

ENERJİ VERİMLİ İŞBİRLİKÇİ DTV SPEKTRUM ALGILAMA

Selman KULAÇ*, **Murat H. SAZLI****

* Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, DÜZCE

**Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

selmankulac@duzce.edu.tr, sazli@eng.ankara.edu.tr

(Geliş/Received: 20.12.2011; Kabul/Accepted: 03.10.2012)

ÖZET

Gelişmekte olan bilişsel radyoda spektrum algılama kalitesinin iyi olması önem arz etmektedir. Etkin spektrum algılama yöntemlerinden birisi de pilot ton algılama yöntemidir. DTV (Sayısal TV) pilot enerji algılamada, 6 MHz'lik DTV kanalı için enerji toplamı yerine, sadece pilot sinyali frekans bölgesindeki genlik değerleri ile enerji toplamı hesaplanarak ciddi anlamda hesaplama tasarrufu sağlanması ile de enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Fakat bir alıcıda, 6 MHz'lik bir DTV kanalına odaklanmak yerine sadece bir pilot sinyali ile ilgilenilmesi ile direkt pilot sinyalinin derin sönümlemeye uğraması durumunda algılamanın yapılamaması olasılığı da vardır. Bu çalışmada, yenilikçi bir yaklaşımla, işbirlikçi yapı ile Goertzel algoritmasından yararlanarak ve sadece pilot sinyali dar bandında enerji algılama yapılması durumunda, tüm işbirlikçi alıcılara gelen pilot sinyalinin derin sönümlemeye uğrama olasılığının çok düşük olduğu ve spektrum algılama kalitesi yanında toplamda enerji verimliliğinin de arttığı yapılan detaylı benzetimlerle gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilişsel Radyo, Spektrum Algılama, İşbirlikçi Çeşitleme, Pilot Ton Algılama, Goertzel Algoritması

ENERGY EFFICIENT COOPERATIVE DTV SPECTRUM SENSING

ABSTRACT

In emerging cognitive radio, spectrum sensing with good quality is important. Pilot tone detection method is one of the most effective spectrum sensing methods. In DTV (Digital TV) pilot detection, total energy can be calculated using only the pilot signal amplitudes in the frequency domain, instead of total energy of the 6 MHz DTV channel. Therefore, significant energy saving can be achieved. However, if the pilot signal suffers from deep fading, detection may not even be possible at all. In this study, with an innovative approach, improvement in spectrum sensing quality besides the energy efficiency is shown by detailed simulations by taking advantage of the cooperative structure and the Goertzel algorithm in the case of pilot signal narrow band energy detection and very low probability of deep fading of the pilot signal.

Key Words: Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Cooperative Diversity, Pilot Tone Sensing, Goertzel Algorithm

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde her alanda olduğu gibi iletişim alanında da enerji verimliliği önem kazanmaya başlamıştır. Enerji kullanımının artması ve enerji kaynaklarının azalması nedeni ile enerji tüketiminin azaltılmasına ve yenilenebilir (rüzgar, güneş) enerji kaynakları kullanımına yönelimi artırmıştır. Bu nedenle telsiz

iletişimde de daha az enerji tüketimi ile daha etkin haberleşme hedeflenmektedir. Ayrıca mobil iletişimde kullanılan mobil cihazların pil ömrünün daha uzun olması da en önde gelen talepler arasında yer almaktadır. Pil ömrünü artırmak için daha az enerji harcanmasını sağlayacak algoritmaların geliştirilmesi, karmaşıklığın azaltılması üzerinde de çalışmalar devam etmektedir.

İletişimde yakın gelecekte hayat bulmaya başlaması beklenen bilişsel (cognitive) radyo teknolojisi için de enerji verimliliği önem arz etmektedir. Spektrum kısıtının oluşmasıyla ihtiyaç duyulan bir iletişim teknolojisi olan bilişsel radyoda enerji kısıtı da dikkate alınmaktadır.

Bilişsel radyo, lisanssız veya bilişsel kullanıcıların spektrumunu dinleyerek lisanslı (primary) kullanıcıların varlıklarının tespiti ve lisanslı kullanıcıların iletim yapmadıkları anlarda iletişim gerçekleştirme yeteneğine sahip olabilmeyi sağlayan bir radyo iletişim tekniğidir [1].

Kablosuz iletişimde kaliteli iletişime karşı en büyük bozucu etki sönümlenme etkilerini en aza indirecek yöntem çeşitleme (diversity) teknikleri olarak bilinmektedir. Bu kapsamda özellikle gezgin sistemlerde boyut, maliyet, enerji tüketimi parametreleri de hesaba katılarak çeşitlemenin etkinliğini artıracak yöntemler araştırılmış ve ilk defa [2]'de önerilen işbirlikçi çeşitleme (cooperative diversity) olarak adlandırılan teknik ortaya çıkarılmıştır.

Bilişsel radyoda spektrum algılama lisanslı kullanıcının rahatsız edilmemesi açısından önemli bir yere sahiptir. Spektrum algılamanın etkin yapılmasında da işbirlikçi çeşitlemenin kullanılması en etkin yöntemlerden biri olmuş ve bu sayede işbirlikçi spektrum algılama literatürde yer edinmiştir [3]. İşbirlikçi spektrum algılama, özellikle iletişimin zorlaştığı gezginlik durumunda da en fazla destek olabilecek yöntemlerden birisi olarak görülmüştür [4].

