

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖNEL HAREKETLİ CİSİMLERİN RADAR
KESİT ALANLARININ VE DOPPLER
SPEKTRUMLARININ İNCELENMESİ

AYŞE ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2014

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK ve FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÖNEL HAREKETLİ CİSİMLERİN
RADAR KESİT ALANLARININ VE
DOPPLER SPEKTRUMLARININ
İNCELENMESİ

AYŞE ÇELİK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. AHMET ARİF ERGİN

GEBZE
2014



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 23/06/2014 tarih ve 2014/37 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/06/2014 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ayşe ÇELİK'in tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. A. Arif ERGİN

ÜYE

: Doç. Dr. Gökhan ÇINAR

ÜYE

: Doç. Dr. Ercan ERTÜRK

ONAY

GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Bu çalışmanın amacı dönel kanatlı cisimlerin radar kesit alanlarını (RKA; radar cross section (RCS)) ve zamana bağlı Doppler izlerini, Geometrik Optik (Geometrical Optics (GO)) yöntemi ve uzak alan yaklaşımı temellerine dayanan MASKE-II RKAY programı kullanarak hesaplamak ve üretmektir. Çalışmanın sonucu olarak, radar sistemlerinden elde edilen RKA izleri ile dönel kanatlı cisimlerin özelliklerinin yorumlanabilmesi için gerekli temel bilgilerin edinilmesi amaçlanmaktadır.

Cisimlerin RKA izlerini hesaplamak ve geometrileri ile RKA izlerinin ilişkisini incelemek için, RHINOCEROS programı ile damla-yapılı ve dikdörtgen plaka şeklinde dönel kanatlar oluşturulmuştur. Oluşturulan geometrilerin Doppler ve RKA izlerinin hesaplanması için MATLAB programında kodlar geliştirilmiş, hesaplamada gerekli olan genlik ve faz bilgileri ise RKAY programı ile elde edilmiştir. Elde edilen zamana bağlı saçılan elektrik alan değerleri kısa-zamanlı Fourier dönüşümüne (KZFD; short-time Fourier transform (STFT)) tabi tutularak zamana bağlı Doppler grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen Doppler grafikleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

Dönel kanatlı cisimlerin RKA değerlerini incelerken ortaya çıkan en önemli sonuç, elde edilen RKA değerinin, geometrik yapıyı oluşturan ve dönme ekseninden farklı uzaklıklarda yer alan farklı radyal hız bileşenlerine sahip kısımlardan meydana gelen saçılma sinyallerinin süperpozisyonu cinsinden elde edilmesidir. Bahsedilen formdaki RKA verisi üzerinde KZFD yönteminin sağladığı çözümleme sayesinde ise, dönel harekete sahip kanatlara ait kısımların (ki kanadın farklı çizgisel hızlara sahip nokta saçıcılar bütünü şeklinde olması söz konusu değerlendirmeyi kolaylaştırmaktadır) gözlem süresi boyunca radar sinyal işleme süreci kapsamında oluşturulan zaman-Doppler imgelerinde sergileyeceği salınımlı karakteristikler incelenebilmektedir. Elde ettiğimiz bu zaman-Doppler karakteristikleri, öncelikli olarak dönel kanatların şekline, sayısına, eğimine ve birbirleri arasındaki açığa bağlı olarak şekillenmekte ve radar alıcısı tarafında dönel kanata ilişkin teşhis bilgilerinin elde edilmesinde kullanılabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Radar kesit alanı, Dönel hareket, Doppler frekans kayması, Kısa-zamanlı Fourier dönüşümü.

SUMMARY

The main purpose of this thesis is to evaluate the radar cross section (RCS) characteristics of the objects with rotating blades via the software MASKE-II RKAY that is based on the far-field approximation and Geometrical Optics (GO) method, and to produce their Doppler signatures. As the outcome of the examination, it has been aimed to obtain basic information required to interpret the properties of the rotating blades with the help of the RCS signatures gathered from the radar systems.

In order to evaluate the RCS signature of the objects and to examine the relation to their geometries, rotating blade models are constructed by using the software RHINOCEROS for ideal rectangular plates and drop geometry, respectively. After evaluating the complex-natured (i.e., denoted by magnitude and phase information) scattered electric field characteristics via the software RKAY, the signal processing MATLAB scripts have been used for focusing on the RCS and Doppler signatures of the investigated geometries. By performing short-time Fourier transform (STFT) over the scattered electric field data, the time-dependent Doppler images have been constructed, and the useful insights about these images have been provided.

The most important outcome gathered by examining the RCS characteristics of objects with rotating blades is that the value of the RCS has been obtained in terms of the superposition of scattered signals caused by several parts of the rotating blades that have been located at different distances from the center of rotation yielding different radial velocity components. Hence, with the help of the decomposition provided by performing STFT over the RCS data with the above-mentioned structure, the oscillatory characteristics existing in the time-Doppler images constructed via radar signal processing through the entire radar observation could be investigated for several parts of the rotating blades (which might be better understood by considering the rotating blades as an assembly of several point scatterers with different linear velocities). The observed time-Doppler characteristics have been facing variations due to the number, shape, slope of the rotating blades and the angle between them, and are used for extracting the identification information of rotating blades in radar receivers.

Keywords: Radar cross section, Rotational movement, Doppler frequency shift, Short-time Fourier transform.

TEŞEKKÜR

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca yardımlarını, tecrübelerini ve değerli zamanını esirgemeyen, çalışmalarımda beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Arif ERGİN'e,

Her zaman yanımda olan eşim Ahmet Faruk COŞKUN'a,

Maddi ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme en içten teşekkürleri borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Konusu ve Gerekliliği	3
1.2. Tezin İçeriği	4
2. DOPPLER VE MİKRO-DOPPLER ETKİSİ	5
2.1. Doppler Etkisi	6
2.1.1. Radarlarda Gözlemlenen Doppler Etkisi	7
2.1.2. Doppler Frekans Kaymalarının Kestirimi ve Analizi	11
2.1.3. Mikro-Doppler Etkileri	14
2.1.4. Radarlarda Gözlemlenen Mikro-Doppler Etkisi	15
2.1.5. Mikro-Doppler Frekans Kaymalarının Kestirimi ve Analizi	16
2.1.5.1. Ani Frekans Analizi	16
2.1.5.2. Birleşik Zaman-Frekans Analizi	17
3. DÖNEL KANAT SAÇILMA MODELİ	20
3.1. RKA Kavramı	20
3.2. RKA Kestirim Yöntemleri	21
3.3. Helikopter Kanatlarına İlişkin Saçılma Sinyali Modeli	23
4. ANALİZ VE SİMÜLASYON SONUÇLARI	29
4.1. Dönel Kanatların Özellikleri	29
4.2. Simülasyon Sonuçları	31
4.2.1. Dönel Kanat Sayısının Etkisi	33

4.2.2. Geometrik Etki	36
4.2.3. Gelen Dalga Açısının Etkisi	38
4.2.4. Kanat Eğiminin Etkisi	42
4.2.5. Frekans Etkisi	45
5. ÇIKARIMLAR VE SONRAKİ ÇALIŞMALAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kisaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
AGF	: Alçak-Geçiren Filtre
CAD	: Computer-Aided Design
EAM	: Eşdeğer Akımlar Metodu
EM	: Elektromanyetik
FFT	: Fast Fourier Transform
FKT	: Fiziksel Kırınım Teorisi
FO	: Fiziksel Optik
FOPEN	: Foliage Penetration
GHz	: Giga-Hertz
GKT	: Geometrik Kırınım Teorisi
GO	: Geometrik Optik (Geometric Optics)
GTD	: Geometric Theory of Diffraction
kHz	: Kilo-Hertz
KZFD	: Kısa-Zamanlı Fourier Dönüşümü
MEC	: Method of Equivalent Currents
MHz	: Mega-Hertz
ML	: Maximum Likelihood
MUSIC	: Multiple Signal Classification
LADAR	: Laser Detection and Ranging
LOS	: Line-of-Sight
PO	: Pyhsical Optics
PRF	: Pulse Repetition Frequency
PTD	: Physical Theory of Diffraction
RCS	: Radar Cross Section
RKA	: Radar Kesit Alanı
SIY	: Seken Işın Yöntemi
STFT	: Short-Time Fourier Transform
UHF	: Ultra-High Frequency

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Doppler etkisi için temsili gösterim.	6
2.2: Bi-statik radar şematik gösterimi.	9
2.3: Doppler frekans kaymalarının tespiti için kullanılan I-Q detektör yapısı.	11
3.1: Bir helikopter kanadının damla-yapısı için temsili gösterim.	23
3.2: Helikopter saçılmasına ait temsili bir Doppler spektrumu gösterim.	23
3.3: Kartezyan koordinatlarda radar - helikopter konumlarının gösterimi.	24
3.4: Radar - helikopter kanatları arası X-Y düzlemi gösterimi.	24
3.5: İki dönel kanat için oluşacak mikro-Doppler etkisinin temsili gösterimi.	28
3.6: Basitleştirilmiş dikdörtgen dönel kanat modeli.	28
4.1: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (CAD (computer-aided design) gösterimi-1).	29
4.2: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (CAD gösterimi-2).	30
4.3: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (2-kanatlı model).	30
4.4: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (3-kanatlı model).	31
4.5: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (4-kanatlı model).	31
4.6: Analiz-1 için zamana bağlı RKA değişimi.	33
4.7: Analiz-1 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	33
4.8: Analiz-1 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	34
4.9: Analiz-2 için zamana bağlı RKA değişimi.	34
4.10: Analiz-2 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	34
4.11: Analiz-2 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	35
4.12: Analiz-3 için zamana bağlı RKA değişimi.	35
4.13: Analiz-3 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	35
4.14: Analiz-3 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	36

4.15: Analiz-4 için zamana bağlı RKA değişimi.	37
4.16: Analiz-4 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	37
4.17: Analiz-4 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	37
4.18: Analiz-5 için zamana bağlı RKA değişimi.	39
4.19: Analiz-5 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	39
4.20: Analiz-5 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	39
4.21: Analiz-6 için zamana bağlı RKA değişimi.	40
4.22: Analiz-6 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	40
4.23: Analiz-6 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	40
4.24: Analiz-7 için zamana bağlı RKA değişimi.	41
4.25: Analiz-7 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	41
4.26: Analiz-7 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	41
4.27: Analiz-8 için zamana bağlı RKA değişimi.	42
4.28: Analiz-8 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	42
4.29: Analiz-8 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	43
4.30: Analiz-9 için zamana bağlı RKA değişimi.	43
4.31: Analiz-9 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	43
4.32: Analiz-9 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	44
4.33: Analiz-10 için zamana bağlı RKA değişimi.	45
4.34: Analiz-10 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	45
4.35: Analiz-10 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	46
4.36: Analiz-11 için zamana bağlı RKA değişimi.	47
4.37: Analiz-11 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.	47
4.38: Analiz-11 için birleşik zaman-frekans spektrumu.	47

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
4.1: Damla-Yapılı Kanat Modeline İlişkin Fiziksel Özellikler.	30
4.2: Simülasyon Senaryolarına İlişkin Parametreler.	32
4.3: Simülasyon Senaryolarına İlişkin Parametreler (Devamı).	32
4.4: Sinyal İşleme Sürecine İlişkin Parametreler.	32

1. GİRİŞ

Uçakların ve helikopterlerin dönen parçalarına ait radar izlerine ilişkin araştırmalar havacılık alanında geniş bir yer tutmaktadır [1]-[3]. Bu tür dönen hareketli yüzeylerin radarlar ile teşhise olanak sağlayan özel bir spektrumu bulunmaktadır.

Radar sistemleri, tespit edilmesi amaçlanan nesneler (veya platformlar) üzerine elektromanyetik (EM) sinyal göndererek geri dönen yankı sinyalini almaktadır. Radar kesit alanının (RKA) hesaplanması esnasında, elde edilen ifade, belirli bir yönde saçılan elektrik alanın değerine eşittir. Geri dönüş sinyalinin gecikmesine bağlı olarak, radar nesnenin uzaklığını (menzili) belirleyebilmektedir. Tespit edilmesi amaçlanan nesnenin hareketli olması durumunda, geri dönüş sinyalinin frekansı, nesne üzerine gönderilen EM sinyal frekansına göre sapmalar gösterecektir. Bahsedilen şekilde, yayın kaynağı ve saçıcı nesne arasındaki (çoğunlukla nesne hareketliliğinden kaynaklanacak) bağıl hız nedeniyle oluşan frekans kayması etkisine literatürde Doppler etkisi denmektedir [4]-[6]. Doppler frekans kayması, hareketli nesnenin radar doğrudan bakış doğrultusundaki (line-of-sight (LOS)) hız bileşeni (radyal hız bileşeni) nedeniyle oluşmaktadır. Geri dönüş sinyalinin frekansındaki Doppler kayması yardımıyla, radar nesnenin radyal hız bileşeninin değerini kestirebilmektedir. Nesnenin veya nesneye ait herhangi bir parçanın, nesnenin ana hareketine ek olarak dönel veya salınımlı bir hareket de sergiliyor olması durumunda, dönel veya salınımlı hareket, nesnenin ana hareketi nedeniyle iletilen frekans değerinin maruz kalacağı Doppler kaymaları civarında, alt frekans bileşenleri oluşmasına neden olacaktır. Bahsedilen şekilde, dönel veya salınımlı hareket nedeniyle oluşan Doppler frekans modülasyonu katkısına mikro-Doppler etkisi denmektedir [6]-[8].

Doppler frekans kayması genellikle geri dönüş sinyalinin Fourier dönüşümü alınarak elde edilen frekans spektrumu incelenerek belirlenmektedir. Frekans spektrumunda yer alan maksimum genlikli bileşen, nesnenin radyal hızı nedeniyle oluşan Doppler frekans kayması değerini temsil etmektedir. Buna ek olarak, Doppler frekans kaymalarına ilişkin bileşenlerin spektrumdaki genişlikleri, mikro-Doppler etkisi nedeniyle oluşan hız saçılmasının kestirilmesi için kullanılmaktadır. Mikro-Doppler etkisi sonucu gözlenen kestirimler, radar tarafından gözlemlenen nesnenin hareket karakteristiğinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilir [6].

Gözlemlenen nesnelere ilişkin mikro-Doppler etkisi, nesnelerin (yapısal özellikleri neticesinde oluşan karmaşık frekans-modülasyonu gibi ayırıcı) izleri ile karakterize edilebilmektedir.

1842 yılında, Avusturyalı matematikçi ve fizikçi Christian Doppler, yıldızların renkli ışık etkileri üzerine bir fenomen ortaya atmıştır [1]. Burada, Doppler, ışık kaynağının görünür renginin kaynağın hareketi ile birlikte değiştiğini iddia etmiştir. Basitçe, bir ışık kaynağından saçılan ışığın renginin gözlemciye doğru hareket ederken mavi ölçekte, gözlemciden uzaklaşırken ise kırmızı ölçekte seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu gözlem neticesinde, Doppler etkisi olarak bilinen etki keşfedilmiştir.

Dönel kanatlı cisimlerin RKA değerlerini 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 dönel kanatların sayısına, dönel 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 tarafından ayrık zamanlı ve dönen kanatların merkeze sabit olduğu kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır [9]. Bu yöntem esnasında yansıtıcının sabit olduğu varsayılarak dönme zamanlarında anlık hesaplamalar yapılmıştır. Bu yöntemde (quasi-stationary) dönen kanadın açısal dönme frekansının açısal aydınlatma frekansına oranı çok küçük ise gerçekçi sonuçlar verdiği kabul edilmiştir [9]. Bu konuda en kesin sonuçlardan birisi 1979 yılında De Zutter tarafından elde edilmiştir [10]. Çalışmasını izafiyet teorisi çatısı altında türettiği geometriler üzerinde yapmıştır. 1989 yılında ise Harfoush tarafından Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi kullanılarak cismin yüzeyindeki hızı içeren sınır koşulları uygulanarak yeni bir metod geliştirilmiştir [11]. Ayrıca aynı yıl içerisinde Sengupta ve Lahaie ilk kez mükemmel iletken dönen kanatlar üzerindeki saçılan alanı Fiziksel Optik (FO; Physical Optics (PO)) yaklaşımı kullanarak çözmüşlerdir [12], [13]. Yapılan çalışma rüzgar türbinlerinin televizyon dalgalarına olan girişimlerinin analizi şeklinde olmuştur. 1992 yılında Bor ve Yang, FO yaklaşımını dönen metal kanatlara uygulamış ve dönen metal kanatları mükemmel iletken dikdörtgen plakalar olarak modellemiştir [14], [15]. Bu modelleme esnasında Eşdeğer Akımlar Metodu (EAM; Method of Equivalent Currents (MEC))

yöntemini kullanarak plakanın kenarlarından kırınan dalgaların etkisini sonuca katarak hesaplamalarda gelişme katetmiştir [16]-[18]. Daha sonra 1996 yılında Tardy, Piau, Chabrat ve Rouch tarafından Bor ve Yang'ın bu çalışması genelleştirilerek bi-statik durum için incelenmiştir [19]. 2002 yılında ise Pouliguen, Lucas, Muller, Quete ve Terret tarafından FO ve EAM yöntemi kullanılarak helikopterlerin rotorlarının RKA hesaplamaları yapılmıştır [20]. [21]'de yapılan çalışmada ise, sonsuz ince dikdörtgen mükemmel-iletken plaka modeli kullanılarak, dönel kanatların oluşturacağı saçılma etkileri FO hesaplama yaklaşımı ile RKA cinsinden incelenmiş ve bu bilgiler ışığında da dönel kanatların Doppler karakteristiği gözlemlenmiştir. Bu tez çalışması kapsamında, [21]'de ele alınan ideal ancak pratik-olmayan kanat modeli iyileştirilerek damla-yapılı daha gerçekçi kanat modeli incelenmiştir.

1.1. Tez Konusu ve Gerekliliği

Bu çalışmanın amacı dönel kanatlı cisimlerin RKA değerlerini uzak alan yaklaşımı ve Geometrik Optik (GO; Geometrical Optics (GO)) esasına dayanan RKAY programı ile analiz etmek ve Doppler izlerinin davranışını belirlemektir. Elde edilen sonuçlar neticesinde ve bu sonuçlardan edinilen tecrübeler ışığında mevcut radar sistemlerinden toplanan sinyalleri işleyerek dönel kanatlı cisimlerin teşhisi için bir altyapı oluşturmaktır.

Cisimlerin RKA izlerini hesaplamak ve geometrileri ile RKA izlerinin ilişkisini incelemek için, RHINOCEROS programı ile damla-yapılı ve dikdörtgen plaka şeklinde modellenmiş dönel kanatlar oluşturulmuştur. Oluşturulan geometrilerin Doppler ve RKA izlerinin hesaplanması için MATLAB programında kodlar geliştirilmiş, hesaplamada gerekli olan genlik ve faz bilgileri ise RKAY programı ile elde edilmiştir. Elde edilen zamana bağlı RKA değerleri kısa-süreli Fourier çözümlemesine tabi tutularak zamana bağlı Doppler grafikleri oluşturulmuştur. Bu zamana bağlı Doppler grafikleri hakkındaki değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu tezin temel amacı elde edilen RKA verilerinden yararlanarak mevcut görüntüden, görüntünün ait olduğu dönel kanatlı cisim hakkında bilgi elde edilmesi, kare plaka ve damla modelinde kanatlar analiz edilerek RKA analizinde kanat modelinin etkisinin incelenmesidir. Bu yönüyle, tez çalışması, [21]'de ele alınan ideal dikdörtgen plaka modeli ile ortaya çıkartılan sonuçların daha gerçekçi bir kanat modeli

için ilerletilmesini sağlamaktadır.

1.2. Tezin İçeriği

Tez toplamda 5 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup tez konusunun öneminden, içeriğinden ve genel yaklaşımdan bahsedilmektedir.

