



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



DOKTORA TEZİ

**İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM AĞLARI İÇİN SİNYAL İŞLEME
TEKNİKLERİ**

Hasan KARTLAK

**Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı**

Danışman

Prof. Dr. Aydın AKAN

II. Danışman

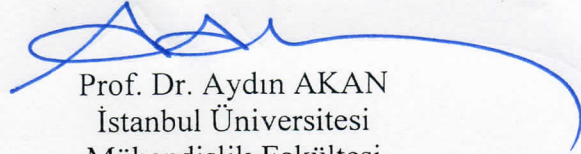
Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU

Haziran 2015

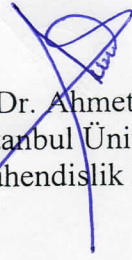
İSTANBUL

Bu çalışma 24 / 06 / 2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Elektronik Mühendisliği programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi:



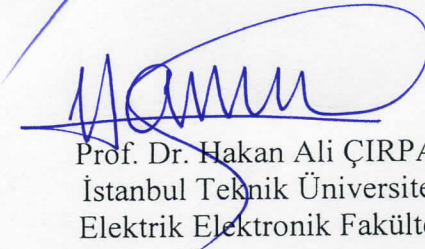
Prof. Dr. Aydın AKAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



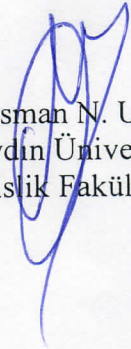
Prof. Dr. Ahmet SERTBAŞ
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. A. Hamdi KAYRAN
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik Elektronik Fakültesi



Prof. Dr. Hakan Ali ÇIRPAN
İstanbul Teknik Üniversitesi
Elektrik Elektronik Fakültesi



Prof. Dr. Osman N. UÇAN
İstanbul Aydın Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 16723 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Doktora tezimin planlanmasında, yürütülmesinde ve başarı ile tamamlanmasında değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşan, ilgilerini ve desteklerini her zaman gösteren, motive eden, bu çalışmanın ortaya çıkması için düzenli olarak zaman ayıran, doktora öğrenimim süresince gösterdikleri her türlü destek ve yardımlardan dolayı çok değerli hocalarım Prof. Dr. Aydın AKAN'a ve Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım.

Yardımlarını esirgemeyen, ilgilerini ve desteklerini her zaman gösteren, tez izleme komitesinde yer alarak doktora tezimin oluşmasında önemli katkılarda bulunan çok değerli hocalarım Prof. Dr. Ahmet Hamdi KAYRAN'a ve Prof. Dr. Osman Nuri UÇAN'a gönülden teşekkür ederim.

Doktora tez çalışmalarımın başarı ile gerçekleşmesi için verdikleri destekler ve yardımlardan dolayı İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Tecrübelerini benimle paylaşan, yol gösteren ve doktora eğitimim süresince yardımlarını esirgemeyen kardeşim Yük. Müh. Hale KARTLAK'a çok teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince anlayış, hoşgörü ve sabırla beni destekleyen, sevgilerini her zaman yanımda hissettiğim anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Haziran 2015

Hasan KARTLAK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	vii
ÖZET.....	ix
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM.....	1
1.2. BİLİŞSEL AĞ	1
1.3. UZAYSAL MODÜLASYON	2
1.4. AMAÇ VE KAPSAM	3
2. GENEL KISIMLAR	6
2.1. İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM AĞLARI	6
2.1.1. Tek-Yönlü Çok-Röleli İşbirlikli Ağ Yapısı	6
2.1.2. İki-Yönlü Çok-Röleli İşbirlikli Ağ Yapısı	8
2.2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA İŞBİRLİKLİ İLETİM	11
2.2.1. Bilişsel Radyo Ağı	13
2.2.2. Bilişsel Radyo Ağlarında İşbirlikli Spektrum Sezme	16
2.2.2.1. Enerji Temelli İşbirlikli Spektrum Sezme	18
2.2.2.2. İşbirlikli Döngüsel Durağanlığa Dayanan Spektrum Sezme	20
2.3. İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN UZAYSAL MODÜLASYON	21
2.4. UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON	24
2.4.1. Uzay-Zaman Blok Kod Yapısı.....	26
3. MALZEME VE YÖNTEM	28
3.1. TEK-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ.....	28
3.2. İKİ-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU	29

3.3. BİLİŞSEL RADYO SİSTEM MODELİNDE TEKLİ RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU	31
3.4. BİLİŞSEL RADYO AĞINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU	33
3.5. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA İŞBİRLİKLİ İLETİM VE İŞBİRLİKLİ SPEKTRUM SEZME İÇİN RÖLE SEÇİMİ	35
3.5.1. İletim için En İyi Röle Seçim Yöntemi.....	35
3.5.2. Spektrum Sezme için En İyi Röle Seçim Yöntemi	35
3.5.3. İletim ve Spektrum Sezme için Ortak En İyi Röle Seçim Yöntemi.....	36
3.6. İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN RÖLE SEÇİM YÖNTEMİ	36
3.7. UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN RÖLE SEÇİM YÖNTEMİ.....	38
4. BULGULAR	41
4.1. TEK-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	41
4.2. İKİ-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	44
4.3. BİLİŞSEL RADYO AĞINDA TEKLİ RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	48
4.4. BİLİŞSEL RADYO AĞINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU İÇİN BENZETİM SONUÇLARI	51
4.5. ENERJİ TEMELLİ İŞBİRLİKLİ SPEKTRUM SEZME İÇİN BENZETİM SONUÇLARI.....	55
4.6. RAYLEIGH SÖNÜMLEMELİ KANALLAR İÇİN İŞBİRLİKLİ DÖNGÜSEL DURAĞANLIĞA DAYANAN SPEKTRUM SEZME VE BENZETİM SONUÇLARI.....	57
4.7. Rician SÖNÜMLEMELİ KANALLAR İÇİN İŞBİRLİKLİ DÖNGÜSEL DURAĞANLIĞA DAYANAN SPEKTRUM SEZME VE BENZETİM SONUÇLARI.....	61
4.8. İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN BENZETİM SONUÇLARI ...	65
4.9. UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN BENZETİM SONUÇLARI.....	67
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	70
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ.....	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Çok röleli bir işbirlikli haberleşme modeli.....	4
Şekil 2.1: Tek-yönlü çok röleli işbirlikli ağ yapısı.	7
Şekil 2.2: İki-yönlü çok-röleli işbirlikli ağ yapısı.....	10
Şekil 2.3: Bilişsel radyo ağı.....	13
Şekil 2.4: İşbirlikli iletişim ağı.	15
Şekil 2.5: Spektrum sezme algoritması.	19
Şekil 2.6: İşbirlikli uzaysal modülasyon sistem yapısı.....	23
Şekil 2.7: Uzak-zaman blok kod matrisi.	26
Şekil 3.1: İşbirlikli uzaysal modülasyon için röle seçim yapısı.....	37
Şekil 3.2: İşbirlikli uzaysal modülasyonda QPSK için röle seçim yapısı.....	37
Şekil 3.3: QPSK veri bitlerinin iletiminde röle indislerinin belirlenme yöntemi.	38
Şekil 3.4: Uzak-zaman blok kodlu işbirlikli uzaysal modülasyon röle seçimsiz sistem.	39
Şekil 3.5: Uzak-zaman blok kodlu işbirlikli uzaysal modülasyon röle seçimli sistem.....	40
Şekil 4.1: $\gamma_e = 9\text{dB}$ için hata başarımlar eğrileri	42
Şekil 4.2: $\gamma_e = 9\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları.	43
Şekil 4.3: $\gamma_e = 12\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları	44
Şekil 4.4: $\gamma_e = 9\text{dB}$ için hata başarımlar eğrileri.	46
Şekil 4.5: $\gamma_e = 9\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları.	47
Şekil 4.6: $\gamma_e = 12\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları.	47
Şekil 4.7: İşbirlikli iletişim ve bilişsel radyo ağlarında rastgele tek bir röle seçim yöntemi için hata başarımlar eğrileri.	49
Şekil 4.8: İşbirlikli iletişim ve bilişsel radyo ağlarında en iyi röle seçim yöntemi için hata başarımlar eğrileri.	50

Şekil 4.9: Bilişsel radyo ağında rastgele tek bir röle seçim ve en iyi röle seçim yöntemleri için hata başarımlar eğrileri.	50
Şekil 4.10: Güç optimizasyonu olmadan hata başarımlar eğrileri.	51
Şekil 4.11: Güç optimizasyonu yapılarak elde edilen hata başarımlar eğrileri.....	52
Şekil 4.12: 12dB eşik değeri için seçilen ortalama röle sayısı.	54
Şekil 4.13: 9dB eşik değeri için seçilen ortalama röle sayısı.	54
Şekil 4.14: 4 farklı senaryo için hata başarımlar eğrisi.....	56
Şekil 4.15: Spektrum sezme için bulma olasılığı eğrisi.....	57
Şekil 4.16: İşbirlikli Bilişsel Ağ Yapısı için Bit Hata Oranı Başarımı	58
Şekil 4.17: İşbirlikli Bilişsel Ağ Yapısı için Sezme Olasılığı Başarımı	59
Şekil 4.18: İşbirlikli Bilişsel Ağ Yapısı için Kaçırma Olasılığı Başarımı	59
Şekil 4.19: Hem İletim hem de Spektrum Sezme için En İyi Röle Seçim Yönteminin Spektral Kolerasyon Fonksiyonu.....	60
Şekil 4.20: Rayleigh sönümlemeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için bit hata oranı başarımlar.....	62
Şekil 4.21: Rician sönümlemeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için bit hata oranı başarımlar	62
Şekil 4.22: Rayleigh sönümlemeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için sezme olasılığı başarımlar.....	63
Şekil 4.23: Rician sönümlemeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için sezme olasılığı başarımlar.....	64
Şekil 4.24: 2-PSK işbirlikli iletişim modeli, en iyi röle seçimine dayalı 2-PSK işbirlikli iletişim modeli, 2-PSK işbirlikli iletişim modelinde kaynak hedef arasındaki direk iletişimin olmadığı sistem senaryosu, QPSK işbirlikli iletişim modeli ve QPSK işbirlikli iletişimde çoklu küme içinde röle seçimi senaryosu için benzetim sonuçları.	66
Şekil 4.25: Uzay-zaman blok kodlu işbirlikli uzaysal modülasyon sistemi için benzetim sonuçları.....	68

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: 2 bit/s/Hz iletim için STBC-SM eşleme kuralı.	27
--	----



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
P_{IK}	: İkincil kaynağın iletim gücü
P_{IR}	: Rölenin iletim gücü
P_T	: Toplam güç
σ_{BK-BH}^2	: Birincil kaynaktan birincil hedefe olan zayıflama değişintisi
σ_{IK-BH}^2	: İkincil kaynaktan birincil hedefe olan zayıflama değişintisi
$\sigma_{IR_i-BH}^2$	: İkincil röleden birincil hedefe olan zayıflama değişintisi
γ^{BK}	: Birincil kaynaktaki sinyal gürültü oranı
s	: İşaret
i	: Röle indisi
r_i	: Hedefte alınan işaret
E	: İşaret enerjisi
h	: Karmaşık Gauss kanal sönmüleme katsayısı
n	: Karmaşık Gauss gürültüsü
k	: Optimizasyon katsayısı
$f(.)$	: Amaç fonksiyonu
$h(.)$	: Koşul fonksiyonu
N_0	: Gürültünün gücü
R_e	: Seçilen en iyi röle
x_b	: Birincil kaynağın işareti
R_b	: Veri oranı
x_i	: İkincil kaynaktaki işaret
x_k	: Kaynaktan çıkan işaret
$x(.)$	: Kesik zamanlı işaret
$\psi_a^b(.)$	: Ana dalgacık fonksiyonu
$\psi(.)$	: Normalize genişleme
$\hat{\sigma}_r^2$	: Alınan işaretin normalize değişimlerinin kestirimleri
P_d	: Bulunma olasılığı
M	: Alınan işareten elde edilen dalgacık katsayılarının normalize değişimi
λ_E	:Monte Carlo denemeleri yardımıyla gürültünün normalize değişimlerinden hesaplanan eşik değeri
H_1	: Birincil kullanıcının alınan işarete var olduğu durum
$R_x^\alpha(\tau)$	: Döngüsel otokorelasyon
$S_x^a(f)$	: Spektral korelasyon yoğunluğu
p_m	: Karmaşık işaretler
$M_s(.)$	: Kaynakta bit'den sembole modülasyon eşleme
s_{ix}	: İletilen PSK karmaşık işaret

$\hat{S}_{ix}^{(R_i)}$	: Rölede kaynağın kestirilen işareti
$\hat{x}_k^{(R_i)}$	: Rölede kaynağın kestirilen biti
ID_{R_i}	: Benzersiz sayısal bir tanımlayıcı
$x^{(R_i)}$	: İletilecek röle bilgisi
$M_R(x^{(R_i)})$	: Röleden iletilen PSK karmaşık semboller
h_{KR_i}	: $K \rightarrow R_i$ kanalları için karmaşık Gauss sönümleme katsayıları
h_{KH}	: $K \rightarrow H$ kanalları için karmaşık Gauss sönümleme katsayıları

Kısaltmalar	Açıklama
RF	: Radyo Frekans
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio)
BK	: Birincil Kaynak
BH	: Birincil Hedef
İK	: İkincil Kaynak
İH	: İkincil Hedef
SM	: Uzaysal Modülasyon (Spatial Modulation)
K	: Kaynak
H	: Hedef
R	: Röle
ÇRS	: Çoklu röle seçimi
AF	: Kuvvetlendir ve aktar (Amplify and forward)
QoS	: Hizmet kalitesi (Quality of Service)
QPSK	: Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
BHO	: Bit Hata Olasılığı
DF	: Çöz ve Aktar (Detect and forward)
PSK	: Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
QAM	: Dördün Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation)
MAP	: En büyük olabilirlik (Maximum a Posteriori Probability)
OSHO	: Ortalama Sembol Hata Olasılığı
V-BLAST	: Dikey-Bell Lab Katmanlı Uzay-Zaman (Vertical-Bell Lab Layered Space-Time)
DD	: Döngüsel durağanlık (Cyclostationary detection, CD)
ED	: Enerji dedektörü (Energy detector)
EOB	: En büyük oran birleştirmesi (Equal gain combining, EGC)
DFBC	: Dikgen frekans bölmeli çoğullama (Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)
THFD	: Ters hızlı Fourier dönüşümü (Inverse fast Fourier transform, IFFT)
HFD	: Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier transform, FFT)
AWGN	: Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (Additive white Gaussian noise)
OYF	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability density function, pdf)
MIMO	: Çok girişli çok çıkışlı (Multi input multi output)
ML	: ençok olabilirlik (maximum likelihood)
SIMO	: Tek-giriş çoklu-çıkış sistemler (Single-input multiple-output)
STBC	: Uzay-zaman blok kodlama (Space Time Block Code)

ÖZET

DOKTORA TEZİ

İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM AĞLARI İÇİN SİNYAL İŞLEME TEKNİKLERİ

Hasan KARTLAK

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Aydın AKAN

II. Danışman : Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU

Kablosuz iletişim imkânlarının hızla yaygınlaşması, bu iletişimi mümkün kılan sistemlerin karmaşıklığının artmasına sebep olmaktadır. Ayarlanabilir çok sayıda parametreye sahip bu karmaşık sistemlerin yönetilmesi problemi, konvansiyonel yöntemlerin çözebileceğinden çok daha zor bir hale gelmektedir. İşbirlikli iletişim ağları halen araştırma ve geliştirme açısından çok yeni bir konudur. Bir kablosuz ağ üzerinden tam bilinebilen ve güvenilir iletişimin oluşturulabilmesi için halen teknik ve ekonomik zorluklar bulunmaktadır. Sinyal işleme işbirlikli iletişim ağlarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmanın amacı; sinyal işleme teknikleri yardımıyla işbirlikli iletişim ağlarında var olan bu zorluklara çözüm üretmektir.

İşbirlikli haberleşme ağlarında terminaller bilgi gönderirken çeşitleme kazancı sağlamak için ağa dahil diğer terminalleri aktarıcı röle olarak kullanırlar. Bu yöntemle terminallerde çoklu anten kullanımına gerek kalmadan uzamsal çeşitleme kazancı sağlanabilmekte ve bunun sonucu olarak direk haberleşmeye göre bağlantı güvenliği, spektral verimlilik ve iletim hızı üstünlüğü sağlanmaktadır. Bütün bu avantajlarından dolayı son yıllarda işbirlikli haberleşme alanında çalışmalar oldukça artmıştır. Güç sınırlı ağlarda ağ içinde hangi terminal veya terminallerin röle olarak kullanılacağı ve toplam gücün kaynak ve röle(ler) arasında nasıl paylaşılacağının belirlenmesi oldukça kritiktir. Bu kritik problemin çözümüne yönelik bir ortak çoklu röle seçim ve güç optimizasyon yapısı tasarlanmıştır.

İki-yönlü işbirlikli haberleşme aynı zamanda çift yönlü işbirlikli haberleşme olarak da bilinmektedir ve kablosuz ağlarda etkili bir iletişim tekniği olarak sunulmaktadır. Son yıllarda bu yeni iletişim tekniği araştırmalarına ilgi artmıştır. Tek-yönlü işbirlikli iletişime kıyasla iki-yönlü işbirlikli iletişimde ağ içinde hangi terminal veya terminallerin röle olarak kullanılacağı ve toplam gücün kaynak ve röle(ler) arasında nasıl paylaşılacağı belirlenmesi daha karmaşıktır. Bu karmaşık problemin çözümü için tek-yönlü işbirlikli iletişim için tasarlanan ortak çoklu röle seçim ve güç optimizasyon yapısı geliştirilerek iki-yönlü işbirlikli iletişime uyarlanmıştır.

Bilişsel radyo, kablosuz spektrum kaynaklarının kullanımını arttırmak için önerilen ve gelişmekte olan bir teknolojidir. Bilişsel radyo lisanslı birçok kanalın içinde kullanılmayan spektrum bantlarını bağımsız olarak belirlemek ve uyumlu bir şekilde kullanmak için geliştirilmiştir. Girişim ölçütü bilişsel radyonun uygulanması için kullanıcılar arasındaki girişimi belirleyen ve yöneten bir kriter olarak önerilmektedir. İkincil kullanıcının birincil kullanıcı ile birlikte lisanslı spektrumu kullanabilmesi için ikincil kullanıcının birincil kullanıcıya olan girişiminin belli bir eşik değerin altında olması gerekir. Bu durum doğal olarak ikincil kullanıcı veriminin sınırlandırılmasına neden olacaktır. Dolayısı ile bilişsel ağlarda kabul edilebilir bir ikincil kullanıcı iletişim performansını sağlayabilmek için, gelişmiş iletim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcıdan birincil kullanıcıya olan girişim kısıtlamaları nedeniyle röle seçim problemi klasik işbirlikli iletişim sistemlerine kıyasla daha karmaşık hale gelebilmektedir. Bu amaçla ikincil kullanıcının birincil kullanıcıya olan girişimini belli bir eşik değerin altında tutarak en iyi röle seçim ve rastgele röle seçim yöntemleri karşılaştırılmış, güç optimizasyonu yardımıyla sistem veriminin artırılmasına çalışılmıştır. Bu karmaşık problemin çözümü için ikincil kullanıcının birincil kullanıcıya olan girişimin belli bir eşik değerin altında tutularak uyarlanabilir çoklu röle seçimi ve güç optimizasyon yapısı tasarlanmıştır.

Bilişsel radyo ağlarının önemli bir parçası da radyo spektrum uygunluğunun algılanmasıdır. Spektrum sezme, kullanılmayan lisanslı radyo spektrum frekans bantlarının algılanması ile frekans spektrumunun verimliliğini arttırmaktadır. Hem iletimin hem de spektrum sezmenin uygun röleler aracılığı ile yapılabilmesi ve sistem veriminin artırılması sağlanmıştır.

İşbirlikli uzaysal modülasyon kullanan kablosuz ağlar için yeni bir işbirliği senaryosu ve röle seçim yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem uzaysal modülasyon kullanan sistemler için en iyi röle seçimine dayanmaktadır. Ayrıca, işbirlikli uzaysal modülasyonun 4 farklı röle grubundan en iyi 4 rölenin seçilmesi ile başarımın arttığı gösterilmiştir. Önerilen yöntemin iletim için ortalama sembol hata oranı performansı bilgisayar benzetimleriyle elde edilmiştir. Sonuçlar, önerilen işbirlikli uzaysal modülasyon yönteminin, sistem başarımını arttırdığını göstermiştir.

Bu tez ile haberleşme tekniklerinden faydalanan işbirlikli iletişim ağlarında daha verimli bir iletişim sağlanmış olacaktır.

Haziran 2015, 92 sayfa.

Anahtar kelimeler: işbirlikli iletişim, bilişsel radyo ağı, röle seçimi, spektrum sezme, uzaysal modülasyon

SUMMARY

Ph.D. THESIS

SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR COOPERATIVE COMMUNICATION NETWORKS

Hasan KARTLAK

İstanbul University

Institute of Graduate School of Science and Engineering

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Aydın AKAN

Co-Supervisor : Doç. Dr. Niyazi ODABAŞIOĞLU

The rapid expansion of wireless communication facilities causes to increase complexity of the systems that make communication possible. The problem of managing these complex systems with a large number of adjustable parameters becomes much more difficult than conventional methods can solve. Cooperative communication networks are still a very new issue for research and development. For complete known and reliable communication over a wireless network, there are still technical and economic challenges. Signal processing plays an important role in cooperative communication networks. The purpose of this thesis is to produce a solution to these challenges with the help of signal processing techniques existing cooperative networks.

In cooperative communication networks, terminals use other available terminals as relays to transmit their messages. As such, spatial diversity gain is achieved without requiring the use of multiple antennas. Consequently improved performance in terms of connection security, spectral efficiency, and transmission speed may be obtained compared to direct transmission. Recently, cooperative transmission techniques have attracted increasing attention due to above mentioned advantages. In communication networks with power limitations, it is a critical problem how to choose which terminal or terminals in the network will be used as relay(s), and how the total power will be shared among the source and the relay(s). To solve this critical problem, a joint multi-relay selection and power optimization structure is designed.

Two-way cooperative communication, also known as bidirectional cooperative communication, is proposed as an effective communication technique for wireless networks, and there has been increasing interest in the research of this new communication technique in recent years. The critical problem of how to choose which

terminal or terminals in the network will be used as relay(s), and how the total power will be shared among the source and the relay(s) become much more complicated in two-way cooperative communication compared to the single-way cooperative communication. For the solution of this complex problem, the multi-relay selection and power optimization structure designed for one-way cooperative communication is developed and adapted to two-way cooperative communication.

Cognitive radio is the state of the art wireless communication technique which allows unlicensed users to utilize licensed users' assigned but unused radio spectrum. As such, it provides efficient usage of radio spectrum resources. For the implementation of cognitive radio, interference temperature is proposed as a metric to quantify and manage the interference between primary user (PU) and secondary user (SU). If the interference from SU to PU is less than a threshold, the SU can access the licensed spectrum together with the PU. Eventually, very low transmit power level is allowed for SUs, and thus throughput of SU will be very limited to satisfy high quality of service for the PU. In order to cope with these constraints, improved transmission techniques as well as sensing the available spectrum of the PU are necessary to achieve the desired communication performance in cognitive radio networks. Relay selection problem becomes much more complicated in cognitive radio networks compared to the classical cooperative communication systems, because of interference limitations from SU to PU. For this purpose, the interference from SU to PU is limited, and the best relay selection and random relay selection methods were compared, with the help of power optimization to increase the efficiency of the system studied. To solve the complex problem, an adaptive multi-relay selection and power optimization method is designed with interference limitations from SU to PU.

An important component of cognitive radio networks is sensing the availability of the radio spectrum. Spectrum sensing improves the efficiency of the frequency spectrum by detecting assigned but unused frequency bands of the radio spectrum. By selecting suitable relay for both communication and spectrum sensing, the system efficiency is improved.

A new cooperation scenario and relay selection algorithm is proposed for wireless networks using cooperative spatial modulation. The proposed method is based on the selection of best relay for spatial modulation. In addition, spatial modulation was implemented by selecting 4 best relays from 4 different relay groups, resulting improved performance. The average symbol error probabilities are calculated to test the transmission performance of the proposed method using computer simulations. Results show that the proposed cooperative spatial modulation scheme improves the system performance.

In this thesis, it will be improved the quality of communication with the help of communication techniques in cooperative communication networks.

June 2015, 92 pages.

Keywords: cooperative communication, cognitive radio network, relay selection, spectrum sensing, spatial modulation

1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme uygulamalarındaki önemli gelişmelerin birçoğu özellikle kablosuz ağlar üzerinde gerçekleşmektedir. Son zamanlardaki kablosuz ağlar üzerinde yapılan çalışmaların da birçoğu işbirlikli iletişim ağları ile ilgilidir. Bu tez çalışmasında da işbirlikli iletişim ağlarında kullanılan yöntemler ile ilgili gelişmeler incelenerek daha verimli bir iletişim elde edilmiştir. Bu bölümde işbirlikli iletişim ve bilişsel ağ kavramları ele alınarak, tezin amacı ve kapsamı açıklanacaktır.

1.1. İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM

Kablosuz haberleşmede iletilen işaretler birçok bozucu etki altında kalmaktadır. Bunlardan bir tanesi de gönderilen bir işaretin değişik yollardan farklı zamanlarda alıcıya ulaşmasıyla gerçekleşen sönümleme etkisi olarak adlandırılan bozucu bir etkidir. Bu bozucu sönümleme etkisini ortadan kaldırmak için verici çeşitleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle iletilmek istenen işaret, birçok anten üzerinden alıcıya ulaştırılmaktadır. İşbirlikli iletişim yönteminde verici, göndermek istediği işareti birçok kullanıcıyı röle şeklinde kullanarak gerçekleştirmektedir. Birçok kullanıcı üzerinden farklı kanal etkilerine maruz kalan işaretler alıcıda birleştirilip asıl işaret elde edilmektedir. Böylece iletilmek istenen işaretin alıcıda elde edilmesindeki başarı oranı artmaktadır. İşbirlikli iletişim yöntemiyle terminallerde çoklu anten kullanımına gerek kalmadan uzamsal çeşitleme kazancı sağlanabilmektedir.

1.2. BİLİŞSEL AĞ

Kablosuz iletişim imkânlarının hızla yaygınlaşması, bu iletişimi mümkün kılan sistemlerin karmaşıklığının artmasına sebep olmaktadır. Ayarlanabilir çok sayıda parametreye sahip bu karmaşık sistemlerin yönetilmesi problemi, konvansiyonel yöntemlerin çözebileceğinden çok daha zor bir hale gelmektedir. Bilişsel radyo sistemlerinin hedeflediği amaçlar; iletişim problemlerinin daha etkili bir şekilde çözülmesi, gerektiği an gerektiği yerde daha güvenilir iletişim ve başta spektrum olmak üzere radyo kaynaklarının daha etkin kullanımınıdır. Söz konusu şebekeler olduğunda ağ

elemanlarının muhtemel etkileşimleri iletişim problemlerinde ve kalitesinde ciddi faydalar sağlayabilir. Bir bilişsel ağ var olan ağ koşullarını inceleyebilen ve sonrasında uçtan uca amaçları göz önünde bulundurarak planlayıp öğrenebilen ve kararlarını uygulayabilen sistemdir. Ağ, yaptığı uyarlamaları öğrenebilir ve ilerdeki kararlarında öğrendiklerini kullanabilir. Tüm bunları yaparken ağın uçtan uca amaçları göz önünde bulundurması esastır. Bilişsel ağ özel ve geçici bir şekilde biçimlenebilir evrimleşebilir ve ağdaki her bir ucun zamanla değişen ya da değişmeyen kullanılabilir enerji, bilişsel yetenekler ve RF önyüz imkânları gibi farklı sınırlamalarla uğraşması gerekebilir. Bilişsel ağ halen araştırma ve geliştirme açısından çok yeni bir konudur. Bir kablosuz ağ üzerinden tam bilinebilen ve güvenilir iletişimin oluşturulabilmesi için halen teknik ve ekonomik zorluklar bulunmaktadır. Sinyal işleme bilişsel ağlarda önemli bir rol oynamaktadır.

İletişim sistemleri alanında bilişsel süreci uygulamaya çalışan ilk yapılar bilişsel ağlar değildir. Bilişsel radyo alanındaki gelişmeler, bilişsel ağlar konusuna zemin hazırlamıştır. Bilişsel radyo, kablosuz iletişimde sinyal alma ve gönderme parametrelerinin düzenlenmesinin bilişsel süreç ile gerçekleştirildiği bir sistemdir. Bu iki konu, paralel bir şekilde ilerlemekte ve birbirlerini desteklemektedir. Tez kapsamında, bilişsel radyo ve bilişsel ağlar konularının paralelliğine uyum sağlayacak şekilde her ikisi de incelenecektir.

Bu tez çalışmasında, sinyal işleme tekniklerinden faydalanarak bilişsel ağlarda; bilişsel radyoda anahtar bir teknoloji olan ve radyo kanallarının daha etkin kullanımını sağlayan spektrum sezme, yük ve toplam enerjiyi azaltmak için en iyi röle seçimi, kullanıcılarda girişim oluşturmaksızın erişim için gereken eşgüdümün sağlanması, ağdaki toplam gücü minimize etmek için güç optimizasyonu yöntemleri yardımıyla bilişsel ağlarda daha verimli bir iletişim sağlanmıştır.

1.3. UZAYSAL MODÜLASYON

Uzaysal Modülasyon (Spatial Modulation, SM) çoklu antenlerle bilgi iletimi temeline dayanan, yeni ve gelişmekte olan bir iletim tekniğidir [39]. Uzaysal modülasyon tekniğinde bilgi iletimi için genlik veya faz ile birlikte anten indisleri de bilgi aktarımında kullanılmakta ve dolayısıyla sistemin band verimi arttırılmaktadır. Verici

tarafından gönderilen bilgi, alıcıya ulaştığında sezici tarafından bu anten indisleri de dikkate alınarak işaretin çözülmesi kararı verilmektedir [40].

Uzaysal modülasyon doğası gereği kanal koşullarına göre hassasiyet gösterebilmektedir. Uzaysal modülasyonun kanal koşullarından yüksek oranda etkilenmesini önlemek için literatürde işbirlikli çeşitleme yapısını kullanan modeller sunulmuştur [42, 52]. Uzaysal modülasyon işbirlikli haberleşme ağlarına uygulandığında, işbirlikli haberleşme ağlarında iletilen semboller yerine terminal bilgisi olarak röle indisleri kullanılmaktadır.

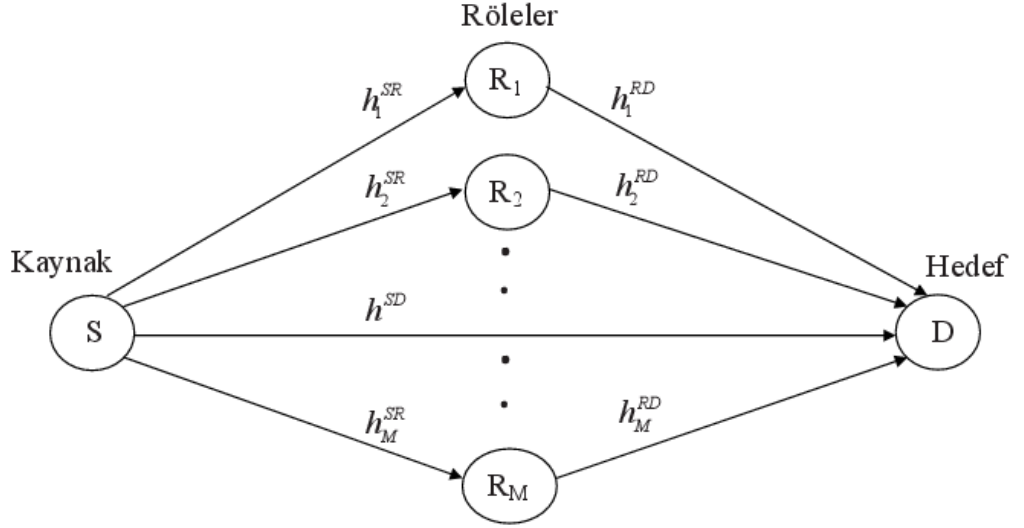
Bu tez çalışmasında, işbirlikli haberleşmede ağda bulunan birçok röle arasından en uygun röle veya röleler seçilerek ve iletişim bu röle veya röleler üzerinden sağlanarak sistemin verimi arttırılmıştır.

1.4. AMAÇ VE KAPSAM

Bu tez çalışmasının amacı; sinyal işleme teknikleri yardımıyla bilişsel iletişim ağlarında da kullanılan işbirlikli haberleşme ağlarında var olan zorluklara çözüm üretmektir. İşbirlikli haberleşme ağlarında terminaller bilgi gönderirken çeşitleme kazancı sağlamak için ağa dahil diğer terminalleri aktarıcı röle olarak kullanırlar [1, 2]. Bu yöntemle terminallerde çoklu anten kullanımına gerek kalmadan uzamsal çeşitleme kazancı sağlanabilmekte ve bunun sonucu olarak direk haberleşmeye göre bağlantı güvenliği, spektral verimlilik ve iletim hızı üstünlüğü sağlanmaktadır. Bütün bu avantajlarından dolayı son yıllarda işbirlikli haberleşme alanında çalışmalar oldukça artmıştır.

