

T.C.  
DENİZ HARP OKULU  
DENİZ BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRONİK SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÖNER KANATLI CİSİMLERİN RADAR İZLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SERKAN KARSLI**

Tez Danışmanı: Doç.Dr. A.Arif ERGİN

İstanbul, 2011

© Çalışmanın Tüm Hakları Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü'ne aittir, 2011

T.C.  
DENİZ HARP OKULU  
DENİZ BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRONİK SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÖNER KANATLI CİSİMLERİN RADAR İZLERİNİN  
İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

SERKAN KARSLI

Tez Danışmanı: Doç.Dr. A.Arif ERGİN

İstanbul, 2011


**DÖNER KANATLI CİSİMLERİN RADAR İZLERİNİN  
İNCELENMESİ**

SERKAN KARSLI

Dz.Kd.Ütgm.

ELEKTRONİK SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ  
YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

Yazar: \_\_\_\_\_

  
Serkan KARSLI

Sınav Tarihi: 17/06/2011

Onaylayanlar: \_\_\_\_\_

  
Doç.Dr. Aytekin ERGİN (Danışman)

  
Yrd.Doç.Dr.Müh.Yzb. Fatih ERDEN (Sınav Komitesi Üyesi)

  
Yrd.Doç.Dr. Erol ÖNEN (Sınav Komitesi Üyesi)

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca yardımlarını ve değerli zamanını esirgemeyen, çalışmalarımnda beni yönlendiren danışmanım Doç.Dr.A.Arif ERGİN'e,

Deniz Harp Okulu'nun tüm olanaklarını bizim için seferber eden değerli komutanım Dr.Dz.Alb.Mustafa KARADENİZ'e,

her zaman maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme,

ve en zor anlarımda hep yanımda olarak bana destek olan çok sevdiğim eşim Aylin'e teşekkürlerimi sunarım.



## ÖZET

### DÖNER KANATLI CİSİMLERİN RADAR İZLERİNİN İNCELENMESİ

Serkan KARSLI

Elektronik Sistemleri Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2011

Danışman: Doç.Dr. A.Arif ERGİN

**Anahtar Kelimeler : Döner Kanatlı Cisimler, Radar İzi, Radar Kesit Alanı (RKA), Fiziksel Optik (FO), Uzak Alan Yaklaşımı, Zamana Bağlı Doppler İzi.**

Bu çalışmanın amacı Fiziksel Optik (FO) yöntemini kullanarak döner kanatlı cisimlerin Radar Kesit Alanlarını (RKA) uzak alan yaklaşımı yardımıyla hesaplamak ve zamana bağlı Doppler izlerini üretmektir. Elde edilen sonuçlar ve deneyimler neticesinde radar sistemlerinden elde edilen RKA izleri aracılığıyla döner kanatlı cisimlerin özellikleri hakkında bilgi elde edilmesi için gerekli altyapının kurulması amaçlanmaktadır.

Hesaplamalar esnasında kullanılan formül, cisme gelen dalganın ilerleme yönü ve polarizasyonu, gözlemcinin mevkii, döner cismin fiziksel özellikleri (döner kanat sayısı, kanatlar arasındaki açı, kanatların boyutları, vb.) gibi parametreleri kullanarak gözlemci konumunda oluşan elektrik alan değerini hesaplar.

RKA hesaplamalarının kolaylıkla yapılabilmesi maksadıyla öncelikli olarak MATLAB programı yardımıyla bilgisayar ortamında döner kanatlı cisimler oluşturulmuştur. Döner kanatlı cisimler oluşturulurken kullanılan geometri dikdörtgen plakadır. Döner kanatlı cisimlerin oluşturulmasını müteakip MATLAB programı yardımıyla RKA hesaplamaları için program

kodları geliştirilmiştir. RKA hesaplamaları esnasında FO yaklaşımdan yararlanılmıştır. Elde edilen zamana bağlı RKA değerleri Fourier çözümlenmesine tabi tutularak zamana bağlı Doppler grafikleri oluşturulmuştur. Bu zamana bağlı Doppler grafikleri hakkındaki değerlendirmeler yapılmıştır.

Döner kanatlı cisimlerin RKA'larını incelerken ortaya çıkan en önemli sonuç, elde edilen RKA'nın, tüm yapıdan yansıyan dalgaların oluşturduğu ve birbirine göre faz kayması olan harmonikler şeklinde oluşudur. Elde ettiğimiz bu harmonikler döner kanatların sayısına, döner kanatların eğimine ve birbirleri arasındaki açıya bağlı olarak şekillenmektedir.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF RADAR SIGNATURES OF ROTATING BLADES**

Serkan KARSLI

Master Thesis for Electronics Systems Engineering, 2011

Advisor: A.Arif ERGİN, Assoc.Prof.(Ph.D.)

**Key Words : Rotating Blades, Radar Signature, Radar Cross Section (RCS), Physical Optics (PO), Far Field Approximation, Time-Doppler Imaging.**

This thesis aims to calculate the Radar Cross Section (RCS) of rotating blades and to create time-Doppler images with Physical Optics (PO) and far field approximations. From the obtained results and the experiences, it is aimed to construct the basic facilities required for providing information about the specifications of the rotating blades, from the RCS signatures obtained from the radar systems.

The formulation used in this study calculates the electric field at the observation point by using the incident wave direction and polarization, observer location, and rotating blades' specifications (number of blades, angle between blades, blade's dimensions, etc.).

In order to calculate RCS easily, simulation of rotating blades is developed with MATLAB. Rectangular plate geometry is used while modelling the rotating blades. After this, MATLAB codes for calculation of the RCS are developed. PO approximation is used while calculating the RCS. By applying the FFT to the time-dependent RCS values, the time-Doppler imaging results are obtained and evaluated.

The most significant result obtained while analysing the RCS of rotating blades is, the obtained RCS's are constituted of the scattering waves and the phase shifted harmonics. These harmonics are formed depending on the number of the blades, the skew of blades, and the angle between the blades.

**“Bu çalışmada yazarın ortaya koymuş olduğu ifadelerin hiçbiri T.C. Deniz Kuvvetleri’nin ve Deniz Harp Okulu ile Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü’nün resmi görüşlerini ve politikalarını yansıtmamaktadır.”**

## İÇİNDEKİLER

JÜRİ ÜYELERİ KABUL VE ONAY SAYFASI .....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
TEŞEKKÜR SAYFASI .....	ii
TÜRKÇE ÖZET .....	iv
İNGİLİZCE ÖZET .....	vi
SORUMLULUK NOTU .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
TABLolar LİSTESİ .....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	xii
ÖNEMLİ TERİMLER AÇIKLAMA LİSTESİ .....	xix
KISALTMALAR LİSTESİ .....	xix
I. GİRİŞ .....	1
A. TEZ KONUSU VE GEREKLİLİĞİ .....	2
B. TEZİN İÇERİĞİ .....	3
II. FİZİKSEL OPTİK (FO) .....	5
A. IŞINIM İNTEGRALI .....	5
B. SAÇILMA PROBLEMLERİNDE UZAK ALAN YAKLAŞIMI .....	7
C. FİZİKSEL OPTİK AKIMLARI .....	10
D. FİZİKSEL OPTİK YAKLAŞIMI .....	13
III. RKA ANALİZİNDE İZLENEN YÖNTEMLER .....	17
A. KULLANILACAK CİSİMLERİN OLUŞTURULMASI .....	17
B. OLUŞTURULAN CİSİMLERİN RKA'LARININ HESAPLANMASI MAKSADıyla MATLAB PROGRAMINDA KODLARININ OLUŞTURULMASI ...	23
C. OLUŞTURULAN CİSİMLERİN MATLAB PROGRAMI YARDIMIYLA RKA'LARININ HESAPLANMASI .....	28
D. CİSİMLERİN RKA-ZAMAN DEĞERLERİNİN DOPPLER-ZAMAN GRAFİKLERİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ .....	31
1. Doppler Etkisi .....	31
2. Doppler Frekansı .....	32
3. Doppler-Zaman Grafiklerinin Elde Edilmesi .....	33
IV. NÜMERİK SONUÇLAR .....	35
A. 5 GHZ. FREKANSI İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR .....	37

B.	18 GHZ. FREKANSI İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR.....	56
V.	SONUÇ VE YORUMLAR.....	79
	KAYNAKLAR .....	81

## TABLÖLAR

TABLÖLAR	SAYFA
1. Tablo 3.1: Döner Kanatların Özellikleri.	25
2. Tablo 4.1: 5 GHz İçin Kullanılan Hesaplama Parametreleri.	35
3. Tablo 4.2: 18 GHz İçin Kullanılan Hesaplama Parametreleri.	36
4. Tablo 4.3 Doppler-Zaman Grafiklerini Elde Etmek İçin Kullanılan Hesaplama Parametreleri.	37

## ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİLLER	SAYFA
1. Şekil 2.1 : Uzak Alan Yaklaşımı.	8
2. Şekil 2.2 : Mükemmel İletkenden Saçılmanın Yaklaşık Fiziksel Eşdeğeri.	11
3. Şekil 2.3 : Sonsuza Uzanan Düz Yüzeyin Fiziksel Eşdeğeri.	12
4. Şekil 2.4 : Fiziksel Optik Yaklaşımı.	13
5. Şekil 2.5 : Düzlemsel Dalganın Dikdörtgen Plakadan Yansıması.	14
6. Şekil 3.1 : Dikdörtgen Plaka.	18
7. Şekil 3.2 : Dikdörtgen Plakaya Gelen ve Yansıyan Dalga.	19
8. Şekil 3.3 : Dikdörtgen Plakadan Yansıyan Dalga.	20
9. Şekil 3.4 : Dikdörtgen Plakaya Gelen Dalga.	21
10. Şekil 3.5 : Dikdörtgen Plakadan Yansıyan Dalga.	22
11. Şekil 3.6 : Tek Kanatlı Cisim.	25
12. Şekil 3.7 : İki Kanatlı Cisim.	26
13. Şekil 3.8 : Üç Kanatlı Cisim.	26
14. Şekil 3.9 : Dört Kanatlı Cisim.	27
15. Şekil 3.10 : Tek Kanatlı Palin RKA'sı.	29

16.	Şekil 3.11 :	İki Kanatlı Palin RKA'sı.	29
17.	Şekil 3.12 :	Üç Kanatlı Palin RKA'sı.	30
18.	Şekil 3.13 :	Dört Kanatlı Palin RKA'sı.	30
19.	Şekil 3.14 :	Doppler Frekansı Hesabı.	33
20.	Şekil 4.1 :	5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	38
21.	Şekil 4.2 :	5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	38
22.	Şekil 4.3 :	5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	39
23.	Şekil 4.4 :	5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	40
24.	Şekil 4.5 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	41
25.	Şekil 4.6 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	41
26.	Şekil 4.7 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	43
27.	Şekil 4.8 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	43
28.	Şekil 4.9 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	44
29.	Şekil 4.10 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	45

30	Şekil 4.11 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	46
31.	Şekil 4.12 :	5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	46
32.	Şekil 4.13 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	47
33.	Şekil 4.14 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	48
34.	Şekil 4.15 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	49
35.	Şekil 4.16 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	49
36.	Şekil 4.17 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	51
37.	Şekil 4.18 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	51
38.	Şekil 4.19 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	52
39.	Şekil 4.20 :	5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	53
40.	Şekil 4.21 :	5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=180$ , $\Phi_{io}=0$ ).	54
41.	Şekil 4.22 :	5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=180$ , $\Phi_{io}=0$ ).	54

42.	Şekil 4.23 :	5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	55
43.	Şekil 4.24 :	5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	56
44.	Şekil 4.25 :	18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	57
45.	Şekil 4.26 :	18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	57
46.	Şekil 4.27 :	18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	58
47.	Şekil 4.28 :	18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	59
48.	Şekil 4.29 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	60
49.	Şekil 4.30 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	60
50.	Şekil 4.31 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	61
51.	Şekil 4.32 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	62
52.	Şekil 4.33 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	63
53.	Şekil 4.34 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	63

54.	Şekil 4.35 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	64
55.	Şekil 4.36 :	18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	65
56.	Şekil 4.37 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	66
57.	Şekil 4.38 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=0$ , $\Phi_{io}=180$ ).	66
58.	Şekil 4.39 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	67
59.	Şekil 4.40 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=30$ , $\Phi_{io}=150$ ).	68
60.	Şekil 4.41 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	69
61.	Şekil 4.42 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=60$ , $\Phi_{io}=120$ ).	69
62.	Şekil 4.43 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	70
63.	Şekil 4.44 :	18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=90$ , $\Phi_{io}=90$ ).	71
64.	Şekil 4.45 :	18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği ( $\Phi_{ii}=180$ , $\Phi_{io}=0$ ).	72
65.	Şekil 4.46 :	18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği ( $\Phi_{ii}=180$ , $\Phi_{io}=0$ ).	72

66.	Şekil 4.47 :	18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği (Phii=90, Phio=90).	73
67.	Şekil 4.48 :	18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği (Phii=90, Phio=90).	74
68.	Şekil 4.49 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Bir Pal İçin RKA Grafiği (Phii=35, Phio=145).	75
69.	Şekil 4.50 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Bir Pal İçin EMAT Grafiği (Phii=35, Phio=145).	75
70.	Şekil 4.51 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği (Phii=35, Phio=145).	76
71.	Şekil 4.52 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği (Phii=35, Phio=145).	76
72.	Şekil 4.53 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Üç Pal İçin RKA Grafiği (Phii=35, Phio=145).	77
73.	Şekil 4.54 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Üç Pal İçin EMAT Grafiği (Phii=35, Phio=145).	77
74.	Şekil 4.55 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Dört Pal İçin RKA Grafiği (Phii=35, Phio=145).	78
75.	Şekil 4.56 :	5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Dört Pal İçin EMAT Grafiği (Phii=35, Phio=145).	78

## ÖNEMLİ TERİMLER AÇIKLAMA LİSTESİ

<b><u>Terimler:</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>	<b>:</b>
BLADE	:	Döner Kanat.
QUASI-STATIONARY	:	Sanki Durağan.
SKEW	:	Eğim.
IMAGE THEORY	:	Görüntü Yöntemi.
EDGE EFFECT	:	Kırınım Etkisi.

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b><u>Kısaltmalar:</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>	<b>:</b>
RKA :	Radar Kesit Alanı.	
RCS :	Radar Cross Section.	
FO :	Fiziksel Optik.	
PO :	Physical Optics.	
MATLAB :	MATrix LABoratory.	
FDTD :	Finite Difference Time Domain. (Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi)	
MEC :	Method Of Equivalent Currents. (Eşdeğer Akımlar Metodu)	
FFT :	Fast Fourier Transform.	
STFT :	Short Time Fourier Transform. (Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü)	
DBSM :	Decibel Per Square Meter. (Desibel Metrekare)	

## I. GİRİŞ

Radar Kesit Alanı (RKA)'nın hesaplanması esnasında, elde edilen ifade, belirli bir yönde saçılan elektrik alanının değerine eşittir. Burada saçılan elektrik alanı bulmak maksadıyla Fiziksel Optik (FO) gibi yüzey akımlarına dayanan bir yaklaşım kullanılabilir.

Uzaydaki bir  $\vec{r}$  noktasındaki elektrik akım yoğunluğunun ifadesi  $\vec{J}(\vec{r})$  ve manyetik akım yoğunluğunun ifadesi  $\vec{J}_m(\vec{r})$ 'nin bilinmesi durumunda Maxwell denklemleri kullanılarak bu akımlar nedeniyle meydana gelen elektromanyetik alan bulunabilir [1]. Pratikte bu akımların bulunması çok zor çözülen bir problem teşkil eder. FO yaklaşım bizlere elektriksel olarak geniş yüzeylere sahip platformlar için belirli yaklaşıklıkla akım yoğunluklarını hesaplama imkanı sağlamaktadır [2].

Fiziksel Optik, yüksek frekans elektromanyetik teorisindeki tekniklerdendir. Kırınım teorisi ve tam dalga çözümler ile birleştirildiğinden dalga boyuna göre büyük cisimlerden saçılma ve ışınım hesaplamalarında önemli bir yöntem olarak yerini almaktadır [3-4].

Uçakların ve helikopterlerin dönen parçalarına ait radar izlerine ilişkin araştırmalar havacılık alanında geniş bir yer tutmaktadır [5-7]. Bu tür dönen hareketli yüzeylerin radarlar ile teşhise olanak sağlayan özel bir spektrumu bulunmaktadır.

Döner kanatlı cisimlerin RKA'larını incelerken ortaya çıkan en önemli hususlardan bir tanesi elde edilen RKA tüm yapıdan yansıyan dalgaların oluşturduğu ve birbirine göre faz kayması olan harmonikler şeklindedir. Bu harmonikler döner kanatların sayısına, döner kanatların eğimine ve birbirleri arasındaki açığa bağlı olarak şekillenmektedir.

Birbirine göre faz kayması olan harmoniklerden saçılan alanların genlikleri hakkında yapılan çalışmalar devam etmektedir. 1976 yılında Van Bladel [8] tarafından ayırık zamanlı ve döner kanatların merkeze sabit olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır. Bu yöntem esnasında yansıtıcının

sabit olduğu varsayılarak dönme zamanlarında anlık hesaplamalar yapılmıştır. Bu yöntemde (quasi-stationary) dönen kanadın açılma dönme frekansının açılma aydınlatma frekansına oranı çok küçük ise gerçekçi sonuçlar verdiği kabul edilmiştir [8]. Bu konuda en kesin sonuçlardan birisi 1979 yılında De Zutter [9] tarafından elde edilmiştir. Çalışmasını izafiyet teorisi çatısı altında türettiği geometriler üzerinde yapmıştır. 1989 yılında ise Harfoush [10] tarafından Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi (Finite Difference Time Domain-FDTD) kullanılarak cismin yüzeyindeki hızı içeren sınır koşulları uygulanarak yeni bir metot geliştirilmiştir. Ayrıca aynı yıl içerisinde Sengupta [11] ve Lahaie [12] ilk kez mükemmel iletken dönen kanatlar üzerindeki saçılan alanı FO yaklaşımı kullanarak çözmüşlerdir. Yapılan çalışma rüzgar türbinlerinin televizyon dalgalarına olan girişimlerinin analizi şeklinde olmuştur. 1992 yılında Bor ve Yang [13-14] FO yaklaşımını dönen metal kanatlara uygulamış ve dönen metal kanatları Mükemmel İletken Dikdörtgen Plakalar (Infinitely Conducting Rectangular Plates) olarak modellemiştir. Bu modelleme esnasında Eşdeğer Akımlar Metodu (Method of Equivalent Currents-MEC) yöntemini kullanarak plakanın kenarlarından kırılan dalgaların etkisini sonuca katarak hesaplamalarda gelişme katetmiştir [15-17]. Daha sonra 1996 yılında Tardy, Piau, Chabrat ve Rouch [18] tarafından Bor ve Yang'ın bu çalışması genelleştirilerek bistatik durum için incelenmiştir. 2002 yılında ise Pouliguen, Lucas, Muller, Quete ve Terret [19] tarafından FO ve MEC yöntemi kullanılarak helikopterlerin rotorlarının RKA hesaplamaları yapılmıştır.

Bu tezde FO yöntemini kullanılarak döner kanatlı cisimlerin RKA davranışları uzak alan yaklaşımı yardımıyla hesaplanacaktır.

#### **A. Tez Konusu ve Gerekliliği :**

Bu çalışmanın amacı FO yöntemini kullanarak döner kanatlı cisimlerin RKA değerlerini uzak alan yaklaşımı yardımıyla hesaplamak ve Doppler izlerinin davranışını belirlemek için bir yöntem geliştirmektir. Elde edilen sonuçlar neticesinde ve bu sonuçlardan edinilen tecrübeler ışığında mevcut

radar sistemlerinden toplanan sinyalleri işleyerek döner kanatlı cisimlerin teşhisi için bir altyapı oluşturmaktır.

Hesaplamalar esnasında kullanılan formül, cisme gelen dalganın ilerleme yönü ve polarizasyonu, gözlemcinin mevkii, döner cismin fiziksel özellikleri (döner kanat sayısı, kanatlar arasındaki açı, kanatların boyutları, vb.) gibi parametreleri kullanarak saçılan alanın hesaplanmasında kullanılmaktadır.

RKA hesaplamalarının kolaylıkla yapılabilmesi maksadıyla öncelikli olarak MATLAB programı yardımıyla bilgisayar ortamında döner kanatlı cisimler oluşturulmuştur. Döner kanatlı cisimler oluşturulurken kullanılan geometri dikdörtgen plakadır. Döner kanatlı cisimlerin oluşturulmasını müteakip MATLAB programı yardımıyla RKA hesaplamaları için program kodları yapılmıştır. RKA hesaplamaları esnasında FO yaklaşımından yararlanılmıştır. Elde edilen zamana bağlı RKA grafikleri Fourier çözümlenmesi ile zamana bağlı Doppler grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerin döner kanatlı bir cismin özniteliklerini gösterdiği ortaya konulacaktır.

Döner kanatlı cisimlerin RKA'larını incelerken ortaya çıkan en önemli hususlardan bir tanesi elde edilen RKA değerinin birçok gövde bileşeninden yansıyan dalgaların oluşturduğu ve birbirine göre faz kayması olan harmonikler şeklinde olmasıdır. Elde ettiğimiz bu harmonikler döner kanatların sayısına, döner kanatların eğimine ve birbirleri arasındaki açığa bağlı olarak şekillenmektedir.

Bu tezin temel amacı elde edilen RKA verilerinden yararlanarak mevcut görüntüden, görüntünün ait olduğu döner kanatlı cisim hakkında bilgi elde edilmesidir.

## **B. Tezin İçeriği :**

Tez toplamda beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup tez konusunun öneminden ve genel yaklaşımdan bahsedilmektedir.

Tezin ikinci bölümünde, yüzey akımlarına dayanılarak yapılan FO yaklaşımı ve FO integrali anlatılacaktır. FO integralinin bulunması maksadıyla ikinci bölümün birinci kısmında saçılma problemi çözümünde kullanılan ışınım integralinden bahsedilecektir. İkinci kısımda uzak alan yaklaşımı kullanılarak hesaplamalar esnasında sonuca etkisi az olan terimlerin sadeleştirilmesi hakkında bilgi verilecektir. Üçüncü kısımda akım ve yük yoğunluklarından yola çıkarak FO akımlarından söz edilecektir. Bu bölümlerde verilen bilgilerin ışığında son kısımda saçılan elektrik alan ifadesi çıkarılacaktır.

Üçüncü bölümde tez kapsamında izlenen yöntemler ve kullanılan teknikler anlatılacaktır. Öncelikli olarak bu bölümün ilk kısmında hesaplamalar esnasında kullanacağımız cisimlerin (döner kanatların) oluşturulmasından bahsedilecektir. İkinci kısımda oluşturulan cisimlerin RKA'larının ve zamana bağlı Doppler izlerinin hesaplanması maksadıyla MATLAB programında kodlanmasından söz edilecektir. MATLAB programı yardımıyla RKA'larının hesaplanması ve elde edilen sonuçlar hakkında Üçüncü kısımda bilgi verilecektir. Bu bölümde son olarak Fourier Dönüşümü (Transform) kullanarak elde ettiğimiz RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman grafiklerine dönüştürmeyi anlatacağız.

Dördüncü bölümde nümerik sonuçlar incelenecektir. Nümerik sonuçlar başlığı altında tez kapsamında yapılan bazı hesaplamalara ve analizlere ilişkin grafik ve tablolar gösterilmiştir.

Beşinci ve son bölümde ise sonuç ve yorumlar sunulacaktır. İlk dört bölüm ışığında yapılan tüm analiz, inceleme ve hesaplamalar neticesinde elde edilen verilerden çıkarımlar yapılarak sonuçlar elde edilecek ve gelecekte bu çalışmanın üzerine neler yapılabileceği hakkında görüşler sunulacaktır.

## II. FİZİKSEL OPTİK (FO)

Radar Kesit Alanı hesaplamalarında, hesaplanan değer hedeften gözlemci yönünde saçılan elektrik alan ifadesiyle ilişkilidir. Bu değer hesaplanması maksadıyla yüzey akımlarına dayanılarak yapılan FO yaklaşımı kullanılabilir.

Bu bölümde, yüzey akımlarına dayanılarak yapılan FO yaklaşımı ve FO İntegrali anlatılacaktır.

Fiziksel optik integralinin bulunması maksadıyla ikinci bölümün birinci kısmında saçılma problemi çözümünde kullanılan ışınım integralinden bahsedilecektir. İkinci kısımda uzak alan yaklaşımı kullanılarak hesaplamalar esnasında sonuca etkisi az olan terimlerin sadeleştirilmesi hakkında bilgi verilecektir. Üçüncü kısımda akım ve yük yoğunluklarından yola çıkarak FO akımlarından söz edilecektir. Bu bölümlerde verilen bilgilerin ışığında son kısımda saçılan elektrik alan ifadesi çıkarılacaktır.

### A. IŞINIM İNTEGRALİ

Serbest uzayda herhangi bir  $(x, y, z)$  noktasındaki elektrik alan şiddeti  $\vec{E}(x, y, z)$  hesaplanmak istendiğinde; bu alanı oluşturan elektrik akım yoğunluğu  $\vec{J}(x', y', z')$  ve manyetik akım yoğunluğu  $\vec{J}_m(x', y', z')$  biliniyorsa Maxwell denklemleri kullanılarak bu akımlardan kaynaklanan elektrik alan hesaplanabilir [1]. Akım yoğunlukları ile alanları birbirine doğrudan bağlayan bu ifadeye ışınım integrali adı verilir.

Saçılan elektrik alanı hesaplamak maksadıyla öncelikle gözlemci noktasındaki vektör potansiyellerini belirtmekte fayda bulunmaktadır.

Gözlemci noktasındaki manyetik vektör potansiyelinin ifadesi,

$$\vec{A}(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint_V \vec{J}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.1)$$

ve elektrik vektör potansiyelinin ifadesi,

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \iiint_V \vec{J}_m(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.2)$$

olarak verilmekte ve denklemlerdeki  $R$ 'nin değeri,  $\vec{r}_0 = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$  ve  $\vec{r}'_0 = x'\hat{x} + y'\hat{y} + z'\hat{z}$  olmak üzere;

$$R = |\vec{r}_0 - \vec{r}'_0| = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.3)$$

kullanılarak hesaplanmaktadır ve  $k$  dalga sayısını belirtmektedir.

Ayrıca iki skaler potansiyeli de  $(x,y,z)$  koordinatında oluşmaktadır. Bunlardan skaler elektrik potansiyeli,

$$\Phi_e(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \iiint_V \rho_v(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.4)$$

ve skaler manyetik potansiyeli,

$$\Phi_m(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\mu} \iiint_V \rho_{mv}(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dv' \quad (2.5)$$

olarak ifade edilmektedir. Yük ve akım ifadeleri arasındaki ilişki,

$$\nabla \cdot \vec{J} = -j\omega\rho_v \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_m = -j\omega\rho_{mv} \quad (2.7)$$

denklemleri ile gösterilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus vektör ve skaler potansiyellerinin yük ve akım yoğunlukları ile ilişkili olmasıdır.

$$\nabla \cdot \vec{A} = -j\omega\mu_0\epsilon_0\Phi_e \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{F} = -j\omega\mu_0\epsilon_0\Phi_m \quad (2.9)$$

Potansiyeller ile akımlar arasındaki ilişki Maxwell denklemleri kullanılarak aşağıdaki denklemlerle belirtilebilir [2].

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \frac{j}{\omega\mu_0\epsilon_0}\nabla(\nabla\cdot\vec{A}) - \frac{1}{\epsilon_0}\nabla\times\vec{F} \quad (2.10)$$

$$\vec{H} = -j\omega\vec{F} - \frac{j}{\omega\mu_0\epsilon_0}\nabla(\nabla\cdot\vec{F}) - \frac{1}{\epsilon_0}\nabla\times\vec{A} \quad (2.11)$$

Bu denklemlerde,  $\omega = k.c$  açısal frekans,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti,  $\mu_0$  ise boşluğun manyetik geçirgenliğidir. Denklemlerde yer alan  $\nabla$  operatörü gözlemci noktasındaki koordinatlara (x,y,z) göre uzamsal türevi ifade etmektedir [2].

Yukarıda çıkarılan denklemler neticesinde ışınım integralleri aşağıda belirtilen ifadelerle gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \vec{E} = & -j\omega\frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_V \vec{J}(x',y',z')\frac{e^{-jkR}}{R}dv' - \frac{j}{\omega\mu_0\epsilon_0}\nabla\left(\nabla\cdot\frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_V \vec{J}(x',y',z')\frac{e^{-jkR}}{R}dv'\right) \\ & - \frac{1}{\epsilon_0}\nabla\times\frac{\epsilon_0}{4\pi}\iiint_V \vec{J}_m(x',y',z')\frac{e^{-jkR}}{R}dv' \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \vec{H} = & -j\omega\frac{\epsilon_0}{4\pi}\iiint_V \vec{J}_m(x',y',z')\frac{e^{-jkR}}{R}dv' - \frac{j}{\omega\mu_0\epsilon_0}\nabla\left(\nabla\cdot\frac{\epsilon_0}{4\pi}\iiint_V \vec{J}_m(x',y',z')\frac{e^{-jkR}}{R}dv'\right) \\ & - \frac{1}{\epsilon_0}\nabla\times\frac{\mu_0}{4\pi}\iiint_V \vec{J}(x',y',z')\frac{e^{-jkR}}{R}dv' \end{aligned} \quad (2.13)$$

## B. SAÇILMA PROBLEMLERİNDE UZAK ALAN YAKLAŞIMI

Radar Kesit Alanı hesaplamalarında gözlemcinin hedefin boyutlarına göre yeterince uzak bir noktada olması durumunda, uzak alan yaklaşımı kullanılarak hesaplamalar esnasında sonuca etkisi az olan terimlerin sadeleştirilip sonuca ulaşmanın basitleştirilmesi amaçlanmaktadır.

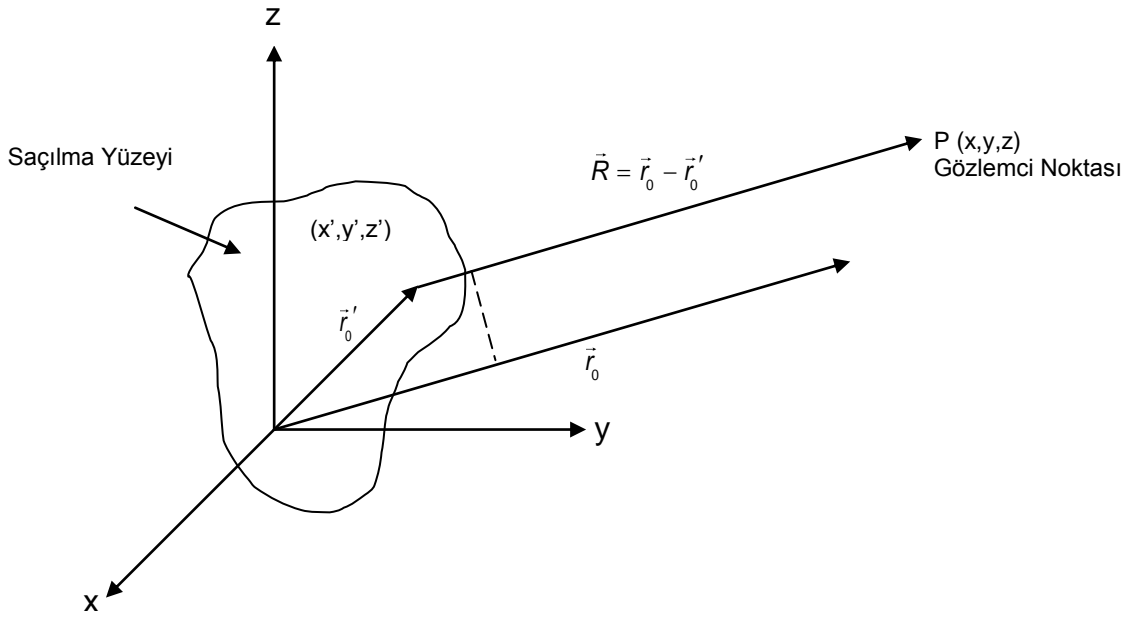
Uzak alan yaklaşımının uygulandığı hedef ve gözlemci arasındaki mesafe  $R$ , hedefi içine alan en küçük kürenin yarıçapı  $D$  ve dalga boyu  $\lambda$  olduğu zaman uzak alan yaklaşımının geçerli olduğu durumlar [1];

$$\begin{aligned}
R &\gg D \\
R &\gg \lambda \\
R &> \frac{2D^2}{\lambda}
\end{aligned}
\tag{2.14}$$

gibi farklı şekillerde gösterilebilir. Bu şartlar altında; hesaplama yaptığımız bölgedeki alan, düzlemsel dalganın yayılmasına benzer özellik gösterecektir. Bu şartlardan en kısıtlayıcı olan  $R > 2D^2/\lambda$  şartıdır.

