

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**MIMO HABERLEŞME KANALLARINDA ENERJİ TABANLI
SPEKTRUM ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

Meryem YARAR

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yavuz ILGIN

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2021**

Her Hakkı Saklıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MIMO HABERLEŞME KANALLARINDA ENERJİ TABANLI SPEKTRUM ALGILAMA YÖNTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Meryem YARAR

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yavuz Ilgın

Kablosuz haberleşme geçmişten günümüze birçok bilim insanının yaptığı çalışmalarla sürekli olarak gelişim gösteren anahtar bir teknolojidir. Kablosuz haberleşmenin ilerlemesini sağlayan en önemli gelişmelerden biri Bilişsel Radyo (BR) teknolojisinin keşfidir. BR teknolojisi ile, artan kullanıcı sayısının sınırlı miktarda olan radyo frekans spektrumunu kullanmaya çalışması sorununa çözüm bulunmuştur. BR, lisanslı kullanıcılar spektrumu boş bıraktıklarında lisanssız kullanıcıların bu boşluklardan eşit ve fırsatçı bir biçimde faydalanmasını sağlamakta ve bunu gerçekleştirirken farklı spektrum algılama yöntemlerini kullanmaktadır. BR teknolojisi öğrenme, algılama gibi birtakım bilişsel özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden en önemlisi spektrum algılamadır. Literatürde spektrum algılama için; Kovaryans Tabanlı Algılama, Çevrimsel Durağan Özellik Algılama, Uyumlu Süzgeç, Özdeğer Tabanlı Spektrum Algılama, Enerji Algılama (EA) gibi farklı spektrum algılama yöntemleri önerilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında algılama performansını artırmak için kullanılan Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) haberleşme teknolojisi incelenerek yeni bir MIMO tabanlı EA yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem incelenirken geleneksel EA ve iyileştirilmiş EA yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak önerilen yöntemin algılama olasılığının daha yüksek olduğu ve dolayısıyla spektrum verimliliği ve performansı bakımından daha üstün bir yöntem olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın MATLAB ortamında bilgisayar benzetimleri yapılarak elde edilen sonuçların teorik sonuçlarla örtüştüğü belirlenmiştir.

2021, 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: Bilişsel radyo, Enerji algılama, Kablosuz haberleşme, Lisanslı kullanıcı, Spektrum algılama

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF ENERGY BASED SPECTRUM DETECTION METHODS IN MIMO COMMUNICATION CHANNELS

Meryem YARAR

Erzincan Binali Yıldırım University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electricals and Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Fatih Yavuz ILGIN

Wireless communication is a key technology that is constantly improving with the work of many scientists from past to present. One of the most important developments that enabled the advancement of wireless communication is the discovery of Cognitive Radio (CR) technology. With CR technology, a solution has been found to the problem of increasing number of users trying to use the limited amount of radio frequency spectrum. When licensed users leave the spectrum empty, CR ensures that unlicensed users benefit from these gaps equally and opportunistically, and while doing this, it uses different spectrum detection methods. CR technology has some cognitive features such as learning and sensing. The most important of these features is spectrum sensing. For spectrum sensing in literature; different spectrum detection methods such as Covariance Based, Cyclo Stationary Feature, Matched Filter, Eigenvalue Based, Energy Based are suggested. Within the scope of this thesis, a new MIMO-based Energy Detection method has been proposed by examining the Multiple Input Multiple Output (MIMO) communication technology used to increase the detection performance. While examining the proposed method, it was compared with traditional ED and improved ED methods. As a result, it has been observed that the detection probability of the proposed method is higher and therefore a superior method in terms of spectrum efficiency and performance. It was determined that the results obtained by using computer simulations in the MATLAB of this study overlap with the theoretical results.

2021, 68 Pages

Keywords: Cognitive radio, Energy detection, Licensed user, Spektrum detection, Wireless communication

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım sırasında rehberliği ve yardımları ile bana yol gösteren, bilgileri ve fikirleri ile beni aydınlatan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Fatih Yavuz ILGIN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince ve yaşamım boyunca her zaman beni destekleyen, bana inanan ve yanımda olan değerli aileme de bu vesileyle en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ve Yüce ALLAH’ıma sonsuz şükürler olsun.

Meryem YARAR

Eylül, 2021

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. BİLİŞSEL RADYO	4
2.1. Neden Bilişsel Radyo ?	4
2.2. Bilişsel Radyo'nun Karakteristik Özellikleri	5
2.3. Bilişsel Radyo Döngüsü	6
2.4. Bilişsel Radyo Ağ Yapısı	8
3. SPEKTRUM ALGILAMA	10
3.1. Spektrum Algılamada Karşılaşılan Zorluklar	12
3.1.1. Donanım gereksinimleri	12
3.1.2. Gürültü belirsizliği	13
3.1.3. Gizli birincil kullanıcı problemi	13
3.1.4. Algılama süresi ve frekansı problemi	13
3.1.5. Güvenlik sorunu	15
3.2. Spektrum Algılama için Teorik Temeller	15
3.3. Spektrum Algılama Performansı	15
3.4. Spektrum Algılama Yöntemleri	16
3.4.1. Kovaryans tabanlı spektrum algılama yöntemi	16
3.4.2. Çevrimsel durağan özellik algılama	18
3.4.3. Uyumlu süzgeç yöntemi	18
3.4.4. Özdeğer tabanlı spektrum algılama	20
3.4.5. EA tabanlı spektrum algılama	21
3.5. MIMO Sistem Modeli	24
3.6. MIMO Sistem Yapısı	25

3.7. MIMO Sistemlerin Kapasitesi	26
3.8. MIMO İletim Teknikleri	27
3.8.1. Uzaysal çoğullama	27
3.8.2. Hüzmeleme	28
3.8.3. Uzay zaman kodlama	29
3.8.4. Ön kodlama	30
3.9. MIMO Haberleşmenin Avantajları	30
3.10. MIMO Haberleşmenin Dezavantajları	32
3.11. Haberleşme Kanal Modelleri	32
3.11.1. AWGN kanalı modeli	32
3.11.2. Rayleigh kanalı modeli	34
3.11.3. Weibull kanalı modeli	35
3.11.4. Nakagami- m kanalı modeli	35
3.11.5. Nakagami-q kanalı modeli	36
3.11.6. Nakagami-n kanalı modeli	37
4. MIMO HABERLEŞME KANALLARINDA ENERJİ TABANLI SPEKTRUM ALGILAMA VE ÖNERİLEN YÖNTEM.....	39
4.1. MIMO Haberleşme Kanallarında Enerji Tabanlı Spektrum Algılamanın İncelenmesi	39
4.1.1. Değiştirilmiş EA yöntemi	41
4.1.2. İyileştirilmiş EA yöntemi	42
4.1.3. Önerilen iyileştirilmiş EA yöntemi	44
5. BENZETİM SONUÇLARI	46
6. SONUÇ.....	56
KAYNAKLAR.....	58
EKLER.....	65
Ek-1. MATLAB Kodları	66
Ek-2. Yayınlar	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Dinamik Spektrum Erişimi	6
Şekil 2.2. BR Döngüsü.....	7
Şekil 2.3. BR Ağ Mimarisi.....	9
Şekil 3.1. Gizli birincil kullanıcı problemi	14
Şekil 3.2. Uyumlu süzgeç akış şeması	19
Şekil 3.3. Özdeğer tabanlı spektrum algılama akış diyagramı.....	20
Şekil 3.4. Enerji Algılama yöntemi blok diyagramı	22
Şekil 3.5. MIMO teknolojisini kullanan modern WIFI yönlendirici	25
Şekil 3.6. MIMO haberleşme sistem yapısı	25
Şekil 3.7. Havacılıkta kullanılan hüzmleme anten modeli.....	28
Şekil 3.8. Uzak zaman kodlayıcı yapısı	29
Şekil 3.9. Çoklu yol yayılımı örneği.....	31
Şekil 3.10. AWGN kanal modeli	32
Şekil 3.11. AWGN kanalın normalize güç profili	33
Şekil 3.12. Direkt ve Direkt Olmayan Görüş Hattı.....	34
Şekil 3.13. Nakagami- n sönümleme modeli	38
Şekil 4.1. EA tabanlı spektrum algılama akış şeması	39
Şekil 4.2. MIMO antenlerde geleneksel EA tabanlı spektrum algılama.....	40
Şekil 4.3. Değiştirilmiş EA akış diyagramı.....	42
Şekil 4.4. İyileştirilmiş EA akış diyagramı	43
Şekil 4.5. Önerilen iyileştirilmiş EA akış diyagramı	45
Şekil 5.1. $\mu = 50$ ve $R = 2$ için algoritma başarımı.....	46
Şekil 5.2. $\mu = 50$ ve $R = 4$ için algoritma başarımı.....	47
Şekil 5.3. $\mu = 50$ ve $R = 8$ için algoritma başarımı.....	48
Şekil 5.4. $\mu = 100$ ve $R = 2$ için algoritma başarımı	49
Şekil 5.5. $\mu = 100$ ve $R = 4$ için algoritma başarımı	50
Şekil 5.6. $\mu = 100$ ve $R = 8$ için algoritma başarımı	51
Şekil 5.7. $\mu = 500$ ve $R = 2$ için algoritma başarımı.....	52
Şekil 5.8. $\mu = 500$ ve $R = 4$ için algoritma başarımı	53
Şekil 5.9. $\mu = 500$ ve $R = 8$ için algoritma başarımı	54

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. 30 MHz- 698 MHz frekans bandındaki spektrum kullanım değerleri	12
Tablo 5.1. $\mu = 50$ ve $R = 2$ için incelen yöntemlerin algılama olasılıkları	47
Tablo 5.2. $\mu = 50$ ve $R = 4$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	48
Tablo 5.3. $\mu = 50$ ve $R = 8$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	49
Tablo 5.4. $\mu = 100$ ve $R = 2$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	50
Tablo 5.5. $\mu = 100$ ve $R = 4$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	51
Tablo 5.6. $\mu = 100$ ve $R = 8$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	52
Tablo 5.7. $\mu = 500$ ve $R = 2$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	53
Tablo 5.8. $\mu = 500$ ve $R = 4$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	54
Tablo 5.9. $\mu = 500$ ve $R = 8$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları	55

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

σ_w^2	Gürültü varyansı
σ_y^2	Alınan ortalama birincil sinyal gücü
$h_{2,1}$	Vericideki 1.antenden alıcıdaki 2.antene olan kanal katsayısı.
$\mathbb{R}_Y$	Alınan işaretin kovaryans matrisi
$\mathbb{R}_X$	İletilen işaretin kovaryans matrisi
$E_i(y_i)$	Alınan işaretin enerjisi
H_0	Ortamda sadece gürültünün bulunduğu hipotez
H_1	Ortamda gürültünün ve lisanslı kullanıcının bulunduğu hipotez
$K_x(t, \tau)$	İşaretin öz ilintisi
P_d	Algılama olasılığı
P_{fa}	Yanlış algılama olasılığı
P_{md}	Eksik algılama olasılığı
$P_\alpha(\alpha)$	Haberleşme kanalları için Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
$a_{R,1}$	Alıcı çoklu yol bileşeni
$a_{T,1}$	Verici çoklu yol bileşeni
f_c	Taşıyıcı frekans
P_{ort}	Alınan işaretin ortalama gücü
T_1	Birinci test istatistiği
T_2	İkinci test istatistiği
$\bar{y}$	Ortalama Sinyal Gürültü Oranı
θ_1	Birinci çoklu yolun rastgele fazı
ω_1	Faz kayması
C	Kanal kapasitesi
F	Güç Spektral Yoğunluğu
G	Bağımsız sıfır ortalamalı sirküler simetrik Gauss gürültüsü
$H(f)$	Band geçiren filtre transfer fonksiyonu
$I(.)$	Bessel fonksiyonu
L	Algılama olayı parametresi
M	Çoklu yol sayısı
N	Örnek sayısı
$Q(.)$	Gauss olasılık kuyruk fonksiyonu
R	Alıcı anten sayısı
T	Verici anten sayısı
W	Bant genişliği
X	Antenden gönderilen işaret
Y	MIMO sistemler yoluyla antenlerden alınan işaret matrisi
m	Nakagami- m dağılımı için sönmüleme parametresi

q	Nakagami- q dağılımı için sönümlleme parametresi
s	Düzleştirme faktörü
tr	Devrik matris
$w(n)$	Kanalda bulunan AWGN gürültüsü
$x(n)$	İletilen işaret
$y(n)$	BR kullanıcısı tarafından alınan işaret
$H(t)$	Kanal kazancı
$\Gamma(.)$	Gamma fonksiyonu
Ω	Kanal sönümlleme genliğinin ortalama kare değeri
α	Kanal sönümlleme genliği
β	Weibull dağılımının sönümlleme parametresi
γ	Sinyal Gürültü Oranı
λ	Eşik değeri
E	Beklenen değer işlemcisi
Ω	Weibull kanalının beklenen değeri

Kısaltmalar

AWGN	Additive White Gaussian Noise (Toplanabilir Beyaz Gauss Gürültüsü)
BPF	Band Pass Filter (Bant Geçiren Filtre)
BR	Bilişsel Radyo
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications (Dijital Geliştirilmiş Kablosuz Telekomünikasyon)
DSA	Dynamic Spectrum Access (Dinamik Spektrum Erişimi)
DSP	Digital Signal Processing (Dijital Sinyal İşleme)
EA	Enerji Algılama / Enerji Tabanlı Algılama
EME	Energy with Minimum Eigenvalue (En Küçük Özdeğer ile Enerji Algılama)
FCC	Federal Communications Commission (Federal İletişim Komisyonu)
FPGA	Field-Programmable Gate Array (Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi)
IEEE	The Institute of Electricals and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IID	Independent and Identically Distributed (Bağımsız ve Aynı Dağılımlı)
LOS	Line of Sight (Direkt Görüş Hattı)
MIMO	Multiple Input Multiple Output (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış)
MME	Maximum and Minimum Eigenvalue (En Büyük ve En Küçük Özdeğer)
NLOS	Non Line of Sight (Direkt Olmayan Görüş Hattı)
OSA	Opportunistic Spectrum Access (Fırsatçı Spektrum Erişimi)
PDF	Probability Density Function (Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu)

QoS	Quality of Service (Servis Kalitesi)
RF	Radyo Frekans
SIMO	Single Input Multiple Output (Tekli Giriş Çoklu Çıkış)
SISO	Single Input Single Output (Tekli Giriş Tekli Çıkış)
SNR	Signal Noise Ratio (Sinyal Gürültü Oranı)



1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme birçok bilim insanının üzerinde önemle durduğu, çeşitli çalışmalar yaptığı ve teknolojideki gelişmelere paralel olarak faydaları daha sonradan anlaşılabilen buluşların ortaya konduğu bir teknolojidir. Kablosuz haberleşme teknolojisinin gelişimi Hans Christian Oersted, Micheal Faraday, Carl Friedrich Gauss, James Clerk Maxwell ve Heinrich Hertz'in çalışmalarıyla başladığı bilinmektedir (Sarkar vd., 2006). 1820 yılında Hans Christian Oersted elektrik akımının manyetik alan meydana getirdiğini yaptığı çalışmalar ile ispatlamıştır. 1831 yılında Micheal Faraday iletkenine yakın mesafede bulunan bir mıknatısın hareket ettirilmesi sonucu indüklenen elektrik akımının meydana geldiğini keşfetmiştir. Ardından James Clerk Maxwell 1864 yılında elektromanyetik radyasyonun varlığını tahmin ederek Maxwell teorisini formüle etmiştir. 1887 yılında ise Hertz tarafından Maxwell teorisi deneysel olarak kanıtlanmıştır. 1895 yılında Guglielmo Marconi, radyo sinyallerinin 2 kilometre mesafeden iletilmesini sağlamıştır (Proakis ve Salehi, 1994). Daha sonra Marconi 1901 yılında Atlas Okyanusu boyunca Mors kodlu s harfini İngiltere'den Kanada'ya göndererek kablosuz haberleşme çağını başlatmış oldu (Maitra, 2003).

Kablosuz haberleşme çağının başlaması ile birlikte birçok teknolojik gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmelerin en önemlilerinden birisi BR teknolojisinin keşfidir. BR fikri 1999 yılında Joseph Mitola ve Gerald Q. Maquire tarafından ortaya atılmıştır (Mitola ve Gerald, 2000). BR'nin ortaya çıkmasındaki temel etkenler kablosuz haberleşmede kullanılan frekans spektrumunun yeterli miktarda olmaması ve spektrumu kullanan kullanıcı sayısının gelişen teknolojiye bağlı olarak sürekli artmasıdır. BR kısıtlı kaynak olan spektrumun en verimli bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla geliştirilen dinamik spektrum erişim yöntemlere fırsat veren gelecek neslin teknolojisi olmaya adaydır. Radyo frekans spektrumu lisanslı kullanıcılara önceden tahsis edilmiştir. Lisanslı kullanıcılar spektrumu boş bıraktıklarında lisanssız kullanıcılar bu boşluğu fırsata çevirerek dinamik spektrum erişimini sağlarlar. Dinamik spektrum erişimine fırsat veren BR teknolojisi ikincil kullanıcıların da spektrumdan faydalanabilmelerini sağlayarak sınırlı miktarda olan spektrumun verimli bir şekilde kullanılmasına imkan verirler. BR spektrum algılama sırasında birbirleriyle etkileşim halinde olan cihazların girişimlerini engelleyerek güvenlik açığını önlemektedir. Bu durum BR'nin karar verme özelliğine sahip olduğunun bir göstergesidir. BR bilişsel yetenek ve yeniden yapılandırılabilirlik gibi bilişsel

özellikleri sayesinde spektrumun varlığına karar verme, gereken durumlarda girişimleri engelleme yoluyla umut vadeci bir teknoloji olmuştur.

Spektrum algılama başlığı altında literatürde birden çok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler kendi içinde ayırt edici özelliklere sahiptir. Spektrum algılama için kovaryans tabanlı algılama, döngüsel durağan özellik algılama, işbirlikçi algılama, eşlenik filtre tabanlı algılama, özdeğer tabanlı algılama ve geleneksel EA yöntemleri bulunmaktadır. Bu spektrum algılama yöntemlerinden kovaryans tabanlı spektrum algılama istatistiksel kovaryans matrisinin özelliklerini kullanarak birincil kullanıcının var olup olmadığını tespit eder (Zeng ve Liang, 2009). Herhangi bir sinyal ön bilgisine ihtiyaç duymaz ve hesaplama maliyeti oldukça düşüktür. Kovaryans tabanlı algılama özdeğer tabanlı spektrum algılama yönteminin temelini oluşturur. Döngüsel durağan özellik algılama yönteminde ise sinyalin sabit bir biçimde periyodik olarak devam etme özelliğinden faydalanılır (Aparna ve Jayasheela, 2012). Bu özellik sayesinde birincil kullanıcı varlığı tespit edilir. Hesaplama bakımından oldukça karmaşık olan bu yöntem işlem maliyeti açısından da çok yüksektir. Eşlenik tabanlı spektrum algılama yöntemi ile birincil kullanıcının varlığını tespit edebilmek için eşik değeri ile filtre çıkışının karşılaştırılması yapılır. Bu yöntemde kısa sürede kazanç elde edilerek doğru bilgi elde edilmesi büyük bir avantajdır. Sinyal varlığı bilgisi mevcutsa birincil kullanıcı elde edilmesi için avantajlı bir yöntemdir. Özdeğer tabanlı spektrum algılama yönteminde belirlenen eşik değerine göre sistemin performans durumu hesaplanabilmektedir. Bu yöntemde algılanacak gürültü ya da işaret için herhangi bir ön bilgi gerekmemektedir (Çiflikli ve Ilgın, 2019). EA yöntemi karmaşık olmayan matematiksel hesabı, sinyal gönderme işleminde ön bilgiye ihtiyaç duymaması, kullanım kolaylığı gibi sebeplerden dolayı çok fazla tercih edilen bir yöntemdir. EA yöntemindeki en büyük olumsuzluk algılama performansını düşüren gürültü belirsizliğidir. İşbirlikli spektrum algılama yöntemi ise adından da anlaşılacağı gibi spektrum algılamanın bilişsel kullanıcılar tarafından ortaklaşa yapıldığı bir sistemdir. Bu sistemin görevi zaman rölelerinin performansını iyileştirmek ve birden fazla algılayıcıdan alınan sonuçları birleştirilerek uzaysal çeşitleme sağlamaktır.

Çoklu antenli haberleşme sistemleri kablosuz haberleşmede önemli bir yer tutmaktadır. Çoklu antenli haberleşme sistemleri en genel olarak Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) haberleşme sistemleri olarak isimlendirilmektedir. Alıcı ve vericideki anten sayısına göre isimlendirilen bu sistemler Tekli Giriş Tekli Çıkış

(Single Input Single Output, SISO), Tekli Giriş Çoklu Çıkış (Single Input Multiple Output, SIMO) gibi farklı şekilde kullanılmaktadırlar. Bu sistemlerden MIMO diğer çoklu sistemlerden performans bakımından daha üstündür.

Bu tez çalışmasında önerilen yöntemle doğru algılama olasılığının artması sağlanarak spektrum algılama performansının iyileşmesi hedeflenmektedir. Bunu sağlayabilmek için alıcı ve vericide birden fazla anten bulunduran geleneksel enerji algılama ve iyileştirilmiş enerji algılama yöntemlerine göre spektrum algılama performansı açısından daha üstün olan MIMO Enerji Algılama (MIMO EA) yöntemi önerilmektedir.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde kablosuz haberleşme için büyük bir dönüm noktası olan BR'nin keşfi ve öneminden bahsedilmiştir. BR' nin bilişsel özellikleri, BR döngüsü ve BR'nin ağ yapısı ile ilgili bilgilere yine bu bölümde yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde BR' nin temel işlevi olan spektrum algılama kavramı doğrultusunda spektrum algılamanın önemi, spektrum algılamada ne gibi zorluklarla karşılaşıldığı ve bu zorluklarla baş edebilmek için ne gibi çalışmalar yapıldığı, spektrum algılama performansını belirleyen etmenlerin neler olduğu incelenmiştir. Ayrıca literatürde bulunan bazı spektrum algılama yöntemleri olan kovaryans tabanlı algılama, çevrimsel durağan özellik algılama, uyumlu süzgeç, özdeğer tabanlı algılama ve enerji algılama detaylı olarak incelenmiştir. Yine bu bölümde MIMO teknolojisi ile ilgili teorik bilgiler verilirken; MIMO haberleşme kullanımının avantajları, dezavantajları ve son olarak da kablosuz haberleşmede kullanılan kanal modelleri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde MIMO haberleşme kanallarında literatürde önerilen geleneksel EA ve iyileştirilmiş EA yöntemleri ve bölüm sonunda ise tezde önerilen MIMO EA yöntemi detaylı olarak anlatılmıştır.

Beşinci bölümde önerilen MIMO EA yönteminin algılama performansını görebilmek için MATLAB ortamında gerçekleştirilen benzetimlerle elde edilen sonuçlar grafiklerle açıklanmış olup, algılama olasılıkları nümerik olarak gösterilmiştir.

Altıncı bölümde ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlar hakkında genel değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. BİLİŞSEL RADYO

BR, Joseph Mitola ve Gerald Q. Maguire tarafından keşfedilmiştir. 1999 yılında Mitola, Radyo Bilgi Temsil Dili (Radio Knowledge Representation Language, RKRL) olarak isimlendirilen teknoloji ile kablosuz haberleşme sistemlerinin verimliliğinin artırılabilceğini açıklamıştır (Mitola ve Maguire, 1999). 2000 yılında RKRL fikri Mitola'nın doktora tezinde daha geniş bir biçimde ifade edilmiştir. Joseph Mitola'ya göre BR “Çalıştığı radyo ortamından haberdar olan ve radyo ortamını algılayabilen, buna göre çalışma parametrelerini ayarlayabilen radyodur”. Federal İletişim Komisyonu (Federal Communications Commission, FCC) gibi düzenleyici kurumlar vericinin çalışmasına odaklanmakta ve BR'yi verici parametrelerini içinde çalıştığı ortama göre değiştirebilen bir radyo şeklinde tanımlamaktadır (FCC, 2003).

BR farkındalık, zeka, öğrenme, güvenilirlik ve verimlilik gibi bilişsel yeteneklere sahiptir. Bu yetenekler oldukça geniş kapsamlı olup bunların hayata geçirilmesi dijital sinyal işleme, ağ oluşturma, makine öğrenimi, bilgisayar yazılımı ve bilgisayar donanımındaki ileri düzey teknolojiler sayesinde mümkün olmaktadır (Haykin, 2005).

BR dinamik spektrum erişimini sağlayan anahtar bir teknolojidir. Çevresel faktörlerin, yerleşik politikaların farkında olan bir radyo sistemidir. Bunun yanı sıra işlemsel parametrelerini sistemli ve otonom bir şekilde ayarlayabilir ve deneyim kazanabilmektedir (FCC, 2002).

