



Polinom uydurma yöntemi kullanarak RF parmak izi çıkarımı

Selçuk TAŞÇIOĞLU*

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
stasci@eng.ankara.edu.tr ORCID: 0000-0001-9064-2960, Tel: (312) 203 33 00 (1808)

Memduh KÖSE

Ahi Evran Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Araştırma ve Uygulama Merkezi, Kırşehir
ORCID: 0000-0002-4935-4542

Ziya TELATAR

Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
Ziya.Telatar@ankara.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1146-2337

Geliş: 03.12.2017, Kabul Tarihi: 02.01.2018

Öz

Bu çalışmada, kimlik tespiti amacıyla kablosuz vericilerin radyo frekansı (RF) parmak izlerinin polinom uydurma yaklaşımıyla elde edilebildiği gösterilmiştir. Polinom uydurma işlemi, vericilerin geçici rejim işaretlerinin anlık genlik karakteristiklerine uygulanmış ve RF parmak izleri, polinom katsayılarının normalize edilmesiyle oluşturulmuştur. Geçici rejim işaretleri Bayesçi bir sinyal algılama yaklaşımıyla tespit edilmiş ve bu işaretlerden elde edilen RF parmak izleri olasılıksal sinir ağı sınıflandırıcısı ile sınıflandırılmıştır.

Polinom uydurma yaklaşımına dayalı RF parmak izlerinin verici kimlik tespiti başarımı ve algoritmanın hesaplama süresi WiFi vericilerine ait deneysel verilerle değerlendirilmiştir. Geçici rejim işaret karakteristiklerine uydurulan polinom derecesi, sınıflandırma başarımı kriteri esas alınarak belirlenmiştir. Kullanılan veri seti için en iyi sınıflandırma başarımı ikinci dereceden polinom katsayılarıyla elde edilmiştir. Bu katsayılardan oluşturulan parmak izleri kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma işleminin hesaplama süresinin, anlık genlik değerlerinin doğrudan kullanıldığı duruma kıyasla daha düşük olduğu gösterilmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, polinom uydurma yaklaşımına dayalı RF parmak izleriyle kablosuz vericilerin kimlik tespitinde hızlı ve başarılı sonuçlar elde edilebildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz aygıt kimlik tespiti; RF parmak izleri; açılma geçici rejim işaretleri; polinomsal eğri uydurma; öznitelik çıkarımı; sınıflandırma.

* Yazışmaların yapılacağı yazar

DOI:

Giriş

Kablosuz haberleşme sistemlerinin yaygınlaşmasıyla ve gizlilik derecesi yüksek bilgiler dahil bu sistemlerdeki veri trafiğinin giderek artmasıyla birlikte kablosuz sistem bilgi güvenliği daha da önemli hale gelmektedir. Kablosuz sistemlerde hali hazırda kullanılan güvenlik önlemlerinin yetersiz kalması nedeniyle ek güvenlik yaklaşımlarının geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu konudaki yenilikçi çözüm önerilerinden biri vericilerin radyo frekansı (RF) parmak izlerinin çıkarılması ve bu parmak izlerine göre verici kimliklerinin tespit edilmesidir. RF parmak izleri, kablosuz vericilerin fiziksel katmanlarında kullanılan devre elemanlarının üretim toleransları gibi etkilerden kaynaklanan özgün karakteristiklerin iletim sinyallerinde oluşturduğu özellikler olarak tanımlanabilir (Toonstra ve Kinsner, 1995; Üreten ve Serinken, 2007). Bu karakteristiklerin kablosuz aygıtların tanımlanması amacıyla kullanıldığı sistemlere *RF parmak izi tabanlı verici kimlik tespit sistemleri* denir. Bu sistemler günümüze kadar yapılan çalışmalarda; VHF vericiler (Toonstra ve Kinsner, 1995, Serinken ve Üreten, 2000), Bluetooth vericiler (Rehman vd, 2012), ZigBee vericiler (Bihl vd., 2016), WiMAX vericiler (Reising vd., 2015) ve WiFi vericiler (Üreten ve Serinken, 2007; Reising vd., 2015; Taşcıoğlu vd., 2017; Zhao vd., 2017) dahil olmak üzere çeşitli aygıtların tanımlanması amacıyla önerilmiştir. Danev ve diğerleri (2012) literatürde önerilen çok sayıda fiziksel katman kimlik tespit yöntemini detaylı incelemişlerdir. Bu çalışmada, kimlik tespiti yapılan aygıtlar ve kullanılan parmak izi çıkarma yöntemleri sınıflandırılmış, sonuçlar sistematik bir rapor halinde sunulmuştur.

RF parmak izi çıkarma yaklaşımlarından biri iletim sinyallerinin açılma geçici rejim (turn-on transient) işaretlerinin kullanılmasıdır. Açılma geçici rejim işaretleri, vericinin ilk iletime başlaması ile kararlı bir iletim sinyali üretinceye kadar geçen sürede yayınladığı sinyaller olarak tanımlanır. Bu işaretler, tüm kablosuz vericiler

tarafından istemsiz olarak üretildiği için bu işaret karakteristiklerinin kullanıldığı kimlik tespit yöntemleri çeşitli kablosuz sistemlerde kullanılabilir.