Dalga boyu,  $c$  ışık hızı ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) ve  $f$  frekans olmak üzere aşağıda belirtilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$\lambda = \frac{c}{f}
\tag{2.15}$$



Şekil 2-1 Uzak Alan Yaklaşımı

Uzak alan yaklaşımı için Şekil 2-1'deki  $\vec{R}$  ve  $\vec{r}_0$  vektörleri birbirine yaklaşık olarak paralel kabul edilebilir.[2]

$$|\vec{R}| = |\vec{r}_0 - \vec{r}'_0|
\tag{2.16}$$

Bu yaklaşımı kullanarak yapılan hesaplamalarda hata  $1/R^2$  seviyesinde olacaktır [3].

Yapılan hesaplamalarda koordinat sisteminin merkezinden gözlemci noktasına uzanan vektör  $\vec{r}_0$  ve saçıcı yüzeye uzanan vektör  $\vec{r}'_0$  olarak tanımlanmıştır. Denklem (2.16)'daki gösterim yaklaşık olarak;

$$R = |\vec{R}| = |\vec{r}_0 - \vec{r}'_0| \approx |\vec{r}_0| - \vec{r}'_0 \cdot \hat{r} \quad (2.17)$$

şeklinde de ifade edilebilir [2]. Burada elde edilen ifade  $\vec{A}$  ve  $\vec{F}$  potansiyellerinde kullanarak denklem (2.12)'da yerine yazılırsa;

$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{-j\omega\mu}{4\pi r_0} e^{-jk r_0} \iiint_V \left[ \vec{J} - (\vec{J} \cdot \hat{r}_0) \hat{r}_0 + \frac{1}{\eta} \vec{J}_m \times \hat{r}_0 \right] e^{jk \vec{r}_0 \cdot \hat{r}} dv' + O\left(\frac{1}{r_0^2}\right) \quad (2.18)$$

elde edilebilir. Burada  $\eta$  ortamın karakteristik empedansını ifade etmektedir. Denklem (2.18)'deki kaynak noktasındaki konum vektörü;

$$\vec{r}'_0 = \hat{x}x' + \hat{y}y' + \hat{z}z' \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} x'|\vec{r}'_0| &= \sin \tilde{\theta} \cos \tilde{\phi} \\ y'|\vec{r}'_0| &= \sin \tilde{\theta} \sin \tilde{\phi} \\ z'|\vec{r}'_0| &= \cos \tilde{\theta} \end{aligned} \quad (2.20)$$

ifadelerini denklem (2.19)'da yerine yazarsak,

$$\hat{r}'_0 = \hat{x} \sin \tilde{\theta} \cos \tilde{\phi} + \hat{y} \sin \tilde{\theta} \sin \tilde{\phi} + \hat{z} \cos \tilde{\theta} \quad (2.21)$$

olarak elde ederiz. Benzer şekilde gözlemci noktasına doğru olan birim vektör,

$$\hat{r}_0 = \hat{x} \sin \theta_r \cos \phi_r + \hat{y} \sin \theta_r \sin \phi_r + \hat{z} \cos \theta_r \quad (2.22)$$

ifadesine eşittir. Yukarıdaki denklemlerde yer alan  $\tilde{\theta}, \tilde{\phi}, \theta_r, \phi_r$  açısal ifadelerinden üçüncü bölümde bahsedilecektir.

İlerleme yönü  $\hat{r}$  olmak üzere denklem (2.18)'den  $\vec{E} = \hat{\theta}E_\theta + \hat{\phi}E_\phi$  olduğu yani  $\vec{E}$ 'nin  $\hat{r}$ 'ya dik olduğu görülmektedir. Buna göre elektrik alanın bileşenleri,

$$E_o(x, y, z) = \frac{-jk\eta}{4\pi r_o} e^{-jkr_o} \iiint_V \left[ \vec{J} \cdot \hat{\theta} + \frac{1}{\eta} \vec{J}_m \cdot \hat{\phi} \right] e^{jk\vec{r}_o \cdot \hat{r}} dv' \quad (2.23)$$

$$E_o(x, y, z) = \frac{-jk\eta}{4\pi r_o} e^{-jkr_o} \iiint_V \left[ \vec{J} \cdot \hat{\phi} + \frac{1}{\eta} \vec{J}_m \cdot \hat{\theta} \right] e^{jk\vec{r}_o \cdot \hat{r}} dv' \quad (2.24)$$

Uzak alan yaklaşımına göre gözlemci noktasının çok uzak bir noktada olduğu varsayılır ve bundan dolayı saçılan küresel dalganın önyüzü gözlemci noktasında düzlemsel dalganın yayılmasına benzer özellik gösterir. Bundan dolayı saçılan dalga yaklaşık olarak TEM modundadır ve  $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$  ve  $\hat{r}_o$  vektörleri birbirine diktir [2]. Diğer bir anlatımla,

$$\vec{H}(x, y, z) \approx \frac{\hat{r}_o \times \vec{E}(x, y, z)}{\eta} \quad (2.25)$$

Bundan sonraki bölümde anlatılacak olan FO akımlarda, buraya kadar ifade ettiğimiz formüller kullanılarak ışınım integralindeki akım yoğunlukları FO yaklaşımı ile basitleştirilecektir.

### C. FİZİKSEL OPTİK AKIMLARI

Fiziksel optik yaklaşımı genel olarak ifade edilirse, elektromanyetik dalganın yüksek frekansta yayılımının hesaplanmasında kullanılan asimptotik bir yöntemdir. Fiziksel optik yaklaşımı, mükemmel iletken bir yüzeyin üzerinde oluşan akımların görüntü teorisi yardımıyla yorumlanması olarak da ifade edilebilir. Oluşan bu akımlar yardımıyla uzak alan yaklaşımı kullanılarak saçılan alan problemleri kolaylıkla çözümlenir.

Uzak alan yaklaşımında önceki bölümde belirtildiği üzere, gözlemci noktasının saçıcı cisme çok uzak bir noktada olduğu varsayılır. Gözlemci noktasında gözlemlenen dalganın önyüzü gözlemci noktasında düzlemsel dalganın yayılmasına benzer özellik gösterdiğinden dalga düzlemsel dalga olarak kabul edilir.

Mükemmel iletken yüzeyler üzerinde yapılan saçılan elektrik alan hesaplamalarında manyetik akım yoğunluğu  $\vec{J}_m$  olmadığı için hesaplama

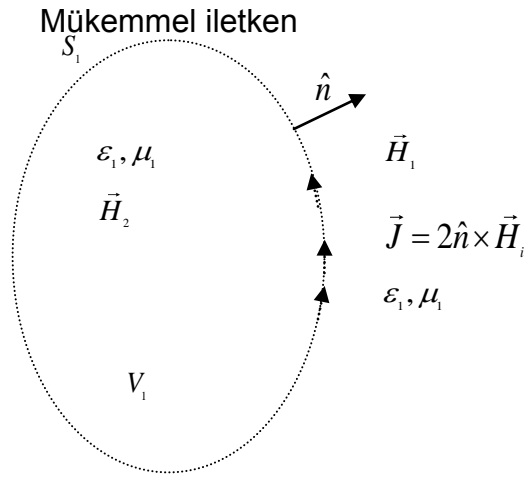
sadece elektrik akım yoğunluğu  $\vec{J}$ 'e bağlı olarak yapılır [1]. Burada  $\vec{J}_m = 0$  olduğu için denklem (2.23) ve (2.24) şu şekilde yazılabilir [2];

$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{-j\omega\mu}{4\pi r_0} e^{-jkr_0} \iiint_V \vec{J} - (\vec{J} \cdot \hat{r}_0) \hat{r}_0 \quad (2.26)$$

Burada;

$$g = \vec{r}_0 \cdot \hat{r} = x' \sin \tilde{\theta} \cos \tilde{\phi} + y' \sin \tilde{\theta} \sin \tilde{\phi} + z' \cos \tilde{\theta} \quad (2.27)$$

yapılacak işlemler esnasında kolaylık sağlaması için tanımlanmış ve kullanılmıştır.



Şekil 2-2 Mükemmel iletkenin saçılmanın yaklaşık fiziksel eşdeğeri

Mükemmel iletken yüzeylerden saçılan elektrik alan hesaplamalarında Şekil 2-2'de görüldüğü gibi manyetik akım yoğunluğu  $\vec{J}_m$  olmadığı için hesaplama sadece elektrik akım yoğunluğu  $\vec{J}$ 'ye bağlı olarak yapılır.

Maxwell denklemleri kullanılarak en genel olarak cismin yüzeyi ile boş uzay arasında,

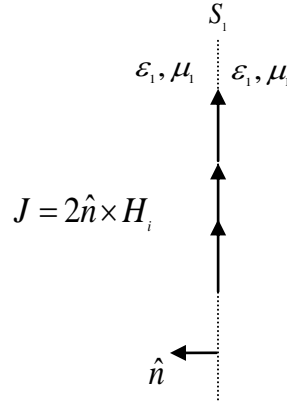
$$\vec{J} = \hat{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \quad (2.28)$$

sınır koşulu yazılabilir [1]. Bu denklemde  $\hat{n}$  ile ifade edilen ikinci ortamdan birinci ortama doğru olan yüzey normali vektörüdür. Burada birinci ortam olarak boş uzay, ikinci ortam olarak mükemmel iletken cisim kabul edilmektedir.

Mükemmel iletken cisim içerisinde elektrik ve manyetik alan ifadeleri sıfıra eşit olacağından saçıcı yüzey üzerindeki akım yoğunluğu,

$$J = \hat{n} \times H_i \quad (2.29)$$

olarak yazılır.



Şekil 2-3 Sonsuza uzanan düz yüzeyin fiziksel eşdeğeri

Şekil 2-3'de gösterildiği gibi düz bir yüzey üzerinde, görüntü yöntemi (*image theory*) kullanılarak hesaplanan toplam manyetik alanın gelen manyetik alanın iki katına eşit olduğu  $\vec{H}_1 = 2\vec{H}_i$  ile gösterilebilir ve oluşan bu akımlara *fiziksel optik akımları* adı verilir [1].

$$J = 2\hat{n} \times \vec{H}_i \quad (2.30)$$

Fiziksel optik yüzey akımları, sadece cismin gelen alan ile aydınlatılan yüzeyinde oluşur. Bundan dolayı denklem (2.30) daha genel olarak,

$$\vec{J} \approx \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i & \text{aydınlık yüzey} \\ 0 & \text{karanlık yüzey} \end{cases} \quad (2.31)$$

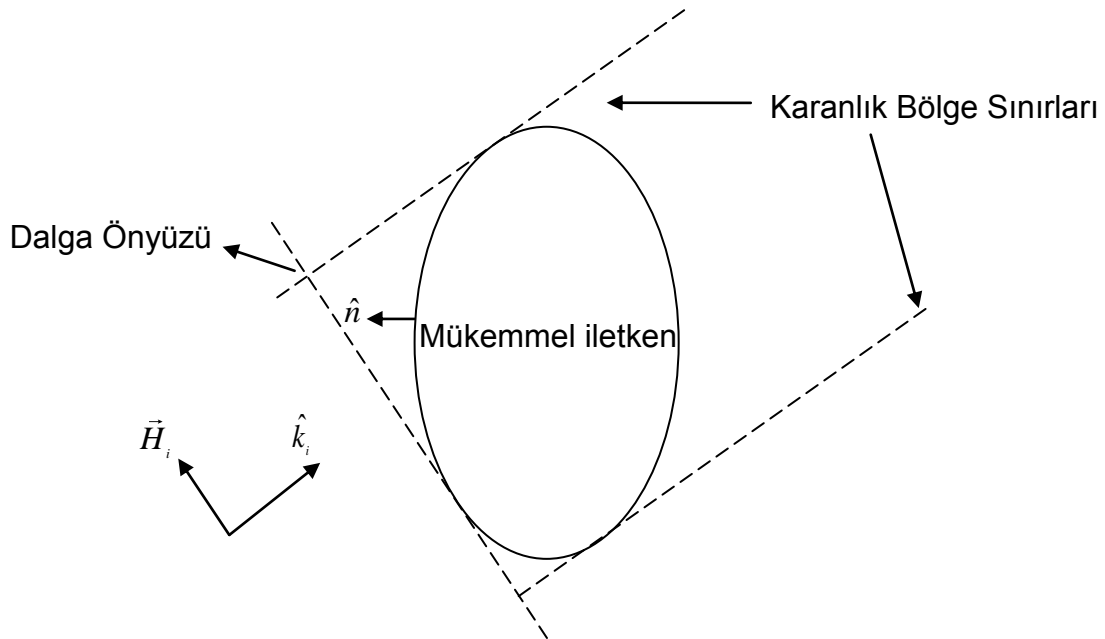
şeklinde ifade edilir. Burada  $\vec{H}_i$  yüzeydeki gelen manyetik alan yoğunluğu ve  $\hat{n}$  ise yüzey normalidir. Gerçek hayatta aydınlık yüzeyden karanlık yüzeye geçtiğimizde akımın hemen sıfır olması mümkün değildir. Fakat, cismin yüzeyi, cisimle etkileşen dalga boyuna göre çok büyükse ve gözlem noktası tam yansıma noktasına yakınsa denklem (2.31)'deki kabulden kaynaklanan hatalar ihmal edilebilir [2].

Bir sonraki bölümde yukarıdaki bölümlerde verilen bilgilerin ışığında FO yüzey akımları, gelen alana bağlı olarak ifade edilerek saçılan elektrik alan ifadesi bulunacaktır.

#### D. FİZİKSEL OPTİK YAKLAŞIMI

Radar Kesit Alanı hesaplanması esnasında, elde edilen ifade, belirli bir yönde saçılan elektrik alan ifadesiyle ilişkilidir. Burada saçılan elektrik alanı bulmak maksadıyla FO gibi yüzey akımlarına dayanan bir yaklaşım kullanılabilir.

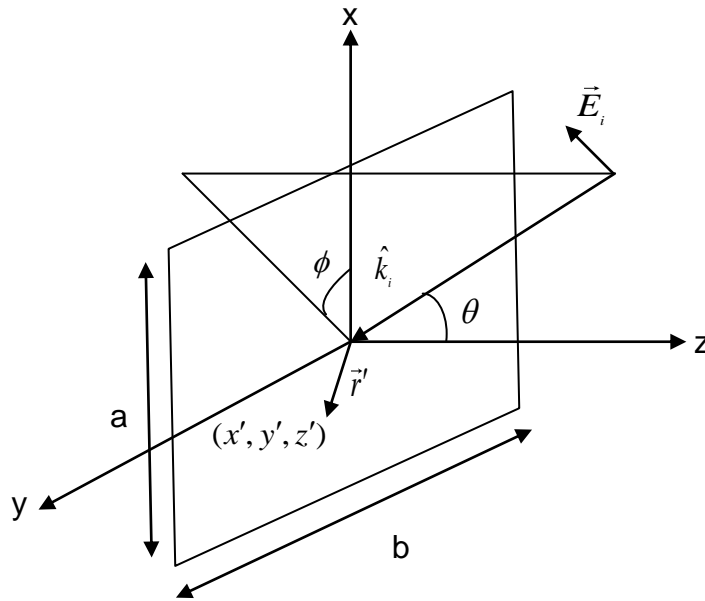
Uzaydaki bir noktanın elektrik akım yoğunluğunun ifadesi  $\vec{J}$  ve manyetik akım yoğunluğunun ifadesi  $\vec{J}_m$ 'nin bilinmesi durumunda Maxwell denklemleri kullanılarak bu akımlar nedeniyle meydana gelen manyetik alan bulunabilir [1]. Pratikte bu akımlar bilinemez sadece akım ve voltaj değişimine neden olan uyarma etkisi ve sınır koşulları bilinebilir. FO yaklaşım bizlere elektriksel olarak geniş yüzeylere sahip platformlar için yüzey nispi olarak doğru hesaplama imkanı sağlamaktadır [2].



Şekil 2-4 Fiziksel Optik yaklaşımı

Şekil 2-4'de FO yaklaşımının düzlemsel dalgaya nasıl uygulandığı gösterilmektedir. Yüzey akımları sadece aydınlık bölge sınırlarında sıfır değildir. Şekil 2-4'te  $\hat{k}_i$  dalganın ilerleme yönünü belirtmektedir.

Gerçek hayatta aydınlık yüzeyden karanlık yüzeye geçtiğimizde akımın hemen sıfır olması mümkün değildir. Fakat, cismin yüzeyi, cisimle etkileşen dalga boyuna göre çok büyükse ve gözlem noktası tam yansıma noktasına yakınsa hatalar ihmal edilebilir [2].



Şekil 2-5 Düzlemsel dalganın dikdörtgen plakadan yansıması

Boyutları a ve b olan dikdörtgen bir plaka Şekil 2-5'te görülmektedir. Düzlemsel bir dalga polarizasyonu isteğe bağlı olarak  $(\theta, \phi)$ 'e bileşenlerine bağlı olarak gelmektedir. Gelen dalganın polarizasyonu  $E_{\theta\theta}$  ve  $E_{\phi\phi}$  sabitlerine bağlı olarak aşağıda ifade edilmiştir [2].

$$\vec{E}_i = (E_{\theta\theta} \hat{\theta} + E_{\phi\phi} \hat{\phi}) e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (2.32)$$

Eğer dalga merkeze (orjine) doğru yayım yapılıyorsa,  $\hat{k}_i = -\hat{r}$  ve düzlemsel dalga olduğundan dolayı, manyetik alan yoğunluğu;

$$\vec{H}_i = \frac{-\hat{r} \times \vec{E}_i}{\eta} = -\left(E_{\theta\theta} \hat{\theta} - E_{\phi\phi} \hat{\phi}\right) \frac{e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}}}{\eta} \quad (2.33)$$

olur. Burada plakanın merkeze yerleştirildiği kabul edilmiştir. Plaka üzerindeki akım değeri FO yaklaşıklığı kullanılarak;

$$\vec{J}(\vec{r}') \approx -2\hat{z} \times (E_{0\theta}\hat{\theta} - E_{0\phi}\hat{\phi}) \frac{e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}'}}{\eta} \quad (2.34)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklem (2.34)'de kullanılan terimler ve vektör ifadeleri;

$$\vec{r}' = \hat{x}x' + \hat{y}y' \text{ (yüzey üzerindeki } \vec{r}' \text{ noktası (} x', y', z' \text{))}$$

$$-\hat{k}_i = \hat{x} \sin \theta \cos \phi + \hat{y} \sin \theta \sin \phi + \hat{z} \cos \theta$$

$$-\vec{k}_i \cdot \vec{r}' = k(x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi)$$

$$\hat{z} \times \hat{\theta} = -\hat{x} \cos \theta \sin \phi + \hat{y} \cos \theta \cos \phi$$

$$\hat{z} \times \hat{\phi} = -\hat{x} \cos \phi - \hat{y} \sin \phi$$

Bu ifadelerden yararlanarak akım ifadesi açık olarak;

$$\vec{J} \approx \frac{-2e^{jkh}}{\eta} \left[ \hat{x}(E_{0\theta} \cos \phi - E_{0\phi} \cos \theta \sin \phi) + \hat{y}(E_{0\theta} \sin \phi + E_{0\phi} \cos \theta \cos \phi) \right] \quad (2.35)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $h = x' \sin \theta \cos \phi + y' \sin \theta \sin \phi$ 'dir. Bulduğumuz akım ifadesini denklem (2.26)'da yerine koyarak;

$$E_o(P) = \frac{-jk\eta}{4\pi r} e^{-jkr} \iint_S \frac{2e^{jkh}}{\eta} \times [(E_{0\theta} \cos \phi - E_{0\phi} \cos \theta \sin \phi) \cos \theta_p \cos \phi_p + (E_{0\theta} \sin \phi + E_{0\phi} \cos \theta \cos \phi) \cos \theta_p \sin \phi_p] e^{jkg} dx' dy' \quad (2.36)$$

sonucuna varırız. Denklemde kullanılan  $P$ , gözlemci noktasını ifade etmekte ve;

$$g = x' \sin \theta_p \cos \phi_p + y' \sin \theta_p \sin \phi_p$$

karşılık kullanılmaktadır. Monostatik saçılma için;

$$\theta_p = \theta$$

$$\phi_p = \phi$$

$$g = h$$

olarak kabul edilmektedir [2].

Buradan hareketle, gelen dalganın polarizasyonunu  $\theta$  polarizasyonlu ( $E_{0\phi} = 0$ ) kabul edersek;

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) = \frac{jk}{2\pi r} e^{-jkr} \int_{-(a/2)}^{a/2} \int_{-(b/2)}^{b/2} E_{0\theta} \cos \theta e^{j2kh} dx' dy' \quad (2.37)$$

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) = \frac{jk}{2\pi r} e^{-jkr} E_{0\theta} \cos \theta \int_{-(a/2)}^{a/2} e^{j2kx'u} dx' \int_{-(b/2)}^{b/2} e^{j2ky'v} dy' \quad (2.38)$$

elde ederiz. Bu denklemde  $u$  ve  $v$  ile ifade edilen değerler durum vektörünün  $x$  ve  $y$  yönündeki kosinüsleri olup [2];

$$\begin{aligned} u &= \sin \theta \cos \phi \\ v &= \sin \theta \sin \phi \end{aligned} \quad (2.39)$$

olarak ifade edilirler. Yukarıda belirtilen integralleri aşağıdaki denklemleri kullanarak çözebiliriz.

$$E_{\theta}(r, \theta, \phi) = \frac{jk}{2\pi r} e^{-jkr} E_{0\theta} \cos \theta ab \operatorname{sinc}(kau) \operatorname{sinc}(kbv) \quad (2.40)$$

Denklem (2-40)'daki  $\operatorname{sinc}$  ifadesi aşağıdaki integral yardımıyla çözümlenerek sonuca ulaşılır.

$$\int_{-a/2}^{a/2} e^{jk_x x'} dx' = a \frac{\sin(k_x a/2)}{k_x a/2} = a \operatorname{sinc}(k_x a/2) \quad (2.41)$$

### III. RKA ANALİZİNDE İZLENEN YÖNTEMLER

Bu bölümde tez kapsamında izlenen yöntemler ve kullanılan teknikler anlatılacaktır. Öncelikli olarak bu bölümün ilk kısmında hesaplamalar esnasında kullanacağımız cisimlerin (döner kanatların) oluşturulmasından bahsedilecektir. İkinci kısımda oluşturulan cisimlerin RKA'larının ve zamana bağlı Doppler izlerinin hesaplanması maksadıyla MATLAB programında kodlanmasından söz edilecektir.

Oluşturulan cisimlerin MATLAB programı yardımıyla RKA'larının hesaplanması ve elde edilen sonuçlar hakkında bilgi verilecektir. Bu bölümde son olarak Fourier Dönüşümü kullanarak elde ettiğimiz RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman grafiklerine dönüştürmeyi anlatacağız.

#### A. KULLANILACAK CİSİMLERİN OLUŞTURULMASI

Tez kapsamında yapacağımız RKA hesaplamalarında kullanacağımız dikdörtgen plaka Şekil 3-1'de görülmektedir.

Şekil 3-1'de xz düzlemine yerleştirilen boyu  $L_1$ , eni  $L_2$  olan dikdörtgen plakadan yansıyan elektrik alanı bulmak maksadıyla aşağıda belirtilen formül kullanılmıştır [18].

$$\begin{aligned} \bar{E}^{PO} = \frac{iE_0^i}{\lambda r_0} e^{-ikr_0} L_1 L_2 e^{ipL_0} \sin c\left(\frac{pL_1}{2}\right) \sin c\left(\frac{qL_2}{2}\right) \\ \left\{ (\hat{p}_0 \cdot \hat{y}_3) [(\hat{u}_i \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] - (\hat{u}_i \cdot \hat{y}_3) [(\hat{p}_0 \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] \right\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

Bu formülde  $L_0$ , C merkez noktasından plakanın merkezine olan mesafeyi ifade etmektedir. Burada;

$$p = k(\hat{u}_r - \hat{u}_i) \cdot \hat{x}_3 \quad (3.2)$$

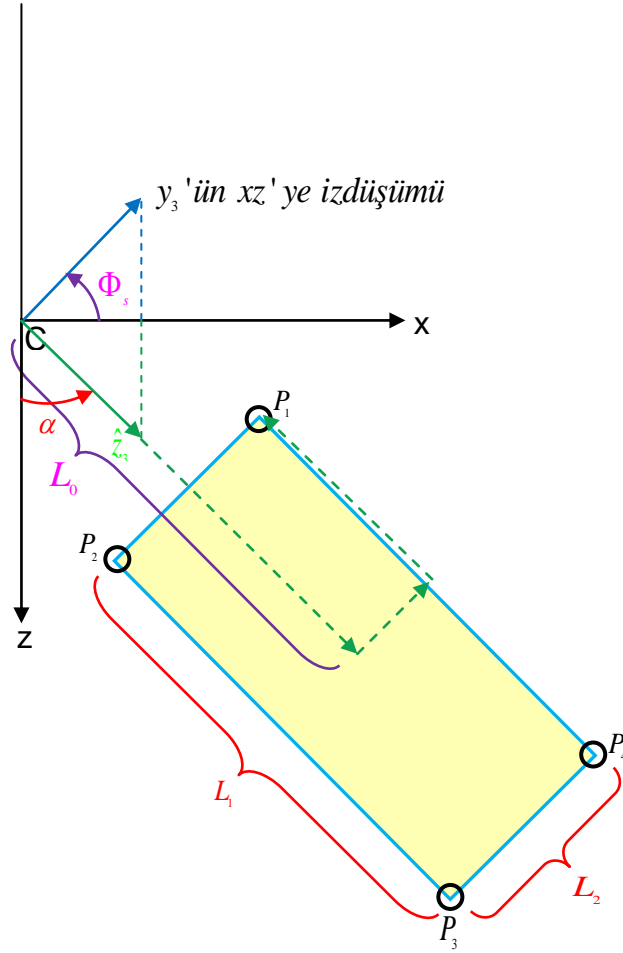
$$q = k(\hat{u}_r - \hat{u}_i) \cdot \hat{z}_3 \quad (3.3)$$

$$\hat{p}_0 = \frac{\bar{E}_0^i}{E_0^i} \quad (3.4)$$

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x} \quad (3.5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.6)$$

ifadelerine karşılık gelmektedir.



Şekil 3-1 Dikdörtgen Plaka

Ayrıca ;

$$\hat{y}_3 = \begin{bmatrix} \sin \Phi_s \cos \alpha \\ \cos \Phi_s \\ -\sin \Phi_s \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (3.7a)$$

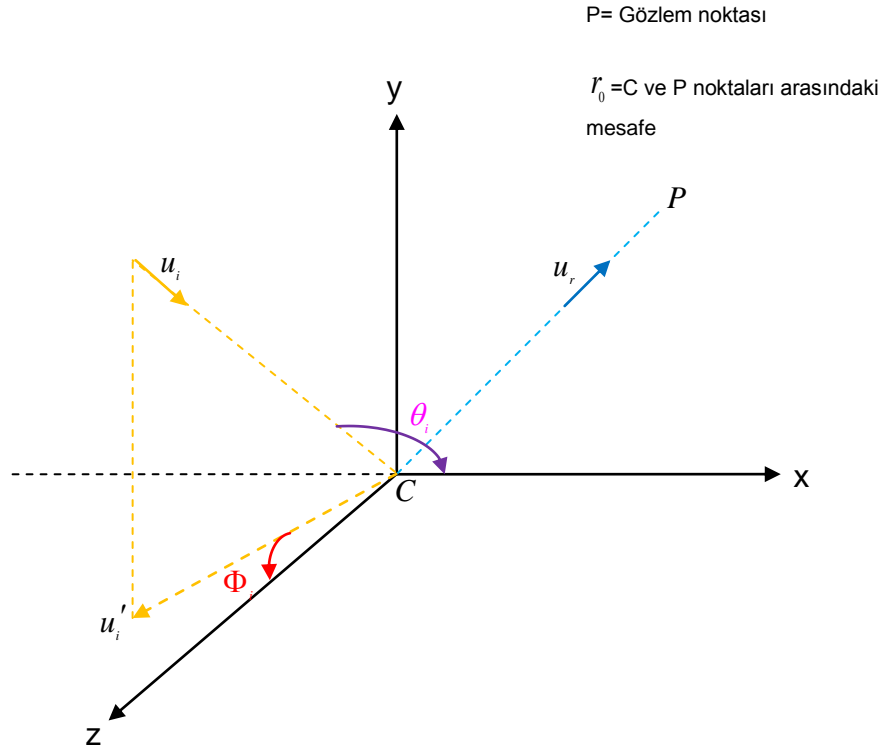
ve

$$\hat{z}_3 = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.7b)$$

olarak bulunmaktadır.

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan gösterimlerin karşılık geldiği ifadeler aşağıda belirtilmiştir:

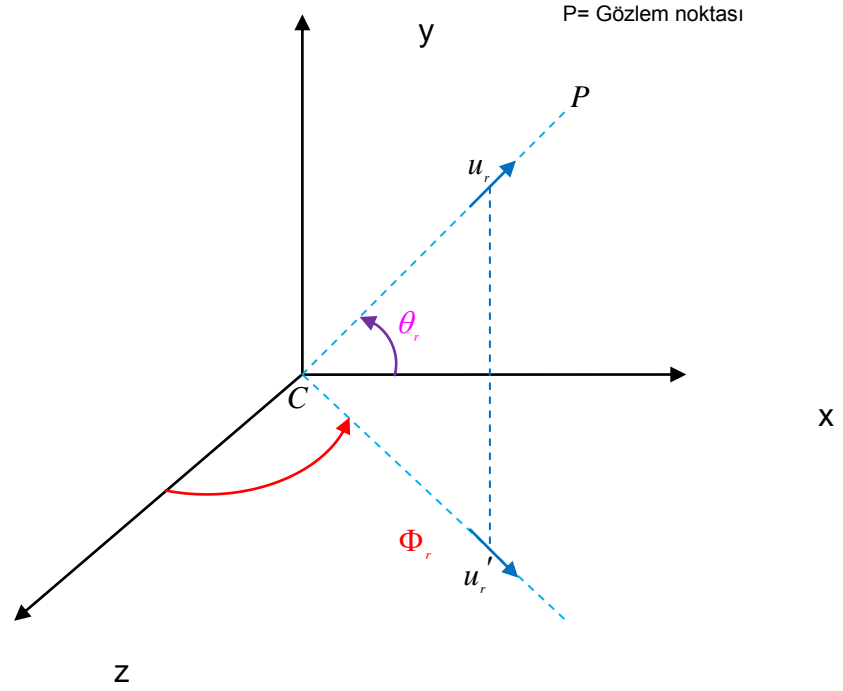
- $\vec{E}^{po}$  Yüzeyden yansıyan elektrik alan
- $\lambda$  Dalga boyu;  $\lambda = c/f$
- $\hat{u}_i$  Gelen dalganın yönü
- $\hat{u}_r$  Gözlemcinin yönü
- $r_0$  C ve P noktaları arasındaki mesafe  
(Gözlem noktasına mesafe)
- P Gözlemci Noktası



Şekil 3-2 Dikdörtgen Plakaya Gelen ve Yansıyan Dalga

$\theta_i$  olarak ifade edilen açı;  $u_i Cx$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve x düzleminde  $u_i$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.

