

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRONİK HARP ORTAMINDA KULLANILAN FARKLI ALMAÇ
YAPILARI VE DEĞİŞKEN ÖZELLİKLERİ**

Cenk Kaan ZEKİ FİKRET

ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2024**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRONİK HARP ORTAMINDA KULLANILAN FARKLI ALMAÇ YAPILARI VE DEĞİŞKEN ÖZELLİKLERİ

Cenk Kaan ZEKİ FİKRET

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet AKBULUT

Elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaç yapılarının detaylı analizi hazırlanan bu tez kapsamında sunulmuştur. Farklı senaryolara göre tercih edilen almaçların kullanım alanları ve bu almaçların hangi parametrelere göre tasarlanması gerektiği incelenmiştir. Literatüre sunulan önemli bir diğer katkı ise, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının farklı karıştırma türleri karşısında başarımının incelenmesidir. Analiz kapsamında, taramalı, taşıyıcı frekans, baraj ve yükseltilmiş gürültü karıştırma çeşitlerinin MATLAB ortamında benzetimi yapılmıştır. Karıştırmaya karşı performans analizi için kullanılan değişkenler karıştırma türü, süperhet almaçın yayın yaptığı sinyal türü, RADAR ve karıştırıcı savaş uçağı arasındaki mesafe ve karıştırıcı savaş uçağının RADAR kesit alanı olmuştur. Sinyallerin frekans eksenindeki Fast Fourier Transfom çıktısı ise, 4 farklı durumda incelenmiştir. Karıştırma çeşitlerine karşı elektronik harp sistemlerinde sık tercih edilen süperhet almaçlar benzetim ortamında analiz edilmiştir. Sendelemeli, Titremeli ve Lineer Frekans Modülasyonu ile yayın yapan süperhet almaçların karıştırmaya karşı etkinliği araştırılmıştır. Süperhet almaçlar, katmanlara ayrılabilen, yüksek kaliteli filtreler ve yükselteçlere sahip modern almaç yapılarıdır. Karıştırma sinyallerinin almaçlar üzerindeki etkinliği, Jamming To Signal Ratio (Sinyalin Karıştırmaya Oranı) parametresi ile dB cinsinden analiz edilmiştir. Süperhet almaçların karmaşık elektronik harp ortamında kullanılan RADAR'lar için neden tercih edildiği, yapılan benzetim çalışması ve uygun literatür taraması ile doğrulanmıştır.

Ağustos 2024, 154 sayfa

Anahtar Kelimeler: Almaç, Karıştırma, Sinyal İşleme, Elektronik Harp, Benzetim

ABSTRACT

Master's Thesis

DIFFERENT RECEIVER STRUCTURES AND THEIR VARIABLE FEATURES USED IN THE ELECTRONIC WARFARE ENVIRONMENT

Cenk Kaan ZEKİ FİKRET

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assistant Professor Ahmet AKBULUT

A detailed analysis of RADAR receiver structures used in the electronic warfare environment has been presented to the literature within the scope of this thesis. The usage areas of preferred receivers according to different scenarios and the parameters by which these receivers should be designed are also examined. Another important contribution to the literature is the examination of the performance of RADAR receivers, which are superhet receivers used in the electronic warfare environment against different jamming types. Sweep, spot, barrage and amplified noise jamming types were simulated in the MATLAB environment. The variables used for anti-jamming performance analysis were jamming type, the type of signal transmitted by the superhet receiver, distance between RADAR and the fighter aircraft, and RADAR cross-sectional area of the fighter aircraft. The Fast Fourier Transform output of the signals on the frequency axis was examined in 4 different cases. Superhet receivers are modern receiver structures that can be separated into layers and have high quality filters and amplifiers as they perform effectively against jamming types. The effectiveness of jamming signals on the receivers was analyzed in dB with the Jamming To Signal Ratio parameter. The preference of superhet receivers for RADARs used in complex electronic warfare environments has been confirmed by the simulation study and appropriate literature review.

August 2024, 154 pages

Key Words: Receiver, Jamming, Signal Processing, Electronic Warfare, Simulation

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrencisi olarak başladığım Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesinden mezun olmaktan büyük bir gurur ve mutluluk duymaktayım. Kazanmış olduğum iki yıllık akademik tecrübe ve bilgi birikiminin sonucu olarak tezimi tamamlamış olmanın mutluluğunu yaşıyorum.

Lisansüstü çalışmalarına başladığım günden beri benden desteklerini, bilgilerini ve tecrübelerini esirgemeyen, bana akademik yolda ışık tutan tez danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Akbulut'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Elektrik elektronik mühendisliğine ilk atılımımı sağlayan, bana meslek kazandıran ve elektrik elektronik mühendisliği konusunda beni yetiştiren, lisans öğretiminden mezun olduğum Başkent Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesi hocalarıma teşekkürlerimi sunarım

Mühendislik becerilerimin artmasına olanak sunan, lisansüstü öğretim sürecimi zenginleştiren, daha iyi bir mühendis olarak akademik çalışmalara devam etme isteğimi aşıl原因an tüm Ankara Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Fakültesi hocalarıma teşekkür ediyorum.

Eğitim öğretim hayatım boyunca bana sonsuz desteklerini sunan aileme teşekkür ederim.

Cenk Kaan ZEKİ FİKRET
Ankara, Ağustos 2024

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iv
KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. YÖNTEM	2
3. TEMEL BİLGİLER VE RADAR ELEKTRONİK HARP'E GİRİŞ	3
3.1 RADAR Sınıflandırılması	4
3.2 Elektronik Harp Almaçları Çalışma Prensipleri	4
3.3 RADAR Sinyali İşlemede Kullanılan Temel Bilgiler	5
3.4 Frekans Kayması	6
3.5 Tutarlılık	7
3.6 RADAR Darbe Sinyali İşleme	8
3.7 Sendelemeli ve Titreşimli Darbe Sinyali İşleme	9
3.8 Sınırlı Süreli / Periyodik Darbe Sinyali	11
3.9 RADAR Sürekli Dalga Sinyali İşleme	12
3.10 Lineer Frekans Modülasyonu ve Doppler Etkisi	13
3.11 İdeale Yakın Sürekli Dalga RADAR Sinyali İşleyebilme	15
3.12 Uyumlu Filtre	16
3.13 Darbe Sıkıştırma	17
4. ELEKTRONİK HARP ALMAÇLARININ ÖNEMİ	18
4.1 Elektronik Harp Ortamında Tercih Edilen RADAR'larda Kullanılan Almaçlar	19
5. KRİSTAL VIDEO ALMAÇLARI	20
5.1 Kristal Video Almaç ve Ölçüm Performansı	23
5.2 Kristal Video Almaçlarına Yönelik Tasarımsal Genişletme Önerileri	24
6. SÜPERHETERODİN ALMAÇ	28
6.1 RF Katman	28
6.2 Mikser Katmanı	30
6.3 IF Katmanı	31
6.4 Sayısal Katman	32
6.5 Süperheterodin Almaç Performans Analizi	33
7. HOMODYNE (ZERO IF) ALMAÇ	38
7.1 Homodyne Almaç Performans Analizi ve Tasarım Problemleri	39
7.2 Homodyne ve Superheterodyne Almaçlar İçin Tasarımsal Tercihler	43
8. AYARLI RADYO FREKANS ALMAÇLARI	44
9. INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASUREMENT (IFM)	
ALMAÇLARI	47
9.1 Kristal Video Almaçları ve IFM Almaçları	48
9.2 IFM Almaçlara Limitleyici Devre Uygulaması	48

9.3 Aynı Anda Gelen Sinyallerin IFM Almaç Tarafından Analiz Edilme Performansı.....	49
9.3.1 Limiter (sınırlayıcı) olmadan statik durum	50
9.3.2 Sınırlayıcı ile statik durum	51
9.3.3 Dinamik durum	52
9.4 Sürekli Dalga Sinyaller ve IFM Almaçları	55
10. COMPRESSIVE (KOMPRESİF) ALMAÇLAR.....	56
10.1 Kompresif Almaçlar ve Ötümlü Sinyallerle Olan Analizi.....	57
10.2 Dağıtıcı Gecikme Hattı Birimlerinin Kompresif Almaçlarda Kullanımı	60
10.3 Uygulamalı Olarak Kullanılan SAW Cihazlarının Performans Sınırlamaları	60
10.4 Çarpım Konvolüsyon Konfigürasyonlu Kompresif Almaç Prensibi	61
10.5 Kompresif Almaçlarda Taramalı Lokal Osilatör Kullanımının Temel Etmenleri	62
10.6 Komresif Almaçların Frekans Çözünürlüğü ve Doğruluğu, Hassasiyet ve Sıkıştırma Zamanı	63
10.7 Aynı Anda Gelen Sinyallerin Tespiti İçin Öneriler	65
10.8 Kompresif Almaçların Elektronik Harp'te Yeri	65
11. ÇOK KANALLI ALMAÇLAR	66
12. BRAGG CELL ALMAÇLAR.....	69
13. SAYISAL (DİJİTAL) ALMAÇLAR.....	71
13.1 Dar Bantlı Sayısal Almaçlar	72
13.2 Sayısal Almaç Mimarileri ve Tasarım Parametreleri	72
13.3 Sayısal Almaçlar Genel Mimari ve Elektronik Harpte Kullanımı	73
14. RWR RECEIVER YAPISININ TANITIMI VE KISITLAMALARI.....	78
14.1 Sinyal İşleme Belirsizlikleri	79
14.2 Pilot Manevraları.....	79
14.3 Elektromanyetik Girişim (EMI).....	80
14.4 Elektronik Harp Ortamında Kullanılan Elektronik Harp Almaçları ve Kullanımı	81
15. RADAR SİSTEMLERİNDE KULLANILAN SÜPERHET ALMAÇLARIN SİNYAL KARIŞTIRMA TÜRLERİNE KARŞI DAYANIKLILIK ANALİZİ.....	84
15.1 Elektronik Harp Ortamında Kullanılan Karıştırma Çeşitleri.....	84
15.1.1 Taşıyıcı frekans karıştırma	84
15.1.2 Taramalı karıştırma.....	85
15.1.3 Baraj karıştırma	85
15.1.4 Yükseltilmiş gürültü karıştırması.....	85
15.1.5 Çoklu yanlış hedef karıştırması	86
15.2 RADAR Sistemlerinde Kullanılan Süperhet Almaçların Farklı Sinyal Karıştırma Tekniklerine Karşı Performans Analizi	86
15.2.1 Yöntem	86
15.3 Titremeli Sinyal Gönderen Süperhet Almaçların Sinyal Karıştırma Karşısında Performansı	87
15.3.1 Taşıyıcı frekans karıştırma	87
15.3.2 Baraj karıştırma	91
15.3.3 Taramalı karıştırma.....	95
15.3.4 Yükseltilmiş gürültü karıştırması.....	100

15.3.5 Titremeli Sinyal İleten Süperhet almaç karıştırmalara karşı performans tablosu	104
15.4 Sendelemeli Sinyal Gönderen Süperhet Almacın Karıştırma Karşısında Performansı	105
15.4.1 Taşıyıcı frekans karıştırma	105
15.4.2 Taramalı karıştırma	109
15.4.3 Yükseltilmiş gürültü karıştırması	113
15.4.4 Baraj karıştırma	118
15.4.5 Sendelemeli sinyal ileten Süperhet almaç karıştırmalara karşı performans tablosu	122
15.5 LFM Sinyal Gönderen Süperhet Almacın Karıştırma Karşısında Performansı	123
15.5.1 Taşıyıcı frekans karıştırma	124
15.5.2 Taramalı karıştırma	127
15.5.3 Yükseltilmiş gürültü karıştırması	132
15.5.4 Baraj karıştırma	136
15.5.5 LFM sinyal ileten Süperhet almaç karıştırmalara karşı performans tablosu	141
15.6 50km ve 20km Mesafede Sendelemeli, Titremeli ve LFM Sinyali İleten Süperhet Almaçların Karıştırma Karşısında Analizi	142
15.7 RCS Değeri Düşürüldüğü Zaman Gerçekleşen Karıştırma Performans Analizi	144
16. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	145
KAYNAKLAR	149
EK 1 İNGİLİZCEDEN TÜRKÇEYE YAPILAN ÇEVİRİLER	152
ÖZGEÇMİŞ	154

KISALTMALAR DİZİNİ

A/D	Analog to Digital
ADC	Analog to Digital Converter
AM	Amplitude Modulation
AOA	Angle of Arrival
CPU	Central Processing Unit
DDS	Direct Digital Synthesis
DSP	Digital Signal Processing
EMI	Electromagnetic Interference
FFT	Fast Fourier Transform
FM	Frequency Modulation
FT	Fourier Transform
GHz	Giga Hertz
IF	Intermediate Frequency
IFM	Instantaneous Frequency Measurement
LFM	Linear Frekans Modülasyonu
LNA	Low Noise Amplifier
LTI	Linear Time Invariant
RCS	RADAR Cross Section
PG	Processing Gain
PRI	Pulse Repetition Interval
PW	Pulse Width
Q	Quality Factor
R	Range
RADAR	Radio Detection and Ranging
RCS	RADAR Cross Section
RF	Radyo Frekans
RSL	Required Signal Level
RWR	Radar Warning Receiver
SAW	Surface to Acoustic Wave
SLO	Swept Local Oscillator
SNR	Signal to Noise Ratio
STALO	Stable Local Oscillator
t	Time
TSS	Tangential Sensitivity

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1	Monostatik RADAR ve hedef izlenimi	3
Şekil 3.2	Darbe genişliği (kırmızı) ve darbe tekrar aralığı (yeşil)	5
Şekil 3.3	Doppler etkisi.....	7
Şekil 3.4	Tutarlılık	8
Şekil 3.5	Monostatik darbe RADAR'ında kullanılan almaç-göndermeç şeması.....	9
Şekil 3.6	Sabit, sendelemli ve titreşimli darbe katarı şeması.....	10
Şekil 3.7	Sendelemeli ve titreşimli darbeler	11
Şekil 3.8	Periyodik darbe sinyali ile sınırlı süreli darbe	12
Şekil 3.9	Doppler etkili ve etkisiz LFM modülasyonuna uğramış RADAR sinyali.....	15
Şekil 3.10	Uyumlu süzgeç kullanılan önkat RF almaç yapısı.....	16
Şekil 3.11	Darbe sıkıştırma	17
Şekil 5.1	Kristal video almaç tasarım örnekleri	20
Şekil 5.2	Kristal video almaçlarında sürekli dalga signal analizi için genişletmeler	26
Şekil 6.1	Süperhet almaç tasarım örneği.....	28
Şekil 6.2	İkincil IF katmanının tasarlanması	32
Şekil 6.3	Kristal video ve süperhet almaçların beraber kullanılmasıyla elde edilen yüksek yetenekli almaç tasarımı	34
Şekil 6.4	IF katman frekans indirgeme analizi için sinyallerin önden modellenmesi ve kararlanması.....	37
Şekil 7.1	Zero IF almaç sistem tasarımı.....	38
Şekil 7.2	Temel bant sinyale indirgeme	39
Şekil 7.3	Zero IF almaç lokal osilatör ve dışarı kaynaklı girişim ve mikserleme sorunları	42
Şekil 8.1	Ayarlı radyo frekans almaç tasarım örneği.....	44
Şekil 8.2	Ayarlı radio almaçlarının elektronik harp sistemlerine entegre çalışması.....	46
Şekil 9.1	Kristal video almaçlar ve IFM almaçların beraber çalıştığı sistem tasarımı.....	48
Şekil 9.2	Worst Case Angle görselleştirilmesi.....	51
Şekil 9.3	Dinamik durum örnek görselleştirme	53
Şekil 10.1	Kompresif almaç basit yaklaşım tasarımı	57

Şekil 10.2	Konvolüsyon-çarpım-konvolüsyon ve çarpım-konvolüsyon-çarpım tasarımları	57
Şekil 10.3	Kompresif almaç elektronik harp şeması.....	58
Şekil 11.1	Çok kanallı almaç tasarım örneği	66
Şekil 12.1	Bragg Cell almaç sistem tasarımı	70
Şekil 13.1	Temel sayısal almaç yapısı	71
Şekil 14.1	RWR almaç sistem tasarımı.....	79
Şekil 14.2	Girilen sıklık parametrelere göre tarama esnasında hedef yayınların tespitini öngörebilen veri üretim çalışması.....	83
Şekil 15.1	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	88
Şekil 15.2	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT Çıktısı.....	88
Şekil 15.3	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması	89
Şekil 15.4	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı.....	89
Şekil 15.5	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal.....	90
Şekil 15.6	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal FFT çıktısı	90
Şekil 15.7	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	91
Şekil 15.8	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	92
Şekil 15.9	Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali	92
Şekil 15.10	Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali FFT çıktısı	93
Şekil 15.11	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması	93
Şekil 15.12	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı.....	94
Şekil 15.13	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal.....	94
Şekil 15.14	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal FFT çıktısı	95
Şekil 15.15	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	96
Şekil 15.16	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	96
Şekil 15.17	Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali	97
Şekil 15.18	Karıştırıcı tarafından iletilen taramalı karıştırma sinyali FFT çıktısı	97
Şekil 15.19	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması	98
Şekil 15.20	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı	98
Şekil 15.21	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	99
Şekil 15.22	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı.....	99
Şekil 15.23	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	100

Şekil 15.24	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	101
Şekil 15.25	Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali	101
Şekil 15.26	Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali FFT çıktısı	102
Şekil 15.27	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması	102
Şekil 15.28	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıkışı	103
Şekil 15.29	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	103
Şekil 15.30	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıkışı	104
Şekil 15.31	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	106
Şekil 15.32	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	106
Şekil 15.33	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması	107
Şekil 15.34	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıkışı	107
Şekil 15.35	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal	108
Şekil 15.36	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal	108
Şekil 15.37	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	109
Şekil 15.38	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	110
Şekil 15.39	Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali	110
Şekil 15.40	Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali FFT çıktısı	111
Şekil 15.41	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması	111
Şekil 15.42	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı	112
Şekil 15.43	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	112
Şekil 15.44	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıkışı	113
Şekil 15.45	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	114
Şekil 15.46	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	114
Şekil 15.47	Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali	115
Şekil 15.48	Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali FFT çıktısı	115
Şekil 15.49	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması	116
Şekil 15.50	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıkışı	116
Şekil 15.51	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	117

Şekil 15.52	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı.....	117
Şekil 15.53	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	118
Şekil 15.54	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	119
Şekil 15.55	Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali	119
Şekil 15.56	Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali FFT çıktısı	120
Şekil 15.57	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması	120
Şekil 15.58	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı.....	121
Şekil 15.59	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	121
Şekil 15.60	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı.....	122
Şekil 15.61	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	124
Şekil 15.62	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	124
Şekil 15.63	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması	125
Şekil 15.64	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı.....	126
Şekil 15.65	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal.....	126
Şekil 15.66	Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal FFT çıktısı	127
Şekil 15.67	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	128
Şekil 15.68	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	128
Şekil 15.69	Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali	129
Şekil 15.70	Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali FFT çıktısı.....	129
Şekil 15.71	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması	130
Şekil 15.72	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı.....	130
Şekil 15.73	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	131
Şekil 15.74	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı.....	131
Şekil 15.75	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	132
Şekil 15.76	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	133
Şekil 15.77	Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali	133
Şekil 15.78	Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali FFT çıktısı	134
Şekil 15.79	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması	134

Şekil 15.80	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı.....	135
Şekil 15.81	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	135
Şekil 15.82	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı.....	136
Şekil 15.83	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali	137
Şekil 15.84	RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı	137
Şekil 15.85	Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali	138
Şekil 15.86	Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali FFT çıktısı	138
Şekil 15.87	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması	139
Şekil 15.88	Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı.....	139
Şekil 15.89	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması	140
Şekil 15.90	Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı.....	140

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 15.1	Titremeli Sinyal İleten Süperhet almaç farklı karışımlara karşı performans analizi	105
Çizelge 15.2	Sendelemeli sinyal gönderen süperhet almaç karıştırma karşısında performans analizi	123
Çizelge 15.3	LFM sinyal gönderen süperhet almaç karıştırma karşısında performans analizi	141
Çizelge 15.4	50km mesafe ile süperhet almaç karıştırma sonuçları.....	142
Çizelge 15.5	20km mesafe ile süperhet almaç karıştırma sonuçları.....	143
Çizelge 15.6	10m ² RCS senaryosunda savaş uçağında karşı süperhet almaç çeşitli karıştırma performans analizi	144

1. GİRİŞ

Elektronik harp ortamında karıştırma, sinyal işleme gibi çeşitli işlemlerin gerçekleşmesindeki en büyük unsurlardan biri harp ortamına uygun almaçların sistemlere entegre edilmesidir. Yer destek merkezleri, havadan ihbar uçakları, savaş uçakları veya hava savunma sistemleri farklı amaçlar için tasarlanmış almaçların RADAR veya istihbarat sistemlerine entegre edilebilmesiyle bugünkü işlevlerini karşılayabilmektedir. Elektronik harp ortamı, yoğun RF sinyali içeren, bilgi karmaşıklığının yüksek olduğu ve istihbari bilginin hayati önem taşıdığı bir savunma-saldırı ortamıdır. Elektronik harp sistemlerinin, üstün teknolojiyle donatılmış olması, harp esnasında kullanıcı tarafına önemli bir avantaj sağlayacaktır. Elektronik harp ortamında iletilen mesaj sinyallerinin almaç sistemi tarafından alınarak, en doğru şekilde analizinin gerçekleştirilip elektronik harp kullanıcı ekranlarına en yüksek hızda sunulabilmesi, elektronik harp ekipleri için kritik önem arz etmektedir.

Elektronik harp ortamında kullanılan almaçlar, istihbari çalışmalar için kritik önem arz etmektedirler. Almaçların tasarım süreçleri, sundukları avantajlar ve dezavantajlar ile beraber hangi elektronik harp sisteminde hangi almaç türünün kullanılacağını belirlemektedir. Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının hassasiyet, veri analizi, uyumlu sinyal ölçümü yapabilme gibi tasarım kriterleri mevcuttur. Karşıt elektronik harp karıştırıcılarından iletilen karıştırma sinyallerine karşı dayanıklılık, yoğun RF sinyal içeren elektronik harp ortamlarında kullanılan almaçlar için önemlidir.

Karıştırma sinyalleri, yükseltilmiş gürültü, taşıyıcı frekans, baraj ve taramalı gibi birden çok çeşitte almaçlara karşı iletilebilmektedir. Bu karıştırma türleri, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının sinyal analiz performansını düşürmeye yönelik karıştırma yöntemleridir. Farklı karıştırıcılara karşı tasarimsal olarak alınacak önemler, istihbari açıdan önemlidir. Karıştırma metotlarına karşı dayanıklı, talep edilen sinyal işleme metotlarıyla uyumlu almaçlar, elektronik harp sistemlerinde uzun ömürlü olmakla birlikte tasarimsal olarak talep edilmektedir.

2. YÖNTEM

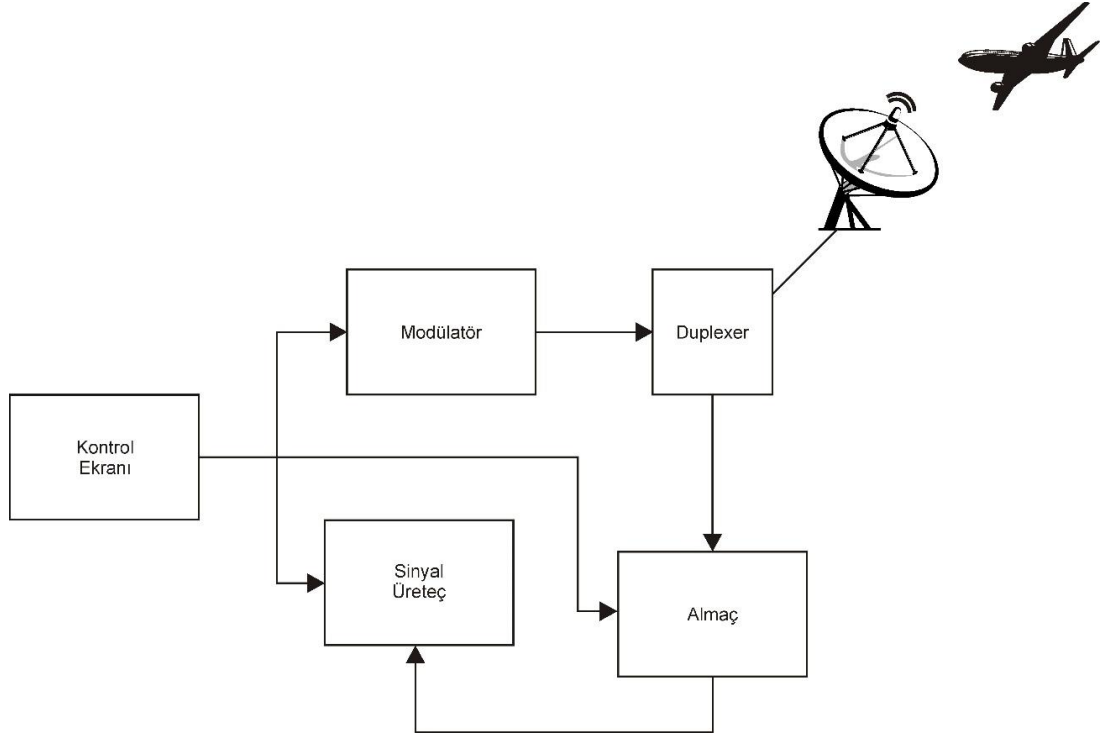
Tez çalışması öncelikli olarak elektronik harp ortamı, temel RADAR bilgisi, almaç tasarımları hakkında teorik bilgiyi kapsamlı olarak sunmaktadır. MATLAB üzerinden elektronik harp ortamında gözlemlenen karakteristik sinyallerin analizi de sunulmaktadır. Daha sonrasında almaç tasarımları hakkında analizlere girilerek almaç tasarım parametreleri hakkında detaylı çalışma sunulmaktadır.

Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarına yönelik karşılaşılan tasarım problemleri ve bu problemlere yönelik çözüm teknikleri ve önerileri sunulmuştur. Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının diğer almaçlarıyla beraber melezlenmeleri, birlikte çalışmaları ve buna yönelik gösterebildikleri performans çalışılmıştır. Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının kullanıldığı örnek tasarımlar sunulmuştur. Daha sonrasında elektronik harp ortamında sıkça karşılaşılan sorunlar ele alınarak bunların elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçları kullanılarak nasıl çözülebileceği tartışılmıştır.

Elektronik harp ortamında sık tercih edilen almaç türleri IFM ve süperhet almaçların farklı karıştırma türleri karşısında performans analizi MATLAB üzerinde benzetim ortamı kurularak gerçekleştirilmiştir. Özdeş elektronik harp sistemlerinin kullanıldığı benzetim ortamında, farklı karıştırma türleri elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarına uygulanarak almaçların sinyal işleyebilme yetenekleri gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgular literatür kapsamında doğrulanmıştır.

3. TEMEL BİLGİLER VE RADAR ELEKTRONİK HARP'E GİRİŞ

RADAR, kelime bazında, 'Radio Detection and Ranging (Radyo ile Tespit Etme ve Menzil Tayini)' anlamına gelmektedir. RADAR çalışma prensibi olarak elektromanyetik enerjinin iletimi için 'Modulated Waveform' (Modülasyona Uğramış) ve 'Directive Antenna' (Yönlendirilmiş Anten) kullanılır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). İlgilenilen, taraması yapılan bölgede tespit edilen unsurlardan geri yansıyan dalga biçimleri, kullanıcıya tespit edilen nesne hakkında dalga biçimine uygulanan sinyal işleme yöntemi ve/veya modülasyon cinsinden bilgiler sunar (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Farklı modülasyon, sinyal işleme tekniğine göre elde edilecek olan bilgiler, bilginin sunum şekli veya bilgilerin sayısal ortama sunulması için izlenmesi gereken indirgeme, sayısallaştırma aşamaları değişkenlik göstermektedir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).



Şekil 3.1 Monostatik RADAR ve hedef izlenimi

3.1 RADAR Sınıflandırılması

RADAR'ların sınıflandırılması için türlü tanımlamalar NATO gibi askeri kuruluşlar tarafından geliştirilmiştir. Fakat sinyal işleme bakış açısından incelendiği takdirde, RADAR'ların ikiye ayrıldığını gözlemek mümkündür (Mahafza 2013). Bunlar;

- Modülasyon uygulanmış ya da uygulanmamış Continuous Wave (Sürekli Dalga) RADAR'lar.
- Zaman ekseninde belirli bir sıkıştırmaya uğramış, 'Pulse Train (Darbe Katarı)' ile çarpılmış, Pulsed Wave (Darbeli Dalga) RADAR'lar.

olarak isimlendirilir (Adamy 2004).

3.2 Elektronik Harp Almaçları Çalışma Prensipleri

Almaç-Göndermeç mimarisi göz önüne alındığında RADAR çalışma mantığı;

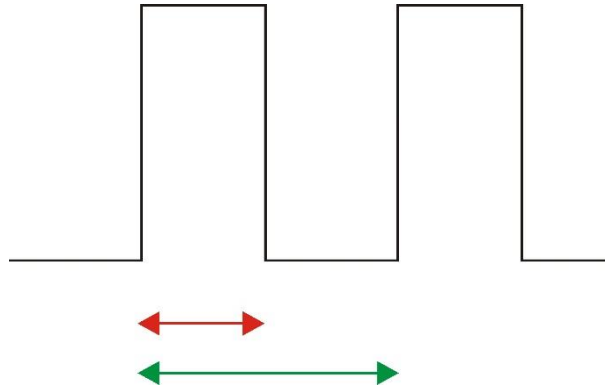
- Verici antenden iletilen sinyal taranan bölgedeki hedefe doğru gönderilir.
- Hedeften yansıyan sinyal, almaç mimarisindeki anten tarafından alınır ve almaç yapısında kullanılan alt sistemlere iletilir.

Filtreleme, yükseltme, alçaltma, demodüle etme gibi aşamalar almaç mimarisinde gerçekleştirilmektedir. Almaç'ta gerçekleşen aşamalardan sonra sayısallaştırılan bilgiler bilgisayar donanımına aktarılmakta, kullanıcıya sunulmaktadır (Skolnik 1981).

Sürekli Dalga RADAR'lar almaç ve göndermeç için iki ayrı anten barındırmaktadırlar. Bu RADAR'lar, Bistatik RADAR olarak adlandırılmaktadırlar. Darbed Wave RADAR'lar ise almaç ve göndermeç için tek bir anten kullanılmaktadırlar, 'Monostatic RADAR (Monostatik RADAR)' olarak adlandırılırlar. Hem Sürekli dalga hem Darbe RADAR'lar, sinyal işleme algoritmasında kullanılan modülasyon türüne göre mesafe ve/veya hız ölçümü yapabilmektedirler (Pakfiliz 2021).

3.3 RADAR Sinyali İşlemede Kullanılan Temel Bilgiler

RADAR sinyal işleme yöntemleri geliştirilirken almanın çıktısında okunacak olan sayısal verilerin kullanıcıya nasıl sunulacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Kullanıcı operatör'ün aşına olduğu, yorumladığı, daha önce yapılmış olan istihbarat çalışmalarından elde edilen parametrik tanımlar göz önüne konulduğunda, ihtiyaç duyulan RADAR sinyal işleme metodunun algoritmik gereksinimleri ortaya çıkmaktadır (Mahafza 2013). RADAR sinyal işleme metotları arasında, 'Pulsed Waveform (Darbeli Dalgaformu)' sinyalleri işlendiği takdirde, 'Pulse Repetition Interval (Darbe Tekrar Aralığı)' tanımı literatürde geçmektedir (Skolnik 1981, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). İki ardışık darbe'nin yükseliş anındaki zaman farkına darbe tekrar aralığı adı verilir. Zaman ve frekans arasındaki ilişkinin ' $1/f$ ', ters orantılı olduğu kabul edilirse, ' $1/PRI$ ', 'Pulse Repetition Frequency' tanımını ortaya çıkarmaktadır (Skolnik 1981, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Darbe Width'in Pulse Repetition Frequency'e bölümü ise, 'Duty Ratio (Görev Döngüsü)' tanımını oluşturmaktadır (Pakfiliz 2021). RADAR sisteminden aktarılacak olan ortalama güç, görev döngüsü değeri ile RADAR'dan aktarılacak olan elektromanyetik dalga'nın maksimum gücün çarpımı olarak tanımlanmaktadır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).



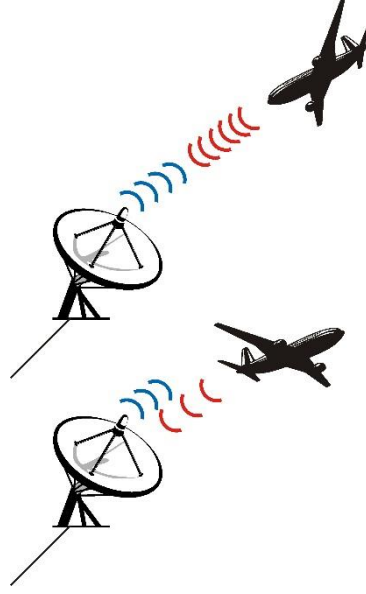
Şekil 3.2 Darbe genişliği (kırmızı) ve darbe tekrar aralığı (yeşil)

Two Time Delay (Çift Zamanlı Gecikme), ' Δt ', bilindiğinde RADAR'ın ölçeceği 'Range (Mesafe)' değeri bulunabilir. Güvenilir bir 'Unambiguous Range (Belirgin Mesafe)' hesabı içinse PRI değerinin yarısı kullanılmaktadır (Adamy 2004). Mesafe çözünürlüğü olarak adlandırılan Delta Range, ' ΔR ', birbirlerine yakın iki hedefin RADAR ekranında tek bir hedefmiş gibi gözükmesini engellemektedir (Adamy 2004). Bu çerçevede RADAR'ın 'Range Bin' performansı da belirlenmektedir (Adamy 2004).

3.4 Frekans Kayması

Frekans kayması, RADAR'lar için radyal hız, mesafe oranı gibi bilgileri çıkarmak için kullanılır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Frekans kaymasının ölçümünü ilgilendiren çalışmalarda Sürekli dalga RADAR'ları tercih edilmektedir.

Taraması yapılan harp alanında barınan coğrafi unsurlar, ağaç, tümseklik ve benzeri, gönderilen elektromanyetik sinyalin çarpıp yansması sonucu RADAR ekranını meşgul etmektedir. RADAR ekranında yansıyan Parazit yankıların belirlenmesi için RADAR Doppler bilgisini işlemelidir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Sabit veya hareketli, yaklaşan veya uzaklaşan hedefler için Doppler bilgisini işleyebilen, ölçümleri gerçekleştirebilen RADAR'lar önemlidir (Mahafza 2013). Doppler fenomeni, hareket eden hedeften dolayı dalgaformunda oluşan dalga boyunun değişikliğini vurgulamaktadır. Uzaklaşan bir hedeften geri yansıyan dalgaların dalgaboyunda bir artış, yaklaşan bir hedeften geri yansıyan dalgaların dalgaboyunda bir azalış görülmektedir. Buna bağlı olarak uzaklaşan bir hedeften yansıyan sinyalin, RADAR göndermecisi tarafından gönderilen sinyalin taşıyıcı frekansına kıyasla merkez frekansında bir azalış gözlemlenmektedir. Yaklaşan bir hedeften yansıyan sinyalin, RADAR göndermecisi tarafından gönderilen sinyalin taşıyıcı frekansına kıyasla merkez frekansında bir artış gözlemlenmektedir. Frekans kayması, hareket eden hedeften dolayı dalgaformunda oluşan merkez frekans değişikliğini açıklar. Bu bağlamda, yaklaşan hedeflere ait darbe'ler daha erken dönerken, uzaklaşan hedeflere ait darbe'ler ise daha geç döner (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).



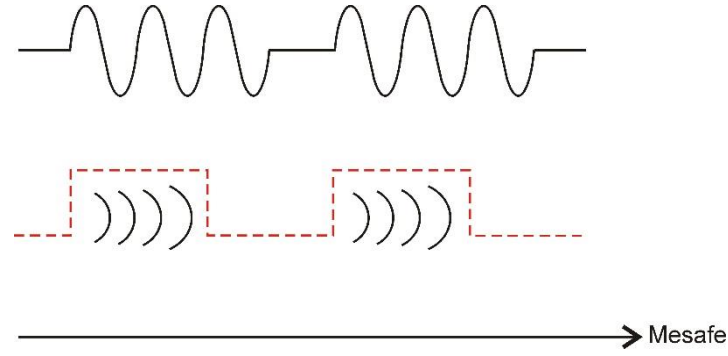
Şekil 3.3 Doppler etkisi

3.5 Tutarlılık

Coherence (Tutarlılık), iletilen iki darbenin fazı eşitse, bir RADAR'ın tutarlı olduğu anlamına geldiğini açıklamaktadır. İki aynı fazdaki ardışık darbe sinyalinin içinde tamsayı katı kadar dalgaboyunun bulunması tutarlılığın korunumunu sağlayacaktır. Sinüsoidal sinyallerin mantığı açısından bakılacak olursa, darbe içinde sıkıştırılan, ardışık sinüsoidal sinyallerin başlangıç ve bitiş noktalarının birbirlerine tamamlayıcı olması, tutarlılığın korunumu anlamına gelecektir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

Tutarlılık aynı zamanda bir RADAR almacınının alınan sinyalin fazını doğru çıkarabilmesiyle de açıklanabilir. Tutarlı veya Alış-Anında-Tutarlı RADAR'lar Doppler bilgisini çıkarabilir. Bir RADAR, aynı zamanda iletilen darbe'lerin faz bilgilerini hafızasında tutabiliyorsa, 'Coherent-on-Receive (Alış Anında Tutarlı)' veya 'Quasi Coherent (Kısmi Tutarlı)' olarak tanımlanır.

Stable Local Oscillator (Sabit Lokal Osilatör, STALO) kullanılarak tutarlılık korunumu sağlanabilir (Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

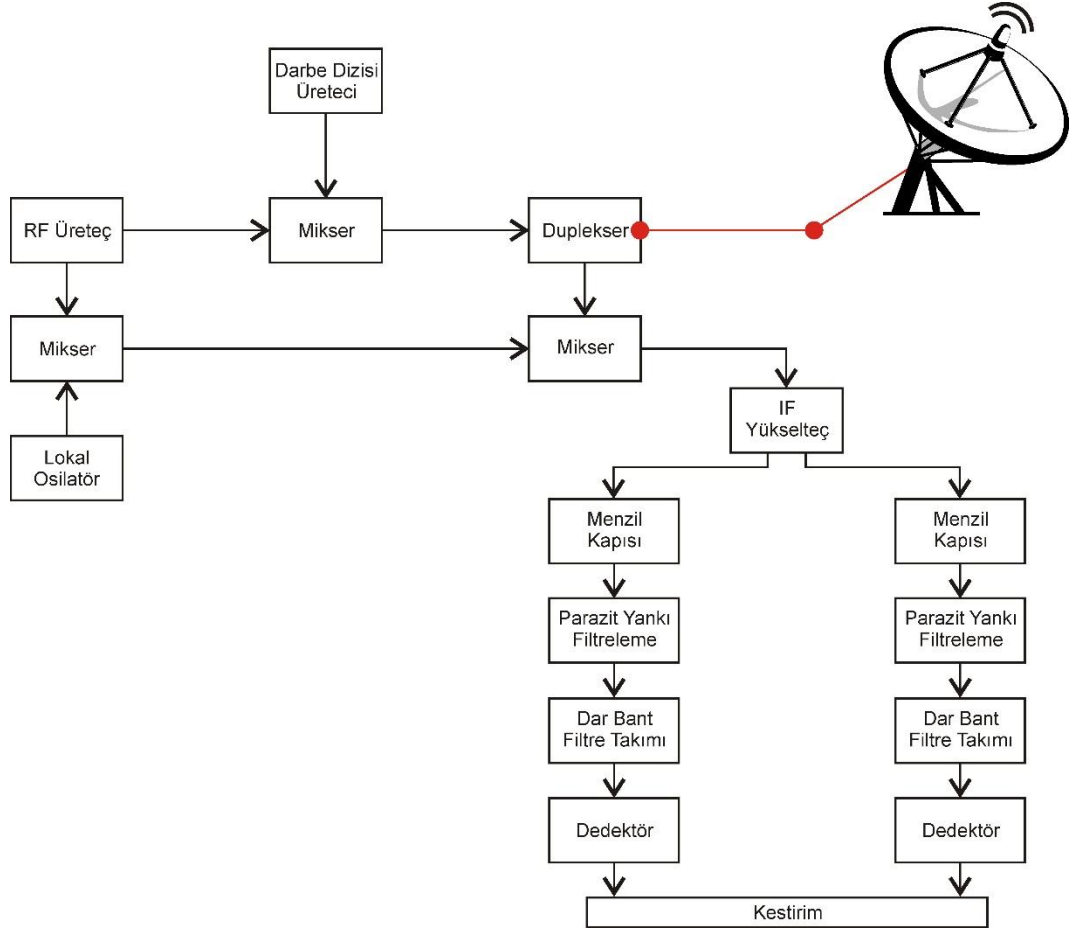


Şekil 3.4 Tutarlılık

3.6 RADAR Darbe Sinyali İşleme

RADAR darbe sinyali işleme, mesafe ölçümleri, özellikle kısa ya da orta menzilli mesafe ölçümleri için tercih edilen sinyal işleme metodu olarak tanımlanmaktadır. Stable Pulse (Sabit Darbe), Staggered Pulse (Sendelemeli Darbe) ve Jittered Pulse (Titremeli Darbe) algoritmik olarak kullanılan sinyal işleme metotlarına örnek olarak verilebilir. Darbe, içinde elektronik harp istihbari bilgilerini taşıyan sinyali işleyip iletebilmek için kilit bir noktadadır. Takibi yapılan hedeften geri yansıyan darbe sinyalinin gürültüye veya dış unsur karıştırma tekniklerine karşı olan dayanıklılığı, sinyal işleme kalitesini belirler (Mahafza 2013). RADAR almacının belirli hassasiyet seviyesindeki sinyalleri ölçebilecek durumda olması ve göndermecin anten ucundan gürbüz darbe sinyallerinin çıkması, tespit edilen hedef hakkında daha doğru bilgi çıkarımı yapılmasına sebep olacaktır (Adamy 2004).

Sabit PRI değerlerine sahip olan darbe dizilerine sabit darbe adı verilmektedir. Sabit olmayan, değişken PRI değerlerine sahip olan darbe dizileri sendelemeli veya titremeli türü programlanmış olabilmektedirler. Sabit olmayan PRI değerlerine sahip darbe dizileri dış karıştırma etkilerine karşı daha dayanıklıdır (Dinç 2010, Pakfiliz 2021). Aynı zamanda ‘Doppler Belirsizliği (Doppler Ambiguity)’ adı altında kör hızdan dolayı gözlemlenen taşıyıcı sinyal frekansında oluşan kaymalar önlenmiş olur. Sendelemeli veya titremeli olarak ayarlanan darbe dizilerinin içindeki Sürekli dalga sinüzoidal sinyaller Lineer Frekans Modülasyonu (LFM) gibi modülasyonlara tabii tutulabilmektedir (Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).



Şekil 3.5 Monostatik darbe RADAR’ında kullanılan almaç-göndermeç şeması

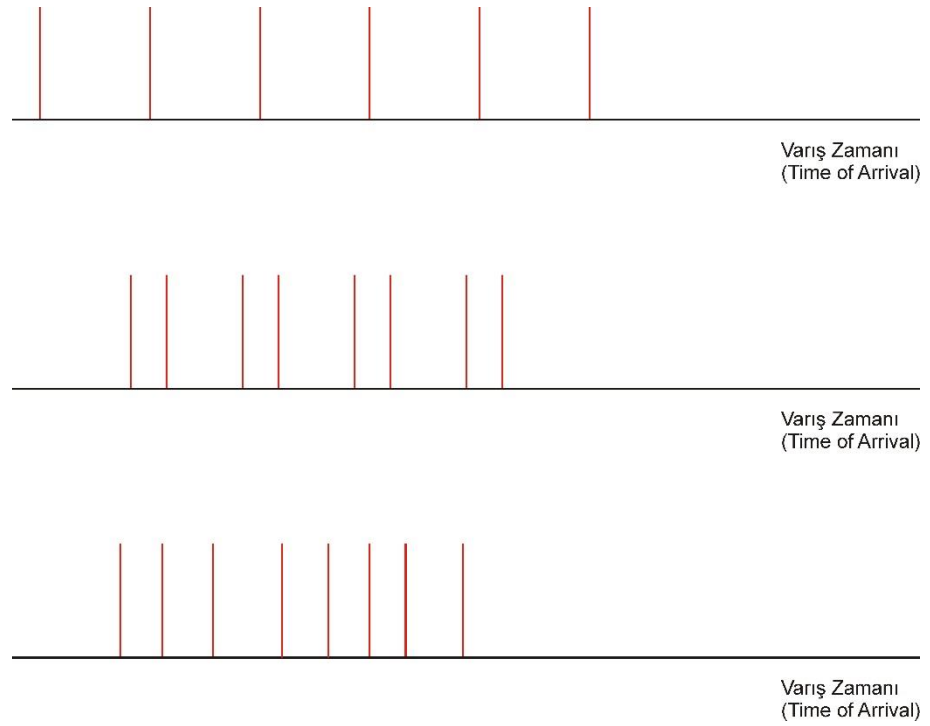
3.7 Sendelemeli ve Titreşimli Darbe Sinyali İşleme

Sendelemeli PRI, RADAR’ dan gönderilen darbe sinyallerinin PRI değerlerinin belirli bir patern içerisinde değişmesine sebep olan değişken PRI’lı sinyal işleme yöntemidir. Çift PRI’lı (2 PRI değerli) veya üçlü PRI’lı (3 PRI değerli) sendelemeli darbeler algoritmik olarak sinyal üreteç işlemcisini daha az yorduklarından ötürü tercih edilebilir darbe dizin kurallarıdır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

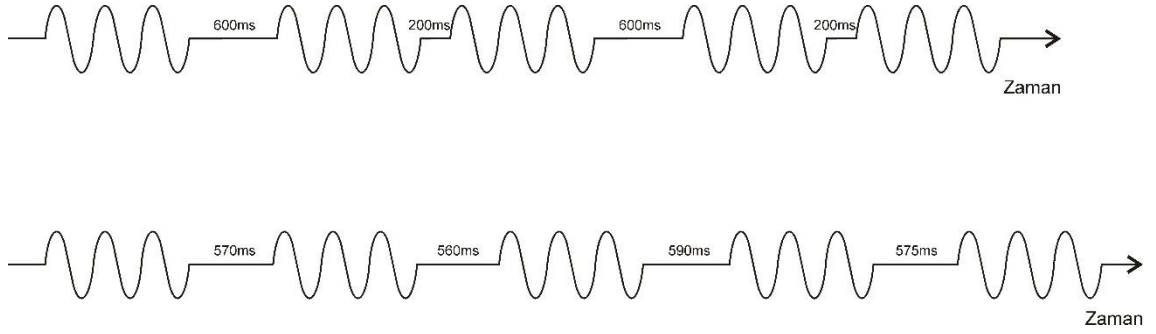
Kademeli olarak değişen PRI’lar sayesinde RADAR almacı geri dönen sinyaller ile yapılan kıyaslamada karıştırma ve parazit yankılara karşı daha net ölçüm sonuçları çıkarabilmektedir (Adamy 2004, Mahafza 2013).

Titremeli PRI metodu ise sendelemli PRI'a kıyasla benzerlik gösteren bir varyatif PRI darbe sinyali işleme metodudur. Sendelemli PRI, belirli bir patern içerisinde PRI değişikliğine tekabül ederken, titremeli PRI ise ardışık darbe'lerin başlangıçları arasındaki süre farkının arasında maksimum %30'luk bir değişime uğramasını öngörür (Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Kısaca, ardışık PRI değerlerinin uğrayacağı değişim maksimum %30 olacaktır. Homojen bir dağılım arzulanmaktadır.

Algoritmik olarak modellemek her ne kadar fiziksel veya yazılımsal hesap yoluyla başarılabilirse de, bir RADAR göndermecine programlanacak olan titremeli darbe dizini algoritmik karmaşıklığı arttırmaktadır. Aynı zamanda üreteç işlemcisi için daha hafıza kaplayıcı, yorucu algoritmalar olarak tanınmaktadırlar (Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).



Şekil 3.6 Sabit, sendelemli ve titreşimli darbe katarı şeması



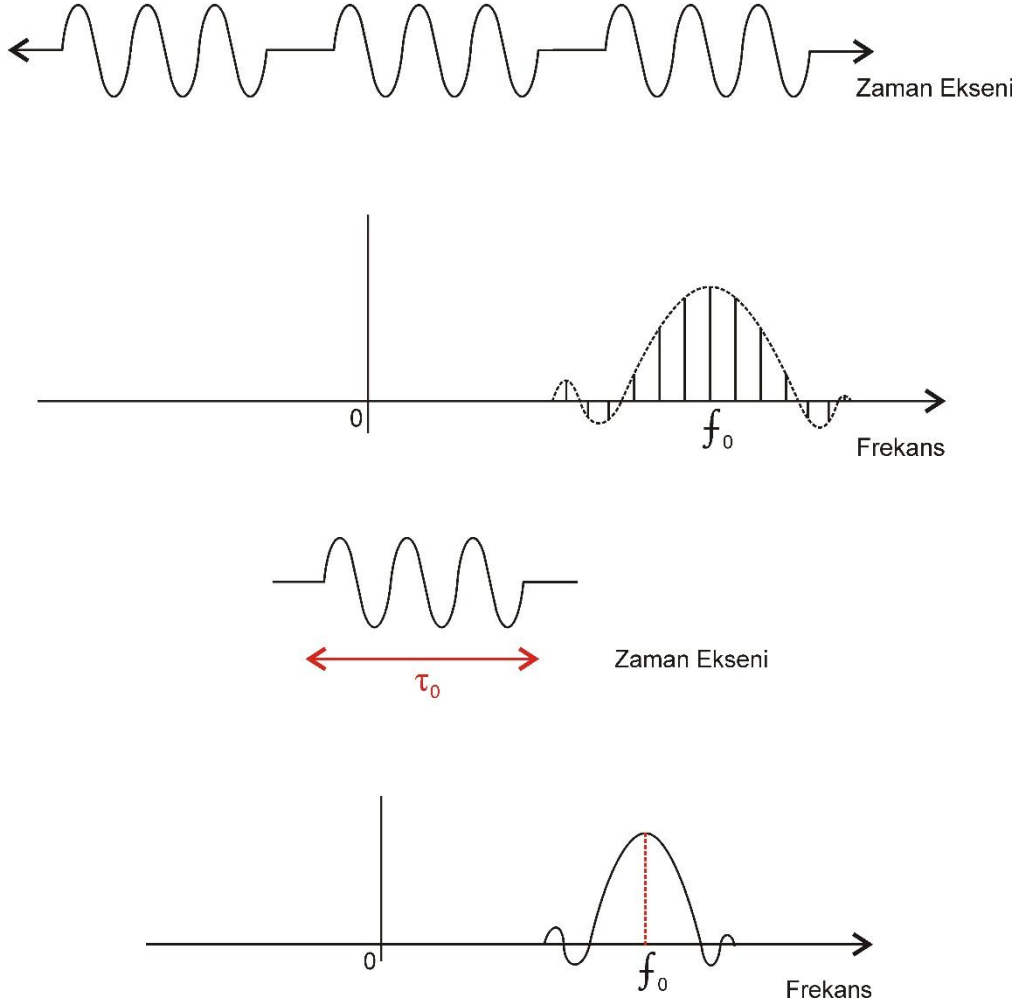
Şekil 3.7 Sendelemeli ve titreşimli darbeler

3.8 Sınırlı Süreli / Periyodik Darbe Sinyali

Sürekli sinüzoidal sinyal darbe ile çarpıldığı takdirde oluşturulan sinyal yapısının doğruluğu, frekans katkılarının çeşitliği, sinyal seviyesinin gürültüye oranı (SNR) gibi değerlerin ölçülebilmesi için benzetim ortamında Fourier analizi gerçekleştirmek ideal bir yöntemdir. Darbe sinyal dizisinin sağlamış olduğu ayrık yapı, ayrık türden Fourier analizi yapılmasına imkan tanımaktadır, Fourier Transform (Fourier Dönüşümü, FT) ve bu dönüşüm sebebiyle oluşan kullanım alanları darbe sinyallerinin analizinde ortaya çıkmaktadır. MATLAB gibi benzetim ortamında sinyal işleme algoritmalarının programlanmasına başlamadan önce bilinen ilk kural, bir zaman ekseninin tanımlanmasıdır. Tanımlanan zaman eksenini, her ne kadar büyük bir değere sahip olursa olsun, sınırlandırılmış bir zaman değerine sahip olacaktır.

Sınırlandırılan zaman değeri, tanımlanan sinüzoidal sinyalin de sınırlanması anlamına gelmektedir. Sınırlı zaman ekseninde çarpılmış bir darbe dizini ile sinüzoidal'in çarpımından oluşan sinyal grubundan bir örnek alınıp frekans ekseninde incelenmesi, MATLAB gibi benzetim ortamlarında hızlı fourier dönüşümü (FFT) fonksiyonu ile gerçekleştirilmektedir. Sınırlı zaman ekseninde tanımlanan Finite Duration Pulse Signal (Sınırlı Zamanlı Darbe Sinyali), FFT fonksiyonuna yerleştirildiği takdirde frekans ekseninde sürekli bir sinyalin gözlemlenmesine sebep olacaktır (Adamy 2004). Teorik olarak analiz edilse de, analizi gerçekleştirilecek olan zaman ekseninde tekil Rect(), zaman ekseninde tekil Sinc() fonksiyonu gözlemlenmesi mümkün olacaktır. Sinc() fonksiyonu frekans ekseninde merkez frekans değerinin olduğu noktada, frekans

ekseninde ortalacaktır. Sınırlı zamanlı sinyal incelenmesi, hazırlanan benzetim ortamında gözlemlenebilmektedir. Sonsuz zaman eksenine uzanan sinyallerin frekans ekseninde incelenmesi teorik olarak incelendiğinde, Rect() ile tanımlanıp, FT dönüşümü alındığında sigma ile sonsuzdan sonsuza toplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu toplama işlemi dahilinde FT sonucu elde edilen Sinc() fonksiyonunun frekans ekseninde ayırık bir sinyal olacak şekilde gözlemlenmektedir (Adamy 2004).