BR iki tür kullanıcıdan oluşmaktadır. Birincisi, verilen frekans bandını kullanma lisansına sahip olan birincil (lisanslı) kullanıcıdır. İkinci olarak ise, verilen frekans bandının lisansına sahip olmayıp ancak boş olduğunda onu kullanabilen ikincil (lisanssız) kullanıcıdır. Lisanslı kullanıcı frekans bandına döner dönmez lisanssız kullanıcı ortamı boşaltarak başka bir boş frekans bandı bulmalıdır. Bir frekans bandının boş olup olmadığını tespit edebilmek için lisanssız kullanıcının spektrum algılama işlemini gerçekleştirmesi gerekmektedir (Yücek ve Aslan, 2009).

2.1. Neden Bilişsel Radyo ?

Son yıllarda, birçok kablosuz aygıtın, cep telefonunun vb. haberleşme teknolojilerinin yoğun olarak kullanılması nedeniyle kablosuz haberleşme alanında önemli bir büyüme

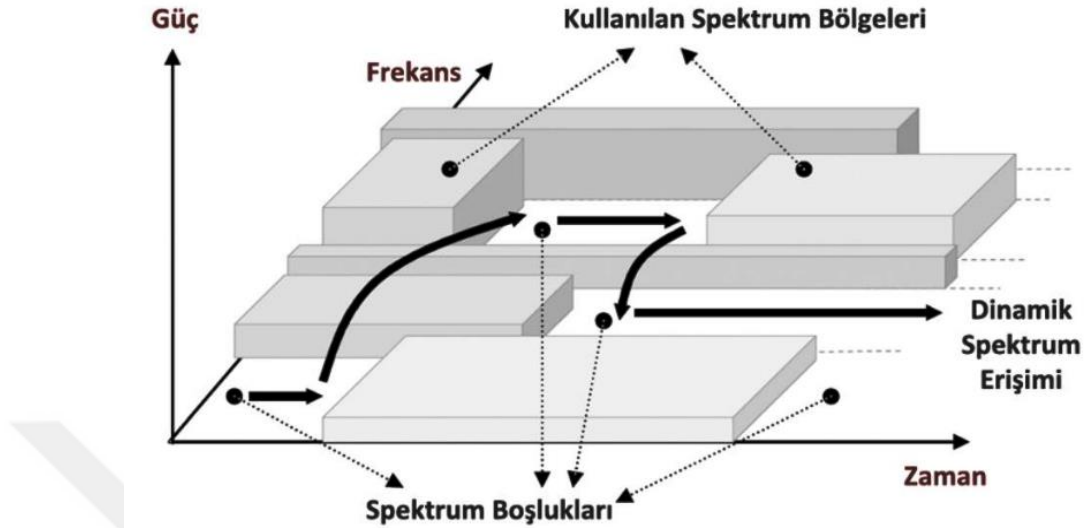
meydana gelmiştir. Kablosuz haberleşme alanındaki bu büyüme neticesinde, yüksek veri hızları, bant genişliği ve spektrum kullanımına olan talep artmıştır. Yapılan çalışmalar spektrumun sınırlı olmasının, kablosuz hizmetlerde devam eden büyümede çok önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, yüksek bant genişliği ve spektrum kullanımı ihtiyacını karşılayan yeni bir teknoloji olarak BR bulunmuştur. BR, spektrum kullanımını verimli bir şekilde gerçekleştirmek ve spektrum kıtlığını azaltmak için Fırsatçı Spektrum Erişimi'ni (Opportunistic Spectrum Access, OSA) sağlayan yeni bir teknolojidir (Maharjan, 2011).

2.2. Bilişsel Radyo'nun Karakteristik Özellikleri

BR bilişsel yetenek ve yeniden yapılandırma olmak üzere iki temel özelliğe sahiptir. Bilişsel yetenek, BR'nin radyo ortamındaki bilgileri takip edebilme ve algılama yeteneğini ifade eder. BR bu bilişsel yeteneğiyle spektrumun nerede ve ne zaman kullanılmadığını tespit edebilir. Sonuç olarak, BR bilişsel yeteneği sayesinde en uygun spektrumu ve en iyi haberleşme parametrelerini seçebilmektedir (Akyıldız vd., 2006). Yeniden yapılandırılabilirlik, BR'nin kendisini; iletim gücü, modülasyon, çalışma frekansı, bağlantı vb. parametrelerini değişikliğe uğratmadan programlayabilme yeteneği olarak ifade edilir (Ejaz, 2008). Yeniden yapılandırılabilirlik, BR'nin dinamik radyo ortamına çabuk uyum sağlayabilmesi için donanım yapısında herhangi bir değişiklik yapmadan anlık veri iletimini gerçekleştirebilmek için iletim parametrelerini ayarlama yeteneğidir. BR'nin çalışma frekansı, modülasyon, iletim gücü, güç kontrolü gibi iletim parametreleri veri iletiminin gerçekleştiği sürecin başından sonuna kadar sürekli olarak yeniden yapılandırılabilir (Akyıldız vd., 2006).

BR, çeşitli frekanslarda gönderme ve alma ve kendi donanım tasarımı tarafından desteklenen farklı iletim erişim teknolojilerini kullanacak şekilde programlanabilir (Jondral, 2005). Spektrumun çoğu halihazırda atanmış olduğundan, en önemli zorluk, lisanslı spektrumu, lisanslı kullanıcıların iletimini engellemeden paylaşmaktır (Akyıldız vd., 2006). BR, spektrum boşluğu olarak adlandırılan, geçici olarak kullanılmayan spektrumun kullanılmasını sağlar (Haykin, 2005). Bu spektrum ayrıca lisanslı kullanıcı tarafından kullanılırsa, BR başka bir spektrum deliğine geçer veya aynı bantta kalır, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi BR dinamik spektrum erişimi sağlayarak girişimi önlemek

için iletim gücü seviyesini veya modülasyon şemasını değiştirerek yeniden yapılandırma işlemine olanak sağlar (Akyıldız vd., 2006).



Şekil 2.1. Dinamik Spektrum Erişimi (Akyıldız vd., 2009)

2.3. Bilişsel Radyo Döngüsü

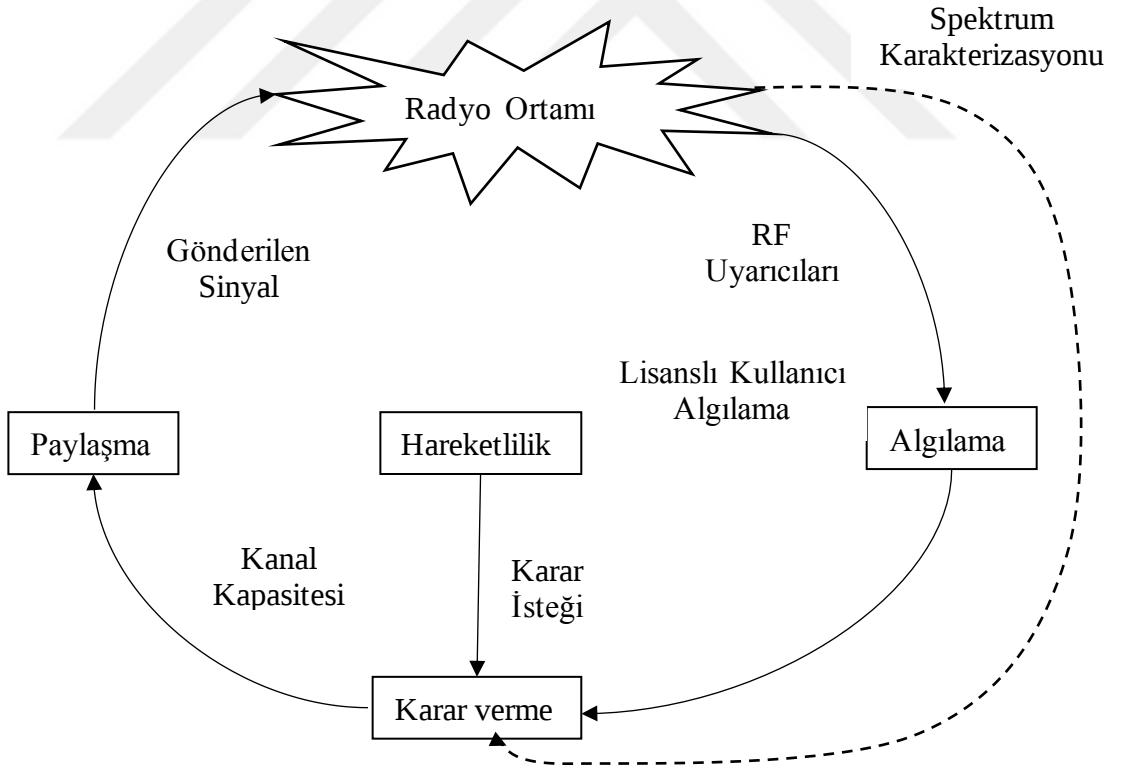
BR çevresindeki radyo ortamından haberdar olan akıllı bir sistemdir. Bu sistemin faaliyeti belirli bir bilişsel döngü çerçevesinde gerçekleşmektedir. BR'nin temel görevlerinin açıklandığı bilişsel döngü şekil 2.2'de de gösterildiği gibi algılama, karar verme, paylaşma ve hareketlilik olmak üzere dört temel aşamadan oluşur. Bu aşamalar aşağıdaki gibi açıklanmaktadır (Atallah, 2015).

- Algılama: BR uygun spektrum bantlarının durumundan faydalanabilmek için spektrumun boşluklarını algılar.
- Karar Verme: BR spektrum boşlukları algılandıktan sonra Servis Kalitesi (Quality of Service, QoS) ihtiyacına en uygun olan spektrum bandına karar vermek için lisanslı kullanıcıların yoğun bulunduğu yerleri tespit ederken aynı zamanda da radyo ortamının durumundan haberdar olur. Bu sebeple karar verme aşamasında lisanslı kullanıcı hakkında ön bilgi gerekmektedir.
- Paylaşma: Birden fazla BR kullanıcısı aynı anda tek bir spektrum bandına erişmek isteyerek çarpışmalar meydana getirir. Bu tür çarpışmaları engellemek için BR

kullanıcısı ve BR arasında veri alışverişini koordineli bir şekilde düzenleyen bir sistem bulunur. Spektrum paylaşımı, çoklu BR kullanıcıları arasında fırsatçı spektrum dağılımına olanak tanımaktadır.

- Hareketlilik: Lisanssız kullanıcılar boş spektrum bandını işgal ettiklerinde, lisanslı kullanıcıların talebi doğrultusunda başka bir spektrum bandına geçerler. Bu duruma spektrum hareketliliği denmektedir. Spektrum hareketliliği gerçekleşirken önceden belirlenmiş olan veri iletiminin iyileştirilmiş bir biçimde ve kesintisiz bir şekilde sağlanması gerekmektedir. Bunun sağlanması spektrum el değiştirme şemalarıyla mümkün olmaktadır. Hareketlilik durumu sağlanırken tüm işlemler işbirliği içinde devam eder.

Bu aşamalar Şekil 2.2’de gösterildiği gibi bilişsel bir döngü içerisinde sistemli bir biçimde gerçekleşmektedir.



Şekil 2.2. BR Döngüsü (Akyıldız vd., 2006)

2.4. Bilişsel Radyo Ağ Yapısı

BR ağ yapısı Şekil 2.3’de gösterilen lisanslı ağ ve lisanssız ağ olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler aşağıda açıklanmaktadır. (Akyıldız vd., 2006).

Lisanslı Ağ: Belirli bir spektrum bandına erişebilme yetkisine sahip olan ağ yapısına lisanslı ağ denir. TV yayın ağları ve hücresel ağlar buna örnek olarak verilebilir. Lisanslı ağı oluşturan bileşenler aşağıda açıklanan elemanlardan oluşmaktadır.

- **Lisanslı Kullanıcı:** Belirli bir spektrumu kullanma yetkisine sahip olan kullanıcıya lisanslı kullanıcı denilmektedir. Bunlar ülkede bulunan spektrum düzenleyen kurumlara belli bir miktar ücret ödeyerek karşılığında lisans bandına sahip olurlar. Lisanslı kullanıcılar BR baz istasyonları ve BR kullanıcıları ile ek bir işleme ihtiyaç duymadan aynı ortamda çalışabilirler.
- **Lisanslı Baz İstasyonu:** Lisanslı baz istasyonu spektrum kullanma yetkisine sahip olan bir altyapı ağ elemanıdır. Spektrumu diğer kullanıcılarla birlikte kullanabilme yeteneğine sahip değildir.

Lisanssız Ağ: İsteddiği spektrumu kullanma yetkisine sahip olmayan ağa lisanssız ağ denir. Lisanslı spektrumdan yararlanabilmek için fırsatçı spektrum erişimleri gibi ek işlemlere ihtiyaç duyar. Lisanssız ağ elemanları aşağıda ifade edildiği gibidir.

- **Lisanssız Kullanıcı:** Spektrum kullanma yetkisine sahip olmayan lisanslı spektrumu kullanmak için ek işlemlere ihtiyaç duyan kullanıcıya lisanssız kullanıcı denilmektedir.
- **Lisanssız Baz İstasyonu:** Lisanssız Baz istasyonu spektruma erişim yetkisi bulunmayan BR kullanıcılarının tek sekmeli bağlantı ile diğer lisanslı ağlara erişebilmesini sağlamaktadır.

BR ağlarının uygulanabileceği çeşitli alanlar vardır. Bunlar kiralık ağ, bilişsel örgü ağı, acil durum ağı ve askeri ağ olarak açıklanabilir. Kiralık ağ; Lisanslı ağ, lisanslı kullanıcının hizmet kalitesinden ödün vermeden üçüncü bir kişiyle anlaşma yaparak spektruma fırsatçı erişim izni vererek kiralık bir ağ sağlayabilir. Örneğin lisanslı ağ spektrum erişim hakkını bir sanal ağ operatörüne kiralayabilir. Bilişsel örgü ağı; BR büyük miktarda spektruma erişim sağladığından BR ağları yoğun kentsel alanlarda yüksek trafik yükünü kaldırabilmek için alt yapı bağlantı noktalarına geçici ya da kalıcı

3. SPEKTRUM ALGILAMA

BR, lisanssız veya BR kullanıcılarının lisanslı kullanıcılarla birlikte spektruma fırsatçı bir şekilde erişmesini sağlayan anahtar bir teknolojidir (Ranjeeth ve Anuradha, 2015). BR kullanıcılarının spektruma erişmesi için lisanslı kullanıcılarla girişim yapmaması gerekir. Bu sebeple lisanslı kullanıcıların spektrumda olup olmadıklarını doğru bir şekilde belirleyebilmek BR için çok önemli bir görevdir.

Spektrum algılama BR'nin farklı spektrum bantlarında oluşan elektromanyetik etkileşimleri tespit edebilme kabiliyeti şeklinde tanımlanır (Konishi vd., 2013). BR'de spektrum algılamada lisanslı kullanıcıların hareketi ve spektrumda bulunan spektrum boşlukları tespit edilir. BR kullanıcıları spektrum boşluklarını hızlı ve doğru bir şekilde algılayarak kesintisiz bir iletişimi gerçekleştirirler. Buradan hareketle hızlilik ve güvenilirliğin spektrum algılama için en uygun yöntemi belirlemede iki önemli unsur olduğunu söylemek mümkündür.

Spektrum algılama için literatürde çok fazla algılama yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemlerin kendi içinde bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu yöntemler ilerleyen bölümlerde detaylı olarak ele alınmıştır.

BR fırsatçı spektrum kullanma özelliği ile spektrum verimliliğini sağlamada büyük görev üstlenmektedir. Spektrum algılama verimliliği, algılama algoritmalarındaki hesaplama karmaşıklığının az olması veya geniş bant spektrumundan (örneğin sıkıştırılmış algılama yöntemleri) yararlanabilmek için örnekleme oranının düşürülmesi olarak tanımlanabilir (Salavran ve Kurt, 2012). Spektrum algılamada verimliliğin sağlanabilmesi için pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların en önemlisi Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electricals and Electronics Engineers, IEEE) topluluğunun düzenlediği standartlardır. Spektrum standartları politika ve tasarım gibi konularda tekdüzelik sağladığı için önem arz etmektedir. Buna birden fazla cihazın bir arada çalışabilmesi örnek olarak verilebilir. IEEE 1900 standartları komitesi (Holland vd., 2015) spektrum algılamada Dinamik Spektrum Erişimi Ağları (Dynamic Spectrum Access, DSA) standartlarını belirlemek için 2007 yılında kurulmuş olan bir yönetim grubudur. Bu grubun çalışma standartları arasında; spektrum algılama, girişim, önerilen uygulamalar, bir arada çalışabilme gibi özellikler vardır ve aşağıdaki yedi çalışma grubundan oluşmaktadır (Makarfi, 2013).

- IEEE.1900.1 = Dinamik spektrum erişimi için tanımlar ve kavramlar: Kablosuz Ağlarla İlgili Terminoloji, Sistem İşlevselliği, Spektrum Yönetimi.
- IEEE.1900.2 = Bant İçi ve Bitişik Bant Girişiminin Radyo Sistemleri Arasındaki Varoluşunun Analizi için Önerilen Uygulama.
- IEEE.1900.3=Yazılım Tanımlı Radyo Uygunluk Modüllerinin Değerlendirilmesi için Önerilen Uygulama.
- IEEE.1900.4 = Heterojen Kablosuz Erişim Ağlarında Optimize Edilmiş Radyo Kaynağı Kullanımı için Ağ Cihazı Dağıtılmış Karar Vermeyi Sağlayan Mimari Yapı Taşları.
- IEEE.1900.5 = Dinamik Spektrum Erişimi Uygulamaları için BR'yi Yönetmeye Yönelik Politika Mimarileri.
- IEEE.1900.6 = Dinamik Spektrum Erişimi ve Gelişmiş Radyo İletişim Sistemleri için Spektrum Algılama Ara yüzleri ve Veri Yapıları.
- IEEE.1900.7 = Sabit ve Mobil Çalışmayı Destekleyen Beyaz Alan Dinamik Spektrum Erişimli Radyo Sistemleri için Radyo Ara yüzü.

Ayrıca IEEE.802.22 standardı spektrum algılama için kullanılan ilk ve en önemli standarttır ve yukarıda sıralanan standartlar ve birçok spektrum algılama yöntemi için önemli bir kaynak olmuştur (Ko vd., 2010).

Spektrum ölçüm çalışmaları yapan Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Federal İletişim Komisyonu (Federal Communication Commission, FCC), yaptığı ölçümlerde gün içerisinde farklı saatlerde bulunan spektrum boşluklarının %15 ve %85 aralığında değişken değerler aldığını bildirmiştir. İrlanda'da yapılan ölçümlerde ise spektrum boşluklarının gün içerisinde Tablo 3.1'de gösterildiği gibi 30 MHz ile 698 MHz frekans bandı arasında değişken değerler aldığı gözlemlenerek rapor edilmiştir (İngök, 2012). Rapor sonucunda en çok kullanılan ortalama spektrum kullanım oranının en çok yüzde 35,1 en az ise yüzde 4,0 olduğu görülmektedir. Yine bant genişliğinin en çok 181 MHz en az ise 9 MHz olduğu görülmektedir.

Spektrum kullanım miktarları ve dolayısıyla verimli bir algılama için çok önemli bir konudur. Spektrum algılama işleminin gerçekleşmesini zorlaştıran birtakım etkenler ve bunlarla baş edebilmek için gerçekleştirilen bazı yöntemler bulunmaktadır. Bunlar Bölüm 3.1' de detaylı olarak anlatılmaktadır.

Tablo 3.1. 30 MHz- 698 MHz frekans bandındaki spektrum kullanım değerleri

Başlangıç Frekansı (MHz)	Bitiş Frekansı (MHz)	Band Genişliği (MHz)	Banda Tahsis Edilen Servis	Kullanılan Spektrum (MHz)	Ortalama Kullanım (%)
30	54	24	Sabit Telsiz	1,351416	5,6
54	88	34	Sabit Telsiz	6,28524	18,5
108	138	30	Amatör	1,88598	6,3
138	174	36	Amatör	4,51656	12,5
174	216	42	Yayın	14,42952	34,4
216	225	9	Yayın	1,77759	19,8
225	406	181	Uydu Uzay	8,664289	4,8
406	470	64	Amatör	11,43872	17,9
470	512	42	Yayın	2,54835	6,1
512	608	96	Yayın	25,39488	26,5
608	698	90	Yayın	3,63501	4,0
698	806	108	Yayın	37,90044	35,1

3.1. Spektrum Algılamada Karşılaşılan Zorluklar

3.1.1. Donanım gereksinimleri

Spektrum algılama işleminin verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için geniş bir spektrum bandının BR kullanıcısı tarafından hızlı bir şekilde taranması, yüksek hızlı işlemcili ya da yüksek güçlü dönüştürücülü donanımsal yapıların bulunması gerekmektedir. Boş frekans bandlarının belirlenebilmesi için çok geniş bir frekans alanının gözlemlenmesi gerekir. Bu gereklilik ek donanımsal yapıların bulunmasını zorunlu kılar. Antenler ve güç amplifikatörleri gibi Radyo Frekans (RF) elemanlarına ilave edilen elemanlar bu ek donanımsal yapılara örnek olarak verilebilir. Ayrıca yüksek hızlı hesap gerektiren donanım ek yapılarına örnek olarak ise Dijital Sinyal İşleme (Digital Signal Processing, DSP) veya Alanda Programlanabilir Kapı Dizisi (Field-Programmable Gate Array, FPGA) örnek olarak verilebilir (Yücek ve Arslan, 2009).

3.1.2. Gürültü belirsizliği

Uygulamada uzay ve zamanda değişen gürültü gücü hakkında kesin bilgiye ulaşmak mümkün değildir. Bu sebeple lisanssız kullanıcı, gürültü belirsizliği olarak da bilinen gürültü gücünü algılamada zorluk yaşar. Eğer gürültü belirsizliğinin olmadığı farz edilirse, BR sisteminin performansı düşer ve bu da ağda mevcut olan gerçek koşulların yok sayılması algısına yol açar. Gürültü belirsizliği, gürültü gücünün dalgalanması sonucu ortaya çıkar ve bu durum algılama hassasiyetini düşürür. Algılama hassasiyetinin düşmesi de algılama doğruluğunun azalmasına ve lisanssız kullanıcının yanlış spektrum kararı vermesine sebep olur. Bu da iletim durumunda iken lisanssız kullanıcının lisanslı kullanıcıya girişimde bulunmasına yol açar. Gürültü belirsizliği zayıf sinyallerin algılanma kapasitesini sınırlandırır. İkincil kullanıcının SNR'si belirli bir seviyenin altında olduğunda enerji algılayıcının performansı iyileştirilemez (Lorincz vd., 2019).

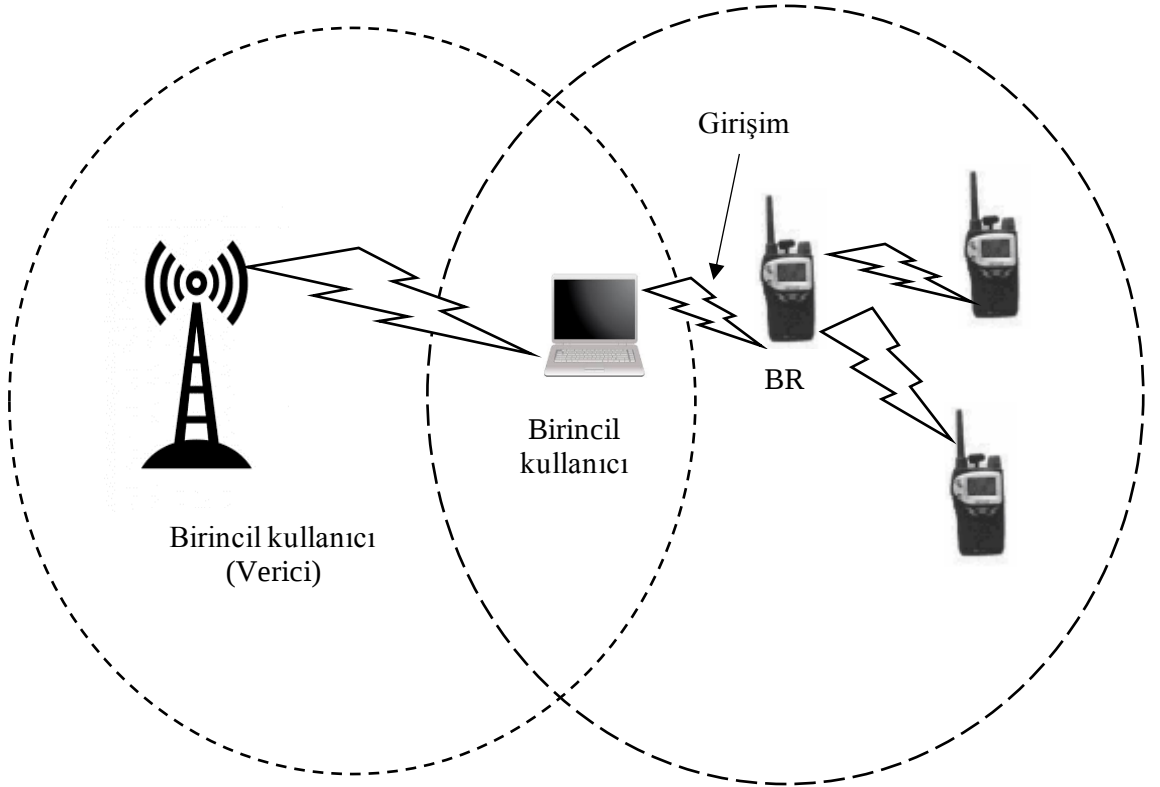
3.1.3. Gizli birincil kullanıcı problemi

Lisanssız kullanıcıların maruz kaldığı gölgeleme, çok yollu sönmüleme gibi durumlardan dolayı gizli birincil kullanıcı problemi meydana gelmektedir. Şekil 3.1'de görülen kesikli çizgiler BR'nin ve lisanslı kullanıcıların çalışma gizli düğümün ortaya çıktığını göstermektedir. Burada BR kullanıcısı kullanıcıların konumlarından dolayı lisanslı vericinin sinyalini algılayamaz ve lisanslı alıcıda girişime sebep olur. Bu sorunu çözebilmek için literatürde işbirlikli algılama yöntemleri önerilmektedir (Makarfi, 2013; Yücek ve Arslan, 2009).