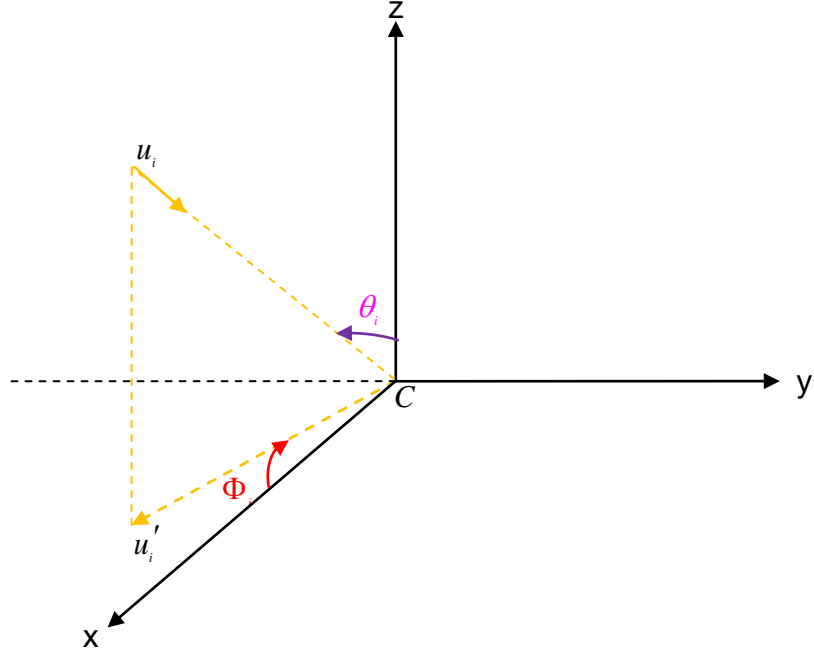
$\Phi_i$  olarak ifade edilen açı;  $u_i' Cz$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve z düzleminde  $u_i'$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.



Şekil 3-3 Dikdörtgen Plakadan Yansıyan Dalga

$\theta_r$  olarak ifade edilen açı;  $u_r Cx$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve x düzleminde  $u_r$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.

$\Phi_r$  olarak ifade edilen açı;  $u_r' Cz$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve z düzleminde  $u_r'$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.



Şekil 3-4 Dikdörtgen Plakaya Gelen Dalga

$\theta_i$  olarak ifade edilen açı;  $u_i C z$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve  $z$  düzleminde  $u_i$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.

$\Phi_i$  olarak ifade edilen açı;  $u'_i C x$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve  $x$  düzleminde  $u'_i$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.

$$\tilde{\theta} = 180 - \theta_i \quad (3.8)$$

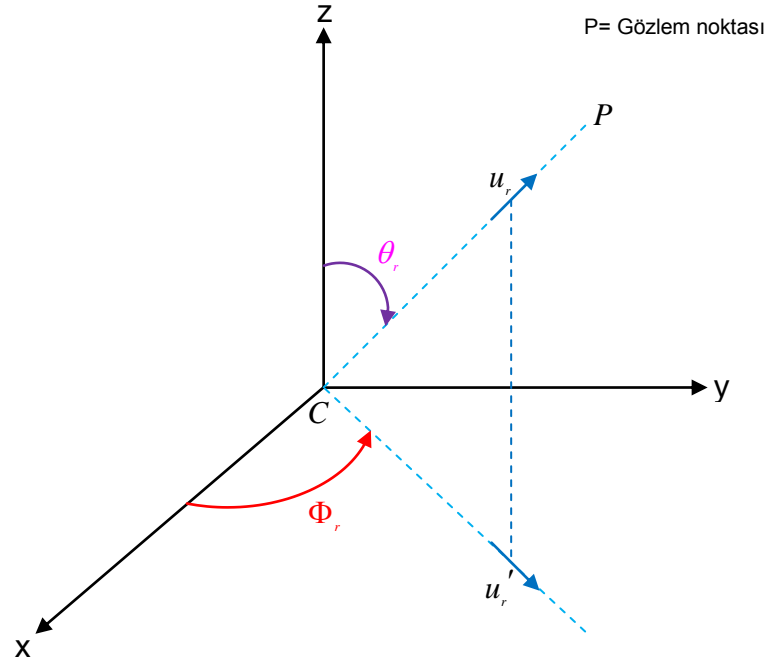
$$\tilde{\phi} = \phi_i - 180 \quad (3.9)$$

$$u_i = \hat{x} \sin \tilde{\theta} \cos \tilde{\phi} + \hat{y} \sin \tilde{\theta} \sin \tilde{\phi} + \hat{z} \cos \tilde{\theta} \quad (3.10)$$

$$\hat{y}_3 = \hat{z} \quad (3.11)$$

$$\hat{x}_3 = \hat{y} \quad (3.12)$$

$$\hat{z}_3 = \hat{x} \quad (3.13)$$



Şekil 3-5 Dikdörtgen Plakadan Yansıyan Dalga

$\theta_r$  olarak ifade edilen açı;  $u_r C_z$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve z düzleminde  $u_r$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.

$\Phi_r$  olarak ifade edilen açı;  $u_r' C_x$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve x düzleminde  $u_r'$ 'ye olan açı olarak ölçülmektedir.

$$\theta = \theta_r \quad (3.14)$$

$$\phi = \phi_r \quad (3.15)$$

$$u_r = \hat{x} \sin \theta_r \cos \phi_r + \hat{y} \sin \theta_r \sin \phi_r + \hat{z} \cos \theta_r \quad (3.16)$$

$$\hat{y}_3 = \hat{z} \quad (3.17)$$

$$\hat{x}_3 = \hat{y} \quad (3.18)$$

$$\hat{z}_3 = \hat{x} \quad (3.19)$$

Denklem (2.14)'de verilen uzak alan yaklaşımı şartlarından birini sağladığımızda; hesaplama yaptığımız bölgedeki alan, düzlemsel dalganın yayılmasına benzer özellik gösterecektir.

Uzak alan yaklaşımı ile yapılan kabulle, denklem (3.1)'deki elektrik alan ifadesi yaklaşık olarak;

$$\begin{aligned} \vec{E}^{PO} = (i/\lambda)L_1L_2e^{ipL_0} \sin c\left(\frac{pL_1}{2}\right) \sin c\left(\frac{qL_2}{2}\right) \\ \left\{ (\hat{p}_0 \cdot \hat{y}_3) [(\hat{u}_i \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] - (\hat{u}_i \cdot \hat{y}_3) [(\hat{p}_0 \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] \right\} \end{aligned} \quad (3.20)$$

yazılabilir.

## B. OLUŞTURULAN CİSİMLERİN RKA'LARININ HESAPLANMASI MAKSADIYLA MATLAB PROGRAMINDA KODLARININ OLUŞTURULMASI

Bir önceki bölümde oluşturduğumuz cisimlerin RKA'larını hesaplamak maksadıyla MATLAB (MATrix LABoratory) programını [20] kullanacağız.

Öncelikli olarak MATLAB programı yardımıyla, hesaplamalar esnasında esas alacağımız temel cisim olan dönen kanatları oluşturacağız. Döner kanatlar Şekil 3-1'de görüldüğü üzere xz düzlemine yerleştirilen boyu  $L_1$ , eni  $L_2$  olan dikdörtgen plaka şeklinde tasarlanmıştır.

Dikdörtgen plakanın oluşturulması esnasında hesaplamalarda kullanılmak üzere referans alınan dört köşesine ait denklemler aşağıda verilmiştir.

$$\vec{P}_1 = L_0 \hat{z}_3 + \frac{L_2}{2} \hat{x}_3 - \frac{L_1}{2} \hat{z}_3 \quad (3.21a)$$

$$\vec{P}_2 = L_0 \hat{z}_3 - \frac{L_2}{2} \hat{x}_3 - \frac{L_1}{2} \hat{z}_3 \quad (3.21b)$$

$$\vec{P}_3 = L_0 \hat{z}_3 + \frac{L_1}{2} \hat{z}_3 - \frac{L_2}{2} \hat{x}_3 \quad (3.21c)$$

$$\vec{P}_4 = L_0 \hat{z}_3 + \frac{L_1}{2} \hat{z}_3 + \frac{L_2}{2} \hat{x}_3 \quad (3.21d)$$

Bunun yanı sıra yukarıdaki denklemlerde kullanılan  $\hat{y}_3$  ve  $\hat{z}_3$  ifadeleri ise;

$$\hat{y}_3 = \begin{bmatrix} \sin \Phi_s \cos \alpha \\ \cos \Phi_s \\ -\sin \Phi_s \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (3.22a)$$

ve

$$\hat{z}_3 = \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ 0 \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (3.22b)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Yukarıdaki ifadelerden yararlanarak  $\hat{x}_3$  ifadesi;

$$\hat{x}_3 = \hat{y}_3 \times \hat{z}_3$$

ile bulunmaktadır.

$\Phi_s$  olarak ifade edilen açı;  $xCy'_3$  arasındaki açıyı ifade etmekte ve  $x$  düzleminde  $y'_3$ 'ne olan açı olarak ölçülmektedir. Ayrıca;

$$\cos(\Phi_s) = \hat{y}_3 \cdot \hat{y} \quad (3.23a)$$

veya

$$\Phi_s = \arccos(\hat{y}_3 \cdot \hat{y}) \quad (3.23b)$$

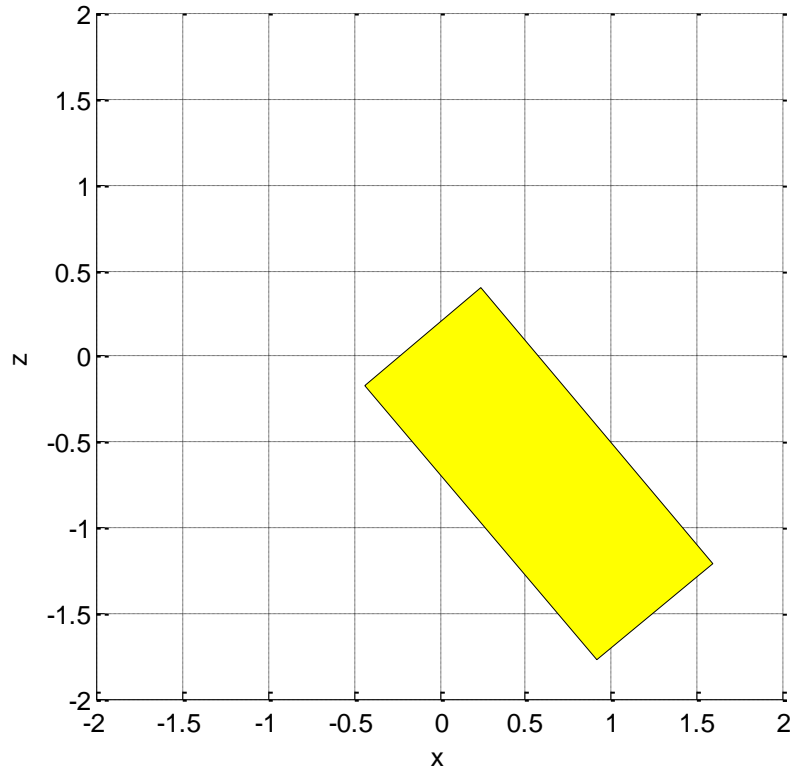
olarak da bulunmaktadır.

Hesaplamalar esnasında kullandığımız döner kanatlara (blade, pal) ait özellikler Tablo 3-1'de verilmiştir.

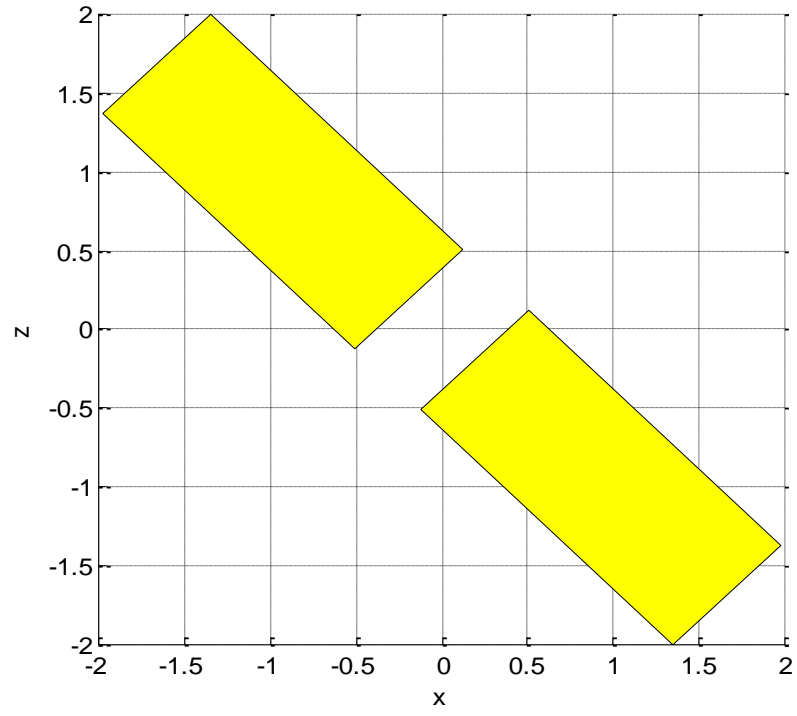
Tablo 3-1 Döner Kanatların Özellikleri

Döner Kanat Sayısı ( $M$ )	Döner Kanatlar Arasındaki Açık ( $\alpha$ )	Döner Kanatın Merkezine Olan Mesafesi ( $L_0$ )	Döner Kanatın Boyu ( $L_1$ )	Döner Kanatın Eni ( $L_2$ )
1	-	4.2 m.	7.2 m.	0.72 m.
2	180	4.2 m.	7.2 m.	0.72 m.
3	120	4.2 m.	7.2 m.	0.72 m.
4	90	4.2 m.	7.2 m.	0.72 m.

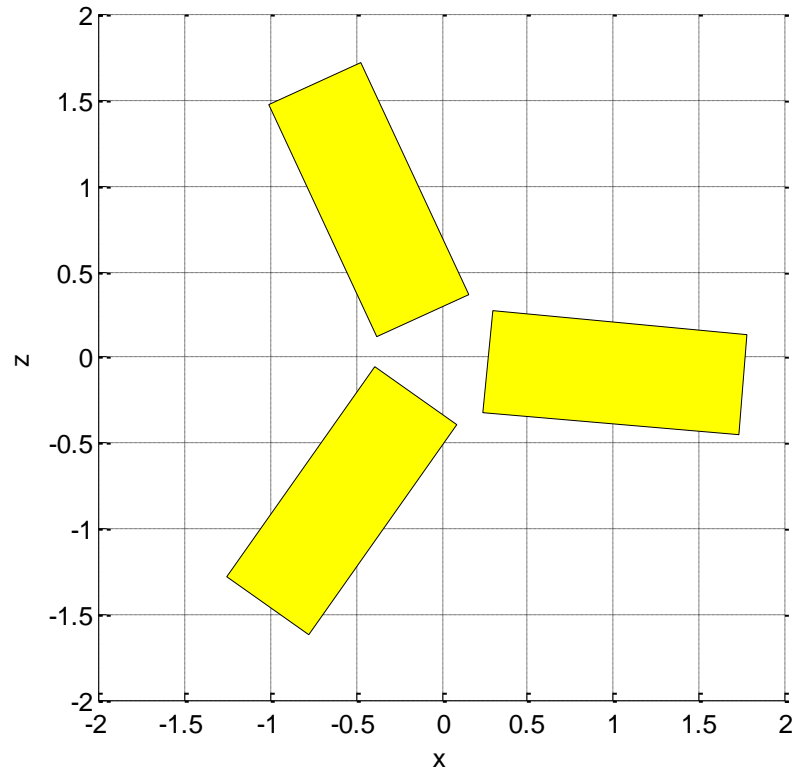
Elde ettiğimiz bu denklemler yardımıyla yapacağımız hesaplamalarda kullanacağımız cisimleri (döner kanatlar) MATLAB programı yardımıyla xz düzlemi üzerinde oluşturduk. Bu cisimler Şekil 3-6-9'da gösterilmiştir.



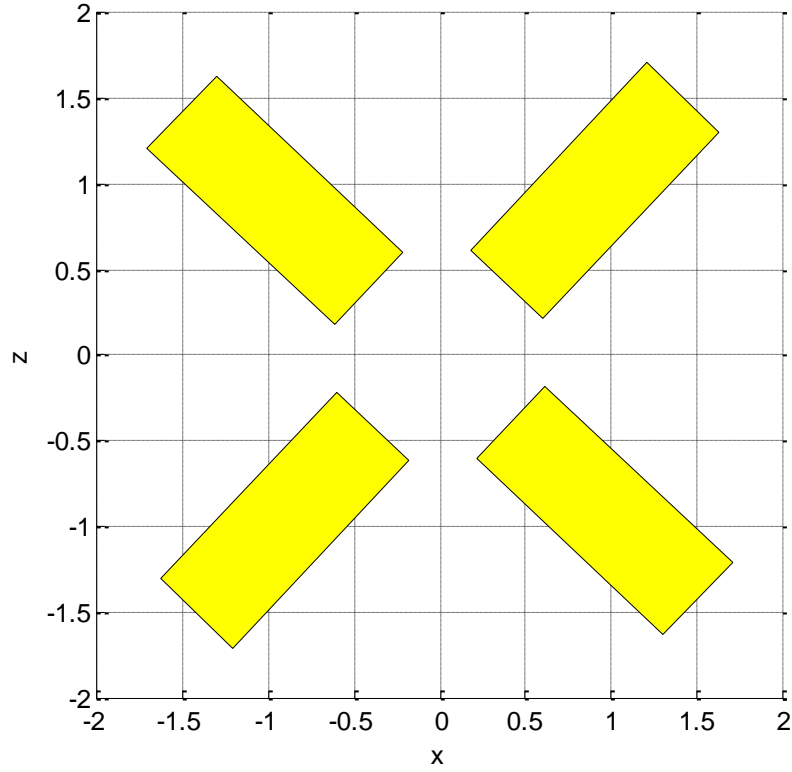
Şekil 3-6 Tek Kanatlı Cisim



Şekil 3-7 İki Kanatlı Cisim



Şekil 3-8 Üç Kanatlı Cisim



Şekil 3-9 Dört Kanatlı Cisim

Yukarıdaki kanatları oluşturduktan sonra FO yaklaşımı ile Şekil 3-1’de xz düzlemine yerleştirilen boyu  $L_1$ , eni  $L_2$  olan dikdörtgen plakadan yansıyan elektrik alanı bulmak maksadıyla aşağıda belirtilen formül kullanılmıştır.[18]

$$\vec{E}^{PO} = \frac{iE_0^i}{\lambda r_0} e^{-ikr_0} L_1 L_2 e^{ipL_0} \sin c\left(\frac{pL_1}{2}\right) \sin c\left(\frac{qL_2}{2}\right) \left\{ (\hat{p}_0 \cdot \hat{y}_3) [(\hat{u}_i \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] - (\hat{u}_i \cdot \hat{y}_3) [(\hat{p}_0 \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] \right\} \quad (3.24)$$

Bölüm 2.2’de anlattığımız uzak alan yaklaşımı ile yapılan kabulle, denklem (3.24)’deki elektrik alan ifadesi yaklaşık olarak;

$$\vec{E}^{PO} = (i / \lambda) L_1 L_2 e^{ipL_0} \sin c\left(\frac{pL_1}{2}\right) \sin c\left(\frac{qL_2}{2}\right) \left\{ (\hat{p}_0 \cdot \hat{y}_3) [(\hat{u}_i \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] - (\hat{u}_i \cdot \hat{y}_3) [(\hat{p}_0 \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] \right\} \quad (3.25)$$

kabul edilmiştir ve yapılan elektrik alan hesaplamalarında bu formül kullanılmıştır.

Kullanılan bu formül neticesinde elde edilen saçılan elektrik alandan RKA hesaplamak maksadıyla aşağıda belirtilen formül kullanılmıştır [1].

$$\sigma_{3-D} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_{sca}|^2}{|E_{inc}|^2} \quad (3.26)$$

Yukarıdaki denklemde kullanılan gösterimler;

$R$  Cisim ile gözlemci noktası arasındaki mesafe

$E_{sca}$  Yansıyan elektrik alan

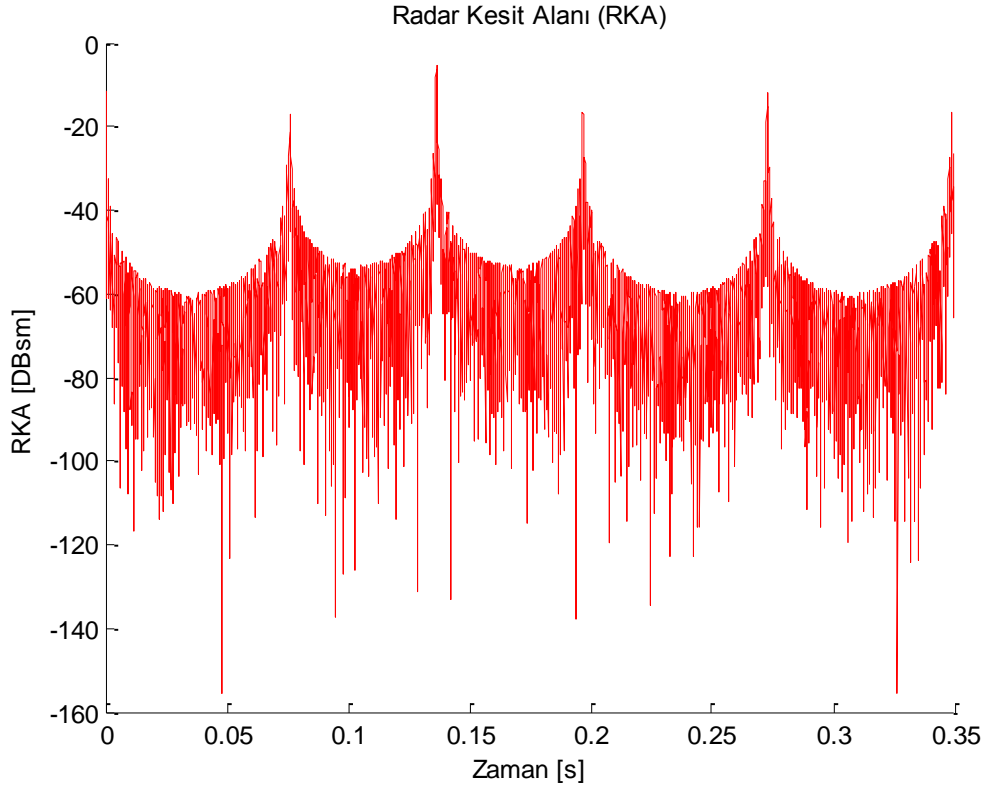
$E_{inc}$  Gelen elektrik alan

olarak ifade edilmektedir.

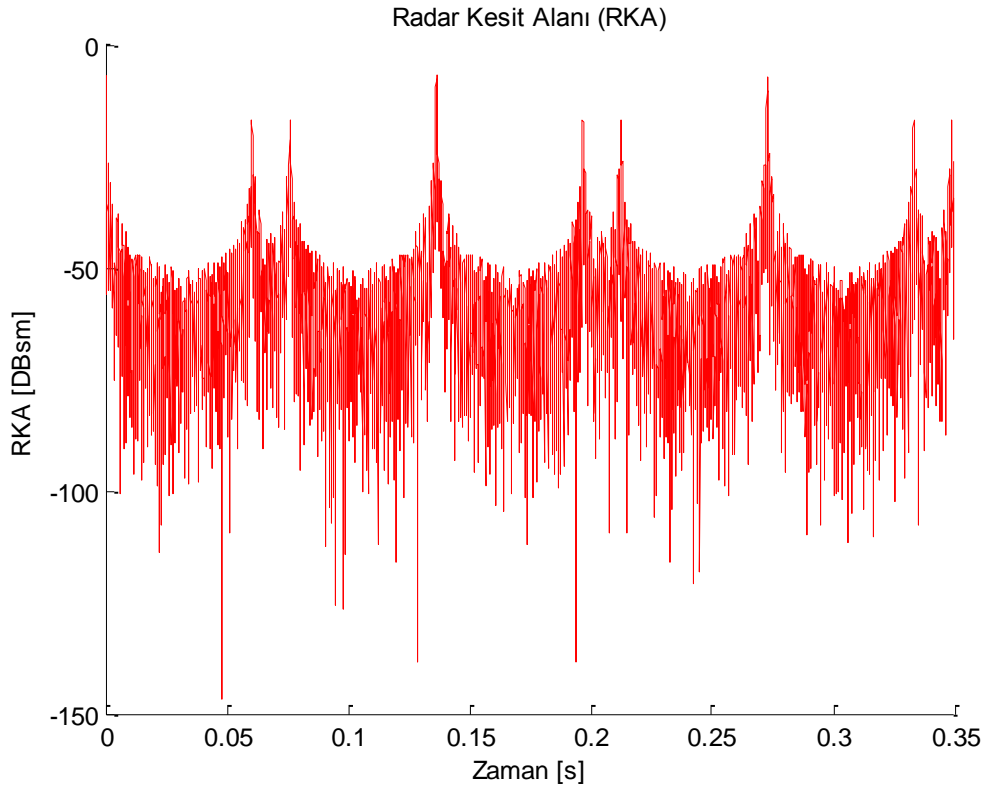
### **C. OLUŞTURULAN CİSİMLERİN MATLAB PROGRAMI YARDIMIYLA RKA'LARININ HESAPLANMASI**

İlk bölümde oluşturulan cisimlerin (döner kanatlar) RKA'larını hesaplamak maksadıyla ikinci bölümde belirtilen formüllerin ışığında MATLAB programı yardımıyla kodları oluşturulmuştur.

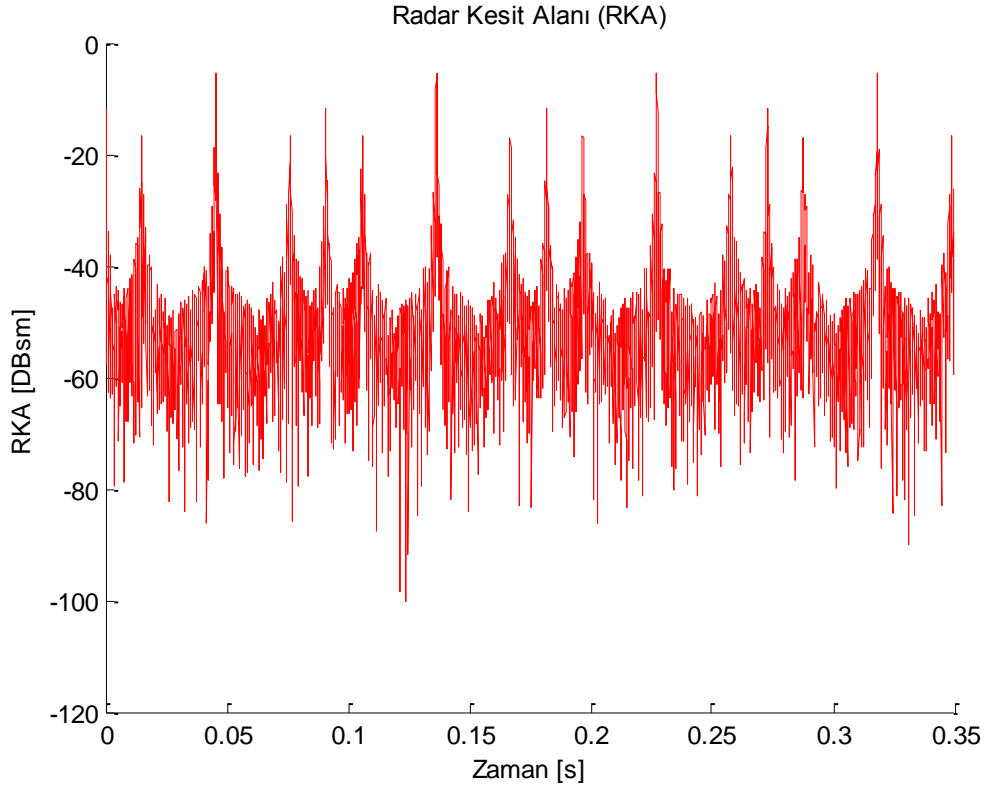
Oluşturulan bu kodlar neticesinde döner kanatların RKA'ları bilgisayar ortamında ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar müteakip şekillerde gösterilmiştir.



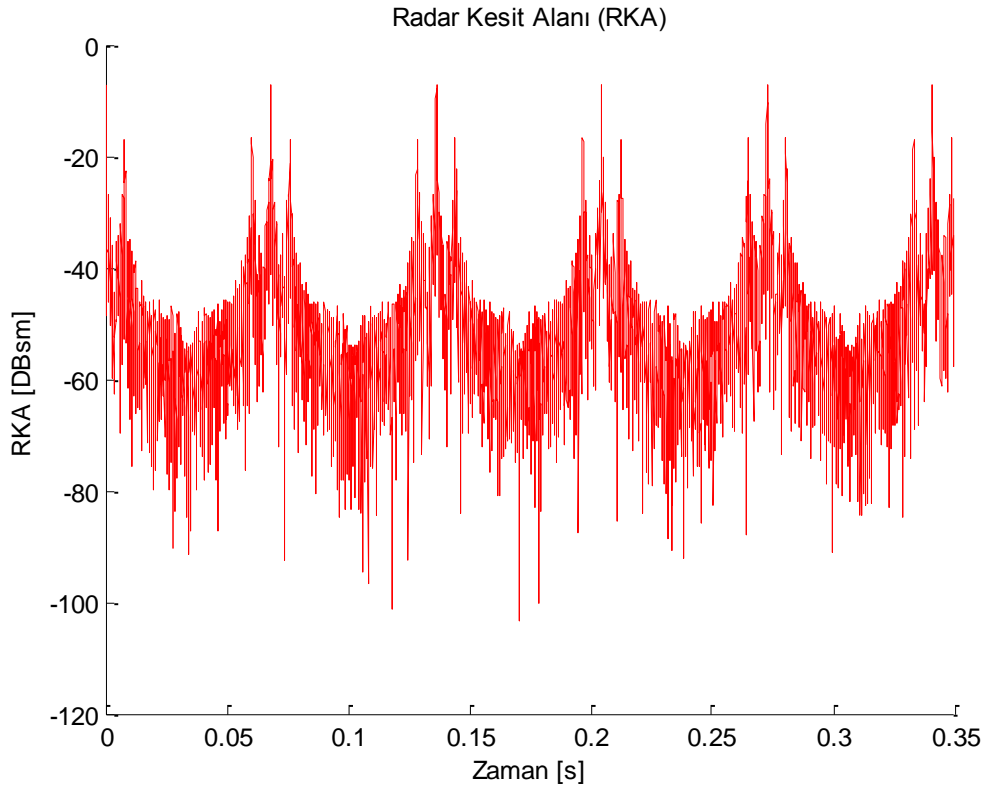
Şekil 3-10 Tek Kanatlı Cismin RKA'sı



Şekil 3-11 İki Kanatlı Cismin RKA'sı



Şekil 3-12 Üç Kanatlı Cismin RKA'sı



Şekil 3-13 Dört Kanatlı Cismin RKA'sı

## **D. CİSİMLERİN RKA-ZAMAN DEĞERLERİNİN DOPPLER-ZAMAN GRAFİKLERİNE DÖNÜŞTÜRÜLMESİ**

Oluşturulan cisimlerin RKA'larının ve zamana bağlı Doppler izlerinin hesaplanması maksadıyla MATLAB programında kodlanmasından ve elde edilen sonuçlar hakkında Bölüm 3.3'de bilgi verilmiştir. Bu bölümde son olarak Fourier Dönüşümü kullanarak elde ettiğimiz RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman grafiklerine dönüştürmeyi anlatacağız.

RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman grafiklerine dönüştürmemizdeki temel amaç döner kanatların hareketi esnasında Doppler etkisinden yararlanarak frekansın zamanla değişimini göstermektir.

Frekansın zamanla değişimini elde etmek ise tezin amacı doğrultusunda bize gözlemci tarafından hedefin tanımlanmasını sağlayacaktır.

### **1. Doppler Etkisi**

Bir ses kaynağı hareket etmeyen bir gözlemciye doğru hareket ettiğinde, gözlemci gerçekte ses kaynağından gelenden yüksek bir ses algılar. Eğer ses kaynağı gözlemciden uzaklaşıyorsa bu etki tersine döner. (negatif Doppler frekansı) gözlemcinin duyduğu ses yüksekliği ses kaynağından kaynaklanan sestən daha az algılanır. Her iki durumda da bir frekans kayması meydana gelir.

Bir ses kaynağı ile o ses kaynağının alıcısı arasında frekanstaki belirgin değişikliğin meydana gelmesinin sebebi, ses kaynağı ile ses alıcısı arasındaki nispi harekettir.

Örneğin, çok hızlı giden bir araçta çalınan bir düdüğün sesi, araç yaklaştığı sırada artarak yükselir ve araç uzaklaşırken giderek azalır. Halbuki çalınan düdüğün frekansı değişmemiştir ve havadaki hızları da sabittir. Ancak yaklaşan araç ile gözlemci arasındaki mesafe azalmaktadır. Bunun sonucu olarak her dalga kendisinden önce yayınlanmış dalgadan daha kısa mesafe

kat edecektir. Böylece dalgalar gitgide azalan zaman farkları ile gözlemciye ulaşırlar.

