



Frekans Atlamalı Sinyallerin Tespiti ve Parametre Kestirimine Genel Bir Bakış: Son Gelişmeler ve Zorluklar

An Overview on Detection and Parameter Estimation of Frequency Hopping Signals: Recent Advances and Challenges

 Mutlu Aydın¹, Ali Kara² 

¹Fen Bilimleri Enstitüsü, ²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye
mutlu.aydin@gazi.edu.tr, akara@gazi.edu.tr

Öz

Frekans atlamalı yayıllı spektrum (İng. Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)) ya da kısaca frekans atlamalı (FA), taşıyıcı frekansı değiştiren yaygın bir haberleşme yöntemidir. Frekans atlamalı haberleşme yöntemi, anti-karıştırma kabiliyetinin güçlü olması gibi çeşitli yararlarından dolayı güvenli iletişim bağlantısı için yaygın olarak kullanılmaktadır. Frekans atlama kullanan sistemler arttıkça, frekans atlayan sinyallerinin tespiti ve parametre kestirimine olan ihtiyaç daha da artmış ve bu yöntemlerin geliştirilmesi, güvenlik açısından kritik bir araştırma alanı haline gelmiştir. Bu çalışmada frekans atlamalı sinyalleri tespit ve parametre kestirimi alanındaki son çalışmalar tek ve çoklu hedefler için iki ayrı kategoride incelenmiştir. Ayrıca gelecek araştırma alanları ve zorlukları tartışılmıştır. Böylece gelecekteki çalışmalara yol gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Frekans Atlamalı, FHSS, Tespit, Parametre Kestirimi

Abstract

Frequency hopping spread spectrum (FHSS) or simply frequency hopping (FH) is a common communication method that changes the carrier frequency. Frequency hopping communication method is widely used for secure communication link due to its various benefits such as strong anti-jamming ability. As systems using frequency hopping increase, the need for detection of frequency hopping signals and parameter estimation has increased, and the development of these methods has become a critical research area in terms of security. In this study, recent studies in the field of detection and parameter estimation of frequency hopping signals are examined in two separate categories for single and multiple targets. Additionally, future research areas and challenges are discussed. Thus, future studies are guided.

Keywords: Frequency Hopping, FHSS, Detection, Parameter Estimation

1. Giriş

Frekans atlamalı haberleşme yönteminde taşıyıcı frekans belirli bir düzende değiştirilerek iletişim sağlanmaktadır. Bu taşıyıcı frekans değişimlerinin her biri "atlama" olarak isimlendirilmektedir. Frekans atlamalı haberleşme yöntemi,

karıştırmaya karşı dirençli olması gibi çeşitli yararlarından dolayı hem sivil hem de askeri sistemlerde sıklıkla kullanılmakta ve kullanan sistemlerin sayısı giderek artmaktadır [1]. Bu nedenle FA sinyallerin tespiti ve parametre kestirimi yöntemlerinin geliştirilmesi çalışmaları da artmaya devam etmektedir. Bu yöntemlerin özellikle alan güvenliğinin sağlanması açısından hayati bir araştırma alanı haline geldiği görülmektedir.

Frekans atlamalı haberleşmenin güvenli bağlantı amacıyla insansız araçlar tarafından sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir [2]. Bundan dolayı FA tespiti ve parametre kestirimine ilişkin çalışmalar özellikle ISM bantlarında çalışan insansız hava araçları (İHA, İng. drone) sinyallerine odaklanmaktadır. Bu durum nedeniyle, FA tespiti ve parametre kestirimine ilişkin gerçek dünya deneylerinin tipik olarak sivil İHA kumanda sinyalleri kullanılarak gerçekleştirildiği görülmektedir [3-7].

Gerçek dünyadaki sivil İHA uygulamalarında, FA sinyallerinin frekans dizisi genellikle sabittir [4]. Bununla birlikte, yeni ve gelişmiş sistemler sözde rastgele atlamalı diziler gibi gelişmiş diziler de kullanılabilmektedir. Ayrıca hızlı frekans atlama yapabilen ve dar atlama bant genişliğine sahip FA sinyalleri de olabilmektedir. Bu nedenlerle FA sinyallerinin tespiti ve parametre kestirimi halen oldukça zorlu bir işittir.