3.1.4. Algılama süresi ve frekansı problemi

BR lisanslı kullanıcılara ait olan spektrum bantlarında çalıştığından, lisanslı kullanıcılar istedikleri zaman bu bantları isteyebilir. Bu durumda BR lisanslı kullanıcıya girişim yapmamak için lisanslı kullanıcının varlığını tespit edecek kadar duyarlı olmalıdır ve spektrumunu derhal terk edebilmelidir. Bu yüzden belirli bir süre içinde BR lisanslı kullanıcının varlığını tanımlamalıdır. Algılama frekansı (BR tarafından algılamanın ne sıklıkla gerçekleştiği) bu sebeple önemli bir parametredir. Algılama frekansı gereksinimleri lisanslı kullanıcının durumuna göre gevşetilebilir. Örnek olarak TV kanalı tespiti durumunda TV kanalının varlığı mevcut kanal kapanmadıkça ya da yeni bir kanal yayına başlamadıkça sık sık değişmez.

Lisanslı kullanıcıyı girişim toleransı algılama frekansını etkileyen önemli faktörlerden biridir. BR'nin kamu güvenliği bantlarında çalıştığı durumlarda mümkün olduğunca sık algılama yapılmalı ve kamu güvenlik birimleri tarafından talep edilmesi halinde bantlar hemen boşaltılmalıdır. İkincil kullanıcı tarafından kullanılan bir kanal algılama prosedürü için kullanılamaz bu sebeple veri iletimi için spektrum algılama ikincil kullanıcı tarafından algılama yorumlanmadan yapılmalıdır. Bu durum ise bütün sistemin veriminin düşmesine sebep olur. Bu problemi gidermek için literatürde dinamik frekans atlama yöntemi önerilmektedir. Bu yöntem tek bir kanaldan daha fazlasını kullanma varsayımına dayanır. Çalışan bir kanal üzerinde yapılan işlemde, tahmin edilen kanallar paralel olarak algılanır ve ardından anahtarlama gerçekleşir ve tahmin edilen kanallardan biri çalışma kanalı olur. Kanal atlama düzenine bir erişim noktası tarafından karar verilir ve bu bilgi bağlantılı istasyonlarda yayınlanır (Hu vd., 2007).



Şekil 3.1. Gizli birincil kullanıcı problemi

3.1.5. Güvenlik sorunu

BR kablosuz haberleşme ortamındaki yaygın güvenlik sorunlarıyla karşı karşıya kalmaktadır. Bilinmeyen lisanslı kullanıcı konumu, kontrol kanallarının yetersizliği, BR düğümlerinin yüksek hassasiyet gerektirmesi güvenlik sorunlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Kötü amaçlı kullanıcılar bu güvenlik sorunlarını fırsat bilerek BR ağına güvenlik saldırıları başlatabilmektedir. Bu güvenlik saldırıları lisanslı kullanıcıların girişime uğramasına ve lisanssız kullanıcıların da spektrum boşluklarını kullanma fırsatını kaçırmalarına sebep olmaktadır. Ayrıca başka bir güvenlik sorunu da kötü amaçlı kullanıcının kendisini lisanslı kullanıcı olarak göstermesinden kaynaklanır. Bunu önlemek amacıyla lisanslı kullanıcılara şifreli bir imza verilir. Bu imza kullanıcının daha sonra yeniden iletim işlemi gerçekleşirken kimliğini doğrulamak için kullanılır. Bu şekilde güvenlik sorunuyla baş edilebilmektedir (Makarfi, 2013).

3.2. Spektrum Algılama için Teorik Temeller

Spektrum algılamada lisanslı kullanıcı ve gürültünün varlığına bağlı olarak iki tane belirleyici temel hipotez bulunmaktadır. Bunlar aşağıdaki eşitliklerde de görüldüğü gibi H_0 ve H_1 hipotezleri olarak isimlendirilmektedir.

$$H_0 : \text{Gürültü} \quad (3.1)$$

$$H_1 : \text{Gürültü} + \text{Lisanslı Kullanıcı} \quad (3.2)$$

3.3. Spektrum Algılama Performansı

Spektrum algılama performansının belirlemek için başlıca üç olasılık bulunmaktadır. İlk olarak algılama olasılığı (Probability of detection, P_d), ikinci olarak yanlış algılama olasılığı (Probability of false alarm detection, P_{fa}) ve üçüncü olarak ise eksik algılama olasılığı (Probability of missed detection, P_{md}) durumudur. Bu olasılıklar lisanslı kullanıcı tarafından frekansın kullanılıp kullanılmadığı durumlarına göre belirlenebilmektedir.

- **Algılama olasılığı (Probability of detection - P_d)** : BR tarafından dolu olarak algılanan frekansın lisanslı kullanıcı tarafından kullanılması olarak ifade

edilmektedir. (Yücek ve Arslan, 2009). Matematiksel olarak gösterimi aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$P_d = P(H_1|H_1) = 1 - P_{md} \quad (3.3)$$

- **Yanlış algılama olasılığı (Probability of false alarm- P_{fa}):** Algılanan spektrum bandı boş olduğunda yanlış algılama meydana gelir yani gerçekte boşta olan frekans bandının lisanslı yani birincil kullanıcı tarafından kullanılıyor gibi algılanmasıdır. Bu durumda eşitlik (3.2)'de gösterildiği gibi H_1 hipotezi seçilir (López-Benítez ve Casadevall, 2010). Aşağıdaki eşitlikte P_{fa} matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$P_{fa} = P(H_1|H_0) \quad (3.4)$$

- **Eksik algılama olasılığı (Probability of miss detection- P_{md}):** BR, frekansın müsait olduğunu bildirmesine rağmen lisanslı kullanıcının bu frekansı kullanması durumudur. (Yücek ve Arslan, 2009). Eksik algılama durumunda spektrum algılama algoritması eşitlik (3.1)'de gösterilen H_0 hipotezini seçer ve bu durum lisanslı kullanıcıya zarar verebilir. (López-Benítez ve Casadevall, 2010). Matematiksel olarak P_{md} aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilebilir.

$$P_{md} = P(H_0|H_1) \quad (3.5)$$

3.4. Spektrum Algılama Yöntemleri

BR'de spektrum algılama çok önemli bir konudur. Literatürde çeşitli spektrum algılama yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri kovaryans tabanlı spektrum algılama, çevrimsel durağan özellik algılama, uyumlu süzgeç yöntemi, özdeğer tabanlı spektrum algılama, enerji algılama tabanlı spektrum algılama gibi yöntemlerdir. Bu bölümde bu yöntemlerden bahsedilecektir.

3.4.1. Kovaryans tabanlı spektrum algılama yöntemi

Uygulamada gürültü gücünün tam olarak bilinmesi oldukça zordur. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için literatürde kovaryans tabanlı algılama yöntemi önerilmektedir (Zeng ve Liang, 2007). Bu yöntemin diğer yöntemlere göre en önemli avantajı, gürültü

ve lisanslı kullanıcı hakkında ön bilgi (varyans, modülasyon, kanal bilgisi) gerektirmemesidir. Ayrıca hesaplama maliyetinin de çok düşük olması kovaryans tabanlı spektrum algılamının bir diğer avantajıdır (Çiflikli ve İlgin, 2018).

Bu yöntemde ilk olarak, alınan işaretin örnek kovaryans matrisi hesaplanarak test istatistiği için iki adet sonuç elde edilir. Ardından bu elde edilen iki test istatistiği sonucunun belli bir eşik değerine göre karşılaştırılmasıyla lisanslı kullanıcının varlığı ya da yokluğu hakkında karar verilir. (Zeng ve Liang, 2009).

Kovaryans matrisi hesaplamak için aşağıdaki eşitlikler tanımlanmaktadır (Althaf ve Prema, 2018).

$$y(n) = [y(n) \quad y(n-1) \quad \dots \quad y(n-s+1)]^{tr} \quad (3.6)$$

$$x(n) = [x(n) \quad x(n-1) \quad \dots \quad x(n-s+1)]^{tr} \quad (3.7)$$

$$w(n) = [w(n) \quad w(n-1) \quad \dots \quad w(n-s+1)]^{tr} \quad (3.8)$$

Eşitlik (3.6)'da $y(n)$ BR kullanıcısı tarafından alınan işareti, eşitlik (3.7)'de $x(n)$ iletilen işareti, eşitlik (3.8)'de $w(n)$ kanalda bulunan AWGN gürültüsünü, tr devrik matrisi, s düzeltme faktörünü ifade etmektedir.

$\mathbb{R}_Y$ alınan işaretin kovaryans matrisi olmak üzere aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi hesaplanır.

$$\mathbb{R}_Y = \mathbf{E}[y(n)y^{tr}(n)] \quad (3.9)$$

Burada $\mathbf{E}$ beklenen değer işlemcisi olarak ifade edilir. Ardından $\mathbb{R}_X$ iletilen işaretin kovaryans matrisi olmak üzere aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mathbb{R}_X = \mathbf{E}[x(n)x^{tr}(n)] \quad (3.10)$$

Yukarıda hesaplanan $\mathbb{R}_Y$ kovaryans matrisine bağlı olarak $\mathbf{T}_1$ ve $\mathbf{T}_2$ sırasıyla birinci ve ikinci test istatistikleri olmak üzere aşağıdaki eşitliklerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mathbf{T}_1 = \frac{\sum_{r=1}^S \sum_{c=1}^S |(\mathbb{R}_Y)_{rc}|}{s} \quad (3.11)$$

$$\mathbf{T}_2 = \frac{\sum_{n=0}^N |(\mathbb{R}_Y)_{rr}|}{s} \quad (3.12)$$

Eşitlik (3.11) ve eşitlik (3.12)'deki r ve c değerleri sırasıyla $\mathbb{R}_Y$ matrisinin satır ve sütun sayılarını, N matrisin örnek sayısını ifade eder. T_1 ve T_2 nin birbirine oranı sonucunda elde edilen değer işaretin varlığını ya da yokluğunu gösterir. Yani eğer $T_1/T_2 < \lambda$ ise işaret yok eğer $T_1/T_2 \geq \lambda$ ise işaret var demektir.

3.4.2. Çevrimsel durağan özellik algılama

Çevrimsel durağan özellik algılamada, zamanla periyodik olarak değişen istatistiksel bir yapı mevcuttur. Bu yöntemde sinyalin sabit döngüsel özelliklerinden yararlanır. Bu özellikler herhangi bir girişim sinyali veya sabit gürültüde bulunmayan spektral korelasyona ve periyodik istatistiğe sahiptir. Çevrimsel durağan özellik algılama yöntemi yüksek gürültü bağışıklığına sahiptir. Birincil kullanıcıların varlığını belirlemek için birincil sinyalde bulunan periyodiklik özelliği kullanılır. Birincil kullanıcının dalga şekli hakkında herhangi bir bilgi yoksa kullanılacak en iyi teknik çevrimsel durağan özellik algılamadır. Bunların yanı sıra, hesaplama karmaşıklığı, uzun algılama süresi, yüksek maliyet ve çevrimsel spektral yoğunluğun zayıf tahminin algılama performansı düşürmesi bu yöntemin dezavantajlarıdır (Aparna ve Jayasheela, 2012).

Kablosuz haberleşmede modülasyona uğramış lisanslı kullanıcıların işaretlerinin ortalaması zamanla periyodik olarak değişiyorsa bu işaretler aşağıdaki eşitliklerde gösterildiği gibi çevrimsel durağan işaretler olarak ifade edilmektedir (İlgin, 2018).

$$m_x(t + D_0) = m_x(t) \quad (3.13)$$

$$K_x(t, \tau) = E[x(t, \tau)x^*(t)] \quad (3.14)$$

Burada $K_x(t, \tau)$ işaretin ötilintisini, $m_x(t)$ modülasyonlu işaretin ortalamasını, D_0 ise işaretin ortalamasını ifade etmektedir.

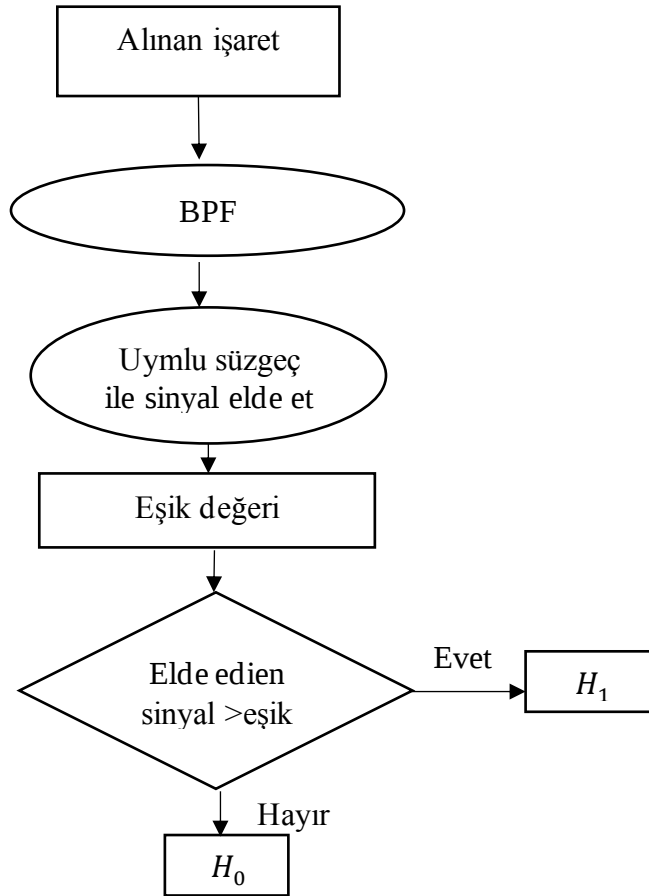
3.4.3. Uyumlu süzgeç yöntemi

Uyumlu süzgeç yöntemi dijital sinyal işleme alanında kullanılır. Bu yöntemle sonradan eklenmiş bir gürültü mevcut olduğunda, Sinyal Gürültü Oranı'nın (Signal Noise Ratio, SNR) en üst düzeye çıkması sağlanmaktadır (Ziafat vd., 2011). Uyumlu süzgeç birincil kullanıcının varlığını saptamayı amaçlar ve bunun için süzgeç çıkışı ile eşik değerini

karşılaştırır (Eduardo ve Caballero, 2015). BR’de birincil kullanıcının dalga bilgisi mevcut olursa, uyumlu süzgeç en avantajlı yöntem olarak gözlemlenir. Bunun yanı sıra sinyal hakkında ön bilgi zorunluluğu ve BR’nin tüm birincil vericiler için ayrı ayrı alıcıya ihtiyaç duyması bu yöntemin dezavantajlarıdır (Ziafat vd., 2011).

$$\text{Test İstatistiği} = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)y^*(n) \quad (3.15)$$

Eşitlik (3.15)’de uyumlu süzgeç test istatistiği verilmiştir. Burada $y^*(n)$ alınan işaretin eşleniğini ifade etmektedir. Uyumlu süzgeç yönteminde yapılan test istatistiği Şekil 3.2’deki akış diyagramında gösterildiği gibi uyumlu süzgeç ile elde edilen sinyal belli bir eşik değeri ile karşılaştırılarak elde edilen bilgi neticesinde birincil kullanıcının işaretinin varlığına karar verilir.

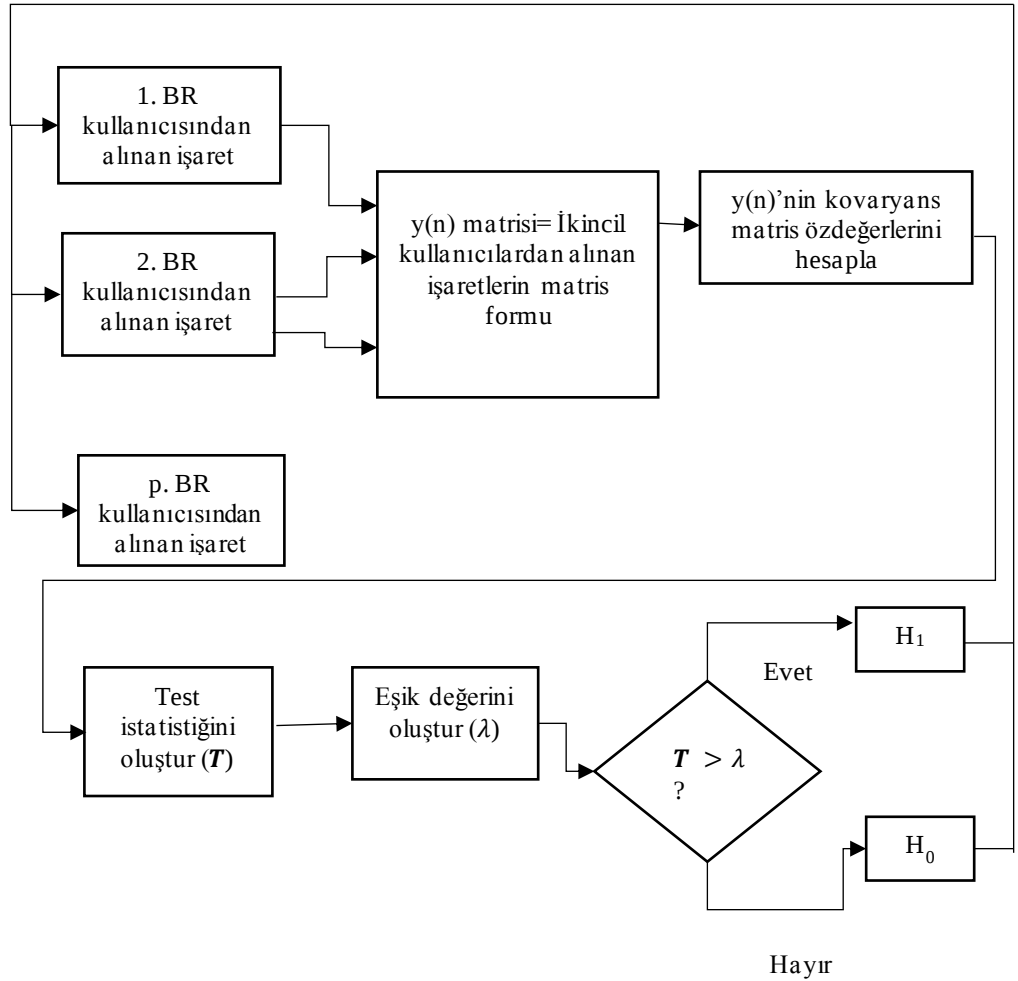


Şekil 3.2. Uyumlu süzgeç akış şeması

3.4.4. Özdeğer tabanlı spektrum algılama

Özdeğer tabanlı spektrum algılama gürültü işareti, algılanacak işaret ve kanal hakkında ön bilgi gerektirmeyen ve darband sistemler için elverişli olan bir yöntemdir. Literatürde özdeğer algılama yöntemi kör spektrum algılama başlığı altında incelenmektedir. Ayrıca gürültü ön bilgisine ihtiyaç duymayan yarı kör özdeğer tabanlı spektrum algılama yöntemleri de literatürde önerilmektedir (İlgin, 2018).

Şekil 3.3'te özdeğer tabanlı spektrum algılama için verilen akış diyagramında y matrisinin kovaryans matrisi özdeğerleri bulunmaktadır. Burada normalde ikincil kullanıcıdan gelen sinyaller y matrisinde toplanır ancak bu durum matrisin hesaplama işlemini zorlaştırır. Bu olumsuzluğu gidermek için düzeltme faktörü kullanılarak matrisin boyutu değiştirilmektedir. En son olarak ise test istatistiği ve eşik değeri karşılaştırılarak spektrum algılama hakkında bilgi edinilmektedir (İlgin, 2018).



Şekil 3.3. Özdeğer tabanlı spektrum algılama akış diyagramı (İlgin, 2018)

Özdeğer tabanlı spektrum algılamada genel olarak aşağıdaki iki yöntemden faydalanılmaktadır (Zeng ve Liang, 2009):

En Büyük ve En Küçük Özdeğer (Maximum and Minimum Eigenvalue, MME) Algılama:

- Adım 1. Alınan işaretin örnek kovaryans matrisi hesaplanır (Bkz (3.9)).
- Adım 2. $\mathbb{R}_Y$ matrisinin en büyük ve en küçük özdeğerleri hesaplanır.
- Adım 3. Karar aşamasına geçilir. Eğer en büyük özdeğerin en küçük özdeğere oranı eşik değerinden (λ) büyükse işaretin olduğuna, küçük ise işaretin olmadığına karar verilir.

En Küçük Özdeğer ile Enerji Algılama (Energy with Minimum Eigenvalue, EME):

- Adım 1. MME yönteminde olduğu gibi alınan işaretin kovaryans matrisi hesaplanır.
- Adım 2. Alınan işaretin ortalama gücü P_{ort} aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanır.

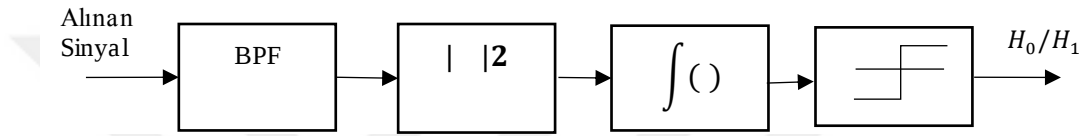
$$P_{ort} = \frac{\sum_{n=1}^N [y(n)]^2}{N} \quad (3.16)$$

- Adım 3. Karar aşamasıdır. Eğer P_{ort} değerinin en küçük özdeğere oranı eşik değerinden büyük ise sinyal var, aksi halde sinyal yok şeklinde karar verilir.

3.4.5. EA tabanlı spektrum algılama

Literatürde radyometri olarak bilinen EA ya da geleneksel EA yöntemi en basit işaret algılama yöntemidir. Uygulamada BR, lisanslı kullanıcı hakkında yeterli bilgiye ulaşamadığında enerji algılayıcı spektrum algılamada etkili olmaktadır (Urkowitz, 1967). EA yönteminin avantajları, matematiksel ifadelerin çok olmaması, donanım yapısının karmaşık olmaması ve lisanslı kullanıcı için ek bilgiye ihtiyaç duyulmamasıdır. Dezavantajları ise, eşik değerini belirlemenin zorluğu ve ikincil kullanıcı frekansı kullandığında birincil kullanıcıların girişiminin sonucunda gürültüyü ayırt edememesidir. EA hesaplaması Neyman Pearson testi ile yapılmaktadır. Bu test ile algılama olasılığını artırılması amaçlanmaktadır (Yılmaz vd., 2018).

EA yöntemini gerçekteşmesi Şekil 3.4'te blok diyagramında gösterilmektedir. Burada ilk olarak girişten alınan sinyal bir bant geçiren filtreden (Band Pass Filter, BPF) geçer. Filtrelenmiş olan sinyalin ilk olarak karesi alınıp toplanır veya integrali alınır. Daha sonra önceden belirlenmiş veya hesaplanan bir eşik değeri ile karşılaştırma işlemi yapılır ve bunun sonucunda birincil sinyalin varlığına veya yokluğuna karar verilir (Urkowitz, 1967). Eğer enerji eşik değerinden fazla ise birincil sinyalin varlığı ve kanalın ikincil kullanıcı tarafından kullanılmadığı düşünülür. Eğer enerji eşik değerinden az ise birincil sinyalin olmadığı ve kanalın ikincil kullanıcının kullanabilmesi için uygun olduğu düşünülür (Gupta vd., 2018).



