

COSRO VE LORO TİPİ TAKİP RADARLARININ KARIŞTIRILMASI

JAMMING OF COSRO AND LORO TYPE TRACKING RADARS

SERCAN SAKLICA

YRD. DOÇ. DR. YAKUP ÖZKAZANÇ

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

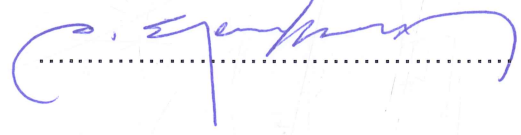
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

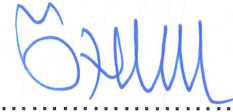
2018

SERCAN SAKLICA'nın hazırladığı "COSRO ve LORO Tipi Takip Radarlarının Karıştırılması" adlı bu çalışma jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

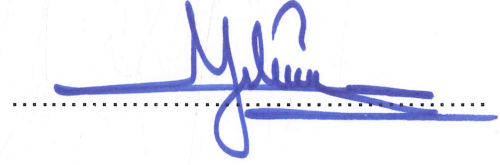
Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ
Başkan



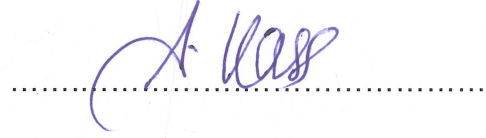
Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ
Danışman



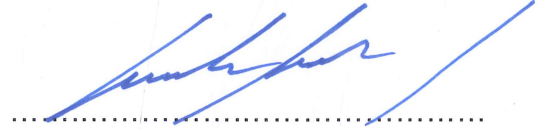
Prof. Dr. Atila YILMAZ
Üye



Prof. Dr. Ali KARA
Üye



Doç. Dr. Cenk TOKER
Üye



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

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☒ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- ☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

28/03/2018



Sercan SAKLICA

ETİK

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

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

beyan ederim.

28/03/2018

SERCAN SAKLICA

ÖZET

COSRO VE LORO TİPİ TAKİP RADARLARININ KARIŞTIRILMASI

SERCAN SAKLICA

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

Mart 2018, 103 Sayfa

Elektronik harpte takip radarlarının karıştırılması, radarların hedefinde olan platformların güvenliği açısından büyük öneme sahiptir. Takip radarlarında, hedeften yansıyan sinyallerde ortaya çıkan genlik modülasyon bilgisinden faydalanarak, hedefin açısal olarak izlenmesi için lob anahtarlama ve konik tarama yöntemleri kullanılabilmektedir. Bu yöntemlerin dezavantajı, karıştırma sinyallerine olan yüksek duyarlılıklarıdır. Bu dezavantajı gidermek için, radar sinyallerinin gönderimi anında tarama yapmayıp, sadece alımı anında tarama yapan teknikler geliştirilmiştir. Bu teknik sayesinde, lob anahtarlama ve konik tarama yapan radarların karıştırılmasında kullanılan genlik modülasyonu ve tarama frekansı bilgisi hedef platform tarafından belirlenememektedir. Bu yöntemi kullanan radarlara Sadece Almada Lob Anahtarlmalı (LORO) ve Sadece Almada Konik Taramalı (COSRO) radarlar denilmektedir. Bu teknik sayesinde, açısal izleme işlevini genlik

modülasyon bilgisi ile yapan radarlara karşı kullanılan standart karıştırma tekniklerinin etkinlikleri düşürülmüştür. Bu tez kapsamında LORO ve COSRO radarlarının karıştırılmasında kullanılabilecek yöntemlerden geniş taramalı genlik modülasyonu ve harmonik genlik modülasyonlu karıştırma teknikleri incelenmiştir. Bu yöntemlerden harmonik genlik modülasyonlu karıştırma tekniği için yapılan teorik ve benzetim analizlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca geniş taramalı genlik modülasyonu ile karıştırma tekniğinde farklı çökme (jog) tespit yöntemleri denenmiş ve sonuçları tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lob Anahtarlama Radar, Konik Taramalı Radar, Sadece Almada Lob Anahtarlama Radar, Sadece Almada Konik Taramalı Radar, Harmonik Genlik Modülasyonlu Karıştırma, Çökme Tespiti

ABSTRACT

JAMMING OF COSRO AND LORO TYPE TRACKING RADARS

SERCAN SAKLICA

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

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

March 2018, 103 Pages

In Electronic Warfare, jamming of tracking radars has high priority of importance for the safety of the target platforms. In tracking radars, lobe switching and conical scanning methods can be used for angular tracking by detecting amplitude modulation information in the reflected signals. The disadvantage of these methods are their high sensitivity to the jamming signals. To overcome this disadvantage, radars which do not scan at the time of transmission but only scan at the time of receiving technique has been developed. By this technique, the amplitude modulation and the scanning frequency information can not be determined by the target platform which is used for jamming the lobe switching and conical scanning radars. Radars that use this method are called as Lobe on Receive Only (LORO) or Conical Scan on Receive Only (COSRO) radars. By this technique, the efficiency of

jamming is reduced that is used against angular tracking radar which is using amplitude modulation information. In this thesis, wide sweep amplitude modulation and harmonic amplitude modulation techniques are investigated which can be used for jamming LORO and COSRO radars. The results of theoretical and simulated efficiency analyzes for the harmonic amplitude modulation jamming are compared. In addition, different jog detection methods of wide sweep amplitude modulation jamming techniques are tried and the results are reported.

Keywords: Lobe Switching Radar, Conical Scanning Radar, Lobe on Receive Only Radar, LORO, Conical Scan on Receive Only Radar, COSRO, Harmonic Amplitude Modulation Jamming, Jog Detection

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında yol gösterici olan, değerli bilgi, tecrübe ve katkılarını esirgemeyip beni yönlendiren danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yakup Özkazanç'a, tez çalışmalarımı destekleyen Aselsan A.Ş.'ye, tez süresince gösterdikleri anlayış ve desteklerinden dolayı Aselsan A.Ş.'de birlikte çalıştığım iş arkadaşlarıma, beni yetiştirip büyüten ve hayatım boyunca benden desteklerini esirgemeyen annem Hüsne SAKLICA, babam Murtaza SAKLICA, kardeşim Ercan SAKLICA'ya ve tez çalışmam boyunca yanımda olarak desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Şehri BARIŞ SAKLICA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELER.....	viii
ŞEKİLLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. RADAR ve ELEKTRONİK HARP TEMELLERİ	3
2.1 Radar Temelleri.....	3
2.1.1 Radarda Hesaplama Yöntemleri.....	4
2.1.2 Temel Radar Parametreleri	9
2.1.3 Anten Tarama Tipleri	13
2.1.4 Takip Radarları	18
2.1.5 Tek Darbe Radarları	19
2.1.6 Lob Anahtarlama Radar	22
2.1.7 Konik Taramalı Radar	23
2.1.8 COSRO ve LORO Radarlar	26
2.2 Elektronik Harp Temelleri	26
2.2.1 Elektronik Taaruz (<i>Electronic Attack</i> , EA)	27
2.2.2 Elektronik Korunma (<i>Electronic Protection</i> , EP)	31
2.2.3 Elektronik Destek (<i>Electronic Support</i> , ES)	34
2.3 Radar Tabanlı Elektronik Harp Tehditleri	35
2.3.1 Dolaylı Tehditler.....	35
2.3.2 Doğrudan Tehditler	35
3. KONİK TARAMALI VE LOB ANAHTARLAMALI RADARLARIN KARIŞTIRILMASI	40
3.1 Konik Taramalı Radarların Karıştırılması	40
3.2 COSRO ve LORO Radarların Karıştırılması	43
3.2.1 Geniş Taramalı Genlik Modülasyonu ile Karıştırma	43

3.2.2	Çökme Tespiti Vasıtası ile Karıştırma	44
3.2.3	Harmonik Genlik Modülasyonu ile Karıştırma	46
4.	COSRO VE LORO RADARLARDA KARIŞTIRMA ANALİZİ VE SİMÜLASYON YAPISI.....	49
4.1	Fourier Serileri ve Katsayıları	49
4.2	Harmonik Frekanslar	53
4.3	Dikdörtgen Dalgalarda Görev Döngüsünün Fourier Katsayılarına Etkisi .	55
4.4	Karıştırma Sinyali	61
4.5	Simülasyon Yapısı.....	62
4.5.1	Arayıcı Başlık.....	63
4.5.2	Karıştırma Birimi	65
4.5.3	İletme ve Alma Ortamları	66
4.5.4	Karıştırma Senaryosu Simülasyonu.....	67
5.	HARMONİK GENLİK MODÜLASYONLU KARIŞTIRMANIN ETKİNLİK ANALİZİ	71
5.1	Teorik Etkinlik Analizi	73
5.2	Simülasyon ile Etkinlik Analizi	78
6.	ÇÖKME TESPİTİ	86
6.1	Türev ile Çökme Tespiti.....	87
6.2	Kayan Pencere ile Çökme Tespiti	91
7.	SONUÇLAR.....	98
	KAYNAKLAR.....	100
	ÖZGEÇMİŞ	102

ÇİZELGELER

Sayfa

Çizelge 5.1 Farklı frekans aralıklarında Fourier katsayılarının etkisi	72
Çizelge 5.2 Karıştırılacak frekans aralığına uygun görev döngüleri.....	85
Çizelge 6.1 Çökme tespit yöntemleri ile belirlenen konik tarama frekansları	95

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 2.1. Jenerik radar blok diyagramı	3
Şekil 2.2 Radar mesafe ölçümü.....	7
Şekil 2.3 Mesafe değişim hızı hesaplama	8
Şekil 2.4 Darbe genişliği ve darbe tekrarlama aralığı	10
Şekil 2.5 Bir anten örüntüsünün radyasyon lobları ve hüzmeye genişliği [5]	11
Şekil 2.6 Radyasyon örüntüsünün iki boyutlu görünümü [5]	11
Şekil 2.7 Anten Radyasyon Örüntüsü [5].....	12
Şekil 2.8 Dairesel tarama yapan radar ([7]'den uyarlanmıştır).....	13
Şekil 2.9 Dairesel tarama tipinin genlik örüntüsü ([7]'den uyarlanmıştır)	14
Şekil 2.10 Bölgesel tarama örneği ([7]'den uyarlanmıştır)	14
Şekil 2.11 Bölgesel tarama tipinin dört farklı pozisyonda genlik örüntüsü ([7]'den uyarlanmıştır)	15
Şekil 2.12 Dört bar raster tarama yapan radar ([7]'den uyarlanmıştır).....	16
Şekil 2.13 Dört bar raster taramanın genlik örüntüsü ([7]'den uyarlanmıştır)	16
Şekil 2.14 Sarmal tarama yapan bir radar örneği ([7]'den uyarlanmıştır)	17
Şekil 2.15 Sarmal tarama tipinin genlik örüntüsü.....	18
Şekil 2.16 Açısal takip döngüleri.....	19
Şekil 2.17 Dört hüzmeli tek darbe radarında hüzmeler ([9]'den uyarlanmıştır) ...	20
Şekil 2.18 Genlik karşılaştırmalı tek darbe radarı ([8]'den uyarlanmıştır)	20
Şekil 2.19 Genlik karşılaştırmalı tek darbe radarı blok diyagramı [2]	21
Şekil 2.20 Faz karşılaştırmalı tek darbe radarı blok diyagramı ([10]'den uyarlanmıştır)	21
Şekil 2.21 Lob anahtarlama radar taramaları ve oluşan genlik örüntüleri	22
Şekil 2.22 Konik taramalı radar örneği ([8]'den uyarlanmıştır).....	23

Şekil 2.23 Konik tarama yapan radar blok diyagramı ([11]'den uyarlanmıştır)....	24
Şekil 2.24 Farklı hedef konumları için oluşan genlik modülasyonları ([8]'den uyarlanmıştır)	25
Şekil 2.25 Karıştırma yöntemleri [15].....	28
Şekil 2.26 Genlik modüleli gürültü karıştırması ([17]'den uyarlanmıştır)	30
Şekil 2.27 Radar komuta kontrol güdümü ([23]'ten uyarlanmıştır)	36
Şekil 2.28 Pasif radar güdümü ([23]'ten uyarlanmıştır)	37
Şekil 2.29 Yarı aktif radar güdümü ([23]'ten uyarlanmıştır)	37
Şekil 2.30 Aktif radar güdümü ([23]'den uyarlanmıştır)	38
Şekil 3.1 Konik taramalı radar ve uygulanan ters kazanç karıştırma sinyalinin genlik örüntüsü ([3]'ten uyarlanmıştır)	41
Şekil 3.2 Radarın karıştırılması ile takip döngüsünün kırılması	41
Şekil 3.3 Otomatik kazanç devresi blok diyagramı ([25]'ten uyarlanmıştır)	42
Şekil 3.4 Karıştırıcı tarama frekans değişimi ve takip radarının yön ölçüm hatası [27]	44
Şekil 3.5 COSRO radarın karıştırılması ve çökme tespiti [27]	45
Şekil 3.6 Harmonik genlik modülasyonunda zaman eksenini.....	46
Şekil 3.7 Harmonik genlik modülasyonunda frekans eksenini.....	47
Şekil 4.1 Dikdörtgen dalgalarda darbe genişliği ve periyodu	50
Şekil 4.2 Harmonik frekanslar.....	54
Şekil 4.3 Harmoniklerin toplanmasıyla periyodik kare dalga oluşum örneği	55
Şekil 4.4 Görev döngüsünün %25 ve %75 olması durumunda Fourier katsayıları (A=1)	58
Şekil 4.5 Görev döngüsünün %40 ve %60 olması durumunda Fourier katsayıları (A=1)	58
Şekil 4.6 Görev döngüsünün Fourier katsayılarına etkisi	59
Şekil 4.7 Görev döngüsünün ilk altı harmonik frekanstaki etkisi	60

Şekil 4.8 Görev döngüsü %25 olan dikdörtgen dalga örneği	61
Şekil 4.9 Frekans taramalı karıştırma sinyali	62
Şekil 4.10 Simülatör blok diyagramı	63
Şekil 4.11 Arayıcı başlık blok diyagramı	64
Şekil 4.12 Karıştırma birimi blok diyagramı	66
Şekil 4.13 İletme ortamı blok diyagramı	66
Şekil 4.14 Alma ortamı blok diyagramı	67
Şekil 4.15 Frekans taramasına bağlı oluşan hata ve genlik değerleri (1 - 60 Hz). 68	
Şekil 4.16 Frekans taramasına bağlı oluşan hata ve genlik değerleri (20 – 30 Hz)	69
Şekil 5.1 Farklı görev döngülerinde frekans aralıklarındaki etkinlik değerleri	73
Şekil 5.2 Her frekans aralığı için görev döngülerinin etkinliğe etkisi	74
Şekil 5.3 Her frekans aralığındaki normalize etkinlik değerleri	76
Şekil 5.4 Frekans aralığına göre uygun görev döngüsü	77
Şekil 5.5 Karıştırıcı ve tehdit radarın zamana göre yaptığı frekans taramaları	78
Şekil 5.6 Tarama Frekansı 10-20 Hz iken karıştırma sinyal seviyesi örneği.....	79
Şekil 5.7 Farklı görev döngüleri için örnek açısıl hata grafikleri	80
Şekil 5.8 Farklı frekans aralıklarında görev döngüsüne göre ortalama hatalar.....	81
Şekil 5.9 Normalize edilmiş ortalama hatalar.....	82
Şekil 5.10 Simülasyon sonuçlarına göre uygun görev döngüsü	84
Şekil 6.1 Türev ile çökme tespiti simulink modeli.....	88
Şekil 6.2 Türev ile çökme tespiti etkinlik analizi (30 Hz)	89
Şekil 6.3 Türev ile çökme tespiti etkinlik analizi (45 Hz)	90
Şekil 6.4 Kayan pencere ile çökme tespiti simulink modeli.....	92
Şekil 6.5 Kayan pencere ile çökme tespiti etkinlik analizi (30 Hz)	93
Şekil 6.6 Kayan pencere ile çökme tespiti etkinlik analizi (45 Hz)	94

Şekil 6.7 Harmonik genlik modülasyonu devam ederken çökme tespiti ile bulunan frekans aralığında tarama yapılması sonucu oluşan radar açısal hata grafiği 96

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

P_D	Radar tarafından gönderilen sinyalin güç yoğunluğu
P_r	Radar tarafından alınan yankının gücü
P_t	Radardan gönderilen sinyalin gücü
G_t	Gönderme anteninin kazancı
G_r	Alma anteninin kazancı
A_e	Eşdeğer anten alanı
λ	Sinyalin dalga boyu
σ	Radar kesit alanı
R	Menzil
c	Işık hızı
f_d	Frekanstaki değişim miktarı
f_0	Gönderilen dalganın frekansı

Kisaltmalar

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AGC	Automatic Gain Control
BW	BeamWidth
COSRO	Conical Scan on Receive Only
CW	Continuous Wave
ED	Elektronik Destek
EH	Elektronik Harp
EK	Elektronik Korunma
ELINT	Electronic Intelligence
ERP	Effective Radiated Power
ET	Elektronik Taaruz
ESM	Electronic Support Measurement
ET	Elektronik Taaruz
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave

GD	Görev Döngüsü
LORO	Lobe on Receive Only
LPI	Low Probability of Intercept
MTI	Moving Target Indicator
NATO	North Atlantic Treaty Organization
PRI	Pulse Repetition Interval
PW	Pulse Width
RSS	Received Signal Strength
RWR	Radar Warning Receiver
SLB	Side Lobe Blanking
TESS	Tactical Engagement Simulation Software
VGA	Variable Gain Amplifier

1. GİRİŞ

Elektronik Harp (EH), elektromanyetik spektrumu kontrol etme, bir düşmana saldırma veya spektrum yoluyla düşman saldırılarını engelleme ile ilgili olan askeri eylemlerdir. Elektronik harpte amaç, rakibin elektromanyetik spektrumu kullanmasını engellemek ve dost unsurların spektruma engelsiz erişimini sağlamaktır [1].

Askeri haberleşme sistemleri, radar sistemleri ve radar güdümlü silah sistemleri, elektromanyetik alanda gerçekleştirilen bu savaşta ön plana çıkan tehditlerin başında gelmektedir [2]. Öne çıkan bu tehditlerden radar güdümlü silah sistemleri ise en hızlı karşılık verilmesi gereken tehditlerden biri olarak ele alınabilir. Radar güdümlü silah sistemlerinin arayıcı başlıklarında kullanılan radarların antenlerinin konik tarama yapması ile radar sinyallerinin genliklerinde modülasyon oluşturularak hedefin anlık açisal yönünün takibi yapılabilmektedir. Hedef sistemin, kendisine yöneltilen güdümlü bir silaha karşılık veremediği durumlarda ise sonuçları ağır olabilmektedir. Bu sebeple hedef sistemlerin kendini koruması gerekliliği ön plana çıkmıştır. Bu kapsamda, geliştirilen Elektronik Destek Sistemleri sayesinde konik taramalı radarların hedef takibini yapabilmek için oluşturduğu genlik modülasyonu bilgisi tespit edilebilmektedir. Tespit edilen modülasyon bilgisi ise kendisini takip eden tehdit sistemi karıştırmak için kullanılmaktadır. Bu sayede hedefler, radar güdümlü silahlardan kendilerini korumayı başarmaktadırlar. Bu durumda, takip radarlarının ise karıştırılmalarına yönelik önlem almaları (karşı karşı tedbir) gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Açisal izleme yapan radarlarının karıştırılabilmesindeki en büyük etkenlerden birisi radarın tarama yaparken oluşturduğu modülasyon bilgisinin tespit edilebilmesidir. Radar sistemlerinde ise bu duruma önlem alınabilmesi amacı ile farklı bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin uygulandığı iki tip radar vardır. Bunlar, COSRO (*Conical Scan on Receive Only*) ve LORO (*Lobe on Receive Only*) radarlardır.

Bu yöntemde, radar sistemi ikinci bir anten kullanımı ile elektromanyetik sinyalleri almak ve göndermek için kullandığı antenleri ayırmıştır. Takip mekanizması için gerekli olan genlik modülasyonu bilgisi, gönderme anında kullanılan anten

merkezde sabit tutulup, sadece alma anında kullanılan anten hareket ettirilerek oluşturulmuştur. Bu sayede hedef sistem üzerinde herhangi bir modülasyon oluşmadığı için hedef sistemler açısından yalnızca almada tarama yapan radar güdümlü silah sistemlerine karşı bir zafiyet oluşmuştur.

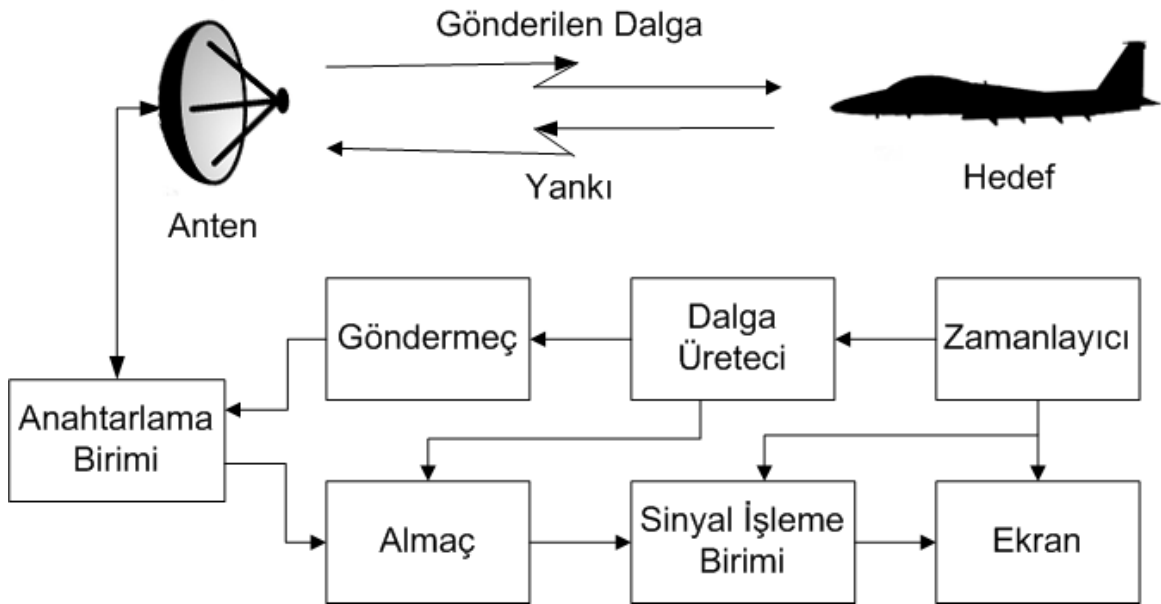
Bu tez çalışmasında, COSRO veya LORO radarlara sahip tehditlere karşı oluşan bu zafiyetin giderilebilmesi için radarların anten tarama frekanslarını bulmaya gerek kalmadan hızlı ve etkili şekilde karıştırma yöntemi olarak harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma tekniği incelenmiştir. Ayrıca geniş taramalı genlik modülasyonu ile karıştırma yöntemi kullanılarak oluşturulan çökmelerin tespit edilmesi ile COSRO ve LORO radarların anten tarama frekansının bulunabilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır.

Tez metninin yapılandırılması kısmında, ikinci bölümde radar ve elektronik harp temelleri ele alınmış ve COSRO ve LORO tipi takip radarları sunulmuştur. Üçüncü bölümde, konik anten taraması yapan radarların karıştırılmalarında kullanılan temel yöntemler belirtilmiştir. Dördüncü bölümde Fourier serileri ve harmonik frekanslar konusu ile analizler sırasında kullanılan simülasyon programının yapısı ele alınmıştır. Beşinci bölümde COSRO ve LORO radarları karıştırmak için kullanılan harmonik genlik modülasyonlu karıştırma yöntemi için teorik ve simülasyon ile etkinlik analizi çalışmaları yapılmış, bu yöntem ile yapılacak bir karıştırma işleminin etkinliğinin maksimum olabilmesi için yapılabilecek parametre ayarlamaları sunulmuştur. Altıncı bölümde COSRO radarların anten dönme frekanslarının bulunabilmesi için kullanılan bir yöntem olan çökme tespiti yöntemi, türev ve kayan pencere tabanlı iki ayrı yöntem ile analiz edilmiştir. Yedinci bölümde ise harmonik genlik modülasyonlu karıştırma yönteminin teorik ve simülasyon analizi sonuçlarının mukayesesi yapılmış ve çökme tespiti ile anten dönme frekansının bulunabilmesinin önemi ele alınmıştır.

2. RADAR ve ELEKTRONİK HARP TEMELLERİ

2.1 Radar Temelleri

Radar kelimesi “Radio Detection and Ranging” kelimelerinin kısaltılmasıyla oluşmuştur. Radarlar radyo dalgalarının kullanılması ile hedeflerin yerini, büyüklüğünü veya hızını tespit etmekte kullanılmaktadır. Radarların çalışma prensipleri elektromanyetik dalgaların nesnelerin üzerinden yansması ilkesine dayanmaktadır. Şekil 2.1’de jenerik bir radar blok diyagramı örneği sunulmuştur.



Şekil 2.1. Jenerik radar blok diyagramı

Radarlar kendilerine verilen görevi yerine getirebilmek için temel olarak dalga üreteçlerinde elektromanyetik dalgalar üretilip göndermeç birimlerine iletilir. Göndermeç birimine iletilen dalgalar buradan anten birimine yönlendirilir ve anten yardımıyla da ortama yayılırlar. Yayılan dalgalar bir nesneye ulaştığında o nesneden yansıyarak farklı yönlerde saçılırlar. Saçılan sinyallerden bazıları ise radara geri döner. Radarların nesnelerden yansıyan sinyallerine yankı (radar echo) denilmektedir. Saçılan yankılar tekrar anten vasıtası ile radar tarafından alınır ve almaç birimine iletilir. Almaç biriminden sinyal işleme birimine iletilen yankının

şiddeti, yönü ve geri gelme süresi hesaplanarak hedefler hakkında bilgi derlenir. Bu bilgiler, bir ekran vasıtasıyla radar operatörüne bilgi olarak sunulur.

2.1.1 Radarda Hesaplama Yöntemleri

Güç Hesaplama

Radardların gönderdikleri elektromanyetik dalgaların güçlerinin hesaplanması işlemi tek yönlü ve çift yönlü olarak ele alınabilir. Tek yönlü radar denkleminde Denklem (2.2)'de verilen radardan yayılan sinyalin bir ED sistemi almacındaki gücünün (P_r) hesaplanma işlemi, Denklem (2.1)'de verilen güç yoğunluğunun (P_D), eşdeğer anten alanı (A_e) ile çarpılması sonucu bulunur.

Radardların gönderdikleri elektromanyetik dalgaların güçlerinin hesaplanması işlemi tek yönlü ve çift yönlü olarak ele alınabilir. Tek yönlü radar denkleminde Denklem (2.1)'de verilen güç yoğunluğunun (P_D)

$$P_D = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (2.1)$$

eşdeğer anten alanı (A_e) ile çarpılması sonucu, Denklem (2.2)'de verilen, radardan yayılan sinyalin bir ED sistemi almacındaki gücü (P_r)

$$P_r = \frac{P_t G_t A_e}{4\pi R^2} \quad (2.2)$$

hesaplanır.

Burada;

P_t : Radardan gönderilen sinyalin gücü (watt)

G_t : Gönderme anteninin kazancı

R : Menzil (metre)

olarak alınmaktadır.

Denklem (2.3) ile verilen anten kazancı formülü kullanılarak,

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2.3)$$

Denklem (2.4)'te verilen eşdeğer anten alanı bilgisi

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2.4)$$

elde edilir. Bu sayede almaca ulaşan güç seviyesi Denklem (2.5)'teki gibi

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (2.5)$$

hesaplanabilir. Bu hesaplamada ortam yayılım kayıpları ihmal edilmiştir.

Çift yönlü radar denkleminde ise radar sinyali hedeften yansıdıktan sonra tekrar radar almacına ulaştığındaki sinyal gücü hesaplanmaktadır [3]. Radara geri yansıyan güç hesaplanırken öncelikle hedeften yansıyan güç miktarı hesaplanmalıdır. Hedeften yansıyan güç miktarı ise Denklem (2.3)'te bulunan eşdeğer anten alanı (A_e) ifadesinin yerine radar kesit alanı (σ) ifadesinin kullanılması ile hesaplanabilir. Anten kazanç formülü bu kapsamda yeniden yazıldığında Denklem (2.6)'daki gibi

$$G_r = \frac{4\pi\sigma}{\lambda^2} \quad (2.6)$$

olmaktadır. Bu sayede hedeften yansıyan sinyalin gücü Denklem (2.7)'deki gibi

$$\text{Hedeften Yansıyan Sinyalin Gücü} = \frac{P_t G_t \lambda^2 4\pi\sigma}{(4\pi R)^2 \lambda^2} \quad (2.7)$$

hesaplanmaktadır.

Radara ulaşan sinyalin radar almacında hesaplanan gücü ise Denklem (2.7)'de hesaplanan hedeften yansıyan sinyalin gücünü, gönderilen sinyal gücü ($P_t G_t$) gibi ele alarak Denklem (2.5)'te verilen tek yönlü radar denkleminde almaca ulaşan güç formülü kullanılarak Denklem (2.8)'deki gibi

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.8)$$

hesaplanabilir.

Burada;

P_D : Radar tarafından gönderilen sinyalin güç yoğunluğu (watt/m²)

P_r : Radar tarafından alınan yankının gücü (watt)

P_t : Radardan gönderilen sinyalin gücü (watt)

G_r : Alma anteninin kazancı

G_t : Gönderme anteninin kazancı

R : Menzil (metre)

A_e : Eşdeğer Anten Alanı (m²)

λ : Sinyalin dalga boyu (metre)

σ : Radar kesit alanı (m²)

olarak alınmaktadır.

Maksimum Radar Menzili Hesaplama

Maksimum menzil denklemi, maksimum menzilin bulunabilmesi için Denklem (2.8)'de verilen çift yönlü radar denkleminin yeniden yazılması ile ortaya çıkan ve Denklem (2.9)'da verilmiş olunan denklemdir. Maksimum radar menzili hedefin artık doğru bir şekilde işlenemediği veya tespit edilemediği mesafe olarak tanımlanabilir [3].

$$R_{max} = \left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_{min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.9)$$

Burada, P_{min} değeri radarın algılayıp işleyebileceği en düşük sinyal gücüdür.

Radarda Mesafe Hesaplama

Elektromanyetik dalgalar atmosferik ortamda ışık hızında yayılırlar. Şekil 2.2’de örneği verilen bir elektromanyetik dalga hedefe ulaştığında yansıyor ve tekrar radara döner. Bu sayede darbeleri yayın yapan bir radarda elektromanyetik dalganın çıkış ve radara tekrar geri dönüş süresi belirlenebilir. Elektromanyetik dalganın atmosferde yayılma hızının frekanstan bağımsız olarak ışık hızına eşit olması sayesinde belirlenen gidiş geliş süreleri kullanılarak hedef ile radar arasındaki mesafe basit bir formül ile hesaplanabilir.

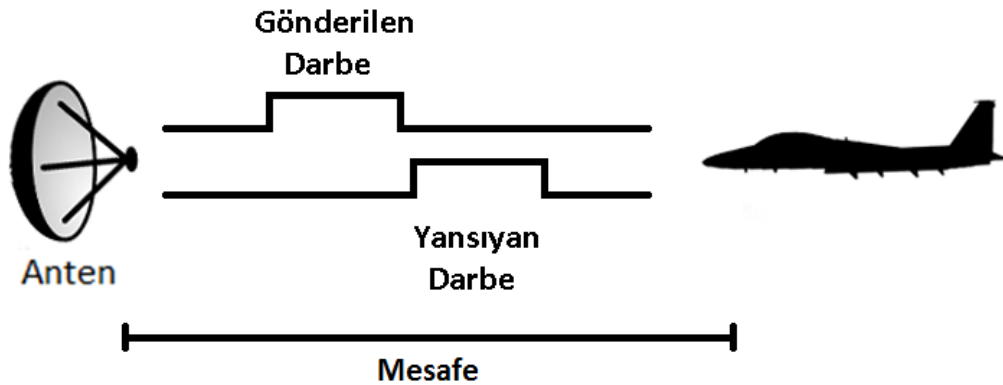
$$R = \frac{c\Delta t}{2} \quad (2.10)$$

Burada;

R : Hedef ile radar arasındaki mesafe (metre)

c : Işık hızı (m/sn)

t : Darbenin radardan ayrılış ve geri geliş zamanları arasındaki fark (sn) olarak alınmaktadır.



Şekil 2.2 Radar mesafe ölçümü

Denklem (2.10)’da hız ve süre çarpımının menzilin iki katına eşit olması, darbenin radardan ayrıldıktan sonra önüne çıkan hedeften yansıyor ve tekrar radara ulaşması sırasında hedef ile radar arasındaki mesafeyi hem gidiş hem dönüş anında aynı yolu iki kez alması ile açıklanabilir.

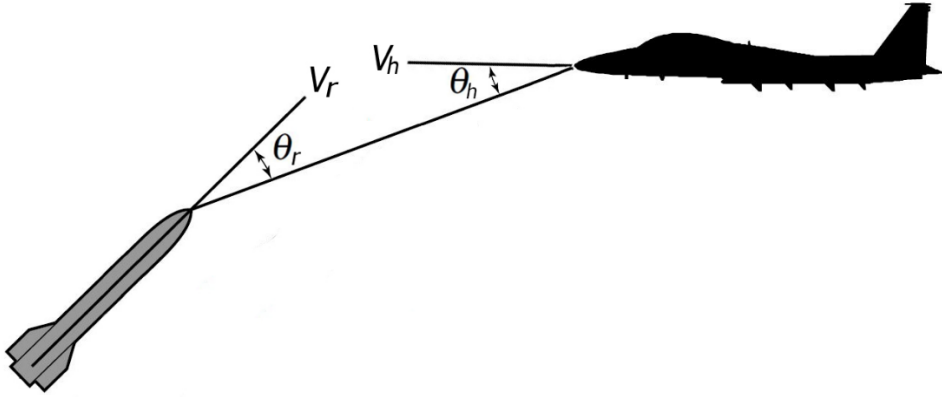
Mesafe Değişim Hızı Hesaplama

Mesafe değişim hızı, doppler kayması ile hesaplanabilmektedir. Bu ölçüm metodunda gönderilen elektromanyetik dalganın hedeften yansıdıktan sonra tekrar radara ulaştığı sırada frekansındaki değişim miktarına bakılmaktadır. Eğer hedef veya radar hareket halindeyse dalganın frekansında menzil değişim hızıyla orantılı bir değişim olmaktadır. Eğer hedef ile radar arasındaki mesafe azalıyorsa frekans değişimi pozitif, artıyorsa negatif olmaktadır [4]. En basit durumda radar ve hedef birbirlerine doğru hareket ettiklerinde Denklem (2.11)'deki gibi olmaktadır.

$$f_d = f_0 \left(\frac{v_c}{c} \right) \quad (2.11)$$

Eğer radar ve hedef doğrudan birbirlerine veya tersi yöne yönlenmeyip Şekil 2.3'teki gibi yönlenmişlerse doppler kayması Denklem (2.12)'deki gibi olmaktadır.

$$f_d = f_0 \left(\frac{v_r \cos \theta_r + v_h \cos \theta_h}{c} \right) \quad (2.12)$$



Şekil 2.3 Mesafe değişim hızı hesaplama

Burada:

f_d : Frekanstaki değişim miktarı (MHz)

f_0 : Gönderilen dalganın frekansı (MHz)

v_c : Hedef ile radarın birbirlerine yaklaşma hızı (m/sn)

c : Işık hızı (m/sn)

V_r : Radarın hızı (m/sn)

V_h : Hedefin hızı (m/sn)

θ_r : Radar hız vektörü ile radar ve hedef arasındaki doğrudan yol arasındaki açı

θ_h : Hedef hız vektörü ile radar ve hedef arasındaki doğrudan yol arasındaki açı olarak alınmaktadır.

2.1.2 Temel Radar Parametreleri

Frekans

Periyodik bir elektromanyetik dalganın bir saniye içerisinde kaç periyot tamamladığını belirten değerdir. Radarlarda tipik olarak mikrodalga bantlarından yararlanılmaktadır.

Darbe Genişliği (*Pulse Width, PW*)

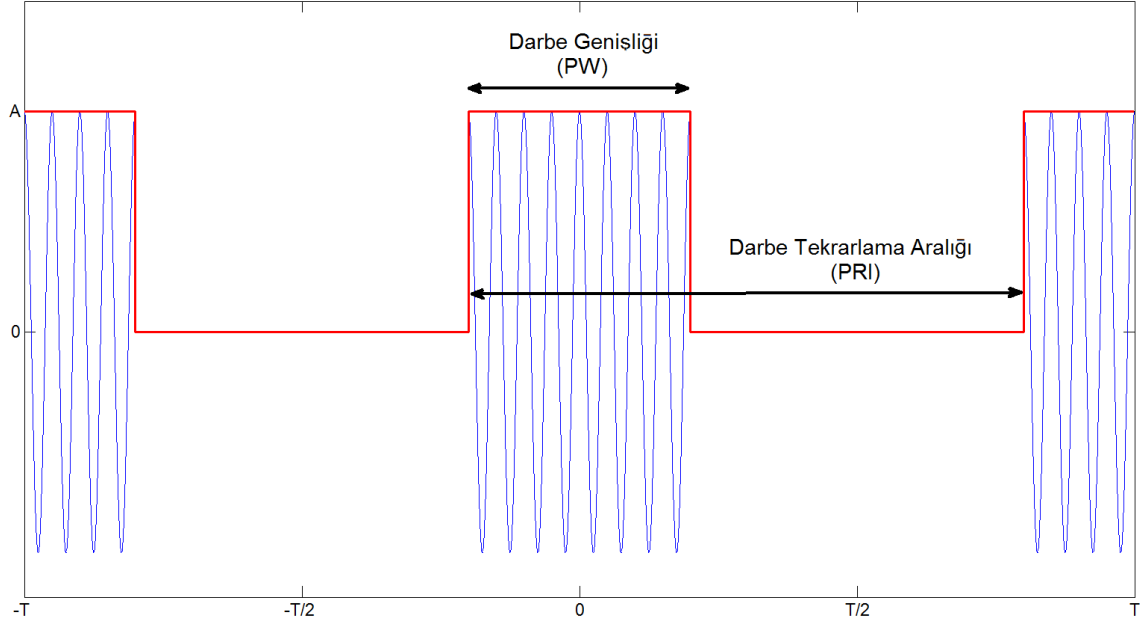
Eğer radar sürekli dalga gönderen (CW) bir radar değilse elektromanyetik dalgayı belirli sürelerde gönderip belirli bir süre boyunca susarak gönderdiği dalganın tekrar kendisine ulaşmasını bekler. Gönderim başladığı andan durdurulduğu ana kadar geçen süreye darbe genişliği denilmektedir. Radarlarda darbe genişliği (PW), radarın türüne göre nanosaniye veya mikrosaniye mertebesinde olabilmektedir.