Güç sınırlı ağlarda ağ içinde hangi terminal veya terminallerin röle olarak kullanılacağı ve toplam gücün kaynak ve röleler arasında nasıl paylaşılacağı belirlenmesi oldukça kritiktir. Bu yüzden röle seçimi konusunda çeşitli araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Bu amaçla öncü sayılabilecek çalışma Bletsas ve ark. tarafından [3]'de yapılmış ve röle seçiminin performans artırımına etkisi gösterilmiştir. Bu öncü çalışmadan sonra röle seçimi üzerine çalışmalar yoğunlaşmış ve farklı röle seçim yöntemleri ortaya atılmıştır [4, 7]. Bu çalışmaların hepsi de tek röle seçimi üzerine yapılmış çalışmalardır. Tek röle kullanımı ise bazı durumlarda iyi bir hata başarımı için yeterli olamamaktadır. Literatürde konuyla ilgili tek röle seçimi yerine mevcut tüm rölelerin kullanılmasına yönelik çalışmalar da mevcuttur. Fakat bu yaklaşımda da artan röle sayısının sistemin band verimi üzerine olumsuz etkisi olması kaçınılmazdır. Hata

başarım performansı - band verimi arasında iyi bir ödünleşim oluşturmak için en iyi yöntem ise çoğu zaman tek veya tüm röle kullanımı yerine çoklu röle kullanımıdır [8].



Şekil 1.1: Çok röleli bir işbirlikli haberleşme modeli.

Çoklu röle kullanımında ise tek röle kullanımına göre röle seçim problemi daha karmaşık bir hal almaktadır. Şu ana kadar bu konuda yapılmış çalışma ise oldukça kısıtlıdır [8, 10] . [8]'de çoklu röle seçimi için optimum çözüm önerilmesine rağmen röle sayısının artmasıyla işlem karmaşıklığı üssel olarak artmaktadır. Özellikle çok yüksek sayıda kullanıcıya sahip ağlarda bu yöntemin kullanılması oldukça zor görünmektedir. Buna bir çözüm olarak eşik temelli bir çoklu röle seçim yöntemi [9]'da önerilmiştir. Fakat bu çalışmada da mevcut gücün terminaller arasında eşit paylaşımı varsayılmakta, gücün optimum kullanılamamasından dolayı da daha çok röle seçilmekte ve dolayısıyla daha çok güç harcanmaktadır.

Bölüm 2'de tanımlar ve sistem modelleri açıklanmıştır. Tez kapsamında önerilen işaret-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) eşik tabanlı ve düşük karmaşıklıkla ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu sistemine yer verilmiştir. Röle seçimi eşik SNR değerine ulaşıncaya kadar uyarlamalı olarak yapılmış, ayrıca her bir röle seçim adımında seçilen röle sayısı ve seçilen röle kanallarına ait anlık çıkış SNR'ları göz

önünde bulundurularak mevcut gücün kaynak ve röleler arasında optimum dağıtılması sağlanmıştır.

Aynı zamanda, işbirlikli iletişim ağları için geliştirilen işbirlikli haberleşme ağlarında hata başarımını arttırıcı düşük işlem karmaşıklıklı ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu tekniği iki-yönlü işbirlikli ağlar için yeniden tasarlanmış ve iki-yönlü işbirlikli ağların hata performansı iyileştirilmiştir.

Bilişsel iletişim ağlarının performansını iyileştirmek için yeniden oluşturulan ve geliştirilen işbirlikli iletişim senaryosu altında röle seçimi ve güç optimizasyonu tekniğine yer verilmiştir.

İşbirlikli iletişim ve işbirlikli spektrum sezme yöntemleri için bir ortak röle seçim yöntemi de geliştirilerek, mümkün olduğu kadar az sayıda röle ve dolayısıyla düşük güç, tüketimi ile iyi bir hata başarımı elde edebilen ortak röle seçim sistemine yer verilmiştir.

Son olarak, işbirlikli uzaysal modülasyon kullanan kablosuz ağlar için tez kapsamında önerilen yeni bir işbirliği senaryosu ve röle seçim yöntemine yer verilmiştir. Sisteme uzay-zaman kodlaması da eklenerek sistemin çeşitleme kazancı ve hızı arttırılmıştır.

Bölüm 3’de röle seçim yöntemlerine ayrılmıştır. Bu bölümde ikinci bölümde açıklanan modeller kullanılarak röle seçimlerinin nasıl yapıldığı açıklanmıştır.

Bölüm 4’de, bilgisayar benzetimleri yardımıyla röle seçim yöntemlerinin başarımları sonuçları gösterilmiştir.

Bölüm 5’de, tez çalışmasının sonuçlarına ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

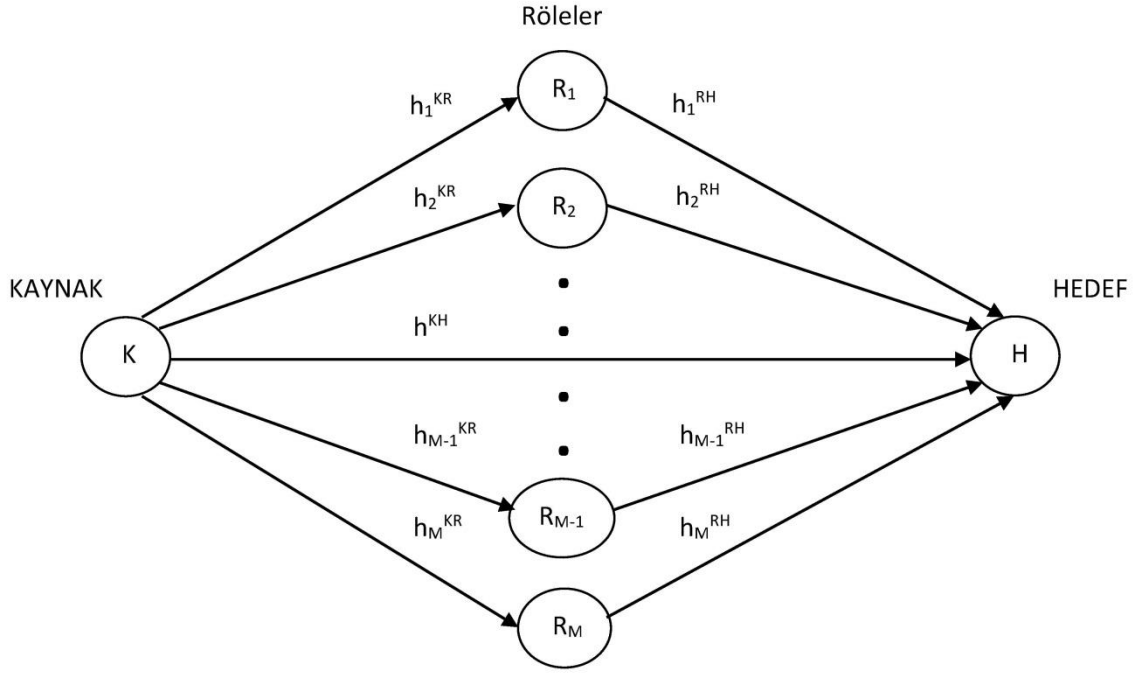
2.1. İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM AĞLARI

Literatürdeki işbirlikli iletişim ağlarında kullanılan röle seçim yöntemleri incelenmiş ve işbirlikli haberleşme ağlarında hata başarımlarını artırıcı düşük işlem karmaşıklıklı bir ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu tekniği geliştirilmiştir. Bu tekniğin çoklu röle seçmede işlem karmaşıklığı, optimum çözüm olan en iyi rölelerin seçilmesi tekniğine oranla oldukça düşük olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, röle seçimi eşik işaret/gürültü oranına ulaşmaya kadar yinelenmeli yapıldığından, her bir yinelemede güç optimizasyonu da yapılabilmektedir. Böylece, mümkün olduğu kadar az sayıda röle ve dolayısıyla düşük güç tüketimi ile iyi bir hata başarımları elde edilmiştir.

Geliştirilen işbirlikli iletişim ağlarında kullanılan işbirlikli haberleşme ağlarında hata başarımlarını artırıcı düşük işlem karmaşıklıklı ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu tekniği iki-yönlü işbirlikli ağların hata performansını iyileştirmek için tasarlanmıştır. Geliştirilen yöntem optimum çözüm olan en iyi röle seçim yöntemi ile karşılaştırıldığında çoklu röle seçim problemi için işlem karmaşıklığının iki-yönlü işbirlikli ağlarda düştüğü ve düşük güç tüketimi ile iyi bir hata başarımları elde edilebildiği görülmüştür.

2.1.1. Tek-Yönlü Çok-Röleli İşbirlikli Ağ Yapısı

Bu tez çalışmasında Şekil 2.1'de görüldüğü gibi olası M röle içinden N adet rölenin seçilerek kaynak terminale iletimde eşlik ettiği bir kuvvetlendir-ve-aktar tipi işbirlikli haberleşme sistemi gözönünde bulundurulmaktadır. Kaynak, Röleler ($R_1, R_2, \dots, R_M$) ve Hedef terminallerinin hepsinin yalnızca bir verici ve bir alıcı antene sahip olduğu varsayılmıştır. İşbirliği protokolü olarak ise ilk olarak [11]'de önerilen "alıcı çeşitlemesi protokolü" gözönüne alınmıştır. Söz konusu bu protoköde birinci evrede kaynak iletmek istediği bilgiyi hem rölelere hem de hedefe gönderir. İkinci evrede ise kaynak sessiz kalır ve sadece röleler kaynaktan aldığı bilgiyi kuvvetlendirerek hedefe iletirler.



Şekil 2.1: Tek-yönlü çok röleli işbirlikli ağ yapısı.

İlk evrede kaynaktan k anında gönderilen işaret s olmak üzere i . rölede ve hedefte alınan işaretler sırasıyla;

$$r_i^{SR} = \sqrt{E_i^{SR}} h_i^{SR} s + n_i^{SR} \quad (2.1)$$

$$r^{SD} = \sqrt{E^{SD}} h^{SD} s + n^{SD} \quad (2.2)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada $i = 1, 2, \dots, N$ seçilen röle sayısını göstermektedir. $\sqrt{E_i^{SR}}$ ve $\sqrt{E^{SD}}$ söz konusu kanallardaki yol kayıpları ve gölgeleme etkilerini içerecek şekilde sırasıyla röle ve hedefteki işaret enerjilerini göstermektedir. h_i^{SR} ve h^{SD} sırasıyla $S \rightarrow R_i$ ve $S \rightarrow D$ kanalları için kompleks Gauss sönmüleme katsayılarını, n_i^{SR} ve n^{SD} ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks Gauss gürültüsünü belirtmek için kullanılmıştır.

Her bir röle kendisine ulaşan işareti $\sqrt{[|r_i^{SR}|]}$ terimi ile normalize ettikten sonra hedef alıcıya gönderir.

İkinci evrede hedef alıcıdaki işaret ise;

$$r_i^{RD} = \sqrt{E_i^{RD}} h_i^{RD} r_i^{SR} + n_i^{RD} \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada, $\sqrt{E_i^{RD}}$ R₁ -> D kanalındaki yol kaybı ve gölgeleme etkileri göz önünde bulundurularak hedefte alınan işaretin enerjisini, h_i^{RD} aynı kanala ilişkin kompleks sönümleme katsayılarını, n_i^{RD} ise sıfır ortalamalı ve boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks Gauss gürültüsünü göstermektedir.

2.1.2. İki-Yönlü Çok-Röleli İşbirlikli Ağ Yapısı

İki-yönlü işbirlikli haberleşme [13, 15] aynı zamanda çift yönlü işbirlikli haberleşme olarak da bilinmektedir ve kablosuz ağlarda etkili bir iletişim tekniği olarak sunulmaktadır. Son yıllarda bu yeni iletişim tekniği araştırmalarına ilgi artmıştır. İki-yönlü röle iletiminde iki kaynak terminal mesajlarını birbirlerine göndermek için diğer uygun terminalleri röle olarak kullanmaktadırlar. Böylece, uzamsal çeşitlilik kazancı her iki kaynak terminalde de artmaktadır. Sonuç olarak direk iletim ile karşılaştırıldığında iletişim performansındaki artış bağlantı güvenilirliğini, spektral etkiyi ve iletim hızını arttırabilecektir. Son zamanlarda iki-yönlü işbirlikli iletim tekniklerine olan ilgi yukarıda açıklanan avantajları nedeniyle artmaktadır.

Bir önceki bölümde güç sınırlı ağlarda ağ içinde hangi terminal veya terminallerin röle olarak kullanılacağı ve toplam gücün kaynak ve röle(ler) arasında nasıl paylaşılacağı belirlenmesinin kritik bir konu olduğu, bu nedenle tek yönlü işbirlikli iletişim sistemlerinde röle seçimi konusunda çeşitli araştırmaların incelendiğinden bahsedilmişti. Bu çalışmalara öncü sayılabilecek çalışma Bletsas ve ark. tarafından [3]'te yapılmış ve röle seçiminin performans artırımına etkisi gösterilmiştir. Bu öncü çalışmadan sonra röle seçimi üzerine çalışmalar yoğunlaşmış ve farklı röle seçim yöntemleri ortaya atılmıştır [4, 7].

Fakat iki-yönlü işbirlikli ağlarda röle seçimi üzerine yapılmış çok az sayıda çalışma vardır. [16]'da iki-yönlü işbirlikli iletişim ağları için bir röle seçim tekniği sunulmuştur. Bahsedilen yöntem tek-yönlü işbirlikli ağlarda en iyi röle seçim yaklaşımının genişletilmiş bir kullanım tekniği olarak görülebilir. En iyi röle seçim tekniğinde kaynaklar ağdaki terminallerden her iki yön içinde ayrı ayrı en iyi sinyal gürültü oranına

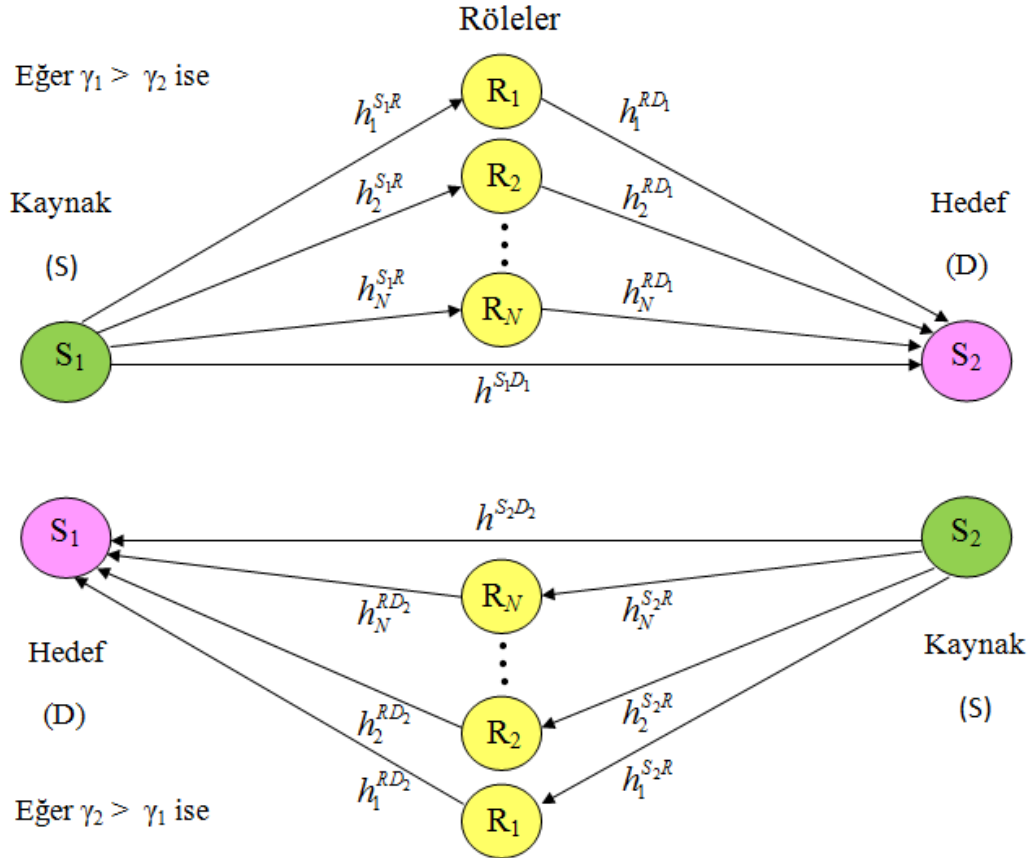
sahip bir röleyi seçmektedir. Daha sonra seçilen rölelerden yüksek işaret gürültü oranına sahip röle üzerinden kaynak diğer kaynağa iletim yapar.

Bazı durumlarda tek röle kullanmak iyi bir hata başarımı elde edebilmek için yeterli olamamaktadır. Tek röle seçimi yerine ağdaki tüm rölelerin kullanılması ile ilgili literatürde çalışmalar vardır. Ne yazık ki bu yaklaşımda röle sayısı artmakta ve böylece sistemin band verimini de olumsuz etkilenmektedir. Çoğu zaman tek röle kullanımı veya tüm rölelerin kullanımı yerine çoklu röle kullanımı hata başarımı - band verimi arasında iyi bir ödünleşim oluşturmak için en iyi yöntemdir [8]. Tek röle kullanımına göre çoklu röle kullanımında röle seçim problemi daha karmaşık bir hal alır. Literatürde tek-yönlü işbirlikli iletişim için çoklu röle seçim yöntemini kullanan sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır [8, 10]. Bir önceki bölümde tek-yönlü işbirlikli iletişim için çoklu röle seçim yöntemi sunulmuştur.

Bu bölümde, bir önceki bölümde tek-yönlü röle ağları için yapılan çalışmanın genişletilmiş bir hali olarak iki-yönlü işbirlikli iletişim için bir ortak çoklu röle seçim ve güç optimizasyon yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan yöntem işaret-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) eşik tabanlı ve en iyi röle seçim yöntemi ile karşılaştırıldığında düşük karmaşıklığa sahip bir yöntemdir. Röle seçimi eşik SNR değerine ulaşmaya kadar her iki kaynak içinde uyarlamalı olarak yapılmaktadır. Ayrıca her bir röle seçim adımında seçilen röle sayısı ve seçilen röle kanallarına ait anlık çıkış SNR'ları göz önünde bulundurularak mevcut gücün kaynak ve röleler arasında optimum dağıtılması sağlanmaktadır. Bu yaklaşım özellikle fazla sayıda röle adayının bulunduğu iki-yönlü işbirlikli ağlarda çoklu röle seçimini düşük hesap karmaşıklığı ile mümkün kılmaktadır. Aynı zamanda her adımda güç optimizasyonu yapılarak daha az sayıda röle ile daha iyi bir hata başarımı elde edilmiştir. Yapılan çalışmanın avantajları bilgisayar benzetimleri yardımıyla gösterilmiştir.

İki-yönlü işbirlikli iletişim yapısında Şekil 2.2'de görüldüğü gibi iki kaynak/hedef terminalleri ve M röle terminallerinden oluşan bir iki-yönlü kuvvetlendir ve aktar (AF) işbirlikli iletişim ağı göz önünde bulundurulmuştur. Amaç iki kaynaktan hangisinin iletim yapacağını belirlenmesi ve seçilen kaynak için mevcut M adet röleden N adet rölenin belirli bir eşik SNR yardımıyla belirlenmesini sağlamaktır. Kaynak/Hedef terminaller (S_1/D_2 , S_2/D_1) ve röle ($R_1, R_2, \dots, R_M$) terminallerinin hepsinin yalnızca bir

verici ve bir alıcı antene sahip olduğu varsayılmıştır. İşbirliği protokolü olarak ise [11]'da önerilen "alıcı çeşitlemesi protokolü" gözönüne alınmıştır. Bu protokole göre birinci evrede kaynak iletmek istediği bilgiyi hem rölelere hem de hedefe gönderir. Daha sonra ikinci evrede ise kaynak sessiz kalır ve sadece röleler kaynaktan aldığı bilgiyi kuvvetlendirerek hedefe iletirler.



Şekil 2.2: İki-yönlü çok-röleli işbirlikli ağ yapısı.

İlk evrede seçilen bir kaynaktan iletilen işaret s olsun, i . rölede alınan işaret ve hedefte (D) alınan işaretler sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$r_i^{SR} = \sqrt{E_i^{SR}} h_i^{SR} s + n_i^{SR} \quad (2.4)$$

$$r^{SD} = \sqrt{E^{SD}} h^{SD} s + n^{SD} \quad (2.5)$$

Burada $i = 1, 2, \dots, N$ seçilen röle sayısını göstermektedir. $\sqrt{E_i^{SR}}$ ve $\sqrt{E^{SD}}$ kanallardaki yol kayıpları ve gölgeleme etkilerini içerecek şekilde sırasıyla röle ve hedefteki işaret

enerjilerini göstermektedir. h_i^{SR} ve h_i^{SD} sırasıyla S $\rightarrow$ R_i ve S $\rightarrow$ D kanalları için kompleks Gauss sönümleme katsayılarını, n_i^{SR} ve n_i^{SD} ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks Gauss gürültüsünü belirtmek için kullanılmıştır.

Her bir röle kendisine ulaşan işareti $\sqrt{E[|r_i^{SR}|^2]}$ terimi ile normalize ettikten sonra ikinci evrede hedef alıcıya gönderir. Hedef alıcıdaki işaret ise aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$r_i^{RD} = \sqrt{E_i^{RD}} h_i^{RD} \frac{r_i^{SR}}{\sqrt{E[|r_i^{SR}|^2]}} + n_i^{RD} \quad (2.6)$$

Burada, $\sqrt{E_i^{RD}}$ R_i $\rightarrow$ D kanalındaki yol kaybı ve gölgeleme etkileri göz önünde bulundurularak hedefte alınan işaretin enerjisini göstermektedir. h_i^{RD} aynı kanala ilişkin kompleks sönümleme katsayılarını, n_i^{RD} ise sıfır ortalamalı ve boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks Gauss gürültüsünü göstermektedir.

2.2. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA İŞBİRLİKLİ İLETİM

Kablosuz spektrum kaynaklarının kullanımını arttırmak için bilişsel radyo önerilen ve gelişmekte olan bir teknolojidir [17]. Girişim ölçütü bilişsel radyonun uygulanması için kullanıcılar arasındaki girişimi belirleyen ve yöneten bir kriter olarak önerilmektedir [18]. İkincil kullanıcının birincil kullanıcı ile birlikte lisanslı spektrumunu kullanabilmesi için ikincil kullanıcının birincil kullanıcıya olan girişiminin belli bir eşik değerin altında olması gerekir. Bu durumda birincil iletimlerin hizmet kalitesi (Quality of Service, QoS) etkilenmeyecektir [18]. Fakat birincil kullanıcıda yüksek QoS elde etmek için ikincil kullanıcının çok düşük iletim güç seviyesine izin verilmesi gerekecektir. Bu durum doğal olarak ikincil kullanıcı veriminin sınırlandırılmasına neden olacaktır. Dolayısı ile bilişsel ağlarda kabul edilebilir bir ikincil kullanıcı iletişim performansını sağlayabilmek için, gelişmiş iletim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Sönümlemeli kanallarda sistem verimini arttırmak için işbirlikli iletişim önerilmiş yeni bir iletim tekniğidir [11]. İşbirlikli iletişim yapısında ağ içinde hangi terminalin röle olarak kullanılacağı ve toplam gücün kaynak ve röle arasında nasıl paylaşılacağı belirlenmesi önemli bir problemidir. Bu nedenle röle seçimi ve güç optimizasyonu konusunda çeşitli araştırmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir. Röle seçimi

ve güç optimizasyonun da öncü bir çalışma [3]'de sunulmuştur. Bu çalışmada röle seçiminin sistem performansına etkisi gösterilmiştir. Son zamanlarda röle seçimi konusunda yapılan çalışmaların sayısı artmış ve farklı röle seçim yöntemleri önerilmiştir [7].

Bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcıdan birincil kullanıcıya olan girişim kısıtlamaları nedeniyle röle seçim problemi klasik işbirlikli iletişim sistemlerine kıyasla daha karmaşık hale gelebilmektedir. Bazı yeni çalışmalarda, bilişsel radyo sistemleri için girişim kısıtlarının dikkate alındığı tek röleli işbirlikli iletişim yapısı önerilmiştir [19].

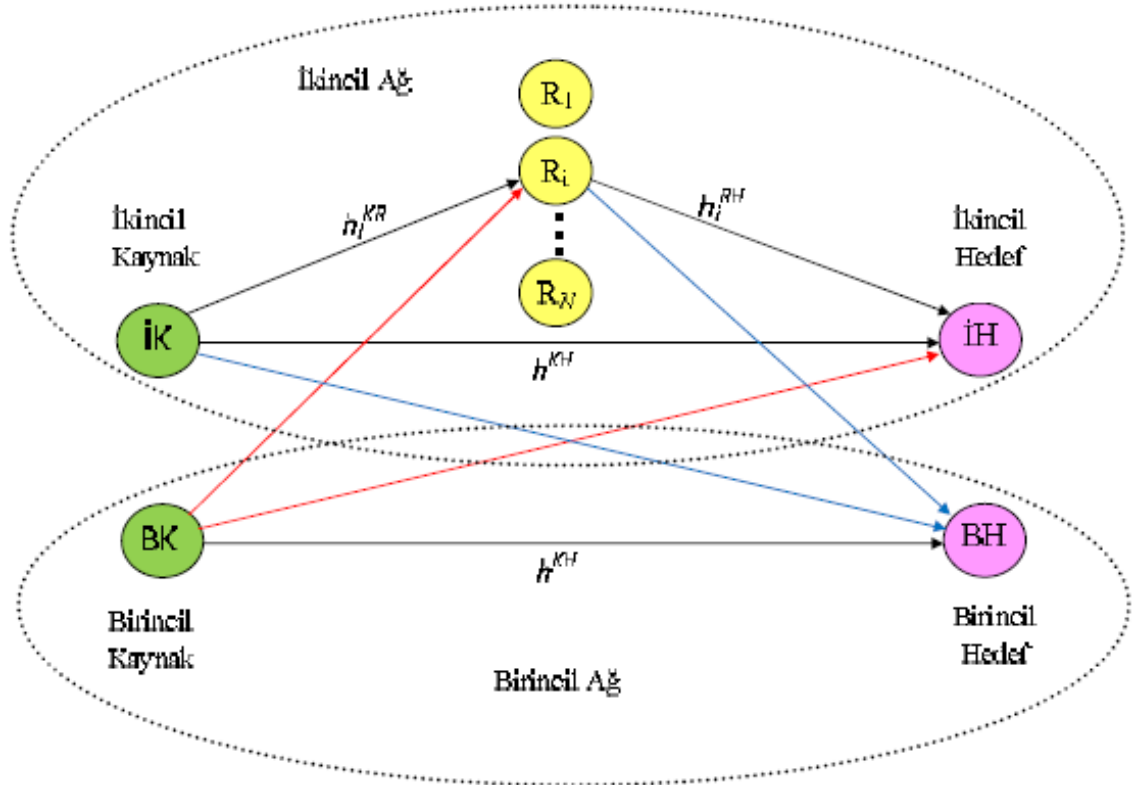
İlk bölümde, birincil kullanıcıya olan girişim kısıtlarını dikkate alarak iyi bir ikincil kullanıcı iletişimi yapılabilmesi için işbirlikli iletişim yapısı oluşturulmuş ve işbirlikli iletişimde röle seçim yöntemlerinden en iyi röle seçim yöntemi ile rastgele tek bir röle seçim yönteminin hata başarımları elde edilerek karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda her iki yöntemde de ideal güç dağılımını sağlamak için, güç optimizasyonu da yapılarak daha iyi bir hata başarımları elde edilmesi sağlanmış, sonuçlar bilgisayar benzetimleri yardımıyla gösterilmiştir.

Tek bir röle üzerinden iletim bazı haberleşme sistemlerinde yeterli hata başarımları sağlayamamaktadır. Literatürde ağdaki tüm terminalleri kullanan yöntemler sunulmuş, fakat bunlar da bant genişliğinin etkisini negatif etkilemektedir. Tek bir röle üzerinden iletim yapmak veya tüm röleleri kullanarak iletim yapmaktansa, hata başarımları ile bant verimini sağlayacak çoklu röle seçim yöntemiyle sorun aşılabılır [8]. Çoklu röle seçimi, tek bir röle seçiminden daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Çoklu röle seçimi yöntemiyle ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma mevcuttur [8, 10]. Aynı zamanda bilişsel radyo sistemleri içinde çoklu röle seçimi ile ilgili de çalışmalar vardır [25, 27]. [20]'de ki çalışmada çoklu röleli bilişsel radyo ağları için bir en iyi röle seçim yöntemiyle uyarlanabilir işbirlikli iletişim tekniği önerilmektedir.

Son bölümde, bilişsel radyo ağları için birleşik çoklu röle seçimiyle güç optimizasyonlu bir uyarlanabilir işbirlikli çeşitleme yapısı oluşturulmuştur. Amaç, bilişsel kullanıcıların birincil kullanıcılara girişimlerinin önüne geçmektir [20, 9]. Tasarlanan röle seçim metodu eşik SNR tabanlı olup, en iyi röle seçim yöntemiyle karşılaştırıldığında daha

düşük hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Röle seçim işlemi belirli bir eşik SNR değerine ulaşıncaya kadar uyarlanır bir şekilde devam etmektedir. Aynı zamanda röle seçim işleminin her bir adımında var olan güç, seçilen röle sayısı ve bu kanallardaki anlık SNR değerleri göz önünde tutularak hem kaynak hem de rölelere en uygun şekilde dağıtılmaktadır. Tasarlanan yapı çoklu röle seçimi için bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcı iletimlerinde potansiyel röle durumları ile düşük hesaplama karmaşıklığı sunmaktadır. Aynı zamanda, her bir adımda güç optimizasyonu yapılarak en az sayıda röle ile hata başarımının elde edilmesi sağlanmıştır. Geliştirilen yöntemin bu temel özellikleri bilgisayar benzetimleri yardımıyla gösterilmiştir.

2.2.1. Bilişsel Radyo Ağı



Şekil 2.3: Bilişsel radyo ağı.

Bu bölümde Şekil 2.3'de görülen birincil ağ ve olası N röle içinden bir röle seçilerek ikincil kaynak terminale iletimde eşlik ettiği bir kuvvetlendir-ve-aktar tipi işbirlikli iletişim ikincil ağı birlikte gözönüne alınmaktadır. Bu sistemde birincil ve ikincil kullanıcılar aynı anda iletim yapmaktadır. Birincil kullanıcı kaynağı bir birincil hedefe

(BH) veri gönderirken, ikincil kullanıcı kaynağı da (İK) bir ikincil hedefe (İH) veri göndermektedir. Kaynaklar (BK, İK), hedefler (BH, İH) ve röle ($R_1, R_2, \dots, R_N$) terminallerinin hepsinin yalnızca bir verici ve bir alıcı antene sahip olduğu varsayılmıştır.

İşbirliği protokolü olarak [20]'de önerilen "alıcı çeşitlemesi protokolü" gözönüne alınmıştır. Birinci evrede ikincil kaynak iletmek istediği bilgiyi hem röleye hem de ikincil hedefe göndermekte, ikinci evrede ise ikincil kaynak sessiz kalmakta ve röle aldığı bilgiyi kuvvetlendirerek hedefe iletmektedir. Birincil iletimlerin istenilen hizmet kalitesini korumak ve birincil hedefe olan girişimleri azaltmak amacıyla ikincil kaynağın ve rölenin iletim gücü sınırlanmıştır.

