Çoklu Antenli Bilişsel Radyo Sistemlerinde Enerji Algılamasına Dayanan Spektrum Sezimi

Spectrum Sensing based on Energy Detection for Cognitive Radio Systems with Multiple Antennas

Refik Fatih Üstok, Berna Özbek

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

{refikustok, bernaozbek}@iyte.edu.tr

Özetçe

Frekans spektrumu sınırlı bir kaynaktır ve etkin bir biçimde kullanılması gereklidir. Spektrum verimliliğini arttırmayı hedefleyen bilişsel radyo sistemleri çevrelerini dinleyerek spektrumdaki boşlukları tespit edebilirler ve lisanssız kullanıcıları lisanslı kullanıcıların haberleşmelerine girişim yapmayacak şekilde frekandaki boşluklara yerleştirebilirler. Frekans sezinlemesi için literatürde kullanılan metotlardan birisi enerji algılaması metodudur. Bu bildiri bilişsel radyo tabanlı sistemlerde enerji algılaması metodunu kullanarak spektrumdaki boşlukları sezinleme üzerine odaklanmıştır. Başarım oranını arttırmak için çoklu anten sistemleri önerilmiş ve benzetim sonuçları irdelenmiştir.

Abstract

Frequency spectrum is a limited resource and has to be used efficiently. Cognitive radios aiming to increase the efficiency of the spectrum can sense their environment, detect the spectrum holes and allocate the unlicensed users into the detected spectrum holes without any interference to licensed users' communications. Energy detection is one of the commonly used methods in the literature to sense the spectrum holes. This paper focuses on spectrum sensing using energy detection method in Cognitive Radio based systems. Some multiple antenna techniques are proposed to increase the performance and some simulation results are analyzed.

1. Giriş

Dünyanın tükenmeye yüz tutmuş sınırlı kaynakları olabilecek en etkili şekilde kullanılması problemi; bugünkü toplumların üstesinden gelmeye çalıştığı en önemli problemlerden biridir. Doğal frekans spektrumu da sınırlıdır, bu nedenle verimli kullanılması gereklidir. Şu anda kullanılan durağan frekans tahsis etme yöntemleri, hızla artan miktardaki daha yüksek veri hızlı cihazların taleplerini karşılamada yetersiz kalmaktadır [1]. Bu nedenle de frekans spektrumunun kullanılabilirliğinin artırılması için spektrumun dinamik kullanımının, durağan kullanımdan ayırt edilmesi gerekmektedir. Spektrumun dinamik kullanılmasının ayırt edilmesi için; bilişsel radyo sistemleri, verimli spektrum kullanımı gibi kullanıcı gerekliliklerini uygun olarak yerine

getiren yeni bir teknoloji olarak önerilmektedir. Bilişsel radyo sistemleri çevresini dinleyerek, işlemlerini hedeflenen başarımla sağlamak için ayarlayabilmektedir. Diğer bir deyişle bilişsel radyo sistemleri, ilk önce spektral çevresini sezinleyerek daha sonra parametrelerini, spektral verimliliği en büyükleterek ortama göre değiştirebilir [2].

Bu bildiri; bilişsel radyo sistemlerinin spektrum sezinlemesi üzerine odaklanmaktadır. Literatürde spektrum sezinlemesinde sıklıkla kullanılan enerji algılama yönteminin tek antenli sistemler için Matlab üzerinde benzetimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra başarım oranını iyileştirmek için çeşitli çoklu anten teknikleri önerilmiştir.

2. Bilişsel Radyo Sistemlerinde Spektrum Sezinleme

2.1. Bilişsel Radyo Sistemleri

Kablosuz iletişimde son yıllarda meydana gelen hızlı gelişmeler sonucunda ortaya çıkan aşırı dolu spektruma yönelik olarak Federal İletişim Komisyonu (FCC) bazı spektrum bantlarını genişletti. Ancak bu genişleme etkili bir sonuç oluşturmadı çünkü bu bantların sürekli kullanılıp kullanılmadığını garantileyemedi [3]. Bu nedenle de spektrumun verimli kullanılmasına yönelik bir katkı sağlayamadı. Fırsatçı iletişime dayanan spektrumun dinamik kullanımı literatürde son zamanlarda spektrumun verimliliği için önerilen çözümler arasında yer almaktadır. Mitola'nın tezinde karşımıza çıkan fırsatçı iletişim, spektrumdaki boşlukları sezinlemeden yola çıkarak spektrumun verimliliğini artıran çözümler sunmaktadır.