Darbe Tekrarlama Aralığı (*Pulse Repetition Interval, PRI*)

Periyodik olarak gönderilen darbeler arasındaki süreyi ifade etmektedir. Radarlarda darbe tekrarlama aralığı (PRI), radarın türüne göre mikrosaniye veya milisaniye mertebesinde olabilmektedir. Darbe genişliği ile darbe tekrarlama aralığı arasındaki ilişki Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Anten Örüntüsü

Belirli bir yöne yönlendirilmiş bir antenin radyasyon örüntüsüne bakıldığında hüzmeleri temel olarak ana, yan ve arka hüzmeler olarak üçe ayrılabilirler. İlgili durum Şekil 2.5'te görselleştirilmiştir.



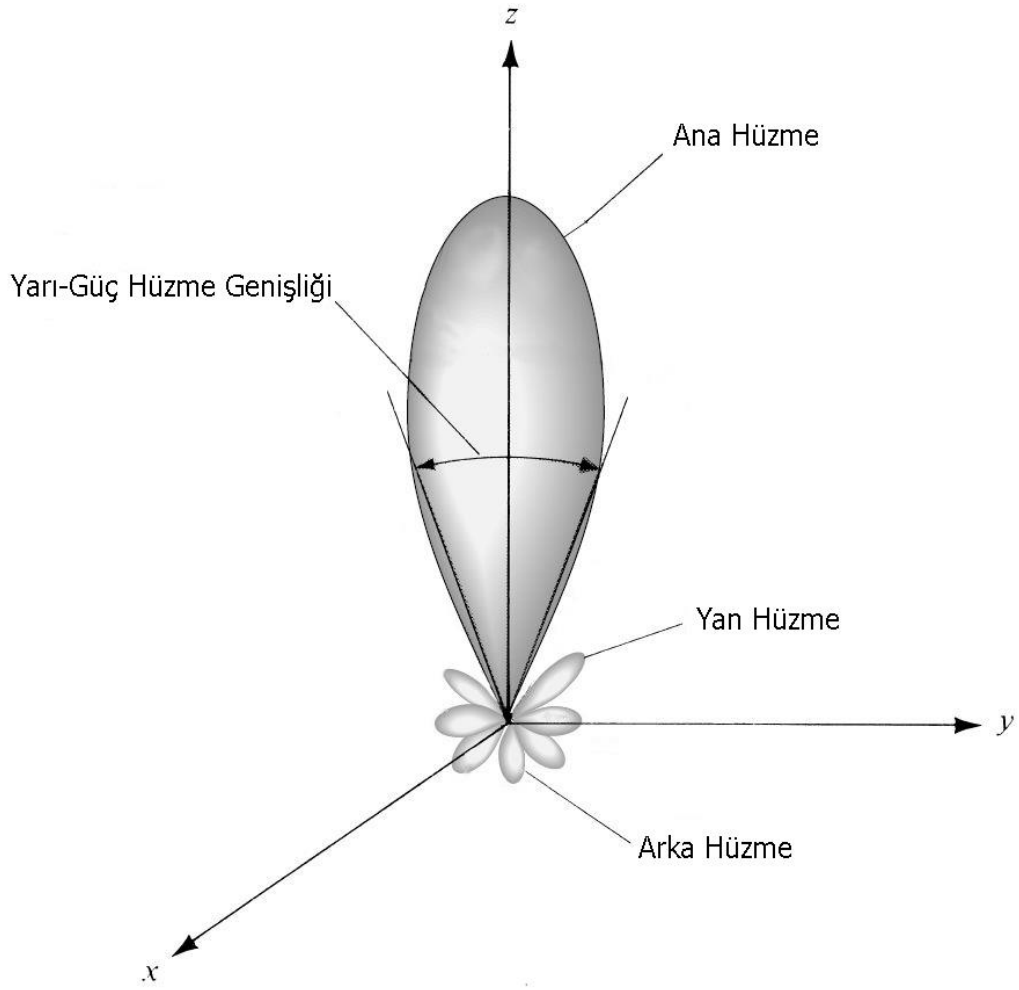
Şekil 2.4 Darbe genişliği ve darbe tekrarlama aralığı

Ana Hüzme: Maksimum radyasyon yoğunluğunun olduğu hüzmeye denilmektedir.

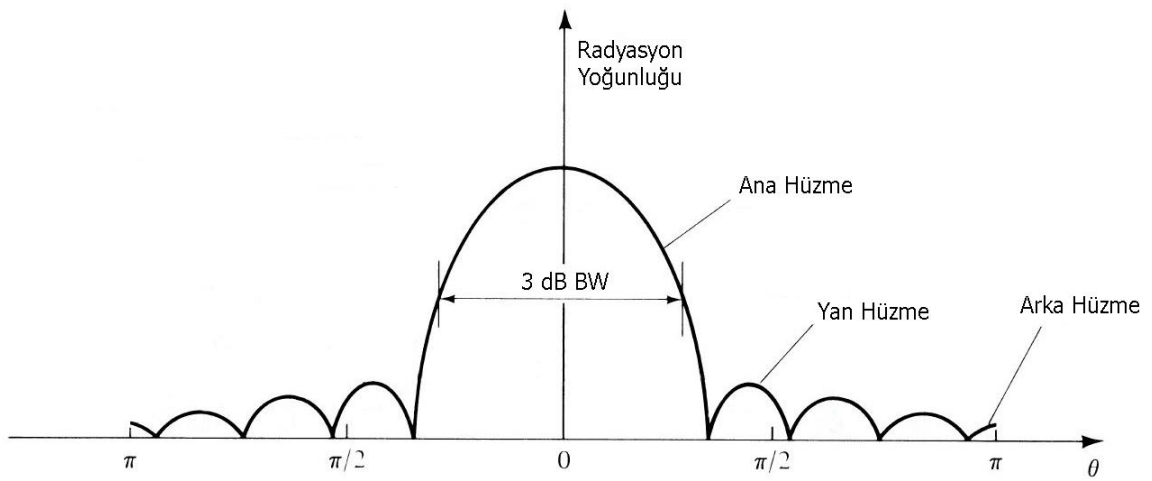
Yan Hüzme: Ana hüzme dışında kalan diğer tüm hüzmelere yan hüzme denilmektedir.

Arka Hüzme: Ana hüzme eksenini ile yaklaşık 180° açı yapan hüzmeye verilen isimdir.

Şekil 2.5'te simetrik üç boyutlu bir polar anten örüntüsü görülmektedir. Aynı örüntünün iki boyutlu görüntüsü ise Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2.5 Bir anten örüntüsünün radyasyon lobları ve hüzme genişliği [5]



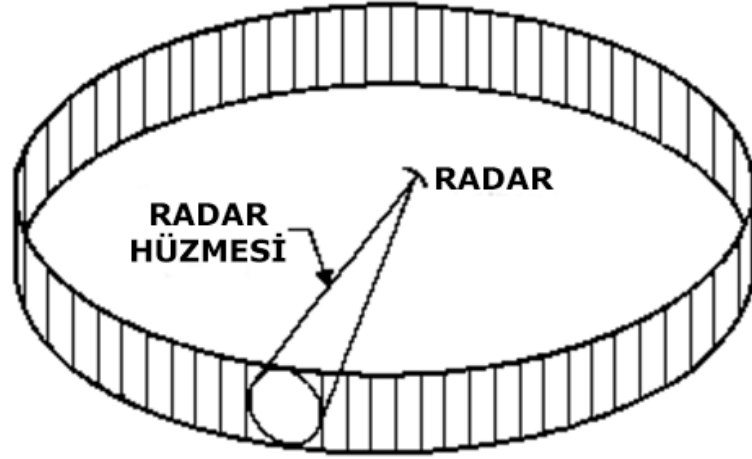
Şekil 2.6 Radyasyon örüntüsünün iki boyutlu görünümü [5]

tekrar geldiği an arasında geçen süre anten tarama periyodu olarak adlandırılmaktadır.

2.1.3 Anten Tarama Tipleri

Dairesel Tarama

Genel olarak arama ve gözetleme radarlarında kullanılmaktadır. Radarın hüzmesi Şekil 2.8’de gösterildiği gibi yatayda saat yönünde veya tersi yönde periyodik olarak sürekli dönüş yapmaktadır. Bu sayede etrafta bulunan hedefler 360°’lik yanca kapsama açısı ile tespit edilebilmektedir.

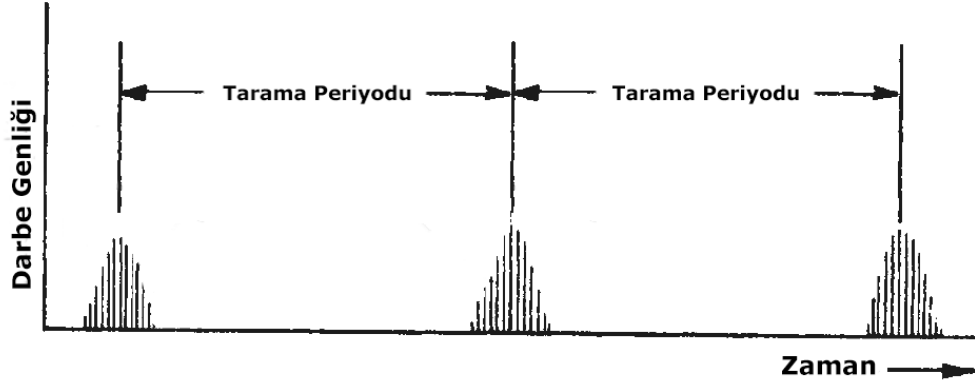


Şekil 2.8 Dairesel tarama yapan radar ([7]’den uyarlanmıştır)

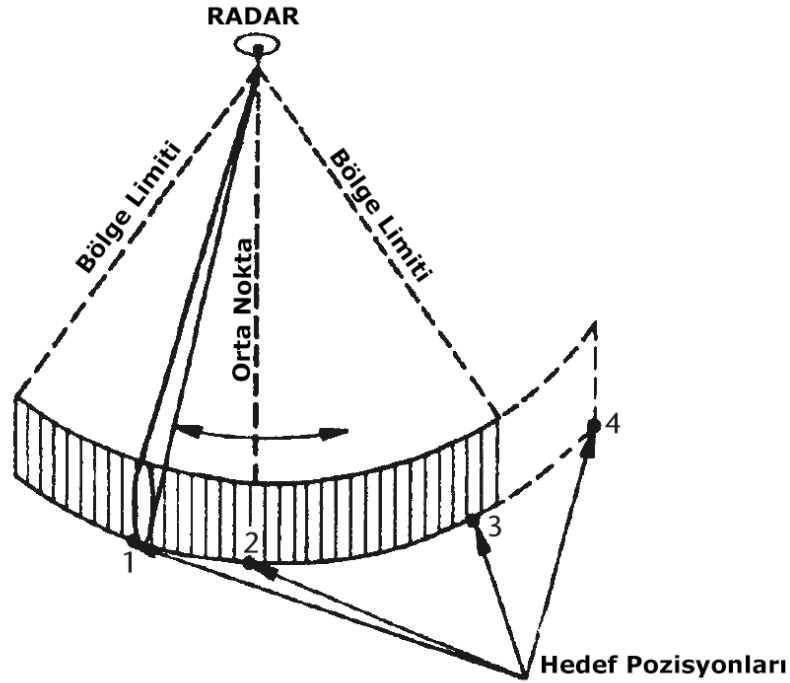
Dairesel tarama yapan bir radarın Elektronik Destek Sistemi tarafından tespit edilmesi durumunda Şekil 2.9’da olduğu gibi aralarında eşit süreler bulunan aydınlatma örüntülerinin oluştuğu tespit edilecektir. Bu örüntü yardımı ile iki tepe arasındaki süre hesaplanarak ilgili dairesel radarın anten tarama periyodu bilgisi bulunabilmektedir.

Bölgesel Tarama

Bölgesel tarama tipinde, Şekil 2.10’da görsel olarak görülebileceği gibi radar hüzmesi belirli bir bölge içerisinde saat yönü ve tersi yönde hareket etmektedir.

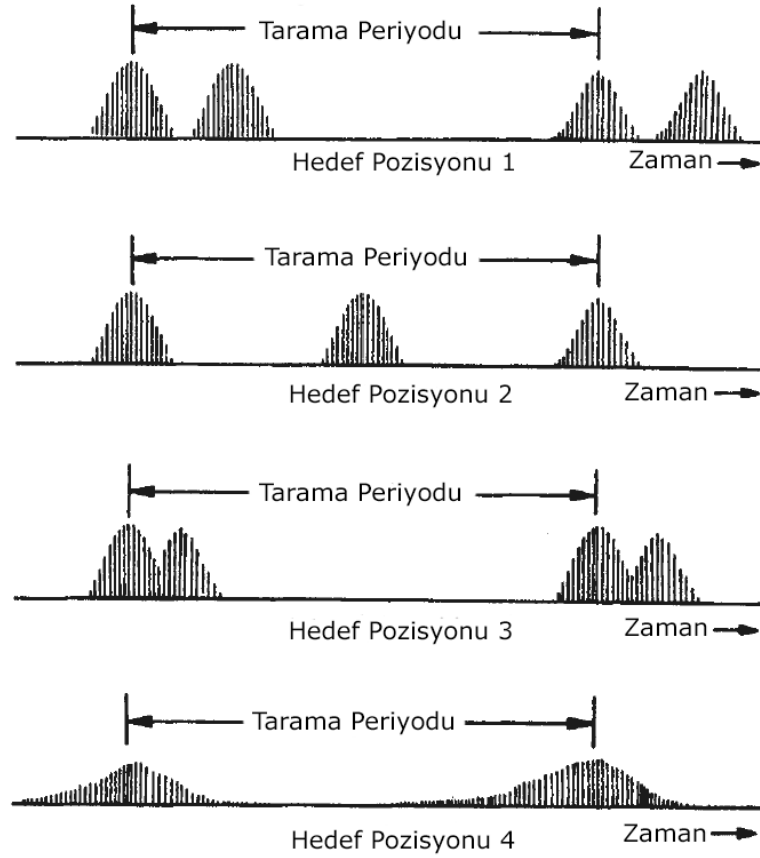


Şekil 2.9 Dairesel tarama tipinin genlik örüntüsü ([7]'den uyarlanmıştır)



Şekil 2.10 Bölgesel tarama örneği ([7]'den uyarlanmıştır)

Bölgesel tarama yapan bir radarın Elektronik Destek Sistemi tarafından tespit edilmesi durumunda Şekil 2.11'de görüldüğü gibi çeşitli örüntüler oluşabilmektedir. Bölgesel taramada tespit edilen örüntülerin değişiklik göstermesinin nedeni hedefin radar tarafından taraman sektörün farklı yerlerinde olabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bölgesel taramada anten tarama periyodu iki çift tepe örüntüsünün arasında geçen sürenin hesaplanması ile bulunmaktadır.



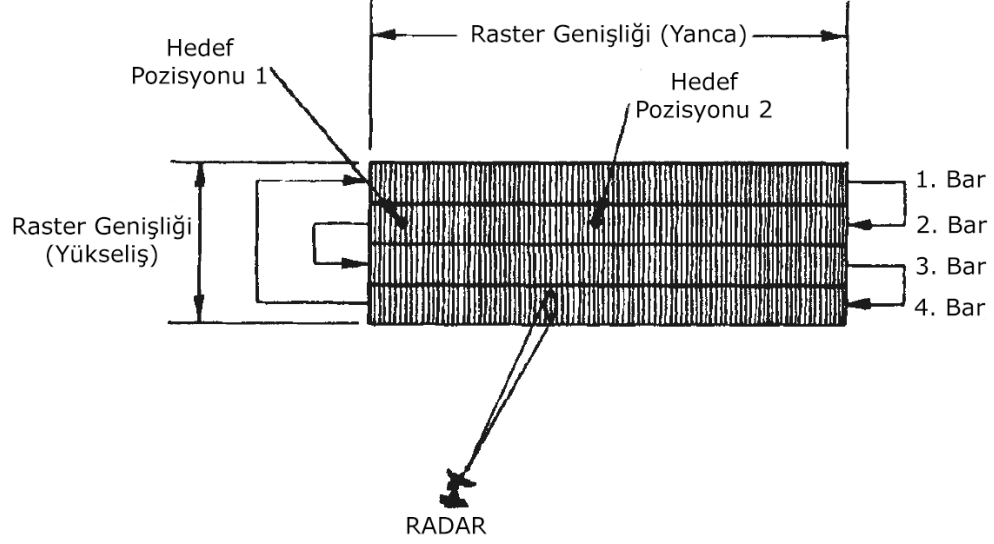
Şekil 2.11 Bölgesel tarama tipinin dört farklı pozisyonda genlik örüntüsü ([7]'den uyarlanmıştır)

Hedefin taranan sektörün tam ortasında veya en uç kısımlarında bulunması tarama periyodunun bulunması açısından zafiyet oluşturmaktadır. Böyle bir durumda tespit edilen örüntüler incelendiğinde yapılan tarama dairesel bir tarama olarak algılanabilmektedir.

Raster Tarama

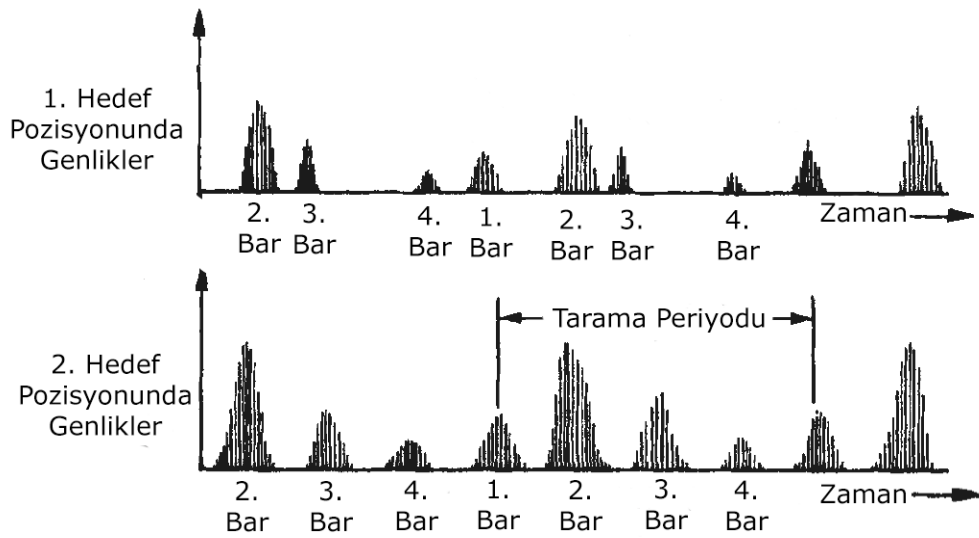
Genellikle savaş uçaklarında, kendilerine ait güdüm sistemleri olan füzelerin ilk ateşlenmeleri için yeterli hassasiyette takip yapılırken aynı zamanda tarama yeteneği (Track While Scan) sayesinde çoklu hedef takibi yapılabilir [8]. Şekil 2.12'de bir örneğinin görülebileceği gibi tarama işlemi başladığında önce yatayda belirli bir genişlikte sektör taraması yapıldıktan sonra radar başlığının dikeyde

hareket ettirilmesiyle farklı bir yükseliş açısında bölgesel tarama yapması şeklinde devam etmektedir.



Şekil 2.12 Dört bar raster tarama yapan radar ([7]'den uyarlanmıştır)

Raster tarama yapan bir radarda farklı genlik örüntüleri oluşabilmektedir. Farklı örüntülerin oluşması hedefin tarama sektörünün farklı noktalarına denk gelmesinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.13'te örnek bir genlik örüntüsü grafiği görülmektedir.

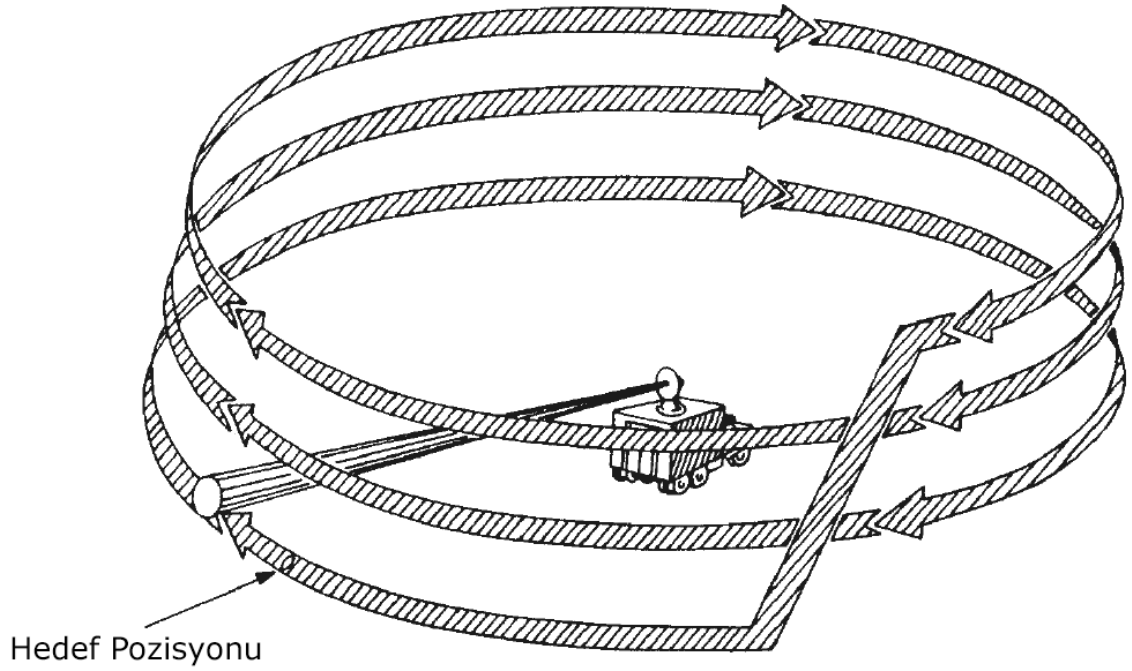


Şekil 2.13 Dört bar raster taramanın genlik örüntüsü ([7]'den uyarlanmıştır)

Tarama tipinin belirlenmesi işleminde radar sinyalinin genliğinin farklı olduğu birden fazla aydınlatma olması bilgisinden yararlanılmaktadır. Genlik seviyeleri birbirine yakın olan iki tepe nokta arasındaki zaman farkı ilgili raster tarama yapan radarın anten tarama periyodunu belirtmektedir.

Sarmal Tarama

Sarmal tarama raster tarama tipine benzer bir tarama gerçekleştirir. Raster taramadan farklı olarak yatayda sadece belirli bir sektörde tarama yapmak yerine 360°'lik bir tarama yapmasıyla ayrılmaktadır. Aynı zamanda, yükseliş açısında da tarama yapabilmesiyle ile dairesel tarama tipinden de farklılaşmaktadır. Şekil 2.14'te sarmal anten taraması yapan bir radar örneği görülmektedir.



Şekil 2.14 Sarmal tarama yapan bir radar örneği ([7]'den uyarlanmıştır)

Örnek genlik örüntüsü Şekil 2.15'te verilmiş olan sarmal taramada, tarama tipinin ve periyodunun belirlenmesi işleminde ise dairesel ve raster tarama tipinin bulmasında kullanılan yöntemler kullanılabilir.



Şekil 2.15 Sarmal tarama tipinin genlik örüntüsü

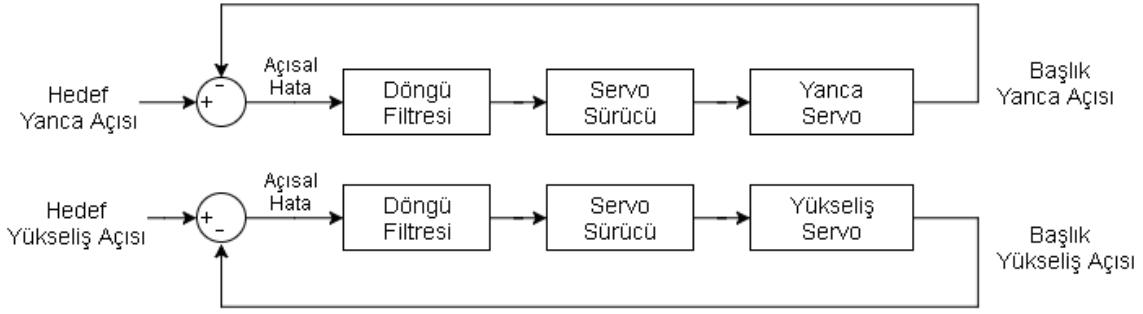
2.1.4 Takip Radarları

Takip radarlarının tespit radarlarından ayrıldığı nokta amaçlarıdır. Tespit radarlarında, büyük bir alan içerisinde hedef tespit edilmeye çalışıldığı için geniş alanları kapsayacak anten taramaları yapılmaktadır. Geniş alanların taranması sebebiyle de anten hüzmesi sürekli hedef üzerinde tutulamadığından ölçüm çözünürlüğü düşük olmaktadır [2]. Bir hedeften sürekli olarak bilgi alınıp takip edilebilmesi için radar hüzmesinin sürekli olarak hedefe yönelmiş olması gerekmektedir. Hedeften gelen sürekliliği olan bilgiler, geri besleme döngülerinde kullanılarak takip mekanizması oluşturulabilir. Geri besleme döngülerindeki temel prensip ise ölçülmesi hedeflenen fiziksel büyüklük ile ölçülen büyüklük arasındaki farkı yani ölçüm hatasını belirlemek ve bu hatayı geri beslemektir. Bu prensip üzerine menzil, doppler veya açısal takip gibi takip devreleri kurulabilir. Takip devrelerinin kurulabilmesi için ise radar hüzmesinin sürekli olarak hedef üzerinde olması gerekmektedir. Bu gereklilik nedeni ile takip radarlarında en kritik bileşen açısal takip döngüleridir.

Açısal Takip Devresi

Diğer takip devrelerinin kurulmasında da önemli bir yere sahip olan açısal takip devrelerinin, radar füze güdümünde de kullanılıyor olması önemini daha da artırmaktadır.

Açısal takibin yapılabilmesi için radar anteninin hüzmesinin hedefe yönelebilmesi gerekir. Bunun için ise antenlerin yanca ve yükseliş açılarında serbest hareket edebilen bir yapıya monte edilmesi gerekmektedir. Örnek yanca ve yükselişte açısal takip döngülerini belirten blok diyagramlar Şekil 2.16'da görülebilmektedir.



Şekil 2.16 Açısal takip döngüleri

Antenin bu iki ekseninde bağımsız hareket etmesini sağlayan iki ayrı servo motor kullanılmaktadır. Servo motorların sürücüleri ise, açısal izleme hataları ile beslenerek açısal izleme döngüsü kapatılır [2].

Açısal takip için tek darbe (*monopulse*), lob anahtarlama, konik taramalı, LORO ve COSRO radarlar kullanılmaktadır.

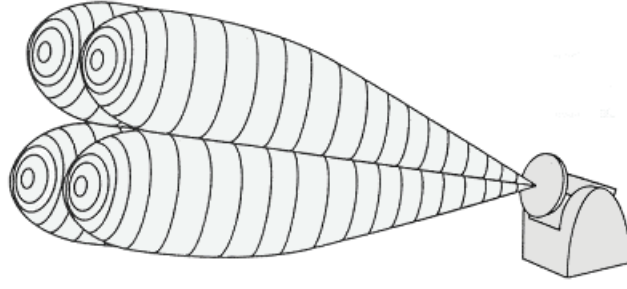
2.1.5 Tek Darbe Radarları

Tek darbe radarları diğer tarama yapan radarlardan farklı olarak gereken açının ölçülmesi işlemini tek bir darbe ile yapabilmektedir. Bunu, radar sinyalini iki veya daha fazla anten hüzmelerinden eş zamanlı olarak alıp karşılaştırarak yapabilmektedir.

Tek darbeden açı ölçümlerinde genellikle genlik karşılaştırmalı ve faz karşılaştırmalı olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır.

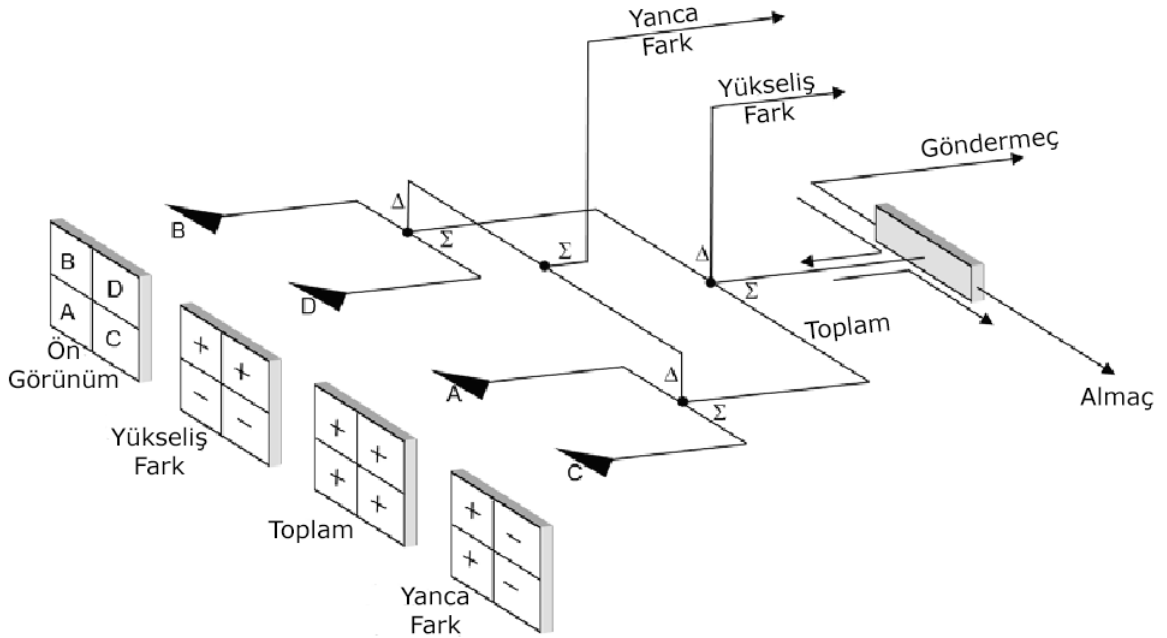
Genlik Karşılaştırmalı Tek Darbe Radarları

Hem yanca hem de yükseliş ekseninde açısal ölçüm yapılabilmesi için hüzmeler, ana hüzmeleri arasında belirli bir açı olacak şekilde ve birbirleri ile belirli ölçüde örtüştürülerek konumlandırılırlar.



Şekil 2.17 Dört hüzmeli tek darbe radarında hüzmeler ([9]'dan uyarlanmıştır)

Dört hüzmeli bir tek darbe radarında hüzmeler, Şekil 2.17'de gösterdiği gibi hem yanca hem de yükseliş açılarının ölçülebilmesi için dört ayrı konuma yerleştirilmiştir.



Şekil 2.18 Genlik karşılaştırmalı tek darbe radarı ([8]'den uyarlanmıştır)

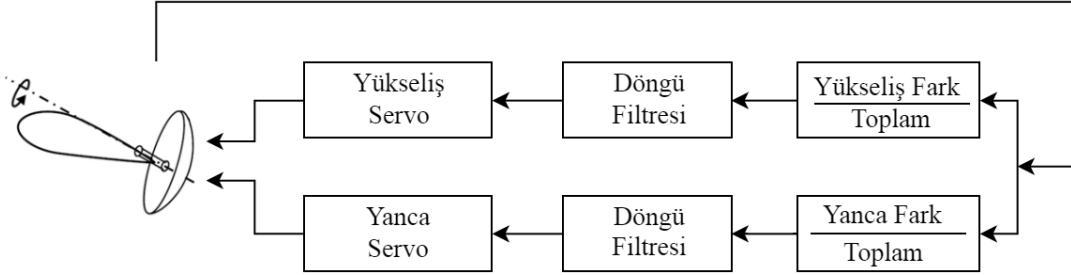
Dört hüzmeye eş zamanlı olarak alınan bir darbenin genlik karşılaştırmasıyla açısının bulunabilmesi için hüzmelerden elde edilen genliklerin toplam ve farkları Şekil 2.18'de görselleştirildiği gibi belirlenmektedir.

$$Toplam = A + B + C + D$$

$$Yanca Fark = (A + B) - (C + D)$$

$$Yükseliş Fark = (B + D) - (A + C)$$

Yanca ve yükselişte fark sinyalleri normalizasyon için toplam sinyaline bölünürler. Bu sayede normalize edilmiş fark sinyalleri, sinyal şiddetinden bağımsız olarak doğrudan açısal hata sinyali olarak kullanılabilirler. Örnek bir genlik karşılaştırmalı tek darbe radarına ait blok diyagram Şekil 2.19'da görselleştirilmiştir.

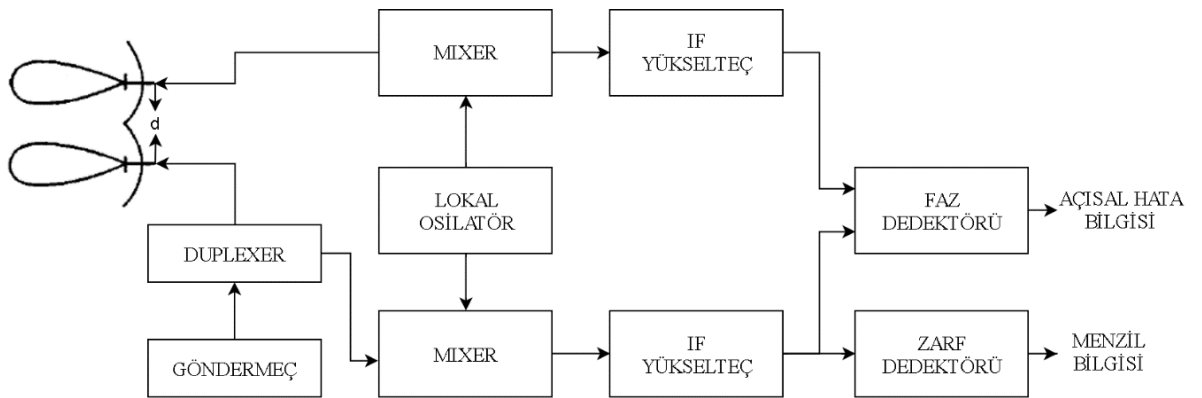


Şekil 2.19 Genlik karşılaştırmalı tek darbe radarı blok diyagramı [2]

Normalize hata sinyalleri de geri besleme döngülerine iletilerek yanca ve yükselişte hedef takibi sağlanır.

Faz Karşılaştırmalı Tek Darbe Radarları

Açısal izleme işleminin genlik karşılaştırması yerine faz karşılaştırması ile yapıldığı tek darbe radarlarıdır. Bu yapıda iki hüzmeye, Şekil 2.20'de de görülebileceği gibi eksenleri paralel olacak şekilde yan yana yerleştirilir. Anten çıkışlarındaki sinyaller, lokal osilatör ile ara frekans katına indirilir. Ara frekans katında yükselteçten geçirilen sinyallerin arasındaki faz kayması, bir faz dedektörü ile tespit edilir. Faz dedektörünün çıkışındaki sinyal, servolara iletilerek döngü tamamlanmış olur.

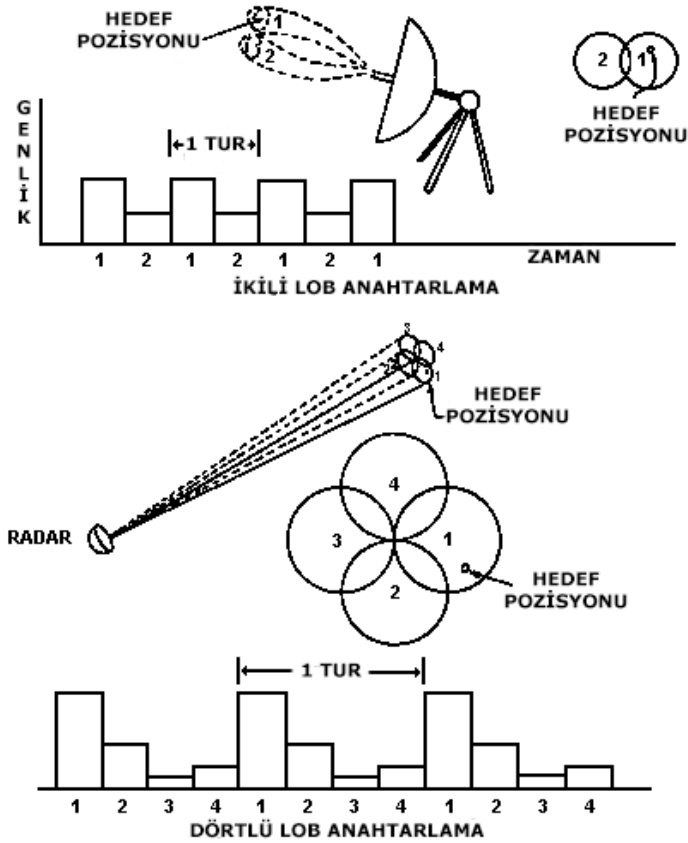


Şekil 2.20 Faz karşılaştırmalı tek darbe radarı blok diyagramı ([10]'dan uyarlanmıştır)

Burada faz kayması, sinyalin hüzme eksenini ile yaptığı açıyla orantılı olacaktır. İki hüzme ile sadece tek eksende açısal izleme yapılabilirken, dört hüzme ile hem yanca hem de yükselişte aynı anda açısal izleme yapılabilecektir.

2.1.6 Lob Anahtarlama Radar

Lob anahtarlama radar taramada ana hüzmeleri radar merkezine belirli bir yan bakış açısı ile yerleştirilmiş hüzmeler bulunmaktadır. Hüzme sayısı iki iken sadece yanca veya sadece yükselişte açısal izleme yapılabilirken dört hüzme ile hem yatay hem de dikeyde açısal izleme yapılabilmektedir. Şekil 2.21’de iki ve dört adet hüzme anahtarlama yapan iki farklı radarın anahtarlamalarına bağlı ölçtükleri genlik seviyeleri görülebilmektedir.



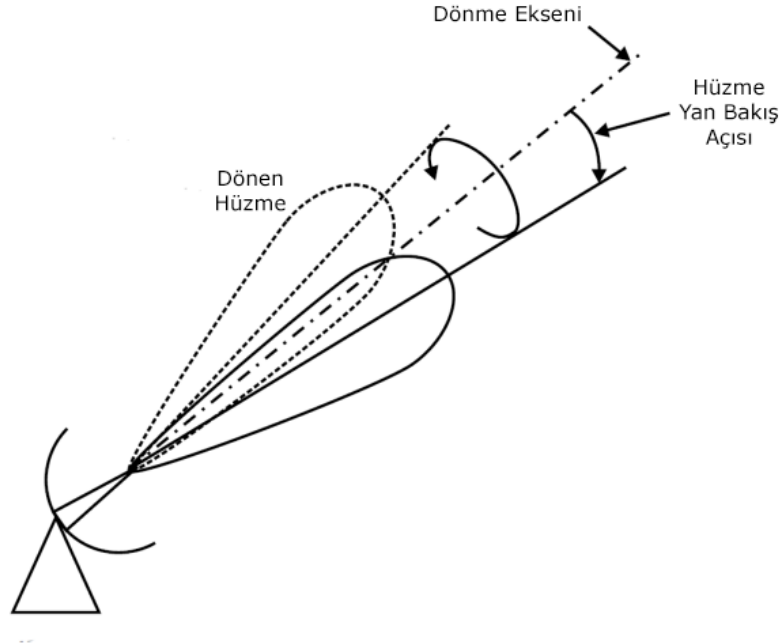
Şekil 2.21 Lob anahtarlama radar taramaları ve oluşan genlik örüntüleri

Radar merkezinin etrafına yerleştirilmiş hüzmelerin sırasıyla anahtarlama ile her hüzmeye gelen sinyalin genlik seviyeleri karşılaştırılarak hedefin yönü belirlenir.

