KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİŞİM SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOKLU ANTENLİ BİLİŞSEL RADYODA SPEKTRUM ALGILAMA TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ

ABDÜLKADİR CAN ÇAKIR

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİLİŞİM SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇOKLU ANTENLİ BİLİŞSEL RADYODA SPEKTRUM ALGILAMA TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ

ABDÜLKADİR CAN ÇAKIR

Yrd.Doç.Dr. Halil YİĞİT
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Alper KARAHAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Ali ÇALHAN
Jüri Üyesi, Düzce Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 29.01.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Kablosuz haberleşmede kullanılan frekans spektrumu sınırlıdır. Bunun yanı sıra spektrum, kullanıcılara sabit olarak tahsis edildiğinden mevcut var olanın da verimsiz olarak kullanılmasına sebep olmaktadır. Günümüzde kablosuz haberleşme teknolojilerinin gelişmesi, yaygınlaşması ve bu teknolojilerden faydalanan kullanıcı sayısının artmasıyla mevcut frekans spektrumu ihtiyacı karşılayamamaktadır. Oluşan bu problemi dinamik spektrum erişimi sağlayarak ortadan kaldırmaya aday olan Bilişsel Radyo güncel araştırma konularından birisidir. Frekans spektrumunun verimli ve aktif kullanılabilmesi için kullanılmayan frekansların doğru algılanması gerekmektedir. Bilişsel Radyo, sahip olduğu spektrum algılama fonksiyonu ile bunu gerçekleştirebilir. Çoklu antenler, kullanılan bantgenişliğinde ve sinyalin gönderim gücünde herhangi bir artışa gerek duymadan kablosuz haberleşme sistemlerinin performansını önemli derecede arttırır. Bu çalışmada bağlantı kalitesini, kanal kapasitesini ve veri hızını daha iyi seviyeye getirmek için iki anahtar teknoloji bir arada kullanılmıştır.

Tez konumun belirlenmesi aşamasında beni bu konuya yönlendiren, çalışmalarımın her safhasında yakın ilgi ve önerileri ile yardımcı olan, iş hayatımdaki yoğunluk sebebiyle çalışmalarımda oluşan aksamalarda büyük sabır gösteren ve her zaman destek olan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Halil YİĞİT'e (Kocaeli Üniversitesi) teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte, yoğunluğuna rağmen bana vakit ayıran dostum Mustafa SALMAN'a ve yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Enis TONUS'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince beni her zaman motive eden ve yanımda olan değerli eşim Burcu ÇAKIR'a ve desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen annem Sevim ÇAKIR, babam Ahmet Nezih ÇAKIR ve kardeşim Helin ÇAKIR'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Ocak – 2016 Abdülkadir Can ÇAKIR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ iv
ÖZET vii
ABSTRACT viii
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 5
1.1. Spektrum Algılama ile İlgili Yapılan Çalışmalar 5
1.2. Tez Çalışmasının Katkıları 7
1.3. Tezin Organizasyonu 7
2. GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ 9
2.1. Giriş 9
2.2. Bilişsel Radyo Teknolojisi 10
3. BR TEKNOLOJİSİNDE SPEKTRUM ALGILAMA 15
3.1. Giriş 15
3.2. Enerji Tabanlı Algılama 16
3.3. Döngüsel Durağanlık Tabanlı Algılama 17
3.4. Eşlenik Filtre Tabanlı Algılama 19
4. SISO SİSTEMLERDE SPEKTRUM ALGILAMA 22
4.1. Giriş 22
4.2. Benzetim Sonuçları 24
5. ÇOKLU ANTENLERLE SPEKTRUM ALGILAMA 27
5.1. Giriş 27
5.2. Benzetim Sonuçları 32
SONUÇLAR VE ÖNERİLER 39
KAYNAKLAR 41
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 46
ÖZGEÇMİŞ 47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Frekans Spektrumunun Tahsisi 9
Şekil 2.2. Frekans Spektrumu Kullanım Yoğunluğu 10
Şekil 2.3. Spektrum Yönetim Çerçevesi 12
Şekil 2.4. Bilişsel Döngü 12
Şekil 2.5. Dinamik Spektrum Erişimi 13
Şekil 2.6. BR Ağ Mimarisi 14
Şekil 3.1. ED Blok Diyagramı 17
Şekil 3.2. CFD Blok Diyagramı 18
Şekil 3.3. MFD Blok Diyagramı 20
Şekil 4.1. SISO Anten Modeli 22
Şekil 4.2. P_d – SNR ROC Eğrisi 24
Şekil 4.3. P_d – P_f ROC Eğrisi 25
Şekil 4.4. P_m – P_f ROC Eğrisi 26
Şekil 5.1. SIMO Anten Modeli 27
Şekil 5.2. Dizi Kazancı 28
Şekil 5.3. MISO Anten Modeli 29
Şekil 5.4. MIMO Anten Modeli 30
Şekil 5.5. Yansıma, Kırılma ve Saçılmanın Genel Görünümü 30
Şekil 5.6. MIMO Antenlerde Spektrum Algılama 31
Şekil 5.7. Sonlu Saçıcılı Kanal Modeli 33
Şekil 5.8. Çoklu Anten Sayısının Algılama Performansına Olan Etkisi 34
Şekil 5.9. BK Hızının Algılama Performansına Olan Etkisi 35
Şekil 5.10. Çokluyol Sayısının Algılama Performansına Olan Etkisi 36
Şekil 5.11. M_T'nin Algılama Performansına Olan Etkisi 37
Şekil 5.12. M_R'nin Algılama Performansına Olan Etkisi 37

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

γ : Sinyal Gürültü Oranı, (desibel)
Γ : Chi Square dağılımı
ψ : Varış Açısı, (derece)
ϕ : Ayrılış Açısı, (derece)
ω_l : l.inci çoklu yoldaki faz kayması
τ_l : l.inci çokluyoldaki gecikme, (s)
ϕ_l : l.inci çokluyolun rastgele fazı, (radian)
θ_l : Alıcının hareket yönü ile l.inci çokluyol arasındaki açı, (derece)
α : Dönemli frekans
α_l : Rayleigh sönümleme parametresi
δ : Taşıyıcı sinyalin dalga boyu
λ : Eşik değeri
$a_{R,l}$: l.inci çoklu yolun alıcıdaki dizi yanıt vektörü
$a_{T,l}$: l.inci çoklu yolun vericideki dizi yanıt vektörü
D : Karar istatiği
dB : Desibel
E : Toplam enerji, (watt)
$\overline{E}$: Ortalama enerji, (watt)
E_i : Her bir antenin toplam enerjisi, (watt)
f : Frekans, (hertz)
h : Kanal kazancı
h_{ij} : j.inci gönderici antenden ve i.inci alıcı antene doğru olan kanal
h_f : Eşlenik filtrenin cevabı
l : Çokluyol indeksi
L : Çokluyol sayısı
H : Kanal matrisi
H_0 : Ortamda sadece gürültünün bulunduğu durum
H_1 : Ortamda lisanslı kullanıcının ve gürültünün bulunduğu durum
M_R : Alıcı anten sayısını
M_T : Gönderici anten sayısı
m_x : Alınan sinyal vektörünün ortalama fonksiyonu
n : Gaussian gürültü vektörü
N_T : Sıfır ortalamalı karmaşık gauss gürültü vektörü
kazancı
N : Alınan örnek sayısı
P_d : Doğru tespit olasılığı
P_f : Yanlış tespit olasılığı
P_m : Kayıp tespit olasılığı
Q_m : Marcum Q fonksiyonu
R_x : Alınan sinyalin özilinti fonksiyonu
R_x^{α} : Dönemli özilinti fonksiyonu

S_x^α : Dönemli spektral fonksiyonu
t : İndeks numarası
T_0 : Ortalama ve özilinti fonksiyonlarının periyodu
T_s : Kanal örnekleme zamanı, (ms)
u : İndeks numarası
V_R : Alıcının saatteki hızı, (km/h)
x : Gönderilen sinyal vektörü
x_f : Gönderilen sinyal vektörü fourier dönüşümü
X_T : $M_T \times 1$ boyutlu gönderilen sinyal vektörü
y : Alınan sinyal vektörü
Y_R : $M_R \times 1$ boyutlu alınan sinyal vektörü

Kısaltmalar

ABD : Amerika Birleşik Devletleri
AWGN : Additive White Gauss Noise (Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültü)
BK : Bilişsel Radyo Kullanıcısı
BPSK : Binary Phase Shift Keying (İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
BPF : Band Pass Filter (Bant Geçiren Filtre)
BR : Bilişsel Radyo
CA : Cyclic Autocorrelation (Dönemli Özilinti Fonksiyonu)
CFD : Cyclostationary Feature Detection (Döngüsel Durağanlık Tabanlı Algılama)
CSD : Cyclic Spectral Density (Dönemli Spektral Fonksiyonu)
DOA : Direction of Arrival (Varış Açısı)
DOD : Direction of Departure (Ayrılış Açısı)
DSA : Dynamic Spectrum Access (Dinamik Spektrum Erişimi)
ECC : European Communication Commission (Avrupa Haberleşme Komisyonu)
ED : Energy Based Detection (Enerji Tabanlı Algılama)
EGC : Equal Gain Combining (Eşit Kazançlı Birleştirme)
FCC : Federal Communication Commission (Federal Haberleşme Komisyonu)
FD : Frequency Diversity (Frekans Çeşitlemesi)
IBD : Interference Based Detection (Girişim Tabanlı Tespit)
ITU : International Telecommunication Union (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği)
LK : Lisanslı Kullanıcı
MFD : Matched Filter Detection (Eşlenik Filtre Tabanlı Algılama)
MIMO : Multiple Input Multiple Output (Çok Girişli Çok Çıkışlı)
MISO : Multiple Input Single Output (Çok Girişli Tek Çıkışlı)
MRC : Maximal Ratio Combining (En Büyük Oran Birleştirmesi)
PRD : Primary Receiver Detection (Birincil Alıcı Tespiti)
PTD : Primary Transmitter Detection (Birincil Gönderici Tespiti)
ROC : Receiver Operating Characteristic (Alıcı İşlem Karakteristiği)
SC : Selection Combining (Seçmeli Birleştirme)
SCF : Spectral Correlation Function (Spektral Korelasyon Fonksiyonu)

SD : Spatial Diversity (Uzaysal Çeşitleme)
SIMO : Single Input Multiple Output (Tek Girişli Çok Çıkışlı)
SISO : Single Input Single Output (Tek Girişli Tek Çıkışlı)
SLC : Square Law Combining (Karesel Birleştirme)
SM : Spatial Multiplexing (Uzaysal Çoğullama)
SNR : Singal to Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)
TD : Time Diversity (Zaman Çeşitlemesi)
TDD : Time Division Duplex (Zaman Bölmeli Çift Yönlü İletim)
QPSK : Quadrature Phase Shift Keying (Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama)

ÇOKLU ANTENLİ BİLİŞSEL RADYODA SPEKTRUM ALGILAMA TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Kablosuz haberleşmede kullanılan sınırlı frekans spektrumu kullanıcılara günümüzde sabit olarak tahsis edilmektedir. Kablosuz haberleşme teknolojilerinin hızla gelişmesi ve yaygınlaşmasından dolayı radyo frekans spektrumu verimli olarak kullanılamamaktadır. Bu problemi ortadan kaldırmak için dinamik spektrum erişimi (Dynamic Spectrum Access, DSA) sağlayan Bilişsel Radyo (BR) teknolojisi geliştirilmiştir. BR, çalıştığı frekans spektrumu aralığını sürekli olarak tarar ve lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılmayan frekansları tespit eder. Elde ettiği bilgilere göre boş frekanslar arasından ihtiyaç duyulan kanal ve hizmet kalitesine göre seçim yapılır. Karar işleminden sonra uygun olan frekanslar lisanssız kullanıcılara adil olarak tahsis edilir. Lisanslı kullanıcı kendi frekansını kullanmaya başladığı zaman BR ilgili frekansı kullanmayı bırakır ve kesintisiz iletişimi sağlamak için hizmet ve kanal kapasitesi gereksinimlerine göre başka kullanılmayan frekanslara geçmek içim çalışır.

Gönderici ve alıcıda çoklu anten elemanı kullanılması, kanal kapasitesini ve veri hızını önemli derecede arttırdığından sistemin performansını da olumlu yönde etkiler. Bu tezde, BR'nin en önemli fonksiyonlarından biri olan spektrum algılama incelenmiştir. Enerji tabanlı spektrum algılama tekniği geleneksel tek girişli tek çıkışlı (Single Input Single Output, SISO) ve çoklu anten sistemlerine uygulanmaktadır. Sinyal Gürültü Oranı'nın (Signal to Noise Ratio, SNR), anten sayısının, mobil olan alıcı hızının ve çokluyol sayısının spektrum algılama performansına olan etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak, SNR, anten sayısı ve çokluyol sayısı arttığında spektrum algılama performansını olumlu etkilemektedir. Alıcının hızı arttığında ise algılama performansı azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bilişsel Radyo, Çoklu Antenler, Enerji Tabanlı Sezme, MIMO, Spektrum Algılama.

AN INVESTIGATION OF SPECTRUM SENSING TECHNIQUES IN COGNITIVE RADIO WITH MULTIPLE ANTENNAS

ABSTRACT

Limited frequency spectrum used for wireless communication are allocated to users as fixed nowadays. The radio frequency spectrum cannot be used effectively due to the rapid development and the spread of wireless communication technologies. Cognitive radio (CR) technology, which provides dynamic spectrum access (DSA), has been improved in order to eliminate this problem. CR scans the range of the frequency spectrum that operate constantly and detects the frequencies unused by the licensed users. According to the information obtained, The selection is made based on the required channel and service quality among the empty frequencies. After the decision process, the appropriate frequencies are allocated fairly to the unlicensed users. When the licensed user starts to use its own frequency, CR stop to use related frequency and try to switch to another unused frequencies based on its service and channel capacity requirements to provide uninterrupted communication.

The usage of multiple antenna elements in transmitter and receiver significantly increases the channel capacity and data rate, thus it affects system performance positively. In this thesis, the spectrum sensing, which is one of the most important functions of cognitive radio, has been studied. The energy based spectrum sensing technique is applied to the conventional single input single output (SISO) and multiple antenna systems. The affects of signal to noise ratio (SNR), number of antennas, mobile receiver speed, and number of multipath onto the spectrum sensing performance have been investigated. Consequently, when SNR, the number of antennas and multipath increase, the spectrum sensing performance is affected positively. The sensing performance decreases as the receiver speed increases.

Keywords: Cognitive Radio, Multiples Antennas, Energy Based Detection, MIMO, Spectrum Sensing.

GİRİŞ

Kablosuz haberleşmeyi sağlamak için kullanılan frekans spektrumu sınırlıdır. Sınırlı olan mevcut frekans spektrumu mobil servisler, uydu servisleri, radyo ve televizyon yayınları gibi farklı hizmetler tarafından kullanılmaktadır. Bu farklı hizmetlerin birbirlerine girişim yapmaması ve iyi performans gösterebilmeleri için frekans spektrumunda her biri için farklı bir bant aralığı tahsis edilmiştir. Bölünen frekans bandı lisans sahiplerine uzun süreyle sabit olarak tahsis edilmiştir. Yapılan bu işlem sonucunda lisans sahipleri kendi bant aralığını kullanırken, lisans sahibi olmayan kullanıcılar bantlar boş olduğunda bile bunlardan faydalanamamaktadır (Zhao ve Sadler, 2007).

Kablosuz haberleşmenin yaygınlaşması ve gelişmesi sonucu bu teknolojilerden faydalanan kullanıcı sayısında artış olmuştur. Kullanılan uygulamalar çoklu ortama dayalı olduğundan ihtiyaç duyulan veri hızı ve miktarı artmıştır. Günümüzde frekans spektrumuna sabit olarak erişim sağlandığından kullanıcıların ihtiyaçları karşılanamamaktadır. Yapılan araştırmalar, mevcut frekans spektrumunda kullanılmayan boş frekansları ortaya koyarak asıl problemi, spektrumun verimsiz kullanılması olarak tespit etmiştir. Oluşan bu problemi ortadan kaldırmak için frekans spektrumunda statik erişim yerine Dinamik Spektrum Erişimi (Dynamic Spectrum Access, DSA) öne çıkmıştır (Cabric ve diğ., 2005).

Gelecek nesil kablosuz haberleşme teknolojilerinden birisi olan Bilişsel Radyo (BR) teknolojisi dinamik spektrum erişimi anlayışıyla çalışmaktadır. Böylece frekans spektrumunun verimli ve aktif olarak kullanılmasına olanak sağlar. BR, çalıştığı frekans spektrumu aralığını algılayarak ondan haberdar olan ve buna göre haberleşme parametrelerini dinamik olarak ayarlayabilen bir radyodur (Kuppusamy ve Mahapatra, 2008).

