ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

KABLOSUZ İLETİŞİMDE İŞBİRLİKÇİ ÇEŞİTLEME YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Selman KULAÇ

ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2012

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Selman KULAÇ tarafından hazırlanan "**Kablosuz İletişimde İşbirlikçi Çeşitleme Yöntemlerinin Araştırılması**" adlı tez çalışması 16/02/2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat Hüsnü SAZLI
Ankara Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan : Doç. Dr. Erkan AFACAN
Gazi Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. M. Ali AKCAYOL
Gazi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. H. Gökhan İLK
Ankara Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Ziya TELATAR
Ankara Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Yrd. Doç. Dr. Murat Hüsnü SAZLI
Ankara Üniversitesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özer KOLSARICI
Enstitü Müdürü

ÖZET

Doktora Tezi

KABLOSUZ İLETİŞİMDE İŞBİRLİKÇİ ÇEŞİTLEME YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Selman KULAÇ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Murat H. SAZLI

Bu doktora tez çalışmasında, bilişsel radyoda spektrum algılama kalitesini ve verimliliğini artırmak amacı ile işbirlikçi çeşitleme yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemler ile spektrum algılama kalitesinin iyileşmesinin yanında, işbirliği yükünün getirdiği karmaşıklığın da azaltılması sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, geliştirilen bir senaryo ile ortamın serbest uzay direkt görüş hattı olması durumunda gezgin kullanıcılar için bir işbirlikçi spektrum algılama tekniği önerilmiştir. Önerilen teknikle, gezgin lisansız kullanıcıların işbirlikçi çeşitlemeden yararlanarak, lisanslı kullanıcının varlığını doğru algılama olasılıklarının artmakta olduğu doğrulanmıştır. Fakat, gezgin kullanıcıların hızlarının artması ile doğru algılama olasılığının azaldığı da vurgulanmıştır.

Önerilen başka bir yöntem ile bir IEEE 802.22 hücresindeki baz istasyonu ve kullanıcıların işbirliği oluşturarak daha iyi TV sinyallerini algıladıkları ve bu işbirliğine zaman çeşitlemesi de ilave edilerek daha iyi başarım sonucuna ulaşıldığı gösterilmiştir. Ayrıca verimli işbirliğinin gerçeklenmesinin, röle SNR eşik değerlerini düşürmeyerek ve daha güvenilir kullanıcıları röle seçerek sağlandığı doğrulanmıştır.

Ayrıca, IEEE 802.22 standardında DTV spektrumunun algılanmasında yenilikçi bir yaklaşım olan işbirlikçi yapı ile Goertzel algoritmasının kullanımı ve sadece pilot sinyali dar bandında enerji algılama yapılması yöntemi önerilmiştir. Önerilen bu yöntem ile tüm işbirlikçi alıcılara gelen pilot sinyalinin derin sönümlenmeye uğrama olasılığının çok düşük olduğu ve spektrum algılama kalitesi yanında toplamda enerji verimliliğinin de arttığı yapılan detaylı benzetimlerle de gösterilmiştir.

Şubat 2012, 90 sayfa

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

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

INVESTIGATION OF COOPERATIVE DIVERSITY METHODS IN WIRELESS COMMUNICATIONS

Selman KULAÇ

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

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Murat H. SAZLI

In this Ph. D. dissertation, cooperative diversity methods have been developed in order to increase quality and efficiency of cognitive radio. Reduction in the complexity brought by the cooperation load is provided, besides spectrum sensing quality improvement by the developed methods.

In this dissertation, with a developed scenario, cooperative spectrum sensing technique is recommended for mobile users when the environment is free space line of sight (LOS). It is confirmed with this technique that the probability of detection of the primary user's existence increases with the usage of cooperative diversity by mobile users. But it is emphasized that the probability of detection of the primary user's existence decreases with the speed of the mobile users.

With another proposed method, it is demonstrated that a base station and users in an IEEE 802.22 cell sense TV signals better with setting up cooperation and it is reached to the better performance result with adding time diversity to this cooperation. Besides, it is confirmed with this method that effective cooperation can be done by not reducing the SNR threshold of relays and choosing more reliable users for relaying.

With an innovative approach, taking advantage of the cooperative structure and the Goertzel algorithm, pilot signal narrow band energy detection method is proposed. With this proposed method, very low probability of the meeting to deep fading of the pilot signal which comes to the all coopeartive receivers and total energy efficiency increasing beside the spectrum sensing quality is also shown with detailed simulations.

February 2012, 90 pages

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

TEŞEKKÜR

Çalışmanın birçok aşamasında bilgi, öneri ve yönlendirmesiyle tezin bu aşamaya gelmesinde katkıda bulunan; makale ve bildiri hazırlıklarımı yönlendiren; tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Murat H. SAZLI'ya (Ankara Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı),

Tez konusunun belirlenmesinde, planlanmasında ve yürütülmesinde yönlendirici olan; Dr. Oktay ÜRETEN'e (Communications Research Centre, Ottawa, Kanada),

Tez konusunun yürütülmesinde yardımcı olan; çalışma süresince gerekli desteği sağlayan; bildiri hazırlıklarımı uzmanlıkla yönlendiren ve özveri ile düzenleyen Dr. Ali EKŞİM'e (TÜBİTAK UEKAE),

Tez çalışmasının büyük bir kısmında tez izleme toplantılarına katılarak fikirleriyle katkıda bulunan 2010 yılında kaybettiğimiz değerli merhum Yrd. Doç. Dr. Cem NAKİPOĞLU (Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı),

Tez çalışması süresince yapılan tez izleme toplantılarına katılan ve fikirleriyle katkıda bulunarak çalışmanın olgunlaşmasında çok büyük emekleri olan Doç. Dr. Ziya TELATAR'a (Ankara Üniversitesi Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı) ve Doç. Dr. Erkan AFACAN'a (Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı)

Ayrıca, çalışma süresince desteği ve anlayışı nedeniyle eşime, yeterli zaman ayıramadığım oğlum Yusuf Salih'e, manevi desteklerini her zaman hissettiğim anneme, babama ve kardeşlerime;

Teşekkür ederim.

Selman KULAÇ
Ankara, Şubat 2012

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iii**
ABSTRACT ..... **iv**
TEŞEKKÜR ..... **v**
KISALTMALAR DİZİNİ ..... **viii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
2.KURAMSAL TEMELLER **10**
2.1 Mobil Radyo Kanalının Karakteristikleri **10**
2.1.1 Okumura-Hata Modeli **11**
2.1.2 Çoklu-yoldan yayılım ve sönümlenme **11**
2.1.2.1 Sönümlenme çeşitleri **12**
2.1.3 Gürültü etkisi **15**
2.2 Kanal Kodlama **15**
2.2.1 Kanal kodlama çeşitleri **15**
2.3 Çeşitleme **16**
2.3.1 Çeşitleme yöntemleri **17**
2.3.2 Alıcıda birleştirme yöntemleri **17**
2.3.3 İşbirlikçi çeşitleme **20**
2.3.3.1 İşbirlikçi iletişim türleri **21**
2.4 Algılama Teknikleri ve Klasik Enerji Algılama Tekniği **24**
2.4.1 Enerji algılama yönteminde keskin karar (Hard Decision) **25**
2.4.2 Enerji algılama yönteminde esnek karar (Soft Decision) **28**
2.4.3 İşbirlikçi enerji algılama tekniği **28**
2.5 İşbirlikçi Spektrum Algılama Konusunda Yapılmış Çalışmalar **29**
2.6 Pilot Ton Algılama **32**
2.7 Karmaşıklık Etkin Frekans Bölgesi Dönüşümü ve Goertzel Algoritması **35**
2.7.1 Goertzel algoritması ile ilgili araştırmalar **39**
3. MATERYAL ve YÖNTEM **40**

3.1 Serbest Uzayda Gezgin Kullanıcılar için İşbirlikçi Spektrum Algılama Senaryosu 40
3.1.1 Kullanılan işbirlikçi spektrum algılama tekniği 42
3.2 IEEE 802.22 Standardında İşbirlikçi Spektrum Algılama Senaryosu 49
3.2.1 Yol kaybı modeli 52
3.2.2 Gölge sönümlenmesi, Rayleigh sönümlenmesi ve çoklu-yol modelleri..... 53
3.2.3 İşbirliği modelleri ve kullanılan işbirlikçi spektrum algılama yöntemi 56
3.3 Goertzel Algoritması Yardımı ile Pilot Ton Algılama 59
3.3.1 Pilot ton aracılığıyla orijinal DTV sinyallerinin algılanması..... 59
3.3.2 Goertzel algoritması yardımı ile enerji verimi yüksek işbirlikçi spektrum algılama 66
3.3.2.1 İşbirlikçi DTV spektrum algılama sistem modeli..... 66
3.3.2.2 Goertzel algoritması kullanarak darbant işbirlikçi DTV pilot ton algılama 68
4. BULGULAR..... 78
5. SONUÇ..... 81
KAYNAKLAR..... 84
ÖZGEÇMİŞ..... 89

KISALTMALAR DİZİNİ

4G	4th Generation (4.Nesil)
AWGN	Additive Wide Gaussian Noise (Eklenir Beyaz Gauss Gürültüsü)
BS	Base station (Baz istasyonu)
CPE	Customer Premise Equipment (Yerleşke içi Müşteri Cihazı
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DFT	Discrete Fourier Transform (Kesikli Fourier Dönüşümü)
DTMF	Dual-Tone Muti Frequency (Çift Ton Çoklu Frekans)
DTV	Digital Television (Sayısal Televizyon)
FC	Fusion Center (Birleştirme Merkezi)
FCC	Federal Communications Comission (Federal Haberleşme Komisyonu)
FFT	Fast Fourier Transform (Hızlı Fourier Dönüşümü)
GSM	Global System for Mobile Communication (Mobil Haberleşme için Küresel Sistem)
HF	High Frequency (Yüksek Frekans)
HiperLAN	High Performance LAN (Yüksek Başarımlı LAN)
ITU	International Telecommunication Union
MIMO	Multi Input Multi Output (Çok Girişli Çok Çıkışlı)
MMAC	Multimedia Mobile Access Communication (Çokluortam Mobil Erişim Haberleşmesi)
NICT	National Institute of Information and Communications Technology
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Dikgen Frekans Bölüşümlü Çoklama)
PDC	Personal Digital Cellular (Kişisel Sayısal Hücresel)
PU	Primary User (Lisanslı Kullanıcı)
SNR	Signal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
SU	Secondary User (Lisanssız Kullanıcı)
TSS	Two-Stage Sensing (İki Aşamalı Algılama)
UWB	Ultra Wide Band (Çok Geniş Bant)
WLAN	Wireless Local Area Networks (Kablosuz Yerel Alan Ağları)
WRAN	Wireless Regional Area Network (Kablosuz Bölgesel Alan Ağı)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Radyo yayılımının basitleştirilmiş ikili-yol modeli……...……...10
Şekil 2.2 Bir mobil radyo kanalının frekans seçiciliği…….....….13
Şekil 2.3 Seçmeli birleştirme tekniği…….....……18
Şekil 2.4 En yüksek oranlı birleştirme tekniği……..……...19
Şekil 2.5 Eşit kazançlı birleştirme yöntemi……..……...19
Şekil 2.6 İki kullanıcılı işbirlikçi iletişim…….....21
Şekil 2.7 Kuvvetlendir ve ilet yöntemi…….....22
Şekil 2.8 Algıla ve ilet yöntemi……..…….23
Şekil 2.9 Kodlamalı işbirliği……....24
Şekil 2.10 Yerel enerji algılayıcı blok diyagramı…….....26
Şekil 2.11 Pilot ton sinyali gösterimi……..…32
Şekil 2.12 Uyumlu süzgeç algılayıcı yardımı ile pilot algılama……....33
Şekil 2.13 Goertzel algoritması Z- dönüşümü yapısı……...…….38
Şekil 3.1 Sistem modeli……...41
Şekil 3.2 İşbirlikçi spektrum algılama tekniği birinci zaman aralığı…….…….....43
Şekil 3.3 İşbirlikçi spektrum algılama tekniği ikinci zaman aralığı…….…...43
Şekil 3.4 Geliştirilen WRAN Sistem modeli……...51
Şekil 3.5 hampton328.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu.....60
Şekil 3.6 luzerne11.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu…..…...61
Şekil 3.7 luzerne8.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu……...62
Şekil 3.8 mantua7.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu……...63
Şekil 3.9 hampton328.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması……..……...64
Şekil 3.10 luzerne11.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması……...……..64
Şekil 3.11 luzerne8.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması……..…..65
Şekil 3.12 mantuay7.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması……...……...…...65

Şekil 3.13 Sistem modeli……..…..67
Şekil 3.14 DTV vericisinden çıkan 6 MHz bant genişliğindeki DTV sinyalinden süzülmüş 309440,6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali ……...71
Şekil 3.15 DTV vericisinden çıkan 6 MHz bant genişliğindeki DTV sinyalinden süzülmüş 309440,6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali goertzel spektrumu……...…….....71
Şekil 3.16 Yol kaybına uğramış sinusoidal DTV pilot sinyali……..…….....72
Şekil 3.17 Yol kaybına uğramış sinusoidal DTV pilot sinyali goertzel spektrumu.....73
Şekil 3.18 DTV profil B çoklu yol kanal transfer fonksiyonu…….....73
Şekil 3.19 Yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin çoklu yol kanaldan geçerek sönümlenmiş halinin goertzel spektrumu ……...…..….74
Şekil 3.20 Yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin sönümlenmiş ve beyaz gauss gürültüsü eklenmiş hali spektrumu…….……..…....75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 İşbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 1 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlanarak, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları……45

Çizelge 3.2 İşbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 2 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlanarak, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları……47

Çizelge 3.3 İşbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 4 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlanarak, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları……49

Çizelge 3.4 Sistem modeli parametreleri……50

Çizelge 3.5 Çoklu-yol profilleri……54

Çizelge 3.6 Profillere göre hatalı algılama olasılıkları ……57

Çizelge 3.7 Profillere ve farklı röle eşiklerine göre hatalı algılama olasılıkları……58

Çizelge 3.8 Sistem modeli parametreleri……66

Çizelge 3.9 Çoklu-yol profil B……68

Çizelge 3.10 Doğru algılama oranları……76

1. GİRİŞ

Günümüzde, kablosuz iletişim yaygın kullanım alanına sahiptir. Bu alanda uzun zamandır var olan kullanım alanlarından bir tanesi radyo yayını olmakla birlikte televizyon yayınının ve uydu iletişiminin de önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir.

1980'li yıllarda analog olarak birinci nesil hücresel telefon haberleşmesinin kullanılması kablosuz iletişim tarihinde önemli bir basamak olmuştur. 1990'lı yıllarda ise bir sonraki basamak olan sayısal ikinci nesil hücresel haberleşme sistemleri kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu yaygınlaşma ile birlikte endüstri ve akademik çalışma sahasında da bu alana olan ilgi artmış ve özellikle bu alanda sayılan görüntü, video ve veri iletiminde başarımın artırılmasına yönelik araştırma ve geliştirme çalışmaları çoğalmıştır.

Bu gelişmeler, endüstrinin standartlar oluşturarak insanlığın hizmetine sunumunu sağlamıştır. Bu standartlara örnek olarak, artık eski olarak bilinen Kişisel Sayısal Hücresel (PDC, Personal Digital Cellular) sistem, Mobil Haberleşme için Küresel Sistem (GSM, Global System for Mobile Communication), IS-54, IS-95 ve IS-136 gösterilebilmektedir. Bu standartlar ses haberleşmesi için tasarlandığından 9,6 kbit/s hızlarında iletim imkanı sunabiliyor iken, 2,5'uncu nesil (2,5G) kapsamında geliştirilmiş olan standartlar ile daha yüksek hız olan 100 kbit/s iletim imkanı sunulabilmektedir. Sonraki aşamada yer alan ve günümüzde önem kazanan 3. nesil (3G) standardı ise hareketli kullanıcılara 144-384 kbit/s arası, durağan kullanıcılara 2048 kbit/s'ye kadar iletim imkanı sunabilmektedir. 3. nesil standardı CDMA (Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim, Code Division Multiple Access) tekniğine dayalı olup geliştirilmiş spektral etkinlik ve artan esnekliği sayesinde yeni hizmetlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır.

3. nesil kablosuz sistemlerde yüksek bit hızına olan talep artarken, paralelde yüksek bit hızlarına ve spektral etkinliğe talebin olduğu diğer bir kablosuz iletişim alanı ise kablosuz yerel alan ağları (Wireless Local Area Networks, WLANs) olmuştur. Bu

alandaki örneklerden IEEE 802.11 standartlarından OFDM (Dikgen Frekans Bölüşümlü Çoklama, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) tabanlı IEEE 802.11a standardı 54 Mbit/s hızlarına kadar, IEEE 802.11b standardı ise 11 Mbit/s hızlarına kadar veri iletimi sağlayabilmektedir. Menzil ve hızın daha da arttığı IEEE 802.11g ve IEEE 802.11n standartları da yaygınlık kazanmaya başlamıştır. Kablosuz yerel alan ağları alanı kapsamında yer alan Yüksek Başarımlı LAN (High Performance LAN, HiperLAN) ve Çokluortam Mobil Erişim Haberleşmesi (MMAC, Multimedia Mobile Access Communication) sistemi de örnekler arasında yer almaktadır.

Yüksek bit hızına olan talep artışı 3. nesil sonrası basamak olan 4. nesil'in (4G) doğmasına neden olmuştur. 4. nesil ile de kullanıcıların ihtiyaç duydukları daha yüksek hız ve IP tabanlı çoklu ortam (multimedia) hizmetlerinin yaygınlaşacağı beklenmektedir (Khan vd. 2009)

Kablosuz iletişim kapsamında, sivil uygulamaların gerçekleştirildiği standartlar dışında askeri uygulamalar için de standartlar geliştirilmiştir. Fakat askeri alanda, kullanım sahasına ve yerine göre ihtiyaçlara uygun daha spesifik değişik teknolojiler geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir.

Kablosuz iletişimde değişik uygulamalardan, farklı spesifikasyonları ve farklı teknolojileri de içerseler, benzer sınırlayıcı etkilerle karşı karşıya kalabilmelerine rağmen benzer taleplerde bulunulmuş ve bulunulmaktadır. Bu talepler şu şekilde sıralanabilir.

- Yüksek veri hızlarına olan ihtiyaç
- Hizmet kalitesi
- Gezginlik
- Kolayca taşınabilirlik
- Kablosuz ağlara bağlanabilirlik
- Diğer kullanıcılarla girişimsizlik
- Güvenlik/Gizlilik

Bu sıralanan taleplerin önceliği kablosuz iletişim uygulama tipine göre değişmektedir. Günümüzde yukarıda sıralanan bu talepler karşısında en başta gelen sınırlayıcı etki, sınırlı bant genişliğidir. Bununla birlikte, gezginlik açısından boyutların miktarı, kullanılan pil ömrü gibi sınırlayıcı etkiler karşısında daha iyi bir hizmet sunabilmek için uygun tasarımlar yapılmaya çalışılmaktadır. Örneğin pil ömrünü artırmak için daha az güç harcatacak algoritmaların geliştirilmesi, karmaşıklığın azaltılması üzerinde çalışılmaktadır.

Özellikle, kablosuz iletişim teknolojisinden yararlanan kullanıcı hareket kabiliyetinin sınırlanmamasını istemekte, bununla birlikte iyi bir hizmet kalitesi talep etmektedir. Bu gereksinimi sağlayabilmek için kullanılan radyo kanalını iyi tanımak ve uygun çözümü üretmek gereklidir.

Kablosuz iletişimde hizmet kalitesini düşürücü en büyük etki sönümlenme (fading) etkisidir. Sönümlenmenin hizmet kalitesi üzerindeki bozucu etkilerini en aza indirecek yöntemlerin başında çeşitleme (diversity) teknikleri gelmektedir. Bu kapsamda özellikle gezgin sistemlerde boyut, maliyet, güç tüketimi parametreleri de hesaba katılarak çeşitlemenin etkinliğini artıracak yöntemler araştırılmış ve ilk defa Laneman vd. (2001) tarafından önerilen işbirlikçi çeşitleme (cooperative diversity) olarak adlandırılan teknik ortaya çıkarılmıştır.

İşbirlikçi çeşitleme tekniği ile kullanıcılar hem röle hem de bilgi kaynağı olabilmektedir. İşbirlikçi çeşitleme sayesinde kaynak vericiden, hedef alıcıya iletim gerçekleşirken, arada yardımcı görevini üstlenecek en az bir tane röle ile başarım artışı sağlanabilmektedir (Laneman vd. 2001), (Hunter ve Nosratinia 2002) ve (Sendonaris vd. 2004).

Kablosuz iletişimde uzamsal çeşitleme (spatial diversity) veya verici anten çeşitlemesi yöntemleri özellikle hücresel sistemlerin baz istasyonları için uygun olmasına karşın, güç tüketimi, boyut, maliyet ve donanım karmaşıklığı açısından gezgin birimler için çok uygun değildir. Ayrıca yüksek frekans (HF, high frequency, 3-30 MHz) kanalında iletişim yapılırken, dalga boylarının büyük olması, anten çeşitlemesi sağlanabilmesi

açısından antenlerin yeterince uzak aralıklarda bulunmasını gerektirir. Bu gibi durumlarda ortamdaki kullanıcılardan yararlanarak işbirlikçi çeşitleme sağlamak faydalı olmaktadır. İşbirlikçi çeşitleme ile kaynak kullanıcısı, bilgisini doğrudan ve bir veya birden fazla işbirlikçi (röle) üzerinden hedef-alıcıya göndererek verici çeşitlemesi sağlayabilmektedir.

Bu tez çalışması ile kablosuz iletişimde işbirlikçi çeşitleme yöntemlerinin araştırılması ve bu yöntemlerin başarıma katkısının olabileceği uygulama alanları üzerinde çalışmalar yapılması hedeflenmiştir.

Bu kapsamda yapılan incelemeler doğrultusunda, işbirlikçi çeşitlemenin bilişsel (cognitive) veya akıllı radyoda daha iyi spektrum algılama özelliği kazandırdığı tespit edilmiş ve bu nedenle işbirlikçi çeşitleme ile bilişsel radyoda spektrum algılama olgularının her ikisini içeren işbirlikçi spektrum algılama çalışma alanına yönelinmiştir.

Bilişsel (cognitive) radyo, lisanssız veya bilişsel kullanıcıların spektrumu dinleyerek lisanslı (primary) kullanıcıların varlıklarının tespiti ve lisanslı kullanıcıların iletim yapmadıkları anlarda iletişim gerçekleştirme yeteneğine sahip olabilmelerini sağlayan bir radyo iletişim tekniğidir (Mitola vd. 1999).

Bilişsel (cognitive) veya akıllı radyo çalışmaları sınırlı frekans spektrumundan daha fazla yararlanmak amacıyla başlamıştır. Bilişsel radyolar ile çevredeki değişimleri algılamak ve bu değişimlere göre kullanıcılara en iyi hizmeti sunacak çözümle iletişim sağlama hedefi doğrultusunda araştırmalar devam etmektedir.

Bilişsel radyo alanında dünya genelinde proje bazlı çalışmalar da devam etmektedir. Bunlardan bazıları Amerika'da DARPA'da (Defense Advanced Research Projects Agency) ve Japonya'da NICT (National Institute of Information and Communications Technology) Enstitüsü'nde yer almıştır. Ayrıca, Avrupa Birliği 7'nci Çerçeve kapsamında önemli bir miktarda kaynağını, esnek radyo sistemleri araştırma ve geliştirme faaliyetleri için tahsis etmiştir. Özellikle Spektrum Etkinliğini Artırmak için

Yeni Fiziksel Katman Teknolojileri alanındaki Fiziksel ve Ağ Katmanlarında Çeşitleme Keşfi konulu CODIV projesi Avrupa Birliğinin desteklediği projelerden biri olmuştur. Ayrıca Çok Geniş Bant (UWB, Ultra Wide Band) alanında yer alan ve lisanssız UWB hücrelerinin lisanslı kablosuz sistemleri ile birlikte çalışabilirliğinin gerçeklenmesi konulu UCELLS projesi de Avrupa Birliği destekli olmuştur.

Kablosuz teknolojilerin yaygınlaşması ile birlikte çok daha fazla spektrum kaynaklarına ihtiyaç duyulacağı anlaşılmıştır. Fakat mevcut düzenlemeler ile lisanssız kullanıma izin verilmemekle birlikte tüm frekans bantlarının spesifik servislere tahsis edilmiş olması durumu da söz konusudur. Amerika'da haberleşme otoritesi olan Federal Haberleşme Komisyonunun (FCC, Federal Communications Comission) bu bilgilerden yola çıkarak yaptığı bir araştırma ile lisanslı spektrum kanalları kullanımının, geniş coğrafik boyutlar ve uzun zaman koşullarında bakıldığında düşük seviyelerde kaldığı sonucuna ulaşılmıştır. FCC, spektrum kullanım yoğunluğunun zaman, frekans ve coğrafik bölgelere göre de değişebildiği belirtmiştir (FCC 2002).

Etkin spektrum kullanımı, lisanslı kullanıcının (PU, primary user) olmadığı durumda, lisanssız kullanıcının (SU, secondary user) kullanılmayan lisanslı bandı kullanmasına izin verilmesi ile geliştirilebilir. Bilişsel radyo ile spektrum etkinliği de hedeflenmiştir (Mitola vd. 1999).

Bilişsel radyoya ilk somut adım Federal Haberleşme Komisyonunun (FCC) özellikle kırsal kesimde zamansal bakıldığında TV bantlarında spektrum kullanımının çok yüksek olmadığını tespit etmesi nedeni ile bu bantlarda TV kullanıcılarını etkilemeksizin lisanssız kullanıma müsaade ettiğini duyurmasıyla başlamıştır. Buna istinaden kurulan IEEE 802.22 çalışma grubu, IEEE 802.22 WRAN (Kablosuz 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 kablosuz iletişim standardını geliştirmektedir. IEEE 802.22 olarak adlandırılan bu standart ile özellikle kırsal kesim kullanıcılarına TV 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 geçekleştirilebilir. Bu sayede TV sinyalinin izlenen kanalda mevcut olup olmadığını daha iyi anlamak mümkün olabilmektedir (Stevenson vd. 2005).