Hareket eden hedefe rastlayan elektromanyetik dalgalar da benzeri şekilde davranırlar ve bir frekans kaymasına maruz kalırlar [21].

Bu etki Avusturyalı fizikçi Christian Doppler (1803-1853) tarafından keşfedilmiş olup, kendisinin adı ile anılmaktadır [21].

## 2. Doppler Frekansı

Frekans kayma miktarı hedef hızının bir ölçüsüdür. Doppler frekansı  $f_d$  ile gösterilir.

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (3.27)$$

Yukarıdaki formülde;

$f_d$  Doppler frekansı [Hz]

$\lambda$  Gönderilen sinyalin dalga boyu [m]

$v$  Hedefin menzil yönündeki hızı [m/s]

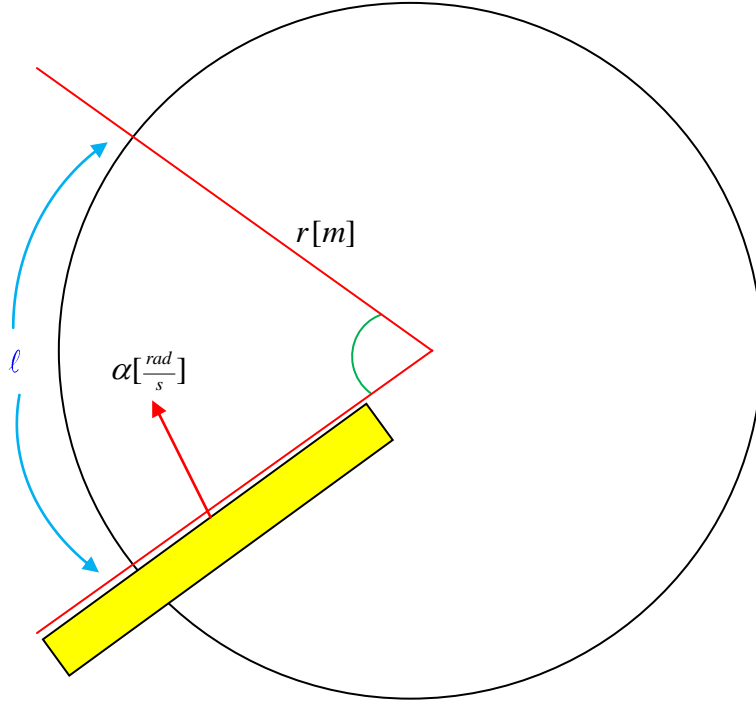
olarak ifade edilmiştir. Ayrıca  $v$  ifadesi Şekil 3-14'de gösterilen gösterimler ışığında aşağıda belirtilen formüller yardımıyla bulunur.

$$v = \frac{\ell}{t} = r[m] \times \alpha \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (3.28)$$

Doppler frekansı hesaplanırken kullanılan  $v$  hedefin hızının yanı sıra elde edilen sonuçları yorumlarken kullanacağımız *radyal hızdan* bahsetmekte fayda bulunmaktadır.

Bir cismin radara olan radyal hızı, uçuş hızının radar yönünde ya da radardan aksi yönde radara nazaran nispi hızını ifade etmektedir. Bir pervane kanadı dönerken , öyle bir an gelir ki *radyal hız* sıfır ve teğet hız ise palin o anki hızı olur. Bu anda palin bu noktadaki Doppler frekansı sıfırdır. Pervane kanadı aynı rotada devam ederse *radyal hız* vektörü radardan uzaklaşan yöndedir. Bu bir *negatif radyal hız*dır. (Burada negatif Doppler frekansı doğar.

Bu değer pozitif Doppler frekansı ile aynıdır. Sadece alınan sinyal ile gönderilen sinyal arasında 180 derece faz farkı vardır.) [21].



Şekil 3-14 Doppler Frekansı Hesabı

Bu bölümde son olarak Fourier Dönüşümü kullanarak elde ettiğimiz RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman grafiklerine dönüştürmeyi anlatacağız. RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman grafiklerine dönüştürmemizdeki temel amaç döner kanatların hareketi esnasında Doppler etkisinden yararlanarak frekansın zamanla değişimini göstermektir. Frekansın zamanla değişimini elde etmek ise tezin amacı doğrultusunda bize gözlemci tarafından hedefin tanımlanmasını sağlayacaktır.

### 3. Doppler-Zaman Grafiklerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde son olarak Fourier Dönüşümü kullanarak RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman grafiklerine dönüştürmeyi anlatacağız.

RKA-zaman değerlerini Doppler-zaman değerlerine dönüştürmemizdeki temel amaç döner kanatların hareketi esnasında doppler etkisinden yararlanarak frekansın zamanla değişimini göstermektir.

Önceki bölümde anlatılan şeklide RKA değerleri elde edilmiş ve elde edilen bu RKA değerleri bir veri matrisi olarak kaydedilmiştir. Bu RKA değerleri 1x7001'lik bir veri matrisi oluşturmuştur. (0.35 sn.lik analiz süresi içerisinde  $5 \times 10^{-5}$  sn.lik örnekleme aralığı ile hesaplama yapılmıştır.)

Oluşturulan bu matris daha sonra ilk değerden başlayarak  $FFT_i$ 'inci değere kadar  $FFT_i$  satırlık ilk sütun oluşturulmuş ve daha sonra her yeni sütunda, bir değer artırılıp bir sütun kaydırılarak  $FFT_i$  satırlık sütunlar şeklinde  $FFT_i \times 7001$ 'lik bir matris şeklinde yeni bir veri matrisi oluşturulmuştur.

Bu işlem yapıldıktan sonra elde edilen yeni matrisin sütunlar yönünde Fourier Dönüşümü alınmış ve frekansta meydana gelen zamanla değişmeyi gözlemlene imkanı elde edilmiştir. Burada yapılan birer basamaklık kaydırma işlemi sayesinde frekans spektrumundaki değişimin çözünürlüğü en yüksek seviyede görülmüştür.

Bu bölümde yaptığımız işlem kısaca Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'nün (Short Time Fourier Transform-STFT) eşdeğeridir. Elde edilen grafikler de kısaca "RKA-Frekans Grafiği" olarak anılmakla birlikte aslında RKA'nın frekans ve zamana göre dağılımını göstermektedir. Bu grafiklere bundan sonra kısaca "EMAT Grafiği" denilecektir.

#### IV. NÜMERİK SONUÇLAR

Bu bölümde nümerik sonuçlar incelenecektir. Nümerik sonuçlar başlığı altında tez kapsamında yapılan bazı hesaplamalara ve analizlere ilişkin grafik ve tablolar gösterilmiştir.

Bölüm 2.2'de anlattığımız uzak alan yaklaşımı ile yapılan kabulle, denklem (3.25)'deki elektrik alan ifadesi;

$$\vec{E}^{PO} = (i / \lambda) L_1 L_2 e^{ipL_0} \sin c\left(\frac{pL_1}{2}\right) \sin c\left(\frac{qL_2}{2}\right) \left\{ (\hat{p}_0 \cdot \hat{y}_3) [(\hat{u}_i \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] - (\hat{u}_i \cdot \hat{y}_3) [(\hat{p}_0 \times \hat{u}_r) \times \hat{u}_r] \right\} \quad (4.1)$$

kabul edilmiştir ve yapılan elektrik alan hesaplamalarında bu formül kullanılmıştır.

Tablo 4-1 5 GHz İçin Kullanılan Hesaplama Parametreleri

Frekans (GHz)	Döner Kanatların Eğimi	Gelen Dalga Açısı	Giden Dalga Açısı	Rotor Hızı (°/s)	Doppler Hızı (m/s)	$F_{dMAX}$ (Hz)
5	0	0	180	1320	182.16	6072
		90	90	1320	182.16	6072
5	10	0	180	1320	182.16	6072
		30	150	1320	182.16	6072
		60	120	1320	182.16	6072
		90	90	1320	182.16	6072
5	30	0	180	1320	182.16	6072
		30	150	1320	182.16	6072
		60	120	1320	182.16	6072
		90	90	1320	182.16	6072
5	90	0	180	1320	182.16	6072
		180	0	1320	182.16	6072

Kullanılan bu formül neticesinde elde edilen saçılan elektrik alandan RKA hesaplamak maksadıyla aşağıda belirtilen formül kullanılmıştır.[1]

$$\sigma_{3-D} = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[ 4\pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right] \quad (4.2)$$

Denklem (3.27) yardımıyla maksimum doppler frekansı hesaplanmıştır [8]. Hesaplanan değerler Tablo 4-1-2'de gösterilmiştir.

Tablo 4-2 18 Ghz İçin Kullanılan Hesaplama Parametreleri

Frekans (GHz)	Döner Kanatların Eğimi	Gelen Dalga Açısı	Giden Dalga Açısı	Rotor Hızı (°/s)	Doppler Hızı (m/s)	$F_{dMAX}$ (Hz)
18	0	0	180	1320	182.16	21859
		90	90	1320	182.16	21859
18	10	0	180	1320	182.16	21859
		30	150	1320	182.16	21859
		60	120	1320	182.16	21859
		90	90	1320	182.16	21859
18	30	0	180	1320	182.16	21859
		30	150	1320	182.16	21859
		60	120	1320	182.16	21859
		90	90	1320	182.16	21859
18	90	0	180	1320	182.16	21859
		180	0	1320	182.16	21859

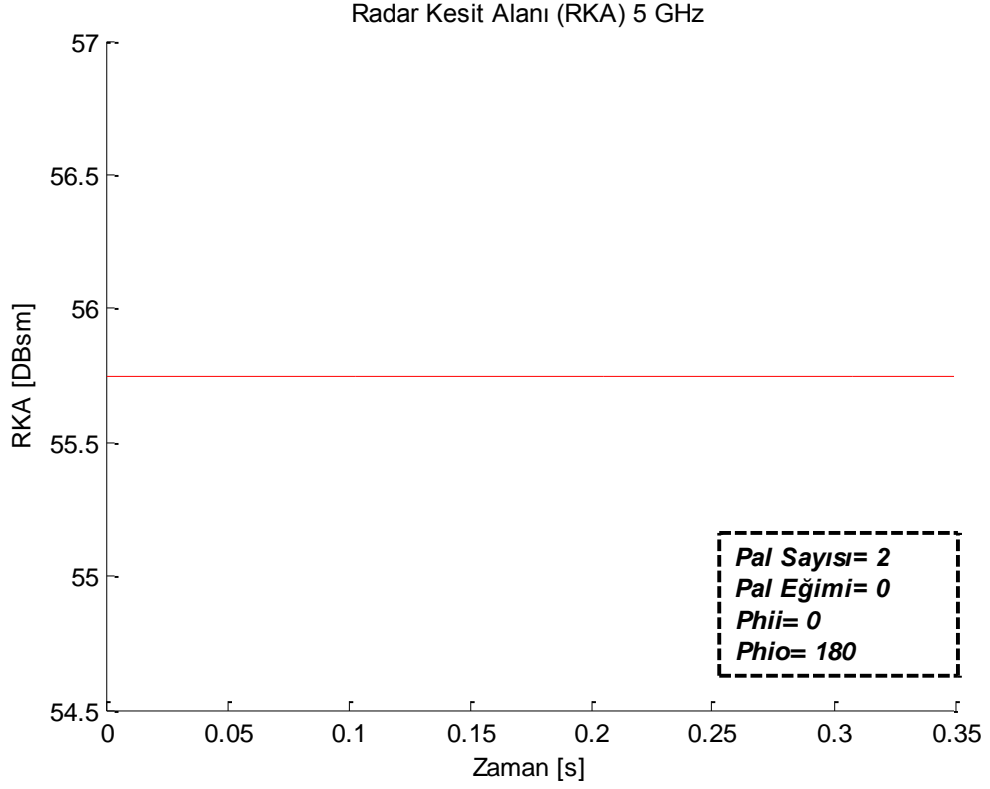
RKA değerlerini elde etmeyi müteakip bu değerler yardımıyla zamanla doppler frekansındaki değişme hesaplanmıştır. Bu hesaplama esnasında kullanılan parametreler Tablo 4-3'te gösterilmiştir.

Tablo 4-3 Doppler-Zaman Grafiklerini Elde Etmek İçin Kullanılan Hesaplama Parametreleri

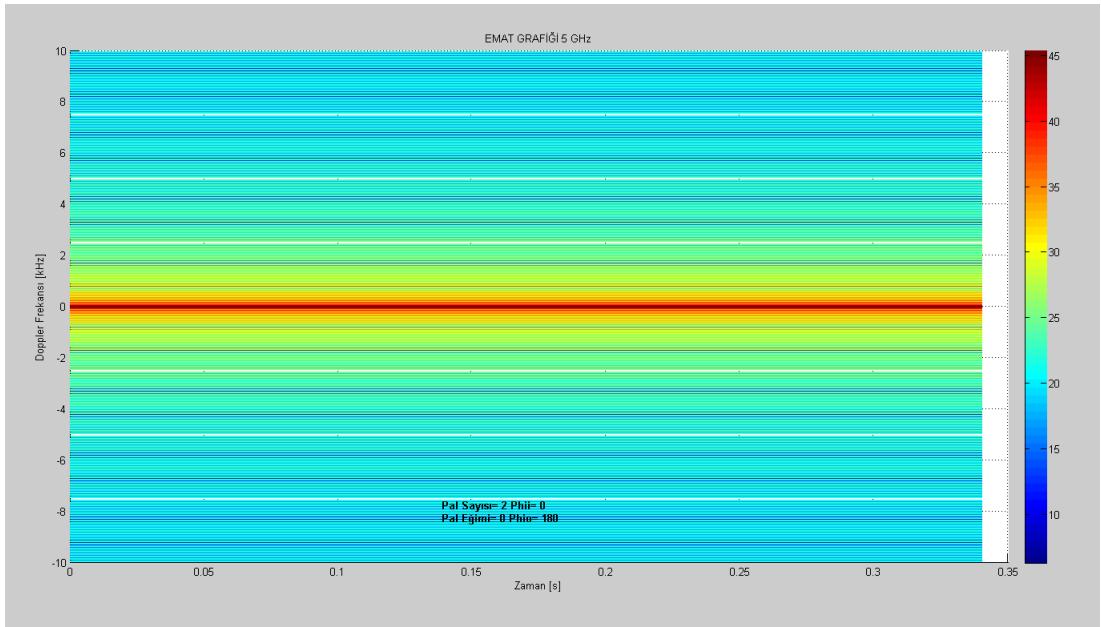
Frekans (GHz)	Örnekleme Aralığı (sn.)	Doppler-Zaman Grafikleri İçin Kullanılan Parametreler	
		$N_{FFT}$	$FFT_l$
5	$5 \times 10^{-5}$	1024	200
18	$5 \times 10^{-5}$	1024	200

#### A. 5 GHZ. FREKANSI İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR

Çözülen ilk nümerik örnekte gözlemci döner kanatlara tepeden bakıyor konumda bulunmaktadır. Pallerin eğimi sıfır olduğundan maksimum yüzey alanı gözlemci tarafından algılanmaktadır ve bu zamanla değişmemektedir (Şekil 4-1). Bu nedenle RKA değeri sabit ve 55.74 dBsm olarak ölçülmektedir. Pallerin radara göre mesafesi değişmediği için Doppler frekansı 0 kHz. olarak bulunmaktadır (Şekil 4-2).

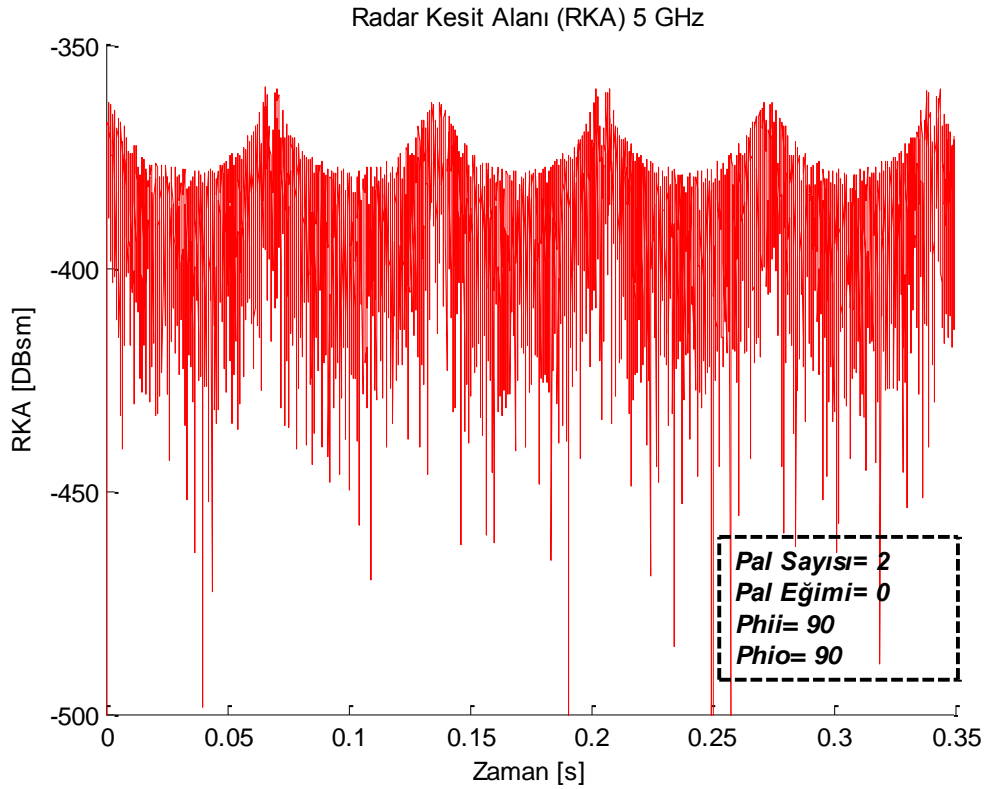


Şekil 4-1 5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

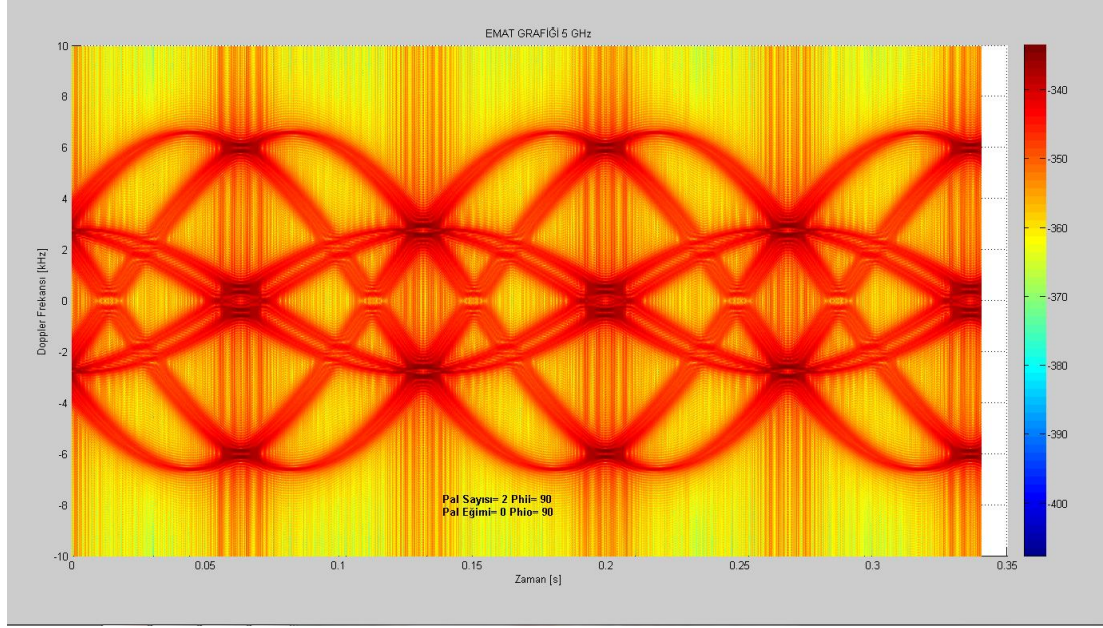


Şekil 4-2 5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

Yapılan ikinci örnekte 2 palli döner kanat seçilmiştir. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi sıfır olduğundan RKA değeri ortalama olarak -400 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Bu değer ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Şekil 4-3'te 0.14 s. ve katlarına denk gelen zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner kanatların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalar. 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerde döner kanat tam bir turunu tamamlamakta ve ikinci turuna başlamaktadır. Bu noktada da maksimum Doppler kayması bulunmaktadır. Şekil 4-4'te de bu periyodik olay görülmektedir.



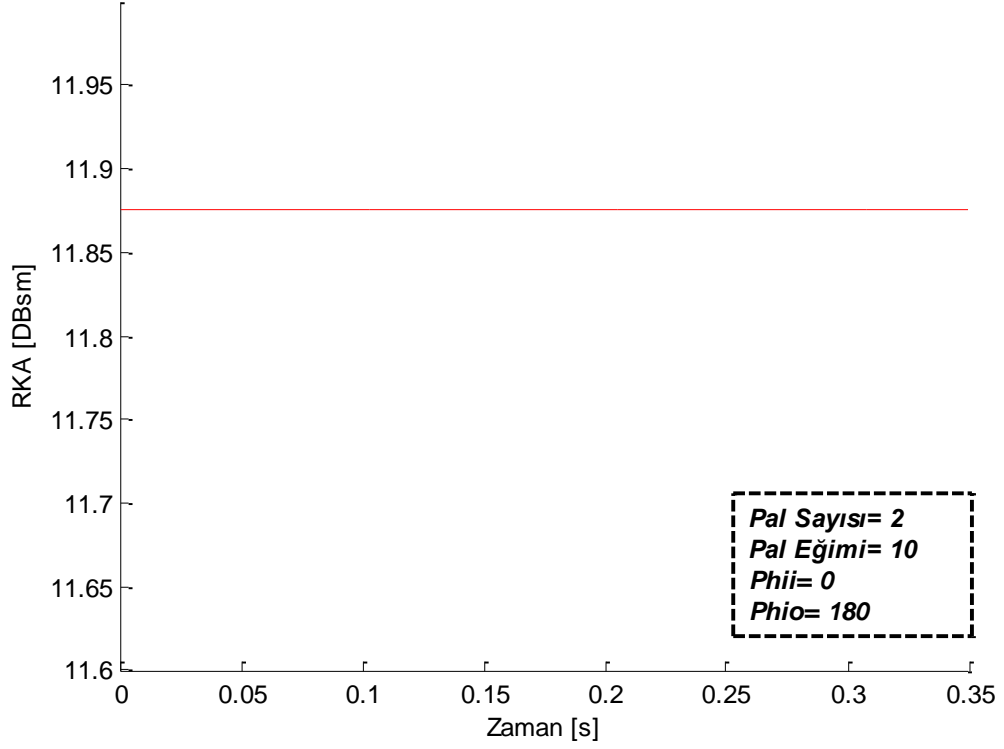
Şekil 4-3 5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)



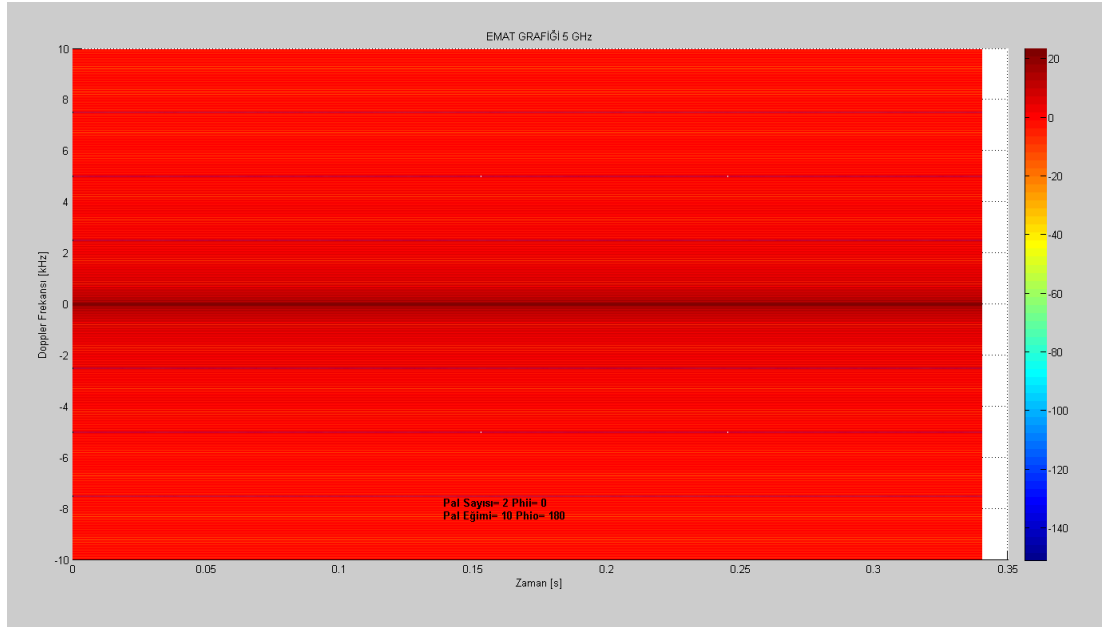
Şekil 4-4 5 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

Üçüncü örnekte de gözlemci döner kanatlara tepeden bakıyor konumda bulunmaktadır. Bu yüzden RKA değeri zamana göre değişmemektedir. Pallerin eğimi 10 derece olduğu için sıfır derecelik eğime nazaran daha az yüzey alanı gözlemci tarafından algılanmaktadır ve bu zamanla değişmemektedir. Bu nedenle Şekil 4-5'te görüldüğü üzere RKA değeri sabit ve 11.87 dBsm olarak ölçülmektedir. Sabit olan RKA değeri de Şekil 4-6'daki EMAT grafiğinde sıfır Doppler oluşturmaktadır.

Radar Kesit Alanı (RKA) 5 GHz

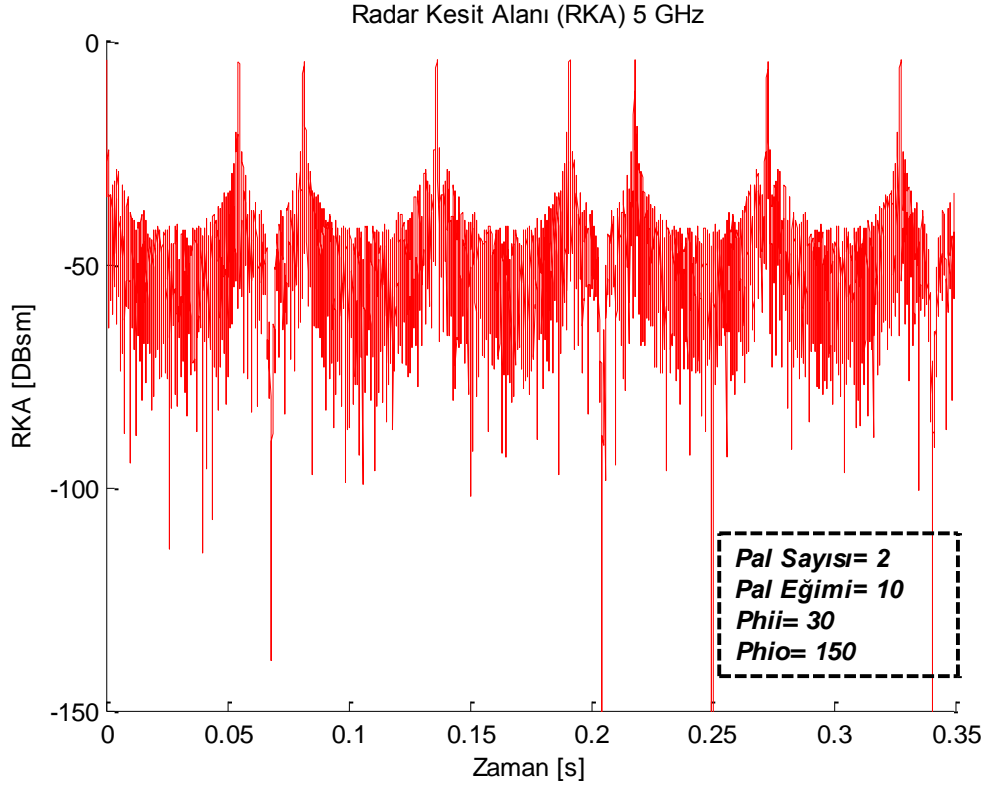


Şekil 4-5 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

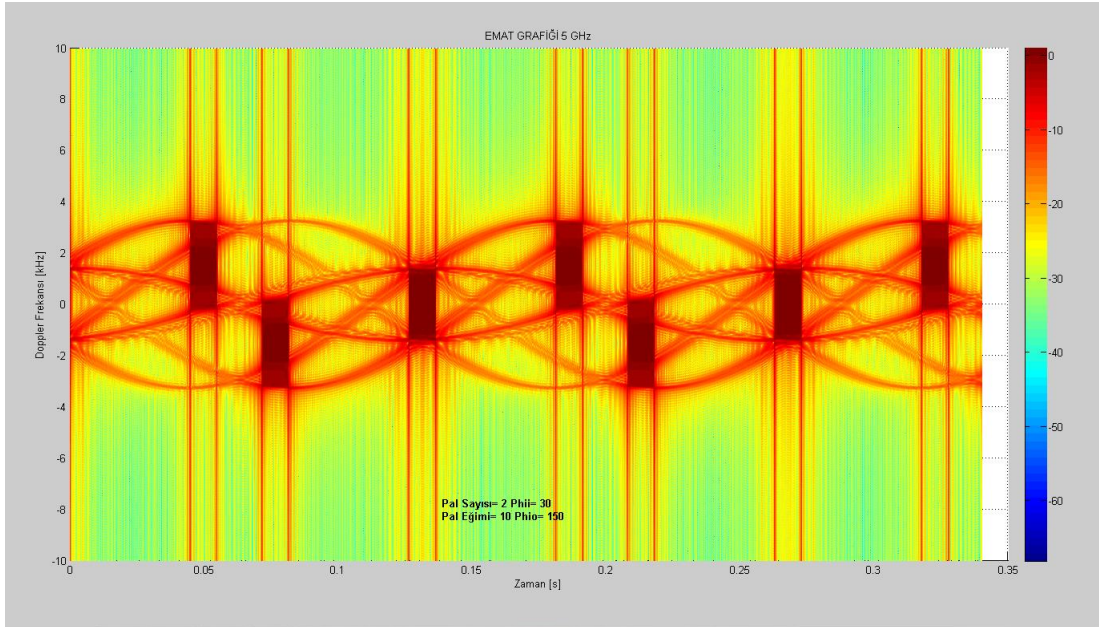


Şekil 4-6 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 10 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -50 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-7'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Şekil 4-8'de bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir. Ayrıca Şekil 4-7'de minimum noktalarına denk gelen zaman değerlerinin hemen öncesinde ve sonrasında maksimumlar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni bu noktalarda döner kanatların gözlemciye göre konumunun değişmesiyle beraber eğimden kaynaklanan yüksek RKA göstermesidir.