FA sinyal parametre kestiriminde zaman frekans analizi için kısa zamanlı Fourier dönüşümü (STFT) [3-4, 8-10, 18-20, 25] ve Wigner-Ville dağılımı (WVD) kullanılmaktadır [15, 20-21]. WVD yönteminin çözünürlüğü yüksek olmasına rağmen çapraz terim girişimi nedeniyle hesaplaması karmaşıktır. STFT çapraz terim girişiminden etkilenmemesi ve hesaplama basitliği nedeniyle tercih edilmektedir.

Bu çalışmada FA tespit ve sınıflandırma alanındaki güncel çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca karşılaştırma için tek ve çoklu hedeflere yönelik iki ana kategorideki çalışmaların özet tabloları oluşturulmuştur. Son olarak gelecek araştırma yönlendirmeleri yapılmış ve alandaki zorluklar tartışılmıştır.

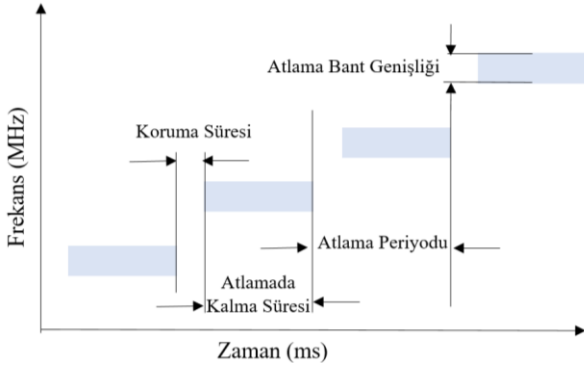
2. FA Sinyal Parametreleri

FA sinyali taşıyıcı frekansını zamanla değiştirmektedir. Bu değişim nedeniyle spektrumda durağan olmayan bir sinyaldir.

Atlama periyodu, atlamada kalma ve koruma (frekans değiştirme) sürelerinin toplamına eşittir. Atlama hızı ise bir saniyedeki atlama sayısıdır ve aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$\text{Atlama Hızı} = \text{Atlama Periyodu}^{-1} \quad (1)$$

Atlama bant genişliği her atlamanın spektrumda kullandığı frekans aralığıdır. Atlama merkez frekansı ise bu aralığın orta noktasıdır. FA sinyali parametreleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1: FA sinyali parametreleri gösterimi

3. Güncel FA Sinyal Tespit ve Parametre Kestirimi Çalışmaları

FA tespit ve parametre kestirim yöntemleri iki ayrı kategoriye ayrılmaktadır. İlki, bir defada tek FA sinyali hedefi için çalışan parametre kestirim ve tespit yöntemleridir. İkincisi ise aynı anda çok sayıda FA sinyallerinin tespiti ve parametre kestirimi için tasarlanmış yöntemlerdir. Bu bölümde, bu iki kategorideki güncel çalışmalar incelenecektir.

3.1. Tek FA Sinyal Tespit ve Parametre Kestirimi Çalışmaları

[3]'deki çalışma, STFT yöntemini kullanmış ve eşik hesaplaması yapmıştır. Hesaplanan eşik değeriyle ikileştirilmenin ardından bant genişliği, merkez frekansı ve atlamada kalma süresi parametrelerinin kestirimleri yapılmaktadır. Daha sonra morfolojik genişleme ve erozyon görüntü işleme yöntemleri kullanılmıştır. Atlama periyodu parametresi normalde bir FA sinyalinin tüm atlamaları için eşittir. Ancak çalışmada analiz edilen 2.4 GHz ISM bandındaki İHA'nın FHSS sinyalinin atlamaları için koruma süresi ve bundan dolayı atlama periyodu parametreleri farklıdır. Koruma süresi parametreleri STFT'nin otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ile hesaplanır. İHA mesafelerine göre atlama zamanı hataları hesaplanmıştır.

[4]'de STFT, Gaussian filtreleme ve Parametrik Olmayan Genlik Niteleme Yöntemi (NPAQM) gerçekleştirilmiştir. Literatürden farklı olarak algoritmalar bir SDR'nin FPGA'sı içinde çalışacak şekilde dijital tasarım yapılmıştır. Sonuçlar [1]'deki gibi 2.4 GHz ISM bandındaki İHA'nın alıcıya mesafesine göre bekleme süresi parametresinin hatası olarak verilmiştir.

