

Darbe Doppler Radarlarda Belirsiz Çoklu Hedef Durumları İçin Performans Analizi

Muhammed Raşit Irmak

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2016

Performance Analysis of Pulsed Doppler Radar
For Multi Target Ambiguity Case

Muhammed Raşit Irmak

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Electrical and Electronics Engineering

September 2016

Darbe Doppler Radarlarda Belirsiz Çoklu Hedef Durumları İin Performans Analizi

Muhammed Raşit Irmak

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Telekomünikasyon Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Rifat Edizkan

Eylül 2016

ONAY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Muhammed Raşit Irmak'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Darbe Doppler Radarlarda Belirsiz Çoklu Hedef Durumları İçin Performans Analizi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Rifat Edizkan

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Rifat Edizkan

Üye : Prof. Dr. Gökhan ÇINAR

Üye : Prof. Dr. Cengiz ÖZZAİM

Üye : -

Üye : -

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŐAHAN

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım klavuzuna göre, Prof. Dr. Rifat Edizkan danışmanlığında hazırlamış olduğum “Darbe Doppler Radarlarda Belirsiz Çoklu Hedef Durumları İçin Performans Analizi” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik, ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamada yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik, ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 22/09/2016

Muhammed Raşit İrmak

İmza

ÖZET

Darbe doppler radarlar hedefin mesafesini ve hızını tespit edebilen radarlardır. Ancak bu tespitler yapılırken hızda ve mesafede oluşan belirsizliklerin çözülmesi gerekmektedir. Bu tezde orta PRF modunda çalışan bir darbe doppler radarın, belirsizliğin olduğu bölgelerde, çoklu hedef tespitinde gösterebileceği performans analiz edilmiştir. Bu analizin yapılabilmesi amacıyla darbe doppler radarların sinyal işlemci yapısının modellendiği bir benzetim yapılmıştır. Benzetimde öncelikle çevresel yankıların ve gürültünün bulunduğu bir ortamda hedeften dönen sinyale FFT, MTI, CFAR ve darbe sıkıştırma gibi sinyal işlemleri uygulanmıştır. Daha sonra belirsizliğin çözümü için rastlantı algoritması kullanılmıştır. Belirli bölgelerde sinyal işleme tekniklerinin etkinlikleri incelenmiş, bu tekniklerin avantajları ve kısıtları ortaya konmuştur. Sinyal işleme teknikleri ve rastlantı algoritması kullanılarak darbe doppler radarın belirsiz bölgelerde hedefleri tespit edebilme performansı incelenmiştir. Darbe doppler radarların bu yöntem ile uzak mesafelerde ve yüksek hızlarda seyreden birden çok hedefi başarıyla tespit edebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler

Belirsizlik, Darbe Doppler Radar, Darbe Sıkıştırma, CFAR, CA-CFAR, LFM, MTI, Rastlantı Algoritması

SUMMARY

Pulse doppler radars can measure velocity and range of the targets. However, while these targets are being detected, doppler and range ambiguities should be resolved. In this thesis, for multi target ambiguity case, medium PRF pulsed doppler radar performance is analyzed. For the purpose of making this analysis, a simulation is made which models the pulse doppler radar signal processor. Firstly, in simulation, processes like FFT, MTI, CFAR and pulse compression are applied to the target echo in an environment that contains clutter and noise. Then coincidence algorithm is used to resolve the ambiguities. In unambiguous region effectiveness of the signal processing techniques are investigated, advantages and disadvantages of these techniques are exhibited. Detection performance of the pulse doppler radar in ambiguous regions is analyzed by using signal processing techniques and coincidence algorithm. It is concluded that pulse doppler radars can detect multiple targets cruising at long distances and high speeds successfully via this method.

Keywords

Ambiguity, Pulse Doppler Radar, Pulse Compression, CFAR, CA-CFAR, LFM, MTI, Coincidence Algorithm.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitim hayatım boyunca, bana danışmanlık ederek, desteğini ve anlayışını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Rifat Edizkan'a, gösterdiği sabırdan dolayı eşime ve manevi desteğinden dolayı anneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Darbe Doppler Radarlar	3
2.2. Darbe Doppler Radarlarda Hedef Tespiti	4
2.3. Darbe Doppler Radarlarda Belirsizlik Çözümü.....	7
3. RADAR KAVRAMI	11
4. TEMEL DARBE RADARI YAPISI	13
4.1. Verici Yapısı	13
4.2. Alıcı Verici Anahtarı	14
4.3. Alıcı Yapısı	14
4.4. Radar Sinyalleri	15
4.4.1. Sürekli dalga	15
4.4.2. Darbe dizisi.....	16
4.5. Radar Ölçümleri.....	20
4.5.1. Mesafe ölçümü	21
4.5.2. Hız ölçümü	22
4.5.3. Yön ölçümü	22
4.5.4. Temel radar denklemi.....	22
5. DARBE DOPPLER RADARLARI	26
5.1. Doppler Prensibi	26
5.2. Doppler Kayması	27
5.3. Darbe Doppler Radarı Kavramı	29
5.3.1. Darbe doppler radar modları ve belirsizlik problemi	31

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.3.1.1. <u>Düşük PRF modu</u>	33
5.3.1.2. <u>Orta PRF modu</u>	33
5.3.1.3. <u>Yüksek PRF modu</u>	34
6. YÖNTEM	36
6.1. Gürültü ve Hedef Tespiti	37
6.1.1. Hedef tespiti ve sinyal gürültü oranı.....	37
6.1.2. Yanlış alarm olasılığı.....	39
6.1.3. Hedef tespit olasılığı.....	39
6.2. Radar Kesit Alanı.....	40
6.3. Çevresel Yankılar	42
6.4. Sinyal İşleme Teknikleri	43
6.4.1. Darbe toplama.....	44
6.4.2. MTI Tekniği	45
6.4.3. Sabit yanlış alarm sıklığı (CFAR)	47
6.4.4. Darbe sıkıştırma tekniği	51
6.4.4.1. <u>Doğrusal frekans modüleli (LFM) darbeler</u>	52
6.4.4.2. <u>Faz modüleli darbeler</u>	54
7. BULGULAR VE TARTIŞMA	57
7.1. Belirsizliğin Olmadığı Durumlarda Sinyal İşleme	58
7.1.1. MTI devresinin etkisi	63
7.1.2. Darbe Sıkıştırma işleminin etkisi	65
7.1.3. CFAR tekniğinde maskeleye ve değişken eşik değerinin etkisi.....	68
7.2. Belirsizlik Durumunda Çoklu Hedef Tespiti	71
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	77
9. KAYNAKLAR DİZİNİ	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Radar gönderme ve alma işlemlerinin ana ögeleri.	12
4.1. Bir darbe radarının temel yapısı	13
4.2. Verici yapısı.....	13
4.3. Bir süperheterodin radar alıcısının yapısı.....	14
4.4. Sinüs dalgasının zaman bölgesinde ve frekans bölgesinde gösterimi	15
4.5. Darbe süresi ve bant genişliği ilişkisi	16
4.6. Darbe dizisi yapısı	16
4.7. Tek bir darbe sinyalin zaman ve frekans bölgesinde gösterimi.....	18
4.8. Sonsuz sayıda darbeden oluşan darbe dizisi ve bu dizinin frekans bölgesinde gösterimi	18
4.9. Sonlu sayıda darbeden oluşan darbe dizisi ve bu dizinin frekans bölgesinde gösterimi	19
4.10. Sonlu sayıda modüleli darbe dizisi ve Fourier dönüşümü.....	20
5.1. Bir nokta kaynak sabit iken ve hareketli iken dalganın yayılımı.	27
5.2. Sinyalin yayınlanması, yansınması ve alınması aşamalarında dalga boyundaki sıkışma.....	28
5.3. Frekans bölgesinde yaklaşan ve uzaklaşan hedeflerin gösterimi	28
5.4. Darbe doppler radarının doppler spektrumu.....	30
5.5. Mesafe belirsizliği	32
5.6. Hız belirsizliği	32
5.7. Yüksek PRF doppler spektrum.....	34
6.1. Hedef tespitine etki eden faktörler.....	36
6.2. Gürültü ile sinyal gürültü toplamı dağılımları.....	39
6.3. Sinyal işlemcide hedef tespit yapısı.....	43
6.4. Senkronize detektör	44
6.5. Sezimleme öncesi faz uyumlu ve sezimleme sonrası faz uyumsuz darbe toplama	45
6.6. MTI filtrelemesinin kavramsal gösterimi doppler spektrumu, MTI frekans tepkisi ve filtrelemeden sonra doppler spektrumu	46
6.7. İki gecikme hatlı ve üç gecikme hatlı temel MTI filtre yapılarının blok şemaları ve transfer fonksiyonları.....	46
6.8. İki gecikme hatlı ve üç gecikme hatlı temel MTI filtrelerinin frekans tepkileri.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.9. Tek boyutta ve iki boyutta CFAR penceresi	48
6.10. Guard hüresiz CA-CFAR eşiği	49
6.11. Guard hücreli CA-CFAR eşiği	50
6.12. Tipik bir uyumlu filtre tepkisi	52
6.13. Doğrusal frekans modüleli darbeler	53
6.14. Sıkıştırılmamış darbe genişliği, chirp modülasyonu ve sıkıştırılmış darbe genişliği	53
6.15. İkili faz modülasyonu	55
6.16. 13 Basamaklı barker kodu uygulaması.....	56
7.1. Sinyal işleme blok şeması.....	58
7.2. 90 Darbelik verinin mesafe ekseninde üst üste çizdirilmesi.....	59
7.3. İşlenmemiş verinin mesafe-doppler ve mesafe-doppler contour grafiği	60
7.4. Çevresel yankısı bastırılmış verinin mesafe-doppler ve mesafe-doppler contour grafiği	61
7.5. Darbe sıkıştırma uygulandıktan sonra mesafe-doppler ve mesafe-doppler contour grafiği	61
7.6. Mesafede ve dopplerde CA-CFAR uygulaması sonucunda elde edilen sinyaller.	62
7.7. Gerçek hedefler ve elde edilen tespitler	63
7.8. Dört gecikme hatlı MTI filtre	63
7.9. 60 ve 90 m/s hızındaki hedeflerin tespit edilen mesafe tepeleri ve hedef tespit sonucu.....	64
7.10. 90 m/s hızındaki iki hedefin mesafe tepeleri	64
7.11. 80 ve 90 m/s hızındaki hedeflerin hedef tespit sonucu ve tespit edilen mesafe tepeleri	65
7.12. 3 ve 3,3 km mesafedeki hedeflerin hedef tespit sonucu ve tespit edilen mesafe tepeleri	66
7.13. BW=2 MHz iken 3 ve 3,075 km mesafedeki hedeflerin hedef tespit sonucu ve tespit edilen mesafe tepeleri	66
7.14. BW=5 MHz iken 3 ve 3,075 km mesafedeki hedeflerin hedef tespit sonucu ve tespit edilen mesafe tepeleri	67
7.15. BW'in 2 MHz ve 4 MHz olduğu durumlarda tepe gücü değişimi	67
7.16. Bir hedefin, başka bir hedefin CA-CFAR penceresine girmediği durum	68

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.17. Bir hedefin, başka bir hedefin CA-CFAR penceresine girdiği durum	69
7.18. CA-CFAR katsayısı 1.5 yapıldığında eşiği geçen mesafe tepeleri.....	69
7.19. CA-CFAR katsayısı düşürülünce Mesafede ve dopplerde elde edilen sinyaller...	71
7.20. Mesafede belirsizlik durumunda hedef tespiti.....	74
7.21. Mesafe belirsizliğinin çözüldüğü durumda hedef tespiti.....	74
7.22. Hızda belirsizlik durumunda hedef tespiti.....	75
7.23. Hız belirsizliğinin çözüldüğü durumda hedef tespiti.....	75
7.24. Belirsizlik durumunda çoklu hedef tespiti.....	76

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. IEEE'nin Radar Frekans Bantları için kullandığı kısaltmalar	25
5.1. Hız ve frekans değişkenlerine göre doppler kayması.....	29
5.2. Darbe doppler radarının çalışma modları	31
6.1. Çeşitli hedeflerin mikrodalga frekanslarındaki ortalama RKA'ları.....	41
6.2. Bilinen Barker kodlarının bir listesi	55
7.1. Hedef seti.....	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A_c	Yüzey Alanı (m^2)
A_e	Anten etkin alanı (m^2)
B	Sıfırdan sıfıra bant genişliği (Hz)
B_n	Gürültü Bant Genişliği (Hz)
C	Işık hızı (3×10^8 m/s)
f_0	Gönderilen sinyalin frekansı (Hz)
f_d	Doppler kayma miktarı (Hz)
f_{dmax}	En yüksek doppler frekansı (Hz)
f_{LO}	Lokal osilatör frekansı (Hz)
F_n	Gürültü kaybı faktörü
G	Verici antenin kazancı
G_j	Karıştırma anteninin kazancı
G_t	Verici antenin kazancı
H	Hacim yansıtıcılık katsayısı (m^2/m^3)
K	Boltzmann Sabiti ($J/^\circ K$)
P_d	Hedef tespit olasılığı
P_{fa}	Yanlış alarm olasılığı
P_{min}	Radarin hedefi algılayabileceği en uzak mesafeden gelen sinyal gücü (W)
P_{ort}	Ortalama güç (W)
PW_{comp}	Sıkıştırılan darbenin genişliği
P_r	Radarda algılanan toplam sinyal gücü (W)
P_R	R mesafesindeki güç yoğunluğu (W/m^2)
P_{RYY}	Radar yönünde yansıyan sinyal güç yoğunluğu (W/Steradyan)
P_t	Radarin yayım gücü (W)
P_{tepe}	Tepe gücü (W)
P_Y	Hedefin yansıttığı toplam sinyal gücü (W)
R	Hedefin radara uzaklığı (m)
R_1	Verici anten ile hedef arasındaki mesafe (m)

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
R_2	Alıcı anten ile hedef arasındaki mesafe (m)
R_{max}	Radarin hedefi algılayabileceği en uzak mesafe (m)
R_{un}	En yüksek belirli mesafe (m)
T	Sinyalin periyodu (s)
T	Sıcaklık Seviyesi ($^{\circ}K$)
T_d	Sonlu sayıda darbeden oluşan dizinin toplam süresi (s)
V	Hedefin radyal hızı (m/s)
V_{max}	En yüksek hız (m/s)
V_R	Radarin hızı (m/s)
V_T	Hedefin hızı (m/s)
ΔF	Sıkıştırılmış darbe frekansındaki toplam değişim
δR	Mesafe çözünürlüğü
Δt	EM dalganın hedefe gidiş ve hedeften dönüş süresi (s)
Λ	Sinyalin dalga boyu (m)
Σ	Hedefin Radar Kesit Alanı (m^2)
σ^0	Yüzey Yansıtıcılık Katsayısı
σ_{sc}	Yüzeysel çevresel yankıların radar kesit alanı (m^2)
σ_{vc}	Hacim çevresel yankı radar kesit alanı (m^2)
T	Darbe genişliği

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ADC	Analog to digital converter (Analog – sayısal dönüştürücü)
BPF	Band pass filter (Bant geçiren filtre)
BW	Band Width
CA-CFAR	Cell Averaging CFAR
CFAR	Constant false alarm rate
CRT	Chinese remainder theorem
CW	Continuous wave (Sürekli dalga)
dBsm	Decibel per square meter

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
EM	Elektromanyetik
EMI	Electromagnetic interference (Elektromanyetik girişim)
ECM	Electronic counter measure (Elektronik karşı tedbir)
FFT	Fast fourier transform
GHz	Giga hertz
GO-CFAR	Greatest of CFAR
HF	High frequency (yüksek frekans)
Hz	Hertz
IEEE	Institute of electrical and electronics engineers
IF	Intermediate frequency (Ara frekans)
KHz	Kilo hertz
Knot	Saatte bir deniz mili
LFM	Linear frequency modulation
LPF	Low pass filter (Alçak geçirgen filtre)
LO-CFAR	Least of CFAR
MHz	Mega hertz
MTI	Moving target indicator
Mph	Mile per hour
PRI	Pulse repetition interval
PRF	Pulse repetition frequency
PW	Pulse width
RF	Radyo frekansı
RKA	Radar kesit alanı
SCR	Signal to clutter ratio
SNR	Signal to noise ratio
TWT	Traveling wave tube
UHF	Ultra high frequency
VHF	Very high frequency

1. GİRİŞ

Darbe doppler radarlar, darbelerinin zamanını kullanarak hedefin mesafesini, doppler etkisini kullanarak da hızını tespit eden radar sistemleridir. Darbe doppler radarlar günümüzde özellikle savunma olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadırlar. Darbe doppler radarın modlarından orta darbe tekrarlama frekansı (PRF: Pulse repetition frequency) modu, hem mesafe ve hem de hız belirsizlikleri oluşmasına rağmen bu belirsizliklerin çözülebileceği bir mod olması nedeniyle yüksek performans sağlamaktadır.

Radar performansındaki gereksinimlere göre sinyal işleme tekniklerinin seçimi askeri amaçlı kullanılan radarların tasarımındaki en önemli adımdır. Düşman radar sistemlerinin kabiliyetlerini, güçlü ve zayıf özelliklerini bilerek bu radarların savaş alanındaki etkisini azaltmak veya yok etmek, elektromanyetik dalgaları kullanarak düşman üzerinde üstünlük sağlama savaşı olarak da tanımlanan elektronik harbin önemli bir faaliyet alanıdır. Radarların kullandığı elektromanyetik sinyallerin frekansını, sinyal modülasyon yapısını, sinyal gücünü ve polarizasyon yapısını değiştirmek suretiyle, savaşlarda düşmanı zafiyete uğratmak amacıyla kullanması mümkündür. Askeri amaçla elektromanyetik dalgaları kullanan radarlar öncelikli elektronik harp tehdidi olarak değerlendirilir.

Elektronik harbin radarlarla ilgili alanında başarılı olabilmek için radarların çalışma prensipleri, ürettiği sinyallerin yapısı ve sahip olduğu elektronik korunma tedbirleri gibi teknik özelliklerini bilmek çok önemlidir. Düşman radarın çalışma prensiplerine, güçlü ve zayıf yönlerine vakıf olunması durumunda hem tehdit radarların tespiti kolaylaşır hem de bu radarları bertaraf etmek için etkili karıştırma teknikleri üretilebilir ve böylelikle elektronik harp yönüyle düşman üzerinde üstünlük kurulabilir.

Bu tezde darbe doppler radarın öncelikle teorik yapısı ayrıntılı bir biçimde anlatılmıştır. Orta PRF'te çalışan darbe doppler radarın gönderdiği ve hedefe çarparak dönen sinyalin, çevresel yankı (clutter) ve ortam gürültüsü ile beraber radar alıcısına gelişmiş modellenmiş ve sinyal işleme teknikleri kullanılarak belirsiz çoklu hedef durumları için radarın performansını analiz etmek amacıyla hedef tespit sürecinin benzetimi yapılmıştır. Bu amaçla, darbe doppler radar işlemci biriminde gerçekleşen hızlı Fourier dönüşümü (FFT:

Fast Fourier Transform), hareketli hedef göstergesi (MTI: Moving Target Indicator), sabit yanlış alarm olasılığı (CFAR: Constant False Alarm Rate) ve darbe sıkıştırma işlemleri ile mesafe ve hızda ortaya çıkabilecek belirsizliklerin çözümünde kullanılan algoritma benzetimde bütünleştirilmiştir. Çevresel yankının ve gürültünün de bulunduğu bir ortamda hedeften dönen sinyalin hedef olarak tespit edilmesi sürecinde bahse konu tekniklerin hedef tespit performansına etkileri incelenmiştir. Sinyal işlemci biriminin benzetiminin bu detayda yapılmasının, çoklu hedef tespitinde darbe doppler radarlarının performansını gerçekçi bir şekilde analiz edebilmek için önemli olduğu değerlendirilmektedir.

Benzetimde sinyal işleme tekniği olarak kullanılan MTI, CFAR ve darbe sıkıştırma tekniklerinin hedef tespit performansına etkileri teker teker analiz edilmiştir. Belirli hız ve mesafe bölgelerinde doğrulukla çalışan bir benzetim gösterildikten sonra belirsiz bölgelerdeki hedeflerin tespit edilebilmesi için kullanılması gereken çözüm yolları ele alınmıştır. Bu amaçla darbe doppler radarların orta PRF modundaki mesafe ve hız belirsizliğinin çözümü için geliştirilen rastlantı algoritması ile beraber bir tespit kıstası belirlenmiş ve bunların uygulanması ile çoklu hedef tespitinde darbe doppler radarlarının performansı analiz edilmiştir.

Darbe doppler radarın hedef tespit performansının analiz edildiği benzetimde kullanılan teknikler için birçok parametre belirlenmiştir. Her bir teknikte kullanılan bu parametrelerin değiştirilmesi ile hedef tespitine yönelik olumlu veya olumsuz sonuçlar alınabilmektedir. Bu benzetim sayesinde radarın kullanılacağı şartlar göz önünde bulundurularak tekniklerin parametreleri belirlenebilir ve radar tasarımı konusunda ön fikir edinilebilir. Kullanılan tekniklerin çıkarılarak yerlerine benzer tekniklerin algoritmalarının benzetime eklenmesi sonucunda radarın göstereceği performans ayrıca incelenebilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Darbe doppler radarlar günümüzde yoğun olarak kullanılmaktadır ve bu radarların çalışma prensiplerini anlatan birçok temel esere ulaşmak mümkündür. Bu radarların hedef tespitinde kullandıkları yöntemler çok çeşitlilik göstermektedir. Belirsizlik çözümü gibi kritik konuların çözümüne yönelik yayımlanan eserler ise oldukça az sayıdadır. Bu bölümde darbe doppler radarlar ile ilgili literatürde geçen önemli eserler, hedef tespitine yönelik geliştirilen yöntemler ve belirsizlik çözümüne ilişkin yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

2.1. Darbe Doppler Radarlar

Mahafza'ya (2003) göre darbeleri radarlar bir dizi modüle edilmiş darbeyi gönderir ve alır. Hedefin mesafesi bu darbelerin gönderildiği ve alındığı zaman esas alınarak hesaplanır. Hedefin hızının tespit edileceği doppler hesabı ise iki türlü yapılabilir. Eğer art arda gelen darbeler arasındaki mesafeler hassas bir biçimde ölçülebiliyorsa doppler frekansı mesafelerin oranından çıkartılabilir. Diğer çözüm ise doppler filtre bankaları kullanmaktır. Rasool ve Bell'e (2010) göre darbe radarlarında iyi otokorelasyon özelliklerine sahip bir darbe seçilir ve uygun bir PRF'te periyodik olarak gönderilir.

Darbe doppler radarları için önemli bir terim olan doppler kavramı üzerine çeşitli tanımlamalar mevcuttur. Morris ve Harkness'a (1996) göre herhangi bir hız ile hareket eden bir hedeften yayılan dalganın frekansından oluşan ve dalganın kaynağı ile hedefin hızından kaynaklanan frekans kaymasına doppler kayması adı verilir. Yere konuşlu radarlarda hareket tümüyle hedef nesneden kaynaklıdır. Hava radarlarında ise hareket, dolayısıyla doppler kayması, radarın kendisinden, hedeften veya her ikisinden birden kaynaklanıyor olabilir (Stimson, 1998).

Hava platformlarında kullanılan darbeleri doppler radar ekosu, dönen yer ekosundan çok küçük olan hareketli hedefleri tespit etmekte kullanılır. Hareketli hedefler, frekans bölgesinde, çevresel yankılardan doppler olgusundan yararlanılarak ayrıştırılırlar. Sürekli dalgalı doppler radarında pratik ve sınırlı bir maksimum mesafe ölçme kabiliyeti vardır.

Darbeli doppler radarlarda yayınlanan ve alınan döngülerin zaman paylaşımı ile bu sınırlamanın üstesinden gelinmiştir (Goetz ve Albright, 2009).

Tüm radarlar gibi darbe doppler radarlar da yoğun girişim ortamında hedef tespiti yapmak zorundadır. Çünkü yansıyan hedef sinyali yoğun bir girişim ile beraber alınır. Girişim şu formlardan oluşabilir: elektronik gürültü, çevresel yankılar, insan yapımı kaynaklardan yayımlanan elektromanyetik girişim ve bir elektronik taarruz amaçlı karıştırma sinyalleri (Richards vd., 2010). Darbe doppler radarlar yer ve deniz kaynaklı çevresel yankıların bulunduğu ortamlarda hedef tespiti amacıyla hava radarları tarafından yoğun olarak kullanılmaktadır (Cury, 2012).

Darbe doppler radarlar üzerinde farklı bilimsel faaliyetler yapmak amacıyla bu radarların modellenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin Onat ve Serin (2011) tarafından yapılan sayısal darbe doppler radar sinyali üretici ve almacının gerçekleştirildiği çalışmada, darbe doppler radar sinyallerinin üretici ve almacı FPGA tabanlı donanımlar ile yapılmıştır. Almacı çıkışında doppler frekansının çözünürlükleri ve genlikleri karşılaştırılmıştır.

2.2. Darbe Doppler Radarlarda Hedef Tespiti

Darbeli doppler radarlar hedefin hızını kestirirken mesafesini de tespit edebilme kabiliyetindedirler. Bu amaçla darbe doppler radarlarda birçok sinyal işleme adımı gerçekleştirilmektedir. Mesafenin net tespit edilebilmesi büyük oranda darbe sıkıştırma tekniğine bağlıken doppler filtreleme hız tahminine imkân vermektedir. CFAR gibi işlemler öncelikle deniz ve yer yankıları gibi çevresel gürültülere karşı etkilidir ve yanlış alarmların oranını düşürerek radarın performansında çalışmasını sağlar (Ounissi, 2006).

Darbe doppler radarlarda hedef tespit amacıyla kullanılan PRF'ler düşük PRF, orta PRF ve yüksek PRF olarak üç farklı sınıfa ayrılır. Yüksek PRF'te mesafe belirsizliği orta PRF'te hem hız hem de mesafe belirsizliği vardır. Düşük PRF radarlarda hedefin hızını doğru belirleyebilmek için doppler belirsizlikleri çözümlenmelidir (Sun vd., 2010). Schikorr'a (2010) göre gerektiği durumlarda PRF değeri artırılarak çevresel yankıların etkisi azaltılabilir. Orta PRF mesafe ve doppler belirsizliklerinin çözüldüğü durumlarda mesafe ve

hızın ikisini birden belirleme konusunda düşük ve yüksek PRF modlarına göre daha başarılıdır. Ahn vd.ne (2011) göre de bu belirsizlikler ve kör bölgeler uygun bir şekilde seçilmesi gereken çoklu PRF kullanılarak çözülebilir. Alabaster'e (2012) göre ise hedefin hem mesafe hem hız verisi isteniyorsa ve yoğun çevresel yankının bulunduğu bir ortam bekleniyorsa tüm bu şartlar altında en iyi sonucu verecek olan orta PRF'tir. Bu ihtiyaç ilk olarak savaş uçaklarının atış kontrol radarlarında doğmuştur ve orta PRF bu ihtiyaca cevap verebilmek için geliştirilmiştir.

Hava platformlarında kullanılan darbe doppler radarları çoğunlukla havadan gözetleme yapılan ortamlarda çalıştığından kara ve deniz kaynaklı çevresel yankıların hedef tespitine önemli derecede etkisi vardır. Radar parametrelerinde hedefin bulunabileceği bölgede çevresel yankıyı en düşük seviyelerde tutacak ayarları yapmak gerekmektedir (Goetz ve Albright, 2009). Ming vd.ne (2006) göre PRF'in sabit kaldığı durumlarda çevresel yankı spektrumu uçağın irtifası, hızı ve hüzme yönü gibi parametrelerden büyük oranda etkilenir. Yüksek PRF kullanıldığında hedeflerin yüksek hızda yaklaşması durumunda tespit edilebilecekleri çevresel yankıların bulunmadığı bir bölge sağlanır (Agarwal, 2012).

Yanlış alarm olasılığının düşük seviyelerde tutulması ve hedef tespitinin otomatikleştirilmesi amacıyla darbe doppler radarlarda CFAR kullanımı önemli avantaj sağlar. CFAR kullanımı ile hedef tespit olasılığı ve mesafe çözünürlüğü belli oranda düşebilir. CFAR alıcısı daha çok otomatik hedef tespitinin kaçınılmaz olduğu radar türlerinde kullanılmaktadır (Richards vd., 2010).

Hedef tespitinde verimi artırmaya yönelik çevresel yankıları önleme amacıyla fiziksel tedbirler almak, sinyal çevresel yankı oranını artırmak, çözünürlük hücrelerini küçülterek çevresel yankı enerjisini azaltmak, çevresel yankıyı zaman ekseninde baskılamak ve MTI kullanarak çevresel yankıyı frekans bandında baskılamak gibi yöntemler kullanılabilir (Galati, 1993).

MTI işlemi oldukça basit ve matematiksel olarak da gösterişsiz olmasına karşın iyi tasarlanmış bir MTI ile sinyal çevresel yankı oranı oldukça iyi seviyelere getirilebilir. MTI filtreler ile çevresel yankılar tamamen bastırılamazken hedef sinyallerinin bir kısmı da bastırılmış olabilir (Richards, 2005). Kwag (2008), MTI doppler kompanzasyon tasarımı bir

hava radar sistemi geliştirilmesine yönelik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada hava platformlarındaki darbeli doppler radar sistemlerinde kullanılmak üzere hareketli radar platformundan kaynaklanan çevresel yankı kaynaklı doppler kaymasının gerçek zamanlı kestirimi ve kompanzasyonu için bir tasarım ortaya konulmuştur.

Darbeli doppler radarlarda hedef tespitinde iyi bir doppler çözünürlüğü elde edebilmek için uzun evre uyumlu sinyaller kullanmak, diğer taraftan mesafe çözünürlüğünü iyileştirmek için darbe genişliğini azaltmak gerekir (Mozeson ve Levanon, 2004). Bu amaçla darbe sıkıştırma teknikleri kullanılmaktadır. Frekans modüleli darbelerin kullanılması uygulaması en yaygın olan darbe sıkıştırma tekniklerindedir.

Bir darbe doppler radarın performansını incelemek amacıyla modellenmesi önemli bir konudur. Ancak özellikle havadan havaya darbe doppler radarların hedef tespit performansının modellenmesi oldukça karmaşıktır. Bu nedenle açık literatürde bu alanda yapılan çalışmalar az sayıda yer almaktadır. Bu modellemelerin içerdiği hesaplamaların kapsamı çok geniştir ve genellikle modellenmenin geçerliliğini şüpheye düşüren çok sayıda sadeleştirme varsayımları içerir. Bu amaçla bir performans modellemesi metodu tanımlanır, bir de hava radarının deneme programından alınan veri kullanılarak, modelin doğrulaması için yöntem tanımlanır (Kinghorn vd., 1993).

Wang vd.nin (1995) çalışmasında havadan erken ihbar radar sistemlerinde hedef tespitinin geliştirilmesi için bir işaret işleme tekniği ele alınmıştır. Doppler domainde sınırlandırılmış, genellenmiş olasılık oran tespiti olarak adlandırılan yeni bir doppler işleme algoritması tasarlanmış ve bu tekniğin performansı zayıf hedeflerin tespitinde halen kullanılan yaklaşımlara karşı yoğun çevresel yankı ortamında kıyaslanmıştır. Bu yaklaşımla, mevcut doppleri ve sabit yanlış alarm oranı işlemcilerini artırarak önemli bir performans gelişiminin elde edilebileceği gösterilmiştir.