Radarın merkezi, genliğin yüksek olduğu hüzmelere doğru yönlendirilerek takip mekanizması kurulmuş olunur.

2.1.7 Konik Taramalı Radar

Temelde lob anahtarlama radarları ile benzerdir. Lob anahtarlama radarlarından farklı olarak birden fazla hüzmelerin anahtarlama yerine tek bir hüzmelerin radarın hedeflediği merkez etrafında, dönme eksenine göre yan bakış açısı (squint angle) kadar eğim oluşturacak şekilde Şekil 2.22’de belirtildiği gibi küçük daireler çizilerek bu taramayı gerçekleştirmektedir.

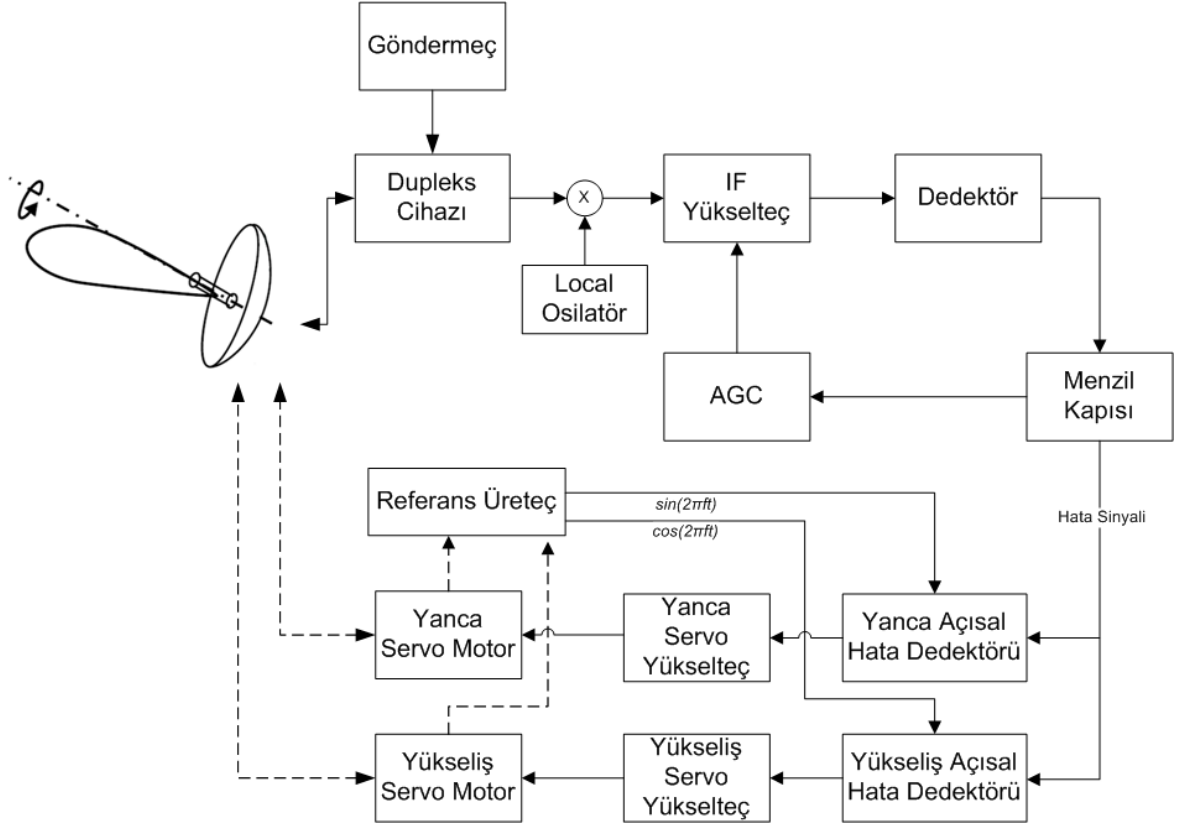


Şekil 2.22 Konik taramalı radar örneği ([8]’den uyarlanmıştır)

Bu taramadaki amaç, hedefin sürekli merkezde kalmasını sağlayacak şekilde anteni hareket ettirmektir. Antenin hedefe yönelmek için yapacağı harekete ise yapılan konik tarama sonucunda oluşan genlik modülasyonlu sinyalin kullanılması ile karar verilmektedir.

Anten hareketlerine karar verilmesi esnasında yapılan işlemler için Şekil 2.23’te verilen blok diyagram üzerinden bakıldığında, gönderilen sinyal hedeften yansıyor tekrar alındıktan sonra, lokal osilatör ile ara frekansa indirilmektedir. Daha sonra ise

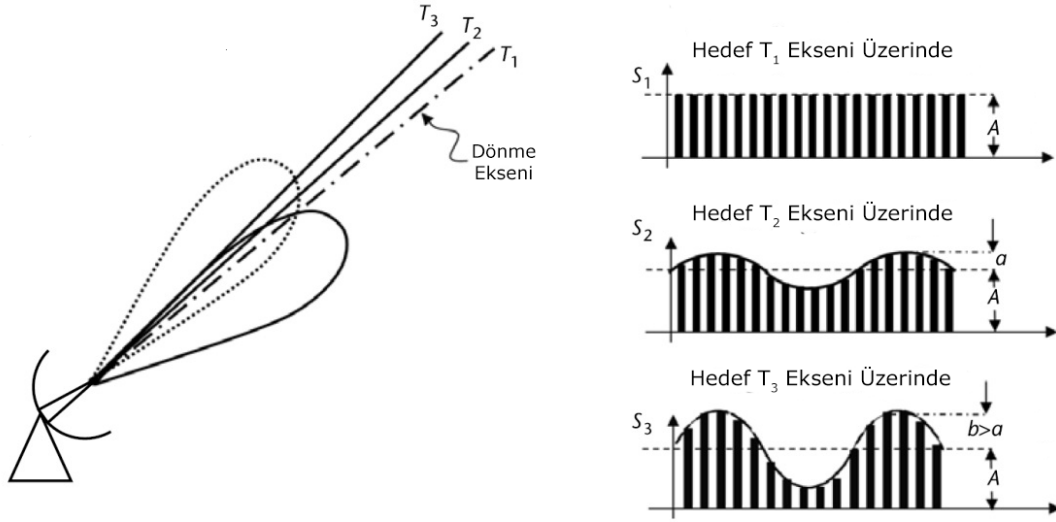
ara frekans yükseltici ile darbelerin genliği ayarlanarak dedektöre iletilmektedir. Dedektörde genliği tespit edilen sinyal menzil kapısına iletilmektedir. Menzil kapısında ise hedefin menzili ölçülerek menzil takibi yapılmaktadır. Menzil kapısı çıkışı aynı zamanda otomatik kazanç kontrol devresine (AGC) de iletilmektedir.



Şekil 2.23 Konik tarama yapan radar blok diyagramı ([11]'den uyarlanmıştır)

Otomatik kazanç kontrol devreleri, kararlı bir açısal izleme döngüsü oluşturulabilmesinde önemli bir yere sahiptirler. Bu devreler, hedefin büyüklüğünden ve menziline bağımsız olarak genlik modülasyonunun sabit bir genlik aralığında oluşabilmesi için ara frekansa indirilmiş sinyale ne kadarlık kazanç uygulanacağını belirlerler. Bu devreler sayesinde gelen sinyalin genliğine bağlı olunmadan kararlı bir açısal izleme döngüsü oluşturulabilir [10]. Genliği belirli bir seviyede sabitlenen hata sinyali yanca ve yükselişte açısal hata dedektörlerine iletilirler. Bu aşamada, antenin konik hareketini sağlayan motorların anlık konumlarına bağlı olarak referans üreticinde üretilen referans sinyalleri de hata dedektörlerine iletilirler. Hata dedektörlerinde, hata sinyali ve referans sinyal arasında faz karşılaştırması

yapılarak servoların ne yönde hareket ettirileceği bilgisi elde edilir. Bu bilgiler de önce servo motor yükselteçlerine ve oradan da ilgili yanca ve yükseliş açılarını ayarlayan servo motorlara iletilerek antenin hedefe yönelmesi sağlanır. Bu işlem, hata sinyalinde modülasyon olduğu sürece tekrarlanarak anten tarama ekseninin her zaman hedefin üzerinde olması sağlanır.



Şekil 2.24 Farklı hedef konumları için oluşan genlik modülasyonları ([8]'den uyarlanmıştır)

Şekil 2.24'teki örneklerde görüldüğü üzere eğer hedef, takip ekseninin tam ortasında değilse radara gelen yankıların genlik seviyeleri hüzmengin anlık pozisyonuna göre değişiklik gösterir. Hüzmengin hedefe yaklaştığı durumlarda yankıların genlik seviyesi daha yüksek olurken hüzmeye hedeften uzaklaştıkça genlik seviyesinde düşüş yaşanır. Başka bir ifadeyle hedefin radarın merkezine olan uzaklığı arttıkça genlik seviyelerindeki değişim de artmaktadır. Değişen genlik seviyeleri zaman ekseninde çizdirildiğinde ise genlik modülasyonlu bir dalga formu olduğu görülmektedir. Hedefin hüzmeye olan uzaklığına bağlı olarak modülasyonun derinliği de değişmektedir. Elde edilen genlik modülasyonu bilgisi kullanılarak radarın takip edici başlığı hareket ettirilerek hedefe yönlendirilmektedir. Eğer radar, hedefi takip ekseninin tam ortasına, yani Şekil 2.24'teki T_1 noktasına alabilirse hüzmeye hangi anında olursa olsun yankıların genlik seviyesi aynı olacağı için sabit bir genlik seviyesi tablosu ortaya çıkar. Bu durumda başarılı bir açısal takip gerçekleştirilmiş olunur. Hedef hareket edip merkezden çıkmaya yönelik hareketler

yapmaya başladığında tekrar oluşacak olan genlik modülasyon bilgisi kullanılarak hedef sürekli olarak merkezde tutulmaya çalışılır. Bu şekilde hedef üzerinde bir açısal takip mekanizması kurulmuş olunur.

2.1.8 COSRO ve LORO Radarlar

Konik ve Lob Anahtarlama radarların yaptığı yayınlar, hedef platform üzerindeki ED sistemi ile izlenildiğinde oluşan genlik modülasyon bilgisi elde edilebilir. Elde edilen genlik modülasyonlu dalga formu incelendiğinde modüleli dalganın periyodunun, konik antenin dönüş periyoduna eşit olduğu görülmektedir. Bu tip radarların anten tarama periyotlarının hedef platformlar tarafından bulunabilmesi ve bulunan tarama frekansı bilgisi kullanılarak karıştırılabilmeleri nedeniyle COSRO (*Conical Scan on Receive Only*) ve LORO (*Lobe on Receive Only*) olarak adlandırılan ve sadece alma anında konik veya lob anahtarlama tarama yapıp sinyal gönderme anında herhangi bir tarama yapmayıp sabit yayın yapan radarlar geliştirilmiştir. Bu tip radarlar iki antenden oluşmaktadırlar. Antenlerden birisi radarın takip ekseninin merkezine sabit olarak konumlandırılmıştır. Bu anten sadece üretilen dalganın ortama gönderilmesi işlevini yerine getirmektedir. Diğer anten ise konik veya lob anahtarlama radarlarda olduğu gibi hareket ederek sadece hedeften yansıyıp gelen sinyalleri alma işlevini yerine getirmektedir. Açısal takip mekanizması için gerekli olan genlik modülasyonu da alma anteninin dönmesi ile elde edilmektedir. Gönderme anteninde herhangi bir dönme işlemi gerçekleşmediği için hedef tarafından tespit edilen sinyallerin genlik seviyeleri üzerinde herhangi bir modülasyon oluşmamaktadır. Modülasyon bilgisine ulaşamadığı için etkin bir şekilde karıştırma yapmak için gerekli olan anten tarama periyodu bilgisi hedefin ED sistemi tarafından tespit edilememektedir. Periyot değerinin bulunamaması nedeniyle de bu tip radarlarda ters kazanç karıştırma yöntemi gibi anten tarama periyodunun kullanıldığı yöntemler kullanılamamaktadır.

2.2 Elektronik Harp Temelleri

Elektronik Harp, spektrumdaki dost hedeflerin hareket özgürlüğünü korurken, düşman hedeflerin elektromanyetik spektrum kullanımını bozmak veya engellemek

için çeşitli kombinasyonlarda saldırma ve savunma taktik ve tekniklerinin uygulanmasıdır.

Bu amaçlar doğrultusunda Elektronik Harp, ABD ve NATO doktrinleri tarafından Elektronik Taaruz (ET), Elektronik Korunma (EK) ve Elektronik Destek (ED) olmak üzere üç ana bölüme ayrılmıştır [12].

2.2.1 Elektronik Taaruz (*Electronic Attack, EA*)

Elektronik Taaruz (ET), düşman birimlerin elektromanyetik spektrum kullanımını bastırmayı, etkisizleştirmeyi veya yok etmeyi amaçlamaktadır [13]. Elektromanyetik enerji konseptinde bu eylem, karıştırma olarak adlandırılıp iletişim sistemleri veya radar sistemleri üzerinde gerçekleştirilebilmektedir. Elektronik sistemlerin savaşta düşman üzerinde üstünlük kazanmak için kullanılmasıyla birlikte, elektronik sistemlerin etkinliğini azaltmak için çeşitli karıştırma teknikleri üzerinde çalışılmıştır. Karıştırma teknikleri de kendi içerisinde pasif ve aktif karıştırma olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.2.1.1 Pasif Taaruz

Bu teknikte herhangi bir elektromanyetik yayılım yapılmadan radarın yaptığı yayılımın hedeften yansıyarak tekrar radara dönüşü sürecine etki edilmektedir. Bu etkiler radar kesit alanını azaltma teknikleri, chaff atımı veya pasif dekoky kullanımı gibi yetenekler ile yaratılabilmektedir.

Radar Kesit Alanı Azaltma

Radarlar, hedeflerden yansıyan sinyalleri tekrar toplayarak hedefler hakkında bilgi sahibi olduklarından hedefler, sinyallerin kendi platformlarından saçılma miktarlarını azaltarak radar tespitine etki edebilmektedirler. Hedeflerin kendi üzerindeki saçılma miktarını azaltma işlemine radar kesit alanını azaltma işlemi denilmektedir. Bu işlemler platform tasarımı aşamasında kesit alanını düşürücü geometrik yaklaşımlar kullanılarak veya RF geçirgen malzemeler kullanılarak yapılabildiği gibi, platformların dış yüzeylerine radar sinyallerini soğuran kaplama malzemeleri kaplanarak da yapılabilmektedir [2].

Chaff Atımı

Hedef, bir radar tarafından takip edildiği durumda içerisinde birçok metal kırpıntının bulunduğu bir chaff kartuşu atarak radara karşı taaruz uygulamaktadır. Metal kırpıntılar havada saçılarak bir bulut halini aldıkları için hedefin yakınlarında ve hedeften daha büyük bir radar kesit alanına sahip yansıtıcı yüzey oluşturulmuş olunur [2]. Bu sayede radarın chaff bulutunu takip etme eğiliminde olması sağlanarak radarın takip mekanizmasına etki edilmektedir.

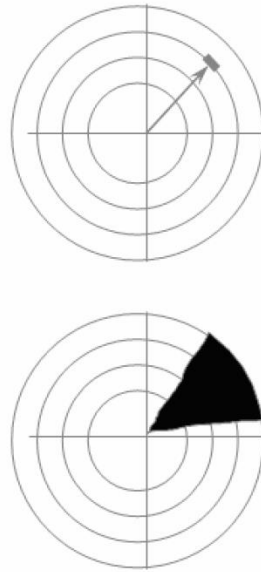
Pasif Dekoy Kullanımı

Pasif dekoylar, boyutlarına göre çok daha büyük radar kesit alanlarına sahip olan yapılardır. Bu özellikleri sayesinde radarın dikkatini hedeften kendi üzerine çekmektedirler [14].

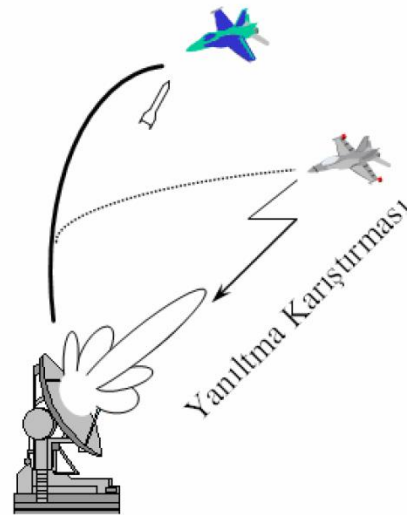
2.2.1.2 Aktif Taaruz

Karıştırma (jamming), düşman unsurların etkilenmesi için elektromanyetik yayılım yapılan karşı tedbir teknikleridir. İki temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar, gürültü ve aldatıcı karıştırma yöntemleridir. Şekil 2.25'te gürültü karıştırması ve aldatma karıştırmasını örnekleyen iki farklı karıştırma senaryosu görselleştirilmiştir.

Gürültü Karıştırması



Aldatma Karıştırması



Şekil 2.25 Karıştırma yöntemleri [15]

Gürültü Karıştırma Teknikleri

Gürültü karıştırmanın spot, taramalı, baraj ve genlik modüleli gibi farklı karıştırma teknikleri bulunmaktadır.

Spot Karıştırma

Spot karıştırmada karıştırma sinyali radar frekansında ve bant genişliği olarak hedef radarın bant genişliğinden bir miktar daha düşük olacak şekilde ayarlanmaktadır. Karıştırma sinyalinin gücü küçük bir alanda yoğunlaştırıldığı için verimi yüksek olmaktadır [16].

Taramalı Spot Karıştırma

Geniş bir spektrumda yüksek güç yoğunluğu gerektiği durumda karıştırıcının spot karıştırma tekniğindeki frekansını sırasıyla bir frekanstan diğerine kaydırması yöntemi ile gerçekleştirilmektedir [17].

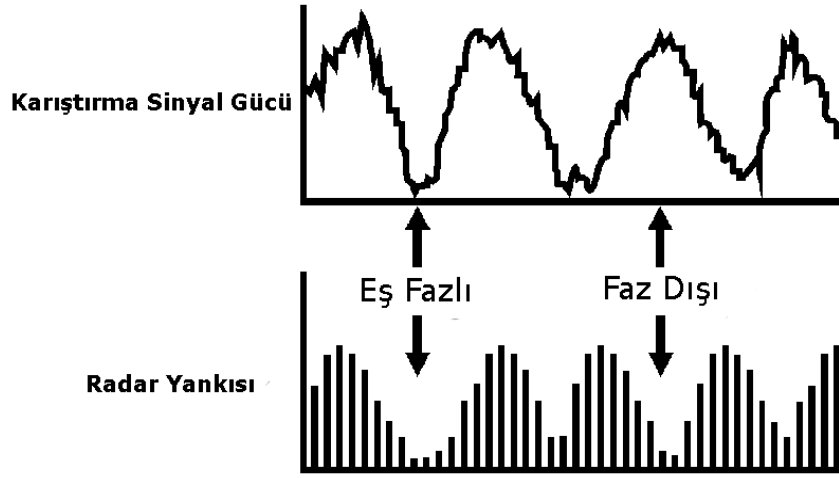
Baraj Karıştırma

Frekansı değişen veya eş zamanlı olarak farklı frekanslarda yayın yapan radarların karıştırılması işleminde kullanılmaktadır. Geniş bir frekans aralığının aynı anda kapsanabilmesi amaçlanmaktadır [16]. Bu sebeple toplam güç, belirli bir frekans aralığına yayıldığı için her bir frekanstaki efektif güç miktarı azalmaktadır. Uygulaması kolay ve geniş bir spektrumu kapsamı nedeniyle tercih edilen bir teknik olmasına karşın yüksek güç gerektiren karıştırma işlemlerinde etkinliği azalmaktadır [17].

Genlik Modüleli Gürültü Karıştırması

Gürültü sinyalinin genliğinin, hedef radarın anten tarama frekansına bağlı olarak modüle edilmesi ile elde edilen karıştırma tekniğidir. Konik tarama yapan bir radara karşı kullanıldığı durumda karıştırma sinyali Şekil 2.26'da olduğu gibi sinüs dalga şeklinde modüle edilir.

Bu karıştırma tekniğindeki yöntemlerden birisinde sinüs dalganın frekansı, tarama frekansından biraz daha yüksek ayarlanarak iki sinyal arasında sürekli değişen bir faz farkı oluşturulur. Sürekli değişen faz farkı nedeniyle radar sahte hedefler için açısız izleme yaparak gerçek hedefi kaybeder [17].



Şekil 2.26 Genlik modüleli gürültü karıştırması ([17]'dan uyarlanmıştır)

Bir diğer yöntemde ise sinüs dalganın frekansı tarama frekansı ile aynı olacak şekilde ayarlanır. Eğer radar yankısı ile karıştırma sinyali arasındaki faz farkı sıfır ise radar başlığı önce hızlı bir şekilde hedefe doğru yönelir fakat hedef radar merkezinde dahi olsa karıştırma sinyalinden gelen modülasyon devam ettiği için başlık hedefi geçerek farklı yönler yönelir. Bu sayede takip devresine etki edilir. İki sinyal arasındaki faz farkının 180° olduğu durumda ise karıştırma sinyalinin radar yankısından daha güçlü yayılım yaptığı durumda radar başlığı hedefin tam tersi yöne yönelerek takip devresi etkisiz hale getirilir [18]. Bu tekniğin etkin olabilmesi için radarın tarama frekansının bilinmesi gerekmektedir.

Aldatıcı Karıştırma Teknikleri

Bu yöntem, radarın hedef hakkında kritik bilgileri elde etmesini engellemek için radara yanıltıcı sinyaller gönderilerek gerçekleştirilir. Tekniğin etkin olabilmesi için radarın sinyalleri tespit edilir, tespit edilen sinyaller değiştirilerek radara tekrar gönderilir. Bu teknikte radara kendi sinyalinin benzerleri tekrar gönderildiği için tekrarlayıcı karıştırıcı (repeater jammer) da denilmektedir. Gürültü karıştırma tekniklerine oranla daha düşük güç seviyelerinde karıştırma yapılabilir [17]. Çoklu sahte hedef üretimi, menzil kapısı çalma veya ters kazanç karıştırma gibi farklı teknikler bulunmaktadır.

Çoklu Sahte Hedef Üretimi

Bu teknikte, radardan gelen darbeler kaydedilmekte ve belirli bir zaman gecikmesi ile tekrar yayınlanmaktadır. Bu işlem vasıtası ile radar yankılarının radara geliş sürelerinin değiştirilmesi hedeflenmektedir. Radara farklı sürelerde gelen birçok darbe ile birlikte radarda farklı menzillerde birçok sahte hedef oluşturulabilmektedir [2].

Menzil Kapısı Çalma (*Range Gate Stealing*)

Bu teknikte tespit edilen radar sinyalleri tekrarlayıcı vasıtası ile tekrar radara gönderilmektedir. Gönderilen darbeler giderek artan gecikmelerle gönderilmektedir. Tekniğin etkin olabilmesi için gönderilen darbelerin gücünün radarın gerçek yankılarından daha yüksek genlik seviyesinde gönderilmesi gerekmektedir. Bu teknik ile radar, karıştırıcıdan gelen sinyalleri kendi sinyalleri olarak algılamaktadır. Bu sayede radarın menzil hesaplama devresi artık kendi yankılarını değil karıştırıcıdan gelen genliği yüksek sinyalleri işlemektedir. Bu şekilde karıştırıcı birim radarın menzil kapısını çalmış olup kendi isteği doğrultusunda menzil hesaplamaları yapmasını sağlamaktadır.

Ters Kazanç Karıştırması (*Inverse Gain Jamming*)

Bu teknikte elektronik destek sisteminin konik taramalı veya lob anahtarlama takip radarlarının anten tarama örüntülerini bulmasından yararlanılmaktadır. Tarama örüntüsünün bilinmesi, radar hüzmesinin hangi anda hedefe yaklaştığının ve hangi anda hedeften uzaklaştığının bilinmesi anlamına gelmektedir. Bu bilginin karıştırıcı birime iletilmesi ile birlikte karıştırıcı radar hüzmesinin kendisine en uzak olduğu anlarda en güçlü sinyali yayınlamakta, hüzmenin en yakın olduğu durumda ise en düşük genlikli sinyali yayınlamaktadır. Bu teknik ile radarın açisal takip mekanizmasının hedefin bulunduğu yönün tersi bir yöne yönlenmesi hedeflenmektedir.

2.2.2 Elektronik Korunma (*Electronic Protection, EP*)

Elektronik korunmada, elektromanyetik spektrumda dost unsurların çalışma performansını yükseltmek ve elektronik taaruzun düşman unsurlar tarafından

kullanıldığı herhangi bir durumda dahi elektromanyetik spektrumun kullanılabilmesini sağlamak amaçlanmaktadır.

Bu kapsamda Elektronik Korunma bazı durumlarda dost unsurların tespit edilebilirliğini azaltma amacıyla düşman ED sistemlerine karşı yapılandırılabilirken, bazı durumlarda ise doğrudan karıştırma tekniklerinin etkinliğini azaltıcı karşı karşı tedbir niteliğindedir.

Yaygın olarak kullanılan bazı Elektronik Korunma teknikleri başlıklar halinde incelenmiştir.

Darbeler Arası Modülasyon

Darbeler arası modülasyon (*inter-pulse modulation*), radarın darbe tekrar periyodunun (PRI) sabit olmaması ve modüle edilmesi anlamına gelmektedir. Darbeler arası modülasyon birden çok periyodun sıralı olarak devreye girmesi (staggered PRI) ile gerçekleştirilebileceği gibi, darbeler arasındaki periyot, tamamen rastgele biçimde (jitter PRI) de değiştirilebilir.

Darbe tekrarlama periyodunun sabit olması, karıştırma sisteminin hem darbeden önce hem de darbeden sonra sahte hedef sinyali üretebilmesini mümkün kılmaktadır [2]. Darbeler arası modülasyon kullanıldığı durumlarda darbe geliş zamanı önceden belirli olmadığı için karıştırma sisteminin hedef sinyalinden önce sahte hedef sinyali yaratması engellenmiş olmaktadır.

Hareketli Hedef İndikatörü (*Moving Target Indicator, MTI*)

Hareketli hedeflerin güçlü geri plan yansıması (clutter) altında bile tespitini olanaklı kılan önemli bir tekniktir [2]. Bu teknik, geri plan yansımasını baskılamanın ve radar tespit performansını artırmanın ötesinde chaff türü karşı tedbirlere karşı da etkili olabilmektedir.

MTI filtresi, yüksek geçirgen bir filtre niteliğindedir. Bu özelliği sayesinde, tipik olarak düşük frekanslı gürültü niteliği taşıyan geri plan yansımalarını baskılama özelliğine sahiptir. MTI filtre ile yer ve deniz yüzeyine yakın olarak seyreden hava hedeflerini tespit etmek mümkün olabilmektedir.

Düşük Algılanma Olasılıklı (*Low Probability of Intercept, LPI*) Radar

LPI türü sinyallerin radarda kullanılması güçlü bir EK tedbiridir. LPI türü radar darbeleri, darbenin frekansının veya fazının modüle edilmesi sureti ile gerçekleştirilir. FMCW radarlarda frekansın monoton olarak artması veya azalması söz konusudur. Darbe türü radarlarda ise, radar darbesinin bir faz kodu ile kodlanmasıyla LPI türü sinyaller üretilmektedir. LPI radar almacında, hedef sinyalinin uyumlu bir filtre ile tespiti söz konusudur. Bu uyumlu filtrenin sağladığı sinyal kazancı sayesinde gürültü baskılanmakta ve SNR sinyal kazancı ölçüsünde arttırılmaktadır. Bu sinyal kazancı sayesinde, radarın tespit menzili artmakta veya belirli bir menzilde çok daha düşük güç ile tespit yapmak mümkün olabilmektedir [2]. Bu özellik LPI radarların elektronik destek sistemleri tarafından tespitini güçleştirmektedir.

Yan Lob Perdeleme (*Side Lobe Blanking, SLB*)

Yan lob perdeleme tekniği, yan lob karıştırmasına karşı kullanılan bir korunma tedbiridir. Normal şartlarda radarın algıladığı sinyalin ana lobdan geldiği temel alınır. Fakat radara gelen sinyaller yalnızca ana lobdan değil, yan loblardan da gelmiş olabilirler. Yan lob perdeleme tekniği, yan loblardan gelen sinyalleri baskılamak için kullanılan bir yöntemdir.

Bu yöntemi uygulamak için, normal radar antenine ilave olarak, yönsellik kazancı düşük veya yönsüz (omni-directional) ikinci bir antene ihtiyaç duyulur. Bu yardımcı antenin duyarlılığı, radar anteninin yan loblarından yüksek ancak ana lobundan düşük olacak şekilde belirlenir. Böylece, iki farklı antenden tespit edilen sinyalin genlikleri karşılaştırılarak sinyalin ana lob içinden gelip gelmediği belirlenerek yan lob karıştırma işlemine karşı korunma tedbiri olarak kullanılabilir.

Yalnızca Almada Tarama (*Receive Only Scanning*)

Konik taramalı radarlar genlik tabanlı karıştırma veya aldatmaya çok açıktırlar. Bu zafiyet karıştırma ve aldatma sinyallerinin genliğinin konik tarama frekansında modüle edilmesi ile ilgilidir [2]. Bu nedenle, konik tarama frekansının belirlenmesini önleyen bir korunma tedbirinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Konik tarama frekansının tespit edilmesini önlemenin en kolay yöntemi bu taramanın yalnızca alıcı hüzme ile yapılmasıdır. Aydınlatmanın sabit bir hüzme ile yapıldığı, taramanın ise alıcı

hüzmede gerçekleştirildiği teknikler yalnızca almada (receive only) tarama teknikleri olarak anılmaktadır [19]. Taramanın yalnızca alıcı hüzmede gerçekleştiği bu tür radarlar COSRO ve LORO radarlarıdır. Yalnızca almaçta tarama ile takip tekniği, konik taramalı ve lob anahtarlamalı radarların genlik tabanlı karıştırmaya karşı zafiyetini azaltmaktadır.

2.2.3 Elektronik Destek (*Electronic Support, ES*)

Elektronik Destek (ED), ortamda bulunan elektromanyetik enerjinin kaynağını tespit etme, tanımlama ve yerini bulma eylemlerini içermektedir [20]. Savaş sırasında ED sisteminin, bulunduğu platforma yönlendirilmiş bir radar güdümlü füzenin ikazını verebilmesi ve geliş yönünü belirleyebilmesi, füzenin karıştırılıp platforma zarar vermesini engellemek için hayati önem taşımaktadır. Barış zamanında düşman unsurların elektromanyetik sistemleri hakkında bilgi toplamak ve bu bilgileri ileride olası bir savaş durumunda kullanmak için saklamak da ED sisteminin görevleri arasında yer almaktadır. Radar ED sistemleri radar ikaz almaçları, elektronik destek tedbir sistemleri ve elektronik istihbarat sistemleri olarak üç gruba ayrılabilirler.

Radar İkaz Almaçları (*Radar Warning Receiver, RWR*)

Bulunduğu platforma tehdit yaratabilecek unsurları tespit ve teşhis etme ve yönünü belirleme amacını taşımaktadırlar. Platformun kendini koruma sistemlerine entegre olarak çalışırlar. Hedeflerinde tespit ve takip radarları ve radar güdümlü füze başlıkları gibi unsurlar olduğu için reaksiyon süresinin çok hızlı olması gerekmektedir. Genellikle yeni bir tehdidi yaklaşık bir saniye içerisinde tanımlayıp raporlaması gerekmektedir [21].

Elektronik Destek Tedbiri Sistemleri (*ESM Systems*)

Elektronik Destek Tedbiri (ESM) sistemlerinin temel işlevi taktik sahada elektronik harp düzeninin tespit edilmesidir. Aynı zamanda barış zamanında ise düşman unsurlar hakkında teknik ve taktik bilgi toplama işlevini yerine getirirler. Radar İkaz Almaçlarından (RWR) daha hassas almaçlara ve daha güçlü analiz yeteneklerine sahip olması ile ayrılırlar [2].

Elektronik İstihbarat Sistemleri (ELINT Systems)

Elektronik İstihbarat (ELINT) Sistemleri, düşman bölgesine taarruz edilmeden önce o bölgede bulunabilecek savunma ve saldırı sistemlerinin önceden tespit edilerek, bu sistemlere ait bilgi toplamaya yönelik olarak geliştirilmişlerdir [22]. Bu sebeple sadece savaş anında değil barış anında da radar sinyalleri dinlenilerek olası savaş durumunda kullanılmak üzere saha kayıtları alınıp veri tabanı oluşturmada kullanılırlar. RWR ve ESM sistemlerinden temel farkı sinyal analizinin çevrimdışı olarak ve hatta almaçların bulunduğu yerlerin haricinde yapılabilmesidir [2].

2.3 Radar Tabanlı Elektronik Harp Tehditleri

Radar tabanlı elektronik harp tehditleri, dolaylı ve doğrudan tehditler olmak üzere ikiye ayrılabilirler.

2.3.1 Dolaylı Tehditler

Tespit fonksiyonu füze güdümü ile doğrudan ilintili olmayan radarlar dolaylı tehdit olarak değerlendirilebilirler. Bu çerçevede erken uyarı radarları, yer ve hava kontrol radarları, gözetleme radarları, seyir radarları ve görüntüleme radarları örnek olarak gösterilebilirler.

2.3.2 Doğrudan Tehditler

Güdümlü füzelerde kullanılan ve güdüme yardımcı olan radarlar bu kategoride değerlendirilebilirler.

Güdümlü Füzeler

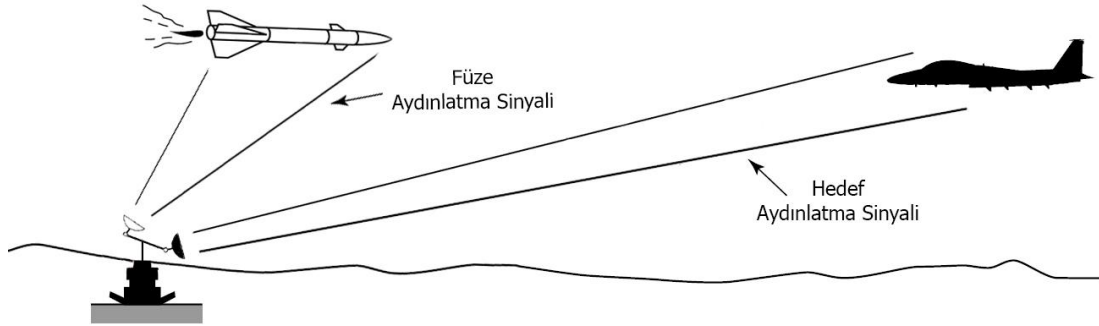
Güdümlü füzeler belirledikleri hedefleri takip ederek, hedeflerine yönelebilen yıkıcılığı yüksek sistemlerdir. Güdümlerini RF sensörler yardımı ile gerçekleştiren füzelere ise radar güdümlü füzeler denilmektedir. Radar güdümlü füzelerde, hedeflerini hassas biçimde takip edebilmesi için arayıcı başlık bulunmaktadır. Arayıcı başlıktan alınan hedefin açısal takip bilgileri güdüm biriminde işlenerek füzenin manevrası hesaplanır. Füze ise hesaplanan manevra bilgisi doğrultusunda hareket ederek hedefini vurmaya ve tahrip etmeyi amaçlar.

Füze Güdümünde Kullanılan Yöntemler

Radar sensörlerinden alınan bilgiler doğrultusunda güdümlendirilen füzelerde farklı güdüm yöntemleri kullanılabilmektedir.

Radar Komuta Gdümlü Füzeler

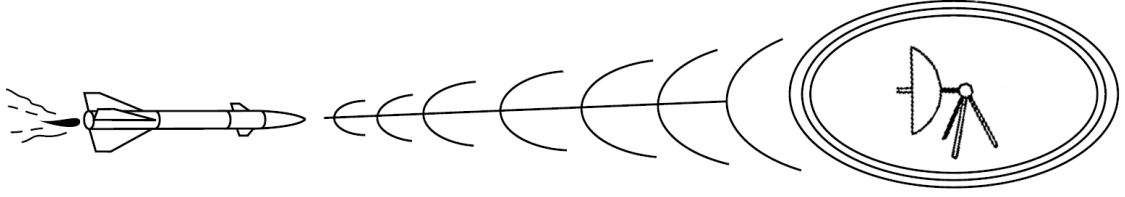
Komuta güdümünde, arayıcı başlık füze üzerinde değil farklı bir noktada bulunmaktadır. Bu güdüm yönteminde hem füze hem de hedef ayrı ayrı izlenmektedir. Füzenin hedefin konumu hakkında bilgisi bulunmamaktadır. Füzeyi ve hedefi izleyen takip radarı, hedef ve füzenin anlık konumlarına göre füzenin hedefe yaklaşmak için yapması gereken manevra hareketlerini hesaplayıp füzeye iletir. Bilgilerin füzeye iletilmesi ise kısa menzilli füzelerde tel yardımı ile yapılabilirken uzun menzilli füzelerde bu işlev RF veri bağı ile gerçekleştirilebilmektedir. Radar komuta güdümü yapılan örnek bir senaryo Şekil 2.27’de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.27 Radar komuta kontrol güdümü ([23]’ten uyarlanmıştır)

Pasif Radar Gdümlü

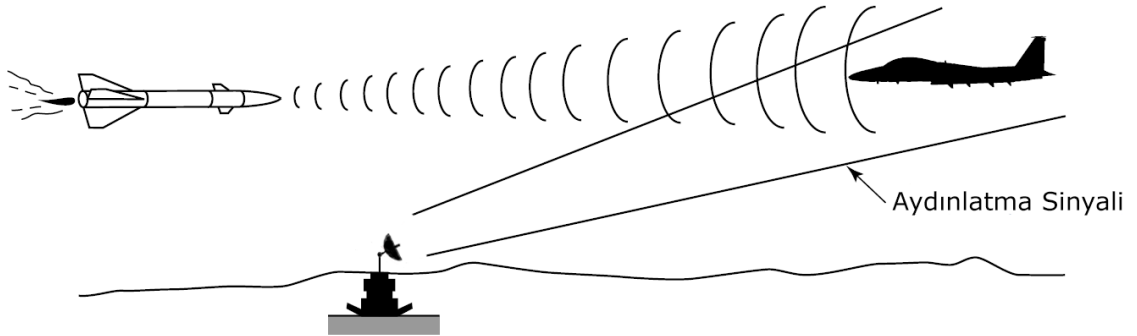
Pasif radar güdümünde, füzede pasif bir arayıcı başlık bulunmaktadır. Füzeden güdüm amaçlı herhangi bir sinyal yayılımı yapılmadan sadece hedefin yaymış olduğu sinyallerin takip edilmesiyle izleme yapılması nedeniyle pasif radar güdümü adını almıştır. Aynı zamanda anti radar füzeleri olarak da adlandırılmaktadırlar. Pasif radar güdümü ile hedefine yönelmiş bir füze için örnek senaryo Şekil 2.28’de görselleştirilmiştir.