BR, tüm frekans spektrumunu sürekli olarak tarayarak lisanslı kullanıcılar tarafından kullanılmayan frekansları tespit eder. Kullanılmayan bu frekansları lisanssız olan BR

kullanıcılarına tahsis eder. Lisanslı kullanıcılar kendi frekanslarını kullanmaya başladığında ise BR kullanıcıları onlara girişim yapmamak için kullandıkları frekansları boşaltır (Gamit ve Trapasiya, 2013).

Kısıtlı olan frekans spektrumunun verimli kullanılması için kullanılmayan frekansların doğru olarak algılanması çok önemlidir. O yüzden BR'nin en önemli fonksiyonlarından birisi Spektrum Algılamadır. Literatürde çeşitli spektrum algılama teknikleri kullanılmıştır. Bunlardan en çok kullanılanlar Enerji Tabanlı Algılama (Energy Based Detection, ED), Döngüsel Durağanlık Tabanlı Algılama (Cyclostationary Feature Detection, CFD) ve Eşlenik Filtre Tabanlı Algılama (Matched Filter Detection, MFD) olanlardır. MFD, gönderilecek sinyal hakkında bilgiye ve farklı her sinyal tipi için tahsis edilen alıcının bilgilerine sahip olduğunda, düşük Sinyal Gürültü Oranı (Singal to Noise Ratio, SNR) bölgesinde bile en doğru algılama performansını verir. CFD, sinyalin döngüsel durağanlık özelliği hakkında detaylı bilgiye sahip olduğunda algılama performansı, ED'den daha iyidir. Fakat bir sinyalin döngüsel durağanlık özelliği hakkında bilgi sahibi olmak basit bir eylem değildir. ED ise gönderilecek sinyal hakkında hiçbir bilgiye ihtiyaç duymadan ondan bağımsız bir şekilde çalışır. Ortamda sadece gürültü bilgisinin bilindiği durumlarda en iyi algılama tekniğidir. Ayrıca işlem ve uygulamalarının basit olması sebebiyle en çok tercih edilen algılama tekniği olmuştur.

Kablosuz haberleşme, geleneksel olarak bir gönderici ve bir alıcıdan oluşan Tek Girişli Tek Çıkışlı (Single Input Single Output, SISO) anten sistemleriyle gerçekleştirilir. Günümüzde sese dayalı uygulamalardan çoklu ortama dayalı uygulamalara geçildiğinden kanal kapasitesi ve veri hızı daha önemli hale gelmiştir. Bu parametreler gönderici ve alıcı taraflarında bulunan anten sayıları ile doğru orantılı olarak gelişim göstermektedir. O yüzden göndericide ve alıcıda kullanılacak çoklu antenler, kablosuz sistemlerin performansı açısından çok önemlidir. Çoklu antenler sayesinde ekstra bantgenişliği ve iletim gücüne ihtiyaç duyulmadan arzulanan sinyal kalitesi ve kanal kapasitesi elde edilebilir.

Çoklu antenler göndericide ve alıcıda kullanılma durumlarına göre Tek Girişli Çok Çıkışlı (Single Input Multiple Output, SIMO), Çok Girişli Tek Çıkışlı (Multiple Input

Single Output, MISO) ve Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) olmak üzere üçe ayrılır. Bunların içinde sadece MIMO sistemler hem gönderici hem de alıcı tarafında çoklu antenler barındırdığından diğer ikisinden farklı olarak birden fazla veri dizisi gönderebilir. Bu sayede performansı diğerlerine göre daha iyidir (Aslan, 2012).

MIMO sistemlerin geleneksel SISO sistemlerden farklı olarak gönderici veya alıcı antenlerin sayısıyla doğru orantılı olarak spektral verimlilikte ve kanal kapasitesinde gözle görülür bir artış sağlar. Ayrıca kullandığı Uzaysal Çoğullama (Spatial Multiplexing, SM) sayesinde frekans kaynaklarını çok tüketmeden ve gönderici gücünü çok arttırmadan sistemin veri hızını arttırır. Göndericide ve alıcıda kullandığı çeşitlilik teknikleriyle gölgelenme ve sönümlenmenin etkilerini azaltır (Jin, 2011).

Geleneksel kablosuz haberleşmede çokluyol yayılımı dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. MIMO sistemler ise bu çokluyollardan elde edilen sinyalleri toplayarak veya en güçlüsü seçerek alıcı tarafında SNR artış sağladığından bu çokluyol yayılımı kendisine avantaja çevirmiştir (Aslan, 2012).

Sinyaller yayılımları esnasında çokluyolu meydana getiren yansıma, kırılma ve saçılmaya maruz kalabilir. MIMO sistemlerde, gönderici tarafında birden fazla anten kullanılarak parçalanarak gönderilen veriler, alıcı tarafında da birden fazla anten tarafından algılanır. Elde edilen bu veriler birleştirilir. Böylece güvenilirlik arttırılmış olur (Atmaca, 2009 ve Aslan, 2012).

MIMO sistemler ayrıca kullandığı hüzmeleme tekniği sayesinde anten dizisinde alıcı durumunda olan eleman komşu göndericilerin girişimini bastırır; gönderici durumunda olan eleman ise diğer alıcılara etkileşim yapmaz (Hua ve diğ., 2011). MIMO sistemler, sağladıkları avantajları sebebiyle etkileyici bir teknoloji olarak kabul görmüştür (Yiğit ve diğ., 2010).

Bu tez çalışmasında, kablosuz haberleşme teknolojisinden faydalanan kullanıcıların artan isteklerini çözebilecek aday bir teknoloji olan BR ve BR'nin sahip olduğu önemli fonksiyonlar ele alınmıştır. Bu fonksiyonlardan en önemlisi olan Spektrum algılamanın ve algılama tekniklerinin üzerinde durulmuştur.

Spektrum algılama için sahip olduğu avantajlar ve basitlik sebebiyle ED tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle değişen kanal koşullarının, göndericide ve/veya alıcıda kullanılan çoklu anten sistemlerinin spektrum algılama performansına olan etkileri incelenmiştir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Spektrum Algılama ile İlgili Yapılan Çalışmalar

BR sistemlerin lisanssız kullanıcılara sağladığı iletişimin kesintisiz ve sürekli olması gerekmektedir. Bu nedenle spektrumun hızlı bir şekilde taranıp lisanslı kullanıcıların kullanmadığı spektrum boşluklarının doğru algılanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Literatürde çeşitli spektrum algılama teknikleri bulunmaktadır. ED, hesaplama yükünün ve uygulama karmaşıklığının az olması sebebiyle en çok kullanılan spektrum algılama tekniklerinden birisidir. ED tekniğinin kullanıldığı çalışmalar literatürde araştırılmıştır.

Digham ve diğ. (2003), SISO anten sistemiyle Rayleigh, Rician ve Nakagami çokluyol sönümleme kanallarında alıcıda farklı çeşitleme yöntemlerini kullanarak spektrum algılama performansını incelemişlerdir. Kullanılan çeşitleme tekniklerinin doğru tespit performansını arttırdığı elde edilmiştir. Sönümleme kanallarından Nakagami, diğerlerine göre daha iyi performans sağlamıştır. Eşit Kazançlı Birleştirme (Equal Gain Combining, EGC) diğer çeşitleme yöntemlerine göre daha iyi sonuç vermiştir.

Ustok ve Ozbek (2009), SISO ve SIMO anten sistemleriyle Rayleigh çokluyol sönümleme kanalında alıcıda çeşitleme yöntemlerinden Seçmeli Birleştirmeyi (Selection Combining, SC) ve EGC kullanarak spektrum algılama performansını incelemişlerdir. Çoklu anten kullanılarak doğru algılama performansı iyileştirilmiştir. SC ve EGC alıcı çeşitleme yöntemleri, SISO sistemlerde birbirine yakın algılama performansını verirken MISO sistemlerde SC'nin daha iyi performans verdiği görülmüştür.

Hwang ve diğ. (2009), SISO ve SIMO anten sistemlerini kullanarak Suzuki kanalında algılama süresinin ve mobil olan alıcının hız durumunun spektrum algılamaya olan etkilerini incelemişlerdir. Algılama süresi arttıkça performansın arttığı, alıcının hızı arttığında ise performansın azaldığı görülmüştür. Algılama

süresinin alıcının hızına göre performansta daha belirleyici olduğu elde edilmiştir. Alıcının hızı ve algılama süresi beraber arttığında algılama performansında bir düşüş yaşanmamıştır.

Hossain ve diğ. (2012), SISO sistemlerle Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültü (Additive White Gauss Noise, AWGN) kanalında spektrum algılama performansını gerçekleştirmişlerdir. SNR arttıkça algılama performansının da arttığını tespit etmişlerdir.

Salarvan ve Kurt (2012), SIMO sistemlerle AWGN ve Rayleigh sönümleme kanallarında çoklu antenlerle EGC ve Karesel Birleştirme (Square Law Combining, SLC) metotlarıyla spektrum algılama performansını ölçmüşlerdir. EGC metodunun AWGN kanalında algılama performansını yükselttiği, Rayleigh kanalında ise değişiklik yapmadığı gözlemlenmiş. SLC metodunun AWGN ve Rayleigh kanallarında algılama performansını arttırdığı tespit edilmiş. Alıcıdaki anten sayısı arttırıldığında her iki birleştirme metodunda ve sönümleme kanalında algılama performansında artış görülmüştür.

Patil ve Wadhai (2013), SISO sistemlerde AWGN, Rayleigh ve Nakagami sönümleme kanalları altında spektrum algılama performansını incelemişlerdir. Nakagami kanalı diğer kanallarla karşılaştırıldığında daha az algılama hatası ve daha iyi algılama performansı sağladığını tespit etmişlerdir.

Gamit ve Trapasiya (2013), SISO ve MIMO sistemlerde ED metodunun Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlamalı (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) modülasyon türünde algılama performansını ortaya koymuşlar. Anten sayısı arttıkça spektrum algılama performansının da arttığını tespit etmişler. MIMO sistemlerin SISO sistemlere göre yanlış algılamayı azaltıp doğru algılamayı arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Namdar (2014), SIMO anten sistemiyle kullanarak Rayleigh kanalında SC, EGC ve En Büyük Oran Birleştirmesi (Maximal Ratio Combining, MRC) alıcıda çeşitleme yöntemleriyle spektrum algılamayı incelemiştir. Çoklu anten

kullanımının performansı arttırdığı tespit edilmekle beraber EGC'nin diğer çeşitleme yöntemlerine göre daha yüksek performans elde etmiştir.

1.2. Tez Çalışmasının Katkıları

Bu tezin ilk bölümünde gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinden BR teknolojisi açıklanmıştır. Sonrasında BR'nin önemli fonksiyonlarından olan spektrum algılama, geleneksel ve çoklu anten içeren sistemlerde matematiksel olarak ifade edilmiştir. Daha sonra bu algılama performansı, SISO sistemde AWGN sönümleme kanalında ve Zaman Bölmeli Çift Yönlü İletime (Time Division Duplex, TDD) sahip SIMO, MISO ve MIMO sistemlerde sonlu saçıcılı kanal modeli kullanarak gerçekleştirilmiştir.

Literatürde yapılan birçok çalışmada ED tekniği, farklı çokluyol sönümleme kanalları, anten sistemleri, alıcıda farklı çeşitleme teknikleri kullanılarak spektrum algılama performansı incelenmiştir. Sonlu saçıcılı kanal modeli, gerçek ortam yayılım koşullarını içinde barındırdığından tercih edilmiştir. Kullanılan bu kanal modeli sayesinde çokluyol bileşenlerinin ayrılış açıları (Direction of Departure, DOD), varış açıları (Direction of Arrival, DOA), yol gecikmesi ve anten dizilerindeki elemanların arasındaki mesafeyi göz önünde bulunduran bir haberleşme ortamı oluşturulabilmektedir.

Tezde gerçekleştirilen sonlu saçıcılı kanal modeli literatürde yer alan diğer çalışmaların aksine gerçeğe yakın haberleşme ortamı sağlamaktadır. Algılama performansı Doğru Algılama Olasılığına göre değerlendirilmiştir. Mobil olan alıcının hızı, çokluyol sayısı ve açısal yayılımlar gibi değişen kanal yayılım parametreleri ve farklı gönderici ve/veya alıcı anten sayıları altında gerçekleştirilen benzetimler, literatürdeki teorik ve pratik uygulamaları destekleyen sonuçlar sağlamaktadır.

1.3. Tezin Organizasyonu

Tez aşağıda özetlenen 6 bölümden oluşmaktadır:

Bu bölümde BR ve çoklu anten sistemleri, tez çalışmasını literatürde yapılan çalışmalardan ayıran temel özellikler ve tez çalışmasında izlenilen yöntem, bu çalışmanın katkıları ile tez organizasyonu hakkında bilgiler sunulmuştur.

Bölüm 2'de gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemlerinin gerekliliği, frekans spektrumunun tahsisi ve kullanım yoğunluğu, BR'nin çalışma mantığı, fonksiyonları, karakteristikleri, ağ mimarisi ve bilişsel döngü ile ilgili bilgiler verilmektedir.

Bölüm 3'te BR'nin önemli fonksiyonlarından olan spektrum algılama ile ilgili temel kavramlar açıklanmaktadır. Literatürde en çok kullanılan üç farklı spektrum algılama tekniğinin blok diyagramlarıyla matematiksel ifadeleri ile ilgili bilgiler ve bu tekniklerin bu tekniklerin avantajlarıyla dezavantajları karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Bölüm 4'te Geleneksel SISO sistem modeli açıklanmaktadır. ED tekniğinin, algılama öncesi haberleşme ortamının durumları ve algılama olasılıkları tanımlanmıştır. Bu model altında ED tekniğini kullanılarak AWGN sönümleme kanalında spektrum algılama performansı benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

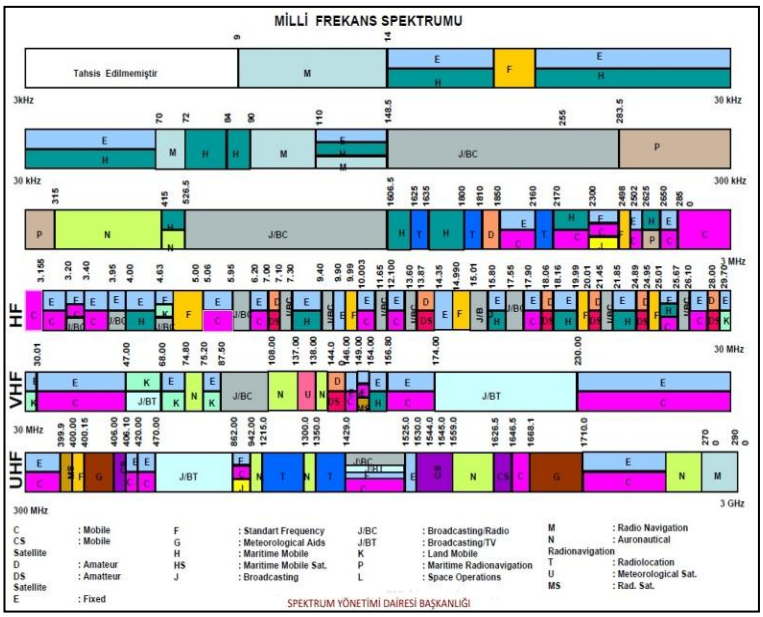
Bölüm 5'te kablosuz haberleşmede çoklu anten kullanımının sağladığı avantajlar, MIMO sistem modeli ve bu modelle gerçekleştirilecek spektrum algılama hakkında bilgiler sunulmaktadır. TDD modunda çalışan çoklu anten sistemlerinin farklı anten ve kanal yayılım koşulları altında spektrum algılama performansları incelenmektedir. Son olarak, benzetim sonuçları detaylı ve karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Sonuçlar ve öneriler bölümünde, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, çalışmanın bilime ve günümüz teknolojisine sağlayabileceği katkılar tartışılmıştır. İleriye yönelik yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. GELECEK NESİL KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİ

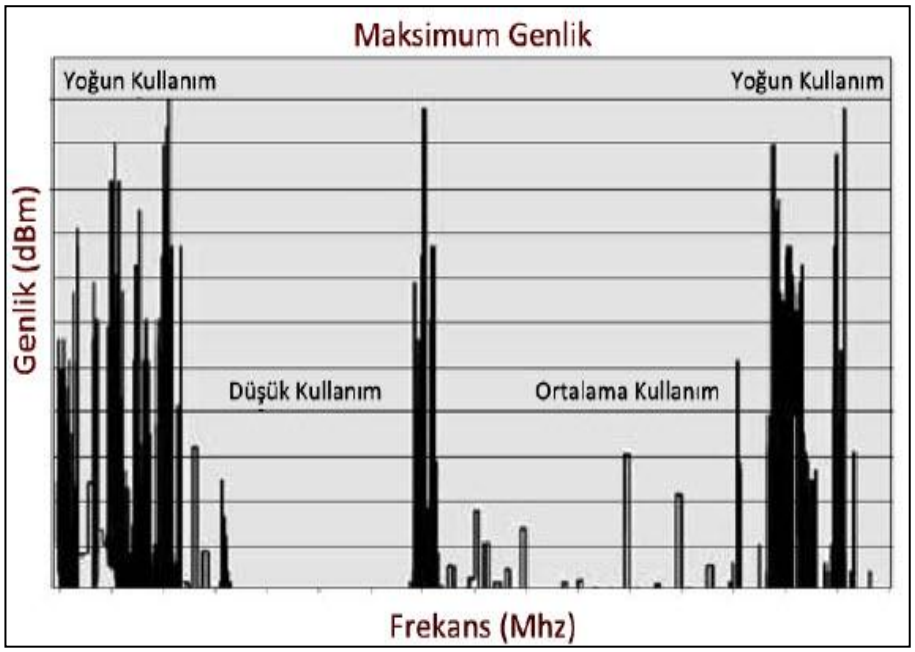
2.1. Giriş

Kablosuz haberleşmeyi sağlamak için kullanılan frekans spektrumu sınırlı olmakla beraber, uygulamaların iyi performans gösterebilmeleri için frekans spektrumunda her biri için farklı bir bant aralığı tahsis edilmiştir. Yapılan bu işlem kullanılacak farklı haberleşme türlerinin kullanımı açısından önemlidir. Türkiye'de tahsis etme işleminin dağılımı Şekil 2.1'de verilmiştir. Dünya ölçeğinde frekans spektrumunun kullanımına ilişkin uluslararası koordinasyon ve yükümlülükler Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union, ITU) tarafından sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra bölgesel koordinasyon için bölge ülkelerinin oluşturduğu Avrupa Haberleşme Komisyonu (European Communication Commission, ECC) gibi bölgesel kuruluşlarla ve ülkelerin ihtiyaç duyduğu detaylı düzenlemeler, frekans tahsis işlemleri ise ulusal kuruluşlarla sağlanmaktadır (URL – 1).