Şekil 3.8 Periyodik darbe sinyali ile sınırlı süreli darbe

3.9 RADAR Sürekli Dalga Sinyali İşleme

RADAR elektronik harp göndermeçlerinde işlenebilecek bir diğer sinyal türü ise Sürekli dalga sinyal türleridir. Sürekli dalga RADAR'ları, ağırlıklı olarak Missile Guidance

RADAR'larında veya mesafe ölçümü bakımından uzun mesafedeki hedeflerin mesafe değerini ölçmek için kullanılır (Mahafza 2013). Sürekli dalga formatında işlenmiş bir RADAR sinyali, kendi halinde, modülasyon olmadan mesafe ölçümü gerçekleştiremez. Lineer Frekans Modülasyonu (LFM) ile uzun mesafedeki hedeflerin mesafe ölçümü gerçekleştirilebilir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). LFM'e uğramış sinyalleri göndermeç yapılarında kullanan RADAR'lar, 'Relative Velocity (Göreceli Hız)' ve 'Rate of Change of Target Range (Hedef Mesafesinin Değişim Oranı)' değerlerini kullanıcı operatöre sunabilmektedir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

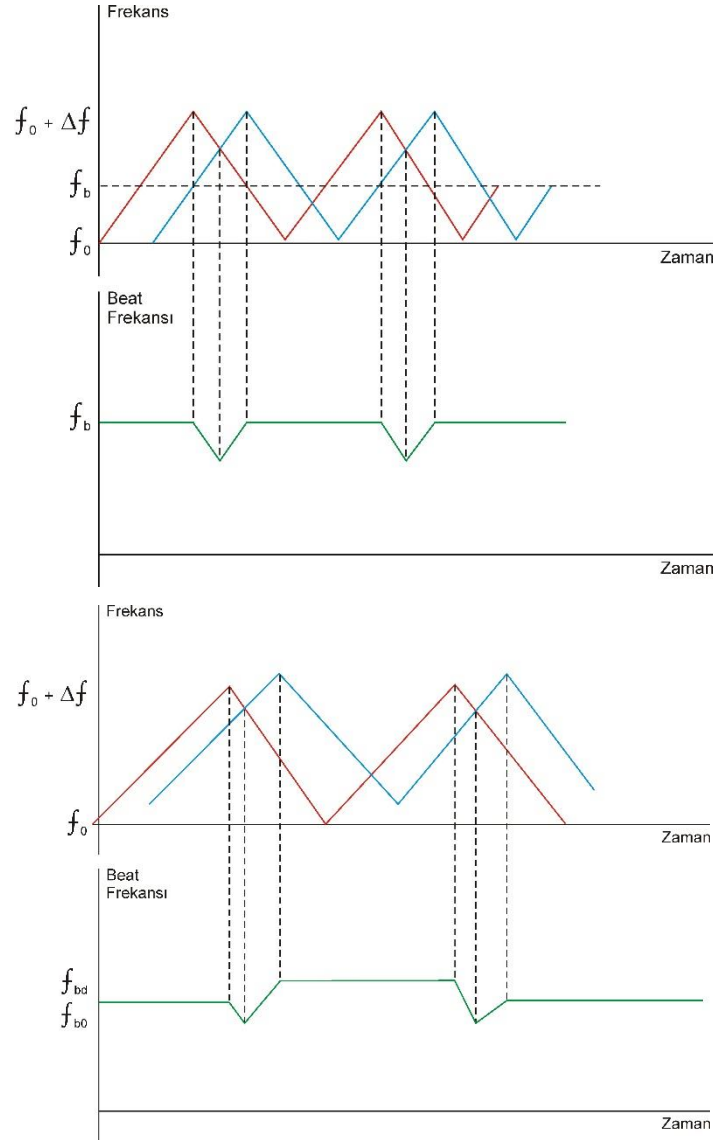
Almaç ve göndermeç yapıları için ayrı anten kullanan Sürekli dalga RADAR'lar, faz detektörleri kullanarak anlık, tutarlı frekans ölçümü yapabilmektedirler. Yapılan anlık frekans ölçümleri, uzun mesafe ölçümüne imkan tanımaktadır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). LFM sinyal işleme algoritması, benzetim aşamasında kullanılan yazılım programı aracılığıyla (MATLAB ve benzeri) tutarlı mesafe ölçüm sonuçları sunabilmektedir. MATLAB platformu üzerinde kullanılabilen sinyal ölçüm kalitesi (SNR parametreleri ve benzeri) algoritmaların hangi aşamalarında verim arttırımına gidilmesi gerektiği konusunda fikir vermektedir. LFM algoritmalarında 'Up veya Down Chirp Sinyalleri (Frekans Gittikçe Artan ya da Azalan Sinyal, Ötümlü Sinyal)', frekans modülasyonu'nun teorik formülü'nün algoritmik olarak uygulanmasında kullanılabilinmektedir. Sinyal işleme metodunun kalitesinin arttırılması için, frekans modülasyonu tarafından ana mesaj sinyaline uygulanılan kısmi frekans değer değişiklikleri referans olarak alınabilir (Mahafza 2013).

3.10 Lineer Frekans Modülasyonu ve Doppler Etkisi

Doppler etkisinin gözlemlenebildiği veya frekans üzerindeki etkisinin çıkartılabildiği bir başka inceleme alanı ise Lineer Frekans Modülasyonu (LFM) analiz grafikleridir. Bu grafiklerin incelenmesi durumunda Doppler dalgaboyu'nun ana mesaj sinyalinin frekans değeri üzerindeki etkisi gözlemlenebilecektir. Taraması yapılan harp alanında sabit bir hedef olması doğrultusunda Doppler etkisi gözlemlenmeyecektir. Bu anda LFM'e ait ötümlü sinyal grafikleri gözlemlendiğinde frekans modülasyonundan kaynaklanan

frekans değişiminin ana mesaj sinyali üzerindeki tek etmen olduğu anlaşılmaktadır (Adamy 2004). ' Δf ', frekans modülasyonundan dolayı oluşan frekans değişimine tekabül etmektedir. ' Δf ' dahilinde olmayan, fakat Received Signal Frequency kapsamında daha yüksek görünen frekans değerleri, Doppler etkisine işaret etmektedir. Doppler etkinine mağruz kalmış LFM sinyalinin ötümlü sinyal grafiği, Doppler etkisinin görünmediği bir grafiğe kıyasla Frekans kayması farkı kadarıyla, y-ekseninde daha yukarı kaydırılmış olduğu gözlemlenmektedir (Adamy 2004).

Bu kaydırma, Up ve Down Beat Frekansı tanımını ortaya çıkarmaktadır. Beat Frekansı, LFM'e uğratılmış Sürekli dalga sinyali kullanan RADAR'larda Doppler etkisinin varlığını tespit etmede kullanılmaktadır (Adamy 2004). Doppler etkisinin gözlemlendiği senaryolarda Beat Frequency Up ve Down parametreleri kullanılmaktadır. Artış ve azalışı tanımlayan Up ve Down frekansları kullanılarak, Frekans kayması hakkında, bağlantılı olarak harp ortamındaki yaklaşan veya uzaklaşan hedef hakkında operator bilgi sahibi olabilmektedir (Adamy 2004).



Şekil 3.9 Doppler etkili ve etkisiz LFM modülasyonuna uğramış RADAR sinyali

3.11 İdeale Yakın Sürekli Dalga RADAR Sinyali İşleyebilme

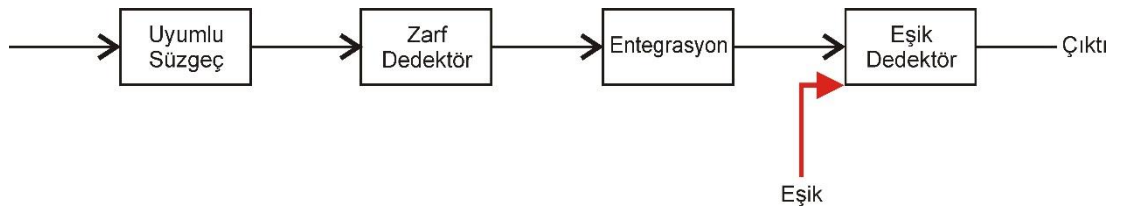
İstenilen, tutarlı veri setini operatöre LFM modülasyonu kullanılmış bir Sürekli dalga RADAR'ında ideal ortamda tasarım sunulması için sinyal işleme bakış açısından gözlemlenmiş bazı gereksinimler vardır. Minimal seviyede gürültü gücü ve maksimum doğrulukta Doppler ölçümü sağlamak için Narrow Band Filter takımları tanımlı bant genişliği kadar dar olmalıdır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Teorik olarak, bir Sürekli dalga RADAR'ının çalışma bant genişliği sonsuza yakın şekilde dar olmalıdır. Sonsuz süreli, sürekli sinüs dalgalarının üretimine

imkan tanınmalıdır. Sürekli dalga RADAR'ların Gated Sürekli dalgaform kadar bant genişliğine sahip olduğu kabul edilmektedir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

3.12 Uyumlu Filtre

Uyumlu filtre konusu, RADAR almaç sistemlerinin bir Linear Time Invariant (LTI) sistemler olarak tanımlanmasından ötürü ortaya çıkmıştır. Uyumlu filtre'nin kendi başına bir LTI sistem olduğu kabul edilirse, Uyumlu filtre sisteminin maksimum SNR çıktısı sağlaması hedeflenmelidir. Uyumlu filtre, RADAR almancının RF katmanında, ön katmanında kullanılmaktadır. Bu katmanda yapılacak olan filtreleme işlemleri, operator çıktısı öncesi gerçekleştirilecek olan sayısallaştırılma aşamalarında sayısal belirsizliklerin ortadan kaldırılmasında rol oynamaktadır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Intermediate Frequency (Ara Frekans, IF) ve sayısallaştırma aşamalarından önce optimal verim, Uyumlu filtre ile sunulacaktır.

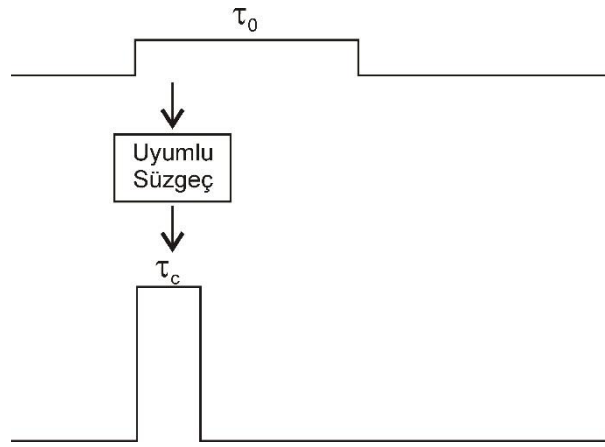
Uyumlu filtre, girdi olarak Gaussian White Noise ve mesaj sinyalini alır. Alınan girdi sinyaline göre Uyumlu filtre'nin dürtü tepkisi (Impulse Response) ortaya çıkarılmaktadır. Uyumlu filtre'ye ait dürtü tepkisi, girdi sinyalinin y-eksenine göre ters çevrilmiş ve belirli bir miktar geciktirilmiş hali olarak tanımlanabilir. LTI Uyumlu filtre sisteminin Dürtü tepkisi'ni ile girdi sinyali arasında konvolüsyon işlemi yürütülmektedir. Konvolüsyon, Overlap ile sonuçlanır ve maksimum benzetim yakalanmış olur. Uyumlu filtre'lerin uygulanabildiği almaçlara 'Matched Filter Receiver (Uyumlu Filtre Kullanan Almaç)' adı verilir (Adamy 2004).



Şekil 3.10 Uyumlu süzgeç kullanılan önkat RF almaç yapısı

3.13 Darbe Sıkıştırma

Uyumlu filtre tekniklerinden biri ‘Pulse Compression (Darbe Sıkıştırma)’ olarak geçmektedir. Darbe sıkıştırma, darbe içerisinde mesaj barındıran Sürekli dalga sinyalinin zaman ekseninde daraltılması fenomenidir (Adamy 2004). Uyumlu filtre kullanılarak bu işlemler yapılmaktadır. Darbeler kısaldıkça elde edilecek olan çözünürlük kalitesi artmaktadır. Fakat bu aşamada SNR değeri azalmaktadır. Darbe sıkıştırma yaşanan bu ikilemi çözmek için kullanılmaktadır (Adamy 2004).



Şekil 3.11 Darbe sıkıştırma

4. ELEKTRONİK HARP ALMAÇLARININ ÖNEMİ

Elektronik harp ortamı, çoklu göndermeç kaynaklarından iletilen karmaşık sinyallerin çözümlenmeye çalışıldığı, çözümlenebildiği doğrultuda istihbari bilgi elde edilebilen yeni nesil RF ve sayısal muharebe ortamıdır. İşlenen sinyallerin kalitesi, bir o kadar da çözümlenebilmesi, doğru bilginin çıkarılması ve operatöre iletilmesi, alınacak olan kritik kararlar konusunda elzemdir. Bilginin doğru bir şekilde iletilip yansıtılabilmesi gayesiyle, elektronik harp ortamında kullanılacak teknolojik unsurların geliştirilebilmesi için uluslararası rekabet her geçen gün artmaktadır (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Schleher 1993, Schleher 1999a, Schleher 1999b, Adamy 2000, Adamy 2002, Güvenç 2002, Adamy 2004, Kural ve Özkazanç 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021, Otenkaya ve Pakfiliz 2023). Bu bakıma, elektronik harp ortamında oturtulması gereken temellerin geliştirilmesi ve kavranılması önemlidir.

Elektronik harp ortamında kullanılan bir elektronik harp sistemi veya bir RADAR ele alındığında, takibi yapılan bir hedef veya iletilmesi istenen bir mesajdan bahetmek gerekmektedir. Hedef hakkında elde edilen bilgi veya istihbari bir mesaj, alıcı tarafında bulunan operatöre sayısal olarak okunabilir bir şekilde iletilmelidir. Bu bilginin iletilmesi için mesaj sinyalinin doğal veya yapay gürültü, doğal yerçekilleri, farklı veya benzer frekansta yayın yapan savaş uçağı veya savunma sistemi gibi elektronik harp sistemleri, karşıt uygulanan karıştırma sinyalleri gibi unsurlara karşı gürbüz, korunaklı olmalıdır (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Schleher 1999a, Schleher 1999b, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Gürbüz bir şekilde iletilen mesaj sinyalinin çıkarılması için, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının kullanımı gereklidir. Elektronik Harp Almaçlarına göre daha farklı bir maliyet ve tasarım bakış açısı sunan elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçları'nın, RADAR veya elektronik harp sistemlerinden iletilen sinyallerin çıkarılması, işlenmesi ve veri bankalarına kaydedilmesi için özel tasarım süreçleri mevcuttur.

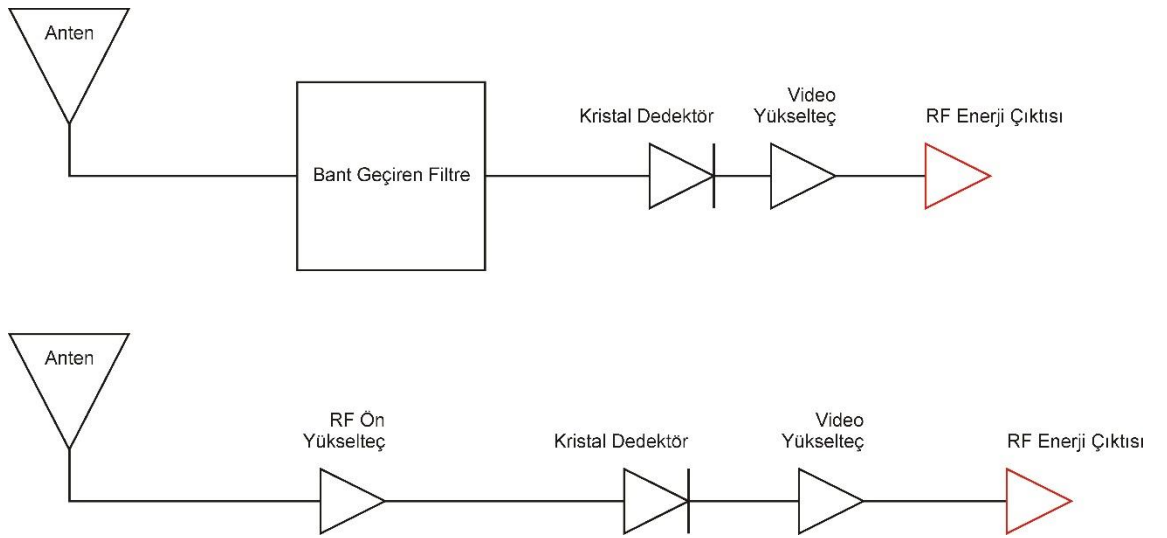
Tasarımsal farklılıklar, askeri şartlar ve iletilen mesaj sinyallerinin RF ve sayısal bakımdan özellikleri, almanç tasarımı konusunda tasarımsal çeşitliliklerin artmasına sebebiyet vermiştir. Almançların tasarım süreçleri, kullanılacak olan elektronik harp sistemine veya RADAR sistemine göre değişiklik göstermekle birlikte, çeşitli elektronik harp ortamına özel almanç tasarım teknikleri geliştirilmiştir. Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almançlarının tasarımları ve kullanımları tek başlarına olabileceği gibi, melez (çaprazlama) almanç yöntemi ile birden fazla almanç çeşidi birleştirilerek türlü amaçlar için kullanılabilen melez almançlar geliştirilebilmektedir. Almanç yapılarının analizi, sinyal işleme ve temel RF ve elektronik bilgilerinin bütünleşmesiyle ortaya çıkarılmaktadır.

4.1 Elektronik Harp Ortamında Tercih Edilen RADAR’larda Kullanılan Almançlar

Elektronik harp unsurlarında kullanılan elektronik harp sistem almançları, Elektronik Harp Almançları, veya basit bir RADAR almanç yapısı incelendiği takdirde; alma anteni, isteğe bağlı olarak bir işaret yükselteç, gürültü veya istenilmeyen frekans harmoniklerini önlemek için filtre takımı ve kullanım amacına uygun olarak sayısallaştırma için A/D Çevirici (Converter)-CPU takımı veya envelope dedektör (Detector) yapıları gözlemlenmektedir (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Schleher 1999b, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Almanç yapısına gönderilecek olan sinyal yapısının değişikliğine göre, temel almanç yapısından uzaklaşarak demodülatör, tuner (ayarlayıcı), çoklu frekans analizi için almanç RF katmanına ilave frekans çoklayıcı gibi belirgin elektronik unsurlar almanç yapılarına dahil edilmiştir (Pakfiliz 2021). Kullanım alanlarına göre artan teknolojik çeşitlilik, farklı almanç türlerinin literatüre kazandırılmasına sebebiyet vermiştir. Almançlar kendi başlarına sistem kurulumlarında kullanılabilindiği gibi, melez almanç yapısı olarak sistemlerde beraber kullanılmaktadır.

5. KRİSTAL VİDEO ALMAÇLARI

Elektronik harp sistemlerinde, darbe türünde sinyallerin analizlerinin çıkarılmasında kullanılabilecek olan temel almaçlardan biri, 'Kristal Video Almaçları' dır. Kristal video almaçları, darbe tekrar aralığı (PRI), darbe genişliği (Pulse Width), yükseliş zamanı (Rising Time) veya alçalış zamanı (Fall Time) benzeri parametrelerin çıkarımında kullanıldığı gerekçesiyle, hassasiyet ölçümünde ön plana çıkmaktadırlar (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Hassasiyet ölçümü, almaçlarda temel olarak iki farklı yöntemle incelenmektedir. Düşük hassasiyet gerektiren kullanım alanları için dar bant geçirgen antenlerin RF ön katmanında kullanılması ve sayısallaştırma katmanına geçerken hassas bir dedektör kullanılması veya yüksek hassasiyet gerektiren durumlara karşın ön RF katmanında anten çıkışı sonrası bir RF ön yükselteç kullanımı gerekli olacaktır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Elektronik harp veya RADAR sistemlerinin kullanıldığı ortamlarda, yüksek hassasiyet gerektiren darbe ölçümleri, daimi olarak doğru sonuç vermemektedir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). RWR tasarım aşamalarında, sahte hedef ihbarları ve oluşan istemsiz RF kilit atma sebebiyle yüksek hassasiyete sebep olabilecek melez almaç yapıları tercih edilmemektedir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).



Şekil 5.1 Kristal video almaç tasarım örnekleri

Kristal video almaçlarının hassasiyetleri, literatürde iki farklı isimlendirme yöntemiyle ön plana çıkmaktadırlar. RF ön katmanda bulunan ön yükseltecin kazancını arttırarak ayarlanabilen hassasiyet, ‘Gain Limited (Kazanç Sınırlı)’ hassasiyet olarak adlandırılır (Wiley 2006). Almaç bant genişliğinin veya RF ön katmanda bulunan ön yükseltecin gürültü figürü’ünü düşürerek elde edilen hassasiyet, ‘Noise Limited (Gürültü Sınırlı)’ hassasiyet olarak adlandırılır (Wiley 2006). RF yükselteçler, maliyeti yüksek olan RF devre elemanlarıdır. Geniş bütçesi bulunmayan elektronik harp sistem inşa çalışmalarında her almaç için tercih edilmeyebilmektedirler (Wiley 2006). Yükselteç içi pembe gürültü, almaç sisteminin gürültü tabanının yükselmesine sebebiyet vermektedir.

Sayısal işlem basamaklarına geçiş öncesi tercih edilen dedektör yapısı, hassasiyet ölçümünü şekillendirmektedir. Dedektör yapısından önce elde edilen gürültü figürü değeri, dedektör öncesi RF yükselteçler aracılığıyla elde edilen RF kazanç değerleri, dedektör öncesi almaç sisteminin ‘Tangential Sensitivity (Teğetsel Hassasiyet)’ ölçümünde kullanılan referans noktalarıdır. Kristal video almaçlar için bu referans noktaları, dedektör etkisini incelemek adına geliştirilen teğetsel hassasiyet analizi için kullanılmaktadır (Tsui 1981). Teğetsel hassasiyet analizi için, gerekli tanımlama beyan edilmiştir (Tsui 1981);

$$TSS = k * T * F \left(6.31Bv + 2.5\sqrt{2BRF * Bv - Bv^2 + A * Bv / (G * F)^2} \right)$$

Fakat, elektronik harp ortamında olduğu gibi yüksek yoğunlukta RF frekans içeren ortamlarda satürasyona uğrayabilmektedirler.

k = Boltzmann sabiti, $1.38 * 10^{-23}$ Ws/K

T = Oda sıcaklığı (290K)

F = Dedektör öncesi kullanılan yükselteçlerin gürültü figürü

Bv = Video bantgenişliği (Hz)

BRF = RF bantgenişliği $\geq 2Bv$

A = Diyot parametresi

G = Dedektör öncesi yükselteçlerin kazancı

'A' ile nitelendirilen diyot parametresi, kristal video almancın dedektör'ünde bulunan kristal diyot'un donanımsal yapısı ile şekillenmektedir. Diyot parametresinin hesabı için, verilen formülü sunulmuştur (Wiley 2006);

$$A = \frac{4Fv * R}{k * T * C^2}$$

Fv = Video yükseltece ait

R = Dedektör'ün dinamik empedansı (Ω)

k = Boltzmann sabiti, $1.38 * 10^{-23}$ Ws/K

T = Oda sıcaklığı (290K)

C = Dedektör hassasiyeti (V/W)

Kazanç sınırlı bir kristal video almancı için, diyot parametresi oldukça yüksektir. Teğetsel hassasiyet hesabı, bu yönelim bakımından değişiklik göstermekle birlikte;

$$TSS_{GainLimited} = \frac{k * T}{G} * (2.5) * \sqrt{A * Bv}$$

olarak ifade edilebilir.

RF katmanında ön yükselteç bulunmadığı tasarımlarda, G katsayısı '1' değerini almaktadır (Wiley 2006).

RF yayınlarının analiz edildiği ortamlarda, kazanç hesapları veya formülasyonları için dBm kullanımı ön plana çıkmaktadır. RF ortamlarında kullanılan frekans seviyelerine ait matematiksel hesaplamalarda veya MATLAB benzetimlerinde, temel olarak referans alınan mertebeye, MHz cinsinden ifade edilmektedir. RF katmanında ön yükseltecin kullanılmadığı kristal video almaçlarında, elektronik harp ortamına uygun olarak analiz gerçekleştirilmesi gerekebilmektedir. Bu analizler için sunulan formülasyon alternatifleri incelenebilir (Wiley 2006);

$$TSS_{\text{ÖnYükselteçYok}} = -110 + 5 \log A + 5 \log Bv$$

Sunulan formülasyon, ön RF yükseltecin kullanılmadığı, melez RWR almaç yapılarında tercih edilmektedir. Ön yükselteç kullanımı dikkate alındığında, finansiyel maliyet ve hassasiyet arasındaki ‘Trade-off (Ödünleşim)’ gözlemlenmektedir. Bu trade-off’un kabulü gerçekleştiği takdirde, kristal video almaçın kullanımına göre değişebilen hassasiyet analizi, elektronik harp veya RADAR almaç sisteminin minimum ölçebileceği güç seviyesine sahip darbe serisi, zaman ekseninde üst üste çakışabilecek (Darbe Üstüne Darbe) darbe sinyallerinin ayrıştırılması, PRI ve PW gibi değerlerin üst hassasiyetle çıkarılabilmesi, darbe darbesinin yükseliş ve alçalış anlarının kestirilebilmesi gibi tasarımsal özelliklerin belirlenmesinde önemli bir unsur olacaktır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

SNR değeri, elektronik harp uygulamalarında ön plana çıkmaktadır. Tasarımsal aşamalarda kullanılan ‘Predetection SNR (Önkestirim SNR)’ değeri, kullanıcı arayüzüne gönderilecek olan sayısal verilerden önce SNR değerinin tahmini hesabıdır (Wiley 2006). Önkestirim SNR değeri, teorik hesaplamalarda yeterli bulunsa dahi, pratik uygulamalarda yeterli kalamayabilmektedir. Pratik ve teorik uygulamalarda, TSS hesabından daha yüksek SNR değerlerinin kullanılması gerektiği bilinmektedir (Wiley 2006). Fakat tercih edilecek olan yükseklik farkı, kullanılacak olan sistem gereksinimlerine göre değişiklik göstermektedir. Tasarımcının alacağı gereksinimsel kararlar TSS ve SNR arasındaki yükseklik farkını şekillendirmektedir.

5.1 Kristal Video Almaç ve Ölçüm Performansı

Kristal video almaçları, yapısal tasarımlarından ötürü, sürekli dalga sinyallerine mağruz kaldıkları takdirde satürasyona uğramaktadırlar. Satürasyon sebebiyle, sürekli dalga sinyallerinin analizi için tercih edilmemektedirler. Elektronik harp ortamında bulunan yoğun RF sinyalleri, belirli bir süre sonra kristal video almaçlarını satürasyona uğratmakla birlikte, gerekli darbe parametrelerini çıkaramaz hale getirmektedirler (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Elektronik harp sistemleri veya RWR gibi RADAR sistemlerinde kullanılacak olan kristal

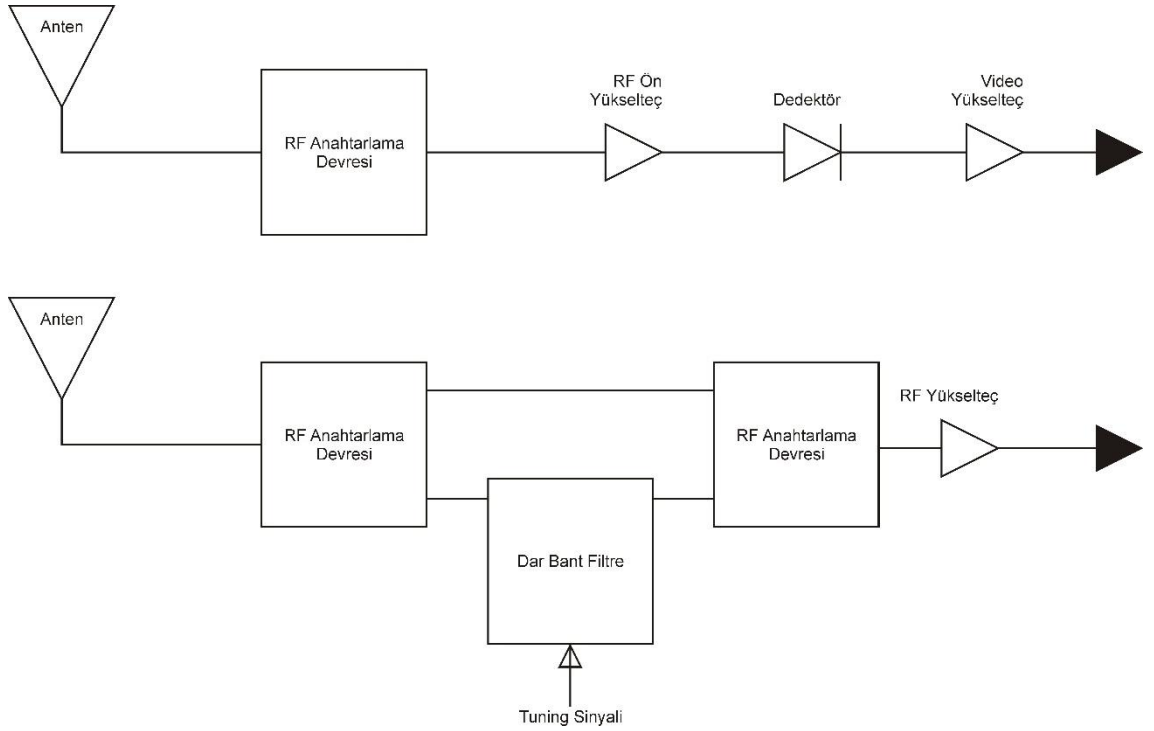
video almaçlar, alınan sinyalin RF frekans bilgisinin çıkarımı için farklı bir almaç yapısıyla melezlenmeye ihtiyaç duyarlar (Pakfiliz 2021). Darbe sinyallerinin karakteristik analizlerinde, eğer sinyal iletim kaynağı belirli bir sıklıkta darbe sinyalini almaç girdi antenine iletiyorsa, kristal video dedektör'ünün kestirim özellikleri sayısallaştırma işlemini yüksek ölçüde iyileştirmektedir (Wiley 2006). RF filtre veya antenden gelen darbe sinyallerinin güç seviyesi, dedektör'ün ihtiyaç duyduğu kestirim referansını sağlamaktadır. PRI seviyesi düşük ve yüksek yoğunlukta gelen darbe sinyalleri dedektör yapısını satürasyona uğratabilecek sürekli dalga sinyali gibi davranabilir (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014).

5.2 Kristal Video Almaçlarına Yönelik Tasarımsal Genişletme Önerileri

Kristal video almacı, diğer almaçlarda olduğu gibi, hassasiyet ölçümü sırasında 'Dynamic Range (Dinamik Erim)' ölçümüne tabii tutulmaktadır. Dinamik erim, logaritmik tabanda hesaplandığında, almaç ucunda ölçülebilecek maksimum güç seviyesi ile minimum güç seviyesinin farkını teşkil etmektedir (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Dinamik erim hesabında kullanılan maksimum güç seviyesi, kristal video almaçlarında, RF ön kat yükseltecinin, dedektör'ün kristal diyodunun ve video yükseltecinin satürasyona ulaşacağı RF enerji seviyesine bağlıdır (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014). Minimum güç seviyesi ise hassasiyet tarafından şekillendirilmektedir. Frekans çoklayıcı gibi, çoklanma işleminden faydalanılmadığı veya hassasiyet belirlenmesi için sadece dedektör'den faydalandığı, düşük hassasiyetli kristal video almaç tasarımlarında, almaç sisteminin dinamik erim değeri, dedektör'ün dinamik erim değerinden daha yüksek olamamaktadır (Wiley 2006). Dedektör'ün önüne ilaveten konulacak olan bir RF yükselteç, dedektör'ün çıkışındaki gürültü seviyesini belirleyecektir (Wiley 2006). RF yükselteçler, düşük güç değerli mesaj sinyallerini bastırabilecek olan pembe gürültü seviyesini, ilgilenilen frekans değerine sahip mesaj sinyallerinin güç değerleriyle beraber yükseltecektir (Wiley 2006, Pakfiliz 2021). Bu fenomen, dinamik erim değerinin azalışına sebep olacaktır. Dinamik erim değerini bir

trade-off'a tabii tutmamak adına, frekans çoklayıcı gibi elemanlar aracılığıyla çoklu almaç sistem mimarileri tercih edilebilir. Çoklu kanallardan elde edilecek çoklu RF kazanç ile elde edilen sinyal çıktıları daha analitik olarak görülmektedir. Kanallara özel olarak hassasiyet çalışmaları, kanal kullanılacak dedektör, RF yükselteç, video yükselteç takımı ile şekillendirilmektedir.

Sürekli dalga sinyallerinin analizinin gerçekleştirilebilmesi için, RF ön katman anten çıkışına basit bir RF switch (Anahtar) yapısı eklenebilir. RF anahtar yapısı referans sinyali olarak kullanabileceği bir sinyale ihtiyaç duymaktadır. Bu sinyale, 'Chopping Signal (Kesici Sinyal)' adı verilmektedir. Kesici sinyali, alınan tasarım maliyetine göre, bir 'Tuner Receiver (Ayarlayıcı Almaç)' gibi, mesaj sinyalini yayınlayan göndermeçten sinyali alarak referans darbe sinyalleri aracılığıyla üretilebildiği gibi, tasarımsal olarak karar verilen PRI ve PW değerlerine bağlı olarak da değişebilmektedir. RF anahtar'ın gelen sürekli dalga sinyalini darbe sinyali olarak yükselteç ve detektör takımına iletmesi, sürekli dalga sinyallerinin ön analizi konusunda fikir oluşturabilecektir. Kesici sinyal üretmek adına, 'Swept Bandpass Filter (Taramalı Bant Geçiren Filtre)' tasarımı da tercih edilmektedir. Taramalı bandpass filtre'ye ek olarak kullanılacak olan ön bir filtre, sürekli dalga sinyallerinin sağlayacağı ek frekans ve RF yoğunluk katkılarını azaltacaktır. RF yoğunluğunun azalması, satürasyonu önleyemeye ilaveten sürekli dalga olarak iletilen mesaj sinyalinin frekans değerinin de çıkarılmasına imkan tanıyacaktır.



Şekil 5.2 Kristal video almaçlarında sürekli dalga signal analizi için genişletmeler

Darbe üstüne darbe sorunu, kristal video almaçları gibi darbe analizi gerçekleştiren almaçların yoğun bir şekilde mağruz kaldığı bir hassasiyet sorunudur. Bu hassasiyet eksikliği sonucu yanlış genlik değerleri veya kaçırılan darbeler olabilir. Aynı anda gelen mesaj sinyallerinin ölçümünü gerçekleştirmek için dedektör tarafından üretilecek ‘Difference Frequency (Fark Frekansı)’ değerini kullanmak gereklidir (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

Kristal video almaçlar, tüm almaç tasarımında olduğu gibi, maksimum ve minimum ölçebileceği RF frekans değerleri mevcuttur. Bu frekansların tanımı F_{High} ve F_{Low} olarak yapılabilir. Dedektör girişine giren, farklı frekans değerine sahip mesaj sinyalleri, dedektör çıkışında frekans değerlerinin farkına sahip frekansta bir dedektör çıktısına sebep olurlar (Wiley 2006). Bu, ‘Fark frekansı’ olarak adlandırılır. Fark frekansı, sıfır ile $F_{High} - F_{Low}$ değeri arasında bir değere sahip olmalıdır. Yükselteç tasarım temellerinden baz alınarak, video yükselteçler, sıfır ile Bv arasındaki frekans değerine sahip sinyal bileşenlerini geçirerek yükseltir. İkincil bir katman tasarımında, yükselteç Bv değerinden $F_{High} - F_{Low}$ fark değeri arasındaki frekans değerlerine sahip sinyal bileşenlerini

geçirerek yükseltecektir (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). İkincil katmanda fark frekansı değerinin kapsanması için tasarlanan yükseltecin çıkışına koyulacak olan dedektör, yükselteç çıktısı sinyalinin zarfını okuyarak çoklu hedeflere karşın elektronik harp uyarı sistemini aktive edilmesine sebep olabilir (Wiley 2006).

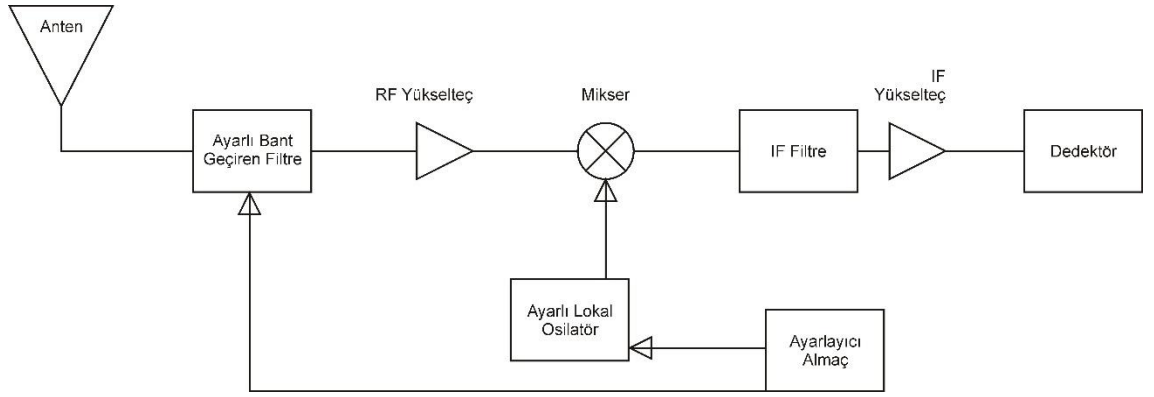
Tasarım esnasında dikkat çekilmesi gereken bir ayrıntı ise, taraması yapılacak olan mesaj sinyallerinin kapsam alanıdır. Girdi mesaj sinyalleri arasındaki en büyük frekans farkı, F_{Low} frekans değerinden daha düşük olmalıdır (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014). Aksi takdirde, F_{Low} frekans değerine yakın frekans katkılarına sahip girişim sinyalleri, tasarlanacak olan çoklu frekans analiz hattından doğrudan geçecektir. Aynı zamanda frekans farkı üretecek olan mesaj sinyallerinden biri, gürültü tabanından yüksek seviyede frekans farkına sahip sinyal bileşeni üretecek kadar gürbüz olmalıdır (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014).

Frekans analizinin getirdiği tasarım detayları ve uygulama konusunda oluşabilecek donanımsal ve yazılımsal karmaşıklık, melez almaç yapılarının ön plana çıkmasına sebebiyet vermektedir. Darbe analiziyle ön plana çıkan kristal video almaçları, frekans ölçüm ve modülasyon bilgilerinin çıkarımında başarılı olan ‘Süperheterodin Almaç’ tasarımıyla çaprazlanmaktadır. Bu çapraz yapılar, maliyet ve tasarımsal esneklik bakımından kullanışlıdır (Pakfiliz 2021).

6. SÜPERHETERODİN ALMAÇ

Süperheterodin (Süperhet) almaçlar, yapısal olarak sadelik, esneklik ve pratiklik bakımından ön plana çıkan almaçlardır. Ortaya çıkış ve gelişimleri, 2. Dünya Harbinden itibaren elektronik harp sistemlerine ve RADAR'lara yansımıştır. Elektronik harp istasyonlarında yaşanan frekans seçiciliğinin yetersizliği, süperhet almaçların tasarımsal esnekliği ile aşılabilmektedir (Pakfiliz 2021).

Performans bakımından, yüksek RF kazanç, seçicilik ve hassas frekans ölçümlerine karşı duyarlılık özellikleri sayesinde RWR veya RADAR almaç sistemlerinde tercih edilmektedirler. Tasarımsal olarak birden fazla kademe, ayrı ayrı analiz veya ilgilenilen elektronik harp unsuruna özel analiz yapılmasına imkan sağlayan basitlikte temel bir yapısı mevcuttur. RF katman, mikser katmanı ve IF katmanı; dahili olarak sayısal dönüşüm katmanı olacak şekilde birden fazla katmanı süperhet almaçların tasarım bünyesinde mevcuttur (Pakfiliz 2021).



Şekil 6.1 Süperhet almaç tasarım örneği

6.1 RF Katman

RF alma anteni, ayarlı bant geçiren filtre, RF ön yükselteç ve çoklu sinyal analiz aşamaları tercih edilen tasarımlar için frekans çoklayıcı yapısının incelendiği almaç katmanıdır. Frekans çoklayıcı, RF katmanda incelenmek istenen frekans aralıklarının bölünerek aşamalı olarak daha rahat analiz edilme imkanlarını sunar (Van Brunt 1978, Van Brunt

1982, Adamy 2002, Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). 2-18 GHz'lik geniş bant tarama yapan süperhet almaçlarda, frekans çoklayıcı yapısı aracılığıyla 2-4 GHz, 4-8 GHz, 8-12 GHz, 12-18 GHz olacak şekilde ayarlanan dörtlü frekans bant ayrışımı elde edilmektedir (Pakfiliz 2021). Ayarlı bant geçiren filtreler, RF katmanda bulunmaktadır. Ayarlı bant geçiren filtreler yapıları gereği, merkez frekans ayarlanabilmesi için mesaj sinyalinin frekans bilgisini içeren referans sinyaline veya tasarım aşamasında belirlenen frekans değerine sahip bir referans sinyaline ihtiyaç duymaktadırlar (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Bu ihtiyaç, ayarlayıcı almaç yapısı sayesinde karşılanmaktadır. Ayarlayıcı almaç yapısı, ayarlı bant geçiren filtre'nin ihtiyaç duyduğu merkez frekans değerini sağlamaktadır. Ayarlayıcı almaç yapısı, mikser katmanında kullanılan lokal osilatör'ün üretmesi gereken çarpım sinyali için kullanacağı referans sinyalinin frekans değerini sağlamakla da yükümlüdür.

Frekans çoklayıcı, çoklu frekans yapılarının analizi yanında, birden fazla anten kullanımının da önüne geçmektedir. Kullanılan anten sayısının artışı, maliyet bakımından yüksek olup, aynı zamanda yan yana duran yüksek kazançlı RF antenlerinin oluşturduğu 'Sidelobe (Yan Hüzme)' sorununa da sebep olmaktadır (Pakfiliz 2021). Yan yana koyulacak olan antenler, anten paternlerinden dolayı birbirlerinin yan hüzmelerine girişimlerde bulunacaklardır. Bu girişimler sonucu alınacak olan sinyallerin okunmasında yüksek bir anten kaybı oluşmaktadır. Bu kayıpların önüne faz dizili anten modeli kullanılarak geçilebilir (Dinç 2010, Pakfiliz 2021). Faz dizili antenler yer elektronik harp sistemleri veya savunma sistemleri gibi geniş alanda yerleştirilebilecek sistemlerle uyumlu olmakla beraber fazla yer kaplamaktadırlar (Pakfiliz 2021). Maliyet açısından çıkabilecek sorunlara faz dizili antenler ilave maddi gereksinim çıkarmaktadırlar. Frekans çoklayıcı, süperhet almaçın boyutsal bakımdan pratikliğini ve kolay entegrasyonunu koruyacaktır. Bu sayede, RWR veya istihbari hava aracı gibi sistemlere süperhet almaçların entegrasyonu tercih edilebilir olacaktır (Pakfiliz 2021).

RF ön yükselteç basamakları, türlü olarak ayarlı bant geçiren filtreden önce ya da sonra olacak şekilde tercih edilebilir. Tasarım önceliği, RF ön yükseltecin yerine karar vermektedir. Daha iyi bir gürültü figürü değerinin gereksinimi, RF ön yükseltecin

sağlayacağı kazancın anten çıkışı sonrası erken bir şekilde sisteme eklenmesini gerektirmektedir (Wiley 2006, Pakfiliz 2021). Fakat bu konumda yaşanacak olan trade-off, gürültü üzerine olacaktır. Ön filtreleme aşamasından geçirilmeyen mesaj sinyalleriyle beraber gelen, istenilmeyen RF yayın kaynaklarından yayılan ilave frekans katkıları, yeryüzü şekillerinden yansıyan RF sinyallerinden gelen ‘RADAR Echo (RADAR Yankısı)’, ön yükseltecin sağlauyacağı kazanç ile beraber yükseltilecektir (Wiley 2006, Poisel 2014). Yükseltelen bu sinyallerin filtrelendirilmesi için, kullanılacak olan bant geçiren filtrenin harmonik bastırma kalitesinin yüksek olması gerekmektedir. Filtre için kullanılacak olan RF komponent tasarımı karmaşıklaşmakla beraber mali olarak yük çıkartabilecektir. RF yükselteçler, aynı zamanda almaç sistemlerinin, RF komponentlerden dolayı kaynaklanan ‘Pembe Gürültü’ seviyesini yükseltmektedir. Yüksek hassasiyet gerektiren almaç tasarımında RF ön yükselteçlerin kullanımı, düşük güç seviyesinde iletilmek istenilen istihbari mesaj sinyallerinin gürültü tabanında kaybolmasına sebebiyet vermektedir (Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). İlave pembe gürültü ile düşük güç seviyesinde iletilen mesaj sinyalleri kaybolabilmekte, veya dedektör ile mesaj sinyali çıkarma aşamalarına gelindiğinde frekans katkılarının sağladığı bilgi çıkarılamayabilmektedir. İlgilenilen mesaj sinyalinin güç seviyesine bağlı olarak RF ön yükselteç ve ayarlı bant geçiren filtre konumuna tasarım aşamasında karar verilmektedir. Ayarlı bant geçiren filtrenin öne alınması, Elektronik Harp Almaçlarının mantığına yakın olarak, ‘Önce gürültü filtrelemesi, sonra yükseltme’ mantığında bir tasarım biçimidir (Wiley 2006). Pembe gürültü seviyesi yükseltilmeden, öncelikli olarak istenilmeyen frekans ve gürültü filtrelemesi süreci tamamlanmaktadır. RF katmanından çıkacak olan mesaj sinyalleri, mikser katmanına iletilmektedir.

6.2 Mikser Katmanı

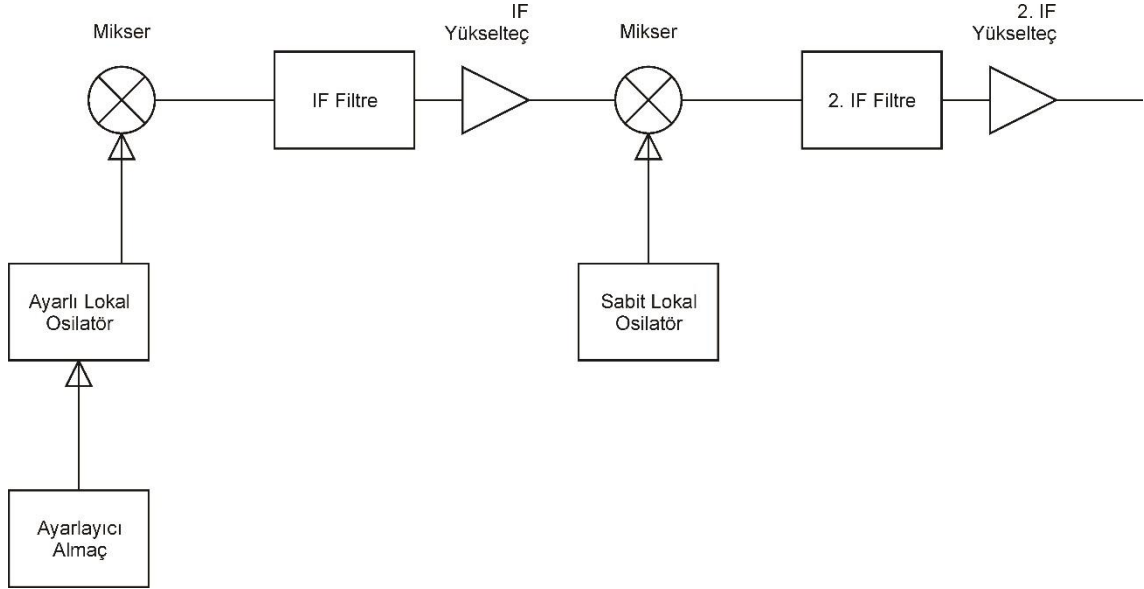
Mikser katmanı, lokal osilatör, mikser, imaj filtre ve ayarlayıcı almaç yapısı aracılığıyla elde edilen sinyal referans sistemini kapsayan katmandır (Pakfiliz 2021). RF katmandan çıkan sinyaller, mikser katmanında bulunan mikser yapısıyla zaman ekseninde çarpım, frekans ekseninde ise konvolüsyon işlemine tabii tutulurlar. Yapılan işlem sonucu $f_{LO} + f_{Message}$ ve $f_{LO} - f_{Message}$ olacak şekilde iki farklı RF frekans değeri, başka bir deyişle iki farklı sinyal oluşumu gözlemlenir. Frekans değeri $f_{LO} + f_{Message}$ olan sinyal, ‘İmaj

Sinyali' olarak adlandırılır ve imaj filtresi tarafından bastırılması gerekmektedir. Frekans değeri $f_{LO} - f_{Message}$ olan sinyal, 'İndirgenmiş Sinyal' olarak kabul edilip, IF katmanına iletilmektedir (Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Mikser katmanında ayarlayıcı yapısının analizi ön plana çıkmaktadır. Lokal osilatör, doğru frekans indirgeme işlemi yapabilmek için referans bir frekans bilgisine, dolaylı olarak bir referans sinyaline ihtiyaç duymaktadır. Referans sinyalinin sağlanması için lokal osilatör, ayarlayıcı almaç bilgisini referans olarak kullanabilir. Ayarlayıcı almaçlar, referans frekans değerini üretmek için, sistem yapılarındaki anteni kullanarak iletilen mesaj sinyallerinden örnekleri çıkarabilmektedirler (Pakfiliz 2021). Alınan mesaj sinyalinin frekans bilgisi lokal osilatöre referans sinyali olarak iletildiği takdirde, doğruluk oranı yüksek bir mikser kademesi elde edilmiş olur. Mikser kazancı, RF kazanç seviyesi oldukça düşük olduğundan kazanç veya gürültü figürü hesaplarına dahil edilmemektedir. İmaj frekansını içeren sinyalin bastırılmasının ardından elde kalan indirgenmiş sinyal, IF katmanına iletilir (Wiley 2006, Pakfiliz 2021).

6.3 IF Katmanı

IF katmanı, tek aşamalı olabileceği gibi çift aşamalı olarak da tasarlanabilir. IF katmanında, tasarım sürecinde öncelikli olarak belirlenmesi gereken bir IF frekansı mevcuttur. Kararı verilen IF frekansı, lokal osilatörlere donanımsal olarak sinyal biçiminde iletilmektedir. İstenilen IF frekansına indirgeme aşamasında, mikser katmanında olduğu gibi, mikser ile zamanda çarpım frekansta konvolüsyon işlemi gerçekleştirilmektedir (Wiley 2006). Daha sonrasında, mikser aşamasında olduğu gibi, mikser çıktısında oluşacak olan imaj frekansını içeren sinyalin bastırılması ve elde edilen sinyal çıktısının bir sonraki IF katmanına, veya sayısallaştırma bloklarına iletilmesi gereklidir. Frekans çoklayıcısının kullanıldığı durumlarda, IF frekansının analizi gerçekleştirilen RF frekans aralığına göre farklı IF frekans seviyeleri seçilebilir. Bu seçim, elektronik harp uygulamalarında istihbari bir kodlama biçimi olarak yorumlanabilir (Wiley 2006, Pakfiliz 2021). Sayısallaştırma basamakları çıkışıındaki kullanıcı paneline sunulacak olan bilginin içeriğine göre, IF indirgeme katmanlarında kullanılacak olan IF frekans seviyeleri, sayısal CPU işlemcilerini en az yoracak şekilde seçilmelidir (Pakfiliz 2021). CPU işlemcilere daha az sayısal işlem yükü bindirmek adına,

IF katmanları iki aşamalı, çift katmanlı olarak da tasarlanabilir. Bunun için tasarım esnasında seçilmesi gereken, ilgilenilen RF frekans aralığı başına iki IF frekans değeri olacaktır (Pakfiliz 2021). IF katmanının tasarimsal karmaşıklığını arttıracak olan bu adım, frekans indirgenmesi işleminin doğruluğunu ve adımsal takip edilebilirliğini arttıracaktır.



Şekil 6.2 İkincil IF katmanının tasarlanması

6.4 Sayısal Katman

Sayısal katman, sayısallaştırılan IF sinyallerinin analizlerini bilgisayar ortamında gerçekleştirmek, kullanıcı ekranına sunmak adına almaçlara ilaveten yerleştirilen son basamaktır. Kullanılacak olan elektronik harp sistemine göre, sayısallaştırma aşamaları değişiklik gösterebilir. Zarf ayrıştırıcı devre ve takiben ADC (Analog to Digital Converter) sistem elemanı, sayısallaştırma aşaması için kullanılabilen eleman ikilisidir. Zarf ayrıştırıcı yerine, darbe katarları ile örnekleme aşaması yapılarak, ADC sistem elemanına gönderim de yapılabilir (Pakfiliz 2021). Sayısal katman, DSP (Digital Signal Processing, Sayısal Sinyal İşleme) mikroişlemci birimi, sayısal analiz işlemcisi veya basitçe bilgisayar olarak adlandırılan sayısal veri analiz elemanı ile son bulur. RF sinyalden elde edilen bilgiler, daha önce almaç sistemi kullanılarak yapılan istihbarat çalışmaları ile eşleştirilerek kullanıcı ekranına sunulur (Wiley 2006). Geçmiş istihbarat

çalışmalardan alınan bilgilerin önemi, özellikle RWR gibi savaş uçaklarında kullanılan melez almaç sistemlerinin sayısal işlemcisi için önem arz etmektedir (Dinç 2010). Pilot veya elektronik harp ekibi için, almaç sistem antenleri tarafından toplanan yayınlardan çıkarılan istihbarat sinyalleri, daha önce yapılan istihbarat çalışmalarından elde edilen sinyallerle eşlenebildiği takdirde, tehdit yayınlara karşı erken tedbir alınabilir (Skolnik 1981, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2004, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021). Sayısal işlemci biriminin analiz hızı ve doğruluğu, yüklenen yazılım ve işlemcide kullanılan sayısal devre elemanlarının verimliliğine bağlı olacak şekilde değişim göstermektedir.