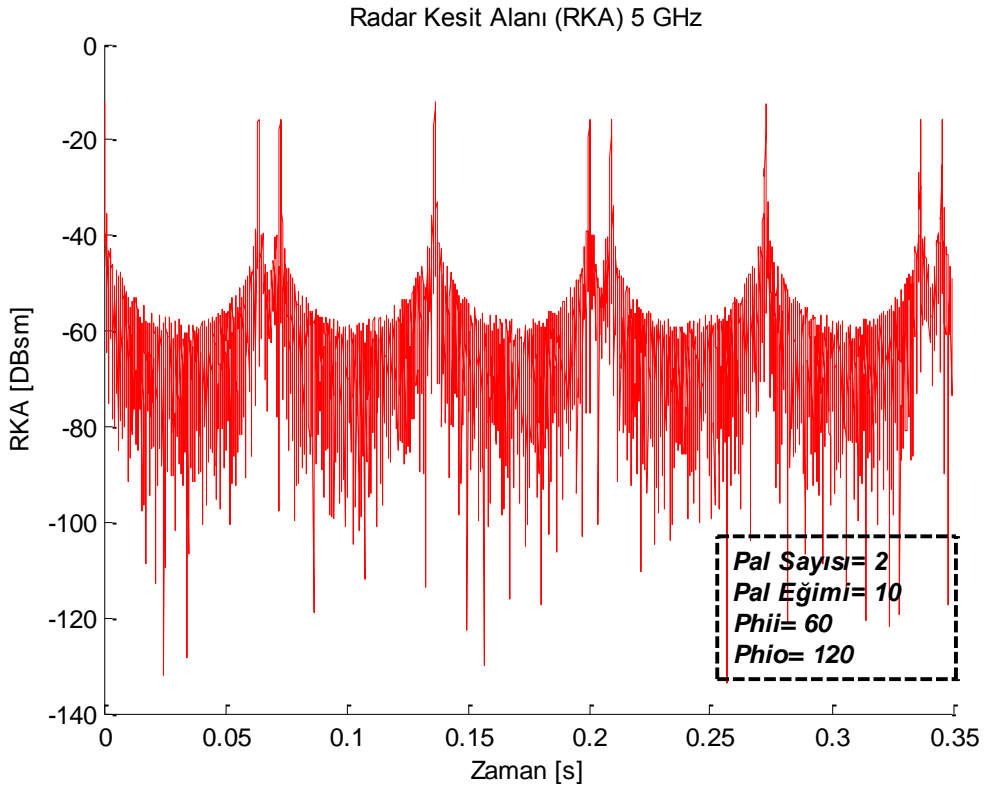


Şekil 4-7 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
 (Phii=30, Phio=150)

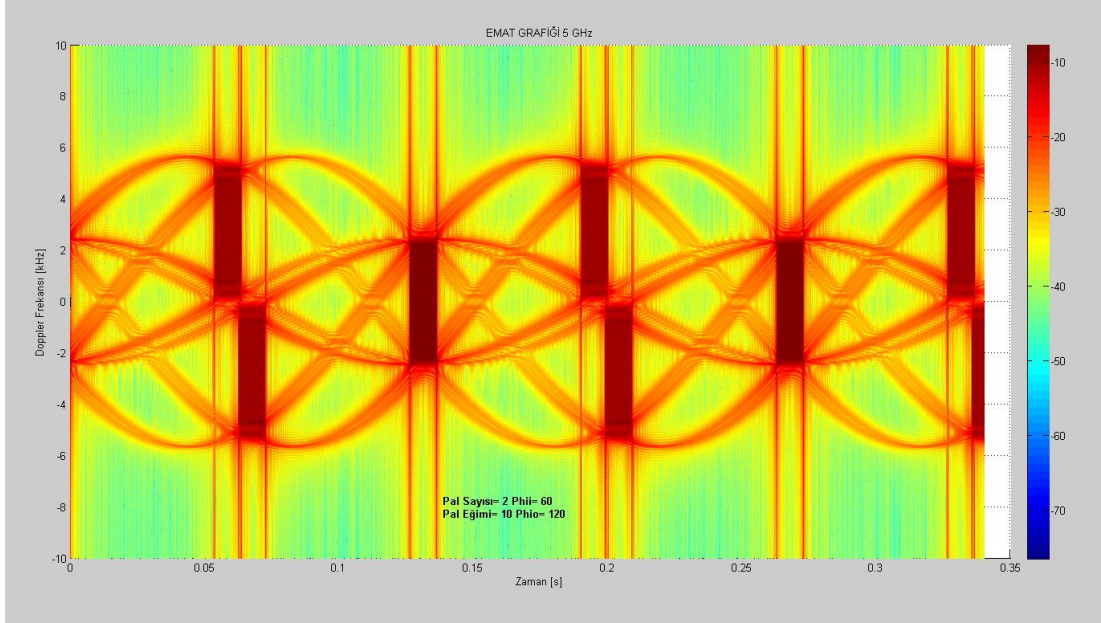


Şekil 4-8 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
 (Phii=30, Phio=150)

Bu örnekte iki palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 10 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -60 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-9'da 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmekte olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde eğimden kaynaklanan iki tepe noktalı maksimum oluşmaktadır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Şekil 4-10'da bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

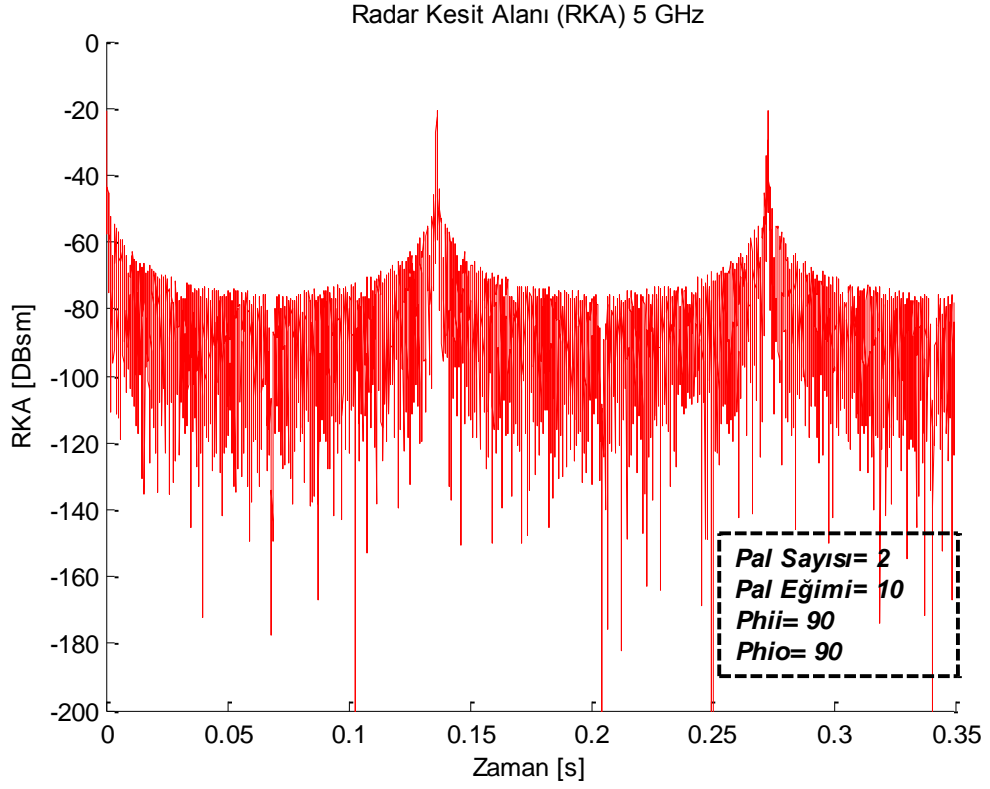


Şekil 4-9 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=60, Phio=120)

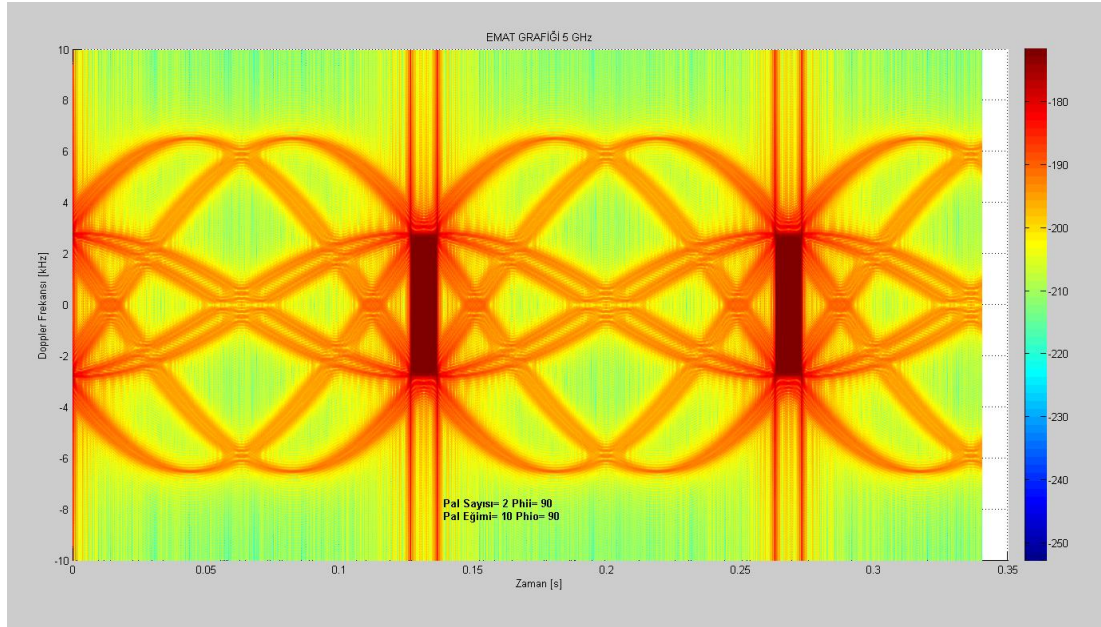


Şekil 4-10 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=60, Phio=120)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat seçilmiştir. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 10 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -100 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-11'de 0.14 s. ve katlarına denk gelen zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner kanatların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerde döner kanat tam bir turunu tamamlamakta ve ikinci turuna başlamaktadır. Bu noktada da maksimum Doppler kayması bulunmaktadır. Şekil 4-12'de de bu periyodik olay görülmektedir.

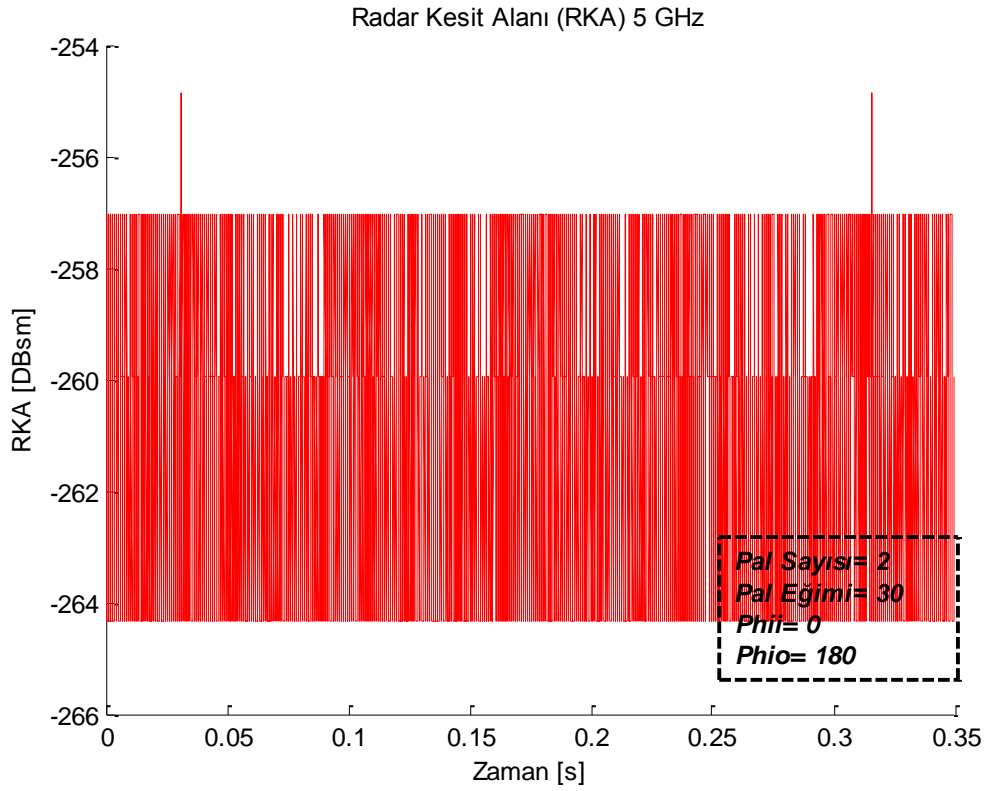


Şekil 4-11 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

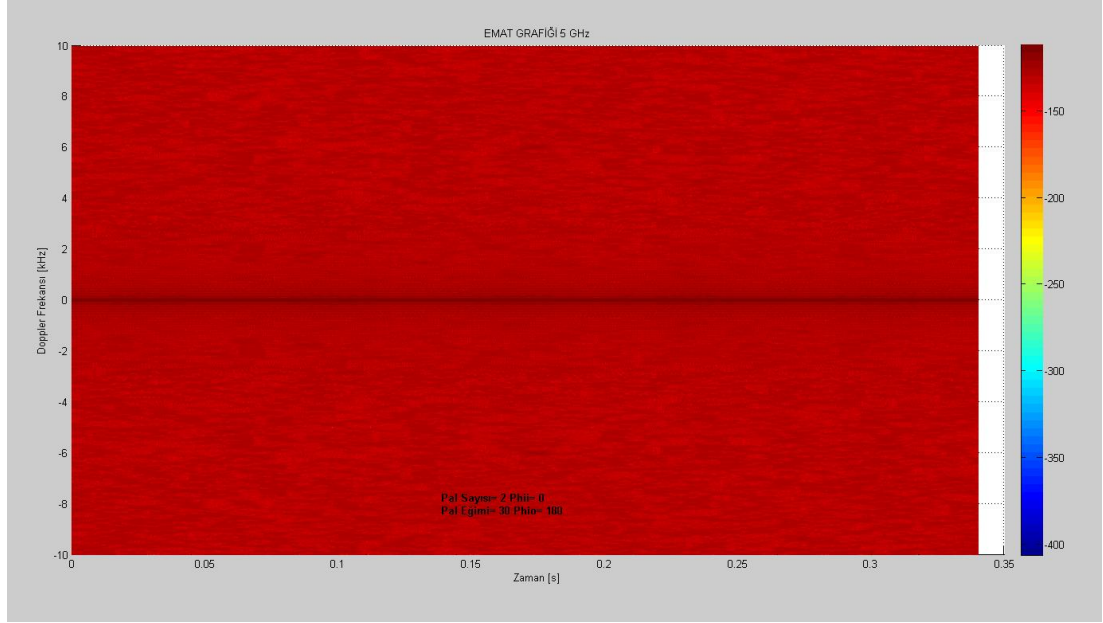


Şekil 4-12 5 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat seçilmiştir. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan Şekil 4-13'te görülen RKA değeri ortalama olarak -260 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Bu değer ihmal edilebilecek kadar düşüktür. 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerde döner kanat tam bir turunu tamamlamakta ve ikinci turuna başlamaktadır. Şekil 4-14'teki EMAT grafiğinde de doppler frekansında bir değişiklik görülmemektedir.

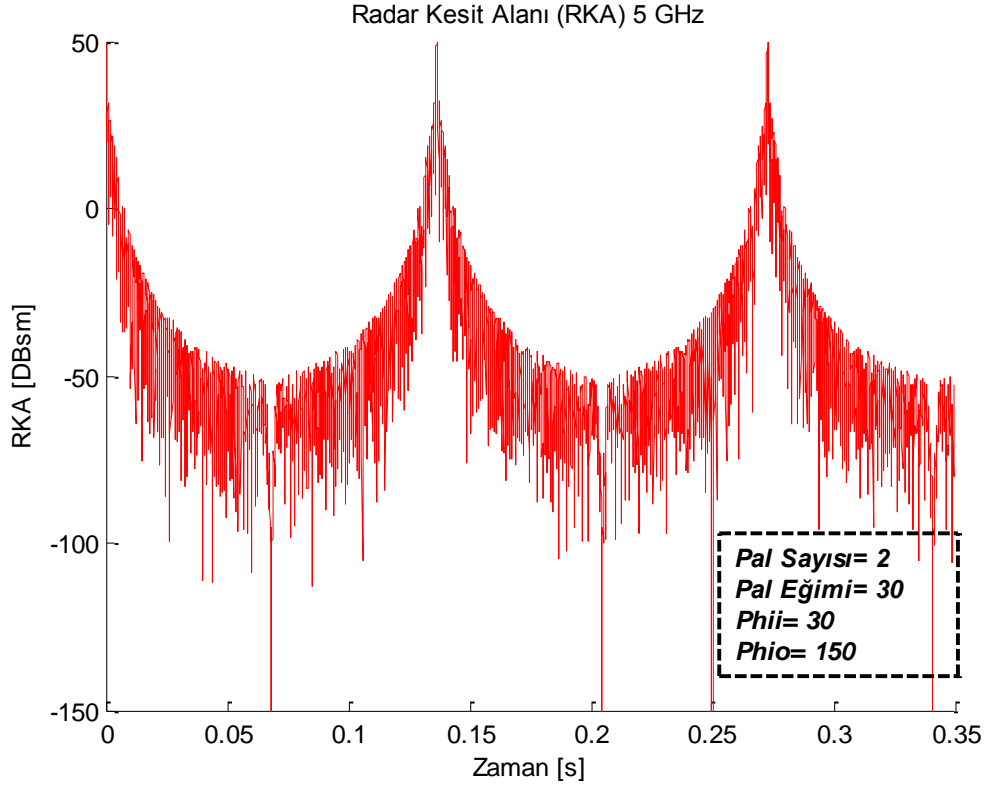


Şekil 4-13 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

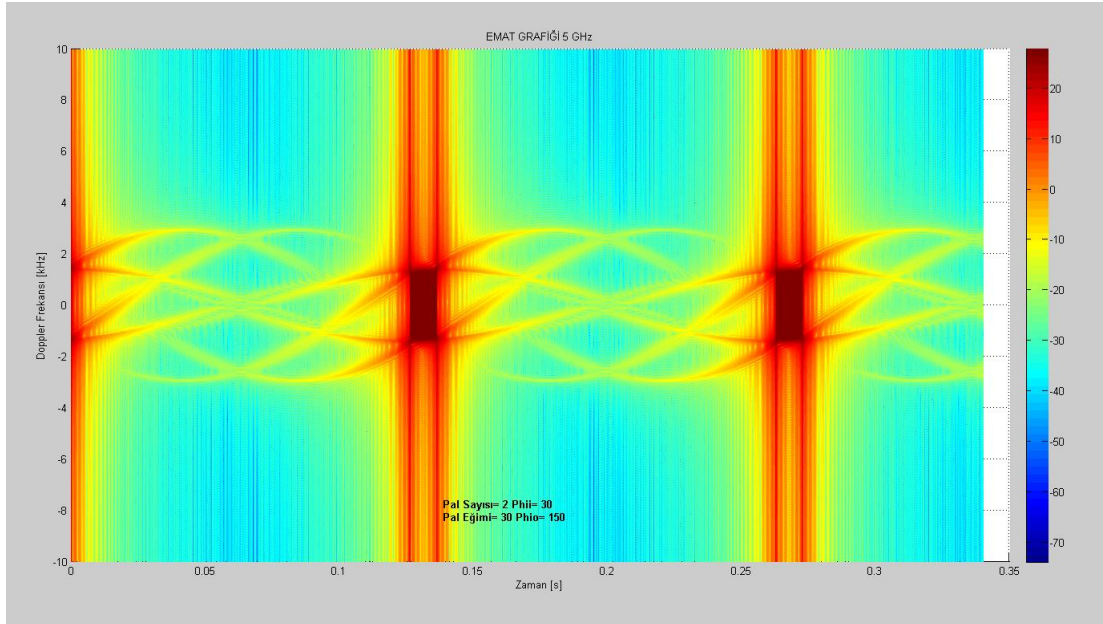


Şekil 4-14 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği (Phii=0, Phio=180)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -50 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-15'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4-16'daki EMAT grafiğinde bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

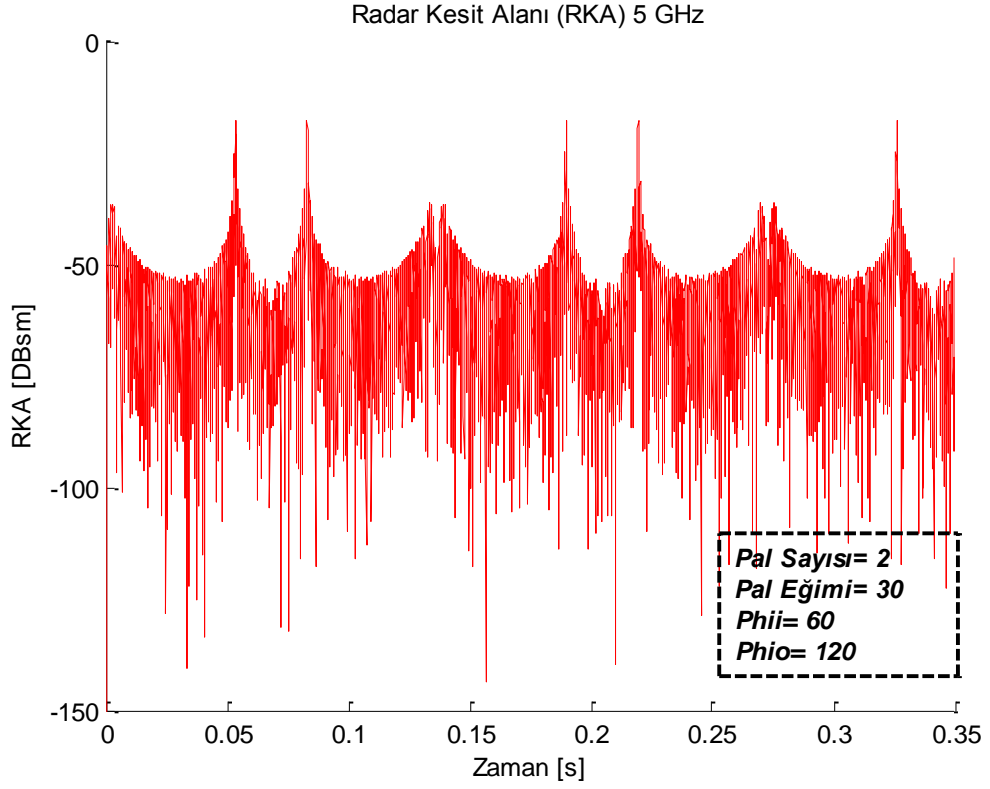


Şekil 4-15 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=30, Phio=150)

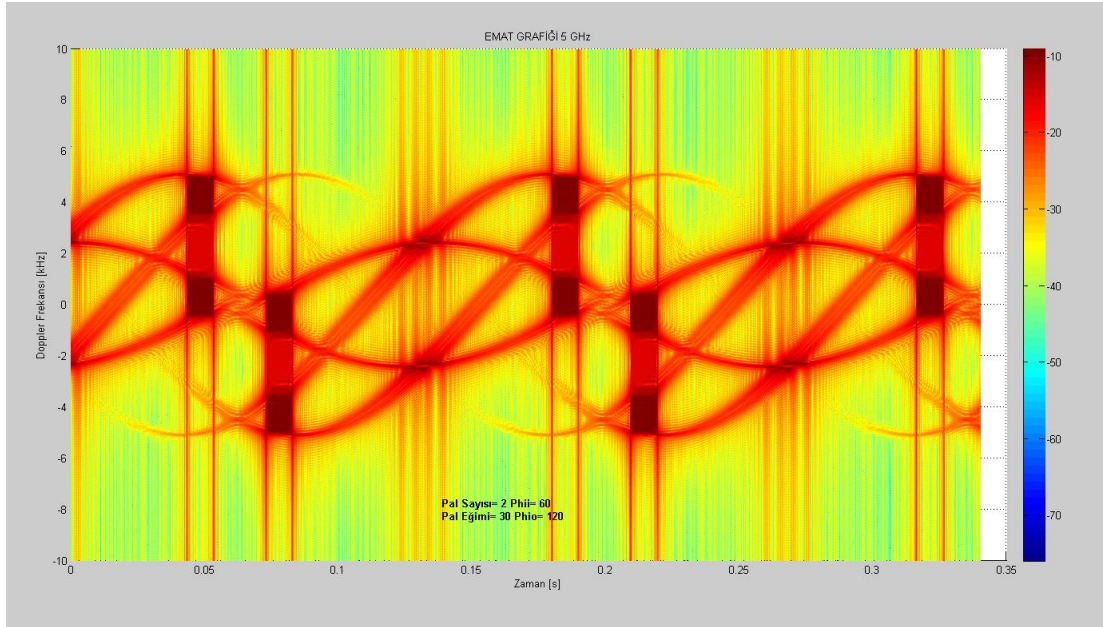


Şekil 4-16 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=30, Phio=150)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -50 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-17'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Şekil 4-18'de bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir. Ayrıca Şekil 4-17'de minimum noktalarına denk gelen zaman değerlerinin hemen öncesinde ve sonrasında maksimumlar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni bu noktalarda döner kanatların gözlemciye göre konumunun değişmesiyle beraber eğimden kaynaklanan yüksek RKA göstermesidir. Bu maksimum noktaları Şekil 4-18'deki EMAT grafiğinde de görülmektedir.

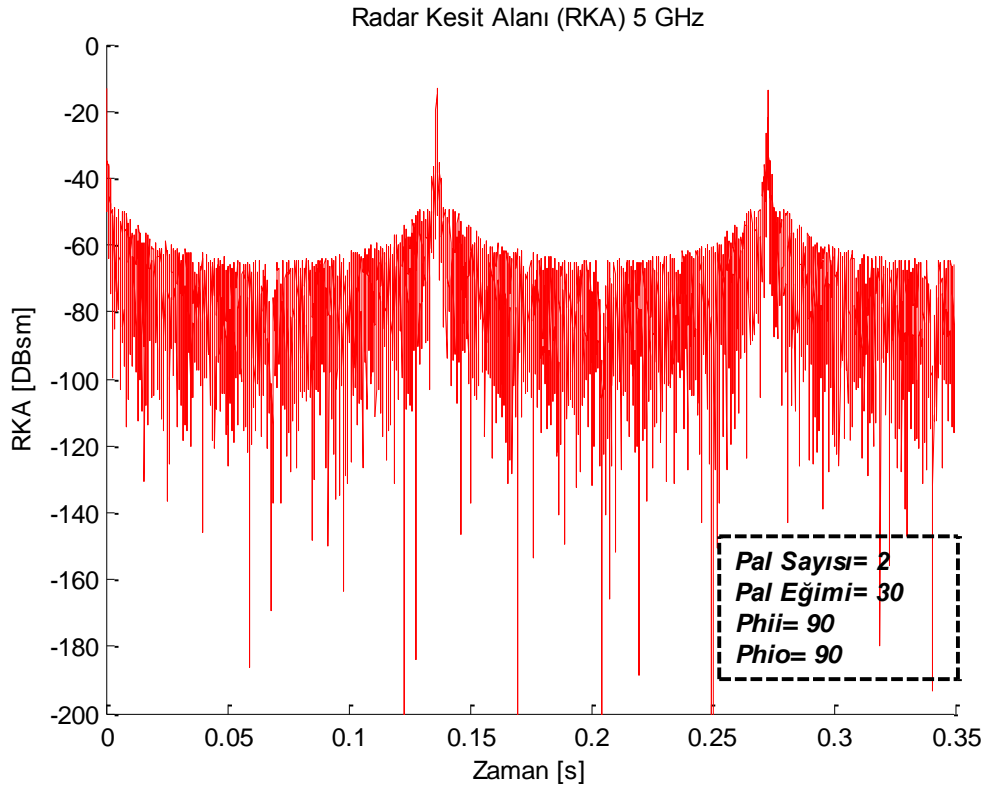


Şekil 4-17 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=60, Phio=120)

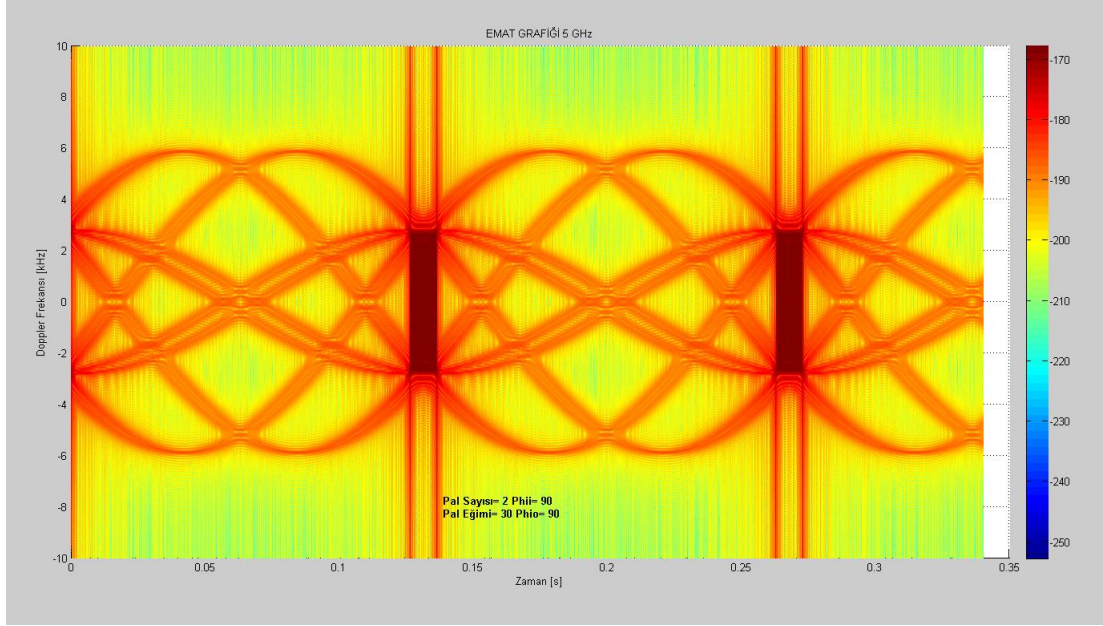


Şekil 4-18 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=60, Phio=120)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -80 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-19'da 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4-20'deki EMAT grafiğinde bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

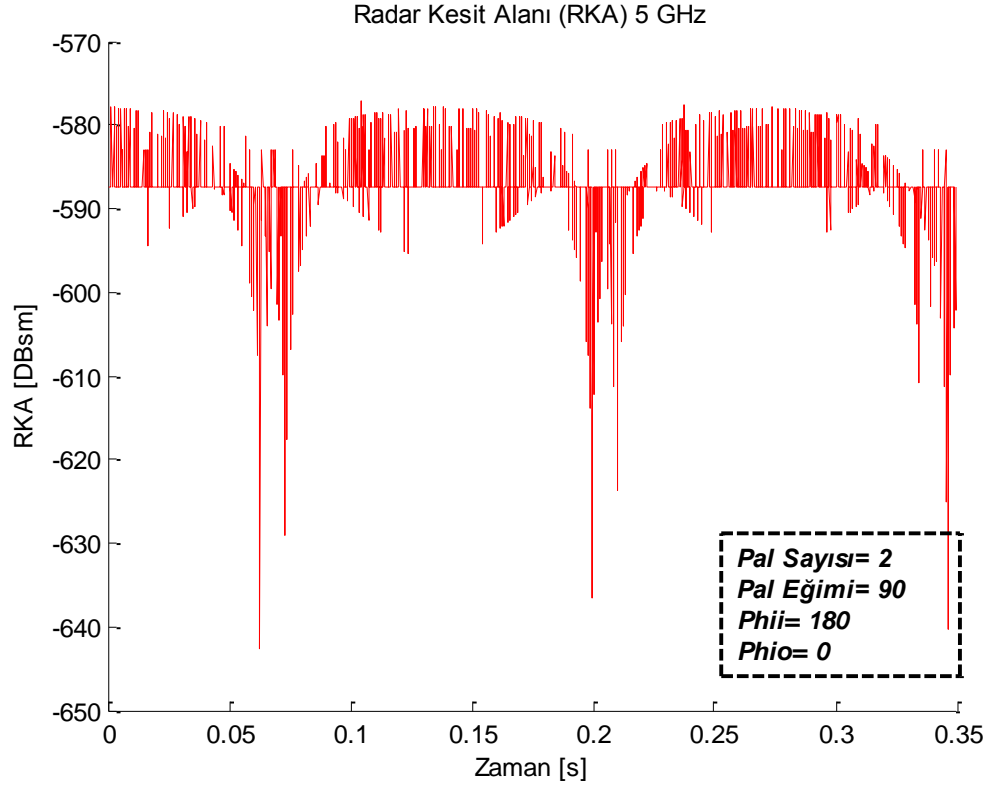


Şekil 4-19 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

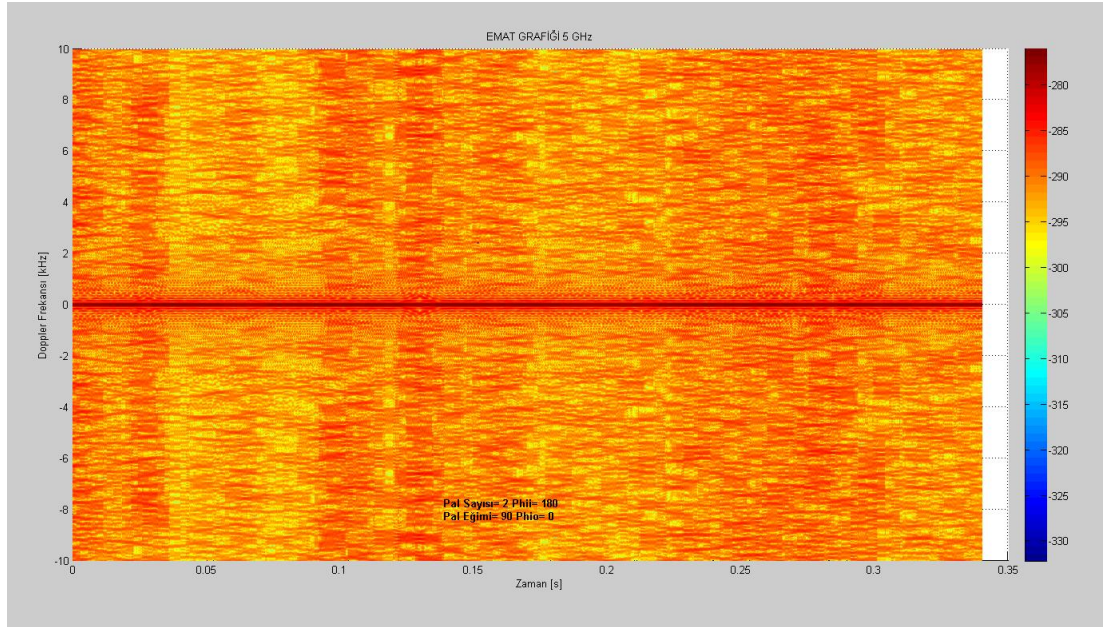


Şekil 4-20 5 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği (Phii=90, Phio=90)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Gözlemci döner kanatlara tepeden bakıyor konumda ve pallerde dik konumda bulunmaktadır. Pallerin eğimi 90 derece olduğundan RKA değeri sabit ve -585 dBsm olarak ölçülmektedir. Bu değer ihmal edilebilecek kadar düşüktür (Şekil 4-21). Pallerin radara göre mesafesi değişmediği için Şekil 4-22'deki EMAT grafiğinde de Doppler frekansı 0 kHz. olarak bulunmaktadır.