Vericilerin geçici rejim işaretlerine yüklediği özgün özelliklerin çıkarılması için bazı istatistiksel sinyal işleme teknikleri kullanılır. Bu teknikler genellikle işaretlerin anlık genlik, anlık faz ve anlık frekans karakteristikleri üzerinde uygulanmaktadır (Lyons, 2004). Üreten ve Serinken (2007) çalışmalarında WiFi vericiler için anlık genlik değerlerinin ayırt edici öznelikler olarak kullanılabildiğini, anlık faz değerlerinin ise göreceli olarak yeterli sınıflandırma başarımı sağlayamayacağını belirtmişlerdir. Aynı tür vericilerin kimlik tespitinde Köse ve Telatar (2010) öznelik olarak geçici rejim işaretlerinin anlık genlik karakteristiklerini kullanarak k -en yakın komşu (k -nearest neighbor, kNN) ve olasılıksal sinir ağı (probabilistic neural network, PNN) sınıflandırıcıların başarımlarını karşılaştırmışlar ve PNN sınıflandırıcının daha başarılı olduğunu göstermişlerdir. Köse ve diğerleri (2015a) IEEE 802.11b aygıtlarının sınıflandırılmasında, geçici rejim işaretlerinin anlık genlik değerleri için hesaplanan standart sapma, varyans, çarpıklık (skewness) ve sivruluk (kurtosis) gibi betimleyici istatistikleriyle oluşturulmuş RF parmak izlerini kullanmışlardır. Deneysel verilerle yapılan testlerde kimlik tespit başarımının, merkezi eğilim (ortalama, medyan) ve yayılımı (varyans, çarpıklık, sivruluk) ölçen betimleyici istatistiklerin bir arada kullanıldığı durumda daha iyi olduğu rapor edilmiştir.

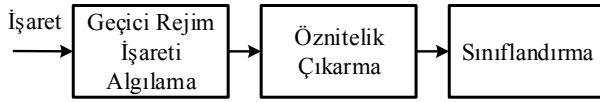
Sınıflandırma problemlerinde öznelik boyutu, sınıflandırma başarımı ve algoritmanın sonuç üretme süresi açısından önemlidir. Öznelik boyutunun büyük olduğu durumlarda veri indirgeme tekniklerinin kullanılması önerilmektedir (Duda vd., 2001; Theodoridis ve Koutroumbas, 2009). Bu çalışmada anlık genlik karakteristiklerine polinom uydurma sonucu elde edilen polinom katsayılarının öznelik olarak kullanılmasıyla, veri boyutu önemli ölçüde

azaltılmaktadır. Bu öznelilikler için hem sınıflandırma başarımı deneysel veri setiyle değerlendirilmiş, hem de sınıflandırma işleminin hesaplama süresi incelenmiştir.

Makalenin bundan sonraki kısımlarında ele alınan konular şu şekilde özetlenebilir: Öncelikle geçici rejim bölgesinden elde edilen RF parmak izlerinin kullanıldığı verici kimlik tespit sistemi özetlenecektir. Daha sonra, geçici rejim işaretleri için anlık genlik değerleri ve bu değerlere polinom uydurulması yoluyla elde edilen öznelilikler tanımlanacaktır. Belirlenen öznelilikler için sınıflandırma başarımı deneysel verilerle değerlendirildikten sonra çalışma özetlenecektir.

Geçici Rejim RF Parmak İzlerine Dayalı Verici Kimlik Tespiti

Geçici rejim işaretlerinin kullanıldığı RF parmak izlerine dayalı bir kimlik tespit sisteminin genel blok diyagramı Şekil 1'deki gibi verilebilir.



Şekil 1. Geçici rejim RF parmak izlerine dayalı bir verici kimlik tespit sistemi blok diyagramı

Bu sistemde ilk aşama geçici rejim işaretlerinin algılanmasıdır. Geçici rejim işaretlerinin içerdiği karakteristik özelliklerin ayırt edilebilmesi için öncelikle bu sinyallerin başlangıç noktasının doğru tespit edilmesi gerekmektedir. Durağan olmayan bir yapıya sahip olan geçici rejim işaretlerinin kanal gürültüsünden ayırt edilip, başlangıç noktasının tam olarak algılanması zor bir problemdir. Bu problemin çözümü için Üreten ve Serinken (2005) tarafından önerilen Bayesçi rampa değişim algılama yöntemi kullanılmıştır. Anlık genlik karakteristiklerinin rampa fonksiyonu olarak modellendiği bu yöntem, çoğu pratik uygulamada karşılaşılabilecek SNR seviyelerinde WiFi

vericilerine ait geçici rejim işaretlerinin bulunmasında kullanılmıştır (Köse vd., 2015b,c).