[5]'teki çalışmada işbirlikçi olmayan bir durum için 2.4 GHz ISM bandındaki Gaussian FSK İHA iletişim sinyallerine bir sıkıştırılmalı örnekleme yöntemi uygulanmıştır. Önerilen yöntemin Bluetooth sinyallerine de uyarlanabilir olduğu belirtilmektedir. İHA kumandası tarafından iletilen bit

dizilerini doğrudan tespit etmek amaçlanmakta ve sinyal yeniden yapılandırma aşaması atlanmaktadır. Veri bit dizileri, azaltılmış spektral bilginin (RSI) çıkarılması ve yumuşak algılama algoritması ile elde edilmektedir. RSI, ortogonal eşleştirme takibi (OMP) algoritmasıyla yeniden yapılandırılmıştır.

[8]'de AWGN ve OFDM modülasyonlu girişim sinyallerinin olduğu ortamlarda 2.4 GHz ISM bandı FA sinyallerinin sınıflandırılması için yapay sinir ağı (ANN) tabanlı bir yöntem önerilmektedir. İlk olarak STFT ile elde edilen spektrogramdan merkez frekansı ve atlama periyodu gibi parametre kestirimleri yapılmıştır. Daha sonra çıktı verileri eğitim aşamasına gönderilir. Eğitim sonrasında, ANN tabanlı önerilen yöntem, doğrusal diskriminant (LD) yönteminden daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

[9]'daki çalışmada STFT'den elde edilen spektrogramın segmentasyonu için DeepLabv3+ ağı kullanılmıştır. Merkez frekansları sürerlilik (persistence) spektrumundan elde edilir. Frekans atlama dizisi finalde tespit edilir. Bundan sonra sonuçlar, sabit yanlış alarm oranı (CFAR) tespiti ile karşılaştırılır.

[10]'daki çalışmada atlama parametrelerini elde etmek için CenterNet tabanlı bir derin ağ uygulanmıştır. İlk olarak STFT, spektrogram elde etmek için kullanılmıştır. Daha sonra önerilen yöntemin yeteneklerini test etmek için karmaşık elektromanyetik girişim (EMI) ortamı simüle edilmiştir. Son olarak piksel koordinatlarının miritalanmasıyla atlama parametreleri elde edilmiştir. CenterNet tabanlı yöntem, tüm gürültü sinyal oranlarında kestirim performansı açısından YOLOv7 ve YOLOX metodlarından daha iyi performans göstermiştir.

[11]'deki makalede spektrum matrisinin spektral yakınsama özelliklerinin analiz edilmesiyle sembol periyodu kestirimi yapılmaktadır. Sembol-frekans dağılımı ve atlama periyodu başına sembol sayısı elde edilir. Atlama periyodu ve merkez frekans parametreleri, öngörülen spektruma göre kestirilir. Bu yöntem PSK modülasyonlu FHSS sinyalleriyle test edilmiştir. Sonuçlar bu yöntemin düşük sinyal güç oranı koşullarında TFA yönteminden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir.

[12]'de analog bilgi dönüştürücüsüne (AIC) dayalı temel bant parametre kestirimi (BPE) yöntemi adı verilen bir FA parametre kestirimi algoritması gerçekleştirilmiştir. Yöntem, parametre kestirimi için Nyquist frekansının yeniden yapılandırılmasını gerektirmemektedir. Test sonuçları önerilen yöntemin 140.000 atlama/sn'ye kadar kestirim yapabileceğini göstermektedir.

[13]'deki makalede çift pencere spektrogram farkı (DWSD) yöntemi iki farklı pencere uzunluğu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Böylece merkez frekans ve atlama periyodu parametreleri daha doğru kestirilebilmektedir.

[14]'de FA sinyalinin spektral korelasyon fonksiyonundan (SCF) dögüsel özellikler çıkarılmakta ve özellik sınıflandırması, eğitilmiş bir destek vektör makinesi (SVM) sınıflandırıcısı ile gerçekleştirilmektedir. İkili ve bir-sınıflı SVM sınıflandırıcıları eğitilmiştir. İkili olan önceden mevcut etiketli FA sinyallerine sahipken bir-sınıf olan ise sahip değildir.

[15]'de çalışmada herhangi bir ön bilgi olmaksızın kuadratik zaman-frekans dağılım yöntemleri Genişletilmiş değiştirilmiş B-dağılımı (EMBD) ve uyarlanabilir düzleştirilmiş Wigner-Ville (SWWVD) yöntemleri uygulanmıştır.