BK'nın x_b işaretini BH'e P_{BK} gücü ve R_b veri oranı ile ilettiği sırada İK da x_i işaretini İH'e $P_{İK}$ gücü ile iletmektedir. Bu çalışmada, birincil iletimin kayıp olasılığı $P_{eşik}$ eşik değerinin altında tutulmakta ve böylece birincil iletimlerin hizmet kalitesinin düşürülmeyeceği garanti edilmektedir. İK'nın $P_{İK}$ gücünü ve rölenin iletim gücü $P_{İR}$ 'yi kontrol etmek için aşağıdaki gibi durağan bir yöntem uygulanmıştır [20]:

$$P_{İK} = \frac{\sigma_{BK-BH}^2 P_{BK}}{\sigma_{İK-BH}^2 \Theta} \rho^+ \quad (2.7)$$

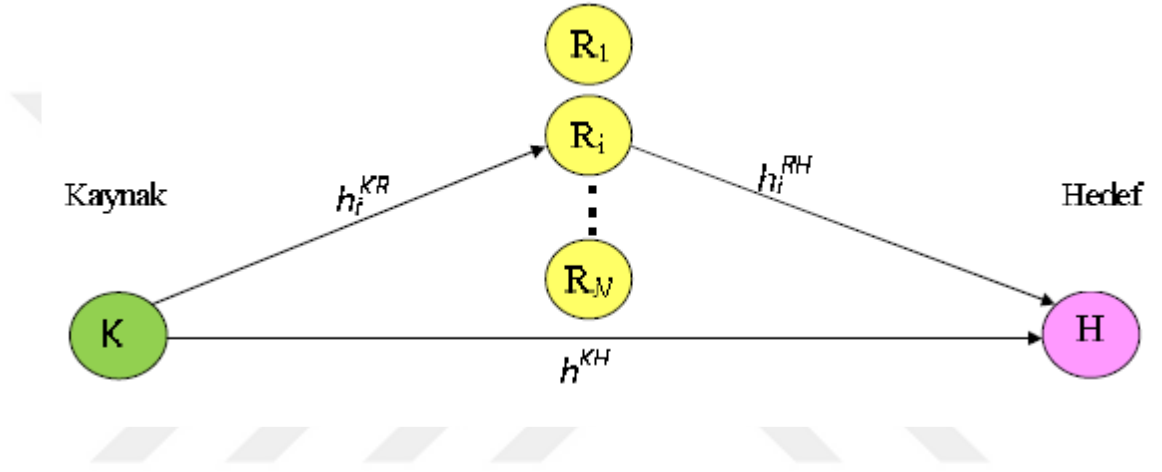
$$P_{İR_i} = \frac{\sigma_{BK-BH}^2 P_{BK}}{\sigma_{İR_i-BH}^2 \Theta} \rho^+ \quad (2.8)$$

Burada σ_{BK-BH}^2 , $\sigma_{İK-BH}^2$ ve $\sigma_{İR_i-BH}^2$ kanalların sırasıyla BK'tan BH'e ve İK'dan BH'e olan zayıflama değişimleridir. γ^{BK} BK'daki sinyal-gürültü oranı, $\Theta = 2_b^R - 1$, $\rho^+ = \max(\rho, 0)$ ve $\rho = (1 / (1 - P_{Esik})) \exp(-(\Theta / \sigma_{BK-BH}^2 \gamma^{BK}) - 1)$. İlk evrede röle ve İH'de alınan işaretler sırasıyla aşağıdaki gibi verilebilir:

$$r_{İR_i} = \sqrt{P_{İK}} h_{İK-İR_i} x_i + \sqrt{P_{BK}} h_{BK-İR_i} x_b + n_{İR_i} \quad (2.9)$$

$$r_{İH} = \sqrt{P_{İK}} h_{İK-İH} x_i + \sqrt{P_{BK}} h_{BK-İH} x_b + n_{İH} \quad (2.10)$$

Burada $i=1,2,...,N$ seçilen röleyi, $\sqrt{P_{IK}}$ ve $\sqrt{P_{BK}}$ söz konusu kanallardaki yol kayıpları ve gölgeleme etkilerini içerecek şekilde sırasıyla röle ve ikincil hedefteki işaret enerjilerini göstermektedir. h_{IK-IR_i} , h_{BK-IR_i} , h_{IK-IH} ve h_{BK-IH} katsayıları IK ve BK için sırasıyla $K \rightarrow R_i$ ve $K \rightarrow IH$ kanalları için karmaşık Gauss sönümleme katsayılarını, n_{IR_i} ve n_{IH} ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı karmaşık Gauss gürültüsünü belirtmektedir.



Şekil 2.4: İşbirlikli iletişim ağı.

Röle kendisine ulaşan işareti $\sqrt{E[|r_{IR_i}|^2]}$ terimi ile normalize ettikten sonra ikinci evrede hedef alıcıya göndermekte olup, ikinci evrede hedef alıcıya ulaşan işaret;

$$r_{RH_i} = \sqrt{P_{IR_i}} h_{IK-RH_i} \frac{r_{IR_i}}{\sqrt{E[|r_{IR_i}|^2]}} + n_{RH_i} \quad (2.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\sqrt{P_{IR_i}}$ enerjisi $R_i \rightarrow IH$ kanalındaki yol kaybı ve gölgeleme etkileri göz önünde bulundurularak hedefte alınan işaretin enerjisini, h_{IK-RH_i} aynı kanala ilişkin karmaşık Gauss sönümleme katsayılarını, n_{RH_i} ise sıfır ortalamalı ve boyut başına $N_0/2$ varyanslı karmaşık Gauss gürültüsünü göstermektedir.

Ayrıca, bilişsel radyo ağının içerisinde yer alan işbirlikli iletişim ağı birincil iletimlerin olmadığı bir senaryo olarak Şekil 2.4'de görülen tek bir ağ olarak düşünülmüş ve hata başarımları karşılaştırma amacıyla elde edilmiştir. Şekil 2.3'deki ikincil ağ Şekil 2.4'de olduğu gibi ayrı bir şekilde düşünüldüğünde ikincil kaynağın ve rölenin iletim güçleri

sınırlanmamış olacaktır. İlk evrede röle ve ikincil hedefte alınan işaretler sırasıyla aşağıdaki gibi verilebilir:

$$r_{iR_i} = \sqrt{P_K} h_{iK-iR_i} x_i + n_{iR_i} \quad (2.12)$$

$$r_{iH} = \sqrt{P_K} h_{iK-iH} x_i + n_{iH} \quad (2.13)$$

Burada P_K ikincil kaynağın ve rölenin iletim gücünü göstermektedir. İkinci evrede hedef alıcıya ulaşan işaret (2.11) eşitliğinde verildiği şekilde yazılabilir.

Birincil iletimlerin etkisi olmayan Şekil 2.4'deki işbirlikli iletişim ağının hata başarımı, bilişsel iletişim ağının hata başarımının karşılaştırılmasında kullanılmıştır. Böylece bilişsel iletişim ağındaki birincil iletimlerin ikincil iletim kaynağına ve röleye olan iletim gücü sınırlamasının hata başarımlarına olan etkisi görülmüştür.

2.2.2. Bilişsel Radyo Ağlarında İşbirlikli Spektrum Sezme

Radyo spektrumunun uygunluğunu sezme bilişsel radyo ağlarının önemli bir bileşenidir. Spektrum sezme, radyo spektrumunun lisanslı fakat kullanılmayan frekans bantlarını tespit ederek frekans spektrumunun verimliliğini artırır. İkincil kullanıcılar, birincil kullanıcıların bu kullanılmayan frekans bantları üzerinden iletişim kurabilirler. Yakın zamanda spektrum sezme ile ilgili farklı çalışmalar sunulmuştur [24]. Literatürde enerji tabanlı spektrum sezme teknikleri, yüksek seviye istatistik temelli yöntemler ve döngüsel durağanlık tabanlı yöntemler vardır [28, 29]. Spektrum sezme de sezme süresi, spektrumu doğru sezmek kadar önemlidir. Düşük hesaplama karmaşıklığına sahip olmaları sebebiyle enerji temelli spektrum sezme teknikleri en çok tercih edilen yöntemlerdendir.

Spektrum sezme tekniğinin hesaplama yükü sezme süresini etkilemektedir. Bundan dolayı, dalgacık dönüşümünü kullanan enerji temelli spektrum sezme teknikleri diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha avantajlıdır. Dalgacık dönüşümü temelli yöntem N-örnekli uzun dizi için N [10] sıralı hesaplama karmaşıklığına sahiptir, oysaki hızlı fourier dönüşüm temelli teknik sıralı $N(\log_2 N)$ hesaplama karmaşıklığına sahiptir. Bu nedenle, dalgacık dönüşümü temelli spektrum sezme geniş bir şekilde uygulanmıştır [30, 31]. Bir röle yardımıyla spektrum sezme başarımının arttırılabileceği son çalışmalarda görülmüştür [32]. İletim için işbirliğine benzer şekilde ağdaki bir röle hem

ikincil kullanıcı için spektrum sezme için hem de ikincil kullanıcı için sonuçları iletebilir. Daha sonra, ikincil kullanıcı bu sonuçları bir yazılım veya donanım karar yöntemini kullanarak birleştirir ve son sonuçlar elde edilir.

İlk bölümde, bilişsel radyo ağlarında hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için seçim işleminin hesaplama yükünü azaltmayı hedefleyen bir optimum röle seçim yöntemi tasarlanmıştır. Dolayısıyla optimum bir röle her iki işlem içinde sadece tek bir seçim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Enerji temelli spektrum sezme algoritmasında, dalgacık dönüşümü düşük hesaplama yüküne sahip olması sebebiyle kullanılmıştır. Geliştirilen yöntemin iletim ve sezme başarımları bilgisayar benzetimleri yardımıyla verilmiştir. Sonuçlar hem işbirlikli spektrum sezme hem de iletim işlemi için tasarlanan yöntemin yeterli başarıma sahip olduğunu göstermiştir.

Daha sonra, bilinmeyen ve değişen gürültü seviyesi veya belirsizliğine karşı daha dayanıklı olan döngüsel durağanlığa dayanan spektrum sezme üzerine çalışmalar yapılmıştır [28, 35]. Spektrum sezme veriminin ağ içindeki diğer kullanıcılarla işbirliği yapılarak artırılabilmesi yapılan çalışmalarda gösterilmiştir [33]. İşbirlikli iletimde olduğu gibi bir röle yardımıyla spektrumun algılanmasında da röle kullanılarak sonuç bir yazılım veya donanım yardımıyla tespit edilebilmektedir.

İkinci bölümde ise, bilişsel ağlar için hem spektrumun algılanmasında daha kararlı ve sezme hesaplama yükünü azaltacak hem de ikincil kullanıcı iletim performansını arttıracak işbirlikli sezme ve işbirlikli iletim için birleşik en iyi röle seçimi önerilmektedir. Önerilen yöntem göre hem iletim hem de sezme için tek bir seçim algoritması kullanılmakta ve her iki problem göz önüne alınarak en iyi röle seçilmektedir. Önerilen yöntem için hem iletim hem de sezme performansları bilgisayar benzetimleri yardımıyla sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen yöntemin hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için uygun olduğunu göstermiştir.

Son bölümde ise bilişsel ağlarda, hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için geliştirilen optimum röle seçim yönteminin Rician kanallı bilişsel ağ modeli gerçekleştirilmiş ve Rayleigh sönümlemeli kanallı bilişsel ağ modeli ile karşılaştırılması yapılmıştır. İletim ve spektrum sezme için bir röle kullanarak işlem karmaşıklığını azaltmak amaçlanmıştır. Ayrıca, ağ içinde hem spektrum sezme hem de işbirlikli

iletişimi birlikte en uygun şekilde gerçekleştirebilecek birleşik röle seçim yöntemi de önerilmektedir. Önerilen yöntemin iletim için bit hata oranı performansı, spektrum sezme için de kestirim olasılığı ve kaçırma olasılığı bilgisayar benzetimleriyle elde edilmiş ve ilgili bölümde verilmiştir. Sonuçlar, önerilen birleşik röle seçim yönteminin hem iletim, hem de döngüsel durağanlık tabanlı spektrum sezme için iyi bir başarıma sahip olduğunu göstermiştir.

2.2.2.1. Enerji Temelli İşbirlikli Spektrum Sezme

Dalgacık katsayılarını veren ayrık çift dalgacık dönüşümü $x(n)$ kesik zamanlı bir işaret için aşağıda verilmiştir [34].

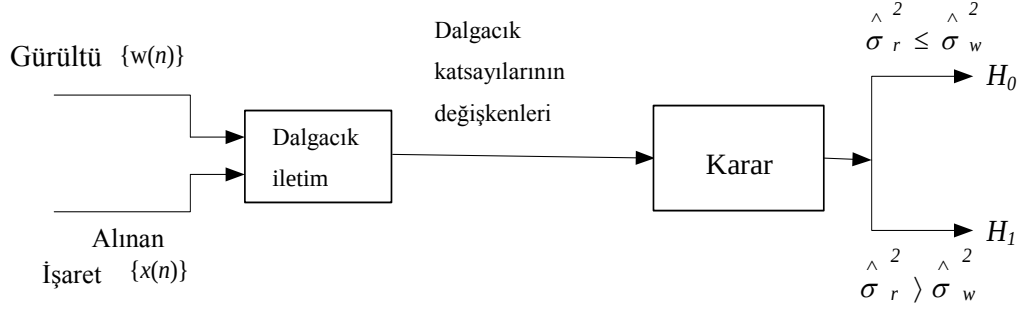
$$x_a^b = \sum_n x(n) \psi_a^b(n) \quad (2.14)$$

Burada $x(n)$ aşağıdaki gibi yazılabilir [34].

$$x(n) = \sum_{a=1}^M \sum_{b=1}^N x_a^b \psi_a^b(n) \quad (2.15)$$

$M = \log_2 N$, N veri uzunluğunu, a ve b sırasıyla genişleme ve çevrim indislerini gösterir. $\psi_a^b(n)$ ana dalgacık fonksiyonunun $\psi(n)$ normalize genişleme ve çevrimini gösterir. Filtrelerin başlangıç kesim frekansı $\pi/2$ 'dir ve istenilen sonuca ulaşmaya kadar her bir adımda 2'ye bölünmektedir. Simülasyonlarda 6 seviyeli dalgacık analizi kullanılmıştır.

Şekil 2.5'de görülen enerji temelli spektrum sezme tekniği kullanılmıştır. Alınan işaretlerin enerjileri dalgacık dönüşümü ile hesaplanmıştır. Birincil kullanıcı her bir banttaki dalgacık katsayılarının toplam enerjilerinin hesaplanması ile bulunmakta ve farklı frekans bantlarındaki işaret enerjileri tespit edilmektedir. Birincil kullanıcı sessiz ise alınan işaret sadece gürültü sebebiyle düşük bir enerji içerir. Birincil kullanıcının iletim yapıp yapmadığını tespit etmemizi sağlayan bir eşik değeri deneysel olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.5: Spektrum sezme algoritması.

Burada $\hat{\sigma}_r^2$ ve $\hat{\sigma}_w^2$ alınan işaretin sırasıyla normalize değişimlerinin kestirimleridir ve her bir ölçek sadece gürültüdür. Dalgacık katsayılarının normalize değişimlerini hesaplayarak eşik değerini belirledik ve sadece gürültü olduğu durumda -1 ile -10 dB arasındaki her bir SNR için $\hat{\sigma}_w^2$ değerini kestirdik. Daha sonra alınan işaretin dalgacık katsayılarını hesapladık ve $\hat{\sigma}_r^2$ dalgacık katsayılarının normalize değişimlerini hesapladık. Son olarak $\hat{\sigma}_r^2$ ve $\hat{\sigma}_w^2$ 'i karşılaştırarak: $\hat{\sigma}_r^2$, $\hat{\sigma}_w^2$ 'dan büyük olduğu zaman birincil kullanıcının frekans bandında iletim yaptığına karar verdik.

İşbirlikli spektrum sezme yaklaşımında, hem ikincil kaynak hem de R_i seçilen rölede dalgacık katsayılarının normalize değişimleri hesaplanmıştır. Dalgacık katsayılarının normalize değişimlerinin hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\hat{\sigma}_r^2 = \frac{|h_{BK-İK}| \hat{\sigma}_{BK-İK}^2 + |h_{BK-İR_i}| \hat{\sigma}_{BK-İR_i}^2}{|h_{BK-İK}| + |h_{BK-İR_i}|} \quad (2.16)$$

burada $\hat{\sigma}_{PT-ST}^2$ ikincil kaynak için dalgacık katsayısının normalize değişimidir. $\hat{\sigma}_{PT-SR_i}^2$, $İR_i$ için dalgacık katsayısının normalize değişimini göstermektedir.

Sonraki bölümde önerilen yöntemin bilgisayar benzetimleri yardımıyla P_d bulunma olasılığı verilmiştir.

$$P_d = P_r(M > \lambda_E | H_1) \quad (2.17)$$

burada, M alınan işaretten elde edilen dalgacık katsayılarının normalize değişimini göstermektedir. λ_E Monte Carlo denemeleri yardımıyla gürültünün normalize

değişimlerinden hesaplanan eşik değerini gösterir. H_1 birincil kullanıcının alınan işarete var olduğu durumdur.

2.2.2.2. İşbirlikli Döngüsel Durağanlığa Dayanan Spektrum Sezme

Bir özellik sezicisi, bir işareti tespit etmek amacıyla işaretin tespit edilebilir bazı özelliklerinin bilinmesi temeline dayanmaktadır. Bu nedenle öznitelik sezicileri, özellikleri tanımlamaya odaklanan işaret işleme yöntemleridir. Durağan işaret süreci, istatistikleri zamanda değişmeyen rastgele bir süreçtir. Böyle bir durumda işaretin ortalama değeri bazı döngüsel davranışlara sahiptir. Dolayısıyla hesaplanan döngüye bağlı olarak farklı ortalama değer görülebilir. Bir işaretin durağan karakteristiklerini görmek için frekans domeninde işareti incelediğimizde istatistiklerin çevrimsel davranışları sebebiyle işaretteki döngüsellikleri noktalanabilir. Spektral kolerasyon fonksiyonu bu noktalamayı yapmak için oluşturulmuştur. Böylece işaret hakkında diğer sezme yöntemlerine göre daha fazla bilgi alınabilmektedir.

Durağanlık, karesel zamanla değişmeyen spektral çizgi üretimini sağlayan özellikler olarak tanımlanır ve döngüsel oto korelasyon fonksiyonu ile karakterize edilmektedir. $R_x^\alpha(\tau)$ döngüsel otokorelasyonun fourier dönüşümünden spektral korelasyon yoğunluğu:

$$S_x^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x^\alpha(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (2.18)$$

olarak elde edilir[18]. Sezici algoritması frekans bandının birincil kullanıcı tarafından kullanılmakta olup olmadığını tespit etmek için aşağıdaki işlemleri sırasıyla gerçekleştirmektedir.

1. $(\alpha = 0, f = \pm f_c)$ ve $(\alpha = \pm 2f_c, f = 0)$ frekanslarındaki dört tepeden en yüksek genliğe sahip olan belirlenmektedir.
2. Buna göre sezici θ 'yı önceden belirlenen eşik değer λ ve $(\alpha = 0, f = 0)$ frekanslarındaki diğer genlik değerleri ile karşılaştırmaktadır.

Eğer θ hem λ 'dan, hem de $\{S_x^\alpha(f=0), S_x^{\alpha=0}(f)\}$ 'dan büyükse; sezici ilgili frekans bandının dolu olduğunu ve ana kullanıcı tarafından kullanıldığını tespit etmiş olmaktadır. Aksi takdirde frekans bandının boş olduğu kabul edilmektedir.

2.3. İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME SİSTEMLERİ İÇİN UZAYSAL MODÜLASYON

Uzaysal Modülasyon (Spatial Modulation, SM) çoklu antenlerle bilgi iletimi temeline dayanan, yeni ve gelişmekte olan bir iletim tekniğidir [39]. Uzaysal modülasyon tekniğinde bilgi iletimi için genlik veya faz ile birlikte anten indisleri de bilgi aktarımında kullanılmakta ve dolayısıyla sistemin band verimi arttırılmaktadır. Verici tarafından gönderilen bilgi, alıcıya ulaştığında sezici tarafından bu anten indisleri de dikkate alınarak işaretin çözülmesi kararı verilmektedir [40].

Uzaysal modülasyon doğası gereği kanal koşullarına göre hassasiyet gösterebilmektedir. Uzaysal modülasyonun kanal koşullarından yüksek oranda etkilenmesini önlemek için literatürde işbirlikli çeşitleme yapısını kullanan modeller sunulmuştur [42, 47].

Uzaysal modülasyon işbirlikli haberleşme ağlarına uygulandığında, işbirlikli haberleşme ağlarında iletilen semboller yerine terminal bilgisi olarak röle indisleri kullanılmaktadır. [41]'de önerilen yöntemde direk iletim ve iki röle kullanılarak işbirlikli ağ modeli oluşturulmuştur.

Literatürde bilinen çalışmalarda yöntemler incelenerek eksikliklerinin giderildiği bir Çöz ve Aktar (Detect and forward, DF) röle tabanlı işbirlikli uzaysal modülasyon mimarisi [53]'deki çalışmada sunulmuştur. Bu çalışma incelendiğinde uzaysal modülasyonun kaynak noktası ve iletilen bilgi bitlerinden oluşan iki farklı kümeye ayrıldığı görülmektedir. Bu kümeler: anten indisleri olarak iletilen bitler ve genlik-faz modülasyonu birleşimidir. Bu da röle bitlerinde esneklik sağlamaktadır [53]. Bununla birlikte bu çalışmada sadece iki röle baz alınarak 2-PSK (Phase Shift Keying) işbirlikli iletişim modeli oluşturulduğu görülmüştür. Diğer yandan, işbirlikli haberleşmede ağda bulunan birçok röle arasından en uygun röle/rölelerin seçilmesi ve iletişimin bu röle/röleler üzerinden sağlanmasının sistemin verimini arttırdığı literatürde bilinmektedir.

Bu çerçevede, ilk bölümünde en iyi röle seçiminin sistem verimine etkisini göstermek amacıyla, [53]'de sunulan modele benzer şekilde iki röle kümesi oluşturularak, bu röle kümelerindeki iletim için en iyi rölenin seçimi yapılmıştır. Dolayısıyla uzaysal modülasyon kullanılarak, işbirlikli iletişim en iyi röle seçim yöntemiyle seçilen bu iki röle üzerinden iletişim gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın sonraki aşamasında ise işbirlikli haberleşme senaryosunda kaynak-hedef arasındaki direk iletim ortadan kaldırılarak, sistemin sadece röleler kullanılarak iletim gerçekleştirme başarımı incelenmiştir.

Çalışmanın bir sonraki adımında ise senaryo geliştirilerek direk iletim olmadan QPSK (quadrature phase-shift keying) işbirlikli iletişimi gerçekleştirebilmesi için 4 röle kullanan bir senaryo önerilmiştir.

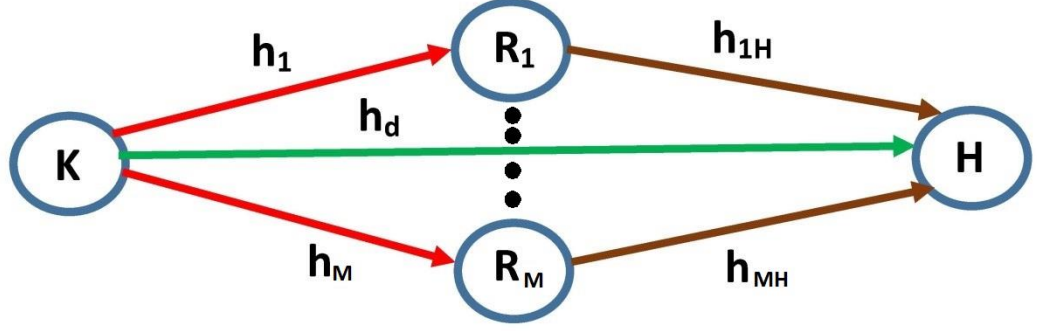
Çalışmanın son bölümünde ise 4 ayrı terminal kümesi içerisinde 4 en iyi rölenin seçimi yapılarak QPSK işbirlikli iletişim performansının arttığı gösterilmiştir.

Kablosuz ağlar için işbirlikli uzaysal modülasyon sistem modeli dört farklı senaryo üzerinden örneklendirilmiştir.

Bunlar:

1. 2-PSK iki röleli sistem,
2. 2-PSK işbirlikli iletişim modelinde kaynak hedef arasındaki direk iletimin olmadığı sistem senaryosu,
3. QPSK dört röleli sistem,
4. QPSK işbirlikli iletişimde çoklu küme içinde röle seçimi senaryosu.

Öncelikle sistemde kullanılan uzaysal modülasyon tekniği aşağıda kısaca sunulacak, daha sonra önerilen röle seçim senaryoları üçüncü bölümde verilecektir.



Şekil 2.6: İşbirlikli uzaysal modülasyon sistem yapısı.

İşbirlikli uzaysal modülasyon sistem yapısı Şekil 2.6'da görüldüğü üzere kaynak (K), röleler $(R_1, R_2, \dots, R_M)$ ve hedef (H) olarak düşünülmüştür. İletim iki evrede gerçekleşmektedir. Birinci evrede kaynak iletmek istediği bilgiyi hem rölelere hem de hedefe göndermekte ve röleler aldıkları bilgiyi en büyük olabilirlik (Maximum a Posteriori Probability, MAP) kriterlerine uygun olarak çözmektedir, ikinci evrede ise kaynak sessiz kalmakta ve röleler çözdükleri bilgiyi hedefe aktarmaktadırlar [53].

Kaynağın işaretleri PSK (Phase Shift Keying) kullanarak M boyutlu olarak gönderdiği varsayılmıştır. Burada M karmaşık işaretler p_m için $m=1, 2, \dots, M$ olarak gösterilmiştir. Kaynaktan çıkan işaret x_k ve iletilen PSK karmaşık işaret s_{ix} , kaynaktan bit'den sembole modülasyon eşleme $M_s(.)$ şeklinde gösterilmiştir.

İlk evrede röle ve hedefte alınan işaretler sırasıyla aşağıdaki gibi verilebilir:

$$r_{R_i} = \sqrt{E_K} h_{KR_i} s_{ix} + n_{R_i} \quad (2.19)$$

$$r_H = \sqrt{E_K} h_{KH} s_{ix} + n_H \quad (2.20)$$

Burada i seçilen röleyi, $\sqrt{E_K}$ söz konusu kanallardaki yol kayıpları ve gölgeleme etkilerini içerecek şekilde işaret enerjisini göstermektedir. h_{KR_i} ve h_{KH} katsayıları K için sırasıyla $K \rightarrow R_i$ ve $K \rightarrow H$ kanalları için karmaşık Gauss sönümleme katsayılarını, n_{R_i} ve n_H ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı karmaşık Gauss gürültüsünü belirtmektedir.

Röleler tarafından alınan işaretlerin çözülmesi için kullanılan MAP kriteri:

$$\hat{s}_{ix}^{(R_i)} = \arg \min_{p_m} |r_{R_i} - \sqrt{E_K} h_{KR_i} p_m|^2 \quad (2.21)$$

$$\hat{x}_k^{(R_i)} = M_s^{-1}(\hat{s}_{ix}^{(R_i)}) \quad (2.22)$$

Burada $\hat{s}_{ix}^{(R_i)}$ rölede kaynağın kestirilen işaretini, $\hat{x}_k^{(R_i)}$ rölede kaynağın kestirilen bitini ifade etmektedir.

Her bir röle benzersiz sayısal bir tanımlayıcı ID_{R_i} ile ifade edilmektedir. Rölede modüle edilen sembol aşağıda verilmiştir.

$$r_{ix}^{(R_i)} = \begin{cases} M_R(x^{(R_i)}), & ID_{R_i} = \hat{x}_k^{(R_i)} \\ 0, & ID_{R_i} \neq \hat{x}_k^{(R_i)} \end{cases} \quad (2.23)$$

Burada $x^{(R_i)}$ iletilecek röle bilgisini, $M_R(x^{(R_i)})$ röleden iletilen PSK karmaşık sembolleri göstermektedir.

Hedefte röleden alınan işaret:

$$r_{RH} = \sum_{i=1}^M (\sqrt{E_{R_i}} h_{R_iH} r_{ix}^{(R_i)}) + n_H \quad (2.24)$$

Burada E_{R_i} röle iletim enerjisini göstermektedir.

2.4. UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON

Uzay-zaman blok kodlama (Space Time Block Code – STBC) alıcı karmaşıklığını azaltmak ve yüksek çeşitleme kazançları elde edebilmek için geliştirilmiştir [54], [55]. STBC yapısında kaynak birçok veri kopyasını çoklu antenler üzerinden göndermektedir. Buda veri iletim güvenilirliğini arttırmaktadır. STBC bir matris ile gösterilmektedir. Bu matriste her bir satır bir zaman dilimini ve her bir sütunda bir anten iletimini göstermektedir. STBC'nin ortogonal olması sebebiyle alıcıda kolaylıkla kod matrisi çözülebilmektedir.

STBC-SM yapısı [58]'de sunulmuştur. Bu yapıda veri bir STBC matrisi ile iletilmektedir. Bu çalışma STBC ve SM'i birleştirerek hem STBC hem de SM'in avantajlarından yararlanmaktadır. STBC-SM yapısında iletilen semboller uzay, zaman ve uzaysal alana yayılmaktadır. STBC'nin çeşitleme kazancı yardımıyla STBC-SM yapısı çeşitleme ve kodlama kazancı sağlayacak şekilde optimize edilmiştir [58]. STBC-SM uzaysal alan yardımıyla da yüksek spektral etki avantajı kazanmaktadır.

İşbirlikli iletişim yöntemiyle terminallerde çoklu anten kullanımına gerek kalmadan uzamsal çeşitleme kazancı sağlanabilmektedir.

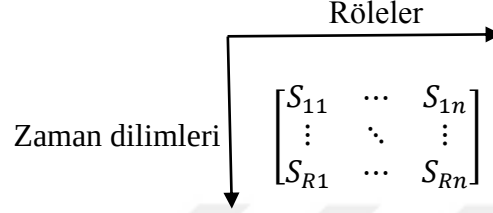
Bölüm 2.3'de anlatılan İşbirlikli Uzaysal Modülasyon yönteminin alıcı karmaşıklığını azaltmak ve çeşitleme kazancını arttırmak için bu bölümde sisteme antenler için geliştirilmiş olan uzay-zaman blok kodlama ilave edilmiştir. Sistemde tek antenli kaynak ve röleler ile birlikte hedefte dört antenli bir alıcı yer almaktadır.

Tek-giriş çoklu-çıkış sistemler (Single-input multiple-output, SIMO) için tasarlanan bu sistem çoklu-giriş çoklu-çıkış sistemlerden (Multiple-input multiple-output, MIMO) farklı olarak kaynak ve rölelerin tek antene sahip olmaları yeterlidir. Böylece vericide birden fazla anten kullanmaktansa ağdaki rölelerin yardımıyla sadece hedefte çoklu anten kullanılarak bağlantı performansı MIMO sistemlerde olduğu gibi artırılmaktadır.

Alamouti STBC yapısı basittir ve W-CDMA ve CDMA-2000 standartlarında yer almıştır [56]. Sezimi kolay ve hızlı olması sebebiyle STBC olarak Alamouti kodu kullanılmıştır. Kaynaktan gönderilen veri ağdaki rölelerin farklı birleşimleri ile bir STBC matrisi yardımıyla hedefe iletilmektedir. Alamouti kodunun yardımıyla veri hem röle indisleri hem de Alamouti kodundaki semboller ile hedefe ulaşmaktadır. Düşük karmaşıklıkta en çok olabilirlik (maximum likelihood – ML) çözümü kullanılarak iletilen semboller ve röle indisleri belirleme kararı yapılmıştır. Tasarlanan sistemin başarımlı analizi yapılmış ve bilgisayar benzetimleri sonucunda sistemin daha önce sunulan işbirlikli uzaysal modülasyon yapısından oldukça iyi bir hata başarımlı verdiği görülmüştür.

2.4.1. Uzay-Zaman Blok Kod Yapısı

STBC yapısında kaynak birçok veri kopyasını çoklu antenler üzerinden göndermektedir. Buda veri iletim güvenilirliğini arttırmaktadır. STBC bir matris ile gösterilmektedir. Bu matriste her bir satır bir zaman dilimini ve her bir sütunda bir anten iletimini göstermektedir.



Şekil 2.7: Uzay-zaman blok kod matrisi.

Alamouti kodu kullanılarak modülasyonlu simgelerden uzay-zaman blok kod matrisi (2.25)'deki gibi oluşturulmuştur. Bu matristeki veriler ve röle indisleri yardımıyla veri rölelerden hedefteki antenlere iletilmektedir.

$$S = \{S_1, S_2\}$$

$$S_1 = \{S_{11}, S_{12}\} = \left\{ \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & 0 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 0 & s_1 & s_2 \\ 0 & 0 & -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \right\}$$

$$S_2 = \{S_{21}, S_{22}\} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & s_1 & s_2 & 0 \\ 0 & -s_2^* & s_1^* & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} s_2 & 0 & 0 & s_1 \\ s_1^* & 0 & 0 & -s_2^* \end{bmatrix} \right\} e^{-j\theta} \quad (2.25)$$

s_1, s_2 STBC kodlarını, $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ birbiriyle örtüşmeyen STBC kod sözcüklerini ifade etmektedir. Θ çeşitleme ve kodlama kazançları oluşturmak için gerekli olan dönme açısıdır.

Tablo 1'de ilk iki bit röle gruplarını G ve son iki bit de M sembol dizisini göstermektedir [58]. G grup için STBC-SM yapısının spektral etkisi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$m = \frac{1}{2} \log_2 G + \log_2 M \text{ [bit/s/ Hz]} \quad (2.26)$$

Alıcıda bir ençok-olabilirlik (*maximum-likelihood*) kod çözme yöntemi kullanılarak bilgi bitleri ve anten indislerini belirleme kararı verilmektedir. Kod çözücü karar verme işlemini gerçekleştirirken vericide ki (2.25) veri matrisini kullanmaktadır. Matrisler üzerinden arama yapılırken kullanılan karar ifadesi:

$$\hat{S}_i = \underset{S \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} \|r_H - h_{R_i H} S_i\|^2 \quad (2.27)$$

Bu eşitlik alıcının maksimum olabilirliği veren $\hat{S}_i$ 'yi hesaplayarak, bir kod sözcüğünü seçeceği anlamına gelmektedir.

Tablo 2.1: 2 bit/s/Hz iletim için STBC-SM eşleme kuralı.