Şekil 2.28 Pasif radar güdümü ([23]'ten uyarlanmıştır)

Yarı Aktif Radar Güdümü

Yarı aktif radar güdümünde arayıcı başlık füze üzerinde bulunmasına rağmen bu başlık sadece sinyal alma işlevini yerine getirir. Sinyal gönderme görevi ise yerde bulunan bir birim tarafından icra edilmektedir. Yere konuşlu olan bir hedef takip radarı hedefi takip ederken aynı zamanda füzenin hedefe yönelebilmesi için aydınlatıcı görevi de görmektedir. Kara konuşlu takip radarının göndermiş olduğu sinyaller hedeften yansıyıp füzeye iletilir. Füze de hedeften yansıyan bu sinyalleri arayıcı başlığı vasıtası ile alarak açısal takip mekanizmasını çalıştırır ve gerekli bilgiyi güdüm mekanizmasına ileterek hedefi açısal olarak takip eder. Yarı aktif radar güdümü ile hedefe yönlenmesi sağlanan bir füze için örnek senaryo Şekil 2.29'da görselleştirilmiştir.

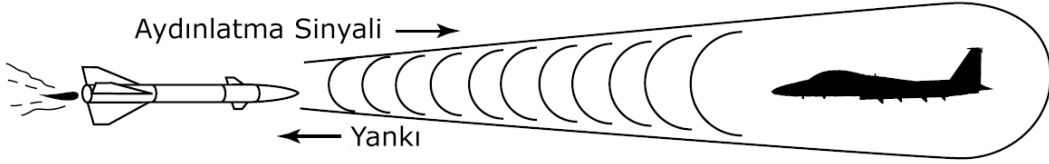


Şekil 2.29 Yarı aktif radar güdümü ([23]'ten uyarlanmıştır)

Aktif Radar Güdümü

Aktif radar güdümünde ise füze, üzerinde bulunan arayıcı başlık ile takip için gerekli olan hedefi aydınlatma ve gelen sinyaller ile hedefi takip etme işlemlerini kendisi

yapar. Kendi takip radarı ile gönderdiği sinyaller hedef üzerinden yansıyor geri döndüğünde arayıcı başlığı ile sinyali alarak açısal hata bilgilerini hesaplar ve bu bilgileri manevra yapmak için kullanarak hedefini takip eder. Takip radarı kendi üzerinde olması nedeniyle uzun menzillerde etkili bir güdüm yöntemi olarak kullanılmaktadır. Uzun menzillerde etkili çalışabilmesi için hedefin bulunabileceği muhtemel bölgeye önce ara yol güdümü ile ulaştırılır ve sonrasında radar arayıcı başlık devreye sokularak aktif hedef takibi başlatılır. Aktif radar güdümü vasıtası ile hedefine yönelen bir füze için örnek senaryo Şekil 2.30'da görselleştirilmiştir.



Şekil 2.30 Aktif radar güdümü ([23]'den uyarlanmıştır)

Radar güdümlü füzeler bir platform için yok edici unsurlar olarak değerlendirilebilirler. Bu sebeple güdümlü füzelerin karıştırılması ve hedef platforma ulaşmasının engellenmesi elektronik harp için her zaman önemli bir unsur olarak değerlendirilmiştir.

Güdümlü füzelerde kullanılan takip radar türlerinden birisi de konik tarama yapan radarlardır. Konik tarama yapan radarların tarama tiplerinin ve frekanslarının bulunması karıştırma işleminde önemli bir yere sahiptir. Bir konik radarın tarama örüntüsü, hedef platform üzerinde bulunan bir ED sistemi ile belirlenebilmektedir. Belirlenen tarama frekansı bilgisi kullanılarak yapılan karıştırma işlemlerinde etkinliğin yüksek olması üzerine radarlar da farklı elektronik korunma yöntemleri geliştirerek karıştırılmaktan kaçınmaya çalışmışlardır. Bu gelişmelerle birlikte LORO ve COSRO gibi anten tarama frekansının bulunmasının zorlaştırıldığı radarlar tasarlanmıştır. Bu tip radarların tarama bilgisi ED sistemleri tarafından belirlenemediğinden, hedef platformlar açısından bir zafiyet oluşmuştur.

LORO ve COSRO radarlara karşı oluşan bu zafiyetin giderilebilmesi için geniş taramalı genlik modülasyonlu karıştırma yöntemi ile karıştırma yapılırken çökme tespit (jog detection) yöntemi de kullanılarak anten tarama frekansı tespit edilebilmektedir. Bir diğerk yöntem olarak ise anten tarama frekansının bulunmasına gerek kalmadan kullanılabilecek bir karıştırma yöntemi olan harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma tekniğı kullanılabilmektedir. Bu çalışmada, nc bölüm konik taramalı ve lob anahtarlamalı radarların karıştırılmasına ayrılmıştır.

3. KONİK TARAMALI VE LOB ANAHTARLAMALI RADARLARIN KARIŞTIRILMASI

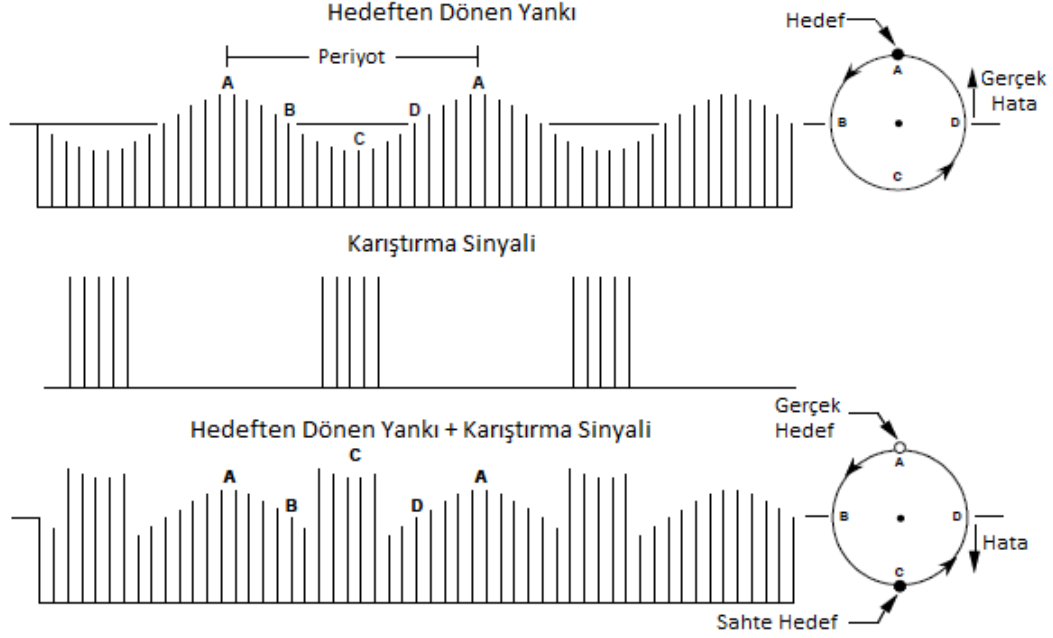
3.1 Konik Taramalı Radarların Karıştırılması

Lob anahtarlama ile konik tarama yöntemlerinin temelde birbirlerine benzemesi sebebi ile iki tarama tipine karşı da benzer karıştırma yöntemleri kullanılabilir. Bu sebeple bu başlık altında belirtilen konik tarama yapan radarlara uygulanabilecek karıştırma yöntemleri, lob anahtarlama radarlara karşı da bire bir uygulanabilmektedir.

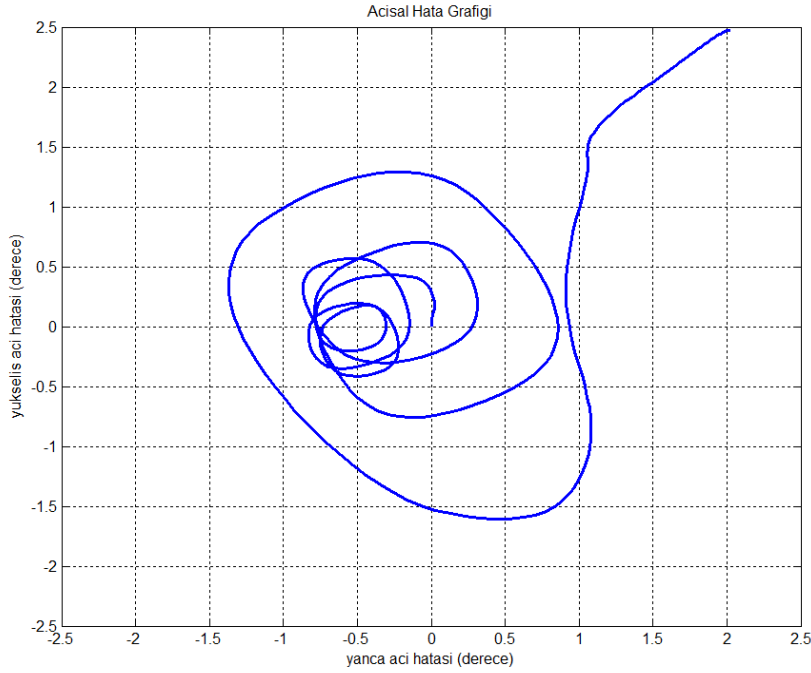
Konik tarama veya lob anahtarlama yapan bir radarı karıştırma işleminin etkin bir şekilde yapılabilmesi için radarın anten tarama frekansının karıştırıcı tarafından bilinmesi önem taşımaktadır. Tarama frekansını bulabilmek için hedef üzerindeki genlik modülesi sinyalin genlik seviyelerinde iki ardışık tepe arasındaki süre hesaplanarak anten tarama frekansı bilgisine ulaşılabilir. Hedef platform üzerinde bulunan bir elektronik destek sistemi ile elde edilen bu bilgi, elektronik taarruz sistemine iletilir. Karıştırıcı birim, bu bilgileri kullanarak, takip radarının gönderdiği sinyallerden daha yüksek genlik seviyelerinde çıkış yaparak karıştırma sinyalini radara yönlendirebilir. Bu aşamadan sonra radara gelen sinyallerdeki modülasyon bilgisi değişecektir.

Karıştırmanın etkin olabilmesi için ise radarın hedeften en uzak konumu taradığı anlarda yüksek genlik seviyelerinde çıkış yapıp, hedefe yakın konumu taradığı anlarda ise en düşük genlik seviyesinde çıkış yapmalı veya bu anlarda hiç sinyal göndermemelidir. Bu durum nedeniyle, radarın konik taramasının yalnızca frekansının değil fazının da tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Radar, kendisine gelen sinyaller üzerindeki genlik modülasyonuna baktığında en düşük genlikli gelmesi gereken zamanlarda en yüksek genlikli gelen sinyaller nedeniyle, arayıcı başlığını hedefin olduğu yönün tam tersi yöne çevirme eğiliminde olur. Bu sayede radar hedeften farklı bir noktaya yönlendirilmiş ve takip mekanizması kırılmış olunur. Bu tekniğe Ters Kazanç Karıştırma (Inverse Gain Jamming) yöntemi denilmektedir ve örnek bir karıştırma senaryosu Şekil 3.1'de görselleştirilmiştir. Bu yöntem bir tekrarlayıcı karıştırıcı ile uygulanır. Takip radarının frekansının bilinip

fazının bilinmediği durumlarda ise ters kazanç karıştırmanın daha güçlü şekilde uygulanması gerekmektedir. Bu tür karıştırma yöntemlerinde, otomatik kazanç kontrol (AGC) devrelerinin yavaş çalışan devreler olmasından istifade edilmektedir.



Şekil 3.1 Konik taramalı radar ve uygulanan ters kazanç karıştırma sinyalinin genlik örüntüsü ([3]'ten uyarlanmıştır)

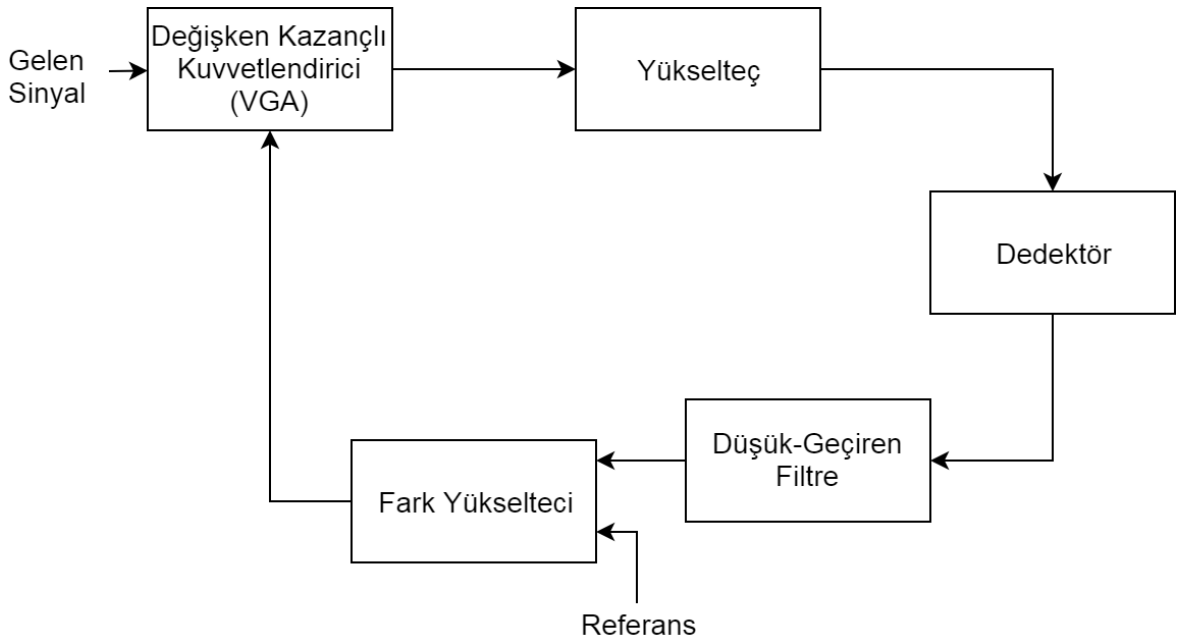


Şekil 3.2 Radarın karıştırılması ile takip döngüsünün kırılması

Şekil 3.2’de bir COSRO takip radarının hedefini takip ettiği sırada karıştırmaya maruz kalmasının ardından takip kilidinin kırıldığı ve hedeften uzak açılara yöneldiği görülmektedir.

Otomatik Kazanç Kontrol Devreleri

Otomatik kazanç kontrol devreleri, açısal izleme döngülerinde izleme işleminin gelen sinyalin genlik seviyesinden bağımsız olarak gerçekleşmesini sağlamak üzere sinyali değişken kazançlarla besleyerek, sinyalin genliğini belirli bir seviyede tutmayı sağlayan devrelerdir [24]. Bu devre ile birlikte izleme işlemi, hedefin uzaklığı, radar kesit alanı ve büyüklüğünden minimum seviyede etkilenmiş olur. Ayrıca AGC devreleri sayesinde radarlar daha küçük bir dinamik alan içerisinde çalışabilecekleri için duyarlılık seviyeleri de iyileşmektedir.



Şekil 3.3 Otomatik kazanç devresi blok diyagramı ([25]’ten uyarlanmıştır)

Şekil 3.3’te bir AGC devresinin temel çalışma prensibini gösteren blok diyagram bulunmaktadır. Burada AGC devresine gelen bir sinyal yükselteçten geçtikten sonra dedektörden geçmektedir. Yükseltecin sinyali ne oranda yükselteceği ise geri besleme ile sinyalin düşük geçiren bir filtreden geçirilmesi ile kararlaştırılmaktadır

[26]. Konik taramalı radarlarda ise hedefin açısal izlenmesi, konik tarama sonucu oluşan genlik modülasyonu ile yapıldığından, düşük geçiren filtrenin bant genişliğinin gelen sinyalin modülasyon bilgisini bozmayacak kadar düşük olması gerekmektedir. Konik taramada oluşacak olan genlik modülasyonunun frekansı, konik tarama frekansına eşit olacaktır. Bu sebeple genlik örüntüsünü bozmamak için AGC devrelerindeki bant genişliğinin konik tarama frekansına kıyasla daha düşük seçilmesi gerekmektedir. Karıştırma işleminde, AGC devrelerinin bu özelliğinden yararlanılarak, gönderilen karıştırma sinyallerinin radar almacında algılanan sinyal seviyelerini değiştirmesi ve takip devresine etki etmesi sağlanmaktadır.

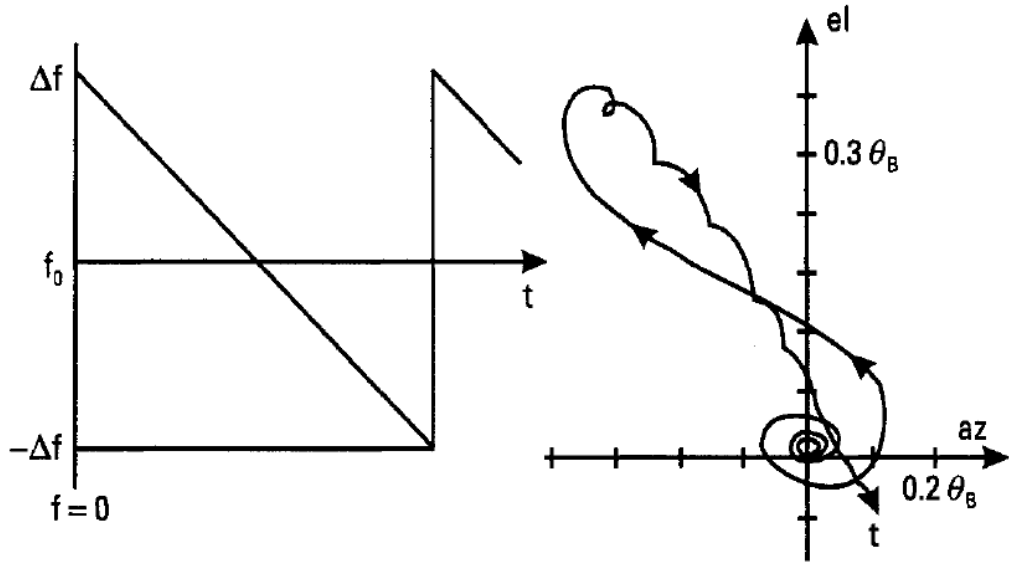
3.2 COSRO ve LORO Radarların Karıştırılması

COSRO ve LORO radarlar hedef üzerinde herhangi bir genlik modülasyonu oluşturmadan sadece kendi aldığı sinyallerde genlik modülasyonu oluşturduğu için hedefler kendilerini bu tip takip radarlarından korumak için farklı karıştırma yöntemleri kullanmak durumunda kalmışlardır. Bunlar geniş taramalı (wide sweep) genlik modülasyonu, çökme tespiti (jog detection) sonrası ters kazanç karıştırması ve harmonik genlik modülasyonu karıştırması yöntemleridir.

3.2.1 Geniş Taramalı Genlik Modülasyonu ile Karıştırma

Bu yöntemde karıştırma birimi radarın tarama frekansı bilgisine sahip olmadığı için belirli bir aralıktaki frekansları sırasıyla tarayarak karıştırma yapmayı hedeflemektedir. Şekil 3.4'te karıştırıcının geniş bir alanda frekans taraması yapmasına bağlı olarak radarda oluşan açısal takip hatası görselleştirilmiştir.

Bu yöntemde, tarama yapılan frekans ile gerçek frekans örtüştüğünde karıştırma işlemi başarılı olmaktadır. Fakat geniş bir frekans aralığı kısa bir zaman içerisinde tarandığı durumda karıştırmanın etkinliğinin yüksek olacağı frekans bölgesinden geçiş süresi genellikle karıştırma işlemi için yeterli olmamaktadır ve ilgili frekans taranıp geçildikten sonra radar takip işlemine tekrar devam edebilmektedir. Frekans tarama hızının yavaş olması durumunda ise açısal izleme döngüsüne etki edilse dahi karıştırma sinyali diğer frekansları tarıyorken radar tekrar takip döngüsünü kurup hedefi izlemeye başlayabilmektedir. Bu husus, yalnızca almada tarama tekniğinin etkili bir karşı karşı tedbir olduğu anlamına gelmektedir.

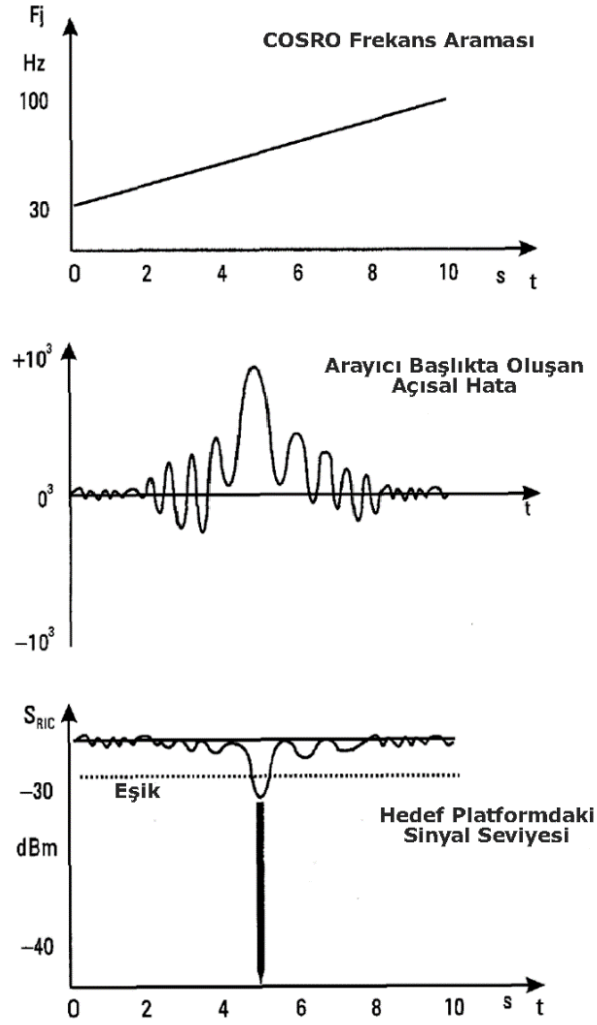


Şekil 3.4 Karıştırıcı tarama frekans değişimi ve takip radarının yön ölçüm hatası [27]

3.2.2 Çökme Tespiti Vasıtası ile Karıştırma

Bu yöntemde geniş taramalı genlik modülasyonu yöntemine ek olarak radarın gönderdiği sinyalin seviyesini anlık olarak tespit edebilme yeteneği gerektiği için ileri seviye bir ED sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Taramalı genlik modülasyonu yönteminde olduğu gibi frekans taraması ile karıştırma yapılırken tarama yapılan frekans ile gerçek radar tarama frekansı örtüştüğünde, karıştırma anlık olarak etkili olmaktadır.

Bu karıştırma tekniği ile radarın açısal izleme mekanizmasına etki edilmektedir. Radarın açısal izleme hatasının artması neticesinde ise radar hüzmesi hedef üzerinden uzaklaşacaktır. Bu durumda Şekil 3.5'te bulunan üçüncü grafikte olduğu gibi hedef platform üzerine düşen genlik seviyelerinde anlık bir azalma yaşanacaktır. Daha sonra frekans taraması devam ettiği için karıştırma etkinliği zamanla azalacak ve buna bağlı olarak açısal izleme hatası da azalacaktır. Bu durumda ise hedef platform üzerine düşen genlik seviyeleri tekrar artarak eski seviyelerine gelecektir. Hedef platformda bulunan bir ED sisteminin, tüm bu ani genlik düşüş ve yükselişlerini ölçmesi sonucu ise bir genlik örüntüsü oluşacaktır.



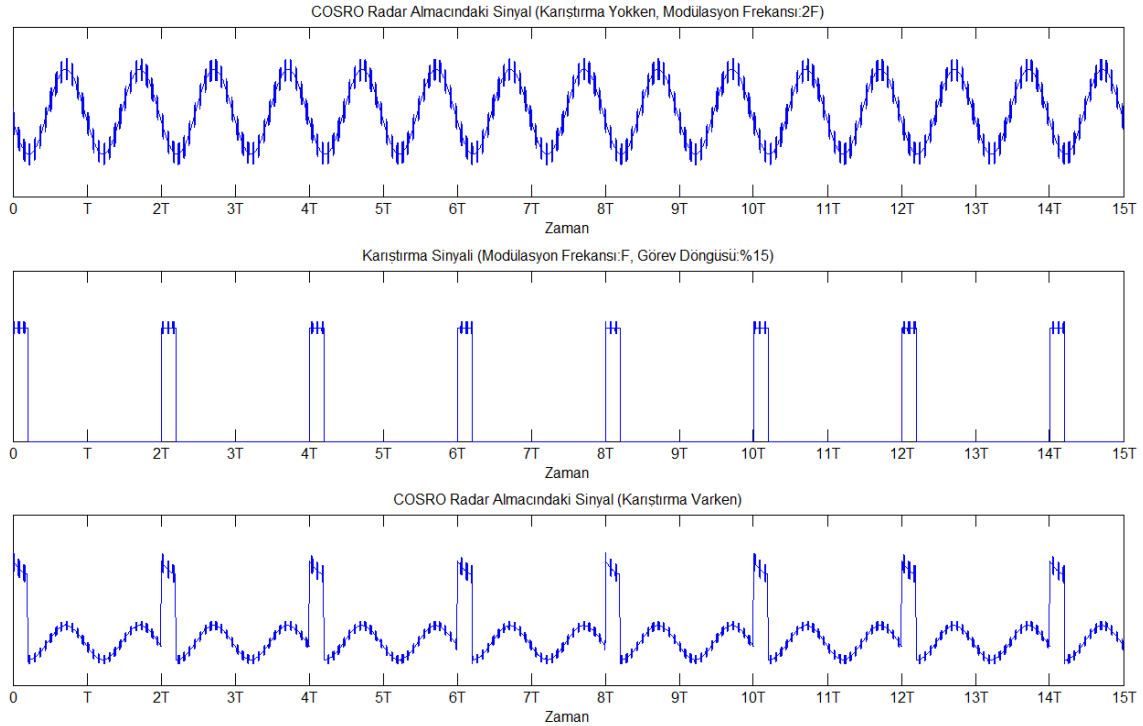
Şekil 3.5 COSRO radarın karıştırılması ve çökme tespiti [27]

Genlik düşüşleri çok kısa bir zaman aralığı içinde gerçekleştiği için genlik örüntüsü incelendiğinde, genel görüntünün içerisinde ani çökmeler olarak yorumlanabilir. Bu ani çökmelerin (jog) tespit edildiği sırada, ED sistemi ile aynı platformda bulunan karıştırıcının hangi frekansı taradığı bilindiği için COSRO ve LORO radarının anten tarama periyodu da tespit edilmiş olunur.

Radarın tarama frekansının sabit olması durumunda elde edilen tarama frekansı bilgisi ile radara ters kazanç karıştırma yöntemi uygulanarak etkin bir karıştırma gerçekleştirilebilir. Tarama frekansının değişken olması ihtimaline karşı ise ters kazanç karıştırma yöntemine ara verilip tekrar çökme tespiti yapılarak tarama frekansı tekrar belirlenmelidir.

3.2.3 Harmonik Genlik Modülasyonu ile Karıştırma

Bu yöntemde, karıştırma sinyali belirli bir periyotta açılıp kapatılmaktadır. Bu yöntem ile birlikte radarın konik tarama frekansına kıyasla daha küçük frekans aralıklarında tarama yapılması yeterli olmaktadır. Bunun sebebi ise periyodik olarak açma kapama işlemi yapıldığında karıştırma sinyali bir dikdörtgen dalga formu oluşturmaktadır ve oluşan bu periyodik dikdörtgen dalga, frekans ekseninde incelendiğinde kendi frekansının katlarında birçok harmonik frekansa sahiptir. Oluşan harmonikler sayesinde karıştırıcı, küçük bir tarama frekansında yayın yapmasına rağmen, daha büyük frekansta tarama yapan bir radarda karıştırma harmonikleri vasıtasıyla etkinlik sağlayabilmektedir.

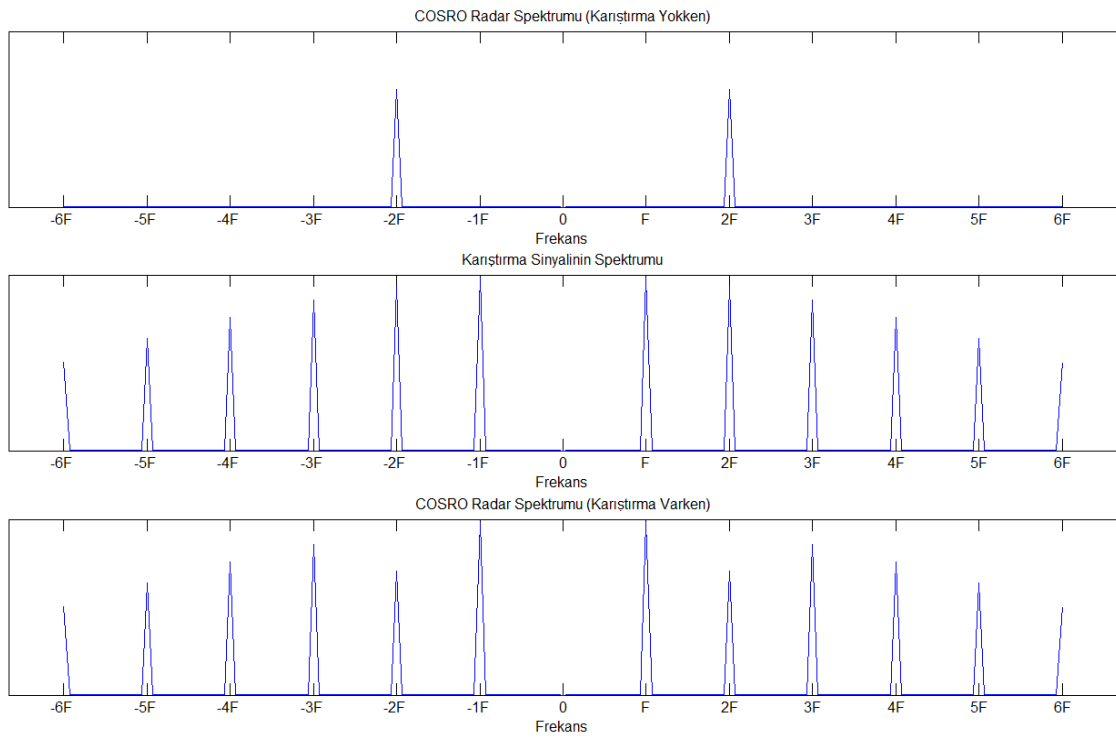


Şekil 3.6 Harmonik genlik modülasyonunda zaman eksenini

Şekil 3.6'da bulunan ilk grafik karıştırmanın etkin olmadığı bir ortamda, hedefini belirli bir açısal hata ile izleyen, $2F$ tarama frekansında tarama yapan örnek bir COSRO radarın almacında algılanan sinyal seviyesini göstermektedir. İkinci grafik ise %15 görev döngüsü ile F frekansında, dikdörtgen dalga formuna sahip bir karıştırma sinyalinin genlik seviyesini göstermektedir. Üçüncü grafikte ise

karıştırmanın etkin olduğu ortamda COSRO radarın almacına gelen örnek bir sinyal seviyesi görülmektedir.

Sinyaller frekans ekseninde incelendiğinde, karıştırma sinyali dikdörtgen dalga formunda gönderildiği için temel frekansı olan F frekansı ve katlarındaki harmonik frekanslarda etkili olduğu görülmektedir. Radar frekansı olan $2F$ frekansı ise karıştırma sinyalinin ikinci harmonik frekansına denk gelmektedir. Şekil 3.7’de bulunan frekans spektrumu grafiklerinde, DC bileşenlerin karıştırmaya etkisinin olmaması nedeni ile DC bileşenler filtrelenerek çizim yapılmıştır.



Şekil 3.7 Harmonik genlik modülasyonunda frekans eksenini

Bu yöntem ile frekansta tarama yapma yönteminin birlikte kullanılması durumunda, karıştırıcının tarama frekans aralığı çok daha küçük ve dar bir alan seçilerek tarama yapılabilir. Bu sayede yapılan tarama sırasında tüm harmonik frekanslar hareket edeceği için küçük bir alanda tarama yaparak çok geniş bir alan kapsanmış olacaktır. Ayrıca çökme tespitine gerek kalmadığı için COSRO ve LORO türü takip radarları ED sistemine ihtiyaç duyulmadan karıştırılabilecektir. Bu sebeple ED sistemi bulunmayan platformlarda, sadece COSRO ve LORO radarlarına karşı değil

konik tarama veya lob anahtarlama yapan radarlara karşı da kullanılabilir. Ayrıca, tek bir frekansta karıştırma yapılmayıp belirli bir frekans aralığı hızlı ve sürekli olarak tarandığı için takip radarının tarama frekansının değişken olması durumunda oluşabilecek zafiyetin de önüne geçilebilir.

4. COSRO VE LORO RADARLARDA KARIŞTIRMA ANALİZİ VE SİMÜLASYON YAPISI

Bu bölümde, COSRO ve LORO radarlar üzerinde etkin bir karıştırmayı en hızlı şekilde gerçekleştirebilmek için harmonik genlik modülasyonlu tarama tekniğinin etkinliğinin en uygun olduğu koşul ve parametrelerin tespit edilebilmesine yönelik olarak Fourier katsayıları, harmonik frekans ve görev döngüsü bilgileri kullanılarak hesaplamalar ve benzetimler yapılmıştır.

4.1 Fourier Serileri ve Katsayıları

Tüm periyodik sinyaller, temel bir frekansta sinüs dalgası ve harmoniklerinin toplamı ile ifade edilebilirler [9].

Periyodik bir dalga'nın Fourier serisi gösterimi Denklem (4.1)'de

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi nft) - \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(2\pi nft) \quad (4.1)$$

belirtilmiştir. Burada, a_n ve b_n değerleri Fourier serisinin katsayılarının genliklerini ifade etmektedir, n değeri pozitif tam sayıdır.

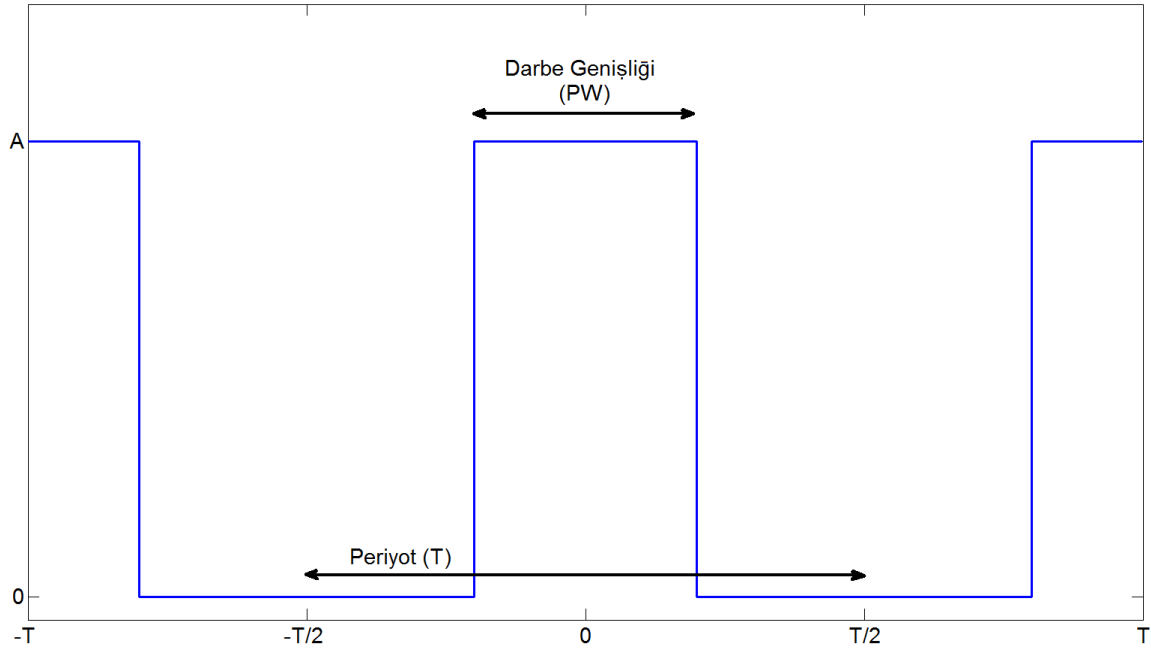
Fourier serisinin katsayılarından a_0 katsayısı Denklem (4.2)'de, a_n katsayısı Denklem (4.3) ve b_n katsayısı ise Denklem (4.4)'de

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt \quad (4.2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_T x(t) \cos(2\pi nft) dt \quad (4.3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_T x(t) \sin(2\pi nft) dt \quad (4.4)$$

Hesaplanmaktadır. Periyodik herhangi bir dalga için verilen genel a_0 , a_n ve b_n formülleri periyodik dikdörtgen dalgalar için de uygulanabilirler.



Şekil 4.1 Dikdörtgen dalgalarda darbe genişliği ve periyodu

Şekil 4.1'de T periyodunda ve PW genişliğinde bir dikdörtgen dalga formu görülmektedir.

İlgili dalga formu:

$$x(t) = \begin{cases} A, & |t| \leq \frac{PW}{2} \\ 0, & |t| > \frac{PW}{2} \end{cases}, \quad -\frac{T}{2} < t \leq \frac{T}{2}$$

İlgili dalganın Fourier katsayılarından a_0 katsayısının hesaplanması işlemi Denklem (4.5) ve Denklem (4.6)'da gösterilmişken, a_n katsayısı ise Denklem (4.13)'te hesaplanmıştır.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-PW/2}^{PW/2} x(t) dt \quad (4.5)$$

$$a_0 = A \frac{PW}{T} \quad (4.6)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(2\pi nft) dt, \quad n \neq 0 \quad (4.7)$$

$x(t)$ değeri $-\frac{PW}{2}$ ve $\frac{PW}{2}$ aralığı içerisinde A, bu aralık dışında kalan durumlarda ise 0'a eşittir. Bu sebeple a_n değeri:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-PW/2}^{PW/2} A \cos(2\pi nft) dt \quad (4.8)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \frac{A}{2\pi fn} \sin(2\pi nft) \Big|_{-PW/2}^{PW/2} \quad (4.9)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \frac{A}{2\pi fn} \left(\sin\left(2\pi nf\left(\frac{PW}{2}\right)\right) - \sin\left(2\pi nf\left(-\frac{PW}{2}\right)\right) \right) \quad (4.10)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \frac{A}{2\pi nf} \left(\sin\left(2\pi nf\left(\frac{PW}{2}\right)\right) + \sin\left(2\pi nf\left(\frac{PW}{2}\right)\right) \right) \quad (4.11)$$

$$a_n = \frac{4}{T} \frac{A}{2\pi n f} \sin\left(2\pi n f \left(\frac{PW}{2}\right)\right) \quad (4.12)$$

$$a_n = \frac{2A}{\pi n} \sin\left(\pi n \frac{PW}{T}\right) \quad (4.13)$$

Denklem (4.13)'te bulunan $\frac{PW}{T}$ değeri aynı zamanda dikdörtgen dalgalarda görev döngüsünü (*duty cycle*) ifade etmektedir. Diğer bir katsayı olan b_n katsayısı ise Denklem (4.18)'de hesaplanmaktadır.