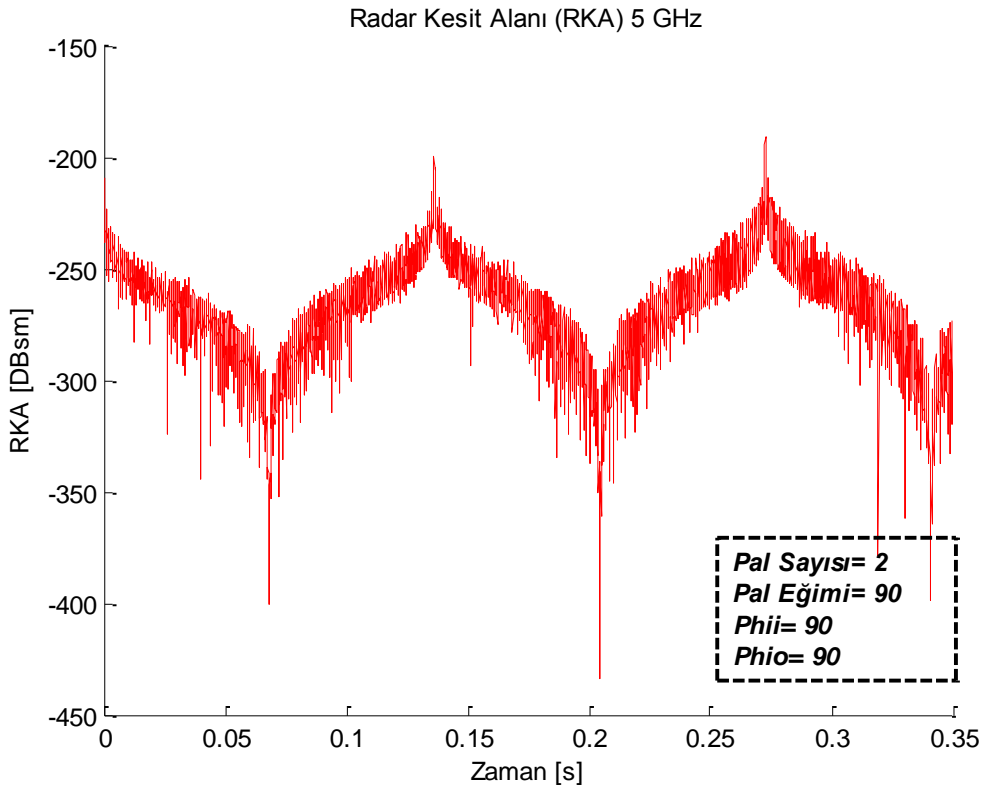


Şekil 4-21 5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=180, Phio=0)

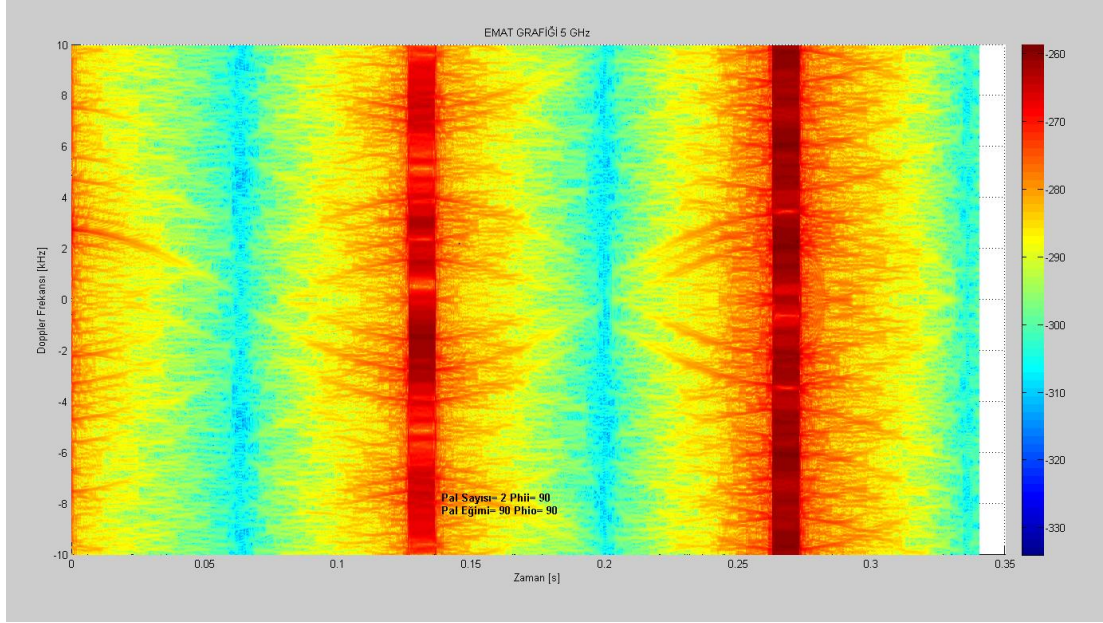


Şekil 4-22 5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=180, Phio=0)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 90 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -250 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-23'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4-20'deki EMAT grafiğinde bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.



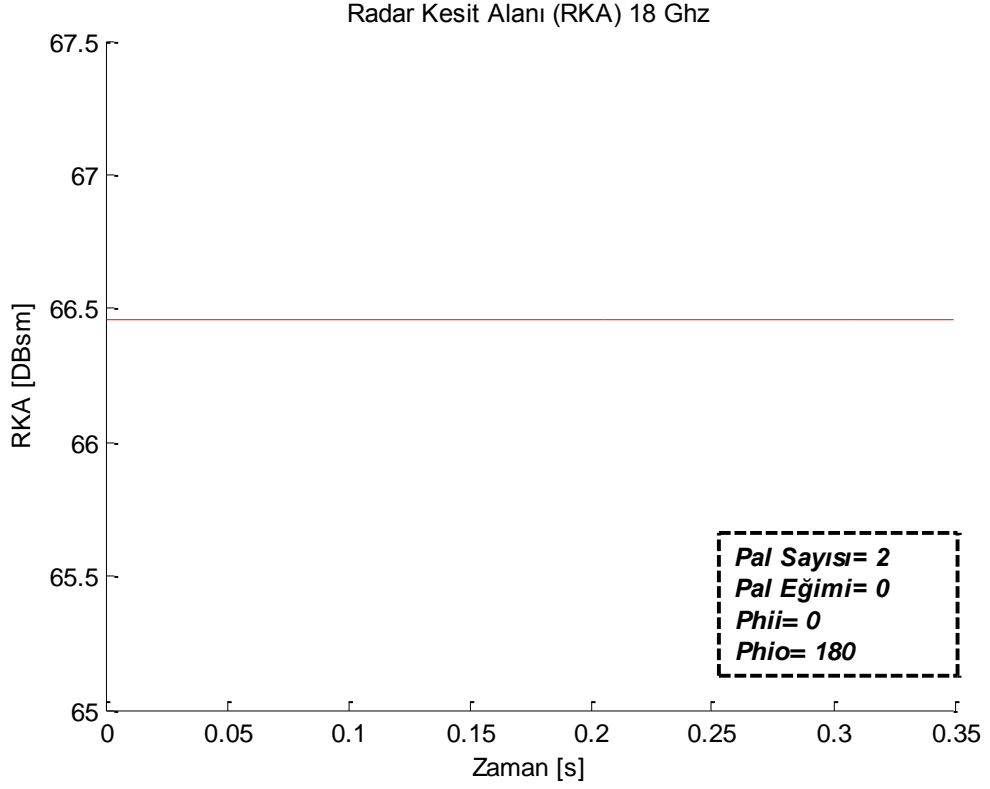
Şekil 4-23 5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)



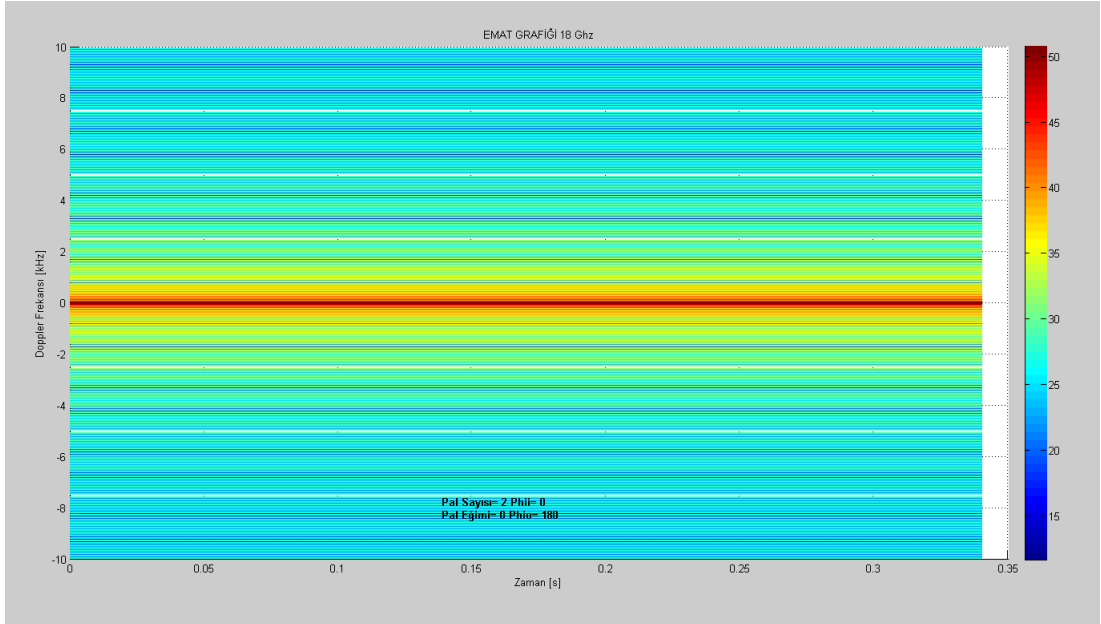
Şekil 4-24 5 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

## B. 18 GHZ. FREKANSI İÇİN YAPILAN HESAPLAMALAR

18 GHz frekansı için çözülen ilk nümerik örnekte gözlemci döner kanatlara tepeden bakıyor konumda bulunmaktadır. Pallerin eğimi sıfır olduğundan maksimum yüzey alanı gözlemci tarafından algılanmaktadır ve bu zamanla değişmemektedir (Şekil 4-25). Bu nedenle RKA değeri sabit ve 66.4 dBsm olarak ölçülmektedir. Pallerin radara göre mesafesi değişmediği için Doppler frekansı 0 kHz. olarak bulunmaktadır (Şekil 4-26).

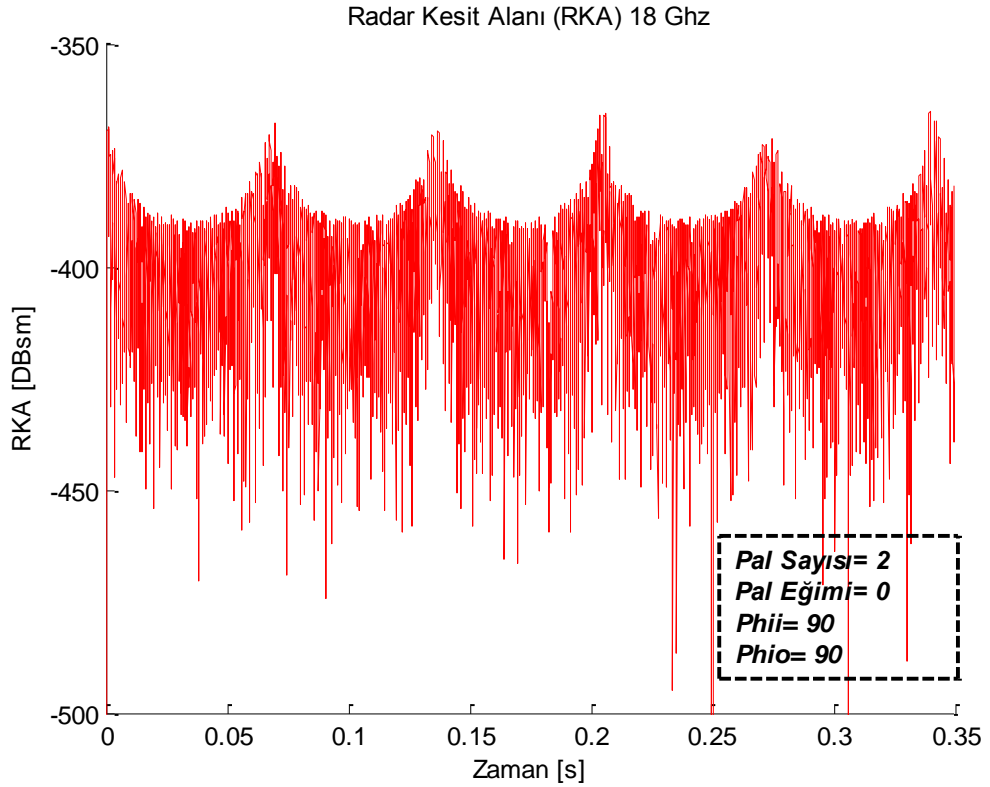


Şekil 4-25 18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

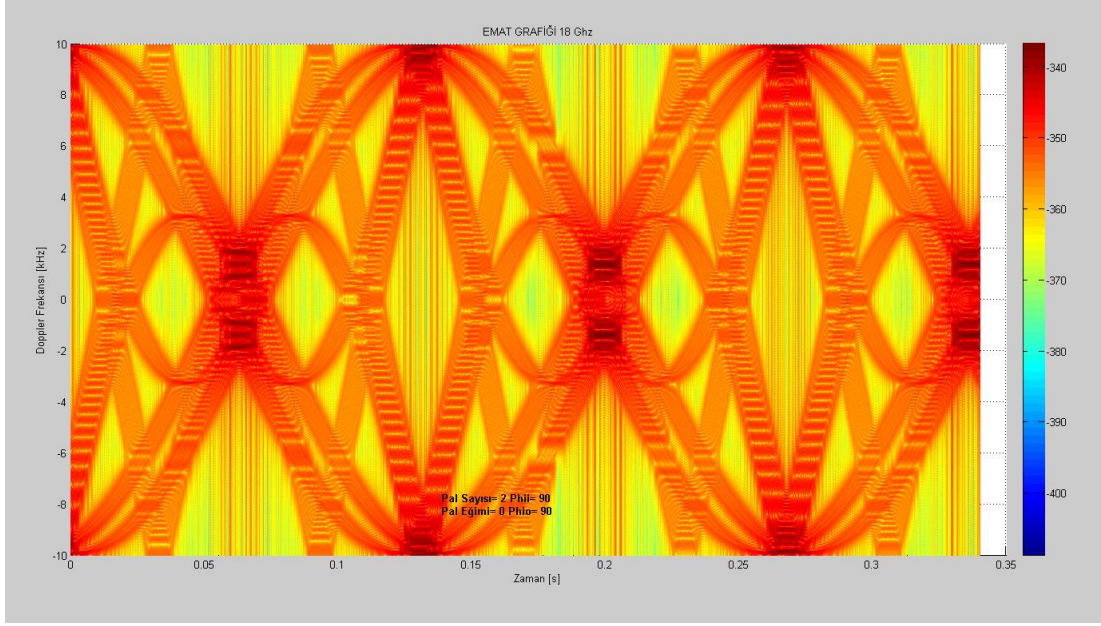


Şekil 4-26 18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

Yapılan ikinci örnekte 2 palli döner kanat seçilmiştir. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi sıfır olduğundan RKA değeri ortalama olarak -400 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Bu değer ihmal edilebilecek kadar düşüktür. Şekil 4-27'de 0.07 s. ve katlarına denk gelen zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerde döner kanat tam bir turunu tamamlamakta ve ikinci turuna başlamaktadır. Bu noktada da maksimum Doppler kayması bulunmaktadır. Şekil 4-28'de de bu periyodik olay görülmektedir.

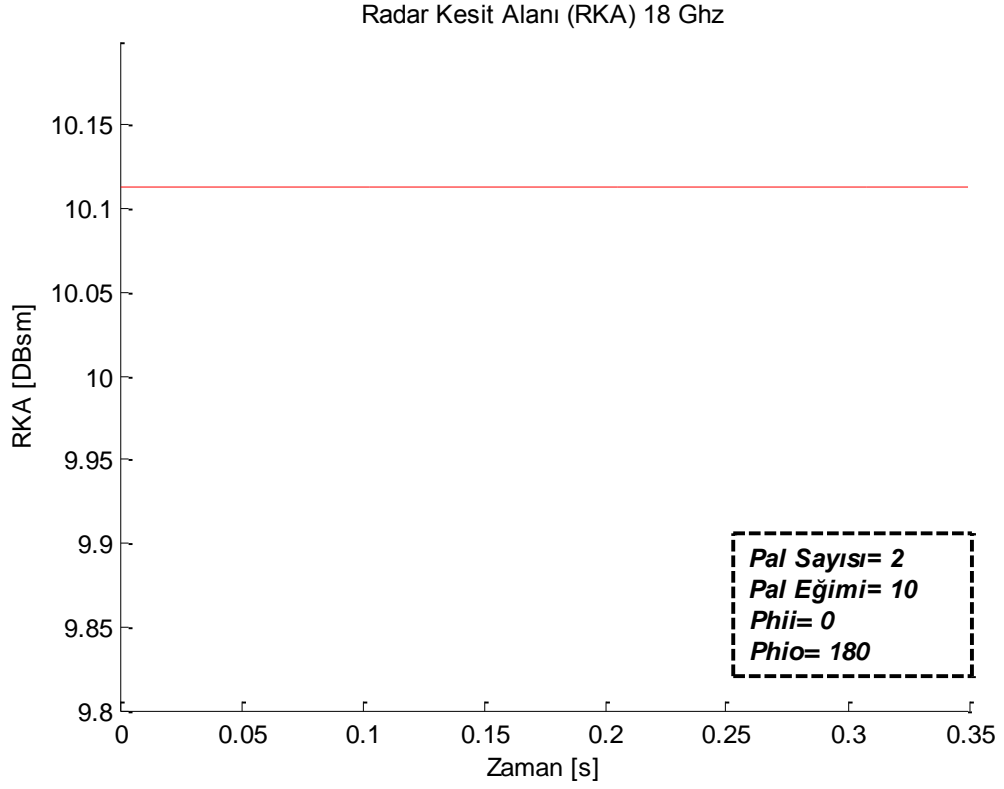


Şekil 4-27 18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

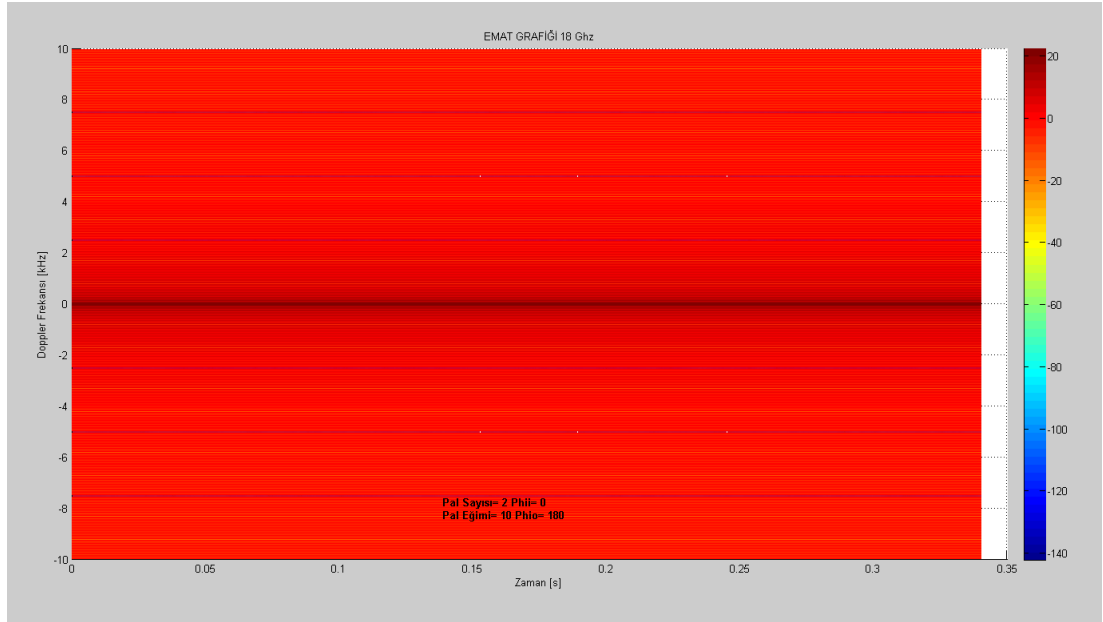


Şekil 4-28 18 GHz Frekansta Eğimi 0 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

Üçüncü örnekte de gözlemci döner kanatlara tepeden bakıyor konumda bulunmaktadır. Bu yüzden RKA değeri zamana göre değişmemektedir. Pallerin eğimi 10 derece olduğu için sıfır derecelik eğime nazaran daha az yüzey alanı gözlemci tarafından algılanmaktadır ve bu zamanla değişmemektedir . Bu nedenle Şekil 4-29'da görüldüğü üzere RKA değeri sabit ve 10.11 dBsm olarak ölçülmektedir. Sabit olan RKA değeri de Şekil 4-30'daki EMAT grafiğinde sıfır Doppler oluşturmaktadır.

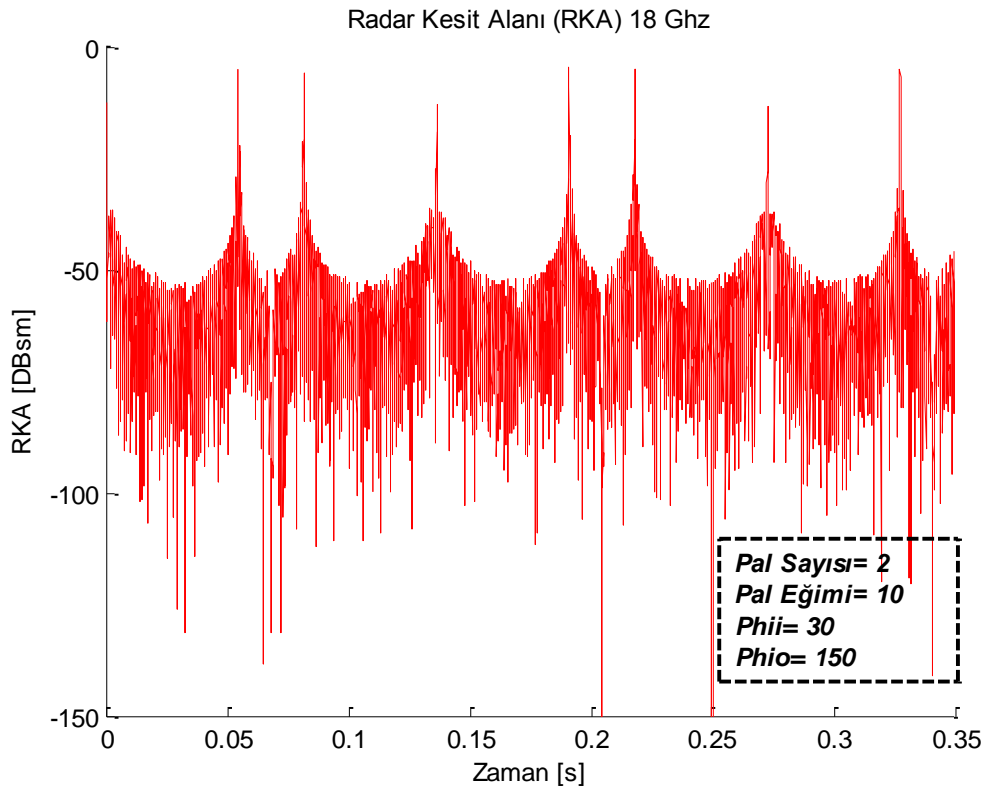


Şekil 4-29 18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

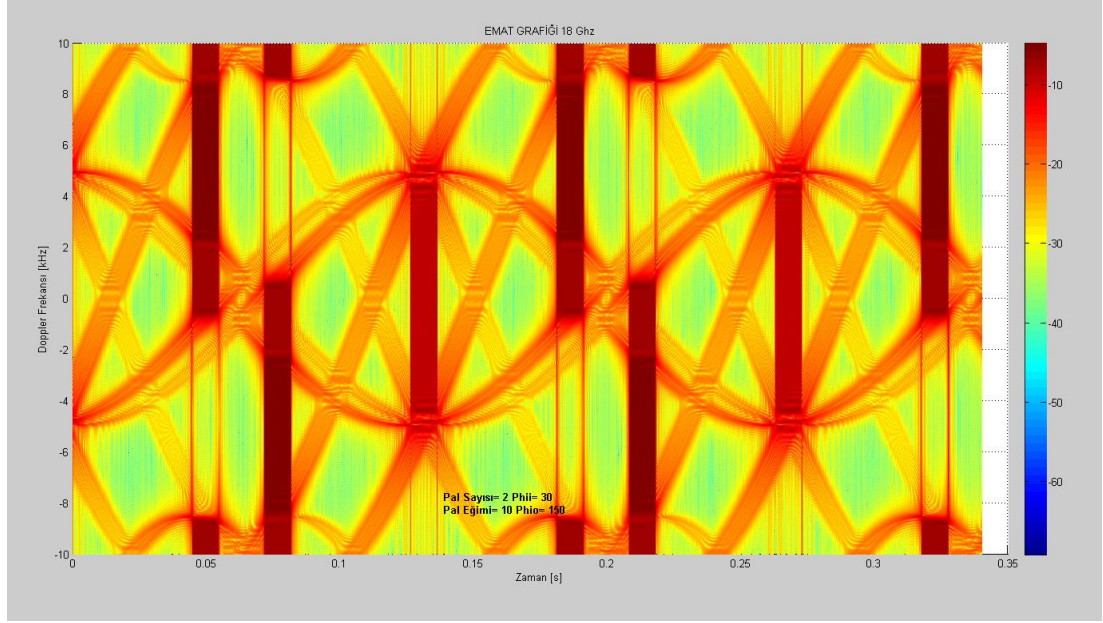


Şekil 4-30 18 Ghz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 10 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -50 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-31'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4-32'de bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir. Ayrıca Şekil 4-31'de minimum noktalarına denk gelen zaman değerlerinin hemen öncesinde ve sonrasında maksimumlar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni bu noktalarda döner kanatların gözlemciye göre konumunun değişmesiyle beraber eğimden kaynaklanan yüksek RKA göstermesidir.