Ming vd. (2006) tarafından hava platformlarında kullanılan darbeli doppler radarda yer yankısı ile ilgili bir simulasyon metodu geliştirmiştir. Bu yöntem hava platformlarında kullanılan darbeli doppler radarın yer yankılarının evre uyumlu video analizine dayanan bir bilgisayar benzetimini içermektedir. Çevresel yankı simulasyonu ve çevresel yankı bastırma analiz sonuçlarının pratikte ciddi anlamı vardır.

2.3. Darbe Doppler Radarlarda Belirsizlik Çözümü

Orta PRF'te çalışan radarlar tipik olarak tek bir PRF kullanmak yerine çeşitli PRF'leri arka arkaya kullanırlar. Bunun en önemli sebebi her PRF'te oluşan belirsizliklerin kıyaslanarak belirsizlik probleminin çözümüdür. Matematiksel olarak bakıldığında doğru mesafeyi ve hızı belirleyebilmek için sadece iki PRF'ten alınan belirsizlik içeren veri yeterlidir. Ancak pratikte kullanılan güçlü hedef çıkarım algoritmaları en az üç PRF'ten alınan hedef verisine ihtiyaç duymaktadır.

Günümüz teknolojisi karşılaşılan duruma göre düşük, orta ve yüksek PRF modlarından en uygun olanının kullanımına olanak sağlamaktadır. Mesafe belirsizliğinin istenmediği durumlarda darbe tekrarlama aralığı (PRI: Pulse Repetition Interval) mümkün olduğunca uzun olmalı yani düşük PRF modunda çalışmalıdır. Eğer hız belirsizliğinin yaşanmaması isteniyorsa yüksek PRF modunda çalışmalıdır (Alabaster, 2012). Günümüze kadar belirsizliklerin çözümü amacıyla birçok algoritma kullanılmıştır. Bu algoritmaların çoğu Çin Artık Teoremine (CRT: Chinese Remainder Theorem) dayanır. Ancak CRT yaklaşımının hatalara çok açık olması sebebiyle genellikle clustering algoritması gibi hata etkisini hesaba katan birçok geliştirilmiş CRT yaklaşımı benimsenmektedir (Sun vd., 2010).

Zhen-xing ve Zheng (1987), gelişmiş bir CRT algoritması kullanarak mesafe belirsizliği çözümünde performansı artırıcı bir yaklaşım getirmiştir. Bu algoritma hesaplamalardaki kolaylığı, verimliliği ve klasik CRT'de bulunan gürültülü veriden kaynaklı hassas hataların azaltılmasını sağladığı için önerilmiştir.

Simpson (1988), darbe doppler radarın arama modunda, orta PRF'te, PRF seçiminin zorluklarını ve en uygun PRF seçiminin yapılabilmesi için verimli bir yaklaşım ortaya koymuştur. Ortaya koyduğu bu yöntemi kullanarak belirlediği PRF setini yayımlamıştır. Trunk ve Brockett (1993) ise mesafe belirsizliğinin çözümü için kullanılan bir clustering algoritması ile CRT'yi karşılaştırmış ve bu algoritmayı CRT'den daha üstün bulmuştur. Bu çalışmada ayrıca orta PRF'teki mesafe ve hız belirsizliklerinin çözümünün yüksek PRF'tekine oranla daha kolay olduğu gösterilmiştir.

Ferrari vd. (1997), çoklu PRF kullanan evre uyumlu darbe doppler radarlarda hız belirsizliğini çözen bir algoritma sunmuşlardır. Algoritma PRF için özel değerlerin seçimine dayanmaktadır. Doppler frekansın doğruluğunun tahmini için ortalama karakök hatası eğrileri verilmiştir. Bu yöntem klasik tekniklerle karşılaştırılmış ve çevresel yankılı bir ortamda algoritmanın uygulanabileceği bildirilmiştir.

Lei vd. (2000) artık (residue) aritmetiğe dayanan ve hem mesafe hem de hız belirsizliğini çözen basit bir algoritma önermiştir. Bu algoritma belirsiz verilerden artık tablosu kullanarak belirli sonuçları çıkarabilmektedir. Bu çalışmada mesafe belirsizliğinin çözümüne yönelik artık tablosunun oluşturulabilmesi için ayrıca bir örnek de sunulmuştur.

Hughes ve Alabaster (2003), mesafe-doppler körlüklerini en aza indirecek en uygun PRF seçiminde evrimsel (evolutionary) algoritmanın etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Bu amaçla evrimsel algoritma kullanarak yeni PRF setlerinin oluşturulabileceği ortaya konmuştur. Geleneksel olarak 8 PRF'in 3'ünde hedef verisinin bulunması istenir. Bu çalışmada hedef verisinin 2 ve 3 PRF'te bulunma durumları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar daha fazla PRF kullanarak daha az PRF'te hedef verisi alınırsa kör noktaların azaldığını göstermiştir.

Darbe doppler radarın düşük PRF ve orta PRF kullandığı durumlarda hızdaki belirsizliğin çözümü şarttır. Li vd. (2006) bu belirsizliklerin çözümü için keystone dönüşümüne dayanan paralel arama tablosunu önermiştir ve bir benzetim ile bu algoritmanın avantajlarını göstermiştir. Meng vd. (2009) ise gömülü değişmez (invariant imbedding) metodu olarak bilinen yenilikçi bir yöntemde, mesafe verisi kullanarak hız belirsizliklerinin çözümünü önermiştir. Teorik analizler ve benzetimler gömülü değişmez yönteminin hız belirsizliklerinin çözümünde etkili olduğunu göstermektedir.

Kronauge vd. (2010) belirsizlikleri çözmekte kullanılan CRT temelli iki farklı sinyal işleme yaklaşımını karşılaştırmıştır. Bu yaklaşımların aynı prensiplere dayanmasına rağmen tespit performanslarının farklı olduğu görülmüştür. Xiong vd. (2011) mesafe belirsizliğini çözen SZ faz kodlaması (SZ phase encoding) algoritmasını analiz etmiştir. Bu analizlerde geliştirilmiş bir SZ yöntemi frekans domaininde kullanılarak mesafe belirsizliğinin çözümü gösterilmiştir. Bu algoritmanın üstüste binen radar ekolarının parametrelerini

yenileyebildiği, hedefin ortalama hızını doğrulukla tahmin edebildiği gösterilmiş ve yöntemin gerçek incelemelerde kullanılabilir olduğu ispatlanmıştır.

Dalga boyu kısa olduğu için özellikle X bandında çalışan doppler hava radarlarında mesafe çözünürlüğü önemli bir problemdir. Wang ve Xie (2011) özellikle mesafe belirsizliği problemini azaltmak için SZ faz kodlaması ve Batch modunun kullanım prensiplerini sunmuş ardından da bu iki algoritmanın çevresel yankıların bastırılması, uygun yükselti, tarama zamanı, hesaplamaların karmaşıklığı ve mesafe belirsizliğini giderme konularındaki performanslarını karşılaştırmıştır. Sonuç olarak da SZ faz kodlamasının Batch moduna kıyasla önemli derecede az mesafe belirsizliği ürettiği, gerçek zamanlı işleme imkân tanıdığı ve her yükseltide kullanılabilirliğini ortaya koymuştur. Mevcut belirsizlik giderme yöntemleri hedeften dönen düşük güçteki sinyalleri değerlendirmeye tabi tutmamaktadır. Oysaki bu sinyaller düşük radar kesit alanına sahip yakın meafedeki hedeften yansıyan sinyaller olabileceğinden potansiyel risk taşımaktadırlar. Bu hususun çözümüne yönelik olarak Nazır ve Pycock (2013) belirsizlikleri yönetilebilir bir seviyeye indirgeyen çoklu tehdit yaklaşımını ortaya koymuşlardır.

Deng vd. (2013) tarafından hız belirsizliğinin çözümüne yönelik sıkıştırılmış algılama (compressed sensing) teorisine dayalı yenilikçi bir yöntem önerilmiştir. Klasik yöntemler ile kıyaslandığında önerilen yöntem sadece daha geniş bir belirli doppler frekans alanı oluşturmak ve radarın zaman kaynağının tüketimini azaltmak amacıyla birkaç tane seyrek darbenin gönderilmesini sağlamak amaçlarını içermektedir. Uygulamada önerilen yöntemin büyük öneme sahip olduğu vurgulanmıştır.

Omar vd. (2015) yüksek PRF'teki mesafe belirsizliğini çözmek için Barker koda dayalı, yenilikçi ve basit olmasının yanında çok etkili bir yöntem sunmuşlardır. Geliştirilen bu algoritmanın yenilikçiliği, gönderilen her darbenin, Barker kodun farklı dairesel kaydırılmış versiyonu ile kodlanmasından kaynaklanmaktadır. Böylelikle üstüste binen darbelerin alıcıda çözümlenebilmesi sağlanır. Bu yetenek ile belirli mesafe dört kata kadar güçlendirilebilir. Bu sırada Barker kodun asıl amacı olan mesafe çözünürlüğündeki iyileştirme de korunmaya devam eder. Bu algoritmanın literatürdeki diğer algoritmalara karşı olan üstünlüğünü göstermek amacıyla hava radarlarına yönelik benzetimler geliştirilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde bu algoritmanın faz kodlamalı teknikler içerisinde

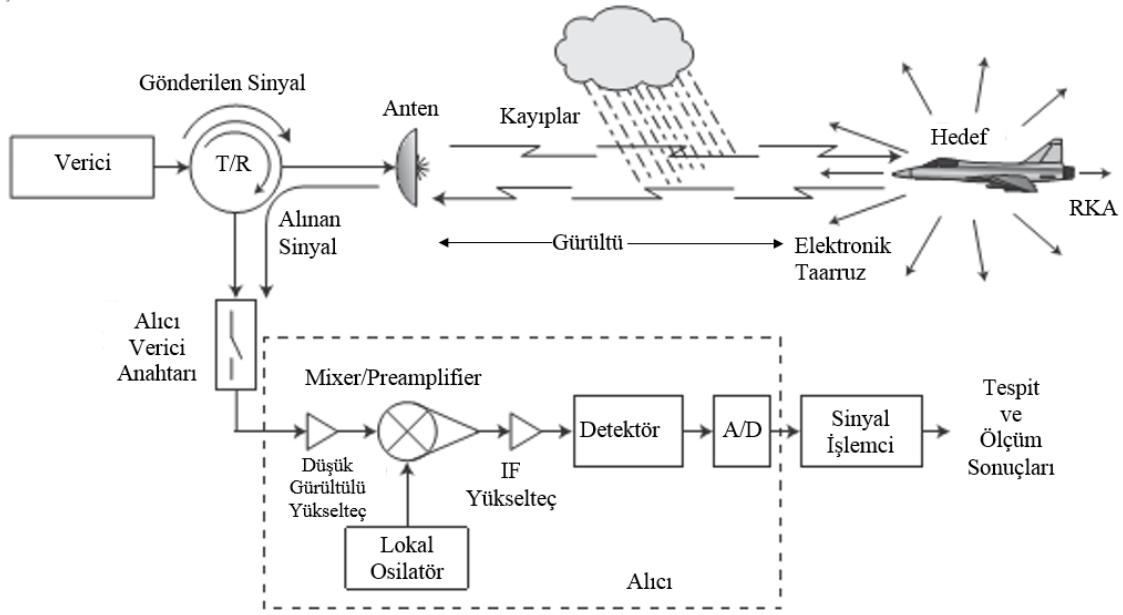
en iyi performansı gösteren tekniklerden biri olan SZ faz kodlaması tekniğinin eriştiği performansı geride bıraktığı görülmüştür.

Alabaster (2012) tarafından geliştirilen rastlantı (coincidence) algoritması veya serilim (unfolding) algoritması olarak bilinen yöntem mesafe ve hız belirsizliklerini çözmek için kullanılmıştır. Bu algoritma ile hedefin tespit edilebildiği her bir PRF için gerçek olması muhtemel tüm mesafe ve hız değerleri daha önce belirlenen azami bir değere kadar hesaplanır. Kullanılan PRI'lar bir mesafe kutusunun tam katlarına sabitlenir ve her PRI için hedefin belirsiz mesafesinin kaçınıcı mesafe kutusuna denk geldiği belirlenir. Hedef tespit kistası M-N için, M tane PRF'te muhtemel bir belirli mesafe oluşursa o mesafe için hedefin tespit edildiği bildirilir. Gerçek doppler kayması PRF'in katlarının görünen değerden çıkarılmasıyla veya bu değere eklenmesiyle bulunur.

3. RADAR KAVRAMI

Radar, radyo frekansında elektromanyetik dalgalar yayınlayan ve bu elektromanyetik dalgaların nesnelere yansmasıyla dönen sinyalleri algılayan bir elektronik sistemdir. Şekil 3.1’de bir radar sinyalinin gönderilmesi, o sinyalin atmosferde yayılması, hedeften yansması ve yansıyan sinyalin alınması aşamalarındaki ana ögeler gösterilmektedir. Bir radarın başlıca bileşenleri verici, anten, alıcı ve sinyal işlemcisidir. Sistem Şekil 3.1’de gösterilenden daha basit veya çok daha karmaşık olabilir. Elektromanyetik dalgaları üreten birime verici denir. Üretilen bu elektromanyetik dalgaları vericiden alıp yayılım ortamına aktaran birim ise antendir. Verici antene bir alıcı verici anahtarı ile bağlanır. Bu anahtar hem vericinin hem alıcının antene irtibatını sağlarken aynı zamanda hassas alıcı bileşenlerinin yüksek güçlü çıkış sinyallerinden korunması için yalıtım görevini de görür. Yayımlanan sinyal hedef bölgeye doğru yönlendirilir. Hedefe ulaşan elektromanyetik dalga, hedeften geri yansır. İstenen hedeften dönen sinyalin yanında yerdeki veya atmosferdeki diğer yüzeylerden de elektromanyetik dalganın yansımaları olur. Bu istenmeyen, aynı zamanda yayılması önlenemeyen sinyallere çevresel yankı denir. Yansıyan sinyallerin bir kısmı radarın alıcı anteni vasıtası ile alınır. Atmosferin ve yerkürenin dalgalar üzerindeki yayılım etkileri, bu elektromanyetik dalgaların hedefteki ve alıcı antendeki gücünü değiştirebilir.

Radar alıcı anteni herhangi bir nesneden yansıyan elektromanyetik dalgayı alabilir. Bu nesne gerçekten algılanmak istenen hedef de olabilir, çevresel yankı oluşturan, ilgilenilmeyen bir nesne de olabilir. Yansıyan sinyalin anten tarafından alınabilen kısmı alıcı devrelerine aktarılır. Alıcıdaki bileşenler alınan sinyalleri yükseltir, radyo frekansı (RF) sinyali ara frekansa (IF: Intermediate Frequency) çevirir ve bir analog – sayısal dönüştürücüden (ADC: Analog to digital converter) geçirir. Daha sonra da bu sinyaller sinyal işlemciye aktarılır. Detektör, hedeften dönen modüle edilmiş sinyalin taşıyıcısını kaldıran böylece sinyal işlemci tarafından hedef verisinin analiz edilmesini sağlayan birimdir.



Şekil 3.1 Radar gönderme ve alma işlemlerinin ana öğeleri (Richards vd.'den, 2010).

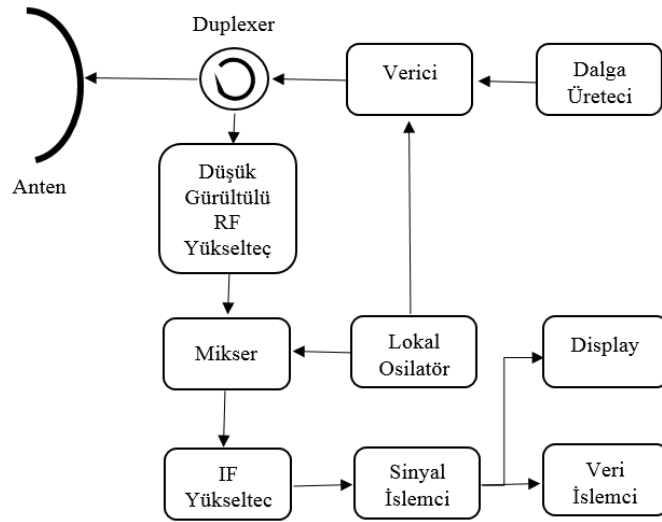
Yansıyan hedef sinyali yoğun bir girişim ile beraber alınır. Girişim dört farklı formda olabilir:

- (1) Dâhili ve harici elektronik gürültü,
- (2) Çevresel yankı olarak isimlendirilen ve hedeflenmeyen nesnelere yansıyan elektromanyetik dalgalar,
- (3) İnsan yapımı kaynaklardan kasıtsız olarak yayımlanan elektromanyetik girişim (EMI: Electromagnetic Interference),
- (4) Bir elektronik taarruz sistemi tarafından yayınlanan, kasıtlı olarak üretilen ve gürültü veya yanlış hedef formatında olabilen karıştırma sinyalleri (Richards vd., 2010).

EMI bir motor ateşlemesinden veya elektrik motor fırçalarından çıkabilen kasıtsız, karıştırma ise gürültü veya gerçek hedefe benzeyen sahte hedefler formundaki kasıtlı üretilmiş sinyallerdir. Gürültünün, çevresel yankının ve karıştırmanın olduğu bir ortamda bir hedefin varlığını belirlemek radar sinyal işlemcisinin ana görevidir. Altıncı bölümde yapılan benzetim ile çevresel yankı ve gürültü içeren bir ortamda, radar sinyal işlemcisinin gerçekleştirdiği sinyal işleme aşamaları modellenmiş ve bu aşamalarda kullanılan farklı parametrelerin hedef tespit yeteneğini nasıl değiştiği analiz edilmiştir.

4. TEMEL DARBE RADARI YAPISI

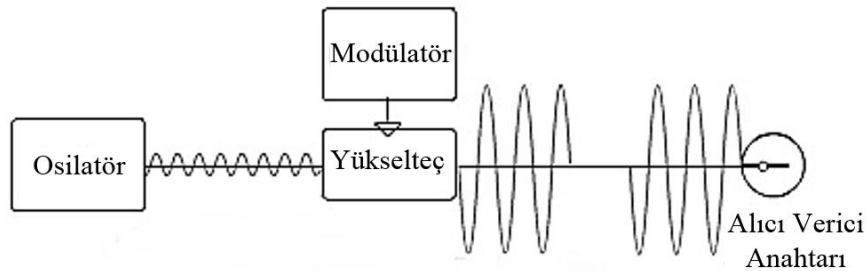
Temel darbe radarı yapısı basit haliyle, Şekil 4.1’de gösterildiği gibi bir verici ünitesi, bir alıcı ünitesi, alıcı verici anahtarı, hem verici hem alıcı olarak kullanılan bir anten, sinyal işlemcisi ve ekrandan oluşur.



Şekil 4.1 Bir darbe radarının temel yapısı

4.1. Verici Yapısı

Verici ünitesi Şekil 4.2’de gösterildiği gibi osilatör, RF yükselteci ve darbe modülatörü olmak üzere üç kısımdan oluşur. Osilatörün genel yapısı, basit olarak doğru akım darbesinin radyo frekanslı darbe enerjisine çevrildiği manyetik alan içine konmuş bir elektron tüpünden oluşur. Osilatörde oluşturulan sürekli dalganın genliği, RF yükseltecinde yükseltilirken bu sürekli dalga, darbe modülatörü tarafından darbe dizisi hâline getirilir.



Şekil 4.2 Verici yapısı

Radarlarda magnetron, klistron, dalga tüpü (TWT: Traveling Wave Tube), katı hal vericileri gibi çeşitli verici türleri kullanılmaktadır.

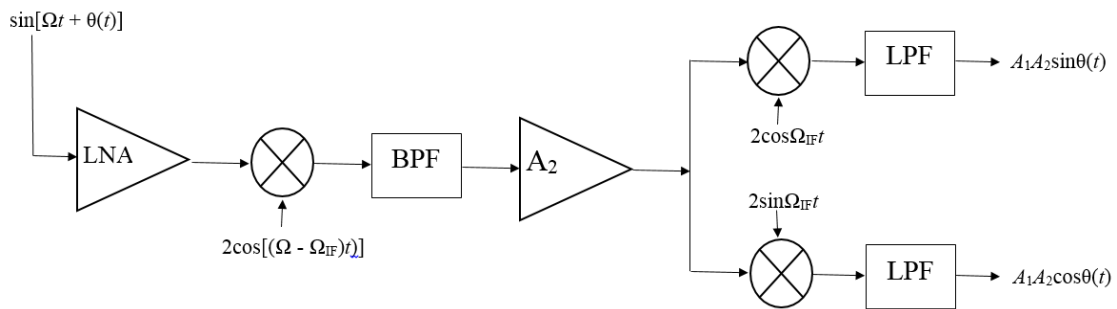
4.2. Alıcı Verici Anahtarı

Alıcı verici anahtarı, radar anteninin sinyal gönderirken verici olarak, sinyal alırken de alıcı olarak çalışmasını sağlayan anahtardır. Temel görevi vericinin yüksek gücünden alıcıyı korumaktır. Alıcı ve verici için ayrı ayrı anten kullanılması durumunda bu birime gerek yoktur.

4.3. Alıcı Yapısı

Alıcının girişinde düşük güçlü bir tane yükselteç kullanılır (Şekil 4.3). Çünkü bu yükselteç alıcıdaki ilk elemandır ve düşük gürültülü olması esastır. Aksi bir durumda bu yükselteç tarafından üretilen gürültü, alıcı ünitesindeki diğer elemanlar tarafından da artırılacağından radarın performansını olumsuz yönde etkiler.

Gelen sinyallerin frekansı yüksektir ve bu haliyle işlenmeleri zordur. Bu nedenle alıcıda, gelen sinyalin frekansını lokal bir osilatörün frekansını kullanarak ara frekansa indiren frekans öteleyici kullanılır. Alıcıdaki IF, gelen sinyalin frekansı ile lokal osilatörün sinyali arasındaki farktır.



Şekil 4.3 Bir süperheterodin radar alıcısının yapısı.

IF yükselteci, IF'ye indirilmiş sinyalleri güçlendirilmesi için kullanılmaktadır. IF yükselteci, aynı zamanda hedef sinyalini güçlendirip gürültü ve istenmeyen hedeflerden gelen çevresel yankıları azaltacak şekilde kullanılır. Bu sayede çevresel yankılar ve gürültü

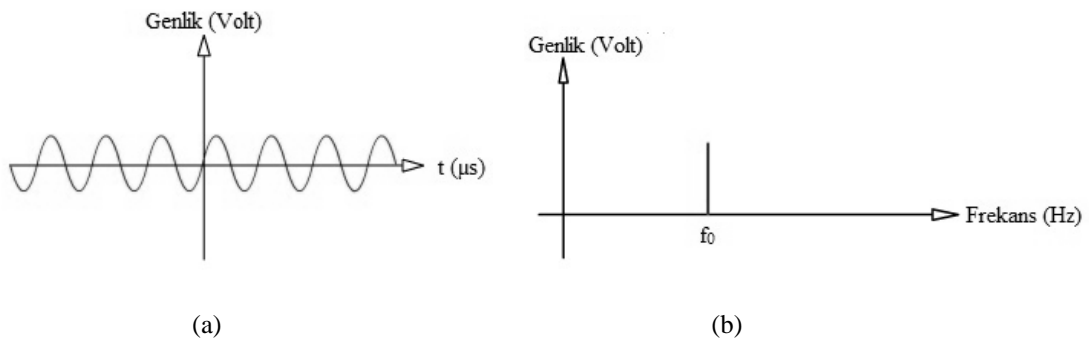
bastırılırken hedeften gelen sinyalin işlenmesi daha kolay yapılabilir. Sinyal işlemcide gerçekleşen işlemlerin ayrıntıları beşinci bölümde anlatılmaktadır.

4.4. Radar Sinyalleri

Radarlar, hedeften ve çevreden yansıyan sinyalleri işleyerek muhtemel hedeflere dair mesafe, hız ve açı gibi verileri üreten sinyal işleme sistemleridir. Sinyallerin zaman bölgesi ve frekans bölgesinde verdikleri bilgiler hedef tespiti için en önemli verileri oluşturur. Radarlarda kullanılan temel sinyal yapıları, sürekli dalgalar ve darbe dizileri şeklinde incelenebilir. Bu bölümde radar sinyalleri ile bunların frekans bölgesindeki gösterimleri ve farklılıkları anlatılmaktadır.

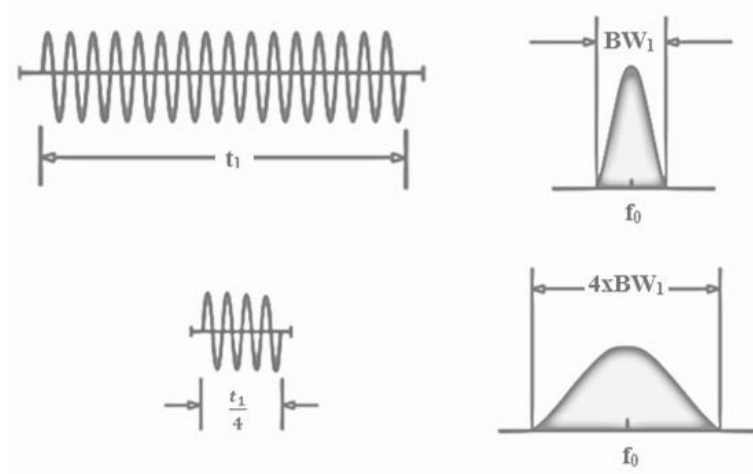
4.4.1. Sürekli dalga

Sürekli dalga daha çok hedefin hızının belirlenmesine ihtiyaç duyulan radarlarda kullanılır. Hedeften yansıyan sinyalin frekansındaki değişiklik incelenerek hedefin hızı bulunabilir. Şekil 4.4'te sonsuz uzunluktaki, frekansı f_0 olan sürekli bir dalganın zaman bölgesinde ve frekans bölgesinde gösterimi yer almaktadır.



Şekil 4.4 Sinüs dalgasının (a) zaman bölgesinde (b) frekans bölgesinde gösterimi

Burada dalganın frekansı değişmediği için frekans bölgesinde gösterim Şekil 4.4 (b)'deki gibi olacaktır. Sinyalin tüm enerjisi f_0 frekansında yer almaktadır. Sinyalin süresi azaldıkça frekans bölgesinde kapladığı bant genişliği artar (Şekil 4.5).



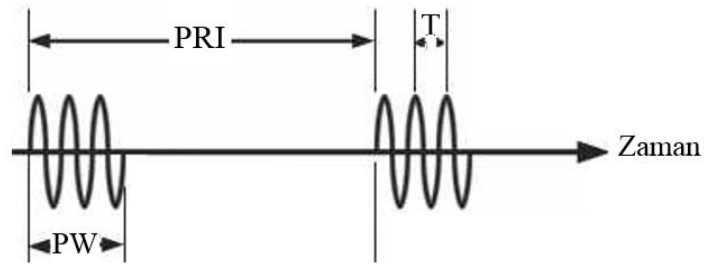
Şekil 4.5 Darbe süresi ve bant genişliği ilişkisi (Stimson'dan, 1998)

Sıfırdan–sıfıra bant genişliği Eşitlik 4.1 ile ifade edilir. Bir sinyalin bant genişliği ile süresinin çarpımı sabittir.

$$B = \frac{2}{\tau} \quad (4.1)$$

4.4.2. Darbe dizisi

Bir darbe radarında kullanılan darbe dizisi şeklindeki sinyalin yapısı Şekil 4.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.6 Darbe dizisi yapısı

Burada kullanılan parametreler şunlardır:

- PRI: Bir darbenin başlangıcı ile bir sonraki darbenin başlangıcı arasında geçen süredir.
- PRF: Saniyedeki darbe sayısıdır ($1/PRI$).

- Darbe genişliği (PW: Pulse Width): Darbenin başlangıcından bitimine kadar geçen süredir.
- Taşıyıcı frekans: Radarın yayımladığı sinyalin frekansı (1/T).

Darbe radarlarında, klasik evre uyumlu, iyi oto korelasyon özelliklerine sahip bir darbe seçilir ve uygun bir PRF’te periyodik olarak gönderilir (Rasool ve Bell, 2010). Darbenin gönderilme sürecinde (PW kadar) verici açık, alıcı kapalı, diğer zamanlarda ise verici kapalı, alıcı açıktır. Sinyalin periyodu T, taşıyıcı frekansı 1/T değerindedir. Bir darbe radarı, etrafındaki hedefleri tespit edebilmek için periyodik bir darbe dizisi yollar ve ölçümler yapabilmek için yukarıdaki parametreleri kullanır. Radarın frekansı, vericide kullanılan osilatörün frekansı ile belirlenir. Radarın çalışacağı bu frekans radarın performansını, tespit mesafesini, açı ölçümü hassasiyetini, hız ölçümünü, çevresel faktörlerden etkilenmesini, boyutunu, ağırlığını ve maliyetini etkiler.

Radarın bir PRI boyunca yaydığı toplam enerji Eşitlik 4.2 ile belirtildiği gibi tepe gücünün PW ile çarpılmasıyla bulunabilir. Bu gücü PRI’ya bölünce ortalama güç (P_{ort}) bulunur.

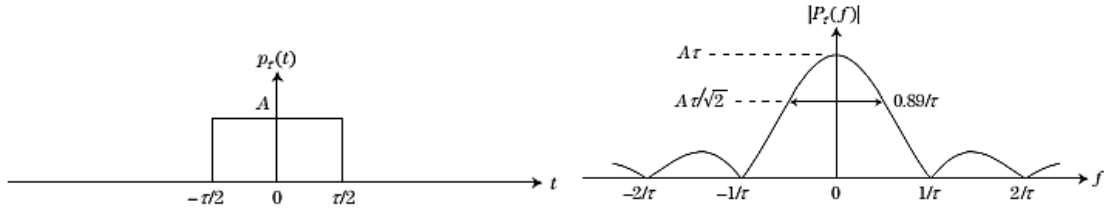
$$P_{ort} = P_{tepe} \times \frac{PW}{PRI} \quad (4.2)$$

Darbe dizisinde darbe genişliğinin periyoda oranı ne kadar büyükse darbe doluluk oranı, dolayısı ile güç de büyük olacağı için radarın menzili artar fakat tehdit elektronik sistemler tarafından tespit edilme olasılığı da artar. Tepe gücünü, darbe genişliğini veya PRF’i artırarak ortalama güç dolayısı ile menzil ve algılama olasılığı artırılır.

Darbe dizisi kullanmak, tek anten kullanımında, vericide oluşan gürültünün alıcı üzerindeki etkisini en aza indirger. Bunun yanı sıra darbe dizisi kullanılarak bir hedefin mesafesi kolaylıkla bulunabilir. Ayrıca modüle edilmiş darbe dizisi kullanmak, yollanan sinyallerin alıcı tarafından birbirinden farklı frekanslarda tespit edilebilmesini sağlar.

