

**FMCW RADARLARIN VE KARŞI TEDBİRLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**AN INVESTIGATION OF FMCW RADARS AND THEIR  
COUNTERMEASURES**

**KADİR ERALTAY**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2011

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

:



Prof.Dr. A. Salim KAYHAN

Üye

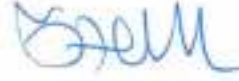
:



Prof.Dr. Feza ARIKAN

Üye (Danışman)

:



Yrd.Doç.Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

Üye

:



Yrd.Doç.Dr. Mücahit K. ÜNER

Üye

:



Yrd.Doç.Dr. Murat EFE

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından ..../..../2011 tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca ..../..../2011 tarihinde kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adil DENİZLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

# FMCW RADARLARIN VE KARŞI TEDBİRLERİNİN İNCELENMESİ

**Kadir ERALTAY**

## ÖZ

Bu çalışmada FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave, Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga) radarların temel çalışma prensipleri ve karıştırma teknikleri incelenmiştir. FMCW radarlarında yaygın kullanılan sinyal yapıları analitik olarak incelenmiş, üçgen dalga tarama yöntemi kullanan radarların yapıları ve bu tip radarlara karşı kullanılan karşı tedbir yöntemleri etüd edilmiştir.

FMCW radarlarda birden fazla hedefin bulunduğu ortam ve radar sinyal işleme birimi modelleri oluşturulmuştur. FMCW radar huzmesi içinde birden fazla hedefin bulunduğu ortamlarda, çoklu hedefleri ayrıştırabilecek bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma irdelenmiş, bu algoritma temelli çalışan bir radarın çoklu hedef içeren ortamlardaki çalışması modellenmiş ve bilgisayar ortamında benzetim yapılmıştır.

FMCW radarlara karşı kullanılacak karıştırma ve aldatma yapabilen karıştırıcılar ile sayısal radyo frekans hafıza (DRFM) mimarisi incelenmiştir. Bu yapılar kullanılarak FMCW radarların, spot gürültü altında ve menzil-hız aldatması yapabilen karıştırıcılarla oluşturulmuş sahte hedeflerin varlığında çalışma başarımı analiz edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** FMCW Radar, Radar Modelleme, Çoklu Hedef Çözümleme, Elektronik Karşı Taarruz, Karıştırma, Aldatma, Sayısal Radyo Frekans Hafızası.

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

# **AN INVESTIGATION OF FMCW RADARS AND THEIR COUNTERMEASURES**

**Kadir ERALTAY**

## **ABSTRACT**

In this study, fundamental operating principle of FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar and its countermeasure techniques have been investigated. Signal forms which are commonly used in FMCW radars are analytically examined. Radar architectures that use method of triangular waveform and, their countermeasure approaches have been surveyed against these radars.

A radar simulation model is proposed for FMCW radars operating in multi-target environments. A radar signal and data processing algorithm is proposed for the resolution of simultaneous multiple targets appearing in the FMCW radar beam. The proposed signal processing framework is presented together with a simulation model depicting the FMCW multi-target resolution capability in computer environment.

Both noise jammers and deception jammers, digital radio frequency memory, architectures have been investigated into Electronic Countermeasures (ECM) systems for FMCW radars. By using these constructions, operating performance of FMCW radars has been analysed when ghost targets are created under spot noise jammers and deception jammers that are capable of distance-velocity deception.

**Keywords:** FMCW Radar, Radar Modelling, Resolution of Multiple Targets, Electronics Countermeasures, Jamming, Deception, Digital Radio Frequency Memory.

**Advisor:** Asst. Prof. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering

## TEŞEKKÜR

Her Őeyden önce, bu tezin oluşturulmasında bilgi ve tecrübelerini sonuna kadar paylaŐan, gösterdiği ilgi ve anlayıŐı hiÇbir zaman esirgemeyen değerli tez danıŐmanım Sayın Yrd. DoÇ. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ'a sonsuz teşekkür ederim.

Tez őralıŐmalarımı her konuda desteklediğine inandığım ASELSAN A.Ő.'ye, yüksek lisans őralıŐmalarım boyunca verdiği finansal destekten dolayı TÜBİTAK BİDEB'e teşekkür ederim.

Tez őralıŐmalarım boyunca konu hakkında sahip oldukları bilgi birikimini her fırsatta bana aktarmaktan őrekinmeyen değerli ASELSAN őralıŐma arkadaŐlarıma ayrıca teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, maddi ve manevi desteklerini hiŐ esirgemeyen ve her zaman yanımda olacaklarını bildiğim baŐta sevgili annem Emine ERALTAY olmak üzere tüm aileme Őükranlarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

### Sayfa

ÖZ .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
SÖZLÜKÇE .....	xiii
1. FMCW RADARLAR.....	1
2. FMCW RADARLARDA KULLANILAN FREKANS KİPLEME YAPILARI .....	7
2.1. Sinüzoidal Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları .....	7
2.2. Testere Dişi Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları .....	14
2.3. Üçgen Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları .....	25
3. FMCW RADARLARDA TASARIM PARAMETRELERİ .....	38
3.1. Belirsizlik Fonksiyonu.....	39
3.1.1 Menzil Belirsizlik Fonksiyonu .....	41
3.1.2 Doppler Belirsizlik Fonksiyonu .....	43
3.2. FMCW Radarlarda Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi .....	45
3.2.1 Radar Çalışma Frekansının Belirlenmesi .....	46
3.2.2 Frekans Kipleme Periyodu .....	47
3.2.3 Ölçülebilecek Maksimum Hedef Hızı .....	48
3.2.4 Ölçülebilecek Maksimum Hedef Menzili .....	49
3.2.5 Menzil Çözünürlüğü ve Modülasyon Bant Genişliği .....	50
3.2.6 Hız Çözünürlüğü ve Periyodik Tarama Sayısı .....	52
3.2.7 Almaç Sinyal İşleme Parametreleri.....	52

4. ÜÇGEN TARAMALI FMCW RADARLARDA ÇOKLU HEDEF ÇÖZÜMLEMESİ	54
5. FMCW RADAR UYGULAMA ÖRNEKLERİ	88
5.1. FMCW Araç Radarları	88
5.2. FMCW Füze İkaz Radarları	96
5.3. FMCW LPI Gözetleme Radarları	101
6. FMCW RADARLARIN KARIŞTIRILMASI	108
6.1. Gürültü Tabanlı EKT Sistemleri	110
6.1.1 Spot Gürültü Yöntemi	112
6.1.2 Süpürme Gürültüsü Yöntemi	112
6.1.3 Baraj Gürültü Yöntemi	113
6.2. Aldatma Tabanlı EKT Sistemleri	128
6.2.1 Sayısal Radyo Frekans Hafızası	129
6.2.2 Hız Aldatması	131
6.2.3 Menzil Aldatması	133
7. SONUÇLAR	142
KAYNAKLAR	145
ÖZGEÇMİŞ	147

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1.1 a) Alma-gönderme için iki ayrı anten kullanan FMCW radar genel blok diyagramı, b) Alma-gönderme için tek bir anten kullanan FMCW radar genel blok diyagramı .....	3
Şekil 2.1 Sinüzoidal frekans kiplmeli radarlarda gönderme-alma sinyallerin izlediği yolların kabaca gösterimi.....	7
Şekil 2.2 Almaç içerisinde elde edilen yansıma sinyalinde hedef hız bilgisi için Doppler frekansının, hedef menzili için yan kulakçıklar arasındaki faz farkının algılandığı ideal durum grafiği .....	11
Şekil 2.3 Radar almacında aynı anda farklı menzillerde ve farklı hızlarda hareketli dört hedefin varlığının algılanması.....	13
Şekil 2.4 Testere dişi gönderilen ve alınan sinyallerin doğrusal frekans dalga formu ve gönderilen sinyal ile alınan sinyaller arasında frekans farkı (vuru frekansı).....	14
Şekil 2.5 Aynı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarının HFD sonuçları ( $N = 40$ ).....	20
Şekil 2.6 Aynı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarının frekans ekseninde daha açık gözlenebilmesi için Şekil 2.6'nın yaklaştırılmış durumu .....	20
Şekil 2.7 Aynı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarına karşılık gelen tarama boyunca zamanda hareketli hedeflerin menzillerin değişiminin görülmesi .....	21
Şekil 2.8 Farklı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarının HFD sonuçları ( $N = 40$ ).....	22
Şekil 2.9 Farklı menzillerde yer alan üç hedef için elde edilen vuru frekanslarına karşılık gelen hedef menzil bilgilerinin gözlenmesi ( $N = 40$ ) .....	22
Şekil 2.10 Farklı menzillerde yer alan üç hedef için elde edilen vuru frekanslarına karşılık gelen hedef menzil bilgilerinin gözlenmesi ( $N = 100$ ) .....	23
Şekil 2.11 Üçgen tipi gönderilen ve alınan sinyallerin doğrusal frekans dalga formu, gönderilen sinyal alınan sinyaller arasında frekans farkı (vuru frekansı) .....	26
Şekil 2.12 FMCW radar sistemi genel blok diyagramı.....	29
Şekil 2.13 FMCW üçgen tarama için elde edilmiş gönderme sinyallerinin a-) zaman b-) frekans eksenindeki görüntüleri .....	34
Şekil 2.14 FMCW üçgen tarama için elde edilmiş yansıma (alma) sinyallerinin a-) zaman b-) frekans eksenindeki görüntüleri .....	35



Şekil 2.15 FMCW üçgen tarama için elde edilmiş çarpıcı ve LPF sonrası sinyallerin a-) zaman b-) frekans eksenindeki görüntüleri (alt-üst vuru frekans çifti) .....	36
Şekil 3.1 Kipleme bant genişliğinin Sıfır Doppler Kesimi durumunda menzil çözünürlüğü üzerindeki etkisinin tanımlı bant genişliklerinde gözlenmesi .....	42
Şekil 3.2 Kipleme bant genişliğinin Sıfır Gecikme Kesimi durumunda Doppler çözünürlüğü üzerindeki etkisinin tanımlı bant genişliklerinde gözlenmesi .....	44
Şekil 3.3 Farklı $N$ periyodik sinyal tekrar sayısının Sıfır Gecikme Kesimi durumunda Doppler çözünürlüğü üzerindeki etkisinin tanımlı tarama sayılarında gözlenmesi.....	45
Şekil 3.4 Birden fazla hedef olması durumunda hedeflerin birbirinden ayırt edilmesi için gerekli menzil çözünürlük etkisinin gözlenmesi.....	50
Şekil 4.1 Tek bir hedef olması durumunda yansıma sinyallerinin HFD sonrası frekans eksenindeki görüntüsü.....	59
Şekil 4.2 İki hedef olması durumunda toplam yansıma sinyallerinin HFD sonrası frekans eksenindeki görüntüsü.....	60
Şekil 4.3 İki hedeften dönen sinyallerin alt ve üst vuru frekanslarının frekans-zaman ekseninde görüntülenmesi (Spektrogram Methodu).....	64
Şekil 4.4 Çoklu hedeflerin çözülmesi için iki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gönderme-alma sinyallerin zaman frekans eksenindeki görüntüsü .....	65
Şekil 4.5 Çoklu hedeflerin tespit algoritması genel akış diyagramı .....	71
Şekil 4.6 İki farklı hedefi ayırt edebilmek için iki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gerçek ve sanal hedeflerin menzil-hız grafiğindeki yerleşimleri.....	72
Şekil 4.7 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile iki adet tehdidin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi .....	73
Şekil 4.8 Dört hedef için $T_m = 2.45ms$ iken; tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumundaki genlik grafiğinin alt-üst vuru frekans bileşenleri olarak gözlemlenmesi .....	75
Şekil 4.9 Dört hedef için $T_m = 3.49ms$ iken; tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumundaki genlik grafiğinin alt-üst vuru frekans bileşenleri olarak gözlemlenmesi .....	76

Şekil 4.10 Dört farklı hedefi ayırt edebilmek için iki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gerçek ve sahte hedeflerin menzil-hız grafiğindeki yerleşimleri.....	78
Şekil 4.11 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile dört adet tehdidin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi .....	79
Şekil 4.12 Radar tehdidi olarak farklı menzil ve farklı hızlarda yedi hedef için elde edilmiş tüm sanal ve gerçek değerlerin gözlenmesi .....	80
Şekil 4.13 Radar tehdidi olarak farklı menzil ve farklı hızlarda yedi hedefin, iki farklı kipleme zaman taraması ile oluşmuş sanal hedeflerin içerisinde bulunması .....	81
Şekil 4.14 İki farklı kipleme periyodunda gönderilen tarama frekansı kullanılarak ölçülen yedi hedefe ait gerçek menzil-hız ile tahmin edilen menzil-hız verileri arasındaki hata grafiği .....	82
Şekil 4.15 Çoklu hedeflerin çözümlenmesi için iki farklı bant genişliğinde tarama yapılması durumunda gönderme tarama sinyallerin zaman-frekans eksenindeki görüntüsü .....	83
Şekil 4.16 Dört hedef için $\Delta F = 150$ MHz iken; almaç karıştırıcısı çıkışında elde edilen toplam vuru frekanslarının zaman ekseninde gözlemlenmesi.....	84
Şekil 4.17 Dört hedef için $\Delta F = 294$ MHz iken; almaç karıştırıcısı çıkışında elde edilen toplam vuru frekanslarının zaman ekseninde gözlemlenmesi.....	85
Şekil 4.18 Dört farklı hedefi ayırt edebilmek için iki farklı bant genişliği frekansında tarama yapılması durumunda gerçek hedeflerin menzil ve hız bilgilerinin Minimum Fark Algoritması ile işaretlenmesi.....	87
Şekil 5.1 Üç hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_1} = 0.145$ ms) .....	93
Şekil 5.2 Üç hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_2} = 0.274$ ms).....	94
Şekil 5.3 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile üç hedefin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi.....	95
Şekil 5.4 Arama Radarı ile füze ve ya benzeri tehditlerin algılanıp ve İmha Sistemi ile yok edilmesi.....	96
Şekil 5.5 İki hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_1} = 2.72$ ms).....	98

Şekil 5.6 İki hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_2} = 3.49$ ms) .....	99
Şekil 5.7 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile iki füze tehdidinin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi.....	100
Şekil 5.8 Beş hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_1} = 0.7$ ms) .....	104
Şekil 5.9 Beş hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_2} = 1.17$ ms) .....	105
Şekil 5.10 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile beş adet tehdidinin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi.....	106
Şekil 6.1 Elektronik Karşı Tedbir (EKT) yöntemlerinin sınıflandırılması .....	109
Şekil 6.2 Gürültü Tabanlı Elektronik Karşı Tedbir Sistemi .....	111
Şekil 6.3 Frekans kiplmeli spot gürültü üreten karıştırıcı sistemi genel blok diyagramı .....	114
Şekil 6.4 a) Yükselen kenar gönderme sinyali çalışma frekansı ve çalışma bant genişliği görüntüsü b) Karıştırıcıdan yayımlanan frekans kiplmeli gaussian dağılımlı düşük güçlü spot gürültü c) Düşük gürültü ortamda radar almıcında algılanan hedef varlığını gösteren yansıma sinyali frekans spektrum görüntüsü .	117
Şekil 6.5 Karıştırıcı gürültü gücünün yükseltilmesiyle radar çalışma bandının karartılması ve hedef yansıma sinyallerinin gürültü altında kalması .....	118
Şekil 6.6 Düşük genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar almıcı ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72$ ms) .....	123
Şekil 6.7 Düşük genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar almıcı ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49$ ms) .....	124
Şekil 6.8 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile düşük gürültü altında iki tehdidinin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi.....	124
Şekil 6.9 Yüksek genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar almıcı ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72$ ms) .....	125

Şekil 6.10 Yüksek genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar almacı ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49 \text{ ms}$ ) .....	126
Şekil 6.11 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile yüksek gürültü altında gerçek hedeflerin sanal hedefler arasında kalması .....	127
Şekil 6.12 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile daha yüksek gürültü altında gerçek hedeflerin sanal hedefler arasında kalması .....	127
Şekil 6.13 Çoklu sahte hedef yaratabilmek için menzil ve hız aldatması yapabilen DRFM mimarisinin genel blok diyagramı .....	130
Şekil 6.14 Hız aldatma karıştırıcı mimarisi genel blok diyagramı .....	132
Şekil 6.15 Menzil aldatma karıştırıcı mimarisi genel blok diyagramı .....	134
Şekil 6.16 İlk taramada düşük gürültülü ortamda radar almacı ile alınmış iki gerçek, bir sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72 \text{ ms}$ ) .....	136
Şekil 6.17 İkinci taramada düşük gürültülü ortamda radar almacı ile alınmış iki gerçek, bir sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49 \text{ ms}$ ) .....	137
Şekil 6.18 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile ortamda var olan ikisi gerçek biri sahte hedef olmak üzere üç hedefin algılanması .....	138
Şekil 6.19 İlk taramada radar almacı ile alınmış üç gerçek, üç sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72 \text{ ms}$ ) .....	139
Şekil 6.20 İkinci taramada radar almacı ile alınmış üç gerçek, üç sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49 \text{ ms}$ ) .....	140
Şekil 6.21 İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile ortamda var olan üç gerçek ve üç sahte hedefin radar ekranında görüntülenmesi .....	141

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 Testere Dişı Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları benzetim parametreleri .....	19
Çizelge 2.2 FMCW radarlar almaç girişı yükselen-düşen kenar sinyallerini frekans ekseninde benzetim yapmak için kullanılan parametreler .....	33
Çizelge 4.1 Testere Dişı Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları benzetim parametreleri .....	57
Çizelge 4.2 Testere Dişı Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları benzetim parametreleri .....	62
Çizelge 5.1 Radar çalışma frekanslarına göre deniz seviyesinde temiz havada atmosferik zayıflama katsayıları .....	89
Çizelge 5.2 Örnek bir Araç Sensör Radarı çalışma sistem parametreleri.....	90
Çizelge 5.3 Benzetim çalışması için Araç Sensör Radarı çalışma parametrelerinin belirlenmesi .....	91
Çizelge 5.4 Füze ikaz radarı benzetim çalışması için belirlenen parametreler .....	97
Çizelge 5.5 FMCW LPI gözetleme radarı benzetim çalışması için belirlenen parametreler .....	103
Çizelge 6.1 FMCW benzetim radarı sistem ve çalışma parametreleri.....	120
Çizelge 6.2 Frekans kiplmeli karıştırıcının sistem ve çalışma parametreleri.....	121

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AF	:	Ambiguity Function (Belirsizlik Fonksiyonu)
ADC	:	Analog to Digital Converter (Analog Sayısal Dönüştürücü)
ACC	:	Adaptive Cruise Control (Uyarlamalı Hız Kontrolü)
CFAR	:	Constant False Alarm Rate (Sabit Yanlış Alarm Oranı)
DDS	:	Direct Digital Synthesizer (Doğrudan Sayısal Sentezleyici)
ECM	:	Electronic Counter Measures (Elektronik Karşı Taarruz,EKT)
EM	:	Elektromanyetik
FMCW	:	Frequency Modulated Continuous Wave (Frekans Kiplenmeli Sürekli Dalga)
FFT	:	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü,HFD)
FSK	:	Frequency Shift Keying (Frekans Kaymalı Anahtarlama)
IF	:	Intermediate Frequency (Ara Frekans)
LFM	:	Linear Frequency Modulation (Doğrusal Frekans Kiplemesi)
LNA	:	Low Noise Amplifier (Düşük Gürültülü Yükselteç,DGY)
LO	:	Local Oscillator (Yerel Osilatör)
LPI	:	Low Probability of Intercept (Yakalanma Olasılığı Düşük,YOD)
PPI	:	Plan Position Indicator (Plan Pozisyon Göstergesi)
PR	:	Pseudo Random (Sözde Rasgele)
RPC	:	Reflected Power Canceller (Güç Yansıma Engelleme)
SNR	:	Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı, SGO)
SOJ	:	Stand-Off Jammer (Menzil Dışı Karıştırıcı)
SSJ	:	Self-Screening Jammer (Öz Perdeleme Karıştırıcısı)
STFT	:	Short Time Fourier Transform (Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü, KZFD)
UHF	:	Ultra High Frequency (Aşırı Yüksek Frekans)
VCO	:	Voltage Controlled Oscillator (Gerilim Kontrollü Osilatör)

## SÖZLÜKÇE

aldatma	:	deception
almaç	:	receiver
alt frekans dönüştürücü	:	down-converter
bastırma	:	suppression
belirsizlik	:	ambiguity
benzetim	:	simulation
birikimli	:	cumulative
çapraz ilinti	:	cross correlation
çarpıcı	:	mixer
çarpışma engelleme	:	collision avoidance
çevresel yansıma sinyalleri	:	clutter
çok fazlı	:	polyphase
çok zamanlı	:	polytime
darbe	:	pulse
dedektör/sezimci	:	detector
düşen kenar	:	down-ramp
dolaştırıcı	:	circulator
dönüştürücü	:	transducer
eşik	:	threshold
eşlenik	:	conjugate
evrişim, katlanma	:	convolution
gecikme hattı	:	delay line
geçit menzili	:	crossover range
göndermeç	:	transmitter

gürültü	:	noise
görev çevrimi	:	duty cycle
hız kapısı	:	velocity gate
hız kontrolü	:	cruise control
huzme	:	beam
karıştırıcı	:	jammer
karmaşık	:	complex
kestirim	:	estimation
kipleme	:	modulation
kipleme periyodu	:	modulation period
korelasyon, ilinti	:	correlation
menzil kapısı	:	range gate
örgü/ağ	:	mesh
öz-ilinti	:	auto-correlation
pencereleme	:	windowing
random	:	rasgele
spektrum / izge/ tayf	:	spectrum
sıfır-kesme	:	zero-crossing
sönümlleme	:	fading
süpürme	:	swept
izge grafiği	:	spectrogram
taşıyıcı	:	carrier
telafi, iyileştirme	:	compensation
tepe	:	peak
temel bant	:	baseband



titreme gürültüsü	:	flicker noise
uyarlamalı	:	adaptive
uyumlu süzgeç	:	matched filter
vuru	:	beat
yanca	:	yaw, azimuth
yükselen kenar	:	up-ramp
yükselteç	:	amplifier
yükseklik ölçer	:	altimeter

## 1. FMCW RADARLAR

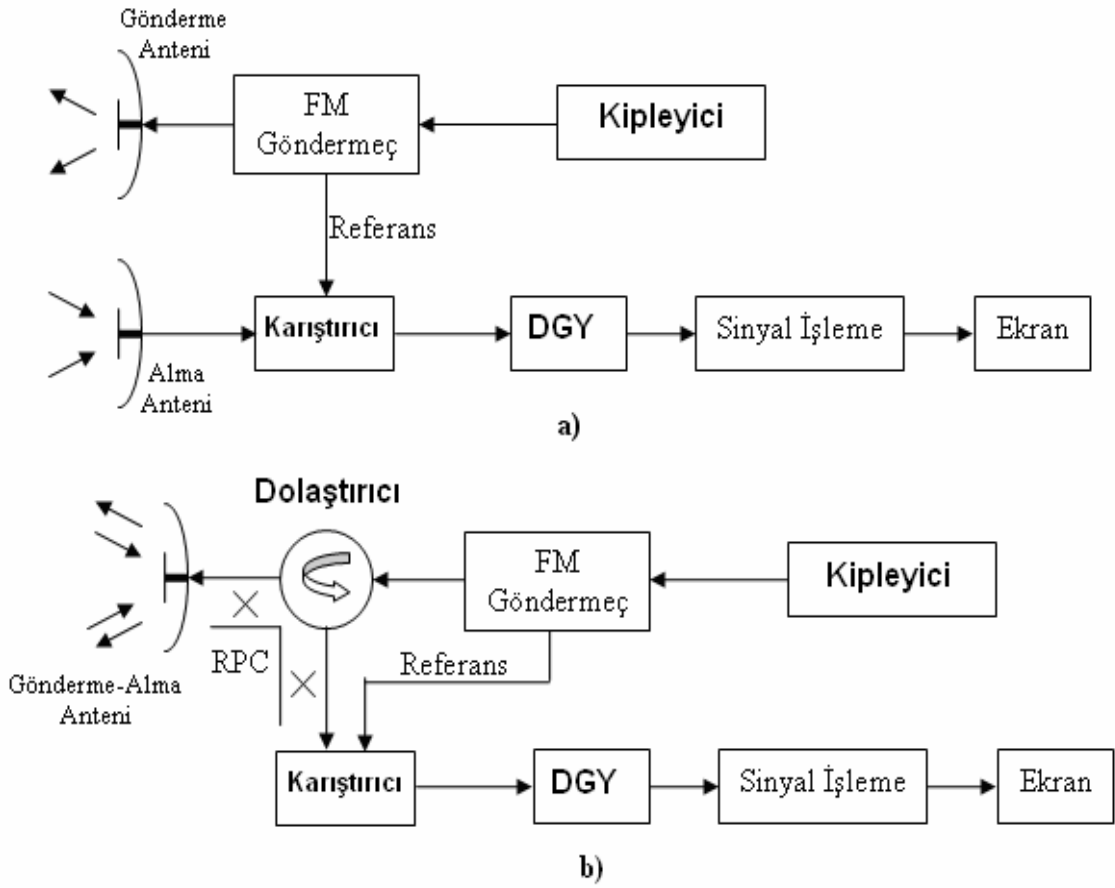
Frekans kiplmeli sinyaller kullanarak hedeften dönen yansıma sinyalleri üzerinden menzil bulma fikrinin temelleri 1928 yılında J.O.Bentley isimli Amerikalı bir araştırmacı tarafından atılmıştır. İlk uygulamalar ise 1930'lu yılların sonlarına doğrudur. Ancak bu yıllarda darbe radarların yaygın kullanımı frekans kiplmeli radarları gölgede bırakmıştır. Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga prensibi, 2. Dünya Savaşı'ndan önce düşük irtifa FMCW radar yükseklik ölçer (altimeter) olarak askeri ve sivil havacılıkta kullanılmıştır [Komarov, Smolskiy, 2003].

FMCW radarlar üzerinde teorik çalışmaların detaylandırılması 1940–1960 yılları arasında olmuştur [Komarov, Smolskiy, 2003]. Bu çalışmalarla birlikte havacılık uygulamalarının yanı sıra denizcilik alanında seyir sistemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Ancak daha önce belirtildiği gibi askeri ve sivil havacılığın darbe radarları üzerine yoğunlaşmış olması bu radarları adeta unutturmuştur. Sadece çok kısa menzillerin ölçüm gereksinimi olan endüstriyel uygulamalarda, askeri alanda füzelerin yakınlık-yükseklik bilgilerini değerlendirme amaçlı ve hareketli hedeflerin tespit sistemlerinde yüksek hassasiyet gereksiniminin olduğu menzil ölçümlerinde kullanılmıştır. Genellikle FMCW radarlar, hedefi gürültü içerisinde ayırt edebilmek için iyi bir menzil-hız çözünürlüğü gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Tasarım aşamasının diğer radarlara göre daha kolay olması nedeni ile kısa menzil ölçüm çözünürlüğü gerektiren sistemlerde de tercih edilmektedirler.

Bunların yanı sıra, günümüzde FMCW radarlar özellikle otomobil güvenlik radarlarında geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Ayrıca, özel dalga formunun getirdiği güvenlik sayesinde çözümlenmesi diğer sinyallere göre daha zor olduğu için Yakalanma Olasılığı Düşük (YOD, Low Probability of Intercept-LPI) radarlarında da kullanılabilir. FMCW genlik izgesi, tarama bant genişliği üzerinde nerdeyse düzdür ve dolayısıyla LPI açısından uygundur. Bu özellik karıştırıcı ve karıştırıcı benzeri yüksek gürültü verecek ya da bandı karıştıracak dış etkenlere karşı direnci artırır. Çünkü herhangi bir sinyalin, FMCW sinyal parametreleri ile eşleşmesi oldukça zordur.

Frekans ya da faz kiplemesi yapılmamış sürekli-dalga radarlarında gönderilen sinyalin genlik ve frekansları sabittir. Bu radarlarda sadece Doppler ölçümü ile hedef hız kestirimi yapılabilirler. Doppler ölçümü gönderilen sinyalin dalga boyuna bağlı olduğundan bu tür radarlar çok yüksek frekanslarda çalışırlar. Bu sayede çok daha hassas hız ölçümleri yapılabilir. Bu tür radarlar sürekli dalga radarları olarak bilinir. Ancak bu radarlarda, gönderilen sinyal zamansal olarak işaretlenmediği için alınan sinyal ile gönderilen sinyal arasındaki zaman farkı sezilenemez. Bu nedenle frekans ya da faz kiplemesi yapılmamış sürekli dalga radarlarında menzil ölçümü olanaksızdır [Mahafza, 2000]. Hız ölçümünün yanı sıra menzil ölçümü de yapabilmek için gönderilen sinyalin frekansı ya da fazı kodlanmalıdır. Ayrıca, frekans kiplemeli yapı ile zaman-bant genişliği çarpımı çok geniş sinyaller oluşturulabilir. Bu sinyaller ile hem yüksek çözünürlüklü hız kestirimi hem de menzil ölçümü yapılabilir. Menzile ait çözünürlük sinyal bant genişliğinden etkilenirken, hız değişimindeki çözünürlük kipleme modülasyon periyoduna ve tarama sayısına bağlı olarak değişim gösterir. Bu çalışmada frekans kiplemeli radarların temel özellikleri araştırıldığı için faz kodlamalı radarlar çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

Temel FMCW radar sistemleri, gönderilen ve alınan sinyallerin korelasyonu ile hedefin menzil ve hız bilgisi ölçümünü yapar [Pace, 2009]. Tipik bir FMCW radar genel blok diyagramı Şekil 1.1'de verilmiştir. Bu diyagramda gösterildiği gibi FMCW radar, tasarımı çok karmaşık olmayan sistem birimlerinden oluşur.



**Şekil 1.1** a) Alma-gönderme için iki ayrı anten kullanan FMCW radar genel blok diyagramı, b) Alma-gönderme için tek bir anten kullanan FMCW radar genel blok diyagramı

Bu birimler, gönderme frekansının oluşturulduğu gönderme birimi ve gönderme anteni, alma birimi ve alma anteninden oluşmaktadır. Bazı FMCW radarlar, istisnai olarak Güç Yansıma Engelleyci (Reflected Power Canceller, RPC) tasarımları ile birlikte özel yalıtımı sağlanmış gönderme-alma sinyallerini birbirinden etkilenmeyecek biçimde gönderilmesini sağlayan yapılar ile tek bir anten üzerinden çalışabilir. RPC yapısı, gönderme-alma yönlendirme anahtarından hemen sonra yer alır. RPC uyarlamalı olarak gönderme-alma besleme geçitlerini engelleyerek dinamik alanı sınırlar. Bu nedenle, yüksek güç gerektiren uygulamalarda gönderme birimi gürültüsünün alt bantlarda hedefi bastırabileceği ve almaca sızabilecek gücün alma birimlerine zarar verebileceği ihtimaline karşın çift anten kullanımı daha yaygındır.

Gönderme biriminde tarama frekans formu, Gerilim Kontrollü Osilatör (Voltage Controlled Oscillator, VCO) ile analog olarak ya da Doğrudan Sayısal Sentezleyici (Direct Digital Synthesizer, DDS) ile sayısal olarak oluşturulur [Pace, 2009]. DDS üzerinden oluşturulan tarama formu biçimleri genellikle üçgen, testere dişi ya da sinüs dalga şeklindedir. Oluşturulan dalga formu, istenilen frekans taşıyıcı seviyesi ile kiplenerek çalışma gönderme frekansına çıkartılır. Gönderme biriminde ayrıca ortama gönderilecek sinyalin güç genlik değerinin oluşturulduğu güç yükselteç birimleri bulunmaktadır. FMCW radarlar yüksek ölçüm doğruluğu gerektiren kısa menzil ölçüm uygulamalarında kullanıldığı için gönderme sinyalinin genlik gücü çok yüksek seviyelere ulaşmaz. FMCW radarların gönderme güçleri 1 mW , 10 mW , 100 mW veya 1 – 100 W seviyelerinde seyir eder [Tecimer, 2006]. Bu seviyedeki sinyal gönderme gücü yarı iletken teknolojisi ile kolaylıkla oluşturulabilir. Yani, güç yükseltme birimi yarı iletken yükselteçler ile tasarlanabilir. Bu özellik FMCW radarların tasarıma getirdiği en büyük avantajlardan biridir. Bunun yanı sıra frekans kipleme ile gönderilen enerji geniş bir bantta yayılım gösterdiği için menzil çözünürlüğünü oldukça iyileştirilir. Ancak; enerji, sürekli zamanlı gönderilen sinyalde efektif olarak uzak menzillere gönderilemez. Buna karşın, darbe radarlarının gönderme güç seviyeleri megawatt (MW ) mertebelerine kadar varmaktadır. Yüksek güç oluşturmak ve gönderme birimini soğutabilmek ciddi gereksinimleri beraberinde getirecektir.

Alma biriminde, hedeften yansıyan sinyaller içerisinde hedef varlık-yokluk bilgisi çıkarılıp, hedefin var olması durumunda sahip olabileceği menzil-hız bilgilerinin kestirildiği birimlerden oluşur. Yansıma sinyalleri alma anteni ile yakalanır. Yüksek frekansa sahip sinyalleri radar alma ünitelerinde analiz edilebilmek için Ara Frekans (Intermediate Frequency, IF) bandına indirmek gerekecektir. Dedektör ve yükselteçlerdeki titreme gürültüsü (1/f flicker noise) etkisini yok ederek daha kararlı bir Doppler ölçümü alabilmek için gönderilen ve alınan sinyaller doğrudan çarpıcı (mixer) ile çarpılıp temel frekans bandına indirilmezler. Çünkü 200Hz altındaki frekanslarda bu gürültü seviyesi oldukça önem kazanmaktadır [Skolnik, 1981]. Titremeli gürültünün kaynağı elektronik devre elemanlarının varlığıdır ve düşük frekanslarda dikkate alınması gerekmektedir. Yüksek frekanslarda ise beyaz gürültü etkisinde gölgelendiği için önemsiz olacaktır. Ayrıca; bu gürültüde güç,

frekansla ters orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle alınan sinyaller, gönderilen sinyal frekansından farklı frekansa sahip bir Yerel Osilatör (Local Oscillator, LO) ile çarpılarak temel banda indirilir. IF banda indirilmiş sinyal frekansı, yaklaşık olarak 30 MHz etrafında seyir eder. Bu sayede düşük frekans titreme gürültülerinin etkisi gözlenmez.

FMCW radarlarda gönderme sinyalinin bir kopyası da alma biriminde referans olarak kullanılır. Bu referans sinyal, hedeflerden yansıyan sinyaller ile bir çarpıcıda çarpılır. Zaman ekseninde sinusoid sinyallerin çarpılması matematiksel olarak iki farklı bileşeni içerecektir. Bu bileşenlerden bir tanesi hedef bilgilerini barındıran temel bant sinyallerinin yer aldığı kısımdır. Diğer ise taşıyıcı frekans bileşenin iki katı büyüklüğünde hedefe ait herhangi bir bilgi barındırmayan yüksek frekanslı kısımdır. Bu nedenle yüksek frekans bileşeninin bastırılması gerekir. Alçak geçiren süzgeçler ile yüksek frekans bileşenleri bastırılır. Hedeften yansıyan sinyallerin genlik seviyelerinin düşük olabileceği ihtimali ile süzgeç çıkışından sonra sinyal genlik seviyesi, gürültü seviyeleri oldukça düşük olan Düşük Gürültülü Yükselteç (DGY, Low Noise Amplifier, LNA) ünitelerinden geçirilir. Artık yansıma sinyalinin üst bileşenleri bastırılmış, genlik değeri düşük gürültülü olarak yükseltilmiştir. Sinyaller içerisinden hedeflerle ilgili bilgilere erişmek için analog olarak işlenmiş sinyaller, Analog-Sayısal Dönüştürücü (Analog-Digital Converter, ADC) ile sayısal verilere dönüştürülür. Günümüzde doğrudan 3 GHz seviyelerinde işlem yapabilme yeteneğine sahip sayısal dönüştürücüler üretilmektedir. Ancak, FMCW radar gönderme sinyalleri frekansı oldukça yüksek seçildiği için bu sinyalleri mutlaka temel banda indirmek gerekecektir. Sayısal ham verilerinin işlenmesinde işlem kolaylığı sağlamak için sinyaller zaman ekseninden frekans eksenine dönüştürülür. Frekans ekseninde yapılan bu işlem Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD, Fast Fourier Transform, FFT) olarak bilinmektedir. HFD dönüşümü sonrası frekans ekseninde hedefin menzil-hız bilgisinin yer aldığı vuru (beat) ve Doppler frekansı iç içedir. Tarama dalga formu biçimine göre, vuru-Doppler frekanslarını ayırt etmek için matematiksel eşitliklere ait çalışmalara ileriki bölümlerde yer verilmiştir.

FMCW radarların en temel yeteneği, sinyali sürekli gönderilip yansiyacak sinyalleri de sürekli zamanlı dinleyebilmesidir. Bu arada herhangi bir bekleme süresi gerekli olmadığından, ölçüm sonuçları kesintisiz alınabilir. Çok hassas menzil ölçebilme

özelliği ve sürekli ölçüm alabilmesi göz önünde bulundurulduğunda, bu radarlar ölçülecek menzillerin çok büyük olmadığı ve daimi ölçülmesi gereken parametrelerin istendiği yerlerde kullanılırlar. Örneğin; yükseklikölçer ile uçakların uçuş yükseklikleri, meteorolojik radarlarda rüzgâr profili ölçümleri gibi.

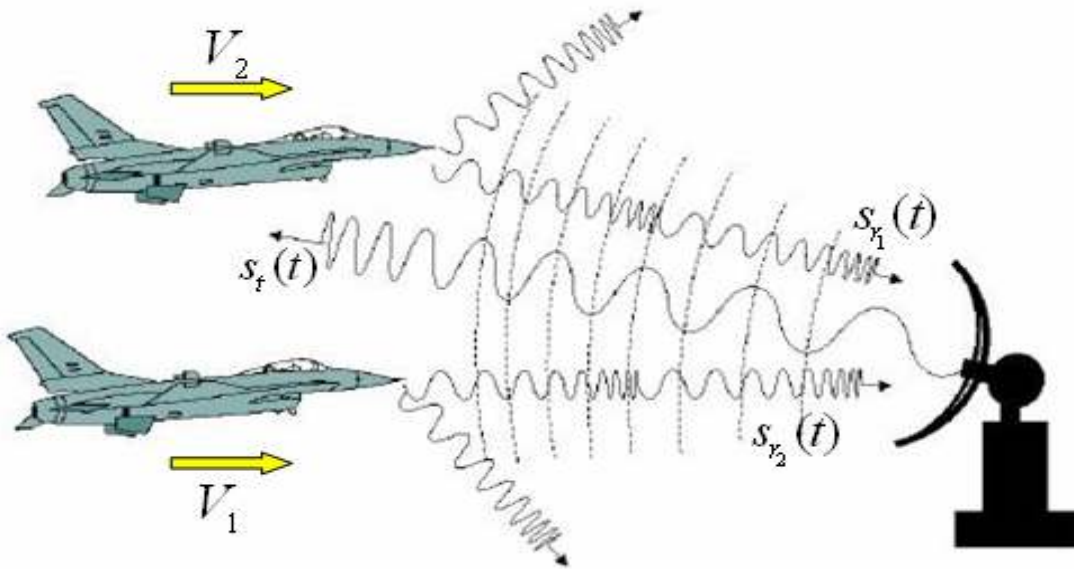
Bu çalışmada FMCW radarlarda bir veya birden fazla hedef menzil ve hız verilerini eş anlı olarak ölçebilmek için radar tasarım gereksinimlerinin belirlenmesi ve bu gereksinimler üzerinden oluşturulmuş benzetim çalışmaları bilgisayar ortamında yürütülmüştür. Aynı zamanda, FMCW radarların karıştırılma yöntemleri çalışılmıştır. Sırası ile ilk bölümde FMCW radarlar ve tasarım mimarileri hakkında genel bilgi verilmiştir. İkinci bölümde FMCW radarlarda kullanılan frekans kipleme yapıları (sinüzoidal, testere diği ve üçgen frekans kipleme) analitik olarak analiz edilip, yapılan benzetim çalışmaları ile analitik ifadelerin sonuçları gözlemlenmiştir. Üçüncü bölümde FMCW radarlarda tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve üçgen tarama için menzil-Doppler çözünürlüğüne etki eden tasarım parametreleri benzetim sonuçları ile yorumlanmıştır. Dördüncü bölümde üçgen taramalı FMCW radarlarda çoklu hedeflerin çözümlenmesi için önerilen yöntem ve yöntem sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere bir algoritma önerilmiştir. Beşinci bölümde FMCW uygulama örnekleri olarak; FMCW araç radarları tasarımı, FMCW füze ikaz radarları tasarımı ve FMCW LPI gözetleme radarı tasarımı benzetim çalışmaları yapılmıştır. Son bölümde ise FMCW radarların karıştırılması başlığı altında gürültü ile karıştırma, aldatma tabanlı elektronik karıştırma yöntemleri çalışılmış ve bir önceki bölümde tasarlanmış füze ikaz radarları üzerinde bu yöntemler benzetim yapılmıştır.

## 2. FMCW RADARLARDA KULLANILAN FREKANS KİPLEME YAPILARI

FMCW radarlarda gönderilen sinyaller, kipleme işlemine tabi tutulmadan önce dalga formları VCO ya da DDS birimleri içerisinde oluşturulur. Tipik FMCW radar dalga formları üçgen dalga, testere dişi dalga ve sinüzoidal dalga biçimindedir. Kipleme işlemi belirli bir bant genişliği ve kipleme zamanı üzerinden istenilen menzil-hız çözünürlüğüne göre belirlenir. Sinüzoidal dalga formunda sürekli zamanlı ölçüm yapan bir radar için hız ölçümünün daha kritik olduğu söylenebilirken, testere dişi tarama yapan bir radar için ise menzil ölçümünün daha kritik olduğu söylenebilir. Üçgen dalga formunda ise hedefe ait menzil ve hız bilgisi aynı anda ölçülebilir. Bu çalışmada çoklu hedefler için hız ve menzil ölçüm özelliğine sahip dalga formu olan üçgen dalga tarama formuna daha detaylı yer verilmiştir, bu bölümde sinüzoidal ve testere dişi frekans taraması yapan radarların özelliklerine ise kısaca yer verilecektir.

### 2.1. Sinüzoidal Frekans Kiplemeli Sürekli Dalga Radarları

Bu frekans kipleme yönteminde taşıyıcı sinyali sinüsdür. Bilgi işaretinin genliğine göre sinüs taşıyıcı işaretinin frekansı değişir.



**Şekil 2.1** Sinüzoidal frekans kiplemeli radarlarda gönderme-alma sinyallerin izlediği yolların kabaca gösterimi



Şekil 2.1'de verilen radar anteni ile  $f_o$  çalışma frekansında,  $T_m$  kipleme zamanında,  $\Delta F$  frekans sapması ile gönderilecek ve alınacak sinüzoidal frekans kiplenmiş elektromanyetik (EM) dalga formu oluşturulur.

Kipleme  $f_m$  frekansı olmak üzere radar anteni ile gönderilen sinüzoidal kiplenmiş sinyalin zamana göre eşitlik ifadesini yazılırsa [Mahafza, 2000];

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_o t + \beta \sin(2\pi f_m t)) \quad (2. 1)$$

biçimindedir. Burada gönderilen sinyal faz bilgisi  $\Phi_i(t)$ ,  $\beta$  kipleme indeksi olmak üzere;

$$\Phi_i(t) = \int_0^t (2\pi f_o + 2\pi \Delta F \cos(2\pi f_m t)) . dt ,$$

$$\Phi_i(t) = 2\pi f_o t + 2\pi \Delta F \int_0^t \cos(2\pi f_m t) . dt$$

$$\Phi_i(t) = 2\pi f_o t + \beta \sin(2\pi f_m t), \quad \beta = \frac{\Delta F}{f_m} \quad (2. 2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Faz bilgisine göre gönderilen sinyalin frekans formu ise

$$\frac{\partial \Phi_i(t)}{\partial t} = 2\pi (f_o + f_i(t))$$

$$f_i(t) = \Delta F \cos(2\pi f_m t), \quad f_m = \frac{1}{T_m} \quad (2. 3)$$

biçimindedir.

Bu noktada bant genişliği Carson kuralına göre belirlenmelidir [Mahafza, 2000].

$$Bant \_ Genişliği \approx 2(\beta + 1) f_m$$

Radar anteni ile alınan  $t_d$  zaman gecikmeli ve  $f_d$  Doppler kaymalı EM yansıma sinyali Eşitlik (2.4)'de verilmiştir.

$$s_r(t) = B \cos(2\pi(f_o + f_d)t - 2\pi f_o t_d + \beta \sin(2\pi f_m(t - t_d))) \quad (2.4)$$

Alınan sinyal faz bilgisi  $\Phi_r(t)$ ;

$$\Phi_r(t) = 2\pi f_o(t - t_d) + 2\pi f_d t + 2\pi \Delta F \int_0^t \cos(2\pi f_m(t - t_d)) . dt ,$$

$$\Phi_t(t) = 2\pi(f_o + f_d)t - 2\pi f_o t_d + \beta \sin(2\pi f_m(t - t_d)) \quad (2.5)$$

biçimindedir. Faz bilgisine göre alınan sinyalin frekans formu ise;

$$f_r(t) = \Delta F \cos(2\pi f_m(t - t_d)) + f_d$$

şeklinde ifade edilebilir.

$R_o$ : Hedefin  $t_o$  anındaki radara olan uzaklığı

$V_t$ : Hedefin hızı

$c$ : Işık hızı

$\Theta$ : Hedefin radar almacı görüş alanı içerisinde yakaladığı görüş açısı olmak üzere radara yaklaşan hedef hareketinin yarattığı Doppler frekans kayması ve zaman gecikmesi ise;

$$f_d \cong \frac{2V_t}{c} \cos \Theta \quad (2.6)$$

$$t_d = \frac{2R(t)}{c}, \quad R(t) = R_o - V_t . t ,$$

$$t_d = \frac{2R_o - 2V_t . t}{c} = \frac{2R_o}{c} - \frac{2V_t . t}{c} \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.1) ve Eşitlik (2.4) elde edilen ideal gönderme ve alma sinyalleri (integral sabitleri yok sayılmıştır) radar almacı girişinde çarpıcıda çarpılır, daha sonra alçak geçiren süzgeç ile yüksek frekans bileşenleri bastırılır. Zaman gecikmesi  $t_d$  ifadesi Eşitlik (2.7)'de türetilmiştir. Bu ifade, alçak geçiren süzgeç çıkışında elde edilecek analitik denklemde yerine konulduğunda oluşacak sinyal Eşitlik (2.8)'de verilmiştir [Skolnik, 1981].

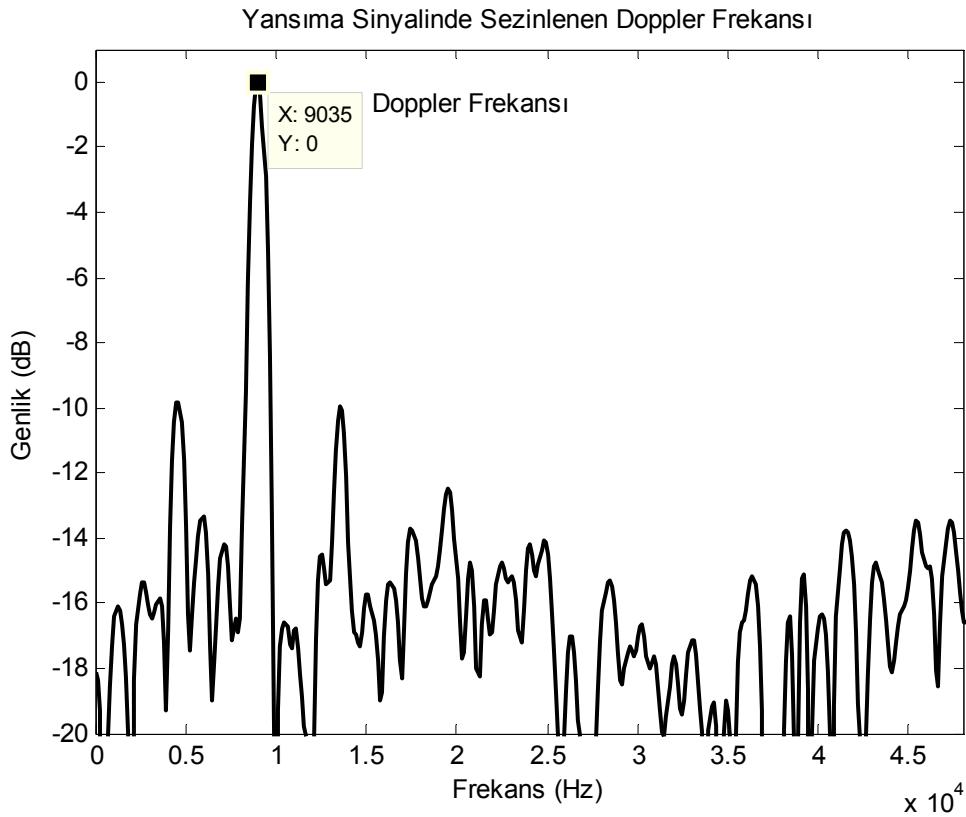
$$\begin{aligned}
s_m(t) &= s_i(t) \cdot s_r(t) \\
&= \exp(j(2\pi f_d t + D \cos(\frac{2\pi}{T_m}(t - \frac{R}{c})))) \\
&\cong J_0(D) \exp(j(2\pi f_d t)) \\
&\quad + J_1(D) \exp(j(2\pi f_d t) + 2\pi f_m(t - \frac{R}{c})) \\
&\quad + J_1(D) \exp(j(2\pi f_d t) - 2\pi f_m(t - \frac{R}{c})) \\
&\quad + \text{diğer Bessel fonksiyon terimleri}
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$$D = \frac{2\Delta F}{f_m} \sin(2\pi f_m \frac{R}{c})$$

Eşitlik (2.8)'de görüldüğü gibi Bessel fonksiyonlarının etkisinde sinyal izge görüntüsünde çok sayıda  $f_m$  frekans aralıklı dizilmiş tepe sinyaller belirecektir. Burada gerekli olan sinyaller tek boyutta HFD alındığında  $f_d$  Doppler merkez frekansı ve onun alt üst yan bantlarında oluşacak faz bilgilerini içeren tepe sinyalleridir. Çünkü merkezi izgesel hattın genliği  $J_0(\beta)$  olup,  $\beta \leq 1$  iken bu noktada Bessel fonksiyonu en büyük değerini alacaktır, ayrıca  $n$ . izgesel hattın genliği de azalan biçimde  $J_n(\beta)$  olacaktır. Kipleme indeksi  $\beta$  küçük değerler aldığı anda sadece  $J_0(\beta)$  ve  $J_1(\beta)$  genlikleri önemli olacaktır.

Sonuçları ideal bir benzetim çalışması üzerinde gözlemleyelim:

Radar çalışma merkez frekansı  $f_o = 3$  GHz, kipleme frekansı  $f_m = 9$  kHz, kipleme frekans sapması  $\Delta F = 2$  kHz, kipleme indeksi  $\beta = 0.23$ , örnekleme frekansı  $f_s = 1$  MHz ve örnekleme sayısı  $N_s = 4096$  nokta olarak seçilmiştir. Hedefin radara  $t_o$  anındaki uzaklığı  $R_o = 15$  km ve radara ivmesiz olarak yaklaşma hızı  $V_t = 450$  m/s'dir. Benzetim çalışması ile elde edilmiş sonuç Şekil 2.2'de verilmiştir. Şekil 2.2, Eşitlik (2.8)'de elde edilmiş sinyallerin alçak geçiren süzgeç sonrası frekans eksenindeki görüntüsüdür.



**Şekil 2.2** Almaç içerisinde elde edilen yansıma sinyalinde hedef hız bilgisi için Doppler frekansının, hedef menzili için yan kulakçıklar arasındaki faz farkının algılandığı ideal durum grafiği

Benzetim çalışması gözlem sonuçlarına göre hedef hızı;

$$V_t = \frac{\lambda f_d}{2} = \frac{c f_d}{2 f_o} = \frac{3 \times 10^8 \times 9035}{2 \times 3 \times 10^9} \approx 451.8 \text{ m/s} \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

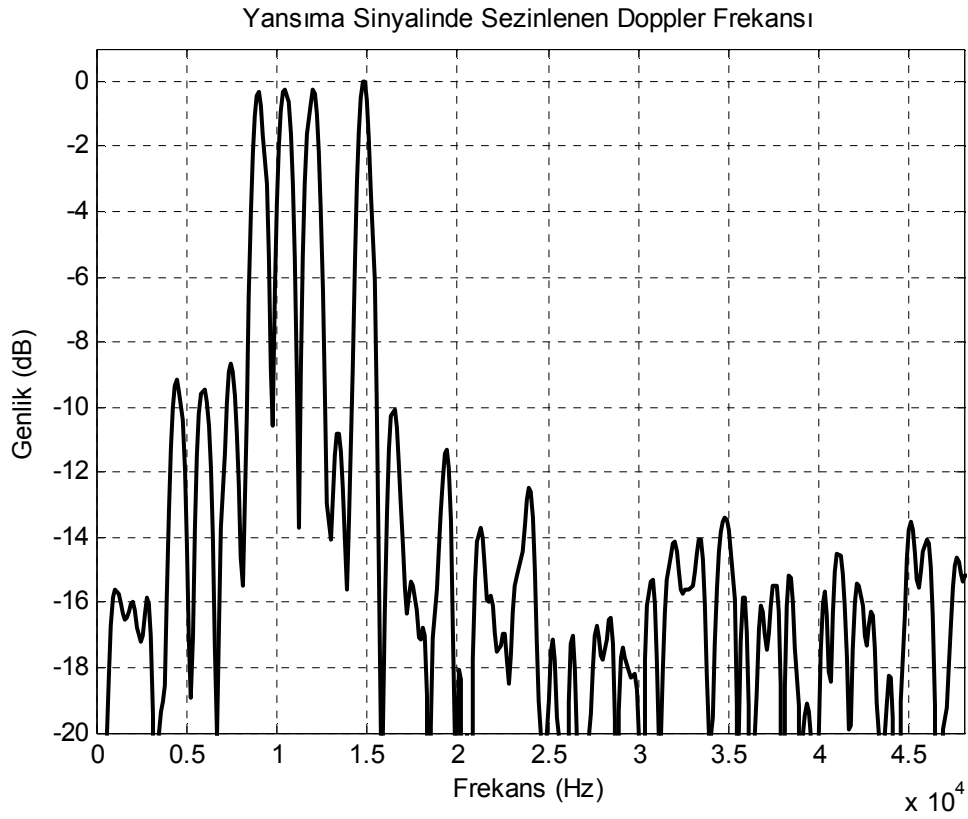
Almaç içerisinde faz bilgisini ölçebilmek için faz dedektörleri kullanılır. Faz tepe noktaları arasında görülen fark Eşitlik (2.9) verilmiştir. Bu bilgiye göre hedef menzili ölçülebilir.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi f_m R_t}{2c} \quad (2.9)$$

HFD genlik spektrumundan faydalanarak hedef hız bilgisi bulunurken, HFD faz izgesini kullanarak da Eşitlik (2.9) ile hedefin radar almancına olan menzili ölçülebilir. Ancak bu radarların gürültü altında faz bilgisinin çok etkilendiği düşünüldüğünde menzil ölçümü için uygun olmadığı bilinmektedir. Gürültülü ortamlarda faz bilgisinin sönümlenmesi hedef menzil bilgisinin ölçümünü engelleyecektir.