[16]'daki makalede hibrit CNN/RNN (HCRNN) yöntemi uygulanmıştır. Hibrit CNN/RNN tabanlı yöntem, çeşitli pencere boyutlarındaki spektrogramlardan çıkarılan özellik haritalarını kullanarak yetersiz zaman-frekans çözünürlüğü sorununu azaltmaktadır. Simülasyonlarda, hibrit CNN/RNN tabanlı yöntem, CNN tabanlı ve geleneksel tespit yöntemlerinden daha iyi performans göstermiştir.

[17]'de FA sinyalleri tespit etmek için kalıntı (residual) ağ ve optimize edilmiş genelleştirilmiş S dönüşümü yöntemi önerilmektedir. ResNet, performansı artırmak için derinliğe dayanan CNN modellerinin kaybolan gradyan ve patlayan gradyan sorunlarını çözmek üzere tasarlanmıştır. HCRNN yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Önerilen algoritmanın ve HCRNN'nin farklı sinyal güç oranları altındaki sonuçları incelenmiş ve önerilen yöntemin HCRNN'den daha iyi performans gösterdiğini sonucuna varılmıştır.

Tablo 1'de tek FA sinyali tespiti ve parametre kestirimi için olan çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1: Tek FA Sinyali Tespit ve Parametre Kestirimi Çalışmaları Özet Tablosu

Kaynak	FA Parametreleri	Kullanılan Metotlar	Test Bandı	FA Sinyal Yapısı
[3]	Atlama merkez frekansı Atlamada kalma süresi Koruma süresi Atlama periyodu	STFT Eşik hesaplaması Görüntü İşleme ACF	2.4 GHz ISM	İHA kumandası Aynı atlamada kalma süresi Farklı koruma süresi
[4]	Atlamada kalma süresi	STFT FPGA ile Dijital Tasarım Gaussian filtreleme NPAQM	2.4 GHz ISM	İHA kumandası Aynı atlamada kalma süresi
[5]	Bit dizisi	CS OMP ile RSI çıkarımı	2.4 GHz ISM	İHA kumandası GFSK modülasyon Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[8]	Atlama merkez frekansı Atlama periyodu	STFT ANN	2.4 GHz ISM	BPSK modülasyon Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[9]	Atlama periyodu Merkez frekansı Atlama bant genişliği Atlama dizisi	STFT DeepLabv3+ ağı Spektrogram segmentasyonu	-	MSK modülasyon Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[10]	Atlama merkez frekansı Atlama bant genişliği Atlamada kalma süresi	STFT CenterNet	-	Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[11]	Atlama merkez frekansı Atlama periyodu Sembol periyodu	Spektral yakınsama karakteristiği analizi Sembol-frekans dağılımı	-	PSK modülasyon Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[12]	Atlama merkez frekansı Atlama periyodu	AIC BPE	-	QPSK modülasyon Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[13]	Atlama merkez frekansı Atlama periyodu	Çift pencere spektrogram farkı	-	Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[14]	Atlama bant genişliği	SVM SCF	-	QPSK ve QAM modülasyon Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[15]	Atlama merkez frekansı Atlama periyodu Atlama dizisi	EMBD ve SWWVD	-	Yavaş atlama hızı QPSK modülasyon
[16]	Atlama merkez frekansı Atlama bant genişliği Atlama periyodu	Hibrit CNN/RNN	-	Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu
[17]	Atlama merkez frekansı Atlama bant genişliği Atlama periyodu	ResNet Optimize genelleştirilmiş S-dönüşümü	-	Aynı atlamada kalma süresi Aynı atlama periyodu

3.2. Çoklu FA Sinyal Tespit ve Parametre Kestirimi Çalışmaları

[6]'daki çalışmada geliştirilmiş bir K-ortalama kümeleme yöntemini kullanarak 2.4 GHz ISM bandındaki birden fazla frekans atlamalı İHA sinyallerini tespit eden bir yöntem önerilmektedir. Ayrıca adaptif eşikleme ve kronolojik sınıflandırma yöntemleri kullanılmıştır. Test sonuçları önerilen yöntemin aynı anda çalışan farklı İHA kumanda sinyallerinin parametrelerini kestirmek için kullanılabileceğini göstermektedir.

[7]'de, birden fazla FA sinyalini tespit etmek için Goodness-of-Fit (GoF) ve Derin Kalıntı Sinir Ağı (DRNN) ile iki aşamalı bir tespit ve sınıflandırma önerilmiştir. Ayrıca YOLO-lite yöntemiyle birleştirilmiş bir tespit ve sınıflandırma yöntemi de kullanılmıştır. 2.4 GHz ISM bandında 9 İHA ve 2 Wi-Fi sinyali ile gerçekleştirilen testlerde frekans domaininde örtüşme olsa dahi başarılı tespit yapılabildiği doğrulanmıştır.