Bilişsel radyoya ilk somut adım Federal Haberleşme Komisyonunun (FCC) özellikle kırsal kesimde zaman bölgesinde bakıldığında TV bantlarında spektrum kullanımının çok yüksek olmadığını tespit ettiğini ve bu nedenle bu bantlarda TV kullanıcılarını etkilemeksizin lisanssız kullanıma müsaade ettiğini duyurmasıyla başlamıştır. Buna istinaden kurulan IEEE 802.22 çalışma grubu, IEEE 802.22 WRAN (Telsiz Bölgesel Alan Ağı, Wireless Regional Area Network) olarak adlandırılan ilk bilişsel radyo çalışmasını başlatmıştır.

IEEE ilk bilişsel (cognitive) radyo sınıfında yer alabilecek ve dünya çapında geçerli olabilecek bir telsiz iletişim standardını geliştirmektedir. IEEE 802.22 WRAN olarak adlandırılan bu standart ile özellikle kırsal kesim kullanıcılarına TV (Digital TV – DTV) bantlarında veri iletişim imkanı sağlanması hedeflenmektedir. TV bantlarında, mevcut TV alıcılarına girişim oluşturmamak ve kullanılmayan kanallardan iletişim yapmak için kullanılmayan kanalların etkin tespiti gereklidir. Bu da etkin spektrum algılamayla gerçekleştirilebilir. Bu etkinliği

sağlama yöntemlerinden biri de işbirlikçi spektrum algılama yöntemidir [5, 6].

IEEE 802.22 standardında spektrum algılama teknikleri genel bir sınıflandırma şekliyle iki sınıfta toplanmıştır. Bunlar gözü kapalı (blind) algılama ve sinyale özel (signal specific) algılama teknikleridir. Gözü kapalı algılama tekniklerinden en fazla uygulananı enerji (veya güç) dedektörüdür [7]. Gözü kapalı algılama tekniklerinden enerji algılama yönteminin en fazla tercih edilme nedeni, enerji algılama yönteminde diğer spektrum algılama tekniklerinin aksine lisanslı kullanıcıların sinyallerine dair önsel (a priori) bilgiye gereksinim duyulmaması ve çok daha az enerji harcatacak karmaşıklık ile maliyet giderine ihtiyaç duyulmasıdır.

Spektrum algılama kalitesinin çok yüksek olması lisanslı kullanıcıların rahatsız edilmemesi açısından çok önemlidir. Gürültü belirsizliği de hesaba katıldığı durumlarda lisanslı kullanıcıların daha etkin sezilebilmesinde sinyale özel (signal specific) algılama teknikleri tercih edilebilmektedir. Bu tekniklerden biri de pilot ton algılama olarak geçmektedir.

Birçok lisanslı sayısal hücreli haberleşme sisteminde senkronizasyon vb nedenlerden ötürü pilot ton iletimi yapılmaktadır. Özellikle sinüs dalgası şeklindeki pilot ton iletimi lisanslı kullanıcı yayın sistemlerinde sıkça rastlanan ve alıcı senkronizasyonunda kullanılan pilot ton iletimidir. Pilot ton iletimi DTV yayın sisteminde de mevcuttur. [8]'de Goertzel algoritması yardımı ile gerçek DTV yayın kayıtları verileri kullanılarak daha hızlı, daha az karmaşıklık içeren ve etkin bir spektrum algılama sağlanması amacı ile daha etkin pilot ton algılama yapıldığı gösterilmiştir.

Bu çalışmada, işbirlikçi spektrum algılama ile DTV sinyallerinin etkin olarak algılanmasında, işbirliği sağlayan birimlerin hepsinde FFT (Fast Fourier Transform, Hızlı Fourier Dönüşümü) yerine Goertzel algoritmasının kullanılarak ve 6 MHz'lik tüm DTV frekans spektrumunun sadece pilot ton bölgesinin enerji algılama yöntemi ile hesaplaması yapılarak toplamda enerji verimliliği sağlandığı gösterilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde sistem modeli, üçüncü bölümünde Goertzel algoritması kullanılarak darbant işbirlikçi DTV pilot ton algılama, dördüncü bölümünde başarımlar değerlendirilmesi ve son bölümünde de çalışmanın ortaya çıkardığı sonuçlar yer almaktadır.

2. SİSTEM MODELİ (SYSTEM MODEL)

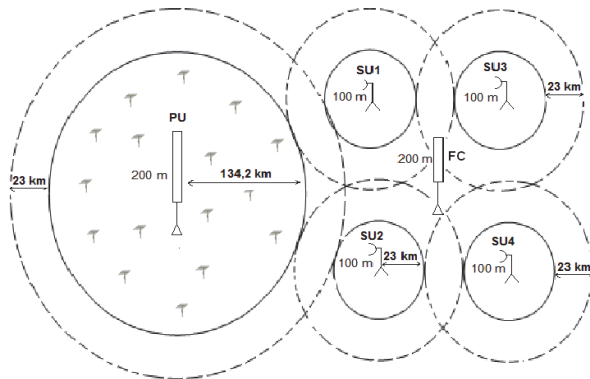
[10] ve [11]'de, geliştirilmekte olan IEEE 802.22 WRAN standardı için, [9]'daki standard'dan yararlanarak yapılan mesafe hesaplamaları mevcuttur. Bu çalışmada da [10]'daki hesaplamalar ışığında

verilen minimum uzaklıklar dikkate alınarak bir IEEE 802.22 WRAN sistem modeli önerilmiştir. Bu sistem modeli parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Sistem modeli parametreleri (System model parameters)

