

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**TEKRARLAYICI KARIŞTIRMA TEKNİĞİ İLE KENDİNİ KORUMA
ELEKTRONİK HARP SİSTEMİNE SAHİP İNSANSIZ HAVA
ARAÇLARININ FREKANS ÇEVİK RADARLARA KARŞI ETKİNLİĞİ**

HAZIRLAYAN

ECEHAN SOYKURUM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2024

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK/ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**TEKRARLAYICI KARIŞTIRMA TEKNİĞİ İLE KENDİNİ KORUMA
ELEKTRONİK HARP SİSTEMİNE SAHİP İNSANSIZ HAVA
ARAÇLARININ FREKANS ÇEVİK RADARLARA KARŞI ETKİNLİĞİ**

HAZIRLAYAN

ECEHAN SOYKURUM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. AHMET GÜNGÖR PAKFİLİZ

ANKARA – 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik/Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik/Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Ecehan SOYKURUM tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 15 / 04 / 2024

Tez Adı: Tekrarlayıcı Karıştırma Tekniği ile Kendini Koruma Elektronik Harp Sistemine Sahip İnsansız Hava Araçlarının Frekans Çevik Radarlara Karşı Etkinliği

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Doç.Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ, Ostim Teknik Üniveritesi

.....

Prof. Dr. Sıtkı Çağdaş İNAM, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi İclal ÇETİN TAŞ, Ostim Teknik Üniveritesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 08 / 05 / 2024

Öğrencinin Adı, Soyadı: Ecehan SOYKURUM

Öğrencinin Numarası: 22020131

Anabilim Dalı: Elektrik/Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik/Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ

Tez Başlığı: Tekrarlayıcı Karıştırma Tekniği ile Kendini Koruma Elektronik Harp Sistemine Sahip İnsansız Hava Araçlarının Frekans Çevik Radarlara Karşı Etkinliği

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 70 sayfalık kısmına ilişkin, 07 / 05 / 2024 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %7'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: ... / ... /

Öğrenci Danışmanı

Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ

.....

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana karşı olan güvenini hiç kaybetmeyen, tüm bilgisini ve imkanlarını tereddütsüz bir şekilde paylaşan, desteğini bir an olsun eksik etmeyen değerli tez danışmanım ve süreç rehberim Doç. Dr. Ahmet Güngör PAKFİLİZ'e bana bu çalışmayı yapma fırsatı tanıdığı için minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezi, hayatımdaki bütün dönüm noktalarında yaptığı sayısız fedakarlık, sağladığı sonsuz destek, her daim gösterdiği sabır, sevgi ve nezaketiyle beni bugünlere getiren sevgili annem Nuran SOYKURUM'a, yapacağım tüm işlerde şüphesiz tüm gücü ve güveniyle arkamda duran, cesaretlendiren babam Hüseyin SOYKURUM'a, doğduğum ilk andan itibaren bıkmadan, usanmadan elinden gelen tüm kuvvetiyle bana her şeyi öğretmeye çalışan ve bugün sahip olduğum tüm bilgilerin temelini oluşturan dayım Bülent KAYA'ya, hayata karşı bakış açısıyla vizyonumu şekillendiren ve geliştiren, iyi veya kötü her anımda, duygularımı benimle paylaşan ve sorunlarıma çözüm bulmaya çabalayan teyzem Sevil Şebnem KAYA'ya ve son olarak sağladığı huzur, gösterdiği yoğun sevgisiyle motivasyonumu her zaman yüksek tutan biricik anneannem Zekiye KAYA'ya ithaf ediyorum ve hepsine sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Sevgili arkadaşım ve başarılı meslektaşım Kemal Burak DOĞAN'a tezim sürecinde, göstermiş olduğu sabır ve anlayış ile birlikte, sağladığı sayısız desteği ve değerli katkıları için teşekkürlerimi sunuyorum.

ÖZET

Ecehan SOYKURUM

TEKRARLAYICI KARIŞTIRMA TEKNİĞİ İLE KENDİNİ KORUMA ELEKTRONİK HARP SİSTEMİNE SAHİP İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ FREKANS ÇEVİK RADARLARA KARŞI ETKİNLİĞİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik/Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2024

Son dönemdeki küresel çatışmalarda uzaktan füze saldırı seçenekleriyle birlikte İnsansız Hava Araçlarının (İHA) askeri alanlarda kullanımı da artmaktadır. Güvenliği tehdit eden tehlikeli görevler için kullanılabilecek mürettebatsız sistemlerle mücadele etmek zordur. Uzaktan kontrol edilebilmesi veya otonom olarak programlanabilmesi İHA'lara daha fazla risk alma fırsatı vermektedir. Radarlar ise, herhangi bir bütünleşmiş hava savunma sisteminin ilk aşamasını oluşturmaktadır; yeni tehditlerin her geçen gün artmasıyla birlikte bu saldırıları önlemek için elektronik savaş daha da kritik hale gelmektedir. İHA'lar ise radar sinyallerini karıştırmak için etkili bir araç olabilir. İHA'ların pilotlu savaş uçaklarının yanına destekleyici olarak entegre edilmesi, modern askeri taktikler için hayati önem taşımaktadır. Bu çalışmada, radarların bu görev kuvvetlerine hazır olup olmadığı ve İHA'ların geliştirilmiş radar tespit kabiliyetlerine karşı karıştırma performansı araştırılmıştır. Buna dayanarak, eş alt darbeler arasında öngörülemez bir frekans atlama düzenine sahip kademeli ve kademeli chirp frekans dalga formları kullanılarak mono-statik darbeli bir radar modellenmiştir. Ayrıca bu radar, darbe tekrarlama aralıklarını doğrusal veya doğrusal olmayan diziler halinde darbeden darbeye ayarlama kabiliyetine de sahiptir. Karıştırıcı kaynağı olarak araç içi entegre kendini koruma elektronik harp sistemi kullanılmıştır. Tekrarlayıcı konsepti gereği toplanan sinyalin karakteristiğine uygun karıştırma tekniğinin uygulanması için faz dizili antenler ve merkezi kontrol bilgisayar ünitesi tasarlanmıştır. Karıştırıcı sisteminin verimliliğini belirlemek için çeşitli simülasyonlar oluşturulmuştur. Sonuçlar, zaman/frekans alanında analiz edilmiştir ve her senaryo için karıştırma sinyal oranları elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Elektronik Harp, İnsansız Hava Araçları, Kendi Kendini Koruma Sistemleri, Tekrarlayıcı Karıştırma Teknikleri, Frekans Çevikliği

ABSTRACT

Ecehan SOYKURUM

USAGE OF REPEATER JAMMING TECHNIQUES FOR THE UNMANNED AERIAL VEHICLE SELF-PROTECTION ELECTRONIC WARFARE SYSTEM AGAINST FREQUENCY AGILE RADARS

Başkent University Institute of Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

2024

Military use of unmanned aerial vehicles (UAV) along with the other remote missile attack options are increased in recent global conflicts. Fighting against uncrewed systems, which can be used for dirty tasks, is challenging. Being able to remotely control or autonomously programmable gives more opportunity to take risk for unmanned systems. Radars comprise the first stage of any integrated air defense system; electronic warfare becomes more critical to prevent attacks of new type of threats. UAVs can be an effective tool for jamming radar signals. Integrating UAVs in a supportive operation capacity alongside piloted fighters has become crucial to modern military tactics. In this study, we investigate the radars' readiness for these task forces and the jamming performance of the UAVs against the improved radar detection capabilities. Based on that, a monostatic pulsed radar has been modelled using stepped frequency and stepped chirp frequency waveforms with an unpredictable frequency hopping pattern between the coherent sub-pulses. Also, this radar has capability to set the pulse repetition intervals (DTAs) on a pulse-to-pulse as linear or non-linear sequences. An onboard self-protection electronic warfare system is used as a jammer source. To apply the suitable jamming technique according to collected signal characteristics and direction in accordance with the repeater concept, a phased array antennas and central control computer unit is designed. To determine the efficiency of the jammer system, simulations generated using frequency agile radar. The results of simulated test cases have been analyzed in time and frequency domain. Jamming to signal ratios have been obtained to be used as performance metric.

KEYWORDS: Electronic Warfare, Unmanned Aerial Vehicles, Self-Protection Systems, Repeater Jamming Effectiveness, Frequency Agile Radars

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektronik Harp Faaliyetleri	2
1.2. Elektronik Harp İçin Temel Bileşen: Radarlar	6
1.3. İnsansız Hava Araçlarının Elektronik Harp Sahasında Kullanımı.....	7
2. TEORİ VE KONSEPT	9
2.1. Kendini Koruma Elektronik Harp Sistemi Tasarımı	9
2.2. Kendini Koruma Elektronik Harp Sisteminin Temel Bileşenleri.....	10
2.3. Frekans Çevik Radar Sinyal Modelinin Tasarımı	12
2.3.1. Temel Radar Tipleri ve Konfigürasyonları.....	12
2.3.2. Darbe Radarı Dalga Formu Karakteristiği ve Temel Performans Parametreleri	14
2.3.3. Darbe Sıkıştırma Tekniklerinin Radar Performansına Katkıları ...	18
2.3.4. Kademeli Frekans Dalga Formunun Kavramsal ve Matematiksel Modellemesi.....	20
2.3.5. Kademeli Chirp Frekans Dalga Formunun Kavramsal ve Matematiksel Modellemesi	24
2.3.6. Kademeli/Titreşimli DTA Dalga Formunun Kavramsal ve Matematiksel Modellemesi	28
2.3.7. Karıştırma Altında Mono Statik Radar Denklemleri	29
3. ANALİZ VE TARTIŞMA	32
3.1. Benzetim Parametrelerin Belirlenmesi.....	32
3.2. Benzetim Ortamının Modellenmesi	35

3.3. Benzetim 1: Sabit ve Tek Taşıyıcı Frekanslı Darbe Radarının Nokta ve Baraj Gürültü Karıştırması Altındaki Etkinliği	36
3.4. Benzetim 2: Kademeli Frekans Modülasyonlu Darbe Radarının Baraj ve Nokta Tarama Karıştırması Altındaki Etkinliği	41
3.5. Benzetim 3: Kademeli Chirp Frekans Modülasyonlu Darbe Radarının Baraj ve Nokta Tarama Karıştırması Altındaki Etkinliği	51
3.5.1. Deneme 1 ve Deneme 2 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları	53
3.5.2. Deneme 3 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları	56
3.5.3. Deneme 4 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları	59
3.5.4. Deneme 5 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları	61
3.6. Benzetim 4: Kademeli ve Titreşimli Darbe Tekrarlama Aralığına Sahip Darbe Radarının Gürültü ve Aldatma Karıştırmasına Karşı Etkinliği.....	63
4. SONUÇ	70
KAYNAKLAR.....	71

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Simölasyon Parametreleri ve Sabitler	33
Tablo 3.2 Benzetim 3 Kapsamında Test Edilecek Senaryolar	53

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Elektronik Harp Sisteminin Antenlerinin İHA Üzerindeki Konumları.....	9
Şekil 2.2 Tekrarlayıcı Karıştırma Elektronik Harp Sisteminin Blok Diyagramı	10
Şekil 2.3 Darbe Radarının Dalga Formu Karakteristiği	15
Şekil 2.4 Menzil Belirsizliği.....	16
Şekil 2.5 Menzil Çözünürlüğü (ΔR) < Darbe Genişliği	17
Şekil 2.6 Menzil Çözünürlüğü (ΔR) $\geq$ Darbe Genişliği	18
Şekil 2.7 Optimal Darbe Genişliğinin Minimum Menzil Çözünürlüğü (ΔR) İle İlişkisi	18
Şekil 2.8 Kademeli Dalga Formu Parametreleri.....	21
Şekil 2.9 Kademeli Dalga Formu Yapısı ve Frekans Adım Modeli.....	21
Şekil 2.10 Kademeli Chirp Dalga Formu Parametreleri.....	25
Şekil 2.11 Kademeli Chirp Dalga Formu Yapısı ve Frekans Adım Modeli.....	25
Şekil 2.12 Radara Karşı Kendini Koruma Karıştırma Senaryosu	30
Şekil 3.1 Burn-Through Mesafesi	34
Şekil 3.2 Elektronik Harp Benzetim Modeli	35
Şekil 3.3 Nokta Karıştırması Altında Temel Darbe Radar Sinyalinin Zaman Alanında Analizi.....	37
Şekil 3.4 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Temel Radar ve Nokta Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi.....	38
Şekil 3.5 Nokta Karıştırması Altında Temel Darbe Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi.....	39
Şekil 3.6 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Temel Radar ve Baraj Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi.....	40
Şekil 3.7 Baraj Karıştırması Altında Temel Darbe Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi.....	41
Şekil 3.8 Kademeli Frekans Dalga Formu.....	42
Şekil 3.9 Doğrusal Kademeli Frekans Modeli İle Modüle Edilmiş Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü	43

Şekil 3.10	Radar Tarafından Alınan Doğrusal Kademeli Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü	43
Şekil 3.11	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Baraj Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi	44
Şekil 3.12	Baraj Karıştırması Altında Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi	45
Şekil 3.13	Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Modeli İle Modüle Edilmiş Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü	46
Şekil 3.14	Radar Tarafından Alınan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Dalga Formunun Demodülasyon Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü	46
Şekil 3.15	Baraj Karıştırması Altında Doğrusal Olmayan Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi	47
Şekil 3.16	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi	48
Şekil 3.17	Nokta Tarama Karıştırması Altında Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi	49
Şekil 3.18	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi	50
Şekil 3.19	Nokta Tarama Karıştırması Altında Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi	51
Şekil 3.20	Kademeli Chirp Frekanslı Dalga Formu	52
Şekil 3.21	Doğrusal Kademeli Chirp Frekans Modeli İle Modüle Edilerek Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü	54
Şekil 3.22	Radar Tarafından Alınan Doğrusal Kademeli Chirp Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü	54
Şekil 3.23	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Chirp Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi	55
Şekil 3.24	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Chirp Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi	56

Şekil 3.25	Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Chirp Frekans Modeli İle Modüle Edilerek Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü.....	57
Şekil 3.26	Radar Tarafından Alınan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Chirp Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü.....	57
Şekil 3.27	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Chirp Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi	58
Şekil 3.28	Kademeli Doğrusal Değişmeyen (Rastgele) Bant Genişliğine Sahip Chirp Frekans Modeli İle Modüle Edilerek Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü	59
Şekil 3.29	Radar Tarafından Alınan Kademeli Doğrusal Değişmeyen (Rastgele) Bant Genişliğine Sahip Chirp Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü	60
Şekil 3.30	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Kademeli Doğrusal Değişmeyen (Rastgele) Bant Genişliğine Sahip Chirp Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi.....	61
Şekil 3.31	Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Değişen Bant Genişliğine Sahip Chirp Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Baraj Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi	62
Şekil 3.32	Baraj Karıştırması Altında Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Değişen Bant Genişliğine Sahip Chirp Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi	63
Şekil 3.33	Nokta Karıştırması Altında Sabit DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi	64
Şekil 3.34	Nokta Karıştırması Altında Sabit DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Frekans Alanı Analizi	64
Şekil 3.35	Nokta Karıştırması Altında Kademeli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi	65
Şekil 3.36	Nokta Karıştırması Altında Kademeli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Frekans Alanı Analizi.....	65
Şekil 3.37	Nokta Karıştırması Altında Titreşimli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi	66
Şekil 3.38	Nokta Karıştırması Altında Titreşimli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Frekans Alanı Analizi.....	66
Şekil 3.39	Aldatma Karıştırması Altında Sabit DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi.....	68

Şekil 3.40	Aldatma Karıştırması Altında Kademeli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi	68
Şekil 3.41	Aldatma Karıştırması Altında Titreşimli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

ADC	Analog/Digital Converter
BT	Burn-Through
DEHS	Destek Elektronik Harp Sistemi
DFRM	Digital Radio Frequency Memory
DFM	Doğrusal Frekans Modülasyonu
DOFM	Doğrusal Olmayan Frekans Modülasyonu
DTA	Darbe Tekrarlama Aralığı
DTF	Darbe Tekrarlama Frekansı
DTS	Darbe Tekrarlama Sıklığı
DFMDF	Doğrusal Frekans Modülasyonlu Dalga Formu
ED	Elektronik Destek
EH	Elektronik Harp
EK	Elektronik Korunma
EM	Elektromanyetik
ELIST	Elektronik İstihbarat
ET	Elektronik Taarruz
GHG	Gecikmeli Hat Giderici
İHA	İnsansız Hava Aracı
KFM	Kademeli Frekans Modülasyonu
KCFM	Kademeli Chirp Frekans Modülasyonu
KKEHS	Kendini Koruma Elektronik Harp Sistemi
KSO	Karıştırma Sinyal Oranı
RKA	Radar Kesit Alanı
RF	Radio Frequency
UK	Uzaktan Karıştırma
SINIST	Sinyal İstihbaratı
YK	Yakından Karıştırma

1. GİRİŞ

Radar, görülebilir alanın dışındaki nesneleri tespit edebilen ve onlar hakkında bilgi toplayabilen bir gözlem aracıdır. Işık yerine elektromanyetik dalga tabanlı çalıştığı için, gözler ve optik cihazlar ile yapılabilen gözlemden çok daha etkilidir. Radar sayesinde karanlık, sis, kar, yağmur gibi görsel veri toplanamayan ortamlarda da gözlem yapılabilir. Bu da onu savaş alanında çok etkili bir araç haline getirmektedir. Radar bu bakımdan, II. Dünya savaşının seyrini ve güç dengelerini değiştiren önemli bir gelişmedir. Fiziki imkanlarla erişilemeyen bilgi ve istihbaratın bu teknoloji vasıtasıyla elde edilebilmesi geleneksel savaş metotlarını farklı bir boyuta taşımıştır. Olası hava saldırılarına karşı erken uyarı sistemlerinin oluşturulması ile birlikte, mevcut insan ve mühimmat gücünün doğru şekilde yönlendirilmesinde önemli bir avantajı da beraberinde getirmiştir. Bu avantajı ortadan kaldırmak isteyen hasım taraflar ise tepki olarak radarın etki gücünü zayıflatmak ya da radarı tamamen etkisiz hale getirecek taarruz teknikleri aramaya yoğunlaştırmıştır. Radarın çalışma prensibinden kaynaklanan zayıflıklarını kullanan yeni karıştırma ve aldatma yöntemleri geliştirilmiştir. Radar kullanıcısı taraflar ise tepki olarak bu zayıflıkları ortadan kaldıracak yöntemler geliştirmiştir. Radar engelleme ve güçlendirme faaliyetleri birbirini doğuran bir gelişim döngüsü haline gelmiştir. Yakın geçmişteki savaş deneyimlerinin gösterdiği üzere, hava sahasında elektromanyetik savaş üstünlüğünü elinde tutmak için taraflar birbirlerini takip ederek sıkı bir rekabet içinde ve çevik davranmalıdır [1].

Gelişen teknoloji; modern dünyanın her geçen gün hızla değişmesine ve şekillenmesine katkı sağlamaktadır. Bu gelişime paralel olarak endüstriyel alanda birçok iş alanı için avantaj ve fayda sağlamasıyla birlikte elektronik savaş alanında da yeni ve potansiyel tehditleri beraberinde getirmektedir. Geçmişte, ülkeler potansiyel rakiplerine karşı üstünlük sağlamak için askeri alandaki ilerlemeleri takip ederken; ticari teknolojilerin hızlı gelişimi, farklı sektörlere olan kolay adaptasyonu, entegrasyonu ve düşük maliyetli üretim olanaklarıyla daha önceden elektronik harp ortamında uygulaması imkansız görülen birçok fikir artık olası mantıklı birer seçenek haline getirmektedir [2]. Son yıllarda yarı iletken tasarımı ve üretimindeki yenilikler sayesinde nano boyutlardaki, düşük gecikmeli anahtarlamaya sahip transistörlerin üretimi; mikroçiplerin daha yüksek performansta, daha hızlı bilgi işlem gücü sunmasını ve az enerji tüketmesini mümkün hale getirmiştir. Gelişmiş

yüksek performanslı işlemciler, karmaşık verilerle çalışmak ve yüksek frekanslı örnekleme için gerekli gücü sağlamıştır. Daha küçük ve güçlü işlem birimleri sayesinde daha küçük ve taşınabilir ölçekte sinyal işleme üniteleri geliştirilebilmiştir. Malzeme bilimi ve üretim tekniklerindeki ilerlemeler, faz kaydırıcı, yüksek güçlü ve düşük gürültülü yükselteç, zayıflatıcı, sınırlayıcı ve anahtarlama birimleri gibi çok sayıda entegre devreler radar ve elektronik harp ekipmanlarının taşınabilirlikten ödün vermeden daha yüksek kabiliyetli olarak üretimine imkan vermiştir. GaAs ve GaN yarı iletken bileşen içeren faz dizili antenler gibi yeni birimler çoğunlukla yüzlerce veya binlerce ögeye sahip olabilirler. Bu sayede eskiden olduğu gibi büyük ve ağır mekanik sistemlere ihtiyaç duymadan hedef alanların taranması hızlı ve yüksek kesinlikle gerçekleştirilebilmektedir. Aynı zamanda mekanik harekete ihtiyaç duyulmaması radar sistemlerinin uçaklara da entegre edilmesini oldukça kolaylaştırmıştır. Gerçek zamanlı olarak çoklu hüzmeler oluşturup yönlendirmek, anten dizisi boyunca yüksek hızlı verileri dağıtma ihtiyacına yönelik büyük bir dijital işleme kaynağı gerektirir. Bu büyüklükteki verilerin yönetimi, milyonlarca dijital mantık birimine sahip yüksek hızlı programlanabilir işlemcilerin geliştirilmesi sayesinde mümkün hale gelmiştir [3]. Tüm bu gelişmeler göz önünde bulundurulduğunda yükselen trendlerin başında gelen İHA'ların elektronik harp sahasında kullanılması da kaçınılmazdır. Dinlenme ihtiyacı olmayan ve sürekli aktif görev yapabilen bu araçlar; küçük boyutlu ve güçlü elektronik harp ekipmanlarının geliştirilmesi sayesinde savunma ve saldırı amaçlı kullanılabilen etkili araçlar haline gelmektedir.

Öte yandan, bu yeni imkanlar her ne kadar orduların işlerini kolaylaştırıyor gibi görünse de aynı zamanda en büyük zayıflıkları haline de kolaylıkla gelebilmektedir. Çünkü askeri sistemler üzerinde insan gücü ve yönetiminden çok, elektronik bileşenlere olan bağımlılığın artması, elektronik sahadaki müdahalelere karşı da bu sistemleri saldırıya açık hale getirmektedir. Pahalı ve gelişmiş savunma sistemleri, düşman unsurları tarafından ucuz ve basit elektronik saldırılarla etkisiz hale getirilebilir. Savaşın görünmez tarafı olan elektromanyetik spektrumun kontrol edilmesi, modern savaş alanında elektronik harbin önemini her geçen gün daha da arttırmaktadır.

1.1. Elektronik Harp Faaliyetleri

Sinyal istihbaratı (SINIST), tehdit oluşturma potansiyeli yüksek olan haberleşme ve elektronik ekipmanlardan yayınlanan sinyallerin tespit ve analiz edilmesi sürecidir. Çalışılan sahada mevcut tehditlerin fark edilmesi ve tanımlanması, bu tehditlere uygulanacak en etkin

elektronik taarruz (ET) veya elektronik korunma (EK) taktiklerinin seçimini etkilediği gibi, ileri vadede de farklı tekniklerin geliştirilmesi açısından kritiktir. Elektronik istihbarat (ELIST) tarafından toplanan tüm sinyaller işlenerek sinyal tipi/modülasyonu, frekansı, bant genişliği, frekansın tekrarlanma miktarı, sinyalin geliş yönü, sinyal gücü ve anten tarama örüntüsü bilgisi gibi radar sistemlerinin karakteristiklerini oluşturan parametreler belirlenmektedir. Karakteristiği çıkarılan bu sinyaller, dost/düşman birimlerin bilgileri ile birlikte sınıflandırılarak istihbarat veri tabanı oluşturulmaktadır [4] [5].

Elektronik destek (ED) sistem ve alt sistemleri amacı, yaklaşan saldırıların üstesinden gelmek için muhtemel tehditlerin varlığını hızlı bir şekilde tespit ederek erken uyarı ve farkındalık oluşturmaktır. Tehdit unsurunun sahip olduğu silahların türlerinin, kullanılan elektronik cihazların görev ve kabiliyetlerinin, elektronik mimari ve teknik alt yapı ile birlikte aralarındaki haberleşme içeriğinin belirlenmesi bu saldırılara ivedilikle önlem almak ve karşı reaksiyon göstermek için kritiktir.

ED ve SINIST aktiviteleri benzerlikler göstermesine karşın, faaliyetin gerçekleştirileceği zamanlama bakımından birbirlerinden ayrılmaktadır. SIGINT sırasında toplanan veriler anında analiz edilmeyi gerektirmemektedir. Ancak alınan sinyal karıştırılmakta olan veya bir an önce önlem alınması gereken bir sinyal olabileceğinden, ED faaliyetleri operasyon esnasında eş zamanlı olarak yürütülmelidir. ED sistemine anlık olarak gelen tüm veriler için SINIST safhasında oluşturulmuş veri tabanında yer alan sinyallerin özellikleriyle kıyaslanarak kimlik tespiti yapılmaktadır. ED sistemi; gerçekleştirdiği bu analizler sonucunda hedefin tehdit olduğu sonucuna ulaşırsa, platformun sahip olduğu teknik yeterlilik imkanları doğrultusunda gerekli gözlem, kontrol veya çeşitli imha birimlerini harekete geçirebilir. Aynı zamanda hangi tip tehditler ile nerede karşılaşabileceği gibi önemli bilgiler üretilebilir ve bu sayede savaş sahası konusunda strateji oluşturucuların fikir sahibi olmaları sağlanabilir.

ET elektronik harbin eylem kısmıdır. Tehdit oluşturan düşman radarları ve tespit sistemlerini elektronik karıştırma ve aldatma teknikleri ile geçici olarak etkisiz hale getirip, sistemlerin işlevselliğini baskılayarak yapılabildiği gibi; çeşitli yüksek güçlü mikrodalga silahlar, anti-radyasyon silahları veya yönlendirilmiş enerji silahları aracılığıyla düşman unsurunu doğrudan imha edilerek de gerçekleştirilebilir.

Karıştırıcı ekipmanlarının saldırı taktiğindeki yerleşimine göre farklı şekillerde karıştırma faaliyeti gerçekleştirilebilir. Düşman radar menziline girerken karıştırma ekipmanını saldırıyı yapan savaş uçağının taşıması kendini koruma elektronik harp sistemi (KKEHS) olarak adlandırılırken, ekipmanın saldırıya destek veren bir başka dost unsur

tarafından taşınmasına destek elektronik harp sistemi (DEHS) denir. Saldırıya destek sağlayan uçağın konumlandırmasına göre de farklı stratejiler üretilebilir. Bir saldırı takımına karıştırıcı desteği veren uçağın faaliyetini radar menziline dışından yürütmesine uzaktan karıştırma (UK), menzil içerisinden yürütmesine ise yakından karıştırma (YK) denir. UK güvenli bir konumdan gerçekleştirildiği için daha uzun ama daha düşük etkili bir karıştırma sağlar. Diğer yandan YK yönteminde etkinlik artmasına karşın karıştırma yapan uçağın kırma uğrama olasılığı oluşur ve buna bağlı önlemler alınması gerekir. KKEHS yönteminde ise karıştırma, radarın kilitlendiği uçak üzerinden ve radara yaklaşan bir biçimde gerçekleştirildiği için yayınlanan sinyaller radar ana hüzmesine yönlendirilir. Bu sayede diğer yöntemlere göre çok daha etkili bir karıştırma yapılmış olur. Fakat bu ağır ve yer kaplayan elemanların saldırı uçağına yüklenmesini gerektirdiğinden daha az taşınabilmesine faydalı yük taşınabilmesine yol açacaktır ve buna bağlı olarak görev başarımlarını azaltacaktır [4] [5].

ET; sahip olunan elektronik harp sistemlerinin tip, kabiliyet, çalışma mod ve limitleri ile sinyal karakteristiği bilgilerinin tehdit unsurları tarafından ele geçirilmesini engellemeyi, bunlar tarafından teşhis ve tespit edilmeyi engellemeyi amaçlayan tedbir ve tekniklerdir. Bu teknikler operasyona ve tehdit tipine göre aktif veya pasif şekillerde uygulanabilir.

ET sistemi; kendisinin fark edilmesine sebep olacak bir sinyal tespit ettiğinde; kendisinden yansıyan bu sinyalin ekosu üzerine istenmeyen yoğun enerjili karıştırma sinyali ekleyerek, düşman elektronik harp sistemleri tarafından beklenen sinyalin ayırt edilmesini zorlaştırmaktadır. Gürültü tabanı, tespit edilebilecek en düşük güçlü sinyalin belirlenmesi için kullanıldığından radar alıcıları için önemli bir tasarım parametresidir. Karıştırma sinyal oranı gürültü karıştırmasının radar alıcısı üzerindeki etkinliğini gösteren en önemli performans ölçütüdür. Radarın kendi sinyal ekosunu ayırt edemeyeceği düzeyde, radar çalışma bandındaki girişimi artırmak karıştırma sinyal oranını minimize edecektir. Doğru karıştırma tekniği seçilerek yeterli güç ile beslendiğinde radarın tespit yeteneği etkisiz hale getirilecektir. Kullanım amacına ve operasyon ihtiyacına yönelik olarak çok sayıda karıştırıcı çeşidi bulunmaktadır [4] [5].

Bir diğer saldırı amaçlı yapılan alternatif ET yöntemi de aldatmadır. ET platformun konumunun, uzaklığının, hızının ve yönünün tehdit unsuru tarafından olduğundan farklı algılanmasını sağlamak için geliştirilen tekniklerdir. Elektronik aldatmada, tehdit radarın sinyalleri alınır, radarın tarama ve dalga biçimi ile senkronize olan yapay sinyaller üretilerek radara geri gönderilmektedir. Hedef radar, gönderilen bu aldatıcı sinyali kendi sinyali zannederek işlemeye başladığında, radar sahte bir hedefe doğru yönlendirilerek farkında

olmaksızın gerçek hedefi takip yeteneğini kaybetmiş olmaktadır. Örneğin; DFRM (Digital Radio Frequency Memory) tabanlı aldatma sistemlerinde, hedeften alınan sinyaller bozulmadan saklanıp, bu sinyallerin bazı parametreleri değiştirilerek yeniden geri gönderilmesiyle, hedef radar sistemlerinin aldatılmasına olanak sağlanır.

Tespit edilen düşman elektronik harp sistemlerine savunma amaçlı geliştirilen pasif ET yöntemleri ise sahte hedef, çaf ve/veya ısı fişeği fırlatan sistemlerdir. Sahte hedef, düşman radarı sahasına bırakılan fiziksel olarak uçaktan küçük hareketli nesnelerdir. Sahaya bırakılan bu nesnelerin radar kesit alanının büyüklüğü sayesinde, gerçek uçağın ayırt edilebilirliği güçleşmektedir. Çaf ölçüleri istenilen frekanslara bağlı olarak değiştirilebilen ince ve küçük iletken metal tellerdir. Atılan çaf ile dost platformdan yansıyan eko, çaflardan yansıyan eko ile karışarak, radar bakış açısından hedef tespit ve takibini zorlaştırmaktadır. Isı fişeği, kızılötesi güdümlü füzelerle karşı kullanılan malzemelerdir. Uçağın egzozundan çıkan ısıya yönelen füzeler, atıldığında daha yüksek ısı yayan ısı fişeklerine yönelerek, hedefin odağını kaybetmiş olmaktadır.

EK sistemleri, tehdit elektronik taarruz sistemleri tarafından uygulanan, dost elektronik harp sistemlerinin çalışmalarını olumsuz yönde etkilemeye odaklanan tekniklere karşı, entegre edildiği sistemin bu saldırıları mümkün olduğu ölçüde azaltmak veya gidermek amacıyla, performansını yükselterek tehdit varlığında dahi işlevini sürdürmesine olanak sağlayan teknik ve tedbirlerdir.

EK sistemlerine sahip platformlar, tehdit elektronik harp sistemlerinden yayınlanan çeşitli karıştırma/aldatma tekniklerine maruz kalmış sinyallerden, kendi sinyallerini ayırt ederek tanınması ve yapılan elektronik taarruza müdahale etme kabiliyetine sahip olacaklardır.