İkinci aşamada algılanan geçici rejim işaretlerinden ayırt edici özneliliklerin çıkarılması yer almaktadır. Bu çalışmada, vericilerin geçici rejim işaretlerine yüklediği karakteristik özelliklerin, anlık genlik değerlerine uydurulan polinom katsayılarına aktarıldığı gösterilmektedir. Bu katsayılar benzer değer aralığında olacak şekilde normalize edilerek RF parmak izleri oluşturulmuştur.

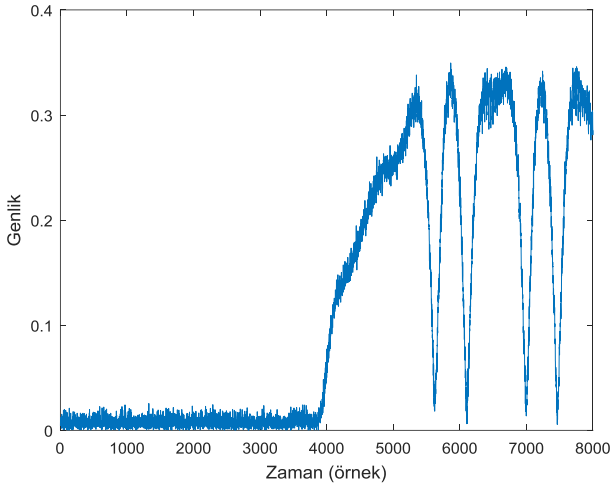
Elde edilen RF parmak izleri bir sınıflandırıcı vasıtasıyla sınıflandırılır. Sınıflandırma aşamasında, ele alınan problem için literatürde yaygın olarak kullanılan ve yüksek başarımlarının elde edildiği rapor edilen PNN sınıflandırıcısı kullanılmıştır (Üreten ve Serinken, 2007; Köse vd. 2015a, c). Veri setinde yer alan RF parmak izlerinin bir kısmı sınıflandırıcının eğitimi aşamasında, kalanlar ise test aşamasında kullanılır. Eğitim aşamasında kullanılacak örnek sayısı, sınıflandırma başarımını en iyileyecek şekilde belirlenir.

Geçici Rejim İşaretleri için Anlık Genlik Değerleri

Karmaşık değerli bir temel bant geçici rejim işareti için anlık genlik değerleri

$$A(n) = \sqrt{I^2(n) + Q^2(n)} \quad (1)$$

eşitliği ile verilir (Lyons, 2004). Bu eşitlikte, $I(n)$ ve $Q(n)$ örneklenmiş sinyalin n anındaki eş fazlı (in-phase) ve dik fazlı (quadrature) bileşenlerini göstermektedir. Şekil 2'de bir WiFi vericisinden alınan dalga biçimi için anlık genlik değerleri verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü üzere, vericinin iletme başladığı andan kararlı bir sinyal üretinceye kadar geçen sürede bir geçici rejim işareti üretilmektedir. Geçici rejim süresince vericinin gücünü yavaş yavaş arttırdığı bu şekilden görülebilmektedir.



Şekil 2. Bir WiFi vericisine ait anlık genlik değerleri

Polinom Uydurma Kullanarak RF Parmak İzlerinin Oluşturulması

Deneyisel ölçüm verilerinin matematiksel bir modele uydurulması işaret analizinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Ölçüm verilerine en yakın olacak şekilde geçen fonksiyonun bulunması işlemi eğri uydurma olarak tanımlanır. Eğri uydurmada kullanılan yaklaşımlardan bir tanesi, ölçüm verisine

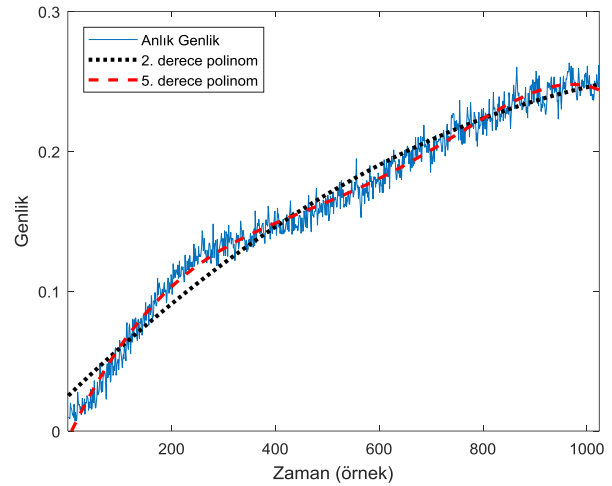
$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_dx^d = \sum_{i=0}^d a_ix^i \quad (2)$$

biçimindeki en uygun polinomun bulunmasıdır. x bağımsız değişkeni, y bağımlı değişkeni, d polinom derecesini ve a_i değerleri polinom katsayılarını göstermektedir. Bu çalışma kapsamında; y bağımlı değişkeni örneklenmiş sinyal değerlerine, x bağımsız değişkeni de örneklenmiş sinyalin indisi olan n değerlerine karşılık gelmektedir. Belirlenen bir derece için polinom katsayıları genellikle bir hata ölçüsünü minimum yapacak şekilde bulunur.

