

BİLİŞSEL RADYOLAR İÇİN BİRİNCİL KULLANICI TRAFİĞİ İÇEREN KANALLARDA DİNAMİK PROGRAMLAMA VE ORTALAMA KÜMÜLATİF TOPLAMA DAYALI YENİ BİR TEST İSTATİSTİĞİNİN ÖNERİLMESİ

Timur Düzenli ve Olcay Akay

Dokuz Eylül Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kaynaklar
Kampüsü, 35160 Buca / İZMİR
Tel: 0 232 301 7196 Faks: 0 232 453 1085
timur.duzenli@deu.edu.tr, olcay.akay@deu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, bilişsel radyo sistemlerinde kullanılmak üzere birincil kullanıcı trafiği içeren kanallarda algılama performansının artırılması için yeni bir yöntem önerilmektedir. Bunun için, öncelikle birincil kullanıcının son durum değişikliğini yaptığı nokta belirlenip, bu noktadan algılama periyodunun sonuna kadar olan örnekler analiz edilerek birincil kullanıcının kanalda olup olmadığına karar verilmektedir.

Kanalda son değişikliğin gerçekleştiği noktanın belirlenebilmesi için MLE (Maximum Likelihood Estimation - En Büyük Olabilirlik Kestirimi) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, bilinmeyen parametrelere bağlı bir olabilirlik fonksiyonu kullanılarak bu fonksiyonu maksimize eden değerler araştırılmaktadır. Olabilirlik fonksiyonunun tepe noktasına (maksimum) karşılık gelen bilinmeyen parametre değerleri bu parametrelerin “en olası” değerleri olmakta ve MLE sonuçları olarak tanımlanmaktadır. Bu işlemin hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için dinamik programlama yönteminden faydalanılmaktadır.

Birincil kullanıcıya ait son değişim noktası belirlendikten sonra, ortalama kümülatif toplamın test istatistiği olarak kullanılmasıyla birincil kullanıcının kanalda olup olmadığına karar verilmektedir. Kümülatif toplama dayalı yöntemlerin bilişsel radyo uygulamaları bulunmakla birlikte özellikle işaretlerdeki değişimlerin algılanmasında etkili olduğu literatürde belirtilmektedir. Bu çalışmada yapılan simülasyonlarla ortalama kümülatif toplamın başarılı bir test istatistiği olarak kullanılabilmesi görülmektedir.

Bu çalışmada önerilen yöntemin performansı, Monte Carlo simülasyonlarıyla elde edilen ROC (Receiver Operating Characteristics) eğrileri kullanılarak enerji algılayıcısı ve onun geliştirilmiş bir versiyonu olan iyileştirilmiş enerji algılayıcısı ile karşılaştırılmaktadır. Yapılan simülasyonlar sonucunda, önerilen yöntemin diğer iki yöntemle göre yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Algılayıcı performansını etkileyen parametreler, birincil kullanıcı trafiğinin yoğunluğu, gözlenen işaretin uzunluğu ve işaret-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio - SNR) olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Bilişsel radyo, spektrum algılama, birincil kullanıcı trafiği, en büyük olabilirlik kestirimi (MLE), dinamik programlama, ortalama kümülatif toplam, enerji algılayıcısı

GİRİŞ

Spektrumun verimli bir şekilde kullanılması için önerilmiş olan bilişsel radyolarda en temel problemlerden biri, erişim yapılacak kanalda kullanılmayan boş bant aralıklarının belirlenmesidir. Bunun gerçekleştirilmesi esnasında, kanalda lisanslı kullanıcının bulunup bulunmadığının algılanması gerekmektedir. Kanalda durağan özellikler gösteren, bir başka deyişle, durumunu koruyan birincil kullanıcıların algılanması için merkezi ve işbirlikçi birçok yöntem ve kuram geliştirilmiş bulunmaktadır [1-10].

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda ise, birincil kullanıcının durumunu en az bir kez değiştirdiği birincil kullanıcı trafiği içeren kanallarda, durağan birincil kullanıcı için önerilmiş yöntemlerin performansının düştüğü gözlenmiştir [11-14]. Örneğin, birincil kullanıcının bir kez durum değiştirdiği bir kanalda enerji algılayıcısının performansındaki düşüş [11] ve [12]'de incelenmiştir. Bir başka çalışmada ise, birincil kullanıcının kanalda çoklu durum değişimi göstermesi halinde yine enerji algılayıcısının performansının düştüğü gösterilmektedir [13]. Birincil kullanıcı trafiğinde özdeğer tabanlı yöntemlerin başarımını inceleyen bir başka çalışmada, özdeğer tabanlı 4 farklı test istatistiğinin karşılaştırımı yapılmaktadır [14]. Bu çalışmada da, birincil kullanıcının kanalda yalnız bir kez durum değiştirdiği varsayılmaktadır.