Elektronik korunma ve tedbir sistemleri çok çeşitli alanlarda, farklı yöntem ve kullanımlar için geliştirilebilmektedir. Bu tedbirler bir ET'ye karşı önlem olarak kullanılabileceği gibi; ED ve SIGINT kapsamındaki faaliyetlere karşı platformun bilgilerini korumaya yönelik bir önlem de olarak da geliştirilebilmektedir. Elektronik harp sisteminin verici, alıcı, anten gibi farklı birimlerinde yapılacak geliştirmelerle tehdit unsurların saldırı ve takibinden kaçınmayı mümkün kılacaktır. Tehdit unsurunun, hedef platformun alıcısına etkin bir şekilde karıştırma uygulayabilmesi için hedefin yayın yaptığı taşıyıcı frekansı belirlemesi gerekmektedir. Benzer şekilde, hedef platforma aldatma karıştırması yapılmak isteniyorsa da hedeften yansıyan sinyalin karakteristiğine benzer bir sinyalin üretilmesi gerekmektedir ki aldatılan platform kendi sinyaliyle karıştırma sinyalini ayırt edemesin. Dolayısıyla, korunma elektronik harp sisteminin birincil önceliği sinyal karakteristiğini açık

edecek parametreleri üzerinde (merkez frekans, darbe tekrarlanma sıklığı, uygulanan modülasyon tekniği vb.) düşman tarafından tahmin ve takip edilmesi zor, karmaşık değişiklikler uygulayarak, sadece kendi sistemlerinin/alıcılarının algılayabileceği senkronizasyonlarla sinyal oluşturmaktır [4] [5].

1.2. Elektronik Harp İçin Temel Bileşen: Radarlar

Karıştırma, radarın performansını olumsuz etkilerken, radar tasarımındaki gereklilikler de operasyonel zorlukları artırmaktadır. Radarlar olabilecek en uzak menzilde hedefleri tespit ve belirleme yapmak zorundadır. Fakat daha uzağa sinyal gönderilmesi hasımların koruma sistemlerinin hazırlanabilmesi için onlara fazladan süre sağlar. Bu sebeple menzil, çözünürlük arasında bir denge sağlanması gerekir. Aynı şekilde uzaklara sinyal göndermek için daha yüksek güç kullanılması gerekecektir. Bu da ağırlık artışı anlamına geleceğinden radarın taşınabilirliğini azaltır. Taşınabilirlik ile menzil arasında bir denge noktası belirlenmesi de radar tasarım zorluklarından biridir. Hava savunma sistemleri bu zorluklarla başa çıkmak için katmanlı bir yapıda tasarlanır. Savunulacak alan katmanlara bölünerek her bir katman için farklı özellikteki radarlar görevlendirilir. Uzun menzilli arama radarları daha büyük hacimdeki alanları daha düşük kesinlikte tararken, kısa menzilli takip radarları daha yüksek kesinlikte ama küçük bloklar halinde tarama yapar. Arama radarı bir hedef tespit ettiğinde, bir içeri katmana geçerken hedefi takip radarına devreder. Bu sayede hedef sadece daha kritik bir bölgeye girdiğinde fazladan güç ve çözünürlük ile takip edilerek uygun zamanda ilgili silah sistemleri hazırlanarak hedefe angaje edilir. Görev paylaşımı sayesinde her bir radar birimi taşınabilir seviyede tutulur. Tüm modern hava savunma sistemi görev paylaşımı yaparak radar ünitelerinin yerlerini farklı zamanlarda değiştirir ve hasımlara karşı şaşırtma taktiği uygular [5].

Radarlar, düşman birimlerini tararken aynı zamanda da sürekli olarak taarruz faaliyetlerini tespit ve bertaraf etmeye çalışmalıdır. Fakat radarın doğası gereği tespit için sürekli olarak çok uzak mesafelere sinyal gönderilmesi gerekir. Uzaklara gönderilen bu sinyallerin gizlenmesi imkansızdır. Sinyaller doğru istihbarat faaliyetleri ile radar anten konumlarının tespit edilmesine de sebep olabilir. Yeterli kaynağa ve teknolojiye sahip bir düşman şüphesiz bu bilgileri toplayacak ve radar performansını düşürmek için kullanacaktır. Bu durumda karşı tedbir almak için en iyi strateji; düşman kaynaklarını maksimum tüketebilmek için konum, frekans, sinyal tipi, sinyal gönderme zamanlaması gibi radar parametrelerini tahmin edilemeyecek şekilde sürekli olarak değiştirmek olmalıdır. Bu

strateji hasımların hazırlık aşamasında daha fazla zaman harcamasına neden olacak ve onları daha yüksek güçlü karıştırıcılar kullanmaya zorlayacaktır. Sonuç olarak faydalı yük taşıma kapasitesi azalan düşman birimler daha fazla risk almak zorunda kalacak ve radar kullanıcısı açısından umulan senaryoda yeterince zorlanan düşman, planlanan operasyonun gerçekleştirilmesinin uygun olmadığı kanaatine varacaktır.

1.3. İnsansız Hava Araçlarının Elektronik Harp Sahasında Kullanımı

İnsansız hava araçları (İHA) radar sistemlerini tehdit eden gelişime açık bir tehdit olma yolunda ilerlemektedir. İHA'lar pilot taşımadığı için kendine özgü avantajlara sahiptir. Geleneksel pilotlu hava araçlarının aksine İHA'lar kokpit ekranları, yaşam destek ekipmanları, fırlatma koltuğu ve hatta pilot bölmesi camına ihtiyacı ortadan kaldırır. Bu da İHA'ların daha hafif ve çevir bir yapıda üretilmesini sağlar. İnsan vücudunun kısıtlayıcı fiziksel limitlerinden arınmış İHA'lar, yüksek G dönüşleri gibi insan kabiliyetlerini zorlayan manevraları gerçekleştirebilir. Aynı zamanda İHA'lar insan taşımadığı için tasarım kısıtlamaları güvenlik açısından daha esnektir ve risk kapasiteleri daha yüksektir [6].

Sürü teknolojileri ilerledikçe, bir İHA pilotunun birden fazla aracı aynı anda kontrol etmesi imkanı hale gelecektir. Bu durum onları SINIST faaliyetleri için daha uygun hale getirecektir. Yapay zeka teknolojisinin de gelişimi ile tamamen otonom İHA sürüleri oluşturulabilecektir. Gönder unut tipinde silahsız elektronik harp yeteneğine sahip araçlar pilotlu savaş uçakları ve bombardıman uçaklarına destek görevlerinde kullanılabilecektir. Tam otonom İHA'ların silah taşıması etik sorunlara neden olurken, bu araçları elektronik harp amacıyla kullanmak yapay zeka kontrollü silah kullanım tartışmasına sebep olmayacaktır [7].

İHA'ların bu avantajları göz önünde bulundurulduğunda, insansız teknolojilerin destek karıştırma faaliyetleri için çok uygun bir aday olduğu görülmektedir. Gelişmiş anten teknolojileri ile donatılmış İHA'lar ön saflarda sürü halinde uçarken radar antenlerine karıştırma sinyallerini yüksek güçle ve yüksek isabet ile uygulayacaktır. YK taktiği ile kullanıldığı durumlarda başarısız olsalar dahi, arkalarından gelen saldırı uçaklarını koruyabilen gözden çıkarılabilir sahte hedefler olarak göreve katkı sağlayacaklardır. İHA'lar arkasından gelen pilotlu uçaklar, ağır elektronik harp ekipmanları ve bunları besleyecek güçlü jeneratörler taşımak zorunda kalmayacak, bunun yerine daha fazla yakıt ve mühimmat taşıyarak görev başarımlarını önemli ölçüde artıracaktır [8].

Bu tip saldırı filosuna karşı en güçlü rakip, ilkel basit darbe radarlarına göre çok daha iyi olan frekans çevikliği kabiliyetine sahip radarlardır. Bu yüzden bu. Çalışmada da İHA'ların frekans çevikliğine sahip radarlara karşı etkinliği araştırılacaktır.

2. TEORİ VE KONSEPT

2.1. Kendini Koruma Elektronik Harp Sistemi Tasarımı

Elektronik atak süreci potansiyel tehditlerin tespiti ve tanımlanması ile başlamaktadır. Her rakip radar sisteminin sahip olduğu güç, sinyal karakteristiği ve korunma sistemi kendine özgü olacağından; karıştırıcı, hedef tipine uygun stratejiler geliştirilmelidir. Hava platformuna entegre edilmiş olan elektronik harp sistemlerinin alıcıları, eş zamanlı çok sayıda karmaşık sinyale maruz kalmaktadır. Alınan RF enerjisinden, tehdit sistemler tarafından üretilen sinyallerin ayrıştırılması sinyal işlemenin en kritik aşamasıdır. Radar kontrollü silah ve hava savunma sistemlerinin yeteneklerinin her geçen gün artması, mevcut sahada ne tür tehditlerin bulunduğu, tehdidin konumu ve çalışma şekli gibi parametrelerin gerçek zamanlı ve otomatik olarak tespit edilmesini zorunlu kılmıştır [9].

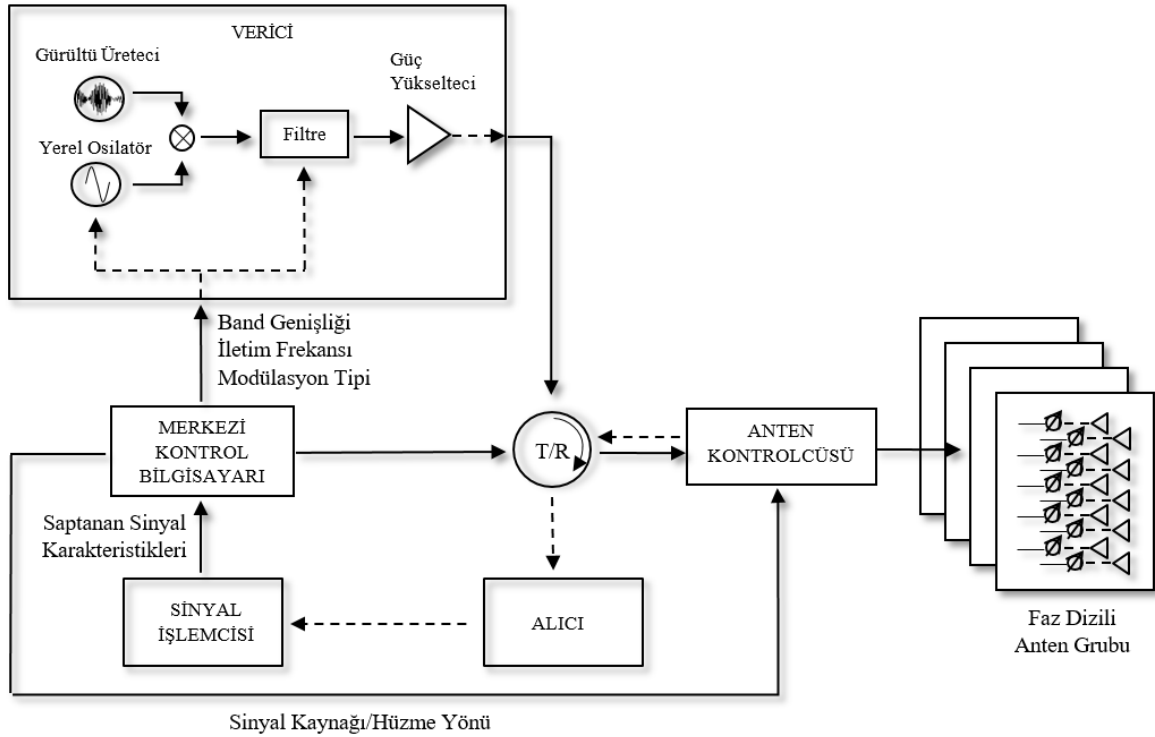
Kendi kendini koruma elektronik harp sistemleri, her biri sinyal işlemenin farklı aşamalarında kullanılan verilerin toplanması için çeşitli anten ve alıcı kombinasyonları bulundurmaktadır. Antenlerin hava aracı üzerindeki fiziksel konumu, sinyalin tespit edilme kabiliyetini doğrudan etkilediğinden; hava aracının etrafında önceden belirlenmiş yatay ve dikey alanı kapsayacak şekilde düzenlenmelidir. Modern elektronik harp sistemlerindeki antenler, spektrumdaki çoğu tehdidin algılanması amacıyla farklı frekans bantlarını kullanmaktadır. İki ayrı anten dizisi, Şekil 2.1’de gösterildiği üzere insansız hava aracının kanat bölmelerine simetrik olarak yerleştirilmiştir. Verici/Alıcı donanımları, merkezi kontrol bilgisayarı, sinyal işleme birimleri ve kontrolcüler aerodinamik yapının korunması ve radar kesit alanının etkilenmemesi için araç içine konumlandırılmıştır.



Şekil 2.1 Elektronik Harp Sisteminin Antenlerinin İHA Üzerindeki Konumları

Bu kapsamda İHA için tasarlanan elektronik tedbir sisteminin bileşenlerinin gösterildiği blok diyagram Şekil 2.2’deki verildiği gibidir. EH sistemi için sinyal işleme

süreci, RF enerjisinin elektronik harp ünitesinin alıcısına ulaşmasıyla başlamaktadır. Bu aşamadan önce tüm tehdit sistemlerinin algılanıp işlenebilmesi için çalışma frekanslarının kapsandığından emin olunmalıdır. Bu sebeple modern elektronik korunma sistemlerinde birden fazla bant için ayrı faz dizi antenler kullanılmaktadır. İHA üzerinde kullanılacak olan bu EH sisteminde, mono statik anten konfigürasyonu kullanılmaktadır. Alıcı modunda antenin işlevi tehdit sistemlerden gelen sinyallerin toplanarak alıcıya işlenmek üzere iletmesiyken; iletim modunda ise vericide üretilen karıştırma sinyalini tehdit platform yönünde yoğunlaştırarak göndermektir.



Şekil 2.2 Tekrarlayıcı Karıştırma Elektronik Harp Sisteminin Blok Diyagramı

2.2. Kendini Koruma Elektronik Harp Sisteminin Temel Bileşenleri

Faz dizili antenler her biri ayrı bir gecikme devresine bağlı yatay ve dikey yönde dizilmiş bir grup anten elemanından oluşur. Yayın yapılacağı zaman gönderilmesi ya da alınması istenen dalganın yönüne göre her bir elemanın gecikme miktarları yatayda ve dikeyde özel olarak hesaplanarak ayarlanır. İstenen yöne en uzakta kalan eleman ile ilk yayın yapılarak diğer elemanlar da buna bağlı bir sıralamada yayın yapılarak toplam enerji bir yönde yoğunlaştırılır. Bu işlem sonucunda anten mekanik olarak döndürülmeden ve önemli bir enerji kaybı yaşanmadan dalga elektronik olarak yönlendirilmiş olur. Fakat eleman

miktarı arttıkça antenin ve geciktirme kontrollerinin karmaşıklığı arttığından üretim maliyeti ve ağırlığı da artmaktadır [10]. Elemanların anten yüzeyine yerleşimi çalışma frekansı ile doğrudan ilişkilidir. Bu yüzden belirli bir frekans bandında hizmet verebilir. Farklı frekans bantlarını kapsamak için birden fazla anten grubu kullanılabilir.

Frekansına göre ilgili faz dizili anten ile alınan radar sinyali, anten kontrolörü ve merkezi kontrol bilgisayarı kullanılarak analiz edilerek sinyalin kaynağının konumu tespit edilir [11]. Daha sonra sinyal işlemcisi kullanılarak karakteristik özellikler çıkarılır. Çıkarılan bu özellikler veri tabanı ile karşılaştırılarak ilgili tehdit için önceden karar verilmiş strateji işleme alınır. Stratejide dikte edilen tedbir prosedürü için yerel osilatör ve gürültü üretici programlanarak karıştırma sinyali filtre ve yükselteç vasıtasıyla son haline getirilerek hazırlanır. Sonrasında, anten gönderme moduna çevrilerek daha önceden tespit edilen konuma doğru yoğunlaştırılan sinyal yayınlanır [4]. Farklı tehditlere yönelik çok miktarda karıştırma tekniği mevcuttur. Karıştırma teknikleri geniş bir konu olduğundan bu çalışmada sadece kısıtlı bir alt kümesi kullanılacaktır.

Baraj karıştırması basit bir karıştırma yöntemidir. Bu yöntemde tüm güç belirlenmiş bir bantta tüm frekanslara yayılarak kullanılır. Fakat sahip olunan gücün büyük bir kısmı ilgisiz frekanslarda kullanılmış olur ve hedef radar tarafından görmezden gelinir. Bu sebeple ilgisiz frekanslar karıştırma sinyal oranına katkı sağlamayacaktır. Bu karıştırma tekniği hedef çalışma frekansı bilinmediği veya bilinmeyen bir örüntüde değiştiği durumda kullanılır. Nokta karıştırma tekniği baraj tekniğine kıyasla çok daha verimli bir yöntemdir. Bu yöntemde tüm güç tek bir frekansta merkezlenmiş dar bir bantta kullanılır. Alıcı-verici devresi verici modundayken, hedef dinlenemez. Hedef bu zayıflıktan yararlanarak, karıştırmadan korunmak için çalışma frekansını değiştirip anti-radyasyon füzesi ile karşılık verebilir. Bu sebeple bazı dalgaları karıştırmadan göndermek ile hedefi arada bir dinleyebilmek arasında dengeli bir seçim yapılması gerekir. Nokta karıştırma yöntemi hedef frekansı bilinen ve zamanla değişmeyen durumlarda kullanılır. Nokta tarama yöntemi iki dünyadan da en iyi özelliklerin kullanıldığı karma bir yöntemdir. Karıştırma önceden belirlenmiş bir frekans aralığında döngü halinde alt bantlara nokta yöntemi uygulanarak yapılır. Bu sayede nokta karıştırmanın verimli enerji kullanımı ile baraj karıştırmanın kapsama avantajı birlikte kullanılmış olur. Fakat her bir frekans bandının yayını zaman paylaşımı ile yapıldığı için sırası geçen frekansın karıştırılması durdurulmuş olur. Bu yöntem belirli bir frekans setinin kullanılacağı ve frekans değişim örüntüsünün bilindiği ama anlık frekansın bilinmediği durumlarda kullanılır [12].

2.3. Frekans Çevik Radar Sinyal Modelinin Tasarımı

2.3.1. Temel Radar Tipleri ve Konfigürasyonları

Radarlar tasarımı sırasında; menzil, çözünürlük, güç, maliyet gibi aynı anda optimize edilemeyen radar parametreleri arasında, kullanım alanına uygun şekilde seçimler yapılmalıdır. Tasarım kararları sonucunda, farklı konularda güçlendirilmiş olan radarlar kategorilere ayrılarak savaş sahasında kendilerine uygun görevlere atanırlar.

Arama radarları, belirli bir hava sahasındaki hedeflerin konumunu belirleyerek; bu tehditler için erken uyarı, kontrol ve önlem geliştirme faaliyetleri kapsamında kullanılmaktadır. Bu radarlar uzun bir menzile sahip olması gerekmesi ile birlikte yakın hedefleri birbirinden ayırabilmesi için de iyi bir menzil çözünürlüğüne sahip olması gerekmektedir. Radar tarafından gönderilen dalganın, uzak mesafelerden gelmesi daha uzun süreceğinden; keşfedilmek istenen hedefin mesafesi arttıkça, radarın dinleme süresinin daha uzun tutulması yani darbe tekrarlama frekansının azaltılması gerekmektedir.

İzleme radarları, belirli bir radar kesit alanına sahip tehdit unsurları için konum, hız ve yöneliminin belirlenmesiyle birlikte hedefin anlık hareketi doğrultusunda takibini sağlamaktadır. Radar güdümlü füzelerin tehdit platforma doğru şekilde yönlendirilebilmesi için, izleme radarları tarafından bu silah sistemlerine yeterince yüksek konum doğruluğu, doğrultu ve hız bilgisi sağlanıp, bu verilerin de kısa periyotlarla güncellemesinin sürdürülmesi gerekmektedir. Çoğu izleme radarında, yüksek yatay ve dikey eksen çözünürlüğü elde etmek amacıyla, kullanılan antenin yönlü ve dar hüzmeye genişliğine sahip olması gerekmektedir. Bu da antenin boyutunun dalga boyuna oranı olarak ifade edileceğinden, kullanılacak hareket ve görev koşullarına uygun olarak eğer anten boyutunun büyüklüğü bir kısıt teşkil ediyorsa, düşük dalga boyu kullanılacağından yüksek frekanslarda çalışılması gerekecektir. Gerekli menzil çözünürlüğünü sağlamak ve hedefe dair bilgileri hızlı bir şekilde güncellemek amacıyla ise, dar darbe genişlikleri ve yüksek darbe tekrarlama frekansları kullanılmalıdır.

Gözetleme radarlarının temel işlevi geniş bir hava sahasını tarayarak, aranan bölgedeki hedeflerin öncelikli olarak konumunun belirlenmesidir. Gözetleme radarları tarafından üretilen bu hedef raporları, hedef modeli oluşturulması için işlenmektedir. Arama esnasında hedef takibi yapabilen bu radarlar tarafından oluşturulan hedef-takip vektörleri, belirlenmesi gereken hedeflerin hız ve hareket modelleri ile birlikte hedefe özgü özelliklerinin belirlenmesini de mümkün kılar. Özellikleri belirlenen ve modeli tanımlanan hedeflerle

bağlantılı tehdidin belirlenmesi bu aşamadan sonra gelecekteki konumunun ve izlenecek stratejinin tahmin edilmesi için kullanılır. Gözetleme radarıyla bağlantısı olan radar veri-işlem birimleri genel olarak radarın geliştireceği stratejiyle ortaklaşa bir yapı içindedir. Tek bir gözetleme ya da arama radarı, diğer tip radarlar tarafından ya da radar vericisini tamamlayıcısı diğer tip algılayıcılarla (elektro-optik, IR-kızılötesi) birleştirmek için kullanılmaktadır.

Bir diğer önemli tasarım kararı da radar alıcı-verici antenlerinin sahadaki konumlandırılmasıdır. Taşınabilirlik ağırlık ve etkinlik arasındaki denge unsurunu oluşturan bu seçim sonucunda radar sistemleri farklı isimlerde anılırlar.

Monostatik ve Bistatik olmak üzere iki temel anten konfigürasyonu kullanılmaktadır. Monostatik radarlarda, anten hem verici hem de alıcı birimi tarafından ortak kullanılmaktadır. Verici birimi genellikle yüksek güç seviyelerinde (yüzlerce kilowatt ve hatta megawatt aralığındaki) elektromanyetik dalgaları iletebilen bir cihazdır. Buna karşılık alıcı birimi ise (miliwatt ila nanowatt aralığında veya daha da az) çok daha düşük güçlere sahip elektromanyetik dalgalara yanıt verebilen aynı zamanda güce duyarlı ve hassas bir cihazdır. Bu nedenle alıcıyı, vericinin yüksek güçlü elektromanyetik dalgalarından korumak için vericiden izole edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, alıcının hassas bileşenlerine ciddi şekilde zarar verilebilir. Bistatik radar konfigürasyonunda verici ve alıcı birimlerinin antenleri, fiziksel olarak farklı konumlandırılarak önemli ölçüde bu izolasyon sağlanabilmektedir.

Donanımsal özellikleri belirlenen radarlar dalga yayınlamaya hazır hale getirildikten sonra kullanım strateji belirlenmesi gerekir. Sahadan toplanan verilerin analizi ile kurulan stratejiler doğrultusunda radarın yayın yapacağı sinyal tipine karar verilir.

Radar sistemlerinde kullanılan dalgalar formlarına göre Sürekli ve Darbeli Dalga olmak üzere iki şekilde sınıflandırılabilir. Sürekli Dalga formuna sahip radarların vericisi herhangi bir kesinti olmaksızın çalışarak, aktif sinyal üretmektedir. Alıcısı da sürekli dinleme modunda kalarak hedeflerden yansıyan tüm sinyalleri işlemek üzere toplamaktadır. Bu dalga formuna sahip radarlarda, verici ve alıcı aynı anda çalışmak durumunda olduğundan genellikle bistatik konfigürasyon kullanılmaktadır.

Sürekli dalga formuna sahip sabit konumda bulunan bir radar ve hedef için radardan gönderilen sinyallerin frekansı değişmemektedir. Ancak Doppler etkisinin bir sonucu olarak, hareketli bir hedef radar yönüne doğru hareket ettiğinde alınan sinyalin frekansı artacaktır benzer şekilde radardan uzaklaştıkça ise alınan sinyalin frekansı azalacaktır. Dolayısıyla radardan gönderilen ve radar tarafından alınan sinyalin frekansında değişiklik olacaktır.

Radar alıcısı ise hedefin bağıl hızını, alınan sinyalin frekansını iletilen sinyalin frekansı ile karşılaştırıp elde edilen faz kaymasından (Doppler Kaymasından) belirlemektedir. Aynı zamanda bu radarlar sürekli olarak iletimde olduğundan, iletilen elektromanyetik dalganın gidiş-dönüş süresinin ölçümü ve buna bağlı olarak da hedef menziline belirlenmesi, dalganın formlarında bazı modülasyon teknikleri uygulanmadan mümkün değildir. Bunun için en yaygın yöntemlerden biri dalganın frekansını zaman içinde değiştiren tekniklerin uygulanmasıdır.

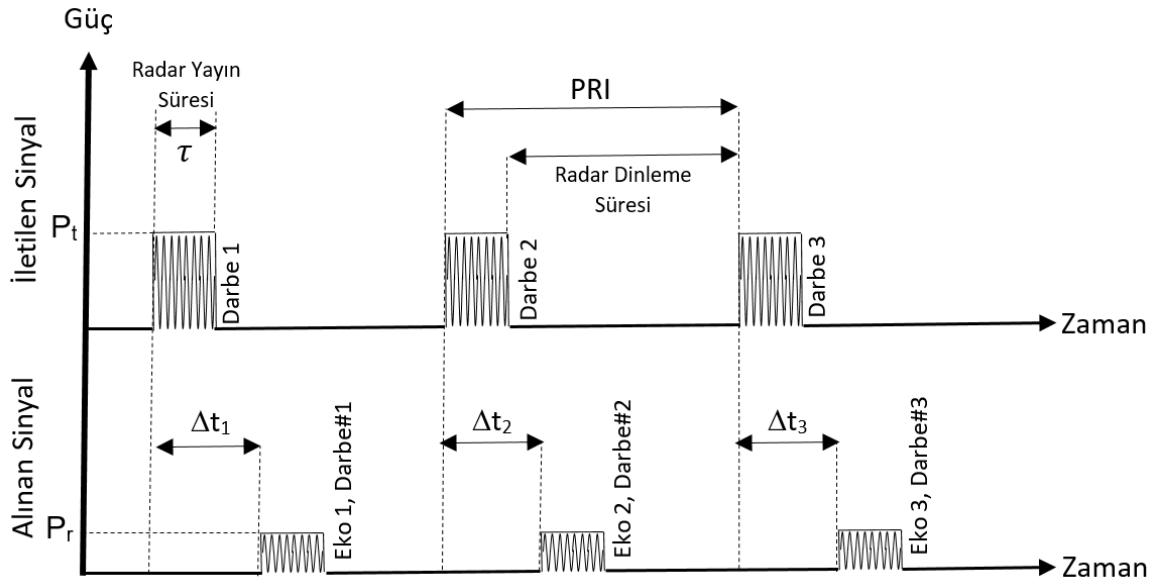
Darbeli Dalga formuna sahip radarlarda, verici bir dizi sonlu, yüksek güçlü RF darbeler üretir ve bu sinyalleri ortama iletir. Vericinin aktif olduğu süre boyunca, alıcı antenden izole edilir veya kapatılır. Dolayısıyla bu süre zarfında alınan sinyaller algılanamaz. Verici kapandığında ise hedef sinyallerinin algılanabilmesi için alıcı açılmaktadır.

Darbeli dalga formu kullanan radarlarda hedefin ve ona bağlı bilgilerin belirlenmesi için, üretilen RF sinyalleri öncelikle hedefe ulaşip ardından hedeften yansıyarak tekrar radara ulaşması gerektiğinden, radarın bir sonraki dalgayı iletmesi için beklemesi gereken süre, istenen menziline bir fonksiyonudur. Radar sisteminden beklenti, daha uzun menzil erişimi sağlaması ise üretilen darbelerin düşük görev döngüsüne sahip olması gerekir. Dolayısıyla verici tarafında yalnızca zamanın küçük bir yüzdesinde iletimde olması, geriye kalan zamanda alıcı tarafında dinlemeye ayrılması gereklidir. Eğer radar sisteminden beklenti, birbirine yakın hedeflerin tespiti/takibi ise, darbe tekrarlama aralığı kısaltılarak belirli bir sürede daha fazla darbe yayınlanması gerekir. Ancak bu durumda da darbelerin üretim sıklığı artacağından, sinyalin gidebileceği maksimum menzil kısıllanacaktır. Bu sebeple radar sistemlerinde, görev ve ihtiyaçlar doğrultusunda darbe tekrarlama sıklığı, menzil ve çözünürlük kapsamında optimize edilmelidir.

2.3.2. Darbe Radarı Dalga Formu Karakteristiği ve Temel Performans Parametreleri

Bir darbe radarının operasyonel etkinliği ile çevresel faktör ve tehditlere karşı direnci, maksimum tespit menzili, menzil belirsizliği, menzil çözünürlüğü gibi özelliklere dayanmaktadır. Radarın sinyal karakteristiği ve performansını şekillendiren bu parametrelerin, görev ihtiyacı çıktılarının ayarlanmasında doğrudan etkisi bulunmaktadır. Darbe radarının temel parametrelerini içeren sinyal karakteristiği Şekil 2.3'de gösterilmektedir. Burada radarın saniyede tamamladığı sinyal gönderme/alma döngülerinin

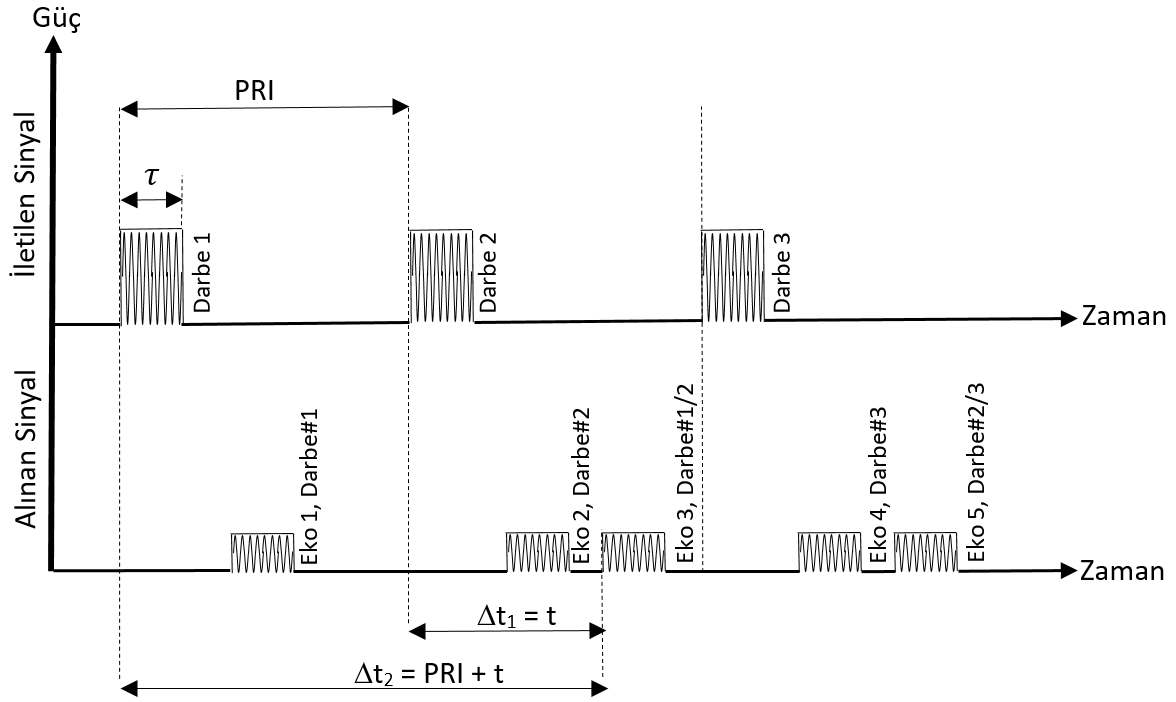
sayısı veya sıklığı darbe tekrarlama frekansı (DTF) olarak adlandırılır. Radar, hedef tespiti için her darbe tekrarlama aralığında (DTA) kısa süreli bir darbe yayınlar ve döngünün geri kalanında hedeflerden gelen sinyal yankılarını dinler. Radarın yayında kaldığı bu süre, darbe genişliği olarak ifade edilir. Bir radar döngüsü süresince radarın iletimde olduğu süreye ise görev döngüsü (veya görev faktörü) olarak adlandırılır ve darbe genişliğinin darbe tekrarlama aralığına oranlanması ile elde edilir [13]. İletilen EM dalgasının ortalama gücü ise, iletilen sinyalin tepe gücü ve iletim görev faktörünün çarpımı oluşturur.