[18]'deki makalede birden fazla FA sinyalinin kör tespiti için FA Sinyal Parametre Çıkarıcısı (FHExt) olarak adlandırılan derin öğrenmeye dayalı bir parametre kestirim yöntemi önerilmektedir. STFT kullanılmıştır. 1.9-2.1 GHz bandında gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre FHExt'in tamamen kör senaryolarda çalışabildiğinin doğrulanmasının yanı sıra yarı kör senaryolara da uyarlanabildiği gösterilmiştir.

[19]'da sinyallerin frekans atlama tanımlama kelimelerini (HDW) sınıflandırmak için sinir ağı (NN) tabanlı bir sinyal sınıflandırma algoritması önerilmektedir. STFT ve geri-yayılım tabanlı eşlenik gradyan algoritması kullanılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre önerilen algoritmanın hızlı olduğu ve düşük sinyal güç oranı koşullarında iyi sınıflandırma doğruluğu sağladığı gösterilmiştir.

[20]'deki çalışmada STFT ve düzeltilmiş sözde Wigner-Ville dağılımı (SPWVD) birleştiren bir yöntem kullanılarak birden fazla FA sinyalinin kör parametre kestirimi gerçekleştirilmiştir. Farklı ağ modları için atlama periyodu, zamanlama ve merkez frekans parametrelerinin kestirilebileceği gösterilmiştir.

[21]'deki makalede çoklu FA sinyalleri için birkaç-adımlı (İng. few-shot) öğrenmeye dayalı bir kör parametre kestirim yöntemi önerilmektedir. Derin öğrenme temelli zaman frekans sırt (İng. ridge) tespiti ve öznitelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları önerilen yöntemin çeşitli gürültü sinyal oranı koşulları altında sadece birkaç ek açıklama ile bile doğru parametre kestirimi yapabildiğini göstermektedir.

[22]'de, bilinmeyen birden fazla sayıdaki FA sinyallerinin sıkıştırılmalı spektrum algılama ve maksimum olasılık (CSML) bazlı frekans ve atlama süresi parametre kestirimi önerilmektedir. Önerilen algoritmanın birden fazla FA sinyal frekansını hızlı ve doğru bir kestirimini gerçekleştirebildiği gösterilmiştir. Ayrıca koruma (frekans değiştirme) süresine sahip birden fazla FA sinyal için de kullanılabileceği doğrulanmıştır.

[23]'teki çalışmada düşük sinyal-gürültü oranı koşulları altında birden fazla FA sinyalini tespit etmek için tek atış dedektörü (SSD) derin sinir ağına (DNN) dayalı bir yöntem

önerilmektedir. Yüksek güçlü gürültü koşulları için zaman-frekans grafiği düzeltme yöntemi olan K-ortalama kümelemesi kullanılmıştır.

[24]'te, uzay-zaman frekans dağılımına (STFD) ve müşterek köşegenleştirme matrisine (JDM) dayalı bir kör parametre kestirim algoritması önerilmektedir. Yön parametresi (DOA) kestirimi için root-MUSIC algoritması kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın, birden fazla FA sinyalinin parametrelerini seyrek doğrusal regresyon (SLR) yöntemine göre daha doğru bir şekilde kestirebildiği belirtilmektedir.

[25]'deki makalede zaman frekans parametrelerini hesaplama maliyetini azaltmak amacıyla bir hayalet modül kullanan YOLOv5 modelini temel alan geliştirilmiş bir nesne dedektörü önerilmiştir. Tekdüze dairesel dizideki birden fazla FA sinyalinin 2 boyutlu DOA parametresi STFD yöntemiyle kestirilmektedir. STFT ve hüzmeuzay (İng. beam-space) dönüşümü yöntemleri kullanılmıştır.

Yukarıda incelenen ilgili çalışmaların özeti Tablo 2'de gösterilmektedir.