Bu çalışmamızda, birincil kullanıcının kanalda sadece bir kez değil, birden fazla durum değiştirmesi halinde kullanılacak bir algılayıcı test istatistiği önermekteyiz. Test istatistiği olarak ortalama kümülatif toplam kullanılmıştır. Literatürde genel olarak işaretlerdeki değişimlerin algılanması [15-17] ve çevrimiçi ardışıl algılama yapılması [18], [19] amacıyla kullanılan kümülatif toplama dayalı yöntemlerin, spektrum algılamaya yönelik bir test istatistiği olarak başarılı bir şekilde kullanılmasının mümkün olduğu, gerçekleştirdiğimiz deneysel performans analizinin sonuçları tarafından desteklenmektedir.

SİSTEM MODELİ

Bu çalışmada önerilen test istatistiğinin uygulanabilmesi için öncelikle MLE (Maximum Likelihood Estimation - En Büyük Olabilirlik Kestirimi) kullanılarak, birincil kullanıcının kanalda son durum değişikliğini gerçekleştirdiği örnek noktası belirlenmektedir. Beyaz Gauss gürültüsü altında birincil kullanıcının çoklu durum değişimi gösterdiği kanallarda değişim noktalarının tespit edilebilmesi için dinamik programlama kullanılabilir. Dinamik programlama bir optimizasyon yöntemi olup, bir fonksiyonu minimize eden parametre değerlerinin hızlı bir şekilde bulunması amacıyla kullanılmaktadır [20]. Öncelikle, bilinmeyen parametrelere ait ortak olabilirlik fonksiyonu belirlenmektedir. Örneğin, çok sayıda sabit (DC) seviye değişimleri içeren, değişim noktalarının ve sabit seviye değerlerinin bilinmediği, beyaz Gauss gürültü içeren bir kanal için bu fonksiyon aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$p(\mathbf{x}; \mathbf{A}, \mathbf{n}) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{N}{2}}} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=0}^{n_0-1} (x[n]-A_0)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=n_0}^{n_1-1} (x[n]-A_1)^2} \cdot \dots \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=n_{k-1}}^{n_k-1} (x[n]-A_k)^2} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde $x[n]$ gözlenen işareti, N gözlenen işaretin uzunluğunu, k durum değişim sayısını, $\mathbf{n}=[n_0 \dots n_k]$ işaretin durum değiştirdiği indis değerlerini, A_k ise $[n_{k-1}, n_k-1]$ aralığında işaretin aldığı farklı DC seviye değerlerini ifade etmektedir. $p(\mathbf{x};\mathbf{A},\mathbf{n})$ olabilirlik fonksiyonunu maksimize eden parametre değerleri, fonksiyonun üstel toplamsal kısmını minimize etmektedir. Dolayısıyla, problem aşağıdaki fonksiyonun minimize edilmesi olarak da ifade edilebilir [20].

$$J(\mathbf{A},\mathbf{n}) = \sum_{n=0}^{n_0-1} (x[n]-A_0)^2 + \sum_{n=n_0}^{n_1-1} (x[n]-A_1)^2 + \dots + \sum_{n=n_{k-1}}^{n_k-1} (x[n]-A_k)^2 \quad (2)$$

$J(\mathbf{A},\mathbf{n})$ fonksiyonunu minimize eden A_k değerleri, bu parametrelerin MLE değerlerini belirlemekte olup

$$\hat{A}_i = \frac{1}{n_i - n_{i-1}} \sum_{n=n_{i-1}}^{n_i-1} x[n], \quad i = 0,1,\dots,k \quad (3)$$

olarak bulunabilir [20]. Yukarıdaki denklemde $n_{-1} = 0$ ve $n_k = N$ olarak alınmıştır. Sonraki adım olarak,

$$\Delta_i[n_{i-1}, n_i - 1] = \sum_{n=n_{i-1}}^{n_i-1} (x[n] - \hat{A}_i)^2, \quad i = 0,1,\dots,k \quad (4)$$

terimi tanımlandığı takdirde $J(\mathbf{A},\mathbf{n})$ fonksiyonunun

$$J(\hat{\mathbf{A}},\mathbf{n}) = \sum_{i=0}^k \Delta_i[n_{i-1}, n_i - 1] \quad (5)$$