Şekil 2.3 Darbe Radarının Dalga Formu Karakteristiği

Hedef menzili, radar tarafından bir darbenin iletilmesinden, hedeften yansıyan sinyali alana kadar geçen süre ölçülerek belirlenir. Radar tarafından iletilen darbeler arasındaki süre, ortamdaki hedeflerden yansımış olabilecek tüm elektromanyetik (EM) dalgaların alınmasına olanak sağlayacak şekilde belirlenmelidir. Her darbe tekrarlama aralığı döngüsü için radar dinleme süresi, belirlenen maksimum mesafedeki hedeften yansıma geri dönene kadar sürmelidir. Aksi takdirde radar, menzil içinde birden fazla hedef olduğunda, bir DTA döngüsünde gelen yankıların kaynağını ayırt edemez. Radar tarafından alınan sinyalin, birinci darbenin ikinci hedeften yansıyıp dönüşü olduğu mu yoksa ikinci darbenin birinci hedeften yansıyan dönüşü mü olduğu kesin olarak belirlenemez ve menzil belirsizliği ortaya çıkar. Şekil 2.4’de gösterildiği üzere, radar ile hedef arasındaki darbenin gidiş dönüş süresi (Δt), darbe tekrarlama aralığından daha büyük olduğu bir senaryoda, hedeften dönen yankı ilgili döngü süresi içerisinde yani bir sonraki darbe iletilmeden önce radarın alıcısına geri

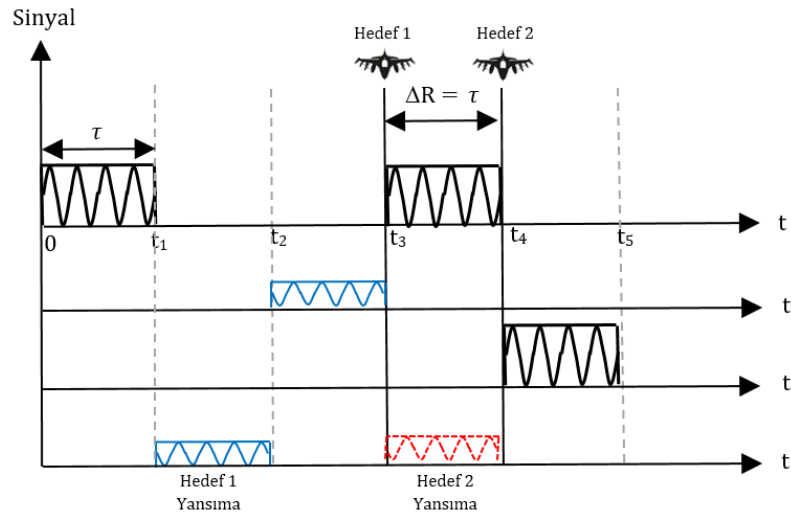
dönemeyecektir. Dolayısıyla bu yansımanın Δt_1 saniye uzaklıktaki kısa menzilli bir hedeften mi, yoksa Δt_2 saniye uzaklıktaki daha uzun menzilli bir hedeften mi geldiği belli değildir. Menzil belirsizliğinin önlenmesi için bir darbe gönderilmeden önce radarın maksimum menzildeki hedeflerden gelen geri dönüşlerin bir sonraki darbe gönderilmeden önce dönmesini sağlayacak kadar yeterli bir süre beklenmesi gerekir [13].



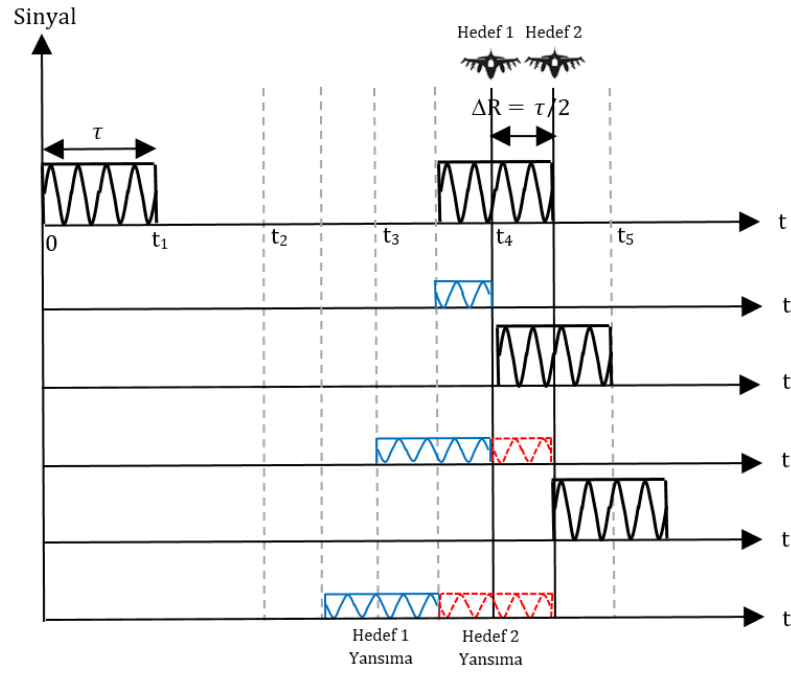
Şekil 2.4 Menzil Belirsizliği

Radar için maksimum algılama menzili, alınan ekonun gücüne bağlıdır. Radarın, yüksek güçlü yansıma alabilmesi için, iletilen darbe uzun mesafede iletim sırasındaki kayıplara maruz kalacağından daha fazla enerjiye sahip olması gerekir. Radarın ortalama iletilen gücü, darbenin tepe gücü ve görev döngüsüne bağlı olduğundan radarın darbe genişliği veya darbe tepe gücü ne kadar arttırılırsa iletilen darbelerin de ortalama gücü artacaktır ki bu sayede havada daha fazla yol kat edebilecektir. Ancak bu iyileştirme radar için bir avantaj olmasına karşın ne yazık ki radarın tehdit elektronik sistemler tarafından tespit edilme/fark edilme olasılığını da beraberinde getirmektedir.

Menzil Çözünürlüğü, birbirine yakın hedefleri farklı nesneler olarak tespit edebilme yeteneğini tanımlayan bir radar ölçüsüdür. Menzil çözünürlüğü de darbe genişliği ile doğru orantılı olduğundan bu hassas çözünürlük gereksinimini karşılamak için de çok kısa süreli darbelerin kullanılmaması gerekmektedir. Fakat kısa darbelerin kullanılması ortalama iletilen gücü ve dolayısıyla da alıcının tarafında karşılanması gereken sinyal-gürültü oranını



Şekil 2.6 Menzil Çözünürlüğü (ΔR) $\geq$ Darbe Genişliği



Şekil 2.7 Optimal Darbe Genişliğinin Minimum Menzil Çözünürlüğü (ΔR) İle İlişkisi

2.3.3. Darbe Sıkıştırma Tekniklerinin Radar Performansına Katkıları

Maksimum tespit menzili ile bu menzil içindeki nesneleri çözümülenmesi için gerekli çözünürlük gereksinimleri, uygulamaya veya radar moduna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, geniş bir hava sahasında olası tehditlerin varlığının tespit edilmesi için geliştirilmiş bir arama radarı, uzun bir menzile ihtiyaç duyar ve bununla birlikte hedefin fiziksel kapsamına eşit veya bundan daha büyük, nispeten kaba bir menzil çözünürlüğü kullanabilir. Bunun aksine, hedef tanıma ve sınıflandırma kabiliyetine sahip bir radar ise hedeflerin

saçılma merkezlerini çözümlemeye yetecek kadar hassas bir çözünürlüğe ihtiyaç duyar. Taktik radarlar için çözünürlük gereksinimleri; erken uyarı, atış kontrolü, hedef tespit, hedef takibi, havadan önleme gibi işlevler göz önünde bulundurulduğunda arama sırasında kullanılanlardan çok daha hassas olmalıdır. Dolayısıyla radarlar icra edecekleri görev doğrultusunda hem alıcısının SNR seviyesine uygun güçte sinyal üreterek beklenen tespit menzili kriterini hem de olası iki yakın mesafedeki hedefin birbirinden ayırt edilmesini sağlayan menzil çözünürlüğü kriterini karşılaması gerekmektedir [14].

Açıkça görüldüğü üzere temel darbe radarının ana problemi, darbe genişliğinin menzil çözünürlüğünü sınırlamasıdır. Buna karşılık ortalama iletilen güç de, maksimum tespit menzili sınırlar. Bu durum, menzil çözünürlüğü ile maksimum tespit menzili arasındaki darbe genişliği sınırlamasına dayalı bir uzlaşmayı gerektirir. Uzun menzildeki hedeflerin varlığının tespit edilmesi ile hedef konumunun yüksek hassasiyet ile belirlenmesi, askeri hava sahasında üstünlük açısından önemli radar ölçümleridir. Bu nedenle bu sorunu ortadan kaldıracak uygun yöntemlere ihtiyaç vardır.

Dalga formunun iletim enerjisini arttırmak için darbeyi uzatmak menzil çözünürlüğünü düşürmekte ve daha hassas menzil çözünürlüğü elde etmek için darbe genişliğini kısaltmak da enerjiyi azaltmaktadır. Yüksek azami güce sahip kısa süreli darbe ile düşük tepe güçlü uzun süreli darbe aynı enerjiye sahiptir. Herhangi spesifik bir modülasyon tekniği uygulanmamış bir iletim sinyali için, alınan bir darbedeki hedef sinyalin bant genişliği, darbe genişliği ile ters orantılıdır. Darbe genişliği ve bant genişliği arasındaki ilişki, menzil çözünürlüğü ile ortalama iletilen gücü ayırmak için bir çözüm sağlar. Darbe uzunluğu korunurken dalganın bant genişliğini arttırmak için darbe içi genlik, faz veya frekans modülasyonu kullanarak enerji ve çözünürlüğü birbirinden ayırmayı sağlayan tekniklere darbe sıkıştırma teknikleri adı verilir.

Bir dalga formunun bant genişliği, darbe içi veya darbeler arası modülasyon teknikleriyle artırılarak darbeyi kısaltmadan da daha hassas menzil çözünürlüğü elde edilebilir. Yıllar içinde frekans modülasyonu aracılığıyla darbe sıkıştırma kapsamında Doğrusal Frekans Modülasyonlu (DFM) dalga formları, Doğrusal Olmayan Frekans Modülasyonlu (DOFM) dalga formları, Kademeli Frekans Modülasyonlu (KFM) dalga formları, Kademeli Chirp Frekans Modülasyonlu (KCFM) dalga formları vb. gibi çeşitli sinyal işleme teknikleri geliştirilmiştir [15].

Darbe içi modüle edilmiş dalga formları, darbe içindeki geniş frekans aralığı boyunca anlık frekansı değiştirir. Bununla birlikte, ultra geniş bant dalga biçimlerini destekleyen donanımı iletmek/almak için sinyal işlemcilerini tasarlamak ve entegre etmek zordur. Tüm

analog bileşenler, herhangi bir bozulma olmaksızın anlık anahtarlama frekanslarını desteklemelidir. Ayrıca faz dizi anten sistemlerinde yönlülük, anten elemanları arasındaki mesafeye ve faz farkına bağlıdır. Anten ışın yönü hesaplaması doğrudan dalga boyuyla ilgilidir. Darbe içi modülasyonda frekans taraması sırasında dalga boyu anında ve kesintisiz olarak değişir. Sistem geniş bant ise, bu dalga boyu değişimi önemli olabilir ve frekans taraması sırasında antenin ışın yönü sürekli olarak değişecektir. Bu durum istenmeyen yönlendirme etkisi nedeniyle ek bir sinyal gücünde ek bir kayıp kaynağına neden olacaktır.

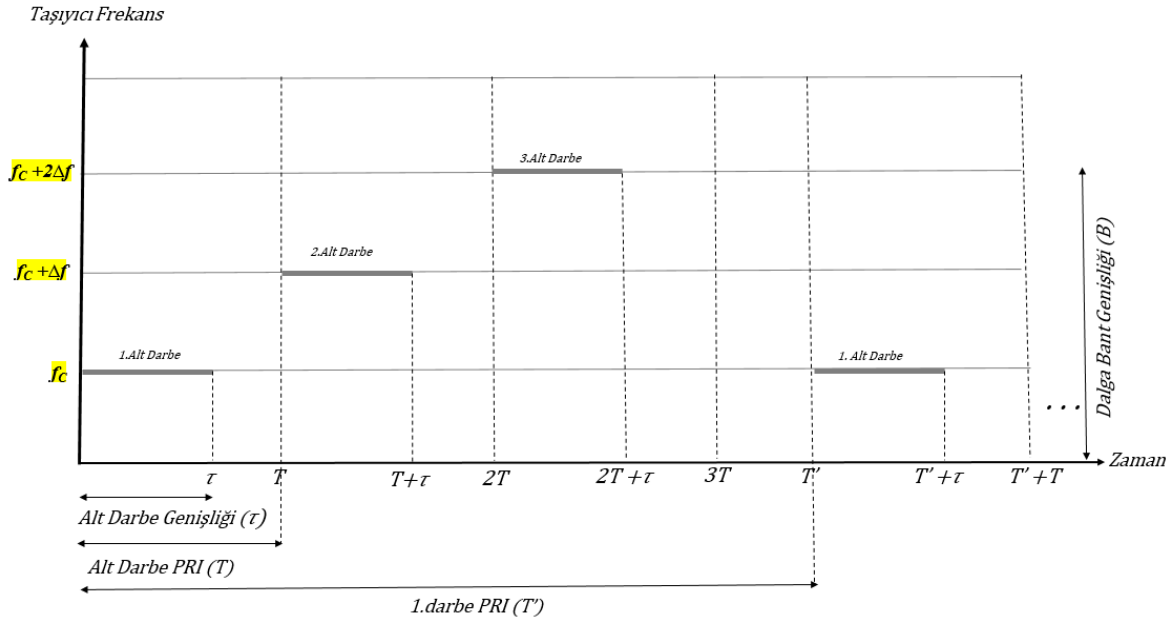
Veri hızı ve darbe başına toplanan örnek sayısı, sinyal işleme gereksinimlerini belirler. Radar alıcısının işlem bant genişliği Analog/Dijital Dönüştürücünün (ADC) örnekleme hızıyla tanımlanır. ADC'nin Nyquist kriterlerini karşılaması için dalganın bant genişliğine eşit veya daha büyük bir hızda örnekleme yapılması gerekir. Dalga biçimi için minimum örnek sayısı, darbe sıkıştırma oranına bağlıdır. Yüksek sıkıştırma oranı için büyük miktarda verinin aktarılması ve işlenmesi sorunludur. KFM; ultra geniş bant uygulamaları için darbe içi frekans modülasyonuna karşı alternatif bir tekniktir. Açıklamalar doğrultusunda, bu çalışmada frekans çevikliğine sahip dalga formunun üretmek için KFM temel olarak kullanılmıştır.

2.3.4. Kademeli Frekans Dalga Formunun Kavramsal ve Matematiksel Modellemesi

Kademeli frekans dalga formu, darbe içi frekans modülasyonu gerektirmeyen geniş bant aralığı uygulamalarında kullanılan alternatif bir tekniktir. Bu dalga biçimi, geniş bant bir sinyalin, sabit adım boyutları kullanılarak dar bantlı frekanslar halinde alt darbelere bölünmesiyle sentezlenmektedir. Genellikle her bir darbenin taşıyıcı frekansının önceki darbeye göre sabit frekans değeri kullanılarak doğrusal olarak artırıldığı veya azaltıldığı frekans adımlama modeli kullanabileceği gibi belirli bir aralıkta rastgele seçilmiş frekanslar kullanılarak doğrusal olmayan frekans adımlama örüntüleri de tercih edilebilir.

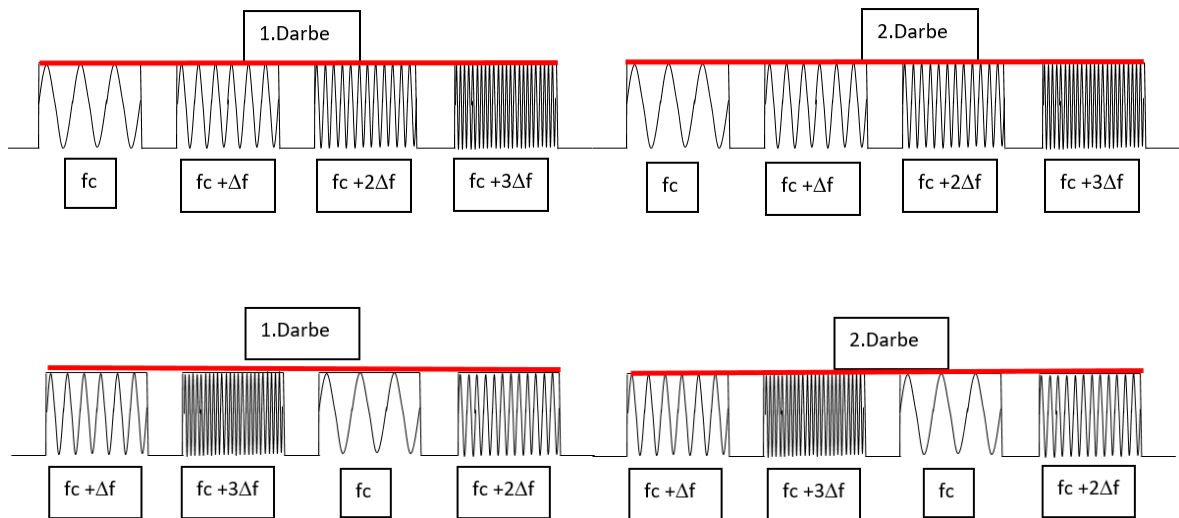
Her bir alt darbe basit, sabit frekanslı bir darbe olabilir; ancak frekans bir darbeden diğerine değiştirilmelidir. En yaygın kademeli frekans dalga biçimi, her bir darbenin taşıyıcı frekansının önceki darbeye göre Δf Hz kadar arttırıldığı veya azaltıldığı doğrusal bir frekans adımlama modelini kullanılmasıdır. Her bir alt darbe bileşeni modüle edilmemiş ve doğrusal bir frekans adımlama örüntüsü kullanıldığında, vericinin ve alıcının anlık bant genişliği $1/\tau$ Hz düzeyinde olması gereklidir. Bu doğrultuda bir bütün olarak gönderilen dalga formunun toplam bant genişliği ise $N \cdot \Delta F$ olacaktır.

Şekil 2.8’de bant genişliği B ve darbe tekrarlama aralığı da T' olan bir sinyalden kademeli frekans dalga formu elde edilmiştir. Burada geniş bant olan bu dalga, darbe tekrarlama aralığı T ve her bir darbenin genişliğinin de τ olan N adet alt darbeye bölünerek darbe içinde yeni bir darbe dizisi elde edilmiştir.



Şekil 2.8 Kademeli Dalga Formu Parametreleri

Şekil 2.9’da kademeli dalga formu için alt darbelerin doğrusal artan frekans adımları ve belirli aralıkta rasgele seçilen frekans adımlarıyla oluşturulmuş modeller gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Kademeli Dalga Formu Yapısı ve Frekans Adım Modeli

Alıcının özelliklerine göre oluşturulan alt darbeler, sabit frekans yayını yerine faz, genlik, frekans modülasyonları uygulanarak daha karmaşık bir yapıya da getirilebilir. Kademeli frekans modülasyonlu dalga formu için radar iletim ve dönüş sinyal eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir [16] [17] [18] [19] [20].

R_0 uzaklığında durağan bir hedef olduğu varsayıldığında, alt darbe dizisinin fazı Eşitlik 2.1'deki fonksiyon ile ifade edebilir. Bu eşitlikte, f_0 gönderim frekansını, c ışık hızını, i alt darbe indisini ve N ise toplam alt darbe sayısını ifade etmektedir.

$$\theta_i = \sum_{i=1}^N 2\pi i f_0 \frac{2R_0}{c} \quad (2.1)$$

Darbeler arasında merkez çalışma frekansının kademeli olarak değiştirilmesi, her darbede $f_0 = \Delta f$ kadar faz rotasyonu oluşturmaktadır. Darbeler arası faz değişimi ($\Delta\theta$) Eşitlik 2.2'deki gibi açıklanmaktadır.

$$\Delta\theta = \theta(i+1) - \theta(i) = 2\pi f_0 \frac{2R_0}{c} \quad (2.2)$$

Gönderilen kademeli frekans darbe dizisi $t_{x(t)}$ Eşitlik 2.3'deki şekilde ifade edilebilir. Burada, N : Toplam alt darbe sayısını, i : alt darbe indisini, f_c : çalışma frekansını, Δf : frekans adımını, T_0 : radar darbe genişliğini ve τ_0 : alt darbe genişliğini ifade etmektedir.

$$t_x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{Re} \{ \exp(j2\pi (f_c + i\Delta f)t) \} \text{rect} \left(\frac{t - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \quad (2.3)$$

Alınan sinyal $r_{x(t)}$ aşağıdaki şekilde ifade edildiği gibidir. Burada Hedefin i numaralı alt darbesindeki yansıtma katsayısı $\Gamma_i = |\Gamma|e^{j\theta}$ şeklindedir. Γ : Hedef yansıtma katsayısıdır.

$$r_x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{Re} \{ \Gamma_i \exp(j2\pi (f_c + i\Delta f)(-\Delta t)) \} \text{rect} \left(\frac{(t - \Delta t) - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \quad (2.4)$$

Kayıpsız bir ortamda, R_0 mesafesinde yer alan bir hedefe gidip dönme süresi Δt ile gösterilmiştir. Hedefin v hızı ile hareket etmesi halinde 2.5 numaralı eşitlikte gösterildiği gibi, Δt fonksiyonu hedefin hızına bağımlı olmaktadır. Fakat hedefin durağan olduğu kabul edilmiştir ve bu sebeple Δt ilk darbeden N . darbeye kadar sabit tutulmuştur. Aşağıdaki fonksiyonlarda da Δt , Eşitlik 2.6'daki ifade edildiği gibi kullanılmıştır.

$$\Delta t = \frac{2(R_0 - vt)}{c} \quad (2.5)$$

$$\Delta t = \frac{2R_0}{c} \quad (2.6)$$

Sayısal modülasyon genellikle karesel (I ve Q) sinyaller ile gerçekleştirilir. I ve Q sinyalleri birbirine diktir. “I” kosinüs sinyalini ifade ederken, “Q” ise sinüs sinyalini ifade etmektedir yani iki komponent arasında 90 derece faz farkı bulunmaktadır.

$$t_{x,ref}(t) = 2 \sum_{i=0}^{N-1} \exp(-j2\pi (f_c + i\Delta f)t) \text{rect}\left(\frac{t - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0}\right) \quad (2.7)$$

Gönderilen sinyalin bir referans versiyonu kuplör aracılığı ile alıcıya beslenir ve karesel karıştırıcı kullanılarak kompleks sinyal Eşitlik 2.7’de ifade edildiği şekilde oluşturulur.

$$r_{x,BB}(t) = r_x(t) \times t_{x,ref}(t) \quad (2.8)$$

Karesel faz terimini ayırmak amacıyla, 2.8 numaralı denklemde tanımlandığı gibi alınan sinyal ile kuplörden gelen referans sinyali karıştırılır ve kompleks temel bant sinyaline indirgenmiş olur. Sonrasında, karesel bileşenleri elde etmek için alçak iletimli filtreleme uygulanır ve 2.9 numaralı denklem elde edilir.

$$r_{x,BB}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} |I_i| e^{j\phi} \exp(-j2\pi (f_c + i\Delta f)(\Delta t)) \text{rect}\left(\frac{t - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0}\right) \quad (2.9)$$

Kompleks temel bant darbe dizisindeki her bir darbeden alınan örneklemeler 2.10 numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$s(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \delta(t - iT_0 - \tau_0/2) \quad (2.10)$$

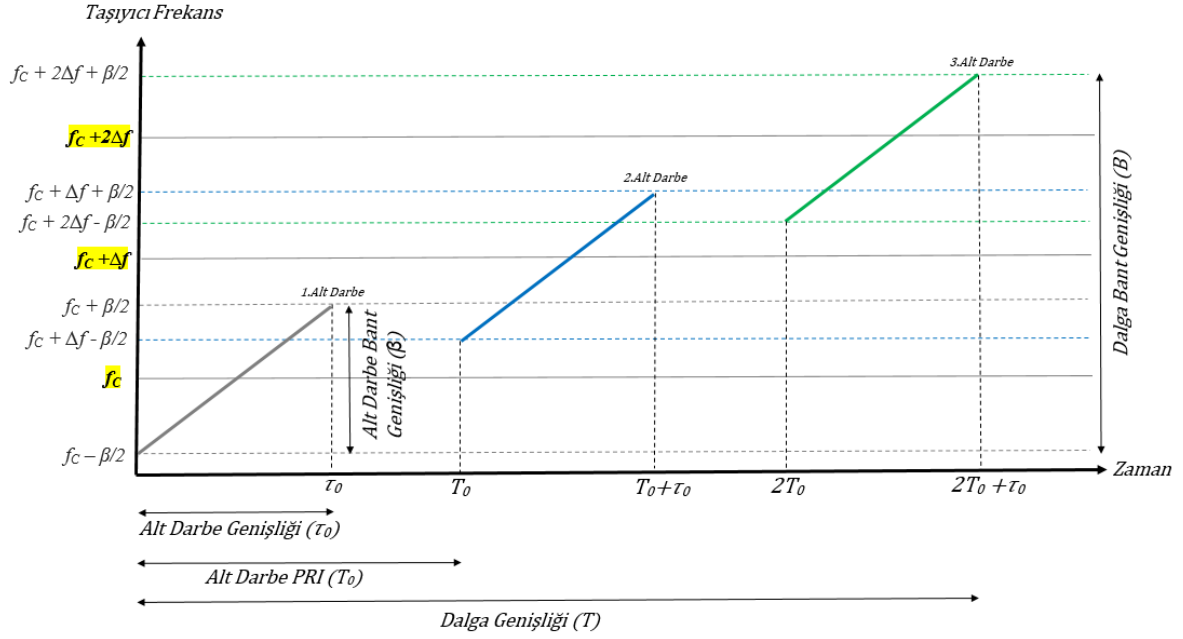
Örneklenen kompleks dizi $C[i]$; 2.9 numaralı temel bant darbe dizisi denklemi ve 2.11 numaralı örnekleme denkleminin çarpılması sonucunda elde edilir.

$$C[i] = | \Gamma_i | e^{j\phi} \exp(-j2\pi (f_c + i\Delta f)\Delta t) \quad i = 0,1,2,\dots,N-1 \quad (2.11)$$

2.11 numaralı denklemde gösterildiği gibi; dizideki her bir eleman, kompleks temel bant sinyalindeki dizide var olan her bir darbe frekansının örneklemevidir. Örneklenmiş veriler eş zamanlı olarak ters kesikli Fourier dönüşümü kullanılarak bir aralıktaki zaman profilleri elde edilir.

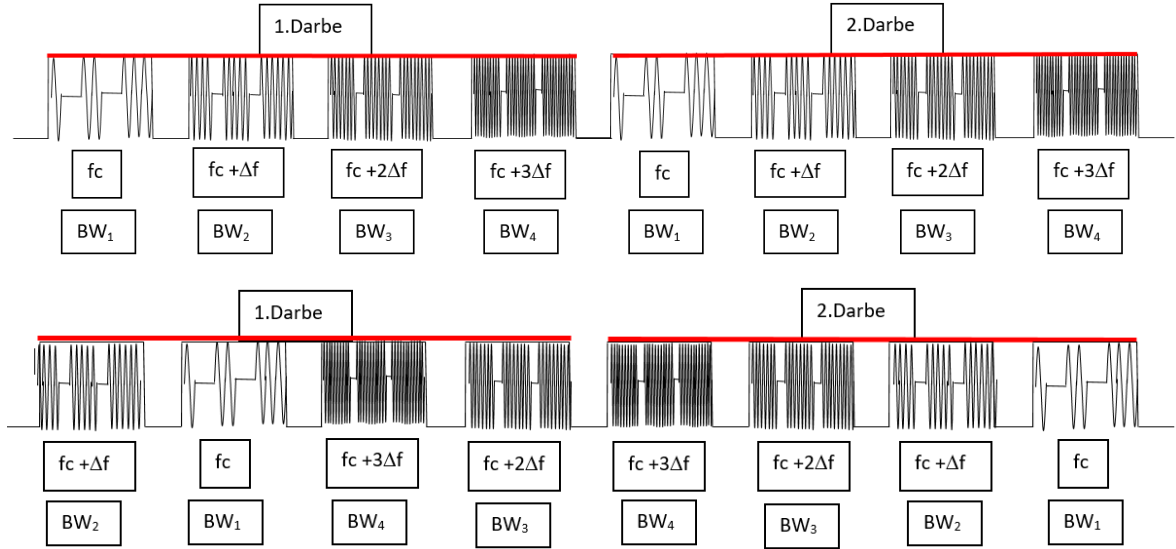
2.3.5. Kademeli Chirp Frekans Dalga Formunun Kavramsal ve Matematiksel Modellemesi

Bu dalga formu, ultra bant genişliğine sahip doğrusal frekans modülasyonlu dalga formunun (DFMDF) özelleştirilmiş bir varyasyonu olarak da düşünülebilir. Şekil 2.10'da gösterilen şekilde, bant genişliği B ve darbe genişliği T olan bir sinyalin, darbe tekrarlama aralığı T_0 ve darbe genişliğinin de τ_0 olduğu N adet darbeye bölünmesi ile elde edilen alt darbelere, anlık frekansı β bant genişliğini tarayan doğrusal frekans modülasyonu uygulanmasıyla kademeli chirp frekanslı darbe dizisi elde edilebilmektedir. Bu ardışık chirp darbelerin merkez frekansları ise darbeden darbeye Δf Hz kadar kaydırılmaktadır. (Tutarlı bir sistem için alt darbelerin genliği ve fazının tüm frekans adımları için sabit olduğu varsayılır. Frekans adımları arasındaki anahtarlama gecikmesinin ihmal edilebilir olduğu kabul edilir.) Alt DFMDF darbelerinin tarama modeli veya darbeler arasındaki frekans farkı doğrusal, doğrusal olmayan veya rastgele bir şekilde değiştirilebilir.



Şekil 2.10 Kademeli Chirp Dalga Formu Parametreleri

Şekil 2.11’de kademeli chirp dalga formu için alt darbelerin doğrusal artan frekans adımları ve belirli aralıkta rasgele seçilen frekans adımlarıyla oluşturulmuş modeller gösterilmektedir.



Şekil 2.11 Kademeli Chirp Dalga Formu Yapısı ve Frekans Adım Modeli

Kademeli chirp frekans modülasyonlu dalga formu için radar iletim ve dönüş sinyal eşitlikleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir [15] [21] [22].

Dizi içerisinde yer alan bir alt darbe için f_i frekansında merkezlenmiş DFM dalga formunun zamana bağlı değişken olan fazı $\varphi(t)$ Eşitlik 2.12’de gösterildiği gibidir. Burada B : taranan frekans bandını, τ : alt darbe genişliğini ifade etmektedir.

$$\theta_i(t) = 2\pi f_i t + \pi \frac{B}{\tau} t^2 \quad (2.12)$$

Anlık frekans; 2.12 numaralı fonksiyonun türevi olarak tanımlanmıştır. Her bir alt darbe adımıdaki DFM dalga formu 2.13 numaralı denklemde gösterilen tarama hızına sahiptir.

$$\theta_i = \frac{d\theta(t)}{dt} = 2\pi f_i + 2\pi \frac{B}{\tau} t = 2\pi \left(f_i + \frac{B}{\tau} t \right) \quad (2.13)$$

Gönderilen kademeli chirp frekanslı alt darbe dizisi $t_{x(t)}$ aşağıdaki gibi modellenenir. Eşitlik 2.14’te f_c : merkez çalışma frekansını, Δf : frekans adımını, T_0 : radar darbe genişliğini ve τ_0 : alt darbe genişliğini ifade etmektedir.

$$t_x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{Re} \{ \exp(j2\pi (f_c + i\Delta f)t + j\pi \mu t^2) \} \text{rect} \left(\frac{t - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \quad (2.14)$$

Denklemin 2.14’te verilen μ katsayısı, tarama hızını ifade etmektedir ve B/τ oranı ile ifade edilir. Bu oran dalganın anlık frekansının eğimini ifade etmektedir. μ katsayısının pozitif olması durumunda artan eğimli; negatif olması durumunda da azalan eğimli bir frekans karakteristiği elde edilir.

