
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

FREKANS ATLAMALI SİNYALLERİN YAZILIM TANIMLI RADYOLAR İLE GERÇEK ZAMANLI TESPİT VE SINIFLANDIRILMASI

Mutlu AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mutlu AYDIN
25/07/2024

FREKANS ATLAMALI SİNYALLERİN YAZILIM TANIMLI RADYOLAR İLE GERÇEK ZAMANLI TESPİT VE SINIFLANDIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mutlu AYDIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Frekans atlama, güçlü anti-karıştırma özelliği gibi birçok avantajı nedeniyle iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte sinyaller, taşıyıcının farklı frekans kanalları arasında değiştirilmesi ile iletilir. Bu nedenle frekans atlama sinyali durağan değildir ve spektrumu zaman içinde değişir. Bu nedenle, frekans atlama sinyallerinin tespiti ve parametre kestirimi görevi gerçek dünyada oldukça zorludur. Bu zorluğun üstesinden gelmek için bu tez çalışması, birden çok eşzamanlı dar bant frekans atlama sinyallerinin parametrelerini tespit etmek ve kestirmek için bir yöntem önermektedir. Önerilen yöntemde öncelikle frekans atlama sinyallerinin analizi için kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) kullanılmış ve eşiklemeye dayalı bir ikilileştirme işlemi kullanılmıştır. Tespit edilen sinyallerin merkez frekanslarının daha doğru bir şekilde başarılı bir şekilde kestirilmesini sağlayan yeni bir yöntem önerilmiştir. Tüm spektrum için parametrelerin kestirimi yapıldıktan sonra frekans atlama sinyallerinin atlamalarını tespit etmek için gerçek zamanlı işleme dayalı bir yaklaşım kullanılmıştır. Son olarak, zaman çakışması olmadan atlamaların gruplara ayrılması için atlama kümeleme yöntemi uygulanmış ve ayrıca bant genişliği parametresinin kontrolü yapılmıştır. Bu çalışmadaki hedef sinyaller genellikle kanalın frekans bandında sabit olduğu varsayılabileceği havadan karaya ve görüş hattında olan iletişimlerdir. Bu nedenle önerilen yöntemin performansı görüş hattında olan kanallar için tasarlanmış Rician sönümleme modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Önerilen yöntemin çoklu dar bant frekans atlamalı sinyallerinin hızlı ve doğru tespiti ve parametre kestirimi için ana akım STFT tabanlı yöntemlere alternatif olabileceği simülasyon sonuçlarında görülmektedir.

Bilim Kodu	:	93420
Anahtar Kelimeler	:	Frekans atlamalı, Yazılım Tanımlı Radyo (YTR), dar bant, parametre kestirimi, sinyal tespiti, sınıflandırma
Sayfa Adedi	:	39
Danışman	:	Prof. Dr. Ali KARA

REAL-TIME DETECTION AND CLASSIFICATION OF FREQUENCY-HOPPING SIGNALS WITH SOFTWARE-DEFINED RADIOS

(M. Sc. Thesis)

Mutlu AYDIN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

Frequency hopping is a widely used technique in communication systems due to its many advantages such as strong anti-jamming ability. In this technique, signals are transmitted by changing the carrier between different frequency channels. Therefore, the frequency hopping signal is not stationary, and its spectrum changes over time. For this reason, the task of detecting frequency hopping signals and parameter estimation is quite difficult in real world. To overcome this challenge, this thesis study proposes a method to detect and estimate the parameters of simultaneous multiple narrowband frequency hopping signals. In the proposed method, firstly, short-time Fourier transform (STFT) was used to analyze frequency hopping signals, and a thresholding-based binarization process was used. A new method has been proposed that enables successful extraction of the center frequencies of the detected signals more accurately. After the parameters are estimated for the entire spectrum, a real-time processing based approach is utilized to detect hops of the frequency hopping signals. Finally, hop clustering was applied to separate hops into groups without time overlap, and control of the bandwidth parameter was also performed. The target signals in this study are generally air-to-ground and line-of-sight communications where the channel can be assumed to be frequency-flat. Therefore, the performance of the proposed method is simulated using the Rician fading model designed for line-of-sight channels. In simulation results, it can be seen that the proposed method can be an alternative to main stream STFT based methods for quick and accurate parameter estimation and detection of multiple narrowband frequency hopping signals.

Science Code	:	93420
Key Words	:	Frequency hopping, Software Defined Radio (SDR), narrow band, parameter estimation, signal detection, classification
Page Number	:	39
Supervisor	:	Prof. Dr. Ali KARA

TEŞEKKÜR

Yönlendirmesi ve desteği ile bana çok değerli ve sayısız katkılarda bulunan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali KARA'ya çok teşekkür ederim. Sayın Doç. Dr. Yaser DALVEREN'e yayın sürecimdeki emekleri için teşekkür ederim. Yüksek lisans sürecimdeki destekleri için çalıştığım kurum TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN'e, Rıfat DALKIRAN, Berkay SAYGILI Yasin AYDINLI, Seçkin ÖNCÜ, Ömer Faruk SARIYER, ve diğer çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleri ile her zaman yanımda olan aileme, babam, annem ve kardeşime çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ ix

SİMGELER VE KISALTMALAR x

1. GİRİŞ 1

2. ÖNBİLGİLER 7

2.1. Frekans Atlamalı (FA) Sinyal Modeli ve Parametreleri 7

2.2. Short–Time Fourier Transform (STFT) 9

3. YÖNTEM 11

4. SİMÜLASYONLAR 19

4.1. Simülasyon Parametreleri ve Ortamı 19

4.2. Simülasyon Sonuçları 20

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER 31

6. SONUÇ 33

KAYNAKLAR 35

ÖZGEÇMİŞ 39

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. İlgili Çalışmaların Özeti 5

Çizelge 3.1. Eşik değeri hesaplama algoritması 12

Çizelge 3.2. Frekans domainde parametre kestirim algoritması..... 13

Çizelge 3.3. Birleştirme algoritması 14

Çizelge 3.4. Atlama kümeleme algoritması..... 16

Çizelge 4.1. FA sinyal parametreleri listesi..... 20

Çizelge 4.2. Değişen K faktörlerine göre tespit edilen FA parametre kestirimlerinin ortalama mutlak hataları (SNR = 6 dB; $f_{D_{maksimum}}$ = 100 Hz) …..…..... 29

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. FA sinyal parametreleri gösterimi 7

Şekil 3.1. Önerilen yöntemin akış şeması 11

Şekil 4.1. GNU Radio Companion ile Rician sönümleme modeli 21

Şekil 4.2. Kompleks taban battaki sinyalin spektrogramı 22

Şekil 4.3. Spektrogramın ikilileştirilmiş versiyonu 22

Şekil 4.4. Birleştirme aşamasından sonra kestirilen tüm kanal frekansları ve bant genişliklerinin 3-D çizimi……..... 23

Şekil 4.5. Tespit edilen atlamaların başlangıç ve bitiş zamanları 24

Şekil 4.6. Tespit edilen FA sinyallerinin atlamada kalış süresi ve koruma süresi mutlak hataları …...……..……. 25

Şekil 4.7. Tespit edilen FA sinyallerinin atlama hızı mutlak hataları 25

Şekil 4.8. -8 dB SNR'da kestirimlerin mutlak hatalarının karşılaştırılması 26

Şekil 4.9. 6 dB SNR'da kestirimlerin mutlak hatalarının karşılaştırılması 27

Şekil 4.10. 24 dB SNR'da kestirimlerin mutlak hatalarının karşılaştırılması 27

Şekil 4.11. FA-A sinyalinin ilk atlamasının ikilileştirilmiş halllerinin farklı SNR'lerde kıyaslaması (SNR = 6 dB) 28

Şekil 4.12. FA-A sinyalinin ilk atlamasının ikilileştirilmiş halllerinin farklı SNR'lerde kıyaslaması (SNR = 24 dB) 28

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
Atlama/s	Saniyedeki Atlama Sayısı
$\boldsymbol{B(n,i)}$	Binarized STFT Matrix
$\boldsymbol{bl}$	Bant Genişliği Listesi
$\boldsymbol{BW}$	Bandwidth
dB	Decibel
$\boldsymbol{DG_{dB}}$	Detection Gap (dB cinsinden)
$\boldsymbol{f_{center}}$	Center Frequency
$\boldsymbol{f_{başlangıç}}$	Başlangıç Frekansı
$\boldsymbol{f_{bitiş}}$	Bitiş Frekansı
$\boldsymbol{f_D}$	Doppler Frekansı
$\boldsymbol{F_s}$	Sampling Frequency
$\boldsymbol{F_{res}}$	Frequency Resolution
Hz	Hertz
GHz	Giga Hertz
K	Rician faktörü
KHz	Kilo Hertz
LO	Local Oscillator
Med	Medyan
$\boldsymbol{mfl}$	Merkez Frekansı Listesi
MHz	Mega Hertz
ms	millisaniye
MS/s	Mega Sample per Second
$\boldsymbol{N}$	FFT Pencere Boyutu
$\boldsymbol{P_{overlap}}$	Overlap Proportion
$\boldsymbol{P_{PBW}}$	Proportion of Protection Bandwidth

Simgeler	Açıklamalar
$S(n, i)$	STFT matrisi
$sıralı_al$	Sıralı Atlama Listesi
$T_{hopping}$	Hopping Period
T_{res}	Time Resolution
w	Pencereleme Fonksiyonu
z	Zaman Domainindeki Sinyal
τ_{guard}	Guard Time
τ_{dwell}	Dwell Time
µs	Microseconds
φ	Eşik Değeri

Kısaltmalar	Açıklamalar
3-D	3 Boyutlu
AM	Amplitude Modulation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BP	Back-Propagation-based
CFR	Code Of Federal Regulations
COTS	Commercial off-the-shelf
CSML	Compressed Spectrum Sensing And Maximum Likelihood
DC	Direct Current
DFT	Discrete Fourier Transform
DNN	Deep Neural Network
DL	Deep Learning
DOA	Direction of Arrival
DRNN	Deep Residual Neural Network
EMI	Electromagnetic Interference
FA	Frekans Atlamalı
FFT	Fast Fourier Transform

Kısaltmalar	Açıklamalar
FH	Frequency Hopping
FHExt	FH Signal Parameter Extractor
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FM	Frequency Modulation
FSK	Frequency Shift Keying
GNU	Gnu's Not Unix
GoF	Goodness-of-Fit
HDW	Hop Description Word
HR	Hopping Rate
IQ	In-phase Quadrature
ISM	İndustrial, Scientific, And Medical
JDM	Joint Diagonalization Matrix
İHA	İnsansız Hava Aracı
MUSIC	MUltiple SIgnal Classification
POI	Probability of Intercept
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
ResNet	Residual Network
SDR	Software Defined Radio
SNR	Signal to Noise Ratio
SPWVD	Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution
SS	Spread Spectrum
SSD	Single Shot MultiBox Detector
STFA	Space-Time Frequency Analysis
STFD	Space-Time Frequency Distribution
STFT	Short-Time Fourier Transform
TF	Time-Frequency
UAS	Unmanned Aircraft Systems
UHF	Ultra High Frequency
VHF	Very High Frequency
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WVD	Wigner-Ville distribution

Kısaltmalar	Açıklamalar
YTR	Yazılım Tanımlı Radyo
YOLO	You Only Look Once

1. GİRİŞ

Frekans atlamalı (FA, İng. Frequency Hopping (FH)) olarak da bilinen frekans atlamalı yayılma spektrumu (İng. frequency-hopping spread spectrum (FHSS)), taşıyıcıyı farklı frekans kanalları arasında değiştirerek radyo sinyallerini iletmek için tipik bir kablosuz sistemde kullanılan temel bir tekniktir. FHSS kullanan sistemlerin frekans bandı alt frekanslar içerir. Sinyal taşıyıcı frekansı bu alt frekanslar arasında, belirli bir sırayla ve hızla değişir ve bu "atlama" olarak adlandırılır. Bu, sinyalin girişimini azaltmayı mümkün kılar. FA, güçlü anti-karıştırma yeteneği ve diğer iletişim sistemleriyle uyumluluğu gibi çeşitli avantajlarından dolayı hem sivil hem de askeri iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1].

Elektromanyetik girişim (İng. electromagnetic interference (EMI)) ortamı, iletişim bağlantısı etrafındaki sabit frekanslı sinyaller ve doğadan gelen girişimler nedeniyle pratikte son derece karmaşık olabilir. Bu nedenle FA sinyallerinin tespiti veya parametre kestirimi oldukça zordur. FA sinyalini analiz etmek için geleneksel sinyal işleme yöntemleri uygun olmayabilir. Bunun nedeni FA sinyalinin durağan olmayan bir sinyal olması ve spektrumunun zaman içinde değişmesinin beklenmesidir. Bu durumda, zaman ve frekans alanının iki boyutlu birleştirilmiş yöntemi olan zaman-frekans (İng. TF) analizi, FA sinyallerinin parametrelerini kestirmede etkili bir yöntem haline gelir [2-6].