Yukarıda seçilmiş radar parametreleri değiştirilmeden ortamda birden fazla hedefin var olduğu bir senaryo yaratılarak hedeflerin frekans spektrumundaki görüntüleri gözlenmek istenmiştir. Bu senaryoda, hedef menzil ve hız bilgileri sırası ile  $R_1 = 8 \text{ km}$ ,  $V_1 = 600 \text{ m/s}$ ,  $R_2 = 12 \text{ km}$ ,  $V_2 = 450 \text{ m/s}$ ,  $R_3 = 15 \text{ km}$ ,  $V_3 = 740 \text{ m/s}$ ,  $R_4 = 4.5 \text{ km}$ ,  $V_4 = 523 \text{ m/s}$  biçiminde kabul edilmiştir.

Ortamda yukarıda verilmiş farklı hız ve menzillere sahip dört hedefin olduğu varsayılarak radar almancı ile hedeflerin hareketlerinden kaynaklı oluşan Doppler kaymalarını algılanarak Şekil 2.3 elde edilmiştir. Bu şekilde görüldüğü dört hedef için dört yüksek genlikli tepe sinyalleri algılanmıştır.



**Şekil 2.3** Radar almacında aynı anda farklı menzillerde ve farklı hızlarda hareketli dört hedefin varlığının algılanması

Bu tepe noktalarına karşılık gelen frekans değerleri sırası ile  $f_{d_1} = 11.966$  kHz,  $f_{d_2} = 9.035$  kHz,  $f_{d_3} = 14.774$  kHz,  $f_{d_4} = 10.501$  kHz olarak ölçülmüştür. Elde edilen Doppler kayması frekanslarına göre her bir hedefe ait hız değeri

$$V_n = \frac{\lambda f_{d_n}}{2} = \frac{c f_{d_n}}{2 f_o} \text{ eşitliği kullanılarak sırasıyla;}$$

$$V_1 = \frac{3 \times 10^8 \times (11966)}{2 \times 3 \times 10^9} \approx 598.3 \text{ m/s}, \quad V_2 = \frac{3 \times 10^8 \times (9035)}{2 \times 3 \times 10^9} \approx 451.8 \text{ m/s}$$

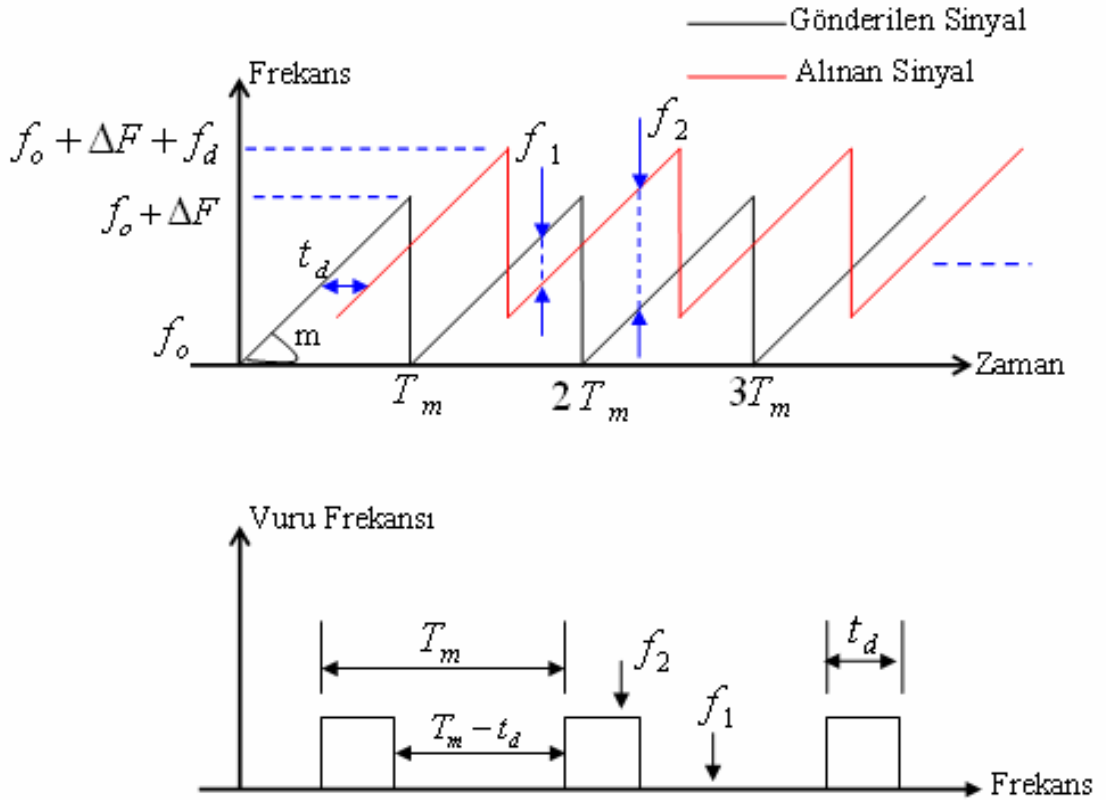
$$V_3 = \frac{3 \times 10^8 \times (14774)}{2 \times 3 \times 10^9} \approx 738.7 \text{ m/s}, \quad V_4 = \frac{3 \times 10^8 \times (10501)}{2 \times 3 \times 10^9} \approx 525 \text{ m/s}$$

olarak ölçülmüştür.

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi çoklu hedeflerin var olduğu durumlarda hedef hız bilgisi kolaylıkla ölçülürken; faz bilgisi içerisinde hedeflere ait menzil bilgisini çıkarmak mümkün olmayacaktır. Polis radarları gibi yüksek hassasiyette hız ölçümünün önemli olduğu uygulamalarda sinüzoidal dalga formu ile kipleme yapılmış gönderme sinyali içeren gönderme birimleri kullanılabilir.

## 2.2. Testere Dişi Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları

Testere dişi dalga formu, belirli bir kipleme periyodunda istenilen zaman boyunca sürekli olarak sadece yükselen kenardan oluşturulur. Tipik testere dişi tarama formu Şekil 2.4'de verilmiştir.



**Şekil 2.4** Testere dişi gönderilen ve alınan sinyallerin doğrusal frekans dalga formu ve gönderilen sinyal ile alınan sinyaller arasında frekans farkı (vuru frekansı)

Radar anteni ile  $f_0$  çalışma frekansında,  $T_m$  kipleme zamanında ve  $\Delta F$  bant genişliğinde gönderilecek ve alınacak olan genel testere dişi frekans kiplmeli EM dalga formunun analitik ifadeleri aşağıda verilmiştir.

Gönderilen sinyal eğimi  $m$

$$m = \frac{\Delta F}{T_m} = \Delta F \cdot f_m \quad (2. 10)$$

ve fazı  $\phi(t)$  olsun. Buna göre gönderilen sinyalin analitik eşitliği  $0 < t < T_m$  zaman aralığında tek bir tarama için;

$$s_t(t) = \cos(2\pi f_o t + 2\pi m \frac{t^2}{2}) \quad (2. 11)$$

biçimindedir.

Radardan uzaklaştığı düşünülen bir hedef için  $t_i$  anında çıkarılan menzil eşitlik denklemleri ve zaman gecikme değeri Eşitlik (2.15)'de verilmiştir.

$$R(t) = R_o + V_t t \quad \Rightarrow \quad t_d = \frac{2R(t)}{c}, \quad t_d = \frac{2R_o}{c} + \frac{2V_t t_i}{c} = t_o + \frac{2V_t t_i}{c} \quad (2. 12)$$

$t_d < t < T_m + t_d$  zaman aralığında alınan sinyalin analitik eşitliği;

$$s_r(t) = A s_t(t - t_d) = A \cos(\omega_o(t - t_d) + \pi m(t - t_d)^2) \quad (2. 13)$$

Eşitlik (2.12) elde edilen gecikme zaman ifadesi Eşitlik (2.13) yerine konulduğunda ilk darbe faz ifadesi  $\phi_l(t = t_i)$ ;



$$\begin{aligned} \phi_1(t_i) = & [-2\pi f_o t_o + \pi m t_o^2] + 2\pi \left[ -2 \frac{V_t}{c} f_o + m t_o \frac{2V_t}{c} - m t_o \right] t_i \\ & - 2\pi m \frac{2V_t}{c} \left( 1 - \frac{V_t}{c} \right) t_i^2 \end{aligned} \quad (2.14)$$

biçiminde ifade edilebilir.

Eşitlik (2.14)'de elde edilmiş ifadede sabit terim, zamana bağlı terim ve zamanın karesi ile orantılı terim olmak üzere üç terim yer almaktadır [Barrick, Oceanic, 1973]. Zamanın karesi ile orantılı terim  $0 < t_i < T_m$  zaman aralığında  $\frac{V_t}{c} \ll 1$  koşulu ile her zaman oldukça küçük değerlere sahip olacağı için ihmal edilebilir. Diğer terimlere göre alınan sinyalin faz ifadesi olan Eşitlik (2.14)'ü tekrar yazarsak Eşitlik (2.15) elde edilir.

$$\phi_1(t_i) \cong \phi_o - 2\pi \left[ -\frac{2V_t}{c} f_o + m t_o \right] t_i, \quad \phi_o = 2\pi f_o t_o \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.15)'de görüldüğü gibi  $m t_o \gg \frac{2V_t}{c} f_o$  olduğundan tek bir tarama durumunda hedef menzili tepe noktası içerisine gizlenmiş hedef hız bilgisini içeren Doppler frekansını ayırt etmek mümkün olmayacaktır. Bu nedenle tarama sayısı, başka bir deyişle hedefin radar tarafından aydınlatılma zamanı artırılmalıdır. Bu durumda elde edilecek alma sinyalini tekrar oluşturursak;

$N$  tarama yapıldığı durumda ölçüm zaman aralığı  $0 < t_i < N T_m$  olup, zaman gecikmesi  $t_d$  :

$$t_d = \frac{2R_o}{c} + \frac{2V_t n t_i}{c} = t_o + \frac{2V_t n t_i}{c} \quad \text{olacaktır. Alınan sinyal faz ifadesi } n \text{ .tarama için}$$

ise;

$$\begin{aligned}
\phi_m(t_i) &= -w_o t_o - w_o \frac{2V_t}{c} t_i - w_o w_o \frac{2V_t}{c} nT_m + \pi m [t_o + \frac{2V_t}{c} (nT_m + t_i)]^2 \\
&\quad - 2\pi m [t_o + \frac{2V_t}{c} (nT_m + t_i)] \\
&\cong \phi_o - 2\pi f_o \frac{2V_t}{c} nT_m - 2\pi [\frac{2V_t}{c} f_o + mt_o + \frac{2V_t}{c} n\Delta F] t_i
\end{aligned} \tag{2.16}$$

biçimindedir [Barrick, Oceanic, 1973]. Bu ifadede zamana bağlı terim olan  $\frac{2V_t}{c} f_o + mt_o + \frac{2V_t}{c} n\Delta F$  eşitliği görüldüğü gibi hedefe ait menzil ve hız bilgisini içermektedir. Ayrıca,  $N$  adet tarama ile vuru frekansı yanında Doppler frekansının etkisi artırılmıştır. Bu sayede Doppler frekansının etkisi sinyal spektrumunda daha belirgin hale gelecektir.

Testere dişli dalga formunda sinyaller sadece yükselen kenar boyunca tarandığından, hedefe ait menzil ve hız bilgisinin aynı anda çıkarılması için ekstra sinyal işleme işlemi gerektirecektir. Bu nedenle tek boyutta HFD alınması teorik olarak hedefin hareketinden dolayı oluşacak Doppler frekans etkisinin sezinlenmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Ancak tarama sayısının artırılması ile Doppler etkisi belirgin hale getirilebilir. Tarama sayısı ( $N$ ) değişiminin etkisi Eşitlik (2.17)'de verilmiştir [Barrick, Oceanic, 1973].

$$f_{beat_n}(t) = \frac{2\Delta F}{cT_m} R_t - \frac{2V_t}{c} f_o + \frac{2V_t}{c} n\Delta F \quad n = 2, 3, 4, \dots, N \tag{2.17}$$

Eşitlik (2.17)'de küçük  $N$  değerleri için

$$\begin{aligned}
f_{beat}(t) &= \frac{2\Delta F}{cT_m} R_t - \frac{2V_t}{c} f_o \\
\frac{2\Delta F}{cT_m} R_t &\gg \frac{2V_t}{c} f_o,
\end{aligned} \tag{2.18}$$

$$f_{beat}(t) \approx \frac{2\Delta F}{cT_m} R_t \quad (2.19)$$

ifadesi elde edilebilir.

Eşitlik (2.18)'de verildiği gibi sadece bir denklem vardır ve bu denklem içerisinde hem hedef hız bilgisi hem de menzil bilgisi yer almaktadır. Ayrıca, büyüklük olarak hedefin menzil etkisinde oluşacak vuru frekans değeri, hız etkisinde oluşacak Doppler frekans değerinden oldukça fazla olacaktır. Bu yaklaşıma göre hedef vuru frekansı ifadesi Eşitlik (2.19)'da verildiği gibi alınabilir.

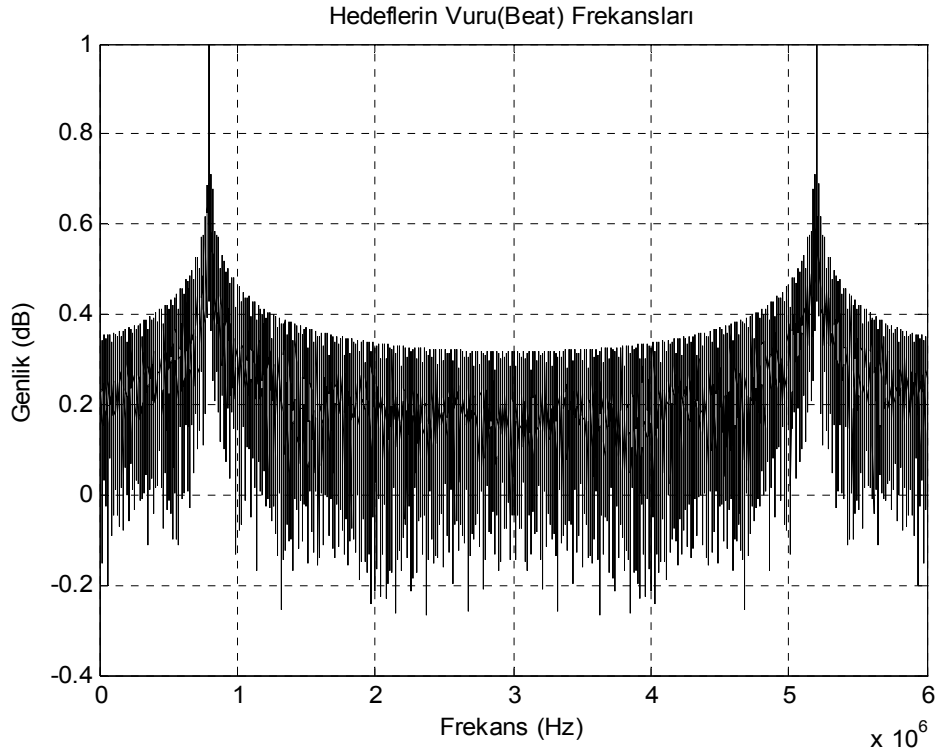
Testere dışı frekans kiplenmeli radar için elde edilen yukarıdaki analitik eşitliklerin sonuçlarını grafiksel olarak gözlemlenmek üzere bir benzetim modeli oluşturulmuştur. Senaryoya göre radar alması tarafından fark edilen  $R_1 = 4000$  m,  $V_1 = 0$  m/s,  $R_2 = 4000$  m,  $V_2 = 300$  m/s ve  $R_3 = 4000$  m,  $V_3 = 600$  m/s aynı menzil ve farklı hız verilerine sahip üç hedefin var olduğu kabul edilmiştir.

Benzetim için kullanılmış radar parametreleri ise Çizelge 2.1'de verilmiştir. Ayrıca, ölçümler gürültüsüz ideal ortamda tarama yapıldığında ve belirli bir hıza sahip hedeflerin radara doğru sıfır derece sapma ile sabit hızlı hareket yaparak yaklaştığı varsayılmıştır.

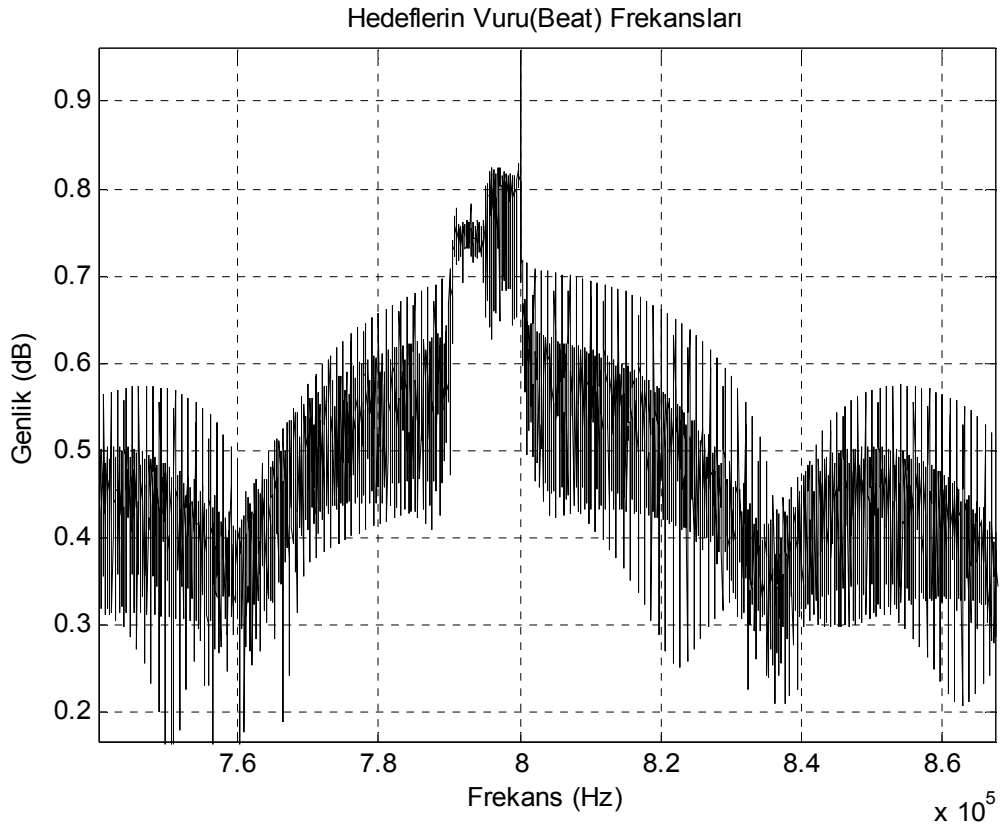
**Çizelge 2.1** Testere Dişı Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları benzetim parametreleri

<b>Genel Tasarım Parametreleri</b>	<b>Açıklama</b>
$f_o = 3$ GHz	Radar Çalışma Frekansı
$T_m = 1.0$ ms	Frekans Kipleme Periyodu
$R_{\max} = 15$ km	Maksimum Ölçülebilen Menzil
$\Delta R = 5$ metre	Menzil Ölçüm Çözünürlüğü
$V_{\max} = 5000$ km/saat	Maksimum Ölçülebilen Hız Limiti
$\Delta V = 0.5$ km/saat	Maksimum Hız Ölçüm Çözünürlüğü
$\Delta F = 30$ MHz	Tarama Bant Genişliği
$f_s = 6$ MHz	ADC Örnekleme Frekansı
$N_s = 8192$	ADC Örnekleme Sayısı
$N = 2 - 100$	Testere Dişı Tarama Sayısı

Bu benzetim çalışması boyunca hedeflerin hızlarını grafiklerde sezinleyebilmek için iki hareketli hedef ile referans kabul edilen durağan bir hedefin var olduğu senaryo oluşturulmuştur. Bu sayede sıfır hıza sahip referans hedefe göre tarama boyunca harcanan zaman diliminde; hıza sahip hedeflerin menzillerindeki değişim algılanmak istenmiştir. Tek boyutta alınan HFD sonuçlarına göre hedeflerin frekans eksenindeki görünümü Şekil 2.5'de ve onun yaklaştırılmış görüntüsü olan Şekil 2.6'da verildiği gibidir.

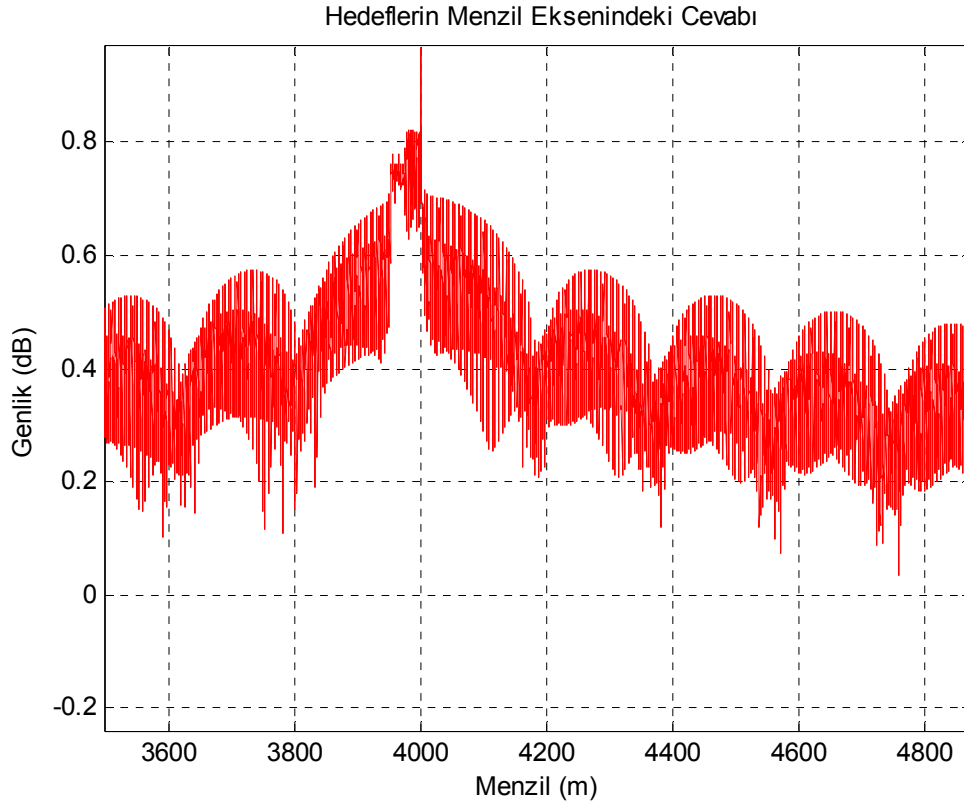


**Şekil 2.5** Aynı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarının HFD sonuçları ( $N = 40$ )



**Şekil 2.6** Aynı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarının frekans ekseninde daha açık gözlenebilmesi için **Şekil 2.5**'nin yaklaştırılmış durumu

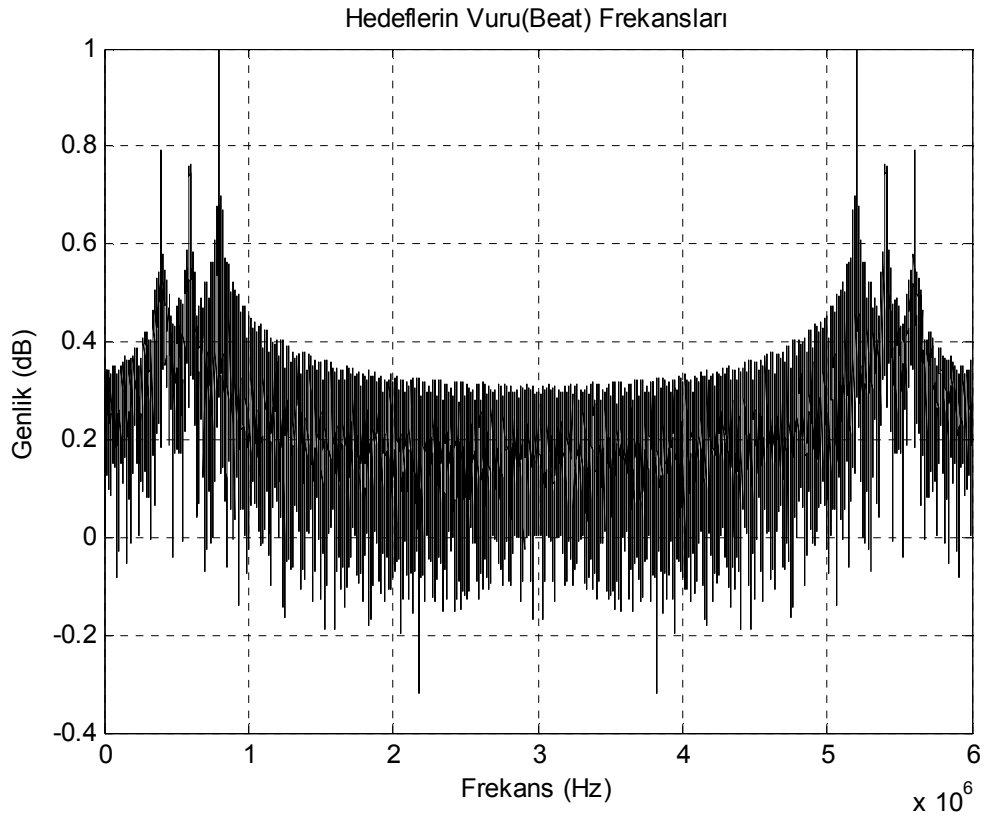
Eşitlik (2.19)'da kabul edilen varsayıma göre Şekil 2.6'da gözlemlenen vuru frekanslarına karşılık gelen hedef menzil bilgisi grafiği Şekil 2.7 çizdirilmiştir.



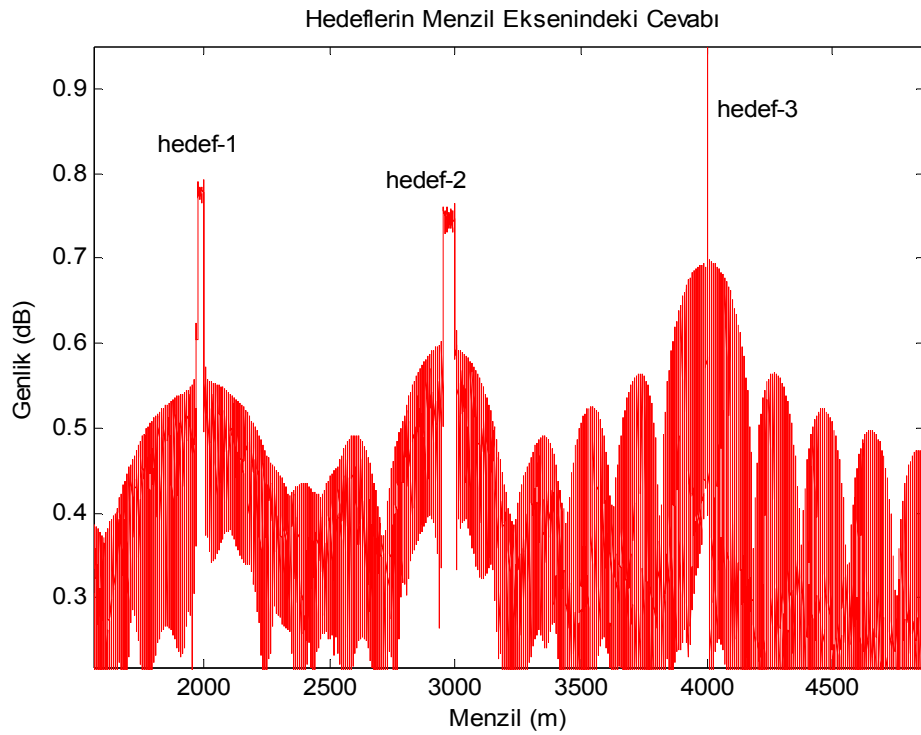
**Şekil 2.7** Aynı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarına karşılık gelen tarama boyunca hareketli hedeflerin menzillerinin değişiminin görülmesi

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi 1ms zaman kipleme periyodu diliminde  $N = 40$  adet tarama yapıldığında sıfırdan farklı hıza sahip hedeflerin bu zaman dilimindeki değişimleri algılanmıştır. Ancak, Şekil 2.7'ye bakılarak hedef sayısı hakkında bir bilgiye net olarak erişilemez. Dolayısıyla aynı menzilde yer alan hedeflerin sayısına tek boyutta HFD alarak karar vermek mümkün değildir.

Benzetim çalışması, Çizelge 2.1'de verilmiş radar parametreleri üzerinden  $R_1 = 4000$  m,  $V_1 = 0$  m/s,  $R_2 = 2000$  m,  $V_2 = 300$  m/s ve  $R_3 = 3000$  m,  $V_3 = 600$  m/s menzil ve hız bilgilerine sahip üç hedefin algılandığı durum için tekrar edilmiştir.



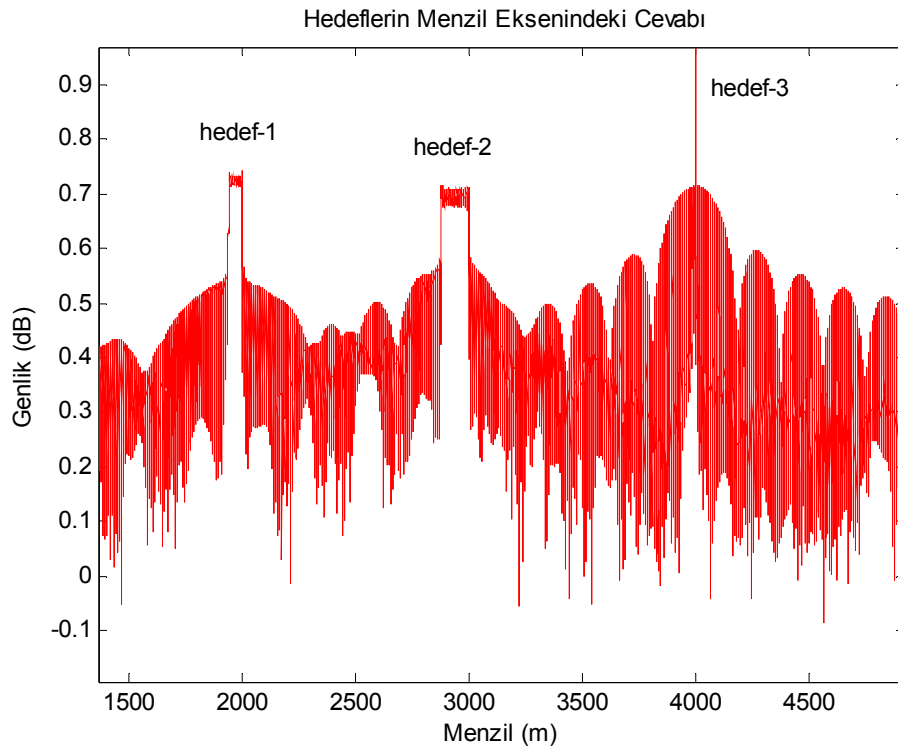
**Şekil 2.8** Farklı menzillerdeki üç hedef için elde edilen vuru frekanslarının HFD sonuçları ( $N = 40$ )



**Şekil 2.9** Farklı menzillerde yer alan üç hedef için elde edilen vuru frekanslarına karşılık gelen hedef menzil bilgilerinin gözlenmesi ( $N = 40$ )

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi farklı menzillerdeki hedefler için hedef sayısı kadar vuru frekansı oluşacaktır. Ancak bu benzetimde, Şekil 2.9’da verildiği gibi 4 km konumlu referans hedefe göre diğer hedeflerin tepe noktalarının frekans eksenindeki yayılımlarından hareketle sadece Doppler kaymasının olduğunu sezilenebilir. Hatta yayılımı daha fazla olan hedefin diğer hedefe göre daha büyük bir hıza sahip olduğu bilgisi de söylenebilir. Ancak, hedeflerin hızlarını net olarak tespit etmek için bu noktaya kadar yapılan işlemler yeterli olmamaktadır.

Testere dişi taramada, Eşitlik (2.17)’de ifade edilmiş denklemdeki  $N$  tarama sayısının Doppler etkisinin sezinlenmesinde oldukça önemli bir yeri vardır. Bu etkiyi görebilmek için aynı benzetim çalışması sadece tarama sayısı artırılarak tekrar edilmiştir. Şekil 2.10 elde edilen hedef menzil bilgisi, Eşitlik (2.19)’da verilmiş varsayım kabul edilerek çizdirilmiştir.



**Şekil 2.10** Farklı menzillerde yer alan üç hedef için elde edilen vuru frekanslarına karşılık gelen hedef menzil bilgilerinin gözlenmesi ( $N = 100$ )

Şekil 2.10’da gözlemlendiği gibi tarama sayısı artırıldığında referans hedefe göre belirli bir hızdaki hedeflerin tepe noktalarının frekans eksenindeki yayılımı da artarak genişlemiştir. Eğer hedefler sıfırdan farklı bir hıza sahipse  $N$  tane tarama



zamanı boyunca bir yerden bir yere hareket edecektir. Hızlarının olması nedeni ile artık başlangıç tarama anında ölçülecek noktadan sürekli olarak kayacaktır. Frekans eksenindeki bu yayılma aslında Doppler etkisinin bizzat kendisidir. Çünkü

$N$  tarama parametresi, hedeflerin Doppler çözünürlüğündeki  $(\Delta f = \frac{1}{NT_m})$

iyileştirme ile daha net olarak görülmesini sağlayacaktır. Fakat tek boyutta HFD alındığında; hız-menzil gibi iki bilinmeyen varken; Eşitlik (2.17) ile verilmiş tek bir denklem olacaktır. Bu nedenle tek boyutta alınacak HFD dönüşümü ancak hedeflerin hızlarının sezinlenebileceğini gösterirken, hız bilgilerinin net olarak belirlenmesine yetmeyecektir [Barrick, Oceanic, 1973]. Yukarıda verilen benzetim çalışmasında sadece tek boyutta HFD alınarak kullanılacak testere dişi kipleme frekansına sahip radarların menzil ölçme yeteneklerinin olduğu görülmektedir. Testere dişli FMCW radarlar hassas menzil ölçümü gerektiren uygulamalarda daha sık kullanım alanına sahiptir. Tarama şekli oluşturulurken doğrusallığın sağlanmasının zorluğu dışında tasarımı karmaşık olmayan sistemlerden bir tanesidir.

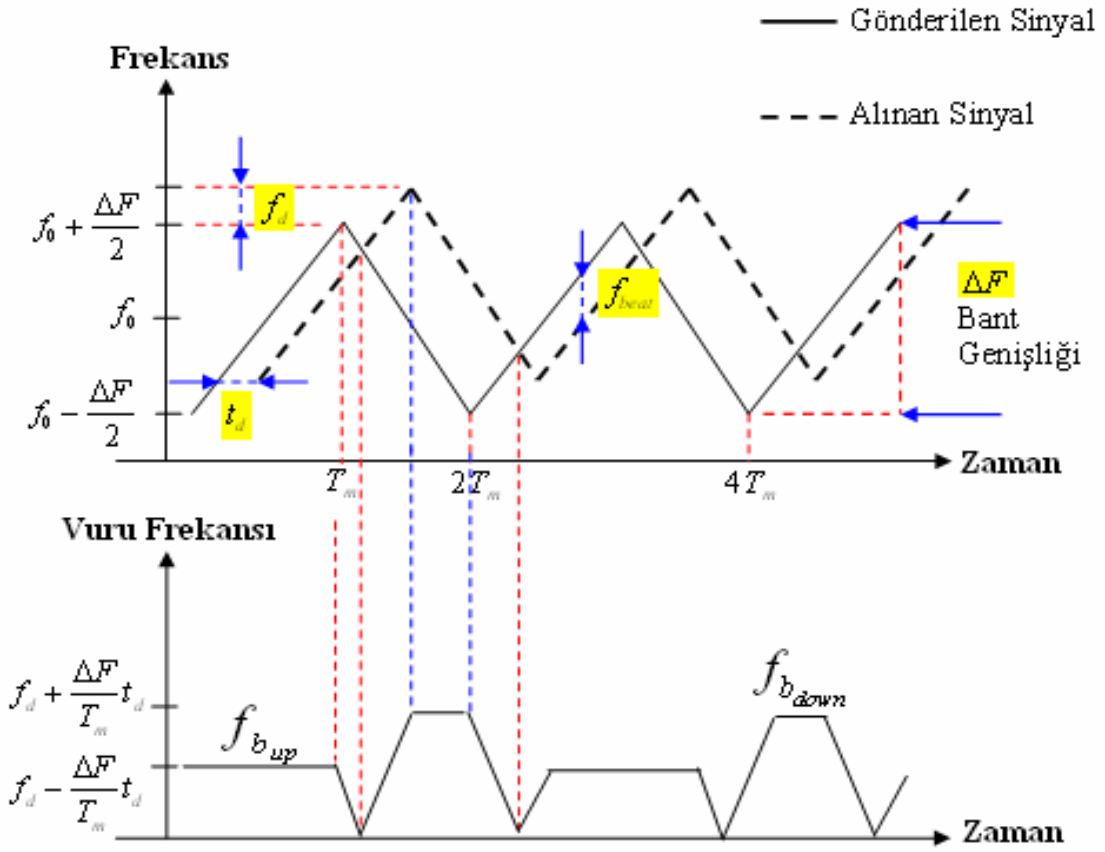
Görüldüğü gibi sinüzoidal kiplemeli tarama ile çalışan radarlar, hedeflerin menzil ve hız bilgileri ölçülebilir. Ancak, gürültülü ortamlarda faz bilgisinin tamamının bozulmaya maruz kalma ihtimalinin yüksek olması nedeni ile sinüzoidal taramalı radarlar, daha çok hassas hız ölçümü gerektiren uygulamalarda sürekli zamanlı olarak birden fazla hedefin hızlarını kolaylıkla ölçebilirler.

Testere dişi kiplemeli tarama ile çalışan radarlar da hedeflere ait hız ve menzil bilgileri ölçebilirler. Ancak, hedeflerin frekans izge grafiğindeki yüksek vuru frekansı etkisinde kaybolan Doppler frekansını sezebilmek için tek boyutta HFD yeterli olmamaktadır [Barrick, Oceanic, 1973]. Ancak, yüksek hassasiyette menzil ölçümü gerektiren ve hız bilgisinin önemsiz olduğu uygulamalarda daha sık tercih edilirler.

### 2.3. Üçgen Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları

Frekans kiplmeli sürekli dalga radarları, uygulama alanı itibari ile genellikle Doppler değişiminden hız ölçümü yapar ya da yansıyan sinyal ile gönderilen sinyal arasındaki zaman farkından faydalanarak menzil ölçümü yapar. Ancak hem menzil hem de hız ölçümü yapan sürekli dalga radarları da mevcuttur. Bu tür FMCW radarlar diğerlerine göre daha özel işlemler gerektirir. Menzil bilgisinin yanında hız bilgisinin de çıkarılması için daha ayrıntılı sinyal işleme alt yapısının oluşturulması gerekir. Çünkü Doppler frekans değeri vuru frekansı yanında oldukça küçük kalmaktadır. Bu küçük değişimi algılamak için detaylı bir sinyal analiz gerekecektir. FMCW radarlarda, hız ve menzil bilgisinin birlikte ölçülmesi için gönderilen dalga formunun frekans eğrisi oldukça önemlidir. Önceki bölümde sinüzoidal frekans kipleme tarama tipi ile testere dişi frekans kipleme tarama tipine değinilmiştir. Bu bölümde ise üçgen dalga frekans kipleme tarama formu detaylı olarak analiz edilecektir. Tezde bu aşamadan sonra yapılan radar benzetim çalışmalarının tamamında doğrusal frekans kiplmeli üçgen dalga formu temel alınmıştır.

Hedeflerin hız ve menzil bilgilerini tek boyutta HFD ile ölçmek isteyen sistemlerde genellikle üçgen dalga tarama tipi tercih edilir. Doğrusal olarak oluşturulması zor olmayan bu dalga formunda, radar almacın yükseliş ve düşüş için aldığı ölçümleri ayırt etme yeteneğine sahip olması gerekir. Yükseliş taramasında dönen sinyaller ile düşüş taramasında dönen sinyaller ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Tipik üçgen dalga tarama tipinde gönderilen ve alınan sinyallerin yer aldığı, gönderme ve alma sinyalleri arasında oluşacak frekans farklarının gösterildiği grafik Şekil 2.11'de verilmiştir.



**Şekil 2.11** Üçgen tipi gönderilen ve alınan sinyallerin doğrusal frekans dalga formu, gönderilen sinyal alınan sinyaller arasında frekans farkı (vuru frekansı)

Bu bölümde aşağıdaki semboller

- $f_o$  : Taşıyıcı frekansı (Radar çalışma frekansı)
- $\Delta F$  (B) : Kipleme bant genişliği
- $T_m$  : Kipleme periyodu
- $f_d$  : Doppler frekansı
- $t_d$  : Gecikme zamanı

olarak isimlendirilmiştir.

Radar göndermeci üzerinden sürekli zamanlı gönderilecek üçgen dalga formunun yükselen ve alçalan frekans eğrilerinin analitik ifadesi aşağıda verilmiştir.

- $f_{t_{up}}$  : Gönderilen sinyalin yükselen frekans eğrisi (yükselen kenar)
- $f_{t_{down}}$  : Gönderilen sinyalin düşen frekans eğrisi (düşen kenar)

$$f_{t_{up}} = f_o - \frac{\Delta F}{2} + \frac{\Delta F}{T_m} t \quad \leftarrow 0 < t < T_m \quad (2.20)$$

$$f_{t_{down}} = f_o + \frac{\Delta F}{2} - \frac{\Delta F}{T_m} t \quad \leftarrow T_m < t < 2T_m$$

$$w = 2\pi f = \frac{\partial \phi}{\partial t}, \quad (2.21)$$

$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f(t) dt$$

Eşitlik (2.20) ve (2.21) kullanıldığında yükselen ve düşen frekans eğrilerinin faz ifadeleri Eşitlik (2.22) gibi olacaktır [Pace, 2009].

$$\phi_{t_{up}} = 2\pi \left[ \left( f_o - \frac{\Delta F}{2} \right) t + \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right] \quad \leftarrow 0 < t < T_m \quad (2.22)$$

$$\phi_{t_{down}} = 2\pi \left[ \left( f_o + \frac{\Delta F}{2} \right) t - \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right] \quad \leftarrow T_m < t < 2T_m$$

Eşitlik (2.22)'ye göre radar gönderme biriminden gönderilen üçgen frekans kiplmeli sinyallerin en genel analitik denklemleri de Eşitlik (2.23)'de tanımlanmıştır [Pace, 2009].

$$s_{t_{up}}(t) = a_o \cos \left( 2\pi \left[ \left( f_o - \frac{\Delta F}{2} \right) t + \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right] \right) \quad \rightarrow 0 < t < T_m \quad (2.23)$$

$$s_{t_{down}}(t) = a_o \cos \left( 2\pi \left[ \left( f_o + \frac{\Delta F}{2} \right) t - \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right] \right) \quad \rightarrow T_m < t < 2T_m$$

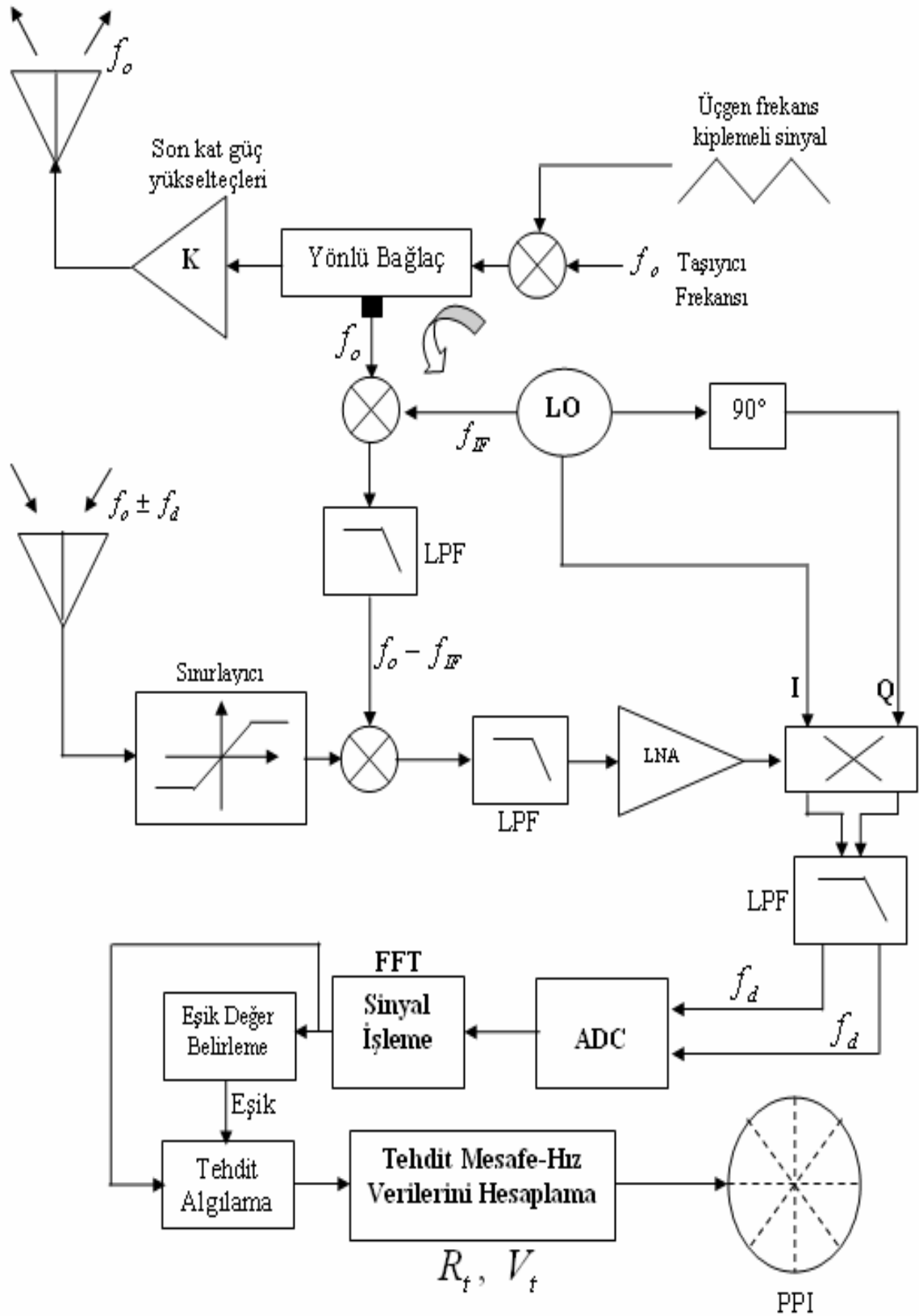
$a_o$  : Gönderilen sinyalin genlik değeri

Bir tarama periyodunda gönderilen dalga formu analitik olarak Eşitlik (2.24)'de verildiği gibi ifade edilebilir. Bu eşitlikte;  $0 < t_1 < T_m$  ve  $T_m < t_2 < 2T_m$  olarak alınmıştır.

$$s_t(t) = s_{t_{up}}(t_1) + s_{t_{down}}(t_2)$$

$$s_t(t) = a_o \cos\left(2\pi \left[ \left( f_o - \frac{\Delta F}{2} \right) t_1 + \frac{\Delta F}{2T_m} t_1^2 \right] \right) + a_o \cos\left(2\pi \left[ \left( f_o + \frac{\Delta F}{2} \right) t_2 - \frac{\Delta F}{2T_m} t_2^2 \right] \right) \quad (2.24)$$

Eşitlik (2.24)'de tanımlanmış sinyal, güç yükseltici ile kuvvetlendirilip gönderme anteninden sürekli zamanlı olarak yayınlanır. Hedef varlığında ya da herhangi bir yansıma durumunda, eko sinyalleri radar almacında süzgeçlenip ortam gürültüsü veya karıştırma gürültüleri bastırılarak yükseltilir. Son olarak sinyal işleme ünitesinde değerlendirilmeye alınır. Hedef tespiti durumunda, kullanıcı ara yüz ekranında konumsal olarak işaretlenir. Kabaca, temel FMCW radar alma-gönderme yapısı Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 FMCW radar sistemi genel blok diyagramı

Hareketli bir hedefin olduğu düşünülerek hareketin yaratmış olduğu Doppler frekansı etkisinde kalan denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

Gönderilen ve alınan sinyaller arasındaki genel ilişki Eşitlik (2.25)'de verildiği gibidir.

$$s_r(t) = \frac{b_o}{a_o} s_t(t - t_d) \quad \rightarrow \quad t_d < t < T_m \quad (2.25)$$

$b_o$  : Alınan Sinyalin Genlik Değeri

$t_d$  zaman gecikme ifadesinin karşılığı daha önce Eşitlik (2.7)'de tanımlanmıştır.

$f_d$  dönen bir sinyaldeki Doppler kayması olmak üzere; bir tarama periyodunda radar almacı ile yakalanan dalga formu analitik olarak aşağıda türetilmiştir.

$$\begin{aligned} f_{r_{up}}(t') &= f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2} + \frac{\Delta F}{2T_m} t' \quad \leftarrow \quad t_d < t' < T_m \\ f_{r_{down}}(t') &= f_o + f_d + \frac{\Delta F}{2} - \frac{\Delta F}{2T_m} t' \quad \leftarrow \quad T_m < t' < 2T_m - t_d \end{aligned} \quad (2.26)$$

Alınan sinyallerin anlık faz bilgileri,

$$\begin{aligned} \phi_{r_{up}}(t') &= (f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2})t' + \frac{\Delta F}{T_m} t'^2, \quad t' = (t - t_d); \\ \phi_{r_{up}}(t) &= (f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2})(t - t_d) + \frac{\Delta F}{T_m} (t - t_d)^2 \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \phi_{r_{down}}(t') &= (f_o + f_d + \frac{\Delta F}{2})t' - \frac{\Delta F}{T_m} t'^2, \quad t' = (t - t_d); \\ \phi_{r_{down}}(t) &= (f_o + f_d + \frac{\Delta F}{2})(t - t_d) - \frac{\Delta F}{T_m} (t - t_d)^2 \end{aligned} \quad (2.28)$$

biçimindedir.

Radar almacı tarafından alınan sinyaller ise, Eşitlik (2.27) ve Eşitlik (2.28) ifadelerinde çıkarılan faz bilgilerinden faydalanarak oluşturulmuş Eşitlik (2.29)'a göre tanımlanabilir. Alınan sinyallerde hesaplama kolaylığı sağlayabilmek için, bu denklemlerin düşen ve alçalan frekans bölümleri birbirlerinden ayrı tanımlanmıştır.

$t_d < t < T_m$  aralığında yükselen kenar geri yansıma sinyali;

$$s_{r_{up}}(t) = b_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d) + \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d)^2 \right]\right),$$

$T_m < t < 2T_m - t_d$  aralığında düşen kenar geri yansıma sinyali de (2. 29)

$$s_{r_{down}}(t) = b_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d + \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d) - \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d)^2 \right]\right)$$

olarak ifade edilebilir.

Öncelikle radar alma anteni ile alınan yansıma sinyalleri, IF banda indirilmiş referans gönderme sinyali ile giriş katında çarpıcıda çarpılır ve daha sonra alçak geçiren süzgeç ile üst frekans bileşenleri bastırılıp sinyal seviyesi düşük gürültülü yükselteçler ile yükseltilir. Alçak geçiren süzgecin bastırma frekansı, tasarlanan radarın maksimum ölçebileceği vuru frekansına göre belirlenir. Alçak geçiren süzgeç çıkışında elde edilen yükselen ve alçalan sinyallere ait analitik denklemler aşağıda çıkarılmıştır.

$$s_{m_p}(t) = s_{t_p}(t) s_{r_p}(t)$$

$$s_{m_p}(t) = a_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o - \frac{\Delta F}{2}\right)t + \frac{\Delta F}{2T_m}t^2 \right]\right) \cdot b_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d) + \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d)^2 \right]\right) \quad (2. 30)$$

Alçak geçiren süzgeç çıkışında elde edilecek yükseliş vuru frekans sinyalleri  $t_d < t < T_m$  zaman aralığında



$$s_{beat_{up}}(t) = LPF(s_{m_{up}}(t)),$$

$$s_{beat_{up}}(t) = c_o \cos\left(2\pi \left[ \left( f_d - \frac{\Delta F}{T_m} t_d \right) t - \left( f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2} \right) t_d + \frac{\Delta F}{2T_m} t_d^2 \right] \right), \quad (2.31)$$

$$s_{beat_{up}}(t) = c_o \cos(\phi_{beat_{up}}(t)),$$

$$f_{beat_{up}} = \frac{\partial \phi_{beat_{up}}(t)}{\partial t},$$

$$f_{beat_{up}} = f_d - \frac{\Delta F}{T_m} t_d, \quad (2.32)$$

olarak yazılabilir.