Sinyalin terimleri yeniden düzenlendiğinde aşağıdaki ifade elde edilir:

$$t_x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \exp(j2\pi f_c t) \exp(j2\pi i\Delta f t) \exp(j\pi \frac{\beta}{\tau_0} t^2) \right\} \text{rect} \left(\frac{t - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \quad (2.15)$$

Kayıpsız bir ortamda, R_0 kadar uzakta bulunan ve $\Gamma_i = |\Gamma|e^{j\Phi}$ yansıtma katsayısına sahip hedeften alınan $r_{x(t)}$ sinyali Eşitlik 2.16’da gösterildiği gibi elde edilir.

$$r_x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \text{Re} \left\{ \Gamma_i \exp \left(j2\pi (f_c + i\Delta f)(t - \Delta t) - j\pi \frac{\beta}{\tau_0} (t - \Delta t)^2 \right) \right\} \text{rect} \left(\frac{(t - \Delta t) - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \quad (2.16)$$

Gönderilen sinyalin Eşitlik 2.17’de belirtilen referans kopyası kuplör ile alıcıya beslenir ve karesel karıştırıcı kullanılarak aşağıdaki kompleks sinyal oluşturulur.

$$t_{x,ref}(t) = 2 \sum_{i=0}^{N-1} \exp \left(-j2\pi (f_c + i\Delta f)t + j\pi \frac{\beta}{\tau_0} t^2 \right) \text{rect} \left(\frac{t - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \quad (2.17)$$

Sıkıştırma öncesinde, alınan sinyal kompleks temel bant sinyaline indirgenir. Bu indirgeme işlemi sırasında faz içi (I) ve karesel (Q) bileşenleri oluşturmak için eş fazlı algılayıcı kullanılır. Demodülasyon işlemi sonrasında elde edilen temel bant sinyali şu Denklem 2.18’de verildiği gibidir.

$$r_{x,BB}(t) = \sum_{i=0}^{N-1} |I_i| e^{j\Phi} \exp \left(-j2\pi (f_c + i\Delta f)(\Delta t) + \pi j \frac{\beta}{\tau_0} (t - \Delta t)^2 \right) \text{rect} \left(\frac{(t - \Delta t) - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \quad (2.18)$$

Temel bant sinyali, 2.19 ve 2.20 numaralı denklemlerde gösterildiği gibi iki ayrı parçada incelenebilir. 2.20 numaralı denklem bir darbe içerisinde iki faz terimi içermektedir. İlki sabitken, ikinci terim darbeler arasında değişkendir. 2.19 numaralı denklemin ilk terimi, chirp işlemi olarak tanımlanmıştır. Bu terim chirp işlemi yapılırken, her bir frekans adımında eş zamanlı olarak değiştirilir.

$$r_{x,BB,1}(t) = \text{rect} \left(\frac{t - iT_0 - \tau_0/2}{\tau_0} \right) \exp \left(\pi j \frac{\beta}{\tau_0} (t - \Delta t)^2 \right) \quad (2.19)$$

$$r_{x,BB,2}(t) = |I_i| e^{j\Phi} \exp(-j2\pi f_c \Delta t) \exp(-j2\pi i \Delta f \Delta t) \quad (2.20)$$

Radar; dönen sinyalleri toplamak için tanımlı bir zaman aralığında ve belirlenmiş bir menzil penceresi içinde alıcı modunda kalır. İlgili menzil penceresinde elde edilen bu sinyal; belirli bir noktadaki hedeften dönüş ile elde edilen ve darbe içi bant aralığını desteklemeye yetecek hızda örneklenmiş sonuçları içerir.

2.3.6. Kademeli/Titreşimli DTA Dalga Formunun Kavramsal ve Matematiksel Modellemesi

Hedefler radar sinyallerinin içinde hareket ederken Doppler frekans kayması yaratırlar. Frekanstaki bu değişim kullanılarak hedef ya da hareketli nesneler, sabit arka plan gürültüsünden ayrılabilir. Bu prensibi kullanan radarlar darbeli Doppler radarlar olarak adlandırılır. Doppler kabiliyeti; sabit arka plan gürültüsü olan ortamlarda görev yapan gelişmiş hava gözetleme radar sistemleri için kritik öneme sahiptir. Tasarımı basit darbe radarlarına ve sürekli dalga radarlarına göre karmaşıklığı ve maliyeti daha yüksektir. Bu zorlukları sebebiyle Doppler radarı kullanmak bazı zorunlu seçimleri de beraberinde getirir.

Bir dalga tekrarlama periyodunda alınan her bir sinyal radar menzilineki çeşitli objelerden gelen yansımaları içerir. Önceki alınan sinyal, bir sinyal tekrarlama periyodu kadar ötelenerek son alınan sinyalden çıkarılırsa sabit nesnelerden gelen yansımalar ikisinde de aynı olacağından birbirlerini etkisizleştirir. Sonuçta elde kalacak sinyal sadece hareket eden nesnelerin tepkilerini içerecektir. Bu tekniği kullanan elemanlara gecikmeli hattı giderici (GHG) denir. Doppler radarları hareketli hedefleri tespit ve takip etmek için GHG'lerden yararlanır. Fakat hedef sinyal tekrarlama sıklığı ile periyodik bir hareket gerçekleştirirse de GHG tarafından elenebilir. Buna hıza körleme hızı denir [23].

Birden fazla farklı darbe tekrarlama sıklığı (DTS) kullanan radar sistemleri darbeli Doppler radar tasarımında esneklik sağlar. Körleme hızları her biri için farklı olur. Buna bağlı olarak belirli bir hızın körleme hızına denk gelme olasılığı azaltılmış olur. DTS her bir taramada, her bir yarım dalga boyunda ya da her bir darbeye değiştirilebilir. DTS çevikliği işlemi radarın hareketli hedefleri tespit etme konusundaki adaptasyonunu ve etkinliğini artırır.

DTA radar taraması sırasında değiştirmek sinyal tekrarlama ile ilgili radara karışı kullanılabilecek eş fazlı karıştırma tekniklerinin etkisini hafifletir. DTA parametresine değişiklik özelliği eklemek, sinyal aralıklarına göre çalışan karıştırıcılara karşı duyarlılığı azaltır. Sinyal dönüş zamanlarını özel olarak hesaplayarak sahte hedef oluşturan aldatma teknikleri hedef takibini önler. Değişken DTA'lı radarlar hasımların sinyal dönüşü hesaplama karmaşıklığını artırarak aldatma karıştırması yapmasını daha zor hale getirir. Değişken DTA aynı zamanda düşman karıştırıcılarını daha uzun süre yayında kalmaya zorlayarak onları anti-radyasyon füzesi savunmasına karşı daha zayıf hale getirir. DTA'yı kademeli teknik ile değiştirmek, tahmin edilebilirlik açısından yeterince cazip olmayabilir. Çünkü değiştirme örüntüleri SINIST faaliyetleri ile keşfedilebilir. Tahmin etme işlemini

daha da karmaşık hale getirmek için DTA belirli bir aralıkta rasgele bir şekilde değiştirilebilir.

Kademeli bir DTA dizisi, DTA [1], DTA [2], ..., DTA[k] olarak tanımlanan sabit aralıklarla artan/azalan bir örüntüye sahiptir. Çoklu sabit DTA dizilerinin kombinasyonu k döngüsünde bir tekrarlanmaktadır. Kademeli DTA dizisi Eşitlik 2.21'de gösterildiği şekilde elde edilir [24].

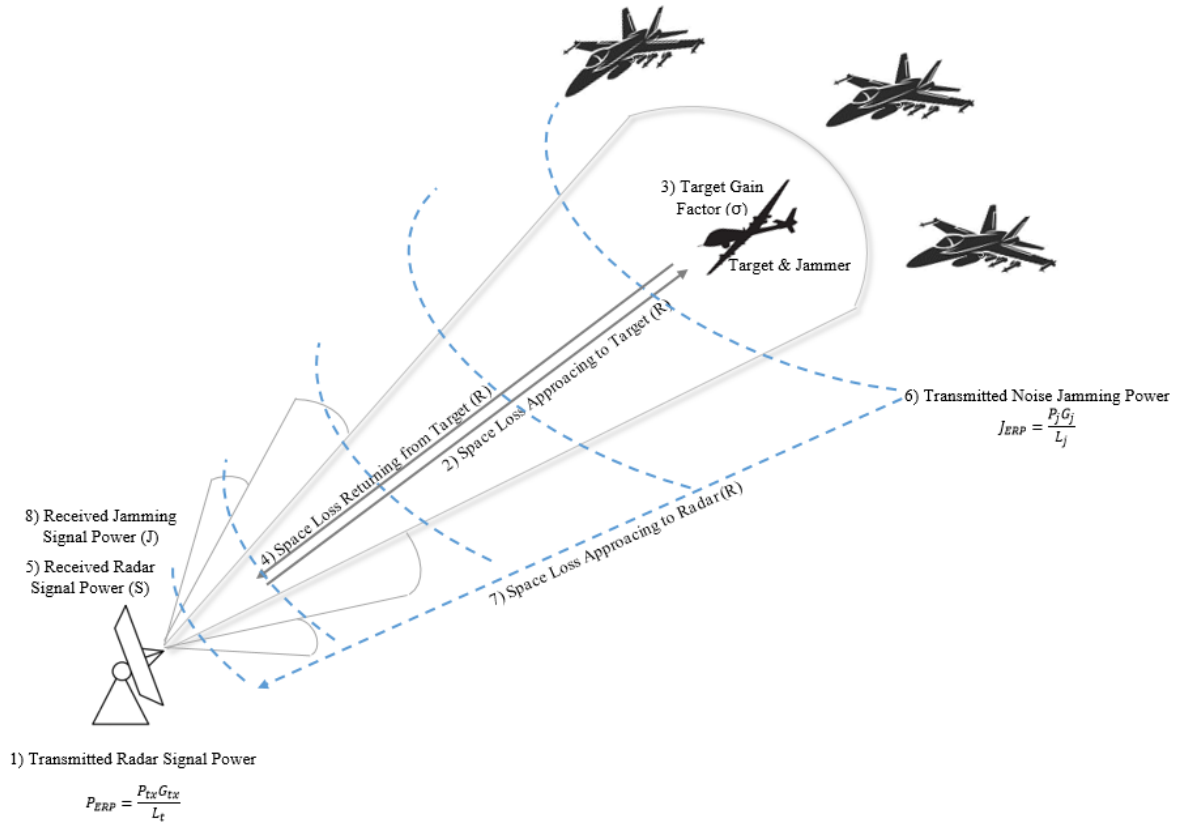
$$\tau_i = \tau_{DTA[mod(i,k)]} \quad i = 0, 1, \dots \text{Toplam darbe Sayısı} \quad (2.21)$$

Titreşimli DTA dizisi, Eşitlik 2.22'de δ olarak belirtilen bir sapma ile değiştirilmektedir. δ , ortalama DTA'nın %30'undan daha az varyansa sahip bir Gauss değişkenidir. DTA darbeden darbeye bu varyans kullanılarak radar performansını etkilemeyecek aralıkta değiştirilmesiyle elde edilir [24]. Eşitlik 2.22'de, τ_i : i numaralı darbenin DTA'sını, i : darbe sayısını, τ_0 : ilk darbenin DTA'sını, δ : varyansı ifade etmektedir.

$$\tau_i = i\tau_0 \pm \delta\tau_i \quad i = 0, 1, \dots, \text{Toplam Darbe Sayısı} \quad (2.22)$$

2.3.7. Karıştırma Altında Mono Statik Radar Denklemleri

Karıştırma sinyal oranı (KSO); Sonuçlar ve Tartışma bölümündeki denemelerde birincil performans ölçütü olarak kullanılacaktır. Radar ve kendini koruma karıştırıcısı sinyal durumlarının görsel ifadesi Şekil 2.12'de verilmiştir. Verici tarafından iletilen güç, radar anteni ile belirli yönlerde yayınlanır. Yayınlama işlemi ile ortaya çıkan güce etkin yayın gücü denir. Toplam sinyal gücü R mesafesindeki hedef üzerinde bir güç yoğunluğu oluşturur. Sonrasında, radar sinyali hedefin radar kesit alanına (RKA) orantılı olarak fazladan bir yükseltme ile yansıtılır. Sinyal, hedefe gidişi ve radar antenine dönüşü sırasında radyo frekans ortam yayılma kaybı veya atmosferik kayıp olarak adlandırılan etkiye maruz kalır [25] [26].



Şekil 2.12 Radara Karşı Kendini Koruma Karıştırma Senaryosu

Sonuç olarak, radar antenine ulaşan nihai sinyal gücü S 2.23 numaralı denklem ile tanımlanmıştır. Bu ifade aynı zamanda mono statik radarlar için iki yönlü radar denklemi olarak da bilinir.

$$S = P_{rx} = \frac{P_{tx} G_{tx} G_{rx} \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 L_t R_t^4} \quad (2.23)$$

Burada, P_{tx} azami verici gücünü, G_{tx} verici modundaki anten kazancını, G_{rx} alıcı modundaki anten kazancını, λ radar sinyalinin dalga boyunu, σ hedefin radar kesit alanını, L_t toplam radar kayıplarını ve R radar ile hedef arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Mono statik radar varsayımında Rx ve Tx antenleri aynı olacağından kazançları da $G_{tx} = G_{rx} = G$ olarak ifade edilebilir.

Karıştırıcının vericisi tarafından iletilen güç de radar ile benzer şekilde karıştırıcı anteni ile belirlenen yönlere etkin güç olarak yayınlanır. R mesafesine gönderilen bu toplam güç bu defa radar anteni üzerinde bir yoğunluk oluşturur. Bu örnekte karıştırma işleminin radarın hedefi tarafından uygulanması sebebiyle radarın dönüş sinyalinin çıkış yeri ile

karıştırma sinyalinin yayınlanma yeri aynı noktadır. Bu bağlamda, radardan hedefe uzaklık (R_t) ve karıştırıcıdan radara uzaklık (R_j) birbirine eşittir. Karıştırma işlemi radarın ana hüzmesi üzerinden yapılmakta olduğundan karıştırma sinyali radarın ana hüzme anten kazancı ile orantılı olarak yükseltilir.

$$J = \frac{P_j G_j G_{rx} \lambda^2}{(4\pi R_j)^2 L_j} \quad (2.24)$$

Eşitlik 2.24’de P_j gönderilen karıştırma sinyalinin azami gücünü, G_j karıştırıcının verici modundaki anten kazancını, G_{rx} alıcı modundaki anten kazancını, λ karıştırma sinyalinin dalga boyunu, L_j toplam karıştırıcı iletim kayıplarını ve R_j radar ile karıştırıcı arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

Aşağıda verilen 2.25 denklemi, karıştırıcı gücünün ifade edildiği sinyalinin 2.24 numaralı denklemin, radar sinyalinin gücünün ifade eden 2.23 denklemine bölünmesiyle elde edilmektedir. Bu oran karıştırma sinyal oranının formülüdür. 2.25 numaralı denklemin logaritmik formda gösterimi 2.26’daki gibidir [25].

$$J/S = \frac{P_j G_j 4\pi R^2 L_t}{P_t G \sigma L_j} \quad (2.25)$$

$$(J/S)_{dB} = 10 \log(P_j) + 10 \log(G_j) - 10 \log(P_t) - 10 \log(G) - 10 \log(\sigma) + 10 \log(4\pi) + 10 \log(R) \quad (2.26)$$

Radardan hedefe gönderilen sinyal ekosunun karıştırmalı bir ortamda ayırt edilebildiği ilk nokta ile radar arasındaki mesafe Burn-Through (BT) mesafesi olarak adlandırılır. Mono statik radarlarda BT’yi bulmak için 2.25 numaralı karıştırma sinyal oranı denklemi R için çözülmelidir. Bu çözüm sonucunda aşağıdaki 2.27 eşitliğinde ifade elde edilir:

$$R_{BT} = \sqrt{\frac{P_t G \sigma J_{min}}{P_j G_j 4\pi S}} \quad (2.27)$$

3. ANALİZ VE TARTIŞMA

3.1. Benzetim Parametrelerin Belirlenmesi

Yakın zamanda yapılan bir çalışmada [27] General Atomics MQ-9 Reaper silahlı insansız hava aracına (SİHA), AN/ALQ167 ECM podu entegre edildiği gösterilmiştir. Bu sistem benzetim parametreleri için referans olarak kullanılacaktır. Üreticinin web sitesinde belirtildiği üzere [28], MQ-9 386 kg dahili ve 1361 kg harici faydalı yük kapasitesine ve kullanıma hazır 11 kW yedek güce sahiptir. ALQ-167 karıştırma podu 1-18 GHz bant aralığında ayarlanabilir farklı varyantlara sahiptir. İlgili varyantların etkin yayın gücü 2 ila 4 kW arasında değişmektedir. Bu da model alınan konak uçak MQ-9'un yedek gücünün birden fazla alt-bant konfigürasyonunu beslemekte yeterli olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte ALQ-1672'nin dahili olarak uçağa entegresi de mümkündür. Bu kullanım şeklinde uçağın radar kesit alanı ve aerodinamik performansında iyileştirme sağlamak mümkündür. ALQ-167'nin yaklaşık ağırlığının aynı ailedeki uçağa takılabilir gürültü ve aldatma radar karıştırıcısı ALQ-165, ALQ-184, ALQ-131 ve ALQ-188 gibi muadilleri ile benzer olacağı varsayılabilir. Adı geçen sistemlerin ağırlık ölçüleri konfigürasyonlarına bağlı olarak 200 kg ila 350 kg arasında değişmektedir [29]. Bu bilgiler ışığında, MQ-9 veya benzer nitelikteki bir SİHA'nın faydalı yük olarak karıştırma podu sistemi taşıyabileceği görülmektedir.

Radar kesit alanı; hedef nesnenin fiziksel büyüklüğüne (uzunluk, yükseklik ve kanat açıklığı), şekline, yönelimine ve gövde üretim materyaline bağlıdır. MQ-9 11m uzunluğa, 3.6 m yüksekliğe ve 20 m kanat açıklığına sahiptir. F16 ise 14.52 m uzunluğa, 5.01 m yüksekliğe ve 9.45 m kanat açıklığına sahiptir. Radar kesit alanı değeri yönelimine bağlı olarak 5 ila 20 dBm² aralığında değişmektedir [25]. MQ-9'un görece uzun kanat açıklığı bulunmasına rağmen kanat alanı F16'ya göre daha küçüktür. Gövde materyalinde farklılıklar ve diğer fiziksel özellikler göz önünde bulundurulduğunda, MQ-9'un F16'ya göre en kötü senaryoda daha iyi bir radar kesit alanı değerine sahip olacağını kabul etmek makul bir yaklaşım olacaktır.

SİHA'lar pilota ihtiyaç duymadığı için; ekranlar, kontrol panelleri, yedekli aviyonik cihazlar ve bunlar için gerekli kablolama gibi pilot destek ekipmanlarına da sahip olmak zorunda değildir. Buna bağlı olarak SİHA'ların maliyeti geleneksel uçaklara göre çok daha düşüktür. Benzer bir maliyet ile birden fazla SİHA kullanarak karıştırma faaliyetleri gerçekleştirmek mümkündür. Bu durumda her biri farklı bantlarda görevlendirilmiş birden

fazla SİHA kullanmak mümkün olacaktır. Bu sayede değerli elektronik harp ekipmanlarını ayrı uçaklarda taşınarak, bir uçağın tespiti halinde tüm cihazları kaybetme riski azaltılacaktır.

MIM-104 Patriot bir yerden havaya füzelı hava savunma sistemidir. Bu sistem çalışmadaki radar için referans olarak kullanılacaktır. AN/MPQ-53 gözetleme, dost-düşman ayırt etme (Identification Friend-or-Foe - IFF), takip etme ve güdümler ve frekans çevikliği özelliklerine sahip 4 ila 8 GHz bandında çalışan Patriot taktik hava savunma sisteminin çok amaçlı bir radar takımıdır. 3 ila 170 km menzilde gözetleme, takip etme, güdümler ve elektronik koruma yapma kabiliyetlerini zaman-paylaşımlı olarak gerçekleştirebilir. Sistemin komuta kontrol bilgisayarı ile milisaniyeler mertebesinde gerçekleşen görev döngüleri oluşturur. Patriot sistemi taşınabilir ve modüler EPP-III Elektrik Üretici birimine sahiptir. Bu ünite ile radar takımları ve yaklaşma kontrol alt sistemlerini besler. Elektrik Üretici birimi 2 adet 150 kW dizel güç jeneratörünü içinde barındırmaktadır [29].

AN-MPQ-53 yaklaşık 2.5m çap içerisinde yaklaşık 5000 adet faz dizili anten elemanı bulundurmaktadır [29]. ALQ-167 karıştırma podunun yaklaşık 0.25m çapa sahip olduğu düşünüldüğünde 50 adet elemana sahip olduğu varsayılabilir. Radar ve karıştırıcı arasındaki 1:100 anten kazancı oranısı benzetim tutarlılığı için çalışma boyunca korunacaktır.

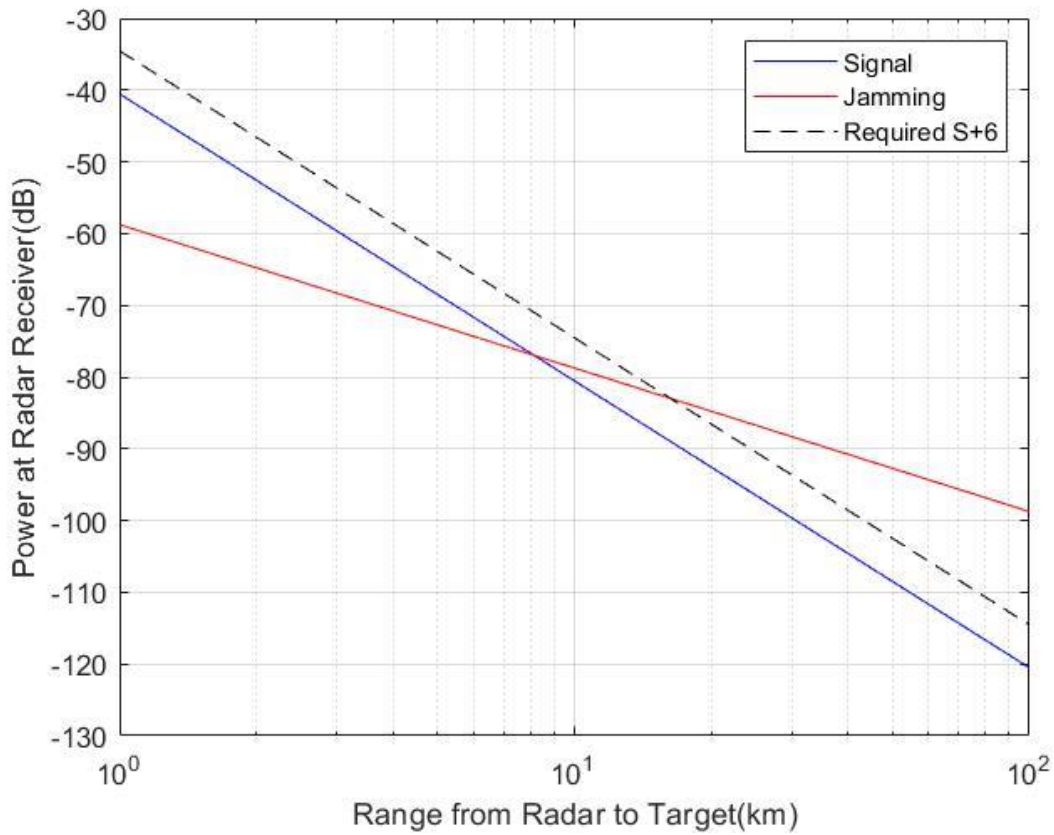
Seçilen çalışma frekansı ve ilgili örnekleme hızları bu bağlamda uygun olarak seçilmiştir. Tüm bu bilgiler ışığında benzetim parametreleri için yapılan seçimleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Simülasyon Parametreleri ve Sabitler

Parametre	Değer
Radar Vericisinin Tepe Gücü	150 kW
Radar Anten Kazancı	37 dBi
Radar Çalışma Frekans Bandı	4-8 GHz
Karıştırıcı/Hedef Radar Kesit Alanı	10 m ²
Karıştırıcı Vericisinin Tepe Gücü	750 W
Karıştırıcı Anten Kazancı	17 dBi
Karıştırıcı Frekans bantları	Bant 1: 4-6 GHz / Bant 2: 6-8 GHz

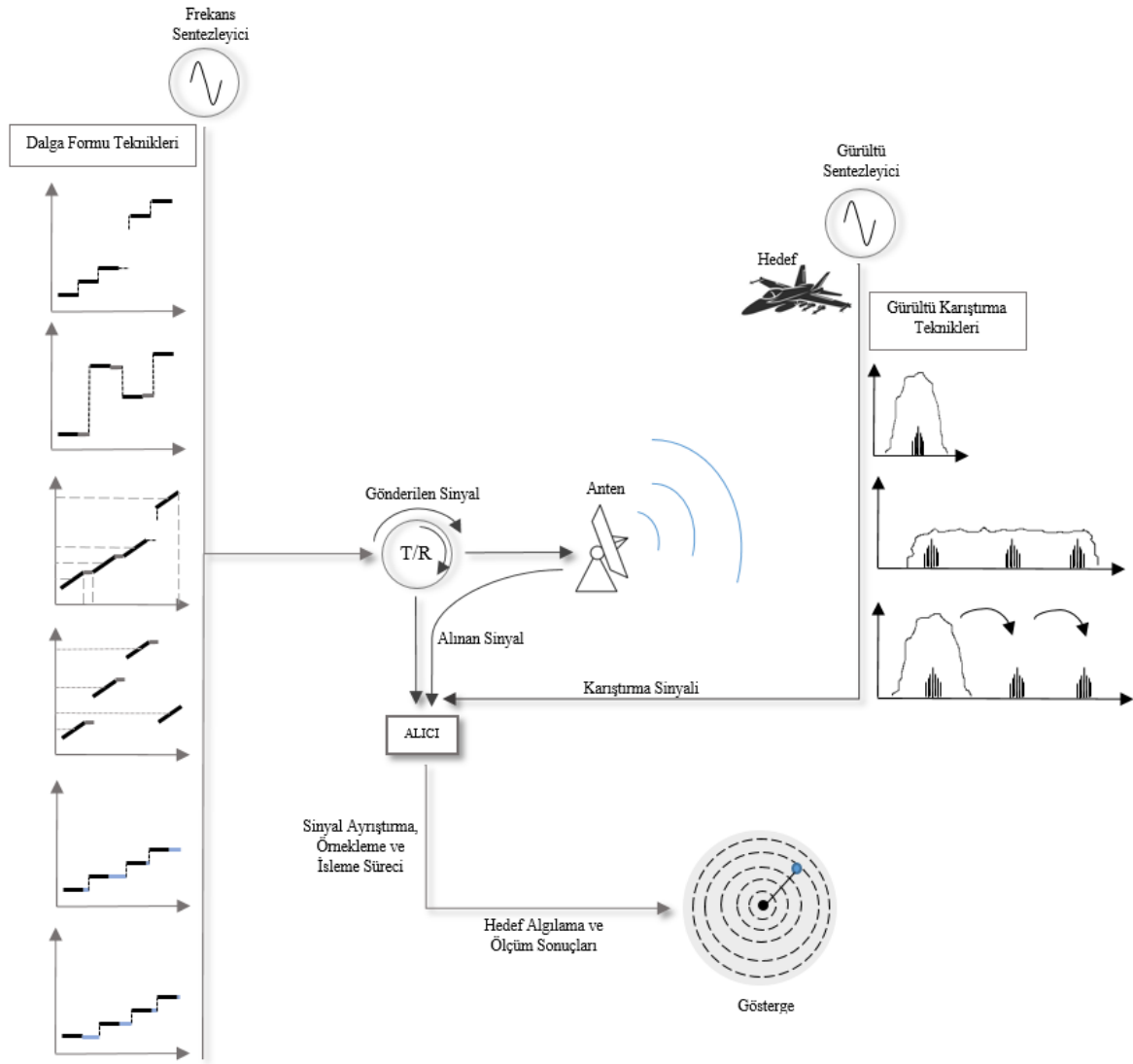
Bilgisayar benzetimleri için kullanılan bilgisayar Intel Core i5 10210U and 8 GB RAM donanımına sahiptir. Aynı metotları kullanarak, bu çalışma başarımını bilgisayarın kapasitesi ile orantılı olarak bu değerleri iyileştirmek mümkündür.

Karıştırıcı taşıyan platformlar yer hedeflerini etkisiz hale getirmek için havadan yere füze sistemine sahiptir. AGM-114 bu amaçla kullanılan füzelerden biridir ve 11 km menzili bulunmaktadır [29]. Bunlara bağlı olarak radar ve karıştırıcı arasındaki uzaklık benzetiminde 15 km olarak belirlenmiştir ve bu değer çalışma boyunca korunacaktır. Çalışma frekansları 4 GHz olan radar-karıştırıcı ikilisi için teorik J/S oranı grafiği Figür 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Burn-Through Mesafesi

3.2. Benzetim Ortamının Modellenmesi



Şekil 3.2 Elektronik Harp Benzetim Modeli

Elektronik taarruz; saldıran tarafın radara karşı elektronik istihbarat toplaması ile başlamaktadır. Bu sebeple savunan radar tarafında öncelikli eylem; kendisi hakkında toplanabilecek istihbaratın etkisiz kılınması olmalıdır. Savunan radar sinyalinin gizlenmesi mümkün olamayacağından, saldıran tarafından ele geçirilebilecek sinyalin karakteristik özelliklerini tahmin edilemez hale getirmek veya saldıran tarafın zayıflıklarını kullanarak elektronik taarruzu zorlaştırmak etkili stratejilerdir. Saldıran tarafın düşman sahinde daha mobil olması gerekliliği ve savunmaya vereceği karşılık için çok kısa bir süresi olması sebebiyle önceden planlama yapılması ihtiyacı taarruzun zayıf noktalarıdır.

Bu bölümde; önceki bölümlerde açıklanan yöntemler ile sinyallerin darbe içi sinyal frekansı, darbe içi sinyal yapısı ve darbe gönderim sıklığı özellikleri değiştirilerek saldıranın

güç ihtiyacının artırılması ve/veya istihbarat sonucu türettiği saldırı yöntemlerinin etkisizleştirilmesi hedeflenmektedir. İlgili yöntemler, belirli saldırı-savunma senaryoları üzerinden ele alınarak, saldıranın karıştırma performansına ve radarın hedef tespiti performansına etkileri incelenecektir.

Elektronik istihbarat sonucunda elde edilen radar sinyallerine yönelik çok çeşitli elektronik taarruz teknikleri bulunmaktadır. Bu tekniklerden biri de karıştırma taarruzudur. Bu teknikte yayın yapılacak sinyalin frekans ve yayınlanma aralıkları belirlenmelidir. Karıştırma sinyali parametreleri radarın değişken veya sabit savunma özelliklerini etkisizleştirmek üzere saldırı öncesinde elde edilen istihbarat ile tespit edilir ve bir veri tabanı oluşturulur. Radar frekansının önceden bilinmesi gücün odaklanmasını sağlayarak daha uzak bir mesafeden karıştırma sağlar. Geliştirilen benzetim ortamında, radar ve karıştırıcı elektronik harp sistemi aldıkları sinyallerin karakteristik özelliklerine göre ayırma kabiliyetine sahiptir ve uygun tekniği belirleyebilecekleri bir merkezi görev bilgisayarı modeline de sahiptirler.

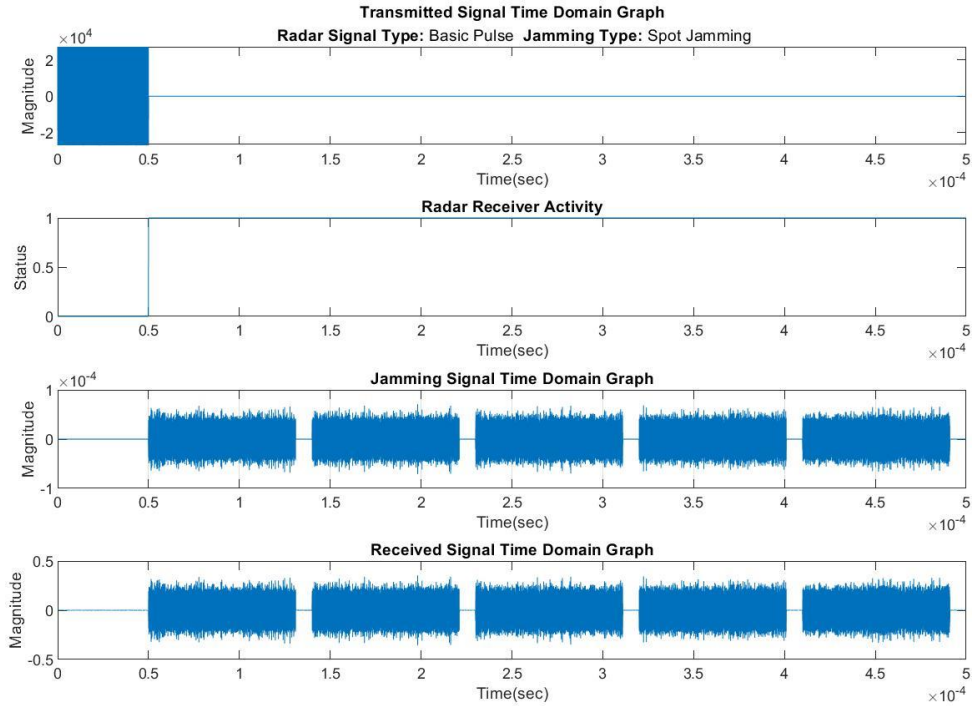
Şekil 3.2’de karıştırmaya maruz bırakılan bir mono-statik radar sisteminin sinyal akış diyagramı yer almaktadır. Radar sisteminin detayları farklılık gösterse de oluşturulan benzetim alt yapısı; verici, anten, alıcı ve sinyal işlemci bloklarını içerecek şekilde MATLAB programının 2021b sürümünde kodlanmıştır. Burada radar sinyali dalga formunun sentezlenmesi, üretilen sinyalin yayınlanması ve atmosferde yayılarak olası bir hedeften yansımaların toplanması ile işlenmesi süreçleri benzetim yoluyla incelenmiş olup zaman ve frekans tanım alanlarında sonuçları elde edilmiştir.