6.5 Süperheterodin Almaç Performans Analizi

Dar bantlı bir süperhet almancın hassasiyet hesabı, IF katmanındaki IF yükseltecin çıkışında üretmesi gereken SNR seviyesine bağlıdır. Bu SNR seviyesine ulaşabilmek için belirli güç seviyesinde bir sinyalin almaç girdi antenine ulaşması gereklidir. Bu sinyal seviyesi, 'Required Signal Level (Gerekli Sinyal Seviyesi)' olarak adlandırılır (Wiley 2006). Gerekli sinyal seviyesi formülü (Wiley 2006);

$$RSL = (SNR) * (NF) * (k * T * B_{IF})$$

RSL = Required Signal Level (Gerekli Sinyal Seviyesi)

SNR = IF çıkışında gereken SNR

NF = Gürültü figürü

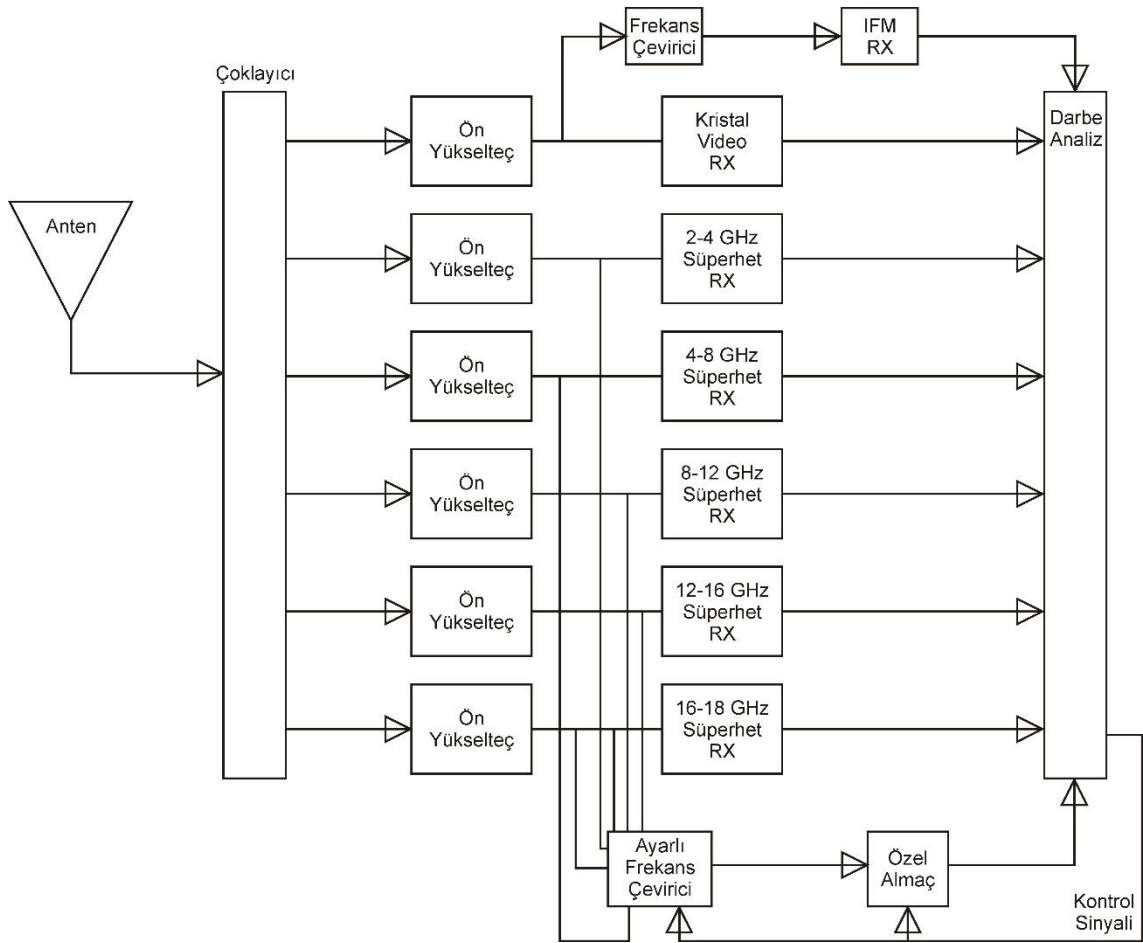
k = Boltzmann sabiti

T = Girdi seviyesinde eşdeğer gürültü sıcaklığı (K)

B_{IF} = IF bantgenişliği (Hz)

Gürültü sıcaklık değeri ağırlıklı olarak kelvin cinsinden ifade edilir. Frekans ölçümü içinse hertz biriminin gerekli mertebeleri kullanılmaktadır.

Hedef tarama paternine göre, geniş bantlı bir arama paterni kullanan almaç ‘Geniş Bantlı Almaç’ olarak adlandırılırken, dar bantlı bir arama paterni kullanan almaç ise ‘Dar Bantlı Almaç’ olarak adlandırılır (Wiley 2006, Poisel 2014). Geniş bantlı almaçlar, yoğun RF frekans sinyalleri içeren ortamlarda satürasyona girme ihtimali yüksek olan almaçlardır (Wiley 2006, Poisel 2014). Bu almaçların tarama hızı, geniş bir frekans tarama paterninin getirdiği pratiklikle, daha hızlı bir şekilde farklı frekans bilgilerini içeren darbe sinyallerini analiz etmek için kullanılabilir (Wiley 2006, Poisel 2014).



Şekil 6.3 Kristal video ve süperhet almaçların beraber kullanılmasıyla elde edilen yüksek yetenekli almaç tasarımı

Geniş bantlı bir süperhet almacının sayısal katmanda işlem kazancı ölçülebilir. Sayısal katmanda kullanılacak olan video yükseltecin kapsayacağı bant genişlik aralığını, 10 veya 20MHz gibi yüksek mertebelere çıkarmak oldukça zordur. Fakat RF veya IF katmanda kullanılacak olan yükselteçlerin kapsayacağı bant genişliği 100MHz gibi yüksek

seviyelere rahatlıkla ulaşabilmektedir. IF seviyesinde elde edilmek istenen SNR, artan ‘Processing Gain (Sayısal İşlem Kazancı)’ değeri ile kolayca arttırılabilir (Wiley 2006).

$$PG = \sqrt{\frac{B_{IF}}{2 * B_v}}$$

PG = Processing Gain (Sayısal İşlem Kazancı)

B_{IF} = IF bant genişliği

B_v = Video bant genişliği

Süperhet almalarda dinamik erim hesabı, RF ön yükselteç aracılığıyla belirlenebilir. Minimum ölçülebilecek güç seviyesine sahip sinyal, hassasiyet, RF ön yükselteç güç seviyesiyle belirlenir (Wiley 2006, Poisel 2014). Maksimum ölçülebilecek sinyal gücü, RF ön yükseltecin satürasyonuna bağlıdır. Maksimum dinamik erim ve en iyi hassasiyeti yakalayabilmek için RF ön yükseltecin, almal içi gürültü tabanını en az şekilde yükseltmesi gerekmektedir (Wiley 2006).

Yüksek doğruluk ve tutarlılık gerektiren IF katman tasarımlarında, lokal osilatörün referans bilgisini aldığı ayarlayıcı’dan gelecek olan sinyalin içerdiği frekans bilgisi önemlidir. Yüksek doğrulukta osilatör ayarının gerçekleşmesi için ‘RMS Frequency Error Due To Noise (Gürültü Sebebiyle RMS Frekans Hatası)’ hesabı geliştirilmiştir (Wiley 2006).

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{3}}{\pi * \tau * \sqrt{\frac{2 * E}{N_0}}} = \frac{\sqrt{3}}{\pi * \tau * \sqrt{2 * SNR * \sqrt{B_\tau}}}$$

σ_f = Gürültü sebebiyle oluşan RMS frekans hatası

τ = Sinyalin kalış süresi veya ölçüm süresi

E = Sinyal Enerjisi = S_τ

N_0 = Noise spectral density

SNR = Signal to noise ratio

B = Almaç gürültü bantgenişliği

Tutarlı RF devre elemanlarının tasarımı, IF frekans ölçümünde doğruluğu arttıracaktır (Wiley 2006). RF eleman tasarımında gürültü tabanı-kazanç-tasarımsal karmaşıklık-maliyet arasında gelişen ödünleşim, IF katmanında tasarlanacak olan devre elemanlarına da yansımaktadır. IF indirgeme frekansının yüksek seçildiği tasarımlarda, istenilmeyen imaj frekansı, istenilen mesaj sinyaline ait frekanstan daha uzakta olacaktır. Bu sebeple yüksek frekanslar için tasarlanacak olan IF filtrelerin seçicilik oranının daha düşük olması, tasarımsal olarak tolerans gösterilebilir olarak görülecektir. IF indirgeme frekansının düşük seçildiği tasarımlarda ise, daha düşük frekansları kapsayan IF filtre tasarımı gerekecektir ve filtre tasarımı esnekleşecektir. Basitleşen filtre tasarımıyla beraber filtrenin geçiş bandından bastırma bandına geçerken daha keskin bir iniş hedeflenebilecek, dedektör aşaması için daha tutarlı bir sinyal sunulacaktır (Jackson 1996).

IF katmanının tasarımında değerlendirilen bir diğer faktör ise, iki katmanlı IF katman tasarımlarında, ayarlayıcı ile ayarlanan lokal osilatör ile sabit ayarlı lokal osilatörü kapsayan IF yapılarından hangi yapıyı birincil IF katmanına yerleştirmek gerektiğidir. Modern elektronik harp sistem ve RADAR almaç tasarımlarında, ayarlayıcı kontrollü lokal osilatör birinci IF katmanına iletilir. Ön indirgeme işleminde yüksek seçicilik sağlanarak mesaj sinyalinin taşıdığı istihbari bilginin korunması önceliklendirilir (Pakfiliz 2021). Geliştirilmiş olan dedektör tasarımları sayesinde ikincil IF katmanında sabit ayarlı osilatör kullanımına imkan tanınmıştır. İkincil bir ayarlayıcı yapısının aradan çıkarılması, tasarımsal ve yapısal olarak pratiklik sağlamıştır. Süperhet almaç tasarımlarının ilk aşamalarında, birincil IF katmanlarına sabit lokal osilatör (Kristal lokal osilatör) kullanımı tercih edilmiştir (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Dedektör yapısının seçiciliğinin tasarım aşamalarında belirlenen seviyelerce sağlanamadığı takdirde, birincil IF katmanının sabit, ikincil IF katmanının ise ayarlayıcı kontrollü lokal osilatör kullanması gereksinimi ortaya çıkmıştır. Birincil IF katmanının mikser çıkışında oluşan imaj frekansına sahip işareti

bastırmak için kullanılacak olan bant geçirgen filtre, ikincil IF katmanında çalışılacak bantgenişliğini sınırlayacaktır (Jackson 1996, Wiley 2006). İkincil IF katmanı, bu tasarımlarda kısıtlanan bant genişliğinde tutarlı frekans indirgeme özelliğine sahip olacaktır. Sınırlı bir bant genişliğinde yapılacak olan mikser/filtreleme kademesi, ikincil IF katmanı çıkışında yerleştirilen dedektör yapısına kestirim için uyumlandırılmış bir sinyal iletecektir. Birincil IF katmanının sabit, ikincil IF katmanının ise ayarlayıcı kontrollü osilatör kullanımı, tasarımsal olarak modern almaçlarda tercih edilmemektedir.

RWR almaç tasarımlarında melezlenen almaçlardan biri olan süperhet almaç türleri, esnek tasarım yapıları ve RF/IF/Sayısal analiz bakımından kapsayıcı oluşlarıyla ön plana çıkmaktadırlar (Pakfiliz 2021). Süperhet almaçlar, birçok heterodin almaç tasarımının geliştirilmesine imkan tanımıştır. Elektronik harp senaryolarında karşılaşılan farklı yayın sinyal türlerinin analizi için, süperhet yapısından temel alınarak spesifik özelliklere sahip RWR, monostatik veya bistatik RADAR, oklu telsiz ve savunma sistemleri için almaç tasarımları elektronik harp literatürüne askeri kullanıma sunulmuştur (Dinç 2010).

```
>> IF_Project
Rx Front-End'de Okunan RF Sinyalin Frkekansını Giriniz (GHz) : 8
Conversion Türünü Giriniz (UP-DOWN): down
İndirgenmek istenen IF katman frekans seviyesini giriniz (MHz) :220

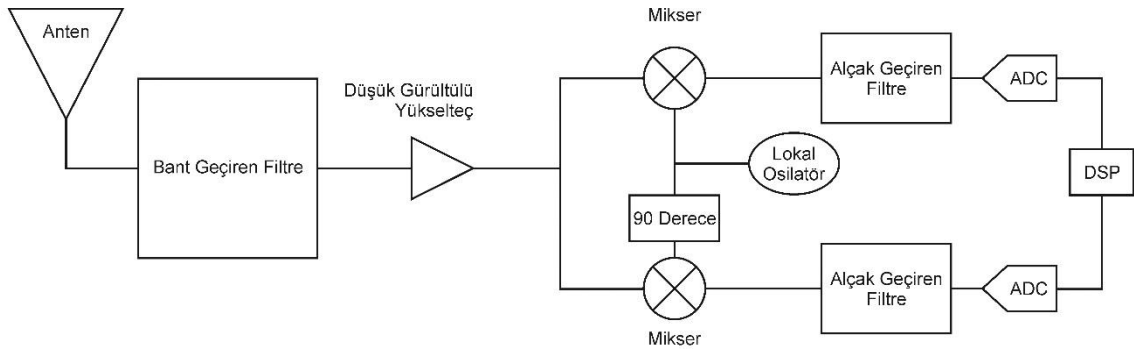
Çıktı Sinyalinde Okunması Gereken Frekans Seviyesi 2.200000e+02 MHz

Gerekli Sinyal Modeli: 1*sin(2*pi*2.200000e+02*t) dir, (f,MHz)
```

şekil 6.4 IF katman frekans indirgeme analizi için sinyallerin önden modellenmesi ve kararlanması

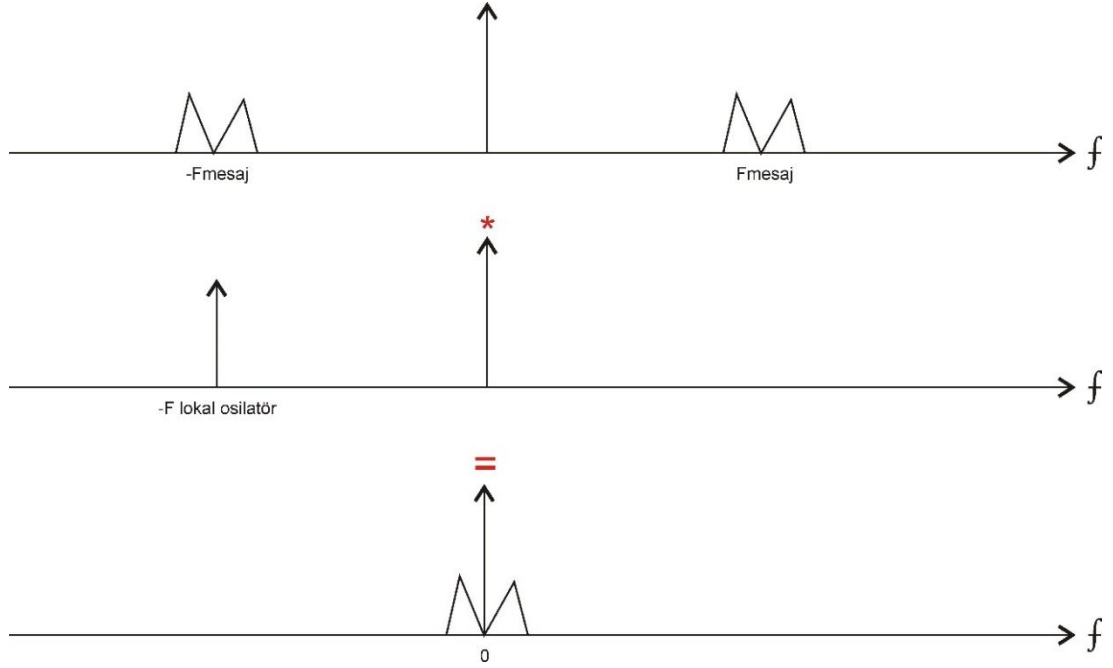
7. HOMODYNE (ZERO IF) ALMAÇ

Homodyne (Homodin) almaç, ‘Direct Conversion (DCR)’ veya ‘Zero IF (Zero Intermediate Frequency)’ IF katman olmadan alınan mesaj sinyalini ‘Baseband (Temel Bant)’ frekans seviyesine iletir. Temel bant, modülasyon aşamasından önce ya da sonra, mesaj sinyali tarafından meşgul edilen frekans aralığı olarak tanımlanmaktadır. Temel bant sinyallerinin frekans değerleri, taşıyıcıya bindirilerek iletilen RF mesaj sinyaline kıyasla oldukça düşüktür (Wiley 2006, Poisel 2014).



Şekil 7.1 Zero IF almaç sistem tasarımı

Verilen şemada da sunulduğu üzere, lokal osilatörün ileticeği sinyalin frekans değeri, mesaj sinyali ile aynı frekans değerine sahip olacaktır. Bu iletim sayesinde imaj frekansını içeren sinyal, düşük geçiren filtre kullanılarak etkili bir şekilde filtrelendirilecektir. Sayısal işlem basamaklarına geçiş için, baseband seviyesindeki sinyal incelendiğinde, frekans ekseninde frekans değerinin sıfır’a indirildiği görülmektedir. Frekans değeri sıfır olan sinyal DC sinyali olacaktır, sayısal işlem basamaklarına geçiş yaparken ADC, dedektör yerine kullanılabilir (Wiley 2006, Poisel 2014). Sayısallaştırılan sinyal, DSP birimine iletilecek ve operatör için tanımlanmış algoritma basamaklarına tabii tutulacaktır. ADC kullanımı, ‘Universal RF Front End (Uluslararası RF Ön Uç)’ tasarımı ve kullanımı konusunda kolaylık sağlayacaktır (Wiley 2006, Poisel 2014). Uluslararası RF ön uç’un sağlanması takdirinde, türlü standartlarda kodlanmış RF sinyalleri aynı blok şemada indirgenerek sayısallaştırılacaktır.



Şekil 7.2 Temel bant sinyale indirgeme

7.1 Homodyne Almaç Performans Analizi ve Tasarım Problemleri

Homodyne (Homodin) almaçlarda bulunan zero IF topolojisi, DSP elektronik tasarımı bakımından maliyet ve yer kazancı sağlamaktadır. İmaj frekansını içeren sinyal işaretlerinin bastırılması için bant geçiren filtre tasarımının gerekmemesi durumuyla, Homodin almaçlar elektronik devre tasarımı bakımından tasarım kolaylığı sağlamaktadırlar (Wiley 2006, Poisel 2014). Fakat indirgeme basamaklarının azlığı, 'Frequency Offset (Frekans Ofseti)' adı verilen lokal osilatörün ihtiyaç duyduğu merkez frekans değerlerinin hatalı olarak sağlanmasına sebebiyet verebilmektedir. Frequency offset sorunlarına karşın tedbir olunması amacıyla, 'Automatic Frequency Control (Otomatik Frekans Kontrol, AFC)' sistemi kullanılmaktadır (Wiley 2006, Poisel 2014). Lokal osilatöre ait sinyalin frekans değeri, AFC sistemi ile kontrol edilerek gereken durumlarda otomatik olarak istenilen frekans değerine ayarlanacaktır.

Homodin almaçlar, hassasiyet ve bastırma bakımından sınırlı performans göstermektedirler. Homodin almancın girdi anteninden gelecek olan yoğun sinyal girişimine karşı Homodin almaçlar, 'Otomatik Kazanç Kontrol (AGC)' adı verilen devre

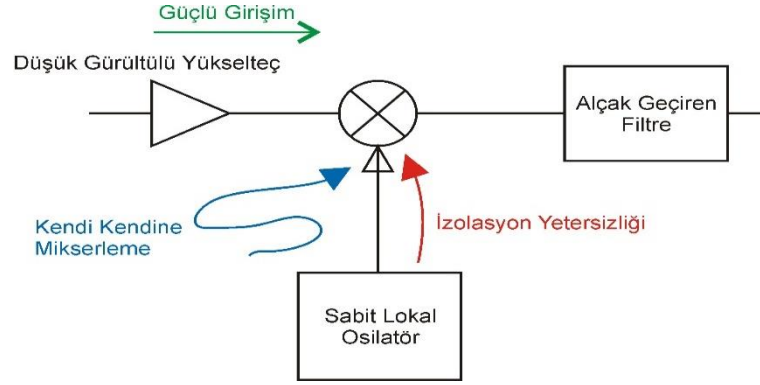
yapısına ihtiyaç duymaktadırlar (Wiley 2006, Poisel 2014). AGC devre yapısı, Homodin almaçlarda kullanılan filtreleri gönderilen yoğun girişim sinyallerine karşı korur. Aynı zamanda, Homodin almaçlar, daha az enerji tüketimine ihtiyaç duymaktadırlar. Homodin almaçlar, beraberinde getirdikleri özelliklerle beraber alınan RF mesaj sinyalini temel bant seviyesine düşürdükleri gerekçesiyle, ‘Quadrature (I/Q) Downconversion (Kuadratür Altçevrim)’ metoduna ihtiyaç duymaktadırlar (Wiley 2006, Poisel 2014). Kuadratür altçevrim metodu, frekans ekseninde negatif tarafta kalan frekans bileşenlerinin 0 Hz’e indirgenmiş mesaj sinyaline ait frekans bileşenlerine girişim uygulamaması ve spektrum’a gürültü olarak yansımaması için gereklidir. Bu metotta mesaj sinyali, RF bant geçiren filtre ve düşük gürültülü yükselteç tarafından geçirildikten sonra, iki ayrı kanala iletilmektedir. Bu kanalların ikisinde de mikser, dar bant geçiren filtre (analog filtre) ile filtreleme, ve dedektör veya ADC ile sayısal kademeye geçiş işlemleri bulunmaktadır. İki kanalda bulunan mikserlere, aynı lokal osilatörden mesaj sinyaline ait frekansı içeren bir çarpım sinyali iletilecektir. Fakat bu kanallardan birine iletilen çarpım sinyali, 90° faz kaydırmasına uğratarak iletilir (Wiley 2006, Poisel 2014). Faz gecikmeli kanal ‘Q’ olarak adlandırılırken faz gecikmesi olmayan kanal ise ‘I’ olarak adlandırılır. Bu kanalların sayısallaştırma basamaklarından alınan çıktı, sayısal sinyal işleme (DSP) birimine gönderilerek kullanıcı elektronik harp sistemi, RADAR tarafından talep edilen analiz-sonuç işlemleri gerçekleştirilmektedir.

Homodin almaç tasarımlarında, temel bant frekans seviyesine mesaj sinyalleri düşürüldüğü ve lokal osilatörlerin donanımsal olarak zaafiyetleri olabileceği gerekçesiyle, sistemsel olarak lokal osilatörden kaynaklanan performans problemleri ortaya çıkmaktadır (Wiley 2006, Poisel 2014). Lokal osilatörlerin almaç sisteminde oluşturduğu sinyal indirgeme sorunları, temelde üç farklı nedenden kaynaklanmaktadır. Lokal osilatör yapısından dolayı oluşacak olan sızdırma sinyalleri, LNA girdi kademesine ulaşması doğrultusunda sızdırma sinyalleri yükseltilecek mikser girdisine ulaşır. Mikser girdisinde kendi lokal osilatör sinyaliyle çarpılan sızıntı sinyali, 0 Hz frekans ekseninde girişim sinyali olarak indirgenmiş mesaj sinyalini engellemektedir. Filtrelendirme kademesinde bu girişim sinyallerinin ayrıştırılamayacağından ötürü, sayısallaştırma aşamalarında hatalı kodlama veya tespit işlemleri gerçekleşebilir. Bu hatalı kodlama

sonucu DSP biriminde hatalı hedef veya yayın kaynağı kestirimi gibi sorunlarla karşılaşılabilir (Wiley 2006, Poisel 2014).

Lokal osilatör tasarımından ötürü yaşanabilecek bir diğer tasarım sorunu ise lokal osilatörden çıkan sızıntı sinyalinin belirli bir güç seviyesine ulaşmasıdır. Bu güç seviyesine ulaşan sızıntı sinyali almaç sisteminin girdi anteninden çıkarak dışarı elektronik harp ortamında bulunan coğrafi unsurlara veya almaçın yerleştirildiği konumda bulunan bina benzeri beşeri unsurlara çarparak yansır (Wiley 2006, Poisel 2014). Yansıyan sinyal tekrar almaç sistem anteni tarafından yakalanarak almaç içi alt elemanlara iletilecektir. İletilen sinyal tekrar lokal osilatörden çıkan çarpım sinyaliyle çarpılarak frekans ekseninde girişim sinyali olarak mesaj sinyalini engelleyecektir (Wiley 2006, Poisel 2014).

Özellikle elektronik harp ortamı gibi yoğun olarak farklı frekansların olduğu ortamlarda, tasarlanan homodin almaç sisteminin anteni, istenmeyen unsurlara ait yayınlardan sinyaller toplayacaktır (Schleher 1993, Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Bu sinyallerin genlik/güç seviyelerine göre farklı şekillerde girişim spektrum ekranında gözlemlenmektedir. Düşük genlik seviyesinde olan sinyaller lokal osilatörden gelen sinyalle çarpılarak spektrumu meşgul etmektedirler. Bu seviyeli girişimler yüksek bastırma oranlı alçak geçiren filtrelerle aşılabilir (Wiley 2006). Fakat güç seviyesi yüksek olan girişim sinyalleri, lokal osilatörün çıktı ucuna kadar ulaşarak lokal osilatörün üreteceği sinyalle beraber çoklu frekans katkılı bir çarpım sinyali oluştururlar. Antenden alınan girişim sinyali, mikserin girdi ucunda da belirecektir (Wiley 2006, Poisel 2014). Mikserin girdi ucundaki girişim sinyali ile oluşan çarpım sinyaliyle yapılan çarpım işlemi sonucu, girişim sinyali kendisiyle de çarpılacaktır. İşlem sonucu ana mesaj sinyalinin gözlemlenmek istendiği 0 Hz seviyesinde, girişim sinyalinin etmenleri de gözlemlenecektir, mesaj sinyalinin çıkarımını yapmak zorlaşacaktır (Wiley 2006, Poisel 2014).



Şekil 7.3 Zero IF almaç lokal osilatör ve dışarı kaynaklı girişim ve mikserleme sorunları

Yaşanabilecek tasarımsal sorunlar için literatür tarafında çoklu öneriler sunulmaktadır. DC sinyallerin öncelikli olarak arındırılması adına, seri bağlantılı ‘AC Eşleme Kapasitörü, (AC Coupling Capacitor)’ içeren yüksek geçirgen bir filtre kullanılabilir (Jackson 1996, Pakfiliz 2021). Yüksek geçirgen filtre, çarpım sonrası oluşacak olan, mesaj sinyaline ait yükseltilmiş frekansı ($f_{LO} + f_{Mesaj}$) içeren işaret sinyalini geçirir (Jackson 1996, Wiley 2006, Pakfiliz 2021). Daha sonrasında bir dedektör kullanarak elde edilen kestirim çıktısı işlemci birimine iletilir. Fakat işlemci biriminde, ana mesaj sinyaline ait frekansın lokal osilatör frekansı ile toplanarak yükseltildiği programlanmalıdır. Bu yaklaşım tarzı, kapasitörün yapısal özelliklerinden dolayı tercih edilmemektedir (Wiley 2006, Poisel 2014). Kapasitörlerin değişen DC seviyelerine karşı yavaş tepki vermesi, yüksek frekanslarda kullanılacak olan kapasitörün elektronik kart pano’sunda daha fazla yer kaplayacak olması kapasitörlerin seri bağlantıda tercih edilmemesine yönelik ulaşılan sonuçlardır (Wiley 2006, Poisel 2014). Aynı zamanda frekans seviyesi yükseltilmiş bir sinyalin zarfının kestiriminin yapılabilmesi için, dedektör’ün yüksek hassasiyette ayarlanması gerekmektedir. Modern almaç tasarım literatüründe, süper harmonik çarpım ve ofset kalibrasyon teknikleri adlı iki farklı etkili yöntem geliştirilmiştir (Harris 1978, Poisel 2002).

- Süper Harmonik Çarpım: Lokal osilatör’den iletilen çarpım sinyalinin mikser ucunda belirerek kendisiyle çarpılmasını önlemek için geliştirilmiş bir yöntemdir. Lokal osilatörün ileteceği sinyalin frekans değeri, RF mesaj sinyalinin frekans değerinin

tamsayı katına veya tam bölenine ayarlanmasıyla yapılır (Harris 1978, Poisel 2002, Wiley 2006).

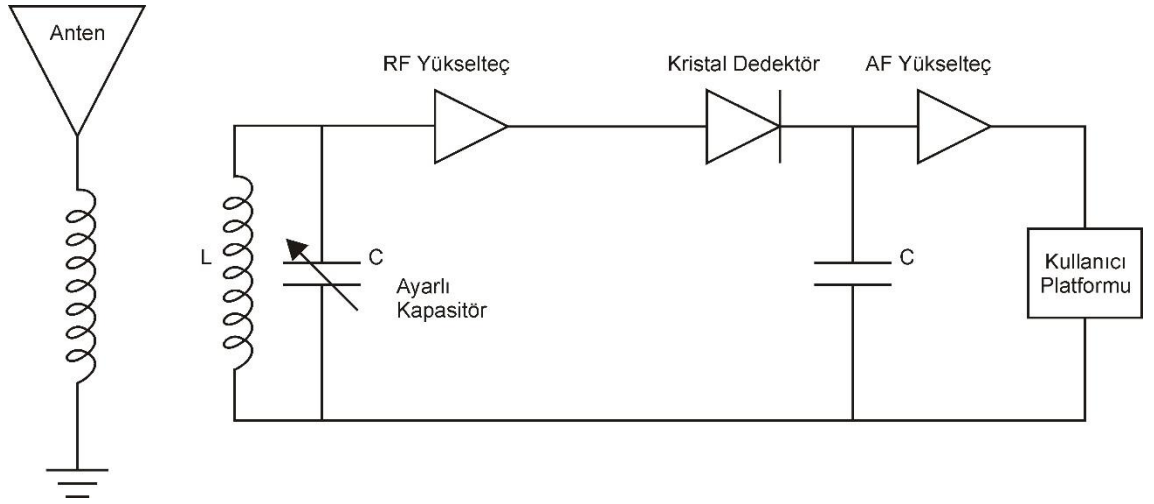
- Ofset Kalibrasyon Teknikleri: Sayısal olarak geliştirilen, ‘Digital Sample and Hold Feedback (Sayısal Örnek ve Tutuş Geri Bildirimi)’ olarak tanımlanan bir geri bildirim sistemidir. Ofset kestirimi, temel bant seviyesinde ‘Corrective Feedback (Doğrulayan Geri Bildirim)’ adı verilen doğrulamalı geri bildirim sistemi ile gerçekleştirilir. Servo motorlar, bu geri bildirim sisteminde kullanılarak istenilmeyen DC ofsetlerin kestiriminde kullanılmaktadır (Harris 1978, Poisel 2002, Wiley 2006).

7.2 Homodyne ve Superheterodyne Almaçlar İçin Tasarımsal Tercihler

Homodin ve süperhet almaçlar, yapısal olarak sundukları farklılıklarla birbirlerine karşı avantajlar ve dezavantajları mevcuttur. İstihbarat uçaklarında veya RWR içeren savaş uçaklarında, ağırlıklı olarak süperhet almaç yapısı tercih edilmektedir. Süperhet yapısının çoklu frekans analiz imkanları ve elektronik harp sistemlerine olan uyumlu tasarım planı, bu almaç yapısını ön plana çıkarmaktadır. Çoklu katman yapısına sahip olan süperhet almaçlar, sistem kazancı ve gürültü tabanı bakımından RF katmana yerleştirilecek olan ön yükseltece bağlıdır (Skolnik 1981, Schleher 1993, Adamy 2000, Adamy 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Çoklu katman yapısı, kazanç üzerine yüksek seviyeli değişiklik yapılmasına veya ön yükselteç tarafından yükseltelen gürültü tabanının indirgenmesine izin vermemektedir. Öte yandan homodin almaçlar, IF katmanının olmayışı, dolayısıyla tek bir indirgeme basamağının oluşuyla kazanç ve gürültü analiz bakımından pratiklik sağlamaktadır. Homodin almaçların girişim sinyallerine karşı olan zaafiyeti, kritik yayın analizi gerektiren harp sistemlerinde tercih edilmemesine sebebiyet vermektedir (Pakfiliz 2021). Pratik mesaj sinyali takibi ve dinlemesi yapılırken veya uluslararası RF ön uç’un sağlanmasını gerektiren RADAR sistemleri tasarlanırken, homodin almaçların sunduğu yapısal avantajlar tercih edilebilmektedir. Yüksek güvenlik ve askeri bilgilerin işlendiği elektronik harp ortamında kullanılan savunma sistemi, savaş uçağı veya istihbarat uçaklarında süperhet almaç’ın sunduğu detaylı tasarım imkanları elverişli olacaktır (Pakfiliz 2021).

8. AYARLI RADYO FREKANS ALMAÇLARI

Elektronik harp ortamında kullanılan almaçlar dahilinde, RADAR için kullanılan basit yapıda radyo almaçları da almaç tasarım literatüründe kazanıma sunulmuştur. Bu almaçlar, düşük elektronik komponent sayısı, tasarımsal sadelik, kabul edilebilir hassasiyet ve kolay kullanım olanaklarıyla ön plana çıkan almaç türleridir. Ayarlı radyo frekans (Tuned Radio) almaçları, bir veya birden fazla RF yükselteç ve filtre takımı, dedektör ve gerektiği takdirde ilave yükselteç'ten oluşmaktadır (Wiley 2006, Poisel 2014). Ayarlı radyo frekans almaç sistemi, basit yapılı elektronik harp telsizlerinde görülmektedir. Örnek olarak sıkça kullanılan bir tasarım, aşağıdaki gibidir (Poisel 2014);



Şekil 8.1 Ayarlı radyo frekans almaç tasarım örneği

Almaç sistem yapısının hassasiyetinin ayarlı LC devresinden sonra gelen RF yükselteç tarafından gelmektedir. İndüktör sabit bir elemanken, kapasitör ise değişken (varyabl) kapasitör türündendir (Wiley 2006, Poisel 2014). Filtrenin rezonant frekansı hesap edildiğinde;

$$f_o = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}}$$

RF yükselteç, işaret sinyalinin genliğini yükselteceği gibi cihaz içi ve dışarıdan alınan toplam gürültü tabanını da yükseltecektir. Üretilen gürültü, rezonant devrenin bant genişliğine bağlıdır. Geniş bir bant genişliği aralığı, daha yüksek gürültüye sebebiyet vermektedir. RF yükselteç, LNA yükselteç olarak seçildiği takdirde, istenilmeyen gürültü seviyelerini tasarımsal olarak istenilen değerlere düşürebilecektir.

Almaç sisteminin frekans aralığı ile almaç çıktısında sunulacak olan SNR değeri, ayarlayıcı radio almaçlarının performans özelliklerini belirlemektedir. Almaç seçiciliği de aynı zamanda RF yükselteç aşamasındaki 'Tuned Circuit (Ayarlı Devre)' yapısıyla korunmaktadır. Rezonant devrenin kalite faktörü (Q), ayarlı radyo almacının seçiciliğini sınırlandıran bir etmendir (Wiley 2006, Poisel 2014);

$$Q = \frac{|X_L|}{R_L}$$

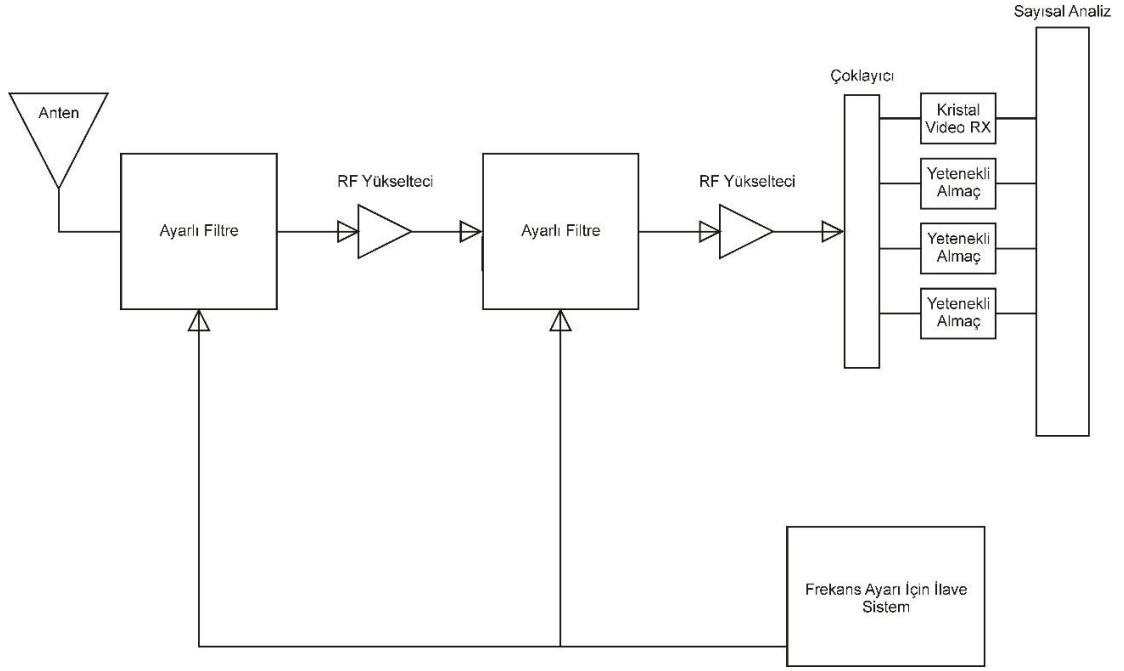
X_L = Sargının endüktif reaktansı = $j\omega L$

R_L = Sargı direnci

Ayarlı radyo almaçların bantgenişliği, LC ayarlı devre yapısının rezonant frekansına bağlı olarak değişmektedir. Bantgenişliği ve rezonant frekansı arasındaki ilişki, aşağıdaki eşitlikte verilmiştir;

$$W = \frac{f_o}{Q}$$

Rezonant devrenin frekansı değiştiğinde, ayarlayıcı radio almacın bant genişliği de değişecektir. Bir başka sonuç ise almaç sisteminin ayar frekansı değiştiğinde, aynı zamanında almaç seçiciliği de değişecektir. Seçiciliğin almaç sisteminin istenmeyen sinyalleri bastırabilme özelliği olarak tanımlandığı için, değişken bir seçicilik oranı RF almaçlarda arzulanan bir özelliktir (Wiley 2006, Poisel 2014). Süperhet almaçlar, yapılarında bulunan yüksek kazançlı, sabit frekans bantlı RF ön yükselteçlerle değişken seçiciliğin önüne geçmektedirler.



Şekil 8.2 Ayarlı radio almalılarının elektronik harp sistemlerine entegre çalışması

Ayarlı radio almalıları, tüketici elektroniğine hitap eden audio işitme sistemleri, taşınabilir radyo sistemleri gibi ürünlerde daha sık tercih edilmektedirler. Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almalılarının gereksinimini duyduğu güvenilir seçicilik, kritik hassasiyet tanımlamaları ve istenilmeyen frekans katkılarını bastırabilme özellikleri ayarlı radyo almalılarında daha kısıtlı olarak sunulmaktadır. Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almalıları için kullanılmak için, ileri seviyede donanımsal tasarım değişikliklerine gidilerek bir süperhet almalı modeline geçilmesi gerekli olacaktır. Elektronik harp sisteminin ana alıcısı, süperhet almalı gibi bir almalı olması gerekmektedir.

9. INSTANTANEOUS FREQUENCY MEASUREMENT (IFM) ALMAÇLARI

IFM (Anlık Frekans Ölçüm) almaçları, anlık olarak alınan darbelerinin içinde bulunan sinyallerin frekans bileşenlerini ölçmek amacıyla geliştirilen almaç sistemleridir. IFM almaç yapısı, frekans ölçümünü alınan mesaj sinyalini sınırlandırma yükselteci sonrası iki hatta bölerek sağlamaktadır (Wiley 2006, Pakfiliz 2021). İki hattan birisi, olduğu gibi faz ayrıştırıcı devreye iletilirken diğeri ise kısa bir faz geciktirmesine uğratıldıktan sonra faz ayrıştırıcıya iletilir. Sinyallerin faz kayması, mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansına doğru orantılı olacak şekildedir (Wiley 2006);

$$\theta = 2 * \pi * f * \tau$$

θ = Faz kayması (Radyan)

f = Taşıyıcı frekansı (Hz)

τ = Diferansiyel gecikme (Saniye)

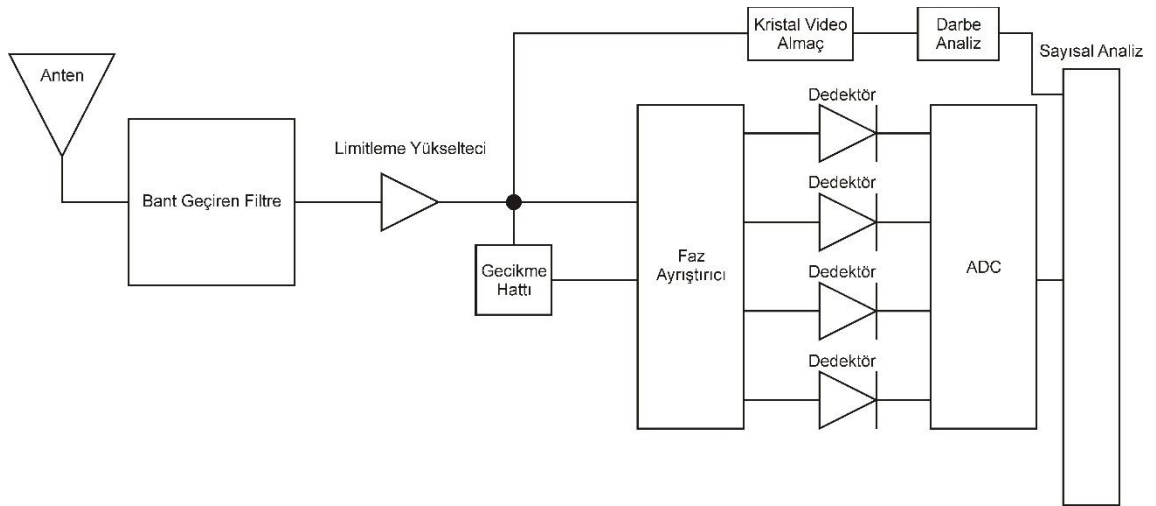
Formülasyondan çıkarılacağı üzere, verilen taşıyıcı frekansına göre, taraması yapılacak olan belirgin bant genişliği için gerekli olan gecikme $\frac{1}{\tau}$ kadardır (Wiley 2006).

Faz ayrıştırıcı (Korelatör) işlemleri, faz kaydırıcı gecikme hattının alınan sinyallere uygulanmasıyla gerçekleşmektedir. Korelatör, gecikme hattından gelen sinyalleri, kendi içindeki 4 hattın 3'ünün 90°, ve 1'inin 180° değerli faz kayması sağlamasıyla ayrıştırma işlemine tabii tutmaktadır (Wiley 2006). Korelatör çıktısı olarak, faz kaydırmasına uğratılmış ve uğratılmamış sinyaller dedektör'e iletilir. Dedektör'de elde edilen 'Envelope (Zarf)' çıktısı, sayısallaştırma amaçları için tasarlanmış olan sayısal mantık devrelerine, oradan da işlemciler/DSP birimlerine iletilir.

IFM almaçlar, zaman ekseninde çok kısa darbelerin frekansını ölçme doğrultusunda tercih edilebilir. Güçleri birbirine yakın seviyede olan sinyaller almaç girdisine ulaştığı takdirde, kristal video almaçların yaşadığı genlik belirsizliğine benzer şekilde, ölçüm güvenilirliğinin yitirilmesi sonucuna ulaşılmaktadır (Wiley 2006). Anlamsız sonuçlar, sayısallaştırma işlem basamağı çıkışında operatöre iletilebilmektedir.

9.1 Kristal Video Almaçları ve IFM Almaçları

IFM almaçları, elektronik harp uygulamalarında, yaklaşık olarak kristal video almaçlarla aynı hassasiyete sahip olmalarıyla bilinmektedirler. Fakat kristal video almaçlara kıyasla, dinamik menzil aralıkları daha düşüktür. Kristal video almaçlar ve IFM almaçlar, çoklu sinyal ortamlarında aynı sorunlarla karşılaşmaktadırlar (Wiley 2006). Darbe sinyallerinin yüksek duty cycle değerlerine ulaştığı yayınlarda veya sürekli dalga yayınlarda, IFM almaçlar ve kristal video almaçlar, satürasyona uğrama durumuyla karşı karşıya kalmaktadırlar. Birden fazla farklı yayın kaynaklarından iletilen sinyaller bu tür almaçlara iletiildiği takdirde, yukarıda bahsi geçen faz kayması denklemi frekans ölçümü açısından yetersiz kalmaktadırlar (Wiley 2006).



Şekil 9.1 Kristal video almaçlar ve IFM almaçların beraber çalıştığı sistem tasarımı

9.2 IFM Almaçlara Limitleyici Devre Uygulaması

'Limiter (Limitleyici Devre)' uygulaması, IFM almaçlarda yaygın olarak kullanılabilir bir uygulama türüdür. IFM almaç yapısında bulunan faz ayırıştırıcının çıktısı, kendisine iletilen sinyalin genliğiyle doğru orantılıdır (Wiley 2006). Faz ayırıştırıcı yapısından önce, sınırlayıcı bir limitleme yükseltecinin kullanıldığı almaç yapısında belirtilmiştir. Elektronik harp uygulamalarında tercih edilen bir diğer yöntem ise, ilave bir limitleyici devre kullanılmasıdır (Wiley 2006). Limitleyici devreler, IFM almaçlarda dinamik

menzil arttırımı sağlamaktadırlar. Limitleyici devre yapısı, faz ayrıştırıcının genliğe bağlı çıktı üretme özelliğini kaldırır. Bu özellik, sadece gürültü taraması yapılan elektronik harp uygulamalarında, tam ölçekli bir çıktı elde edilmesine sebebiyet verebilmekle birlikte, gürültü tarafından sınırlandırılan bir hassasiyet değerine almaç sistemini taşımaktadır (Wiley 2006). Elektronik harp sistemlerinde kullanılan melez almaç yapıları, belirli bir ‘Threshold (Eşik)’ değerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Kristal video almaçları, bu eşik seviyesinin kestirilmesi için uygundur. Kristal video almaçları, eşik değerinin kestirimi ile belirlenen sinyalin seviyesinin üstündeki sinyallerin frekans katkılarının geçerli ölçüme tabii tutulmuş olduğuna karar vermektedirler (Wiley 2006).

Limitleyici devrelerin bir diğer özelliği, frekans ölçümünün doğruluğu üzerinedir. IFM almaç yapısında kullanılan RF devre elemanları, her daim kusursuz olarak ‘Matched (Uyumlu)’ olamamaktadır (Wiley 2006). Sabit genlikte almaç antenine ulaşan sinyal, sinyal frekansın ölçümünü sadece çıktı vektörünün açısının fonksiyonu olacak şekilde kalibre edebilmektedir. Bu kalibrasyon yeteneği, geniş bir yelpazeye yayılan sinyal genliklerinin IFM almaca ulaşması durumunda da geçerlidir. Limiter kullanılmadığı takdirde, ayrı olarak frekans-açı kalibrasyon tabloları her genlik seviyesini ayrı ayrı kapsayacak şekilde kullanılmaktadır (Wiley 2006).

9.3 Aynı Anda Gelen Sinyallerin IFM Almaç Tarafından Analiz Edilme Performansı

IFM almaçlar, yüksek doğrulukta hedef tespiti, yeterli hassasiyet performansı, yüksek frekans ölçüm doğruluğu, kullanıcı operatör ekranına sayısal çıktı sunabilme özelliği, kısa tepki süreleri ve geniş dinamik aralıklarına ön plana çıkmaktadırlar. Belirli zaman aralıklarında, tek bir darbe sinyalinin IFM almaçlara ulaştığı ideal bir darbe analiz ortamı oluşturulduğu varsayılırsa, IFM almaçlar türlü girişim problemlerine karşı ideal sonuçlar çıkarmaktadırlar. Fakat yoğun RF sinyali içeren frekans ortamlarında, birden fazla kaynaktan yayılan sinyallerin nasıl işleneceği önem kazanmaktadır. IFM almaçların sinyal ölçüm kabiliyetleri, farklı senaryolar altında incelenmektedir.

9.3.1 Limiter (sınırlayıcı) olmadan statik durum

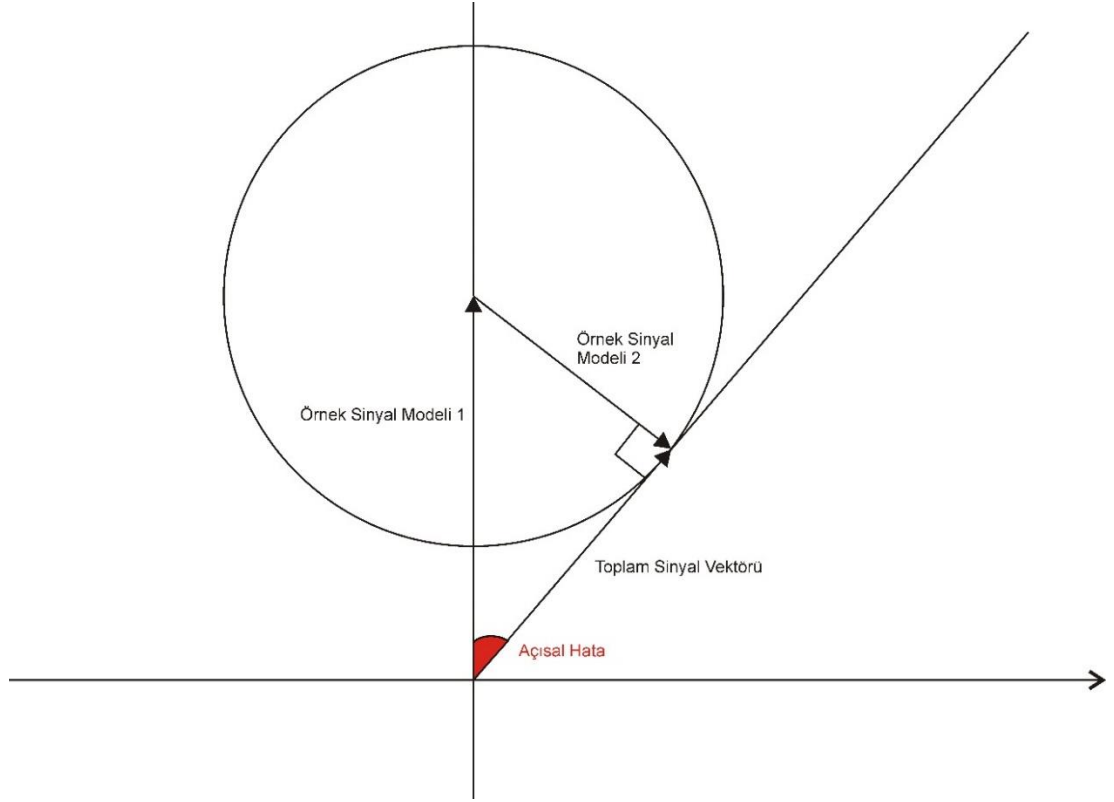
Sabit genlikli iki sinyalin limiter kullanılmayan IFM almaç antenine frekans ölçüm esnasında ulaşması durumudur. Bu durumun analizi için, grafiksel çözüm yöntemleri tercih edilebilmektedir. Grafiksel çözüm yönteminde, sinyallerin gösterimleri, en yüksek genlikli sinyal için $S_{Yüksek}$ ve daha zayıf genlikli sinyal için $S_{Zayıf}$ olacak şekilde gerçekleştirilir (Wiley 2006). $S_{Yüksek}$ olan güçlü sinyal, iki boyutlu dikey eksenini takip edecek şekilde dik olarak çizilir. $S_{Zayıf}$ olarak adlandırılan zayıf sinyal, vektörel toplam ile $S_{Yüksek}$ sinyaliyle toplanır. Vektörel toplam, orijinden başlayıp $S_{Zayıf}$ 'ta bitecek şekilde bir toplam sinyali olarak ifade edilir. Toplam sinyal, S_{Toplam} olarak grafikte adlandırılır. S_{Toplam} sinyal vektörü ve $S_{Yüksek}$ sinyal vektörü arasındaki açı, yer değiştirme açısı olarak adlandırılır, " $\Delta\varphi$ " şeklinde gösterilebilir. $\Delta\varphi$ açısı, 'Angular Error (Açısal Hata)' olarak tanımlanmaktadır (Wiley 2006).

$S_{Yüksek}$ ve $S_{Zayıf}$ sinyallerinin vektörlerinin kesişim noktası merkez noktası olacak şekilde bir çember çizilir. Çizilen çembere doğru orijinden çizilecek olan teğetin üstüne çizilen vektör, daha önce de öngörüldüğü gibi, S_{Toplam} sinyalini gösterecektir. S_{Toplam} ve $S_{Yüksek}$ sinyal vektörleri arasındaki $\Delta\varphi$ açısının değişimi gözlemlenebilmektedir. IFM almaç sistem analizinde, bu çizim grafiği kullanılarak, 'Worst Case Angle' konsepti geliştirilmektedir. Worst case angle, verilen koşul sağlandığı takdirde gözlemlenmektedir (Wiley 2006);

$$S_{Toplam}^2 = S_{Yüksek}^2 - S_{Zayıf}^2$$

$$\Delta\varphi = \arcsin\left(\frac{S_{Zayıf}}{S_{Yüksek}}\right)$$

Worst case angle'ın $S_{Yüksek}$ ve $S_{Zayıf}$ cinsinden değişimi, verilen grafikte gözlemlenebilmektedir (Wiley 2006);



Şekil 9.2 Worst Case Angle görselleştirilmesi

9.3.2 Sınırlayıcı ile statik durum

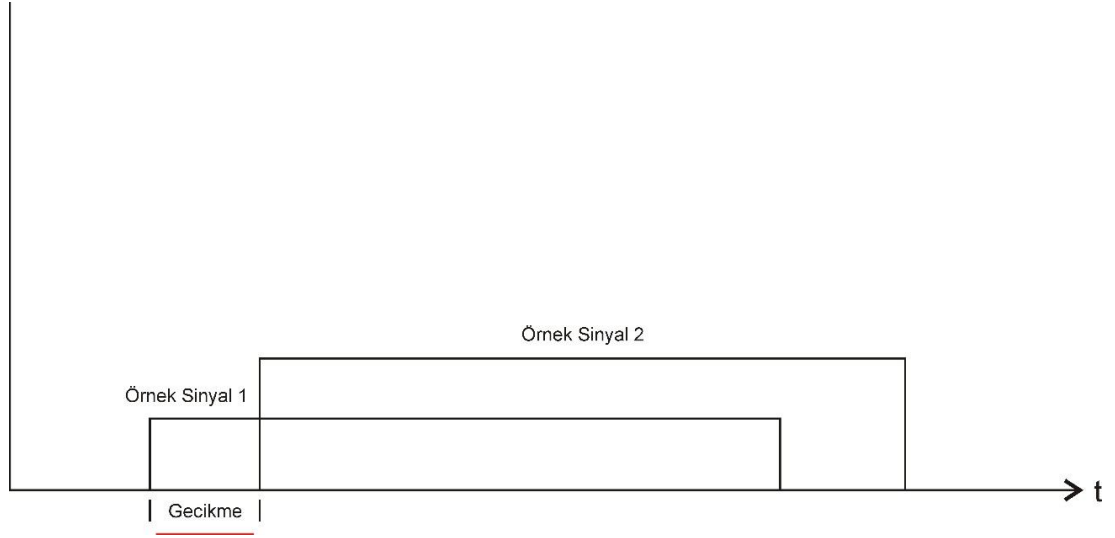
Limiter (Sınırlayıcı) devresi, IFM almaç yapısının faz ayrıştırıcısının önüne yerleştirildiği takdirde, $S_{Zayıf}$ genlik seviyesini $S_{Yüksek}$ 'e göre düşürecektir. Bu özellik sayesinde IFM almaçın ölçüm performansının doğruluğu artacaktır (Wiley 2006). Doğrusal olmayan (Nonlinear) limiter devreleri, 'Intermodulation Products (Modülasyon Arası Yan Ürünler)' olarak adlandırılan, istenilmeyen frekans katkılarını üretebilecektir. İstenilmeyen frekans değerleri spektrumda $2 * f_{Yüksek} - f_{Zayıf}$ ve $2 * f_{Yüksek} + f_{Zayıf}$ olacak şekilde gözükmektedirler.