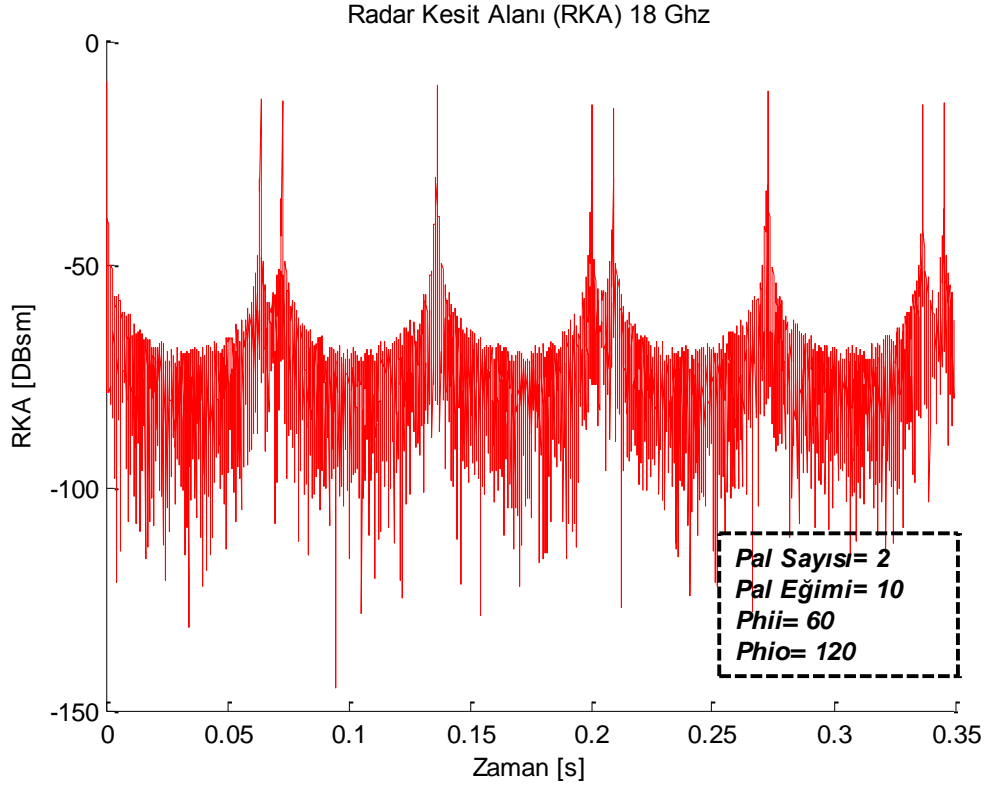


Şekil 4-31 18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=30, Phio=150)

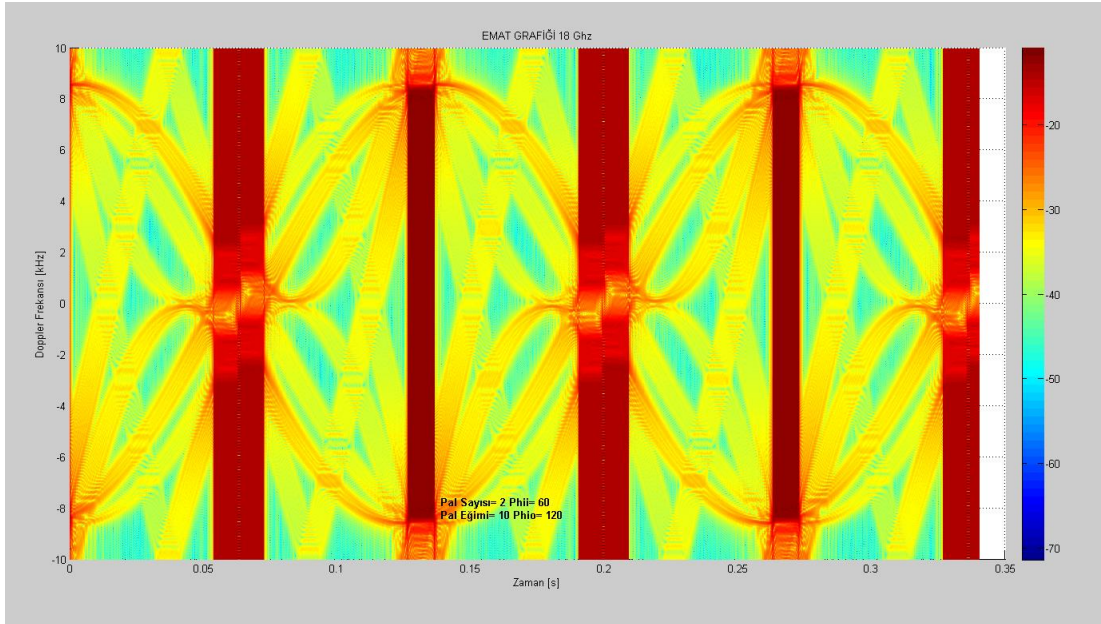


Şekil 4-32 18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=30, Phio=150)

Bu örnekte iki palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 10 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -80 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-33'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmekte olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde eğimden kaynaklanan iki tepe noktalı maksimum oluşmaktadır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Şekil 4-34'de bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

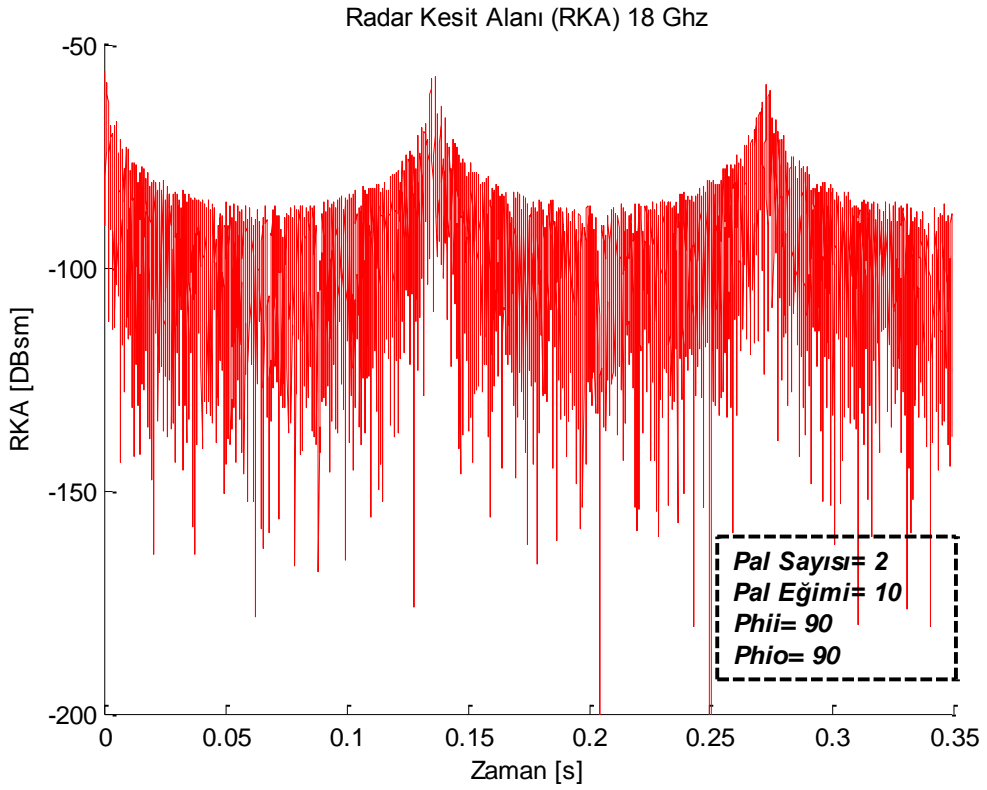


Şekil 4-33 18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
 (Phii=60, Phio=120)

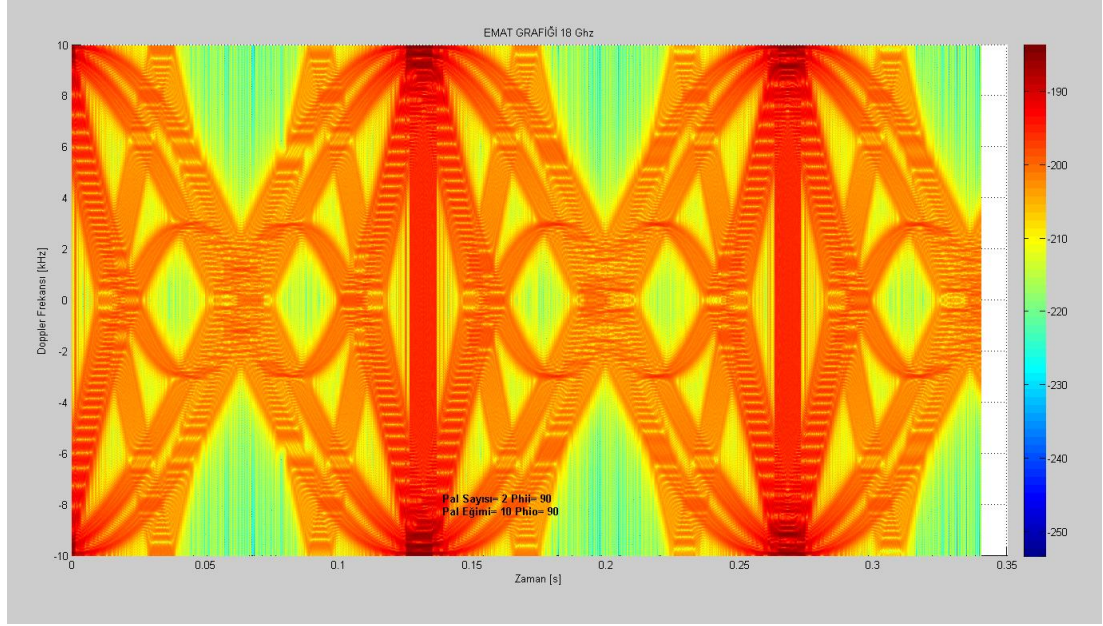


Şekil 4-34 18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
 (Phii=60, Phio=120)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat seçilmiştir. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 10 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -100 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-35'te 0.14 s. ve katlarına denk gelen zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner kanatların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalarlardır. 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerde döner kanat tam bir turunu tamamlamakta ve ikinci turuna başlamaktadır. Bu noktada da maksimum Doppler kayması bulunmaktadır. Şekil 4-36'da de bu periyodik olay görülmektedir.

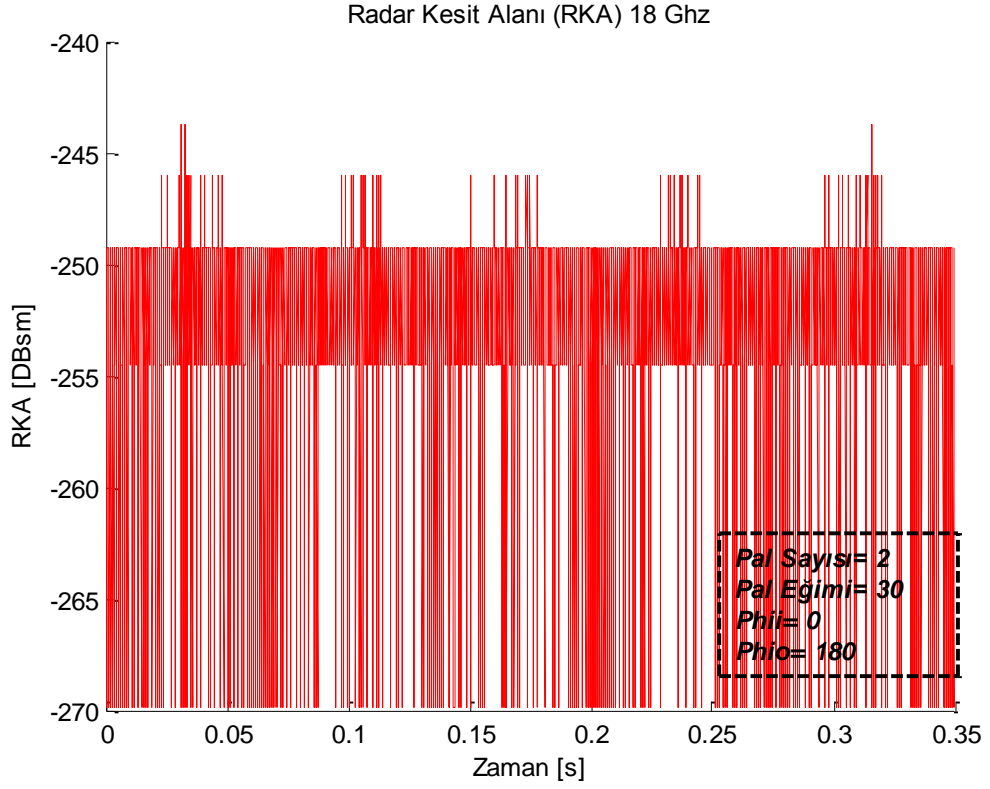


Şekil 4-35 18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

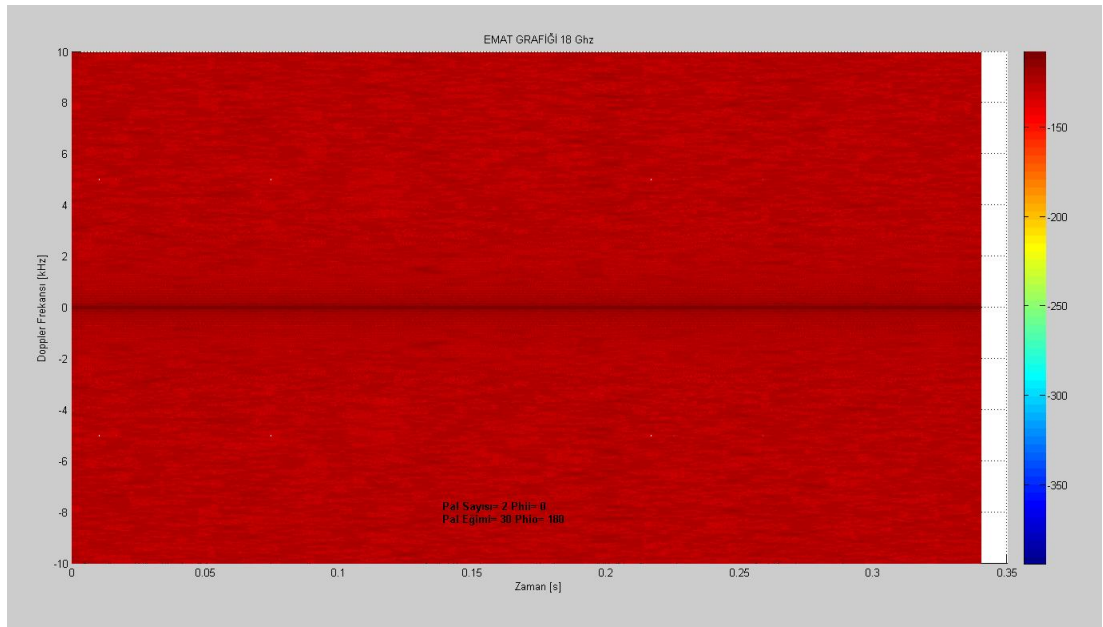


Şekil 4-36 18 GHz Frekansta Eğimi 10 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat seçilmiştir. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan Şekil 4-37’de görülen RKA değeri ortalama olarak -255 dBsm’lerde hesaplanmıştır. Bu değer ihmal edilebilecek kadar düşüktür. 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerde döner kanat tam bir turunu tamamlamakta ve ikinci turuna başlamaktadır. Şekil 4-38’deki EMAT grafiğinde de doppler frekansında bir değişiklik görülmemektedir.

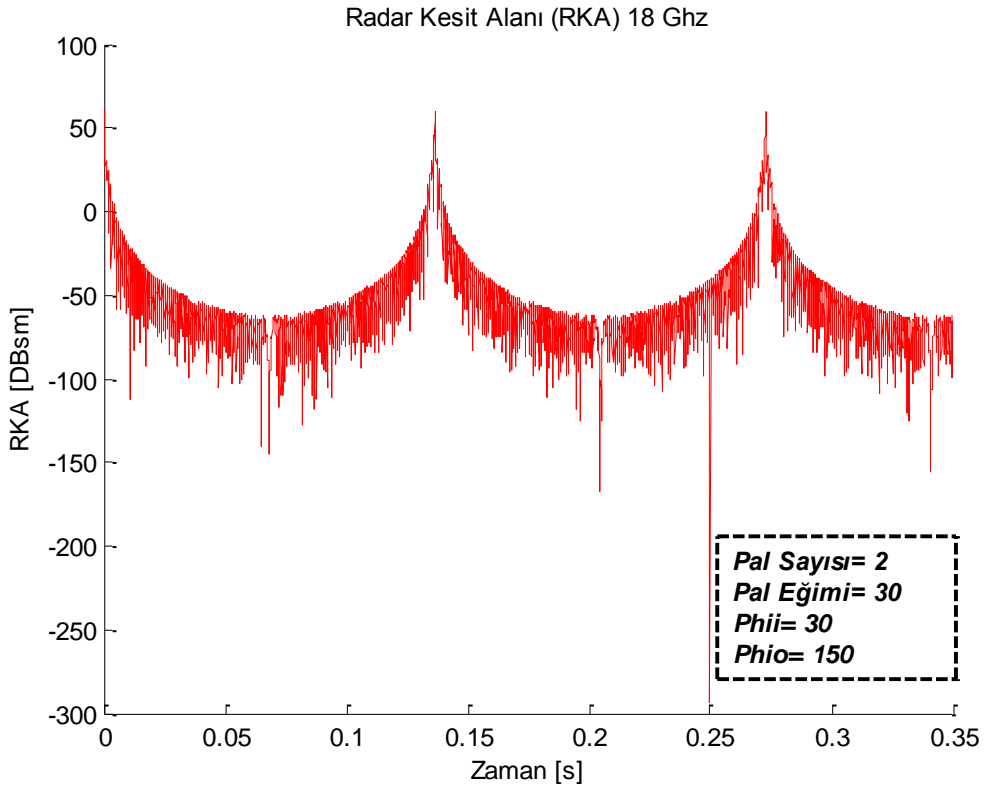


Şekil 4-37 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

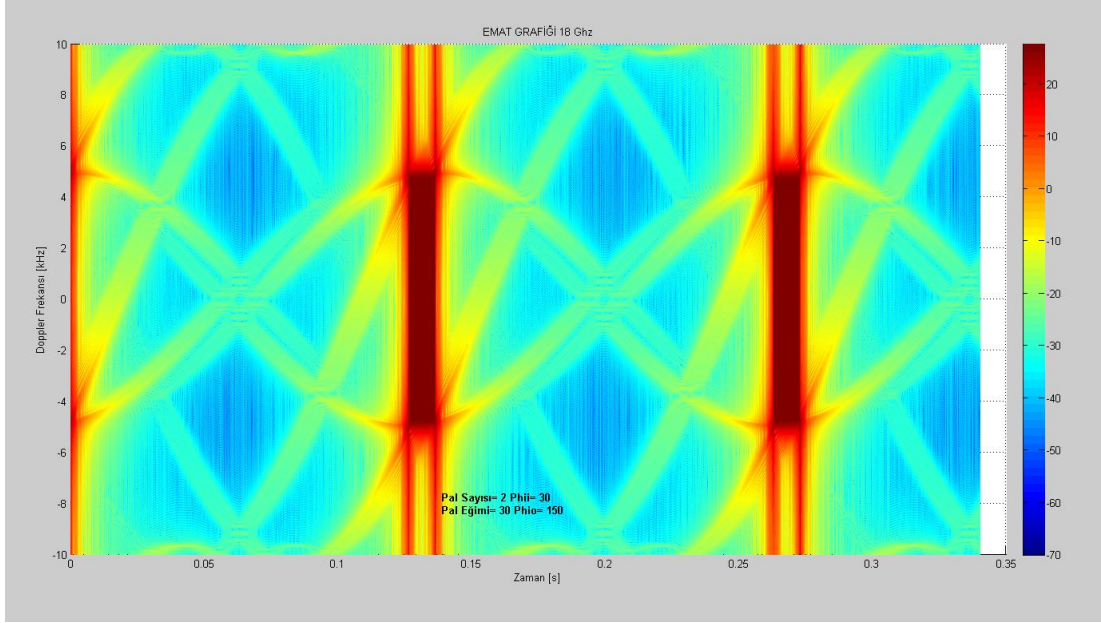


Şekil 4-38 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=0, Phio=180)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -50 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-39'da 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4-16'daki EMAT grafiğinde bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

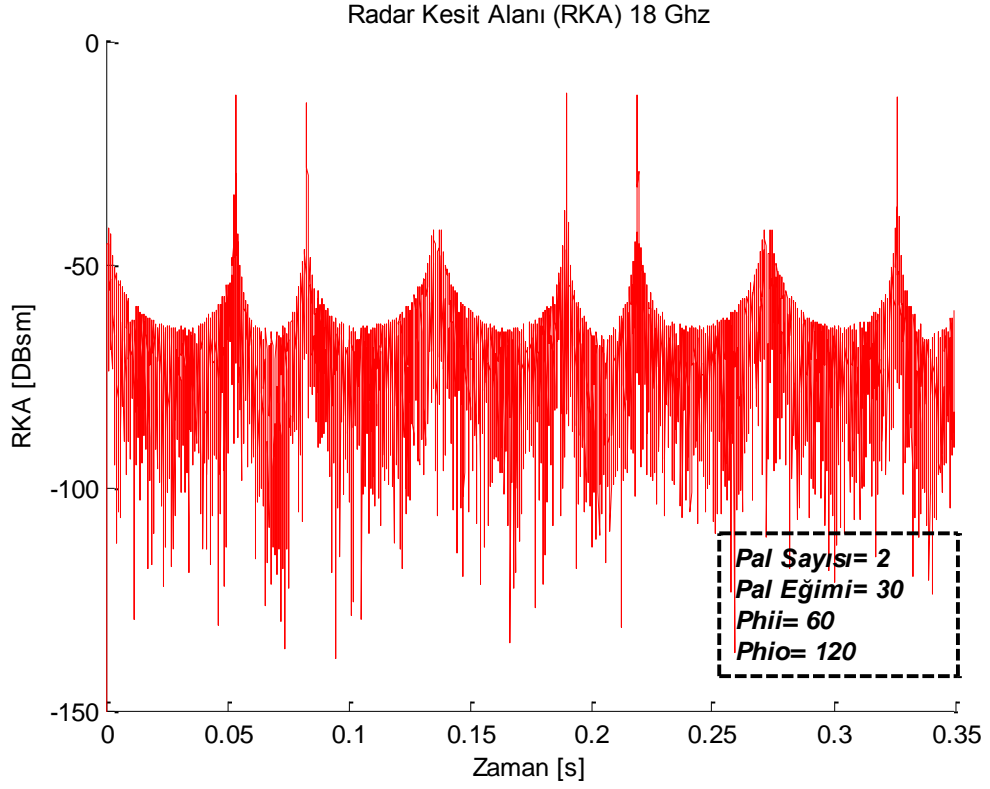


Şekil 4-39 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=30, Phio=150)

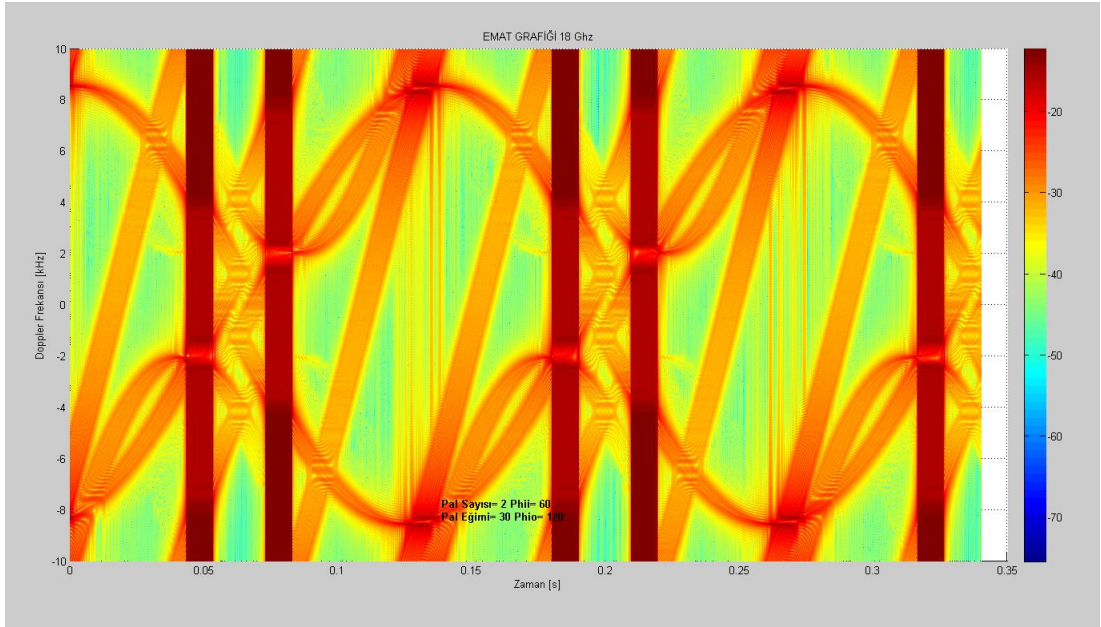


Şekil 4-40 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=30, Phio=150)

Yapılan bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -80 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-41'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin maksimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre maksimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Şekil 4-42'de bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir. Ayrıca Şekil 4-41'de minimum noktalarına denk gelen zaman değerlerinin hemen öncesinde ve sonrasında maksimumlar gözlemlenmektedir. Bunun nedeni bu noktalarda döner kanatların gözlemciye göre konumunun değişmesiyle beraber eğimden kaynaklanan yüksek RKA göstermesidir. Bu maksimum noktaları Şekil 4-42'deki EMAT grafiğinde de görülmektedir.

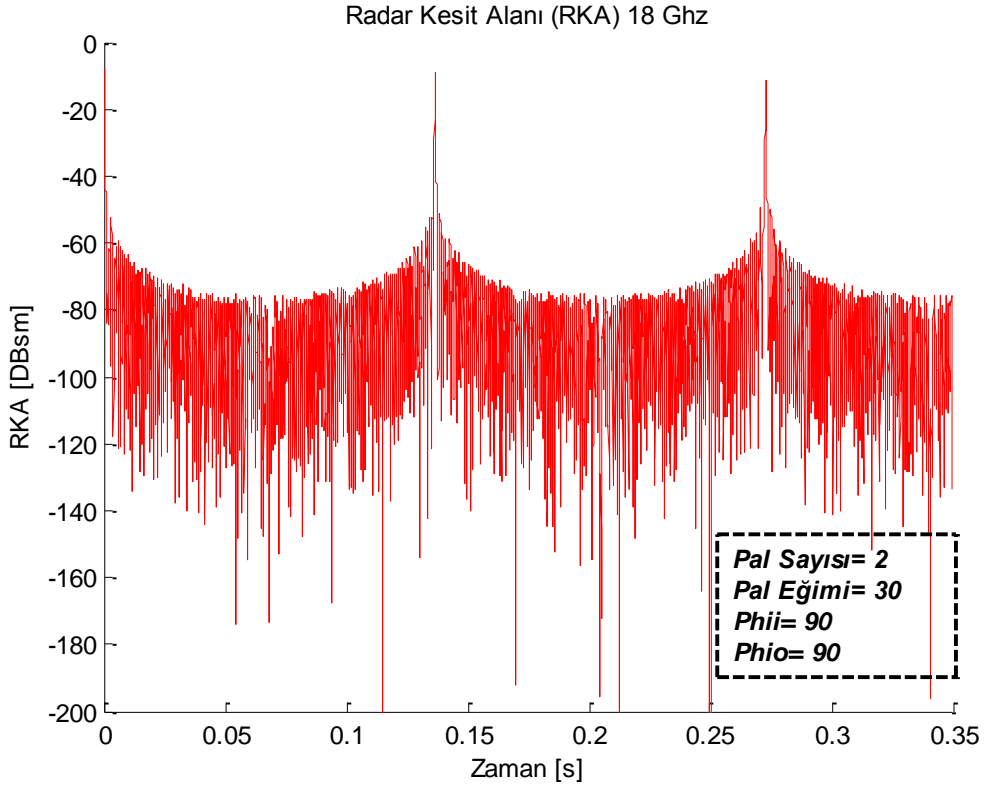


Şekil 4-41 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=60, Phio=120)

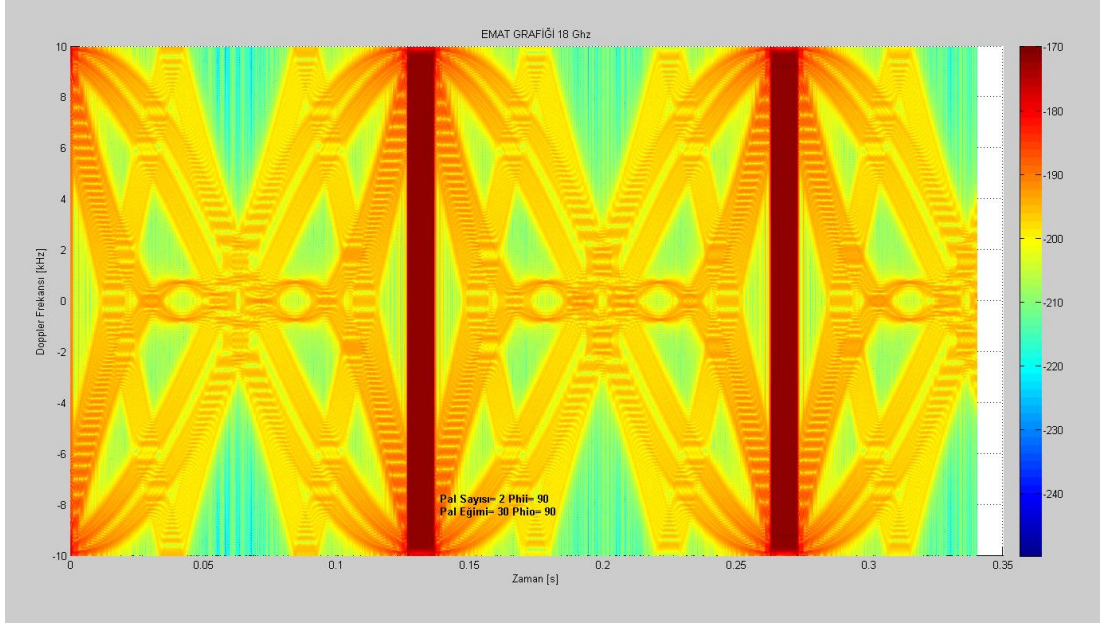


Şekil 4-42 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=60, Phio=120)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 30 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -80 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-43'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4-44'deki EMAT grafiğinde bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

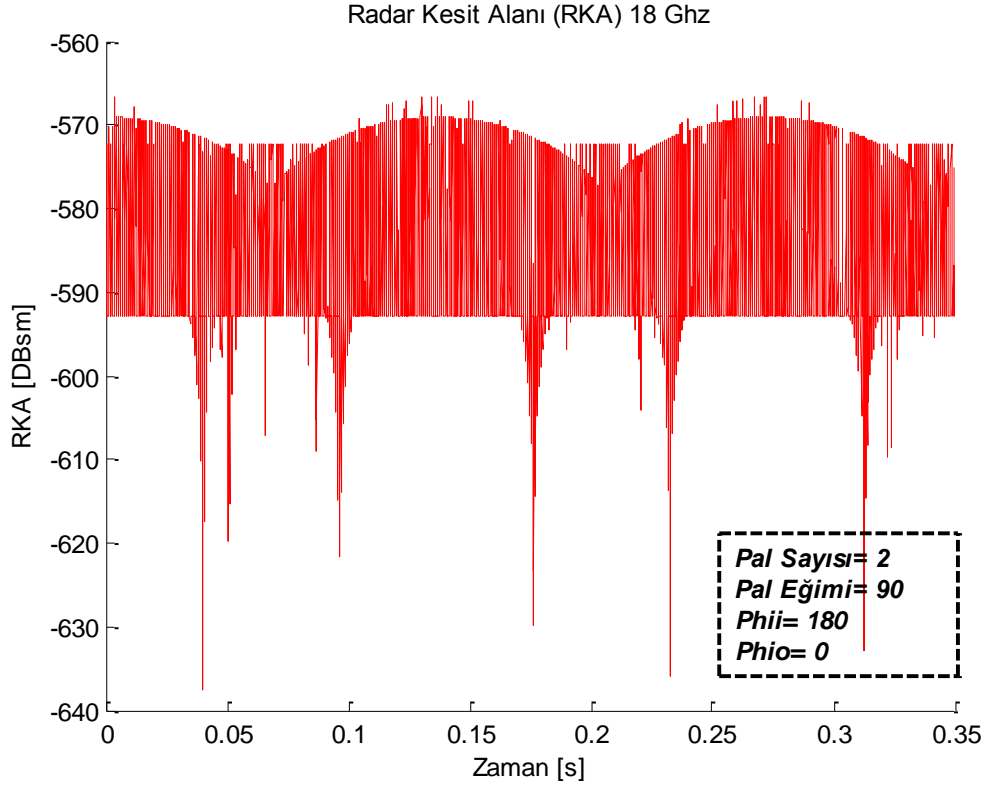


Şekil 4-43 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

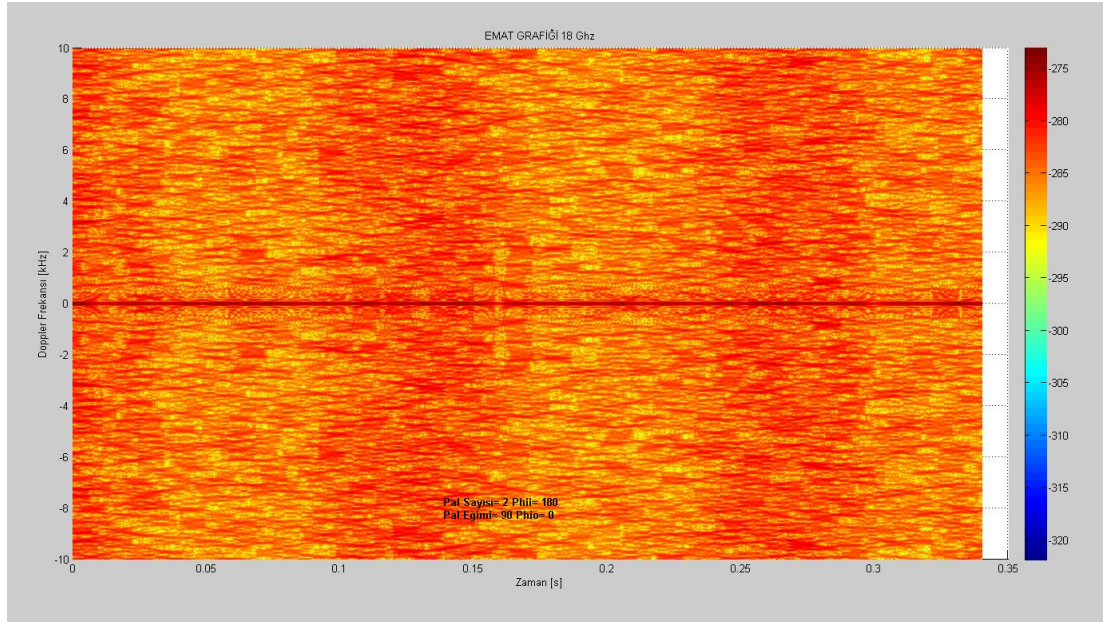


Şekil 4-44 18 GHz Frekansta Eğimi 30 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Gözlemci döner kanatlara tepeden bakıyor konumda ve pallerde dik konumda bulunmaktadır. Pallerin eğimi 90 derece olduğundan RKA değeri sabit ve -580 dBsm olarak ölçülmektedir. Bu değer ihmal edilebilecek kadar düşüktür (Şekil 4-45). Pallerin radara göre mesafesi değişmediği için Şekil 4-46'daki EMAT grafiğinde de Doppler frekansı 0 kHz. olarak bulunmaktadır.