Bu kapsamda, tekrarlayıcı karıştırma tekniği ile kendini koruma elektronik harp sistemine sahip insansız hava aracının sahip olacağı teknikler gürültü ve aldatma olarak modellenmiştir. Radar ise kademeli frekans modülasyonlu dalga formları, kademeli chirp frekans modülasyonlu dalga formlarını kullanarak darbe içi frekans çevikliği oluştururken; kademeli ve titreşimli DTA ile de darbeler arası frekans çevikliği elde edilmiştir. Alt başlıklarda incelenen benzetimlerin tamamı Şekil 3.2’de yer alan simülasyon modeli çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

3.3. Benzetim 1: Sabit ve Tek Taşıyıcı Frekanslı Darbe Radarının Nokta ve Baraj Gürültü Karıştırması Altındaki Etkinliği

Taarruz öncesi sinyal istihbaratı faaliyetleri sonucu sinyal karakteristiği tespit edilmiş 4 GHz sabit merkez frekansında yayın yapan mono-statik bir darbe radarı İHA’ya entegre

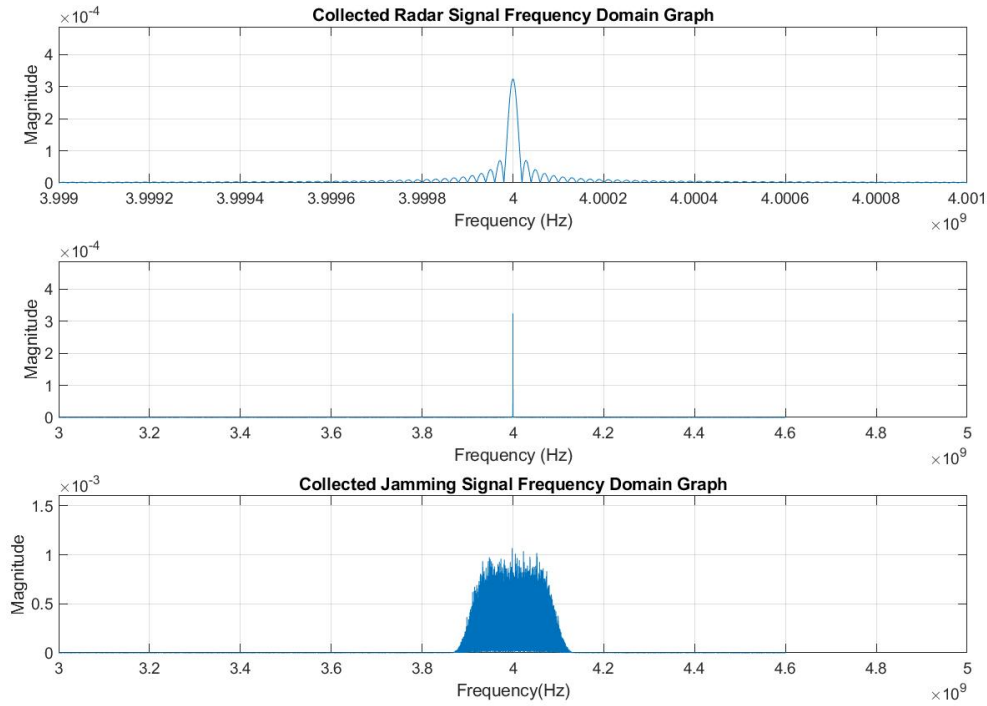
edilmiş kendini koruma EH sistemi ile gürültü karıştırması kullanılarak etkisiz hale getirilmek isteniyor. Çalışma frekansı belirlenip değişken olmadığı da tespit edildikten sonra, saldırı gücünün tamamını bu frekansta yoğunlaştıran bir tekniğin seçilmesi daha uygun olacaktır. Radarın aktif çalışma döngüsünün keşfedilmesi, doğru zamanlamada karıştırma sinyali yayınlamak için kritik bir öneme sahiptir. Kendi kendini koruma merkezli elektronik harp sistemleri, karıştırma sinyaline odaklanma (Home On Jam) tekniği kullanarak güdümlenmiş anti-radyasyon füzelerinden korunması gerektiğinden sürekli olarak karıştırma sinyali yayınlamamaktadır. Dolayısıyla karıştırıcı yayın anının, radar alıcısının aktif olduğu ana denk getirilmesi önemlidir. Radarın darbe tekrarlanma sıklığı takip edilerek, dinleme moduna geçişi çözümlenebildiği durumlarda ne zaman karıştırma sinyali yayınlacağı önceden belirlenebilmektedir.



Şekil 3.3 Nokta Karıştırması Altında Temel Darbe Radar Sinyalinin Zaman Alanında Analizi

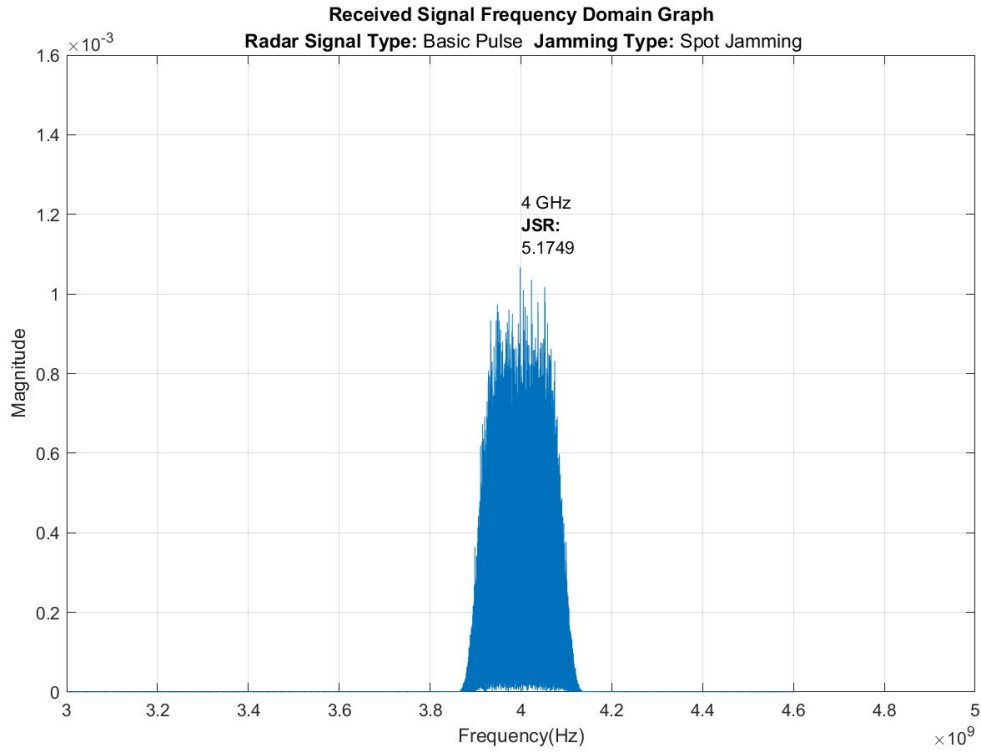
Temel darbe radarının bir DTA döngüsü boyunca gerçekleştirilen benzetimde, yayınlanan radar ve karıştırma sinyali ile birlikte radar alıcısına ulaşan sinyalin zaman alanındaki benzetim grafikleri Şekil 3.3’de gösterildiği üzere elde edilmiştir. Burada radarın iletimde ve dinleme modunda olduğu toplam 500 μ s boyunca gözlem yapılmıştır. Radar, 50

μs süre boyunca sabit 4 GHz frekansta iletimde kalırken 450 μs süre zarfında dinleme modunda kalarak tehdit yayınlarını toplamaktadır ve işlemektedir. Karıştırıcı ise, radarın dinleme fazı süresince 90 μs tekrarlama aralığına ve 0.9 görev döngüsüne sahip 4 GHz merkez frekanslı 100 MHz bant genişliğinde nokta gürültü karıştırma yayını yapmaktadır. Yayınlanan gürültü sinyalinin çoğunun hedeflenen radar frekans bandında radara iletilmesi beklenmektedir.



Şekil 3.4 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Temel Radar ve Nokta Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

Şekil 3.4’de hedeften yansıyor dönen radar sinyali ve karıştırıcıdan yayınlanan gürültü sinyalinin alıcı antenine ulaştığı anda frekans alanındaki tepkisi yer almaktadır. Yinelemeli karıştırma sistemine sahip İHA platformu, ortamdaki tehdit radar yayınlarını eş zamanlı toplayıp işleyerek, aldığı sinyal karakteristiğine yönelik cevap üretmektedir. Alınan sinyalin karmaşıklığı ne kadar fazlaysa, işleme ve cevap üretme zamanı da o kadar gecikecektir. Temel darbe radarına özel bir modülasyon uygulanmadığından, çalışma frekansının anında tespit edilebildiği bu senaryoda görülebileceği gibi karıştırma gücünün tek bir frekansta toplanması, radarın uzak bir mesafeden etkisizleştirilmesine sebep olmuştur.

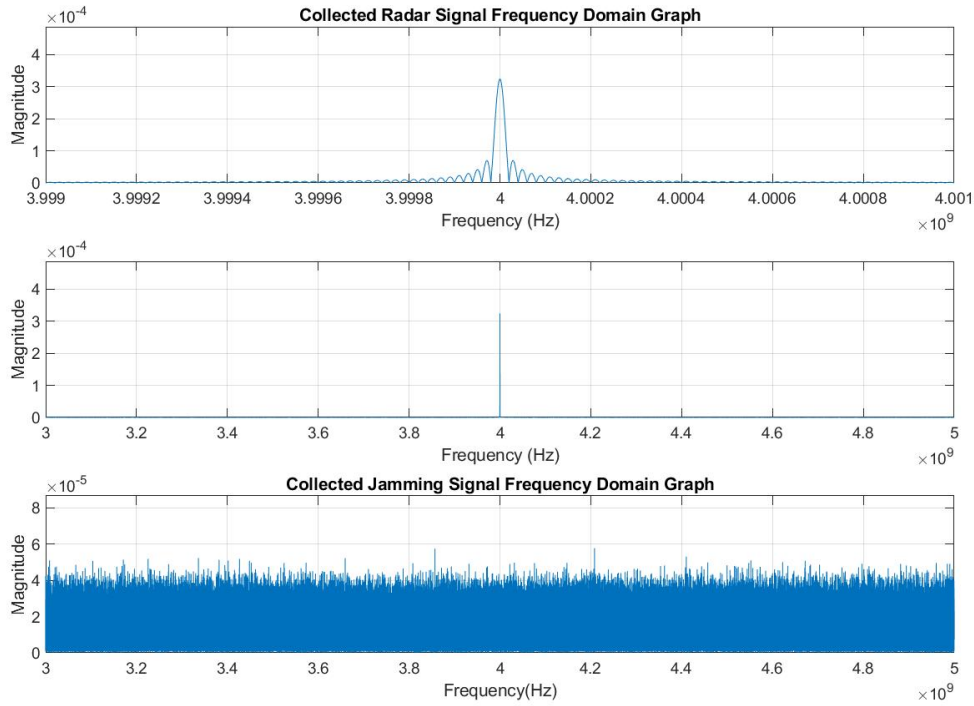


Şekil 3.5 Nokta Karıştırması Altında Temel Darbe Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi

Şekil 3.5’de radar alıcısında tanımlı banttaki işlenmeye hazır toplam ulaşan sinyal yer almaktadır. Burada ölçülen JSR = 5.1749 değeri, sabit frekanslı temel darbe radarının nokta gürültü karıştırma karşısında bir şansı olmadığını açıkça göstermektedir.

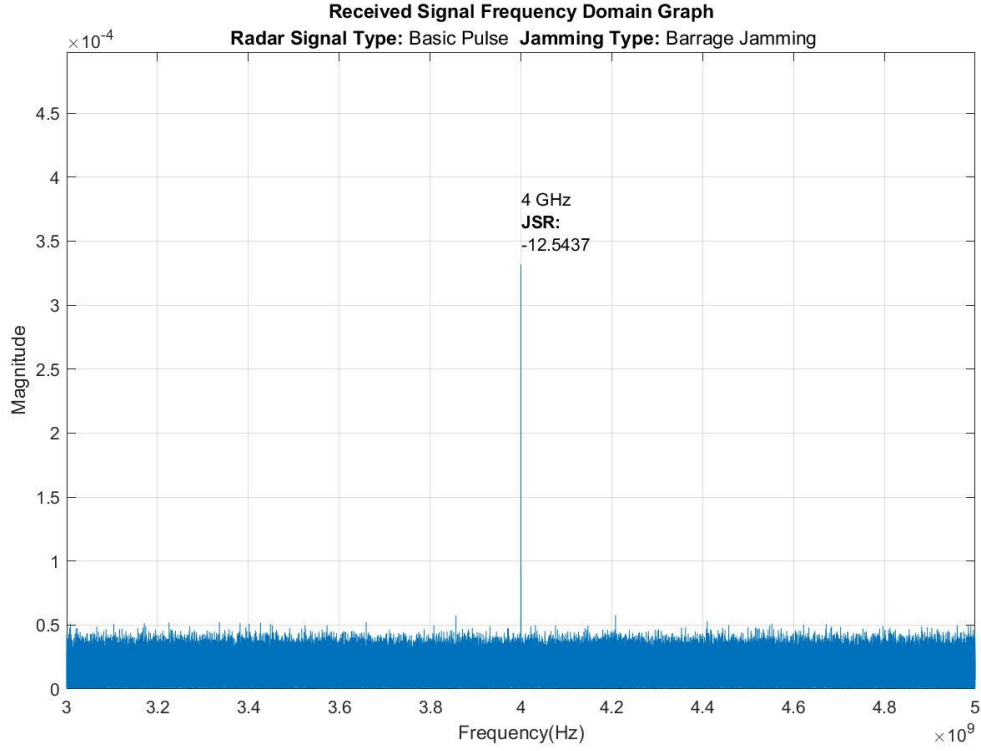
Bu senaryoda görülebileceği gibi, karıştırıcı veri tabanında tespit ettiği radar sinyalinin karşılığını bulması durumunda, uygulanacak teknığe karar vermek oldukça basittir. Ancak operasyon sahasında sabit ve tek frekanslı yayın yapan yalnızca bir radar yerine birden fazla farklı merkez frekanslarda farklı amaçları ve işlevleri olan radar olması da muhtemeldir. Bunun yanı sıra başarılı bir istihbaratın yapılamadığı dolayısıyla da alınan işlenen sinyalin veri tabanında karşılığının olmadığı durumlar da, ihtimaller arasında değerlendirilmelidir. İHA üzerine entegre edilmiş bu elektronik harp sistemi radar çalışma frekansını belirleyememesi durumunda ise nokta karıştırma yöntemi etkisini kaybedebilir. Bu durumları kapsaması için, en kötü senaryoda dahi bir alternatif sunuluyor olması beklenmektedir. Bu tip belirsiz durumlarda geniş bantta sahip baraj karıştırmasının tercih edilmesi daha uygun olabilir. Bu da aynı gücün bir bant boyunca bölünmesine sebep olacağından platformun daha uzak bir menzilden dahi tespit edilmesine sebep olabilir.

Şekil 3.6’da gösterildiği üzere, karıştırıcı toplam gücünü 3.0 GHz ile 5.0 GHz arasına böldüğü varsayılın. Burada elektronik harp sistemi merkezi görev bilgisayarının vermesi gereken en önemli karar uygulanacak olan baraj karıştırmanın bant genişliğidir. Anlık tespitler doğrultusunda var olan veya bölgede var olması beklenen tehdit unsurlarına uygun bir bant genişliği belirlenebilmelidir. Aksi takdirde elektronik harp sisteminin elinde olan kısıtlı güç gereksiz bantlarda harcanmaktadır.



Şekil 3.6 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Temel Radar ve Baraj Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

Elektronik harp sisteminin elindeki toplam güç nokta karıştırma uygulamasında 100 MHz’lik dar bir bant üzerinden tehdit radar platforma aktarılırken, baraj karıştırmasında aynı güç 2000 MHz’lik bir bant üzerinden iletilmektedir. Şekil 3.7’de hesaplanan JSR = -12.5437 değerinden de görülüyor ki gürültü gücü geniş bir banda ne kadar çok yayılırsa, karıştırma etkinliğini de bir o kadar düşürmektedir. Dolayısıyla baraj karıştırma amacına uygun özel senaryolarda tercih edilmelidir.

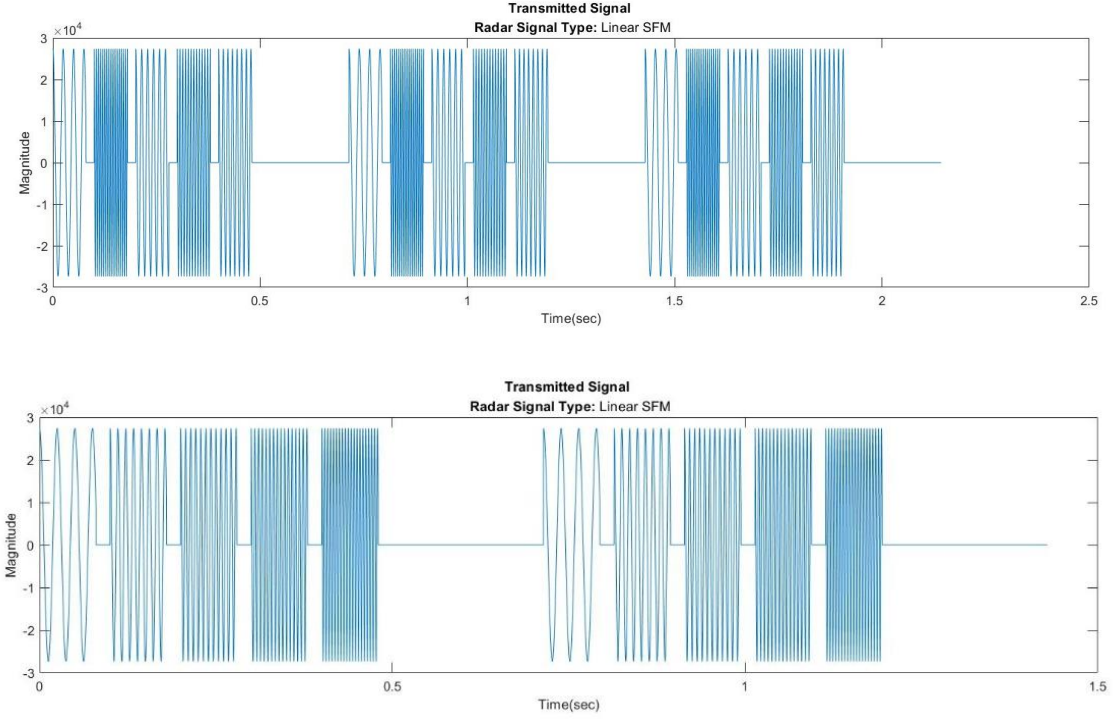


Şekil 3.7 Baraj Karıştırması Altında Temel Darbe Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi

Bu benzetim çeşitli darbe içi/darbeler arası modülasyon teknikleri uygulanmış senaryolar için referans niteliğindedir ve çalışma boyunca kontrol grubu olarak kabul edilmiştir. İlgili güç seviyeleri, menzil ve hedef özellikleri diğer tüm benzetimlerde aynı tutulmuştur.

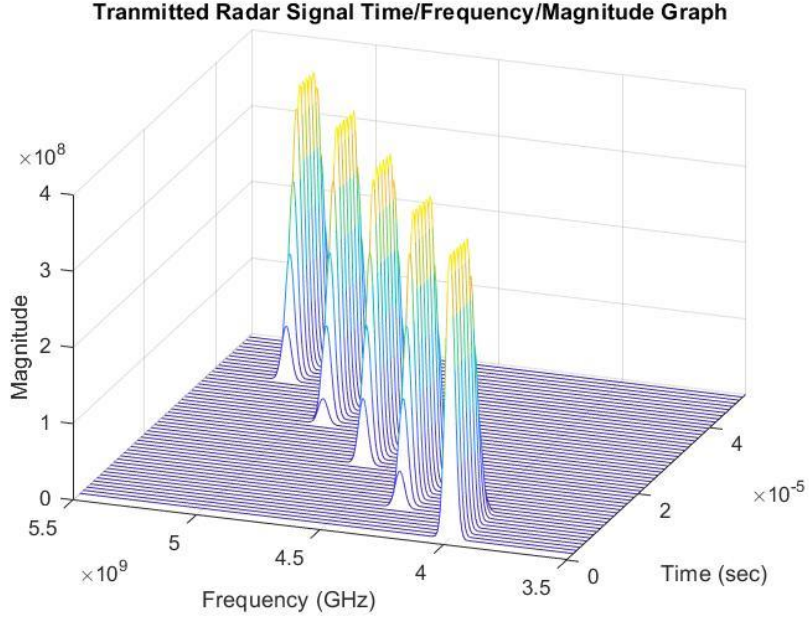
3.4. Benzetim 2: Kademeli Frekans Modülasyonlu Darbe Radarının Baraj ve Nokta Tarama Karıştırması Altındaki Etkinliği

Radar sistemlerinin nokta karıştırma gibi güçlü karıştırma yöntemlerine karşı koyabilmesi için iletim frekansını değiştirmesi gerektiği bir önceki çalışmanın sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Çünkü darbe için frekans çevikliğine sahip radarlar, bilinen çalışma frekanslarından biri tarafından etkisiz hale getirilse dahi yayın yapacağı diğer frekanslara müdahale edilmediği sürece menzili içinde hedef tespit etme kabiliyetini sürdürebilecektir.

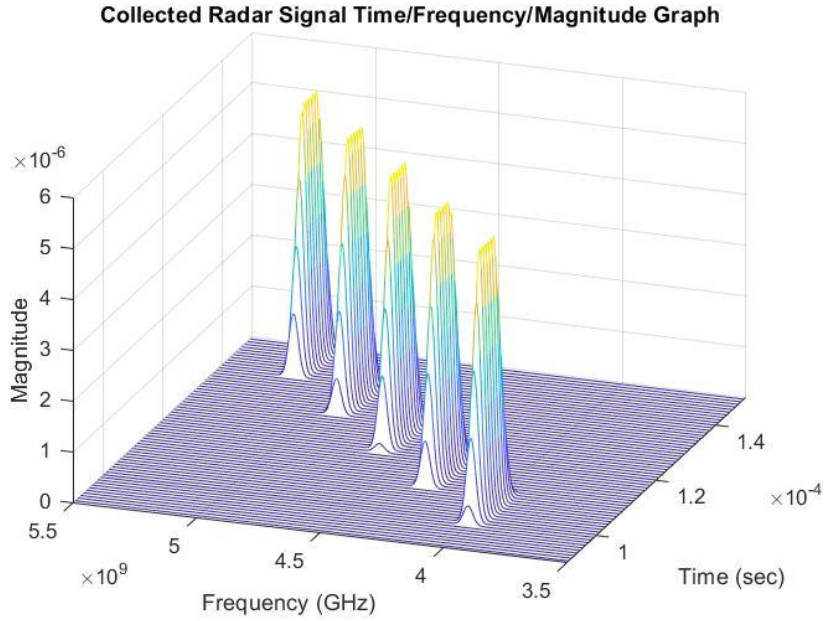


Şekil 3.8 Kademeli Frekans Dalga Formu

Bu benzetim modelinde radar dalga üreticinde hazırlanan kademeli frekans modülasyonlu sinyal Şekil 3.8’de gösterildiği üzere ayarlanan farklı parametre karakteristiklerine göre elde edilmiştir. Burada geniş bant bir sinyal bir radar darbesi boyunca sabit frekans adımlarına da dar bantlı alt darbelere bölünerek, hem radar performansı menzil ve çözünürlük bakımlarından iyileştirilirken hem de frekansta yaratılan değişimle gürültü karıştırmalarına karşı bağışıklığının artırıldığı öngörülmektedir. Bir önceki benzetim çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda bu sinyal, yayınlanan bir darbe içerisinde tek bir frekans yerine, birden fazla frekans adımı kullanarak daha karmaşık frekans örüntüler elde edilmesini sağlıyor. Şekil 3.8’de gösterildiği üzere oluşturulan bu dar bantlı alt darbelerin sayısı, frekans adım miktarı, frekans adım örüntüsü, darbe tekrarlama sıklığı gibi parametreler doğrusal veya doğrusal olmayan rastgele formlarda düzenlenerek frekansta öngörülme yen değişiklikler yapılması amaçlanmıştır.



Şekil 3.9 Doğrusal Kademeli Frekans Modeli İle Modüle Edilmiş Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü

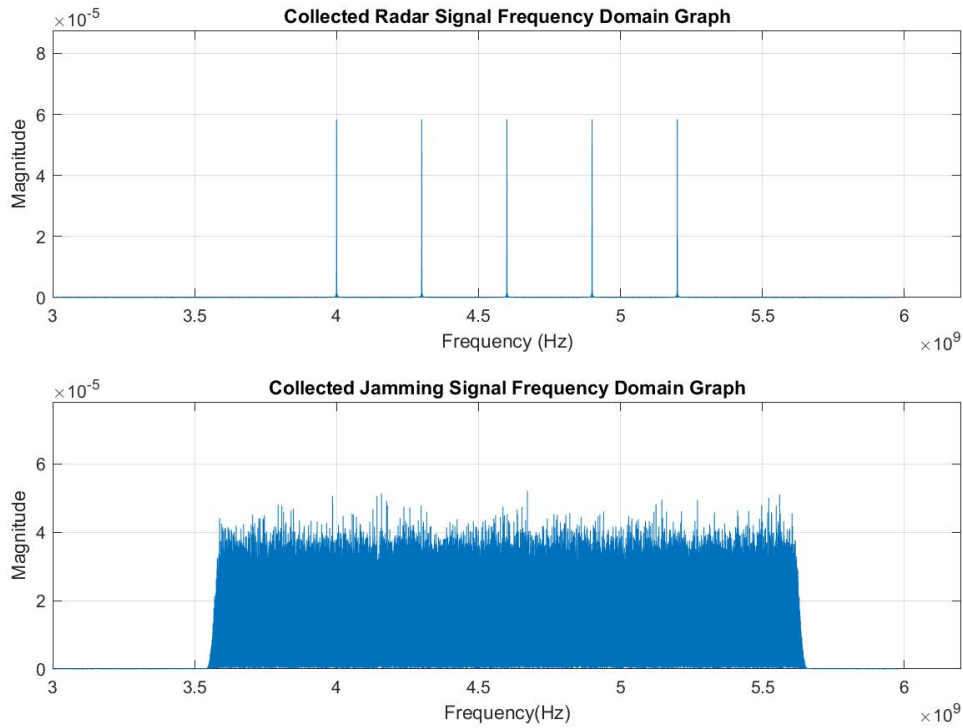


Şekil 3.10 Radar Tarafından Alınan Doğrusal Kademeli Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü

Bu benzetimde darbe radarı, bir bant boyunca sabit frekans adımlarıyla oluşturulan doğrusal olarak değişen çalışma frekanslarında yayın yapma kabiliyetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.9’da doğrusal kademeli frekans modülasyonu ile elde edilmiş

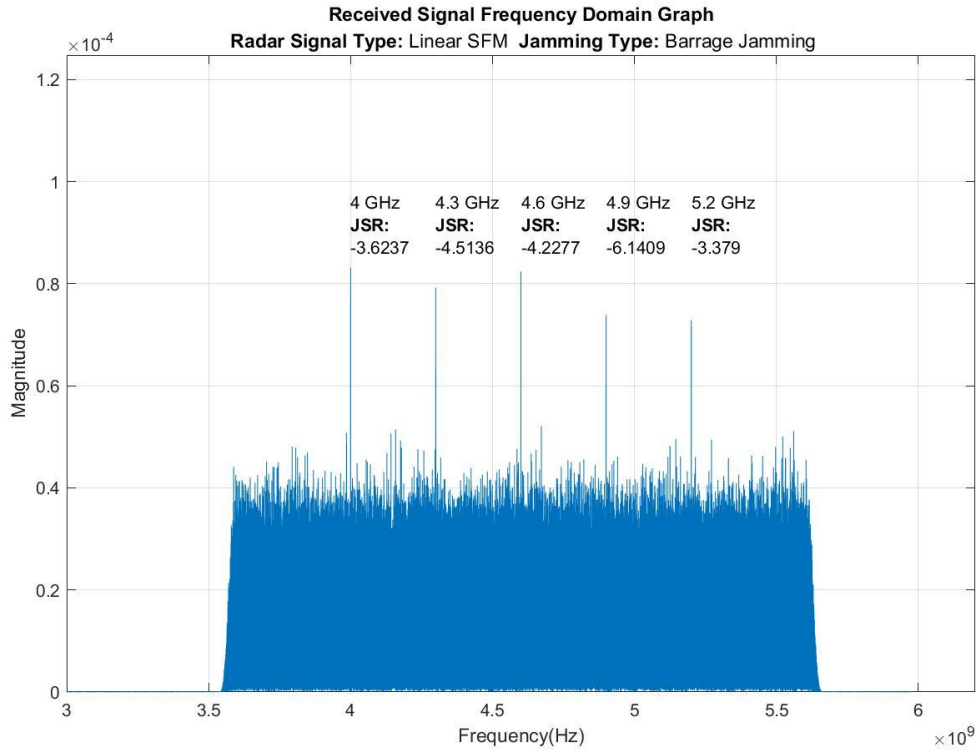
dalga formunun bir ana darbe DTA döngüsündeki alt darbelerinin büyüklük-frekans-zaman kümesindeki örüntü modeli gösterilmektedir. Şekil 3.10’de de radar tarafından alınan eko sinyalinin demodüle edildikten sonraki örüntüsü gösterilmektedir.

İlk olarak doğrusal (artan/azalan) kademeli frekans modülasyonlu dalga formuna sahip darbe radarı için sonuçlar elde edilmiştir. Radar tarafından gönderilen ilk darbe, Şekil 3.11’da gösterildiği üzere çalışma frekansı 4 GHz ‘den başlayarak her bir darbe arasında 300 MHz sabit frekans adımı olacak şekilde artan yönlü doğrusal beş alt darbe elemanlı bir frekans dizisinden meydana gelmiştir. 10 μ s DTA değerine ve 0.9 görev döngüsüne sahip bu alt darbeler birleşerek, radarın bir darbe iletim süresinde gönderilmek üzere oluşturulmuştur.



Şekil 3.11 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Baraj Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

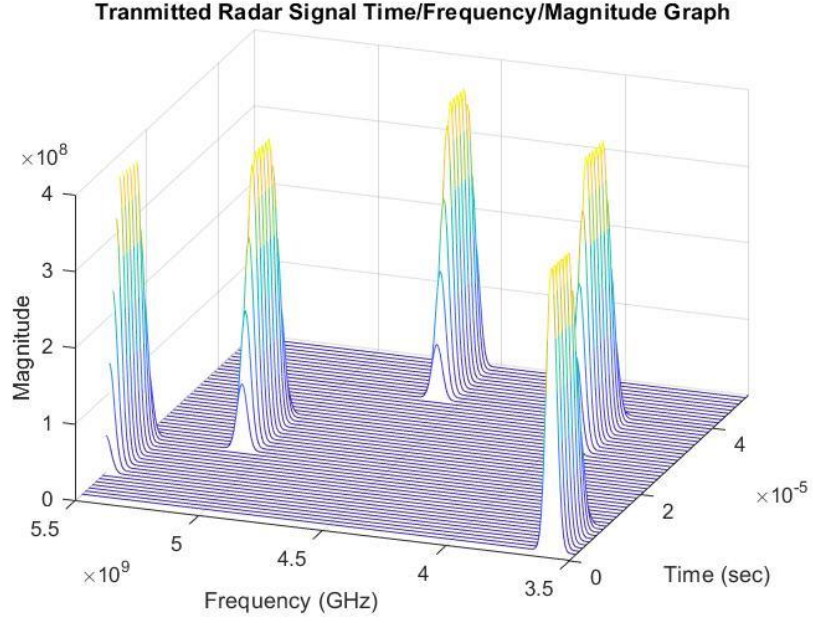
Şekil 3.11’da radarın bir görev döngüsünden elde edilmiş 4.0 GHz, 4.3 GHz, 4.6 GHz, 4.9 GHz ve 5.2 GHz olmak üzere beş ayrı alt darbe frekans yayınlarından dönen yansımalar görülmektedir.