Parametreler	Değeri
TV verici çıkış gücü	90 dBm
TV verici anten yüksekliği	200 m
Baz istasyonu anten yüksekliği	100 m
Karar merkezi yüksekliği	200 m
Sayısal TV iletim bandgenişliği	6 MHz
Girişim koruma uzaklığı	≥ 23 km
WRAN hücre yarıçapı	23 km
TV vericisinin yarıçapı	134,2 km
PU-SU3	240 km
PU-SU4	240 km

Bu sistem modeline göre Şekil 1’de büyük bir TV yayın hücresi, dört adet daha küçük IEEE 802.22 WRAN hücreleri ve bir karar merkezi (FC, Fusion Center) bulunmaktadır. TV yayın hücresi merkezinde PU (Primary User, Lisanslı Kullanıcı) olarak adlandırılan aktif bir TV vericisi ve aynı hücre içinde rasgele dağılmış pasif TV alıcıları bulunmaktadır. IEEE 802.22 WRAN hücrelerinde, hücre merkezlerinde SU (Secondary User, Lisansız Kullanıcı) olarak adlandırılan ve işbirliği elemanı olan aktif birer baz istasyonu ile hücre içinde rasgele dağıldığı varsayılan ve alım/iletim yapan pasif (işbirliği elemanı olmayan) kullanıcılar (CPE, Customer Premise Equipment) bulunmaktadır. IEEE 802.22 WRAN hücrelerindeki kullanıcıların sınır noktaları dahil hücre içinde rahatça dağılabildikleri varsayılarak, TV yayın hücresi ile IEEE 802.22 WRAN hücreleri (SU1, SU2) komşulukları arasında ve tüm IEEE 802.22 WRAN hücreleri komşulukları aralarında büyük bir girişim koruma uzaklığı (en az 23 km) bırakılmıştır. Bu sayede, herhangi iki hücrenin birbirine en yakın sınır noktalarında iletim yapan kullanıcıların (CPE) olması durumunda dahi her türlü oluşabilecek girişim etkisi ortadan kalkmış olacaktır.



Şekil 1. Sistem modeli (System model)

Geliştirilmekte olan IEEE 802.22 standardına özel literatürde geliştirilmiş bir yol kaybı modeli mevcut olmamakla birlikte, sayısal TV yayınlarının alımında UHF bandında yapılan ölçümlerde Okumura-Hata modelinin [12] çalışmasında da geçtiği gibi uygunluk açısından tercih ediliyor olması, bu çalışmada da Okumura-Hata Modelinin yol kaybının hesaplanmasında kullanılması tercih nedeni olmuştur.

Gölge sönümlenmesinin varyansı 5.5 dB olarak kabul edilmiş (ITU-R P.1546-1) ve kanalın çok-yollu (multipath) profili [13]’ten alınmıştır. 6 MHz’lik sayısal televizyon yayınında 6 adet yol bulunmaktadır ve Çok-yollu profilleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Çok-yollu profiller (Multipath profiles)

Profil A	Yol 1	Yol 2	Yol 3	Yol 4	Yol 5	Yol 6
Aşan gecikme	0	3 μ s	8 μ s	11 μ s	13 μ s	21 μ s
Bağıl genlik	0	-7 dB	-15 dB	-22 dB	-24 dB	-19 dB
Doppler frekansı	0	0,10 Hz	2,5 Hz	0,13 Hz	0,17 Hz	0,37 Hz
Profil B	Yol 1	Yol 2	Yol 3	Yol 4	Yol 5	Yol 6
Aşan gecikme	-3 μ s	0	2 μ s	4 μ s	7 μ s	11 μ s
Bağıl genlik	-6 dB	0	-7 dB	-22 dB	-16 dB	-20 dB
Doppler frekansı	0,1 Hz	0	0,13 Hz	2,5 Hz	0,17 Hz	0,37 Hz
Profil C	Yol 1	Yol 2	Yol 3	Yol 4	Yol 5	Yol 6
Aşan gecikme	-2 μ s	0	5 μ s	16 μ s	24 μ s	33 μ s
Bağıl genlik	-9 dB	0	-19 dB	-14 dB	-24 dB	-16 dB
Doppler frekansı	0,13 Hz	0	0,17 Hz	2,5 Hz	0,23 Hz	0,10 Hz
Profil D	Yol 1	Yol 2	Yol 3	Yol 4	Yol 5	Yol 6
Aşan gecikme	-2 μ s	0	5 μ s	16 μ s	22 μ s	0 - 60 μ s
Bağıl genlik	-10 dB	0	-22 dB	-18 dB	-21 dB	-30 - +10 dB
Doppler frekansı	0,23 Hz	0	0,1 Hz	2,5 Hz	0,17 Hz	0,13 Hz

Bu çalışmada çok yol etkisi Profil B, [14]’ten yararlanarak gerçekleştirilmiştir. Çok yol etkisi ile sönümlenen sinyale toplanır beyaz gauss gürültüsü (AWGN – Additive White Gaussian Noise) eklenerek algılanacak sinyal elde edilmiştir.

3. GOERTZEL ALGORİTMASI KULLANARAK DARBAND İŞBİRLİKÇİ DTV PİLOT TON ALGILAMA (NARROWBAND COOPERATIVE DTV PILOT TONE DETECTION USING GOERTZEL ALGORITHM)

Pilot ton algılamada ve frekans kestiriminde direkt yöntem standart periodogram yöntemidir. Standart periodogram FFT dönüşümünün genlik karesi olarak bilinmektedir. N nokta bir dizi için periodogram aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanır.

$$S_x(f) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi n f) \right|^2 \quad (1)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

Periodogram örnekleri, $f_k = k / N$ kullanılarak FFT ile hesaplanabilmektedir [15]. Bizim çalışmamızda periodogram benzeri hesap Goertzel algoritması kullanılarak yapılmıştır.

DFT (Discrete Fourier Transform, Ayrık Fourier Dönüşümü), FFT algoritmaları ile hesaplanmaktadır. Farklı DFT uzunlukları (N) için farklı FFT algoritmaları kullanılmaktadır. FFT algoritmalarının en fazla kullanılan şekli de $N=2^m$ (iki'nin üssü FFT algoritması) için kullanılır. DTMF tonlarının algılanması, FSK demodülasyonu gibi bazı durumlarda da daha az sayıda DFT frekans örneğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gibi durumlarda hesaplama karmaşıklığını daha da azaltan Goertzel algoritması kullanılabilmektedir [16].

Goertzel algoritması bir tekrarlamalı (recursive) FFT algoritması türüdür [17]. Goertzel algoritması ikinci derece süzgeç kullanarak giriş sinyalinin k. DFT katsayısını hesaplar ve istenen frekanstaki DFT genliğinin hesaplanmasını sağlar. Giriş dizisinde aranan frekans veya frekanslar belliyse, kullanılan katsayılar hedef frekansa göre seçilebilir, böylece katsayıdan kaynaklanan karmaşıklık azaltılmış olur. Goertzel algoritması ile hesaplamada, seçilen frekanstaki sinyal genlik değeri değişmediğinden, seçilen frekanstaki sinyal enerjisi (dönüşümün genlik karesi) ve algılama başarımı da DFT ve FFT'dekinden daha düşük olmamaktadır.

Goertzel algoritması kullanılırken N nokta giriş sinyali için L nokta spektral değerler yeterli ise, hesap yükü $N \times L$ ile orantılıdır. FFT hesaplamasında ise hesap yükü ise $N(\log_2 N)$ ile orantılıdır. Oransal olarak $L < \log_2 N$ olduğunda, Goertzel algoritması FFT'ye karşı ciddi anlamda daha az hesap yükü ile daha az

enerji harcatarak enerji verimliliği sağlanmasına neden olmaktadır [17].

Goertzel algoritması ile transfer fonksiyonu aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$H(Z) = \frac{Y(Z)}{X(Z)} = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{1 - (2 \cos(\frac{2\pi k}{N}) z^{-1} - z^{-2})} \quad (2)$$

Burada $W_N^k = e^{-j(\frac{2\pi k}{N})}$, $k = f_{\text{tone}} N / f_s$ ve f_{tone} ise algılanması istenen sinyalin frekansıdır. f_s örnekleme frekansı ve N örnek sayısıdır. Sinyalin faz bilgisi gerekmesizin enerjisine ihtiyaç duyulduğunda Goertzel algoritması ile enerji hesabı önceki giriş değerlerinden de yararlanarak aşağıdaki gibi hesaplanır [18].

$$\begin{aligned} |X_g(k)|^2 &= v_k^2(N-1) + v_k^2(N-2) \\ &- 2 \cos(2\pi f_{\text{tone}} / f_s) \times v_k(N-1) \times v_k(N-2) \end{aligned} \quad (3)$$

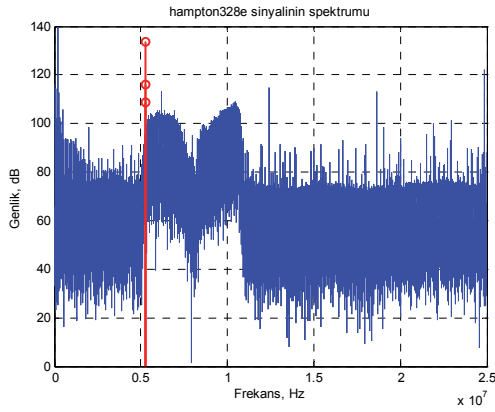
Goertzel algoritması ile periodogram benzeri hesap eşitlik 3'ten de yararlanarak aşağıdaki gibi olacaktır.

$$S_x(f) = \frac{1}{N} |X_g(k)|^2 \quad (4)$$

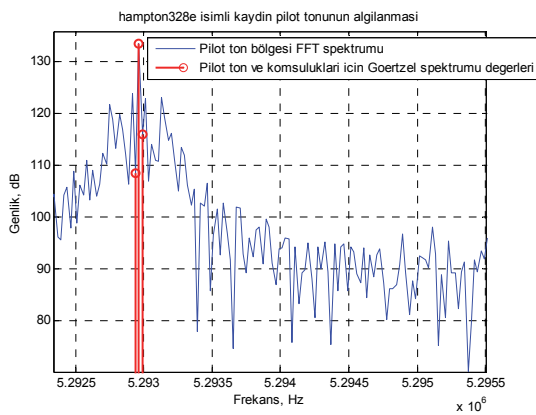
DFT hesaplaması (FFT) yöntemi ile alıcıya ulaşmış 6 MHz band genişliğindeki DTV sinyali için frekans bölgesi spektral yoğunluğu çıkarılabilmektedir. Fakat sadece ilgilenilen DTV pilot sinyali için FFT ile fazla hesaplama gerek olmamakta ve Goertzel Algoritması ile sadece DTV pilot frekansı ([19]) için hesaplama yaptırılarak ve pilot sinyali süzülerek algılama yapılabilmekte ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir [8, 20].

Öncelikli olarak bu çalışmada, Goertzel algoritması ile hesaplamada, seçilen frekanstaki sinyal genlik değerinin azalmadığı da aşağıda doğrulanmıştır. Dolayısı ile seçilen frekanstaki sinyal enerjisi (dönüşümün genlik karesi) ve algılama başarımının DFT ve FFT'dekinden daha düşük olmadığı da doğrulanmış olmaktadır.

Aşağıda, şekil 2'deki gibi bir alıcıya gelen kaydedilmiş gerçek karasal DTV sinyali yer almaktadır [21]. Bu orijinal DTV sinyali, kaydedilme esnasında genlik ve frekans'ta farklı kaydırmalara uğramış olduğundan, pilot frekansı yerinin ve genliğin farklı olduğuna dikkat edilmelidir.

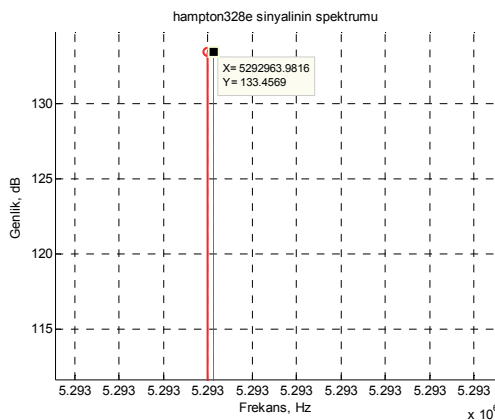


Şekil 2. hampton328.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu [21] (hampton328.snp DTV data record's power spectral density [21])



Şekil 3. hampton328.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması (hampton328.snp DTV data record's pilot tone sensing with Goertzel Algorithm)

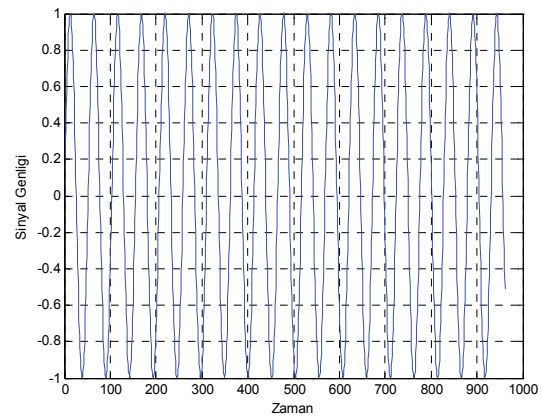
Şekil 3'te FFT ve Goertzel dönüşümleri ile elde edilen pilot frekansı genlik değerlerine bakılmış ve Şekil 4'te ise bu genlik değerlerinin denk oldukları gösterilmiştir.



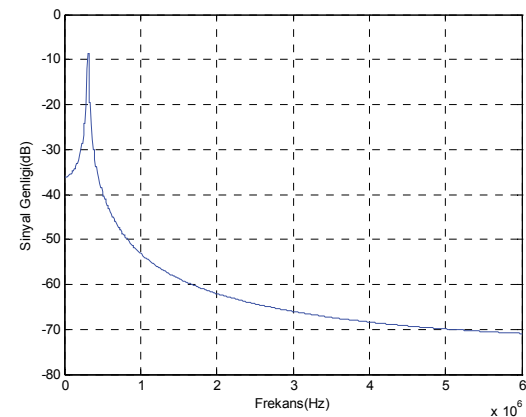
Şekil 4. hampton328.snp isimli DTV yayın kaydı pilot frekansı için FFT ve Goertzel genlik değerleri (FFT and Goertzel amplitudes for pilot frequency of hampton328.snp DTV data record)

Bu çalışmada da 100000, 200000, 309440.6, 400000, 500000, 6000000 Hz frekans bileşenleri hesaba katılarak (oransal olarak $L=6$) Goertzel algoritması uygulanmıştır. Pilot frekansı (309440.6 Hz) dışındaki frekans bileşenleri (vericiden çıkış durumunda değerleri etkisiz olan) periodogram benzeri hesap yöntemi ile enerji algılamada enerji toplamı hesabında kullanılması amacı ile hesaba katılmıştır.

Şekil 5 ve 6'da DTV vericisinden çıkan 6 MHz band genişliğindeki DTV sinyalinden süzölmüş 309440.6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali yer almaktadır.

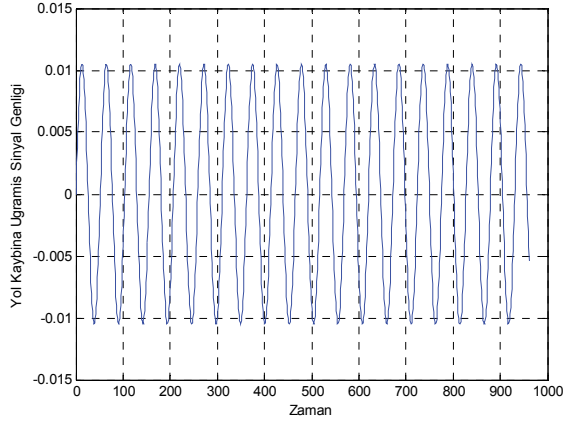


Şekil 5. DTV vericisinden çıkan 6 MHz band genişliğindeki DTV sinyalinden süzölmüş 309440.6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali (Sinusoidal pilot signal with a frequency of 309440.6 Hz which is filtered from DTV signal broadcasted from a DTV transmitter with 6 MHz bandwidth)

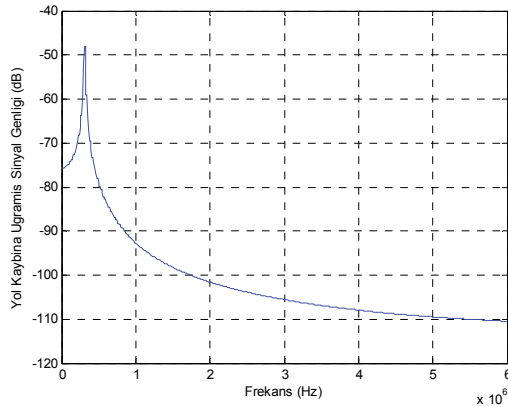


Şekil 6. DTV vericisinden çıkan 6 MHz band genişliğindeki DTV sinyalinden süzölmüş 309440.6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali Goertzel spektrumu (Goertzel spectrum of sinusoidal pilot signal with a frequency of 309440.6 Hz which is filtered from DTV signal broadcasted from a DTV transmitter with 6 MHz bandwidth)

Şekil 7 ve 8'de çıkış sinyalinin sistem modelinde anlatıldığı şekilde yol kaybına uğramış hali yer almaktadır.

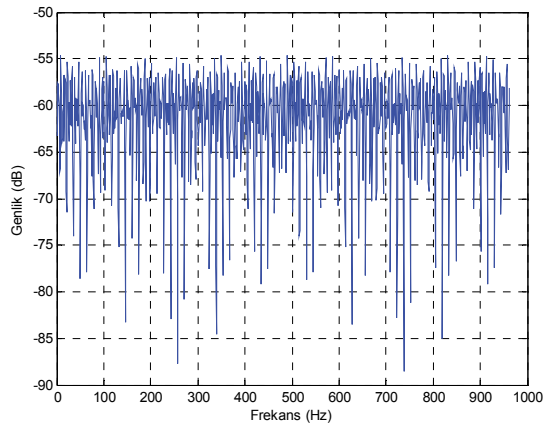


Şekil 7. Yol kaybına uğramış sinusoidal DTV pilot sinyali (Sinusoidal DTV pilot signal which is met to path-loss)



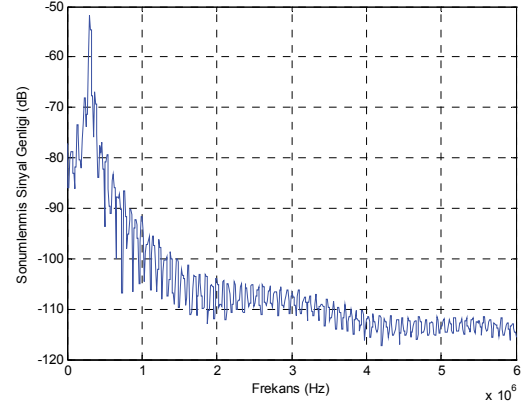
Şekil 8. Yol kaybına uğramış sinusoidal DTV pilot sinyali Goertzel spektrumu (Goertzel spectrum of sinusoidal DTV pilot signal which is met to path-loss)

Şekil 9'da DTV Profil B çok yollu kanal transfer fonksiyonu gösterilmiştir.



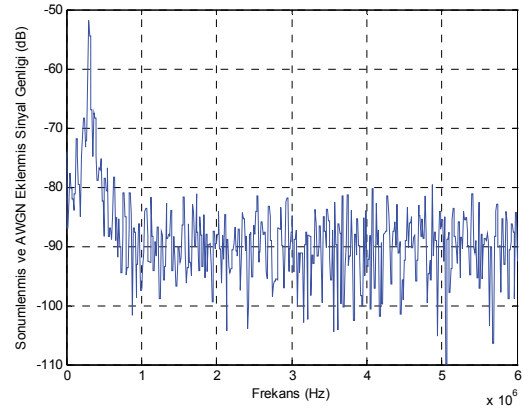
Şekil 9. DTV profil B çok yollu kanal transfer fonksiyonu (DTV profile B multipath channel transfer function)

Şekil 10'da yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin çok yollu kanaldan geçerek sönmüş hali gösterilmiştir.



Şekil 10. Yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin çok yollu kanaldan geçerek sönmüş halinin Goertzel spektrumu (Goertzel Spectrum of DTV pilot signal which is met to path loss and faded by being passed through multipath channel)

Şekil 11'de yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin sönmüş ve beyaz gauss gürültüsü eklenmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 11. Yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin sönmüş ve beyaz gauss gürültüsü eklenmiş halinin spektrumu (Goertzel Spectrum of DTV pilot signal which is met to path loss, faded by being passed through multipath channel and added white gaussian noise)

Bir WRAN hücresine Şekil 11'deki gibi gelen sinyalin pilot bölgesi enerji algılama yöntemi ile DTV sinyalinin varlığı tespit edilebilmektedir. Bunun sadece bir alıcıya gelen gerçek DTV sinyal kayıtları ile yapıldığı [8, 20]'de de belirtilmiştir. [3,6]'da da geçtiği üzere, bir algılayıcı yerine işbirliği oluşturan birden çok algılayıcının işbirlikçi spektrum algılama yaparak daha etkin algılama yapacağı bilinmektedir. Fakat bu çalışmada katkı olarak, bölüm 2'deki sistem modeline uygun bir IEEE 802.22 WRAN senaryosunda, Goertzel algoritmasının kullanımı ile WRAN hücreleri baz istasyonları (SU1, SU2, SU3, SU4) ve karar merkezinin (FC) işbirliği oluşturması neticesinde, toplamda işbirlikçi enerji etkinliği sağlandığı ifade edilmektedir.

4. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ (PERFORMANCE EVALUATION)

Çalışmamızdaki sistem modelinde belirtilen WRAN hücreleri baz istasyonları (SU1, SU2, SU3, SU4) ve karar merkezinin (FC) işbirliği oluşturması ile işbirlikçi spektrum algılama benzetimi yapılmıştır. Yapılan benzetim bir milyon iterasyon içermektedir. Bir milyon iterasyonun her birinde kanal dolu iken aynı pilot sinyali tüm alıcılar tarafından alınmıştır. DTV pilot sinyalinin 1000000 kez gönderilişinde alıcıların her biri ve işbirlikçi yapı tarafından algılanma sayıları 0,03'lük enerji algılama eşiği için Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Doğru algılama oranları (Probability of detection percentages)

Algılayıcı	Doğru Algılama Sayısı (Oranları)
SU1	411285 (% 41,13)
SU2	410970 (% 41,10)
SU3	215484 (% 21,55)
SU4	214346 (% 21,43)
FC	648365 (% 64,84)
İşbirlikçi Yapı (Tüm Algılayıcılar)	924793 (% 92,48)

Tablo 3'ten de anlaşılabacağı üzere SU3 ve SU4 için algılama oranları sırası ile % 21,55 ve % 21,43 çıkarak DTV vericisine uzak olmaları nedeni ile en düşük seviyelerde çıkmıştır. SU1 ve SU2'nin algılama oranları ise sırası ile % 41,13 ve % 41,10 çıkarak istenen seviyenin altında kalmıştır. Karar merkezi ise daha fazla anten yüksekliğine sahip olması nedeni % 64,84 doğru algılama oranına sahip olmuştur. Fakat istenen seviyede algılama oranına (% 92,48 > % 90) işbirlikçi yapı ile erişilmiştir. İşbirlikçi yapı ile de her bir iterasyonda herhangi bir alıcının algılanması durumu (VEYA kuralı - OR rule) gerçekleştirilerek en yüksek algılama seviyesine erişilmiştir.

Ayrıca çalışmamızda, Goertzel algoritmasında 962 nokta giriş sinyali için $L=6$ nokta spektral değerlere göre her bir alıcıda hesaplama yapılarak işbirliği ile toplamda 5 alıcı ile $5 \times L = 30$ oranına ulaşılmıştır. [15, 19]'daki gibi direkt FFT olması durumunda ise $N = 2^m$ kuralı gereği FFT için gereken 962 nokta giriş sinyaline yakın değer olan 1024 nokta kullanılacak ve $\log_2 1024 = 10$ oranına ulaşılabacaktı. Bu durumda toplamda 5 alıcı ile $5 \times 10 = 50$ oranına ulaşılabacaktı. [17]'de sadece bir alıcıda $L < \log_2 N$ olduğunda Goertzel algoritması ile sağlanan hesap yükü avantajı, bu çalışmada yer alan birden fazla alıcının oluşturduğu işbirlikçi yaklaşımla 5 alıcıda da gerçekleştirilerek, toplamsal enerji tasarrufu (30<50) sağlanması sonucuna ulaştırmıştır. İşbirlikçi yapı ile doğru algılama sayısı (oranı) artışı yanında, işbirlikçi spektrum algılama ile işbirliğinde olan tüm alıcılar