Bilişsel Radyo sistemleri kullanarak fırsatçı iletişim sistemlerini gerçeklemek daha kolaydır. Bilişsel radyo sistemleri çevrelerini, ağın durumunu sezinleyip ona göre parametrelerini ayarlayabildiği için daha esnek ve verimli iletişim sağlarlar.

2.2. Spektrum Sezinleme

Spektrum sezinleme basit olarak birincil kullanıcının iletişim halinde olup olmadığını anlamak ve böylece spektrumdaki boşlukları sezinlemek olarak tanımlanabilir. Böylece ikincil

kullanıcıları (lisanssız); birincil kullanıcılara (lisanslı) girişim yapmadan, spektrumun bulduğumuz boşluklarını iletişim yapmaları için tahsis edebiliriz. Bilişsel radyo sistemleri için spektrum sezinleme halen gelişme aşamasındadır ve bu yüzden de şu anda literatürde sunulan metotlar oldukça sınırlıdır. Kısaca spektrum sezinleme aşağıdaki iki hipotez arasında karar vermektir [4].

$$r(t) = \begin{cases} n(t) \rightarrow H_0 \\ hs(t) + n(t) \rightarrow H_1 \end{cases} \quad (1)$$

$r(t)$ lisanssız kullanıcı tarafından alınan sinyal, $s(t)$ lisanslı kullanıcı tarafından yollanan sinyal, h kanal kazancı ve $n(t)$ varyansı $\sigma^2 = \frac{1}{10^{0.1SNR}}$ olan eklemeli beyaz Gauss gürültüsü

(AWGN) olarak tanımlanmıştır. Bir başka deyişle H_0 lisanslı kullanıcının iletişim kurmadığı boş hipotezi ve H_1 ise lisanslı kullanıcının varlığını belirten hipotezi göstermektedir. Sezinleme işlemlerinde eğer H_1 hipotezi doğru iken H_0 hipotezine karar verirse lisanslı kullanıcı iletişim halinde olmasına rağmen spektrumun kullanılmadığına karar verilir ve lisanssız kullanıcının iletişimine izin verilir. Diğer bir deyişle bu durumların oluşmasına Sinyal Atlama Olasılığı (Probability of Missing) denir. Bu durumda lisanssız kullanıcı, lisanslı kullanıcıya girişim yapar. Eğer H_0 hipotezi doğru iken H_1 hipotezine karar verirse, lisanslı kullanıcı sinyal yollamasına rağmen sistem lisanslı kullanıcının varlığına karar verir ve böylece o sırada spektrum boş olmasına rağmen ikinci kullanıcının kullanımına tahsis edilemez. Sonuçta spektrum verimli kullanılamaz. Bu durumların oluşma olasılıkları Yanlış Alarm Olasılığı (False Alarm Probability) olarak tanımlanır. Literatürde spektrum sezinlemesi için genel olarak önerilen metotlar uyumlu süzgeçleme, enerji algılaması, dönmeli durağan özellik sezinleme, yüksek dereceli istatistikler ve dalga formuna dayanan sezinleme olarak sıralanabilir. Bu çalışmamız yalnızca enerji algılama üzerinde odaklanmıştır.

2.3. Enerji Algılama

Enerji algılama lisanslı kullanıcıların önsel bilgisinin lisanssız kullanıcılar tarafından bilinmediği zamanlarda kullanılacak en iyi metotlardan birisidir. Bu metot, belirli bir gözlem zamanında alınan sinyalin enerjisini hesaplar [5].

Şekil 1: Welch periodogramını kullanarak Enerji Algılama.

Literatürde enerji algılamasının gerçekleştirilmesi için oluşturulmuş çeşitli periodogram yöntemleri bulunmaktadır. Genel olarak bu periodogramlarda band geçiren filtre, analog/sayısal dönüştürücü, kare alma devresi ve entegratör bulunmaktadır. Önce giriş sinyalimizin bant genişliği bant geçiren filtre ile odaklanmak için sınırlandırılır. Filtre edilmiş

sinyalin daha sonra karesi alınır ve gözlem aralığında entegre edilir. Sonunda da eşik değeri ile karşılaştırılıp sinyalin olup olmadığına karar verilir. Şekil 1’de en çok kullanılan periodogramlardan biri olan Welch periodogramı verilmiştir.