Şekil 3.4. Enerji Algılama yöntemi blok diyagramı (Gupta vd., 2018)

Yukarı da da bahsedilen Neyman Pearson testi kullanılarak $E_i(y_i)$ alınan işaretin enerjisi olmak üzere aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanabilir.

$$E_i(y_i) = \sum_{n=1}^N |y_i[n]|^2 \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} \lambda \quad (3.17)$$

Alınan sinyal transfer fonksiyonu ile ideal bir BPF tarafından aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi filtreleme hesabı yapılır (Ranjeet ve Anuradha, 2015).

$$H(f) = \begin{cases} \frac{2}{\sqrt{F}}, & |f - f_c| \leq W \\ 0, & |f - f_c| \geq W \end{cases} \quad (3.18)$$

Burada $H(f)$ BPF transfer fonksiyonunu, f_c filtre tarafından seçilen taşıyıcı frekansı, F güç spektral yoğunluğunu ve W ise sinyal bant genişliğini ifade etmektedir. Böylece alınan işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability Density Function, PDF) aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanabilir.

$$f_y(y) = \begin{cases} \frac{1}{2^u \Gamma(u)} y^{u-1} e^{-\frac{y}{2}} & H_0 \\ \frac{1}{2} \left(\frac{y}{2\gamma}\right)^{\frac{u-1}{2}} e^{-\frac{2y+\gamma}{2}} I_{u-1}(\sqrt{2y\gamma}) & H_1 \end{cases} \quad (3.19)$$

Burada $f_y(y)$ alınan işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonunu, $I_u(.)$ değeri u . dereceden Bessel fonksiyonu, $\Gamma(.)$ gama fonksiyonunu, γ SNR'yi ifade etmektedir.

SNR'nin düşük olduğu durumlarda belirli bir performans elde etmek için BR kullanıcısından alınan işaret örneklerinin sayısı genellikle fazladır ($N \gg 1$). Buradaki bilgiye dayanarak aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi, Merkezi Limit Teoremi kullanılarak Gauss olasılık tahminleri yapılabilir (Lopez-Benitez ve Casadevall, 2010).

$$E_i(y_i) \sim \begin{cases} \mathcal{N}(N\sigma_w^2, 2N\sigma_w^4), & H_0 \\ \mathcal{N}(N(\sigma_y^2 + \sigma_w^2), 2N(\sigma_y^2 + \sigma_w^2)^2), & H_1 \end{cases} \quad (3.20)$$

Burada σ_w^2 gürültü varyansdır, σ_y^2 ise alınan ortalama birincil sinyal gücüdür.

Enerji algılamada önceden belirlenmiş bir eşik değeri mevcuttur. Bu eşik değeri enerji algılayıcının algılama performansını belirlemede etkilidir. Spektrum algılama performansını ölçebilmek için P_d ve P_{fa} hesaplamaları yapılmalıdır. İlk olarak P_d değeri aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi hesaplanabilir (Abramowitz ve Stegun, 1972).

$$P_d = P\{E_i(y_i) > \lambda | H_1\} = Q\left(\frac{\lambda - N(\sigma_y^2 + \sigma_w^2)}{\sqrt{2N(\sigma_y^2 + \sigma_w^2)^2}}\right) \quad (3.21)$$

Burada $Q(.)$ ile ifade edilen denklem Gauss olasılık kuyruk fonksiyonunu ifade eder.

Daha sonra yanlış algılama olasılığı hesaplamak için aşağıdaki eşitlikten yararlanılabilir (Abramowitz ve Stegun, 1972).

$$P_{fa} = P\{E_i(y_i) > \lambda | H_0\} = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \quad (3.22)$$

P_d ile P_{fa} değerleri hesaplandıktan sonra elde edilen verilerle eksik algılama olasılığı da hesaplanır ve sonuca göre H_1 hipotezi seçilir. Ancak eğer bu sefer herhangi bir sinyal bilgisi yoksa spektrum hakkında verilen kararın yanlış olduğu anlaşılır Eksik algılama olasılığı ne kadar büyük olursa güvenilirlik o kadar az olmaktadır. Bu durum da lisanslı kullanıcıların beklenmedik sinyal girişimlerine maruz kalmasına sebebiyet vermektedir.

Enerji algılama yönteminde karar verme işleminin gerçekleşmesini sağlayan eşik değeri aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi hesaplanabilir (Lopez ve Casadewall, 2010).

$$\lambda = (Q^{-1}(P_{fa, hedef})\sqrt{2N} + N)\sigma_w^2 \quad (3.23)$$

Burada $P_{fa, hedef}$ hedef yanlış algılama olasılığını ifade etmektedir ve önceden belirlenen bir P_{fa} değeri ile $P_{fa, hedef}$ değerinin hesaplanması için gereken eşik değerinin bulunmasını sağlamaktadır. SNR'ye bağlı olarak değişen algılama olasılığı aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği gibidir.

$$P_d(\gamma) = Q\left(\frac{Q^{-1}(P_{fa, hedef})\sqrt{2N} - N_\gamma}{\sqrt{2N}(1+\gamma)}\right) \quad (3.24)$$

$$\cong Q\left(Q^{-1}(P_{fa, hedef}) - \sqrt{\frac{N}{2}}\gamma\right)$$

Buradaki SNR değeri aşağıdaki eşitlikle bulunabilmektedir.

$$\gamma = \frac{\sigma_x^2}{\sigma_w^2} \quad (3.25)$$

3.5. MIMO Sistem Modeli

Çoklu haberleşme sistemleri verici ve alıcıdaki anten yapılarına göre Tekli Giriş Tekli Çıkış (Single Input Single Output, SISO), Tekli Giriş Çoklu Çıkış (Single Input Multiple Output, SIMO), Çoklu Giriş Tekli Çıkış (Multiple Input Single Output, MISO), MIMO olarak isimlendirilirler. Bunlardan MIMO yapısı çoklu antenli haberleşme sistemlerinin en önemlisidir. MIMO kavramıyla ilgili ilk çalışma 1987 yılında Jack Winters tarafından yapılmıştır.

MIMO haberleşme sistemleri veri iletimini çok hızlı bir şekilde sağlayarak çoklu yol yayılımından kaynaklanan olumsuzlukları yararlı hale getirip, spektrum algılamada verimliliği büyük ölçüde sağlamaktadır (Gesbert vd., 2003). Foschini ve Gans (1996), çoklu haberleşme sistemleriyle ilgili yaptıkları bir çalışmada alıcıda bulunan anten sayısının vericide bulunan anten sayısından daha fazla veya aynı sayıda olması durumunda, kapasitenin verici anten sayısına bağlı ve orantılı olarak arttığını gözlemlemişlerdir. Kapasitedeki artış daha hızlı haberleşmeyi sağladığı için MIMO haberleşme sistemleri tek antenli haberleşme sistemlerine göre daha avantajlı hale getirmiştir. Şekil 3.5'te alıcı ve vericide birden fazla anten kullanan bir WIFI yönlendirici gösterilmektedir. Bu yönlendirici MIMO anten teknolojisi kullanarak birden çok BR

kullanıcısının aynı anda kablosuz ağlara erişmesini sağlayarak haberleşmenin verimli bir şekilde devam etmesini sağlamaktadır.

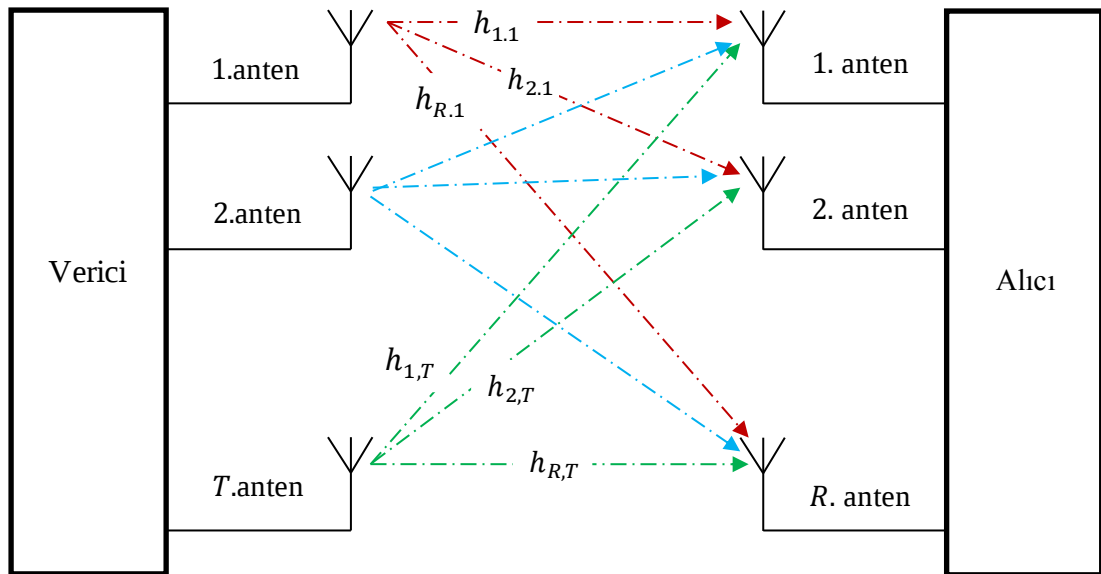
MIMO haberleşme kanalları için Bağımsız ve Aynı Dağılımlı (Independent and Identically Distributed, IID) karmaşık Gauss sönümlmeli varsayım, büyük kapasite ve çeşitlilik sağlar ancak uzay-zaman kodlarını simüle etmek için kullanılan bu varsayım gerçek uygulamada teorikte olduğu kadar kapasite ve uzaysal çeşitlilik artışı sağlayamaz (Bonek vd., 2003).



Şekil 3.5. MIMO teknolojisini kullanan modern WIFI yönlendirici

3.6. MIMO Sistem Yapısı

MIMO haberleşme sisteminin en temel yapısı Şekil 3.6’da görüldüğü gibi vericideki ve alıcıdaki çoklu anten bileşenlerinden oluşmaktadır.



Şekil 3.6. MIMO haberleşme sistem yapısı

Burada $h_{2,1}$ vericide bulunan 1. antenden alıcıda bulunan 2. antene olan kanal katsayısını göstermektedir. Böylece R adet alıcı antene ve T adet verici antene sahip bir MIMO haberleşme sistemi için bu katsayılar aşağıdaki $R \times T$ boyutlu $\mathbf{H}$ matrisiyle ifade edilmektedir.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \dots & h_{1,T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \vdots & h_{2,T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{R,1} & h_{R,2} & \dots & h_{R,T} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

MIMO haberleşme sistemi vektörel olarak aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilebilir.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}.\mathbf{X} + \mathbf{G} \quad (3.27)$$

Burada $\mathbf{Y}$ MIMO sistem yoluyla antenlerden alınan işaret matrisini, $\mathbf{X}$ antenden gönderilen işaretleri, $\mathbf{G}$ bağımsız sıfır ortalamalı sirküler simetrik Gauss gürültüsünü temsil etmektedir.

MIMO haberleşme sistemleri birden fazla veri akışını aynı anda göndermek ve almak için Şekil 3.6'da gösterildiği gibi birden fazla anten kullanır. İhtiyaç duyulan anten sayısı sistemin kendi özel donanım ve yazılımına bağlı olarak en uygun bir şekilde seçilir. Anten konfigürasyonları 2×2 MIMO (İki verici anten iki alıcı anten), 3×3 MIMO (Üç verici anten üç alıcı anten) vb. gibi sistem yapısına göre değişebilmektedir. Buradaki anten yapılarından elde edilen bilgilere göre, bir sistemde ne kadar çok anten varsa o kadar çok gerçek zamanlı veri akışı sağlanabilmektedir. Ancak radyo ortam koşullarının değişmesi, teknolojiye ilerlemeler vb. gibi durumlarda anten sayısının artırılmasıyla her zaman olumlu sonuçlar alınmayabilir.

3.7. MIMO Sistemlerin Kapasitesi

MIMO haberleşme sistemi ile hem alıcıda hem de vericide çok sayıda anten kullanılır. Bu sistemlerde vericiye çoklu antenlerin eklenmesiyle birlikte sistemin kapasitesi ve çeşitliliği artar ve buna bağlı olarak performans önemli ölçüde artar (Sinha ve Mitra, 2005-2010). Çoklu verici ve alıcıdan oluşan antenler tek bir modeme ait olabildiği gibi farklı kullanıcılar tarafından da kullanılabilir.

Mobil haberleşme sistemlerinde kullanıcıların artan ihtiyaçlarından dolayı kapasite artışı sağlanması çok önemli bir konudur. Kullanıcıların yüksek veri hızı talebi güçlü kodlayıcı sistemlerine ve çoklu haberleşme sistemlerine olan bağı kuvvetlendirmektedir. Geleneksel bir SISO sistemde kanalın kapasitesi SNR'ye bağlı olarak sınırlanılmaktadır. Buna karşılık olarak MIMO sistemde kanalın kapasitesinin artması umut verici bir gelişmenin habercisidir. MIMO haberleşme kanallarında kullanılan verici gücü ile anten sayısının bağımsız olduğu varsayılmakla beraber verici ve alıcıdaki anten sayısındaki artmaya bağlı olarak kapasite artışının olduğu gözlemlenmektedir (Fernandez ve Armada, 2004).

Geleneksel bir SISO sistemde kapasite hesabı aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi Shannon kapasite formülü ile hesaplanır (Shannon, 1949).

$$C = W \log_2(1 + \gamma) \quad (3.28)$$

Burada C kanal kapasitesini (bit /saniye), W bant genişliğini ifade etmektedir.

Shannon kapasite formülü, sinyalin AWGN'ye maruz kaldığında ve ortalama sinyal gücü sınırlandırıldığında bant genişliği W olan kanaldan saniyede geçen bit sayısının ne kadarının hatasız iletildiğini ifade etmektedir (Lundheim, 2002). MIMO haberleşme kanallarında kapasite gösterimi aşağıdaki formüldeki gibidir (Ghayoula vd., 2014).

$$C = \log_2(\det [I_R + \frac{SNR}{T} . H \bar{H}]) \quad (3.29)$$

Burada I_R $R \times T$ boyutlu birim matrisi, $\bar{H}$ eşlenik devrik matrisi, det ise determinant matrisi ifade etmektedir.

3.8. MIMO İletim Teknikleri

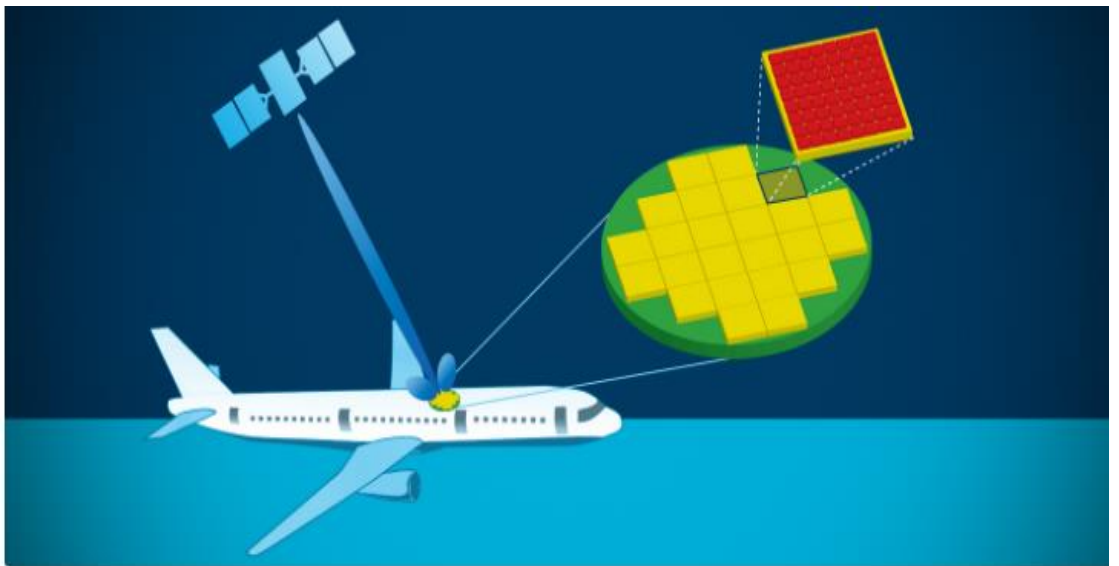
3.8.1. Uzaysal çoğullama

Uzaysal çoğullama genel olarak bit dizileri bilgisinin farklı şekillerde işlenerek dönüşümünü sağlama işlemidir. Bu dönüşüm uygulamada birden fazla bağımsız veri akışını çoklu antenler üzerinden ileterek spektrum verimliliğini artırmayı sağlamaktadır. Bu yöntemde yatay, köşegen ve dikey olmak üzere üç çeşit kodlama durumu bulunmaktadır. Yatay kodlama durumunda bitler vericilerin toplam sayısına eşit olan alt akışlara ayrıştırılır. Köşegen kodlama durumunda sembollerin köşegende dağılan çapraz

yapılı kodlaması yapılır. Dikey kodlama durumunda ise ilk olarak veri akışı kodlanır ve modülasyon gerçekleştirilir. Daha sonra elde edilen semboller toplam verici antenlerin sayısı ile eşit şekilde yine ayrıştırılır (Gutierrez, 2014). Uzaysal çoğullama ile sinyal birden fazla bölüme ayrılır. Ayrılan sinyaller aynı radyo frekans kanalında farklı antenler ile aynı zaman diliminde iletilir. Sonuç olarak uzaysal çoğullamayla aynı anda farklı verilerin birbirinden farklı terminallere iletilmesiyle MIMO sistemlerde kanal kapasitesi artırılabilir.

3.8.2. Hüzmeleme

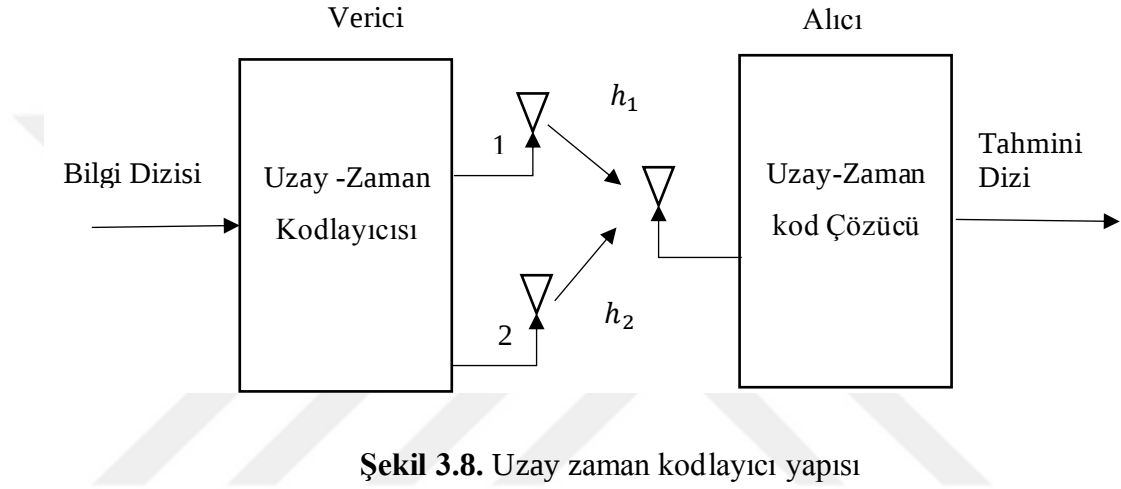
Kablosuz haberleşme sistemlerinde hüzmeleme farklı antenlerden alınan sinyallerin ya da farklı yollardan iletilecek sinyallerin genlik ve fazlarını ayarlayarak belli bir yöne doğru güçlü ışın oluşturmak ve girişimi önlemek için yapılan Dijital Sinyal İşleme (Digital Signal Processing, DSP) tekniğidir (ShahbazPanahi ve Jing, 2018). Hüzmelemede kullanılan antenler fazlı dizi veya hüzme yönlendirmeli antenler olarak da bilinir ve çok hassas olmadıkları için mekanik bakım gerektirmezler. Uçak, uydu gibi sabit olmayan sistemlerde hüzmelemenin avantajlarından faydalanılmaktadır. Şekil 3.7’de sabit olmayan sistemlere örnek olarak verilen havacılıkta hüzme oluşturan antenler kullanılarak verici ve alıcı sinyallerin doğru bir şekilde hareket etmesi kontrollü bir biçimde sağlanmaktadır. Hüzmeleme, artan SNR ve dizi işleme sisteminde bulunan açılal yayılımın tahmin doğruluğunu sağlar (Hamid vd., 2014).



Şekil 3.7. Havacılıkta kullanılan hüzmeleme anten modeli

3.8.3. Uzak zaman kodlama

Uzak zaman kodlama sinyal işleme ile kodlama modülasyonunu birleştirerek iletim çeşitliliğini sağlamaktadır. Uzak zaman kodlaması temelini 1998’de Alamouti’nin önerdiği iletim çeşitliliği yönteminden alır. Uzak zaman kodlaması ile aynı bilgi dizileri birden fazla anten vericisinden iletilir ve kodlama kazancı sağlanır. Alıcı kısmında tek veya çok sayıda anten olabilirken verici kısmında ise birden fazla anten olması gerekmektedir (Amin ve Transpasiya, 2012).



Uzak zaman kodlayıcı şekil 3.8’de gösterildiği gibi verici antenlerinin tamamı ile uzak boyunca ve sembolleri farklı zaman aralıklarıyla göndererek tek bir akışı kodlar. Uzak zaman kodlayıcı haddinden fazla sayıda bulunan sinyallere ön işlem yapmaktadır. Alıcıda ise bu ön işlem uzak zaman kod        tarafından yapılmaktadır (Amin ve Transpasiya, 2012).

2×1 ’lik uzak zaman kodlayıcı aşağıdaki iki eşitlikte gösterildiği gibi hesaplanabilir (Kim vd., 2009).

$$y_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + w_1 \quad (3.30)$$

$$y_2 = -h_1 x_2 + h_2 x_1 + w_2 \quad (3.31)$$

Burada y_1 ve y_2 sırasıyla ilk sembol süresince alınan sinyalleri ve ikinci sembol süresince alınan sinyalleri, h_1 ve h_2 kanalları ve n_1 ve n_2 AWGN’ yi, x_1 ve x_2 vericide bulunan antenleri w_1 ve w_2 ilk ve ikinci sembol s resinde oluşan gürültüyü ifade etmektedir. Ayrıca matris olarak gösterimi aşağıdaki eşitlikteki gibidir.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2 & x_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Vericiden iletilen işaretler aşağıdaki matris eşitliği ile gösterilir.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2 & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (h_1^2 + h_2^2) \cdot x_1 + \hat{z}_1 \\ (h_1^2 + h_2^2) x_2 + \hat{z}_2 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Burada $\hat{x}_1$ ve $\hat{x}_2$ alıcıdaki algılanan işaretleri temsil etmektedir.

3.8.4. Ön kodlama

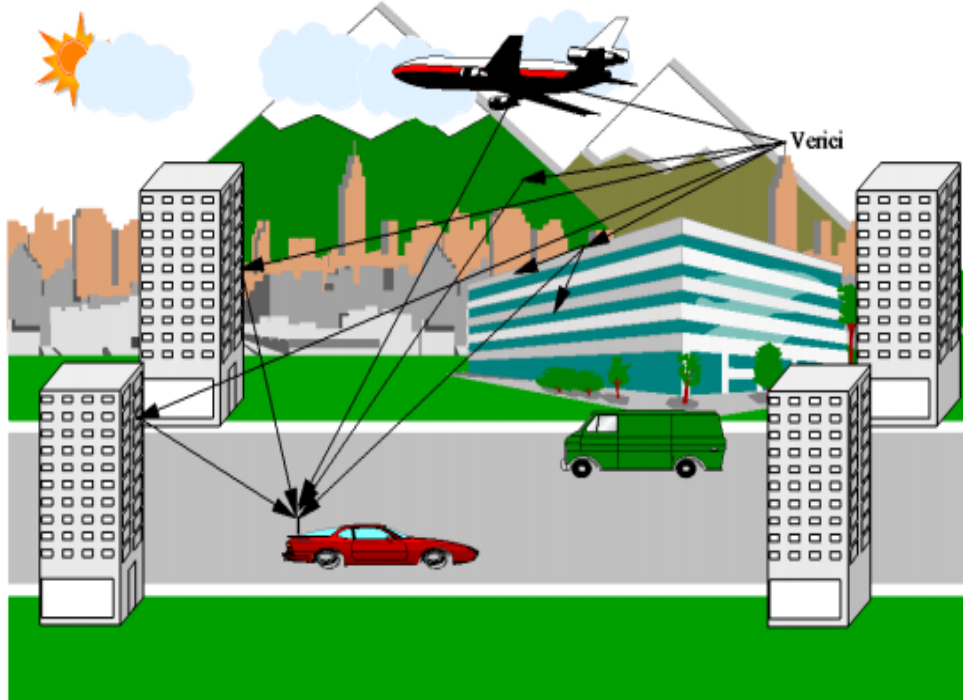
Verici- alıcı bir MIMO sistemde verici kısmında kanal durum bilgisinin kullanılması gerekmektedir. Bu bilgi ön kodlama yöntemi ile elde edilebilir. Ön kodlama yöntemi ile MIMO kanal kapasitesi ve verimliliği artırılır (He vd., 2006; Jiang vd., 2011). Kanal durum bilgisinin elde edilmesi ile MIMO performansı iyileştirilerek kanaldan daha çok fayda sağlanır. Kanal durum bilgisi geri bildirimi ile vericinin MIMO ön kodlamadan tam olarak yararlanabilmesi için tüm kanal bilgisinin öğrenilmesi engellenir (Jiang vd., 2011). MIMO sistemler için önemli olan ön kodlama yöntemi, yol kaybını telafi eder ve girişimi ortadan kaldırır (Gao vd., 2017).