Tezin ikinci bölümünde hareketli cisimlerin radarlarda gözlemlenen Doppler ve mikro-Doppler etkisinden, Doppler ve mikro-Doppler frekans kaymalarının kestirimi ve analizinden bahsedilmektedir.

Üçüncü bölümde, RKA analizi, RKA kestirim yöntemleri ve tez kapsamında ele alınan kanatların matematiksel ifadesi ile RKA analizi ele alınacaktır.

Dördüncü bölümde birçok farklı konfigürasyon için gerçekleştirilen analizlerin sonuçları incelenecektir. Analiz sonuçları başlığı altında tez kapsamında yapılan bazı hesaplamalara ve analizlere ilişkin grafik ve tablolar verilmiştir.

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.

2. DOPPLER VE MİKRO-DOPPLER ETKİSİ

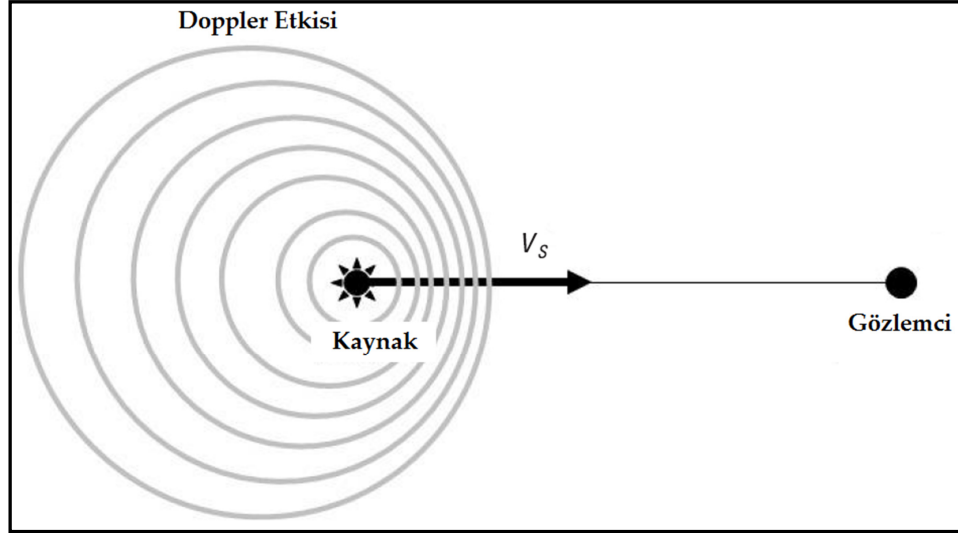
Radar sistemleri, tespit edilmesi amaçlanan nesneler (veya platformlar) üzerine EM sinyal göndererek geri dönen yankı sinyalini almaktadır. Geri dönüş sinyalinin gecikmesine bağlı olarak, radar nesnenin uzaklığını (menzilini) belirleyebilmektedir. Tespit edilmesi amaçlanan nesnenin hareketli olması durumunda, geri dönüş sinyalinin frekansı, nesne üzerine gönderilen EM sinyal frekansına göre sapmalar gösterecektir. Bahsedilen şekilde, yayın kaynağı ve saçıcı nesne arasındaki (çoğunlukla nesne hareketliliğinden kaynaklanacak) bağlı hız nedeniyle oluşan frekans kayması etkisine literatürde Doppler etkisi denmektedir [4]-[6].

Doppler frekans kayması, hareketli nesnenin radar doğrudan bakış doğrultusundaki hız bileşeni (radyal hız bileşeni) nedeniyle oluşmaktadır. Geri dönüş sinyalinin frekansındaki Doppler kayması yardımıyla, radar nesnenin radyal hız bileşeninin değerini kestirebilmektedir. Nesnenin veya nesneye ait herhangi bir parçanın, nesnenin ana hareketine ek olarak dönel veya salınımlı bir hareket de sergiliyor olması durumunda, dönel veya salınımlı hareket, nesnenin ana hareketi nedeniyle iletilen frekans değerinin maruz kalacağı Doppler kaymaları civarında, alt frekans bileşenleri oluşmasına neden olacaktır. Bahsedilen şekilde, dönel veya salınımlı hareket nedeniyle oluşan Doppler frekans modülasyonu katkısına mikro-Doppler etkisi denmektedir [6]-[8].

Doppler frekans kayması genellikle geri dönüş sinyalinin Fourier dönüşümü alınarak elde edilen frekans spektrumu incelenerek belirlenmektedir. Frekans spektrumunda yer alan maksimum genlikli bileşen, nesnenin radyal hızı nedeniyle oluşan Doppler frekans kayması değerini temsil etmektedir. Buna ek olarak, Doppler frekans kaymalarına ilişkin bileşenlerin spektrumdaki genişlikleri, mikro-Doppler etkisi nedeniyle oluşan hız saçılmasının kestirilmesi ve radar tarafından gözlemlenen nesnenin hareket karakteristiğinin belirlenmesi amacıyla için kullanılmaktadır [3]. Gözlemlenen nesnelere ilişkin mikro-Doppler etkisi, nesnelerin (yapısal özellikleri neticesinde oluşan karmaşık frekans-modülasyonu gibi ayırıcı) izleri ile karakterize edilebilmektedir.

2.1. Doppler Etkisi

1842 yılında, Avusturyalı matematikçi ve fizikçi Christian Doppler, yıldızların renkli ışık etkileri üzerine bir fenomen ortaya atmıştır [1]. Burada, Doppler, ışık kaynağının görünür renginin kaynağın hareketi ile birlikte değiştiğini iddia etmiştir. Basitçe, bir ışık kaynağından saçılan ışığın renginin gözlemciye doğru hareket ederken mavi ölçekte, gözlemciden uzaklaşırken ise kırmızı ölçekte seyrettiği gözlemlenmiştir. Bu gözlem neticesinde, Doppler etkisi olarak bilinen etki keşfedilmiştir. Bu fenomen, bir ışık kaynağının gözlemlenen frekansının veya dalgaboyunun, kaynağın gözlemciye göre bağıl hızına bağlı olduğunu iddia etmektedir. Kaynağın hareketi, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, kaynağın önündeki dalgaların sıkışmasını, kaynağın arkasındaki dalgaların ise gevşemesini sağlamaktadır.



Şekil 2.1: Doppler etkisi için temsili gösterim.

Doppler etkisi, 1843 yılında, farklı hızlarda hareket eden bir trenin sireninin ürettiği ses dalgaları kullanılarak deneysel olarak ispatlanmıştır. Ele alınan yayılım ortamında ses dalgasının ilerleme hızı c_{sound} ile, ses kaynağının ürettiği dalgaının frekansı ise f ile gösterilmek üzere, ses dalgasının dalgaboyu $\lambda = c_{sound}/f$ olarak tanımlanmaktadır. Ses kaynağının, sabit olan gözlemciye ve yayılım ortamına göre bağıl v hızı ile hareket ettiği düşünüldüğünde, gözlemci tarafından algılanan ses dalgasının frekansı

$$f' = \frac{c_{sound}}{c_{sound} \pm v} f = \frac{1}{1 \pm v/c_{sound}} f \quad (2.1)$$

olarak hesaplanmaktadır. v/c_{sound} oranının çok küçük değerleri için, Doppler kaymalı frekans değeri

$$f' = \frac{1}{1 \pm v/c_{sound}} f \approx 1 \mp \frac{v}{c_{sound}} f \quad (2.2)$$

olarak elde edilmektedir. Benzer şekilde, gözlemcinin, sabit kaynağa ve yayılım ortamına göre bağlı v_o hızı ile hareket ettiği durumda, gözlemci tarafından algılanan ses dalgasının frekansı

$$f' = \frac{c_{sound} \pm v_o}{c_{sound}} f \approx 1 \mp \frac{v_o}{c_{sound}} f, \quad (2.3)$$

hem ses kaynağının, hem de gözlemcinin yayılım ortamına göre bağlı v_s ve v_o hızları ile hareket ettiği durumda ise,

$$f' = \frac{c_{sound} \pm v_o}{c_{sound} \mp v_s} f, \quad (2.4)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Kaynağın ve gözlemcinin tek bir eksen üzerine birbirlerine doğru hareket etmeleri durumunda, (2.4) ifadesinde üst sırada verilen işaretler, kaynağın ve gözlemcinin birbirlerinden uzaklaşacak şekilde hareket etmesi durumunda ise alt sırada verilen işaretler geçerli olmaktadır.

2.1.1. Radarlarda Gözlemlenen Doppler Etkisi

Radarsistemlerinde, takip edilen bir hedefin hızı (v), genellikle EM dalganın yayılım hızından (c), çok küçüktür: $v \ll c$ veya $\beta = v/c \approx 0$. Verici birimin (EM yayın kaynağının) ve alıcı birimin aynı konumda bulunduğu mono-statik radar sistemlerinde, hedeften geri dönen EM dalganın gidip-gelme mesafesi, verici ve hedef arasındaki mesafenin iki katıdır. Bu durumda, EM dalga hareketi, iki farklı fazdan oluşmaktadır:

- İlki, dalganın vericiden hedefe doğru ilerleyen ve $-fv/c$ 'lik Doppler frekans kayması oluşturan ilerleme fazı,
- İkincisi ise, hedeften alıcı birime geri dönen ve $-fv/c$ 'lik Doppler frekans kayması oluşturan geri dönüş fazıdır.

Böylelikle, radar sinyalinin maruz kalacağı toplam Doppler frekans kayması

$$f_D = -f \frac{2v}{c} \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Radar sisteminin hareketsiz olması durumunda, benzer gözlemler v radyal hızı ile hareket eden hedef durumunda geçerli olmaktadır. Hedefin hızının, hedefin radar bakış doğrultusuna göre radardan uzaklaştığı durumda pozitif olarak tanımlanması nedeniyle, Doppler frekans kayması negatif olacaktır.

Şekil 2.2'de iki boyutlu düzlem üzerinde resmedilen bi-statik bir radar sisteminde, verici ve alıcı birimler, her iki uç birim için maksimum hedef uzaklığı değeri ile karşılaştırılabilir seviyede olan belirli bir L mesafesi ile ayrılmıştır. $\vec{r}$ vektör notasyonunu temsil etmek üzere, hedef ile verici ve alıcı birimler arası uzaklıklar $\vec{r}_T$ ve $\vec{r}_R$ vektörleri ile ifade edilmektedir. $\Phi = \alpha_R - \alpha_T$ ile gösterilen bi-statik açı değeri, verici-hedef arası doğrultu ile hedef-alıcı arası doğrultu arasındaki açıyı, α_T ve α_R ise, şekilde gösterildiği üzere, sırasıyla verici ve alıcı bakış açılarını temsil etmektedir.

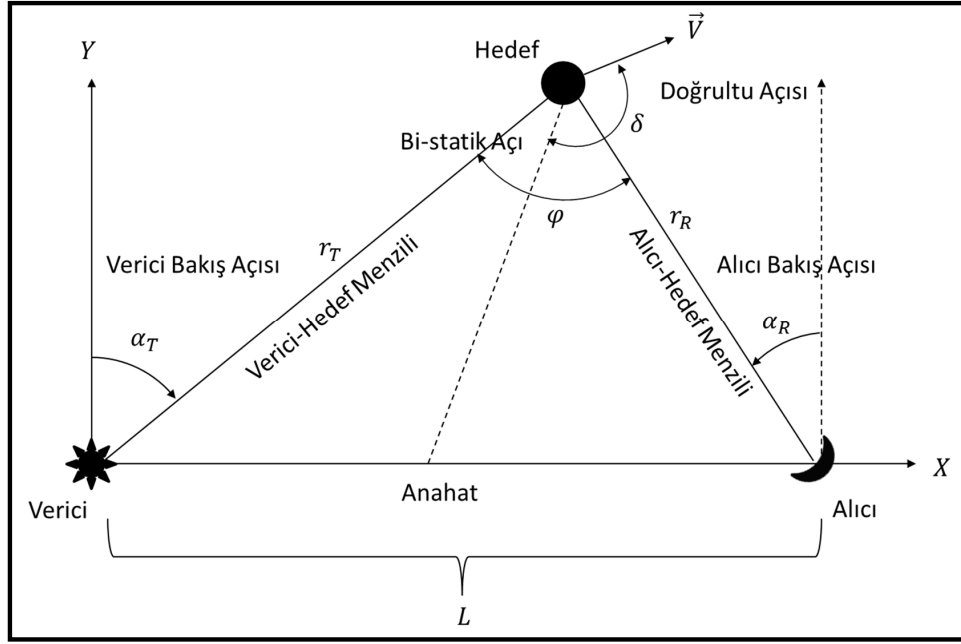
Hedef ile yayın kaynağı arasındaki mesafe $r_T = |\vec{r}_T|$ bilindiği takdirde, hedef ile alıcı sistem arasındaki mesafe de elde edilebilmektedir:

$$r_R = |\vec{r}_R| = \left(L^2 + r_T^2 - 2r_R L \sin \alpha_T \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

Ayrıca, alıcı sistemin hedef noktaya bakış açısı,

$$\alpha_R = \tan^{-1} \left(\frac{L - r_T \sin \alpha_T}{r_T \cos \alpha_T} \right) \quad (2.7)$$

ifadesi yardımıyla hesaplanmaktadır.



Şekil 2.2: Bi-statik radar şematik gösterimi.

Hedefin bir $\vec{V}$ hız vektörü ile hareket etmesi durumunda, verici-hedef LOS doğrultusundaki bileşeni

$$v_T = \vec{V} \frac{\vec{r}_T}{|\vec{r}_T|} \quad (2.8)$$

ifadesi yardımıyla hesaplanmaktadır. Benzer şekilde, alıcı-hedef arası LOS doğrultusundaki bileşeni

$$v_R = \vec{V} \frac{\vec{r}_R}{|\vec{r}_R|} \quad (2.9)$$

şeklinde türetilabilmektedir. Hedefin hareketi nedeniyle, verici-hedef arası menzil değeri zamanın fonksiyonu olarak

$$r_T(t) = r_T(0) + v_T t \quad (2.10)$$

alıcı-hedef arası menzil değeri de

$$r_R(t) = r_R(0) + v_R t \quad (2.11)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. İletilen ve alınan sinyaller arasındaki faz değişimi, radar sinyalinin dalgaboyunun, hedef-verici ve hedef-alıcı arası menzil değerlerinin fonksiyonudur:

$$\Delta\Phi(t) = \frac{r_R(t) + r_T(t)}{\lambda} \quad (2.12)$$

Faz farkı ifadesi elde edildikten sonra, bu ifadenin değişim hızı kullanılarak Doppler frekans kayması türetilenmektedir. Buna göre, (2.12) ifadesinin zamana göre türevi

$$f_{D,Bi} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{d}{dt} \Delta\Phi(t) \right] = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\lambda} \left[\frac{d}{dt} (r_R(t) + r_T(t)) \right] = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\lambda} [v_R + v_T] \quad (2.13)$$

şeklinde tanımlanan bi-statik Doppler frekans kaymasını vermektedir.

Bi-statik bir radar sisteminde, Doppler kayması üç farklı etkene bağlıdır [3], [6]. Bunlardan ilki, Doppler kaymasının maksimum değeridir. $\vec{V}$ hızı ile hareket eden bir hedef için, radarda gözlemlenecek maksimum Doppler kayması değeri,

$$f_{D,max} = \frac{2f_c}{c} |\vec{V}| \quad (2.14)$$

olarak hesaplanmaktadır. İkinci etken, bi-statik üçgenleşme faktörüdür:

$$D = \cos \left(\frac{\alpha_R - \alpha_T}{2} \right) = \cos \left(\frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.15)$$

Üçüncü etken, Şekil 2.2'den de görülebilen, hedefin hareket ettiği yön ile alıcı-verici arası orta doğrultusu arasındaki δ açısı cinsinden tanımlanmaktadır: $C = \cos \delta$.

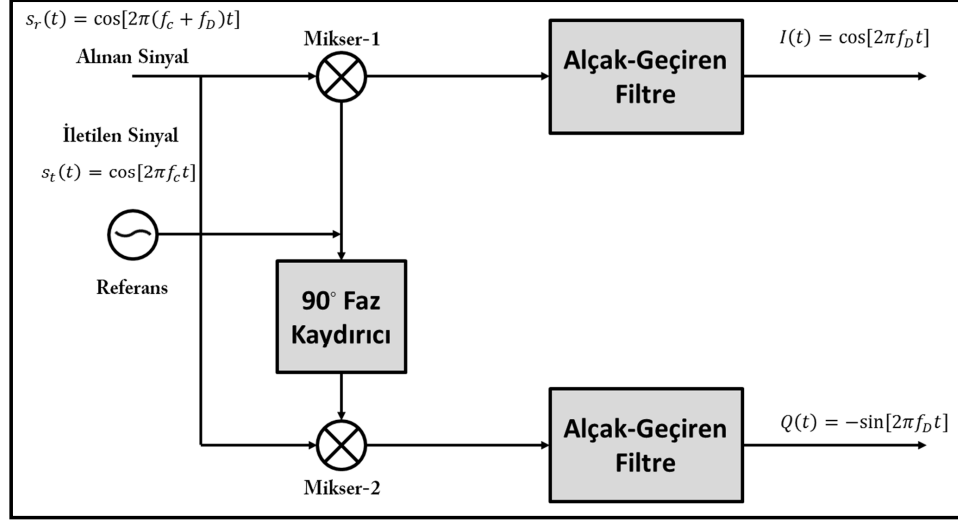
Böylelikle, bi-statik bir radar sisteminde, hedef hareketi nedeniyle gözlemlenecek olan Doppler frekans kayması

$$f_{D,Bi} = f_{D,max} DC = \frac{2f_c}{c} |\vec{V}| \cos \left(\frac{\varphi}{2} \right) \cos \delta \quad (2.16)$$

şeklinde yeniden ifade edilebilmektedir.

2.1.2. Doppler Frekans Kaymalarının Kestirimi ve Analizi

Doppler radarları, hedeflerin radyal hız bileşenlerini belirlemek amacıyla Doppler etkisini kullanmaktadır. Doppler frekans kayması, Şekil 2.3'te görüldüğü gibi, alınan bir radar sinyalinin eşfazlı (in-phase (I)) ve dik-fazlı (quadrature (Q)) bileşenlerinin elde edildiği bir I-Q detektör yardımıyla belirlenebilmektedir.



Şekil 2.3: Doppler frekans kaymalarının tespiti için kullanılan I-Q detektör yapısı.

I-Q detektörde, alınan sinyal, senkron detektörler olarak adlandırılan iki farklı mikser bloğuna ayrılmaktadır. Birinci senkron mikserde, alınan sinyal, referans sinyal (iletim sinyali) ile çarpılırken, diğer senkron mikser bloğunda ise, alınan sinyal, referans sinyalin 90° faz-kaymalı kopyası ile çarpılmaktadır. Alınan radar sinyali

$$s_r(t) = a \cos [2\pi(f_c + f_D)t] = a \cos [2\pi f_c t + \varphi(t)] \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edildiğinde, a alınan sinyal genliğini, f_c radar iletim frekansını, $\varphi(t) = 2\pi f_D t$ ise, hedef hareketliliği nedeniyle alınan sinyalin fazında oluşan zaman bağlı değişimi temsil etmektedir. Alınan işareti

$$s_t(t) = \cos [2\pi f_c t] \quad (2.18)$$

şeklinde tanımlı iletilen sinyal ile çarptığımızda, senkron I detektörünün çıkışında oluşan sinyal

$$s_r(t)s_t(t) = \frac{a}{2}\cos [4\pi f_c t + \varphi(t)] + \frac{a}{2}\cos [\varphi(t)] \quad (2.19)$$

olarak ifade edilebilirken, alçak-geçiren filtreleme (AGF) işlemi sonucunda, I kanalı çıkışında

$$I(t) = \frac{a}{2}\cos [\varphi(t)] \quad (2.20)$$

ile ifade edilebilen sinyal elde edilecektir. Benzer şekilde, (2.16) ile verilen alınan sinyalin, (2.17) ile verilen iletim sinyalinin fazının 90° kaydırılması ile elde edilen $s_t^{90}(t) = \sin(2\pi f_c t)$ sinyali ile çarpılması ve AGF sürecinden geçirilmesi neticesinde, Q kanalının çıkışında

$$Q(t) = -\frac{a}{2}\sin [\varphi(t)] \quad (2.21)$$

sinyali elde edilecektir. I ve Q kanallarında elde edilecek (2.17) ve (2.20) ile ifade edilen sinyallerin birleştirilmesi neticesinde, kompleks Doppler sinyali

$$s_D(t) = I(t) + jQ(t) = \frac{a}{2}\exp(-j\varphi(t)) = \frac{a}{2}\exp(-j2\pi f_D t) \quad (2.22)$$

şeklinde elde edilecektir.