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(2\pi n f t) dt \quad (4.14)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-PW/2}^{PW/2} A \sin(2\pi n f t) dt \quad (4.15)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \frac{A}{2\pi n f} \cos(2\pi n f t) \Big|_{-PW/2}^{PW/2} \quad (4.16)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \frac{A}{2\pi n f} \left(\cos\left(2\pi n f \left(\frac{PW}{2}\right)\right) - \cos\left(2\pi n f \left(-\frac{PW}{2}\right)\right) \right) \quad (4.17)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \frac{A}{2\pi n f} \left(\cos \left(2\pi n f \left(\frac{PW}{2} \right) \right) - \cos \left(2\pi n f \left(\frac{PW}{2} \right) \right) \right) \quad (4.18)$$

$$b_n = 0$$

Dikdörtgen bir dalga için hesaplanan Fourier katsayılarına bakıldığında, b_n katsayısının, sıfırdan büyük tüm n tamsayı değerleri için sıfır çıktığı görülmektedir. Bu durumda $x(t)$ dikdörtgen dalgasının gösterimi Denklem (4.19) ve Denklem (4.20)'deki gibi olmaktadır.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f t) \quad (4.19)$$

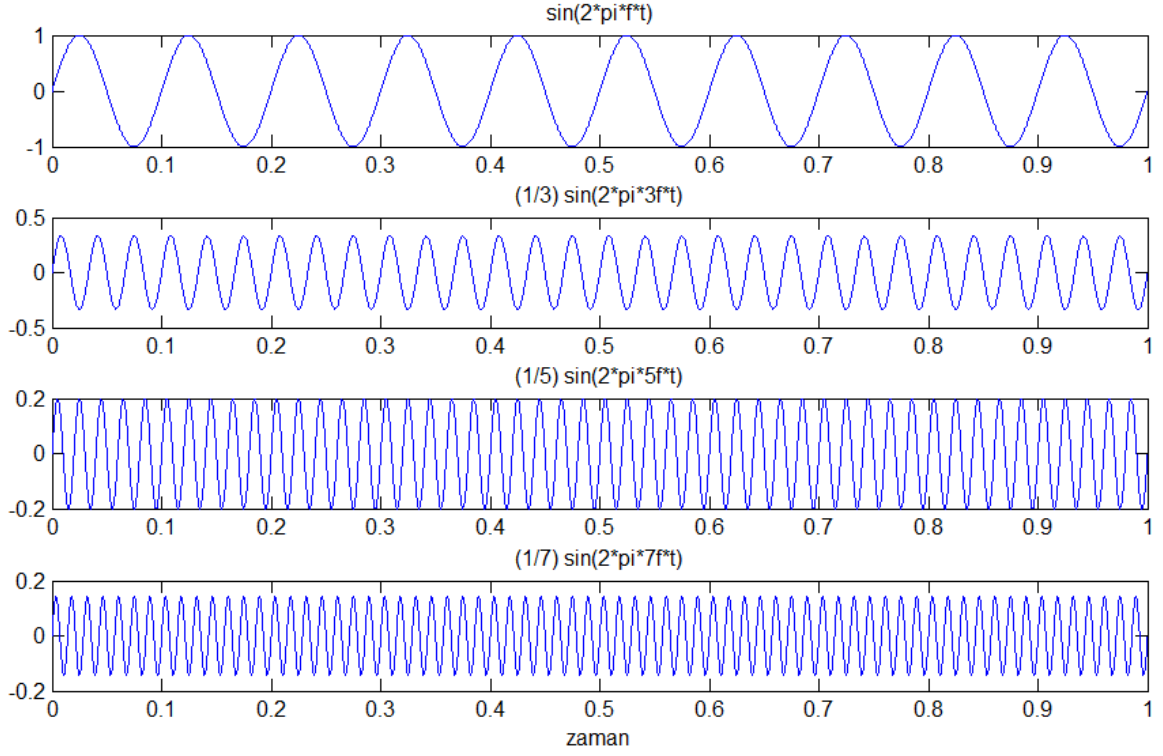
$$x(t) = A \frac{PW}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A}{\pi n} \sin \left(\pi n \frac{PW}{T} \right) \cos(2\pi n f t) \quad (4.20)$$

4.2 Harmonik Frekanslar

Periyodik bir dalga, çeşitli genlik ve frekanslarda sinüs ve kosinüs dalgaların toplanması ile oluşturulabilmektedir. Bu sinyallerin frekansları, dalga formundaki temel frekansın tamsayı katlarında olmaktadır. Temel frekans birinci harmonik frekans olarak, diğer frekanslar ise yüksek harmonik frekanslar olarak adlandırılmaktadır [3].

Şekil 4.2'de bir “f” frekansı ve onun 3, 5 ve 7. katlarındaki frekanslarda salınım yapan farklı genliklerde sinüs dalgaları görülmektedir. Buradaki 3, 5 ve 7. kat frekanslar, “f” temel frekansının harmonikleri olarak adlandırılmaktadır. İlgili sinüs dalgaların genlik

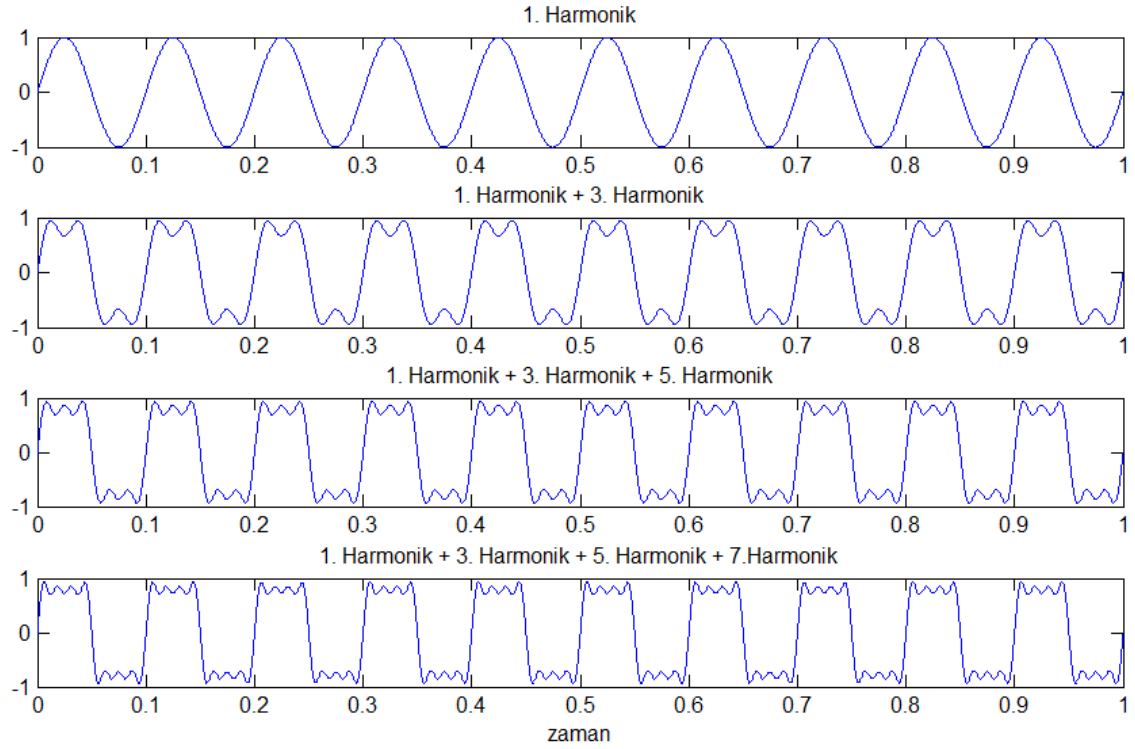
değerleri için Fourier katsayı değerleri kullanılarak toplandığında, periyodik bir kare dalga oluşturulabilir.



Şekil 4.2 Harmonik frekanslar

Şekil 4.3'te temel frekans ve harmonik frekansların sırası ile toplanması sonucu oluşan dalga formları gösterilmiştir. Toplanan harmonik frekansların sayısının artması ile birlikte, dalga formu kare dalgaya daha çok benzemektedir. Sonsuz sayıda harmonik toplanarak dalga oluşturulduğu durumda ise oluşan dalga tam bir kare dalga olacaktır.

Dikdörtgen dalgaları oluşturan bütün yüksek harmonik frekanslar temel frekansın tam sayı katları olduğundan temel frekans ile periyodiktirler. Bu sebeple, harmonik frekansların toplanması sonucu oluşan dalga da temel frekans ile aynı periyodiklikte bir dalga olacaktır. Burada harmonik olarak ifade edilen değerlerin büyüklükleri ilgili dikdörtgen dalganın Fourier katsayılarının büyüklüklerini ifade etmektedir.



Şekil 4.3 Harmoniklerin toplanmasıyla periyodik kare dalga oluşum örneği

4.3 Dikdörtgen Dalgalarda Görev Döngüsünün Fourier Katsayılarına Etkisi

Dikdörtgen dalgalar için yapılan Fourier katsayı hesaplarında Denklem (4.13)'te tüm a_n katsayılarının görev döngüsü parametresi ile bağlantılı olduğu, hatta katsayıların birbirleri arasında fark oluşturmalarındaki tek değişken olduğu görülmektedir. Bu sebeple bir dikdörtgen dalgayı oluşturan harmonik frekanslar ile ilgili işlemler yapılması durumunda görev döngüsü parametresi büyük önem kazanmaktadır.

Ayrıca Fourier katsayılarının büyüklüklerinin %50 görev döngüsü değerine göre simetrik bir görünüme sahip olduğu sadece fazlarında farklılıklar olduğu aşağıdaki hesaplamalarla gösterilebilir. Genlik, periyot ve görev döngüsü parametreleri

$$Genlik = A$$

$$Periyot = T$$

$$G\ddot{ö}rev D\ddot{o}ng\ddot{ü}s\ddot{ü} = GD = \frac{PW}{T}$$

değerleri ile ifade edilmektedir. a_0 , a_n ve b_n Fourier katsayıları ise aşağıdaki gibi

$$a_0 = A * GD$$

$$a_n = 2A * \frac{\sin(n * \pi * GD)}{n\pi}, \quad n \geq 1$$

$$b_n = 0$$

hesaplanmıştır.

GD değerinin yerine $(1 - GD)$ yazıldığı durumda:

$$a_n = 2A * \frac{\sin((1 - GD) * n * \pi)}{n * \pi} = 2A * \frac{\sin([n * \pi] - [GD * n * \pi])}{n * \pi}$$

$$\sin(x - y) = \sin(x) \cos(y) - \cos(x) \sin(y), \quad x = n * \pi, \quad y = GD * n * \pi$$

$$\begin{aligned} & 2A * \frac{\sin([n * \pi] - [GD * n * \pi])}{n * \pi} \\ &= 2A * \frac{\sin(n * \pi) \cos(GD * n * \pi) - \cos(n * \pi) \sin(GD * n * \pi)}{n * \pi} \end{aligned}$$

n değerinin pozitif tam sayılar olduğu durumda:

$$\sin(n * \pi) = 0$$

$$\cos(n * \pi) = (-1)^n$$

$$\begin{aligned} 2A * \frac{\sin((1 - GD) * n * \pi)}{n * \pi} &= -(-1)^n * 2A * \frac{\sin(GD * n * \pi)}{n * \pi} \\ &= (-1)^{(n+1)} * 2A * \frac{\sin(GD * n * \pi)}{n * \pi} \end{aligned}$$

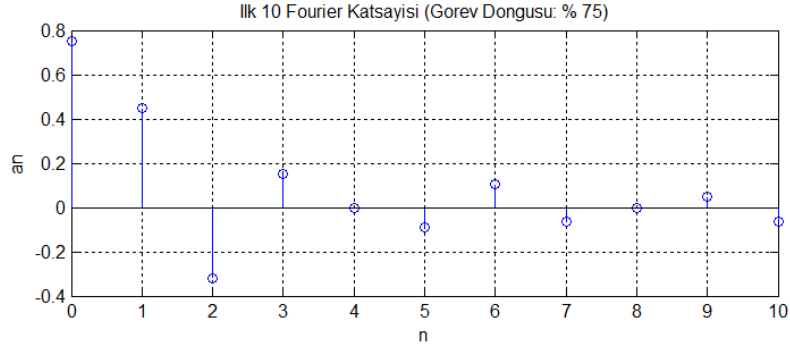
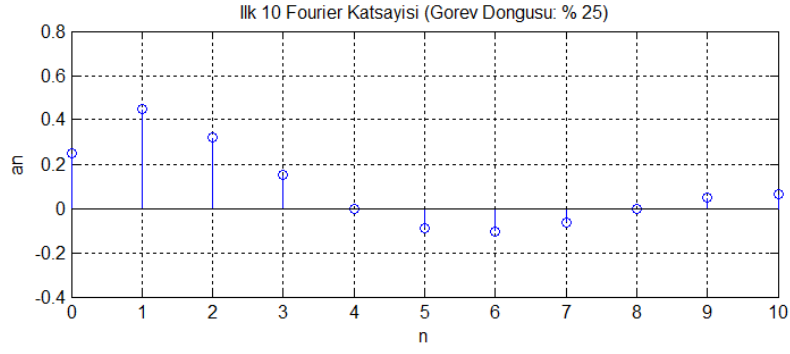
GD ve 1-GD değerleri için hesaplanan an katsayıları için:

$$a_{n(1-GD)} = (-1)^{(n+1)} a_{n(GD)} \quad (4.21)$$

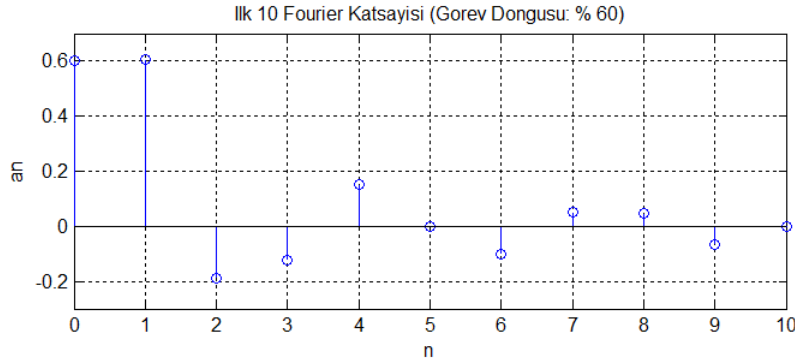
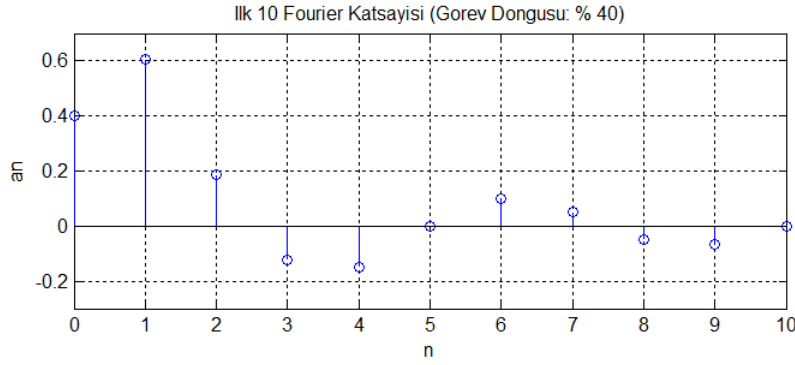
$$|a_{n(GD)}| = |a_{n(1-GD)}| \quad (4.22)$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda GD değerinin yerine $(1 - GD)$ yazılmış olmasının katsayıların büyüklüğüne etki etmediği Denklem (4.22)'de görülmektedir. Katsayıların büyüklüğünün yanı sıra fazlarının da etkisi önem teşkil etmektedir. Denklem (4.21)'de bulunan $(-1)^{(n+1)}$ çarpanından dolayı %50'den büyük görev döngülerinde çift numaraya sahip harmoniklerin %50'den küçük görev döngülerine göre 180° faz farkına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca, Denklem (4.6)'da görev döngüsünün %50'den büyük veya küçük olmasının a_0 değerini değiştireceği görülmektedir fakat a_0 değeri DC komponent olduğu için karıştırmaya etkisi olmayacaktır.

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 kıyaslandığında görev döngüsü parametresinin değiştirilmesi ile Fourier katsayılarının büyüklüklerinin değiştiği görülmektedir. Ayrıca a_0 haricindeki a_n değerlerinin mutlak değerleri ele alındığında ise %50 görev döngüsüne göre simetrik olarak eşit çıktığı görülmektedir.

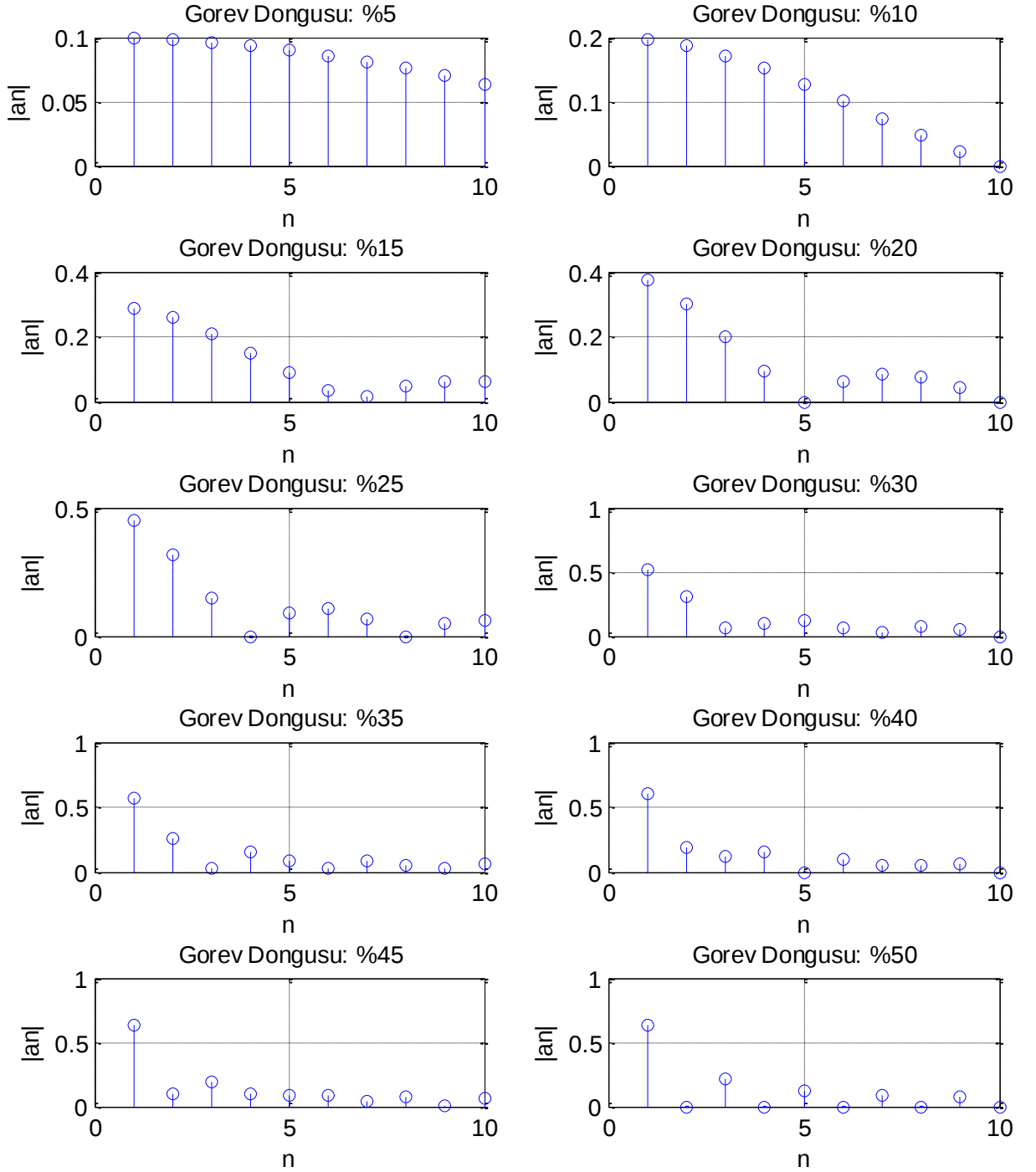


Şekil 4.4 Görev döngüsünün %25 ve %75 olması durumunda Fourier katsayıları (A=1)



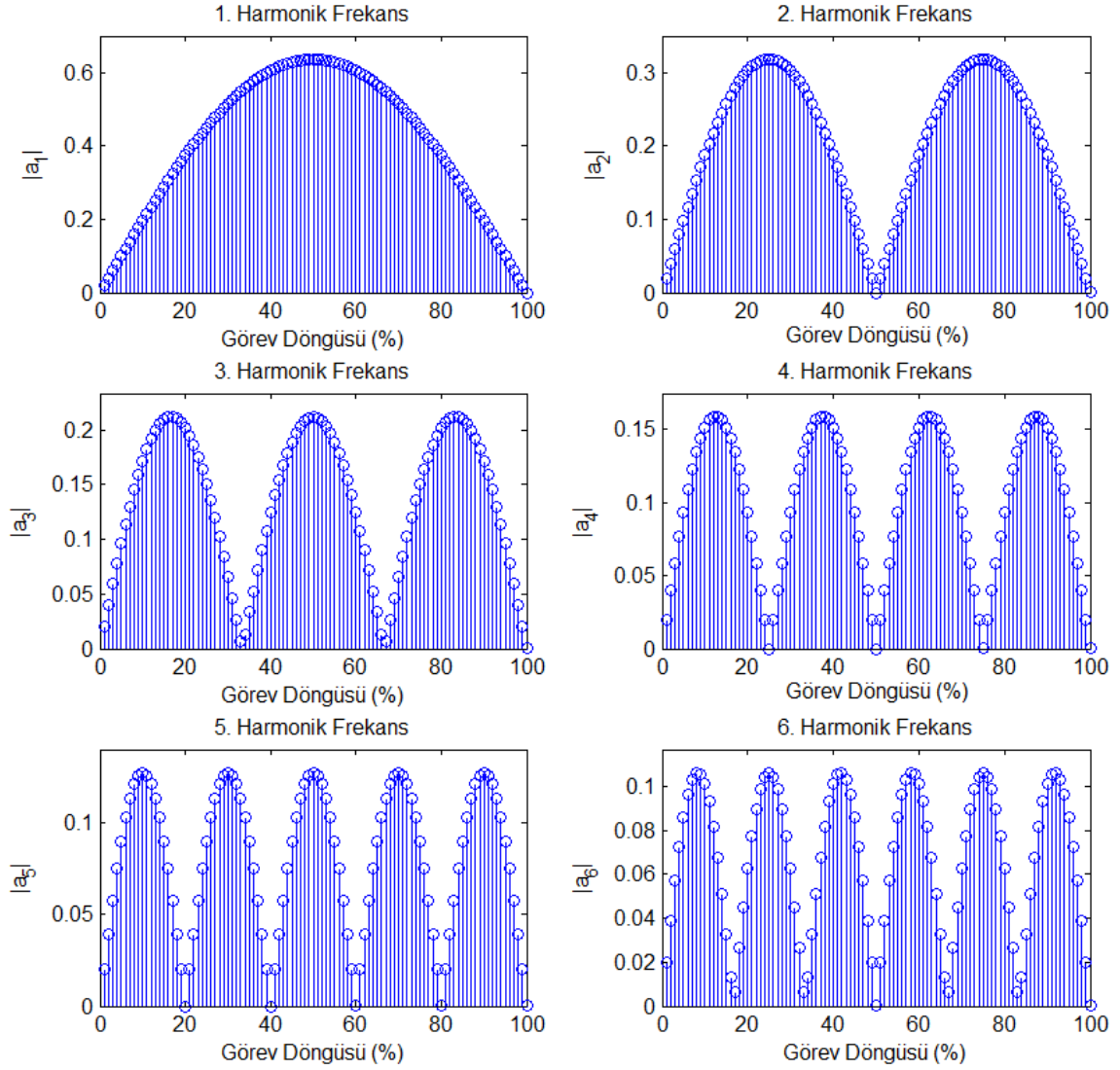
Şekil 4.5 Görev döngüsünün %40 ve %60 olması durumunda Fourier katsayıları (A=1)

Farklı görev döngülerine sahip dikdörtgen dalgalar için hesaplanan Fourier katsayılarının çizdirildiği  ekil 4.6 incelendiğinde görev döngüsünün Fourier katsayılarının büyüklüğüne etkisi daha iyi görülebilmektedir.



Şekil 4.6 Görev döngüsünün Fourier katsayılarına etkisi

Ayrıca görev döngüsünün her bir a_n katsayısına ayrı ayrı etkisinin incelenebilmesi için  ekil 4.7’de görev döngüsünün ilk altı harmonik frekanstaki etkisi g rselle tirilmi tir.



Şekil 4.7 Görev döngüsünün ilk altı harmonik frekanstaki etkisi

Burada ilk altı Fourier katsayısı, başka bir ifadeyle ilk altı harmonik frekans için görev döngüsü değeri %1’den %100’e kadar, %1 çözünürlük ile değiştirilerek hesaplanmış ve grafikler üzerinde gösterilmiştir.

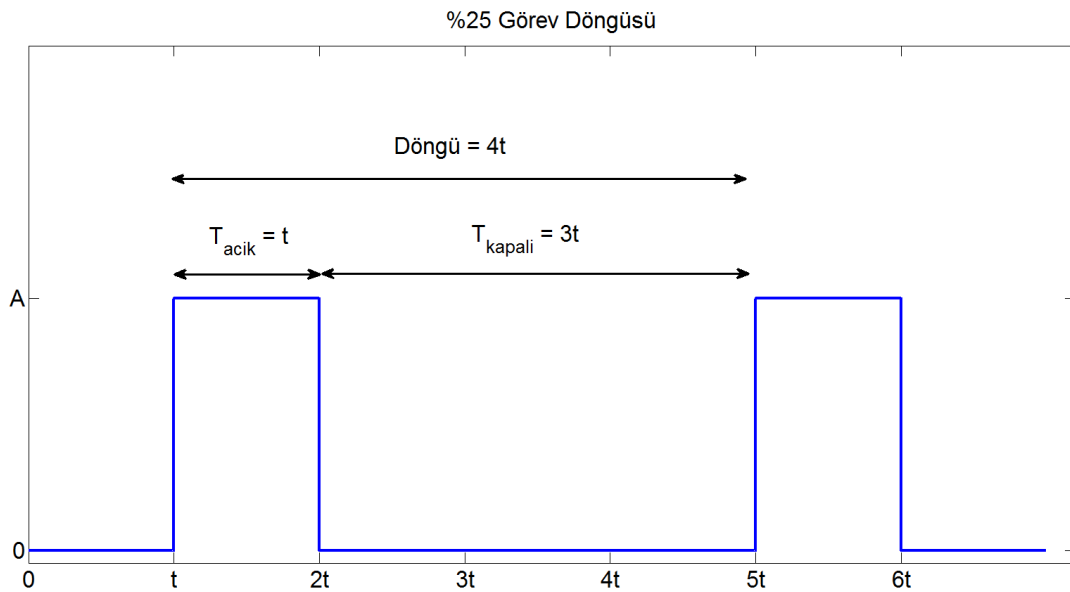
4.4 Karıştırma Sinyali

Takip edilen bir hedef platform, kendisini açısız izleme ile takip eden COSRO/LORO radarları fark etmiş olsa dahi radarın konik tarama frekansını belirleyememektedir. Bu durumda izlenmeyi engellemek için tehdidi en etkili şekilde karıştırması gerekmektedir. Fakat tehdit radarının hedefini bertaraf etmek için gönderilmiş bir güdümlü füze başlığında olması ihtimalinde hedef, kendini koruyabilmesi için çok kısa bir reaksiyon süresine sahiptir. Bu sebeple sadece etkili şekilde karıştırma işlemi yeterli olmamakta, aynı zamanda en hızlı şekilde karıştırma yapması gerekmektedir. Bu nedenle harmonik genlik modülasyonlu karıştırma yöntemi detaylı olarak incelenecektir.

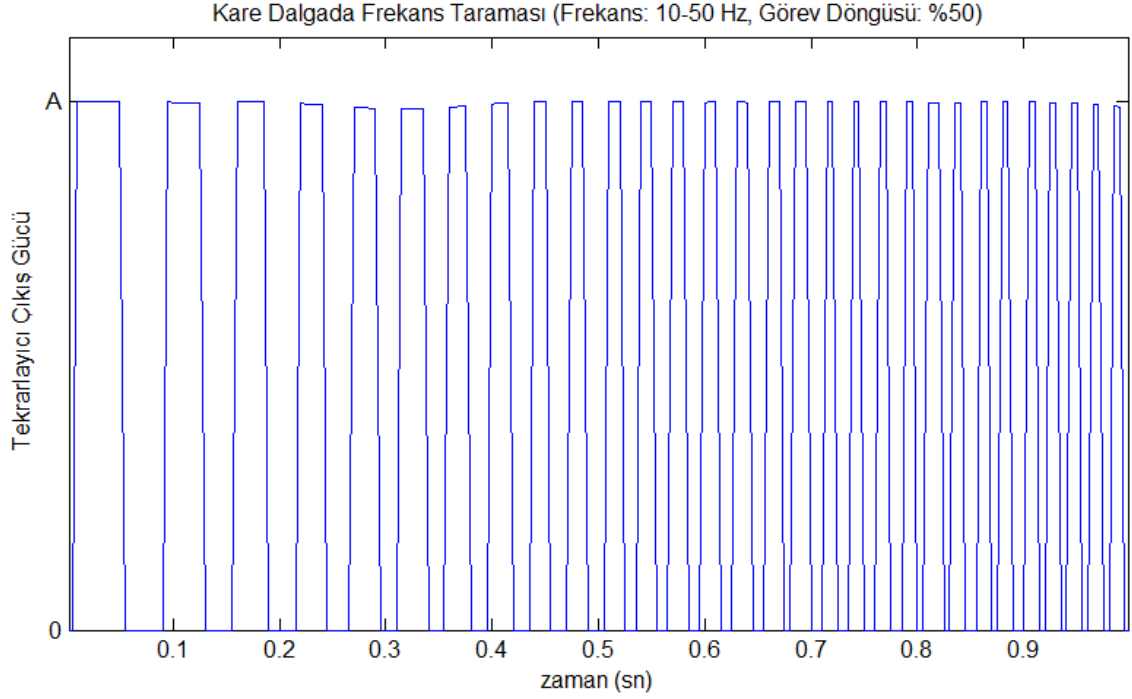
Bu yöntemde karıştırma birimindeki tekrarlayıcıdan çıkacak olan sinyaller belirli aralıklarda açılıp kapatılarak genlikleri dikdörtgen dalga formunda modüle edilerek gönderilmektedir. Bu dikdörtgen dalgaların frekanslarının kaydırılarak belirli bir frekans aralığının taranması hedeflenmektedir. Şekil 4.8’de bir örneği gösterilen periyodik bir dikdörtgen dalgada frekans ve görev döngüsü terimleri:

$$\text{Frekans} = \frac{1}{\text{Dalganın Periyodu}}$$

$$\text{Görev Döngüsü} = \frac{\text{Sinyal yayılımı yapılan zaman}}{\text{Dalganın periyodu}}$$



Şekil 4.8 Görev döngüsü %25 olan dikdörtgen dalga örneği



Şekil 4.9 Frekans taramalı karıştırma sinyali

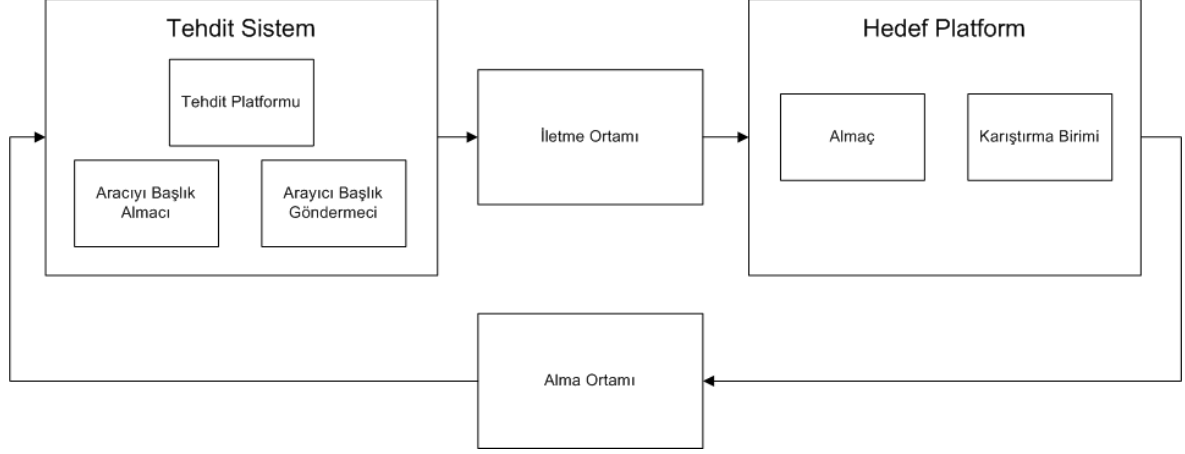
Şekil 4.9’da tekrarlayıcının devreye girmesi ile birlikte tarama frekansı 10 Hz ile 50 Hz arasında, frekans değişim hızı 40 Hz/sn olacak şekilde tarama yapan ve görev döngüsü %50 olarak ayarlanmış örnek bir karıştırma sinyali görülmektedir.

4.5 Simülasyon Yapısı

Bu çalışmada radar takip mekanizmasının ve karıştırma birimlerinin simüle edilmesinde kullanılan simülasyon programı Tactical Technologies Inc. şirketi tarafından geliştirilmiş TESS (Tactical Engagement Simulation Software) isimli MATLAB Simulink tabanlı bir simülasyon programıdır.

Şekil 4.10 ile verilen simülasyon blok diyagramı incelendiğinde bir tehdit sisteminde takip radarının hedef arayıp, bulduktan sonra kilitleyerek hedefi takip etmesi işlemi gerçekleştirilebilir. Tehdit sistem tarafında tüm bu işlemler yapılıyorken hedef platform üzerine düşen elektromanyetik sinyaller izlenebilir ve karıştırma birimi vasıtası ile karıştırma sinyalleri tehdit sisteme yönlendirilerek radarın takip mekanizmasına etki edilmeye çalışılır. Simülasyonda çeşitli parametre ayarlamaları

ile LORO radarları simüle eden bir tehdit sistemi ve bu sistemi karıştırmaya yönelik bir hedef platform tanımlanmıştır.

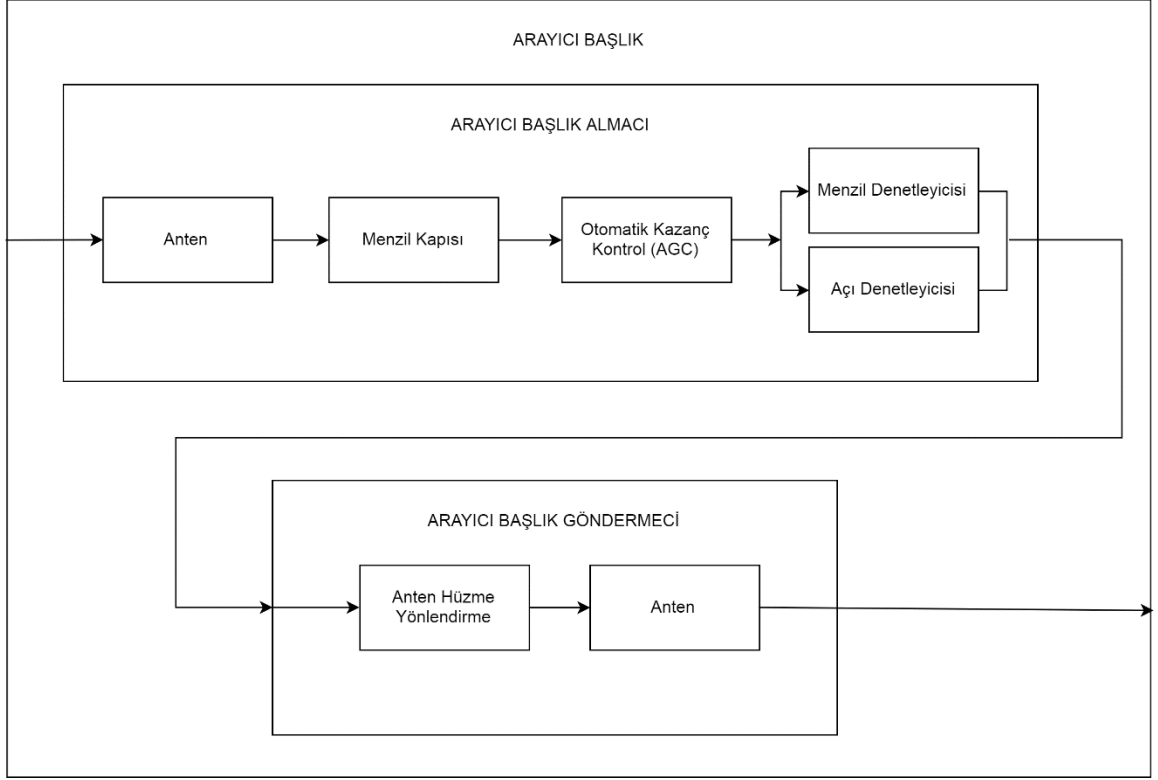


Şekil 4.10 Simülör blok diyagramı

Tez kapsamında yapılan simülasyonlarda, Şekil 4.9'da örnek bir grafiği verilen karıştırma sinyali, tekrarlayıcının periyodik olarak açılıp kapatılması yöntemi ile yaratılmaktadır. Yapılan açma kapama işleminin frekansı, önceden belirlenmiş başlangıç ve bitiş frekansları arasında belirli bir hız ile kaydırılarak değiştirilmektedir. Bu yapılan işlemler sırasında görev döngüsü, simülasyona başlamadan önce ayarlanmış olan değerde sabit tutulmaktadır. Şekil 4.10'da bulunan blokların içeriği ve tez kapsamında kullanılan parametreler başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

4.5.1 Arayıcı Başlık

Tehdit sistemin arayıcı başlığında anten, almacı ve göndermece birimleri bulunmaktadır. LORO tipinde tarama yapan bir radarda sinyal, tarama yapmayan bir anten vasıtası ile göndermecekten ortama yayılır ve daha sonra hedeften yansıyan sinyal lob anahtarlama yapan farklı bir anten vasıtası ile algılanarak almacı biriminde işlenir ve hedef hakkında bilgi sahibi olunur. Arayıcı başlık blok diyagramı Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.11 Arayıcı başlık blok diyagramı

Arayıcı Başlık Almaç Ayarları

Bu alanda tehdit sisteminde bulunan arayıcı başlığın almaç biriminde kullanılan parametreler ve değerleri belirtilmiştir:

Radar tipi: LORO

Açısal takip yanca servo bant genişliği: 2 Hz

Açısal takip yükseliş servo bant genişliği: 2 Hz

Menzil takip kapı genişliği: 2us

Yanca ve yükseliş arama genişliği: 10°

Değişim: 10 derece/sn

AGC bant genişliği: 5 Hz

Anten Tarama Frekansı: Farklı frekans değerleri ile denemeler yapılmıştır.