Literatürde Wigner-Ville dağılımı (İng. Wigner-Ville distribution (WVD) [7–11], dalgacık dönüşümü [12,13] ve Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (İng. Short-Time Fourier Transform (STFT)) [14–17], FA sinyal parametre kestirimi için yaygın olarak kullanılan TF analiz yöntemleridir. Bu yöntemler arasında WVD'nin TF çözünürlüğü daha yüksektir. Ancak çapraz-terim girişiminden dolayı hesaplama açısından karmaşıktır. Dalgacık dönüşümünün değişken TF çözünürlüğüne sahip olması diğer yöntemlere göre ana avantajıdır. Ancak önemli bir dezavantaj olarak gürültüye karşı çok hassastır. Öte yandan STFT, çapraz terim girişiminden etkilenmez. Bu nedenle diğer yöntemlere göre hesaplama açısından en basit yöntem olarak kabul edilebilir. Basitliği nedeniyle STFT kolaylıkla uygulanabilir. Bu nedenle FA sinyallerinin analizinde çoğunlukla STFT tercih edilmektedir.

Öte yandan FA, sahip olduğu birçok avantaj nedeniyle insansız otonom sistemler (İng. Unmanned Aircraft Systems (UAS)) tarafından kullanılan önemli iletişim tekniklerinden biri

olarak bilinmektedir [18]. Özellikle birçok insansız hava aracı (İHA), güvenli iletişim için FA sinyal tabanlı iletim sistemlerini benimser. Bu nedenle, son yıllarda çalışmaların çoğu, özellikle endüstriyel, bilimsel ve medikal (İng. industrial, scientific, and medical (ISM)) bantlardaki İHA'ları tespit etmek ve sınıflandırmak için EMI ortamında İHA FA sinyallerinin kestirimine odaklanmıştır [19-24]. Gerçek dünyadaki sivil İHA uygulamalarında FA sinyallerinin frekans dizisinin tipik olarak sabit olduğuna dikkat etmek önemlidir. Bununla birlikte, hassas bilgileri ileten bazı iletişim sistemleri, sözde rastgele atlamalı diziler gibi bazı karmaşık diziler gerektirebilir. Bu nedenle FA sinyallerinin tespiti ve doğru parametre kestirimi halen zorludur. Ayrıca literatürde FA sinyal parametresi kestirim yöntemleri öneren çalışmaların çoğu 2,4 GHz ISM operasyonel bandına odaklanmaktadır. Bununla birlikte hassas bilgiler taşıyan FA sinyalleri doğası gereği dar bantlı olabilir. Ayrıca tespitteki gecikme, korunan alanın, platformun veya sistemin güvenliğini sağlamak için dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktördür. Dolayısıyla dar bantlı FA sinyallerinin hızlı ve doğru parametre kestirimi için hala birçok zorluğun olduğu sonucuna varılabilir.

Bu tez çalışmasında, çoklu dar bant FA sinyallerinin parametrelerini tespit etmek ve kestirmek amacıyla hızlı ve doğru bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen yöntemde öncelikle FA sinyallerini analiz etmek için STFT kullanılmıştır. Frekans dönüşümü sonrası, FA sinyallerini tespit etmek için eşiklemeye dayalı oldukça etkili ve pratik bir ikilileştirme sürecinden yararlanılır. Bundan sonra, tespit edilen sinyallerin parametrelerini kestirmek için yeni bir algoritma önerilmektedir. Bant genişliği parametresi kestirimi için gerçekleştirilen bir birleştirme sürecinden sonra, temel yöntemle parametre kestirimini hassaslaştıracak yeni bir algoritma önerilmiştir. Bu yeni algoritmada, başlangıçtaki temel yönteme kıyasla daha doğru parametre kestirimi elde etmek için birleştirilmiş bant genişliği ve bu bandın merkez frekansı bilgisinden yararlanılır. Tüm spektrum için parametreler kestirildikten sonra atlamalar buna göre tespit edilir. Son adım atlamaların zamanda çakışmayacak şekilde kümelenmesini içerir. Bir gruba yeni bir atlama noktası eklerken, algoritma hem yeni atlamanın hem de gruba daha önceki eklenmiş mevcut atlamanın bant genişliklerini kontrol eder. Böylece yalnızca çakışmayan zaman dilimlerine ve uyumlu bant genişliklerine sahip atlamaların birlikte yerleştirilmesi sağlanır. Bu yaklaşım, zaman çakışmalarını önlerken aynı bant genişliğine sahip atlamaları etkili bir şekilde ayırır. Önerilen yöntemin farklı sinyal-gürültü oranlarında (İng. SNR) etkinliğini incelemek için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlarda iki farklı frekans kaydırmalı anahtarlama (İng.

FSK) modülasyon sinyali kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin, güvenli ve hassas mesaj iletimlerinde yaygın olarak kullanılan çoklu dar bant FA sinyallerinin hızlı ve doğru parametre kestirimi ve tespiti için bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

İlgili çalışmalar ve katkılar

Literatürde incelenen FA sinyallerinin parametre kestirim ve tespit yöntemleri iki ana kategoriye ayrılabilir. İlk kısımda tek FA sinyalinin tespiti ve parametre kestirimi için yöntemler önerilmektedir [2,12,14,19,22,23,25–31]. Diğer kısımda ise çoklu FA sinyalleri için uygulanabilecek bazı yararlı yöntemler önerilmektedir [4,20,24,32–38]. Bu bölümde, bu tez çalışmasının ana katkılarını anlamak amacıyla çoklu FA sinyallerinin parametre kestirimi ve tespit yöntemleri ile ilgili çalışmalar incelenecektir.

[4]'te, uzay-zaman frekans analizine (İng. space-time frequency analysis (STFA)) ve JDM (Müşterek Köşegenleştirme Matrisi, İng. Joint Diagonalization Matrix) dayalı bir kör parametre kestirim algoritması sunulmaktadır. Önerilen algoritmanın, birden fazla FA sinyalinin parametrelerini daha yüksek SNR seviyelerinde etkili bir şekilde kestirebildiği bildirilmektedir. [20]'de, birden fazla FA dron sinyalini tespit etmek için geliştirilmiş bir K-ortalama kümeleme yöntemini temel alan bir yöntem önerilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin farklı FA drone kontrol sinyallerinin parametrelerini kestirmek için kullanılabileceğini göstermektedir. [24]'te, birden fazla FA sinyalini tespit etmek için Goodness-of-Fit (GoF) ve DRNN (Derin Artık Sinir Ağı, İng. Deep Residual Neural Network) ile iki aşamalı bir tespit ve sınıflandırma ve YOLO-lite yöntemleriyle birleştirilmiş tespit ve sınıflandırma kullanılmıştır. [32]'de, STFT ve SPWVD (İng. Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution, Düzleştirilmiş Sözde Wigner-Ville Dağılımı) birleştiren bir yöntem kullanılarak birden fazla FA sinyalinin kör parametre kestirimi önerilmektedir. Farklı ağ modları için atlama periyodu, zamanlama ve merkez frekans parametrelerinin kestirilebileceğini gösterilmiştir. [33]'te, FA sinyallerinin bilinmeyen sayıları ve frekansları için çoklu FA sinyallerinin CSML (İng. Compressed Spectrum Sensing And Maximum Likelihood, Sıkıştırılmış Spektrum Algılama ve Maksimum Olasılık) bazlı frekans ve atlama süresi parametre kestirimi önerilmektedir. Önerilen algoritmanın, birden fazla FA sinyal frekansının hızlı ve doğru bir kestirimini gerçekleştirebildiği, bunun da frekans değiştirme süresine sahip birden fazla FA sinyali için eşit derecede etkili olduğu doğrulanmıştır. [34]'te, düşük sinyal-gürültü oranı (SNR) koşulları altında birden fazla FA sinyalini tespit etmek

için derin sinir ağına dayalı bir yöntem önerilmektedir. [35]'te sinyallerin FA tanımlama kelimelerini (İng. Hop Description Word (HDW)) sınıflandırmak için sinir ağı tabanlı bir sinyal sıralama algoritması sunulmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen algoritmanın hızlı olduğu ve düşük SNR koşullarında daha iyi sınıflandırma doğruluğu sağladığı gösterilmiştir. [36]'da birden fazla FA sinyalinin kör tespiti için FHExt (İng. FH Signal Parameter Extractor, FA Sinyal Parametre Çıkarıcısı) olarak adlandırılan derin öğrenmeye dayalı bir parametre kestirim yöntemi önerilmektedir. FHExt tamamen kör senaryolarda deneysel sonuçlara göre doğrulanmıştır. Ayrıca yarı kör senaryolara da uyarlanabildiği gösterilmiştir. [37]'de, çoklu FA sinyalleri için birkaç adımlı öğrenmeye (İng. few-shot learning) dayalı bir kör parametre kestirim yöntemi önerilmektedir. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin, çeşitli SNR koşulları altında birkaç açıklama ile bile doğru parametre kestirimine ulaştığını doğrulamaktadır. Son olarak, [38]'de, tekdüze dairesel dizideki birden fazla FA sinyalinin TF parametrelerini ve 2 boyutlu DOA (İng. direction of arrival, varış yönünü) kestirmek için hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla bir hayalet modül kullanan YOLOv5 modelini temel alan geliştirilmiş bir nesne dedektörü önerilmiştir.

Yukarıda incelenen ilgili çalışmaların özeti Çizelge 1.1'de gösterilmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere çalışmaların sadece birkaçı, önerdikleri yöntemin etkinliğini doğrulamak için 2 GHz civarında bir test (sinyal frekansı) bandını kullanmaktadır. Ancak bu tez kapsamındaki çalışmalarda ilk kez önerilen yöntemin performans değerlendirmesi için 915 MHz frekans bandı kullanılmıştır. Bu, önerilen yöntemin VHF (İng. Very High Frequency, Çok Yüksek Frekans) ve düşük UHF (İng. Ultra High Frequency, Ultra Yüksek Frekans) bantlarındaki çoklu FA sinyallerinin tespiti ve parametre kestirimi için bir alternatif olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca, bu tez çalışmasında önerilen yöntem, farklı atlama periyodu, atlamada kalma süresi ve koruma (frekans değiştirme) süresi parametrelerine sahip birden fazla FA sinyalini tespit edebilmektedir. Ayrıca, spektrogramın tüm TF değerlerinin beklenmesini önlemek için atlama bant genişliği parametresinin kullanımına dayalı yeni bir sinyal tespit algoritması önerilmiştir.

Çizelge 1.1. Çoklu FA Sinyali Tespit ve Parametre Kestirimi Çalışmaları Özet Tablosu

Kaynak	FA Parametreleri	Metotlar	Test Bandı	FA Sinyal Sayısı	FA Sinyal Özellikleri
[4]	Merkez Frekansı Atlama Zamanı Atlama Periyodu DOA	STFD JDM Root-MUSIC	-	3	Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekans domainde örtüşme yok
[20]	Bant genişliği Dalga Şekli Zirve Enerji Kalma Süresi	Adaptif eşikleme Zaman sürekliliği tespiti Gelişmiş K-ortalama kümeleme Kronolojik sıralama	2.4 GHz ISM	1-2	Drone kumandası Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi
[24]	Merkez Frekansı Bant genişliği Kalma Süresi Modülasyon	GoF ve DRNN ile iki aşamalı tespit & sınıflandırma YOLO-lite ile birleştirilmiş tespit & sınıflandırma	2.4 GHz ISM	11	9 Drone kumandası 2 Wi-Fi yönlendiricisi Frekans domainde örtüşme var
[32]	Merkez Frekansı Atlama Periyodu Koruma Süresi	STFT & SPWVD	-	2	Bir FA sinyali için aynı atlamada kalma süresi ve farklı koruma süresi Frekans domainde örtüşme yok
[33]	Merkez Frekansı Atlama Zamanı	Segmentasyon CSML Ortalama and sıfır-ayarı	-	2	Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekans domainde örtüşme yok
[34]	Merkez Frekansı Atlama Zamanı Atlama Periyodu Bant genişliği	DNN SSD K-ortalama kümeleme	-	1-2	BPSK, QPSK, QAM Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekans domainde örtüşme yok
[35]	Merkez Frekansı Atlama Zamanı Atlama Gücü	STFT Nöral Network BP-Eşlenik gradyan algoritması	-	4	Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Farklı atlama zamanı Frekans domainde örtüşme yok
[36]	Merkez Frekansı Bant genişliği Kalma Süresi Atlama Periyodu	STFT K-ortalama kümeleme Derin öğrenme ResNet-50	1.9 – 2.1 GHz	2,3,4	23 modülasyon Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekans domainde kısmi örtüşme
[37]	Merkez Frekansı Kalma Süresi Atlama Hızı	SPWVD DL temelli TF ridge tespiti Few-shot öğrenme	-	1-6	AM, FM, BPSK, QPSK, 16QAM Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekans domainde örtüşme yok
[38]	Merkez Frekansı Bant genişliği Atlama Zamanı Atlama Periyodu 2-D-DOA	STFT STFD YOLOv5 Beamspace dönüşümü	-	5	Bir FA sinyali için aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekans domainde örtüşme yok