Alçak geçiren süzgeç çıkışında  $T_m < t < 2T_m - t_d$  zaman aralığında elde edilecek düşüş vuru frekans sinyalleri;

$$s_{beat_{down}}(t) = LPF(s_{m_{down}}(t))$$

$$s_{beat_{down}}(t) = c_o \cos\left(2\pi \left[ \left( f_d + \frac{\Delta F}{T_m} t_d \right) t - \left( f_o + f_d + \frac{\Delta F}{2} \right) t_d - \frac{\Delta F}{2T_m} t_d^2 \right] \right) \quad (2.33)$$

$$s_{beat_{down}}(t) = c_o \cos(\phi_{beat_{down}}(t))$$

$$f_{beat_{down}} = \frac{\partial \phi_{beat_{down}}(t)}{\partial t}$$

$$f_{beat_{down}} = f_d + \frac{\Delta F}{T_m} t_d \quad (2.34)$$

biçimindedir. Buradan Eşitlik (2.32) ve (2.34) kullanılarak Eşitlik (2.36) türetilir. Eşitlik (2.36) kullanılarak hedef menzili ve hedef hızı hesaplanır.

$$f_{beat}(t) = \frac{1}{2} \cdot [f_{beat_{up}}(t) + f_{beat_{down}}(t)] \quad (2.35)$$

$$f_d(t) = \frac{1}{2} \cdot [f_{beat_{down}}(t) - f_{beat_{up}}(t)]$$

$$R_t = \frac{T_m \cdot c}{4\Delta F} [f_{beat_{up}}(t) + f_{beat_{down}}(t)] \quad (2.36)$$

$$V_t = \frac{c}{4f_o} [f_{beat_{down}}(t) - f_{beat_{up}}(t)]$$

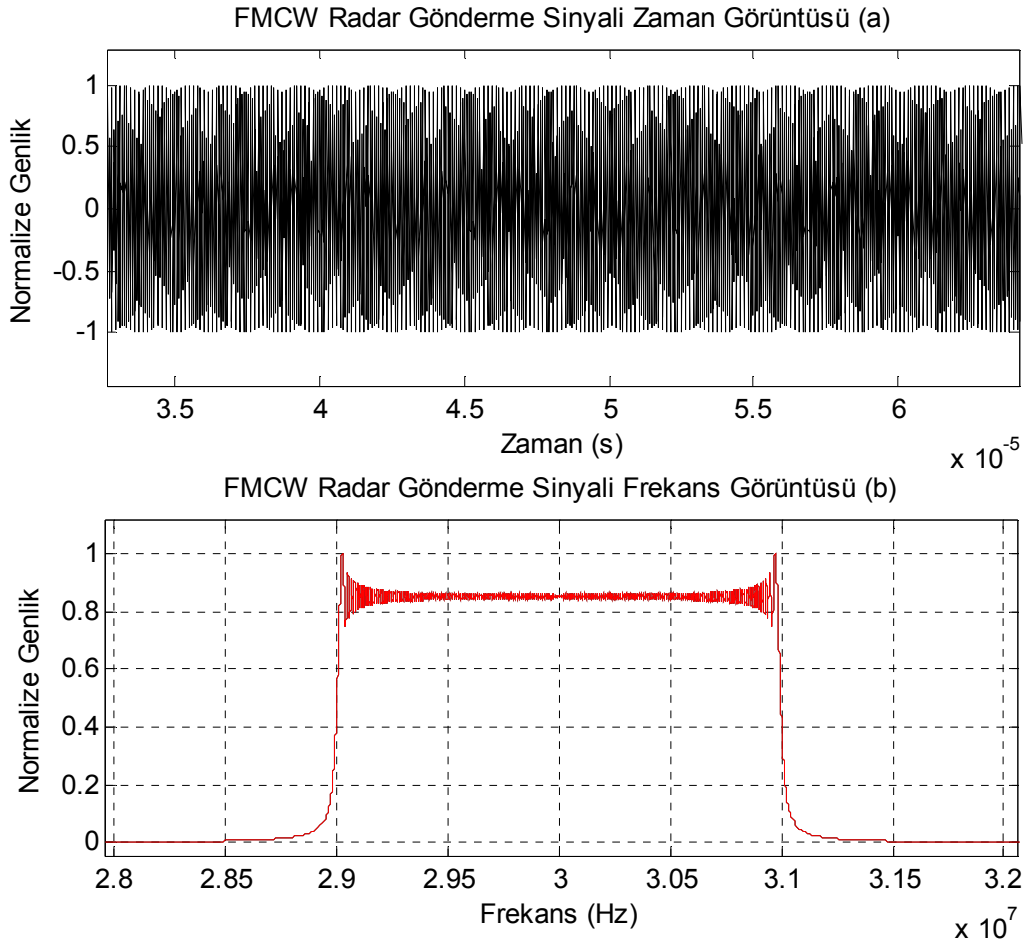
$R_t$  : Hedefin radara olan uzaklığı (Menzil Bilgisi)

$V_t$  : Hedefin radara yaklaşma hızı

Eşitlik (2.31) ve Eşitlik (2.33)'de tipik radar alma sinyallerinin ideal ortamda alçak geçiren süzgeç çıkışıdaki analog sinyalleri verilmiştir. Basit bir benzetim çalışması oluşturularak sırası ile Eşitlik (2.26)'da gönderme sinyallerini, (2.31)'de alma sinyallerini ve Eşitlik (2.32)'de de almaç içerisinden karıştırıcı çıkışında elde edilmiş vuru sinyallerini zaman ve frekans ekseninde gözlemlenmiştir. İdeal ortamda tek bir tehdidin var olduğu düşünülerek seçilmiş benzetim radarı parametreleri **Çizelge 2.2**'de verilmiştir.

**Çizelge 2.2** FMCW radarlar almaç girişi yükselen-düşen kenar sinyallerini frekans ekseninde benzetim yapmak için kullanılan parametreler

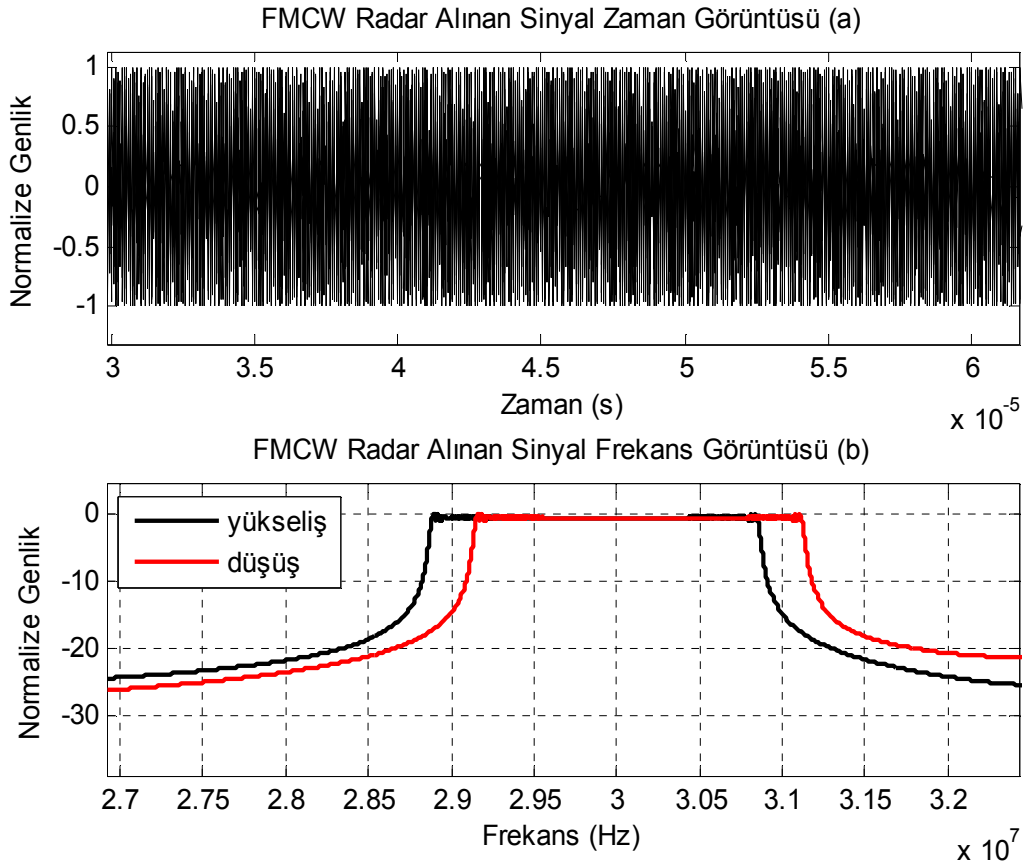
Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$f_o = 30$ MHz	Radar Çalışma Frekansı
$T_m = 2$ ms	Frekans Kipleme Periyodu
$\Delta F = 2$ MHz	Tarama Bant Genişliği
$f_s = 65$ MHz	ADC Örnekleme Frekansı
$R_t = 20$ km, $V_t = 2500$ m/s	Hedef Menzil ve Hız Bilgisi



**Şekil 2.13** FMCW üçgen tarama için elde edilmiş gönderme sinyallerinin a-) zaman b-) frekans eksenindeki görüntüleri

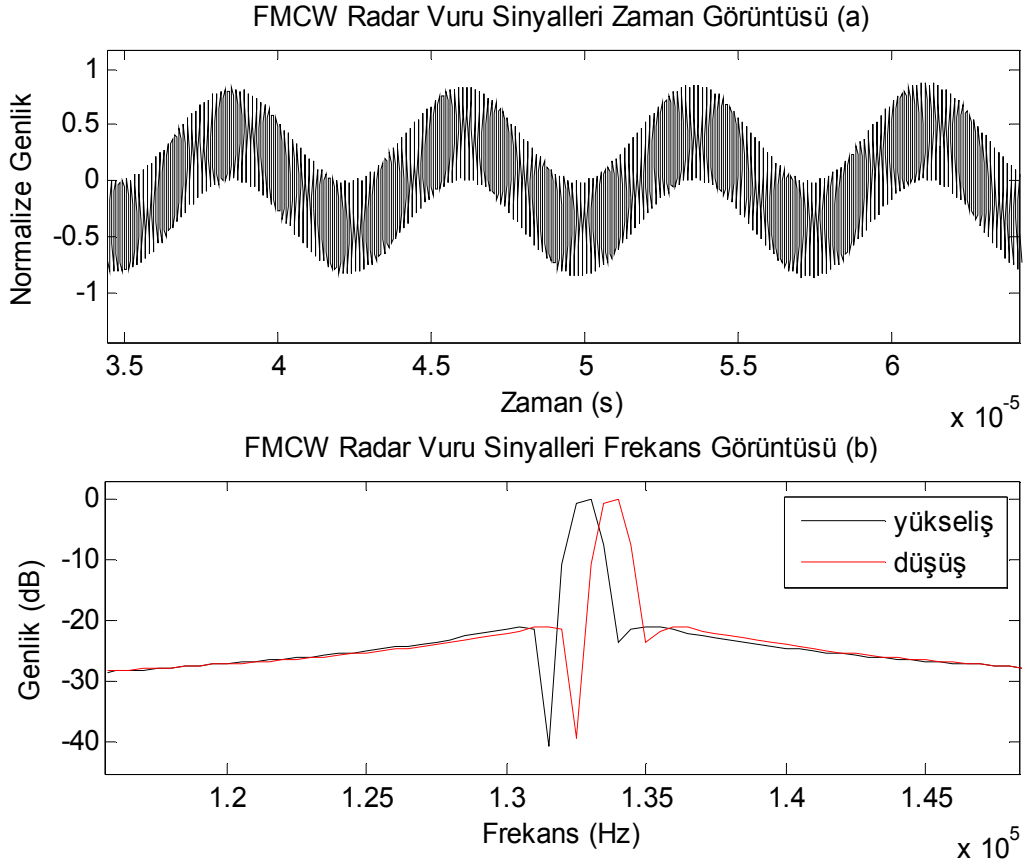
Eşitlik (2.24)'de verilen gönderme sinyalinin zaman ve frekans eksenindeki görüntüleri Şekil 2.13'de verilmiştir. Gönderme sinyali merkez frekans çevresinde tarama bant genişliği ( $\Delta F$ ) kadar yayılım göstermektedir.

Eşitlik (2.29)'da tanımlı hedef yansıma sinyallerinin zaman ve frekans eksenindeki görüntüleri Şekil 2.14'de verilmiştir.



**Şekil 2.14** FMCW üçgen tarama için elde edilmiş yansıma (alma) sinyallerinin a-) zaman b-) frekans eksenindeki görüntüleri

Eşitlik (2.31) ve Eşitlik (2.33) ifadeleri, alınan sinyallerin almaç içerisinde çarpıcıdan geçirilip LPF sonrası elde edilmiştir. Şekil 2.15’de görüldüğü gibi, LPF çıkışında alınan sinyaller hedef menzil ve hız bilgisini barındıran alt ve üst vuru frekans çiftinden oluşmaktadır.



**Şekil 2.15** FMCW üçgen tarama için elde edilmiş çarpıcı ve LPF sonrası sinyallerin a-) zaman b-) frekans eksenindeki görüntüleri (alt-üst vuru frekans çifti)

Şekil 2.15'e göre elde edilmiş alt ve üst vuru frekansları  $f_{beat_{up}} = 0.133$  MHz ve  $f_{beat_{down}} = 0.134$  MHz olarak ölçülmüştür. Eşitlik (2.36) kullanılarak hedef menzil ve hız değerleri ise

$$R_t = \frac{T_m c}{4\Delta F} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) = \frac{(2 \times 10^{-3})(3 \times 10^8)}{4 \times 2 \times 10^6} (0.133 \times 10^6 + 0.134 \times 10^6)_t = 20.25 \text{ km}$$

$$V_t = \frac{c}{4f_o} (f_{beat_{down}} - f_{beat_{up}}) = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 30 \times 10^6} (0.134 \times 10^6 - 0.133 \times 10^6) = 2500 \text{ m/s}$$

olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi ölçüm sonuçları benzetim çalışması başlangıcında girilmiş değerlere oldukça yakın çıkmıştır.

Hareketli hedefler için türetilen bu analitik ifadeler durağan hedefler için de kolaylıkla tanımlanabilir. Eşitlik (2.29)'da alma sinyalinde  $f_d$  yerine sıfır konulduğunda durağan bir hedef için benzer ifadeler oluşturulabilir. Eşitlik (2.29) ve Eşitlik (2.23)'de gönderilen ve alınan sinyallerin birbirleri ile çarpılıp süzgeçlenmesinden sonra bu iki sinyalin frekansları arasındaki fark ortaya çıkmaktadır. Bu fark yükselen ve alçalan kenar için Şekil 2.11'de daha önceden gösterilmiştir ve analitik olarak da bu grafik doğrulanmış olur. Elde edilen yükselen ve alçalan frekans farklarını kullanarak hedefe ait hız ve menzil bilgileri Eşitlik (2.36)'dan rahatlıkla ölçülebilir duruma getirilmiştir. Hedef hakkında bu bilgilere ulaşabilmek için veriler sayısal sinyal işleme ünitesine alınır. Frekans bölgesinde sinyallerin HFD sonuçları gözlemlenir. Üçgen tarama formunun yapısı gereği yükselen kenar için bir tepe sinyali üretilirken, alçalan kenar için de ayrı bir tepe sinyali üretilmiş olacaktır. Bir hedefin yükselen-alçalan taramaya göre ölçülmüş tepe noktalarını Eşitlik (2.36)'da kullanarak hedef hız-menzil bilgisi elde edilebilir [Pace, 2009].

Bölüm-2'de, FMCW radarların tasarım parametreleri ve üçgen frekans taramalı gönderme dalga formu üzerinde menzil-Doppler çözünürlüğüne etki eden etmenlerin araştırılacağı bir sonraki bölüme giriş yapılmak istenmiştir. Bu bölümde ayrıca, diğer FMCW dalga formların analitik ifadeleri türetilmiş, gönderme ve alma sinyallerinin zaman frekans eksenindeki görüntüleri gözlemlenmiştir. Hedefe ait menzil ve hız bilgilerini aynı anda ölçebilmek için üçgen tarama tipinde frekans kiplemesi yapılmıştır ve tek bir hedef varlığında oluşturulmuş benzetim çalışması ile üçgen frekans kiplemeli radar yeteneği doğrulanmıştır.

Bu bölümde, hassas hız ölçümlerinde FMCW sinüzoidal dalga formunun kullanılabilmesi, hassas menzil ölçümleri için ise FMCW testere dişi dalga formu kullanımının uygun olabileceği benzetim çalışmaları ile görülmüştür. Ancak, hedef menzil ve hız bilgisini eş anlı olarak ölçebilmek için üçgen dalga tipinde tarama yapılması gerektiğine karar verilmiştir. Dolayısıyla Bölüm-3 ve sonraki bölümlerde yapılan çalışmalar boyunca üçgen frekans tarama tipi kullanılmıştır.

### 3. FMCW RADARLARDA TASARIM PARAMETRELERİ

Bu bölüm, FMCW üçgen tarama yapan radarlarda menzil-Doppler çözünürlüğü ve FMCW radarlarda tasarım parametrelerinin detaylı olarak belirlenmesi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Hareketli hedeflerin Doppler kayması ile doğru orantılı hız bilgisinin, dalganın hedefe çarpıp tekrar radara dönene kadar geçen zamanla orantılı menzil bilgisinin, doğru ve hassas olarak tahmin edilememesi en önemli problemlerden bir tanesidir.

Menzil ve Doppler frekansına bağlı olarak ölçülen hedef hız bilgisinin yüksek çözünürlükte ölçümlerle doğru ölçülmesi, özellikle izleme radarları ile kısa menzil radarlarda çok önemlidir. Ölçümlerde elde edilen hata oranı eğer geri beslemeli olarak hata ölçerlerden geçirilip telafi (compensation) edilmez ise hata oranları birikimli olarak artacaktır. Bunun paralelinde hedefe ait hız ve menzil bilgisi kısmen de olsa yanlış yorumlanabilir. Bu gibi durumlarda radar tasarımlarına başlamadan önce kestirim yapılacak hedefe ait hız ve menzil çözünürlük bilgisi, gönderilecek kodlanmış sinyal için analiz edilmelidir. Yaygın olarak; sinyallerin belirtilen bu özellikleri Belirsizlik Fonksiyonu (Ambiguity Function, AF) analizleriyle belirlenir. Bir sinyalin belirsizlik fonksiyonu karakteristiği, o dalga formunda yapılacak menzil-Doppler ölçüm çözünürlüklerinin bir göstergesidir. Belirsizlik fonksiyonu analizleri görsel olarak iki boyutta kontur grafikleri, üç boyutta (hız, menzil, genlik-belirsizlik diyagramı), örgü (mesh) grafikleri ve tek boyutta sıfır gecikme kesiminde (zero-delay cut off) Doppler çözünürlüğü, sıfır Doppler kesiminde (zero-Doppler cut off) menzil çözünürlüğü grafikleri üzerinden yorumlanmaktadır [Mahafza, 2000].

Biz tasarımlarımızda üçgen tarama yapan FMCW radarlar üzerinde araştırma yaptığımız için üçgen frekans kiplenmeli sinyallerin hız ve menzil çözünürlüklerinin iyileştirilmesi için gerekli konulara değinilecektir.

### 3.1. Belirsizlik Fonksiyonu

Belirsizlik analizi, sürekli dalga şekillerinin özelliklerini anlayabilmek ve bu dalgaların ölçüm doğruluğu, hedef çözünürlüğü, menzilde oluşabilecek belirsizlikler, oransal hız bilgisi ve çevresel yansıma sinyalleri (clutter) karşısındaki cevabını sorgulamaya yardımcı olur [Levanon, Mozeson, 2004]. Başka bir ifade ile verilen bir dalganın çözünürlük formunun sağlayabileceği belirsizlik fonksiyonu kullanılarak anlaşılabilir.

Radar alıcılarındaki uyumlu süzgeçler hedeften yansıyan sinyal ile gönderilen sinyalin karmaşık eşleniğinin çapraz ilintisini hesaplar. Uyumlu süzgeçler gönderilecek sinyallerin bir kopyası gibidir. Alınan sinyallerin bu kopyaya benzerliklerini araştırır ve bu işlemi yaparken sinyal enerjisinden maksimum seviyede faydalanır. Belirsizlik fonksiyonu da, bu uyumlu almanın sonlu uzunluktaki sinyale tepkisidir. Belirsizlik analizinde almanın, hedeften belirli bir gecikme ile geri dönen sinyale ve belirli bir frekansta gönderilmiş sinyale uyumlu olduğu düşünülür. Bu durumda belirsizlik, almanın uyumlu olduğu sinyalden farklı Doppler kayması ve zaman gecikmesine sahip sinyallere gösterdiği tepki fonksiyonudur.

Verilen  $u(t)$  sinyali için belirsizlik fonksiyonu, iki boyuttaki ilinti fonksiyonun genlik karesi olarak Eşitlik (3.1)'de verildiği gibi tanımlanır [Pace, 2009].

$$AF = |\chi(\tau, \nu)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u^*(t - \tau) \exp(j2\pi\nu t) dt \right|^2 \quad (3.1)$$

Belirsizlik fonksiyonun maksimum değeri, yani tepe genlik değeri  $\tau = 0, \nu = 0$  noktasıdır. Çünkü bu nokta, uyumlu süzgecin eşleştiği sinyale olan tepkisidir. Bu noktada uyumlu süzgeç, sinyalden en yüksek enerjiyi toplar. Diğer noktalar, uyumlu olmayan sinyallere tepki noktalarıdır. Belirsizlik fonksiyonu incelenerek, bir radar sinyalinin menzil çözünürlüğüne ve Doppler kaymasına ne kadar bağışık olduğu ölçülebilir. İdealde belirsizlik fonksiyonu  $\tau = 0, \nu = 0$  noktasında en yüksek değerinde, diğer noktalarda ise sıfır değerinde olmalıdır. Sonlu sinyallerin süresi ile



bant genişliği arasındaki ters orantı yüzünden ideal belirsizlik fonksiyonunu elde etmek imkânsızdır. Sinyalin bir hedefi çözme yetisi, belirsizlik fonksiyonunun ana huzme genişliği ile tahmin edilir. Bu fonksiyonun yan kulakçıkları ise gürültü ortamında yer alan bir ya da birden fazla hedefin çözümlenebilmesini etkiler. Eğer belirsizlik fonksiyonu  $\tau = 0, \nu = 0$  dışındaki noktalarda yüksek değerlere sahipse hedefe dair ölçülen hız ve menzil bilgisinin doğruluğu azalır. Bu durumda radar almacı birden fazla hedefi tek bir hedefmiş gibi algılayıp diğer hedeflerin yüksek etek değerleri arasında sıkışıp kaldığını anlamayabilir. Hedef var olmasına rağmen tek bir genlik değeri gözlemlenir, eşik belirleyici devresinde diğer hedeflere ait olabilecek sinyaller gürültü olarak elenebilir. İdealde, menzil ve Doppler eksenlerinde ana huzme dar ve yüksek genlikli, yan kulakçıklar ise mümkün olduğunca düşük genlikte olmalıdır. Yan kulakçıkların yüksek değerliklerinde hedeflerin ayırt edilmesi zorlaşacaktır. Değişik kodlama tasarımları ile ideale yakın belirsizlik fonksiyonları oluşturulabilir. Kodlama, menzil çözünürlüğü artıran bir yöntemken, Doppler ekseninde çözünürlük sağlayabilmek için radarın HFD işlemcisine giren sinyalin uzunluğu önem kazanır. Hedefin gözlemlenmesinde tarama süresi uzatılarak daha fazla kod periyodunda hedef bilgisi işlemci içerisinde değerlendirilir. Ancak çok iyi bir Doppler çözünürlüğü için tarama bandı süresi uzatılması, hedefin daha fazla aydınlatılıp daha çok bilgi toplanarak işlemci içerisine alınma süresini uzatır. Ayrıca çok fazla datanın ADC üzerinden gelerek işlemci içerisinde değerlendirilmesi için harcanan zaman ve işlem hız gereksinimi de bir handikap yaratacaktır. Sürekli zamanlı sinyallerde dalga kesintiye uğramaksızın devamlı olarak tarama bölgesine gönderildiği için bu sinyallere ait belirsizlik fonksiyonu oluşturulurken periyodik özelliklerinin getirmiş olduğu etki çok önemlidir. Periyodik belirsizlik fonksiyonu,  $T$  periyotlu periyodik bir dalga formu tarafından sürekli zamanlı kiplenmiş sinyale uyumlu almacın vermiş olduğu tepki olarak tanımlanabilir. Referans sinyali, gönderilen sinyalin  $N$  periyot sayısındaki gönderme sinyalinin kopyasından oluşturulur. Eşitlik (3.1)'de tanımlanmış tek periyottaki belirsizlik fonksiyonu  $N$  ve  $T$  değerlerinden oluşturulmuş sinyalin, karmaşık zarfından ve zaman gecikmesinden bağımsız olarak üretilen bir fonksiyon ile genel olgu içerisinde çarpılarak periyodik belirsizlik fonksiyonu oluşturulur. Periyodik belirsizlik fonksiyonu analitik ifadesi Eşitlik (3.2)'de tanımlanmıştır [Pace, 2009].

$$|\chi_N(\tau, \nu)|^2 = |\chi(\tau, \nu)|^2 \left| \frac{\sin(N\pi\nu T)}{N \sin(\pi\nu T)} \right|^2 \quad (3.2)$$

Bu fonksiyona bakılarak  $N$  değerinin menzil ya da Doppler çözünürlüğü üzerinde nasıl bir etki yaptığı basit bir benzetim çalışması ile kolayca açıklanabilir. Benzetimler, belirsizlik fonksiyonun temel özelliklerinden olan sıfır gecikme kesimi Doppler etkisi ve sıfır Doppler kesimi gecikme etkisi olarak tek boyutta tanımlanabilir.

### 3.1.1 Menzil Belirsizlik Fonksiyonu

Hedefe ait menzil çözünürlüğünün etkisini gözlemleyebilmek için periyodik belirsizlik fonksiyonunda Doppler etkisi yok kabul edilir. Buna sıfır Doppler kesimi gecikme etkisi denilebilir. Analitik olarak sinyalin öz-ilinti fonksiyonuna denk gelir [Mahafza, 2000]. Üçgen dalga sinyalinde yükselen ve düşen kenar için belirlenmiş belirsizlik fonksiyonu esas alınarak sıfır Doppler kesim gecikme sinyalini Eşitlik (3.3)'de verildiği gibi yazabiliriz.  $B$  tarama bant genişliği,  $T_m$  kipleme periyodu olmak üzere yükselen ve düşen kenar için belirsizlik fonksiyonları sırası ile

$$|\chi_{up}(\tau, \nu)|^2 = \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T_m}\right) \frac{\sin\left(\pi T_m \left(\frac{B}{T_m} \tau + \nu\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_m}\right)\right)}{\pi T_m \left(\frac{B}{T_m} \tau + \nu\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_m}\right)} \right|^2$$

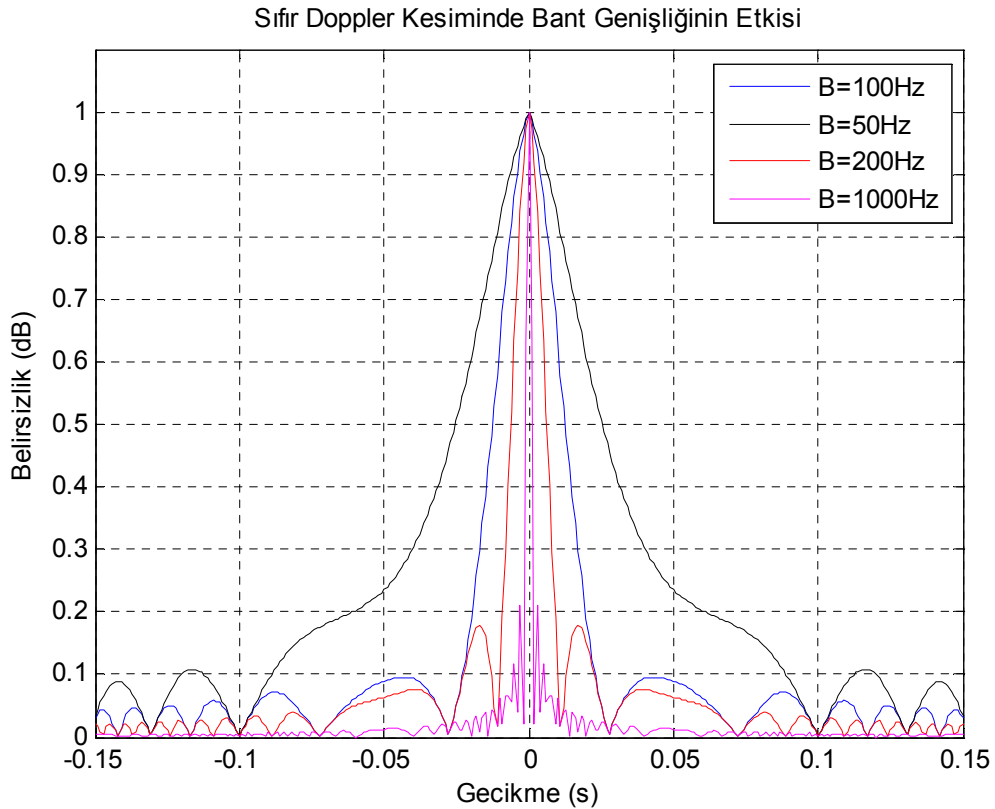
$$|\chi_{down}(\tau, \nu)|^2 = \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T_m}\right) \frac{\sin\left(\pi T_m \left(\frac{B}{T_m} \tau - \nu\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_m}\right)\right)}{\pi T_m \left(\frac{B}{T_m} \tau - \nu\right) \left(1 - \frac{|\tau|}{T_m}\right)} \right|^2$$

biçiminde ifade edilebilir [Mahafza, 2000].

$$|\chi(\tau, \nu = 0)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} u(t)u^*(t - \tau)dt \right|^2 = |R(\tau)|^2 \quad (3.3)$$

Ölçümde menzil çözünürlüğünü artırmak için kipleme frekans bant genişliği artırılabilir. Tarama bant genişliği artırılması ile zaman gecikmesi süresinin menzil üzerindeki etkisi frekans ekseninde kolaylıkla gözlemlenebilir. Tipik bir yükselen kenar belirsizlik fonksiyonu için bant genişliğinin sıfır Doppler kesimi durumunda menzil çözünürlüğü üzerindeki etkisi benzetim yapılmıştır. Bu benzetim çalışmasında kullanılan yükselen kenar için belirsizlik fonksiyonu  $\nu = 0$  iken aşağıdaki gibi ifade edilebilir [Mahafza, 2000].

$$|\chi_{up}(\tau, \nu = 0)|^2 = \left| \left(1 - \frac{|\tau|}{T_m}\right) \frac{\sin(\pi B\tau(1 - \frac{|\tau|}{T_m}))}{\pi B\tau(1 - \frac{|\tau|}{T_m})} \right|^2$$



**Şekil 3.1** Kipleme bant genişliğinin Sıfır Doppler Kesimi durumunda menzil çözünürlüğü üzerindeki etkisinin tanımlı bant genişliklerinde gözlenmesi

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi kipleme bant genişliğinin ( $B$ ) artırılması ile gecikme ekseninde çok daha dar ana huzmeye ve oldukça düşük seviyede yan kulakçıklara sahip sinyaller oluşturulabilir. Kipleme bant genişliğini artırılması, doğrudan menzil çözünürlüğünün iyileşmesine etki eder.

### 3.1.2 Doppler Belirsizlik Fonksiyonu

Hedefe ait Doppler bilgisinin çözünürlük analizi için periyodik belirsizlik fonksiyonunda zaman gecikmesi etkisi yok kabul edilir. Buna sıfır zaman gecikmesi kesimi Doppler etkisi denilebilir. Analitik olarak sinyalin enerjisinin ifade edildiği genlik spektrumuna karşılık gelir [Mahafza, 2000].

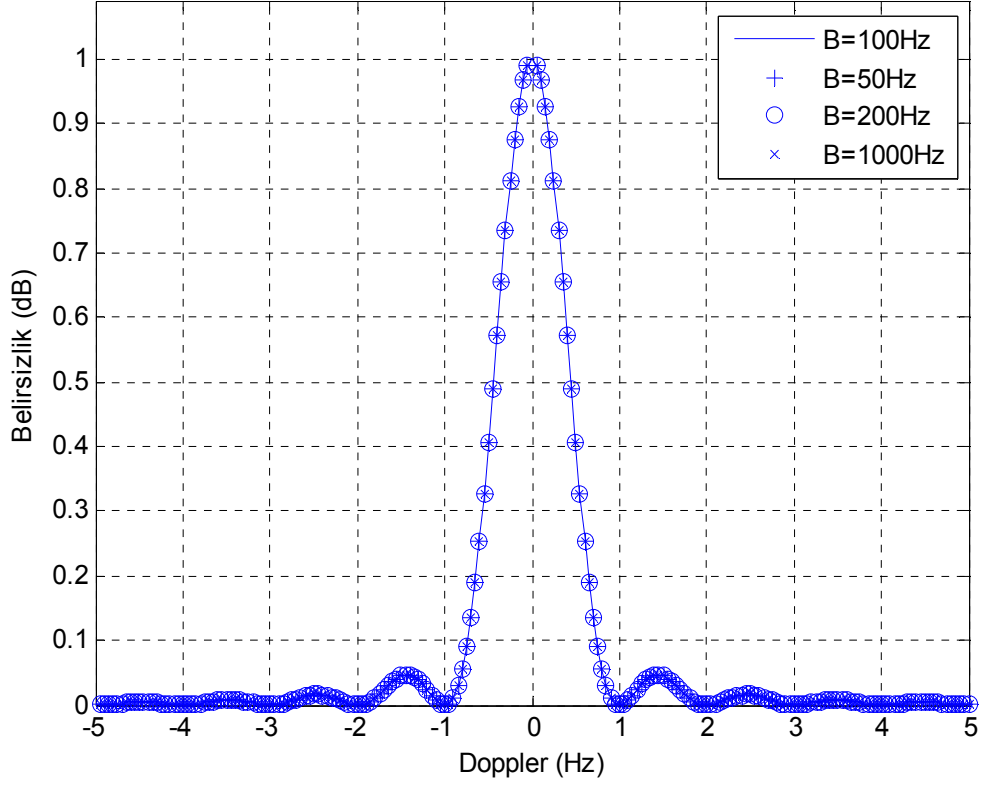
$$|\chi(\tau = 0, \nu)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} |u(t)|^2 e^{j2\pi\nu t} dt \right|^2 \left| \frac{\sin(N\pi\nu T)}{N \sin(\pi\nu T)} \right|^2 \quad (3.4)$$

Yükselen kenar için sıfır zaman gecikmesi kesimi Doppler denklemi  $\tau = 0$  için aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$|\chi_{up}(\tau = 0, \nu)|^2 = \left| \frac{\sin(\pi T_m \nu)}{\pi T_m \nu} \right|^2 \left| \frac{\sin(N\pi\nu T)}{N \sin(\pi\nu T)} \right|^2$$

Ölçümde menzil çözünürlüğünü artırmak için  $N$  adet periyodik sinyal ile tarama sayısı artırılabilir. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere bant genişliği değişimi Doppler çözünürlüğü üzerine etki etmez.

Tarama Bant Genişliğinin Sıfır Gecikme Kesimindeki Etkisi



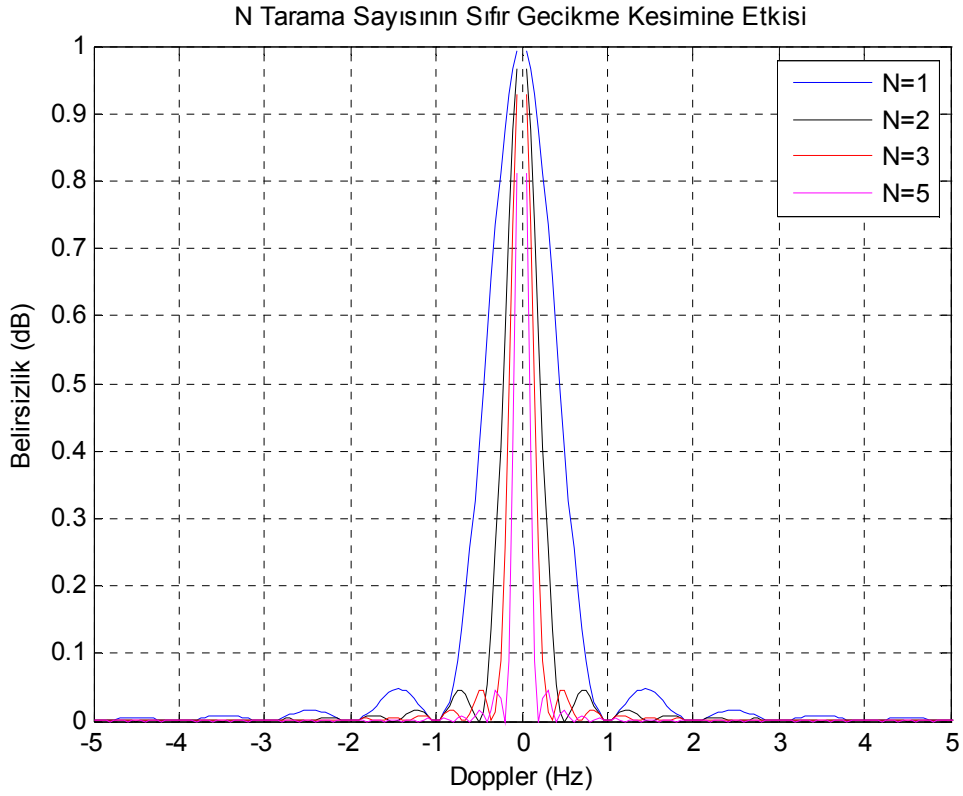
**Şekil 3.2** Kipleme bant genişliğinin Sıfır Gecikme Kesimi durumunda Doppler çözünürlüğü üzerindeki etkisinin tanımlı bant genişliklerinde gözlenmesi

Ancak  $N$  periyodik tekrar sayısı artırılarak Şekil 3.3'de gözlemlendiği gibi daha iyi sonuçlar verecek Doppler çözünürlüğü elde edilebilir.

Büyük  $N$  değerleri için periyodik belirsizlik fonksiyonu bazı noktalar hariç

$(\nu = \frac{N}{T}, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$  sifra sıkıştırılır. Sonsuz  $N$  değeri için Eşitlik (3.4) darbe

katarı halini alır. Büyük  $N$  değerlerinde fonksiyon, net olarak mükemmel periyodik belirsizlik fonksiyonu serisine dönüşür ve evre uyumlu darbe katarını andırır [Pace, 2009].



**Şekil 3.3** Farklı  $N$  periyodik sinyal tekrar sayısının Sıfır Gecikme Kesimi durumunda Doppler çözünürlüğü üzerindeki etkisinin tanımlı tarama sayılarında gözlenmesi

### 3.2. FMCW Radarlarda Tasarım Parametrelerinin Belirlenmesi

FMCW radar tasarımına başlamadan önce radarın özelliklerinin ve ölçüm yeteneklerini belirleyen tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekir. Bir FMCW radara ait kritik tasarım parametreleri

- Radar Çalışma Frekansı ( $f_o$ ),
- Frekans Kipleme Periyodu ( $T_m$ ),
- Ölçülebilecek Maksimum Hedef Hızı ( $V_{\max}$ ),
- Ölçülebilecek Maksimum Hedef Menzili ( $R_{\max}$ ),
- Menzil Çözünürlüğü ( $\Delta R$ ) ve Modülasyon Bant Genişliği ( $\Delta F$ ),
- Hız Çözünürlüğü ( $\Delta V$ ) ve Periyodik Tarama Sayısı ( $N$ ),

- Almaç Sinyal İşleme Parametreleri (Örnekleme Frekans ( $f_s$ ), Örnekleme Sayısı ( $N_s$ )).

olarak sıralanabilir.

Yukarıda maddeler halinde verilen radara ait kritik parametrelerin belirlenmesi tasarım için önemli yer tutar. Bu başlıklar altında radarın genel özelliklerinden diğer alt tanımlar matematiksel olarak çıkartılabilir. Bu bölümde yukarıda verilmiş olan radar tasarım parametreleri üzerinde durulmuştur.

### 3.2.1 Radar Çalışma Frekansının Belirlenmesi

Bir radar tasarımı yapılmadan önce ilk olarak o radarın hangi frekans bandında yayım yapacağı ve yayımları dinleyeceğinin bilinmesi en temel gereksinimdir. Radar çalışma frekansının belirlenmesi, beraberinde pek çok parametrenin belirlenmesinde yardımcı olur. Radar çalışma merkez frekansı  $f_o$  olmak üzere, yayım yapılan sinyallerin dalga boyu ( $\lambda$ ) Eşitlik (3.5)'e göre belirlenir.

$$\lambda = \frac{c}{f_o} \quad (3.5)$$

İdealde radar anten boyu, iletimde minimum kayıp ve en iyi sinyal eşleşmesinin sağlayacak şekilde yarım dalga boyunda ( $\lambda / 2$ ) seçilir. Küçük anten boyutları için yüksek frekanslar (>24 GHz) seçilebilir, ancak bu frekanslarda atmosferik zayıflama artarken uzak menzillere güç iletim zorlaşacaktır, yüksek frekanslarda yağmur, sis gibi hava olayları sinyallerin bozulmasında ciddi bir etken olabilir.

Bunun yanı sıra, yayım yapılacak merkez frekansının diğer kaynaklar tarafından kullanılmaması da bantta karışmayı engellemek amaçlı gerekli kısıtlamalardan bir tanesidir. Kısacası, radar çalışma frekansının seçimi kritik bir nokta olup pek çok etmenin aynı anda düşünülmesini gerektirmektedir.

### 3.2.2 Frekans Kipleme Periyodu

Frekans kipleme periyodu, gönderilen sinyalin yükselen veya düşen frekans eğrileri için geçen zaman olarak tanımlanır. Her  $T_m$  zaman diliminde artan ve azalan doğrusal frekans eğrileri kendini tekrarlar. Kipleme periyodu seçiminde iki kritik nokta vardır;

- Hedef en az bir  $T_m$  zaman dilimine karşılık gelecek menzil kutusu içerisinde kalabilmelidir. Bu zorunluluk Eşitlik (3.6)'da analitik olarak gösterilmiştir [Pace, 2009].

$$T_m < \frac{\Delta R}{V_{t_{\max}}} \quad (3.6)$$

- $T_m$  kipleme periyodu hedefe gönderilen ve geri yansıyan sinyallerin alınması için geçen zaman değerinin ( $t_d$ ) Eşitlik (3.7)'de verildiği gibi en az 5.5 katı değerinde olması gerekir. Bu sayede yüksek hız çözünürlüğü, daha iyi frekans çözünürlüğü ve etkin kullanılmış bant genişliğinde düşük kayıpta güç gönderimi sağlanmış olur.

$$t_{d_{\max}} = \frac{2R_{\max}}{c} \Rightarrow T_m = Kt_{d_{\max}} ; K \geq 5.5$$
$$T_m = Kt_{d_{\max}} < \frac{\Delta R}{V_{t_{\max}}} \quad (3.7)$$

Hedef menzili ile vuru frekansı arasındaki ilişkiden faydalanarak türetilen denklem ele alınırsa;

$R = \frac{T_m c}{2\Delta F} f_{beat}$  ifadesinde her iki tarafın sabit modülasyon periyodunda ve frekans kaymasında diferansiyel farkı alındığında Eşitlik (3.8) elde edilir [Pace, 2009].



$$\Delta R = \frac{T_m c}{2\Delta F} \Delta f_{beat} \quad , \quad \Delta f_{beat} = \sqrt{\Delta f_t^2 + \Delta f_r^2} \quad (3.8)$$

Vuru frekans çözünürlüğü almaç frekans çözünürlüğü ile hedefin spektral genişliğinin katlanması (convolution) tarafından sınırlandırılır. Vuru frekans sinyali her  $T_m - t_d$  genişliğindeki zaman diliminde tekrar eder. Bu nedenle evre uyumlu işlem aralığı  $\Delta f_t$  Eşitlik (3.9)'a göre belirlenir.

$$\Delta f_t = \frac{1}{T_m - t_d} \cong \frac{1}{T_m} \quad (3.9)$$

Ayrıca,  $T_m$  kipleme periyodu darbe tekrarlama aralığı olarak da tanımlanmaktadır. FMCW radarlar %100 görev çevrim (duty cycle) faktörüne sahip oldukları için maksimum ölçülebilecek tanımlı menzilin (unambiguity range) belirlenmesinde etkin rol oynarlar. Ölçülebilecek maksimum menzil,

$$R_{u_{max}} = \frac{cT_m}{2} \quad (3.10)$$

olarak belirlenir [Mahafza, 2000].

### 3.2.3 Ölçülebilecek Maksimum Hedef Hızı

Kipleme periyodu seçimi yapılırken (3.7)'de verilen eşitlik göz önünde bulundurulmalıdır. Bu eşitlik kullanılarak maksimum ölçülebilecek hedef hızı Eşitlik (3.11)'de verilmiştir.

$$V_{t_{max}} < \frac{\Delta R}{T_m} \quad , \quad \Delta R : \text{menzil çözünürlüğü} \quad (3.11)$$

Hedef hareketinin oluşturduğu ölçülebilecek maksimum Doppler frekansı ise;

$$f_{d_{\max}} = \frac{2V_t}{\lambda} < \frac{2\Delta R}{\lambda T_m} \quad (3.12)$$

biçimindedir.

### 3.2.4 Ölçülebilecek Maksimum Hedef Menzili

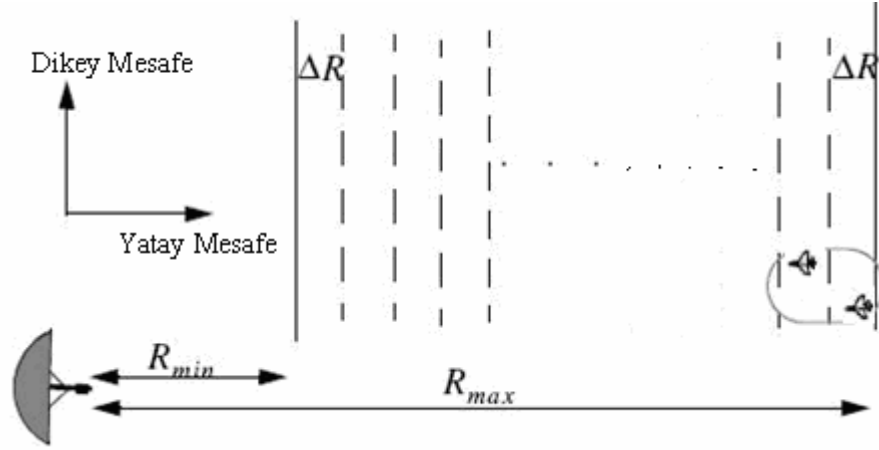
Hedefe ait en önemli iki bilgidен birisi olan menzil bilgisi, radarın tasarımı esnasında seçilir. Radarın tespitini amaçladığı nesne türüne göre ölçebileceği maksimum menzil belirlenir. Örneğin bir füze radarı için bu menzil 1000–10000 metre arasında iken bir araç menzil sensörü için çok daha küçük menziller seçilebilir. Ölçülebilecek en büyük menzil tasarım esnasında belirlenip, radar göndermeci ve alması ona göre tasarlanmalıdır. Maksimum ölçülen menzil değeri pek çok parametreye bağlıdır. Temel radar denkleminde yola çıkarsak, ölçüm yapılacak menzilin belirlenmesi için denklem parametreleri özenle seçilmelidir.

$$R_{\max} = \left( \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_e B F L (SNR)_{\min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3.13)$$

Eşitlik (3.13)'de [Mahafza, 2000] görüldüğü gibi maksimum ölçülebilecek menzil ( $R_{\max}$ ); radar gönderme birimi gücüne ( $P_t$ ), gönderme ve alma anten kazançlarına ( $G$ ), dalga boyuna ( $\lambda$ ), hedef kesit alanına ( $\sigma$ ), radar alması termal çalışma sıcaklığına ( $T_e$ ), alması gürültü faktörüne ( $F$ ), radar genel kayıplarına ( $L$ ), alması bant genişliğine ( $B$ ) ve radar alması çıkışı minimum sinyal gürültü oranı ( $SNR$ ) gibi pek çok parametreye birden bağlıdır. Eşitlik (3.13) dışında, maksimum ölçülen menzil kabaca daha önce Eşitlik (3.10)'da verildiği gibi hesaplanabilir. Ancak, maksimum menzil ölçümünü daha doğru belirlenmek için, önce diğer parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir.

### 3.2.5 Menzil Çözünürlüğü ve Modülasyon Bant Genişliği

Menzil çözünürlüğü, radarın birden fazla hedef algılaması durumunda, hedefleri birbirinden ayırt edebileceği minimum menzil olarak tanımlanır. Herhangi iki hedef arasında olması gereken minimum menzildir. Şekil 3.4’de gösterildiği gibi yatay ya da dikey konumda birbirine yakın hedeflerin belirlenmesi için bu değerin küçük olması istenir.



**Şekil 3.4** Birden fazla hedef olması durumunda hedeflerin birbirinden ayırt edilmesi için gerekli menzil çözünürlük etkisinin gözlenmesi

Gönderilen sinyalin doğrusallık özelliği de göz önünde bulundurulduğunda;

$$\delta R_{chirp} = \frac{c}{2\Delta F} \quad (3.14)$$

olarak alınır.

Gerçekte gönderilen sinyalin doğrusallık oranı da menzil çözünürlüğünü etkiler. Bu etki  $m$  frekans sapma oranı olmak üzere,

$$m = \frac{\Delta F}{T_m}, \quad Lin = \frac{m_{max} - m_{min}}{m_{min}}, \quad \text{ve}$$

$$\delta R_{lin} = Lin R_t$$

şeklindedir [Brooker, 2005]. Burada doğrusallık oranı  $Lin$ , gönderme frekans dalga formundaki oluşabilecek doğrusallık bozulmaları sonucunda ölçülebilecek maksimum ve minimum frekans sapma oranına göre belirlenir. Bu ifadelerin birleşimi ile hedeflerin ayırt edilmesi için gerekli  $\Delta R$  menzil çözünürlüğü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta R = \sqrt{\delta R_{chirp}^2 + \delta R_{lin}^2}$$

Eşitlik (3.14)'de görüldüğü gibi gönderilen sinyalin doğrusal olduğu düşünülürken, menzil çözünürlüğü için en önemli parametre kipleme bant genişliğidir. Bant genişliği artırıldıkça menzil çözünürlüğü daha hassas hale gelir. Ölçümlerde yapılacak maksimum hedefler arası menzil hata oranı da  $\Delta R$  kadar olacaktır. Çok küçük menzil farklarının ölçümü için yüksek bant genişliği gereklidir. Ancak bant genişliği artırılması, frekans bölgesinde taşıyıcı frekans çevresinde genişlemeye karşılık gelecektir.

Menzil ölçümlerinden menzil çözünürlüğü kullanılarak menzil kapıları (range gates) oluşturulur. Oluşturan menzil kapılarının sayısı;

$$M = \frac{R_{max} - R_{min}}{\Delta R}$$

olarak belirlenir.

Farklı hedeflerin aynı menzil kapısı içerisinde yer alması menzil belirsizliğini oluşturur. Daha hassas ölçümler için menzil çözünürlüğü yüksek tutulmalıdır. Artan menzil kapı sayısı ile belirsizlik giderilebilir. Diğer bir durum ise menzil ölçüm doğruluğudur. Hedeften dönen yansıma sinyallerinden çıkarılan vuru frekansının birden fazla menzil kutusu içerisinde yayılım göstermesi menzil ölçüm hatası olarak yansyacaktır. Bu yayılıma engel olmak ve ölçüm doğruluğu sağlayabilmek için pencereleme fonksiyonları kullanılabilir.

### 3.2.6 Hız Çözünürlüğü ve Periyodik Tarama Sayısı

Hız çözünürlüğü,  $T_m$  kipleme periyodu içerisinde  $N$  tane tarama yapıldığında;

$$\Delta V = \frac{\lambda}{2NT_m} \quad (3.15)$$

biçimindedir.

Hız çözünürlüğünü daha iyi sezimlemek için periyodik tarama sayısının ( $N$ ) artırılarak hedefin daha fazla zaman diliminde aydınlatılması sağlanmalıdır. Ya da Eşitlik (3.15)'de verildiği gibi  $T_m$  kipleme periyodu zaman dilimi kontrollü olarak artırılabilir. Zaman ekseninde yapılan bu iyileştirme ile daha fazla veri örneklenmiş olacaktır. İdealde, ölçümlerde yapılacak maksimum hız hata oranı da  $\Delta V$  kadar olacaktır.

Maksimum ölçüm hız değeri ile hız çözünürlüğü kullanılarak hız kapıları (velocity gates) oluşturulur. Oluşturan hız kapılarının sayısı;

$$V_{bin} = \frac{V_{max}}{\Delta V}$$

biçimindedir.

### 3.2.7 Almaç Sinyal İşleme Parametreleri

Alınan sinyallerin işlenmesinde en kolay ve en etkili yöntemlerden bir tanesi sinyalin frekans bölgesine alınması ile gerçekleştirilir. Sinyal, HFD dönüşümü ile frekans eksenine taşınır. Sinyal bozulmasına imkân vermemek için dönüşüm parametreleri olan örnekleme frekansı ve örnekleme sayısının uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir.

Örnekleme frekansı seçimi için Nyquist ölçüm koşulları sağlanmalıdır. Analog-sayısal örnekleme oranı analizi yapılacak olan maksimum vuru frekansının en az iki katı alınmalıdır. Bu frekans değeri seviyesi günümüzde oldukça yükseltilmiştir.

Bugün 3GHz frekansında örnekleme yapabilen analog-sayısal çeviriciler üretilmektedir. Maksimum örnekleme frekansı

$$2f_{beat_{max}} \leq f_s \Rightarrow 2\left(\frac{\Delta F}{T_m} \frac{2R_{max}}{c} + \frac{2V_t}{\lambda}\right) \leq f_s \quad (3.16)$$

biçimindedir [Pace, 2009].

Görüldüğü gibi örnekleme frekansı maksimum ölçüm menziline, bant genişliğine, kipleme periyoduna ve küçük değerlerde de olsa Doppler frekans kaymasına bağlıdır.

Maksimum örnekleme frekansının ölçüsü zaman ekseninde alınacak örneklerin çözünürlüklerini göstermektedir. Örnekleme frekansı  $f_s$  iken; örnekleme zaman çözünürlüğü,

$$t_s = \frac{1}{f_s}$$

biçimindedir.

Belirlenen kipleme periyoduna göre HFD işleminde eşleşecek örnekleme sayısı ( $N$ ), ikinin katları olacak şekilde Eşitlik (3.17)'ye göre seçilmelidir.

$$T_m = \frac{N}{f_s} = \frac{2^n}{f_s}, \quad N = 2^n \quad (3.17)$$

Bu bölümde bir radar sistemi tasarlanırken radarın temel özelliklerinin nasıl belirlenmesi gerektiği konusuna değinilmiştir. Temel tasarım parametrelerin analitik eşitliklerle belirlendiği ve birbirlerini doğrudan etkiledikleri görülmektedir. Radar iç içe geçmiş sistemler bütünüdür. Aynı anda pek çok parametrenin etkileri incelenmelidir. Tasarlanacak radar türüne göre bu özellikler değişiklik gösterecektir.

#### 4. ÜÇGEN TARAMALI FMCW RADARLARDA ÇOKLU HEDEF ÇÖZÜMLEMESİ

FMCW radarlar frekans modülasyonu kullanarak hedeflerin eşanlı hem menzil hem de hız verilerini belirleyebilen sistemlerdir. FMCW radarlar hedeften geri yansıyan sinyal ile gönderilen sinyal arasındaki vuru frekansını işleyerek hedeflerin menzil-hız verilerini ölçmektedir. FMCW radarlarda birden fazla hedeften geri saçılan sinyaller, almanca içerisinde tek bir yansıma sinyali gibi üst üste binmiş olarak gözlemlenecektir. Radar huzmesi içinde birden fazla hedefin bulunduğu durumlarda; almanca oluşan vuru frekansları da çoklu olacaktır.