Bilişsel radyo, lisanssız kullanıcıların lisanslı kullanıcıları rahatsız etmemeleri şartıyla, lisanssız kullanıcılar ile lisanslı kullanıcıların iletimlerinde aynı frekans bantlarını paylaşmaları esasına dayanmaktadır. Bu paylaşımı, diğer SU'ların da neden olduğu girişimle birlikte farklı yayılım koşulları, çok çeşitli PU'ların farklı modülasyon türlerini kullanarak, farklı veri hızlarında ve farklı iletim güçlerinde yayın yapması zorlaştırmaktadır. Özellikle, gizli kalmış terminal problemi olarak nitelendirilen bilişsel radyonun gölgelenme veya sönümlenme etkisi nedeni ile PU'nun yayınlarını alamaması olayı spektrum algılama gerçeklenmesinde önemli bir husustur (Cabric vd. 2004).

Bilişsel radyo sisteminde kullanılacak frekans bandının boş ve kullanılabilir olmasını iyi tespit edecek bir spektrum algılama (spectrum sensing) tekniğinin yer alması gereklidir. Bu spektrum algılama tekniği, lisanssız (secondary) kullanıcıların kendi iletimlerini gerçekleştirmeden önce lisanslı (primary) kullanıcıların kanalda olup olmadığını anlama yeteneğinde olmalıdır. Bu da etkin bir spektrum algılamayı (spectrum sensing) gerektirir. Bu etkinliğin artması mevcut lisanslı kullanıcıların daha yüksek olasılıkla algılanmasına (detection probability) bağlıdır. Bu etkinliği artıran yöntemlerden birisi de literatürde "İşbirlikçi Spektrum Algılama" olarak geçmektedir (Ganesan ve Li 2007).

İşbirlikçi spektrum algılama mantığı kablosuz iletişimde iletişim kalitesini artıran yöntemlerden biri olan işbirlikçi çeşitleme (cooperative diversity) tekniğinden esinlenilerek ortaya çıkmıştır. İşbirlikçi çeşitleme, kablosuz iletim yapılırken ortamdaki diğer kablosuz terminallerden (özellikle antenlerinden) yardım alınarak ve onları röle (relay) gibi davrandırarak daha kaliteli ve yüksek başarımlı bir iletişim olanağına kavuşulmasını sağlayan bir tekniktir (Ganesan ve Li 2007).

IEEE 802.22 WRAN mimarisi DTV kapsama alanı dışında kalan bir IEEE 802.22 WRAN hücresi bir baz istasyonu (BS) ve belli sayıda istemci istasyonu (Yerleşke içi Müşteri Cihazı, CPE, Customer Premise Equipment) içermektedir. BS bir iletici olmakla birlikte, aynı zamanda spektrum algılama yapılırken rapor edilen tüm sonuçları toplayan ve değerlendirme yapan kontrol ve karar birimidir (Shellhammer 2008). IEEE 802.22 standardındaki bu spektrum algılamadaki ilk amaç TV kanalının kullanılıp kullanılmadığını anlamaktır. Bu anlaşılırlığı zorlaştıran etkenler alıcıdaki gürültü, gölge sönümlemesi (shadow fading), DTV'den başka kablosuz iletişim yayını yapan sistem veya cihazların girişimleri, bitişik kanallardan DTV sinyallerinin iletimidir (Shankar 2008).

IEEE 802.22 WRAN standardında algılanacak sinyal seviyelerinin çok düşük olması (-116 dBm'e kadar) tek algılayıcı yapısı ile algılamanın zorlaşmasını sağlamaktadır (Shellhammer 2008). Ancak işbirlikçi algılama ile çok düşük sinyal seviyelerinde daha iyi algılama yapılmaktadır. Özellikle tek algılayıcı ile SNR duvarı (SNR wall) olarak adlandırılan sınırın altında bir SNR'da alım yapıldığında kanalın uzun süre dinlenmesi algılama sağlanmasında bir çözüm getirmemekle birlikte, işbirlikçi çeşitleme ile alınan SNR seviyesi SNR duvarının üstüne çıkartılarak algılama sağlanabilmektedir (Kim vd. 2008).

IEEE 802.22 standardında algılanabilirliği artırmak için iki aşamalı algılama (TSS, two-stage sensing) önerilmiştir (Kim vd. 2008). İlk aşama hızlı algılama (fast sensing) olarak, ikinci aşama ise iyi algılama (fine sensing) olarak isimlendirilmiştir. Hızlı algılama daha az performans sunan ancak daha az zaman gerektiren enerji (veya güç) algılama ile yapılırken, iyi algılama özellikle gürültü belirsizliği (noise uncertainty) olduğu durumda daha iyi başarım sunan ancak daha çok zaman gerektiren öznitelik (feature) algılama ile yapılır.

IEEE 802.22 standardında spektrum algılama teknikleri genel bir sınıflandırma şekliyle iki sınıfta toplanmıştır. Bunlar gözü kapalı (blind) algılama ve sinyale özel (signal spesific) algılama tekniklerdir. Gözü kapalı algılama tekniklerinden en fazla uygulananı enerji (veya güç) detektörüdür. Enerji detektörü gürültü belirsizliği olmadığı durumlarda

negatif SNR değerlerinde daha iyi sonuç vermektedir (Shellhammer 2008). Ancak gürültü belirsizliği olması durumu enerji detektörünün başarımını ciddi şekilde azaltmaktadır. Gürültü kestiriminde başlangıç hatası, sıcaklık nedeniyle gürültüde değişimler, sıcaklık nedeniyle yükselteç kazancındaki değişiklikler, girişim seviyelerindeki değişimler nedeni ile oluşan hatalar gürültü belirsizliğine neden olmaktadır (Shellhammer vd. 2008). Gözü kapalı algılama tekniklerinden enerji detektörünün tercih edilme nedeni ise örnekleme süresince ortalama değerin değişmiyor olmasıdır (Shellhammer 2008).

Bu tez çalışmasında bilişsel radyoda spektrum algılama kalitesini ve verimliliğini artırmak amacı ile işbirlikçi çeşitleme yöntemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemler ile spektrum algılama kalitesinin iyileşmesinin yanında, işbirliği yükünün getirdiği karmaşıklığın da azaltılması sağlanmıştır.

Bu tezin özgün değeri ve literatüre katkıları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Serbest uzayda gezgin işbirlikçi spektrum algılama : Geliştirilen senaryo ile gezginliğin olduğu serbest uzay ortamında işbirliği gerçekleştirmenin algılama kalitesini artırdığı, birim zamanda yer değiştirme miktarının artması ile algılama kalitesinin düştüğü tespit edilebilmektir.

IEEE 802.22 standardında işbirlikçi spektrum algılama : IEEE 802.22 standardına uygun karasal ortam gerçeklendiğinde, önerilen yöntemdeki gibi işbirlikçi çeşitleme yanında zaman çeşitlemesi de sağlanarak spektrum algılama kalitesi daha da yükseltilebilmektedir. Fakat röle eşik değerlerinin düşürülmesinin verimliliği olumsuz yönde etkilediğine de dikkat edilmelidir. Kullanıcılara hareketlilik kazandırıldığı durumda ise, kullanıcıların TV vericisine olan uzaklıklarının fazla olması, anten boylarının kısa olması nedeni ile işbirliği seviyesinin çok altında alım yapmaları sonucunda işbirliği koşulları oluşamamakta ve işbirliği gerçekleştirilememektedir.

Goertzel algoritması yardımı ile pilot ton algılama : IEEE 802.22 standardına DTV spektrumunun algılanması önemli bir yere sahiptir. DTV sinyalinin de içerdiği pilot ton'un algılanması, Goertzel algoritması yardımı ile gerçek sinyal kayıtları üzerinden denenerek tezde gösterilmiştir. Önerilen yöntemle, Goertzel algoritması yardımı ile sağlanan karmaşıklık avantajıyla enerji verimi ve spektrum algılama kalitesi yüksek işbirlikçi pilot ton algılama sağlanabilmektedir.

Tez, beş bölümden oluşmaktadır:

İlk bölümde, tez çalışmasının amacı ve kapsamı anlatılmıştır.

İkinci bölümde, kullanılacak yöntemlerin anlaşılmasını sağlayan kuramsal bilgiler verilmiştir. Bu bölümde, mobil radyo kanalının karakteristikleri, çeşitleme yöntemleri, algılama teknikleri, işbirlikçi spektrum algılama tekniği, pilot ton algılama yöntemi, Goertzel algoritması detaylandırılmıştır.

Üçüncü bölümde, geliştirilen işbirlikçi spektrum algılama yöntemleri anlatılmıştır. Bu bölümde, serbest uzayda gezgin işbirlikçi spektrum algılama yöntemi açıklanmış ve IEEE 802.22 standardına uygun ortam için işbirlikçi spektrum algılama yöntemi anlatılmıştır. Goertzel algoritması kullanarak pilot tonun algılanması ve işbirliği sağlanarak algılama kalitesi ve enerji verimliliği yüksek, karmaşıklığı az model de bu bölümde sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, geliştirilen yöntemlere ait bulgular verilmiştir.

Beşinci bölümde ise bu bulgular neticesinde çıkarılan sonuçlar ile ileride bu alanda yapılabilecek çalışmalar ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

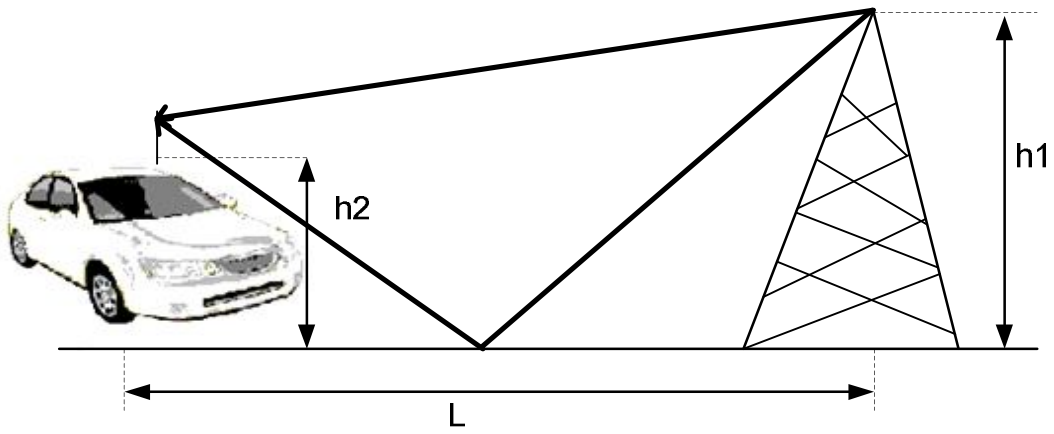
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Mobil Radyo Kanalının Karakteristikleri

İdeal şartlarda serbest uzayda yayılan radyo sinyallerinin elektromanyetik dalgaları için alınan güç (P_{ef}), vericiden olan uzaklığın (L) karesi ile ters orantılı olarak azalır.

$$P_{ef} \sim 1/L^2 \tag{2.1}$$

Bu şartlar karasal ortam için geçerli değildir. Radyo sinyali dağlar, bitki örtüsü, su yüzeyi gibi engeller vasıtası ile yansıyarak ve saçılarak yayılır ve alıcıda toplanır. Bu çoklu yol yayılımına bir örnek Şekil 2.1'de verilmiştir. Şekil 2.1'de basit bir ikili-yol yayılım modeli gösterilmiştir. Sinyal bileşenlerinden biri yansıyarak alıcıya ulaşırken, diğeri direkt alıcıya ulaşmaktadır (Eberspaecher vd. 2008).



Şekil 2.1 Radyo yayılımının basitleştirilmiş ikili-yol modeli

Şekil 2.1'den ikili-yol yayılım modelinde direkt ve sadece bir yansıyan yoldan alınan güç, $P_E = P_0 \frac{4}{(4\pi L/\lambda)^2}(\frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda L})^2 = P_0(\frac{h_1 h_2}{L^2})^2$ olarak ifade edilebilir.

P_0 : Vericiden çıkan güç

h_1 : Vericinin yüksekliği

h_2 : Alıcının yüksekliği

L : Alıcı-verici arasındaki uzaklık

İkili-yol yayılım modelindeki varsayımlarla, basitleştirilmiş olarak yayılım kaybı oranı (L_1 ve L_2 iki farklı yolu için) ise aşağıdaki gibidir.

$$\alpha_E = \frac{P_{E2}}{P_{E1}} = (\frac{L_1}{L_2})^4 \quad \text{veya} \quad \alpha_E = 40\log(\frac{L_1}{L_2}) \text{ dB cinsinden}$$

Gerçekte yayılım kaybı ise $P_E \approx L^{-\gamma} \quad 2 \le \gamma \le 5$ şeklinde ifade edilir.

γ : yayılım sabiti (çevre şartlarına bağlı)

2.1.1 Okumura-Hata Modeli

Baz istasyonundan mobile doğru 1968'de Okumura tarafından alınan ölçümlere dayalı olup, 1980'de Hata tarafından kapalı forma dönüştürülmüş yol kaybı modelidir. Okumura-Hata modeli, taşıyıcı frekansın $150 \le f_c \le 1500$ (MHz), baz istasyonu anten yüksekliğinin $30 \le h_b \le 200$ (m), kullanıcıların anten yüksekliklerinin $1 \le h_m \le 10$ (m) ve baz istasyonu ile kullanıcılar arası uzaklığın $1 \le d \le 20$ (km) olduğu durumlar için kullanılan bir modeldir.

2.1.2 Çoklu-yoldan yayılım ve sönümlenme

Yayılım kaybı, yola bağımlı zayıflama dışında, özellikle çoklu yol yayılım etkisi nedeni ile oluşabilmektedir. Bu etki sinyal frekans bileşenlerinin farklı faz kaymaları ile alıcıya ulaşmasıyla oluşur. Bu ise elektromanyetik dalgaların yansıma (reflection), kırınım (diffraciton), saçılma (scattering) gibi olaylara maruz kalması ile mümkün olur

(Eberspaecher vd. 2008).

Çoklu yoldan yayılımın avantajı alıcıya direkt yol olmadığında kısmi sinyalin elde edilmesini sağlamasıdır. Çoklu yoldan yayılımın dezavantajı ise farklı faz kaymaları ile farklı genlikteki sinyal bileşenlerinin üst üste binmesi ve alınan sinyalde bozulma ortaya çıkmasıdır. Bu olaya sönümlenme (fading) denir.

2.1.2.1 Sönümlenme çeşitleri

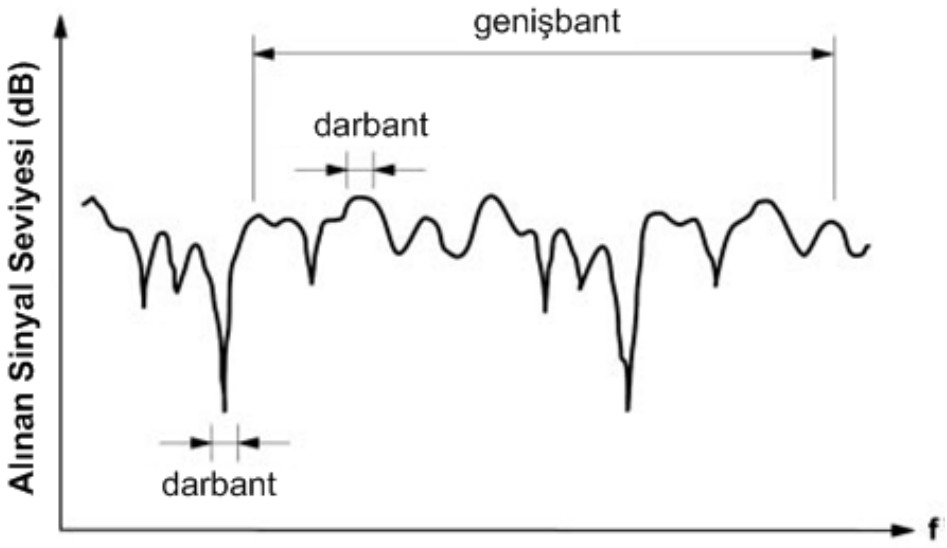
Mobil istasyonun hareketi boyunca, çoklu yol yayılım sebebiyle alınan sinyal seviyelerinde çok büyük değişiklikler (30-40 dB'ye kadar) olur. Alıcıda sönümlenme olurken sinyal bileşenlerinden bir tanesi daha güçlü ve etkili gelmiş olabilir. Baskın sinyal, mobil istasyon ile baz istasyonu arasında direkt yol alan sinyal bileşeni de olabilir. Bu durumda Rice kanalı ve Rice sönümlenmesinden bahsedilir. Bütün çoklu yol bileşenleri, yayılım şartlarına farklı etkinlikte uğramakla birlikte, mobil istasyon ile baz istasyonu arasında direkt yol olmadığı durumda ise Rayleigh sönümlenmesinden söz edilir.

Sönümlenmeler ile zaman periyodunda iletim zarar görür, hatta imkansızlaşabilir. Böylelikle yüksek veya düşük bit hataları oluşur.

Sinyal seviyeleri çoklu yol sinyal bileşenlerinin faz kaymasına bağlıdır. Bu faz kayması da sinyalin dalga boyuna bağlıdır. Bu yüzden sabit sinyal seviyesi iletim frekansına bağlıdır. Böylelikle radyo haberleşmede sönümlenme ilkesi frekans özelliklidir denilebilir. Eğer darbantlı bir sinyalimiz varsa (Şekil 2.2), sinyal seviyeleri değişmediğinde (aynı yayılım şartları) sinyalimiz frekans seçmeyen (frequency non-selectived) durumundadır. Eğer sinyalin bant genişliği büyükse, farklı frekanslar farklı derecede sönümlenmeye uğradıklarında kanal frekans seçici (frequency selective) olarak isimlendirilir (Eberspaecher vd. 2008).

Frekans seçici sönümlenme nedeniyle farklı varış zamanlarıyla oluşan zaman saçılması

da meydana çıkar. Bu, bir sembolün komşu sembollerle girişimine ve bozuk biçimli sinyallerin oluşmasına sebep olur. Çoklu yol yayılmada gecikme 0,5 μs'den (şehir bölgeleri içinde) 16-20 μs'ye (dağlık kesimlerde) kadar çıkabilir. Bu durumda sayısal mobil radyo sistemlerinde, sembol süresi birkaç μs iken, 20 μs'lik bir gecikme birkaç sembolün bozulmasına sebep olabilir.



Şekil 2.2 Bir mobil radyo kanalının frekans seçiciliği

Sönümlenme söz konusu olduğunda kanalın evre uyumlu bant genişliği (coherence bandwidth) ve evre uyumlu zamanı (coherence time) dikkate alınır (Rappaport 2002).

Eğer gönderilen sinyalin bant genişliği, kanalın evre uyumlu bant genişliğinden daha küçük ise frekans bölgesinde sinyal bileşenleri eşit oranda zayıflamaya maruz kalır ve sinyal frekans seçici olmayan (frequency non-selective) veya düz (flat) sönümlenmeye uğramıştır denilir. Gönderilen sinyalin bant genişliği, kanalın evre uyumlu bant genişliğinden daha büyük ise frekans bölgesinde sinyal bileşenleri eşit oranda zayıflamaya maruz kalmaz ve sinyal frekans seçici (frequency selective) sönümlenmeye uğramıştır denilir. Bu durumda semboller arası girişim (ISI, intersymbol interference) gözlenir ve alınan sinyalde daha kötü kalitede bir alım gerçekleşmiş olur (Hourani

2004).

Ayrıca kanalın evre uyumlu zamanı açısından bakılırsa, gönderilen sinyalin sembol süresi, kanalın evre uyumlu zamanından daha küçük ise sinyal yavaş (slow) sönümlenmeye uğramıştır denilir. Eğer gönderilen sinyalin sembol süresi, kanalın evre uyumlu zamanından daha büyük ise sinyal hızlı (fast) sönümlenmeye uğramıştır denilir. Hızlı sönümlenme, hareketli alıcının hızından kaynaklanan Doppler etkisi ile kanalın bir sembol süresi içinde hızlı değişim etkisi oluşturması anlamına gelmektedir.

Bazen kanal, kısa zaman aralıklarıyla bit hata oranını yüksek seviyelere (10^{-1} veya 10^{-2}) çıkararak kesintilere (derin sönümlenme inişlerinde) neden olabilir. Korumasız ve düzeltmesiz iletim, neredeyse imkansızlaşabilir. Bu açıdan çoklu yol yayılım etkilerini azaltacak ilave işlemler gereklidir. Bunlardan bir tanesi de denkleştiricilerin (equalizer) kullanılmasıdır (Eberspaecher vd. 2008). Denkleştirici, girişimle oluşan sinyal bozunumunun (distortion) düzelmesini (zayıf bileşenleri güçlendirme yöntemiyle) sağlar. İyi iletim için kanal kodlama da gereklidir. Çeşitli kanal kodlama yöntemleri ile bit hata oranının azalması sağlanabilir. Ancak radyo kanalında çoklu yoldan (multipath) yayılımda sönümlenme ile oluşan etkileri en aza indirgemek ise çeşitleme (diversity) tekniklerinin kullanılması ile mümkündür. Çeşitleme teknikleri ile mobil radyo kanalında en etkin haberleşme imkanı sağlanabilir.

Ayrıca, sinyalin bir yol boyunca ilerlemesi durumunda, alıcıya ulaşırken aldığı yolda bazı nesnelerle (ağaçlar, binalar) karşılaşarak kayıplara uğraması ise gölgelenme (shadowing) olarak isimlendirilir. Alınan sinyal vericiye aynı uzaklıkta iken gelen sinyal farklılık gösterebilir ve bu gelen sinyal lognormal dağılımına sahip olabilir. Bu durum lognormal gölgelenme olarak isimlendirilir (Coulson vd. 2009).

2.1.3 Gürültü etkisi

Gürültü doğal etkenler nedeniyle oluşan bir rasgele değişkendir. Gürültü iletilen sinyalde bozucu etki oluşturur. Eklenir Beyaz Gauss Gürültüsü (Additive White Gaussian Noise – AWGN) yaygın olarak kullanılan bir gürültü modelidir.

2.2 Kanal Kodlama

Bilgi kanalda iletilirken meydana gelen hataların sezilebilmesi veya düzeltilebilmesi için bilgi dizisine belli bir kural eşliğinde fazladan bilgi ekleme işlemine kanal kodlama denir. Kaynak kodlamada (ses ve veri sıkıştırma) azaltılan bilgi dizisi kanal kodlama sonucunda artar.

- Kanal kodlama ile hataya karşı performans artarken, fazladan bilgi içerdiği için (kontrol bitleri) bant genişliğinin etkili kullanımı da azalmış olur.

- Kanal kodlamanın performansı, düşük sinyal gürültü oranlarında iyi değildir. Çünkü kodlama teknikleri belli bir hatayı kabullenerek belirlenmiştir.

2.2.1 Kanal kodlama çeşitleri

Günümüze kadar haberleşme sistemlerinde vazgeçilmez bir unsur olan kanal kodlama konusu üzerinde uzun çalışmalar yapılmıştır ve de yapılmaya devam etmektedir. Özellikle de kablosuz haberleşme sistemleri için gerekli olan kanal kodlama işleminin amacı, kanal üzerinden gönderilen verinin bir takım bozucuların etkisi ile uğradığı etkiye karşı koymak ve verinin asgari hatalı olarak alıcıya ulaştırılmasını sağlamaktır. Bu amaca uygun olarak çok çeşitli kanal kodlama türleri ve kanal kodlama algoritmaları geliştirilmiştir. Aşağıda bazı kanal kodlama türleri sınıflandırılarak verilmiştir (Proakis 2001).

- Blok kodlar (Block Codes) : Bilgi blok olarak kodlanır.

- Katlamalı kodlar (Convolutional Codes) : Gelen bilgi bit bit işlenir.
- Turbo kodlar : Blok ve katlamalı kodların bazı özelliklerini kullanan kod çözümü döngülü (iterative) bir kanal kodlama türüdür.
- Kafes kodlamalı Modülasyon (Trellis Coded Modulation) : Kodlama ve modülasyon işleminin birleştirildiği kodlama şeklidir.

2.3 Çeşitleme

Kablosuz (mobil) haberleşmede, yüksek data hızları ve kullanıcıların gezginliğinin fazla olması giderek daha çok talep edilmektedir. Kaliteyi ve spektral verimliliği artırmak için etkili modülasyon, kodlama teknikleri ve sinyal işleme teknikleri geliştirilmiştir. Buna rağmen, alınan sinyalin sönümlenme etkisi ile oluşan yetersizliği, uygun demodülasyonun yapılamamasına neden olabilmektedir. Buna karşılık kodlama yapılması, vericinin gücünün ve anten kazancının yükseltilmesi, hem ekonomik hem de yeterli olamamaktadır. Çeşitleme (diversity) tekniklerinin kullanılması böyle bir durumda önemli bir alternatif olarak durmaktadır (Hourani 2004).

Çeşitleme, mesajın birkaç kopyasının farklı bağımsız sönümlenme kanallarından aynı anda gönderimi olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda, en azından bir sinyal büyük olasılıkla sönümlenme etkisine uğramamış veya az bozulmuş olarak alıcıya ulaşabilir. Böylelikle haberleşmenin etkinliği artmış olur.

Genel olarak çeşitleme gereksinimleri;

- Birden fazla iletim yolu olabilmeli,
- Her yol aynı mesajı taşıyabilmeli,
- Her yolun sönümlenme istatistikleri bağımsız olmalı,
- Yolların ortalama sinyal gücü birbirine yakın olmalıdır.

Bu çeşitleme gereksinimlerini sağlayabilecek farklı çeşitleme yöntemleri mevcuttur. Frekans, zaman, uzay&yön (anten, açı, polarizasyon) çeşitlemeleri bunlardan bazılarıdır (Proakis 2001). Uygun çeşitleme yöntemine göre çeşitleme gerçekleştirilir.

2.3.1 Çeşitleme yöntemleri

Farklı zaman dilimlerinde iletilen sinyalin kopyaları gönderiliyorsa, zamansal çeşitleme (temporal diversity) yapılıyor demektir. Bu durumda aynı sembolün iletildiği zaman farkı en az kanalın evre uyumlu zamanı kadar seçilmelidir (Hourani 2004).

Frekans çeşitlemesi de farklı frekanslarda aynı sinyali iletme esasına dayalıdır. Bu durumda seçilen taşıyıcı frekanslar en az kanalın evre uyumlu bant genişliği kadar ayrıştırılmalıdır.