Oluşan frekans katkıları, RF yükselteçlerden çıkan, istenilmeyen intermodülasyon frekans değerleriyle aynıdır. Fakat limiter devresinin çıktısından kaynaklanan intermodülasyon frekans katkıları, IFM almaç sisteminin frekans ölçümünün kalitesinin arttırılması açısından önemli bir unsur olarak kullanılabilir. RF limiter devrenin çıktısında, arzulanan frekans katkılarına ait sinyallerle beraber gelen intermodulation

frekansı taşıyan işaretler, sonraki aşamalarda bulunan filtrenin ‘Passband’ ‘inde gözükecektir (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Schleher 1999b, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014). Bu sebeple, intermodulation frekansı taşıyan sinyal işaretleri, dışarıdan alınmış ilave yayın gibi gözükecektir. RF limiter devrenin çıkışında bulunacak toplam güç, gelen ilave sinyal işaretlerine rağmen sabit olacaktır. Güç korunumu açısından, zayıf güç seviyesine sahip $S_{Zayıf}$ sinyalinin güç seviyesi intermodulation işaretleri sebebiyle düşecektir (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Schleher 1999b, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014). Bu güç düşümü, istenilen frekans seviyelerindeki sinyallerin ölçümünün doğruluğunu artırıcı bir etmen olacaktır. Statik durumlarda, aynı anda gelen sinyallerden zayıf güç katkısına sahip olan sinyal işaretleri limiter devresi tarafından bastırılmaktadır. Bastırılma, sayısallaştırma aşamalarında kodlama hatalarını azaltacaktır. Hata azaltımı, $S_{Yüksek}$ sinyalinin limiter devresine ulaştığı andaki SNR seviyesine bağlı olarak değişecektir.

9.3.3 Dinamik durum

Aynı anda iki darbe sinyalinin çakışarak ‘Coincident Pulse (Denk Gelen Darbe)’ durumu oluşturması, düşük RF yoğunluklu ortamlarda olası değildir. Elektronik harp ortamında darbe sinyal analizinin önüne geçen önemli bir sorun, bir darbe’nin ‘Rising Edge (Yükselen Uç)’ olarak adlandırılan darbe genliği yükselen kenarından kısa bir süre sonra farklı bir darbe sinyal yayınına ait darbe sinyalinin yükselen kenarının denk gelmesidir (Schleher 1993, Schleher 1999a, Güvenç 2002, Wiley 2006, Dinç 2010, Pakfiliz 2021, Otenkaya ve Pakfiliz 2023). Bu anda, doğru darbe sinyali ölçüm parametereleri çıkarılamayabilmektedir. Aynı zamanda IFM almaçlarda geçiş hatlarından kaynaklanacak olan geniş çaplı frekans ölçüm hataları da gözlemlenebilmektedir.



Şekil 9.3 Dinamik durum örnek görselleştirme

Ölçümlerde gözlemlenebilecek olan hata, faz ayrıştırıcı'nın gecikme olan ve olmayan kollarında gözlemlenebilmektedir. Ortak kanaldan iletilen toplam sinyalde farklı darbe yayınlarının çakışma durumuna uğradığı ve uğramadığı anlar faz ayrıştırıcının gecikmeli ve gecikmesiz kollarına iletilmektedir. Gecikmeli hatta uyumsuz darbe çakışması olduğu ve gecikmesiz hatta darbe çakışmasının olmadığı veya tam tersi durumlarda detektörler farklı patern'lere sahip sinyallerin çıkarımını yapacaktır. Sayısallaştırma ekranlarında bu çıkarım hata olarak yansıyacaktır (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021).

Aynı anda denk gelen darbe sinyallerinin çıkarımı için farklı metotlar elektronik harp literatürüne tanıtılmıştır. İlk sunulan yöntemlerden biri ise, kestirim aşamasında fark frekansının çıkarılması çalışmasının yapılmasıdır. Bu çalışma, bir filtreleme operasyonudur. Filtreleme aralığı, ilgilenilen video bant genişliğinden tahmini maksimum fark frekansına kadardır (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Filtreleme adımına ilave olarak sinyal kestirim işlemi ve alçak geçiren filtre kullanılarak frekans filtreleme işlemi gerçekleştirilir. Tasarım parametrelerince belirlenen eşik değerlerince frekans katkılarının güç değeri karşılaştırılır (Wiley 2006). Eşik değerinin üzerine çıkan birden fazla frekans katkısı bulunduğu takdirde, birden fazla darbe yayını yapan kaynaktan

bahsetmek mümkün olacaktır (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014). Bu çözüm yolu, darbe sinyallerinin genliklerini hesaba katmayan bir yöntem olmakla birlikte genlik seviyelerini de hesaba katan yöntemler elektronik harp RADAR sistemlerinde kullanılmaktadırlar (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014).

Değişken güç seviyelerine özel olarak daha etkin bir ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem kapsamında video detektör çıktısından okunacak olan video voltaj seviyesinin sabit olması beklenmektedir. Sabit olmayan ölçüm değerleri, 'No Read (Okunamadı)' olarak tanımlanarak çıkarılabilir. Bu yöntemin geliştirilmesiyle beraber hatalı ölçümler yüzdesel olarak oldukça azalmaktadır. Almac sistemine ulaştırılan elektronik harp sinyalleri olan S_1 ve S_2 'nin sinyal güç seviyesine bağlı olarak yaşanabilecek senaryolar incelenmelidir. S_1 sinyalinin güç seviyesi S_2 sinyalinin güç seviyesinden daha yüksek olduğu durumlarda, S_1/S_2 oranı belirli birkaç decibel değerini aşabildiği takdirde S_1 sinyaline ait frekans değeri doğru olarak ölçülebilmektedir (Wiley 2006). S_2 sinyalinin güç değeri S_1 sinyalinin güç değerinden daha yüksek olduğu durumlarda, S_1 ve S_2 darbe sinyallerinin arasındaki delay değeri τ analitik olarak referans alınır (Wiley 2006). τ değeri IFM almacın video bant genişliğinin sabit video genliği çıkarmak için faz ayrıştırıcıda ihtiyaç olduğu gecikmeden daha düşük olması gerekmektedir (Wiley 2006). Bu sayede, sayısallaştırma basamaklarında video voltaj değerlerinin sabitlendiği andan itibaren sayısal analiz işlemleri yapılacaktır. S_2/S_1 değeri, belirli bir değer birkaç decibel üzerinde olmalıdır (Wiley 2006).

Farklı bir analiz durumu olarak τ değerinin IFM almac tarafından ihtiyaç duyulan gecikme değerinden yüksek olması durumu incelenebilir. Bu durumda, darbe sinyallerinin güç seviyeleri üzerine çalışılacaktır. S_1 sinyali'nin frekans değeri doğru bir şekilde ölçülebilmektedir. S_2 sinyalinin frekans değerinin doğru ölçümü, S_2/S_1 değerinin belirli bir değer yaklaşık olarak birkaç decibel üzerinde olmalıdır (Van Brunt

1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014).

9.4 Sürekli Dalga Sinyaller ve IFM Almaçları

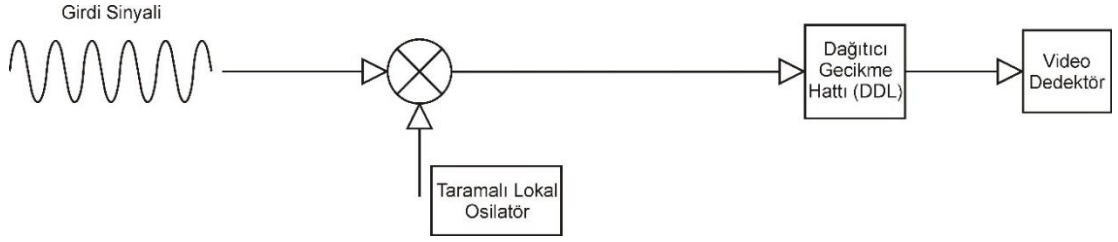
Sürekli dalga sinyalleri, zaman eksenini aralıksız olarak kaplayan sinyal türleridir. Bu sinyal, almaç antenine ulaştıkları takdirde bütün darbe sinyallerini kapsayacak şekilde çakışma yaşayacaklardır. Elektronik harp ortamında sürekli dalga yayın yapan sinyaller, tespit olasılığının düşmesi açısından darbe sinyallerine kıyasla daha düşük genlik seviyesindedirler. Fakat sürekli dalga sinyaller genlik olarak darbe sinyallerinden daha yüksek seviyede oldukları takdirde darbe sinyallerini maskeleyecektirler. Sürekli dalga sinyallerinin darbe sinyallerine dönüştürülmesi için RF chopper devre yapısı kullanılabilir (Wiley 2006). Sürekli dalga sinyaline ait olan frekans bilgisi, diğer darbe yayınlar gibi ölçülebilir. Almaç yapısında filtre yapısı olarak ‘Tunable Notch Filter (Ayarlanabilen Çentik Süzgeci)’ kullanımı, sınırlayıcı devresinden önce kullanıldığı takdirde ilave sürekli dalga sinyallerinden gelen frekans ve güç katkıları bastırılacaktır (Wiley 2006). Farklı filtre yapılarından taramalı bant geçiren filtre yapısı, almaç anteni tarafından yakalanan ve işlenen sinyallerin frekans değerlerini düzenli olarak taramaktadır. Farklı frekans katkıları sunan yayınlara ait sinyaller, filtre tarafından taranır (Van Brunt 1978, Van Brunt 1982, Adamy 2002, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Poisel 2014). Sayısallaştırma basamaklarına kadar ulaşan analiz çıktıları, sayısal analiz ekranındaki istihbarat raporları ve sinyal analiz altyapısında bulunan verilerle kıyaslanır. Taramalı bant geçiren filtre’nin tarama esnasında denk geldiği frekans katkıları analiz ekranında sunulmaktadır (Pakfiliz 2021). IFM almaç yapısı, süperhet almaç yapısıyla çarpıztılarak melez almaç yapısı oluşturulabilir. Melez almaç yapısı sayesinde sürekli dalga sinyallerinin oluşturabileceği hatalı frekans ölçüm etmenleri süperhet almaç tarafından engellenebilmektedir (Pakfiliz 2021).

IFM almaç yapısı, karmaşık RF sinyallerinin yoğun olarak bulunduğu elektronik harp ortamlarında süperhet almaç kadar yüksek performans sergileyemeyebilse de elektronik harp sistemlerinde tecih edilebilen almaç türlerindedir.

10. COMPRESSIVE (KOMPRESİF) ALMAÇLAR

Compressive (Kompresif) almaçlar, geniş bantlı elektronik harp uygulamalarında tercih edilen almaç türleridir. Kompresif almaçlar, yapısal olarak süperhet almaçlara benzerlik göstermekle birlikte, hızlı ayarlama özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Sinyal işleme becerisi yüksek olan kompresif almaçlar, birden fazla yayın kaynağından gelen çoklu frekans katkılarını yüksek doğrulukta ayırt edebilmeleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Süperhet almaç seviyesinde bir hassasiyetle beraber süperhet almaç'a kıyasla daha geniş bir menzil aralığı sunmaktadırlar. Kompresif almaçlar, analiz edilen sinyallerin faz ve genlik değerlerini koruyabilmektedirler. Korunan faz ve genlik değerleri, çok kanallı anten dizilerinin almaç sistemine uyarlanabilmesine ve sinyal yayınının geliş yönünün belirlenebilmesine sebebiyet vermektedir (Breuer vd. 1989, Li ve Milstein 1991, Snelling ve Geraniotis 1994).

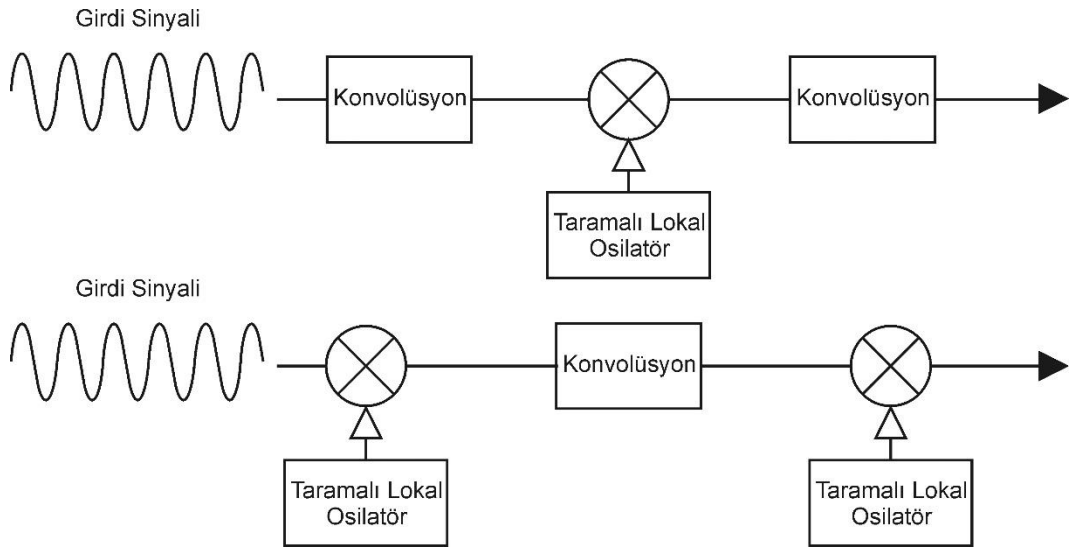
Kompresif almaçların hızlı tarama özelliği, 'Swept Local Oscillator (Taramalı Lokal Osilatör, SLO)' kullanımından gelmektedir. SLO, 'Sweep Generator (Tarama Jeneratörü)' sistemine bağlı olarak çok frekanslı, taramalı örnek sinyal çıktıları üretmektedir (Breuer vd. 1989, Li ve Milstein 1991, Snelling ve Geraniotis 1994, Poisel 2014). Üretilen SLO sinyali, almaç girdi antenine ulaşılan sinyalle çarpılarak 'IF Chirp Output (Ötümlü IF Çıktısı)' sinyali üretmektedirler. Ötümlü IF çıktısı adı altında üretilen sinyal, anten girdi sinyalinin frekans modülasyonuna uğratılmış hali olarak da adlandırılmaktadır (Breuer vd. 1989, Li ve Milstein 1991, Snelling ve Geraniotis 1994, Poisel 2014). Kompresif almaçların kullandığı frekans modülasyonu, yüksek doğrulukta frekans ölçümüyle sonuçlanmaktadır. Almaç sistem tasarımında 'Dispersive Delay Line (Dağıtıcı Gecikme Hattı)' dan faydalanılarak farklı frekans değerlerinin farklılığına göre frekans katkıları belirli bir gecikmeye uğratılır (Poisel 2014). Dağıtıcı gecikme hattı çıktısı olarak alınan geciktirilmiş sinyal örnekleri video dedektör'e iletilir. Video dedektör çıkışı sinyal sayısal basamaklara iletilmek üzere yönlendirilir.



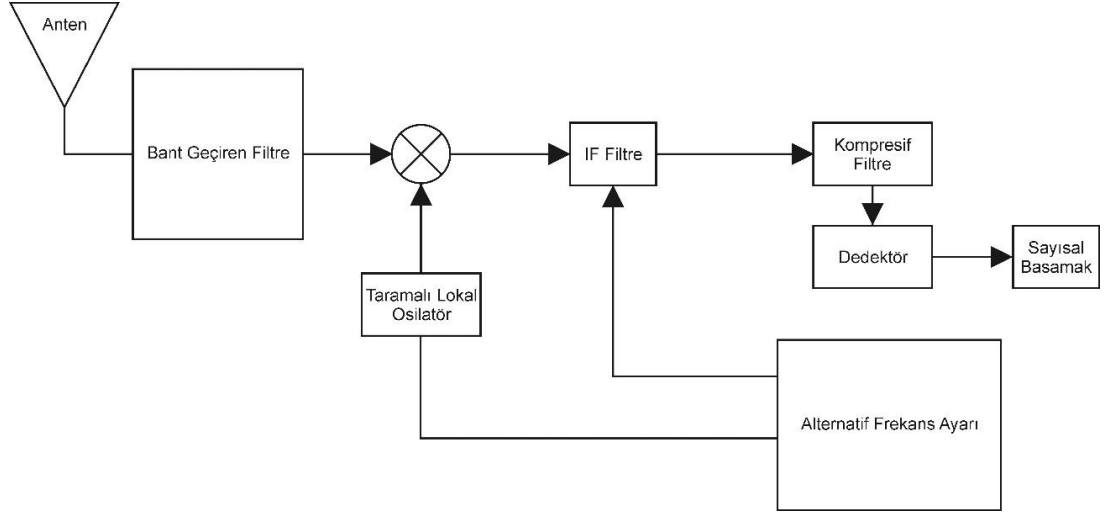
Şekil 10.1 Kompresif almaç basit yaklaşım tasarımı

10.1 Kompresif Almaçlar ve Ötümlü Sinyallerle Olan Analizi

Elektronik harp ortamında RADAR uygulamalarında kullanılan kompresif almaçlar, konvolüsyon-çarpım-konvolüsyon veya çarpım-konvolüsyon-çarpım tasarım formülasyonlarını kullanmaktadırlar (tasarım aşağıya çizilecek). Mikser elemanlarına girdi olarak gönderilen kompleks eksponansiyel girdiler, ötümlü sinyal formatını temsil etmek amacıyla kullanılmaktadır. Fakat elektronik harp komuta kontrol uygulamalarında, konvolüsyon-çarpım-konvolüsyon oryantasyonu tercih edilmektedir (Poisel 2014).



Şekil 10.2 Konvolüsyon-çarpım-konvolüsyon ve çarpım-konvolüsyon-çarpım tasarımları



Şekil 10.3 Kompresif almaç elektronik harp şeması

Kompresif bir almaçın ayarlanan bant genişliğini taradıktan sonra, taraması yapılan bütün frekans katkılarının gösterimini operatöre sunmalıdır. Frekans katkılarının spektrumda birleştirmek için kullanılacak olan bir sıkıştırma filtresi (Kompresif Filtre), gerekli performansı sağlayacaktır. Kompresif almaçlar, demodülasyon yapma özelliğine sahip olan almaç türleri değildir. Dar bantlı, demodülasyon işlemlerini gerçekleştirebilen almaçlar için ön bant aşaması olarak tercih edilebilen almaç türlerindedir (Poisel 2014).

Kompresif almaçlar için ötümlü-dönüşüm algoritmaları, fourier dönüşümünün sunduğu ilişkidir faydalanılarak çıkarılmaktadır.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (f(t)e^{-j\omega t})dt$$

Denklem çözüm için farklı gösterimlerde kullanılmaktadır. $f(t)$, girdi sinyalinin zamana göre değişimini ifade eden fonksiyondur. İntegral eşitsizliğini, zaman ve frekans arasında lineer bir ilişki olduğu kabul edilerek algoritmik olarak çözümlenmesi adına kullanılabilir bir yöntem sunulmuştur (Poisel 2014);

$$-2\omega t = (t - \omega)^2 - t^2 - \omega^2$$

$$F(\omega) = F(\mu t) = e^{-j\frac{1}{2}\mu t^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(f(u) e^{-j\frac{1}{2}\mu u^2} \right) e^{j\frac{1}{2}\mu(t-u)^2} du$$

Denklem analizine geçildiğinde kompresif almaç sistem basamakları gözlemlenmektedir. $f(t)$ olarak tanımlanan girdi sinyali, fourier dönüşümünün bir aşaması olarak eksponansiyel $e^{-j\omega t}$ ile çarpılmaktadır. $e^{-j\frac{1}{2}\mu u^2}$ ile gerçekleştirilen ön çarpım, ötümlü dalgaformu ile gerçekleştirilen mikser basamağını temsil etmektedir. Ön çarpımı olarak elde edilen sinyal bütünlüğü, ötümlü sinyal filtresi içerisinde bir konvolüsyon işlemine tabii tutulmaktadır. İntegral içi, $e^{j\frac{1}{2}\mu(t-u)^2}$, ile gösterilmektedir. Çarpım konvolüsyon çarpım tasarım modeli takip edildiği takdirde, ilaveten ötümlü sinyal dalgaformu $e^{-j\frac{1}{2}\mu t^2}$ ile yapılacak olan çarpım, fourier dönüşüm sonucu olan $F(\omega)$ fonksiyonunu ortaya çıkarmaktadır (Jackson 1996, Wiley 2006, Poisel 2014).

Çarpım konvolüsyon modeli incelenecek olursa, son aşamada ilaveten gerçekleştirilen $e^{-j\frac{1}{2}\mu t^2}$ ile çarpım sayısal işlemci tarafından çıkarılması istenilen fourier dönüşüm elemanlarının çıkarımını gerçekleştiremeyecektir. Bu durum, sadece spektral bileşenleri ön ötümlü sinyal ile çarpım aralığı boyunca sabit olan sinyallerin güç spektrum analizinin gerçekleştirilmesine imkân tanımaktadır. Fourier dönüşümünün sayısal analizini gerçekleştirecek olan sayısal işlemciler için çarpım konvolüsyon çarpım konfigürasyonu tercih edilmektedir (Jackson 1996, Wiley 2006, Poisel 2014).

SAW (Surface to Acoustic Wave, Yüzeysel Akustik Dalga) ötümlü sinyal filtreleri, kompresif almaç sistemlerinde istenilmeyen frekans katkılarını kaldırmak adına tercih edilen filtrelerdendir (Poisel 2014). SAW ötümlü sinyal filtrelere dürtü sinyali gönderilen işlem sonrası, elde edilen dürtü tepkisi sinyalleri mikser elemanına gönderilir. $f(t)$ olarak ifade edilen girdi sinyali ile SAW ötümlü sinyal filtre çıkışı dürtü sinyalleri mikser aşamasında çarpılır. Çarpım konvolüsyon çarpım tasarım modeli tercih edildiği takdirde, konvolüsyon filtresi aşaması için de SAW ötümlü sinyal filtresi kullanılabilir (Poisel 2014).

Algoritmik tasarımların belirlenmesi adına, SAW ötümlü sinyal filtre çıktısında okunacak olan dürtü tepkisi sinyali, verilen matematiksel eşitlikle modellenmiştir (Poisel 2014);

$$c_i(t) = \prod \left\{ \frac{t - t_i}{T_i} \right\} w_i(t) \cos \left\{ w_i t - \frac{1}{2} \mu t^2 + \varphi_i \right\}$$

$\prod \left\{ \frac{t - t_i}{T_i} \right\}$, dikdörtgensel bir ‘Gating (Geçit)’ fonksiyonunu temsil etmektedir. Geçit fonksiyonu, t_i süresinde, $t = T_i$ anında merkeze alınmıştır. Denklemsel çözümlenmelerde, dürtü sinyallerinin uygulanması ile SAW filtrenin vereceği dürtü tepkisinin oluşmaya başlaması arasında geçen zaman ihmal edilmektedir. φ_i bir faz terimiyken $w_i(t)$ ise ‘Weighting Function (Ağırlıklandırma Fonksiyonu)’ olarak tanımlanmaktadır. μ , anlık açılmalık frekans değişiminin büyüklüğü olarak tanımlanmaktadır (Poisel 2014).

10.2 Dağıtıcı Gecikme Hattı Birimlerinin Kompresif Almaçlarda Kullanımı

Dağıtıcı gecikme hattı (DDL), karakteristik olarak tasarlanan bir almaç sistem elemanıdır. Bu tasarım çerçevesinde, DDL elemanına girdi olarak ulaşan sinyalin, bir veya birden fazla frekans katkısı olacaktır. Bu frekans katkılarına göre tasarımsal olarak her bir frekans değerine göre DDL’de belirlenen bir gecikme değeri olacaktır. Bu gecikme değeri kadar gecikme, girdi sinyaline uygulanarak DDL çıkışına yönlendirilecektir (Poisel 2014).

DDL elemanları, lineer karakteristiğe sahiptir. Birden fazla frekans katkısına sahip olan sinyaller veya lineer olarak artan/azalan frekansa sahip olan sinyaller, tanımlanan gecikme değerine göre ayrışarak DDL çıkışından gönderilir.

10.3 Uygulamalı Olarak Kullanılan SAW Cihazlarının Performans Sınırlamaları

SAW filtre kullanılarak tasarlanan kompresif almaçlar için tercih edilecek fourier dönüşüm analiz işlemcilerde girdi sinyaline ait frekans katkıları maksimum bant genişliğinde, W_{Max} , analiz işlemlerine tabii tutulacaktır. Kompresif almaç sisteminin

konvolüsyon çarpım konvolüsyon konfigürasyonuna ayarlanması dahilinde, W_{Max} algoritmik olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Poisel 2014);

$$2\pi W_{Max} = \mu(T_0 - T_1)$$

T_1 , işlemcinin çalışabileceği maksimum sinyal süresi olarak tanımlanmaktadır. Verimlilik adına kullanılan işlemci zaman/bant genişliği çarpımının maksimum hesabı ise aşağıdaki gibidir (Poisel 2014);

$$2\pi W_{Max} T_1 = \mu T_0^2 \frac{T_1}{T_0} \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right)$$

10.4 Çarpım Konvolüsyon Konfigürasyonlu Kompresif Almaç Prensibi

Çarpım konvolüsyon kompresif almaçlarında tercih edilecek olan sistem karmaşıklığına göre, point of intercept değeri artmaktadır. Sistem tasarım maliyetine göre tercih edilecek olan kompresif almaç sistemi, elektronik harp sisteminde ihtiyaç duyulacak standartlara göre değişecektir. Şemalarda geçerli olacak şekilde, W_R , RF girdi sinyalinin bantgenişliği olarak tanımlanmaktadır. Taramalı lokal osilatör (SLO), T_T sürede tanımlanan W_T bantgenişliğini tarama işlemini tamamlamaktadır.

Kompresif almaç içerisinde, mikser katmanında, S_1 ve S_2 sinyallerinin mikser tarafından çarpıldığı evre incelendiği takdirde, süperhet ve IF almaçlarda yaşanan benzer RF çarpım işlemini gözlemlemek mümkün olacaktır. Kompresif almaç girdi antenine ulaşan sinyal S_1 , taramalı lokal osilatör'den gönderilen S_2 sinyali ile mikser kademesinde çarpıma uğrayacaktır (Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Sinyallerin frekansları, f_1 ve f_2 olarak ifade edilir. $f_1 < f_2$ olduğu durum analiz edildiği takdirde, süperhet almaçta da gözlemlenen IF filtreleme basamaklarının uyarlanması kompresif almaç sisteminde de gözlemlenecektir (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Frekans değişikliğine uğratılan sinyaller, DDL birimine iletilecektir. DDL biriminin çalışma mantığına uygun olarak, yüksek frekans değerine sahip olan sinyal bileşenlerin daha az gecikmeye uğratılacaktır (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Gecikmeye uğrayan frekans bileşenleri, DDL çıkışı kompresif almaç konfigürasyonuna göre bir sonraki sistem elemanına iletilecektir.

Çarpım konvolüsyon konfigürasyonu, sayısal kademedan önce fazlasıyla ‘Spur’ olarak adlandırılan, istenilmeyen ilave frekans katkılarını sunabilmektedir. Yüksek spur oluşumu fourier dönüşüm analizi gerçekleştiren sayısal işlemcilerin kullanım prosedürünü zorlaştırmaktadır. SAW ötümlü sinyal filtresi kullanılarak konvolüsyon çarpım konvolüsyon konfigürasyonuna geçilerek kompresif almaç sisteminden fourier dönüşüm analizi gerçekleştirilebilir.

10.5 Kompresif Almaçlarda Taramalı Lokal Osilatör Kullanımının Temel Etmenleri

Kompresif almaçların performans analizi kapsamında, taramalı lokal osilatör tarafından sağlanacak olan sinyal bilgisi önemli bir etmendir. SLO tarafından sunulacak olan dalgaboyu, voltaj kontrollü osilatör, doğrudan sinyal sentez (DDS), veya seri bağlı iki DDL’i dürtü sinyali göndererek uyarma yöntemi ile elde edilebilir (Poisel 2014). Yapılacak olan dalgaboyu üretim metot tercihi, kompresif almaç sisteminin tarama yaptığı frekans aralığına, sağlanılan tarama hızına ve lineerliğe bağlı olarak değişebilmektedir. Konvolüsyon çarpım konvolüsyon sistem tasarımı tercih edildiği takdirde, ötümlü SLO sinyalinin verim hesabı için kullanılan zaman bantgenişliği çarpımı, TW , DDL konvolüsyon sisteminin TW çarpım değerinin dört katı olmalıdır (Poisel 2014). Frekans-Zaman eğrisinine ait genik değerinin de aynı olması gerekmektedir.

Dürtü lokal osilatör sistemi, seri bağlı çift DDL sistemi ile frekans çarpanının kullanımıyla oluşturulan sistemdir. Bu sistemin üreteceği çıktı, sabit genlikli, ötümlü frekanslı lokal osilatör sinyalleri olacaktır. Voltaj kontrollü osilatör kullanımı, voltaj kontrollü osilatör’ün barındırdığı lineer rampa karakteristiklerinden ötürüdür. Taramalı DDS, düşük gürültülü çıktı oluşturmaları sebebiyle aktif olarak ötümlü frekans sinyali üretmek için tercih edilen bir yöntemdir (Poisel 2014). DDL konvolüsyon ile uyumlu olacak şekilde ötümlü frekans üretimi taramalı DDS ile gerçekleştirilmektedir. Almaç çözünürlüğünü istenilen tasarım seviyelerine ayarlayabilmek için ideal bir yöntem olmakla birlikte, düşük ücret, çevresel dış faktörlere karşın gürbüz yapı, sürdürülebilirlik ve yüksek tarama hızı yeteneği ile avantajlı bir ötümlü frekans sinyali üretim tercihidir.

10.6 Komresif Almaçların Frekans Çözünürlüğü ve Doğruluğu, Hassasiyet ve Sıkıştırma Zamanı

Frekans çözünürlüğü, Δf_o , farklı taşıyıcı frekanslarına sahip mesaj sinyallerinin almaç tarafından ayırt edilebilme kabiliyetidir (Wiley 2006, Poisel 2014). Kompresif almaçlar için frekans çözünürlüğü, $\frac{1}{\text{Sıkıştırma Zamanı}}$ olarak formüle edilmektedir. Kompresif almaç sisteminde zaman ekseninde yapılan örnekleme işlemi, frekans ekseninde yapılan delta dirak analizlerinde yan hüzmeye üretilmesine sebebiyet verecektir (Wiley 2006, Poisel 2014). Yan hüzmeler, istenilmeyen ilave frekans katkıları olarak fourier dönüşüm analiz işlemcisine kaydedilecektir. Sinyal'in arı analiz sonuçları sekteye uğramaktadır. Teorik olarak sinüzoidal sinyalin frekans eksenindeki çözümü olan delta dirak, sincx fonksiyonu olarak yansımaktadır. Birden fazla frekans katkısına sahip sinyallerin veya farklı yayın kaynaklarından farklı frekans değerlerine sahip mesaj sinyallerinin almaç girdi antenine ulaşması durumunda, ilave yan hüzmeye sorunları frekans ve mesaj sinyali kestirimi konusunda almaç sayısal birimine engel çıkartmaktadır. Yan hüzmelerin oluşumunun getirdiği mesaj sinyali belirleme zorluğu, hedef tanıma açısından frekans çözünürlüğü ile frekans ayırt edilerek giderilebilir (Poisel 2014). Frekans çözünürlüğü ile doğru sinyal ayrımı yapılamadığı takdirde, video dedektör tarafından yanlış bir sinyal zarfı çıkarılarak sayısal birime gönderilecektir. Yanlış çıkarılan sinyal zarfı sonucu tespiti yapılan mesaj sinyali kaynağı hatalı olarak elektronik harp istihbari birimlerine iletilebilmektedir (Poisel 2014).

Kompresif almaçın mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansının ölçüm doğruluğu, almaçın anlık frekans aralığına, kompresyon hızına, clock hızına, frekans ölçüm devresindeki bit sayısına bağlıdır (Poisel 2014). Frekans ölçümünün doğruluğu, kompresif almaç sisteminin bantgenişliği gereksinimlerini tasarımsal olarak belirleyen bir faktördür.

Kompresif almaç sistemlerinde sinyal gücü, almaçın her sıkıştırma periyodunda entegre edilmektedir. Bu tasarımsal özellikler göz önünde bulundurulduğu takdirde hassasiyet iyileştirmesi gözlemlenebilmektedir. Kompresif almaçların hassasiyetleri, sıkıştırma zamanıyla orantılı olacak şekilde tasarlanmaktadır (Poisel 2014). Orantılı tasarımın sağlanabilmesi için sıkıştırma periyodu boyunca yayın kaynağından girdi antenine yayın

sinyali iletilmelidir. Yayın kaynağından girdi antenine yayın sadece belirli aralıklarla iletilmesi durumunda, hassasiyet değeri kompresif almancın girdi sinyaline maruz bırakılma miktarının fonksiyonu olacaktır (Poisel 2014). Tasarımsal olarak bun durumun oluşabilmesi için tasarımsal olarak tanımlanan zaman parametresi, sıkıştırma periyodunun iki katından daha az bir zaman boyunca girdi antenine yayın iletilmesi olarak tanımlanabilmektedir. Belirtilen senaryolarda hassasiyet hesabı, sadece istatistiksel olarak gerçekleştirilebilir olup matematiksel tahmin yoluyla çıkarımlar yapılabilmektedir (Poisel 2014).

Elektronik harp sistemlerinin kullanıldığı harp ortamlarına göre kompresif almaçların sıkıştırma zamanı için tasarımsal değişiklikler gerçekleştirilmiştir. Optimum sıkıştırma zamanı, elektronik harp sistemlerinin kullanım amaçlarına göre belirlenmesi gereken bir parametredir. Birden fazla, aynı anda gelen uzun ve kısa süreli RF yayınların tespiti için hassasiyet ön plana çıkmaktadır (Poisel 2014). Karşılaşılan elektronik harp istihbarat sinyallerinin kısa süreli olması durumunda, beklenen en kısa süreli sinyalin yarısı kadar sıkıştırma süresinin kompresif almaç sistemine uyarlanması gerekmektedir. Bu tasarımsal özellik sağlandığı takdirde RF darbe sinyalleri ve sürekli dalga yayınlar için gerekli hassasiyet kompresif almaca sağlanmaktadır (Poisel 2014). Kompresif almaçların ön plana çıktığı elektronik harp RADAR sistemlerinde, çift kanallı kompresif almaç modeli tercih edilmektedir. Kanallar uzun ve kısa süreli sinyallerin analizini gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Kompresif almaçların tercih edildiği sistemlerde tarama süresi, uzun süreli darbe sinyalleri ve beklenen en kısa süreli darbe sinyaline bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Poisel 2014). Bu ilişki, matematiksel olarak bir eşitliğe dökülmüştür (Poisel 2014);

$$Hassasiyet = 10 \log_{10}(K_B T \times 10^6) + 10 \log_{10}(W_{in}) - 10 \log_{10}(W\tau)$$

W_{in} = MHz cinsinden girdi bant genişliği

W = Sıkıştırılmış darbe sinyalinin spektral genişliği

τ = DDL birimine iletilen IF girdinin geçici genişliği

Almaç girdi antenine ulaşan sinyalin karakteristik parametreleri ve kompresif almaç hassasiyeti arasındaki ilişki gözlemlenebilmektedir.

10.7 Aynı Anda Gelen Sinyallerin Tespiti İçin Öneriler

Kompresif almaçların en büyük özelliklerinden biri, birden fazla aynı anda gelen sinyallerin tespitini sağlayabilmesidir. Fazla çıktıyı önleyebilmek için almaç sisteminin çıktıları, frekans, varış açısı (AOA) gibi parametrelerle filtrelenebilir. Sayısal olarak kodlanabilecek olan sinyal sayısı, verilen ilişkiye göre tanımlanmaktadır (Poisel 2014).

$$N_S = \frac{W_R}{\Delta f_o}$$

N_S = Sinyal sayısı

W_R = Almaç bant genişliği

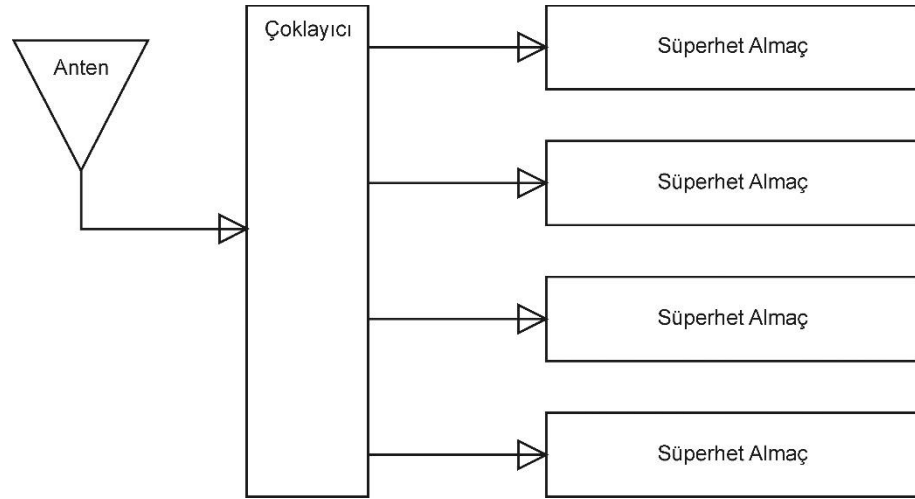
Δf_o = Almaç frekans çözünürlüğü

10.8 Kompresif Almaçların Elektronik Harp'te Yeri

Kompresif almaçlar, genel olarak tespitini gerçekleştirdikleri yayın sinyallerini, bağlı oldukları dar bant analiz almaçlarına iletmek için yayın kaynaklarının tespiti için tercih edilen almaç türleridir. Kompresif almaçlar, ayarlanan bant genişliğini sabit, tek bantlı almaç sistemlerine göre daha hızlı tarama yapabilme özelliğine sahiptirler. Süperhet almaçlara kıyaslandığı takdirde, yakın seviyede bir hassasiyet değeri tasarimsal olarak kompresif almaçlarda bulunmaktadır. Süperhet almaçlara kıyaslandığında, daha iyi bir dinamik menzile sağlamaktadırlar. Süperhet almaçlara benzer olarak, iyi frekans kapsamı, darbe ve sürekli dalga sinyallerin analizi ve iyi seçiciliğe rağmen, süperhet almaçların aksine demodülsayon özelliği barınmayan almaç türleri olarak elektronik harp literatüründe tanımlanmaktadırlar.

11. ÇOK KANALLI ALMAÇLAR

Süperhet almaç yapısı veya benzeri almaçların farklı frekans aralıklarını incelemek için birden fazla kanallı olarak çoklandıkları tasarımlara çok kanallı almaçlar ismi verilir. Frekans ayrışmaları, tasarımsal süreçte karar verilecek şekilde olmaktadır. 2-18GHz frekans aralığında incelenen çok kanallı süperhet almaçlar, 2-4GHz, 4-8GHz, 8-12GHz, 12-16GHz ve 16-18GHz olacak şekilde çoklu kanallara ayrıştırılabilir (Pakfiliz 2021). Ayrıştırılan bu kanalların da merkez frekans değerleri farklı olacaktır. Çok kanallı almaç tasarımlarında, hassasiyet bakımından kayıplar gözlemlenebilir. Hassasiyet değerinin tasarımsal aşamalarda belirli bir seviyenin üstünde olması, “Yanlış Alarm” olasılığının tek kanallı almaçlarla aynı olmasına olanak sağlayacaktır.



Şekil 11.1 Çok kanallı almaç tasarım örneği

$P_{FA,1}$, tek kanallı bir almaçın yanlış alarm olasılığını ifade etmektedir. N tane bağımsız kanallı birçok kanallı almaç için kabul edilebilir yanlış alarm olasılığını hesaplamak için, verilen eşitlik kullanılabilir (Wiley 2006, Poisel 2014);

$$P_{FA,N} = 1 - [1 - P_{FA,1}]^N$$

Tasarlanan almaç sisteminin kanal miktarı arttıkça hassasiyet seviyesinde kayıpların gözlenebileceği, tasarımsal anlarda belirlenebildiği gibi almaç sisteminin elektronik harp

ortamında kullanımından ötürü de gözlemlenebilmektedir. İki kanalın ayrıştığı frekans değerine denk gelen frekans seviyesinde güç katkısına sahip olan sinyaller, almaç sisteminin sinyal ölçüm hassasiyetini yaklaşık olarak 3-4,3dB değer aralığında düşürmektedir (Wiley 2006). Almaç sisteminin yapım aşamalarda da, çok kanallı almaç tasarımı maliyet ve karmaşık tasarım süreçlerini beraberinde getirmektedir.

Kanallama işlemleriyle beraber sinyal işleme sorunları da ortaya çıkabilmektedir. Çok kanallı almaç sisteminin girdisine ulaşan sinyalin bant genişliği, alınan sinyalin ana frekansını kapsayan aralıktaki almaç kanalının bant genişliğinden daha geniş olduğu takdirde, bazı yan kanallar da aynı anda RF olarak uyarılacaktır. Sinyal bant genişliği, kanal bant genişliğine göre daha düşük olsa da, yoğun RF sinyallerinin olduğu ortamlarda, zayıf genlikli sinyallerin ölçümü zorlaşabilmektedir (Wiley 2006). Zayıf genlikli ve yüksek genlikli, farklı frekans katkılarına sahip sinyaller çok kanallı almaçlara ulaştığında, yüksek genlikli sinyal birden fazla kanalı RF olarak uyaracaktır. Çoklu kanalların uyarılması sebebiyle, kanalların merkez frekansı hatalı ayarlanmaktadır. Darbe sinyallerinin zarfı hatalı olarak çıkacaktır.

Çok kanallı almaç tasarımlarında, genel amaç tasarımlarında olduğu gibi, yaşanan önemli bir tasarım sorunu mevcuttur. Bu sorun, aynı anda almaca gelen, farklı genlikte ve birbirine oldukça yakın frekans katkılarına sahip sinyallerin ayrıştırılmasıdır. Frekans ölçümlerinin hassas bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için, kanalların RF ve IF katmanlarına uygun bir filtre bankası tasarlanmaktadır. Anlık olarak frekans bandının detaylı analizi, çoklu filtre bankaları ile gerçekleştirilmektedir. Filtre bankalarında bulunan, hassas merkez frekans ayarlı filtreler, sinyallere ait frekans katkılarının detaylı olarak ayrıştırılmasına olanak tanımaktadır. Filtrelerin tasarımı, geniş kapsamlı RF ve IF frekans analizine imkânlı olmaktadır. Filtrelerin hassas olarak bir banka formatında tasarlanacak olması, tasarımsal maliyeti arttırmakla birlikte almaç sisteminin karmaşıklığını da arttıracaktır.

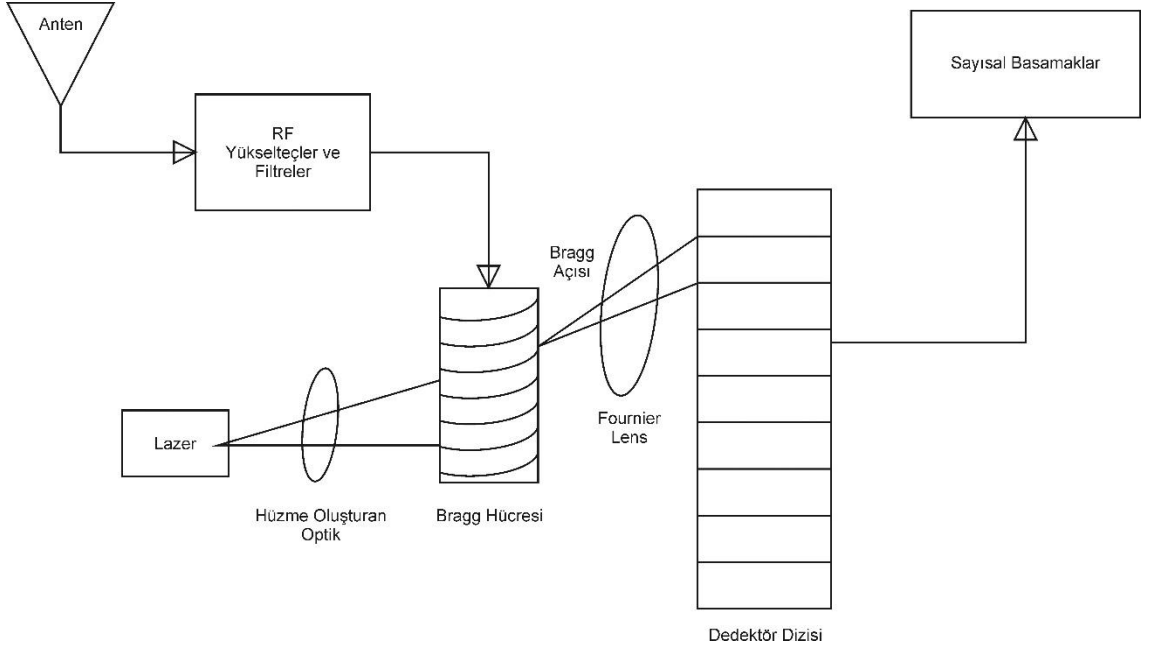
Çok kanallı almaçların kullanımı, geniş bantlı almaç kullanım alanlarında maddi olarak zahmetli bir süreçtir. RF ve IF frekans seviyelerinin belirlenmesinde kullanılacak olan ayarlı filtreler, frekans doğruluğunun temelini sağlamaktadırlar. Sürekli dalga sinyalleri,

aynı anda gelen çoklu RF sinyalleri ve bu sinyallerin birden fazla frekans aralıklı almaç kanallarını uyartması, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının çoklu kanal tasarımlarında sinyal ölçümünü zorlaştırmaktadır (Wiley 2006). Bu problemlerin çözümü, ilgilen sinyal bant genişliğine kıyasla çok daha geniş bant genişliğinin almaç kanallarına tasarım esnasında verilmesidir. Bant genişliği yeterli genişlikte olan almaç kanallarının frekans indirgeme aşamalarından sonra sayısallaştırma aşamalarında, zarf çıkarıcı detektörlere veya ilave dar bantlı tarama yapan almaç sistemlerinin girdilerine iletilebilir. Tasarımsal olarak da dar bantlı tarama yapan almaç sistemlerine girdi olarak sinyallerin iletilmesi, kullanışlı bir seçenektir. Modern bir sayısallaştırma aşaması için de yüksek hızlı “Analog to Digital Converter (A/D Dönüştürücü)” ve takibinde sayısal filtre bankaları veya sayısal veri işleme blokları kullanılmaktadır.

12. BRAGG CELL ALMAÇLAR

Bragg cell almaç türleri, elektronik harp ortamlarındaki uygulamalarda fazlasıyla tercih edilen almaç türleri olarak ortaya çıkmamaktadırlar. Tasarımsal olarak aynı anda birden fazla sinyali alabilme yetenekleriyle ön plana çıkabilen almaç türleridir.

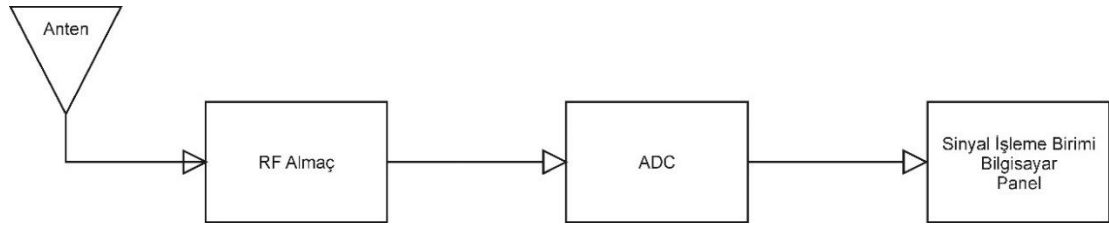
Bragg cell almaçların kullanıldığı sistemlerde, anten girdisi olarak çoklu sinyaller iletilir. Alternatif olarak filtreleme aşamasından sonra RF yükseltece alınan sinyaller iletilir. Transduser, yükseltilecek RF sinyallerin Bragg hücrelerine iletiminde kullanılmaktadır. Bragg hücresi, ikincil bir girdi olarak ayrı bir lazer ışın kaynağından lazer ışını almaktadır (Pakfiliz 2021). Bragg hücresi içerisinde, lazer ışınının, RF sinyali içerisinde bulunan frekans değerine göre belirli bir miktarda açısal sapması işlemi gerçekleştirilir (Pakfiliz 2021). Dalga boyu algılayan eleman veya ışık algılayan eleman, Bragg hücresi içerisinde kırınımına uğratılmış lazer ışınlarını algılamakla yükümlüdür (Pakfiliz 2021). Dalga boyu algılayıcı, kırınımına uğramış lazer sinyalinin kırılma açısını tespit etmektedir. Çıktı olarak alınan kırılmış lazer ışınına göre sayısal birimlerde okunabilecek, RF sinyallerin frekanslarını ayrı ayrı temsil eden sayısal olarak okunabilecek bir sinyal iletir (Pakfiliz 2021). RF frekans çeşitliliği yoğun olan ortamlarda, Bragg cell almaçlar tercih edilebilmektedir. Sinyalin genliği, dalga boyu algılayıcı içerisinde fotohücrelere denk gelen ışık seviyesine göre belirlenebilir (Pakfiliz 2021). Sınırlı bir dinamik menzil ve hassasiyet bakımından süperhet almaçlarla benzerlik gösterdikleri gerekçesiyle uygulama yerine teorik olarak literatürde kullanımı gözlemlenen bir almaç türüdür (Pakfiliz 2021). Elektronik harp ortamında darbe sinyallerinin zarfının çıkarılmasında başarısız bir performans sergileyecek almaç türleridir. Tasarımsal değerlendirme süreçlerinde, dar bantlı almaçlar ile birlikte, hassas frekans tarama ayarlaması yapmak için tercih edilebilmektedirler (Pakfiliz 2021).



Şekil 12.1 Bragg Cell almaç sistem tasarımı

13. SAYISAL (DİJİTAL) ALMAÇLAR

Analogdan dijitale geçiş sürecinde, yaşanan yazılımsal ve donanımsal gelişmelerden ötürü, dijital almaçlar bilgisayar yetkinliklerinin artmasıyla ön plana çıkmaktadırlar. Sayısal almaçların ön plana çıkan özelliklerinden biri, sınırlandırma alanları sistem tarafından kullanılan bilgisayar teknolojisinin sınırları kadardır. Sayısal almaçlarda zaman ekseninde yapılan analizler, ayrık sinyaller üzerinden yapılmaktadır. Sayısal devre tasarımı, üretimi daha pratik ve maliyetsiz, güvenilir ve titiz olarak almaç teknolojisine entegre edilmiştir. Analog elektronik teknolojisine ait bileşenler, kullanım süresi, ortam sıcaklığı ve komponent sıcaklığı gibi dış faktörler sebebiyle zamanla işlevselliğini yitirmektedir (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Tasarlanan sayısal devreler, aynı zamanda donanım değişikliğine gidilmeden yazılımsal olarak kullanım alanına göre değiştirilebilir. Sayısal sinyal işleme algoritmaları ve yöntemleri karmaşıktıkça, konvansiyonel analog devre tasarımlarıyla gerçekleştirilemeyecek almaç sistem gereksinimleri ortaya çıkmıştır.



Şekil 13.1 Temel sayısal almaç yapısı

Sayısal almaçların elektronik harp sistemlerinde, RADAR’larda kullanımının yaygınlaşması sebebiyle, sayısal almaçların yetkinlikleri her geçen gün sınırlarını daha ileri seviyelere taşımaktadır. Sayısal almaçların yüksek yetenekleri, “İdeal Almaç (Ideal Receiver)” kavramını ortaya çıkarmıştır (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). İdeal almaçlar, tamamiyle sayısal bilgisayar kontrolünde olan, sinyal toplama anteni çıkışında yerleştirilen bir ADC ile yüksek yetenekli bilgisayar bağlantısı tarafından oluşturulan almaç türüdür (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Basit yapıdaki ideal almaç mimarisi, RF sinyallerin gürültü, değişken frekans katkısı ve RF genlik değerlerinden ötürü kullanıma uygun değildir. İdeal almaçın almaç anten çıkışına bir ön seçim filtresinin yerleştirilmesi gerekmektedir. Girişim sinyalleri, ön bastırma aşaması olmadan sayısal girişime maruz

bırakılacaktır. Sayısal almaçların mimari tasarımları, dar bantlı almaç tasarım uyarlamaları ve sayısal RF/IF yapıları olacak şekilde analizi gerçekleştirilebilen almaç türleridir (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). RF ve IF yapıları, RF örnekleme ve alt örnekleme, IF örnekleme ve alt örnekleme olacak şekilde alt yapılara sahiptir.

13.1 Dar Bantlı Sayısal Almaçlar

Tasarım esnasında RF ve IF indirgeme aşamalarına sahip olan, çift indirgeme aşamalarına sahip almaçlara yer verilmiştir. Dar bantlı, genlik modülasyonuna (AM) veya frekans modülasyonuna (FM) uğratılmış sinyallerin kestirimi, verilen formüllerle gerçekleştirilmektedir (Wiley 2006, Poisel 2014).

$$\text{Zarf } s(t) = AM = \sqrt{Re^2[s(t)] + Im^2[s(t)]}$$

$$\text{Anlık Frekans } s(t) = FM = \frac{d}{dt} \tan^{-1} \frac{Q(t)}{I(t)}$$

$$\text{Faz } s(t) = \tan^{-1} \frac{Q(t)}{I(t)}$$

13.2 Sayısal Almaç Mimarileri ve Tasarım Parametreleri

Örnek sayısal almaç mimarisi, Şekil 13.1’de paylaşılmıştır. Ön seçim filtreleri, düşük gürültülü yükselteçlerin (LNA) genellikle öncesine yerleştirilmektedir. Düşük gürültülü yükselteçler, almaç sisteminin gürültü tabanını belirlemektedirler. İlave olarak yerleştirilebilecek yükselteçler ile almaç sisteminin gürültü taban seviyesi değişiklik gösterebilmektedir. ADC elemanın ihtiyaç duyacağı genlik seviyesine göre kullanılacak olan yükselteçler tasarım esnasında belirlenmektedir. Faz ayrışımının olduğu tasarımlarda, 90 derecelik farklarla I ve Q kanallarına sinyal iletmi sağlanır. ADC elemanlarında sinyaller, analogdan sayısal boyuta taşınır (Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021).