Böylelikle, Doppler frekans kayması değeri f_D , kompleks Doppler sinyali $s_D(t)$ 'den bir frekans analiz aracı kullanılarak kestirilebilmektedir. Tek bir frekans bileşenine sahip sinüsoidal bir sinyalin Doppler frekans kaymasının kestirilmesi amacıyla, sinyalin spektral yoğunluğunu resmetmeye yarayan "periodogram" kullanılabilir. Sonrasında ise, periodogram verisinin maksimum olduğu noktayı tespit etmek amacıyla en-büyük olabilirlikli kestirim (maximum likelihood (ML)) uygulanabilmektedir [23, (25)]:

$$\hat{f}_D = \max_{f_D^{(k)}} \left\{ \left| \sum_{k=1}^N a(k) \exp(-j2\pi f_D(k)) \right|^2 \right\} \quad (2.23)$$

İncelenen sinyalin örnek sayısı limitli olduğunda, spektrumunun kestirilmesi amacıyla kullanılabilecek en basit metot, hesaplama yükü açısından efektif ve gerçekleştirme yönünden kolay olan hızlı Fourier dönüşümüdür (fast Fourier transform (FFT)). Buna karşın, frekans çözünürlüğü, sinyalin zaman uzayındaki genişliği (toplam gözlem süresi) ile limitlidir ve bu değer, zaman uzayında yapılan pencereleme ile ilişkili olarak spektrum sızıntısı olarak tanımlanan, yüksek değerli sıfır-frekans bileşeni oluşumu durumunda bozulmaktadır. Zaman penceresinin sıfır-doldurma işlemi ile genişletilmesi ise, frekans uzayında iyileştirilmiş ara değerlendirme çözünürlüğü sağlarken, esasında daha yüksek bir frekans çözünürlüğü getirmemektedir. FFT sürecinin frekans çözünürlüğünü arttırmak için en olağan yol, sıfır-doldurma olmaksızın, sinyali bu sürece daha uzun bir gözlem süresi için sokmaktır.

FFT işleminin kısıtlamalarından kurtulmak amacıyla, bir çok alternatif spektrum kesitim yöntemi önerilmiştir [24], [25]. MUSIC (multiple signal classification) gibi oto-regresif modelleme ve özvektör- temelli metotlar ve diğer süper-çözünürlüklü kestirim metotları, sinyalin spektrumunun kestirimi için kullanılabilmektedir. Buna karşın, onlar da, büyük boyutlu matris çarpımlarına veya yinelemeli optimizasyon tekniklerine ihtiyaç duymaktadır.

Hedefin hızını ve menzilini belirlemeyi amaçlayan eşfazlı darbe radarları için, zaman uzayı gözlem süresi, radarın darbe tekrarlama frekansı (pulse repetition frequency (PRF)) cinsinden $\Delta t = 1/PRF$ olarak elde edilmektedir. Böylelikle, darbe radarının gözlemleyebileceği en yüksek frekanslı bileşen

$$v_{max} = \pm \frac{\lambda PRF}{4} \quad (2.24)$$

ifadesi ile hesaplanabilmektedir. (2.23) denkliği ile verilen ve Nyquist hızı olarak adlandırılan değerden daha büyük hız bileşenleri bu değere göre (mod işlemi etkisi ile) katlanarak gözlemlenecektir. Ele alınan darbe-radarının algılayabileceği menzil değerleri ise,

$$r_{max} = \frac{c}{2PRF} \quad (2.25)$$

şeklinde tanımlanan maksimum belirsiz-olmayan menzil (maximum unambiguous range) ile sınırlı olarak elde edilecektir.

2.1.3. Mikro-Doppler Etkileri

Mikro-Doppler etkileri, esasında eşfazlı lazer (light amplification by stimulated emission of radiation)-temelli radar sistemlerinde karşılaşılmıştır. LADAR (Laser detection and ranging) sistemleri, nesneler üzerine optik frekanslı EM dalga yayarak, nesneden geri yansıyan ışık dalgasının genliği, frekansı, fazı ve hatta polarizasyonu üzerindeki modülasyonlarını inceleyerek nesnenin menziline, hızını ve diğer özelliklerini belirleyebilmektedir. Faz-uyumlu LADAR sistemleri, saçılan ışık dalgasının, yerel osilatörde üretilen bir referans lazer dalgasına göre fazı üzerindeki değişimi inceleyerek nesnenin hızını yüksek hassasiyetle belirleme yeteneğine sahiptir [3]. Bu sistemlerde, bir nesneden geri saçılan sinyalin fazının, menzil değerindeki değişime karşı çok hassas olması nedeniyle, dalgaboyunun yarısı kadar olan bir menzil değişimi 360° faz değişimine neden olabilmektedir. f_v frekanslı ve D_v genlikli bir titreşim durumunda, titreşim nedeniyle oluşacak maksimum Doppler frekans değişimi

$$\max \{f_D\} = \frac{2}{\lambda} D_v f_v \quad (2.26)$$

ifadesi ile elde edilmektedir. Sonuç olarak, yüksek frekanslı bir sistemde, çok düşük titreşim frekanslarında bile, çok küçük bir titreşim genliği büyük bir faz değişimine neden olabilmektedir. Bu nedenle de, Doppler frekans kaymaları rahatlıkla algılanabilmektedir. Birçok durumda, bir nesne veya bir nesnenin herhangi bir yapısal parçası, "mikro hareket" olarak adlandırılabilir ve salınımlar yapabilmektedir. Mikro hareketin kaynağı, bir uçağın dönel pervanesi, bir helikopterin dönel kanatları, dönel hareket yapan bir anten, kuşların kanat çırpışları, el ve kolları sallanarak yürüyen bir insan vb. etkenler olabilmektedir. Mikro hareket, radar sistemlerinin iletmiş olduğu sinyallerin taşıyıcı frekansı üzerinde değişimlere neden olmaktadır. Saf periyodik bir titreşim veya dönel hareket için, mikro hareket, taşıyıcı frekansın etrafında Doppler frekans kayması kaynaklı alt frekans bantları oluşturmaktadır. Mikro hareket nedeniyle oluşan modülasyon etkisi, taşıyıcı frekans değeri, titreşim veya dönel hareket sıklığı ve

hareket yönü ile saçıcıya gelen dalganın geliş açısı ile ilişkili olarak harmonik frekans bileşenleri üretmektedir. Oluşan frekans modülasyonları incelenerek, ele alınan nesnenin kinematik özellikleri belirlenebilmektedir [3]. Hedef sınıflandırma süreci amacıyla, pervane, dönel hareketli kanat ve jet motorunun oluşturacağı modülasyonun kullanılmasının uzun zaman önce önerilmiş olmasına karşın, zamanla değişen frekans modülasyonunun bir hedef izi olarak nasıl modelleneceği, oluşturulacak bu hedef izinden hedefin kinematik özelliklerinin hangi metotla çıkartılacağı ve hedef izinin sınıflandırma sürecinde nasıl kullanılacağı gibi konular halen araştırma başlıkları olarak güncelliğini korumaktadır.

2.1.4. Radarlarda Gözlemlenen Mikro-Doppler Etkisi

Mikro-Doppler etkisi sinyalin frekans bandına bağlıdır. Mikrodalga bandında çalışmakta olan bir radar sistemi için, mikro-Doppler etkisi, hedefin salınım frekansı ile salınım genliğinin çarpımının yeterince yüksek olması durumunda gözlemlenebilir olabilir. X-bantta çalıştırılan iletim dalgaboyu 3-cm olan bir radarda, salınım frekansı 15 Hertz ve yer değiştirme miktarı 0.3 cm olan bir salınımın oluşturabileceği maksimum mikro-Doppler frekans kayması 18.8 Hertz olarak gözlemlenecektir. 10-cm dalgaboyu ile iletim yapan L-bant bir radar sistemi için, aynı değerli maksimum mikro-Doppler frekans kaymasının gözlemlenmesi için, 15 Hertz’lik salınım frekansı için gerekli yer değiştirme miktarı 1 cm olmalıdır ki, bu değer pratikte karşılaşılmak için çok büyüktür. Bu nedenle, alçak-frekanslarda çalıştırılan radar sistemlerinde, titreşim kaynaklı mikro-Doppler etkileri tespit edilemeyecektir. Buna karşın, dönel hareketli kanatlar, dönme eksenine göre uzun kanatları ve yüksek hızlı uç noktaları nedeniyle radarda tespit edilebilir seviyede mikro-Doppler kaymaları oluşturabilmektedir. 300-1000 MegaHertz (MHz) arası ultra-high frequency (UHF) bandında çalışan ve ağaçların altında hedeflerin tespitini sağlayan FOPEN (“Foliage Penetration”) radarlarında, hedef hareketliliği nedeniyle oluşan mikro-Doppler kaymaları tespit edilemeyecek kadar düşük seviyelerde kalmaktadır. Buna karşın, dönel kanatlar veya pervaneler nedeniyle oluşacak mikro-Doppler kaymalarının radarda tespit edilmeleri mümkün olmaktadır. UHF bandında 0.6 m dalgaboyu ile iletim yapan bir radar sistemi için, helikopter dönel kanatlarının 200 m/s kanat ucu hızı ile dönmesi durumunda, gözlemlenebilecek maksimum mikro-Doppler frekans

kayması değeri 666 Hertz gibi hatırı sayılır seviyede oluşacaktır.

2.1.5. Mikro-Doppler Frekans Kaymalarının Kestirimi ve Analizi

Mikro-Doppler frekans kayması, klasik Doppler sinyal işleme sürecinde kullanılan I-Q detektörün çıkışındaki kompleks sinyalden çıkartılabilen zamanla değişen bir frekans değeridir. Zamanla değişen frekans niteliklerinin incelenmesi noktasında, FFT yöntemi, zamana bağlı bir değişim çıktısı üretmediği için uygun görülmemektedir. Bir sinyali eş-zamanlı olarak hem zaman uzayında hem de frekans uzayında ifade etmeye yarayan analiz metotları anlık frekans analizi ve birleşik zaman-frekans analizidir. Sıklıkla kullanılan bir ani frekans tanımı, analitik sinyalin reel ve imajiner kısımlarını oluşturmak amacıyla Hilbert dönüşümü çiftini kullanmaktadır [26]. Zamana bağlı türevleme işlemi yardımıyla türetilen ani frekans değeri, verilen bir zamana ait yalnızca tek bir frekans değeri vermektedir. Bu da, bu yöntemin çoklu-frekans bileşenli sinyaller için değil de, sadece tek bir frekans bileşeni olan sinyaller için uygun olduğunu göstermektedir. Tek bir frekans bileşenli sinyal, ele alınan her bir zaman anında dar-bantlı olmakta ve birleşik zaman-frekans uzayında sınırlı ve değişkenlik arz eden bir bölgede enerjiye sahip olmaktadır. Bu durumun tersine, çoklu-frekans bileşenli sinyal, aynı zamana anında birçok bağımsız frekans bandında enerjiye sahip olabilmektedir. Bu tür sinyalleri inceleyebilmek amacıyla geliştirilen açık bir yöntemde, çoklu-frekans bileşenli sinyallerin, toplanabilir çok sayıda tek-frekans bileşenli sinyale ayrıştırılması konu alınmıştır [27]. Sinyale ilişkin nihai zaman-frekans dağılımı, her bir frekans bileşenine ait ani frekans değerinin hesaplanması ve bu değerlerinin toplanması neticesinde elde edilmektedir. Birleşik zaman-frekans analizi, sinyalin zaman ve frekans uzayında tanımlı enerji dağılımının lokalize edilmesini amaçlamaktadır [28]. Bu yaklaşım, çoklu-frekans bileşenli sinyaller için olduğu gibi, tek-frekans bileşenli sinyaller için de uygundur.

2.1.5.1. Ani Frekans Analizi

Reel değerli $s(t)$ sinyali için, karşılık gelen kompleks değerli sinyal

$$z(t) = s(t) + jH\{s(t)\} = a(t) \exp [\varphi(t)] \quad (2.27)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir [3]. Burada, $H\{\cdot\}$ Hilbert dönüşümü operatörünü temsil etmekte ve reel değerli $s(t)$ sinyali için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$H\{s(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (2.28)$$

(2.27) ifadesinde $z(t)$, reel $s(t)$ sinyali ile ilişkili analitik sinyali, $a(t)$ ve $\varphi(t)$ ise sırasıyla, analitik sinyale ilişkin genlik ve faz fonksiyonlarını temsil etmektedir. Bu nedenle, $z(t)$ sinyalinin anlık frekansı, $\varphi(t)$ ile verilen faz fonksiyonunun zamana göre türevi yardımıyla elde edilebilmektedir:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \varphi(t) \quad (2.29)$$

Pratikte, sürekli bir sinyal yerine, $t = n\Delta t$, $n = 1, 2, \dots, N$, ayrık zaman örneklerinde tanımlı olan ve $s(n)$ olarak ifade edilen ayrık reel değerli sinyal kullanılacaktır. Buna göre, kompleks sinyal ifadesi

$$z(n) = s(n) + jH\{s(n)\} \quad (2.30)$$

şeklinde olacaktır. Ayrık bir sinyal için, anlık frekans değeri (2.28)'e benzer şekilde, ancak ayrık faz değerlerinin türevleri şeklinde tanımlanacağından, faz fonksiyonuna ilişkin merkezi sonlu farklar denklemi cinsinden kestirilebilmektedir [13]:

$$f(n) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{2\Delta t} [\varphi(n+1) - \varphi(n-1)]_{2\pi} \quad (2.31)$$

Burada, Δt zaman örnekleme aralığını, $[\cdot]_{2\pi}$ ise 2π 'ye göre mod alma operatörünü temsil etmektedir.

2.1.5.2. Birleşik Zaman-Frekans Analizi

Bir sinyalin spektral içeriği zamanın fonksiyonu olarak değişiyorsa, klasik Fourier dönüşümü zamana-bağılı bir spektral tahlil yapma noktasında yetersiz

kalmaktadır. Bu nedenle, birleşik bir zaman-frekans analizi, sinyalin zamana bağlı spektral değişimi hakkında bilgi ve bakış açısı sağlayabilecektir.

1948 yılında, Nobel ödüllü bir Macar olan Dennis Gabor, herhangi bir sinyalin zaman-frekans analizine ilişkin ilk algoritmayı önermiştir [30]. Gabor, $s(t)$ sinyalinin zaman ve frekans karakteristiklerinin

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{mn} G(g, n, m,) \quad (2.32)$$

açılımı ile eş-zamanlı olarak gözlemlenebileceğini belirtmiştir. (2.30) ifadesinde verilen Gabor fonksiyonu $G(g, n, m)$, bir Gauss pencere fonksiyonu olan $g(t) = \frac{1}{\pi^{1/4} \sqrt{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$ cinsinden

$$G(g, n, m) = g(t - m\Delta T) e^{jn\Delta F t} \quad (2.33)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [3]. Burada ΔT ve ΔF , sırasıyla zaman ve frekans aralıklarını temsil etmektedir. Gabor, zaman-frekans çözümlemesinde kullanılan $G(\cdot)$ baz fonksiyonlarının birleşik zaman-frekans düzleminde minimum yer kapladıklarını iddia etmiştir.

Spectrogram, zamanla değişen bir sinyalin zaman-bağımlı spektral yoğunluğunu incelemek amacıyla kullanılan diğer bir yaygın kullanılan metottur. Bu, spektro-zamansal bir gösterimdir ve sinyalin esas spektral içeriklerinin zamanla değişimini sağlamaktadır. Spectrogram, KZFD metodu kullanılarak oluşturulan kompleks verinin mutlak değerinin karesi hesaplanarak sunulmaktadır:

$$Spectrogram(t, f) = |KZFD(t, f)|^2 \quad (2.34)$$

KZFD metodu ile, klasik Fourier dönüşümünden farklı olarak, zaman sinyalini bütün gözlem süresi üzerinden dönüşüme tabi tutmak yerine, birbiri ile örtüşen veya örtüşmeyen kısa-süreli zaman pencereleri boyunca dönüşüme tabi tutmaktadır. Zaman-sınırlı pencere fonksiyonu sayesinde, KZFD işleminin çözünürlüğü pencere uzunluğu ile ayarlanabilmektedir. KZFD metodu için, zaman ve frekans

Çözünürlükleri arasında bir ödünleşim mevcuttur. Geniş bir pencere fonksiyonu, yüksek frekans çözünürlüğüne karşın düşük zaman çözünürlüğü sağlamaktadır. Gabor dönüşümü, zaman ve frekans çözünürlüğü değerlerinin çarpımlarının minimum olduğı ve Gauss tipi pencere fonksiyonun kullanıldığı tipik bir KZFD sürecidir.

3. DÖNEL KANAT SAÇILMA MODELİ

Tezin bu bölümünde, helikopter ve rüzgar türbini gibi dönel hareketli kanatların oluşturacağı saçılma etkilerinin modellenmesi noktasında temel bazı bilgiler sunulmaktadır. Kanatlardan kaynaklanacak saçılmanın karakteristiğinin incelenmesi amacıyla, sırasıyla RKA kavramından ve literatürde ele alınan ve çeşitli hesaplamalı EM metotta kullanılan RKA kesitirm yöntemlerinden bahsedilmiştir. RKA kavramı hakkında bilgi altyapısı sağlandıktan sonra, helikopter kanatlarından kaynaklanacak saçılma sinyallerinin matematiksel modelinden bahsedilmiştir. Burada, tez çalışması içerisinde sıklıkla dönel hareketli kanatlar helikopter kanadı olarak düşünülse ve görselleştirilse de, ele alınan problem ve elde edilecek çıkarımlar ve sonuçlar, farklı bir bakış açısı için rüzgar türbinleri gibi yüksek saçıcılık değerine sahip ve büyük cisimler için de benzerlik gösterecektir.

3.1. RKA Kavramı

Radar sistemlerinin vericilerinden yayılan EM dalgaların nesneleri aydınlatması durumunda, EM saçılma meydana gelmektedir. Gelen EM dalgalar, hedef nesnenin yüzeyinde ve/veya hacminin içerisinde akımlar indüklenmesine ve sonrasında da saçılan EM alanların oluşmasına neden olmaktadır. Saçılan EM alanlar birçok muhtemel noktaya iletilebilmektedir. Hedefin yeterince uzak bir noktada bulunması durumunda, hedefe ulaşan EM dalga cephesinin düzlemsel dalga olduğu düşünülebilmektedir. Saçılan EM dalgaların gücü, hedefin bi-statik saçılma kesit alanı cinsinden ifade edilebilmektedir. Saçılma yönünün radar yönü olması durumunda, bi-statik saçılma geri-saçılma ve kesit alanı ise geri-saçılma kesit alanı veya diğer bir deyişle radar kesit alanı (RKA) olmaktadır.

Literatürde bulunan birçok kitap, makale ve teknik terimler sözlüğünün tanımlamalarına göre, RKA, bir hedefin saçıcılık kabiliyetinin bir ölçüsüdür [31]. RKA, tanım itibarıyla

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada, r , radar ile hedef arasındaki mesafeyi, E_i ve

E_s , sırasıyla, hedef nesnenin üzerine gelen ve nesneden saçılan EM dalgaları ifade etmektedir.