Uzamsal çeşitleme (spatial diversity) veya anten çeşitlemesi ise verici ve/veya alıcıda birden fazla anten kullanımı esasına dayanır. Antenler arasındaki mesafe en az taşıyıcı dalga boyunun yarısı kadar olmalıdır.

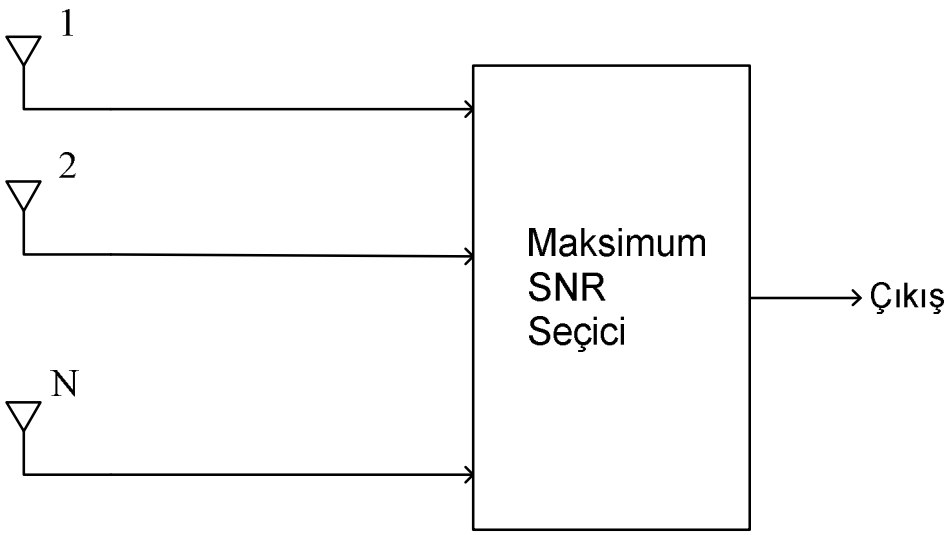
Polarizasyon çeşitlemesi de tek anten ile değişik polarizasyonlarda sinyal iletimi esasına dayanır. Dikey ve yatay polarizasyonlar kullanarak çeşitleme sağlanır.

Yukarıda belirtilen çeşitlemeler dışında yol, modülasyon gibi daha birçok çeşitleme türleri de vardır. Çeşitlemede en önemli husus, farklı şekilde iletilen sinyallerin uğradığı sönümlenme, gürültü gibi etkilerin olabildiğince bağımsız olması gerekliliğidir.

2.3.2 Alıcıda birleştirme yöntemleri

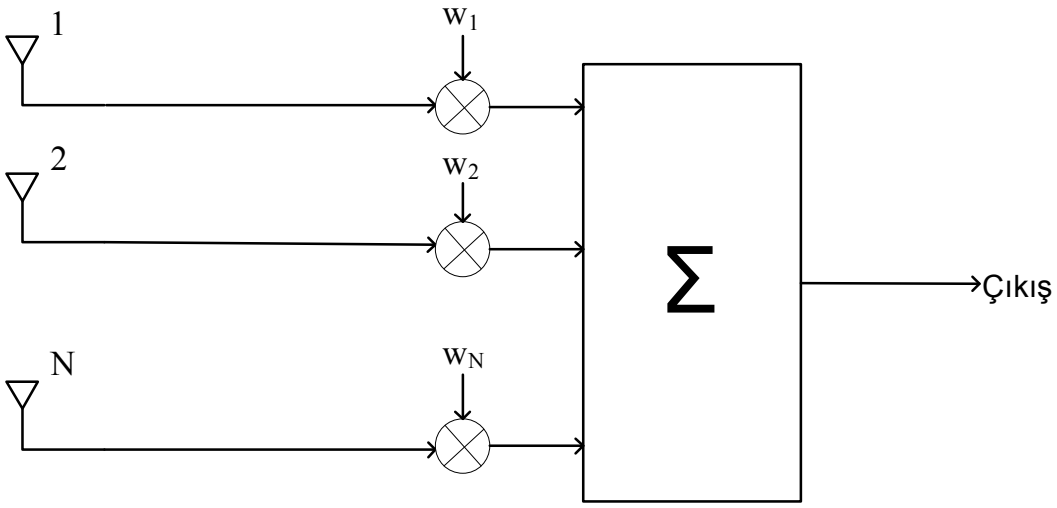
Alıcıda, çeşitleme türüne bakılmaksızın sistemin toplamda alınan gücü artıracak şekilde alınan sinyalleri işlemesi gerekmektedir (Hourani 2004).

Bu kapsamda tercih edilen birleştirme yöntemlerinden bir tanesi seçmeli birleştirme (selection combining) olarak geçmektedir. Bu durumda alıcı, bağımsız kanallardan gelen sinyallerden SNR'ı en yüksek olanı kullanır (Şekil 2.3).



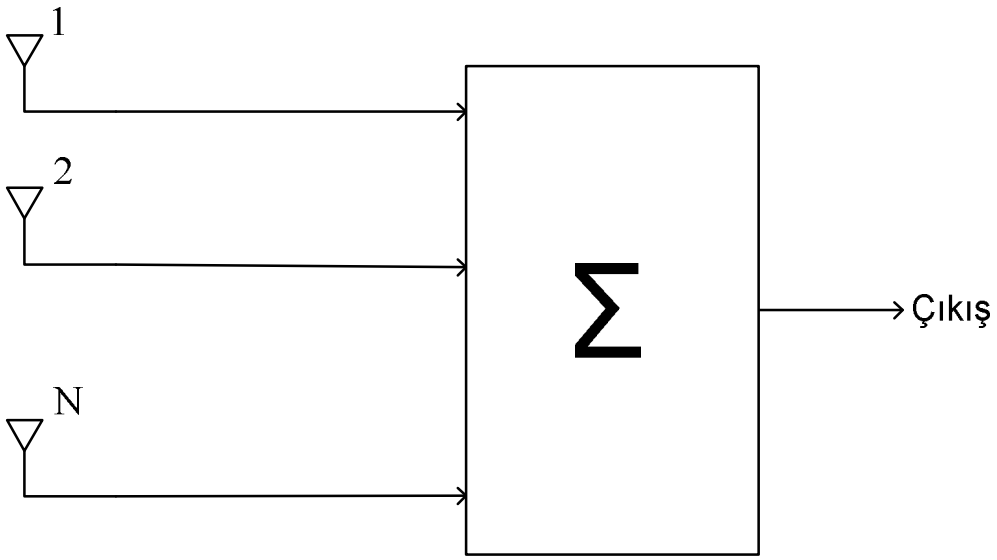
Şekil 2.3 Seçmeli birleştirme tekniği

Diğer bir birleştirme yöntemi en yüksek oranlı birleştirme (maximum ratio combining) yöntemidir. Bu yöntemde, herbir bağımsız kanal üzerinden alınan sinyal ayrı ayrı ağırlıklandırılarak çıkıştaki SNR'ı maksimum yapacak şekilde birleştirilir (Şekil 2.4) (Hourani 2004).



Şekil 2.4 En yüksek oranlı birleştirme tekniği

Başka bir yöntem ise eşit kazançlı birleştirme (equal gain combining) yöntemidir. Bu yöntemde bağımsız kanallardan alınan tüm sinyaller herhangi bir ağırlıklaştırma yapılmaksızın toplanır (Şekil 2.5) (Hourani 2004).



Şekil 2.5 Eşit kazançlı birleştirme yöntemi

Yukarıda tek bir alıcıda gerçekleştirilen birleştirme yöntemlerinin, tek bir vericiden gönderilen işaretlerin değerlendirilmesi ile gerçekleştiği anlatılmaktadır. Fakat son zamanlarda, verici tarafından alıcıya gönderilen işaretlerin başka kullanıcı/kullanıcıların da yardımı ile işbirliği sağlanarak çeşitleme oluşturulması ile hedefe veya alıcıya ulaştırılması önem kazanmıştır. Bu teknik işbirlikçi çeşitleme (cooperative diversity) olarak literatüre geçmiştir (Laneman 2001).

2.3.3 İşbirlikçi çeşitleme

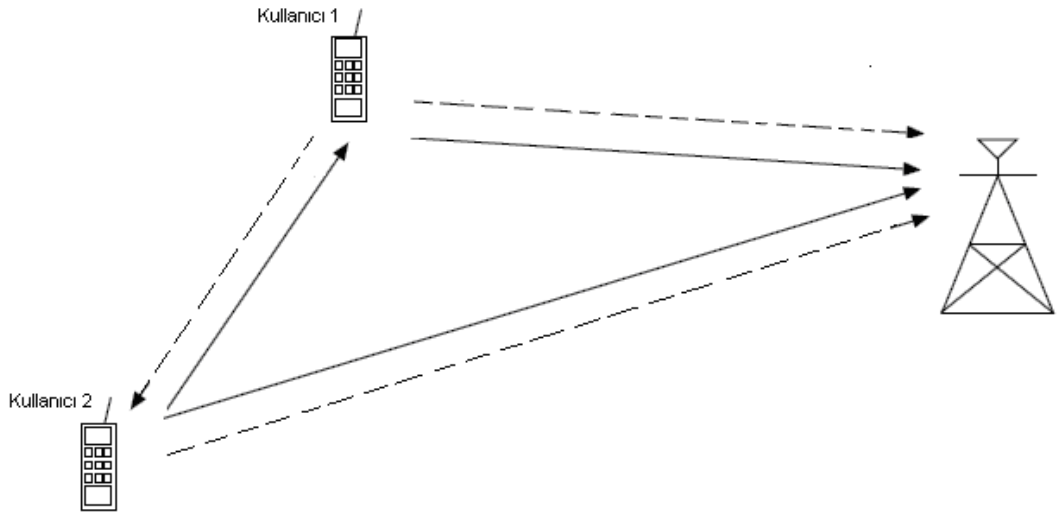
Kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan kanallarda görülen en önemli bozucu etki, çok yollu yayılımdan kaynaklanan sönümlenme etkisidir. Sönümlenme etkilerine karşı koyma yöntemlerinden biri çok antenli, bir başka deyişle çok girişli çok çıkışlı (multi input multi output, MIMO) sistemler kullanmaktır. Bu yöntem anten çeşitlemesi kapsamında yer alır. Son yıllarda MIMO yapılar ve bu yapılara uygun kod tasarımının araştırılması literatürde geniş yer bulmuştur.

Verici anten çeşitlemesi yöntemleri özellikle hücresel sistemlerin baz istasyonları için uygun olmasına karşın, boyut, maliyet ve donanım karmaşıklığı açısından gezgin birimler için çok uygun değildir. Bu probleme bir çözüm olarak da ilk defa Laneman vd. (2001) tarafından ortaya atılan "işbirlikçi çeşitleme (cooperative diversity)" tekniği kullanılabilir. İşbirlikçi çeşitlemede kaynak kullanıcısı, bilgisini doğrudan ve bir veya birden fazla işbirlikçi (röle) üzerinden hedef-alıcıya göndererek verici çeşitlemesi sağlamaktadır.

İşbirlikçi çeşitlemenin temeli, Cover ve El Gamal (1979) tarafından yayınlanmış olan klasik röleli çalışmalarına kadar uzanmaktadır. İşbirlikçi iletişim sistemlerinde kullanıcılar hem röle hem de bilgi kaynağı olarak çalışmaktadırlar.

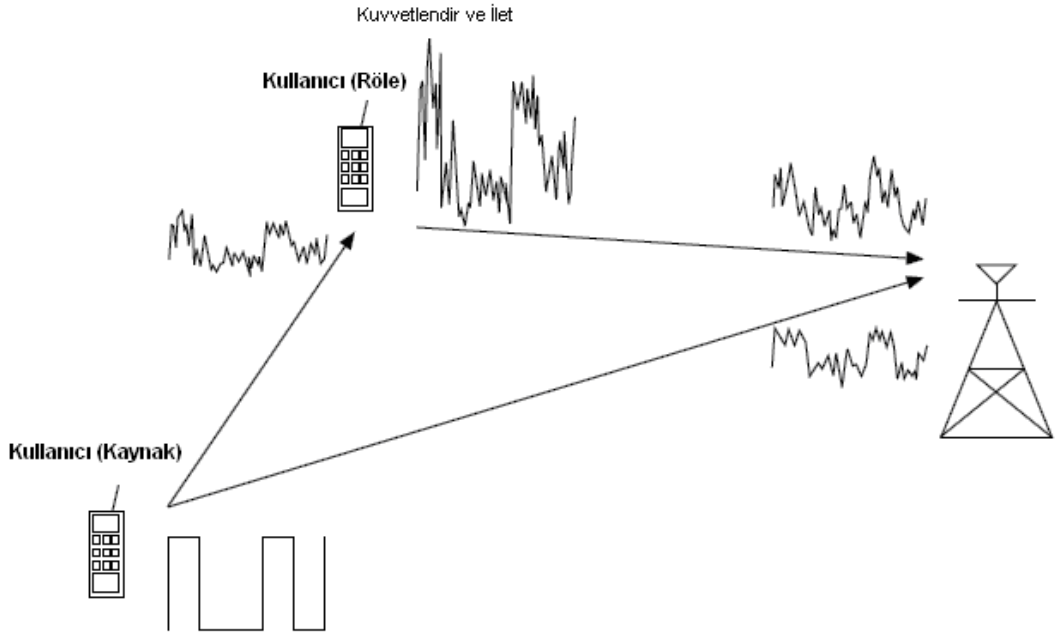
2.3.3.1 İşbirlikçi iletişim türleri

İşbirlikçi iletişimde, her kullanıcı kendi bilgisini iletmenin yanında, diğer kullanıcılar için de röle görevi üstlenebilmektedir (Şekil 2.6).



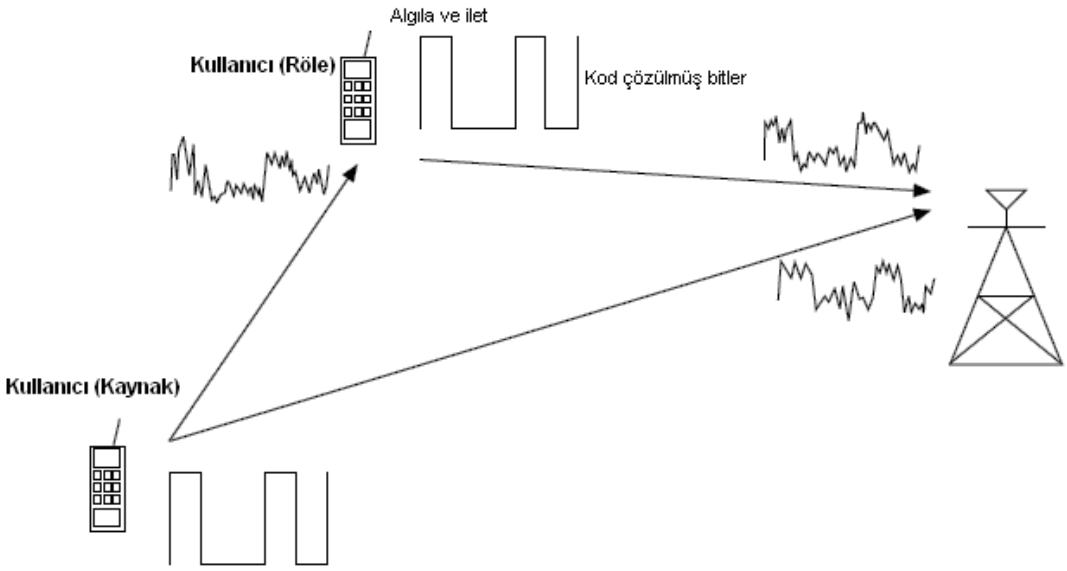
Şekil 2.6 İki kullanıcılı işbirlikçi iletişim (Nosratinia vd. 2004)

Kullanıcıların röle görevi yapabildikleri işbirlikçi çeşitleme yöntemlerinden bir tanesi, "kuvvetlendir ve ilet (amplify and forward)" yöntemidir. İlk olarak Laneman vd. tarafından önerilen işbirlikçi iletişim yöntemidir (2001). Şekil 2.7'de, bu yönteme uygun olarak işbirlikçi olan diğer kullanıcı, kaynak kullanıcıdan gelen işareti kuvvetlendirip iletmektedir.



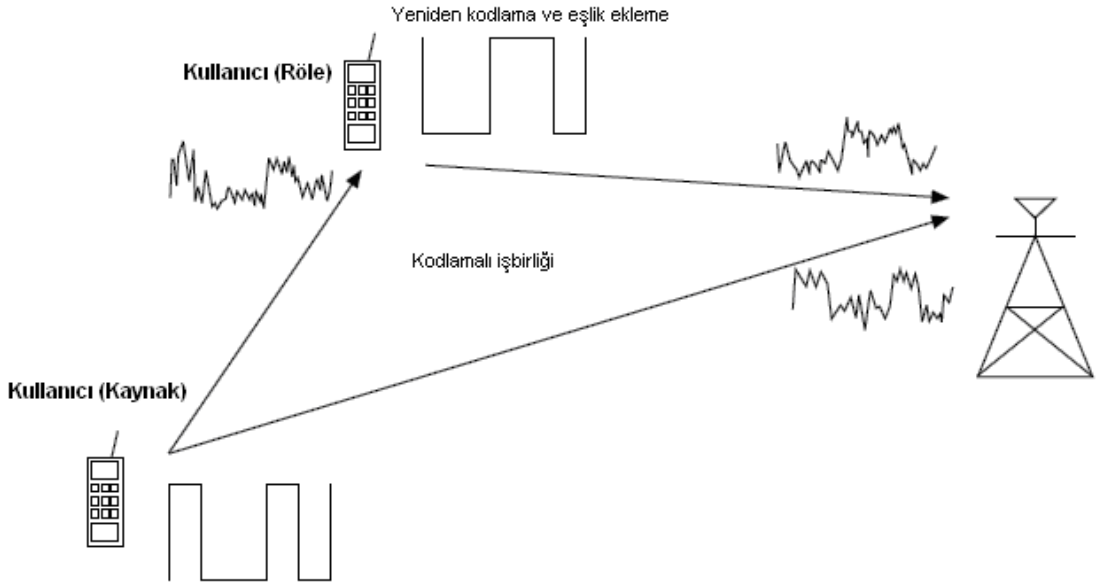
Şekil 2.7 Kuvvetlendir ve ilet yöntemi (Nosratinia vd. 2004)

Diğer bir önerilen yöntem olan "algıla ve ilet (decode and forward)" yöntemi ise ilk olarak Sendonaris ve arkadaşları tarafından 2003 yılında önerilmiştir. Bu senaryoya uygun olarak Şekil 2.8'de işbirlikçi olan diğer kullanıcı, kaynak kullanıcıdan gelen diğer işaretin kodunu çözüp, tekrar sayısal olarak iletmektedir.



Şekil 2.8 Algıla ve ilet yöntemi (Nosratinia vd. 2004)

Başka bir yöntem "kodlamalı işbirliği (coded cooperation)" ise ilk olarak Hunter ve Nostratinia tarafından önerilmiştir (2002). Önerilen bu yönteme uygun olarak Şekil 2.9'da kaynak kullanıcıdan çıkan işaret, diğer bir yardımcı kullanıcı tarafından tekrar kodlanıp hedefe gönderilmektedir.



Şekil 2.9 Kodlamalı işbirliği (Nosratinia vd. 2004)

2.4 Algılama Teknikleri ve Klasik Enerji Algılama Tekniği

Bilişsel radyo ile çevreyi algılama ve değişen çevre koşullarına göre iç parametrelerin (iletim gücü, taşıyıcı frekans, modülasyon stratejisi) ayarlanması esası temel alınmıştır (FCC 2002). Bu gerçekleşirken de nerede olunursa olunsun, çok yüksek güvenilirlikle iletişim gerçekleştirme ve radyo spektrumundan en etkili şekilde istifade edilmesi de en önemli amaçlar olmuştur.

Genel olarak bilişsel radyo dört ana başlığa ayrıştırılmıştır. Bunlar, spektrumun neresinde boşluk olduğunu anlamak için lisanslı kullanıcıların varlıklarının tespit edilmesi (spektrum algılama), en iyi kanalın seçimi (spektrum yönetimi), diğer kullanıcılarla boş kanallara erişim (spektrum paylaşımı), lisanslı kullanıcı geldiğinde kanalı terk etmedir (spektrum gezginliği) (Letaief ve Zhag 2009).

Bilişsel radyoda spektrum algılama lisanslı kullanıcının rahatsız edilmemesi hedefi nedeni ile en fazla üzerinde durulan konulardan biri olmuştur. Bu nedenle çeşitli spektrum algılama araştırmaları yapılarak algılama olasılığını artıracak farklı yöntemler

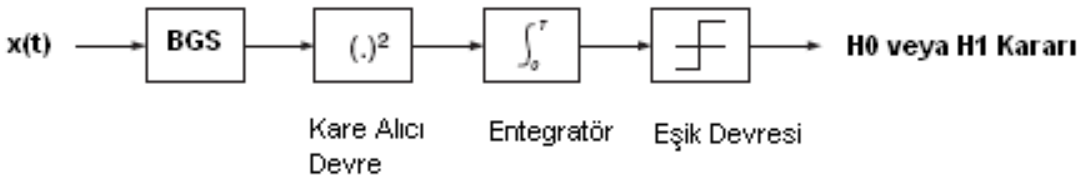
üzerinde çalışılmıştır. Bunlardan en fazla tercih edilenler enerji algılama (energy detection) (Kay 1998), uyumlu süzgeç algılama (matched fitler detection) (Cabric 2006) ve dönemli-durağan algılama (cyclostationary detection) (Enserink ve Cochran 1994) yöntemleri olarak literatürde geçmektedir. En yaygın olarak kullanılanı enerji algılama yöntemidir. Bunun nedeni ise enerji algılama yönteminde diğer spektrum algılama tekniklerinin aksine lisanslı kullanıcıların sinyallerine dair öncelikli (a priori) bilgiye gereksinim duyulmaması ve çok daha az karmaşıklık ile maliyet giderine ihtiyaç duyulmasıdır (Ma ve Li 2007).

2.4.1 Enerji algılama yönteminde keskin karar (Hard Decision)

Keskin karar (hard decision), enerji algılama yönteminde algılanan değerlerin sabit iki değere atanarak gerçeklendiği karar yapısıdır. Bu yapıda, yerel karar vericiler sadece bu iki değerden birini gönderirler (Ma ve Li 2007) ve (Vistotsky vd. 2005).

$$x(t) = \begin{cases} n(t) \\ hs(t) + n(t) \end{cases} \tag{2.2}$$

Eşitlik (2.2)'de s(t), lisanslı kullanıcı tarafından iletilen sinyali; n(t), toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü; h ise kanal genlik kazancını ifade etmektedir.



Şekil 2.10 Yerel enerji algılayıcı blok diyagramı

Şekil 2.10'da yerel enerji algılayıcı blok diyagramı gösterilmiştir. Öncelikle, yerel enerji algılayıcıda alınan x(*t*) işareti, bandı sınırlanması için Bant Geçiren Süzgeç (BGS) devresinden geçirilmektedir. Alınan işaret, sonra Kare Alıcı Devre'den ve T zaman aralığı kadar Entegratör devresinden geçirilmektedir. Entegratör çıkışı (Y) bir eşik değerle (λ) karşılaştırılarak H0 veya H1 kararı elde edilebilmektedir.

$$P_d = P\{Y > \lambda | \ H_1\} \tag{2.3}$$

$$P_f = P\{Y > \lambda | \ H_0\} \tag{2.4}$$

Genel anlamda eşitlik (2.3) ve (2.4)'te verildiği gibi doğru algılama olasılığı P_d, lisanslı kullanıcı yayını varken Entegratör çıkışının eşik değerden daha fazla olması olasılığıdır. Hatalı algılama olasılığı P_f ise lisanslı kullanıcı yayını yok iken Entegratör çıkışının eşik değerden daha fazla olması olasılığıdır.

AWGN kanal için Y'nin yığılımlı dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibidir (Digham vd. 2003).

$$F_Y(y) = 1 - Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \tag{2.5}$$

Burada $Q_u(a,b)$ genelleştirilmiş Marcum Q-fonksiyonu olmak üzere AWGN kanal için hatalı algılama olasılığı P_f ve doğru algılama olasılığı P_d aşağıdaki gibidir.

$$P_f = \frac{\Gamma(u, \frac{\lambda}{2})}{\Gamma(u)} \tag{2.6}$$

$$P_d = Q_u(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}) \tag{2.7}$$

Eşitlik (2.5), (2.6) ve (2.7)'de Γ tamam olmayan gamma fonksiyonu (incomplete gamma function), 2u serbestlik derecesi (degrees of freedom), γ sinyal-gürültü oranıdır (SNR).

Sinyalin genliği Rayleigh dağılımında olursa doğru algılama olasılığı aşağıdaki gibidir.

$$\overline{P}_{dRay} = e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{u-2} \frac{1}{n!} (\frac{\lambda}{2})^n$$

$$+ (\frac{1+\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}})^{u-1} \left[e^{-\frac{\lambda}{2(1+\bar{\gamma})}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{n=0}^{u-2} \frac{1}{n!} \frac{\lambda\bar{\gamma}}{2(1+\bar{\gamma})} \right] \tag{2.8}$$

Burada $\bar{\gamma}$ ise ortalama SNR'ı, U=TW zaman-band genişliği ürününü ifade etmektedir.

Sinyalin genliği Rice dağılımında olursa doğru algılama olasılığı aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$\overline{P}_{dRic|u=1} = Q(\sqrt{\frac{2K\overline{\gamma}}{K+1+\overline{\gamma}}}, \sqrt{\frac{\lambda(K+1)}{K+1+\overline{\gamma}}}) \quad (2.9)$$

Yukarıdaki eşitlikte K Rice faktörüdür.

2.4.2 Enerji algılama yönteminde esnek karar (Soft Decision)

Enerji algılama yönteminde algılanan değerlerin ikiden fazla değere atandığı karar yapısıdır. Yerel birimlerde algılanan bu değerler normalizasyon ve ağırlıklandırma işlemlerinden sonra merkezi birime iletilebilmektedir (Ma ve Li 2007) ve (Vistotsky vd. 2005).

Esnek karar yapısı, keskin karar yapısına göre yerel karar vericilerdeki bilgi kayıpları dikkate alındığında toplamda daha yüksek performans sunabilmektedir. Fakat esnek karar yapısına göre keskin karar yapısı, daha az karmaşıklık ve iletimde daha az bant genişliği ihtiyacı duymaktadır.