Eğri uydurma amacıyla farklı yapıdaki modellere kıyasla polinomsal modellerin avantajı, parametrelere bağımlılığın doğrusal olmasıdır. Bu modellerde parametre hesabındaki minimumu bulma problemi doğrusaldır ve kolay çözülebilir (Bishop, 1992).

Öznitelik Çıkarımı ve Normalizasyon

Bu çalışmada WiFi vericilerine ait geçici rejim işaretlerinin sınıflandırılması amacıyla, bu işaretlerin anlık genlik değerlerine uydurulan polinomların Eşitlik (2)'de verilen a_i katsayıları öznitelik olarak kullanılmaktadır. Şekil 3'te bir WiFi vericisine ait örnek bir geçici rejim anlık genlik verisi ve bu veriye uydurulan ikinci ve beşinci dereceden iki farklı polinom gösterilmektedir. İkinci derece için 3 katsayı, beşinci derece için 6 katsayı, ölçüm verisiyle polinom arasındaki hatayı en küçük yapacak şekilde en küçük kareler yöntemiyle belirlenmiştir. Uydurulan polinomun derecesi sınıflandırma başarımını en büyük yapacak şekilde belirlenmektedir. Derecenin belirlenmesi konusu bir sonraki bölümde detaylandırılacaktır.



Şekil 3. Şekil 1'de verilen sinyal için elde edilen geçici rejim işareti ve bu işarete uydurulan ikinci ve beşinci dereceden polinomsal eğriler.

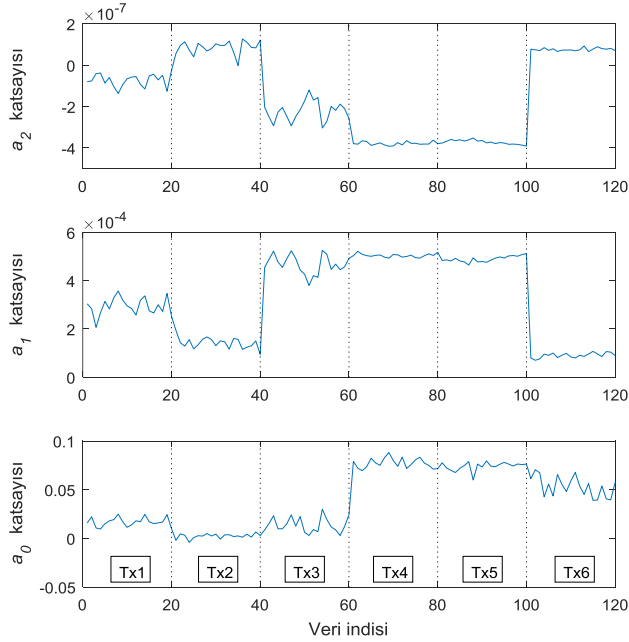
Şekil 4'te bir örnek olarak altı farklı WiFi vericinin (Tx1,...,Tx6) her birinden rasgele seçilen 20 ölçüm için ikinci dereceden polinom uydurma sonucu elde edilen üç katsayının değerleri gösterilmektedir. Bu şekilde düşey eksen değerleri incelendiğinde a_0 , a_1 ve a_2 katsayılarının değer aralıklarının birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu katsayıların öznitelik olarak kullanılabilmesi için normalize edilmesi gerekmektedir (Theodoridis ve Koutroumbas, 2009). Üç polinom katsayısının her birinin eğitim aşamasındaki N ölçüm için elde edilen değerleri kullanarak

$$\bar{a}_m = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_{jm}, \quad m=0,1,2 \quad (3)$$

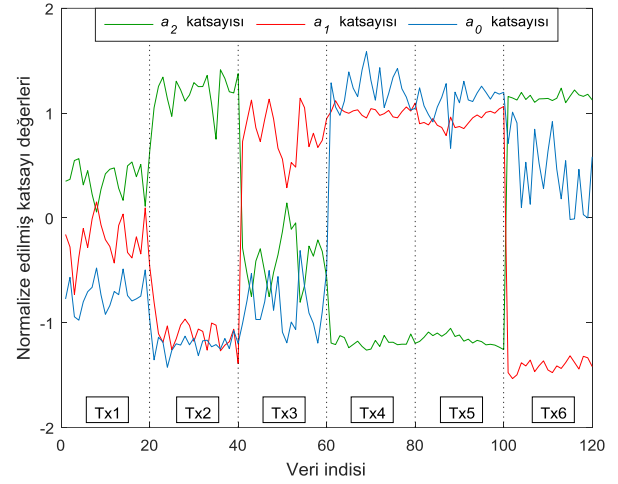
$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (a_{jm} - \bar{a}_m)^2} \quad (4)$$