3.9. MIMO Haberleşmenin Avantajları

MIMO haberleşme sistemlerinde aynı bilgi akışının iletilmesi veya alınması için çok sayıda alıcılı anten sistemi kullanılmaktadır. Bunun neticesinde çeşitlilik kazancı sağlanmaktadır. MIMO sistemlerde sağlanan çeşitlilik kazancı ile diğer haberleşme sistemlerine nazaran sönümlenme ve gürültü azaltılarak sinyalin güvenilirliği artmaktadır. Alıcı çeşitliliği durumunda, alıcıda bulunan antenlerin her birinde meydana gelen ve birbirine karışan gürültülü sinyallerden elde edilen gerçek sinyali ortaya çıkarabilmek için farklı teknikler kullanılır. İletim çeşitliliği durumunda, uzay zaman kodlama veya ön kodlama aynı bilginin birden fazla kanala en az bir kısmının verici ve alıcı arasında güvenilir bir iletişimin yapılabilmesi için gönderilmesini sağlar. MIMO, birden fazla alıcı ve verici anten ile farklı veri akışını sağladığı için kablosuz haberleşme kanalında bulunan yollar üzerinde çoğullanır (Roy, 2016).

Binaların yoğun olduğu alanlarda bulunan hücresel birimlerin bazılarında iletişimin sağlanabilmesi için gereken alıcı ile verici arasında direk görüş hattı (Line of Sight, LoS)

bulunmaz. Bunun sonucunda vericiden alıcıya doğru giden sinyaller bina yüzeylerine çarparak kırılmaya uğrarlar. Bu sinyaller uzunca bir yol aldıktan sonra hedefe ulaştıklarından dolayı Şekil 3.9’da gösterilen çoklu yol yayılımına sebep olurlar (Çakır, 2012). MIMO haberleşme sistemlerinde çoklu yol yayılımının sebep olduğu olumsuzlukları önleyip bağlantı kalitesini ve kapasitesini arttırmak için alıcıda ve vericide birden çok anten dizileri kullanılmaktadır. Birden çok anten kullanımı ile farklı antenlerden farklı veri akışının iletilmesi sağlanmaktadır. Belirli bir frekans bant genişliğine ulaşmak için oluşan veri akışı yoğunluğu, spektrum verimliliğini büyük ölçüde iyileştirmek için bir haberleşme kanalı tarafından artırılabilir. Anten dizileri enerjiyi belirli yönler kaydırmak ve sinyali bastırmak için kullanılabilir. Bu durum iletilen sinyal girişiminin azalmasını ve alınan sinyalin uzaysal filtrelenmesini sağlar. Çok bölmeli kablosuz ağlar veya klasik kablosuz sistem yapısına sahip ağlar, MIMO anten yapısından yararlanabilmektedir. MIMO anten yapısının kullanılması ile daha geniş bir ağ oluşturulmakta ve dolayısıyla kapsama aralığı artmaktadır. Kapsama aralığının artırılması ile de anten başına düşen güç ihtiyacı azalmaktadır. Bundan dolayı MIMO sistem yapısı kablosuz haberleşme sistemleri için yüksek performans ve düşük maliyet sağlamaktadır. (Comisso, 2008).



Şekil 3.9. Çoklu yol yayılımı örneği (Çakır, 2012)

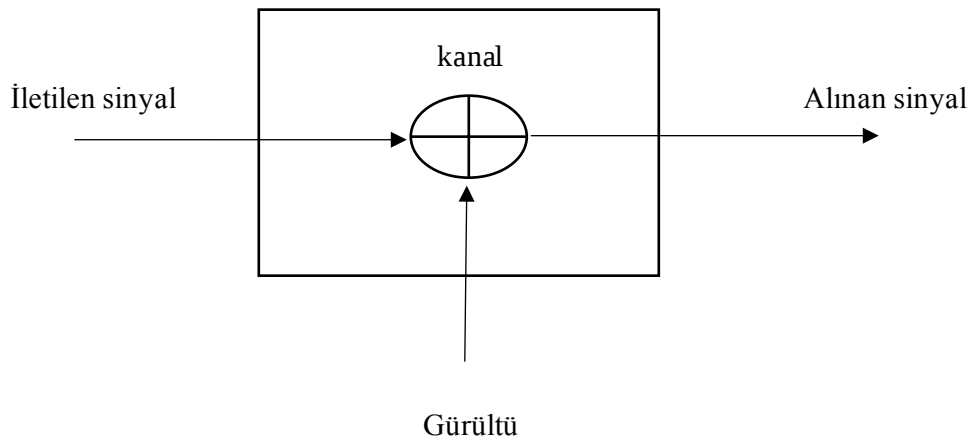
3.10. MIMO Haberleşmenin Dezavantajları

MIMO haberleşmenin daha önceki bölümde bahsedildiği gibi birçok avantajının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar arasında en önemli dezavantajı, çoklu anten yapısının çok yüksek maliyetli olan Radyo Frekans (RF) modüllerine ihtiyaç duymasındır. Bu RF modülleri haberleşme sisteminin maliyetinin artmasına sebep olur (Kumar, 2019). Bunun yanı sıra donanım ve yazılım yapısının karmaşık olması da MIMO sistemin dezavantajlarından biridir.

3.11. Haberleşme Kanal Modelleri

3.11.1. AWGN kanalı modeli

Toplanır beyaz Gauss gürültüsü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) genellikle haberleşme kanallarında bulunan temel bir gürültü modelidir. Bir AWGN kanal modelinde başka bir kaynaktan gelen herhangi bir bozulma veya herhangi bir etki olmadığı varsayılır. AWGN kanal modeli alıcıda bulunan rastgele elektron hareketi tarafından termal gürültü için oluşturulmaktadır (Idris vd., 2006). AWGN kanalı radyo kanalları gibi çeşitli fiziksel haberleşme kanalları için kullanılan en basit matematiksel modellerden biridir ve kanallarda iletilecek dijital sinyal bilgisi analog sinyalle eşleştirilir (Proakis ve Salehi, 1994). Şekil 3.10'da AWGN kanal modelinin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.10. AWGN kanal modeli (Proakis ve Salehi, 1994)

Şekil 3.10'da alınan sinyalin durumuna göre algılama olasılıkları hesaplanmaktadır. Alınan sinyal sönmüleme ve gölgeleme etkisine maruz kalmamışsa kanaldaki sönmüleme

parametresinin 1'e eşit olduğu varsayılır. Buradan yola çıkılarak AWGN için algılama olasılığı ve yanlış algılama olasılığı aşağıdaki eşitliklerde verildiği gibi hesaplanabilir (Ranjeeth ve Anuradha, 2015).

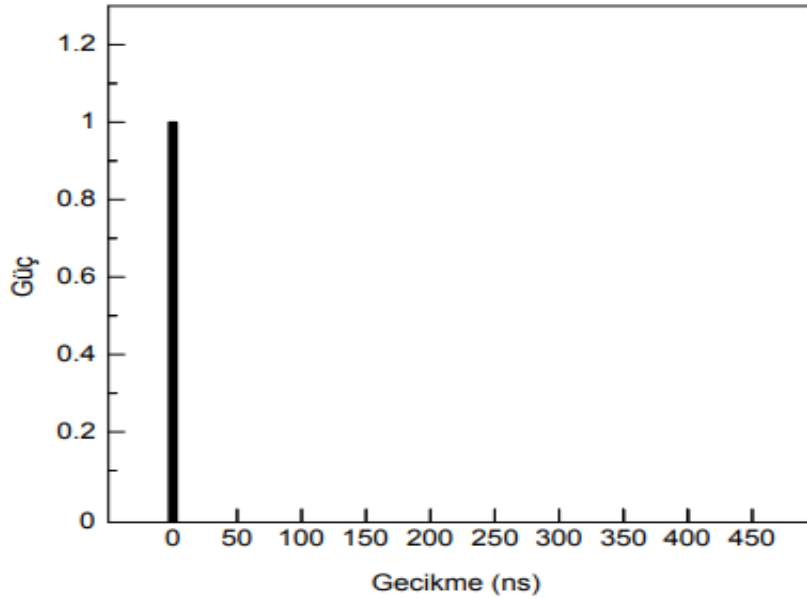
$$P_d = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \lambda) \quad (3.34)$$

$$P_{fa} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m)} \quad (3.35)$$

Haberleşmede AWGN kanallarda karşılaşılan en önemli değişken Gauss rastgele değişkenidir. Bunun sebebi ise gürültünün kaynağı olan termal gürültünün Gauss dağılımına sahip olmasıdır. AWGN gürültü sinyalinin Gauss PDF'si aşağıdaki gibi gösterilebilir (Proakis ve Salehi, 1994).

$$P_\alpha(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\alpha-E)^2}{2\sigma^2}} \quad (3.36)$$

Burada P_α AWGN kanalının olasılık yoğunluk fonksiyonunu, E beklenen değeri, σ^2 varyansı ifade etmektedir. Şekil 3.11'de AWGN kanalının gecikme ve güç grafiği verilerek AWGN kanalının normalize güç profili çizilmiştir. Buradasadece $t = 0$ anında tek bir dal bulunmakta olup gecikmenin 0 ns olduğu ve gücün 1 değerine eşit olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 3.11. AWGN kanalın normalize güç profili

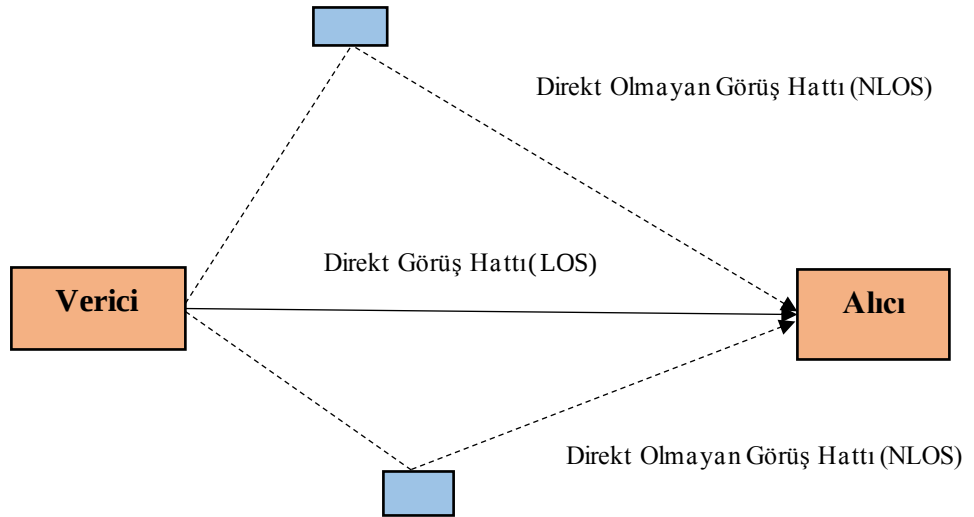
3.11.2. Rayleigh kanalı modeli

Rayleigh Kanalı sönümlemeli bir kanal modelidir ve çoklu yol alımı sonucunda Rayleigh sönümlemesi meydana gelir. Rayleigh kanalı, bir yayılma ortamının radyo sinyali üzerindeki etkisinin incelenmesi için kullanılan istatistiksel bir modeldir. BR kanallarında sönümlemeli sinyalin zamanla değişen yapısını belirlemek için Rayleigh dağılımı kullanılmaktadır (Karataev, 2007). Rayleigh sönümlemesi verici ile alıcı arasında direkt olmayan görüş hattı (Non Line of Sight, NLOS) bulunması durumunda uygulanabilir (Dhabhai vd., 2014). Direkt ve direkt olmayan görüş hattı Şekil 3.12’de gösterildiği gibidir (Kapucu, 2012).

Kanal sönümleme genliği α olmak üzere Rayleigh PDF aşağıdaki eşitlikte ifade edilmektedir (Simon ve Alouini, 2005).

$$P_{\alpha}(\alpha) = \frac{2\alpha}{\Omega} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0 \quad (3.37)$$

Burada $\Omega = \alpha^{-2}$ sönümleme genliğinin ortalama kare değerini ifade etmektedir (Kapucu, 2012).



Şekil 3.12. Direkt ve Direkt Olmayan Görüş Hattı (Kapucu, 2012)

3.11.3. Weibull kanalı modeli

Weibull istatistiksel dağılımı 1937 yılında önerildikten sonra 1951 yılında Walodi Weibull tarafından tanınmıştır. Radar sistemlerinde, hava tahmini gibi uygulamalarda ve mühendislik alanlarında da kullanılmaktadır. Kablosuz haberleşmede, homojen olmayan ortamlarda yayılan çok yollu dalgaların modellenmesinde kullanılmaktadır (Sofotasios vd., 2013). Weibull kanalı hem iç hem de dış ortamlarda sönümlemeli kanalları tanımlamak için uygun bir istatistiksel sönümleme modelidir. Kablosuz haberleşme sistemleri için önemli bir kanaldır (Kabalcı, 2016). Rayleigh dağılımının yeterli olmadığı durumda kentsel ortamlarda yayılmanın yanı sıra örneğin 1,89 Ghz'de Dijital Geliştirilmiş Kablosuz Telekomünikasyon (Digital Enhanced Cordless Telecommunication, DECT) sistemindeki yol kaybını modelleyebilmektedir (Sofotasios vd., 2013). Weibull dağılımının PDF'si aşağıdaki gibi hesaplanır. (Kabalcı, 2016).

$$P_{\alpha}(\alpha) = \frac{\beta}{\Omega} \alpha^{\beta-1} \exp\left(\frac{-\alpha^{\beta}}{\Omega}\right), \quad 0 < \beta < \infty \quad (3.38)$$

Burada $\Omega = E[\alpha^{\beta}]$ olmak üzere, $E[\alpha^{\beta}]$ beklenen değerdir. β weibull dağılımı için sönümleme parametresidir ve birden fazla dağılımı içermektedir. $\beta = 2$ olması durumunda dağılım Rayleigh dağılımına dönüşür.

3.11.4. Nakagami- m kanalı modeli

Nakagami- m dağılımı ile ilgili çalışma ilk olarak 1940'lı yıllarda Minoru Nakagami tarafından yapılmıştır. Çalışma uzun mesafeli kablosuz kanallarda küçük ölçekli hızlı sönümlemeyi modellemek için önerilmiştir. Küçük ölçekli sönümleme, verici ve alıcı arasında bulunan çoklu yolların girişimlerine göre alınan sinyal genliğinin kısa süreli değişimi olarak tanımlanmaktadır (Abuelenin, 2018). Nakagami- m kanalı bina içi ve mobil haberleşme için en iyisidir. Aynı zamanda iyonosfer saçılmalarının etkisinin gösterilmesinde de kullanılır. Nakagami- m dağılımının PDF'si aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibidir (Simon ve Alouini, 2005).

$$P_{\alpha}(\alpha) = \frac{2m^m \alpha^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(\frac{-m\alpha^2}{\Omega}\right), \quad \alpha \geq 0, m \geq 0,5 \quad (3.39)$$

Burada m Nakagami sönümleme parametresini, temsil etmektedir. m parametresi 0,5 ile ∞ aralığında değer almaktadır. Nakagami- m dağılımı ki-kare (chi-square) merkezine

sahip olup $m = 0,5$ olduğunda Nakagami- m Gauss dağılımına benzer, $m = 1$ olduğunda Rayleigh ile aynı dağılıma sahip olur ve $m = \infty$ olduğunda ise AWGN kanalına benzer. Bazı değerler için Nakagami- q ve Nakagami- n ile de benzerlik gösterebilir (Simon ve Alouini, 2005; Kapucu, 2012).

Sembol başına düşen SNR yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilir (Simon ve Alouini, 2005).

$$P_\gamma(\gamma) = \frac{2m^m \gamma^{2m-1}}{\bar{\gamma}^m \Gamma(m)} e\left(\frac{-m\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0 \quad (3.40)$$

Burada γ değeri SNR' yi ifade etmektedir.

3.11.5. Nakagami- q kanalı modeli

Nakagami- q kanal modeli Hoyt kanal modeli olarak da bilinmektedir. Sönümlemeye maruz kalmış olan kablosuz haberleşme sistemlerinin kısa vadeli sinyal varyasyonunu tanımlamak için yaygın şekilde kullanılır (Paris, 2009). Hoyt kanal modeli Rayleigh modelinden daha şiddetli zayıflama koşullarını karakterize etmek için hücrel haberleşmede kullanılmaktadır (Paris ve Jimenez, 2010). Nakagami- q kanalına ait PDF aşağıda gösterildiği gibidir (Simon ve Alouini, 2005).

$$P_\alpha(\alpha) = \frac{(1+q^2)\alpha}{q\Omega} e\left[-\frac{(1+q^2)^2\alpha^2}{4q^2\Omega}\right] I_0\left(\frac{(1-q^4)\alpha^2}{4q^2\Omega}\right), \alpha \geq 0 \quad (3.41)$$

Burada I_0 birinci dereceli Bessel modifiye fonksiyonunu, q Nakagami- q sönümleme parametresini ifade etmektedir ve bu parametre 0 ile 1 arasındadır. Nakagami- q dağılımı $q = 0$ değeri için Gauss dağılımının aynısıdır, $q = 1$ değeri için ise Rayleigh dağılımı ile aynı olmaktadır.

Sembol başına SNR yoğunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilmektedir (Simon ve Alouini, 2005).

$$P_\gamma(\gamma) = \frac{(1+q^2)}{2q\bar{\gamma}} \exp\left[-\frac{(1+q^2)^2\gamma}{4q^2\bar{\gamma}}\right] I_0\left(\frac{(1-q^4)\gamma}{4q^2\bar{\gamma}}\right), \gamma \geq 0 \quad (3.42)$$

Burada $\bar{\gamma}$ ortalama SNR değerini göstermektedir.

3.11.6. Nakagami- n kanalı modeli

Nakagami- n kanalı Nakagami Rice ve Ricean olarak da bilinmektedir. Genellikle dağınık modellemede ve uydu kanalındaki iletimi modellemede kullanılır (Noga ve Studanski, 2016). Nakagami- n kanalı direkt görüşün (LOS) bulunduğu durumda yerleşim yerlerindeki ve kırsal alanlardaki mobil haberleşme için kullanılmaktadır. Ayrıca gemiler arası haberleşmenin sağlanabilmesi için de ihtiyaç duyulan bir kanaldır. Alıcı ve verici arasında direkt görüş hattı olduğunda, yansıma kırılma ve saçılmaya uğrayarak alıcıya ulaşan sinyal olduğu durumda Rice dağılımı kullanılmaktadır. Rice sönümleme kanalının PDF'si aşağıda gösterildiği gibidir (Simon ve Alouini, 2005).

$$P_{\alpha}(\alpha) = \frac{(1+n^2)e^{-n^2}\alpha}{\Omega} \exp\left(-\frac{(1+n^2)\alpha^2}{\Omega}\right) I_0\left(2n\alpha\sqrt{\frac{(1+n^2)}{\Omega}}\right), \alpha \geq 0 \quad (3.43)$$

Burada n sönümleme parametresini temsil etmektedir ve n parametresi 0 ile ∞ arasında değer alabilmektedir. n parametresi Rician K faktörü ile ilişkilidir ($K = n^2$). K değeri ile yansıyıp, saçılıp ve kırılıp gelen işaretlerin etkisi ters orantılı olarak değişir. Bu ise K 'nın değerinin artmasıyla LOS bileşeninin gücünün girişime sebep olan işaretlerden daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. SNR'nin PDF'si aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği gibidir (Simon ve Alouini, 2005).

$$P_{\gamma}(\gamma) = \frac{(1+n^2)e^{-n^2}\gamma}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}\right) I_0\left(2n\sqrt{\frac{(1+n^2)\gamma}{\bar{\gamma}}}\right), \gamma \geq 0 \quad (3.44)$$

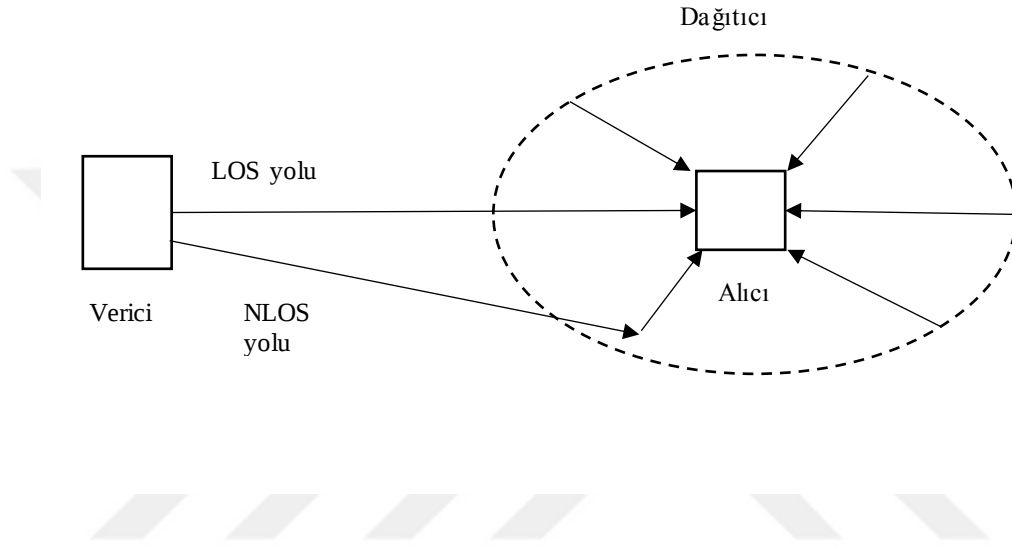
Nakagami- n kanalının sönümleme miktarı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\text{Sönümleme Miktarı} = \frac{1+2n^2}{(1+n^2)^2}, n \geq 0 \quad (3.45)$$

Burada n 'nin değerlerine göre yorum yapılmaktadır. $n = 0$ için sönümleme miktarı 1 değerine eşit olur ve dağılım artık Rayleigh dağılımına dönüşür. $n = \infty$ için sönümleme miktarı 0 değerine eşit olur ve herhangi bir sönümleme gerçekleşmez.

Kablosuz haberleşmede önemli bir sorun olan sinyalin zayıflaması kanalın performansının düşmesine sebep olmaktadır. Yukarıda bahsedilen sönümleme miktarı ve PDF hesaplamaları kanal performansının iyileştirilmesinde kullanılan parametrelerden ikisidir. Bunlarda başka bit hata oranı, kesinti olasılığı, kanal kapasitesi, LOS ve NLOS

gibi farklı parametreler de kullanılarak yapılan hesaplamalar sinyal performansının iyileştirilmesine ve dolayısıyla kanal performansının artmasına yönelik çalışmalardır. Şekil 3.13’de LOS ve NLOS yolların bulunduğu Nakagami- n sönümlleme kanalı modeli gösterilmektedir. Bu modelde Rician K faktörünün değeri artırılıp verici ve alıcı arasındaki kanalda bulunan LOS ve NLOS sinyalleri birleştirilerek kanaldaki performansın iyileştirilmesi sağlanabilmektedir.

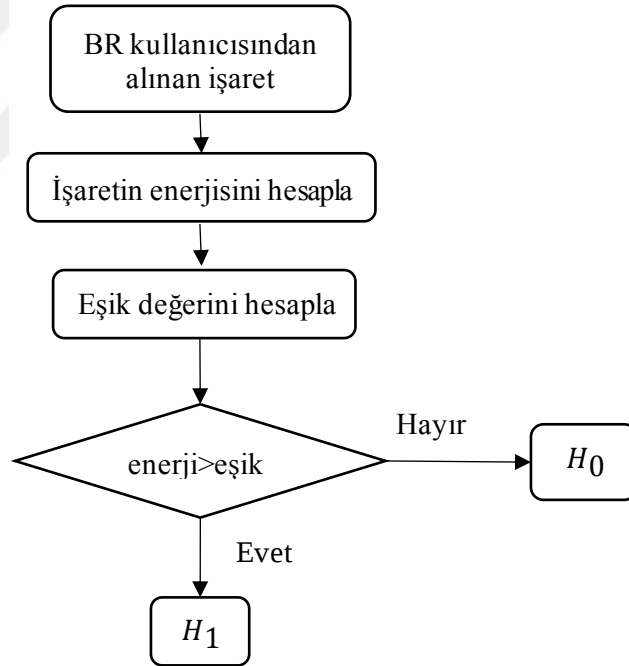


Şekil 3.13. Nakagami- n sönümlleme modeli (Pathak ve Katiyar, 2016)

4. MIMO HABERLEŞME KANALLARINDA ENERJİ TABANLI SPEKTRUM ALGILAMA VE ÖNERİLEN YÖNTEM

4.1. MIMO Haberleşme Kanallarında Enerji Tabanlı Spektrum Algılamanın İncelenmesi

Daha önce de bahsedildiği gibi BR'nin en önemli ve en temel özelliği spektrum algılamadır. Spektrum algılamanın iyileştirilebilmesi için literatürde farklı yöntemler önerilmektedir. Bunlar arasında çoklu antenli yapılarla spektrum algılama önemli bir yer tutmaktadır. Çoklu antenli yapılar kullanılan anten sayısı ve çeşitlemelerine göre SIMO, MIMO ve SISO gibi farklı şekilde ifade edilmektedir. MIMO anten yapısı alıcı ve verici kısmında bulunan çoklu antenler vasıtasıyla çeşitlilik, dizi ve çoğullama gibi kazançlar sağlamaktadır. Geleneksel SISO EA tabanlı spektrum algılama prensibi Şekil 4.1'de gösterildiği gibi açıklanmaktadır.