Alınan sinyaller, yerel osilatörde gönderilen sinyalin kopyası ile karıştırılıp almanca geçiren süzgeçde süzülmesinden sonra birden fazla hedefe ait sinyalin vuru frekansları HFD işleminde ortaya çıkar. Üçgen frekans kiplmeli taramada vuru sinyalleri, almanca ve yükselen kenar vuru frekans bileşenlerinden oluşmaktadır. HFD işleminde sonra hedeflere ait almanca ve yükselen vuru frekansları birbirinden bağımsız olarak tepe yapacak şekilde gözükür. Ancak burada asıl sorun, hedeflerin almanca ve yükselen vuru frekanslarını kendi aralarında eşleştirmek gerektiği için doğru eşleştirmenin nasıl yapılması gerektiğidir. Ancak doğru eşleştirme sonrası ilgili hedefe ait menzil ve hız bilgisi tanımlanabilir. Bu hususta çoklu hedef ortamında hedeflerin menzil-hız verilerini belirleyebilmek için özel bir algoritmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada bu sorunu aşmak için bir algoritma önerilmiş ve benzetim sonuçları ile başarımlı analizi yapılmıştır.

Ortamda çoklu hedefler olması durumunda, radar almanca gelecek ve karıştırılıp süzgeçden süzöldükten sonra elde edilecek sinyallerin analitik ifadeleri Eşitlik (4.1)'den başlayarak tanımlanmıştır. Gönderilen sinyal;

$$\begin{aligned}
s_{t_{up}}(t) &= a_o \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o - \frac{\Delta F}{2}\right)t + \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right]\right), & 0 < t < T_m \\
s_{t_{down}}(t) &= a_o \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + \frac{\Delta F}{2}\right)t - \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right]\right), & T_m < t < 2T_m \\
s_{transmitted}(t) &= s_{t_{up}}(t) + s_{t_{down}}(t)
\end{aligned} \tag{4.1}$$

olarak ifade edilebilir.

Birden fazla hedeften yansıyan sinyallerin radar almacı önündeki analitik ifadesi  $N$  hedef sayısı olmak üzere Eşitlik (4.2) ile genelleştirilebilir.

$$s_{received}^i(t) = \frac{b_o^i}{a_o} \cdot s_{transmitted}(t - t_d^i) \tag{4.2}$$

$t_d^i$  ve  $f_d^i$ , sırası ile  $i$ . hedefin zaman gecikmesi ve Doppler kayması olmak üzere her bir hedeften dönen sinyaller;

$$\begin{aligned}
s_{r_{up}}^1(t) &= b_o^1 \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d^1 - \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d^1) + \frac{\Delta F}{T_m} (t - t_d^1)^2 \right]\right), \\
s_{r_{down}}^1(t) &= b_o^1 \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d^1 + \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d^1) - \frac{\Delta F}{T_m} (t - t_d^1)^2 \right]\right),
\end{aligned}$$



$$s_{r_{up}}^2(t) = b_o^2 \cdot \cos\left(2\pi \left[ (f_o + f_d^2 - \frac{\Delta F}{2})(t - t_d^2) + \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d^2)^2 \right] \right), \quad (4.3)$$

$$s_{r_{down}}^2(t) = b_o^2 \cdot \cos\left(2\pi \left[ (f_o + f_d^2 + \frac{\Delta F}{2})(t - t_d^2) - \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d^2)^2 \right] \right),$$

$$\vdots$$

$$s_{r_{up}}^i(t) = b_o^i \cdot \cos\left(2\pi \left[ (f_o + f_d^i - \frac{\Delta F}{2})(t - t_d^i) + \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d^i)^2 \right] \right),$$

$$s_{r_{down}}^i(t) = b_o^i \cdot \cos\left(2\pi \left[ (f_o + f_d^i + \frac{\Delta F}{2})(t - t_d^i) - \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d^i)^2 \right] \right),$$

$$s_{received}(t) = \sum_{i=1}^N (s_{r_{up}}^i(t) + s_{r_{down}}^i(t))$$

olarak yazılabilir.

Çarpıcıdan geçirilip alçak geçiren süzgeçde süzölmüş birden fazla hedeften yansıyan sinyallerin analitik ifadeleri;

$$s_m^i(t) = s_{received}^i(t) \cdot s_{transmitted}(t) \quad (4.4)$$

biçimindedir. Her bir hedefe ait süzgeçlenmiş sinyaller,

$$s_{m_{up}}^i(t) = c_o^i \cdot \cos\left(2\pi \left[ (f_d^i + \frac{\Delta F}{T_m} t_d^i)t + (f_o + f_d^i - \frac{\Delta F}{2})t_d^i - \frac{\Delta F}{2T_m}(t_d^i)^2 \right] \right),$$

$$s_{m_{down}}^i(t) = c_o^i \cdot \cos\left(2\pi \left[ (f_d^i - \frac{\Delta F}{T_m} t_d^i)t + (f_o + f_d^i + \frac{\Delta F}{2})t_d^i + \frac{\Delta F}{2T_m}(t_d^i)^2 \right] \right), \quad (4.5)$$

$$c_o^i = \frac{a_o \cdot b_o^i}{2}$$

olarak ifade edilir.

$$\begin{aligned}
\sum s_{m_{up}}(t) &= \sum_{j=1}^N c_{o_j} \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_{d_j} + \frac{\Delta F}{T_m} t_{d_j}\right)t + \left(f_o + f_{d_j} - \frac{\Delta F}{2}\right)t_{d_j} - \frac{\Delta F}{2T_m} (t_{d_j})^2 \right]\right), \\
\sum s_{m_{down}}(t) &= \sum_{j=1}^N c_{o_j} \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_{d_j} - \frac{\Delta F}{T_m} t_{d_j}\right)t + \left(f_o + f_{d_j} + \frac{\Delta F}{2}\right)t_{d_j} + \frac{\Delta F}{2T_m} (t_{d_j})^2 \right]\right), \\
s_{m_{total}}(t) &= \sum_{i=1}^N s_{received}^i(t) s_{transmitted}^i(t) = \sum s_{m_{up}}(t) + \sum s_{m_{down}}(t) \quad (4.6)
\end{aligned}$$

Çoklu hedeflerin ayırt edilmesinde amaç, Eşitlik (4.6)'ya göre  $t_{d_1}, t_{d_2}, t_{d_3}, \dots, t_{d_n}$  zaman gecikmelerine karşılık gelen  $f_{d_1}, f_{d_2}, f_{d_3}, \dots, f_{d_n}$  Doppler kayması değerlerini eş anlı olarak belirleyebilmektir. Çoklu hedef çözümüleme algoritmasını geliştirmek için parametreleri Çizelge 4.1'de yer alan bir FMCW radar esas alınmıştır.

**Çizelge 4.1** Testere Dışı Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları benzetim parametreleri

Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$f_o = 30$ GHz	Radar Çalışma Frekansı
$T_m = 3.49$ ms	Frekans Kipleme Periyodu
$R_{max} = 4$ km	Maksimum Ölçülebilen Menzil
$\Delta R = 1$ metre	Menzil Ölçüm Çözünürlüğü
$V_{max} = 500$ m/s	Maksimum Ölçülebilen Hız Limiti
$\Delta V = 1$ m/s	Maksimum Hız Ölçüm Çözünürlüğü
$\Delta F = 150$ MHz	Tarama Bant Genişliği
$f_s \approx 1.2$ MHz	ADC Örnekleme Frekansı
$N_s = 4096$	ADC Örnekleme Sayısı
$N = 6$	Üçgen Tarama Sayısı

Gürültüsüz ideal ortamda radar alması tarafından tek bir hedefin algılandığı düşünülürse, üçgen tarama ile frekans ekseninde hedefin yükselen ve düşen vuru frekansları Şekil 4.1'de verildiği gibi olacaktır. Benzetim radarı ile tespit edilecek hedefin menzil ve hız bilgisi sırasıyla 1200 metre, 350 m/s olarak girilmiştir. Benzetim çalışmasında Şekil 4.1'den HFD sonrası elde edilen tepe noktalarının değerleri aşağıda verildiği gibi ölçülmüştür.

$$f_{beat_{up}} = 1.1875 \text{ MHz}, f_{beat_{down}} = 1.20151 \text{ MHz}$$

Eşitlik (2.36) analitik ifadelerini tekrar yazarak hedef menzil ve hız değerleri hesaplanır.

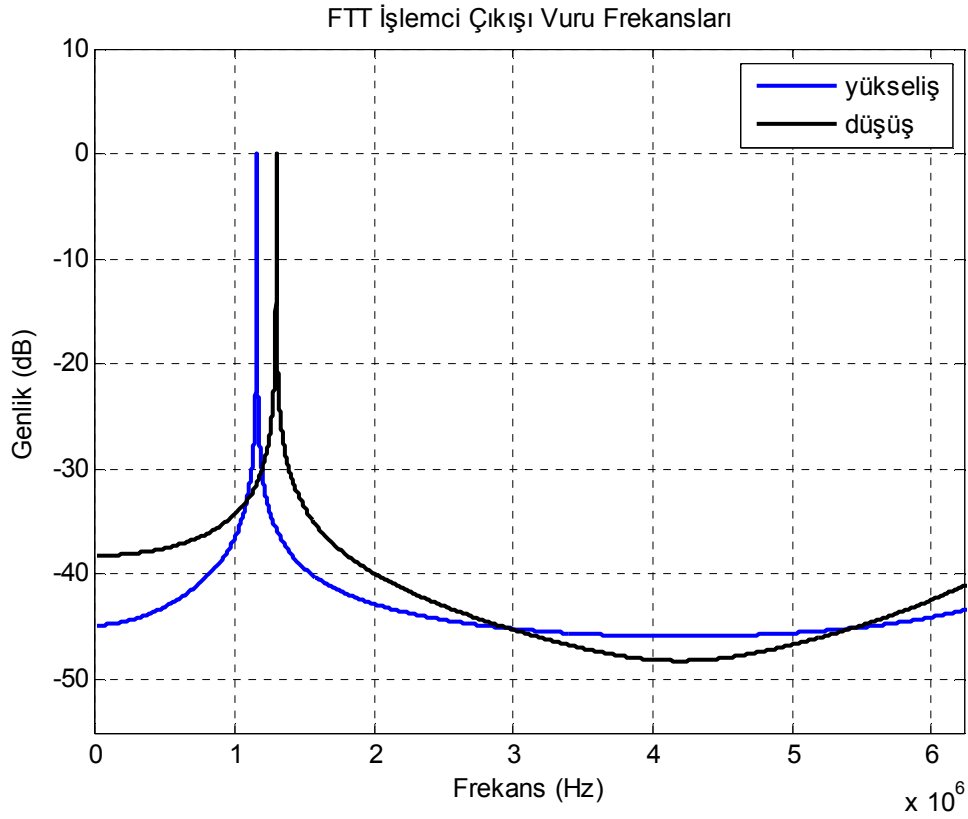
$$R_t = \frac{T_m \cdot c}{4\Delta F} \left[ f_{beat_{up}}(t) + f_{beat_{down}}(t) \right]$$

$$V_t = \frac{c}{4f_o} \left[ f_{beat_{down}}(t) - f_{beat_{up}}(t) \right]$$

Ölçülen alt ve üst vuru frekansları yukarıdaki eşitlikte yerine konulduğunda sırası ile hedef menzil ve hız bilgisi;

$$R_t = 1194.5 \text{ m}, V_t = 350.25 \text{ m/s}$$

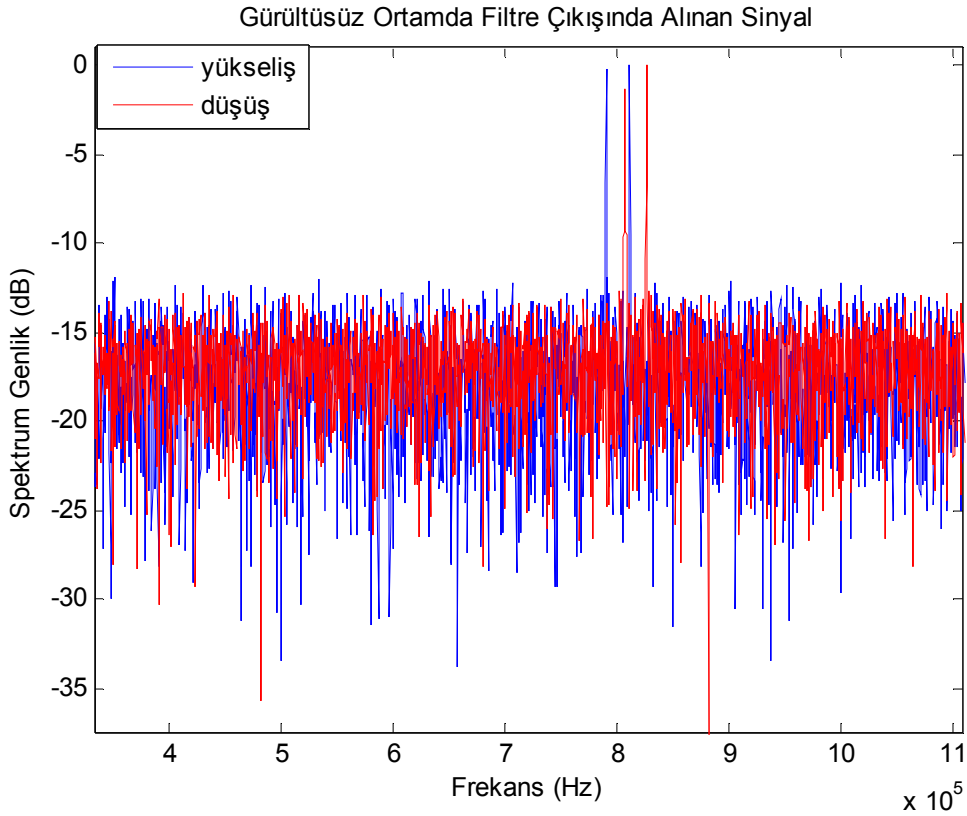
olarak belirlenmiştir.



**Şekil 4.1** Tek bir hedef olması durumunda yansıma sinyallerinin HFD sonrası frekans eksenindeki görüntüsü

Yukarıda verilen sonuçlara göre, eğer gönderilen sinyalin frekans değişim eğrisi üçgen dalga formunda ve ortamda tek bir hedef varsa, bu hedeflerin hız-menzil bilgileri Eşitlik (2.36) kullanılarak yaklaşık olarak başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Ancak, ortamda birden fazla hedef olması durumunda ise benzer işlemleri uygulamak tek başına başarılı olmayacaktır. Çünkü FMCW radarlarda birden fazla hedeften yansıyan sinyaller almaç içerisinde tek bir yansıma sinyali gibi üst üste binmiş olarak gözükecektir. Üçgen tarama yapıldığında karıştırıcı ve süzgeçlemeden sonra her bir hedefin bir çift alt ve üst vuru frekans bileşeni mevcuttur. Bu nedenle, frekans ekseninde birden fazla alt-üst vuru frekans bileşenleri ortaya çıkacaktır. Bu vuru frekans çiftlerinin hangi hedefe ait olduğuna dair bir eşleştirme algoritması oluşturulmaz ise alınan ölçümler yanıltıcı olacaktır. Hedeflere ait doğru alt-üst vuru frekans bileşenlerinin eşleştirilmesi gerekmektedir. Bu durumu daha net gözlemek üzere aşağıda belirtilen bir senaryo oluşturulmuştur.

Ortamda birden fazla hedef olduğu varsayılarak Çizelge 4.1’de verilmiş tasarım parametreleri ile oluşturulmuş radar benzetim çalışması, aşağıda hedef hız ve menzil bilgileri verilmiş durumlar için yürütülmüştür. Ortamda algılanılması durumunda, hedeflere ait gerçek menzil-hız bilgileri  $R_1 = 2865$  m ,  $V_1 = 365$  m/s ,  $R_2 = 2796$  m ,  $V_1 = 421$  m/s olarak kabul edilmiştir. Bu senaryo yürütüldüğünde Şekil 4.2 elde edilmiştir.



**Şekil 4.2** İki hedef olması durumunda toplam yansıma sinyallerinin HFD sonrası frekans eksenindeki görüntüsü

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi doğru alt-üst vuru frekans taramalarına karşılık gelen sinyaller gözlemlenmesine rağmen birbirleri net olarak eşleşemedikleri için hedeflerin hız ve menzil bilgilerini çıkarmak mümkün olmayacaktır.

Şekil 4.2’ye göre her bir hedef için ölçülen vuru frekansı yaklaşık değerleri  $f_{up_1} = 0.790$  MHz,  $f_{down_1} = 0.807$  MHz,  $f_{up_2} = 0.812$  MHz ve  $f_{down_2} = 0.826$  MHz olarak ölçülmüştür. Vuru frekans değerleri belirlendikten

sonra bu frekansların kendi aralarında oluşturacakları olası eşleşmeleri tanımlamak için bir analitik ifade oluşturulmuştur.

Ortamda bulunacak hedef sayısı  $n = 3$  kabul edildiğinde, olası tüm alt-üst vuru frekans eşleşmeleri aşağıda verilen matris gibi olacaktır. Örnek olarak  $(f_{up_1}, f_{down_1})$  olası eşleşmelerden bir tanesini göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} (f_{up_1}, f_{down_1}) & (f_{up_2}, f_{down_2}) & (f_{up_3}, f_{down_3}) \\ (f_{up_1}, f_{down_1}) & (f_{up_2}, f_{down_3}) & (f_{up_3}, f_{down_2}) \\ (f_{up_1}, f_{down_2}) & (f_{up_2}, f_{down_1}) & (f_{up_3}, f_{down_3}) \\ (f_{up_1}, f_{down_2}) & (f_{up_2}, f_{down_3}) & (f_{up_3}, f_{down_1}) \\ (f_{up_1}, f_{down_3}) & (f_{up_2}, f_{down_1}) & (f_{up_3}, f_{down_2}) \\ (f_{up_1}, f_{down_3}) & (f_{up_2}, f_{down_2}) & (f_{up_3}, f_{down_1}) \end{bmatrix}_{(3! \times 3)}$$

Yukarıda verilen matrisde yer alan her bir eşleştirme aynı zamanda Eşitlik (2.36)'ya göre herhangi bir menzil ve hız değerine karşılık gelecektir. Her eşleştirmenin bir menzil ve hız değerine karşılık geldiği düşünülürse; elde edilmiş menzil ve hız matrisleride aşağıda verildiği gibi oluşturulacaktır.

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ R_1 & R_4 & R_5 \\ R_6 & R_7 & R_3 \\ R_6 & R_4 & R_8 \\ R_9 & R_7 & R_5 \\ R_9 & R_2 & R_8 \end{bmatrix}_{(3! \times 3)}, \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \\ V_1 & V_4 & V_5 \\ V_6 & V_7 & V_3 \\ V_6 & V_4 & V_8 \\ V_9 & V_7 & V_5 \\ V_9 & V_2 & V_8 \end{bmatrix}_{(3! \times 3)}$$

Yukarıda üç hedef için oluşturulmuş vuru frekansı eşleştirme matrisi ve buna karşılık gelecek menzil-hız matrislerindeki genelleştirmeden faydalanarak Şekil 4.2'den ölçülen alt vuru frekanslarına göre oluşacak eşleşmeleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2** Testere Dişı Frekans Kiplmeli Sürekli Dalga Radarları benzetim parametreleri

Olası Eşleşme Durumu	Alt-Üst Vuru Frekans Çiftleri (MHz)	Hedef Menzili (metre)	Hedef Hızı (metre/s)
$(f_{up_1}, f_{down_1})$	( 0.7906 - 0.80716 )	2787.5	422.5
$(f_{up_2}, f_{down_2})$	( 0.81146 - 0.82607 )	2857.5	365.25
$(f_{up_1}, f_{down_2})$	( 0.79026 - 0.82607 )	2820.5	895.25
$(f_{up_2}, f_{down_1})$	( 0.81146 - 0.80716 )	2824.5	-107.5

Çizelge 4.2'de verilmiş iki hedef için alt-üst vuru frekanslarının kendi aralarında oluşturacağı olası eşleşmelerine göre elde edilmiş menzil ve hız değerleri bilgisayar ortamında ortamında matris yapısında kayıt edilmiştir. Aşağıda verilen iki hedef için oluşturulmuş menzil ve hız matrisleri, bu yapıya örnek gösterilebilir.

$$Mesafe\_Matrisi = \begin{bmatrix} 2787.5 & 2820.5 \\ 2824.5 & 2857.5 \end{bmatrix} (metre)$$

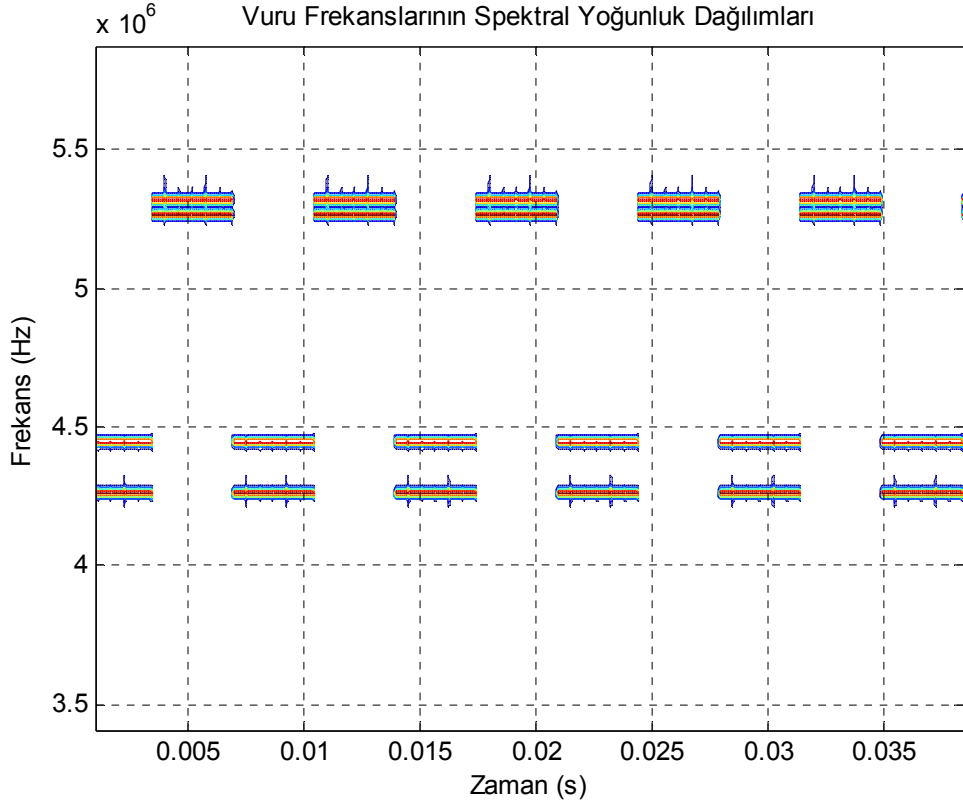
$$Hız\_Matrisi = \begin{bmatrix} 422.5 & 895.25 \\ -107.5 & 365.25 \end{bmatrix} (metre / s)$$

Menzil ve hız matrislerinde görüldüğü gibi iki hedef için ikisi gerçek, ikisi sanal (hayalet) hedef menzil-hız verileri bulunmuştur. Benzetim çalışması için girilen gerçek hedef menzil-hız değerleri bu matrislerin içerisinde çekilmelidir. Ancak, hayalet hedeflerin tespit edilip elenmesi gerekmektedir. Her üst vuru frekans değeri için iki farklı alt vuru frekans bileşeni vardır. Bir üst vuru frekansına karşılık iki olası alt vuru frekansı olduğundan, iki hedef için dört olası menzil ve hız verisi olacaktır. Dolayısıyla iki gerçek iki de sanal hedef oluşacaktır. Gerçek hedefler menzil ve hız matrislerinde aynı renkler ile işaretlenmiştir. Diğer veriler ise sanal hedeflere aittir.

Hangi alt vuru frekansı hangi üst vuru frekansı ile eşlemeli sorusunun cevabını Şekil 4.2 üzerinden anlamak mümkün değildir. Herhangi bir gürültü ya da bozulmanın olmadığı ideal durumda, frekans ekseninde her bir hedef için bir vuru frekans çifti olacağından HFD alınmış yansıma sinyallerinin tepe sayısı hedef sayısının iki katı olacaktır. Örneğin iki hedef algılandığında, Şekil 4.2'de verildiği gibi hedeften yansıyan sinyallerin iki alt ve iki üst vuru frekansı olmak üzere dört tepe noktası gözlemlenecektir.

Birbirine yakın güce sahip bilgi sinyali ile gürültü sinyali zaman frekans düzleminde farklı yoğunluklarda olacağı için vuru sinyallerinin zaman-frekans düzlemindeki dağılımı inceleyerek birbirinden ayırt edilebilir. Bu düşünce ile farklı frekanslarda belirecek alt ve üst vuru frekanslarının zaman frekans düzlemindeki dağılımı ile vuru frekansları belirlenebilir mi? Vuru frekansı belirlenecek hedeflerin menzil ve hız bilgisi hesaplanacağı için hedefleri ayırt edebilir. Bu nedenle hedeflerin zaman frekans eksenlerindeki kontur grafiklerinden faydalanılmak istenmiştir. Bunlardan bir tanesi de İzge Grafiği (Spektrogram)'dır. Spektrogram bir sinyalin izgesel (spektral) yoğunluğunun zaman içerisinde nasıl değiştiğini gösteren zaman-frekans gösterimidir. Tipik bir dar bant süzgeç bankasından oluşturulur. Süzgeç genişlikleri kullanılacak pencere uzunluğu ile ayarlanır. Spektrogramlar genellikle iki yolla üretilirler. Bunlardan bir tanesi süzgeç bankası yaklaşımı ile oluşturulmuş seri bant geçiren süzgeç formlarıdır. Bu yöntem modern sinyal işleme tekniklerinin gelişmesinden önce kullanılmaktaydı. Bant geçiren süzgeçler metodu genellikle giriş sinyalinin frekans bantlarına bölünüp analog olarak işlenmesine dayanır. Her süzgeç çıkışının genliği bir dönüştürücüyü (transducer) kontrol eder. Bu dönüştürücülerde kâğıt üzerinde bir resimmiş gibi spektrogramı kayıt eder. İkinci olarak ise sayısal işlem olan Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD, Short Time Fourier Transform-STFT)'dur. Bir  $s(t)$  sinyalinin spektrogramı, işaret çözümü yöntemlerinden biri olan kısa KZFD dönüşümünün genlik karesi ile ifade edilebilir. Bir sinyalin standart Fourier dönüşümünde sinyal bileşenlere ayrılır ve bileşenlerin gücü belirlenir. Ancak bu işlev tüm frekans karakteristiğini içermez. Durağan olmayan sinyallerin periyodu sabit değildir ve frekansta bir noktadan bahsedildiğinde zaman karşılığı olarak tüm aralıkları karşılar. Şekil 4.2'de HFD işlemcisine gelen toplam vuru frekanslarının spektrogram yöntemine göre zaman frekans eksenindeki görüntüleri Şekil 4.3'de gözlemlenmiştir.



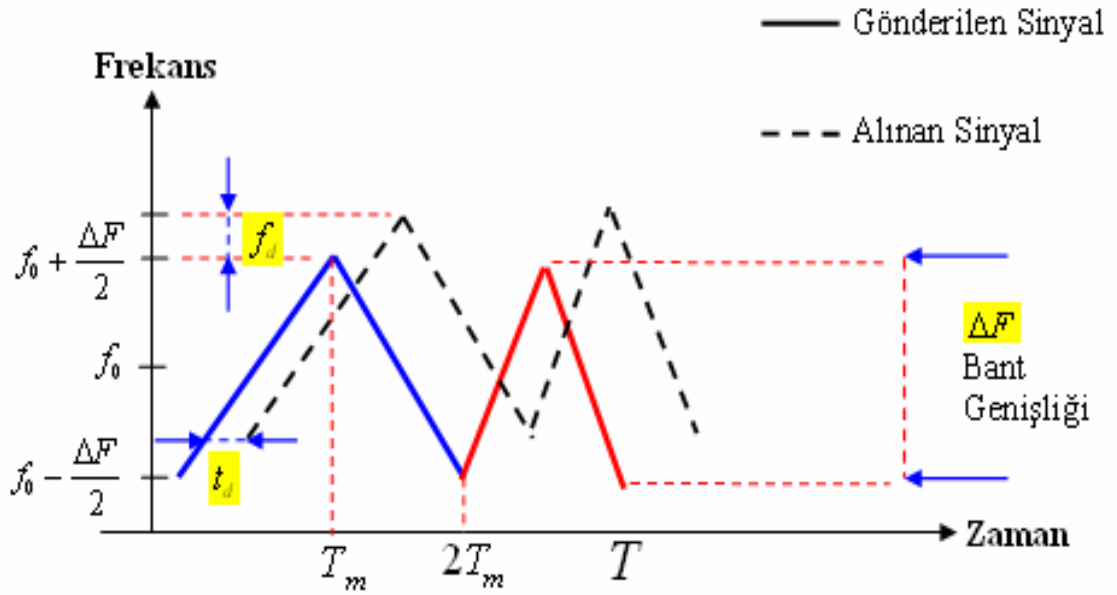


**Şekil 4.3** İki hedeften dönen sinyallerin alt ve üst vuru frekanslarının frekans-zaman ekseninde görüntülenmesi (Spektrogram Methodu)

Şekil 4.3'de spektrogram dönüşümü ile hedeflere ait vuru bileşenlerinin ayırt edilmesinin çok güç olduğu bu nedenle ilgili hedeflerin hız ve menzil bilgilerinin çıkarılamadığı anlaşılmaktadır.

Frekans ekseninde gözlemlenen alt ve üst vuru frekans çiftlerinin eşleştirilmesi gerekmektedir. Şimdi bu eşleştirmeyi nasıl yaparız sorusuna cevap aranmalıdır.

Eşitlik (2.36)'da verilen denklemdeki; radar çalışma frekansı, gönderilen sinyal kipleme zamanı, radar çalışma bant genişliği gibi parametreler yer almaktadır. Bu parametrelerden kipleme zaman periyodunu ( $T_m$ ) küçük değerler çerçevesinde reel katsayılı bir parametre ile çarparak Şekil 4.4'de verilmiş dalga formunda değiştirilir ve yeni menzil ile hız eşitliklerini elde etmeye çalışılır.



**Şekil 4.4** Çoklu hedeflerin çözülmesi için iki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gönderme-alma sinyallerin zaman frekans eksenindeki görüntüsü

$T_m$  kipleme periyodu  $k$  gibi sabit değerli reel bir sayı ile çarpıldığında elde edilecek ikinci kipleme periyodu  $T_m'$  olsun.

$$T_m' = k.T_m, \quad (4.7)$$

Buna göre yeni vuru frekanslarına karşılık gelen yeni ölçülecek hedef menzil ve hız değerleri  $R_t'$  ve  $V_t'$  olacaktır.

$$f_{beat_{up}}' = \frac{2\Delta F}{k.cT_m'} R_t' - \frac{2V_t'}{c} f_0$$

$$f_{beat_{down}}' = \frac{2\Delta F}{k.cT_m'} R_t' + \frac{2V_t'}{c} f_0 \quad (4.8)$$

Eşitlik (4.8) elde edilen yeni vuru frekans bileşenleri hedef hız ve menzil bilgisini içermektedir. Eşitlik (4.9)'da belirtildiği gibi hedef menzil bilgisinin yer aldığı vuru frekans değeri, hedef hız değeri yanında oldukça büyük olacaktır.

$$\frac{2\Delta F}{k.cT_m} R_t' \gg \frac{2V_t'}{c} f_o \quad (4.9)$$

Buna göre Eşitlik (4.8)'i tekrar yazılırsa;

$$\begin{aligned} f_{beat_{up}}' &\cong \frac{2\Delta F}{k.cT_m} R_t' \cong \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}} \\ f_{beat_{down}}' &\cong \frac{2\Delta F}{k.cT_m} R_t' \cong \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \end{aligned} \quad (4.10)$$

olacaktır. Son olarak hedef menzil bilgisini verecek analitik denklem tekrar yazılırsa,

$$\begin{aligned} R_t' &\cong \frac{k.T_m.c}{4\Delta F} \left( \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}} + \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \right) \cong \frac{k.T_m.c}{4\Delta F} \frac{1}{k} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \\ R_t' &\cong \frac{T_m.c}{4\Delta F} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \cong R_t \end{aligned} \quad (4.11)$$

olacaktır.

Eğer radar kipleme frekans periyodu  $T_m$ , “k” gibi reel bir parametre ile değiştirilirse, yaklaşık olarak Eşitlik (4.11)'de verilen sonuç elde edilecektir. Bu sonuca göre kipleme frekans periyodundaki değişim, hedefler için tanımlanacak menzil bilgisi hesaplarındaki etkisi yok sayılabilir. Yani yeni taramada  $T_m$  kipleme periyodunu değiştirmek hedef menzil bilgisinde çok belirgin değişiklikler yapmayacaktır. O halde, şimdi de kipleme frekans periyodundaki değişimin hedeflerin hız denklemlerini nasıl etkileyeceğini gözlemlenmelidir.

Hedef hız analitik denklemini tekrar yazılırsa;

$$V_t = \frac{c}{4f_o} (f_{beat_{down}} - f_{beat_{up}}) \quad (4.12)$$

yeni vuru frekansları Eşitlik (4.10)'da daha önce elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} f_{beat_{up}}' &= \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}} \\ f_{beat_{down}}' &= \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.13) sonuçları Eşitlik (4.12)'de yerine yazılırsa, elde edilen hız denklemi

$$\begin{aligned} V_t' &= \frac{c}{4f_o} \left( \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}} + \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \right) = \frac{c}{4f_o} \cdot \frac{1}{k} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \\ V_t' &= \frac{c}{4k \cdot f_o} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \neq V_t \end{aligned} \quad (4.14)$$

olacaktır. Bu denklemde seçilen  $k$  parametresinin büyüklüğüne göre hedef hız bilgisindeki değişim Eşitlik (4.15) verildiği gibi etkilenecektir.

$$\begin{aligned} E\check{g}er \Rightarrow \quad k < 1 \quad V_t' > V_t \\ k > 1 \quad V_t' \leq V_t \end{aligned} \quad (4.15)$$

Eşitlik (4.7)'den başlayıp Eşitlik (4.15)'e kadar çıkarılan matematiksel ifadelerde görülüyor ki; radar gönderme frekans dalga formunun temel bileşenlerinden bir tanesi olan kipleme zamanı parametresinin değişimi, hedef menzil eşitliğini değiştirmezken; hedef hız denklemlerini doğrudan " $k$ " değerinin büyüklüğüne göre etkileyecektir. Bu etki radar sinyal işleme birimi içerisinde oluşturulacak bir değerlendirme algoritması ile kolaylıkla sezilip, hız değişimi ile oluşacak sahte hedef farklarının ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Diğer bir ifade ile iki farklı kipleme zamanına göre ölçülmüş veriler eğer doğru eşleştirilir ise; vuru frekans değerleri değişse dahi gerçek hedef menzil ve hız değerleri değişmeyecektir. Tabi burada hedef sayısına göre hesaplanacak olan olası hedef menzil ve hedef hız değerleri farklı kipleme zamanları için saklanmalıdır.

Yukarıda iki ve üç hedef için çıkarılmış olası eşleşme tablosunda hedef sayısına bağlı olarak olası hedef bilgilerinin hesaplanması artacaktır. Bu artış hedef sayısı  $n$  olmak üzere farklı hız ve farklı menzil bilgilerinin oluşabileceği sayısal değerler, Eşitlik (4.16)'da verilen ifade kadar olacaktır.

$$\text{Olası eşleşme sayısı} : (nxn!) \quad (4.16)$$

Hız ve menzil bilgilerinin birbirleri arasındaki tüm olasılıkları hesaplamak yerine her hedef üst vuru frekansının sahip olacağı alt vuru frekansına göre hesaplama yapılabilir. Üç hedef için çıkarılmış olası vuru frekansları eşleşmeleri sonucu hesaplanacak hedef menzil ve hız değerleri aşağıdaki verilmiş matris gibi olacaktır.

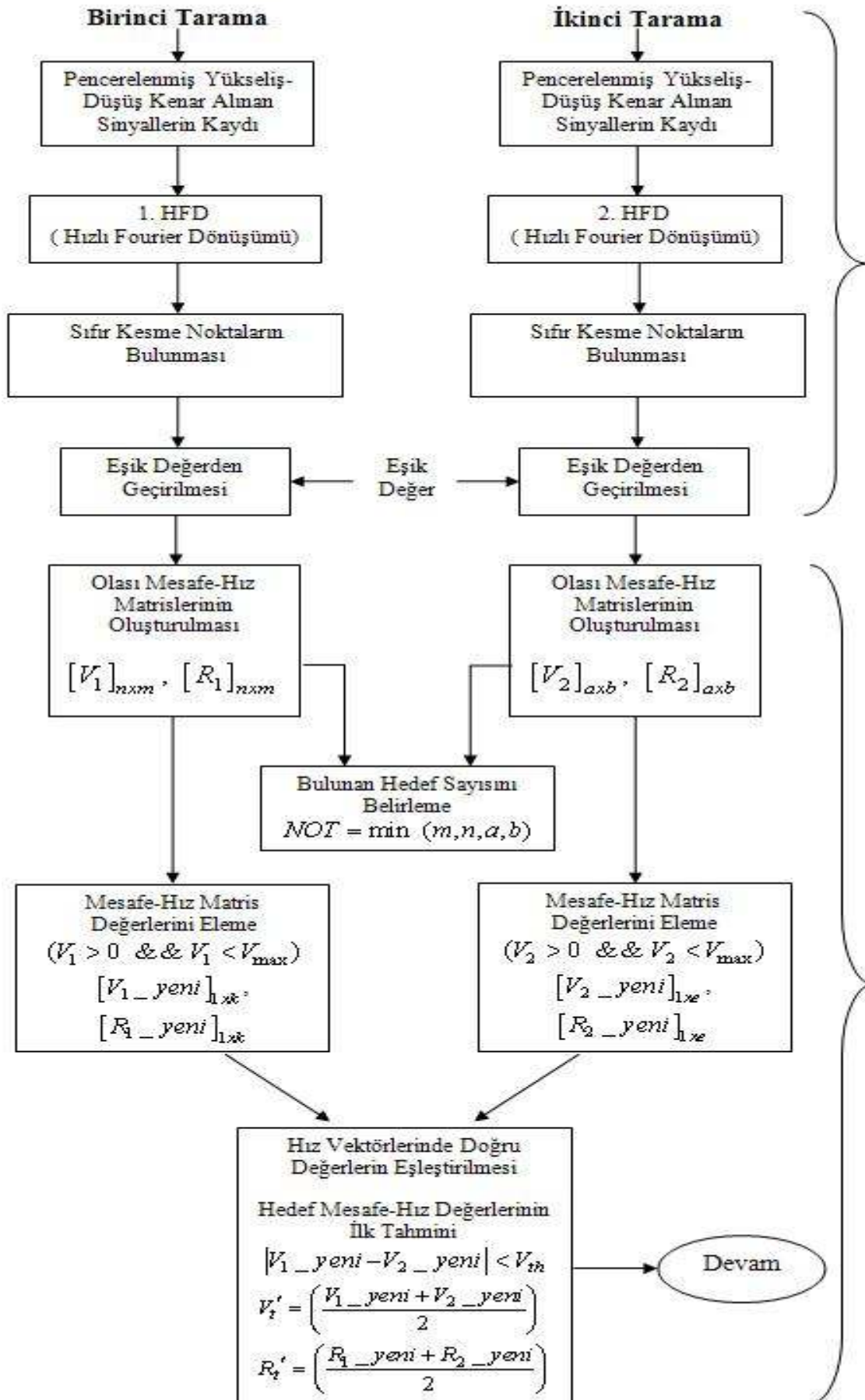
$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ R_1 & R_4 & R_5 \\ R_6 & R_7 & R_3 \\ R_6 & R_4 & R_8 \\ R_9 & R_7 & R_5 \\ R_9 & R_2 & R_8 \end{bmatrix}_{(3! \times 3)} \quad , \quad \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 \\ V_1 & V_4 & V_5 \\ V_6 & V_7 & V_3 \\ V_6 & V_4 & V_8 \\ V_9 & V_7 & V_5 \\ V_9 & V_2 & V_8 \end{bmatrix}_{(3! \times 3)}$$

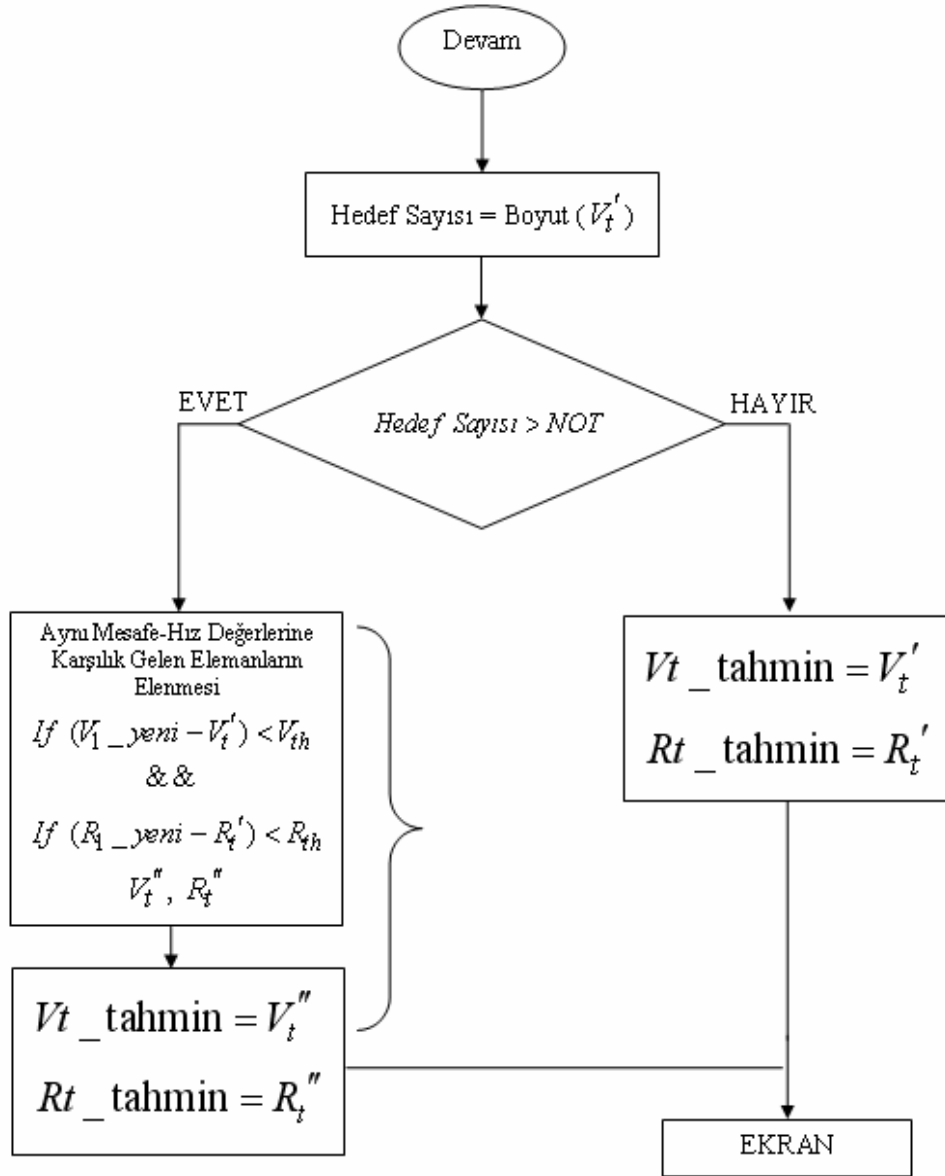
Bu matrisde görüldüğü üzere üç hedef için 18 adet menzil ve hız değerleri ölçülmüştür. Ancak bu ölçümlerde her değerden iki tane vardır. İkinci bir tarama da benzer şekilde farklı değerlerden aynı boyutta yeni bir matris oluşturulacaktır. Burada iki matris elemanları arasındaki minimum değişim gösteren değerler ile ilgilenileceği için minimum değişime sahip her değerden iki adet olacaktır. İşlem yükünü azaltmak amaçlı farklı hız ve farklı menzil bilgilerinin oluşabileceği sayısal değerler;

$$\text{Mesafe – Hız Matris Boyutu} : [ ]_{nxn}$$

biçiminde  $(nxn)$ 'lik matrislerden oluşacak şekilde düzenlenmiştir.

Bu matris elemanlarında hedeflerin menzil bilgileri yaklaşık olarak aynı kalacakken, hız bilgileri çok farklı değerler alarak değişecektir. Bu değişime maruz kalmayacak gerçek hedef hız değerleri, kendi menziline karşılık gelen matris elemanı üzerinde kısmen kesişecek ya da oldukça yaklaşacaktır. Eğer hedefler aynı menzilde ise birbirleri ile kesişemeyecektir ancak iki noktanın birbirlerine olan menzilleri diğer olası menzillere göre oldukça düşük olacaktır. Bu sayede en düşük farka karşılık gelen menzil-hız matris elemanı bize hedefin gerçek bilgilerini verecektir. Şekil 4.5’de hedeflere ait menzil ve hız eşleştirmeleri yapabilmek için önerilmiş olan bu algoritmanın genel akış diyagramı verilmiştir.





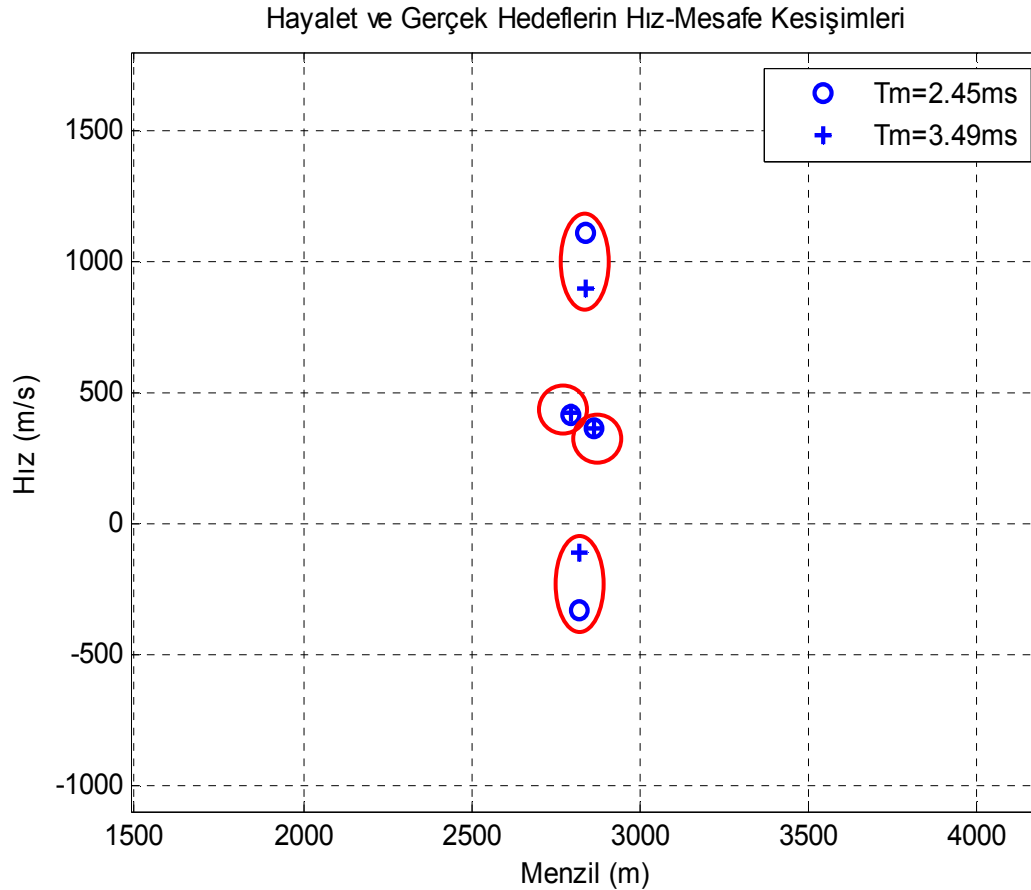
**Şekil 4.5** Çoklu hedeflerin tespit algoritması genel akış diyagramı

Şimdi bu düşünceleri gözlemlmek üzere iki farklı kipleme frekans periyodunda çalışan Çizelge 4.1'de tanımlanan sürekli dalga radarı üzerinden benzetim yapılmıştır.

Benzetim çalışmasında hedeflere ait menzil-hız verileri  $R_1 = 2865$  m,  $V_1 = 365$  m/s,  $R_2 = 2796$  m,  $V_1 = 421$  m/s olarak girilmiştir. Ayrıca ikinci tarama için seçilen kipleme periyodu  $T_m' = 2.45$  ms'dir.

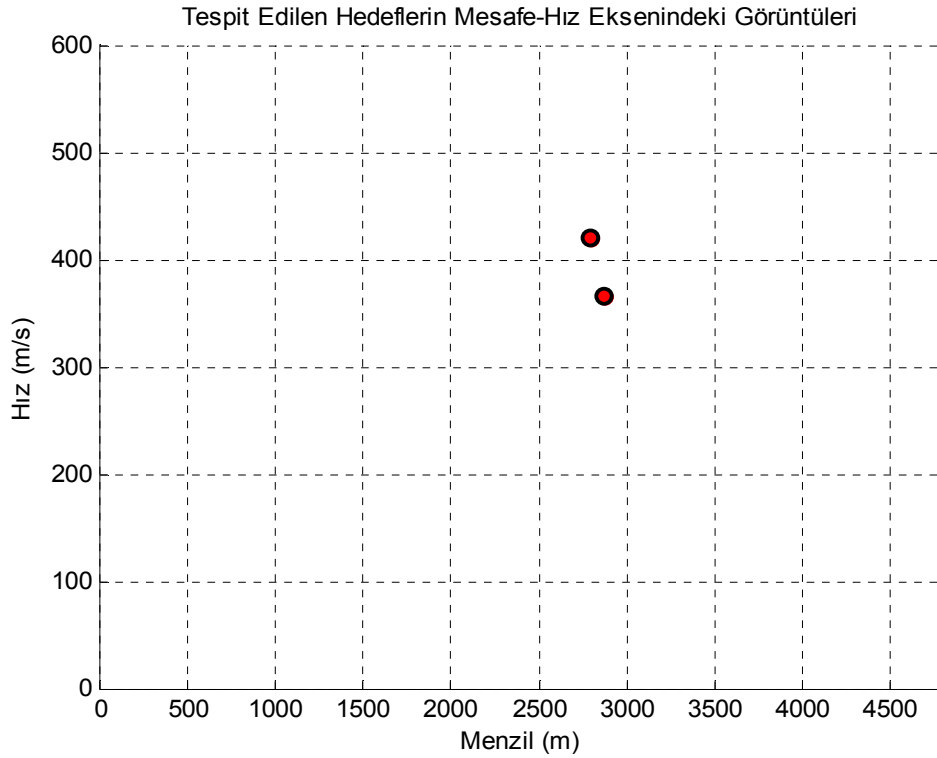


Benzetim çalışması yukarıda verilmiş hedef bilgileri girdi alınarak çalıştırıldığında çoklu hedeflerin eşleşme görüntüleri öncelikle Şekil 4.6'da sanal ve gerçek hedefler olarak iç içe gözlemlenecektir. Görüldüğü gibi iki farklı kipleme periyodu kullanıp ölçülen hedef menzil hız bilgilerini karşılıklı olarak her bir tarama için eşleştirildiğinde sanal hedefler birbirleri ile eşleşemeyecektir.



**Şekil 4.6** İki farklı hedefi ayırt edebilmek için iki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gerçek ve sanal hedeflerin menzil-hız grafiğindeki yerleşimleri

Sanal hedefleri elemek üzere yukarıda tanımlanmış minimum fark algoritmasını kullanarak Şekil 4.7 elde edilmiştir. Görüldüğü gibi sanal hedefler arasında ayrıklık tasarlanan algoritma ile sezinlenerek elenmiştir.



**Şekil 4.7** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile iki adet tehdidin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi

İki farklı kipleme periyodu zamanı kullanılarak iki ayrı ölçüm yapılmış ve bu ölçümler birbirleri ile örtüştürmek istenmiştir. Gerçek hedef verilerinin her iki taramada da aynı kalması gerektiği görülmüştür. Bu teoriden yola çıkarak ortamda birden fazla hedef olması durumunda sanal hedeflerin ayrık duracağı ve elenebileceği görülmüştür. Oluşturulmuş örnek ölçüm matrislerine aşağıda detaylı olarak değinilmiştir.