Yukarında anlatılan klasik enerji algılama tekniklerinin SU'larda birbirlerinden bağımsız şekilde belirli bir periyod boyunca uygulanmasıyla her SU için bağımsız karar dizileri elde edilebilmektedir.

2.4.3 İşbirlikçi enerji algılama tekniği

Bilişsel radyoda spektrum kullanım önceliğinin PU'lara ait olması nedeni ile spektrum algılama (spectrum sensing), spektrum boşluklarının tespitinde çok önemli bir yere sahip olmuştur. PU'ların daha etkili algılanabilmesi de daha etkili spektrum algılama ile mümkün olabilmektedir. Bu yüzden maliyet etkin işbirlikçi spektrum algılama, işbirliği oluşturarak enerji algılama ile yapılabilmektedir. Aşağıda N elamanlı bir işbirlikçi yapı için VE (AND) ve VEYA (OR) kuralına göre algılama (P_D) ve yanlış alarm olasılıkları (P_F) verilmiştir. VE kuralı uygulanarak işbirliği sağlandığında P_D azalırken, P_F de

azalmaktadır. VEYA kuralı uygulanarak işbirliği sağlandığında ise P_D artarken, P_F de artmaktadır (Quin vd. 2009).

$$P_{ve_D} = \prod_{i=1}^{N} P_{Di} \tag{2.10}$$

$$P_{ve_F} = \prod_{i=1}^{N} P_{Fi} \tag{2.11}$$

$$P_{veya_D} = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - P_{Di}) \tag{2.12}$$

$$P_{veya_D} = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - P_{Fi}) \tag{2.13}$$

2.5 İşbirlikçi Spektrum Algılama Konusunda Yapılmış Çalışmalar

İşbirlikçi spektrum algılama alanında yer alan bir çalışmada, iki adet protokol önerilmiştir. 4 adet TDMA zaman aralığı içeren protokollerde, lisanslı kullanıcı ve iki lisanssız kullanıcının bu zaman aralıklarını kullanarak uygun kombinasyonda gönderim ve alım yaptığı yer almaktadır. Bu protokollerde, sadece işbirlikçi spektrum algılama yer alması ve işbirlikçi çeşitlemenin gerçeklenmemiş olması, işbirlikçi çeşitleme de içeren Ganesan (2007) çalışmasına üstünlük sağlanması sonucunun çıkmasına neden olmuştur (Chen vd. 2008).

Diğer bir çalışmada, işbirlikçi spektrum algılamanın üstünlüğü belirtilmekle birlikte işbirliğine katılacakların güvenilir olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu durumda

lisanssız kullanıcıların bağımsız sönümlenmeye maruz kalması, gölgelenme (shadowing) ilintisi uzaklık bağımlı ise lisanssız kullanıcılar arasındaki uzaklığın artırılması gerektiği benzetimlerle ispatlanmıştır. Ayrıca kanal etkileri açısından bağımsız iletimli az sayıda lisanssız kullanıcının işbirliğinin, bağımlı iletimli çok sayıda lisanssız kullanıcının işbirliğinden daha etkili olduğu da belirtilmiştir (Mishra vd. 2006).

Başka bir çalışmada bilişsel kullanıcıların, kanalın log-normal gölgelenme (shadowing) ve Rayleigh sönümlenme etkisi oluşturması durumunda işbirlikçi spektrum algılama ile spektrum algılama etkinliğinin arttığının gözlendiği belirtilmiştir. Ayrıca uzamsal ilintili (spatially correlated) gölgelenme ortamında lisanssız kullanıcılar arasındaki uzaklığın artmasının da başarımı artırdığı vurgulanmıştır (Ghasemi vd. 2005).

Diğer bir çalışmada gezginliğin olduğu ortamda tüm lisanssız kullanıcıların yerlerinin GPS ve UWB (Ultra Wide Band) yardımı ile sürekli güncellenerek optimum röle seçimi önerisi olmuştur. Optimum röle seçimleri tamamlandıktan sonra lisanslı kullanıcıyı ilk algılayan vasıtasıyla lisanslı kullanıcının varlığı bilgisinin sisteme girişinin sağlandığı belirtilmektedir (Sun vd. 2006).

Bir başka çalışmada, lisanssız kullanıcıların işbirliği ile spektrum algılama gerçekleştirirken, lisanslı kullanıcı sinyalini yüksek SNR'da alanları röle olarak tercih etmelerinin, çevredeki tüm lisanslı kullanıcıları röle olarak tercih etmelerinden daha etkili olduğu sonucu çıkarılmıştır (Peh vd. 2007).

Bir çalışmada LQ detektör (Linear Quadratic Detector) ile aynı bandı gözleyen lisanssız kullanıcıların, lisanslı kullanıcı bilgisini füzyon merkezine bildirme ve birleştirme yapma yöntemini içermektedir (Unnikrishnan vd. 2008)

Ma'nın (2007) çalışmasında da esnek birleştirme (soft combination) ve keskin birleştirme (hard combination) ile işbirlikçi spektrum algılama tekniklerine değinilmiştir. Esnek birleştirmenin biraz daha iyi olduğu gösterilmekle birlikte, enerji

bölgesinin iki bitle ifade edilip (4 bölgeli) gösterildiği durumun performans ve karmaşıklık açısından daha uygun olduğu vurgulanmıştır.

Zhang (2008) çalışmasında, hatalı alarm (false alarm) ve hatalı algılama (misdetection) olasılıkları toplamda minimize edilerek yarı oylamalı (half voting) kuralın optimum olduğu ispatlanmıştır. Fakat çok düşük enerji eşik seviyeleri için VE (AND) kuralının optimum olduğu, çok yüksek enerji eşik seviyeleri için OR (VEYA) kuralının optimum olduğu da belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada, esnek oylamaya alternatif olarak, lisanssız kullanıcıların spektrum algılama kabiliyetlerinin ölçümüne göre güvenilirliklerinin tespiti ve belli güvenilirlik eşik seviyesini aşanların spektrum algılama oylamasına katılması modeli önerilmiştir. Ayrıca bilgi iletiminin topak oluştur ilet (cluster collect forward) yöntemince yapılması ile toplamda enerji tasarrufu yapılabileceği vurgulanmıştır (Lee vd. 2008).

Diğer bir çalışmada, güvenilir olmayan veya yanıltıcı lisanssız kullanıcıların tespiti yöntemi vardır. Bu yöntem tüm kullanıcıların datasını inceleyip, alt ve üst sınır dışında kalanları yanıltıcı görerek, onları devre dışı bırakma esasına dayanmaktadır (Kaligineedi vd. 2008) .

Başka bir çalışmada, hedef lisanssız kullanıcıya yardımcı olacak lisanssız kullanıcıların (rölelerin) güçlerinin belirli ağırlık katsayıları ile çarpımının toplamı ile elde edilen eşik ile karşılaştırılması durumunun yanlış alarm durumunda avantaj sağladığı gösterilmiştir (Matsui vd. 2007).

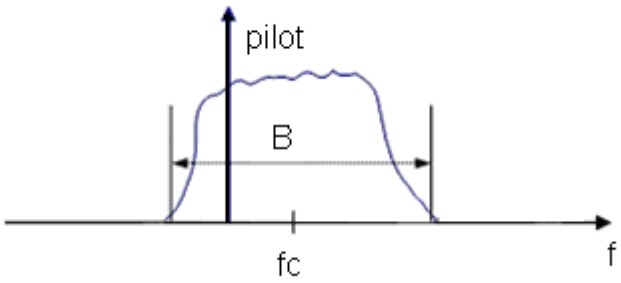
Başka bir çalışmada atlamalı iletimle uzak ve ilintisiz lisanssız kullanıcılardan yararlanma ve rapor iletimi ile girişim değerlerine bakarak iletim gücü kontrolü yöntemi vurgulanmıştır (Yu vd. 2007).

2.6 Pilot Ton Algılama

Gürültü belirsizliğinin de hesaba katıldığı durumlarda lisanslı kullanıcıların sezilebilmesinde sinyale özel (signal spesific) algılama teknikleri tercih edilebilmektedir. Bu tekniklerden biri de pilot ton algılama olarak geçmektedir.

Birçok lisanslı sayısal hücresel haberleşme sisteminde senkronizasyon vb nedenlerden ötürü pilot ton iletimi yapılmaktadır. Genelde pilot tonun gücü toplam iletilen gücün %1'i ile %10'u arasında değişmektedir. Özellikle sinüs dalgası şeklindeki pilot ton iletimi lisanlı kullanıcı yayın sistemlerinde sıkça rastlanan ve alıcı senkronizasyonunda kullanılan pilot ton iletimidir (Cabric 2006).

Şekil 2.11'de pilot ton içeren bir sinyalin frekans bölgesi gösterimi mevcuttur.



Şekil 2.11 Pilot ton sinyali gösterimi

Pilot tonun iletildiği bir ortamda, alıcının pilot ton hakkında tüm bilgiye sahip olduğu ve pilot tonu ayrıştırabildiği durumda, beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) eklenmiş temel bant kesikli sinyal için algılama, aşağıdaki iki hipotezin testine dayalıdır.

$$H0: Y[n] = W[n] \quad \text{sinyal yok}$$

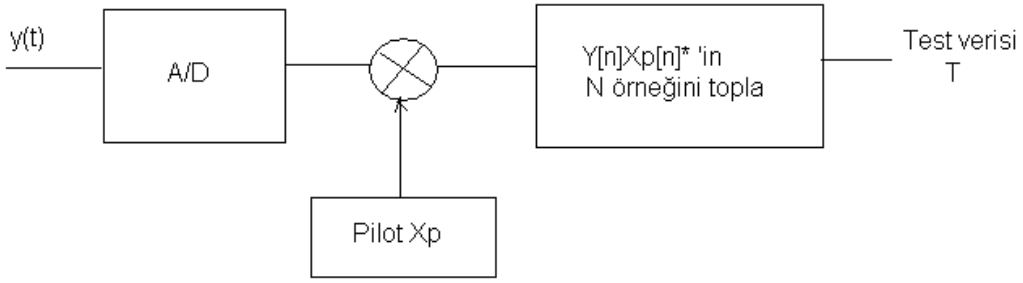
$$H1: Y[n] = X_p[n] + W[n] \quad \text{sinyal var}$$

$$n = 1,\ldots, N; \quad N \text{ gözlem aralığı} \qquad (2.14)$$

$X_p[n]$ (pilot ton) sinyali θ gücünde olup W[n] ise σ_w^2 varyansına sahip beyaz Gauss gürültüsüdür. Optimum algılayıcı uyumlu süzgeç algılayıcı (matched fitler detector) olduğundan

$$T = \sum_{N} Y[n] x_p[n]^* \tag{2.15}$$

test verisi Şekil 2.12'ye göre elde edilmiş olacaktır.



Şekil 2.12 Uyumlu süzgeç algılayıcı yardımı ile pilot algılama

Eşik değer belirli değer olan γ olduğunda, karar mekanizması aşağıdaki gibi olacaktır.

$T > \gamma$ ise sinyal var kararı verilir

$T < \gamma$ ise sinyal yok kararı verilir

H0 iken T~ Normal(0, σ_w^2 ε)

H1 iken T~ Normal(ε, σ_w^2ε)

Burada $\varepsilon = \sum_{N} (x_p[n])^2$ şeklindedir.

Bu durumda P_d (doğru algılama olasılığı) ve P_{fa} (hatalı algılama olasılığı) aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$P_{fa} = P_T(T > \gamma | H_0) = Q(\frac{\gamma}{\sqrt{\sigma_w^2 \varepsilon}}) \tag{2.16}$$

$$P_d = P_T(T > \gamma | H_1) = Q(\frac{\gamma - \varepsilon}{\sqrt{\sigma_w^2 \varepsilon}}) \tag{2.17}$$

Minimum örnek sayısı ise sinyal gürültü oranı SNR= θ/σ_w^2'ın fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$N = [Q^{-1}(P_{fa}) - Q^{-1}(P_d)]^2 SNR^{-1} \tag{2.18}$$

Pilot ton algılama konusunda yapılmış bir çalışmada, stokastik rezonans tekniği kullanılarak algılama olasılığında artış olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışma, lisanslı kullanıcı sinyalini direkt DTV'deki sinüsoidal pilot sinyali olarak sistem modeli oluşturmuştur (Zheng vd. 2009).

Diğer bir çalışmada, pilot ton algılamada pilot tonun derin sönümlenmeye maruz kalabileceği, eşik değerin gürültü belirsizliği durumunda alıngan olduğu ve pilot yerinin belirsizliğinin (100 kHz bant genişliğinde filtre gerektirebilecek ve performansı düşürebilecek) oluşması problemleri oluşabileceğinden bahsedilmiştir. Pilot-yeri algılamanın (pilot-location detection) gürültü belirsizliğinde etkin olduğu, pilot-enerji algılamanın (pilot-energy detection) filtre bant genişliğini düşürerek etkinlik sağladığı

ve her iki yöntemin de uygulanarak daha sağlam algılama yapılabileceği belirtilmiştir (Ghosh vd. 2007).

Başka bir çalışmada, önerilen spektral kovaryans algılama yöntemi ile pilot-yeri algılamaya göre algılama süresi aynı iken 3 dB daha iyi algılama sağlanabildiği belirtilmiştir (Kim ve Andrews 2010).

2.7 Karmaşıklık Etkin Frekans Bölgesi Dönüşümü ve Goertzel Algoritması

DFT (Discrete Fourier Transform, Ayrık Fourier Dönüşümü), FFT (Fast Fourier Transform, Hızlı Fourier Dönüşümü) 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 kullanılanıdır. Bu durumda işlem sayısı $\log_2(N).N$'e düşürülebilmektedir. DTMF tonlarının algılanması, FSK (Frequency Shift Keying, Frekans Kaydırmalı Anahtarlama) demodulasyonu gibi bazı durumlarda da daha az sayıda DFT frekans örneğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gibi durumlarda hesaplama karmaşıklığını 2 kat kadar azaltan ve frekans analiz tekniği olarak geçen Goertzel algoritması (Goertzel 1958) kullanılabilmektedir. Goertzel algoritmasının çıkarımı aşağıdadır ve Z-dönüşümü yapısı Şekil 2.13'te verilmiştir (Stein 2000).

DFT,

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) e^{-(\frac{j2\pi nk}{N})}) \tag{2.19}$$

eşitliği ile, ters-DFT ise

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (X(k) e^{+(\frac{j2\pi nk}{N})}) \tag{2.20}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir.

Karmaşık üstel $e^{-j(\frac{2\pi k}{N})}$ ifadesi

$$e^{-j(\frac{2\pi k}{N})} = W_N^k \tag{2.21}$$

olarak gösterilecek olursa $W_N^{-Nk} = 1$ olur.

Buna göre eşitlik (2.15)'teki DFT eşitliği yeniden aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) 1 W_N^{nk})$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) W_N^{-Nk} W_N^{nk}) \tag{2.22}$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) W_N^{(N-n)(-k)})$$

$$= (((W_N^{-k} x(0) + x(1)) W_N^{-k} + x(2)) W_N^{-k} + ... + x(N-1)) W_N^{-k}$$

Son ifade eşitlik (2.19)'daki gibi fark eşitliğine dönüştürülebilir.

$$y(n) = W_N^{-k} y(n-1) + x(n) \tag{2.23}$$

Burada y(-1) = 0'dır. DFT katsayıları fark eşitliğinin $n=N$ anındaki çıkışlarına eşittir.

$$x(k) = y(N) \tag{2.24}$$

Fark eşitliği Z-dönüşümü yazılıp, pay ve paydanın $1-W_N^{-k}z^{-1}$ ile çarpılması sonucunda aşağıdaki eşitliğe dönüştürülebilir.

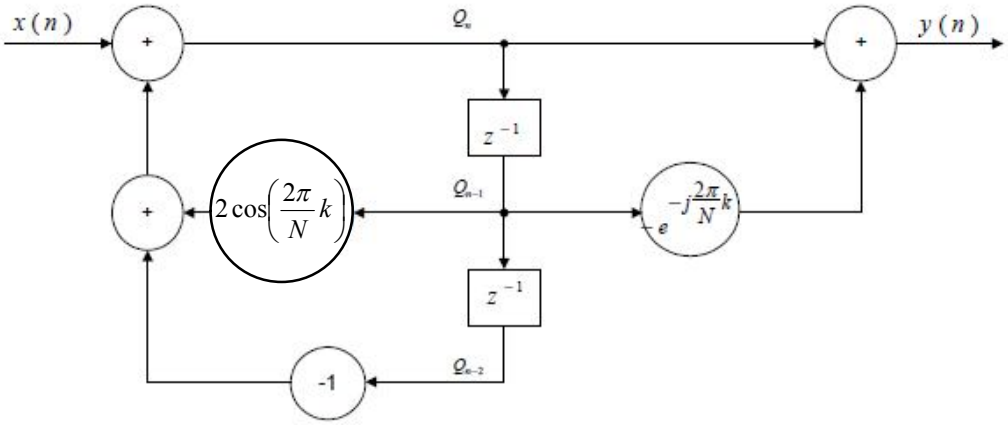
$$\frac{Y(Z)}{X(Z)} = H(Z) = \frac{1}{1-W_N^{-k}z^{-1}} \tag{2.25}$$

$$= \frac{1-W_N^{k}\,z^{-1}}{1-((W_N^{-k}+W_N^{-k})z^{-1}-z^{-2})} \tag{2.26}$$

Eşitlik (2.22) aşağıdaki gibi de ifade edilebilir.

$$\frac{Y(Z)}{X(Z)} = \frac{1-W_N^{k}z^{-1}}{1-(2\cos(\frac{2\pi k}{N})z^{-1}-z^{-2})} \tag{2.27}$$

Eşitlik (2.23)´ün gerçeklenmesi Şekil 2.13`te gösterilmiştir.



Şekil 2.13 Goertzel algoritması Z- dönüşümü yapısı

$$Q_n = x(n) + 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)Q_{n-1} - Q_{n-2}\,; \quad 0 \le n \le N \tag{2.28}$$

$$y_k(n)\big|_{n=N} = X(k) = Q_{n-1} - Q_{n-2}e^{-j\frac{2\pi}{N}k}\,; \ n=N \tag{2.29}$$

Algoritma ile Şekil 2.13'e göre sonuca ulaşmak için eşitlik (2.28)'deki kısmı N kez, eşitlik (2.29)'daki kısmı 1 kez gerçeklemek gereklidir. Eğer sadece genlik bilgisi ile ilgileniliyorsa, kompleks işlemleri devre dışı bırakarak, sadece gerçel işlemlerle işlem yükü azaltılabilir. Bu durumda ise eşitlik (2.29)'dan elde edilen eşitlik (2.30) kullanılır.

$$\left|y_k(N)\right|^2 = \left|X(k)\right|^2 = Q(N)^2 + Q(N-1)^2 - 2\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)Q(N)Q(N-1) \tag{2.30}$$

2.7.1 Goertzel algoritması ile ilgili araştırmalar

Trajkovic ve Radovic'in çalışmasında (2006), Goertzel algoritması kullanılarak DTMF tonlarının algılanmasında başarım analizleri verilmiştir. DTMF tonlarının konuşma sesinden veya gürültüden ayrıştırılmasında düşük grup ve yüksek grup sinyallerinin toplam gücünün, toplam sinyal gücünün %75'inden fazla olması dikkate alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada yüksek grup ve düşük grup sinyali arasındaki farkın (twist test) testinin ve SNR oranlarının da hesaba katılmasıyla algılama olasılıkları sunulmuştur.

Schwingshackl vd. (2006) çalışmasında, Goertzel algoritmasından türetilen algoritma (GQA – Goertzel Quotient Algorithm) ile düşük giriş frekanslarında daha sağlam ve keskin frekans kestirimi yapılabildiği belirtilmiştir.

Başka bir çalışmada, Goertzel algoritmasının hesap yükü avantajı yanında daha net ve sağlam bir yöntem sunulmuştur. Bu çalışmada DTMF frekanslarının kabul edilebilir yakınlığında olan frekanslar ve ona uygun katsayılar da hesaba katılmıştır (Andritsppoulos vd. 2001).

Zhang vd. (2008) çalışmasında da, geliştirilmiş Goertzel algoritmasına dayalı, donanımdan yazılıma başarım etkinliği artırılmış sayısal ton kod çözücü gerçeklenmesinden bahsedilmiştir.

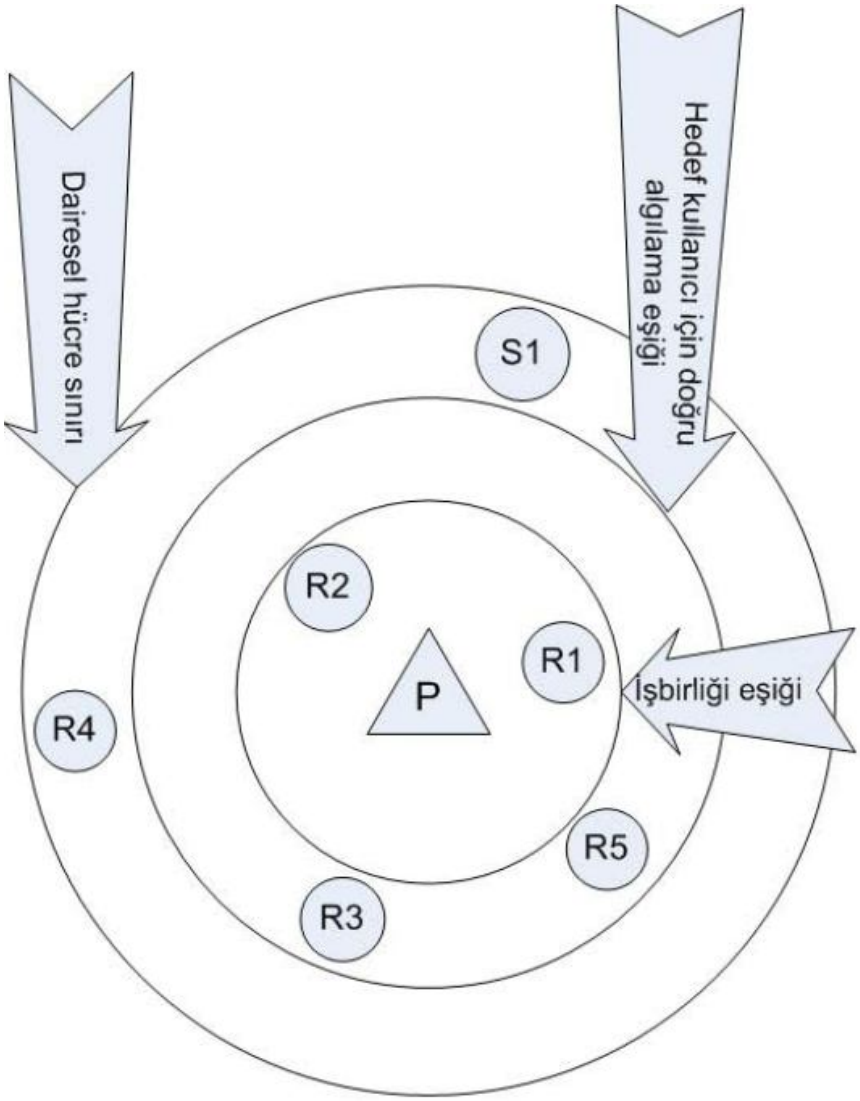
Diğer bir çalışma, veri gözlem süresi ve hesaplama karmaşıklığının fazla olduğu dönemli-durağan algılama (cyclostationary detection) yöntemi ile spektrum algılama konusunu içermektedir. Goertzel algoritması ve FFT algoritmalarının karşılaştırıldığı bu çalışmada, dönemli-durağan algılama yönteminin yüksek karmaşıklık içermesine rağmen Goertzel algoritması ile birlikte kullanılmasının etkinliği artırdığı ve tüm frekans bandı yerine ilgilenilen frekanslar üzerinden işlem yapmış olmanın karmaşıklık yükünü azalttığı belirtilmiştir (Wang vd. 2008).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Serbest Uzayda Gezgin Kullanıcılar için İşbirlikçi Spektrum Algılama Senaryosu

Kablosuz mobil haberleşmede çok çeşitli senaryolara göre modellemeler yapılabilmektedir. Buradaki senaryo sabit bir lisanslı (primary) kullanıcının iletişimini etkin olarak gerçekleştirdiği ve merkezinde yer aldığı dairesel bir hücre (cell) içerisinde yer alan lisanssız (secondary) kullanıcıların işbirliği oluşturarak lisanslı kullanıcıyı daha iyi algılamaları esasına dayanmaktadır.

Bu senaryoda tüm kullanıcıların işaretleri serbest uzayda (free space) direkt görüş hattı (LOS, line of sight) boyunca ilerlemektedir. Rasgele gezinen bir lisanssız kullanıcı için bir güç eşik seviyesi vardır ve bu güç eşik seviyesi üstünde bir alım yapıldığında (lisanslı kullanıcıdan gelen işaret için), lisanslı kullanıcının varlığı tespit edilebilmekte, bu güç eşik seviyesi altında alım yapıldığında ise lisanslı kullanıcının varlığı tespit edilememekte ve hatalı algılama yapılmaktadır. Bir lisanssız kullanıcıya diğer bir lisanssız kullanıcının röle olarak yardımcı olması için daha yüksek bir lisanslı kullanıcı işareti alım gücü eşik seviyesi gereklidir. Bu güç eşik seviyesini aşan etrafta yer alan diğer tüm lisanssız kullanıcılar, röle görevini üstlenebilmektedir.



Şekil 3.1 Sistem modeli

Bu senaryoya uygun sistem modeli Şekil 3.1'de yer almaktadır. Şekle göre dairesel bir hücre merkezinde bir lisanslı kullanıcı (P) yer almaktadır. Bu dairesel hücrenin çapı 1 km olup, lisanssız kullanıcılar (S1 ve Ri, i=1,2….) rasgele yönlere değişik hızlarda hareket etmekte ve benzetim süresince hücre içinde kalmaktadır. Gezgin kullanıcılar (hedef) için alınan güç, serbest uzay direkt görüş hattı ortamında, aşağıdaki gibidir.

$$P_{\text{alınan}} = P_{\text{lisanslı}}/d^2 \tag{3.1}$$

Burada d lisanslı kullanıcı ile hedef lisanssız kullanıcı arasındaki uzaklık, $P_{\text{lisanslı}}$ lisanslı kullanıcının iletim gücü ve $P_{\text{alınan}}$ ise lisanssız hedef kullanıcının aldığı güçtür.