	Grup No	Giriş Bitleri	İletim Matrisleri			Grup No	Giriş Bitleri	İletim Matrisleri
S ₁	G = 0	0000	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	S ₂	G = 2	1000	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	
		0001	$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$			1001	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	
		0010	$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$			1010	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	
		0011	$\begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$			1011	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	
	G = 1	0100	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$		G = 3	1100	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	
		0101	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$			1101	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	
		0110	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$			1110	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	
		0111	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$			1111	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{i\theta}$	

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. TEK-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan ortak röle seçimi ve güç optimizasyonu yöntemi incelenecektir. Alıcıda bir eşik SNR değeri belirlenmesi ve alıcı tarafından alınan sinyallerin birleşik anlık çıkış SNR değerinin belirlenen eşik SNR değerine ulaşınca kadar sisteme rastgele yeni bir röle daha eklenmesi; her bir röle ekleme aşamasında da sisteme dahil olan yeni röle sayısına göre toplam gücün kaynak ve röleler arasında en optimum olarak hangi oranlarda kullanılacağıının belirlenmesi esasına dayanan bir yapı tasarlanmıştır. Her ne kadar [9]'da önerilen yöntem de sisteme eşik SNR değerine ulaşana kadar rastgele yeni röle ekleme mantığıyla oluşturulmuş olsa da, her bir röle ekleme adımında güç optimizasyonu yapılmadığı için bu çalışmada tasarlanan yapıya göre aynı eşik SNR değerine ulaşmak için sisteme daha çok röle eklenmesini gerektirmekte ve dolayısıyla daha çok güç tüketimine neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasında tasarlanan yöntemde göre öncelikle ağa dahil terminallerden biri tamamen rastgele ilk röle (R_1) olarak seçilir. Kaynaktan hedefe γ_i^{SD} , kaynaktan röleye γ_i^{SR} ve röleden hedefe γ_i^{RD} anlık SNR değerleri kullanılarak alıcıda birleştirilen sinyalin SNR değeri (3.1) eşitliğinde verildiği şekilde oluşturulur [9, 12].

$$\gamma = \gamma_i^{SD} + \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i^{SR} \gamma_i^{RD}}{(\gamma_i^{SR} + \gamma_i^{RD} + 1)} \quad (3.1)$$

Burada, $\gamma_i^{SD} = \frac{k_0 P_T |h_i^{SD}|^2}{N_0}$, $\gamma_i^{SR} = \frac{k_0 P_T |h_i^{SR}|^2}{N_0}$ ve $\gamma_i^{RD} = \frac{k_i P_T |h_i^{RD}|^2}{N_0}$ şeklindedir. P_T iletim yapılırken tüm terminallerin kullanacağı toplam gücü, k_0 ve k_i değerleri ise sırasıyla kaynak ve i. rölede toplam gücün hangi oranda kullanılacağını belirten optimizasyon katsayılarını göstermektedir.

Toplam güç harcaması, alıcıda alınan sinyal için birleştirilmiş anlık çıkış SNR ifadesini en büyükleyen katsayılar elde edilerek optimize edilmiştir. $\gamma(\cdot)$ fonksiyonunu en büyükleyen katsayıları elde edebilmek için, Lagrange koşullu en iyileme fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulmuştur. (3.2) eşitliğinde $f(\cdot)$ amaç fonksiyonunu $h(\cdot)$ ise koşul fonksiyonunu göstermektedir:

$$\min_{k_i} l(k_i, \lambda) = f(k_i) + \lambda h(k_i) \quad (3.2)$$

$$\text{öyle ki } h(k_0, \dots, k_N) = k_0 + \dots + k_i = 1.$$

$0 \leq k_i \leq 1, \forall i$. Buradan elde edilen optimum güç dağılım katsayıları kullanılarak alıcıda alınan ve birleştirilen sinyalin anlık çıkış SNR değeri hesaplanmakta ve eşik SNR (γ_e) değeri ile karşılaştırılarak seçilen ilk rölenin yeterli olup olmadığı test edilmektedir. Hesaplanan birleşik SNR değeri (γ) eşik SNR değerine (γ_e) eşit veya daha büyükse, seçilen tek röle yeterli olduğundan röle seçim işlemi sonlandırılmakta ve seçilen rölenin yardımıyla ve bulunan optimum güç dağılım katsayıları kullanılarak iletim gerçekleştirilmektedir. Eğer hesaplanan SNR değeri (γ) eşik SNR değerinin (γ_e) altında bir değere sahip bulunursa, sisteme rastgele seçilen bir röle daha eklenmekte, oluşan yeni sistemin birleştirilmiş SNR maliyet fonksiyonu tekrar oluşturularak mevcut röle sayısına göre optimum güç dağılım katsayıları tekrar elde edilmekte ve sistemin birleşik anlık çıkış SNR değeri yeniden hesaplanmaktadır. Birleşik anlık çıkış SNR değeri, eşik SNR değeri ile tekrar karşılaştırılmakta ve hesaplanan bu birleşik anlık çıkış SNR değeri (γ), belirlenen eşik SNR değerine (γ_e) ulaşana kadar sisteme rastgele yeni röle eklenmeye devam edilmektedir. Dördüncü bölümde, bu yöntemin çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu başarımı, benzetimlerle verilecektir.

3.2. İKİ-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU

Bu bölümde iki-yönlü röle ağında kullanılan ortak çoklu-röle seçimi ve güç optimizasyonu yöntemi incelenecektir. Bu yöntemde her iki kaynak için alıcıda bir eşik SNR değeri belirlenir ve her iki kaynaktan biri alıcı olarak aldığı sinyallerin birleşik anlık çıkış SNR değerinin belirlenen eşik SNR değerine ulaşmaya kadar sisteme rastgele yeni bir röle daha eklenir. Her bir röle ekleme aşamasında da sisteme dahil olan yeni röle sayısına göre toplam gücün kaynak ve röleler arasında en optimum olarak

hangi oranlarda kullanılacağı bir güç optimizasyon işlemi ile belirlenir. Her ne kadar tek-yönlü işbirlikli ağlarda [9]'da önerilen yöntem de sisteme eşik SNR değerine ulaşana kadar rastgele yeni röle ekleme mantığıyla oluşturulmuş olsa da, her bir röle ekleme adımında güç optimizasyonu yapılmadığı için bu çalışmada tasarlanan yapıya göre aynı eşik SNR değerine ulaşmak için sisteme daha çok röle eklenmesini gerektirmekte ve dolayısıyla daha çok güç tüketimine neden olmaktadır.

Tasarlanan yapının akışı aşağıdaki gibidir:

1. Her iki yön içinde ağda bulunan uygun rölelerden rastgele herhangi bir röle ilk röle (R_1) olarak seçilir.
2. Kaynaktan hedefe γ_i^{SD} , kaynaktan röleye γ_i^{SR} ve röleden hedefe γ_i^{RD} anlık SNR değerleri kullanılarak alıcıda birleştirilen sinyalin SNR değeri (3.3) ve (3.4) eşitliğinde verildiği şekilde her iki yön içinde hesaplanır [11, 12].

$$\gamma_1 = \gamma_i^{S_1 D_1} + \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i^{S_1 R} \gamma_i^{RD_1}}{(\gamma_i^{S_1 R} + \gamma_i^{RD_1} + 1)} \quad (3.3)$$

$$\gamma_2 = \gamma_i^{S_2 D_2} + \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i^{S_2 R} \gamma_i^{RD_2}}{(\gamma_i^{S_2 R} + \gamma_i^{RD_2} + 1)} \quad (3.4)$$

Burada, birinci yön için SNR değerleri $\gamma_i^{S_1 D_1} = \frac{k_0 P_T |h_i^{S_1 D_1}|^2}{N_0}$, $\gamma_i^{S_1 R} = \frac{k_0 P_T |h_i^{S_1 R}|^2}{N_0}$

ve $\gamma_i^{RD_1} = \frac{k_i P_T |h_i^{RD_1}|^2}{N_0}$ olarak belirlenir, ikinci yön içinde benzer şekilde elde

edilir. P_T iletim yapılırken tüm terminallerin kullanacağı toplam gücü, k_0 ve k_i değerleri ise sırasıyla seçilen kaynak ve i . rölede toplam gücün hangi oranda kullanılacağını belirten optimizasyon katsayılarını göstermektedir.

3. Her iki yön için toplam güç harcaması, alıcıda alınan sinyal için birleştirilmiş anlık çıkış SNR ifadesini en büyükleyen katsayılar elde edilerek optimize edilmiştir. Birinci yön için γ_1 ve γ_2 fonksiyonunu en büyükleyen katsayıları elde edebilmek için, Lagrange koşullu en iyileme fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$^{max}_{k_i}l(k_i, \lambda) = \gamma_j(k_i) + \lambda h(k_i) \quad (3.5)$$

$$\text{öyle ki } h(k_0, \dots, k_N) = k_0 + \dots + k_N = 1.$$

$0 \leq k_i \leq 1, \forall i$ ve $j=1,2$. (2.11) eşitliğinde $\gamma_j(k_i)$ amaç fonksiyonunu (birinci yön için $j=1$ ve ters yön için $j=2$) ve $h(k_i)$ ise koşul fonksiyonunu göstermektedir.

4. Buradan elde edilen optimum güç dağılım katsayıları kullanılarak her iki alıcıda alınan ve birleştirilen sinyalin anlık çıkış SNR değeri hesaplanmakta ve eşik SNR (γ_e) değeri ile karşılaştırılarak seçilen ilk rölenin yeterli olup olmadığı test edilmektedir. Herhangi bir kaynak için hesaplanan birleşik SNR değeri (γ_1 veya γ_2) eşik SNR değerine (γ_e) eşit veya daha büyükse, eşik SNR değerine ulaşan taraf kaynak olarak belirlenmekte, seçilen tek röle yeterli olduğundan röle seçim işlemi sonlandırılmakta ve seçilen rölenin yardımıyla ve bulunan optimum güç dağılım katsayıları kullanılarak bu kaynaktan hedefe iletim gerçekleştirilmektedir.
5. Eğer her iki kaynak içinde hesaplanan SNR değeri (γ_1 veya γ_2) eşik SNR değerinin (γ_e) altında bir değere sahip bulunursa, sisteme rastgele seçilen bir röle daha eklenmekte, oluşan yeni sistemin birleştirilmiş SNR maliyet fonksiyonu her iki yön içinde tekrar oluşturularak mevcut röle sayısına göre optimum güç dağılım katsayıları tekrar elde edilmekte ve sistemin birleşik anlık çıkış SNR değeri yeniden hesaplanmaktadır. Birleşik anlık çıkış SNR değeri, eşik SNR değeri ile tekrar karşılaştırılmakta ve hesaplanan bu birleşik anlık çıkış SNR değeri (γ_1 veya γ_2), kaynaklardan herhangi biri için belirlenen eşik SNR değerine (γ_e) ulaşana kadar sisteme rastgele yeni röle eklenmeye devam edilmektedir.

3.3. BİLİŞSEL RADYO SİSTEM MODELİNDE TEKLİ RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU

Röle seçim yöntemi olarak rastgele bir röle seçim ve en iyi röle seçim yöntemleri kullanılmıştır. Rastgele bir röle seçim yönteminde ağ içerisindeki N tane röleden ($R_1, R_2, \dots, R_N$) herhangi biri rastgele seçilerek kaynaktan hedefe iletim bu röle ve kaynağın işbirliği ile gerçekleştirilmektedir. En iyi röle seçim yönteminde ise hedefte en

yüksek anlık sinyal gürültü oranı alınabilen röle en iyi olarak görülmektedir. Buna göre en iyi röle seçim kriteri aşağıda gösterilmiştir.

$$R_e = \arg \max SINR_{iH} = \arg \max \frac{|h_{iR_i-iH}|^2}{\sigma_{iR_i-BH}^2} \quad (3.6)$$

Burada R_e seçilen en iyi röleyi ifade etmektedir. En iyi röle seçim kriterinde hem $IK \rightarrow R_i$ ve $R_i \rightarrow iH$ durumları hem de $R_i \rightarrow BH$ durumu göz önünde bulundurulmaktadır.

Güç optimizasyonu için öncelikle ikincil kaynaktan ikincil hedefe γ^{iH} , ikincil kaynaktan seçilen röleye γ_i^{iR} ve seçilen röleden ikincil hedefe γ_i^{RH} anlık işaret-gürültü oranları kullanılarak ikincil hedefteki birleşik işaret gürültü oranı (3.7) eşitliğinde verildiği şekilde hesaplanır [9].

$$\gamma = \gamma^{iH} + \frac{\gamma_i^{iR} \gamma_i^{RH}}{(\gamma_i^{iH} + \gamma_i^{RH} + 1)} \quad (3.7)$$

Burada kullanılan anlık işaret-gürültü oranları $\gamma^{iH} = \frac{k_0 P_T |h_{iK-iH}|^2}{N_0}$,

$$\gamma_i^{iR} = \frac{k_0 P_T |h_{iK-iR_i}|^2}{N_0} \text{ ve } \gamma_i^{RH} = \frac{k_1 P_T |h_{iK-R_iH}|^2}{N_0} \text{ alınmıştır. } P_T \text{ iletim yapılırken tüm}$$

terminallerin kullanacağı toplam gücü, k_0 ve k_1 değerleri ise sırasıyla kaynak ve i^{th} rölede toplam gücün hangi oranda paylaşılacağını belirten optimizasyon katsayılarını göstermektedir. Toplam güç tüketimi alıcıda alınan işaret için birleştirilmiş anlık çıkış işaret-gürültü oranı ifadesini en büyükleyen katsayılar elde edilerek optimize edilmiştir. γ fonksiyonunu en büyükleyen katsayıları elde edebilmek için, Lagrange koşullu en iyileme fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulmuştur;

$$\max_{k_i} \ell(k_i, \lambda) = \gamma(k_i) + \lambda h(k_i) \quad (3.8)$$

$$\text{öyle ki } h(k_0, k_1) = k_0 + k_1 = 1.$$

$0 \leq k_i \leq 1, \forall i$ ve $h(k_i)$ koşul fonksiyonunu göstermektedir. Bulunan optimum güç dağılım katsayılarının yardımıyla iletim gerçekleştirilmektedir.

3.4. BİLİŞSEL RADYO AĞINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan ikincil ağ için ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu yöntemi incelenecektir. Alıcıda bir eşik SNR değeri belirlenmesi ve alıcı tarafından alınan sinyallerin birleşik anlık çıkış SNR değerinin belirlenen eşik SNR değerine ulaşınca kadar sisteme rastgele yeni bir röle daha eklenmesi; her bir röle ekleme aşamasında da sisteme dahil olan yeni röle sayısına göre toplam gücün kaynak ve röleler arasında en optimum olarak hangi oranlarda kullanılacağını belirlenmesi esasına dayanan bir yapı tasarlanmıştır. Her ne kadar [9]'da önerilen yöntem de sisteme eşik SNR değerine ulaşana kadar rastgele yeni röle ekleme mantığıyla oluşturulmuş olsa da, her bir röle ekleme adımıda güç optimizasyonu yapılmadığı için bu çalışmada tasarlanan yapıya göre aynı eşik SNR değerine ulaşmak için sisteme daha çok röle eklenmesini gerektirmekte ve dolayısıyla daha çok güç tüketimine neden olmaktadır. Fakat [38]'de sunduğumuz çalışmada ki yaklaşımda güç optimizasyonu ile [9]'da sunulan yönteme göre aynı SNR değerinde daha az sayıda röle ile daha az güç tüketimine ihtiyaç duymaktadır. [38]'de ki röle seçimleri sırasında ki güç optimizasyonu, Lagrange toplama metodu kullanılarak toplam güç sabitlerinden oluşan SNR değerleriyle birleştirilen bir maliyet fonksiyonuyla gerçekleştirilmiştir.

Tasarlanan yapının akışı aşağıdaki gibidir:

1. İkincil ağda ki rölelerden biri tamamen rastgele ilk röle (R_1) olarak seçilir.
2. İkincil kaynaktan hedefe γ_i^{SD} , ikincil kaynaktan röleye γ_i^{SR} ve röleden ikincil hedefe γ_i^{RD} anlık SNR değerleri kullanılarak alıcıda birleştirilen sinyalin SNR değeri (3.9) eşitliğinde verildiği şekilde oluşturulur [9].

$$\gamma = \gamma_i^{SD} + \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_i^{SR} \gamma_i^{RD}}{(\gamma_i^{SR} + \gamma_i^{RD} + 1)} \quad (3.9)$$

Burada, $\gamma_i^{SD} = \frac{k_0 P_{ST} |h_{ST-SD}|^2}{N_0}$, $\gamma_i^{SR} = \frac{k_0 P_{ST} |h_{ST-SRi}|^2}{N_0}$ ve

$\gamma_i^{RD} = \frac{k_i P_{SRi} |h_{ST-RiD}|^2}{N_0}$ şeklindedir. k_0 ve k_i değerleri ise sırasıyla kaynak ve i.

rölede toplam gücün hangi oranda kullanılacağını belirten optimizasyon katsayılarını göstermektedir.

3. Toplam güç harcaması, alıcıda alınan sinyal için birleştirilmiş anlık çıkış SNR ifadesini en büyükleyen katsayılar elde edilerek optimize edilmiştir. γ fonksiyonunu en büyükleyen k_i katsayılarını elde edebilmek için, Lagrange koşullu en iyileme fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

$$\max_{k_i} l(k_i, \lambda) = \gamma(k_i) + \lambda h(k_i) \quad (3.10)$$

$$\text{öyle ki } h(k_0, \dots, k_N) = k_0 + \dots + k_N = 1$$

$0 \leq k_i \leq 1, \forall i$, $\gamma(k_i)$ amaç fonksiyonunu $h(k_i)$ ise koşul fonksiyonunu göstermektedir:

4. Buradan elde edilen optimum güç dağılım katsayıları kullanılarak alıcıda alınan ve birleştirilen sinyalin anlık çıkış SNR değeri hesaplanmakta ve eşik SNR (γ_e) değeri ile karşılaştırılarak seçilen ilk rölenin yeterli olup olmadığı test edilmektedir. Hesaplanan birleşik SNR değeri (γ) eşik SNR değerine (γ_e) eşit veya daha büyükse, seçilen tek röle yeterli olduğundan röle seçim işlemi sonlandırılmakta ve seçilen rölenin yardımıyla ve bulunan optimum güç dağılım katsayıları kullanılarak iletim gerçekleştirilmektedir.
5. Eğer hesaplanan SNR değeri (γ) eşik SNR değerinin (γ_e) altında bir değere sahip bulunursa, sisteme rastgele seçilen bir röle daha eklenmekte, oluşan yeni sistemin birleştirilmiş SNR maliyet fonksiyonu tekrar oluşturularak mevcut röle sayısına göre optimum güç dağılım katsayıları tekrar elde edilmekte ve sistemin birleşik anlık çıkış SNR değeri yeniden hesaplanmaktadır. Birleşik anlık çıkış SNR değeri, eşik SNR değeri ile tekrar karşılaştırılmakta ve hesaplanan bu birleşik anlık çıkış SNR değeri (γ), belirlenen eşik SNR değerine (γ_e) ulaşana kadar sisteme rastgele yeni röle eklenmeye devam edilmektedir.

3.5. BİLİŞSEL RADYO AĞLARINDA İŞBİRLİKLI İLETİM VE İŞBİRLİKLI SPEKTRUM SEZME İÇİN RÖLE SEÇİMİ

Bu bölümde bilişsel ağlar için önerilen hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için birleşik en iyi röle seçim yapısı verilmektedir. Yöntemin ilk bölümü işbirlikli iletim için en iyi röle seçimidir. İkinci bölümü ise spektrum sezme için en iyi rölenin seçimidir. Yöntemin son bölümü ise hem işbirlikli iletim hem de spektrum sezmenin birleştirilerek en iyi rölenin tespit edilmesidir. Seçilen röle iletim ve spektrum sezme için ideale en yakın çözüm olacaktır. Takip eden bölümlerde öncelikle işbirlikli bilişsel ağ yapısı anlatılacak ve devamında da işbirlikli iletim ve spektrum sezme için en iyi röle seçim yöntemi açıklanacaktır.

Röle seçim yöntemi ile önce sadece iletimin optimize edildiği, sonra spektrum sezmenin optimize edildiği ve son olarak da hem iletim hem de spektrum sezmenin birlikte optimize edildiği durum ele alınacaktır.

3.5.1. İletim için En İyi Röle Seçim Yöntemi

En iyi röle seçim yönteminde hedefte en yüksek anlık sinyal gürültü oranı alınabilen röle en iyi olarak görülmektedir. Buna göre en iyi röle seçim kriteri aşağıda gösterilmiştir.

$$R_e = \arg \max SINR_{IH} = \arg \max \frac{|h_{IR_i-IH}|^2}{\sigma_{IR_i-BH}^2} \quad (3.11)$$

Burada R_e seçilen en iyi röleyi ifade etmektedir. En iyi röle seçim kriterinde hem $IK \rightarrow R_i$ ve $R_i \rightarrow IH$ durumları hem de $R_i \rightarrow BH$ durumu göz önünde bulundurulmaktadır.

3.5.2. Spektrum Sezme için En İyi Röle Seçim Yöntemi

Birincil kullanıcının spektrumunu sezmek için en büyük kanal katsayısına sahip röle en iyi röle olarak görülmektedir. Buna göre en iyi röle seçim kriteri aşağıda gösterilmiştir.

$$R_e = \arg \max \frac{|h_{BK-IR_i}|^2}{\sigma_{IR_i-BH}^2} \quad (3.12)$$

3.5.3. İletim ve Spektrum Sezme için Ortak En İyi Röle Seçim Yöntemi

Hem iletim hem de spektrum sezmeyi birlikte gerçekleştirecek ikincil ağdaki tek bir rölenin seçimi gerçekleştirilmiştir. Seçilen röle ile ikincil kaynaktan gelen işaretin yükseltilmesi, ikincil hedefte alınan en yüksek anlık işaret gürültü oranının başarılması ve birincil kullanıcı spektrumunun algılanması hedeflenmektedir. Buna göre iletim ve spektrum sezme için en iyi röle seçim koşulu aşağıda gösterilmiştir.

$$R_e = \arg \max \frac{|h_{IR_i-IH}|^2 + |h_{BK-IR_i}|^2}{\sigma_{IR_i-BH}^2} \quad (3.13)$$

3.6. İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN RÖLE SEÇİM YÖNTEMİ

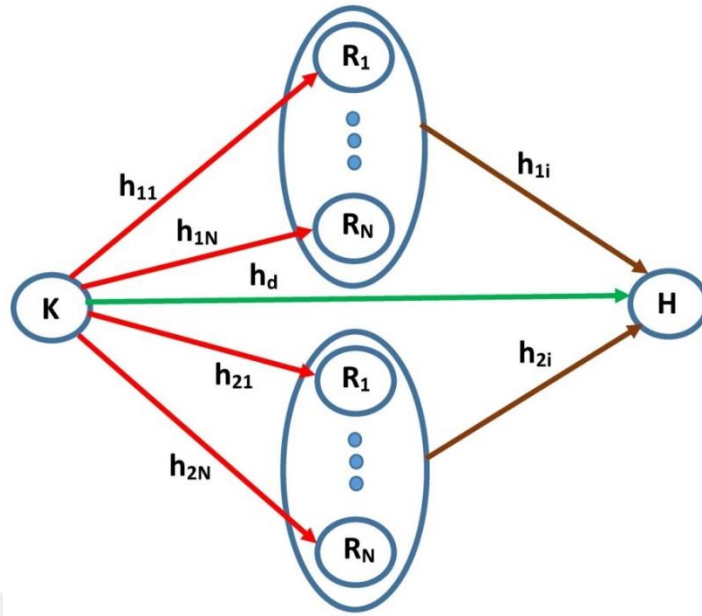
İşbirlikli uzaysal modülasyonda röle seçimi için sistem yapısı Şekil 3.1'de görüldüğü üzere röle seçimi N adet iki farklı röle grubunda ayrı ayrı uygulanmaktadır. Çalışmanın QPSK yapısı için röle seçimi Şekil 3.2'de görüldüğü üzere röle seçimi N adet dört farklı röle grubunda ayrı ayrı uygulanmaktadır.

Şekil 3.1'de öncelikle uzaysal modülasyon tekniğinde ilgili bilgi bitleri göz önünde bulundurularak röle gurubu belirlenmekte, sonrasında ise belirlenen röle gurubu içinden hedefte (H) en yüksek anlık sinyal gürültü oranı alınabilen röle en iyi röle olarak seçilmektedir. Buna göre en iyi röle seçim kriteri aşağıda verildiği gibidir.

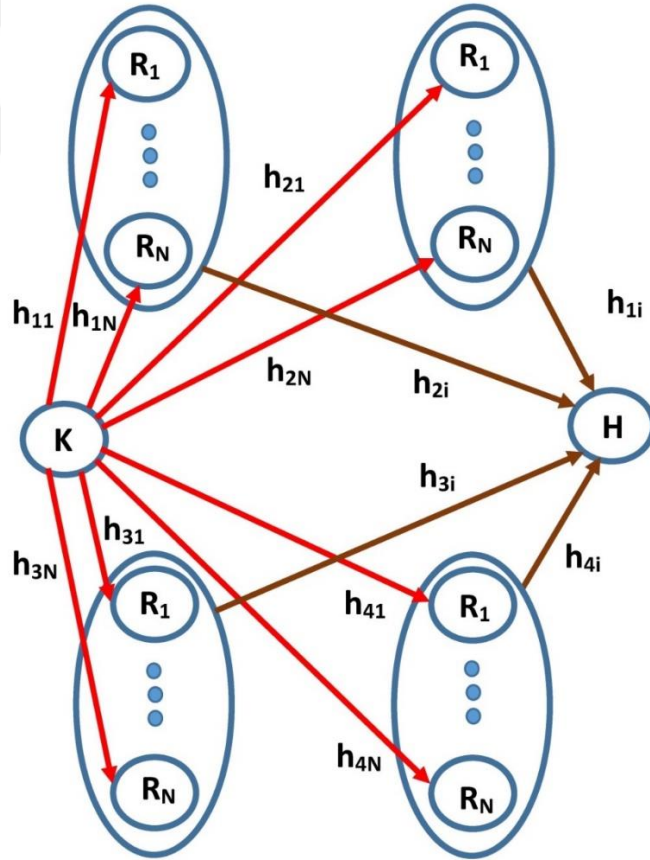
$$\begin{aligned} R_e &= \arg \max SINR_H \\ &= \arg \max |h_{R_i-H}|^2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Burada R_e seçilen en iyi röleyi ifade etmektedir. En iyi röle seçim kriterinde $K \rightarrow R_i$ ve $R_i \rightarrow H$ kanalları göz önünde bulundurulmaktadır.

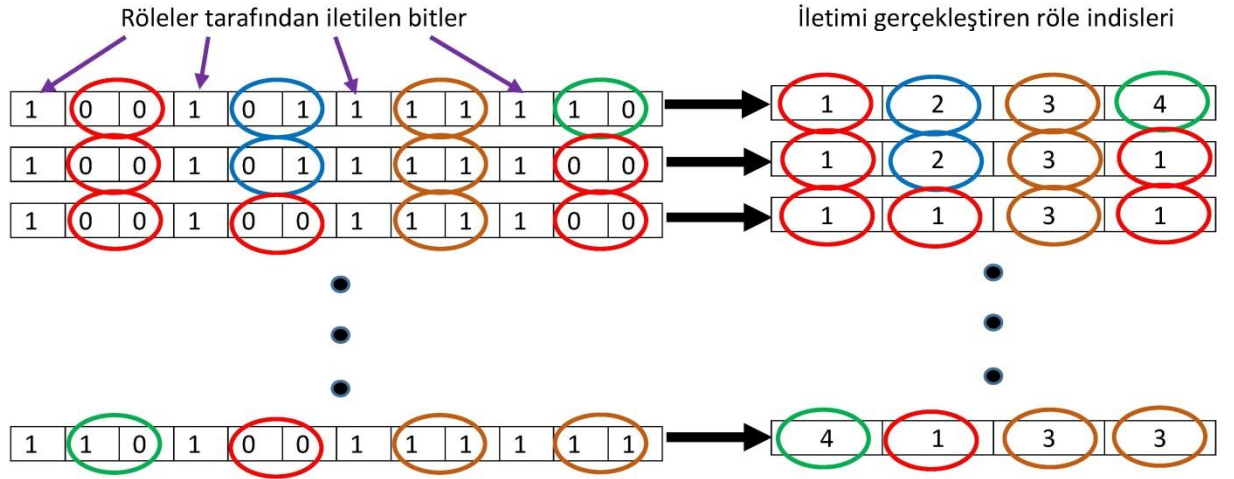
Röle gruplarında seçilen en iyi rölelerin QPSK iletimi esnasında röle indislerinin belirlenmesi ve röleler tarafından iletilen bitler Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: İşbirlikli uzaysal modülasyon için röle seçim yapısı.



Şekil 3.2: İşbirlikli uzaysal modülasyonda QPSK için röle seçim yapısı.



Şekil 3.3: QPSK veri bitlerinin iletiminde röle indislerinin belirlenme yöntemi.

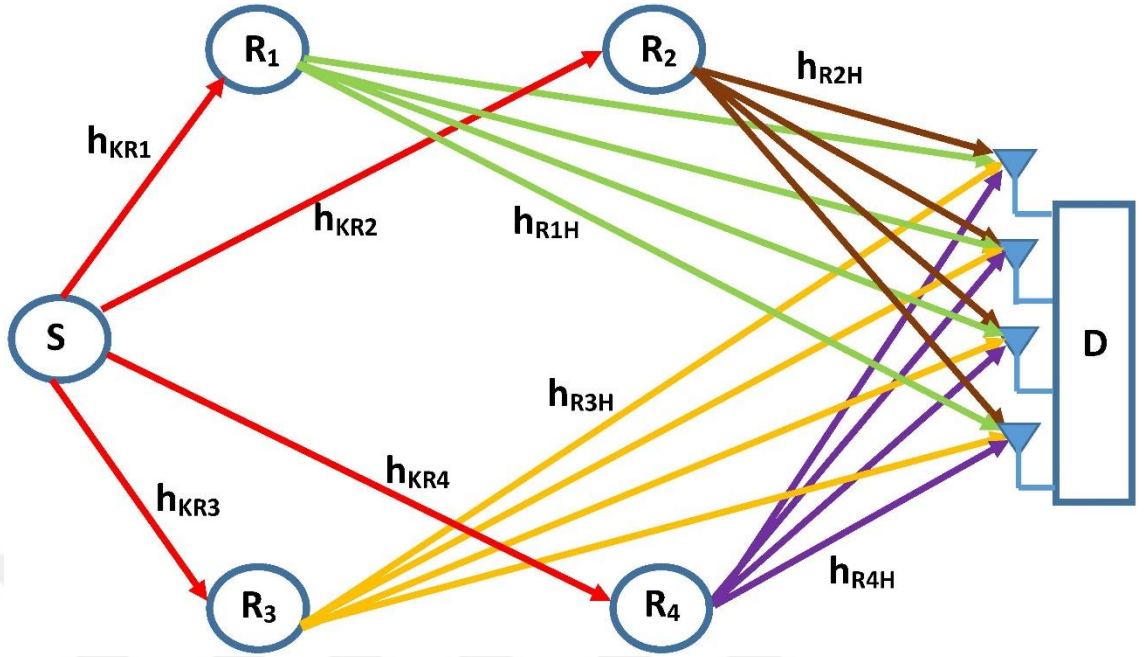
3.7. UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN RÖLE SEÇİM YÖNTEMİ

Bu bölümde kablosuz ağlar için işbirlikli uzay-zaman blok kodlu uzaysal modülasyon sistem modülü anlatılacaktır. İşbirlikli uzay-zaman blok kodlu uzaysal modülasyon sistem yapısı Şekil 3.4'de görüldüğü üzere kaynak (K), röleler ($R_1, R_2, \dots, R_M$) ve hedef (H) olarak düşünülmüştür. İletim iki evrede gerçekleşmektedir. Birinci evrede kaynak iletmek istediği bilgiyi rölelere göndermekte ve ikinci evrede ise kaynak sessiz kalmakta, röleler ise bilgiyi hedefe aktarmaktadırlar.

İlk evrede rölede alınan işaret aşağıdaki gibi verilebilir:

$$r_{R_i} = \sqrt{E_K} h_{KR_i} s_i + n_{R_i} \quad (3.15)$$

Burada i seçilen röleyi, $\sqrt{E_K}$ söz konusu kanallardaki yol kayıpları ve gölgeleme etkilerini içerecek şekilde işaret enerjisini göstermektedir. h_{KR_i} katsayıları $K \rightarrow R_i$ için karmaşık Gauss sönümleme katsayılarını, n_{R_i} ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı karmaşık Gauss gürültüsünü belirtmektedir.



Şekil 3.4: Uzay-zaman blok kodlu işbirlikli uzaysal modülasyon röle seçimsiz sistem.