şeklinde yazılması mümkün olur. Bundan sonraki aşamada ise $J(\hat{\mathbf{A}},\mathbf{n})$ teriminin n üzerinden minimize edilmesi gerektiğinden

$$I_k[L] = \min_{n_0, n_1, \dots, n_{k-1}} \sum_{i=0}^k \Delta_i[n_{i-1}, n_i - 1], \quad 0 < n_0 < n_1 < \dots < n_{k-1} < L + 1 \quad (6)$$

şeklinde yeni bir fonksiyon tanımlanabilir. Bu denklemde, L işlem yapılan veri aralığının uzunluğunu ifade etmektedir. $I_k[L]$ terimini aşağıdaki şekilde yazmak da mümkündür [20]:

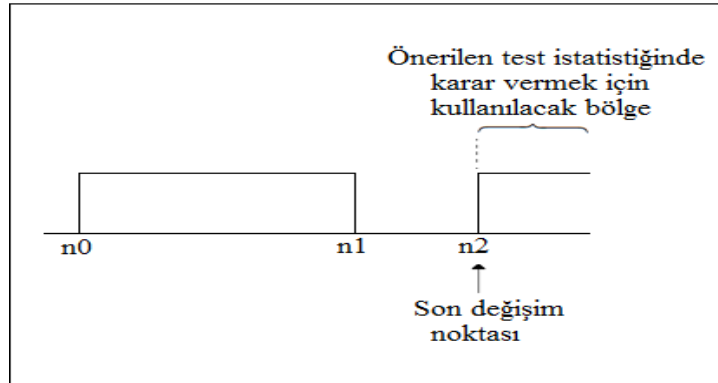
$$I_k[L] = \min_{n_{k-1}} \left[\left(\min_{n_0, n_1, \dots, n_{k-2}} \sum_{i=0}^{k-1} \Delta_i[n_{i-1}, n_i - 1] \right) + \Delta_k[n_{k-1}, n_k - 1] \right] \quad (7)$$

$$= \min_{n_{k-1}} (I_{k-1}[n_{k-1} - 1] + \Delta_k[n_{k-1}, L])$$

Elde edilen bu son terim $[0, L]$ uzunluğunda ve k değişim içeren bir kanalda minimum hatanın, ilk k aralığa ait minimum hata ile son aralıkta ortaya çıkan hatanın toplamına eşit olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlarda, gözlenen işaretin uzunluğu N kabul edildiğinden, $L=N-1$ olarak alınmıştır.

Özet olarak, dinamik programlama yardımı ile sıralı bir süreç izlendiği söylenebilir. Bu sürece göre, dinamik programlama sırayla durum değişim noktalarını kestirmekte, bunu yaparken de her seferinde tüm gözlem verisini kullanmak yerine, sadece tespit ettiği en son değişim noktasından sonra gelen verileri kullanmaktadır.

Yukarıda özetlenen algoritma, kaç seviye değişimi olduğunun önceden bilindiğini varsaymaktadır. Ancak, bilişsel radyo sistemlerinde bu her zaman gerçekçi bir varsayım olmayabilir. Hem bu sorunu aşmak, hem de algoritmayı hızlandırmak amacıyla, bu çalışmada önerilen yöntem tüm durum değişim noktalarını belirlemek yerine, gözlenen işaretin yine bütününe kullanarak sadece en son durum değişikliğinin gerçekleştiği noktayı belirlemektedir. Bu tip bir senaryo Şekil 1’de gösterilmektedir. Bu senaryoya göre, birincil kullanıcının kanalda yaptığı durum değişikliklerinin tümü yerine, sadece kanaldaki son durum değişimi ikincil kullanıcıyı ilgilendirmektedir. Dolayısıyla, önerilen test istatistiği sadece son değişim noktasından itibaren (Şekil 1’de n_2) yer alan verileri kullanarak kanalın boş olup olmadığına karar vermektedir.