RKA değeri, hedefin saçılma karakteristiği hakkında bilgi vermektedir. Bu değer, hedefin bulunduğu noktada, hedeften saçılan ve hedefe gelen EM dalgaların şiddetlerinin oranları olarak tanımlanmış olup, radar - hedef arası mesafe değerine de normalize edildiği için, r değerine bağıllık göstermemektedir. RKA değeri, hedefin boyutlarına, geometrisine, içerdiği malzeme karakteristiğine, radarın çalışma frekansına, polarizasyona ve hedefin alıcı ve verici antenlere göre oryantasyonuna bağıllık göstermektedir [31]-[33].

Bir hedeften gerçekleşen EM saçılma mekanizması, yansımaları, kırınımları, yüzey dalgalarını, oluklama (*ducting*) ve bu etkiler arasındaki etkileşimleri içeren komplike bir yapıya sahiptir. Yüzeylerden gerçekleşen yansımalar, diğer saçılma mekanizmaları içerisinde en baskın bileşenleri oluşturmaktadır. Özellikle keskin kenarlar ve köşeler gibi süreksizlik noktalarından gerçekleşen kırınım etkileri, yansımalara kıyasla daha düşük şiddetlerde gözlemlenmektedir. Yüzey dalgası, bir hedefin yüzeyi boyunca ilerleyen akıma ilişkin EM dalgayı temsil etmektedir. Düzgün bir yüzey sızıntı şeklinde dalgalar oluştururken, kıvrımlı yüzeyler sürünen dalgalar oluşturmaktadır. Oluklanma ise, EM dalgaının dalga-kılavuzu benzeri yapıların içerisine girdiğinde oluşmaktadır. RKA karakteristiğinde keskin çıkışlar ve yan loblar ise, çok sayıda yansımalar, kırınım ve diğer saçılma mekanizmalarının gözlemlenmesi ile ilişkilendirilmektedir.

3.2. RKA Kestirim Yöntemleri

Literatürde, belirli geometrik cisimlerin ve çeşitli platformların RKA karakteristikleri birçok çalışmada farklı birçok hesaplama yöntemi kullanılarak ele alınmıştır. Cisim üzerine gelen EM dalgaının indüklediği akıma ilişkin dağılımın bilindiği durumda, dağılım ifadesi, cisimden saçılan EM alanının ve RKA değerinin türetilmesi amacıyla radyasyon integrali ifadesine yerleştirilebilmektedir. RKA kestirimi için sıklıkla kullanılan metotlar, PO, ışın izleme, moment metodu ve sonlu-farklar metotlarıdır [33].

PO yöntemi, bir yüksek-frekans yaklaşımı olup, cisimlerin yüzeyinde indüklenen akımların kestirimini sağlamaktadır. Bu yöntem, birincil yansımanın

oluşabileceği bölgelerde verimli iken, dar bakış açılarında ve gölgelenmiş alanlarda verimsizdir. Bunun yanında, PO metodu, yüzey dalgalarını değerlendirmeye katmamaktadır. Cismin kenar noktalarındaki akım yoğunlukların verimli olarak hesaplanabilmesi için, Fiziksel Kırınım Teorisi (FKT; Physical Theory of Diffraction (PTD)) kullanılmaktadır.

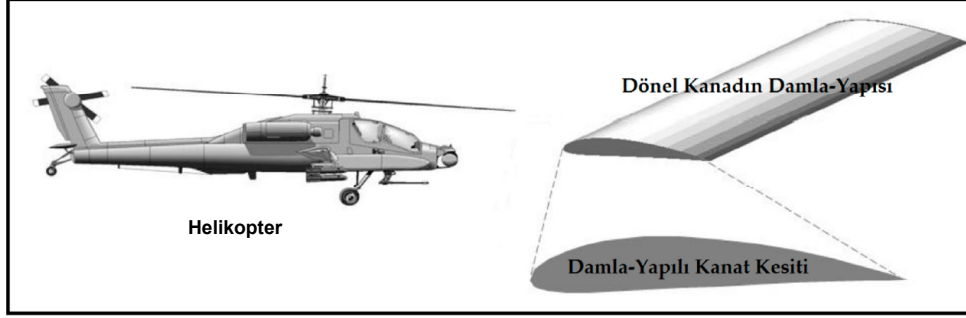
Işın-izleme metodu, büyük ve gelişigüzel geometriye sahip cisimlerin incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır. GO, ışın-izlemenin genel teorisini oluşturmakta olup, yansıyan ve refrakte olan alanların hesaplanması için bir formül sağlamaktadır. Bu yöntemin de kırınım etkilerini dahil edecek şekilde iyileştirilmesi amacıyla Geometrik Kırınım Teorisi (GKT; Geometric Theory of Diffraction (GTD)) kullanılabilir. Karmaşık geometriye mükemmel iletken cisimlerden gerçekleşen yüksek-frekanslı saçılmaların hesaplanması amacıyla, GTD, PTD ve bu yöntemlerin hibrit versiyonlarına dayalı hesaplama kodları geliştirilmiştir.

Seken Işın Yöntemi (SIY; Shooting-and-bouncing Rays (SBR)) ve PTD yöntemlerini içeren XPATCH hesaplama kodu, bir hedefin RKA izlerini belirlenmesi ve sonrasında da sınıflandırılması amacıyla geliştirilmiştir [34]. Bu kod, karmaşık geometrilere geri-saçılmaların hesaplanmasına olanak vermektedir. Diğer bazı hesaplama algoritmaları, Hollanda'da geliştirilen RAPPORT kodu ve elektrik alan integral denklemi ile zaman-uzayında sonlu farklar yöntemlerine dayanan NEC (numerical electromagnetic code) kodudur [33].

Ayrıca, PO-temelli bazı RCD kestirim algoritmaları da mevcuttur. Bunlar arasında, sabit bir cismin mono-statik ve bi-statik RKA değerini hesaplayan "POFacet" algoritması [35] bulunmaktadır. Bu yöntemde, RKA değeri hesaplanacak nesne yaklaşık olarak çok büyük sayıda yüzey parçalarına (üçgen ızgaralara) bölünerek modellenmekte ve toplam RKA değeri, her bir alt parçanın RKA değerinin toplamının karekökü olarak elde edilmektedir. Her bir üçgen yüzeyin RKA değeri ise, diğer üçgen yüzeyler yokmuşcasına sadece söz konusu yüzeyin varlığı durumunda hesaplanmaktadır. Bunun yanı sıra, üçgen yüzeyler arası çoklu etkileşim, kenar kırınım etkileri ve yüzey dalgaları dikkate alınmamaktadır. Yalnızca, gölgeleme etkisi, her bir yüzeyin gelen EM dalga için yaklaşık olarak gölgelenmiş veya aydınlatılmış olduğuna karar vererek hesaba katılmaktadır.

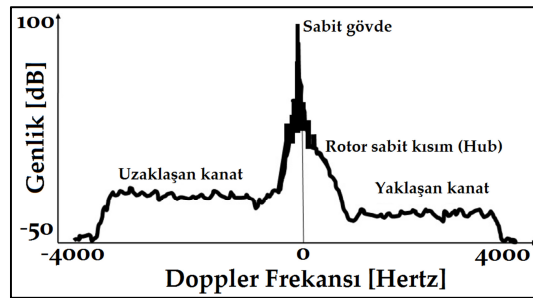
3.3. Helikopter Kanatlarına İlişkin Saçılma Sinyali Modeli

Bir helikopter kanadının damla yapısı ve RKA karakteristiği Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1: Bir helikopter kanadının damla-yapısı için temsili gösterim.

Farklı tipte damla-yapılı kanatlar çok farklı şekillere ve boyutlara sahip olmaktadır. Helikopter kanatları, çoğunlukla, yüksek radar yansıtıcılığına sahip metal veya kompozit malzemeden oluşmaktadır. Damla-yapılı helikopter kanadından gerçekleşecek EM saçılma, büyük oranda, düzgün kanat yüzeylerinden kaynaklanan yansımalar ve iz süren keskin kenarlardan kaynaklanan kırınım etkilerinden oluşmaktadır. Helikopterlerden kaynaklanan geri-saçılmalar eşsiz spektral imzalarını barındırmaktadır [36]. Şekil 3.2, dönel hareketli kanatları olan bir helikoptere ilişkin örnek bir spektral imza resmedilmiştir.

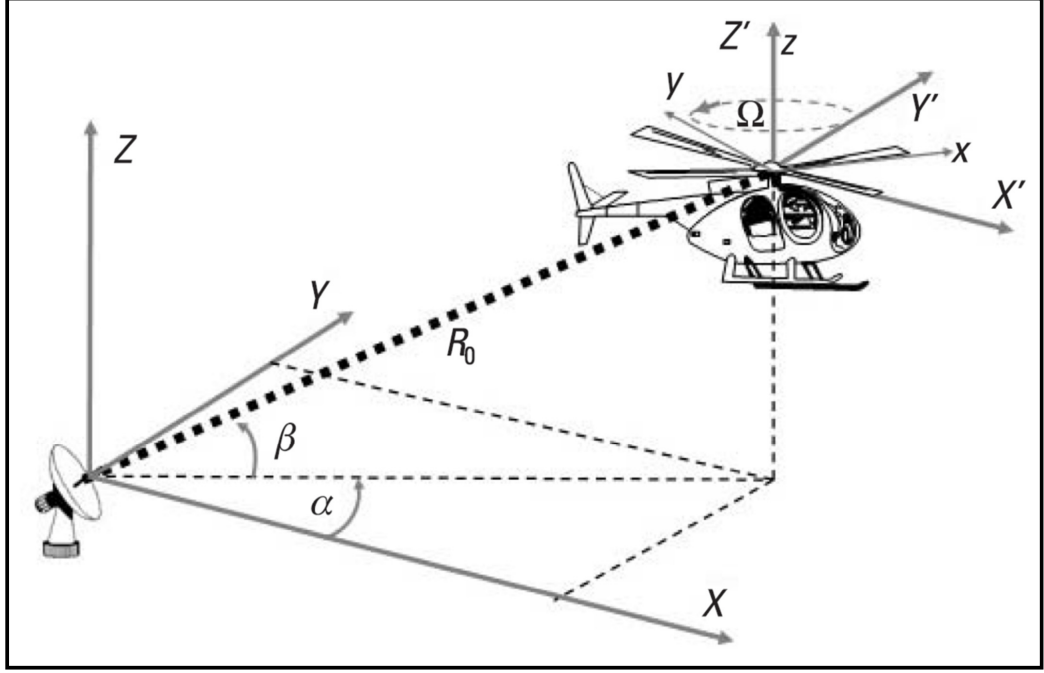


Şekil 3.2: Helikopter saçılmasına ait temsili bir Doppler spektrumu gösterim.

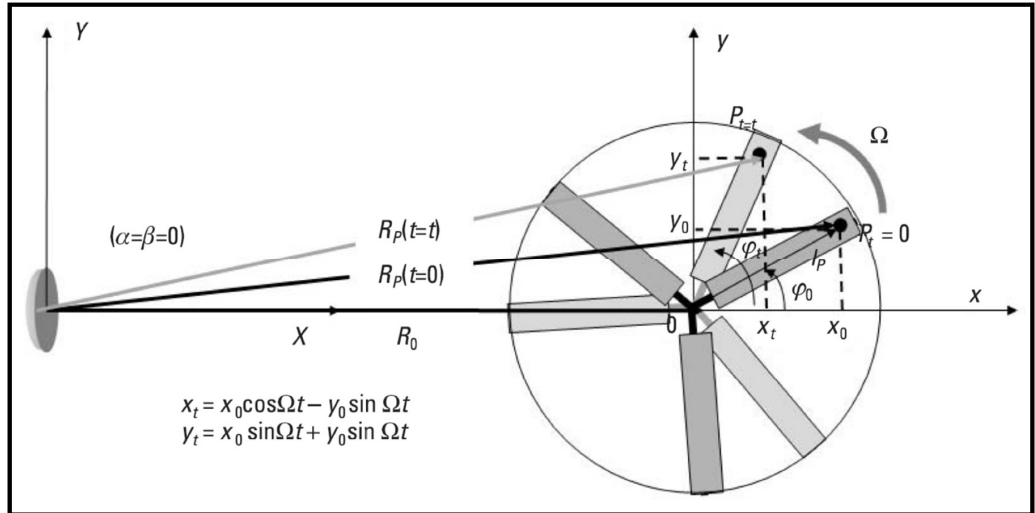
Spektral imza incelendiğinde, sabit gövdeden kaynaklanan düşük frekanslar civarında yoğunlaşmış bileşenlerin, buna ek olarak rotorun sabit kısmından, yaklaşan ve uzaklaşan kanatlardan kaynaklanan bileşenlerin bulunduğu görülmektedir.

Bileşenlerin en güçlüsü, düşük frekanslar civarında yoğunlaşmaya neden olan sabit gövdeye aittir. Ayrıca, şekilden görüldüğü gibi, yaklaşan ve uzaklaşan kanatlar için geometriler özdeş olmadığı için, farklı kırınım etkilerinin, Doppler spektrumunda yaklaşan ve uzaklaşan kanatların etkileri arasında farklılığa neden olmaktadır.

Radar ve dönel hareketli kanatlara ilişkin geometri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Kartezyan koordinatlarda radar - helikopter konumlarının gösterimi.



Şekil 3.4: Radar - helikopter kanatları arası X-Y düzlemi gösterimi.

Radar sistemi, (X, Y, Z) ile gösterilen üç boyutlu Kartezyan koordinat sisteminin merkezinde yer almaktadır. Dönel hareketli kanatlar ise $(x, y, z = 0)$ düzlemi üzerinde z eksenini etrafında Ω açısal hızı ile dönmekte olan (X', Y', Z') düzleminin merkezini ortalayacak şekilde yerleştirilmiştir. (X', Y', Z') referans koordinatlar, (X, Y, Z) standart Kartezyan koordinatlara, helikopter kanatlarının fiziksel özellikleri ve dönme hızı cinsinden dönüştürülebilmektedir. Şekil 3.3'ten görüldüğü gibi, helikopter gövdesinin (dönme merkezinin) radar sistemine göre uzaklığı R_o , dikey bakış açısı β ve yatay bakış açısı α olarak ifade edilmektedir.

EM saçılma fenomeni açısından bakıldığında, her bir kanat, saçılma merkezlerinden oluşmaktadır. Her bir saçılma merkezi belirli bir yansıtıcılığa sahip bir nokta olarak değerlendirilmektedir. Basitlik olması amacıyla, bütün saçılma merkezleri için eşdeğer yansıtıcılık değeri kabul edilebilmektedir. Dikey ve yatay bakış açılarının sıfır olması ($\beta = \alpha = 0^\circ$) durumunda, $(x_o, y_o, z_o = 0)$ noktasında bulunan ve (X', Y', Z') koordinat sisteminde z eksenini etrafında Ω açısal hızı ile dönmekte olan bir P noktasal saçıcı için, dönme merkez noktasında olan uzaklık $l_P = \sqrt{x_o^2 + y_o^2}$ olarak hesaplanmaktadır. P noktasının başlangıç ($t = 0$) anında dönme açısının φ_o olması durumunda, herhangi bir t anında dönme açısının değeri $\varphi_t = \varphi_o + \Omega t$ olmakta ve P noktasal saçıcısının Kartezyan koordinatları $(x_t, y_t, z_t = 0)$ olarak ifade edilmektedir:

$$x_t = x_o \cos \Omega t - y_o \sin \Omega t \quad (3.2)$$

$$y_t = x_o \sin \Omega t + y_o \cos \Omega t \quad (3.3)$$

Böylelikle, radar ile P noktası arasındaki mesafe

$$R_P(t) = \{R_o^2 + l_P^2 + 2R_o l_P \cos(\varphi_o + \Omega t)\}^{1/2} \\ \approx R_o + l_P \cos \varphi_o \cos \Omega t + l_P \sin \varphi_o \sin \Omega t \quad (3.4)$$

şeklinde elde edilebilmektedir. Bu ifadenin yaklaşık olarak türetilmesinde, uzak alanda $\left(\frac{l_P}{R_o}\right)^2 \rightarrow 0$ limit durumu kullanılmaktadır. (3.4) denklemi ile ifade edilebilen mesafe terimi elde edildikten sonra, P noktasından saçılan radar sinyali

$$s_R(t) = \exp \{ -j [2\pi f_c t + \Phi(t)] \} \quad (3.5)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada, $\Phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} R_P(t)$ saçıcının faz fonksiyonunu temsil etmektedir. Dikey ve yatay bakış açılarının sıfırdan farklı ($\beta \neq 0, \alpha \neq 0$) olması durumunda ise, faz fonksiyonu

$$\Phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda} [R_o + \cos \beta (l_P \cos \varphi_o \cos \Omega t + l_P \sin \varphi_o \sin \Omega t) + z_o \sin \beta] \quad (3.6)$$

şeklinde güncellenmektedir. (3.6) denkleminde verilen faz fonksiyonu kullanıldığında, P noktasından radara dönen sinyal

$$s_R(t) = \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi}{\lambda} [R_o + z_o \sin \beta] \right] \right\} \times \exp \left\{ -j \left[2\pi f_c t + \frac{4\pi}{\lambda} l_P \cos \beta \cos(\Omega t + \varphi_o) \right] \right\} \quad (3.7)$$

olarak ifade edilmektedir. P noktasından radara dönen sinyalin temelbant eşdeğeri aşağıdaki gibi elde edilmektedir [6]:

$$s_B(t) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_o + z_o \sin \beta] \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} l_P \cos \beta \cos(\Omega t + \varphi_o) \right\} \quad (3.8)$$

(3.8) ifadesi bütün kanat uzunluğu L üzerinden entegre edildiğinde, nihai temelbant sinyal

$$s_L(t) = L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_o + z_o \sin \beta] \right\} \exp \left\{ -j \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos(\Omega t + \varphi_o) \right\} \times \text{sinc} \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos(\Omega t + \varphi_o) \right) \quad (3.9)$$

olarak elde edilmektedir. Toplam N adet kanadı bulunan bir helikopter için, her bir kanadın başlangıç açısı $\theta_k = \theta_0 + \frac{2\pi k}{N}$, $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ da dikkate alınarak, toplam radar sinyali bütün kanatlardan kaynaklanacak saçılma sinyallerinin toplamı şeklinde elde edilmektedir:

$$s_{\Sigma}(t) = L \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} [R_o + z_o \sin \beta] \right\} \sum_{k=0}^{N-1} \exp \{ -j \Phi_k(t) \} \times \text{sinc} \left(\frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos(\Omega t + \varphi_o + 2\pi k/N) \right) \quad (3.10)$$

(3.10) denkleminde verilen faz fonksiyonu

$$\Phi_k(t) = \frac{2\pi L}{\lambda} \cos \beta \cos(\Omega t + \varphi_o + 2\pi k/N), k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Faz fonksiyonunun zamana göre türevi, sinyalin anlık frekansını vereceği için, (3.11) ifadesinin zamana göre türevi, k . kanat nedeniyle oluşacak anlık Doppler frekans kayması değerini verecektir:

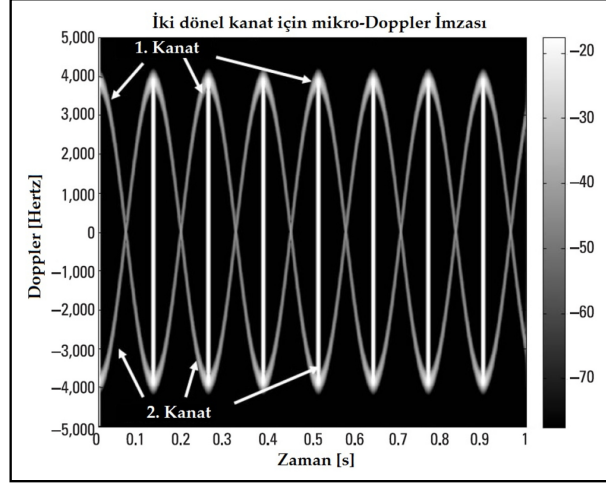
$$f_{D,k}(t) = \frac{L}{\lambda} \Omega \cos \beta \left[\cos(\Omega t) \cos \left(\varphi_o + \frac{2\pi k}{N} \right) - \sin(\Omega t) \sin \left(\varphi_o + \frac{2\pi k}{N} \right) \right] \quad (3.12)$$

(3.12)'den görüldüğü gibi, Doppler frekansı iki sinüsoidal fonksiyonu, açısal dönme hızı ile modüle etmektedir. Dönel hareketli kanatların oluşturduğu Doppler modülasyonu, helikopterlerin eşsiz imzaları olarak değerlendirilmektedir [37], [38]. Doppler modülasyonunun birleşik zaman-frekans uzayında incelenmesi ile, dönel kanatların oluşturduğu mikro-Doppler etkileri gözlemlenebilmektedir. Şekil 3.5'te iki kanatlı dönel harekete ilişkin verilen mikro-Doppler karakteristiğinden görüleceği gibi, bütün gözlem süresi boyunca her iki kanat için sekizer dalga tepesi oluşmaktadır.