IF örneklemenin yapıldığı almaç tasarımlarında da, diğer sayısal almaç yapılarında olduğu gibi ADC elemanın performansını hızlandıracak etmenler mevcuttur. Ön selektör filtre, LNA, bastırıcı filtreler, frekans indirgeme aşamaları ve gürültülerden arındırma adına kullanılan filtreler, ADC elemanının daha belirgin sayısal sonuçlar çıkarmasına sebep olacaktır (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). IF frekansına indirgeme aşamalarının bulunduğu almaç yapılarında, ADC elemanları daha düşük frekans değerlerine sahip sinyallerle sayısallaştırma işlemleri gerçekleştirecektir. Gürültü ve karıştırma sinyallerine karşı daha bağımsız bir almaç sistemi tasarlanmış olacaktır. Düşük frekansa indirgeme ve ilave filtrelendirme aşamaları, daha tutarlı sayısallaştırma işlemlerini de beraberinde getirecektir. IF katmanının olmayışı, almaç sistem karmaşıklığını ve maliyetini düşürmektedir. Fakat IF katmanının getirdiği performans avantajları, IF katmanının gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır.

13.3 Sayısal Almaçlar Genel Mimari ve Elektronik Harpte Kullanımı

Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçları olarak kullanılan sayısal almaçlar, istihbari açıdan elektronik harp sistemlerine gelişmiş avantajlar sunmaktadırlar. İstihbari verilerin işlenebilmesi, görev veri dosyalarının oluşturulabilmesi, hedeflerden alınan/yansıtılan sinyallerden istihbari verilerin toplanması, toplanılan istihbari verilerin geçmiş elektronik harp saha çalışmalarıyla ilişkilendirilmesi gibi işlevsel özellikler, sayısal almaçların elektronik harp RADAR sistemlerine entegre edilebilmesi açısından önem arz etmektedir (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). ADC elemanları, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarında sayısallaştırma kademesinde temel parametrelerin belirlenmesinde ön plana çıkabilmektedirler. Bu parametreler, almancın maksimum bant genişliğinin belirlenmesi, SNR ve anlık dinamik alan olarak sıralandırılabilir. Sayısal almaçlarda maksimum SNR seviyesi karar verilirken, aşağıdaki dB cinsinden ifade edilen formülden faydalanılabilir (Poisel 2014, Pakfiliz 2021);

$$SNR = 1.76 + 6.02 * (ADC \text{ kuantalama bit sayısı})$$

ADC elemanlar, yüksek RF enerjisine ve artan RF frekans değerlerine karşı gürbüz yapıda olmak durumundadırlar. Aynı zamanda ADC elemanlardan önce kullanılacak olan dedektör, filtreleme gibi RF devre elemanlarının ADC elemanını yoğun RF enerjiden koruyacak seviyede olmalıdırlar. ADC elemanda sayısallaştırılan sinyal, verisel olarak sayısal almaç işlemcisinde işlenir. İşlemci belleğinde saklanan, istihbarat çalışmalarından elde edilen sayısal veriler ile görev sonrası sinyal analizinden elde edilen sayısal veriler, işlemci içersinde ilişkilendirilerek kullanıcı operatöre göre sunulur. Almaç sisteminde kullanılan mikroişlemcinin yetkinliği ve işlemciye yüklenen yazılım türüne göre almaç sisteminin sayısal veri analiz performansı değişkenlik gösterecektir.

Elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının tasarımdan sonra yapılacak olan performans değerlendirmeleri, tahmin edilebilir boyuttadır. Filtreleme, sayısal işlem basamaklarına çevirebilme, sinyal demodülasyonu yapabilme ve sinyal içi modülasyonu ayırt edebilme, sinyal yapısının kapsamlı analizini sunabilme gibi detaylı yetkinlikler, elektronik harp ortamında kullanılan sistemlerdeki almaçların performans değerlendirmesinde kullanılmaktadırlar (Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Planlaması yapılan elektronik harp ortamının yoğunluğuna göre, karşılaşılması beklenen dost/düşman unsur sayısı, dolayısıyla RF sinyal yoğunluğu artacaktır. RF sinyal yoğunluğunun artması, mesaj ve RF frekans çeşitliliğinin de artışına sebebiyet verecektir. Sayısal almaç sistemlerinin, çoklanma yöntemiyle farklı frekans aralıklarına bölünmesi, frekans aralıklarına bölünürken maliyet olarak düşük maliyetli tasarımların tercih edilmesi, tasarımsal olarak fazla yer kaplayacak elemanlardan kaçınılması ve etkin RF, IF ve sayısal elemanların tercih edilmesi elektronik harp sistemleride talep edilen performans etkinliğini arttıracaktır (Pakfiliz 2021).

Sayısal almaçlar, teknik olarak kullanıldıkları takdirde elektronik harp sistemlerinde teknolojik olarak büyük avantajlara sahip sistemler olarak ön plana çıkmaktadırlar. Nyquist kriteri, örnekleme yapılan sinyallerin doğru bir sayısal işleme süreci için örnekleme oranını belirler. Nyquist kriteri, teorik olarak çoklu frekans katkılı sinyallerde en yüksek frekans katkı değerinin iki katı olarak tanımlanabilir. Fakat gelişen elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaç sistem tasarım aşamalarında, Nyquist kriterinin daha detaylı olarak tanımlanması amaçlanmıştır (Poisel 2014). Bunun üzerine Nyquist

kriteri, sinyalin bant genişliğinin iki katı olacak şekilde revize edilmiştir (Poisel 2014). Nyquist oranının üzerinde bir örnekleme oranı ise, “Oversampling (Yüksek Oranda Örnekleme)” olarak adlandırılır. Almac sistem tasarım süreçlerinde, Nyquist oranından daha yüksek bir oranda örneklenen sinyallerin sayısal eksene geçiş sürecinde sinyalden kazanç sağladığı tasarımsal olarak kabul edilmektedir (Poisel 2014). Yüksek oranda örneklemeye karşıt olarak, Nyquist oranının altında bir örnekleme oranında yapılan örnekleme hızına, “Undersampling (Düşük Oranda Örnekleme)” adı verilir. Alınan sinyal, Nyquist oranının altında örneklendiği takdirde, istenilmeyen bir çarpım işlemine uğratılmış gibi, örtüşmekte ve bozulmaktadır (Poisel 2014).

Sayısallaştırma işlem basamaklarında, sinyal örnekleme oranının daha yüksek, örnekleme sürecinin daha hızlı olması durumunda, gürültü tabanının daha düşük olduğu kabul edilmektedir. Girdi sinyaliyle beraber gelen, elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almac sistemindeki komponentlerin sağladığı pembe gürültüyle yükselen toplam gürültü, girdi sinyalinin çoklu frekans katkılarına dağıtılmaktadır. Toplam gürültü azalmamakla birlikte sabit kalacaktır, fakat çok daha geniş bir banda yayılacaktır. Gürültünün yayılmasının etkileri, sinyal SNR oranının hesaplanmasıyla ortaya çıkarılmaktadır (Poisel 2014);

$$SNR = 6.02b + 1.76 + 10 \log_{10}(f_s/2W)$$

b = ADC bit sayısı

f_s = Örnekleme frekansı

W = Sinyal bantgenişliği

Yukarıda verilen SNR eşitliğinde de anlaşılacağı üzere, örnekleme frekansı ve SNR oranı arasında doğrudan bir orantı mevcuttur. Yüksek oranda örneklemenin haricinde, sayısal basamaklara geçiş öncesi filtreleme işlemi de istenilmeyen frekans katkılarının ve gürültü örneklerinin bastırılması için önem taşımaktadır.

Tasarımsal olarak düşük oranda örnekleme'nin karşılaştığı durumlarda, mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansının spektrumunda hangi frekans değerinde gözükeceği önceden kestirilebilmektedir. Bu işlem için, verilen formül geliştirilmiştir (Poisel 2014);

$$f_{gözükten} = f_{sinyal} \bmod f_s$$

$f_{gözükten}$ değeri, f_s değerinin yarısından daha düşük olduğu takdirde, tahmini gözlemlenecek frekans değeri olarak kullanılabilir. $f_{gözükten}$ değeri f_s değerinin yarısından daha yüksek olduğu takdirde, f_s değerinden $f_{gözükten}$ değeri çıkarılmalıdır (Poisel 2014).

Almaç sistemindeki RF aşaması veya anten girdisindeki gürültü seviyesi ele alındığı takdirde, gürültü voltaj seviyesi verilen formülle analiz edilebilir (Poisel 2014);

$$V_{Gürültü}^2 = 4k_B TRW$$

k_B = Boltzmann sabiti = $1.38 \times 10^{-23} J/K$

T = Kelvin cinsinden sıcaklık

R = Direnç

W = Bantgenişliği

Güç voltaj değerinden faydalanılarak, anten bir güç kaynağı olarak gösterilebilir. Gücün hesabı için gereken formül hesabı ise iki farklı şekilde ifade edilebilir (Poisel 2014);

$$P_{Anten} = \frac{V_{Gürültü}^2}{4R}$$

$$P_{Anten} = k_B TW$$

Antenin güç kaynağı olarak kullanıldığı hesaplamalar, almaç sistem tasarımında kıyaslama noktası olarak alınabilir. Hesaplanan gürültü seviyesi, tasarlanılan almancın içerisinde bulunan komponentlerin ısıl gürültülerinden dolayı bozulacaktır. Isıl gürültünün dahil olduğu çalışmalarda, gürültü seviyesinin değişikliğini kıyaslayabilmek adına

sunulan formüller tasarımsal açıdan faydalıdır. Komponentlerin ısı gürültüleri, gürültü tabanını fazla yükselttiği veya ilave frekans katkısı olarak gözükebilecek sinyal çıktıları ürettikleri takdirde, referans başlangıç gürültü seviyesi ile gerekli kıyaslama yapılarak tasarımsal değişikliğe gidilmesi mümkündür. Almaç sistemine ulaşan sinyalde barınan gürültünün güç seviyesi, sinyalin SNR değerini düşürecektir.

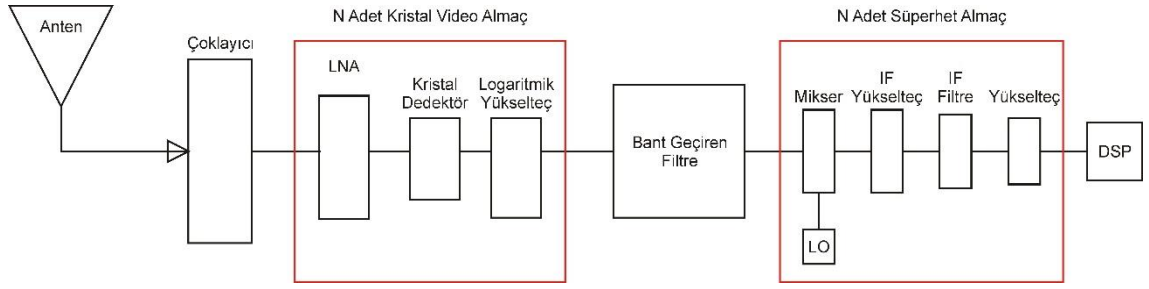
Sayısal almaçlar, elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaç sistem tasarım süreçlerinde yüksek esneklikleri ve daimi olarak gelişime açık yapılarıyla ön plana çıkan almaç türleridir. Elektronik harp sistemlerinin gereksinimleri, yüksek sıcaklık veya farklı hava koşullarına karşı dayanıklılık, yoğun RF sinyallerinin almaç sistemine karşı verebileceği zararlara karşı dayanıklılık gibi etmenlerle şekillenmektedir.

14. RWR RECEIVER YAPISININ TANITIMI VE KISITLAMALARI

RWR almaçları, modern savaş uçaklarında hedef ikazı için kullanılan, süperhet ve kristal video almaçlarının çaprazlanmasıyla oluşan elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarıdır. Mali açıdan yüksek almaçlar olsalar da, modern savaş uçağı tasarımında pilotlar için hayati öneme sahiptirler. RWR almaçları ve almaç içi komponentleri, RWR almaç girdi anteninden ulaşan sinyal yayınlarını ayırt etmek ve işlemek için kullanılmaktadırlar. Çoğu RWR almaçları, farklı frekans değerlerine sahip sinyalleri analiz edebilmek adına çoklu frekans bantlarına ayrılmaktadır (Pakfiliz 2021).

RWR almaçları, süperhet ve kristal video almaçlar olmak üzere iki farklı almaç türünün çaprazlanmasıyla oluşturulmaktadır. Kristal video almaçlar, RWR almaçlarının ihtiyaç duyduğu darbe sinyal analizini gerçekleştirmektedir (Pakfiliz 2021). Anlık olarak geniş bant kapsama, ideal hassasiyet seviyesi, geniş frekans aralığı kapsama özelliklerine sahiptirler. Kristal video almaçları küçük boyut ve uygun maliyetle birleştirildiğinde RWR almaçları için kullanılabilir hale gelmektedirler. Kristal video almaçları yoğun sinyalin barındığı ortamlarda saturasyona uğramaları sebebiyle savaş uçaklarında tek başına kullanımları güvenli değildir. Yoğun frekans ve RF sinyal ortamında hassas analiz gerçekleştirebilecek bir süperhet almaca da ihtiyaç vardır (Pakfiliz 2021).

Süperhet almaçlar, yerleştirilen RWR sistemi için frekans bantlarını yüksek hızda tarama özelliğine sahiptirler. İyi bir frekans seçiciliği, ideal hassasiyet seviyesi ve seçiciliği mevcuttur. Ön seçici filtre ve lokal osilatör, RWR sistemlerine yerleştirilen süperhet almaçlarda sinyal işlemcisi tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir (Pakfiliz 2021). Kontrol biçimi, sinyal işlemcisine yüklenen tarama tipleriyle belirginleşmektedir. Hedef tespit durumunda, frekans bandı tarama işlemine ara verilir ve yayın kaynağından alınan sinyal analiz edilerek pilot ekranına bildirim sağlanır (Pakfiliz 2021). Çalışma prensibi olarak, RWR içine yerleştirilen süperhet almacı ile diğer elektronik harp sistemlerine yerleştirilen süperhet almaçlarının çalışma prensibi aynıdır. RWR süperhet almacı, IF frekansa indirgeme, yükseltme, filtreleme, sayısallaştırma, sinyal işlemcisinde sınıflandırma ve pilot kullanıcı arayüzüne bildirimde bulunma işlemlerini oldukça hızlı bir şekilde gerçekleştirmek zorundadır (Pakfiliz 2021).



Şekil 14.1 RWR almacı sistem tasarımı

RWR almacıların modern savaş uçaklarına yerleştirildiği göz önünde bulundurulduğunda, belli başlı tasarımsal kısıtlamalar sahada gözlemlenmektedir. Bu kısıtlamalar, pilot manevraları, sinyal işleme belirsizlikleri ve elektromanyetik girişimler olarak incelenmektedirler (Electromagnetic Interference, EMI) (Pakfiliz 2021).

14.1 Sinyal İşleme Belirsizlikleri

RWR almacı sisteminde türlü nedenlerden ötürü sinyal işleme belirsizlikleri oluşabilmektedir. Tehdit elektronik harp sistemlerinin yaptığı sinyal yayınlarının çeşitliliği, RWR sistemlerinin daha karmaşık bir analiz yeteneğine sahip olmasını gerektirmektedir. RWR sistemi, daha önce tanımlanmamış bir elektronik harp sisteminden gelen yayını, daha önce tanımlanan bir elektronik harp sistemi ile eşlediğinde, belirsizlik oluşmaktadır. Benzer şekilde, bir tehdit sisteminden gelen yayın dost olarak tanımlandığında veya tehdit sistemi pilot ekranında birden fazla ifadeyle, hem dost hem düşman olarak gösterildiği takdirde, RWR almacı sistemi içersinde belirsizlik oluşmaktadır (Pakfiliz 2021). Bir frekans değerinde çalışan birden fazla elektronik harp tehdit sistemi barınabilmektedir. Sadece tehdit sisteminin frekans bilgisinin çıkarılabildiği ortamlarda, pilot arayüzüne birden fazla veya yanlış bir tehdit unsuru gösterilebilmektedir (Pakfiliz 2021).

14.2 Pilot Manevraları

RWR almacı, savaş uçağı belirli bir ekseninde olacak şekilde uçarken konumlandırma bilgisi oluşturmaktadır. RWR almacı tasarımı yapılırken, pilot manevraları göz önünde

barındırılmalı, belirli bir oranda yatış açısı düşünülerek doğru konum tespiti sağlayacak sistem dayanıklılığı gerçekleştirilmelidir (Pakfiliz 2021). Ani pilot manevraları durumunda, tehdit yayın kaynaklarından gelen yayınlar savaş uçağı gövdesi tarafından engellenebilmektedir. Aynı zamanda, ani pilot manevraları, savaş uçağında farklı konumlandırılmış antenlere ulaşan sinyal güç seviyesini eşitleyerek, yayın kaynağının konumunun pilota yanlış bildirilmesine sebebiyet verecektir (Pakfiliz 2021).

14.3 Elektromanyetik Girişim (EMI)

Elektromanyetik girişim, RF sistemlerin çalışmasını engelleyen elektromanyetik bir etkidir. EMI, tehdit sistemler tarafından uygulanan karıştırmalardan dolayı veya elektronik harp ortamında çevre yayınlarından dolayı istemsizce yapılan yayınlardan dolayı oluşabilmektedir (Pakfiliz 2021). Sinyal tespitindeki yüksek hassasiyet ve yüksek kazançlı RWR antenlerinin sağladığı geniş frekans bandı tarama alanı bazı RWR almaç sistemlerini EMI girişim anında duyarlı bırakabilmektedir. RWR almancının hassasiyetinin azalması, almaç antenine ulaşan sinyallerinin tespitini geciktirebilir. Karıştırıcının elektronik harp ortamında bulunması durumunda EMI girişiminin etkinliği, karıştırıcı sistem tarafından iletilen sinyalin gücüne, karıştırıcının hüzme genişliğine ve karıştırıcı sistem ile RWR almaç sisteminin arasındaki mesafeye bağlı olarak değişmektedir (Pakfiliz 2021). Self Protection Jammer (SPJ) sistemine sahip olan kol uçakları, RWR almaç sistemlerinin pilot ekranında elektronik harp ortamında gerçekte olduğundan daha fazla tehdit işaretinin görülmesine sebep olmaktadır. Bu durum, almaç hassasiyetini düşürecektir (Pakfiliz 2021). Pilot ve diğer elektronik harp uzman mühendisleri, RWR almaç sistemi tasarım aşamasında EMI'nin elektromanyetik etkilerini göz önüne alarak almaç sistem tasarımını gerçekleştirmeye özen göstermektedirler (Pakfiliz 2021).

14.4 Elektronik Harp Ortamında Kullanılan Elektronik Harp Almaçları ve Kullanımı

Elektronik harp ortamı, farklı türlerde karmaşık sinyallerin yoğun olarak gözlemlendiği bir keşif ortamıdır. Birçok keşif elektronik harp sistemi, sinyal alma ve analiz esnasında, birden fazla almaç türünün analitik özelliklerine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu ihtiyaç kapsamında, birden fazla türden almacın, aynı veya farklı frekans aralıklarını taradığı bir almaç mimarisi inşa edilir. Alınan sinyalin çoklu almaçlara iletimi, güç bölücü veya frekans çoklayıcı ile gerçekleştirilir (Pakfiliz 2021). İlgilenilen elektronik harp keşif sistemindeki almaçların her biri, aynı frekans bandını taradığı takdirde, güç bölücü kullanımı uygun bulunmaktadır. Frekans çoklayıcı, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının farklı frekans bandını taradığı durumlarda tercih edilmektedirler (Pakfiliz 2021). Dar bantlı almaçlar, yüksek önem arz eden sinyaller almaç sisteminin antenine ulaşmadıkça, ayarlandıkları frekansta çalışmaktadırlar. Sinyal tarama ve tespiti için dar bantlı almaçların çok almaçlı yapılarda da tercih edilmeleri yaygın bir tasarım trendidir (Pakfiliz 2021).

Sinyal tarama ve inceleme yöntemleri arasında elektronik harp sahasında sıkça kullanılan bir yöntem ise, sahadaki gürültü ile korelasyon yapımıdır. Elektronik harp sahasında önceden alınan gürültülerin elektronik harp almacının bilgi bankasında tutulması, elektronik harp sisteminin görev esnasında kullanılmasında faydalı olmaktadır. İncelenmek istenilen elektronik harp ortamıyla ilgili çevrede bulunan gürültüler, belirli zaman aralıklarıyla taranarak kaydedilir. Daha sonrasında yayın kaynağı tarafından iletilen sinyal almaç antenine ulaştığı anda daha önce elde edilen gürültü sinyalleri ile korelasyon işlemi yapılmaktadır. Korelasyon sonrası sinyalin filtrelendirilme veya yükseltilmesi, hem sinyal analizinin doğruluk payını arttırmaktadır, hem de elektronik harp sahasının tanınırlığı hakkında bilgi vermektedir.

Elektronik harp, RADAR ve keşif sistemlerinde kullanılan almaç sistemleri için çoklu örnek modeller geliştirilmiştir. Kullanımsal olarak pratik bir kombinasyon, kristal video almaçlarının ve IFM (Intermediate Frequency Measurement, Ara Frekans Ölçüm) almaçlarının bir arada kullanıldığı elektronik harp çoklu almaç sistemleridir (Pakfiliz

2021). Belirtilen kombinasyon, sağladığı yüksek hızlı sinyal parametresi analizi sayesinde, ideal boyutu ile de RWR almaç sistemleri için tercih edilebilmektedir. Kristal video almaçları, darbe genişliği, genliği, darbenin başlangıç ve durma zamanı gibi parametreleri ölçmekle yükümlüdür (Pakfiliz 2021). IFM almaç, ortamdaki alınan darbe sinyallerinin frekans bilgisini çıkartmaktadır. Fakat gelişen elektronik harp teknolojileriyle beraber, analizi gereken sinyallerin zorluğu da artmıştır. Modern RWR yapıları, zorlu sinyallerin tespiti ve işlenmesi için daha hassas sinyal analizi gerçekleştirebilen almaç yapısına ihtiyaç duymaktadırlar (Pakfiliz 2021). Bu yapılar arasında, bilgisayar destekli sayısal almaçlar veya geniş bir menzile sahip süperhet almaçlar tercih edilmektedir. Gelişen sayısal almaç ve süperhet almaç sayısal katman teknolojileriyle beraber, akıllı tarama, sinyal arama düzenleri geliştirilmiştir (Pakfiliz 2021). Akıllı tarama paternleri, elektronik harp sisteminin kullanılacağı ortamda bulunan RF sinyallerin sıklığı ve yoğunluğuna göre frekans bandı tarama önceliğini bir öncelik sırasına dizer. Dizilen tarama sırasına göre, elektronik harp ortamında sıkça görülen veya öncelikli tehdit elektronik harp sistemlerine karşı erken analiz ve karar alım aşamaları yürütülebilir (Pakfiliz 2021).

Elektronik harp sistemlerinin ihtiyaç duyduğu anten tarama paterni, elektronik harp almaç sayısal işlemcisine yüklenen yazılımla kontrol edilmektedir. Elektronik harp bölgesindeki unsurların tanındığı veya karşıt sistemlerin çalışma yayın frekansı bilindiği takdirde, anten tarama patern biçimi şekillenmektedir. Tarama sonuçlarına göre, bölgede hangi unsurların daha sık tespit edileceği, öngörülebilir olmaktadır. İstihbarat ve RADAR çalışmalarının bir sonucu olarak, hedeflerin elektronik harp sistem ekranında çıkma sıklığına göre veri tabloları oluşturulmakta ve bu tablolara göre anten tarama önceliği ortaya çıkarılmaktadır. Daha verimli ve önceliklendirilmiş bir tarama paterni, aranması yapılan yayın unsurlarına karşı hızlı analiz sonuçlarının sağlanmasında etkilidir.

```
Data Generate ? ('t' or 'T' for yes)t
Remainder Parameter Insertion: 7
Calculated Time Scale (Ex: 1000 Samples): 200

ans =

200x1 table

      string
-----
"1"      "No Detection"
"2"      "No Detection"
"3"      "No Detection"
"4"      "No Detection"
"5"      "No Detection"
      :
"196"    "SA-17 Detected"
"197"    "No Detection"
"198"    "No Detection"
"199"    "No Detection"
"200"    "No Detection"

Display all 200 rows.
```

Şekil 14.2 Girilen sıklık parametrelere göre tarama esnasında hedef yayınların tespitini öngörebilen veri üretim çalışması

RWR almaçlarının modernleşmesiyle beraber genlik, darbe genişliği, varış yönü, varış zamanı gibi parametrelerin çıkarımı kolaylaştırılmıştır. Geniş bantlı tarama kapasitesi, elektronik harp ortamındaki tehdit Tx sistemlerinin yaptığı yayınların frekans bandının kapsanmasını imkanı kılmaktadır (Pakfiliz 2021). Elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaç sistemleri, gelişen elektronik harp teknolojisiyle beraber gerek sayısal gerek RF olarak yeni özellikler kazanmaya açık hale gelmektedirler. Almaç mimarilerinin gittikçe esnekleşen yapıları, elektronik harp sistemleri için uyumluluk ve verimlilik açısından avantaj sağlamaktadırlar. Elektronik harp ortamında kullanılan sinyal yapılarının karmaşıklığı arttıkça, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının tasarımsal önemi ve almaçlara olan sistemsal bakış açısı önem kazanmaktadır.

15. RADAR SİSTEMLERİNDE KULLANILAN SÜPERHET ALMAÇLARIN SİNYAL KARIŞTIRMA TÜRLERİNE KARŞI DAYANIKLILIK ANALİZİ

15.1 Elektronik Harp Ortamında Kullanılan Karıştırma Çeşitleri

RADAR sistemlerinde kullanılan süperhet almaçların gürültüye karşı yüksek dayanıklılığının olması yüksek önem arz etmektedir. Gürültüye karşı dayanıklı olan almaçlar, kullanıcı arayüzüne en doğru istihbari veriyi iletilmesine olanak tanımaktadırlar. RADAR almaçları, iki farklı yönle sıkça karıştırılmaktadırlar. Bunlar, ‘Deception (Aldatma)’ ve ‘Noise (Gürültü)’ karıştırma çeşitleri olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Yapılan çalışmada, taşıyıcı frekans, taramalı, baraj ve yükseltilmiş gürültü karıştırmasından faydalanılmıştır. Elektronik harp ortamında faydalanılan aldatma ve gürültü karıştırma türleri, aşağıdaki gibidir;

15.1.1 Taşıyıcı frekans karıştırma

DRFM (Digital Radio Frequency Memory, Taşıyıcı Frekans) karıştırma, karşıt Karıştırıcı sisteminin çalışma frekansı bilindiği takdirde uygulanabilecek en güçlü karıştırma türlerinden biridir. Karşıt Karıştırıcı sisteminin çalışma frekansının aynı değerinde bir mesaj sinyali, düşman Karıştırıcı sistemi tarafından iletilir. Bu sayede RADAR tarafından iletilmiş olan mesaj sinyali karşıt Karıştırıcı sistemi tarafından yükseltilmiş olup, RADAR’a geri iletilecektir. Aynı zamanında sinyal zaman ekseninde faz kaymasına uğrayarak başlangıç noktası 0’den başlayamayacak, daha geç görünecektir. Bu karıştırma metoduyla almaçların istihbari bilgiyi çıkarması oldukça zor bir hale bürünecektir. Karıştırıcı sistem, bu karıştırma tekniğinde tüm gücünü tek bir frekans bandını karıştırmak üzerine harcamaktadır (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Schleher 1993, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

15.1.2 Taramalı karıştırma

Taramalı (Sweep) karıştırma, bir sinyal karıştırıcısının tam gücünü bir frekanstan diğerine kaydırma işlemidir. Bu "tarama" hareketi, hepsi aynı anda olmasa da, birden fazla frekansı hızlı bir şekilde art arda karıştırır. Elektronik harp ortamında yüksek sıklıkla taramasının yapılması gereken frekans bant aralıklarının karıştırılması karıştırıcı açısından verimli bir yöntemdir (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Schleher 1993, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

15.1.3 Baraj karıştırma

Baraj karıştırma, elektronik harp kullanıcı ekranını gürültüyle doldurarak radar sistemlerini kör etmeye çalışan bir karıştırma tekniğidir. Bu teknik ile yayın yapan sistemin yayın sinyalini ve elektronik harp ortamındaki diğer unsurları da görünmez hale getiren bir elektronik savaş tekniğidir. "Baraj", herhangi bir radarın bant genişliğine kıyasla birçok frekans bant genişliğinde sinyal gönderen sistemleri ifade eder. Karıştırma sistemi, aynı anda birden fazla radarı karıştırabilmektedir. Bu sayede herhangi ilave bir ayarlama yapmadan karşıt tarafa ait olan elektronik harp unsurları kolaylıkla ve etkin bir şekilde karıştırılabilmektedir. Fakat baraj karıştırmayı sağlayan sistemini toplam gücü, çoklu kanalları karıştırabilmek adına paylaştırılmaktadır (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Schleher 1993, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

15.1.4 Yükseltilmiş gürültü karıştırması

Karşıt Karıştırıcı sisteminin gürültü tabanını ilave pembe ve beyaz gürültüyle yükseltmeyi hedefleyen karıştırma türüdür. Bu karıştırma türü sayesinde düşük genlik seviyesinde gizlenen mesaj sinyali elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaç sistemi tarafından işlenemez hale getirilmektedir (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van

Brunt 1982, Schleher 1993, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

15.1.5 Çoklu yanlış hedef karıştırması

RADAR kullanıcı ekranında, birden fazla yayın yapan hedef varmış gibi gösterilen bir karıştırma türüdür. Bu karıştırma türü, düşman tarafına karşı iletilen mesajı ve yayın kaynağının istihbari bilgilerini korumak için kullanılmaktadır (Van Brunt 1978, Skolnik 1981, Van Brunt 1982, Schleher 1993, Schleher 1999a, Adamy 2000, Adamy 2002, Adamy 2004, Levanon ve Mozeson 2004, Wiley 2006, Dinç 2010, Mahafza 2013, Pakfiliz 2021).

15.2 RADAR Sistemlerinde Kullanılan Süperhet Almaçların Farklı Sinyal Karıştırma Tekniklerine Karşı Performans Analizi

15.2.1 Yöntem

Elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaçlarının performans analizini gerçekleştirmek adına, kullanılan değişkenler karıştırma türü ve RADAR tarafından iletilen sinyal türü olmuştur. RADAR tarafından, Jitter (Titremeli), Stagger (Sendelemeli), ve LFM (Lineer Frekans Modülasyonu) olacak şekilde 3 farklı sinyal türü iletilmiştir. Lineer Frekans Modülasyonu ile çalışan RADAR, 'Bistatic (Bistatik)' olup alıcı ve verici anteni ayrı RADAR sistemi olarak tanımlanmıştır. Titremeli ve sendelemeli türde sinyal ileten RADAR ise 'Monostatic (Monostatik)' RADAR olarak adlandırılmıştır. RADAR sistemlerinde süperhet almaç tercih edildiğinden dolayı, süperhet almaç kullanılmıştır. Karıştırıcı ve RADAR almacı arasındaki mesafe, 100km olarak kabul edilip sabit tutulmuştur. Karıştırma olarak, taşıyıcı frekans, taramalı, baraj, ve yükseltilmiş gürültü karıştırması teknikleri kullanılmıştır. Karıştırma karışısında ise, süperhet almaçların farklı sinyal iletim türlerine göre performans analizi gerçekleştirilmiştir. Sinyallerin frekans eksenindeki FFT çıktısı ise, 4 farklı durumda incelenmiştir. RADAR sistemi tarafından iletilen mesaj sinyali'nin FFT çıktısı, karıştırıcı tarafından iletilen karıştırma sinyalinin FFT çıktısı, yol kaybı ilaveli karıştırma sinyaliyle

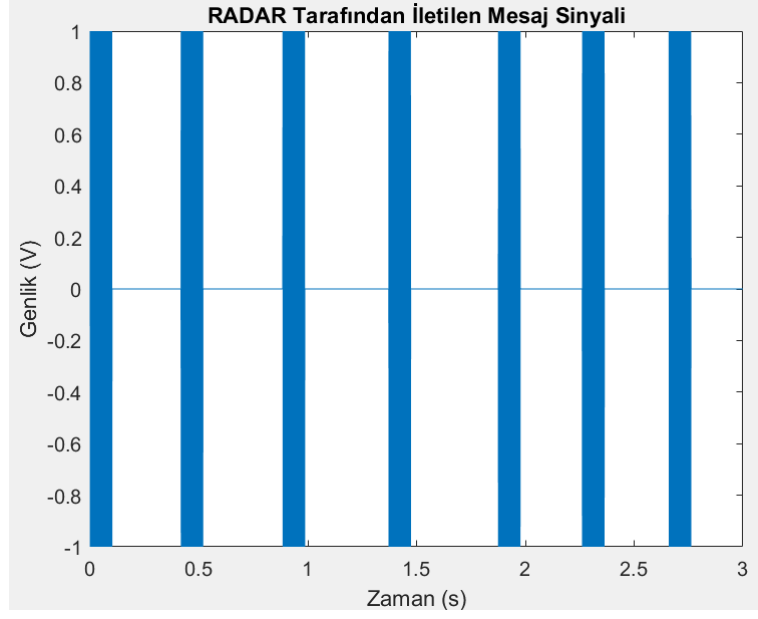
birleşen mesaj sinyalinin RADAR sistem alamacına ulaştığındaki durumun FFT çıktısı, RADAR sistem alamacının türlü yükseltme ve filtreleme aşamalarından geçtikten sonra sayısallaştırma basamağına iletilmeden önce sinyalin FFT çıktısı çalışmıştır. Sinyaller, RADAR sistemlerine uygun olacak şekilde GHz seviyesinde programlanmıştır. Bu analiz çalışması, bireysel olarak geliştirilmiş algoritmalar aracılığıyla MATLAB üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmanın ardından, sinyalin karıştırma altındaki performansını belirleyebilmek için üç farklı parametreden yola çıkılmıştır. Bunlar, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansının, Karıştırıcı sistem alamacında sayısallaştırma birimine gönderilmeden önce gözlemlenen sinyalin frekansıyla aynı olup olmadığı, mesaj sinyalinin güç seviyesinin karıştırıcı sinyal ilave edildikten sonra gösterdiği azalma veya artma ve frekans spektrumunda farklı frekans değerlerinde ilave yüksek seviyeli güç katkısının bulunup bulunmadığı olarak belirlenmiştir. Performans ölçüm parametresi olarak, karıştırmanın olduğu durumlarda Jamming To Signal Ratio (Karıştırmanın Sinyale Oranı, JSR) oranı kullanılmıştır.

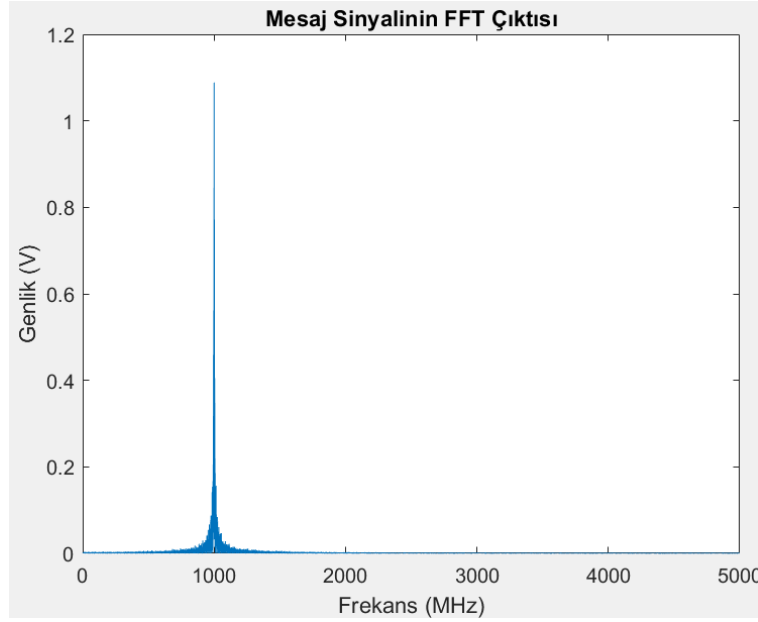
15.3 Titremeli Sinyal Gönderen Süperhet Almaçların Sinyal Karıştırma Karşısında Performansı

15.3.1 Taşıyıcı frekans karıştırma

RADAR tarafından mesaj sinyali iletilmektedir. İletilen mesaj sinyalinin, Karıştırıcı sistem alamacına ulaştırılması ve almaç tarafından analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;



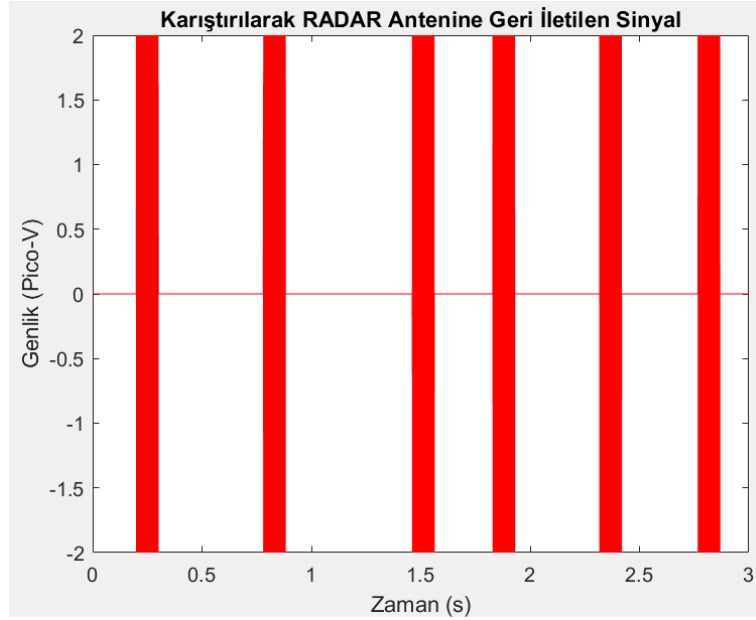
Şekil 15.1 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali



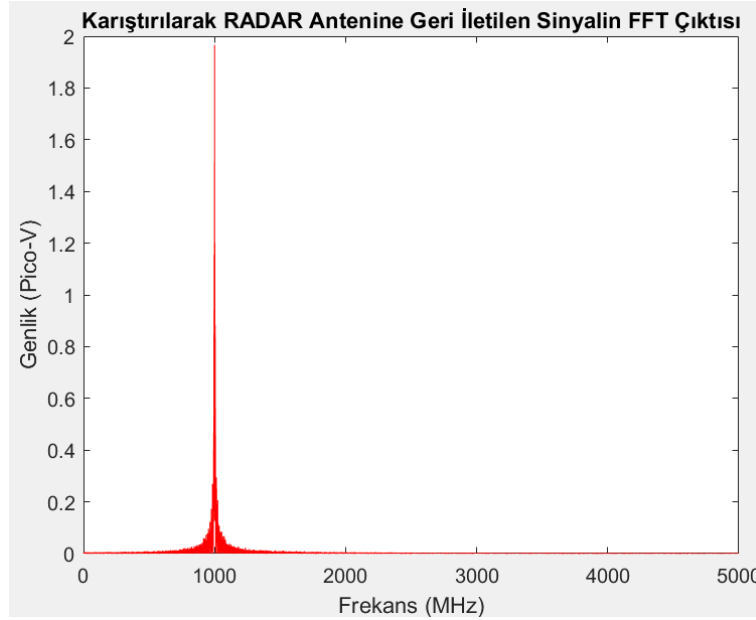
Şekil 15.2 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT Çıktısı

Mesaj Sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp alamacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, taşıyıcı frekans karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin alamacına bir karıştırma uygulamaktadır. Bu karıştırma türünde RADAR tarafından iletilen mesaj

sinyalinin genliği yaklaşık iki katına çıkarılmış ve faz kayması uygulanmıştır. Yapılan karıştırmadan sonra sinyal RADAR sisteminin almacına geri iletilmiştir. Uygulanan karıştırma sonrasında RADAR sistem anteninde gözlemlenen sinyal aşağıdaki gibidir;

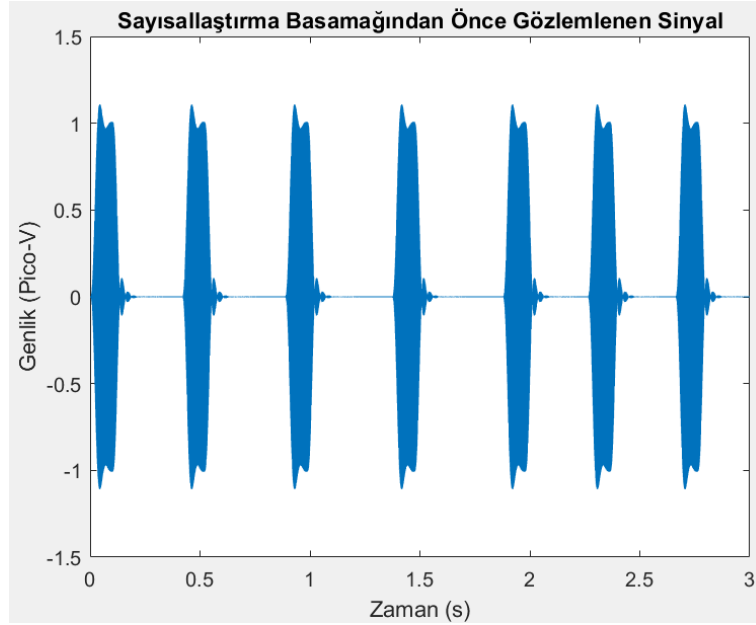


şekil 15.3 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması

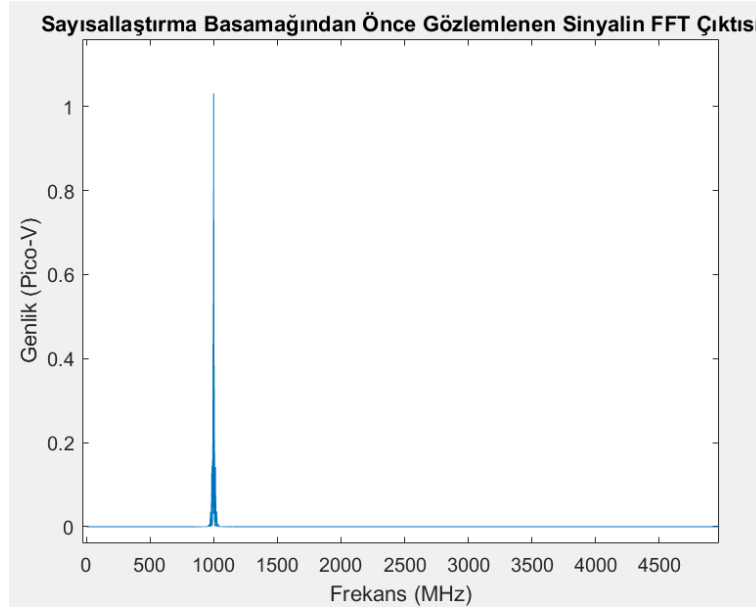


şekil 15.4 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT ıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyal, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.5 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal

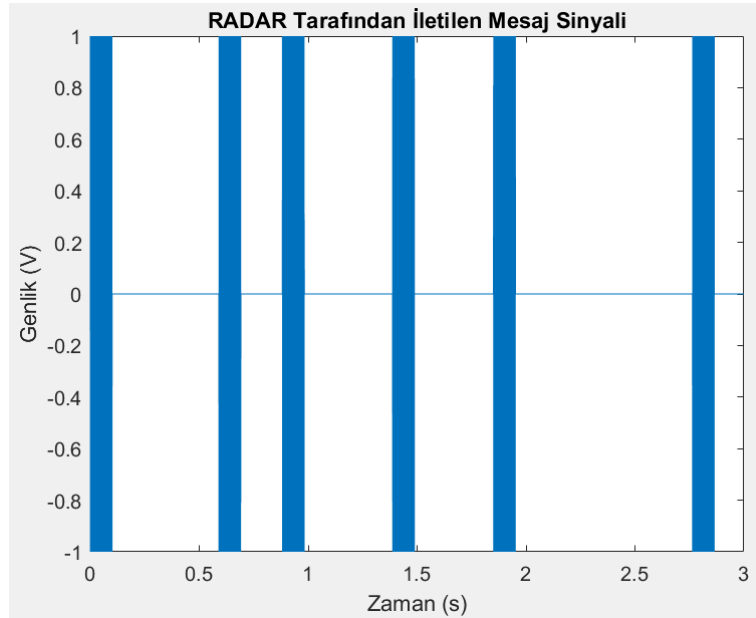


Şekil 15.6 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal FFT çıktısı

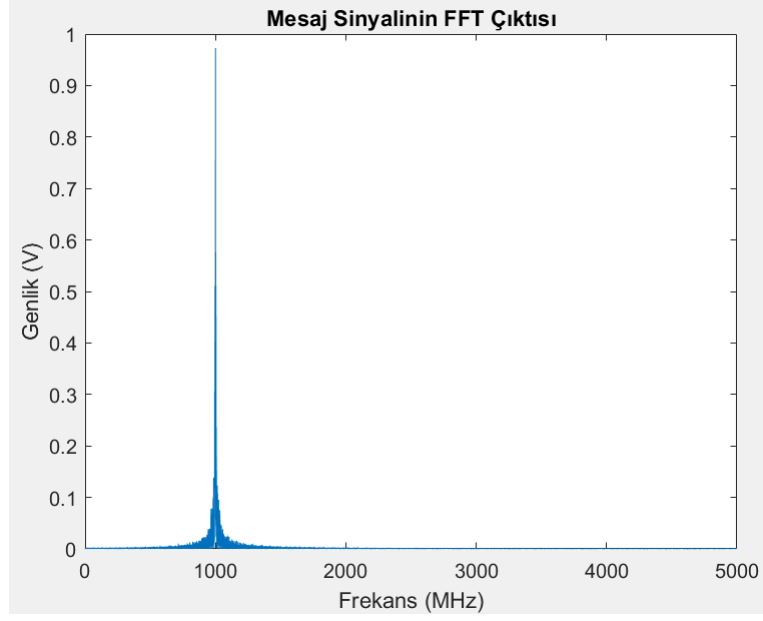
15.3.2 Baraj karıştırma

Baraj karıştırma senaryosu, çoklu frekans bantlarını gösterebilmek adına, taşıyıcı frekans karıştırmasından daha farklı olması gerekmiştir. Baraj karıştırma, çoklu frekans kanallarını eşit oranda karıştırabilmek adına, karıştırıcı sinyalin gücünü ilgilenilen frekans bantlarına eşit olarak dağıtmaktadır. Bu sebeple, frekans spektrumunda gözlemlenecek olan karıştırma sinyallerinin güç seviyeleri daha düşük olarak okunmuştur.

RADAR'lar tarafından iletilen toplam mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

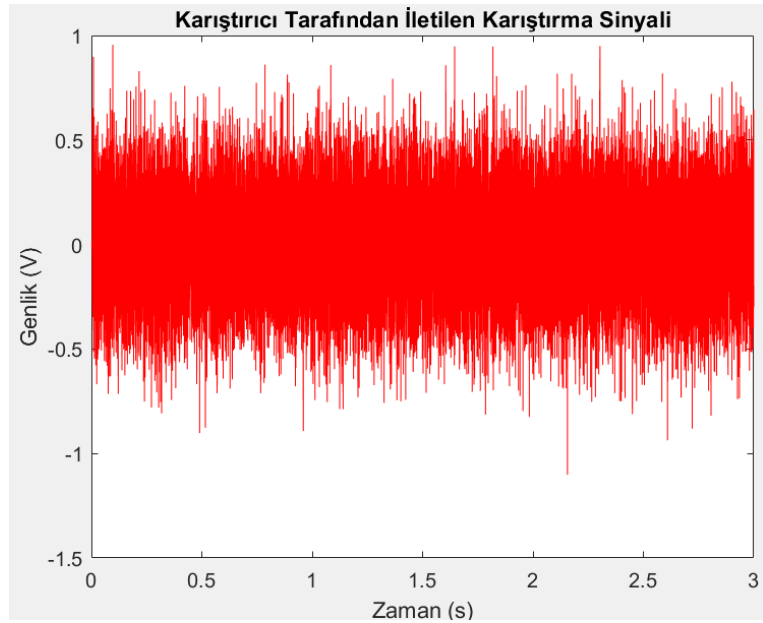


Şekil 15.7 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

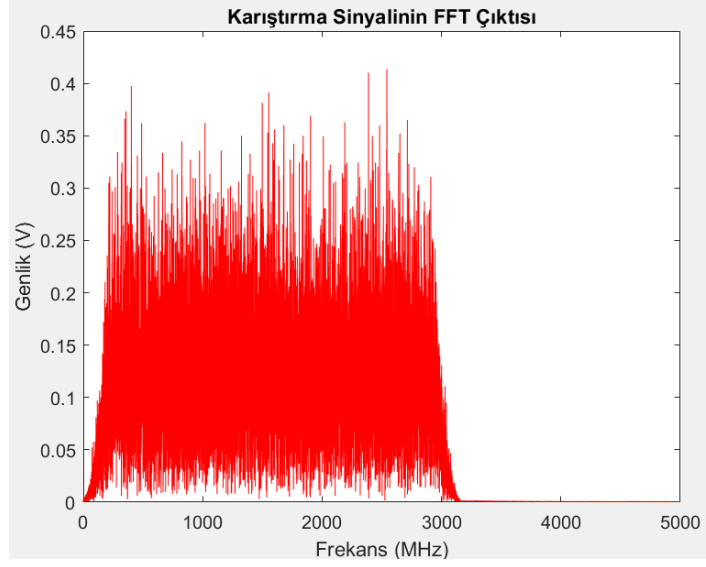


Şekil 15.8 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj Sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp alamacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, baraj karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin alamacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;

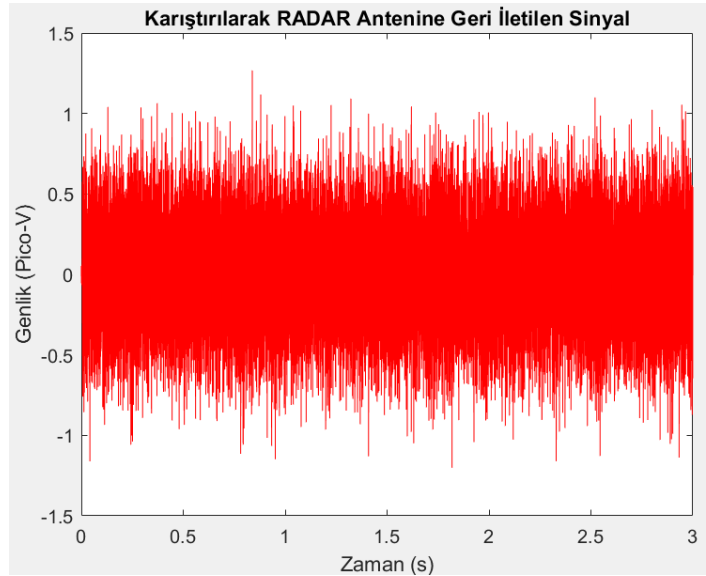


Şekil 15.9 Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali

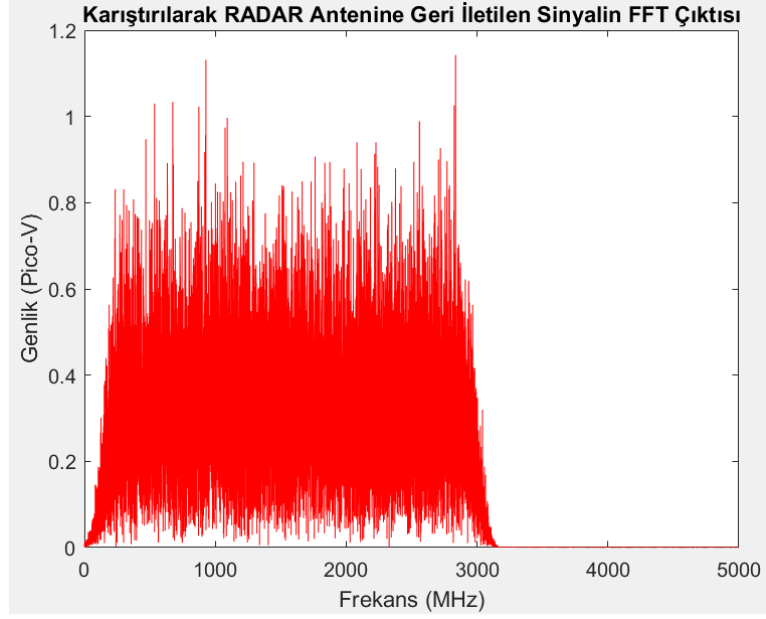


Şekil 15.10 Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sistem almacının alıcı anteninde, belirli bir yol kaybıyla beraber, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali toplanmaktadır. Toplanan sinyal, Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulacak ve sayısal katmanda analiz için iletilecektir. Karıştırıcı sisteminin anteninde toplanılan sinyal bütünlüğü, aşağıdaki gibidir;

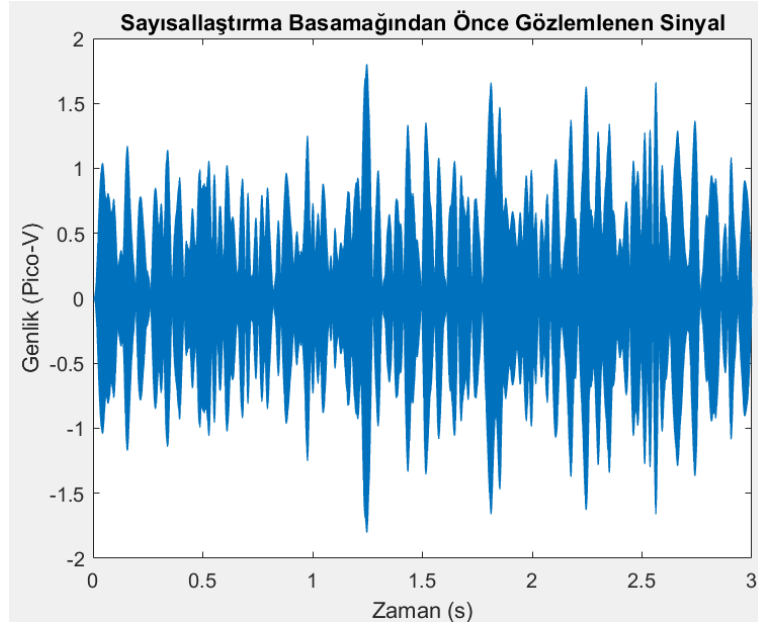


Şekil 15.11 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almacı anteninde toplanması

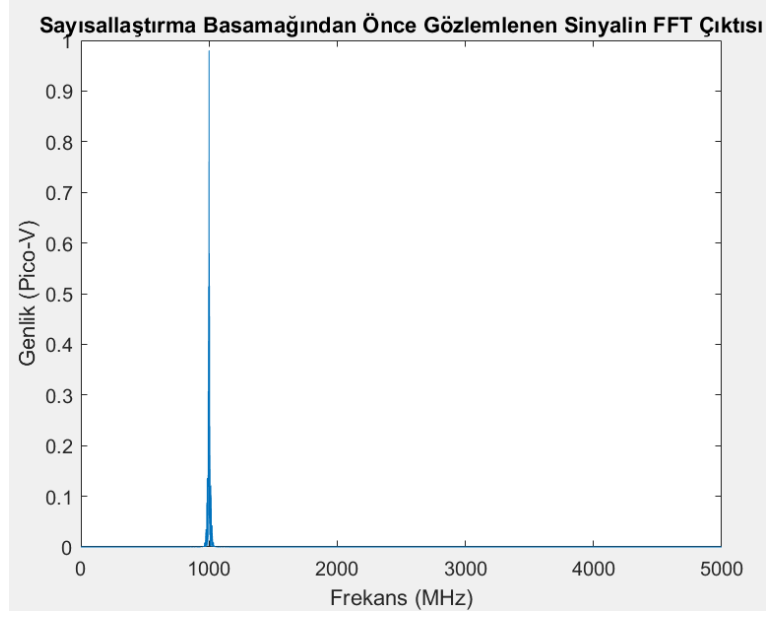


Şekil 15.12 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almacı anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.13 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal



Şekil 15.14 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal FFT çıktısı

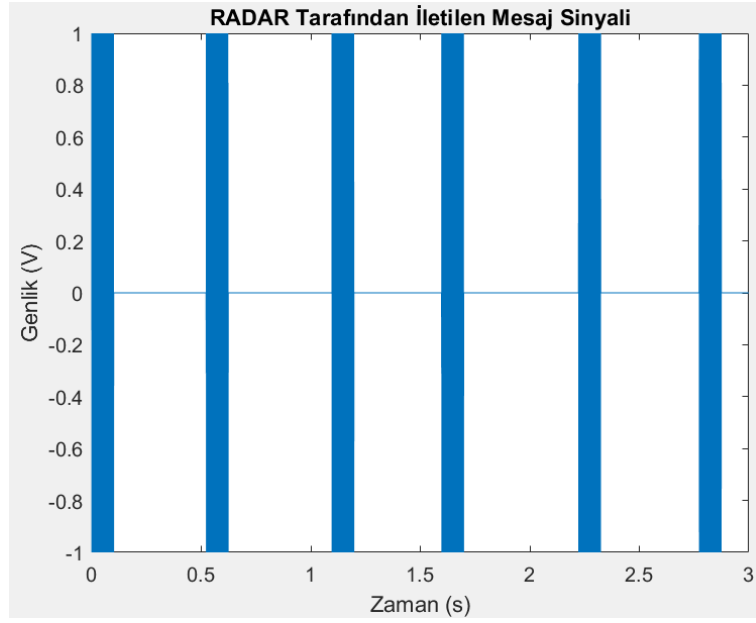
Baraj karıştırma, çoklu bantları karıştırmak adına her ne kadar pratik bir yöntem olsa da, yüksek genlikli RADAR mesaj sinyali ve yüksek seçiciliğe sahip bant geçiren filtrelerin kullanıldığı durumda, etkinliğini yitirebilmektedir. Baraj karıştırmanın etkisi, genlikler üzerinde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Baraj karıştırma, kullanıldığı elektronik harp ortamında mesaj sinyalinin genliğini almaç sistemi tarafından daha zor okunur hale getirmiştir.