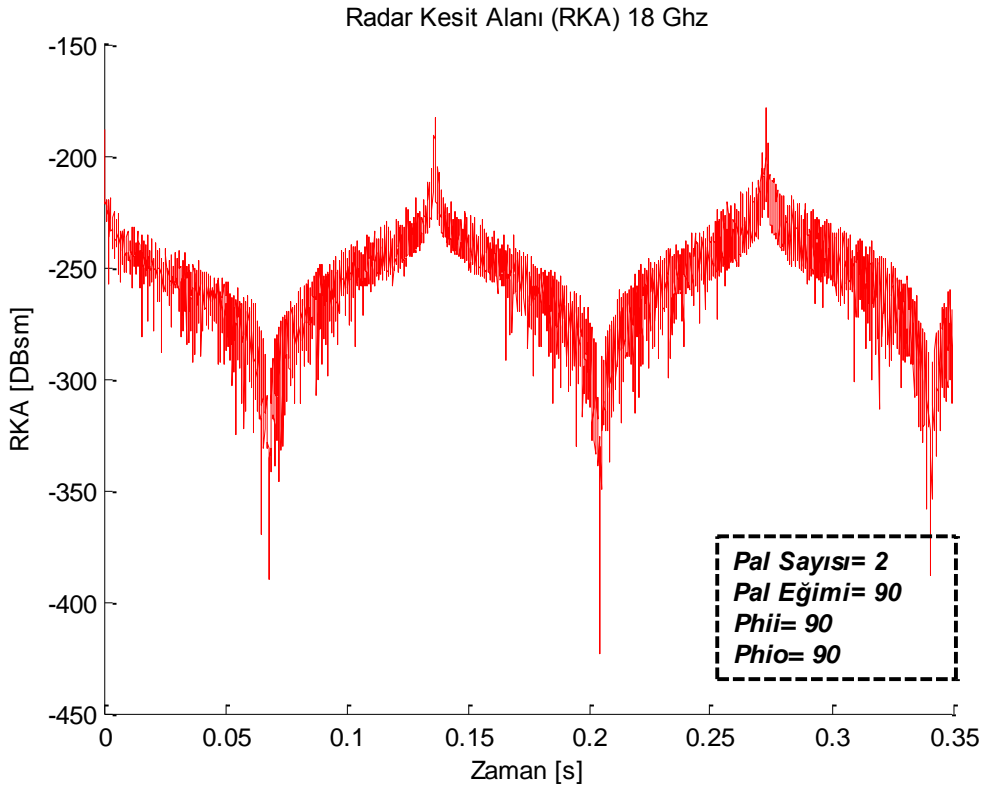


Şekil 4-45 18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
 (Phii=180, Phio=0)

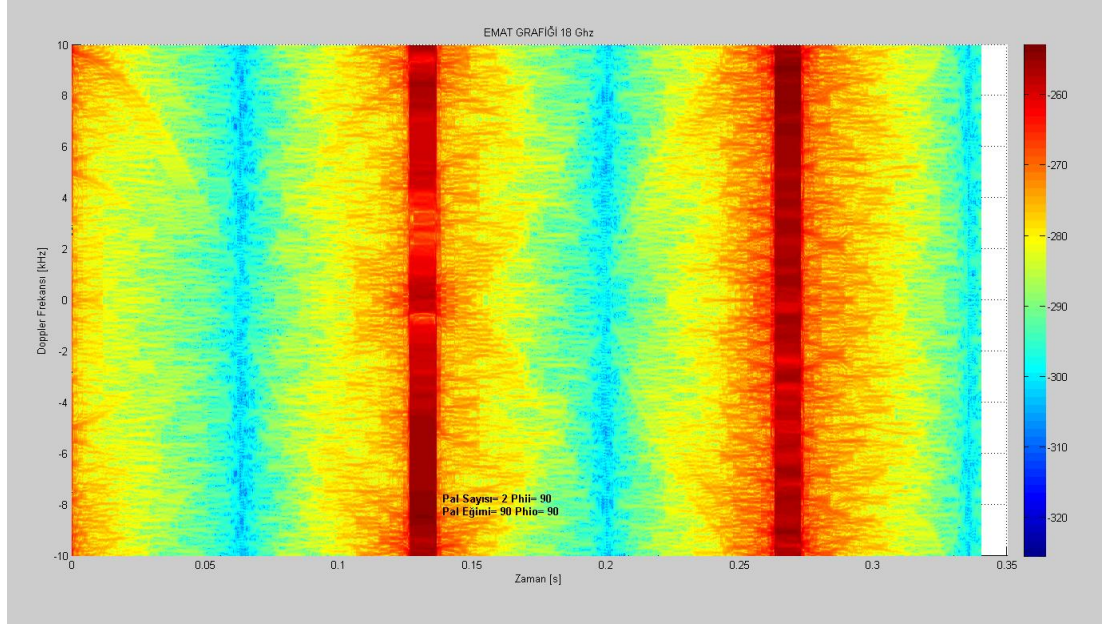


Şekil 4-46 18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
 (Phii=180, Phio=0)

Bu örnekte 2 palli döner kanat kullanılmıştır. Pallerin gözlemci ile aynı düzlemde eğimi 90 derece olduğundan RKA değeri ortalama olarak -260 dBsm'lerde hesaplanmıştır. Şekil 4-47'de 0.07 s. ve 0.21 s. zaman değerine denk gelen zaman değerlerinde iki döner kanattan ilki gözlemciye en yakın noktadan geçerken ikincisi en uzak noktadan geçmektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerine denk gelen noktalarda minimumlar oluşmaktadır. Bu noktalar Doppler etkisinin minimum olduğu, yani döner katların gözlemciye göre minimum Doppler hızı gösterdiği noktalardır. Bunun yanında 0.14 s. ve 0.28 s. zaman değerine denk gelen yerlerde iki döner kanat da gözlemciye en çok RKA göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4-48'deki EMAT grafiğinde bu maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

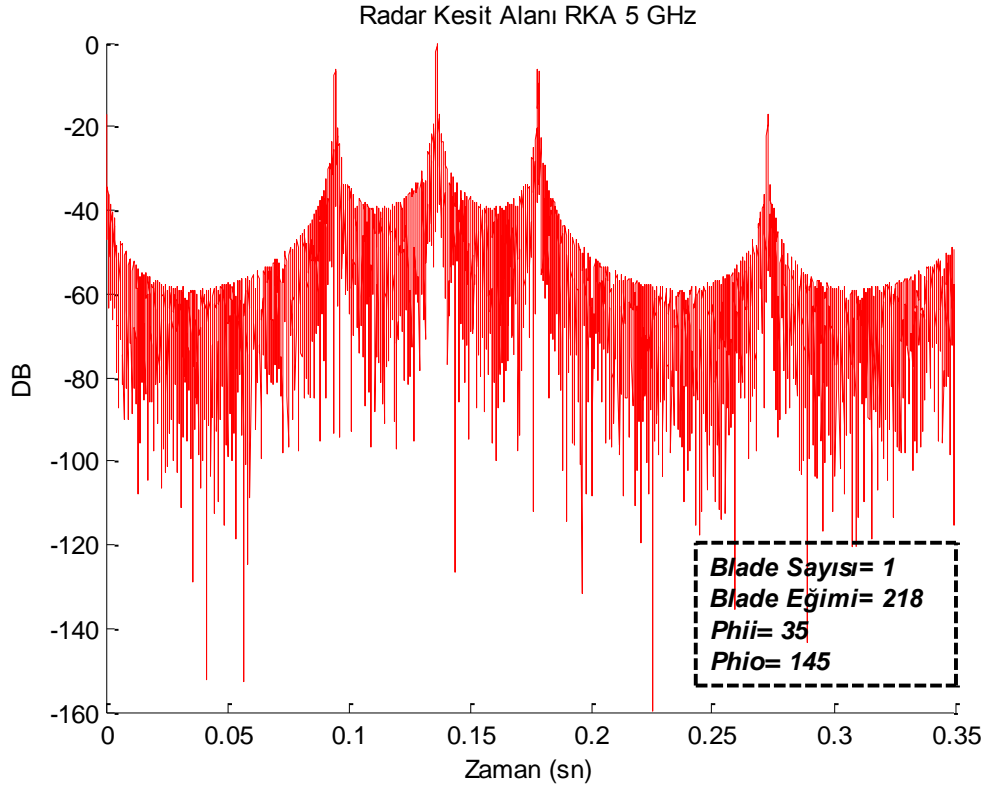


Şekil 4-47 18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

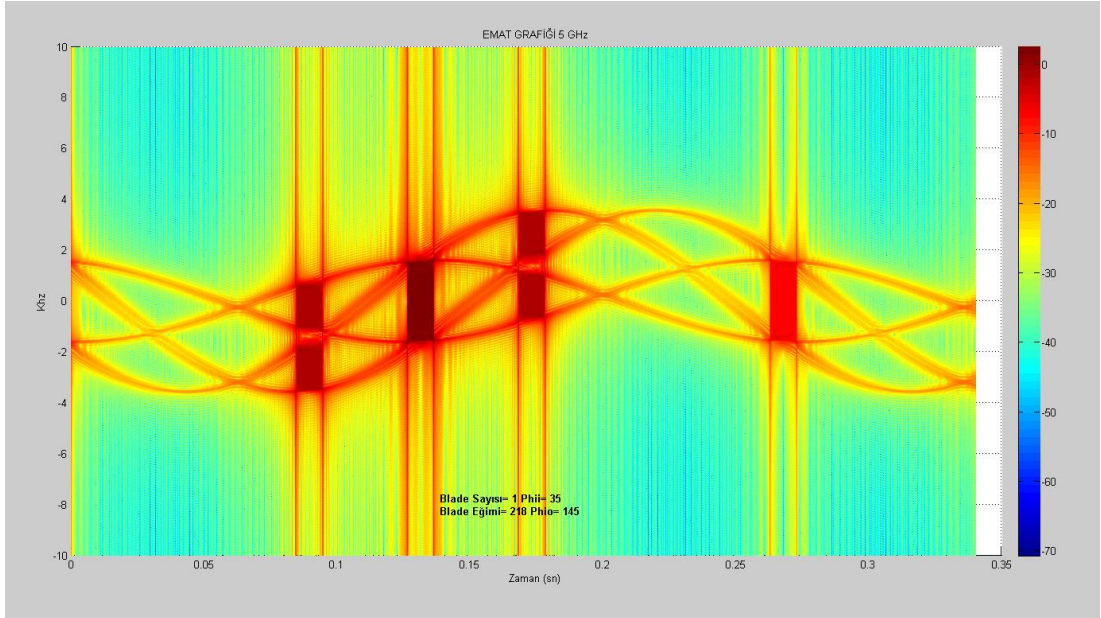


Şekil 4-48 18 GHz Frekansta Eğimi 90 Derece Olan İki Pal İçin EMAT Grafiği  
(Phii=90, Phio=90)

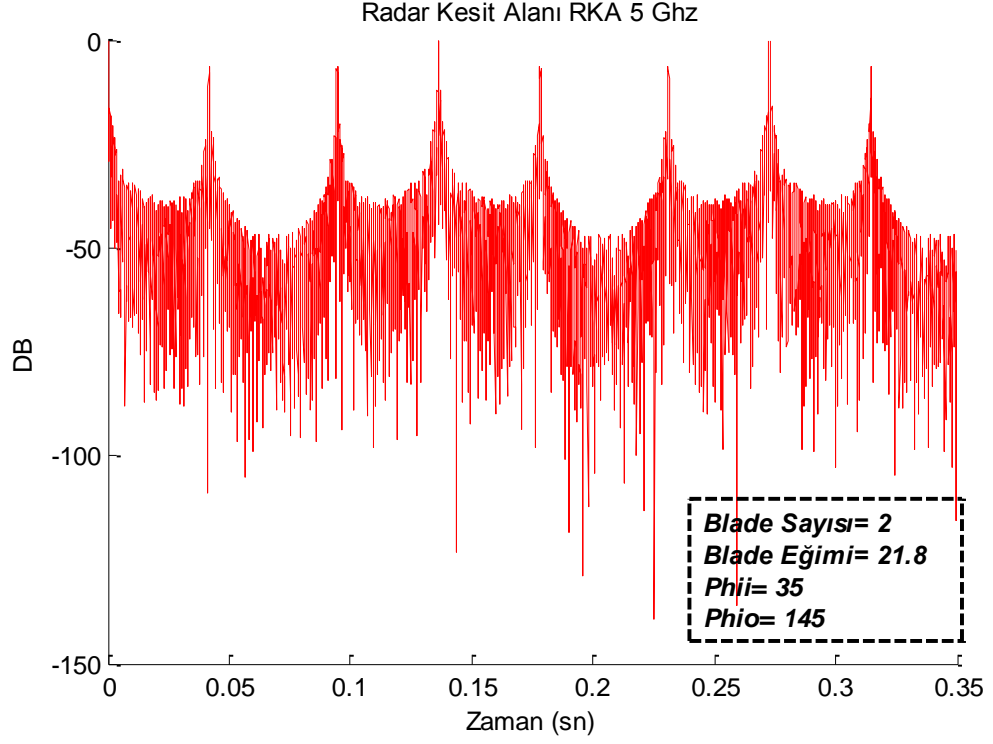
Yapılan bütün hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler Pouliguen, Lucas, Muller, Quete ve Terret [19] yaptığı hesaplamalar ile karşılaştırılmış ve kritik eğimin 21.8 derece, gelen dalga açısının 35 derece ve gözlemci açısının 145 derece olduğu değerlendirilmiştir. Bu sonuca ilişkin yapılan hesaplamalara ait grafikler Şekil 4-49-56 yer almaktadır.



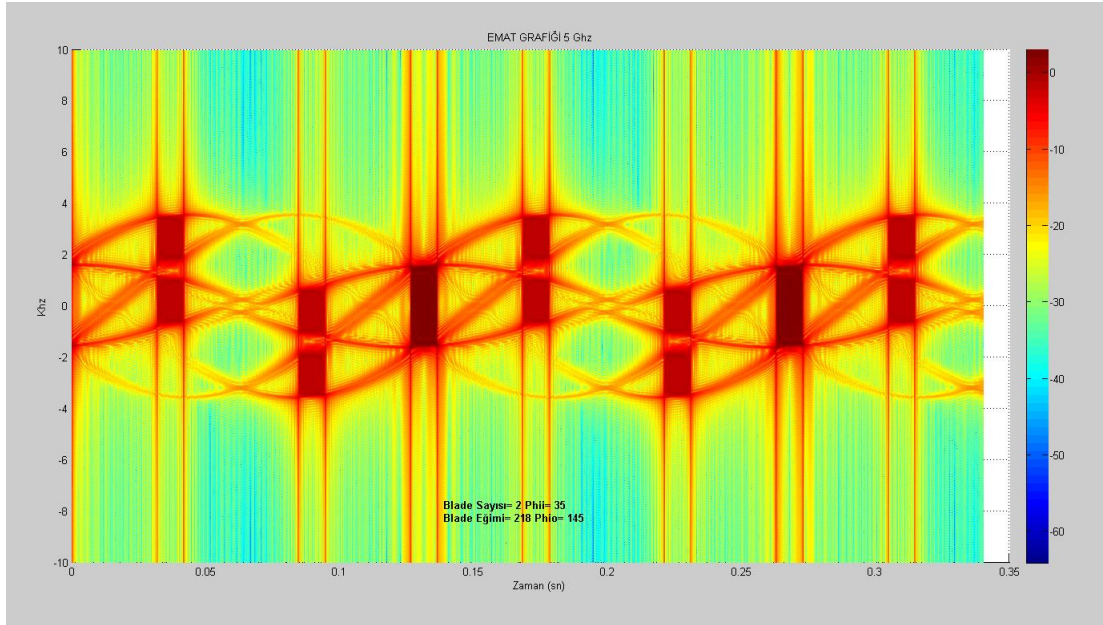
Şekil 4-49 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Bir Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=35, Phio=145)



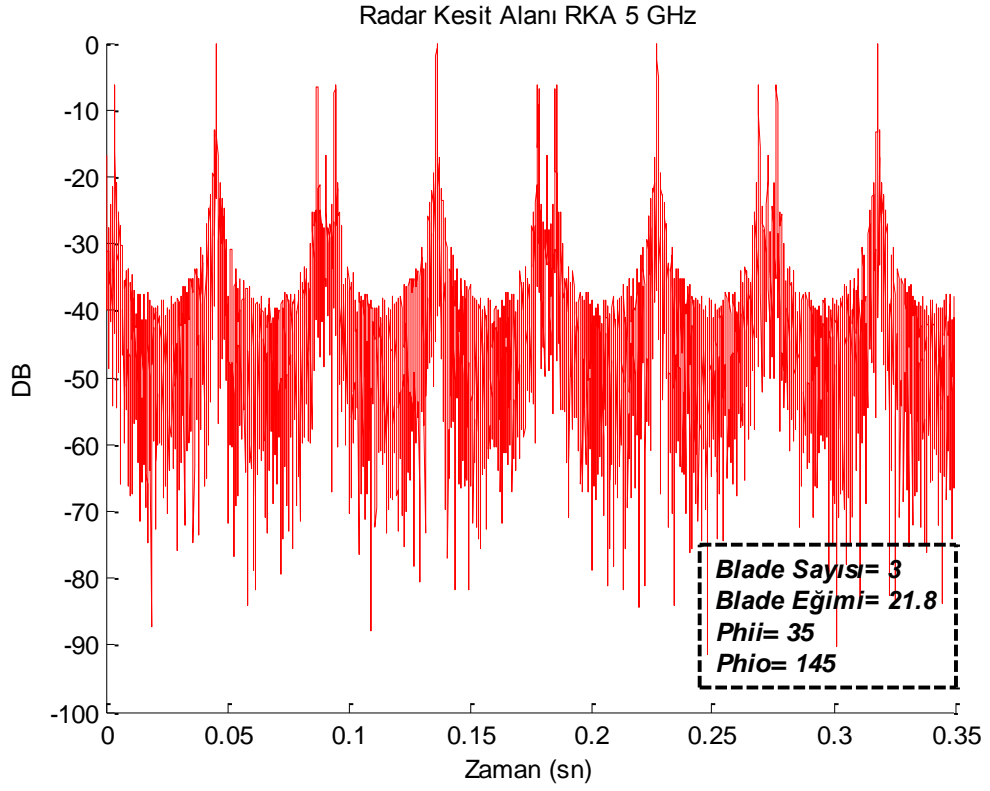
Şekil 4-50 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Bir Pal İçin EMAT  
Grafiği (Phii=35, Phio=145)



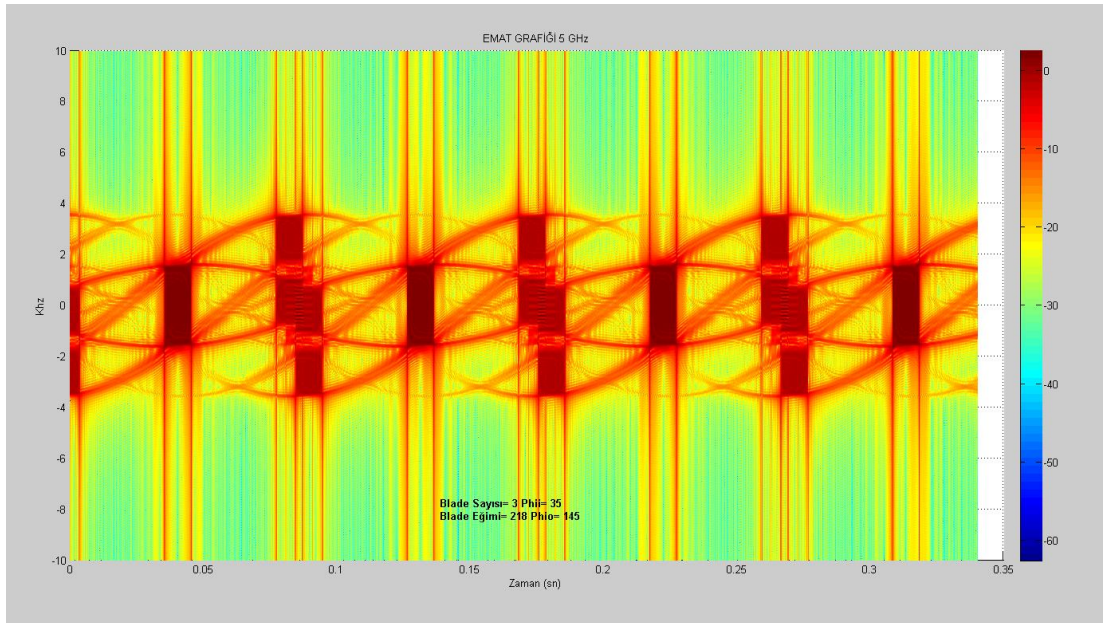
Şekil 4-51 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan İki Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=35, Phio=145)



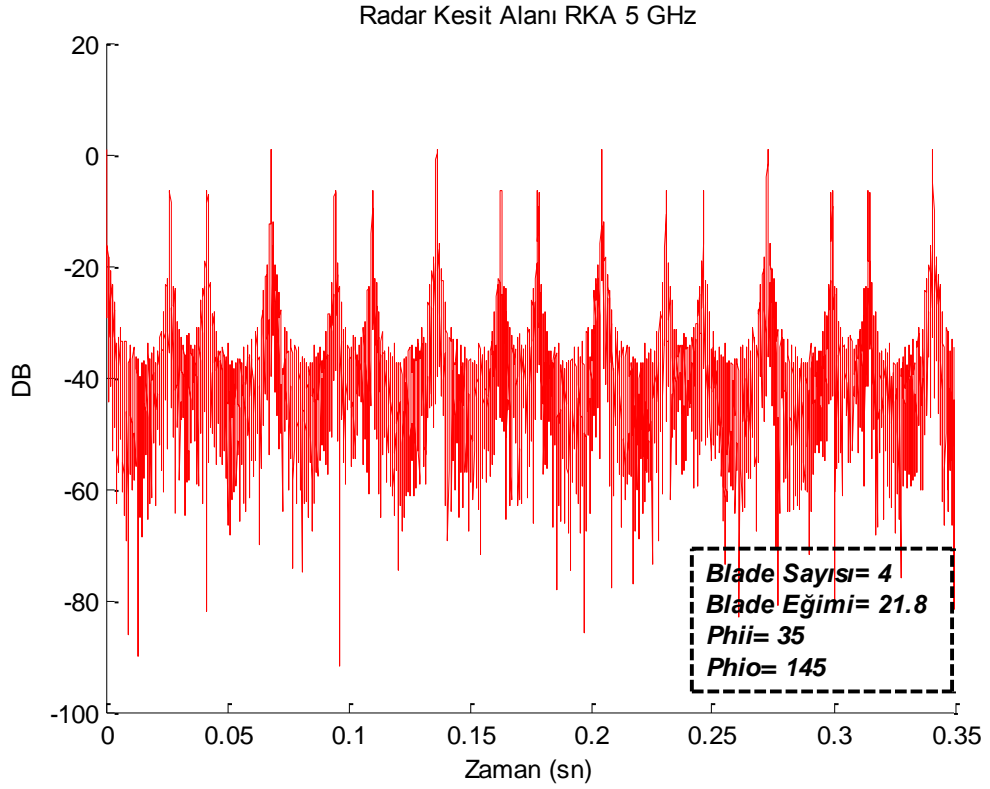
Şekil 4-52 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan İki Pal İçin EMAT  
Grafiği (Phii=35, Phio=145)



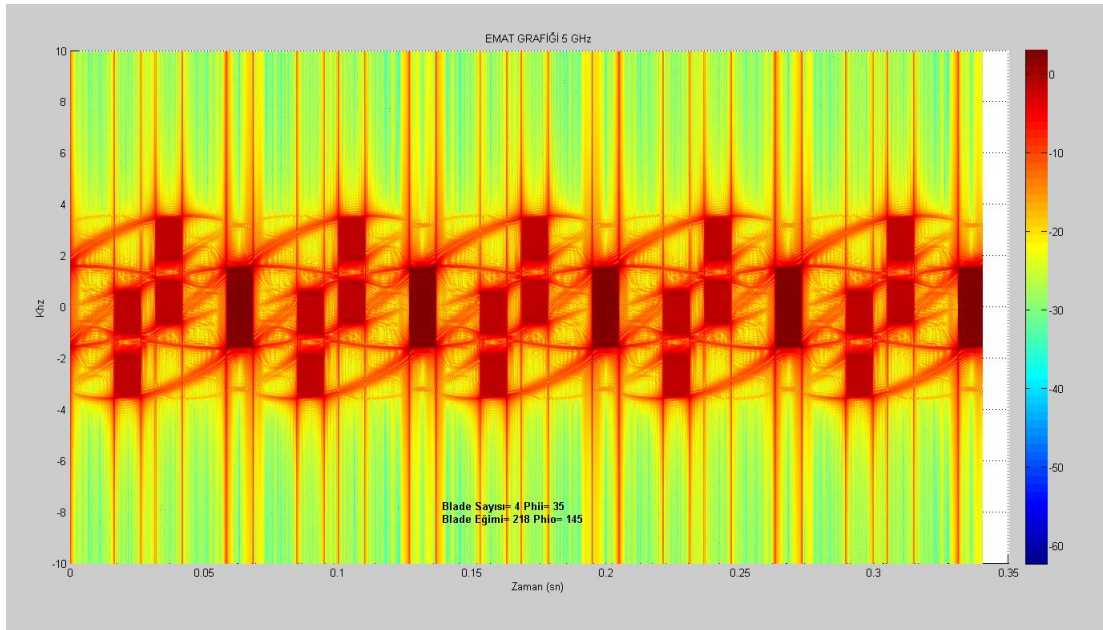
Şekil 4-53 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Üç Pal İçin RKA Grafiği  
(Phii=35, Phio=145)



Şekil 4-54 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Üç Pal İçin EMAT  
Grafiki (Phii=35, Phio=145)



Şekil 4-55 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Dört Pal İçin RKA  
Grafığı (Phii=35, Phio=145)



Şekil 4-56 5 GHz Frekansta Eğimi 21.8 Derece Olan Dört Pal İçin EMAT  
Grafığı (Phii=35, Phio=145)

## V. SONUÇ VE YORUMLAR

Bu bölümde sonuç ve yorumlar sunulacaktır. İlk dört bölüm ışığında yapılan tüm analiz, inceleme ve hesaplamalar neticesinde elde edilen verilerden çıkarımlar yapılarak sonuçlar elde edilecektir.

Fiziksel Optik yöntemi kullanarak helikopter veya rüzgar türbini gibi döner kanatlı cisimlerin RKA değerlerini uzak alan yaklaşımı yardımıyla hesaplamayı ve elde edilen sonuçlar neticesinde mevcut RKA grafiklerinden döner kanatlı cisimlerin özellikleri hakkında bilgi elde edilmesini amaçlayan bu teze ait sonuçlar ve öneriler şunlardır:

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda Fiziksel Optik yöntemi kullanarak döner kanatlı cisimlerin RKA değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen RKA verilerinden zamana bağlı Doppler frekansı görüntüleri üretilmiş ve bu görüntülerin ait olduğu döner kanatlı cisim hakkında bilgi elde edilmesi sağlanmıştır. Zamana bağlı Doppler grafiklerinde dikkat çeken en önemli hususlardan birisi, ortaya çıkan RKA değerlerinin, tüm yapının bileşenleri olan kanatlardan (paller) yansıyan dalgaların oluşturduğu ve birbirine göre faz kayması olan harmonikler şeklinde olmasıdır. Meydana gelen bu harmonikler döner kanat (pal, blade) sayısına, döner kanatlar arasındaki açığa, döner kanatların geometrik yapısına bağlı olarak şekillendiği gözlemlenmiştir.

Tez kapsamında yapılan hesaplamalar ve analizler neticesinde; RKA ve EMAT grafiklerinde her bir kanattan gelen etkilerin tek bir anlık Doppler oluşturmadığı, her kanada ait dört Doppler sarmalının bulunduğu gözlemlenmiştir. Bu beklenmeyen etkinin oluşturulan döner kanatların modellenmesinin dikdörtgen plaka ile yapılmış olmasından kaynaklandığı ve dikdörtgen plakanın köşelerinden yansıyan dalgaların buna sebebiyet verdiği değerlendirilmektedir. Bu eksikliğin giderilebilmesi maksadıyla, çalışmanın devamı olarak döner kanatların modellenmesinin gerçek kanat yapısında (damla yapısına yakın) yapılması ve kenar kırınımlarının da (Edge Effect) hesaplanması düşünülmektedir.

Kırınım hesaplamalarında Eşdeğer Akımlar Metodu (Method of Equivalent Currents-MEC) yönteminin kullanılmasının sonraki çalışmalarda fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışma ile plakanın kenarlarından yansıyan dalgaların etkisinin sonuca katılması ve hesaplamalarda gelişme katedileceği değerlendirilmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan birisi de ölçüm yapılacak cisimlere ilişkin yapılan modellemelerde; döner kanadın tam olarak modellendiği, Maxwell denklemlerinin FO yaklaşımı gibi yaklaşık olarak değil de tam olarak çözüldüğü durumda analizlerden tam doğru sonuçlar elde edilebilir olmasıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] C.A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Wiley, New York, 1989.
- [2] David C. JENN, *Radar and Laser Cross Section Engineering*, AIAA Education Series, Washington, 1995.
- [3] SERİM Hüseyin Avni, *Fiziksel Optiksel Yaklaşımın Radon Dönüşümü Yorumu ile NURBS Yüzeyleri Üzerinden Radar Kesit Alanı (RKA) Hesaplanması*, Doktora Tezi, Gebze, 2008.
- [4] F. Obelleiro, J.M. Taboada, L. Landesa and I.T.Castro, *Synthesis of array antennas onboard complex platforms considering coupling effects by means of a hybrid MM-PO technique*, *Microwave Opt Technol Lett*, Vol. 33, pp. 207-212, 2002.
- [5] R. Bhalla and H. Ling, *ISAR Image simulation of targets with moving parts using the shooting and bouncing ray technique*, *IEEE Antennas Propagat. Conf., Seattle, WA, June 1994*, pp. 1994-1997.
- [6] G. Somers and D. Bruno, *Spectral characteristics of electromagnetic wave scattering by rotating propellers and its effects on clutter discrimination*, *IEEE Antennas Propagat. Conf., Seattle, WA, June 1994*, pp. 144-147.
- [7] I. Tardy, *Contribution á la caractérisation d'objets á symetrie cyclique en rotation*, thèse de Doctorat, Univ. Bordeaux, 1995.
- [8] J. Van Bladel , *Electromagnetic fields in the presence of rotating bodies*, *Proc. IEEE*, vol. 64, no.3, pp. 301-318, Mar. 1976.
- [9] D. De Zutter , *Doppler effect from a transmitter in translational motion*, *Microwaves, Opt. Acoustics*, vol. 3, pp. 85-92, Mar. 1979.
- [10] F. Harfoush, A. Taflove, and G. Kriegsman, *A numerical technique for analyzing electromagnetic wave scattering from moving surfaces in one and two dimensions*, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 37, pp. 55-63, Jan. 1989.

- [11] D. L. Sengupta and T. B. A. Senior, *Electromagnetic scattering by rotating objects*, *Proc. URSI Symp. Electromagnetic Wave Theory*, June 1977, pp. 314-315.
- [12] I. J. Lahaie and D. L. Sengupta, *Scattering of electromagnetic waves by a slowly rotating rectangular metal plate*, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-27, pp. 40-46, Jan. 1979.
- [13] S. S. Bor, T. L. Yang and S. Y. Yang, *Radar cross-sectional spectra of rotating multiple skew-plated metal fan blades by physical optics/ physical theory of diffraction, equivalent currents approximation*, *J. Appl. Phys.*, pt. 1, vol. 31, no. 4A, pp. 1549-1554, May 1992.
- [14] T. L. Yang, and S. S. Bor, *Comparison of monostatic doppler and radar cross-section spectra by rotating multiple skew-plated metal fan blades*, *Int. J. Electron.*, vol. 72, no. 4, pp. 659-668, 1992.
- [15] K. M. Mitzner, *Incremental length diffraction coefficients*, *Aircraft Division Northrop Corp., Tech. Rep. AFAL-TR-73-296*, 1974.
- [16] A. Michaeli, *Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation*, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-23, pp. 252-258, Mar. 1984.
- [17] E. F. Knott, *The relationship between Mitzner's IDCL and Michaeli's equivalent currents*, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-33, pp. 112-114, Jan. 1985.
- [18] I. Tardy, G. P. Piau, P. Chabrat, and J. Rouch, *Computational and experimental analysis of the rotating fans*, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, no.10, pp.1414-1421, Oct. 1996.
- [19] P. Pouliguen, L. Lucas, F. Muller, S. Quete, and C. Terret, *Calculation and Analysis of Electromagnetic Scattering by Helicopter Rotating Blades*, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 50, no.10, pp.1396-1406, Oct. 2002.
- [20] The Mathworks Inc., ABD, <http://www.mathworks.com>, Mayis 2011.
- [21] Christian Wolff, Almany, <http://www.radartutorial.eu>, Mayis 2011.