(3.1)'deki formülden alınan gücün, uzaklık arttıkça uzaklığın karesi kadar, azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durumda, eşik güçleri yerine eşik uzaklığı deyimi de kullanılabilir.

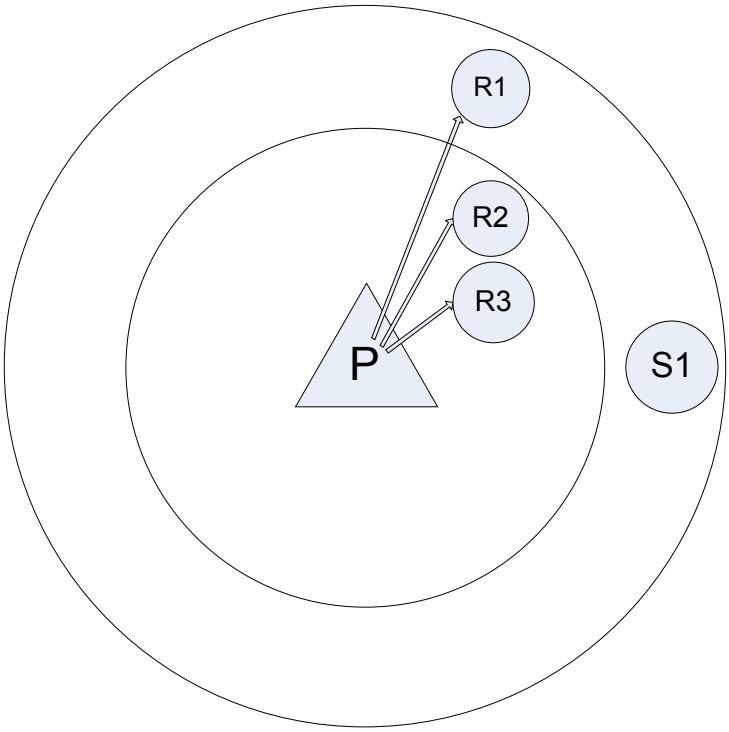
3.1.1 Kullanılan işbirlikçi spektrum algılama tekniği

Buradaki işbirlikçi spektrum algılama tekniği iki zaman aralığından oluşmaktadır. Birinci zaman aralığında, röleler, lisanslı kullanıcıdan gelen işaretin gücünü algılamaya çalışır. Eğer en az bir röle belirlenen eşik uzaklık sınırını aşmamış ise işbirliği eşik seviyesi üzerinde alım gücüne sahiptir. İkinci zaman aralığında, güç eşik sınırını aşan röle veya röleler, lisanslı kullanıcının bastığı güçte, hedef lisanssız kullanıcıya işaret gönderir. Böylelikle hem lisanslı kullanıcıdan hem de yardımcı röle veya rölelerden gelen toplam güç ile işbirlikçi hatalı algılama olasılığı (HAO) sonucuna gidilir. Gezgin kullanıcılar için önerilen işbirlikçi spektrum algılama tekniğinin birinci zaman aralığı Şekil 3.2'de, ikinci zaman aralığı ise Şekil 3.3`te gösterilmiştir.

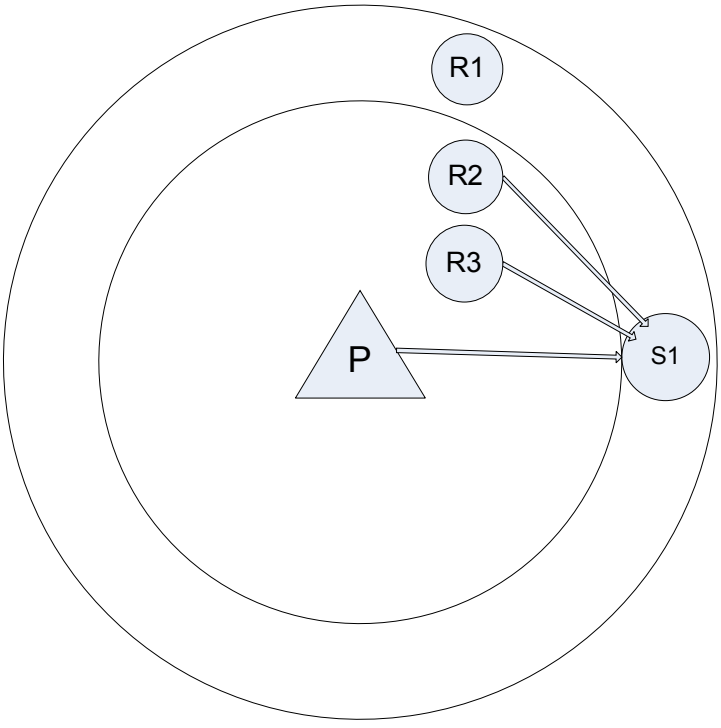
İşbirlikçi Spektrum Algılama Tekniği için alınan güç eşitlik (3.2)'deki gibi bulunabilir.

$$\mathrm{P}_{\text{isbirlikci}} = \mathrm{P}_{\text{lisansli}}/\mathrm{d}_0^2 + \sum_{i=1}^{N} \mathrm{P}_{\text{lisansli}}/\mathrm{d}_\mathrm{i}^2 \tag{3.2}$$

Burada d_0 lisanslı kullanıcı ile hedef lisanssız kullanıcı arasındaki uzaklık, $P_{\text{lisanslı}}$ lisanslı kullanıcının iletim gücü, $P_{\text{isbirlikci}}$ lisanssız hedef kullanıcının işbirliği ile aldığı toplam güç, N ortamdaki işbirliği eşiği üzerinde güç alan röle sayısı ve d_i ise yardım eden röle ile hedef lisanssız kullanıcı arasındaki uzaklıktır.



Şekil 3.2 İşbirlikçi spektrum algılama tekniği birinci zaman aralığı



Şekil 3.3 İşbirlikçi spektrum algılama tekniği ikinci zaman aralığı

Açıklanan sistem modeline uygun olarak, lisanssız kullanıcılar 1000 kez rasgele dağıtılmış ve her dağıtımda 10000 saniye boyunca rasgele yönlere hareket etmişlerdir. Elde edilen hatalı algılama olasılığı (HAO) değeri, tüm dağıtımlarda elde edilen HAO değerlerinin ortalamasıdır. Benzetim sonuçları; değişen röle sayısı, lisanssız kullanıcıların hızı, hedef lisanssız kullanıcılar için eşik uzaklığı, işbirliği sağlayacak olan lisanssız kullanıcılar için eşik uzaklığı parametrelerine göre elde edilmiştir. Bu sonuçlar eşik seviyesinin altında bir güçle alım yapma olasılığını gösterir ki, burada hatalı algılama olasılığı olarak nitelendirilmiştir. Bu hatalı algılama olasılıkları rölesiz ve işbirlikçi yapılar için çizelgelerde ayrı sütunlarda gösterilmiştir.

Çizelge 3.1'de işbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 1 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlandığı, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları yer almaktadır. Lisanssız hedef kullanıcının ve yardım eden rölenin hızı 1 m/s ve doğru algılama eşiği 500 m olduğunda, işbirliksiz algılama yapılırsa, HAO % 49,12 olmaktadır. İşbirliği yapma eşiği 250 m olarak alınıp, 1 kullanıcı ile işbirliği yapılırsa, HAO % 42,7`ye düşmektedir. İşbirliği eşiği 400 m`ye çıkarılırsa HAO % 36,53 olmaktadır. Röle ve lisanssız hedef kullanıcının hızları 3 m/s`ye çıkartılırsa, işbirliksiz HAO % 51,42`ye çıkmaktadır. İşbirliği eşiği 250 m ve 400 m için hatalı algılama olasılıkları sırasıyla % 46,77 ve % 40,9 olmaktadır. Çizelge 3.1`de de görüleceği gibi doğru algılama eşiği arttığında HAO düşmekte, röle ve lisanssız kullanıcının hızı arttığında ise HAO artmaktadır.

Çizelge 3.1 İşbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 1 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlandığı, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları

Röle Sayısı	Hız (m/s)	Doğru Algılama Eşiği	İşbirliği Eşiği	HAO (Rölesiz)	HAO (İşbirlikçi)
1	1	500m	250m	0,4912	0,4270
1	1	500m	400m	0,4912	0,3653
1	1	700m	250m	0,2977	0,2217
1	1	700m	500m	0,2977	0,1479
1	1	900m	500m	0,0964	0,0490
1	1	900m	700m	0,0964	0,0311
1	3	500m	250m	0,5142	0,4677
1	3	500m	400m	0,5142	0,4090
1	3	700m	250m	0,3092	0,2520
1	3	700m	500m	0,3092	0,1670
1	3	900m	500m	0,1068	0,0537
1	3	900m	700m	0,1068	0,0319
1	5	500m	250m	0,5642	0,5364
1	5	500m	400m	0,5642	0,4803
1	5	700m	250m	0,3397	0,3003
1	5	700m	500m	0,3397	0,2120
1	5	900m	500m	0,1166	0,0659
1	5	900m	700m	0,1166	0,0383

Çizelge 3.2'de işbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 2 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlandığı, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları yer almaktadır. Çizelge 3.1 - 3.2'deki değerlerden bazıları karşılaştırılacak olursa; hedef kullanıcının ve yardım eden rölelerin hızı 1 m/s ve doğru algılama eşiği 500 m olduğunda ve işbirliği eşiği 250 m için 1 röleli işbirliğinin HAO % 42,7 iken 2 röleli işbirliğinde HAO % 38,96`ye düşmektedir. İşbirliği eşiği 400 m olduğunda ise, 1 röleli işbirliğinin HAO % 36,53 iken 2 röleli işbirliği HAO ise % 30,69 olmaktadır. Rölelerin ve lisanssız hedef kullanıcının hızları 3 m/s`ye çıkartılırsa ve işbirliği eşiği 250 m alınırsa, 1 röleli işbirliğinde HAO % 46,77 iken 2 röleli işbirliğinde ise % 42,81 olmaktadır. Çizelge 3.1 ve 3.2`nin karşılaştırılmasından da görüleceği gibi röle sayısı 2 olduğunda HAO olasılığı azalmaktadır.

Çizelge 3.2 İşbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 2 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlandığı, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları

Röle Sayısı	Hız (m/s)	Doğru Algılama Eşiği	İşbirliği Eşiği	HAO (Rölesiz)	HAO (İşbirlikçi)
2	1	500m	250m	0,4912	0,3896
2	1	500m	400m	0,4912	0,3069
2	1	700m	250m	0,2977	0,1783
2	1	700m	500m	0,2977	0,0902
2	1	900m	500m	0,0964	0,0234
2	1	900m	700m	0,0964	0,0072
2	3	500m	250m	0,5142	0,4281
2	3	500m	400m	0,5142	0,3483
2	3	700m	250m	0,3092	0,2062
2	3	700m	500m	0,3092	0,1066
2	3	900m	500m	0,1068	0,0307
2	3	900m	700m	0,1068	0,0080
2	5	500m	250m	0,5642	0,4882
2	5	500m	400m	0,5642	0,4083
2	5	700m	250m	0,3397	0,2535
2	5	700m	500m	0,3397	0,1339
2	5	900m	500m	0,1166	0,0371
2	5	900m	700m	0,1166	0,0118

Çizelge 3.3'te ise işbirliğinin gerçekleşmediği ve 4 adet röle ile işbirliğinin gerçekleştiği, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlandığı, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları yer almaktadır. Çizelge 3.2 - 3.3'teki değerlerden bazıları karşılaştırılacak olursa; hedef

kullanıcının ve yardım eden rölelerin hızı 1 m/s ve doğru algılama eşiği 500 m olduğunda ve işbirliği eşiği 250 m için 2 röleli işbirliğinin HAO % 38,96 iken 4 röleli işbirliğinde HAO % 29,38`e düşmektedir. İşbirliği eşiği 400 m olduğunda ise, 2 röleli işbirliğinin HAO % 30,69 iken 4 röleli işbirliği HAO ise % 19,28 olmaktadır. Rölelerin ve lisanssız hedef kullanıcının hızları 3 m/s`ye çıkartılırsa ve işbirliği eşiği 250 m alınırsa, 2 röleli işbirliğinde HAO % 42,81 iken 4 röleli işbirliğinde ise % 35,21 olmaktadır. Çizelge 3.2 ve 3.3'ün karşılaştırılmasından da anlaşılacağı üzere röle sayısı 4'e çıktığında HAO olasılığı daha da azalmaktadır.

Çizelge 3.3 İşbirliğinin yapılmadığı (rölesiz) ve 4 adet röle ile işbirliğinin yapıldığı, röle ve hedef lisanssız kullanıcılar için hızların 1, 3 ve 5 m/s'ye ayarlandığı, değişik uzaklık eşik seviyelerine göre hatalı algılama olasılıkları

Röle Sayısı	Hız (m/s)	Doğru Algılama Eşiği	İşbirliği Eşiği	HAO (Rölesiz)	HAO (İşbirlikçi)
4	1	500m	250m	0,4912	0,2938
4	1	500m	400m	0,4912	0,1928
4	1	700m	250m	0,2977	0,1076
4	1	700m	500m	0,2977	0,0252
4	1	900m	500m	0,0964	0,0054
4	1	900m	700m	0,0964	0,0004
4	3	500m	250m	0,5142	0,3521
4	3	500m	400m	0,5142	0,2239
4	3	700m	250m	0,3092	0,1336
4	3	700m	500m	0,3092	0,0397
4	3	900m	500m	0,1068	0,0096
4	3	900m	700m	0,1068	0,0010
4	5	500m	250m	0,5642	0,4278
4	5	500m	400m	0,5642	0,2925
4	5	700m	250m	0,3397	0,1797
4	5	700m	500m	0,3397	0,0574
4	5	900m	500m	0,1166	0,0152
4	5	900m	700m	0,1166	0,0031

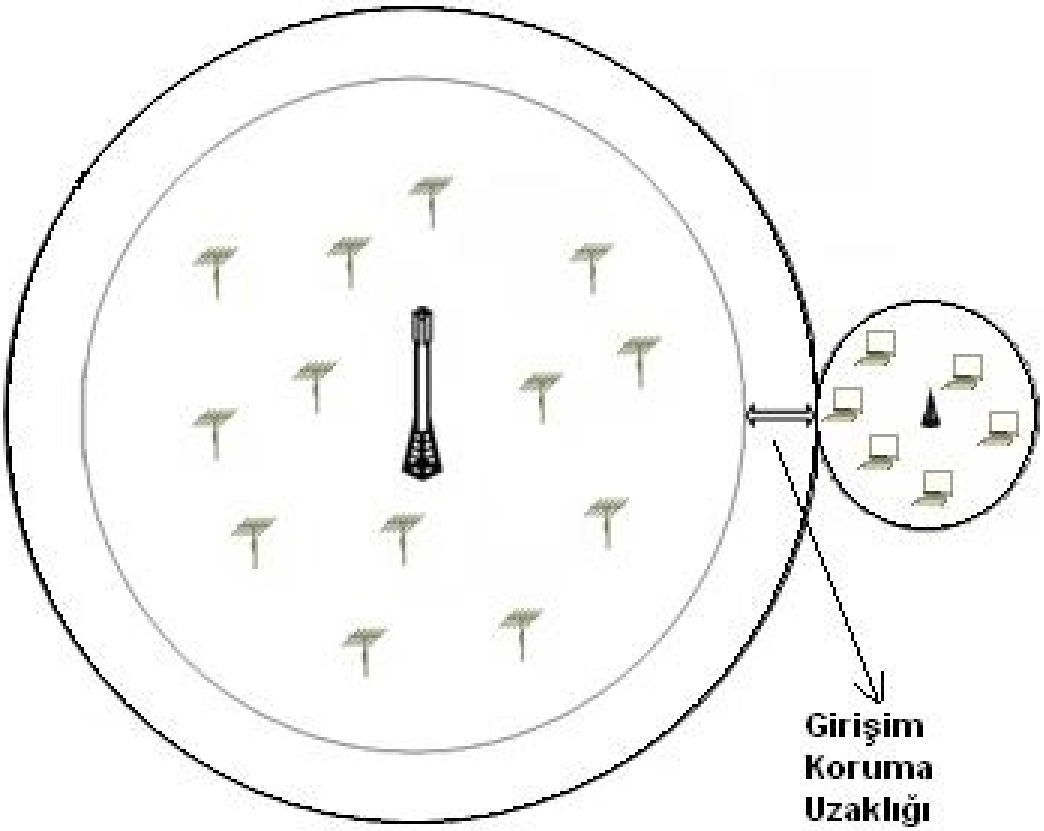
3.2 IEEE 802.22 Standardında İşbirlikçi Spektrum Algılama Senaryosu

Geliştirilmekte olan IEEE 802.22 WRAN standardı için ITU-R P.1546-1'deki standarda uygunluk referans noktası seçilerek hesaplamalar yapılmıştır (Shellhammer vd. 2006). Tez çalışmamızda da benzer şekilde ITU-R P.1546-1 standardı referans noktası

seçilmiş, Shellhammer'ın (2008) çalışmasındaki hesaplamalar ışığında verilen minimum uzaklıklar dikkate alınarak bir IEEE 802.22 WRAN sistem modeli çıkarılmıştır. Bu sistem modeli parametreleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 Sistem modeli parametreleri

Parametreler	**Değeri**
TV verici çıkış gücü	90 dBm
Kullanıcı çıkış gücü	4 W
TV verici anten yüksekliği	200 m
Baz istasyonu anten yüksekliği	10 m
Kullanıcı anten yüksekliği	1,5 m
Sayısal TV iletim bant genişliği	6 MHz
Sayısal TV iletim frekansı	615 MHz
Girişim koruma uzaklığı	23 km
WRAN hücresinin yarıçapı	23 km
TV vericisinin yarıçapı	134,2 km



Şekil 3.4 Geliştirilen WRAN sistem modeli

Bu sistem modeline göre Şekil 3.4'te büyük bir TV yayın hücresi ve daha küçük bir IEEE 802.22 WRAN hücresi bulunmaktadır. TV yayın hücresi merkezinde bir TV vericisi ve aynı hücre içinde rasgele dağılmış TV alcıları bulunmaktadır. IEEE 802.22 WRAN hücresinin merkezinde bir baz istasyonu ve aynı hücre içinde rasgele dağılmış kullanıcılar (CPE) bulunmaktadır. IEEE 802.22 WRAN hücresinde kullanıcılar, sınır noktaları dahil hücre içinde rahatça dağılabilsinler diye TV yayın hücresi ile IEEE 802.22 WRAN hücresi arasında büyük bir girişim koruma uzaklığı (23 km) bırakılmıştır. Bu sayede iki hücrenin birbirine en yakın noktalarında kullanıcılarının olması durumunda bile girişim etkisi yeterince düşürülmüş olmaktadır.

3.2.1 Yol kaybı modeli

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 Matsui'nin (2008) çalışmasında da geçtiği gibi uygunluk açısından tercih ediliyor olması, tez çalışmamızın bu aşamasında da Okumura-Hata Modelinin yol kaybının hesaplanmasında kullanılmasına neden olmuştur.

Okumura-Hata modeli, taşıyıcı frekansın $150 \leq f_c \leq 1500$ (MHz), baz istasyonu anten yüksekliğinin $30 \leq h_b \leq 200$ (m), kullanıcıların anten yüksekliklerinin $1 \leq h_m \leq 10$ (m) ve baz istasyonu ile kullanıcılar arası uzaklığın $1 \leq d \leq 20$ (km) olduğu durumlar için kullanılan bir modeldir. Çalışmamızda, bu modele mümkün olduğu kadar yakın olması için TV vericisinin anten yüksekliği 200 m, kullanıcıların anten yüksekliği 1,5 m ve baz istasyonunun anten yüksekliği 10 m alınmıştır. TV vericisi, baz istasyonu ve kullanıcılarda yön-bağımsız (isotropic) antenler olduğu varsayılarak, banliyölerdeki (sub-urban) yol kaybı (Lp) aşağıdaki gibidir.

$$Lp(\text{dB}) = A + B\log_{10}(d) - C \tag{3.3}$$

Yukarıdaki denklemdeki A, B ve C parametreleri ile A parametresindeki $a(h_m)$ parametresi açılımları aşağıdadır.

$$A = 69{,}55 + 26.16\log_{10}(f_c) - 13{,}82\log_{10}(h_b) - a(h_m),$$

$$B = 44.9 - 6{,}55\log_{10}(h_b),$$

$$C = 5{,}4 + 2[\log_{10}(f_c/28)]^2 \text{ ve}$$

$$a(h_m) = (1{,}1\log_{10}(f_c)-0{,}7)\, h_m - (1{,}56\log_{10}(f_c)-0{,}8) \tag{3.4}$$

Denklemde TV vericisi iletim yaparken h_b, TV vericisinin anten yüksekliği ve h_m ise kullanıcıların ve baz istasyonunun anten yüksekliği olarak Çizelge 3.4'te verildiği gibi alınmıştır. Zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme sağlanırken ve kullanıcılar iletim yaparken h_b, kullanıcıların anten yükseklikleri ve h_m ise baz istasyonunun anten yüksekliği olarak Çizelge 3.5'te verildiği gibi alınmıştır.

3.2.2 Gölge sönümlenmesi, Rayleigh sönümlenmesi ve çoklu-yol modelleri

Gölge sönümlenmesinin varyansı 5.5 dB olarak kabul edilmiş (ITU-R P.1546-1) ve kanalın çoklu-yol (multipath) profilleri (IEEE 802.22-05/0055R7 2008)`ten alınmıştır. 6 MHz'lik sayısal televizyon yayınında 6 adet yol bulunmaktadır ve çoklu-yol profilleri Çizelge 3.5'te gösterilmiştir. Her profilde "0" değerleri içeren sütun referans alınan yolu ve sinyal bileşenini ifade etmektedir. Aşan gecikme, bu referans alınan sinyal bileşenine göre zaman gecikmesini ifade etmektedir. Bağıl genlik, referans alınan sinyal bileşenine göre genlik farkını (oranını) vermektedir. Doppler frekansı ise referans alınan sinyal bileşenine göre frekans kaymasını vermektedir. Geliştirilen modelde enerji algılama yapıldığından bağıl genlikler dikkate alınmıştır.

Çizelge 3.5 Çoklu-yol profilleri

Profil A	Yol 1	Yol 2	Yol 3	Yol 4	Yol 5	Yol 6
Aşan gecikme	0	3 µs	8 µs	11 µs	13 µs	21 µs
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 µs	0	2 µs	4 µs	7 µs	11 µs
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 µs	0	5 µs	16 µs	24 µs	33 µs
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 µs	0	5 µs	16 µs	22 µs	0 - 60 µs
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 yayılma modelinde, taşıyıcının girişim ve gürültü toplamına oranı (T/I, C/I); her alıcı için yol kaybı, gölge sönümlenmesi, Rayleigh sönümlenmesi ve kablosuz ortamda bulunan 6 çoklu-yol dikkate alınarak ve alıcıda büyükçe oran birleştirme (maximal ratio combining) yapılarak hesaplanmaktadır. Detaylı T/I hesaplaması aşağıda verilmiştir.

$$(T/I) = \sum_{i=1}^{6} (\mathrm{T/I})_{\mathrm{i}} \tag{3.5}$$

Burada $(T/I)_i$, i. yol için taşıyıcının girişim ve gürültüye oranını göstermektedir ve aşağıdaki gibi formüle edilebilinir.

$$(T/I)_j = (ASG)_j - \left(PN + \sum_{i=1, i\neq j}^{6} (\mathrm{ASG})_{\mathrm{i}} \right) \tag{3.6}$$

Yukarıdaki eşitlikte $(ASG)_j$ *j.* yoldan Alınan Sinyalin Gücü ve *PN* ise gürültünün gücünü göstermektedir. Gürültünün gücü (PN), 6 MHz lik alıcı bant genişliği için ve alıcının 10 dB'lik gürültü biçimine (noise figure) sahip olması durumunda aşağıdaki şekilde hesaplanabilir (Shellhammer vd. 2006).

$$PN = -174 + 10\log_{10}(6\text{x}10^6) + 10 = -96{,}2185 \text{ dBm} \tag{3.7}$$

j. yoldan Alınan Sinyalin Gücü aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$(ASG)_j = YP_j - LP_j - GS - URF \tag{3.8}$$

burada YP_j *j.* yoldaki iletilen sinyalin gücü, *GS* gölge sönümlemesi ve *URF* ise ilintisiz (uncorralated) Rayleigh sönümlemesini göstermektedir.

3.2.3 İşbirliği modelleri ve kullanılan işbirlikçi spektrum algılama yöntemi

İşbirliksiz model: TV vericisinden baz istasyonuna gelen sinyalin T/I değerine göre karar verilir.

İşbirlikçi çeşitleme modeli: Baz istasyonuna birinci zaman aralığında gelen sinyal ile -5 dB'den daha fazla T/I değerine sahip kullanıcıların gönderdikleri sinyaller toplanır.

Zaman çeşitlemesi modeli: Baz istasyonu birinci ve ikinci zaman aralığında TV vericisinden gelen ve farklı sönümlemelere uğramış sinyalleri toplar. İki farklı zaman aralığının her birinde ayrı ayrı karar verilmeyip, iki farklı zaman aralığında elde edilen sinyallerin güçlerinin toplamı ile oluşan toplam değere bakılarak karar verilen modeldir.

Zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme modeli: Baz istasyonuna birinci ve ikinci zaman aralıklarında TV vericisinden gelen sinyallerle, eşiği geçen terminallerden gelen sinyaller toplanır.

Shellhammer'ın (2008) çalışmasında gürültü belirsizliği olmadığı durumda, T/I değerinin -5 dB ve üstü değerlerinde hatalı algılama olasılığının (mis-detection probability) sıfıra yaklaştığı gösterilmiştir. Çalışmamızda, T/I değerinin -5 dB ve üstü olması durumunda doğru algılama yapıldığı kabul edilmiştir. Km^2 başına 2 kullanıcı düştüğü kabul edilmiş (Kim vd. 2008) ve bu kullanıcıların WRAN hücresinde düzgün dağıldıkları varsayılmıştır.

Açıklanan sistem modeline uygun her profil için 10 milyon benzetim yapılarak Çizelge 3.6 elde edilmiştir.