Şekil 4.1. EA tabanlı spektrum algılama akış şeması

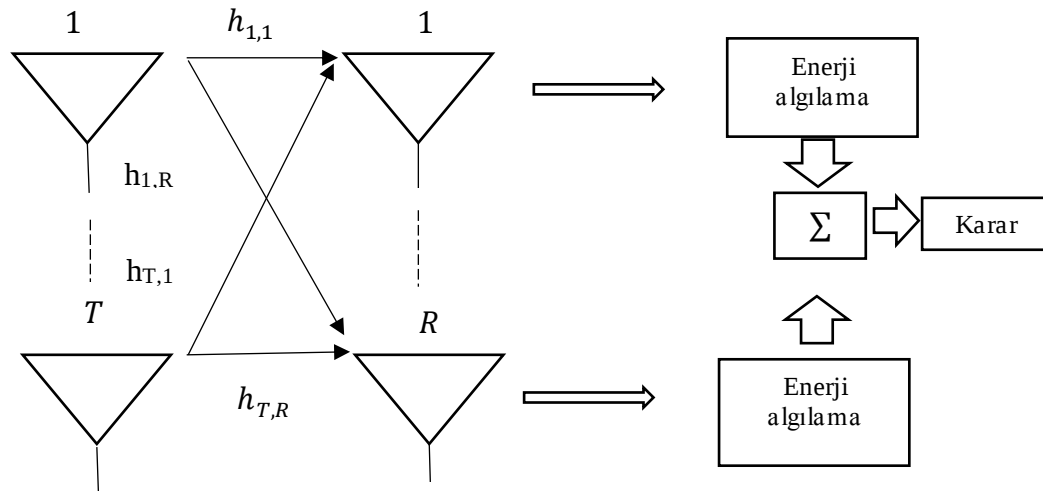
Burada ilk olarak BR kullanıcısından alınan işaretin enerjisi $E_i(y_i)$ hesaplanır (Bkz. (3.17)). Ardından eşik değeri aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanır.

$$\lambda = (Q^{-1}(P_{fa})\sqrt{2N} + N)\sigma_w^2 \quad (4.1)$$

Eşik değeri belirlendikten sonra karşılaştırma işlemi yapılır. Eğer enerji değeri eşik değerinden büyükse H_1 hipotezi seçilir, tersi ise yani enerji değeri eşik değerinden küçükse H_1 hipotezi seçilir.

MIMO haberleşmede kullanılan antenler için tasarlanan kanallar, kablosuz haberleşme ortamının performansını algılayabilmek için gerçek yayılım koşullarını yansıtabilmelidir. MIMO anten sistemleri genel olarak fiziksel model ve analitik model olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Fiziksel modellerde anten yapılanması dikkate alınmaz sadece alıcı ile verici arasındaki çift yönlü yayılma yapısı esas alınır. Analitik modellerde ise her iki bağlantı noktasında bulunan anten dizileri arasındaki impuls cevabını vererek fiziksel dalga yayılımını ve anten konfigürasyonunu eş zamanlı olarak gerçekleştirir (Almers vd., 2007).

MIMO antenlerde enerji tabanlı spektrum algılama Şekil 4.2’de gösterildiği gibidir. Burada verici ve alıcıda bulunan antenler sırasıyla 1’den T ’ye kadar ve 1’den R ’ye kadardır. (Çakır ve Yiğit, 2015).



Şekil 4.2. MIMO antenlerde geleneksel EA tabanlı spektrum algılama (Çakır ve Yiğit, 2015)

Kanal kazancı $\mathbf{H}(\mathbf{t})$ olmak üzere aşağıdaki eşitlikteki gibi hesaplanır.

$$\mathbf{H}(\mathbf{t}) = \sum_{l=1}^M \alpha_l a_{R,l} a_{T,l}^H e^{-j(\omega_l t + \theta_l)} \quad (4.2)$$

$M \rightarrow$ Çoklu yol sayısı

$a_{R,1}$ ve $a_{T,1} \rightarrow$ alıcı ve verici dizisinde çoklu yol bileşenleri

$\theta_1 \rightarrow$ birinci çoklu yolun rastgele fazı

$\omega_1 \rightarrow$ faz kayması

olarak ifade edilirler.

4.1.1. Değiştirilmiş EA yöntemi

Geleneksel EA gerçekleşirken anlık sinyal enerjisi düşüşlerinden kaynaklanan eksik algılama sayısını azaltmak için Değiştirilmiş EA yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemde eksik algılama olasılığı azaltılarak enerji algılama performansı iyileştirilmektedir. Geleneksel EA yönteminde gerçekleştirilen $E_i(y_i)$ parametresinin hesaplanması, bu yöntemde her algılama olayında gerçekleştirilir. Değiştirilmiş EA'nın geleneksel EA'dan farkı değiştirilmiş EA'nın son algılama olaylarının test istatistiklerinin değerlerini içeren güncel listeyi kaydetmesi ve aşağıdaki eşitlikte de ifade edildiği gibi alınan işaretlerin enerjilerinin ortalamasını hesaplamasıdır (Lopez-Benitez ve Casadevall, 2010).

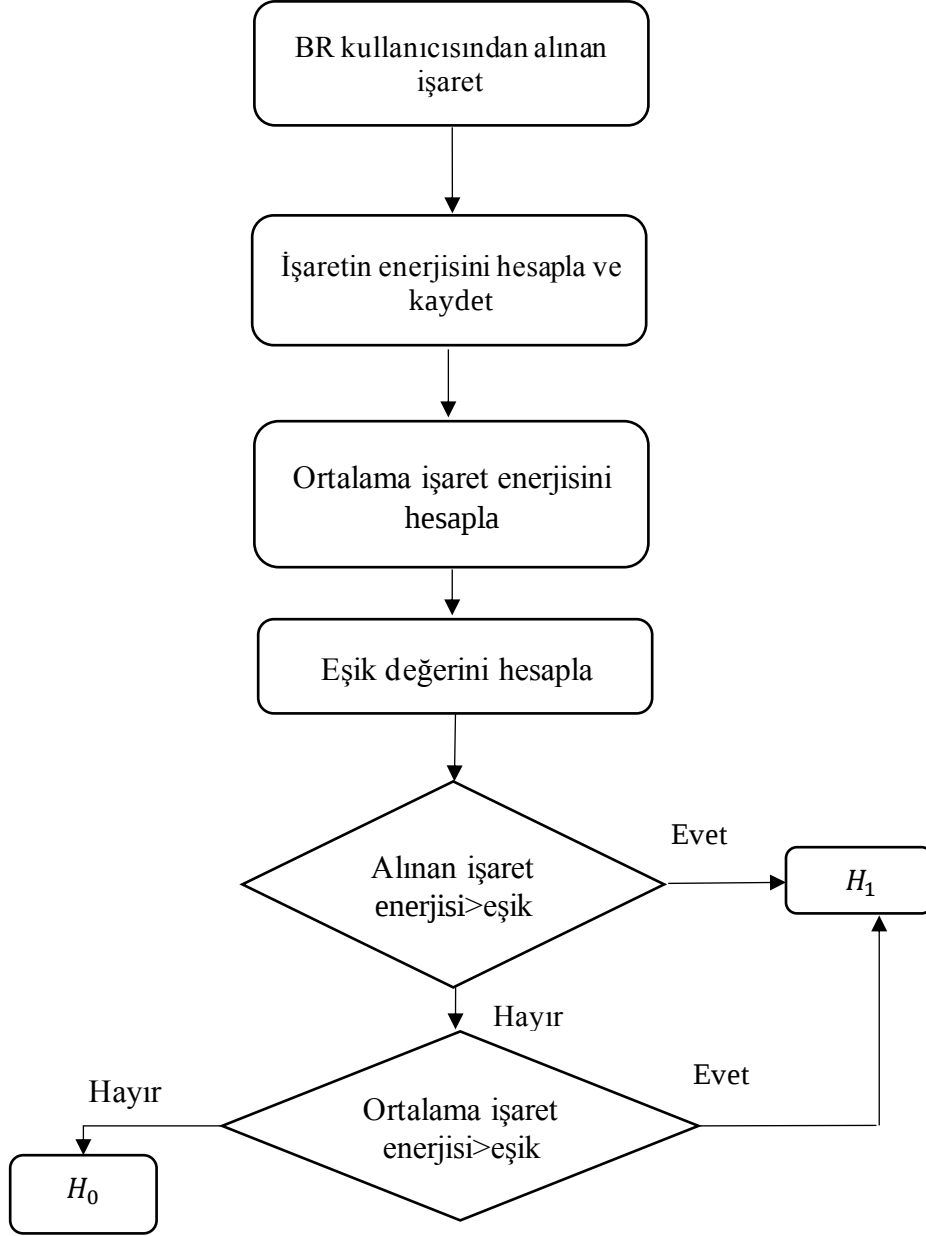
$$E_i^{ort}(E_i) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L E_{i-L+l}(y_{i-L+l}) \quad (4.3)$$

Burada L algılama olayı parametresidir. E_i değeri aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibidir.

$$E_i = E_{i-L+1}(y_{i-L+1}), E_{i-L+2}(y_{i-L+2}), \dots, E_i(y_i) \quad (4.4)$$

Şekil 4.3'teki akış diyagramında da görüldüğü gibi ilk olarak BR kullanıcısından alınan işaretin enerjisi, $E_i(y_i)$ (Bkz. (3.17)) hesaplanır ve kaydedilir. Ardından hesaplanan $E_i(y_i)$ sonucu elde edilen değer eşik değerinin altına düştüğünde algılanan işaretin ortalama enerjisi (4.2)'deki gibi $E_i^{ort}(E_i)$ hesaplanır. Daha sonra eşik değeri hesaplanır (Bkz. (3.17)). Hesaplama işlemleri bittikten sonra elde edilen değerler ile karşılaştırma yapılır. Karşılaştırmada alınan işaretin enerjisi eşik değerinden büyükse H_1 hipotezi geçerlidir. Eğer alınan işaretin enerjisi eşik değerinden küçükse bu sefer ortalama işaretin enerjisi ile eşik değeri karşılaştırılır. Karşılaştırma sonucunda ortalama işaretin enerjisi eşik değerinden büyükse yine H_1 hipotezine gidilir, küçükse H_0 hipotezi seçilir. Bu yapılan ek karşılaştırma işgal edilen kanalın anlık sinyal enerjisi düşüşünden dolayı devre

dışı ya da boşta olarak bildirilmesini önlemek için yapılır. Böylece H_0 ve H_1 hipotezlerinin seçilmesi güvenli bir şekilde gerçekleşir.

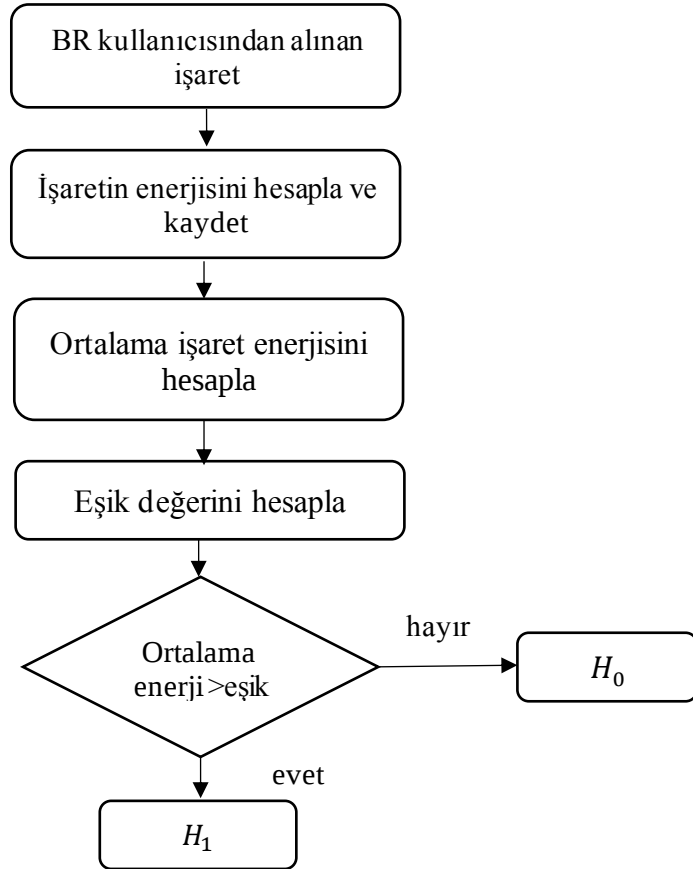


Şekil 4.3. Değiştirilmiş EA akış diyagramı

4.1.2. İyileştirilmiş EA yöntemi

Değiştirilmiş EA yönteminin yanlış algılama olasılığını en aza indirmek için Şekil 4.4’ te gösterilen iyileştirilmiş EA yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemde A ve B olmak üzere iki algılama aşaması olduğu farz edilir. Değiştirilmiş EA yönteminde hem A hem de B algılama aşaması $E_i(y_i) < \lambda$ ve $E_i^{ort}(E_i) > \lambda$ olduğundan dolayı H_1 hipotezi seçilir.

Algılama aşaması B’de yanlış algılama olasılığı meydana gelir ve bu olasılığı önleyebilmek için iyileştirilmiş EA yöntemi ile en sondan bir önceki olayın test istatistiğine yani $E_{i-1}(y_{i-1})$ ‘e göre ek bir karşılaştırma yapılır. $E_i^{ort}(E_i) > \lambda$, $E_i(y_i) < \lambda$ ve $E_{i-1}(y_{i-1}) > \lambda$ durumları anlık bir enerji düşüşünün gerçekleştiğini ve H_1 hipotezinin seçilmesine karar verildiğini göstermektedir. Eğer $E_{i-1}(y_{i-1}) < \lambda$ ve $E_i(y_i) < \lambda$ durumu meydana gelirse H_0 hipotezi seçilmelidir. İyileştirilmiş EA ve değiştirilmiş EA yönteminde algılama aşaması A için H_1 hipotezi seçilir ve geleneksel EA yönteminin spektrum algılaması iyileşir. İyileştirilmiş EA algoritması B algılama aşaması için H_0 hipotezini seçmelidir. Bu yöntemde değiştirilmiş EA yöntemiyle elde edilen yanlış algılama olasılığı azalırken ve geleneksel EA yönteminin algılama olasılığı artarak algılama başarımı iyileşmektedir (Lopez-Benitez ve Casadevall, 2010).



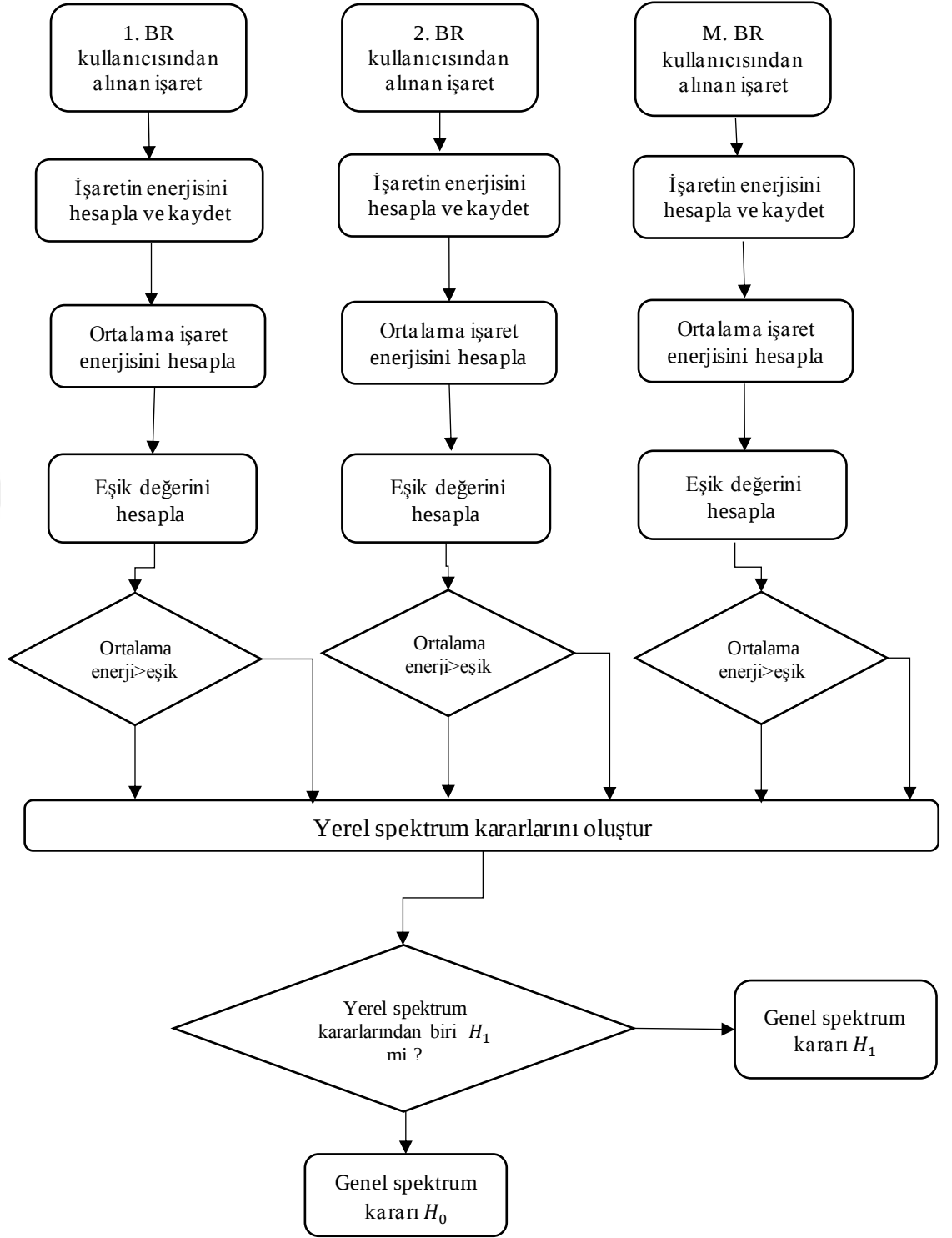
Şekil 4.4. İyileştirilmiş EA akış diyagramı

4.1.3. Önerilen iyileştirilmiş EA yöntemi

Bazı haberleşme uygulamalarında algılama olasılığının en üst seviyede elde edilmesi önemli iken bazı durumlarda ise yanlış algılama olasılığının en az seviyeye indirilmesi daha önemli olmaktadır. Bu gibi durumlar iyi bir algılama performansının sağlanması için gereklidir. Bunun sağlanabilmesi için bu tezde MIMO haberleşme kanallarında iyileştirilmiş EA'ya dayanan bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem Şekil 4.5'deki akış diyagramında gösterildiği gibi birden fazla BR kullanıcısı ile gerçekleşmektedir. Burada öncelik olarak BR kullanıcılarından algılanan işaretin enerjisi hesaplanır (Bkz (3.17)) ve kaydedilir. Daha sonra hesaplanan enerjilerin toplamının ortalaması hesaplanır (Bkz (4.2)). Ardından eşik değeri (4.1)'deki gibi hesaplanır ve kaydedilir. Eşik değeri hesaplandıktan sonra ortalama enerji ile eşik değeri karşılaştırılır. Benzer şekilde ikinci BR kullanıcısı ve diğer M tane BR kullanıcısı için de aynı işlemler gerçekleştirildikten sonra hipoteze karar vermek için test yapılır. Ardından spektrum durumunu belirleyebilmek için yerel spektrum kararları oluşturulur. Son olarak ise yerel spektrum testi yapılır. Test sonucunda bir tane spektrum kararı H_1 ise yani ortalama enerji eşik değerinden büyükse nihai sonuç H_1 olarak belirlenir ve işlem sonlandırılır. Eğer hipotez testi sonucu yerel spektrum kararlarından herhangi biri H_1 değilse genel spektrum sonucu H_0 olarak belirlenir ve işlem bu şekilde sonlanır. BR'nin her bir anteninden alınan sinyaller ayrı ayrı hesaplama işlemine tabi tutulur. En sonunda H_0 veya H_1 hipotezleri elde edilerek spektrumun boş olup olmadığına karar verilir.

Yukarıda bahsedilen hipotez testi yapılırken önemli bir nokta eşik değeridir. Eşik değeri belirlenirken geleneksel EA ve iyileştirilmiş EA yöntemleri ve önerilen iyileştirilmiş EA yöntemi için eşik değerleri hesaplamaları yapılmaktadır. Ancak eşik değeri hesaplama yapılmadan da önceden belirlenmiş bir şekilde de verilebilir.

Önerilen iyileştirilmiş EA yönteminde alıcıdaki BR kullanıcı sayısının artırılması tek başına spektrum verimliliğini artırmaya yetmemektedir. Bu sebeple örnek uzunluğu miktarı da artırılmalıdır. Önerilen iyileştirilmiş EA yönteminde MIMO sistem kullanılarak alıcı antenlere gelen sinyaller birleştirilerek toplam sinyalin ortalama gücünün artırılması ve kapasite artışı sağlanmaktadır. Düşük SNR değerlerinde bile BR'de MIMO antenler kullanılarak alıcı tarafındaki anten sayısı artırılarak birden fazla BR kullanıcısı ve daha çok örnek uzunluğu ile daha yüksek algılama olasılığının elde edilmesi sağlanmaktadır.

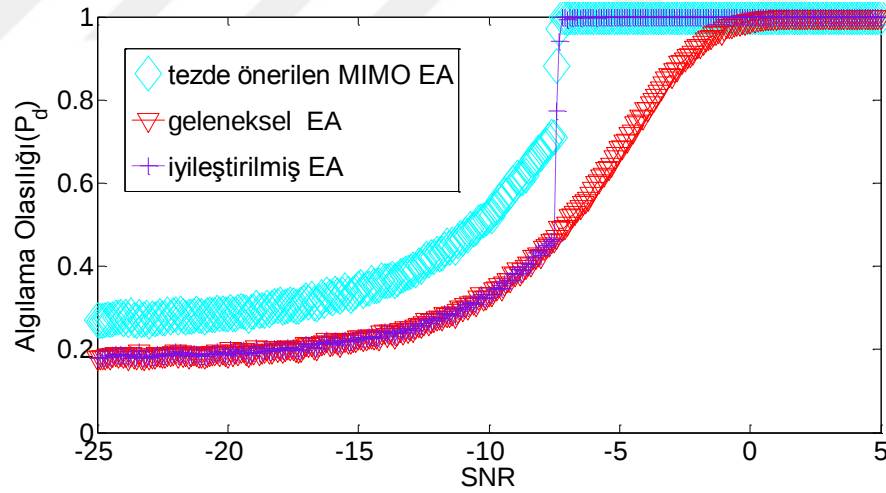


Şekil 4.5. Önerilen iyileştirilmiş EA akış diyagramı

5. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde geleneksel EA, iyileştirilmiş EA ve önerilen MIMO EA yönteminin spektrum algılamaya olan etkileri incelenmiştir. Neyman Pearson test istatistiğinden faydalanılarak ve Matlab ortamında yapılan benzetim sonuçları yardımı ile algılama olasılıkları elde edilmiştir. Benzetim çalışmaları 10000 Monte Carlo deneyiyle yapılmıştır. Hipotez testi yapılırken ihtiyaç duyulan eşik değeri hesaplanırken kullanılan hedef P_{fa} değeri, WRAN 802.22 çalışma grubu tarafından izin verilen değere göre 0,1 olarak belirlenmiştir. Ayrıca benzetimler AWGN kanalı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Geleneksel EA, iyileştirilmiş EA ve önerilen MIMO EA yöntemleri karşılaştırılarak, $\mu = 50$, $\mu = 100$ ve $\mu = 500$ örnek uzunlukları için farklı dB cinsinden SNR değerleri altında değişen $R = 2$, $R = 4$ ve $R = 8$ alıcı anten sayıları ile gerçekleştirilen benzetimler sonucunda önerilen MIMO EA yönteminin en yüksek algılama olasılığına sahip olduğu şekillerden de açıkça görülmektedir. Bu sonuçlar nümerik olarak tablolarda gösterilmektedir.