Şekil 2.1. Frekans Spektrumunun Tahsisi (URL – 2)

Kablosuz haberleşmede kullanılan teknolojinin gelişmesiyle ve kablosuz haberleşmenin yaygınlaşmasıyla lisanslı ve lisanssız frekans spektrumlarının ve kullanıcıların ihtiyaçları artmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) bulunan Federal Haberleşme Komisyonunun (Federal Communication Commission, FCC) yaptığı araştırmalar, sabit spektrum atama politikasının, mevcut frekans spektrumunun verimsiz kullanılmasına sebep olduğunu göstermiştir (Peha, 2005). Şekil 2.2 frekans spektrumu örnek bir kullanım yoğunluğu göstermektedir.



Şekil 2.2. Frekans Spektrumu Kullanım Yoğunluğu (Akyildiz ve diğ., 2006)

Sabit spektrum atama politikasının yeterli olmaması nedeniyle oluşan bu problemi önleyebilmek için ilk kez Mitola ve Maguire tarafından 1999 yılında ortaya atılan DSA kavramı olarak da adlandırılan gelecek nesil haberleşme kablosuz haberleşme sistemlerinden BR teknolojisi ortaya çıkmıştır.

BR sistemlerinin ilk somut adımı, ABD'de FCC'nin, BR kullanımını Aralık 2004'te önermesi ve Kasım 2008'de belirlenen kurallarla kullanımına müsaade ettiğini duyurmasıyla başlamıştır (Sato, 2012).

2.2. Bilişsel Radyo Teknolojisi

FCC'ye göre BR, çalıştığı elektromanyetik ortamı algılayabilen, haberleşmenin

kesintisiz bir şekilde devam edebilmesi için radyo iletişim parametrelerini birbirinden bağımsız bir şekilde dinamik olarak değiştirebilen, birlikte işlerliği kolaylaştıran ve lisanssız aygıtların lisanslı frekanslara erişebilmesini sağlayan bir radyodur (URL – 3).

BR'nin temel görevi, ortamdaki birincil kullanıcı olarak da bilinen lisanslı kullanıcıları ve bunlar tarafından kullanılmayan frekans spektrumlarını algılamaktır. Uygun frekans spektrumu tespit edildiğinde bunları BR kullanıcısı olarak bilinen lisanssız kullanıcılara tahsis etmektir. Şekil 2.3'te BR Ağları için Spektrum Yönetim Çerçevesi verilmiştir. BR'nin dinamik olarak bu işlemleri yapabilmesi için sahip olduğu fonksiyonlar bulunmaktadır (Çakır ve Yiğit, 2015).

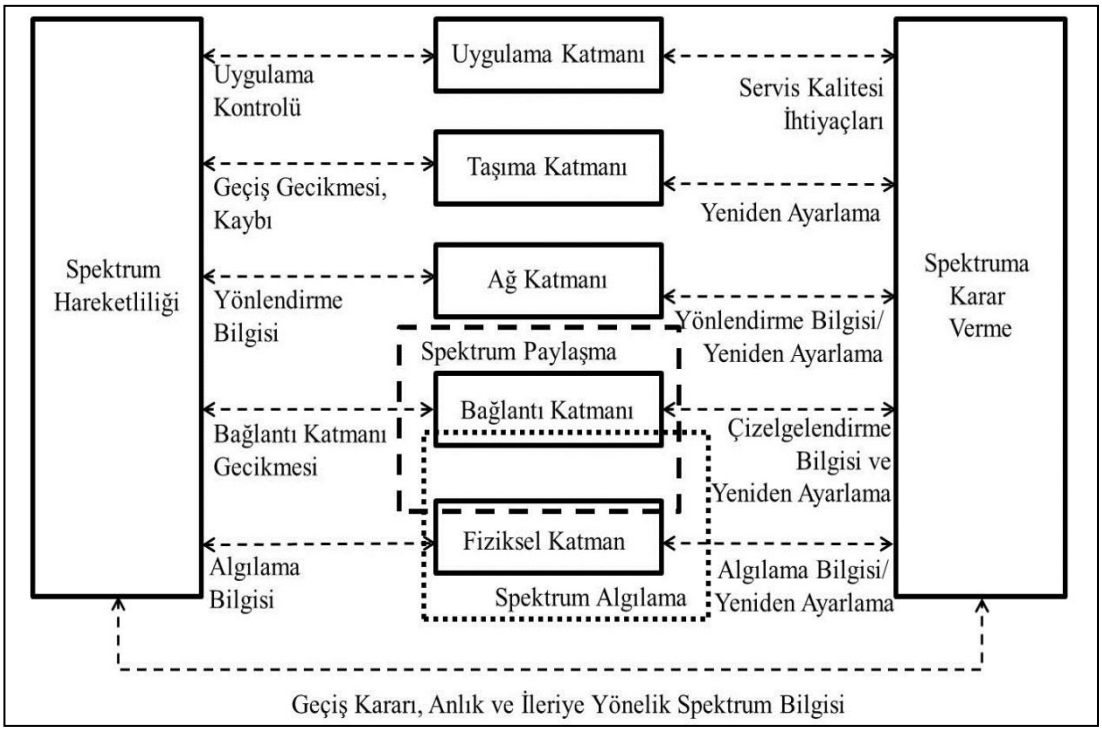
Bunlardan birincisi, BR'nin tüm radyo ortamını sürekli olarak taranmasını sağlayan Spektrum Algılama (Spectrum Detection) fonksiyonudur.

İkincisi, Spektrum Yönetimidir (Spectrum Management). Burada, algılama bilgilerine göre boş frekans spektrumları içinden ihtiyaç duyulan kanal ve hizmet kalitesine göre spektrum seçimi yapılır.

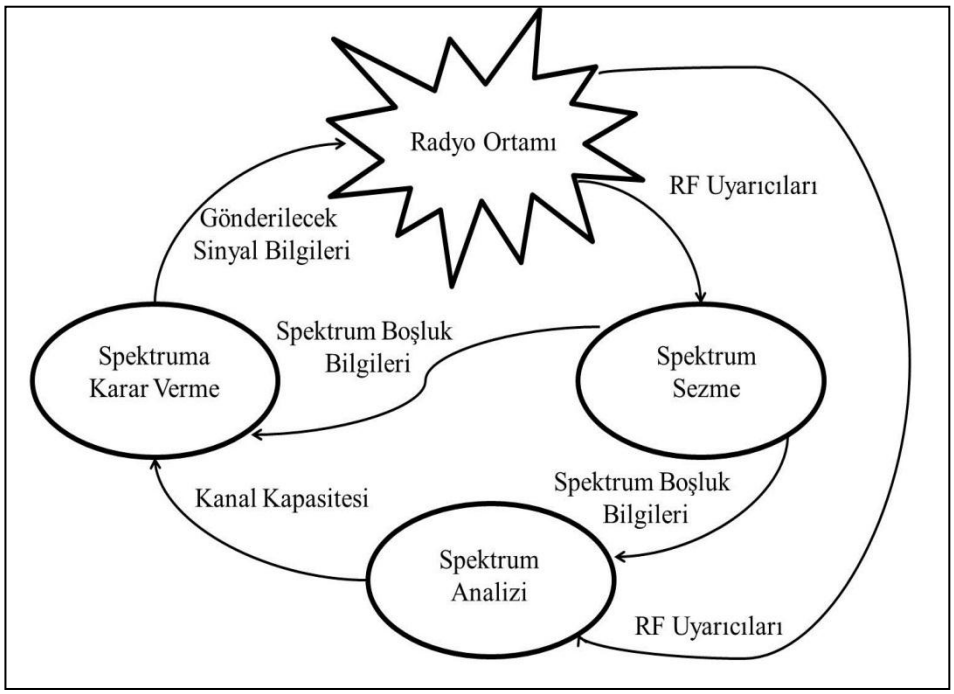
Üçüncüsü, algılama sonucunda uygun olduğu görülen frekans spektrumlarının BR kullanıcıları arasında adil bir şekilde paylaştırılmasını sağlayan Spektrum Paylaşımıdır (Spectrum Sharing).

Sonuncusu ise lisanslı kullanıcı kendi spektrumunu kullanmaya başladığında BR kullanıcısının ona etkileşim yapmaması için veya BR kullanıcısının daha iyi servis kalitesine sahip bir spektrum bulduğunda onu kullanabilmesi için yapılan spektrum değişim hareketlerini ifade eden Spektrum Hareketliliğidir (Spectrum Mobility) (Akyildiz ve diğ., 2011).

Bilişsel yeteneği ve yeniden ayarlanabilirliği BR'nin iki ana karakteristiğidir (Haykin, 2005). Bilişsel yeteneği, radyo ortamına adapte olabilmek için onu sürekli olarak takip edebilme ve uygun iletişim parametrelerine karar verebilme yeteneğidir. Bu karakteristik Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bir bilişsel döngü çerçevesinde gerçekleşir.



Şekil 2.3. Spektrum Yönetim Çerçevesi (Akyildiz ve diğ., 2008)

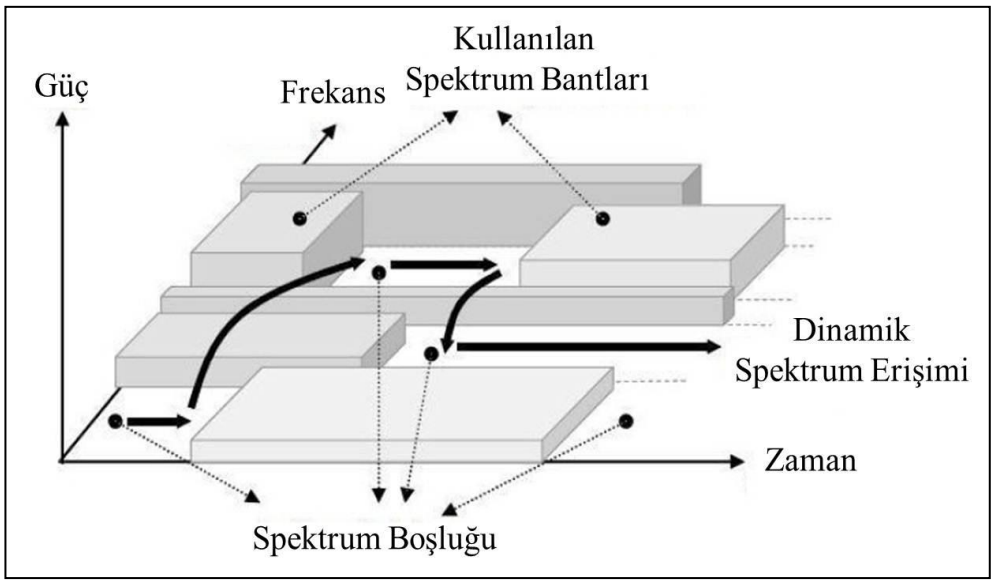


Şekil 2.4. Bilişsel Döngü (Akyildiz ve diğ., 2006)

Bu bilişsel döngü içerisinde bulunan spektrum sezme, frekans spektrumlarını tarayıp bunlardan bilgi elde eder. Sahip olduğu bu bilgileri ise spektrum analizi ve spektruma karar verme birimlerine gönderir. Spektrum analizi, spektrum sezme

işleminden gelen boş kanalların karakteristiklerini analiz edip sonuçları spektruma karar verme aşamasına gönderir. Spektrum karar verme ise, kullanıcıların ihtiyaçlarına göre kendisine gelen bilgileri de değerlendirerek en uygun spektruma karar verir (Çakır ve Yiğit, 2015).

BR, Bilişsel yeteneği sayesinde Şekil 2.5'te görüldüğü gibi spektrum bandının, spektrum boşluğu veya beyaz alan olarak da adlandırılan kullanılmayan bölümlerini tahsis edebilir. Yeniden ayarlanabilirlik ise; radyo ortamına göre bilişsel radyonun, kendi alıcısının veya göndericisinin çalışma frekansını, modülasyon şemasını, iletim gücünü ve kullandığı haberleşme teknolojisini dinamik olarak değiştirebilmesidir (Akyildiz ve diğ., 2006).

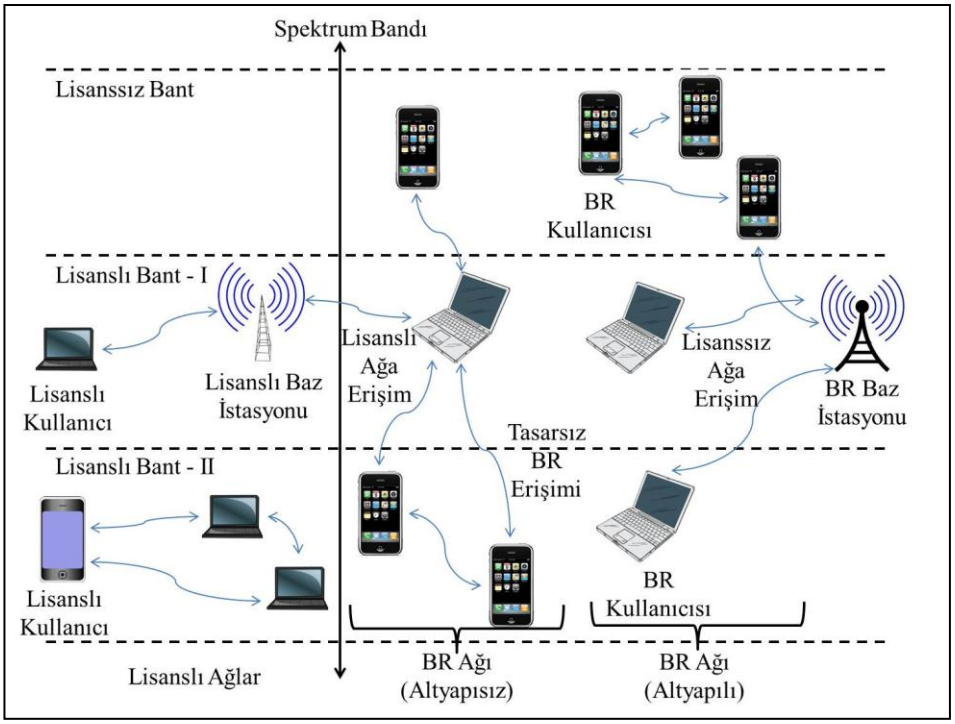


Şekil 2.5. Dinamik Spektrum Erişimi (Akyildiz ve diğ., 2009)

BR ağı, Lisanslı ve Lisanssız Bant yapısına sahiptir. Bu frekans bantları üzerinde haberleşmeyi gerçekleştiren Lisanslı Baz İstasyonu, Lisanslı Kullanıcı, BR Baz İstasyonu ve BR Kullanıcısı bileşenleri bulunabilir. Şekil 2.6'da örnek bir BR Ağ Mimarisi sunulmuştur (Akyildiz ve diğ., 2006).