Şekil 1. Önerilen yöntemin karar vermek için kullandığı gözlem aralığı

Bu çalışmada, son değişim noktasını belirlemek için, dinamik programlama algoritması algılama periyodunun sonundan ($N-1$ numaralı örnek) analize başlayarak son değişimin olduğu örnek noktasını (n_2) tespit etmektedir. Her zaman tek bir değişim noktası arandığından, kanalda gerçekleşen değişimlerin sayısının önceden bilinmesine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Önerilen bu yöntemin tekli veya çoklu durum değişiklikleri içeren kanallarda başarı göstermesi amaçlanmıştır. Örneğin, tek bir durum değişikliğinin olduğu kanallarda birincil kullanıcının kanalı terk etmesi aşağıdaki şekilde modellenilebilir.

$$x[n] = s[n] + w[n], \quad n = 1, 2, \dots, n_0 \quad (8)$$

$$x[n] = w[n], \quad n = n_0 + 1, n_0 + 2, \dots, N \quad (9)$$

Burada, $x[n]$ gözlem verisini, $s[n]$ birincil kullanıcıya ait işareti ve $w[n]$ de beyaz Gauss gürültüsünü temsil etmektedir. Benzer şekilde, birincil kullanıcının kanala ulaştığı durumlar için de modelin aşağıdaki şekilde kurulması mümkündür.

$$x[n] = w[n], \quad n = 1, 2, \dots, n_0 \quad (10)$$

$$x[n] = s[n] + w[n], \quad n = n_0 + 1, n_0 + 2, \dots, N \quad (11)$$

Bu çalışmada öncelikle, yukarıda örnek olarak açıklanan modellerde belirtilen n_0 örnek noktası belirlenmekte, sonrasında ise bu noktadan gözlenen işaretin sonuna kadar yer alan verileri kullanarak test istatistiği hesaplanmaktadır. Kanalda tek bir durum değişikliği olmasının yanında birden fazla durum değişikliğinin olduğu durumlarda da, önerilen test istatistiğinin sonucuna bakarak birincil kullanıcının kanalda olup olmadığına karar verilebilmektedir. Bu şekilde, literatürdeki diğer yöntemlere göre performansta bir iyileşme sağlanmaktadır.

Son durum değişiminin gerçekleştiği örnek noktasının belirlenmesinden sonraki aşama test istatistiğinin veriye uygulanmasıdır. Değişimin hızlı algılanması konusunda literatürde sıkça kullanılan [15-19], aynı zamanda son yıllarda bilişsel radyolarda da uygulanmaya başlayan kümülatif toplama dayalı yöntemlerin, test istatistiği olarak da kullanılabilirliği gözlenmiştir. Buradan yola çıkarak, bu çalışmada da kümülatif toplam tabanlı bir test istatistiğinin kullanımı tercih edilmiştir. Son değişim noktası belirlendikten sonra, bu noktadan başlayarak gözlenen işaretin sonuna kadar olan veri örnekleri üzerinden aşağıda tanımlanan ortalama kümülatif toplam, algılama test istatistiği olarak hesaplanmaktadır:

$$T(\mathbf{x}) = \frac{1}{M} \left(\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^m x[j] \right) \quad (12)$$

Bu denklemde, \mathbf{x} vektörü son durum değişimi noktasından sonra gözlenen veri örneklerini, M de bu örneklerin toplam sayısını temsil etmektedir. Önerilen yöntemin performansı Monte Carlo simülasyonlarıyla test edilmiş olup, literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırması ROC eğrileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

MONTE CARLO SİMULASYONLARI

Önerdiğimiz test istatistiğinin performansı, yanlış uyarı (P_{FA}) olasılığına göre algılama (P_D) olasılığını gösteren ROC (Receiver Operating Characteristics) eğrileri kullanılarak incelenmiş, enerji algılayıcısı ve onun birincil kullanıcı trafiği içeren kanallar için geliştirilmiş bir versiyonu olan iyileştirilmiş enerji algılayıcısının performansı ile karşılaştırılmıştır. Şekillerde “DP-CUSUM” bu çalışmada önerilen test istatistiğini, “Improved Energy Detector”, [12]’de önerilen iyileştirilmiş enerji algılayıcısını, “Energy Detector” ise klasik anlamdaki enerji algılayıcısını [21] temsil etmektedir. [12] çalışmasındaki benzer şekilde birincil kullanıcıya ait işaret $s[n]=1$ (sabit işaret) olarak ve gürültü de beyaz Gauss gürültüsü olarak kabul edilmiştir. Birincil kullanıcının kanala ulaşması ve kanalı terk etmesi Poisson rasgele süreci ile modellendiği takdirde, λ_a ve λ_d

parametreleri sırasıyla birincil kullanıcıya ait kanala ulaşma ve kanalı terk etme oranlarını ifade etmektedir [12]. Bu durumda, T gözlem uzunluğu için kanala ulaşma ve kanalı terk etme sayıları sırasıyla $\lambda_a T$ ve $\lambda_d T$ olarak verilmektedir. Farklı $\lambda_a T$ ve $\lambda_d T$ değerleri için elde edilen ROC eğrileri Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmektedir.