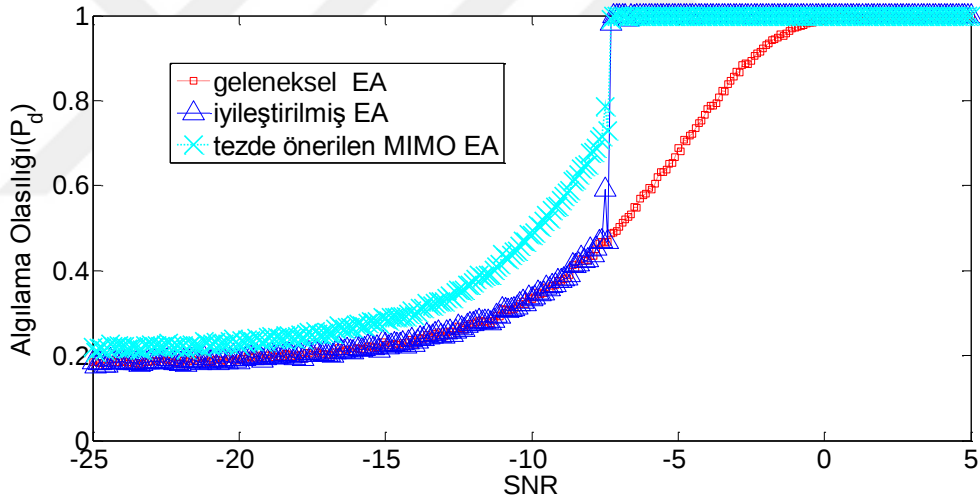
Şekil 5.1. $\mu = 50$ ve $R = 2$ için algoritma başarımları

Şekil 5.1'de örnek uzunluğu 50 ve alıcı anten sayısı 2 olmak üzere bu değerlerin iyileştirilmiş EA, geleneksel EA ve önerilen MIMO EA yöntemlerinin algılama performansına olan etkisi incelenmiştir. Algılama olasılığının farklı gürültü seviyelerinde değiştiği ve buna bağlı olarak da algılama performansının da değiştiği açıkça görülmektedir. Gürültü seviyesi arttıkça algılama olasılığı bu üç yöntem için de artmaktadır. Ancak en yüksek algılama olasılığı önerilen yöntemle aittir. Tablo 5.1'de de

algılama olasılıklarının bazı değerleri farklı gürültü değerleri için nümerik olarak verilmektedir. Örneğin SNR değerinin -5 dB olduğu durumda önerilen yöntem 1 olasılık değerini almıştır.

Tablo 5.1. $\mu = 50$ ve $R = 2$ için incelen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1793	0,1850	0,2291	0,3320	0,6846	0,9892	1
İyileştirilmiş EA	0,1794	0,1850	0,2291	0,3321	0,9990	1	1
Önerilen MIMO EA	0,2696	0,2841	0,3457	0,5227	1	1	1



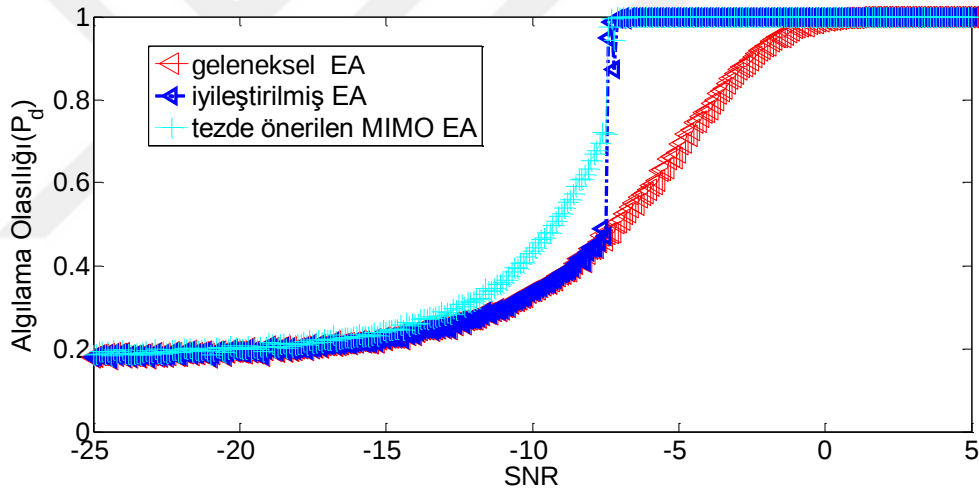
Şekil 5.2. $\mu = 50$ ve $R = 4$ için algoritma başarımı

Şekil 5.2’de örnek uzunluğu yine 50 ve alıcı anten sayısı artırılıp 4 olarak alınmak üzere bu değerlerin iyileştirilmiş EA geleneksel EA ve önerilen MIMO EA yöntemlerinin algılama performansına olan etkisi incelenmiştir. Gürültü seviyesi arttıkça algılama olasılığı bu üç yöntem için de artmaktadır. Burada -6,3 dB gürültü seviyesinde algılama olasılığının 1 olduğu değerin önerilen MIMO EA yöntemine ait olduğu belirlenmiştir. Algılama olasılığının en düşük olanın geleneksel yöntemle ait olduğu gözlenmiştir. Tablo 5.2’de geleneksel EA, iyileştirilmiş EA ve tezde önerilen MIMO EA yöntemlerinin algılama olasılıkları detaylı bir şekilde görülmektedir. -25 dB değerinde önerilen

yöntemin algılama olasılığının 0,2194 ile en yüksek olduğu ve 0,1846 ile en düşük algılama olasılığının ise geleneksel EA yöntemine ait olduğu belirlenmiştir.

Tablo 5.2. $\mu = 50$ ve $R = 4$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1846	0,1839	0,2255	0,3330	0,6882	0,9876	1
İyileştirilmiş EA	0,1849	0,1839	0,2255	0,3335	1	1	1
Önerilen MIMO EA	0,2194	0,2228	0,2868	0,4833	1	1	1

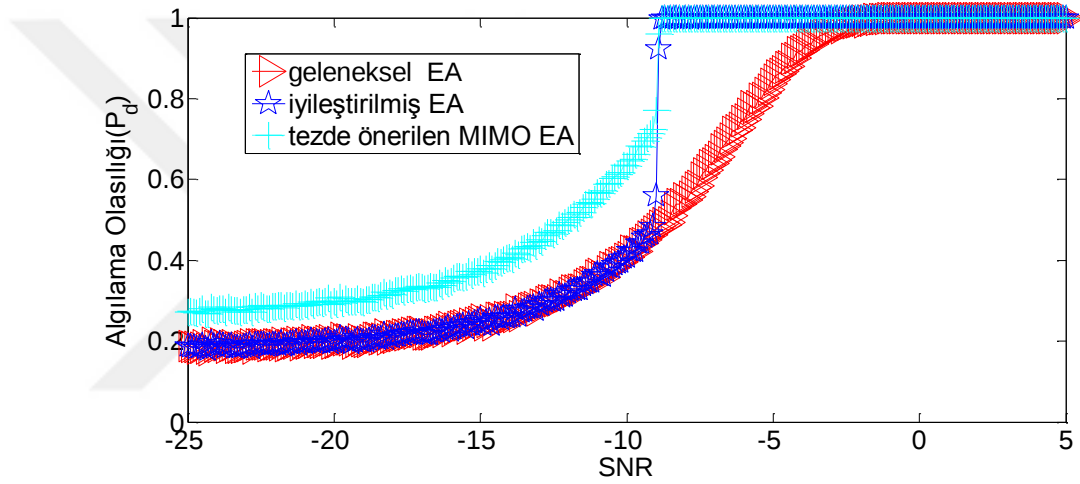


Şekil 5.3. $\mu = 50$ ve $R = 8$ için algoritma başarımı

Şekil 5.3'te örnek uzunluğu yine 50 olarak fakat alıcı anten sayısı 8 olacak biçimde artırılarak algılama performansı değerlendirilmektedir. Burada yine önerilen yöntemin algılama olasılığının -6,7 dB gürültü seviyesinde diğer yöntemlere nazaran daha yüksek ve mükemmel yani 1'e eşit olduğu görülmektedir. Algılama olasılığı ve dolayısıyla performansı en düşük olanın ise geleneksel EA olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 5.3'te -25 dB ile 5 dB aralığındaki gürültü seviyelerinde gözlemlenen bazı algılama olasılıkları her üç yöntem içinde detaylı bir şekilde verilmektedir. -25 dB, -20 dB, -15 dB ve -10 dB değerleri için algılama olasılıklarının en yüksek olduğu değerlerin önerilen yöntemle ait olduğu görülmektedir.

Tablo 5.3. $\mu = 50$ ve $R = 8$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

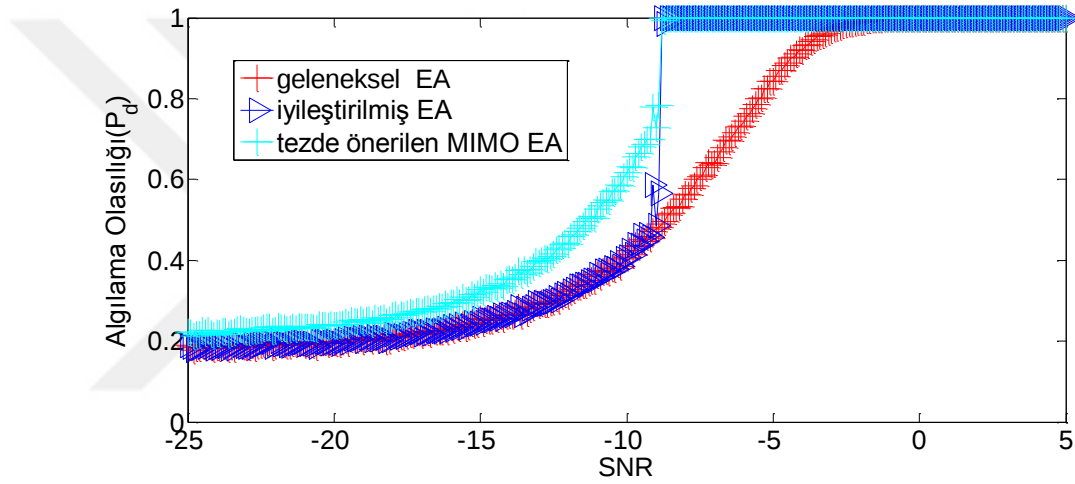
Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1792	0,1926	0,2217	0,3393	0,6722	0,9928	1
İyileştirilmiş EA	0,1793	0,1926	0,2217	0,3393	1	1	1
Önerilen MIMO EA	0,1853	0,2018	0,2407	0,4348	1	1	1

**Şekil 5.4.** $\mu = 100$ ve $R = 2$ için algoritma başarımları

Şekil 5.4'te bu sefer örnek uzunluğunu 100 alarak ve de alıcı anten sayısını 2 alarak spektrum algılama performansı gösterilmektedir. Bu değerlerin daha düşük gürültü seviyesinde algılama olasılığının başarımının artırdığını göstermektedir. Yani -8,4 SNR değerinde algılama olasılığının önerilen yöntem ve iyileştirilmiş EA yöntemi için 1 olduğu ve en düşük algılamanın ise 0,5291 ile geleneksel yöntemle ait olduğu görülmektedir. Ancak Tablo 5.4'te de görüldüğü gibi genel olarak algılama olasılığının en yüksek olduğu değerler önerilen yöntemle aittir. -25 dB SNR değeri için en düşük algılama olasılığının 0,1881 ile geleneksel EA yönteminin olduğu ve 0,2727 ile en yüksek algılama olasılığının önerilen MIMO EA yönteminin olduğu belirlenmiştir. Böylece alıcı anten sayısının 2 ve örnek uzunluğunun 100 değerini alması spektrum algılama olasılığını özellikle -25 ile -5 dB değerleri arasında artırmayı başararak spektrum algılama performansını iyileştirdiği belirlenmiştir.

Tablo 5.4. $\mu = 100$ ve $R = 2$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1881	0,1952	0,2527	0,4073	0,8460	0,9998	1
İyileştirilmiş EA	0,1882	0,1952	0,2527	0,4073	1	1	1
Önerilen MIMO EA	0,2727	0,2978	0,3781	0,6340	1	1	1

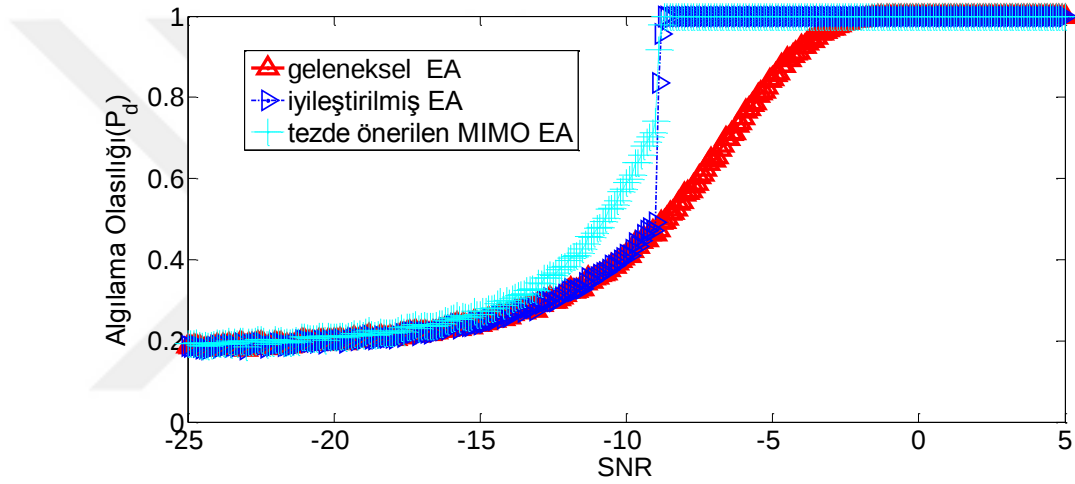
**Şekil 5.5.** $\mu = 100$ ve $R = 4$ için algoritma başarımları

Şekil 5.5'te örnek uzunluğu bir önceki grafikteki gibi 100 fakat alıcı anten sayısı artırılarak 4 olarak alınmıştır. Bu değerler altında -8,3 dB SNR gürültü seviyesinde olasılıkların algılandığı ve önerilen yöntemle iyileştirilmiş yöntemin algılamalarının 1 olasılığına eşit olduğu ve geleneksel EA yöntemininse 0,5310 algılama olasılığına eşit olduğu gözlenmiştir.

Tablo 5.5'te de her üç yöntem için farklı gürültü değerleri altında elde edilen bazı algılama olasılıkları verilmektedir. Burada -25 dB'de en yüksek algılama olasılığının önerilen MIMO EA yöntemine ait olduğu belirlenmiştir. Yine -20 dB, -15 dB ve -10 dB değerlerinde de en yüksek algılama değerinin önerilen yöntemle ait olduğu gözlenmiştir. -5 dB ile 5 dB değerleri de dahil olmak üzere algılama başarımının ise 1 algılama olasılığı değerini alarak en üst seviyeye çıktığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.5. $\mu = 100$ ve $R = 4$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1892	0,1981	0,2553	0,4068	0,8426	0,9998	1
İyileştirilmiş EA	0,1892	0,1981	0,2553	0,4068	0,9999	1	1
Önerilen MIMO EA	0,2238	0,2399	0,3279	0,6178	1	1	1

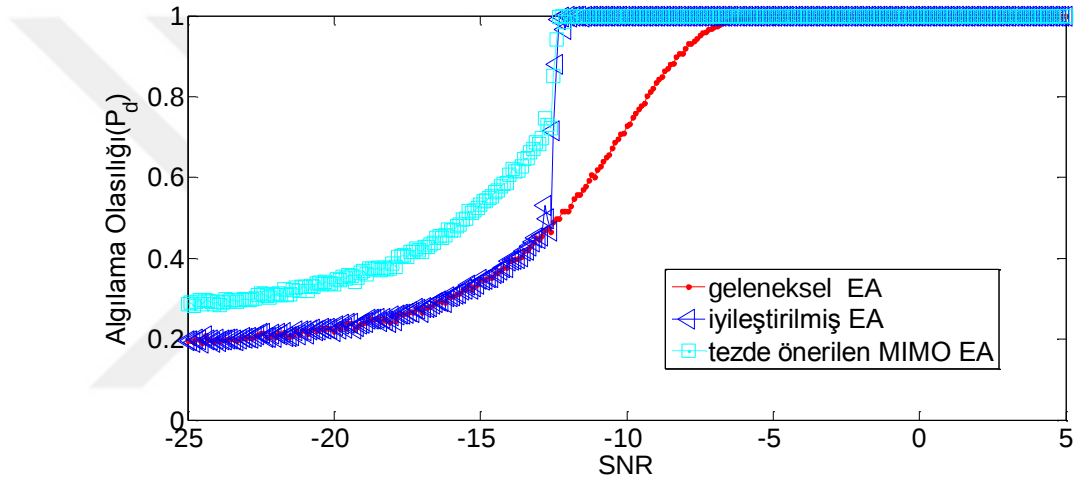
**Şekil 5.6.** $\mu = 100$ ve $R = 8$ için algoritma başarımı

Şekil 5.6’da bir önceki örnek uzunluğu alınıp anten sayısı ise 8 olarak artırıldığında -8,4 dB SNR gürültü seviyesinde algılama olasılığının önerilen algoritma için 1 olarak yani iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Yine aynı gürültü seviyesi için geleneksel yöntemin algılama olasılığının yaklaşık 0,52 olduğu ve iyileştirilmiş EA algoritması için yaklaşık olarak 0,9 olduğu görülmektedir.

Algılama performansının daha iyi görülebilmesi için nümerik olarak Tablo 5.6’da detaylı bir şekilde bazı olasılık değerleri incelenmiştir. Burada -25 dB SNR değeri için önerilen MIMO EA algoritmasının 0,1927 algılama olasılığına eşit olduğu gözlemlenmiştir. -20 dB için algılama olasılığının 0,2097 ve -15 dB SNR için ise 0,5904’e ulaşarak diğer algoritmalarından daha yüksek algılama olasılığına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca -5 dB, 0 dB ve 5 dB değerleri içinse algılamanın 1 değerine ulaşarak mükemmel seviyeye ulaştığı tespit edilmiştir.

Tablo 5.6. $\mu = 100$ ve $R = 8$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1866	0,2008	0,2409	0,4113	0,8459	0,9998	1
İyileştirilmiş EA	0,1867	0,2008	0,2410	0,4116	1	1	1
Önerilen MIMO EA	0,1927	0,2097	0,2652	0,5904	1	1	1

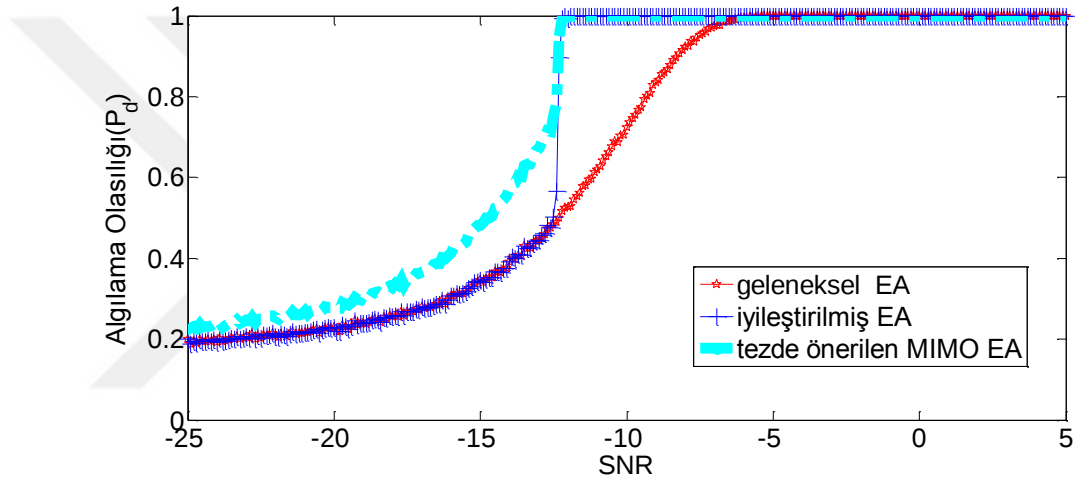
**Şekil 5.7.** $\mu = 500$ ve $R = 2$ için algoritma başarımı

Şekil 5.7’de örnek uzunluğu 500 olarak artırılıp ve alıcı anten sayısı da 2 olarak alındığında en yüksek algılama olasılığının önerilen MIMO EA yönteme ait olduğu açıkça görülmektedir. Önerilen yöntemin -11,3 dB SNR gürültü değerinde 1 olasılıkla algılama yapmaktadır. Aynı gürültü değeri için en düşük algılama olasılığına sahip olan algoritma geleneksel EA’dır.

Tablo 5.7’de de farklı gürültü değerleri için algılanan olasılık değerleri nümerik olarak incelendiğinde önerilen MIMO EA yöntemin algılama olasılığının -25 dB SNR altında 0,2860; -20 dB SNR altında 0,3367 ve -15 dB SNR altında ise 0,5329 değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. Bu sefer -10 dB ve -5 dB, 0 dB ve 5 dB SNR değerlerinde algılama olasılıklarının 1 değerine eşit olduğu ve spektrum algılama performansın üst seviyeye çıkarak iyileştiği açıkça görülmektedir.

Tablo 5.7. $\mu = 500$ ve $R = 2$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1968	0,2179	0,3479	0,7271	0,9995	1	1
İyileştirilmiş EA	0,1968	0,2179	0,3479	0,9998	1	1	1
Önerilen MIMO EA	0,2860	0,3367	0,5329	1	1	1	1

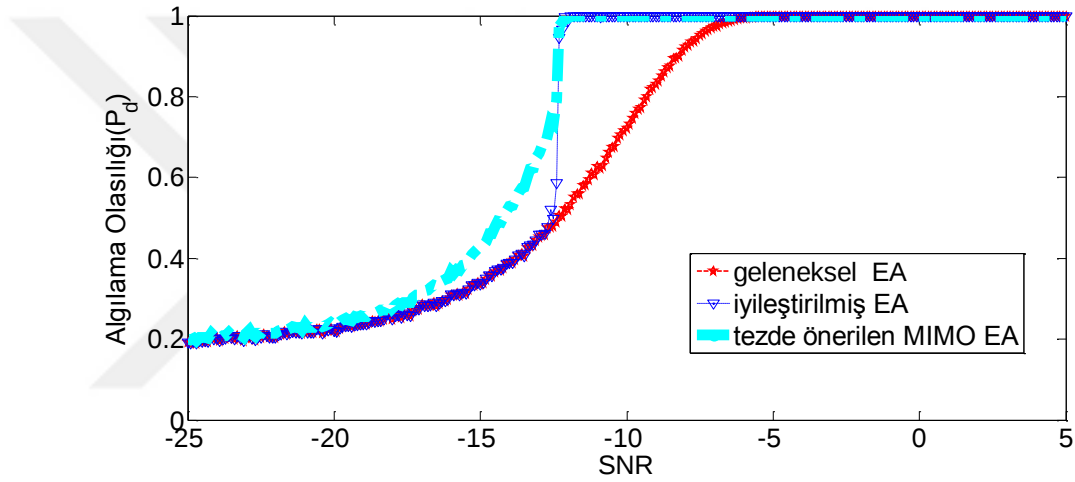
**Şekil 5.8.** $\mu = 500$ ve $R = 4$ için algoritma başarımı

Şekil 5.8’de yine bir önceki şemadaki örnek uzunluğu alınıp anten sayısı ise değiştirilip 4’e çıkarıldığında bu sefer biraz daha düşük yani -11,5 dB gürültü seviyesi altında algılama olasılığının 1 değerine eşit olduğu algoritmaların önerilen yöntem ve iyileştirilmiş EA yöntemine ait olduğu gözlemlenmektedir. Burada da en düşük performansın yine geleneksel yöntemle ait olduğu görülmektedir.

Genel olarak Tablo 5.8’de görüldüğü gibi -25 dB’de algılama olasılığının 0,2376 olan önerilen MIMO EA algoritmasına ait olduğu belirlenmiştir. Yine algılama olasılığının -20 dB SNR altında 0,2824 ile önerilen yöntemle ait olduğu ve -15 dB SNR altında da yine algılama olasılığının 0,4814 ile önerilen MIMO EA algoritmasına ait olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca -10 dB, -5 dB, 0 dB ve 5 dB değerleri altında da önerilen yöntem 1 algılama olasılığına ulaşarak en iyi spektrum algılama performansını sağladığı gözlemlenmiştir.