İki farklı tarama periyodunda elde edilen hedef menzil ve hız matrisleri aşağıda verilmiştir. Bu matris elemanları arasındaki eşleşme renkleri ile işaretlenmiştir.

$$Mesafe\_Matrisi = \begin{bmatrix} 2795.7 & 2839.8 \\ 2821.2 & 2865.4 \end{bmatrix} \text{ (m)}$$

$$T_m = 2.45 \text{ ms}$$

$$Hız\_Matrisi = \begin{bmatrix} 418.4 & 1112.2 \\ -326.5 & 367.3 \end{bmatrix} \text{ (m/s)}$$

$$Mesafe\_Matrisi = \begin{bmatrix} 2796.3 & 2839.2 \\ 2822.2 & 2865.1 \end{bmatrix} \text{ (m)}$$

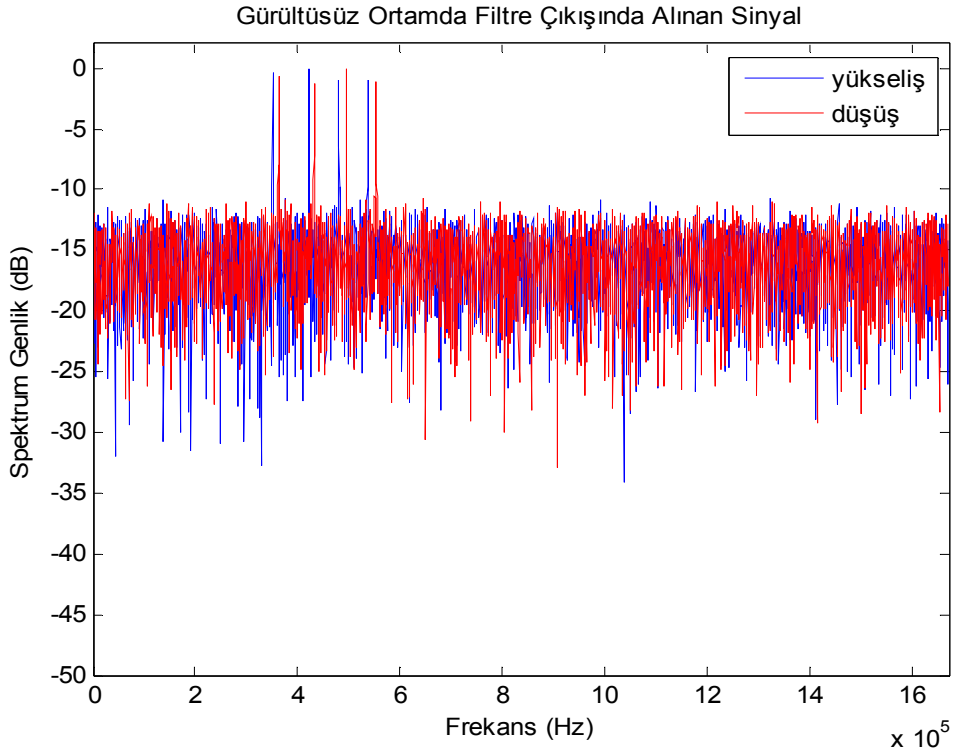
$$T_m = 3.49 \text{ ms}$$

$$Hız\_Matrisi = \begin{bmatrix} 363.8 & 6982.8 \\ -6203.4 & 415.5 \end{bmatrix} \text{ (m/s)}$$

Menzil ve hız matris elamanlarında gözlemlendiği gibi, eğer iki farklı kipleme periyodu kullanılırsa menzil matrislerindeki elemanlarda belirgin değişiklikler olmazken, hız matris elamanlarında daha önce analitik olarak ispatlandığı gibi büyük değişimler olacaktır. Bu değişimler bir taraftan sanal hedefleri yaratırken diğer taraftan gerçek hedefler için çok küçük değişimler gösterecektir. Bu etkiden faydalanılarak birden fazla hedef olması durumunda hedeflerin menzil ve hız bilgileri birbirinden bağımsız olarak hesaplanabilir. Bu algoritma çalıştırıldığında Şekil 4.7'de verildiği gibi sanal hedefler elenerek gerçek hedefler yakalanmıştır.

Sadece hedef sayısını artırarak ölçümleri tekrar edelim ve sonuçları gözlemleyelim. Benzetim çalışmasında dört hedefe ait menzil (m) ve hız (m/s) bilgi girişleri aşağıdaki gibi kabul edilip benzetim çıktıları kayıt edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1200 & 1050 & 879 & 1342 \\ 350 & 250 & 312 & 398 \end{bmatrix}$$



**Şekil 4.8** Dört hedef için  $T_m = 2.45ms$  iken; tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumundaki genlik grafiğinin alt-üst vuru frekans bileşenleri olarak gözlemlenmesi

Birinci kipleme zamanında elde edilmiş Şekil 4.8'e göre, her hedef için alt-üst vuru frekansı yaklaşık değerleri;

$$f_{up_1} = 0.351 \text{ MHz}, f_{down_1} = 0.363 \text{ MHz},$$

$$f_{up_2} = 0.422 \text{ MHz}, f_{down_2} = 0.432 \text{ MHz},$$

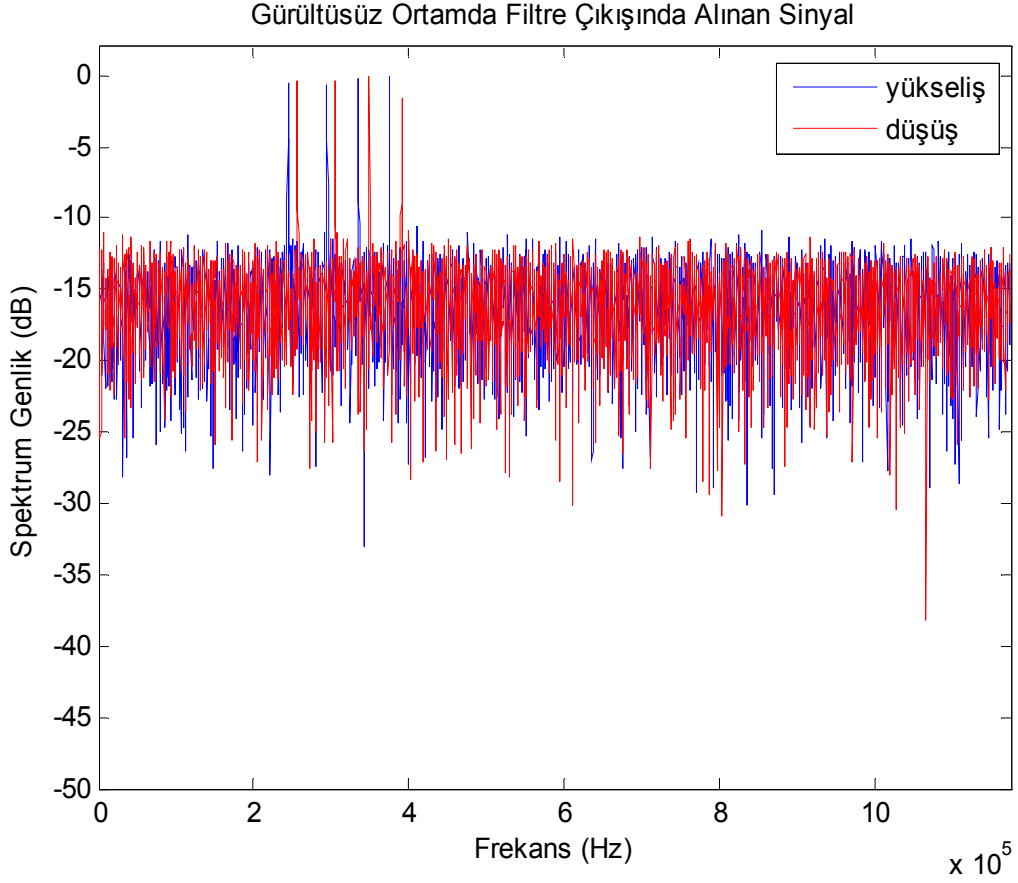
$$f_{up_3} = 0.481 \text{ MHz}, f_{down_3} = 0.495 \text{ MHz},$$

$$f_{up_4} = 0.537 \text{ MHz}, f_{down_4} = 0.553 \text{ MHz}$$

olarak ölçülmüştür.

Dört yükselen kenar ve dört düşen kenar tarama sonucu ölçülmüş toplamda sekiz frekans değeri olacaktır. Daha önce belirtildiği gibi 4x4 boyutunda hedef menzil ve hız verileri için iki adet matris oluşturulmuştur. Toplamda minimum fark

algoritmasına giren ölçüm sayısı, ilk tarama 16 adet ikinci tarama olmak üzere 32 adet olacaktır.



**Şekil 4.9** Dört hedef için  $T_m = 3.49ms$  iken; tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumundaki genlik grafiğinin alt-üst vuru frekans bileşenleri olarak gözlemlenmesi

İkinci kipleme zamanında yapılan taramada Şekil 4.9'a göre, her hedef için alt-üst vuru frekansı yaklaşık değerleri;

$$\begin{aligned} f_{up_1} &= 0.244 \text{ MHz}, & f_{down_1} &= 0.256 \text{ MHz}, \\ f_{up_2} &= 0.294 \text{ MHz}, & f_{down_2} &= 0.304 \text{ MHz}, \\ f_{up_3} &= 0.335 \text{ MHz}, & f_{down_3} &= 0.349 \text{ MHz}, \\ f_{up_4} &= 0.374 \text{ MHz}, & f_{down_4} &= 0.3899 \text{ MHz} \end{aligned}$$

olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.8'de ve Şekil 4.9'da gözlemlendiği üzere, hedef sayısının birden fazla olması durumunda alt-üst vuru frekanslarını birbirleri ile doğru olarak eşleştirmek bu aşamada mümkün gibi gözükmemektedir. Ancak, matematiksel olarak özellikle hedef hız değerlerinin farklı kipleme zamanı için farklı olduğu görülmüştür. Daha önce belirtildiği gibi bu farkların minimum olduğu kısmi kesim noktaları bize doğru hedef menzil ve hız bilgisini verecektir. Olası pek çok duruma rağmen doğru hedefin menzil ve hız bilgilerine ulaşmak, matris elamanları arasında yapılacak eşleştirme ardından çok karmaşık olmamaktadır.

İki farklı kipleme zamanında yapılan taramada yukarıda ölçülmüş vuru frekanslarının kendi aralarında oluşturacağı olası eşleşmelere karşılık gelen hedef menzil ve hız değerlerinden oluşturulmuş matrisler aşağıdaki gibi olacaktır.

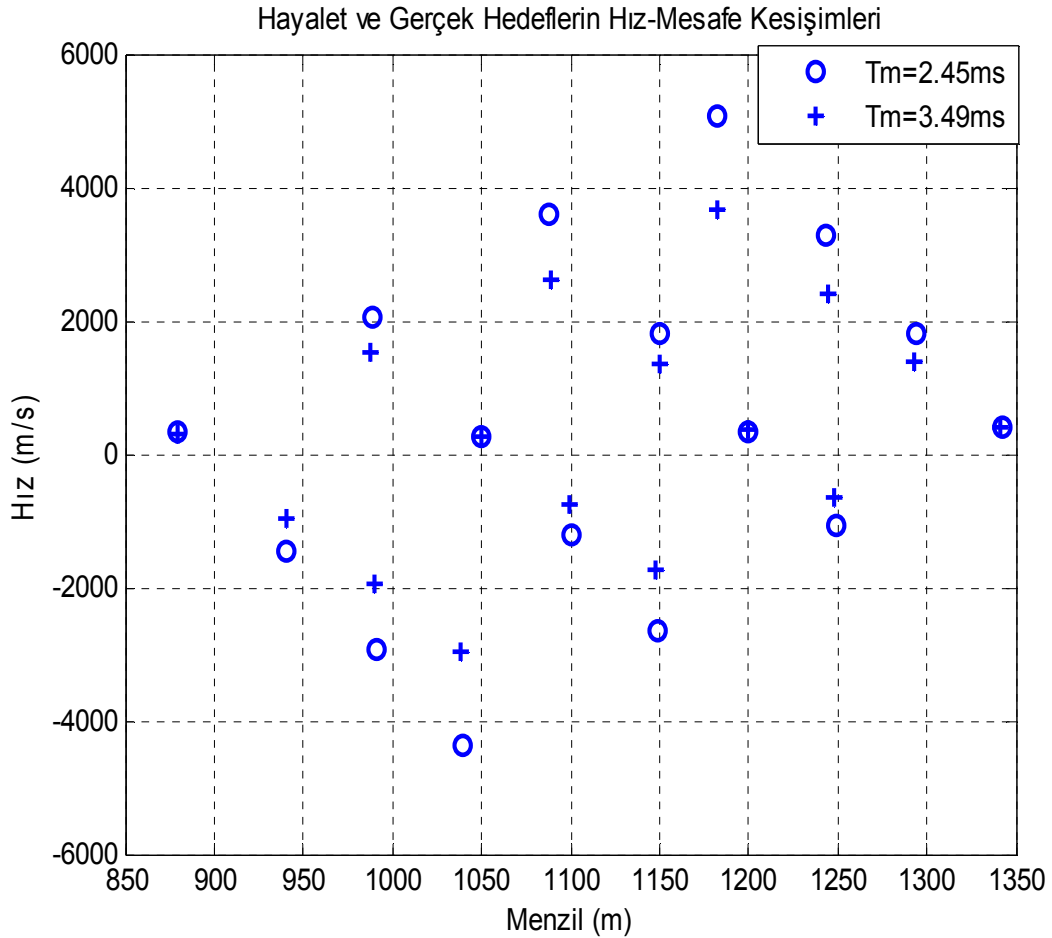
$$Mesafe\_Matrisi = \begin{bmatrix} 879.1 & 989.0 & 1088.5 & 1182.1 \\ 940.4 & 1050.2 & 1149.7 & 1243.3 \\ 990.8 & 1100.7 & 1200.1 & 1293.7 \\ 1039.5 & 1149.3 & 1248.8 & 1342.3 \end{bmatrix} \quad (m) \quad T_m = 2.45 \text{ ms}$$

$$Hız\_Matrisi = \begin{bmatrix} 316.3 & 2040.8 & 3602.0 & 5071.4 \\ -1469.4 & 255.1 & 1816.3 & 3285.7 \\ -2938.8 & -1214.3 & 346.9 & 1816.3 \\ -4357.1 & -2632.7 & -1071.4 & 398.0 \end{bmatrix} \quad (m/s)$$

$$Mesafe\_Matrisi = \begin{bmatrix} 879.0 & 988.2 & 1088.9 & 1182.5 \\ 940.6 & 1049.8 & 1150.5 & 1244.1 \\ 989.9 & 1099.1 & 1199.8 & 1293.5 \\ 1038.2 & 1147.4 & 1248.2 & 1341.8 \end{bmatrix} \quad (m) \quad T_m = 3.49 \text{ ms}$$

$$Hız\_Matrisi = \begin{bmatrix} 308.0 & 1511.5 & 2621.8 & 3653.3 \\ -952.7 & 250.7 & 1361.0 & 2392.6 \\ -1962.8 & -759.3 & 351.0 & 1382.5 \\ -2951.3 & -1747.9 & -637.5 & 394.0 \end{bmatrix} \quad (m/s)$$

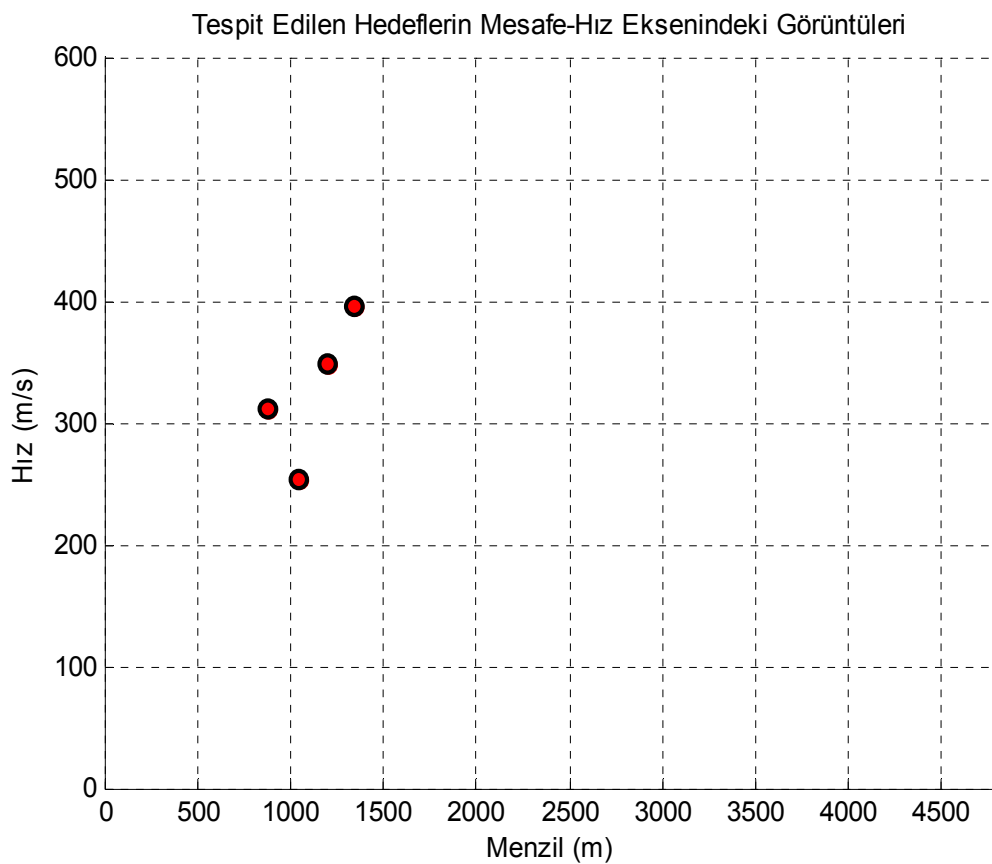
Hedefe ait menzil ve hız matrislerindeki her farklı renk bir hedefi temsil etmektedir. Hedeflerin iki farklı menzil-hız matrislerindeki yerlerini görebilmek için işaretleme yapılmıştır. Farklı kipleme zamanlarında elde edilen menzil-hız matrisleri dikkatlice incelendiğinde birbirleri ile eşleştikleri gözlemlenebilir. Tüm olası ölçümler için matris elamanlarına karşılık gelecek değerler Şekil 4.10'da verilmiştir. Şekil 4.10'da verilen grafik "o" 2.45 ms'lik kipleme zamanında alınan ölçümleri, "+" ise 3.49 ms kipleme zamanı sonrası alınan ölçümleri göstermektedir. Görülüyor ki, kipleme zamanının değişimine karşılık vermeyen hedefler bizim gerçek hedeflerimizdir. Yani "o" ve "+" eşleşmelerinin olduğu noktalar doğru menzil ve hız bilgisini barındıracaktır.



**Şekil 4.10** Dört farklı hedefi ayırt edebilmek için iki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gerçek ve sahte hedeflerin menzil-hız grafiğindeki yerleşimleri

İki farklı kipleme periyodu kullanarak iki farklı ölçüm sonuçlarını karşılaştırdığımızda sanal hedeflerin kesişim gösteremediği çok net olarak görülmektedir. Burada da görülmektedir ki sanal hedeflerin hızları farklı kipleme frekansı sonucu çok farklı yerlere gitmiştir. Bu da yöntemin etkinliğini ortaya çıkarmaktadır.

İki farklı kipleme zamanında yapılan taramaya göre elde edilmiş menzil-hız matrisleri, oluşturulan algorithmadan geçirildiğinde sanal hedefler elenmiş olarak Şekil 4.11'de çizdirilmiştir.



**Şekil 4.11** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile dört adet tehdidin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi

Algoritma sonrasında elde edilen menzil-hız verileri aşağıda verildiği gibi ölçülmüştür. Görüldüğü gibi ölçüm sonuçları benzetim çalışması girdi değerlerine oldukça yakındır.

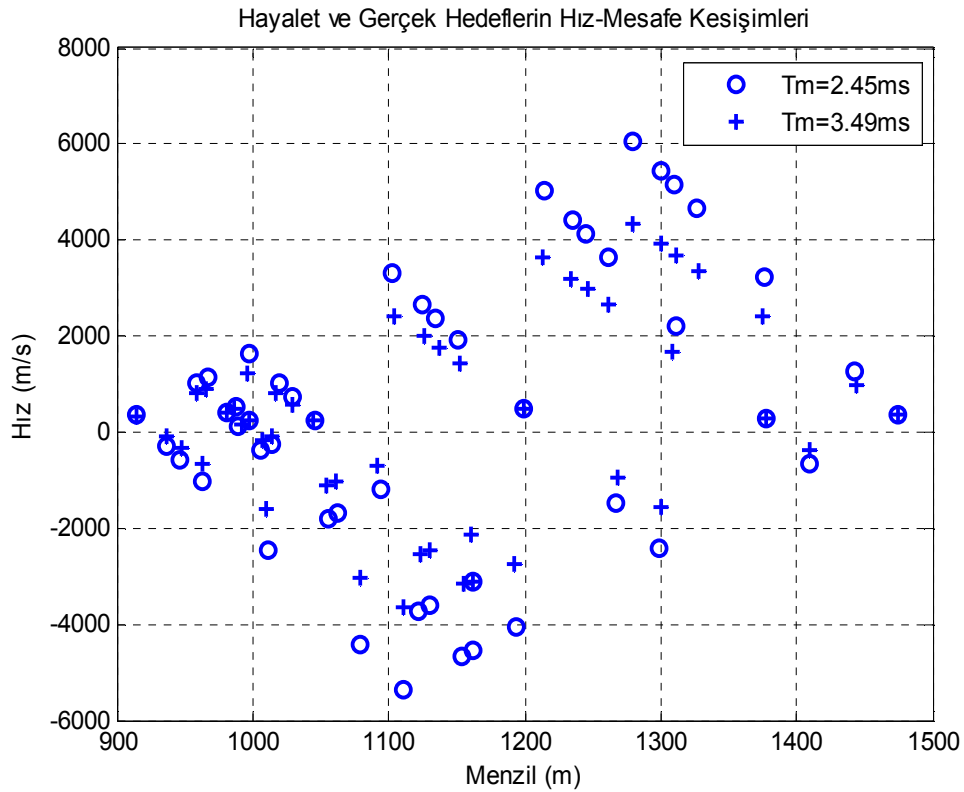


$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1200 & 1050 & 879.1 & 1342.1 \\ 348.97 & 252.91 & 312.17 & 395.97 \end{bmatrix}$$

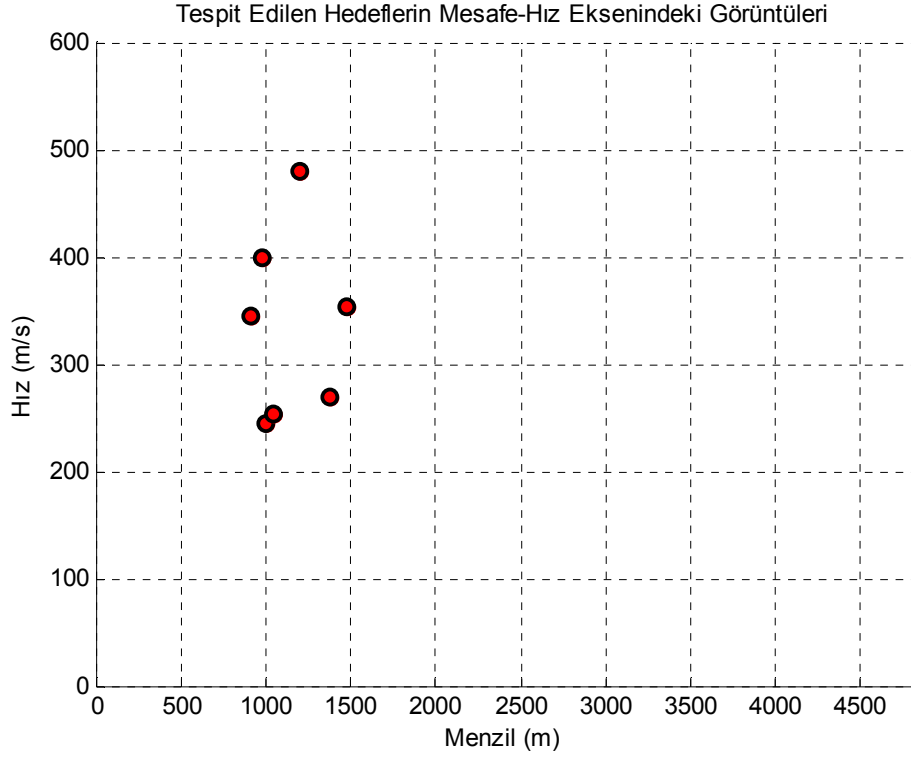
Benzetim radar parametreleri değiştirilmeden hedef sayısını daha da artırarak algoritma başarımını gözlemleyelim. Bu durumda seçilen yedi hedef için menzil (m) ve hız (m/s) bilgi girişleri aşağıdaki gibi kabul edilsin.

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 & R_6 & R_7 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 & V_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1200 & 1045 & 1475 & 998 & 980 & 1378 & 915 \\ 480 & 250 & 356 & 245 & 400 & 274 & 346 \end{bmatrix}$$

Benzetim sonuçları, sanal hedefleri süzen algoritma öncesi ve sonrası sırası ile Şekil 4.12'de ve Şekil 4.13'de verilmiştir. Bu grafiklerde işaretlenmiş değerler benzetim öncesi tanımlanmış hedeflerin menzil ve hız değerlerine oldukça yakındır. Görüldüğü gibi hedef sayısı artırıldığında yöntem başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Aşağıda verilmiş benzetim sonrası gözlemlenen ölçüm sonuçları gerçek değerlerine oldukça yakındır.

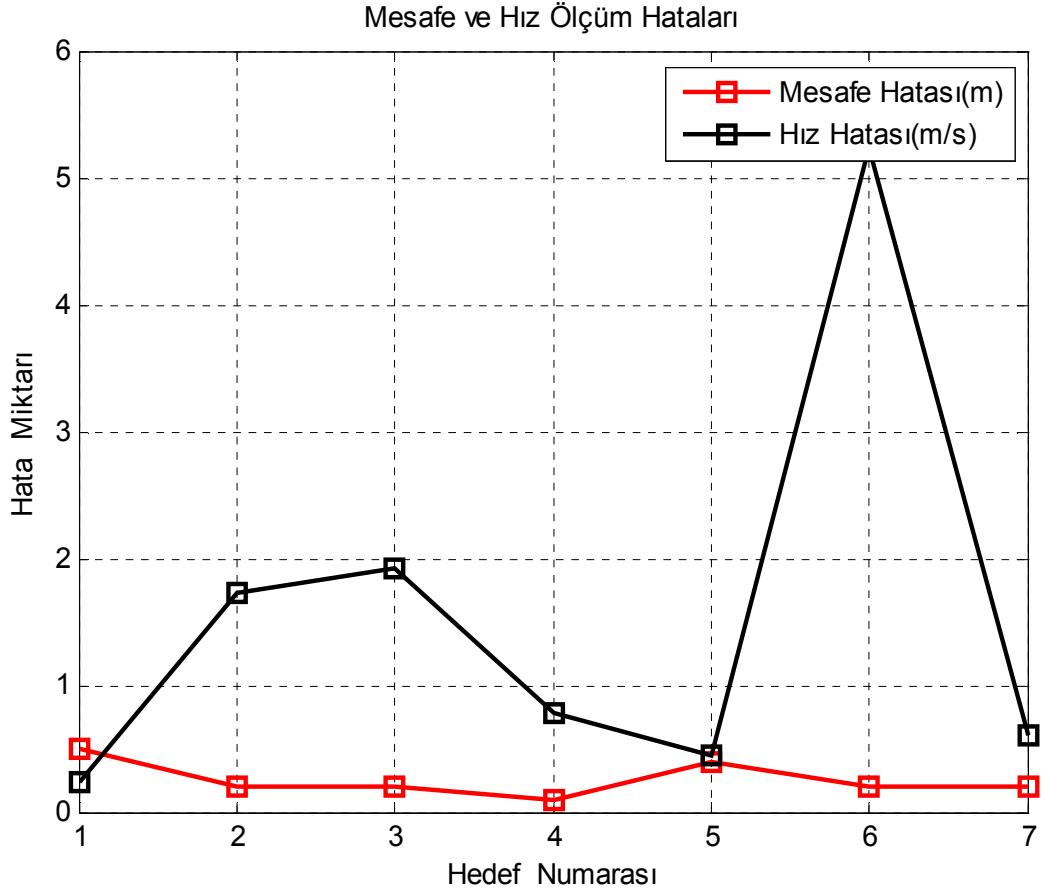


**Şekil 4.12** Radar tehdidi olarak farklı menzil ve farklı hızlarda yedi hedef için elde edilmiş tüm sanal ve gerçek değerlerin gözlenmesi



**Şekil 4.13** Radar tehdidi olarak farklı menzil ve farklı hızlarda yedi hedefin, iki farklı kipleme zaman taraması ile oluşmuş sanal hedeflerin içerisinde bulunması

Şekil 4.14’de benzetim öncesi tanımlanan hedeflerin gerçek menzil-hız verileri ile benzetim sonrası ölçülen menzil-hız verileri arasındaki hata miktarını verilmiştir. Ölçüm hatalarının gerçek değerinden sapmalarının nedenleri parametre değişiminde kullanılan reel “ $k$ ” değeri üzerinden oluşturulan tam sayı olmayan parametrelerin tam sayıya yuvarlanması gerektiği yerlerde elde edilen farklar ve HFD işleminin hedef maksimum menzil ve hız çözünürlüğü kadar hata yapma olasılığı gösterilebilir.

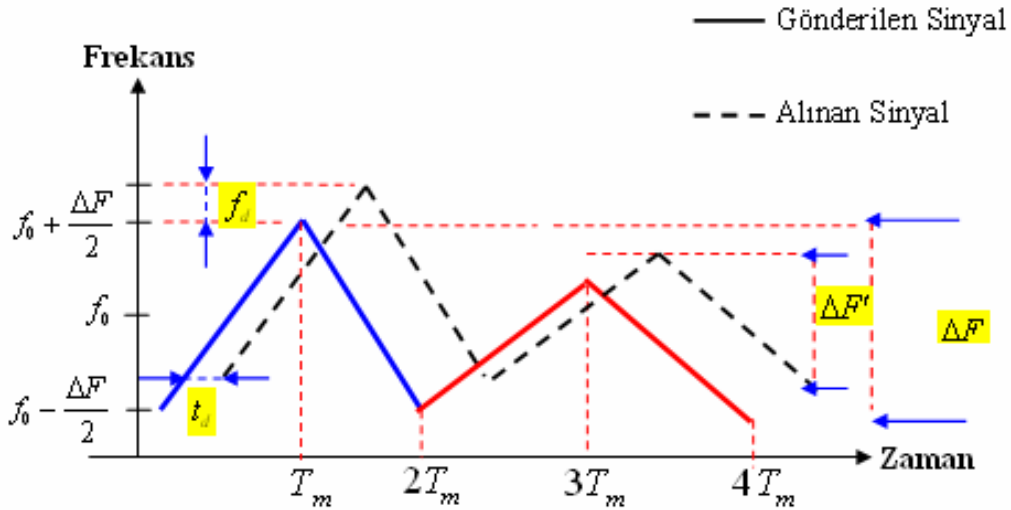


**Şekil 4.14** İki farklı kipleme periyodunda gönderilen tarama frekansı kullanılarak ölçülen yedi hedefe ait gerçek menzil-hız ile tahmin edilen menzil-hız verileri arasındaki hata grafiği

Çoklu hedeflerin var olduğu durumda, hedefleri ayırt edebilmek için yapılan çalışmalar boyunca farklı iki kipleme zamanı kullanarak hedef menziline karşılık gelen vuru frekans değerinin Doppler frekans değeri yanında oldukça büyük olması etkisinden faydalanılmıştır. Bu büyüklük sayesinde kipleme zamanı değişimi ikinci taramada hedefin yeni menzili oluşması kısmen engellemiştir. Sadece hedefin hızı belirgin olarak değişimlere uğramıştır. Bu değişimden faydalanılarak eski ve yeni hedef menzil-hız bilgisi çiftleri eşleştirilmeye çalışılmıştır. Bu eşleştirme, Şekil 4.5'de verilen algoritma akış diyagramında gösterildiği gibi ölçümler arasındaki *Minimum Aralık Değişim (Minimum Distance Theorem)* mantığına dayanmaktadır. Değişimin minimum olduğu noktalar bize gerçek hedef menzil-hız çiftini verecektir. Bu yöntem sayesinde FMCW üçgen tarama formu ile çoklu hedeflerin sinyal spektrumunda ayırt edilebileceği görülmüştür. Ayrıca, hedef menzil ve hız bilgileri

matematiksel olarak bulunurken sadece tek boyutta HFD almak başarılı sonuç vermektedir.

Ayrıca kipleme zamanı değiştirilmeden, radar çalışma bant genişliği ( $\Delta F$ ) de değiştirildiğinde yukarıda verilen matematiksel denklemler aynı biçimde etkileneceği için benzer ölçümler alınabilir. Sonuçlar benzer olacaktır. Yani radar, ya bant genişliğini değiştirip ya da kipleme zaman periyodunu değiştirerek tarama yaptığına çoklu hedefleri ayırt edebilir duruma getirilebilir. Bant genişliği değiştirerek oluşturulan taramanın doğrusal formu Şekil 4.15’de verilmiştir.



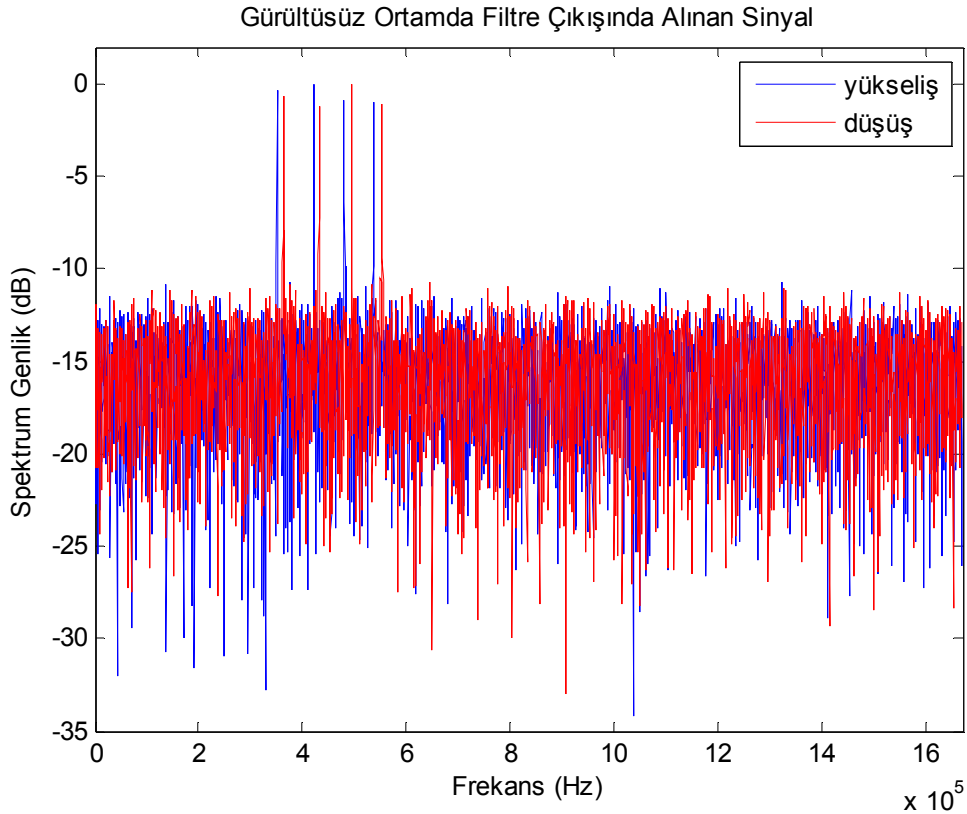
**Şekil 4.15** Çoklu hedeflerin çözülmesi için iki farklı bant genişliğinde tarama yapılması durumunda gönderme tarama sinyallerinin zaman-frekans eksenindeki görüntüsü

Daha önce kipleme periyodu  $T_m$  değiştirilip iki farklı tarama yapılarak Eşitlik (2.36)'da elde edilen hedeflerin menzil ve hız bilgilerinin değişimleri analitik olarak Eşitlik (4.11)'de ve Eşitlik (4.14)'de sırası ile çözümlenmişti. Eğer tarama periyodu yerine gönderilen sinyalin tarama bant genişliği frekansı Şekil 4.15'de verildiği gibi değiştirilirse bu denklemler aynı şekilde etkilenecektir ve elde edilen sonuçlar değişmeyecektir. Şimdi tarama bant genişliği değişiminin, tehdit ortamında birden fazla hedef olması durumundaki etkilerini aynı benzetim çalışması parametreleri ile gözlemleyelim.

Benzetim çalışmasında dört hedefe ait menzil ( m ) ve hız ( m/s ) verileri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1200 & 1050 & 879 & 1342 \\ 350 & 250 & 312 & 398 \end{bmatrix}$$

Radar tehdit ortamında yukarıdaki gibi dört hedefin var olduğu düşünülmüştür. Bu dört hedefi aynı anda birbirlerinden ayırt edebilmek için iki farklı bant genişliği frekansında ( $\Delta F = 150$  MHz,  $\Delta F' \approx 294$  MHz) tarama yapıldığında radar tarafından gönderilen sinyaller ve radar almacında alçak geçiren süzgeç çıkışında elde edilecek toplam vuru frekansları Şekil 4.16'da ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



**Şekil 4.16** Dört hedef için  $\Delta F = 150$  MHz iken; almaç karıştırıcısı çıkışında elde edilen toplam vuru frekanslarının zaman ekseninde gözlemlenmesi

$\Delta F = 150$  MHz'de birinci tarama bant genişliğinde elde edilmiş Şekil 4.16'ya göre her bir hedef için vuru frekansı yaklaşık değerleri;

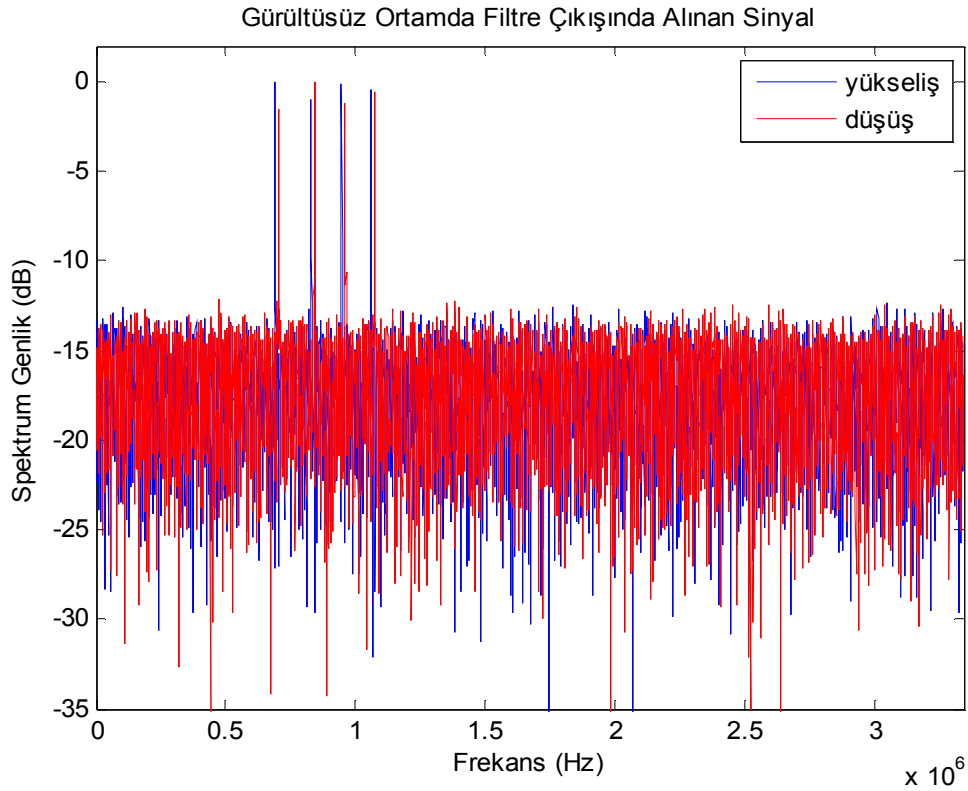
$$f_{up_1} = 0.351 \text{ MHz}, f_{down_1} = 0.363 \text{ MHz},$$

$$f_{up_2} = 0.422 \text{ MHz}, f_{down_2} = 0.432 \text{ MHz},$$

$$f_{up_3} = 0.481 \text{ MHz}, f_{down_3} = 0.495 \text{ MHz},$$

$$f_{up_4} = 0.538 \text{ MHz}, f_{down_4} = 0.553 \text{ MHz}$$

olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.17** Dört hedef için  $\Delta F = 294 \text{ MHz}$  iken; almaç karıştırıcısı çıkışında elde edilen toplam vuru frekanslarının zaman ekseninde gözlemlenmesi

$\Delta F = 294 \text{ MHz}$ 'de ikinci tarama bant genişliğinde elde edilmiş Şekil 4.17'ye göre her bir hedef için vuru frekansı yaklaşık değerleri;

$$f_{up_1} = 0.692 \text{ MHz}, f_{down_1} = 0.701 \text{ MHz},$$

$$f_{up_2} = 0.830 \text{ MHz}, f_{down_2} = 0.841 \text{ MHz},$$

$$f_{up_3} = 0.947 \text{ MHz}, f_{down_3} = 0.961 \text{ MHz},$$

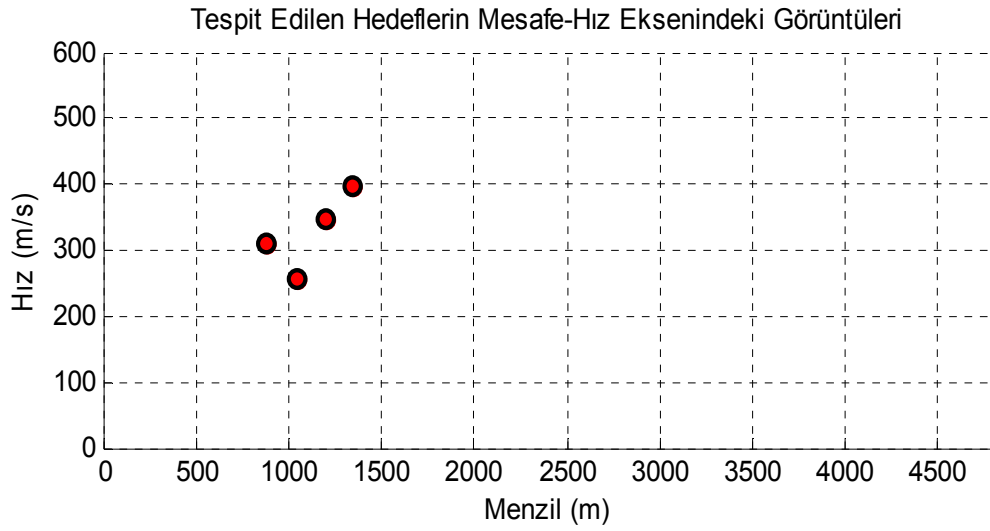
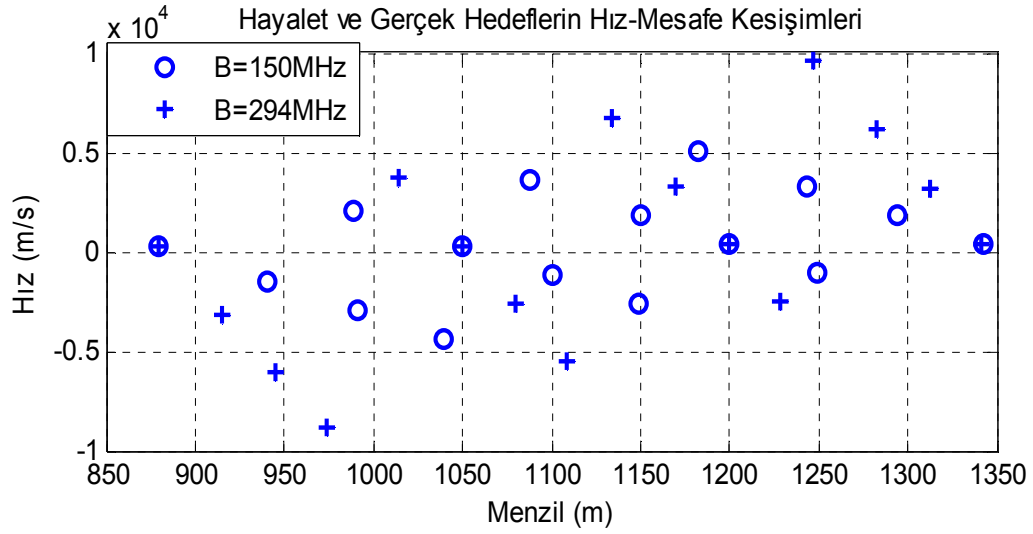
$$f_{up_4} = 1.059 \text{ MHz}, f_{down_4} = 1.075 \text{ MHz}$$

olarak ölçülmüştür.

Daha önce iki farklı kipleme periyodu kullanılarak taranan aynı hedefleri menzil-hız bilgilerinin kesim noktaları Şekil 4.11’de işaretlenmişti. İki farklı bant genişliği frekansı tarama yapıldığında Şekil 4.18’de elde edilen sonuçlar da benzer olarak işaretlenmiştir. Birden fazla hedefin bulunduğu ortamda iki farklı bant genişliği kullanılarak tarama yapıldığında eş anlı olarak hedefler birbirinden ayırt edilip, menzil ve hız bilgileri doğru olarak ölçülmüştür. Benzetim sonrası hedef menzil ve hız değerleri,

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1199.96 & 1050.14 & 878.99 & 1342.11 \\ 346.94 & 255.10 & 311.22 & 397.96 \end{bmatrix}$$

olarak ölçülmüştür.



**Şekil 4.18** Dört farklı hedefi ayırt edebilmek için iki farklı bant genişliği frekansında tarama yapılması durumunda gerçek hedeflerin menzil ve hız bilgilerinin Minimum Fark Algoritması ile işaretlenmesi

Sonuç olarak birden fazla hedefin olması durumunda, üçgen tarama formu temel bileşenleri olan ve Eşitlik (2.36) denklemlerini doğrudan etkileyen kipleme zamanı  $T_m$  ve bant genişliği  $\Delta F$  belirli bir tarama sonrası değiştirilir. İlk tarama ölçüm verileri ile ikinci ölçüm verileri karşılaştırılır. Karşılaştırma sonrası gerçek hedeflerin bilgileri eşleşebilirken, sahte hedeflerin bilgileri birbirleri ile eşleşemeyecektir. Bu sayede kısmi kesişim noktalarında hedeflerin menzil ve hız bilgilerine erişilecektir.



## 5. FMCW RADAR UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Bu bölümde araç radarı, füze ikaz radarı ve LPI gözetleme radarı olarak kullanılacak üç FMCW sistemin sinyal tasarımı yapılmıştır.

Günümüzde FMCW radarların; çarpışma önleme araç radarları, menzil kontrol araç radarları, polis radarı, yükseklikölçerler radarı, füze ikaz radarları, düşük olasılıklı karışma radarları gibi pek çok uygulama alanı bulunmaktadır. FMCW radarlar yüksek menzil-hız çözünürlüğü gerektiren çok kısa ve orta menzil ölçümlerinde sürekli zamanlı çalışarak kesintisiz veri toplayabildiği için özellikle tercih edilirler. Aynı zamanda belirli bir dalga formunda frekans kiplemeli kodlama ile gönderildikleri için gürültü ortamında çalışma başarımları oldukça iyidir. Bu sayede karıştırma tehditlerine olan bağışıklığı yüksek LPI radarlarda da kullanılır.

Bu bölümde FMCW dalga formunun kullanıldığı araç radarları, füze erken ikaz radarları ve LPI radarlar üzerinde durulacaktır. Bu uygulama alanları sırası ile kısa menzil, orta menzil ve uzak menzil özelliklerini barındırdığı için FMCW radarların tasarımı ve ölçüm doğrulukları, kritik radar tasarım parametreleri değiştirilerek analiz edilecektir.

### 5.1. FMCW Araç Radarları

Günümüzde, yüksek performanslı araç radar tasarımları farklı uygulama alanlarında geliştirilmeye devam edilmektedir. Çoklu hedeflerin var olduğu durumlarda bile bu radarlar için tasarlanmış sensörlerle, hedefe ait menzil-hız bilgileri yüksek çözünürlük ve doğrulukta ölçülebilir. Amaç, kısa işlem zamanı içerisinde güvenilir, oldukça düşük sabit yanlış alarm oranında hedef bilgilerine erişebilmektir. Bu bilgiler sayesinde araç için gerekli güvenlik önlemleri alınabilir. Son zamanlarda Uyarlamalı Hız Kontrol (Adaptive Cruise Control, ACC) sistemlerinin dışında, çarpışma menzili tahmini yapabilme ve buna göre çarpışma engelleme (Collision Avoidance) sistemlerinde de radar sensörleri kullanılmaktadır. Güvenlik gereksinimi üzerine tasarlanan bu radarlarda, çarpışmadan 300 metre önce hedef varlığı tanımlama işlemlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır

[Meinecke, Rohling, 2000]. Burada yüksek performans, sensörün minimum sabit yanlış alarm oranında gözlem alanı içerisindeki birden fazla hedefin hız ve menzil bilgilerinin yüksek çözünürlükte ve hızlı güncelleme zamanında ölçülebilmesi demektir.

Hava koşulları ve ölçüm doğruluğu düşünüldüğünde, menzil-hız ölçüm hassasiyeti için araba radarları, yüksek çalışma frekanslarında ve bant genişliğinde kullanılır. Yüksek çalışma frekans bantları;  $K_u$ -Bant (12.5 GHz – 18.0 GHz), K-Bant (18.0 GHz – 26.5 GHz),  $K_a$ -Bant (26.5 GHz – 40.0 GHz) ve Milimetre Frekans Bant 34 GHz-110 GHz'dır. Yüksek frekans bantları, sisli, tozlu, bulutlu ve benzeri hava olaylarından oldukça etkilenir. Çizelge 5.1'de gösterildiği gibi yüksek frekanslarda artış gösteren atmosferik zayıflama nedeni ile kısa menzil ölçümlerde kullanılır [David, 1997].

**Çizelge 5.1** Radar çalışma frekanslarına göre deniz seviyesinde temiz havada atmosferik zayıflama katsayıları

<b>Radar Bandı</b>	<b>Çalışma Frekansı (GHz)</b>	<b>Zayıflama Katsayısı (dB/km)</b>
L	1.3	0.012
S	3.0	0.015
C	5.5	0.017
X	10	0.024
Ku	15	0.055
K	22	0.3
Ka	35	0.14
V	60	35.0
W	95	0.8
-	140	1.0
-	240	15.0

Kısa menzilde yüksek ölçüm çözünürlüğü gerektiren araç radarlarına tasarlanan sensörlerin çalışma frekansları bu bantlar içerisinde seçilir. Günümüzde üretilmiş bu sensörlerin tipik çalışma frekans değerleri 24 GHz, 30-33 GHz, 77 GHz ve 94 GHz'dir. Uyarlamalı hız kontrol ve çarpışma engelleme gibi sistemler için geliştirilen sensörler W-bant 77 GHz çalışma frekansında üretilmeye başlanmıştır. Bu frekansta anten boyları 10 cm boyutlarında olup oldukça minyatürdür ve gönderilen güç 1-100 mW seviyelerindedir. Ayrıca, bu özelliği ile robot uygulamalarında kullanılan sensörlerin tasarımına öncülük sağlar. Deneysel çalışmalarda ise 94 GHz'lik çalışma frekans bandı kullanılmaktadır. Bu amaçla tasarlanmış tipik radarlardan bir tanesine ait sistem özellikleri Çizelge 5.2'de örneklendirilmiştir [Rohling, 2010].

**Çizelge 5.2** Örnek bir Araç Sensör Radarı çalışma sistem parametreleri

Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$f_o = 24$ GHz	Radar Çalışma Frekansı
$\Delta R = 1$ metre	Menzil Ölçüm Çözünürlüğü
$V_{\max} = 250$ m/s	Maksimum Ölçülebilen Hız Limiti
$\Delta V = 1$ m/s	Hız Ölçüm Çözünürlüğü
Chirp Uzunluğu = 40 ms	Hedefi Aydınlatma Zamanı

Araç radar sistemleri, ortamda birden fazla aracın da olacağı durum düşünülerek bekleme yapmaksızın sürekli olarak ölçüm almak gereksinimi duymaktadır. Dolayısıyla bu sistemler sürekli dalga gönderimi prensibi ile çalışırlar. Sürekli zamanlı sinyaller, darbe radarlarına göre daha kısa ölçüm zamanına sahip olmakla birlikte daha düşük ölçüm parametrelerini hesaplama karmaşıklığı içerdiğinden bu tür uygulamalarda tercih edilirler. Bunun yanı sıra araç uygulamaları çok yüksek menzil ölçüm doğruluğu gerektirdiğinden bu hassasiyete sahip darbe radar sensörleri oldukça karmaşık olacaktır ve maliyet oldukça yükselecektir.

Bu sensörlerde, Frequency Shift Keying (FSK, Frekans Kaymalı Anahtarlama) ve Linear Frequency Modulation (LFM, Doğrusal Frekans Kiplenmeli) iki adet sürekli dalga formu kullanımı tercih edilir [Rohling, Fölster, Meinecke, Mende, 2000].

Bu çalışmada ise LFM dalga formu kullanılarak çoklu hedeflerin var olduğu durumlar için ölçümler alınmıştır. Üçgen frekans tarama dalga formu kullanılması ile hedeflere ait hız ve menzil bilgileri çözümlenmiştir. Bilgisayar ortamında ortamında oluşturulmuş benzetim araç radar tasarım parametreleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.

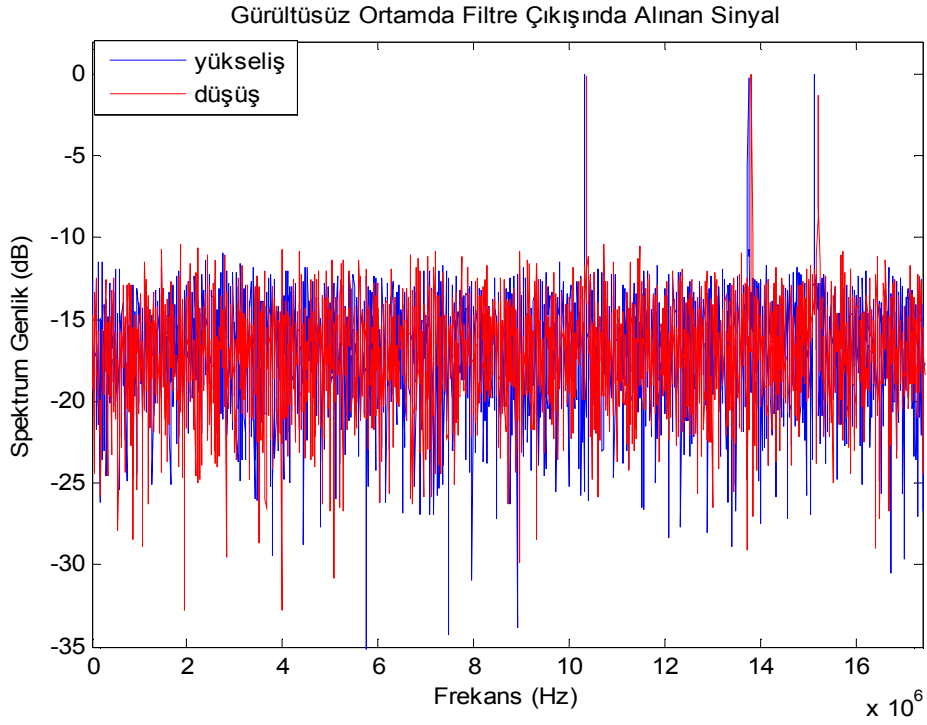
**Çizelge 5.3** Benzetim çalışması için Araç Sensör Radarı çalışma parametrelerinin belirlenmesi

Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$f_o = 77$ GHz	Radar Çalışma Frekansı
$\Delta R = 0.1$ metre	Menzil Ölçüm Çözünürlüğü
$V_{\max} = 300$ m/s	Maksimum Ölçülebilen Hız Limiti
$\Delta V = 1.2$ m/s	Hız Ölçüm Çözünürlüğü
$R_{\max} = 250$ metre	Maksimum Ölçülebilen Menzil Limiti
$T_{m_1} = 0.145$ ms	Kiplenme Periyodu Zamanı-1
$T_{m_2} = 0.274$ ms	Kiplenme Periyodu Zamanı-2
$f_s = 30$ MHz	ADC Örnekleme Zamanı
$N_s = 8192$	ADC Örnekleme Sayısı
$t_{d_{\max}} = 1.67$ $\mu$ s	Maksimum Dalga Yayılım Zamanı
$f_{beat_{\max}} = 9.3$ MHz	Maksimum Ölçülebilen Vuru Frekansı
$t_s = 0.034$ $\mu$ s	Zaman Çözünürlüğü
$N = 2 - 25$	Üçgen Dalga Tarama Sayısı

Çoklu hedefleri ayırt edebilmek için Çizelge 5.3'de verilen benzetim tasarım parametreleri içerisinde iki farklı kipleme periyodu zamanı kullanıldığı göze çarpmaktadır. Bu kipleme zamanı parametreleri değişiminden etkilenen hedef hız bilgisinin yaratacağı hayalet hedeflerin varlığı gözlenip gerçek hedeflere ulaşılmaya çalışılmıştır. İki farklı kipleme periyodu kullanmak yerine iki farklı tarama frekans bant genişliği de kullanılabilir. Bu iki yöntemle tarama frekans eğrisinin eğimi değiştirildiği için, ölçüm sonuçları bir önceki bölümde açıklandığı gibi benzer olacaktır. Çizelge 5.3'e göre benzetim yapılmış araç radarının ölçüm sonuçları iki farklı kipleme periyodu ve iki farklı tarama bant genişliği için alınmıştır. Sırası ile radar sensörü tarafından farklı menzil ve hızlarda üç ve yedi hedefin algılandığı durum benzetim yapılarak ölçüm alınmıştır.

Radar almacında üç hedefin var olduğu durumda benzetime giren hedef bilgileri sırasıyla  $R_1 = 220$  m,  $V_1 = 85$  m/s,  $R_2 = 150$  m,  $V_2 = 48$  m/s,  $R_3 = 200$  m ve  $V_3 = 75$  m/s olarak alınmıştır.

Daha önceki benzetim çalışmalarında olduğu gibi frekans ekseninde tek boyutta HFD uygulanarak Şekil 5.1'de verilen yükseliş ve düşüş tarama frekans eğrilerine karşılık gelen hedeflerin vuru frekans tepeleri elde edilecektir.



**Şekil 5.1** Üç hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_1} = 0.145$  ms )

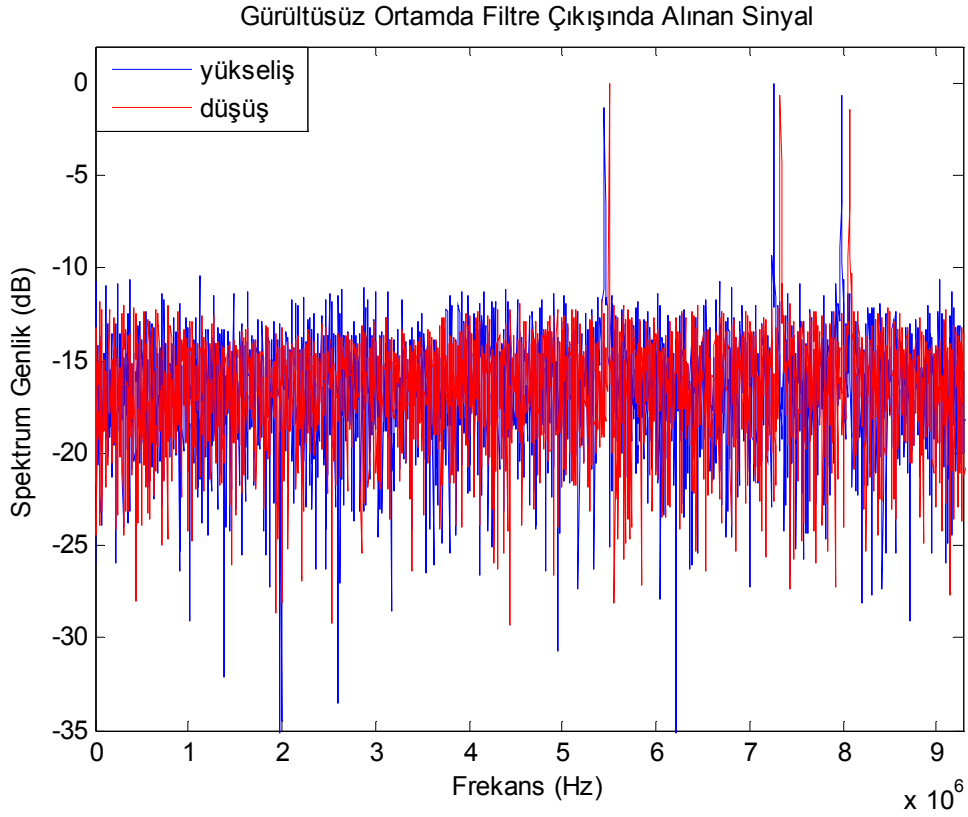
Farklı kipleme periyotlu taramalarla elde edilmiş vuru frekanslarından hedef hız-menzil matrisleri hesaplanmıştır. Birinci kipleme zamanında yapılan tarama sonucu Şekil 5.1’de gözlemlenen hedef alt ve üst vuru frekans çifleri sırası ile

$$f_{up_1} = 10.317 \text{ MHz} , f_{down_1} = 10.366 \text{ MHz} ,$$

$$f_{up_2} = 13.752 \text{ MHz} , f_{down_2} = 13.828 \text{ MHz} ,$$

$$f_{up_3} = 15.124 \text{ MHz} \text{ ve } f_{down_3} = 15.214 \text{ MHz}$$

olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.2** Üç hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_2} = 0.274$  ms)

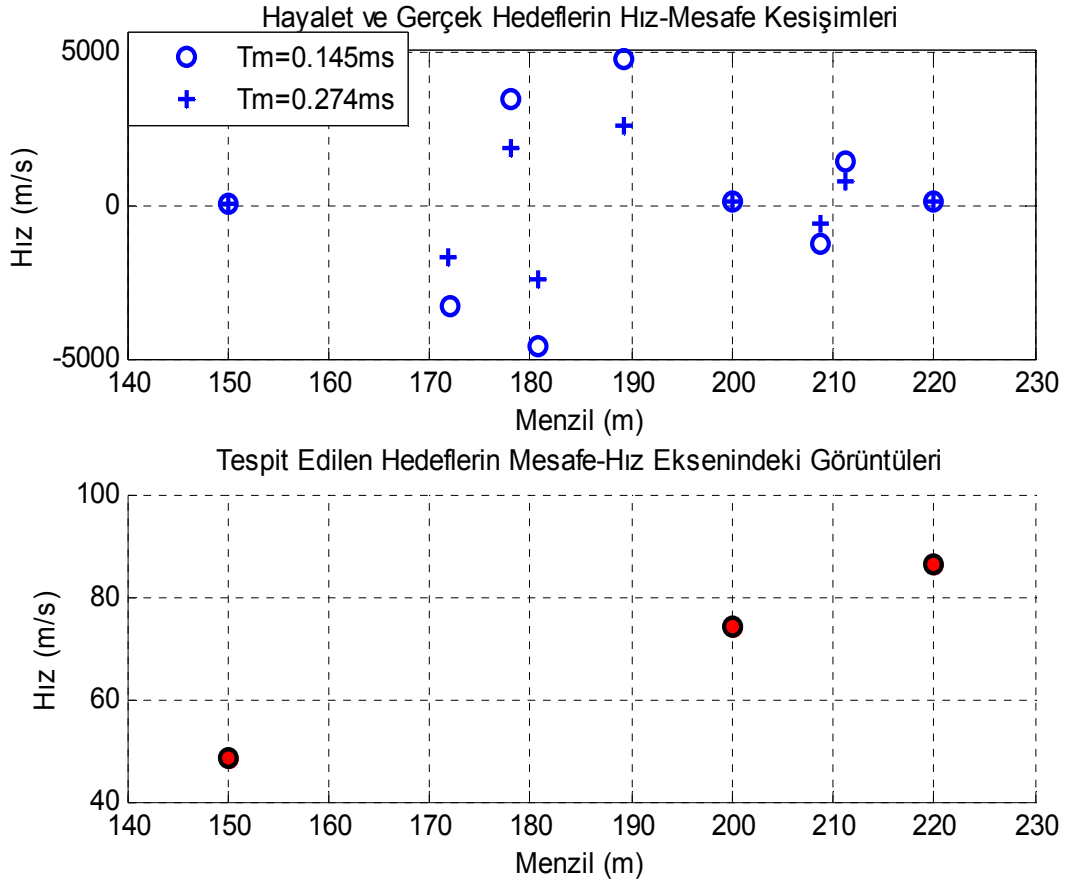
İkinci kipleme zamanında yapılan tarama sonucunda ise Şekil 5.2’de gözlemlenen hedef alt ve üst vuru frekansları

$$f_{up_1} = 54.453 \text{ MHz}, f_{down_1} = 54.964 \text{ MHz},$$

$$f_{up_2} = 72.555 \text{ MHz}, f_{down_2} = 73.321 \text{ MHz},$$

$$f_{up_3} = 79.818 \text{ MHz ve } f_{down_3} = 80.693 \text{ MHz}$$

olarak ölçülmüştür. Her iki taramada da elde edilen vuru frekanslarının birbirleri arasında alt-üst vuru frekans eşlemesi ile oluşturacakları tüm olası durumlar Şekil 5.3’de verilmiştir. Sanal hedefler algoritma sonrası elenmiş olup, sonuçlara da aynı grafikte yer verilmiştir.



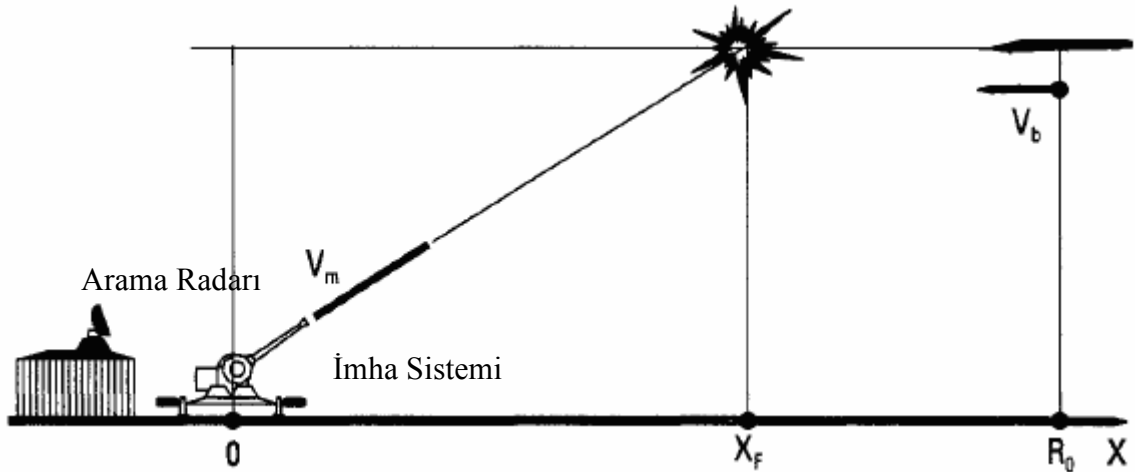
**Şekil 5.3** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile üç hedefin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi

Yukarı verilen her iki tarama da elde edilmiş vuru frekanslarının tasarlanmış algoritma ile eşleştirilip sanal hedefler elenerek, gerçek hedef menzil ve hız değeri ölçüm sonuçları sırası ile  $R_1 = 220.03$  m,  $V_1 = 86.321$  m/s,  $R_2 = 149.99$  m,  $V_2 = 48.395$  m/s,  $R_3 = 199.99$  m ve  $V_3 = 74.27$  m/s olarak çıkarılmıştır. Görüldüğü gibi benzetim çalışması sonrası ölçüm sonuçları benzetim girdi verilerine oldukça yakındır.



## 5.2. FMCW Füze İkaz Radarları

1950 yıllarından bu yana en önemli düşman saldırı unsurlarından biri de füzelerdir. Bugün kıtalar arası taktik balistik füzeler, kısa menzilli imha füzeleri, radar tarayıcı başlıklı güdümlü füzeler, kızıl ötesi güdümlü füzeler ve benzeri çeşitte pek çok füze üretilmektedir. Füze tehditlerinden haberdar olmak için amaca göre füze alarm radarları yani arama radarları tasarlanmaktadır. Tehdidi erken fark etmek ve tehdidi yok edecek komuta-kontrol merkezine bilgi vermek bu tür radarlarda en temel özelliktir. Komuta-kontrol biriminin tehditten haberdar olması ile birlikte atış kontrol mekanizmasını devreye alarak, füze veya füzelerin erken imha edilmesi sağlanır. Komuta kontrol birimleri ile ortak çalışan radarlar genellikle Şekil 5.4'de verildiği gibi karada ya da gemi üzerinde konuşlandırılır [Neri, 2001].



**Şekil 5.4** Arama Radarı ile füze ve ya benzeri tehditlerin algılanıp ve İmha Sistemi ile yok edilmesi

Füzeler, hedeflerine 1–10 saniye gibi kısa bir zaman diliminde ulaşabilmesi için imha edilecek hedefe göre daha yüksek hızlara sahiptirler. Çok yüksek hızlı füzeler 5000 m/s hız değerlerine ulaşabilmektedir. Füze ikaz radarlarının, füzelerin yüksek hız değerlerine sahip olması nedeni ile hız ölçüm aralığının diğer radar türlerine göre daha geniş olması gerekir. Bu nedenle menzil-hız ölçüm doğruluk oranı füze ikaz radarlarında oldukça önemlidir. Bu bölümde Çizelge 5.4'de verilen benzetim radarında maksimum ölçülebilen füze tehdit menzili 8000 metre iken maksimum ölçülebilecek füze hızı 1500 m/s olarak seçilmiştir.

**Çizelge 5.4** Füze ikaz radarı benzetim çalışması için belirlenen parametreler

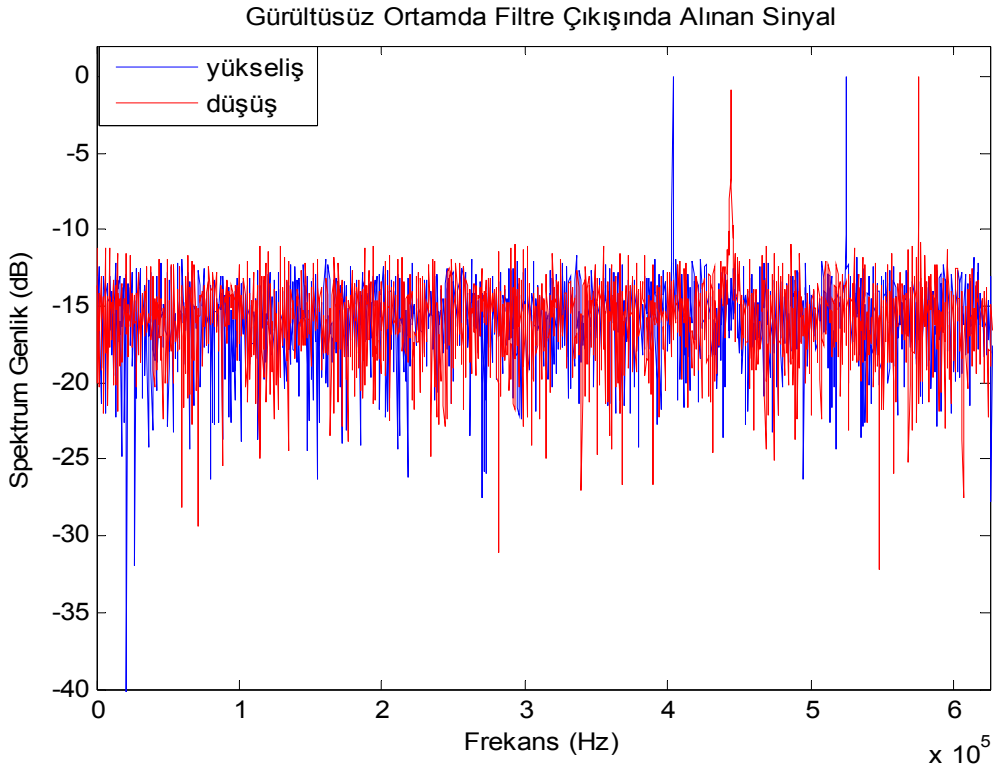
Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$f_o = 3$ GHz	Radar Çalışma Frekansı
$\Delta R = 5$ metre	Menzil Ölçüm Çözünürlüğü
$V_{\max} = 1500$ m/s	Maksimum Ölçülebilen Hız Limiti
$\Delta V = 2.4$ m/s	Hız Ölçüm Çözünürlüğü
$R_{\max} = 8000$ m	Maksimum Ölçülebilen Menzil Limiti
$T_{m_1} = 2.72$ ms	Kipleme Periyodu Zamanı-1
$T_{m_2} = 3.49$ ms	Kipleme Periyodu Zamanı-2
$\xi = 104700$	Zaman bant genişliği çarpımı
$f_s = 1.18$ MHz	ADC Örnekleme Zamanı
$N_s = 4096$	ADC Örnekleme Sayısı
$t_{d_{\max}} = 53.33$ $\mu$ s	Maksimum Dalga Yayılım Zamanı
$f_{beat_{\max}} = 0.5$ MHz	Maksimum Ölçülebilen Vuru Frekansı
$t_s = 0.85$ $\mu$ s	Zaman Çözünürlüğü
$N = 2 - 100$	Üçgen Dalga Tarama Sayısı

Çizelge 5.4'de verilen benzetim radarı parametrelerinin, hedef türüne göre seçildiğine dikkat edilmelidir. Eğer tespit edilecek hedef bir füze ise yüksek hız ve orta menzil ölçüm gereksinimi için parametre seçilirken, eğer tespit edilecek hedef bir yaya ise yüksek hız çözünürlüğü ve kısa menzil ölçüm doğruluğu gerekecektir. Örneğin bu çalışmada menzilin 8000 metreye çıkarılması ile çalışma bant genişliği düşürülmüştür. Çünkü menzilin artması yüksek vuru frekanslarının oluşmasına

neden olurken bant genişliğinin de yüksek tutulması verilerin işleme zamanını uzatacaktır.

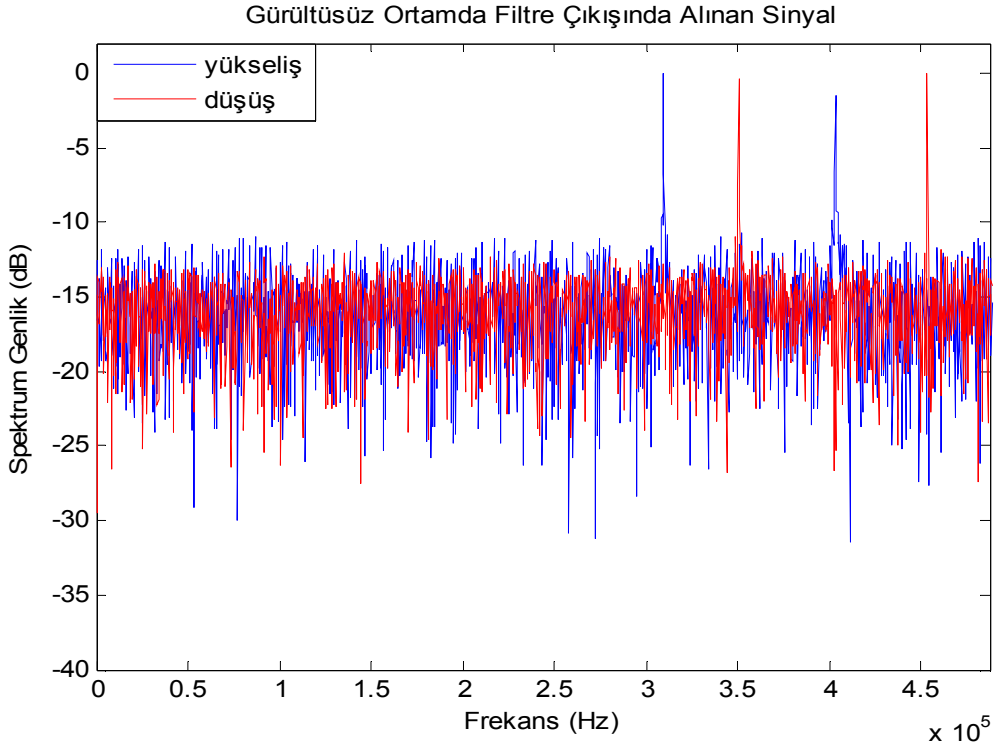
Senaryoya göre radar almacına yaklaştığı düşünülen iki adet füze tehdidi için tanımlanmış benzetim menzil-hız girdi verileri  $R_1 = 7500$  m,  $V_1 = 1250$  m/s,  $R_2 = 5780$  m ve  $V_2 = 1025$  m/s olarak seçilmiştir.

Tehdit ortamında birden fazla hedefi bulabilmek için iki farklı kipleme zamanında tarama yapılmıştır. Bu taramaların her birinde radar almacında gözlemlenen vuru frekanslarının görüntüleri sırasıyla Şekil 5.5'de ve Şekil 5.6'da genlik-frekans eksenine göre verilmiştir.



**Şekil 5.5** İki hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_1} = 2.72$  ms)

Birinci kipleme zamanında yapılan tarama sonucu Şekil 5.5'de gözlemlenen hedef alt ve üst vuru frekansları  $f_{up_1} = 0.403$  MHz,  $f_{down_1} = 0.444$  MHz,  $f_{up_2} = 0.525$  MHz ve  $f_{down_2} = 0.575$  MHz olarak ölçülmüştür.

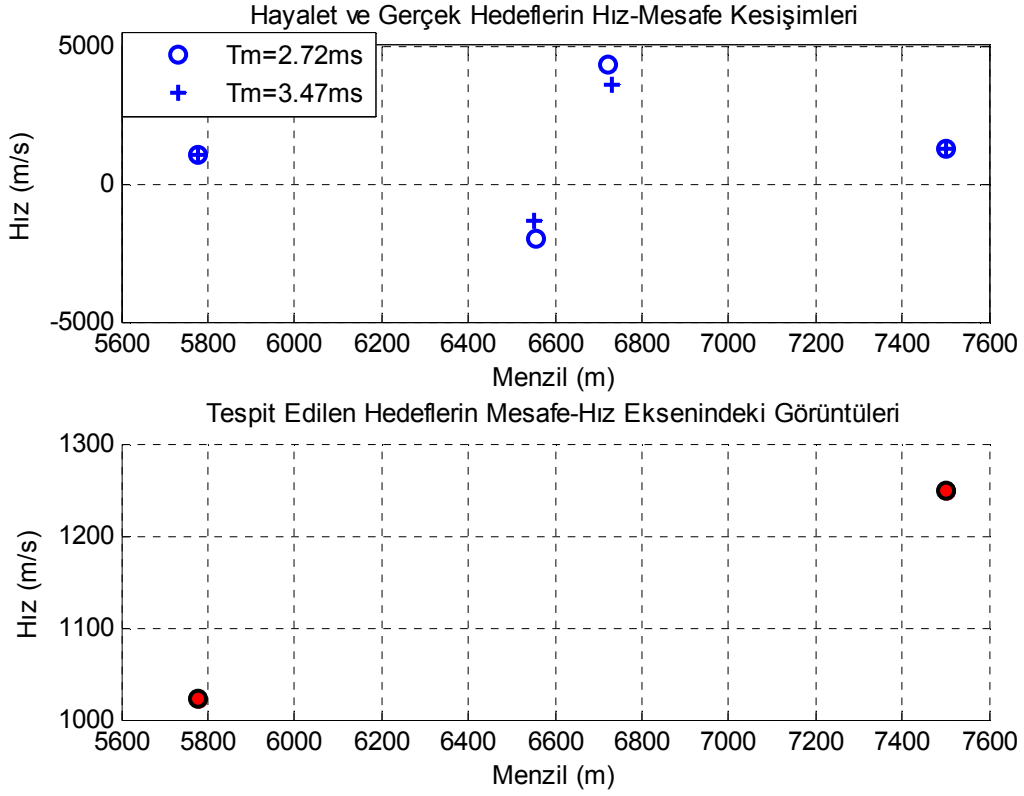


**Şekil 5.6** İki hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_2} = 3.49$  ms)

İkinci kipleme zamanında yapılan tarama sonucunda da Şekil 5.6'da gözlemlenen hedef alt ve üst vuru frekansları  $f_{up_1} = 0.309$  MHz,  $f_{down_1} = 0.351$  MHz,  $f_{up_2} = 0.403$  MHz ve  $f_{down_2} = 0.453$  MHz olarak ölçülmüştür.

İki farklı kipleme zamanı kullanarak tarama yapıldığında ölçülen hedef alt-üst vuru frekanslarının kendi arasında oluşturacağı tüm olası durumlar ve bu olası durumlar arasında sanal hedefleri elemeye yönelik tasarlanmış algoritma sonrası eşleşme gösteren noktalar Şekil 5.7'de verildiği gibi gösterilmiştir.

Vuru frekanslarının sinyal işleme ünitesinde değerlendirilip çoklu hedef çözümü algoritmasından geçirilmesinden sonra elde edilmiş benzetim çalışmasında tehdit menzil-hız değerleri Şekil 5.7'de verildiği gibi  $R_1 = 7500.75$  m,  $V_1 = 1248.21$  m/s,  $R_2 = 5779.05$  m ve  $V_2 = 1022.23$  m/s olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.7** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile iki füze tehdidinin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi

Füzeler de imha noktasına çok kısa zamanda ulaşırlar, havada kalma süreleri oldukça düşüktür. Bu gereksinim doğrultusunda füzenin menzili ve hızı hakkında kesintisiz bilgi alınarak bir an evvel hedef imha menziline girdiği anda komuta kontrol merkezinin kısa zaman dilimlerinde devreye alınması gerekir. FMCW radarlar sürekli zamanlı ölçüm almaları ve özellikle kısa menzillerde yüksek doğrulukta hedef menzil-hız bilgilerini ölçebildiği için bu tür uygulamalarda kullanılabilir. Bu bölümde de genel itibari ile ortamda füze tehdidi olma ihtimali düşünülerek kesintisiz olarak tehdit üzerinden bilgi dönüşünün yüksek çözünürlükte dönmesi gerektiği düşünülerek FMCW radar parametreleri uyarlanıp benzetim çalışmaları çoklu hedefler üzerinden yürütülmüştür. Çıkan ölçüm sonuçları benzetim çalışması başında girilen tehdit bilgilerine oldukça yakın çıkmıştır.

### 5.3. FMCW LPI Gözetleme Radarları

LPI sinyaller yakalanma olasılığı düşük sinyallerdir. Radarın LPI karakteristiği temelde, huzme oluşturma, gönderilen ve alınan huzmelerin farklılaştırılması ile sağlanmaktadır. Düşük tepe güç seviyeleri, faz ve ya frekans bileşenleri kodlanarak geniş bir frekans bandında yayılım gösterme özellikleri sayesinde sinyallerin karşı unsurlar tarafından tespit edilmesini güçleştirir [Pace, 2009]. Çok geniş frekans bandında kiplenmiş düşman sinyallerini ve özelliklerinin tanımlayıp çözümleyebilmek, arkasından alıkoyma, karıştırma işlemlerinin başlatmak oldukça zordur. Elektronik harp alıcılarının bu sinyalleri analiz edebilmesi ve değerlendirme yapabilmesi için yüksek hızlı işlemciler ve yüksek frekansta örnek alabilen analog sayısal dönüştürücülere ihtiyacı olacaktır. Yüksek frekansta örneklenmiş verilerin kayıt ve depo işlemleri elektronik harp almacını ayrıca yükleyecektir. Çünkü LPI sinyalleri düşük güç seviyelerinde geniş banda yayılım gösterdiklerinden elektronik harp almaçlarının bu geniş bandı kısa sürede tarama yapıp verileri analiz etmesi bir hayli işlem yükü getirecektir. Radar sinyali frekans alanında zamana bağlı çeviklik gösterdiğinden düşman almacının geniş bir frekans bandını tarayan süzgeci ile geniş bir frekans bandında gezinen radar sinyalinin aynı anda aynı frekansta buluşması düşük bir olasılıktır. Buluşmalar bile bu uyum durumu çok kısa süreceklerinden almacın, geniş bir frekans bandını tarayan bant-geçiren süzgecinin çıkışında yeterli sinyal enerjisi elde edilemez. Bu özellikler LPI sinyallerin tercih edilmesinde oldukça önem arz eder. LPI sinyalleri ya faz kaydırmalı anahtarlama ya da frekans kaydırmalı anahtarlama yöntemleri ile oluşturulabilir [Pace, 2009]. Bu bölümde doğrusal FMCW yöntemi ile kodlama çalışılmıştır.

Yukarı verilen kipleme teknikleri ile ışın enerjisi geniş bir banda yayımlanabilir. Bu yöntemlerin sağlamış olduğu kodlama kazancının yanı sıra sıkıştırma kazançları (compression gain) da olacaktır. Sinyalin süreklilik özelliği değiştirilmeden frekansı zaman içinde değişken yaparak zaman eksenin kestiği değerde iyileştirme yapılmıştır. Bu iyileştirme sıkıştırma kazancı olarak tanımlanır ve zaman-bant genişliği çarpımında kazanç oluşturur. Bu kazanç sayesinde gönderilen sinyal güç seviyesi düşürülebilir. Bu özellik LPI radarların, düşük güçte yarı iletken teknoloji ile gönderme birimi tasarlanmasına imkân sağlar. Sıkıştırma kazancı kullanılacak bant genişliği ile doğrudan ilintilidir. Zaman-bant genişliği

çarpımı frekans ya da faz kiplemesi yapılmamış sistemlerde birdir. Bir diğer ifade ile sinyal işleme kazancı, radar almacına alınan sinyalin giriş sinyal gürültü oranı değerinin, almaç çıkış sinyal gürültü oranı arasındaki fark, LPI yeteneğini öne çıkartır. Örneğin, frekans kiplemeli sürekli dalga sinyal kullanımı durumunda, almaç sisteminde sinyal işleme kazanç değeri, frekans tarama zamanı ile tarama bant genişliğinin çarpımına karşılık gelir.

LPI sinyaller modern radar sistemlerinde düşük güçleri ile gizlilik sağladığı gibi yüksek menzil ve Doppler çözünürlüğü de sağlayabilirler. Menzil ve Doppler çözünürlüklerinin tek ve çoklu hedeflerde optimize edilmesi için gerekli yöntem ve bu yöntemlerin analiz sonuçlarına kısaca daha önceki bölümlerde değinilmiştir. LPI sinyallerin ortak özelliklerinden bir diğeri de belli uzunlukta bir darbenin içine fazladan bilgi yerleştirilmesidir. Bu durumda yapılandırılmış darbelere uyumlu süzgeç tasarımını karmaşık hale getirmiştir. Bu karmaşıklık paralelinde modern sayısal sinyal işleme teknolojisinin kullanım gereksinimi doğurmaktadır.

LPI sinyallerin oluşturulmasında alma ve gönderme birimlerinin tasarımı oldukça kritiktir. Radar sisteminin hedef tespit menzili, ortalama çıkış gücü ( $P_{ort}$ ) ile ilintili olmakla birlikte; karşı kuvvet kestirme almaç sisteminin, kendi hedefini tespit menzili tepe çıkış gücü ile de ilintilidir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda aslında yapılması gereken radarın Eşitlik (5.1)'de verildiği gibi yüksek ortalama çıkış gücüne sahip olması bunun yanı sıra da gönderilecek bu yüksek gücün tepe değerinin düşük olması istenir.

$$P_{ortalama} = P_{tepe} \cdot dt, \quad dt : \text{Sinyal görev çevrim süresi (duty cycle)} \quad (5.1)$$

$$dt = \frac{\tau}{T_m}$$

Darbeleri radarlarda görev çevrim süresi %0,1'ler seviyesinde veya daha düşük seviyelerde seyir etmektedir. Bu nedenle ortalama yüksek güç elde edebilmek için gönderilecek sinyalin tepe güç değerinin yüksek olması gerekmektedir. Bu değer bazı radarlarda megawatt mertebesine çıkmaktadır. Hali ile bu yüksek gücü oluşturulabilmek için gerekli gönderme alt yapısı karmaşık hale bürünürken, maliyet olarak da yüksek değerlere ulaşır. Oysa LPI radarlarda, sinyal sürekli

olarak gönderildiği için görev çevrim süresi %100 yani birdir. Böylece gönderilen tepe gücü güç değeri ortalama güce eşit olacaktır. Bu bölümde, Çizelge 5.5’de belirlenmiş parametrelere göre düşük gürültülü ortamda tipik bir LPI radarı benzetim çalışması yapılmıştır. Ortamda birden fazla tehdit olabileceği düşünülerek iki farklı kipleme zamanı kullanılarak ölçüm alınmıştır.

**Çizelge 5.5** FMCW LPI gözetleme radarı benzetim çalışması için belirlenen parametreler

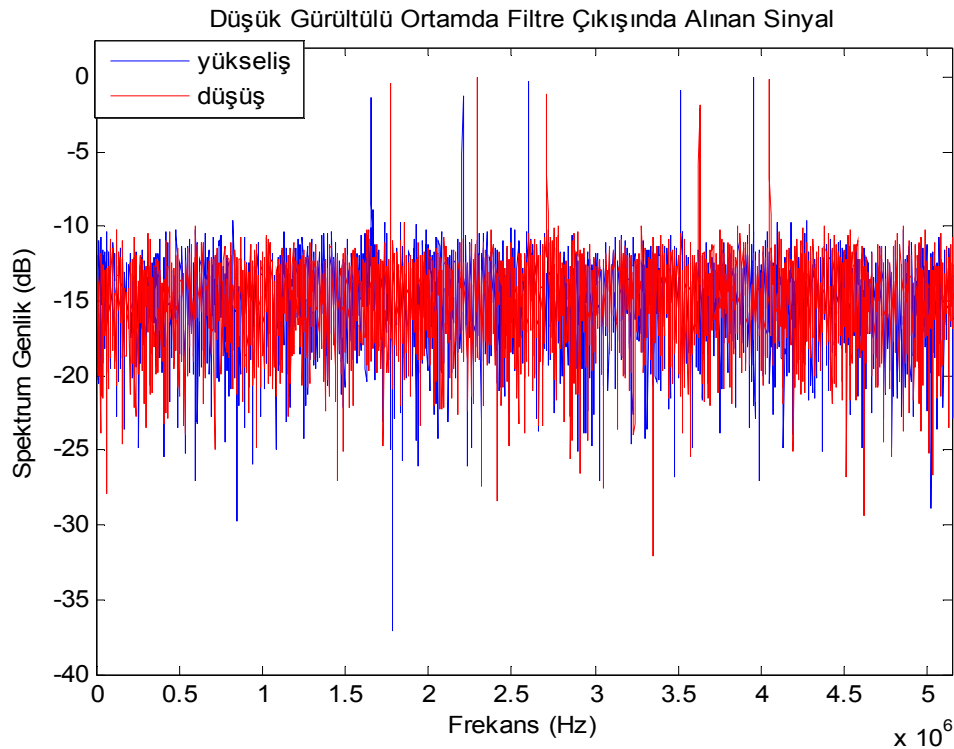
Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$f_o = 9$ GHz	Radar Çalışma Frekansı
$\Delta R = 10$ metre	Menzil Ölçüm Çözünürlüğü
$V_{\max} = 1000$ m/s	Maksimum Ölçülebilen Hız Limiti
$\Delta V = 2.5$ m/s	Hız Ölçüm Çözünürlüğü
$R_{\max} = 30$ km	Maksimum Ölçülebilen Menzil Limiti
$T_{m_1} = 0.7$ ms	Kipleme Periyodu Zamanı-1
$T_{m_2} = 1.17$ ms	Kipleme Periyodu Zamanı-2
$\xi = 17550$	Zaman Bant Genişliği Çarpımı
$f_s = 7$ MHz	ADC Örnekleme Zamanı
$N_s = 8192$	ADC Örnekleme Sayısı
$t_{d_{\max}} = 0.2$ ms	Maksimum Dalga Yayılım Zamanı
$f_{beat_{\max}} = 3.1$ MHz	Maksimum Ölçülebilen Vuru Frekansı
$t_s = 0.14$ $\mu$ s	Zaman Çözünürlüğü
$N = 2 - 100$	Üçgen Dalga Tarama Sayısı



Tasarım parametrelerine bakıldığında radar ölçüm menzili yükseltilmiş olup uzak menziller gözlenmek istenmiştir. Bu nedenle ölçüm hata oranı menzil çözünürlük değeri de düşmüştür. Taranan bant boyu daha kısa olup ölçüm menzilinün büyümesi nedeni ile sayısal örnekleme frekansı yükselmiştir. Bu bilgiler ile düşük gürültülü ortamda beş hedefin var olduğu düşünülerek oluşturulan benzetim çalışması, aşağıda verilmiş hedef menzil-hız bilgileri için çalıştırılmış ve ölçüm sonuçları gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmasında hedef menzil (m) ve hız (m/s) bilgileri,

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25000 & 28000 & 18600 & 12000 & 15750 \\ 950 & 845 & 900 & 980 & 745 \end{bmatrix}$$

olarak varsayılmıştır.

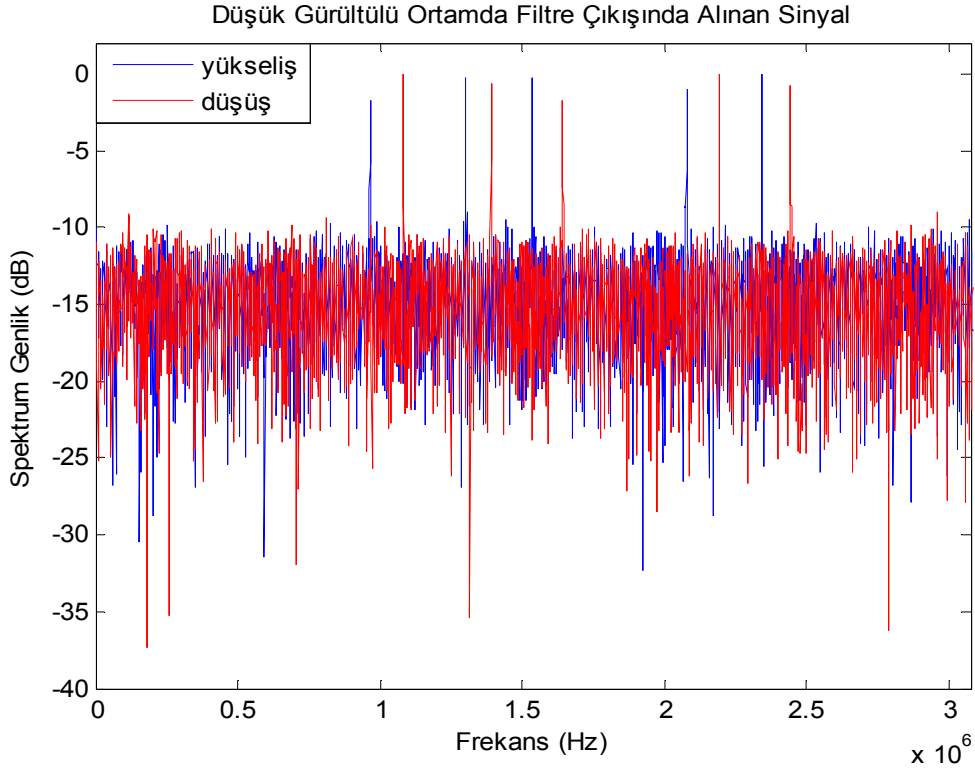


**Şekil 5.8** Beş hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_1} = 0.7$  ms)

Birinci kipleme zamanında yapılan tarama sonucu Şekil 5.8'de gözlemlenen hedef alt ve üst vuru frekansları;

$$\begin{aligned}
f_{up_1} &= 1.654 \text{ MHz}, & f_{down_1} &= 1.773 \text{ MHz}, \\
f_{up_2} &= 2.204 \text{ MHz}, & f_{down_2} &= 2.294 \text{ MHz}, \\
f_{up_3} &= 2.603 \text{ MHz}, & f_{down_3} &= 2.71 \text{ MHz}, \\
f_{up_4} &= 3.514 \text{ MHz}, & f_{down_4} &= 3.629 \text{ MHz}, \\
f_{up_5} &= 3.949 \text{ MHz}, & f_{down_5} &= 4.05 \text{ MHz}
\end{aligned}$$

olarak ölçülmüştür.



**Şekil 5.9** Beş hedef için tüm vuru frekanslarının HFD sonrası frekans spektrumunda genlik grafiğinin alt-üst vuru olarak gözlemlenmesi ( $T_{m_2} = 1.17 \text{ ms}$ )

İkinci kipleme zamanında yapılan tarama sonucunda da Şekil 5.9'da gözlemlenen hedef alt ve üst vuru frekansları;

$$\begin{aligned}
f_{up_1} &= 0.967 \text{ MHz}, & f_{down_1} &= 1.084 \text{ MHz}, \\
f_{up_2} &= 1.30 \text{ MHz}, & f_{down_2} &= 1.391 \text{ MHz},
\end{aligned}$$

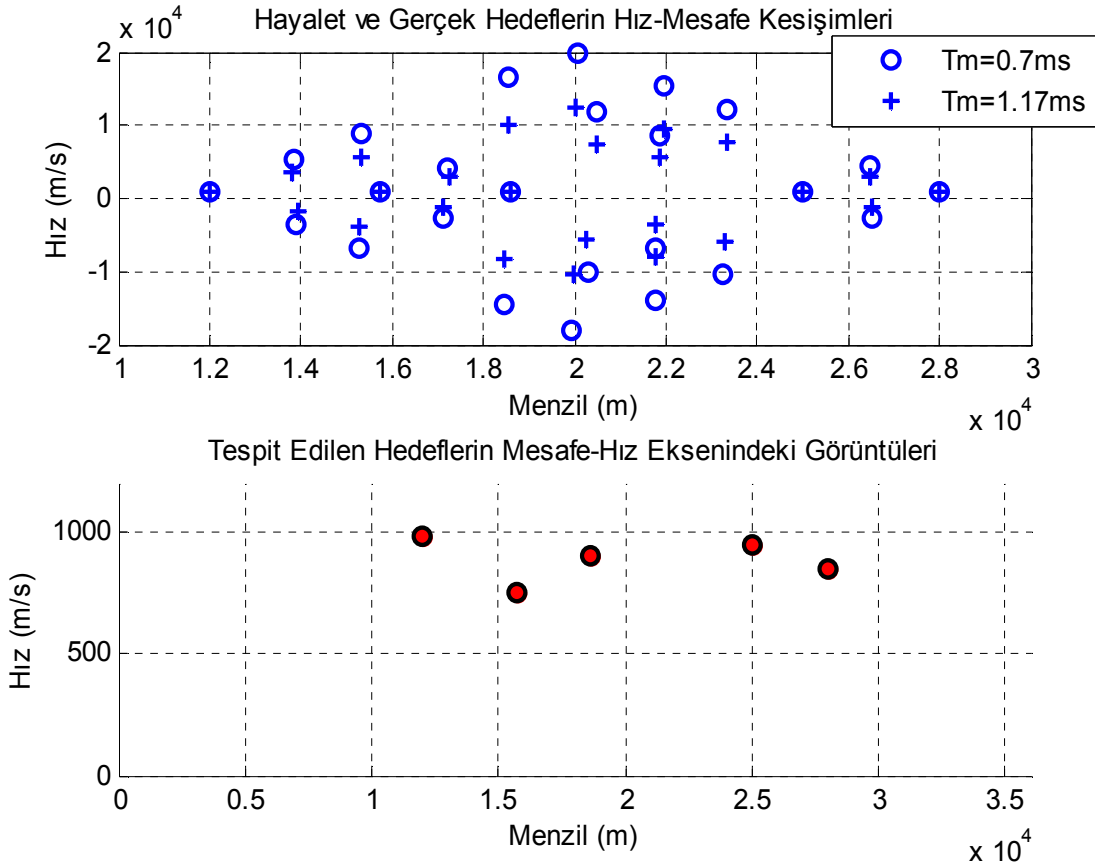
$$f_{up_3} = 1.535 \text{ MHz}, f_{down_3} = 1.644 \text{ MHz},$$

$$f_{up_4} = 2.079 \text{ MHz}, f_{down_4} = 2.193 \text{ MHz},$$

$$f_{up_5} = 2.342 \text{ MHz}, f_{down_5} = 2.444 \text{ MHz}$$

olarak ölçülmüştür.

Ölçülen hedef alt-üst vuru frekanslarının kendi arasında oluşturacağı tüm olası durumlar ve bu olası durumlar arasında sanal hedefleri elemeye yönelik tasarlanmış algoritma sonrası eşleşme gösteren noktalar Şekil 5.10'da verildiği gibi gösterilmiştir.



**Şekil 5.10** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile beş adet tehdidin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi

Şekil 5.10'da ortamda var olduğunu düşünülen hedeflerin menzil-hız değerleri benzetim çalışması başlangıcında girilen verilere oldukça yakındır.

Benzetim çalışmasında Minimum Fark Algoritması kullanılarak göre elde edilmiş ölçüm sonuçları

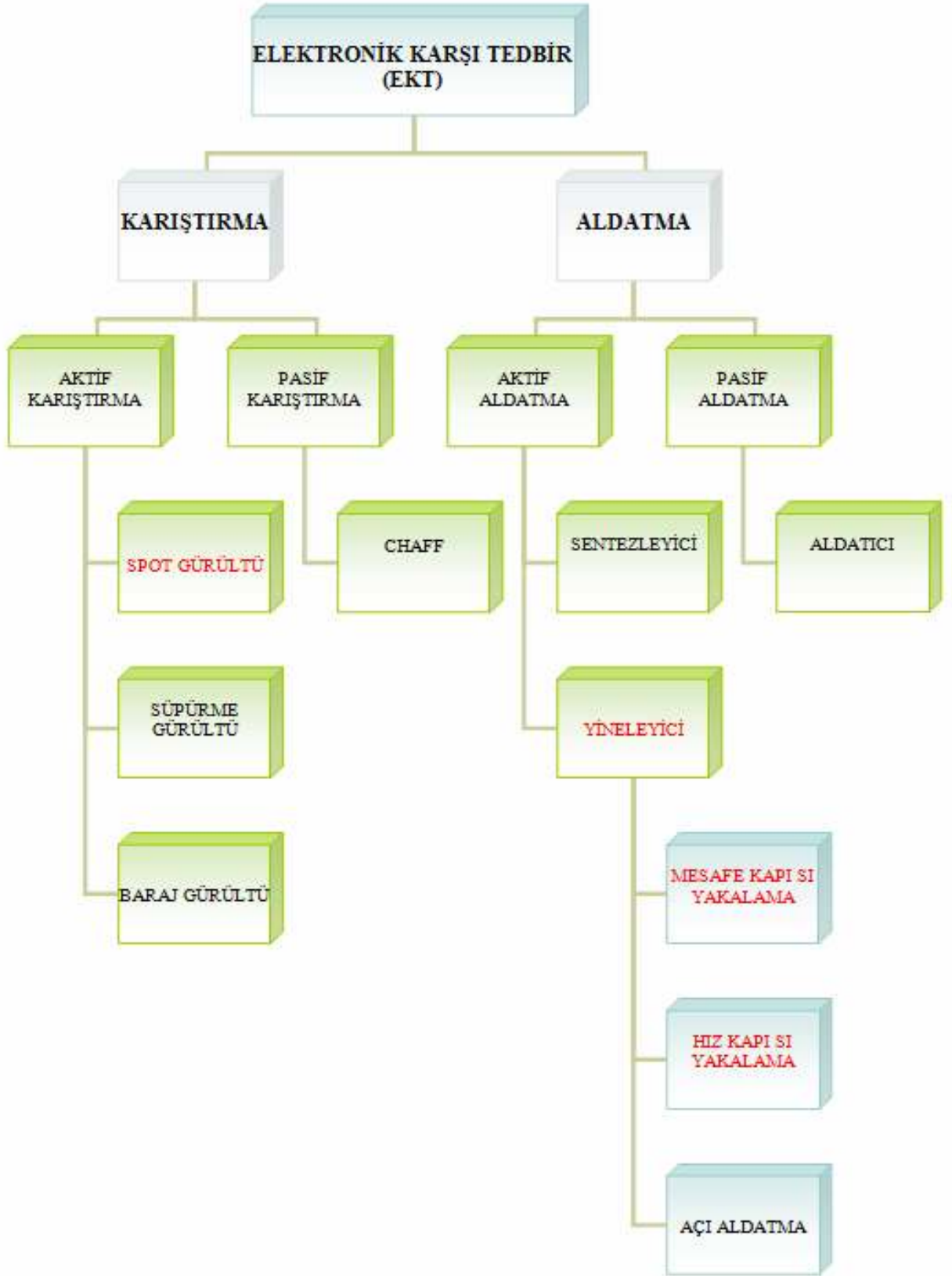
$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R_4 & R_5 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25002.83 & 27999.75 & 18600.05 & 12000.5 & 15749.2 \\ 949.84 & 846.41 & 898.71 & 981.94 & 748.93 \end{bmatrix}$$

olarak hesaplanmıştır.

## 6. FMCW RADARLARIN KARIŞTIRILMASI

Askeri ve sivil tüm radarların, birçok elektromanyetik yayılımın olduğu etkileşimli ortamlarda çalışabilme özelliğine sahip olması gerekmektedir. Radarlar kendi etki alanında aynı spektrumu kullanan diğer kullanıcıların ışımalarından, karışma ve gürültü gibi dış dünyadan kaynaklı çevresel faktörlerden minimum etkilenecek şekilde tasarlanmalıdırlar. Bu çalışma ortamında kendi fonksiyonlarını gösteren sistemler, elektromanyetik uyumluluğa sahiptir anlamındadır. Ancak, özellikle askeri radarlar kendi başarımlarını elektronik olarak bertaraf etmek isteyecek düşman çevresel ortamlarda dahi çalışabilme yeteneğini barındırmalıdırlar. Elektronik karıştırma yöntemleri ile düşman radarı çalışma spektrumunun kirletilmesine Elektronik Karşı Taarruz (EKT, Electronic Counter Measures-ECM) denir. EKT sistemlerinin ana amacı düşman radarlarının yanıltılması sağlayabilmek ya da ölçüm almasını engelleyebilmektir. Bunu yapabilmek için pek çok taktik ve teknik Şekil 6.1’de sınıflandırma halinde verilmiştir. Genel olarak EKT sistemleri, aktif ve pasif karşı tedbirler olarak sınıflandırılır. Detaylı biçimde ise aç ölçüm EKT, menzil ölçüm EKT ve hız ölçüm EKT gibi fonksiyonel olarak tanımlanabilir.

Bu bölümde önce temel EKT yapıları anlatımı ve ardından FMCW radarlara yönelik olarak kullanılabilir karıştırma teknikleri önerilmiştir. Önerilen karıştırma tekniklerinin etkinliği benzetim modelleri üzerinden çalışılmıştır.

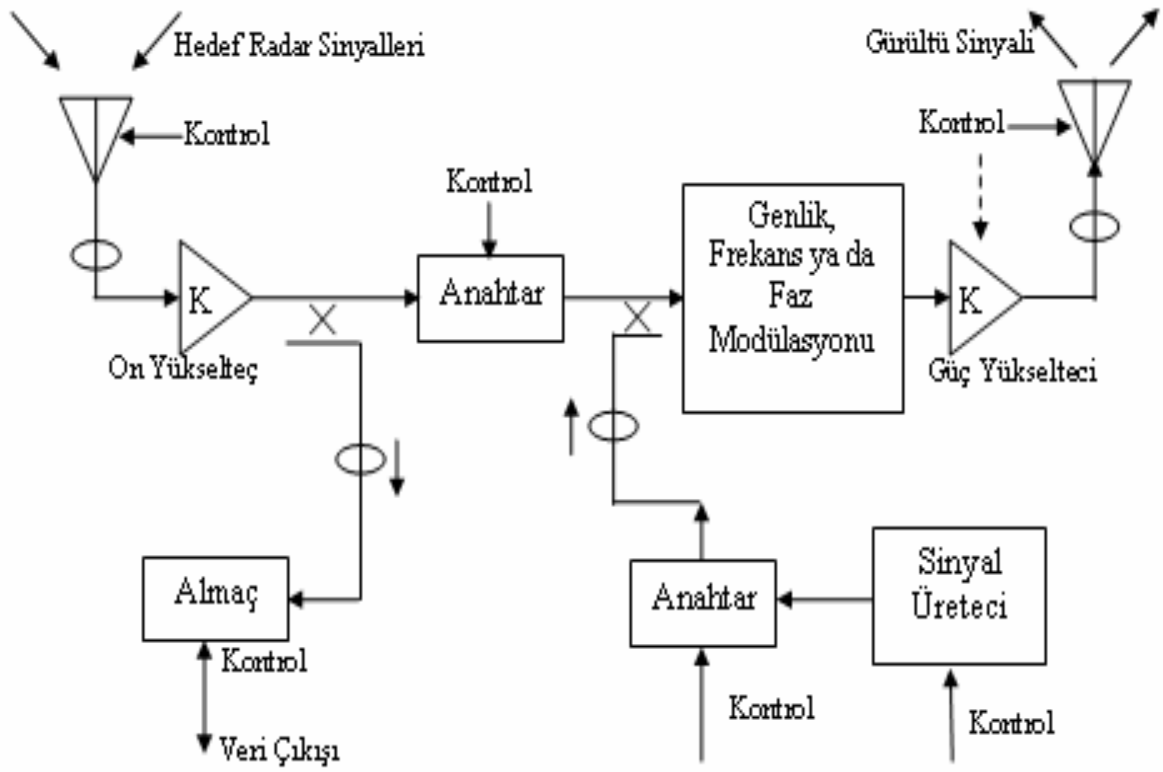


**Şekil 6.1** Elektronik Karşı Tedbir (EKT) yöntemlerinin sınıflandırılması

## 6.1. Gürültü Tabanlı EKT Sistemleri

Radar çalışma başarımını sınırlayan en temel faktörlerden bir tanesi de gürültünün varlığıdır. Radar almaç gürültüsü ve çevresel durağan gürültüler dışında, düşman güçleri tarafından oluşturulmuş özel amaçlı, istemli olarak gürültü yayan karıştırma sistemleri, gürültü tabanlı EKT sistemleri olarak bilinir. Tipik olarak aktif EKT sistemleri savunma bölgesi altında konuşlandırılırlar ve Şekil 6.2'de verildiği gibi tasarlanabilirler. Düşman tarafından kullanılan sistemleri, EM enerji yayılımıyla köreltilme hedeflenir. Gürültü ile EKT yöntemi, geliştirilen ilk tekniklerden biridir. Yüksek güç gerektiren gürültü ile EKT tekniği eski nesil sistemlere yönelik karıştırma yöntemlerindedir. Temel amaç düşman radarının menzil ölçümünü etkilemektir. Bunun için yansıma sinyallerinin gürültü seviyesi altında kalmasını sağlamak gerekir. Radar çalışma bandında gürültü seviyesinin yükseltilmesi istenir. Başka bir ifade ile gürültü tabanlı sistemler alma birimine girecek Sinyal Gürültü Oranını (SGO, Signal to Noise Ratio-SNR) düşürmeyi hedefler. Gürültü gönderme gücü de, SGO'nun ne kadar düşürülmek istenmesine göre belirlenir. Sonuçta, düşürülmüş SGO ile istenilen hedeflerin bulunması zorlaştırılır. Hedefin gürültü tabanı altında kalması sağlanmak istendiği için gürültü ile karıştırmanın diğer bir adı da maskeleyedir.

Şekil 6.2'de [Wiegand, 1991] benzetim yapılmış gürültü ile EKT yapmak isteyen sistemde, hedef çalışma sinyal frekansı, çalışma sinyal bant genişliği gibi temel parametreler belirlenmek istenir. Bu parametrelerin belirlenmesinin ardından yüksek genlikte karıştırma sinyali düşman radarı arama ortamında basılır.



**Şekil 6.2** Gürültü Tabanlı Elektronik Karşı Tedbir Sistemi

Gürültülü EKT ortamı altında, radar alma ünitesini gürültü etkileşiminden minimum etkilenecek yapıda tasarlamak çok kolay değildir. Gürültü, radar antenin ana huzmesinde ya da yan huzmesinden girebilir. Eğer karıştırıcı sistemi gürültüyü radar alma anteni ana huzmesi içerisinden yayımlıyorsa bu tür gürültülerin kaynağı radar ekranında kolaylıkla tespit edilerek karşı tedbir alınabilir. Buna karşın radarın ana huzmesinin kullanılması karıştırıcıya radar antenin alma kazancını da sağlamış olacaktır. Bu sayede daha düşük güçte gürültü radar ana huzmesinden gönderilebilir. Ancak, karıştırıcılar temelde radar ana huzmesini değil de radar alma antenin yan huzmelerini hedef alarak gürültü yaymak isterler [Skolnik, 2008]. Çünkü antenlerin yan huzmelerinden girildiğinde radar ekranının tamamı gürültü ile kaplanır. Gürültü kaynağının yeri tespit edilemez ve gürültü bastırılamaz ise hedefler tespit edilemez. Bu tür karıştırma yapıları, yan huzmeden girebilmek için uzak menzil konuşlandırmada yüksek güç gerektireceğinden genellikle yakın menzillere yerleştirilir. Yani gürültü ile karıştırma yapılmak isteniyorsa ana hedef, çalışması engellenmek istenilen radar antenin yan huzmeleridir. Ana huzme üzerinden de gürültü yayılımı yapılabilir. Ancak, uyarlamalı antenler ile



oluşturulmuş ana huzmeler üzerinden gürültü yaymak etkin olmazken; yan huzme bastırıcılardan oluşturulmuş radar almaçları da gürültüden etkilenmeyebilir. Bunlar göz önünde bulundurulduğunda günümüz radarları gürültüye maruz kalma ihtimalleri oldukça düşük olacak şekilde tasarlanır.

Ana huzmeden gürültü yayımlayan karıştırıcılar, genellikle araç üzerinde sabitlenmiş olarak ya da araca koruma yapmak üzere onunla birlikte seyir etmek isteyen sistemlerde kullanılır. Öz Perdeleme Karıştırıcıları (Self-Screening Jammers-SSJ) en yaygın örneklerdendir. Yan huzmeden gürültü yayımlayan karıştırıcılar ise özel radarları ile birlikte hedefe yakın olmadan kendi karşı sistemlerini maskeleyebilmek için belirli bir bölgede konuşlandırılır. Menzil Dışı Karıştırıcı (Stand-off Jammers-SOJ) bu sınıfa örnek olarak verilebilir [Skolnik, 2008].

Gürültü tabanlı karıştırma radarlarında, oluşturulacak gürültü türleri kendi arasında 3 sınıfta toparlanabilir.

### **6.1.1 Spot Gürültü Yöntemi**

Sadece karıştırma yapılacak radarın çalışma frekansı bandı çevresinde yansıma sinyalinden daha yüksek genlikte gürültü yayan dar bantlı sistemler spot gürültü (spot noise) karıştırma olarak tanımlanır. Aynı anda sadece bir sinyal gürültüye maruz bırakıldığı için karıştırma yapılacak radar sisteminin tek bir frekansta yayılım yapmasını gerektirir, aksi durumda etkin değildir. Bu tür gürültülerden korunabilmek için radarın çalışma frekansı değiştirilerek frekans atlatılır ya da radar çalışma bant aralığı geniş tutulur. Spot gürültü karıştırma sistemleri yüksek genlikte güç göndermeleri gerektiği için geniş frekans bandı karşısında bu gücü basamayabilirler.

### **6.1.2 Süpürme Gürültüsü Yöntemi**

Dar bantlı spot gürültü yapısıyla geniş bir RF bandında süpürme yapmaktır. Yüksek genlikli gürültü, frekans kaydırmalı biçimde bant boyunca sürekli olarak

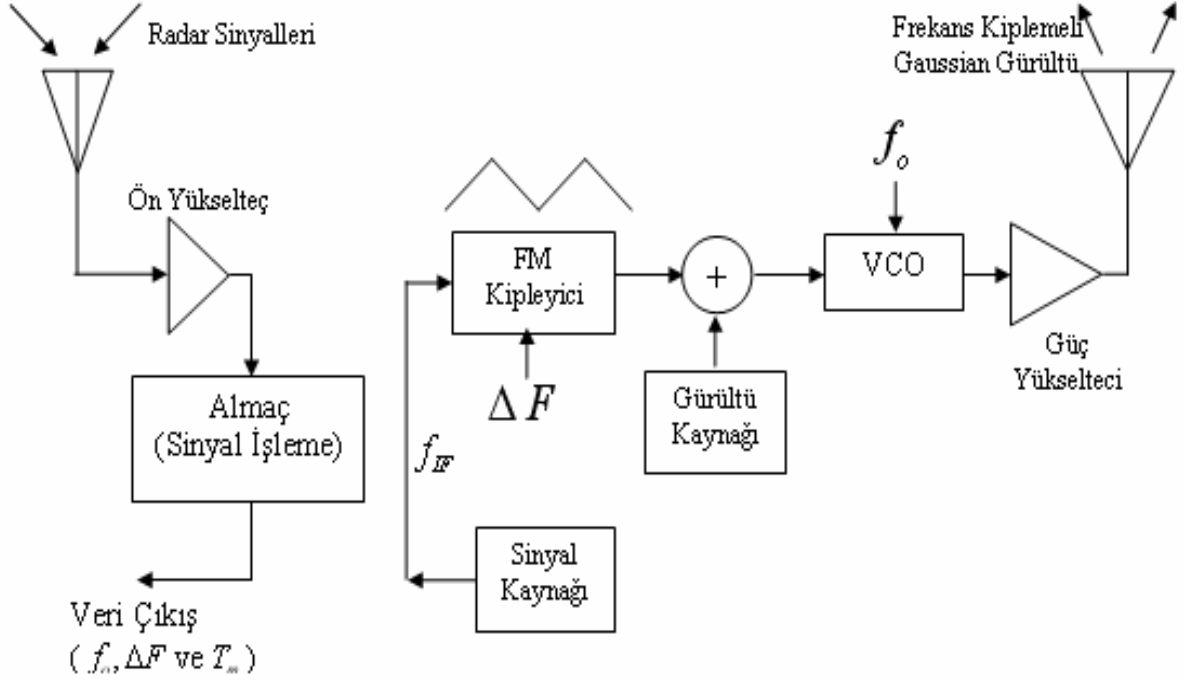
radar elektromanyetik spektrumunu tarar. Süpürme gürültüsü (swept noise) yöntemi genellikle arama radarlarında değişken frekansta yayım yaparak geniş bantta anlık olarak birden fazla sahte hedef yaratmak için kullanılabilir. Çalışma frekansı değişkenlik gösterebilen frekans atlamalı radarlara ya da tek bantta yayım yapan radarlara yansıma sinyalinin daha güçlü seviyede süpürme gürültü belirli süreli olarak verilerek karıştırma yapılabilir. Radar sinyalinin sürekli olarak gürültüye maruz bırakılmaması bu sistemlerin dezavantajıdır. Dicke-Fix almanca yapısını kullanmayan radarlar bu gürültü türüne maruz kalabilir. Dicke-Fix prensibi, alıcıyı parazitlerden, hızlı taramalı veya dar bantlı darbe kiplenmeli parazit gürültü kaynaklarından korumak için özel olarak geliştirilmiştir [Neri, 2001].

### 6.1.3 Baraj Gürültü Yöntemi

Birkaç frekansı ya da tüm kanalı aynı anda karıştırma yaptığından emin olabilmek için gürültü tüm bant boyunca basılır (barrage noise). Karıştırılmak istenilen sinyallerin parametrelerine ihtiyaç olmaksızın tüm bant karıştırılır. Ancak gürültüyü yüksek güçte tüm banda yaymak verimli ve etkin bir yöntem değildir. Yüksek çalışma frekansında yayım yapan radarların hem anten kazançları yüksek olup yan huzme seviyeleri aşağıdadır hem de çalışma bant genişlikleri büyüktür. Bu tür sistemlerin yan huzmelerinde bant boyu gürültü üretebilmek yüksek güç gereksinimi yaratacaktır. Yüksek güç üretilse dahi gürültünün kaynağını tespit etmek zor olmayacaktır.

Bu çalışmada Bölüm-5'de tasarlanan füze ikaz radarlarına karşı gürültülü EKT sistemlerinden sadece spot gürültü ile karıştırma yapılmak istenmiştir. Şekil 6.3'de spot gürültü üretmek için oluşturulmuş genel sistem mimarisi blok diyagramı verilmiştir. Öncelikle hava aracına takılmış bu sistem, yayın yapan radarın varlığından haberdar olduktan sonra belirli bir süre radar sinyallerini dinleyerek onun çalışma merkez frekansını, çalışma bant genişliğini ve sinyal gönderme karakteristiğini anlamaya çalışmaktadır. Bu parametreler tespit edildikten sonra radar çalışma bant genişliğinden daha büyük bir bant genişliğinde frekans taramalı gürültü oluşturulur ve radar çalışma frekansında yayım yapacak şekilde kiplenme yapılır. Gürültü gönderme gücü ise son kat olan güç yükselteç ünitesinde istenilen

seviyede kontrollü olarak ayarlanır ve bir gönderme anteni yardımı ile radar ana huzmesine yayım yapar.



**Şekil 6.3** Frekans kiplenmeli spot gürültü üreten karıştırıcı sistemi genel blok diyagramı

Ortamda gürültü olmadığı durumda radar tarafından gönderilen ve geri yansıma ile alınan sinyaller analitik olarak aşağıda ifade edilmiştir.

Radar göndermeci ile ortama yayım yapılan frekans kiplenmeli sürekli zamanlı gönderme sinyallerine ait eşitlikler;

$$\begin{aligned}
 s_{t_{up}}(t) &= a_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o - \frac{\Delta F}{2}\right)t + \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right] \right) \quad \rightarrow \quad 0 < t < T_m \\
 s_{t_{down}}(t) &= a_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + \frac{\Delta F}{2}\right)t - \frac{\Delta F}{2T_m} t^2 \right] \right) \quad \rightarrow \quad T_m < t < 2T_m \quad (6.1) \\
 s_t(t) &= s_{t_{up}}(t) + s_{t_{down}}(t)
 \end{aligned}$$

biçimindedir. Yayım yapılan alan içerisinde tek bir hedefin durağan ya da hareketli olması durumunda, gürültü haricinde geri dönen yansıma sinyalleri Eşitlik (6.2)'de verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
 s_{r_{up}}(t) &= b_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d) + \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d)^2 \right] \right) \rightarrow t_d < t < T_m \\
 s_{r_{down}}(t) &= b_o \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d + \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d) - \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d)^2 \right] \right) \rightarrow T_m < t < 2T_m - t_d \\
 s_r(t) &= s_{r_{up}}(t) + s_{r_{down}}(t) \tag{6.2}
 \end{aligned}$$

Ortamda yüksek genlikli gürültülerin olması durumunda yukarıda elde edilen alma denkleminde gürültünün etkisi de eklenecektir. Bu çalışmada FMCW radarın karıştırma karşı tedbiri olarak, frekans kiplmeli gauss gürültüsü yayımının yapıldığı varsayılmıştır.

Karıştırıcıdan gönderilen frekans kiplmeli gürültü ile birlikte radar almacında görülecek toplam yansıma sinyalleri  $n_{FM}(t)$  frekans kiplmeli gauss gürültüsü olarak düşünüldüğünde;

$$\begin{aligned}
 s(t) &= s_r(t) + n_{FM}(t) \\
 n_{FM_{up}}(t) &= K \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o - \frac{\Delta F'}{2}\right)t + \frac{\Delta F'}{2T_m}t^2 + \phi(t) \right] \right), \quad \Delta F' > \Delta F \\
 n_{FM_{down}}(t) &= K \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + \frac{\Delta F'}{2}\right)t - \frac{\Delta F'}{2T_m}t^2 + \phi(t) \right] \right)
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

şeklinde analitik olarak ifade edilebilir. Burada

$\phi(t)$ : Gaussian gürültü ( $[0, 2\pi]$  aralığında dağılım göstererek sinyal fazına eklenir)

$K$ : Güç yükseltici kazanç katsayısı

$\Delta F'$ : Gürültü bant genişliği olarak tanımlanmaktadır.

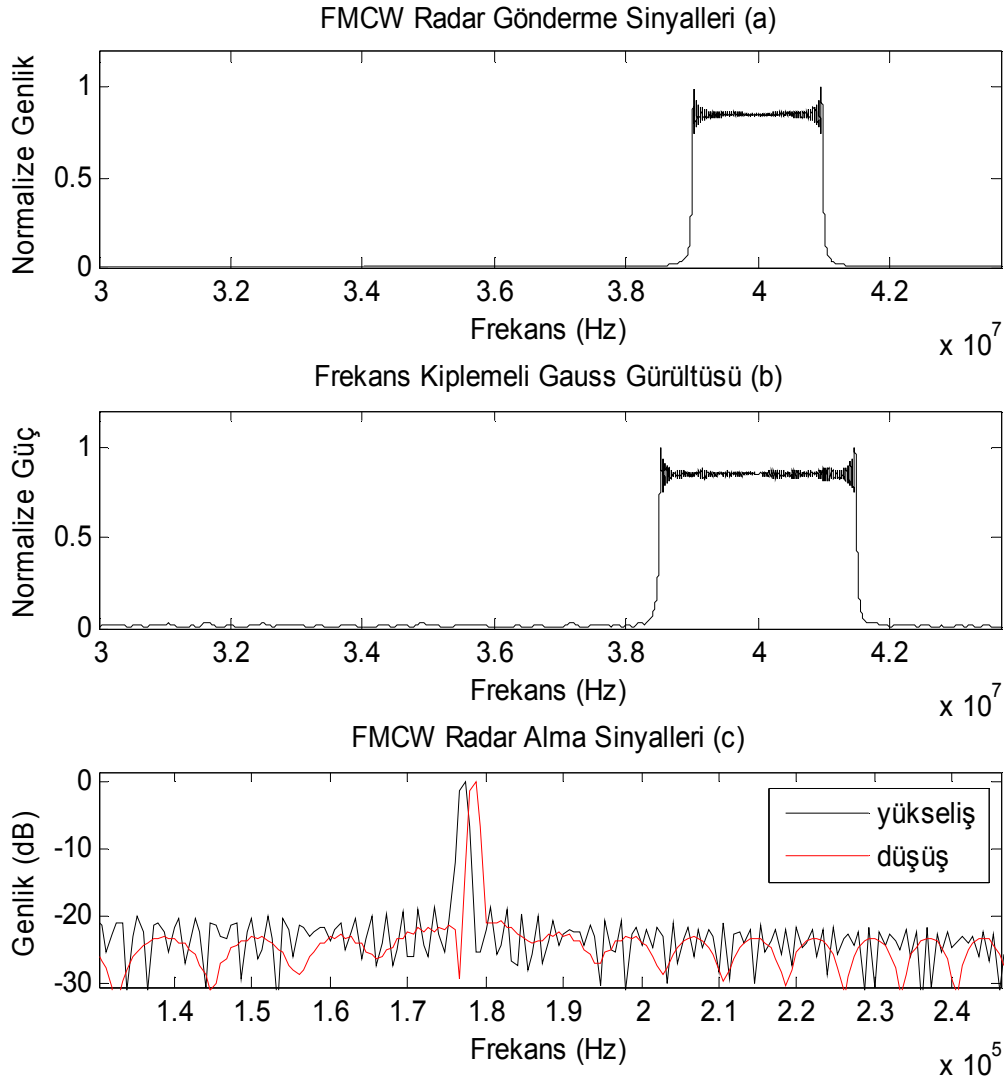
Bu çalışmada Şekil 6.3'de verilen spot gürültü üreten EKT sistemi mimarisine göre üretilmiş karartma sinyallerinin, gönderme gücü ile orantılı olarak hedef yansımaları üzerindeki etkisi gözlenmek istendiği için, spot gürültü karıştırıcısı kısaca benzetim yapılmıştır. Benzetim çalışmasında, karıştırıcının radar çalışma frekansı ve çalışma bant genişliğini tespit ettiği varsayılmış ve aynı çalışma frekansında, daha büyük bant genişliğinde düşük ve yüksek genlik seviyesinde gürültü üretilmiştir. Radar almacındaki gönderme ve karıştırıcı varlığındaki alma sinyalleri analitik ifadeleri Eşitlik (6.1), (6.2) ve Eşitlik (6.3) verildiği gibi oluşturulmuştur.

Benzetim çalışmasında karıştırıcı çalışma merkez frekansı ( $f_o$ ) 40 MHz, çalışma bant genişliği ( $\Delta F$ ) 2 MHz, gürültü üretici frekans kipleme zamanı ( $T_m$ ) 1.5 ms seçilmiştir. Ortamda tehdit olarak 20 km menzilde ve 2500 m/s sabit hızlı hareket yapan bir hedef olduğu varsayılmıştır. Spot gürültünün temel çalışma mantığını görebilmek için gürültü, üçgen taramalı frekans kiplemesi karıştırıcı gönderme sinyalinin fazına eklenmiştir. Karıştırıcı bant genişliği radar çalışma bant genişliğinin 1.5 katı (3 MHz) seçilmiştir.

Spot gürültü üreten karıştırıcı etkinliği benzetim çalışmasında, sırası ile Şekil 6.4'de düşük seviyeli gürültüde ve Şekil 6.5'de yüksek seviyeli gürültü varlığında hedef menzil ölçüm sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 6.4'de görüldüğü gibi karıştırıcı gönderme gücü düşük seviyede iken radar çalışma bandının tam olarak karartılmadığı ve yansıma sinyallerinin gözlenebileceği görülmüştür. Buna göre düşük gürültü seviyesinde hedef vuru frekansları,  $f_{beat_{up}} = 177.33$  kHz ve  $f_{beat_{down}} = 178.67$  kHz olarak ölçülmüştür. Hedef menzil ve hız değerleri, vuru frekansları kullanılarak Eşitlik (2.36) ile hesaplanır. Buna göre hedef menzil ve hız değerleri de aşağıdaki gibi ölçülmüştür.

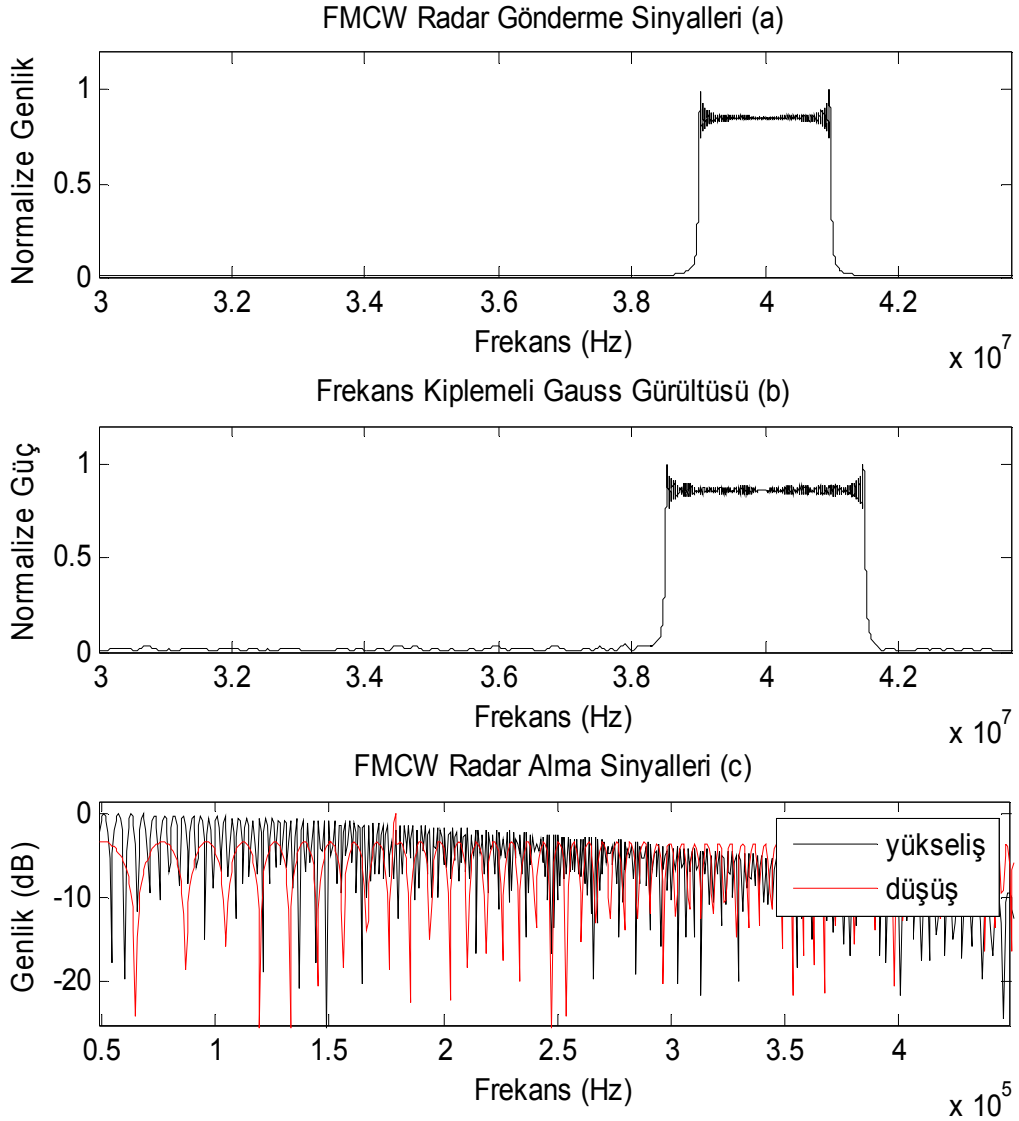
$$R_t = \frac{T_m c}{2\Delta F} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) = 20025 \text{ m}$$

$$V_t = \frac{c}{2f_o} (f_{beat_{down}} - f_{beat_{up}}) = 2508.1 \text{ m/s}$$



**Şekil 6.4** a) Yükselen kenar gönderme sinyali çalışma frekansı ve çalışma bant genişliği görüntüsü b) Karıştırıcıdan yayımlanan frekans kiplimli gaussian dağılımlı düşük güçlü spot gürültü c) Düşük gürültü ortamda radar almada algılanan hedef varlığını gösteren yansımaya sinyali frekans spektrum görüntüsü

Karıştırıcı gönderme gücü yüksek genlikli olarak yayım yaptığında Şekil 6.5’de gözlemlendiği gibi radar çalışma bant genişliği karartılmış ve hedef yansımaya sinyalleri gürültü eteği altında kalmıştır. Ortamda hedef olup olmadığı anlaşılammıştır.



**Şekil 6.5** Karıştırıcı gürültü gücünün yükseltilmesiyle radar çalışma bandının karartılması ve hedef yansıma sinyallerinin gürültü altında kalması

Spot gürültü sistemi temel çalışma özellikleri açıklandıktan sonra gürültü altında ölçüm yapacak benzetim radarı tasarım parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için FMCW radarın herhangi bir karıştırma olmaması durumunda ölçebileceği maksimum menzile göre belirlenmiş minimum almaç çıkışı sinyal gürültü oranı Eşitlik (6.4) esas alınarak tasarlanır.

$$R_{\max} = \left[ \frac{P_{CW} \cdot T_m \cdot G_r^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot L \cdot (SNR_o)_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6.4)$$

$$P_{CW} = \left( \frac{(4\pi)^3 \cdot R_{\max}^4 \cdot k \cdot T_e \cdot B \cdot F \cdot L \cdot (SNR_o)_{\min}}{T_m \cdot G_r^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma} \right) \quad (6.5)$$

Karıştırıcı olması durumunda karıştırıcıdan gönderilen güçle birlikte radar tarafından alınacak toplam geri yansıma gücü de Eşitlik (6.6)'da verildiği gibidir [Mahafza, 2000].

$$P_{SSJ} = \frac{P_J \cdot G_J}{4\pi \cdot R^2} \cdot \left( \frac{\lambda^2 \cdot G_r}{4\pi} \right) \cdot \left( \frac{B}{B_J \cdot L_J} \right) \quad (6.6)$$

Radar almacında görülen sinyal gürültü oranı ile karıştırıcı sinyal gürültü oranı arasındaki ilişki Eşitlik (6.7)'de verilmiştir.

$$\frac{SNR}{S_{SSJ}} = \left( \frac{P_t \cdot G_r \cdot \sigma \cdot B_J \cdot L_J}{4\pi \cdot P_J \cdot G_J \cdot R^2 \cdot B \cdot L} \right) \quad (6.7)$$

Eşitlik (6.7)'de verilen oranın birden büyük olmaya başladığı noktaya karşılık gelecek menzile geçit menzili (crossover range) denir. Bu noktadan sonra sinyal gürültü oranı her zaman karıştırıcı gürültü seviyesinin üzerinde olacaktır. Yani karıştırıcı bu noktadan itibaren etkinliğini kaybedecektir. Geçit menzili,

$$(R_{CO}) = \left[ \frac{P_t \cdot G_r \cdot \sigma \cdot B_J \cdot L_J}{4\pi \cdot P_J \cdot G_J \cdot B \cdot L} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.8)$$

biçiminde ifade edilebilir [Mahafza, 2000]. Eşitlik (6.8)'de  $P_t$  radar gönderme gücü,  $P_J$  karıştırıcı gönderme gücü,  $G_r$  radar alma anteni kazancı,  $G_J$  karıştırıcı



gönderme anten kazancı,  $\sigma$  radar kesit alanı,  $B$  radar çalışma bant genişliği,  $B_J$  karıştırıcı çalışma bant genişliği,  $L$  radar almaç gürültüsü ve  $L_J$  karıştırıcı almaç gürültüsü olarak ifade edilmiştir.

Bu denklemlerde yer alan parametreler benzetim çalışması için Çizelge 6.1'de belirlenmiştir.

**Çizelge 6.1** FMCW benzetim radarı sistem ve çalışma parametreleri

Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$f_o = 3$ GHz	Radar Çalışma Frekansı
$\Delta R = 5$ metre	Menzil Ölçüm Çözünürlüğü
$V_{\max} = 1500$ m/s	Maksimum Ölçülebilen Hız Limiti
$\Delta V = 5$ m/s	Hız Ölçüm Çözünürlüğü
$R_{\max} = 8000$ metre	Maksimum Ölçülebilen Menzil Limiti
$Tm_{\max} = 3.49$ ms	Maksimum Seçilmiş Kipleme Zamanı
$\Delta F = 30$ MHz	Radar Çalışma Bant Genişliği
$(SNR_o)_{\min} = -16$ dB	Almaç çıkışı SNR oranı
$G_r = 40$ dB	Radar Gönderme ve Alma Anten Kazancı
$F = 5$ dB	Radar Almaç Gürültü Faktörü
$L = 2$ dB	Radar Sistem Kaybı
$\sigma = 1m^2$	Tespit Edilecek Füze Kesit Alanı
$T_e = 270$ Kelvin	Radar Almaç Çalışma Sıcaklığı

Çizelge 6.1'de verilmiş bilgiler ve Eşitlik (6.5)'e göre radar gönderme gücü aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$P_{CW} = \left( \frac{(4\pi)^3 \cdot (8 \times 10^3)^4 \cdot (1.38 \times 10^{-23}) \cdot 270 \cdot 30 \cdot 10^6 \cdot 10^{0.2} \cdot 10^{0.5} \cdot 10^{-1.6}}{3.49 \times 10^{-3} \cdot (10^4)^2 \cdot 10^{-2} \cdot 1} \right)$$

$$P_{CW} \cong 32.8 \text{ W}$$

Görüldüğü gibi 8 km menzil füze tehditlerine karşı tedbir almak için gerekli güç seviyesi oldukça düşüktür. Yarı iletken güç yükselteçler ile oluşturulmuş düşük güç transferi ile orta menzilde ölçüm yapma, FMCW radarların en genel özelliklerinden birisidir. Almacı içerisinde -15 dB gürültü seviyesinin en alt tabanı seçilmiş olup bunun üzerindeki sinyaller ölçülebilir. Ancak benzetim çalışmasında hedef var olup olmadığına karar vermek için seçilen minimum eşik değeri -4 dB olarak seçilmiştir. Ayrıca, karıştırıcı tarafından radar almacına gönderilen gürültü seviyesi önce düşük tutulmuş, daha sonra adım adım artırılarak benzetim çalışması sonuçları değerlendirilmiştir.

Radar özellikleri belirlendikten sonra onu karıştırmak için füze tehdidini gönderen sisteme eşlik edecek karıştırıcıya ait parametreler ise **Çizelge 6.2**'de verilmiştir.

**Çizelge 6.2** Frekans kiplimli karıştırıcının sistem ve çalışma parametreleri

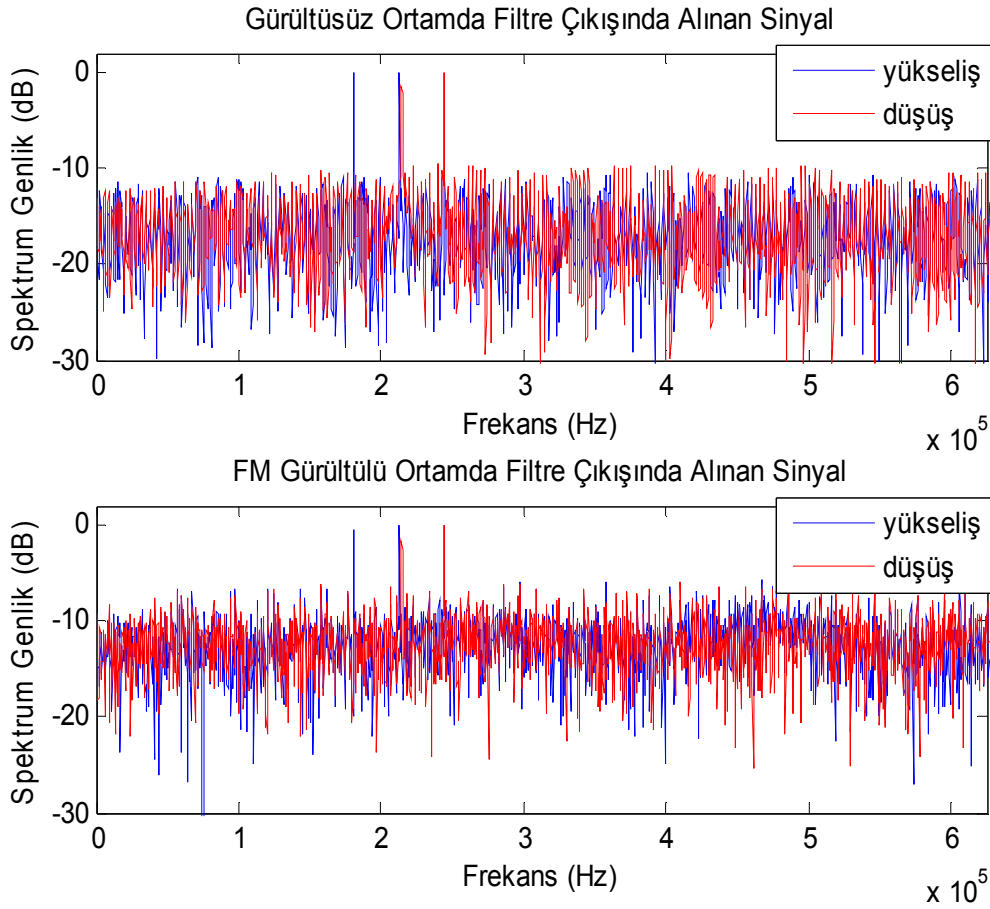
Genel Tasarım Parametreleri	Açıklama
$B_J = 1.5(\Delta F)$	Karıştırıcı Çalışma Bant Genişliği
$P_J = 150 \text{ W}$	Karıştırıcı Maksimum Gönderme Gücü
$G_r = 10 \text{ dB}$	Karıştırıcı Gönderme ve Alma Anten Kazancı
$L_J = 3 \text{ dB}$	Karıştırıcı Sistem Kaybı

Simülasyonun iki adet füze tehdidi için, gaussian dağılımlı gürültü ile karıştırıldığı durumda elde edilen menzil-hız bilgilerini yakalama doğruluğu ölçülmüştür. Çalışmada radar almacı tarafından algılandığı düşünülen hedeflere ait gerçek menzil-hız bilgileri sırası ile  $R_1 = 2700$  m,  $V_1 = 850$  m/s,  $R_2 = 3120$  m ve  $V_2 = 780$  m/s kabul edilmiştir.

Benzetim çalışması radarı ve karıştırıcı çalışma parametreleri belirlendikten sonra farklı kipleme zamanlarında elde edilen birinci ve ikinci tarama sonuçlarına ait çıktılar aşağıda verilmiştir.

Çoklu füze tehdidini analiz edebilmek için çalışmanın önceki bölümlerinde belirlenen yöntemlerden iki farklı kipleme zamanı ile tarama seçilmiştir. Bu yöntemi hatırlamak gerekirse; öncelikle belirli bir zamanda tarama yapıp veriler almaya alınır. Daha sonra farklı bir kipleme zamanında tarama yapılarak elde edilen birinci ve ikinci tarama verileri karşılaştırılır. Dolayısıyla ilk tarama ve ikinci tarama arasında geçen zaman diliminde ortama verilen rasgele gürültü fazı değişebilir. Gürültü zaman içerisinde rasgele dağılıma sahip olduğu için zaman ve frekans eksenlerinde dağılımları farklı olabilir. Ancak maksimum gürültü genlik seviyesi değişmeyecektir.

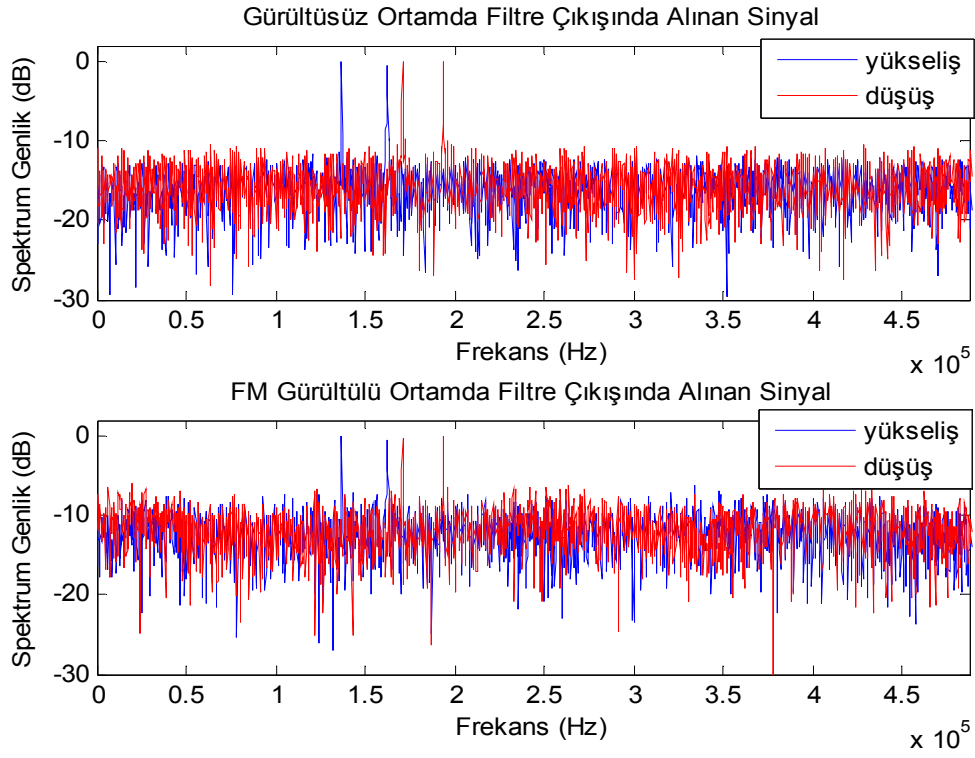
Şekil 6.6'da görüldüğü gibi ortamda gürültü seviyesi karıştırıcı yokken ortalama -15 dB seviyelerinde olup; ortamda karıştırıcı varken gaussian dağılımlı spot gürültü ile birlikte alınan yansıma sinyallerindeki gürültü tabanı ortalama -8 dB civarına yükselmiştir.



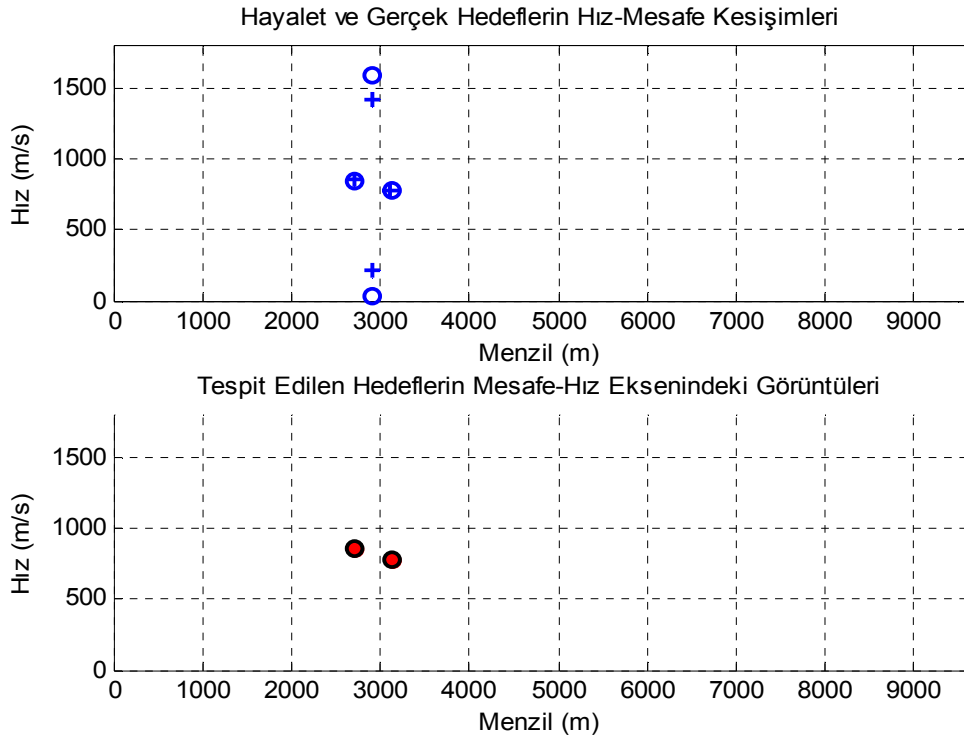
**Şekil 6.6** Düşük genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar alması ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72$  ms)

Hedef varlığına karar verebilmek seçilmesi gereken eşik değeri seviyesi de yükselmiş olacaktır. Eşik değerinin çok daha yukarıda olmasına neden olacak gürültü varlığında düşük seviyeli gerçek hedef yansıma sinyalleri yok sayılacaktır ve radarın yanılgısına neden olacaktır. Eşik değeri belirlemek için CFAR benzeri hata oranı düşük algoritmalar kullanılabilir. Bu çalışmada eşik değeri sabit olarak belirlenmiş olup yukarıda belirtildiği gibi -4 dB değerindedir.

Şekil 6.7’de ikinci kipleme zamanına göre yapılan tarama sonucunda elde edilen grafikler verilmiştir.



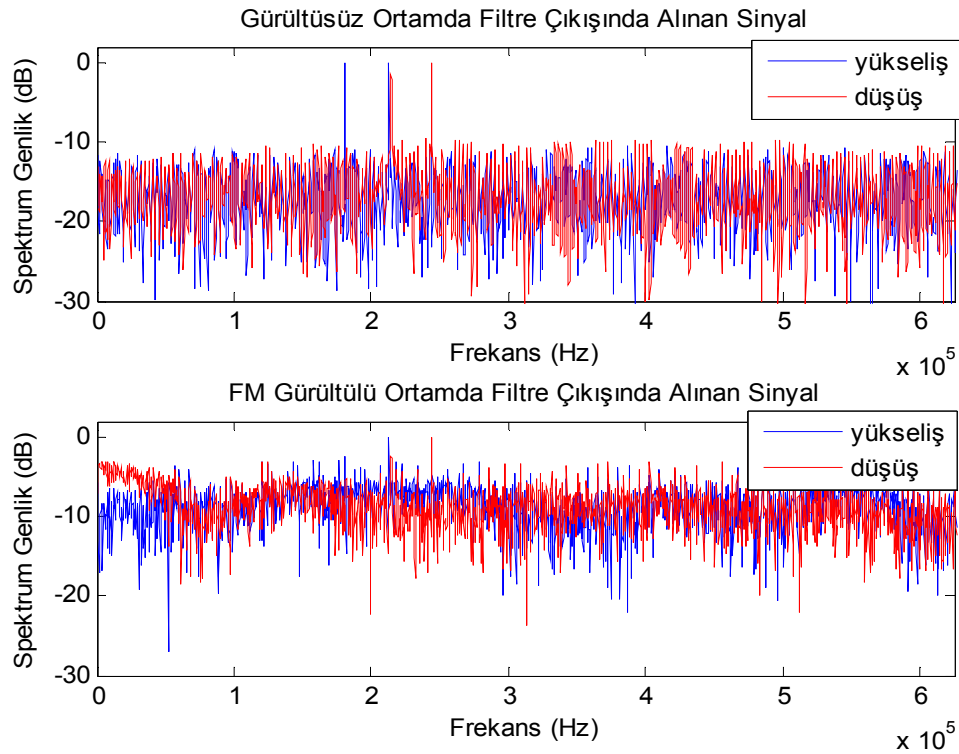
**Şekil 6.7** Düşük genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar almacı ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49$  ms)



**Şekil 6.8** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile düşük gürültü altında iki tehdidin menzil-hız bilgilerini elde edilmesi

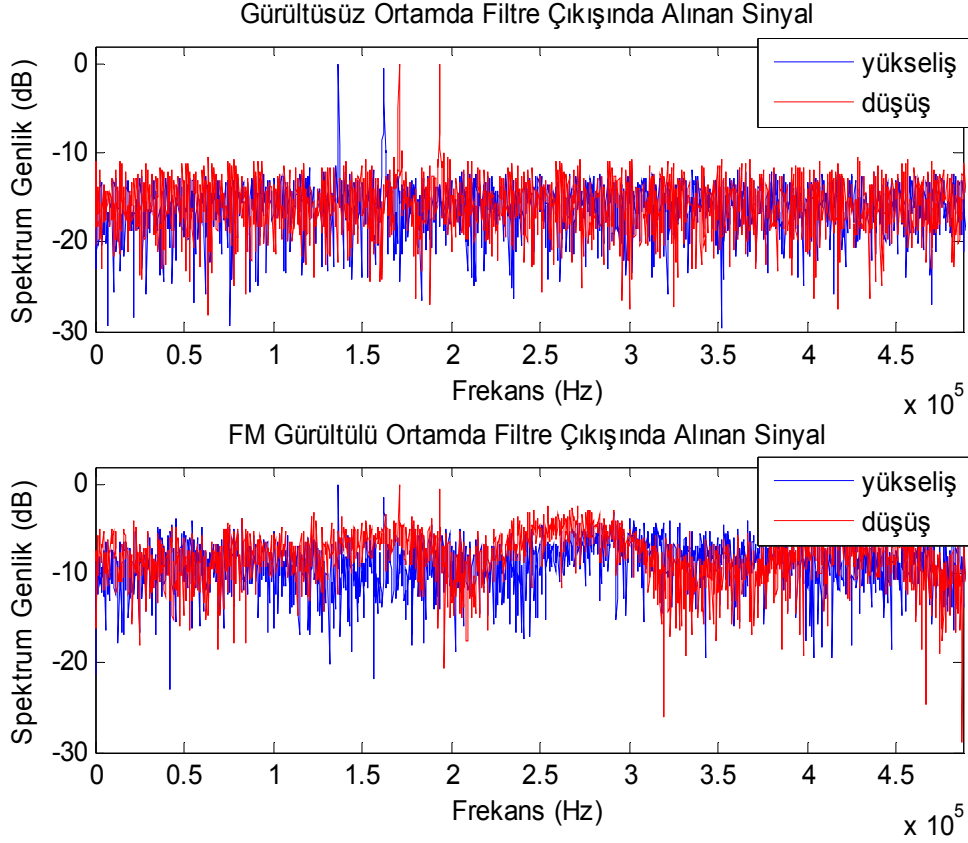
Hava tehdidi benzetim çalışmasında, benzetim yapılan iki adet füzenin menzil ve hız bilgileri karıştırıcıya rağmen tespit edilmiştir. Ancak burada karıştırıcıdan gönderilen gürültü gücü düşük tutulmuştur. Sadece daha önce hedef varlık-yokluk karar eşik değeri -15 dB seviyesinden -8 dB seviyesi üzerine yükseltilmek zorunda kalınmıştır. Dolayısıyla eğer -8 dB sinyal gürültü oranına sahip olacak farklı bir hedef var olmuş olsa idi gürültü tabanı altında kalabilir ve tespit edilemezdi. Ancak burada iki adet füzenin yeterli seviyede sinyal gürültü oranının üstünde olduğu kabul edilmiştir. Benzetim çalışması sonucu belirlenen gürültü ortamında Şekil 6.8’de verildiği gibi elde edilen iki hava tehdidine ait menzil-hız verileri  $R_1 = 2700.9$  m,  $V_1 = 853.61$  m/s,  $R_2 = 3119.55$  m ve  $V_2 = 781.03$  m/s olarak hesaplanmıştır. Ölçüm değerleri gerçek verilere oldukça yakındır.

Bir sonraki benzetimde spot gürültünün genliği yükseltip gerçek hedef yansıma sinyalleri gürültü altında bırakılmıştır. Hedef olarak yaratılmış yukarıda verilen füze tehdit bilgileri, değiştirilmeden yüksek genlikli spot gürültü veren karıştırıcının var olduğu ortamda ölçülmeye çalışılmıştır.



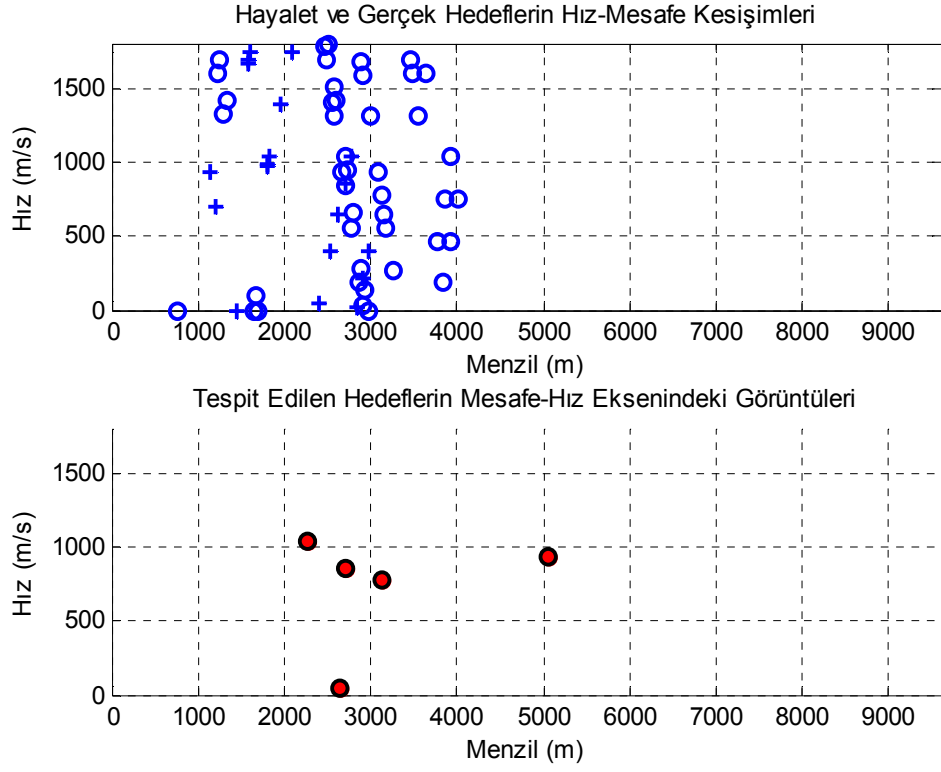
**Şekil 6.9** Yüksek genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar alması ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72$  ms)

Görüldüğü gibi karıştırıcı tarafından frekans kiplenmeli olarak oluşturulmuş gaussian gürültü gücü genlik seviyesi artırıldığında hedef yansıma sinyallerinin gürültü tabanı altında kaldığı görülmektedir. Eğer radar gürültüye karşı hiçbir önlem almamış ise Şekil 6.11'deki gibi gürültü içerisinde hedeflerin varlığını net olarak ayırt edemeyecek, gürültünün getirdiği sahte hedefleri algılamış olacaktır.

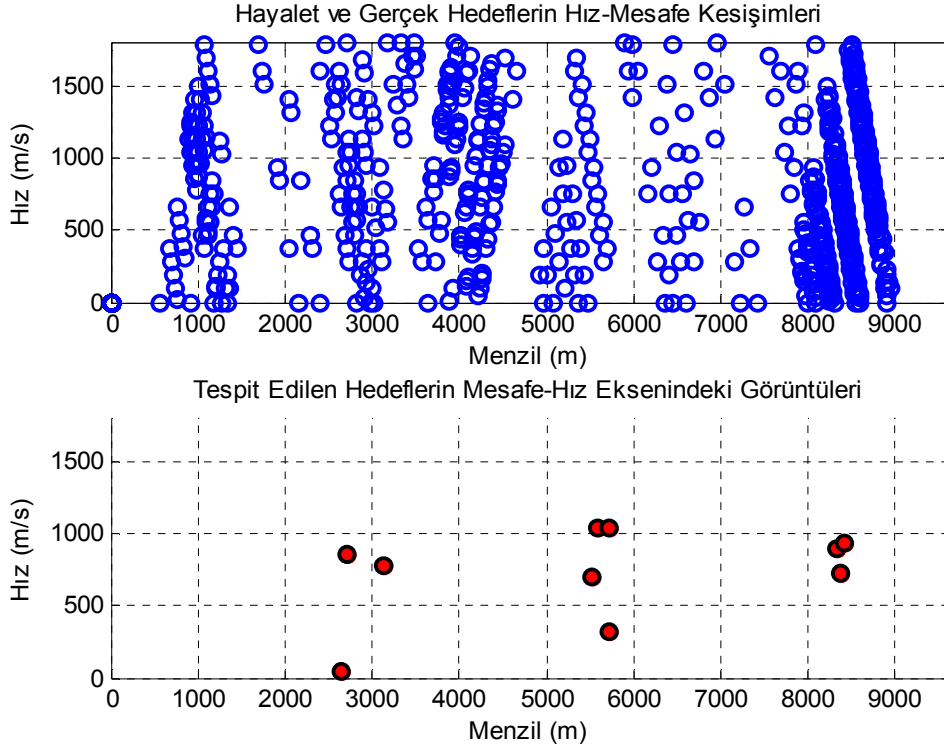


**Şekil 6.10** Yüksek genlikte gürültülü ve gürültüsüz ortamda radar alması ile alınmış iki hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49$  ms)

Şekil 6.11'de görüldüğü üzere ortamda iki hedef olmasına rağmen radar ekranında ikiden fazla hedef görülmüştür. Gürültü nedeni ile radar görüntüleme ekranının kirletilmiştir. Bu durumda radar, gerçek hedef ve ya hedeflerin varlığından haberdar olamayacaktır. Spot gürültü seviyesinin daha da artırılması ile Şekil 6.12'de daha fazla sahte hedefin ekranda belirdiği gözlemlenmektedir. Normalde gürültü ile karıştırma etkin bir EKT yöntem olmasa da eğer ölçüm radarı gerekli önlemi almadı ise uzun süre gürültüye maruz kalabilir ve tehditlerin zaman kazanmasını engelleyemez.



**Şekil 6.11** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile yüksek gürültü altında gerçek hedeflerin sanal hedefler arasında kalması



**Şekil 6.12** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile daha yüksek gürültü altında gerçek hedeflerin sanal hedefler arasında kalması



## 6.2. Aldatma Tabanlı EKT Sistemleri

Düşman radar ekranında gürültü oluşturmak yerine, gerçekte var olmayan yanıltıcı hedefler oluşturularak radarın karıştırılması için geliştirilmiş sistemlere Aldatma Tabanlı EKT Sistemleri denir. Aldatma sistemleri özellikle takip radarları üzerinde sıklıkla kullanılır [Wiegand, 1991]. Belirli bir hareket zaman algoritması ile sahte hedefler gezginleştirilir. Radar, takip etmesi gerekli tehdidi bırakıp bu hedeflere yöneldiğinde ya da belirli bir süre çözümü karmaşasına düşmesi bile kimi zaman karıştırma yapan sistemler için yeterli olacaktır. Özellikle hem füze tehdidi alan hem de füze ile tehdit edilen kısa menzilli zaman dilimlerinde elde edilen bu edinim oldukça faydalı olabilir.

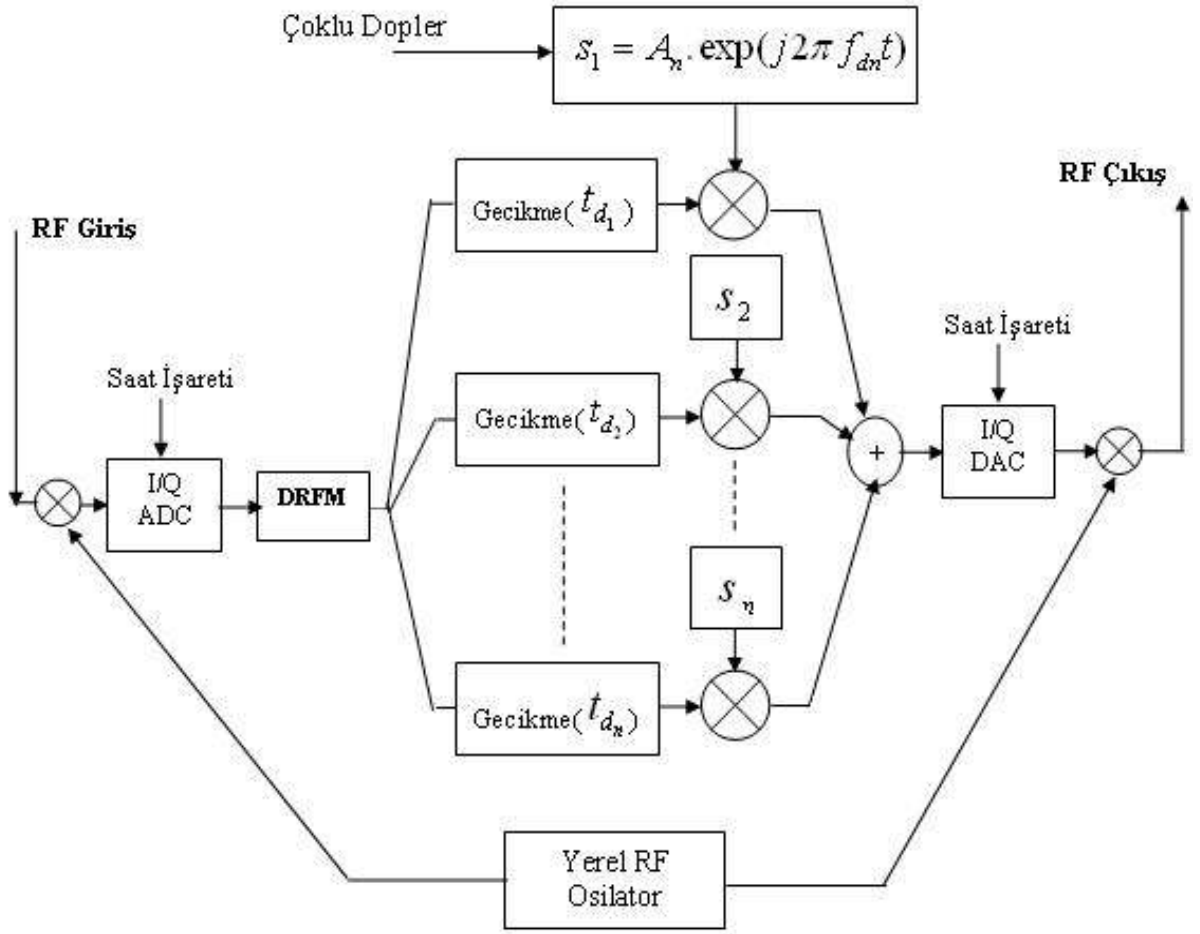
Düşman radarlarında birden fazla sahte hedef yaratabilme özelliğine sahip olan karıştırıcılarda ana fikir, alınan düşman radar sinyallerinin genlik seviyesinin kuvvetlendirilip menzil-hız ya da açı değişimi ile düşman radarı yanıltıcı hedef alarak gönderilmesidir. Doğru uygulandığında, düşman radarı gerçek veri değerlerine sahip olmayan sahte hedefleri tespit ederek yanıltıcı olacaktır.

Aldatma sistemleri, düşman radarının gönderme sinyalini belirli bir zaman boyunca dinleyip göndermiş olduğu dalga formunu tespit etmeye çalışır. Yüksek çözünürlüklü analog-sayısal dönüştürücüler kullanılarak gönderilen dalga formunun kopyası çıkartılır. Sayısal Radyo Frekans Hafıza (Digital Radio Frequency Memory-DRFM) gibi yüksek bellekli hafıza birimlerinde verilerin kopyaları saklanır [Hanulak, Hosko, 2008]. İstenilen zamanda hafızadaki veriler işlenerek ortamda sahte hedef yaratmak için hedeflerin menzil, hız veya her ikisi birlikte değiştirilerek geri yansıma sinyalleri çoklanabilir. Bu sayede ortamda normalden fazla hedef sezilenecek ve radarın değerlendirme mekanizması karıştırılacaktır.

## 6.2.1 Sayısal Radyo Frekans Hafızası

Son yıllarda gelişen hızlı işlemciler ile birlikte bugün üretilen radarlar pek çok işlemi sayısal olarak yapmaktadır. Sayısal radar işlemcileri; darbe sıkıştırma, Doppler çözümüleme, frekans kıvraklığı ve gelişmiş dalga formlarını programlayabilme özelliğine sahip olmuştur. Eski tip tekrarlayıcı karıştırıcılar olan hız yakalama, menzil yakalama ya da gürültü oluşturma gibi aldatma ve karıştırma teknikleri evre uyumlu sinyal işleme alt yapısını kullanan radarların tasarlanmasıyla birlikte etkinliğini yitirmiştir. Çünkü tekrarlanmış sinyaller, orijinal sinyaller gibi radar almacı içerisinde evre uyumlu olmadığından işlem kazançları düşüktür. Gelen sinyalle aynı evrede sinyal göndermek radar almacında uyumlu (match) süzgeçde süzülmemiş olacaktır. Günümüzde üretilen modern radarların işlem kazançları 60 dB seviyesine ulaşmış durumdadır [Alhumaidi, 2004]. Bu nedenle EKT sisteminde bu açığın giderilmesi için radar gönderme sinyalini olduğu gibi saklayabilecek ve gelen sinyalle evre uyumlu sinyal geliştirebilecek ve radar gönderme dalga formunu saklayabilecek olanağa sahip DRFM mimarisi geliştirilmiştir. DRFM yapıları, sayısal EKT sistem teknolojisinin en önemli unsurlarından biridir. Aynı anda hem menzil hem de hız aldatması yapılacak şekilde sahte hedefler düşman radarı dalga formunda ve çalışma frekansında gönderilebilir.

Üç tip DRFM mimarisi bulunmaktadır [Alhumaidi, 2004]. Bunlar; genlik kodlamalı DRFM yapısı, dört evreli kodlamalı DRFM yapısı ve faz kodlamalı DRFM yapısı olmak üzere tanımlanmaktadır. Genlik kodlamalı DRFM gelen RF sinyali doğrudan karıştırıcıdan geçirip süzgeçler ve yüksek hızda çalışan analog sayısal dönüştürücülerden geçirir. Gelen sinyal büyük bant genişliğinde işlendiği için yüksek hızlarda dönüştürücülere ihtiyaç duymaktadır. Dört evreli kodlamalı DRFM ise sinyali reel ve sanal iki bileşene ayırıp temel bantta işlem yaptığından düşük hızlarda dönüştürücüleri aktif olarak kullanabilir. Ancak işlemler iki koldan yürütüldüğü için her dönüştürücüden iki adet kullanım gerektirir. Faz kodlamalı DRFM ise yalnızca faz detektöründen gelen faz bilgisini saklar.



**Şekil 6.13** Çoklu sahte hedef yaratabilmek için menzil ve hız aldatması yapabilen DRFM mimarisinin genel blok diyagramı

Tipik bir DRFM genel mimari blok diyagramı Şekil 6.13’de verilmiştir. Girişte alınan radyo frekans radar gönderme sinyallerini temel banda indirmek için aşağı frekans dönüştürücü (down-converter) kullanılır. Temel bant sinyalleri yüksek hızda analog-sayısal dönüştürücü ile örneklenip sayısal hafıza birimine sayısal veri girdisi olarak iletilir. Yüksek çözünürlükte örneklenmiş sayısal veriler DRFM hafızasında yedeklenir. DRFM hafızasının düşman radarı dalga formunun tamamını yedekleyebilecek kadar büyük olması istenir [Hanulak, Hosko, 2008]. Ayrıca hafızada yazma-okuma işlemleri kayıpsız olarak nano saniye mertebelerindedir. Burada sinyale ait her türlü genlik, faz ve ya frekans kipleme gibi benzeri kipleme işlemi gerçekleştirilebilir. DRFM içerisinde tüm bu işlemler için yüksek saat işaretli sayısal devre elamanları kullanılır. DRFM tasarımındaki en temel görev, etkin çalışma bant genişliğinin belirlenmiş olması, buna göre sinyallerin temel bantta indirilmesi, analog sinyallerin sayısal sinyallere dönüştürülmesinde örnekleme

hızının yüksek olması, örnekleme çözünürlüğünün yüksekliği ve hafıza biriminin saklayabileceği yeterli veri alanının ve hızının belirlenmiş olmasıdır.

DRFM sistemin pek çok avantajı vardır. Bunların başında sinyal işleme alt yapısının tekrarlanabilirliği, güvenilirliği, kararlılığı, esnek olarak programlanabilirliği ve büyüme potansiyeline sahip olmasıdır. Bugün DRFM yapıları hem aldatma hem de gürültü karıştırıcısı olarak kullanılabilir. Bu yönü ile en iyi EKT sistemi ara yüzlerinden bir tanesi denilebilir. Ayrıca, kullanıcıya evre uyumlu ya da evre uyumsuz karıştırma yapma imkânını sağlamaktadır. Dezavantajı ise ileri teknoloji gerektirmesi, yüksek hızda performans gerektirmesi, geniş bant genişliğinde çalışma alanı kısıtlamasına sahip olmasıdır. Ancak son yıllarda analog sayısal dönüştürücülerin teknolojisi oldukça hızlı bir şekilde gelişmektedir.

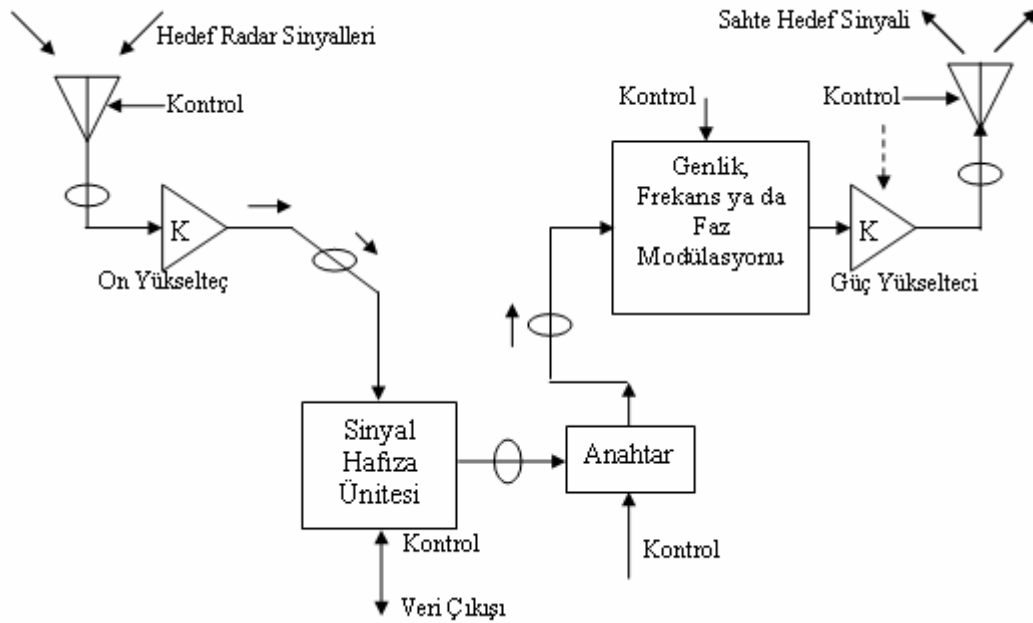
Bu çalışmada gerçek hedeflerin etrafında onları gizleyebilmek için sahte hedefler oluşturulmak istenmiştir. Sahte hedef oluşturabilmek için radar gönderme sinyalinin Doppler frekansı ve geri yansıma zamanı üzerinde değişiklikler yapılmıştır. Bu sayede Şekil 6.13'de verilen mimari benzetimi yapılarak gerçekte olmayan hız ve menzillerde sahte hedefler üretilmek istenmiştir.

Öncelikle en temel aldatma yöntemlerinden olan hız aldatma ve menzil aldatma yapılarını anlatalım.

### **6.2.2 Hız Aldatması**

Sahte hedef yaratma yöntemlerinden biri olan hız aldatma (velocity deception) sistemi genel blok diyagramı Şekil 6.14'de verilmiştir. Sistemde öncelikle düşman radar gönderme sinyali karıştırıcı almacı ile algılanır, limitli ön yükselteç ile zayıf sinyal seviyesi ilk katta süzgeçlenip yükseltilir. Hız aldatması yapan karıştırıcılar, düşman sinyalleri çözümleyip sayısal veriler halinde sinyal hafıza ünitesi içerisinde tutar. Bu sinyaller içerisinde sahte hedef yaratmak üzere gerçek Doppler frekansı dışında yeni Doppler frekansları oluşturulur. Daha sonra radar çalışma frekansında üretilen sinyaller kiplenir. Kiplenmiş sahte hedef hız bilgisi oluşturan Doppler frekanslarını barındıracak karıştırıcı sinyalleri, kuvvetlendirilip radar alma anteni ana huzmeleri hedef alınacak şekilde tekrar gönderilir. Bu sayede radar normal

olarak sadece tehditten dönecek yansıma sinyallerinin yanı sıra sahte hedef sinyallerini de ekranda görmeye başlar. Eğer sahte hedef olduğu algılanamaz ise bu veriler radar ve radarın yönlendirdiği komuta kontrol merkezini yanıltmış olacaktır. Bu yöntem özellikle izleme radarlarında kullanılır. Hedeflerin sahte olduğunu belli etmemek için oluşturulacak herhangi bir hareket denklemi ile hedeflerin durağanlıktan çıkartılıp hareket ettirilmesi istenir. İzleme radarları sahte hedef olmadığını anlamadığı durumda bu hedefleri de izlemeye başlayacaktır. Bu karıştırıcılar ile düşman radarı gönderme sinyali özellikleri tamamı ile çözümlendikten sonra istenilen zamanda farklı menzil-hız değerlerinde sahte hedefler gönderilerek gizlenme yapılabilir.



**Şekil 6.14** Hız aldatma karıştırıcı mimarisi genel blok diyagramı

Eşitlik (6.2)'de verilen gerçek hedeften yansıyan sinyallerin yanı sıra, sahte hedef yaratmak üzere karıştırıcıdan gönderilen sinyallerin analitik ifadesi Eşitlik (6.9)'da verilmiştir. Bu ifade  $f_d'$  karıştırıcıdan gönderilen sahte hedef bilgisinde hedef hızının yaratacağı Doppler kaymasıdır.

$$s_{r_{up}}'(t) = K \cos\left(2\pi \left[ (f_o + f_d' - \frac{\Delta F}{2})(t - t_d) + \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d)^2 \right]\right),$$

$$t_d < t < T_m$$

(6.9)

$$s_{r_{down}}'(t) = K \cos\left(2\pi \left[ (f_o + f_d' + \frac{\Delta F}{2})(t - t_d) - \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d)^2 \right]\right),$$

$$T_m < t < 2T_m - t_d$$

$$f_d' \neq f_d \text{ ve } K > b_o .$$

Görüldüğü gibi alınan sinyallerin tüm karakteristiğinin belirli bir zaman diliminde karıştırıcı almacı sinyal işleme ünitesinde çözümlendiği düşünülerek aynı bant ve frekansta yayım yapmak üzere farklı hız değeri oluşturacak Doppler frekansı, frekans kiplmeli sinyal fazında ilgili yere eklenmiştir. Zaman içerisinde karıştırıcı isterse birden fazla sahte hedefte oluşturabilir.

### 6.2.3 Menzil Aldatması

Sahte hedef yaratma yöntemlerinden bir diğeri olan menzil aldatma (range deception) sistemi genel blok diyagramı Şekil 6.15'de verilmiştir. Görüldüğü gibi menzil aldatma sistem mimari hız aldatma sistem mimarisinden daha basittir. Düşman radar sinyalleri karıştırıcı almacı ile doğrudan alınır ve belirli zaman gecikmesinde yüksek genlikli olarak istenilen anda yayım yapılabilir. Bu yapılarda alınan sinyal radyo frekansta gecikme hattı (delay line) üzerinden geçirilir ve arkasından doğrudan sinyal özellikleri değiştirilmeksizin yayım yüksek genlikte gönderilir. Menzil-hız gözlem ekranında farklı menzillerde aynı hızlara sahip sahte hedefler oluşturularak düşman radarı aldatılmak istenir. Farklı menzillerde oluşturulmuş sahte hedefler arasında gerçek hedef kendini gizlemek ister. Sahte hedef yaratmak üzere karıştırıcıdan gönderilen sinyallerin analitik ifadesi Eşitlik

(6.10)'da verilmiştir. Bu ifade  $t_d'$  karıştırıcıdan gönderilen sahte hedef bilgisinde hedef menziline karşılık gelecek gecikme zamanıdır.

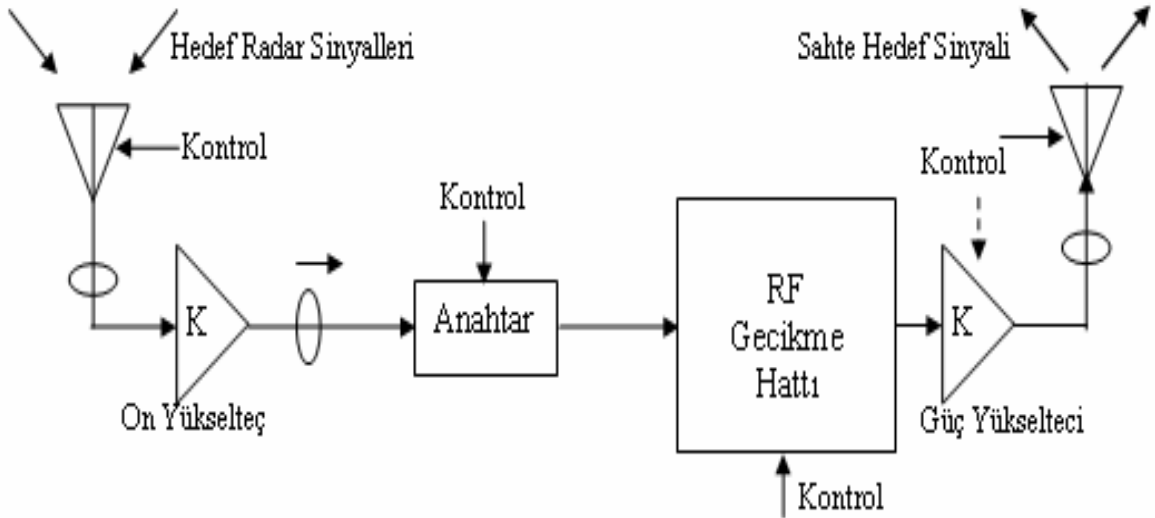
$$s_{r_{up}}'(t) = K \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left( f_o + f_d - \frac{\Delta F}{2} \right) (t - t_d') + \frac{\Delta F}{T_m} (t - t_d')^2 \right] \right)$$

$$t_d' < t < T_m$$

(6.10)

$$s_{r_{down}}'(t) = K \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left( f_o + f_d + \frac{\Delta F}{2} \right) (t - t_d') - \frac{\Delta F}{T_m} (t - t_d')^2 \right] \right)$$

$$T_m < t < 2T_m - t_d'$$



**Şekil 6.15** Menzil aldatma karıştırıcı mimarisi genel blok diyagramı

Bu çalışmada benzetim yapılan karıştırıcıda, hem menzil hem de hız aldatması yapacak şekilde sayısal radyo frekans hafıza birimi kullanılarak sahte hedeflere ait bilgiler üretilip radar yan huzmelerini hedef alarak yayım yapıldığı düşünülmüştür.

Radar gerçek yansıma sinyallerinin yanı sıra sahte hedef oluşturmak için kullanılan karıştırıcı gönderme sinyalleri Eşitlik (6.11)'de verilmiştir.

$$s_{r_{up}}'(t) = c_o \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d' - \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d') + \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d')^2 \right]\right)$$

$$t_d' < t < T_m$$
(6.11)

$$s_{r_{down}}'(t) = c_o \cdot \cos\left(2\pi \left[ \left(f_o + f_d' + \frac{\Delta F}{2}\right)(t - t_d') - \frac{\Delta F}{T_m}(t - t_d')^2 \right]\right)$$

$$T_m < t < 2T_m - t_d'$$

Eşitlik (6.11)'de sahte hedeflerin hız bilgisi  $f_d'$  ile oluşturulurken, menzil bilgisi  $t_d'$  ile oluşturulmuştur. Ayrıca, benzetim çalışması boyunca karıştırıcının radar gönderme sinyalinin merkez frekansı, bant genişliği ve kipleme zamanı bilgilerinin daha önceden çözümlendiği varsayılmıştır. Bu bilgiler tespit edildikten sonra istenilen sayıda sahte hedef yaratmak üzere Eşitlik (6.11) elde edilen dalga formu karıştırıcı gönderme anteninden düşman radarı alma antenine doğrudan gönderildiği varsayılmıştır. Ayrıca, ortamda var olan gürültü gauss dağılımlı ancak güç genlik seviyesinin düşük olduğu kabul edilmiştir. Benzetim radarı çalışma parametreleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

İlk yapılan benzetim çalışmasında aşağıdaki menzil-hız bilgilerine sahip gerçek hedeflerin var olduğu ve aynı zamanda DRFM tabanlı çalışan bir karıştırıcı ile menzil-hız aldatması yapabilecek şekilde bir sahte hedef oluşturulmuştur. Menzil (m), hız (m/s) olmak üzere gerçek hedef menzil-hız bilgileri,

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 \\ V_1 & V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7500 & 4500 \\ 1050 & 780 \end{bmatrix}$$

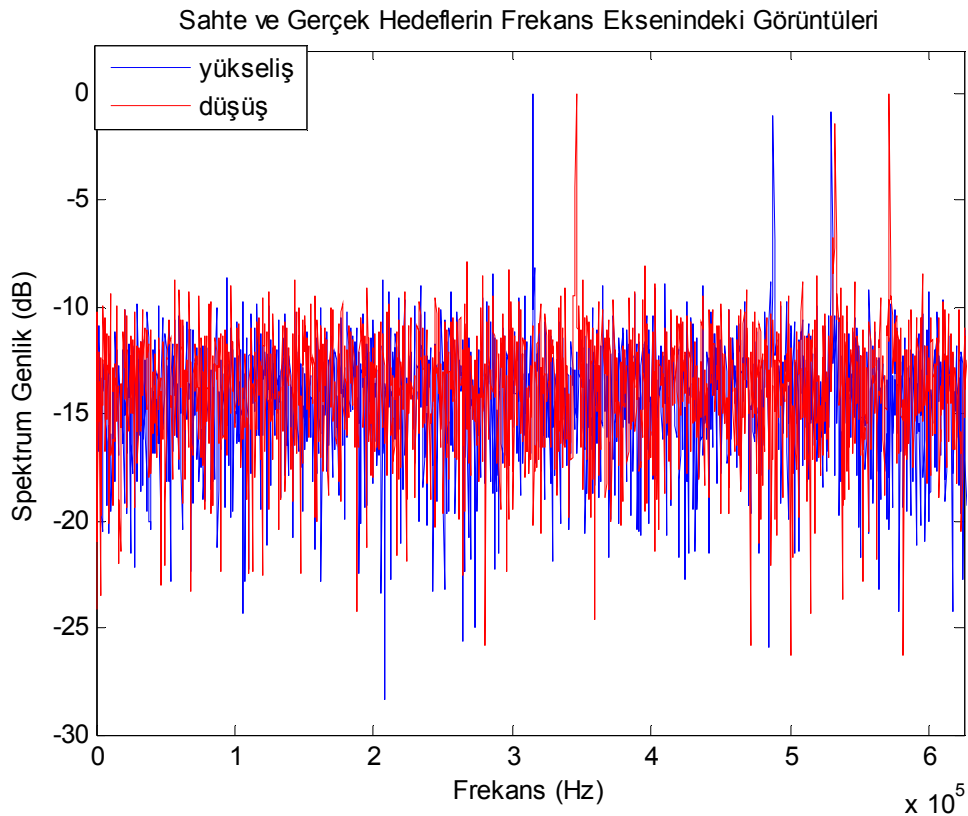
sahte hedef menzil-hız bilgisi ise;



$$\begin{bmatrix} R_1' \\ V_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6950 \\ 1120 \end{bmatrix}$$

olarak belirlenmiştir.

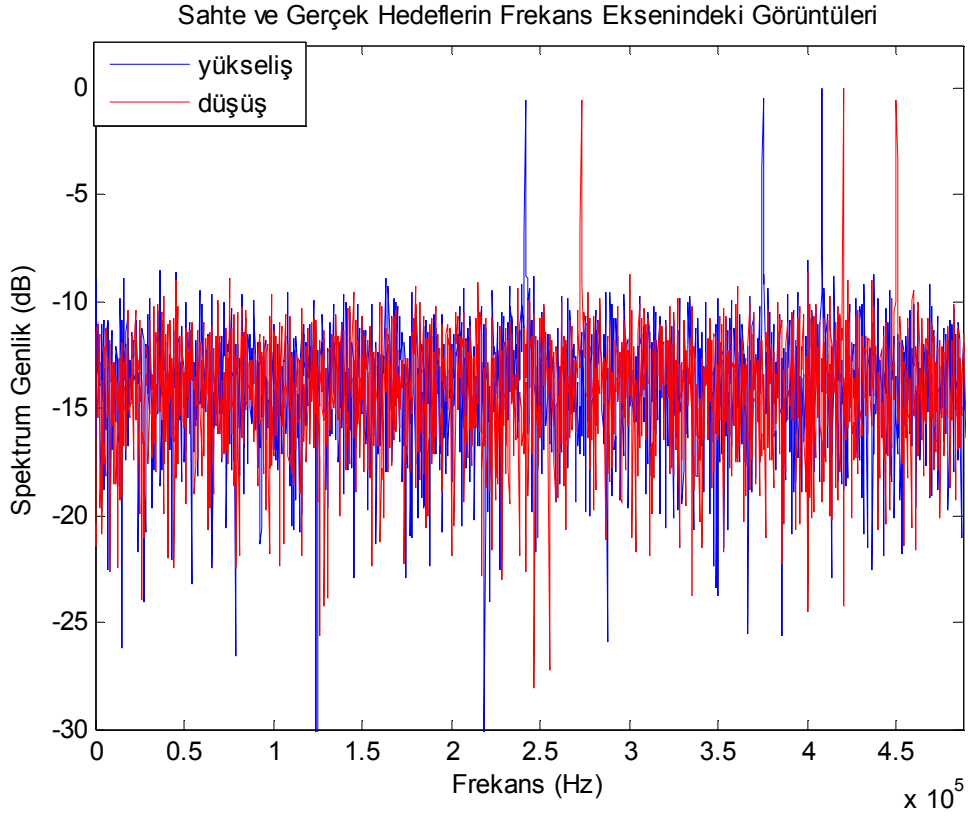
Şekil 6.16'da ve Şekil 6.17'de çoklu hedeflerin çözümlenmesi için iki farklı kipleme zamanı kullanıldığında elde edilmiş almaç çıkışı sinyallerin frekans eksenindeki görüntüleri verilmiştir. Bu gözlemlerde görüldüğü gibi benzetim çalışmasında, önceden seçilmiş eşik değeri seviyesini aşan tepe sinyallerinin sayısı altıdır. Dolayısıyla ortamda farklı menzil ve hızlara sahip üç hedefin var olduğu anlaşılmıştır.



**Şekil 6.16** İlk taramada düşük gürültülü ortamda radar almacı ile alınmış iki gerçek, bir sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72ms$ )

Bu hedeflerden birisi DRFM karıştırıcısı tarafından radar almacını yanıltmak amacı ile radar gönderme sinyaliyle aynı karakteristikteki sahte hedef sinyalidir. Bu

sinyalin diğer sinyallerden herhangi bir farkının olmadığı bu durumda ayırt edilemeyeceği görülmektedir.

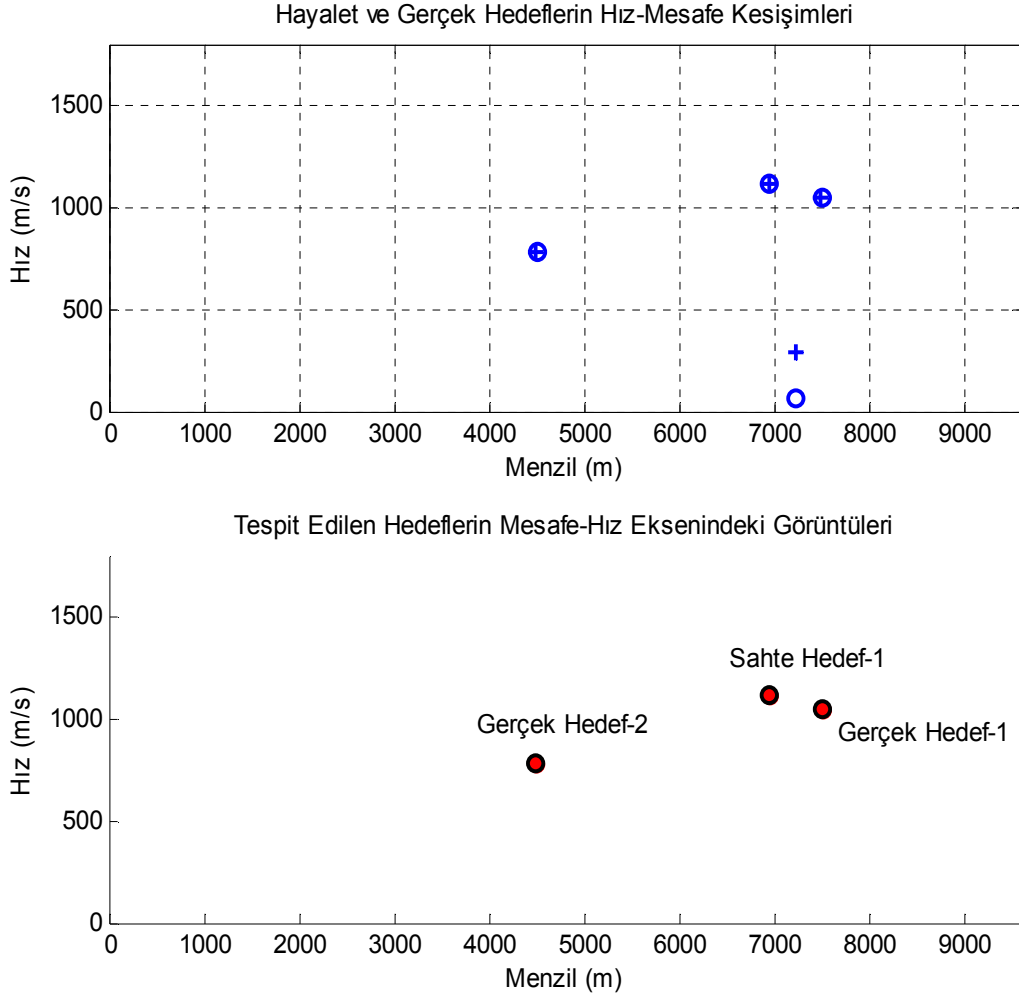


**Şekil 6.17** İkinci taramada düşük gürültülü ortamda radar almacı ile alınmış iki gerçek, bir sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49ms$ )

Benzetim çalışması sonucu yansıma sinyallerinden ölçülmüş menzil-hız bilgilerinin ekran görüntüsü Şekil 6.18’de verilmiştir. Bu grafikte görüldüğü gibi ortamda sanal olarak yaratılmış sahte hedef, radar ekranında gerçek hedef gibi gözlemlenmiş ve değerlendirmeye alınmıştır. Hedef menzil-hız bilgilerinde elde edilmiş ölçüm sonuçları ise

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R'_1 \\ V_1 & V_2 & V'_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7500.5 & 4499.7 & 6950.1 \\ 1046.82 & 781.026 & 1114.81 \end{bmatrix} \text{ olarak ölçülmüştür.}$$

Sahte hedef gerçek hedefler arasında yerini almış olup ilk aşamada radar tarafından tehdit olarak algılanabilir. Ölçüm değerleri benzetim çalışması başlangıcı verilen girdi değerlerini oldukça yakınlık göstermektedir.



**Şekil 6.18** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile ortamda var olan ikisi gerçek biri sahte hedef olmak üzere üç hedefin algılanması

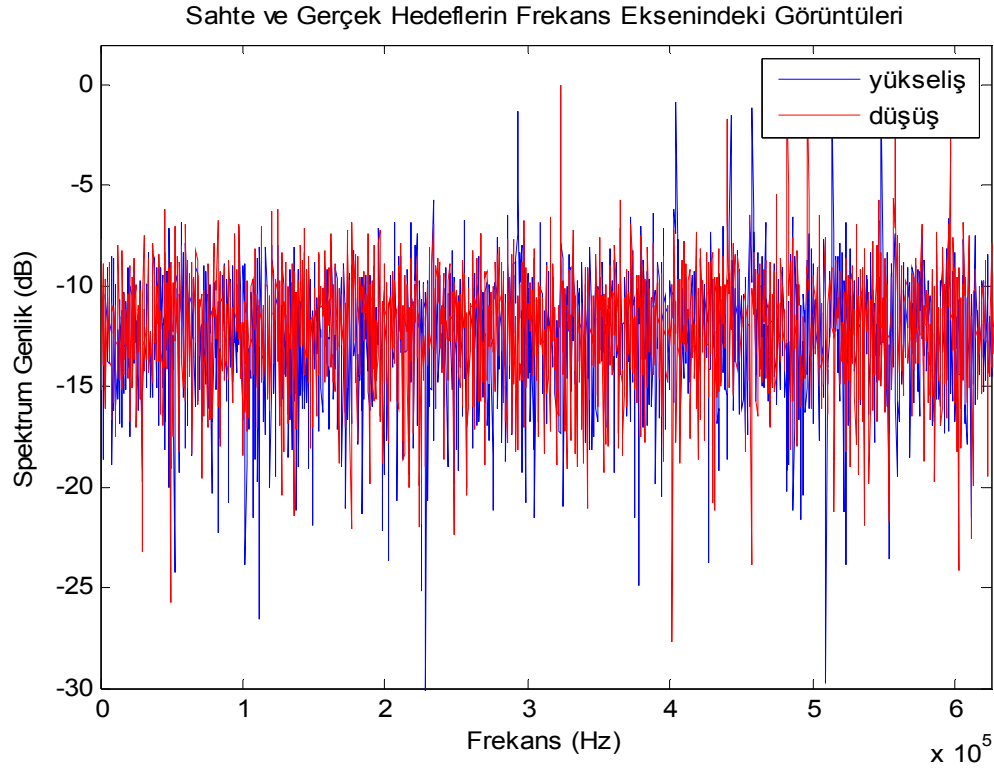
Benzetim çalışması gerçek ve sahte hedeflerin sayısı artırılarak tekrar koşturulmuştur. Benzetim çalışması gerçek ve sahte hedeflerin menzil-hız bilgi girdileri aşağıda verildiği gibi alınmıştır. Sırasıyla gerçek hedef menzil-hız bilgileri,

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ V_1 & V_2 & V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7800 & 6500 & 4200 \\ 1200 & 980 & 750 \end{bmatrix},$$

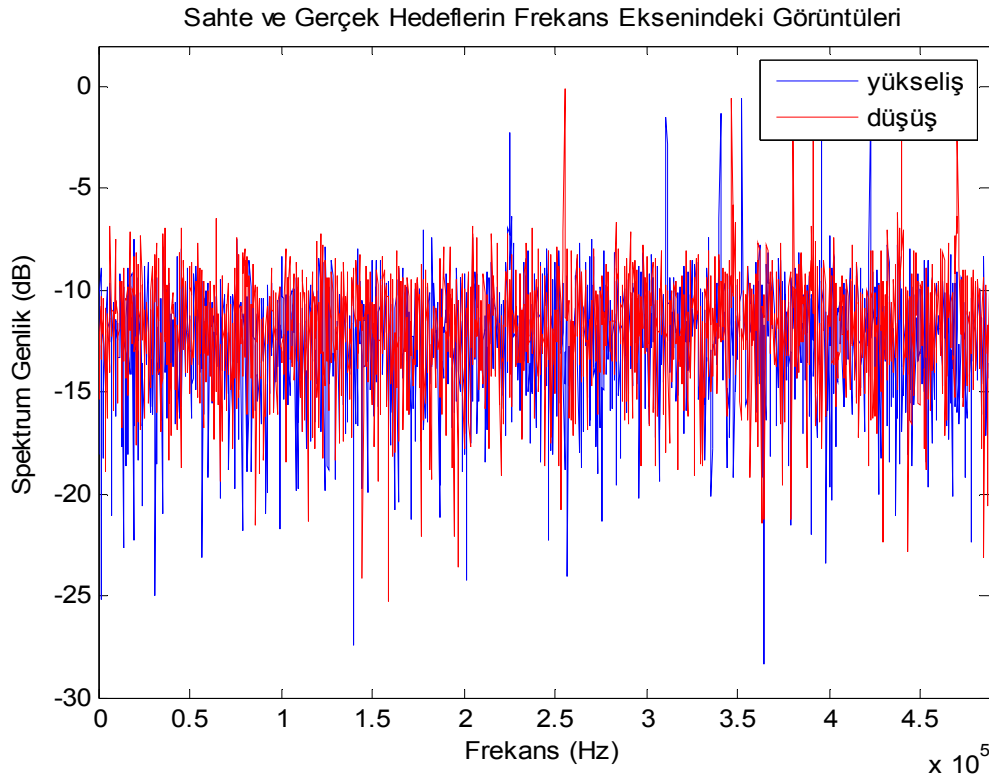
sahte hedef menzil-hız bilgileri de

$$\begin{bmatrix} R'_1 & R'_2 & R'_3 \\ V'_1 & V'_2 & V'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7300 & 5750 & 6300 \\ 1100 & 890 & 1000 \end{bmatrix}$$

olarak kabul edilmiştir.



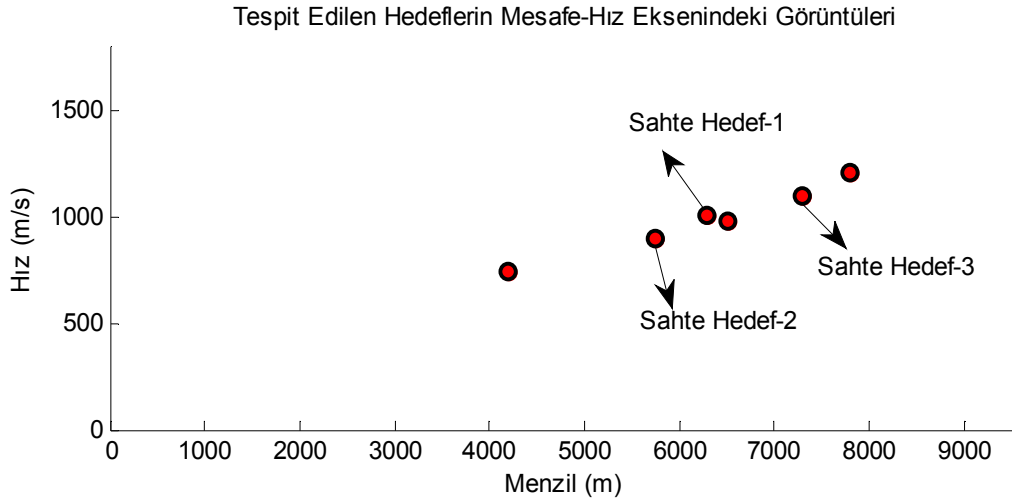
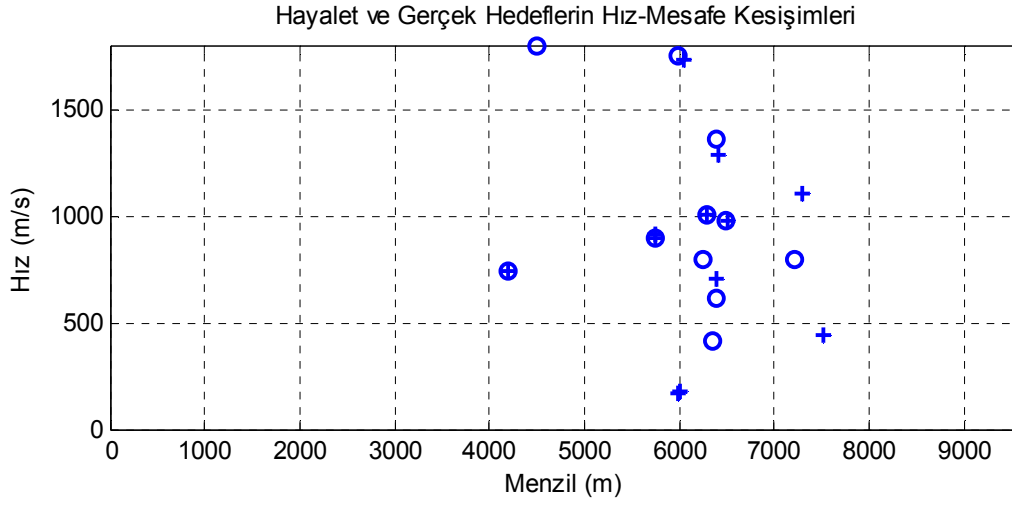
**Şekil 6.19** İlk taramada radar almacı ile alınmış üç gerçek, üç sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 2.72ms$ )



**Şekil 6.20** İkinci taramada radar almacı ile alınmış üç gerçek, üç sahte hedefe ait yansıma sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüleri ( $T_m = 3.49ms$ )

Benzetim sonrası radar ölçüm başarımını görmek üzere elde edilen gerçek ve sahte hedeflere ait menzil-hız bilgileri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & R'_1 & R'_2 & R'_3 \\ V_1 & V_2 & V_3 & V'_1 & V'_2 & V'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7799.9 & 6500.9 & 4200.5 & 7299.9 & 5751.1 & 6298.7 \\ 1200.16 & 977.82 & 744.74 & 1098.45 & 893.48 & 1002.35 \end{bmatrix}$$



**Şekil 6.21** İki farklı kipleme zamanı taramasında Minimum Fark Ölçüm algoritması ile ortamda var olan üç gerçek ve üç sahte hedefin radar ekranında görüntülenmesi

Şekil 6.21’de açıkça gözlemlendiği gibi, radar ortamda üç gerçek hedef olduğu halde üç hedef karıştırıcı tarafından oluşturulduğu için altı hedef algılamıştır. Almaç hedeflerin sahte hedef olduğunu anlamak için özel izleme algoritmaları kullanması gerekecektir. Aksi durumda sahte hedefler için işlem yapmak zorunda kalacaktır ve yanılmış olacaktır.

## 7. SONUÇLAR

Bu çalışmada FMCW radarların temel çalışma prensipleri ve karşı tedbirleri araştırılmıştır. Sürekli zamanlı çalışma radarlarında, gönderme sinyalleri kiplenmez ise menzil ölçümünün mümkün olmadığından çeşitli frekans kipleme dalga formlarının kullanılması gerekmektedir. Bu dalga formları analitik olarak ifade edilip her biri için ayrıca benzetim çalışması yapılmıştır. Hedef hız bilgisi ölçümünün daha kritik olduğu yerlerde sinüzoidal frekans kiplemeli dalga formunun kullanılabileceği, daha hassas menzil bilgisi ölçümünün alınması gerektiği yerlerde testere dişi frekans kiplemeli dalga formunun kullanılabileceği belirtilmiştir. Hem menzil hem de hız ölçümünün sürekli olarak ölçülmesi istenilen durumlarda ise üçgen frekans kiplemeli dalga formlarının kullanılabileceği benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

Tehdit ortamında birden fazla hedef var olduğunda, hedeflerin birbirinden ayrı olarak menzil-hız değerlerinin ölçülmesi için gönderme ve alma sinyallerinin değerlendirilmesi gerekmektedir. Birden fazla tehdit algılanması durumunda, gönderme sinyali sinüzoidal olarak kodlanmış ise hedeflerin menzil bilgilerini ayırt etmek için faz dedektörü kullanılmalıdır. Ancak gürültü varlığında hedef menzil bilgilerinin yer aldığı faz bilgisi çok kolay sönmülmektedir. Gönderme sinyali testere dişi frekans taraması ile kodlanmış ise tek boyutta HFD ile hedeflerin bir hıza sahip oldukları anlaşılabilir ancak net olarak ölçülemezken, hedeflerin menzil bilgileri ise kolaylıkla ölçülebilir. Bu nedenle çalışmalar boyunca, hedeflerin aynı anda menzil-hız bilgilerini ölçebilmek için üçgen frekans kiplenmiş dalga formunda gönderme sinyalleri kullanılmıştır. Bu dalga formunun oluşmasında kullanılan parametrelerin etkilerini gözlemleyebilmek için belirsizlik fonksiyonundan faydalanılmıştır. Ayrıca, gönderme sinyalinin periyodiklik özelliğinin hedef hız bilgisi ölçümündeki etkinliği yine belirsizlik fonksiyonu kullanılarak incelenmiştir.

Tezde FMCW radar huzmesi içinde birden fazla hedefin olması durumunda, üçgen tarama formunun temel parametreleri olan kipleme zamanı  $T_m$  ve bant genişliği  $\Delta F$  parametrelerini farklı taramalarda değiştirerek; çoklu hedeflerin menzil ve hızlarını belirsizlik olmadan ölçülebilen bir yöntem önerilmiştir. Frekans kodlanmış

sürekli zamanlı radar gönderme sinyalinde kipleme zamanı ya da bant genişliğini değiştirerek iki farklı tarama yapılmıştır. Frekans tarama eğrisindeki bu değişimin hedef sinyallerinin menzil-hız bilgileri üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk tarama ölçüm verileri ile ikinci tarama ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Parametre değişimi sayesinde; sadece hedeflerin hızları belirgin olarak değişirken, menzillerdeki değişim minimal olarak kalmıştır. Böylece eski ve yeni hedef menzil-hız çiftleri eşleştirilmeye çalışılmıştır. Eşleştirme, ölçümler arasındaki “*Minimum Aralık Değişimi*” mantığına dayanmaktadır. Değişimin minimum olduğu noktalar bize çoklu hedeflerin menzil-hız bilgilerini vermektedir. Bu yöntemin, Frekans Kodlu Sürekli Dalga formulu üçgen tarama yaparak hedeflerin menzil-hız verilerini ölçmek isteyen radarlarda, çoklu hedeflerin analiz edilmesine olanak sağladığı yapılan modelleme ve oluşturulan benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır.

Son zamanlarda FMCW radarlar, yüksek menzil ve hız çözünürlükleri sayesinde araç güvenlik sistemlerini oluşturan otomatik hız kontrol sensörleri, çarpışma engelleme sensörlerinde, kısa menzilde füze ikaz sensörlerinde ve LPI radarlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Düşük üretim maliyetleri, düşük güç gereksinimi sayesinde yarı-iletken teknolojisi ile kolaylıkla gönderme birimlerinin tasarlanması gibi önemli özellikleri kullanım sıklığı bulmasında en önemli unsurlar olarak gösterilebilir. Ayrıca bu çalışmada çoklu hedef varlığında, önerilen algoritma kullanılarak FMCW radarların 300 metreye kadar kısa menzil (araç güvenlik sensörleri), 8000 metreye kadar orta menzil (füze erken ikaz sensörleri) ve 30000 metreye kadar uzak menzil (LPI gözetleme radarları) kabul edilmek koşulu ile tasarım parametreleri belirlenip ölçüm doğrulukları benzetim sonuçları ile gözlenmiştir.

Ayrıca, FMCW radar almacını karıştırabilmek için gerekli EKT sistemleri genel ve alt başlıklar halinde araştırılmıştır. EKT sistemleri, gürültü ile karıştırma ve aktif-pasif aldatma yöntemleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanmıştır.

Gürültü ile karıştırma yöntemleri içerisinde spot gürültü üreten karıştırıcı mimarisi açıklanıp benzetim çalışması ile bu gürültü etkinliği araştırılmıştır. Spot gürültü karıştırıcısının etkin karıştırma yapabilmesi için öncelikle karıştırma yapacağı radar sisteminin merkez çalışma frekansını ve çalışma bant genişliğini doğru olarak



özmesi gerekmektedir. Bu nedenle aktif bir almaç yapısına sahip olmalıdır. Parametreleri doğru çözümlenmiş radar, eğer gürültü varlığını sezinleyemez ise karıştırıcı gönderme gücünün de yükseltilmesi ile ortamda sanal hedefler bulmuştur. Ancak günümüzde FMCW radarların çalışma parametrelerinin tespit edilmesi çok kolay değildir. Çünkü FMCW radarlar çok küçük gönderme gücü seviyelerine sahip olup düşük gürültü tabanında çalışmaktadırlar. Bu sebeple karıştırıcı almacının hassas tasarlanması gerekmektedir.

Aktif-pasif aldatma yöntemleri içerisinden menzil ve hız aldatması yapabilen DRFM mimarisi araştırılıp temel çalışma mantığına değinilmiştir. Bu mimariye göre DRFM öncelikle radar çalışma sinyallerini belirli zaman aralığında doğrudan hafızaya alır. Daha sonra belirli zaman aralıklarında gecikmeli olarak göndererek istenilen menzillerde ve istenilen sayıda sanal hedefler yaratabilir. Ayrıca gönderme sinyaline Doppler etkisi varmış gibi sabit hızlı ya da ivmeli hareket modellemesi yapacak şekilde sanal hedefler yaratabilir. Oldukça esnek bir yapıya sahip olan DRFM sistemleri, son yıllarda en etkili EKT sistemlerinden biri haline gelmiştir. Benzetim alışmasında DRFM üzerinden sanal hedefler oluşturulduğu varsayılarak radar gözlem ekranı sanal hedefler ile kirletilerek gerçek hedeflerin gizlenebileceği ölçüm sonuçları ile gösterilmiştir.

Konu üzerinde yapılacak gelecek çalışmalar adına, bu tezin önemli bir bölümünü oluşturan FMCW radarlarda çoklu hedeflerin algılanması için önerilmiş algoritma üzerinde etkin başarım ve ölçüm doğruluğu sağlamak adına iyileştirmeler yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Alhumaidi, S., 18-21 April 2004, DRFM, Heart Of Modern Digital Electronic Warfare Systems, Second EW Symposium Proceedings Riyadh, Saudi Arabia.
- Barrick, D., Oceanic, N., and Lab, A.A.W.P., July 1973, FM/CW Radar Signals and Digital Processing, Environmental Research Laboratories.
- Brooker, G.M., November 21-23 2005, Understanding Millimetre Wave FMCW Radars, 1st International Conference on Sensing Technology.
- Brooker, G.M., Bishop M., Scheduling, 14–15 November 2001, S., Millimeter Waves for Robotics, Proc. 2001 Australian Conference on Robotics and Automation Sydney, pp. 91–94.
- David, W., May 1997, FMCW MMW Radar for Automotive Longitudinal Control, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-97-19.
- Du, Y., Yang, J., Xiong, J., 31 Aug.-4 Sept. 2004, Novel Method for Ambiguity Elimination in the Linear FMCW Radar, Volume 3, pp. 2066–2069, Signal Processing, Proceedings. ICSP '04. 2004 7th International Conference.
- Goppelt, M., Blocher, H., Menzel, W., 2010, Automotive Radar – Investigation of Mutual Interference Mechanisms, Advances in Radio Science.
- Hanulak, P., Hosko, E., 2008 Possibilities of DRFM Circuit Using For Modular ECM System Of Self Protection, paper for ESM Sensor OSVTUO 2008003
- Hyun, E., Lee, J., June 2009, Method to Improve Range and Velocity Error Using De-interleaving and Frequency Interpolation for Automotive FMCW Radars, International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition Vol. 2, No. 2.
- Hyun, E., Lee, J., 2009, A Method for Multi-target Range and Velocity Detection in Automotive FMCW Radar Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, St. Louis, MO, USA, October 3-7.
- Komarov, I.V., Smolskiy, S.M., 2003, Fundamentals of Short-Range FM Radar, Artech House.
- Levanon N., Mozeson E., 2004, Radar Signals, 1.st Editon Wiley-Interscience.
- Meinecke, M.M, Rohling, H., October 11.-12. 2000, Combination of LFMCW and FSK Modulation Principles for Automotive Radar Systems, German Radar Symposium GRS2000, Berlin.
- Mahafza, B.R., 2000, Radar System Analysis and Design Using MATLAB, Chapman&Hall/CRC.

- Neri, F., 2001, Introduction to Electronic Defense Systems, Second Edition, Artech House, pp. 228.
- Pace, P. E., 2009, Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar, Second Edition, Artech House, Norwood.
- Piper, S. O., 16-17 Jun 1993, Receiver Frequency Resolution for Range Resolution in Homodyne FMCW Radar, Telesystems Conference, pp.169-173.
- Pourvoyeur, K., Feger, R., Schuster, S., Stelzer, A., Maurer, L., June 30 2008-July 3 2008, Ramp Sequence Analysis to Resolve Multi Target Scenarios for a 77-GHz FMCW Radar Sensor, pp. 428–434, Cologne, Information Fusion, 11th International Conference.
- Rohling H., 16-18 June 2010, Development Milestones in 24 GHz Automotive Radar Systems, 11th International Radar Symposium, pp. 1-6
- Rohling H., Fölster F., Meinecke M.M., Mende R., A New Generation of Automotive Radar Waveform Design Techniques, German Radar Symposium, 2000.
- Rohling, H., 2006, Waveform Design, Range CFAR and Target Recognition, Advances in Sensing with Security Applications, NATO Security through Science Series, Volume 2, pp. 293–322.
- Skolnik, M. I., 1981, Introduction to Radar Systems, Second Edition McGraw-Hill.
- Skolnik, M., 2008, Radar Handbook, 3rd Eds., McGraw-Hill.
- Tecimer, M., Aralık 2006, STM Raporu, Düşük Kestirilme Olasılıklı (Low Probability of Intercept-LPI) Radar Sistem ve Teknolojileri
- Wiegand, R. J., May 1991, Radar Electronic Countermeasures System Design, Artech House.
- Wojtkiewicz, A., Misiurewicz, J., Nalecz, M., Jedrzejewski, K., and Kulpa, K., 1997 “Two-dimensional signal processing in FMCW radars,” Proc. XX KKTOiUE, pp. 475–480.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Kadir Eraltay

Doğum Yeri : Çorum/Sungurlu

Doğum Yılı : 1984

Medeni Hali : Bekâr

### Eğitim ve Akademik Durumu

Lise 1999–2002 : Çankaya Lisesi

Lisans 2003–2008 : Gazi Üniversitesi

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, ANKARA

Yabancı Dil : İngilizce

### İş Tecrübesi

Ağustos 2008-... : ASELSAN A.Ş. , ANKARA

Radar, Elektronik Harp ve İstihbarat Sistemleri Grup Başkanlığı (REHİS), Tasarım Teknolojileri Direktörlüğü, Test Sistemleri ve Süreçler Tasarım Müdürlüğü, Test Mühendisi