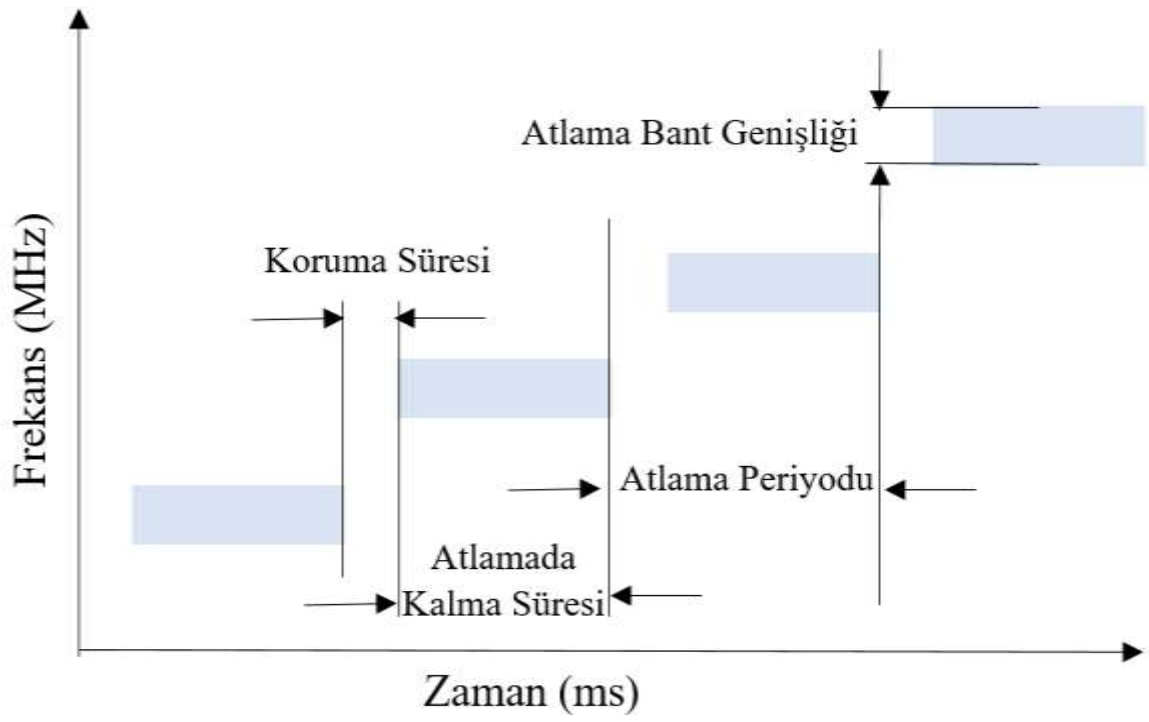
Tezin geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2'te FA sinyal modeli ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Daha sonra Bölüm 3'te önerilen yöntem açıklanmaktadır. Bölüm 4'te önerilen yöntemi test etmek ve doğrulamak için yapılan simülasyonlar ve sonuçları anlatılmaktadır. Bölüm 5’te sonuçlar tartışılmakta ve gelecekteki araştırma yönleri ele alınmaktadır. Bölüm 6’da sonuçlar özetlenmiştir.

2. ÖNBİLGİLER

Bu bölümde önerilen yöntem tanıtılmadan önce FA sinyal modeli ve STFT yöntemine ilişkin bilgiler verilmektedir. Bu bağlamda öncelikle FA sinyallerinin özellikleri anlatılmış, ardından STFT yönteminin açıklaması yapılmıştır.

2.1. Frekans Atlamalı (FA) Sinyal Modeli ve Parametreleri

FA, bir yayılı spektrum (İng. Spread Spectrum (SS)) sinyalleme türü olarak bilinir. Bu iletişim yöntemi, belirli bir taşıyıcı frekansı kullanarak sinyalleri verici ile alıcı arasında iletmek için önceden belirlenmiş bir kuralı kullanır. FA sinyal atlama parametreleri Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. FA sinyal parametreleri gösterimi

Şekilde görüldüğü gibi frekans ile alakalı önemli parametrelerden biri atlama bant genişliğidir (İng. bandwidth (*BW*)). Bir atlamanın kullandığı bandın orta noktası atlama merkez frekansıdır (İng. center frequency (f_{center})). Ölçülen atlamanın başlangıç ve bitiş zamanları arasındaki süre atlamada kalma (İng. dwell time (τ_{dwell})) süresidir. Diğeri ise ölçülen atlamanın bitiminden yeni atlamanın başlangıcına kadar geçen süre olan koruma

veya frekans değiştirme süresidir (İng. guard time (τ_{guard})). Bir diğeri ise bekleme süresi ile koruma süresinin toplamı olan atlama periyodunun (İng. Hopping Period ($T_{hopping}$)) süresidir. Eş 2.1'de bu durum gösterilmektedir.

$$T_{hopping} = \tau_{dwell} + \tau_{guard} \tag{2.1}$$

Ayrıca atlama periyodu parametresi kullanılarak bir atlamanın atlama hızı parametresi (İng. Hopping Rate (HR)) aşağıdaki şekilde de hesaplanabilir:

$$HR = \frac{1}{T_{hopping}} \tag{2.2}$$

Tipik olarak FA sinyalleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir: [19,39]

$$x(t) = s(t) \sum_{m=0}^{M-1} e^{j2\pi f_{c_m} t_m + \theta_m} rect\left(\frac{t_m}{\tau_{dwell_m}}\right) \tag{2.3}$$

Bu eşitlikte f_{c_m}, θ_m, t_m, and τ_{dwell_m} sırasıyla m'inci atlamanın taşıyıcı frekansı, fazı, atlama periyodu zaman uzunluğu ve atlamada kalma süresidir. M, toplam atlama sayısıdır. $s(t)$, bilgi veya mesaj sinyalinin kompleks temel bant eşdeğeridir. Burada $t \in [0, T]$ ve T, FA sinyalinin toplam süresidir. Eşitlikteki "rect" ifadesi kare fonksiyonunu (İng. Rectangular function) temsil etmektedir.

Alınan sinyalin kompleks temel bant eşdeğeri ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$r(t) = \sum_{n=0}^{N-1} y_n(t) + w(t) + I(t) \tag{2.4}$$

Bu eşitlikte $y_n(t)$ ortamdaki bir FA sinyalini belirtir, $w(t)$ karmaşık toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü (İng. additive white Gaussian noise (AWGN)) temsil eder; burada eş fazlı (İng. in-phase) ve kuadratur (İng. quadrature) bileşenler bağımsızdır ve sıfır ortalama normal dağılımla aynı şekilde dağıtılır. I(t), alıcı bant genişliği içindeki girişim sinyallerine karşılık gelir.

2.2. Short–Time Fourier Transform (STFT)

STFT, FA sinyallerini analiz etmek için uygun bir yöntemdir. Zaman domainindeki sinyalin, $z(t)$, STFT'si, matematiksel olarak Eş. 2.5'teki gibi ifade edilebilir [40]:

$$\text{STFT}\{z(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} [z(t)\omega(t-\tau)]e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (2.5)$$

Bu eşitlikte $\omega(t)$ standart bir pencereleme fonksiyonudur. Matris formunda $S = [s_1[f] \quad s_2[f] \quad \dots \quad s_K[f]]$ olarak tanımlanan STFT matrisinin i'inci elemanı, $s_i[f]$, bir sütun vektörüne karşılık gelir ve $r[n]\omega[n-iR]$'nin Ayrık Fourier dönüşümü (İng. Discrete Fourier transform (DFT)) ile aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [19]:

$$s_i[f] = \sum_{n=0}^{N-1} r[n]\omega[n-iR]e^{-j2\pi fn} \quad (2.6)$$

Burada R kaydırma uzunluğu, $r[n]$ ve $\omega[n]$ sırasıyla $r(t)$ ve $\omega(t)$'nin örneklenmiş versiyonudur.

STFT'nin tespit performansı büyük ölçüde FA sinyallerin atlama sayısına, kalma sürelerine ve zaman çözünürlüğüne bağlıdır. 100% POI (İng. Probability of Intercept), Yakalama Olasılığı), $t_{100\%\,\text{POI}}$, için minimum FA kalma süresi şu şekilde hesaplanabilir [41]:

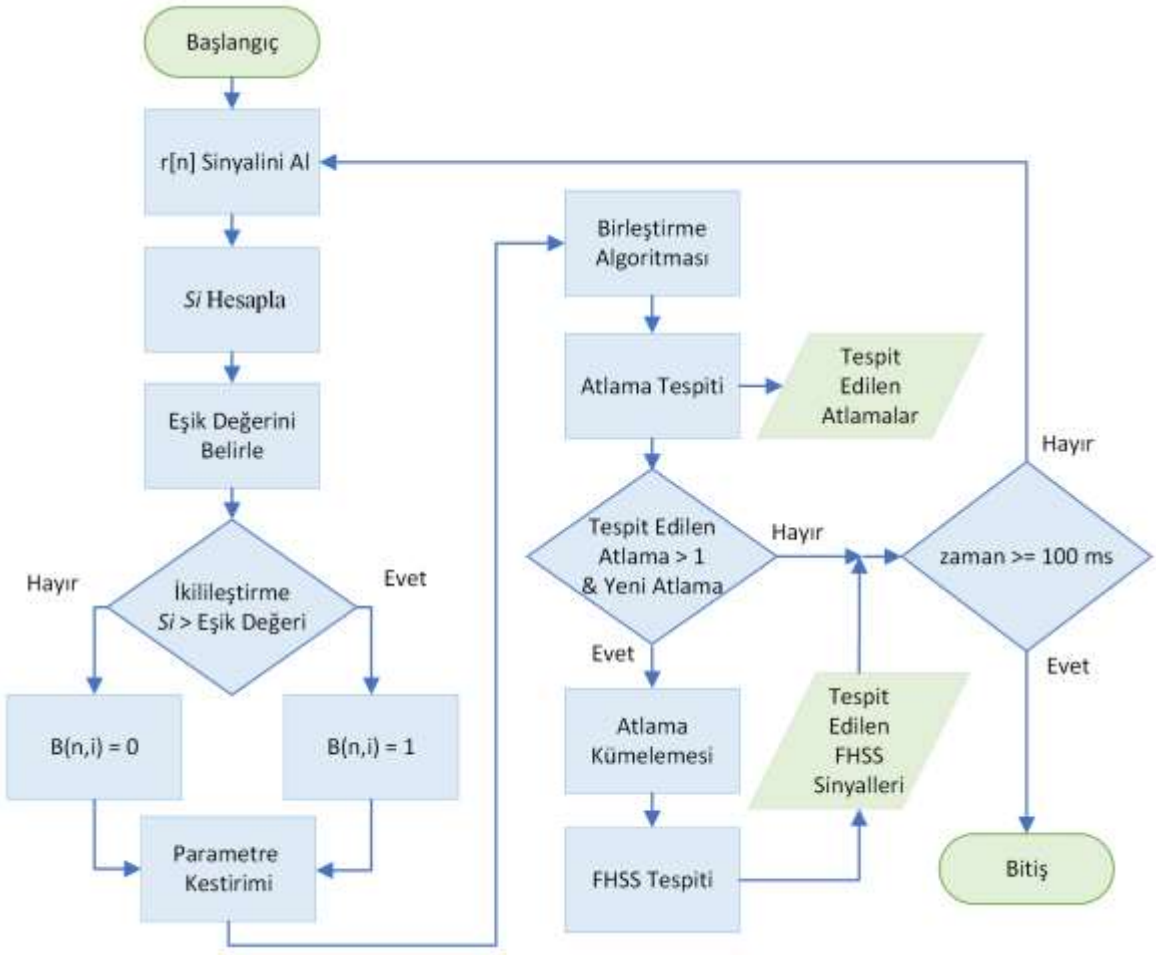
$$t_{100\%\,\text{POI}} = \left(2 - P_{overlap}\right)\frac{N}{F_s} \quad (2.7)$$

Burada $P_{overlap}$ örtüşme (İng. overlap) oranı, F_s örnekleme frekansı (İng. sampling frequency) ve N, hızlı Fourier dönüşümü (İng. Fast Fourier Transform (FFT)) pencere boyutudur.

3. YÖNTEM

Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 3.1'de gösterilmektedir. İlk olarak $r(t)$, sinyali alındıktan sonra S_i'nin hesaplanması için STFT uygulanır. FFT çözünürlüğünün (İng. frequency resolution (F_{res})) aşağıdakilere göre ayarlanabileceği unutulmamalıdır:

$$F_{res} = \frac{F_s}{N} \tag{3.1}$$



Şekil 3.1. Önerilen yöntemin akış şeması

Önerilen yöntemde 4096 pencere boyutuna sahip bir Hamming penceresiyle birlikte FFT kullanılmaktadır [42]. Federal yönetmelikler (CFR) kurallarına göre 15 kHz frekans çözünürlüğü seçilmiştir.

S_i hesaplandıktan sonra [19]'da kullanılana benzer bir ikilileştirme işlemi uygulanır. Bu işlemde Eş. 2.5'te verilen STFT matrisi $S(n,i)$, ikilileştirilmiş (İng. binarized) bir matris

olan $B(n,i)$'ye dönüştürülür. Bu, FA sinyallerinin tanımlanması için kullanılan bir eşik değeri (φ) hesaplanarak gerçekleştirilir. Eşik hesaplama algoritması Çizelge 3.1'de verilmiştir; burada DG_{dB}, dB cinsinden tespit açıklığıdır (İng. detection gap (DG_{dB})) ve spektrumdaki girişim sinyallerinin gücüne göre seçilebilir. S_{max}^2, S matrisindeki her elemanın karelerinin en büyük değeridir. Med, medyanı simgelemektedir.