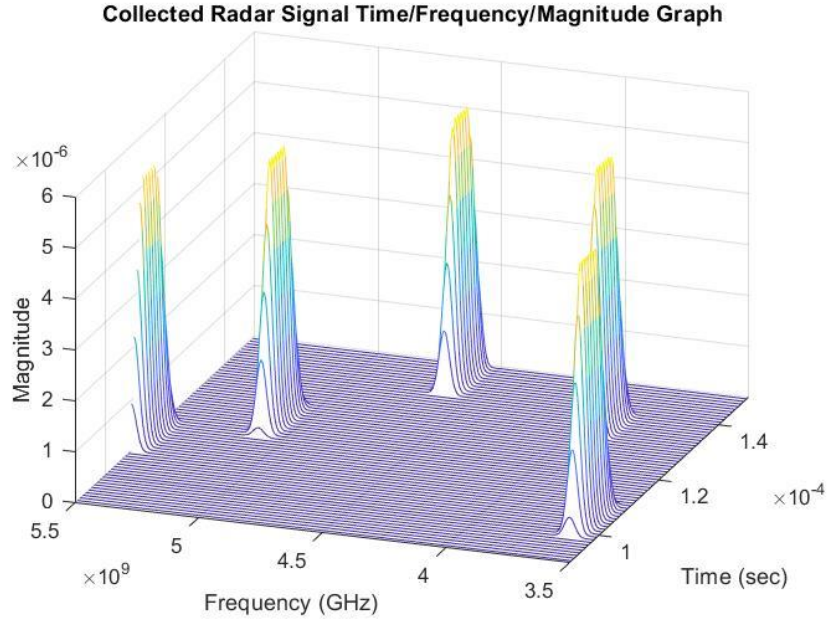
Şekil 3.12 Baraj Karıştırması Altında Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi

Bir önceki benzetimde yinelemeli karıştırma elektronik harp sistemi alıcısı aynı sürede yalnızca bir frekans ve dalga formu çözümlemeye çalışırken; bu benzetimde aynı sürede darbe içinde değişen frekans örüntüsünü çok hızlı çözümleyerek, radarın alıcısının aktif olduğu anda karıştırma sinyalini doğru frekanslarda ve beklenen zamanlarda üretmesi gerekmektedir.

Radarın frekansta çeviklik tekniklerini kullanması durumunda olası karşı-tedbirler; tüm bilinen frekansları kaplamak için baraj karıştırmaya odaklanabilir. Bu durumda, istenilen tüm olası frekansları kaplayabilir ancak güç tüm banda yayılacağı için ilgili frekansta oldukça büyük bir etki kaybına sebep olacaktır. Yayınlanan her bir frekanstaki efektif karıştırma gücü de düşecektir. Doğrusal şekilde artan kademeli frekans modülasyonlu dalga formu için; bir önceki benzetimde nokta karıştırması için uygulanan toplam güç 3.5 GHz - 5.5 GHz bant genişliğini kapsayacak şekilde yayılarak baraj karıştırması uygulanır. Şekil 3.12'deki yer alan benzetime göre her frekansın payına düşen karıştırma gücünün azaldığı görülmektedir. Burada radar frekanslarındaki JSR değerleri -3.379 ile -6.141 arasında karıştırıcı aleyhine ölçülmüştür.



Şekil 3.13 Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Modeli İle Modüle Edilmiş Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü

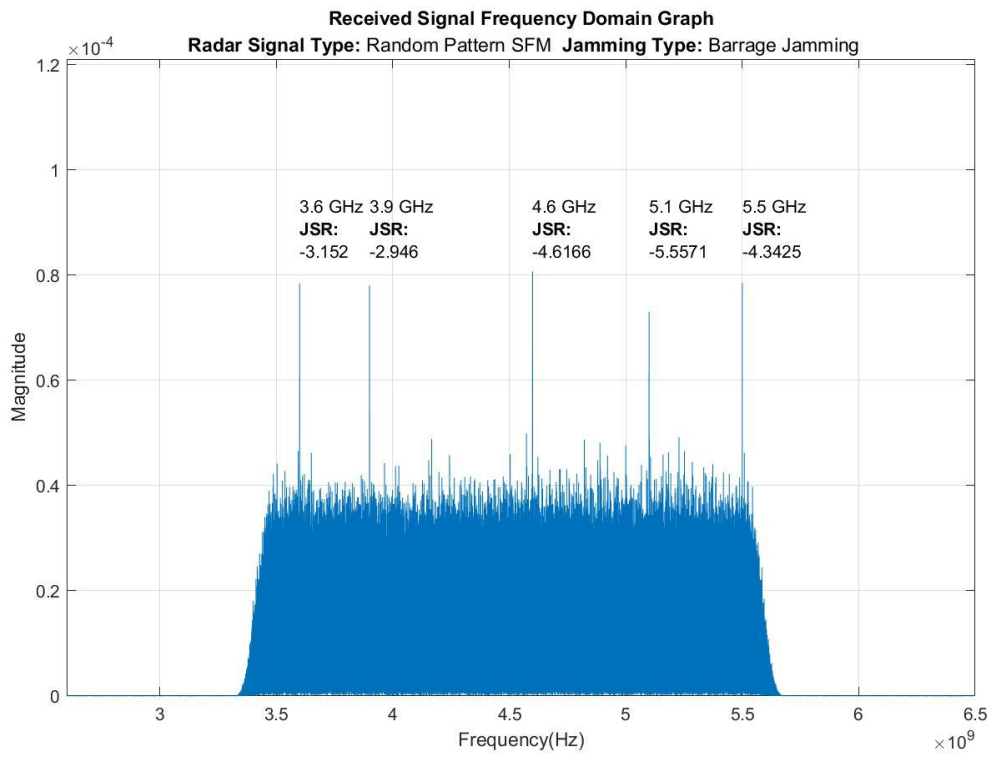


Şekil 3.14 Radar Tarafından Alınan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Dalga Formunun Demodülasyon Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü

Bu benzetimin ikinci aşaması olarak doğrusal olmayan frekans kademeli dalga formuna sahip darbe radarı için sonuçlar elde edilmiştir. Diğer benzetimin aksine zaman içerisinde tahmin edilebilir, birbirine bağlı frekans değişkenlerine dayalı bir model yerine

rastgele, doğrusal olmayan örüntüler kullanılmıştır. Darbe için seçilen frekansların zamana göre değişimi yayınlanan sinyal için Şekil 3.13’de, sırayla alınan ve demodüle edilen sinyal için de Şekil 3.14’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

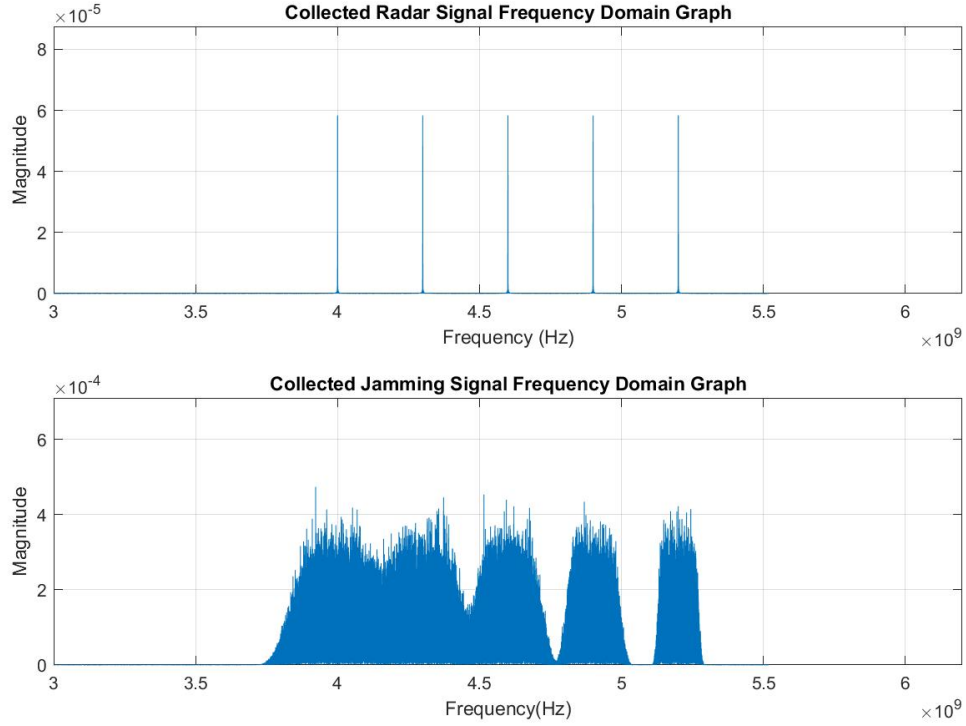
Radarın baraj karıştırmasından etkilenmemesi için geliştirebileceği birçok yöntem vardır. Baraj gürültü karıştırmasının etkinliğini azaltmak için radar, yayınladığı merkez çalışma frekans bandını genişleterek, karıştırıcının gücünü bu banda yaymaya zorlayabilir. Bunun yanı sıra radarın frekans diziliminin artış/azalış trendi, kapsanan frekans bandı, frekans değişim miktarı gibi frekans örüntüsünün temel noktalarını tespit edilmesini zorlaştıran uygulamalar eklenebilir.



Şekil 3.15 Baraj Karıştırması Altında Doğrusal Olmayan Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi

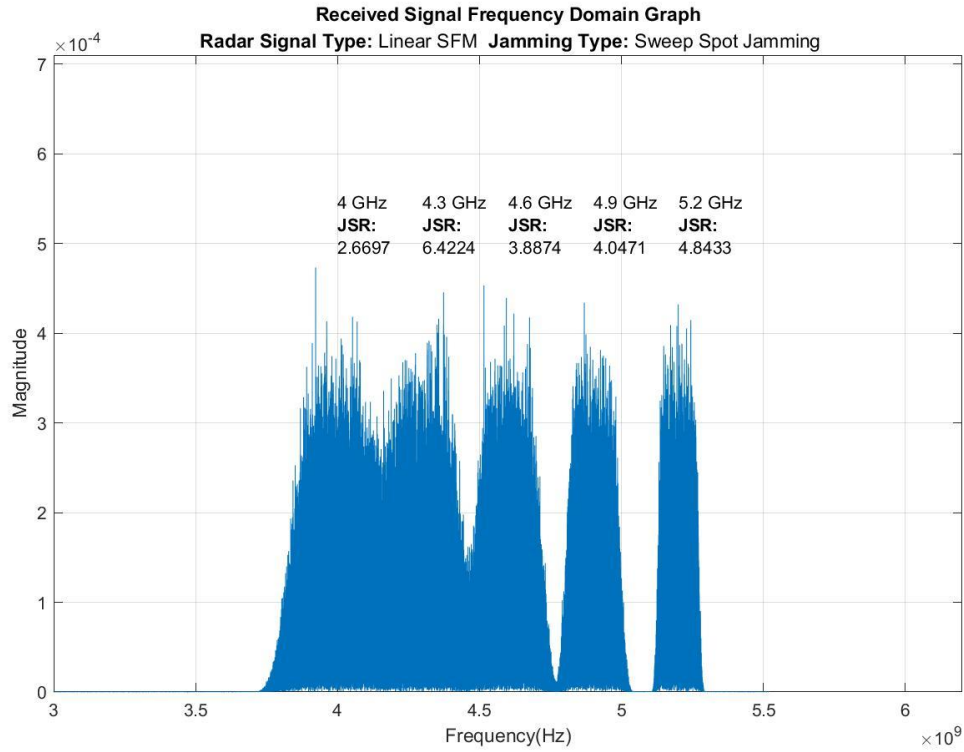
Bu doğrultuda büyük bir bant genişliği üzerinde yüksek güç yoğunluğu üstünlüğü sağlamak istendiğinde, Şekil 3.15’de görülüyor ki baraj karıştırması yeterli olamayacaktır. 3.5 GHz - 5.5 GHz arasında Rastgele seçilmiş frekanslar kullanılarak yayınlanan radar sinyaline baraj karıştırması uygulanmasına rağmen JSR oranları gösteriyor ki radar var olan hedefi hala tespit edebilecek kadar güç üstünlüğüne sahiptir.

Alternatif olarak, İHA üzerine konumlandırılmış faz dizili antenler ile tehdit sinyaller anlık olarak algılanarak, belirlenen frekanslara gürültü eklenerek radara yeniden yönlendirilerek radarın bant aralığı boyunca taranabilir. Bu teknik, karıştırılmak istenen frekans aralığında güç yoğunluğunu koruyarak aynı zamanda karıştırmanın geniş bir bantı kapsamasına da olanak tanıyacaktır.



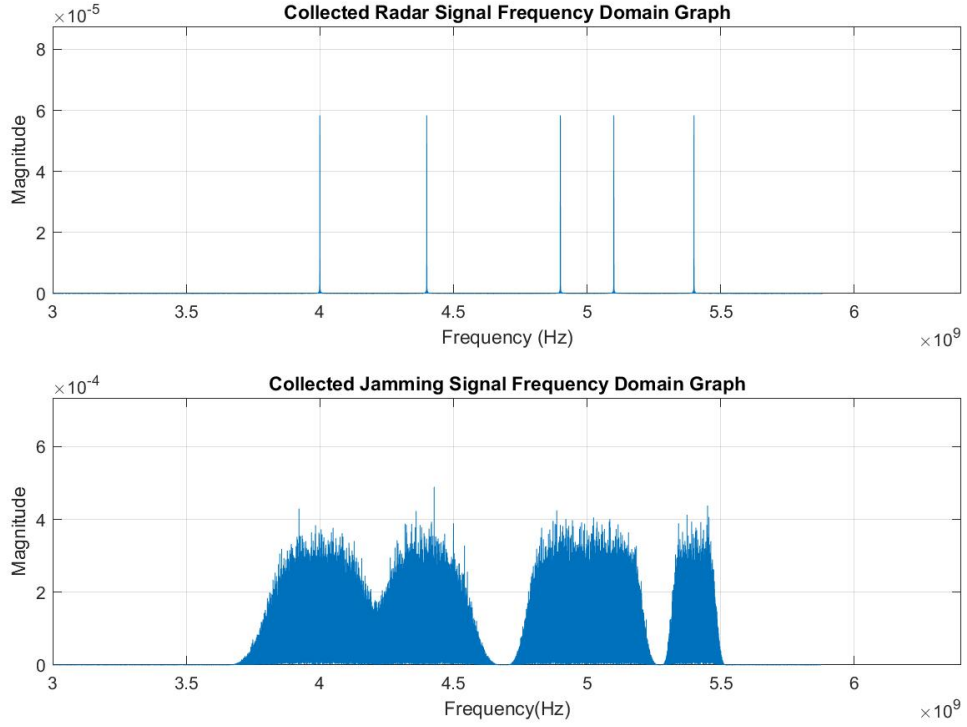
Şekil 3.16 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

Önceki bölümlerde teorik olarak açıklanan yinelemeli karıştırma sisteminin benzetim ortamında uygulandığı bu senaryoda karıştırıcı, algılanan sinyallerin çalışma frekansları, frekans değişim örüntüsü, frekans değişim hızı gibi görev stratejik parametreleri toplayarak, uygulanacak karıştırma tekniğinde avantaj sağlamak amacıyla için dinleme moduna geçer. Her frekansta maksimum karıştırma güç yoğunluğu sağlamak için nokta tarama karıştırması uygulanmasında koz olarak kullanılabilir. Sonrasında, karıştırıcı tespit ettiği frekansta yayın yapmak için tekrar iletim moduna geçer. Bu işlem nokta tarama karıştırması amacıyla tekrarlamalı olarak çalıştırılabilir.



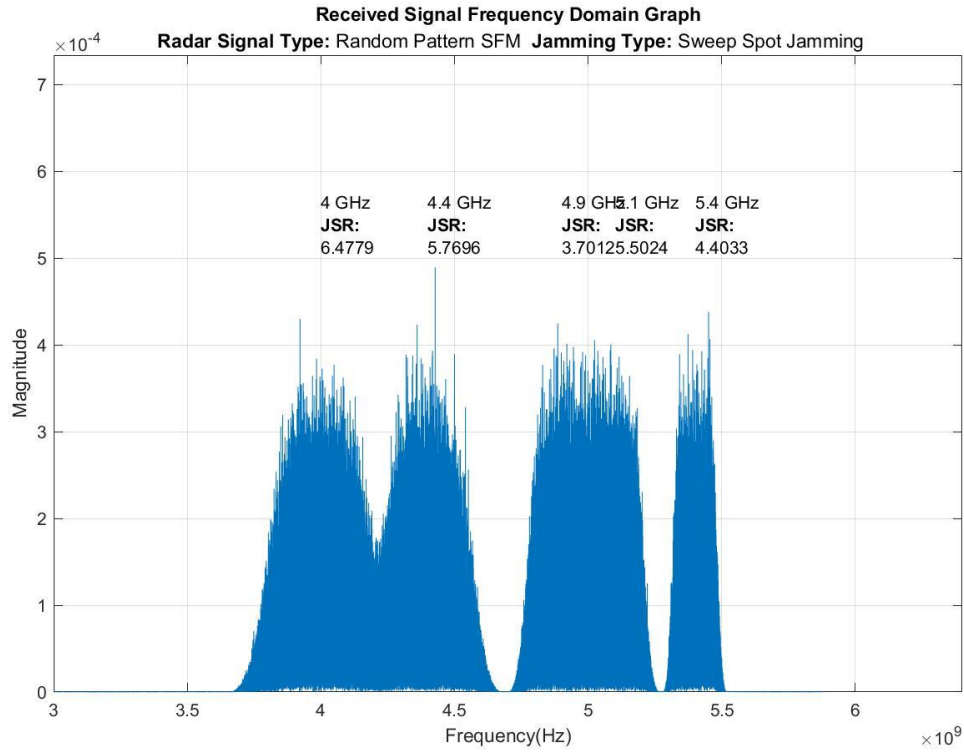
Şekil 3.17 Nokta Tarama Karıştırması Altında Doğrusal Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi

Karıştırma gücünün önemli bir bileşeni güç yoğunluğudur. Gürültü karıştırmasının etkinliği ise önceki test senaryoları temel alındığında güç yoğunluğuna bağlı olduğu görülmüştür. Güç yoğunluğu; karıştırma sinyalinin, frekans aralığının veya bant genişliğinin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla radarın gürültü karışmasına karşı en büyük kuzu karıştırıcının gücünü bu frekanslar arasında yaymak durumunda bırakmasıdır. Bu sebeple ne kadar çok frekans kapsanırsa karıştırmanın etkisi o denli azalacağından alıcı için tanımlanabilecek maksimum bant genişliğinde olabildiğince frekans çeşitliliği sağlandığı durumda, beklenti nokta taramalı gürültü karıştırmasını etkisiz hale getirilerek, karıştırıcıyı baraj karıştırma yapmaya mahkûm bırakmak olacaktır. Ancak Şekil 3.16'da yer alan doğrusal artışı frekans adımlama modeli ile oluşturulmuş radar sinyali ile nokta tarama gürültü karıştırma sinyalinin radar alıcısına ulaştığı andaki frekans alanı çözümü gösterilmektedir. Şekil 3.17'de ise radar tarafından alınan sinyalin demodüle edilmiş sinyalin frekans alanı gösterilmektedir. Görülüyor ki radar sinyali darbe içinde alt darbelerle farklı merkez frekanslar atasa da her alt darbe JSR oranına bakıldığında, nokta tarama gürültüsünün de o frekansları başarılı şekilde takip edebildiği görülmektedir.



Şekil 3.18 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

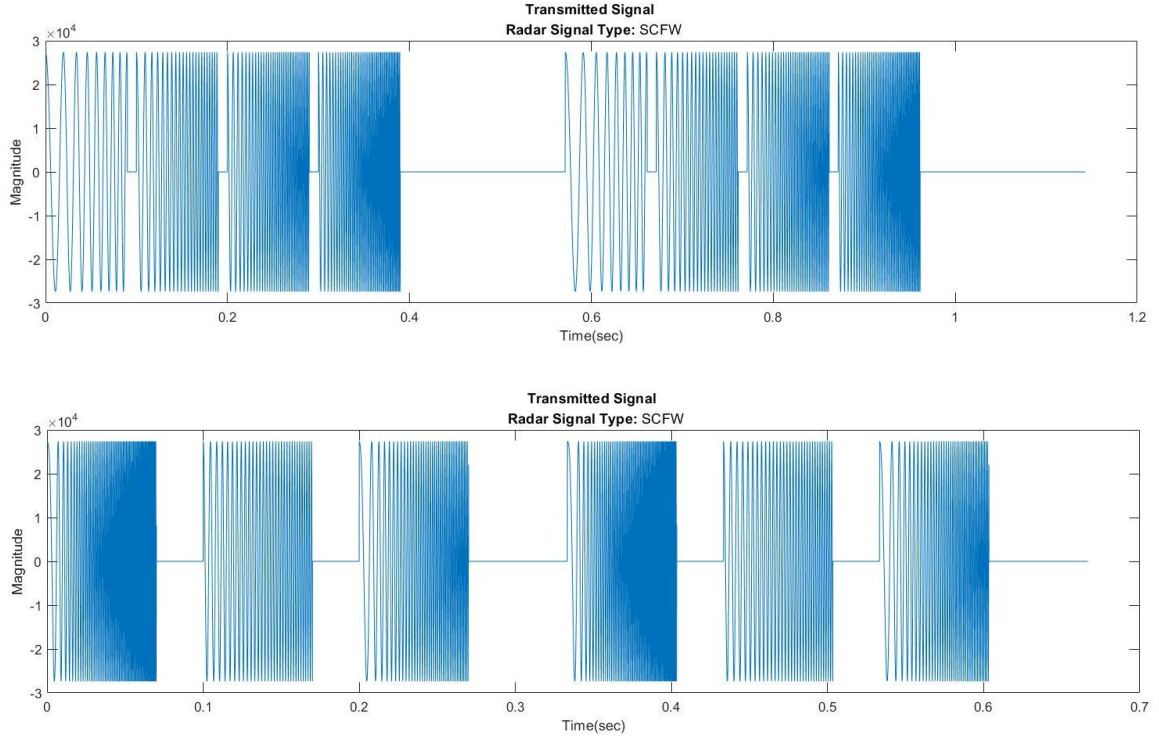
Şekil 3.18’de yer alan rastgele frekans adımlama modeli ile oluşturulmuş radar sinyali ile nokta tarama gürültü karıştırma sinyalinin radar alıcısına ulaştığı andaki frekans alanı çözümü gösterilmektedir. Şekil 3.19’da da radar tarafından alınan sinyalin demodüle edilmiş sinyalin frekans alanı gösterilmektedir. Bir önceki senaryoya ek olarak oluşturulan frekans örüntüsü sabit frekans adımlaması yerine, radar sinyalinin çalışma frekans bandı içerisinde rastgele frekans adımları kullanılarak oluşturulmuştur. Şekil 3.19’da ölçülen JSR oranlarına bakıldığında karıştırıcı radarın alt darbelerde yayın yaptığı tüm frekansları gürültüyle bastırmayı başarmıştır. Burada karıştırıcının en önemli avantajı radar tarafından aldığı sinyalin karakteristiğini belirleyerek gerçek zamanlı olarak o frekanslarda karıştırma yayını yapabilmesidir.



Şekil 3.19 Nokta Tarama Karıştırması Altında Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi

3.5. Benzetim 3: Kademeli Chirp Frekans Modülasyonlu Darbe Radarının Baraj ve Nokta Tarama Karıştırması Altındaki Etkinliği

Benzetim 1 ve 2’de elde edilen sonuçlar doğrultusunda karıştırıcının, anlık algıladığı tehdit radar sinyallerini ne kadar hızlı çözümleyip, merkez çalışma frekans örüntüsünü tespit ettiği takdirde nokta karıştırma veya tarama nokta karıştırması gibi güçlü gürültü karıştırması teknikleri ile başarı elde etmesi kaçınılmaz olduğu görülmüştür. Bu durumda radar ise, karıştırmayı önlemek adına farklı yöntem arayışlarına girmelidir. Benzetim 3’de radar chirp kademeli frekans modülasyonu ile elde edilmiş sinyal tipinde yayın yaparak, karıştırıcının frekansları önceden tahmin edemeyeceği çeşitlilikte bir örüntü ile hızlı tepki üretmesini engellemeyi hedeflemiştir. Bir önceki denemelerde görülüyor ki darbe içinde kapsanan frekans bandı ne kadar geniş ve bu aralıkta birbiriyle ilişkilendirilemeyen Rastgele değişimlerle oluşturulmuş bir frekans örüntüsü kullanılırsa karıştırıcının tercih edeceği gürültü karıştırma tekniği daha çok güce bağımlı hale geliyor. Anlık olarak değiştirilen frekans bandı genişledikçe seçilen teknik bu bandı kapsamaya yönelik olacağından; etkinliğinin artırılması ancak gücünün bu oranda artırılmasıyla elde edilebilecektir.



Şekil 3.20 Kademeli Chirp Frekanslı Dalga Formu

Benzetim modelinde radar dalga üreticinde hazırlanan kademeli chirp frekans modülasyonlu sinyal Şekil 3.20’de gösterildiği üzere ayarlanan farklı parametre karakteristiklerine göre elde edilmiştir. Burada doğrusal frekans modülasyonuna sahip geniş bant bir sinyal bir radar darbesi boyunca dar bantlı alt darbeler bölünerek, hem radar performansı menzil ve çözünürlük bakımlarından iyileştirilirken hem de frekansta yaratılan değişimle gürültü karıştırmalarına karşı bağışıklığının artırıldığı öngörülmektedir. Bir önceki benzetim çalışmaları göz önünde bulundurulduğunda bu sinyal, yayınlanan bir darbe içerisinde tek bir frekans yerine, bir frekans bandı boyunca sağlanan çeşitlilikle daha karmaşık örüntüler elde edilmesini vaat ediyor. Şekil 3.20’de gösterildiği üzere bu dar bantlı doğrusal modülasyona sahip alt darbelerin sayısı, başlangıç frekansları, taradığı bant genişliği, darbe tekrarlama sıklığı gibi parametreler doğrusal veya doğrusal olmayan Rastgele formlarda düzenlenerek frekansta öngörülme yen değişiklikler yapılması amaçlanmıştır.

Tablo 3.2’de Benzetim 3 kapsamında test edilecek senaryolar yer almaktadır. Bu senaryolarda kademeli chirp dalga formunun alt darbelerinde taranan bandın başlangıç frekansı, genişliği gibi parametrelerin Rastgele örüntülerle değiştirilmesi ile birlikte uygulanan karıştırma sinyalin merkez frekansı ve türleri yer almaktadır. Bu senaryolar

karıştırıcının veri tabanındaki önceden belirlenmiş sinyal işleme tekniklerini ve uygulanacak hamleleri ifade etmektedir.

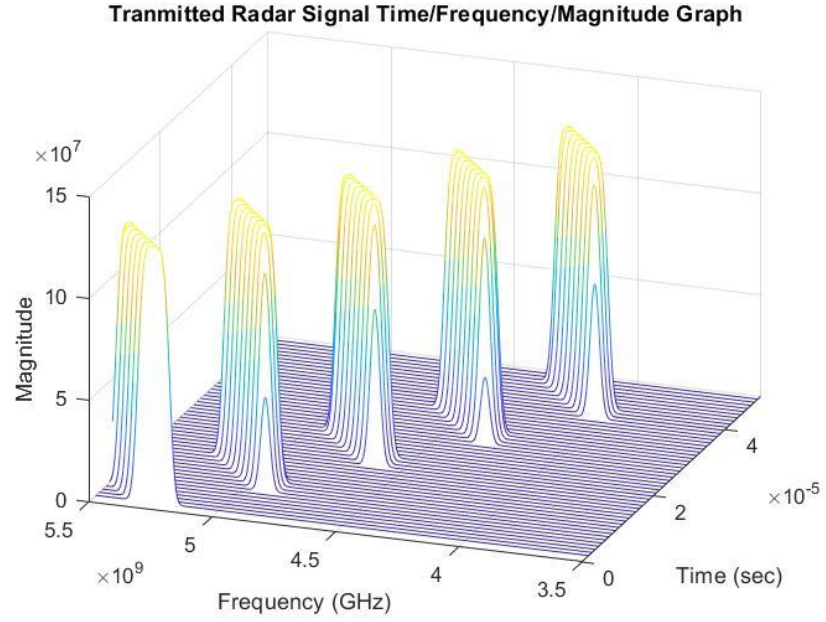
Tablo 3.2 Benzetim 3 Kapsamında Test Edilecek Senaryolar

Deneme	Radar Sinyal Tipi	Alt Darbe Tarama Bandı (MHz)	Karıştırıcı Merkez Frekansı	Karıştırıcı Tipi
1	Doğrusal Kademeli Chirp Dalga Formu (DKCD)	400	Her Alt Darbenin Başlangıç Frekansı	Nokta Tarama
2	Doğrusal Kademeli Chirp Dalga Formu (DKCD)	400	Her Alt Darbenin Tarama Bandının Merkez Frekansı	Nokta Tarama
3	Rastgele Kademeli Chirp Dalga Formu	300	Her Alt Darbenin Tarama Bandının Merkez Frekansı	Nokta Tarama
4	Doğrusal Kademe ve Rastgele Tarama Bant Genişliğine Sahip Chirp Dalga Formu	200,300,400	Her Alt Darbenin Tarama Bandının Merkez Frekansı	Nokta Tarama
5	Rastgele Kademe ve Tarama Bant Genişliğine Sahip Chirp Dalga Formu	200,300,400	Her Darbede Taranan Tüm Bandın Merkezi	Baraj

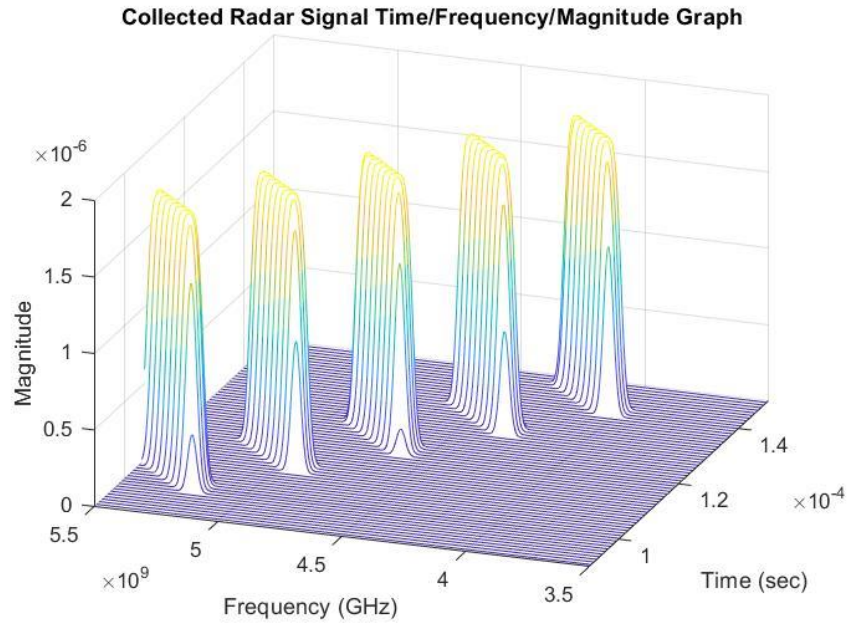
3.5.1. Deneme 1 ve Deneme 2 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları

Frekans alanında farklı gürültü yerleşimleri Deneme 1 ve Deneme 2’de incelenecektir. İlk denemede alt darbelerin başlangıç frekanslarını (4 GHz, 4.4 GHz, 4.8 GHz, 5.2 GHz ve 5.6 GHz) merkez alan nokta karıştırma uygulanırken; ikinci denemede alt darbelerin frekans bandının merkezlerini (4.2 GHz, 4.6 GHz, 5.0 GHz, 5.4 GHz ve 5.8 GHz) hedef alan nokta tarama karıştırması uygulanacaktır. Darbe için seçilen frekansların zamana göre değişimi yayınlanan sinyal için Şekil 3.21’de, sırayla alınan ve demodüle edilen sinyal için de Şekil

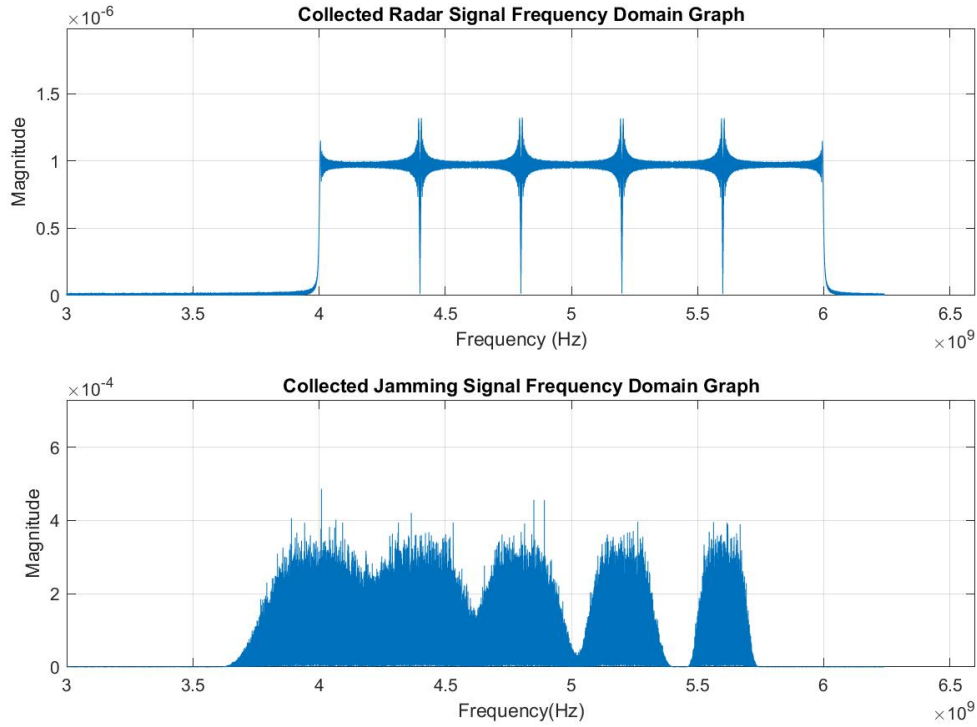
3.22’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir. Kullanılan model, alt darbe tarama bant genişliği 400 MHz olan doğrusal kademeli chirp dalga formudur.