için de FFT yerine Goertzel algoritması ile hesaplama yapılarak pilot sinyalinin algılanması, toplam harcanan enerjinin % 40 oranında azalmasına da neden olmuştur.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bilişsel radyo tekniğinde lisanslı kullanıcıların rahatsız edilmemeleri için etkin bir spektrum algılama yönteminin olması önemlidir. Etkin spektrum algılama yöntemlerinden biri de pilot ton algılama yöntemi olarak bilinmektedir. DTV pilot enerji algılamada, DTV pilot sinyali ile enerji toplamı ve bu toplamın bir eşikle karşılaştırılmasında tüm 6 MHz'lik DTV kanalı için enerji toplamı yerine, sadece darband pilot sinyali frekansı bölgesindeki genlik değerleri ile enerji toplamı hesaplanarak ciddi anlamda hesap karmaşıklığı azaltılması ile de enerji tüketiminin azaltılması sağlanabilmektedir. Fakat sadece bir alıcıda, tüm 6 MHz'lik bir DTV kanalına odaklanmak yerine sadece bir pilot sinyali ile ilgilenilmesi ve direkt pilot sinyalinin derin sönmülemeye uğraması durumunda algılamanın yapılamaması olanağı da vardır. Bu çalışmada, yenilikçi bir bakışla, işbirlikçi yapı ile Goertzel algoritması kullanılarak ve sadece pilot sinyali dar bandında standard periodogram benzeri yöntem ile enerji algılama yapılması durumunda, tüm işbirlikçi alıcılara gelen pilot sinyalinin derin sönmülemeye uğramış olması ihtimalinin çok düşük olduğu ve spektrum algılama kalitesi yanında toplamda enerji verimliliğinin de arttığı yapılan detaylı benzetimlerle gösterilmiştir. Bu çalışmada lisanslı kullanıcı pilot sinyaline kusursuz senkronize olduğu varsayılmıştır. Özellikle düşük SNR'larda, algılayıcı ile lisanslı kullanıcı arasında frekans kayması (offset) oluşması muhtemeldir. Bu tür durumlarda, Goertzel algoritması ile süzülecek darband pilot ton frekans bölgesinin bandı genişletilerek yine etkin spektrum algılama ve enerji tasarrufu sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Mitola, I.J., "Software Radios: Survey, Critical Evaluation and Future Directions", **IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.**, Vol. 8, pp.25-31, Apr.1993.
2. Laneman, J. N. and Tse, D. N. C., "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behaviour," **IEEE Trans. Inform.Theory**, vol. 50, pp. 3062–3080, Dec.2004
3. Ganesan, G., and Li, Y.G., "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio – Part I: Two User Networks", **IEEE Trans. on Wireless Commun.** Vol., pp. 2204-2213, June 2007
4. Ekşim, A., Kulaç, S. and Sazlı, M.H. "Gezgin Kullanıcılar için İşbirlikçi Spektrum Algılama", **IEEE 16th Signal Processing on**

- Communications Applications 2008, SIU 2008.**, 19-22 Nis. 2008
5. Kulaç, S., Ekşim, A. and Sazlı, M.H. "IEEE 802.22 Standardında İşbirlikçi Spektrum Algılama", **IEEE 17th Signal Processing on Communications Applications 2009, SIU 2009.**, 9-11 Nis. 2009
 6. Ekşim, A., Kulaç, S. and Sazlı, M.H. "Effective Cooperative Spectrum Sensing in IEEE 802.22 Standard with Time Diversity", **ACTEA 2009**, 15-17 July 2009
 7. Shellhammer S.J. "Spectrum Sensing in IEEE 802.22", **CIP2008**, Santorini, Greece, 9-10 June 2008
 8. Ekşim, A., Kulaç, S. and Sazlı, M.H. "DTV Spectrum Sensing with Pilot Tone Filtering", **URSIGASS 2011**, 13-20 August 2011
 9. "Method for point-to-area prediction for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz", **ITU-R P.1546-1**, October 11, 2005
 10. Shellhammer S.J., Shankar, S., Tandra, R. and Tomcik, J., "Performance of Power Detector Sensors of DTV Signals in IEEE 802.22 WRANs", **TAPAS'06**, Boston, MA, USA, 5 August 2006
 11. Shellhammer, S., Twail, V., Chouinard, G. and Muterspaugh, M., "Spectrum Sensing Simulation Model", **IEEE 802.22-05/0028r0**, Feb. 2006
 12. Matsui, M., Shiba, H., Akabane, K. and Uehara, K., "A Novel Cooperative Sensing Technique for Cognitive Radio", **PIMRC'07**, 2007
 13. "WRAN Channel Modelling", **IEEE 802.22 05/0055r7**, Aug. 2005
 14. "WRAN Discrete Channel B", **IEEE 802.22-07/0185r1**, March 2007
 15. So, H.C., Chan, Y.T., Ma, O. and Ching, P.C., "Comparison of Various Periodograms for Sinusoid Detection and Frequency Estimation", **IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems**, Vol 35, No.3, July 1999
 16. Goertzel, G., "An Algorithm for the Evaluation of Finite Trigonometric Series" **The American Mathematical Monthly**, 1958
 17. Wang, W., Gao, Z., Huang, L. and Yao, Y., "Spectrum Sensing Based on Goertzel Algorithm", **WICOM'08.**, 12-14 Oct. 2008
 18. Zhang, K., Yu, X. and Wan, W., "A Digital Tone Decoder Based on Modified Goertzel Algorithm", **ICALIP2008**, 7-9 July 2008
 19. Zheng, K., Hushang, L., Djovadi, S., M. and Wang, J., "Spectrum Sensing in Low SNR Regime via Stochastic Resonance", **CISS.2010**, 17-19 March 2010
 20. Kulaç, S., Ekşim, A. and Sazlı, M.H. "Pilot Ton Kullanarak DTV Spektrum Algılama", **IEEE 19th Signal Processing on Communications Applications 2011, SIU 2011.**, 20-22 Nis. 2011
 21. <http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/hampton328e.html>