Çizelge 3.1. Eşik değeri hesaplama algoritması

Girdi: S_i

Çıktı: Eşik Değeri (φ)

1. Eğer $S_{max}^2 \geq \text{med}(S_i{}^2) + DG_{dB}$ ise
2. $\quad \varphi = \sqrt{\text{maksimum}(\text{med}(S_i{}^2) + DG_{dB}, S_{max}^2 - 10dB)}$
3. değilse
4. $\quad \varphi = \sqrt{\text{med}(S_i{}^2) + DG_{dB}}$
5. eğer sonu

Spesifik olarak, sinyal tespit edildiğinde $B(n,i)$ 1 olur. Bu nedenle ikili matris matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$B(n,i) = \begin{cases} 1, & S(n,i) \geq \varphi \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases} \tag{3.2}$$

İkilileştirme sürecini, merkez frekansı ve bant genişliği gibi sinyal parametrelerinin kestirimi takip eder. Bu amaçla kullanılan algoritma Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bu algoritma sayesinde B matrisinden gelen sinyaller tespit edilerek parametreler buna göre hesaplanır. Ancak kanal bozuklukları nedeniyle B matrisinde bazı bozulmalar meydana gelebilir. Bu nedenle alınan sinyalin kurtarılması için çoğunlukla görüntü işleme tabanlı yöntemlerden yararlanılır [43]. Bu yöntemler STFT sürecinin durdurulmasını sağlar ve ardından uzun atlama periyoduna sahip yavaş FA sinyallerini tespit eder. Ancak hızlı atlamalı sinyaller, uzun süre beklemeye gerek kalmadan hızlı bir şekilde belirlenebilir. Bu tezde önerilen algoritmada ise STFT'nin her aşamasında parametre düzeltmeleri kullanılmaktadır. Ek olarak, FA sinyallerinin her bir atlama kanalının merkez frekansının ortalaması alınır. Böylece algoritma ilerledikçe kestirimler hassaslaşır.

Çizelge 3.2. Frekans domainde parametre kestirim algoritması

Girdi: $B(n,i), n = 0$

Çıktı: Merkez frekans (f_{center}), bant genişliği (BW)

1. $n < N$ olduğu sürece şunları yap:
2. eğer $B(n, i) == 1$ ise:
3. $f_{başlangıç} = n\ F_{res} - \frac{F_s}{2}$
4. $B(n + 1, i) == 1$ olduğu sürece şunları yap:
5. $f_{bitiş} = (n + 1)\ F_{res} - \frac{F_s}{2}$
6. $n = n + 1$
7. döngü sonu
8. $f_{center} = (f_{başlangıç} + f_{bitiş}) / 2$
9. $BW = f_{başlangıç} - f_{bitiş} + F_{res}$
10. f_{center} and BW parametrelerini bir listeye ekle
11. eğer sonu
12. $n = n + 1$
13. döngü sonu

Çoğu gerçek dünya uygulamasında, bir FA sinyalinin bant genişliği, genellikle merkez frekansın her iki tarafındaki bant genişliğinin yarısı kadar olan bir koruma bant genişliği içerir. Bir FHSS sinyalindeki tüm atlamalar aynı bant genişliğine sahip olduğundan, bir birleştirme algoritması (Çizelge 3.3), tespit edilen sinyallerin merkez frekanslarının minimum bir aralıkla ayrılıp ayrılmadığını doğrular. Bu minimum mesafe, sinyallerin bant genişliği ve orantılı koruma bant genişliğinin toplamı ile belirlenir. Koruma bant genişliğinin oranı (İng. proportion of protection bandwidth (P_{PBW})) kullanıcı tarafından seçilebilir ($0 < P_{PBW} < 1$). Bu algoritmada, ayırmanın sinyal bant genişliği ve koruma bant genişliğinin toplamından daha az olması şartıyla merkez frekanslar birleştirilir. Sonuç olarak bu yöntem yanlış alarm oranının (İng. false alarm rate) azaltılmasına katkı sağlar.

Tüm spektrum için kanal merkezi frekansları ve bant genişlikleri kestirildikten sonra atlamalar buna göre tespit edilir ve daha sonraki işlemler için bir listede tutulur. Hop tespit edilemediği takdirde STFT'nin bir sonraki aşamasına geçilerek işleme devam edilir. Kanal merkez frekansları ve bant genişlikleri önceki aşamalarda olduğu gibi hesaplanır. Ancak buradaki temel fark, kestirilen kanalların merkez frekanslarının STFT aşamaları arasında karşılaştırılmasıdır. Yeni kestirilen bir merkez frekansı önceden tespit edilen bir kanalın aralığına düşerse, her iki kestirimin merkez frekanslarının ortalaması alınır.

Çizelge 3.3. Birleştirme algoritması

Girdi: Merkez frekansı listesi (*mfl*), bant genişliği listesi (*bl*), $k = 0$

Çıktı: Merkez frekansı listesi (*mfl*), bant genişliği listesi (*bl*)

1. $k <$ (uzunluk$(mfl) - 1)$ olduğu sürece şunları yap:
2. *bulundu* = Yanlış
3. k+1 'den (uzunluk (*mfl*) – 1)'ye kadar l değerleri için şunları yap:
4. eğer $|mfl(k) - mfl(l)|$ < (maksimum($bl(k)$, $bl(l)$)$(1 + P_{PBW})$) ise
5. eğer $mfl(k) > mfl(l)$ ise
6. $f_{başlangıç} = mfl(k) + \frac{bl(k)}{2}$
7. $f_{bitiş} = mfl(l) - \frac{bl(l)}{2}$
8. değilse
9. $f_{başlangıç} = mfl(l) + \frac{bl(l)}{2}$
10. $f_{bitiş} = mfl(k) - \frac{bl(k)}{2}$
11. eğer sonu
12. $f_{center} = \frac{(f_{başlangıç} + f_{bitiş})}{2}$
13. $BW = (f_{başlangıç} - f_{bitiş})$
14. $mfl(k)$, $mfl(l)$, $bl(k)$, ve $bl(l)$'yi sil
15. f_{center}'ı *mfl*'ye ekle
16. BW'ı *bl*'ye ekle
17. *bulundu* = Doğru
18. döngüyü boz
19. eğer sonu
20. döngü sonu
21. eğer *bulundu* değil ise
22. $k = k + 1$
23. eğer sonu
24. döngü sonu

Algılanan kanalın aralığı kestirilen bant genişliği ile orantılıdır. FHSS sinyalinin bant genişliği kestirimi, FFT aşamasında sinyaldeki süreksizlikler nedeniyle atlamaların başlangıç ve bitiş zamanlarında bozulabilir. Süreksizlikler, sinyalin spektrumda daha geniş bir frekans aralığına yayılmasına neden olur. Bu tür bozulmaları ortadan kaldırmak için özel bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma, kestirilen ($f_{bitiş}$, $f_{başlangıç}$) frekanslarının sırasıyla en düşük ve en yüksek frekansların %97,5'inin seçer ve sırasıyla maksimum ve minimumu alır. Daha sonra güncellenen bant genişliği bu iki kestirilen değer arasındaki fark olarak hesaplanır. Bu şekilde bant genişliği genişleme bozulmaları ortadan kaldırılabilir. Bu yöntem, kanal merkez frekanslarının yanı sıra sinyal bant genişliklerinin daha doğru kestirilmesinin sağlanmasına yardımcı olur.

Ayrıca, önceki aşamada aktif olan bir kanala yeni bir bilgi eklenmezse, o kanalın atlama bitiş zamanı olarak kaydedilir. Dolayısıyla tüm atlamaların başlangıç ve bitiş zamanı parametreleri kestirilebilir ve daha sonra atlama kümeleme aşamasında kullanılabilir.

Atlamaların tespitini atlamaların kümelenmesi işlemi takip eder. Genel olarak atlamalar zaman domaininde çakışıp çakışmadığına göre gruplara ayrılabilir. Ana amaç atlamaları zaman çakışması olmadan ayırmak olacaktır [20]. Atlamalar zaman aralıklarına göre ayrıldıktan sonra atlamaların bant genişlikleri de kontrol edilir. Böylece aynı bant genişliğine sahip atlamaların tespit edilmesi amaçlanır. Ancak kestirim hataları nedeniyle bir tolerans değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu yöntemde, atlamaların aynı bant genişliğine sahip olup olmadığına karar vermek amacıyla bant genişliği kestirimlerinde tolerans değeri olarak F_{res} değeri seçilmiştir. Bu nedenle önerilen yöntemde [20]'de önerilen zaman çakışmasına dayalı kümeleme algoritması benimsenmiştir. Atlama kümeleme algoritması Çizelge 3.4.'te gösterilmektedir.

Genel olarak atlamada kalma süresi yanıltıcı olabilir. Bu tez çalışmasında ele alınan frekans atlamalı sistemler merkez frekanslarını sözde rastgele bir şekilde değiştirir. Koruma süresi (frekans değiştirme süresi) ihmal edilebilir olduğunda ve merkez frekans dizileri ardışık tekrarları içerdiğinde, atlamada kalma süresi olarak kalma sürelerinin katları kestirilebilir. Dolayısıyla, atlamada kalma süresi bu durumda güvenilir bir ayırt edici parametre olarak kullanılamaz. Bununla birlikte, varış yönü (DOA), sembol hızı, sembol dizisi, enerji, koruma (frekans değiştirme) süresi ve modülasyon gibi diğer bazı parametreler atlama kümelemesi için kullanılabilir. Önerilen yöntemin kümeleme işlemi, bir FA sinyalinin atlama parametrelerini tanımlayarak karakterize eder. Bu parametreler arasında merkez frekansı, bant genişliği, başlangıç ve bitiş zamanı, atlamada kalma süresi, koruma (frekans değiştirme) süresi ve atlama hızı yer almaktadır.

Önerilen yöntemin son aşaması FA sinyalleri tespit aşamasıdır. Yanlış alarm oranını azaltmak için bir aşamada ortaya çıkan ve daha sonraki aşamalarda kaybolan yani sadece tek bir aşamada tespit edilen atlamalar elenir. Benzer şekilde, yalnızca bir atlama noktasına sahip olan FA listeleri, sürekli sinyallerin ve girişim sinyallerinin yanlış tespitini ortadan kaldırmak için göz ardı edilir.

Çizelge 3.4. Atlama kümeleme algoritması

Girdi: Atlama listesi

Çıktı: FA sinyal listesi

1. *sıralı_al* = atlama listesini başlangıç zamanına göre sırala
2. *sayaç* = 0 % FA numaralandırılmasında kullanılır
3. *sıralı_al* 'deki $atlama_{sıralı_al}$ değerleri için şunları yap:
4. *yerleştirildi* = Yanlış
5. FA sinyal listesi'ndeki FA_i değerleri için şunları yap:
6. *çakıştı* = Yanlış
7. FA_i'deki $atlama_{FA_i}$ değerleri için şunları yap:
8. eğer $başlangıç\ zamanı_{atlama_{sıralı_al}} \leq bitiş\ zamanı_{atlama_{FA_i}}$ ise
9. *çakıştı* = Doğru
10. döngüyü boz
11. eğer sonu
12. döngü sonu
13. eğer *çakıştı* değil ise
14. % farklı bant genişliğine sahip atlamaları ayırmak için tolerans kontrolü
15. eğer $\left|BW_{atlama_{sıralı_al}} - BW_{\ FA_i'deki\ atlama_0}\right| < f_{res}$ ise
16. % $BW_{\ FA_i'deki\ atlama_0}$ FA_i'deki ilk atlamanın bant genişliğidir
17. $atlama_{sıralı_al}$ 'yi FA_i listesine ekle
18. *FA_no* = FA_i'nin indeks(i) değeri
19. *yerleştirildi* = Doğru
20. döngüyü boz
21. eğer sonu
22. eğer sonu
23. döngü sonu
24. eğer *yerleştirildi* değil ise
25. [$atlama_{sıralı_al}$] listesini FA sinyal listesine ekle
26. *FA_no = sayaç*
27. *sayaç = sayaç + 1*
28. eğer sonu
29. *FA_no*'yu $atlama_{sıralı_al}$ parametrelerine ekle
30. döngü sonu

Belirli bir FA sinyali (tehdit) tespit edilecekse, sinyalin parametrelerinin aralığı FA tespit algoritmasına tolerans değerleri ile sağlanabilir. Tehdit alıcı sistemde göründüğünde tespit algoritması, tehdidin tanımlanması için bir alarm verir. Önceden tanımlanmış bir FA sinyali algoritmaya verilmezse kümeleme aşamasında tanımlanan FHSS sinyallerinin hepsi için alarm verecektir.

Önerilen yöntemde, alınan verilerin çok kısa bir süre için (100 ms) STFT'nin hesaplandığını belirtmek faydalı olacaktır. Bu nedenle yavaş atlamalı sinyallerin de başarılı bir şekilde tespit edilmesi özellikle dikkate alınmıştır. Ancak STFT boyutunun arttırılması hesaplama maliyetini önemli ölçüde artırabilir. Düşük hesaplama maliyeti adına, STFT örtüşme kullanmayabilir, bu da zaman çözünürlüğünü azaltır. Örtüşme olmaması (0%) bir FFT'nin edinim (İng. acquisition) zamanına karşılık gelen bir zaman çözünürlüğüne (T_{res}) yol açar ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$T_{res} = \frac{N}{F_s} \tag{3.3}$$

4. SİMÜLASYONLAR

Bu bölümde önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için simülasyonlar sunulmaktadır. İlk olarak simülasyon parametreleri ve ortamı anlatılmıştır. Daha sonra simülasyon sonuçları tartışılmıştır.