Şekil 2'de farklı gözlem uzunlukları ($N=100, 200, 400$) ve farklı SNR değerleri için (-5 dB ve -10 dB) elde edilen ROC eğrileri görülmektedir. $\lambda_a T=1$ olup, birincil kullanıcının kanalı terk etmediği varsayılmaktadır ($\lambda_d T=0$). Şekilden görülebileceği gibi, bütün yöntemler için performans, SNR değeri ve gözlem uzunluğu arttıkça iyileşmektedir. Bu çalışmada önerilen yöntem, bütün durumlarda diğer yöntemlere üstünlük sağlamaktadır.

Şekil 3'te ise $\lambda_a T=2$ ve $\lambda_d T=1$ 'dir (Şekil 1'de yer alan senaryo). Dolayısıyla kanaldaki toplam değişim sayısı 3 olmaktadır. Şekil 2'de kullanılan SNR ve N değerleri burada da kullanılmıştır. Birincil kullanıcı trafiğinin artmasıyla bütün yöntemler için performansta bir bozulma gözlemlenmektedir. Ancak, her durum için, önerilen yöntem diğer iki yönteme göre daha üstün performans göstermektedir.

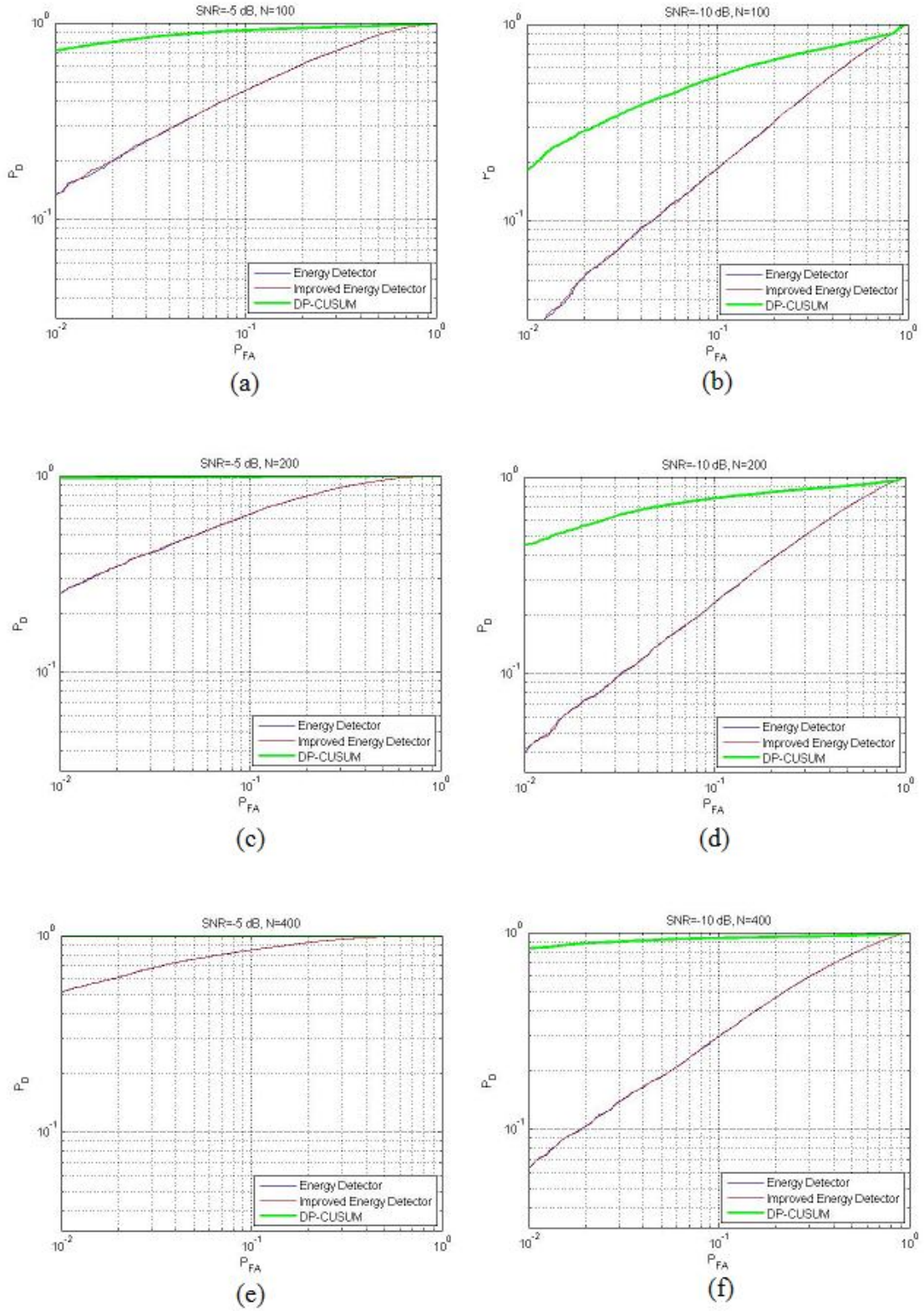
Son olarak, [12] çalışmasında iyileştirilmiş enerji algılayıcısının teorik performans eğrilerinin klasik enerji algılayıcısına göre az da olsa daha iyi sonuçlar sergilediği belirtilmekle birlikte, yaptığımız Monte Carlo simülasyonlarında bu iki yöntemin deneysel performans eğrilerinin büyük oranda çakıştığı gözlenmiştir.