Arayıcı Başlık Göndermeç Ayarları

Bu blokta radar göndermecinin simüle edilebilmesi için çeşitli anten parametreleri ve yayılan elektromanteyik dalganın özellikleri gibi ayarlamalar yapılabilmektedir.

Bu alanda bulunan temel parametreler ve değerleri:

Anten çapı: 1m

Yayılm verimliliği: %80

Anten polarizasyonu: 0° (Doğrusal Polarizasyon)

Hüzme şekli: Sincsqared

Yan hüzme seviyesi (ana hüzmeğe göre): -25 dB

Yayın frekansı: 9 GHz

Yayın gücü: 30 kW

Darbe genişliği: 1 us

Darbe tekrarlama aralığı: 100 us

4.5.2 Karıştırma Birimi

Bu blokta takip radarına genlik modülasyonlu karıştırma uygulanabilmesi için gerekli olan almaç ve göndermeç birimleri bulunmaktadır. Karıştırma birimi blok diyagramı Şekil 4.12’de sunulmuştur.

Bu alanda bulunan temel parametreler ve değerleri:

Anten verimliliği: %80

Anten hüzme genişliği: 30°

Yayın gücü: 30 dBW

Sistem kazancı: 50 dB

Yan hüzme seviyesi: -15dB

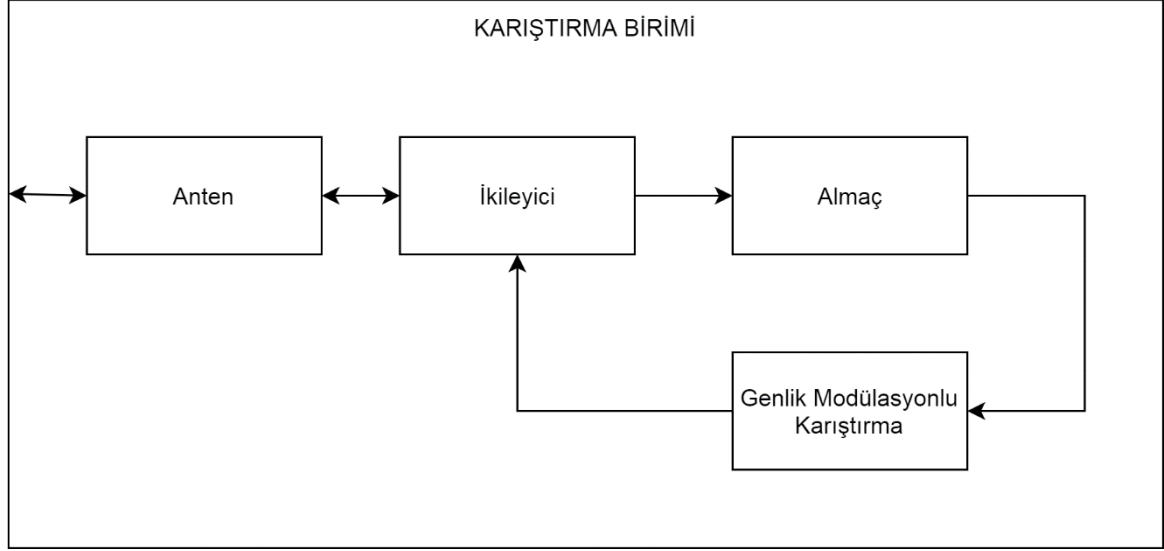
Hüzme şekli: Sincsqared

Açısal karıştırma tekniği: Genlik Modülasyonu (AM)

Genlik modülasyon dalga formu: Testere dişi

Tarama Frekansı: Farklı frekans değerleri ile denemeler yapılmıştır.

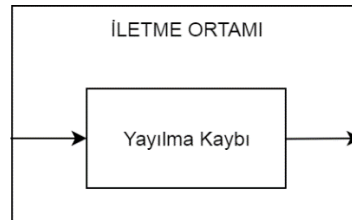
Görev döngüsü: Farklı görev döngüsü değerleri ile denemeler yapılmıştır.



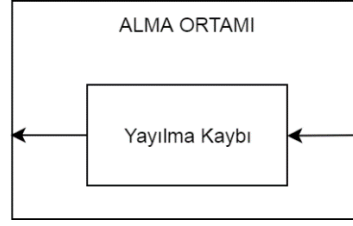
Şekil 4.12 Karıştırma birimi blok diyagramı

4.5.3 İletme ve Alma Ortamları

İletme ve alma ortamlarında radar sinyalinin menzile göre yayılma kayıpları hesaba katılarak iletilen güç yoğunluğu hesaplanmaktadır.



Şekil 4.13 İletme ortamı blok diyagramı



Şekil 4.14 Alma ortamı blok diyagramı

Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te bulunan her iki ortam için de kullanılan formülde yayılma kaybı sonrası iletilen güç yoğunluğu Denklem (2.1)'de verilen denklem kullanılarak hesaplanmaktadır.

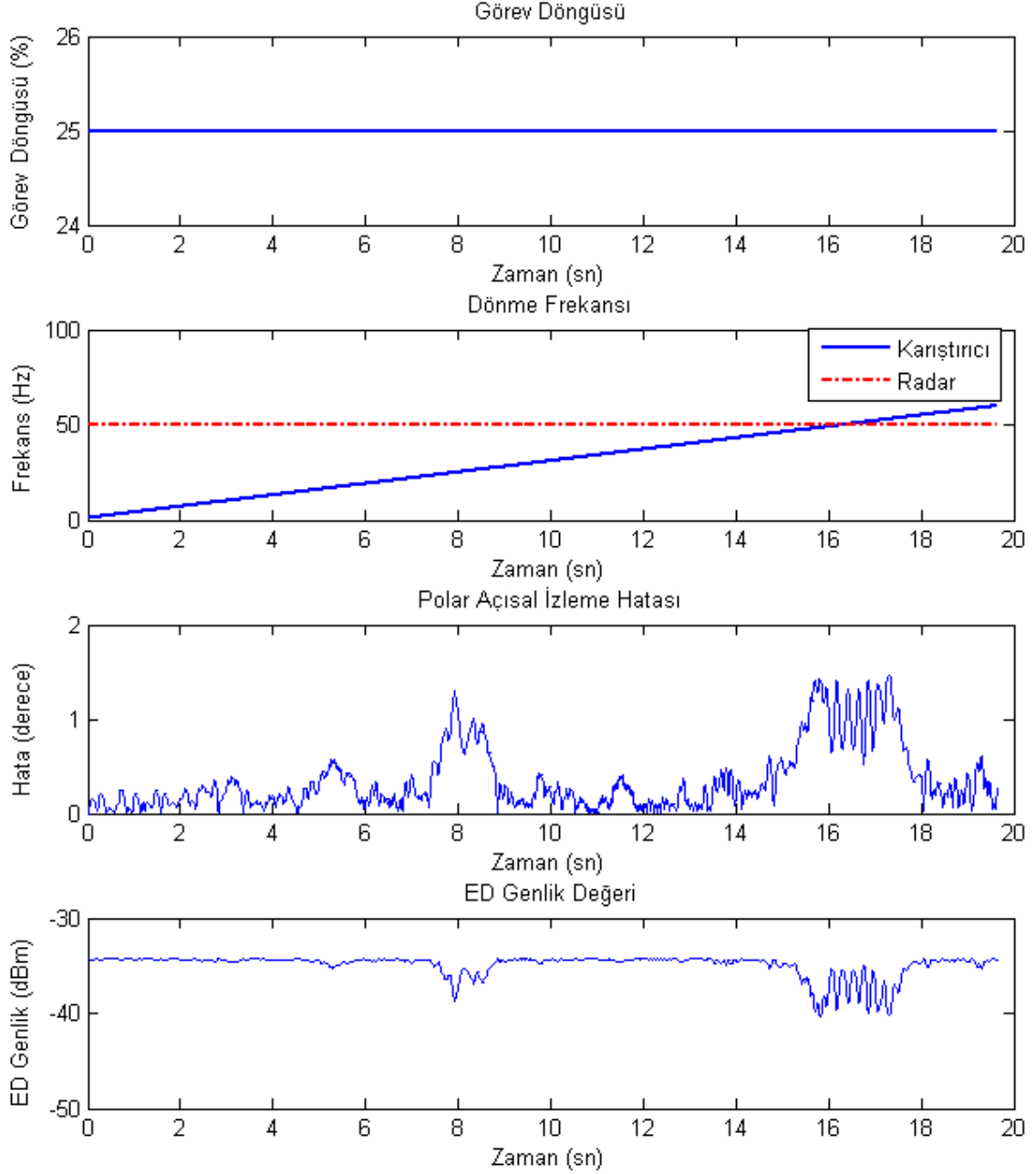
$$\text{İletilen Güç Yoğunluğu} = \frac{\text{Etkin Yayılım Gücü (ERP)}}{4\pi R^2}$$

4.5.4 Karıştırma Senaryosu Simülasyonu

Simülasyon ile gerçekleştirilmiş Şekil 4.15'te grafikleri gösterilen örnek senaryoda takip radarının konik tarama frekansı 50 Hz olarak seçilmiştir. Hedef platformun karıştırma sinyalinin tarama frekansı ise 1 Hz ile başlayarak 60 Hz değerine kadar yükseltilmiştir. İlgili karıştırma sinyalinin görev döngüsü ise bu örnek simülasyon için %25 olarak seçilmiştir.

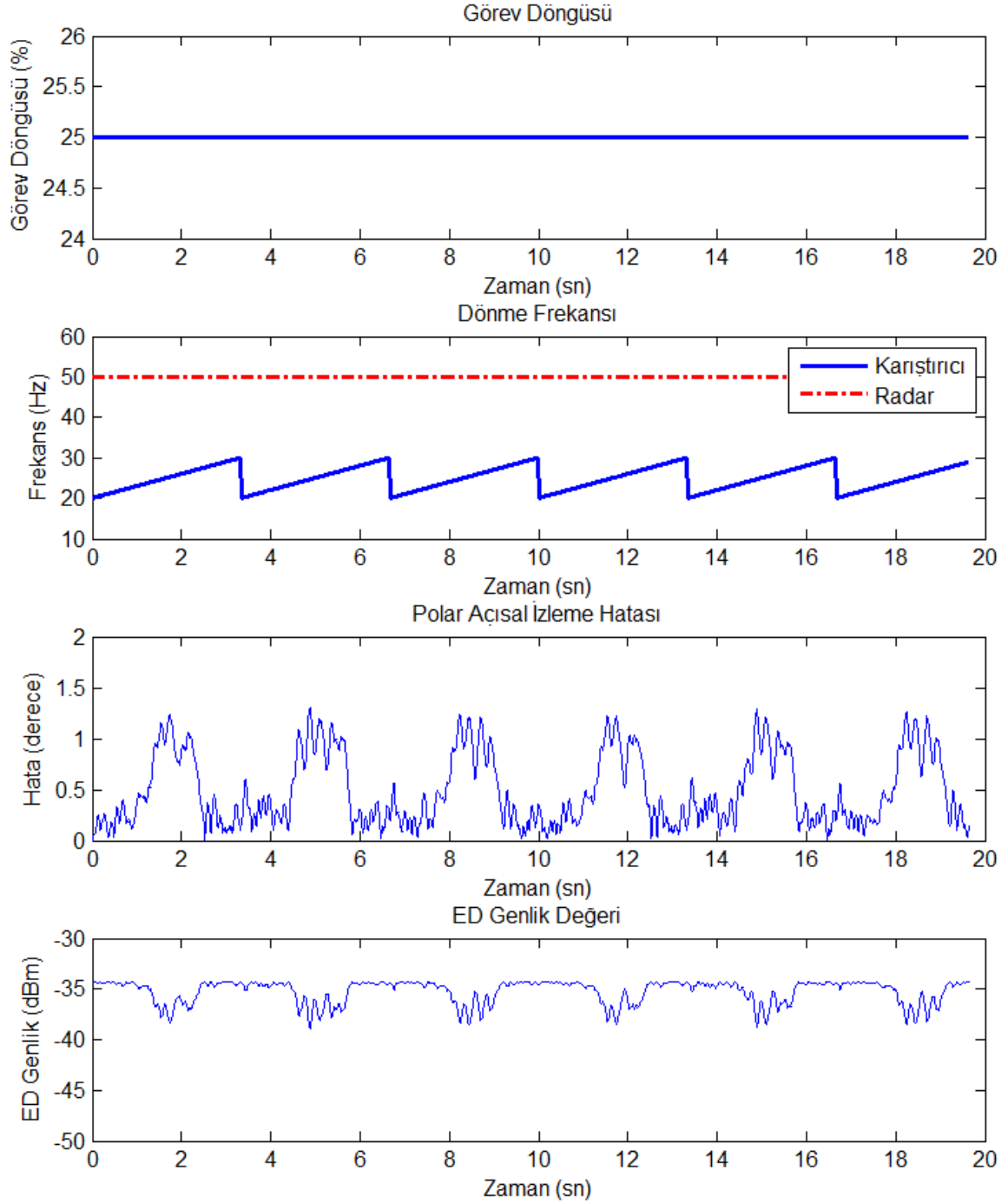
Simülasyon başlangıcında takip radarı hedefe kilitlenmiş ve sürekli olarak takip etmektedir. Bu nedenle başlangıçta radarın açısız izleme hatası 0.1° mertebesinde. Takip altında olan hedefin ED sisteminin ölçtüğü genlik değerlerine bakıldığında genliği sabit bir yayının sürekli varlığı görülmektedir. Bu aşamada hedef, takip edildiğini fark ederek radara karıştırma amaçlı sinyaller göndermeye başlamıştır. Gönderilen sinyalin tarama frekansı ise 1 Hz değerinden başlayıp sürekli artırılarak devam etmektedir. Tarama frekansının artırılması ile birlikte radarın açısız izleme hatasında artışlar ve azalışlar meydana gelmektedir. Hata grafiğinde lokal maksimum oluşan bölgeler incelendiğinde, karıştırma sinyalinin tarama frekansının 16.6 Hz, 25 Hz ve 50 Hz değerlerine yakın değerlerde olduğu ve 50 Hz değerine gelindiğinde ise hatanın maksimum değere ulaştığı

görülmektedir. Belirtilen değerlerden farklı değerler tarandığı durumda ise hatanın azaldığı görülmektedir. Hata artışlarının olduğu frekans değerleri ayrı ayrı incelendiğinde, 16.6 Hz değerinin üçüncü harmoniğinin, 25 Hz değerinin ikinci harmoniğinin ve 50 Hz değerinin birinci harmoniğinin 50 Hz değerine denk geldiği ve 50 Hz değerinin de COSRO radarın konik tarama frekansı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.15 Frekans taramasına bağlı oluşan hata ve genlik değerleri (1 - 60 Hz)

Şekil 4.16'da frekans tarama hızı, Şekil 4.15'te bulunan simülasyon ile aynı hızda tutulup frekans aralığı 20-30 Hz aralığında değiştirilmiştir. Bu sayede karıştırma işleminin, karıştırma sinyalinin ikinci harmonik frekansı ile yapılması hedeflenmiştir.



Şekil 4.16 Frekans taramasına bağlı oluşan hata ve genlik değerleri (20 – 30 Hz)

Simülasyon sonuçları incelendiğinde Şekil 4.15'teki gibi geniş bir alanda tarama yaparak birinci harmonik ile karıştırma yapmak yerine Şekil 4.16'daki gibi daha dar bir aralıkta tarama yaparak ikinci harmonik frekans ile etkinlik sağlandığında konik taramalı radarla daha sık bir biçimde büyük hatalar oluşturulduğu görülmektedir. Bu sonuç ile birlikte konik tarama frekansı belirlenemeyen radarlar için karıştırmanın, konik tarama frekansının yüksek harmonikleri ile daha etkin olabileceği ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, beşinci bölüm harmonik genlik modülasyonlu karıştırmada tarama frekans aralığının ve frekans aralığına uygun görev döngüsünün seçimi konusuna ayrılmıştır.

Sonuçlara ED sistemi tarafından bakıldığında ise karıştırmanın etkinliğinin arttığı anlarda radarın hedefi takip ederken açısal hata yapması nedeniyle ED sisteminde ölçülen genlik değerlerinde çökmeler oluşmaktadır. ED sistemi üzerinden oluşan çökmeler incelenerek radar tarama frekansı hakkında bilgi edinilebilir. Bu çalışmada, altıncı bölüm çökme tespiti yapılarak COSRO ve LORO radarların konik tarama frekanslarının bulunmasına ayrılmıştır.

5. HARMONİK GENLİK MODÜLASYONLU KARIŞTIRMANIN ETKİNLİK ANALİZİ

Harmonik frekanslar kullanılarak yapılacak olan karıştırma işlemlerinde dikkat edilmesi gereken husus, taramadaki frekans değişim hızının her yüksek harmonik frekansa geçildiğinde katlanarak artmasıdır.

Temel frekans (birinci harmonik) taramasının F - $2F$ frekans aralığında ve V frekans değişim hızı ile yapıldığı durumda, bir tur T sürede tamamlanmaktadır. Birinci harmonik frekans F frekansından $2F$ frekansına doğru taranırken aynı anda ikinci harmonik frekans ise $2F$ frekansından $4F$ frekansına doğru tarama gerçekleştirmektedir. Üçüncü harmonik frekans ise $3F$ frekansından $6F$ frekansına doğru taramasını devam ettirmektedir. Bu şekilde tüm yüksek harmonikler farklı frekans aralıklarında eş zamanlı tarama yapmaktadırlar.

Farklı aralıklarda frekans taramaları devam ederken dikkat edilmesi gereken nokta ise tüm tarama yapılan frekansların temel frekansın harmonikleri olması nedeniyle taramaların aynı anda başlanıp aynı anda bitmeleridir.

Tarama süreleri tüm harmonik frekans taramalarında aynı olmasına karşın harmonik seviyesinin yükselmesi ile birlikte taranan frekans bölgesi genişlemektedir. Frekans bölgesinin genişlemesine rağmen eşit sürelerde tarama yapılabilen olmasının sebebi ise her yüksek harmonik frekans taramasında tarama hızının katlanarak artıyor olmasıdır.

Yüksek harmonik frekanslarda tarama hızının katlanarak artması nedeniyle karıştırılmak istenilen frekans üzerinde kalma süresi azalmakta ve buna bağlı olarak karıştırma etkinliği düşmektedir. Yüksek harmonik frekanslarda Fourier katsayılarının etkilerinin hesaplanması sırasında yapılan işlemler Çizelge 5.1 vasıtası ile aktarılmıştır.

Çizelge 5.1’de karıştırıcı ile F - $2F$ aralığı taranırken en küçük ikinci harmonik değerinin $2F$ ’te bulunması sebebiyle F - $2F$ aralığında sadece temel frekans (birinci harmonik) etkilidir. Bu sebeple bu frekans aralığında sadece a_1 katsayısının etkisi bulunmaktadır. $2F$ - $3F$ frekans aralığında ise sadece ikinci harmonik frekans etkili olduğundan bu alandaki etkinlik hesaplamasında sadece a_2 katsayısı kullanılmıştır.

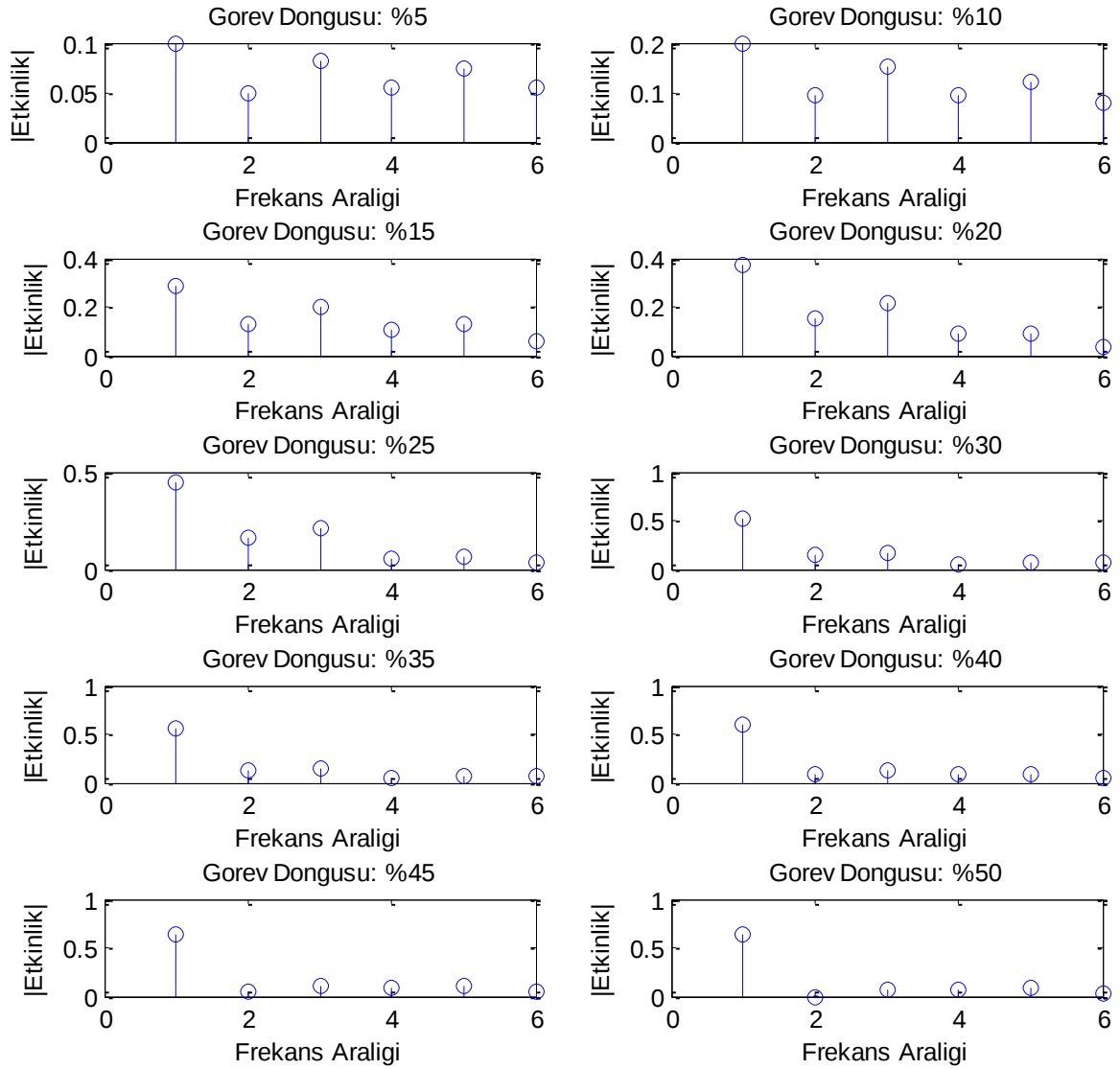
Fakat ikinci harmonik frekans bölgesinde, frekans tarama hızının birinci frekans bölgesine göre iki katına çıkması nedeniyle etkinlik değeri yarıya düşürülmüştür. Bu sebeple 2F-3F aralığındaki etkinlik değeri olarak a_2 katsayısının yarısı alınmıştır. 3F-4F frekans aralığında ise ikinci harmonik frekans taraması 2V hızı ile devam ederken aynı anda üçüncü harmonik frekans taraması da 3F frekansından taramaya başlayarak 6F frekansına doğru 3V hızı ile tarama yapmaktadır. Bu frekansta üçüncü harmonik frekansın tarama hızının birinci harmonik frekansın tarama hızının üç katı olması nedeniyle etkinlik değeri üçte birine düşürülmüştür. Bu sebeple üçüncü harmonik frekansın, bulunduğu frekans aralıklarındaki etkinlik değeri a_3 katsayısının üçte biri olarak hesaplanmıştır. 3F-4F frekans aralığına ikinci ve üçüncü harmoniklerin birlikte etki etmesi nedeniyle iki etkinlik değeri toplanarak ilgili frekans aralığındaki toplam etkinlik değeri hesaplanmıştır. Bu yöntem ile altıncı harmonik frekans bölgesine kadar her frekans aralığına etki eden harmonikler belirlenmiş ve etkinlik değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 Farklı frekans aralıklarında Fourier katsayılarının etkisi

	F -2F (1. Aralık)	2F-3F (2. Aralık)	3F-4F (3. Aralık)	4F-5F (4. Aralık)	5F-6F (5. Aralık)	6F-7F (6. Aralık)
Etkinlik	a_1	$\frac{a_2}{2}$	$\frac{a_2}{2} + \frac{a_3}{3}$	$\frac{a_3}{3} + \frac{a_4}{4}$	$\frac{a_3}{3} + \frac{a_4}{4} + \frac{a_5}{5}$	$\frac{a_4}{4} + \frac{a_5}{5} + \frac{a_6}{6}$

Fourier katsayılarının, görev döngüsü parametresi ile bağlantılı olması nedeniyle görev döngüsü değeri değiştirildiğinde Fourier katsayıları da değişmektedir. Her farklı görev döngüsü değeri için Fourier katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan katsayılar ile Çizelge 5.1'deki hesaplama yöntemi kullanılarak her frekans aralığı için bir etkinlik değeri hesaplanmıştır.

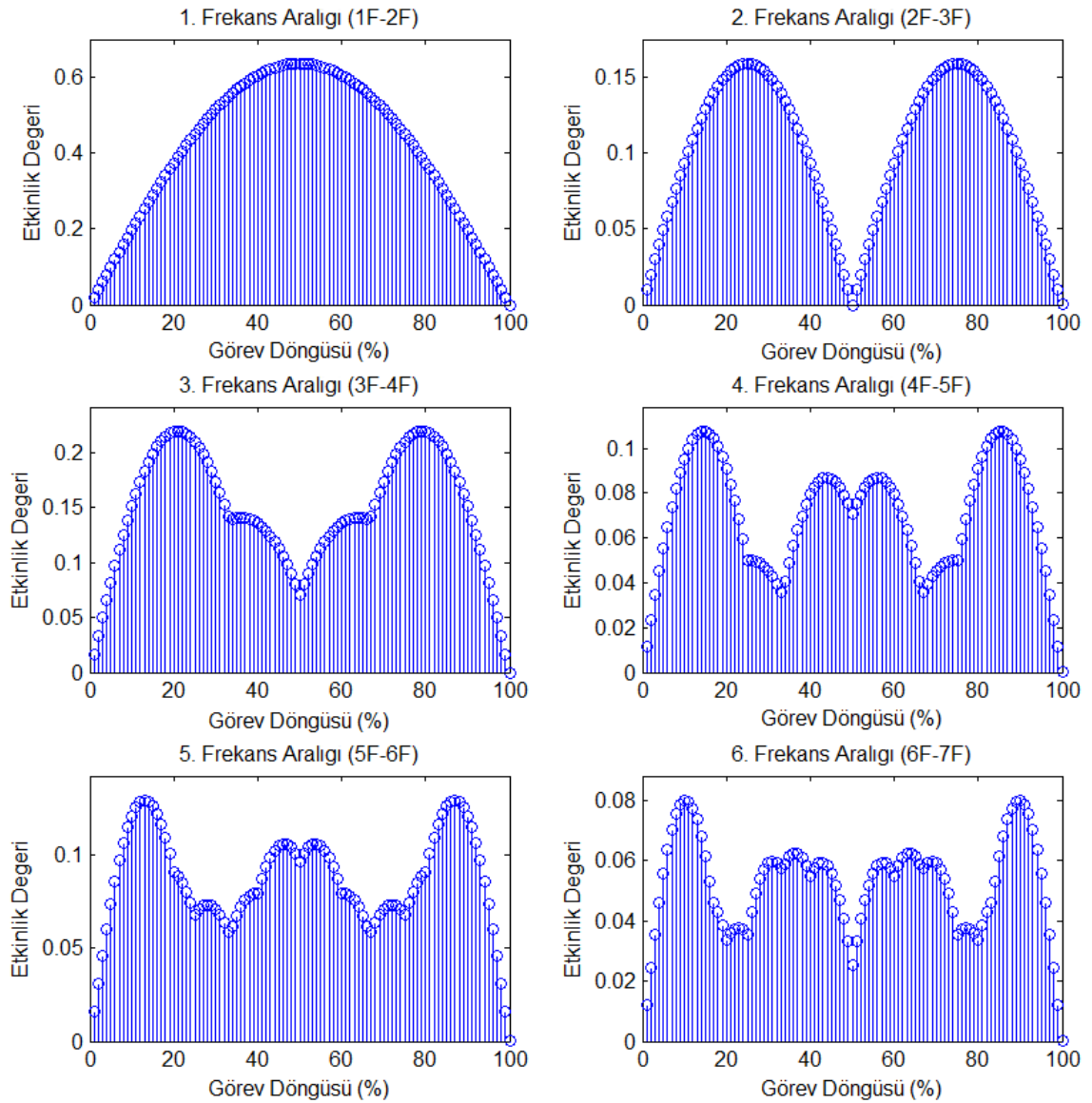
Şekil 5.1'de farklı görev döngüleri için hesaplanmış ilk altı frekans bölgesine ait etkinlik değerleri görülmektedir.



Şekil 5.1 Farklı görev döngülerinde frekans aralıklarındaki etkinlik değerleri

5.1 Teorik Etkinlik Analizi

Şekil 5.2’de her frekans aralığında farklı etkinlik hesaplamaları yapılması nedeniyle her frekans aralığında diğer tüm değişkenler sabit tutularak sadece görev döngüsü parametresi değiştirilmiş ve her görev döngüsü değeri için etkinlik değerleri çizdirilmiştir.



Şekil 5.2 Her frekans aralığı için görev döngülerinin etkinliğe etkisi

Şekil 5.2’de diğer tüm parametreler sabit, görev döngüsü parametresi %0 ile başlayarak %100 değerine gelinceye kadar %1’lik artışlarla hesaplanmış ve grafikleri çizdirilmiştir. Grafikler incelendiğinde her frekans aralığındaki maksimum etkinlik değerinin farklı görev döngüsü değerleri ile sağlandığı görülmektedir.

Karıştırma birimi, birinci frekans bölgesinde (F-2F aralığında) tarama yapıyorken karıştırılması hedeflenen aralık sadece birinci frekans bölgesi ise karıştırmanın maksimum etkinlikte olabilmesi için görev döngüsü parametresinin %50 olarak seçilmesi gerektiği görülmektedir. İkinci frekans bölgesinin de hedeflenen aralık

içerisinde olması durumunda ise %50 görev döngüsü değerinin ikinci frekans aralığındaki etkinliğinin çok düşük olması nedeniyle bu aralıktaki karıştırma etkinliği çok düşük olacaktır. Her frekans aralığında farklı örüntüler oluşması nedeniyle ortak bir görev döngüsü belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Her frekans aralığı için ayrı ayrı en etkin görev döngüsü değeri Şekil 5.2’de verilen grafiklerden bulunabilmektedir. Buradaki asıl sorun ise birden fazla frekans aralığının aynı anda etkin bir şekilde karıştırılması gerekliliğidir. Bu gerekliliğin en etkin şekilde yerine getirilebilmesi için ilk olarak hedef sistemin önceki çalışmalardan edinilen taktik, teknik ve istihbarati bilgiler doğrultusunda, hangi frekans aralığında karıştırma yapılacağını belirlemesi gerekmektedir.

Kapsanacak frekans aralığının belirlenmesi işlemi sonrası, birinci harmonik frekanstan başlanarak etki edilmek istenen maksimum frekansın dahil olduğu harmonik frekansa kadar tüm aralıkların etkinlik değerleri toplanarak belirlenen frekans aralığının etkinlik grafiği oluşturulmuştur.

Etkinlik değerlerinin toplanması işlemi yapılmadan önce ise Şekil 5.2’de bulunan etkinlik değerlerinden her biri kendi frekans aralığı içerisinde aşağıdaki normalizasyon formülü kullanılarak normalize edilmiştir.

$$X_N = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)}$$

Burada:

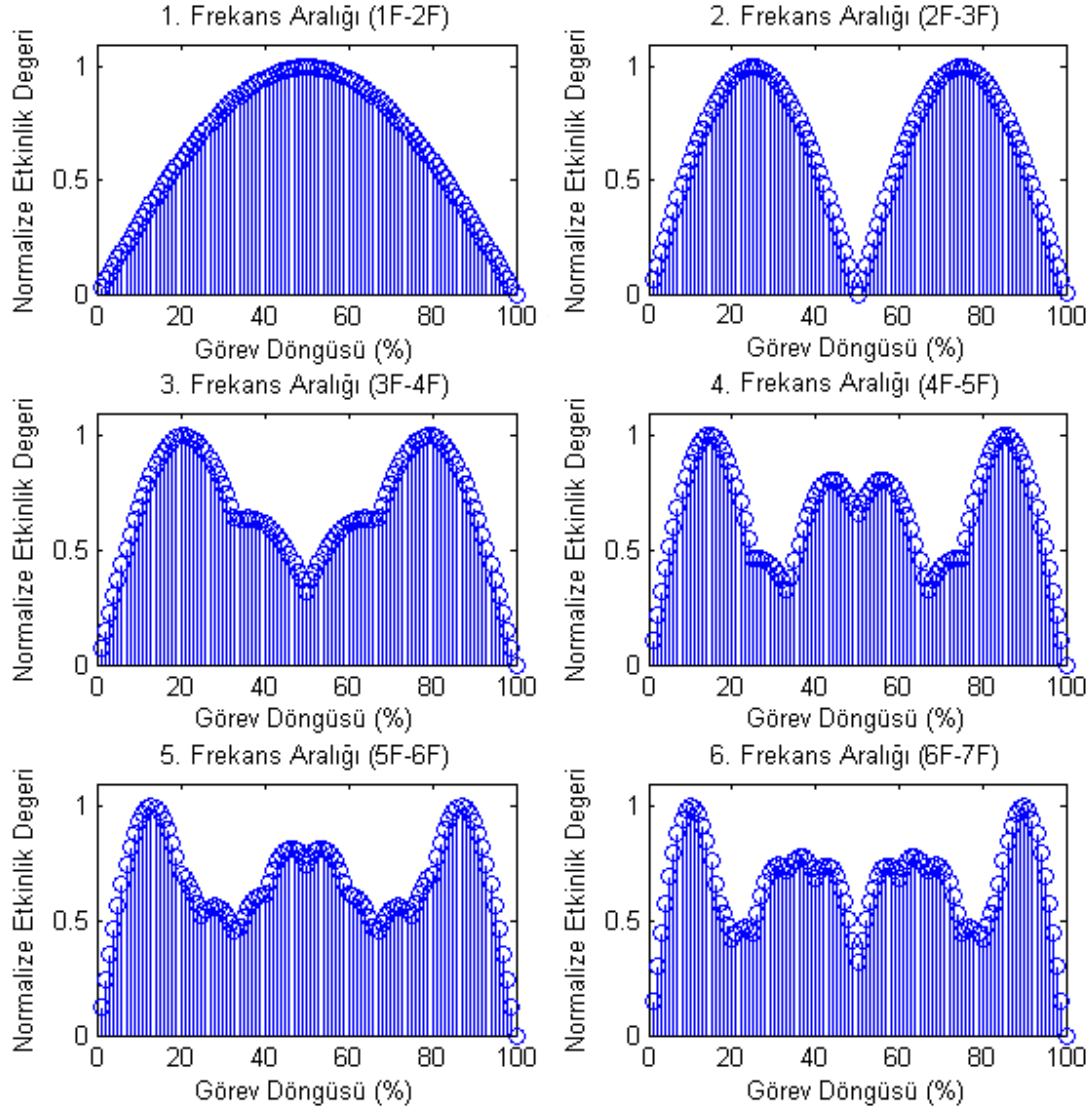
X: Şekil 5.2’de verilmiş olunan etkinlik değerleri,

X_N : Normalize edilmiş etkinlik değerleri,

min(): Veri setinde bulunan minimum değeri veren fonksiyon,

maks(): Veri setinde bulunan maksimum değeri veren fonksiyondur.

Normalizasyon sonrası oluşan sonuçlar ise Şekil 5.3’te çizdirilmiştir.

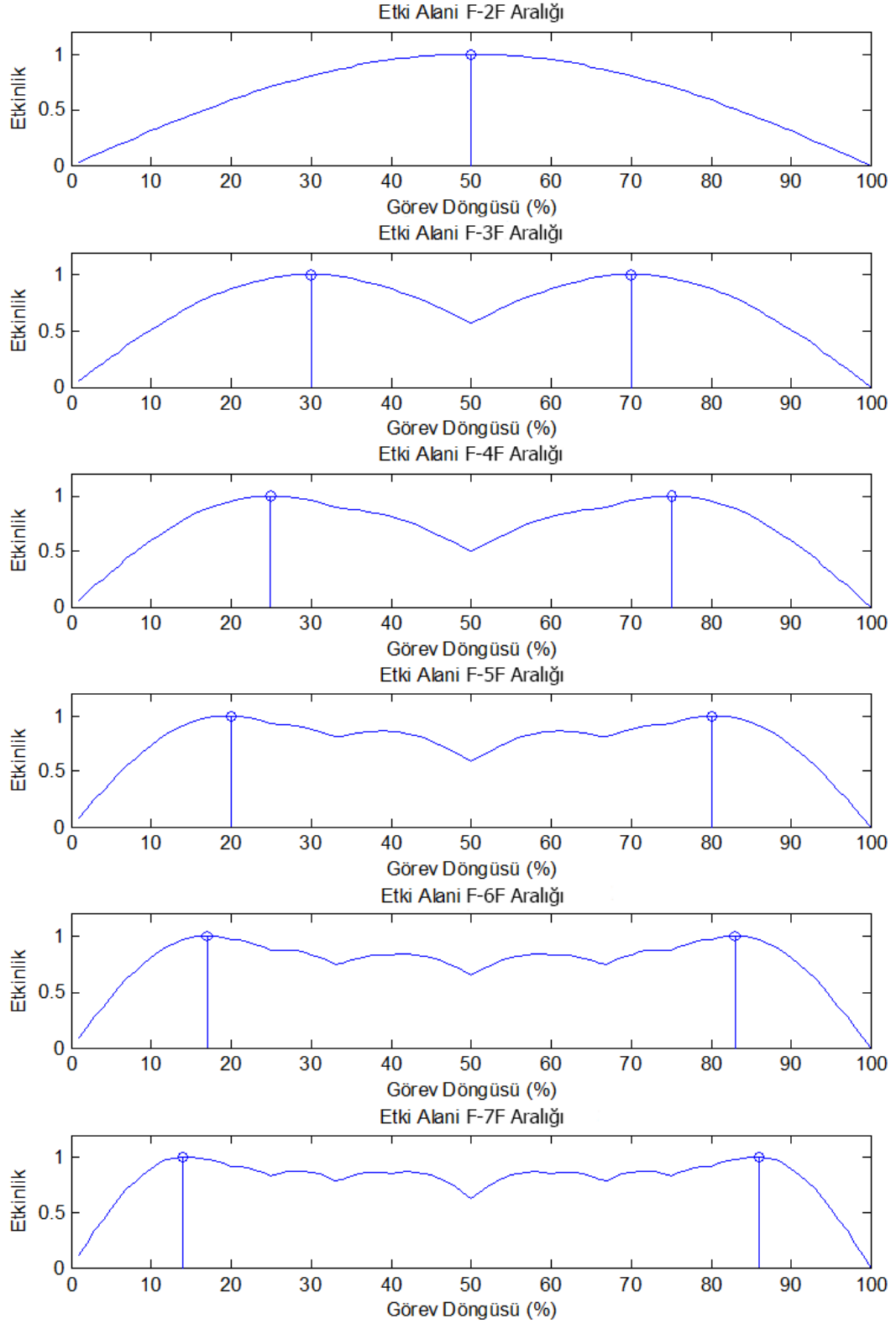


Şekil 5.3 Her frekans aralığındaki normalize etkinlik değerleri

Toplama işlemi Şekil 5.3'te bulunan normalize edilmiş değerler kullanılarak yapılmış ve toplama işleminin sonucunda oluşan değerler de normalize edilerek Şekil 5.4'te çizdirilmiştir.