Alıcıdaki her bir anten tarafından hedefte rölelerden alınan işaret:

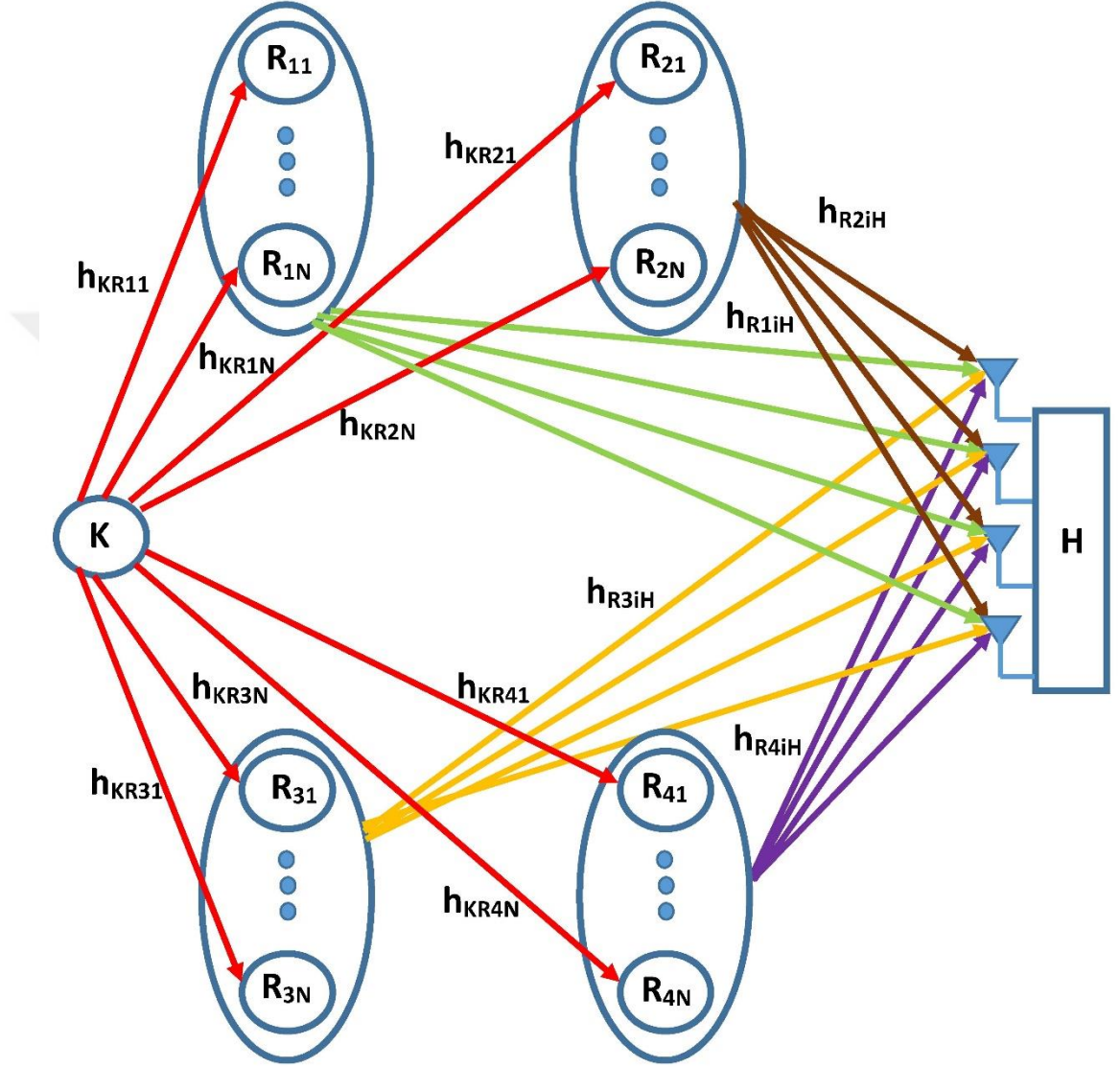
$$r_H = \sum_{i=1}^M (\sqrt{E_{R_i}} h_{R_i H} r_i^{(R_i)}) + n_H \quad (3.16)$$

Burada i seçilen röleyi, $\sqrt{E_{R_i}}$ söz konusu kanallardaki yol kayıpları ve gölgeleme etkilerini içerecek şekilde işaret enerjisini göstermektedir. $h_{R_i H}$ katsayıları $R_i \rightarrow H$ için karmaşık Gauss sönümleme katsayılarını, n_H ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı karmaşık Gauss gürültüsünü belirtmektedir.

Röle seçimi Şekil 3.5’de görüldüğü üzere N adet dört farklı röle grubunda ayrı ayrı uygulanmaktadır. Röle grubu içinden hedefte (H) en yüksek anlık sinyal gürültü oranı alınabilen röle en iyi röle olarak seçilmektedir. Buna göre en iyi röle seçim kriteri aşağıda verildiği gibidir.

$$\begin{aligned} R_e &= \arg \max SINR_H \\ &= \arg \max (|h_{KR_i}|^2 + \frac{|h_{R_i D_1}|^2 + |h_{R_i D_2}|^2 + |h_{R_i D_3}|^2 + |h_{R_i D_4}|^2}{4}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Burada R_e seçilen en iyi röleyi ifade etmektedir. En iyi röle seçim kriterinde $K \rightarrow R_i$ ve $R_i \rightarrow H$ kanalları göz önünde bulundurulmaktadır. D_i hedefteki i 'nci anteni göstermektedir.



Şekil 3.5: Uzay-zaman blok kodlu işbirlikli uzaysal modülasyon röle seçimli sistem.

4. BULGULAR

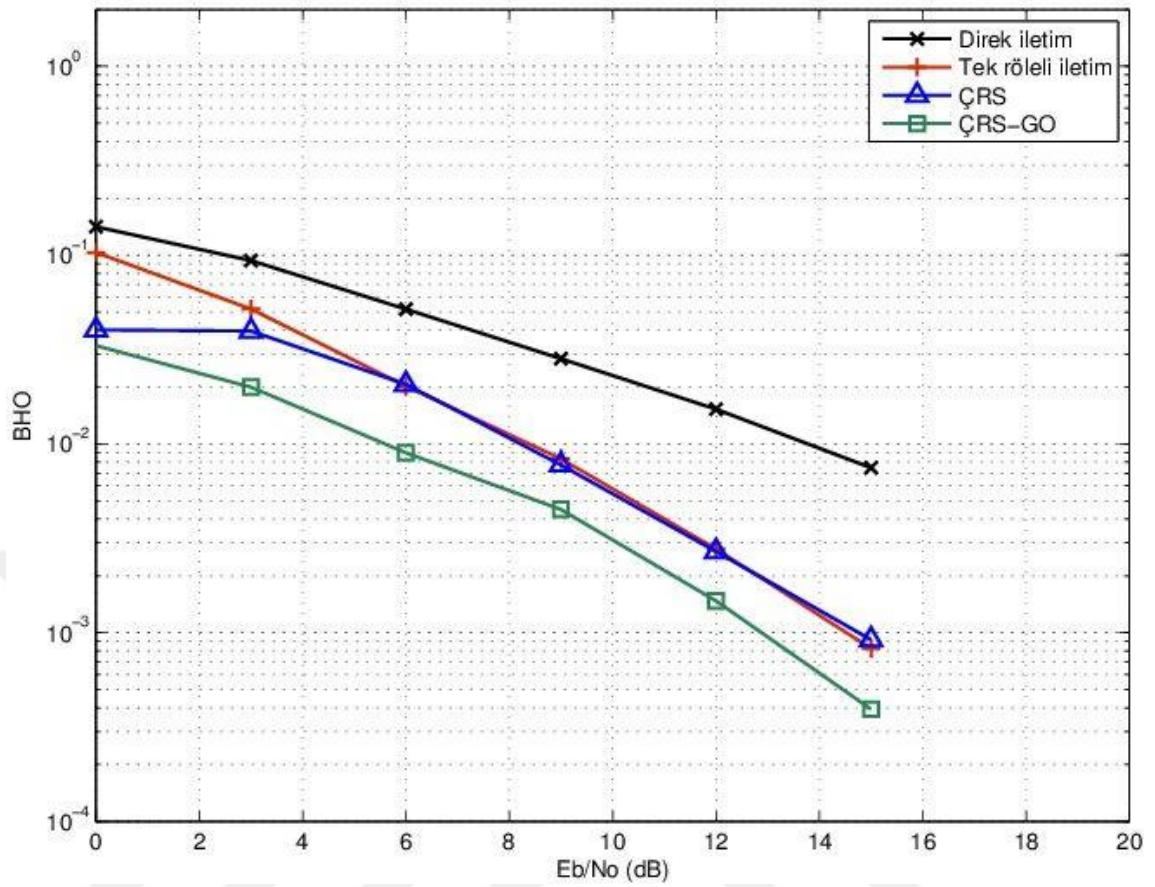
4.1. TEK-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

Sistemin performansının test edilmesi amacıyla bilgisayar yardımıyla Monte-Carlo benzetimleri yapılmıştır. Benzetimlerde çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak alınmış, bir çerçeve boyunca kanal sönümleme katsayılarının değişmediği varsayılmıştır. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla alıcıdan vericiye iletildiği ve dolayısıyla verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir. Ayrıca Kaynak-Hedef, Kaynak-Röleler ve Röleler-Hedef arasındaki tüm kanalların Rayleigh sönümlemeli kanallar olduğu varsayılmış; sembollerin QPSK modülasyonu ile modüle edilerek gönderildiği düşünülmüştür.

Bu varsayımlar altında sistemin performansını incelemek için hata başarımlar eğrileri ve seçilen ortalama röle sayısı eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 4.1 eşik SNR değerinin $\gamma_e = 9\text{dB}$ olarak belirlendiği durumda sistemin hata başarımlar performansını (şekilde ÇRS-GO olarak etiketlenmiştir) göstermektedir. Karşılaştırma amacıyla aynı şeklin içine öncelikle rölesiz yani direk iletim sistemin hata başarımlar eğrisi ve tekli röle seçiminin hata başarımlar eğrisi ve son olarak da [9]'da önerilen şekilde, güç optimizasyonu yapılmadan çoklu röle seçim yönteminin (şekilde ÇRS olarak etiketlenmiştir) hata başarımlar eğrileri de yerleştirilmiştir.

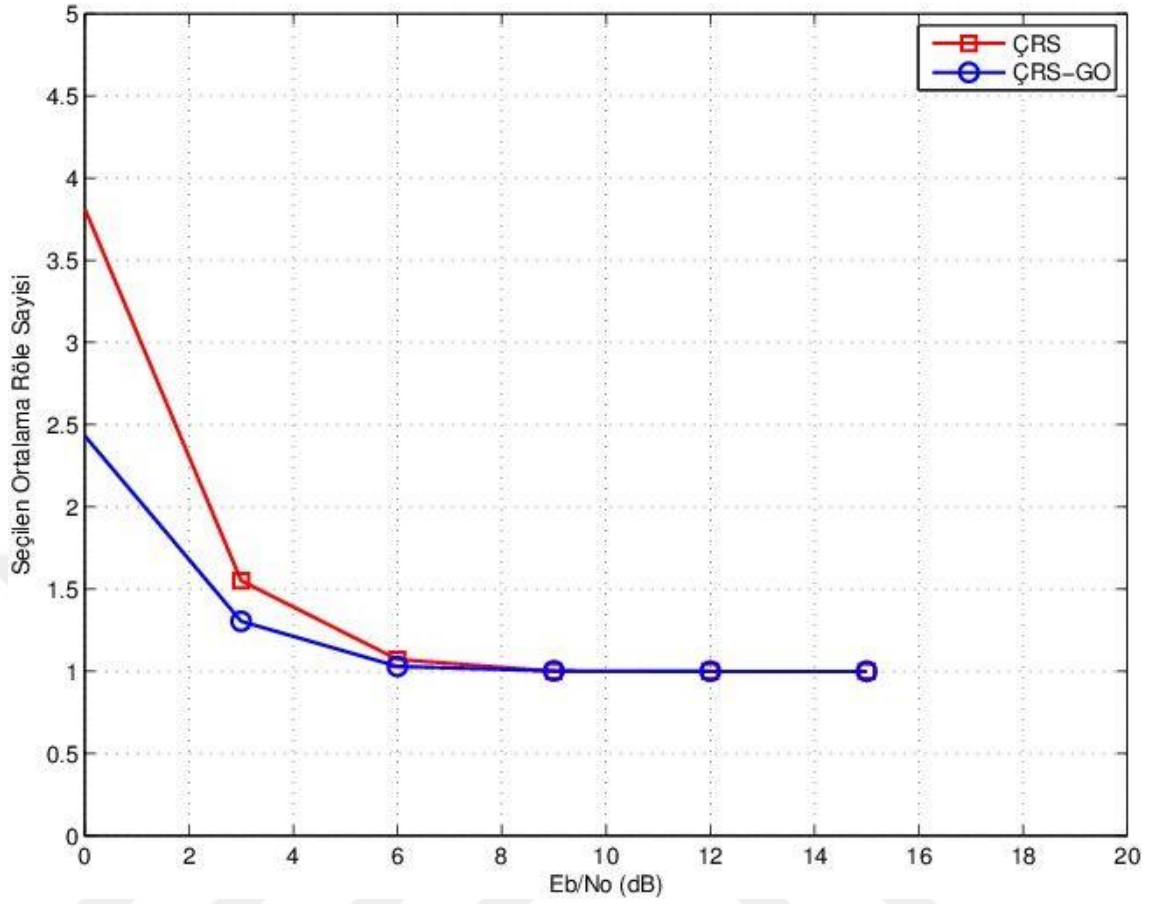
Şekilden de açıkça görüldüğü gibi önerilen yöntem yukarıda bahsedilen şartlar altında [9]'da önerilen çoklu röle seçim yöntemine göre daha üstün bir hata başarımlarına sahiptir. Güç kazancı olarak bakıldığında değişik hata oranları için [9]'a göre kabaca 2-3dB kazanç sağlamaktadır.

Artan Bit-Başına-Enerji/Gürültü (E_b/N_0) ile seçilen röle sayısı azaldığından [9]'da önerilen yöntem hata başarımlar açısından tekli röle seçimine yakınsarken önerilen sistemde güç optimizasyonu yapıldığından seçilen röle sayısının azalmasına rağmen tekli röle seçimine göre kazanç halen devam etmektedir.



Şekil 4.1: $\gamma_e = 9\text{dB}$ için hata başarımları eğrileri

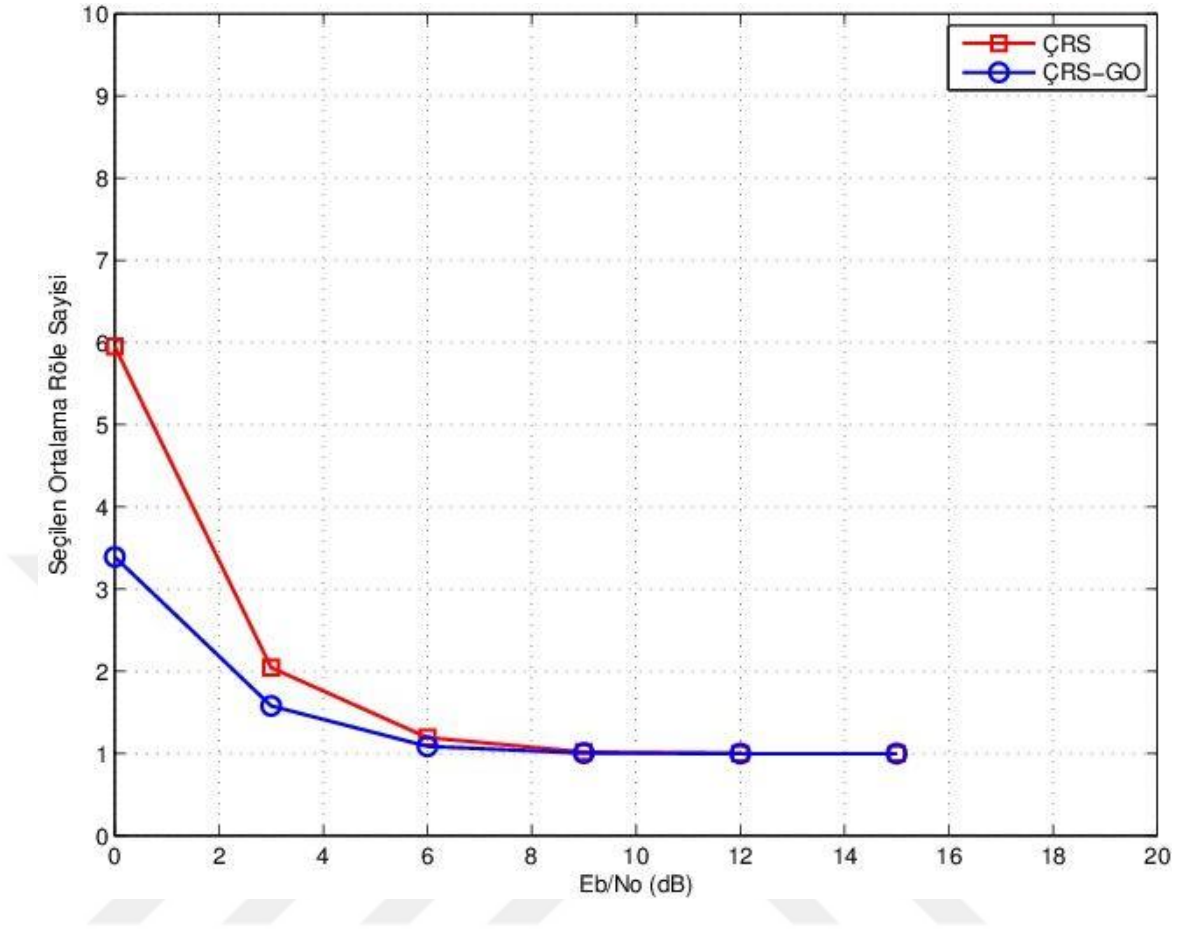
Şekil 4.2'de ve Şekil 4.3'te ise sırasıyla 9dB ve 12dB eşik SNR değerleri için seçilen ortalama röle sayıları görülmektedir. Röle seçimi her bir çerçeve için yeniden yapıldığından şekillerde görülen eğriler ortalama sayıları vermektedir. Bu şekillere de yine önerilen yöntemin seçilen ortalama röle sayısı açısından karşılaştırılabilmesi için [9]'da önerilen yöntemde seçilen ortalama röle sayısı eğrileri eklenmiştir. İki şekilden de önerilen sistemle seçilen ortalama röle sayısının önemli oranda azaltıldığı görülmektedir. Seçilen röle sayısının mümkün olduğunca azaltılabilmesi sistemin verimi açısından oldukça önemlidir. Çünkü daha az röle ile eşik SNR'a ulaşılabilmesiyle toplam harcanan güç azaltılmakta, dahası daha az röle seçim adımı uygulanacağından işlem karmaşıklığı da en azda tutulabilmektedir. Şekillerden çıkan diğer bir sonuçta eşik SNR değeri arttıkça önerilen yöntemin seçilen ortalama röle sayısı açısından daha avantajlı hale geldiğidir.



Şekil 4.2: $\gamma_e=9\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları.

İşbirlikli haberleşme ağlarında performansı artırmak için kullanılan çoklu röle seçim yöntemindeki işlem karmaşıklığının azaltılması ve mümkün olan en az sayıda röle seçilerek güç tüketiminin azaltılması amaçlarıyla bir ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu yapısı tasarlanmıştır. Tasarlanan yapının düşük işlem karmaşıklığında seçilen röle sayısını ve dolayısıyla güç tüketimini azalttığı bilgisayar benzetimleri yardımıyla gösterilmiştir.

Takip eden bölümde, bu bölümde anlatılan işbirlikli iletişim ağlarında kullanılan işbirlikli haberleşme ağlarında hata başarımını arttırıcı düşük işlem karmaşıklıkli ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu tekniği iki-yönlü işbirlikli ağların hata performansı verilecektir. Geliştirilen yöntem optimum çözüm olan en iyi röle seçim yöntemi ile karşılaştırıldığında çoklu röle seçim problemi için işlem karmaşıklığının iki-yönlü işbirlikli ağlarda düştüğü ve düşük güç tüketimi ile iyi bir hata başarımı elde edilebildiği anlatılmıştır.



Şekil 4.3: $\gamma_e = 12\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları

4.2. İKİ-YÖNLÜ ÇOK-RÖLELİ İŞBİRLİKLİ AĞ YAPISINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde bahsedilen yapı bilgisayar yardımıyla Monte-Carlo benzetimleri ile test edilmiştir. Benzetimlerde çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak alınmış, bir çerçeve boyunca kanal sönümleme katsayılarının değişmediği varsayılmıştır. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla alıcıdan vericiye iletildiği ve dolayısıyla verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir. Ayrıca her iki yön içinde Kaynak-Hedef, Kaynak-Röleler ve Röleler-Hedef arasındaki tüm kanalların Rayleigh sönümlemeli kanallar olduğu varsayılmış ve sembollerin QPSK modülasyonu ile modüle edilerek gönderildiği düşünülmüştür.

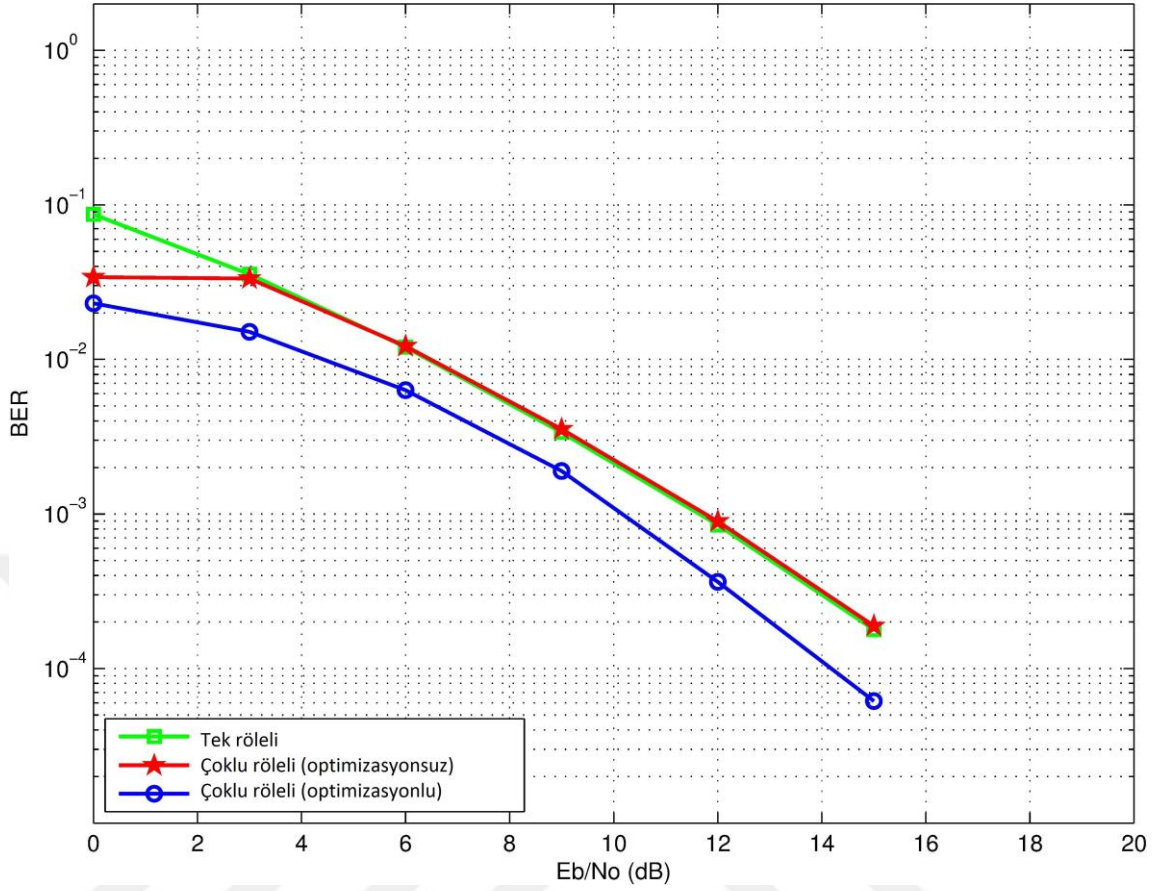
Bu varsayımlar altında sistemin başarımını incelemek için hata başarımları eğrileri ve seçilen ortalama röle sayısı eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 4.4’de eşik SNR değerinin

$\gamma_e=9\text{dB}$ olarak belirlendiği durumda sistemin hata başarımı hem güç optimizasyonu yapılmamış hem de güç optimizasyonu yapılmış olarak gösterilmiştir. Aynı zamanda karşılaştırma amacıyla aynı şeklin içine iki-yönlü işbirlikli iletişim sisteminde tekli röle seçiminin hata başarım eğrisi de yerleştirilmiştir.

Şekilden de açıkça görüldüğü gibi tasarlanan yapının karmaşıklığı arttırmadan tek röle seçim yönteminin hata başarımından daha iyi bir hata başarımı sunduğu görülmektedir. Güç kazancı olarak bakıldığında değişik hata oranları için tasarlanan yapı 2dB kazanç sağlamaktadır. Güç optimizasyonunun yapılmadığı durum için düşük SNR değerlerinde çoklu röle seçim yönteminin kullanılması sebebiyle iyi bir hata başarımı elde edilebildiği görülmektedir. Yüksek SNR değerleri için ise tek bir röle eşik SNR değerine ulaşması için yeterli olmakta ve tek röle seçim yöntemi ile aynı hata başarımı ile sonuçlanmaktadır.

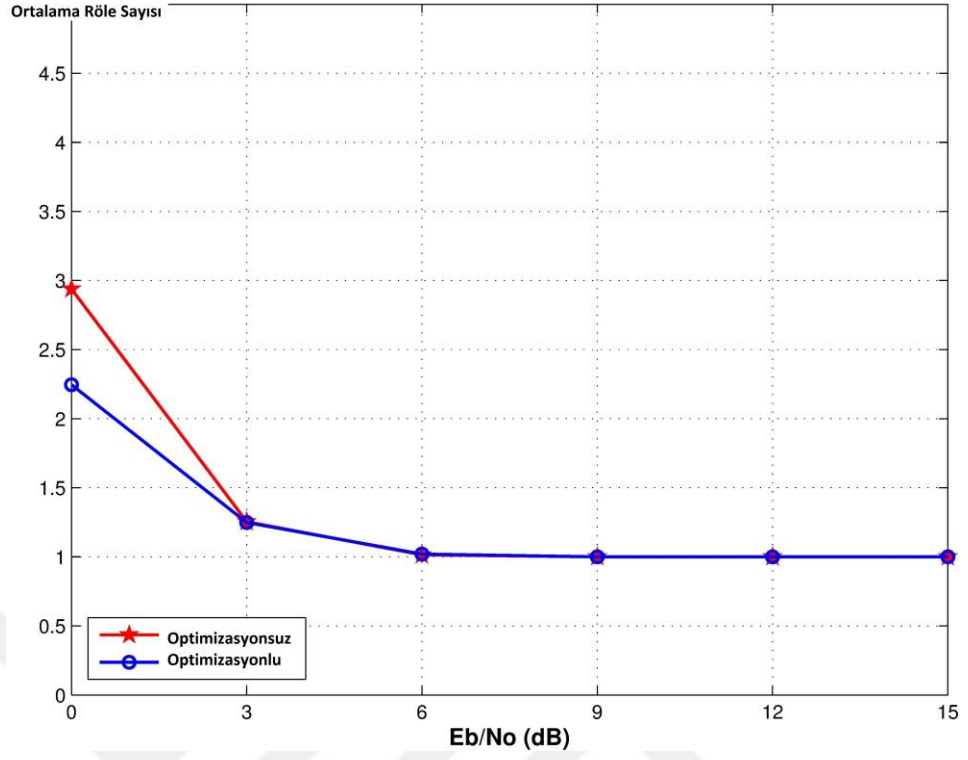
Güç optimizasyonunun olmadığı durumda SNR arttıkça seçilen röle sayısı azalmakta ve başarım tek röle seçim yöntemi durumuna yaklaşmaktadır. Diğer bir yandan da tasarlanan güç optimizasyonlu durumda kullanılan röle sayısı azalmakta ve tek röle seçim yönteminden daha iyi başarım elde edilmektedir.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da ise sırasıyla 9dB ve 12dB eşik SNR değerleri için seçilen ortalama röle sayıları verilmektedir. Röle seçimi her bir çerçeve için yeniden yapıldığından şekillerde görülen eğriler ortalama sayıları vermektedir. Tasarlanan yöntemin seçilen ortalama röle sayısı açısından karşılaştırılabilmesi için güç optimizasyonsuz durum için ortalama röle sayısı eğrileri de eklenmiştir. İki şekilden de önerilen sistemle seçilen ortalama röle sayısının önemli oranda azaltıldığı görülmektedir. Seçilen röle sayısının mümkün olduğunca azaltılabilmesi sistemin verimi açısından oldukça önemlidir. Daha az röle ile eşik SNR'a ulaşılabilmesiyle toplam harcanan güç azaltılmakta ve daha az röle seçim adımı uygulanacağından işlem karmaşıklığı da en azda tutulabilmektedir. Şekillerden eşik SNR değeri arttıkça tasarlanan yapının seçilen ortalama röle sayısı açısından daha avantajlı olduğu görülmektedir.

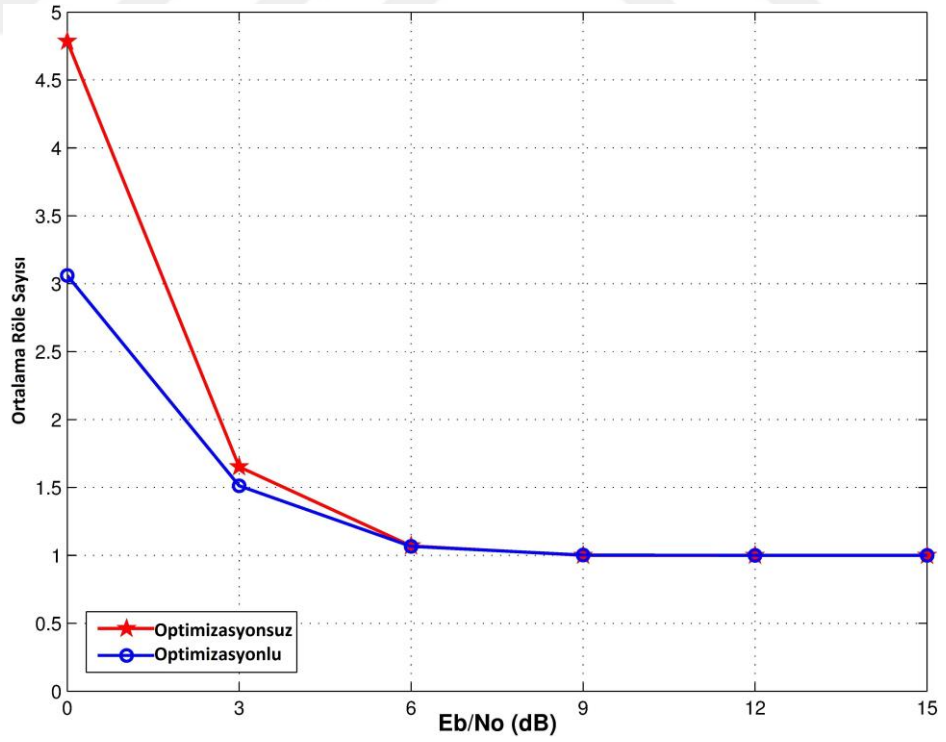


Şekil 4.4: $\gamma_e = 9\text{dB}$ için hata başarımları eğrileri.

İki-yönlü işbirlikli haberleşme ağlarında performansı artırmak için kullanılan çoklu röle seçim yöntemindeki işlem karmaşıklığının azaltılması ve mümkün olan en az sayıda röle seçilerek güç tüketiminin azaltılması amaçlarıyla bir ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu yapısı tasarlanmıştır. En önemli avantajda, mümkün olduğunca fazla sayıda olası röle ile iki-yönlü işbirlikli ağlarda tasarlanan yapının hesaplama karmaşıklığı röle sayısının artışı ile exponansiyelden ziyade lineer olarak artmaktadır. Benzetim sonuçları tasarlanan yöntemin seçilen röle sayısını ve sonuç olarak güç tüketimini azalttığını göstermektedir.



Şekil 4.5: $\gamma_e = 9\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları.

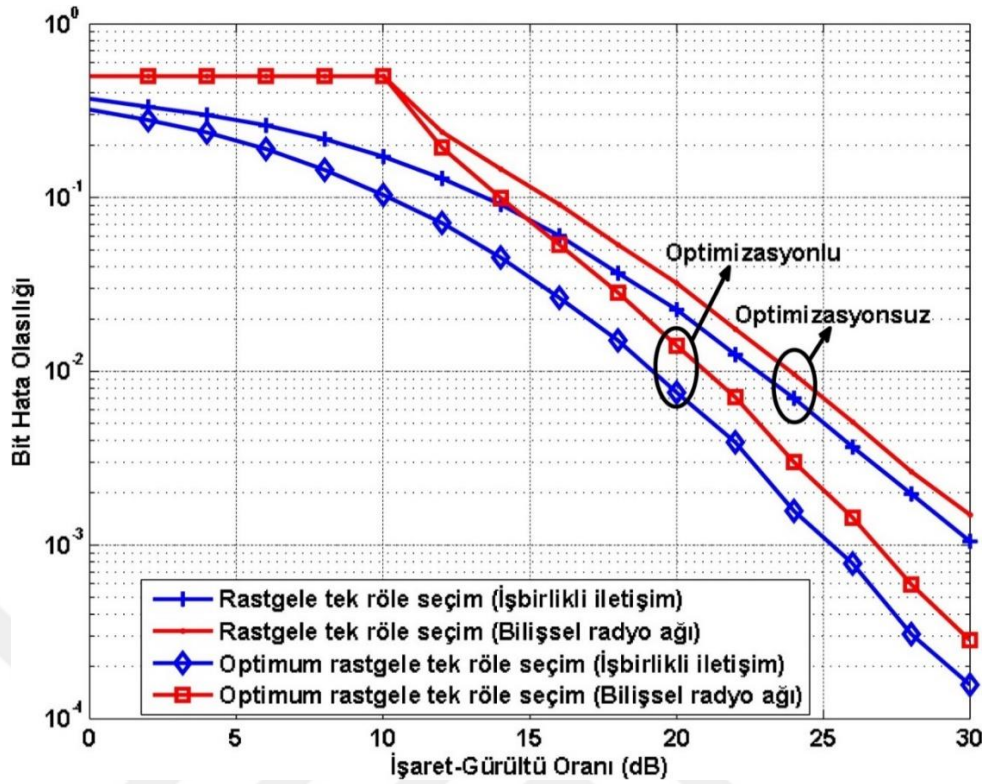


Şekil 4.6: $\gamma_e = 12\text{dB}$ için seçilen ortalama röle sayıları.