$$\hat{a}_{jm} = \frac{a_{jm} - \bar{a}_m}{\sigma_m} \quad (5)$$

eşitlikleri ile normalizasyon işlemi uygulandığında elde edilen $\hat{a}_m$ ($m=0,1,2$) öznitelikleri 0 ortalamalı ve 1 varyanslı olur (Theodoridis ve Koutroumbas, 2009). Bu normalizasyon işlemi Şekil 4'te verilen katsayılara uygulandığında, Şekil 5'teki normalize edilmiş öznitelik değerleri elde edilmiştir. Sonuç olarak bu şekildeki üç öznitelikten her birinin 120 ölçüm üzerinden ortalaması 0 ve varyansı 1'dir. Şekil 4 ve Şekil 5'te her vericiden rasgele 20 ölçüm seçilmesinin nedeni, bu seçimin PNN sınıflandırıcı başarımı için uygun olmasıdır. Bu değerlerin seçimi konusunda bir sonraki bölümde bilgi verilecektir. PNN sınıflandırıcının eğitim aşamasında hesaplanan ve kaydedilen $\bar{a}_m$ ve σ_m değerleri, test aşamasında özniteliklerin normalize edilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 4. Altı WiFi vericisinin her birinden alınan 20 ölçüm için elde edilen ikinci derece polinom katsayıları



Şekil 5. Şekil 4'te verilen polinom katsayılarının normalize değerleri

Başarım Değerlendirmesi

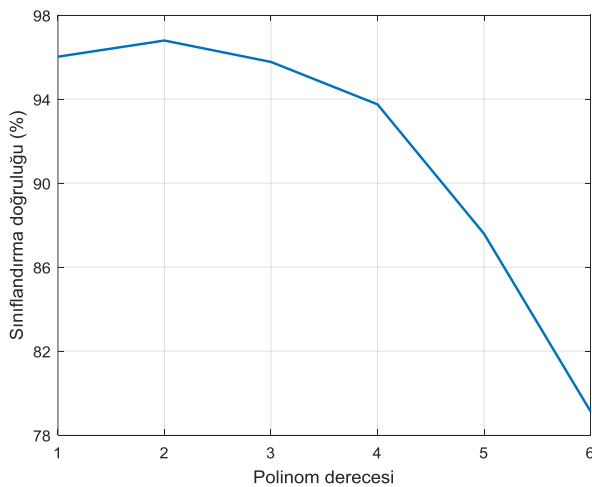
Polinom uydurmaya dayalı RF parmak izlerinin kablosuz vericilerin sınıflandırılmasındaki başarımını test etmek amacıyla altı farklı IEEE 802.11b WiFi vericisinden toplanan deneysel veriler kullanılmıştır. Veri setinde her vericiden alınan 100 ölçüm sinyali bulunmaktadır. Sınıflandırmada, her vericiye ait rasgele seçilen 20 ölçüm değeri eğitim aşamasında, kalanları ise test aşamasında kullanılmıştır. Bu değerlerin seçiminde, Köse ve Telatar (2010) tarafından ele alınan verici sınıflandırma probleminde PNN sınıflandırıcının eğitim aşamasında örneklem %20'sinden fazlasının kullanılmasının sınıflandırma başarımını artırmadığı yönünde elde ettikleri sonuç esas alınmıştır. Çalışmadaki tüm sonuçlar, sınıflandırma algoritmasının 100 defa çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçların ortalamasıdır. Her defasında eğitim ve test vektörleri rasgele seçilerek, eğitim vektörlerinin seçimine bağlı yanlı bir sonucun önlenmesi amaçlanmıştır.

Polinom Derecesinin Belirlenmesi

Bu çalışmada ele alınan sınıflandırma probleminde polinom derecesinin belirlenmesindeki amaç, geleneksel eğri uydurma problemlerinden farklıdır. Geleneksel eğri uydurma problemlerinde polinom derecesi belirlenirken, model karmaşıklığı ya da hatanın en küçük yapılması gibi amaçlar dikkate alınır. Diğer taraftan bu çalışmada, seçilen derece için

polinom katsayılarının vericileri en iyi şekilde ayırt etmesi temel amaçtır. Bu durumu daha iyi açıklayabilmek için Şekil 3'teki geçici rejim anlık genlik verisine uydurulan ikinci ve beşinci dereceden polinomlar için hata değerleri hesaplanmıştır. Hatanın kare ortalamalarının karekök değerleri, ikinci ve beşinci dereceden polinomlar için sırasıyla 0.0114 ve 0.0076 olarak bulunmuştur. Beklendiği üzere, beşinci dereceden polinomun hata değeri daha düşüktür. Ancak, bu polinomların katsayıları ile üretilen parmak izlerinin sınıflandırma başarımı karşılaştırıldığında, ikinci dereceden polinom katsayılarının daha başarılı olduğu Şekil 6'dan görülmektedir. Sınıflandırma problemlerinde genel olarak, yüksek sınıflandırma başarımının mümkün olan en küçük öznitelik boyu ile elde edilmesi amaçlanır. Aksi halde, boyut sorunu (curse of dimensionality) gibi etkilerle sınıflandırma başarımının azaldığı bilinmektedir (Duda vd., 2001).