Çizelge 3.6 Profillere göre hatalı algılama olasılıkları

	Profil A	**Profil B**	**Profil C**	**Profil D**
İşbirliksiz	6,99E-02	2,66E-02	6,78E-02	5,08E-02
İşbirlikçi çeşitleme	4,10E-04	0,0017	8,20E-03	0
Zaman çeşitlemesi	0,002	3,40E-04	8,50E-04	9,90E-04
Zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme	0	0	3,00E-05	0

Bir sonraki aşama ise mevcut senaryoda eşik değerlerini değiştirme çalışması olmuştur. Shellhammer'ın (2008) çalışmasında gürültü belirsizliği olmadığı durumda, T/I değerinin -10 dB olması durumunda hatalı algılama olasılığının (Pmd) yaklaşık olarak 0,01, – 11,25 dB olması durumunda hatalı algılama olasılığının (Pmd) yaklaşık olarak 0,1 ve -15 dB olması durumunda hatalı algılama olasılığının (Pmd) yaklaşık olarak 0,55 civarında olduğu görülmektedir (Çizelge 3.7).

Çizelge 3.7 Profillere ve farklı röle eşiklerine göre hatalı algılama olasılıkları

Röle Eşiği = -5 dB	**Profil A**	**Profil B**	**Profil C**	**Profil D**
İşbirliksiz	0,0726	0,028	0,0706	0,0521
İşbirlikçi çeşitleme	0,0712	0,0276	0,0689	0,0498
Zaman çeşitlemesi	0,0022	3,311820E-04	0,001	0,012
Zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme	0,0021	3,07270E-04	9,89E-04	0,0011

Röle Eşiği = -10 dB	**Profil A**	**Profil B**	**Profil C**	**Profil D**
İşbirliksiz	0,0724	0,0285	0,0707	0,0522
İşbirlikçi çeşitleme	0,059	0,0233	0,0549	0,0243
Zaman çeşitlemesi	0,0022	3,30000E-04	0,001	0,0012
Zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme	0,0017	2,38180E-04	6,90E-04	4,10E-04

Çizelge 3.7 Profillere ve farklı röle eşiklerine göre hatalı algılama olasılıkları (devam)

Röle Eşiği = -11,25 dB	**Profil A**	**Profil B**	**Profil C**	**Profil D**
İşbirliksiz	0,0723	0,0282	0,0708	0,052
İşbirlikçi çeşitleme	0,0497	0,0201	0,0413	0,0131
Zaman çeşitlemesi	0,0022	3,13330E-04	0,001	0,0012
Zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme	0,0013	1,95240E-04	5,06E-04	2,14E-04

Röle Eşiği = -15 dB	**Profil A**	**Profil B**	**Profil C**	**Profil D**
İşbirliksiz	0,0723	0,0282	0,0708	0,052
İşbirlikçi çeşitleme	0,0172	0,0057	0,0064	0,0026
Zaman çeşitlemesi	0,0022	3,16850E-04	0,001	0,0012
Zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme	3,23370E-04	4,07700E-05	5,23E-05	1,60E-05

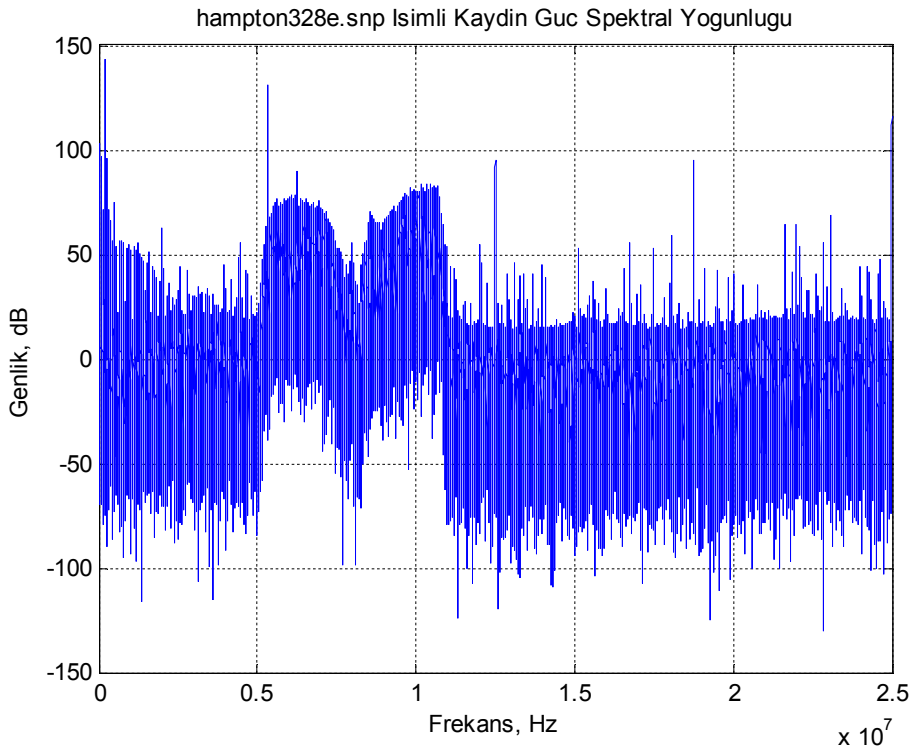
3.3 Goertzel Algoritması Yardımı ile Pilot Ton Algılama

3.3.1 Pilot ton aracılığıyla orijinal DTV sinyallerinin algılanması

Orijinal DTV sinyallerini kullanmak amacı ile tez çalışmamızın bu kısmında, Cornell Üniversitesi BERG (Blind Equalization Research Group) proje BARD (Broadband Adaptive Receiver Design) grubu, NxtWave Communications şirketi, Applied Signal Technology şirketi ve Avustralya Ulusal Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliği grubunun Amerika Birleşik Devletlerinin Philadelphia şehrinde yapılan DTV yayınlarından yararlanarak, ortaklaşa katılım ile almış oldukları orijinal karasal DTV

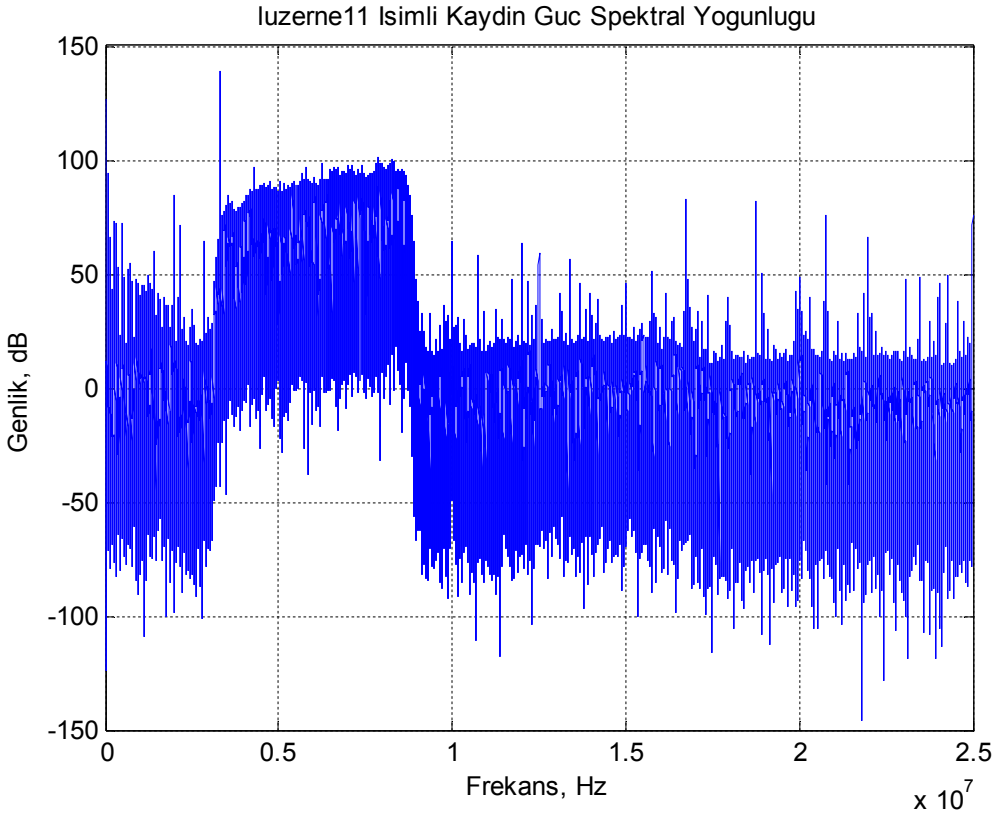
alan ölçümleri kullanılmıştır (Garrison vd. 2001). Kullanılan bu ölçümlerin yönlü (yagi) ve omnidireksiyonel (omni directional) antenler kullanılarak, şehirsel, kenar mahalle ve kırsal bölgelerde 2 sn süreye kadar yapıldığı belirtilmiştir (http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/dtv.html, 2011). Ayrıca bu ölçümlerle elde edilen verilerin 50 MHz'le örneklenerek ve ara frekansa çekilerek kaydedildiği de belirtilmiştir.

Şekil 3.5'te, orijinal DTV sinyali kanalda ilerlerken sinyal spektrumunun ortadan çentilerek gürültü tabanına yaklaştığı hampton328.snp isimli kayıt mevcuttur (Garrison vd. 2001). Bu kaydın, 24.03.2000 tarihinde, saat 14:20'de, verici frekansı 545 MHz ve gücü 800kW olduğu zamanda, bir Hampton Inn oteli odasında, havanın açık ve güneşli olduğu bir günde, yönlü (yagi) anten kullanılarak yapıldığı belirtilmiştir. Kayda bakıldığında, pilot sinyalinin bandın düşük frekans kenarında biraz net olarak (moderate to strong) gözüktüğü anlaşılmaktadır (http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/hampton328e.html, 2011).



Şekil 3.5 hampton328.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu

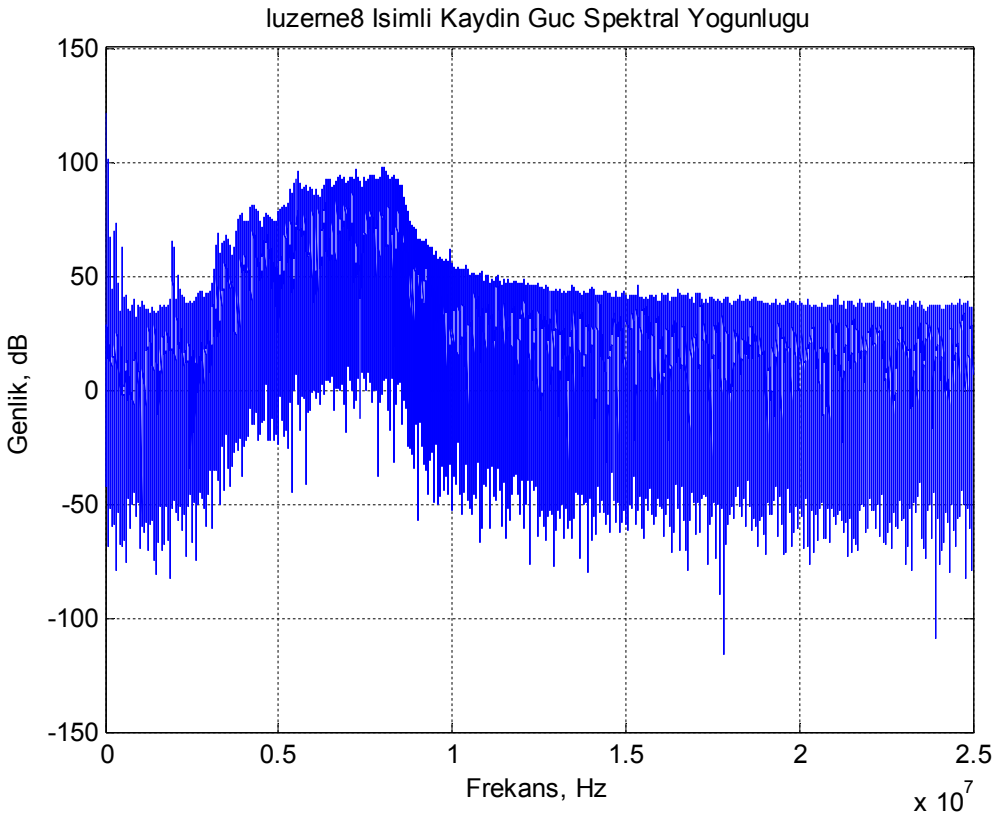
Şekil 3.6'da, orijinal DTV sinyali kanalda ilerlerken sinyal spektrumu pek bozulmaya uğramamış luzerne11.snp isimli kayıt mevcuttur (http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/luzerne11.html, 2011). Bu kaydın, 25.03.2000 ve 31.03.2000 tarihlerinde, verici frekansı 545 MHz ve gücü 800kW olduğu zamanda, Philadelphia'da bulunan Luzerne ve Whittacker caddelerinin kesişimi olan bölgede, havanın rüzgarlı olması nedeni ile anten titreşiminin olduğu bir günde, yönlü (yagi) anten kullanılarak yapıldığı belirtilmiştir. Kayda bakıldığında, pilot sinyalinin bandın düşük frekans kenarında net olarak gözüktüğü anlaşılmaktadır.



Şekil 3.6 luzerne11.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu

Şekil 3.7'de, orijinal DTV sinyali kanalda ilerlerken sinyal spektrumunun bandın düşük frekans kenarında gürültü tabanına yaklaştığı luzerne8.snp isimli kayıt mevcuttur (Garrison vd. 2001). Bu kaydın, 25.03.2000 ve 31.03.2000 tarihlerinde, verici frekansı 545 MHz ve gücü 800kW olduğu zamanda, Philadelphia'da bulunan Luzerne ve

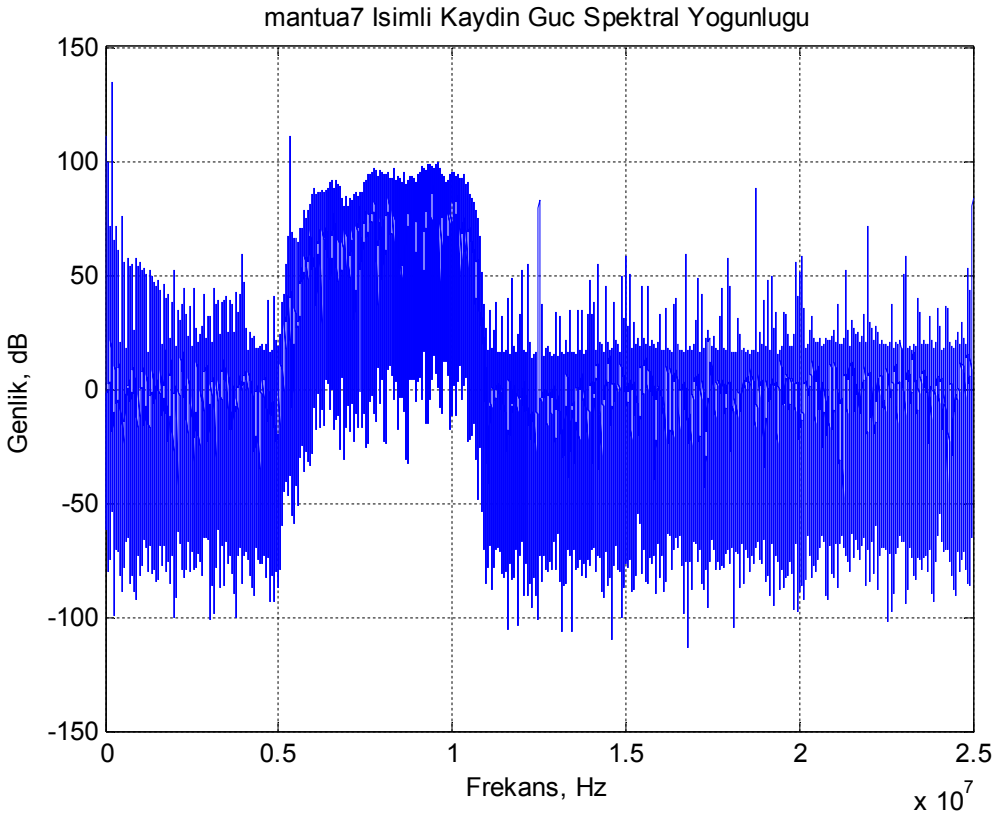
Whittacker caddelerinin kesişimi olan bölgede, havanın rüzgarlı olması nedeni ile anten titreşiminin olduğu bir günde, yönlü (yagi) anten kullanılarak yapıldığı belirtilmiştir. Anten yönünün de luzerne11.snp isimli kayıttaki yönün yaklaşık olarak zıttı yönünde olduğu belirtilmiştir. Kayda bakıldığında, pilot sinyali ciddi anlamda zayıflamış (weak) olarak gözükmektedir (http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/luzerne8.html, 2011).



Şekil 3.7 luzerne8.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu

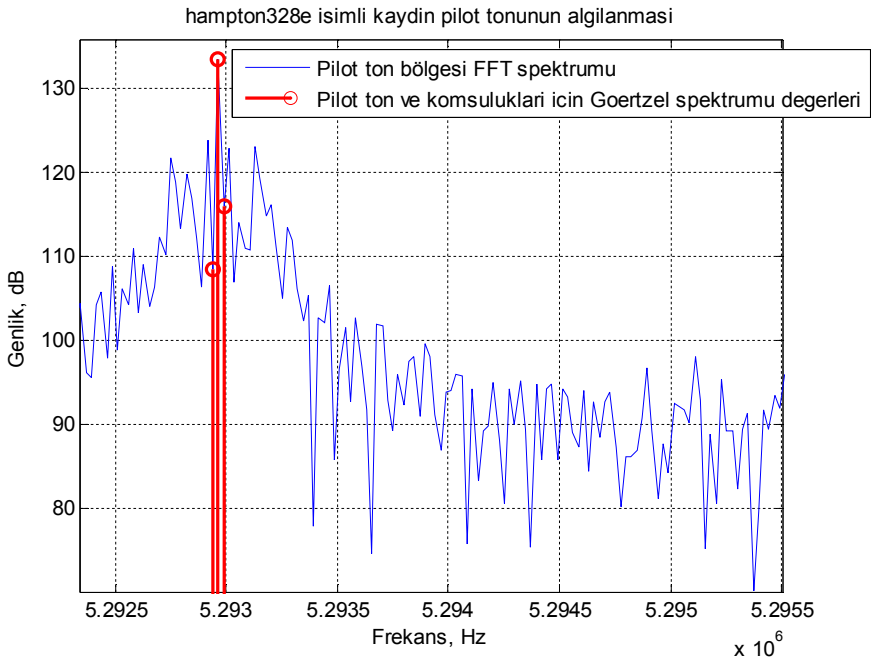
Şekil 3.8'de, Luzerne8'de olduğu gibi orijinal DTV sinyali kanalda ilerlerken sinyal spektrumunun bandın düşük frekans kenarında gürültü tabanına yaklaştığı mantua7.snp isimli kayıt mevcuttur (Garrison vd. 2001). Bu kaydın, Philadelphia şehir merkezindeki bir verici sinyali alınarak, 25.03.2000 ve 31.03.2000 tarihlerinde, Philadelphia'da bulunan Mantua caddesi kenarında, havanın güneşli/rüzgarlı olması nedeni ile anten titreşiminin olduğu bir günde, yönlü (yagi) anten kullanılarak yapıldığı belirtilmiştir.

Kayda bakıldığında, pilot sinyalinin orta halli (moderate) seviyede olduğu gözükmektedir (http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/mantua7.html, 2011).

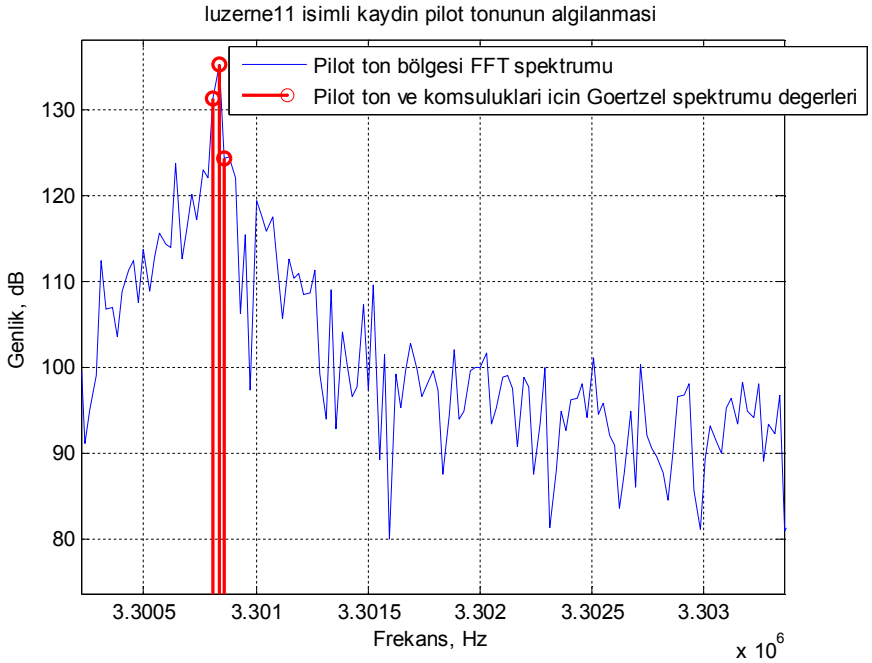


Şekil 3.8 mantua7.snp isimli DTV yayın kaydının güç spektral yoğunluğu

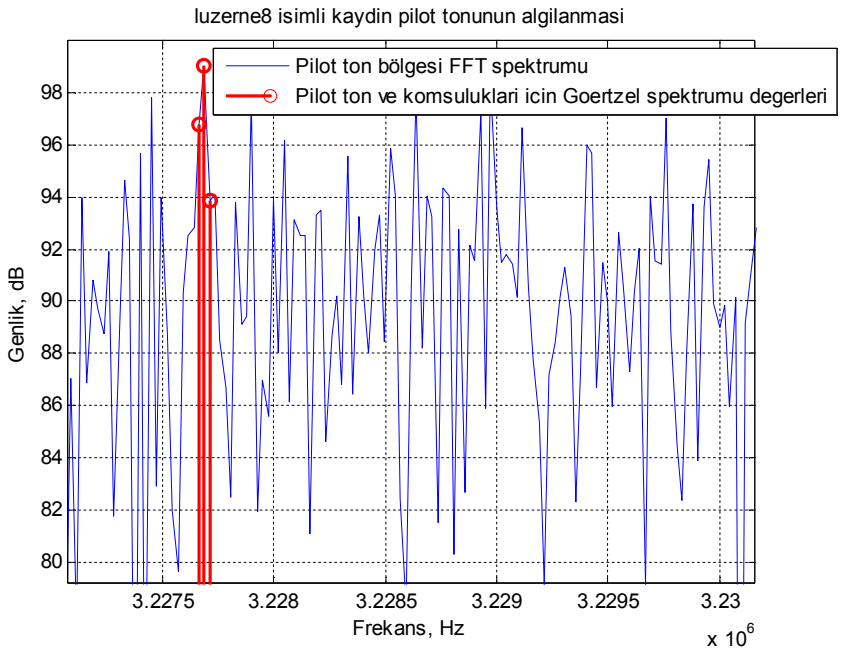
Yukarıda orijinal kayıtları gösterilen ve çeşitli karasal bozucu etkilere maruz kalmış DTV alıcı sinyalleri Goertzel algoritmasından geçirilerek pilot tonlarının elde edilişi sırası ile Şekil 3.9 - 3.12'de gösterilmiştir. Genliği en yüksek değer olan pilot ton ve pilot tonun sağ ve sol komşuları Goertzel algoritması ile elde edilmiştir. Tüm sinyallerin geniş bant frekans bölgeleri için FFT grafikleri ile birlikte pilot ton ve pilot tonun sağ ve sol komşuları Goertzel genlik değerleri birlikte verilmiştir.



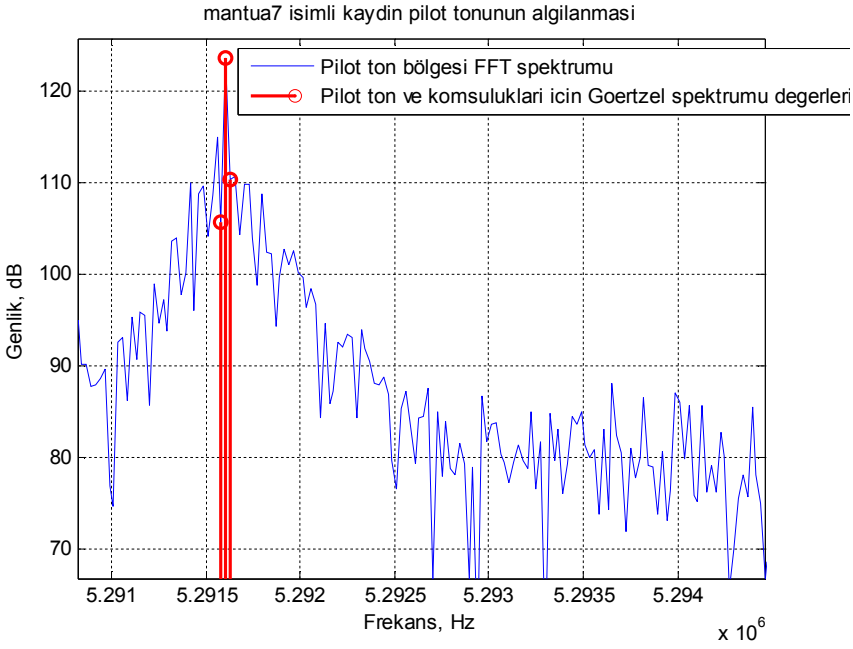
Şekil 3.9 hampton328.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması



Şekil 3.10 luzerne11.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması



Şekil 3.11 luzerne8.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması



Şekil 3.12 mantua7.snp isimli DTV yayın kaydının Goertzel algoritmasıyla pilot tonunun algılanması

3.3.2 Goertzel algoritması yardımı ile enerji verimi yüksek işbirlikçi spektrum algılama

Bu çalışmada, işbirlikçi spektrum algılama ile DTV sinyallerinin etkin olarak algılanmasında, işbirliği sağlayan birimlerin hepsinde FFT 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.