4.3. BİLİŞSEL RADYO AĞINDA TEKLİ RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde sistemin bilgisayar yardımıyla Monte-Carlo benzetim sonuçları verilecektir. Benzetimler de çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak alınmış, bir çerçeve boyunca kanal sönümleme katsayılarının değişmediği varsayılmıştır. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla ikincil alıcıdan ikincil vericiye iletildiği ve dolayısıyla ikincil verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir. Ayrıca Kaynak-Hedef, Kaynak-Röle ve Röle-Hedef arasındaki tüm kanalların her iki ağ içinde Rayleigh sönümlmeli kanallar olduğu varsayılmış ve sembollerin QPSK modülasyonu ile modüle edilerek gönderildiği düşünülmüştür. Hata başarımlar eğrilerinde yatay eksenlerdeki işaret gürültü oranı, röle ve hedefte her iki kanal içinde aynı kabul edilmiştir.

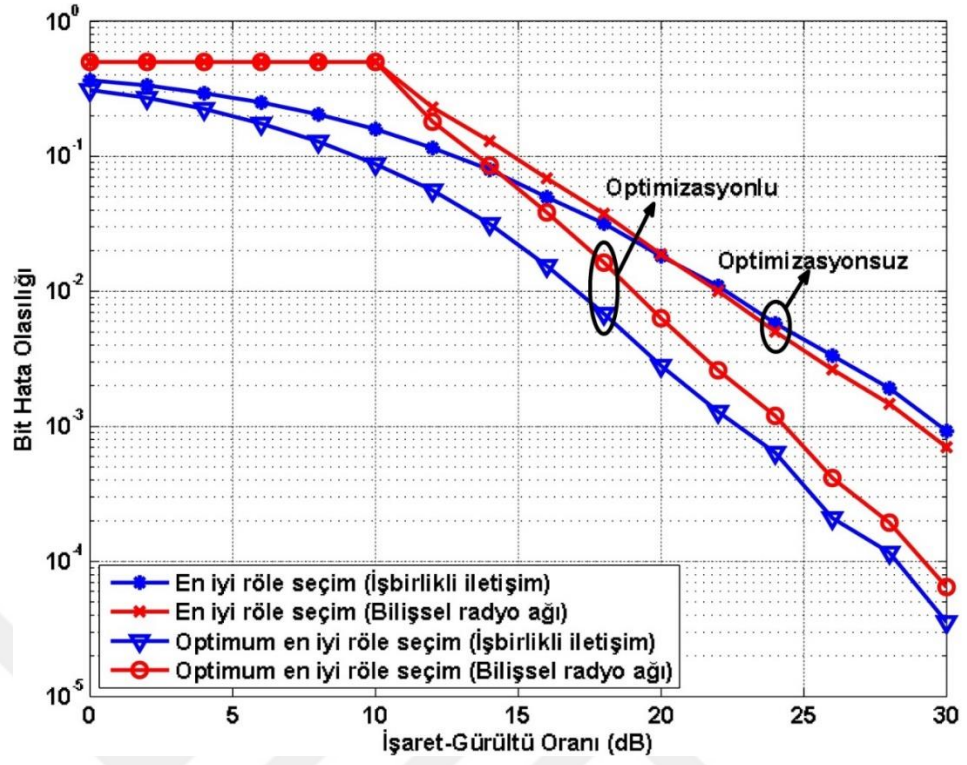
Bu varsayımlar altında sistemin performansını incelemek için hata başarımlar eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 4.7'de rastgele tek bir röle seçim yöntemi ve Şekil 4.8'de en iyi röle seçim yöntemi için işbirlikli iletişim ve bilişsel iletişim ağlarında hata başarımlar eğrileri hem güç optimizasyonsuz yapı ile hem de güç optimizasyonlu yapı ile elde edilmiştir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de bilişsel iletişim ağı için 10dB'de bir durma noktası olduğu görülmektedir. Birincil iletimlerin bu noktadan düşük işaret-gürültü oranları için birincil iletimin kayıp olasılığı P_{Esik} eşik değeri sağlanamadığı için ikincil iletimlere izin verilmemektedir ve bu noktadan düşük işaret-gürültü oranı değerleri için sadece birincil iletimler için işbirliği olmayan senaryonun olduğu farz edilmiştir. Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'den işbirlikli iletişim ağı ve bilişsel iletişim ağı güç optimizasyonu yapıldığında hata başarımlarının arttığı görülmüştür. Aynı zamanda hata başarımlar eğrilerinden işbirlikli iletişim ağına hata başarımların bilişsel iletişim ağı içerisindeki performansının düştüğü görülmektedir. Bilişsel iletişim ağındaki hata başarımlarının düşmesinin nedeni birincil iletimlerin ikincil iletimlerin iletim gücünü sınırlandırmasıdır. Ayrıca, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'den güç optimizasyonunun hata başarımlarını işaret-gürültü oranıyla artan şekilde 0-5dB aralığında arttırdığı görülmektedir.



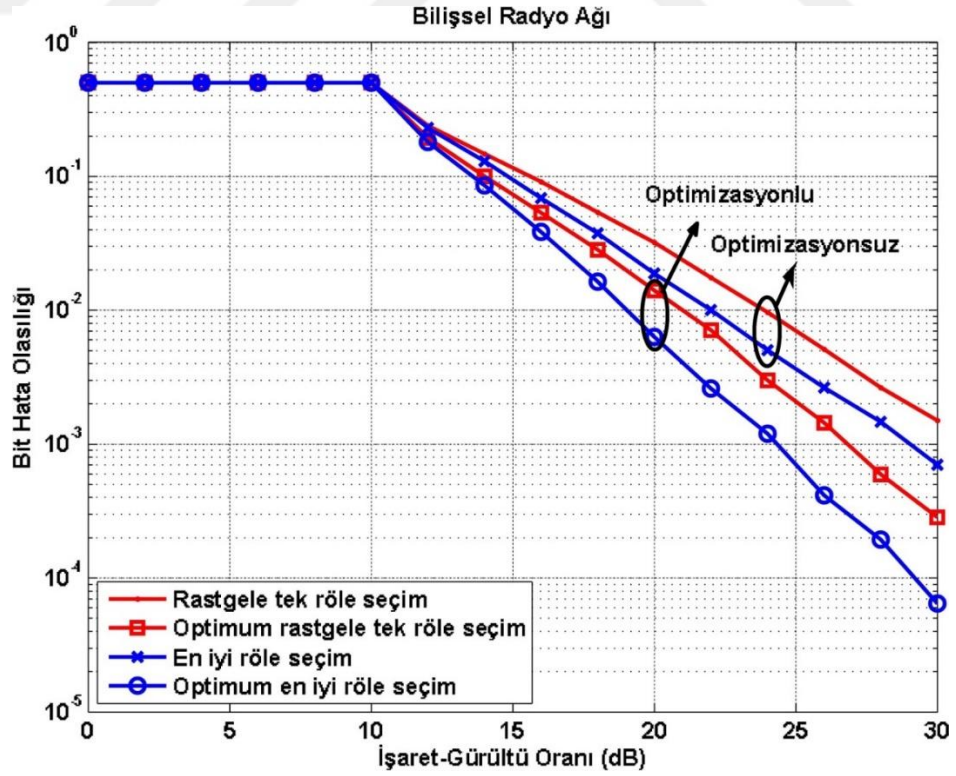
Şekil 4.7: İşbirlikli iletişim ve bilişsel radyo ağlarında rastgele tek bir röle seçim yöntemi için hata başarımları.

Şekil 4.9 ise bilişsel iletişim ağlarında en iyi röle seçim yöntemi ve rastgele bir röle seçim yönteminin hata performanslarının birlikte görülebilmesini sağlamaktadır. Bu şekilde görüldüğü ve zaten beklenildiği gibi en iyi röle seçim yönteminin hata başarımları rastgele bir röle seçim yöntemine göre 0-3dB daha iyi olmasına karşın en iyi röle seçimin işlem karmaşıklığı özellikle çok fazla aday röleye sahip ağlarda oldukça yüksektir. En iyi röle seçim yönteminin karmaşıklığından kurtulmak için daha iyi hata performansına sahip güç optimizasyonlu rastgele tek bir röle seçim yöntemi kullanılabilir.

Bilişsel iletişim ağlarında birincil kullanıcıya en az girişimle iyi bir ikincil kullanıcı iletişimi yapılabilmesi için işbirlikli bir iletişim yapısı altında farklı röle seçim yöntemleri ve güç optimizasyonu önerilmiştir. Önerilen yöntemlerin performansını incelemek için hata başarımları eğrileri bilgisayar benzetimleriyle çıkarılmıştır. Karşılaştırma amacıyla bilişsel iletişim kısıtı olmadığı durum için de işbirlikli iletişim için hata başarımları eğrileri çıkarılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen yöntemlerle lisanslı kullanıcıya en az girişimle iyi bir ikincil kullanıcı iletişimi yapılabileceği görülmüştür.



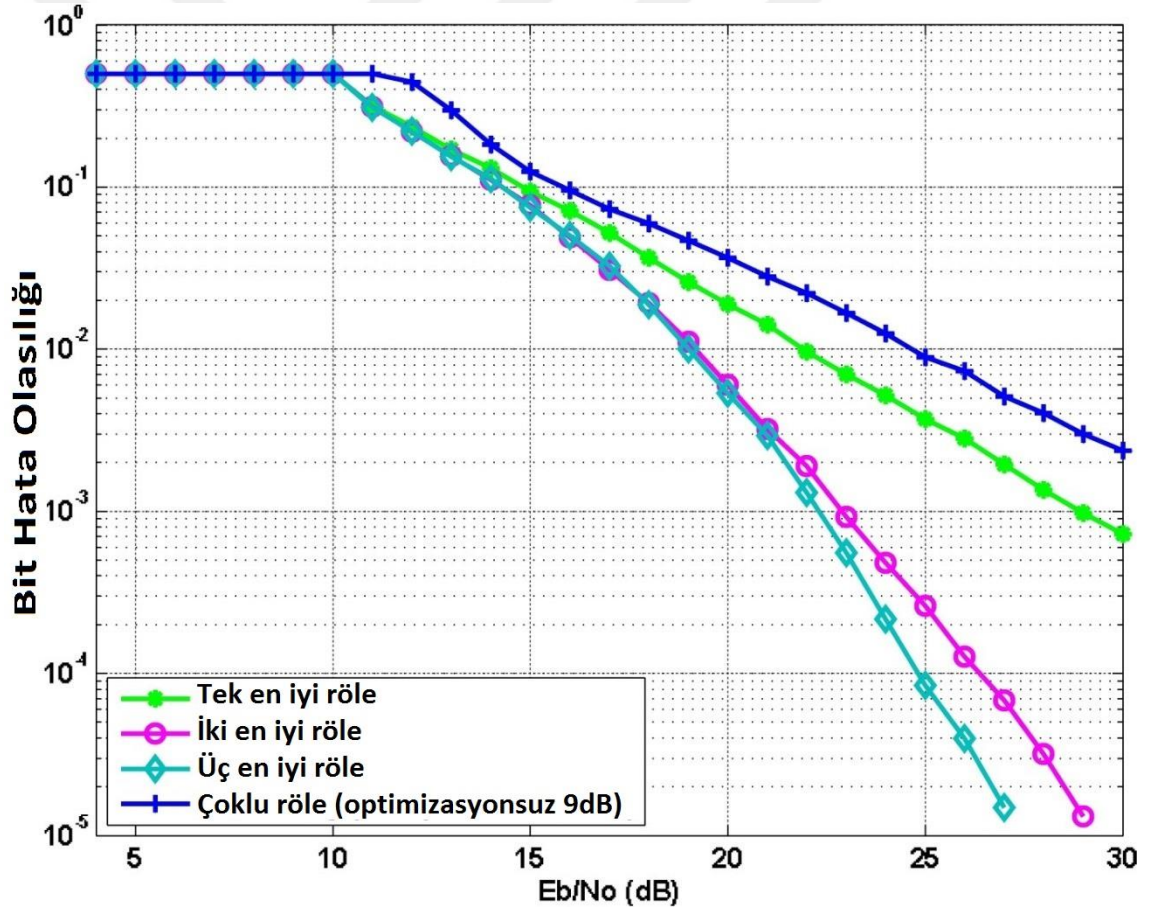
Şekil 4.8: İşbirlikli iletişim ve bilişsel radyo ağlarında en iyi röle seçim yöntemi için hata başarımları eğrileri.



Şekil 4.9: Bilişsel radyo ağında rastgele tek bir röle seçim ve en iyi röle seçim yöntemleri için hata başarımları eğrileri.

4.4. BİLİŞSEL RADYO AĞINDA ORTAK ÇOKLU RÖLE SEÇİMİ VE GÜÇ OPTİMİZASYONU İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

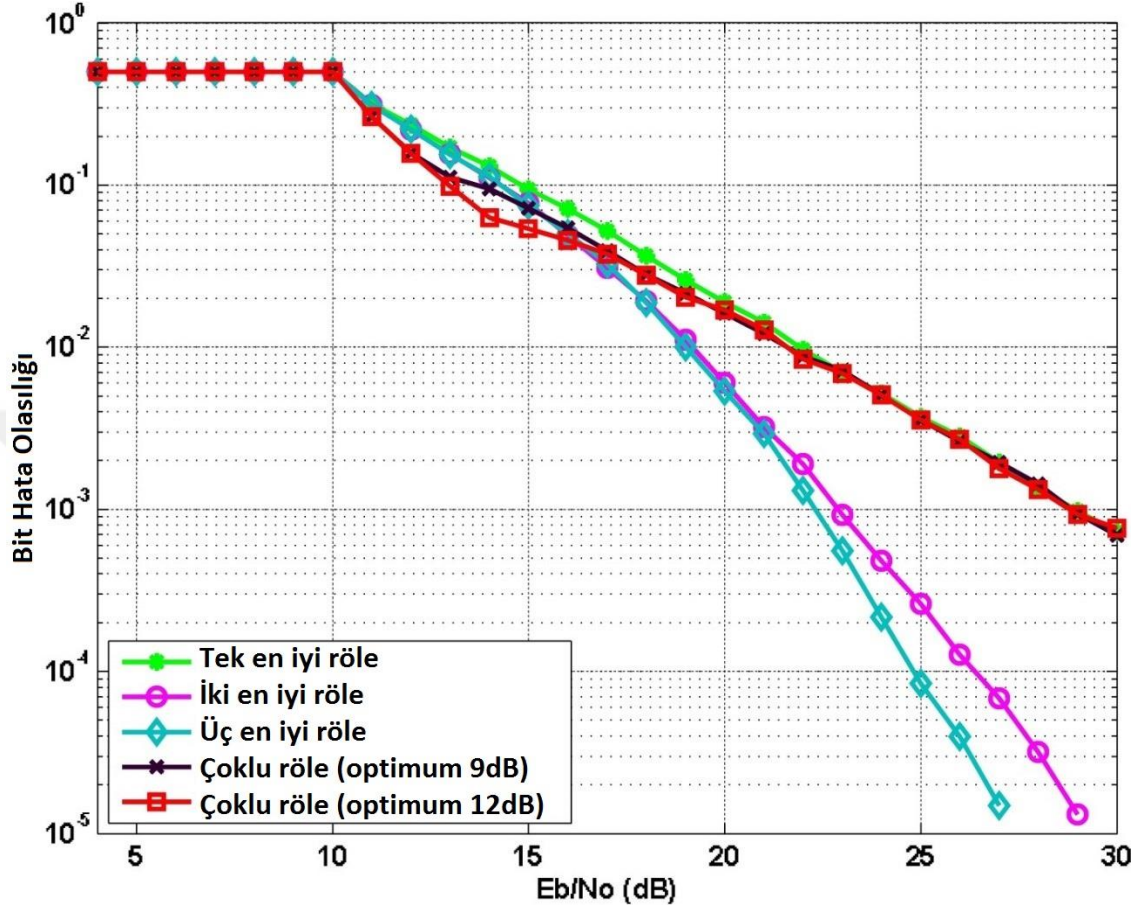
Sistemin performansının test edilmesi amacıyla bilgisayar yardımıyla Monte-Carlo benzetimleri yapılmıştır. Benzetimlerde çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak alınmış, bir çerçeve boyunca kanal sönümleme katsayılarının değişmediği varsayılmıştır. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla ikincil alıcıdan ikincil vericiye iletildiği ve dolayısıyla ikincil verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir. Ayrıca Kaynak-Hedef, Kaynak-Röleler ve Röleler-Hedef arasındaki tüm kanalların Rayleigh sönümlmeli kanallar olduğu varsayılmış; sembollerin QPSK modülasyonu ile modüle edilerek gönderildiği düşünülmüştür.



Şekil 4.10: Güç optimizasyonu olmadan hata başarımları eğrileri.

Bu varsayımlar altında sistemin performansını incelemek için hata başarımları eğrileri ve seçilen ortalama röle sayısı eğrileri çıkarılmıştır. Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sistemin hata başarımları güç optimizasyonu olmadan ve güç optimizasyonu yapılarak sırasıyla

gösterilmiştir. Aynı şekillerde ayrıca bu bilişsel iletişim sistemi için tek en iyi röle, çift en iyi röle ve üçlü en iyi röle seçim durumları için hata başarımları eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.11: Güç optimizasyonu yapılarak elde edilen hata başarımları eğrileri.

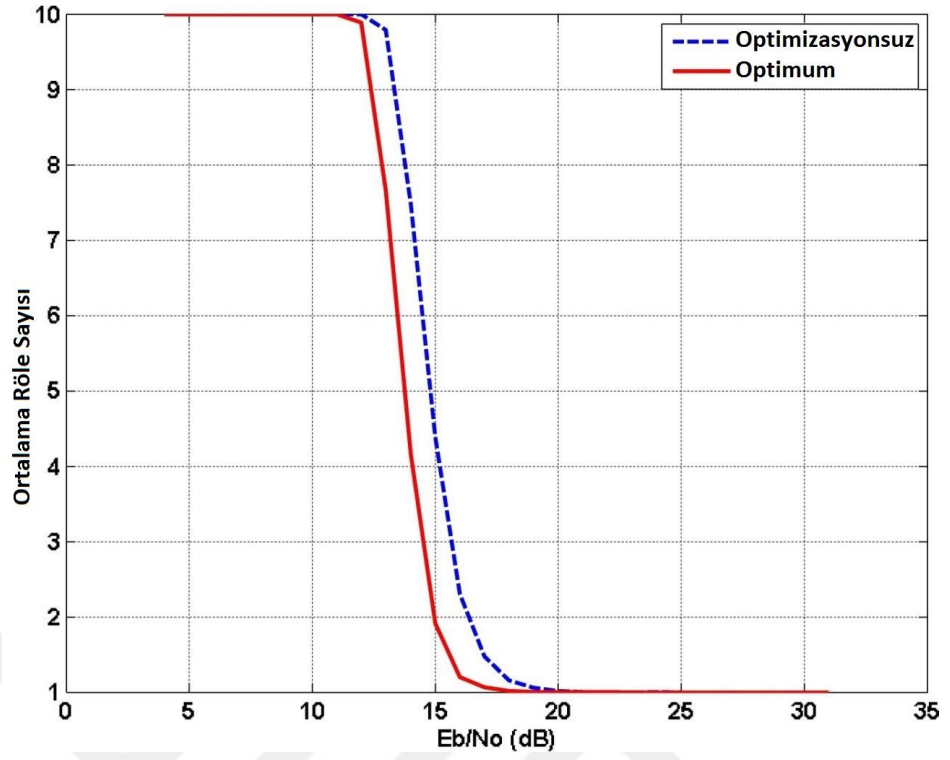
Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de 10dB değerinde görülen kesim noktası birincil iletim SNR kesim değerinden daha küçük SNR değerleri için ikincil iletime izin verilmeyen noktayı göstermektedir. Kesim noktasından küçük bölge için işbirlikli iletişimin olmadığı ve sadece birincil iletimin gerçekleştirildiği varsayılmıştır. 10dB ve 16dB değerleri arasındaki artan karmaşıklık haricinde Şekil 4.11'den rahatlıkla anlaşıldığı üzere önerilen metod tek en iyi röle, çift en iyi röle ve üçlü en iyi röle seçim yöntemlerinden daha iyi hata başarımı sağlamıştır. SNR yükseldikçe önerdiğimiz metod ve tek en iyi röle seçim metodu yaklaşık aynı hata başarımını sağlamaktadır, çünkü seçilen röle sayısı birden tek röleye düşmektedir. Beklendiği üzere Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 karşılaştırıldığında optimizasyonlu yöntemin optimizasyonsuz yöntemden daha iyi

sonuçlar verdiği görülmektedir. Ayrıca girişim durumunda tasarladığımız yöntemin daha başarılı bir performans gösterdiği göz önünde bulundurulmalıdır.

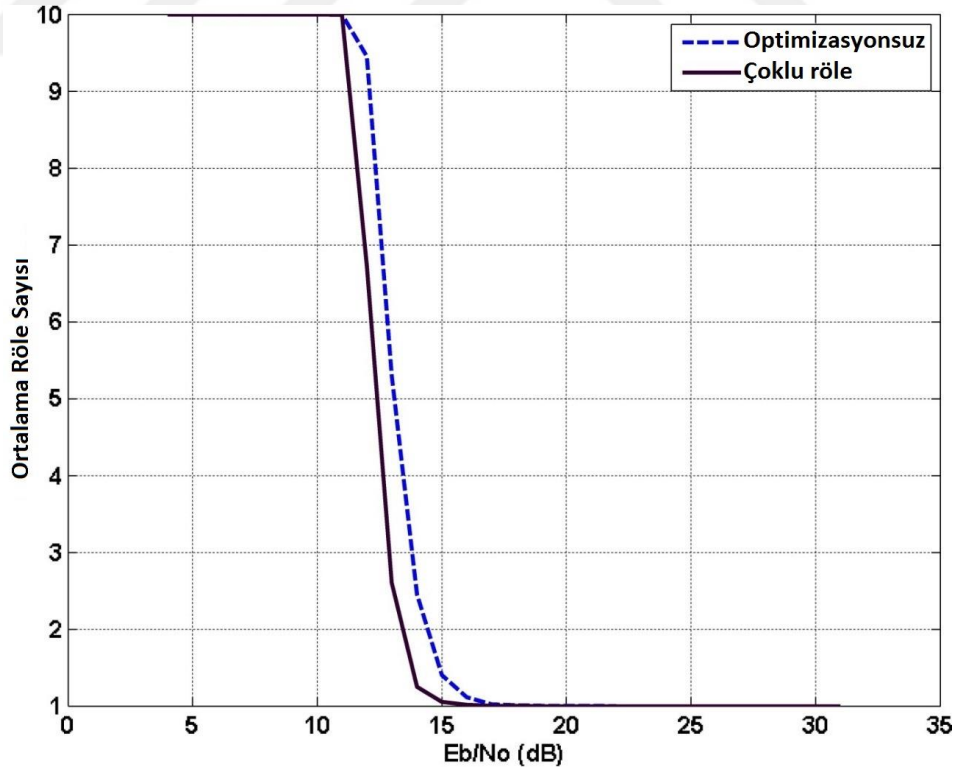
Optimizasyonsuz durum için Şekil 4.10'de görüldüğü üzere çok daha düşük hesaplama karmaşıklığı ile yeterli hata performansını sağladık. Bu yapı çok düşük hesaplama karmaşıklığına ihtiyaç duyan sistemler için elverişli olabilir.

12dB ve 9dB değerlerinde seçilen ortalama röle sayıları Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de sırasıyla gösterilmiştir. Seçilen ortalama röle sayıları hem optimizasyonsuz hem de optimizasyonlu durum için her bir şekilde verilmiştir. Tüm çerçevelerdeki röle seçim işlemi tamamlanıncaya kadar seçilen ortalama röle sayıları her bir çerçeve için tekrarlanmıştır. Tasarlanan metodun her bir adımında güç optimizasyonunun ilave edilmesinin kullanılan röle sayısını azalttığı her iki şekilden de anlaşılmaktadır. İletim için daha az sayıda röle kullanmak sistem verimini arttırmaktadır. Bu gereken SNR değerine sadece birkaç röle ile ulaşmak mümkündür. Daha az röle seçilmesiyle hesaplama karmaşıklığını düşüren önemli bir sonuçtur. Eşik SNR değeri arttırıldıkça seçilen ortalama röle sayısındaki avantajın arttığı da gözlenmiştir.

Bu bölümde, bilişsel radyo ağlarının performansını arttıran düşük hesaplama karmaşıklığına sahip ortak çoklu röle seçimiyle güç optimizasyonlu bir uyarlanabilir işbirlikli çeşitleme yapısı oluşturulmuştur. Bu metodun en önemli avantajı bilişsel ağlarda olası röle sayısının büyüklüğü ile ilgili olarak hesaplama karmaşıklığı röle sayısının artışıyla eksponansiyel değil lineer olarak artmasıdır. Tasarlanan yapı çoklu röle seçimi için bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcı iletimlerinde potansiyel röle durumları ile düşük hesaplama karmaşıklığı sunmaktadır. Aynı zamanda, her bir adımda güç optimizasyonu yapılarak en az sayıda röle ile hata başarımının elde edilmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak birincil kullanıcı iletim kalitesi korunarak düşük karmaşıklıkla bilişsel kullanıcıların iletimi performansı arttırılmıştır.



Şekil 4.12: 12dB eşik değeri için seçilen ortalama röle sayısı.



Şekil 4.13: 9dB eşik değeri için seçilen ortalama röle sayısı.

4.5. ENERJİ TEMELLİ İŞBİRLİKLİ SPEKTRUM SEZME İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

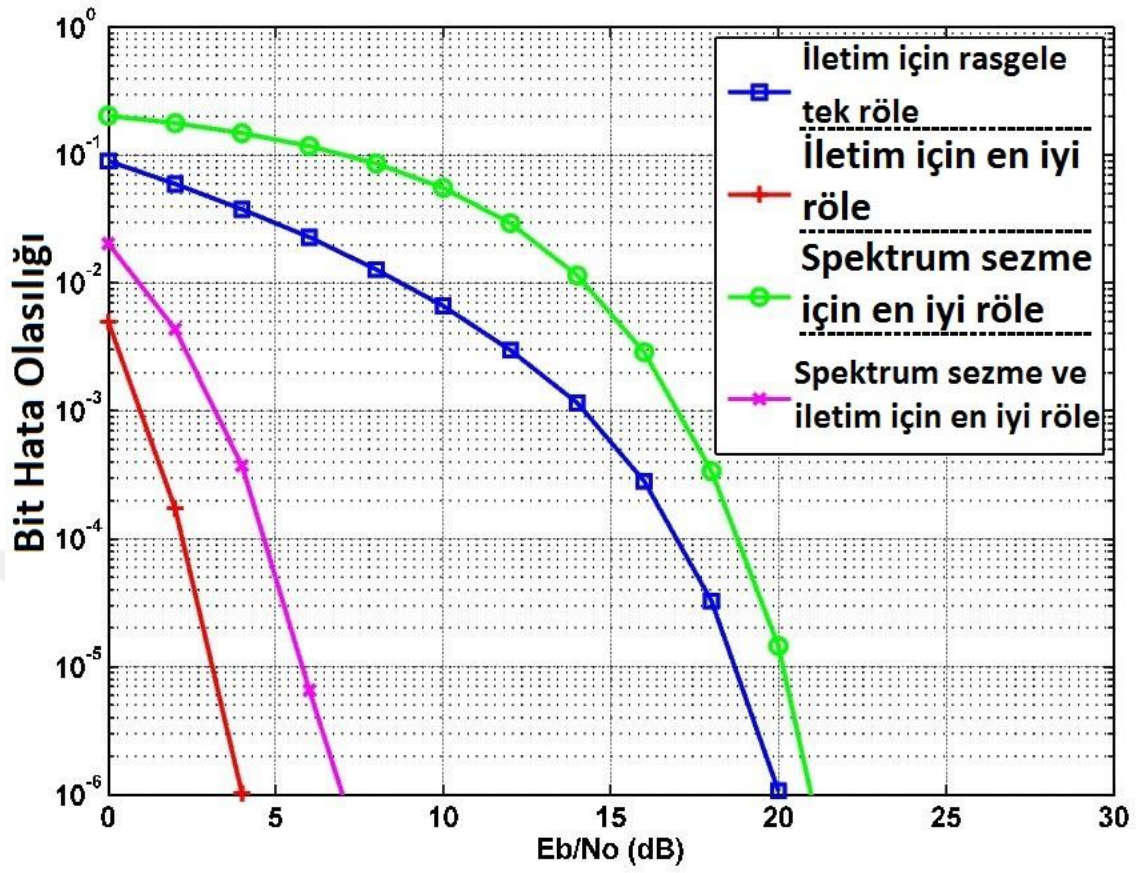
Bu bölümde Monte Carlo denemeleri yardımıyla elde edilen bilgisayar benzetim sonuçları verilecektir. Yöntem dört farklı senaryoda test edilmiştir:

1. Hem işbirlikli iletim hem de spektrum sezme için ikincil ağda bulunan rölelerden bir tanesi rasgele seçilmiştir.
2. İletim için en iyi röle seçilmiş ve hem iletim hem de spektrum sezme için kullanılmıştır.
3. Spektrum sezme için en iyi röle seçilmiş ve hem iletim hem de spektrum sezme için kullanılmıştır.
4. Önerilen yöntem ile en iyi röle seçilmiş ve hem iletim hem de spektrum sezme için kullanılmıştır.

Benzetimlerde çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak alınmış, bir çerçeve boyunca kanal sönmüleme katsayılarının değişmediği varsayılmıştır. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla ikincil alıcıdan ikincil vericiye iletildiği ve dolayısıyla ikincil verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir. Ayrıca Kaynak-Hedef, Kaynak-Röleler ve Röleler-Hedef arasındaki tüm kanalların Rayleigh sönmülemeli kanallar olduğu varsayılmış; sembollerin QPSK modülasyonu ile modüle edilerek gönderildiği düşünülmüştür.

Şekil 2.3'deki bilişsel ağ yapısının başarımı elde edilmiş ve bit hata olasılığı eğrisi Şekil 4.14'de verilmiştir.

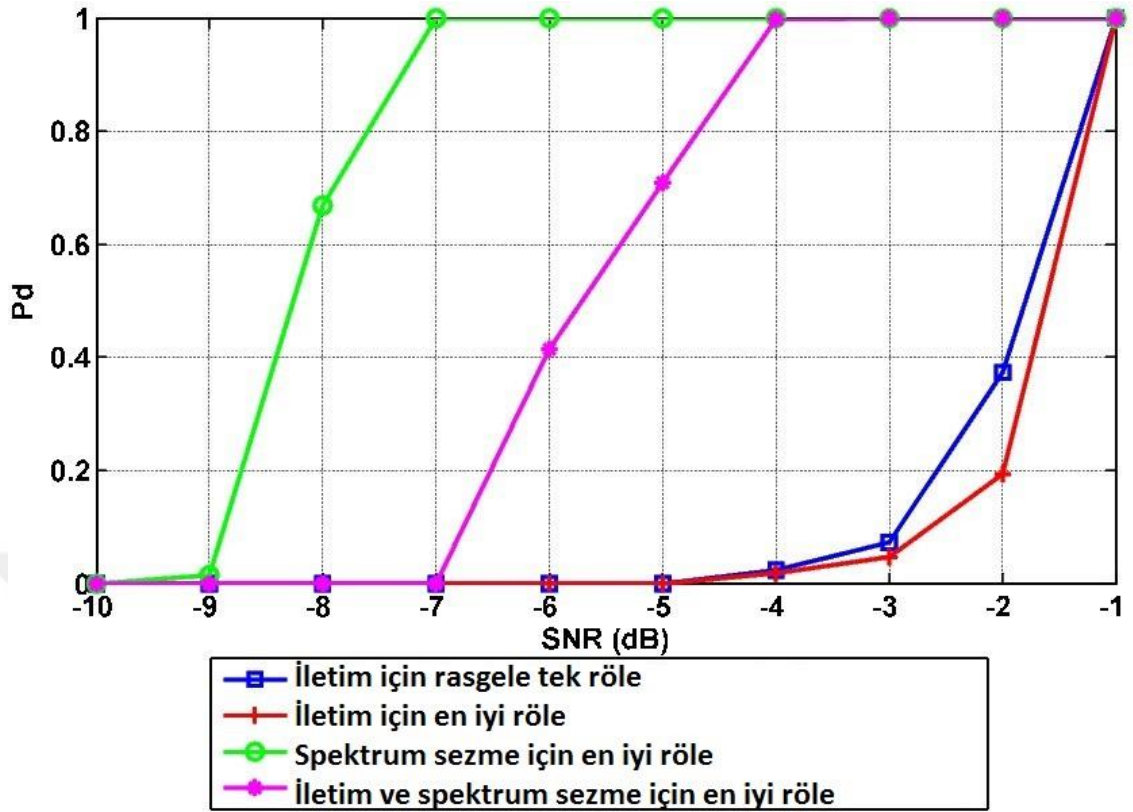
Şekil 4.14'den rahatlıkla anlaşılabacağı üzere (2) numaralı senaryoda diğerlerinden daha iyi bir başarımla elde edilmiştir. İletim için en kötü başarımla (3) numaralı senaryoda görülmüştür. Fakat (4) numaralı senaryoda önerilen yöntem rasgele röle seçim yöntemi ve spektrum sezme için en iyi röle seçim yönteminden daha iyi bir başarımla vermiştir. Ayrıca önerilen yöntem iletim için en iyi röle seçim yöntemine çok yakın bir başarımla sağlamıştır. Spektrum sezme için bulma olasılıkları başarımı yukardaki senaryolar için test edilmiş ve sonuçlar Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.14: 4 farklı senaryo için hata başarıım eğrisi.