SONUÇ

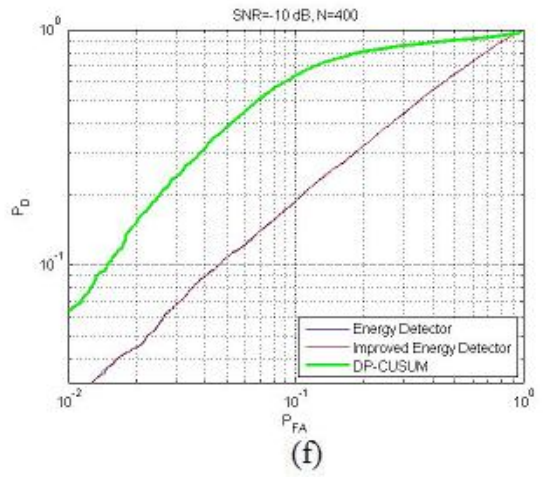
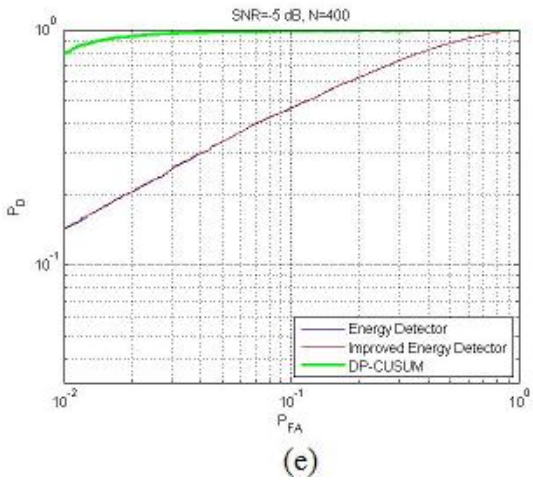
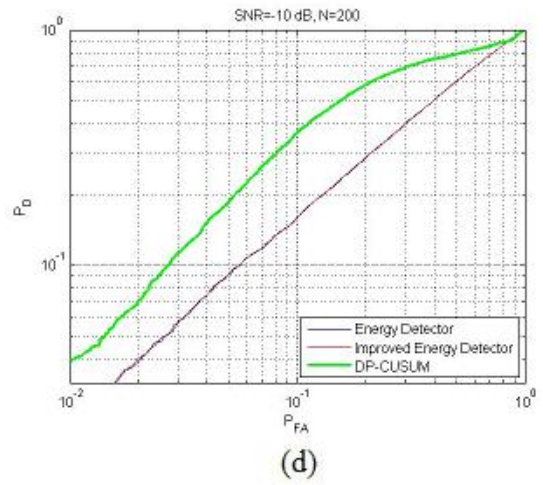
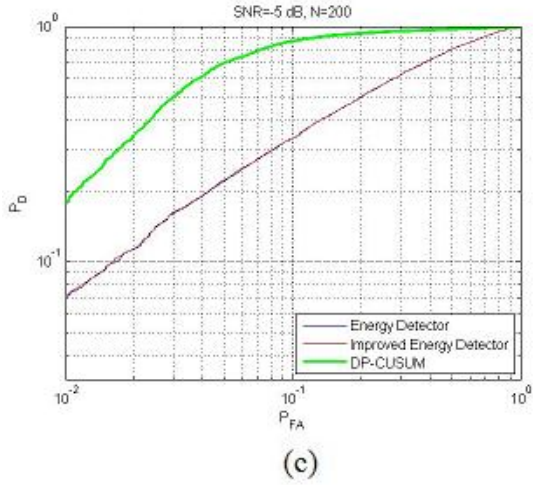
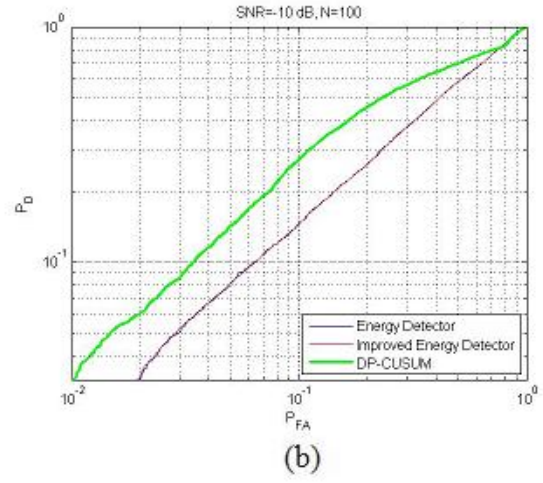
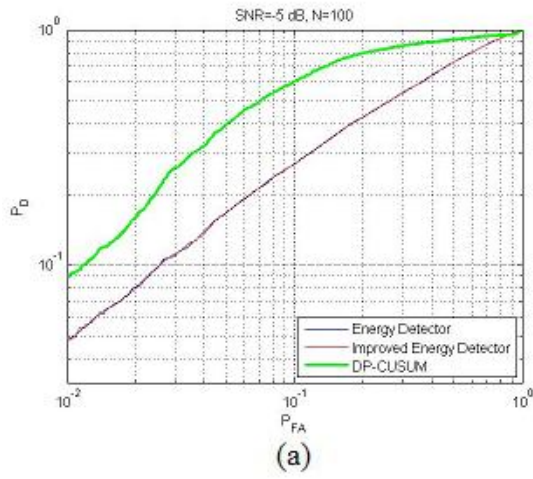
Gerçekleştirilen bu çalışmada, birincil kullanıcı trafiği içeren bilişsel radyo uygulamalarına yönelik olarak, birincil kullanıcının algılanmasının iyileştirilmesi amacıyla yeni bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntemin yüksek birincil kullanıcı trafiği altında ve düşük SNR değerlerinde dahi karşılaştırıldığı diğer yöntemlere (enerji algılayıcısı ve iyileştirilmiş enerji algılayıcısı) göre yüksek performans sağladığı gözlemlenmiştir. Önerilen test istatistiğinin sadece son durum değişimi noktasından sonraki gözlem verilerini kullanmasının bu performans artırımını sağladığını düşünmekteyiz. Şayet, karşılaştırılan diğer yöntemlerde olduğu gibi, gözlem verisinin tamamı karar sürecine katılırsa performansın olumsuz etkilenmesi beklenebilir. Önerilen test istatistiğinin kullandığı gözlem aralığında durum değişikliğinin olmaması, diğer yöntemlere göre başarıyı artırılmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] S. Shankar, C. Cordeiro and K. Challapali, "Spectrum agile radios: Utilization and sensing architectures," in Proc. IEEE Int. Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, Maryland, USA, pp. 160–169, Nov. 2005.
- [2] Y. Yuan, P. Bahl, R. Chandra, P. A. Chou, J. I. Ferrell, T. Moscibroda, S. Narlanka and Y. Wu, "KNOWS: Cognitive radio networks over white spaces," in Proc. IEEE Int. Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, Ireland, pp. 416–427, Apr. 2007.
- [3] G. Ganesan and Y. Li, "Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio," in Proc. IEEE Global Telecomm. Conf. (Globecom), vol. 5, St. Louis, Missouri, USA, pp. 2505–2509, Nov./Dec. 2005.