Lisanslı Kullanıcı (LK), ülke çapında spektrumu düzenleyen kuruluşlara belli bir ücret ödeyerek almış olduğu lisansla bir frekansı kullanabilme hakkına sahip olan kullanıcı tipidir. BR Kullanıcısı (BK) ise, frekans spektrumunu algılayarak LK'ların kendi frekanslarını kullanmadığı zamanlarda o frekans bandını şartlı olarak

kullanabilen kullanıcı tipidir. Şartlı olarak kullanabilmeyle ile ifade edilmek istenen LK'nın kendi frekansını kullanmaya başladığı anda BK'nın o frekanstaki haberleşmesini kesip hattı boşaltma işlemidir. BR teknolojisinin kullanılabilmesi için bunun yapılması zorunluluktur. Böylece BK'lar, LK'ların haberleşmesine herhangi bir etkileşimde bulunmadan onların frekanslarından faydalanabilirler. (Çolak Arslan ve diğ., 2008).



Şekil 2.6. BR Ağ Mimarisi (Akyildiz ve diğ., 2006)

Bilişsel Radyolarda önerilen üç farklı erişim yöntemi mevcuttur. BR Ağ Erişiminde, BK'lar kendi baz istasyonlarına lisanslı ve lisanssız bantlardan erişebilirler. Tasarsız (Ad-Hoc) BR Erişiminde, BK'lar tasarsız bir ağda lisanslı ve lisanssız spektrum bantlarını kullanarak iletişim kurabilir ve birbirlerine erişebilir. Lisanslı Ağ Erişiminde, BK'lar lisanslı bantları kullanarak lisanslı baz istasyonlarına da erişebilir (Akyildiz ve diğ., 2008).

3. BR TEKNOLOJİSİNDE SPEKTRUM ALGILAMA

3.1. Giriş

BR, bulunduğu ortamı algılar ve sezme sonuçlarına göre uygun frekans spektrumlarını tespit eder. Bu işlem spektrum algılama olarak ifade edilmektedir. (Gamit ve Trapasiya, 2013).

BK, LK'nın kendi frekans bandını kullanmak istemesi durumunda, o bandı hızlı bir şekilde boşaltmak zorundadır. Bu işlemi yaptıktan sonra BK'nın kendi iletişiminde kesilme yaşamaması için o anda kullanılmayan başka bir frekans bandına geçerek iletişimini sürdürmesi gerekmektedir. Buradan da anlaşılabileceği gibi BR sistemlerin performansını etkileyen en kritik kısım, BK'ların hızlı bir şekilde spektrumu tarayarak kullanılmayan boşlukları tespit edip, bunlardan yararlanarak diğer BK'lar ile eş zamanlı davranması ve iletişim kurabilmesidir (Tongül, 2010).

Spektrum algılama, BR sistemlerin iletişim kanalında meydana gelebilecek tüm koşullar altında sistemin çalışabilirliğini sağlaması gerektiğinden üzerinde önemle durulan bir konu olmuştur. Spektrum algılama metotları Birincil Gönderici Tespiti (Primary Transmitter Detection, PTD), Birincil Alıcı Tespiti (Primary Receiver Detection, PRD) ve Girişim Tabanlı Tespit (Interference Based Detection, IBD) olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Gerçek ortamda birincil alıcı ve gönderici arasındaki haberleşme kanalının direk ölçülmesi BR için zordur. BR kullanıcısının haberleşme alanı içindeki spektrum boşluklarını tespit edebilmesi için birincil kullanıcıyı da tespit etmesi gerekmektedir. Bu yüzden BR kullanıcılarının yerel gözlemlerine dayalı olarak algılama yapan PTD, en çok araştırılan spektrum algılama metodudur. PTD metodunu kullanan çok sayıda spektrum algılama tekniği bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları ED, CFD ve MFD'dir (Akyildiz ve diğ., 2008).

Spektrum algılamada H_0 ve H_1 olmak üzere iki tane durum bulunmaktadır. H_0, ortamda LK'nın bulunmadığı sadece gürültünün bulunduğu durumdur. H_1 ise

ortamda LK'nın ve gürültünün bulunduğu durumdur.

$$H_0: y(t) = n(t) \tag{3.1}$$

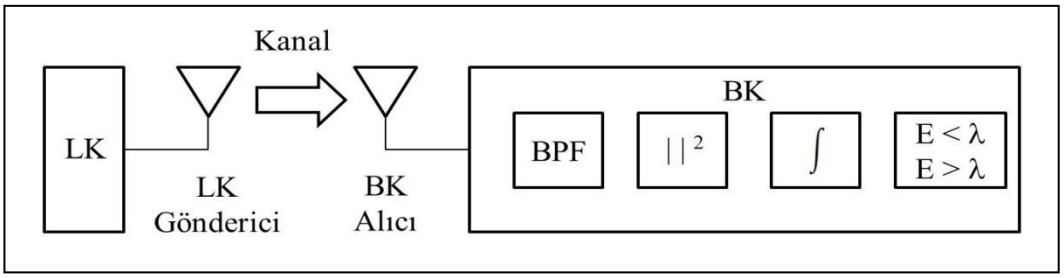
$$H_1: y(t) = h.x(t) + n(t) \tag{3.2}$$

Spektrum algılama performansı üç olasılıkta gerçekleşebilir. Doğru Tespit Olasılığı (Probability of Detection, P_d), BR'nin algıladığı frekansı dolu olarak bildirdiği durumda frekansın gerçekten LK tarafından kullanılma durumudur. Kayıp Tespit Olasılığı (Probability of Miss Detection, P_m), BR'nin algıladığı frekansı uygun olarak bildirdiği halde frekansın LK tarafından kullanılma durumdur. Yanlış Tespit Olasılığı (Probability of False Alarm, P_f), BR'nin algıladığı frekansı dolu olarak bildirdiği halde frekansın LK tarafından kullanılmadığı durumdur (Yucek ve Arslan, 2009).

3.2. Enerji Tabanlı Algılama

ED hesaplama yükünün ve uygulama karmaşıklığının az olması sebebiyle en çok kullanılan spektrum algılama tekniklerinden biri olan kullanılmıştır. Şekil 3.1 ED blok diyagramını göstermektedir. LK, lisanslı kullanıcı olmak üzere, kanal gönderici ve alıcı arasındaki haberleşmenin gerçekleştiği ortam, BK bilişsel radyo kullanıcısını ifade etmektedir. Elde edilen sinyaller bir bant geçiren filtreden (Band Pass Filter, BPF) geçer. Filtreden geçen sinyallerin enerjilerinin karesi alınarak toplanır. Bu enerji değerlerinin alınan örnek sayısı kadar ortalaması alınır. Son olarak, önceden tanımlanmış bir eşik değeriyle karşılaştırılır. Bu karşılaştırma işlemi lisanslı kullanıcının varlığını veya yokluğunu belirlemek için yapılır. Eşik değeri, sabit olarak veya kanal şartlarına göre değişebilecek şekilde ayarlanabilir.

Bu yöntemin avantajı, lisanslı kullanıcının hiçbir bilgisi BR kullanıcıları tarafından bilinmeden en iyi sonucu vermesidir. İşlem ve uygulamaları karmaşık değildir. Dezavantajı ise iyi bir tespit sonucu vermesi için uzun bir algılama süresine ihtiyaç duyması, farklı sinyal tiplerini ayırt etmemesi, sadece sinyalin varlığına bakması ve gürültünün gücünün belli olmadığı durumlarda tespit performansının iyi olmamasıdır (Akyildiz ve diğ., 2008).



Şekil 3.1. ED Blok Diyagramı (Çakır ve Yiğit, 2015)

Kablosuz haberleşmenin en basit şekilde yapıldığı SISO sistemlerde enerji tabanlı spektrum algılaması matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$y(t) = h.x(t) + n(t) \tag{3.3}$$

$$E = \frac{1}{N}\sum_{t=0}^{N}\left|y(t)\right| \tag{3.4}$$

LK tarafından gönderilen sinyal x, kanal kazancı h, gauss gürültüsü n, bilişsel radyo kullanıcısının aldığı sinyal ise y, toplam enerji E, örnek sayısı N, eşik değeri λ ile ifade edilmektedir.

Enerji tabanlı spektrum algılamada ki performanslar aşağıdaki gibi üç olasılıktan oluşmaktadır (Yucek ve Arslan, 2009).

$$P_d = (E > | H_1) \tag{3.5}$$

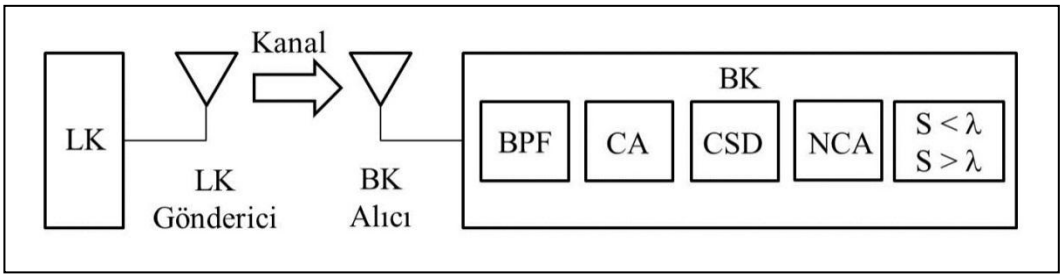
$$P_m = 1 - P_d \tag{3.6}$$

$$P_f = (E < | H_0) \tag{3.7}$$

3.3. Döngüsel Durağanlık Tabanlı Algılama

Modüle edilen sinyaller genelde belirli bir döngüde tekrar ederler. Birbirinden farklı olan sinyallerin döngüsel durağanlık özellikleri de birbirinden farklıdır. Bunlar kendi anlam ve ilişkilerine göre karakterize edilirler. Sonrasında bu sinyallerin karakterleri (Spectral Correlation Function, SCF) tarafından tespit edilir. Bu teknik, SCF'yi kullanarak sinyalleri tanımlamaya ve sınıflandırılmaya yarar. Modülasyona uğramış sinyal, belirli aralıklarla tekrar ederken gürültünün geniş anlamda durağan bir sinyal

olması sonucunda gürültünün gücüyle, modüle edilen sinyalin gücünü SCF ayırt edebilmektedir. Bu tekniğin en önemli özelliği de budur. Bu yüzden gürültünün gücü belli olmadığı durumlarda ED'den daha iyi performans gösterir. Hesaplamasının karışık olması ve gözlem süresinin uzun sürmesi ise dezavantajlarındandır (Zhang ve diğ., 2009).



Şekil 3.2. CFD Blok Diyagramı (Ustok ve Ozbek, 2011)

LK tarafından gönderilen ve belirli aralıklarla tekrar eden sinyal x, sinyalin ortalaması m_x, sinyalin özilinti fonksiyonu R_x, ortalama ve özilinti fonksiyonlarının periyodu T_0 ve eşik değeri ise λ olarak tanımlanmıştır.

$$m_x\left(t + T_0\right) = m_x\left(t\right) \tag{3.8}$$

$$R_x\left(t + T_0, T_0\right) = R_x\left(t,u\right) \tag{3.9}$$

Özilinti fonksiyonundaki t ve u değerlerini $t + \tau / 2$ ve $t - \tau / 2$ ile yer değiştirirsek fonksiyonun son halini elde ederiz.

$$R_x\left(t + \tau / 2,\ t - \tau / 2\right) = \sum_{\alpha} R_x^{\alpha}\left(\tau\right) e^{j2\pi\alpha t} \tag{3.10}$$

Denklemdeki R_x^{α} dönemli özilinti fonksiyonu (Cyclic Autocorrelation, CA), α ise dönemli frekans olarak ifade edilmektedir. Dönemli özilinti fonksiyonu şu şekilde tanımlanabilir.

$$R_x^{\alpha}\left(\tau\right) = \frac{1}{T} \int_{-1/T}^{1/T} R_x\left(t + \tau / 2,\ t - \tau / 2\right) e^{-j2\pi\alpha t} dt \tag{3.11}$$

Dönemli özilinti fonksiyonunun fourier dönüşümü ise dönemli spektral fonksiyonu

(Cyclic Spectral Density, CSD) olarak ifade edilir ve Eşitlik (3.12)'de gösterilmektedir.

$$S_x^{\alpha}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^{\alpha}(\,)\, e^{-j2\pi f\tau} d\tau \tag{3.12}$$

Benzetimlerde gözlemlenen örnekler sınırlı sayıda olduğundan, CA fonksiyonu sınırlı bir aralıktan tespit edilmelidir. O yüzden x sinyalinin, f + $\frac{\alpha}{2}$ ve f - $\frac{\alpha}{2}$ frekanslarında Δt zaman aralığında normalize edilmiş korelasyonu bulunur. Eşitlik (3.13) bu korelasyonu ifade etmektedir. x_f elde edilen x sinyalinin sonlu zaman fourier dönüşümü göstermektedir.

$$S_x^{\alpha}(f) = \lim_{t\to\infty} \lim_{\Delta t\to\infty} \int_{-\frac{\Delta t}{2}}^{\frac{\Delta t}{2}} \frac{1}{T} x_f\left(t, f + \frac{\alpha}{2}\right) x_f^*\left(t, f - \frac{\alpha}{2}\right) dt \tag{3.13}$$

Döngüsel Durağanlık tabanlı spektrum algılamada ki performanslar aşağıdaki gibi üç olasılıktan oluşmaktadır (Zhang ve diğ.,2009).

$$P_d = \left(\max\left(|S_x^{\alpha}(f)|\right) > \lambda \mid H_1\right) \tag{3.14}$$

$$P_m = 1 - P_d \tag{3.15}$$

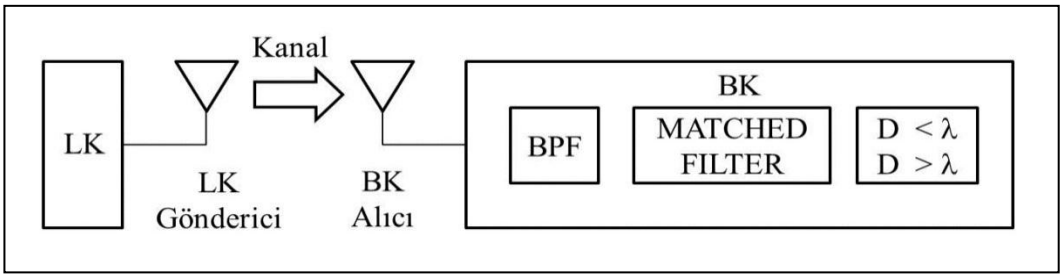
$$P_f = \left(\max\left(|S_x^{\alpha}(f)|\right) < \lambda \mid H_0\right) \tag{3.16}$$

3.4. Eşlenik Filtre Tabanlı Algılama

Eşlenik filtre, dijital sinyal işlemede kullanılan doğrusal bir filtredir. Rasgele gürültünün bulunduğu ortamda tutarlı bir algılama yapabilmek için SNR oranını maksimum yapar. LK ve BK arasında zaman kaydırmalı olarak sinyali ilişkili hale getirir. Daha sonra filtrenin çıkışındaki değerle belirlenen eşik değerini karşılaştırarak LK'nın varlığını tespit eder (Eduardo ve Cabellero, 2015).

LK, BK'ya pilot sinyal göndererek ileteceği sinyal hakkında bilgi verebilir. Bu metot, BK'nın gönderilecek sinyalin dalga boyu, frekansı, modülasyon tipi ve

çerçeve formatı gibi bilgilerine sahip olduğu durumda iyi bir tespit performansı gerçekleştirir. Diğer metotlarla karşılaştırıldığında kısa sürede daha kesin bir sonuç elde ederek yüksek işlem kazancı sağlar. Gönderilecek sinyal hakkında yanlış bilgiye sahip olduğunda ise çok kötü bir algılama performansı elde etmesi bu metodun dezavantajıdır. Diğer dezavantajlarından birisi, gönderilebilecek tüm sinyal çeşitlerini algılayabilen bir algılama birimine ihtiyaç duymasıdır. Çünkü böyle kapsamlı bir birimin pratikte oluşturulması zordur. Ayrıca algılamada çeşitli alıcı algoritmalarını çalıştırmaya ihtiyaç duyduğundan güç tüketimi fazladır. Sonuç olarak gönderilecek sinyalin bilgisi biliniyorsa LK'yı tespit etmek için en uygun metottur (Yucek ve Arslan, 2009).