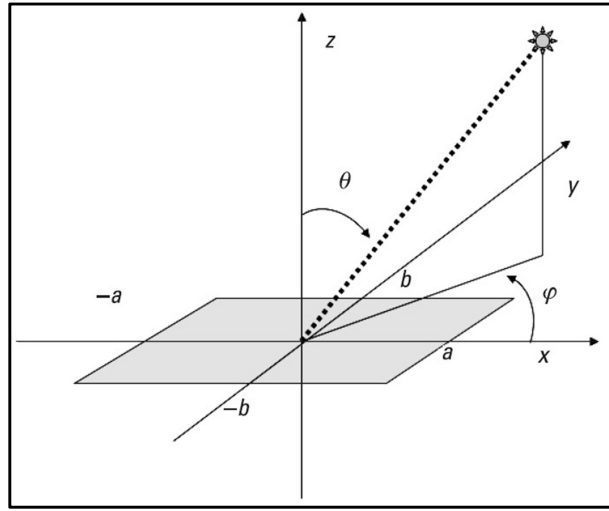
Dönel hareketli kanatlardan kaynaklanan EM saçılmaların hesaplanması noktasında basitlik sağlanması adına, Şekil 3.1'de verilen dönel kanat modeli, diğer keskin ve kıvrımlı aksamaları gözardı edilerek, sabit açısal hızla belirli bir eksen etrafında dönen homojen doğrusal dikdörtgen düzgün plaka modeline indirgenmiştir. Bu amaçla ele alınan kanada ilişkin geometri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekil 3.6'da resmedilen düzgün dikdörtgen plakanın mükemmel-iletkenlik varsayımı altındaki RKA karakteristiğine ilişkin matematiksel ifade [39]'da verilmiştir. [39]'da söz konusu dikdörtgen plaka için verilen yaklaşık RKA ifadesi

$$\sigma = \sigma_M \sigma_{OR} = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \left(\cos \theta \frac{\sin x_k \sin y_k}{x_k y_k} \right)^2 \quad (3.13)$$

şeklinde maksimum genliği ifade eden σ_M ve radar - dikdörtgen plaka oryantasyonuna bağlı σ_{OR} faktörlerinden oluşmaktadır. Burada, $\sigma_M = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2}$, $\sigma_{OR} = \left(\cos \theta \frac{\sin x_k}{x_k} \frac{\sin y_k}{y_k} \right)^2$, $x_k = \frac{2\pi a}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi$ ve $y_k = \frac{2\pi b}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi$ olarak ifade edilmektedir. (3.13)'te verilen RKA ifadesi, polarizasyondan bağımsız olarak, küçük gözlem açı değerleri ($\theta \leq 20^\circ$) için yüksek tutarlılık sergilemektedir.



Şekil 3.5: İki dönel kanat için oluşacak mikro-Doppler etkisinin temsili gösterimi.



Şekil 3.6: Basitleştirilmiş dikdörtgen dönel kanat modeli.

Böylelikle, (3.10) denklemi ile, dönel kanatlardan kaynaklanacak saçılma sinyallerinin genlikleri, (3.13)'te verilen yaklaşık RKA değerleri ile ifade edildiğinde, N adet dönel hareketli kanadın oluşturacağı toplam saçılma sinyali ifadesi elde edilmiş olacaktır.

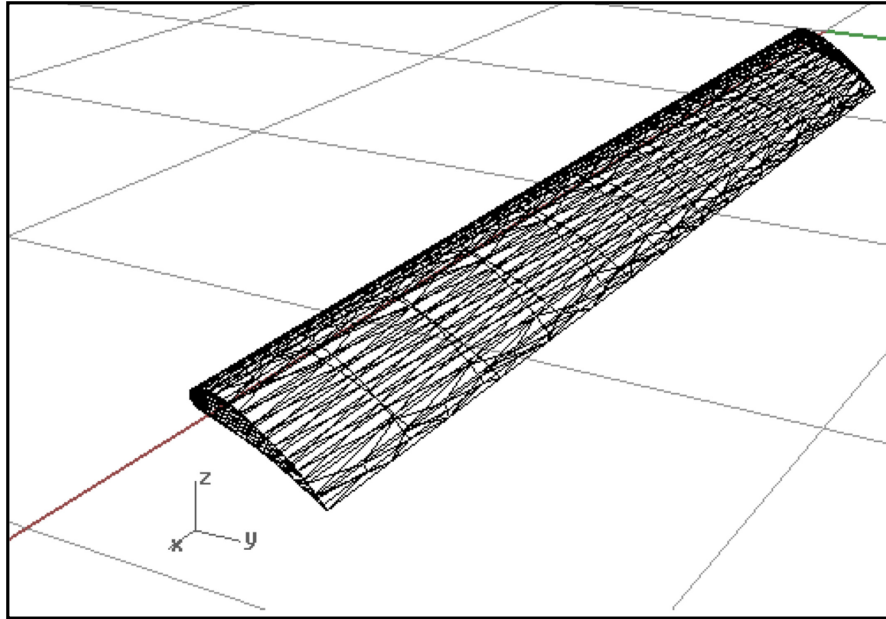
4. ANALİZ VE SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, kare plaka ve damla-yapılı dönel kanat modelleri için RKA ve Doppler karakteristiklerinin kanat geometrisi, polarizasyon, kanatların eğimi, kanatların sayısı ve frekans etkilerine göre değişimleri alt başlıklar halinde incelenecektir. RKAY yazılımının sağladığı simülasyon ortamında, her bir kanat dönüş açısı veya zaman anı için elde edilen saçılan elektrik alan değerleri, MATLAB ortamında hazırlanan ve frekans spektrumu ile birleşik zaman-frekans spektrumunu incelemeye yarayan sinyal işleme bloğu için giriş verisi olma özelliği taşımaktadır.

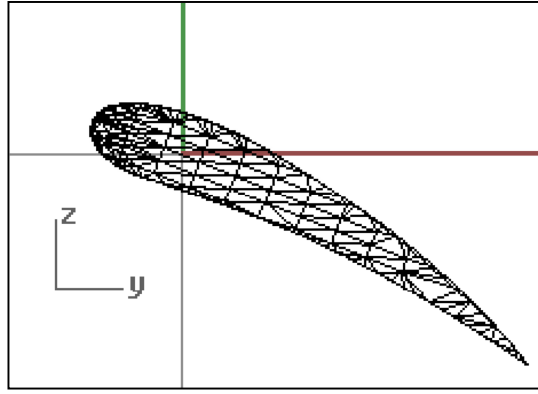
Tez kapsamında yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen ve türetilen RKA ve Doppler karakteristiklerine ilişkin sonuç grafikleri ve tablolar sunulmuştur.

4.1. Dönel Kanatların Özellikleri

Analizlerde kullanılan dönel kanat modeli, RHINOCEROS programı ile 3.34 m uzunluğunda ve 0.3 m genişliğinde olacak şekilde oluşturulmuştur. Damla-yapılı kanat modelin perspektiften ve yandan görünümü sırasıyla aşağıda Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (CAD (computer-aided design) gösterimi-1).



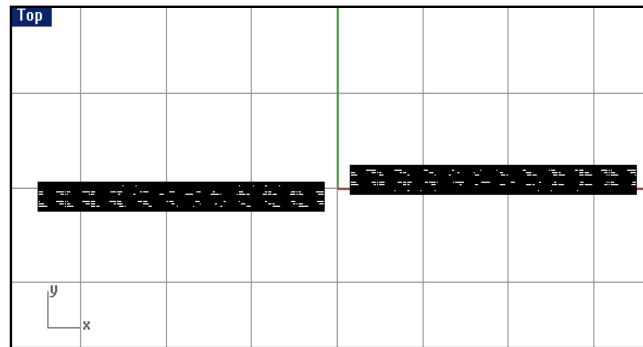
Şekil 4.2: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (CAD gösterimi-2).

Şekil 4.1 ve 4.2’de sırasıyla perspektif görünümü ve $Y - Z$ düzlemindeki kesit görünümü verilen dönel kanatlara ait fiziksel özellikler Tablo 4.1’de verilmiştir.

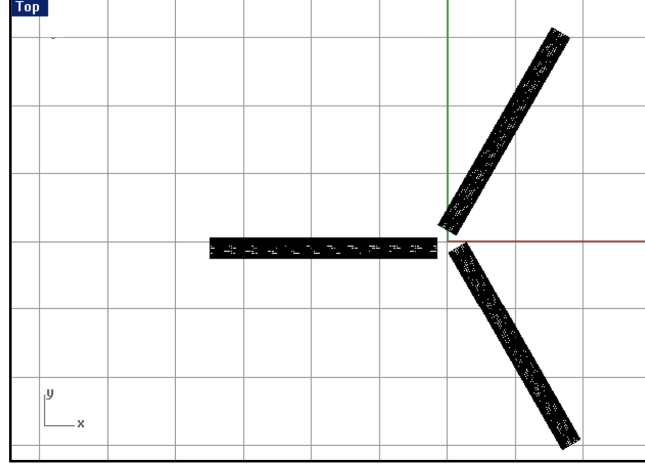
Tablo 4.1: Damla-Yapılı Kanat Modeline İlişkin Fiziksel Özellikler.

Dönel Kanat Sayısı (M)	1	2	3	4
Dönel Kanatlar Arası Açı (α) [$^{\circ}$]	-	180	120	90
Dönel Kanatın Orjine Olan En Yakın Mesafesi (L_0) [m]	0.15	0.15	0.15	0.15
Dönel Kanadın Boyu (L_1) [m]	3.34	3.34	3.34	3.34
Dönel Kanadın Eni (L_2) [m]	0.3	0.3	0.3	0.3

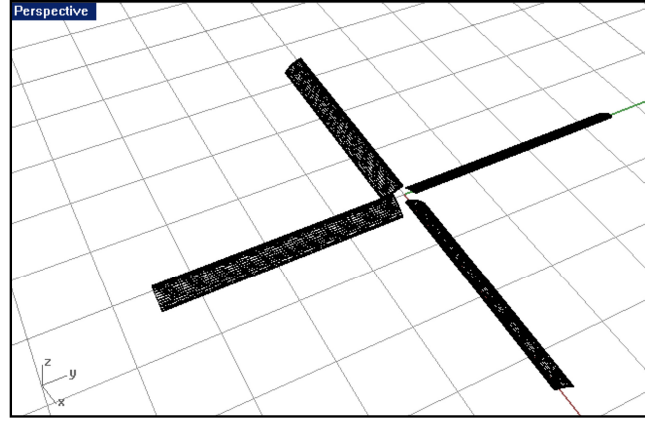
Analizlerde kullanılan 2-, 3- ve 4-kanatlı geometrinin üstten görünümü Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’te verilmiştir.



Şekil 4.3: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (2-kanatlı model).



Şekil 4.4: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (3-kanatlı model).



Şekil 4.5: Analiz ve simülasyonlarda ele alınan damla-yapılı kanat modeli (4-kanatlı model).

4.2. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, Bölüm 4.1’de geometrik özellikleri ve CAD modeli verilen damla-yapılı kanat modelinin kullanıldığı farklı senaryolar için simülasyonlar RKAY yazılımı ortamında gerçekleştirilmiş ve kanatlardan kaynaklanan EM saçılan elektrik alan değerleri zamana (veya kanat dönme açısına) bağlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen elektrik alan değerleri kullanılarak, kanatların RKA değişimi, kanatlardan kaynaklanan Doppler etkilerini kabaca gösteren Doppler spektrumu ve zamana bağlı Doppler frekans kaymalarını daha ayrıntılı şekilde gösteren birleşim zaman-Doppler görüntüleri oluşturularak sırasıyla sunulmuştur.

Aşağıda Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te simülasyon senaryolarına ait parametreler

verilmektedir. Analiz-4'te kanat modeli olarak dikdörtgen metal levha kullanılırken diğer tüm analizlerde damla-yapılı kanat modeli kullanılmıştır.

Tablo 4.2: Simülasyon Senaryolarına İlişkin Parametreler.

Analiz No.	1	2	3	4	5	6
Dönel Kanat Sayısı (M)	4	3	1	1	2	2
Frekans [GHz]	5	5	5	5	5	5
Dönel Kanatların Eğimi [$^{\circ}$]	21.8	21.8	21.8	21.8	90	90
Gelen Dalga Açısı [$^{\circ}$]	90	30	90	90	30	0
Giden Dalga Açısı [$^{\circ}$]	90	150	90	90	150	180
Rotor Hızı [$^{\circ}/s$]	2640	2640	2640	2640	2640	2640
$F_{d,max}$ [Hertz]	13.196	13.196	13.196	13.196	13.196	13.196

Tablo 4.3: Simülasyon Senaryolarına İlişkin Parametreler (Devamı).

Analiz No.	7	8	9	10	11
Dönel Kanat Sayısı (M)	2	2	2	2	2
Frekans [GHz]	5	5	5	18	10
Dönel Kanatların Eğimi [$^{\circ}$]	10	30	30	30	10
Gelen Dalga Açısı [$^{\circ}$]	30	30	90	90	90
Giden Dalga Açısı [$^{\circ}$]	150	150	90	90	90
Rotor Hızı [$^{\circ}/s$]	2640	2640	2640	2640	2640
$F_{d,max}$ [kHz]	13.196	13.196	13.196	13.196	13.196

Simülasyon sonuçlarının yorumlanması amacıyla, kanatlara, çalışma koşulları ve radar - kanatlar arası oryantasyona ilişkin parametrelerin sırasıyla değişimleri için gruplanmıştır. İlerleyen bölümlerde verilen RKA, Doppler karakteristiği ve birleşik zaman-frekans spektrumu sonuçlarının elde edilmesi aşamalarında gerçekleştirilen sinyal işleme süreçlerinde kullanılan parametreler Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4: Sinyal İşleme Sürecine İlişkin Parametreler.

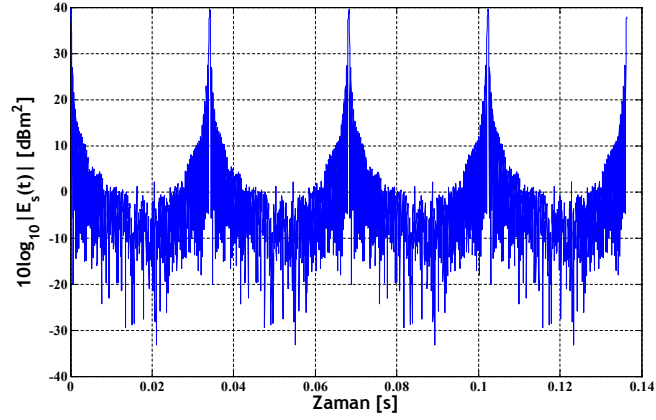
Frekans [GHz]	Örnekleme Aralığı [s]	N_{FFT}	FFT_l
5	3.7889E-05	14400	200
10	3.7889E-05	14400	200
18	1.8942E-05	28800	200

Tablo 4.4'te verilen N_{FFT} ve FFT_l , sırasıyla, dönel kanatların oluşturduğu EM saçılmaya ilişkin Doppler spektrumunun elde edilmesi amacıyla uygulanan

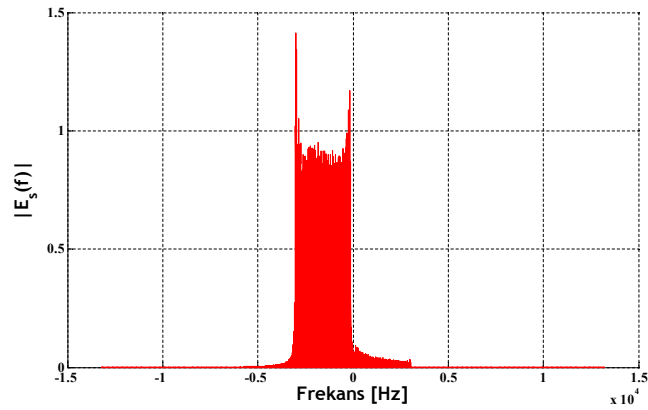
FFT işlemindeki nokta sayısını ve zaman-Doppler imgelerinin çıkartılması amacıyla uygulanan KSFD metodundaki FFT kayan-pencere nokta sayısını temsil etmektedir.

4.2.1. Dönel Kanat Sayısının Etkisi

Analiz-1, Analiz-2 ve Analiz-3 senaryolarına göre kanat sayısının RKA değerlerine ve Doppler spektrumuna etkisi incelenmiştir. Analizlerde ele alınan senaryolara göre Analiz-1’de 4-kanatlı, Analiz-2’de 3-kanatlı ve Analiz-3’te tek-kanatlı damla-yapılı kanat modeli kullanılmıştır. Analiz-1’e ilişkin RKA karakteristiği, Doppler spektrumu ve birleşim zaman-frekans spektrumu gösterimi sırasıyla Şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de resmedilmiştir.

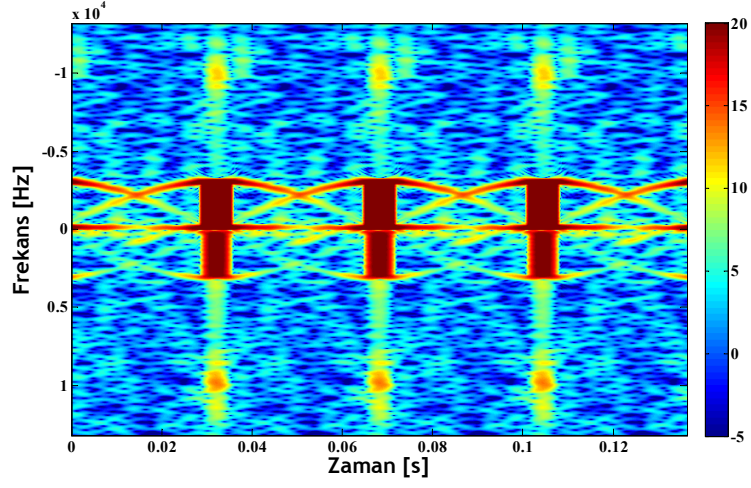


Şekil 4.6: Analiz-1 için zamana bağlı RKA değişimi.