Rasgele seçim yönteminin bulma olasılığı değerleri, iletim için en iyi röle seçim olan (2) numaralı senaryodan daha yüksektir. Fakat önerilen optimum yöntem iletim için rasgele seçim ve en iyi röle seçim yöntemlerinden daha iyi bulma olasılık değerlerine sahiptir. Son olarak iletim ve spektrum sezme için önerilen en iyi röle seçim yönteminin bulma olasılık değerleri, spektrum sezme için en iyi röle seçim yöntemine diğer yöntemlerden çok daha yakın bulma olasılık değerlerine sahiptir.

Bu bölümde, çok röleli bilişsel radyo ağlarında işbirlikli iletim ve spektrum sezme için bir birleşik optimum röle seçim yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan röle seçim yapısının en önemli avantajı, hem iletim için yeterli bir hata başarımına sahip hem de spektrum sezme için yeterli bir bulma olasılığını sağlayan birleşik bir röle seçimini gerçekleştirmesidir. Simülasyon sonuçları çok röleli bilişsel ağlarda önerilen yöntemin optimum sistem çıktısı sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak önerilen yöntem hem ikincil ağda veri iletimi için yeterli başarıma sahip hem de birincil ağın spektrumunu iyi bir şekilde algılayabilen bir röle seçimini başarıyla gerçekleştirebilmektedir.



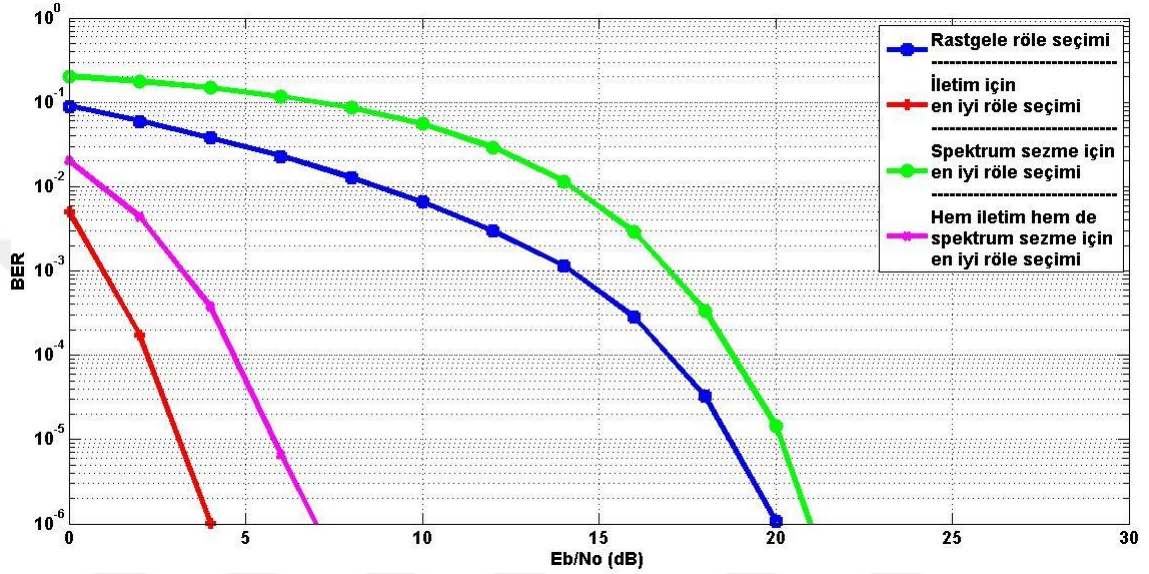
Şekil 4.15: Spektrum sezme için bulma olasılığı eğrisi.

4.6. RAYLEIGH SÖNÜMLEMELİ KANALLAR İÇİN İŞBİRLİKLİ DÖNGÜSEL DURAĞANLIĞA DAYANAN SPEKTRUM SEZME VE BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, önerilen yöntemin bilgisayar yardımıyla elde edilen Monte-Carlo benzetim sonuçları sunulmakta ve performans karşılaştırmaları yapılmaktadır. Öncelikle, işbirlikli iletim için Bit Hata Olasılığı (BHO) ve işbirlikli spektrum sezme için sezme olasılığı ikincil ağda bulunan rölelerden bir tanesi rastgele seçilerek elde edilmiştir. İkinci olarak, ikincil ağda bulunan rölelerden iletim için en iyi röle tespit edilerek önerilen yöntem test edilmiştir. Üçüncü olarak önerilen yöntem, spektrum sezme için ikincil ağda bulunan rölelerden en iyi röle tespit edilerek test edilmiştir. Son olarak önerilen yöntem, hem iletişim hem de spektrum sezme için ikincil ağda bulunan rölelerden en iyi röle seçilerek test edilmiştir.

Benzetimlerde çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak seçilmiş ve bir çerçeve boyunca kanal sönmleme katsayılarının değişmediği kabul edilmiştir. Röle seçim işlemi için

gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla ikincil alıcıdan ikincil vericiye iletiildiği ve dolasıyla ikincil verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir. Ayrıca Kaynak-Hedef, Kaynak-Röle ve Röle-Hedef arasındaki tüm kanalların her iki ağ için de Rayleigh sönümlemeli kanallar olduğu varsayılmış ve sembollerin QPSK modülasyonu ile modüle edilerek gönderildiği düşünölmüştür.

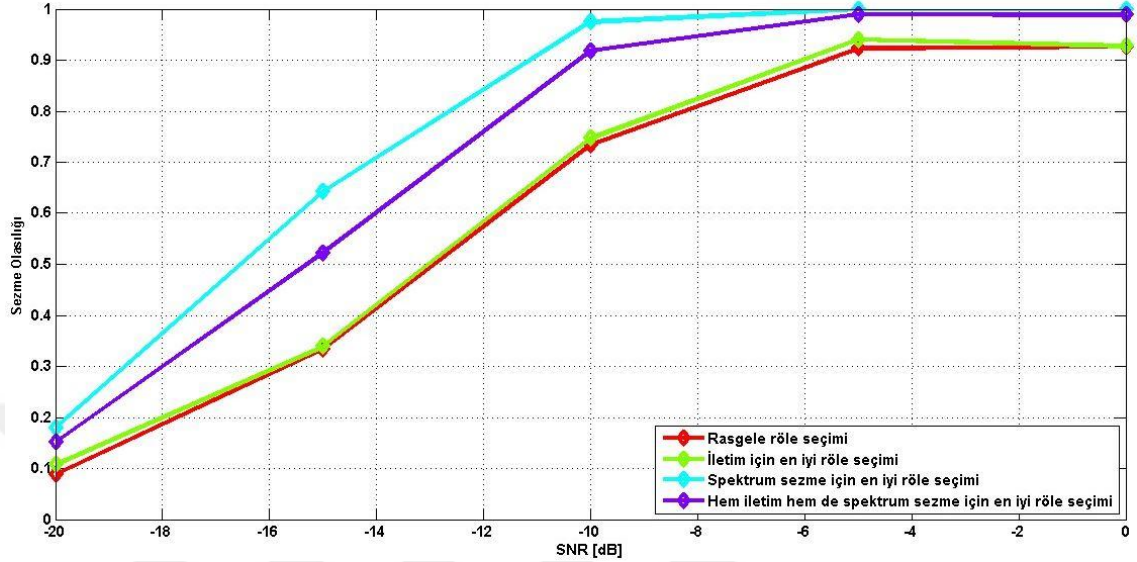


Şekil 4.16: İşbirlikli Bilişsel Ağ Yapısı için Bit Hata Oranı Başarımı

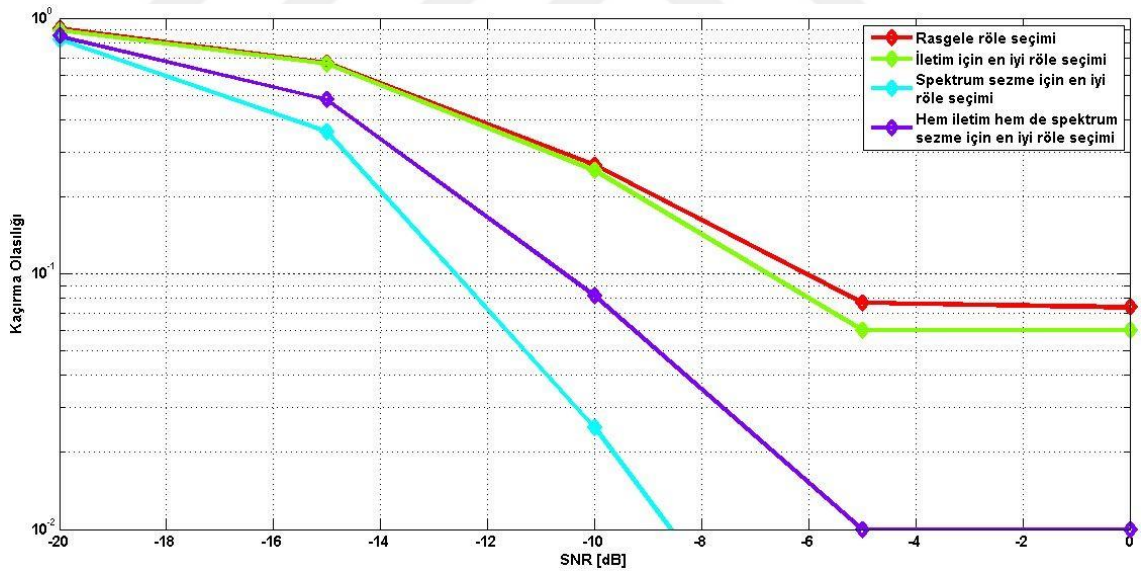
Şekil 2.3'de gösterilen bilişsel ağ yapısının bit hata oranı başarımı Şekil 4.16'da sunulmuştur. Şekil 4.16'dan açıkça göröldüğü üzere iletim için en iyi röle seçim yöntemi, rastgele röle seçiminden ve spektrum sezme için en iyi röle seçim yönteminden daha iyi hata başarımına sahiptir. Bildiride önerilen her iki amaç için birleşik röle seçim yöntemi ise rastgele röle seçimi ve spektrum sezme için en iyi röle seçim yöntemlerine göre daha iyi bir hata başarımı göstermiş ve iletim için en iyi röle seçim yöntemine çok yakın bir hata başarımına ulaşmıştır. Her bir yöntem için sezme olasılıkları hesaplanarak spektrum sezme başarımları elde edilmiş ve Şekil 4.17'de sunulmuştur.

Şekil 4.17'de göröldüğü üzere iletim için en iyi röle seçim yönteminin sezme olasılığı rastgele röle seçiminden daha iyi bir başarım göstermesine rağmen spektrum sezme için en iyi röle seçim yönteminden daha kötü bir sezme başarımı göstermektedir. Önerilen birleşik röle seçim yöntemi ise rastgele röle seçimi ve iletim için en iyi röle seçim yöntemlerine göre daha iyi bir sezme başarımı göstermiş ve spektrum sezme için en iyi

röle seçim yöntemine çok yakın bir sezme başarımına ulaşmıştır. Aynı zamanda, her bir yöntem için kaçırma olasılıkları da Şekil 4.18’de sunulmuştur.



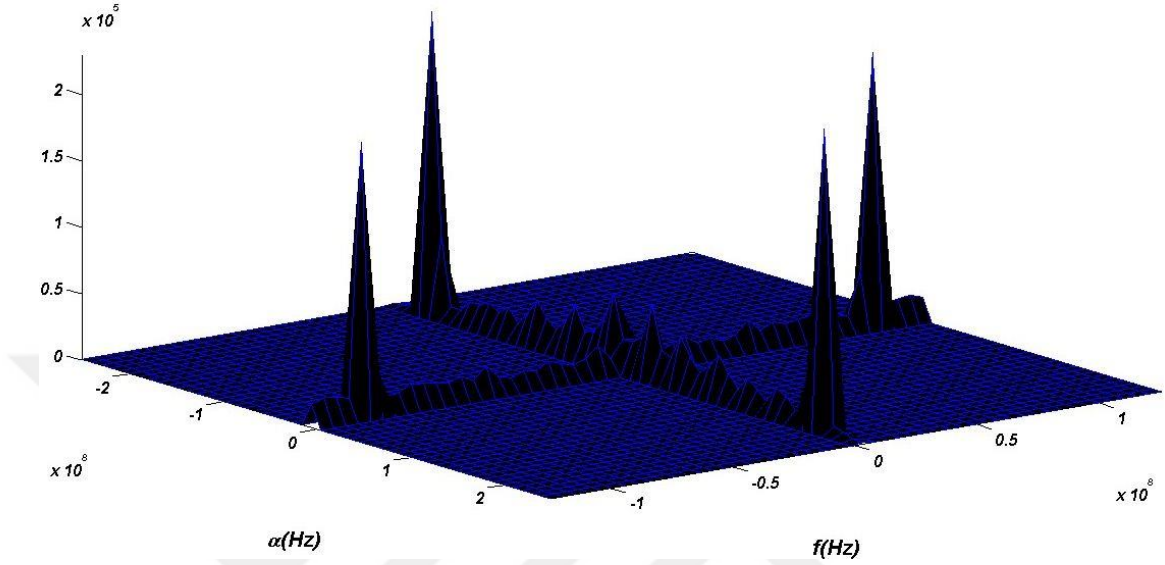
Şekil 4.17: İşbirlikli Bilişsel Ağ Yapısı için Sezme Olasılığı Başarımı



Şekil 4.18: İşbirlikli Bilişsel Ağ Yapısı için Kaçırma Olasılığı Başarımı

Şekil 4.18'de görüldüğü üzere iletim için en iyi röle seçim yönteminin kaçırma olasılığı rastgele röle seçiminden daha iyi bir başarımla göstermesine rağmen spektrum sezme için en iyi röle seçim yönteminden daha kötü bir kaçırma olasılığı başarımla vermiştir. Birleşik röle seçim yöntemi ise rastgele röle seçimi ve iletim için en iyi röle seçim yöntemlerine göre daha iyi bir kaçırma başarımla göstermiş ve spektrum sezme için en

iyi röle seçim yöntemine yakın bir sezme başarımına ulaşmıştır. Ayrıca, hem iletim hem de spektrum sezme için en iyi röle seçim yönteminin spektral kolerasyon fonksiyonu Şekil 4.19'da sunulmuştur.



Şekil 4.19: Hem İletim hem de Spektrum Sezme için En İyi Röle Seçim Yönteminin Spektral Kolerasyon Fonksiyonu

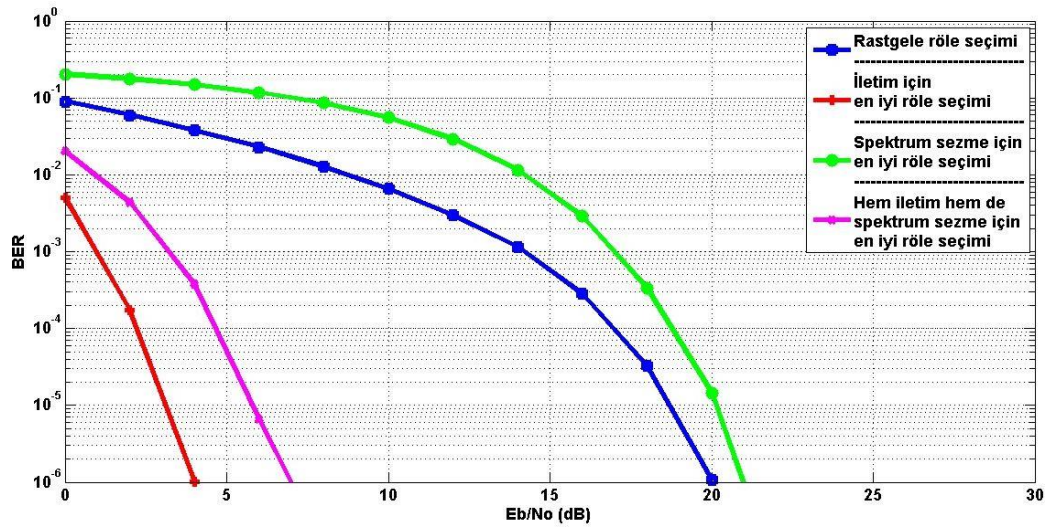
Bu bölümde bilişsel ağlarda hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için birleşik en iyi röle seçimine yönelik bir yöntem sunulmuştur. Önerilen röle seçim yönteminin en önemli avantajı düşük röle seçim karmaşıklığı ile hem iletişim hem de spektrum sezmede ortak seçilen rölenin iletim için yeterli bir hata başarımı ve yeterli bir sezme olasılığı başarımı göstermesidir. Ayrıca önerilen röle seçim yöntemi, döngüsel durağanlığa dayanan spektrum sezme tekniğini kullanması sebebiyle daha kararlı çalışmış, daha düşük SNR değerlerinde çalışabilmiş ve işlem kazancı sağlamıştır. Benzetim sonuçları, önerilen yöntemin bilişsel ağlar için en uygun sistem verimini sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak, önerilen birleşik röle seçim yöntemi düşük işaret gürültü oranlarında da ikincil ağda veri iletişimi ve birincil ağda spektrum sezme için yeterli verimi düşük işlem karmaşıklığı ile elde etmiştir.

4.7. RICIAN SÖNÜMLEMELİ KANALLAR İÇİN İŞBİRLİKLİ DÖNGÜSEL DURAĞANLIĞA DAYANAN SPEKTRUM SEZME VE BENZETİM SONUÇLARI

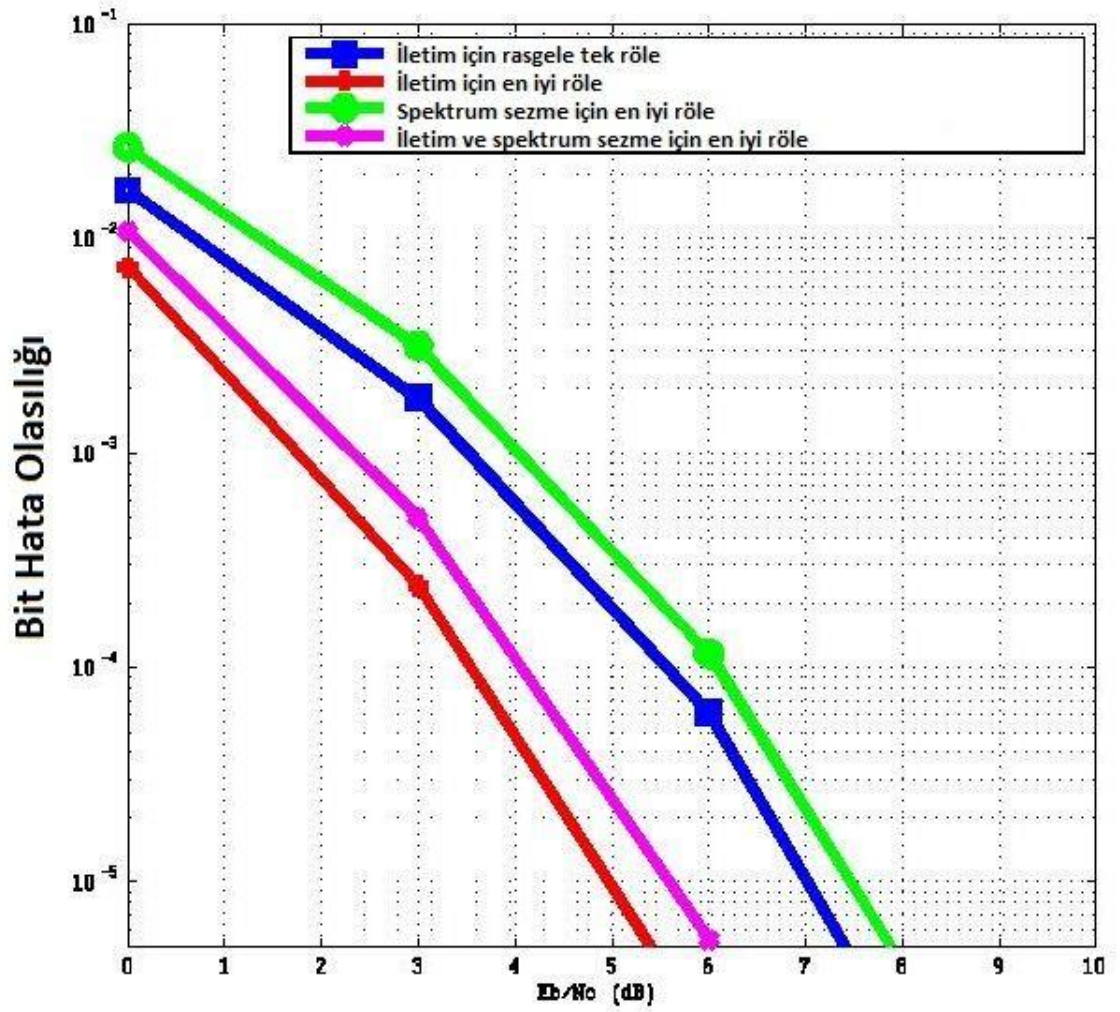
Bu bölümde ise, Rician kanallı bilişsel ağlar için hem spektrumun algılanmasında daha kararlı ve sezme hesaplama yükünü azaltacak hem de ikincil kullanıcı iletim performansını arttıracak işbirlikli sezme ve işbirlikli iletim için birleşik en iyi röle seçimi gerçekleştirilmiştir. Önerilen yöntemle göre hem iletim hem de sezme için tek bir seçim algoritması kullanılmakta ve her iki problem göz önüne alınarak en iyi röle seçilmektedir. Önerilen yöntem için hem iletim hem de sezme performansları bilgisayar benzetimleri yardımıyla sunulmuştur. Sonuçlar, önerilen yöntemin hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için uygun olduğunu göstermiştir.

Önerilen yöntemin hem Rician sönümlemeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlemeli kanal modeline sahip bilişsel ağlar için bilgisayar yardımıyla elde edilen Monte-Carlo benzetim sonuçları sunulmakta ve performans karşılaştırmaları yapılmaktadır. Öncelikle, işbirlikli iletim için Bit Hata Olasılığı (BHO) ve işbirlikli spektrum sezme için sezme olasılığı ikincil ağda bulunan rölelerden bir tanesi rastgele seçilerek elde edilmiştir. İkinci olarak, ikincil ağda bulunan rölelerden iletim için en iyi röle tespit edilerek önerilen yöntem test edilmiştir. Üçüncü olarak önerilen yöntem, spektrum sezme için ikincil ağda bulunan rölelerden en iyi röle tespit edilerek test edilmiştir. Son olarak önerilen yöntem, hem iletişim hem de spektrum sezme için ikincil ağda bulunan rölelerden en iyi röle seçilerek test edilmiştir.

Hem Rician sönümlemeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlemeli kanal modeline sahip bilişsel ağ benzetimlerinde çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak seçilmiş ve bir çerçeve boyunca kanal sönümleme katsayılarının değişmediği kabul edilmiştir. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla ikincil alıcıdan ikincil vericiye iletildiği ve dolayısıyla ikincil verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir. Ayrıca Kaynak-Hedef, Kaynak-Röle ve Röle-Hedef arasındaki tüm kanalların her iki ağ için de Rayleigh ve Rician sönümlemeli kanallar olduğu varsayılmış ve sembollerin QPSK modülasyonu ile modüle edilerek gönderildiği düşünülmüştür. Rician sönümlemeli kanal için Rician sönümleme katsayısı $K = 20$ olarak kabul edilmiştir.

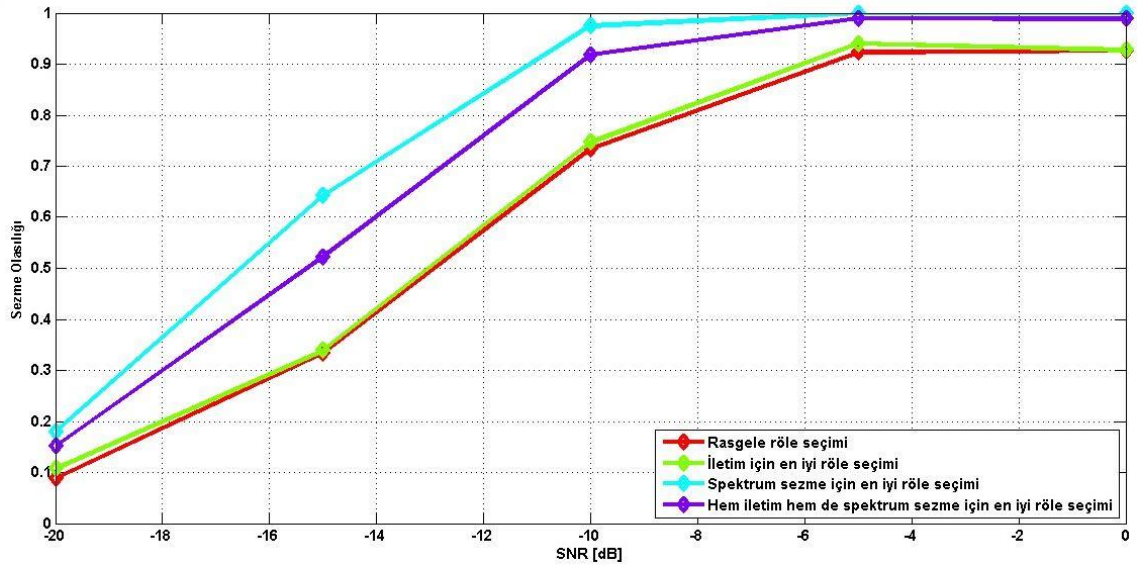


Şekil 4.20: Rayleigh sönümlmeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için bit hata oranı başarımı



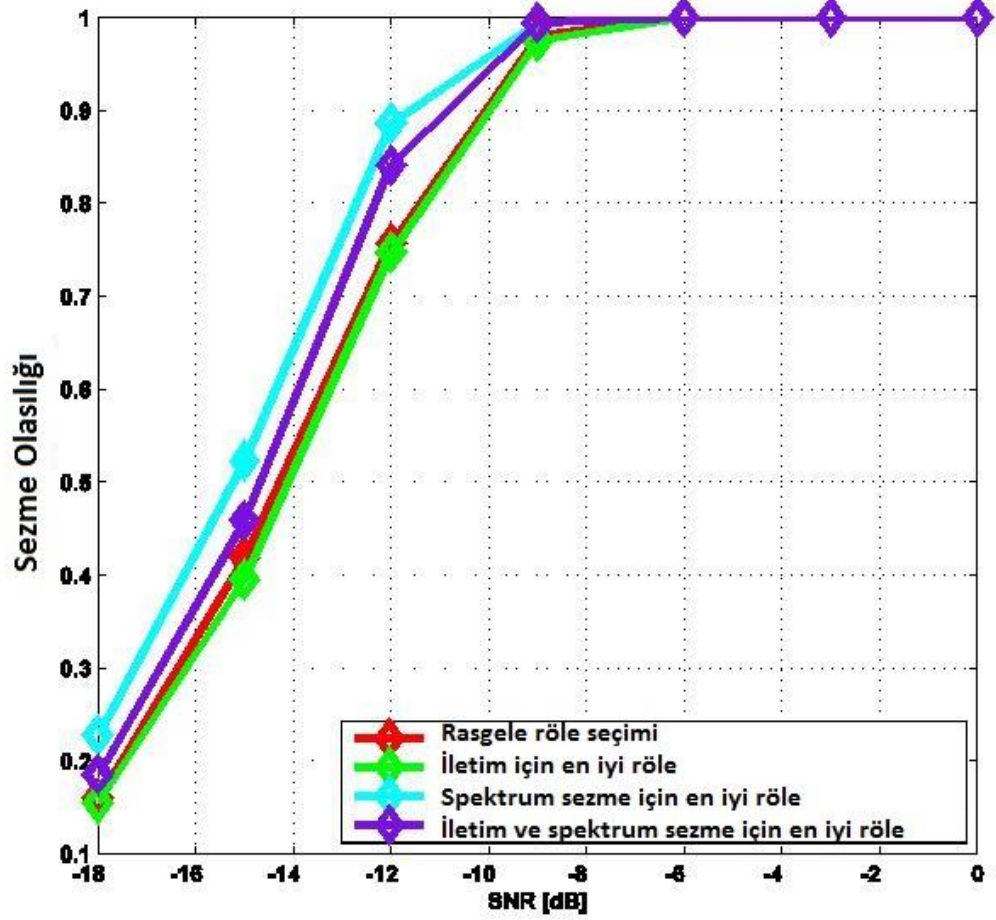
Şekil 4.21: Rician sönümlmeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için bit hata oranı başarımı

Şekil 2.3'de gösterilen bilişsel ağ yapısının bit hata oranı başarımı Şekil 4.20'de Rayleigh sönümlmeli kanal modeli için Şekil 4.21'de ise Rician sönümlmeli kanal modeli için sunulmuştur. Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'den açıkça görüldüğü üzere iletim için en iyi röle seçim yöntemi, rastgele röle seçiminden ve spektrum sezme için en iyi röle seçim yönteminden daha iyi hata başarımına sahiptir. Önerilen her iki amaç için birleşik röle seçim yöntemi ise rastgele röle seçimi ve spektrum sezme için en iyi röle seçim yöntemlerine göre daha iyi bir hata başarımı göstermiş ve iletim için en iyi röle seçim yöntemine çok yakın bir hata başarımına ulaşmıştır. Her bir yöntem için sezme olasılıkları hesaplanarak spektrum sezme başarımları elde edilmiş ve Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de sunulmuştur.



Şekil 4.22: Rayleigh sönümlmeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için sezme olasılığı başarımı

Şekil 4.22'de Rayleigh sönümlmeli kanal modeli için ve Şekil 4.23'de ise Rician sönümlmeli kanal modeli için görüldüğü üzere iletim için en iyi röle seçim yönteminin sezme olasılığı rastgele röle seçiminden daha iyi bir başarıml göstermesine rağmen spektrum sezme için en iyi röle seçim yönteminden daha kötü bir sezme başarımı göstermektedir. Önerilen birleşik röle seçim yöntemi ise rastgele röle seçimi ve iletim için en iyi röle seçim yöntemlerine göre daha iyi bir sezme başarımı göstermiş ve spektrum sezme için en iyi röle seçim yöntemine çok yakın bir sezme başarımına ulaşmıştır.



Şekil 4.23: Rician sönümlmeli kanal modeline sahip işbirlikli bilişsel ağ yapısı için sezme olasılığı başarımı

Bu bölümde hem Rician sönümlmeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlmeli kanal modeline sahip bilişsel ağlarda hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için birleşik en iyi röle seçimine yönelik bir yöntem sunulmuştur. Önerilen röle seçim yönteminin en önemli avantajı düşük röle seçim karmaşıklığı ile hem iletişim hem de spektrum sezmede ortak seçilen rölenin iletim için yeterli bir hata başarımı ve yeterli bir sezme olasılığı başarımı göstermesidir. Ayrıca önerilen röle seçim yöntemi, döngüsel durağanlığa dayanan spektrum sezme tekniğini kullanması sebebiyle daha kararlı çalışmış, daha düşük SNR değerlerinde çalışabilmiş ve işlem kazancı sağlamıştır. Benzetim sonuçları, önerilen yöntemin hem Rician sönümlmeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlmeli kanal modeline sahip bilişsel ağlar için en uygun sistem verimini sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak, önerilen birleşik

röle seçim yöntemi düşük işaret gürültü oranlarında da ikincil ağda veri iletişimi ve birincil ağda spektrum sezme için yeterli verimi düşük işlem karmaşıklığı ile hem Rician sönümlemeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlemeli kanal modeline sahip bilişsel ağlarda elde etmiştir.

4.8. İŞBİRLİKLİ UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, önerilen yöntemin bilgisayar yardımıyla elde edilen Monte-Carlo benzetim sonuçları sunulmakta ve performans karşılaştırmaları yapılmaktadır.

Çalışmanın birinci bölümü röle seçimi olmadan ve daha sonra işbirlikli uzaysal modülasyonda röle seçimi için sistem yapısı Şekil 3.1'de görüldüğü üzere röle seçimi her biri N adet röle içeren, iki farklı röle grubunda ayrı ayrı uygulanmaktadır. Her grupta seçilen en iyi röle ile iletim gerçekleştirilmektedir.