4. Gelecek Araştırma Yönlendirmeleri ve Araştırma Zorlukları

Tablo 1 ve Tablo 2'den anlaşılacağı üzere çalışmaların sadece birkaçı, önerdikleri yöntemin etkinliğini doğrulamak için 2 GHz civarında bir test bandını özellikle de 2.4 GHz ISM bandını kullanmıştır. Test sinyalleri frekans atlamalı İHA kumandası, Wi-Fi ve çeşitli modülasyonlara sahip sinyalleri içermektedir. Farklı tipteki FA sinyallerin de gerçek dünya testlerinde kullanılabileceği değerlendirilmektedir. Bu nedenlerle önerilen yöntemlerin gerçek dünya testleri konusunda eksik olduğu görülmektedir. Test edilmemiş yöntemlerin gerçek dünyada test edilmesi, test edilenlerin ise farklı frekans bantlarında farklı hedef sinyalleri ile test edilmeleri önerilmektedir.

Çok geniş bantlarda atlama yapabilen özellikle askeri FA iletişim sistemleri olabilmektedir. Bu da gerçek zamanlı (anlık) bant genişliği parametresinin önemini ortaya koymaktadır. Literatürde en fazla 200 MHz bant genişliği ile gerçek dünya testleri gerçekleştirilmiştir. Daha geniş bant genişlikleri sistem maliyetlerini ve ayrıca hesaplama maliyetini oldukça arttırmaktadır. Ayrıca sistem boyutlarının büyümesine sebep olduğundan taşınabilirliği olumsuz etkilemektedir. Ayrıca gürültünün gücü bant genişliği ile doğru orantılı olarak artmakta ve dar bant almaçların gürültü figürü düşük olmaktadır. Etkin güvenliğin sağlanabilmesi için hedef sistemlerin kullanılabileceği tüm bantları kapsayacak şekilde algılama yapılması gerektiğinden yüksek frekans bantlarını da kapsayacak çok kanallı almaç sistemleri tasarımının gelecek sistemlerde çok daha önemli olacağı değerlendirilmektedir.

FA sinyallerinin doğru bir şekilde tespit edilmesi ve parametrelerinin kestirilmesi kadar bu işlemin hızlı bir şekilde yapılması da güvenlik açısından kritiktir. Bu nedenle önerilen yöntemlerin FPGA gibi gerçek zamanlı platformlara taşınabilir olmasının büyük önem taşıdığı değerlendirilmektedir.

Tablo 2: Çoklu FA Sinyali Tespit ve Parametre Kestirimi Çalışmaları Özet Tablosu

Kaynak	Kullanılan FA Parametreleri	Kullanılan Metotlar	Test Bandı	FA Sinyallerinin Yapısı	FA Sinyal Sayısı
[6]	Bant genişliği Dalga Şekli Tepe Enerji Atlamada kalma süresi	Adaptif eşikleme Gelişmiş K-ortalama kümeleme Kronolojik sınıflandırma	2.4 GHz ISM	İHA kumandası Tek FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi	1-2
[7]	Atlama merkez frekansı Atlama bant genişliği Atlamada kalma süresi Modülasyon	GoF ve DRNN YOLO-lite	2.4 GHz ISM	9 İHA kumandası 2 Wi-Fi Frekansta örtüşme	11
[18]	Atlama merkez frekansı Atlama bant genişliği Atlamada kalma süresi Atlama periyodu	STFT K-ortalama kümeleme FHExt ResNet-50	1.9 – 2.1 GHz	23 modülasyon Tek FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekansta kısmi örtüşme	2,3,4
[19]	Atlama merkez frekansı Atlama zamanı Güç	STFT NN BP-Eşlenik gradyan algoritması	-	Tek FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Farklı atlama zamanı Frekansta örtüşmeme	4
[20]	Merkez frekansı Atlama periyodu Koruma süresi	STFT SPWVD	-	Tek FA sinyalinde aynı atlamada kalma süresi ve farklı koruma süresi Frekansta örtüşmeme	2
[21]	Atlama merkez frekansı Atlamada kalma süresi Atlama hızı	SPWVD DL temelli TF sırt tespiti Few-shot öğrenme	-	AM, FM, BPSK, QPSK ve 16QAM modülasyon Bir FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekansta örtüşmeme	1-6
[22]	Atlama merkez frekansı Atlama zamanı	Segmentasyon CSML Ortalama ve sıfır-düzenleme	-	Tek FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekansta örtüşmeme	2
[23]	Atlama merkez frekansı Atlama zamanı Atlama periyodu Atlama bant genişliği	DNN SSD K-ortalama kümeleme	-	BPSK, QPSK, QAM modülasyon Tek FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekansta örtüşmeme	1-2
[24]	Atlama merkez frekansı Atlama zamanı Atlama periyodu DOA	STFD JDM Root-MUSIC	-	Tek FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekansta örtüşmeme	3
[25]	Atlama merkez frekansı Atlama bant genişliği Atlama zamanı Atlama periyodu 2-D-DOA	STFT STFD YOLOv5 Hüzmeuzay dönüşümü	-	Tek FA sinyalinde aynı atlama periyodu ve atlamada kalma süresi Frekansta örtüşmeme	5

5. Sonuç

Bu makalede frekans atlamalı sinyallerin tespiti ve parametre kestirimi alanındaki son çalışmalar tek ve çoklu hedefler için iki ayrı kategoride incelenmiştir. Karşılaştırma için özet tabloları oluşturulmuştur. Ayrıca gelecek araştırma alanları ve bu alanlardaki zorlukları incelenen çalışmalar üzerinden tartışılmıştır. Dolayısıyla gelecekteki çalışmalara yol gösterme açısından önemli bir çalışma ortaya çıkmıştır.

6. Kaynaklar

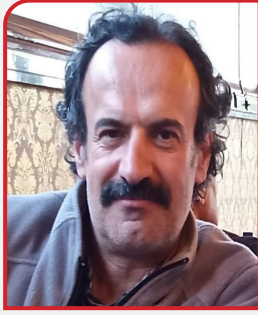
- [1] D. Torrieri, *Principles of Spread-Spectrum communication systems*. Springer, 2018.
- [2] V. V. D. Knaap, M. Mouri, ve P. Zwamborn, “MSG-SET-183 – Detection and Characterization of a UAS RF FHSS Communication Link,” *NATO S&T Organization*, 2021.
- [3] B. Kaplan, I. Kahraman, A. Gocin, H. A. Cirpan, ve A. R. Ekti, “Measurement based FHSS-type drone controller detection at 2.4GHz: An STFT approach,” *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020.
- [4] P. Flak, “Drone detection sensor with continuous 2.4 ghz ISM band coverage based on cost-effective SDR platform,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114574–114586, 2021.
- [5] D. Mototolea, R. Youssef, E. Radoi, ve I. Nicolaescu, “Non-cooperative low-complexity detection approach for FHSS-GFSK drone control signals,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 401–412, 2020.

- [6] J. Ye, "A new frequency hopping signal detection of civil UAV based on improved K-means clustering algorithm," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 53190–53204, 2021.
- [7] S. Basak, S. Rajendran, S. Pollin, ve B. Scheers, "Combined RF-based drone detection and classification," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 8, no. 1, pp. 111–120, 2022.
- [8] M. T. Khan, A. Z. Sha'ameri, ve M. M. Zabidi, "Classification of FHSS signals in a multi-signal environment by Artificial Neural Network," *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 11, no. 1, pp. 775–789, 2022.
- [9] Z. Deng, ve J. Lei, "Spectrogram-based frequency hopping signal detection in a complex electromagnetic environment," *2022 7th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, 2022.
- [10] Z. Chen, "Unlocking signal processing with image detection: A frequency hopping detection scheme for complex EMI environments using STFT and CenterNet," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 46004–46014, 2023.
- [11] H. Zhu, H. Lv, Z. Dai, M. Tan, ve W. Song, "A novel parameter estimation method of fhss signal with low snr," *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 18, no. 6, pp. 891–900, 2023.
- [12] L. Zhi, Z. Jianhua, C. Hao, G. Xu, ve L. Jian, "Parameter estimation of frequency hopping signals based on analogue information converter," *IET Communications*, vol. 13, no. 13, pp. 1886–1892, 2019.
- [13] Y. He, Y. Su, Y. Chen, Y. Yu, ve X. Yang, "Double window spectrogram difference method: A blind estimation of frequency-hopping signal for battlefield communication environment," *2018 24th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2018.
- [14] Md. Z. Hasan, D. J. Couto, M. A. Abdel-Malek, ve J. H. Reed, "Frequency hopping signal detection in low signal-to-noise ratio regimes," *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2023.
- [15] A. Kanaa ve A. Z. Sha'ameri, "A robust parameter estimation of FHSS signals using time–frequency analysis in a non-cooperative environment," *Physical Communication*, vol. 26, pp. 9–20, 2018.
- [16] K.-G. Lee ve S.-J. Oh, "Detection of Frequency-Hopping signals with deep learning," *IEEE Communications Letters*, vol. 24(5), pp. 1042–1046, 2020.
- [17] C. Li, Y. Chen, ve Z. Zhao, "Frequency hopping signal detection based on optimized generalized S transform and ResNet," *Mathematical Biosciences and Engineering*, vol. 20, no. 7, pp. 12843–12863, 2023.
- [18] Y. Wang, H. Liao, S. Yuan, ve N. Liu, "A Learning-Based signal parameter extraction approach for Multi-Source Frequency-Hopping signal sorting," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 30, pp. 1162–1166, 2023.
- [19] Z. Wang, B. Zhang, Z. Zhu, Z. Wang, ve K. Gong, "Signal sorting algorithm of hybrid frequency hopping network station based on neural network," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 35924–35931, 2021.
- [20] D. Zhang, Y. Shang, X. Liang, ve J. Lin, "Efficient blind estimation of parameters for multiple frequency hopping signals via single channel," *2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, 2022.
- [21] K. Lu, Z. Qian, M. Wang, ve D. Wang, "Few-shot learning based blind parameter estimation for multiple frequency-hopping signals," *Multidimensional Systems and Signal Processing*, vol. 34, no. 1, pp. 271–289, 2023.
- [22] Y. Li, F. Wang, G. Fan, Y. Liu, ve Y. Zhang, "A fast estimation algorithm for parameters of multiple Frequency-Hopping signals based on compressed spectrum sensing and maximum likelihood," *Electronics*, vol. 12, no. 8, p. 1808, 2023.
- [23] Y. Wang, "Detection and parameter estimation of frequency hopping signal based on the deep neural network," *International Journal of Electronics*, vol. 109, no. 3, pp. 520–536, 2021.
- [24] J. Wan, D. Zhang, W. Xu, ve Q. Guo, "Parameter estimation of multi frequency hopping signals based on space-time-frequency distribution," *Symmetry*, vol. 11, no. 5, p. 648, May 2019.
- [25] M. Lin, Y. Tian, X. Zhang, ve Y. Huang, "Parameter estimation of Frequency-Hopping signal in UCA based on deep learning and spatial Time–Frequency distribution," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 7, pp. 7460–7474, 2023.