En iyi sınıflandırma başarımının elde edildiği polinom derecesinin belirlenmesi için farklı polinom dereceleri için elde edilen katsayılarla oluşturulan parmak izleri kullanılarak vericiler sınıflandırılmış ve sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi, en iyi sınıflandırma başarımı yaklaşık % 97 değeri ile ikinci derece için elde edilmiştir. 5 ve daha büyük derece değerlerinde sınıflandırma başarımı %90 değerinin altına düşmektedir.

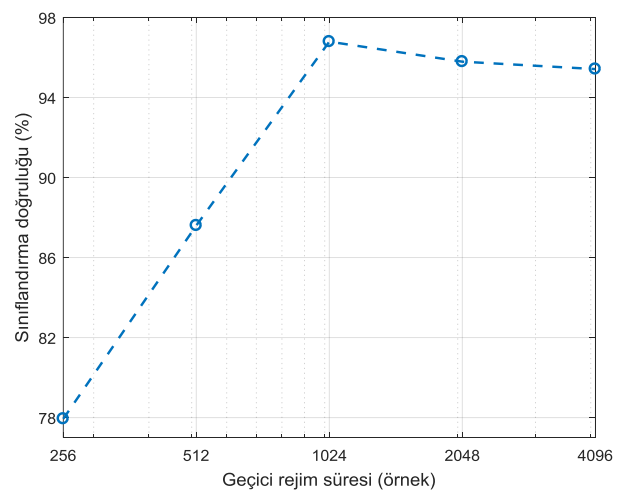


Şekil 6. Polinom uydurma sonucu bulunan ve normalize edilen özniteliklerin polinom derecesine karşı sınıflandırma başarımları

Geçici Rejim Süresi Testi

WiFi vericilerin geçici rejim süresinin üst sınır değeri, IEEE 802.11 standardında vericilerin en büyük güç değerini üretmesi konusundaki kısıt olan $2\mu s$ değeri olarak düşünülebilir (IEEE Std. 802.11-2012, 2012). Bununla birlikte pratikte, pek çok kablosuz vericinin bu değerin çok altında geçici rejim süresine sahip olduğu bilinmektedir. Örneğin IEEE 802.11b vericileri için yapılan deneysel çalışmalarda geçici rejim süresi yaklaşık $0.2\mu s$ olarak alınmıştır (Üreten ve Serinken 2007, Taşcıoğlu vd. 2017). Polinom uydurma yönteminin kullanıldığı bu çalışmamızdaki WiFi verici ölçümleri için literatürde verilen bu süre değerinin örnek cinsinden karşılığı yaklaşık 1024 örnektir. Şekil 6'nın elde edilmesinde bu değer kullanılmıştır.

İkinci derece polinom uydurma işlemi geçici rejim süresinin 256, 512, 1024, 2048 ve 4096 örnek değerleri için de uygulanmış ve sınıflandırma başarımları hesaplanmıştır. En iyi sınıflandırma başarımının, literatürde verilen değer ile tutarlı olarak, Şekil 7'de görüldüğü gibi 1024 değerinde elde edildiği gözlenmiştir. Bu şekilden çıkarılabilecek diğer bir sonuç da geçici rejim işaret süresinin 1024 örnekten daha büyük seçilmesi ile polinom katsayılarına dayalı parmak izlerinin sağladığı sınıflandırma başarımında iyileşme olmamakta, küçük miktarda başarımların kaybı olmaktadır.



Şekil 7. Geçici rejim süresine karşı sınıflandırma doğruluğu.

Tablo 1. Anlık genliklerin ve karşılık gelen polinom katsayılarının öznitelik olarak kullanıldığı durumlarda bir test ölçümü için ortalama hesaplama süreleri

Geçici rejim işareti süresi (örnek)	Anlık genlik		Polinom katsayıları	
	Öznitelik boyu (örnek)	Öznitelik çıkarmasını içeren test aşaması süresi (ms)	Öznitelik boyu (örnek)	Öznitelik çıkarmasını içeren test aşaması süresi (ms)
1024	1024	6.65	3	4.56
2048	2048	11.42	3	4.62
4096	4096	18.50	3	4.67

Hesaplama Süresi Testi

Polinom katsayıları ile oluşturulan RF parmak izlerinin kullanıldığı sınıflandırma algoritmasının hesaplama süresiyle ilgili sonuç çıkarabilmek için bazı ölçümler yapılmıştır. Sınıflandırma algoritmalarının eğitim aşaması çevrim dışı yapıldığı için hesaplama süresi genellikle test aşaması için dikkate alınır. Bu nedenle, bir test vektörü için öznitelik çıkarımı ve hangi sınıflandırıcıya ait olduğunun test edilmesi için gerekli hesaplama süreleri ölçülmüş ve ortalama değerler Tablo 1’de verilmiştir. Hesaplama süreleri, Intel i7-4770 (3.4 GHz) işlemcili, 16 GB hafızalı bir bilgisayarda Matlab ortamında ölçülmüştür. Bu süre değerlerinin elde edilmesi için algoritma 100 kez çalıştırılmış ve her seferinde 480 farklı test vektörü sınıflandırılmıştır. Bu değerler üzerinden ortalama alınarak, tek bir test vektörü için gerekli ortalama hesaplama süresi bulunmuştur. Sonuçlar, geçici rejim işaret süresinin üç farklı değeri için elde edilmiştir.