4.1. Simülasyon Parametreleri ve Ortamı

Simülasyon parametreleri gerçek dünya uygulamalarına göre seçilmiştir. FA sinyal tespiti için düşük maliyetli Yazılım Tanımlı Radyo (İng. Software Defined Radio (SDR)) tabanlı çözümlerin kullanılmasına yönelik yaygın uygulamalar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında ticari kullanıma hazır (İng. Commercial off-the-shelf (COTS)) SDR'leri kullanarak FA sinyalleri üretmenin ve tespit etmenin pratik yönleri incelenmiştir. Bu, SDR'lerin yeteneklerinin ve sınırlamalarının tanımlanmasını içerir. Ancak önerilen çerçeve genişletilebilirlik göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır, böylece diğer donanım platformlarına ve çalışma koşullarına uyum sağlamaya olanak sağlanır. Aşağıdaki parametreler piyasadaki COTS SDR'lerin yetenekleri dikkate alınarak seçilmiştir. İlk olarak, COTS SDR'lerin örnekleme hızına ve hedeflenen operasyonel FA sinyallerinin gereksinimlerine uyum sağlamak amacıyla örnekleme frekansı 61,44 MS/s olarak seçilmiştir. Bu tür SDR'lerde çalışma frekansı 70 MHz'den 6 GHz'e kadar seçilebilmektedir. Bu nedenle çalışma frekansı bu SDR'lerin genellikle sahip olduğu 56 MHz anlık bant genişliği ile bu frekans aralığında seçilmiştir. Böylece T_{res} Eş. 3.10 kullanılarak yaklaşık 66,7 µs olarak belirlenebilir. Ayrıca Eş 2.7 kullanılarak %100 POI sağlanacak şekilde %0 örtüşme oranıyla minimum atlamada kalma süresi 133,4 µs civarında belirlenebilir. Bu, 7500 atlama/s'ye kadar teorik sınırlara sahip FA sinyallerini algılamayı mümkün kılacaktır. Bunların, 915 MHz ISM bandı gibi VHF ve düşük UHF bantlarındaki tehditler için sağlanabileceğini belirtmek önemlidir. Simülasyonlarda Algoritma 1'de $DG_{dB} = 14\ dB$ alınmıştır. Ayrıca P_{PBW}, birleştirme algoritmasında (Çizelge 3.3) kullanılacak kestirilen bant genişliğinin 65%'i olarak belirlenmiştir. Tekrar etmek gerekirse, bu parametrik konfigürasyon hala çeşitli operasyonel senaryolara doğrudan adaptasyona izin verebilecek esneklik sunmaktadır.

Simülasyonlarda, yazılım tanımlı radyoların geliştirilmesinde ve konuşlandırılmasında kullanılan sinyal işleme için açık kaynaklı bir araç seti olan GNU Radyo kütüphanesi

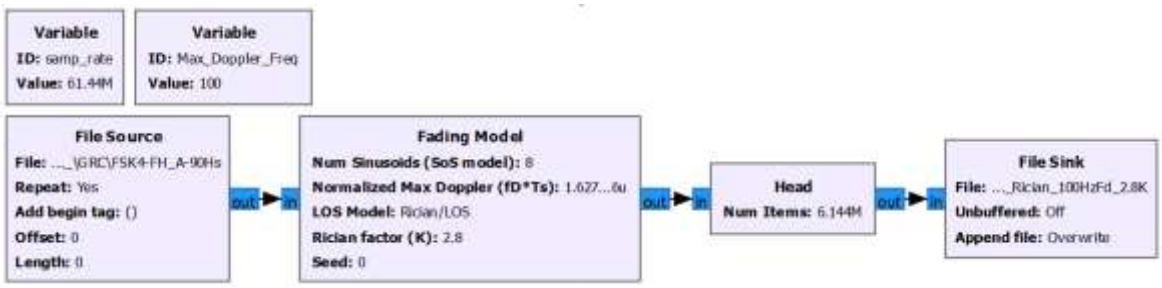
kullanılarak iki FA sinyali üretildi [21]. Bu çalışmada dört frekanslı kaydırmalı anahtarlama (4-FSK) ve sekiz frekanslı kaydırmalı anahtarlama modülasyonu (8-FSK) modülasyonları kullanılmıştır. Sinyal parametreleri Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Çizelge 4.1. FA sinyal parametreleri listesi

FA Sinyali	Modülasyon	$\Delta\tau_{dwell}$ (μs)	$\Delta\tau_{guard}$ (μs)	HR (atlama/s)	f_{center} (MHz)	BW (KHz)
FA-A	4-FSK	10777.7	334.4	90	0.7 10.7 20.7	40
FA-B	8-FSK	7766.4	567	120	−15 −5 5 15	80

Sinyal modelleme için Python NumPy kütüphanesi ve FSK sinyalleri üretmek için GNU Radyo kütüphanesi kullanılmıştır. FSK sinyalleri GNU Radio tarafından üretilmiş ve bunlar daha sonra Python'da FA sinyalleri oluşturmak için kullanılmıştır. FA sinyalleri oluşturulduktan sonra, farklı SNR değerlerini simüle etmek için değişen güç seviyelerine sahip toplanır beyaz Gauss gürültüsü (İng. additive white Gaussian noise (AWGN)) eklendi.

Bu çalışmadaki hedef 915 MHz frekans bandı FA sinyalleri genellikle kanalın frekans bandında sabit (İng. frequency-flat) olduğu varsayılabileceği havadan karaya ve görüş hattında (İng. line-of-sight (LOS)) olan iletişimlerdir. Bu nedenle, [24]'deki yazarların önceki makalelerindeki yaklaşıma benzer şekilde, önerilen yöntemin performansı görüş hattında olan kanallar için tasarlanmış Rician sönümleme koşulları altında incelenmiştir. Simülasyonlarda Rician sönümleme koşullarını dikkate almak için GNU Radio Companion programı kullanılmıştır. İlgili akış grafiği Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Simülasyonlarda Rician faktörü (K) ve maksimum doppler frekansı (f_D) sırasıyla 2.8 ve 100 Hz olarak seçilmiştir.

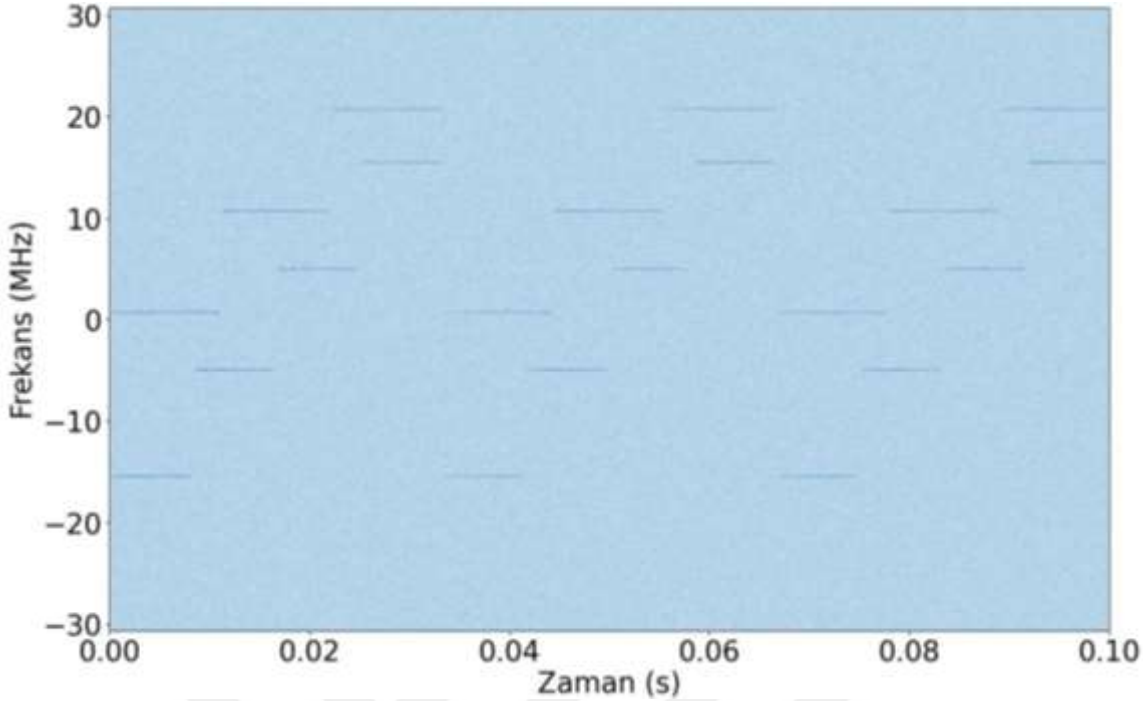


Şekil 4.1. GNU Radio Companion ile Rician sönümleme modeli

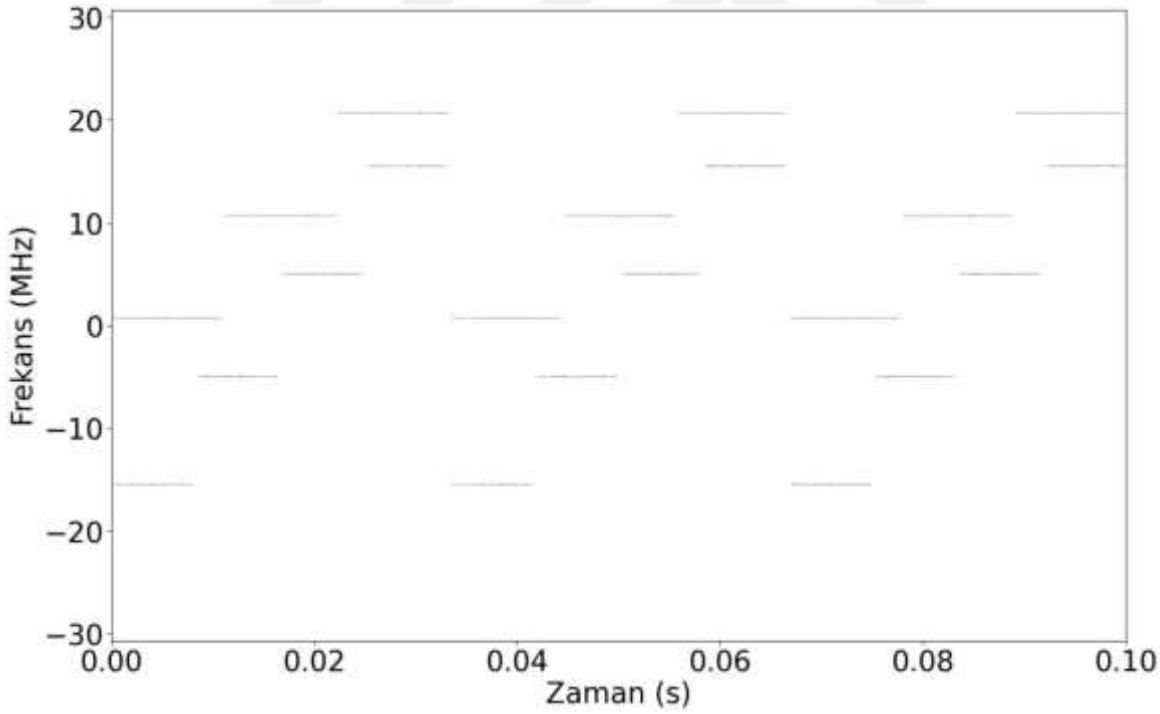
4.2. Simülasyon Sonuçları

Önerilen yöntemin farklı SNR seviyelerindeki etkinliğini doğrulamak için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon SNR değerleri, seçilen FFT pencere boyutu gürültü tabanını azaltan FFT işleme kazancıyla (İng. processing gain) orantılı olduğundan, seçilen FFT pencere boyutuna (N) göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Bu nedenle simülasyonlarda SNR seviyeleri -8 dB, 6 dB ve 24 dB olarak kabul edilmiştir.

Örnek olarak, önerilen yöntemin başlangıç aşamaları için -8 dB SNR seviyesinde elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 4.2.'de gösterilmektedir. Şekil 4.2, Rician kanalı (K = 2.8 and f_D = 100 Hz) ve -12 dB SNR'deki karmaşık temel bant sinyalinin %0 örtüşme ve 4096 noktalı bir Hamming penceresi ile STFT kullanılarak oluşturulan spektrogramını göstermektedir. Şekil 4.3.'de ise bunun ikilileştirilmiş versiyonunu gösterilmektedir.