Karıştırma çeşitlerinin süperhet almaçlar üzerindeki etkilerini incelemek adına, farklı bir karıştırma türü olan taramalı karıştırma ele alınacaktır.

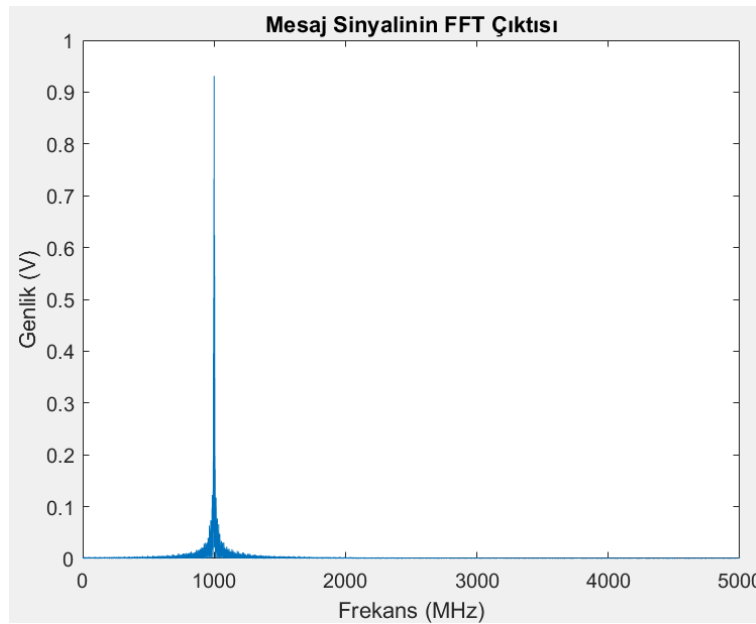
15.3.3 Taramalı karıştırma

Taramalı (Sweep) karıştırma, bir sinyal karıştırıcısının tam gücünü bir frekanstan diğerine kaydırma işlemidir. Bu "tarama" hareketi, hepsi aynı anda olmasa da, birden fazla frekansı hızlı bir şekilde art arda karıştırır. Mesaj sinyali, bir önceki analizde kullanılan RADAR tipiyle özdeş, Karıştırıcı sistemine mesafesi aynı olacak şekilde (100km) ayarlanan RADAR tarafından iletilecektir. RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve

karıştırıcı tarafından iletilen karıştırıcı sinyali, Karıştırıcı sistem almacı tarafından analiz edilecektir. RADAR'lar tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

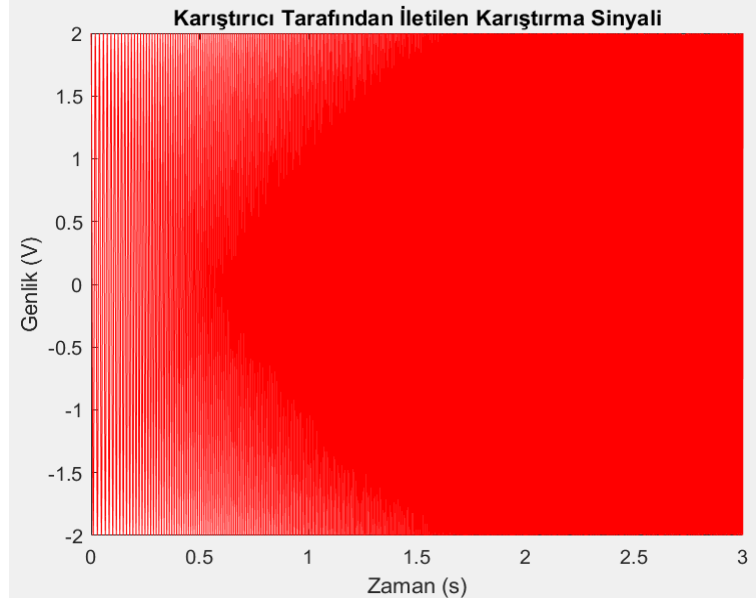


Şekil 15.15 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

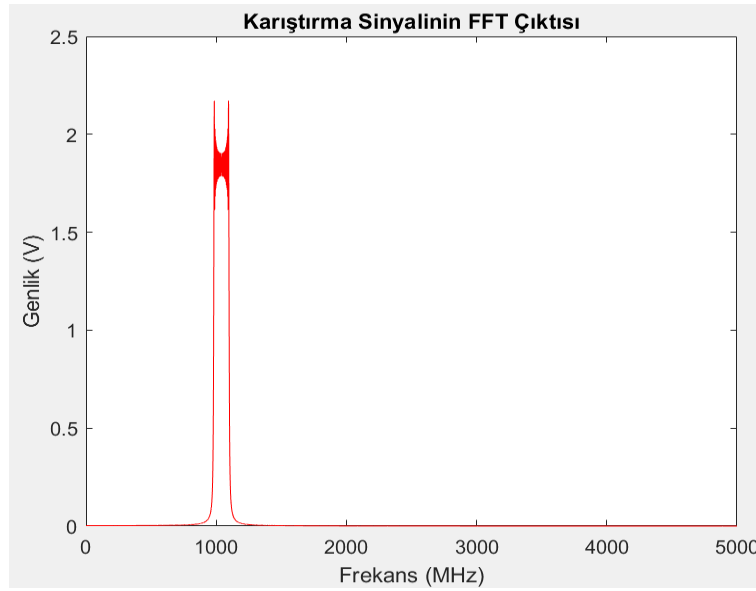


Şekil 15.16 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp alamacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, taramalı karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin alamacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;

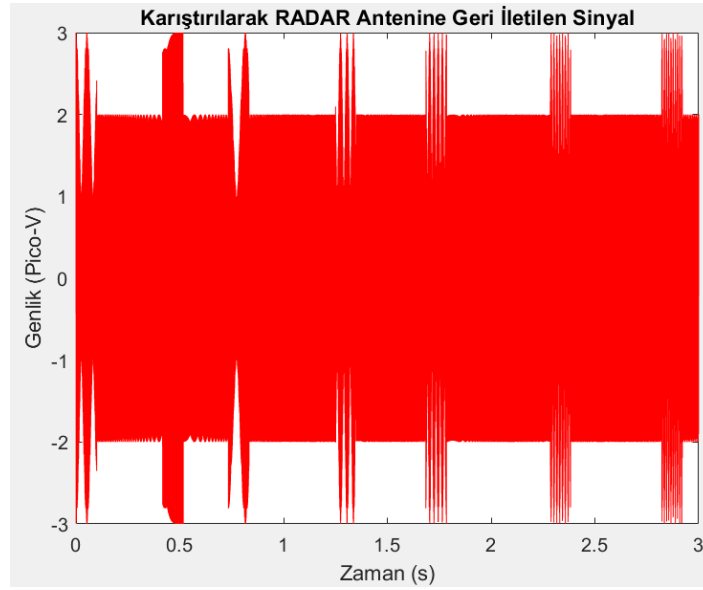


Şekil 15.17 Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali

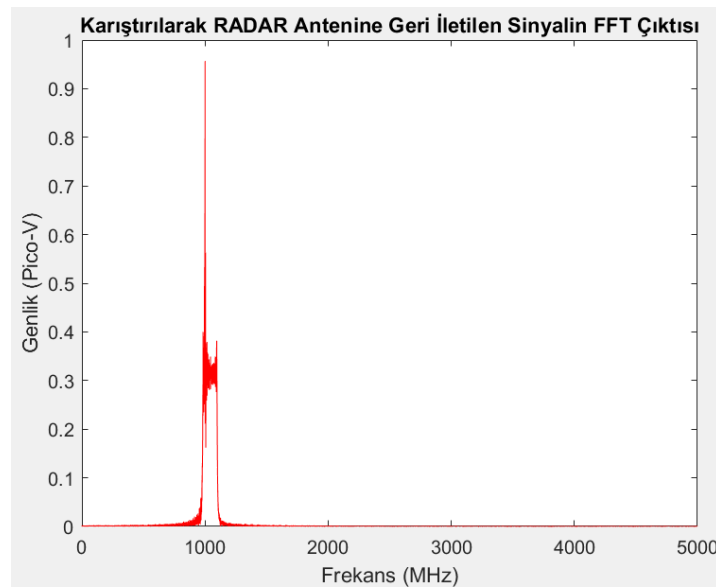


Şekil 15.18 Karıştırıcı tarafından iletilen taramalı karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sistem almacının alıcı anteninde, belirli bir yol kaybıyla beraber, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen taramalı karıştırma sinyali toplanmaktadır. Toplanan sinyal, Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulacak ve sayısal katmanda analiz için iletilecektir. Karıştırıcı sisteminin anteninde toplanılan sinyal bütünlüğü, aşağıdaki gibidir;

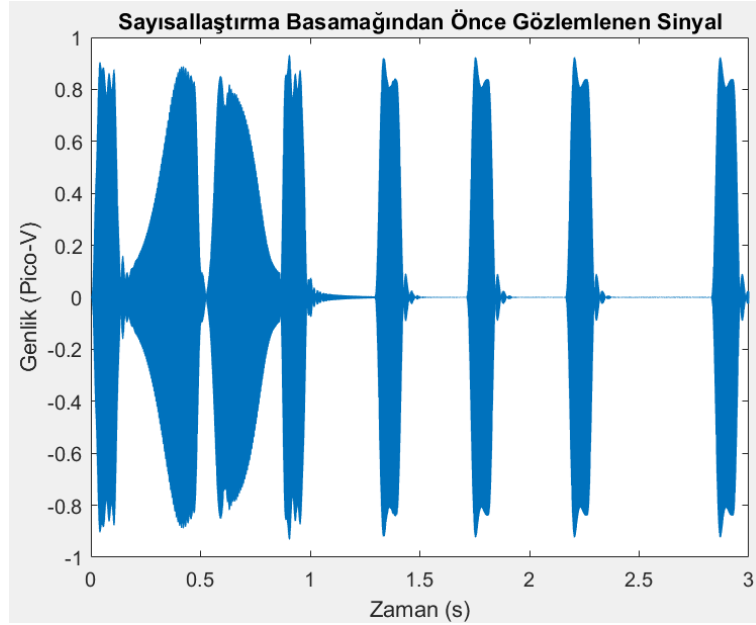


Şekil 15.19 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması

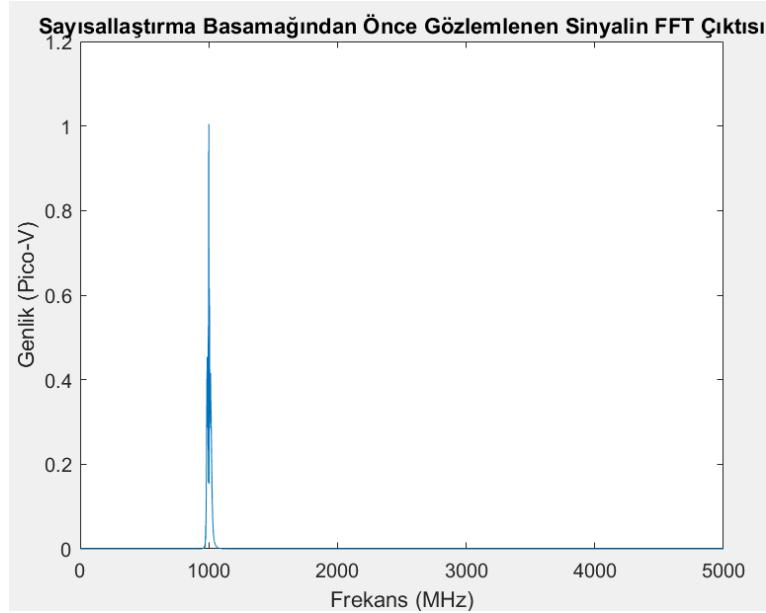


Şekil 15.20 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.21 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması



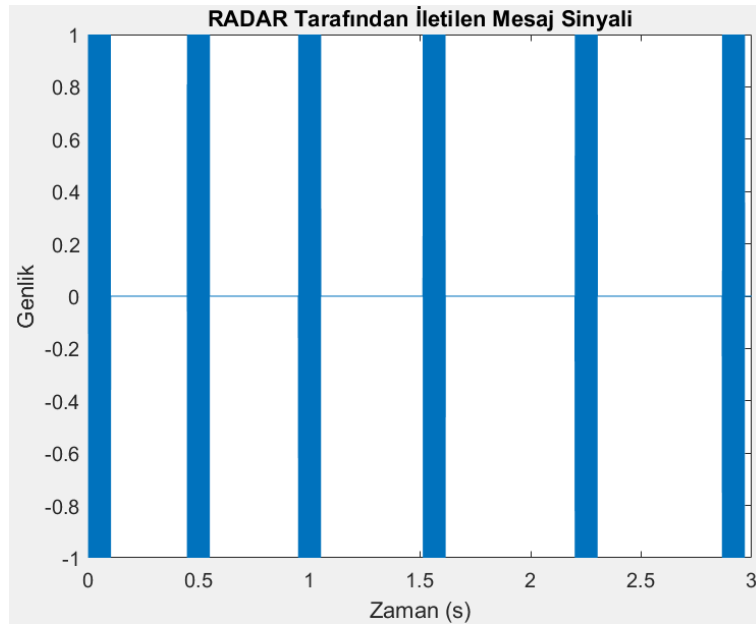
Şekil 15.22 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

Taramalı karıştırma uygulanan süperhet almaçta, ana mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansını analiz ederken genlik seviyesinde belirli bir azalış gözlemlenmiştir. Taramalı karıştırmanın yüksek sıklıkta frekans spektrumunu meşgul ediyor olması, süperhet almaçın filtreleme aşamalarını zorlaştırmaktadır. Bu zorluk, sayısal birime de yansıtacaktır. Yüksek kaliteli yükselteçler veya filtreleme elemanları kullanılmadan sayısal birime sinyal iletimi sağlanmamalıdır. Aksi takdirde mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansı ıskalanabilmektedir.

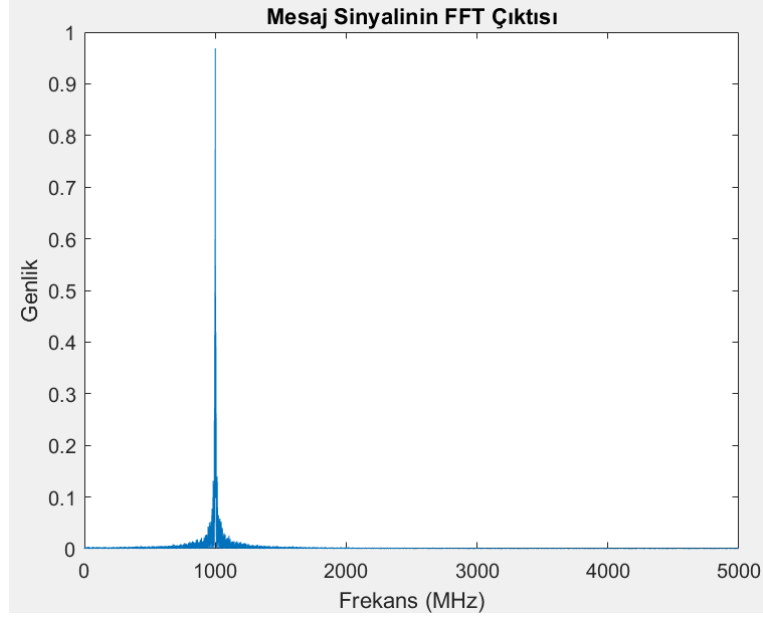
15.3.4 Yükseltilmiş gürültü karıştırması

Yükseltilmiş gürültü karıştırması, Karıştırıcı sistem almaçının gürültü tabanını yükseltmeye yönelik bir karıştırma çalışmasıdır. Karıştırıcı sisteminin gürültü tabanı yükseldiği durumda, alınmak istenen mesaj sinyalinin genliği düşük olduğu takdirde, mesaj sinyali yükseltilmiş gürültü tabanının altında kalmaktadır. Bu nedenle, belirli genlik seviyesine ulaşamayan mesaj sinyali almaç tarafından okunamamaktadır. Karıştırma sinyali, RADAR sistemindeki süperhet almaçın antenine iletilmiştir.

RADAR'lar tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

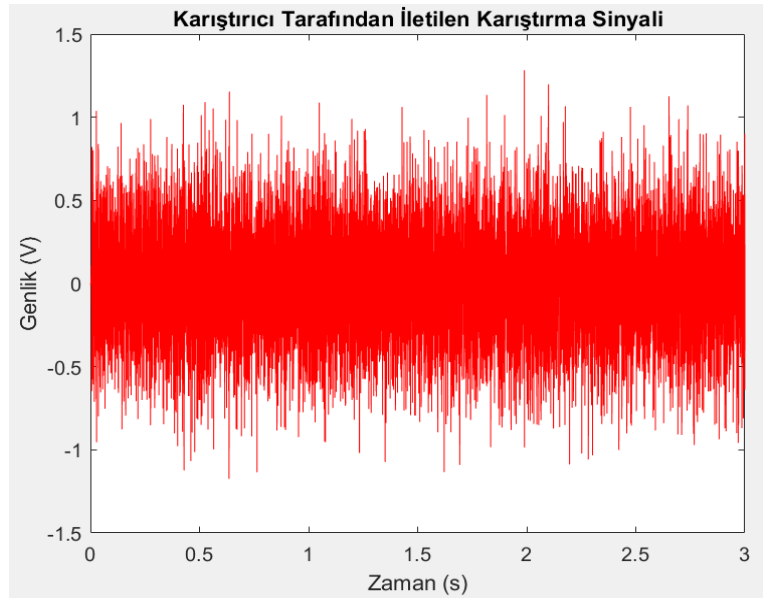


Şekil 15.23 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

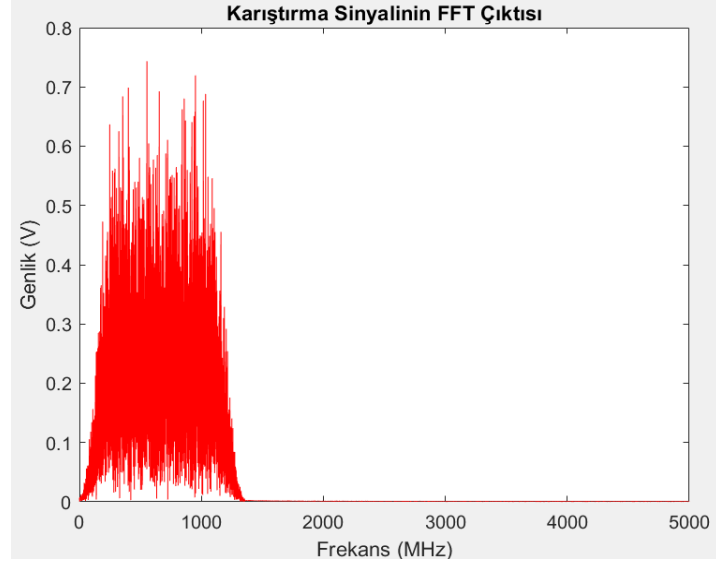


Şekil 15.24 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp alamacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, yükseltilmiş gürültü karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin alamacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;

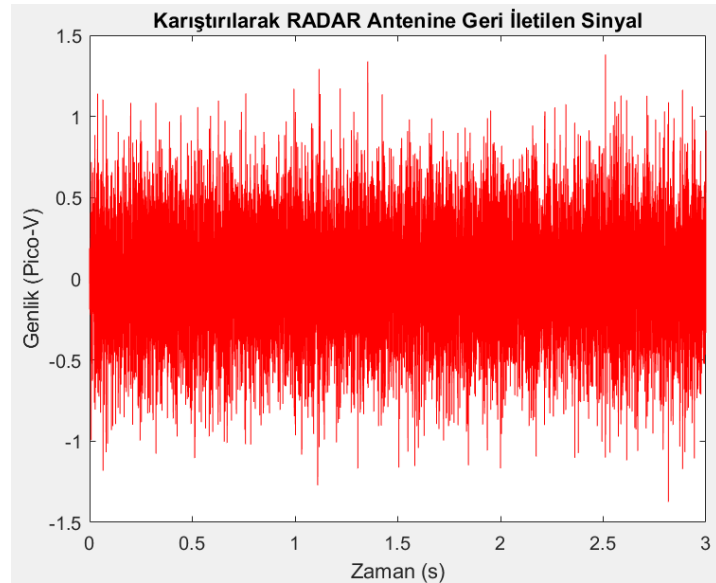


Şekil 15.25 Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali

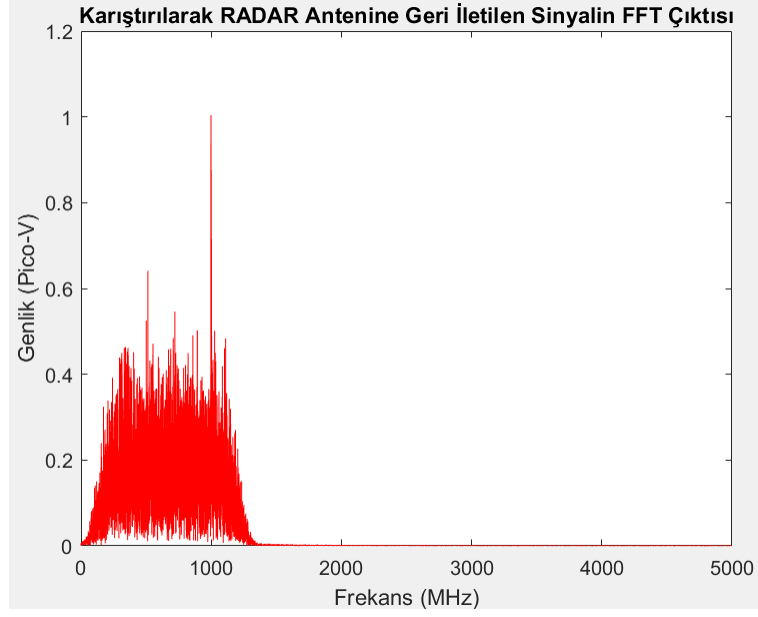


Şekil 15.26 Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sistem almacının alıcı anteninde, belirli bir yol kaybıyla beraber, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali toplanmaktadır. Toplanan sinyal, Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulacak ve sayısal katmanda analiz için iletilecektir. Karıştırıcı sisteminin anteninde toplanılan sinyal bütünlüğü, aşağıdaki gibidir;

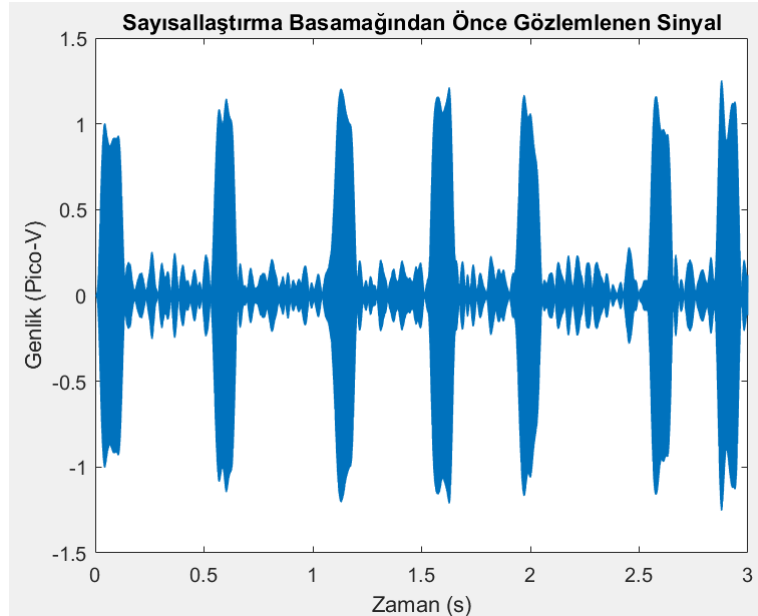


Şekil 15.27 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması

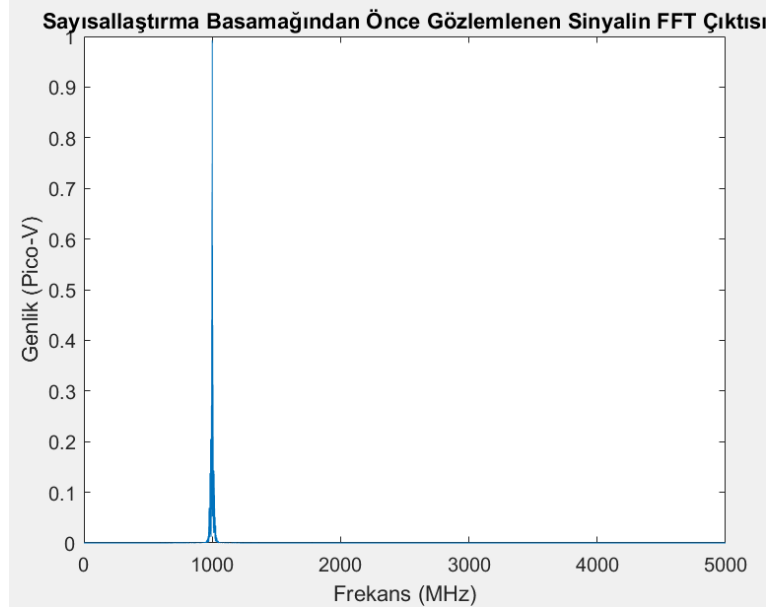


Şekil 15.28 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.29 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması



Şekil 15.30 Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

Gürültü karıştırması ilave edildiği takdirde bant geçiren filtrenin mesaj sinyalini filtreleyebilme yeteneği daha zorlanmaktadır. Karıştırma sinyali, mesaj sinyaline ilave olarak ek gürültü tabanı eklemekle birlikte ölçümünü zorlaştırmaktadır.

15.3.5 Titremeli Sinyal İleten Süperhet almaç karıştırmalara karşı performans tablosu

Süperhet almaçın kullanıldığı Karıştırıcı sisteminde, sayısallaştırma basamağının ardından elde edilen sayısal veri kullanıcı paneline iletilir. Sayısallaştırma basamağından önce okunacak olan sinyalin güç seviyesi, karıştırma varken ve yokken kıyaslanmıştır, aşağıdaki gibidir;

Çizelge 15.1 Titremeli sinyal ileten süperhet almaç farklı karışırtmalara karşı performans analizi

Sinyal Türü	Karışırtma Türü	JSR Oranı (dB)
Titremeli	Gürültü Karışırtma	1,63
Titremeli	Taşıyıcı Frekans Karışırtma	2,48
Titremeli	Taramalı Karışırtma	3,53
Titremeli	Baraj Karışırtma	1,58

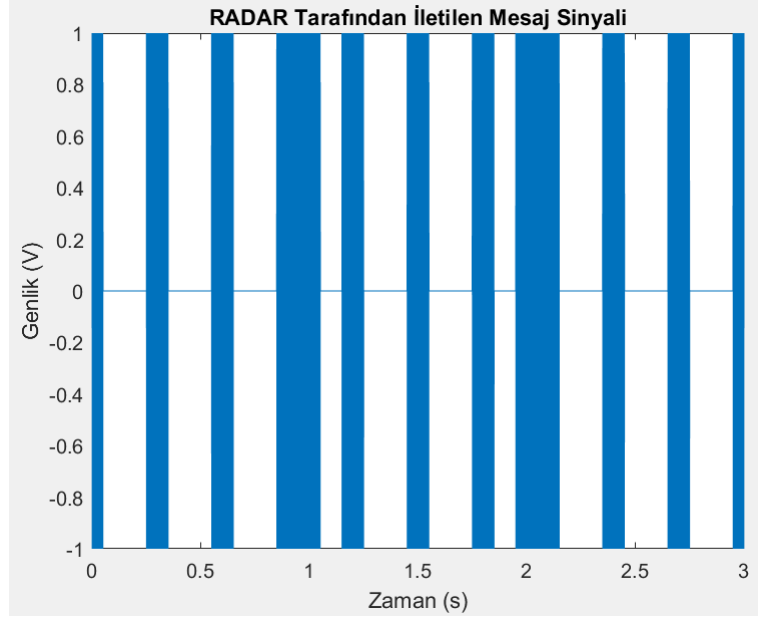
Yapılan çalışma, titremeli sinyal ile tarama yapan süperhet almaçlar için yapılmıştır. Karışırtma etkinliğini gözlemlemek adına, farklı bir sinyal iletim türü olan ‘Stagger (Sendelemeli)’ kullanan özdeş süperhet almaç üzerinde de aynı çalışma yürütülecektir. Sendelemeli sinyal işleme türü, titremeli sinyal işleme türüne göre daha basit yapıda olmakla birlikte karışırtmaya karşı daha dayanıksız olarak tanımlanmaktadır

15.4 Sendelemeli Sinyal Gönderen Süperhet Almacın Karışırtma Karşısında Performansı

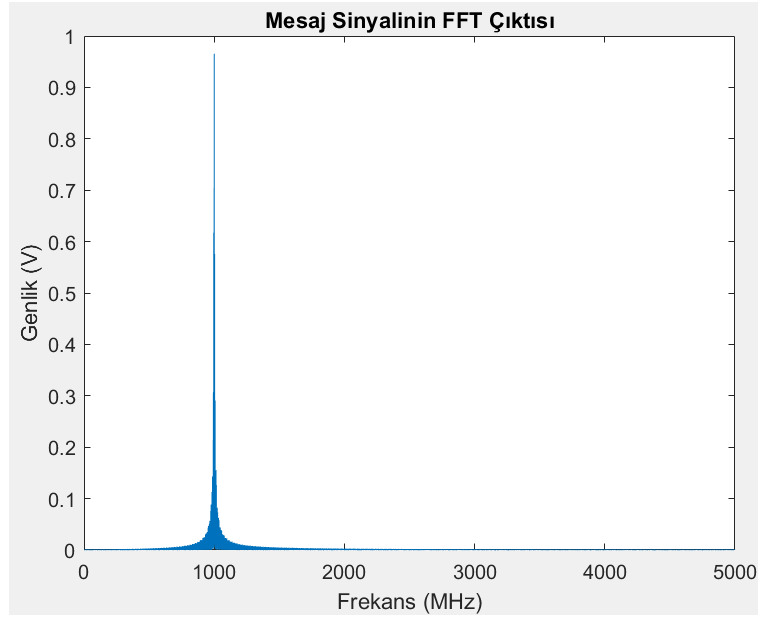
Takip edilen senaryo ve uygulanan metotlar, benzetim ortamı titremeli sinyal ileten süperhet almaç için uygulanan analiz ortamı ile aynıdır.

15.4.1 Taşıyıcı frekans karışırtma

RADAR tarafından mesaj sinyali iletilmektedir. İletilen mesaj sinyalinin, Karışırtıcı sistem almacına ulaştırılması ve almaç tarafından analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;



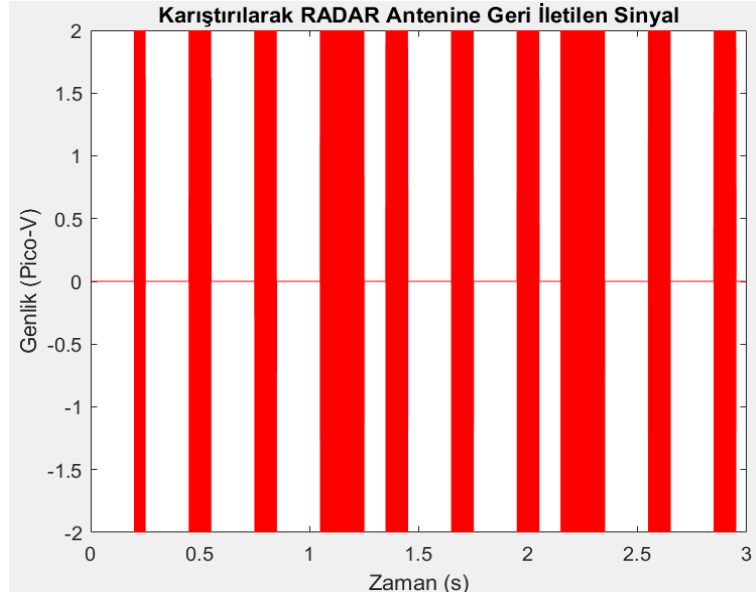
Şekil 15.31 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali



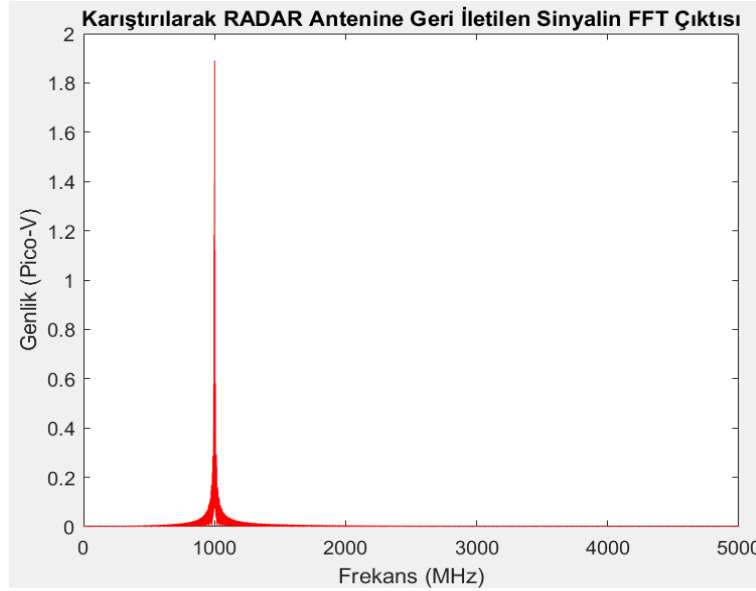
Şekil 15.32 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj Sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp almacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, taşıyıcı frekans karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin almacına bir karıştırma uygulamaktadır. Bu karıştırma türünde RADAR tarafından iletilen mesaj

sinyalinin genliği yaklaşık iki katına çıkarılmış ve faz kayması uygulanmıştır. Yapılan karıştırmadan sonra sinyal RADAR sisteminin almacına geri iletilmiştir. Uygulanan karıştırma sonrasında RADAR sistem anteninde gözlemlenen sinyal aşağıdaki gibidir;

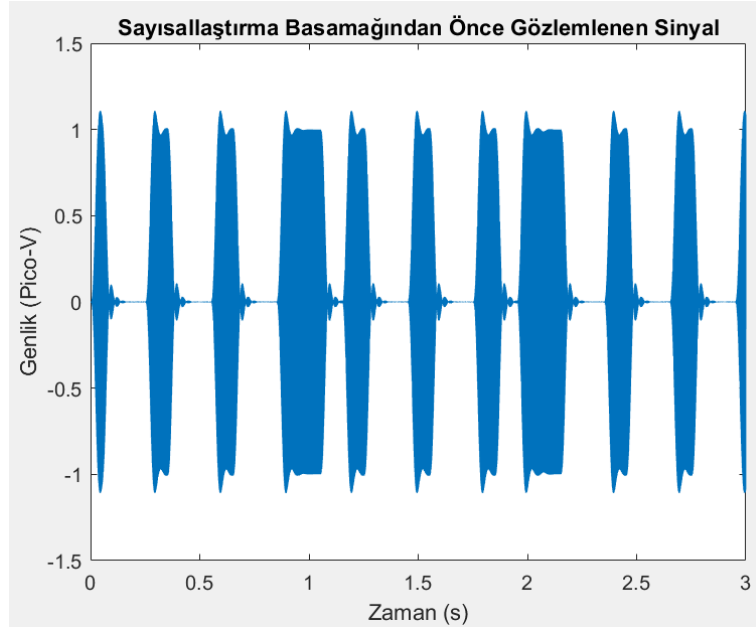


şekil 15.33 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması

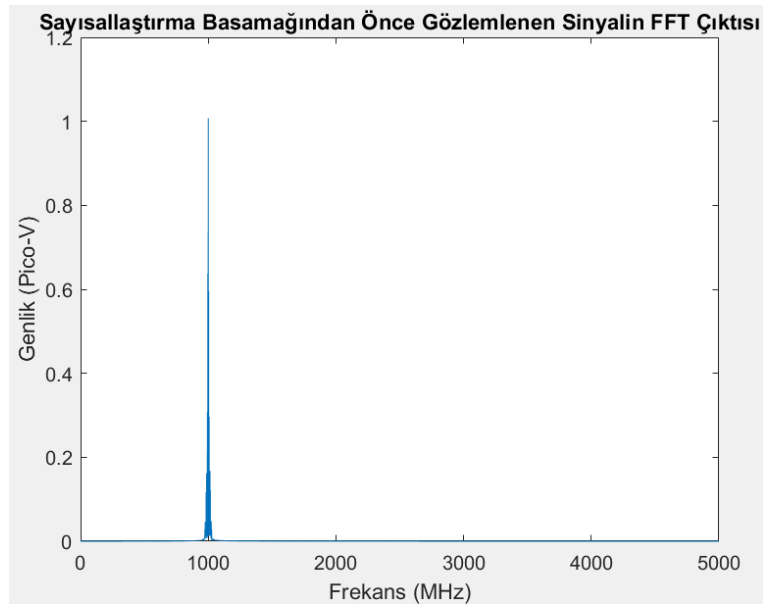


şekil 15.34 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT ıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyal, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.35 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal

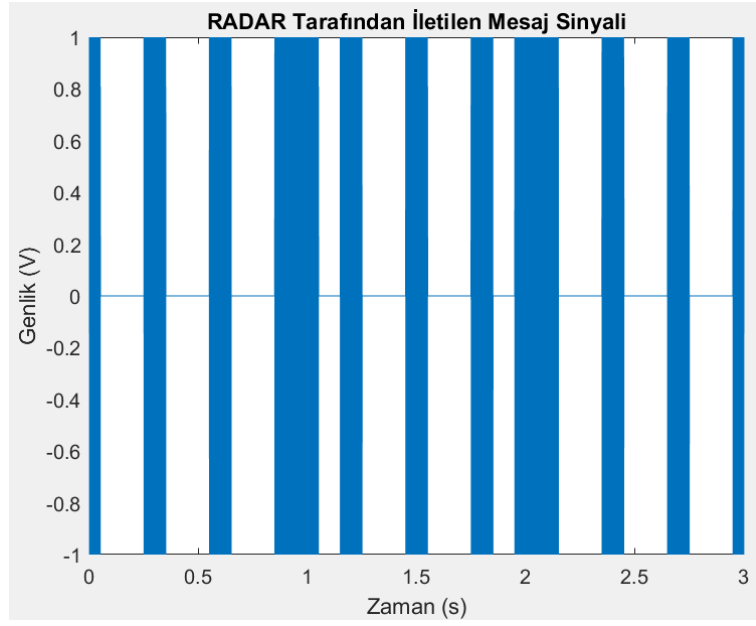


Şekil 15.36 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal

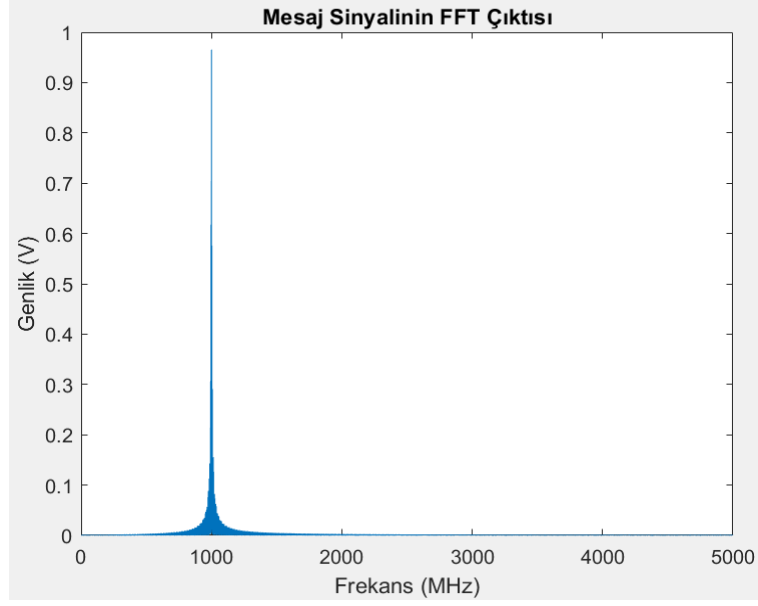
Bant seçici filtre, istenilen mesaj sinyalini filtreleyerek sayısal katmana iletmiştir.

15.4.2 Taramalı karıştırma

Taramalı (Sweep) karıştırma, bir sinyal karıştırıcısının tam gücünü bir frekanstan diğerine kaydırma işlemidir. Bu "tarama" hareketi, hepsi aynı anda olmasa da, birden fazla frekansı hızlı bir şekilde art arda karıştırır. Mesaj sinyali, bir önceki analizde kullanılan RADAR tipiyle özdeş, Karıştırıcı sistemine mesafesi aynı olacak şekilde (100km) ayarlanan RADAR tarafından iletilecektir. RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen karıştırıcı sinyali, Karıştırıcı sistem almacı tarafından analiz edilecektir. RADAR'lar tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.37 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

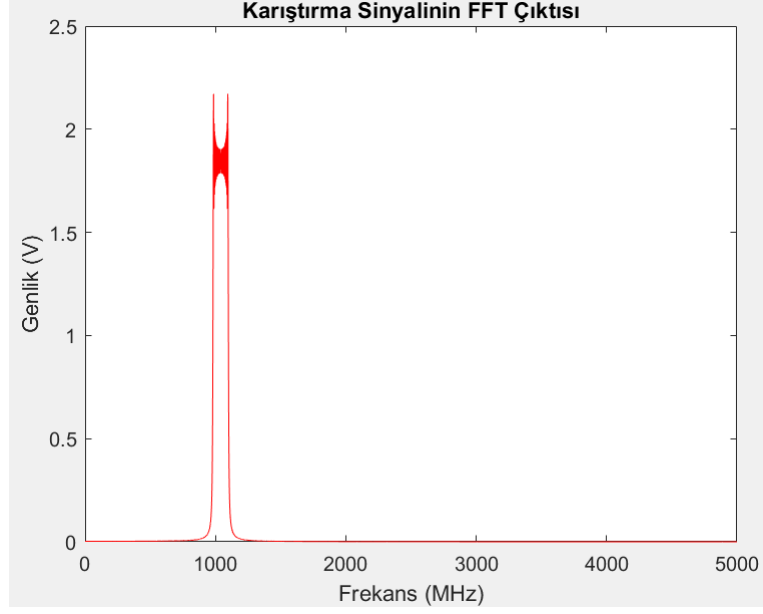


Şekil 15.38 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp alamacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, taramalı karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin alamacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;

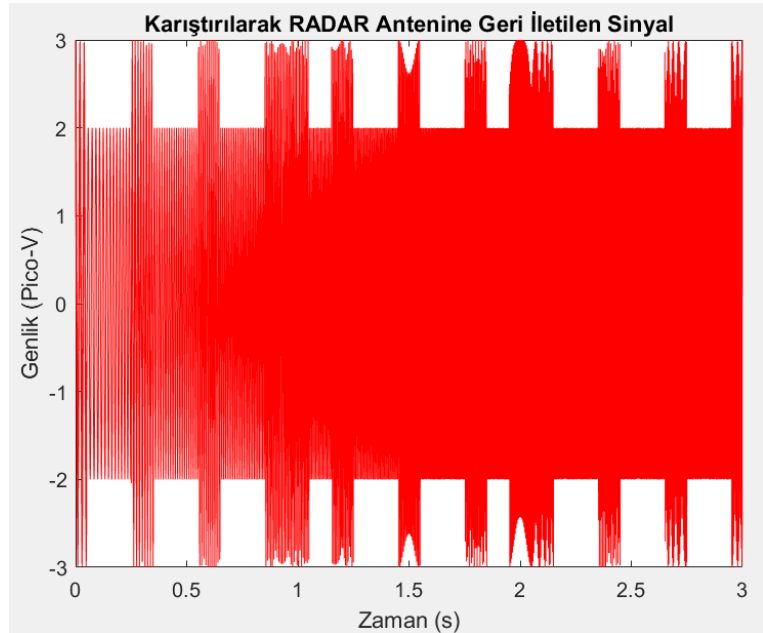


Şekil 15.39 Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali

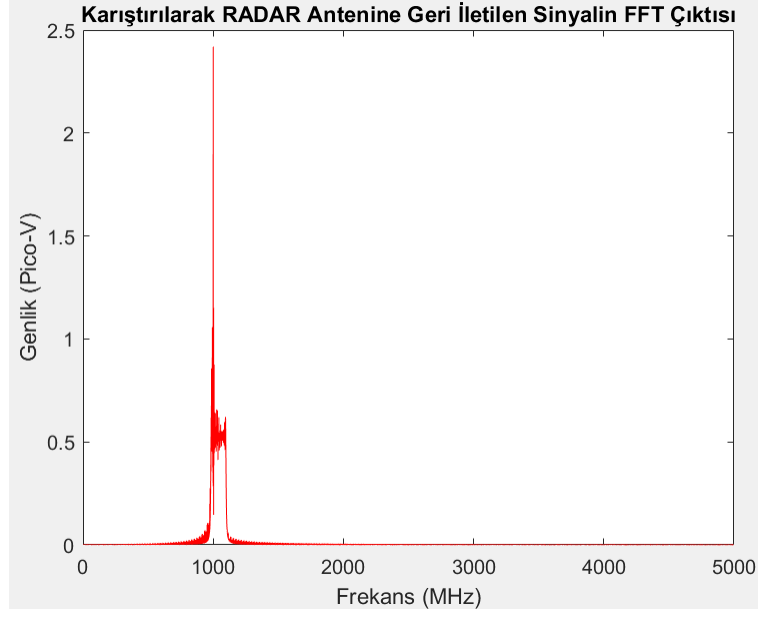


Şekil 15.40 Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;

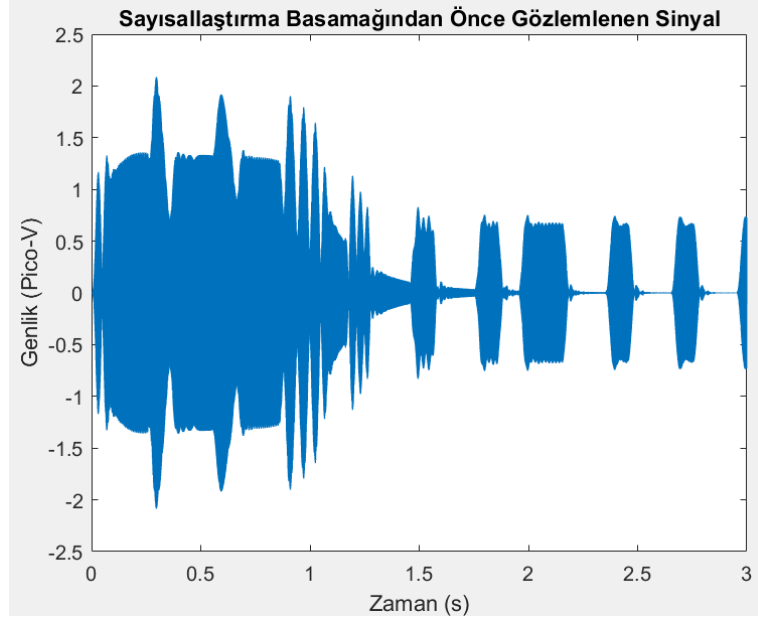


Şekil 15.41 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması

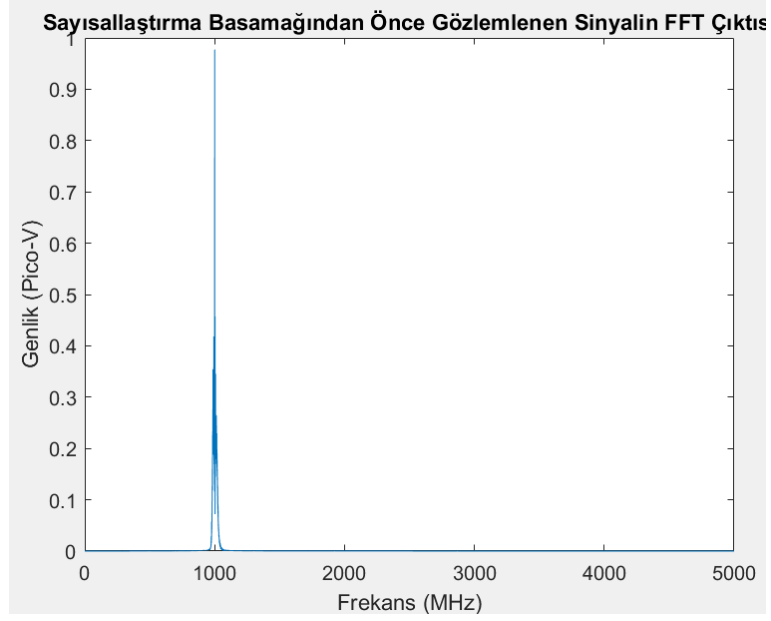


Şekil 15.42 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.43 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması



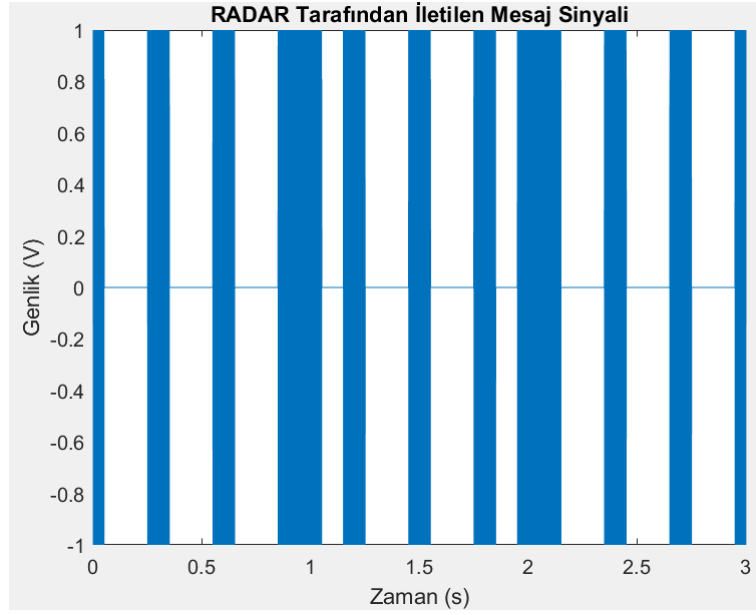
Şekil 15.44 Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

Taramalı karıştırma uygulanan sendelemeli sinyal ileten süperhet almaçta, ana mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansını analiz ederken genlik seviyesinde belirli bir azalış gözlemlenmiştir. Taramalı karıştırma'nın geniş bir çapta frekans spektrumunu meşgul ediyor olması, sendelemeli sinyal ileten süperhet almaçta almanın filtreleme aşamalarını zorlaştırmaktadır. Bu zorluk, sayısal birime de yansıtacaktır. Yüksek kaliteli yükselteçler veya filtreleme elemanları kullanılmadan sayısal birime sinyal iletimi sağlanmamalıdır. Aksi takdirde mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansı ıskalanabilmektedir.

