

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AF VE DF TABANLI İŞBİRLİKLİ SİSTEMLERDE RÖLE SEÇİMİ

AYŞE İPEK AKIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
HABERLEŞME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. HACI İLHAN**

İSTANBUL, 2013

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AF VE DF TABANLI İŞBİRLİKLİ SİSTEMLERDE RÖLE SEÇİMİ

Ayşe İpek AKIN tarafından hazırlanan tez çalışması 19.12.2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd.Doç.Dr.Hacı İlhan
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Hasari ÇELEBİ
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2013-04-03-YL03 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bu alışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun 113E229 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca beni sabırla dinleyip yardımını ve bilgisini esirgemeyen, bu tezin oluşmasında büyük emek harcayan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Beraber akademik çalışmalar yaptığımız Dr. Özgür Özdemir'e teşekkür ederim. Ayrıca çalışmam boyunca verdikleri destekten dolayı Marmara Üniversitesi'nden Prof. Dr. A. Fevzi BABA ve Doç. Dr. Hayriye KORKMAZ hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm tez çalışmam boyunca yanımda olan A. Yasin ATALAY'a ve son olarak tüm eğitim hayatım boyunca bana gösterdikleri destek, sevgi ve sabır için sevgili annem Oya AKIN ve sevgili babam Yıldırım AKIN'a çok çok teşekkür ederim.

Aralık, 2013

Ayşe İpek AKIN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Orijinal Katkı.....	3
BÖLÜM 2	
TELSİZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE KANAL MODELLERİ VE SÖNÜMLEME	5
2.1 Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal Modeli	5
2.2 Sönümlenmeli Kanal Karakteristikleri	6
2.2.1 Kanal Parametreleri	6
2.2.2 Kanalların Sınıflandırılması	8
2.3 Sönümlenmeli Kanal Modelleri.....	9
2.3.1 Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Modeli.....	9
2.3.2 Rician Sönümlenmeli Kanal Modeli	10
2.3.3 Nakagami- m Sönümlenmeli Kanal Modeli	10
2.3.4 Kaskat Sönümlenmeli Kanal Modeli.....	11
BÖLÜM 3	
ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ	12
3.1 Temel Çeşitleme Teknikleri.....	12

3.1.1	Zaman Çeşitlemesi	13
3.1.2	Frekans Çeşitlemesi.....	13
3.1.3	Uzay (Anten) Çeşitlemesi.....	13
3.2	Alıcıda Birleştirme Yöntemleri	13
3.2.1	Seçmeli Birleştirme (SC)	14
3.2.2	En Büyük Oran Birleştirmesi (MRC)	16
3.2.3	Eşit Kazançlı Birleştirme (EGC).....	17
BÖLÜM 4		
İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEME.....		19
4.1	Aktarma Yöntemleri	20
4.1.1	Kuvvetlendir ve İlet (AF)	20
4.1.2	Çöz ve İlet (DF)	21
4.2	Kullanılan İletişim Protokolleri.....	22
4.3	Çoklu Röleli Sistemler	23
BÖLÜM 5		
AF KULLANAN ÇOK RÖLELİ SİSTEMLERDE RÖLE SEÇİMİ.....		24
5.1	Sistem Modeli ve Hata Başarım Analizi	24
5.2	Röle Seçim Algoritması ve Sembol Hata Oranı Analizleri	26
5.3	Benzetim Sonuçları.....	30
BÖLÜM 6		
DF KULLANAN ÇOK RÖLELİ SİSTEMLERDE RÖLE SEÇİMİ		34
6.1	Sistem Modeli 1	35
6.1.1	Röle Seçim Algoritması ve Hata Performans Analizi	36
6.1.2	Benzetim Sonuçları	39
6.2	Sistem Modeli 2	41
6.2.1	Röle Seçim Algoritması ve Hata Performans Analizi	43
6.2.2	Benzetim Sonuçları	46
BÖLÜM 7		
SONUÇLAR		51
KAYNAKÇA		53
ÖZGEÇMİŞ.....		57

SİMGE LİSTESİ

$(.)^*$	Konjuge alma işlemi
$K_0(\cdot)$	İkinci türden sıfırcı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonu
$K_1(\cdot)$	İkinci türden birinci dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonu
$I_0(\cdot)$	Birinci türden sıfırcı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonu
$\Gamma(\cdot)$	Gamma fonksiyonu
$G_{\dots}(\cdot)$	Meijer G fonksiyonu
$E[\cdot]$	Beklenen değer operatörü
T_m	Çok yönlü yayılım
B_c	Uyumluluk band genişliği
T_c	Uyumluluk süresi
B_d	Doppler yayılımı
m	Nakagami sönümlenme parametresi
N	Röle sayısı
Q	Kanal kaskatlık derecesi
E_b	Ortalama bit enerjisi
E_s	Ortalama sembol enerjisi
$n(t)$	Gürültü terimi
N_0	Gürültü varyansı
x	İletilen sinyal
\hat{x}_k	Kestirilmiş sinyal
σ^2	Varyans
d_{AB}	A-B terminalleri arası normalize uzaklık
h_{SR_k}	Kaynak-k.röle arası kanal katsayısı
g_{R_kD}	k.röle-hedef arası kanal katsayısı
γ	Ani SNR
$\bar{\gamma}$	Ortalama SNR
$P(\cdot)$	Hata olasılığı
ν	Yol kaybı sabiti

KISALTMA LİSTESİ

AF	Kuvvetlendir ve İlet (Amplify and Forward)
AWGN	Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü (Additive White Gaussian Noise)
BER	Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BPSK	İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Phase Shift Keying)
CDF	Birikimsel Dağılım Fonksiyonu (Cumulative Distribution Function)
C-MRC	İşbirlikli En Büyük Oran Birleştirmesi (Cooperative Maximum Ratio Combining)
D	Hedef (Destination)
DF	Çöz ve İlet (Decode and Forward)
EGC	Eşit Kazanç Birleştirmesi (Equal Gain Combining)
MGF	Moment Üretme Fonksiyonu (Moment Generating Function)
MIMO	Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multi Input Multi Output)
ML	En Büyük Olabilirlikli (Maximum Likelihood)
MPSK	M Düzeyli Faz Kaydırmalı Anahtarlama (M-ary Phase Shift Keying)
MRC	En Büyük Oran Birleştirmesi (Maximum Ratio Combining)
PDF	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)
QPSK	Dörtlü Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying)
R	Röle (Relay)
S	Kaynak (Source)
SC	Seçmeli Birleştirme (Selection Combining)
SER	Simge Hata Oranı (Symbol Error Rate)
SNR	İşaret-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)
VN	Sanal Gürültü (Virtual Noise)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 (a) Gauss dağılımının PDF eğrisi (b) Gauss dağılımının CDF eğrisi (c) AWGN güç spektral yoğunluğu	6
Şekil 3. 1 Seçmeli birleştirme.....	14
Şekil 3. 2 En büyük oran birleştirmesi.....	17
Şekil 4. 1 İşbirlikli sistem yapısı.....	20
Şekil 4. 2 Kuvvetlendir ve ilet yöntemi.....	21
Şekil 4. 3 Çöz ve ilet yöntemi.....	21
Şekil 4. 4 Çoklu röleli sistemler	23
Şekil 5. 1 BPSK modülasyonu için AF tabanlı röle seçimli sistemin servis kesilme olasılığı	31
Şekil 5. 2 BPSK modülasyonu kullanan AF röleli sistemin SER performansı	32
Şekil 5. 3 QPSK modülasyonu kullanan AF röleli sistemin SER performansı.....	33
Şekil 6. 1 BPSK modülasyonu için $m=2$ olması durumundaki MRC ve C-MRC hata performansları	40
Şekil 6. 2 BPSK modülasyonu için $N=3$ olması durumundaki MRC ve C-MRC hata performansları	41
Şekil 6. 3 Sistem modeli	42
Şekil 6. 4 Rölenin hedefe yakın olduğu konumda hata performans eğrileri.....	47
Şekil 6. 5 Hedefte klasik MRC kullanılması durumundaki hata performans eğrileri ...	48
Şekil 6. 6 Hedefte VN kullanılması durumunda hata performans eğrileri.....	49
Şekil 6. 7 Rölenin hedefe yakın olduğu ($d_{sr} = 0,9$) durumda farklı Q değerleri için hata performans eğrileri.....	50

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1 Protokol I	22
Çizelge 4. 2 Protokol II.....	22
Çizelge 4. 3 Protokol III.....	23
Çizelge 6. 1 BER= 10^{-4} değeri için VN SNR kazancı.....	50

AF VE DF TABANLI İŞBİRLİKLİ SİSTEMLERDE RÖLE SEÇİMİ

Ayşe İpek AKIN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN

Çok yollu yayılımdan kaynaklanan sönümlenme, telsiz iletişim sistemlerinde görülen en önemli bozucu etkidir. Sönümlenme etkilerine karşı koyma yöntemlerinden biri uzay veya anten çeşitlemesi olarak da bilinen, çok girişli çok çıkışlı (multi input multi output, MIMO) sistemler kullanılmaktadır. Çoklu anten kullanmak baz istasyonları için uygun olmasına karşın, donanım karmaşıklığı ve maliyet açısından gezgin birimler için çok uygun değildir. Bu engeli alternatif bir çözüm olarak, “işbirlikli iletişim” tekniği kullanılmıştır. İşbirlikli iletişimde, kaynaktan gönderilen mesajlar hedefe, hücre içindeki uygun diğer kullanıcılar veya röleler üzerinden kuvvetlendir ve ilet (amplify and forward, AF) veya çöz ve ilet (decode and forward, DF) aktarma yöntemleriyle iletilmektedir. İşbirlikli iletişimde, gezgin birimler tek verici / tek alıcı antene sahip olsalar bile tüm sistemde dağıtılmış anlamda uzay çeşitlemesi elde edilebilmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda, işbirlikli röleli sistemlerin, işbirliği yapılmayan sistemlere göre aynı işaret-gürültü oranında (Signal-to-noise ratio, SNR) hata başarımını iyileştirebileceği görülmüştür. İşbirliği yapılarak elde edilen bu başarımlar, sistemde kullanılan röle sayıları artırılarak daha da iyileştirilebilir.

Literatürde, ele alınan sistemlerde terminaller arasındaki kanallar genellikle Rayleigh ve Nakagami-m dağılımlı olarak modellenmiştir. Fakat haberleşen terminallerden birkaçı veya hepsinin hareketli terminaller olması durumunda bu klasik dağılımların yetersiz kaldığı ve bu dağılımların yerine çarpımsal kanal modeli veya kaskat kanal modeli adı verilen modellemelerin kullanılabileceği yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Bu tezde AF ve DF tabanlı işbirlikli röle sistemlerinde röle seçimi algoritmaları incelenerek yeni algoritmalar önerilmesi planlanmıştır. Bu sistemlerde farklı kablosuz kanal yapıları (Rayleigh, Nakagami- m , kaskat kanallar) ele alınmıştır. Öncelikle AF tabanlı işbirlikli sistemlerin hata performansları yani Monte Carlo simülasyonları bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir. Sonrasında, özellikle, uçtan-uca SNR ve istatistikleri (olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF), olasılık dağılım fonksiyonu (CDF), moment üreten fonksiyonu (MGF)) türetilerek sistemin servis kesilme olasılığı ve bit/simge hata olasılığı (BER/SER) ifadeleri elde edilmiştir. Teorik sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının aynı olduğu gösterilmiştir.

Ayrıca DF tabanlı işbirlikli röle sistemleri için hata yayılımını azaltıcı metodlar kullanılmış ve yeni yöntemler önerilerek sistem başarımları araştırılmıştır. DF tabanlı işbirlikli telsiz iletişim sistemlerinde röledeki sezim hatalarının hedefteki başarımları olumsuz etkilemesi sonucu hata yayılımına sebep olmaktadır. Bu problem için çözümler literatürde genelde tek antenli sistemler için önerilmiştir. Bu tezde bu çözümlerden, işbirlikli en büyük oran birleştirmesi (Cooperative maximal ratio combining, C-MRC) ve sanal gürültü (virtual noise, VN) yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İşbirlikli haberleşme, kuvvetlendir ve ilet, çöz ve ilet, röle seçimi, en büyük olabirlikli birleştirici

RELAY SELECTION IN AF AND DF BASED COOPERATIVE SYSTEMS

Ayşe İpek AKIN

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Dr. Hacı İLHAN

In wireless channels, the most disruptive effect is the fading which is caused by multipath propagation. One of the methods to avoid these fading effects is using multi input multi output (MIMO) systems. This method is also known as space or antenna diversity. Although using multiple antennas is feasible for base stations, it is not suitable for mobile units because of hardware complexity and cost. Thus cooperative communication techniques have become a popular alternative solution to MIMO systems. In cooperative communications, network nodes (users or relays) help the transmission of the message to the destination by using amplify and forward (AF) or decode and forward (DF) methods. This achieves spatial diversity gains in a distributed manner even if the users have single antennas. Recent research have shown that the relay/cooperative systems provide better error performance compared to non-cooperative systems at the same signal-to-noise ratio (SNR). The performance of cooperative systems can be further improved by increasing the number of relays.

In the literature, the channels between the terminals are usually modelled as Rayleigh and Nakagami- m distribution. However when terminals are in motion, all these classical distributions are inadequate. For this case, experimental studies show that a new model which is named as multiplicative channel model or cascaded channel model is used instead of these classical distributions.

In this thesis, the effects of relay selection on the error performance of the cooperative systems using AF and DF relaying is investigated over different channel

models (Rayleigh, Nakagami- m , Cascaded channels). Error performance analysis for cooperative/relay systems is studied for several system and channel models. Specifically, by deriving end-to-end signal-to-noise ratio (SNR) and its statistics (e.g. probability density function (PDF), cumulative distribution function (CDF) and moment generating function (MGF)), outage probability and bit/symbol error rate (BER/SER) expressions are obtained.

Also, application of error propagation reduction techniques and development of new methods are investigated. Error propagation occurs in DF based wireless cooperative communication systems due to the detection errors at the relay terminals affecting the performance at the destination in a negative way. In this thesis cooperative maximal ratio combining (C-MRC) and virtual noise (VN) methods are focused on.

Keywords: Cooperative communication, amplify and forward, decode and forward, relay selection, maximum ratio combining

1.1 Literatür Özeti

Alıcı ve verici terminallerin her ikisinde birden çok sayıda anten kullanılması ile elde edilen MIMO haberleşme modelinin [1] çok yüksek kapasite artışları sağlayarak, bağlantı kalitesi ve düşük verici gücü gibi ihtiyaçları karşılamakta önemli bir yere sahip olduğunu gösteren literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur [2]-[4]. MIMO sistemler diğer tek antenli sistemlere göre karmaşık sistemlerdir. MIMO sistemlerin karmaşıklığını düşürmek için anten seçimi kullanılabilir [5]. Klasik MIMO sistemlerin kullanımı hücresel sistemlerin baz istasyonları için uygun olmasına karşın, boyut, maliyet ve donanım karmaşıklığı açısından gezgin birimler için çok uygun değildir [6]. Buna bir çözüm olarak işbirlikli çeşitleme tekniği önerilmiştir [7], [8]. Literatürde işbirlikli çeşitleme teknikleri geliştirilerek MIMO sistemlerin sağlamış olduğu hata başarımlarının yakalanması hedeflenmiştir.

İşbirlikli çeşitlemede temel fikir, kaynak-hedef arasındaki iletişimin ortamdaki röle adı verilen terminallerin yardımı ile yapılmasıdır. Kuvvetlendir ve ilet (AF) ve çöz ve ilet (DF) yöntemleri, işbirlikli haberleşme sistemlerinde rölede kullanılan başlıca aktarma yöntemlerindedir. AF yöntemi kaynaktan gönderilen sinyalin kuvvetlendirilip iletilmesi ilkesine dayanırken, DF yönteminde ise kaynaktan gönderilen sinyal rölede çözülüp tekrar kodlanarak hedefe iletilmektedir [9]-[12]. DF tekniğinde önde gelen hata yayılımı ile mücadele teknikleri arasında en büyük olabilirlikli (Maximum likelihood, ML) tabanlı sezim [13], işbirlikli en büyük oran bireştirme (Cooperative maximum ratio combining, C-MRC) [14] ve toplamsal gürültü (Virtual noise, VN) modeli

[15] gösterilebilir. AF yönteminde kullanılan teknik olarak ise, en büyük oran birleştirici (Maximum ratio combining, MRC) [16] gösterilebilir.

Literatürde bulunan işbirlikli sistemlerle ilgili çalışmalarda genellikle kanal yapısı olarak Rayleigh, Rician ve Nakagami dağılımları kullanılmaktadır [17]-[19]. Klasik Rayleigh ve Nakagami gibi dağılımların hücresele radyo sistemleri için ideal kanal modelleri oldukları ispatlansa da [20], [21], terminallerin tümünün veya birkaçının hareketli olması durumunda bu dağılımların yetersiz kaldığı gösterilmiştir. Bu durumlar için kaskat sönmülemeli kanallar olarak adlandırılan, gezgin terminallerin etrafındaki bağımsız saçıcı grupların kanal kazançlarının çarpımından oluşan çarpımsal bir kanal modeli deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [22], [23].

Yapılan çalışmalarda çoklu röleye sahip işbirlikli sistemlerde röle seçiminin sistem performansını iyileştirdiği görülmüştür [24]-[27]. Röle seçimli işbirlikli sistemlerde en iyi şartların olduğu kanala sahip röle üzerinden aktarım yapılmaktadır. [28]'de verilen Bletsas vd. nin yaptığı çalışmada çok röleli sistemler için, ilk olarak kodları düzgün çözen röleler belirlendiği ve sonrasında da iletim için en iyi röle seçildiği bir röle seçim kriteri önerilmiştir. [29]'da ise röle ve hedef arasındaki linkin maksimum işaret-gürültü-oranına (signal-to-noise ratio, SNR) sahip olan röle seçilmektedir. Kaynak-röle ve röle-hedef arasındaki anlık SNR değerlerinin ötelenmiş harmonik ortalamalarına dayalı seçim kriterleri de literatürde önerilmiş yaklaşımlardandır [30].

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, günlük hayatımızda vazgeçilmez bir yer teşkil eden telsiz iletişim sistemlerinin performansını arttıracak yöntemlerin önerilip çeşitli kanal modelleri üzerinde başarımlarının incelenmesidir. Çok kullanıcı bir telsiz ağdaki terminallerin birbirlerinin haberleşmesine yardımcı olmasının ağ verimliliğini önemli ölçüde artırdığı son yıllarda yapılan çalışmalarla görülmüştür. İşbirlikli iletişim adı verilen bu yaklaşımda kaynaktan hedefe veri iletiminde kaynağı dinleyen ve röle olarak isimlendirilen komşu kullanıcıların da görev alması sağlanmaktadır. Böylelikle kaynak verisinin çok sayıda kanaldan hedefe iletimi mümkün hale getirilerek performans artışı elde edilmektedir. Kullanılan sistemde çok sayıda röle kullanıp röle seçimi yapılması durumunda sistem performansı daha da artmaktadır. İşbirlikli iletişim ağları, röle terminallerinde

gerçekleştirilen işaret işleme yaklaşımına göre genel olarak analog ve sayısal aktarmalı ağlar olarak sınıflandırılabilirler. Analog aktarmanın (AF) kullanıldığı işbirlikli telsiz ağlarda alınan işaretler üzerinde kuvvetlendirme işlemi yapılarak hedefe yeniden iletilmektedir. Sayısal aktarmanın (DF) kullanıldığı yapılarda ise kaynak verisi tekrar elde edildikten sonra kodlanıp hedefe aktarılır.

AF tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde röledeki gürültü bileşeni de kuvvetlendirilmiş olmasına rağmen hedef birim, işaretin iki bağımsız sönümlenmeli şeklini aldığı için daha iyi bir karar verir. Literatürde genellikle AF protokolü için hedefte ideal sezme tekniği olarak en büyük oran birleştirici (Maximum ratio combining, MRC) kullanılmaktadır.

DF tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde kaynak-röle arası kanaldaki bozucu etkiler sonucu oluşan hata yayılımı problemi sistem performansında önemli düşmelere neden olmaktadır. Literatürde hata yayılımı problemini farklı açılardan ele alarak özgün çözümler sunan başlıca teknikler: ML tabanlı sezim, işbirlikli en büyük oran birleştirme (Cooperative maximum ratio combining, C-MRC) ve toplamsal sanal gürültü modeli (Virtual noise, VN) olarak verilebilir. Bu tekniklerden ML tabanlı sezim tek röleli sistemlerde kullanıma uygunken [10], çok röleli sistemelerde C-MRC ve VN modeli tercih edilmiştir [31], [15].

Bu tezde hata yayılımını azaltıcı bu yöntemler kullanılarak tek antenli çok röleli DF tabanlı işbirlikli sistemlerin, farklı kanal yapılarında ve röle seçim algoritması kullanılması durumunda hata performansları araştırılıp incelenmiştir.

Ayrıca hedefte MRC birleştirme tekniği kullanılarak, farklı kanal yapıları ve röle sayıları için AF tabanlı çok röleli işbirlikli sistemlerin hata performans analizleri yapılmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Çok röleli işbirlikli iletişim sistemlerinde röledeki algılama hatalarının neden olduğu hata yayılımı problemine karşı geliştirilmiş literatürde değişik teknikler bulunmaktadır. Bu tezde, amaç bölümünde belirtilen tekniklerin röle seçim algoritması ile birleştirilerek sistemin performansının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca hata yayılımı ile mücadele tekniklerinin AF tabanlı ve DF tabanlı sistemlerde, farklı kanal yapılarındaki (Rayleigh, Nakagami, Kaskad kanallar) performans incelemesinin yapılması ve geliştirilmesi de hedeflenmiştir.

Bu tez toplamda beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş yapılmaktadır.

İkinci bölümde telsiz iletişim sistemlerinde kanal ve sönümlemeden bahsedilecektir. Sönümleme hakkında bilgi verildikten sonra, kanal parametreleri, kanalların sınıflandırılması ve sönümlemeli kanallar hakkında detaylı olarak açıklama yapılacaktır.

Üçüncü bölüm ise çeşitleme tekniklerinden oluşmaktadır. Neden çeşitlemeye ihtiyaç duyulduğundan bahsedildikten sonra temel çeşitleme teknikleri tanıtılacaktır. Alıcıda çeşitleme teknikleri başlığı altında birleştirme yöntemleri anlatılacaktır

Dördüncü bölümde tezin konusunu oluşturan işbirlikli çeşitlemeye giriş yapılacaktır. Rölede kullanılan aktarma yöntemlerinden bahsedildikten sonra, kullanılan iletişim protokolleri verilecek ve çoklu röleli sistemler üzerinde durulacaktır.

Beşinci bölümde AF kullanan röle seçimli işbirlikli sistem ele alınacak, sistemin PDF, CDF ve MGF analitik ifadeleri elde edilecektir. Sonrasında CDF ifadesi kullanılarak sistemin servis kesilme olasılığı ve MGF ifadesi kullanılarak sistemin sembol hata olasılığı çıkarımları yapılacaktır. Son olarak elde edilen Monte-Carlo simülasyonları sunulacaktır.

Altıncı bölümde ise DF kullanan röle seçimli işbirlikli sistemler ele alınacak, hata yayılım problemine çözüm olarak üretilen tekniklerden C-MRC ve VN yöntemleri üzerinde detaylı olarak durulacak ve elde edilen Monte-Carlo simülasyonları sunulacaktır.

Yedinci bölüm sonuç bölümüdür. Bu çalışmalarda yapılması hedeflenenler, izlenen yol ve elde edilen sonuçlar tekrardan belirtilip, sonuçlar yorumlanacaktır.

TELSİZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE KANAL MODELLERİ VE SÖNÜMLEME

Telsiz haberleşme sistemlerinde iletişim, vericiler tarafından iletilen işaretin pekçok farklı yoldan alıcıya ulaşması ile gerçekleşmektedir. Bu süre zarfında iletişimin gerçekleştiği çevredeki yüksek binalar, doğal veya yapay diğer etkiler veya atmosferik yansımalar nedeniyle iletilen dalgada yansımalar ve kırılmalar gerçekleşebilir. İletim sonunda alıcıdaki işaret ise tüm bu çok yollu yayılım sonucu gelen işaretlerin toplamıdır. Tüm bu yollardan iletilen işaretlerin genliklerinde ve fazlarında farklılıklar olabilir dolayısıyla alıcıdaki toplam işaretin genlik ve faz bileşenlerinde de değişimler gözlemlenebilir. *Sönümlenme (fading)* olarak adlandırılan bu olay, işaret yapısının da bozulmasına yol açar.

2.1 Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal Modeli

Haberleşme sistemlerinde en fazla karşılaşılan bozucu etki olan toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) en temel gürültü modelidir. Kanalda arka plandaki gürültü ve/veya alıcıdaki ısı gürültü olarak modellenir ve alıcıdaki sinyale toplam olarak ilave edilir. ζ beklenen değer, σ^2 varyans ifadeleri olmak üzere gürültünün olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, PDF) şu şekildedir [32],

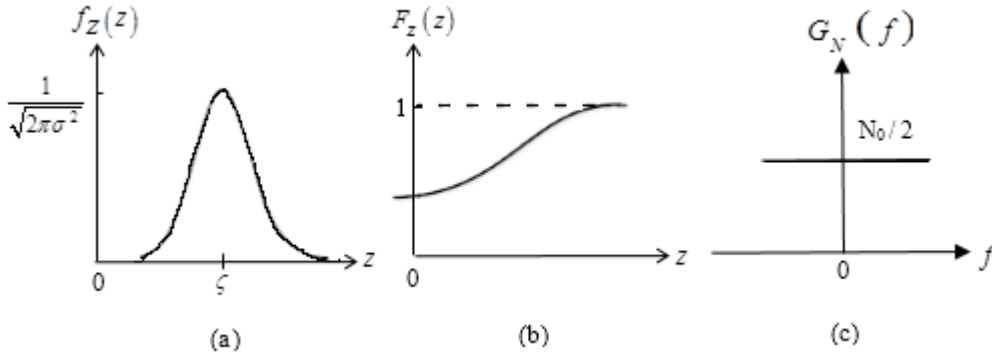
$$f_Z(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(z-\zeta)^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < z < \infty. \quad (2.1)$$

PDF'in integrali alındığında birikimsel dağılım fonksiyonunu (cumulative distribution function, CDF) bulunur:

$$F_Z(z) = \int_{-\infty}^z f_Z(z) dz = 1 - Q\left(\frac{z-\zeta}{\sigma}\right). \quad (2.2)$$

Burada $Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ biçimindedir [33].

Gauss dağılımının PDF, CDF ve AWGN güç spektral yoğunluğu Şekil 2.1 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir.



Şekil 2. 1 (a) Gauss dağılımının PDF eğrisi (b) Gauss dağılımının CDF eğrisi (c) AWGN güç spektral yoğunluğu

Grafikten de anlaşılacağı gibi AWGN güç spektrumu bütün frekanslar için $N_0/2$ değerinde sabit kalmaktadır yani ideal bir kanal modelidir.

2.2 Sönümlmeli Kanal Karakteristikleri

İdeal bir model olmakla birlikte, iletişimdeki sönümlleme dikkate alındığında AWGN gezgin telsiz iletişim sistemlerini uygun olarak modelleyememektedir. Bu nedenle zamanla değişen kanal karakteristiğini modellemek için sönümlmeli kanal modelleri kullanılmaktadır [34].

2.2.1 Kanal Parametreleri

Sönümlmeli kanalları karakterize etmek için bazı parametreler tanımlanmaktadır. Bu parametreler çok yönlü yayılım, uyumluluk band genişliği, uyumluluk süresi ve Doppler yayılımı olarak sayılabilir [34].

- **Çok Yollu Yayılım (T_m)**

Sönümlenmeli bir kanalda alıcıda, iletilen işaretin farklı yollardan, farklı gecikmelerle gelen şekilleri alınır. Alınan işaretle, iletilen işaret arasındaki gecikmeden kaynaklı olan zaman farkına çok yollu yayılım (zaman gecikmesi) denilmektedir. Çok yollu yayılım T_m ile gösterilir.

- **Uyumluluk Band Genişliği (B_c)**

Belirli bir işaretin spektral bileşenlerinin, yaklaşık olarak aynı kazanç ve doğrusal fazda geçebildiği kanalın genişliği, uyumluluk band genişliği olarak adlandırılır. Uyumluluk band genişliği B_c ile gösterilmektedir [34], [35]. Çok yollu yayılımla arasındaki ilişki,

$$B_c \approx 1/T_m \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir.

- **Uyumluluk Süresi (T_c)**

Uyumluluk süresi, T_c , kanalın darbe yanıtının değişmediği zaman aralığını ifade etmektedir. Bu durumda eğer simge süresi T_c 'den küçük olursa simgenin iletim boyunca zamanda değişmediği varsayılır [35].

- **Doppler Yayılımı (B_d)**

Kanalın zamanla değişim özelliğinden dolayı meydana gelen spektral genişleme Doppler yayılımı B_d ile ifade edilir. Doppler yayılımı, iletilen işaretin Doppler Spektrumunun sıfırdan farklı olduğu frekans aralığını vermektedir. Spektral genişlemenin miktarı gezgin birimin göreceli hızına, işaretin geliş açısına bağlıdır [35]. Uyumluluk süresi ile Doppler yayılımı arasında

$$T_c = 1/B_d \quad (2.4)$$

şeklinde bir ilişki vardır.

2.2.2 Kanalların Sınıflandırılması

- **Yavaş Sönümlmeli Kanallar**

Sönümlmeli kanalın zamanla değişim periyodunun, kanaldan iletilen işaretlerin sembol sürelerinden büyük olması durumunda kanal yavaş sönümlmeli kanal olarak adlandırılır. Kanalın, iletilen işarete zaman uzayında verdiği cevap, iletilen işaretin sembol süresinden daha uzun bir süre için sabittir. Yani, T_s işaretin sembol süresi olmak üzere, $T_s \ll T_c$ ise bu kanal üzerinden iletilen işaret yavaş sönümlmeye maruz kalır.

- **Hızlı Sönümlmeli Kanallar**

Yavaş sönümlmeli kanalla ters olarak, sönümlmeli bir kanalın zamanla değişim periyodu, kanaldan iletilen işaretlerin sembol sürelerinden küçük ise kanal hızlı sönümlmeli kanal olarak adlandırılır. $T_s \gg T_c$ eşitsizliği ile gösterilir.

- **Frekans Seçici Kanal**

Belirli bir işaretin spektral bileşenlerinin yaklaşık olarak aynı kazanç ve doğrusal fazda geçebildiği kanalın band genişliği, iletilen işaretin band genişliğinden daha dar ise, iletilen işaret frekans uzayında frekans seçici sönümlmeye maruz kalır. Frekans seçici sönümlmeye uğramış bir işaretin spektral yapısı bozulur. Özetle, B_s işaretin band genişliği olmak üzere, $B_s \gg B_c$ veya eşdeğer olarak $T_s \ll \sigma$ olmalıdır. Burada σ kanalın gecikme yayılımıdır.

- **Frekans Seçici Olmayan Kanal**

Sönümlmeli telsiz haberleşme kanalı, iletilen işaretin band genişliğinden büyük bir uyumluluk band genişliğine sahipse, kanaldan iletilen işaretler frekans seçici olmayan sönümlmeye maruz kalırlar. Frekans seçici olmayan sönümlmeye uğrayan bir işaretin spektral yapısı bozulmaz. Bununla birlikte; kanalın zamanla değişim hızı, alınan işaretin zaman uzayında bozulmasına neden olabilir. Frekans seçici olmayan sönümlme, düz sönümlme olarak da adlandırılmaktadır. Bir işaretin düz sönümlmeye uğraması için, $B_s \ll B_c$ eşdeğer olarak $T_s \gg \sigma$ olmalıdır.

2.3 Sönümlenmeli Kanal Modelleri

AWGN, sönümlenmeli sistemleri karakterize etmek için yetersiz olduğundan sönümlenmeli kanal modellerine ihtiyaç duyulduğu belirtilmişti. Aşağıda bu sönümlenmeli kanal modelleri hakkında bilgi verilecektir.

2.3.1 Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Modeli

İletişimin çevredeki binalardan yansıma, kırılma ve saçılmalar sonucu iletilen sinyallerle gerçekleştiği, alıcı ve verici arasında direkt görüş hattının bulunmadığı durumda işaretin zarfı Rayleigh dağılımlı olmaktadır. Rayleigh dağılımının PDF ifadesi [35],

$$f_Z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right), \quad 0 \leq z \quad (2.5)$$

biçimindedir.

Burada σ^2 , dik bileşenlerin varyansıdır. Rayleigh dağılımının ortalama değeri,

$$z_{ort} = E[Z] = \int_0^{\infty} z f(z) dz = \sigma \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad (2.6)$$

olarak bulunur. Rayleigh dağılımının gücü $\Omega = E[Z^2] = 2\sigma^2$, varyansı ise

$$\begin{aligned} \sigma_Z^2 &= E[Z^2] - E^2[Z] = \int_0^{\infty} z^2 f(z) dz - \frac{\sigma^2 \pi}{2} \\ &= \sigma^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

şeklindedir.

Alıcı ve verici birbirini hiçbir şekilde direkt olarak görmediği için, Rayleigh sönümlenmeli kanal, hata başarımını en kötü etkileyen kanal türüdür. Hata performans incelemeleri yapılırken önemli olan sistemin en kötü durumda gösterdiği performanstır bu nedenle incelemelerde çoğunlukla Rayleigh sönümlenmeli kanal kullanılmaktadır.

2.3.2 Rician Sönümlenmeli Kanal Modeli

Çok yönlü yayılım sonucu iletilen işaretler yanında, alıcı ve verici arasında direkt görüş hattının da olduğu durumlarda sönümlenme katsayılarının Rician dağılımlı olduğu görülmektedir. Rician dağılımın PDF'i aşağıdaki şekilde verilir [35]:

$$f_Z(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{zA}{\sigma^2}\right), \quad z \geq 0. \quad (2.8)$$

Burada görülen A baskın işaretin maksimum değeri (genliği); $I_0(\cdot)$ ise birinci türden sıfırıncı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur. Rician dağılımında vericiden alıcıya direkt ulaşan işaretin gücü ile yansiyarak ulaşan işaretlerin gücünün oranını gösteren bir K parametresi tanımlanır. Bu durumda K parametresi,

$$K = \frac{\text{Doğrudan ulaşan işaretin ortalama gücü}}{\text{Yansiyarak ulaşan işaretlerin ortalama gücü}} = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir. Rician dağılımının PDF ifadesi K parametresine bağlı olarak yazılırsa,

$$f_Z(z) = \frac{2z(1+K)}{\Omega} \exp\left(-K - \frac{z^2(1+K)}{\Omega}\right) I_0\left(2z\sqrt{\frac{K(1+K)}{\Omega}}\right), \quad z \geq 0. \quad (2.10)$$

ifadesi elde edilir. Burada Ω Rician dağılımına ait ortalama güçtür. $K = \infty$ durumunda Rician dağılımı AWGN kanala yakınsamakta, $K = 0$ durumunda ise Rician dağılımı Rayleigh dağılımına yakınsamaktadır [35].

2.3.3 Nakagami- m Sönümlenmeli Kanal Modeli

Nakagami- m dağılımı Rayleigh ve Rician dağılımlarına göre daha genel bir dağılımdır. m sönümlenme parametresi olmak üzere Nakagami dağılımının PDF'i [36],

$$f_Z(z) = \frac{2m}{\Omega} \frac{z^{2m-1}}{\Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mz^2}{\Omega}\right), \quad z \geq 0, \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (2.11)$$

biçimindedir.

Burada $\Gamma(\cdot)$, Gamma fonksiyonudur [37]. Sönümlenme parametresi $m=0.5$ olduğunda Nakagami dağılımı, tek taraflı Gauss dağılımını, $m=1$ olduğunda ise Rayleigh dağılımını vermektedir. $m \rightarrow \infty$ durumunda ise sönümlenmesiz AWGN kanala yakınsar.

2.3.4 Kaskat Sönümlmeli Kanal Modeli

Yapılan çalışmalarla klasik sönümlmeli dağılımların hücresele radyo sistemleri için ideal kanal modelleri oldukları ispatlanmıştır. Fakat [20] ve [21]'de sistemdeki terminallerin birkaçının veya tümünün hareketli olması durumunda bu dağılımların yetersiz kaldığı gösterilmiştir. Bu durumlar için Andersen, kaskat sönümlmeli kanallar olarak adlandırılan, gezgin terminallerin etrafındaki bağımsız saçıcı grupların kanal kazançlarının çarpımından oluşan çarpımsal bir kanal modeli önermiştir [22], [23]. Alıcı ve verici terminallerinin hareketli olduğu senaryolar için, iki bağımsız saçıcı grubun olduğu yani çift sönümlmeli kanal modelinin uygunluğu ise [38]'de gösterilmiştir.

Çarpımsal kanal modellerini matematiksel olarak modelleyebilmek için Q tane birbirinden istatistiksel bağımsız rastgele değişkenin çarpımı $(Z_i, i = 1, 2, \dots, Q)$ [39],

$$Y = \prod_{i=1}^Q Z_i \quad (2.12)$$

biçiminde verilmiştir.

ÇEŞİTLEME TEKNİKLERİ

Daha önce de bahsedildiği gibi telsiz haberleşme sistemlerinin gerçekleştirilmesinde karşılaşılan en önemli problemlerden birisi çok yollu sönümlemedir. Bilginin istatistiksel bağımsız farklı kanallar üzerinden iletilmesi prensibine dayanan çeşitleme, sönümlemenin olumsuz etkilerini azaltan temel bir yaklaşımdır.

Eğer işaret tek bir yoldan yollanırsa derin sönümlemeye uğrayabilir, gönderilen sinyal yok olabilir. Bu durumda yapılabilecek bir şey kalmaz. Fakat istenilen işaretin birden fazla kopyasını, birden fazla yoldan yollamak, bazı kopyaların sönümlemeye uğrayacak olmasına rağmen, bazılarının ise sönümlemeye maruz kalmadan iletilme şansını arttırmaktadır. Bu sayede de alıcıdaki işaretin gücü belli bir seviyenin üstünde kalmış olur.

Çeşitleme tekniklerinin kullanılmaması durumunda ise iletim yüksek güçte gerçekleştirilerek veya büyük boyutlarda anten kullanarak iletilen işaretin alıcıda doğru algılanabilmesi sağlanabilir. Fakat gerek maliyet gerekse boyut sorunları açısından, çeşitleme teknikleri bu çözümlerin önüne geçmektedir [40].

3.1 Temel Çeşitleme Teknikleri

Telsiz haberleşme sistemlerinde kullanılan temel çeşitleme teknikleri aşağıda verilmiştir.

- Zaman Çeşitlemesi
- Frekans Çeşitlemesi
- Uzay (Anten) Çeşitlemesi

3.1.1 Zaman Çeşitlemesi

Zaman çeşitlemesinde temel prensip istenilen işaretin farklı zaman periyotlarında iletilmesine dayanmaktadır. Bu sayede alıcıda bağımsız sönülemeye uğramış işaretler elde edilmiş olur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, birbirini takip eden zaman dilimleri arasındaki zaman ayrımı en azından kanalın uyumluluk süresi kadar olmalıdır [32]. Uyumluluk süresinin ise gezgin birimin hızına bağlı olduğu düşünüldüğünde, gezgin birimin çok yavaş hareket etmesi durumunda istenmeyen gecikmelerin yaşandığı ve yüksek güç gerektiren durumlar ortaya çıkabilir.

3.1.2 Frekans Çeşitlemesi

Frekans çeşitlemesinde aynı işaret birbirinden farklı frekanslarda gönderilmekte bu sayede alıcıya farklı sönüleme etkilerine uğramış işaretler gelmektedir. Frekans çeşitlemesinde frekans aralığının uyumluluk band genişliğinden büyük olması gerekmektedir aksi halde semboller arası girişim meydana gelmektedir. Bu tekniğin dezavantajı olarak, kullanılan kanal sayısı kadar alıcı gerektirmesi söylenebilir ayrıca birden fazla frekans kullanıldığından dolayı bandverimliliği de düşüktür.

3.1.3 Uzay (Anten) Çeşitlemesi

Bir başka temel çeşitleme yöntemi ise anten çeşitlemesidir. Anten çeşitlemesi radyo şebekelerinde kullanılan en yaygın tekniktir. Uygulamasının kolay olması yanında ek bandgenişliğine de gerek duyulmaz.

Anten çeşitlemesi alıcı ve vericinin her ikisinde veya sadece bir tanesinde birden çok anten kullanılması ile sağlanmaktadır. Bu sayede birbirinden bağımsız sönülemeli kanallar üzerinden iletişim sağlanmaktadır. Bağımsız sönüleme elde edilmesi için dikkat edilmesi gereken nokta antenler arasındaki mesafedir. Gezgin iletişim için bu mesafe, λ dalga boyu olmak üzere, $0,5 \lambda - 0,8 \lambda$ arasındadır [41].

3.2 Alıcıda Birleştirme Yöntemleri

Daha önceden de belirtildiği gibi çeşitlemenin temel fikri iletilen sinyalin bağımsız sönülemeye uğramış birden fazla kopyasının birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu bölümde alıcıda birden çok anten kullanılması durumuna dayanan “alıcıda anten

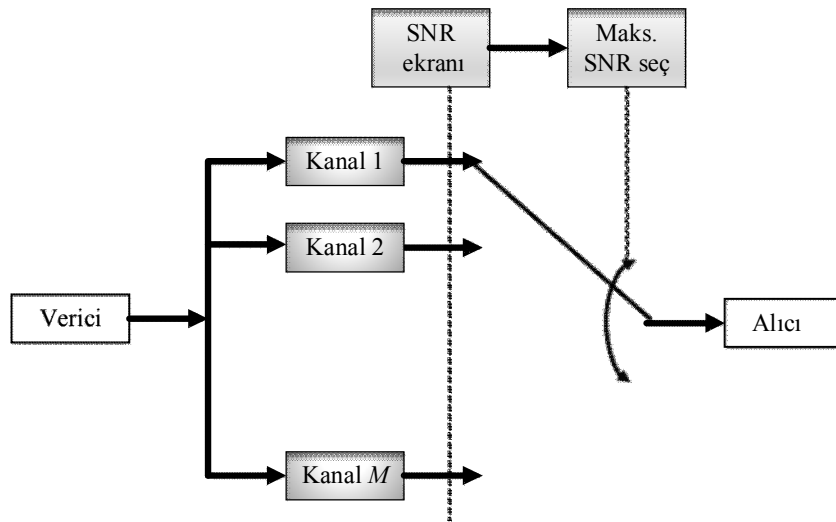
çeşitlemesi” tekniğinden bahsedilecektir. Bu teknikte sadece alıcı tarafında birden çok anten kullanılmaktadır. Her bir antene farklı bağımsız kanallardan gelen sinyalleri birleştirilmek için bazı teknikler kullanılır. Bu birleştirici tekniklerinden en önemlileri,

- Seçmeli Birleştirme (Selection combining, SC)
- En Büyük Oran Birleştirmesi (Maximum ratio combining, MRC)
- Eşit Kazançlı Birleştirme (Equal gain combining, EGC)

olarak sayılabilir [42].

3.2.1 Seçmeli Birleştirme (SC)

SC tekniğinde alıcı birbirinden bağımsız kanallar üzerinden gelen sinyaller arasında en yüksek işaret-gürültü oranına (signal-to-noise ratio, SNR) sahip olan sinyali kullanır.



Şekil 3. 1 Seçmeli birleştirme

Sistemde M adet alıcı anten yani M adet bağımsız sönümlenmeli kanal olduğu kabul edilirse alıcıda elde edilen işaret,

$$r_i = h_i s + n_i \quad , \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. Burada gönderilen simge s ile ifade edilmiştir. h_i , i . kanala ait kompleks sönümlenme katsayısını ve n_i ise $i=1,2,\dots,M$ olmak üzere sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü göstermektedir.

i . kanalın ani SNR değeri olan γ_i ise,

$$\gamma_i = |h_i|^2 \frac{E}{N_0} \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada E gönderilen işaretlerin ortalama enerjisidir.

Seçmeli birleştirme işlemi sonucunda elde edilen işaretin SNR ifadesi γ_{SC} olmak üzere aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\gamma_{SC} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_M). \quad (3.3)$$

Kanalın Rayleigh sönümlenmeli kanal olduğu varsayıldığı durumda, i . kanala ait ortalama SNR değeri $\bar{\gamma}_i = E[\gamma_i]$ ise γ_i 'nin PDF ifadesi,

$$f(\gamma_i) = \frac{1}{\bar{\gamma}_i} e^{-\gamma_i/\bar{\gamma}_i} \quad (3.4)$$

biçimindedir.

PDF fonksiyonunun integrali alındığında i . kanala ilişkin CDF ifadesi elde edilir:

$$F(\gamma_i) = 1 - e^{-\gamma_i/\bar{\gamma}_i}. \quad (3.5)$$

Seçmeli birleştirme sonucundaki servis kesilme olasılığı ise,

$$P_{out} = \prod_{i=1}^M F(\gamma_0) = \prod_{i=1}^M (1 - e^{-\gamma_0/\bar{\gamma}_i}) \quad (3.6)$$

biçiminde olur.

Her kanaldaki ortalama SNR değerinin aynı olduğu ($\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}, \forall i$) kabul edilirse (3.6) numaralı denklem şöyle düzenlenebilir:

$$P_{out} = f(\gamma_{SC} < \gamma_0) = [1 - e^{-\gamma_0/\bar{\gamma}}]^M. \quad (3.7)$$

(3.7) numaralı denklemin $\gamma_0 = \gamma$ 'ya göre türevi alındığında γ_{SC} için PDF dağılımı elde edilir:

$$f_{\gamma_{SC}}(\gamma) = \frac{M}{\bar{\gamma}} \left[1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}} \right]^{M-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}}. \quad (3.8)$$

Buradan da birleştirici çıkışındaki ortalama SNR değeri,

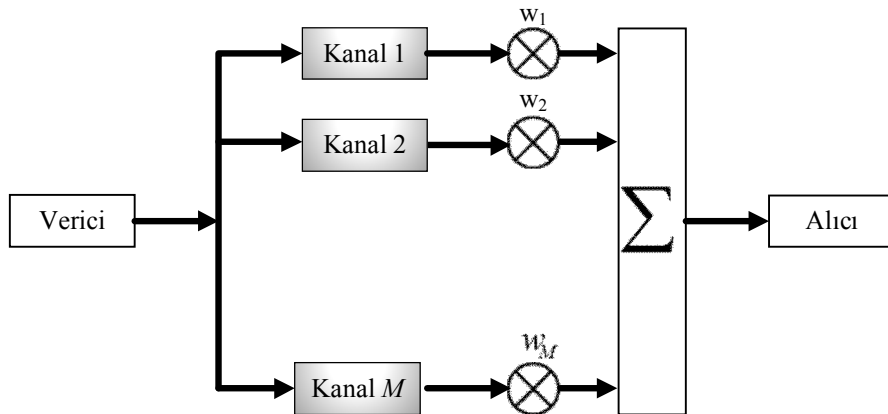
$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_{SC} &= \int_0^{\infty} \gamma f_{\gamma_{SC}}(\gamma) d\gamma \\ &= \int_0^{\infty} \frac{\gamma M}{\bar{\gamma}} \left[1 - e^{-\gamma/\bar{\gamma}} \right]^{M-1} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} d\gamma \\ &= \bar{\gamma} \sum_{i=1}^M \frac{1}{i} \end{aligned} \quad (3.9)$$

olur.

Sonuçtan da görüldüğü gibi seçmeli birleştirme yöntemiyle çıkıştaki ortalama SNR değeri, girişteki ortalama SNR değerinin $\sum_{i=1}^M \frac{1}{i}$ katı olmaktadır. Seçmeli birleştirme yöntemi performans açısından diğer yöntemlere göre kötü de olsa yöntemler arasında karmaşıklığı en düşük olanıdır [43].

3.2.2 En Büyük Oran Birleştirmesi (MRC)

MRC tekniği birleştirme teknikleri içerisinde en iyi performans gösteren yöntem olmakla beraber aynı zamanda da en kompleks olan yöntemdir [43]. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi, bu metotta kanallar, çıkışta maksimum SNR değeri elde edilecek şekilde ağırlıklandırılarak birleştirilir.



Şekil 3. 2 En büyük oran birleştirmesi

Burada $w_i, i=1,2,\dots,M$ ağırlık katsayılarını göstermektedir. $w_i = h_i^*$ seçilmesi durumunda MRC çıkışı,

$$r = \sum_{i=1}^M w_i r_i = \sum_{i=1}^M |h_i|^2 s + \sum_{i=1}^M h_i^* n_i \quad (3.10)$$

olur. Burada $h_i, i=1,2,\dots,M$ kanal katsayısını ifade etmektedir. i . kanala ait SNR değerinin $\gamma_i = |h_i|^2 \frac{E}{N_0}$ olduğu bilindiğine göre çıkıştaki SNR değeri,

$$\gamma_{MRC} = \frac{\left(\sum_{i=1}^M |h_i|^2 \right)^2 E}{\sum_{i=1}^M |h_i|^2 N} = \sum_{i=1}^M |h_i|^2 \frac{E}{N_0} = \sum_{i=1}^M \gamma_i \quad (3.11)$$

olarak ifade edilebilir. Sonuç yorumlanacak olursa çıkıştaki sinyalin SNR'ı, her bir yoldan gelen sinyallerin SNR'larının toplamına eşit olmaktadır. MRC yöntemi çıkıştaki SNR değerini maksimum yapmaktadır, bu nedenle de optimum bir birleştirme yöntemidir. Bu yöntemde kanal durum bilgisinin (channel state information, CSI) alıcıda tam olarak bilinmesi gerekmektedir.

Kanalın Rayleigh olduğu ve her kanaldaki ortalama SNR değerinin aynı olduğu ($\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}, \forall i$) varsayıldığında çıkıştaki γ_{MRC} 'nin beklenen değeri,

$$\bar{\gamma}_{MRC} = E \left[\sum_{i=1}^M \gamma_i \right] = \bar{\gamma} M \quad (3.12)$$

olarak ifade edilir. Burada $E[\cdot]$ beklenen değer işlevidir.

3.2.3 Eşit Kazançlı Birleştirme (EGC)

EGC tekniğinde, MRC'den farklı olarak $\forall i, w_i = 1$ olarak seçilir, yani ağırlıklandırma yapılmaz. Bu durumda çıkıştaki SNR değeri,

$$\gamma_{EGC} = \left(\sum_{i=1}^M h_i \right)^2 \frac{E}{MN_0} \quad (3.13)$$

olur.

Kanalın Rayleigh olduğu ve her kanaldaki ortalama SNR değerinin aynı olduğu ($\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}, \forall i$) varsayıldığında çıkıştaki γ_{EGC} 'nin beklenen değeri aşağıdaki gibidir [44],

$$\bar{\gamma}_{EGC} = \bar{\gamma} \left(1 + (M-1)\pi/4 \right). \quad (3.14)$$

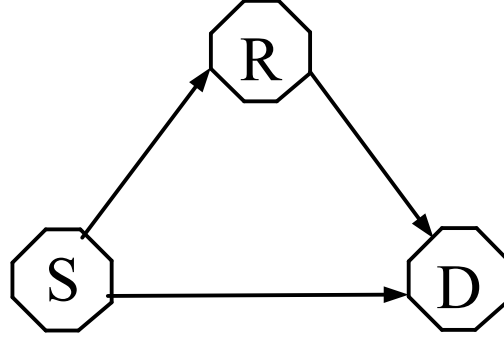
EGC yontemi MRC ile karşılaştırıldığında işlem bakımından kolaylık sağlamasına rağmen performans açısından MRC kadar iyi sonuçlar vermemektedir [45].

İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEME

Temel çeşitleme teknikleri başlığı altında sönümlenmeye karşı kullanılan çeşitleme tekniklerinden bahsedilmişti. Bunlardan uzay çeşitlemesi olarak da adlandırılan anten çeşitlemesinin kullanıldığı MIMO sistemlerin en önemli avantajı iletim çeşitlemesine olanak sağlamalarıdır. Fakat pratikte gezgin kullanıcılar üzerine birden fazla anten yerleştirmek mümkün olmamaktadır, bu nedenle de MIMO sistemlerinin sağlayacağı kazançlar elde edilememektedir. Dolayısıyla gerek maliyet, gerek donanım, gerekse boyut sınırlamalarından dolayı MIMO sistemler gezgin kullanıcılar için kullanışlı olmamaktadır [39].

Son yıllarda tek antenli sistemleri kullanarak, MIMO avantajlarının elde edilebileceği bir sistem olan işbirlikli sistemler üzerinde durulmuştur. İşbirlikli haberleşme konusunda ilk orijinal çalışma Van Der Meulen tarafından yapılmıştır [46]. Bu çalışmayla üçlü haberleşme terminali sayesinde oluşturulan haberleşme kanalı incelenmiş ve ilk defa işbirlikli haberleşme tanımı yapılmıştır. 1980'lerde ve 1990'larda çok az sayıda çalışma mevcuttur ancak MIMO sistemlerinin avantajlarının ortaya konmuş olması sebebiyle işbirlikli haberleşme konusundaki çalışmalar hız kazanmıştır [10], [11]. Cover ve El Gamal'ın yaptıkları çalışmayla aktarım (relaying) kanalları için ideal işbirlikli haberleşme konusu genişletilmiştir [47]. 80'li ve 90'lı yıllarda çalışmaların azalmasından sonra 2000'li yılların başında Laneman'ın çalışmaları ile işbirlikli çeşitleme yeniden önem kazanmıştır [7], [18], [48].

Tipik bir işbirlikli sistem Şekil 4.1'de görülmektedir. Bu sistem kaynak (source, S), röle (relay, R) ve hedef (destination, D) adı verilen üç yapıdan oluşmaktadır.



Şekil 4. 1 İşbirlikli sistem yapısı

4.1 Aktarma Yöntemleri

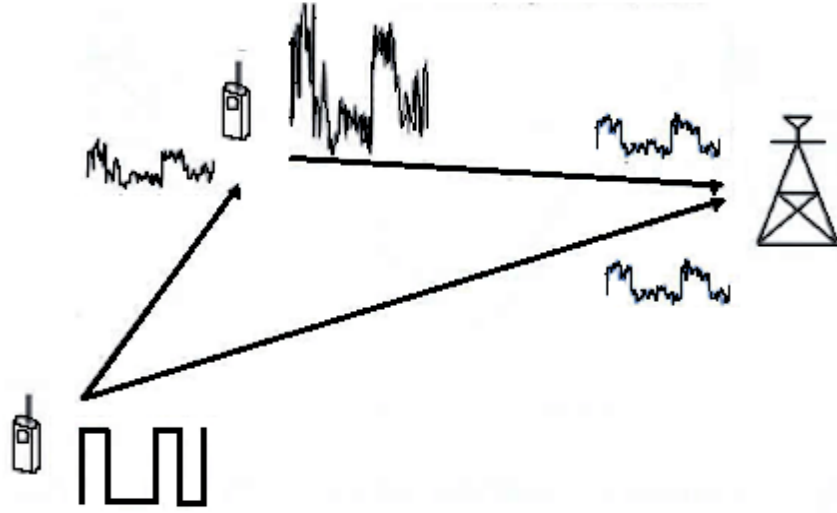
İşbirlikli haberleşmede rölenin görevi kendisine gelen sinyali hedefe iletmektir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta rölenin sinyali nasıl bir sinyal işleme tekniği kullanarak ileteceğidir. Burada bahsedilen sinyal işleme teknikleriyle aktarma yöntemleri kastedilmektedir. Kullanılan bu yöntemlerin sistemin performansına etkileri yüksek olduğundan fikir sahibi olmak oldukça önemlidir. İki temel aktarma yöntemi mevcuttur,

Kuvvetlendir ve İlet (Amplify-and-Forward, AF)

Çöz ve İlet (Decode-and-Forward, DF)

4.1.1 Kuvvetlendir ve İlet (AF)

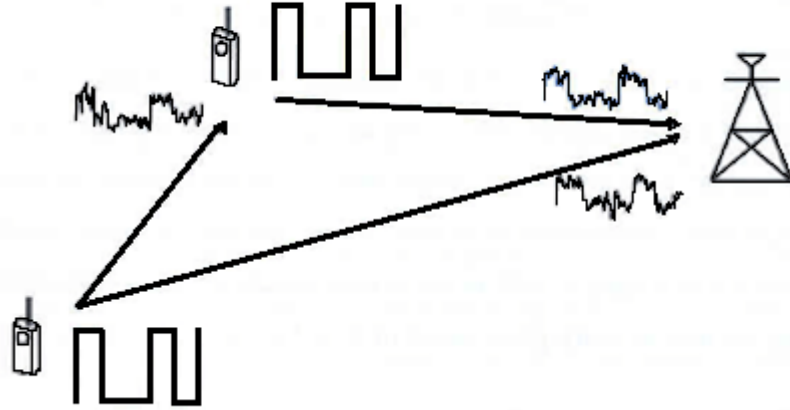
Laneman ve arkadaşları [7] tarafından önerilen bu sistemde kaynaktan röleye gelen gürültülü sinyal kuvvetlendirildikten sonra hedefe iletilmektedir. AF yöntemi uygulaması basit bir yöntemdir fakat bu yöntemde, röledeki gürültü bileşeni de kuvvetlendirildiği için bu bir dezavantaj olarak görülebilir. Buna rağmen hedef birim, işaretin birbirinden bağımsız farklı sönümlenmelere uğramış kopyalarını aldığı için daha iyi bir karar verir. Şekil 4.2’de kuvvetlendir ve ilet protokolü gösterilmektedir.



Şekil 4. 2 Kuvvetlendir ve ilet yöntemi

4.1.2 Çöz ve İlet (DF)

Bir diğer aktarım yöntemi ise çöz ve ilet tekniğidir. DF yönteminde kaynaktan gönderilen sinyal rölede çözülüp tekrar kodlanarak hedefe iletilmektedir [9]-[12]. Şekil 4.3’de DF yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 4. 3 Çöz ve ilet yöntemi

AF yöntemiyle karşılaştırıldığında, AF’de olduğu gibi gürültü güçlenmesi olmamaktadır. Fakat DF tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde karşılaşılan en önemli problem, kaynak-röle arası kanaldaki bozucu etkiler sonucu rölede algılama hatalarının oluşması ve

röleden hedefe hatalı paketlerin iletilmesidir. Böyle bir durumda da çeşitleme kazancı görülmeyebilir.

4.2 Kullanılan İletişim Protokolleri

İşbirlikli haberleşmede iletişim üç farklı protokole göre gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi [18]'de ele alınan Protokol I'dir.

Bu protokolda ilk zaman diliminde kaynak (S), röle (R) ve hedefe (D) iletim yaparken, ikinci zaman diliminde ise röle (R) ve kaynak (S), hedefe (D) iletim yapmaktadırlar. Çizelge 4.1' de zaman aralıkları ve yapılan iletimler gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1 Protokol I

1. Zaman Dilimi	2. Zaman Dilimi
$S \rightarrow R$	$R \rightarrow D$
$S \rightarrow D$	$S \rightarrow D$

[18]'de verilen Protokol II'de ilk zaman diliminde kaynak (S), röle (R) ve hedefe (D) iletim yaparken, ikinci zaman diliminde ise yalnızca röle (R), hedefe (D) iletim yapmaktadır. İletim çizelgesi aşağıda görülmektedir.

Çizelge 4. 2 Protokol II

1.Zaman Dilimi	2.Zaman Dilimi
$S \rightarrow R$	$R \rightarrow D$
$S \rightarrow D$	

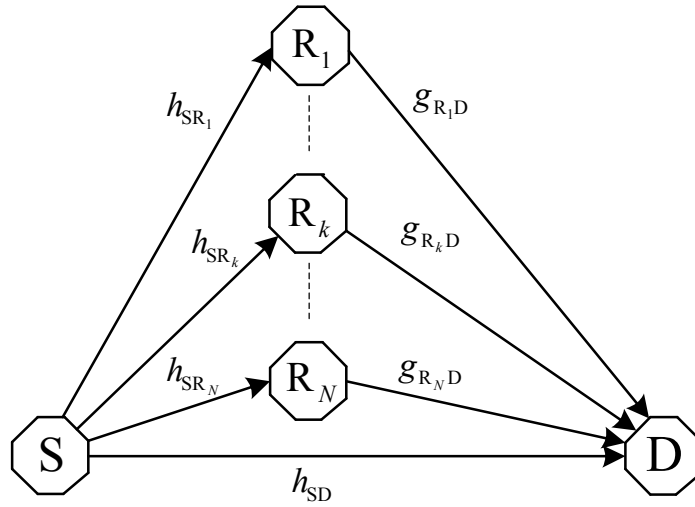
[18]'de ayrıca verilen Protokol III'de ise ilk zaman diliminde yalnızca S kaynağı, R rölesine iletim yaparken, ikinci zaman diliminde ise R rölesi ve S kaynağı D hedefine iletim yapmaktadır. Çizelge 4.3'de Protokol III'ün iletim çizelgesi görülmektedir.

Çizelge 4. 3 Protokol III

1.Zaman Dilimi	2.Zaman Dilimi
$S \rightarrow R$	$R \rightarrow D$
	$S \rightarrow D$

4.3 Çoklu Röleli Sistemler

Röleli sistemlerde hata performansını arttırmak için tek röleli sistemler kolaylıkla çoklu röleli sistemlere genişletilebilir. Şekil 4.4'de N adet röleden oluşan bir işbirlikli sistem görülmektedir.



Şekil 4. 4 Çoklu röleli sistemler

Burada h_{SR_k} ve $g_{R_k D}$ sırasıyla $k=1, 2, \dots, N$ olmak üzere kaynak ile k . röle ($S \rightarrow R_k$) ve k . röle ile hedef arasındaki ($R_k \rightarrow D$) kanal sönümlenme katsayılarını ifade etmektedir. h_{SD} ise kaynak-hedef ($S \rightarrow D$) arasındaki kanal katsayısını göstermektedir.

AF KULLANAN ÇOK RÖLELİ SİSTEMLERDE RÖLE SEÇİMİ

Yapılan çalışmalarda çoklu röleye sahip işbirlikli sistemlerde röle seçiminin sistem performansını iyileştirdiği görülmüştür [24]-[27]. Röle seçimli işbirlikli sistemlerde en iyi şartlara sahip olan kanala ilişkin röle üzerinden aktarım yapılmaktadır. [28]'de verilen Bletsas vd. nin yaptığı çalışmada çok röleli sistemler için, ilk olarak kodları düzgün çözen röleler belirlendiği ve sonrasında da iletim için en iyi röle seçildiği bir röle seçim kriteri önerilmiştir. [29]'da ise röle ve hedef arasındaki linkin maksimum işaret-gürültü-oranına (signal-to-noise ratio, SNR) sahip olan röle seçilmektedir. Bu çalışmada kullanılan röle seçim kriterlerine bir sonraki bölümde detaylı olarak yer verilecektir.

5.1 Sistem Modeli ve Hata Başarım Analizi

Burada çok röleli bir sistem modeli ele alınmıştır. Şekil 4.4'de de görüldüğü gibi sistem kaynak (S), hedef (D) ve N adet röleden (R) oluşmaktadır. Her bir terminalde tek alıcı ve tek verici anten vardır ve half-duplex (yarı-dublex) yapıdadır. h_{SR_k} ve g_{R_kD} sıfır ortalamalı, 0.5 varyanslı, birbirinden bağımsız ve aynı dağılımlı (independent and identically distributed, i.i.d.) kompleks Gauss değişkenleri olarak varsayılmıştır. Bu da klasik Rayleigh sönümlemesine denk gelmektedir. Kaynak-hedef (S→D) arasındaki kanal katsayısı h_{SD} ise iki bağımsız kompleks Gauss değişkeninin çarpımı olarak modellenmiştir [21]. Yani h_{SD_1} ve h_{SD_2} sıfır ortalamalı, 0,5 varyanslı olmak üzere, $h_{SD} = h_{SD_1} h_{SD_2}$ olarak yazılabilir. Bu nedenle $|h_{SD}|$ çift (double) Rayleigh dağılımlı rastgele değişken olur [49], [50] ve PDF ifadesi,

$$f(|h_{SD}|) = 4|h_{SD}|K_0(2|h_{SD}|) \quad (5.1)$$

biçimindedir. Burada $K_0(\cdot)$ ikinci türden sıfırncı dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur [51].

Bu sistem modelinde Protokol II kullanılmaktadır. Yani, birinci zaman diliminde kaynak verisini röle ve hedefe iletmektedir. İkinci zaman diliminde ise röle, birinci zaman diliminde aldığı gürültülü işareti kuvvetlendirerek hedefe iletmektedir. Yani, birinci zaman diliminde aldığı işaretin gücünü normalize ederek hedefe iletmektedir.

Birinci fazda kaynağın röle ve hedefe birim güçlü x sinyalini ilettiğini varsayalım. Bu durumda k . rölede ve hedefte alınan işaretler şu şekilde yazılabilir,

$$y_{\text{SR}_k} = \sqrt{E_s} x h_{\text{SR}_k} + n_{\text{SR}_k}, \quad (5.2)$$

$$y_{\text{SD}} = \sqrt{E_s} x h_{\text{SD}} + n_{\text{SD}}. \quad (5.3)$$

Burada n_{SD} ve n_{SR_k} sırasıyla, hedefteki ve k . röledeki 0 ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı toplamsal beyaz Gauss gürültüsüdür. E_s ise ortalama sembol enerjisidir. İkinci fazda, k . röle kendisine gelen gürültülü sinyali kuvvetlendirerek hedefe iletmektedir ve hedefte elde edilen işaret,

$$y_{\text{R}_k\text{D}} = \beta_k y_{\text{SR}_k} g_{\text{R}_k\text{D}} + n_{\text{R}_k\text{D}} \quad (5.4)$$

biçimindedir. Burada $g_{\text{R}_k\text{D}}$ $\text{R}_k \rightarrow \text{D}$ linkinin kanal katsayısı, $n_{\text{R}_k\text{D}}$, 0 ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü ifade etmektedir.

$\beta_k = \left(\frac{\sqrt{E_s}}{\sqrt{E_s |h_{\text{SR}_k}|^2 + N_0}} \right)$ ise kuvvetlendirme faktörüdür.

Hedefteki ani uçtan-uça SNR değeri γ_{D} ifadesi,

$$\gamma_{\text{D}} = \gamma_{\text{SD}} + \sum_{k=1}^N \frac{\gamma_{\text{SR}_k} \gamma_{\text{R}_k\text{D}}}{1 + \gamma_{\text{SR}_k} + \gamma_{\text{R}_k\text{D}}} \quad (5.5)$$

biçiminde yazılabilir.

Burada $\gamma_{\text{SD}} = (E_s/N_0) |h_{\text{SD}}|^2$, $\gamma_{\text{SR}_k} = (E_s/N_0) |h_{\text{SR}_k}|^2$ ve $\gamma_{\text{R}_k\text{D}} = (E_s/N_0) |g_{\text{R}_k\text{D}}|^2$ sırasıyla;

$\text{S} \rightarrow \text{D}$, $\text{S} \rightarrow \text{R}_k$ ve $\text{R}_k \rightarrow \text{D}$ linklerine ait ani SNR değerleridir. N_0 ise gürültü varyansıdır.

Analizini basitleştirmek için (5.5) numaralı denklemdeki ani SNR ifadesinin ikinci

kısımının, k . röleye göre bir üst sınır ifadesi verilebilir [16]. Bu üst sınır ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$\gamma_k = \min\left(\gamma_{\text{SR}_k}, \gamma_{\text{R}_k\text{D}}\right) \geq \frac{\gamma_{\text{SR}_k} \gamma_{\text{R}_k\text{D}}}{1 + \gamma_{\text{SR}_k} + \gamma_{\text{R}_k\text{D}}}. \quad (5.6)$$

Son olarak (5.5) ifadesi,

$$\gamma_{\text{D}} \leq \gamma_{\text{SD}} + \sum_{k=1}^N \gamma_k \quad (5.7)$$

olarak yazılabilir

Sistemin toplam SNR (uçtan-uça SNR) değeri $\gamma_{\text{tot}} = \gamma_{\text{SD}} + \gamma_b$ olmakla birlikte buradaki γ_b röle seçimi sonrasındaki en iyi röleye ilişkin ani SNR değeridir. Sistemin performansını analiz etmek için sistemin moment üreten fonksiyon (MGF) ifadesi hesaplanmalıdır. Toplam MGF ifadesi,

$$M_{\gamma_{\text{tot}}}(s) = M_{\gamma_{\text{SD}}}(s) M_{\gamma_b}(s) \quad (5.8)$$

biçiminde olur. Buradaki $M_{\gamma_{\text{SD}}}(s)$ ve $M_{\gamma_b}(s)$ sırasıyla, γ_{SD} ve γ_b nin MGF ifadeleridir.

5.2 Röle Seçim Algoritması ve Sembol Hata Oranı Analizleri

Bu bölümde γ_b ve γ_{SD} değerlerinin MGF ifadeleri elde edilecektir. Toplam SNR'ın CDF i kullanılarak sistemin servis kesilme olasılığı hesaplanacaktır. Son olarak toplam SNR'ın MGF'si ve ortalama simge hata olasılığı (SER) ifadesi sunulacaktır.

A. $S \rightarrow R_k \rightarrow D$ kanalına ait SNR'ın MGF'si

Bir rastgele değişkenin PDF ifadesinin Laplace transformu alınarak MGF ifadesi elde edilebilir. Tüm kanalların Rayleigh sönümlenmeli kanal olduğu varsayıldığında, γ_a ($a \in \{\text{SR}_k, \text{R}_k\text{D}\}$) 'nın olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) ve olasılık dağılım fonksiyonu (CDF) ifadeleri şu şekilde yazılabilir,

$$f_{\gamma_a}(\gamma) = \frac{1}{\gamma_a} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_a}\right), \quad (5.9)$$

$$F_{\gamma_a}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_a}\right). \quad (5.10)$$

Burada, $\bar{\gamma}_a = E_s/N_0$ 'dır.

$S \rightarrow R_k$ ve $R_k \rightarrow D$ linklerinin ani sönümlenme katsayıları kullanılarak röle seçim algoritmasına göre en yüksek ani SNR değerine sahip olan röle seçilir [52]. Yani maxmin kriterine göre röle seçim algoritması,

$$\gamma_b = \max_{k \in R} \{\gamma_k\} = \max_{k \in R} \left\{ \min \left(\gamma_{SR_k}, \gamma_{R_kD} \right) \right\} \quad (5.11)$$

biçimindedir. γ_b 'nin CDF ifadesi,

$$F_{\gamma_b}(\gamma) = \left[F_{\gamma_k}(\gamma) \right]^N \quad (5.12)$$

şeklinde olur. Burada N röle sayısıdır. γ_b 'ye ilişkin CDF ifadesinin γ 'ya göre türevi alınarak PDF ifadesi elde edilir:

$$f_{\gamma_b}(\gamma) = N \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k}\right) \right]^{N-1}. \quad (5.13)$$

Burada $\bar{\gamma}_k = \bar{\gamma}_{SR_k} \bar{\gamma}_{R_kD} / (\bar{\gamma}_{SR_k} + \bar{\gamma}_{R_kD})$ şeklindedir. Binom açılımı kullanılarak (5.13) numaralı denklemi düzenlersek,

$$f_{\gamma_b}(\gamma) = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\bar{\gamma}_k} C_N^n n (-1)^{n-1} \left[\exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k}\right) \right]^n \quad (5.14)$$

şeklini alır. Burada $C_N^n = N! / (N-n)! n!$ ifadesi binom katsayısıdır. Laplace transformu uygulanarak γ_b 'nin MGF'si,

$$M_{\gamma_b}(s) = \int_0^{\infty} \exp(-s\gamma) f_{\gamma_b}(\gamma) d\gamma = \sum_{n=1}^N C_N^n \frac{n(-1)^{n-1}}{n+s\bar{\gamma}_k} \quad (5.15)$$

biçiminde elde edilir.

B. S→D kanalına ait SNR'in MGF'si

Tasarlanan sistemde kaynak ve hedef arasındaki kanal çift (double) Rayleigh olarak modellenmiştir. S→D linkine ait uçtan-uça SNR değerinin (γ_{SD}) PDF ifadesi [49], [50], [53],

$$f_{\gamma_{SD}}(\gamma) = \frac{2}{\bar{\gamma}_{SD}} K_0 \left(2\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SD}}} \right) \quad (5.16)$$

biçimindedir.

Burada $\bar{\gamma}_{SD} = E_s/N_0$ şeklindedir. (5.16)'daki PDF ifadesinin integrali alınarak, CDF ifadesi,

$$F_{\gamma_{SD}}(\gamma) = 1 - 2\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SD}}} K_1 \left(2\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SD}}} \right) \quad (5.17)$$

şeklinde olur. Burada $K_1(\cdot)$ ifadesi ikinci türden birinci dereceden değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur. [51]'de 6.614.4 numaralı ifadeden yararlanarak γ_{SD} 'nin MGF ifadesi,

$$M_{\gamma_{SD}}(s) = \frac{1}{\sqrt{s\bar{\gamma}_{SD}}} \exp\left(\frac{1}{2s\bar{\gamma}_{SD}}\right) W_{-\frac{1}{2},0}\left(\frac{1}{s\bar{\gamma}_{SD}}\right) \quad (5.18)$$

biçiminde bulunur. Burada $W_{\nu,\mu}(\cdot)$, Whittaker fonksiyonudur [51].

C. Ortalama SER Hesabı

Sistemin toplam SNR'ının (γ_{tot}), MGF'si,

$$M_{tot}(s) = M_{\gamma_b}(s) M_{\gamma_{SD}}(s) = \sum_{n=1}^N C_N^n \frac{n(-1)^{n-1}}{n+s\bar{\gamma}_k} \times \frac{1}{\sqrt{s\bar{\gamma}_{SD}}} \exp\left(\frac{1}{2s\bar{\gamma}_{SD}}\right) W_{-\frac{1}{2},0}\left(\frac{1}{s\bar{\gamma}_{SD}}\right) \quad (5.19)$$

biçimindedir.

Röle seçimli işbirlikli sistemin performans incelemesi yapılmak istendiğinde, MPSK modülasyonu için ortalama SER ifadesi MGF tabanlı yaklaşım yapılarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_s = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} M_{tot} \left(s = -\frac{\sin^2(\pi/M)}{\sin^2\theta} \right) d\theta. \quad (5.20)$$

Burada M modülasyon derecesini göstermektedir.

D. Servis Kesilme Olasılığı Analizi

Hedefteki toplam SNR değeri olan γ_{tot} 'ın, verilen bir eşik değerinden (γ_{th}) düşük olma olasılığı servis kesilme olasılığı olarak tanımlanır. Bu durumda toplam SNR'ın CDF'ini kullanarak, sistemin servis kesilme olasılığı,

$$P_{out} = \Pr(0 \leq \gamma_{tot} \leq \gamma_{th}) = F_{\gamma_{tot}}(\gamma_{th}) \quad (5.21)$$

şeklinde olur.

CDF'i bulabilmek için öncelikle PDF hesaplanmalıdır. γ_{tot} 'ın PDF'i ise $f_{\gamma_{SD}}(\gamma)$ ve $f_{\gamma_b}(\gamma)$ 'in konvolüsyonu hesaplanarak

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{tot}}(\gamma) &= \int_0^\gamma f_{\gamma_{SD}}(\tau) f_{\gamma_b}(\gamma - \tau) d\tau \\ &= \int_0^\gamma \sum_{n=1}^N C_N^n n (-1)^{n-1} \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \left[\exp(-n(\gamma - \tau)/\bar{\gamma}_k) \right] \\ &\quad \times \frac{2}{\bar{\gamma}_{SD}} K_0 \left(2\sqrt{\frac{\tau}{\bar{\gamma}_{SD}}} \right) d\tau \end{aligned} \quad (5.22)$$

elde edilir.

[54]'deki 03.04.21.0009.01 denkleminin yardımıyla ve $\exp(x) = \sum_{n=0}^{\infty} x^n/n!$ ifadesi kullanılarak (5.22) ifadesinin kapalı form çözümü:

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{tot}}(\gamma) &= \sum_{n=1}^N C_N^n n (-1)^{n-1} \exp\left(-\frac{n\gamma}{\bar{\gamma}_k}\right) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{n^{i+1} (2\gamma)^{i+2}}{i! (2i+2) (\bar{\gamma}_k)^{i+1} (\bar{\gamma}_{SD})^{i+2}} \\ &\quad \times \left[K_0 \left(2\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SD}}} \right) {}_1F_2 \left(1; i+2, i+1; \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SD}} \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sqrt{\gamma}}{(i+1)\sqrt{\bar{\gamma}_{SD}}} K_1 \left(2\sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SD}}} \right) {}_1F_2 \left(1; i+2, i+1; \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SD}} \right) \right] \end{aligned} \quad (5.23)$$

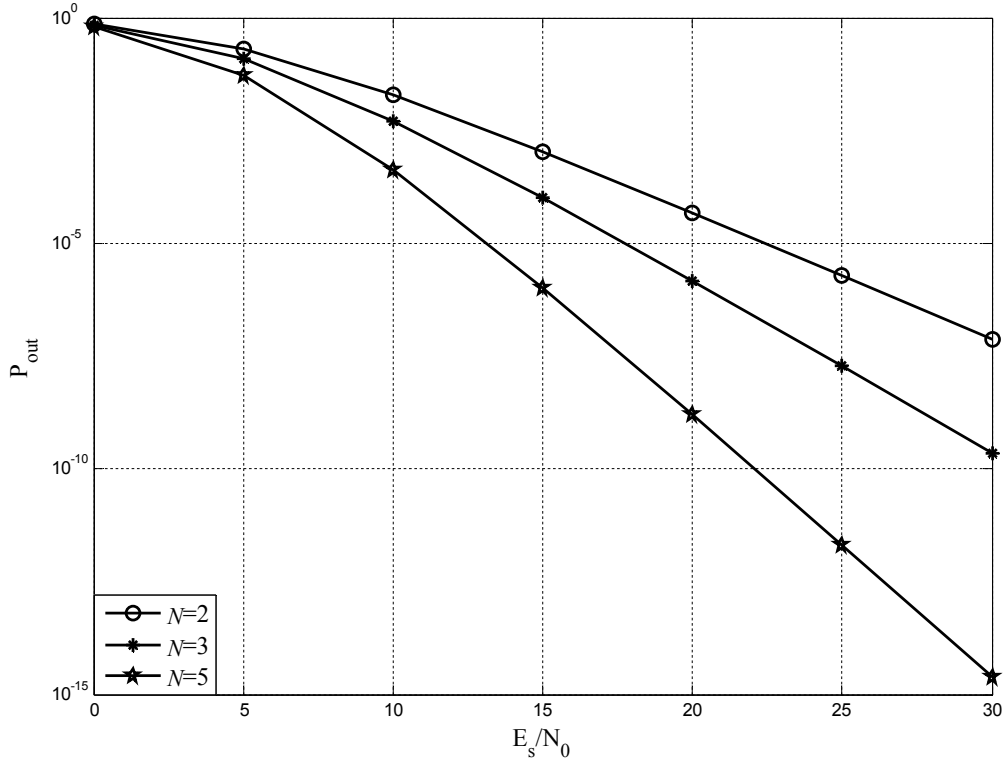
biçimindedir.

Burada ${}_2F_1(.,.,.,.)$, Gauss hipergeometrik fonksiyonudur [51]. $K_0(\cdot)$ ve ${}_2F_1(.,.,.,.)$ fonksiyonların değerleri, MATHEMATICA ve MAPLE gibi programlar kullanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Son olarak servis kesilme olasılığı, $f_{\gamma_{tot}}(\gamma)$ cinsinden şu şekilde hesaplanır:

$$P_{out} = F_{\gamma_{tot}}(\gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_{tot}}(\gamma) d\gamma. \quad (5.24)$$

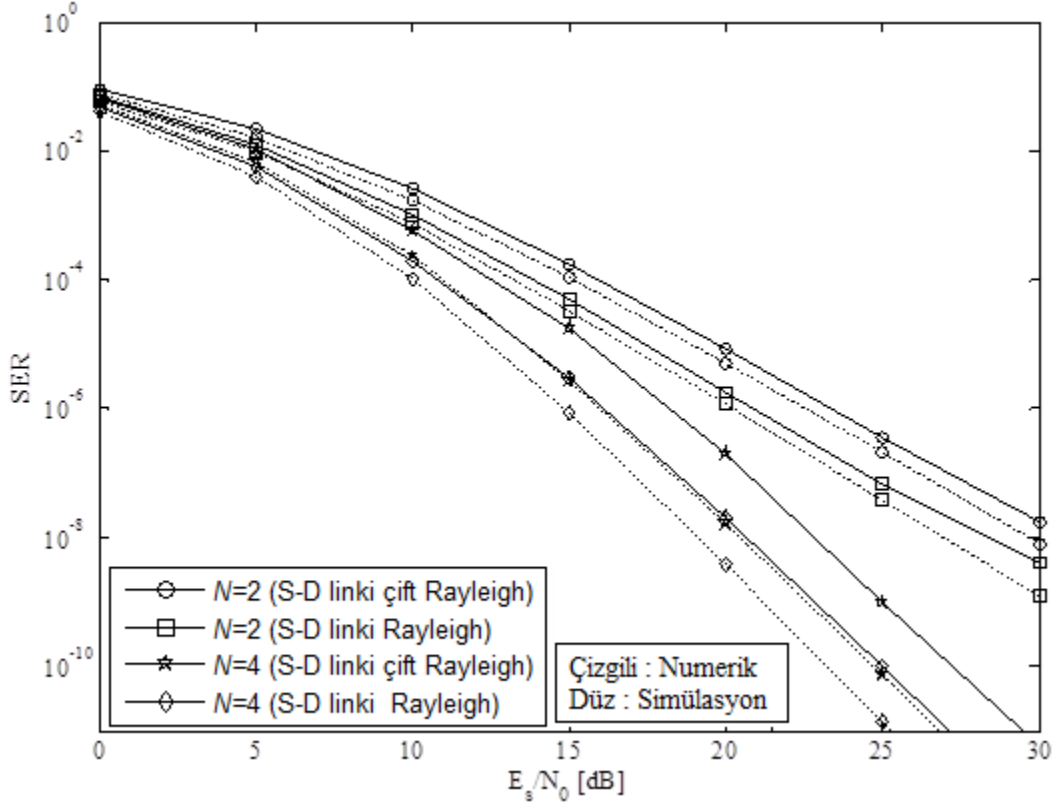
5.3 Benzetim Sonuçları

Bu bölümde elde edilen analitik (teorik) ıkarımları doğrulamak için Monte-Carlo simülasyonlarına yer verilecektir. Simülasyonlarda MPSK modülasyonu için AF tabanlı röle seçimli işbirlikli bir sistem ele alınmıştır (şekil 4.4). $S \rightarrow R_k$ ve $R_k \rightarrow D$ linkleri Rayleigh dağılımlı, $S \rightarrow D$ linki ise çift (double) Rayleigh olarak kabul edilmiştir. Yani kaynak ve hedefin hareketli, rölenin ise sabit terminaller olduğu varsayılmıştır. Karşılaştırma amacıyla tüm linkleri Rayleigh dağılımlı olan röle seçimli işbirlikli sistem yapısı da ele alınmıştır. Simülasyon sonuçları BPSK ve QPSK modülasyonları için ve röle sayısı $N=2,3,5$ olması durumları için elde edilmiştir. Numerik (teorik) sonuçlar için, formüllerdeki özel fonksiyonlar MATHEMATICA ve MAPLE gibi programlar kullanılarak hesaplanabilir. Ayrıca hesaplamalar yapılırken, $\bar{\gamma}_{SD} = \bar{\gamma}_0 = E_s/N_0$, dolayısıyla da $\bar{\gamma}_k = \bar{\gamma}_0/2$ olarak varsayılmıştır.



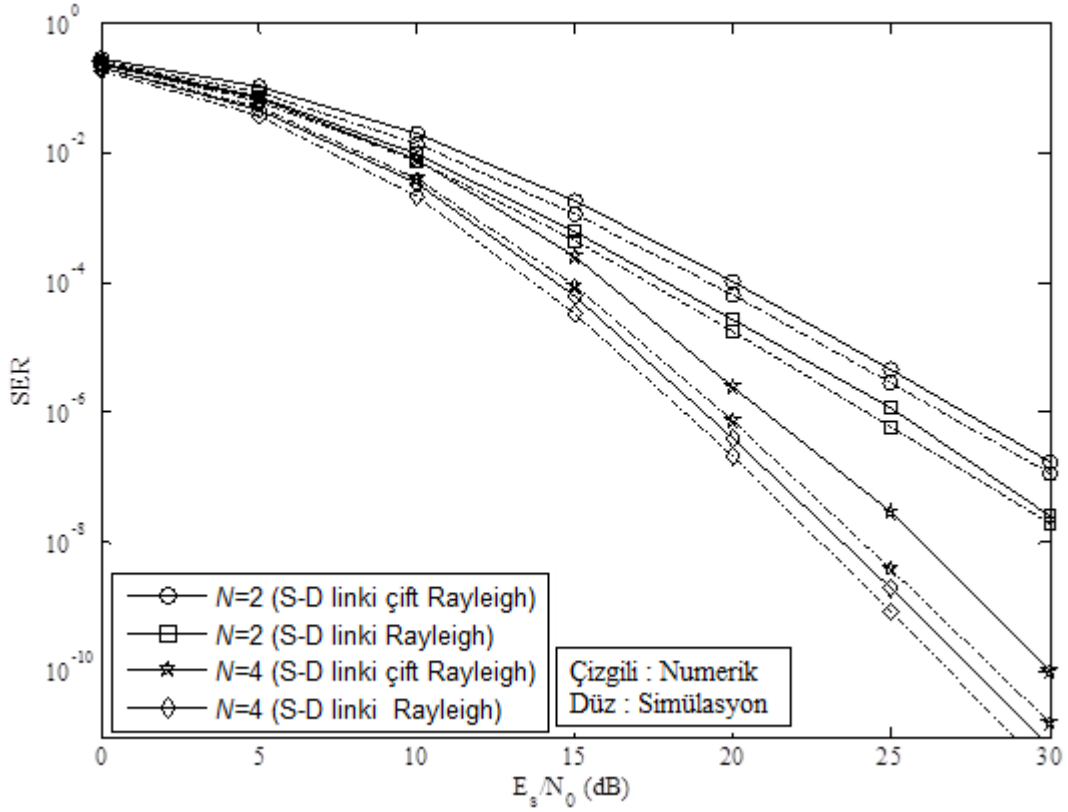
Şekil 5. 1 BPSK modülasyonu için AF tabanlı röle seçimli sistemin servis kesilme olasılığı

Şekil 5.1' de eşik değerinin , $\gamma_{th} = 3$ dB olması durumundaki sistemin servis kesilme olasılığı sunulmuştur. Burada BPSK modülasyonu kullanılmıştır. Şekildeki sonuçtan da açıkça görüldüğü gibi, servis kesilme olasılığı, röle sayısı N değeri arttıkça, azalan bir performans artışı göstermektedir.



Şekil 5. 2 BPSK modülasyonu kullanan AF röleli sistemin SER performansı

Şekil 5.2’de BPSK modülasyonu ve farklı röle sayıları ($N = 2, 4$) için, sistemin ortalama SER performansı gösterilmiştir. Beklenildiği gibi röle sayıları ve ortalama SER performansı arasında bir orantı vardır. Ortalama SER’i arttırmak için röle sayısı da arttırılmalıdır.



Şekil 5. 3 QPSK modülasyonu kullanan AF röleli sistemin SER performansı

Şekil 5.3'de röle sayısı $N=2$ ve $N=4$ olması durumunda QPSK modülasyonu için sistemin SER olasılığı incelenmiştir. Şekil 5.2 ile kıyaslanacak olunursa BPSK modülasyonu için tasarlanan sistemin performansının, QPSK modülasyonu için tasarlanan sistemin performansından daha iyi olduğu görülmektedir.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'den görüleceği gibi tüm linklerin Rayleigh dağılımlı olduğu durumda röle seçimli işbirlikli sistem daha iyi performans göstermektedir. Numerik (teorik) sonuçlar, simülasyon sonuçları için alt sınırı göstermektedir. Ayrıca ortalama SER için elde edilen numerik değerlerin simülasyon sonuçlarıyla yeteri kadar yakın olduğu da görülmektedir.

DF KULLANAN ÇOK RÖLELİ SİSTEMLERDE RÖLE SEÇİMİ

AF yönteminde en iyi performansı veren birleştirme yönteminin MRC olduğunu söylemiştik. Buna karşın MRC tekniği DF kullanan sistemlerde tam çeşitleme kazancı sağlamamaktadır. DF tabanlı işbirlikli iletişim modelinde tek röle olması durumunda en büyük olabirlikli (Maximum likelihood, ML) sezim tekniğinin tam çeşitleme kazancı sağladığı [10]'da gösterilmiştir. ML tekniği röledeki olası tüm sembol sezim durumlarının hedef tarafından göz önüne alınarak gönderilen sembol için karar verilmesi prensibine dayanmakta olup optimum çözümü sunar. Bu yönüyle literatürdeki diğer yaklaşımlar için performans üst sınırı olarak kabul edilebilir. Buna karşın, iletimde kullanılan işaret kümesinin eleman sayısı arttıkça alıcıdaki ML sezim kuralının karmaşıklığı da üstel olarak artmaktadır. ML tabanlı tekniklerin bir diğer dezavantajı da performans analizinin zorluğudur. