

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DÜŞÜK MALİYETLİ ALICILARDA RF PARMAK İZİ OLUŞTURMA
YÖNTEMİNE DAYALI KABLOSUZ VERİCİLERİN KİMLİK TESPİTİ**

Abdullah ASLAN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2020**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK MALİYETLİ ALICILARDA RF PARMAK İZİ OLUŞTURMA YÖNTEMİNE DAYALI KABLOSUZ VERİCİLERİN KİMLİK TESPİTİ

Abdullah ASLAN

Ankara Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk TAŞCIOĞLU

Kablosuz yerel haberleşme ağlarında kablosuz vericilerin tanımlanması ve yetkilendirilmesi, siber saldırıların ve yetkisiz kullanıcı girişlerinin önlenmesi açısından önemlidir. Geleneksel güvenlik katmanlarında kablosuz vericiler, radyo sinyallerindeki sayısal kimlik bilgilerinin elde edilmesi yoluyla tanımlanmaktadır. Fakat sayısal kimlik bilgilerinin taklit edilebilmesinden dolayı bir vericinin kopyalanmış olduğu, mevcut güvenlik algoritmaları tarafından ayırt edilemez. Kablosuz vericilerin sinyal üretici devre katmanında yer alan analog-sayısal çeviriciler (ADC), filtreler, frekans karıştırıcılar ve kuvvetlendiriciler birbirinden farklı ve taklit edilebilmesi oldukça zor olan donanım kusurlarına sahiptir. Dolayısıyla her bir verici cihaz, iletim sinyallerine yansıyan bu kusurlar temel alınarak üretilecek bir RF parmak izi yardımıyla ayırt edilebilir. Mevcut RF parmak izlerinin çoğu yüksek maliyetli RF alıcılar ile geliştirilmiş ve bu şartlardaki başarımları literatürde yer almıştır. Ancak, bu cihazlarda geliştirilen yöntemlerin pratikte yaygın olarak kullanılması için düşük sistem maliyeti ve sistem esnekliği açılarından değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu tez kapsamında, düşük maliyetli alıcılarla toplanan geçici rejim sinyallerinden RF parmak izleri üretilmiş ve bu yolla verici kimlikleri tespit edilmiştir. RF parmak izleri geçici rejim sinyallerinin anlık genlik özniteliklerinden elde edilmiştir. Mevcut bazı çalışmalarda, düşük maliyetli alıcıların geçici rejim sinyalinin RF parmak izi çıkarımında kullanılmasının uygun olmayacağı deneysel ya da benzetim yapılmaksızın ifade edilmiştir. Tezde elde edilen deneysel sonuçlar bu iddianın geçersiz olduğunu ortaya koyduğundan tez çalışması özgün ve literatüre katkı sağlayacak niteliktedir.

Geçici rejim sinyalleri, iletim sinyallerinin başında yer aldığı için bu sinyalleri kullanan yöntemler, öntaki ve veri gibi sinyal kısımlarını kullanan yöntemlere kıyasla daha düşük tepki gecikmesine sahiptir. Ayrıca, öntaki gibi belirli bazı standartlarda yer alan sinyal bölgelerinin aksine, tüm vericiler tarafından üretilmektedir. Tez kapsamında geçici rejim sinyallerine dayalı RF parmak izi çıkarımının ilk kez düşük maliyetli bir alıcıyla gerçek bir sistemde sınanmış olması, bu yöntemin düşük tepki süresinin kritik olduğu uygulamalarda kullanılabilmesi açısından önemlidir.

Ocak 2020, 56 sayfa

Anahtar Kelimeler: RF parmak izi oluşturma, RF parmak izi sınıflandırma, geçici rejim sinyali algılama, yazılım tanımlı radyo, düşük maliyetli alıcılar, kablosuz cihaz tanımlama, kablosuz ağ güvenliği, fiziksel katman güvenliği.

ABSTRACT

Master Thesis

IDENTIFICATION OF WIRELESS TRANSMITTERS BASED ON RF FINGERPRINTING IN LOW-END RECEIVERS

Abdullah ASLAN

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Selçuk TAŞCIOĞLU

Identifying and authorizing wireless transmitters in wireless local communication networks is important to prevent cyber-attacks and unauthorized user access. In conventional security layers, wireless transmitters are identified by obtaining digital identification information in radio signals. However, it is indistinguishable by existing security algorithms that a transmitter has been copied due to the ability to emulate digital identification information. Analog-digital converters (ADC), filters, frequency mixers and amplifiers used in the signal generator circuit layer of wireless transmitters have hardware imperfections that are very different and difficult to emulate. Thus, each transmitting device can be identified using RF fingerprints that are generated based on the characteristics in the transmission signals induced by these imperfections. Many of the existing RF fingerprints have been developed with high-end RF receivers and the performance results in these conditions have been reported in the literature. However, the methods developed in these devices should be evaluated in terms of low system cost and system flexibility in order to be widely used in practice.

In this thesis, RF fingerprints were obtained from transient signals collected with low cost receivers and transmitters were identified in this way. RF fingerprints were obtained from the instantaneous amplitude characteristics of transient signals. In the literature, it has been claimed that the use of the transient signals for RF fingerprinting in low-cost receivers would be inappropriate without providing any experimental or simulation results. Since the experimental results obtained in the thesis reveal that this claim is invalid, the thesis is novel and will contribute to the literature.

Since the transients are at the start of the transmission signals, the methods that use these signals have a lower latency compared to methods using signal parts such as the preamble and data. Moreover, transients are produced by all type of transmitters. On the other hand, preamble signals are used for certain type of standards. In the thesis, RF fingerprint extraction based on transients is tested on a real system using a low-cost receiver for the first time. This work is important in order to use low cost RF fingerprinting methods in real applications where low latency is critical.

January 2020, 56 pages

Key Words: RF fingerprinting, RF fingerprint classification, transient detection, software defined radio (SDR), low-end receivers, wireless device identification, wireless network security, physical layer security.

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini, tecrübelerini ve değerli zamanını bana ayırarak her fırsatta yardımcı olan tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Selçuk TAŞCIOĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu zorlu çalışma süresince hem teknik donanım hem de bilgi ve tecrübelerini aktaran Dr. Öğr. Üyesi Memduh KÖSE'ye ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SOYSAL'a teşekkürlerimi sunarım. Tez kapsamında Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde bulunan Kestirim, İzleme ve Füzyon, İstatistiksel Sinyal İşleme ile Sinyal İşleme ve Haberleşme Araştırma Laboratuvarları teçhizatlarının kullanımına olanak sağlayan öğretim üyelerinden Prof. Dr. Murat EFE ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SOYSAL'a teşekkür ederim. Ayrıca, tüm eğitim hayatım boyunca bana destek veren ve anlayış göstererek yanımda olan değerli eşime sonsuz teşekkür ederim.

Abdullah ASLAN
Ankara, Ocak 2020

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| TEZ ONAY SAYFASI | |
| ETİK..... | i |
| ÖZET..... | ii |
| ABSTRACT | iii |
| ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR..... | iv |
| KISALTMALAR DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | vii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | viii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Fiziksel Katman Güvenliği | 2 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER..... | 7 |
| 2.1 Bayes Basamak Algılayıcı | 7 |
| 2.2 Bayes Rampa Algılayıcı | 8 |
| 2.3 Anlık Genlik Öznitelikleri | 9 |
| 2.4 PNN Sınıflandırıcı..... | 11 |
| 2.5 Sayısal Alıcı-Vericiler | 13 |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMA | 18 |
| 3.1 RF Parmak İzi Çıkarma Sistemi | 18 |
| 3.2 Yazılım Tanımlı Radyo (Software Defined Radio-SDR) | 19 |
| 3.2.1 Analog Devices AD-FMCOMMS3-EBZ geliştirme kartı..... | 20 |
| 3.3 FPGA Geliştirme Kartı..... | 22 |
| 3.4 Verici Sinyallerinin Toplanması..... | 23 |
| 4. RF PARMAK İZİ OLUŞTURMA İŞLEMİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER | 28 |
| 4.1 Geçici Rejim Sinyalinin Elde Edilmesi..... | 28 |
| 4.2 Geçici Rejim ve Öncül Sinyal Bölgelerinin Kıyaslanması | 30 |
| 4.3 Sinyal Özniteliklerinin Elde Edilmesi | 31 |
| 4.4 Sınıflandırma Yöntemi | 33 |
| 5. BULGULAR..... | 34 |
| 5.1 Toplanan Sinyallerin SNR Seviyeleri | 34 |
| 5.2 Verici Sınıflandırma Başarımı..... | 35 |
| 5.3 Benzer Bir Çalışma ile Kıyaslama..... | 41 |
| 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME | 44 |
| KAYNAKLAR | 47 |
| EKLER..... | 52 |
| EK 1 Bayes Rampa ve Basamak Algılayıcıların Matris Formundaki Eşitlikleri ... | 53 |
| EK 2 Bazı Türkçe Terimlerin İngilizce Karşılıkları..... | 55 |
| ÖZGEÇMİŞ | 56 |

KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|-------|---|
| CM | Confusion Matrix (Hata Matrisi) |
| CUSUM | CUMulative SUM (Birikimli Toplam) |
| ESN | Electronic Serial Number (Elektronik Seri Numarası) |
| MIN | Mobile Identification Number (Mobil Kimlik Numarası) |
| IF | Intermediate Frequency (Ara Frekans) |
| IoT | Internet of Things (Nesnelerin İnterneti) |
| PNN | Probabilistic Neural Networks (Olasılıksal Sinir Ağları) |
| RF | Radio Frequency (Radyo Frekansı) |
| SNR | Signal-to-Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı) |
| SDR | Software Defined Radio (Yazılım Tanımlı Radyo) |
| VHF | Very High Frequency (Çok Yüksek Frekans) |
| WiFi | Wireless Fidelity |
| WLAN | Wireless Local Area Networks (Kablosuz Yerel Alan Ağları) |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1 Gauss gürültüsü eklenmiş basamak formundaki sinyal (solda) ve Bayes basamak algılayıcı tarafından oluşturulan değişim noktasının konumunu gösteren sonsal olasılık yoğunluğu (sağda) | 8 |
| Şekil 2.2 Gauss gürültüsü eklenmiş rampa formundaki sinyal (solda) ve Bayes rampa algılayıcı tarafından oluşturulan değişim noktasının konumunu gösteren sonsal olasılık yoğunluğu (sağda) | 9 |
| Şekil 2.3 $\cos\omega_0 t$ sinyalinin analitik formu ve Hilbert dönüşümü (Lyons 2004) | 10 |
| Şekil 2.4 PNN ağ yapısı (Safavian, 2005)..... | 12 |
| Şekil 2.5 Sayısal bir radyo alıcı-vericinin genel yapısı (Kalivas, 2009)..... | 13 |
| Şekil 2.6 Geleneksel ara frekanslı sayısal alıcı (Kalivas, 2009)..... | 14 |
| Şekil 2.7 Geleneksel ara frekanslı verici (Rudell, 1999) | 16 |
| Şekil 3.1 RF Parmak İzi Çıkarma Sistemi Blok Diyagramı..... | 18 |
| Şekil 3.2 YTR referans blok şeması (Mitola 2000)..... | 20 |
| Şekil 3.3 FMCOMMS3 YTR kartının (sağda) ve FPGA içinde sentezlenmiş sinyal toplama devresinin (sağda) fonksiyonel blok şeması (Analog Devices 2014) | 21 |
| Şekil 3.4 AD-FMCOMMS-EBZ geliştirme kartının üstten (solda) ve alttan (sağda) görünümü (Analog Devices 2014) | 21 |
| Şekil 3.5 Zynq7000 tümdevresinin blok şeması (sağda) ve ZedBoard geliştirme kartının fiziksel görünümü..... | 23 |
| Şekil 3.6 Sinyal toplama düzeneğinin blok şeması | 24 |
| Şekil 3.7 Deney düzeneği..... | 24 |
| Şekil 3.8 Altı farklı vericiden yakalanan sinyaller (devam)..... | 26 |
| Şekil 3.9 IEEE 802.11b paket yapısı | 26 |
| Şekil 4.1 Geçici rejim sinyali gücü (IEEE Std. 802.11 2012)..... | 28 |
| Şekil 4.2 Bayes basamak algılayıcı tarafından geçici rejim sinyalinin başlangıç noktasının algılanması | 29 |
| Şekil 4.3 Verici sinyalindeki geçici rejim (üstte) ve öncül (altta) sinyal bölgelerinin (kırmızı renkli) görünümü | 30 |
| Şekil 4.4 Geçici rejim sinyallerine ait anlık genlik öznitelikleri | 31 |
| Şekil 5.1 Sinyal toplama esnasında verici ve alıcı arasındaki mesafeler | 34 |
| Şekil 5.2 23dB ve 14dB ortalama SNR değerleri için eğitim vektörü sayısına göre doğru sınıflandırma oranı | 35 |
| Şekil 5.3 Ortalama 23dB ve 14dB SNR değerindeki verici sinyallerinden elde edilen öznitelik vektörlerinin sınıflandırma başarımı..... | 37 |
| Şekil 5.4 23dB ve 14dB SNR değeri için sınıflandırma başarımlarının kutu diyagramları..... | 37 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 1.1 23dB SNR seviyesi için hata matrisi | 40 |
| Çizelge 1.2 14dB SNR seviyesi için hata matrisi..... | 40 |
| Çizelge 1.3 S. U. Rehman (2014) doktora tezi çalışmasındaki çizelge 5.1’de yer alan 15dB SNR değeri için 6 adet vericinin düşük maliyetli alıcıda elde edilen Sınıflandırma başarımları | 42 |



1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme, 19. yüzyılın sonlarına doğru ilk defa ortaya çıkmış ve günümüze kadar geçen sürede kullanımı pek çok alanda hızlı bir şekilde artmıştır. Özellikle son 15 yılda, geliştirilen yeni teknolojiler ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi haberleşme ağı yaklaşımlarının etkisiyle kablosuz haberleşme sistemleri adeta günlük hayatın bir parçası haline gelmiştir. Örnek olarak askeri, havacılık, bireysel iletişim, akıllı araçlar, akıllı ev uygulamaları, akıllı sağlık sistemleri gibi alanlarda kablosuz haberleşme sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kablosuz haberleşme esnasında iletilen radyo dalgaları yetkisiz kullanıcılar tarafından da algılanabildiğinden, veri güvenliği önemli bir konudur. Genellikle birbirleri ile haberleşen kullanıcılar, olabilecek güvenlik ihlallerinden habersizlerdir. Yetkisiz kullanıcılar, yakalanan sinyalleri taklit ederek bir aldatma saldırısı başlatabilir ve mevcut haberleşmenin yönünü değiştirebilirler. Hatta diğer kullanıcı cihazlarına ait sayısal kimlik bilgilerini bu saldırılar yoluyla taklit edebilirler (Meyer, 2004). Örneğin, kablosuz cihazların yazılımında yer alan, arayüz donanımına ait ağ adresinin değiştirilebilir ya da kopyalanabilir olması, aldatma saldırılarına karşı zafiyet oluşturabilmektedir (Faria 2006). Benzer olarak, hücresel telefonlara ait elektronik seri numaralarının (ESN) ve mobil tanımlama numaralarının (MIN) kaydedildiği hafıza çipleri değiştirilerek hücresel telefona farklı bir kimlik kazandırılabilir (Nguyen 2011). Kablosuz cihazların kimlik bilgilerinin değiştirilebiliyor olmasından dolayı kullanıcıların haberleşme esnasında taklit edilmesi, bant genişliğinin ihlali ve servis dışı bırakılması gibi saldırılar gerçekleşebilmektedir.

Diğer yandan, kaynak kısıtlı IoT aygıtlarının giderek yaygınlaşması, bu aygıtlardaki haberleşme güvenliğinin önemini de arttırmaktadır. Bu tip aygıtlar için kaynak gereksinimi ve güç tüketimi açılarından daha verimli yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Ancak, bu sistemlerdeki güvenlik prosedürleri, cihaz kimliğinin belirlenmesinde temel olarak sayısal katmanda yer alan şifreleme (cryptographic) algoritmalarını kullanmakta ve mevcut araştırmalar genel olarak bu algoritmaların geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Şifreleme işleminde geçerli anahtarın elde

edilebilmesi için iki yönlü haberleşmenin gerekmesi, yetkisiz kullanıcıların anahtara erişimini mümkün kılabilir. Böyle bir durumda güvenlik anahtarı kopyalanabilmekte ve alıcılardaki güvenlik algoritmaları tarafından tanımlanan verici cihazın kopya bir anahtara sahip olup olmadığı ayırt edilemez hale gelmektedir. Ayrıca, şifreleme algoritmalarının işlem yükü ve iki yönlü haberleşme gereksinimi, batarya ile çalışan alıcı-vericilerde aktif çalışma süresini kısaltmaktadır (Nouchi, 2019).

1.1 Fiziksel Katman Güvenliği

Fiziksel katman güvenliği, vericilerin tanımlanması için analog iletim sinyallerindeki özniteliklerin elde edilmesine dayanan bir konudur (Üreten vd. 2007). Bu öznitelikler, kablosuz vericilerin üretimi esnasında, birbirinden farklı kusurlara sahip donanımların kullanılmasıyla ortaya çıkar. Bu özniteliklerin elde edilmesi temeline dayanan fiziksel katman güvenliği prosedürüne, RF parmak izi çıkarma adı verilir (Üreten vd. 2007, Danev 2010). RF parmak izinin çıkarılmasını sağlayan sözkonusu kusurların kaynağı genellikle sinyal üretici devre katmanında yer alan analog-sayısal çeviriciler (ADC), filtreler, frekans karıştırıcılar ve kuvvetlendiriciler olmaktadır (Reising vd. 2010).

Çoğu güvenlik teknolojilerinde olduğu gibi, RF parmak izi üretme işleminin de doğduğu alan askeri uygulamalar olmuştur. Örneğin, ilk RF parmak izi üretme sistemi, Vietnam savaşı esnasında düşman radarları ile dost radarlarını ayırt etmek için kullanılmıştır (Nansai Hu 2012). Geçen seneler içerisinde, araştırmacılar, ticari alanda kullanılan kablosuz vericilerin tanımlanması için kullanılabilecek RF parmak izi çıkarma teknikleri üzerinde çalışmışlardır (Zamora 2010).

RF parmak izi yaklaşımında vericide güvenlik amacıyla herhangi bir ek işlem yapılmamakta, hali hazırda veri iletimi için gönderilen sinyallerden parmak izleri çıkarılmaktadır. RF parmak izine dayalı güvenlik yaklaşımı, vericide ek kaynak gereksinimine neden olmadığından özellikle kaynak kısıtlı IoT vericilerin kimlik tespiti için potansiyel bir adaydır. Son yıllarda bu konuda yapılan çalışma sayısı oldukça artmıştır (Sharaf-Dabbagh ve Saad 2016, Xu vd. 2016, Baldini vd. 2017a, b, Baldini vd. 2018, Peng vd. 2018, Talbot vd. 2018, Köse vd. 2019, Nouchi 2019).

Geçmişteki araştırmaların büyük çoğunluğunda RF parmak izleri, yüksek örnekleme hızına sahip osiloskoplar, spektrum analizörler gibi yüksek maliyetli alıcılarda elde edilmiştir. Bu cihazların sinyal alıcı katmanları yüksek kalitede ve pahalı donanım birimlerinden meydana gelmektedir. Bu yapıdaki alıcılar, RF parmak izi üretmek için kullanılan sinyal öznitelikleri üzerinde oldukça düşük miktarda bozucu etkiye sahiptir ve dolayısıyla algılanan sinyalden daha fazla özgün veri elde edilebilir. Nitekim yapılan çalışmalarda %99 kesinliğe kadar varan başarı oranları elde edilmiştir (Zamora 2010, Rehman 2012, Rehman 2014a, Bertoncini 2012, Danev 2009).

Ancak, RF parmak izi üretme işleminin pratikte kullanılabilmesi için düşük sistem maliyeti ve sistem esnekliği açılarından değerlendirilmesi gerekmektedir. Örneğin yaygınlaşan kaynak kısıtlı IoT alıcı cihazlarda RF parmak izi tabanlı güvenlik yaklaşımının hayata geçirilebilmesi için, RF parmak izine dayalı güvenlik sisteminin düşük maliyetli alıcılarda uygulanması gereklidir. Bu nedenle RF parmak izi tabanlı kimlik belirleme yöntemlerin uygulanabilirliğinin artırılması için evrensellik, özgünlük, değişmezlik gibi ölçütlere sahip RF parmak izlerinin üretilebileceği düşük maliyetli sistemlerin tasarımı büyük önem taşımaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda düşük maliyetli alıcı etkisi de incelenmeye başlanmıştır. Ancak bu çalışmaların tamamında araştırmacılar kalıcı durum sinyal bölgesi üzerine yoğunlaşmışlardır (Rehman 2012, Rehman 2013, Rehman 2014a, b, Klueszka 2014, Lowder 2015, Stubbs 2014). Literatürdeki bazı çalışmalarda, düşük maliyetli alıcıların örnekleme frekansı düşük olduğundan, deneysel ya da benzetim yapılmaksızın geçici rejim sinyalinin RF parmak izi çıkarımı amacıyla kullanılmasının uygun olmayacağı ve geçici rejim sinyalinin süresi kısa olduğuna için çok yüksek örnekleme frekansı gereksinimi olacağı ifade edilmiştir (Kennedy 2008a, b, Rehman 2012). Bu konunun doğrudan ele alındığı tek çalışmada deneysel verilerin bilgisayar ortamında, örnekleme frekansı örnek seyreltme yoluyla azaltılarak (28MSamples/s) RF parmak izi oluşturma çalışmaları yapılmıştır (Taşcıoğlu vd. 2019). Yazarlar söz konusu çalışmada örnekleme frekansının, örnek seyreltme yoluyla düşürülmesi durumunda geçici rejim sinyallerine dayalı RF parmak izi sisteminin başarımının düşmeyeceğini göstermişlerdir. Bunun nedenini düzenleyici kurumların yayın kuralları gereği, radyo vericilerinin çıkışında bitişik kanallara girişimi önleyecek filtreler kullanılıyor olmasına bağlamışlardır. Bu filtreler, bant dışındaki sinyalleri çok yüksek

oranda bastırıldığı için bant dışındaki spektral bileşenlerin çok zayıf olduğu, bu nedenle pratikte bant genişliğinin 2,5 katı gibi bir örnekleme frekansının yeterli olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak, yazarlar gerçek bir sistem üzerinde deneysel olarak doğrudan düşük örnekleme frekansında sinyal toplanması durumunda elde edilen RF parmak izi başarımını incelememişler ve bunu gelecek çalışma konusu olarak belirlemişlerdir. Tez kapsamında bu konuda ilk kez deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiş, dolayısıyla daha önceki düşük maliyetli alıcı-vericiler ile gerçekleştirilen RF parmak izi çıkarma çalışmalarında kullanılan sinyal bölgelerinden farklı olarak geçici rejim sinyali kullanılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışma sürecinde vericiden farklı SNR seviyelerinde sinyaller toplamak için, geçmişteki benzer çalışmalarda (Rehman 2014b) yer alan yapay SNR oluşturma yöntemleri tercih edilmemiştir. Bunun yerine, verici ile alıcı arasındaki mesafe değiştirilerek her bir verici sinyalinin kestirilen SNR değeri hesaplanmış ve iki farklı SNR'a sahip sinyaller elde edilmiştir. Dolayısıyla tezde gerçekleştirilen deneysel çalışma gerçek çevresel koşullar altında yapılmıştır.

Tez çalışmasının özgün yönü ve önemi şöyle özetlenebilir:

- Geçici rejim sinyali, iletim sinyallerinin başında yer aldığı için öntakı ve veri gibi sinyal kısımlarını kullanan yöntemlere kıyasla daha düşük tepki gecikmesine sahiptir. Ayrıca, öntakı gibi belirli bazı standartlarda yer alan sinyal bölgelerinin aksine, tüm vericiler tarafından üretilmektedir. Tez kapsamında geçici rejim sinyallerine dayalı RF parmak izi çıkarımının *ilk kez* düşük maliyetli bir alıcıyla gerçek bir sistemde sınanmış olması, bu yöntemin özellikle akıllı araçlar ve akıllı sağlık sistemleri gibi düşük tepki süresinin kritik olduğu alanlarda kullanılabilmesinin önünü açması açısından önemlidir.
- Tezde düşük maliyetli alıcıların RF parmak izi başarımına etkisi, sinyal özneliklerindeki bozulma ve sınıflandırıcıdaki başarımı üzerinden değerlendirilmiştir. Mevcut parmak izi çıkarma yöntemlerinin düşük maliyetli alıcılarda doğrulanması yönünde yapılan çalışmalar, bu yöntemlerin pratikte kullanılabilirliğini göstermesi açısından önemlidir.
- Düşük maliyetli alıcılarda RF parmak izi çıkarmak için kullanımı planlanan FPGA tabanlı sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Vericilerden sinyal toplanması

esnasında, yakalanan her bir verici sinyali içerisindeki fiziksel cihaz (MAC) adresini çözecek bir yazılım platformu oluşturulmuş, bu sayede yakalanan her bir sinyal gönderildiği vericiye göre kaydedilmiştir. Dolayısıyla, mevcut çalışmalarda gibi yakın mesafeden kontrollü sinyal gönderip alma ya da RF izoleli bir ortam kullanmak suretiyle sinyal toplama işlemine ihtiyaç kalmamıştır.

Tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tez çalışmasının amaç ve kapsamı belirtilerek, konu hakkında yapılmış mevcut çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde, tez çalışmasında izlenen yöntemler hakkında kavramsal bilgiler sunulmuştur. Öncelikle, kablosuz verici sinyallerinin algılanmasında kullanılan Bayes tabanlı basamak ve rampa algılayıcılar anlatılmıştır. Ayrıca, RF parmak izi çıkarımında yaygın olarak kullanılan anlık genlik karakteristiklerinin elde edilmesinden bahsedilmiştir. Devamında RF parmak izlerini sınıflandırmada kullanılan olasılıksal sinir ağları (Probabilistic Neural Networks -PNN-) sınıflandırıcısı ile ilgili bilgiler verilmiştir. Son olarak, sayısal alıcı vericilerin çeşitleri ve çalışma prensipleri anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, RF parmak izi çıkarma sisteminin blok şeması verilerek sistem tanımı yapılmıştır. Her aşamanın tez çalışmasındaki karşılığı özetlenmiştir. Daha sonra, düşük maliyetli alıcı olarak kullanılan yazılım tanımlı radyo (YTR) alıcısı hakkında genel bilgi verilerek, bu amaçla kullanılan geliştirme kartına ait teknik özelliklere yer verilmiştir. YTR alıcısının çalışmasını sağlayan ve PC ile arasında gerekli veri dönüşümünü sağlayan FPGA kartı hakkında temel bilgi ve bazı teknik özelliklere değinilmiştir. Son olarak, deneysel çalışmada kurulan düzenek ile ilgili bilgilere yer verilmiş, verici sinyallerinin toplanması için oluşturulan senaryo anlatılarak yakalanan bazı verici sinyalleri örneklendirilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, ilk olarak geçici rejim sinyalinin ilgili standartta yer alan tanımı ve kısıtlarından bahsedilmiş, yakalanan verici sinyallerinden elde edilmesi için uygulanan yöntem anlatılmıştır. Sonrasında, vericilere ait elde edilen öznitelikler örneklendirilmiştir. Bölümün son başlığında, elde edilen özniteliklerin sınıflandırılması için kullanılan eğitim-test vektörlerinin belirlenmesi için uygulanan yöntem anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, deneysel çalışma sonucunda elde edilen bulgular çeşitli başarıml ölçütleri ile sunulmuş, sınıflandırma başarımlı ve sinyal gücünün başarımla etkisi değerlendirilmiştir.



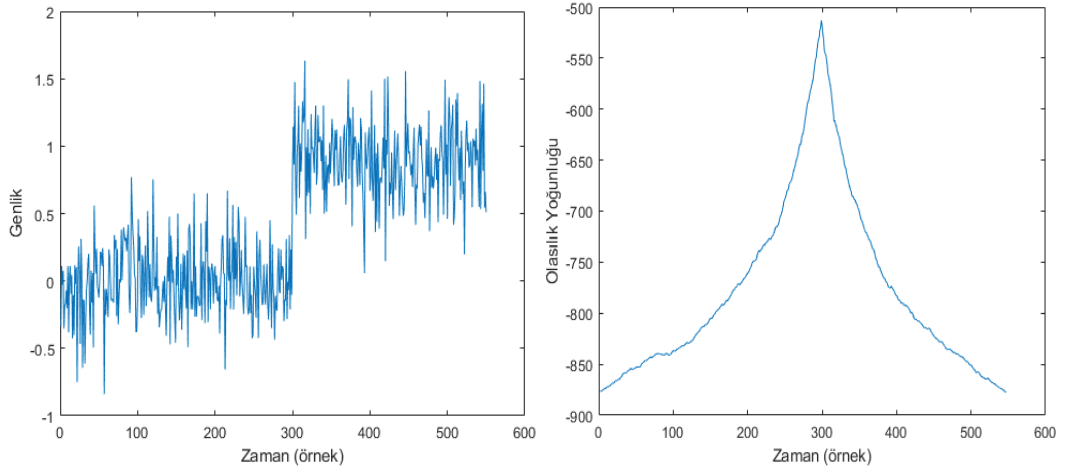
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Bayes Basamak Algılayıcı

Veri analizinin pek çok alanındaki temel problem, veri içindeki değişim noktalarının yerini tespit etmektir. Örneğin sağlık alanında hastalara verilen ilaç seviyelerinin değişiminin, araçlardaki yakıt basıncının ani değişiminin ya da bir görüntünün kenarlarının tespiti pratikte bu değişim problemlerine dair örneklerdir. Bu problemlerin çözümü için O'Ruanaidh ve Fitzgerald (1996) tarafından, tek boyutlu (zaman serileri) veriler için değişim noktalarının bölgelerini tespit etmek maksadıyla Bayes tabanlı teknikler geliştirilmiştir. Bu teknikler, değişim noktası bölgelerinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarını kullanarak sinyal serileri içerisindeki konumlarını elde etmektedir. Değişimin konumu, Gauss bir süreç içerisinde ele alınmakta ve genelleştirilmiş parçalı doğrusal modelin matris formülasyonu olarak ifade edilmektedir. Genelleştirilmiş parçalı doğrusal model formülasyonu, daha karmaşık veri modellerinde çoklu değişim noktalarının tanımlanması için analizin kapsamını kolaylıkla genişletme imkanı sunar. Bu analiz kapsamına parçalı polinom modellenmiş veriler ve özbağlanımlı (AR) veriler de dahildir (O'Ruanaidh ve Fitzgerald 1996).

Genelleştirilmiş doğrusal parçalı model için matris hesaplaması yüksek maliyetli olabilmektedir. Özellikle uzun veri serileri için bu durum ortaya çıkmaktadır (O'Ruanaidh ve Fitzgerald 1996). Fakat yazarların yaptığı bu çalışmanın tarihinden bugüne kadar geçen sürede meydana gelen teknolojik gelişmeler ile hesap yükü oldukça azalmıştır. Tez çalışmasında, yakalanan sinyallerden geçici rejim sinyalini elde etmek için basamak algılayıcısı kullanılmıştır. Basamak algılayıcısının seçiminde, geçici rejim sinyali formunun basamak yapısına daha uygun olması etkili olmuştur.

Şekil 2.1'de gürültülü basamak formunda bir sinyal ve basamak algılayıcısının değişim noktasını sonsal olasılık yoğunluğu olarak hesapladığı grafik görülmektedir. EK 1'de basamak algılayıcısının genelleştirilmiş matris formundaki eşitlikleri verilmiştir.

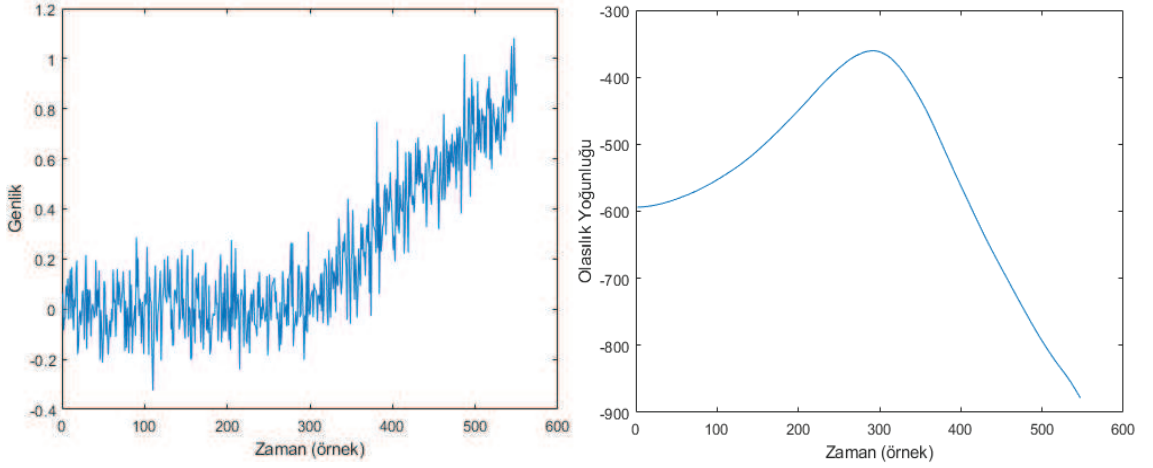


Şekil 2.1 Gauss gürültüsü eklenmiş basamak formundaki sinyal (solda) ve Bayes basamak algılayıcı tarafından oluşturulan değişim noktasının konumunu gösteren sonsal olasılık yoğunluğu (sağda)

2.2 Bayes Rampa Algılayıcı

Bayes basamak ve rampa algılayıcı Üreten ve Serinken (2005) tarafından WiFi sinyallerine uygulanarak her iki algılayıcının başarımları değerlendirilmiş ve kıyaslama yapılmıştır. Çalışmada algılanan WiFi sinyallerinin geçici rejim sinyalinin yapısına bağlı olarak, rampa algılayıcının basamak algılayıcıdan daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Köse vd. (2015b) araştırmasında rampa algılayıcının SNR değerine karşı başarımını analiz etmiş, SNR değerinin 10dB ve üzeri olduğu durumlarda başarımının yüksek olduğunu göstermişlerdir. Bayes rampa algılayıcıya ait eşitlikler, basamak algılayıcının eşitliklerindeki sinyal modelinin ve G matrisinin değiştirilmesi yoluyla kolay bir şekilde elde edilebilmektedir (Üreten vd. 2005). Bu eşitlikler EK 1’de verilmiştir.

Şekil 2.2’de Gauss gürültüsü eklenmiş rampa formundaki sinyal (solda) ve Bayes rampa algılayıcı tarafından değişim noktasının konumu için hesaplanan sonsal yoğunluğu grafiği (sağda) verilmiştir.



Şekil 2.2 Gauss gürültüsü eklenmiş rampa formundaki sinyal (solda) ve Bayes rampa algılayıcı tarafından oluşturulan değişim noktasının konumunu gösteren sonsal olasılık yoğunluğu (sağda)

2.3 Anlık Genlik Öznitelikleri

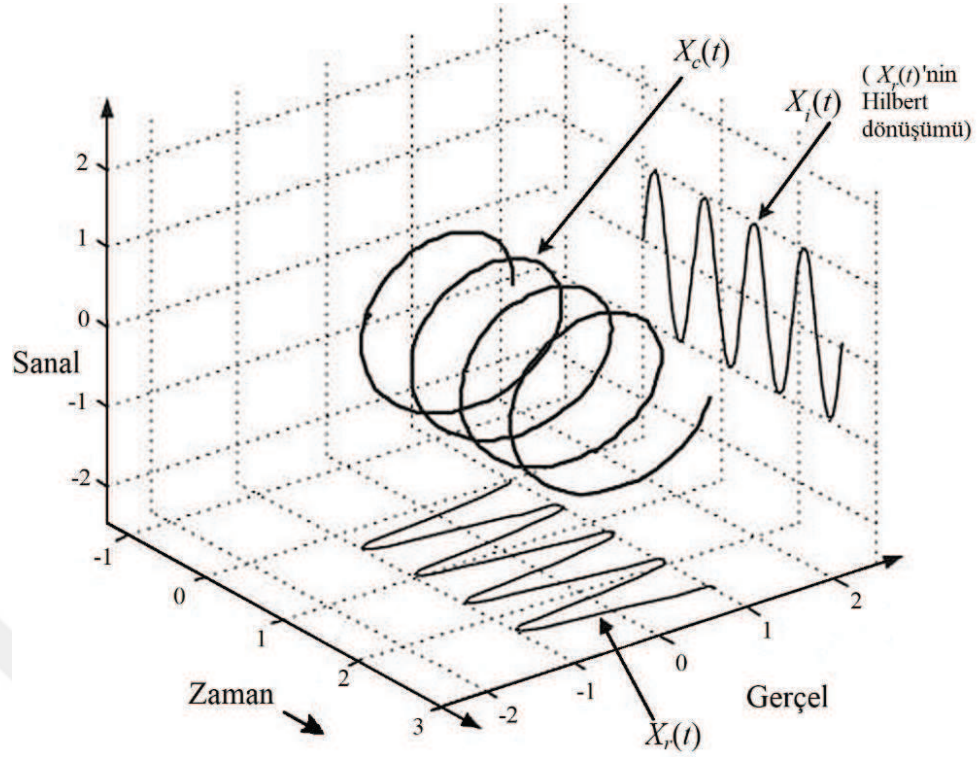
Genlik tabanlı öznitelikler kapsamında değerlendirilen ve RF parmak izi çıkarmak amacıyla sinyalin ilgili bölgesinin genlik değerlerinden oluşan özniteliklerdir. Genellikle analitik bir sinyalin genlik değeri olarak ifade edilmektedir. Analitik bir $x_c(t)$ sinyali aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$x_c(t) = x_r(t) + jx_i(t) \quad (2.1)$$

Burada x_i , $x_r(t)$ orijinal gerçek giriş sinyalinin Hilbert dönüşümüdür. Eğer, $x_r(t) = \cos(\omega_0 t)$ olacak şekilde zamana bağlı büyüklüğü değişen bir sinyal ise $x_c(t)$ sinyali, Euler açılımı kullanılarak aşağıdaki eşitlikle tanımlanır:

$$x_c(t) = \cos(\omega_0 t) + j \sin(\omega_0 t) = e^{j\omega_0 t} \quad (2.2)$$

Şekil 2.3'te $\cos(\omega_0 t)$ sinyali, Hilbert dönüşümü ile görülmektedir. Koyu renkli sinyal $x_c(t)$ analitik sinyalidir.



Şekil 2.3 $\cos(\omega_0 t)$ sinyalinin analitik formu ve Hilbert dönüşümü (Lyons 2004)

Anlık genlik (zarfı) olan $E(t)$ aşağıdaki eşitlikle elde edilir (Lyons 2004):

$$E(t) = |x_c(t)| = \sqrt{x_r^2(t) + x_i^2(t)} \quad (2.3)$$

Anlık genlik özniteliklerinden elde edilen RF parmak izleri genellikle yüksek boyutludur. Bu durum doğal olarak hesaplama yükünü arttırmaktadır. Ayrıca, diğer sinyal özniteliklerine göre gürültüden daha fazla etkilenirler. Buna karşın elde edilmeleri nispeten kolay olduğundan pek çok çalışmada kullanılmıştır (Üreten ve Serinken 2007, Köse ve Telatar 2010, Yuan ve Hu 2010, Yuan vd. 2015, Köse vd. 2019). Ayrıca, polinom uydurma yöntemi ile birleştirilerek yüksek başarımlı sonuçlarının elde edildiği çalışmalar da mevcuttur (Zhao vd. 2013, Taşcıoğlu vd. 2018).

Yukarıda anlatılan Hilbert dönüşümü kullanılarak analitik sinyallerin ve anlık genlik değerlerinin elde edilmesi genellikle tek kanaldan alınan gerçekte değerli ölçümler için kullanılır. Tezde, sinyallerin yakalanmasında kullanılan YTR alıcısı sinyallere ait I/Q

bileşenlerini doğrudan ürettiğinden, yakalanan sinyal verileri karmaşık sayı formunda elde edilmiştir. Bu nedenle analitik sinyal elde edilmesine gerek kalmadan doğrudan eşitlik 2.3 kullanılarak sinyallerin anlık genlik bilgileri elde edilmiştir.

2.4 PNN Sınıflandırıcı

İlk defa 1966 yılında D. F. Specht tarafından yayınlanan olasılıksal sinir ağları (PNN) sınıflandırıcı, ileri beslemeli bir sinir ağı modeli olup sınıflandırma ve örüntü tanıma problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. PNN algoritmasında her sınıfa ait olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF), Parzen penceresi ve parametrik olmayan bir fonksiyon tarafından hesaplanır. Her bir sınıfa ait olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılarak yeni giren bir test verisinin her bir sınıfa ait olma olasılığı kestirilir. Daha sonra test verisi, Bayes kuralı kullanılarak en yüksek sonsal olasılık değerinin üretildiği sınıfa atanır. Bu yöntem ile sınıflandıramama ihtimali en aza çekilmektedir. PNN sınıflandırıcı, Bayes ağı ve çekirdek Fischer ayrımsayıcı analizi olarak anılan istatistiksel bir algoritmadan türetilmiştir (Specht, 1990, Masters 1993).

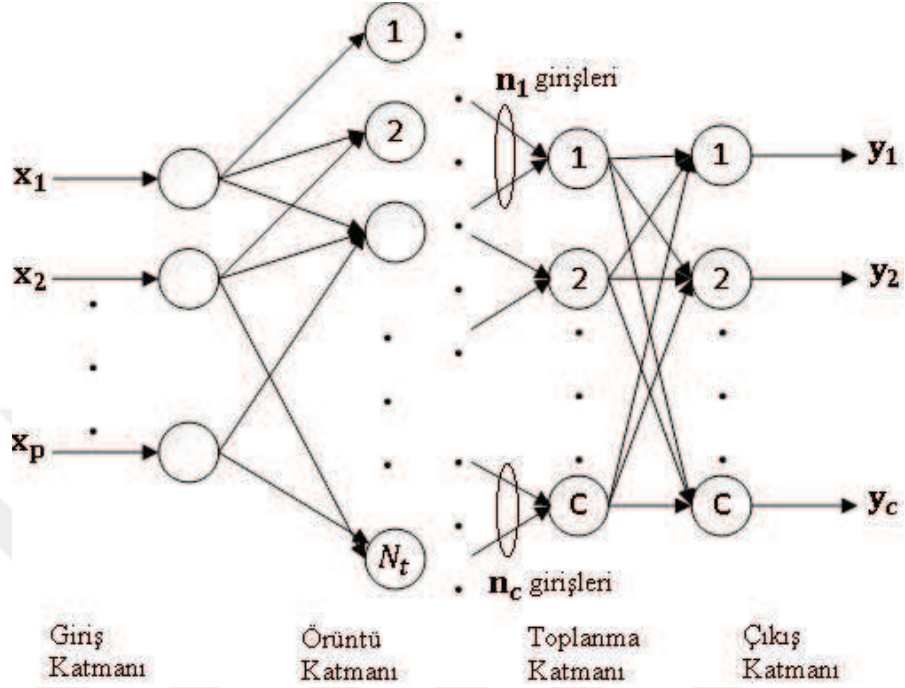
PNN sınıflandırıcı dört adet katmandan oluşmaktadır. Bunlar: giriş katmanı, örüntü katmanı, toplanma katmanı ve çıkış katmanıdır. Şekil 2.4'te PNN'nin ağ yapısı görülmektedir.

Giriş katmanı, girilen veri vektörünün boyutu p adet düğüm içerir. Bu yüzden giriş vektörü $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ ağa sokulduğunda \mathbf{x} vektörünün her bir bileşeni giriş katmanındaki ilgili düğüme atanır.

Örüntü katmanı, eğitim için kullanılan vektör sayısı kadar sinir hücresine sahiptir. k . sınıf için kullanılan eğitim vektörü sayısı n_k ve toplam sınıf sayısı C olsun. Bu durumda aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$\sum_{i=1}^C n_i = N_t \quad (2.4)$$

Burada N_t toplam eğitim vektörü sayısını ifade eder. Dolayısıyla PNN örüntü katmanı N_t adet sinir hücresine sahiptir.



Şekil 2.4 PNN ağ yapısı (Safavian, 2005)

Örüntü katmandaki her bir sinir hücresinin iki önemli fonksiyonu vardır. İlk olarak giriş vektörü ile ilgili eğitim vektörü arasındaki Öklid uzaklığını hesaplar. Sonra, elde edilen sonucu ölçekleyerek aşağıdaki doğrusal olmayan fonksiyona sokar.

$$g_k(\mathbf{x}) = \frac{1}{n_k(\sigma_1\sigma_2 \dots \sigma_p)(\sqrt{2\pi})^p} \sum_{r=1}^{n_k} \exp\left(-\sum_{i=1}^p \frac{(x_i - x_{r,i})^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (2.5)$$

Burada, $g_k(\mathbf{x})$, \mathbf{x} vektörü için kestirilen PDF, σ ise standart sapmadır. Örüntü katmanında her bir eğitim vektörü için $\exp\left(-\sum_{i=1}^p \frac{(x_i - x_{r,i})^2}{2\sigma_i^2}\right)$ ifadesi hesaplanır.

Toplanma katmanı, C adet sınıf kadar sinir hücresi içerir. Her hücre giriş verisini, örüntü katmanında yer alan ve kendi eğitim vektörlerini içeren ilgili sınıfın sinir hücrelerinden alır. Örneğin, toplanma katmanındaki 2. sinir hücresi, örüntü katmanında n_2 adet vektör

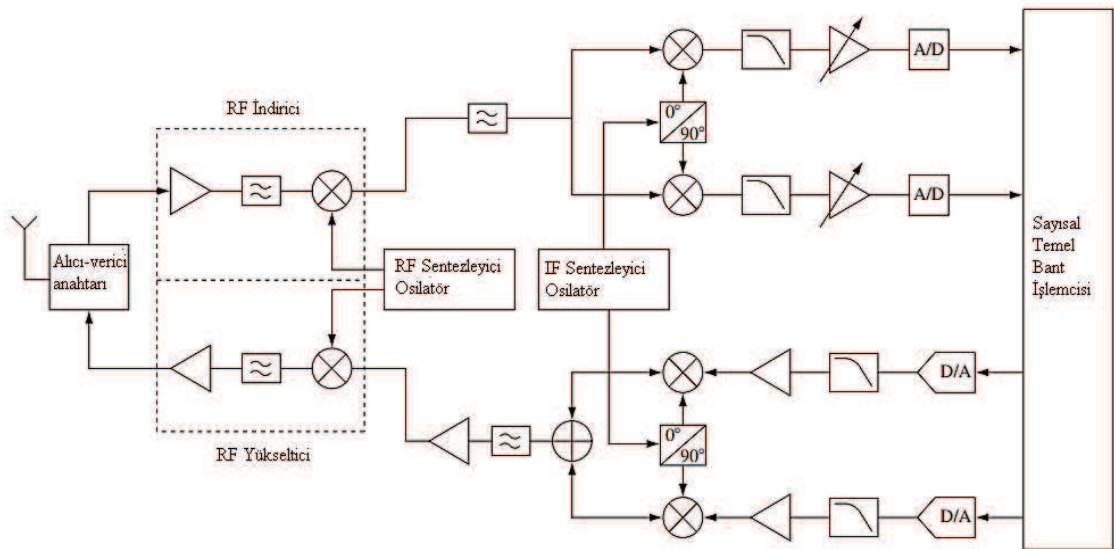
içeren 2 numaralı sınıftan n_2 adet kadar veri vektörü alır. Toplanma katmanının çıkış bilgisi, bir giriş vektörü için hesaplanan her bir sınıfa ait PDF'in ölçüsüdür. Bayes kuralına göre, giriş vektörünün sınıflandırılma işlemi, PDF ölçüsü değerleri arasında en yüksek olan sınıfa göre yapılmalıdır.

Çıkış katmanı basit olarak C adet çıkışa sahip bir karar verme bloğudur. Çıkış değerleri y_i , aşağıdaki kurala göre belirlenir (Safavian, 2005, Shalev-Shwartz 2014):

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{eğer } g_i(\mathbf{x}) > g_j(\mathbf{x}) \quad \forall j, j \neq i \\ 0, & \text{Diğer durumlar} \end{cases} \quad (2.5)$$

2.5 Sayısal Alıcı-Vericiler

RF alıcı-vericiler sinyal gönderme ve alma işlemini tek bünyede gerçekleştirebilen sistemlerdir. Bir alıcı-vericinin verici katı tarafından gönderilen sinyal, diğer alıcı-vericinin alıcı katı tarafından algılanır ve aynı şekilde ters yönlü olarak bu işlem gerçekleştirilebilir. Böylece iki yönlü kablosuz haberleşme sağlanmış olur (Bulloc, 2017). Eğer gönderilen ve alınan radyo sinyalleri sayısallaştırılarak işlenirse sayısal alıcı-verici elde edilmiş olur. Şekil 2.5'te sayısal bir alıcı-vericinin genel yapısı görülmektedir.

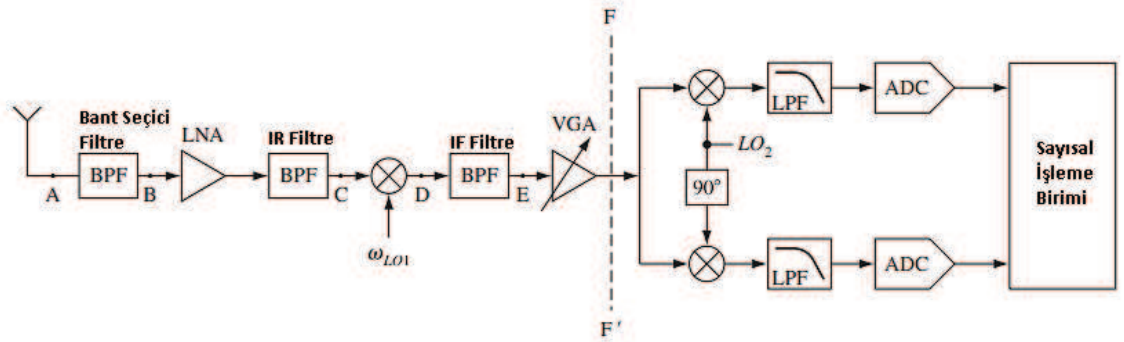


Şekil 2.5 Sayısal bir radyo alıcı-vericinin genel yapısı (Kalivas, 2009)

Bir sayısal alıcı genel olarak RF ön-kat, temel bant (IF) katı ve IF sinyallerini algılayarak sayısal bilgiye dönüştürmek için analog-sayısal çevirici (ADC) içeren temel bant işleme katmanından oluşur. Benzer şekilde sayısal verici tarafında, sayısal bilginin radyo frekanslı sinyallerine dönüştürülmesinden sorumlu sayısal-analog çevirici (DAC) modülü ve analog sinyale dönüşen bilgiyi radyo frekans seviyesine çıkarmaktan sorumlu frekans yükseltici içermektedir. Hem alıcı hem de verici tarafta istenmeyen frekans bileşenlerinin ve gürültünün elimine edilmesi için filtreler ve sinyal gücünün ayarlanabilmesi için frekans kuvvetlendirici bloklar yer almaktadır.

Sayısal alıcı-vericilerin mimarisinin tasarımı değişik faktörlere bağlı olarak çeşitlilik gösterebilmektedir. Bu faktörler, sadece teknik gereklere bağlı olmamakta, aynı zamanda uygulama alanı ve ticari ihtiyaçlar doğrultusunda farklılık gösterebilmektedir.

Sayısal alıcılar genel olarak geleneksel ara frekanslı (heterodyne) alıcı ve sıfır ara frekanslı (zero IF) alıcı olmak üzere iki tip mimariye sahiptir. Geleneksel ara frekanslı alıcının genel mimarisi Şekil 2.6'da görülmektedir (Kalivas, 2009).



Şekil 2.6 Geleneksel ara frekanslı sayısal alıcı (Kalivas, 2009)

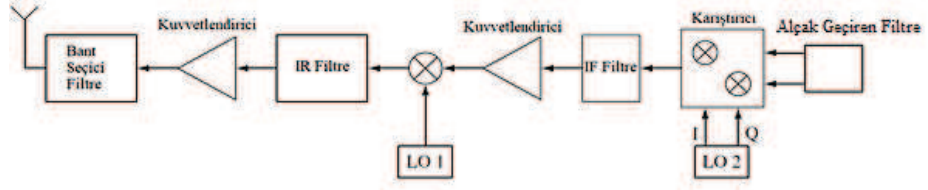
Geleneksel ara frekanslı alıcıda antenden alınan sinyal bant seçici filtreden geçirilerek kullanılan haberleşme bandı dışındaki frekans bileşenleri bastırılır. Elde edilen bant içi frekanslar LNA ile orta seviyede kuvvetlendirilir ve sanal sinyal bastırma filtresinden geçirilir. Sanal sinyal bastırma filtresinden amacı olabildiğince IF frekanslı sinyalde sanal frekanslı bileşenlerin bastırılmasıdır. Bundan sonra, sinyal yerel osilatör karıştırıcısından geçirilerek frekans indirme işlemi gerçekleştirilir ve kanal seçici filtreden geçirilir. Kanal frekans seçiciliği bu bölgede gerçekleşmiş olur. Son olarak 90 derece faz farklı

karıştırıcılara ayrı ayrı uygulanarak I/Q sinyalleri elde edilir ve sinyal son olarak alçak geçiren filtreden geçirildikten sonra sayısal örnekleme işlemlerine hazır hale getirilir. Bu işlemler bütün sayısal modülasyon sistemleri için geçerlidir. Böylece haberleşme bilgisi iki boyutlu Kartezyen uzayında elde edilmiş olur.

Sıfır ara frekanslı alıcılarda Şekil 2.6'da yer alan birinci yerel osilatör frekansı RF frekansına ayarlanarak IF frekansı sıfıra, yani doğrudan temel banda çekilir. Bu alıcı, sıfır IF alıcı olarak da bilinmektedir. Bu yöntem sayesinde geleneksel ara frekanslı alıcı mimarisinde yer alan IF bölgesi, sıfır ara frekanslı alıcıda kullanılmadığından daha az sayıda donanım birimi ile gerçekleştirilmiş olmaktadır. Öte yandan sıfır ara frekanslı alıcının tasarımı daha fazla dikkat gerektirmektedir.

Her iki mimari kıyaslandığında, bant içi filtreleme, SNR, I/Q sinyal bileşeni dengelenmesi gibi konularda geleneksel ara frekanslı alıcı, sıfır ara frekanslı alıcıya daha üstün olabilmekte iken, uygulama maliyeti ve yüksek entegrasyon açısından sıfır ara frekanslı alıcılar daha uygun olmaktadır. Geleneksel ara frekanslı alıcılar daha çok yüksek mesafe isteyen GSM ve GPS gibi haberleşmelerde yaygın kullanılmakta iken, sıfır ara frekanslı alıcılar 3G terminalleri, Bluetooth, 802.11a/b/g gibi geniş bant haberleşmelerde daha çok tercih edilmektedirler (Kalivas, 2009).

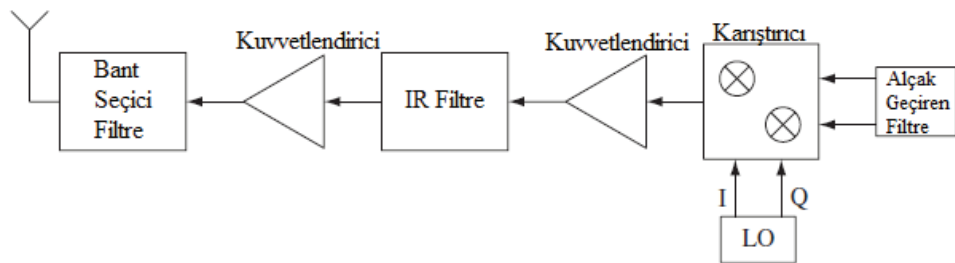
Sayısal vericiler genel olarak yukarıda bahsedilen alıcı mimarilerinin tersiniri olacak şekilde tasarlanmışlardır. Sayısal verici, bilginin modüle edilmesinden, modüle edilmiş sinyalin uygulama gereklerini karşılayacak şekilde RF frekansına yükseltip kuvvetlendirilmesinden sorumludur. Sayısal verici tasarımındaki en önemli hususlar: modülasyon öncesi sinyalin hazırlanması, modülasyon hassasiyetini sağlayacak modülatör tasarımı, iletilen sinyal gücü ve iletilen radyo sinyalinin spektral içeriğidir. Hassasiyet, seçicilik ve gürültü karakteristikleri nispeten daha düşük önemdedir. Şekil 2.7'de geleneksel ara frekanslı vericinin genel yapısı verilmiştir.



Şekil 2.7 Geleneksel ara frekanslı verici (Rudell, 1999)

Alçak geçiren filtreden gelen temel bant sinyali, LO2 yerel osilatörü ile anahtarlanan karıştırıcıdan geçirilerek IF frekansına yükseltilir. IF filtre ile sinyalin harmonik frekansları bastırıldıktan sonra sinyal kuvvetlendirici vasıtasıyla kuvvetlendirilir ve LO1 osilatörlü karıştırıcıdan geçirilerek bu sefer RF frekansı seviyesine yükseltilir. Böylelikle temel bant sinyalinin frekansı iki aşamada yayın yapılacak frekansa ulaştırılmış olur. Daha sonra, RF frekansındaki sinyal IR filtresinden geçirilerek iletilecek sinyaldeki istenmeyen taşıyıcı yan bantları elimine edilir. Bu filtreden sonra sinyal son kez kuvvetlendirilerek RF bant durduran filtreden geçirilir ve sinyal istenilen bant aralığında gönderilmeye hazır hale getirilmiş olur.

Bu süreçten anlaşılacağı üzere verici kanalındaki filtrelerin karakteristik özellikleri alıcı kanalındakilerden oldukça farklı olmaktadır. Verici kanalındaki IF filtrenin komşu kanaldaki bantları elimine etme noktasındaki gereksinimleri, alıcı kanaldaki IF filtre kriterlerine göre daha esnek olmaktadır. Benzer şekilde vericideki karıştırıcı sonrasındaki RF filtrenin bant genişliği, sadece verici içindeki bant dışı frekans bileşenlerini bastırmaya yönelik belirlendiğinden, alıcı kanaldaki RF filtreye göre daha basit tasarıma sahiptir.



Şekil 2.8 Sıfır ara frekanslı sayısal verici (Rudell, 1999)

Eğer şekil 2.7’de IF filtre ve ikinci karıştırıcı çıkarılırsa sıfır ara frekanslı verici elde edilir. Şekil 2.8’de tipik bir sıfır ara frekanslı sayısal verici görülmektedir. Bu verici tipinde karıştırıcı RF frekansında çalışmak zorundadır. Bu durum karıştırıcı girişi ve çıkışı arasındaki frekans farkını arttırdığı için genlik ve faz dengesizliklerine karşı vericiyi daha hassas hale getirmektedir. Sonuçta geleneksel ara frekanslı vericiye göre performans düşüşlerine daha açıktır. Diğer taraftan güç kuvvetlendiricisi yüksek güç ve gürültü çıkışına sahip olabileceğinden tasarımın titiz olmaması durumunda aynı frekansta çalışan yerel osilatör bu durumdan olumsuz etkilenebilir (Razavi, 1999). Bu etkinin giderilmesi için farklı frekanslarda çalışan iki ayrı gerilim kontrollü osilatör kullanılmaktadır. Böylece kuvvetlendirici frekansından kaynaklanan bozulma elimine edilir (Stetzler, 1995, Kalivas, 2009).

Doğrudan frekans yükseltmeli sayısal verici çift bantlı olarak Xu vd. (2005) tarafından 802.11a/b/g WLAN standardına uygulanmıştır. Ayrıca, Darabi (2003) tarafından doğrudan frekans yükseltmeli alıcı-verici, çift-modlu 802.11b ve Bluetooth alıcı vericisinde uygulanmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde ilk olarak deneysel RF parmak izi çıkarma işleminin aşamaları tanımlanacak, IEEE 802.11b WiFi sinyalinin özellikleri ve deneysel çalışmada kullanılan sinyal bölgelerinden bahsedilecektir. Daha sonra, kullanılan ekipmanlar ve deney düzeneği anlatılacaktır. Son olarak sinyal toplama işlemi hakkında bilgi verilerek elde edilen sinyaller örneklendirilecektir.

3.1 RF Parmak İzi Çıkarma Sistemi

RF parmak izi çıkarma sisteminin amacı, fiziksel verici katmanlarının haberleşme sinyallerini gözlemlemek suretiyle vericilerin belirli karakteristik özelliklerini çıkararak vericileri sınıflandırmaktır. Dolayısıyla bu sistem, veri toplama, işleme ve kaydetme işlemlerini yürüten bir çeşit örüntü tanıma sistemidir (Theodoridis ve Koutroumbas 2009). RF parmak izi çıkarma sisteminin aşamaları şekil 3.1'deki gibi tanımlanabilir:



Şekil 3.1 RF Parmak İzi Çıkarma Sistemi Blok Diyagramı

Görüldüğü gibi RF parmak izi çıkarma sistemi beş temel bloktan oluşmaktadır. Tanımlanan cihaz, haberleşme sinyalleri yakalanarak RF parmak izi çıkarılacak kablosuz vericiyi temsil etmektedir. Sinyal yakalama bloğu, RF parmak izi çıkarılacak kablosuz verici sinyallerinin algılanması, örneklenmesi ve sayısallaştırarak sinyal işleme ortamına iletilmesinden sorumludur. Üçüncü blokta, sayısallaştırılan verici sinyallerinin özniteliklerinin elde edileceği sinyal bölgesi algılanmaktadır. RF parmak izi çıkarma sisteminde oldukça kritik olan ve parmak izi başarımına doğrudan etki eden aşamalardan birisidir. Ayrıca, elde edilen sinyal bölgelerinin hizalanması, normalize edilmesi gibi işlemler yine bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Öznitelik çıkarma bloğunda, elde edilen sinyal bölgelerinden sınıflandırmaya tabi tutulacak özgün sinyal karakteristikleri elde edilmektedir. Bir veya birden fazla öznitelik, belirlenen yöntemlere göre elde edildikten sonra sınıflandırma bloğuna gönderilmektedir. Sınıflandırma aşamasında, kablosuz

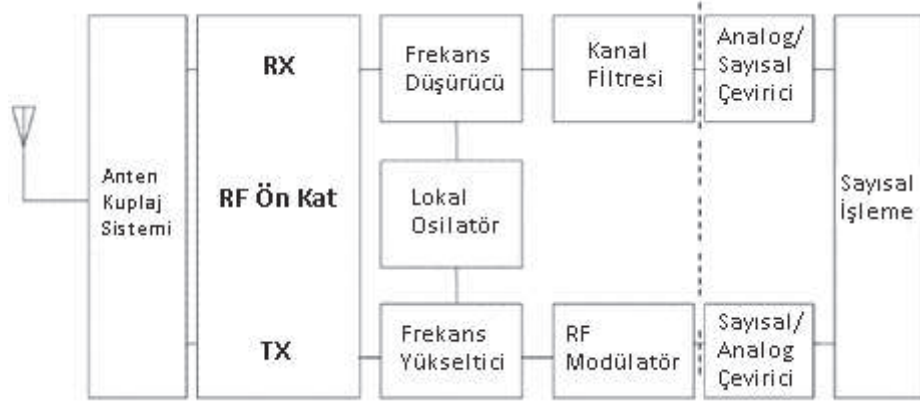
vericilerin sinyallerinden elde edilen öznitelikler sınıflandırılarak RF parmak izleri elde edilmektedir. Dolayısıyla RF parmak izinin başarımı bu bloğun çıktılarında birisidir.

Tezde gerçekleştirilen deneysel çalışmada yukarıda bahsedilen sistem aşamaları kısaca şu şekilde gerçekleştirilmiştir. IEEE 802.11b standardında çalışan altı adet WiFi vericisi sınıflandırılmak amacıyla kullanılmıştır. Verici sinyallerin yakalanması düşük maliyetli alıcı olarak tanımlanan yazılım tabanlı radyo (YTR) alıcısı ve buna bağlı anten ile gerçekleştirilmiştir. Yakalanan sinyaller PC tarafından kaydedildikten sonra ortalama SNR değerleri hesaplanarak veri setlerine bölünmüştür. Daha sonra Bayes basamak algılayıcı kullanılarak bütün verici sinyalinden geçici rejim sinyalleri ayrıştırılmıştır. Geçici rejim sinyali üzerinden RF parmak izi üretmek için anlık genlik özniteliği elde edilerek sınıflandırma aşamasına geçilmiştir. Sınıflandırma işlemi MATLAB ortamında PNN sınıflandırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yukarıda tanımlanan sistem aşamaları ve deneysel çalışmada kullanılan ekipmanların özellikleri ilerleyen bölümlerde detaylı olarak anlatılmıştır.

3.2 Yazılım Tanımlı Radyo (Software Defined Radio-SDR)

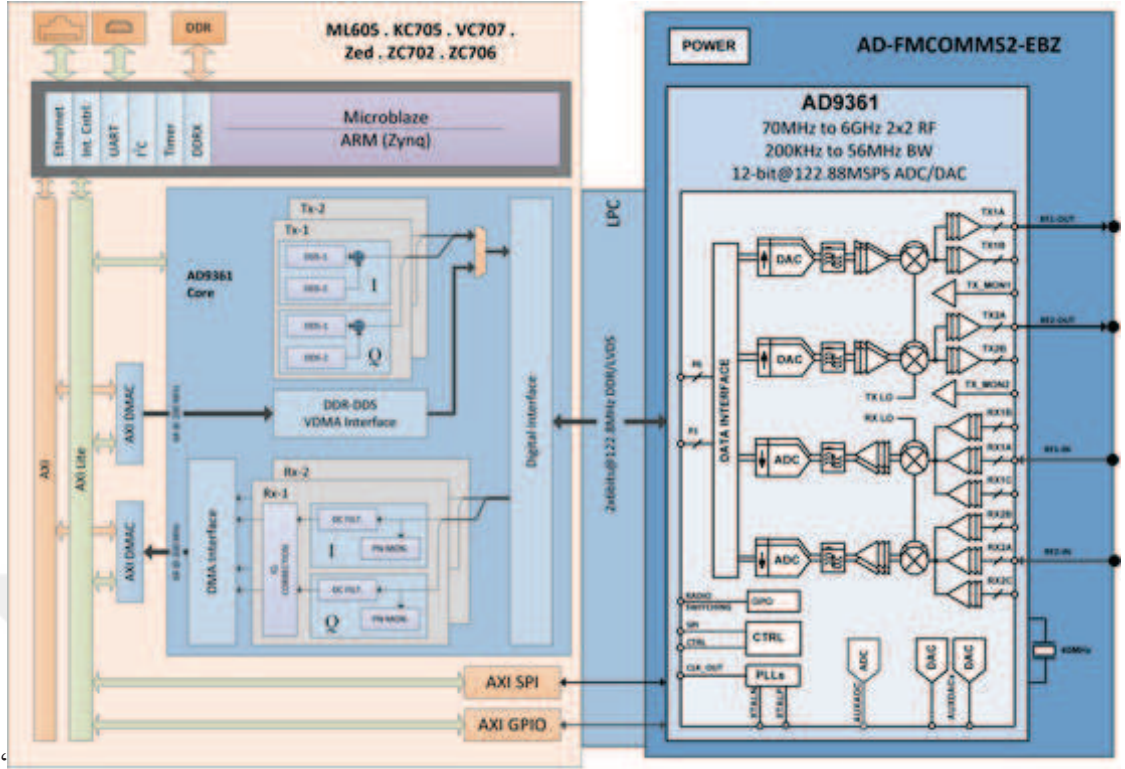
Yazılım Tanımlı Radyo (YTR), farklı radyo dalga formlarını işleyebilen ve çoklu modülasyon-demodülasyon tekniklerini kullanabilen, bu işlemleri gerçek zamanlı yazılımlar ile gerçekleştirebilen programlanabilir kablolu sayısal alıcı-vericilerdir. YTR kavramı ilk olarak 1992 yılında Joseph Mitola tarafından oluşturulmuş ve şekil 3.2'teki referans mimarisi tanımlanmıştır (Mitola 2000). YTR, mevcut dalga formlarını algılama ve bulunduğu radyo ağının koşullarına uyum sağlayabilmesi sayesinde özellikle bilişsel radyo (BR) ağlarındaki kullanımı yaygındır. Bünyesinde barındırdığı sayısal sinyal işlemcileri (DSP) ya da FPGA (Field Programmable Gate Array) birimlerinin programlanması yoluyla çeşitli radyo dalga şekillerini ve modülasyon/demodülasyon tekniklerini gerçekleştirerek istenilen haberleşme standardında çalışabilmektedir. Ayrıca, programlanabilirlik özelliği ile düşük maliyetli alıcı-verici olarak bilimsel çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Bullock 2018).



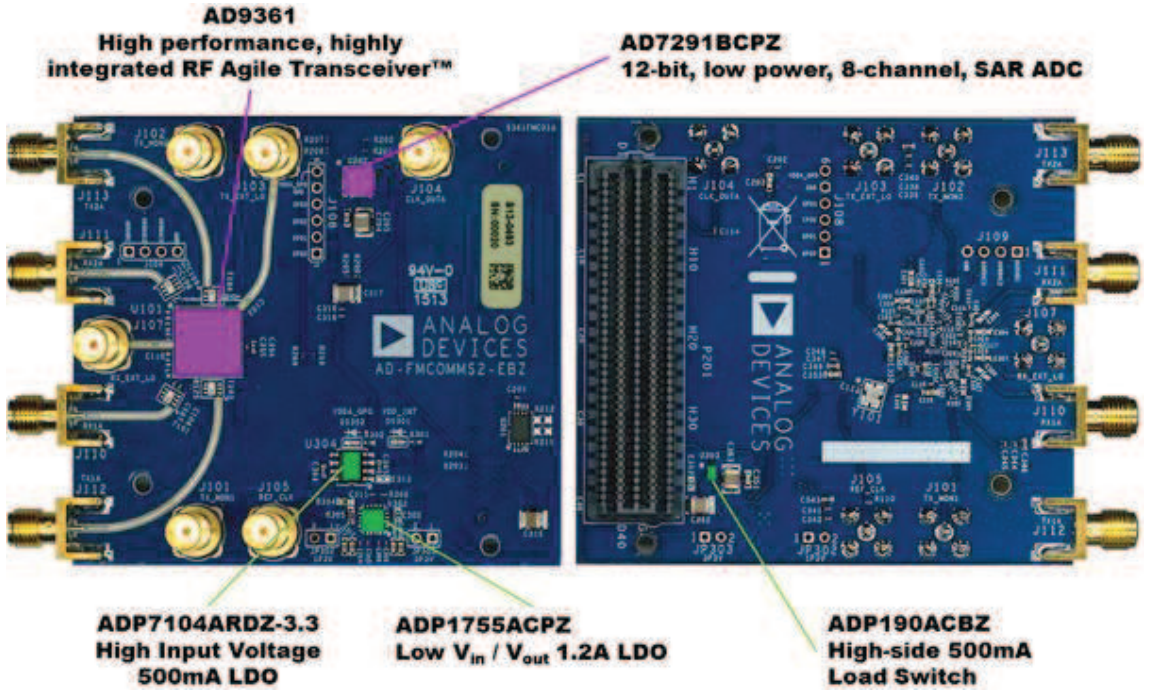
Şekil 3.2 YTR referans blok şeması (Mitola 2000)

3.2.1 Analog Devices AD-FMCOMMS3-EBZ geliştirme kartı

Analog Devices firması tarafından YTR olarak tasarlanan ve geliştirilen bu kartın amacı, yazılım geliştiriciler, sistem mimarisi tasarımcıları gibi kullanıcılara 70 MHz – 6 GHz frekans aralığında ayarlanabilen RF uygulamaları için tek bir geliştirme platformu sağlamaktır. Bu sayede WiFi, GSM, GPS, 3G, 4.5G gibi pek çok haberleşme standardında çalışabilme özelliğine sahiptir. Kartın programlanabilmesi ve işlevsel hale gelebilmesi için Şekil 3.3'teki blok şemada görüldüğü gibi FPGA tabanlı bir ana karta FMC konektörü ile bağlanması gerekmektedir. YTR geliştirme kartı üzerinde temel olarak AD9361 programlanabilir radyo alıcı-verici tümdevresi ve ona bağlı osilatör, güç katı ve bağlantı konektörü yer almaktadır. YTR kartındaki RF alıcı anteninden yakalanan RF sinyali temel banda indirilerek I/Q sinyal bileşenlerine ayrılmakta ve bu bileşenler analog-sayısal çevirici ile örneklenerek sayısallaştırılmaktadır (Analog Devices 2014).



Şekil 3.3 FMCOMMS3 YTR kartının (sağda) ve FPGA içinde sentezlenmiş sinyal toplama devresinin (sağda) fonksiyonel blok şeması (Analog Devices 2014)



Şekil 3.4 AD-FMCOMMS-EBZ geliştirme kartının üstten (solda) ve alttan (sağda) görünümü (Analog Devices 2014)

Sayısallaştırılan veriler FPGA ana kartına gönderilerek, FPGA üzerinde sentezlenmiş olan sayısal devre blokları vasıtasıyla toplanmakta ve Ethernet kablosuyla bilgisayara iletilmektedir. Tez çalışmasında YTR kartının IEEE 802.11b standardında WiFi sinyalleri toplayabilmesi için gerekli ayarlar MATLAB ortamında, YTR için tasarlanmış yazılım fonksiyonları kullanılarak yapılmakta ve FPGA ana kartına gönderilmektedir. İşlemlerin detayları, sinyal toplama bölümünde detaylı olarak anlatılmıştır.

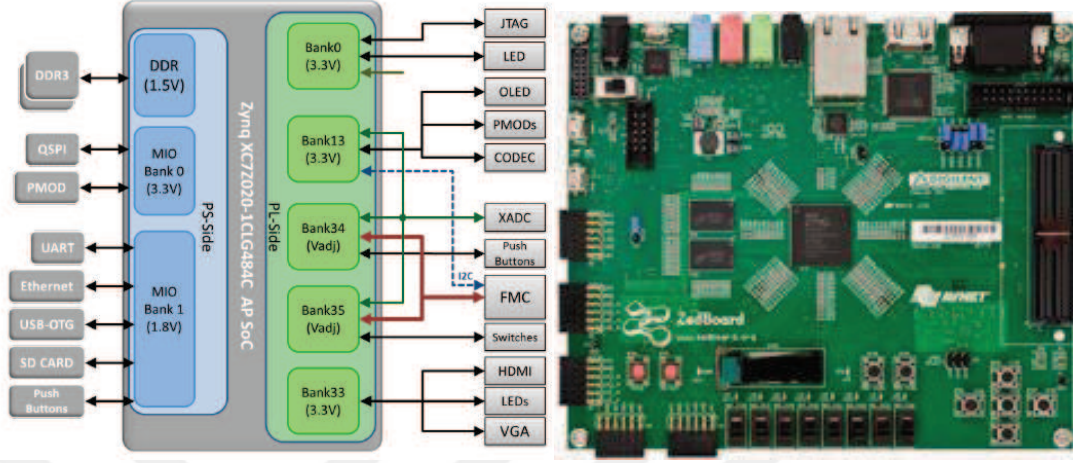
3.3 FPGA Geliştirme Kartı

YTR kartının programlanabilmesi ve sinyal verilerinin alınabilmesi için FPGA tabanlı bir anakarta ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla tez çalışmasında ZedBoard adında Digilent firması tarafından üretilen, Xilinx Zynq-7000 serisi FPGA ve ARM işlemci içeren tümdevre tabanlı bir geliştirme kartı kullanılmıştır. Kart üzerinde bulunan FPGA ve ARM işlemci mimarisine sahip tümdevre sayesinde sayısal sinyal işleme, görüntü işleme, motor kontrol, donanım hızlandırıcı gibi uygulamalar gerçek zamanlı olarak rahatça geliştirilebilmektedir. ZedBoard geliştirme kartının özellikleri kısaca şöyledir (Digilent 2012):

- İki çekirdekli ARM işlemci ve FPGA alanı
- 512 MB DDR3 bellek
- 256 MB kalıcı bellek
- 4 GB destekli SD kart yuvası
- Ethernet ve USB seri haberleşme arayüzü
- 1080p HDMI ve 8-bit VGA görüntü arayüzü

FPGA içerisinde, kullanılan YTR kartı için özel olarak Analog Devices tarafından sentezlenmiş sayısal devre blokları bulunmaktadır. Sinyal toplama esnasında, YTR tarafından sayısallaştırılan sinyal verileri paralel veri yolu ile FPGA kartına iletilmektedir. Alınan veriler tampon belleklerde tutularak, veri hızı ve biçim dönüşümü yapılmak suretiyle seri hale getirilmektedir. FPGA tarafından seri hale getirilen veriler, aynı tümdevre içinde bulunan işlemci tarafından alınmaktadır. Son olarak bu veriler işlemci tarafından Ethernet protokolüne uygun hale getirilerek bilgisayar ortamına

gönderilmektedir. Şekil 3.5'te tezde kullanılan FPGA geliştirme kartı ve tümdevreye ait blok şema görülmektedir.

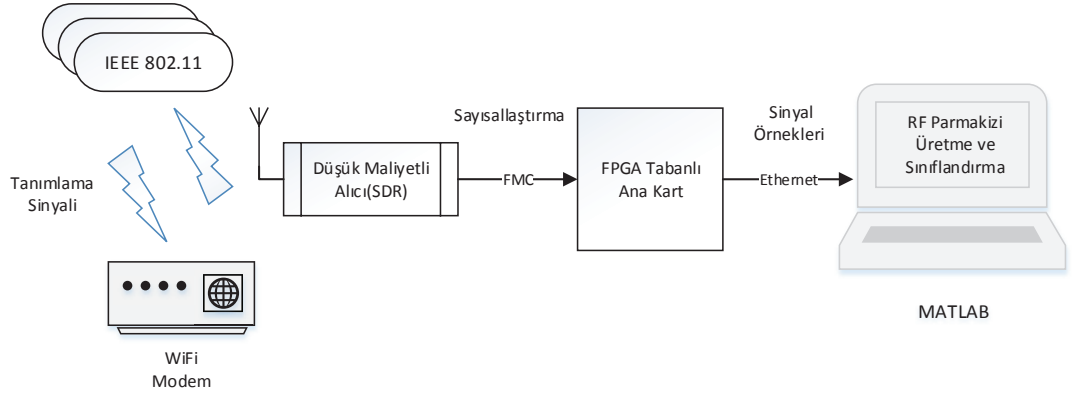


Şekil 3.5 Zynq7000 tümdevresinin blok şeması (sağda) ve ZedBoard geliştirme kartının fiziksel görünümü

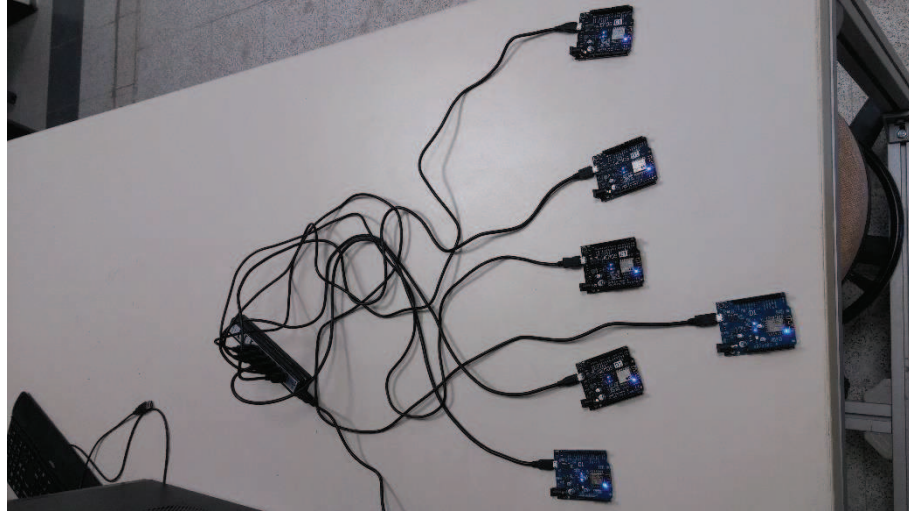
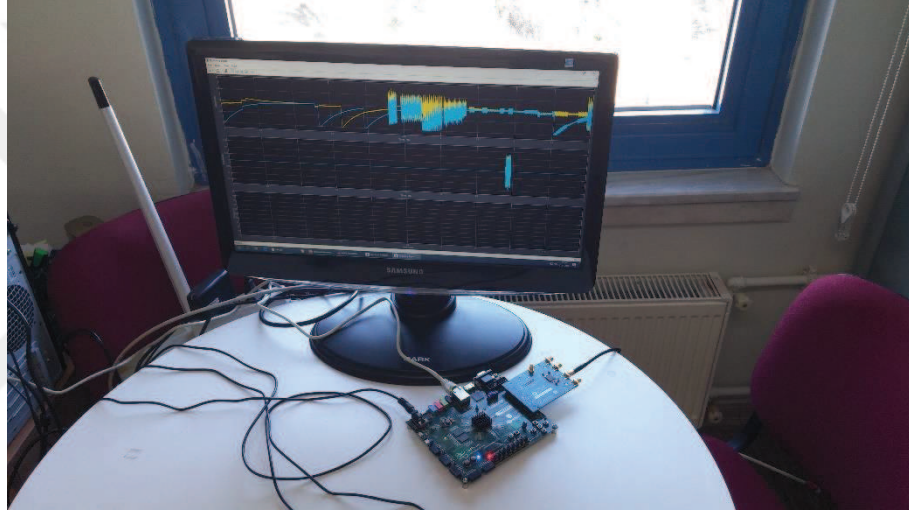
Şekil 3.5'teki blok şemadan görüldüğü gibi tümdevre, işlemci (PS) ve FPGA (PL) bölgelerinden oluşmaktadır. Geçici hafıza birimi (DDR3), seri haberleşme kanalları (QSPI, UART, USB, SD CARD) ve giriş çıkış birimlerinin bir kısmı işlemci tarafından doğrudan yönetilmektedir. Programlayıcı (JTAG), görüntü arayüzleri (HDMI, VGA) ve hızlı giriş çıkışlar (FMC, XADC, PMODs) ise FPGA alanı tarafından yönetilmektedir. Sinyal yakalamak için kullanılan YTR kartı yüksek hızda veri transferi gerektirdiği için FPGA tarafından yönetilen FMC haberleşme arayüzünü kullanmaktadır.

3.4 Verici Sinyallerinin Toplanması

Tez çalışması için Ankara Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Kestirim, İzleme ve Füzyon, İstatistiksel Sinyal İşleme ile Sinyal İşleme ve Haberleşme Araştırma Laboratuvarlarında yer alan teçhizatlarla kurulan deney düzeneğine ait blok şema şekil 3.6'da görülmektedir. Deneysel çalışma esnasında yakalanan sinyaller ve sinyalden elde edilen vericiye ait fiziksel adresler gerçek zamanlı olarak bilgisayar ekranından da gözlenebilmektedir.

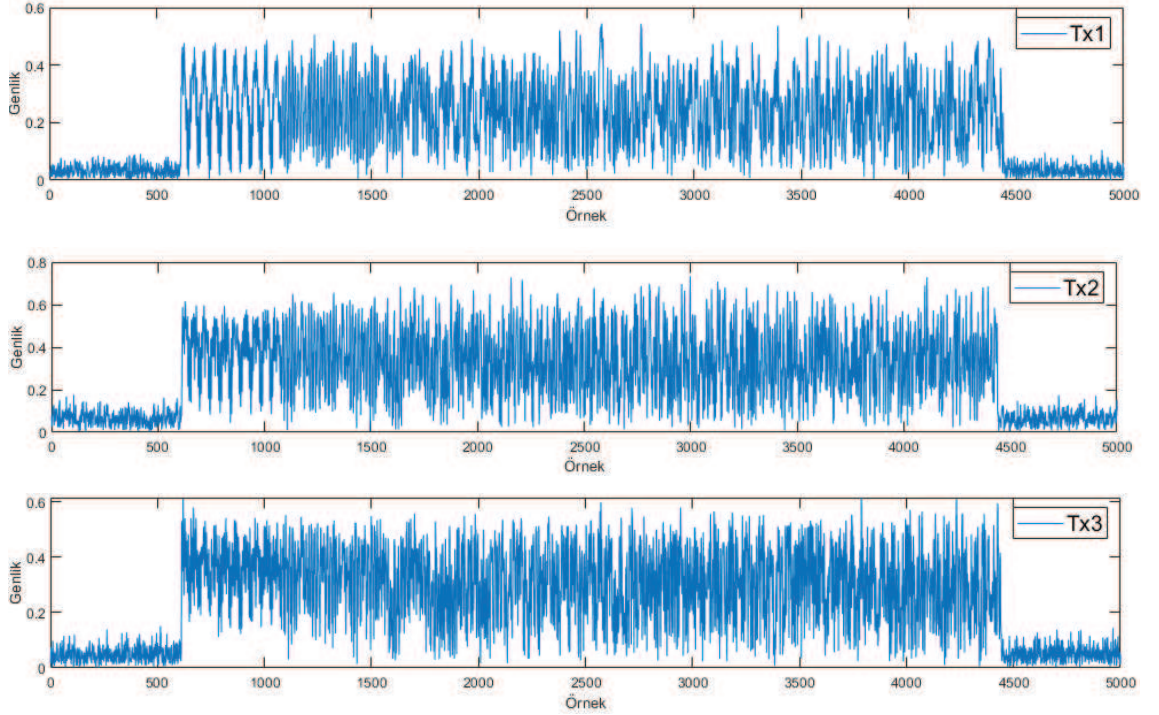


Şekil 3.6 Sinyal toplama düzeneğinin blok şeması

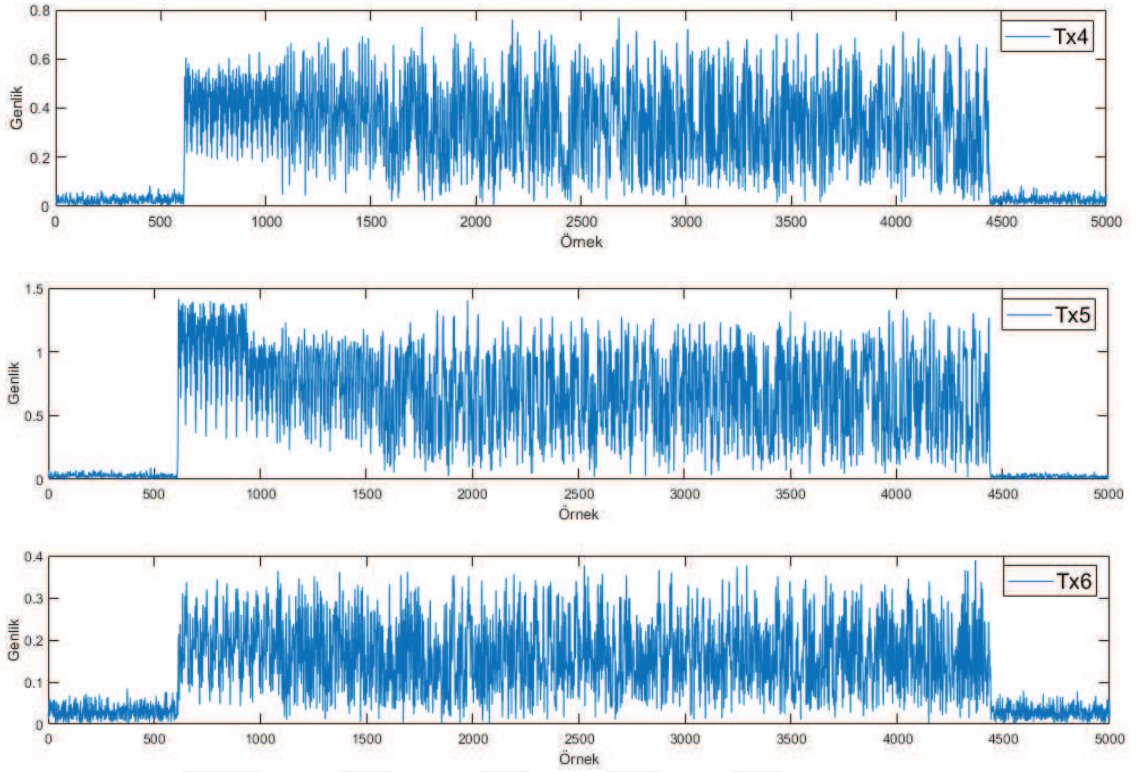


Şekil 3.7 Deneş düzeneği

Şekil 3.7’de laboratuvarında kurulan deney düzeneği ve düzenekteki bilgisayar ekranında bir vericiye ait sinyalin diğer sinyallerden ayırt edilmiş olarak gösterilmesi yer almaktadır. Deneysel çalışmada altı adet IEEE 802.11b vericisi bir WiFi modemine bağlanarak kablosuz bir ağ (WLAN) kurulmuştur. Vericiler, üzerindeki ESP8266 tümdevresinde koştan istemci yazılımı sayesinde modem tarafından işletilen ağa bağlanarak periyodik olarak internet üzerinden bilgi alışverişi yapmaktadırlar. 2.4GHz frekans bandında iletilen sinyaller dinleyici konumundaki YTR tarafından yakalanarak temel banda indirilmekte ve 60MHz ile örneklenecek sayısal hale getirilmektedir. Elde edilen sinyal verileri FPGA anakartı tarafından MATLAB ortamına gönderilmektedir. Bu yöntem kullanılarak farklı SNR değerlerinde sinyaller toplamak için her verici, alıcıya göre 7 metre ve 13 metre olmak üzere iki farklı mesafeye konumlandırılmıştır. Her iki mesafede bir vericiden 400’er adet olmak üzere altı adet vericiden toplamda 4800 adet sinyal toplanmıştır. Şekil 3.8’de 6 vericiden yakalanan sinyal örnekleri görülmektedir:

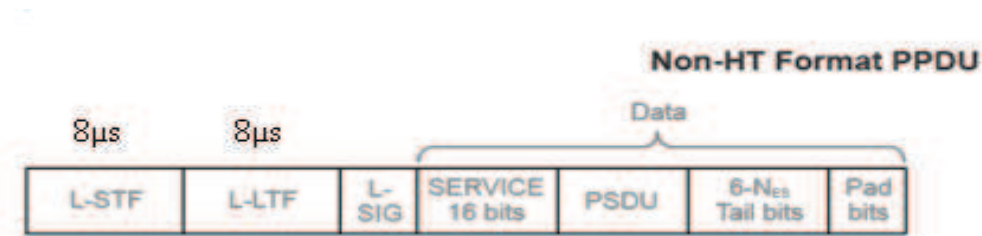


Şekil 3.8 Altı farklı vericiden yakalanan sinyaller



Şekil 3.8 Altı farklı vericiden yakalanan sinyaller (devam)

Elde edilen sinyallerin hangi vericiden olduğunu tespit etmek ve her bir verici için sinyal veri tabanı oluşturmak için MATLAB tarafından sağlanan WLAN yazılım aracı (toolbox) kullanılmıştır. WLAN yazılım aracı, geçerli sinyali algılamak için şekil 3.9’da IEEE 802.11b standardında tanımlanan paket yapısında kısa öncül (L-STF) ve uzun öncül (L-LTF) bölgelerini oto-korelasyon yöntemi ile tespit etmektedir. Daha sonra, veri (data) bölgesinden vericiye ait MAC adresini çözerek vericinin sayısal kimliklerini elde etmektedir. Böylece yakalanan sinyaller verici adresi ile ilişkilendirilerek kaydedilmektedir.



Şekil 3.9 IEEE 802.11b paket yapısı

Sinyal özniteliğinin doğru şekilde elde edilebilmesi ve sinyal gücünün RF parmak izine etkisini gözlemleyebilmek için sinyal toplama işlemi sonunda yakalanan sinyaller SNR değerlerine göre gruplanmıştır. Sinyallerin SNR değerleri hesaplanırken kullanılan eşitlik aşağıda (2.8) eşitliğiyle verilmiştir.

Şekil 3.8’de verilen sinyallerin geçici rejim öncesi gürültü bölgesi N_{sinyal} , ve sinyalin öncül bölgesi P_{sinyal} vektörleri olsun. Buna göre her iki bölgeye ait vektör eşitlikleri,

$$N_{sinyal} = (a_1, a_2, a_3 \dots \dots a_x) \quad (2.4)$$

$$P_{sinyal} = (b_1, b_2, b_3 \dots \dots b_y) \quad (2.5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde her iki vektör de sırasıyla x ve y adet sinyal örneklerinden meydana gelmektedir. Sinyalin gürültü ve öncül bölgesinin gücü sırasıyla,

$$PN_{sinyal} = \frac{N_{sinyal}N'_{sinyal}}{x} \quad (2.6)$$

ve

$$PP_{sinyal} = \frac{P_{sinyal}P'_{sinyal}}{y} \quad (2.7)$$

olarak gösterilebilir. Yukarıda tanımlanan eşitlikler kullanılarak kestirilen SNR değeri,

$$SNR_{kestirilen} = 10 \log \left(\frac{PP_{sinyal} - PN_{sinyal}}{PN_{sinyal}} \right) \quad (2.8)$$

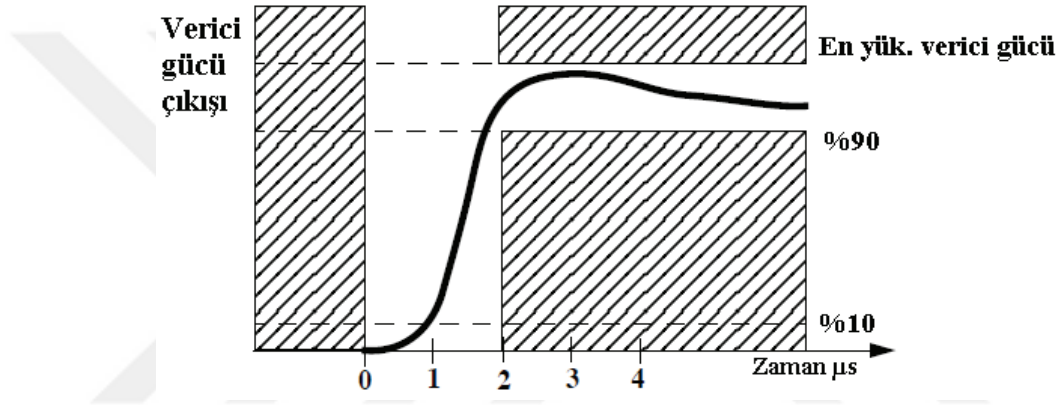
olarak ifade edilir.

Bölüm 5’te yakalanan sinyaller ile ilgili bilgiler detaylandırılmıştır.

4. RF PARMAK İZİ OLUŞTURMA İŞLEMİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER

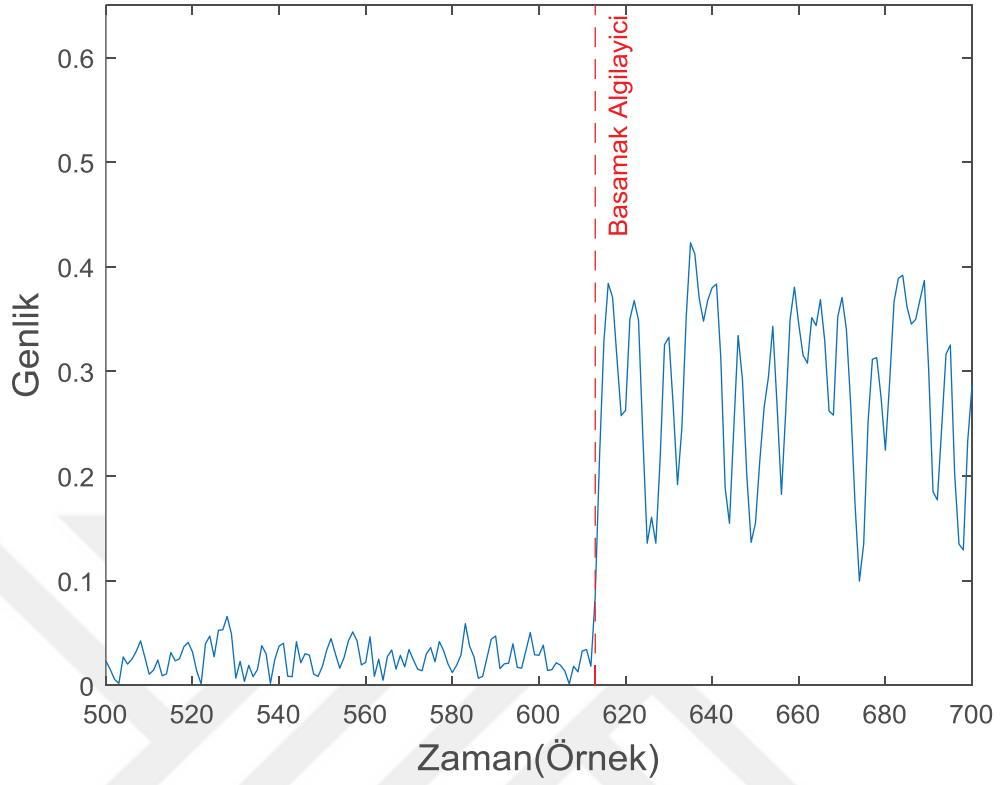
4.1 Geçici Rejim Sinyalinin Elde Edilmesi

IEEE 802.11b standardında, geçici rejim sinyalinin kısıtları özellikleri Şekil 4.1’de tanımlanmıştır. Buna göre geçici rejim sinyali, iletim sinyali gücünün en yüksek değerinin %10’u ile %90’nı arasında kalan bölgeyi geçmemelidir ve en fazla 2µs uzunluğunda olmalıdır.



Şekil 4.1 Geçici rejim sinyali gücü (IEEE Std. 802.11 2012)

Bu limitler, deneysel çalışma sürecinde verici sinyallerinden geçici rejim sinyali elde edilirken göz önünde bulundurulmuştur. Literatürdeki çalışmalarda geçici rejim sinyalinin tespit edilmesi için kullanılan yöntemlerin başarımlarının, sinyalin tanımlandığı standartlara ve örnekleme hızına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. RF parmak izi çıkarmak amacıyla geçici rejim işareti elde etmek için kullanılan Bayes rampa algılayıcı ve Bayes basamak algılayıcıların yüksek başarımlar verdiği çalışmalar mevcuttur (Üreten ve Serinken 2007, Klein vd.2009a, b, 2010, Williams vd. 2010a, b). Tez çalışmasında, yukarıda sözü edilen her iki yöntem de denenmiş, basamak algılayıcının oldukça yüksek başarımlar verdiği gözlenmiştir. Şekil 4.2’de karmaşık formdaki geçici rejim sinyalinin genlik değerleri üzerinden Bayes basamak algılayıcı tarafından tespit edilen başlangıç noktası görülmektedir.

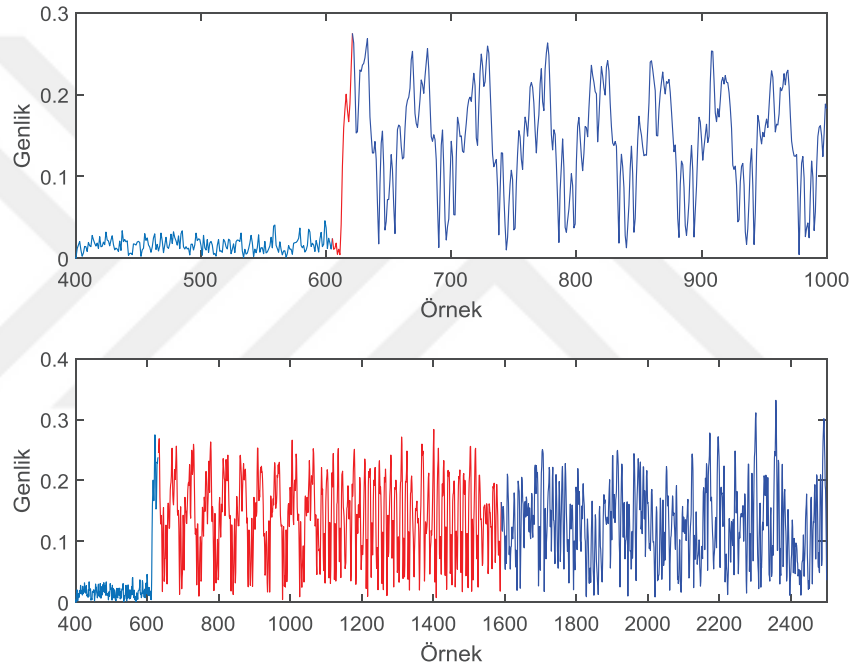


Şekil 4.2 Bayes basamak algılayıcı tarafından geçici rejim sinyalinin başlangıç noktasının algılanması

Başlangıç noktası tespit edilen geçici rejim sinyalinin süresi, IEEE 802.11b standardındaki vericiler için yapılan deneysel çalışmalara dayanarak 200ns olarak alınmıştır (Üreten ve Serinken 2007, Taşcıoğlu vd. 2017, Köse 2019). 60MHz örnekleme hızı için 200ns uzunluğundaki geçici rejim sinyali 12 örnekten oluşmaktadır. Bu değerler göz önüne alınarak verici sinyallerinden geçici rejim bölgeleri elde edilmiş ve öznelilik çıkarma aşamasına geçilmiştir.

4.2 Geçici Rejim ve Öncül Sinyal Bölgelerinin Kıyaslanması

Şekil 4.3'te yakalanan verici sinyallerinden birine ait geçici rejim ve öncül bölgeleri iki ayrı grafikte kırmızı renkle boyalı olarak gösterilmiştir. Geçici rejim sinyal bölgesi bir önceki başlıkta bahsedildiği gibi 12 örnek (200ns) uzunluğundadır. Öncül bölgesinin uzunluğu ise şekil 3.9'da gösterildiği gibi IEEE 802.11b standardında tanımlanan uzunlukta, yani L-STF ve L-LTF bölgelerinin toplam uzunluğu olarak yaklaşık 960 örnek (16 μ s)'tir.

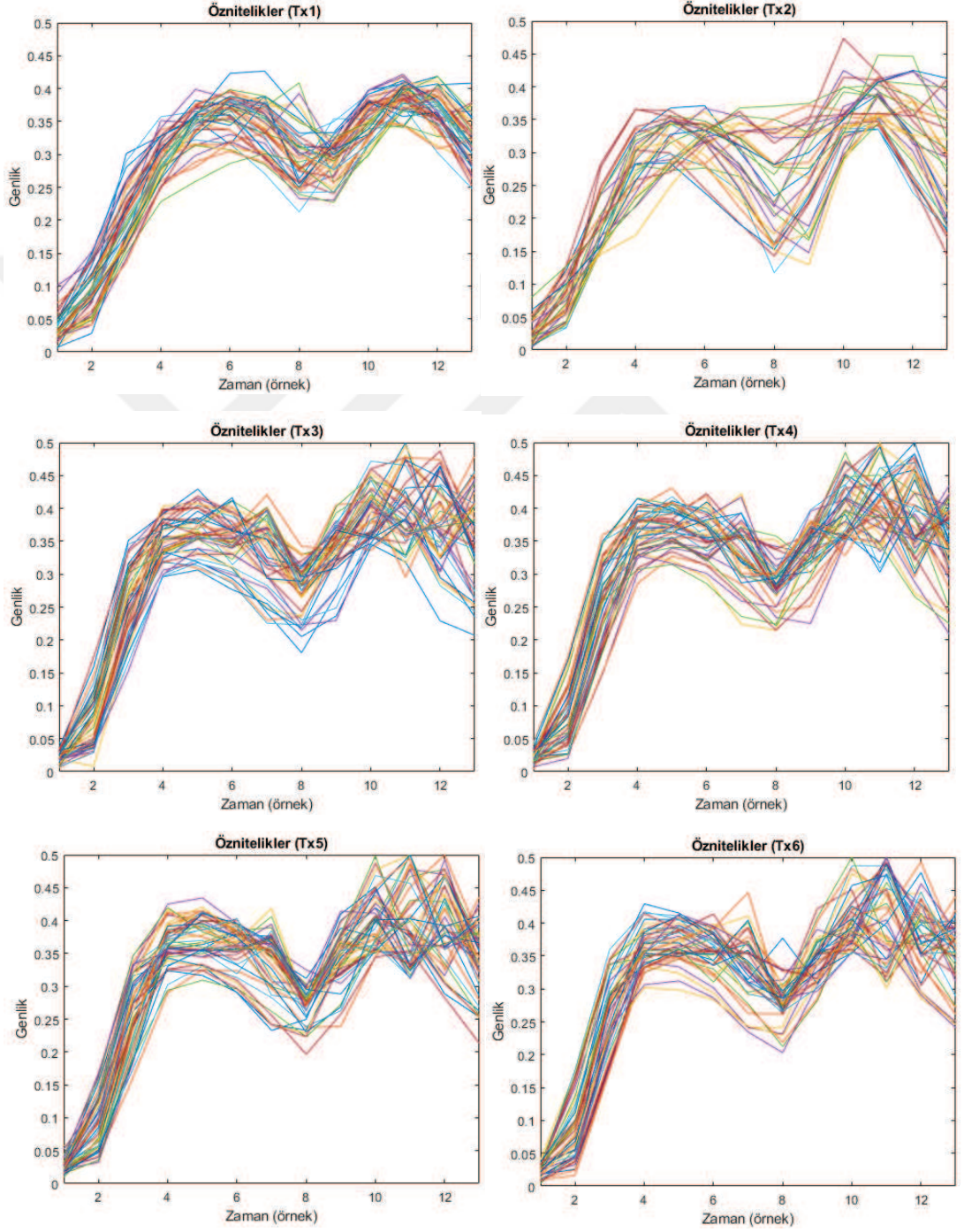


Şekil 4.3 Verici sinyalindeki geçici rejim (üstte) ve öncül (altta) sinyal bölgelerinin (kırmızı renkli) görünümü

Söz konusu iki sinyal bölgesi arasındaki göze çarpan en büyük fark sinyal bölgelerinin uzunluğu ve sinyal içerisinde bulunduğu konumdur. Dolayısıyla, bölüm 1.1'de belirtildiği gibi düşük maliyetli RF parmak izi sisteminde geçici rejim sinyalinin kullanımının, hem bütün haberleşme standartlarında çalışan vericiler için uygulanabilir olduğu hem de düşük tepki süresinin kritik olduğu uygulamalarda daha avantajlı olduğu görülmektedir.

4.3 Sinyal Özniteliklerinin Elde Edilmesi

Bu aşamada, RF parmak izi sınıflandırma işleminde kullanılmak üzere bir önceki aşamada elde edilen geçici rejim sinyallerinin anlık genlik özneliği kullanılmıştır.



Şekil 4.4 Geçici rejim sinyallerine ait anlık genlik öznelikleri

Şekil 4.4'te altı adet vericiye ait özniteliklerin bir kısmı görülmektedir. Anlık genlik öznitelikleri, görsel olarak analiz edilebilmesi ve daha önceki RF parmak izi çıkarma çalışmalarında yaygın olarak kullanılmış olmasından dolayı tercih edilmiştir. Nitekim bu tez çalışmasında özellikle yüksek SNR değerli verici sinyallerinden elde edilen anlık genlik özniteliği, sınıflandırma başarımını %95 oranlarına kadar yükseltmektedir. Buna karşın, genellikle boyutlarının yüksek olması hesap yükünü arttırmaktadır. Ayrıca, sinyal genliğine olan bağımlılığının yüksek olmasından dolayı ısı gürültüye karşı oldukça duyarlı olduğu gözlenmiştir.

Şekil 4.4'teki öznitelikleri görsel olarak değerlendirmek gerekirse, Tx1 vericisinden elde edilen anlık genlik özniteliği demetinin, diğer vericilerden elde edilen özniteliklere göre oldukça benzer şekilde ve küçük sapmalarla oluştuğu söylenebilir. Bu açıdan Tx2 vericisinden elde edilen öznitelik demetini oluşturan sinyallerin diğer verici özniteliklerine göre daha fazla sapmalarla sahip olduğu görülmektedir. Daha önce belirtildiği gibi anlık genlik özniteliğinin gürültüye olan hassasiyetinden dolayı bu sapmaların, sinyal toplama aşmasında meydana gelen anlık SNR değişimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Her bir vericinin öznitelikleri görsel olarak oluşturdukları örüntüler açısından değerlendirildiğinde, dikkatli bakılırsa her vericinin özniteliklerinin farklı örneklerde farklı genlik değeri dağılımlarına sahip oldukları görülebilir. Örneğin, Tx2 ve Tx4'te ait öznitelik demetleri kıyaslanırsa, Tx2'ye ait özniteliklerin 4.-8. örnekleri arasında aldıkları genlik değerleri yaklaşık 0.2 ile 0.35 aralığında iken, Tx4 vericisinin öznitelikleri aynı örnek değerleri aralığında 0.3 ile 0.4 aralığında değerler almışlardır. Görsel olarak benzer değerlendirmeler diğer vericilerin öznitelikleri açısından da yapılabilir. Fakat, görsel analiz, ancak bir ön değerlendirme olabileceğinden, gözle görülebilen ve görülemeyen bütün farklılıkların baz alınarak yapıldığı en doğru analiz yöntemi, elbette bilgisayar ortamındaki sınıflandırma algoritmaları ile gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, her bir vericiye ait özniteliklerin sınıflandırılması MATLAB ortamında PNN sınıflandırıcı algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiş ve konudaki nicel değerlendirme sonuçları beşinci bölümde sunulmuştur. Yine de anlık genlik özniteliğinin görsel analize imkan vermesi, sınıflandırma öncesinde kabaca tutarlılık kontrolü yapma olanağı sunmaktadır.

4.4 Sınıflandırma Yöntemi

Parmak izi sınıflandırma işlemi, altı adet verici cihaza ait sinyaller toplandıktan sonra bu sinyallerden elde edilen özniteliklerin PNN sınıflandırıcıda sınıflandırılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bunun için her bir vericiden iki farklı SNR değerinde en az 400 adet sinyal toplandıktan sonra geçici rejim sinyalleri elde edilerek oluşturulan anlık genlik öznitelikleri, Monte Carlo çapraz doğrulama (Monte Carlo Cross Validation) yöntemi izlenerek sınıflandırıcıya girilmiştir. Bu yöntem kapsamında, öznitelik veri kümesi belirlenen eğitim-test oranlarında alt kümelere ayrılarak her defasında bir küme test, kalan kümeler eğitim için sınıflandırıcıya girilmiştir. Böylece parmak izi sınıflandırma işleminde eğitim kümesi seçiminden bağımsız bir değerlendirme yapılması sağlanarak yöntemin güvenilirliği arttırılmıştır. Aşağıda, sınıflandırma işleminde kullanılan öznitelik kümesinin, Monte Carlo çapraz doğrulama yöntemine dayalı eğitim ve test kümesi olarak planlanması görülmektedir. Bu yöntemle elde edilen başarımlar, sınıflandırıcı hata oranı histogramı, kutu diyagramı ve hata matrisi olarak bölüm 5.2’de sunulmuştur.

| | | | | |
|----|----|----|-------|----|
| V1 | V2 | V3 | | Vn |
|----|----|----|-------|----|

V(2) ... V(10) ile eğit ve V1 ile test et

| | | | | |
|----|----|----|-------|----|
| V1 | V2 | V3 | | Vn |
|----|----|----|-------|----|

V(1), V(3) ... V(n) ile eğit ve V2 ile test et

| | | | | |
|----|----|----|-------|----|
| V1 | V2 | V3 | | Vn |
|----|----|----|-------|----|

V(1), V(2), V(4) ... V(n) ile eğit ve V3 ile test et

⋮

⋮

| | | | | |
|----|----|----|-------|----|
| V1 | V2 | V3 | | Vn |
|----|----|----|-------|----|

V(1) ... V(n-1) ile eğit ve Vn ile test et

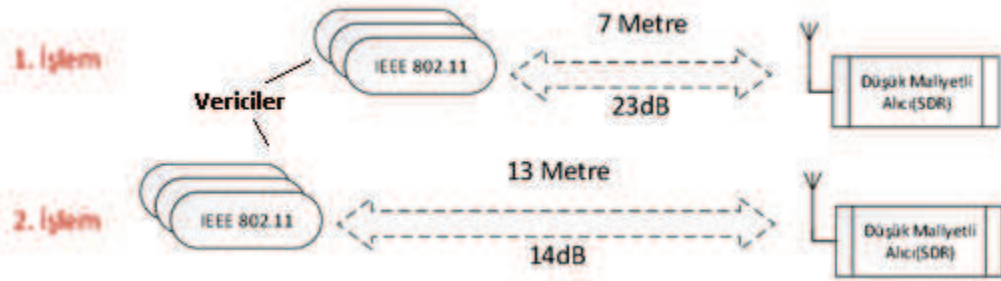
Parmak izi sınıflandırıcısında, öznitelik kümesinden eğitim için kullanılan veri miktarının sınıflandırma başarımlarındaki etkisi de gözlemlenmiştir. Bunun için, eğitim vektörü sayısı değiştirilerek sınıflandırma başarımlarına bakılmış ve sınıflandırıcının doyuma ulaştığı nokta esas alınarak eğitim vektörü sayısı tespit edilmiştir. Bu işlemde eğitim vektörü sayısının her değeri için belirli sayıda Monte Carlo çapraz doğrulaması yapılmıştır. Bu çalışma için elde edilen sonuçlar bölüm 5.1’de verilmiştir.

5. BULGULAR

Bu bölümde, elde edilen bulgular üç alt bölümde verilmiştir. Birinci alt bölümde, sinyal toplama aşamasında elde edilen verici sinyallerinin SNR sonuçları sunulmuştur. İkinci alt bölümde ise, verici sinyallerinden elde edilen RF parmak izlerinin sınıflandırma başarımları ve ilgili değerlendirmeler yer almaktadır. Bu bölümde, sonuçlar ve değerlendirmeler iki farklı SNR seviyesindeki verici sinyalleri için ayrı ayrı sunulmuştur. Değerlendirmeler yapılırken SNR değerinin, geçici rejim sinyali ve anlık genlik özneliği ile olan ilişkisi ve başarıma olan etkileri göz önüne alınmıştır. Son bölümde, S. U. Rehman (2014)'a ait doktora tezinde elde edilen bulgular ile bu çalışmadaki bulgular arasında kıyaslamalar yapılmıştır.

5.1 Toplanan Sinyallerin SNR Seviyeleri

Verici sınıflandırma başarımları değerlendirilirken toplanan sinyallerin SNR seviyelerinin etkisini gözlemleyebilmek için vericiler, şekil 5.1'deki gibi sabit alıcı konumuna göre iki farklı mesafede iken sinyaller toplanmıştır.



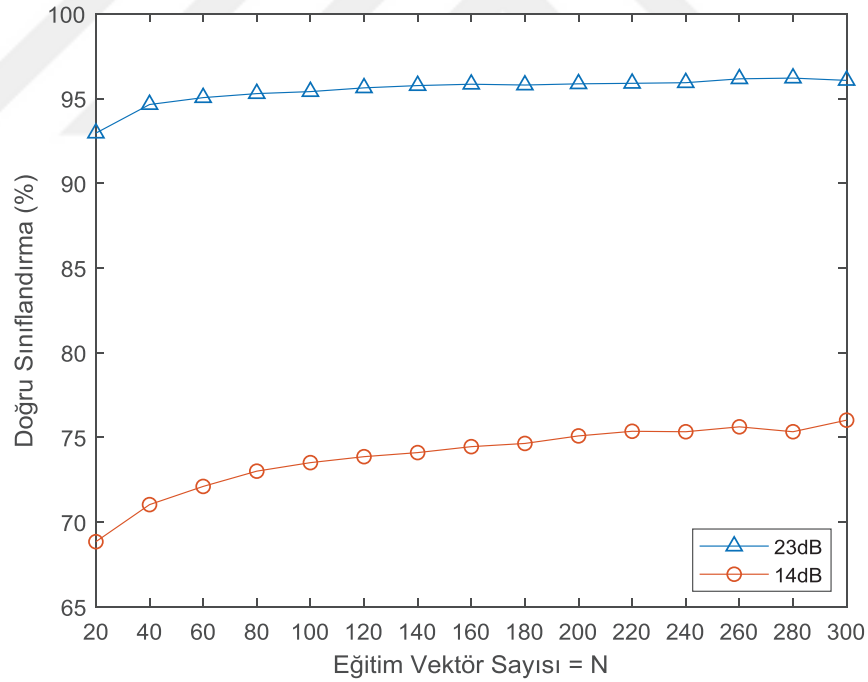
Şekil 5.1 Sinyal toplama esnasında verici ve alıcı arasındaki mesafeler

Birinci konumda vericiler alıcıya yaklaşık 7 metre uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilmiştir. İkinci konumda bu mesafe yaklaşık 13 metre olacak şekilde ayarlanmıştır. Altı farklı vericiden toplanan sinyallerin ortalama SNR seviyesi birinci konum için 23dB ve ikinci konum için 14dB olarak hesaplanmıştır. SNR değerleri her ölçüm için (2.8) eşitliğiyle kestirilmiş ve elde edilen sonuç değerlerinin ortalaması alınmıştır. Böylelikle, her bir vericiden 14dB ve 23dB ortalama SNR seviyesinde 400'er

adet sinyal olmak üzere toplamda bir vericiden 800 adet, dolayısıyla bütün vericilerden toplam 4800 adet sinyal toplanmıştır.

5.2 Verici Sınıflandırma Başarımı

Önceki bölümde söz edilen iki farklı SNR seviyesindeki verici sinyallerinden öncelikle 4.1. bölümünde anlatıldığı gibi Bayes basamak algılayıcı ile geçici rejim sinyalleri elde edilmiştir. Bu sinyallerin anlık genlik değerleri öznitelik olarak PNN sınıflandırıcıya girilmiş ve her iki SNR seviyesi için sınıflandırma başarımları karşılaştırılmıştır. Her verici sinyalinden 12 örnek uzunluğunda anlık genlik özneliği elde edilmektedir. Böylece, bölüm 5.1’de anlatıldığı gibi verici başına her iki SNR seviyesi için toplam 800 adet öznitelik elde edilmiştir. Dolayısıyla altı adet vericiden elde edilen toplam 4800 adet verici özneliği verici sınıflandırılması amacıyla kullanılmıştır.

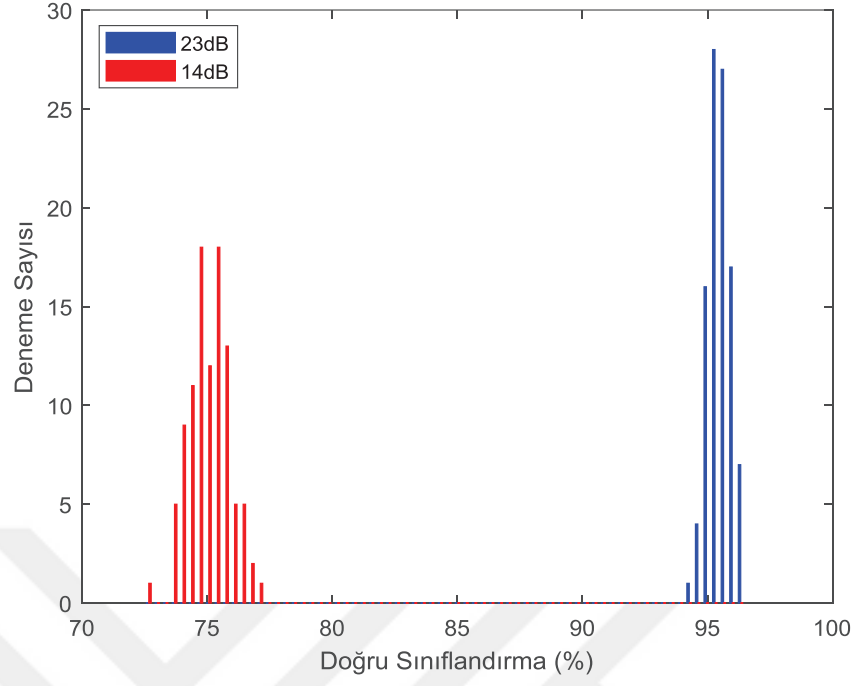


Şekil 5.2 23dB ve 14dB ortalama SNR değerleri için eğitim vektörü sayısına göre doğru sınıflandırma oranı

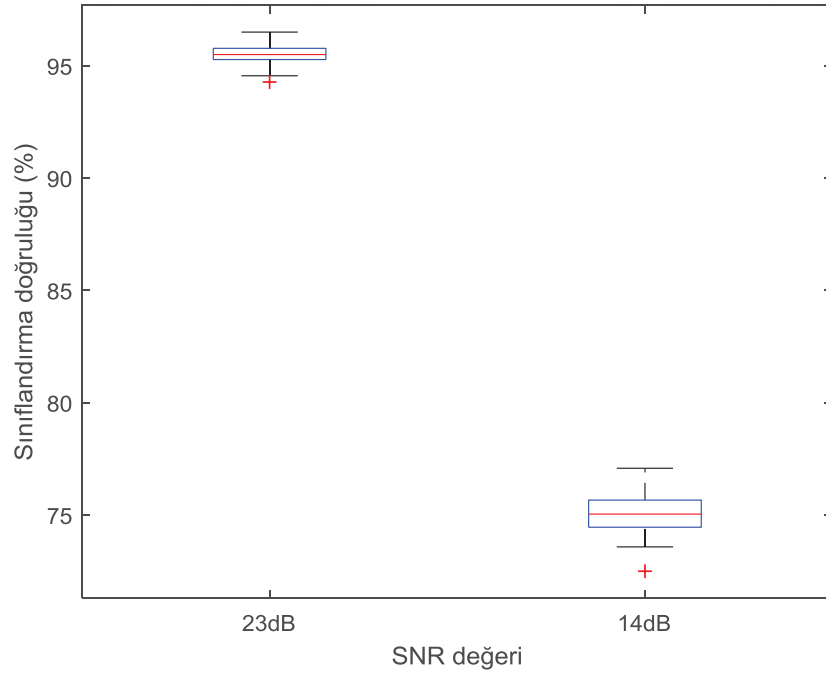
Her iki SNR seviyesi için ayrı ayrı olmak üzere, her bir vericinin N adet öznitelik vektörü eğitim, geriye kalan $400 - N$ adet öznitelik vektörü ise test için kullanılmıştır. Eğitim vektörü sayısı N , 20 ile 300 aralığında değişecek şekilde her defasında 20 arttırılmak üzere eğitim-test işlemi tekrarlanmıştır. Her eğitim-test işleminde bölüm 4.4'te tarif edilen Monte Carlo çapraz doğrulaması 50 defa tekrarlanarak ortalama sınıflandırma başarımı hesaplanmıştır. Şekil 5.2'de iki farklı SNR değeri için sınıflandırıcı başarımları görülmektedir.

Her iki SNR değeri için başarımların karşılaştırıldığında, verici sinyal gücünün sınıflandırılma başarımına doğrudan etki ettiği görülmektedir. Ayrıca, SNR seviyesinin yüksek olduğu veri kümesi için eğitim vektör sayısının 100 değerinden itibaren arttırılmasıyla başarımda önemli bir iyileştirme elde edilemezken, SNR seviyesinin düşük olduğu veri kümesinde aynı etki ancak eğitim vektörü sayısının 200 değerinden sonra elde edilebilmektedir. Bu sonuçlar, yüksek SNR seviyesinde PNN sınıflandırıcının daha az örnek ile eğitilebildiğini göstermektedir.

Her iki SNR değeri için, PNN sınıflandırıcının şekil 5.2'deki grafikte belirlenen doyum noktalarındaki eğitim-test oranları kullanılarak 100 defa Monte Carlo çapraz doğrulama işlemi yapılmıştır. Ortalama sınıflandırma başarımının ve sınıflandırma kararlılığının değerlendirilebilmesi için Monte Carlo çapraz doğrulama işlemlerinden elde edilen başarımların oranları şekil 5.3'teki histogramlarda gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Ortalama 23dB ve 14dB SNR değerindeki verici sinyallerinden elde edilen öznitelik vektörlerinin sınıflandırma başarımı



Şekil 5.4 23dB ve 14dB SNR değeri için sınıflandırma başarımlarının kutu diyagramları

Buna göre, yüksek SNR değerli verici sinyallerinden elde edilen öznitelikler için sınıflandırıcı başarımının ortalama %95,49 oranında ve 0.43 standart sapma değerine sahip bir dağılımda olduğu görülmektedir. Diğer yandan, düşük SNR değerindeki verici sinyallerinden elde edilen özniteliklerin sınıflandırma başarımının ortalaması %75,06 iken dağılımının standart sapması 0.83 değerinde olmuştur. Bu verilere göre, yüksek SNR seviyesindeki verici sinyallerinden elde edilen özniteliklerin, düşük SNR değerli verici sinyallerinden elde edilen özniteliklere göre daha yüksek başarımla ve daha kararlı olarak sınıflandırıldığı söylenebilir. Ancak, her iki SNR değeri için histogramlarda görüldüğü üzere, geçici rejim sinyallerinden elde edilen anlık genlik özniteliklerinin sınıflandırma başarımları genel olarak düşük sapmalarda gerçekleşmiştir.

Verici sınıflandırma başarımı oranlarının ve bu oranların dağılımının betimleyici bir gösterimi için kutu diyagramlarından yararlanılmıştır. Bu amaçla, daha önce şekil 5.2'teki başarımlar grafiğinde belirlenen eğitim-test vektörü oranları kullanılarak şekil 5.4'teki kutu diyagramları elde edilmiştir. 100 Monte Carlo çapraz doğrulama ile elde edilen başarımların değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralandığı kabul edilirse, ikinci çeyreklik olarak da adlandırılan ortanca (median) değer, kutuların içindeki kırmızı çizgi ile gösterilmektedir. Kutuların üst sınırı, %75'inci yüzdelerlik (birinci çeyreklik) olarak adlandırılır ve ortanca değer ile en yüksek başarımların değeri arasında kalan orta noktadaki değeri gösterir. Kutuların alt sınırı ise %25'inci yüzdelerlik (üçüncü çeyreklik) adı verilen, ortanca değer ile en düşük başarımların değeri aralığında kalan orta noktadaki değerdir. En yüksek ve en düşük başarımların değerleri, kutu sınırlarının dışında kalan çizgilerle ifade edilmiştir. Kırmızı ile gösterilen '+' işareti ise ortanca değer hesaplaması dışında tutulan uç değeri temsil etmektedir.

Bu tanımlardan yola çıkarak şekil 5.4'te 23dB SNR değeri için elde edilen başarımların ortanca değeri %95,5, birinci çeyreklik değeri %95,77 ve üçüncü çeyreklik %95,27 olarak elde edilmiştir. Ortanca değer hesaplamasına giren en yüksek değer %96,50 iken en düşük değer %94,55 olmuştur. Başarımların ortanca değerinin küçük miktarda kutu alt sınırına yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, 23dB SNR için başarımların dağılımının negatif bir çarpıklığa sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, %94,27 değerinde bir uç değer gözlemlenmektedir. 14dB SNR seviyesi için

başarım oranlarının kutu diyagramında ortanca değer %75.04, birinci ve üçüncü çeyreklikler de sırasıyla %75,66 ve %74,45 olarak hesaplanmıştır. Ortanca hesabına giren en yüksek başarım oranı %77.08, en düşük başarım oranı ise %73,58 olmuştur. Ortanca hesaplamasının dışında kalan uç değer ise %72,5'tir. Bu grafikte de ortanca değer oldukça küçük miktarda kutu alt sınırına yakın olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, 23dB SNR değerindeki dağılıma benzer olarak 14dB SNR seviyesi için başarım oranlarının dağılımının yine negatif bir çarpıklığa sahip olduğu görülmektedir. Kısaca, her iki SNR değeri için dağılımların simetrik olmadığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, yüksek SNR değeri için elde edilen dağılımın görece daha dar olması, sınıflandırma kararlılığının SNR değeri ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir.

Her bir vericinin sınıflandırma başarımlarının değerlendirilebilmesi için hata matrislerinden yararlanılmıştır. Hata matrisleri, iki farklı SNR seviyesi için ayrı ayrı olmak üzere, verici sinyallerinden elde edilen anlık genlik özniteliklerinin sınıflandırma sonuçlarından elde edilmiştir. Sınıflandırma işlemi, şekil 5.2'de belirlenen eğitim-test vektörü oranlarında 100 Monte Carlo çapraz doğrulaması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 23dB ve 14dB SNR seviyesi için elde edilen hata matrisleri çizelge 5.1'de ve çizelge 5.2'de verilmiştir.

Yüksek SNR seviyesi için başarım değerleri incelendiğinde, Tx6'nın %97,76 ile en yüksek oranda ayırt edilebildiği görülmektedir. En düşük başarım ise %92,11 oranıyla Tx3 için gerçekleşmiştir. Örnek olarak Tx3 vericisinin değerleri incelendiğinde, %6,78 oranıyla diğer vericilere göre en fazla Tx6 vericisi olarak yanlış sınıflandırıldığı görülmektedir. Aynı şekilde Tx4 vericisi için yanlış sınıflandırma, %4,66 oranıyla en çok Tx5 olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak Tx6 vericisinin diğer vericilere göre en özgün parmak izlerine sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 5.1 23dB SNR seviyesi için hata matrisi

| Doğru sınıf | Öngörülen sınıf | | | | | |
|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Tx1 | Tx2 | Tx3 | Tx4 | Tx5 | Tx6 |
| Tx1 | 94,49 | 0,04 | 0,07 | 3,09 | 2,06 | 0,26 |
| Tx2 | 0,41 | 97,21 | 0,18 | 0,51 | 0,32 | 1,36 |
| Tx3 | 0,33 | 0,52 | 92,11 | 0,15 | 0,12 | 6,78 |
| Tx4 | 0,72 | 0,30 | 0,05 | 94,26 | 4,66 | 0,01 |
| Tx5 | 0,71 | 0,00 | 0,31 | 1,80 | 97,16 | 0,02 |
| Tx6 | 0,03 | 0,52 | 1,47 | 0,12 | 0,09 | 97,76 |

Düşük SNR değerinde özellikle Tx1 ve Tx5 vericisinin sınıflandırma başarımının diğerlerine göre bariz bir şekilde düştüğü gözlenmektedir. Çizelge incelendiğinde Tx1 %41,27 sınıflandırma oranıyla en düşük başarımla sınıflandırılan verici olmuştur. Diğer taraftan %37,62 oranıyla Tx6 vericisi olarak yanlış sınıflandırılmıştır. Tx2, Tx3 ve Tx4 ise yüksek SNR değerinde olduğu gibi yüksek sınıflandırma oranlarına sahiplerdir.

Çizelge 5.2 14dB SNR seviyesi için hata matrisi

| Doğru sınıf | Öngörülen sınıf | | | | | |
|-------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Tx1 | Tx2 | Tx3 | Tx4 | Tx5 | Tx6 |
| Tx1 | 41,27 | 5,37 | 12,62 | 0,75 | 2,39 | 37,62 |
| Tx2 | 0,84 | 94,84 | 4,02 | 0,00 | 0,03 | 0,28 |
| Tx3 | 0,11 | 3,96 | 95,77 | 0,01 | 0,07 | 0,09 |
| Tx4 | 0,41 | 0,09 | 2,96 | 95,75 | 0,49 | 0,32 |
| Tx5 | 8,42 | 1,50 | 9,61 | 24,46 | 47,35 | 8,67 |
| Tx6 | 9,05 | 2,55 | 11,03 | 1,49 | 0,48 | 75,42 |

İki çizelgede yer alan değerler kıyaslandığında, bazı vericilere ait parmak izlerinin sinyal gücüne bağlı olarak diğerlerine göre daha olumsuz etkilendiği görülmektedir. Vericilerin sınıflandırılmasında kullanılan anlık genlik özneliği geçici rejim sinyallerinden elde edilmektedir. Verici sinyallerinin SNR değerinin düşmesi ile ortaya çıkan genlik bozulması, özneliklerin kaynağı olan geçici rejim sinyalinin genliği için de geçerlidir. Dolayısıyla, anlık genlik özneliklerinin sinyal genliği ile doğrudan ilintili olması nedeniyle düşük SNR değerlerindeki sınıflandırma başarımlarının azalması beklenmektedir. Ayrıca, geçici rejim sinyalinin tespiti için kullanılan Bayes basamak algılayıcı sinyal genliği üzerinden algılama yapmaktadır. Bu nedenle, SNR değerinin düşmesiyle beraber sinyal genliğinde oluşan bozulmaların, basamak algılayıcı tarafından geçici rejim sinyalinin başlangıcı olarak algılanan konumlarda kaymalara sebep olabileceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, çizelge 5.2'deki bazı vericilerin sınıflandırma başarımlarındaki belirgin düşüşlerin nedeni, sinyal gücünün düşmesine bağlı olarak anlık genlik özneliklerinin özgünlüğünün azalması ve Bayes basamak algılayıcıdaki hatalı algılamaların artması olarak açıklanabilir.

5.3 Benzer Bir Çalışma ile Kıyaslama

5.2. bölümün altında sunulan bulgular, S. U. Rehman (2014)'e ait doktora tezinde bölüm 5.3 altında yer alan bulgular ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamanın nedeni, yazarın çalışması ile bu tez çalışması arasında bazı önemli benzerliklerin ve farklılıkların olmasıdır.

Benzerlikler:

- Düşük maliyetli alıcılar için RF parmak izi çıkarma konusunun ele alınmış olması,
- Sınıflandırılan kablosuz vericilerin IEEE 802.11 standardında çalışması,
- Düşük maliyetli kablosuz alıcı olarak YTR'nin kullanılması ve düşük örnekleme frekansı (25 MSPS) ile çalışılması,

S. U. Rehman'ın (2014) çalışmasının bu tez çalışmasındaki kıyasla farkları:

- Sınıflandırılan özneliklerin güç spektral katsayılarından elde edilmiş olması,
- Özneliklerin verici sinyallerinin öncül kısmından elde edilmiş olması,
- Verici sinyallerinin SNR değerinin yapay olarak değiştirilmiş olması,

Yazara ait çalışmada, 15dB SNR seviyesi için verici olarak ayarlanmış 6 adet YTR, düşük maliyetli alıcı olarak ayarlanan başka bir YTR tarafından sınıflandırılarak elde edilen başarımları gösteren hata matrisleri verilmiştir. Bu sınıflandırma işlemleri, kullanılan 7 adet YTR alıcı-vericininin 1 adedi düşük maliyetli alıcı, kalan 6 adeti verici olacak şekilde 7 farklı şekilde oluşturulan deney düzeneği için tekrarlanarak 7 farklı hata matrisleri elde edilmiştir. Yazarın çalışmasındaki çizelge 5.1’de yer alan düşük maliyetli alıcı ile elde edilen sınıflandırma başarımlarının hata matrisi aşağıda verilmiştir. Bu tez çalışmasında 14dB SNR değerindeki verici sinyalleri için elde edilen sınıflandırma başarımları ile yazarın elde ettiği bulgu kıyaslandığında oldukça benzer sonuçların varlığı dikkati çekmektedir. Özellikle, çizelge 5.3’te görüldüğü gibi Tx3 vericisinin sınıflandırma başarımları %50 gibi düşük oranda gerçekleşirken Tx1 vericisinin başarımlarında herhangi bir düşüş gözlemlenmemiştir. Diğer vericiler ise %94-%72 aralığında bir başarıma sahiptir. Yazarın elde ettiği bu değerler ile çizelge 5.2’deki verilerin benzer bir karakter sergilediği söylenebilir.

Çizelge 5.3 S. U. Rehman (2014) doktora tezi çalışmasındaki çizelge 5.1’de yer alan 15dB SNR değeri için 6 adet vericinin düşük maliyetli alıcıda elde edilen sınıflandırma başarımları

| Doğru sınıf | Öngörülen sınıf | | | | | |
|-------------|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | Tx1 | Tx2 | Tx3 | Tx4 | Tx5 | Tx6 |
| Tx1 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Tx2 | 4 | 94 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Tx3 | 0 | 0 | 50 | 28 | 6 | 16 |
| Tx4 | 0 | 0 | 23 | 72 | 1 | 5 |
| Tx5 | 0 | 1 | 10 | 3 | 84 | 1 |
| Tx6 | 0 | 0 | 7 | 5 | 1 | 87 |

Bu kıyaslamalardan yola çıkarak yazarın öne sürmüş olduğu varsayımın aksine, düşük maliyetli alıcılar kullanılarak, geçici rejim sinyali üzerinden RF parmak izi çıkarma işleminde kabul edilebilir başarımların yakalanması için yüksek örnekleme frekansının

gerekmediği görülmektedir. Ayrıca, yazar farklı SNR değerleri elde etmek için MATLAB ortamında verici sinyallerine yapay gürültü ekleme yöntemini seçmiştir. Bu çalışmada ise SNR değerleri, verici ile alıcı arasındaki mesafe değiştirilerek elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmadaki bulgular elde edilirken mümkün olduğunca gerçek koşullar sağlanmaya çalışılmıştır.



6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Tezde, kablosuz haberleşmede güvenlik için ek bir katman oluşturabilmek amacıyla düşük maliyetli alıcılarda RF parmak izi çıkarma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda, yüksek maliyetli alıcılarda 5-6 GHz gibi yüksek mertebelerdeki örnekleme hızları ile elde edilen RF parmak izlerinin aksine düşük maliyetli alıcı kullanılarak, 60 MHz gibi düşük bir örnekleme hızında verici parmak izleri elde edilmiştir. Ayrıca, düşük maliyetli alıcıların kullanıldığı diğer çalışmalardaki RF parmak izleri sinyalin öncül bölgesinden elde edilmiş iken, tez çalışmasında geçici rejim sinyalinden elde edilmiştir. RF parmak izi çalışmaları, altı adet IEEE 802.11b vericisinden 23dB SNR değerinde 2400 adet, 14dB SNR değerinde ise yine 2400 adet olmak üzere toplamda 4800 adet iletim sinyali toplamak suretiyle gerçek çevresel koşullar altında ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3'te parmak izi çıkarma sisteminin blok şeması verilerek sistem tanımı yapılmış, her bir blok için deneysel çalışmanın aşamaları anlatılmıştır. Verici sinyallerinin toplanması için gerçekleştirilen çalışmalar, kullanılan yöntemler, ekipman ve yazılım araçlarının ayrıntıları bu bölümde verilmiştir. Vericilere ait sinyallerin kontrolsüz bir ortamda elde edilebilmesi ve sinyal işleme süreci için vericilere göre ayrı ayrı kaydedilmesi için MATLAB ortamında WLAN yazılım aracı kullanılmıştır. Bu sayede, mevcut bazı çalışmalardaki gibi RF sinyal katmanına doğrudan kablo bağlantısı yaparak sinyal toplama (Danev 2012), vericiye yakın mesafeden sinyal toplama (Stubbs 2014) ya da yankılaşsız oda (anechoic chamber) gibi RF izoleli bir ortamda (Scanlon 2010) sinyal toplama gibi yöntemlere ihtiyaç kalmamıştır.

Bölüm 4.1'de geçici rejim sinyali için standartta tanımlanan kısıtlara yer verilerek, elde edilmesinde kullanılan yöntem anlatılmıştır. Bölüm 4.2'de geçici rejim sinyali ile öncül sinyal bölgesi RF parmak izi çıkarma işlemleri açısından kıyaslanmış, geçici rejim sinyalin avantajlarından bahsedilmiştir. Bölüm 4.3'te ise geçici rejim sinyallerinden elde edilen anlık genlik öznitelikleri grafikler halinde verilmiştir. Sınıflandırma yönteminde kullanılan eğitim-test veri setinin kümelenebilmesi ve organizasyonu bölüm 4.4'te

anlatılmıştır. Ayrıca, deneysel çalışma sürecinde Monte Carlo çapraz doğrulama yönteminin PNN sınıflandırıcıdaki kullanımı bu bölümde anlatılmıştır.

Bölüm 5'te vericilerden toplanan ortalama 23dB ve 14dB SNR seviyesindeki sinyallerden elde edilen özneliklerin sınıflandırma başarımları değerlendirilmiştir. Değişen sayıda eğitim-test vektörü ile Monte Carlo çapraz doğrulama yöntemi kullanılarak PNN sınıflandırıcının başarımları test edilmiş, her bir verici için sınıflandırma oranları grafikler ve çizelgeler halinde verilmiştir. SNR değeri yükseldikçe sınıflandırıcının daha az sayıda eğitim vektörü ile eğitildiği gözlenmiştir. Dolayısıyla, verici sinyali gücünün PNN sınıflandırıcının eğitimine doğrudan etki ettiği anlaşılmıştır. Diğer yandan, elde edilen başarımların histogramları ve kutu diyagramlarında her iki SNR değeri için sınıflandırıcının kararlılığını sürdürdüğü görülmüştür. Her bir verici için sınıflandırma oranları incelendiğinde, genel olarak yüksek SNR değerinde bütün RF parmak izlerinin özgünlüğünü koruduğu gözlemlenmiş, ortalama %95 sınıflandırma başarımları elde edilmiştir. Ortalama SNR değerinin 14dB'ye düşmesiyle bazı verici parmak izlerinde bozulmaların olduğu gözlenmiş, bu durumun anlık genlik özneliğinin geçici rejim sinyali genliğine olan bağımlılığından kaynaklandığı düşünülmüştür. Yine de genel olarak %75 gibi kabul edilebilir bir sınıflandırma başarımları elde edilmiştir. Bölüm 5.3'te 14dB SNR seviyesi için her bir vericinin sınıflandırma başarımları, bu tez çalışmasına oldukça benzer olan başka bir çalışmada, 15dB SNR seviyesindeki verici sinyalleri kullanılarak elde edilen sınıflandırma başarımları ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamada, yazarın öncül sinyal bölgesine ait güç spektral özneliklerini kullanarak elde ettiği sınıflandırma başarımları ile bu çalışmada elde edilen başarımların oldukça benzer olduğu görülmüştür. Böylece, geçici rejim sinyali kullanılarak RF parmak izi çıkarmak için yüksek örnekleme hızının gerekmediği sonucu desteklenmiştir.

Verici sinyallerinin ortalama SNR değerinin Bayes basamak algılayıcı performansı ile olan ilişkisi, elde edilen sinyal özneliklerinin özgünlüğünü etkilemesi ve doğal olarak parmak izi başarımlarını belirlemesi açısından en önemli faktör olduğu söylenebilir. Ayrıca kullanılan özneliğin gürültü performansı başarımları etkileyen bir başka etkidir. Bu sonuçların ışığında, mevcut yöntemlerin iyileştirilmesi ya da daha uygun algılayıcı ve öznelik kullanımı ile zorlu koşullar altında daha sağlam RF parmak izi çıkarımı mümkün

görülmektedir. Yine de geçici rejim sinyali üzerinden elde edilen RF parmak izlerinin farklı SNR değerlerindeki başarımları göz önüne alındığında, mevcut çalışmalarda kabul edilen varsayımların aksine diğer sinyal bölgelerinden elde edilen RF parmak izi başarımları ile yarışabilir seviyede olduğu bu çalışmayla gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, geçici rejim sinyal bölgesinin kablosuz haberleşme açısından evrenselliği ve kullanılan özniteliğin hesaplama yükünün hafif olmasının avantajları korunarak kabul edilebilir başarımlar elde edilmiştir. Bu yönüyle elde edilen sonuçlar, özellikle IoT gibi düşük güç sarfiyatı gerektiren alıcılarda ve düşük tepki gecikmesi istenen uygulamalarda, geçici rejime sinyaline dayalı fiziksel katman güvenliğinin hayata geçirilebilir olduğunu göstermesi bakımından umut vermektedir. Diğer yandan, geçici rejim sinyali kullanılarak parmak izi çıkarılması konusunda anlık genlik değerlerinin dışında farklı özniteliklerin denenmesi, fiziksel katman güvenliğinin düşük tepki gecikmesinin gerektiği alanlara uygulanabilirliği konusunda daha çok fikir verecektir. Bu bağlamda, geçici rejim sinyallerinden spektral özniteliklere ya da istatistiksel tabanlı özniteliklere dayalı RF parmak izi çıkarma yaklaşımları gelecek çalışma konuları olarak değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Analog Devices. 2014. <https://wiki.analog.com/resources/eval/user-guides/ad-fmcomms3-ebz>. Erişim Tarihi: 10.01.2020.
- Baldini, G., Giuliani, R., Steri, G. and Neisse, R. 2017. Physical layer authentication of Internet of Things wireless devices through permutation and dispersion entropy. Global Internet of Things Summit (GloTS), 1-6.
- Baldini, G., Giuliani, R. and Dimc, F. 2018. Physical layer authentication of Internet of Things wireless devices using convolutional neural networks and recurrence plots. Internet Technology Letters.
- Bullock S. R. 2018. Transceiver and system design for digital communications. 5.th edition. 524 s.
- Bertoncini, K. Rudd, B. Nousain and M. Hinders. 2012. Wavelet Fingerprinting of Radio-Frequency Identification (RFID) Tags. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 12. 4843-4850.
- Danev, B. and Capkun, S. 2010. Defrawy, "Attacks on physical-layer identification," in Proc. ACM Conf on Wireless network security, 89-98.
- Digilent. 2012. <https://store.digilentinc.com/zedboard-zynq-7000-arm-fpga-soc-development-board/>. Erişim Tarihi: 10.01.2020.
- H. Darabi et al. 2003. A dual mode 802.11b/Bluetooth radio in 0.35/ μ m CMOS. 2003 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. ISSCC. 86-479.
- IEEE Std. 802.11 2012. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- Kalivas G. 2009. Digital System Design. A John Wiley and Sons, Ltd, Publication. 458 s.
- Kennedy, I. O., Scanlon, P. and Buddhikot, M. M. 2008a. Passive steady state rf fingerprinting: A cognitive technique for scalable deployment of cochannel femto cell underlays. 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 1-12.
- Kennedy, I. O., Scanlon, P., Mullany, F. J., Buddhikot, M. M., Nolan, K. E. and Rondeau, T. W. 2008b. Radio transmitter fingerprinting: A steady state frequency domain approach. Vehicular Technology Conference, VTC 2008-Fall. IEEE 68th, Calgary, BC, 1-5.
- Klein, R., Temple, M. A. and Mendenhall, M. J. 2009a. Application of wavelet-based RF fingerprinting to enhance wireless network security. Journal of Communications and Networks, 11(6), 544-555.

- Klein, R.W., Temple, M.A., Mendenhall, M.J. and Reising, D.R. 2009b. Sensitivity analysis of burst detection and RF fingerprinting classification performance. International Conference on Communications (ICC), 1-5.
- Klein, R.W., Temple, M.A. and Mendenhall, M.J. 2010. Application of wavelet denoising to improve OFDM-based signal detection and classification. Security and Communication Networks, 3(1), 71-82.
- Klueszka, J. N., 2014. Radio frequency fingerprinting techniques through preamble modification in IEEE 802.11b, Yüksek Lisans Tezi. 83 s.
- Köse, M. and Telatar, Z. 2010. An approach on identification of 802.11b devices by RF signature in wireless local area networks. IEEE 18th Signal Process. And Commun. Appl. Conf. (SIU), 800-803.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S. ve Telatar, Z. 2011a. Kablosuz yerel alan ağları sinyali fazlarının istatistiksel analizi, 7. İstatistik Kongresi (İSTKON7), 344-345.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S. and Telatar, Z. 2011b. Bayesian change point analysis using the phase distribution of complex signals. Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Series A2-A3, 53(1), 15-23.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S. and Telatar, Z. 2015a. Wireless device identification using descriptive statistics. Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Series A2-A3, 57(1), 1-10.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S. and Telatar, Z. 2015b. The effect of transient detection errors on RF fingerprint classification performance. 14th Int. Conf. on Circuits, Syst., Electron., Control & Signal Process. (CSECS 15), 89-93.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S. and Telatar, Z. 2015c. Signal-to-noise ratio estimation of noisy transient signals. Commun. Fac. Sci. Univ. Ank. Series A2-A3, 57(1), 11-19.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S. and Telatar, Z. 2018. Değişim noktası kestirimi için CUSUM algoritmasının başarımlı değerlendirilmesi, DÜMF Mühendislik Dergisi, vol. 9, no. 1, pp. 99-108.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S. and Telatar, Z. 2019a. RF Fingerprinting of IoT devices based on transient energy spectrum, IEEE Access, vol. 7, pp. 18715-18726. 103
- Köse, M., 2019b. Kablosuz Vericilerin Açılma Geçici Rejim Sinyallerine Dayalı RF Parmak İzleri Kullanılarak Sınıflandırılması. Doktora Tezi. 111 s.
- Lowder, W. M, 2015. Real-time RF-DNA fingerprinting of zigbee devices using a software defined radio with FPGA processing. Yüksek Lisans Tezi. 62 s.
- Lyons, R.G. 2004. Understanding Digital Signal Processing. Second edition, Prentice-Hall, 688 s.
- Masters, T. 1993. Practical Neural Network Recipes in C++. Morgan Kaufmann, 493 s.
- Mitola J. 1995. The Software Radio Architecture IEEE Communications Magazine. 26-38.

- Nguyen, N. G. Zheng, Z. Han, and R. Zheng. 2011. Device fingerprinting to enhance wireless security using nonparametric bayesian method. IEEE INFOCOM. 1404–1412.
- Nansai Hu and Y. Yao. 2012. Identification of legacy radios in a cognitive radio network using a radio frequency fingerprinting based method. IEEE International Conference on Communications (ICC). 1597-1602.
- D. Nouichi, M. Abdelsalam, Q. Nasir and S. Abbas. 2019. IoT Devices Security Using RF Fingerprinting. Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). 1-7.
- Rehman, S.U., Sowerby, K. and Coghill, C. 2012a. Analysis of receiver front end on the performance of RF fingerprinting. IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - (PIMRC), Sydney, NSW, 2494-2499.
- Rehman, S.U., Sowerby, K. and Coghill, C. 2012b. RF fingerprint extraction from the energy envelope of an instantaneous transient signal. Commun. Theory Workshop (AusCTW), 90-95.
- Rehman, S. U., Sowerby, K., Coghill, C. 2013. Analysis of impersonation attacks on system using RF fingerprinting and low-end receivers. Journal of Computer and System Sciences. 591-601.
- Rehman, S.U., Sowerby, K. and Coghill, C. 2014a. Radio-frequency fingerprinting for mitigating primary user emulation attack in low-end cognitive radios. IET Communications, 8(8), 1274–1284.
- Rehman. 2014b. Radio Frequency Fingerprinting for Low-end Wireless Devices. Doktora Tezi. 165 s.
- Reising, D.R., Temple, M.A. and Mendenhall, M.J. 2010. Improving intra-cellular security using air monitoring with RF fingerprints. Wireless Communications and Networking Conference ,1-6.
- Reising, D.R., Temple, M.A. and Jackson, J.A. 2015. Authorized and rogue device discrimination using dimensionally reduced RF-DNA fingerprints. IEEE Transaction on Information Forensics and Security, 10(6), 1180-1192.
- Rudell J. C. et al.. 1999. Recent developments in high integration multi-standard CMOS transceivers for personal communication systems. Proceedings. 1998 International Symposium on Low Power Electronics and Design (IEEE Cat. No.98TH8379). 149-154.
- O’Ruanaidh, J.J.K. and Fitzgerald, W.J. 1996. Numerical Bayesian methods applied to signal processing. Springer-Verlag, 244.
- Safavian. 2005. Classification of power systems transients. Prentice- Hall, 688 s.

- Scanlon P., Kennedy I. O. and Liu Y., 2010, Feature extraction approaches to RF fingerprinting for device identification in femtocells. *Bell Labs Technical Journal*, vol. 15, no. 3, 141-151.
- Serinken, N. and Üreten, O. 2000. Generalised dimension characterisation of radio transmitter turn-on transients. *Electronics Letters*, 36(12), 1064-1066.
- Shalev-Shwartz, S. and Ben-David, S. 2014. *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms*. Cambridge Univ. Press, 409 p., USA.
- Sharaf-Dabbagh, Y. and Saad, W. 2016. On the authentication of devices in the internet of things, in: *Proc. IEEE 17th Int. Symp. on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Netw. (WoWMoM)*, 1-3. 104
- Specht, D. F. 1990. Probabilistic neural networks. *Neural Networks*, vol. 3, 109-118.
- Stetzler T., Post I., Havens J., Koyama M. 1995. A 2.7 V to 4.5 V single-chip GSM transceiver RF integrated circuit. *Proceedings ISSCC '95 - International Solid-State Circuits Conference*. 150-151.
- Stubbs, T. D., 2014. Comparison of RF-DNA fingerprinting using high/low value receivers with zigbee devices. 64 s.
- Taşcıoğlu, S. Köse, M. and Telatar, Z. 2017. Effect of sampling rate on transient based RF fingerprinting, in *Proc. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO2017)*, pp. 1156-1160.
- Taşcıoğlu, S. Köse, M. and Telatar, Z. 2018. Polinom uydurma yöntemi kullanarak RF parmak izi çıkarımı, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, vol. 9, no. 1, pp. 89-97.
- Theodoridis, S. and Koutroumbas, K. 2009. *Pattern Recognition*. Fourth edition, Elsevier, 984 p., USA.
- U. Meyer and S., Wetzel. 2004. "A man-in-the-middle attack on umts," in *Proceedings of the 3rd ACM workshop on Wireless security*; 90–97.
- Üreten, O. 2000. Telsiz vericilerinin açılma geçici rejim sinyallerinin algılanması, modellenmesi, sınıflandırılması. *Doktora Tezi*, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Üreten, O. and Serinken, N. 1999. Detection of radio transmitter turn-on transients. *Electronics Letters*, 35(23); 1996-1997.
- Üreten, O. and Serinken, N. 2005. Bayesian detection of Wi-Fi transmitter RF fingerprints. *Electronics Letters*, 41(6); 373-374.
- Üreten, O. and Serinken, N. 2007. Wireless security through RF fingerprinting. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 32(1); 27-33.
- Williams, M. D., Temple, M.A. and Reising, D.R. 2010a. Augmenting Bit-Level Network Security Using Physical Layer RF-DNA Fingerprinting. *IEEE Global Telecommun. Conference (GLOBECOM)*, 1-6.

- Williams, M.D., Munns, S.A., Temple, M.A. and Mendenhall, M.J. 2010b. RF-DNA Fingerprinting for Airport WiMAX Communications Security. 4th Int. Conf. Netw. Syst. Security (NSS), 32-39. 105
- Xu, Q., Zheng, R., Saad, W. and Han, Z. 2016. Device fingerprinting in wireless networks: Challenges and opportunities. *IEEE Commun. Surveys Tuts.* 18(1), 94-104.
- Yuan, H.L. and Hu, A.Q. 2010. Preamble-based detection of Wi-Fi transmitter RF fingerprints. *Electronics Letters*, 46(16), 1165-1167.
- Yuan, Y.J., Wang, X., Huang, Z.T. and Sha, Z.C. 2015. Detection of radio transient signal based on permutation entropy and GLRT. *Wireless Personal Communications*, 82(2), 1047-1057.
- Zamora G., S. Bergin, and I. Kennedy. 2010. Using Support Vector Machines for Passive Steady State RF Fingerprinting. *Novel Algorithms and Techniques in Telecommunications and Networking*. 183-188.
- Zhao, C., Chi, T.-Y., Huang, L., Yao, Y. and Kuo, S.-Y. 2013. Wireless local area network cards identification based on transient fingerprinting. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 13, 711-718.

EKLER

EK 1 Bayes Rampa ve Basamak Algılayıcıların Matris Formundaki Eşitlikleri

EK 2 Bazı Türkçe Terimlerin İngilizce Karşılıkları



EK 1 Bayes Rampa ve Basamak Algılayıcıların Matris Formundaki Eşitlikleri

Basamak algılayıcı için parçalı gözlemlenmiş model matrisi

$$G^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

şeklinde yazılmaktadır. G matrisinde birinci stunun m adet satırı 1 ve geri kalan (N - m) adedi 0'dır. İkinci sütunun m adet satırı 0, geri kalan (N-m) adedi 1'dir. Sonsal olasılık değeri hesaplamada kullanılan terimler şöyledir:

$$G^T G = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & N - m \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$(G^T G)^{-1} = (m(N - m))^{-1} \begin{bmatrix} N - m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

$$d^T G = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m d_i & \sum_{i=m+1}^N d_i \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$d^T d = \sum_{i=1}^N d_i^2 \quad (\text{A.5})$$

Yukarıdaki eşitlikler aşağıdaki sonsal yoğunluk eşitliğinde yerine yazılarak her örnek için değişim noktası olma olasılığı hesaplanmaktadır.

$$p(\{m\}|d, l) \propto \frac{[d^t d - d^t G (G^T G)^{-1} d]^{\frac{-(-N-M)}{2}}}{\sqrt{\det (G^T G)}} \quad (\text{A.6})$$

Değişim noktası olan m değeri bu değerlerin en büyük olduğu noktanın indisi olmaktadır (O'Ruanaidh ve Fitzgerald 1996).

Rampa algılayıcı için yukarıdaki eşitliklerde sadece G matrisi değiştirilmiştir. Değişim noktasından sonra rampa değişimini gösteren model matrisi:

$$G^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \dots & \dots & \dots & 1 & 1 & \dots & \dots & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & \dots & N - m \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

$$G^T G = \begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^{N-m} i \\ \sum_{i=1}^{N-m} i & \sum_{i=1}^{N-m} (i)^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$(G^T G)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 \\ N \sum_{i=1}^{N-m} (i)^2 - \sum_{i=1}^{N-m} i \sum_{i=1}^{N-m} i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} - \sum_{i=1}^{N-m} (i)^2 & - \sum_{i=1}^{N-m} i \\ - \sum_{i=1}^{N-m} i & N \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$d^T G = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m d_i & \sum_{i=m+1}^N d_i * (i - m) \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

$$d^T d = \sum_{i=1}^N d_i^2 \quad (\text{A.11})$$

Yukarıdaki eşitlikler (A.6) eşitliğinde yerine konulduktan sonra her bir veri noktasının değişim noktası olma olasılığı hesaplanır. Bu değerlerin teorik olarak en büyük olduğu nokta değerinin yeri m değişim noktasıdır (Üreten ve Serinken 2005).

EK 2 Bazı Türkçe Terimlerin İngilizce Karşılıkları

| | |
|---------------------------|------------------------|
| Fiziksel Katman | Physical Layer |
| Frekans Düşürücü | Downconverter |
| Geçici rejim | Transient |
| Kalıcı durum | Steady state |
| Önsel dağılım | Prior distribution |
| RF parmak izi | RF fingerprint |
| RF parmak izi çıkarımı | RF fingerprinting |
| Sonsal dağılım | Posterior distribution |
| Tepki gecikmesi | Latency |
| Yazılım Tanımlamalı Radyo | Software Defined Radio |

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Abdullah ASLAN

Doğum Yeri : Seydişehir

Doğum Tarihi : 14.04.1984

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Seydişehir Mahmut Esad Anadolu Lisesi (2002)

Lisans : Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi (2007)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2013- Şubat 2020)

Çalıştığı Kurum ve Yıl:

Başaranlar Mühendislik A.Ş. (2009-2011)

Rayennur LTD. ŞTİ (2011-2012)

ATEL Savunma A.Ş. (2012-2016)

Nurol Makina ve Sanayi A.Ş. (2016-2019)

TÜBİTAK Uzay Teknolojileri ve Araştırma Enstitüsü (2019-)