Enerji algılama metodunda karşılaşılan en büyük zorluklardan biri enerjisi hesaplanan sinyalin karşılaştırılacağı eşik değerinin belirlenmesidir. Ref. [5]’te üzerinde çalışılan denklemler yardımıyla eşik değerine karar verilebilir. Eşik değeri belirlenirken oluşturulacak sistemin verimliliği göz önünde bulundurulur. Çünkü her bir eşik değere denk düşen sabit yanlış alarm olasılıkları bulunmaktadır. Yanlış Alarm Olasılığı (2) numaralı denklem ile bulunmaktadır.

$$P_f = E_\gamma [\text{Prob}\{H_1 | H_0\}] = \frac{\Gamma\left(u, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(u)} \quad (2)$$

yanlış alarm olasılığını (P_f) hesaplanmasında kullanılan (2) numaralı denklemde λ eşik değeri, u ise $u = T.W$ ile tanımlanabilir. W sinyal bant genişliği, T ise alınan sinyal örneklerinin gözlem zamanıdır. E_γ ise Rayleigh dağılım gösteren γ rasgele değişkeni üzerinden ortalamasını göstermektedir. $\Gamma(\cdot)$ gamma fonksiyonunu $\Gamma(\cdot, \cdot)$ tamamlanmamış (incomplete) gamma fonksiyonunu tanımlamaktadır. Bu denklemleri kullanarak farklı P_f değerleri için eşik değerleri bulunabilir. Enerji algılaması algoritmasını H_1 hipotezi için şu şekilde ifade edebiliriz.

$s(n) \rightarrow$ BPSK sembolleri

Lisanslı kullanıcının kiplenmiş sembolleri kanaldan geçirilir.

$$r(n) = hs(n) + w(n) \quad (3)$$

h Rayleigh kanal, $w(n)$ ise eklemeli Beyaz Gauss gürültüdür. Lisanssız kullanıcı tarafından alınan $r(n)$ sembollerine enerji algılama algoritması uygulanır. Önce N boyutlu ayrık Fourier dönüşümü uygulanır. Daha sonra genliğinin karesi alınarak ortalaması alınır. Bulunan sonuç daha sonra yanlış alarm olasılığının Sinyal Gürültü Oranı’na (SNR) bağlı olarak değişmemesini sağlamak için $\frac{1}{\sigma_w^2}$ ’ye bölünerek aşağıda

verildiği gibi normalize edilir.

$$E_k = \frac{1}{N\sigma_w^2} \left| \sum_{n=1}^N r(n) e^{-i2\pi \left(\frac{k-1}{N}\right)(n-1)} \right|^2, k = 1 \dots N \quad (4)$$

$$E = \sum_{k=1}^N E_k \quad (5)$$

Daha sonra bulunan E değerleri belirli yanlış alarm olasılıkları için bulunan λ eşik değeriyle karşılaştırılır ve lisanslı kullanıcının iletişimde olup olmadığına karar verilir.

$E > \lambda$ H_1 hipotezi doğru, lisanslı kullanıcı sinyali var.

$E < \lambda$ H_0 hipotezi doğru, lisanslı kullanıcı sinyali yok.

2.4. Çoklu Anten Sistemleri ile Enerji Algılaması

Çoklu antenli sistemler, geleceğin telsiz iletişim sistemlerinde, spektral verimliliği etkili bir şekilde artırma potansiyeli taşımaktadır. Birçok çoklu anten teknikleri bulunmasına rağmen benzetimini gerçekleştirdiğimiz enerji algılama modelinde kullanılabilecek çoklu anten algoritmaları oldukça zordur. Çünkü lisanssız kullanıcı, kanal bilgisine sahip değildir.