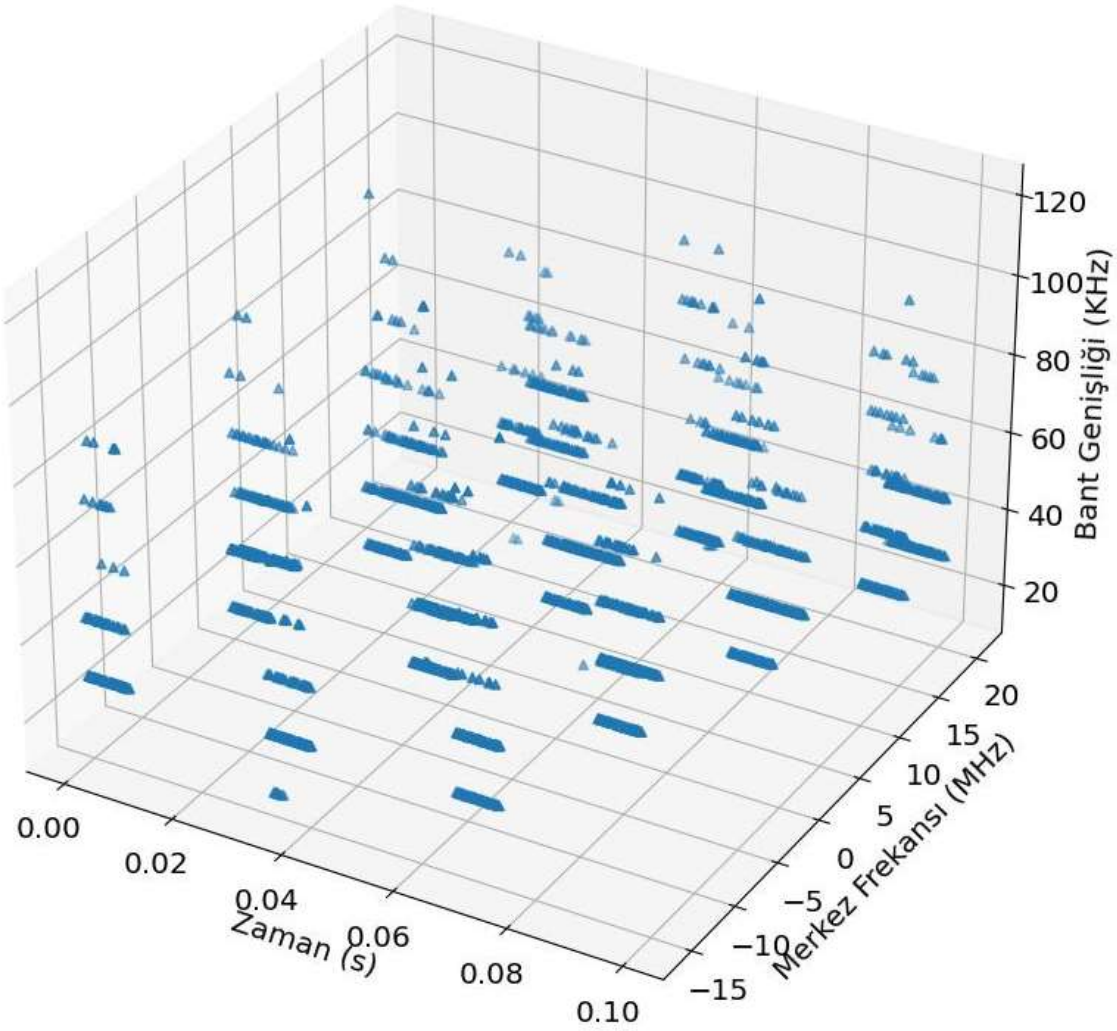


Şekil 4.2. Kompleks taban banttaki sinyalin spektrogramı



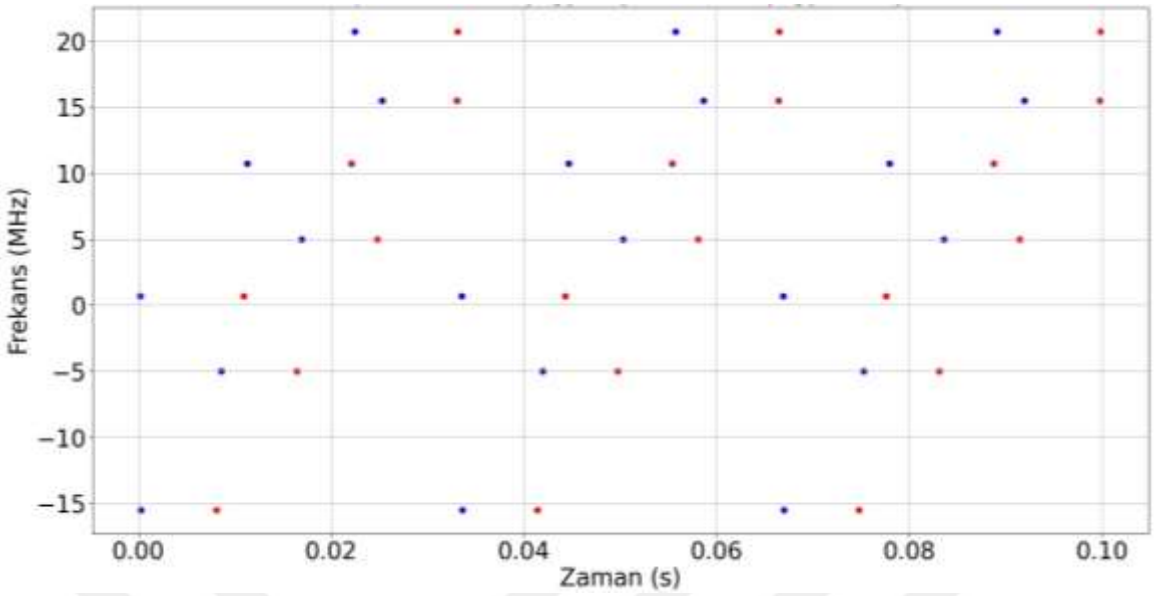
Şekil 4.3. Spektrogramın ikilileştirilmiş versiyonu

Genel olarak Şekil 4.4, birleştirme algoritmasından sonrası kestirilen tüm kanal frekanslarının ve karşılık gelen bant genişliklerinin 3 boyutlu (3-D) dağılım grafiğini göstermektedir.



Şekil 4.4. Birleştirme aşamasından sonra kestirilen tüm kanal frekansları ve bant genişliklerinin 3-D çizimi

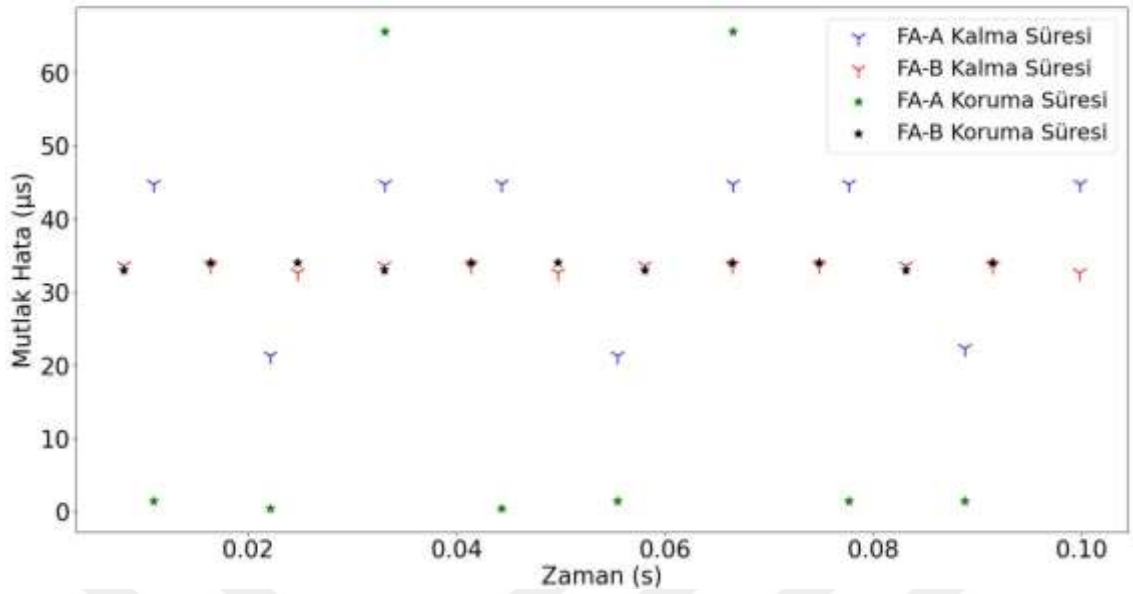
Ayrıca -8 dB SNR'de atlama tespit aşamasından sonra elde edilen sonuçlar Şekil 4.5.'te gösterilmektedir; burada mavi daireler atlama başlangıçlarını, kırmızı daireler ise atlama bitişleri gösterir.



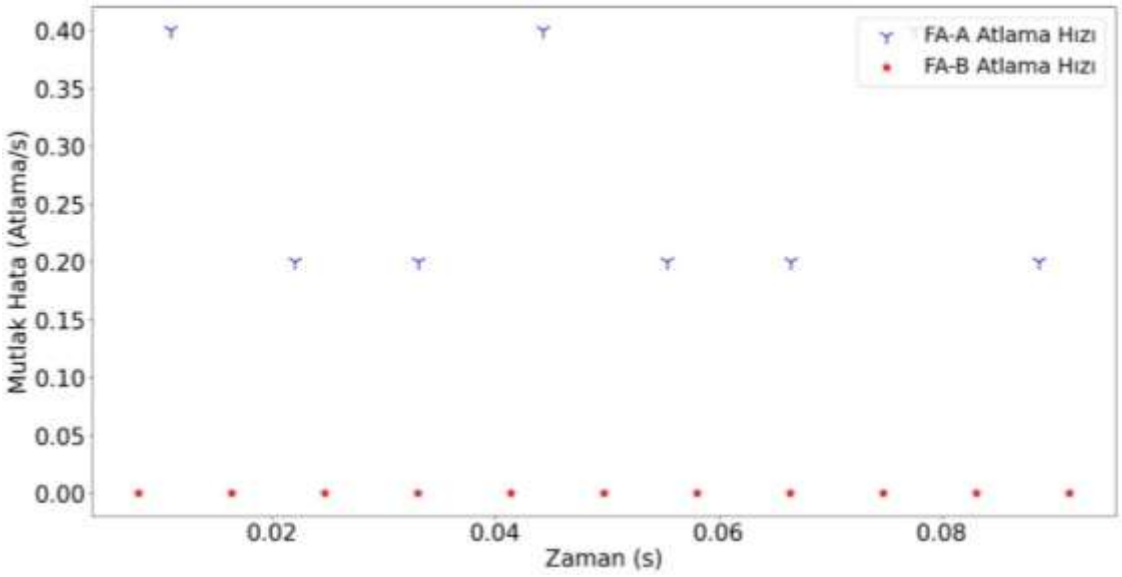
Şekil 4.5. Tespit edilen atlamaların başlangıç ve bitiş zamanları

Elde edilen deneysel sonuçlara dayanarak önerilen yöntemin performansı iki adımda incelenmiştir. İlk adımda, önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için merkez frekansı (Δf_{center}), bant genişliği (ΔBW), atlamada kalma süresi ($\Delta \tau_{dwell}$) koruma (frekans değiştirme) süresi ($\Delta \tau_{guard}$) ve atlama hızı (ΔHR) gibi kestirilen sinyal parametrelerinin mutlak hatası hesaplanmıştır.

-8 dB SNR'de kestirilen sinyal parametrelerinin mutlak hataları Şekil 4.6 ve 4.7'de gösterilmektedir. Sonuç olarak, önerilen yöntemin hem FA-A hem de FA-B sinyallerinin tüm parametrelerini verimli bir şekilde kestirebilmiştir. Özellikle bant genişlikleri birbirine çok yakın ayarlandığında bile ayırma konusunda iyi performans göstermiştir. Önerilen yöntem, örtüşen FA sinyallerinin zaman domaininde kümelenmesinde önemli bir avantaj sunmaktadır. Bunun nedeni atlama bant genişliğinin (BW) çoklu sinyal ortamlarında kritik bir kümeleme parametresi olmasıdır.



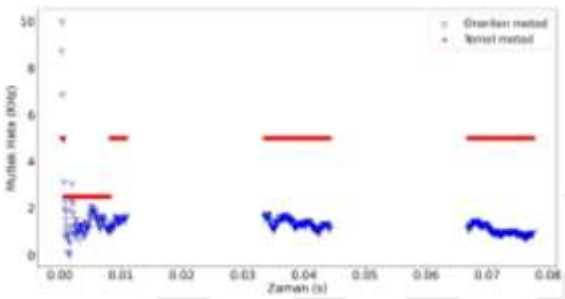
Şekil 4.6. Tespit edilen FA sinyallerinin atlamada kalma süresi ve koruma süresi mutlak hataları



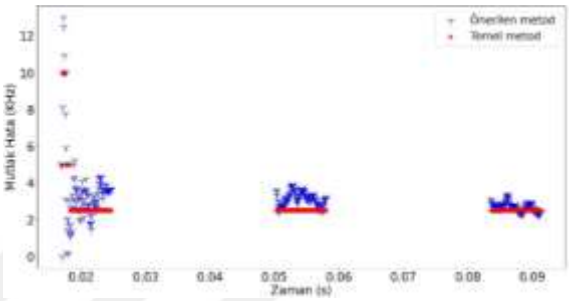
Şekil 4.7. Tespit edilen FA sinyallerinin atlama hızı mutlak hataları

Bant genişliğine (BW) ek olarak merkez frekansı (f_{center}) çoklu sinyal ortamlarında kestirilmesi gereken diğer bir kritik parametredir. Bu nedenle ikinci adım, önerilen yöntemin bu parametreleri kestirmekteki performansını karşılaştırmalı olarak değerlendirmeyi amaçlamıştır. Bu amaçla, f_{center} kestirimi için ortalamanın kullanıldığı ve BW kestirimi için uç değerleri eleme yönteminin uygulandığı önerilen yöntem ile literatürde kullanılan temel (İng. basic) yöntem kıyaslanmıştır. Geleneksel yöntemde BW, $f_{başlangıç}$ and $f_{bitiş}$ değerleri arasındaki farkın maksimum değeri olarak hesaplanırken f_{center}, maksimum farkı sağlayan

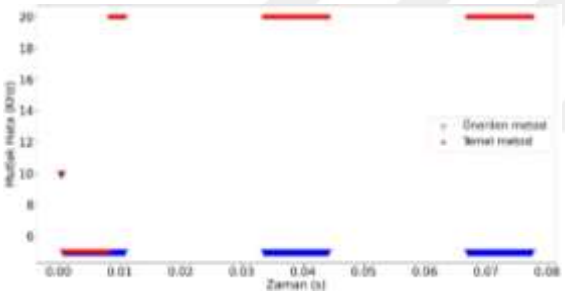
$f_{başlangıç}$ and $f_{bitiş}$değerlerinin ortalaması alınarak hesaplanır [20,32]. Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için mutlak hata değeri ölçüt olarak kullanılmıştır. 0,7 MHz FA-A sinyali ve 5 MHz FA-B sinyali için merkez frekansı ve bant genişliği parametreleri için -8 dB, 6 dB ve 24 dB SNR seviyelerinde hesaplanan mutlak hatalar sırasıyla Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'de gösterilmektedir. İlgili grafiklerde önerilen yöntemin parametre kestirimlerinin doğruluğunu önemli ölçüde arttırdığı açık olarak görülmektedir.