Şekil 3.3. MFD Blok Diyagramı (Sansoy ve Buttar, 2015)

SISO sistemlerde eşlenik filtre tabanlı spektrum algılaması matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$y(t) = x(t) + n(t) \tag{3.17}$$

$$Y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} h(t-k).x(t) \tag{3.18}$$

Şekil 3.3 MFD blok diyagramını göstermektedir. LK tarafından gönderilen sinyal x, ortamdaki gürültü n, BK'nın aldığı sinyal y, alınan örnek sayısı N, LK'nın gönderdiği sinyalin kompleks eşleniğiyle elde edilen eşlenik filtrenin cevabı h_f ve eşlenik filtrenin çıkışı Y olarak tanımlanmıştır.

$$h_f(t) = x^*(N-1-t) \tag{3.19}$$

$$Y(N-1) = \sum_{t=0}^{N-1} y(t).x(t) = y^{T}.x \tag{3.20}$$

$$D(y) = \left| \sqrt{\frac{2}{N.E.\sigma_w^2}} \sum_{t=0}^{N-1} y(t).x^{*}(t) \right|^2 \tag{3.21}$$

Eşlenik filtre tabanlı algılamanın karar istatistiği D yukarıda belirtilmiştir. Eşlenik filtre tabanlı spektrum algılamada ki performanslar aşağıdaki gibi üç olasılıktan oluşmaktadır (Upadhyay ve Deshmukh, 2015).

$$P_d = P\,(\,D(y) > |\,H_1) \tag{3.22}$$

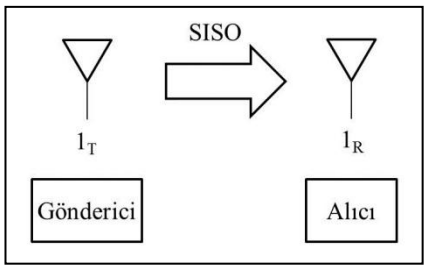
$$P_m = 1 - P_d \tag{3.23}$$

$$P_f = P\,(\,D(y) > |\,H_0) \tag{3.24}$$

4. SISO SİSTEMLERDE SPEKTRUM ALGILAMA

4.1. Giriş

Şekil 4.1'de gösterilen SISO anten modelinde ED yöntemini kullanarak elde edilen spektrum algılama performansları aşağıda ifade edilmiştir (Oh ve Lee, 2009).



Şekil 4.1. SISO Anten Modeli (Sansoy ve Buttar, 2015)

$$P_d = P\,(\,E > |\,H_1) \tag{4.1}$$

Eşitlik (4.1)'de gösterildiği gibi LK'nın ortamda bulunduğu H_1 durumunda alınan sinyalin enerjisi önceden belirlenen eşik değerinden büyükse doğru tespit yapılmış olur.

$$P_d = Q_m\left(\sqrt{2\gamma}\ ,\sqrt{\lambda}\right) \tag{4.2}$$

Doğru Tespit Olasılığı Eşitlik (4.2)'de gösterildiği gibi Marcum Q fonksiyonu ile elde edilir. γ, SNR'ı ifade etmektedir.

$$Q_m(a,b) = \int_b^{\alpha} x.\left(\frac{x}{a}\right)^{M-1}.\exp\left(\frac{-x^2+a^2}{2}\right)I_{M-1}(ax)\,dx \tag{4.3}$$

Marcum Q fonksiyonu Eşitlik (4.3)'te tanımlanmıştır.

$$P_m = P\,(\,E < |\,H_1) \tag{4.4}$$

Eşitlik (4.4)'te gösterildiği gibi LK'nın ortamda bulunduğu H_1 durumunda alınan sinyalin enerjisi önceden belirlenen eşik değerinden küçükse sinyal kaybedilmiş yani elde edilmemiş olur.

$$P_m = 1 - P_d \tag{4.5}$$

Kayıp Tespit Olasılığının, Doğru Tespit Olasılığı ile olan ilişkisi Eşitlik (4.5)'te verilmiştir.

$$P_f = P\,(E > | H_0) \tag{4.6}$$

Eşitlik (4.6)'da ifade edildiği gibi LK'nın ortamda bulunmadığı H_0 durumunda alınan sinyalin enerjisi önceden belirlenen eşik değerinden büyükse sinyal yanlış hatalı olarak elde edilmiş olur.

$$P_f = \frac{\Gamma\left(N/2 , \lambda/2 \right)}{\Gamma\left(\lambda/2 \right)} \tag{4.7}$$

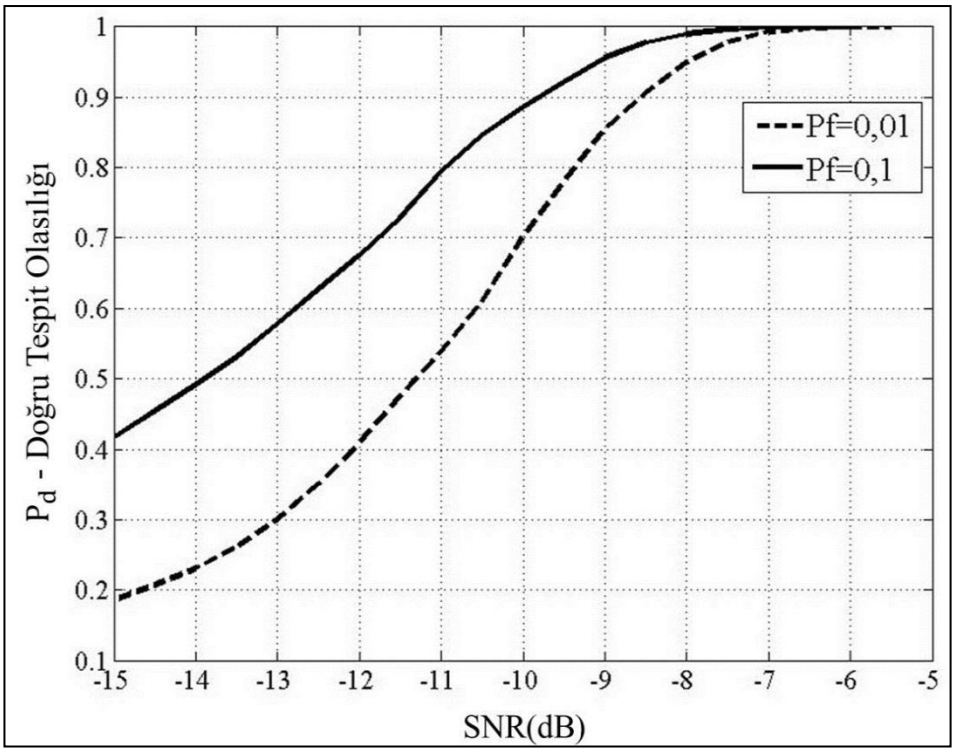
Yanlış Tespit Olasılığı, Eşitlik (4.7)'de Chi Square dağılımı ile elde edilir. N, alınan örnek sayısını ifade etmektedir. Chi Square dağılımı Eşitlik (4.8)'de tanımlanmıştır.

$$\Gamma(a,b) = \int_a^{\infty} x^{b-1}.\, e^{-x} dx \tag{4.8}$$

Spektrum algılamada kullanılacak eşik değeri, sistemin izin verebileceği Yanlış Tespit Olasılığına göre belirlenir. P_f, ne kadar yüksek seçilirse o kadar çok kullanılmayan spektrum bandı dolu olarak algılanır. Böylece dolu olarak algılanan boş bantlar BK tarafından kullanılamaz ve spektrum verimliliği düşer. Diğer taraftan P_f, düşük seçildiğinde Kayıp Tespit Olasılığı P_m artacağından LK tarafından kullanılan spektrum bandı boş olarak algılanacaktır ve LK'ya girişim olasılığı artacaktır. Sonuç olarak spektrum algılama performansı eşik değerine göre gerçekleşir (Ustok ve Ozbek, 2011 ve Oh ve Lee, 2009).

4.2. Benzetim Sonuçları

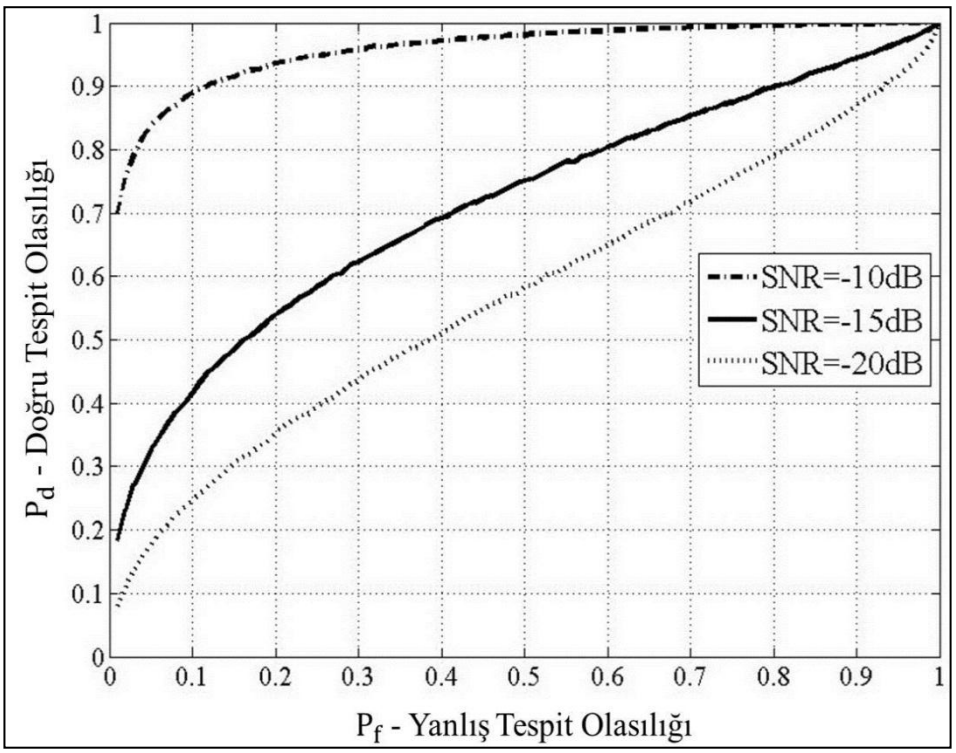
Şekil 4.2 SISO anten modeline sahip bir sistemde SNR'ın P_d'ye olan etkisi alıcı işlem karakteristik (Receiver Operating Characteristic, ROC) eğrisini göstermektedir. BPSK (Binary Phase Shift Keying) modülasyonu kullanılarak ve AWGN kanal altında benzetim gerçekleştirilmektedir. -15 dB ile -5 dB arasındaki SNR değerleri ve iki farklı P_f değeri için algılama performansı incelendi. SNR artış gösterdiğinde P_d'de artış göstermektedir. P_f için sistemin müsaade ettiği değere kadar yapılan artırma işlemi algılama performansını olumlu etkiler. Fakat bu artırım daha fazla olursa spektrum verimliliği düşer. Nitekim P_f'nin 0,1 olduğu durumda daha düşük SNR değerlerinde P_f'nin 0,01 olduğu duruma göre daha doğru tespit olasılığı elde edilmektedir.



Şekil 4.2. P_d – SNR ROC Eğrisi

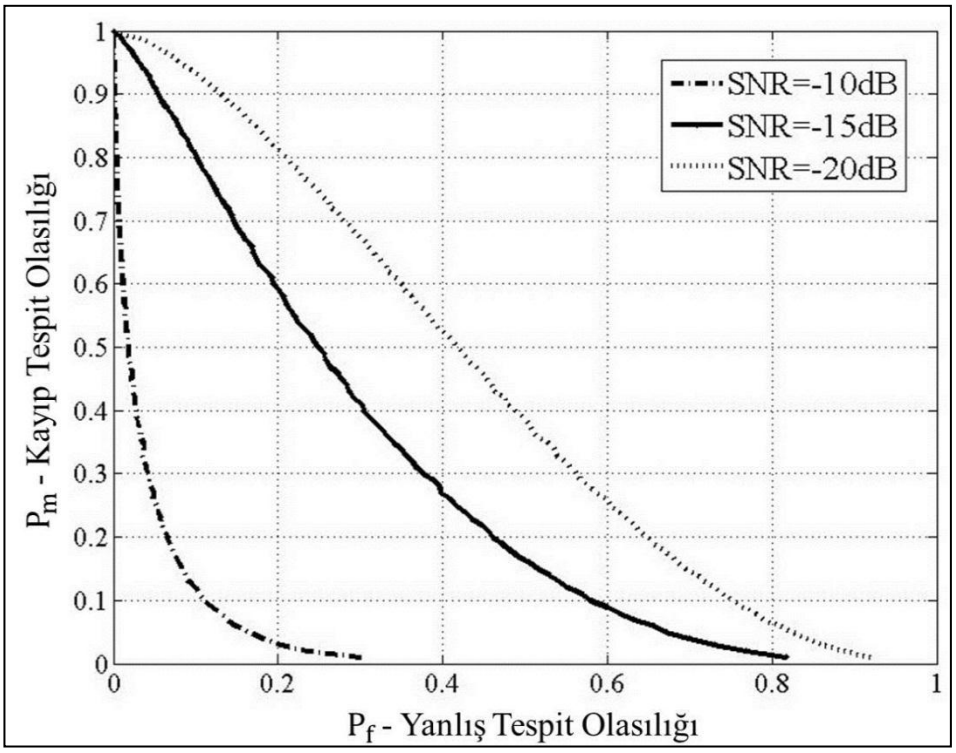
Şekil 4.3 SISO anten modeline sahip bir sistemde P_d'nin P_f'ye olan etkisi ROC eğrisinde göstermektedir. BPSK modülasyonu kullanılarak ve AWGN kanal altında benzetim gerçekleştirilmektedir. -10 dB, -15 dB ve -20 dB olmak üzere üç farklı SNR değeri için algılama performansı incelendi. SNR değerinin artış gösterip sinyalin gürültüyü bastırdığı durumda P_d olasılığı P_f'den daha yüksek çıktığından

spektrum algılama performansı artış göstermektedir. Düşük SNR değerlerinde ise P_d ve P_f olasılıkları birbirine yakın çıkmaktadır.



Şekil 4.3. P_d – P_f ROC Eğrisi

Şekil 4.4 SISO anten modeline sahip bir sistemde P_m'nin P_f'ye olan etkisini ROC eğrisinde göstermektedir. BPSK modülasyonu kullanılarak ve AWGN kanal altında benzetim gerçekleştirilmektedir. -10 dB, -15 dB ve -20 dB olmak üzere üç farklı SNR değeri için algılama performansı incelendi. SNR artış gösterdiğinde P_m olasılığı azalır. Sinyal gücünün, gürültünün gücünden yüksek olduğu durumlarda sinyalin kayıp olma olasılığı azalmaktadır. Düşük SNR değerlerinde ise P_m olasılığı daha yüksek değerde olduğundan gerçekte dolu olan spektrum BK tarafından boş olarak algılanıp LK'ya girişim gerçekleşebilir.



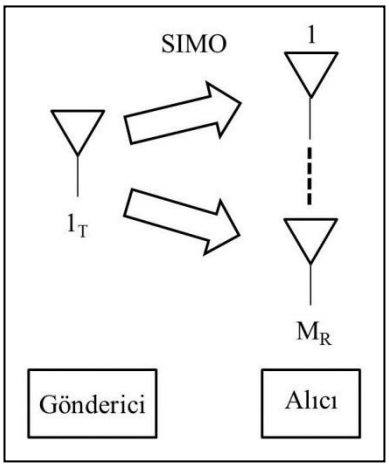
Şekil 4.4. P_m – P_f ROC Eğrisi

5. ÇOKLU ANTENLERLE SPEKTRUM ALGILAMA

5.1. Giriş

Kablosuz haberleşmede spektral verimliliği arttırmak ve kanal zorluklarının üstesinden gelebilmek için geleneksel SISO sistemler yerine gönderici ve/veya alıcıda çoklu anten kullanan sistemler kullanılmaktadır. Bunlar, Şekil 5.1'de gösterilen SIMO, Şekil 5.3'te gösterilen MISO ve Şekil 5.4'te gösterilen MIMO sistemlerdir (Yiğit, 2010).

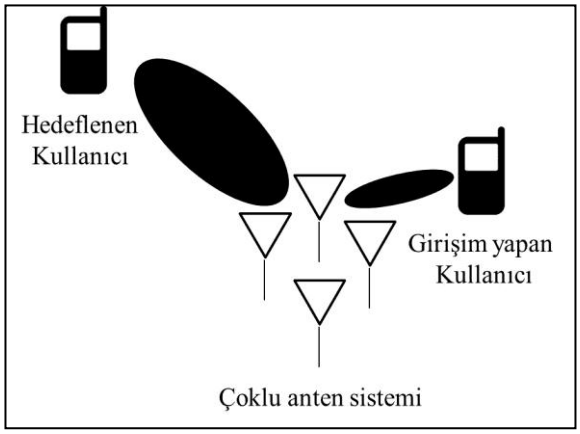
Çoklu antenler, kablosuz sistemlerin performansını arttırma açısından çok önemlidir. Geleneksel SISO sistemlere göre spektral verimlilikleri daha fazladır (Zheng ve Tse, 2003). Çoklu antenlerin gönderici ve/veya alıcıda kullanılması, dizi kazancı, çeşitleme kazancı, uzaysal çoğullama kazancı ve hüzmeleme kazancı elde edilmesini sağlar (Gesbert ve diğ., 2003).