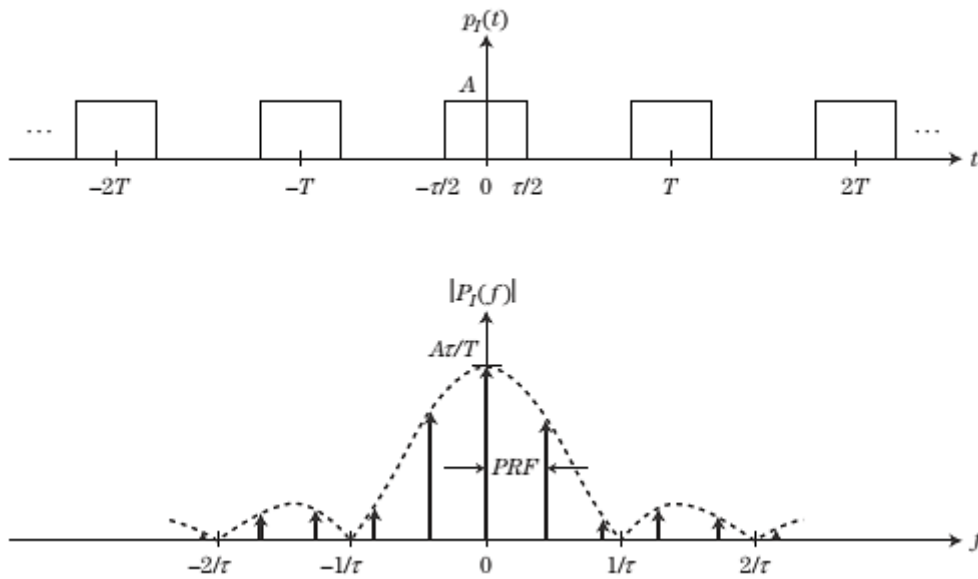
Tek bir darbe incelendiğinde, darbe genişliği τ olan bir sinyal, $P_\tau(t)$ ve bu sinyalin frekans bölgesindeki karşılığı, $P_\tau(f)$, Şekil 4.7 ile gösterilebilir. $P_\tau(f)$, Eşitlik 4.3 ile gösterildiği gibi bir sinc fonksiyonunu ifade eder.

$$P_\tau(f) = A\tau \text{sinc}(\pi f\tau) \quad (4.3)$$



Şekil 4.7 Tek bir darbe sinyalin (a) zaman ve (b) frekans bölgesinde gösterimi (Richards vd.'den 2010)

Sonsuz sayıda darbe incelendiğinde, ortaya çıkan darbe dizisi ve bu dizinin frekans bölgesinde gösterimi Şekil 4.8'teki gibidir.



Şekil 4.8 Sonsuz sayıda darbeden oluşan darbe dizisi ve bu dizinin frekans bölgesinde gösterimi (Richards vd.'den 2010)

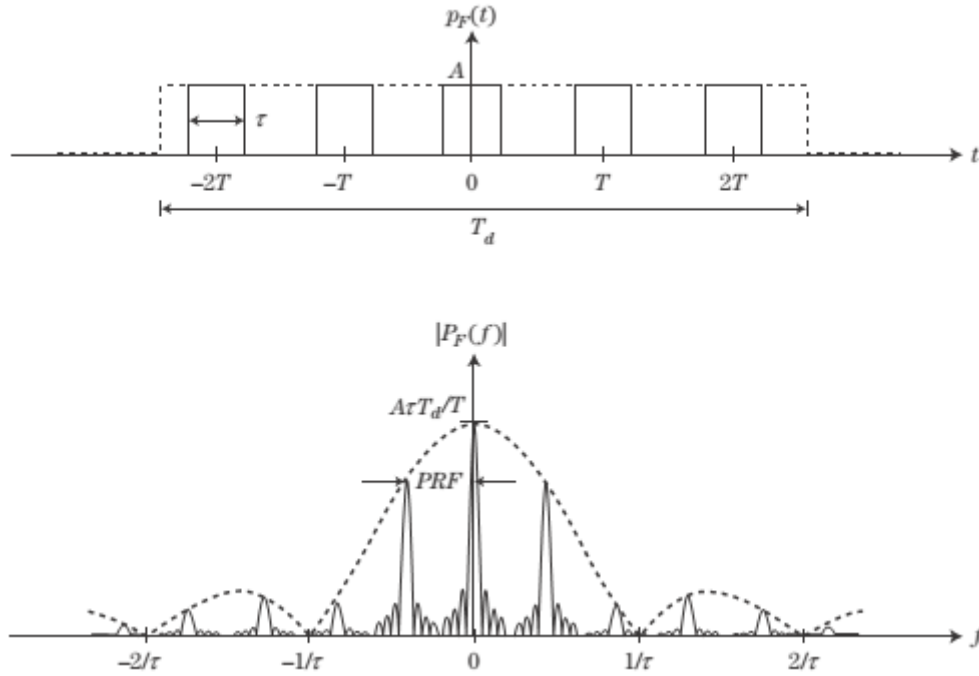
Frekans bölgesinde, enerjinin yoğunlaştığı dürtüler arasındaki fark (bkz. Şekil 4.8) darbe tekrar frekansı olarak ortaya çıkmıştır. Buradaki dürtülerin her biri birer sinüse karşılık gelir (Eşitlik 4.4).

$$P_1(f) = \frac{A\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi\tau k.PRF) \cdot \delta_D(f - k.PRF) \quad (4.4)$$

Sonlu sayıda darbe incelendiğinde, toplam süresi T_d olan sonlu sayıda darbeden oluşan dizinin frekans bölgesinde Eşitlik 4.5 ile ifade edilen hali aldığı görülür.

$$P_F(f) = \frac{ATd\tau}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi\tau k.PRF) \text{sinc}[\pi(f - k.PRF)T_d] \quad (4.5)$$

Darbe dizisinin zaman ve frekans bölgesindeki gösterimi ise Şekil 4.9'daki gibi olur.

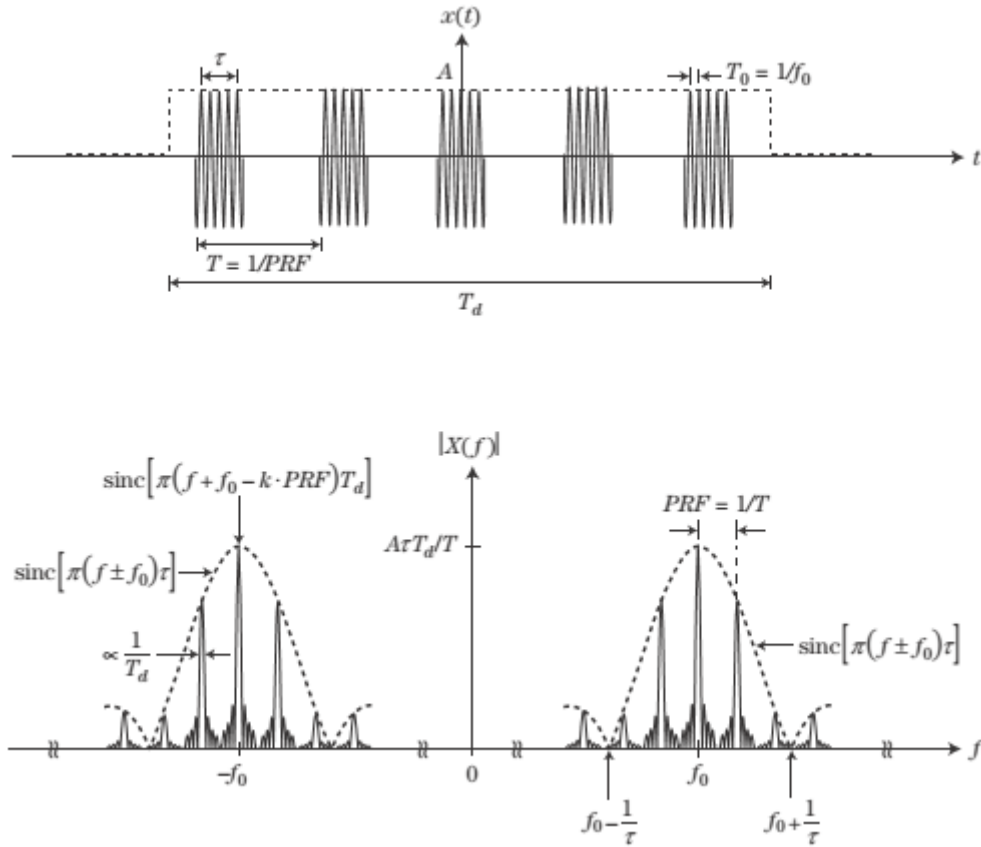


Şekil 4.9 Sonlu sayıda darbeden oluşan darbe dizisi ve bu dizinin frekans bölgesinde gösterimi (Richards vd.'den 2010)

Sürekli bir dalga, sıradan bir darbe dizisi ile çarpıldığında modüleli bir darbe dizisi elde edilir. Frekans bölgesinde ise Şekil 4.10'da görüldüğü gibi taşıyıcı frekans etrafında PRF aralıklarla dürtüler oluşur (Richards vd., 2010).

$$x(t) = P_F(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t) \quad (4.6)$$

$$X(f) = \frac{ATd\tau}{T} \left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi\tau k \cdot PRF) \text{sinc}[\pi(f - f_0 - k \cdot PRF)T_d] + \sum_{k=-\infty}^{\infty} \text{sinc}(\pi\tau k \cdot PRF) \text{sinc}[\pi(f + f_0 - k \cdot PRF)T_d] \right\} \quad (4.7)$$



Şekil 4.10 Sonlu sayıda modüledi darbe dizisi ve Fourier dönüşümü (Richards vd.'den 2010)

4.5. Radar Ölçümleri

Radarların başlıca görevleri hedeflerin mesafesini, hızını ve yönünü ölçmektir. Hedefin büyüklüğüne ve geometrisine dair bazı çıkarımların yapılmasına katkı sağlasalar da kesin bilgi veremezler. Örneğin aynı mesafede bulunan hedeflerden farklı büyüklükte sinyaller alınması durumunda, bu farkın radar kesit alanından (RKA) kaynaklandığı yorumu yapılarak hedeflerin büyüklükleri kıyaslanabilir. Bu şekilde hedeflerin büyüklükleri ile ilgili gruplandırma yapılabilir.

4.5.1. Mesafe ölçümü

Radarı gönderdiği elektromanyetik dalgalar ışık hızında ilerler. Radar sinyallerinin hedefe gidiş dönüş süresi ölçülerek hedefin mesafesi ölçülebilir. Hedefin uzaklığı, sinyalin gidiş ve dönüş mesafesinin toplamının yarısı olduğundan, radar ile hedef arasındaki mesafe Eşitlik 4.8 ile bulunabilir.

$$R = c \times \frac{\Delta t}{2} \quad (4.8)$$

Eğer hedef çok uzaktaysa ilk sinyal hedeften dönene kadar radar ikinci bir sinyal göndermiş olabilir. Bu durumda radar, geri dönen sinyali, gönderilen ilk sinyalin yansıması olarak değil de ikinci sinyalin yansıması olarak algılar. Sonuçta gerçekte uzakta olan bir hedef radar tarafından daha yakındaymış gibi algılanır.

Radarı mesafe ile ilgili bu belirsizliklerini belirleyen temel parametre PRI'dır. İki darbe arasında geçen sürede gönderilen sinyal, en fazla Eşitlik 4.9 ile belirtilen yolu alarak geri döner.

$$R = c \times \frac{PRI}{2} \quad (4.9)$$

Radarı bu mesafeden daha ötedeki hedefleri daha yakındaymış gibi göstereceği için bu mesafeye en yüksek belirli mesafe denir. Mesafedeki belirsizlikleri gidermek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Radarda farklı PRI değerleri kullanmak bunlardan biridir. Farklı PRI değerleri için farklı mesafeler ölçülüyor ise belirsizlik var, aynı mesafeler ölçülüyor ise yok demektir.

Darbe radarı, darbe gönderimi esnasında herhangi bir sinyal alamayacağından çok yakın mesafeleri algılayamaz. Çünkü darbenin gönderim işlemi bitmeden yani darbe genişliği süresi içerisinde sinyal geri dönmüştür. Radarı algılayamayacağı bu mesafe (kör menzil) Eşitlik 4.10 ile belirtilmiştir.

$$R = c \times \frac{PW}{2} \quad (4.10)$$

4.5.2. Hız ölçümü

Radar hedefin yaklaşmasını, uzaklaşmasını ve radar ile hedef arasındaki mesafenin değişim hızı olan radyal hızını gönderdiği sinyallerin yansımalarındaki frekans kayma miktarını ölçerek tespit eder. Doppler kayma miktarı hedefin radyal hızına ve gönderilen sinyalin frekansına bağlıdır.

Doppler kaymasını ifade eden Eşitlik 4.11'de de görüldüğü gibi, tespit edilen doppler frekansı radyal hız ile orantılıdır. Darbe doppler radarlar doppler frekansını ölçme yetenekleri sayesinde hedefin hızını tespit edebilmektedirler. Doppler frekansının ölçümü dördüncü bölümde ayrıntılı biçimde anlatılmaktadır.

$$v = c \times \frac{f_d}{2f_0} \quad (4.11)$$

4.5.3. Yön ölçümü

Radarın yön ölçümü için kullandığı temel yöntem gelen sinyallerin genliklerini karşılaştırmaktır. Bu amaçla radar anteninin farklı yönlerden ölçüm alması sağlanır ve hedeften dönen sinyalin varlığının tespit edildiği yön hedefin yönü olarak tayin edilir. Radar sürekli olarak farklı yönlerden gelen sinyalleri karşılaştırır ve bu arama periyodunda yüksek genliğe sahip sinyalleri hedef olarak değerlendirir.

4.5.4. Temel radar denklemi

Radar alıcısına hedeften gelen sinyalin gücü, bu güce etki eden ana parametreler cinsinden ifade edilir. Aynı antenin hem alıcı hem verici olarak kullanıldığı mono statik radarlar için bu denklem Eşitlik 4.12 ile verilmiştir.

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R^2} \times G \times \sigma \times \frac{1}{4\pi R^2} \times A_e \quad (4.12)$$

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (4.13)$$

Sinyaller mesafe arttıkça daha geniş alanı aydınlattıkları için radardan uzaklaştıkça güç yoğunlukları $1/R^2$ çarpanıyla zayıflar. Radar sinyallerini bir hüzmeye içerisinde yoğunlaştırarak gönderdiği için güç hedef yönüne belli bir oranda artarak gönderilmektedir. Radar denkleminde bu oran anten kazancı olarak ifade edilir. Hedefe gönderilen sinyal, hedefin alanı ve yansıtıcılığı oranında radara geri gönderilecektir. RKA (σ) olarak adlandırılan kavram, hedefin geometrik alanını, yansıtıcılığını ve yansıttığı sinyallerin ne kadarını radar yönünde yansıttığını belirtir. Hedeften yansıyan sinyal, radar alıcı antenine ulaşmaya kadar yine $1/R^2$ oranında zayıflayacaktır. Alıcı anten, etkin alanı nispetinde, yani dönen sinyallerden üzerine düşen kadarını algılayacaktır. Anten etkin alanı, antenin geometrik alanı ile verimliliğinin çarpımına eşittir. Hedeften yansıyan sinyaller, radara geri döndüğünde antende algılanan toplam güç P_r kadar olacaktır.

Alıcı ve verici anteni birbirinden ayrı olan bistatik radarlarda antenlerin hedeflere uzaklıkları farklı olacağı için alıcı radarda algılanan toplam güç Eşitlik 4.14 ile ifade edilebilir.

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R_1^2} \times G_t \times \sigma \times \frac{1}{4\pi R_2^2} \times A_e \quad (4.14)$$

Radar denkleminde de görüldüğü gibi yansıyan sinyalin gücünü en çok etkileyen değer hedefin radar antenine olan uzaklığıdır. Monostatik bir radar için radar sinyali mesafenin dört katı kadar zayıflar. Bu nedenle uzun menzilli radarlarda, algılanan güç, yayınlanan güce oranla çok düşüktür. Radar alıcıları, hedeften dönen sinyallerle birlikte radarın ısı gürültüsü, kozmik ışık, çevresel yankı gibi faktörlerin oluşturduğu gürültüyü de algırlar. Radar bu gürültü ortamında etkin çalışabilmek için belirli bir güç eşliğinin üzerindeki sinyalleri algılar. Radarın algılayabileceği, en uzak mesafeden (R_{\max}) gelen sinyal, P_{\min} olarak adlandırılır. Yukardaki denklikten R_{\max} ve P_{\min} için Eşitlik 4.15 ile gösterilen denklemler elde edilir (Skolnik, 2002, 2008).

$$P_{min} = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 R_{max}^4} \quad R_{max} = \left(\frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 P_{min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.15)$$

Temel radar denklemi, radarın hedef tespitiyle ilgili birçok bilgi verir. Vericinin gücü, anten kazancı, hedefin radar kesit alanı ve antenin etkin alanı büyüdükçe, hedef daha uzaktan algılanabilir. Örneğin, küçük radar kesit alanına sahip hedefler ancak yakın mesafeden algılanabilir. Radar, çok küçük güç değerlerinde gelen hedef sinyalini algılayabiliyorsa menzili uzun mesafelere kadar çıkıyor demektir. Anten kazancı ve radarın yaydığı tepe gücü radar denkleminde daha açık yazılırsa temel radar denklemi elde edilir (Eşitlik 4.16).

$$R_{max} = \left(\frac{P_{ort} P R I \sigma A_e^2}{4\pi P W \lambda^2 P_{min}} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4.16)$$

Burada da görüldüğü gibi gönderilen radar sinyalinin dalga boyunun büyük olması algılanacak en uzak mesafeyi olumsuz etkilerken, antenin etkin alanının büyük olması olumlu etkiler. Çünkü antenin algıladığı sinyallerin toplam gücü, antenin etkin alanına bağlıdır. Bistatik antenler için, radardan yayılan sinyaller hedefe çarpana kadar verici antenin parametreleri, sinyaller hedefe çarptıktan sonra da alıcı antenin parametreleri kullanılır. Radarlar farklı frekans bantlarında çalışabilmektedir. Radarların frekans kullanımı ile ilgili ayrıntılar Çizelge 4.1 ile verilmiştir.

Çizelge 4.1 IEEE'nin Radar Frekans Bantları için kullandığı kısaltmalar (Skolnik'ten, 2002)

Bant Gösterimi	Frekans Aralığı	Radarlara Atanan Özel Frekans Aralıkları
HF	3 – 30 MHz	
VHF	30 – 300 MHz	138 – 144 MHz 216 – 255 MHz
UHF	300 – 1000 MHz	420 – 450 MHz 890 – 942 MHz
L	1.0 – 2.0 GHz	1215 – 1400 MHz
S	2.0 – 4.0 GHz	2.3 – 2.5 GHz 2.7 – 3.7 GHz
C	4.0 – 8.0 GHz	4.2 – 4.4 GHz 5.25 – 5.925 GHz
X	8.0 – 12.0 GHz	8.5 – 10.68 GHz
Ku	12.0 – 18.0 GHz	13.4 – 14.0 GHz 15.7 – 17.7 GHz
K	18.0 – 27.0 GHz	24.05 – 24.25 GHz 24.65 – 24.75 GHz
Ka	27.0 – 40.0 GHz	33.4 – 36.0 GHz
V	40.0 – 75.0 GHz	59.0 – 64.0 GHz
W	75.0 – 110.0 GHz	76.0 – 81.0 GHz 92.0 – 100.0 GHz

5. DARBE DOPPLER RADARLARI

Darbeli radarlar bir dizi modüle edilmiş darbeyi gönderir ve alırlar. Hedefin mesafesi bu darbelerin gönderildiği ve alındığı zamana bakılarak hesaplanır. Doppler ölçümü ise iki türlü yapılabilir. Eğer art arda gelen darbeler arasındaki mesafeler hassas bir biçimde ölçülebiliyorsa doppler frekansı mesafelerin oranından çıkartılabilir. Bu yaklaşım mesafenin belli bir süre çok hızlı değişmediği durumlarda kullanışlıdır. Bunun yanında doppler filtre bankaları kullanmak da başka bir çözümdür (Mahafza, 2003).

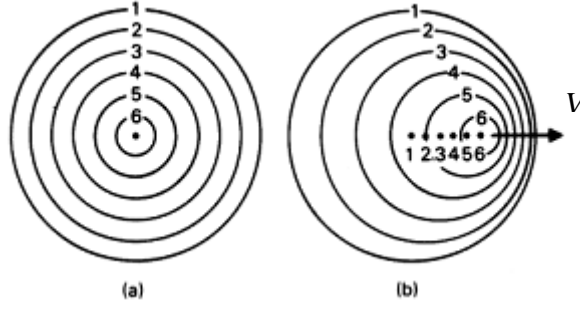
Darbe doppler işleme, yer ve deniz kaynaklı çevresel yankıların bulunduğu durumlarda hedef tespiti amacıyla hava radarları tarafından yoğun olarak kullanılmaktadır. Bir dizi darbe gönderilir ve alınan sinyaller, Fourier dönüşümü veya benzer bir teknik kullanılarak dar spektral bantlarda çözümlenerek işlenir. Bu dar spektral bantlar hedefin bulunduğu bölgedeki çevresel yankıların azaltılmasını veya yok edilmesini sağlayarak hedefin tespitine ve takibine imkân sağlar (Cury, 2012).

5.1. Doppler Prensibi

Doppler etkisi, hareket halindeki bir nesneden yayımlanan veya yansıyan bir sinyalin frekanstaki kaymadır. Şekil 5.1’de de gösterildiği gibi nokta bir kaynaktan yayımlanan dalga hareket yönünde sıkışırken, hareket yönünün aksine ise genişler.

Her iki durumda da nesnenin hızı ne kadar yüksek olursa etkisi o kadar çok olur. Sadece harekete belirli bir açıdan bakıldığında dalga etkilenmeyecektir. Frekans, dalga boyu ile ters orantılı olduğundan, dalga ne kadar sıkışır, frekansı da o kadar artar. Aynı şekilde dalga boyu artarken, frekans azalır. Bu nedenle dalganın frekansı nesnenin hızı ile doğru orantılı olarak artar. Radarlarda, doppler kayması radar ile radar sinyalini yansıtan nesne arasındaki bağıl hızdan kaynaklanmaktadır. Eğer radar ile hedef nesne arasındaki mesafe azalıyorsa, dalgalar sıkışır. Dalga boyları küçülür ve frekansları artar. Mesafe artıyor ise etki tam tersi olur. Yere konumlu radarlarda bağıl hareket tümüyle hedef nesneden kaynaklıdır. Bu durumda yerden dönen sinyallerde doppler kayması olmaz ve hedef ile çevresel yankı arasındaki ayırım nispeten kolaylaşır. Hava radarlarında ise durum biraz daha karmaşıktır.

Bağıl hareket, dolayısıyla doppler kayması, radarın kendisinden, hedeften veya her ikisinden birden kaynaklanıyor olabilir (Stimson, 1998).



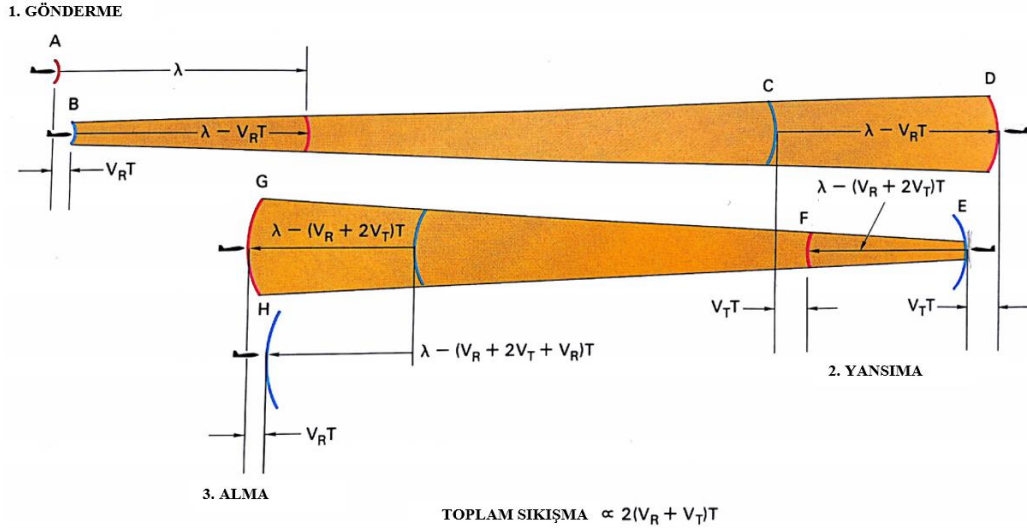
Şekil 5.1 Bir nokta kaynak (a) sabit iken, (b) hareketli iken, dalganın yayılımı.
(Stimson'dan, 1998)

5.2. Doppler Kayması

Herhangi bir hız ile hareket eden bir hedeften yayılan dalganın frekansından oluşan ve dalganın kaynağı ile hedefin bağıl hızından kaynaklanan frekans kaymasına doppler kayması adı verilir (Morris ve Harkness, 1996). Gerçek durumlarda hareketli bir hedef sebebiyle oluşan doppler kayması, gönderilen sinyalin frekansının küçük bir yüzdesine karşılık gelir (Goetz ve Albright, 2009).

Radar ile hedefin birbirlerine yaklaşması durumunda, dalga boyunda meydana gelen sıkışma Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Dalganın periyodu, T , kadar geçen sürede, radarın ve hedefin hızlarının (V_R , V_T) etkisi ile dalgada meydana gelecek toplam sıkışma $2(V_R + V_T)T$ kadar olmaktadır. T çok küçük olduğundan, dalga boyundaki sıkışma miktarı oldukça küçük olacaktır. X- bant bir radyo dalgası için radarın ve hedefin hızı 600'er knot alınır ise radarın frekansı 10 GHz seviyelerinde olduğundan, ortaya çıkan doppler frekansı 40 KHz olacaktır.

Doppler frekansı, Eşitlik 5.1 ile belirtildiği gibi sinyalin gidiş dönüş mesafesindeki değişimin dalga boyuna oranı ile hesaplanır. Gidiş dönüş mesafesi, hedefin radara olan uzaklığının iki katıdır. Yaklaşan hedefler için, mesafedeki değişim negatif olduğundan, doppler frekansının pozitif çıkması adına eksi ile çarpım yapılır.



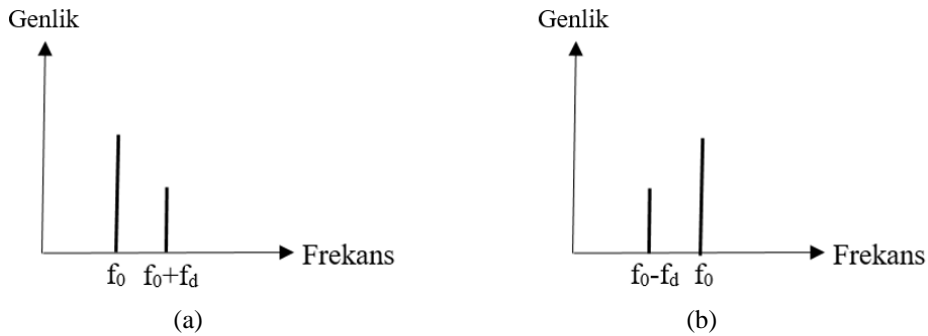
Şekil 5.2 Sinyalin yayınlanması, yansınması ve alınması aşamalarında dalga boyundaki sıkışma (Stimson'dan, 1998)

$$f_d = \frac{\dot{d}}{\lambda} = -2 \frac{\dot{R}}{\lambda} = \frac{2V}{\lambda} \quad (5.1)$$

Doppler kayması, hedef hızı ile doğru orantılıdır. Hedefin radara göre bağıl hızı V olarak alınmıştır. Gerçekte doppler frekansının büyüklüğü, hedefin radar yönündeki hızına bağlıdır. Radar ile hedef arasındaki açı göz önüne alınarak daha genel bir denklem Eşitlik 5.2'deki gibi verilebilir.

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos \theta \quad (5.2)$$

Frekans bölgesinde yaklaşan ve uzaklaşan hedefler için doppler kayması Şekil 5.3, bazı hız ve frekans değerlerine göre oluşan doppler kaymaları Çizelge 5.1 ile gösterilmiştir



Şekil 5.3 Frekans bölgesinde (a) yaklaşan ve (b) uzaklaşan hedeflerin gösterimi

Çizelge 5.1 Hız ve frekans değişkenlerine göre doppler kayması (Richards'tan, 2010).

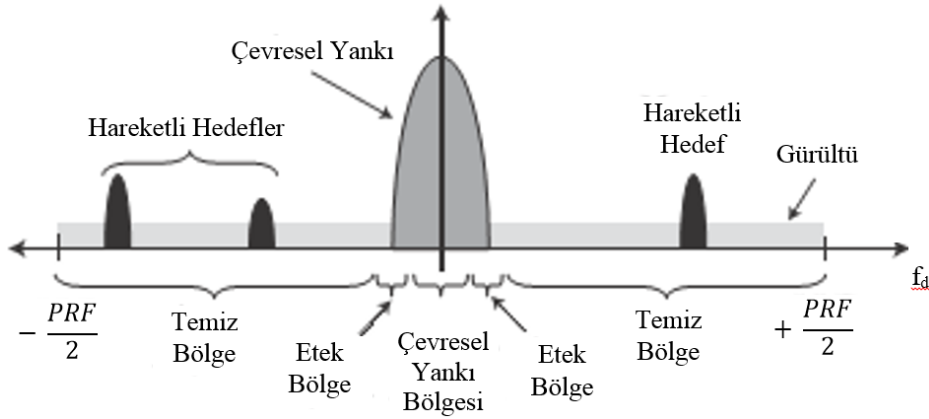
Radar Frekansı (f)		Doppler Kayması (fa) (Hz)		
Bant	Frekans (GHz)	1 m/s	1 knot	1 mph
L	1	6.67	3.43	2.98
S	3	20.0	10.3	8.94
C	5	33.3	17.1	14.9
X	10	66.7	34.3	29.8
K _u	16	107	54.9	47.7
K _a	35	233	120	104
W	95	633	326	283

5.3. Darbe Doppler Radarı Kavramı

Hassas bir şekilde belli bir frekans değerinde kalabilen güç kaynaklarının ilerlemesi ve sinyal işleme tekniklerinde kaydedilen gelişmeler sayesinde günümüzde çok etkili doppler radarları geliştirilebilmektedir. Bu radarlar hedeflenen cismin hem hızını hem de mesafesini yüksek doğruluk oranı ile tespit edebilmektedirler. Çevresel yankılar ile asıl hedefi hızlarından ayırt edebilme kabiliyeti darbe doppler radarı ayrıcalıklı kılmaktadır. Darbe doppler radarlar bu özelliklerini gelişen sinyal işleme teknolojisine borçludur.

Günümüzde darbe doppler radarlarına en fazla ihtiyaç hava platformlarında duyulmaktadır. Yerde konuşlu, hareketsiz bir radar için algılanan çevresel yankıların doppler frekansı sıfır veya sıfıra yakın olur. Oysa hava platformunun hızından dolayı çeşitli doppler frekanslarında çevresel yankılar algılanabilir ve bunların hedef tespitinde oldukça önemli bir sorun olduğu görülür. Çevresel yankıların yoğun olduğu ortamlarda hedefin mesafe, hız gibi özelliklerine göre farklı modlarda çalışarak hedeflerin tespitini sağlayabilen darbe doppler radarlar bu sorunun en iyi çözümüdür. Bu nedenlerden ötürü darbe doppler radarlarının en yaygın kullanım alanı muharebeye katılan hava platformlarıdır.

Şekil 5.4'te darbe doppler radarının doppler spektrumu görülmektedir. Hava platformunda konuşlu bir darbe doppler radarı, ana lobundaki hedeflerden başka, çevresel yankıları oluşturan, irtifa yankısını, ana lob çevresel yankısını ve yan lob çevresel yankılarını da alır.



Şekil 5.4 Darbe doppler radarının doppler spektrumu (Richards'tan, 2005)

Bu çevresel yankılardan irtifa yankısı, platformun alt bölgesinden ve antenin yan lobundan algılanan, yerden yansıyan sinyallerdir. Yani platform yere yaklaştığında veya uzaklaştığında yerden yansıyan sinyallerde doppler kayması olur. Platformun radarının ana lobundan kaynaklara ana lob çevresel yankısı, antenin yan loblarından gelen sinyallerin de, yan lobun yükseliş açısına göre farklı frekanslarda oluşturdukları çevresel yankılara ise yan lob çevresel yankısı denir.

Darbe doppler radarlar hedef yansımalarını çevresel yankılardan doppler kaymalarına bakarak ayırt edebildiği gibi dönen sinyalin zamanına bakarak da ayırt edebilir. Çünkü farklı çevresel yankılar farklı zamanlarda platforma dönmektedirler. Dolayısı ile darbe doppler radarlar hedeflerini tespit edebilmek için mesafe-doppler matrisinde veri toplar ve bu verileri sinyal işlemeye tabi tutarlar. Eski tip radarlara nazaran karmaşık olan bu işlemler yüksek işlemci gücü sayesinde mümkün olmaktadır.

Darbe doppler radarının kullandığı PRF değeriyle ilintili olarak mesafede ve doppler frekansında belirsizlikler oluşabilmektedir. Mesela radar düşük PRF değerine sahip bir modda çalıştırıldığında çok yüksek doppler frekansı oluşturan yüksek hızlı bir hedef tespit edilmeye çalışıldığında doppler frekansı PRF değerinden büyük olacak ve hedefin hızı tam olarak belirlenemeyecektir. Oysa böyle bir durumda hedefin mesafesinde herhangi bir belirsizlik problemi yaşanmaz.

5.3.1. Darbe doppler radar modları ve belirsizlik problemi

Modern radar sistemlerinde radar donanımındaki evre uyumlu sinyal gönderebilme, PRF anahtarlama ve çoklu PRF üretebilme gibi gelişmeler radarın farklı modlarda çalışmasına imkân tanımaktadır. Sayısal bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sayesinde ise çok sayıda hesaplama, çok kısa sürede yapılabilir hale gelmiştir. Bu etkenlerin birleşimi ile günümüzde farklı PRF'leri anahtarlayıp gerekli hesapları yaparak milisaniyeler içinde hedef bilgilerini göstermek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte günümüz teknolojisi karşılaşılan duruma göre düşük, orta ve yüksek PRF modlarından en uygun olanının kullanımına olanak sağlamaktadır.

Darbe Doppler radarların çalışma modları ve bu modların hangi belirsizlikleri oluşturabilecekleri Çizelge 5.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Darbe doppler radarının çalışma modları

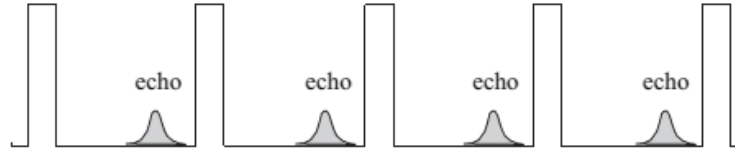
Çalışma Modu	Mesafe	Doppler
Düşük PRF	Belirli	Belirsiz
Orta PRF	Belirsiz	Belirsiz
Yüksek PRF	Belirsiz	Belirli

Darbe doppler radarın mesafe belirsizliğine düşmeden ölçebileceği en yüksek mesafe Eşitlik 5.3 ile belirlenir.

$$R_{max} \leq R_{un} = \frac{PRI \times c}{2} \quad (5.3)$$

Mesafe belirsizliğinin istenmediği durumlarda PRI mümkün olduğunca uzun olmalı yani düşük PRF modunda çalışılmalıdır. Şekil 5.5'te gönderilen sinyal ve tek bir hedeften dönen sinyal gösterilmektedir. Hedefin gerçek mesafesi Eşitlik 5.4 ile belirtildiği gibi görünen mesafe ile en yüksek belirli mesafenin katlarının toplamıdır. Burada $x = 1, 2, 3, \dots$ olabilir ve mesafe belirsizliğinin derecesini belirtir.

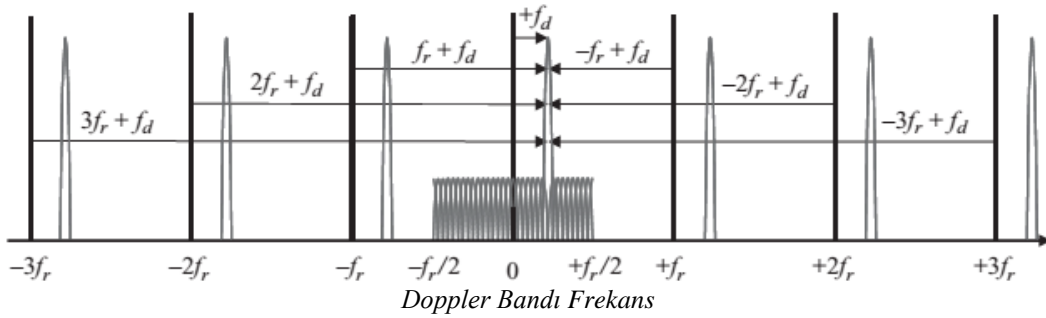
$$R_{gerçek} \leq R_{görünen} + xR_{un} \quad (5.4)$$



Şekil 5.5 Mesafe belirsizliği (Alabaster'dan, 2012)

Eğer hız belirsizliğinin yaşanmaması isteniyorsa yüksek PRF modunda çalışılmalıdır. Yüksek PRF modunda çalışılması durumunda PRF değeri doppler frekansından büyük olacak böylelikle hız belirsizliği yaşanmayacaktır. Hız belirsizliği yaşanmaması için PRF'in alabileceği en küçük değer Eşitlik 5.5 ile hesaplanabilir.

$$PRF > f_{dmax} = \frac{2V_{max}}{\lambda} \quad (5.5)$$



Şekil 5.6 Hız belirsizliği (Alabaster'den, 2012)

-PRF/2'den +PRF/2'ye kadar olan ve doppler bandı olarak isimlendirilen bantta her bir hedef için yalnızca bir sinyal elde edilir. Bu bantın biraz daha geniş olması durumunda bir hedef için iki sinyal oluşması ve iki hedef algılanması mümkündür. Bantın biraz daha dar olması durumunda ise doppler kayması PRF/2'ye yakın olan hedeflerin tespit edilememesi söz konusu olur. Bu sebeple doppler bandı PRF'e eşit olmalıdır. Doppler radarlarda hız belirsizliği probleminin anlatıldığı Şekil 5.6'da bir hedeften dönen sinyalin doppler kayması görülmektedir. Görünen doppler kayması +f_d olmasına rağmen gerçek doppler kayması Eşitlik 5.6 ile de belirtildiği gibi PRF'in katlarının görünen değerden çıkarılmasıyla veya bu değere eklenmesiyle bulunur. Hız belirsizliğinin derecesi burada y ile ifade edilmektedir. (Alabaster, 2012)

$$f_{d_gerçek} \leq f_d \pm yPRF \quad (5.6)$$

5.3.1.1. Düşük PRF modu

Düşük PRF modunda mesafe belirsizliği yoktur. Bu sayede mesafe ölçüm işlemleri basittir. Ayrıca mesafedeki çözünürlük ile yan loblardan oluşan yankılardan kurtulmak kolaylaşır. Ana lobdaki çevresel yankıların hedef ile aynı mesafede olmaları durumunda ise doppler frekansından yararlanır. Çevresel yankıları bastırmak için kimi zaman belirli hedefleri de yok etmek gerekebilir.

Bu modun esas kabiliyeti yüksek çözünürlüklü hassas mesafe ölçümü yapabilmesidir. Bu nedenle yer haritalandırması gibi uygulamalarda tercih edilir. Basit bir sinyal işleme yapısına sahiptir. Buna karşın havadan yere doğru olan uygulamalarda düşük tespit olasılığı veya yüksek yanlış alarm oranı ile çalışır. Uzun tespit mesafesini sağlayabilmesi için yüksek darbe gücüne ya da darbe sıkıştırma oranına gereksinim duymaktadır. Doppler belirsizliği yüksek seviyede olduğundan yerdeki hareketli hedefleri tespit etmekte başarılı değildir. Düşük PRF radarların belirsiz doppler frekans bölgesini genişletebilmek ve hedefin radyal hızını doğru belirleyebilmek için doppler belirsizlik çözümlerine ihtiyaç vardır (Sun vd., 2010).

5.3.1.2. Orta PRF modu

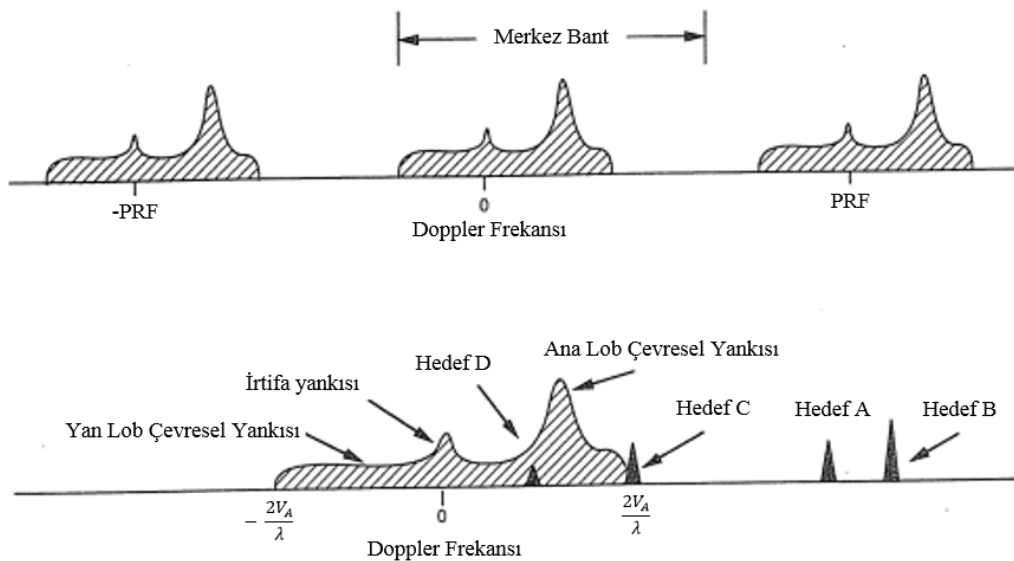
Orta PRF modu, çok uzun menzile ihtiyaç duymayan uygulamalarda, yoğun çevresel yankıların bulunduğu ortamlarda en iyi performansı verebilen moddur. Gerektiği durumlarda PRF değeri artırılarak çevresel yankıların etkisi daha da azaltılabilir. Hem mesafe hem de doppler işleme etkin olarak kullanılmaktadır. Bu sayede mesafe ve hızın ikisini birden belirleme konusunda düşük ve yüksek PRF modlarına göre daha başarılıdır. Ancak bunun için mesafe ve doppler belirsizliklerinin çözümü gereklidir (Michael Schikorr, 2010). Bu belirsizlikler ve kör bölgeler uygun bir şekilde seçilmesi gereken çoklu PRF kullanılarak çözülebilir (Ahn vd., 2011). Yer hedeflerini ayırt edebilme yeteneği olmasıyla birlikte yan lobların bastırılması karmaşık işlemler gerektirmektedir.

Yüksek PRF modu öncelikle uzak mesafelerde hedef tespiti ve hedeflerin dopplerde takibi için kullanılır. Bu frekans ayırt edebilme kabiliyeti mesafedeki değişimin doğru bulunabilmesini sağlar. Yüksek PRF doppler modu ayrıca yer çevresel yankılarının yoğun

olduğu ortamlarda hedef tespitinde başarılıdır. Ancak bu mod radarın mesafesini ölçmede hassas değildir. Hassas bir mesafe bilgisi ve iyi bir yer haritalama uygulaması için radarların düşük PRF modu kullanılmalıdır. Orta PRF modu ise düşük ve yüksek PRF modlarının avantajlarına ve kısıtlamalarına sahip bir moddur. Ancak zayıflıklarının hiçbiri uç seviyelerde değildir. Oldukça hassas mesafe ve hız bilgisi vermekle birlikte, yer yankılarının olduğu ortamlarda da hedef tespit kabiliyeti kabul edilebilir düzeydedir. Eğer hedefin hem mesafe hem hız verisi isteniyorsa, hedefin tespit edilmesi istenen senaryo çok değişken koşulları içeriyorsa ve yoğun çevresel yankının bulunduğu bir ortam bekleniyorsa tüm bu şartlar altında en iyi sonucu verecek olan orta PRF'tir. Bu ihtiyaç ilk olarak savaş uçaklarının atış kontrol radarlarında doğmuştur ve orta PRF bu ihtiyaca cevap verebilmek için geliştirilmiştir (Alabaster, 2012).

5.3.1.3. Yüksek PRF modu

Yüksek PRF kullanıldığında Şekil 5.7'te görüldüğü gibi PRF'ler arasında geniş bir çevresel yankısız bölge oluşur ve hedeflerin yüksek hızda yaklaşması durumunda tespit edilebilmelerine imkân sağlayan, çevresel yankıların bulunmadığı bir bölge sağlar (Agarwal, 2012). Böylece hedef tespitinde, ana lobda oluşan çevresel yankı sorunu, hedefleri etkilemeden bastırılarak yüksek PRF kullanımı ile çözülebilir. Doppler çözünürlüğü de fazla olacağından çok sayıda hedef ayırt edilebilmektedir.



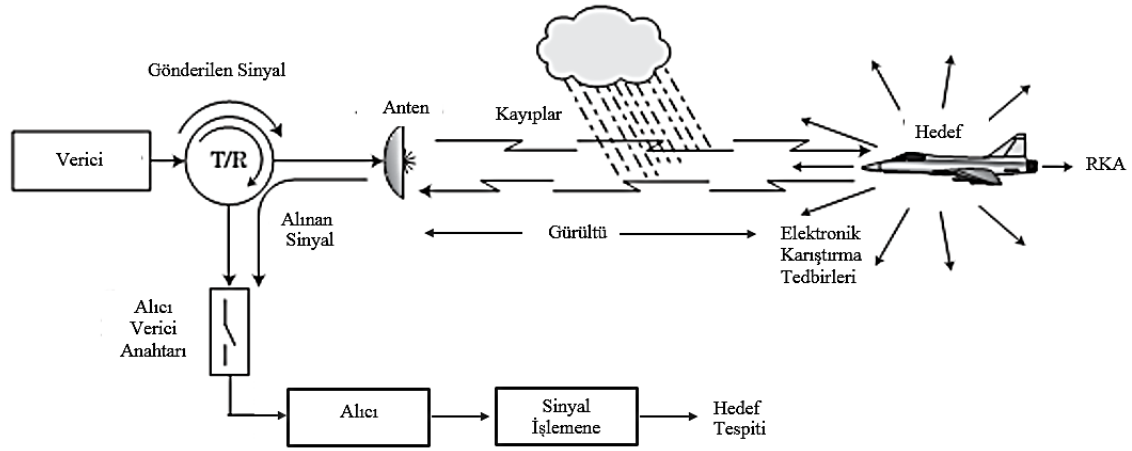
Şekil 5.7 Yüksek PRF doppler spektrum (Morris ve Harkness'tan, 1996)

Özellikle yaklaşan hedeflerin doppler frekansı yüksek PRF ile tespit edilebilir. Tepe gücü fazla artırmadan doluluk oranını artırarak yüksek ortalama güçler elde edilebilir ve tespit mesafesi de bu sayede artırılabilir.

Yüksek PRF modunun doppler hassasiyeti çok yüksek olmasına karşın mesafede belirsizlikler meydana gelmektedir. Radarlarda kullanılan ve darbenin dönüş zamanı kullanılarak hesaplanan mesafe ölçümünün yüksek PRF'lerde kullanılması mümkün değildir. Bu belirsizliği gidermek için farklı PRF setleri kullanılabilir veya kullanılan radar frekansı modüle edilerek mesafe hesaplanır. Yüksek PRF modunda ana lob çevresel yansımalar etkili bir şekilde bastırılabilirken yan lob yankıları düşük hızdaki hedeflerin tespitini olumsuz etkiler.

6. YÖNTEM

Bu bölümde bir darbeli doppler radarda hedef tespitine etki eden faktörler incelenmektedir. Şekil 6.1’de radardan gönderilen sinyalin, yayınlanmasından itibaren hedeften dönüp tekrar radar tarafından alınması ve alıcı biriminde işlenip hedefin tespit edilmesi aşamalarında maruz kaldığı etkenler görülmektedir.



Şekil 6.1 Hedef tespitine etki eden faktörler

Hedef tespitine etki eden faktörlerin başında ortam özellikleri gelmektedir. Radar sinyallerinin intişarının gerçekleştiği atmosferik koşullar hedef sinyalinin alınması için ideal koşullar değildir. Bu koşullarda dönen sinyal gürültüyle birleşmekte ve kayba uğramaktadır. Ayrıca hedef harici nesnelere kaynaklı çevresel yankılarda hedef sinyali ile beraber radar anteni tarafından alınmaktadır. Böyle bir ortamda hedef tespiti açısından hayati öneme sahip olan yanlış alarm olasılığı ve hedef tespit olasılığı radarlarda ayrıntılı bir biçimde ele alınan kavramlardır. Radar kesit alanı ise hedef sinyalinin büyüklüğünü doğrudan etkilemektedir. Hedeften dönen sinyal radarın alıcısına ulaştıktan sonra hedef tespiti için oldukça karmaşık sinyal işleme teknikleri kullanılabilir. Bu çalışmada özellikle darbe sıkıştırma teknikleri ve sabit yanlış alarm olasılığı teknikleri üzerinde durulmaktadır.

6.1. Gürültü ve Hedef Tespiti

Radar denkleminde bir radarın tespit edebileceği en düşük sinyal gücü Eşitlik 6.1 ile verilmiştir. Denklemdaki S_{min} değeri hedeften dönen sinyalin herhangi bir değeri olabilir, sabit bir değer değildir.

$$S_{min} = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 R_{max}^4} \quad (6.1)$$

Hedeften yansıyan radar sinyalleri her zaman gürültü ile birlikte algılanır ve hedef tespiti her zaman gürültülü bir ortamda gerçekleştirilir. Bu nedenle, radarın algılayabileceği en düşük sinyal gücü herhangi bir büyüklük olabilir.

Hedeflerden dönen sinyaller yeterli güce sahip ise gürültü belirgin bir şekilde tespit eşik seviyesinin üzerinde kalmaktadır. Ancak bazı durumlarda hedeften dönen sinyaller gürültü seviyesine kadar düşebilmekte ya da gürültü seviyesinin altında kalabilmektedir. Radar alıcısındaki gürültü de bazı durumlarda yüksek bir sinyal olarak tepki verip hedeften dönen bir sinyal gibi görünebilir. Böyle bir ortamda hangi sinyalin hedef, hangi sinyalin gürültü olduğunun belirlenmesi güçtür ve ancak sinyal işleme teknikleri kullanılarak tespit yapılabilir.

Radarın hedeften gelen sinyalleri gürültüden ayırt edebilmek için öncelikle bir eşik değeri belirler. Ancak hem gürültünün hem de hedeften dönen sinyallerin seviyeleri rasgele olduğu için, uygulanan eşik değerine göre kimi zaman hedefler tespit edilememekte kimi zaman da gürültü, hedef olarak algılanabilmektedir. Bu durumları tanımlamak için kullanılan kavramlar hedef tespit olasılığı (P_d) ve yanlış alarm olasılığı (P_{fa})'dır.

6.1.1. Hedef tespiti ve sinyal gürültü oranı

Bir darbe radarında hedef tespiti, alıcı detektörünün çıkışında yapılır. Alıcı detektörünün çıkışında hem hedeften dönen darbe hem de gürültü bulunur. Termal kaynaklı sistem gürültüsü çevresel yankılar bu gürültüyü oluşturan temel etkenlerdir.

Detektör çıkışındaki sinyal seviyesinin belirli bir eşik seviyesinin üstünde olduğu noktalarda hedef tespiti yapılabilir. Eşik seviyesinin belirlenmesi hedef tespitinde önemli bir aşamadır. Hem gürültünün hem de hedeften dönen sinyallerin güç seviyelerine bakılarak tespit olasılığının ve yanlış alarm olasılığının en uygun değerlerinin elde edileceği bir eşik seviyesi belirlemek gerekmektedir. Eşik seviyesi çok düşük tutulursa yanlış alarm olasılığının olması gerekenden fazla çıkma durumu olacaktır. Eşik seviyesi, hedeften dönen sinyallerin güç seviyesinin üstünde de olmaması gerekmektedir. Böyle bir durumda hedefin tespit edilme ihtimali büyüktür. Değişken gürültü ortamlarında, değişken eşik seviyesi kullanma esasına dayanan CFAR yönteminin kullanılması ile yanlış alarm olasılığı belli bir seviyede tutulabilmektedir. Elektronik devrelerde sinyaller işlenirken gürültü, Eşitlik (6.2) ile verilen ısı gürültünün de etkisiyle artmaktadır.

$$\text{Isıl Gürültü} = kTB_n \quad (6.2)$$

Bir elektronik düzeneğin gürültüye olan katkısı, gürültü kaybı faktörü (F_n) ile ölçülür ve Eşitlik (6.3) ile tanımlanır.

$$F_n = \frac{\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{Giriş}}}{\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{Çıkış}}} \quad (6.3)$$

İdeal bir devrenin gürültü kaybı faktörü, $F_n = 1$ 'dir. Pratikte ise F_n bu değerden daha büyüktür. Eşitlik (6.4) ile gösterilen $(S/N)_{\min}$ değeri, belirlenen yanlış alarm ve tespit olasılığına göre ihtiyaç duyulan en düşük sinyal – gürültü oranı (SNR: Signal to Noise Ratio) değeridir.

$$S_{\min} = kT_0 B_n F_n \left(\frac{S_{\text{Çıkış}}}{N_{\text{Çıkış}}}\right)_{\min} \quad R_{\max} = \left(\frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 kT_0 B_n F_n \left(\frac{S}{N}\right)_{\min}}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (6.4)$$

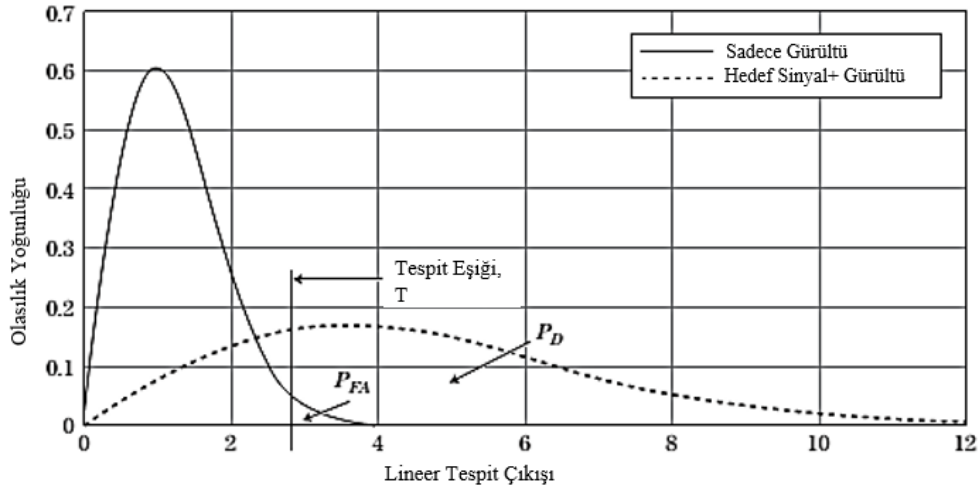
Bu denklemden, radar alıcısında tespit edilebilecek en düşük SNR düştükçe radar menzilin arttığı görülebilir. Aynı zamanda radar alıcı devrelerinden oluşan gürültü kaybı faktörünün radar menzilin düşürdüğü de görülmektedir (Skolnik, 2002)

Yanlış alarm ve tespit olasılığı bir karar verme mekanizması olarak değerlendirilebilir. Düşük tespit olasılığı ile çalışmak ortamdaki bir tehdidin görülmemesine neden olabilir. Ortamda olmayan bir hedefin varmış gibi gösterilmesi yani yanlış alarm ise kısa vadede bir tehlike teşkil etmez iken kullanıcıların kullandıkları radar sistemine güvenlerinin azalmasına neden olur.

6.1.2. Yanlış alarm olasılığı

Tespit olasılığı ve yanlış alarm olasılığı hem sinyalin hem de gürültünün dağılımlarının bir sonucudur. Yanlış alarm olasılığı, ortamda hedef yokken gürültünün ortaya koyduğu sinyal seviyesinin radar eşik değerinden yüksek olma olasılığıdır. İdealde, $P_{fa} = 0$ olması beklenir. Pratikte ise P_{fa} 'nın 10^{-2} , 10^{-4} , 10^{-6} gibi çok düşük değerlerde olması amaçlanır.

Yanlış alarm olasılığı yani gürültünün radarın eşik seviyesini geçme olasılığı, Şekil 6.2'deki gürültü eğrisinin eşik değerini geçen kısmının alanının eğrinin altında kalan tüm alana oranıdır.



Şekil 6.2 Gürültü ile sinyal gürültü toplamı dağılımları (Richards vd.'den, 2010)

6.1.3. Hedef tespit olasılığı

Hedef tespit olasılığı, hedeften gelen sinyalin radar eşik değerinden yüksek olması olasılığı yani bir hedeften yansıyan darbenin doğru olarak tespit edilme olasılığıdır. İdeal

durumda hedeften yansıyan tüm darbelerin tespiti gerektiğinden, $P_d = 1$ olması, pratikte ise P_d 'nin 0,9 veya 0,95 gibi yüksek olasılık değerleri alması beklenir.

Radar için belirlenen eşik seviyesi yükseltirse yanlış alarm olasılığı azalır, ancak tespit olasılığı da düşmektedir. Hedef tespiti için belirlenen eşik değerinin büyük olması durumunda yanlış alarmla birlikte tespit olasılığının da azaldığı görülmektedir (Bkz. Şekil 6.2).

P_d değeri sabit tutulmaya çalışılırken, SNR düştüğünde eşik değeri de azaltılacağından, P_{fa} değerinin artması kaçınılmaz olacaktır. SNR düştüğünde P_d 'nin değeri sabit tutulmaya çalışılırsa eşik değeri azaltılacağından, P_{fa} değerinin artması kaçınılmaz olacaktır. SNR sabit tutulduğunda yüksek tespit olasılığı yalnızca yanlış alarm oranının yükselmesiyle mümkün olur. Gürültü artarsa, P_d 'nin sabit tutulması için P_{fa} 'nin artması kaçınılmazdır. P_{fa} sabit tutulmak isteniyorsa P_d düşecektir, yani hedefin tespit edilememesi ihtimali artacaktır.

6.2. Radar Kesit Alanı

Radar kesit alanı kısaca hedefin radar sinyallerini yansıtıcılığı olarak tanımlanabilir. Hedefin geometrisi ve üzerine gelen sinyalleri radar yönünde ne ölçüde yansıttığı önemli değişkenlerdir. Ayrıca radarın bakış açısı ve gönderdiği sinyalin frekansı ve polarizasyonu RKA değerini etkileyen faktörlerdir. Hedefin geometrik alanı, yansıtıcılığı ve yönlendiriciliği bir araya getirilerek RKA kavramını oluştururlar. RKA Eşitlik 6.5 ile tanımlanır.

$$\sigma = \text{Geometrik Kesit Alan} \times \text{Yansıtıcılık Oranı} \times \text{Yönlendirme Oranı} \quad (6.5)$$

Hedefin geometrik kesit alanı, radarın yaydığı elektromanyetik sinyalleri karşılayan geometrik alanıdır ve hedefin geometrisine bağlı olup yanca ve yükseliş açısına göre değişir. Hedefin yansıtıcılığı, hedefin elektromanyetik özelliklerine bağlıdır. Yansıtıcılık oranı, hedefin aldığı gücün yansıttığı güce oranıdır. Bir hedefin yönlendiriciliği ise, hedefin, üzerine gelen sinyalleri radar yönüne hangi oranda yansıttığını gösterir. Yansıtıcılık ve

yönlendirme oranları kullanılarak RKA formülü, Eşitlik 6.6 ile bulunur. RKA üzerine düşen sinyalleri yüzde yüz olarak ve her yöne eşit yansıtan bir hedef olarak modellenebilmektedir.

$$\sigma = A \times \frac{P_Y}{A \times P_R} \times \frac{P_{RYY}}{P_Y} \times 4\pi = 4\pi \frac{P_{RYY}}{P_R} \quad (6.6)$$

Hava platformlarını radarların tespit etmesini engellemeye yönelik yapılan önemli çalışmalardan biri de platformları sinyal soğurucu malzeme ile kaplamak ve bu yolla yansıtıcılığı azaltmaktır. Ayrıca radarın gönderdiği sinyalin frekansı ve polarizasyon tipi de hedefin RKA'sında önemli değişikliklere sebep olur. Hedefi oluşturan her parça, frekansa bağlı olarak toplam RKA'yı azaltabilir veya artırabilir. Radardan gönderilen sinyalin polarizasyonu ile hedeften yansıyan sinyalin polarizasyonu farklılıklar gösterebilmektedir. Radardan yayınlanan sinyalin polarizasyonu dik iken dönen sinyalde hem dikey hem de yatay polarizasyon görülebilmektedir. Çeşitli hedeflerin ortalama RKA'ları Çizelge 6.1 ile verilmiştir.

Çizelge 6.1 Çeşitli hedeflerin mikrodalga frekanslarındaki ortalama RKA'ları (Skolnik, 2002)

Hedef	RKA, m ²	RKA, dBsm
Klasik Kanatlı Füze	0,5	-3
Küçük Tek Motorlu Uçak	1	0
Küçük Jet Uçak	2	3
Büyük Jet Uçak	6	8
Orta Bombardıman Uçağı	20	13
Büyük Bombardıman Uçağı	40	16
Jumbo Jet	100	20
Küçük Tekne	2	3
Büyük Tekne	10	10
Büyük Gemi	10,000	40
Kamyonet	200	23
Otomobil	100	20
Bisiklet	2	3
İnsan	1	0
Kuş	0,01	-20

6.3. Çevresel Yankılar

Radar alıcılarında hedef sinyallerinden farklı olarak çevreden yansıyan sinyallere çevresel yankı denir. Tanımdan da anlaşılacağı gibi radar bir hedeften veri toplarken, istenmeyen bir durum olmasına rağmen, sadece hedeften gelen sinyalleri değil, aynı zamanda hedefin çevresindeki nesnelere yansıyan sinyalleri de algılayabilir. Hava darbe doppler radarları çoğunlukla havadan gözetleme yapılan ortamlarda çalıştığından kara ve deniz kaynaklı çevresel yankıların hedef tespitine önemli derecede etkisi vardır. PRF'in sabit kaldığı durumlarda çevresel yankı spektrumu uçağın irtifası, hızı ve hüzme yönü gibi parametrelerden büyük oranda etkilenir (Ming vd., 2006).

Gürültü karakteristiğine benzeyen çevresel yankılar, rasgele dağılımlar kullanılarak modellenilebilir. Bunun nedeni, toplam çevresel yankıya neden olan, birbirinden bağımsız birimlerden dönen yansımalar rasgele genlik ve faz dağılımlarında olmalarıdır. Teker teker incelendiğinde çevresel yankılardan kaynaklanan sinyaller de hedeften dönen sinyaller gibi tek bir RKA ile ifade edilebilir.

Çevresel yankılar yüzey çevresel ve hacim çevresel yankılar olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Kara ve denizden kaynaklanan istenmeyen yansımalara yüzey çevresel yankılar denirken, havada bir hacim içerisine yayılmış bazı nesnelere kaynaklanan çevresel yankı sinyallerine hacim çevresel yankı adı verilir. Havadaki bu nesnelere bazen kuş veya böcek sürüsü olurken bazen de yağmur damlacıkları olabilmektedir. Ayrıca elektronik taarruz amacıyla hava platformlarından atılan küçük metal parçacıklarının oluşturduğu chaff bulutu da hacim çevresel yankılara verilebilecek en iyi örneklerdendir. Radar anten paterninin ana lobu tarafından algılanan sinyaller radar huzmesinin ana lobu tarafından algılanan çevresel yankılar ile yan loblar tarafından algılanan çevresel yankılar da farklı karakteristiklere sahiptir.

Yüzey çevresel yankıların radar kesit alanı Eşitlik 6.7, hacim çevresel yankıların radar kesit alanı ise Eşitlik 6.8 ile ifade edilebilir.

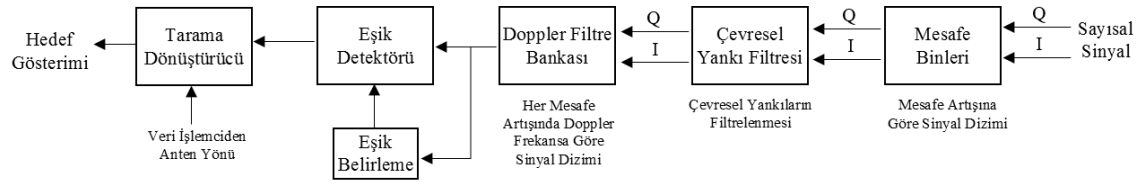
$$\sigma_{sc} = \sigma^0 A_c \quad (6.7)$$

$$\sigma_{vc} = hV_c \quad (6.8)$$

Radarin çıkış gücü arttıkça hem hedeften dönen sinyal şiddetinin hem de çevresel yankılardan oluşan gürültü seviyesinin aynı oranda artmasından dolayı radarın çıkış gücünün artırılması hedefin tespit mesafesini değiştirmemektedir. σ^0 ve h bakış açısına, kullanılan radar sinyalinin frekansı ile polarizasyonuna ve yüzey dokusuna bağlıdır. Yüzeysel ve hacimsel yansıtıcılık katsayıları çoğu zaman deneysel olarak belirlenen katsayılardır. Çevresel yankılar ile ilgili temel problem, radar parametrelerinde, hedefin bulunabileceği bölgede çevresel yankıyı en düşük seviyelerde tutacak ayarları yapmaktır (Goetz ve Albright, 2009).

6.4. Sinyal İşleme Teknikleri

Darbe doppler radarında sinyal işleme yapısı temel olarak Şekil 6.3'te gösterildiği gibidir. Sinyal işlemciye gelen hedeften dönen sinyaller mesafeye göre dizilir ve mesafe kutusuna kaydedilir. Çevresel yankılar filtrelendikten sonra her mesafe kutusundaki sinyaller doppler frekanslarına göre dizilir.

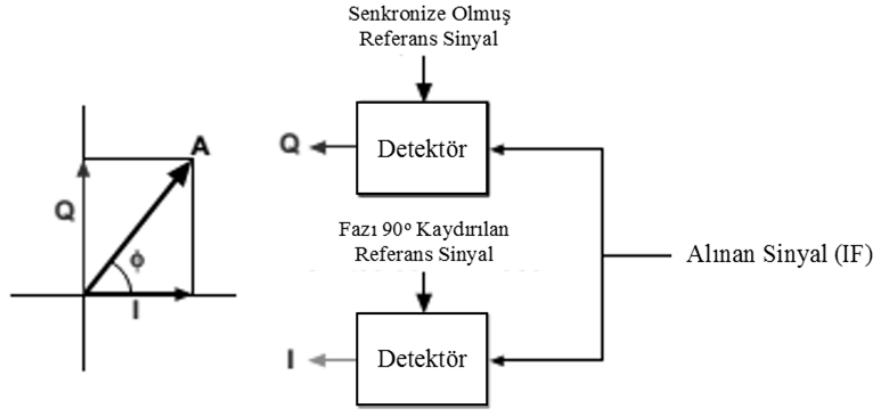


Şekil 6.3 Sinyal işleme hedef tespit yapısı (Stimson'dan, 1998)

Hedeften dönen sinyaller, her bir mesafe kutusu için ayrı ayrı değerlendirilir. Faz uyumlu darbe toplama süresi boyunca her mesafe için elde edilen sinyaller, doppler frekansının ayrıştırılması için doppler filtre bankasına gönderilir ya da FFT kullanılarak darbe toplama süresi boyunca toplanan sinyallerin doppler frekans spektrumu elde edilir.

Doppler radarını, diğer radarlardan ayıran temel özellik, gelen sinyalleri faz uyumlu bir modda işlemesidir. Şekil 6.4'te gösterilen video detektör, doppler frekans kaymalarını tespit edebilen bir detektördür. In-phase (I) ve quadrature (Q) olmak üzere iki tane iki kutuplu video çıkış sinyali üretilir. I ve Q sinyallerinin örneklerinin vektör toplamları örneklenmiş sinyalin enerjisi ile orantılıdır. Aralarındaki oran sinyalin fazını gösterir. Örnekler ADC ile sayısala çevrilir ve sinyal işlemciye aktarılır (Stimson, 1998).

Sinyal işlemci, gelen sayısal verileri geliş zamanlarına, dolayısı ile menzillerine göre, menzil kutusu olarak ifade edilen menzil aralıklarına sıralar. Aynı zamanda çevresel yankı gibi istenmeyen sinyalleri doppler frekanslarına bakarak filtreler. Her bir menzil kutusu için oluşturulan ve dar bant filtrelerden oluşan filtre bankalarını kullanarak işlemci aynı hedeften yansıyan ve aynı doppler frekansa sahip ekoların enerjilerini birleştirir. Böylelikle hedeften dönen sinyalin tespitine engel teşkil eden gürültü ve çevresel yankı etkisini azaltır.



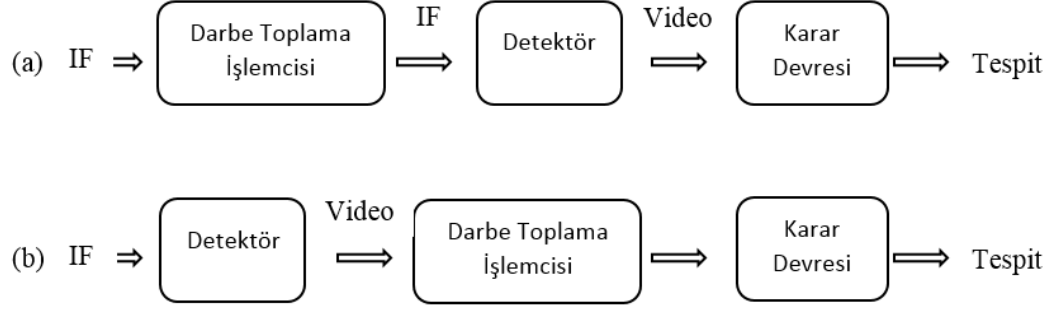
Şekil 6.4 Senkronize detektör

6.4.1. Darbe toplama

Radar performansını artırmak amacıyla, hedef tespitine karar vermek için hedeften dönen ardışık birden fazla sinyali birlikte kullanma yöntemine darbe toplama denir. Darbe toplama, algılama öncesinde ya da algılama sonrasında yapılabilir.

Eğer algılama öncesinde birden fazla sinyal vektörel olarak toplanacak olursa sinyaller arasında faz farkı olmadığı için sinyallerin toplam genliği büyürken gürültünün toplam genliği, gürültünün istatistiksel dağılımından dolayı fazla büyümeyebilir. Çünkü gürültünün oluşturduğu sinyaller arasında faz farkı vardır. Bu durumda SNR çok artacaktır. Genliği gürültüden çok düşük sinyallerin algılanması bile darbe toplama yöntemiyle mümkün olabilir. Sezimleme öncesi darbe toplama, ancak vericinin faz uyumlu darbe üretmesiyle mümkündür (Şekil 6.5).

Sinyal toplama süresinde elde edilen hedeften dönen toplam sinyal seviyesi, sinyal toplama süresi ne kadar uzun ise o oranda artmaktadır. Böylece sinyal toplama süresi uzadıkça edeceğimiz SNR de artar.



Şekil 6.5 a) Sezimleme öncesi faz uyumlu b) sezimleme sonrası faz uyumsuz darbe toplama

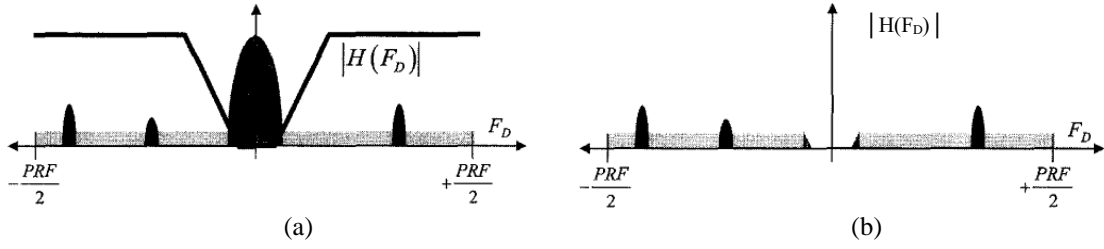
Sezimleme sonrasında darbe toplama yöntemi kullanılırsa faz bilgisi kaybolduğundan, gürültü sinyalleri, sezimleme öncesinde olduğu gibi birbirini yok etme eğiliminde olmaz. Sinyalin genliği artarken gürültünün genliği de artar. Sezimleme sonrası darbe toplama, daha çok eski teknoloji faz uyumsuz radarlarda kullanılır.

6.4.2. MTI Tekniği

Bir radar belirli hedefleri tespit etmek için kullanılırken hedeflerden farklı olarak hedefin çevresinden yansıyan ve çevresel yankı olarak adlandırılan sinyalleri de tespit edebilir. Çevresel yankılar hedefin tespit edilmesini zorlaştıran en önemli etken olduğundan bu sinyallerin nasıl engelleneceği konusu radar tasarımında göz önüne alınan en önemli problemlerdendir. Çevresel yankıları engelleme yöntemleri olarak; çevresel yankıların radar antenine ulaşmaması için fiziksel tedbirler almak, radar anteninin hüzmeye paternini şekillendirerek veya farklı polarizasyon teknikleri kullanarak SCR oranını artırmak, radarın çözünürlük hücrelerini küçülterek çevresel yankı enerjisini azaltmak, CFAR, uyarlamalı eşik veya çevresel yankı haritası kullanarak çevresel yankıyı zaman ekseninde baskılamak ve MTI kullanarak çevresel yankıyı frekans bandında baskılamak sayılabilir (Galati, 1993).

Genellikle çevresel yankıların gücü çok yüksektir ve hedeften dönen sinyallerden de daha güçlüdürler ama hedeflere oranla hızları çok daha düşük olduğundan doppler frekansı düşük kalacaktır. Bu nedenle MTI tekniği kullanılarak hareketsiz cisimlerin oluşturduğu

çevresel yankıların bastırılması yaygın olarak kullanılan bir çözümdür. MTI tekniği kullanılmayan bir radarda hedefler, çevresel yankıların içinde tespit edilemeyebilir. Çevresel yankılar düşük frekansta sinyaller olduğundan MTI tekniği ile düşük frekanstaki sinyaller bastırılır ve sadece belirli hızın üstünde seyreden hedeflerin algılanması mümkün olur.

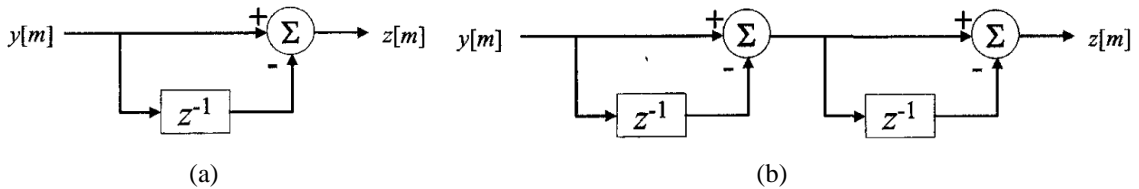


Şekil 6.6 MTI filtrelemesinin kavramsal gösterimi a) doppler spektrumu ve MTI frekans tepkisi b) filtrelemeden sonra doppler spektrumu (Richards'tan, 2005)

MTI kavramının etkisi Şekil 6.6'de gösterilmektedir. MTI işlemi oldukça basit ve matematiksel olarak da gösterişsiz olmasına karşın iyi tasarlanmış bir MTI ile sinyal - çevresel yankı oranı (SCR) oldukça iyi seviyelere, hatta bazı çevresel yankı ortamlarında 20 desibel seviyelerine getirilebilir (Richards, 2005).

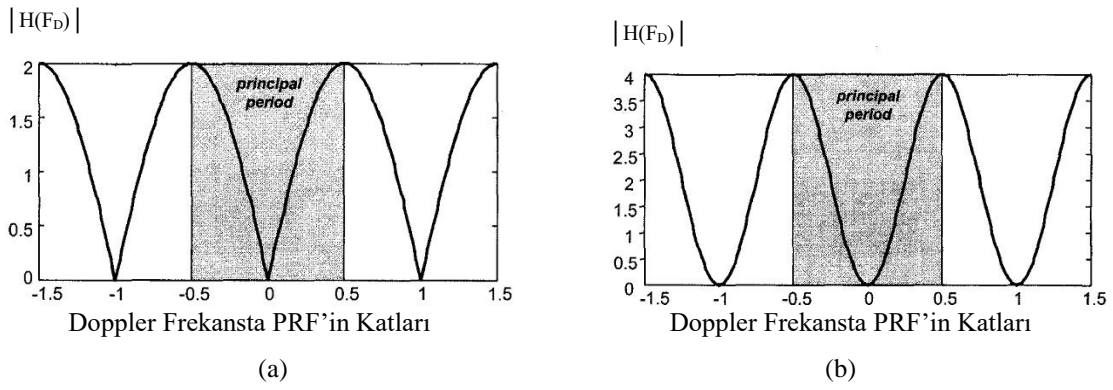
Çevresel yankıları yok etmenin en basit yolu, dönen sinyallerden ikinci sinyali birinci sinyalden çıkarmaktır. Çevresel yankı kaynaklı sinyallerin frekans, faz gibi özellikleri değişmeyeceğinden hareketsiz nesnelerin oluşturduğu sinyaller birbirinden çıkarılınca geriye sadece hareketli bir hedeften dönen sinyaller kalacaktır. Hareketli hedeflerden dönen sinyaller arasında faz değişikliği olacaktır.

Şekil 6.7 (a)'da birinci derece MTI filtresi olarak da bilinen iki gecikme hatlı Şekil 6.7 (b)'de ise üç gecikme hatlı MTI filtre yapısı gösterilmektedir.



Şekil 6.7 a) İki gecikme hatlı b) üç gecikme hatlı temel MTI filtre yapılarının blok şemaları ve transfer fonksiyonları

Şekil 6.8 (a)'da görüldüğü gibi iki gecikme hatlı MTI filtresi çevresel yankıları bastırabilmek için yeterli yüksek geçirgen filtre özelliklerine sahip değildir. Daha iyi bir sonuç elde edebilmek için iki tane iki gecikme hatlı MTI filtrenin kademeli dizilmesiyle elde edilen üç gecikme hatlı MTI filtre kullanılabilir. Şekil 6.8 (b)'de görüldüğü gibi iki gecikme hatlı yerine üç gecikme hatlı MTI kullanıldığında sıfır doppler bölgesinde daha geniş bir spektrumda çevresel yankılar bastırılmaktadır. Bu nedenle birçok uygulamada tek gecikme hatlı süzgecin sağladığı çevresel yankı bastırımı yeterli olmadığından birden fazla gecikme devresi kullanılır.



Şekil 6.8 a) İki gecikme hatlı b) üç gecikme hatlı temel MTI filtrelerinin frekans tepkileri (Richards'tan, 2005)

Bununla birlikte gecikme devre sayısı arttıkça süzgecin geçirgen bant genişliğinin azaldığı görülmektedir. Bu da hedefin tespit edilme olasılığının azalması sonucunu doğuracaktır. Böyle uygulamalarda özellikle düşük hızdaki hedeflerin MTI filtresi tarafından bastırılarak tespit edilememesi ihtimali artar. Her ne kadar MTI filtrelerinden çevresel yankıları tamamen bastırması hareketli hedeflerin de hepsinin tespitine imkân tanması beklense de gerçek hayatta çevresel yankılar tamamen bastırılamazken hedef sinyallerin bir kısmı ise bastırılabilir (Richards, 2005).

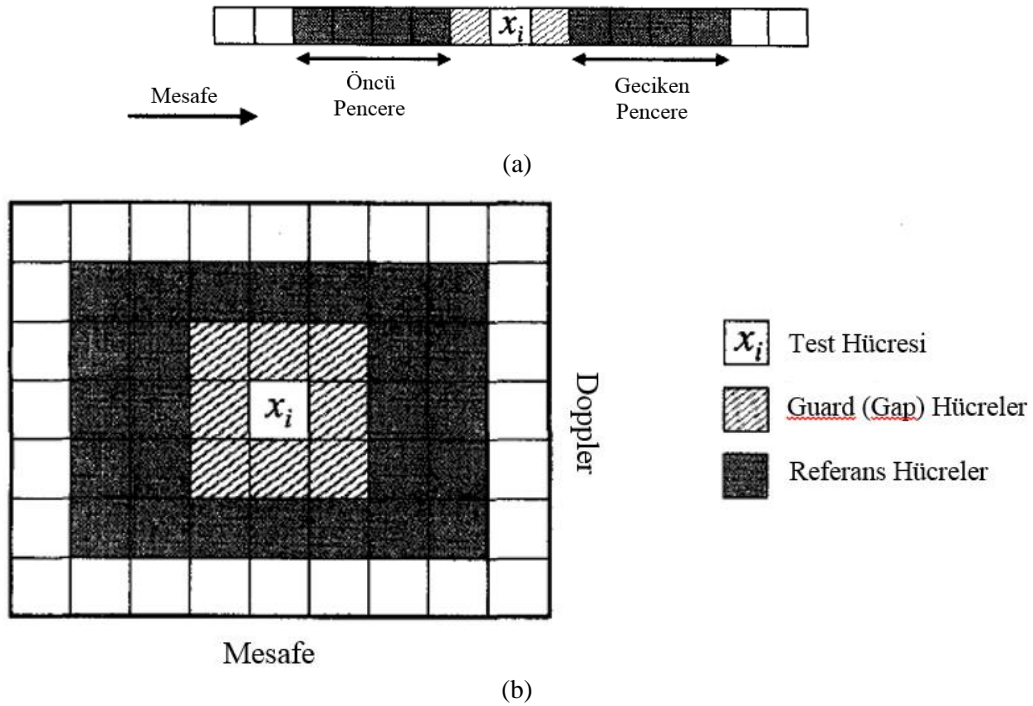
6.4.3. Sabit yanlış alarm sıklığı (CFAR)

Klasik radar hedef tespit eşik değeri belirleme prensibine göre girişim seviyesi sabit ve bilinen bir değer olarak kabul edilir. Hâlbuki pratikte girişim seviyeleri çok değişkenlik gösterebilir. Uyarlamalı eşik belirleme veya otomatik eşik belirleme olarak da bilinen

CFAR, gerçekçi girişim içeren senaryolarda, öngörülebilir hedef tespiti ve yanlış alarm davranışları sağlamak için tasarlanan teknikler kümesidir.

Hedef tespit eşiği tek bir değere ayarlanırsa ya tespit olasılığı azalacaktır ya da çevresel yankı ve girişimden dolayı yanlış alarm olasılığı artacaktır. Öngörülebilir ve tutarlı bir performans elde edebilmek için radar tasarımcıları CFAR tekniğini tercih etmektedirler. Bunu başarabilmek için mevcut girişim şiddeti eldeki verilerle gerçek zamanlı olarak tahmin edilebilmelidir. Böylelikle tespit eşiği amaçlanan P_{fa} 'yı sağlamak üzere ayarlanabilecektir.

En yaygın olarak kullanılan hücre ortalamalı CFAR (CA-CFAR) uygulamasında test hücresi, (x_i), hedefin var olup olmadığının kararının verileceği hücreyi belirtmektedir. Uygulamalarda bu test hücresi mesafe hücrelerinin tek boyutlu veri vektöründe veya mesafe doppler matrisinde seçilebilmektedir. Test hücresinin etrafında, birçok hücreden oluşan bir pencere açılır ve bu pencerenin içinde kalan sinyal seviyesinin değerlendirilmesi yapılır.



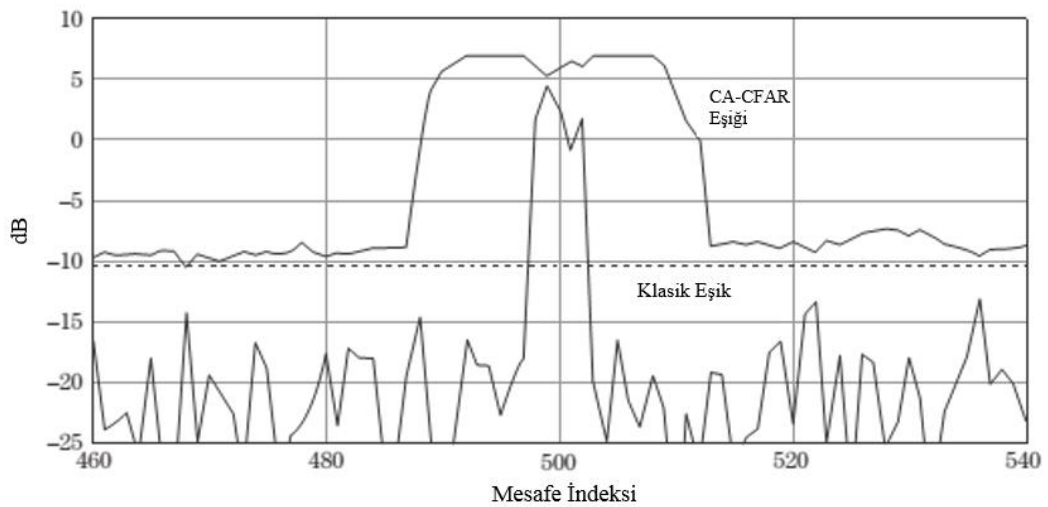
Şekil 6.9 a) Tek boyutta b) iki boyutta CFAR penceresi (Richards'tan, 2005)

Şekil 6.9'da ortalaması alınacak örneklerin nasıl seçildiğini gösteren iki örnek sunulmuştur. Şekil 6.9 (a)'da test hücresi x_i 'yi ortada tutan mesafe hücrelerinin tek boyutlu veri vektörü gösterilmektedir. İki taraflı koyu renkli hücreler test edilen hücrenin radara göre daha uzağında ve yakınında bulunan verileri temsil eder ve girişim değişkenini tahmin etmek

için ortalamaları alınır. Bu hücelere referans hücreler denir. Guard hücreler olarak adlandırılan test hücrelerinin bitişiğindeki taralı hücreler ortalamaya dâhil edilmez. Bunun sebebi test hücrelerinde hedefin bulunması durumunda bitişik hücrelerin hedeften dönen sinyalin şiddetinden etkilenme ihtimalidir. Bu durumda guard hücrelerinde hedef ve girişim hücreleri beraber bulunacağından sadece girişim hakkında bilgi veremezler. Hedeften gelen enerji girişim değişkeni hakkındaki tahmini değeri artıracaktır. Böylelikle eşik değeri çok yüksek çıkacak ve P_d beklenenden düşük çıkacaktır.

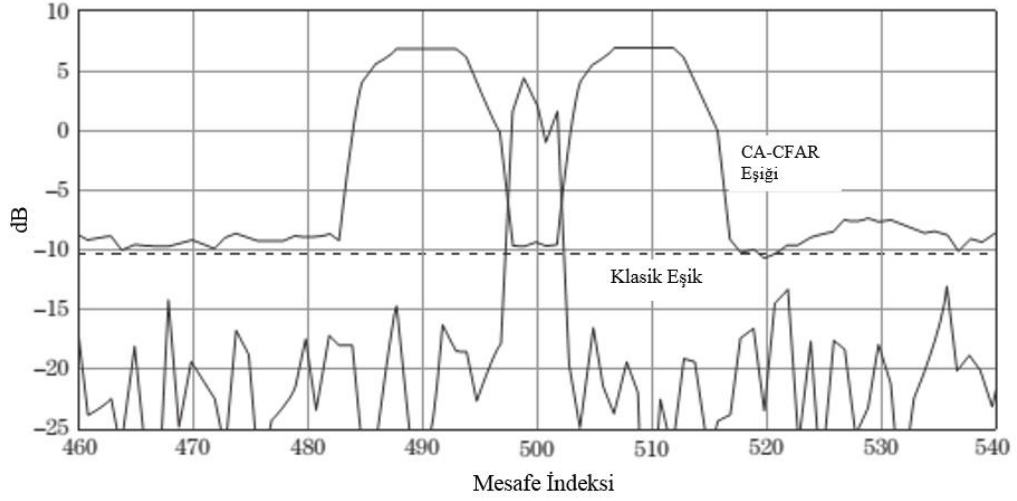
Referans hücrelerinin, guard hücrelerinin ve test hücrelerinin birleşimine CFAR penceresi denir. CFAR penceresi tüm veri penceresi boyunca her defasında bir hücre ilerlemek kaydıyla hareket ettirilir. Her pozisyonda x_i için alınan ölçümlere bakılarak bir tespit kararı verilir. Test hücrelerine uygulanan tespit eşik değeri öncü ve geciken pencereleri kapsayan ölçümlerden çıkarılır. Şekil 6.9 (b)'de CFAR tekniğinin mesafe-doppler matrisine uygulaması iki boyutlu olarak gösterilmektedir. Bu durumda CA-CFAR yalnızca belirli menzilde ve doppler hücrelerine uygulanmalıdır. Çünkü yer çevresel yankılarından dolayı dopplerde ve menzilde girişim homojen olmayan bir yapıdadır (Richards, 2005).

Şekil 6.10'da ve Şekil 6.11'de guard hücrelerinin CA-CFAR eşik değeri hesaplamasına dâhil edilmemesinin sonuçları incelenmektedir. Herhangi bir guard hücreleri belirlemeden uygulanan CA-CFAR eşik değeri Şekil 6.10'da görülmektedir. Eşik dönen hedef sinyallerinin üzerinde kalmaktadır ve hiçbir hedef tespit edilememiştir.



Şekil 6.10 Guard hücrelerinde CA-CFAR eşik değeri (Richards vd.'den, 2010)

Bu duruma kendi kendini maskelemek denilmektedir. Bu maskelemeyi bastırmak için x_i 'nin her iki tarafına da guard hücreler eklemek gerekir. Şekil 6.11'de guard hücrelerini içeren CFAR penceresi kullanarak elde edilmiş yeni eşik değerinin bir önceki şekildeki verilere uygulanması gösterilmektedir. Şekilden de açıkça anlaşılacağı gibi guard hücre uygulaması kendi kendine maskelemeyi engellemektedir.



Şekil 6.11 Guard hücreli CA-CFAR eşik (Richards vd.'den, 2010)

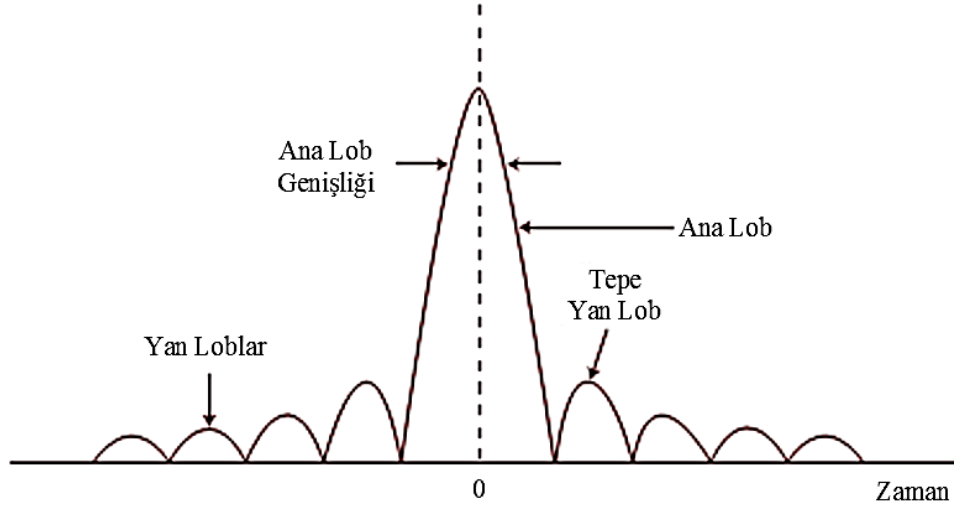
En temel anlamda CFAR tekniği, test hücresi civarındaki sinyallerin ortalamasının alınması olarak ifade edilebilir. Pencerenin uzunluğu, ortamdaki girişimin ilinti zamanına göre belirlenebilir. Çok kısa tutulduğunda, ortalamayı tam olarak doğru bulamadığımızdan eşik değeri yüksek olur ve CFAR kaybı artar. En verimli P_{fa} 'yı verebilecek pencere genişliğine dair yapılan analizler altıncı bölümde sunulmuştur.

Uyarlanabilir eşik belirlenmesinde kullanılan çarpım sabiti, hedef ve çevresel yankı sinyallerinin istatistiksel özelliklerine göre belirlenir. Çevresel yankılara rağmen yanlış alarm olasılığının düşük seviyelerde tutulması ve hedef tespitinin otomatikleştirilmesi CFAR kullanımının en önemli avantajlarıdır. Buna karşın CFAR kullanımı esnasında hedef tespit olasılığı düşeceğinden bazı hedefler kaçırılabilir. Mesafe çözünürlüğü ise belli oranda düşer. CFAR alıcısının tasarımı kolay değildir. Bu nedenle CFAR alıcısı otomatik hedef tespitinin kaçınılmaz olduğu radar türlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Richards vd., 2010).

6.4.4. Darbe sıkıştırma tekniği

İyi bir doppler çözünürlüğü elde edebilmek için uzun evre uyumlu sinyaller kullanmak gereklidir. Mesafe çözünürlüğünü iyileştirmek için ise darbe genişliğinin azaltılmasına ihtiyaç duyulmaktadır (Mozeson ve Levanon, 2004). İdealde hem uzun tespit mesafesi, hem de iyi bir mesafe çözünürlüğü istendiğinden mümkün olan en kısa darbelerin çok yüksek güçler ile gönderilmesi gerekir. Bununla birlikte yüksek güç kullanımını kısıtlayan pratikte birçok durum vardır. Bu nedenle yeteri kadar düşük PRF'lerde, uzun tespit mesafeleri elde edebilmek için mümkün olduğunda geniş darbe gönderme zorunluluğu vardır. Darbe sıkıştırma tekniği bu ikileme bir çözüm sunmaktadır. Darbe sıkıştırma tekniklerinde gerekli ortalama gücü sağlayacak kadar genişlikteki darbeler iç modülasyona tâbi tutularak gönderilir ve yansıyan sinyalin modülasyonu çözülerek sıkıştırılır. Uzun süreli darbeler kullanılarak ve darbenin içindeki taşıyıcı sinyalin frekansını veya fazını modüle ederek aynı anda hem uzun mesafe isteğini hem de yüksek hız çözünürlüğü elde etmek mümkündür.

Bir sinyalin zaman bölgesindeki genişliği frekans bölgesindeki bant genişliği ile ters orantılı olduğu için zaman bölgesindeki sıkıştırılmış sinyaller frekans bölgesinde geniş bantlara sahip olur. Uyumlu süzgecin çıkışında gözlenen sıkıştırılmış sinyalin tepe seviyesi, gelen darbenin enerjisi ile orantılıdır. Şekil 6.12'de uyumlu filtre ile filtrelenmiş, sıkıştırılmış bir sinyalin ana lobu ve yan lobları gösterilmektedir. Darbe sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılmış sinyaller frekans bölgesinde geniş bantlı, zaman bölgesinde düşük yan lobludur. Darbe sıkıştırma teknikleri, darbe içindeki taşıyıcı modüle edilerek yapılmaktadır. Modüle edilmemiş bir darbe için bant genişliği (B) ve darbe genişliği (t) çarpımı 1'dir. Sıkıştırılmış darbe de ise bu oran 10 – 100 000 arasında olabilmektedir.

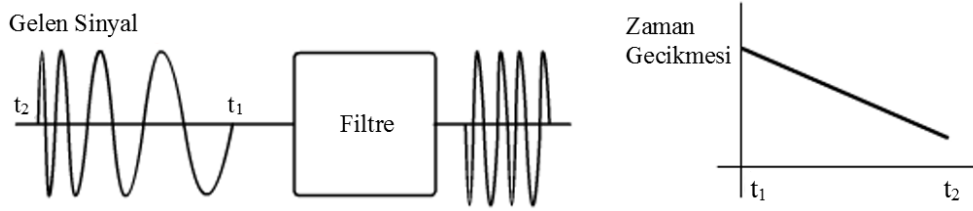


Şekil 6.12 Tipik bir uyumlu filtre tepkisi

Radar uygulamalarında öne çıkan, darbe sıkıştırma teknikleri ile sıkıştırılan sinyal tipleri, doğrusal frekans modüleli (LFM: linear frequency modulated) ve ikili faz modüleli (binary phase modulated) darbelerdir. İkili faz kodlanmış sinyallerin işlenmesi, LFM ile kodlanmış sinyallerin işlenmesinden daha karmaşıktır. Örneğin, ikili faz kodlamasında doppler etkisinden korunmak için filtre bankası kullanılırken, LFM, doppler kaymasından etkilenmez. Yine LFM'de darbe sıkıştırma için kullanılan filtre genelde analogdur. İkili faz kodlamasında ise sayısal filtreler kullanılır. Bu sebeple ikili faz kodlamasında ADC kullanıldığı için darbe sıkıştırma sisteminin frekans bandı, kullanılan ADC'nin frekans bandı ile sınırlıdır. LFM yüksek çözünürlük sağlarken, ikili faz kodlaması yüksek darbe genişliği sağlamaktadır.

6.4.4.1. Doğrusal frekans modüleli (LFM) darbeler

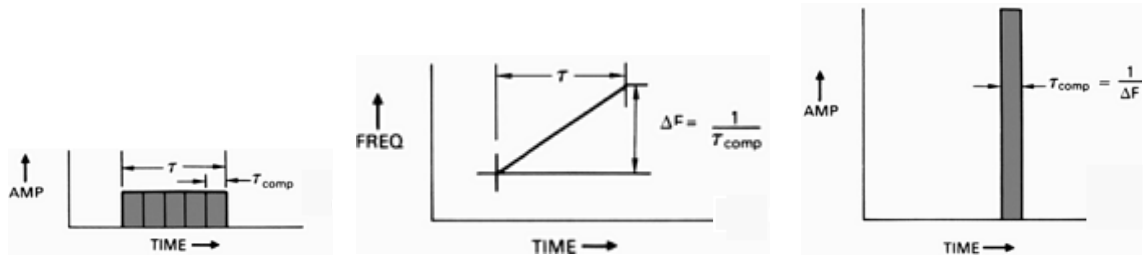
Kuş cıvıltılarına benzerliğinden dolayı İngilizce cıvıldamak anlamına gelen “chirp” kelimesi ile de isimlendirilmektedir. Doğrusal frekans modülasyonu, darbenin taşıyıcı frekansının doğrusal olarak artırılması veya azaltılması ile elde edilir. Şekil 6.13'de de görüldüğü gibi düşük frekanstaki sinyallere filtrede daha fazla gecikme uygulanır. Böylece geri dönen darbenin düşük frekansa sahip başlangıç noktası, yüksek frekansa sahip bitiş noktasına göre daha fazla gecikeceğinden filtre çıkışında ikisi de aynı frekansa sahip olurlar. Sonuç olarak filtre çıkışındaki sinyale bakılacak olursa genişliğinde belirgin bir artış, genişliğinde de bir daralma elde edilmiş olur.



Şekil 6.13 Doğrusal frekans modüleli darbeler

Birbirlerine çok yakın uzaklıktaki iki hedef arasındaki mesafenin darbe genişliğine oranla daha küçük olduğu durumlarda hedeflerden dönen sinyaller ayırt edilemez bir biçimde birbirlerine girerler. Böyle durumlarda mesafe çözünürlüğünün iyileştirilmesi ve dolayısı ile dönen sinyallerin ayırt edilebilmesi için darbe sıkıştırma yöntemleri çok kullanışlıdır.

Alınan darbelerin sıkıştırılma oranına darbe sıkıştırma oranı denir. Yani darbenin sıkıştırılmadan önceki genişliğinin (PW), sıkıştırıldıktan sonraki genişliğine (PW_{comp}) oranı darbe sıkıştırma oranını verir. Şekil 6.14 ile sıkıştırılmamış darbe genişliği, chirp modülasyonu ve sıkıştırılmış darbe genişliği arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 6.14 Sıkıştırılmamış darbe genişliği, chirp modülasyonu ve sıkıştırılmış darbe genişliği (Stimson'dan, 1998)

Darbe sıkıştırma oranı Eşitlik 6.9 ile, darbe sıkıştırma sonrasında elde edilen darbe genişliği ise 6.10 ile ifade edilmektedir.

$$\text{Darbe Sıkıştırma Oranı} = \frac{PW}{PW_{comp}} \quad (6.9)$$

$$PW_{comp} = \frac{1}{\Delta F} \quad (6.10)$$

Monostatik radarlarda iki nokta hedefin mesafede birbirlerinden ayırt edebilecekleri en küçük uzaklığı ifade eden mesafe çözünürlüğü Eşitlik 6.11 ile ifade edilmektedir.

$$\delta R = \frac{cPW}{2} \quad (6.11)$$

Darbe sıkıştırma işleminden sonra ise teorik olarak beklenen yeni mesafe çözünürlüğü ise Eşitlik 6.12 ile verilmiştir. Ancak pratikte ise bu mesafe çözünürlüğünün Eşitlik 6.12’de elde edilen çözünürlüğün iki veya üç katı olması beklenmektedir.

$$\delta R = \frac{cPW_{comp}}{2} = \frac{c}{2\Delta F} \quad (6.12)$$

Doğrusal frekans modülasyonu ile çok yüksek sıkıştırma oranlarına ulaşılabilir. Bununla birlikte doğrusal frekans modülasyonu diğer sıkıştırma tekniklerine nispeten daha basit bir tekniktir. Darbenin alıcıya gelme zamanına veya darbenin kesin frekansına bakılmaksızın filtreden aynı sıkıştırma oranı uygulanarak eşit olarak geçirilmektedir.

Doğrusal frekans modülasyonundaki temel kısıt ise mesafe ve doppler frekansı arasındaki oldukça küçük sayılabilecek belirsizliktir. Eğer bir darbenin frekansı pozitif bir doppler kayması ile artırılmış ise başka bir kaymanın olmadığı durumlarda darbe chirp filtresinden daha kısa bir sürede çıkacaktır. Radarda bu farkın doppler kaymasından mı yoksa az bir mesafe uzaktaki bir hedeften yansıyan sinyal mi olduğu anlaşılabilir. Ancak tipik olarak karşılaşılan doppler kaymaları, iletilen her bir darbe frekansındaki artıştan (ΔF) çok daha düşük olduğundan belirsizlik genellikle bir problem teşkil etmez (Stimson, 1998).

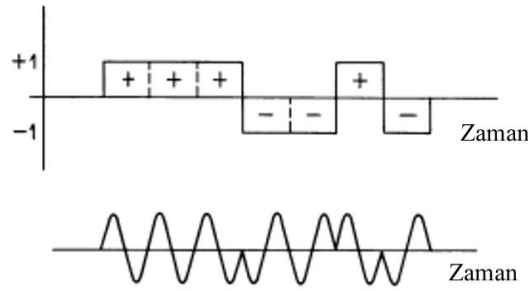
6.4.4.2. Faz modüleli darbeler

En fazla kullanılan darbe sıkıştırma yöntemlerinden biri de faz modüleli darbeler kullanmaktır. Faz modüleli darbeler sabit radar frekansına sahiptirler ama darbe uzunluğu içinde belirlenen N tane sabit değerde fazın anahtarlanması ile elde edilirler. Böyle bir darbe, Eşitlik 6.13 ile gösterildiği gibi frekansları eşit ama fazları farklı N tane bitişik alt darbenin τ_c süresince biriktirilmesi olarak modellenilebilir.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n(t - n\tau_c) \quad (6.13)$$

$$x_n(t) = \begin{cases} \exp(j\phi_n) & 0 \leq t \leq \tau_c \\ 0 & \text{diğer} \end{cases}$$

Faz modüleli sinyaller, ikili faz modüleli ve çok fazlı olmak üzere ikiye ayrılır. İkili fazda, fazın durumu için sadece iki seçenek vardır (Şekil 6.15). Çok fazlıda ise ikiden daha fazla durum vardır. Her ikisi için de çeşitli alt kategoriler bulunmaktadır.



Şekil 6.15 İkili faz modülasyonu (Skolnik'ten, 2002)

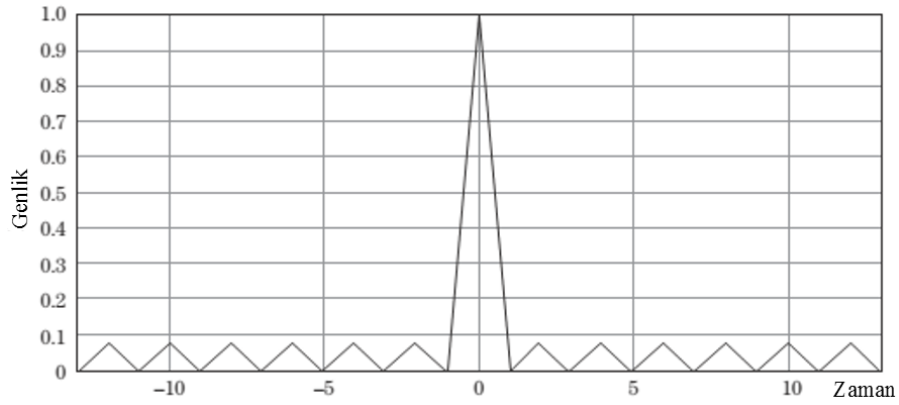
İkili faz modülasyonunun alt kategorileri olarak başlıca Barker kodlarından ve sözde rastgele kodlardan bahsedilebilir. Uzunluğu N olan bir ikili kodda tepe seviyesinin en yüksek yan lob seviyesine oranı N ise bu kod Barker kodu olarak adlandırılır. Barker kodlarının özelliği sadece tek bir noktada tepe yapması ve yan lob seviyesini eşit tutmasıdır. Her uzunlukta Barker kodu yoktur. Bilinen Barker kodlarının listesi ve bu kodlara karşılık gelen tepe yan lob oranları Çizelge 6.2 ile gösterilmiştir.

Çizelge 6.2 Bilinen Barker kodlarının bir listesi (Richards vd.'den 2010)

Kod Uzunluğu	Kod Dizini	Tepe Yan lob Seviyesi, dB
2	+-, ++	-6,0
3	++-	-9,5
4	++-+, +++-	-12,0
5	+++++	-14,0
7	++++-+-	-16,9
11	++++-+-+--	-20,8
13	+++++--+-+--	-22,3

Barker kodları içerisindeki + ve - işaretleri kendi aralarında değiştirilebilir. Örneğin (+ + -) kodu (- - +) ile değiştirilebilir. Aynı şekilde basamakların yerleri ters çevrilebilir. Örneğin (++-) kodu (-++) kodu ile değiştirilebilir. Bu kodlar birbirlerini tamamlayıcı kodlardır. Gecikme hattında (-) işaretli kanallarda faz ters çevrilerek çıktı elde edilir.

En uzun Barker kodu 13 basamaklıdır. Şekil 6.16'da 13 basamaklı Barker kodu uygulaması görülmektedir. Yan lob bastırımı $1/N$ ile darbe sıkıştırma oranı ise N ile orantılıdır. 13'ten daha yüksek bir darbe sıkıştırma oranı istendiğinde yine Barker kodları kullanılarak kombine Barker kodları oluşturulabilir. Ancak kombine Barker kodları karakteristik Barker kodu özelliklere sahip olmayacaklardır. Bu nedenle yüksek darbe sıkıştırma oranları istendiğinde genellikle rasgele kodlar kullanılır.



Şekil 6.16 13 Basamaklı Barker kodu uygulaması (Richards vd.'den 2010)

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Havadan havaya darbe doppler radarların hedef tespit performansının modellenmesi karmaşık bir konudur ve bu konu açık literatürde görece az yer almaktadır (Kingham vd., 1993). Bu tezde matlab programında hazırlanan darbe doppler radar benzetimi ile 5. bölümde yer verilen radarlarda hedef tespitine etki eden faktörler simüle edilmiştir. Benzetim ile darbe doppler radarın hedef tespit süreci gerçekçi bir şekilde aktarılmıştır. Öncelikle belirsizliğin olmadığı durumlarda darbe doppler radarın MTI, CFAR ve darbe sıkıştırma tekniklerinin hedef tespit performansına etkileri incelenmiştir. Sonraki bölümde ise belirsizlik içeren durumlarda, çoklu hedef takibinde, darbe doppler radarın performans analizi yapılmıştır. Bu analizler yapılırken darbe doppler radarlarda gerçekleşen hedef tespit süreci ve bu sürece etki eden faktörlerin gerçekçi bir şekilde benzetilmesi doğru sonuçlar alabilmek için çok önemlidir.

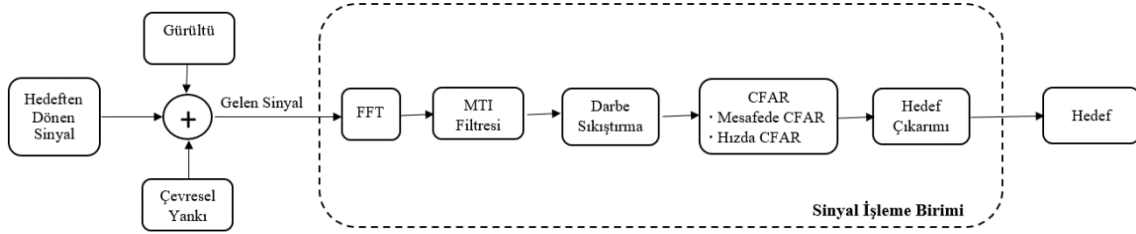
Benzetimde darbe doppler radarın çalışma parametreleri seçilebilmektedir. Bu parametreler radarın çalıştığı taşıyıcı frekans, PRI, PW, chirp BW, darbe sayısı ve örnekleme oranıdır. Aynı şekilde farklı CFAR parametreleri ile darbe doppler radarın hedef tespit performansını analiz edebilmek için CFAR pencere genişliği, guard hücre sayısı ve eşik katsayısı da kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Radarın çalışma parametreleri belirlendikten sonra analiz edilecek olan hedeflerin bazı özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla hedefe veya hedeflere ait mesafe, hız ve SNR değerleri kullanıcı tarafından girilir. Aynı anda analiz edilebilecek hedef sayısında herhangi bir sınırlama getirilmemiştir.

SNR büyük olursa gürültünün genliğine oranla hedeften dönen sinyalin gücü daha büyük olacağı için radar hedefi daha kolay tespit eder. Yani SNR'nin artması radarın hedefi tespit edebilme yeteneğini de artırır. Radar tarafından üretilen sinyalin gücünde, verici anteninden gönderildiği andan itibaren hedefe çarpıp alıcı anten tarafından alınana kadar çevresel koşullardan ötürü önemli oranda kayıp olur. Bununla birlikte hedeften dönen sinyale ortamdaki gürültünün ve çevresel yankıların eklenmesi kaçınılmazdır. Benzetim ortamında bu verilerin de yansıtılması önemli bulunmuştur. Bu amaçla hedefe ait bir SNR değerinin kullanıcı tarafından girilmesi istenmektedir. SNR'yi etkileyen başlıca faktörler olarak radar

verici gücü, atmosferik kayıplar, hedefin RKA'sı ve ortamdaki gürültü sayılabilir. Benzetimde ortamdaki gürültü oluşturulmakta, kullanıcıdan radarın gücünü ve hedefin RKA'sını göz önünde bulundurarak SNR değerini belirlemesi beklenmektedir.

7.1. Belirsizliğin Olmadığı Durumlarda Sinyal İşleme

Bu bölümde mesafede ve dopplerde belirsiz alana girilmeden, belirli bölgede hedefin tespitine yönelik algoritmalar koşturulmaktadır. Hedeflerin mesafe ve hız değerleri PRI ve PRF parametrelerine bağlı ortaya çıkan en uzun belirli mesafenin ve en yüksek belirli hız değerlerinin altında seçilerek analizler yapılmıştır.



Şekil 7.1 Sinyal işleme blok şeması

Benzetimde sırasıyla yapılan işlem adımları Şekil 7.1 ile gösterilmiştir. Öncelikle girilen parametrelere göre hedeften dönen radar sinyali oluşturulur. Rastgele oluşturulan gürültü ve ayrıca oluşturulan çevresel yankı sinyalleri dönen sinyale eklenir. Bu aşamadan sonra radar alıcısında gerçekleştirilen radar sinyal işleme yöntemleri ile hedef ya da hedefler tespit edilir.

Hedef tespit sürecindeki işlem adımları analiz edilirken Çizelge 7.1 ile gösterilen hedef seti kullanılmıştır.

Çizelge 7.1 Hedef seti

Hedef No	Mesafe (km)	Hız (m/s)	SNR
1	2	80	0
2	4.5	100	-2
3	3	-90	0

Radarın varsayılan parametreleri olarak ise;

Radar Frekansı = 10 GHz,

PRI = 50 μ s,

PW = 5 μ s,

Chirp BW = 2 MHz,

Darbe Sayısı = 90,

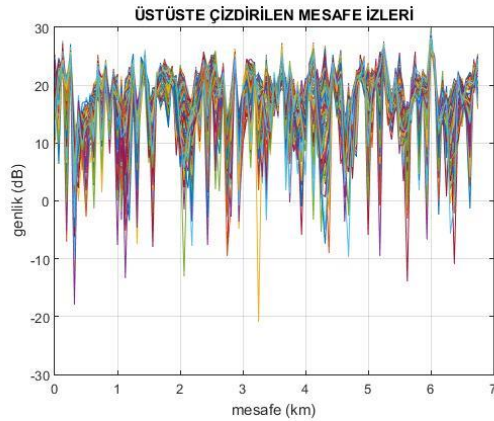
CFAR Pencere Genişliği = 18,

Guard Hücre Sayısı = 2,

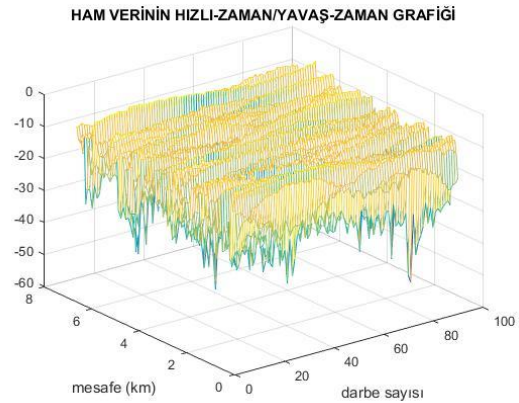
CFAR Eşik Katsayısı = 2 olarak alınmıştır.

Varsayılan PRI değeri için en yüksek belirli mesafe değeri 7.5 km, hız değeri ise 300 m/s'dir.

şekil 7.2 (a) ve (b)'de 90 darbeden alınan verilerin mesafe ekseninde oluşturdukları izlerin üst üste bindirilmesi ile elde edilen grafik ve bu verinin hızlı-zaman/yavaş-zaman eksenlerinde çizdirilen mesh grafiği gösterilmektedir. Her iki şekilde de, ne mesafede ne de dopplerde hedefi işaret eden belirgin bir tepe değeri görülmemektedir.



(a)

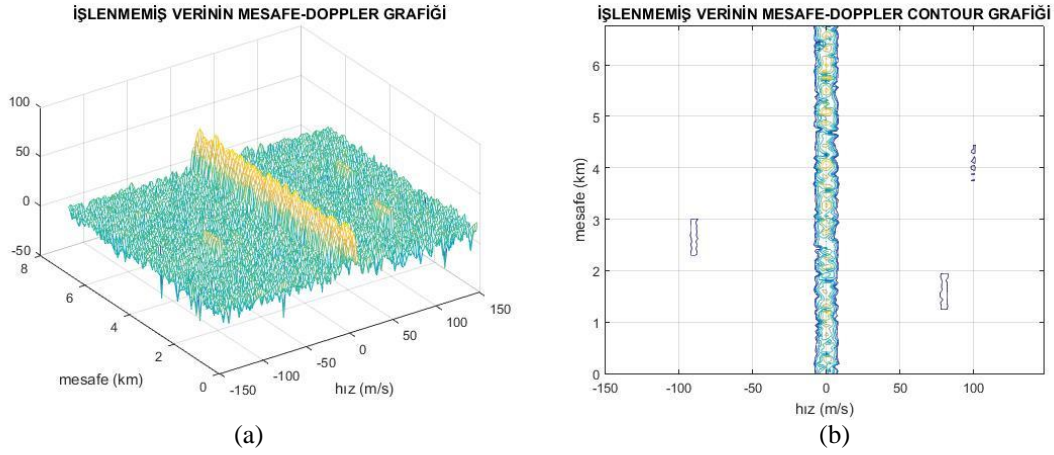


(b)

şekil 7.2 a) 90 Darbelik verinin mesafe ekseninde üst üste çizdirilmesi b) Ham verinin hızlı-zaman/yavaş-zaman grafiği

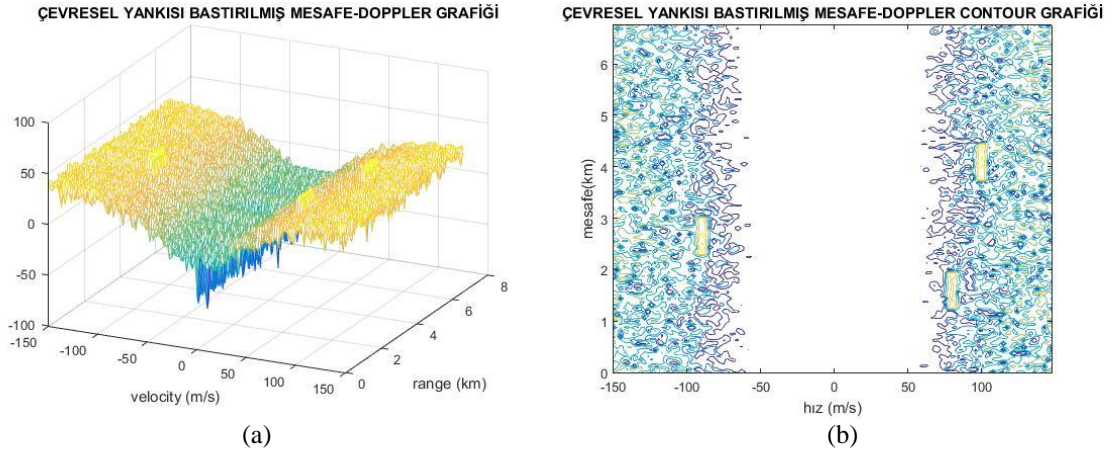
Aynı veriyi kullanarak, hızlı-zaman/yavaş-zaman matrisinin yavaş-zaman yönünde dönüştürülmesiyle elde edilen mesafe-doppler grafiği şekil 7.3 (a)'da, bu verinin contour biçimindeki grafiği ise şekil 7.3 (b)'de gösterilmektedir. Geleneksel bir darbe doppler radar

işlemcisi 128 nokta FFT doppler işlemci kullanır (Wang vd., 2002). Benzetimde de iyi bir doppler çözünürlüğü elde edebilmek için 128 nokta FFT kullanılmıştır. Dopplerde yan lobları bastırmak amacıyla da tüm FFT uygulamalarında Hamming Window kullanılmıştır. Bu aşamada, bazı doppler bölgelerinde asinc fonksiyonunun olduğu fark edilebilmektedir (Bkz. Şekil 7.3(a)). Doppler çözünürlüğünü de ifade eden asinc fonksiyonunun genişliği ise darbe sayısına bağlıdır. Veri alınan darbe sayısı arttıkça doppler çözünürlüğü iyileşir. Hızın sıfıra yaklaştığı bölgelerde, tüm mesafe kutuları boyunca çevresel yankının izleri açıkça görülmektedir. Çevresel yankılar ile birlikte hedefler de fark edilebilir olmaya başlamıştır. Ancak henüz darbe sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmediğinden, her hedefin, darbe genişliğine bağlı olarak yaklaşık 0.75 km mesafe aralığına yayıldığı görülmektedir.



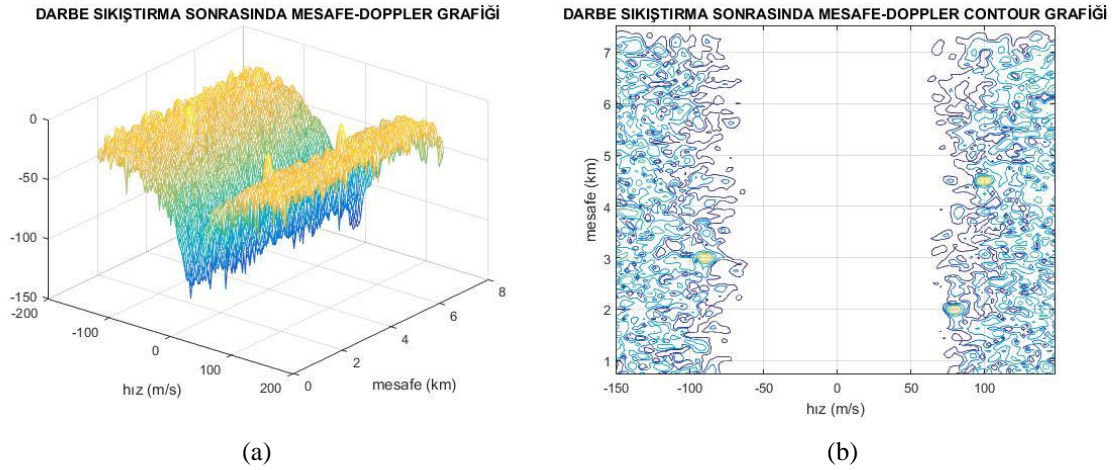
Şekil 7.3 İşlenmemiş verinin a) mesafe-doppler b) mesafe-doppler contour grafiği

Benzetimde çevresel yankı etkisini gidermek için MTI uygulaması gerçekleştirilmiştir. MTI algoritması olarak yaygın kullanımı olan dört gecikme hatlı filtre yapısı kullanılmıştır. Şekil 7.4 incelendiğinde MTI filtresi uygulanarak çevresel yankı enerjisinin başarılı bir şekilde bastırıldığı görülmektedir. Hızın sıfıra yaklaştığı bölgede MTI filtresinin etkisi çok belirgin olduğundan düşük hızda seyreden hedeflerin de MTI'dan etkilenmesi kaçınılmazdır. Bu hususun hedef tespiti üzerindeki etkileri ilerleyen bölümde incelenmektedir.



Şekil 7.4 Çevresel yankısı bastırılmış verinin a) mesafe-doppler b) mesafe-doppler contour grafiği

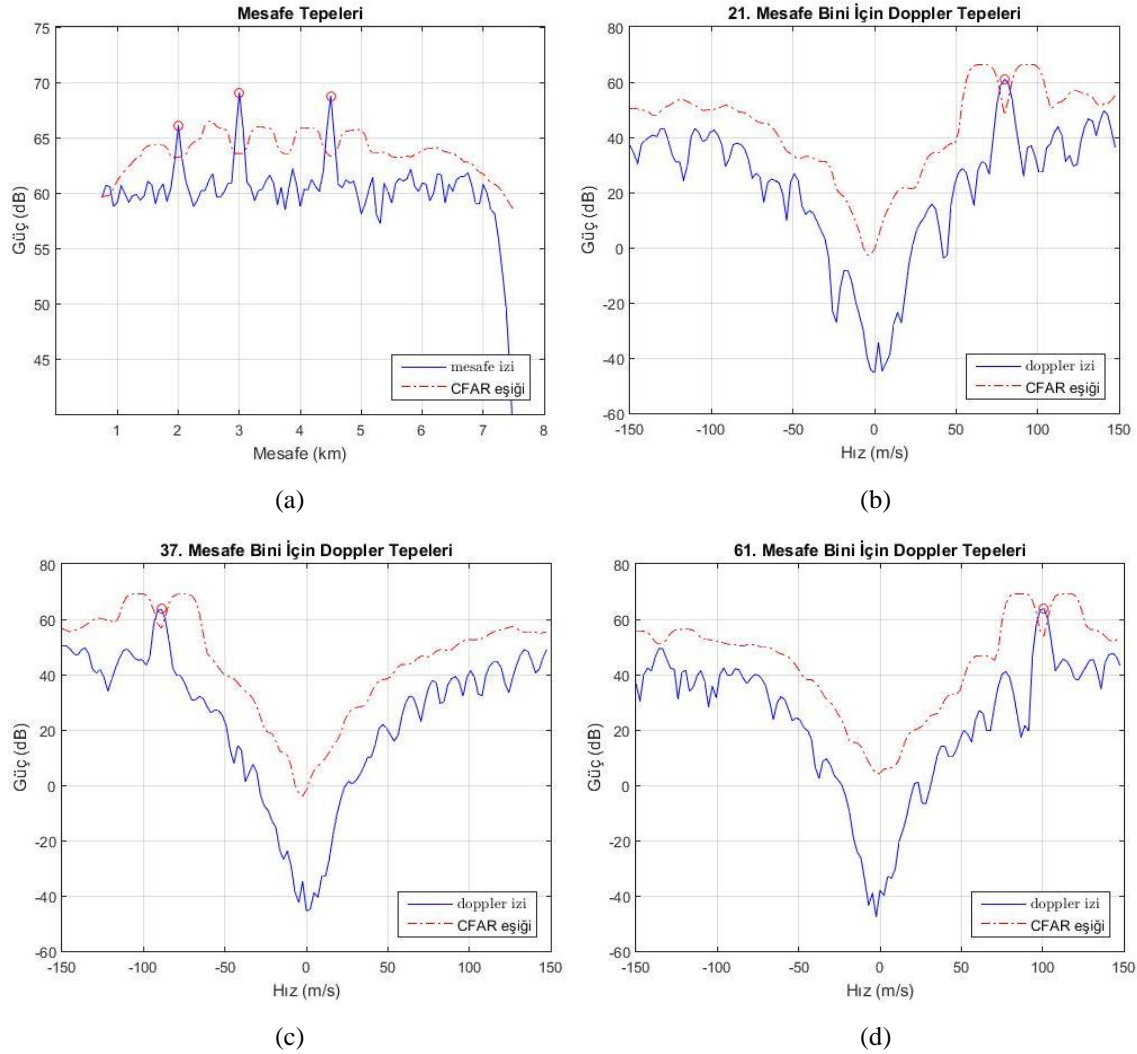
Radar sinyal işleme tekniklerinden olan darbe sıkıştırma tekniği radar alıcısında uyumlu filtre aracılığı ile yapılır. Bu benzetimde darbe sıkıştırma tekniklerinden LFM kullanılmıştır. Darbe sıkıştırma uygulandıktan sonra elde edilen mesafe-doppler grafiklerinde de (Şekil 7.5) görüldüğü gibi daha önce 750 m. mesafe aralığına yayılan hedeften dönen sinyalin oldukça daraldığı ve tepe değerlerinin büyüdüğü görülmektedir. Bunun sonucu olarak da LFM sayesinde SCR ve SNR oranları dolayısı ile de hedef tespit ihtimali artırılmış olur.



Şekil 7.5 Darbe sıkıştırma uygulandıktan sonra a) mesafe-doppler b) mesafe-doppler contour grafiği

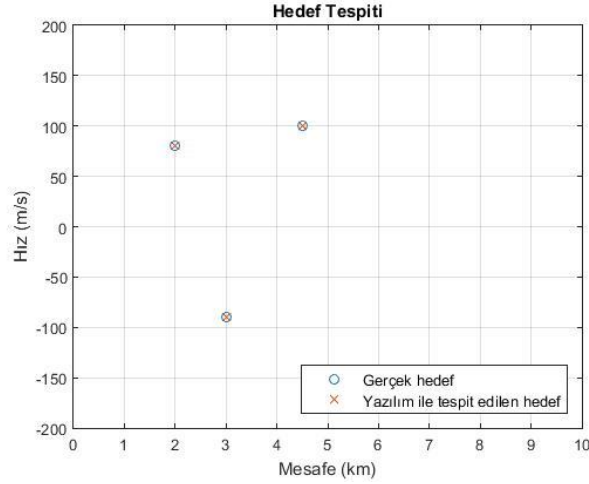
Bu aşamadan sonra hedeften dönen sinyallerin hızı ve mesafesi ölçülebilir. İlk olarak girişim seviyesini kestirebilmek için CFAR tekniği uygulanır. Benzetimde CFAR tekniklerinden olan CA-CFAR tekniği iki aşamalı olarak uygulanmaktadır. Öncelikle sadece

mesafede, daha sonra ise hedef tespit edilen mesafe kutuları için dopplerde tek yönlü CA-CFAR uygulanır. Hedeflerin mesafe kutularını tespit etmek için, mesafe kutularına karşılık gelen tüm doppler kutuları bir sütunda toplam gücü elde etmek için evre uyumsuz bir biçimde birleştirilir. Mesafede CA-CFAR eşik değerinin üzerine çıkan tepeler bulunur ve ilgili mesafe kutuları kaydedilir. Şekil 7.6 (a)'da görüldüğü gibi üç farklı menzilde hedeften dönen sinyaller eşik değerini geçmektedir. Daha sonra hedeflerin hızını tespit edebilmek amacıyla tespit edilen mesafe kutuları için dopplerdeki tepe değerleri bulunur. Şekil 7.6 (b), (c) ve (d) de tespiti edilen bu üç mesafedeki hedef için dopplerde uygulanan CA-CFAR sonuçları görülmektedir. Hedeflerin hızlarının bu uygulama sonucunda başarılı bir şekilde tespit edildiği görülmektedir.



Şekil 7.6 a) Mesafede ve b), c), d) dopplerde CA-CFAR uygulaması sonucunda elde edilen sinyaller.

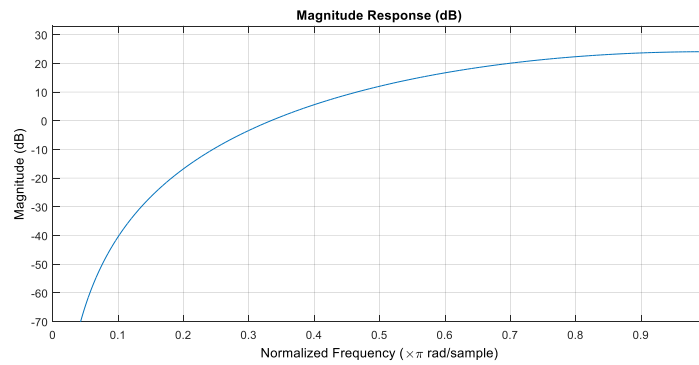
Şekil 7.7’de hedef tespitine yönelik gerçekleştirilen bütün bu işlemlerin sonucunda ulaşılan tespitler ile gerçek hedeflerin aynı şekil üzerinde gösterimi vardır. Görüldüğü gibi benzetim ile yukarıda verilen parametreler girilerek yapılan uygulamada hedeflerin başarılı bir şekilde tespiti mümkün olmuştur.



Şekil 7.7 Gerçek hedefler ve elde edilen tespitler

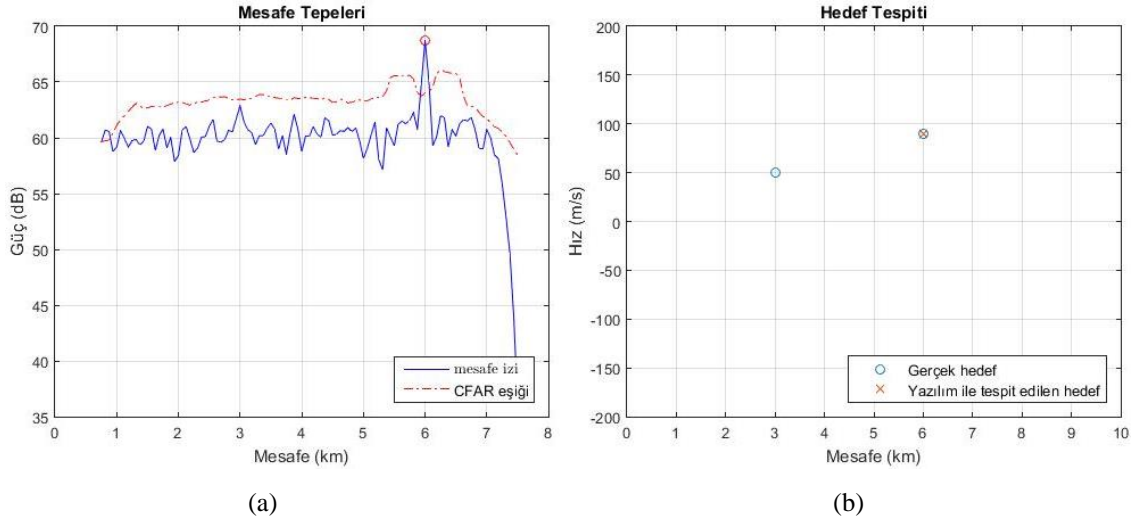
7.1.1. MTI devresinin etkisi

Benzetimde kullanılan dört gecikme hatlı MTI filtre karakteristiği Şekil 7.8’de gösterilmiştir.



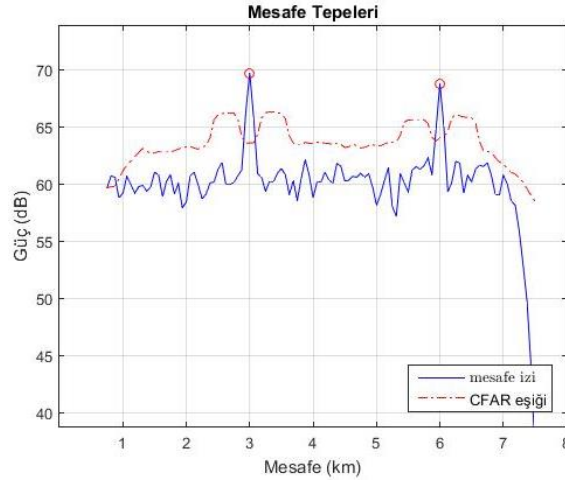
Şekil 7.8 Dört gecikme hatlı MTI filtre

Tüm diğer parametrelerin sabit tutulduğu bir durumda 3 ve 6 km mesafede iki hedefin hızları sırasıyla 50 ve 90 m/s alındığında, Şekil 7.9 (a) ve (b)’de görüldüğü gibi 50 m/s hızla giden hedeften dönen sinyal tespit eşliğini geçememiş ve tespit edilememiş sadece 90 m/s hızla giden hedef tespit edilebilmiştir.



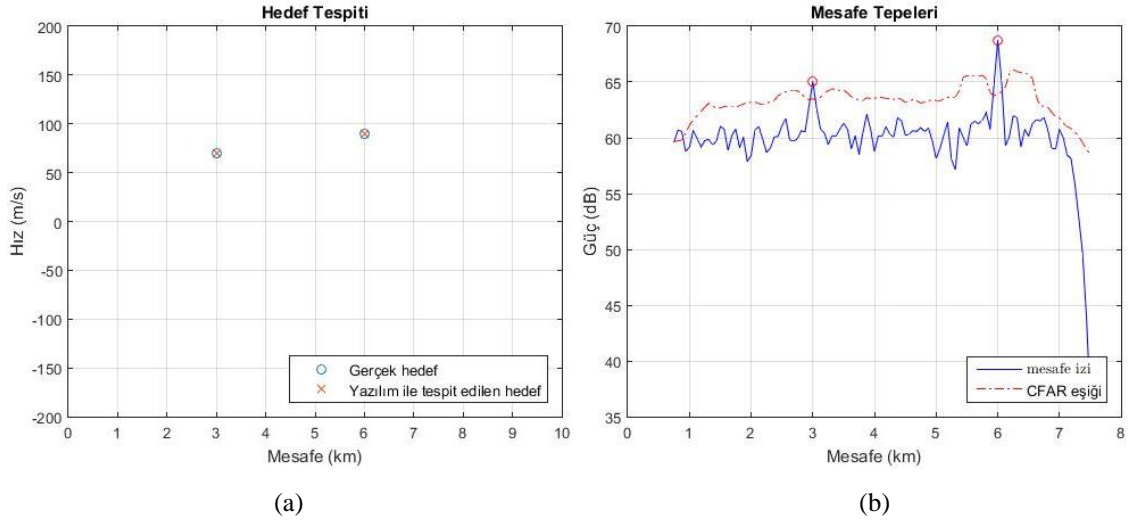
Şekil 7.9 60 ve 90 m/s hızındaki hedeflerin a) tespit edilen mesafe tepeleri b) hedef tespit sonucu

Hedeflerin hızlarının ikisinin de 90 m/s yapılması durumunda ise Şekil 7.10'da görüldüğü gibi iki hedefin de tespit edilebildiği ve tepe değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7.10 90 m/s hızındaki iki hedefin mesafe tepeleri

Hızların 80 ve 90 m/s girilmesi durumunda ise iki hedefte tespit edilebilmesine rağmen (Şekil 7.11 (a)) MTI etkisinden dolayı 80 m/s hıza sahip 3 km mesafedeki hedefin tepe değerinin 90 m/s hıza sahip hedefe oranla daha düşük olduğu (Şekil 7.11 (b)) görülmüştür. Hedefin hızının daha da düşmesi durumunda MTI'n etkisi artmakta hedef tespiti mümkün olmamaktadır.

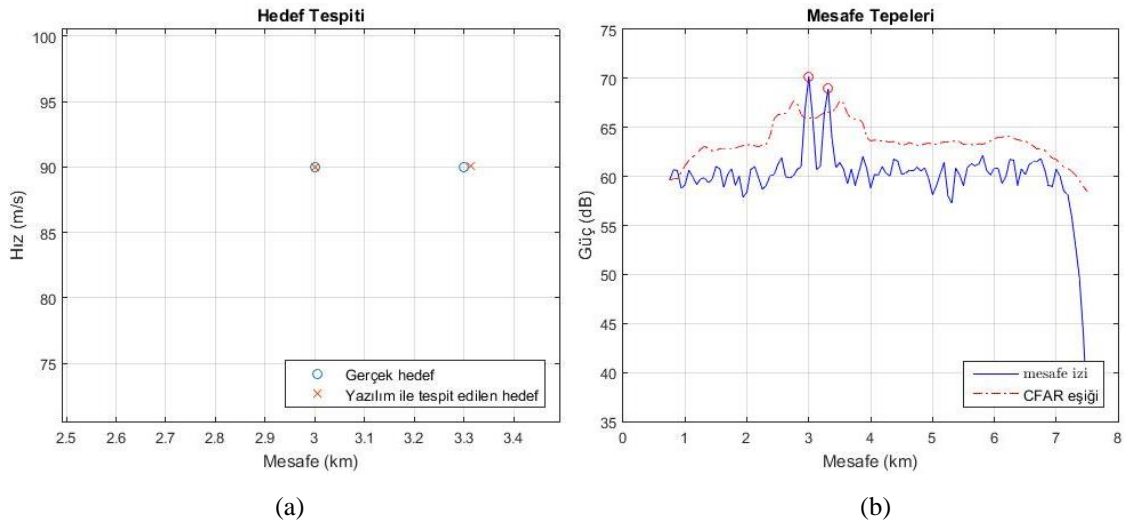


Şekil 7.11 80 ve 90 m/s hızındaki hedeflerin a) hedef tespit sonucu b) tespit edilen mesafe tepeleri

7.1.2. Darbe sıkıştırma işleminin etkisi

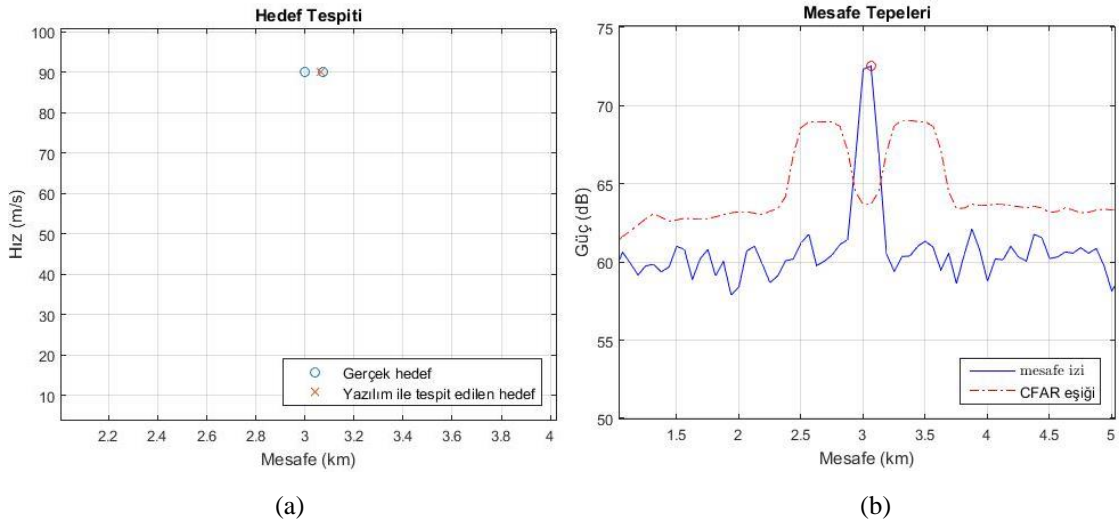
Darbe sıkıştırma işlemi ile radar alıcısında radar sinyalinin darbe genişliğinin azalması ve bu darbelerin genliğinin artması beklenir. Bu benzetimde darbe sıkıştırma yöntemi olarak LFM kullanılmıştır. Darbe sıkıştırma yönteminin kullanılmadığı durumlarda bir darbe doppler radarın mesafe çözünürlüğü darbe genişliğine bağlı olarak Eşitlik 6.9'de verildiği gibidir. Doğrusal darbe modülasyonu kullanılması durumunda ise mesafe çözünürlüğü Eşitlik 6.10'de verildiği gibi olacaktır.

Darbe genişliğinin 5 μ s alındığı ve darbe sıkıştırma yönteminin kullanılmadığı durumlarda mesafe çözünürlüğünün 750 m olması beklenir. Ancak doğrusal darbe modülasyonu kullanılarak, chirp BW değeri 2 MHz alınırsa mesafe çözünürlüğünün idealde 75 m, pratikte ise 150 veya 225 m olması beklenir. Tüm diğer parametrelerin sabit tutulduğu durumda mesafeleri 3 ve 3,3 olan iki hedefin, chirp BW değeri 2 MHz olduğu için Şekil 7.12'deki gibi tespit edilebildiği görülebilmektedir.



Şekil 7.12 3 ve 3,3 km mesafedeki hedeflerin a) hedef tespit sonucu b) tespit edilen mesafe tepeleri

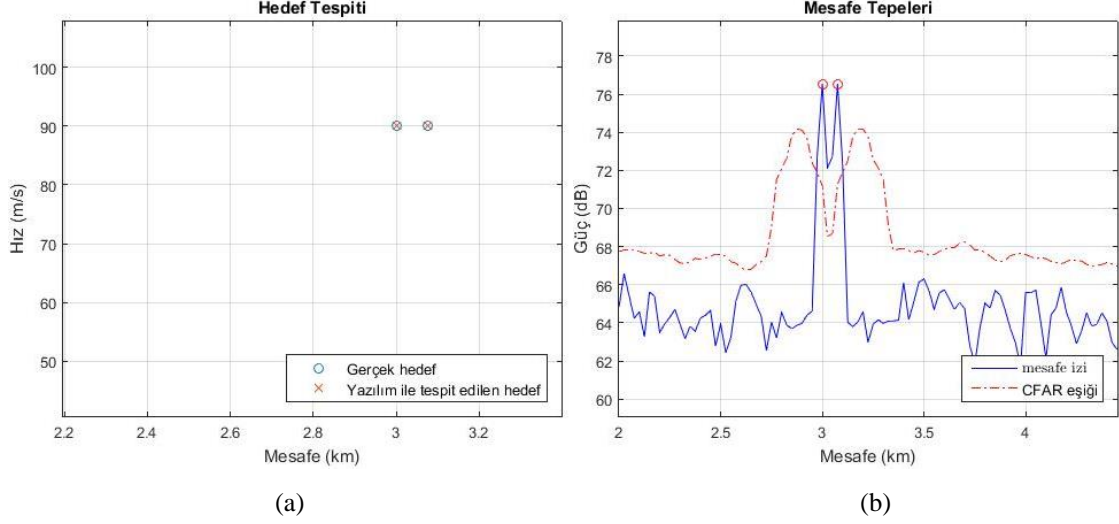
Chirp BW'in 2 MHz olduğu durumda, iki hedefin mesafelerinin 3 ve 3,075 km girildiği durumda ise Şekil 7.13'deki gibi iki hedeften bir tanesinin algılanabildiği diğer hedefin algılanabilmesi için mesafe çözünürlüğünün yeterli olmadığı görülmektedir. Bu nedenle hedeflerden bir tanesi algılanamamaktadır.



Şekil 7.13 BW=2 MHz iken 3 ve 3,075 km mesafedeki hedeflerin a) hedef tespit sonucu b) tespit edilen mesafe tepeleri

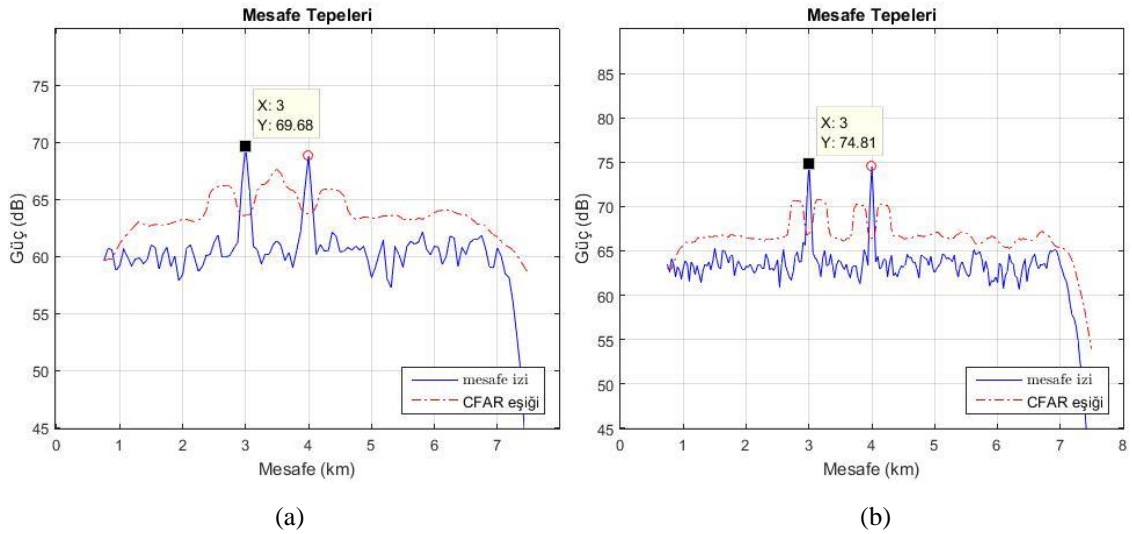
Chirp BW'in 5 MHz yapılması durumunda ise mesafe çözünürlüğünün idealde 30 m, pratikte ise 60-90 m olması beklenir. Şekil 7.14'de chirp BW'in 5 MHz alınması durumunda 3 ve 3,075 m mesafelerdeki hedeflerin iki hedef olarak tespit edilebildiği görülebilmektedir.

Bu şekilde darbe sıkıştırma oranının artırılarak mesafe çözünürlüğünün iyileştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 7.14 BW=5 MHz iken 3 ve 3,075 km mesafedeki hedeflerin a) hedef tespit sonucu b) tespit edilen mesafe tepeleri

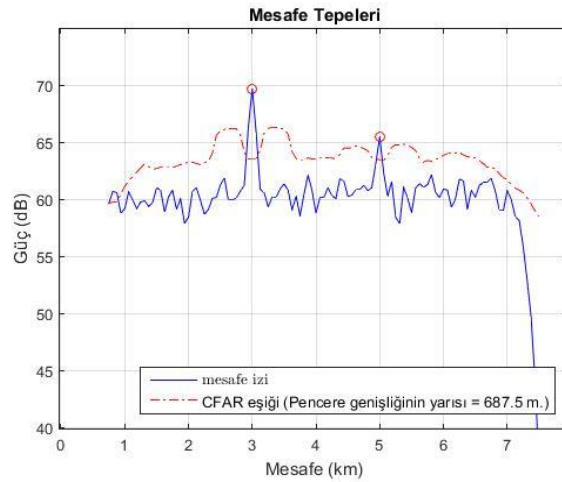
Darbe sıkıştırma yönteminin kullanılması ile ayrıca alınan darbenin genliğinde bir artış olması beklenmektedir. Bu amaçla diğer tüm parametrelerin sabit tutulduğu durumda BW'in 2 MHz ve 4 MHz olduğu iki durumda 3 km ve 4 km mesafedeki hedeflerden dönen sinyallerin genliğindeki fark Şekil 7.15'de gösterilmiştir. Darbe sıkıştırma oranının artırıldığı durumlarda alınan sinyalin genliği artmaktadır.



Şekil 7.15 BW'in a) 2 MHz b) 4 MHz olduğu durumlarda tepe gücü değişimi

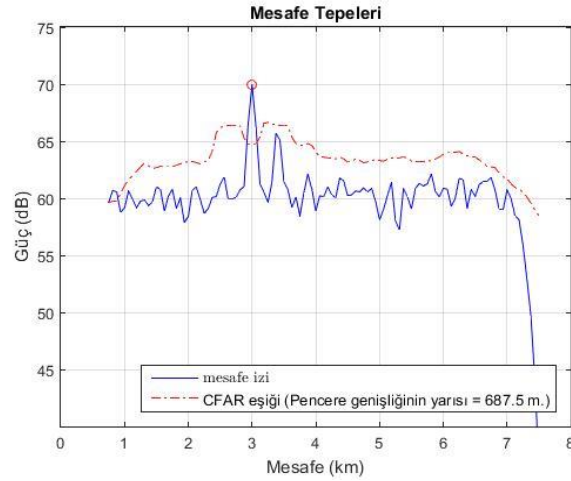
7.1.3. CFAR tekniğinde maskeleye ve değişken eşik değerinin etkisi

Benzetimde CFAR tekniği olarak CA-CFAR tekniği kullanılmıştır. CA-CFAR uygulamasında bir hedefin tespiti için aılan CFAR penceresine başka bir hedefin girmesi durumunda düşük genlikli hedeflerin tespiti mümkün olmayabilmektedir. Test hücresinin düşük genlikli hedefe denk getirilmesi durumunda CFAR penceresine giren yüksek genlikli hedefler CFAR tespit eşiğini yükseltir ve test hücresindeki hedefin tespiti zorlaşır. Hızları eşit, mesafeleri 3 ve 5 km'deki iki hedeften dönen sinyallerin bir tanesinin SNR değeri "0" alınırken, diğerinin genliğini düşük tutmak amacıyla "-5" alınmıştır. Şekil 7.16'da da görüldüğü gibi geciken CFAR pencere genişliği 687 m olduğundan 2 km uzaklıktaki diğer hedef CFAR penceresine girmediğinden hedef tespitine olumsuz etkisi olmamış ve iki hedef de tespit edilebilmiştir.



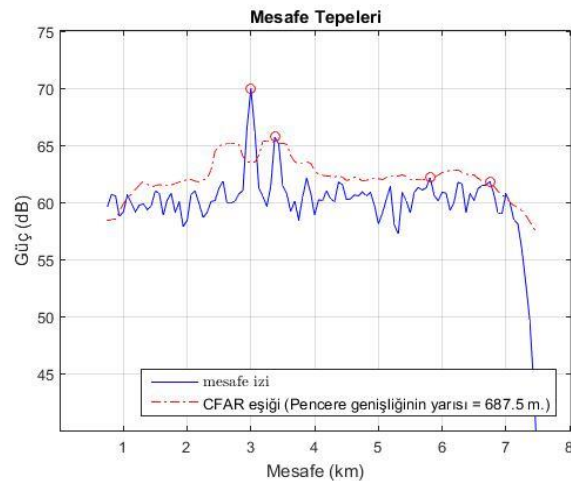
Şekil 7.16 Bir hedefin, başka bir hedefin CA-CFAR penceresine girmediği durum

İki hedefin de CFAR penceresinin içinde olması durumunu incelemek için hedeflerin mesafelerinin 3 ve 3,4 km olduğu durum Şekil 7.17'de incelenmiştir. İki hedef arasındaki mesafe 400 m olduğundan bir hedeften dönen sinyal tespiti için test noktasına alındığında ikinci hedeften dönen sinyal test hücresi için belirlenen eşik değerinin hesaplanmasında kullanılan pencereye dâhil olmaktadır. 3 km mesafede bulunan hedeften dönen sinyalin genlik değeri yüksek olduğundan, 3,4 km mesafede bulunan hedeften dönen düşük genlikli sinyalin tespiti için belirlenen CFAR eşik değerini yükseltmiş ve 3,4 km'deki hedefi maskeleyerek tespit edilmesini engellemiştir.



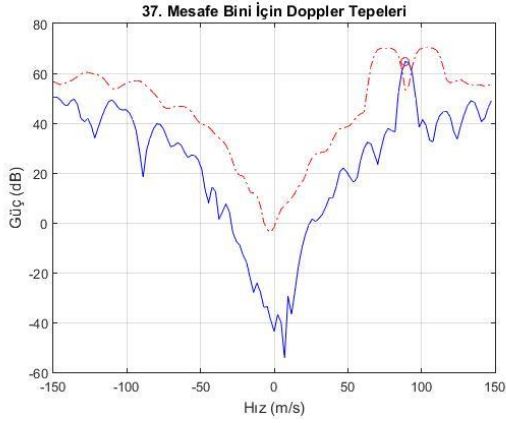
Şekil 7.17 Bir hedefin, başka bir hedefin CA-CFAR penceresine girdiği durum

CA-CFAR eşik değerinin düşürülmesi durumunda düşük genlikli hedeflerin de tespit edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Ancak böyle bir durumda düşük eşik değeriyle hedef olmayan bazı sinyaller de hedef olarak algılanabilecektir. Yani yanlış alarm olasılığı artacaktır. Şekil 7.17'de SNR değerleri 0 ve -3 dB olan 3 ve 3.4 km mesafedeki hedeflerden düşük genlikli olan hedefin maskeleyen etkisinden dolayı tespit edilemediği görülmektedir. CA-CFAR eşikini belirleyen katsayı değerinin 2'den 1.5'e düşürülmesi durumunda Şekil 7.18'deki gibi 3.4 km mesafedeki hedef de tespit edilebilmiştir. Ancak mesafede CA-CFAR uygulandığında gerçek hedeflerin yanında bazı sahte hedeflerinde oluştuğu görülür. Birkaç yerde gürültü ve çevresel yankı kaynaklı sinyalin genliği eşik değerini geçmiştir.

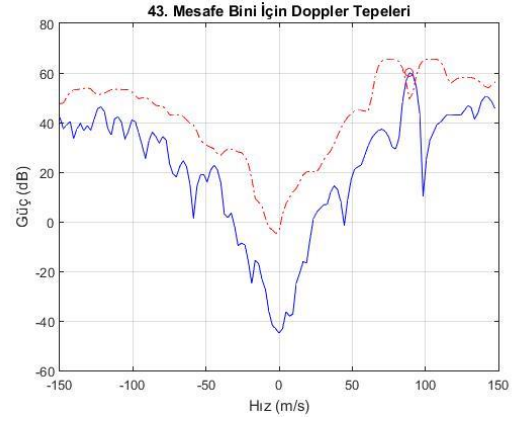


Şekil 7.18 CA-CFAR katsayısı 1.5 yapıldığında eşik geçen mesafe tepeleri

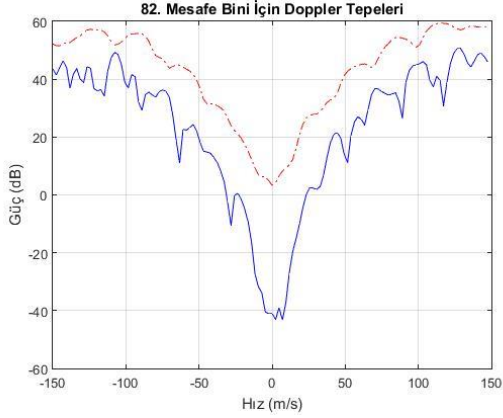
Bu durumlarda gürültü ve çevresel yankı kaynaklı sahte hedeflerin önüne geçmek için benzetimde mesafede CFAR ile tespit edilen her hedefe dopplerde CFAR uygulanmaktadır. Sahte hedeflerin doppleri çok düşük olduğundan dopplerde CFAR eşikini geçememekte ve hedef olarak değerlendirilmemektedirler (Şekil 7.19). Bu durumda genlik değeri düşük olduğu için tespit edilemeyen hedef, CFAR eşik değeri düşürülerek tespit edilebilmiştir.



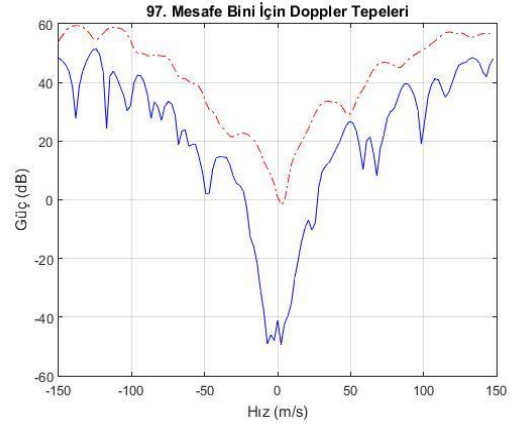
(a)



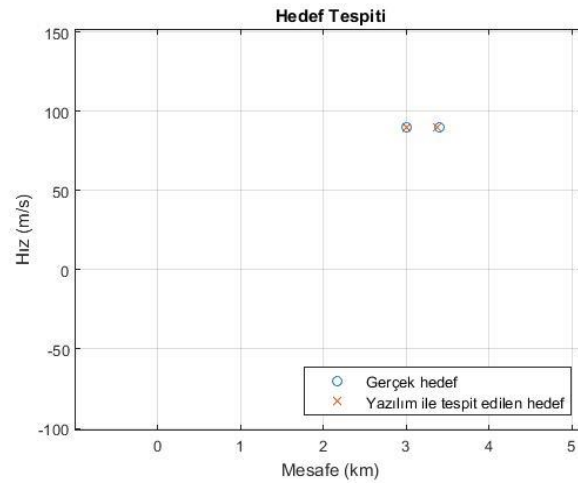
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 7.19 CA-CFAR katsayısı düşürülünce a) Mesafede ve b), c), d) dopplerde elde edilen sinyaller e) tespit sonucu

7.2. Belirsizlik Durumunda Çoklu Hedef Tespiti

Darbe doppler radarlar “doppler dilemma” olarak bilinen bir ikilem ile karşı karşıyadırlar. Yani geniş bir belirli mesafe bölgesi elde etmek için seçilen PRF sonucunda belirli hız bölgesi küçülür (Ounissi, 2006). Benzetimde orta PRF bir doppler radar tasarlanmıştır. Bölüm 5’te anlatıldığı gibi orta PRF’te hem mesafede hem de hızda belirsizlikler oluşur. Bu yöntemde çalışmak zordur çünkü hedefleri çevresel yankılardan ayırmak için gerekli karmaşık sinyal işlemci yapısını içerir ve mesafe-doppler belirsizliklerini çözmek gerekmektedir (Kinghorn vd., 1993). Orta PRF’te çalışan radarlar tipik olarak tek bir PRF kullanmak yerine çeşitli PRF’leri arka arkaya kullanırlar. Bunun başlıca üç sebebi vardır. Birincisi, her PRF’te oluşan belirsizlikleri kıyaslayarak belirsizlik probleminin çözümü sağlanır. İkincisi, farklı PRF’lerde farklı çevresel yankı bölgeleri oluşacağından küçük hedefler için bile yeterli sayıda PRF ile hedef tespiti mümkün olabilmektedir. Üçüncüsü ise, bir PRF kullanımında oluşan kör bölgelerin diğer PRF’ler ile tespit edilebilir hale gelmesi sağlanır.

Matematiksel olarak bakıldığında doğru mesafeyi ve hızı belirleyebilmek için sadece iki PRF’ten alınan belirsizlik içeren veri yeterlidir. Ancak pratikte kullanılan güçlü hedef çıkarım algoritmaları en az üç PRF’ten alınan hedef verisine ihtiyaç duymaktadır. Çoklu PRF kullanan radarların hedef tespitinde belirsizlikleri çözmek için kullandığı bazı kıstaslar

vardır. Kullanılan PRF sayısı N ile ifade edilir ve N genellikle 5 ila 9 arasındadır. En yaygın uygulamalarda ise $N=8$ olarak kullanılır. Bir sinyalin hedef olarak sınıflandırılabilmesi için kullanılan PRF'ler içerisinde en az belli bir sayıda tespit yapılabilmesi aranır. Tespitin yapılması beklenen en az PRF sayısı da M ile ifade edilecek olursa N tane PRF kullanımında M tane PRF ile hedef algılanabilmiş ise gelen sinyal hedef olarak sınıflandırılmaktadır. 8'de 3 tespit, genel kabul gören bir tespit kıstasıdır ve benzetimde de 8 PRF'ten 3'ünde hedef algılanmış ise o hedef tespit edilmiş sayılmaktadır. Bu tespitler yapılırken CA-CFAR kontrollü tespit işlemi yapılmış ve hedeften dönen sinyallerin hem mesafede hem de hızda CA-CFAR eşiğini geçmeleri durumunda hedefler tespit edilmişlerdir (Alabaster, 2012). Bir tespit kıstasının hedef tespit yeteneği birden çok hedefin varlığında ve hedef verisinin ölçüm toleransları ile bozulduğu durumlarda güvenilir bir performans sağlamak için yeterince güçlü olmalıdır (Wiley vd., 2006).

Bir PRF kıstasının belirlenmesi, kullanılacak olan PRF'lerin tam olarak sayısal değerlerinin belirlenmesini ve tespit kıstası olan $M-N$ sayılarının belirlenmesini içerir. PRF kıstasının tasarımı ise radarın göstereceği performansa ana etkindir. Kullanılan PRF'ler teker teker ele alındığında fazla bir anlam ifade etmese bile bu PRF'lerin oluşturacağı birleşim radarın etkinliğini belirler.

Gerçek mesafe ve doppler değerleri PRF değerinden bağımsızdır (Bkz. Eşitlik 5.4 ve 5.6). Görünen mesafe, görünen doppler kayması, mesafe ve doppler belirsizliklerinin dereceleri ve en uzun belirli mesafe ile en yüksek belirli hız ise her PRF ile birlikte değişir.

Benzetimde rastlantı (coincidence) algoritması veya serilim (unfolding) algoritması olarak bilinen yöntem mesafe ve hız belirsizliklerini çözmek için kullanılmıştır. Hedefin tespit edilebildiği her bir PRF için gerçek olması muhtemel tüm mesafe ve hız değerleri daha önce belirlenen azami bir değere kadar hesaplanır. Kullanılan PRI'lar bir mesafe kutusunun tam katlarına sabitlenir ve her PRI için hedefin belirsiz mesafesinin kaçınıcı mesafe kutusuna denk geldiği belirlenir. Belirsiz hedefin mesafe kutusu Eşitlik 7.1 ile ifade edilir. Burada x mesafe belirsizliğinin derecesini, m PRI'da bulunan mesafe kutusunu, Aa hedefin tespit edildiği görünen mesafe kutusunu ve Aux muhtemel belirli mesafe kutusunun numarasını gösterir.

$$A_{ux} = A_a + xm \quad x = 0,1,2,3 \dots \quad (7.1)$$

Örneğin, eğer bir hedef, 70 mesafe kutulu PRI'nın 47. mesafe kutusunda, 85 mesafe kutulu PRI'nın 12. mesafe kutusunda, 97 mesafe kutulu PRI'nın 25. mesafe kutusunda tespit edilmiş ise mesafe kutusu birimi cinsinden muhtemel belirli mesafe seti aşağıdaki gibi olacaktır:

{47, 117, 187, 257, 327, 397, 467, 537, **607**, 677,....., 1237}.

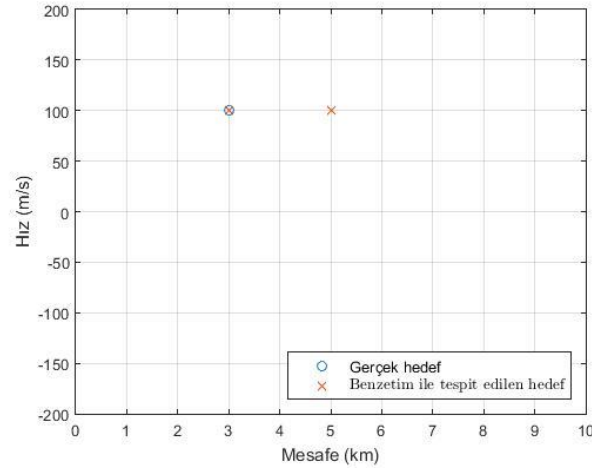
{12, 97, 182, 267, 352, 437, 522, **607**, 692,....., 1202}

{25, 122, 219, 316, 413, 510, **607**, 704,....., 1189}

Hedef tespit kıstası M-N için, M tane PRF'te muhtemel bir belirli mesafe oluşursa o mesafe için hedefin tespit edildiği bildirilir. Bu örnekte 607. mesafe hücresinde bir hedef tespiti bildirilir. Genellikle bir ya da iki mesafe hücresi yakınlıkta çıkan uzaklıklar tolerans gösterilerek aynı mesafe olarak kabul edilir.

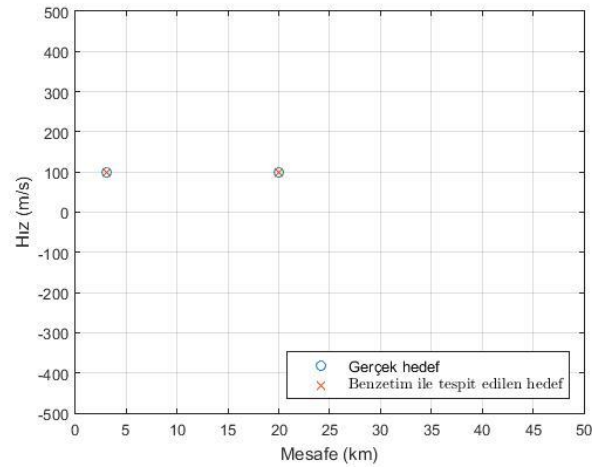
Benzetimde belirsizlikleri çözmek için kullanılan rastlantı algoritmasında 8 farklı PRI (63.11, 69.97, 77.07, 81.31, 90.06, 99.90, 109.75, 119.00 μ s) kullanılmaktadır ve hedef tespit kıstası (M-N) olarak 3 PRI'da hedefin tespit edilebilme koşulu aranmıştır. Ayrıca en fazla 2 mesafe kutusu yakınlıkta hedef tespiti yapılması durumunda da hedefin tespit edilebildiği kabulü yapılmış yani tolerans değeri 2 olarak belirlenmiştir.

Belirsizliği çözen algoritmaların kullanılmadığı durumlarda PRI 50 μ s alınırsa en yüksek belirli mesafe 7.5 km olacaktır. Menzilleri 3 ve 20 km, hızları 100 m/s olan iki hedef tespit edilmeye çalışılırsa belirsizlik oluşacak ve Şekil 7.20'deki gibi ikinci hedefin 20 km olan gerçek mesafesi 5 km'de görünen mesafe olarak algılanabilecektir. Mesafede belirsizlik olduğu için yapılan bu hedef tespitlerinin hangisinin gerçek olduğu anlaşılamamaktadır.



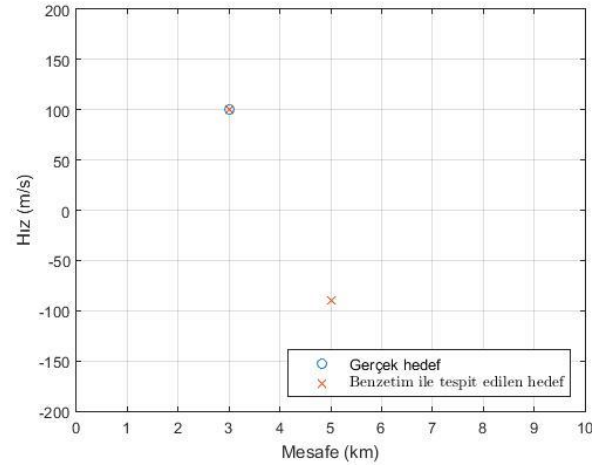
Şekil 7.20 Mesafede belirsizlik durumunda hedef tespiti

Rastlantı algoritmasının kullanılması halinde ise Şekil 7.21’de görüldüğü gibi mesafedeki belirsizlik çözülmüş ve 20 km’de olan gerçek hedef, 20 km’de tespit edilebilmiştir.



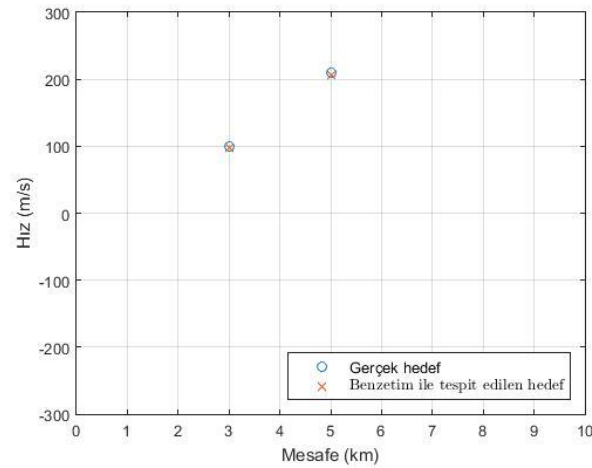
Şekil 7.21 Mesafe belirsizliğinin çözüldüğü durumda hedef tespiti

Benzer şekilde belirsizliği çözen algoritmaların kullanılmadığı durumlarda PRI 50 μ s ve radarın taşıyıcı frekansı 10 GHz alınır en yüksek belirli hız 150 m/s olacaktır. Menzilleri 3 ve 5 km, hızları 100 ve 210 m/s olan iki hedef tespit edilmeye çalışılırsa belirsizlik oluşacak ve Şekil 7.22’deki gibi ikinci hedefin 210 m/s olan gerçek hızı -90 m/s’de görünen hız olarak tespit edilebilecektir. Hızda belirsizlik olduğu için yapılan bu hedef tespitlerinin hangisinin gerçek olduğu anlaşılamamaktadır.



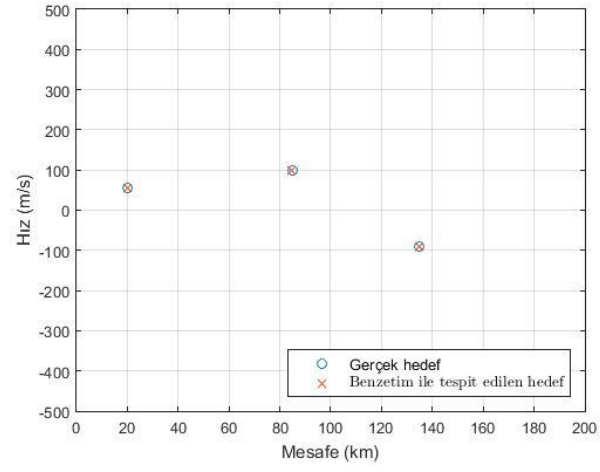
Şekil 7.22 Hızda belirsizlik durumunda hedef tespiti

Rastlantı algoritmasının kullanılması halinde ise Şekil 7.23'te görüldüğü gibi hızdaki belirsizlik çözülmüş ve 210 m/s'de olan gerçek hedef, 210 m/s'de tespit edilebilmiştir.



Şekil 7.23 Hız belirsizliğinin çözüldüğü durumda hedef tespiti

Benzetimde tespit edilebilecek en uzun mesafe ve en yüksek hız değerleri için limitler belirlenmiştir. Tespit edilmesi istenen hedeflerin mesafe ve hız değerleri bu limitlerin altında seçilmesi durumunda Şekil 7.24'te gösterildiği gibi farklı mesafe hız değerlerine sahip birçok hedef aynı anda benzetim tarafından doğrulukla tespit edilebilmektedir.



Şekil 7.24 Belirsizlik durumunda çoklu hedef tespiti

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Darbe doppler radarlar, darbe radarların ve sürekli dalga radarlarının özelliklerini birleştiren, darbelerinin zamanını kullanarak hedefin mesafesini doppler etkisini kullanarak da hızını tespit eden radar sistemleridir. Bu tespitleri oldukça yoğun çevresel yankıların bulunduğu ortamlarda hatta chaff ya da başka girişim etkilerinin bulunduğu durumlarda bile yapabilirler (Alabaster, 2012). Darbe doppler radarlar günümüzde hava savunma radarı, füze arayıcı başlığı, deniz sistemlerinin radarları, havadan erken ihbar radarları, hava platformlarının atış kontrol radarları olarak ve daha birçok askeri alanda kullanılmaktadır. Darbe doppler radarın modlarından ise orta PRF modu, özellikle yoğun çevresel yankı bulunan çalışma ortamlarındaki başarısı ve hem mesafe belirsizliğinin hem de hız belirsizliğinin çözülebileceği mod olması nedeniyle yüksek performans sağlamaktadır.

Bu tez ile orta PRF'te çalışan darbe doppler radarın sinyal işleme birimlerinin ve bu birimlere çevresel yankının ve gürültünün bulunduğu bir ortamda hedeften gelen sinyallerin benzetimi yapılmıştır. Bu birimlerde gerçekleşen FFT, MTI, darbe sıkıştırma, CFAR gibi sinyal işleme teknikleri oluşturularak benzetimde hepsinin bir arada koordineli bir biçimde çalışabilmesi sağlanmıştır. Bir darbe doppler radarın gönderdiği ve hedefe çarparak dönen sinyalin, çevresel yankı ve ortam gürültüsü ile beraber radar alıcısına geliş modellenmiş ve sinyal işleme teknikleri kullanılarak hedefin tespit edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca hedef tespiti için önemli bir problem teşkil eden ve hem mesafede hem de hızda oluşan belirsizliklerin çözümünde kullanılan rastlantı algoritması ile uzak mesafe ve yüksek hızlarda bile birçok hedefin aynı anda darbe doppler radarı tarafından tespit edilebileceği gösterilmiştir.

Benzetim ile darbe doppler radar alıcısında gerçekleşen bu sinyal işleme tekniklerinin hedef tespitinde hangi yönlerden ne derece etkili olduğu göz önüne serilmiş bu tekniklerin avantajları ve kısıtları incelenmiştir. Çevresel yankıların bastırılması için kullanılan MTI filtresinin bu amaç için çok başarılı olduğu ancak MTI filtresinin sıfır doppler bölgesini baskımlarken düşük hızda seyreden hedeflerin tespitini de zorlaştırdığı görülmüştür. Özellikle MTI filtresinde gecikme hattı sayısı arttıkça düşük hızlı hedeflerin tespit edilme ihtimali azalmaktadır.

Benzetimde darbe sıkıştırma tekniği olarak LFM kullanılmıştır. Darbe sıkıştırma tekniğinin kullanılırken darbenin sıkıştırılmasına mukabil darbe doppler radarın mesafe çözünürlüğü hassasiyetinin ne derece iyileştiği örneklerle gösterilmiştir. Ayrıca sıkıştırılan darbenin genliğinde görülen artışın darbe doppler radarın daha uzak mesafelerden hedef tespiti yapmasına imkân sağladığı sonucu çıkmaktadır. Getirdiği bu avantajlar göz önüne alındığında darbe sıkıştırma tekniğinin darbe doppler radarların performansını artıran önemli bir teknik olduğu görülmektedir.

Darbe doppler radarlarda hedef tespitinde önemli bir yeri olan CFAR tekniklerinden CA-CFAR tekniği benzetime dâhil edilmiştir. Hedef tespit olasılığı ile yanlış alarm oranı arasındaki dengeyi uyarlamalı eşik seviyesi oluşturarak verimli bir şekilde kuran CA-CFAR tekniğinin avantajları tezde anlatılmıştır. Ancak benzetim vasıtası ile CA-CFAR pencere genişliği belirlenirken maskeleyme etkisinin bazı hedeflerin tespit edilememesine yol açabileceği gösterilmiştir. Ayrıca eşik seviyesinin belirlenmesinde kullanılan katsayının seçiminin yanlış alarm oranına etkisi incelenmiştir.

Darbe doppler radarlarda tek PRI kullanılması durumunda mesafede ve hızda belirsizlikler oluşmaktadır. Tek bir PRI ile doğru ölçülebilen hız ve mesafe sınırlıdır. Daha yüksek hız ve mesafe değerlerine sahip hedeflerin tespit edilebilmesi için birden fazla PRI kullanmak gerekmektedir. Tezde kullanılan rastlantı algoritmasında 8 PRI kullanılmış ve bunların 3'ünde aynı değerlere sahip bir sinyal algılanmış ise o sinyal hedef tespiti olarak kıymetlendirilmiştir. Böylelikle yukarıda bahsedilen sinyal işleme teknikleriyle beraber kullanılan belirsizlik çözme tekniğinin çoklu hedeflerde performansı değerlendirilmiştir. Bu yolla yüksek hız ve uzak mesafe değerlerini taşıyan birden çok hedefin darbe doppler radarlarda başarı ile tespit edilebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Darbe doppler radarın hedef tespit performansının analiz edildiği benzetimde kullanılan teknikler için birçok parametre belirlenmiştir. Her bir teknikte kullanılan bu parametrelerin değiştirilmesi ile radarın çalıştırıldığı çevresel şartlar ve tespit edilmesi amaçlanan hedeflere bağlı olarak olumlu veya olumsuz sonuçlar alınabilmektedir. Radarın kullanılacağı koşullar değerlendirilerek performansı artırıcı önlemler benzetim kullanılarak alınabilir. Örneğin darbe doppler radarın çalıştırılacağı ortamda çevresel yankı etkisinin sınırlı olduğu bilgisi varsa dört gecikme hatlı MTI filtresi yerine tek gecikmeli filtre düşük

yoğunluklu çevresel yankı etkisindeki hedef sinyale uygulanır ve sonuçlar analiz edilir. Ya da örneğin hedef sayısının az olduğu ve hedefler arasındaki mesafenin fazla olduğu koşullarda çalıştırılacak bir darbe doppler radarda CA-CFAR uygulanırken pencere genişliğini geniş tutmak faydalı olacaktır. Bu sayede CFAR eşik seviyesi daha gerçekçi belirlenecek ve hedef tespit olasılığı artacaktır. Hedefin yakınlardaki başka bir hedefin maskelenme ihtimalinin olmadığı düşünüldüğünde tekniği bu şekilde uygulamak performansı artıracaktır. Bu örneklerde görüldüğü gibi tez ile üretilen benzetim sayesinde farklı koşullarda en iyi performansı sağlayacak darbeleri doppler radar tasarımı sinyal işleme tekniklerinin uygulanma biçimi ile belirlenebilmektedir.

Darbeleri doppler radarların alıcı birimlerinde gerçekleşen ve bu tezde incelenen sinyal işleme tekniklerinin çalışma prensipleri ve darbeleri doppler radarların hedef tespit performansına etkileri bir benzetim ile birleştirilmeden teker teker de analiz edilebilirdi. Ancak radar alıcısında da bu tekniklerin birbirlerinin peşi sıra sinyal işlediği ve gerçek durumda birinden çıkan sonucun diğerinin yapacağı işleme de etkileri olduğu düşünüldüğünde tekniklerin hedef tespiti amacıyla beraber çalıştırılmasının daha gerçekçi olduğu değerlendirilmiştir.

Benzetim ile bu tezde kullanılmayan farklı tekniklerin hedef tespitine etkileri incelenebilir. Örneğin tezde darbe sıkıştırma tekniği olarak kullanılan LFM yerine faz modüleli darbelerin kullanılması sağlanabilir ve bu tekniğin darbeleri doppler radarın hedef tespit performansına olumlu ya da olumsuz etkileri incelenebilir. Ya da CFAR tekniği olarak kullanılan CA-CFAR'ın yerine GO-CFAR, LO-CFAR gibi başka teknikler kullanılarak, bu tekniklerin birbirlerine göre üstün tarafları incelenebilir.

Yukarıda belirtildiği gibi darbe doppler radarların askeri alanda kullanımı oldukça yaygındır. Radar performansındaki gereksinimlere göre sinyal işleme tekniklerinin seçimi askeri amaçlı kullanılan radarların tasarımındaki en önemli adımdır (Ounissi, 2006). Radarların kullandığı elektromanyetik sinyallerin frekansını, sinyal modülasyon yapısını, sinyal gücünü ve polarizasyon yapısını değiştirmek suretiyle, savaşlarda düşmanı zafiyete uğratmak amacıyla kullanması mümkündür. Elektronik harp kısaca, elektromanyetik dalgaları kullanarak düşman üzerinde üstünlük sağlama savaşı olarak tanımlanabilir. Bir başka ifade ile elektronik harp, dost unsurların elektromanyetik spektrumu kullanmasını

kolaylaştırırken düşmanın elektromanyetik spektrumdan yararlanmasını önleme faaliyetidir. Bu nedenle askeri amaçlı elektromanyetik dalgaları kullanan radarlar öncelikli elektronik harp tehdidi olarak değerlendirilir.

Düşman radarlarının elektronik taarruz teknikleri ile zafiyete uğratılması, dost radarların ise elektronik korunma tedbirleri ile maruz kalacağı elektronik taarruzdan etkilenmeden görevlerini yapmaya çalışmaları elektronik harbin önemli bir çalışma alanıdır. Bu nedenle elektronik harbin radarlarla ilgili alanında başarılı olabilmek için düşmanın elinde bulunan radarların çalışma prensipleri, ürettiği sinyallerin yapısı ve sahip olduğu elektronik korunma tedbirleri gibi teknik özelliklerini bilmek çok önemlidir. Çünkü elektronik taarruz ile karıştırma yapılması planlanan düşman radarın hangi özelliklerde olduğu ve uygulanacak olan karıştırma tekniğinin düşman radarı üzerinde nasıl bir etki oluşturacağı bilinmez ise uygulanacak olan elektronik taarruzun başarılı olma ihtimali çok azdır. Düşman radarın çalışma prensiplerine, güçlü ve zayıf yönlerine vakıf olunması durumunda ise çok etkili karıştırma teknikleri üretilebilir ve elektronik harp yönüyle düşman üzerinde üstünlük kurulabilir.

Bu tez ve benzeri çalışmalar ile farklı tipte radarların elektronik harp açısından analizlerini yapmak mümkündür. Bu tezde üretilen benzetim gibi benzetimler kullanılarak hedef radarların hangi tip karıştırmaya karşı zafiyetleri olduğu araştırılabilir veya dost radarların elektronik taarruzdan korunması için alınması gereken tedbirler bulunabilir.

9. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agarwal V., Mukherjee, S., 2012, Range velocity blind zone for airborne MPRF radar in look-down search mode, Sensing Technology (ICST), Sixth International Conference on, Kolkata, p. 63-68.
- Ahn, S., Lee, H., Jung, B., 2011, Medium PRF set selection for pulsed doppler radars using simulated annealing, IEEE RadarCon (RADAR), Kansas City, MO, p. 90-94.
- Alabaster, C., 2012, Pulse Doppler Radar: Principles, Technology, Applications, SciTech Publishing, Edison, NJ.
- Cury, G.R., 2012, Radar Essentials, SciTech Publishing, Raleigh, NC.
- Deng, Z., Ye, L., Fu, M., Zhao, C., 2013, Doppler ambiguity resolution based on random sparse probing pulses, Radar Conference 2013, IET International, Xi'an, p. 1-5.
- Ferrari, A., Berenguer, C., Alengrin, G., 1997, Doppler ambiguity resolution using multiple PRF, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 33, no. 3, p. 738-751.
- Galati, G., 1993, Advanced radar techniques and systems, Peter Peregrinus, London, UK.
- Goetz, L. P., Albright, J. D., 2009, Airborne Pulse-Doppler Radar, Air Arm Div., Westinghouse Electric Corp., Baltimore, Md.
- Hughes, E.J., Alabaster, C.M., 2003, Novel PRF schedules for medium PRF radar, Radar Conference, Proceedings of the International, pp. 678-683.
- Kinghorn, A.M., Smith, M.J., Heggie, C.A., 1993, Pulse-Doppler radar detection performance modelling and verification, Computer Modelling and Simulation of Radar Systems, IEE Colloquium on, London, p. 8/1-8/4.
- Kronauge, M., Schroeder, C., Rohling, H., 2010, Radar target detection and Doppler ambiguity resolution, 11-th International Radar Symposium, Vilnius, Lithuania, p. 1-4.
- Kwag, Y.K., 2008, An Airborne Radar System with Adaptive MTD Doppler Compensation Scheme using DSP Based Real-Time Spectral Estimation, IEEE Radar Conference, Rome, 2008, p. 1-5.
- Lei, W., Long, T., Han, Y., 2000, Resolution of range and velocity ambiguity for a medium pulse Doppler radar, Radar Conference, The Record of the IEEE 2000 International, Alexandria, VA, p. 560-564.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Li, Y., Zeng, T., Long, T., Wang, Z., 2006, Range Migration Compensation and Doppler Ambiguity Resolution by Keystone Transform, CIE International Conference on Radar, Shanghai, p. 1-4.
- Mahafza, B.R., Elsherbeni, A., 2003, Matlab Simulations for Radar Systems Design, Chapman & Hall/CRC CRC Press LLC.
- Meng, F., Xie, L., Li, R., 2009, Research on invariant imbedding method of velocity ambiguity resolution, Radar Conference, 2009 IET International, Guilin, p. 1-4.
- Ming, L., Yu-mei, L., Feng, R., 2006, A Simple Simulation Method of Ground Clutter for Airborne Pulse Doppler Radar, CIE International Conference on Radar, Shanghai, p. 1-4.
- Morris, G., Harkness, L., 1996, Airborne pulsed doppler radar, Artech House, Norwood.
- Mozeson, E., Levanon, N., 2004, Radar Signals, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Nazir, M., Pycock, D., 2013, Constraint-based range-velocity disambiguation, 14th International Radar Symposium (IRS), Dresden, p. 708-713.
- Omar, S.M., Kassem, F., Mitri, R., Hijazi, H., Saleh, M., 2015 A novel barker code algorithm for resolving range ambiguity in high PRF radars, Radar Conference (EuRAD) 2015 European, Paris, p. 81-84.
- Onat, E., Serin, M., 2011, Implementation of digital pulse doppler radar signal generator and receiver, IEEE 19th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), p. 710-713.
- Ounissi K., 2006, Advanced signal processing techniques for pulsed-doppler radar, Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden.
- Rasool, S. B., Bell, M. R., 2010, Efficient pulse-Doppler processing and ambiguity functions of nonuniform coherent pulse trains, IEEE Radar Conference, Washington, DC, pp. 1150-1155.
- Richards, M.A., 2005, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw-Hill, New York
- Richards, M.A., Scheer, J.A., William A.H., 2010, Principles of modern radar, SciTech Pub.
- Schikorr, M., 2010, Medium-PRF detection by non-coherent integration, Radar Conference (EuRAD), European, Paris, p. 224-227.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Simpson J., 1988, PRF set selection for pulse-Doppler radars, IEEE Region 5 Conference, 'Spanning the Peaks of Electrotechnology', Colorado Springs, CO, p. 38-44.
- Skolnik, M., 2002, Introduction to Radar Systems, McGraw-Hill, New York.
- Skolnik, M., Radar Handbook, 2008, McGraw-Hill, New York.
- Stimson, G.W., 1998, Introduction to airborne radar, SciTech Pub.
- Sun, J., Tian, J., Wang, G., Mao, S., 2010, Doppler ambiguity resolution for multiple PRF radar using iterative adaptive approach, Electronics Letters, vol. 46, no. 23, p. 1562-1563.
- Trunk, G., Brockett, S., 1993, Range and velocity ambiguity resolution, Radar Conference, Record of the 1993 IEEE National, Lynnfield, MA, USA, p. 146-149.
- Xiong, Y., Cheng, M., Gao, Y., Li, B., Wang, J., 2011, Simulation research on the use of phase encoding algorithm in correcting range ambiguity for Doppler weather radar, International Conference on Information Science and Technology, Nanjing, p. 761-765.
- Wang, H., Wicks, M., Zhang, Y., 1995, A new Doppler processing technique for detection performance improvement in existing airborne radars, Radar Conference, Record of the IEEE 1995 International, Alexandria, VA, p. 72-76.
- Wang, X., Xie, C., 2011, Comparison of sz phase coding and batch mode to mitigate range ambiguity of doppler weather radar, Natural Computation (ICNC), 2011 Seventh International Conference on, Shanghai, p. 2027-2031.
- Wiley, D., Parry, S., Alabaster, C., Hughes, E., 2006, Performance comparison of PRF schedules for medium PRF radar, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 42, no. 2, p. 601-611.
- Zhen-xing, H., Zheng, W., 1987, Range ambiguity resolution in multiple PRF pulse Doppler radars, Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '87., p. 1786-1789.