Etkinlik değerlerinde normalizasyon yapılmasının temel nedeni ise karıştırılmak istenen frekans aralıklarının her birinin öneminin eşit tutulmak istenmesidir. Her frekans aralığı için ayrı ayrı hesaplanan etkinlik değerleri Şekil 5.2'de görülmektedir. Burada her frekans aralığındaki maksimum etkinlik seviyelerinin farklı olduğu görülmektedir. Etki edilmek istenen tüm frekans aralıkları için ortak bir görev döngüsü seçilmesi gerekmesi nedeniyle her frekans aralığındaki değerler normalize

edilmiş ve normalize değerler ile toplama işlemi yapılmıştır. Bu sayede her frekans aralığının toplama işlemindeki ağırlığı birbirine eşitlenmiştir.



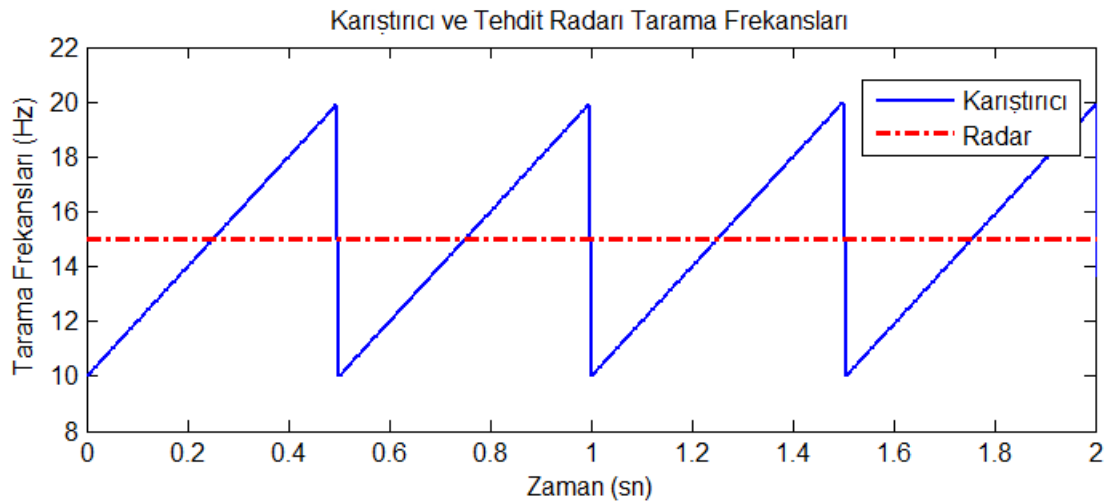
Şekil 5.4 Frekans aralığına göre uygun görev döngüsü

Karıştırma yapacak olan hedef platform tarafından belirlenen frekans aralığının $F-3F$ frekans aralığı olması durumunda, karıştırmaya etki edecek aralıklar sadece birinci ($F-2F$) ve ikinci ($2F-3F$) frekans aralığı olacaktır. Bu nedenle ilgili iki aralıktaki normalize etkinlik değerleri toplanıp normalize edilerek bu aralıktaki etkinlik değerleri bulunmuştur. Daha geniş frekans aralıklarında çalışılması durumunda diğer frekans aralıklarının normalize etkinlik değerleri de toplama eklenip, normalize edilerek grafikler oluşturulmuştur. Oluşan grafiklerdeki maksimum değerler belirlenerek bu değerlerin hangi görev döngü değerleri ile sağlandığı belirlenmiştir.

Bu sayede, karıştırılmak istenen frekans aralığı belirlenip karıştırıcı birime iletildiğinde, ilgili frekans aralığındaki tüm frekanslar için optimum etkinliği sağlayan görev döngüsü değeri seçilerek karıştırma işlemi bu görev döngüsü ile yapılabilecektir.

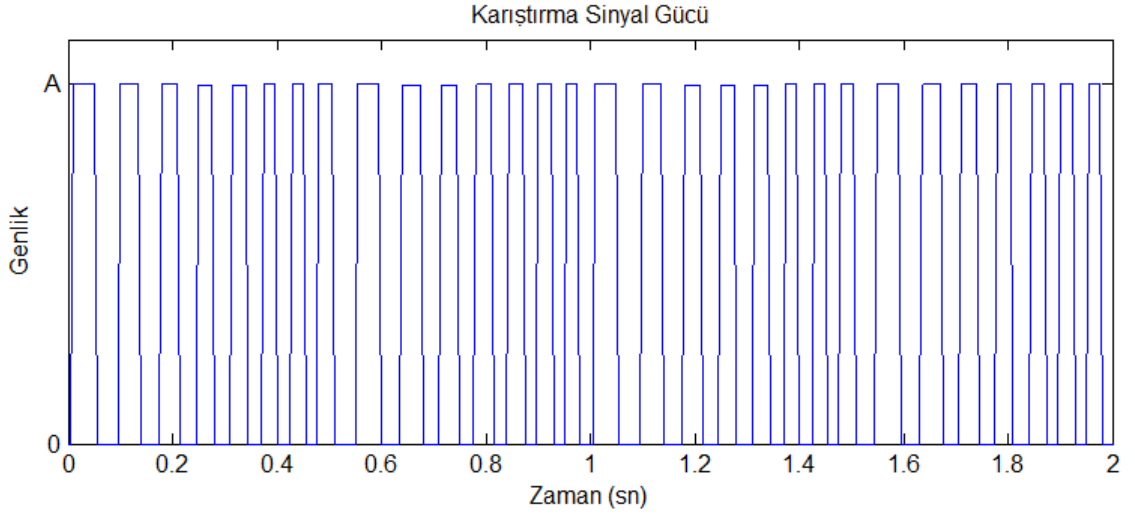
5.2 Simülasyon ile Etkinlik Analizi

Etkinlik değerlerinin teorik olarak hesaplanmasında kullanılan yöntemler simülatör ile tekrarlanarak görev döngüsünün karıştırmaya olan etkisi gözlemlenmiştir. Simülatörde yapılan ayarlamalarda, radar konik tarama frekansı belirli bir frekansta sabit tutulmuş, karıştırıcı frekansı ise belirli bir frekans aralığında tarama yapacak şekilde ayarlanmıştır. Bu değerler simüle edilmek istenen frekans aralıklarına göre değiştirilmiştir. Her frekans aralığındaki farklı görev döngülerinin etkisini izlemek için farklı görev döngüsü değerlerinde simülasyonlar tekrarlanmıştır.



Şekil 5.5 Karıştırıcı ve tehdit radarın zamana göre yaptığı frekans taramaları

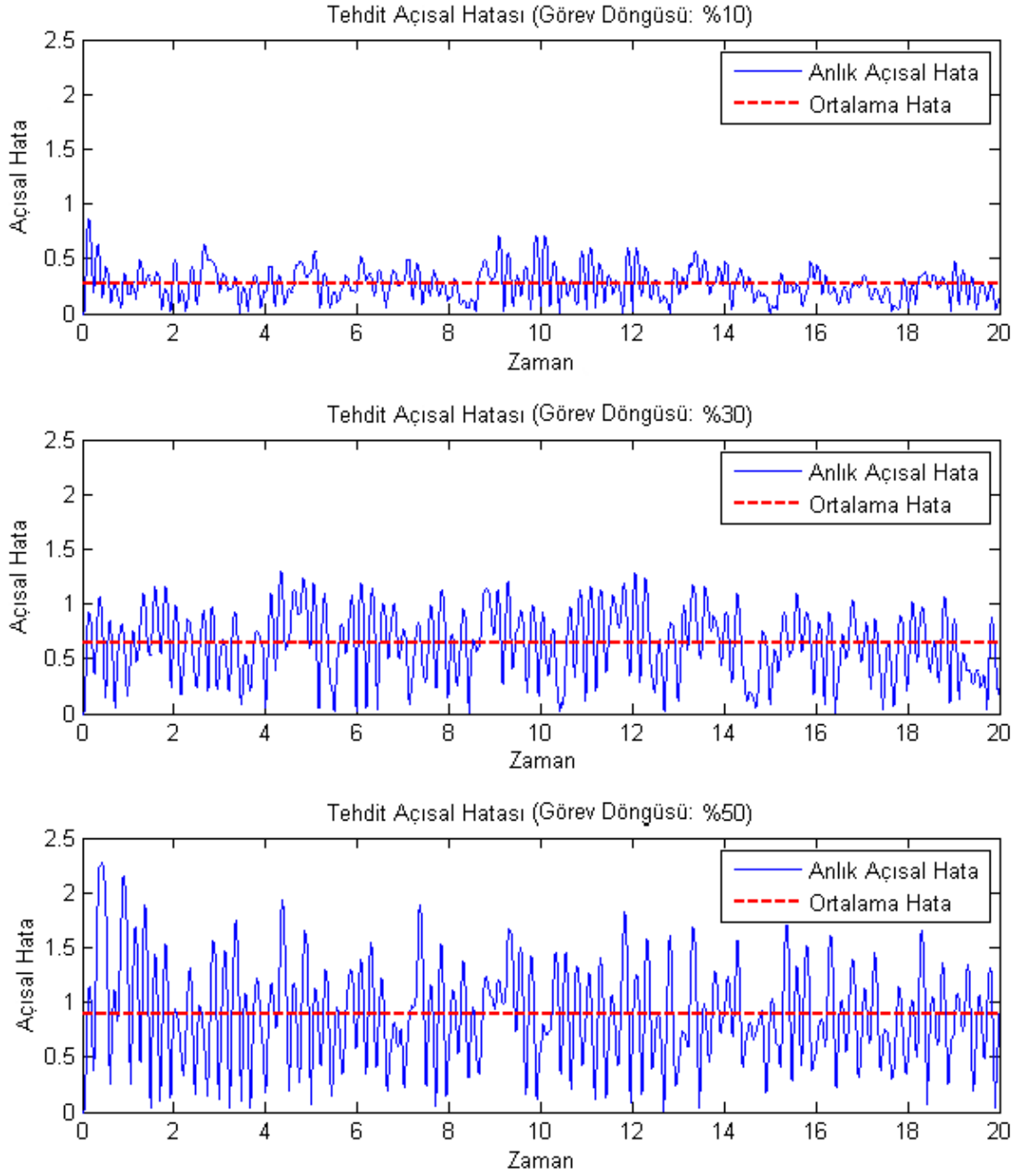
Şekil 5.5'te karıştırıcının tarama başlangıç frekansı 10 Hz, bitiş frekansı 20 Hz ve dalga formu testere dişi olacak şekilde değiştiği görülmektedir. Radarın konik tarama frekansı ise 15 Hz olarak ayarlanmıştır. Radar konik tarama frekansı, karıştırıcının tarama frekansının başlangıç ve bitiş değerlerinin arasında bir değer olduğu için birinci frekans aralığında yer almaktadır.



Şekil 5.6 Tarama Frekansı 10-20 Hz iken karıştırma sinyal seviyesi örneği

Şekil 5.6'da ise tarama frekansı 10-20 Hz aralığında değişen, görev döngüsü %50 olarak ayarlanmış bir karıştırma sinyalinin dikdörtgen dalga oluşturacak şekilde açılıp kapatıldığı sinyal güç seviyesi görünmektedir. Şekil incelendiğinde öncelikle 10 Hz frekanslı bir dalga oluşmuşken zamanla frekans artmakta ve daha sık periyotlu bir dalga formu oluşmaktadır.

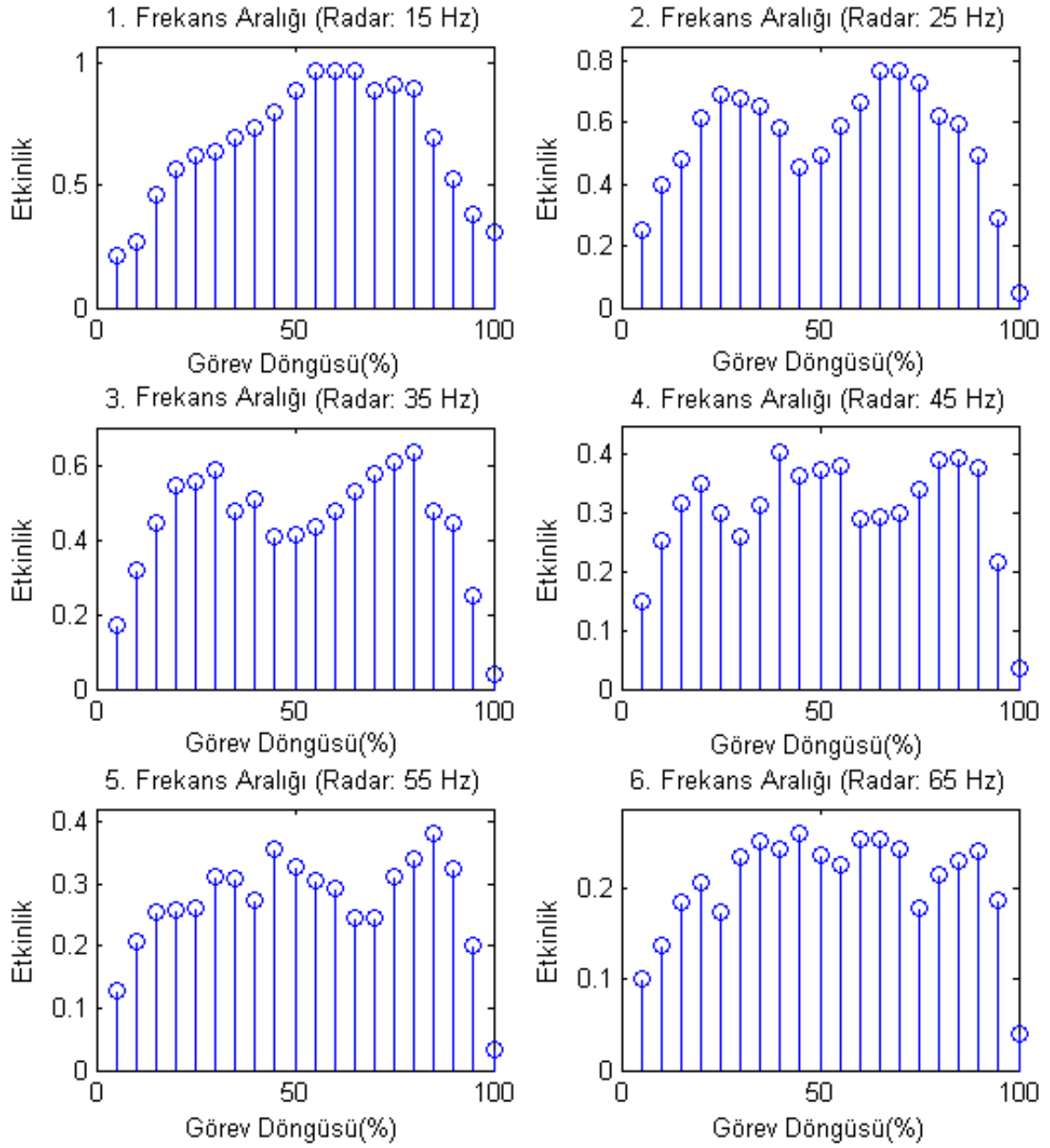
Simülasyonun senaryosunda LORO özellikli bir takip radarı hedefini açısal olarak takip etmektedir. Takip edilen hedef sistem ise radara genlik modülasyon tekniği ile karıştırma uygulamaktadır. Hedef sistem, uyguladığı karıştırma tekniği ile radarın takip mekanizmasına etki ederek açısal takip hatasını artırmayı hedeflemektedir. Böyle bir senaryoda karıştırma etkinliği, radarın açısal takip hatası olarak ele alınabilir. Karıştırma etkinliğinin görev döngüsüne göre nasıl değiştiğinin görülebilmesi için her frekans aralığında, farklı görev döngüleri ile açısal hata ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda radarda oluşan anlık açısal takip hataları çizdirilmiştir.



Şekil 5.7 Farklı görev döngüleri için örnek açısal hata grafikleri

Şekil 5.7’de sonuçları bulunan simülasyonda, radar konik tarama frekansı 15 Hz değerinde tarama yaparken karıştırıcı 10 Hz ile 20 Hz arasında tarama yapmaktadır. Görev döngüsü değeri ise sırasıyla %10, %30 ve %50 olarak ayarlanarak denemeler yapılmış ve ilgili koşullarda radarda oluşan anlık açısal takip hata grafikleri ve hataların ortalama değerleri çizdirilmiştir. Grafikler incelendiğinde açısal hataların görev döngüsüne bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

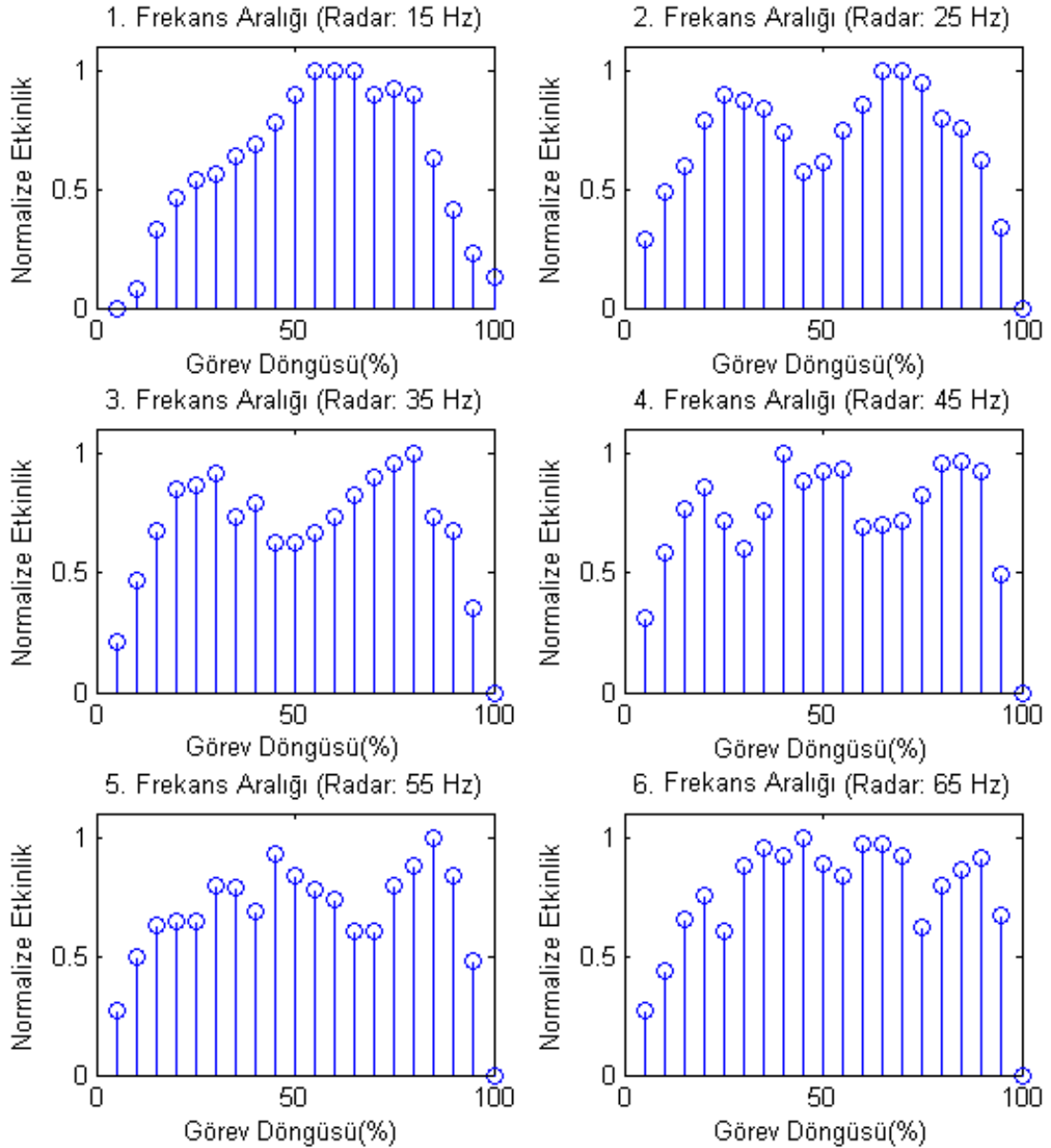
Radarın açısıl hata değerin anlık olarak değışkenlik göstermesi nedeni ile karışırma etkinlik analizinde hataların ortalama değeri kullanılmıştır.



Şekil 5.8 Farklı frekans aralıklarında görev döngüsüne göre ortalama hatalar

Etkinlik ölçümleri için yapılan simülasyonlarda karıştırıcının tarama frekansı Şekil 5.5'te görülebileceği gibi her denemede 10 Hz ile 20 Hz arasında testere dişi dalga formu oluşturacak şekilde değıştırılmıştır. Radarın konik tarama frekansı ise farklı frekans aralıklarının test edilebilmesi maksadı ile birinci frekans aralığı için 15 Hz, ikinci frekans aralığı için 25 Hz, üçüncü frekans aralığı için 35 Hz, dördüncü frekans

aralığı için 45 Hz, beşinci frekans aralığı için 55 Hz ve altıncı frekans aralığı için 65 Hz olarak ayarlanarak simülasyonlar yapılmıştır. Her frekans aralığında görev döngüsü %5 ile %100 değerleri arasında %5'lik artışlarla ayarlanarak simülasyonlar yapılmış ve her adımda oluşan ortalama açısız hata değerleri hesaplanmıştır. Her görev döngüsü için hesaplanan ortalama hata değerleri kullanılarak her frekans aralığı için grafikler Şekil 5.8'de çizdirilmiştir. Hesaplanan ortalama hata değerleri her bir frekans aralığı için ayrı ayrı normalize edilmiş ve normalize değerler Şekil 5.9'da çizdirilmiştir.



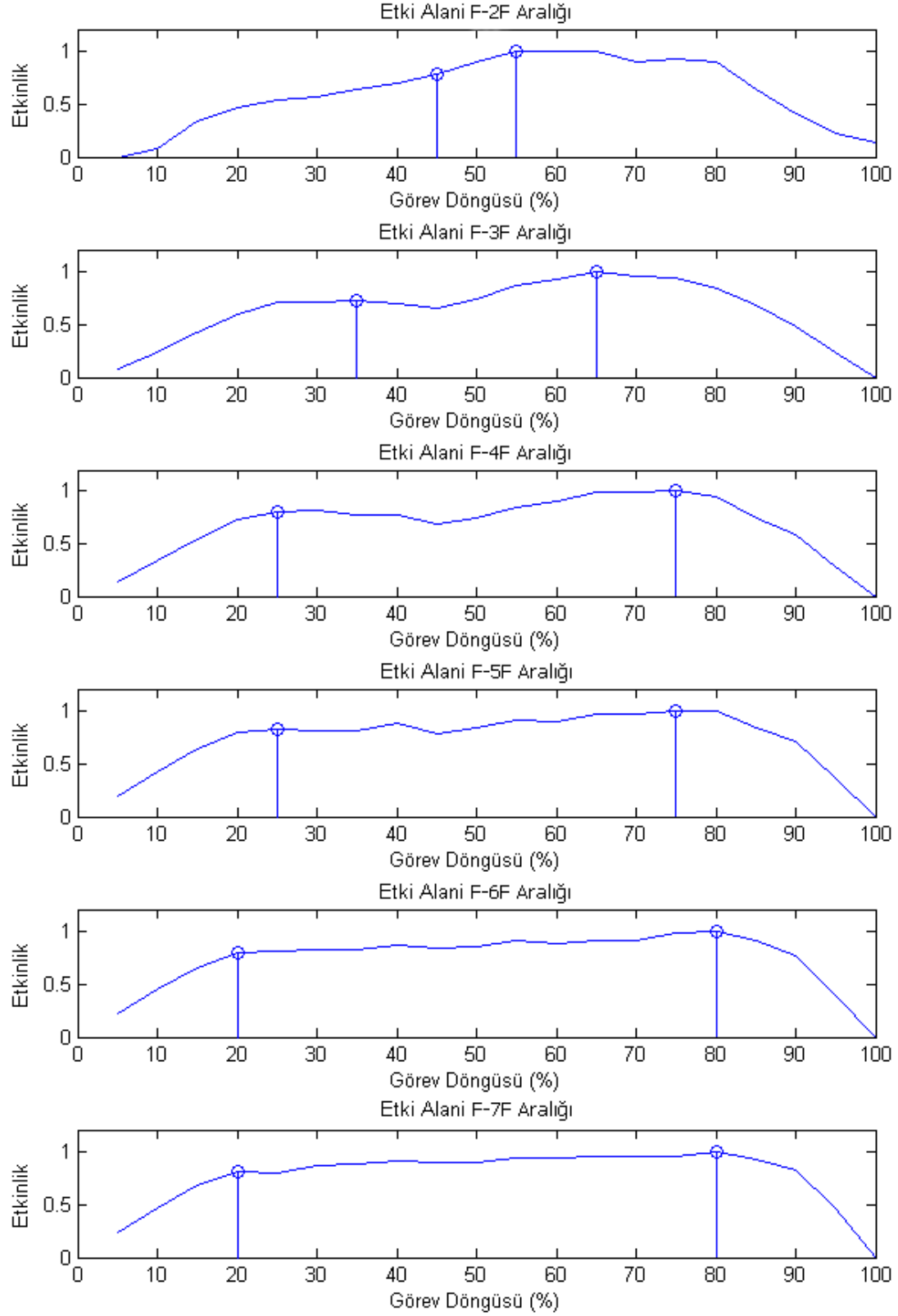
Şekil 5.9 Normalize edilmiş ortalama hatalar

Şekil 5.9'da hesaplanan normalize etkinlik değerleri, simülasyonlar sırasında radarın açışal takibi esnasında yaptığı hataların ortalaması alınarak hesaplanmış ve normalize edilerek çizdirilmiştir. Karıştırıcının etki etmesinin istendiği frekans aralığının değişmesi durumunda maksimum etkiyi sağlayan görev döngüsü değeri değişiklik gösterecektir. Seçilen frekans aralığındaki optimum karıştırma etkinliğini sağlayacak görev döngüsünün belirlenebilmesi için birinci harmonik frekanstan başlanarak etki edilmek istenen maksimum tarama frekansın dahil olduğu harmonik frekansa kadarki tüm aralıkların etkinlik değerleri toplanıp, toplam değerler normalize edilerek belirlenen frekans aralığının etkinlik grafikleri oluşturulmuştur.

Karıştırılmak istenen frekans aralığının belirlenmesi sonrası, grafiklerden ilgili frekans aralığında maksimum etkinliği sağlayan görev döngüsü seçilerek, ilgilenilen frekans aralığındaki tüm tarama frekanslarında optimum karıştırma yapılabilecektir.

Şekil 5.10'da çizdirmiş simülasyondan elde edilen veriler ile Şekil 5.4'te çizdirilmiş teorik olarak hesaplanan veriler birbirleri ile örtüşse de bazı farklılıklar olduğu da görülmektedir. Örneğin, Şekil 5.4'te teorik olarak hesaplanan etkinlik değerlerine göre görev döngüsünde %50'ye göre simetrik olan noktalarda etkinliğin aynı olduğu görülmektedir. Fakat dinamik bir model olan simülasyon üzerinden elde edilen Şekil 5.10'daki değerlere bakıldığında ise büyük olan görev döngülerinde etkinliklerin daha fazla olduğu görülmektedir.

Burada dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, teorik etkinlik analizinde, radarlarda kullanılan parametreler veya herhangi bir dış etkenin müdahalesi hesaba katılmadığı için statik bir sonuç ortaya çıkmışken, simülasyon ile etkinlik analizinde, kullanılan radarın takip mekanizmasının modellenmesi sırasında bir benzetim yapılmış ve bu örnek radarın, kendisine uygulanan karıştırma sinyallerine verdiği tepki ile dinamik bir model üzerinden etkinlik analizi yapılmıştır. Radarın açışal izleme mekanizması modellenirken kullanılan değişkenlerin değiştirilmesi ile birlikte radarın karıştırma sinyallerine vereceği tepkilerde de değişiklikler oluşabilmektedir. Sonuçlarda farklılıklar oluşmasında etkili olan bir diğer husus ise Denklem (4.21)'deki eşitlikte %50'ye göre simetrik olan değerlerin bazılarında 180° faz farkı oluşmuş olmasıdır.



Şekil 5.10 Simülasyon sonuçlarına göre uygun görev döngüsü

Tüm bu etkilerle birlikte Şekil 5.4 ve Şekil 5.10'da çizdirilen görev döngülerine bağlı etkinlik grafiklerinden her frekans aralığında maksimum etkinliği sağlayan görev döngüsü değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerler Çizelge 5.2'de teorik etkinlik analizi ve simülasyon ile etkinlik analizi sonuçlarına göre listelenmiştir.

Çizelge 5.2 Karıştırılacak frekans aralığına uygun görev döngüleri

Karıştırılacak Frekans Aralığı	Görev Döngüsü (Teorik)	Görev Döngüsü (Simülasyon)
F-2F	% 50	% 55
F-3F	% 70	% 65
F-4F	% 75	% 75
F-5F	% 80	% 75
F-6F	% 83	% 80
F-7F	% 86	% 80

İstihbarati bilgiler sonucunda tehdit radarının hangi frekans aralığında olabileceğinin belirlenmesinin ardından frekans aralığına uygun görev döngüsü değeri Çizelge 5.2'den seçilerek COSRO veya LORO tipi bir takip radarına karşı frekans kaydırmalı harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma işlemi yapılabilecektir.

6. ÇÖKME TESPİTİ

Bir COSRO veya LORO radar, hedef platforma açışal kilitlenme işlemini gerçekleştirdiğinde, gönderme anteni hedef üzerinde sabit kalırken sadece alma anteni dönerek takip için gerekli olan modülasyon bilgisini oluşturmaktadır. Hedef sistemin, bir radar tarafından takip edildiğini tespit edebilmesi için radardan gelen sinyalleri anlık olarak tespit edip işleyebilecek bir ED sistemine ihtiyacı vardır. Hedef sistem takip altında iken ED sistemi vasıtasıyla ölçülen genlik değerlerine bakıldığında, sürekli aynı genlik seviyesinde yayın yapan bir tehdit tespit edilecektir. ED sistemi tarafından sinyalin herhangi bir anten taraması yapmadan sürekli olarak hedef platformu aydınlatıyor olmasının tespit edilmesi ile birlikte platforma kilitlenmiş bir radar tehdidi olduğu bilgisi üretilebilir. Bu aşamada platforma kilitlenmiş tehdidin radar güdümlü bir füze olabileceği varsayımıyla hızlı bir şekilde karşı tedbir uygulanması gerekmektedir. Konik taramalı takip radarlarına karşı etkinliği yüksek olan ters kazanç karıştırma tekniğinin kullanılabilmesi için ise tehdidin anten dönme frekansının bilinmesi gerekmektedir. Sadece alma anında dönüş yapıp gönderme anında sabit kalan antenlere sahip radarların hedef üzerindeki sinyallerine bakıldığında ise herhangi bir modülasyon olmayacağı için dönme frekansına yönelik bir bilgi üretilmemektedir. Bu durumda öncelikle etkinliği daha düşük olan geniş frekans taramalı karıştırma yöntemi ile geniş bir frekans bölgesinde tarama yapılabilir. Karıştırma biriminde frekans taraması devam ederken, radarın tarama yaptığı frekansa yaklaşıldığında, radarın takip mekanizması karıştırmadan etkilenmeye başlayacaktır. Tarama devam ederek, tam olarak radarın tarama frekansına denk geldiğinde ise karıştırma etkinliği maksimum olacaktır. Bu aşamadan sonra tarama frekansı artmaya devam edeceği için karıştırma etkinliği tekrar azalacaktır. Bu süreç içerisinde, karıştırma etkinliğinin artması ile radarın takip mekanizmasında hatalar oluşacaktır. Oluşan hatalar nedeniyle radar, hedefe anten hüzmesini tam olarak doğru şekilde yönlendiremeyeceği için ED sisteminin ölçtüğü genlik değerlerinde düşüşler oluşacaktır. Tarama frekansı ile radarın frekansının aynı olduğu, başka bir deyişle, karıştırma etkinliğinin maksimum olduğu anda ise ED sisteminde ölçülen genlik değeri minimum değerine ulaşacaktır. Tarama frekansı artmaya devam ettiğinden karıştırma etkinliği tekrar azalacak ve

radar hüzmesini daha doğru açılarla yönlendireceği için ölçülen genlik değerleri tekrar yükselecektir. Bu düşüş ve yükselişler kısa süre içerisinde gerçekleştiği için ölçülen genlik örüntüsünde anlık çökmeler (jog) olarak görülecektir. Bu çökmelerin olduğu anların tespit edilmesi, radarın tarama frekansının bulunabilmesi için önem arz etmektedir. Çökmenin maksimum olduğu anlar tespit edilerek, bu sırada karıştırıcının hangi frekansı taradığının bilinmesi ile tehdit radarının tarama frekansı belirlenebilir.

Radarin tarama frekansının tespit edilmesi durumunda, geniş taramalı karıştırma işlemi iptal edilip tespit edilen frekansta ters kazanç tekniği ile karıştırma işlemi uygulanarak daha etkin bir karıştırma sağlanabilir.

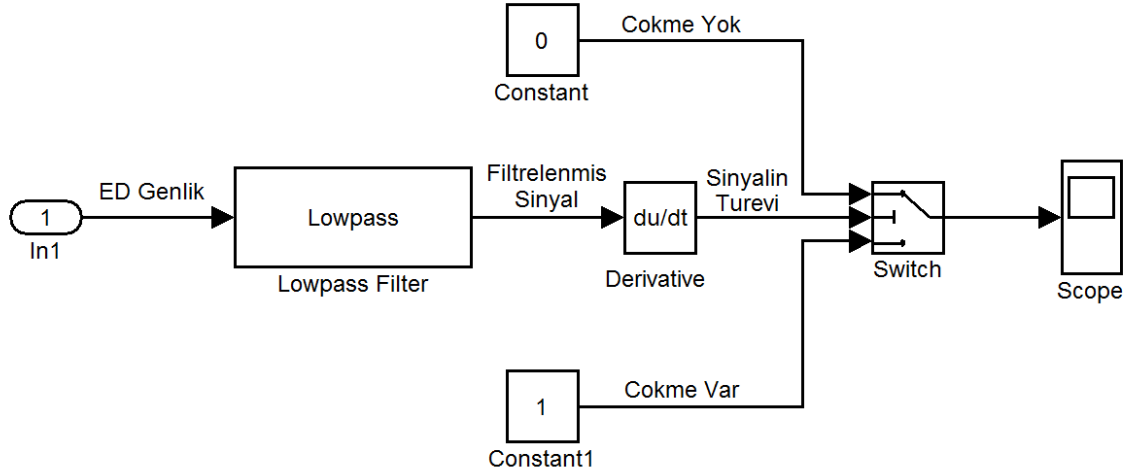
Bu tez çalışmasında karıştırma işleminde öneme sahip olan çökme bilgisinin tespiti için türev tabanlı ve kayan pencere tabanlı olmak üzere iki farklı yöntem denenmiştir.

6.1 Türev ile Çökme Tespiti

ED sisteminde ölçülen genlik değerlerinin türevi alınarak çökmeler tespit edilebilmektedir. Karıştırmanın etkin olmadığı durumlarda ölçülen genlik seviyesindeki değişim miktarı az olduğu için bu alanlarda alınan türevlerin sonucu küçük değerler çıkacaktır. Ani düşüşler olduğu durumda ise türev değeri negatif yönde artış gösterecektir. Bu değer çökmenin oluşma hızına bağlı olarak değişebilecek bir değerdir. Türev sonucunun, belirlenen bir eşik değer ile kıyaslanması sonucu eşiğin geçildiği durumlarda çökme olduğu tespit edilmiş olunur. Simülasyonlarda çökme tespitinin anlık olarak yapılabilmesi için Şekil 6.1’de sunulan Simulink modeli tasarlanmıştır.