Şekil 5.1. SIMO Anten Modeli (Achary ve diğ., 2012)

Şekil 5.2'de gösterildiği gibi çoklu antenler kullanılarak elde edilen dizi kazancıyla komşu göndericilerin girişimi bastırılır (Hua ve diğ., 2011). Gönderici ve alıcı anten çiftleri arasındaki iletişim genellikle yayılım yolları üzerinden yapıldığından veri

gönderimi ve alımı uzaysal alanda olur. Anten dizisi, bu yayılım yolların birbirinden ayrılmasını sağlar. Bu sayede aynı zaman ve frekansta birden fazla veri iletimi gerçekleştirilmiş olur (Jensen ve Wallace, 2004).

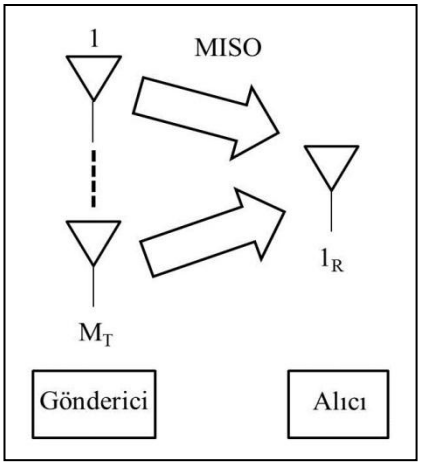


Şekil 5.2. Dizi Kazancı (Yiğit, 2010)

Çoklu antenler kullanılarak yapılan çeşitleme, sönümlemenin etkilerini azaltmaya yarar. Gönderici ve alıcı antenlerin her bir çifti göndericiden alıcıya bir sinyal yolu sağlar. Aynı veriyi taşıyan sinyalin farklı yollar üzerinden gönderilmesiyle gönderilen verinin çoklu bağımsız sönümlemeye uğrayan kopyaları alıcıda gözlemlenebilir. Böylece gönderilecek verinin güvenilirliği arttırılmış olur (Zheng ve Tse, 2003). Sinyalin farklı kopyaları farklı zamanlarda iletilince zaman çeşitlemesi (Time Diversity, TD), farklı bağımsız frekanslar üzerinden iletilince frekans çeşitlemesi (Frequency Diversity, FD) ve gönderici alıcı antenler arasındaki her bir kanalın bağımsız olarak sönümlemeye uğrayarak iletilmesi uzaysal çeşitleme (Spatial Diversity, SD) olarak ifade edilmektedir (Yiğit, 2010). Çeşitleme tekniklerinin esas amacı bağımsız sönümleme kanallarından alınan sinyallerin farklı kopyalarını karşılaştırıp doğru olanı elde etmektir. (Achary ve diğ., 2012). Sönümlenmeden ve gölgelenmeden dolayı spektrum algılamada ortaya çıkan performans düşüklüğü BK'da çoklu anten kullanımı ile büyük oranda giderilebilir (İngök, 2012).

Uzaysal Çoğullama kazancı, aynı frekans üzerinden iletim sağlayan gönderici ve alıcı arasındaki birbirinden bağımsız paralel uzaysal kanallar ile gerçekleşir. İletim gücü ve bant genişliğinde herhangi bir artışa gidilmeden veri hızında artış elde edilmesini sağlar. SM kazancı, anten sayısının artmasıyla veri hızını doğru orantılı

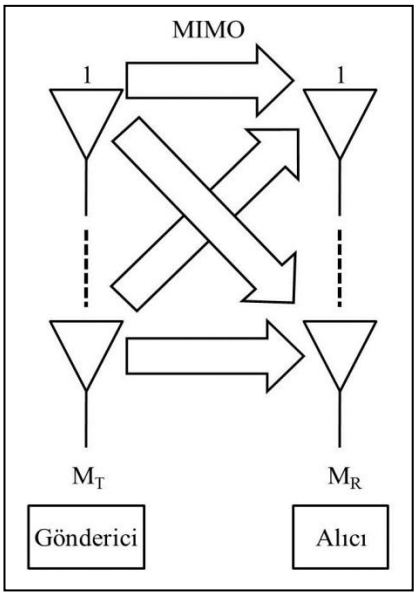
olarak artırır (Yiğit, 2010).



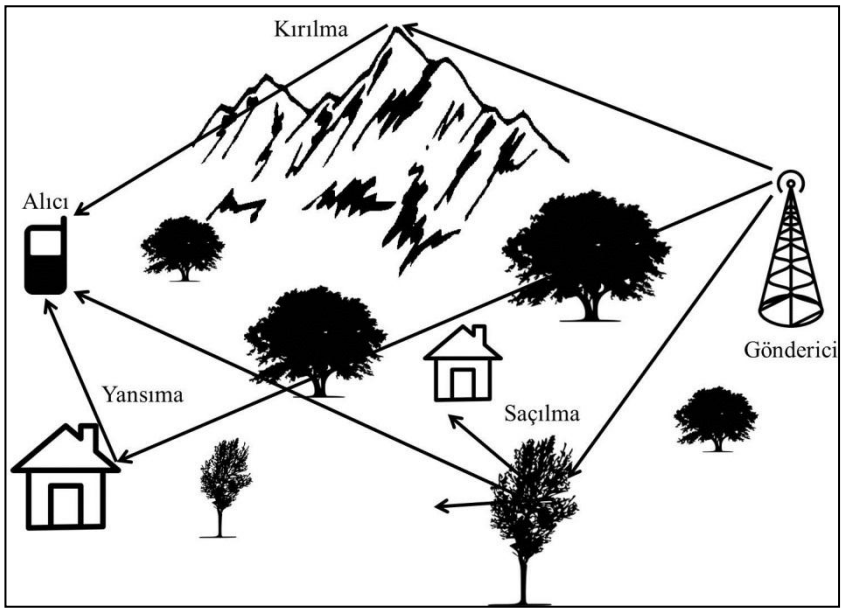
Şekil 5.3. MISO Anten Modeli (Achary ve diğ., 2012)

MIMO, üzerinde bulundurduğu çoklu antenlerle gelişmiş sinyal işlemeye yönelik çok sayıda fayda sağlamaktadır. Kablosuz haberleşme sistemlerine getirdiği uzay boyutu sayesinde ilave bir güç ve bant genişliğine ihtiyaç duymadan kanal kapasitesini ve sinyal kalitesini arttıran etkili bir teknoloji olarak kabul görmüştür (Hua ve diğ., 2011). Bu sistemlerde gönderici ve alıcıda kullanılan anten dizileri arasında birbirinden bağımsız sönümlemeye uğrayan paralel kanallar mevcuttur. Bu kanallar üzerinden aynı frekans ve zamanda veri dizileri gönderilebilir. Böylece, bağlantı güvenilirliğinin ve spektral verimliliğin artmasını sağlanır.

SISO sistemler için bir dezavantaj olan çokluyol sönümlemesi MIMO sistemler tarafından avantaja çevrilir. (Zheng ve Tse, 2003). MIMO'nun avantaja çevirdiği bu çokluyol sönümlemeleri Yansıma, Kırılma ve Saçılma olarak adlandırılmıştır. Şekil 5.5 Yansıma, Kırılma ve Saçılmanın genel görünümünü göstermektedir (Atmaca, 2009).



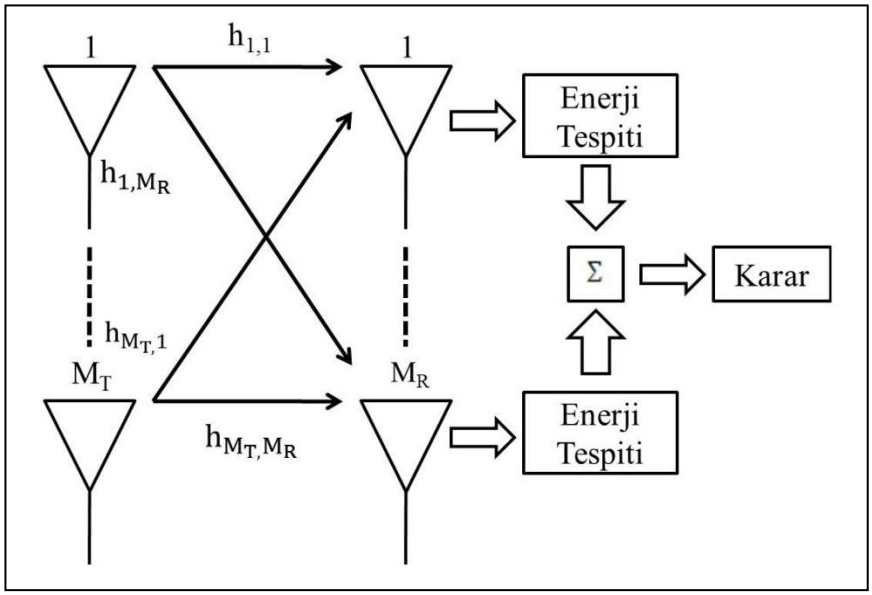
Şekil 5.4. MIMO Anten Modeli (Cakir ve Yigit, 2015)



Şekil 5.5. Yansıma, Kırılma ve Saçılmanın Genel Görünümü (Atmaca, 2009)

Kablosuz iletişimde MIMO yapısının yaygınlaşması birçok kanal modelinin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu yapının kablosuz haberleşme ortamındaki performansını değerlendirebilmek için gerçek yayılım koşullarını yansıtan bir kanal modeli kullanılmalıdır. Bu yüzden literatürde üzerine çalışılmış çeşitli kanal modelleri bulunmaktadır. MIMO anten modelinde kullanılan kanal modelleri fiziksel

ve analitik olarak sınıflandırılabilir. Fiziksel kanal modelleri gönderici ve alıcı anten dizileri arasında çift yönlü çokluyol yayılımına dayanan bir ortam oluşturmaya çalışır. Fiziksel kanal modelleri, anten modeli, anten sayısı, dizi geometrisi, polarizasyon gibi anten ayarlarından ve bant genişliğinden bağımsızdır. Modelleme yaparken dalga yayılım parametrelerinden karmaşık yol genliğini, ayrılış açısını, varış açısını ve yol gecikmesini kullanır. Analitik kanal modelleri, dalga yayılımını matematiksel olarak tam ifade edemediğinden bireysel gönderici ve alıcı antenler arasındaki dürtü yanıtını kullanır (Almers ve diğ., 2007).



Şekil 5.6. MIMO Antenlerde Spektrum Algılama (Cakir ve Yigit, 2015)

Şekil 5.6'da gönderici anten sayısı M_T, alıcı anten sayısı M_R olmak üzere MIMO antenlerde enerji tabanlı spektrum algılama gösterilmektedir. Eşitlik (5.1)'de Y_R $M_R \times 1$ boyutlu alınan sinyal vektörünü, X_T $M_T \times 1$ boyutlu iletilen sinyal vektörünü ve N_T sıfır ortalamalı karmaşık Gauss gürültü vektörünü temsil etmektedir.

$$Y_R = H.X_T + N_T \tag{5.1}$$

Eşitlik (5.2)'de h_{ij} j.inci gönderici anteninden i.inci alıcı antenine doğru olan kanal kazancı olmak üzere $H=[h_{ij}]$ $M_R \times M_T$ boyutlu kanal matrisidir. Her iki uç arasındaki kanal bağıntısı ihmal edilebilir yol gecikmesi (τ_l) durumunda Eşitlik (5.3)'te yazılmıştır.

$$H=\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,M_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \vdots & h_{2,M_R} \\ \vdots & \vdots & h_{i,j} & \vdots \\ h_{M_R,1} & h_{M_R,2} & \cdots & h_{M_R M_T} \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

$$H(t)=\sum_{l=1}^{L}\alpha_l a_{R,l} a_{T,l}^{H} e^{j(\omega_l t+\theta_l)} \tag{5.3}$$

L çokluyolların sayısı, α_l Rayleigh sönümleme parametresi, $a_{R,l}$ ve $a_{T,l}$ sırasıyla alıcı ve verici anten dizisinde l.inci çokluyol bileşeni için tanımlanan dizi yanıt vektörleridir. ϕ_l l.inci çokluyolun rastgele fazıdır. ω_l Eşitlik (5.4)'de verildiği gibi alıcının hareketinden dolayı oluşan faz kaymasıdır.

$$\omega_l=2\pi\frac{V_R}{\delta}\cos\theta_l \tag{5.4}$$

θ_l alıcının hareket yönü ile l.inci çokluyol arasındaki açıdır. V_R ise alıcının saatteki hızıdır. δ taşıyıcı sinyalin dalga boyudur. BR'nin her bir anteninden ($i=1,\ldots,M_R$) alınan sinyallere enerji tespiti bloğu uygulanır. Eşitlik (3.4) kullanılarak her bir antenin toplam enerjisi E_i hesaplanır. Daha sonra, çıkan sonuçlar toplanır ve Eşitlik (5.5)'de verildiği gibi M_R'ye bölünerek ortalaması alınır.

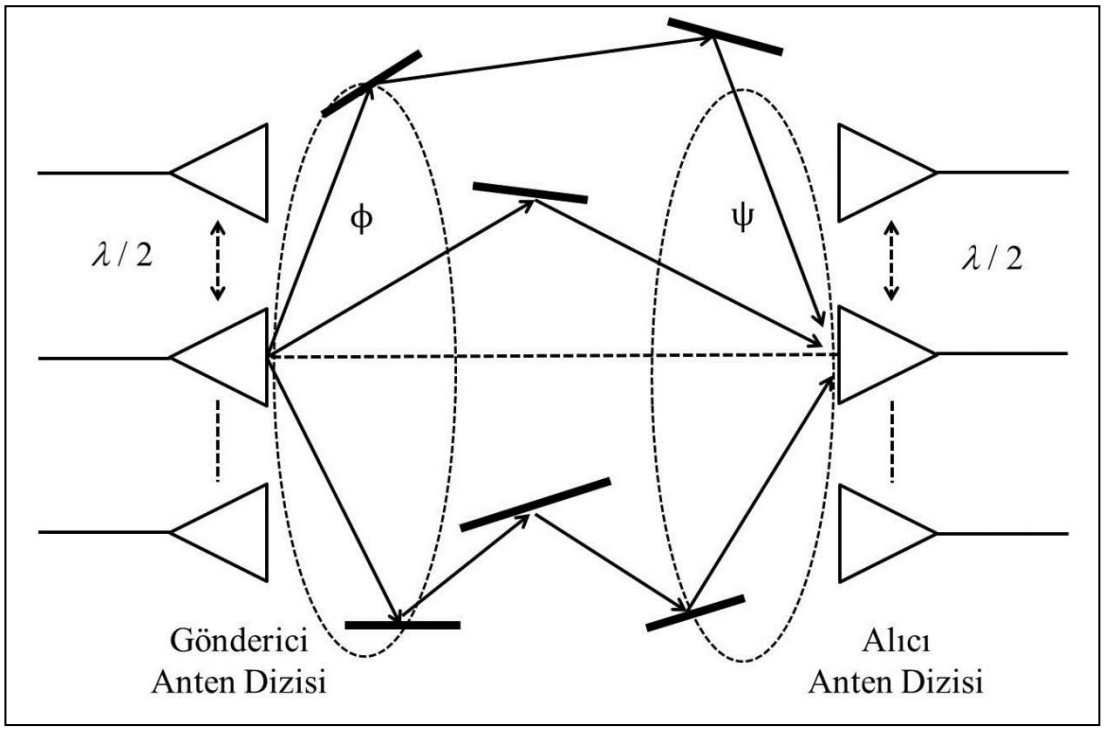
$$\bar{E}=\frac{1}{M_R}\sum_{i=1}^{M_R}E_i \tag{5.5}$$

Son olarak, çıkan sonuç önceden belirlenen eşik değeri ile karşılaştırılarak karar verilir.

5.2. Benzetim Sonuçları

Bu çalışmada literatürde en çok kullanılan kanal modellerinden birisi olan Sonlu saçıcılı kanal modeli kullanıldı. (Almers ve diğ., 2007). Kullanılan bu kanal modelinde çokluyol bileşenlerinin gönderici anten dizisinden ϕ DOD açısı ile saçıldığı, ψ DOA açısı ile alıcı anten dizisine ulaştığı ve anten dizilerindeki elemanların arasındaki mesafenin $\lambda/2$ olarak alındığı Şekil 5.7'de gösterilir.