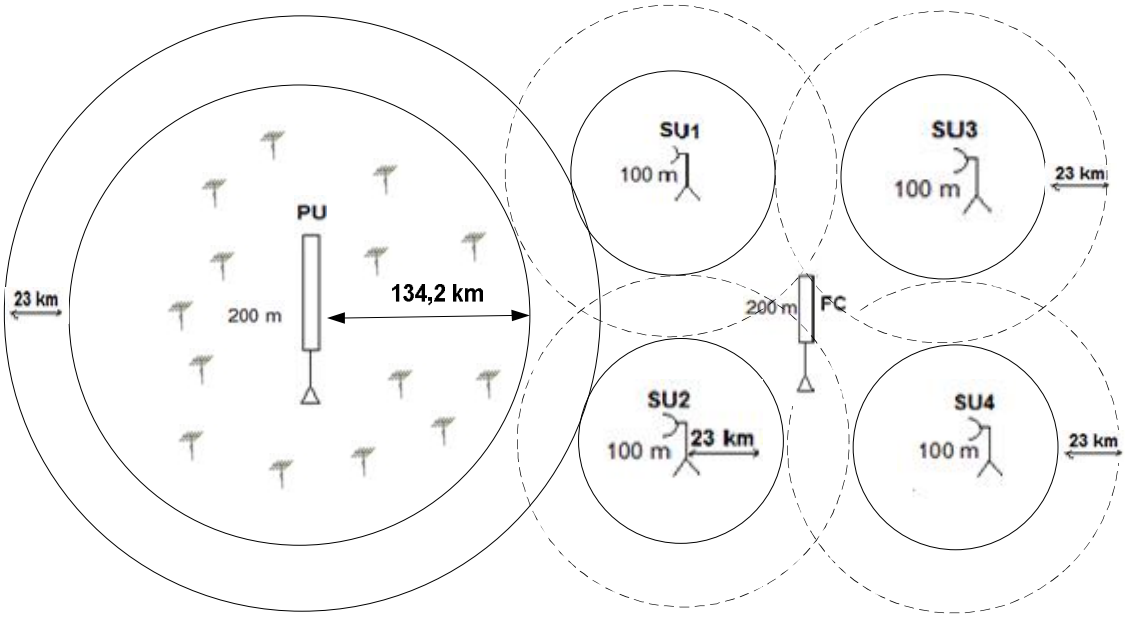
3.3.2.1 İşbirlikçi DTV spektrum algılama sistem modeli

Geliştirilmekte olan IEEE 802.22 WRAN standardı için ITU-R P.1546-1'deki standarda uygunluk referans noktası seçilerek hesaplamalar yapılmıştır (Shellhammer vd. 2006). Tez çalışmamızda da benzer şekilde ITU-R P.1546-1 standardı referans seçilmiş, Shellhammer'ın (2006) çalışmasındakine uygun olacak şekilde verilen minimum uzaklıklar dikkate alınarak bir sistem modeli çıkarılmıştır. Bu sistem modeli parametreleri Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8 Sistem modeli parametreleri

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 bant genişliği	6 MHz
Girişim koruma uzaklığı	>=23 km
WRAN hücre yarıçapı	23 km
TV vericisinin yarıçapı	134,2 km

Bu sistem modeline göre Şekil 3.13'te büyük bir TV yayın hücresi ve işbirliği oluşturan daha küçük IEEE 802.22 WRAN hücreleri ve bir karar merkezi (FC) bulunmaktadır. TV yayın hücresi merkezinde PU olarak adlandırılan bir TV vericisi ve aynı hücre içinde rasgele dağılmış TV alıcıları bulunmaktadır. IEEE 802.22 WRAN hücrelerinin merkezinde SU olarak adlandırılan ve işbirliği elemanı olan birer baz istasyonu bulunmaktadır. IEEE 802.22 WRAN hücrelerinde kullanıcılar, sınır noktaları dahil hücre içinde rahatça dağılabilsinler diye TV yayın hücresi ile IEEE 802.22 WRAN hücreleri ve IEEE 802.22 WRAN hücreleri aralarında büyük bir girişim koruma uzaklığı (en az 23 km) bırakılmıştır. Bu sayede herhangi iki hücrenin birbirine en yakın noktalarında kullanıcılarının olması durumunda bile girişim etkisi yeterince düşürülmüş olmaktadır.



Şekil 3.13 Sistem modeli

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 Matsui'nin (2008) çalışmasında da geçtiği gibi uygunluk açısından tercih edilmiş olması, tez çalışmamızın bu aşamasında da

Okumura-Hata Modelinin yol kaybının hesaplanmasında kullanılmasına neden olmuştur.

Gölge sönümlenmesinin varyansı 5.5 dB olarak kabul edilmiş (ITU-R P.1546-1) ve kanalın çoklu-yol (multipath) profili (IEEE 802.22-05/0055R7 2008)`den alınmıştır. 6 MHz'lik sayısal televizyon yayınında 6 adet yol bulunmaktadır ve kullanılan çoklu-yol profili (Profil B) Çizelge 3.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 3.9 Çoklu-yol profil B

Profil B	Yol 1	Yol 2	Yol 3	Yol 4	Yol 5	Yol 6
Aşan gecikme	-3 µs	0	2 µs	4 µs	7 µs	11 µs
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

Bu çalışmada kanal modeli Profil B (IEEE 802.22-07/0185r1 2007)'den yararlanarak gerçeklenmiştir. Çok yol etkisi ile sönümlenen sinyale beyaz gauss gürültüsü (AWGN – Additive White Gaussian Noise) eklenerek algılanacak sinyal elde edilmiştir.

3.3.2.2 Goertzel algoritması kullanarak darbant işbirlikçi DTV pilot ton algılama

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.

$$S_x(f) = \frac{1}{N}\left|\sum_{n=0}^{N-1} x(n)\exp(-j2\pi nf)\right|^2 \tag{3.9}$$

k = 0,1,…..,N-1

Periodogram örnekleri, f_k = k / N kullanılarak FFT ile hesaplanabilmektedir (So vd. 1999). Bizim çalışmamızda periodogram benzeri hesap Goertzel algoritması kullanılarak yapılmıştır.

DFT, 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 kullanılanıdır. DTMF tonlarının algılanması, FSK demodulasyonu gibi bazı durumlarda da daha az sayıda DFT frekans örneğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gibi durumlarda hesaplama karmaşıklığını daha da azaltan Goertzel algoritması kullanılabilmektedir (Goertzel 1958). Goertzel algoritmasında N nokta giriş sinyali için L nokta spektral değerler yeterli ise, hesap yükü *N x L* ile orantılıdır. FFT hesaplamasında ise hesap yükü $N(log_2N)$ ile orantılıdır. Oransal olarak $L < log_2N$ olduğunda, Goertzel algoritması FFT'ye karşı ciddi anlamda daha az hesap yükü ile daha az enerji harcatarak enerji verimliliği sağlanmasına neden olmaktadır (Wang vd. 2008).

Goertzel algoritması ile transfer fonksiyonu aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$H(Z) = \frac{Y(Z)}{X(Z)} = \frac{1 - W_N^k z^{-1}}{1 - (2\cos(\frac{2\pi k}{N})z^{-1} - z^{-2})} \tag{3.10}$$

Burada $W_N^k = e^{-j(\frac{2\pi k}{N})}$, k = f_{tone} N / f_s ve f_{tone} ise algılanması istenen sinyalin frekansıdır. f_s örnekleme frekansı ve N örnek sayısıdır. Sinyalin faz bilgisi

gerekmeksizin enerjisine ihtiyaç duyulduğunda Goertzel algoritması ile enerji hesabı önceki giriş değerlerinden de yararlanarak aşağıdaki gibidir (Zhang vd. 2008).

$$\left|X_g(k)\right|^2 = v_k^2(N-1) + v_k^2(N-2)$$

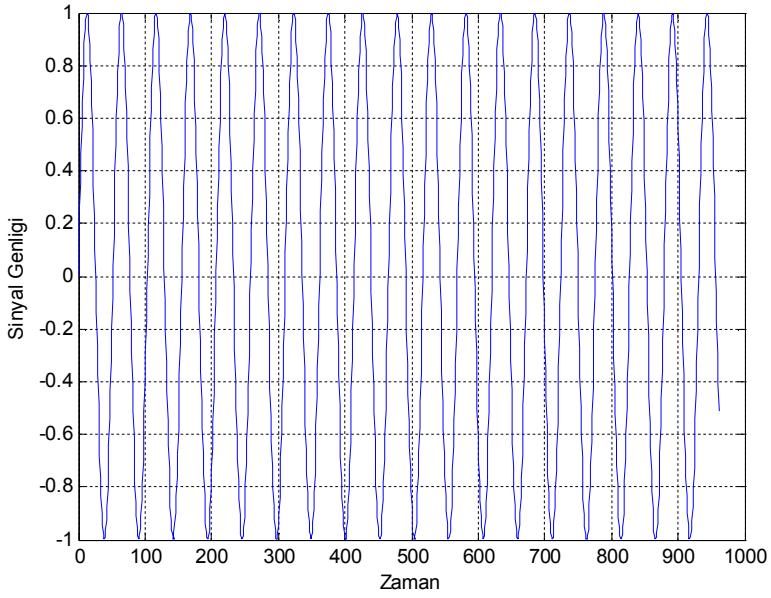
$$- 2\cos(2\pi f_{tone} / f_s) * v_k(N-1)v_k(N-2) \quad (3.11)$$

Goertzel algoritması ile periodogram benzeri hesap eşitlik 3.11'den de yararlanarak aşağıdaki gibi olacaktır.

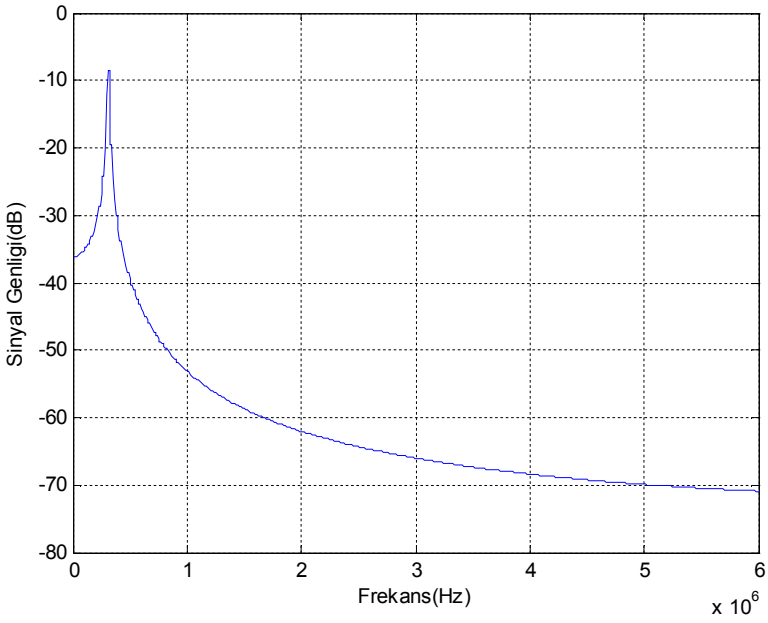
$$S_x(f) = \frac{1}{N}\left|X_g(k)\right|^2 \quad (3.12)$$

DFT hesaplaması (FFT) yöntemi ile alıcıya ulaşmış 6 MHz bant genişliğindeki DTV sinyali için frekans bölgesi spektral yoğunluğu çıkarılabilmektedir. Fakat sadece ilgilenilen DTV pilot sinyali için FFT ile fazla hesaplamaya gerek olmamakta ve Goertzel Algoritması ile sadece DTV pilot frekansı (Zheng vd.2010) için hesaplama yaptırılarak ve pilot sinyali süzülerek algılama yapılabilmekte ve enerji tasarrufu sağlanabilmektedir (Kulac vd. 2011) ve (Eksim vd. 2011). 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 3.14 ve 3.15'te DTV vericisinden çıkan 6 MHz bant genişliğindeki DTV sinyalinden süzülmüş 309440,6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali yer almaktadır.

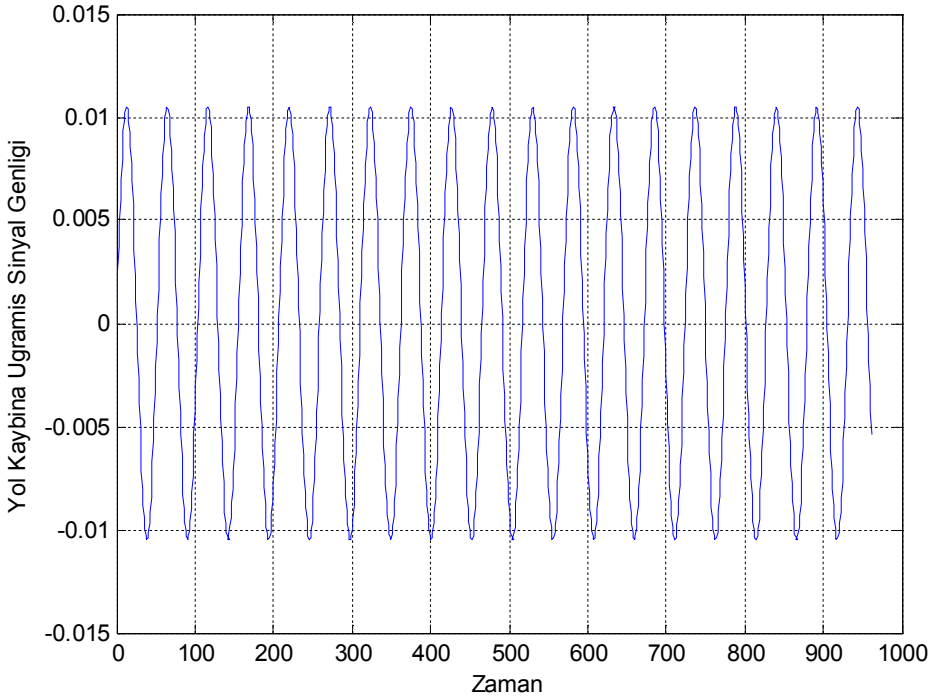


Şekil 3.14 DTV vericisinden çıkan 6 MHz bant genişliğindeki DTV sinyalinden süzülmüş 309440,6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali

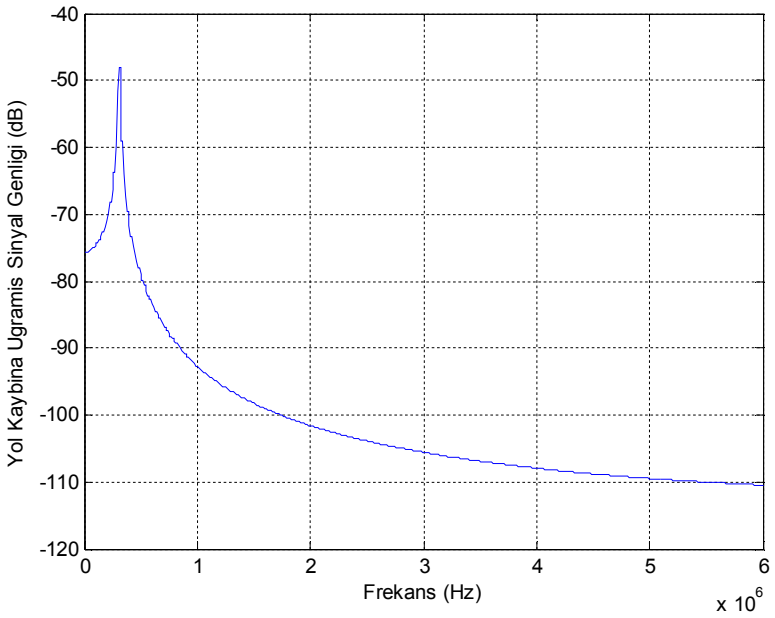


Şekil 3.15 DTV vericisinden çıkan 6 MHz bant genişliğindeki DTV sinyalinden süzülmüş 309440,6 Hz frekansındaki sinusoidal pilot sinyali Goertzel spektrumu

Şekil 3.16 ve 3.17'de çıkış sinyalinin sistem modelinde anlatıldığı şekilde yol kaybına uğramış hali yer almaktadır.

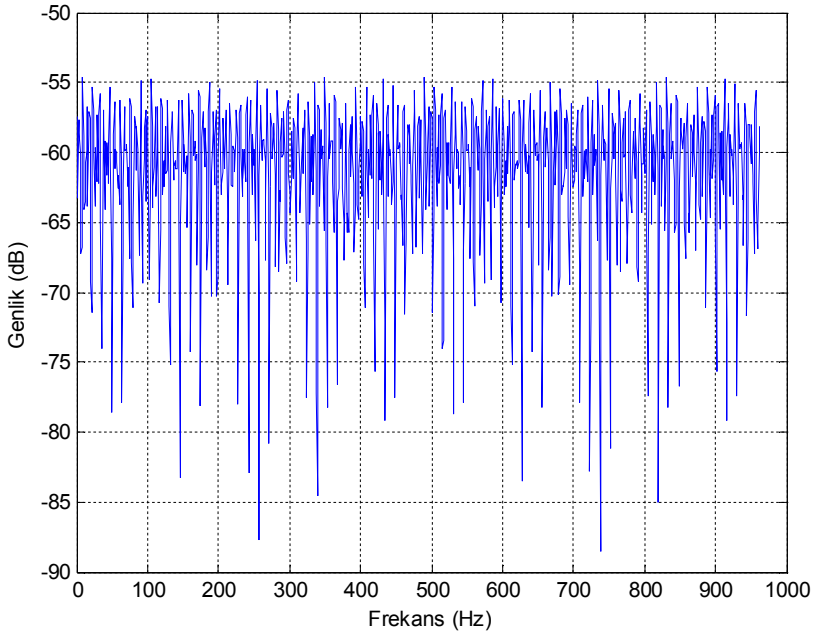


Şekil 3.16 Yol kaybına uğramış sinusoidal DTV pilot sinyali



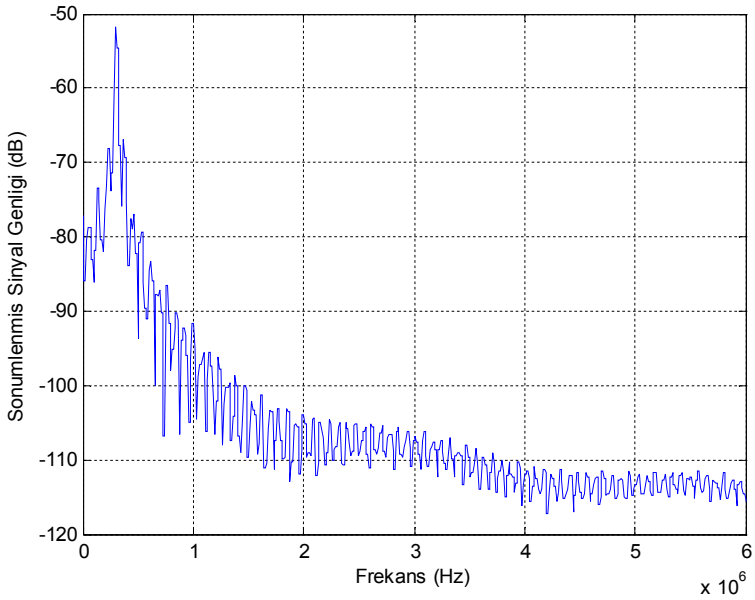
Şekil 3.17 Yol kaybına uğramış sinusoidal DTV pilot sinyali Goertzel spektrumu

Şekil 3.18'de DTV Profil B çoklu-yol kanal transfer fonksiyonu gösterilmiştir.



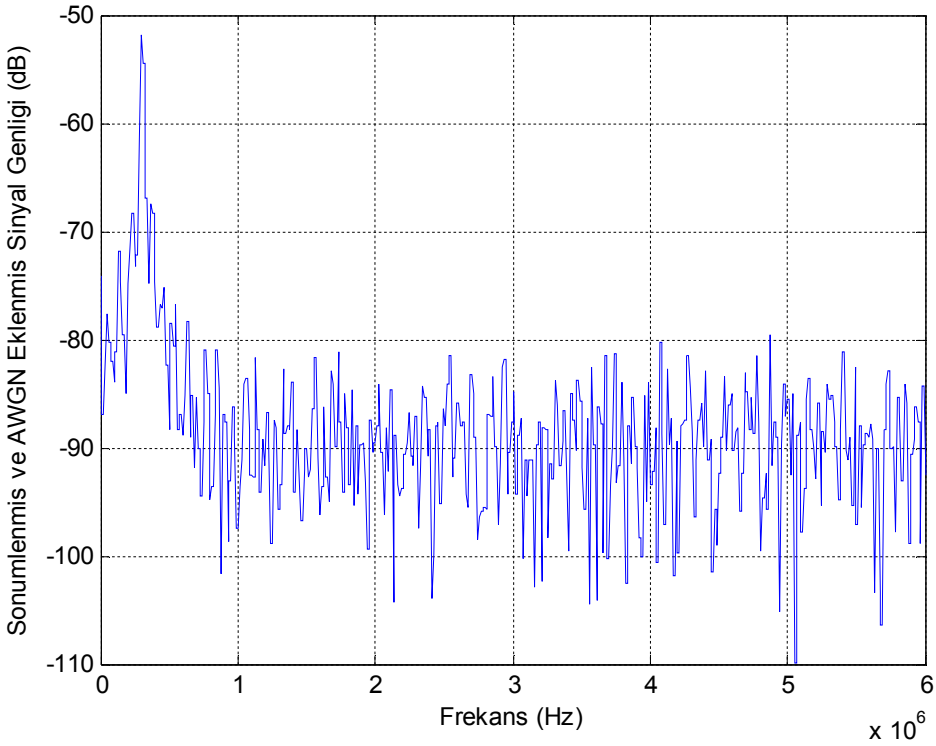
Şekil 3.18 DTV profil B çoklu yol kanal transfer fonksiyonu

Şekil 3.19'da yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin çoklu-yol kanaldan geçerek sönümlenmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin çoklu yol kanaldan geçerek sönümlenmiş halinin Goertzel spektrumu

Şekil 3.20'de yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin sönümlenmiş ve beyaz Gauss gürültüsü eklenmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.20 Yol kaybına uğramış DTV pilot sinyalinin sönümlenmiş ve beyaz Gauss gürültüsü eklenmiş halinin spektrumu

Bir WRAN hücresine Şekil 3.20'deki gibi gelen sinyalin pilot bölgesi enerji algılama yöntemi ile DTV sinyalinin varlığı tespit edilebilmektedir. Fakat bir algılayıcı yerine işbirliği oluşturan birden çok algılayıcının işbirlikçi spektrum algılama yaparak daha etkin algılama yapacağı bilinmektedir.

Çalışmamızda 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 iterasyon, 4 çekirdekli işlemcisi olan kişisel bilgisayarda paralel çalıştırılma yolu ile (her bir çekirdek'te ilintisiz 250 bin iterasyon eş zamanlı olarak tekrarlanarak) yaklaşık iki gün süre sonunda tamamlanmıştır. Bir milyon iterasyonun her birinde kanal dolu iken aynı pilot sinyali tüm alıcılar tarafından alınmıştır. DTV pilot sinyalinin

1000000 kez gönderilişinde alıcılar ve işbirlikçi yapı tarafından algılanma sayıları 0,03'lük enerji algılama eşiği için Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10 Doğru algılama oranları

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)

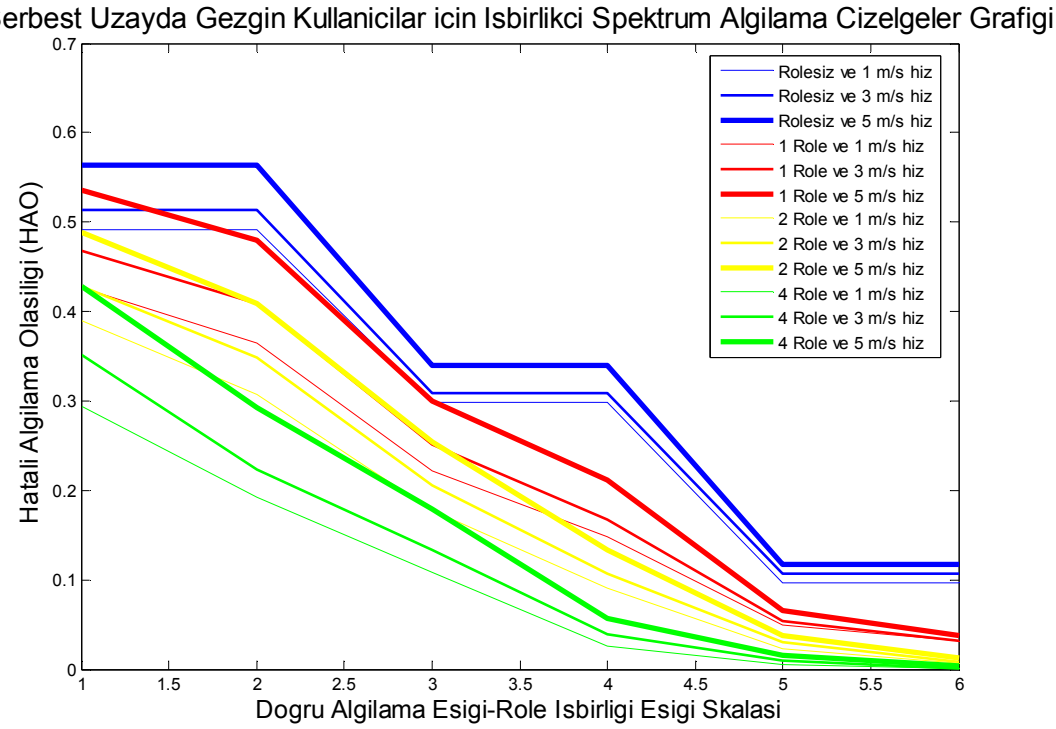
Çizelge 3.10'dan da anlaşılacağı üzere SU3 ve SU4 için algılama oranları sırası ile % 21,55 ve % 21,43 çıkarak DTV vericisine uzak olmaları nedeni ile en düşük seviyelerde çıkmıştır. SU1 ve SU2'nin algılama oranları ise sırası ile % 41,13 ve % 41,10 çıkarak istenen seviyenin altında kalmıştır. Karar merkezi ise daha fazla anten yüksekliğine sahip olması nedeni % 64,84 doğru algılama oranına sahip olmuştur. Fakat istenen seviyede algılama oranına % 92,48 ile işbirlikçi yapı ile erişilmiştir. İşbirlikçi yapı ile ise, her bir iterasyonda herhangi bir alıcının algılaması durumu (VEYA kuralı - OR rule) gerçeklenerek 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. 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 ulaşılacaktı. Bu durumda toplamda 5 alıcı ile 5 x 10 = 50 oranına ulaşılacaktı. Yukarıda anlatıldığı gibi bir alıcıda $L < \log_2 N$ olduğunda Goertzel algoritması ile sağlanan hesap yükü avantajı, işbirliğinde yer alan 5 alıcıda da gerçeklenerek toplamda enerji tasarrufu sağlanmıştır. 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 ciddi oranda azalmasına da neden olmuştur.