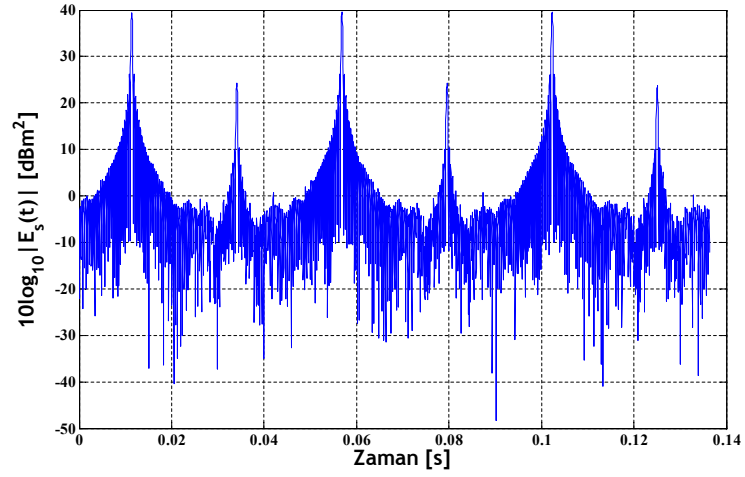


Şekil 4.7: Analiz-1 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.

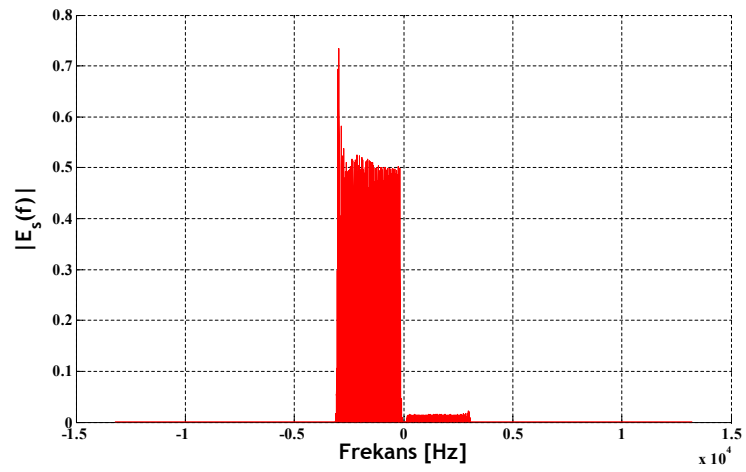
Benzer şekilde, Analiz-2 ve Analiz-3’e ilişkin sonuçlar sırasıyla Şekil 4.9-4.11 ve Şekil 4.12-4.14’te verilmiştir.



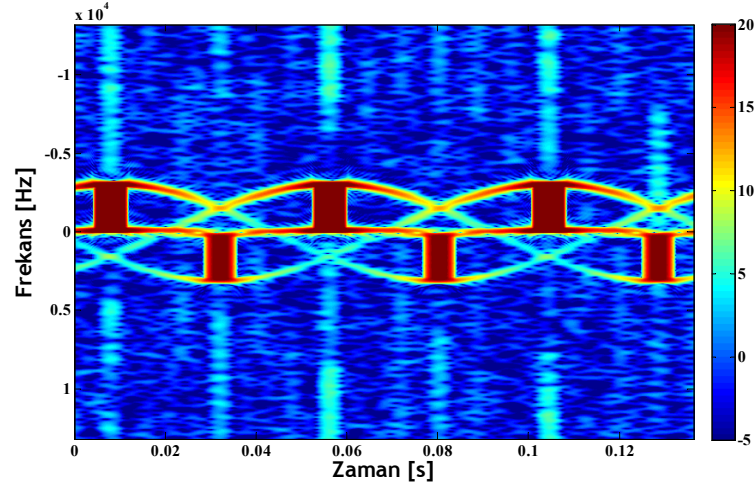
Şekil 4.8: Analiz-1 için birleşik zaman-frekans spektrumu.



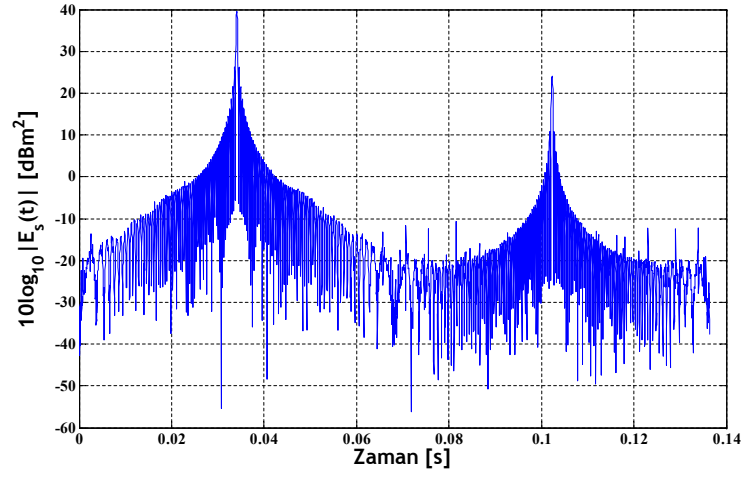
Şekil 4.9: Analiz-2 için zamana bağlı RKA değişimi.



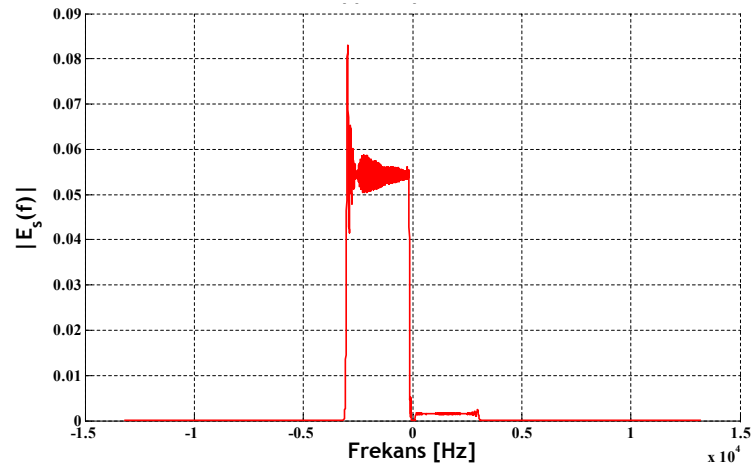
Şekil 4.10: Analiz-2 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



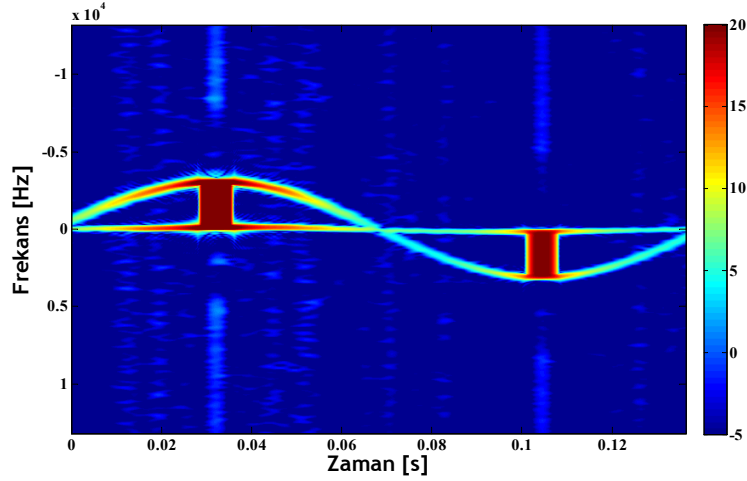
Şekil 4.11: Analiz-2 için birleşik zaman-frekans spektrumu.



Şekil 4.12: Analiz-3 için zamana bağlı RKA değişimi.



Şekil 4.13: Analiz-3 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



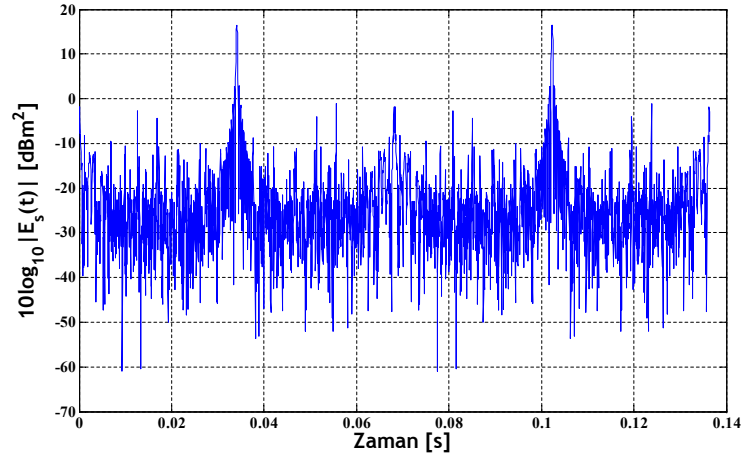
Şekil 4.14: Analiz-3 için birleşik zaman-frekans spektrumu.

Şekil 4.6 grafiğinde görüldüğü üzere 0.034 s, 0.068 s ve 0.1 s zaman değerine denk gelen yerlerde gözlemciye en yüksek seviyeli RKA değerini göstermektedir, 0.05 ve 0.08 s zaman değerlerinde, gözlemcide kanatların en yakın ve en uzak noktaları bulunmaktadır, bu nedenle söz konusu zaman anlarında minimum RKA değerleri gözlemlenmektedir. Bunun yanında Şekil 4.6, 4.9 ve 4.12’de RKA grafiklerinde kanat sayısının tepe noktaları gözlemlenmektedir. Şekil 4.7, 4.10 ve 4.13 grafiklerinde kanat sayısının Doppler spektrumuna etkisi görülmektedir; hız bileşeni sayısı ile spektrumun arttığı gözlemlenmiştir. Birleşik zaman-frekans analizi, RKA grafiklerindeki kanat sayısının gözlemlenen tepe noktası sayısına etkisini doğrulamaktadır; buna göre Şekil 4.8, Şekil 4.11 ve Şekil 4.14’te verilen birleşik zaman-frekans grafiklerinde kanat sayısının sinüzoid oluştuğu görülmektedir.

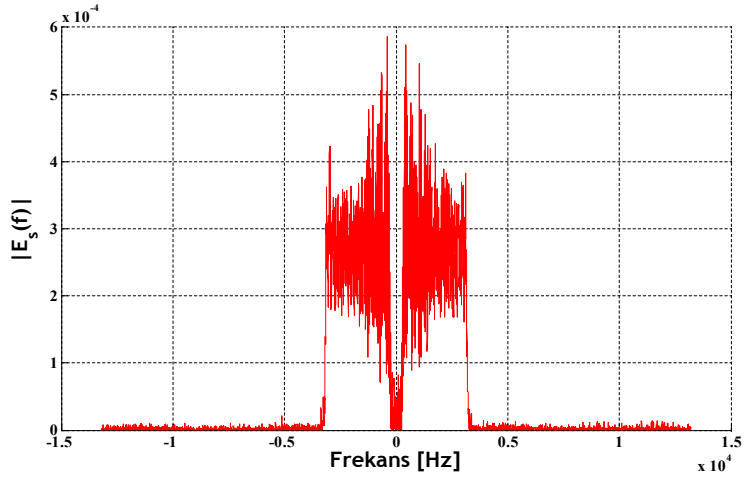
4.2.2. Geometrik Etki

Bu kısımda yapılan analizlerde cisimlerin tespit edilmesinde geometrik etkiler incelenmiştir. Geometrik etkileri incelemek için Analiz-3 ve Analiz-4’e göre aynı boyutlardaki damla modelindeki kanat ile dikdörtgen düz plaka modelindeki kanatlar karşılaştırılmıştır. Analiz-3 için RKA, Doppler ve birleşik zaman-frekans spektrumları Bölüm 4.3.1’de sırasıyla Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’te verilmişti. Analiz-4 için ise sonuçlar, sırasıyla Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.

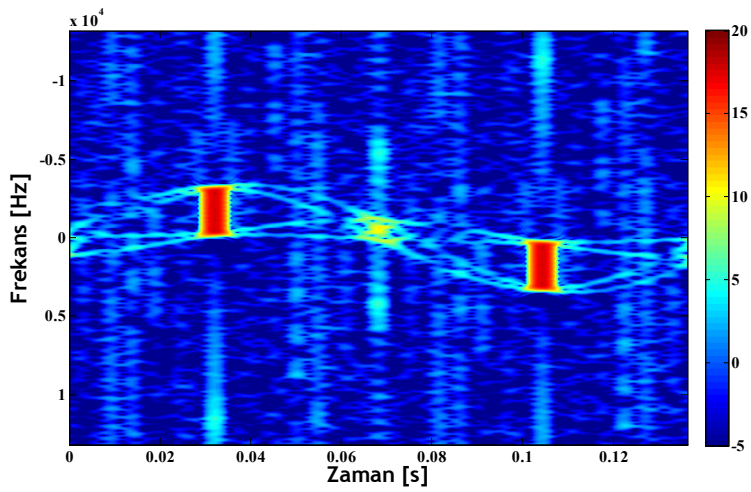
Her iki analizdeki kanat modeller Pouliguen’in [20] belirttiği 21.8 derece kanat eğimine sahiptir ve gelen dalga açısı 35 derece olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.15: Analiz-4 için zamana bağlı RKA değişimi.



Şekil 4.16: Analiz-4 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



Şekil 4.17: Analiz-4 için birleşik zaman-frekans spektrumu.

Analiz-3 ve Analiz-4 sonuçlarına göre Şekil 4.12 ve Şekil 4.15 karşılaştırıldığında damla modelin RKA değerinin 40 dB seviyesinde, dikdörtgen düz plakanın ise 15 dB seviyesinde olduğu gözlenmektedir. Bu farkın nedeninin, gözlemci ile kanatların aynı düzlemde olduğu durumda dikdörtgen plakanın yüzey alanının damla modele nazaran daha küçük olmasından ve damla modelden daha fazla yansıma gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Doppler spektrumları (Şekil 4.13 ve Şekil 4.16) karşılaştırıldığında damla modelin spekturumunun simetrik olmadığı, dikdörtgen plakanın spektrumunun simetrik olduğu görülmektedir. Bu fark kanatların geometrilerinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında damla modelde dikdörtgen plaka modele göre daha az frekans bileşeninin olduğu görülmektedir.

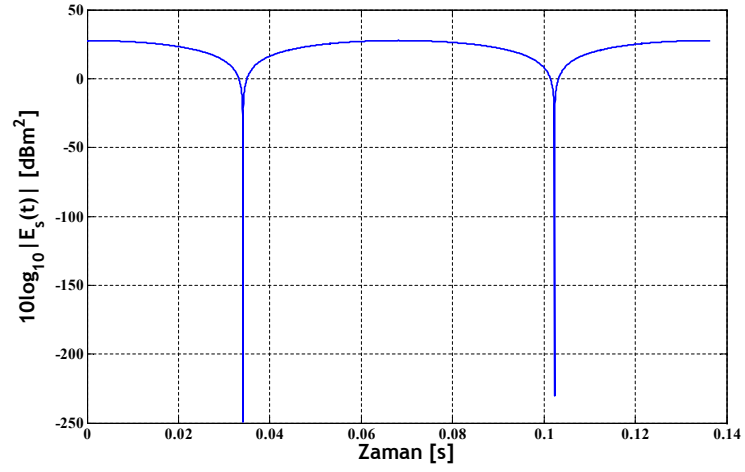
Kanatların birleşik zaman-frekans spektrumlarında (Şekil 4.14 ve Şekil 4.17) Doppler etkisinin maksimum ve minimum olduğu noktalar görülmektedir. Ayrıca bu resimlere göre damla modelde beklendiği gibi kanat sayısı kadar sinüzoid gözlenirken, dikdörtgen plakada birden fazla sinüzoid görülmektedir.

4.2.3. Gelen Dalga Açısının Etkisi

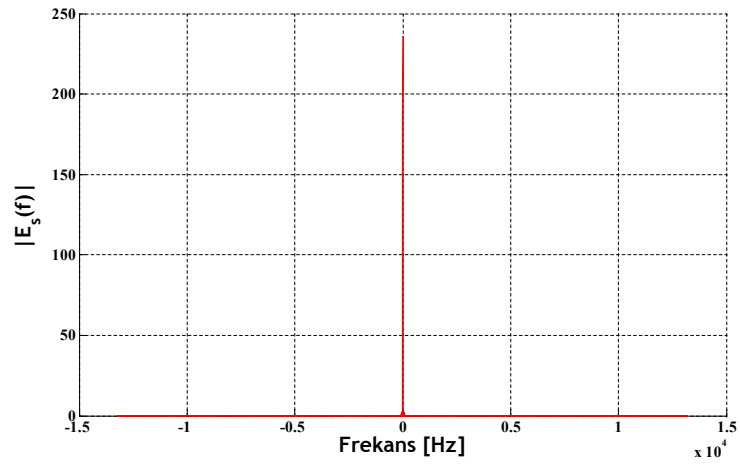
Analiz-5, Analiz-6 ve Analiz-7 senaryolarına göre 5 GHz frekansında, gelen dalganın açısının cismin RKA değerine ve Doppler spektrumuna etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak RKA, Doppler ve birleşik zaman-frekans spektrumları Analiz-5 için Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de, Analiz-6 için Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te, Analiz-7 için ise Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir.

Analiz-5’te gözlemci dönel kanatlara tepeden bakıyor konumda ve kanatlar da dik konumda bulunmaktadır. Kanatların eğimi 90 derece olduğundan RKA değeri neredeyse sabit ve -25 dBm^2 civarındadır (Şekil 4.18). Kanatlar üzerindeki her noktanın gözlem noktasına göre mesafesi dönel hareket boyunca değişmediğinden Doppler frekansı 0 Hz’tir (Şekil 4.19) ve spektrum genişliği de diğer senaryolara göre minimumdandır. Bu durum Şekil 4.20’de de görülmektedir.

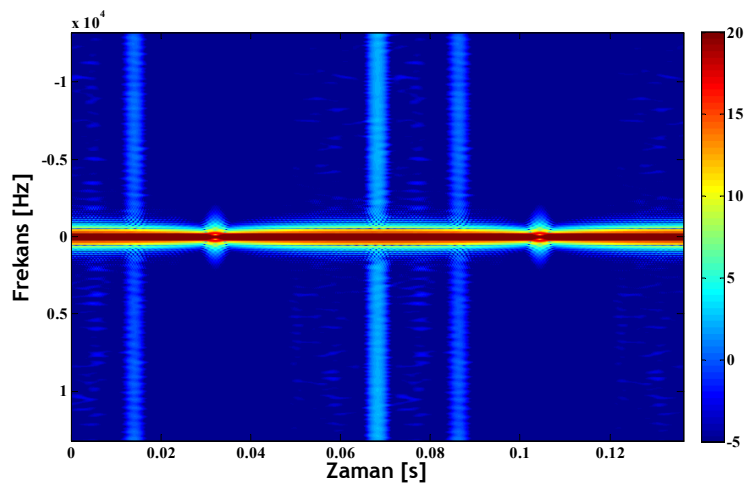
Şekil 4.21 ve Şekil 4.24 grafiklerinde görüldüğü üzere 0.034s ve 0.1 s zaman değerleri, iki dönel kanadın da gözlemciye göre maksimum RKA değerinin oluştuğu anlardır. Şekil 4.21’de, kanatlar ve cisimler aynı düzlemde ve dalga cisme 90 derece açıyla gelmektedir, RKA’sı 20 dBm^2 seviyesindedir.



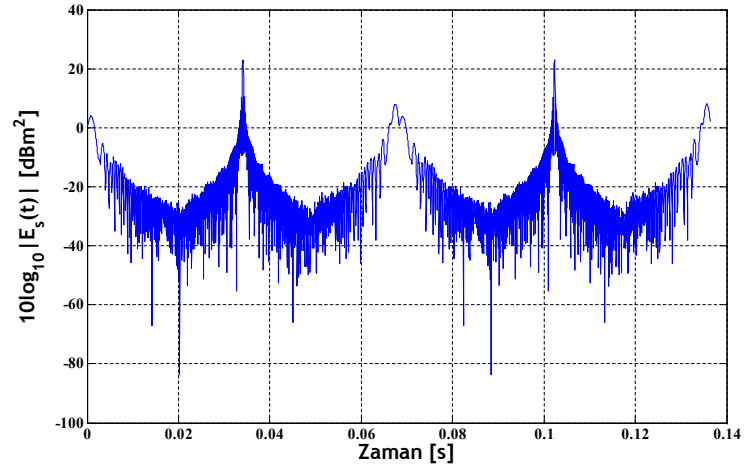
Şekil 4.18: Analiz-5 için zamana bağlı RKA değişimi.