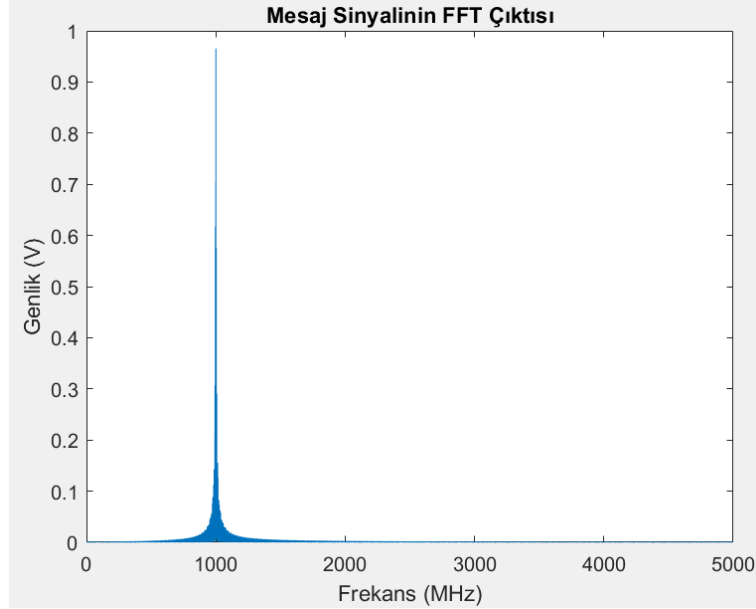
15.4.3 Yükseltilmiş gürültü karıştırması

Yükseltilmiş gürültü karıştırması, Karıştırıcı sistem almasının gürültü tabanını yükseltmeye yönelik bir karıştırma çalışmasıdır. Karıştırıcı sisteminin gürültü tabanı yükseldiği durumda, alınmak istenen mesaj sinyalinin genliği düşük olduğu takdirde, mesaj sinyali yükseltilmiş gürültü tabanının altında kalmaktadır. Bu nedenle, belirli genlik seviyesine ulaşamayan mesaj sinyali almaç tarafından okunamamaktadır. Karıştırma sinyali, RADAR sistemindeki süperhet almanın antenine iletilmiştir.

RADAR'lar tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;



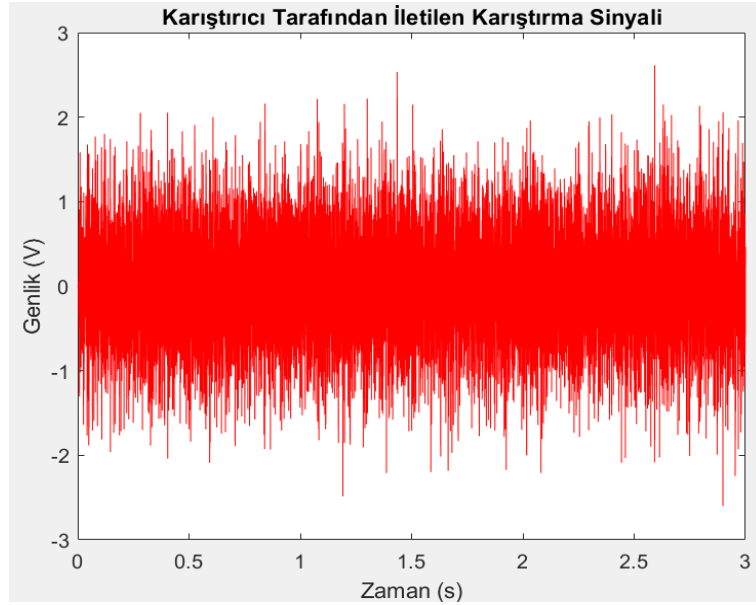
Şekil 15.45 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali



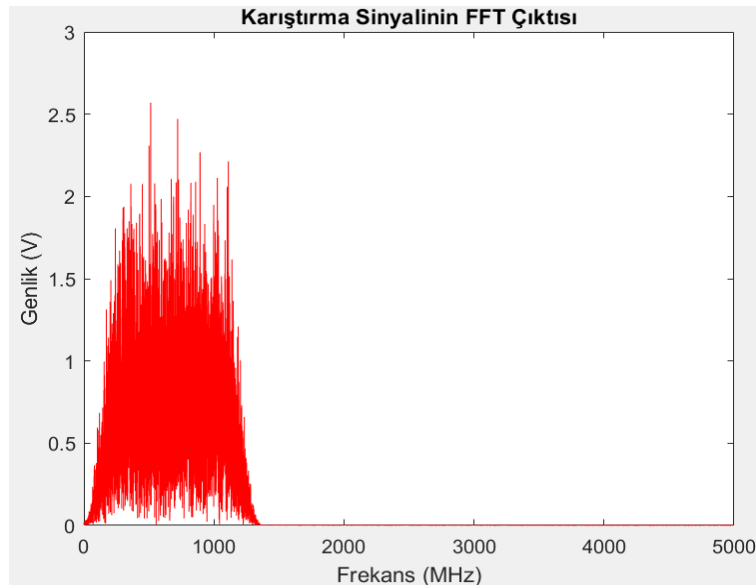
Şekil 15.46 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp almacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir

karıştırıcı, yükseltilmiş gürültü karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin almacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;



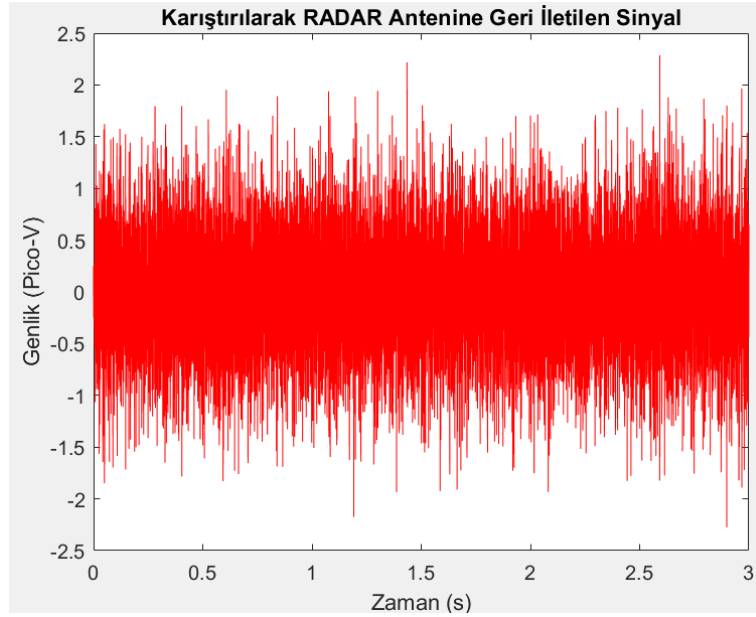
Şekil 15.47 Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali



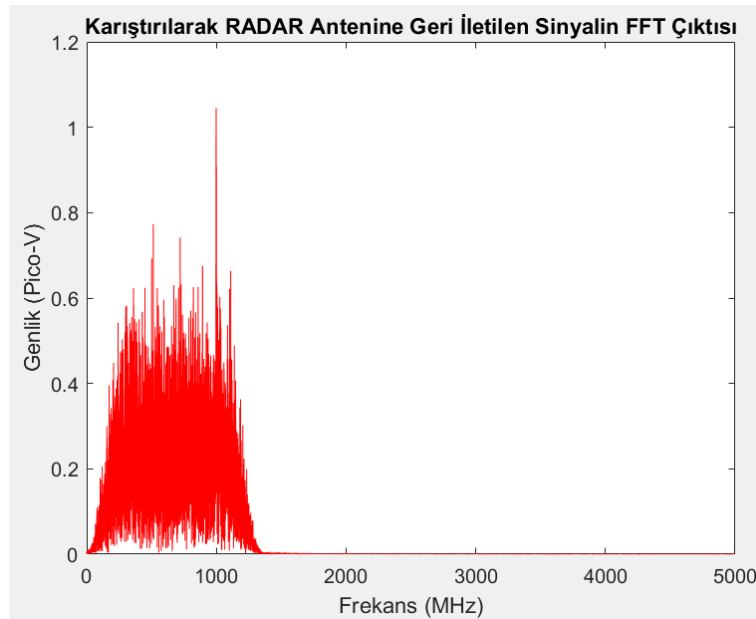
Şekil 15.48 Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sistem almacının alıcı anteninde, belirli bir yol kaybıyla beraber, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü

karıştırma sinyali toplanmaktadır. Toplanan sinyal, Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulacak ve sayısal katmanda analiz için iletilecektir. Karıştırıcı sisteminin anteninde toplanılan sinyal bütünlüğü, aşağıdaki gibidir;

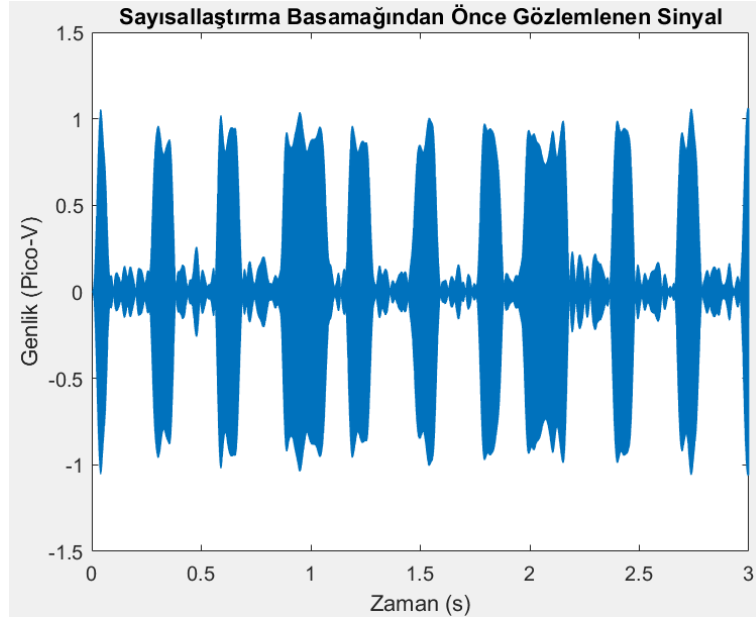


Şekil 15.49 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması

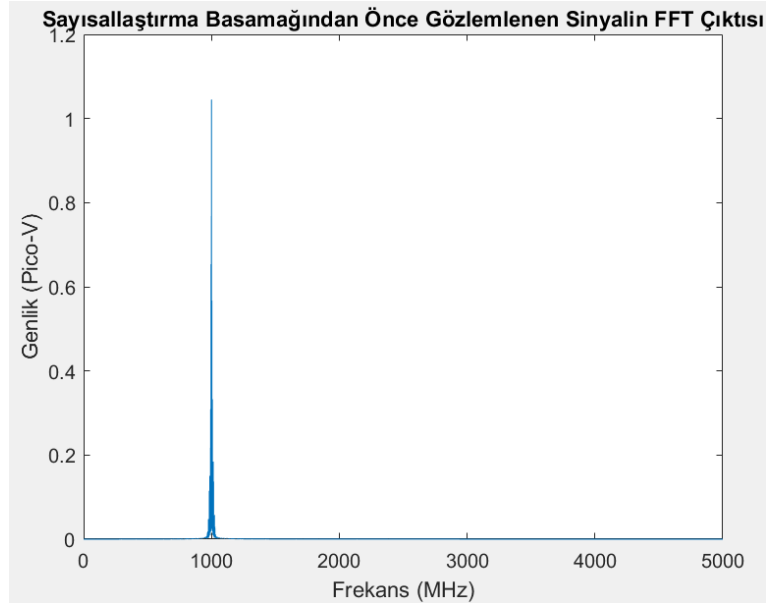


Şekil 15.50 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.51 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması



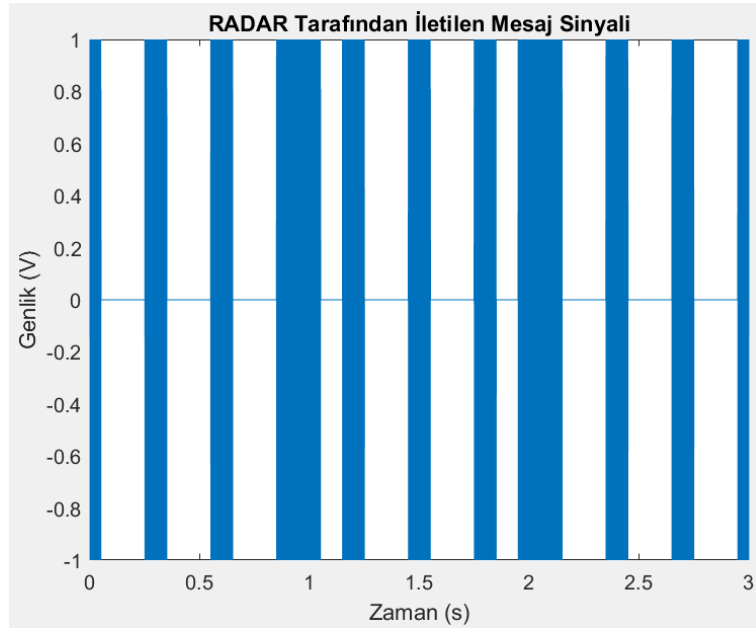
Şekil 15.52 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

Gürültü karıştırması ilave edildiği takdirde bant geçiren filtrenin mesaj sinyalini filtreleyebilme yeteneği daha zorlanmaktadır. Karıştırma sinyali, mesaj sinyaline ilave olarak ek gürültü tabanı eklemekle birlikte ölçümünü zorlaştırmaktadır.

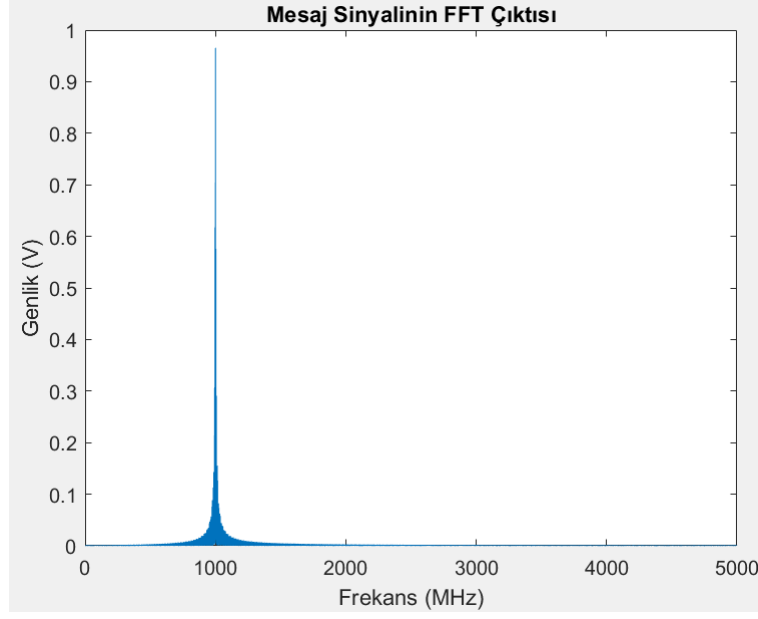
15.4.4 Baraj karıştırma

Baraj karıştırma senaryosu, çoklu frekans bantlarını gösterebilmek adına, taşıyıcı frekans karıştırmasından daha farklı olması gerekmiştir. Baraj karıştırma, çoklu frekans kanallarını eşit oranda karıştırılabilmek adına, karıştırıcı sinyalin gücünü ilgilenilen frekans bantlarına eşit olarak dağıtmaktadır. Bu sebeple, frekans spektrumunda gözlemlenecek olan karıştırma sinyallerinin güç seviyeleri daha düşük olarak okunmuştur. Mesaj sinyali, özdeş, Karıştırıcı sistemine mesafesi aynı olacak şekilde (100km) ayarlanan RADAR'lar tarafından iletilecektir. RADAR'lar tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen karıştırıcı sinyali, Karıştırıcı sistem almacı tarafından analiz edilecektir.

RADAR'lar tarafından iletilen toplam mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

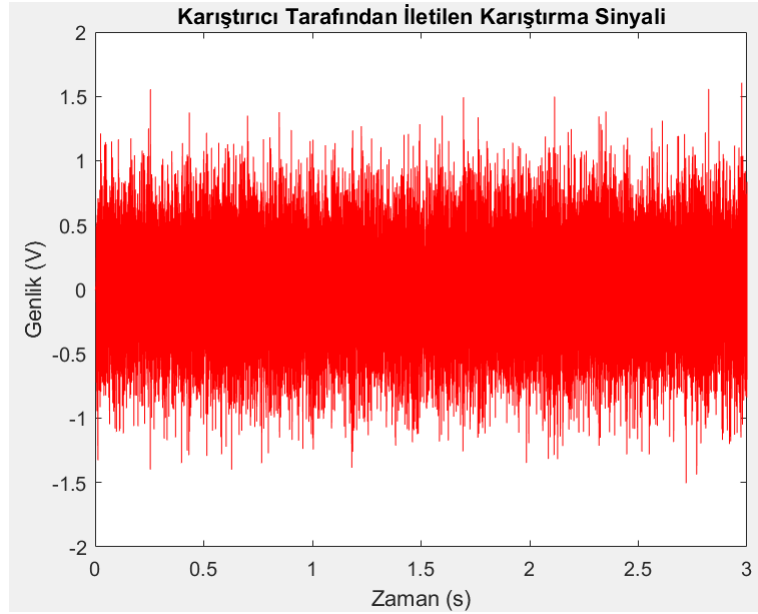


Şekil 15.53 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

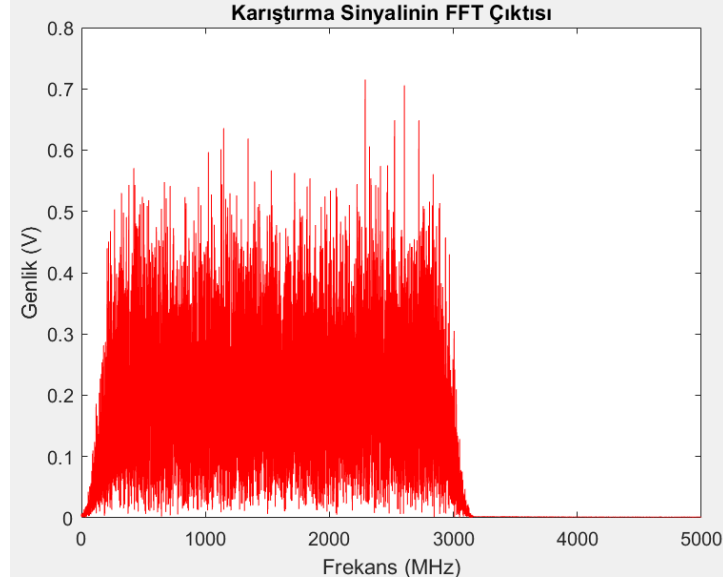


Şekil 15.54 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj Sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat, elektronik harp almacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, baraj karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin almacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;

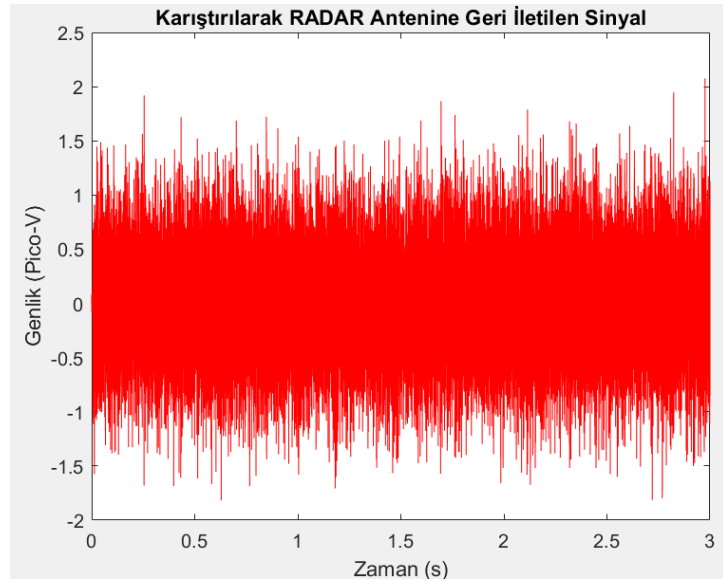


Şekil 15.55 Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali

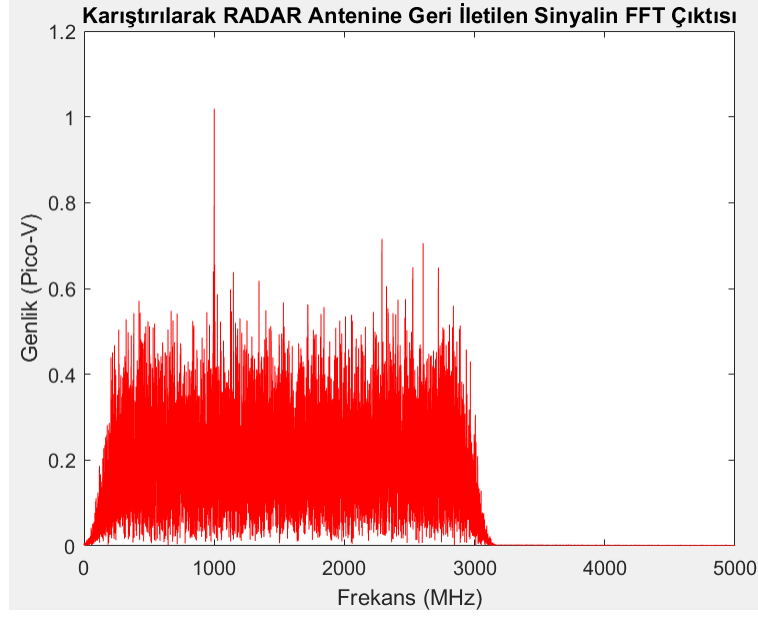


Şekil 15.56 Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sistem almacının alıcı anteninde, belirli bir yol kaybıyla beraber, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali toplanmaktadır. Toplanılan sinyal, Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulacak ve sayısal katmanda analiz için iletilecektir. Karıştırıcı sisteminin anteninde toplanılan sinyal bütünlüğü, aşağıdaki gibidir;

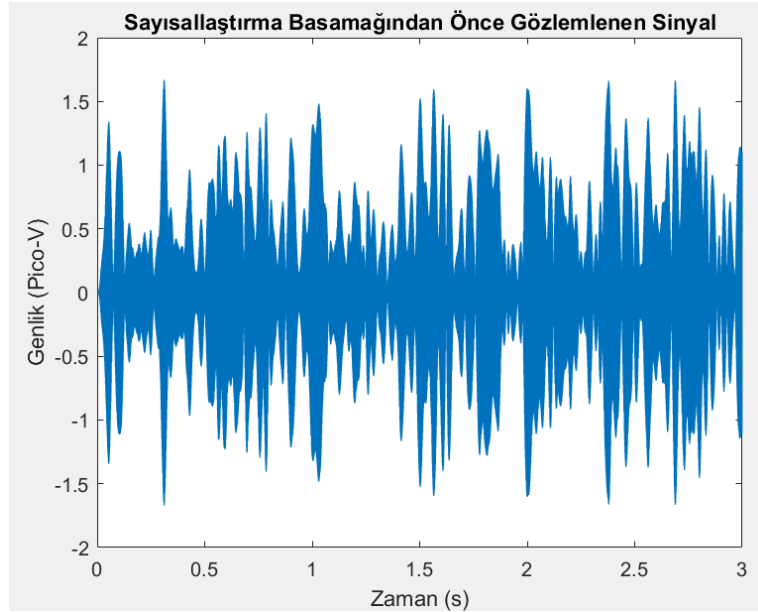


Şekil 15.57 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması

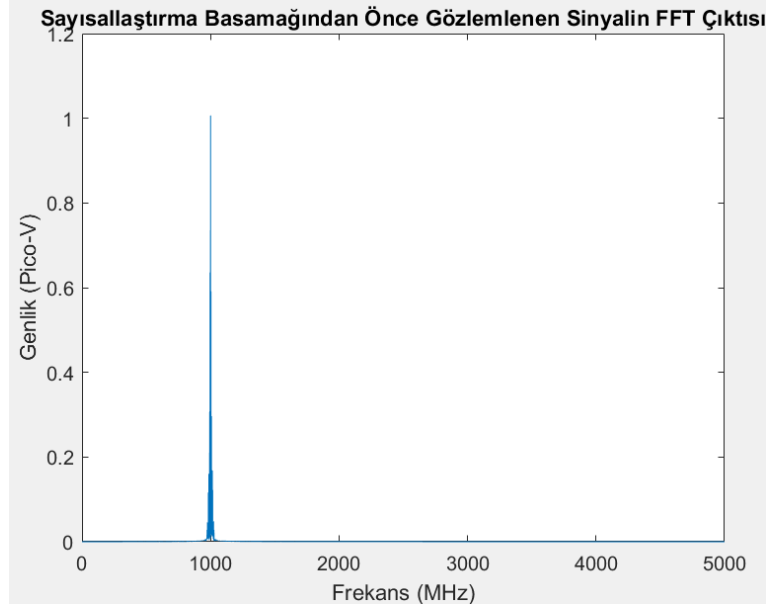


Şekil 15.58 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.59 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması



Şekil 15.60 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

Baraj karıştırma, çoklu bantları karıştırmak adına her ne kadar pratik bir yöntem olsa da, yüksek genlikli RADAR mesaj sinyali ve yüksek seçiciliğe sahip bant geçiren filtrelerin kullanıldığı durumda, etkinliğini yitirebilmektedir. Baraj karıştırmanın etkisi, genlikler üzerinde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Baraj karıştırma, kullanıldığı elektronik harp ortamında mesaj sinyalinin genliğini almaç sistemi tarafından daha zor okunur hale getirmiştir.

15.4.5 Sendelemeli sinyal ileten Süperhet almaç karıştırmalara karşı performans tablosu

Sendelemeli sinyal ileten Süperhet almaçın kullanıldığı Karıştırıcı sisteminde, sayılaştırma basamağının ardından elde edilen sayısal veri kullanıcı paneline iletilir. Sayılaştırma basamağından önce okunacak olan sinyalin güç seviyesi, karıştırma varken ve yokken kıyaslanmıştır, aşağıdaki gibidir;

Çizelge 15.2 Sendelemeli sinyal gönderen süperhet almaç karıştırma karşısında performans analizi

Sinyal Türü	Karıştırma Türü	JSR Oranı (dB)
Sendelemeli	Gürültü Karıştırma	1,91
Sendelemeli	DRFM Karıştırma	3,21
Sendelemeli	Sweep (Tarama) Karıştırma	4,09
Sendelemeli	Baraj Karıştırma	2,6

Yapılan çalışma esnasında, karıştırma türlerinin ve farklı sinyal yayını yapan süperhet almaç türünün değiştirilmesi takdirinde JSR oranındaki değişim gözlemlenmiştir. Yapılan çalışma sonucu, karıştırmanın etkilerini gözlemlemek adına daha etkin bir parametreye ihtiyaç olduğu kanısına varılmıştır. Bu durumda, sadece mesaj sinyalinin genlik seviyesinin kontrol edilerek karıştırma etkinliğinin gözlemlenmesinin sağlıksız bir yaklaşım olduğu kanısına varılmıştır. Bu durumda, JSR gibi parametrelere başvurulması gerekmektedir.

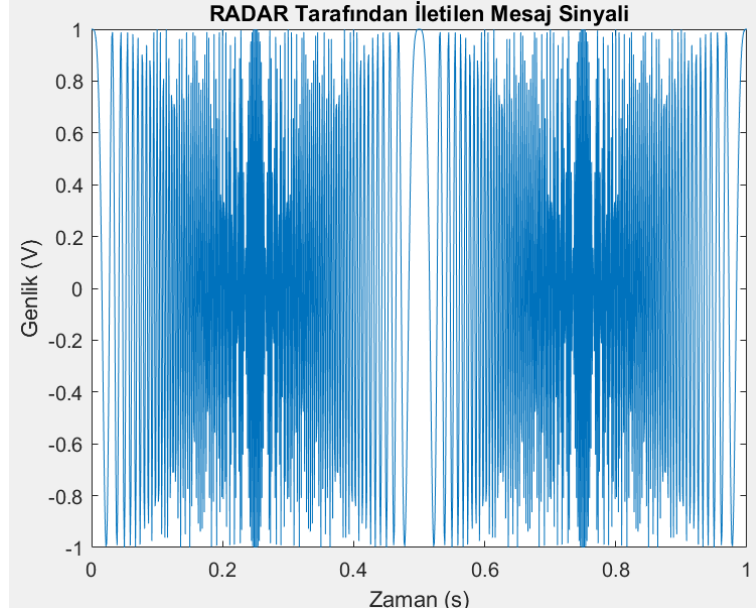
Sendelemeli ve titremeli sinyal türleriyle arama yapan RADAR’da kullanılan süperhet almaç için elde edilen sonuçlar yukarıdaki gibidir. Titremeli sinyal türü, gürültü ve aldatma karıştırma türlerine karşı daha etkili bir sinyal işleme stratejisi olarak belirlenmiştir. Aynı çalışma, LFM kullanan bistatik RADAR’ın süperhet almaç için de yapılacaktır. Bistatik RADAR türleri, monostatik RADAR’a kıyasla daha az tercih edilen RADAR türleridir. Bunun temel sebepleri arasında, monostatik RADAR’ların karıştırma karşısında yüksek etkinliği ve tasarımsal pratikliği yer almaktadır.

15.5 LFM Sinyal Gönderen Süperhet Almacın Karıştırma Karşısında Performansı

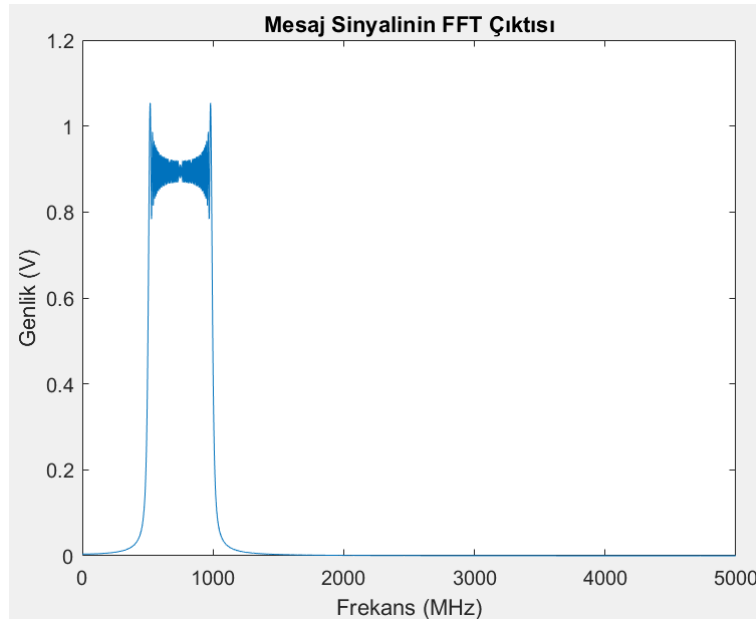
Takip edilen senaryo ve uygulanan metotlar, benzetim ortamı titremeli ve sendelemeli sinyal ileten süperhet almaç için uygulanan analiz ortamı ile aynıdır.

15.5.1 Taşıyıcı frekans karıştırma

RADAR tarafından mesaj sinyali iletilmektedir. İletilen mesaj sinyalinin, Karıştırıcı sistem alamacına ulaştırılması ve almaç tarafından analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

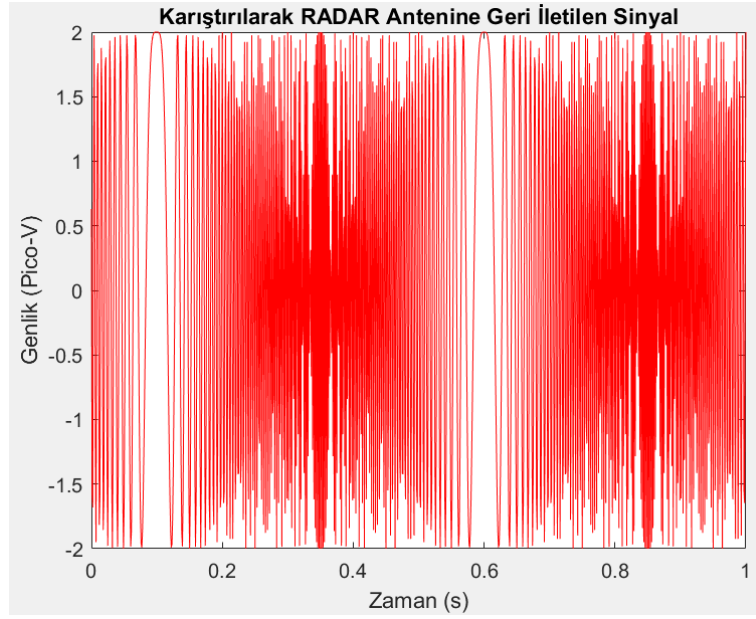


Şekil 15.61 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

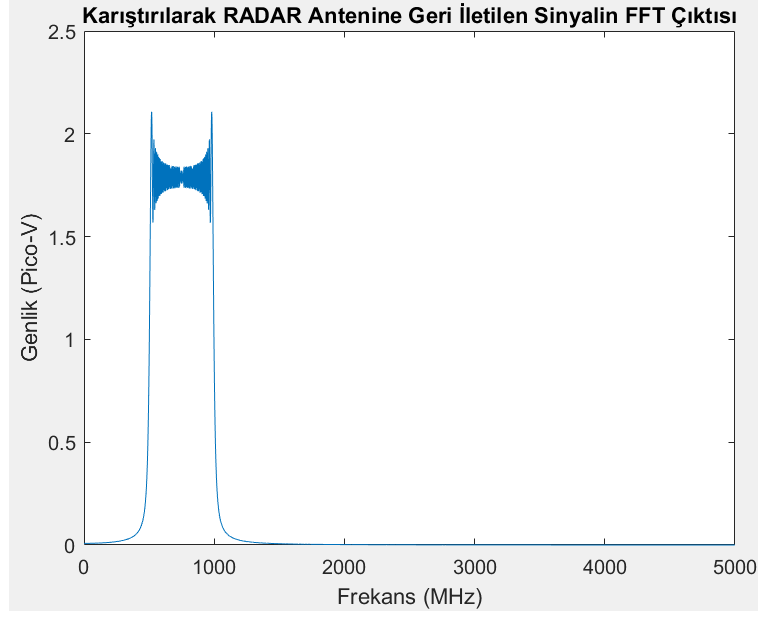


Şekil 15.62 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj Sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp almacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, taşıyıcı frekans karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin almacına bir karıştırma uygulamaktadır. Bu karıştırma türünde RADAR tarafından iletilen mesaj sinyalinin genliği yaklaşık iki katına çıkarılmış ve faz kayması uygulanmıştır. Yapılan karıştırmadan sonra sinyal RADAR sisteminin almacına geri iletilmiştir. Uygulanan karıştırma sonrasında RADAR sistem anteninde gözlemlenen sinyal aşağıdaki gibidir;

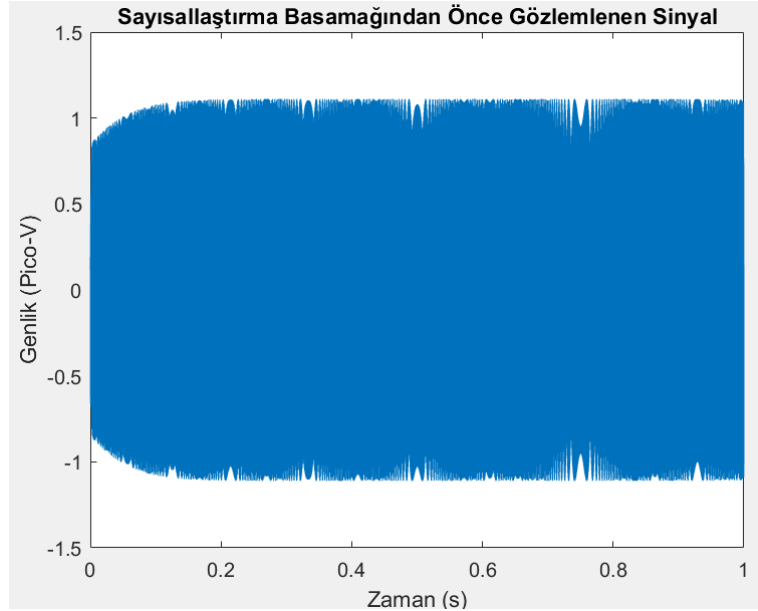


Şekil 15.63 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması

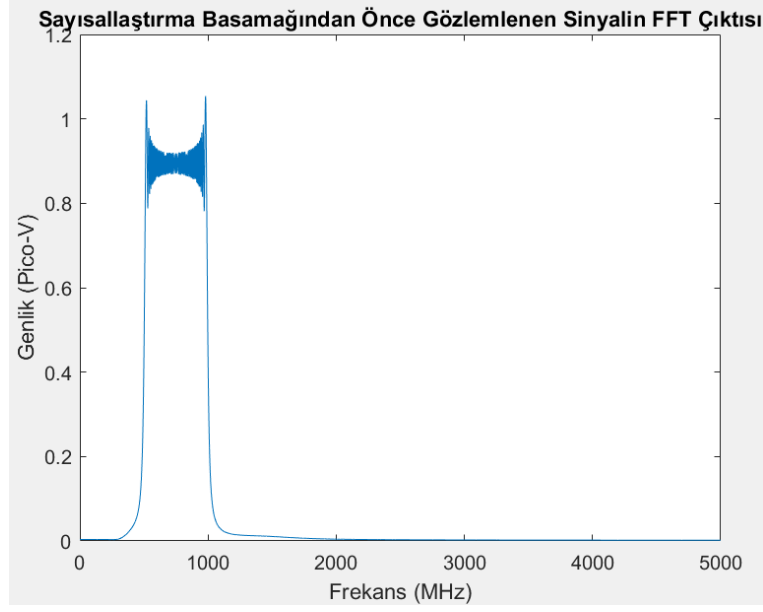


Şekil 15.64 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyal, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.65 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal

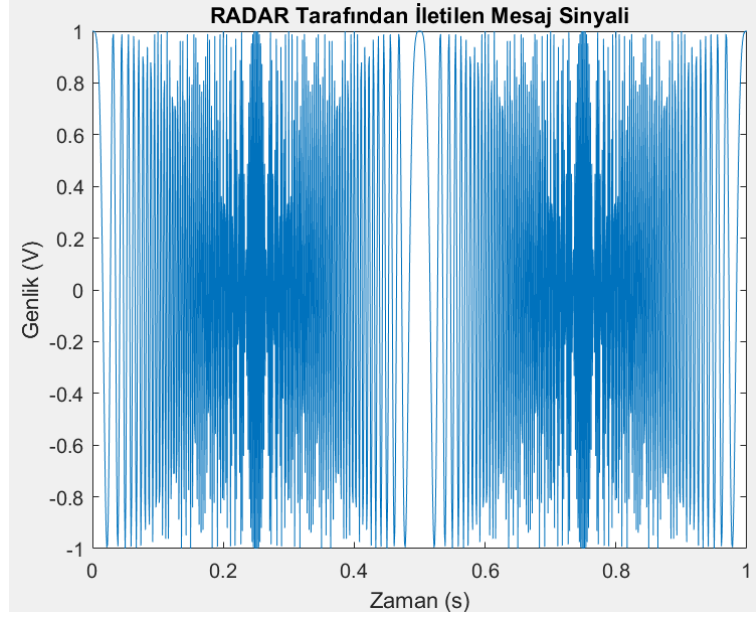


Şekil 15.66 Sayısal katmandan önce gözlemlenen sinyal FFT çıktısı

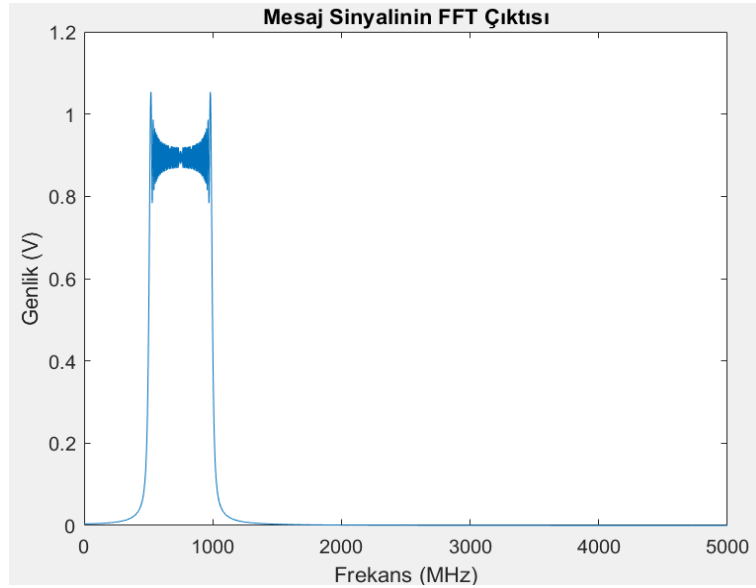
Almaçta kullanılan filtre, istenilen mesaj sinyalini filtreleyerek sayısal katmana iletmiştir.

15.5.2 Taramalı karıştırma

Taramalı (Sweep) karıştırma, bir sinyal karıştırıcısının tam gücünü bir frekanstan diğerine kaydırma işlemidir. Bu “tarama” hareketi, hepsi aynı anda olmasa da, birden fazla frekansı hızlı bir şekilde art arda karıştırır. Mesaj sinyali, bir önceki analizde kullanılan RADAR tipiyle özdeş, Karıştırıcı sistemine mesafesi aynı olacak şekilde (100km) ayarlanan RADAR tarafından iletilecektir. RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen karıştırıcı sinyali, Karıştırıcı sistem almaç tarafından analiz edilecektir. RADAR’lar tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

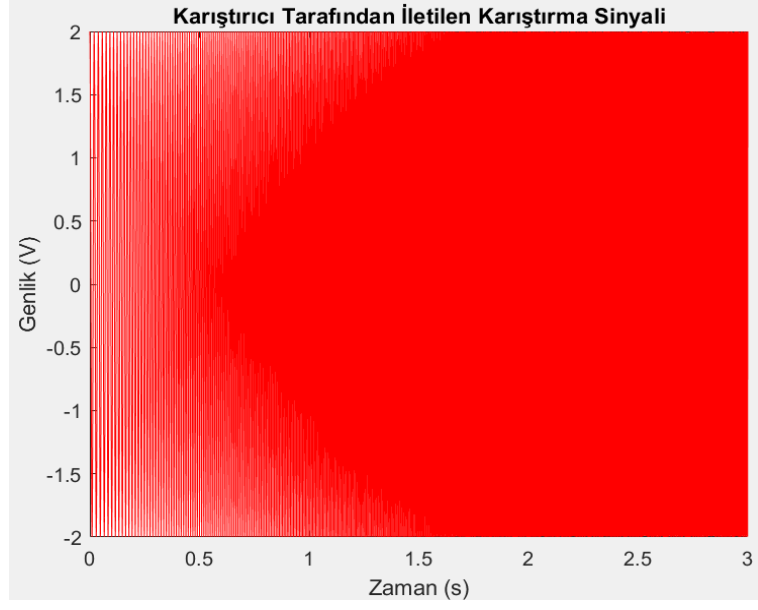


Şekil 15.67 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

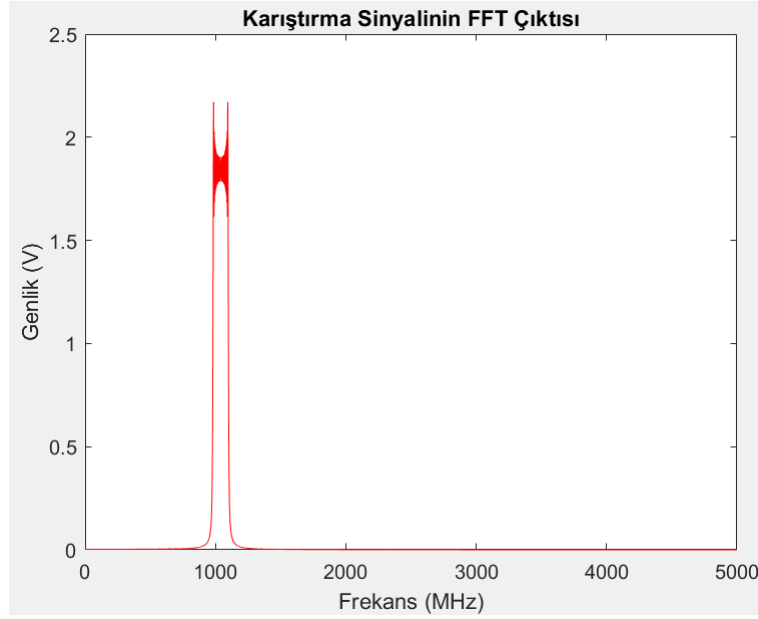


Şekil 15.68 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp almacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, taramalı karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin almacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;

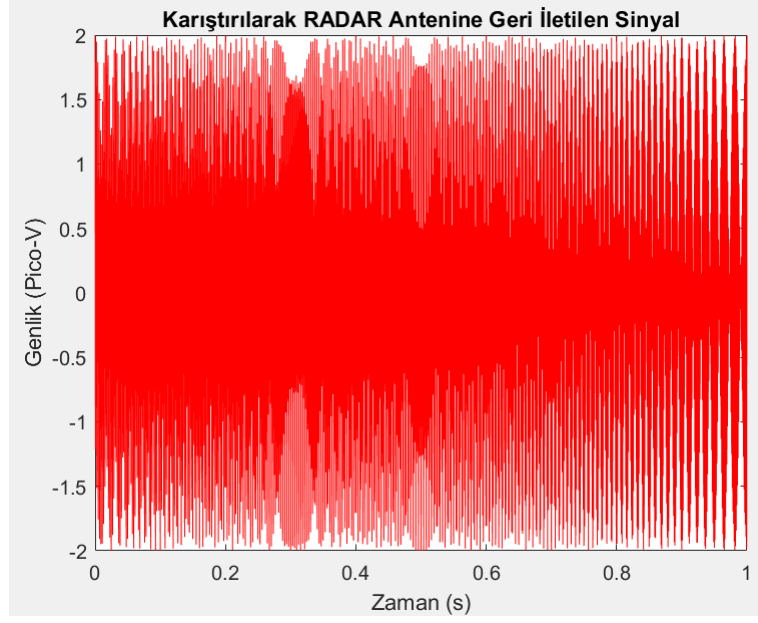


Şekil 15.69 Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali

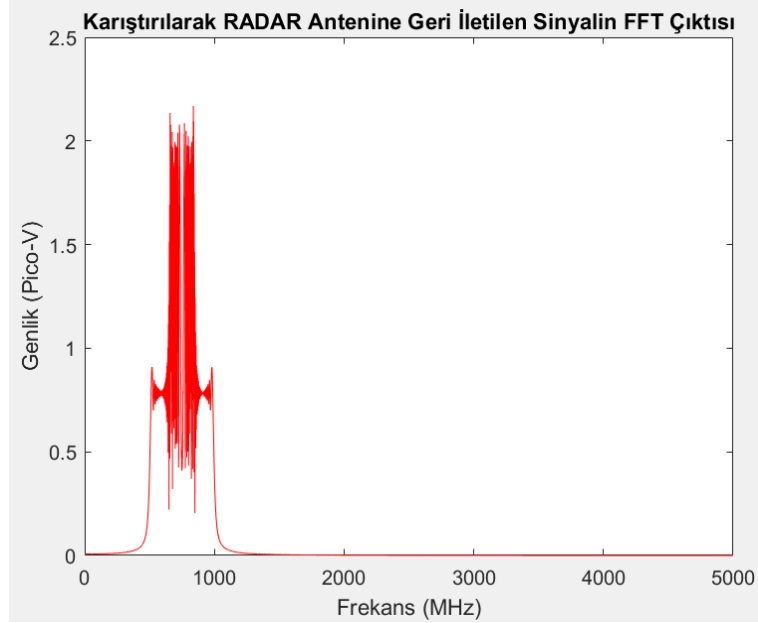


Şekil 15.70 Karıştırıcı Tarafından İletilen Taramalı Karıştırma Sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;

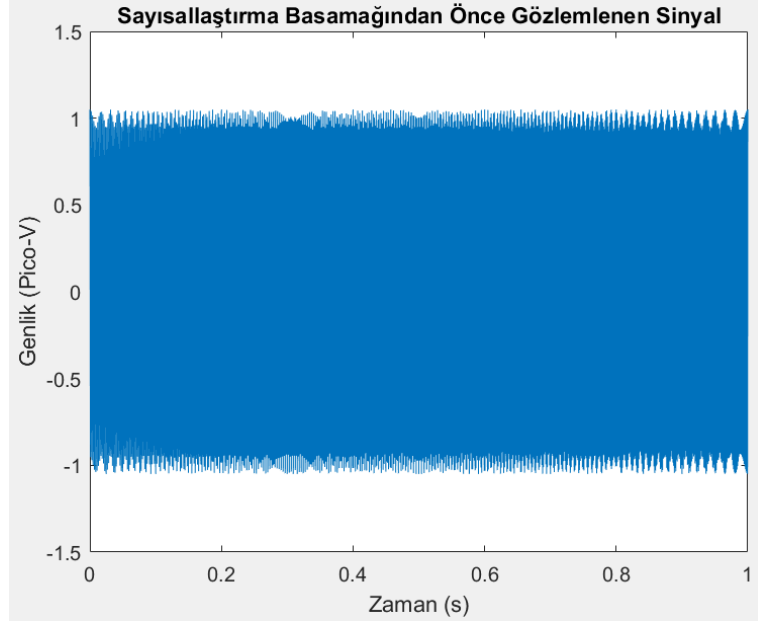


Şekil 15.71 Karıştırıcı tarafından iletilen taramalı karıştırma sinyali

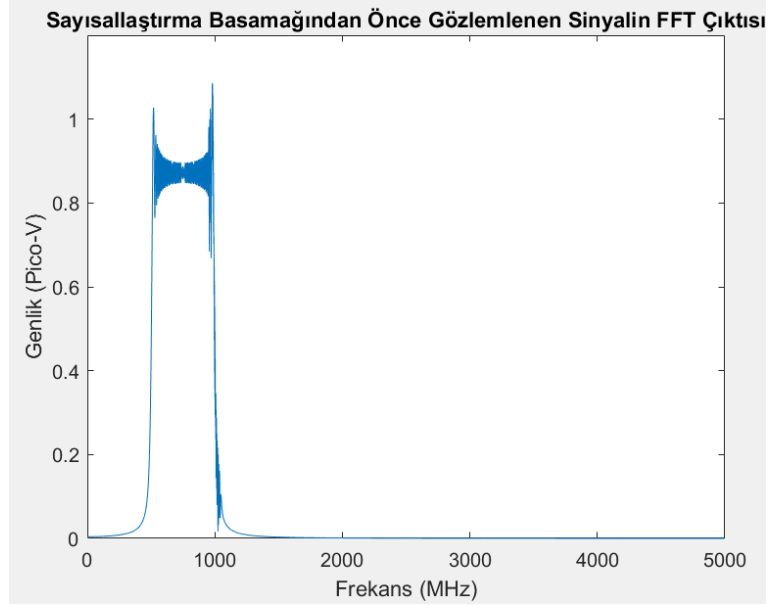


Şekil 15.72 Karıştırıcı tarafından iletilen taramalı karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.73 Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması



Şekil 15.74 Sayısal katmandan önce sinyalin filtreleme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

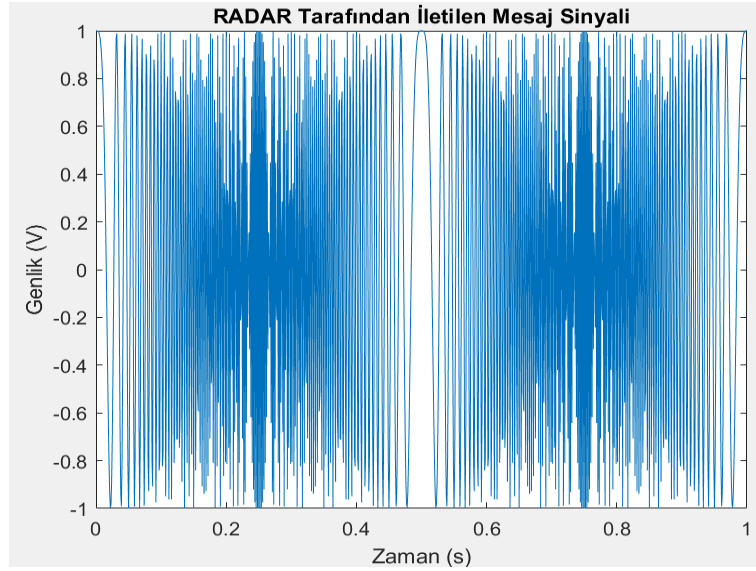
Taramalı karıştırma uygulanan sendelemeli sinyal ileten süperhet almaçta, ana mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansını analiz ederken genlik seviyesinde belirli bir azalış gözlemlenmiştir. Taramalı karıştırma'nın geniş bir çapta frekans spektrumunu meşgul

ediyor olması, sendelemeli sinyal ileten süperhet almaçta almancın filtrelendirme aşamalarını zorlaştırmaktadır. Bu zorluk, sayısal birime de yansıtacaktır. Yüksek kaliteli yükselteçler veya filtrelendirme elemanları kullanılmadan sayısal birime sinyal iletimi sağlanmamalıdır. Aksi takdirde mesaj sinyalinin taşıyıcı frekansı ıskalanabilmektedir.

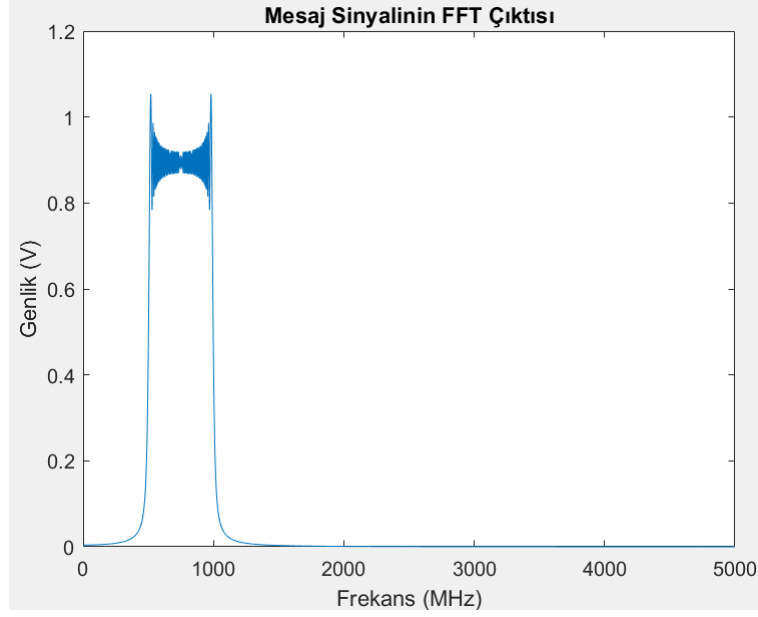
15.5.3 Yükseltilmiş gürültü karıştırması

Yükseltilmiş gürültü karıştırması, Karıştırıcı sistem almancının gürültü tabanını yükseltmeye yönelik bir karıştırma çalışmasıdır. Karıştırıcı sisteminin gürültü tabanı yükseldiği durumda, alınmak istenen mesaj sinyalinin genliği düşük olduğu takdirde, mesaj sinyali yükseltilmiş gürültü tabanının altında kalmaktadır. Bu nedenle, belirli genlik seviyesine ulaşamayan mesaj sinyali almaç tarafından okunamamaktadır. Karıştırma sinyali, RADAR sistemindeki süperhet almancın antenine iletilmiştir.