Hesaplama süresi açısından bir karşılaştırma yapabilmek için boyut indirgeme yapılmadan doğrudan anlık genlik değerlerinin kullanıldığı algoritma için de hesaplama süreleri ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 1’de verilmiştir. Geçici rejim işareti süresi 1024 örnek iken polinom katsayılarına dayalı RF parmak izlerinin kullanıldığı durumda algoritma, anlık genlik değerlerinin tamamının kullanıldığı duruma göre yaklaşık 1.5 kat hızlıdır. Geçici rejim süresi 4096 örnek alındığında hız farkı yaklaşık 4 kat olmaktadır.

Bu tablodan gözlenen bir başka sonuç da geçici rejim işareti süresi arttıkça hesaplama süresinin; anlık genlik öznitelikleri için artması, diğer taraftan polinom katsayısı öznitelikleri için yaklaşık olarak aynı kalmasıdır. Bu durum uzun süreli geçici rejim işaretlerinin kullanıldığı sistemlerde, polinom katsayılarına dayalı RF parmak izlerinin hesaplama süresi avantajı sağlayacağını göstermektedir.

Sonuç

Bu çalışmada, kablosuz verici kimliklerinin geçici rejim karakteristiklerine dayalı RF parmak izleri ile belirlenmesi konusu ele alınmıştır. RF parmak izleri geçici rejim işaretlerinin anlık genlik değerlerine uydurulan polinomların katsayılarından elde edilmiştir. Elde edilen bu parmak izleriyle verici kimlik tanımlama işleminin başarıyla gerçekleştirilebildiği deneysel verilerle gösterilmiştir.

Polinom katsayılarına dayalı üretilen RF parmak izleriyle veri boyutu azaltıldığı için sınıflandırma algoritmasında hesaplama süresi avantajı sağlanmaktadır. Bu avantaj özellikle, geçici rejim işareti süresinin uzun olduğu, geçici rejim yerine kararlı rejim karakteristikleri gibi daha uzun sinyal kısımlarının kullanıldığı ya da örnekleme frekansının yüksek olduğu uygulamalarda daha da önem kazanacaktır.

Eğri uydurmada Gauss ya da trigonometrik fonksiyonlar gibi farklı yapıdaki eğrilerin kullanılması ve bu modellere ait parametrelerle RF parmak izlerinin üretilmesi de mümkün olabilir. Bununla birlikte polinomsal modellerin, doğrusal yapısı ve dolayısıyla eğri uydurma işleminin basit olması sayesinde, öznetelik çıkarımının hızlı yapılabilmesine olanak sağladığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Kaynaklar