Şekil 2. $\lambda_a T=1$ için üç yönteme ait ROC eğrileri, (a) SNR=-5 dB, N=100, (b) SNR=-10 dB, N=100, (c) SNR=-5 dB, N=200, (d) SNR=-10 dB, N=200, (e) SNR=-5 dB, N=400, (f) SNR=-10 dB, N=400



Şekil 3. $\lambda_a T=2$ ve $\lambda_a T=1$ için üç yönteme ait ROC eğrileri, (a) SNR=-5 dB, N=100, (b) SNR=-10 dB, N=100, (c) SNR=-5 dB, N=200, (d) SNR=-10 dB, N=200, (e) SNR=-5 dB, N=400, (f) SNR=-10 dB, N=400

- [4] D. Cabric, S. Mishra and R. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," in Proc. Asilomar Conf. on Signals, Systems and Computers, vol. 1, Pacific Grove, California, USA, pp. 772–776, Nov. 2004.
- [5] A. Ghasemi and E. Sousa, "Optimization of spectrum sensing for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," in Proc. IEEE Consumer Comm. and Netw. Conf., Las Vegas, Nevada, USA, pp. 1022–1026, Jan. 2007.
- [6] D. Datla, R. Rajbanshi, A. M. Wyglinski and G. J. Minden, "Parametric adaptive spectrum sensing framework for dynamic spectrum access networks," in Proc. IEEE Int. Symp. on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Dublin, Ireland, pp. 482–485, Apr. 2007.
- [7] F. Digham, M. Alouini and M. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," in Proc. IEEE Int. Conf. Commun., vol. 5, Seattle, Washington, USA, pp. 3575–3579, May 2003.
- [8] P. Qihang, Z. Kun, W. Jun and L. Shaoqian, "A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context," in Proc. IEEE Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Comm., Helsinki, Finland, pp. 1–5, Sept. 2006.
- [9] L. Wei and O. Tirkkonen, "Spectrum sensing in the presence of multiple primary users", IEEE Trans. on Comm., vol. 60, no. 5, pp. 1268 – 1277, May 2012.
- [10] J. Lehtomaki, M. Juntti, H. Saarnisaari and S. Koivu, "Threshold setting strategies for a quantized total power radiometer," IEEE Sig. Proc. Lett., vol. 12, no. 11, pp. 796–799, Nov. 2005.
- [11] T. Wang, Y. Chen, E. L. Hines and B. Zhao, "Analysis of effect of primary user traffic on spectrum sensing performance", Int. Conf. on Comm. and Netw. CHINACOM, pp. 1-5, China, 2009.
- [12] N. C. Beaulieu and Y. Chen, "Improved energy detector for cognitive radios with randomly arriving or departing primary users", IEEE Sig. Proc. Lett., vol. 17, no. 10, pp. 867-870, Oct. 2010.
- [13] L. Tang, Y. Chen, E. L. Hines and M. Alouini, "Performance analysis of spectrum sensing with multiple status changes in primary user traffic", IEEE Comm. Lett., vol. 16, no. 6, pp. 914-918, June 2012.
- [14] Y. Chen, C. Wang and B. Zhao, "Performance comparison of feature-based detectors for spectrum sensing in the presence of primary user traffic", IEEE Sig. Proc. Lett., vol. 18, no. 5, pp. 291-294, May 2011.
- [15] S. Zarrin and T. J. Lim, "Cooperative quickest spectrum sensing in cognitive radios with unknown parameters", GLOBECOM- 2009, IEEE Global Telecom. Conf., Hawaii, USA, pp. 1-6, Dec. 2009.
- [16] C. Alippi and M. Roveri, "An adaptive CUSUM-based test for signal change detection", International Symposium on Circuits and Systems, Kos, Greece, May 2006.
- [17] G. V. Moustakides, "Decentralized CUSUM change detection", 9th Int. Conf. on Information Fusion, Florence, Italy, pp. 1-6, July 2006.
- [18] A. Jayaprakasam and V. Sharma, "Sequential detection based cooperative spectrum sensing algorithms in cognitive radio", First UK-India Int. Workshop on Cognitive Wireless Systems (UKIWCWS), New Delhi, India, pp. 1-6, Dec. 2009.
- [19] A. Jayaprakasam and V. Sharma, "Cooperative robust sequential detection algorithms for spectrum sensing in cognitive radio", Int. Conf. on Ultra Modern Telecom. & Workshops, St. Petersburg, Russia, pp. 1-6, Oct. 2009.

- [20] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing Volume II: Detection Theory*. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [21] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals", *Proc. IEEE*, vol. 55, pp. 523–531, Apr. 1967.