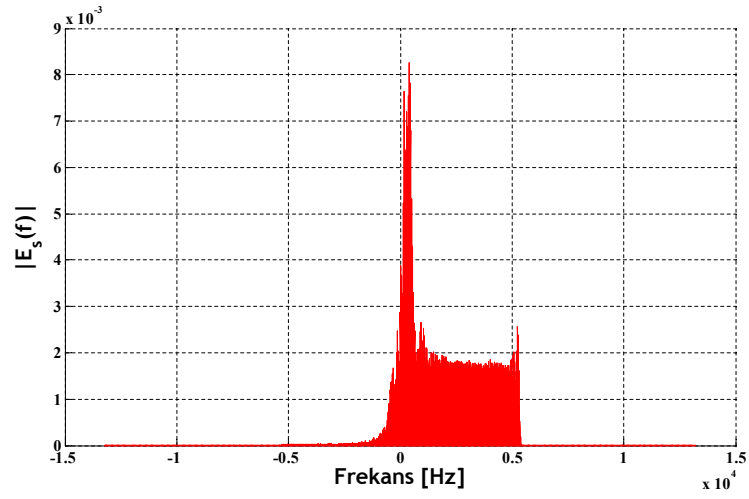
Şekil 4.19: Analiz-5 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



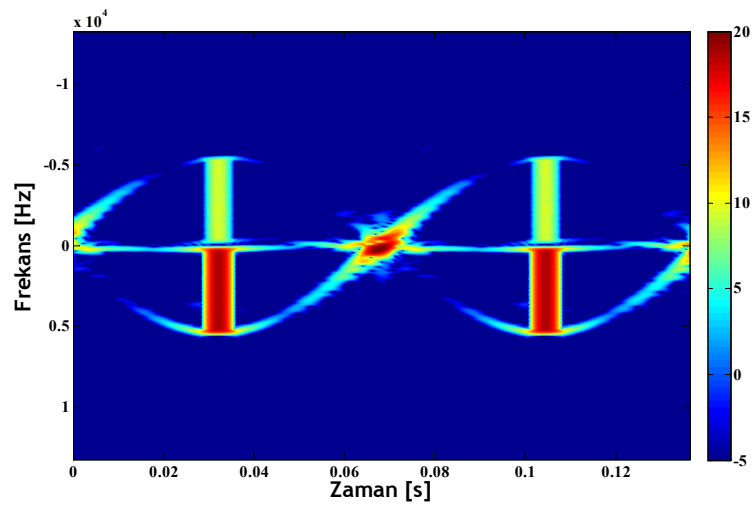
Şekil 4.20: Analiz-5 için birleşik zaman-frekans spektrumu.



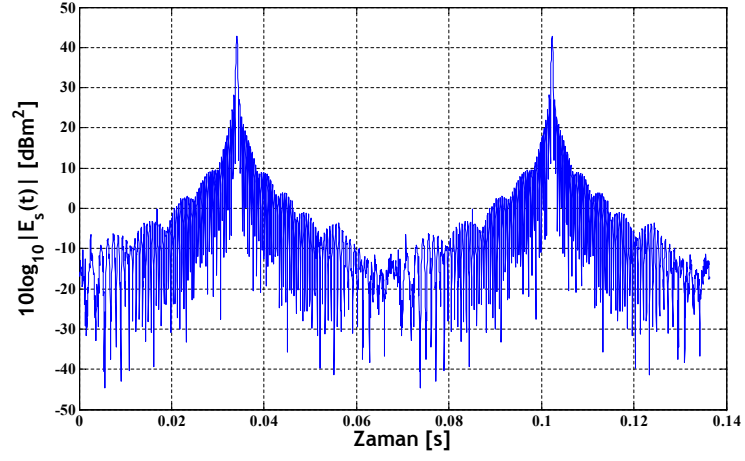
Şekil 4.21: Analiz-6 için zamana bağlı RKA değişimi.



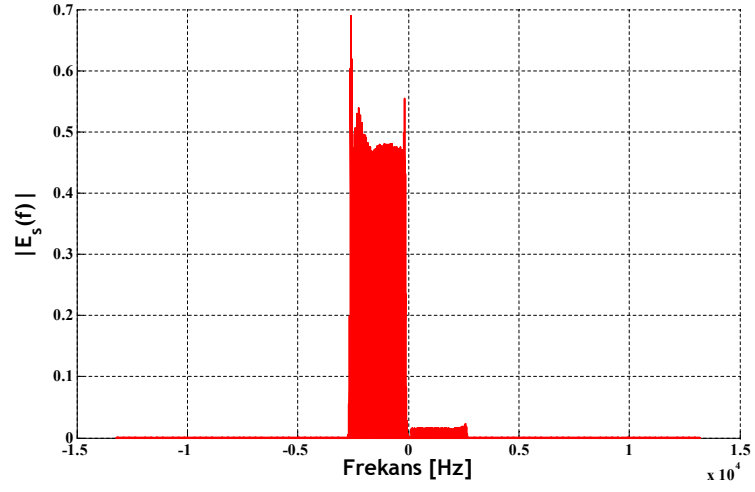
Şekil 4.22: Analiz-6 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



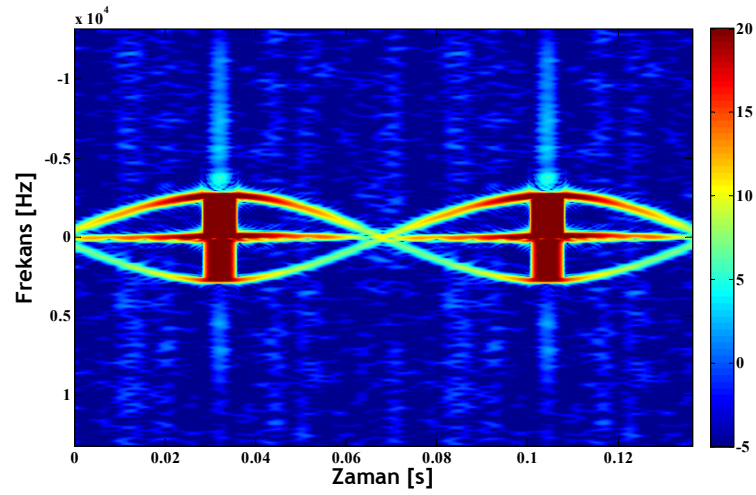
Şekil 4.23: Analiz-6 için birleşik zaman-frekans spektrumu.



Şekil 4.24: Analiz-7 için zamana bağlı RKA değişimi.



Şekil 4.25: Analiz-7 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.

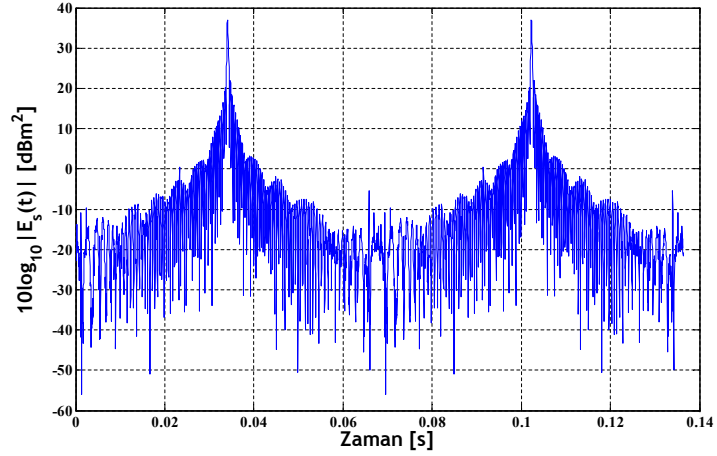


Şekil 4.26: Analiz-7 için birleşik zaman-frekans spektrumu.

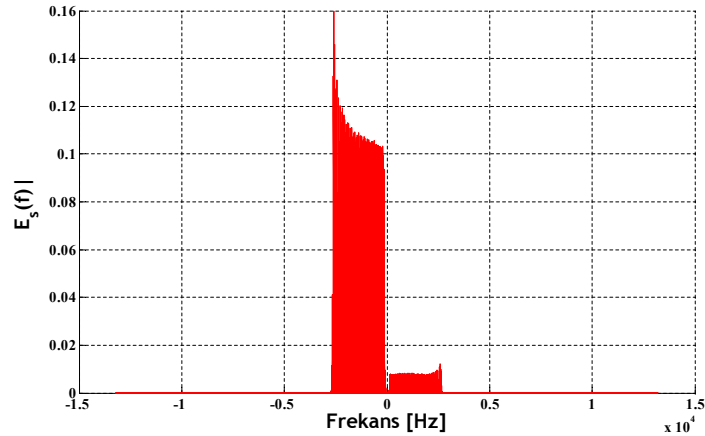
Şekil 4.24'te cisme dalgalar 30 derece eğimle gelmektedir ve RKA'sı 40 dBm²'den fazladır. Bunun nedeni, 30 derecede cismin yüzeyinin daha fazla görülmesidir. Kanatların oluşturduğu hız bileşenleri, Şekil 4.22 ve Şekil 4.25'te verilmiştir. Doppler spektrumlarında bileşenlerin kapladığı alanın dalganın geliş açısının sinüsü ile ilişkili olduğu görülmektedir. Buna göre 90 derece için spektrum genişliği yaklaşık 5 kHz iken 30 derece için bu değer yaklaşık 2.5-3 kHz civarındadır. Bu frekans bileşenlerinin etkisi Şekil 4.23 ve Şekil 4.26'da da görülmektedir.

4.2.4. Kanat Eğiminin Etkisi

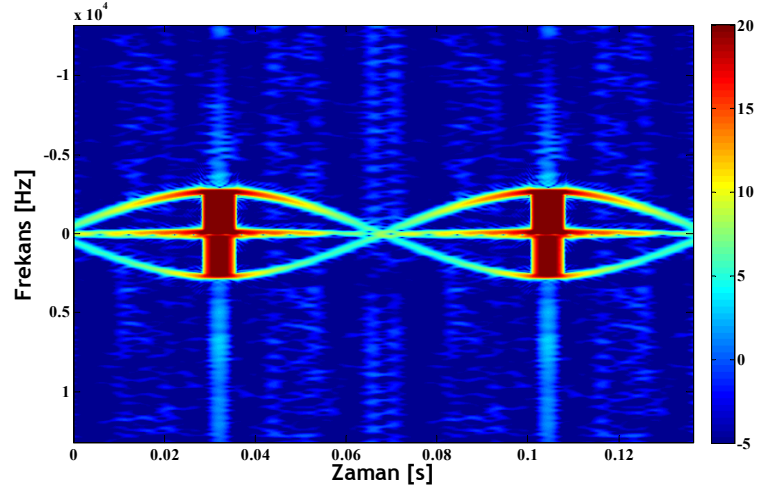
Analiz-8 için sonuçlar sırasıyla Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da, Analiz-9 için ise sırasıyla Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de verilmiştir.



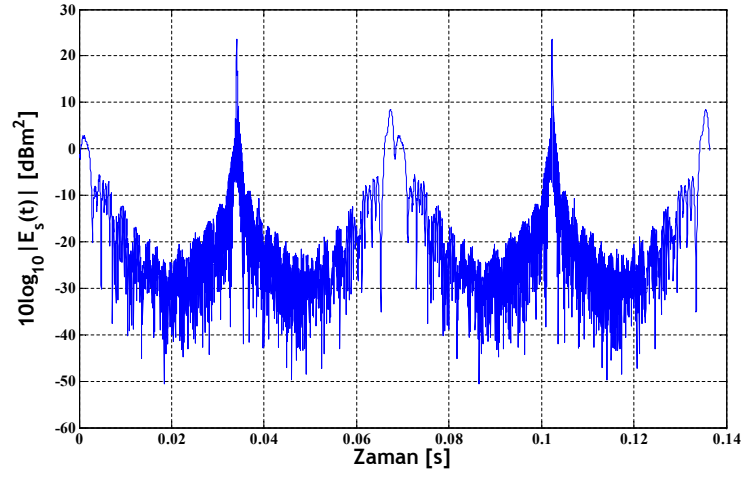
Şekil 4.27: Analiz-8 için zamana bağlı RKA değişimi.



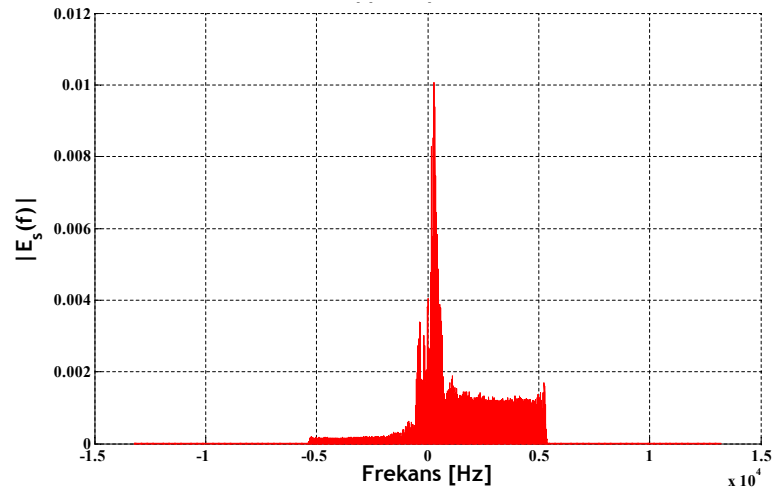
Şekil 4.28: Analiz-8 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



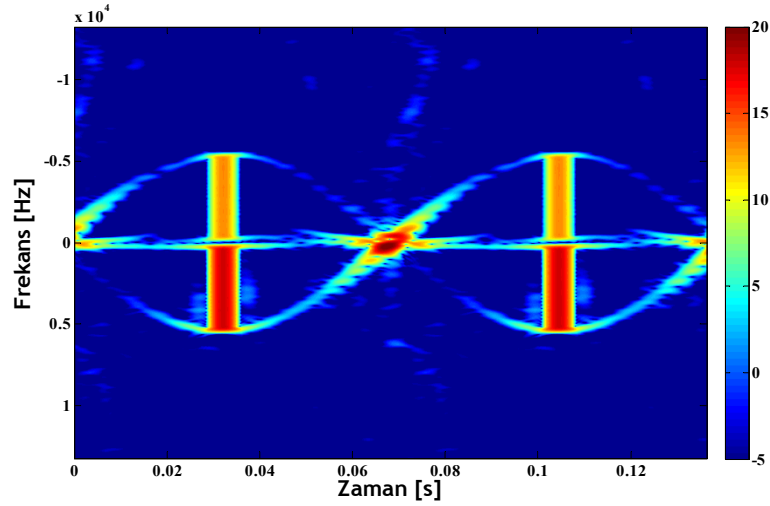
Şekil 4.29: Analiz-8 için birleşik zaman-frekans spektrumu.



Şekil 4.30: Analiz-9 için zamana bağlı RKA değişimi.



Şekil 4.31: Analiz-9 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



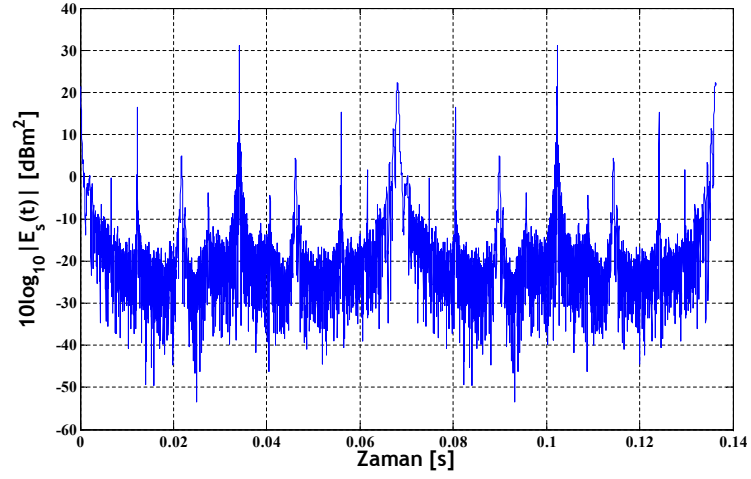
Şekil 4.32: Analiz-9 için birleşik zaman-frekans spektrumu.

Analiz-8 ile sonuçları Bölüm 4.2.3'te verilen Analiz-7 senaryolarına göre ve Analiz-9 ile daha önce sonuçları Bölüm 4.2.3'te verilen Analiz-6 senaryolarına göre 5 GHz frekansında, kanat eğiminin cismin RKA ve Doppler spektrumuna etkisi incelenmiştir. Şekil 4.21 ve Şekil 4.30 grafiklerinde görüldüğü gibi 0.034 s ve 0.1 s zaman değerlerinde, iki dönel kanat da gözlemciye göre en yüksek RKA değerini göstermektedir. Şekil 4.21'de, kanatlar 10 derece eğimli iken RKA değeri 22 dBm², Şekil 4.30'da ise, kanatlar 30 derece eğimli iken RKA değeri 23 dBm² seviyesindedir. Bunun nedeni, 30 derece eğimli kanatlarda cismin yüzeyinin daha fazla görülmesidir.

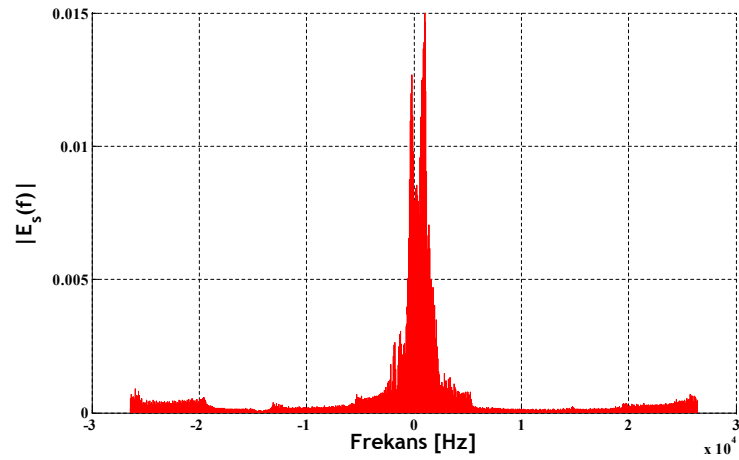
Kanatların oluşturduğu hız bileşenleri, Şekil 4.22 ve Şekil 4.31'de verilmiştir. Bu şekillere göre Doppler spektrumlarında bileşenlerin kapladığı alanlar eşittir, bunun nedeni Doppler spektrumunun her iki durumda yaklaşık 5 kHz seviyesinde olması, gelen dalga açısının her iki durumda da aynı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu etki Şekil 4.23 ve Şekil 4.32'de de görülmektedir. Şekil 4.27 grafiğinde görüldüğü gibi, 0.034 s ve 0.1 s zaman değerlerinde, iki dönel kanat da gözlemciye göre en yüksek RKA değerini göstermektedir. Şekil 4.27'de, kanatlar 30 derece eğimlidir ve RKA değeri 37 dBm² seviyesindedir. Şekil 4.24 ile karşılaştırıldığında her iki durumda RKA karakteristiklerinin özdeş ancak şiddetlerinin farklı olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, 30 derece eğimli kanatlarda cisim yüzeyinin daha fazla görülmesidir. RKA karakteristiklerinin benzer olması Şekil 4.25 ile Şekil 4.28, ve Şekil 4.26 ile Şekil 4.29'da görüldüğü üzere Doppler spektrumlarının ve birleşik zaman-frekans resimlerinin de benzer olmasına yol açmıştır.