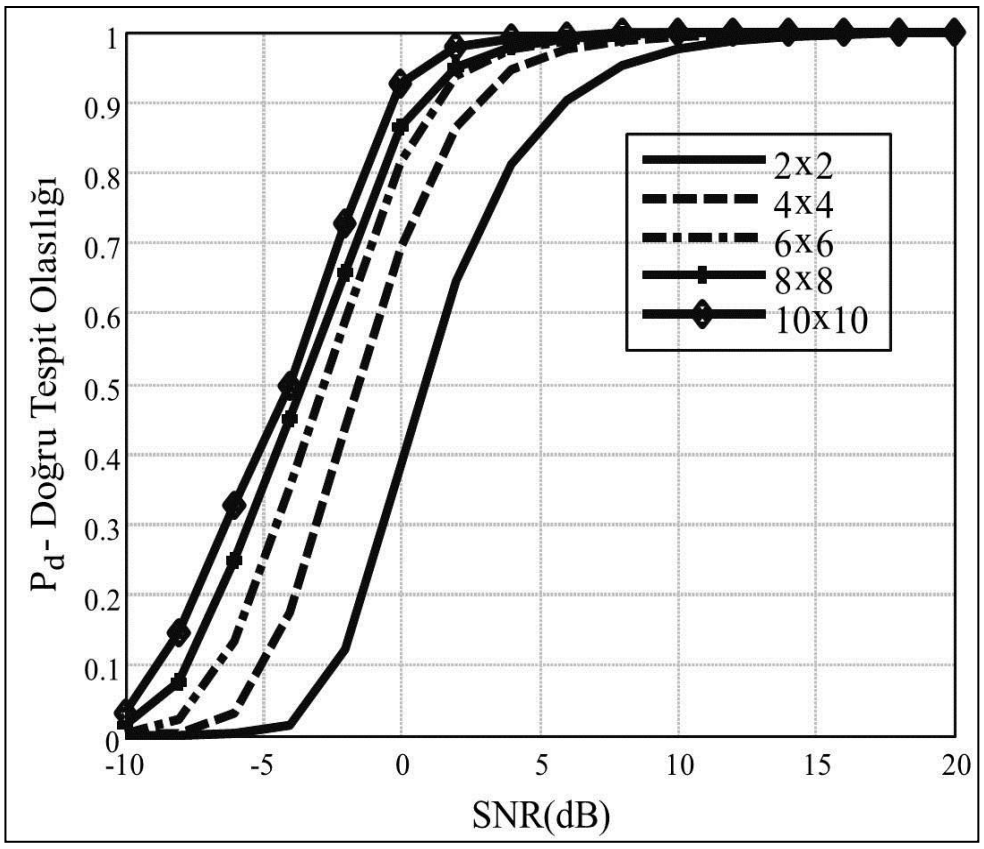
LK ve BK'nın çoklu antenler ile donatıldığı durumda enerji tabanlı spektrum algılamanın performansını farklı yayılım koşulları altında analiz etmek için benzetimler gerçekleştirildi. LK'nın sabit, BK'nın hareketli olduğu varsayılmaktadır. Eşitlik (5.3) ile verilen kanal, BK hızı (V_R), LK ve BK çoklu antenlerine gelen çokluyolların sayısı (L), açısal yayılımları ve ortalama ayrılış ve varış açıları için üretilir. Taşıyıcı frekansı 2,4 GHz olarak alındı. Örnekleme zamanı T_s, TDD çerçeve yapısına uygun olarak 10/15 ms olarak seçildi (Kavak ve diğ., 2005).



Şekil 5.7. Sonlu Saçıcılı Kanal Modeli (Yiğit, 2010)

İstatistiksel sonuçlar elde etmek için 100 TDD çerçevesi oluşturuldu ve her bir çerçeve için 1000 monte carlo koşturması gerçekleştirildi. Her bir çerçevede çokluyolların LK'dan ortalama ayrılış açıları ve BK'ya ortalama varış açıları ve açısal yayılımları rastgele değişmektedir. Çokluyolların uzunlukları arasındaki farkın neden olduğu yol gecikmesi (τ_l) ihmal edilmiştir. Ayrıca, çokluyollardaki Doppler kayması her koşturmada rastgele alındı. Benzetimler -10 dB ve 20 dB SNR değerleri arasında ve QPSK modülasyonu kullanılarak gerçekleştirildi. P_f değeri 0,01 olarak alındı.

Şekil 5.8 LK ve BK tarafındaki anten sayılarının spektrum algılama performansına olan etkisini gösterir. 2×2, 4×4, 6×6, 8×8 ve 10×10 olmak üzere beş farklı anten yapısı kullanıldı. Şekil 5.8'de açıkça görüldüğü gibi MIMO sistemlerde anten sayısının artması LK'yı doğru bir şekilde algılama performansını artırır. MIMO sistemlerde göndericide ve/veya alıcıda çoklu antenlerin kullanılması, alıcı antenlere gelen sinyallerin birleştirilerek toplam sinyalin ortalama gücünün arttırılmasına olanak sağlar. Bu nedenle, düşük SNR değerlerinde LK ve BK'da çoklu antenlerin kullanılması daha yüksek P_d elde edilmesine neden olur.

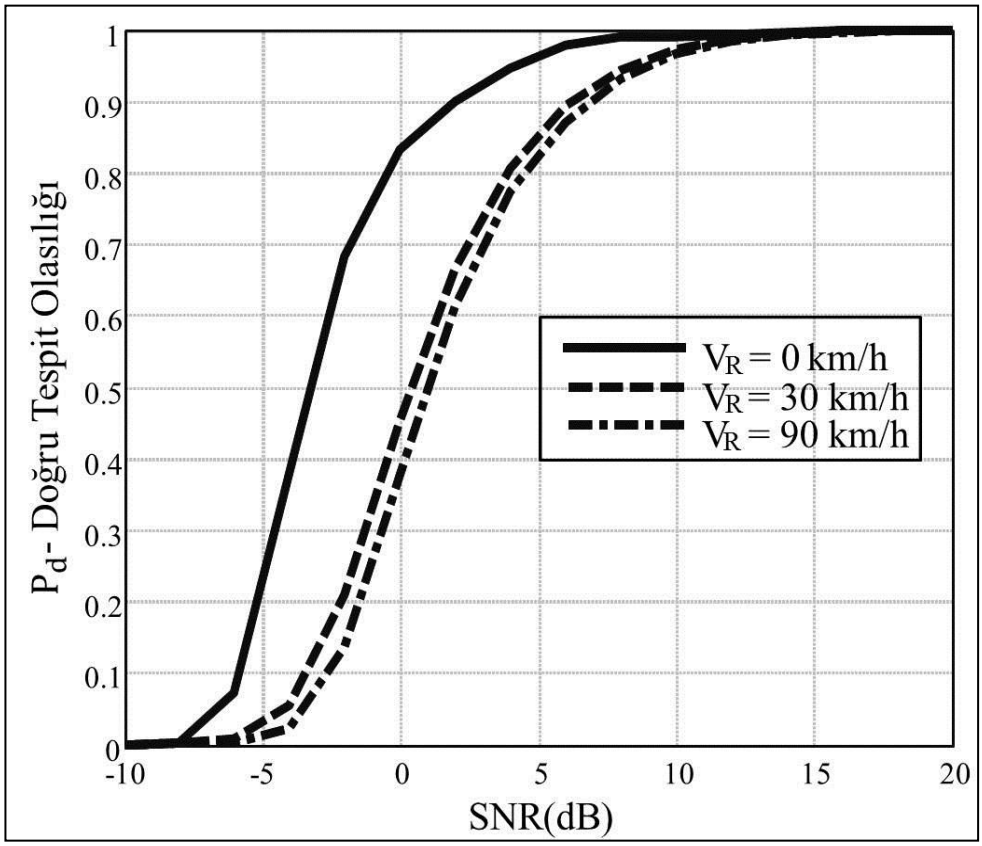


Şekil 5.8. Çoklu Anten Sayısının Algılama Performansına Olan Etkisi

BK'nın mobil olduğu ve hızlı hareket ettiği durumda, LK ve BK arasındaki yansımanın, dağılmanın ve sapmanın neden olduğu çokluyol yayılımı ve frekans kaymasının (Doppler Etkisi) neden olduğu hızlı bozunumdan dolayı kanal karakteristikleri zamanla hızlı bir şekilde değişir (Yiğit, 2010).

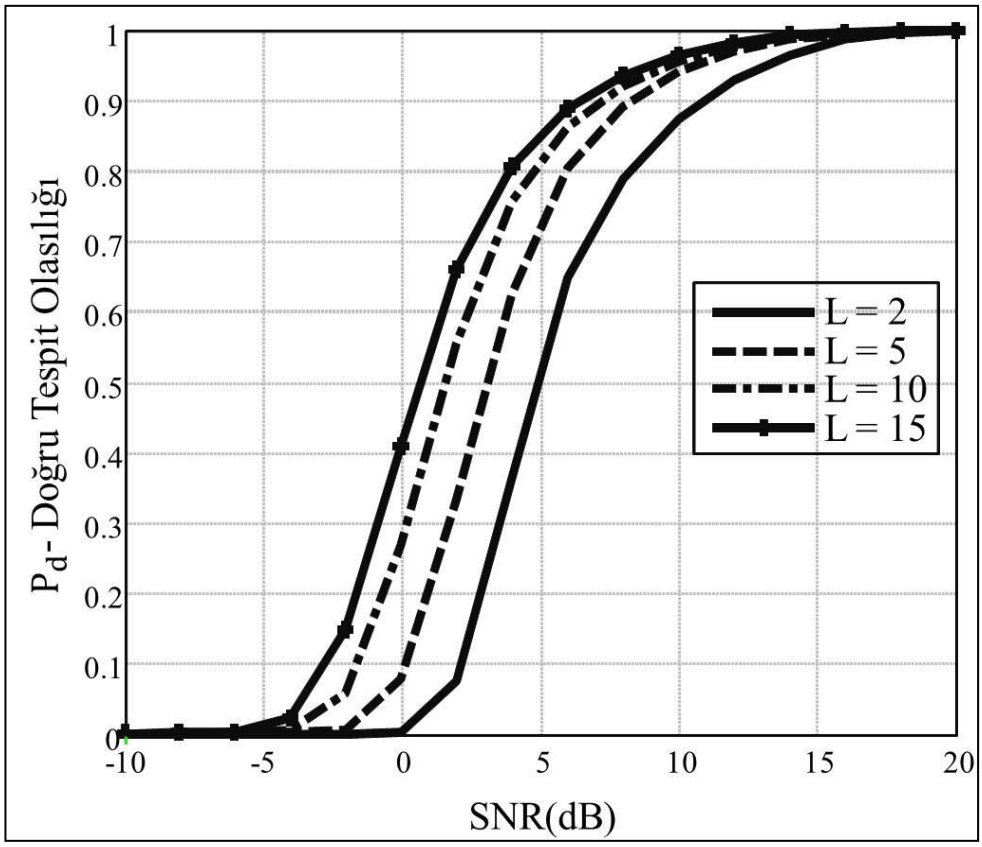
Mobil olan BK'nın 0 km/h, 30 km/h ve 90 km/h hızlarında hareket ettiği, LK'nın ise sabit olduğu zaman spektrum algılama performansına etkisi Şekil 5.9'da

verilmektedir. Hız değeri azaldıkça, daha düşük SNR değerlerinde daha yüksek P_d olasılığı elde edilmektedir. Şekil 5.9'da açıkça görüldüğü gibi spektrum algılama, BK'nın hareketinden dolayı oluşan frekans kayması sebebiyle özellikle yüksek hızlarda hassas değildir.



Şekil 5.9. BK Hızının Algılama Performansına Olan Etkisi

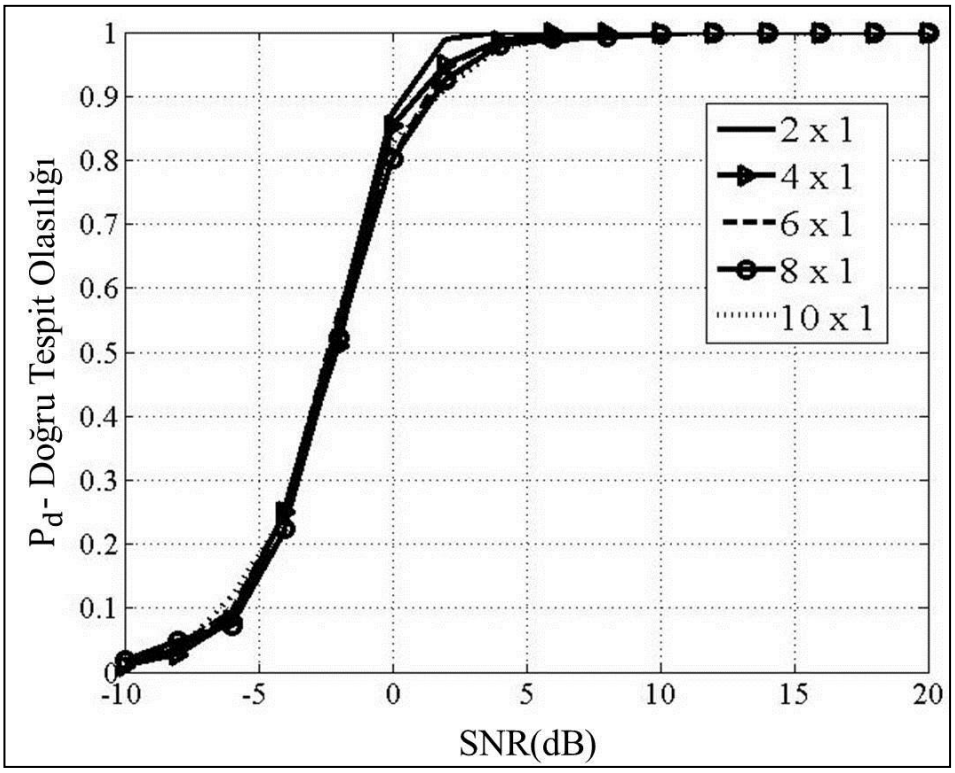
LK ve BK arasında çokluyol sayısının 2, 5, 10 ve 15 olduğu durumdaki spektrum algılama performansı sonuçları Şekil 5.10'da gösterilir. Çokluyol sayısı artarken, LK ve BK arasındaki MIMO kanalı, kötü durumlu kanaldan iyi durumlu kanala dönüşür. Bu durumda, kanalın özdeğer yayılımı yani uzaysal seçiciliği artar. Bundan dolayı, LK ile BK arasındaki bağımsız kanalların sayısı artar. Dolayısıyla, alıcıda alınan sinyale gürültünün etkisi önemli derecede olmaz. Şekil 5.10'da açıkça görüldüğü gibi spektrum algılamada çokluyol sayısının artması özellikle düşük SNR değerlerinde P_d başarımını artırmaktadır.



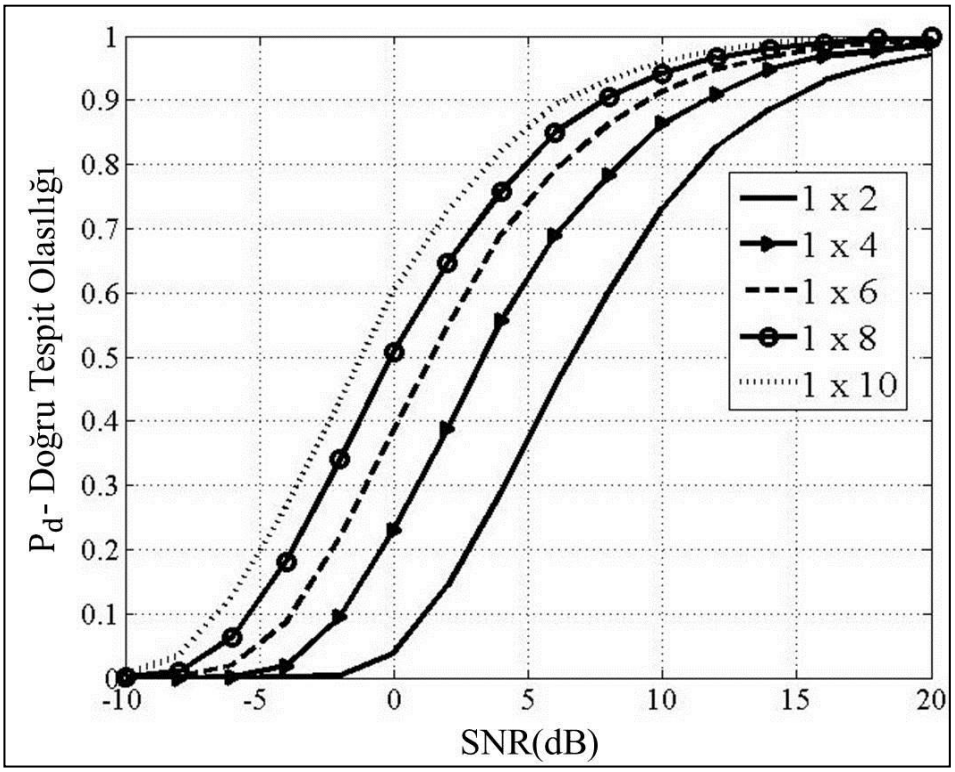
Şekil 5.10. Çokluyol Sayısının Algılama Performansına Olan Etkisi

MISO anten sistemlerindeki gibi sadece gönderici anten dizisinde birden fazla anten elemanı kullanmak SISO sistemlere göre algılama performansında ayırt edici bir miktarda artış sağlamaz. Ancak SIMO ve MIMO anten sistemlerinde olduğu gibi alıcı anten dizisinde birden fazla anten elemanı kullanmak algılama performansında anten sayısıyla orantılı olarak önemli ölçüde artış sağlamaktadır (Yiğit, 2010). Alıcı tarafında birden fazla anten elemanı kullanmak sadece alınan sinyalin gücünü arttırmaz aynı zamanda çokluyol problemlerini de azaltır (Achary ve diğ., 2012).

Şekil 5.11'de LK tarafında birden fazla, BK tarafında ise bir tane anten elemanına sahip MISO sistem kullanılmasının spektrum algılama performansına olan etkisi gösterilir. 2×1, 4×1, 6×1, 8×1 ve 10×1 olmak üzere beş farklı anten yapısı kullanıldı.



Şekil 5.11. M_T'nin Algılama Performansına Olan Etkisi



Şekil 5.12. M_R'nin Algılama Performansına Olan Etkisi

Şekil 5.11'de açıkça görüldüğü gibi gönderici tarafındaki anten sayısının artması LK'yı doğru bir şekilde algılama performansını olumlu yönde etkilemez. Bu nedenle, LK'da kullanılan çoklu antenlerde gönderici anten sayısının değişimi daha yüksek P_d elde etmek için yeterli değildir.

Şekil 5.12'de LK tarafında bir tane, BK tarafında ise birden fazla anten elemanı kullanılmasının spektrum algılama performansına olan etkisi gösterilir. 1×2, 1×4, 1×6, 1×8 ve 1×10 olmak üzere beş farklı anten yapısına sahip SIMO sistem kullanıldı. Şekil 5.12'de açıkça görüldüğü gibi alıcı tarafındaki anten sayısının artması LK'yı doğru bir şekilde algılama performansında olumlu yönde artış sağladı. Bu nedenle, BK'da kullanılan çoklu antenlerde alıcı anten sayısının değişimi daha yüksek P_d elde etmeyi sağlar.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Uygulamaların ve servislerin veri hızı, bant genişliği, bağlantı kalitesi gibi sürekli artan kablosuz haberleşme ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için mevcut frekans spektrumunun verimli bir şekilde kullanılması önem arz etmektedir. BR teknolojisi, frekans spektrumunun verimli olarak kullanılmasına yönelik çözüm sunmaya aday bir teknoloji olarak karşımıza çıkmaktadır. BR'nin önemli fonksiyonlarından olan Spektrum Algılama günümüz çalışma konularından birisidir. Kablosuz haberleşme sistemlerinin performansı açısından önemli olan gönderici ve/veya alıcıda çok elemanlı anten dizileri kullanan çoklu anten sistemleri bantgenişliği ve gönderim gücünde herhangi bir artışa ihtiyaç duymadan kapasite ve sinyal kalitesinde iyileştirme yapmaktadır. Çoklu anten sistemlerinin içinde kapasiteyi en çok arttıran, haberleşme ortamındaki hataları en iyi seviyede azaltarak performansı en yüksek anten modeli MIMO'dur. MIMO sistemlerin performansı yayılım yapılan kanaldan önemli bir derecede etkilenir. Bu nedenle bu kanalın modellenmesi ve oluşturulan bu modele göre spektrum algılama performansının değerlendirilmesi üzerinde önemle araştırmaların yapıldığı bir diğer konudur.

Bu tez çalışmasında, AWGN kanalı altında SNR'da yapılan değişikliklere ve verilen farklı P_f olasılıklarına göre ED tekniğiyle benzetimler gerçekleştirilerek geleneksel olarak haberleşmenin gerçekleştirildiği bir gönderici ve bir alıcıda oluşan SISO sistemler için spektrum algılama performansı incelenmiştir.

Haberleşme ortamının sahip olduğu gerçek koşulları sağlayan sonlu saçıcılı kanal modeli tasarlanarak, TDD modunda çalışan çoklu anten sistemleri için spektrum algılama performansı incelenmiştir. Algılama başarımı, P_d olasığına göre tespit edilmiştir ve değişen yayılım parametrelerine ve kullanılan çoklu anten modeline göre incelenmiştir. Gerçekleştirilen benzetimlerde elde edilen sonuçlar, spektrum algılama performansının teorik sonuçlarla örtüştüğünü göstermektedir. SNR'ın artması spektrum algılama performasının artmasına olanak sağlar. Göndericideki ve

alıcıdaki anten dizilerinde çoklu anten elemanı kullanımı ve ortamda bulunan çokluyol sayısında artışa gidilmesi algılama performansına önemli miktarda katkı yapmaktadır. Mobil alıcının hızının artması kanalda daha fazla bozunumuna sebep olduğundan spektrum algılama performansı bu durumdan olumsuz olarak etkilenir.

Bu tez çalışmasında, BR ve spektrum algılama ile ilgili bilgiler verilmiştir. Spektrum algılamada kullanılan ED tekniği ile geleneksel SISO sistemlerde ve çoklu anten modeli kullanan sistemlerde spektrum algılama performansının incelenmesine yönelik benzetimler yapılmıştır.

Tez çalışmasından esinlenerek, ED tekniğinin performansı literatürde kullanılan diğer algılama teknikleri kullanıldığında çıkacak algılama sonuçlarıyla karşılaştırılabilir. Spektrum algılamada kritik öneme olan sahip eşik değerinin statik olarak belirlenmesi yerine adaptif olarak türetilmesi konusunda araştırma çalışmaları gerçekleştirilebilir. Ayrıca, vericide çeşitleme sağlayan Uzay Zaman Kodlamanın en iyi bilinen türü Uzay Zaman Blok Kodlama ile spektrum algılama performansı incelenebilir.

KAYNAKLAR

Achary R., Vityanathan V., Raj P., Nagarajan S., Antenna Selection in MIMO Cognitive Radio, *International Journal of ComputerApplications*, 2012, **41**(19), 40-48.

Akyildiz I. F., Lee W. Y., Vuran M. C., Mohanty S., NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless network: A survey, *Computer Networks*, 2006, **50**(13), 2127–2159.

Akyildiz I. F., Lee W. Y., Vuran M. C., Mohanty S., A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Network, *IEEE Communications Magazine*, 2008, **46**(4), 40–48.

Akyildiz I. F., Lee W. Y., Chowdhury K. R., Spectrum Management in Cognitive Radio Ad Hoc Networks, *IEEE Network*, 2009, **23**(4), 6–12.

Akyildiz I. F., Lo B. F., Balakrishnan R., Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: A survey, *Physical Communication*, 2011, **4**(1), 40–62.

Almers P., Bonek E., Burr A., Czink N., Debbah M., Degli-Esposti V., Hofstetter H., Kyösti P., Laurenson D., Matz G., Molisch A.F., Oestges C., Özcelik H., Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007, **2007**, 1–19.

Altay C., Distributed Spectrum Sensing via Energy Detection in Cognitive Radios, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013, 325536.

Aslan A., Çok Giriş ve Çok Çıkış Çoklu Taşıyıcılı Kod Bölmeli Çoklu Erişim ve Çok Giriş Çok Çıkış Uzay Zaman Kodlama Dik Frekans Bölmeli Çoklu Erişim Sistemleri Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 322993.

Atmaca S., Akıllı Anten Kullanan Genişbant Kablosuz Haberleşme Sistemleri için Servis Kalitesi Destekli Ortam Erişim Kontrol Protokolü, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 233141.

Cabric D., Mishra S. M., Brodersen R. W., Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios, *38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, California, USA, 7-10 November 2004.

Cakir A. C., Yigit H., Channel Effect on Perfomance of Energy Based Spectrum Sensing in MIMO Cognitive Radio, *IEEE 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference*, Malatya, Türkiye, 16-19 May 2015.

Çakır A. C., Yiğit H., Bilişsel Radyoda Enerji Tabanlı Spektrum Algılama, *4.Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu*, Yalova, Türkiye, 21-23 Mayıs 2015.

Çolak Arslan D., İlhan S., Dinçer H., Bilişsel Radyo, *Elektronik-Elektronik Bilgisayar Mühendisligi Sempozyumu*, Bursa, Türkiye, 26-30 Kasım 2008.

Digham F. F., Alaouni M. S., Simon M. K., On the Energy Detection of Unknown Signals over Fading Channels, *IEEE International Conference on Communications*, Alaska, USA, 11-15 May 2003.

Eduarda A. F., Cabellero R. G. G., Experimental Evaluation of Performance for Spectrum Sensing: Matched Filter vs. Energy Detector, *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing*, Popayan, Colombia, 13-15 May 2015.

Gamit J. S., Trapasiya S. D., Cognitive Radio Energy Based Spectrum Sensing using MIMO, *International Conference on Communication and Signal Processing*, Melmaruvathur, India, 3-5 April 2013.

Gesbert D., Shafi M., Shiu D. S, Smith P. J., and Naguib A., From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, **21**(3), 281–302.

Gorcin A., Qaraqe K. A., Celebi H., Arslan H., An Adaptive Threshold Method for Spectrum Sensing in Multi-Channel Cognitive Radio Networks, *IEEE 17th International Conference on Telecommunication*, Doha, Qatar, 4-7 April 2010.

Haykin S., Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, **23**(2), 201–220.

Hossain S., Abdullah I., Hossain M. A., Energy Detection Performance of Spectrum Sensing in Cognitive Radio, *International Journal of Information Technology and Computer Science*, DOI: 10.5815/ijitcs.2012.11.02.

Hua S., Liu H., Wu M., Panwar S. S., Exploiting MIMO Antennas in Cooperative Cognitive Radio Networks, *The 30th IEEE International Conference on Computer Communication*, Shangai, China, 10-15 April 2011.

Hwang S. H., Baek J. H., Dobre O. A., Spectrum Sensing using Multiple Antenna-Aided Energy Detectors for Cognitive Radio, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, St.John's, Canada, 3-6 May 2009.

İngök S., Bilişsel Radyoda Özdeğer Tabanlı Spektrum Sezme Yöntemleri,Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2012, 323847.

Jensen M. A., Wallace J. W., A Review of Antennas and Propagation for MIMO Wireless Systems, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, **52**(11), 2810–2824.

Jin L., Scheduling, Spectrum Sensing and Cooperation in MU-MIMO Broadcast and Cognitive Radio Systems**,** Phd. thesis, The University of Manchaster, Manchaster Doctoral College, Manchester, 2011.

Joshi D. R., Popescu D. C., Dobre O. A., Dynamic Threshold Adaptation for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems, *Radio and Wireless Symposium*, New Orleans, USA, 10-14 January 2010.

Kavak A., Yiğit H., Ertunc H. M., Using Adaline Neural Network for Performance Improvement of Smart Antennas in TDD Wireless Communications, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, **16**(6), 1606–1625.

Krishnamoorthy A. N., Pasupathy A. S., Mani M., Krishnamurthi S., Leelakrishnan S. K., Narayanankutty K. A., Optimization of Threshold for Energy Based Spectrum Sensing Using Differential Evolution, *Wireless Engineering and Technology*, 2011, **2**(3), 130–134.

Kuppusamy V., Mahapatra R., Primary User Detection in OFDM based MIMO Cognitive Radio, *3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, Singapore, 15-17 May 2008.

Mitola J., Maguire G. Q., Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal, *IEEE Personal Communications*, 1999, **6**(4), 13–18.

Namdar M., Bilişsel İletişim Ağlarında Parçalı Spektrum Algılama ve Alıcı Çeşitleme Yöntemleri,Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014, 364170.

Oh D. C., Lee Y. H., Energy Detection Based Spectrum Sensing for Sensing Error Minimization in Cognitive Radio Networks, *International Journal of Communication Networks and Information Security*, 2009, **1**(1), 1–5.

Patil D. P., Wadhai V. M., Performance Evaluation in Cognitive Radio Network over Wireless Fading Channels from Spectrum Sensing Perspective, *International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy*, Chennai, India, 12-14 December 2013.

Peha J. M., Approaches to Spectrum Sharing, *IEEE Communications Magazine*, 2005, **43**(2), 10–12.

Salarvan A., Kurt G. K., Multi-Antenna Spectrum Sensing for Cognitive Radio under Rayleigh Channel, *IEEE Symposium on Computers and Communication*, Nevsehir, Turkey, 1-4 July 2012.

Sansoy M., Buttar A. S., Spectrum Sensing Algorithms in Cognitive Radio: A Survey, *International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies*, Coimbatore, India, 5-7 March 2015.

Sato N., Sawai R., Sun C., Muraoka K., Ariyoshi M., Delehaye P., Xiao J., Zhang Y., Freda M., TV White Spaces as part of the future Spectrum Landscape for Wireless Communications, *ETSI Reconfigurable Radio System Workshop*, Cannes, France, 12 December 2012.

Taha M., Alnadi D. A., Threshold Adaptation in Spectrum Sensing For Cognitive Radio using Particle Swarm Optimization, *International Conference on Control, Engineering and Information Technology*, Sousse, Tunisia, 22-25 March 2014.

Tongül H., Bilişsel Radyo Ağlarında Sönümlenme ve Gölgelenmenin İşbirlikçi Algılamaya Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010, 284660.

URL – 1: http://www.btk.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Arastirma-Raporlari (Ziyaret Tarihi: 26 Temmuz 2015).

URL – 2: http://cr.cs.itu.edu.tr/Members/kahramanb/dosyalar/CR.pdf (Ziyaret Tarihi: 30 Temmuz 2015).

URL – 3: https://www.ntia.doc.gov/legacy/ntiahome/fccfilings/2005/cogradio/ET Docket03-10802152005.htm (Ziyaret Tarihi: 28 Temmuz 2015).

Upadhyay S., Deshmukh S., Blind Parameter Estimation Based Matched Filter Detection for Cognitive Radio Networks, *International Conference on Communication and Signal Processing*, Melmaruvathur, India, 2-4 April 2015.

Ustok R. F., Ozbek B., Spectrum Sensing Based on Energy Detection for Cognitive Radio Systems with Multiple Antennas, *IEEE 17th Signal Processing and Communications Applications Conference*, Antalya, Turkey, 2-4 April 2015.

Yigit H., Kavak A., Kucuk K., Capacity İmprovement for TDD-MIMO Systems via AR Modeling Based Linear Prediction, *Wireless Personal Communications*, 2010, **52**(2), 411–418.

Yigit H., Kavak A., Kucuk K., Turkboylari M., Performance improvement via AR modeling based linear prediction for TDD-MIMO systems, *IEEE 16th Signal Processing and Communication and Applications Conference*, Aydin, Turkey, 20-22 April 2008.

Yiğit H., Çok Girişli Çok Çıkışlı (MIMO) Sistemlerde Kanal Tahmini ve Hat Uyarlaması ile Başarım İyileştirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2010, 275802.

Yucek T., Arslan H., A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, **11**(1), 116–130.

Zhang T., Yu G., Sun C., Performance of Cyclostationary Features Based Spectrum Sensing Method in a Multiple Antenna Cognitive Radio System, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Budapest, Hungary, 5-8 April 2009.

Zhao Q., Sadler B. M., A Survey of Dynamic Spectrum Access, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, **24**(3), 79–89.

Zheng L., Tse D. N. C., Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple-Antenna Channels , *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, **49**(5), 1073–1096.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Çakır A. C., Yiğit H., Bilişsel Radyoda Enerji Tabanlı Spektrum Algılama, *4.Uluslararası Meslek Yüksekokulları Sempozyumu*, Yalova, Türkiye, 21-23 Mayıs 2015.

Cakir A. C., Yigit H., Channel Effect on Perfomance of Energy Based Spectrum Sensing in MIMO Cognitive Radio, *IEEE 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference,* Malatya, Türkiye, 16-19 May 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Abdülkadir Can ÇAKIR, 1988 yılında Üsküdar'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2007 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü'nden, 2011 yılında Bilgisayar Öğretmeni olarak mezun oldu. 2013 Şubat ayında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki yüksek lisans eğitimine halen devam etmektedir. 2012 yılından itibaren Kara Kuvvetleri Astsubay Meslek Yüksekokulu'nda Elektrik ve Elektronik Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.