4. BULGULAR

Üçüncü bölümde serbest uzayda gezgin kullanıcılar için işbirlikçi spektrum algılama uygulaması anlatılmıştır. Bu uygulama yöntemi neticesinde Şekil 4.1'den de anlaşılmaktadır ki, yardımcı röle sayısı arttıkça hedef lisanssız kullanıcılar için hatalı algılama olasılığı azalmaktadır. Benzer şekilde röle sayısına bakılmaksızın, eşik uzaklıkları arttıkça yine hatalı algılama olasılığı azalmaktadır. Fakat lisanssız kullanıcıların birim zamanda yer değiştirme miktarları, dolayısı ile hızları (hareket kabiliyetleri) arttığında ise hatalı algılama olasılığı artmaktadır.



Şekil 4.1 Serbest uzayda gezgin kullanıcılar için işbirlikçi spektrum algılama çizelgeler grafiği

Bir sonraki senaryo olan IEEE 802.22 standardında işbirlikçi spektrum algılama uygulamasında iletim ortamının serbest uzaydan ziyade gerçekçi karasal ortam olması hedeflenmiştir. Bu senaryoda tüm iletim profillerinde tek röle eşiğine (-5 dB) göre

zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme yönteminin birlikte yapılmasının doğru karar vermeye çok önemli katkı sağladığı anlaşılmıştır.

Senaryoda kullanılan her bir gerçekçi kanal modeli için farklı röle eşiklerine göre benzetimler yapıldığında ise, tüm iletim profillerinde zaman çeşitlemesi ve işbirlikçi çeşitleme modelinin birlikte yapılması doğru karar vermeye çok önemli katkı sağlamıştır. Sade işbirlikçi çeşitlemenin başarıma katkısının, zaman çeşitlemesindeki başarıma katkısından daha az olmasının iki nedeni tespit edilmiştir. Birincisi, Okumura-Hata modeline göre sade işbirlikçi çeşitleme olduğunda, kullanıcıların gönderme esnasındaki anten boylarının kısa ve bastıkları gücün az olmasıdır. İkincisi ise zaman çeşitlemesi olduğunda her bir zaman aralığındaki direkt TV vericisinden gelen iletimde tamamen ilintisiz iletim yapıldığı varsayılarak güçlü çeşitleme etkisinden istifade edildiğidir.

Ayrıca röle eşiğinin düşürülmesine rağmen hatalı algılama olasılıklarının pek değişmediği yine Çizelge 3.7'den anlaşılmaktadır. Röle eşiğinin düşmesi ile toplam röle sayısı artmakla birlikte güvenilir olmayan (kanal boşken dolu zanneden) röle sayısı da artmaktadır. Bu nedenle toplam katkı pek değişmemekle birlikte maliyet, güç tüketimi ve karmaşıklık artmakta ve toplam verimlilik azalmaktadır. İşbirliği oluştururken güvenilir röle'lerden yararlanmak verimlilik ve başarımı artırmaktadır.

Mevcut senaryoyu gezgin işbirlikçi spektrum algılama kapsamına almak için sabit olan kullanıcılara (CPE) hareketlilik kazandırarak da benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimlerde kullanıcılar rasgele dağıtılmış ve rasgele hareket eden hareketli kullanıcılar dışındaki diğer tüm sistem parçalarının (TV vericisi, TV alıcıları ve baz istasyonu) durağanlıklarını koruduğu varsayılmıştır. Rasgele bir anda kullanıcıların (CPE) 1/3'ünün saatte 3 km hızla hareket etmekte olduğu ve diğer kullanıcıların ise o anda durağan pozisyonda algılamalarını yapmakta olduğu varsayılmıştır. Gerçekçi kırsal kesim ve IEEE 802.22 standardı modeline uygun olmasının hedeflenmesi, kullanıcıların hareketlilik özgürlüğüne sahip olmaları durumunda bile yerleşim yerinin küçük olması nedeni ile az sayıda kullanıcının düşük hızlarda (yürüyüş hızı, 3 km/saat) hareket ettiği varsayımı ile örtüşmüştür. Fakat bu durumda kullanıcıların ortalama

olarak -15 dB civarında alım yaptıkları ve -5 dB üzerinde alımın çok nadiren gerçekleşmesi nedeni ile işbirliği koşullarının oluşturulamadığı benzetimler esnasında ortaya çıkmıştır. Hareketli kullanıcıların TV vericisine olan uzaklıklarının fazla olması, anten boylarının kısa olması nedeni ile işbirliği seviyesinin çok altında alım yapmaları sonucunda işbirliği koşullarının sağlanamadığı ve işbirliği gerçekleştirilemediği anlaşılmıştır. Bu nedenle IEEE 802.22 standardı için kullanıcıların gezginliği durumunda etkin işbirlikçi spektrum algılama sağlanamadığı bulgusuna varılmıştır.

Diğer bir yöntemde pilot ton kullanarak gerçek DTV spektrumunun algılanması yer almıştır. Bu yöntemde gerçek sinyal kayıtları için Goertzel Algoritması uygulanmış ve sinyal kayıtları güç spektral yoğunlukları ile birlikte pilot ton çıktıları gösterimleri şekillerde gösterilmiştir. Şekil 3.9 - 3.12'de tüm orijinal sinyal kayıtları için pilot tonların görüldüğü tüm şekillerden anlaşılmaktadır. Orijinal kaydı alınmış sinyallerin çeşitli bozulmalara uğramış olmalarına rağmen pilot tonlarının süzülerek seçilip algılanabildiği de şekillerden anlaşılmaktadır.

Gerçek DTV pilot tonunun Goertzel algoritması ile algılanabildiği gerçeklendikten sonra işbirlikçi yapı kurularak fayda sağlanması yoluna gidilmiştir. DTV pilot enerji algılamada, DTV pilot sinyali ile enerji toplamı ve bu toplamın bir eşikle karşılaştırılmasında 6 MHz'lik DTV kanalı için enerji toplamı yerine, sadece darbant pilot sinyali frekansı bölgesindeki genlik değerleri ile enerji toplamı hesaplanarak ciddi anlamda hesap karmaşıklığı azaltılması ile de enerji tüketiminin azaltılması sağlanabilmektedir. Fakat bir alıcıda, 6 MHz'lik bir DTV kanalına odaklanmak yerine sadece bir pilot sinyali ile ilgilenilmesi ve direkt pilot sinyalinin derin sönümlenmeye uğraması durumunda algılamanın yapılamaması olanağı da vardır. Tezde bu durum göz önüne alınarak, işbirlikçi yapı ile Goertzel algoritması kullanılarak ve sadece pilot sinyali dar bandında standart periodogram benzeri yöntem ile enerji algılama yapılması durumunda, tüm işbirlikçi alıcılara gelen pilot sinyalinin derin sönümlenmeye uğramış olması ihtimalinin çok düşük olduğu ve spektrum algılama kalitesi yanında toplamda enerji verimliliğinin de arttığı yapılan detaylı benzetimlerle gösterilmiştir.

5. SONUÇ

Günümüzde, kablosuz iletişime olan talebin artması, araştırmacıları bu alanda yeni arayışlara ve mevcut spektrum ile yeni teknolojiler geliştirme çabasına sürüklemiştir. Mevcut spektrumun lisanslı kullanıcılar tarafından doldurulması ve yer bulunmaması kısıtını ortadan kaldırma veya en aza indirme çabaları sonucunda ise bilişsel (cognitive) radyo doğmuştur.

Bilişsel radyo, lisanssız kullanıcıların lisanslı kullanıcıları rahatsız etmemeleri şartıyla, lisanssız kullanıcılar ile lisanslı kullanıcıların aynı frekans bantlarını paylaşma esasına dayanmaktadır. Bu paylaşım, lisanslı kullanıcıların istedikleri zamanlarda kendi lisanslı kanallarını kullanmasına engel olmayan ve lisanssız kullanıcıların, lisanslı kullanıcılar kanallarını kullanmadıkları zamanlarda boş olan kanalları kullanmasına olanak sağlayan bir paylaşım şeklidir.

Geliştirilmekte olan ve IEEE 802.22 WRAN olarak adlandırılan standart ile özellikle kırsal kesim kullanıcılarına lisanssız olarak TV bantlarında veri iletişim imkanı sunulması hedeflenmektedir. TV bantlarında, mevcut TV alıcılarına girişim oluşturmama için etkin spektrum algılama gereklidir. Bunu başarabilmenin yöntemlerinden biri de işbirlikçi spektrum algılama yapısı kurabilmektir. Özellikle IEEE 802.22 WRAN standardında algılanacak sinyal seviyelerinin çok düşük olması (-116 dBm'e kadar) tek algılayıcı yapısı ile algılamanın zorlaşmasını sağlamaktadır. Ancak işbirlikçi algılama ile çok düşük sinyal seviyelerinde daha iyi algılama yapılmaktadır. Özellikle tek algılayıcı ile SNR duvarı (SNR wall) olarak adlandırılan sınırın altında bir SNR'da alım yapıldığında kanalın uzun süre dinlenmesi algılama sağlanmasında bir çözüm getirmemekle birlikte, işbirlikçi çeşitleme ile alınan SNR seviyesi SNR duvarının üstüne çıkarılarak algılama sağlanabilmektedir.

Tez çalışmamızda öncelikli olarak, gezginliğin olduğu serbest uzay ortamında işbirliği oluşturmanın algılama kalitesini artırdığı gösterilmiştir.

İlave olarak, geliştirilen işbirlikçi sistem modeli ile bir IEEE 802.22 hücresindeki baz istasyonu ve gezgin kullanıcıların işbirliği oluşturarak daha iyi TV sinyallerini algılayacağı öngörüsü ile çalışmalar yapılmıştır. Hareketli kullanıcıların TV vericisine olan uzaklıklarının fazla olması, anten boylarının kısa olması nedeni ile işbirliği seviyesinin çok altında alım yapmaları sonucunda işbirliği koşullarının sağlanamadığı ve işbirliği gerçekleştirilemediği belirtilmiştir. Fakat gezginliğin olmadığı IEEE 802.22 modeli için işbirlikçi çeşitleme yanında zaman çeşitlemesi ile ciddi başarım artışının olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca geliştirmiş olduğumuz işbirlikçi sistem modelinde röle eşik değerlerinin düşürüldüğü senaryolara göre benzetimler yapılmıştır. Bu senaryolar sonucunda röle eşiğinin düşmesine rağmen hatalı algılama olasılıklarının pek değişmediği gözlenmiştir. Röle eşiğinin düşmesi ile toplam röle sayısının arttığı fakat güvenilir olmayan röle sayısının da arttığı gözlenmiştir. Ayrıca toplam katkının pek değişmediği fakat maliyet, güç tüketimi ve karmaşıklığın artması nedeni ile toplam verimliliğin azaldığı sonucuna da ulaşılmıştır.

Bilişsel radyo tekniğinde lisanslı kullanıcıların rahatsız edilmemeleri için etkin bir spektrum algılama yönteminin olması önem arzetmektedir. Etkin spektrum algılama yöntemlerinden biri de pilot ton algılama yöntemidir. Birçok lisanslı sayısal hücresel haberleşme sisteminde kanal kestirimi, senkronizasyon vb nedenlerden ötürü pilot ton iletimi yapılmaktadır. Tez çalışmamızda bir pilot ton iletimi mevcut olan sayısal/dijital televizyon (DTV) yayın sisteminde, daha hızlı ve etkin bir spektrum algılama sağlanmasında yardımcı olması maksadı ile orijinal DTV yayınları verisi kullanılarak, lisanslı kullanıcılar rahatsız edilmeden etkin bir pilot ton algılama yapıldığı gösterilmiştir. Pilot tonun algılanmasında Goertzel Algoritması kullanılmış ve gerçek DTV sinyal kayıtları üzerinde yapılan çalışmalarda pilot ton hatasız bir şekilde algılanmıştır.

DTV (Sayısal TV) pilot enerji algılamada, 6 MHz'lik DTV kanalı için enerji algılama yerine, sadece pilot sinyali frekansı bölgesinde enerji algılama yapılarak 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 ve direkt pilot sinyalinin derin sönümlenmeye uğraması durumunda algılamanın yapılamaması olasılığı da vardır. Tez çalışmamızda, 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 sönümlenmeye uğrama olasılığının çok düşük olduğu ve spektrum algılama kalitesi yanında toplamda %40 enerji tasarrufu sağlanarak enerji verimliliğinin arttığı gösterilmiştir.

Tezdeki son yöntemde, lisanslı kullanıcı pilot sinyali ile kusursuz senkronizasyon sağlandığı varsayılmıştır. Özellikle düşük SNR'larda, algılayıcı ile lisanslı kullanıcı arasında frekans kayması (offset) oluşması muhtemeldir. Bu tür durumlarda, N sinyal örnek sayısı olmak üzere, Goertzel algoritması ile süzülecek darbant pilot ton frekans bölgesinde bakılacak frekans sayısı (L) artırılarak ($L \leq \log_2 N$ olması koşulu ile) yine etkin spektrum algılama ve enerji tasarrufu sağlanabilir.

Bu tezde, birden çok bilişsel radyoların olduğu ortamda tek bir kanalın (bandın) algılanması üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Fakat birden çok yayının yapıldığı farklı bantlardaki kanalları izleyerek ve bu kanallar üzerinden kanal kestirimi yaparak uygun işbirliği protokolü oluşturulması ile spektrum algılama kalitesini daha da iyileştirmek mümkün olabilir. Farklı her bant için, pilot ton frekans bölgesinde bakılacak frekans sayısı (L) için $L \leq \log_2 N$ olması koşulu gerçeklenerek enerji tasarruflu yöntem ile bu protokollerin verimli olarak gerçekleştirilmesi olası gözükmektedir.

Spektrum doluluk problemi kablosuz iletişimin yaygınlaşması ile daha da gün yüzüne çıkmakta, işbirlikçi çeşitleme yöntemlerinin daha da önem kazanmasına neden olmaktadır. Her işbirlikçi çeşitleme yöntemi, her kablosuz sistem ve ortam için uygun olmamakla birlikte; gelecekte farklı kablosuz sistem ve ortamlara özgü işbirlikçi çeşitleme yöntemlerinin ve protokollerinin geliştirileceği ve kullanılacağı beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Andrdspoulos, F. E., Cardoso, N. B., Doumenis, G. A., Mitsos Y. M. and Sarakis, L. E. 2001. An accurate dual tone multiple frequency detector based on the low-complexity goertzel algorithm.

Anonymous. 2000. Broadband Adaptive Receiver Design, DTV Channel Characterization. Web Sitesi http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/dtv.html. Erişim tarihi : 10.05.2011

Anonymous. 2000. Broadband Adaptive Receiver Design, DTV Channel Characterization, hampton328e. Web sitesi. http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/hampton328e.html. Erişim tarihi : 10.05.2011

Anonymous. 2000. Broadband Adaptive Receiver Design, DTV Channel Characterization, luzerne11. Web sitesi. http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/luzerne11.html. Erişim tarihi : 10.05.2011

Anonymous. 2000. Broadband Adaptive Receiver Design, DTV Channel Characterization, luzerne8. Web sitesi. http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/luzerne8.html. Erişim tarihi : 10.05.2011

Anonymous. 2000. Broadband Adaptive Receiver Design, DTV Channel Characterization,mantua7. Web sitesi. http://bard.ece.cornell.edu/downloads/data/dtv/mantua7.html. Erişim tarihi : 10.05.2011

Anonymous. 2005. ITU-R P.1546-1. Method for point-to-area prediction for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz.

Cabric, D., Mishra, S. and Brodersen, R. W. 2004. Implementation ıssues in spectrum sensing for cognitive radios. Asimolar Conference on Signals and Computers.

Cabric, D., Tkachenko, A. and Brodersen, R. W. 2006. Spectrum sensing measurements of pilot, energy and collaborative detection. MILCOM'06.

Chen, Q., Gao, F., Nallanathan, A. and Xin, Y. 2008. Improved cooperative spectrum sensing in cognitive radio. IEEE VTC Spring 2008, 1418-1422

Coulson, A. J., Williamson, A. G. and Vaughan, R.G. 1998. A statistical basis for lognormal shadowing effects in multipath fading channels. IEEE Transactions on Communications, Volume 46, pp. 494-502.

Cover, T. M. and Gamal, A. A. E. 1979. Capacity theorems for the relay channel. IEEE Trans. Info. Theory, Vol. 25, Number. 5, pp. 572–84.

Digham, F. F., Alouini, M.S. and Simon, M. K. 2003. On the energy detection of unknown signals over fading channels. IEEE Int. Conf. Commun. vol. 5, pp. 3575-3579.

Eberspacher, J., Vögel H. J. and Bettstetter, C. 2008. GSM: switching, services and protocols. 3rd Edition, Wiley.

Ekşim, A., Kulaç, S. and Sazlı, M.H. 2001. DTV Spectrum Sensing with Pilot Tone Filtering. URSIGASS 2011.

Enserink, S. and Cochran, D. 1994. A cyclostationary feature detector. in Proc. 28th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Monterey, CA, pp. 806–810.

Federal Communications Commission (FCC). 2002. Spectrum policy task force. ET Docket no. 02-135.

Ganesan, G. and Li, Y.G. 2007a. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio – part I : two user networks. IEEE Trans. on Wireless Commın., pp. 2204-2213.

Ganesan, G. and Li, Y.G. 2007b. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio – part II : multiuser networks. IEEE Trans. on Wireless Commın., pp. 2214-2222.

Garrison, I.M., Martin, R.K., Sethares, W.A., Hart, B., Chung, W., Balakrishnan, J., Casas, R.A., Endres, T.J., Larimore, M., Schniter, P. and Johnson, C.R. 2001. DTV channel characterization. 2001 Conference on Information Sciences and Systems, The John Hopkins University

Ghasemi, A. and Sousa, E. S. 2005. Collaborative spectrum sensing for opportununistic access in fading environments. IEEE 2005, 131-136.

Ghosh, M., Gaddam V. and Turkenich, G. 2007. DTV signal sensing using pilot detection. IEEE 802.22-07/0125-00-0000.

Goertzel, G. 1958. An Algorithm for the evaluation of finite trigonometric series. The American Mathematical Monthly.

Haourani, H. 2005. An overview of diversity techniques in wireless communication systems. postgraduate course in radio communications. S-72.333.

Hata, M. 1980. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Trans. Veh. Tech., pp. 317-25.

Hunter, T. E. and Nosratinia, A. 2002. Cooperative diversity through coding. Proc. IEEE ISIT, Laussane, Switzerland, p. 220.

Kaligineedi, P., Khabbazian, M. and Bhargava, V.K. 2008. Secure cooperative sensing techniques for cognitive radio systems. IEEE .

Kay, S. M. 1998. Fundamentals of statistical signal processing: detection theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Khan, A.H., Qadeer, M. A., Ansari, J. A. and Waheed, S. 2009. 4G as a next generation wireless network. ICFCC'09.

Kim H. and Shin, K. G. 2008. In-band spectrum sensing in cognitive radio networks: energy detection or feature detection?. MobiCom'08, San Francisco, California, USA.

Kim, J. and Andrews, J. G. 2010. Spectral covariance for spectrum sensing with application to IEEE 802.22. ICASSP'10.

Kulaç, S., Ekşim, A. and Sazlı, M.H. 2011. Pilot Ton Kullanarak DTV Spektrum Algılama. IEEE 19th Signal Processing on Communications Applications 2011, SİU 2011.

Laneman, J. N., Wornell, G. W. and Tse, D. N. C. 2001. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks. Proc. IEEE ISIT, Washington, DC, p. 294.

Lee, C. and Wolf, W. 2008. Energy efficient techniques for cooperative spectrum sensing in cognitive radios. IEEE.

Letaief, K.B. and Zhag, W. 2009. Cooperative communication for cognitive radio networks. Procedings of the IEEE. Vol. 97, Number 5.

Ma, J. and Li, Y. 2007. Soft combination and detection for copperative spectrum sensing in cognitive radio networks. IEEE.

Matsui, M., Shiba, Akabane, H. K. and UIehara, K. 2007. A novel cooperative sensing technique for cognitive radio. IEEE.

Mishra, S.M., Sahai, A. and Brodersen, R.W. 2006. Cooperative sensing amnog cognitive radios. IEEE ICC 2006, 1658-1663.

Mitola, III J. and Maguire, G. Q. 1999. Cognitive radio: making software radios more personal. IEEE Pers. Commun, vol. 6, pp. 13–18.

Nosratinia, A. Hunter, T. E. and Hedayat, A. 2004. Cooperative communication in wireless networks. IEEE Communication Magazine, vol.42, pp.74-80

Okumura, Y., Ohmore, E. and Fukuda, K. 1968. Field strength and its variability in VHF and UHF land mobile service. Rev. Elec. Commun. Lab., pp. 825-73

Peh, E. and Liang, Y.C. 2007. Optimization for cooperative sensing in cognitve radio networks. IEEE.

Proakis, J.G. 2000. Digital communications" McGrawwHill Pres.

Quin, Q., Zhimin, Z. And Caili, G. 2009. A study of data fusion and decision algorithms based on cooperative spectrum sensing. 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery

Schwingshackl, D. Mayerdorfer T. and Straubnigg, D. 2006. Universal tone detection based on the goertzel algorithm. MVSCAS'06.

Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B. 2003. User cooperation diversity part ı and part II. IEEE Trans. Commun., vol. 51, no. 11,pp. 1927–48.

Shankar, S. 2008. Overview of blind sensing techniques considered in IEEE 802.22 WRANs. SON Workshops'08, Sanfrancisco, California, USA.

Shellhammer, S. J. 2008. Spectrum sensing in IEEE 802.22. CIP2008, Santorini, Greece

Shellhammer, S. J., Shankar, S., Tandra R. and Tomcik, J. 2006. Performance of power detector sensors of DTV signals in IEEE 802.22 WRANs. TAPAS'06, Boston, MA, USA.

Shellhammer, S., Twail, V., Chouinard, G. and Muterspaugh, M. 2006. Spectrum Sensing Simulation Model. IEEE 802.22-05/0028r0.

So, H.C., Chan, Y.T., Ma, O. and Ching, P.C. 1999. Comparison of Various Periodograms for Sinusoid Detection and Frequency Estimation. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol 35, No.3.

Sofer, E. and Chouinard, G. 2005. WRAN Channel Modelling. IEEE 802.22-05/0055r7

Stein, Y. 2000. Digital Signal Processing A computer science perspective. John Willey & Sons, Canada.

Stevenson, C. R., Cordeiro, C., Sofer, E. and Chouinard, G. 2005. Functional requirements for the IEEE 802.22 wran standard. IEEE 802.22-05/0007r46.

Sun, H., Jiang, J. and Lin, M. 2006. Adaptive cooperation algorithm for cognitive radio networks. IEEE.

Trajkovic, M. S. and Radovic, D. 2006. Performance analysis of the DTMF detector based on the goertzel's algorithm. TELFOR'06.

Unnikrishnan, J. and Veeravalli, V.V. 2008. Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio. IEEE.

Vistotsky, E., Kuffner, S. and Peterson, R. 2005. On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing," in Proc. IEEE Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Baltimore, MD, pp. 338–345.

Wang, W., Gao, Z., Huang, L. and Yao,Y. 2008. Spectrum Sensing Based on Goertzel Algorithm. WICOM'08.

Yu, Y. and Muratai, H. 2007. Multihop cooperative senbsing and transmit power control based on ınterference ınformation for cognitive radio. IEEE, 2007

Zhang, K. Yu X. and Wan, W. 2008. A digital tone decoder based on modified goertzel algorithm. ICALIP2008.

Zhang, W., Malik, R.K. and Letaief, K. B. 2008. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitve radio network. IEEE.

Zheng, K., Li, H., Djouadi, S. M. and Wang, J. 2010. Spectrum sensing in low SNR regime via stochastic resonance. CISS'10.

Zheng, Y, Changlong, X. and Liang. Y.C.. 2007. WRAN Discerete Channel B", IEEE 802.22-07/0185r1.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Selman KULAÇ
Doğum Yeri : Düzce
Doğum Tarihi : 06.06.1980
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Düzce Süper Lisesi (1998)
Lisans: Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü (2002)
Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2004)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2002 - 2007
TÜBİTAK UEKAE, 2007 - 2011
Türk Telekom ARGE Direktörlüğü, 2011

Yayınları :

Kulaç, S., ve Sazlı, M.H. 2011. Enerji Verimli İşbirlikçi Spektrum Algılama. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Dergisi (Başvurusu yapıldı)

Ekşim, A., **Kulaç, S.** and Sazlı, M.H. 2011. DTV Spectrum Sensing with Pilot Tone Filtering. URSIGASS 2011.

Kulaç, S., Ekşim, A. and Sazlı, M.H. 2011. Pilot Ton Kullanarak DTV Spektrum Algılama. IEEE 19th Signal Processing on Communications Applications 2011, SİU 2011.

Ekşim, A., **Kulaç, S.** and Sazlı, M.H. 2009. Effective Cooperative Spectrum Sensing in IEEE 802.22 Standard with Time Diversity. ACTEA 2009

Kulaç, S., Ekşim, A. and Sazlı, M.H. 2009. IEEE 802.22 Standardında İşbirlikçi Spektrum Algılama", IEEE 17th Signal Processing on Communications Applications 2009, SİU 2009.

Ekşim, A., **Kulaç, S.** and Sazlı, M.H. 2008. Gezgin Kullanıcılar için İşbirlikçi Spektrum Algılama", IEEE 16th Signal Processing on Communications Applications 2008, SİU 2008.

Kulaç, S. ve Nazlıbilek, S. 2006. H.264/AVC/MPEG4 Part 10 Video Kodlama. İGS'2006 5. İstatistik Günleri Sempozyumu, ANTALYA

Kulaç, S. ve Yılmaz, M. 2004. IP Üzerinden Çoklu Ortam Duraksız Akış. TBD 21. Ulusal Bilişim Kurultayı, ODTÜ, ANKARA