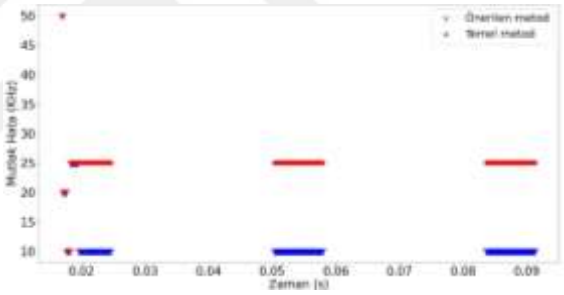
(a) FA-A 0.7 MHz kanalının merkez frekansı kestirimi mutlak hatası



(b) FA-B 5 MHz kanalının merkez frekansı kestirimi mutlak hatası

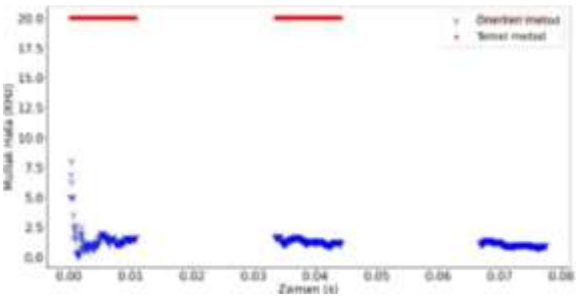


(c) FA-A 0.7 MHz kanalının bant genişliği kestirimi mutlak hatası

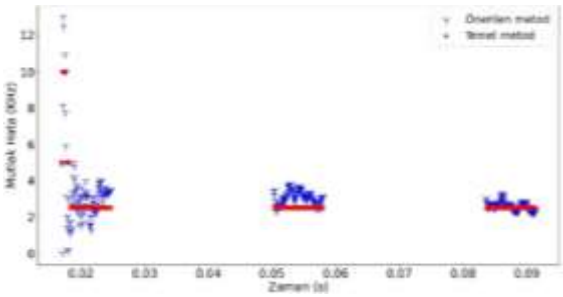


(d) FA-B 5 MHz kanalının bant genişliği kestirimi mutlak hatası

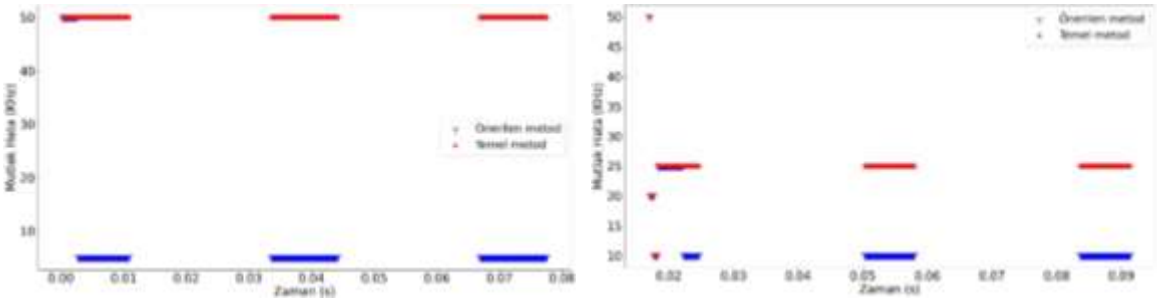
Şekil 4.8. -8 dB SNR'da kestirimlerin mutlak hatalarının karşılaştırılması



(a) FA-A 0.7 MHz kanalının merkez frekansı kestirimi mutlak hatası



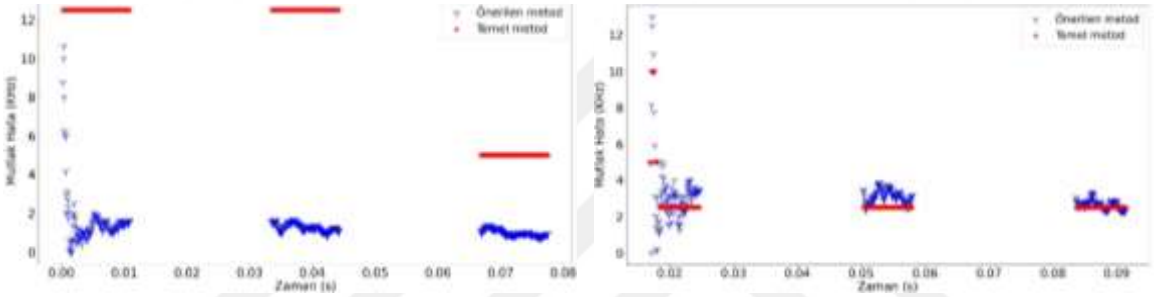
(b) FA-B 5 MHz kanalının merkez frekansı kestirimi mutlak hatası



(c) FA-A 0.7 MHz kanalının bant genişliği kestirimi mutlak hatası

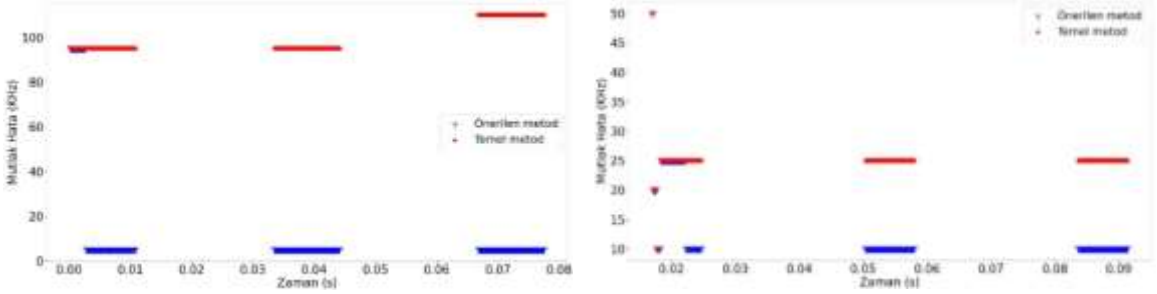
(d) FA-B 5 MHz kanalının bant genişliği kestirimi mutlak hatası

Şekil 4.9. 6 dB SNR'da kestirimlerin mutlak hatalarının karşılaştırılması



(a) FA-A 0.7 MHz kanalının merkez frekansı kestirimi mutlak hatası

(b) FA-B 5 MHz kanalının merkez frekansı kestirimi mutlak hatası



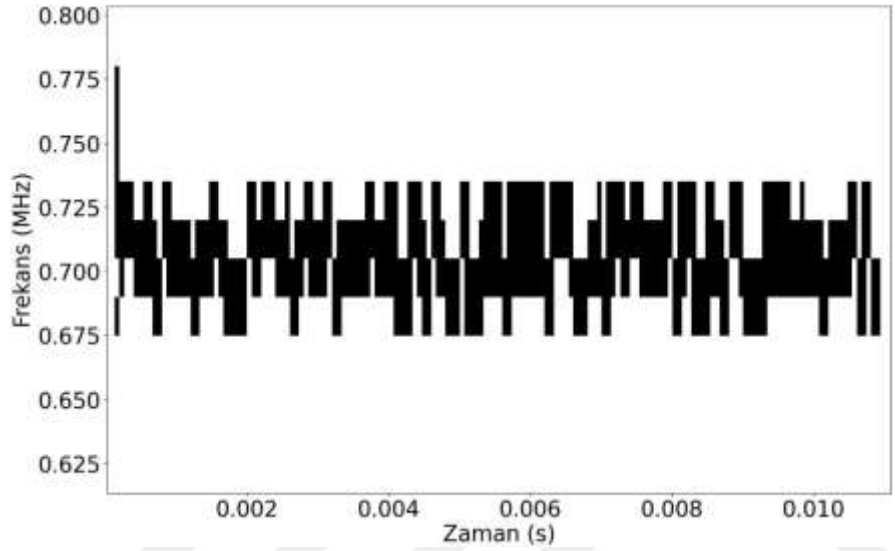
(c) FA-A 0.7 MHz kanalının bant genişliği kestirimi mutlak hatası

(d) FA-B 5 MHz kanalının bant genişliği kestirimi mutlak hatası

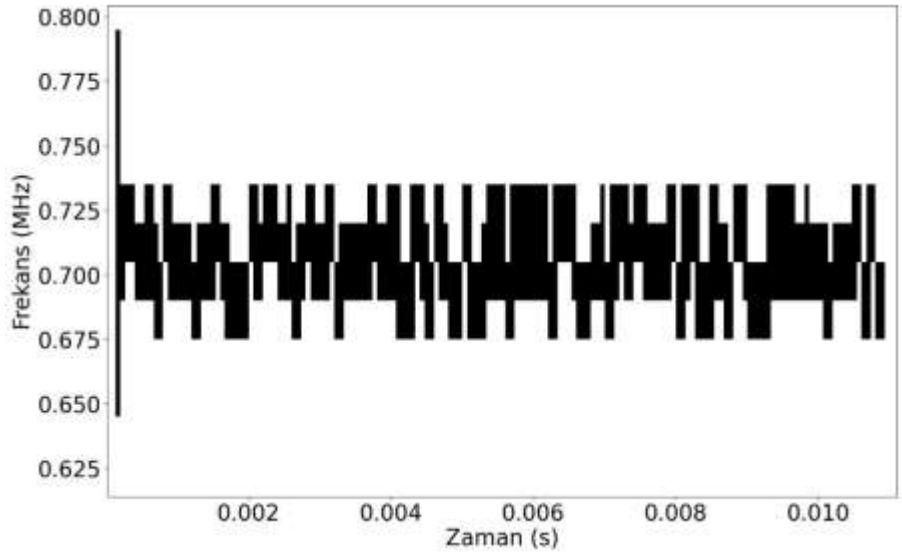
Şekil 4.10. 24 dB SNR'da kestirimlerin mutlak hatalarının karşılaştırılması

Sonuçlara göre temel yöntemde SNR arttıkça mutlak hataların da arttığı sonucuna varılabilir. Bu durum çalışmada kullanılan eşikleme tekniği ile ilişkilendirilebilir. Bu teknikte eşik seviyesini belirlemek için minimum tespit eşik seviyesi kestirilir. Ayrıca yüksek SNR sinyalleri için eşik değeri, FA sinyallerinin maksimum gücünden 10 dB daha düşük olarak hesaplanır. Eşikleme algoritması bu iki değerden büyük olanı seçer. Maksimum güç, minimum algılama eşiğinden 10 dB daha büyük değilse, seçilen eşiğin maksimum güce göre

aralığı azaltılır. Bu, kestirilen bant genişliğinde bir azalmaya yol açar. Eşik seviyesinden etkilenen pencerelerdeki süreksizlik nedeniyle atlamaların başlangıcında ve bitişinde açıklanan bant genişliği genişlemesi, düşük SNR'de hafifletilebilir. Bu gibi durumlarda düşük SNR nedeniyle bant genişliği kestirimindeki azalma, genişleme etkisinin neden olduğu artışı iptal eder. Örnek olarak, ikili hale getirilmiş FA-A sinyalinin 6 dB ve 24 dB SNR'deki ilk sıçramasının karşılaştırması 4.11 ve 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4.11. FA-A sinyalinin ilk atlamasının ikilileştirilmiş halllerinin farklı SNR'lerde kıyaslaması (SNR = 6 dB)



Şekil 4.12. FA-A sinyalinin ilk atlamasının ikilileştirilmiş halllerinin farklı SNR'lerde kıyaslaması (SNR = 24 dB)

Şimdiye kadar yapılanlar, Rician sönümlemesi olduğunda kanalın genellikle frekans bandında sabit (İng. frequency-flat) olduğu varsayılan havadan karaya iletimlere odaklanmıştır. Daha sonra önerilen yöntemi farklı Rician kanalları altında test etmek için sönümleme modeline farklı K faktörleri uygulandı. Sonuçlar ortalama mutlak hatalar (Δ) açısından Çizelge 4.2'de gösterilmektedir ve önceki araştırmalarla oldukça tutarlıdır [24].