Özgeçmişler



Mutlu Aydın, Elektrik-Elektronik Mühendisliği lisans derecesini 2020 yılında Türk Hava Kurumu Üniversitesi'nde tamamladı. 2020 yılından itibaren TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN'de Radyo Frekans (RF) elektronik harp sistem ve algoritma geliştirme alanında çalışmaktadır. Muhabere ve radar elektronik harp sistemleri ve algoritmaların tasarımı, laboratuvar ve açık saha ölçüm, analiz, test ve doğrulamasının gerçekleştirilmesi konularında tecrübe sahibidir. Özellikle yazılım tanımlı radyolar (Software Defined Radio) ve açık kaynak GNU Radio kütüphanesi üzerine odaklanmaktadır. Şu anda, Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde frekans atlamalı sinyallerin tespiti konusunda yüksek lisans çalışmalarına devam etmektedir.



Ali Kara, 2002 yılında Hacettepe Üniversitesi'nden Elektrik-Elektronik Mühendisliği alanında Doktor unvanını aldı. 1999-2000 yılları arasında Symbol Technologies/Motorola ile ortak sanayi projesinde New York Üniversitesi, Brooklyn kampüsünde araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2000 yılında Atılım Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne katıldı ve çeşitli görevlerde bulundu. 2021 yılına kadar Atılım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü müdürü olarak görev yaptı. Aynı zamanda 2006-2012 yılları arasında TÜBİTAK BİLGEM'de danışman ve baş araştırmacı olarak çalışarak ulusal savunma ve güvenlik projelerine katkıda bulundu. Devlet ve sanayi tarafından finanse edilen birçok projede aktif olarak yer aldı. Genel olarak elektromanyetik dalgalar, kablosuz haberleşme, radar ve elektronik harp sistemleri ile mühendislik eğitimi alanlarında birçok araştırma projesine liderlik etti. Bir eğitim projesinde, Avrupa üniversitelerinden araştırmacıların yer aldığı Sanal ve Uzak Laboratuvar (VRL) platformu (ERRL- Avrupa Uzak Radyo Laboratuvarı) geliştirilmesine öncülük etti. Bu platform Avrupa Komisyonu tarafından finanse edildi. Dr. Kara'nın beş adet patent tescili bulunmaktadır. Son yıllarda yapay zekanın (ML/DL) uzmanlık alanlarındaki sorunları çözmek için kullanımına odaklanmaktadır.