2.5. Önerilen Çoklu Anten Sistemleri

2.5.1. Enbüyük Seçme Yöntemi

Bizim enerji algılama için önerdiğimiz tek girişli çok çıkışlı sistemlerimiz iki farklı yöntem kullanmaktadır. Birinci yöntemde çıkışta antenlerden alınan sinyallerin arasından en büyükleri seçip, enerji algılaması bloğuna uygulanmasını içeren Enbüyük Seçme Yöntemi'dir. Öncelikle hangi antenden genliği en büyük verinin geldiği (8) numaralı denklem ile belirlenir. O anda en büyük verinin alındığı j_{max} anteninden alınan sinyal (9) numaralı denklemdeki gibi enerji algılama bloğuna uygulanır.

Şekil 2: Enbüyük Seçme Yöntemi kullanılarak Enerji Algılaması Blok şeması

$$r_x(n) = h_x s(n) + w(n); x = 1, 2, \dots, Nr \quad (6)$$

$$r(n) = [r_1(n); r_2(n); \dots; r_{Nr}(n)]^T \quad (7)$$

$$j_{max} = \arg \max_x (r_x(n)) \quad (8)$$

$$E_k = \frac{1}{N\sigma_w^2} \left| \sum_{n=1}^N r_{j_{max}}(n) e^{-i2\pi \left(\frac{k-1}{N} \right) (n-1)} \right|^2 \quad (9)$$

$$E = \sum_{k=1}^N E_k \quad (10)$$

Bu yöntemde hesapladığımız E 'ler belirlenmiş P_f 'ler için bulunan eşik değerleri ile karşılaştırılır. Çoklu anten teknikleri kullanılırken, enerji algılamasının literatürde belirtilen dezavantajlarından biri olan değişen gürültü seviyeleri nedeniyle eşik değeri bulunması zorlaşmaktadır. Nr alıcıdaki anten sayısını göstermektedir.

2.5.2. Toplama Yöntemi

İkinci yöntem ise alınan sinyallerin toplamı yöntemidir. Bu metotta her bir antenden alınan sinyaller ayrı ayrı enerji algılama bloğuna (11) numaralı denklemde verildiği gibi uygulanır, çıkan sonuçlar toplanıp ortalamasına bölünüp, (13) numaralı denklem elde edilir ve çıkan sonuç eşik değeri ile karşılaştırılır.

Şekil 3: Toplama Yöntemi kullanılarak Enerji Algılaması Blok Şeması

$$E_k(j) = \frac{1}{N\sigma_w^2} \left| \sum_{n=1}^N r_j(n) e^{-i2\pi \left(\frac{k-1}{N} \right) (n-1)} \right|^2 \quad (11)$$

$$E(j) = \sum_{k=1}^N E_k(j) \quad (12)$$

$$E = \frac{1}{Nr} \sum_{j=1}^{Nr} E(j) \quad (13)$$

3. Benzetim Sonuçları

Benzetimlerimizde tek taşıyıcılı kiplenim tekniklerinden BPSK kullanılmıştır. Lisanslı kullanıcı ile lisanssız kullanıcı arasındaki kanal yol kayıpsız Rayleigh olarak kabul edilmiştir. Tasarladığımız sistemde 100 birim zamanda rastgele olarak bazen lisanslı kullanıcının iletişim halinde olduğu, bazen de lisanslı kullanıcının haberleşmediği varsayılmıştır. $u=5$ olarak kabul edilmiştir. (2) numaralı denklemden yararlanarak uygun eşik değerleri $P_f=0.1$ için $\lambda = 15.906$, $P_f=0.01$ için $\lambda = 23.19$, $P_f=0.001$ için $\lambda = 29.5$ olarak hesaplanmıştır. Eşik değerleri benzetimlerde dB cinsine çevrilerek kullanılmıştır.

Bir sonraki adımda tek antenli sistemler için $SNR=15$ dB seçilerek değişen yanlış alarm olasılıklarına göre sinyal atlama olasılıkları çizdirildi.

Şekil 4'te görüldüğü üzere yanlış alarm olasılığı P_f arttıkça sinyal atlama olasılığı P_m azalmaktadır. Diğer bir deyişle ne kadar düşük P_f değeri için benzetimler yapılırsa, sinyal atlama olasılıkları o kadar kötü çıkacaktır.

Son bölümde ise çoklu anten teknikleri kullanılarak benzetim sonuçları iyileştirilmiştir. İki farklı yöntem önce 1 verici 2 alıcı, daha sonra 1 verici 4 alıcı kullanılan sistemler için

uygulanmıştır. Kullanılan tüm yöntemler, yanlış alarm olasılığı $P_f=0.01$ için hesaplanmıştır. Önerdiğimiz yöntemlerde 1 verici 2 alıcılı sistemler için $P_f=0.01$ değerine karşılık Toplama yöntemi için 12.6 dB, Enbüyük Seçme yöntemi için 14.96 dB, 1 verici 4 alıcılı sistemler için yine aynı yanlış alarm olasılığına karşılık Toplama yöntemi için 11.736 dB, Enbüyük Seçme yöntemi için 16.1 dB eşik değeri olarak seçilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü üzere, sinyal gürültü oranı arttıkça sinyal atlama olasılığı azalmaktadır. Önerilen çoklu anten sistemleri ile enerji algılaması performansında iyileşme gözlemlenmektedir. Örneğin 15 dB SNR oranı için tek antenli sistemlerde yaklaşık 0.04 sinyal atlama olasılığına karşılık 1 verici 2 alıcılı sistemlerde önerilen her iki yöntem için yaklaşık 0.003 sinyal atlama olasılığı bulunmaktadır, bu oran 1 verici 4 alıcılı sistemlerde yaklaşık 10^{-5} civarında bulunmaktadır. Şekil 6'da görüldüğü üzere alıcıda çoklu anten kullanılarak lisanslı kullanıcıyı doğru sezinleme başarımları iyileştirilmiştir. Alıcıda 2 anten kullandığımızda toplama yöntemi ile en büyük seçme yöntemi sonuçları yaklaşık olarak aynı çıkmakta fakat daha fazla anten için en büyük seçme yöntemi toplama yöntemine göre daha iyi sonuç vermiştir.

Şekil 4: Sinyal Atlama Olasılığının Yanlış Alarm Olasılığına göre çizdirilmesi

Şekil 5: Çoklu Anten Teknikleri kullanılarak hesaplanan Sinyal Atlama Olasılığının SNR ile değişimi grafiği

Şekil 6: Çoklu Anten Teknikleri kullanılarak hesaplanan Doğru Algılama Olasılığının SNR ile değişimi grafiği

4. Sonuçlar

Bilişsel Radyo için düşünülen lisanssız kullanıcı için lisanslı kullanıcının enerji algılama yöntemi kullanılarak iletişimde olup olmadığı sezinlendi. Çoklu alıcı antenli sistemler için enerji algılama yöntemleri kullanılarak yanlış alarm olasılıkları ile sinyal atlama olasılıklarının değişimi incelendi. Böylece lisanssız kullanıcıda birden çok anten kullanarak lisanslı kullanıcının doğru olarak sezinlenmesi iyileştirildi ve lisanssız kullanıcının lisanslı kullanıcıya girişim yapma olasılığı azaltıldı.

5. Kaynakça

- [1] Arslan H., Yücek T. "Spectrum Sensing for Cognitive Radio Applications" *Cognitive Radio, Software Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems*, Springer Netherlands Sayfa No: 263-289 2007
- [2] I.F. Akyıldız, W-Y Lee, M.C. Vuran, S. Mohanty "Next generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey" *2006 Elsevier Computer Networks* 50/13, 15 Eylül 2006, Sayfa No: 2127-2159
- [3] Karama Hamdi, Wei Zhang, Khaled Ben Letaief "Power Control in Cognitive Radio Systems Based on Spectrum Sensing Side Information" *ICC 2007 Sayfa No: 5161-5165* 1-4244-0353-7/07
- [4] Marko Höyhty, Atso Hekkala, Marcos D. Katz, Aarne Mämmelä "Spectrum Awareness: Techniques and Challenges for Active Spectrum Sensing" *Cognitive Wireless Networks*, Springer Netherlands, Sayfa No: 353-372 978-1-4020-5978-0 (Print) 978-1-4020-5979-7 (Online)
- [5] Harry Urkowitz "Energy Detection of Unknown Deterministic Signals" *Proceedings of the IEEE*, VOL. 55, NO. 4, Sayfa N: 523-530, NİSAN 1967