4.2.5. Frekans Etkisi

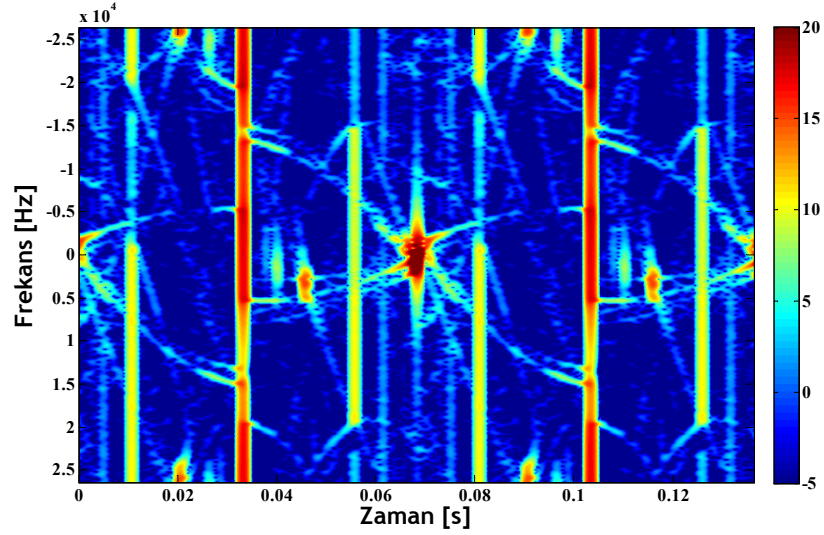
Bu bölümde radar çalışma frekansının cisimlerin teşhisi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna göre daha önce sonuçları verilmiş olan Analiz-9 ile Analiz-10 senaryolarında 30 derece kanat eğimi ve 90 derece gelen ışın açısına göre sırasıyla 5 GHz ve 18 GHz radar çalışma frekanslarının etkisi incelenmiştir. Analiz-6 ve Analiz-11 senaryolarında ise 10 derece kanat eğimi ve 90 derece gelen ışın açısına göre sırasıyla 5 GHz ve 10 GHz radar çalışma frekanslarının etkisi incelenmiştir. RKA karakteristiği, Doppler spektrumu ve birleşik zaman-frekans spektrumu imgesi Analiz-10 için Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te verilmiştir.



Şekil 4.33: Analiz-10 için zamana bağlı RKA değişimi.



Şekil 4.34: Analiz-10 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



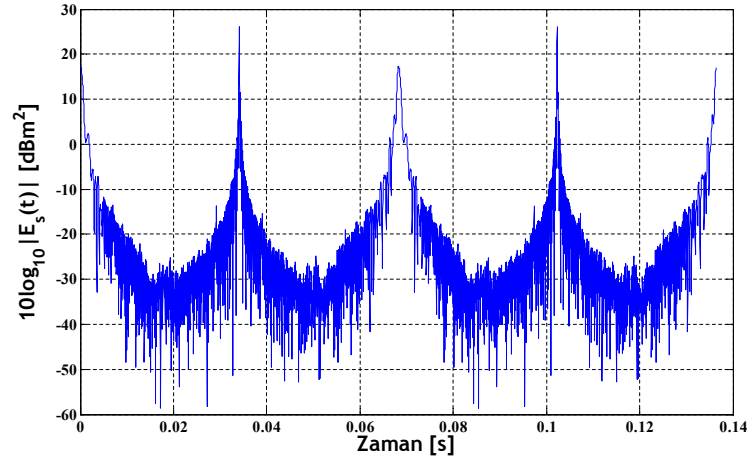
Şekil 4.35: Analiz-10 için birleşik zaman-frekans spektrumu.

Bunun yanında Şekil 4.36, 4.33 ve 4.12’de verilen RKA grafiklerinde kanat sayısınınca tepe noktası gözlemlenmektedir. Bu durum Şekil 4.38, 4.35 ve 4.14’te verilen grafiklerde de gözlenmektedir; birleşik zaman-frekans grafiklerinde kanat sayısınınca sinüzoid oluşmaktadır.

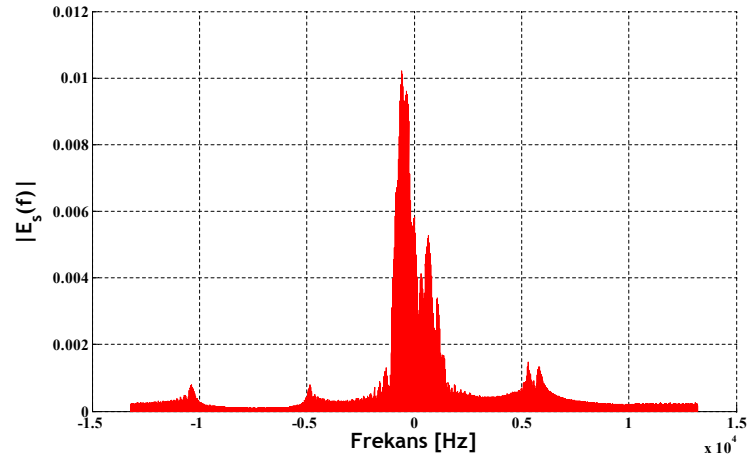
Analiz-9 ve Analiz-10 senaryoları karşılaştırılırsa, Şekil 4.33’te görüldüğü üzere yaklaşık 0.034 s ve 0.1 s zaman değerlerinde iki dönel kanat da gözlemciye en şiddetli RKA değerlerini göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4.33’te radar çalışma frekansı 18 GHz’tir ve RKA değeri 31 dBm² seviyesindedir.

Aynı polarizasyon için 5 GHz’te yapılan Şekil 4.30’da verilen simülasyon sonucu ile karşılaştırıldığında frekansın artmasıyla yansıtıcılığın arttığı yönünde çıkarım yapılabilir. Doppler spektrumları ve zaman-frekans analizleri karşılaştırıldığında 18 GHz’te yapılan simülasyonda Doppler spektrumundaki frekans bileşeninin fazla olduğu ve sinüzoid karakteristiğinin daha belirsiz olduğu görülmektedir. Bunun nedeni frekansın artmasıyla simülasyon parametrelerinin de artması gerektiği şeklinde yorumlanabilir (Şekil 4.34, Şekil 4.35).

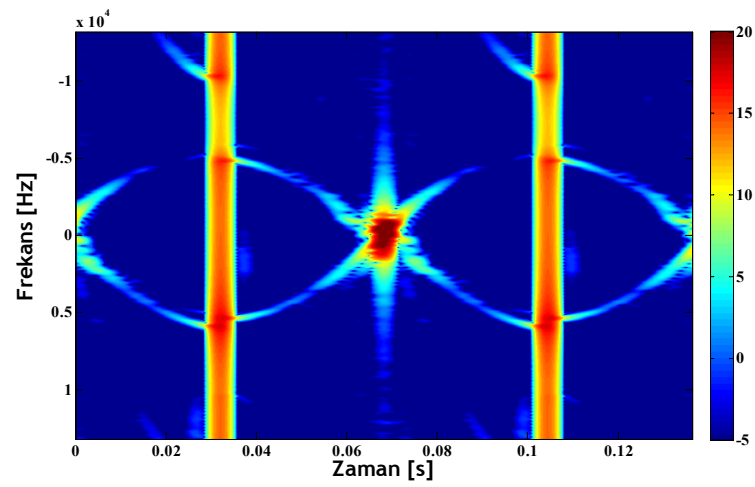
Daha önce sonuçları verilen Analiz-6 ile karşılaştırma sağlamak amacıyla gerçekleştirilen Analiz-11 senaryosuna ilişkin RKA karakteristiği, Doppler spektrumu ve birleşim zaman-frekans spektrumu imgesi sırasıyla Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.36: Analiz-11 için zamana bağlı RKA değişimi.



Şekil 4.37: Analiz-11 için saçılma sinyalinin Doppler spektrumu.



Şekil 4.38: Analiz-11 için birleşik zaman-frekans spektrumu.

Analiz-11 ve Analiz-6 senaryoları karşılaştırıldığında, Şekil 4.21 ve Şekil 4.36 grafiklerinde görüldüğü üzere yaklaşık 0.034 s ve 0.1 s zaman değerlerinde iki dönel kanat da gözlemciye göre en şiddetli RKA değerlerini göstermektedir. Bu nedenle bu zaman değerlerinde maksimumlar oluşmaktadır. Şekil 4.21’de, frekans 5 GHz’tir ve RKA değeri 22 dBm² seviyesindedir. Şekil 4.36’da, frekans 10 GHz’tir ve RKA değeri 27 dBm² seviyesindedir. Bu durum, frekansla birlikte yansıtıcılığın artmasıyla açıklanabilir.

Kanatların oluşturduğu hız bileşenleri, Şekil 4.22 ve Şekil 4.37’de verilmiştir. Bu verilere göre Doppler spektrumlarında 10 GHz’te bileşenlerin kapladığı alanlar 5 GHz’teki bileşenlerin kapladığı alandan daha fazladır. Bu etki Şekil 4.23 ve Şekil 4.38’de de görülmektedir.

5. ÇIKARIMLAR VE SONRAKİ ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışması kapsamında, damla-yapılı dönel kanatların oluşturacağı saçılan elektrik alan değerleri, kanatların dönme açısına (dolayısıyla zamana) bağlı olarak RKAY yazılımında sunulan simülasyon ortamında elde edilmiş ve elde edilen EM saçılma karakteristiğinin frekans spektrumundaki kaba analizi ve zamana bağlı Doppler karakteristiğini sunan birleşik zaman-frekans spektrumundaki ayrıntılı analizi gerçekleştirilmiştir. Radar - kanatlar arası bakış açıları, kanat eğim açıları, kanat sayısı, radar çalışma frekansı vb. parametrelere bağlı olarak tasarlanan senaryolar için yapılan EM saçılma ve Doppler karakteristiği simülasyonları ile, gözlemlenen RKA ve Doppler karakteristiklerinin belirtilen parametrelere bağımlılığı resmedilmiştir.

Tez çalışması kapsamında yapılan simülasyonlar ve incelemeler neticesinde, ele alınan damla-yapılı dönel kanat modelinin RKA ve Doppler karakteristikleri ile ilişkili olarak aşağıda belirtilen çıkarımlar gözlemlenmiştir:

- Dönel kanatlı cisimlerin RKA değerlerini incelerken ortaya çıkan en önemli sonuç, elde edilen RKA değerinin, geometrik yapıyı oluşturan ve dönme ekseninden farklı uzaklıklarda yer alan farklı radyal hız bileşenlerine sahip kısımlardan meydana gelen saçılma sinyallerinin süperpozisyonu cinsinden elde edilmesidir.
- Bahsedilen formdaki RKA verisi üzerinde STFT yönteminin sağladığı çözümleme sayesinde ise, dönel harekete sahip kanatlara ait kısımların (ki kanadın farklı çizgisel hızlara sahip nokta saçıcılar bütünü şeklinde olması söz konusu değerlendirmeyi kolaylaştırmaktadır) gözlem süresi boyunca radar sinyal işleme süreci kapsamında oluşturulan zaman-Doppler imgelerinde sergileyeceği salınımlı karakteristikler incelenebilmektedir.
- Elde ettiğimiz bu zaman-Doppler karakteristikleri, öncelikli olarak dönel kanatların şekline, sayısına, eğimine ve birbirleri arasındaki açıya bağlı olarak şekillenmekte ve radar sinyallerinden kanat özelliklerinin çıkartılmasına ve teşhis edilebilmesine olanak vermektedir.

Belirtilen çıkarımlar doğrultusunda, dönel hareketli kanatların RKA ve Doppler karakteristikleri üzerine yapılması muhtemel sonraki çalışma başlıkları aşağıda listelenmiştir:

- Farklı geometrilere sahip (özellikle radar yansıtıcılığını minimize etmeyi amaçlayan "stealth" bakış açısıyla tasarlanan) dönel kanat modelleri için, kanat malzeme karakteristiği de dikkate alınarak benzer çalışma tekrarlanabilir.
- Dönel hareketli kanatların radar sistemleri tarafından tespit edilebilme ve izlenme olasılığı üzerinde farklı kanat modellerinin etkilerinin karşılaştırılması ele alınabilir.
- Farklı tip dönel kanat geometrileri için Doppler karakteristikleri incelenerek, kanat veri setleri üzerinden sınıflandırıcı tasarımı yapılabilir.
- Ele alınan dönel kanatların bir helikoptere ait olması durumunda, dönel kanatların etkisine ek olarak (sabit veya ivmeli hızla) hareket eden gövdenin de etkisi de incelenebilir.

Listelenen çalışmaların her biri, ilgili literatüre katkıda bulunacak ve yapılacak ileri araştırmalar için başlangıç niteliği taşıyacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Bhalla R., Ling H., (1994), "ISAR Image simulation of targets with moving parts using the shooting and bouncing ray technique", IEEE Antennas and Propagation Conference, 1994-1997, Seattle, WA, USA, 20-24 June.
- [2] Somers G., Bruno D., (1994), "Spectral characteristics of electromagnetic wave scattering by rotating propellers and its effects on clutter discrimination", IEEE Antennas and Propagation Conference, 144-147, Seattle, WA, USA, 20-24 June.
- [3] Tardy I., (1995), "Contribution á la caractérisation d'objets á symetrie cyclique en rotation", Thése de Doctorat, Universite Bordeaux.
- [4] Eden A., (1992), "The Search for Christian Doppler", 1st Edition, Berlin, Germany: Springer-Verlag.
- [5] Gill T. P., (1965), "The Doppler Effect: The Theory and Applications", 1st Edition, New York: Academic Press.
- [6] Chen V. C., (2011), "The Micro-Doppler Effect in Radar", 1st Edition, Norwood, MA: Artech House.
- [7] Chen V. C., Ling H., (2002), "Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis", 1st Edition, Norwood, MA: Artech House.
- [8] Chen V. C., (2006), "Micro-Doppler Effect in Radar: Phenomenon, Model, and Simulation Study", IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 42 (1), 2-21.
- [9] Bladel J. Van , (1976), "Electromagnetic fields in the presence of rotating bodies", Proceedings of the IEEE, 64 (3), 301-318.
- [10] Zutter D. De , (1979), "Doppler effect from a transmitter in translational motion", Microwaves Optical Acoustics, 3 (3), 85-92.
- [11] Harfoush F., Taflove A., Kriegsman G., (1989), "A numerical technique for analyzing electromagnetic wave scattering from moving surfaces in one and two dimensions", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 37 (1), 55-63.
- [12] Sengupta D. L., Senior T. B. A., (1977), "Electromagnetic scattering by rotating objects", URSI Symposium on Electromagnetic Wave Theory, 314-315, Stanford, California, USA, 24-25 June.
- [13] Lahaie I. J., Sengupta D. L., (1979), "Scattering of electromagnetic waves by a slowly rotating rectangular metal plate", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, AP-27 (1), 40-46.
- [14] Bor S. S., Yang T. L., Yang S. Y., (1992), "Radar cross-sectional spectra of rotating multiple skew-plated metal fan blades by physical optics/ physical theory of diffraction, equivalent currents approximation", Journal of Applied Physics, 31 (4A), 1549-1554.

- [15] Yang T. L., Bor S. S., (1992), "Comparison of monostatic doppler and radar cross-section spectra by rotating multiple skew-plated metal fan blades", *International Journal of Electronics*, 72 (4), 659-668.
- [16] Ryan C. E., Peters L., (1969), "Evaluation of edge-diffracted fields including equivalent currents for the caustic regions", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-17 (3), 292-299.
- [17] Michaeli A., (1984), "Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-23 (3), 252-258.
- [18] Knott E. F., (1985), "The relationship between Mitzner's IDCL and Michaeli's equivalent currents", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, AP-33 (1), 112-114.
- [19] Tardy I., Piau G. P., Chabrat P., Rouch J., (1996), "Computational and experimental analysis of the rotating fans", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 44 (10), 1414-1421.
- [20] Pouliguen P., Lucas L., Muller F., Quete S., Terret C., (2002), "Calculation and Analysis of Electromagnetic Scattering by Helicopter Rotating Blades", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 50 (10), 1396-1406.
- [21] Karşı S., (2011), "Döner Kanatlı Cisimlerin Radar İzlerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Deniz Harp Okulu.
- [22] Willis N. J., (2005), "Bistatic Radar", 2nd Edition, Raleigh, NC: SciTech Publishing.
- [23] Rife D. C., R. R. Boorstyn, (1974), "Single Tone Parameter Estimation from Discrete-Time Observations", *IEEE Transactions on Information Theory*, 20 (5), 591-598.
- [24] Kay S. M., Marple S. L., (1981), "Spectrum Analysis: A Modern Perspective", *Proceedings of the IEEE*, 69 (11), 1380-1419.
- [25] Marple S. L., (1987), "Digital Spectral Analysis with Applications", 1st Edition, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [26] Gupta M. S., (1975), "Definition of Instantaneous Frequency and Frequency Measurability", *American Journal of Physics*, 43 (12), 1087-1088.
- [27] Huang N. E., (1998), "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-Stationary Time Series Analysis", *Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 454 (A), 903-995.
- [28] Kay S. M., (1989), "A Fast and Accurate Single Frequency Estimator", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 37 (12), 1987-1990.
- [29] Boashash B., (1992), "Estimating and Interpreting the Instantaneous Frequency of a Signal-Part 2: Algorithms and Applications", *Proceedings of the IEEE*, 80 (4), 540-568.
- [30] Gabor D., (1946), "Theory of Communication", *Journal of IEE*, 93 (III-26), 429-457.

- [31] Knott E. F., Schaffer J. F., Tuley M. T., (1993), “Radar Cross Section”, 2nd Edition, Norwood, MA: Artech House.
- [32] Ruck G. T., (1970), “Radar Cross Section Handbook”, 1st Edition, New York: Plenum Press.
- [33] Jenn D., (2005), “Radar Cross-Section”, in Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, Chang K., 1st Edition, New York: John Wiley&Sons.
- [34] Ling H., Chou K., Lee S., (1989), “Shooting and Bouncing Rays: Calculating the RCS of an Arbitrarily Shaped Cavity”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 37 (2), 194–205.
- [35] Chatzigeorgiadis F., Jenn D., (2004), “A MATLAB Physical-Optics RCS Prediction Code”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 46 (4), 137–139.
- [36] Chen V. C., (2001), “Radar Signatures of Rotor Blades”, Proceedings of SPIE on Wavelet Applications VIII, 4391 (3), 63–70.
- [37] Misiurewicz J., Kulpa K., Czekala Z., (1997), “Analysis of Recorded Helicopter Echo”, IEE Radar 97 Proceedings, Edinburgh, Scotland, 14-16 October.
- [38] Bullard B. D., Dowdy P. C., (1991), “Pulse Doppler Signature of a Rotary-Wing Aircraft”, IEEE Radar Conference, Los Angeles, CA, USA, 12–13 March 1991.
- [39] Mahafza B., (2000), “Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB”, London, 1st Edition, U.K.: Chapman & Hall/CRC.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Konya'nın Bozkır ilçesinde doğmuş olan Ayşe Çelik, 2003 yılında Meram Anadolu Lisesi'nden mezun olmuştur. 2004 yılı Öğrenci Seçme Sınavı sonucunda okumaya hak kazandığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (GYTE) Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında mezun olmuştur. Lisansüstü eğitimine 2009 yılında GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı yüksek lisans programında başlamıştır. Lisans programından mezuniyetinden bu yana GYTE Açık Saha Elektromanyetik Laboratuvarı (ASEMLAB) bünyesinde Araştırmacı olarak, SEDNA Bilgi ve İletişim Sistemleri Ltd. Şirketi'nde Ürün Sorumlusu olarak çalışmıştır. Mart 2014 tarihinden itibaren Amadeus Bilgi Teknolojisi Hizmetleri Anonim Şirketi'nde İş Analisti olarak çalışmaktadır.