Çizelge 4.2. Değişen K faktörlerine göre tespit edilen FA parametre kestirimlerinin ortalama mutlak hataları (SNR = 6 dB; $f_{D_{maksimum}}$ = 100 Hz)

FA	K	Δf_{center} (Hz)	ΔBW (kHz)	$\Delta \tau_{dwell}$ (µs)	$\Delta \tau_{guard}$ (µs)	ΔHR (atlama/s)
FA-A	0.7	870	10	~29.43	8725	0.25
	1	~886.3	10	~29.43	8725	0.25
	2.8	872	10	~29.43	8725	0.25
	10	~887.6	10	~31.92	8725	0.275
FA-B	0.7	~1767.4	10	33.35	~33.64	0
	1	1788	10	33.35	~33.64	0
	2.8	~1747.8	10	33.35	~33.64	0
	10	1755	10	33.35	~33.64	0

Özetlemek gerekirse, algılama sırasında bekleme süresini önemli ölçüde azaltarak, önerilen eşiklemeye dayalı yöntem, dar bant FA sinyal tespiti için geleneksel STFT yöntemlerine göre önemli bir avantaj sunmaktadır. Geleneksel STFT yöntemlerinde, tespit algoritmalarının tüm spektrogram örneklerinin elde edilmesini ve FFT ile frekans alanına dönüştürülmesini beklemesi gerekir. Önerilen yöntemde bu süre sadece 2 atlama periyoduna indirilmekte ve bu da zaman tüketimini önemli ölçüde azaltmaktadır. Önerilen yöntem, iki dar bant FA sinyalinin tespit edilmesi işlemi sonunda bekleme süresini, geleneksel yöntemin gerektirdiği örnek toplama ve FFT işleme sürelerinin %22.2'sine (FA-A) ve %16.7'sine (FA-B) düşürmektedir.

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile önerilen yöntemin parametre kestirimlerinin doğruluğunu arttırdığı ve bunun yanın sıra farklı SNR seviyelerinde birden fazla dar bant FA sinyalinin tespit edilebildiği doğrulanmıştır. Önerilen algoritma, STFT spektrogramının yalnızca ilgili kısımlarını stratejik bir şekilde işleyerek hızlı FA sinyali tespitini mümkün kılmaktadır. Bu verimli yapı, önerilen yöntemi, hızlı FA sinyallerinin hızlı tespitini gerektiren gerçek zamanlı tehdit tanımlama sistemleri için uygun hale getirir.

Önerilen sistemin gerçek dünya senaryolarındaki performansına ilişkin hala bazı endişeler olabilir. Örneğin, alınan FA sinyallerindeki güç değişiklikleri eşikleme sürecini zorlaştırabilir. Ayrıca, yazılım tanımlı radyoların almaç mimarisi olan direkt dönüşüm almaçlarının IQ dengesizlik (İng. IQ imbalance) kaynaklı kazanç ve faz hataları ile DC ofset (diğer bir adıyla İng. local oscillator (LO) leakage) gibi iki büyük dezavantajları nedeniyle performans kayıpları yaşanabilir. Bununla birlikte, gerçek dünya testleri, önerilen yöntemi etkili performansa yönelik olarak kolayca geliştirebilir

Ayrıca önerilen yöntem, modülasyon tipini, sembol dizisini ve FSK kayma oranını kestirmek için daha da genişletilebilir. Bu, önerilen yöntemde FA sinyallerinin kümelenmesini, özellikle de bant genişliğine dayalı kümelemeyi geliştirebilir. Öte yandan önerilen yöntemin çeşitli kanal koşullarındaki performansı da test edilebilir. İleride, geniş bant sinyallerini alt bantlara bölerek etkili bir şekilde analiz edebilen sinyal işleme teknikleri uygulanarak mevcut yöntem geliştirilebilir. Bütün bunlar takip araştırması olarak değerlendirilebilir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışması, çoklu dar bant FA sinyallerinin parametrelerini tespit etmek ve kestirmek için STFT tabanlı bir yöntem önermektedir. Temel olarak dört aşamayı içerir: a) FA sinyallerini tespit etmek için eşik hesaplamasına dayalı bir ikilileştirme sürecinden yararlanılması; b) parametreleri kestirmek için önerilen bir algoritmanın kullanılması; c) tespit edilen sinyallerin merkez frekanslarını ayırmak için koruma bant genişliğini kullanan bir birleştirme algoritmasının benimsenmesi, d) bant genişliği parametresine ve zamanda çakışma olmamasına dayalı olarak kümelenme ve tespit edilme. Önerilen yöntemin farklı SNR seviyelerinde (−8 dB, 6 dB ve 24 dB) verimliliğini değerlendirmek için simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyonlarda GNU Radio kütüphanesi ile NumPy tarafından oluşturulan 4-FSK ve 8-FSK modülasyon şemalarına sahip iki FA sinyali kullanılmıştır. Önerilen yöntemin merkez frekansı, bant genişliği, atlamada kalma süresi, koruma (frekans değiştirme) süresi ve atlama hızı gibi kestirilen sinyal parametreleri üzerindeki performansı mutlak hata metriği açısından değerlendirilmiştir. Simülasyonlardan elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin, çoklu dar bant FA sinyallerinin parametre kestirimi ve tespiti için iyi bilinen ana akım STFT yöntemlerine göre daha hızlı ve daha doğru bir alternatif olabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

1. Torrieri, D. (2018). *Principles of Spread-Spectrum Communication Systems*. Cham: Springer International Publishing.

2. Kanaa, A., ve Sha'ameri, A. Z. (2018). A robust parameter estimation of FHSS signals using time–frequency analysis in a non-cooperative environment. *Physical Communication,* 26, 9–20.

3. Zhi, L., Jianhua, Z., Hao, C., Xu, G., ve Jian, L. (2019). Parameter estimation of frequency hopping signals based on analogue information converter. *IET Communications, 13*, 1886–1892.

4. Wan, J., Zhang, D., Xu, W. ve Guo, Q. (2019). Parameter estimation of multi-frequency hopping signals based on space-time-frequency distribution. *Symmetry*, 11, 648.

5. Wang, H., Zhang, B., Wang, H., Wu, B. ve Guo, D. (2022). Hopping time estimation of frequency-hopping signals based on HMM-enhanced Bayesian compressive sensing with missing observations. *IEEE Communications Letters*, 26, 2180–2184.

6. Jiang, Z., Wang, S., Chen, Y., Wang, P. ve Gao, L. (2022). *Frequency hopping signal parameter estimation algorithm based on time-frequency point correlation*. Proceedings of the 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 740-744.

7. Barbarossa, S. ve Scaglione, A. (1997, April). *Parameter estimation of spread spectrum frequency-hopping signals using time-frequency distributions.* Proceedings of the First IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 213–216.

8. Feng, T., ve Yuan, C. W. (2010). Combination of Wigner–Ville distribution and its application to blind parameter estimation of frequency-hopping signals. *Journal of Xidian University*, 37, 1137–1142.

9. Chen, T.-C. (2012). Joint signal parameter estimation of frequency-hopping communications. *IET Communications*, 6, 381.

10. Wang, Z., Li, Y., ve Xu, W. (2021). A blind parameter estimation method of frequency hopping signal with low SNR. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 15, 248–253.

11. Jun, Z., Zhaoyang, Z., Lifeng, L., ve Qian-qian, C. (2003). Blind parameter estimation of frequency-hopping signals based on time-frequency analysis. *Journal of Circuits and Systems*, 8, 213–216.

12. He, Y., Su, Y., Chen, Y., Yu, Y., ve Yang, X. (2018). *Double window spectrogram difference method: A blind estimation of frequency-hopping signal for battlefield communication environment.* Proceedings of the 2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), 439–443.

13. Xie, J., Hou, S., ve Zhang, Q. (2019). *An improved central frequency estimation method for frequency-hopping signal*. Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 250–253.

14. Tong, L., Yinhui, T., ve Jun, L. (2010). *Parameter estimation of FH signals based on STFT and MUSIC algorithm*. Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010), v5-232.

15. Angelosante, D., Giannakis, G. B., ve Sidiropoulos, N. D. (2010). Estimating multiple frequency-hopping signal parameters via sparse linear regression. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58, 5044–5056.

16. Feng, T., ve Yuan, C.-W. (2011). Blind parameter estimation of frequency-hopping signals based on the time-frequency distribution maxima. *Dianzi Xuebao/Acta Electronica Sinica*, 39, 2921–2925.

17. Fu, W., Li, X., Liu, N., Hei, Y., ve Wei, J. (2017). Parameter blind estimation of frequency-hopping signal based on time–frequency diagram modification. *Wireless Personal Communications*, 97, 3979–3992.

18. İnternet: Knaap, V. V. D., Mouri, M., ve Zwamborn, P. (2021). MSG-SET-183 – Detection and Characterization of a UAS RF FHSS Communication Link. *NATO Science & Technology Organization.*, URL: https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-MSG-SET-183/MP-MSG-SET-183-16P.pdf, Son Erişim Tarihi: 18.07.2024.

19. Kaplan, B., Kahraman, I., Görçin, A., Çırpan, H. A., ve Ekti, A. R. (2020). *Measurement based FHSS–type drone controller detection at 2.4 GHz: An STFT approach*. Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)1–6.

20. Ye, J., Zou, J., Gao, J., Zhang, G., Kong, M., Pei, Z., ve Cui, K. (2021). A new frequency hopping signal detection of civil UAV based on improved k-means clustering algorithm. *IEEE Access*, 9, 53190–53204.

21. Chiper, F.-L., Martian, A., Vladeanu, C., Marghescu, I., Craciunescu, R., ve Fratu, O. (2022). Drone detection and defense systems: Survey and a software-defined radio-based solution. *Sensors*, 22, 1453.

22. Flak, P. (2021). Drone detection sensor with continuous 2.4 GHz ISM band coverage based on cost-effective SDR platform. *IEEE Access*, 9, 114574–114586.

23. Mototolea, D., Youssef, R., Radoi, E., ve Nicolaescu, I. (2020). Non-cooperative low-complexity detection approach for FHSS-GFSK drone control signals. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 401–412.

24. Basak, S., Rajendran, S., Pollin, S., ve Scheers, B. (2021). Combined RF-based drone detection and classification. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 8, 111–120.

25. Zhu, H., Lv, H., Dai, Z., Tan, M., ve Song, W. (2023). A novel parameter estimation method of FHSS signal with low SNR. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 18, 891–900.

26. Hasan, M. Z., Couto, D. J., Abdel-Malek, M. A., ve Reed, J. H. (2023). Frequency hopping signal detection in low signal-to-noise ratio regimes. *Proceedings of the 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 1–7.

27. Deng, Z., ve Lei, J. (2022). *Spectrogram-based frequency hopping signal detection in a complex electromagnetic environment*. Proceedings of the 2022 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP), 6–10.

28. Chen, Z., Shi, Y., Wang, Y., Li, X., Yu, X., ve Shi, Y. (2023). Unlocking signal processing with image detection: A frequency hopping detection scheme for complex EMI environments using STFT and CenterNet. *IEEE Access*, 11, 46004–46014

29. Khan, M. T., Sha'ameri, A. Z. ve Zabidi, M. M. A. (2021). Classification of FHSS signals in a multi-signal environment by artificial neural network. *International Journal of Computing and Digital Systems, 11*(1), 775–789.

30. Lee, K.-G., ve Oh, S.-J. (2020). Detection of frequency-hopping signals with deep learning. *IEEE Communications Letters*, 24, 1042–1046.

31. Li, C., Chen, Y., ve Zhao, H. (2023). Frequency hopping signal detection based on optimized generalized S transform and ResNet. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 20, 12843–12863.

32. Zhang, D., Shang, Y., Liang, X., ve Lin, J. (2022). *Efficient blind estimation of parameters for multiple frequency hopping signals via single channel*. Proceedings of the 2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), 1063–1069.

33. Li, Y., Wang, F., Fan, G., Liu, Y., ve Zhang, Y. (2023). A fast estimation algorithm for parameters of multiple frequency-hopping signals based on compressed spectrum sensing and maximum likelihood. *Electronics*, 12, 1808.

34. Wang, Y., He, S., Wang, C., Li, Z., Li, J., Dai, H., ve Xie, J. (2022). Detection and parameter estimation of frequency hopping signal based on the deep neural network. *International Journal of Electronics*, 109, 520–536.

35. Wang, Z., Zhang, B., Zhu, Z., Wang, Z., ve Gong, K. (2021). Signal sorting algorithm of hybrid frequency hopping network station based on neural network. *IEEE Access*, 9, 35924–35931.

36. Wang, Y., Liao, H., Yuan, S., ve Liu, N. (2023). A learning-based signal parameter extraction approach for multi-source frequency-hopping signal sorting. *IEEE Signal Processing Letters.*

37. Lu, K., Qian, Z., Wang, M., ve Wang, D. (2023). Few-shot learning based blind parameter estimation for multiple frequency-hopping signals. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 34, 271–289.

38. Lin, M., Tian, Y., Zhang, X., ve Huang, Y. (2023). Parameter estimation of frequency-hopping signal in UCA based on deep learning and spatial time–frequency distribution. *IEEE Sensors Journal*, 23, 7460–7474.

39. Wei, S., Zhang, M., Wang, G., Sun, X., Zhang, L., ve Chen, D. (2019). Robust multi-frame joint frequency hopping radar waveform parameters estimation under low signal-noise-ratio. *IEEE Access*, 7, 177198–177210.

40. Ouyang, X., ve Amin, M. G. (2001). Short-time Fourier transform receiver for nonstationary interference excision in direct sequence spread spectrum communications. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 49, 851–863.

41. Internet: Rohde-schwarz, (2024). *Implementation of Real-Time Spectrum Analysis White Paper*, URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ef77/1EF77_3e_Real-time_Spectrum_Analysis.pdf , Son Erişim Tarihi: 08.06.2024.

42. Podder, P., Khan, T. Z., Khan, M. H., ve Rahman, M. M. (2014). Comparative performance analysis of Hamming, Hanning and Blackman window. *International Journal of Computer Applications*, 96, 1–7.

43. Luo, L. (2009). *Detection of an unknown frequency hopping signal based on image features.* Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing, 1–4.



Gazili olmak ayrıcalıktır