Tablo 5.8. $\mu = 500$ ve $R = 4$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,2003	0,2287	0,3463	0,7240	0,9992	1	1
İyileştirilmiş EA	0,2003	0,2287	0,3463	1	1	1	1
Önerilen MIMO EA	0,2376	0,2824	0,4813	1	1	1	1

**Şekil 5.9.** $\mu = 500$ ve $R = 8$ için algoritma başarımı

Son olarak Şekil 5.9'da yine örnek uzunluğu bir önceki şemadaki gibi 500, alıcı anten sayısı ise artırılarak yani 8 olarak alınmıştır. Bunun sonucunda algılama olasılığının 1 olduğu değerin -11,9 gibi düşük gürültü oranında ortaya çıktığı görülmekte ve böylelikle yine en iyi performansın önerilen MIMO EA algoritmasına ait olduğu açıkça görülmektedir. En düşük algılama olasılığı ise yine geleneksel EA algoritmasına aittir. Performans için belirlenen değerler Tablo 5.9'da her üç yöntem için de nümerik olarak verilmiştir. Burada önerilen yöntemin algılama olasılıklarının -25 dB SNR altında 0,1993; -20 dB SNR altında 0,2356 ve -15 dB SNR altında ise 0,4245 değerlerine ulaşarak diğer algoritmalarından daha iyi bir sonuç elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca önerilen MIMO EA yönteminin -10 dB, -5 dB, 0 dB ve 5 dB değerlerinde çok iyi performans elde ettikleri ve algılama olasılığının 1 olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak önerilen yöntem için örnek uzunluğu ve alıcı anten sayısındaki artışın spektrum algılama performansına iyileştirdiği yapılan çalışma sonucunda anlaşılmaktadır.

Tablo 5.9. $\mu = 500$ ve $R = 8$ için incelenen yöntemlerin algılama olasılıkları

Yöntem	SNR (dB)						
	-25	-20	-15	-10	-5	0	5
Geleneksel EA	0,1922	0,2216	0,3366	0,7224	0,9995	1	1
İyileştirilmiş EA	0,1922	0,2216	0,3366	1	1	1	1
Önerilen MIMO EA	0,1993	0,2356	0,4245	1	1	1	1

6. SONUÇ

Kablosuz haberleşme teknolojilerinin ilerlemesiyle artan kullanıcı sayısındaki artış spektruma olan talebi de orantılı olarak artırmıştır. Sınırlı sayıda olan spektrum bu talebi karşılamada yetersiz kalmıştır. Bu soruna çözüm sağlayan BR teknolojisi kablosuz haberleşme için bir dönüm noktası olmuştur. BR teknolojisinin en önemli özelliklerinden birisi spektrum algılamadır. Bu tez çalışmasında spektrum algılamanın yöntemleri ve özellikleri incelenmiştir.

Spektrum algılamada; matematiksel ifadelerin çok olmaması, donanımsal yapısının basit olması, lisanslı kullanıcı için ek bilgi gerekmemesi gibi sebeplerden dolayı EA yöntemi kullanılmıştır. Ancak EA yöntemi gürültü belirsizliği altında ve düşük SNR değerleri altında algılama başarımını düşürmektedir. Bu olumsuzlukların giderilebilmesi için bu tez çalışmasında MIMO EA yöntemi önerilmektedir. Alıcı ve verici tarafında birden fazla kullanıcı veya anten kullanılması esasına dayanan MIMO EA yönteminde BR kullanıcısından gelen işaretin enerjisi hesaplanır ve kaydedilir ardından ortalama enerji algılama hesabı yapılır çıkan sonuç ile hesaplanan eşik değeri karşılaştırılır ve bu işlemler MIMO sistemdeki her bir anten için hesaplanır ve sonuç olarak spektrumun varlığına ya da yokluğuna karar verilir.

Yapılan benzetimler MATLAB ortamında AWGN kanalı altında ve farklı SNR değerleri, örnek uzunlukları ve çoklu anten sayıları için Geleneksel EA, İyileştirilmiş EA ve önerilen MIMO EA yöntemleri karşılaştırılarak gerçekleştirilmiştir. SNR = -5dB’de $\mu = 50$ örnek uzunluğu ve $R = 2$ anten sayısı için Geleneksel EA yönteminin en düşük algılama olasılığına sahip olduğu görülürken, iyileştirilmiş EA yönteminde bu olasılığın daha yüksek ve önerilen MIMO EA yönteminde ise algılama olasılığının %100 olduğu yani $P_d = 1$ olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer önerilen MIMO EA yönteminin üstün başarımlı sağladığını göstermektedir. SNR = -5 dB’de $\mu = 100$ ve $R = 4$ için doğru algılama olasılığı en düşük olan Geleneksel EA ve en yüksek değere yani $P_d = 1$ değerine sahip olanın ise önerilen MIMO EA yöntemine ait olduğu gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında örnek uzunluğu ve MIMO anten sayısı artırılarak karşılaştırmalı olarak incelenen geleneksel EA, iyileştirilmiş EA ve önerilen MIMO EA yöntemleri arasında düşük SNR değerlerinde bile en yüksek doğru algılama olasılığının önerilen MIMO EA yöntemine ait olduğu ve yapılan benzetim çalışmalarının teorik sonuçlarla

örtüştüğü gözlemlenmiştir. Örnek uzunluğundaki ve çoklu anten sayısındaki artış algılama performansında önemli bir iyileşme sağlamaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan MIMO antenlerin sayısı ve örnek uzunlukları artırılarak spektrum algılama olasılığı artmakta ve dolayısıyla algılama performansı iyileşmektedir. Ancak buna karşılık algılama süresi uzamaktadır. Bu tez çalışmasından esinlenerek spektrum algılama işlemi gerçekleştirken algılama süresinin kısaltılmasına yönelik olarak ileriki aşama için çalışmalar yapılarak algılama süresi minimum değere ulaştırılabilir.



KAYNAKLAR

- Abramowitz, M., and Stegun, I. A. (1964) Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, **U.S. Government Printing Office**, United States, 55, 931-932.
- Abuelenin, S. M. (2018) "On the similarity between Nakagami-m fading distribution and the Gaussian ensembles of random matrix theory", **ArXiv preprint ArXiv:1803.08688**, 4-15.
- Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., and Chowdhury, K. R. (2009) "Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks", **IEEE Network**, 23(4), 6-12.
- Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C. and Mohanty, S. (2006) "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey", **Computer Networks**, 50(13), 2127-2159.
- Akyildiz, I. F., Lo, B. F. and Balakrishnan, R. (2011) "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey", **Physical Communication**, 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. and Özcelik H. (2007) "Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems", **Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking**, 1-19.
- Althaf, C. M. and Prema, S. C. (2018, January) "Covariance and eigenvalue based spectrum sensing using usrp in real environment", **In 2018 10th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)**, India, 414-417.
- Amin, M. R. and Trapasiya, S. D. (2012) "Space time coding scheme for MIMO system-literature survey", **Procedia Engineering**, (38), 3509-3517.
- Aparna, P. S. And Jayasheela, M. (2012) "Cyclostationary feature detection in cognitive radio using different modulation schemes", **International Journal of Computer Applications**, 47(21), 12-16.
- Arjoune, Y. and Kaabouch, N. (2019) "A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions", **Sensors**, 19(1), 126-158.
- Atallah, R. F., Khabbaz, M. J. and Assi, C. M. (2015) "Vehicular networking: A survey on spectrum access technologies and persisting challenges", **Vehicular Communications**, 2(3), 125-149.
- binti Idris, A. and bin Rahim, R. F. (2006, September) "The effect of additive white gaussian noise and multipath rayleigh fading on ber statistic in digital cellular network", **In 2006 International RF and Microwave Conference**, Malaysia, 97-100.

- Bonek, E., Herdin, M., Weichselberger, W. And Ozcelik, H. (2003) "MIMO-study propagation first!", *In Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology*, 150-153.
- Cabric, D. and Brodersen, R. W. (2005) "Physical layer design issues unique to cognitive radio systems", *In 2005 IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2, 759-763.
- Cabric, D., Mishra, S. M. And Brodersen, R. W. (2004, November) "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios", *In Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1, 772-776.
- Comisso, M. (2008) "Beamforming techniques for wireless communications in low-rank channels: analytical models and synthesis algorithms", Doctoral Thesis, *University of Trieste Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Italy.
- Çakır, F. (2012) "Frekans seçici Rayleigh sönümlmeli kanallar için yeni bir kaskad kodlama yöntemi", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Çakır, A. C. and Yiğit, H. (2015, May) "Channel effect on performance of energy based spectrum sensing in MIMO cognitive radio", *In 2015 23rd Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2086-2089.
- Çiflikli, C. and Ilgın, F. Y. (2018) "Covariance based spectrum sensing with studentized extreme eigenvalue", *Technical Gazette*, 25(1), 100-106.
- Çiflikli, C. ve Ilgın, F. Y. (2019) "Özdeğer tabanlı algılama yöntemlerinde eşik değerinin algılama performansına etkisi", *Technological Applied Sciences*, 14(1), 11-19.
- Dhabhai, H., Gupta, R. P. and Jain, A. (2014) "Parametric Comparison of various Fading Channels using MATLAB Simulation", *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, 1(5), 91-96.
- Eduardo, A. F. and Caballero, R. G. G. (2015) "Experimental evaluation of performance for spectrum sensing: Matched filter vs energy detector", *In IEEE Colombian Conference on Communication and Computing (IEEE COLCOM)*, 1-6.
- Ejaz, W. (2008) "Spectrum sensing in cognitive radio networks", Master Thesis, *National University of Sciences and Technology*, Pakistan.
- Eksim, A., Kulac, S. and Sazli, M. H. (2008) "Cooperative spectrum sensing for mobile users", *In 2008 IEEE 16th Signal Processing, Communication and Applications Conference*, Aydın, 1-4.
- FCC, "2002 Spectrum policy task force reprot et docket no. 02-135", <https://www.fcc.gov/sptf/files/SEWGFfinalReport1.pdf>, Son erişim tarihi: 18.11.2020

- FCC. “2003 Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order” <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-03-222A1.pdf>, Son erişim tarihi: 18.11. 2020.
- Fernández, M. and Armada, A. (2004) “ Study of MIMO channel capacity for IST METRA models”, *Telecommunications and Information Science and Technologies*, Belgium, 1-5.
- Foschini, G. J. (1996) “Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas”, *Bell Labs Technical Journal*, 1(2), 41-59.
- Gao, X., Dai, L., Gao, Z., Xie, T. and Wang, Z. (2017) “Precoding for mmWave massive MIMO. In mmWave Massive MIMO”, *Academic Press*, 79-111.
- Gardner, W. A. (1991) “Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals” *IEEE Signal processing magazine*, 8(2), 14-36.
- Gesbert, D., Shafi, M., Shiu, D. S., Smith, P. J. and Naguib, A. (2003) “From theory to practice: An overview of MIMO space-time coded wireless systems”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 21(3), 281-302.
- Ghayoula, E., Bouallegue, A., Ghayoula, R. and Chouinard, J. Y. (2014) “Capacity and performance of MIMO systems for wireless communications”, *Journal of Engineering Science and Technology, Review*, 7(3), 108-111.
- Gupta, I., Hari, A. and Sahu, O. P. (2018) “Hardware implementation of energy detection scheme in cognitive radio networks”, *IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 575-577.
- Gutierrez, R. R. (2014) “Transmission and Detection Techniques for MIMO Systems, Doctorate Dissertation”, *The University of Leeds School of Electronic and Electrical Engineering*, United Kingdom.
- Habulin, M. and Knez, Ž. (2001) “Activity and stability of lipases from different sources in supercritical carbon dioxide and near-critical propane”, *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 76(12), 1260-1266.
- Hamid, U., Qamar, R. A. and Waqas, K. (2014) “Performance comparison of time-domain and frequency-domain beamforming techniques for sensor array processing”, *In Proceedings of 2014 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology (IBCAST)*, Islamabad, 379-385.
- Haykin, S. (2005) “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2), 201-220.
- He, Z., Liu, Y. and Zhang, X. (2006) “Performance of MIMO precoding systems with imperfect channel state information”, *In Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile technology, Applications and Systems*, New York, 66-70.

- Holland, O., Harada, H., Tran, H. N., Bochow, B., Ariyoshi, M., Sherman, M. and Kliks, A. (2015) "The IEEE dynamic spectrum access networks standards committee and IEEE 1900 working groups", ***Opportunistic Spectrum Sharing and White Space Access: The Practical Reality***, 631-648.
- Hu, W., Willkomm, D., Abusubaih, M., Gross, J., Vlantis, G., Gerla, M., and Wolisz, A. (2007) "Cognitive radios for dynamic spectrum access-dynamic frequency hopping communities for efficient IEEE 802.22 operation", ***IEEE Communications Magazine***, 45(5), 80-87.
- Ilgin, F. Y. (2018) "Özdeğer tabanlı spektrum algılama yöntemlerinde farklı eşik değerlerinin belirlenmesi için yeni yaklaşımlar ve uygulamaları", Doktora Tezi, ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kayseri.
- Jiang, C., Wang, M. M., Yang, C., Shu, F., Wang, J., Sheng, W. and Chen, Q. (2011) "MIMO precoding using rotating codebooks", ***IEEE Transactions on Vehicular Technology***, 60(3), 1222-1227.
- Jondral, F. K. (2005) "Software-defined radio-basics and evolution to cognitive radio", ***EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking***, 2005(3), 1-9.
- Kabalıcı, Y. (2016) "DD-KBÇE İletişim Sistemlerinin farklı yayma kodları İçin Weibull sönümlü kanaldaki bit hata oranı başarımlar analizleri", ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji***, 4(2), 31-39.
- Kapoor, S., Rao, S. V. R. K. and Singh, G. (2011) "Opportunistic spectrum sensing by employing matched filter in cognitive radio network", ***In 2011 International Conference on Communication Systems and Network Technologies***, 580-583.
- Kapucu, N. (2012) "İşbirlikli haberleşme sistemlerinin farklı sönümlü kanallardaki başarımlar analizleri için yeni matematiksel ifadelerin türetilmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Kayseri.
- Karataev, T. (2007) "Alternatif sönümlemeli kanal yapıları ve haberleşme sistemlerinde etkilerinin analizi", Yüksek Lisans Tezi, ***Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul.
- Kim, J. M., Sohn, S. H., Han, N., Choi, S., Ahn, C., Hong, G. and Yun, Y. (2009) "Cognitive radio in multiple antenna systems", ***In Cognitive Radio Technology***, 535-556.
- Ko, G., Franklin, A. A., You, S. J., PAK, J. S., Song, M. S. and Kim, C. J. (2010) "Channel management in IEEE 802.22 WRAN systems", ***IEEE Communications Magazine***, 48(9), 88-94.
- Konishi, Y., Masuyama, H., Kasahara, S. and Takahashi, Y. (2013) "Performance analysis of dynamic spectrum handoff scheme with variable bandwidth demand of secondary users for cognitive radio networks", ***Wireless Networks***, 19(5), 607-617.

- Kumar, N. (2019) “Cost reduction and channel capacity enhancement of MIMO system Using antenna selection techniques” *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 65(2), 189-194.
- Lee, W., Srisomboon, K. and Prayote, A. (2015) “Fast spectrum sensing with coordinate system in cognitive radio networks”, *ETRI Journal*, 37(3), 491-501.
- Liu, S. Q., Hu, B. J. and Wang, X. Y. (2012) “Hierarchical cooperative spectrum sensing based on double thresholds energy detection”, *IEEE Communications Letters*, 16(7), 1096-1099.
- López-Benítez, M. and Casadevall, F. (2010) “Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio”, *European transactions on Telecommunications*, 21(8), 680-693.
- Lorincz, J., Ramljak, I. and Begušić, D. (2019) “A review of the noise uncertainty impact on energy detection with different OFDM system designs”, *Computer Communications*, 148, 185-207.
- Lundheim, L. (2002) “On Shannon and Shannon's formula”, *Teletronikk*, 98(1), 20-29.
- Maharjan, S. D. (2011) “Spectrum sensing of cognitive radio networks using amplify and forward relay over correlated Nakagami-m fading channel”, Master Thesis, *Blekinge Institute of Technology*, Sweden.
- Maitra, A. (2003) “Early history of wireless communications”, *Souvenir of 33rd Annual Convention of Radio Physics and Electronics Association*, University of Calcutta, India.
- Makarfi, A. (2013) “Spectrum sensing techniques in wireless communication networks”, Doctorate Thesis, *The University of Manchester*, United Kingdom.
- Maleki, S. (2013) “Energy efficient spectrum sensing for cognitive radio networks”, Doctorate Thesis, *University of Luxembourg*, Luxembourg.
- Mitola, J. (1993) “Software radios: Survey, critical evaluation and future directions”, *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 8(4), 25-36.
- Mitola, J. I. (2000) “Cognitive radio. An integrated agent architecture for software defined radio” Doctorate Thesis, *Royal Institute of Technology*, Sweden.
- Mitola, J. And Maguire, G. Q. (1999) “Cognitive radio: making software radios more personal”, *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18.
- Noga, K. M. and Studański, R. (2016) “Estimation of Nakagami distribution parameters in describing a fading radio-communication channel”, *Scientific Journal of Polish Naval Academy*, 204(1), 69-81.
- Paris, J. F. and Morales-Jimenez, D. (2010) “Outage probability analysis for Nakagami-q (Hoyt) fading channels under Rayleigh interference”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 9(4), 1272-1276.

- Paris, J.F. (2009) "Nakagami-q (Hoyt) distribution function with applications", *Electronics Letters*, 45(4), 210-211.
- Patil, V. H., Chauhan, A. R., Mehta, S. and Mathadu, C. (2020) "Spectrum sensing in cognitive radio", *International Journal of Engineering Research and Technology*, 9(8), 403-407.
- Pathak, S., and Katiyar, H. (2016) "Performance Analysis of wireless link in Rician fading channel", *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 5(4), 101-105.
- Proakis, J.G. and Salehi M., (1994) "Communication system engineering 2nd edition, *Prentice Hall*, New Jersey, 07458, 3-371.
- Quan, Z., Cui, S., Sayed, A. H. and Poor, H. V. (2008) "Optimal multiband joint detection for spectrum sensing in cognitive radio networks", *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57(3), 1128-1140.
- Ranjeeth, M. and Anuradha, S. (2015) "Performance of fading channels on energy detection based spectrum sensing", *Procedia Materials Science*, 10, 361-370.
- Roy, S. G. (2016) "A Study on MIMO wireless communication channel performance in correlated channels", Master Thesis, *National Institute of Technology, Rourkela*.
- Salarvan, A. and Kurt, G. K. (2012) "Multi-antenna spectrum sensing for cognitive radio under Rayleigh channel", *In 2012 IEEE Symposium on Computers and Communications*, 780-784.
- Sarkar, T. K., Mailloux, R., Oliner, A. A., Salazar-Palma, M., and Sengupta, D. L. (2006) "History of wireless", *John Wiley and Sons*, 177, 351-355.
- ShahbazPanahi, S. and Jing, Y. (2018) "Recent advances in network beamforming", *Academic Press Library in Signal Processing*, 7, 403-477.
- Shannon, C. E. (1949) "Communication in the presence of noise", *Proceedings of the IRE*, 37(1), 10-21.
- Simon, M. K. and Alouini, M. S. (2005) "Digital communication over fading channels", *John Wiley and Sons*, 95, 20-180.
- Sinha, N. B., Bera, R., & Mitra, M. (2010) "Capacity and v-blast techniques for MIMO wireless channel", *International Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 14(1), 11,22.
- Sofotasios, P. C., Fikadu, M. K., Ho-Van, K. and Valkama, M. (2013) "Energy detection sensing of unknown signals over Weibull fading channels", *In 2013 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, Vietnam, 414-419.

- Stevenson, C. R., Chouinard, G., Lei, Z., Hu, W., Shellhammer, S. J. and Caldwell, W. (2009) "IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area network standard", *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 130-138.
- Urkowitz, H. (1967) "Energy detection of unknown deterministic signals", *Proceedings of the IEEE*, 55(4), 523-531.
- Üstok, R. F. (2010) "Spectrum sensing techniques for cognitive radio systems with multiple antennas", Master Thesis, *Izmir Institute of Technology*, Izmir.
- Winters, J. (1987) "On the capacity of radio communication systems with diversity in a Rayleigh fading environment", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 5(5), 871-878.
- Yılmazel, R., Seyman, M. N. and Eyüp, T. (2018) "Energy detection approach for spectrum sensing in cognitive radio systems", *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 10(2), 1-9.
- Yucek, T. and Arslan, H. (2009) "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications", *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 11(1), 116-130.
- Zeng, Y. and Liang, Y. C. (2007) "Covariance based signal detections for cognitive radio", *In 2007 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Ireland, 202-207.
- Zeng, Y. and Liang, Y. C. (2008) "Spectrum sensing algorithms for cognitive radio based on statistical covariances", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(4), 1804-1815.
- Zeng, Y. and Liang, Y. C. (2009) "Eigenvalue based spectrum sensing algorithms for cognitive radio", *IEEE Transactions on Communications*, 57(6), 1784-1793.
- Ziafat, S., Ejaz, W. and Jamal, H. (2011) "Spectrum sensing techniques for cognitive radio networks: Performance analysis", *In 2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Intelligent Radio for Future Personal Terminals*, Korea, 1-4.



Ek-1. MATLAB Kodları

```
clc
close all
clear all

μ = 100; % Örnek uzunluğu sayısı
E=[];
snr_dB = [-25:0.1:5]; % SNR değerleri
snr = 10.^(snr_dB./10); % SNR lineer değeri
% Pf = 0.01:0.01:1; % Pf = Yanlış Algılama Olasılığı
Pf = 0.1;
R=4;% Alıcı anten sayısı
%%Simülasyon için algılama olasılıkları hesaplama
for m = 1:length(snr)
    m
    i = 0; k=0;E=0;t=0;
    for kk=1:10000 % Monte Carlo simülasyon sayısı
        n = randn(1, μ); %AWGN nin 0 ortalamalı ve 1 varyanslı
        gürültüsü

        s = sqrt(snr(m)).*randn(1, μ); % Gerçek değerli Gauss
        Birincil kullanıcı sinyali% sc=[sc s];
        % end
        y = s + n; % İkincil kullanıcıdan alınan işaret
        energy = abs(y).^2; % Alınan işaretin enerjisi
        E=[E energy];
        energy_fin = (1/ μ).*sum(energy); % Enerji algılama için
        test istatistiğini hesaplama
        energy_fin1 =sum(mean(E)); % ortalama Enerji algılama test
        istatistiği
        thresh(m) = (qfuncinv(Pf)./sqrt(μ))+ 1; % Eşik değeri
        hesaplamak için teorik değer

        n1 = randn(R,μ); %AWGN noise with mean 0 and variance 1
        s1 = sqrt(snr(m)).*randn(R, μ);%Gerçek değerli Gauss
        Birincil Kullanıcı Sinyali
        y1 = s1 + n1; % İkincil kullanıcıdan alınan sinyal
        for a=1:R
            energyy(a,:) = abs(y1(a,:)).^2; % N tane örnek sayısı
            için alınan işaretin enerjisi
        end
        % EE=[EE energyy];
        % energy_fin = (1/ μ).*sum(energy); % EA için test
        istatistiği
        energy_fin2 = (mean(mean(energyy))); % EA için test
        istatistiği
```

```

    if (energy_fin >= thresh(m)) % alınan enerjinin eşik
değerinden büyük olup olmadığını kontrol et, enerji eşik
değerinden büyük değilse Pd yi yani algılama olasılığını 1
artır.
        i = i+1;end
    if (energy_fin1 >= thresh(m)||energy_fin >= thresh(m)) %
alınan enerjinin eşik değerinden büyük olup olmadığını
kontrol et, enerji eşik değerinden büyük değilse Pd yi yani
algılama olasılığını 1 artır.

        k = k+1;end
    if (energy_fin2 >= thresh(m)||energy_fin1>=
thresh(m)||energy_fin>= thresh(m)) % alınan enerjinin eşik
değerinden büyük olup olmadığını kontrol et, enerji eşik
değerinden büyük değilse Pd yi yani algılama olasılığını 1
artır.

        t = t+1;end
end
%   kk1=k+i;
Pd(m) = i/kk;
Pd1(m) = k/kk;
Pd2(m) = t/kk;
end
P=[Pd; Pd1;Pd2;snr_dB ];
hold on
plot(snr_dB, Pd,'r')
hold on
plot(snr_dB, Pd1)
hold on
plot(snr_dB, Pd2,'c')
legend ('geleneksel EA','iyileştirilmiş EA','tezde
önerilen MIMO EA')

```

Ek-2. Yayınlar

- Yarar, M., Ilgın, F.Y. ve Çiflikli, C. (2020) “Çok antenli bilişsel radyolarda GLRD tabanlı spektrum algılama”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, Ejosat Özel Sayı (ARACONF)*, Kayseri, 285-291.
- Yarar, M. ve Ilgın, F.Y. (2020) “Bilişsel radyolarda iyileştirilmiş enerji algılama tabanlı spektrum algılama”, *4.Geleceğin Mühendisleri Uluslararası Öğrenci Sempozyumu (EFIS)*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, 75-79.
- Yarar, M., Ilgın, F.Y. ve Çiflikli, C. (2020) “Çok antenli bilişsel radyolarda GLRD tabanlı spektrum algılama”, *International Conference on Access to Recent Advances in Engineering and Digitalization (Özet bildir-ARACONF)*, Nuh Naci Yazgan Üniversitesi, Kayseri, 99-100.