Şekil 3.21 Doğrusal Kademeli Chirp Frekans Modeli İle Modüle Edilerek Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü

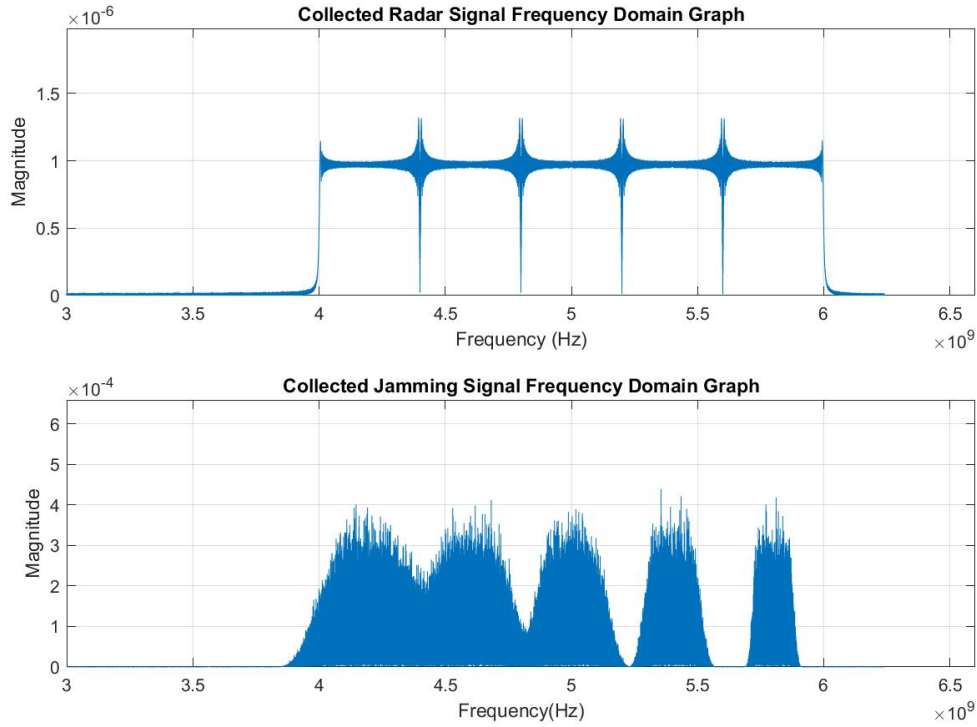


Şekil 3.22 Radar Tarafından Alınan Doğrusal Kademeli Chirp Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü



Şekil 3.23 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Chirp Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

Sabit Kademeli Frekans modeli ile elde edilmiş dalga formu ile yapılan denemelerde, nokta tarama karıştırması tespit edilen her alt darbe frekansının merkezine konumlandırılarak o frekansı etkisiz hale getirebiliyordu. Ancak şuan alt darbeler sabit bir frekans kademesi yerine bir bant boyunca taranan frekanslardan oluştuğundan, nokta taramanın bu bant boyunca nereye konumlandırılacağı önem kazanacaktır. Şekil 3.23’de her alt darbenin başlangıç frekansını merkez alan bir yöntem izlenirken; Şekil 3.24’de alt darbenin sahip olduğu frekans bandının merkezine konumlandırılmıştır. Her banda uygulanan nokta karıştırmanın bant genişliği 200 MHz’dir. Deneme 1 ve Deneme 2 için radarın alt darbeleri için tarama bandı 400 MHz olduğundan sonuçlardan da görüldüğü üzere nokta karıştırmanın bant genişliği, alıcı tarafından toplanan radar alt darbelerinin bandını kaplamaya yeterli olmuyor. Ancak radar, alt darbe bandını ne kadar dar tutarsa, karıştırıcı da risk alarak nokta karıştırma bant genişliğini o doğrultuda nokta karıştırması için olabilecek maksimum boyutta getirerek bu durumu avantaja çevirebilir.

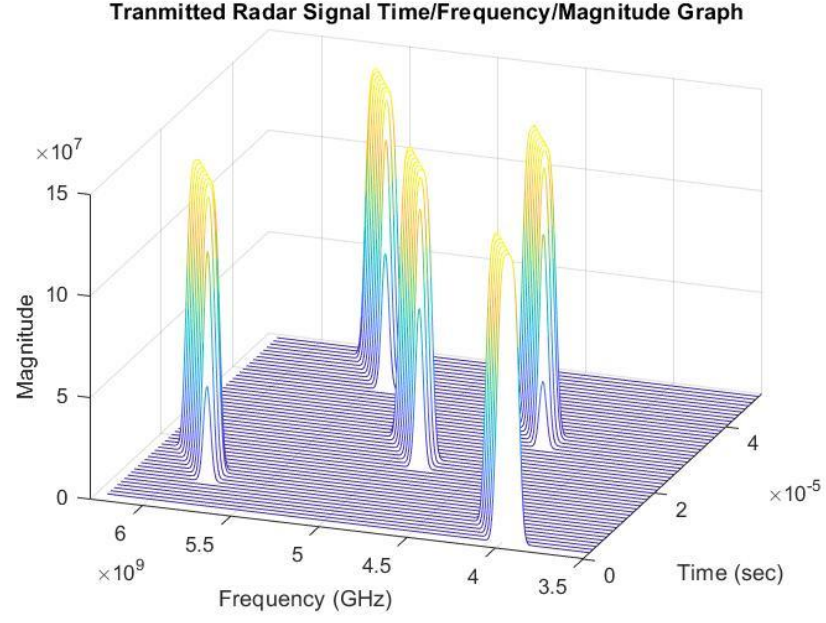


Şekil 3.24 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Kademeli Chirp Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

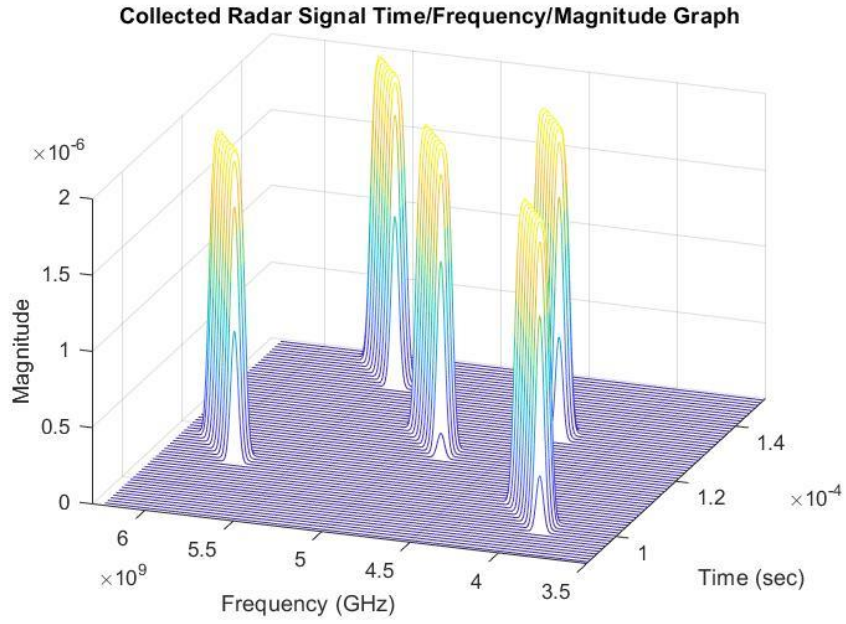
Bu yapılan gözlem sonucu radarın ürettiği alt darbelerin bant genişliğini kaplama olasılığı göz önünde bulundurulduğunda, karıştırıcı eğer nokta tarama gürültüsü tercih ederse uygulanacak gürültünün merkezinin bu taranan bandın merkezine konumlandırılması deneme sonuçlarında görülüyor ki daha makul bir tercih olacaktır.

3.5.2. Deneme 3 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları

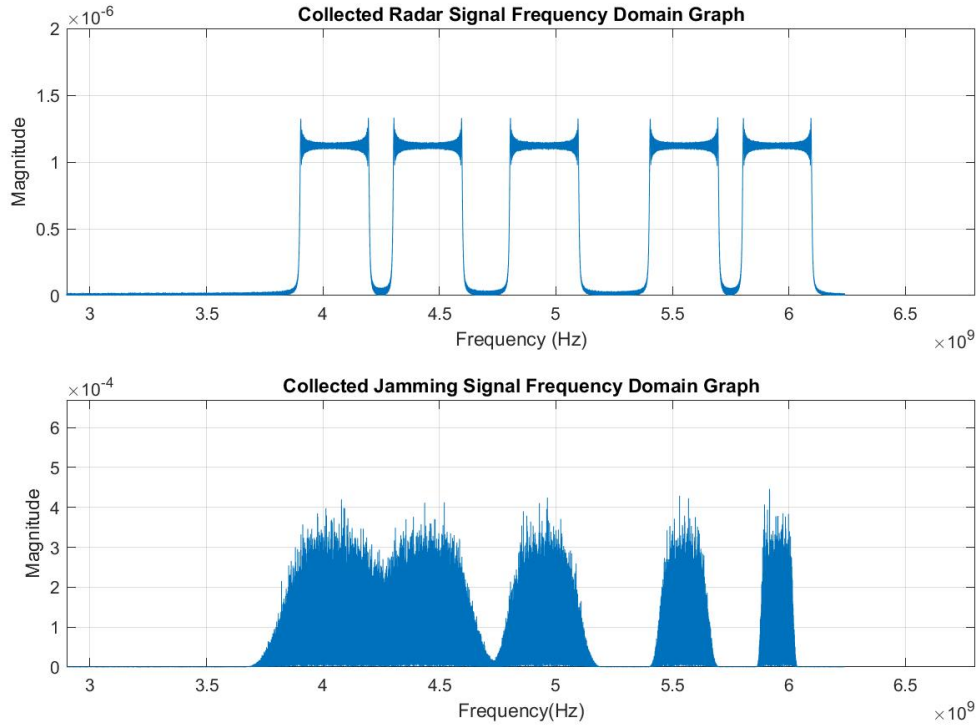
Radar bakış açısıyla, yayın yapılan frekansın gizlenmesi için üretilen alt darbelerin taradığı bant genişliği sabit tutulurken, tarama başlama frekansları Rastgele bir örüntüyle oluşturulmuştur. Radarın ürettiği bu dalga formu ile karıştırıcının alıcısı tarafından algılanan bu sinyalin demodülasyonu aşamasında tarama bant genişliğinin tespit edilip nokta gürültünün bandını bu doğrultuda ayarlanmasını engellemeye çalışmaktır. Radar, bir önceki benzetim çalışmasında olduğu gibi karıştırıcıyı baraj gürültüye zorlayarak bu teknikle çok daha geniş bir banda yayılmasını sağlamaya çalışmaktadır. Radar tarafından yayınlanan frekans örüntüsünün zamana bağlı frekans değişimi Şekil 3.25’de; hedeften yansıyor dönen sinyalin demodüle edilmiş hali ise Şekil 3.26’da gösterildiği üzere elde edilmiştir.



Şekil 3.25 Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Chirp Frekans Modeli İle Modüle Edilerek Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü



Şekil 3.26 Radar Tarafından Alınan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Chirp Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örüntüsü



Şekil 3.27 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Chirp Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

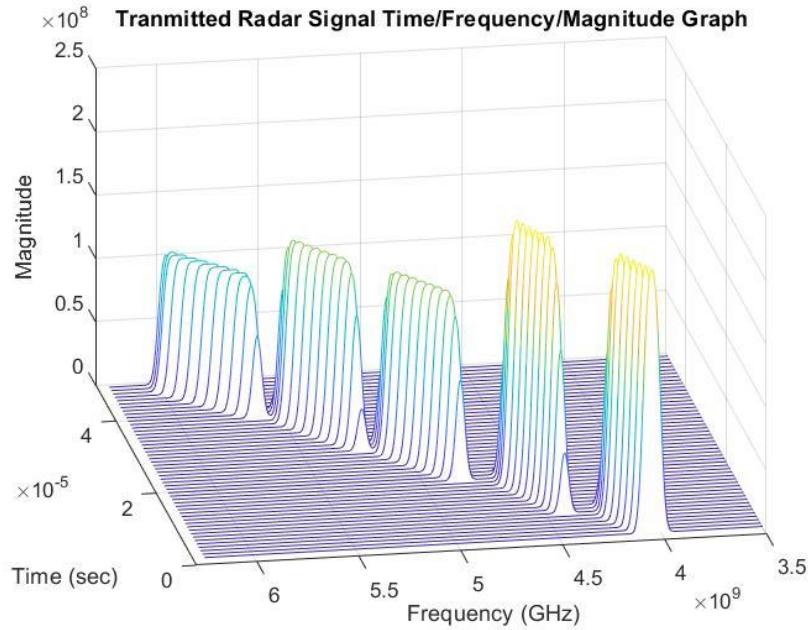
Sinyal karakteristiği tekrarlı, öğrenilebilir ve doğrusal oldukça, sinyal istihbaratı evresinde tehdit veri tabanı için o kadar fazla bilgi sağlanmış olur. Dolayısıyla önceden belirlenen tehditler için seçilecek savunma teknikleri ve alternatifleri de operasyonun iyi yönetilmesini sağlar. Deneme 1 ve Deneme 2’de yineleyici kabiliyete sahip karıştırıcı platform alıcısı tarafından toplanan sinyalin; alt darbelerinin sayısı, her alt darbe için tarama bandının başlangıç frekansı, tarama bant genişliği bilgilerinin işleyebileceği veri sıklığı ve karmaşıklıkta olmasıyla birlikte veri tabanı ile direkt eşleştirilebilmesi sebebiyle nokta tarama karıştırmanın özelliklerinin bu doğrultuda güncellenmesiyle etkisiz hale getirilebilir. Dolayısıyla radar, karıştırıcı alıcısının sinyal işleme kabiliyeti gelişmiş olsa dahi, veri tabanında tehdit eşleştirme aşamasında geciktirme sağlayacak tekniklere yönelmelidir ki mikro saniye seviyesinde değişen frekanslara cevap üretebilsin. Bu doğrultuda gerçekleştirilen benzetim sonucu Şekil 3.27’deki gibidir. Alt darbe başlangıç frekansının değiştirilmesi, karıştırıcının alıcısının algılama hızı ve işlem gücü kabiliyetini etkileyememiştir. Yinelemeli karıştırıcı, gelen darbeyi anlık olarak çözümleyebildiğinden değiştirilen bu rastgele örüntüyü de takip edebilecek yeteneğe sahiptir. Burada karıştırmanın

daha efektif olabilmesi için taranan nokta gürültü sinyallerinin bant genişliğinin gelen sinyal ile doğru orantılı artırılması gereklidir. Gürültü gücü geniş bir banda yayılması yerine, nokta gürültülerin bant genişliği artırılarak kullanılabilir.

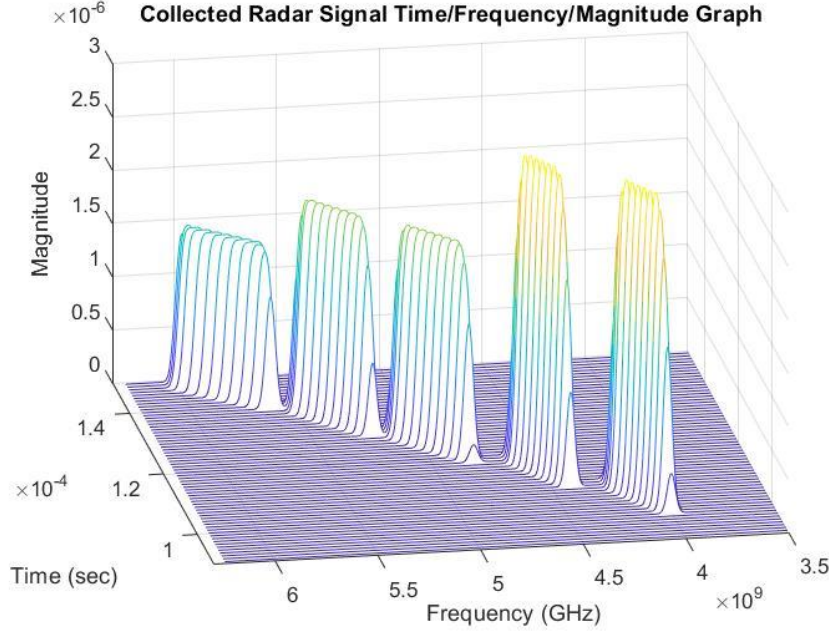
3.5.3. Deneme 4 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları

Bu denemede de radar, geniş bir bantı doğrusal olmayan (rastgele) şekilde değişen tarama bant genişlikleriyle bölünmüş alt darbe adımlardan oluşan sinyal üretebilme kabiliyetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.28’de kademeli doğrusal olmayan (rastgele) bant genişliğine sahip chirp frekans modeli ile modüle edilerek elde edilmiş dalga formunun bir ana darbe DTA döngüsündeki alt darbelerinin büyüklük-frekans-zaman kümesindeki örüntü modeli gösterilmektedir. Şekil 3.29’da ise hedeften yansıyan bu sinyalin demodüle edildikten sonraki örüntüsü yer almaktadır.

Bu denemede radar bakış açısıyla sağlanmak istenen, karıştırıcıyı her alt darbeye oluşturacağı gürültü sinyalinin bant genişliğini değiştirmeye zorlamaktır. EH ünitesinin alıcısı, gerçek zamanlı olarak algıladığı radar sinyalini, radara tekrar dönmeden önce çözümlemek ve uygulayacağı karıştırma tekniğe karar vermek durumundadır.



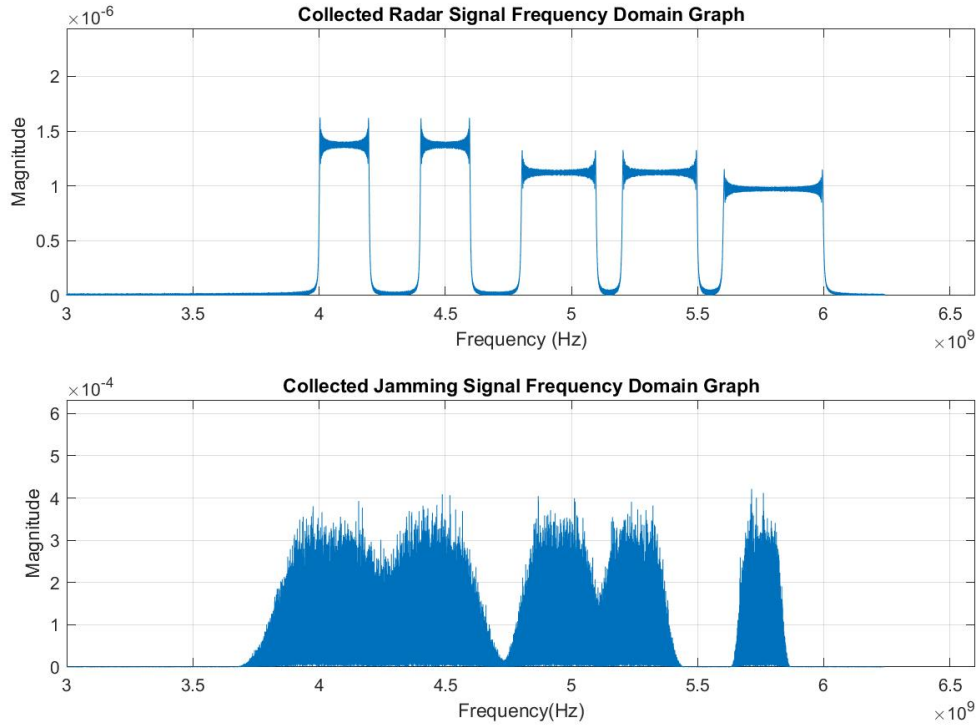
Şekil 3.28 Kademeli Doğrusal Değişmeyen (Rastgele) Bant Genişliğine Sahip Chirp Frekans Modeli İle Modüle Edilerek Yayınlanan Radar Sinyalinin Örüntüsü



Şekil 3.29 Radar Tarafından Alınan Kademeli Doğrusal Değişmeyen (Rastgele) Bant Genişliğine Sahip Chirp Dalga Formunun Demodülasyonu Sonucu Elde Edilen Sinyal Örneği

Şekil 3.30’da radar alıcısına ulaşan radar sinyali ile nokta tarama gürültü karıştırma sinyalinin frekans alanındaki çözümü gösterilmektedir. Nokta gürültünün bant genişliği 200 MHz’de sabit tutulduğu sürece görülüyor ki kapsanmayan bantlardan radar etkinliğini sürdürmeye devam edebiliyor. Dolayısıyla karıştırıcının bu sinyal karakteristiğine karşı iki alternatifi vardır. Bunlardan ilki, gelen dalganın içerisinde yer alan alt darbelerin frekans bantlarına göre gürültü bant genişliğini filtrelemektir. Bir diğer alternatifi de, bir radar darbesinin tüm bant genişliği boyunca geniş bir frekans aralığını düşen güç pahasına baraj gürültü ile etkisiz hale getirmektir. Burada işlenecek verinin boyutunu etkileyen alt darbe sayısı ve bu darbelerin tekrarlama frekansı parametreleri de önemli rol oynamaktadır.

Buraya kadar gerçekleştirilen senaryoların sonuçları değerlendirildiğinde, nokta karıştırma tekniği; radar frekans spektrumunun kullanımı tahmin edilemediği ve işlem gücünün yeterince karmaşık olmadığı durumlarda radar sinyal karakteristiğine uygun ayarlamalar yapılarak kullanılabilir. Eğer işlem kapasitesi bu ayarlamaları yapmaya yetmediği takdirde baraj karıştırması uygulanması daha uygun olacaktır. Nokta taramada, güç zaman içinde farklı dar bantlardaki frekanslara yönlendirilmesiyle elde ediliyorken, bu dalga formuna özel seçili bant genişletilerek baraj seviyesine getirilerek de taranabilir.

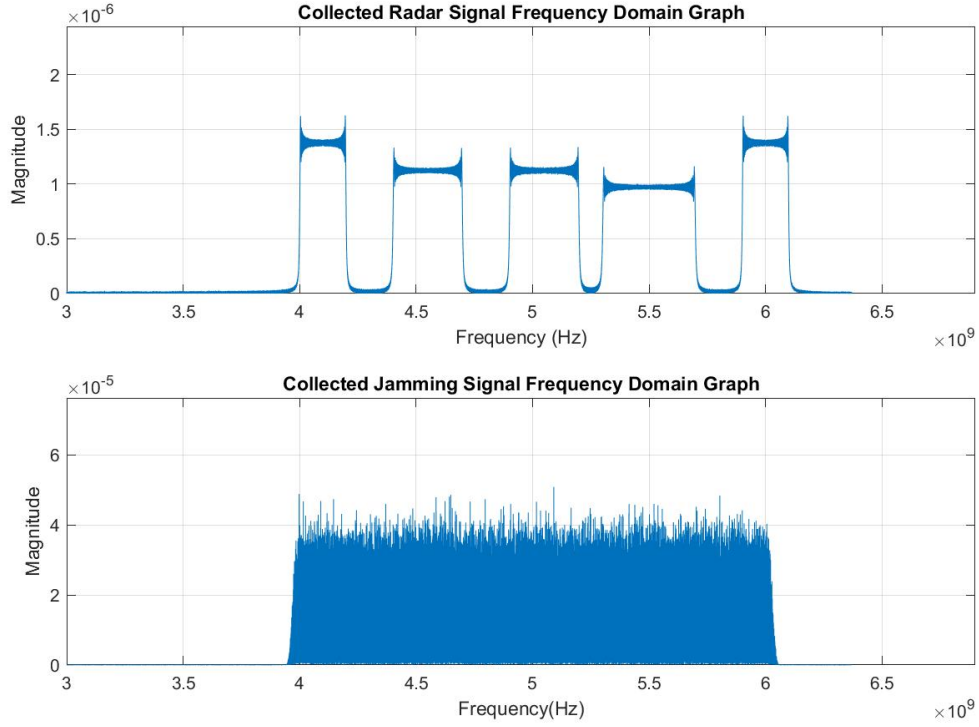


Şekil 3.30 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Kademeli Doğrusal Değişmeyen (Rastgele) Bant Genişliğine Sahip Chirp Radar Sinyalinin ve Nokta Tarama Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

3.5.4. Deneme 5 Kapsamında Elde Edilen Benzetim Sonuçları

Bu benzetimin son denemesinde ise geniş bir bandı doğrusal olmayan (rastgele) şekilde değişen tarama bant genişlikleriyle bölünmüş alt darbeler yine radar darbesinin frekans aralığı içinde rastgele seçilen başlangıç frekans adımlarından oluşan sinyal üretebilme kabiliyetine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.31’de doğrusal olmayan (rastgele) bant genişliğine ve alt darbe başlangıç frekansına sahip kademeli chirp frekans modeli ile modüle edilerek elde edilmiş dalga formunun bir ana darbe DTA döngüsündeki alt darbelerinin büyüklük-frekans-zaman kümesindeki örüntü modeli gösterilmektedir.

Bu benzetimde yer alan tüm denemelerdeki değişiklikler senaryoda bileştirilip karmaşık bir yapı oluşturulmuştur. Dalga formunun karakteristiğinde bulunan alt darbe başlangıç frekansı ile alt darbelerde taranan frekans bant genişlikleri aynı deneme içinde rastgele düzende değiştirilerek elde edilmiştir.

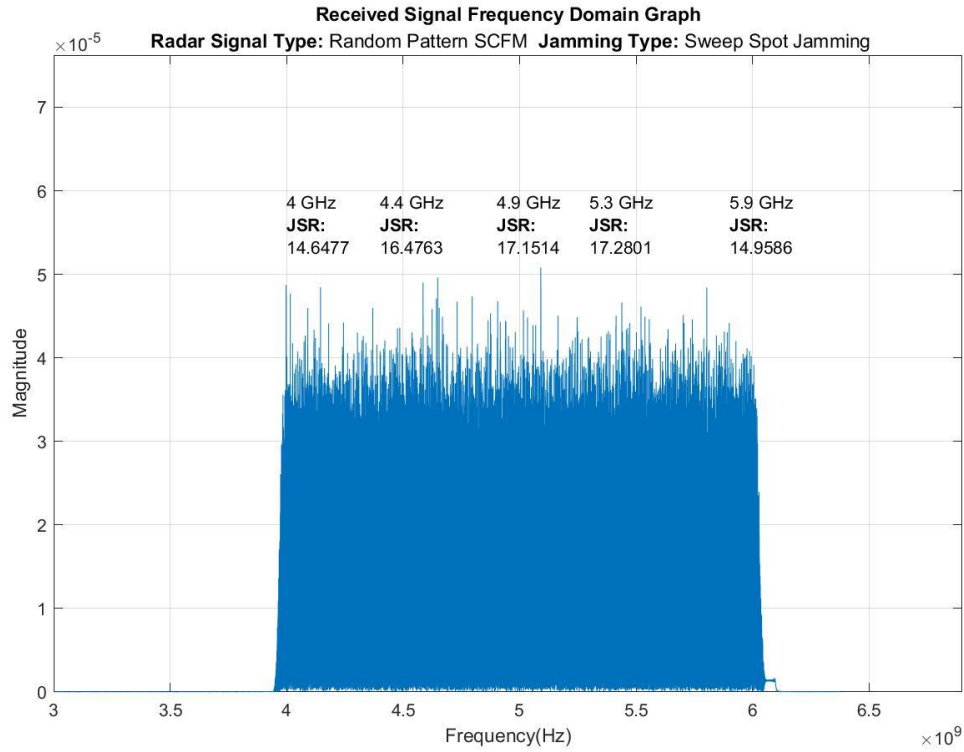


Şekil 3.31 Radar Alıcı Antenine Ulaşan Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Değişen Bant Genişliğine Sahip Chirp Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin ve Baraj Gürültü Karıştırma Sinyalinin Frekans Alanındaki Benzetimi

Bu benzetim boyunca farklı olarak dikkat edilmesi gereken en önemli nokta iletilen sinyalin tepe gücü değiştirilmemesine rağmen frekans başına iletilen alt darbelerin şiddetinde önemli ölçüde azalış olmasıdır. Tek frekansta yayın yapan radar tek darbesinde tüm gücünü bir frekansa yönlendirmekteydi. Dolayısıyla mevcut durumda aynı güç bu örnek için beş ayrı frekans bandını kapsayacak şekilde bölündüğünden, radar frekans çeşitliliğini arttırmak pahasına alt darbelerin gücünün azalmasına razı olmaktadır.

Şekil 3.32’de radar alıcısına ulaşan radar sinyali ile baraj gürültü karıştırma sinyalinin frekans alanındaki çözümü gösterilmektedir. Baraj karıştırma 4 ile 6 GHz arasında yaklaşık 2 GHz bandı kaplamaktadır. Dolayısıyla karıştırıcı özel bir tekniğe gerek kalmadan yayın yapılan bandı etkisiz hale getirebildiği bu deneme sonucu elde edilmiştir.

Sonuç olarak bu gelişme radara bir iyileştirme sağlasa da, etkin güçte düşüş ve dolayısıyla sinyal bandında performans kaybına sebep olacaktır. Bu zayıflık da radar spektrumunu potansiyel baraj karıştırması ataklarına karşı savunmasız hale getirecektir.