RADAR'lar tarafından iletilen mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

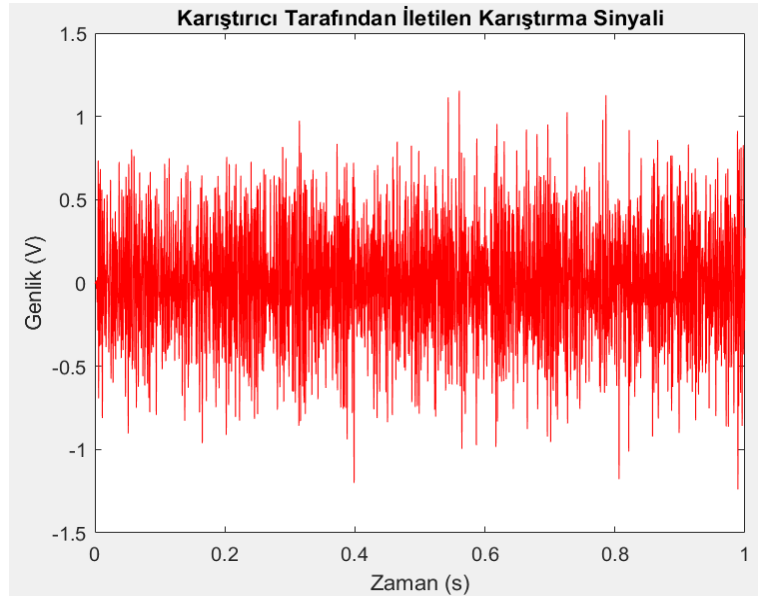


Şekil 15.75 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

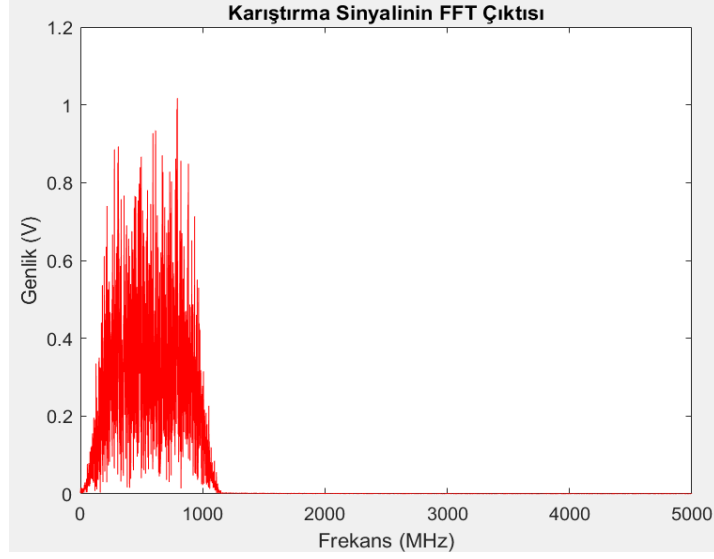


Şekil 15.76 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat elektronik harp alamacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, yükseltilmiş gürültü karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin alamacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;

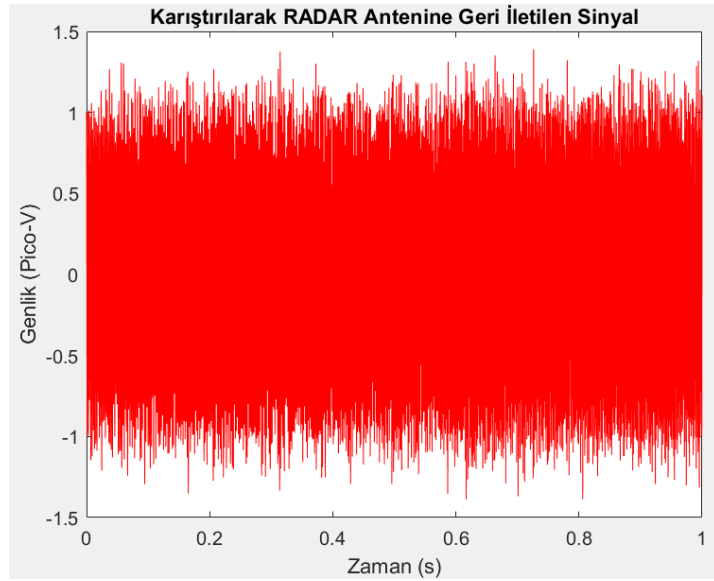


Şekil 15.77 Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali

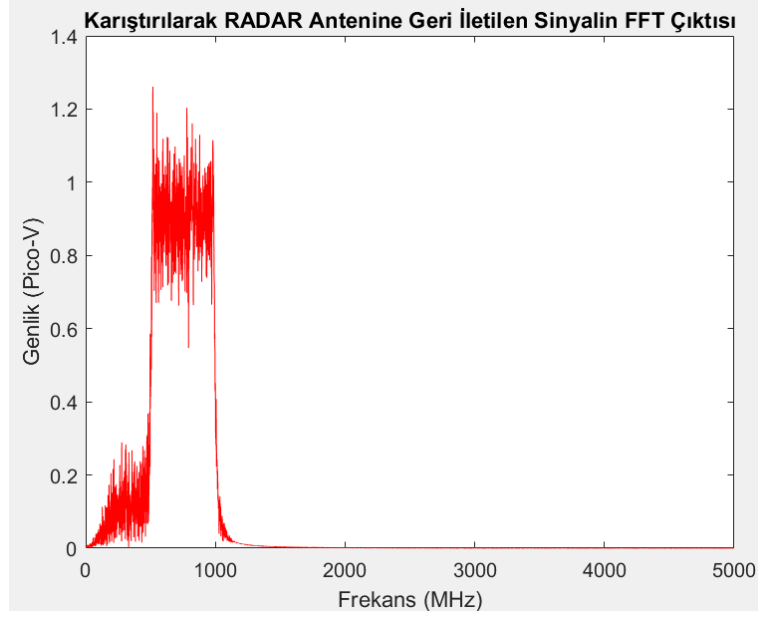


Şekil 15.78 Karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sistem almacının alıcı anteninde, belirli bir yol kaybıyla beraber, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen yükseltilmiş gürültü karıştırma sinyali toplanmaktadır. Toplanan sinyal, Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulacak ve sayısal katmanda analiz için iletilecektir. Karıştırıcı sisteminin anteninde toplanılan sinyal bütünlüğü, aşağıdaki gibidir;

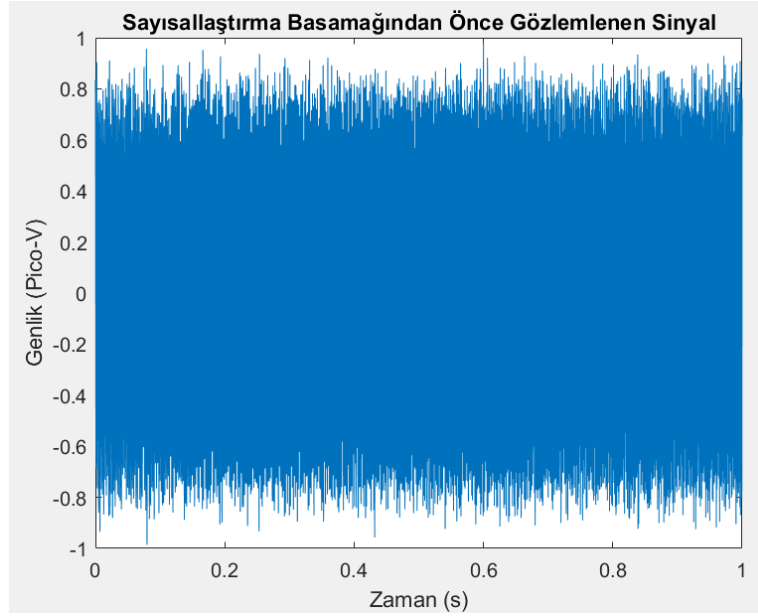


Şekil 15.79 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması

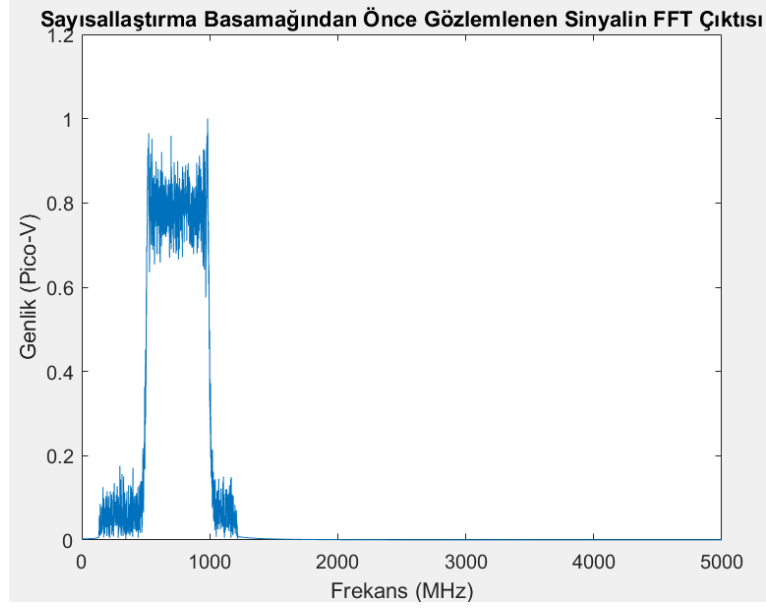


Şekil 15.80 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyalinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.81 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması



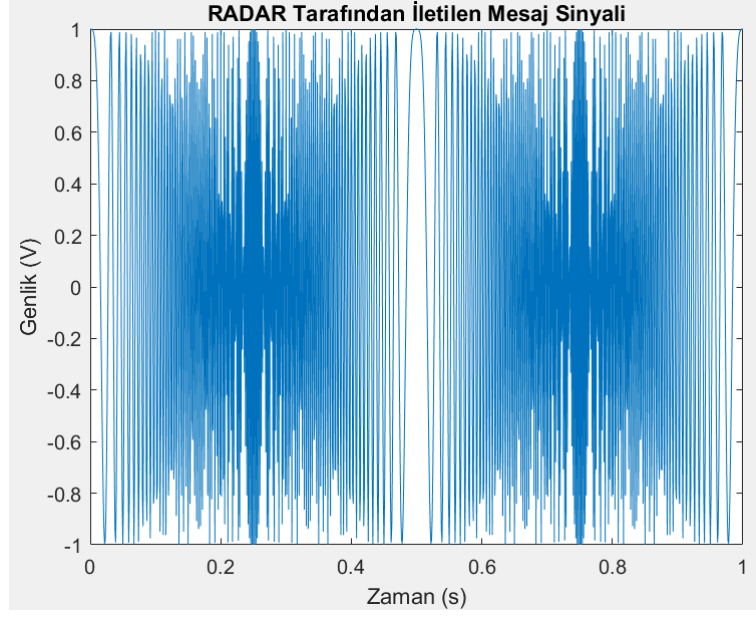
Şekil 15.82 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

Gürültü karıştırması ilave edildiği takdirde bant geçiren filtrenin mesaj sinyalini filtreleyebilme yeteneği daha zorlanmaktadır. Karıştırma sinyali, mesaj sinyaline ilave olarak ek gürültü tabanı eklemekle birlikte ölçümünü zorlaştırmaktadır.

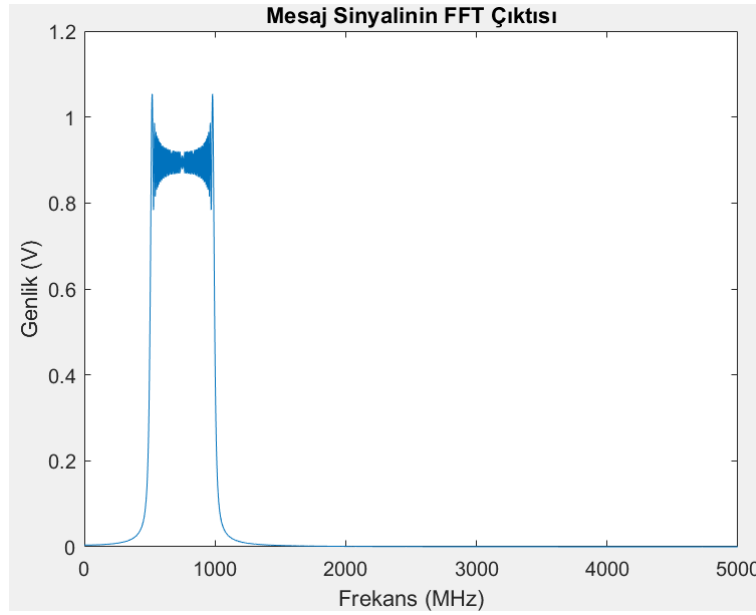
15.5.4 Baraj karıştırma

Baraj karıştırma senaryosu, çoklu frekans bantlarını gösterebilmek adına, taşıyıcı frekans karıştırmasından daha farklı olması gerekmiştir. Baraj karıştırma, çoklu frekans kanallarını eşit oranda karıştırabilmek adına, karıştırıcı sinyalin gücünü ilgilenilen frekans bantlarına eşit olarak dağıtmaktadır. Bu sebeple, frekans spektrumunda gözlemlenecek olan karıştırma sinyallerinin güç seviyeleri daha düşük olarak okunmuştur. Mesaj sinyali, özdeş, Karıştırıcı sistemine mesafesi aynı olacak şekilde (100km) ayarlanan RADAR'lar tarafından iletilecektir. RADAR'lar tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen karıştırıcı sinyali, Karıştırıcı sistem almacı tarafından analiz edilecektir.

RADAR'lar tarafından iletilen toplam mesaj sinyali, aşağıdaki gibidir;

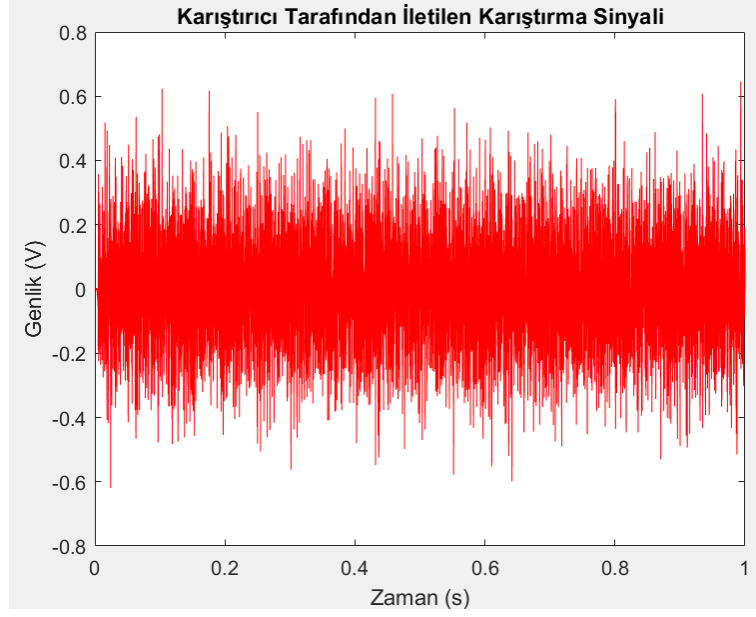


Şekil 15.83 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali

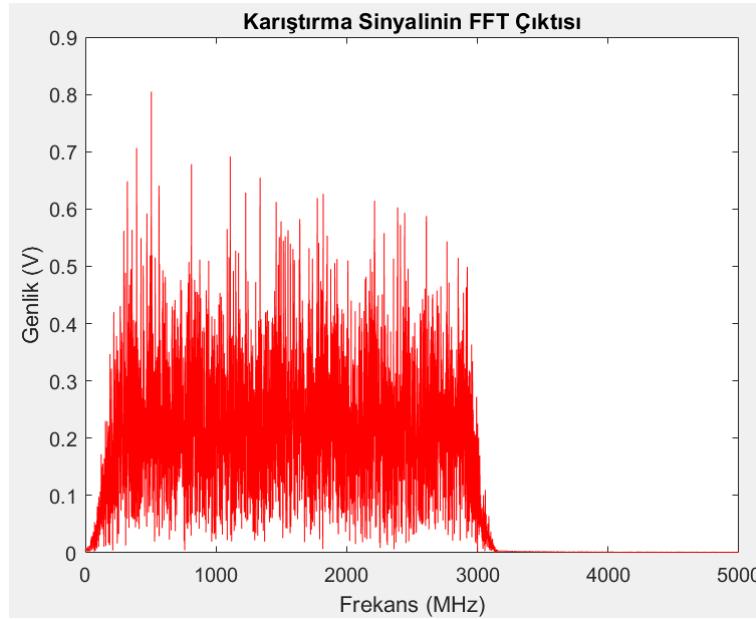


Şekil 15.84 RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali FFT çıktısı

Mesaj Sinyali, RADAR tarafından Karıştırıcı sisteminin almaç antenine doğru yönlendirilmiştir. Fakat, elektronik harp almacına RADAR ile eşit mesafe uzaklıkta bir karıştırıcı, baraj karıştırma tekniği uygulayarak Karıştırıcı sisteminin almacına bir karıştırma uygulamaktadır. Uygulanan karıştırma aşağıdaki gibidir;



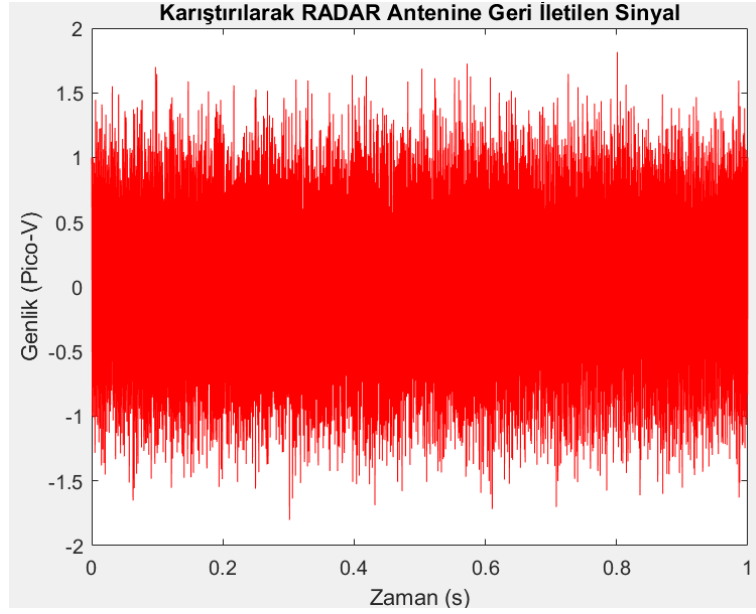
Şekil 15.85 Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali



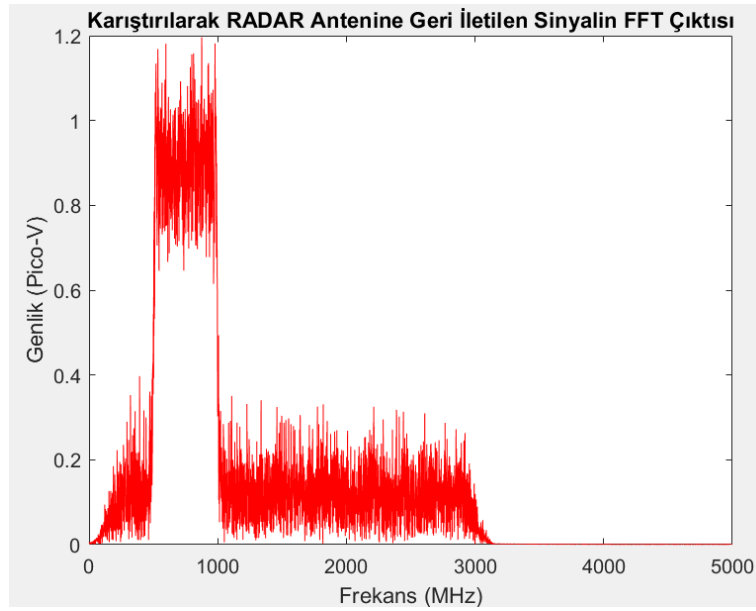
Şekil 15.86 Karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali FFT çıktısı

Karıştırıcı sistem almacının alıcı anteninde, belirli bir yol kaybıyla beraber, RADAR tarafından iletilen mesaj sinyali ve karıştırıcı tarafından iletilen baraj karıştırma sinyali toplanmaktadır. Toplanılan sinyal, Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulacak ve sayısal katmanda analiz için

iletilecektir. Karıştırıcı sisteminin anteninde toplanılan sinyal bütünlüğü, aşağıdaki gibidir;

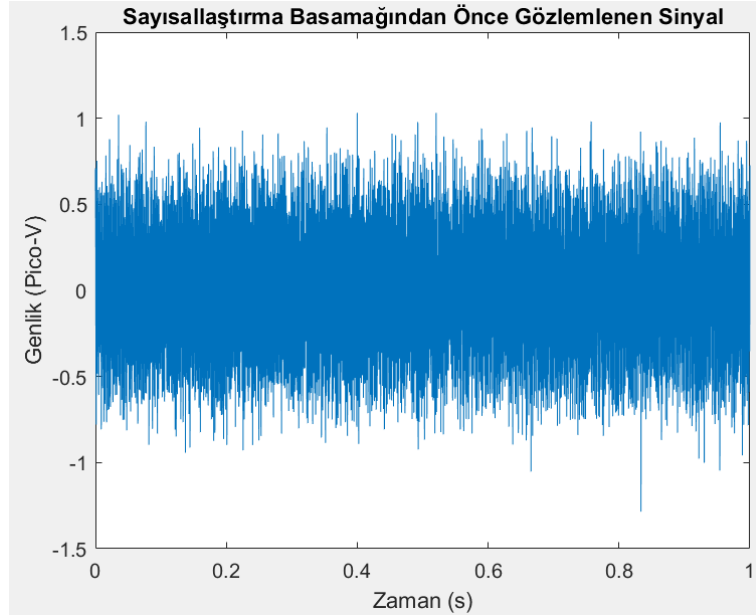


Şekil 15.87 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması

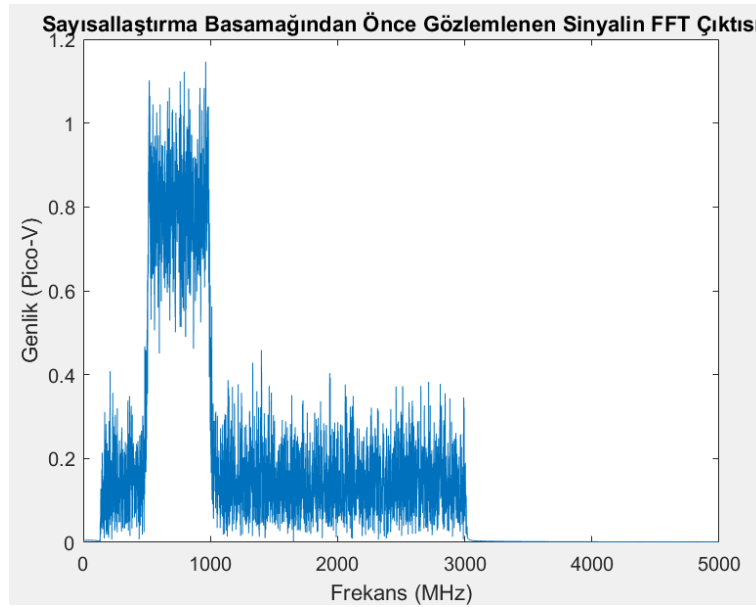


Şekil 15.88 Mesaj sinyali ve karıştırıcı sinyallerinin almaç anteninde toplanması FFT çıktısı

Karıştırıcı sisteminin almacında indirgenme, filtrelendirilme, yükseltme gibi aşamalara tabii tutulduktan sonra sinyal bütünlüğü, sayısal katmana yönlendirilir. Sayısal katmandan önce frekans spektrumunda gözlemlenen sinyaller, aşağıdaki gibidir;



Şekil 15.89 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması



Şekil 15.90 Sayısal katmandan önce sinyalin filtrelendirme ile ayrıştırılması FFT çıktısı

Baraj karıştırma, çoklu bantları karıştırmak adına her ne kadar pratik bir yöntem olsa da, yüksek genlikli RADAR mesaj sinyali ve yüksek seçiciliğe sahip bant geçiren filtrelerin kullanıldığı durumda, etkinliğini yitirebilmektedir. Baraj karıştırmanın etkisi, genlikler üzerinde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Baraj karıştırma, kullanıldığı elektronik harp ortamında mesaj sinyalinin genliğini almaç sistemi tarafından daha zor okunur hale getirmiştir.

15.5.5 LFM sinyal ileten Süperhet almaç karıştırmalara karşı performans tablosu

LFM sinyal ileten Süperhet almaçın kullanıldığı Karıştırıcı sisteminde, sayısallaştırma basamağının ardından elde edilen sayısal veri kullanıcı paneline iletilir. Sayısallaştırma basamağından önce okunacak olan JSR seviyesi kıyaslanmıştır, aşağıdaki gibidir;

Çizelge 15.3 LFM sinyal gönderen süperhet almaç karıştırma karşısında performans analizi

Sinyal Türü	Karıştırma Türü	JSR Oranı (dB)
LFM	Gürültü Karıştırma	8,66
LFM	DRFM Karıştırma	7,38
LFM	Sweep (Tarama) Karıştırma	7,58
LFM	Baraj Karıştırma	6,3

Gözlemlenen sonuçlar, karıştırma etkinliklerini daha belirgin bir şekilde ortaya koymaktadır. Elektronik harp ortamında, mesafe (R) değeri sıkça değişkendir. Türkiye komşu iller arası mesafe yaklaşık olarak 100km olduğu gerekçesiyle, başlangıç çalışması için 100km mesafe karıştırıcı ve RADAR sistemi arasına konmuştur. RADAR ve karıştırıcı, yolun yarısını kattettiği takdirde, 50km'lik mesafe kalmış olacaktır. Aynı zamanda, aradaki mesafe azaldıkça, karıştırma ve mesaj sinyali RADAR almaçında daha yüksek olarak okunacaktır. Fakat, karıştırma sistemleri, karşıt RADAR sistemlerine yaklaştıkça karıştırmanın etkinliği azalacak, JSR oranı gittikçe azalmaya başlayacaktır. Böylece, RADAR sistemi karşıt karıştırıcı sistemini daha rahat bir şekilde

gözlemleyebilecektir. Daha sonrasında 20km'lik bir mesafe incelenerek karıştırma sinyalinin mesaj sinyali karşısında daha yetersiz kaldığı gözlemlenerek karıştırmanın etkilerinin minimize edildiği fark edilecektir.

15.6 50km ve 20km Mesafede Sendelemeli, Titremeli ve LFM Sinyali İleten Süperhet Almaçların Karıştırma Karşısında Analizi

Mesafe değeri azaldığı takdirde, mesaj ve karıştırma sinyallerinin genliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. JSR oranı, RADAR ve karıştırıcı arasındaki mesafeyle beraber azalmaktadır. Karıştırıcının etkinliği, mesaj sinyalinin genliğine kıyasla, aradaki mesafe azaldıkça azalmaktadır.

Çizelge 15.4 50km mesafe ile süperhet almaç karıştırma sonuçları

Sinyal Türü	Karıştırma Türü	JSR Oranı (dB)
Titremeli	Gürültü Karıştırma	1,32
Titremeli	DRFM Karıştırma	2,18
Titremeli	Sweep (Tarama) Karıştırma	3,03
Titremeli	Baraj Karıştırma	1,18
Sendelemeli	Gürültü Karıştırma	1,51
Sendelemeli	DRFM Karıştırma	2,81
Sendelemeli	Sweep (Tarama) Karıştırma	3,79
Sendelemeli	Baraj Karıştırma	1,87
LFM	Gürültü Karıştırma	8,29
LFM	DRFM Karıştırma	7,18
LFM	Sweep (Tarama) Karıştırma	7,28
LFM	Baraj Karıştırma	5,47

Elektronik harp ortamında kullanılan her savaş uçağı, karşıt RADAR sistemine belirli bir mesafeden fazla yaklaşması durumunda, karıştırma etkinliği düşük seviyelere inmektedir. Bu mesafe, savaş uçağı teknolojisi geliştikçe düşmektedir. RADAR ekranında belirgin olarak savaş uçağının yaptığı yayın ortaya çıkmaktadır. 20km mesafede gözlemlenen JSR oranları aşağıdaki gibidir;

Çizelge 15.5 20km mesafe ile süperhet almaç karıştırma sonuçları

Sinyal Türü	Karıştırma Türü	JSR Oranı (dB)
Titremeli	Gürültü Karıştırma	1,12
Titremeli	DRFM Karıştırma	1,79
Titremeli	Sweep (Tarama) Karıştırma	2,63
Titremeli	Baraj Karıştırma	0,67
Sendelemeli	Gürültü Karıştırma	1,31
Sendelemeli	DRFM Karıştırma	2,34
Sendelemeli	Sweep (Tarama) Karıştırma	3,19
Sendelemeli	Baraj Karıştırma	1,47
LFM	Gürültü Karıştırma	7,89
LFM	DRFM Karıştırma	6,81
LFM	Sweep (Tarama) Karıştırma	7,03
LFM	Baraj Karıştırma	5,19

RADAR ve karıştırıcı kullanan savaş uçağının bulunduğu bir senaryoda, bir diğer önemli bir husus, RCS (RADAR Cross Section, RADAR Kesit Alanı) değeridir. RADAR kesit alanı, RADAR ekranında savaş uçağının ne kadar kolay tespit edilip edilemeyeceğinin ölçütüdür. Daha yüksek bir RCS değeri, daha kolay tespit edilebilen bir savaş uçağı anlamına gelmektedir (Zeeshan vd. 2009).

Yapılan çalışmalar sonucu, savaş uçaklarının RCS değerleri $100m^2$ 'den başlamakla birlikte, 25, 10, $0,5m^2$ gibi değerlere ulaşabilmektedir (Zeeshan vd. 2009). Yapılan çalışmada, RCS değeri, elektronik harp ortamında kullanılan nakliye uçakları düşünülerek, $25m^2$ olarak kabul edilmiştir. RCS değerinin etkinliğini gözlemleyebilmek adına, karıştırıcı savaş uçağının RCS değeri $10m^2$ 'ye düşürülmüştür. RCS değerinin düşürülmesi doğrultusunda, savaş uçağından RADAR'a yansıyan sinyal daha okunması zor, zayıf olarak RADAR'a iletilecektir.

15.7 RCS Değeri Düşürüldüğü Zaman Gerçekleşen Karıştırma Performans Analizi

RCS değeri düşürüldüğü takdirde JSR oranının yükselmesi, karıştırma etkinliğinin artması beklenmektedir. RADAR tarafından tespit edilmesi istenilen hedef, karıştırma stratejisini daha etkin olarak kullanabilecektir. Yapılan çalışmada, 10m² RCS için elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Çizelge 15.6 10m² RCS senaryosunda savaş uçağında karşı süperhet almaç çeşitli karıştırma performans analizi

Sinyal Türü	Karıştırma Türü	JSR Oranı (dB)
Titremeli	Gürültü Karıştırma	1,92
Titremeli	DRFM Karıştırma	2,79
Titremeli	Sweep (Tarama) Karıştırma	3,83
Titremeli	Baraj Karıştırma	1,87
Sendelemeli	Gürültü Karıştırma	2,33
Sendelemeli	DRFM Karıştırma	3,74
Sendelemeli	Sweep (Tarama) Karıştırma	4,69
Sendelemeli	Baraj Karıştırma	2,97
LFM	Gürültü Karıştırma	9,89
LFM	DRFM Karıştırma	8,21
LFM	Sweep (Tarama) Karıştırma	8,03
LFM	Baraj Karıştırma	7,09

Başlangıçta kurulan 100km mesafe ve 25m² RCS değeri olan savaş uçağı senaryosuna kıyasla, 100km mesafe ve 10m² RCS değeri olan savaş uçağı senaryosunda, JSR değeri daha düşük olacak şekilde gözlemlenmiştir. Savaş uçağı, RADAR'ın taramasına karşı kendini daha iyi savunmuştur.

16. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Elektronik harp ortamında kullanılan farklı almaç yapıları ve değişken özellikleri tezi, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarının kullanım alanlarını detaylandıran, sistem tasarım örneklerini sunan, almaçların birbirlerine göre avantajlarını ve dezavantajlarını sunan, sistemsel analizlerini tüm detaylarıyla kapsamlı bir şekilde ele alan, elektronik harp ortamında kullanılan Elektronik Harp Almaçlarında gözlemlenen sinyal türlerinin benzetimini sunan ve almaçların performans analizini gerçekleştiren bir mühendislik tezidir.

Bu tez kapsamında, sayısal almaçların teknolojik olarak önlerinin açık olduğu, fakat uygulama olarak elektronik harp gelişmelerinin sayısal sistemlerle olan uyumluluğunun artması gerektiği kaydedilmiştir. Süperhet almaçlarının, her ne kadar maliyet olarak yüksek ve fiziksel yer bakımından alan kaplasalar da, RF sinyallerin yoğun olduğu ortamlarda gürbüz sinyal analizi gerçekleştirebildikleri ortaya koyulmuştur. Detaylı frekans bilgisinin çıkarılmak istendiği ortamlarda, süperhet almaçların gerekliliği ve tasarımsal esnekliklerinin ön plana çıktığı kaydedilmiştir. Kristal video almaçlar, darbe sinyallerinin karakteristik parametrelerini çıkarmakta ön plana çıkmaktadırlar. Darbe yükseliş zamanı, bitiş zamanı ve darbe genişliği gibi parametrelerin çıkarımı için kristal video almaçlara ihtiyaç vardır. Elektronik harp sistemleri, takip ve tarama işlemleri için darbe türü sinyal yayınları kullandıkları gerekçesiyle, tehdit altında olan elektronik harp sistem almaçlarının darbe parametrelerini çıkarmaları önemlidir. Savaş uçaklarında bulunan RWR almaç sistemleri gibi elektronik harp sistemleri, birden fazla almaç türünün çaprazlanmasıyla oluşan almaç sistemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaç, birden fazla almaç kabiliyetinin birleştirilmesiyle giderilmektedir.

Tez kapsamında, IFM almaçlarının maliyet olarak süperhet almaçlara göre daha uygun oldukları, fakat RF sinyal ortamının ve sinyal karmaşıklığının yoğun olduğu ortamlarda tasarımsal olarak yetersiz kaldıkları kaydedilmiştir. Bu sebeple, RF sinyallerinin frekans bilgisinin işlenmesi ve geçmiş elektronik harp çalışmalarında elde edilen istihbari bilgilerle eşleştirilmeleri konusunda süperhet almaç türlerinin tercih edilmesi daha uygun bulunmuştur.

Bragg cell, homodin ve kompresif almaç gibi almaç modellerinin, elektronik harp sistemlerinde sıkça tercih edilmeyen almaçlar olarak elektronik harp literatüründe kaydedilmektedir. Süperhet almaçlarının tasarımsal esneklikleri ve sayısal almaçların elektronik harp literatürü genişledikçe ön plana çıkıyor olmaları ve kristal video almaçlarının detaylı darbe sinyal parametrelerini çıkarabiliyor olmaları, almaç tasarımı konusunda diğer tasarım önerilerinin gelişimini arka planda bırakmıştır. Uyarlama ve uygulamada pratiklik ve basitlik, elektronik harp sinyal analizinin kapsamlı ve hızlı bir şekilde gerçekleştiriliyor olması, çok kanallı süperhet almaçlar, kristal video almaçları ve sayısal sinyal işleme bilgisayar işlemcilerinin kabiliyetlerinin genişletilmesine sebebiyet vermiştir.

Tez kapsamında elde edilen sonuçlar, literatür taraması yapılan kaynakla uyumludur. Bahsedilen süperhet almaçların yapıları ve analizleri kapsamında, süperhet almaçlarının ideal hassasiyet değerlerine, tasarımsal olarak esnek olduklarına ve RF sinyallerinin frekans bilgilerinin çekilmesi konusunda başarılı olduklarına dikkat çekilmiştir. Süperhet almaçlarının frekans analizinin RWR gibi karmaşık elektronik harp ortamında kullanılması durumunda IFM almaçlar gibi diğer almaçlara kıyasla avantaj sağlayacağı belirtilmiştir. Kristal video almaçlarının darbe türü sinyallerini sağlarken gösterdiği hassasiyet ve bu hassasiyetin gerekliliği, elektronik harp literatür kaynakları tarafınca ilişkilendirilerek doğru bulunmuştur (Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Kristal video almaçlarıyla beraber kullanılan süperhet almaçlarının ortak kullanımı, literatür taramasında faydalanılan kaynaklar sonucunda da uygun bulunmuştur (Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Sayısal almaç teknolojisinin önde gelen bir almaç geliştirme yöntemi olduğu, fakat bu almaç türlerinin elektronik harp saha uygulamalarının genişletmesi için sayısal almaçların RF sistemlere olan entegrasyonu, bilgisayar ve sayısal sinyal işlemci yeteneklerinin artırılması gerekliliğine vurgu yapılmıştır. Süperhet ve kristal video almaçlardan oluşan melez almaç sisteminin gelişmekte olan sayısal katman aşamasının sinyal işleme kabiliyet ve hızıyla beraber arzulanan sayısal almaçların RF sistemlere uyarlanması gereklidir. Her ne kadar ideal, tamamiyle kusursuz çalışan sayısal bir almaç elektronik harp literatüründe arzulansa da, bu durum gerçekleşmemektedir. Sayısal almaç sistemlerinin sunduğu geniş kullanım ve analiz alanları, elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaç sistemleri için yapılacak

gelişmelere öncülük etmektedir. Sayısal almaçların mantık aşamasına yakınlaşan almaç tasarımları, elektronik harp sahasında uygulanabildiği takdirde kullanıcıya yüksek bir analiz doğruluğu, verimliliği ve hızı kazandırmaktadır. Sunulan bu avantajlar ve kazanımlar, doğrulanmıştır (Wiley 2006, Poisel 2014, Pakfiliz 2021).

Tez çalışması kapsamında, farklı sinyal türleriyle tarama yapan süperhet almaçlarının MATLAB ortamında farklı karıştırma çeşitlerine karşı performans analizi gerçekleştirilmiştir. Yapısal esnekliklerinden dolayı, süperhet almaçlar, elektronik harp karıştırıcıları tarafından sık tercih edilen taşıyıcı frekans karıştırması dahil, karıştırma türlerine karşı belirli bir dayanıklılık performansı gösterebilen almaçlar olarak saptanmıştır.

Taşıyıcı frekans karıştırmasına karşı, uyumlu (Matched) filtre ideal bir yaklaşım olarak tanımlanmaktadır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Kauppi ve Martikainen 2007, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Sinyal karıştırması almaçta bulunan detektörlerin işlevlerini yerine getirmesinde güçlük çıkartmaktadır. Belirli bir filtrelendirme işleminin ardından, sıkça taraması yapılan frekans bandını kapsayan almaç frekans aralıklarında daha yüksek hassasiyetli detektörler tercih edilebilir. Detektörlerle beraber yüksek hızda frekans ekseninde analiz gerçekleştirebilen DSP birimleri de frekans karıştırmasına karşı almaç tarafında önemli bir koruma sağlayabilecektir (Graham 2010, Qiang ve Gu 2011, Song vd. 2012, Liu ve Zhang 2019, Zhang vd. 2023).

Süperhet almaçlar, yapılarında barındırdıkları yüksek seçicili filtreler ve yüksek kalitede kullanılan yükselteçleri sayesinde karıştırma çeşitlerine karşı daha etkin bir performans sergilemiştir. Çoklu IF yapısı sayesinde süperhet almaç, literatürde de vurgulandığı üzere, karıştırma çeşitleri karşısında RADAR'lar tarafından tercih edilen modern almaç yapısıdır (Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Kauppi ve Martikainen 2007, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021). Süperhet almaç için kullanılan sendelemeli sinyal modeli, çeşitli sinyal karışımlarına karşı en etkin olarak saptanmıştır. Sinyal işleme metodundaki karmaşıklık, sinyal karışımlarına karşı dayanıklılığı da beraberinde getirmiştir. Süperhet almaçlar, hassas darbe parametre ölçümü gerektiren melez elektronik harp yapılarında, karıştırmaya karşı esnek tasarım yapısı sayesinde tercih edilmesi uygun bulunmuştur

(Skolnik 1981, Adamy 2000, Adamy 2004, Kauppi ve Martikainen 2007, Mahafza 2013, Poisel 2014, Pakfiliz 2021).

Karıştırıcı ve RADAR arasındaki mesafe azaldıkça, RADAR karıştırıcı sistemi daha rahat algılamaya başlayacaktır. Bunun sebebi, karıştırıcı sistem RADAR'a yaklaştığı takdirde, JSR oranı azalışa geçmektedir. Bu sebeplerden ötürü karıştırıcılar, tasarım sürecinde kararlaştırılan mesafeden fazla RADAR'lara yaklaşmamaktadırlar. Yeni nesil savaş uçaklarında, RCS değeri gittikçe düşmektedir. Bu durum, savaş uçaklarının RADAR ekranında tespit edilebilme oranını düşürmektedir. Bu durum, yapılan benzetim çalışmasında da doğrulanmıştır. Bu sebepten ötürü almaçlar, tasarımsal olarak daha karmaşık bir yapıya bürünmek durumundadır (Graham 2010, Qiang ve Gu 2011, Song vd. 2012, Liu ve Zhang 2019, Zhang vd. 2023).

MATLAB ortamında gerçekleştirilen benzetimler, yazılım tabanlı olmakla birlikte gerçek almaç veya karıştırıcı verilerini yansıtamayabilmektedir. İşlenen mesaj ve karıştırma sinyalleri ve sinyallerin uğradığı almaç indirgeme işlemleri, elektronik harp literatürü tarafından sunulan bilgiye dayanılarak gerçekleştirilmiştir. Askeri harp ortamında kullanılan almaç ve karıştırıcı sistemlerine ulaşmanın güçlüğü göz önünde tutulduğu takdirde, süperhet almaçların genel anlamda türlü karıştırma metotlarına karşı nasıl bir performans sergileyebileceği MATLAB benzetimleri aracılığıyla literatüre sunulmuştur.

Bu tez kapsamında, bahsedilen almaç türleri fiziksel olarak analiz altına sunulamamıştır. Elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaçlarının içerdiği askeri bilgiler, kamuoyuyla paylaşılmamaktadır. Almaç komponentleri milyon dolar seviyesinde maliyetlere sahiptir ve bu almaçlara erişim oldukça güçtür. Elektronik harp ortamında kullanılan almaçların sunduğu çıktılar, askeri bilgi seviyesinde olmakla birlikte hassas bilgi içeriğinin kamuoyuyla paylaşılmamaktadır. Tez kapsamında, elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaçlarının analizi benzetimler, sistem modellemeleri, sinyal gösterimleri ve teorik bilgilerin genişletilerek elektronik harp ortamındaki uygulama örneklerine yer verilerek gerçekleştirilmiştir. Elektronik harp ortamında kullanılan RADAR almaçlarının kullanım senaryolarına göre ve özelliklerine göre detaylı çalışmaları sunulurken, elektronik harp ve RADAR almaçları literatürüne katkı sunulmuştur.

KAYNAKLAR

- Adamy, D.L. 2000. Ew 101: A First Course in Electronic Warfare Artech House Publishers, 308 p., Exeter, United Kingdom.
- Adamy, D.L. 2002. Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation, Artech House Radar Library, 248 p., Boston.
- Adamy, D.L. 2004. Ew 102: A Second Course in Electronic Warfare. Artech House Publishers, 274 p., Boston, London.
- Berger, S. 2003. Digital radio frequency memory linear range gate stealer spectrum. Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on, 39; 725-735.
- Berger, S.D. 2001. The Spectrum of a Digital Radio Frequency Memory Linear Range Gate Stealer Electronic Attack Signal. Proceedings of the 2001 IEEE Radar Conference. 1-3 May 2001 (27-30); Atlanta/Georgia.
- Berger, S.D. and Meer, D.E. 1990. An Expression for the Frequency Spectrum of a Digital Radio Frequency Memory Signal. Proceedings of the IEEE 1990 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 1990. 21-25 May 1990 (90-93); Dayton, OH/USA.
- Breuer, K.D., Levy, J.S. and Paczkowski, H.C. 1989. The Compressive Receiver: A Versatile Tool for EW Systems. Microwave Journal, 10; 81-99.
- Dinç, V. 2010. Elektronik harp teknikleri. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Ankara.
- Ghani, K.A., Dimiyati, K., Sha'ameri, A.Z. and Daud, N.G.N. 2016. Statistical Modelling for Missing and Spurious Pulses in Pulse Repetition Interval (PRI) Analysis. Defence S and T Technical Bulletin, 9(1); 18-27.
- Graham, A. 2010. Radar and Radar Jamming. In: Communications, Radar and Electronic Warfare. John Wiley & Sons, Inc., 101-133. doi: 10.1002/9780470977170.ch7.
- Güvenç, M.M. 2002. Uçaklardaki darbeli doppler radarlar için elektronik karıştırmanın algılama menziline etkisi. Yüksek Lisans Tezi. ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Harris, F.J. 1978. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. Proceedings of the 1978 IEEE First Working Conference on Current Measurement. Vol. 66, No. 1, 11-13 January 1978 (51-83); Newark, Delaware.
- Jackson, L.B. 1996. Digital Filters and Signal Processing, 3e - with MATLAB Exercises. Third Edition, Springer Science & Business Media, LLC, 502 p., New York/USA.

- Kauppi, J-P. and Martikainen, K.S. 2007. An Efficient Set of Features for Pulse Repetition Interval Modulation Recognition. 2007 IET International Conference on Radar Systems. 15-18 October 2007 (1-5); Edinburgh/UK.
- Kural, F. and Özkazanç, Y. 2004. A Method For Detecting RGPO/VGPO Jamming. IEEE 12th Signal Processing and Communications Applications Conference. 28-30 April 2004 (237-240); Kuşadası/Turkey.
- Kwak, C.M. 2009. Application of DRFM in ECM for pulse type radar. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2009 (IRMMW-THz 2009). 34th International Conference on 21-25 Sept. 2009 (1-2); Busan/Korea.
- Levanon, N. and Mozeson, E. 2004. Radar Signals. John Wiley & Sons, Inc., 412 p., New Jersey/USA.
- Li, K.H. and Milstein, L.D. 1991. On the Use of a Compressive Receiver for Signal Detection. IEEE Transactions on Communications, 39(4); 557-569.
- Liu, Q. and Zhang, W. 2019. Deep learning and recognition of radar jamming based on CNN. 2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID). 14-15 Dec 2019 (208-212); Hangzhou/China.
- Mahafza, B.R. 2013. Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. Third Edition, deciBel Research Inc. 374 p., Huntsville, Alabama, USA.
- Otenkaya, Ö.B. and Pakfiliz, A.G. 2023. Increasing the radar cross section using phase array antenna in the body structure of miniature air-launched decoy platforms. Review of Computer Engineering Research, 10(1); 1-15.
- Pakfiliz, A.G. 2021. Elektronik Harp. Palme Yayınevi, 288 s., Ankara.
- Poisel, R.A. 2002. Introduction to Communications Electronic Warfare Systems. Norwood, MA: Artech House, 555 p., Boston, London.
- Poisel, R.A. 2014. Electronic Warfare Receivers and Receiving Systems. Artec House, 833 p., Boston.
- Pring, P.C.J., James, G.E., Hayes, D. and White, M.P. 1994. The Phase Performance Of Digital Radio Frequency Memories (DRFMs). 1994 Second International Conference Advanced A-D and D-A Conversion Techniques and their Applications. 6-8 Jul 1993 (18-23); Cambridge/U.K.
- Qiang, W. and Gu Z. 2011. The application of jamming analyzing technique in the radar system. Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar. 24-27 Oct 2011 (1063-1066); Chengdu/China.
- Schleher, D.C. 1993. Introduction to Electronic Warfare. Artec House Publishers, Norwood, 109-183.

- Schleher, D.C. 1999a. *Electronic Warfare in the Information Age*. Artech House Publishers, 614 p., Boston, London.
- Schleher, D.C. 1999b. *Electronic Warfare in the Information Age*. Artech House Radar Library, 605 p., Boston.
- Skolnik, M.I. 1981. *Skolnik, Introduction to Radar Systems*. Second Edition, McGraw-Hill International Edition, 581 p., Singapore.
- Snelling, W.E. and Geraniotis, E. 1994. Analysis of Compressive Receivers for the Optimal Interception of Frequency-Hopped Waveforms. *IEEE Transactions on Communications*, 42(1); 127-139.
- Song, X., Willett, P. and Zhou, S. 2012. Jammer detection and estimation with MIMO radar. 2012 Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR). 04-07 Nov 2012 (1312-1316); Pacific Grove, CA/USA.
- Tsui, J. 1981. Tangential Sensitivity of EW Receivers. *Microwave Journal*, 24; 99-102.
- Van Brunt, L.B. 1978. *Applied ECM*. Volume 1, EW Engineering, Inc., 973 p., Dunn Loring, Va.
- Van Brunt, L.B. 1982. *Applied ECM*. Volume 2, EW Engineering, Inc., 661 p., Dunn Loring, Va.
- Wiley, R.G. 2006. *ELINT, The Interception and Analysis of Radar Signals*. Artech House Radar Library, 478 p., Boston.
- Zeeshan, Q., Yunfeng, D., Kamran, A., Rafique, A.F. and Nisar, K. 2009. Stealth Considerations for Aerodynamic Design. *International Journal of Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing*, 19(1); 8-16.
- Zhang, C., Wang, L., Jiang, R., Hu, J. and Xu, S. 2023. Radar Jamming Decision-Making in Cognitive Electronic Warfare: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 23(11); 11383-11403.

EK 1 İNGİLİZCEDEN TÜRKÇEYE YAPILAN ÇEVİRİLER

Elektronik harp literatüründe, Türkçeye kazandırılmış terimler mevcuttur. Türkçeye kazandırılmış terimler kadar kazandırılmayan terimler de mevcuttur. Bu terimlere karşı, dil tutarlılığı açısından bazı çeviri önerileri oluşturulmuştur. Bu öneriler çerçevesinde, elektronik harp terimler tercüme çalışması yapılmıştır.

ADC	Analogdan Sayısala Çevirici
AFC	Otomatik Frekans Kontrol
Baseband	Temel Bant
Chirp	Frekanslı Gittikçe Artan ya da Azalan Sinyal, Ötümlü Sinyal
Chopping Signal	Kesici Sinyal
Clutter	Parazit Yankı
Coherence	Tutarlılık
Coherent On Receive	Alış Anında Tutarlı
Coincident Pulse	Denk Gelen Darbe
Continuous Wave	Sürekli Dalga
Coupling	Eşleme
Darbe Compression	Darbe Sıkıştırma
Delta Range	Mesafe Çözünürlüğü
Difference Frequency	Fark Frekansı
Direct Digital Synthesis	Doğrudan Sinyal Sentez
Directive Antenna	Yönlendirilmiş Anten
Dispersive Delay Line	Dağıtıcı Gecikme Hattı
Doppler Ambiguity	Doppler Belirsizliği
DSP	Sayısal Sinyal İşleme
Duty Ratio	Görev Döngüsü
Dynamic Range	Dinamik Erim
EMI	Elektromanyetik Girişim
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
Finite Duration	Sınırlı Süreli
Frequency Modulated Continuous Wave	Frekans Modüleli Sürekli Dalga
Frequency Offset	Frekans Ofseti
Gain Limited	Kazanç Sınırlı
IF	Ara Frekans
Impulse	Dürtü
Intermodulation Products	Modülasyon Arası Yan Ürünler
Jitter	Titremeli
LTI	Lineer Zamandan Bağımsız
Matched Filter	Uyumlu Filtre
Modulated Waveform	Modülasyona Uğramış Dalgaformu
Monostatic	Monostatik veya Tek Antenli
Multiple False Target	Çoklu Yanlış Hedef
Noise Figure	Gürültü Figürü
Offset Calibration Technique	Ofset Kalibrasyon Tekniği
Periodic Pulse	Periyodik Darbe

Predetection SNR	Önkestirim SNR
Processing Gain	Sayısal İşlem Kazancı
Pulse on Pulse	Üst Üste Darbe
Pulse Repetition Interval	Darbe Tekrar Aralığı
Pulse Train	Darbe Katarı
Pulsed Wave RADAR	Darbeli Dalga RADAR
Pulsed Waveform	Darbeli Dalgaformu
Quadrature Downconversion	Kuadratur Alt Çevrim
Quality Factor	Kalite Faktörü
RADAR Echo	RADAR Yankısı
RADAR	Radyo ile Tespit Etme ve Menzil Tayini
Range Rate	Mesafe Oranı
Rate of Change of Target Range	Hedef Mesafesinin Değişim Oranı
RCS	RADAR Kesit Alanı
Relative Velocity	Göreceli Hız
Required Signal Level	Gerekli Sinyal Seviyesi
RF Switch	RF Anahtar
RMS Frequency Error Due to Noise	Gürültü Sebebiyle RMS Frekans Hatası
RWR	RADAR Uyarıcı Almaç
SAW	Yüzeysel Akustik Dalga
Sidelobe	Yan Hüzme
Signal to Noise Ratio	Sinyalin Gürültüye Oranı
SLO	Taramalı Lokal Osilatör
Spot	Taşıyıcı Frekans
Stagger	Sendelemeli
STALO	Sabit Lokal Osilatör
Super Harmonic Mixing	Süper Harkmonik Çarpım
Swept Bandpass Filter	Taramalı Bant Geçiren Filtre
Tangential Sensitivity	Teğetsel Hassasiyet
Tradeoff	Ödüşim
Transmitted Signal	İletilen Sinyal
Tunable Notch Filter	Ayarlanabilen Çentik Süzgeci
Tuned Circuit	Ayarlı Devre
Tuned Radio Frequency	Ayarlı Radyo Frekansı
Tuner Rx	Ayarlayıcı Almaç
Two Time Delay	Çift Zamanlı Gecikme
Unambiguous Range	Belirgin Mesafe
Universal RF Front End	Uluslararası RF Ön Uç