Bu yöntemde, çökmenin boyutuna göre değil, çökme sırasındaki eğimine göre işlem yapıldığı için çökme olarak değerlendirilmeyecek kadar küçük boyutlardaki dalgalanmalar dahi eğer anlık çok hızlı bir düşüş yaşanmış ise yanlış karar verilerek çökme olduğu bilgisi üretilebilmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için genlik sinyali öncelikle düşük bantta geçirgen bir filtreden geçirilmiştir. Bu sayede küçük dalgalanmalar engellenerek hatalı çökme tespitinin önüne geçilmiş olunur. Filtrelenmiş sinyalin türevi alınarak, türev değerinin belirlenmiş bir eşik değerinden daha küçük olup olmadığı kontrol edilir. Eğer türev sonucu eşik değerden daha

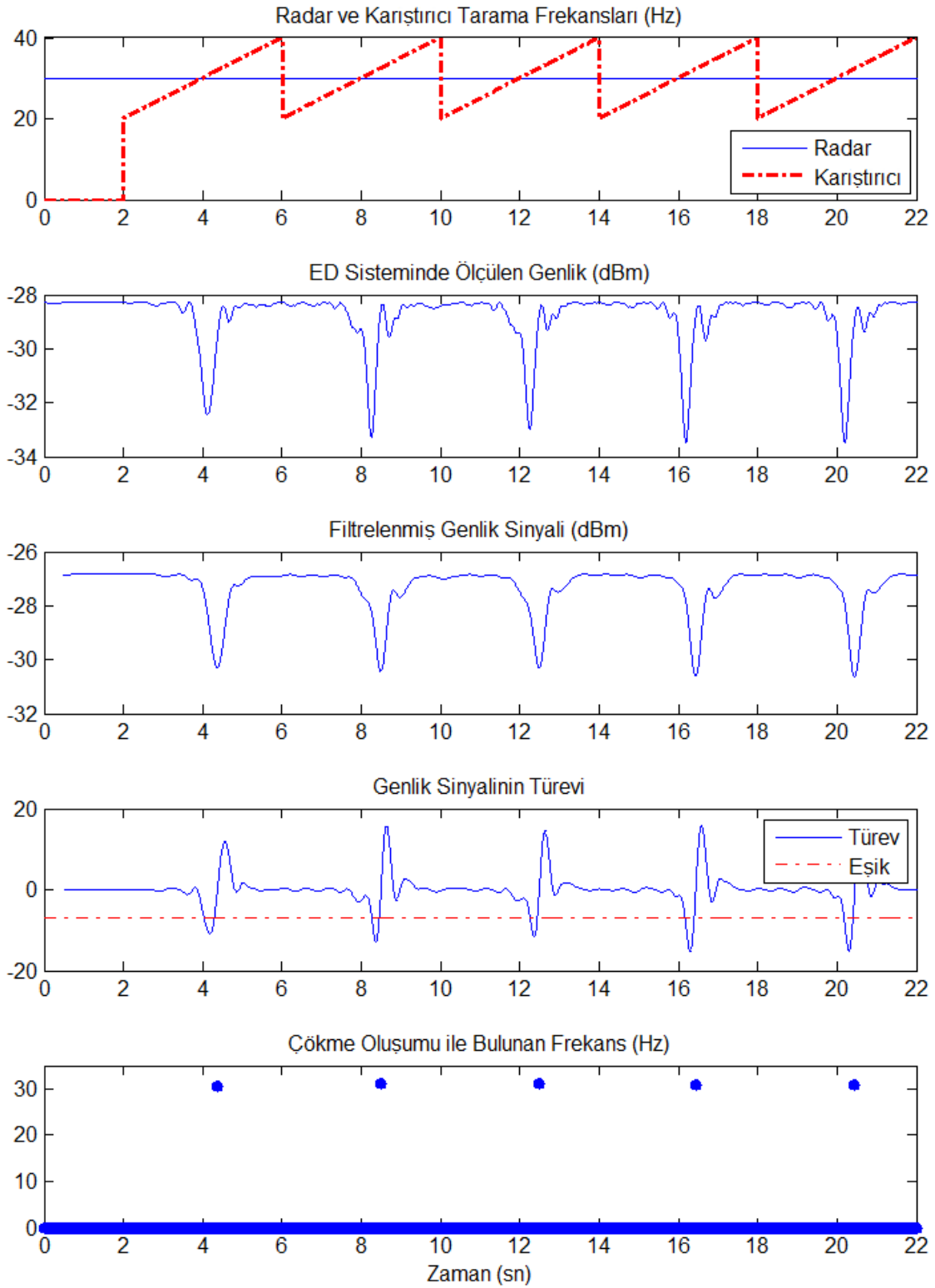
küçük ise bu alanda çökme olduğu bilgisi üretilir. Burada dikkat edilmesi gereken iki husus vardır. Birincisi sinyalin düşük geçirgen filtreden geçirilmesi ile birlikte sinyalde gecikme meydana gelecek olması, diğeri radarın karıştırmaya vereceği tepki süresinden kaynaklanan bir gecikme meydana gelecek olmasıdır.



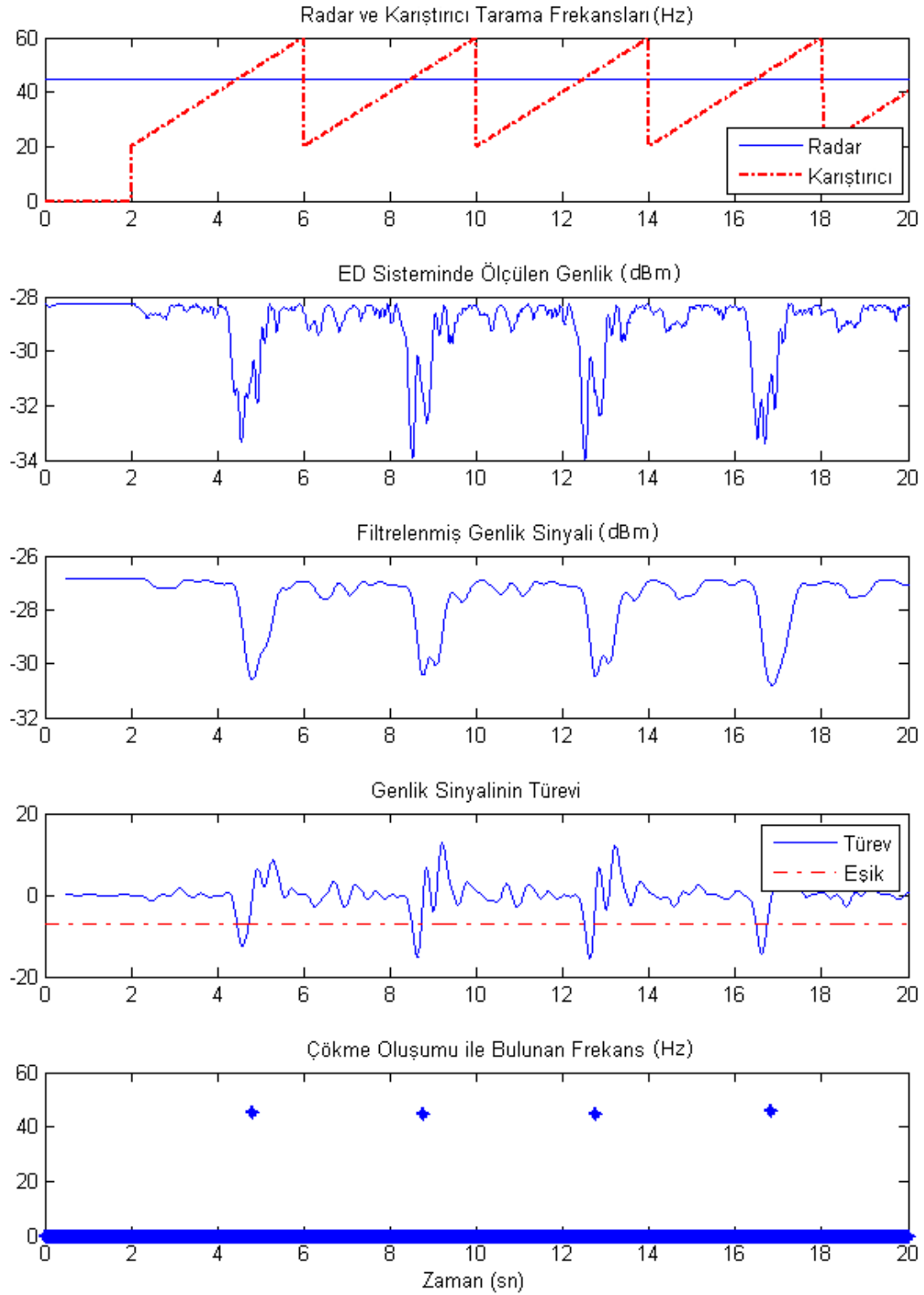
Şekil 6.1 Türev ile çökme tespiti simulink modeli

Radarın konik tarama frekansını bulurken, gecikmeleri tolere edebilmek için çökmenin maksimum olduğu yani sinyalin türevinin eşiği geçtikten sonra tekrar sıfır noktasına geldiği an taranan frekansın belirlenmesi yerine kısa bir süre önce taranmış olunan frekans değeri alınır. Bu sayede hem düşük geçirgen filtreden hem de radarın karıştırmaya olan tepki süresinden kaynaklanan gecikmeler tolere edilebilir.

Şekil 6.2’de tehdit radarının hedefini 30 Hz tarama frekansı ile takip ettiği görülmektedir. İlk iki saniye boyunca hedef platform, bilgi toplayarak takip edildiğini tespit etmektedir. Takip edildiğinin tespitini yaptıktan sonra (ikinci saniyede) karıştırma birimi tarama frekansını 20 Hz ile 40 Hz arasında değiştirerek tarama yapmaktadır. Burada, son grafikte hedef sistem tarafından bulunan frekans değerlerinin ortalaması 30.92 Hz’dir.



Şekil 6.2 Türev ile çökme tespiti etkinlik analizi (30 Hz)



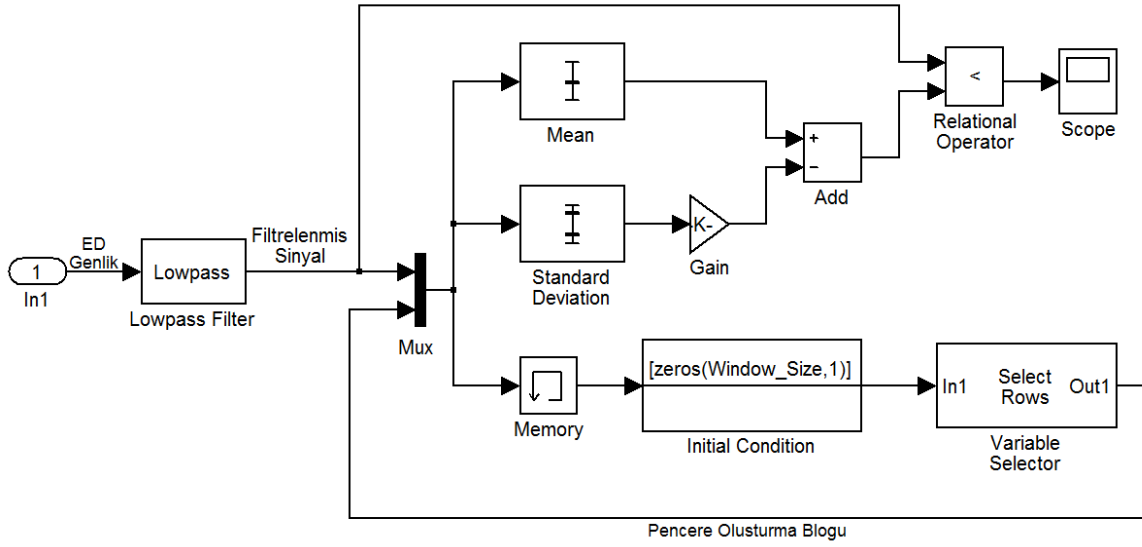
Şekil 6.3 Türev ile çökme tespiti etkinlik analizi (45 Hz)

Şekil 6.3'te ise farklı bir tehdit radarının hedefini 45 Hz tarama frekansı ile takip ettiği görülmektedir. Karıştırma birimi takip edildiğinin tespitini yaptıktan sonra (ikinci saniye) tarama frekansını 20 Hz ile 60 Hz arasında değiştirerek tarama yapmaktadır. Burada, son grafikte hedef sistem tarafından bulunan frekans değerlerinin ortalaması 45,31 Hz'dir.

Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te bulunan simülasyonlarda yapılan frekans taramaları ile takip mekanizmasına etki edilerek hedef platformun üzerine düşen sinyallerin genliklerinde değişim yaratmak amaçlanmaktadır. Karıştırma ile eş zamanlı olarak genlik değerleri incelenerek çökme oluşan anlar tespit edilmeye çalışılacaktır. Bu işlem için ilk olarak oluşmuş olabilecek dalgalanmaların elimine edilebilmesi için sinyal, düşük bantta geçirgen bir filtreden geçirilerek, filtrelenmiş sinyal elde edilmiştir. Filtrelenmiş sinyalin ise türevi alınarak, genlik örüntüsünde oluşmuş olan anlık değişimler çizdirilmiştir. Türev değerinin belirlenmiş olan bir eşik değerini geçip geçmediği kontrol edilmiş ve eşik değeri geçildiği durumlar çökmenin olduğu anlar olarak kullanılmıştır. Düşük geçirgen filtreden geçirilen sinyalde oluşan gecikmelerin ve radarın karıştırmaya olan tepki süresinin de ihmal edilmemesi için çökmenin maksimum olduğu an karıştırıcıdan gönderilen karıştırma sinyalinin frekansı yerine kısa bir süre önce gönderilen frekans bilgisi kullanılarak frekans bulma işlemi gerçekleştirilmiştir. Grafikler üzerinden bakıldığında, 30 Hz'de tarama yapan bir radar için çökme tespitlerinin ortalama 30,92 Hz, 45 Hz'de tarama yapan bir radar için ise ortalama 45,31 Hz olarak yapıldığı görülebilmektedir.

6.2 Kayan Pencere ile Çökme Tespiti

ED sisteminin algıladığı sinyal seviyesinde oluşabilecek dalgalanmaların etkisini azaltmak için kayan pencere tabanlı alternatif bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde, ED sistemi tarafından ölçülen genlik değerleri, belirli bir uzunluğa sahip pencere oluşturularak bu pencereden geçirilmektedir. Sinyalin, pencerenin içerisinde kalan kısmının ortalaması ve standart sapması hesaplanmaktadır. Simülasyonlarda çökme tespitinin anlık olarak yapılabilmesi için Şekil 6.4'te görseli verilen Simulink modeli tasarlanmıştır.

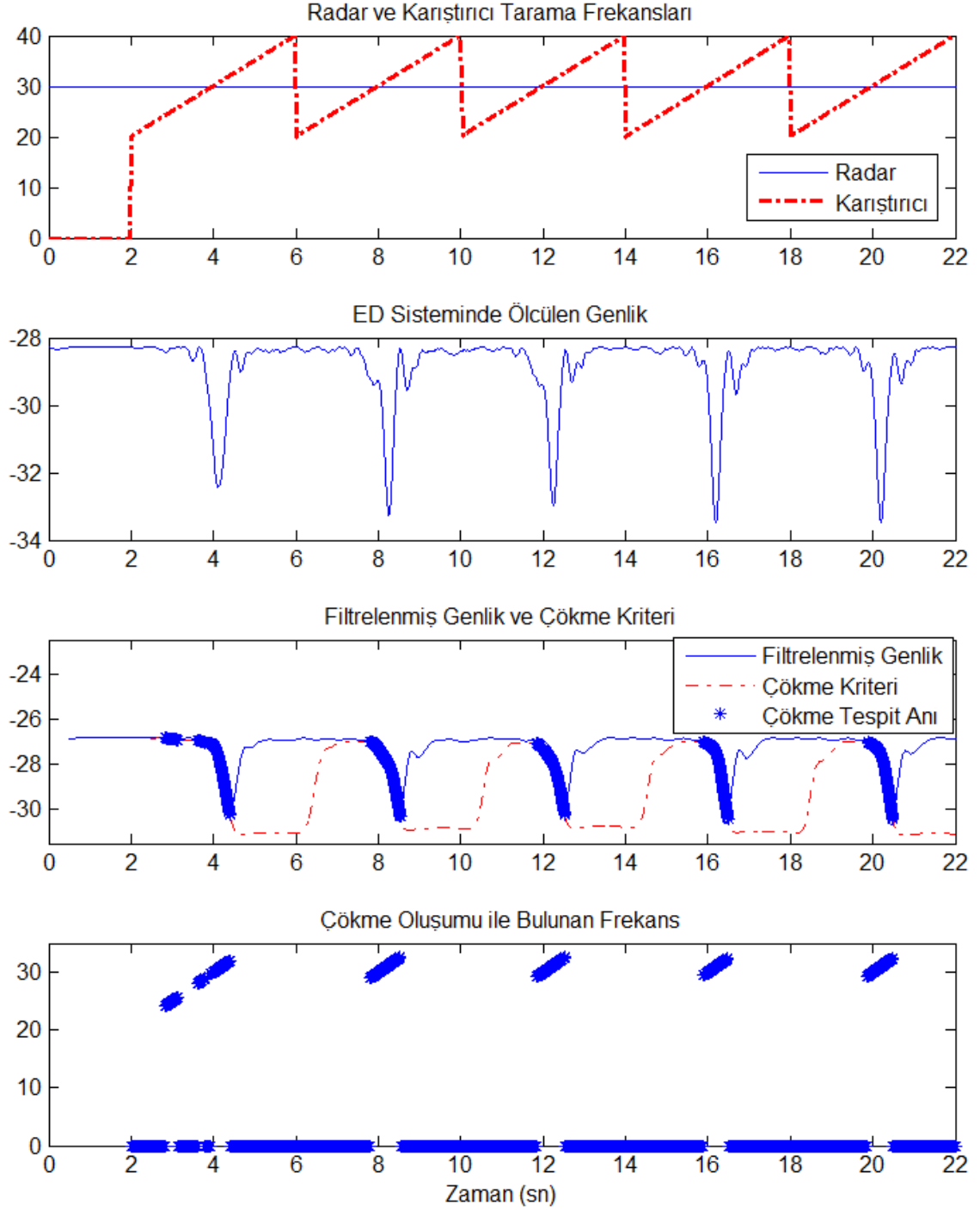


Şekil 6.4 Kayan pencere ile çökme tespiti simulink modeli

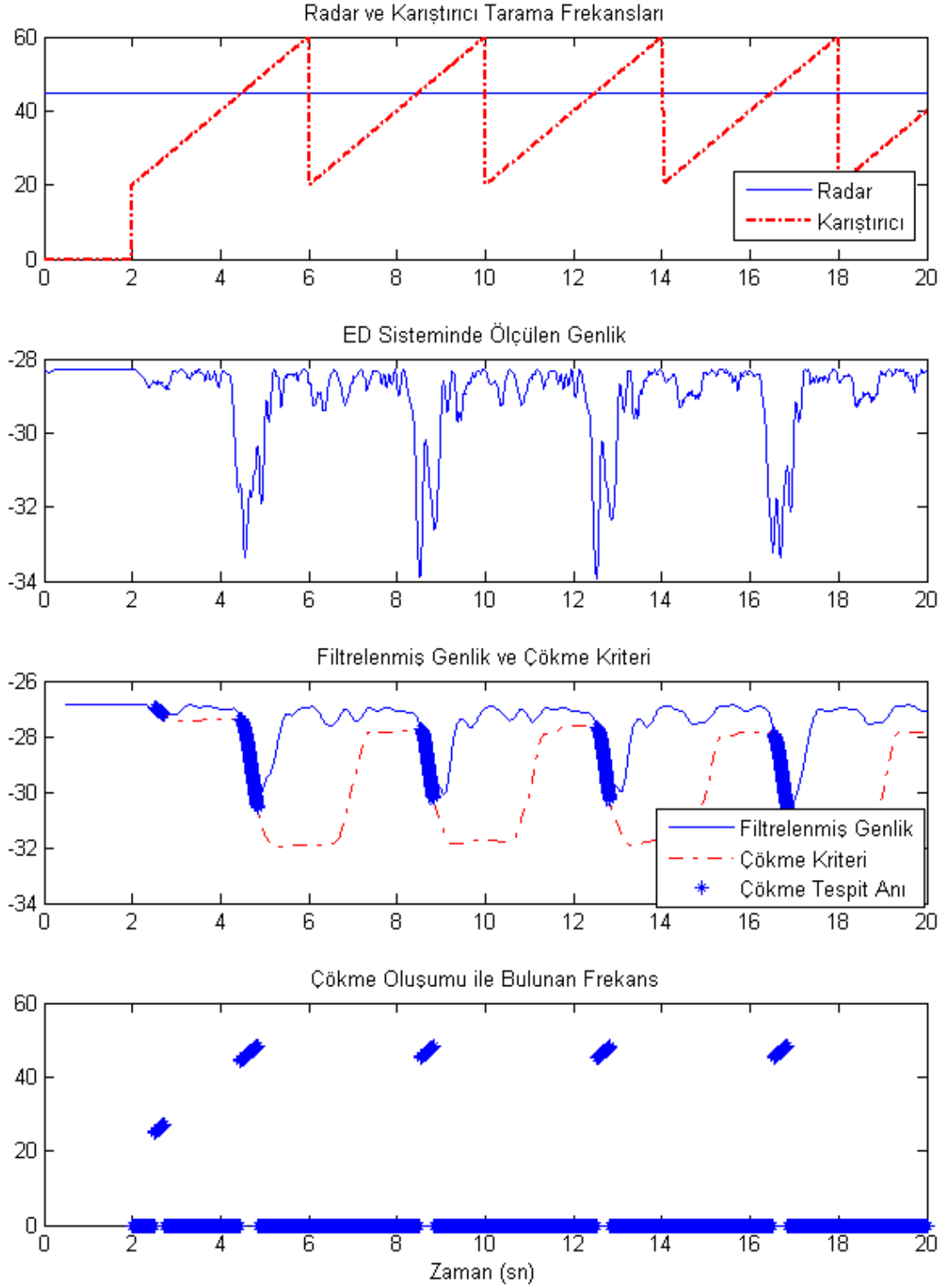
Sistemin çökme tespitini yapabilmesi için bir eşik değerin tanımlanması gerekmektedir. Buradaki eşik değeri ise belirlenen pencere içerisinde hesaplanan ortalamadan belirlenen bir katsayı ile çarpılan standart sapma değeri çıkarılarak belirlenmektedir. Bu işlem her yeni gelen sinyal ile tekrar yapıldığı için eşik bilgisi anlık olarak değişen dinamik bir değerdir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda pencere uzunluğu 2 saniye, standart sapma değerinin çarpıldığı katsayı değeri ise 3 olarak alınmıştır. Eşik değeri belirlendikten sonra filtrenmiş genlik değeri ile karşılaştırılır ve genlik seviyesi eğer eşik değerinden daha küçük ise burada bir çökme oluştuğu bilgisi üretilir.

Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da ilk iki saniye boyunca radar hedefi takip ederken, hedef takip edildiğini tespit edip ikinci saniyede karıştırma işlemine başlamıştır. Karıştırma devam ederken, çökmelerin doğru tespit edilebilmesi için ölçülen genlik değerleri, düşük frekansta geçiren bir filtreden geçirilerek gürültüler giderilmiştir. Filtrenmiş sinyal ise belirlenmiş bir uzunluktaki pencereden geçirilmiş ve pencere içerisinde kalan alanlarının ortalaması ve standart sapması hesaplanmıştır. Standart sapma değeri belirlenmiş bir katsayı değeri ile çarpılıp ortalama değerden çıkarılarak eşik değeri belirlenmiştir. Eşik değeri ile filtrenmiş genlik sinyali karşılaştırılarak, genliğin eşik değerden daha küçük olduğu durumlarda çökme tespiti yapılmıştır.

Tarama frekansının belirlenmesinde, çökmenin tespiti esnasında karıştırıcıdan gönderilen sinyalin hangi tarama frekansında olduğu belirlenmiş ve bu frekanstan kısa zaman önce taranmış olunan frekanslar kullanılmıştır. Bu sayede düşük geçirgen filtre ve radarın tepki süresi nedeniyle oluşan gecikmeler tolere edilmiştir.



Şekil 6.5 Kayan pencere ile çökme tespiti etkinlik analizi (30 Hz)



Şekil 6.6 Kayan pencere ile çökme tespiti etkinlik analizi (45 Hz)

Grafiklerde, ilk çökme tespitinin hatalı yapıldığı görülmektedir. Bunun sebebi ise başlangıç anında radarın karıştırma etkisi altında olmadan hedefi takip etmesi

nedeniyle ölçülen genlik değerlerinde değişim olmamasından dolayı standart sapma değerinin çok küçük çıkmasıdır. Daha sonraki tespitlerde ise hatalı tespit yapılmadığı görülmektedir.

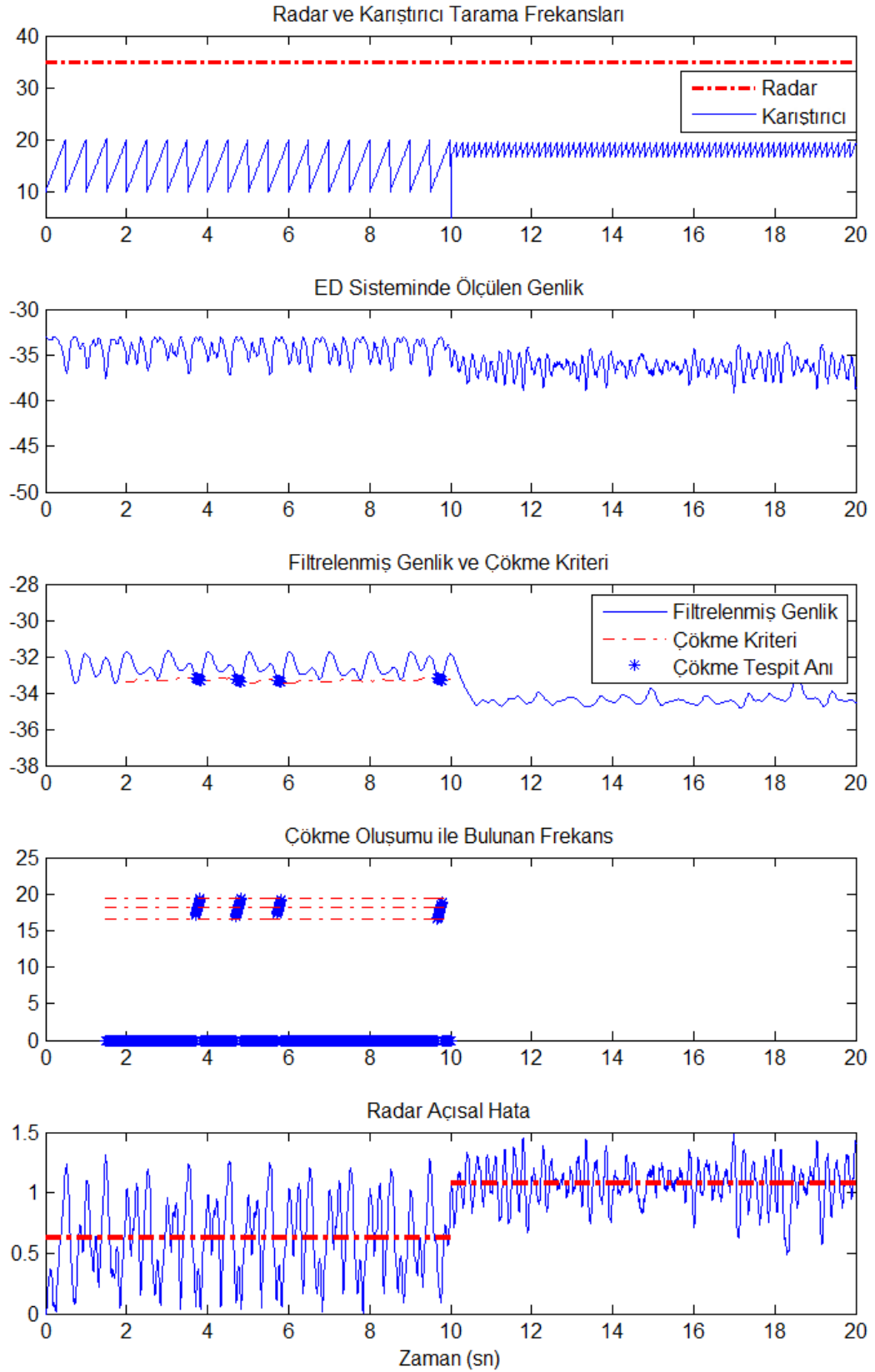
Türev tabanlı yöntem ile belirlenen ortalama konik tarama frekansları sırası ile 30,92 Hz ve 45,31 Hz, kayan pencere tabanlı yöntem ile belirlenenler 30,86 Hz ve 46,62 Hz olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler ile gerçek değerler arasındaki hata oranları Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1 Çökme tespit yöntemleri ile belirlenen konik tarama frekansları

	Gerçek Radar Frekansı (Hz)	Simülasyon ile Bulunan Radar Frekansı (Hz)	Hata (%)
Türev Yöntemi	30 Hz	30.92 Hz	% 3.1
	45 Hz	45.31 Hz	% 0.7
Kayan Pencere Yöntemi	30 Hz	30.86 Hz	% 2.9
	45 Hz	46.62 Hz	% 3.6

İki yöntem için belirlenen değerler incelendiğinde, sonuçların birbirlerinden çok farklı olmadığı görülmektedir. Fakat ED sistemi tarafından alınan sinyal gücünde (*Received Signal Strength*, RSS) oluşabilecek dalgalanmalara karşı kayan pencere tabanlı yöntemin daha güvenilir olacağı değerlendirilmektedir.

Ayrıca, COSRO veya LORO tipi takip radarlarının güdümlü füzelerde bulunabilmesi nedeniyle bir platformun kendini bu tip bir tehditten koruyabilmesi için kısa bir zamanı bulunmaktadır. Bu değer hava platformları için 20 saniyeden daha kısa süreler olabilmektedir. Bu sebeple, ilgili tehditlere karşı hızlı bir karıştırma yöntemi olan frekans kaydırmalı harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma yönteminin birincil yöntem olarak kullanılması hızlı bir karıştırma etkinliği için önem taşımaktadır. Harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma işlemi devam ederken, bu yöneme paralel olarak çökme tespit yöntemi vasıtası ile tehdit radarın tarama frekansının tespit edilmeye çalışılması ise etkili karıştırmanın sağlanabilmesinde faydalı bir senaryo olarak öne çıkmaktadır. İlgili senaryoda, frekans kaydırmalı



Şekil 6.7 Harmonik genlik modülasyonu devam ederken çökme tespiti ile bulunan frekans aralığında tarama yapılması sonucu oluşan radar açısıl hata grafiği

harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma esnasında çökme tespiti ile tehdit radarının karıştırma işleminden maksimum seviyede etkilendiği daha dar bir frekans aralığının tespit edilebilmesi durumunda, karıştırma işlemi sadece bulunan yeni frekans aralığında devam ettirilerek daha yüksek etkinlik seviyelerinde karıştırma sağlanabilecektir. İlgili senaryo için yapılmış olan örnek bir simülasyon Şekil 6.7’de sunulmaktadır.

Şekil 6.7’de, 35 Hz’de konik tarama yaparak hedefini takip eden bir COSRO radar bulunmaktadır. İlgili radar için karıştırma işlemi 10 – 20 Hz aralığında tarama yapan bir karıştırıcı vasıtası ile sağlanmaktadır. Karıştırma işleminde kullanılan dikdörtgen dalga formunun görev döngüsü ise Çizelge 5.2’de bulunan frekans aralıklarından en uygun değer olan %75 olarak seçilmiştir. Karıştırma frekansının hangi frekans aralığında ve hangi görev döngüsü ile karıştırma yapacağı belirlendikten sonra karıştırma işlemi aktifleştirilmiş ve ilk 10 saniye süresince tehdit radarının karıştırmadan en fazla etkilendiği frekans aralığının belirlenebilmesi için kayan pencere vasıtası ile çökme tespiti yöntemi kullanılmıştır. 10 saniyenin sonunda ise karıştırmanın daha etkili sonuçlar doğurduğu frekans aralığı olarak 16.6 – 19.5 Hz aralığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra ise karıştırma işlemi sadece belirlenmiş olunan yeni frekans aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu sayede tehdit radarının, karıştırma işleminden kaynaklanan açısal izleme hatasının 0 - 10 saniye aralığında 0.63° olan ortalamasının 10 - 20 saniye aralığında %70 oranında artarak 1.07° olduğu görülmektedir.

7. SONUÇLAR

Tez kapsamında, açısal izleme yapan radarlardan COSRO ve LORO radarlarına karşı harmonik genlik modülasyonlu karıştırma ve geniş taramalı genlik modülasyonu ile karıştırma yöntemleri incelenmiştir. Elektronik harp ve radar temelleri hakkında bilgiler verildikten sonra kendi yaptıkları anten taramasından kaynaklanan genlik modülasyonu bilgisini kullanarak açısal izleme yapan lob anahtarlama, konik taramalı, LORO ve COSRO radarların karıştırılması için kullanılan yöntemler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

Karıştırma yöntemlerinden COSRO ve LORO radarların karıştırılmasında kullanılan harmonik genlik modülasyonu yöntemi detaylı anlatılmış ve bu yöntemin etkinlik analizinde kullanılan TESS simülatörü hakkında bilgiler verilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda harmonik genlik modülasyonu yöntemiyle COSRO veya LORO bir radar karıştırılmak istendiğinde etki edilmek istenen radar konik tarama frekansının aralığının değişmesi sonucu karıştırma etkinliğinin de görev döngüsüne bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Bu sebeple karıştırılmak istenen frekans aralığına bağlı olarak en etkili görev döngüsü değeri değişecektir. Tarama frekansı bilinmeyen bir radara karşı karıştırma yapılması nedeniyle farklı frekans aralıklarında maksimum etkinlik sağlanabilmesi için farklı görev döngüsü değerlerinin seçilmesi gerekliliği oluşmuştur.

Teorik hesaplamalarda bir operatörün F-7F frekans aralığında karıştırılmasını istediği her frekans aralığı için seçilebilecek en uygun görev döngüsü değerleri grafikler ve çizelgeler ile belirtilmiştir. Teorik sonuçlara ek olarak aynı frekans aralıklarında simülatör ile yapılan testlerle de radarın açısal izleme hataları dikkate alınarak grafikler oluşturulmuştur. Grafikler incelendiğinde, teorik hesaplamalarla oluşturulan grafik %50 görev döngüsüne göre simetrik olarak aynı sonuçları vermesine karşın simülasyon ile elde edilen grafikte %50'ye göre simetrik görüntünün genel olarak korunduğu görülse de yüksek görev döngüsü değerlerinin daha etkili olduğu görülmektedir. Bunun sebepleri arasındaki önemli etkenden biri teorik hesaplamaların tamamen statik bir model üzerinden yapılmasına karşın simülasyon ile etkinlik analizinde bir çok parametreye bağlı olan dinamik bir model kullanılması iken diğer bir etken ise %50'ye göre simetrik olan görev döngülerinde

Fourier katsayılarının arasında 180° faz farkı olmasıdır. Bu sebeple, simülasyonda modellenen radara karşı karıştırma yapılması durumunda, belirlenen frekans aralıklarında seçilmesi gereken görev döngüsü değeri olarak %50'ye göre simetrik olan değerlerden büyük olan değer seçilmesinin daha uygun olduğu görülmektedir.

Ayrıca farklı bir karıştırma yöntemi olan geniş taramalı genlik modülasyonu ile karıştırma yöntemi, 15 Hz ve 45 Hz'de tarama yapan iki farklı radara karşı kullanıldığı sırada çökme tespiti yapılarak radarların tarama frekanslarının tespiti üzerine çalışılmıştır. Çökme bulma işlemlerinde iki farklı yöntem denenmiştir. İki yöntem için de Matlab Simulink modelleri oluşturulup TESS simülatöründen elde edilen örnek veri setleri ile denemeler yapıp ilgili radarların tarama frekansları tespit edilmiş ve çizelge ile sunulmuştur. Yeterli zamanın bulunması durumunda tarama frekansı bulunabilen bir COSRO veya LORO radar, bulunmuş olunan frekansta ters kazanç karıştırma yöntemi uygulanarak etkin şekilde karıştırılabilecektir. Fakat COSRO veya LORO tipi takip radarlarının genel olarak güdümlü füzelerde bulunmalarından dolayı hedefin tehdit karşısında kısa bir zamanı olacaktır. Bu sebeple en kısa sürede karıştırmanın etkili olabilmesi için frekans kaydırmalı harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma yöntemi uygulanmalı, çökme tespiti ile konik tarama frekansı belirleme yöntemi ise bu yöneme paralel olarak uygulanmalıdır.

Frekans kaydırmalı harmonik genlik modülasyonu ile karıştırma işlemi devam ederken, radarın karıştırmadan en fazla etkilendiği daha dar bir frekans aralığının çökme tespiti vasıtası ile belirlenebilmesi durumunda, karıştırma işlemi tespit edilen yeni frekans aralığında yapılarak daha etkili bir karıştırma senaryosu yaratılmış olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] US Joint Chiefs of Staff, *Electronic Warfare*, Joint Publication 3-13.1, **2007**.
- [2] Y. Özkazanç, *Elektronik Harp Temelleri Ders Notları*, Ankara, **2016**.
- [3] Naval Air Warfare Center Weapons Division, *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, Technical Communication Office, **2013**.
- [4] D. L. Adamy, *EW 101 A First Course in Electronic Warfare*, Artech House, **2001**.
- [5] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 3. Baskı, John Wiley & Sons, **2005**.
- [6] D. L. Adamy, *EW 102 A Second Course in Electronic Warfare*, Artech House, **2004**.
- [7] R. G. Wiley, *ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals*, Artech House, **2006**.
- [8] A. D. Martino, *Introduction to Modern EW Systems*, Artech House, **2012**.
- [9] G. Brooker, *Sensors and Signals*, University of Sydney, Avustralya, **2007**.
- [10] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 2. Baskı, McGraw-Hill, **1990**.
- [11] G. Rabow, *Conical Scan Tracking System*, United States of America Patent: US 3,859,658, 7 Ocak **1975**.
- [12] Joint Chiefs of Staff, *Joint Doctrine for Electronic Warfare*, Joint Publication 3-51, **2000**.
- [13] Department of the Army, *Electronic Warfare in Operations*, Washington, **2009**.
- [14] S. A. Vakin, L. N. Shustov ve R. H. Dunwell, *Fundamentals of Electronic Warfare*, Artech House, **2001**.

- [15] M. Özçelik, *Elektronik Harp ve Sinyal Karıştırması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2006**.
- [16] D. Adamy, EW 101 Radar Jamming Techniques, *The Journal of Electronic Defense*, cilt 32, no. 12, pp. 44-46, **2010**.
- [17] N. A. NV, *Electronic Warfare Fundamentals*, Nevada, **2000**.
- [18] R. N. Lothes, M. B. Szymanski ve R. G. Wiley, *Radar Vulnerability to Jamming*, Artech House, **1990**.
- [19] A. J. Golden, *Radar Electronic Warfare*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, **1987**.
- [20] M. R. Frater ve M. Ryan, *Electronic Warfare for the Digitized Battlefield*, Artech House, **2001**.
- [21] D. L. Adamy, *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*, Artech House, **2003**.
- [22] V. Dinç, *Elektronik Harp Teknikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, **2010**.
- [23] G. M. Siouris, *Missile Guidance and Control Systems*, Springer, **2004**.
- [24] J. L. Eaves ve E. K. Reedy, *Principles of Modern Radar*, Chapman & Hall, **1987**.
- [25] I. Rosu, RF Technical Articles, <http://www.qsl.net/va3iul/> (Şubat 2017).
- [26] W. N. Dean ve J. C. Rundlett, *Automatic Gain Control System for Radar Direction Indicators*. United States of America Patent: US 2,552,527, 28 Mart **1945**.
- [27] F. Neri, *Introduction to Electronic Defence Systems*, 2. Baskı, SciTech, **2006**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Sercan SAKLICA
Doğum Yeri : Altındağ, ANKARA
Medeni Hali : Evli
E-Posta : sercansaklica@gmail.com

Eğitim

Lise : İncesu Anadolu Lisesi, 2007
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik
ve Elektronik Mühendisliği, 2013

Yabancı Dil

İngilizce İleri

İş Deneyimi

ASELSAN REHİS Sistem Mühendisi (2013 - ...)

Deneyim Alanları

Radar Elektronik Harp Sistemleri, Elektronik Destek Sistemleri

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

Yoktur.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Yoktur.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Yoktur.



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 02/04/2018

Tez Başlığı / ~~Konusu~~: COSRO ve LORO Tipi Takip Radarlarının Karıştırılması

Yukarıda başlığı / ~~konusu~~ gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 100 sayfalık kısmına ilişkin, 02/04/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından *Turnitin* adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dahil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: SERCAN SAKLICA

Öğrenci No: N13128584

Anabilim Dalı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik ve Elektronik Mühendisliği

Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

02.04.2018

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

(Unvan, Ad Soyad, İmza)