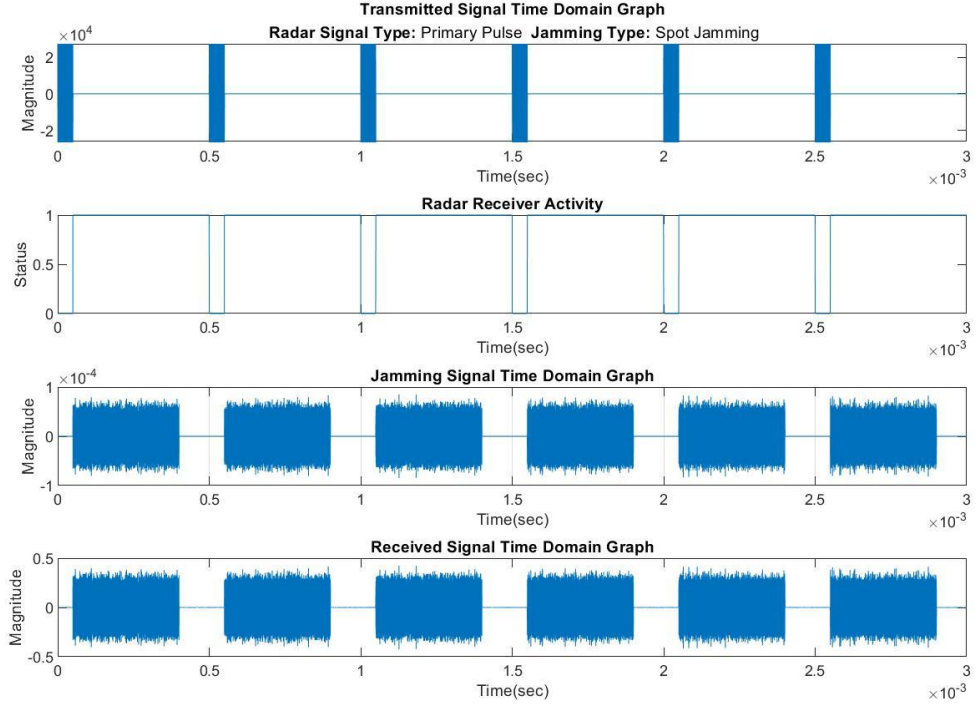


Şekil 3.32 Baraj Karıştırması Altında Doğrusal Olmayan (Rastgele) Kademeli Değişen Bant Genişliğine Sahip Chirp Frekans Modeli ile Modüle Edilmiş Radar Sinyalinin Frekans Alanında Analizi

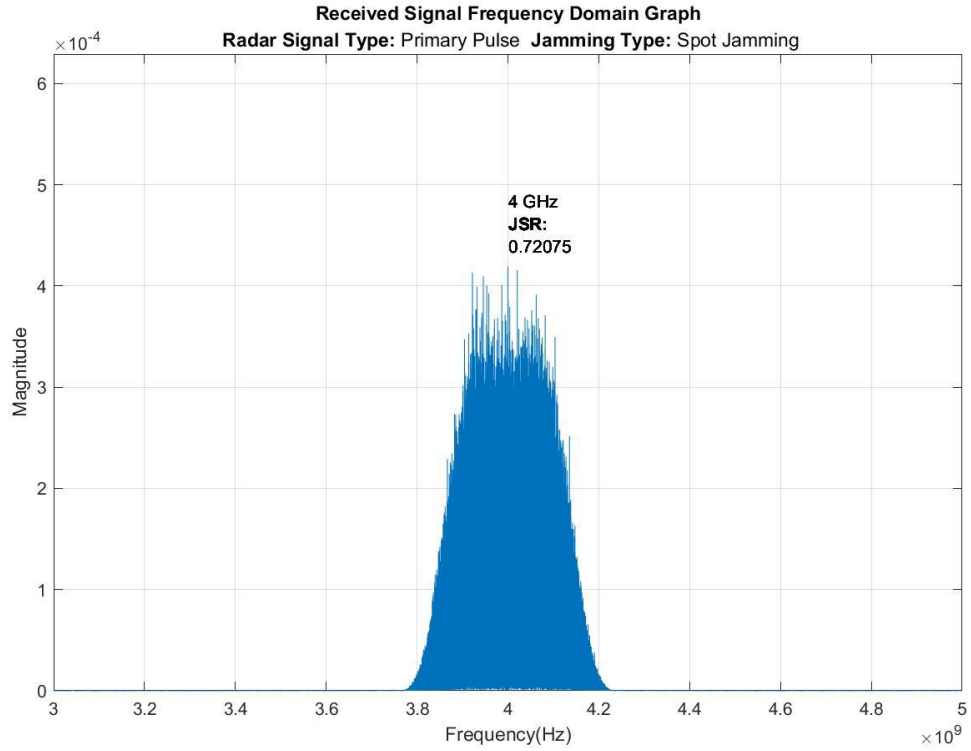
3.6. Benzetim 4: Kademeli ve Titreşimli Darbe Tekrarlama Aralığına Sahip Darbe Radarının Gürültü ve Aldatma Karıştırmasına Karşı Etkinliği

Son benzetim çalışmasında, sabit frekanslı temel bir darbe radarının darbe tekrarlama sıklığı farklı modellerle değiştirilerek gürültü ve aldatma karışırmaları altında radara olan katkısı incelenecektir. İlk olarak da kademeli artış/azalış ve titreşimli DTA örüntülerinin nokta karıştırmasına altında etkileri gözlemlenecektir.

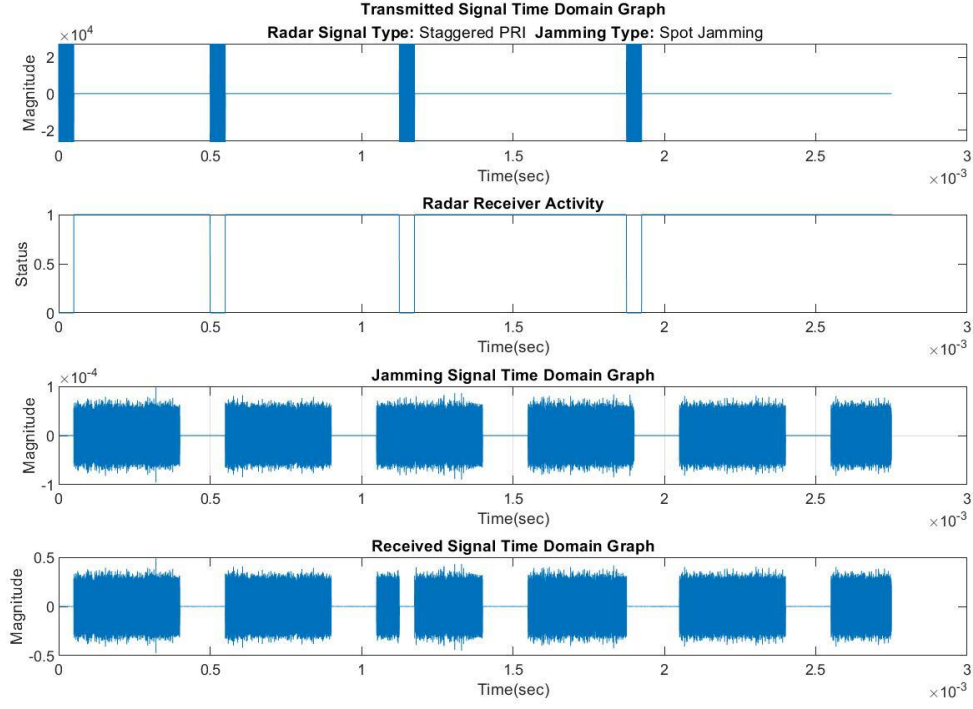
Kendi kendini koruma EH sisteminin hedefi alıcısının algıladığı tüm sinyallerin karakteristiklerini belirleyip, bu spesifik özelliklere uygun sinyalleri üreterek tekrar tehdit radara yayınlamaktır. Bir önceki benzetim çalışmalarında test edildiği üzere bu kritik parametrelerden biri çalışma frekansı olduğu gibi bir diğeri de darbe tekrarlama aralığıdır. Karıştırıcı bilindiği üzere karşı saldırılardan kaçınabilmek için sürekli olarak yayın yapamamaktadır. Bu nedenle, karıştırma sinyalinin radar antenine maksimum karıştırma gücü transferi için radar dinleme zamanlamasının belirlenmesi önemlidir.



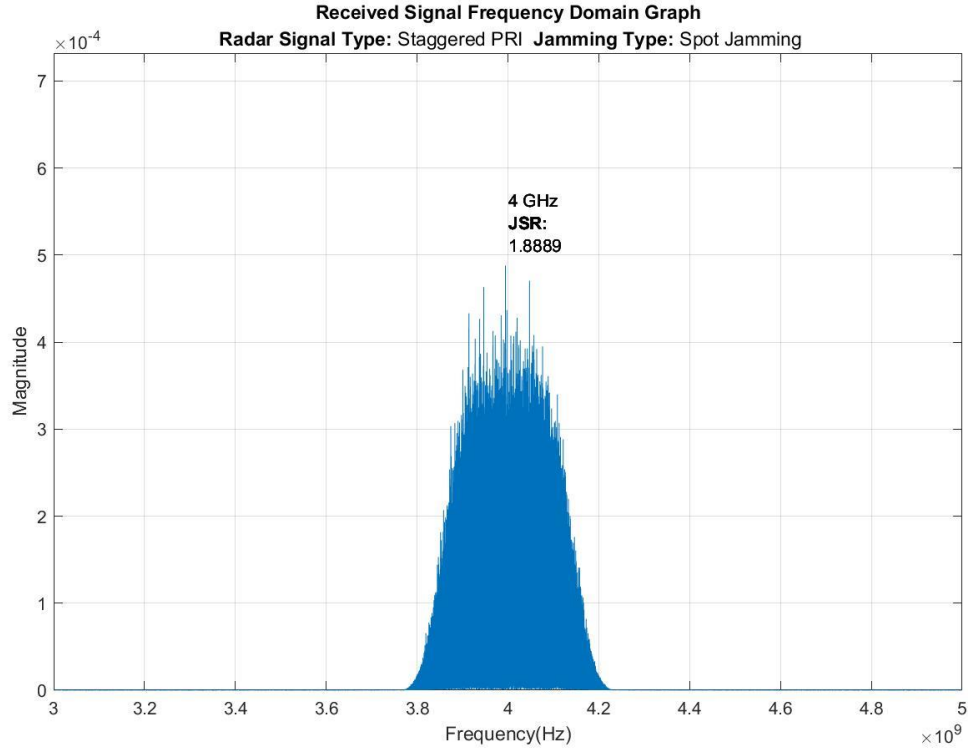
Şekil 3.33 Nokta Karıştırması Altında Sabit DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi



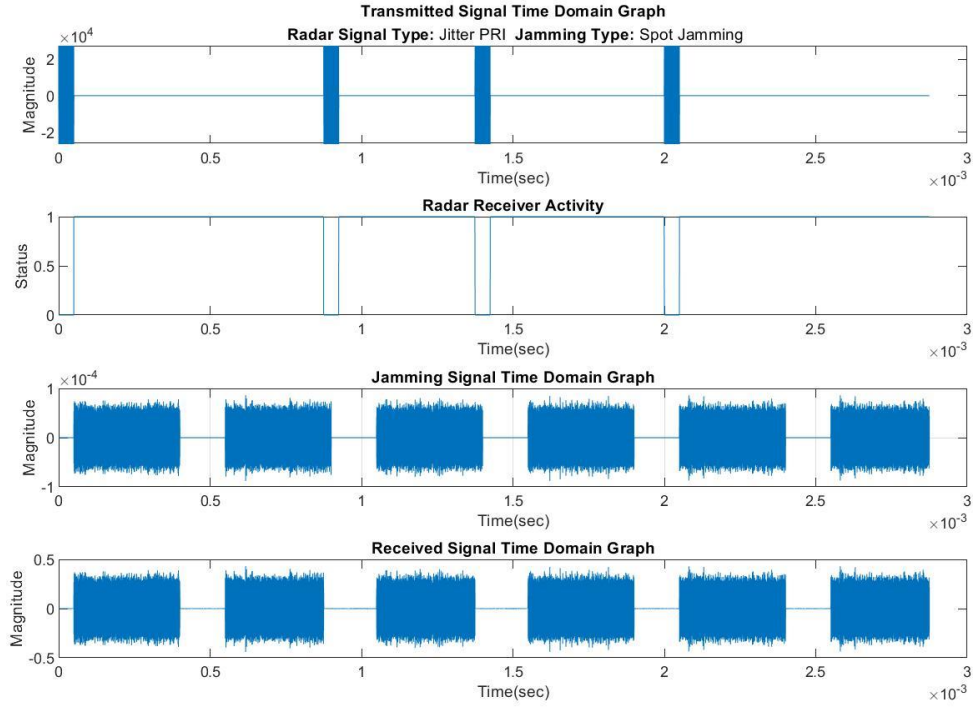
Şekil 3.34 Nokta Karıştırması Altında Sabit DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Frekans Alanı Analizi



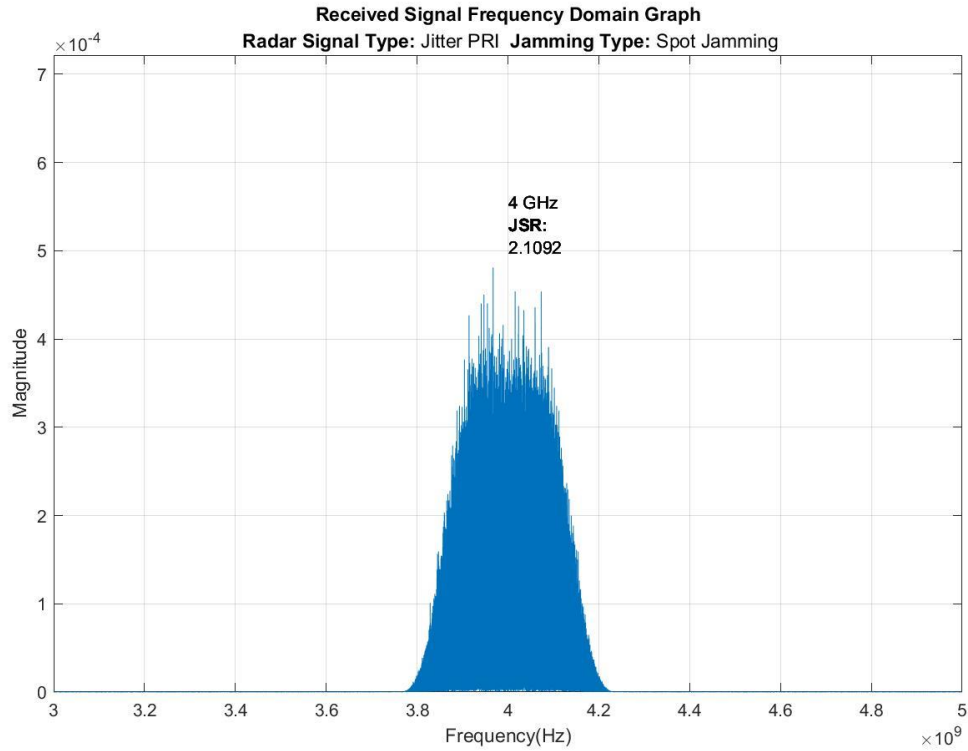
Şekil 3.35 Nokta Karıştırması Altında Kademeli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi



Şekil 3.36 Nokta Karıştırması Altında Kademeli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Frekans Alanı Analizi



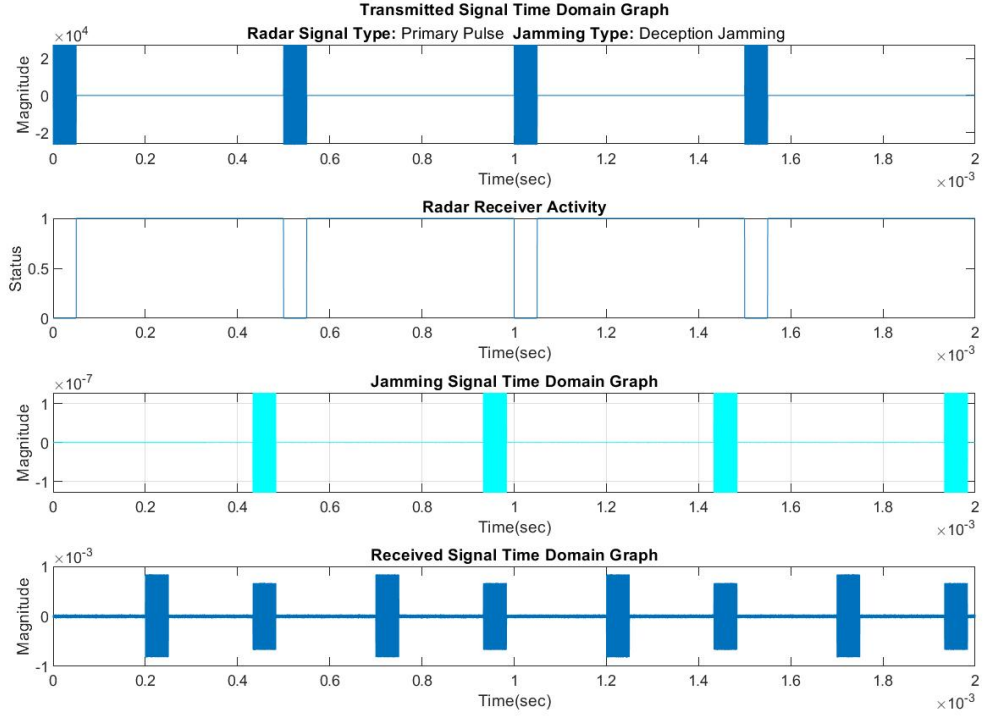
Şekil 3.37 Nokta Karıştırması Altında Titreşimli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi



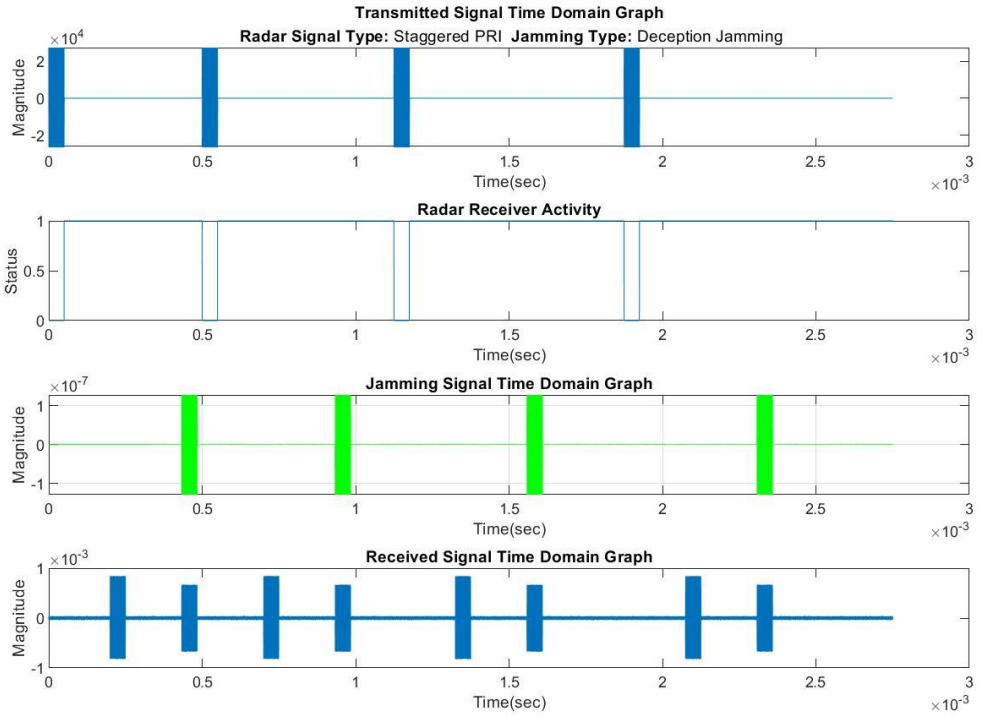
Şekil 3.38 Nokta Karıştırması Altında Titreşimli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Frekans Alanı Analizi

DTA örüntü testlerine referans olması için sabit 4 GHz frekanslı herhangi bir darbe içi veya darbe dışı modülasyonu bulunmayan darbe radarına nokta gürültü karıştırması uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 3.33’de gösterildiği üzere 3000 μ s boyunca gerçekleştirilen benzetimde, 500 μ s sabit darbe tekrarlama aralığına sahip 6 darbe gözlemlenmiştir. Tekrarlamalı karıştırıcı radarın yayınladığı sinyalin frekansını tespit etmeye odaklandığı gibi, darbe tekrarlama sıklığını da takip ederek güç yoğunluğunu radar alıcısı aktif modda çalışırken uygulamıştır. Şekilde görüldüğü üzere karıştırıcı gürültü yayını yapmaya, radar alıcısı aktifken başlıyor ve 0.8 görev döngüsüyle radarın aktif olduğu süre boyunca devam ediyor. Şekil 3.34’de yer alan sonuç ise gürültünün radar alıcısında etkisini gösteren JSR= 0.72075 değeridir. Şekil 3.35 ve Şekil 3.37’de, karıştırıcının darbe tekrarlama aralığındaki değişime olan senkronizasyonunu kaybettiği senaryoların zaman analizi gösterilmektedir. Benzetim referans olan deneme ile aynı 3000 μ s boyunca sığabilecek kadar darbe sayısını gözlemleyecek şekilde ayarlanmıştır. Karıştırıcı referans senaryoda olduğu gibi 0.8 görev döngüsü ile ancak bu sefer radarın alıcı aktivitesini spesifik olarak belirleyemeden gürültü sinyali yayını yapmaktadır. Darbeler arası gerçekleştirilen modülasyon işlemlerinde, karıştırıcı bir sonraki radar yayını ancak sinyali algıladığı zaman işleyip analiz edebileceğinden bir sonraki süreyi tahmin etmek ve ona uygun teknik geliştirmek zorlayıcı olabilir. Şekil 3.36’da kademeli doğrusal artışlı DTA değerine sahip sinyalin karıştırma/sinyal orası JSR = 1.8889; Şekil 3.38’deki titreşimli değişken DTA değerine sahip sinyalin karıştırma/sinyal orası ise JSR = 2.1092 olarak ölçülmüştür. Sonuçlar gösteriyor ki, darbe tekrarlama aralığının darbeden darbeye değiştirilmesi gürültü sinyalindeki güç dağılımını çok fazla etkilememektedir. Buna rağmen, radar iletim ve dinleme zamanlamaları potansiyel olarak anti-radyasyon füze ataklarından korunma için stratejilere katkı sağlayabilir.

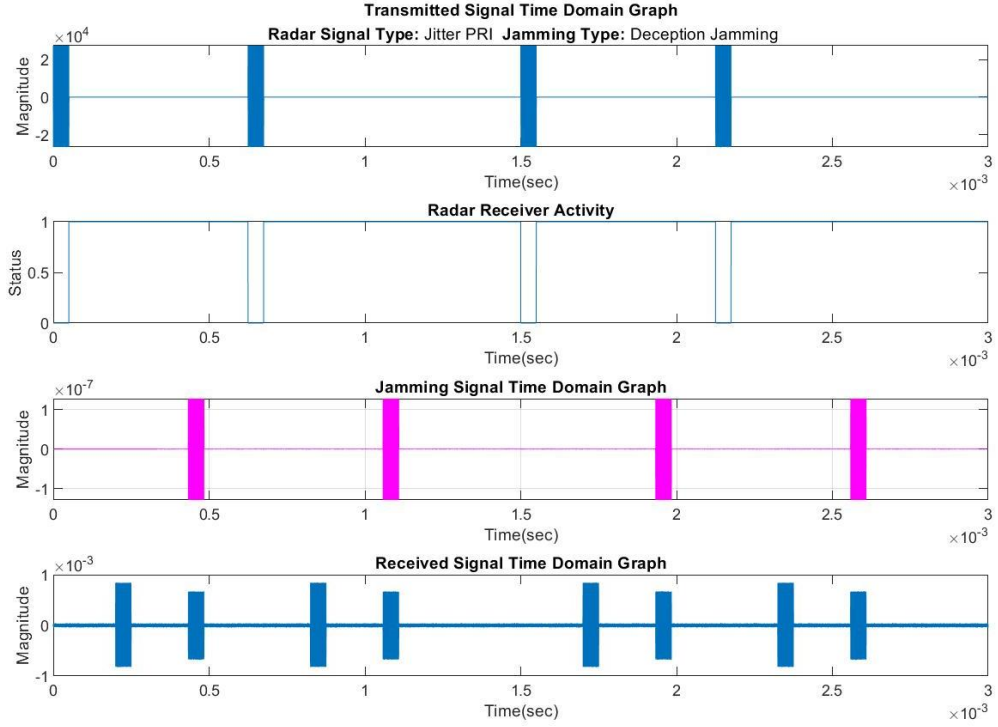
Tekrarlamalı karıştırıcı daha etkin sonuçlar elde etmek için frekans tabanlı tekniklerden zaman tabanlı yöntemlere geçiş yapar. Radar diğer bölümlerde anlatıldığı üzere darbe tekrarlama aralığını farklı avantajlar sağlamak için değiştirmektedir. Radarın hedef gözetleme ve takip etme yetenekleri, yalancı hedefler oluşturularak etkisiz hale getirilebilir. Radar belirlenen her DTA döngüsündeki dinleme fazında, hedeften yansıyan tüm sinyalleri dinler ve işler. Aldatma karıştırması uygulandığında radar, bir DTA döngüsünde var olan gerçek hedefi ve onun parametrelerini (pozisyon, hız ve açı) ayırt edemeyecek hale getirilebilir.



Şekil 3.39 Aldatma Karıştırması Altında Sabit DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi



Şekil 3.40 Aldatma Karıştırması Altında Kademeli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi



Şekil 3.41 Aldatma Karıştırması Altında Titreşimli DTA Değeri ile Oluşturulmuş Radar Sinyalinin Zaman Alanı Analizi

Şekil 3.39’da sabit/değişken olmayan DTA’ya sahip darbe radarına, Şekil 3.40’da kademeli artan DTA’ya sahip darbe radarına ve son olarak da Şekil 3.41’de de titreşimli DTA’ya sahip darbe radarına aldatma karıştırması uygulanmıştır. Tekrarlamalı karıştırıcı değişken DTA’lı darbe radarına daha etkin müdahale elde etmek için frekans tabanlı yöntemlerden zaman tabanlı yöntemlere geçiş yapar. Radarın hedef gözetleme ve takip etme yetenekleri yalancı hedefler oluşturularak etkisiz hale getirilebileceği önceki bölümlerde açıklanmıştı. Burada karıştırıcı, radardan gelen darbe aralık örüntülerini takip etmektedir. Tekrarlayan ve veri tabanında belirlenen bir örüntü algıladığında, radardan gelen sinyalin karakteristiğini kopyalayıp sahte bir hedef üreterek, radara tekrar yönlendirmektedir. Eğer karıştırıcı Şekil 3.40 ve Şekil 3.41’deki gibi DTA örüntüsü çerçevesinde başarılı sahte hedefler yayınlayabilirse radar, karıştırmanın varlığını tespit etmede güçlük çekecektir ve belirlenmesi gereken iki benzer hedef radar ekranında belirlenerek radar karıştırılmış olacaktır.

4. SONUÇ

Çıktılar değerlendirildiğinde, nokta karıştırma eklemenin çoğunlukla baraj karıştırma eklemekten daha etkili olduğu görülmüştür. Fakat, radar darbe içerisinde lineer olarak frekans değiştirdiğinde nokta karıştırma tekniği optimal çözüm değildir. Sonuç olarak, detaylı radar sinyal analizinin başarılı karıştırma işlemi için kritik bir öneme sahip olduğu anlaşılmıştır.

Simülasyonlar; tekrarlayıcı gürültü karıştırmasının karıştırıcının radar sinyalini işleyerek değişim örüntülerini keşfetmesi durumunda darbe sıkıştırma radarlarına karşı yüksek etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çoklu mono-statik radarların görev yaptığı bir operasyon sahasında, İHA tekrarlayıcı gürültü karıştırıcı kolay ve uygun maliyetli bir şekilde ölçeklenebileceği görülebilmektedir. Çoklu tekrarlayıcı EH sistemleri bir İHA üzerine uygulanabileceği gibi birden fazla İHA üzerine her bir bant bölünerek de uygulanabilir.

Görece daha az karmaşıklıkta görevler için jet motorlu ve entegre EH sistemlerine sahip daha güçlü İHA sistemleri geleneksel savaş uçaklarına göre daha iyi performans gösterebilir. İHA'ların fiziksel sınırlamalara sebep olan insan faktörü olmadığından, her türlü ivme ve yönelim koşulunda ve stresli durumlarda benzer kararlar alıp bunları aynı başarımla uygulama ihtimali pilotlu uçaklara göre çok daha yüksektir. Yapay zeka teknolojisinin de gelişmesiyle İHA'ların otonom görev kabiliyetleri giderek artacaktır. Sonuçta, İHA'ların, kirli işler konusunda insanların en büyük yardımcısı haline geleceği açıktır. Bu da pilot üzerindeki ek baskı ve riskleri ortadan kaldırarak, insan pilotların ana görevine odaklanmasını sağlayacak ve sahada oluşabilecek belirsizlikleri daha hızlı ve güvenli bir şekilde tolere edebilmesine olanak sağlayacaktır. Bu sayede görev başarımları da artacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] D. Singh, "Electronic Warfare: Changing Operational Concepts," *Air Power Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 43-64, 2021.
- [2] D. Daso, "New World Vistas. Looking toward the Future, Learning from the Past," *Air and Space Power Journal*, Amerika Birleşik Devletleri, 1999.
- [3] F. Testa, M. T. Wade, M. Lustedt, F. Cavaliere, M. Romagnoli, and V. Stojanović, "Optical Interconnects for Future Advanced Antenna Systems: Architectures, Requirements and Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 40, no. 2, pp. 393-403, 2022.
- [4] D. L. Adamy, *Introduction to Electronic Warfare Modeling and Simulation*, Amerika Birleşik Devletleri: Artech House, 2003.
- [5] A. Graham, *Communications, Radar and Electronic Warfare*, UK: John Wiley & Sons, 2001.
- [6] D. Bookstaber, "Unmanned Combat Aerial Vehicles: What Men Do in Aircraft and Why Machines Can Do it Better," *Air and Space Power Journal Maxwell AFB AL*, Amerika Birleşik devletleri, 2000.
- [7] D. L. Gaub, "The Children of Aphrodite The Proliferation and Threat of Unmanned Aerial Systems In the Twenty-First Century," *School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College Fort Leavenworth - Master Thesis*, Amerika Birleşik Devletleri, 2011.
- [8] G. Tham, E. Wong and K. K. K. Ming, "Technologies in Hybrid Warfare: Challenges and Opportunities," *Pointer, Journal of the Singapore Armed Forces*, vol. 43, no. 1, pp. 12-24, 2017.
- [9] R. G. Wiley, *ELINT The Interception and Analysis of Radar Signals*, Amerika Birleşik Devletleri: Artech House, 2006.

- [10] A. J. Fenn, D. H. Temme, W. P. Delaney and W. E. Courtney, "The Development of Phased-Array Radar Technology," *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 321-340, 2000.
- [11] H. Meikie, *Modern Radar Systems*, Amerika Birleşik Devletleri: Artech House, 2001.
- [12] B. R. Mahafza, S. C. Winton and A. Z. Elsherbeni, *Handbook of Radar Signal Analysis*, Amerika Birleşik Devletleri: CRC Press Taylor and Francis Group, 2022.
- [13] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design using Matlab Third Edition," in *Chapter 1 Definitions and Nomenclature*, Amerika Birleşik Devletleri, CRC Press Taylor & Francis Group, 2013, pp. 9-17.
- [14] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing Second Edition," in *Chapter 2 Signal Models*, Amerika Birleşik Devletleri, McGraw-Hill Education, 2014, pp. 12-89.
- [15] W. L. Melvin and J. A. Scheer, "Principle of Modern Radar Vol. II:Advanced Techniques," in *Chapter 2 Advanced Pulse Compression Waveform Modulations and Techniques*, Amerika Birleşik Devletleri, SciTech Publishing Edison, NJ, 2013, pp. 40-48.
- [16] W. L. Melvin and J. A. Scheer, "Principles of Modern Radar Vol. II: Advanced Techniques," in *Chapter 2 Advanced Pulse Compression Waveform Modulations and Techniques*, US, SciTech Publishing, Edison, NJ, 2013, pp. 58-70.
- [17] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design using Matlab Third Edition," in *Chapter 7 Pulse Compression*, Amerika Birleşik Devletleri, CRC Press Taylor & Francis Group, 2013, pp. 254-257.
- [18] D. A. Noon, "Stepped-Frequency Radar Design and Signal Processing Enhances Ground Penetrating Radar Performance," 2013, Department of Electrical & Computer Engineering The University of Queensland and Cooperative - A thesis for the degree of Doctor of Philosophy.
- [19] Y. Lin, X. Xu, J. Pang, B. Li and R. Zhou, "The New Mathematical Model of Motion Compensation for Stepped-Frequency Radar Signal," *Hindawi Publishing Corporation-Mathematical Problems in Engineering*, 2014.

- [20] T. Zeng, S. Chang, H. Fan and Q. Liu, "Design and Processing of a Novel Chaos-Based Stepped Frequency Synthesized Wideband Radar Signal," *MDPI-Sensors*, 2018.
- [21] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design Using Matlab Third Edition," in *Chapter 7 Pulse Compression*, Amerika Birleşik Devletleri, CRC Press Taylor & Francis Group, 2013, pp. 184-186.
- [22] Q. Zhang and Y.-Q. Jin, "Aspects of Radar Imaging Using Frequency-Stepped Chirp Signals," *Hindawi Publishing Corporation-EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2006, pp. 1-8, 2006.
- [23] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems (2nd ed.)," in *Chapter 4 MTI and Pulse Doppler Radar*, Amerika Birleşik Devletleri, McGraw-Hill, 1981, pp. 114-117.
- [24] H. C. Feng, B. Tang and T. Wan, "Radar pulse repetition interval modulation recognition with combined net and domain-adaptive few-shot learning," *Elsevier-Digital Signal Processing*, vol. 127, 2022.
- [25] A. G. Pakfiliz, "Increasing self-protection jammer efficiency using radar cross section adaptation," *Elsevier - Computers & Electrical Engineering*, vol. 98, no. C, 2022.
- [26] B. R. Mahafza, S. C. Winton and A. Z. Elsherbeni, "Handbook of Radar Signal Analysis," in *Chapter 5 Radar Electronic Warfare Techniques*, Amerika Birleşik Devletleri, CRC Press Taylor & Francis Group, 2022, pp. 161-169.
- [27] L. Heflin, "53rd Wing," 13 Mayıs 2023. [Online]. Available: <https://www.53rdwing.af.mil/News/Article/3394752/53rd-wing-tests-angry-kitten-pod-on-mq-9-and-completes-full-integrated-combat-t>.
- [28] "MQ-9A "Reaper"," General Atomics Aeronautical, [Online]. Available: <https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9a>.
- [29] "Jane's Radar and Electronic Warfare Systems," *Jane's Information Group*, 2002.