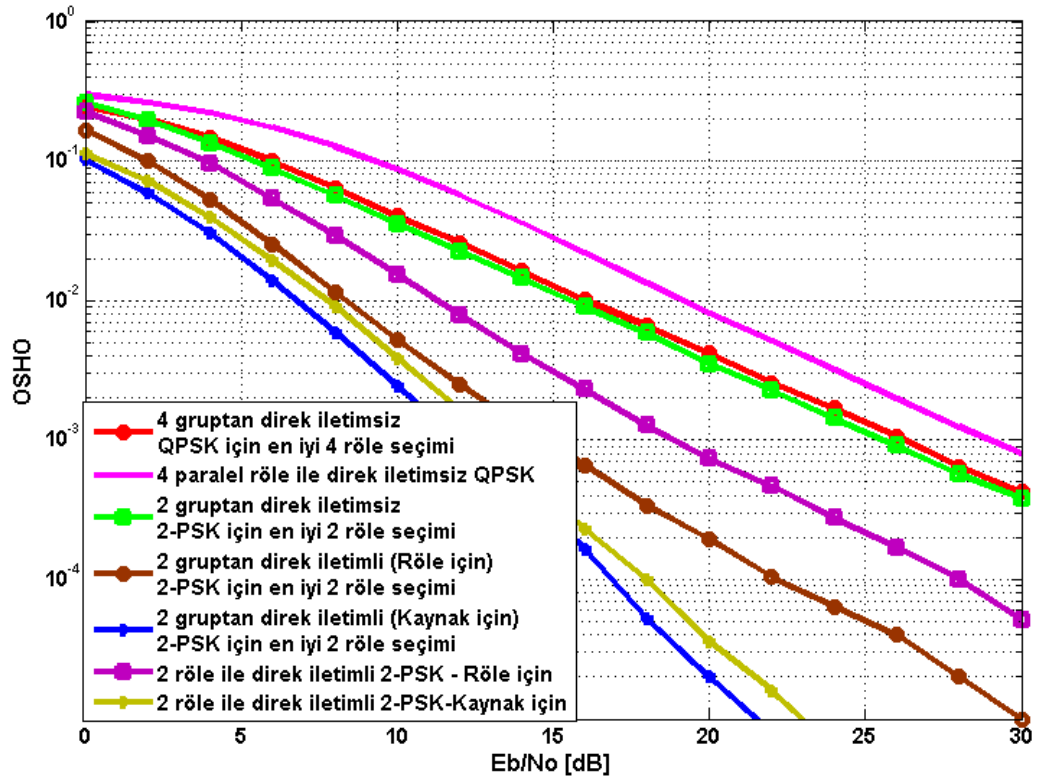
Çalışmanın ikinci bölümünde direk iletim olmadan sadece röleler kullanılarak iletişim gerçekleştirilmektedir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise QPSK için 4 adet röle kullanılmış ve dördüncü bölümünde de Şekil 3.2'de görüldüğü gibi röle seçimi, her biri N adet röle içeren, dört farklı röle grubunda ayrı ayrı uygulanmaktadır.

Benzetimlerde QPSK modülasyonu kullanan sistem yapısı için çerçeve uzunluğu 130 sembol olarak seçilmiş ve bir çerçeve boyunca kanal sönümleme katsayılarının değişmediği kabul edilmiştir. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geribesleme yardımıyla alıcıdan vericiye iletildiği ve dolayısıyla verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir.

1. Şekil 3.1'deki en iyi röle seçim yapısının (2 gruptan direk iletim de kullanılarak, 2-PSK için en iyi 2 röle seçimi) Ortalama Sembol Hata Olasılığı (OSHO) başarımı Şekil 4.24'de görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 2.6'da ki röle seçimi olmadan, sadece iki röle kullanılarak işbirlikli uzaysal modülasyonu (2 röle ile direk iletimli 2-PSK) yapısından daha iyidir.

2. Direkt iletimin sistemden çıkarılması durumunda (2 gruptan direkt iletimless 2-PSK için en iyi 2 röle seçimi) beklenildiği üzere sistemin ortalama sembol hata başarımları düşmüştür.
3. Röle seçimi yapılmadan sadece 4 paralel röle kullanılarak (4 paralel röle ile direkt iletimless QPSK) işbirlikli iletim için yeni bir model yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yeni modelde QPSK işaret kullanıldığı için sistemden beklendiği üzere ortalama sembol hata başarımları 2-PSK için oluşturulan yapıya göre daha düşük çıkmıştır.



Şekil 4.24: 2-PSK işbirlikli iletişim modeli, en iyi röle seçimine dayalı 2-PSK işbirlikli iletişim modeli, 2-PSK işbirlikli iletişim modelinde kaynak hedef arasındaki direkt iletimin olmadığı sistem senaryosu, QPSK işbirlikli iletişim modeli ve QPSK işbirlikli iletişimde çoklu küme içinde röle seçimi senaryosu için benzetim sonuçları.

4. Son olarak Şekil 3.2'de QPSK işaret iletimi için önerdiğimiz işbirlikli uzaysal modülasyon için en iyi röle seçimi (4 gruptan direk iletilimsiz QPSK için en iyi 4 röle seçimi) gerçekleştirildiğinde Şekil 4.24'den rahatlıkla anlaşılacağı üzere sistem başarımı röle seçimi yapılmayan sistemden (4 paralel röle ile direk iletilimsiz QPSK) daha iyi bir başarımla göstermiş ve QPSK iletimini 2-PSK iletim yapan (4 paralel röle ile direk iletilimsiz QPSK) sistemin başarımına çok yakın bir şekilde gerçekleştirdiği görülmüştür.

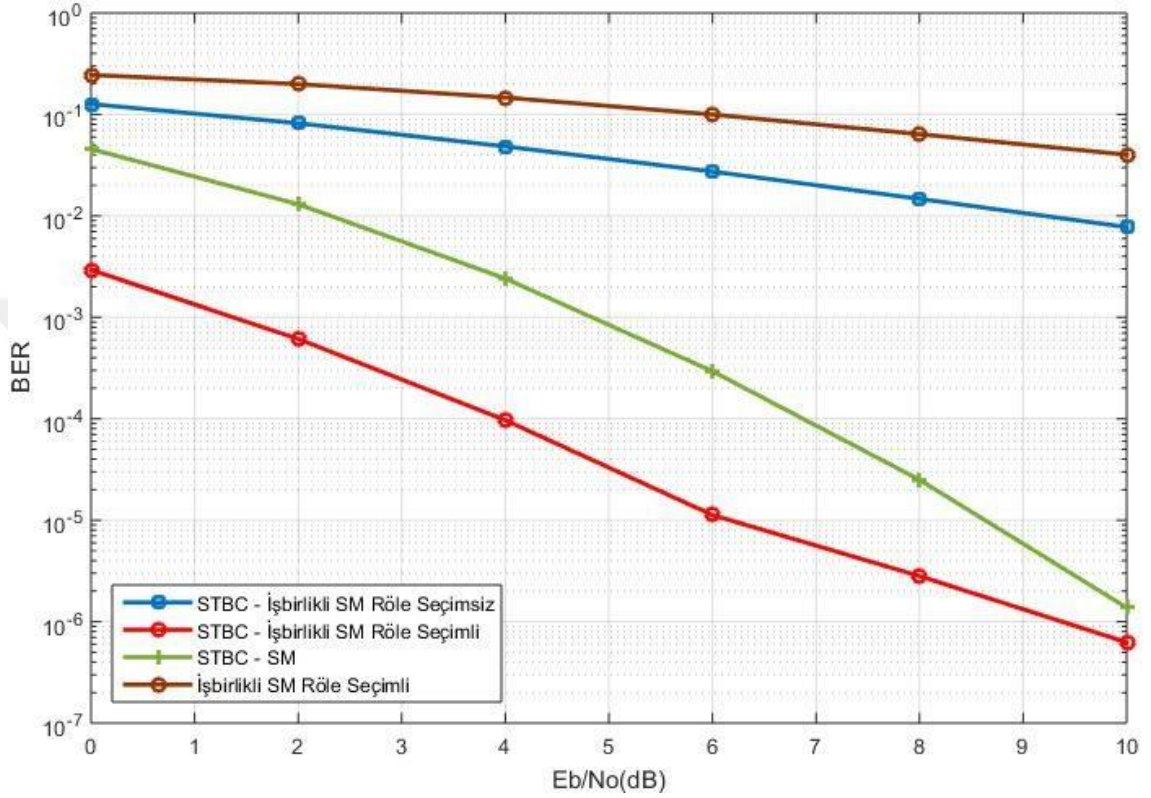
Bu bölümde kablosuz ağlarda işbirlikli uzaysal modülasyon yöntemi incelenmiştir. Sisteme röle seçim algoritması başarılı bir şekilde uyarlanmış ve sistem başarımının artırıldığı gösterilmiştir. Daha sonra, sistem QPSK işaret iletimi için yeniden tasarlanmış ve uzaysal modülasyon için en iyi röle seçimine yönelik yeni bir yöntem sunulmuştur. Önerilen röle seçim yönteminin en önemli avantajı QPSK işaret iletimini 2-PSK iletimine yakın bir başarımla gerçekleştirmesidir. Benzetim sonuçları, önerilen yöntemin işbirlikli uzaysal modülasyon için uygun bir sistem verimi sağladığını göstermiştir.

4.9. UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMALI İŞBİRLİKLI UZAYSAL MODÜLASYON İÇİN BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, önerilen işbirlikli uzay-zaman blok kodlu uzaysal modülasyonda röle seçim yönteminin bilgisayar yardımıyla elde edilen Monte-Carlo benzetim sonuçları sunulmakta ve performans karşılaştırmaları yapılmaktadır. Karşılaştırmalarda 4 farklı senaryo ele alınmıştır:

1. 2 bit/s/Hz iletim için ağdaki her bir grupta bulunan rölelerden en iyi röle seçim yöntemine göre seçimin yapıldığı işbirlikli uzaysal-modülasyon yapısı,
2. 2 bit/s/Hz iletim için işbirliksiz uzay-zaman blok kodlu uzaysal-modülasyon yapısı
3. 2 bit/s/Hz iletim için ağdaki her bir grupta bulunan rölelerden bir tanesinin rasgele seçildiği işbirlikli uzay-zaman blok kodlu uzaysal-modülasyon yapısı.
4. 2 bit/s/Hz iletim için ağdaki her bir grupta bulunan rölelerden en iyi röle seçim yöntemine göre seçimin yapıldığı işbirlikli uzay-zaman blok kodlu uzaysal-modülasyon yapısı.

Benzetimlerde QPSK modülasyonu kullanan sistem yapısı için bir çerçeve boyunca kanal sönümleme katsayılarının değişmediği kabul edilmiştir. Röle seçim işlemi için gerekli olan kanal bilgilerinin ise bir geri besleme yardımıyla alıcıdan vericiye iletildiği ve dolayısıyla verici tarafından da bilindiği kabul edilmiştir.



Şekil 4.25: Uzay-zaman blok kodlu işbirlikli uzaysal modülasyon sistemi için benzetim sonuçları.

Önerilen sistemin performans verimini karşılaştırmak için sistemin işbirliksiz ve işbirlikli sistemde rölelerin rasgele belirlenme durumlarına grafikte yer verilmiştir. Şekil 3.5'de gösterilen işbirlikli en iyi röle seçim yapısının hata başarımının hem işbirliksiz uzay zaman kodlu uzaysal modülasyon yapısından hem de işbirlikli rasgele röle seçimli sistemin hata başarımından çok daha iyi bir hata başarımı verdiği Şekil 4.25'deki grafikten rahatlıkla görülmektedir.

Bu bölümde kablosuz ağlarda işbirlikli uzay-zaman blok kodlu uzaysal modülasyonda röle seçim yöntemi incelenmiştir. Sisteme röle seçim algoritması başarılı bir şekilde uyarlanmış ve bu yeni sistemin başarımının arttırıldığı gösterilmiştir. Benzetim

sonuçları, önerilen yöntemin işbirlikli uzay zaman blok kodlu uzaysal modülasyon için çok iyi bir sistem verimi sağladığını göstermiştir. Bilgisayar benzetimleri sonucunda sistemin daha önce sunulan işbirlikli uzaysal modülasyon yapısından oldukça iyi bir hata başarımı verdiği görülmüştür.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında ilk olarak işbirlikli haberleşme ağlarında hata başarımlarını artırıcı düşük işlem karmaşıklıklı bir ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu tekniği önerilmektedir. Önerilen tekniğin çoklu röle seçmede işlem karmaşıklığı, optimum çözüm olan en iyi rölelerin seçilmesi tekniğine oranla oldukça düşüktür. Üstelik röle seçimi eşik işaret/gürültü oranına ulaşınca kadar yinelemeli yapıldığından, her bir yinelemede güç optimizasyonu da yapılabilmektedir. Böylece, mümkün olduğu kadar az sayıda röle ve dolayısıyla düşük güç tüketimi ile iyi bir hata başarımları elde edilebilmektedir.

İki-yönlü işbirlikli haberleşme ağlarında performansı artırmak için kullanılan çoklu röle seçim yöntemindeki işlem karmaşıklığının azaltılması ve mümkün olan en az sayıda röle seçilerek güç tüketiminin azaltılması amaçlarıyla bir ortak çoklu röle seçimi ve güç optimizasyonu yapısı tasarlanmıştır. En önemli avantajda, mümkün olduğunca fazla sayıda olası röle ile iki-yönlü işbirlikli ağlarda tasarlanan yapının hesaplama karmaşıklığı röle sayısının artışı ile exponansiyelden ziyade lineer olarak artmaktadır. Benzetim sonuçları tasarlanan yöntemin seçilen röle sayısını ve sonuç olarak güç tüketimini azalttığını göstermektedir.

Bilişsel iletişim ağları için de işbirlikli bir iletim senaryosu altında röle seçimi ve güç optimizasyon yöntemi tasarlanmıştır. Amaç, bilişsel radyo ağları için lisanslı birincil iletim için yüksek bir hizmet kalitesini garanti ederken, ikincil iletimin başarımlarını arttırmaktır. İşbirlikli iletişim için röle seçim yöntemlerinden en iyi röle seçimi ve sadece rastgele bir röle seçim yöntemleri kullanılmıştır. İdeal güç dağılımını sağlamak için her iki yöntemde de güç optimizasyonu yapılmıştır. İşbirlikli iletişim ağı için hata başarımlar eğrileri de elde edilmiş ve bilişsel radyo ağının hata başarımları ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları önerilen yöntemin bilişsel radyo ağlarında lisanslı kullanıcıya en az girişim oluşturularak iyi bir ikincil kullanıcı iletimi yapılabileceğini göstermektedir.

Bilişsel radyo ağlarının performansını arttıran düşük hesaplama karmaşıklığına sahip ortak çoklu röle seçimiyle güç optimizasyonlu bir uyarlanabilir işbirlikli çeşitleme yapısı oluşturulmuştur. Bu metodun en önemli avantajı bilişsel ağlarda olası röle sayısının büyüklüğü ile ilgili olarak hesaplama karmaşıklığı röle sayısının artışıyla exponansiyel değil lineer olarak artmasıdır. Tasarlanan yapı çoklu röle seçimi için bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcı iletimlerinde potansiyel röle durumları ile düşük hesaplama karmaşıklığı sunmaktadır. Aynı zamanda, her bir adımda güç optimizasyonu yapılarak en az sayıda röle ile hata başarımının elde edilmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak birincil kullanıcı iletim kalitesi korunarak düşük karmaşıklıkla bilişsel kullanıcıların iletimi performansı arttırılmıştır.

Çok röleli bilişsel radyo ağlarında işbirlikli iletim ve spektrum sezme için bir birleşik optimum röle seçim yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan röle seçim yapısının en önemli avantajı, hem iletim için yeterli bir hata başarımına sahip hem de spektrum sezme için yeterli bir bulma olasılığını sağlayan birleşik bir röle seçimini gerçekleştirmesidir. Simülasyon sonuçları çok röleli bilişsel ağlarda önerilen yöntemin optimum sistem çıktısı sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak önerilen yöntem hem ikincil ağda veri iletimi için yeterli başarıma sahip hem de birincil ağın spektrumunu iyi bir şekilde algılayabilen bir röle seçimini başarıyla gerçekleştirebilmektedir.

Bilişsel ağlarda boş bantları tespit ederek ikincil kullanıcıların kullanımına sunmak amacıyla işbirlikli ve döngüsel durağanlığa dayanan spektrum sezme yöntemi sunulmuştur. Ayrıca, ağ içinde hem spektrum sezme hem de işbirlikli iletişimi birlikte en uygun şekilde gerçekleştirebilecek birleşik röle seçim yöntemi de önerilmektedir. Önerilen yöntemin iletim için bit hata oranı performansı, spektrum sezme için de kestirim olasılığı ve kaçırma olasılığı bilgisayar benzetimleriyle elde edilmiş ve ilgili bölümde verilmiştir. Sonuçlar, önerilen birleşik röle seçim yönteminin hem iletim, hem de döngüsel durağanlık tabanlı spektrum sezme için iyi bir başarıma sahip olduğunu göstermiştir.

Hem Rician sönümlmeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlmeli kanal modeline sahip bilişsel ağlarda hem işbirlikli iletim hem de işbirlikli spektrum sezme için birleşik en iyi röle seçimine yönelik bir yöntem sunulmuştur. Önerilen röle seçim yönteminin en önemli avantajı düşük röle seçim karmaşıklığı ile hem iletişim hem de

spektrum sezmede ortak seçilen rölenin iletim için yeterli bir hata başarımı ve yeterli bir sezme olasılığı başarımı göstermesidir. Ayrıca önerilen röle seçim yöntemi, döngüsel durağanlığa dayanan spektrum sezme tekniğini kullanması sebebiyle daha kararlı çalışmış, daha düşük SNR değerlerinde çalışabilmiş ve işlem kazancı sağlamıştır. Benzetim sonuçları, önerilen yöntemin hem Rician sönümlmeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlmeli kanal modeline sahip bilişsel ağlar için en uygun sistem verimini sağladığını göstermiştir. Sonuç olarak, önerilen birleşik röle seçim yöntemi düşük işaret gürültü oranlarında da ikincil ağda veri iletişimi ve birincil ağda spektrum sezme için yeterli verimi düşük işlem karmaşıklığı ile hem Rician sönümlmeli kanal modeline sahip hem de Rayleigh sönümlmeli kanal modeline sahip bilişsel ağlarda elde etmiştir.

İşbirlikli uzaysal modülasyon kullanan kablosuz ağlar için yeni bir işbirliği senaryosu ve röle seçim yöntemi sunulmaktadır. Önerilen yöntem uzaysal modülasyon kullanan sistemler için en iyi röle seçimine dayanmaktadır. Ayrıca, çalışmada işbirlikli uzaysal modülasyonun 4 farklı röle grubundan en iyi 4 rölenin seçilmesi ile başarımın arttığı gösterilmiştir. Önerilen yöntemin iletim için ortalama sembol hata oranı performansı bilgisayar benzetimleriyle elde edilmiştir. Sonuçlar, önerilen işbirlikli uzaysal modülasyon yönteminin, sistem başarımını arttırdığını göstermiştir.

Son olarakta, geliştirilen İşbirlikli Uzaysal Modülasyon yönteminin alıcı karmaşıklığını azaltmak ve çeşitleme kazancını arttırmak için bu bölümde sisteme antenler için geliştirilmiş olan uzay-zaman blok kodlama ilave edilmiştir. Tasarlanan sistemin başarımları analizi yapılmış ve bilgisayar benzetimleri sonucunda sistemin çok iyi bir hata başarımı verdiği görülmüştür.

Bu tez ile sinyal işleme tekniklerinden faydalanarak işbirlikli iletişim ağlarında daha verimli bir iletişim sağlayacak ve sistem başarımını arttıracak modeller geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar literatüre kazandırılan özgün katkılar olarak yerini almıştır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip ve B. Aazhang, November 2003, User cooperation diversity part i: System description,, *IEEE Transactions on Communication*, 51(11), 1927-1938.
- [2] J. N. Laneman ve G. W. Wornell,, October 2003, Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49(10), 2415-2425.
- [3] A. Bletsas, A. Khitsi, D. P. Reed ve A. Lippman, March 2006, A simple cooperative diversity method based on network path selection, *IEEE Journal of Selected Areas Communication*, 24(3), 659-672.
- [4] Chen Y., Yu G., Qiu P. ve Zhang Z., 2006, Power-aware cooperative relay selection strategies in wireless ad hoc networks, *IEEE Annual International Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Helsinki, Finland, 1-5.
- [5] E. Beres ve R. S. Adve,, 2006, On selection cooperation in distributed networks, *IEEE Conference on Information Sciences Systems (CISS'06)*, 659-672.
- [6] A. Bletsas, A. Khitsi ve M. Z. Win, May 2008, Opportunistic cooperative diversity with feedback and cheap radios, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 7(5), 1823-1827.
- [7] R. Tannious ve A. Nosratinia, October 2008, Spectrally-efficient relay selection with limited feedback, *IEEE Journal of Selected Areas Communication*, 26(8), 1419-1428.
- [8] Y. Jing ve H. Jafarkhani, March 2009, Single and Multiple Relay Selection Schemes and Their Diversity Orders, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 8(3), 1414- 1423.
- [9] Gayan Amarasuriya, Masoud Ardakani, Chintha Tellambura, 2010, Adaptive Multiple Relay Selection Scheme for Cooperative Wireless Networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1-6.
- [10] Dan Chen, Hong Ji, Xi Li, Kun Zhao , 2010, A Novel Multi-relay Selection and Power Allocation Optimization Scheme in Cooperative Networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 1-6.
- [11] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, December 2004, Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior, *IEEE Transactions on Information Theory*, 50(12), 3062-3080.

- [12] Paul. A. Anghel, Mostafa Kaveh, September 2004, Exact Symbol Error Probability of a Cooperative Network in a Rayleigh-Fading Environment, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 3(5), 1416-1421.
- [13] B. Rankov and A. Wittneben, October 2005, Spectral efficient signaling for halfduplex relay channels, *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*.
- [14] B. Rankov and A. Wittneben, July 2006, Achievable rate regions for the two-way relay channel, *IEEE International Symposium on Information Theory*.
- [15] Y. Han, S. H. Ting, and W. H. Chin, Spring 2008, High Rate Two-Way Amplify and forward Half Duplex Relaying with OS-TBC, *IEEE Vehicular Technology Conference*.
- [16] M. Ju and I. M. Kim, July 2010, Joint Relay Selection and Opportunistic Source Selection in Bidirectional Cooperative Diversity Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(6), 2885-2897.
- [17] S. Haykin, 2005, Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications, *IEEE Journal of Selected Areas Communication*, 23(2), 201-220.
- [18] Y. Xing, C. N. Mathur, M. A. Haleem, R. Chandramouli, and K. P. Subbalakshmi, 2007, Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(4), 423-433.
- [19] L. Li, X. Zhou, H. Xu, G. Y. Li, D. Wang and A. Soong, January 2011, Simplified relay selection and power allocation in cooperative cognitive radio systems, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 10(1), 33-36.
- [20] Y. Zou, J. Zhu, B. Zheng, and Y. Yao, October 2010, An Adaptive Cooperation Diversity Scheme With Best-Relay Selection in Cognitive Radio Networks, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58(10), 5438-5445.
- [21] G. Ganesan and Y. G. Li, 2007, Cooperative spectrum sensing in cognitive radio-part I: Two user networks, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 6(6), 2204-2213.
- [22] O. Simeone, Y. Bar-Ness, and U. Spagnolini, 2007, Stable throughput of cognitive radios with and without relaying capability, *IEEE Transactions on Communication*, 55(12), 2351-2360.
- [23] O. Simeone, J. Gambini, Y. Bar-Ness, and U. Spagnolini, 2007, Cooperation and cognitive radio, *IEEE International Conference on Communications 2007*, 6511-6515.
- [24] J. Jia, J. Zhang, and Q. Zhang, 2009, Cooperative relay for cognitive radio networks, *IEEE Conference of Computer Communications (INFOCOM) 2009*, 2304-2312.

- [25] J. Xu, H. Zhang, D. Yuan, Q. Jin, C. Wang, 2011, Novel Multiple Relay Selection Schemes in Two-Hop Cognitive Relay Networks, *Communications and Mobile Computing (CMC)*, 2011 *Third International Conference on*, 307–310.
- [26] E. Shin, D. Kim, 2010, Effect of primary spectrum availability on outage probability of cognitive relay systems in secondary spectrum usage, *Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2010 *The 12th International Conference on*, 227–231.
- [27] M. Naeem, U. Pareek, D.C. Lee, 2010, Interference Aware Relay Assignment Schemes for Multiuser Cognitive Radio Systems, *Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall)*, 2010 *IEEE 72nd*, 1–5.
- [28] L. Yingpei, H. Chen, J. Lingge, H. Di, 2010, A Cyclostationary-Based Spectrum Sensing Method Using Stochastic Resonance in Cognitive Radio, *IEEE Communications Workshops (ICC)*, 1-5.
- [29] T. Yucek, H. Arslan, 2009, A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 11(1).
- [30] Y. Hur, J. Park, K. Kim, J. Lee, K. Lim, C. Lee, H. Kim, and J. Laskar, Sept. 2006, A cognitive radio (CR) testbed system employing a wideband multiresolution spectrum sensing (MRSS) technique, *IEEE Vehicular Technology Conference*, 1-5.
- [31] A. Chandran, A. Karthik, A. Kumar, R. C. Naidu, S. S. M, U. S. Lyer, R. Ramanathan, Feb. 2011, Discrete Wavelet Transform Based Spectrum Sensing in Futuristic Cognitive Radios, *Devices and Communications (ICDeCom)*, 1-4, 24-25.
- [32] S.B.Zhang, J.J.Qin, 2010, Energy Detection Algorithm Based on Wavelet Packet Transform under Uncertain Noise for Spectrum Sensing, *Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, pp:1-4.
- [33] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, March 2011, Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: A Survey, *Physical Communication (Elsevier) Journal*, 4(1), 40-62.
- [34] Wornell, G. W., 1995 *Signal Processing With Fractals: A Wavelet-Based Approach*, Prentice Hall, NJ.
- [35] J.C.Shen; Alsusa, E., 2013, Joint Cycle Frequencies and Lags Utilization in Cyclostationary Feature Spectrum Sensing, *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 5337 – 5346, 61(21).
- [36] H.Kartlak, C.Bektas, N.Odabasioglu, A.Akan, 2012, An Optimum Relay Selection for Cooperative Transmission and Spectrum Sensing in Cognitive Networks, *International Workshop on Cognitive and Cooperative Wireless Communication Systems*.
- [37] W.A.Gardner, 1986, *The Spectral Correlation Theory of Cyclostationary Time-Series*, Signal Processing 11, Elsevier Science Pub., 13-36.

- [38] H. Kartlak, N. Odabasioglu and A. Akan, 2011, Joint Multiple Relay Selection and Power Optimization in Two-Way Relay Networks, *3rd International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 1–4.
- [39] Mesleh, R., Haas, H., Sinanovic, S., Ahn, S. C. W. ve Yun, S., 2008, Spatial modulation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(4), 2228-2241.
- [40] Jeganathan, J., Ghrayeb, A., ve Szczecinski, L., 2008, Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis, *IEEE Communication Letter*, 12, 545-547.
- [41] Narayanan, S. ; WEST Aquila s.r.l., L'Aquila, Italy ; Di Renzo, M. ; Graziosi, F. ; Haas, H., 2013, Distributed Spatial Modulation for Relay Networks, *IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 1-6.
- [42] S. Sugiura, S. Chen, H. Haas, P. M. Grant, and L. Hanzo, June 2011, Coherent versus non-coherent decode-and-forward relaying aided cooperative space-time shift keying, *IEEE Transactions on Communications*, 59(6), 1707–1719.
- [43] T. Yang, J. Yuan, 2008, Performance of Cooperative Spatial-Interleaved Superposition Modulation in Fading Multiple-Access Channels, *IEEE International Conferences on Communication*, 891–895.
- [44] Y. Yang and S. Aissa, July 2011, Information-guided transmission in decode-and-forward relaying systems: Spatial exploitation and throughput enhancement, *IEEE Transactions on Wireless Communication*, 10(7), 2341–2351.
- [45] N. Serafimovski., S. Sinanovic., M. Di Renzo, and H. Haas, May 2011, Dual-hop spatial modulation (Dh-SM), *IEEE Vehicular Technology Conference – Spring*, 1–5.
- [46] S. Narayanan, M. Di Renzo, F. Graziosi, and H. Haas, Sep. 2012, Distributed space shift keying for the uplink of relay-aided cellular networks, *IEEE Int. Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks*, 1-6.
- [47] Mesleh, Raed ; Ikki, Salama S., 2013, Analysis of cooperative communication spatial modulation with imperfect channel estimation, *IEEE Annual International Symposium On Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 2027- 2023.
- [48] Oyman, O. ; Feng Xue, 2007, Antenna Selection, Diversity Coding and Spatial Multiplexing in Cooperative Wireless Networks, *IEEE Signals, Systems and Computers*, 814- 818.
- [49] Duong, T.Q. ; Zepernick, H., 2008, Average symbol error rate of cooperative spatial multiplexing in composite channels, *IEEE Wireless Communication Systems*, 335-339.

- [50] R. Mesleh, S. S. Ikki, E. M. Aggoune, and A. Mansour, Sept. 2012, Performance analysis of space shift keying (SSK) modulation with multiple cooperative relays, *EURASIP Journal of Advances in Signal Processing*, 1–10.
- [51] R. Mesleh, S. S. Ikki, and M. Alwakeel, Dec. 2011, Performance analysis of space shift keying with amplify and forward relaying, *IEEE Communication Letters*, 15(12), 1350–1352.
- [52] R. Mesleh and S. S. Ikki, Aug. 2013, Performance analysis of spatial modulation with multiple decode and forward relays, *IEEE Wireless Communication Letters*, 2(4), 423–426.
- [53] P. Yang, B. Zhang, Y. Xiao, B. Dong, S. Li, M. El-Hajjar, L. Hanzo, 2013, Detect-and-Forward Relaying Aided Cooperative Spatial Modulation for Wireless Networks, *IEEE Transactions on Communications*, 61(11), 4500 - 4511.
- [54] Alamouti, S. M., 1998, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal of Selected Areas on Communications*, 16, 1451-1458.
- [55] Tarokh, V., Jafarkhani, H. ve Calderbank, A. R., 1999, "Spacetime block codes from orthogonal designs," *IEEE Transactions on Information Theory*, 45, 1456-1467.
- [56] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. Smith, and A. Naguib, 2003, "From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems," *IEEE Journal on selected areas in Communications*, 21(3), pp. 281–302.
- [57] Wolniansky, P., Foschini, G., Golden, G. ve Valenzuela, R., "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," *International Symposium on Signals, Systems, Electronics (ISSSE'98)*, Pisa, Italy, 1998, 295-300.
- [58] Basar, E.; Aygolu, U.; Panayirci, E.; Poor, V. H.; 2011, "Space-Time Block Coded Spatial Modulation", *IEEE Transactions on Communications*, 59(3), pp. 823-832.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı	Hasan KARTLAK
Uyruğu	T.C.
Doğum tarihi, Yeri	1979 Serik
Telefon	0 538 744 30 72
E-mail	hasan@mail.org
Web adres	www.hasan.tk

Eğitim

Derece	Kurum/Anabilim Dalı/Programı	Yılı
Doktora	İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2015
Yüksek Lisans	İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü / Elektronik ve Haberleşme Müh.	2005
Lisans	Dumlupınar Ün. Mühendislik Fak. Elektrik Elektronik Müh.	2002
Lise	Antalya Anadolu Teknik Lisesi Bilgisayar Bölümü	1997

Makaleler / Bildiriler

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., "Cooperation Methods for Cognitive Radio Systems", Telecommunication Systems (Springer), (Gönderildi)

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., "Space Time Block Coded Cooperative Spatial Modulation", *The 11th IEEE International Conference on Wireless and Mobile*

Computing, Networking and Communications (WiMob 2015), (Gönderildi)

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., "Relay Selection Methods In Cooperative Spatial Modulation For Wireless Networks", *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2015 23th, MALATYA, TÜRKİYE, 16-19 Mayıs 2015

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., 1-5 Eylül 2014, Optimum Relay Selection For Cooperative Spectrum Sensing And Transmission In Cognitive Networks, *European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2014)*, Lisbon, PORTEKİZ, 161-165.

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., 23-25 Nisan 2014, Bilişsel Ağlarda İşbirlikli Spektrum Algılama Ve İletim İçin Birleşik En İyi Rôle Seçimi, *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2014 22nd, Trabzon, TÜRKİYE, 1187-1190.

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., 3-5 Ekim 2012, An Optimum Relay Selection For Cooperative Transmission And Spectrum Sensing In Cognitive Networks, *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2012 4th International Congress on, St. Petersburg, RUSYA, 969-973.

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., 21-23 Haziran 2012, Signal Processing Techniques For Cooperative Communication Networks, *Electrical & Electronics Engineering Master Forum (MASFOR 2012)*, İstanbul, TÜRKİYE, 1-2.

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., 21-23 Haziran 2012, Adaptive Multiple Relay Selection And Power Optimization For Cognitive Radio Networks, *Communications (COMM)*, 2012 9th International Conference on, Bucharest, ROMANYA, 197-200.

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., 18-20 Nisan 2012, Performance Improvement Of Secondary User Transmission In Cognitive Radio Networks, *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2012 20th, Muğla, TÜRKİYE, 1-4.

Kartlak H., Odabaşioğlu N., Akan A., 5-7 Ekim 2011, Joint Multiple Relay Selection And Power Optimization In Two-Way Relay Networks, *Ultra Modern*

Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on, Budapest, MACARISTAN, 1-4.

Kartlak H., Odabaşıoğlu N., Akan A., 20-22 Nisan 2011, Joint Multiple Relay Selection And Power Optimization In Cooperative Networks, *Signal Processing and Communications Applications (SIU)*, 2011 IEEE 19th Conference on, Antalya, TÜRKİYE, 785-788.