- Bihl, T.J., Bauer, K.W., Temple, M.A., (2016). Feature Selection for RF Fingerprinting With Multiple Discriminant Analysis and Using ZigBee Device Emissions, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 11, 8, 1862-1874.
- Bishop, C.M., Roach, C.M., (1992). Fast curve fitting using neural networks, *Review of Scientific Instruments*, 63, 10, 4450-4456.
- Danev, B., Zanetti, D., Capkun, S., (2012). On physical-layer identification of wireless devices, *ACM Computing Surveys*, 45, 1, 1-29.
- Duda, R.O., Hart, P.E., Stork, D.G., (2001). *Pattern Classification*, 680, Wiley- Interscience, NY, USA.
- IEEE Std 802.11-2012., (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.
- Köse, M., Telatar, Z., (2010). An approach on identification of 802.11b devices by RF signature in wireless local area networks, *Proceedings, IEEE 18th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)*, 800-803, Diyarbakır.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S., Telatar, Z., (2015a). Wireless device identification using descriptive statistics, *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3*, 57, 1, 1-10.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S., Telatar, Z., (2015b). Signal-to-noise ratio estimation of noisy transient signals, *Communications Faculty of Sciences University of Ankara Series A2-A3*, 57, 1, 11-19.
- Köse, M., Taşcıoğlu, S., Telatar, Z., (2015c). The effect of transient detection errors on RF fingerprint classification performance, *Proceedings, 14th Int. Conf. on Circuits, Syst., Electron., Control & Signal Process. (CSECS'15)*, 89-93, Konya.
- Lyons, R.G., (2004). *Understanding Digital Signal Processing*, 688, Prentice-Hall, NJ, USA.
- Papoulis, A., Pillai, S.U., (2002). *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 852, McGraw-Hill, NY, USA.
- Rehman, S.U., Sowerby, K., Coghill, C., (2012). RF fingerprint extraction from the energy envelope of an instantaneous transient signal, *Proceedings, Australian Communications Theory Workshop (AusCTW)*, 90-95, Wellington.
- Reising, D.R., Temple, M.A., Jackson, J.A., (2015). Authorized and rogue device discrimination using dimensionally reduced RF-DNA fingerprints, *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 10, 6, 1180-1192.
- Serinken, N., Üreten, O., (2000). Generalised dimension characterisation of radio transmitter turn-on transients, *Electronic Letters*, 36, 12, 1064-1066.
- Taşcıoğlu, S., Köse, M., Telatar, Z., (2017). Effect of sampling rate on transient based RF fingerprinting, *Proceedings, 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)*, 1156-1160, Bursa.
- Theodoridis, S., Koutroumbas, K., (2009). *Pattern Recognition*, 984, Academic Press, MA, USA.
- Toonstra, J., Kinsner, W., (1995). Transient analysis and genetic algorithms for classification, *Proceedings, IEEE Conf. Commun., Power, and Comput. (WESCANEX 95)*, 432-437, Winnipeg.
- Üreten, O., Serinken, N., (2005). Bayesian detection of Wi-Fi transmitter RF fingerprints, *Electronic Letters*, 41, 6, 373-374.
- Üreten, O., Serinken, N., (2007). Wireless security through RF fingerprinting, *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 32, 1, 27-33.
- Zhao, C., Huang, M., Huang, L., Du X., Guizani, M., (2017). A robust authentication scheme based on physical-layer phase noise fingerprint for emerging wireless networks, *Computer Networks*, 128, 164-171.

RF fingerprinting using polynomial fitting

Extended abstract

RF fingerprints are defined as the unique characteristics of wireless transmitters resulting from the effects such as manufacturing tolerances of circuit elements in the physical layer. Since these characteristics are unique, they can be used for the identification of wireless devices. This identification process is considered as a tool to enhance wireless network security

One of the approaches for RF fingerprinting is to use the transmitters' turn-on transient signals, which are defined as the signals transmitted by the transmitter until a steady state signal is generated. Since these signals are generated by all types of wireless transmitters, this approach can be used to identify various wireless devices such as VHF, UHF, Bluetooth, and IEEE 802.11 transmitters.

Signal processing techniques, which are used to extract the unique features from the transient signals, are usually applied to the instantaneous amplitude, instantaneous phase and instantaneous frequency characteristics of the signals. In this work, polynomial fitting approach was applied to the instantaneous amplitude characteristics of the transmitters' turn-on transient signals to obtain RF fingerprints. It was shown that RF fingerprints generated by using the normalized polynomial coefficients can be used for identification of wireless devices.

In the first stage of a transient-based identification system, detection of transient signals and estimation of transients' starting points are performed. Accuracy of the estimates of the transients' starting points is important for obtaining the unique characteristics of these signals. It is not an easy problem to separate a transient signal from the channel noise due to its nonstationary character. In this work, a Bayesian ramp change detection method was employed to detect transient signals, in which the instantaneous amplitude characteristics are modeled as a ramp function.

In the second stage, features are extracted from the detected turn-on transient signals. In this study, it was shown that the unique characteristics of turn-on transient signals of transmitters can be obtained from

the coefficients of polynomials fitted to the instantaneous amplitude profiles. RF fingerprints were generated from normalized polynomial coefficients.

Lastly, in the third stage, RF fingerprints were classified by a probabilistic neural network (PNN) classifier. Some of the samples in the data set were used as training set and the remaining samples were used as test set. The number of samples to be used in the training stage was determined so that classification performance is optimized.

In classification problems, the feature dimension is an important parameter both in terms of classification performance and in terms of complexity of the algorithm. In cases where the feature size is very large, data reduction techniques are required. In this study, since the polynomial fitting provide a significant dimensionality reduction, RF fingerprints generated from polynomial coefficients have an advantage in terms of computation time. This advantage may be particularly important in applications where the duration of the analyzed signal is longer, or the sampling frequency is higher.

The classification performance and the testing time for the obtained RF fingerprints were evaluated using experimental data collected from WiFi transmitters. The degree of the polynomial was determined on the basis of the classification performance. The best classification performance was obtained with a quadratic polynomial for the data set used. It has been shown that the fingerprints consisting of polynomial coefficients require less testing time than instantaneous amplitude fingerprints. The results in this study show that fast and accurate wireless device identification can be carried out by using RF fingerprints based on polynomial fitting approach.

Although different types of curves, such as Gaussian or trigonometric functions, may also be used to generate RF fingerprints, it should be noted that the linearity of the polynomial models, and hence the simplicity of the fitting process, allows the feature extraction to be performed fast.

Keywords: Wireless device identification, RF fingerprints, turn-on transient signals, polynomial curve fitting, feature extraction, classification.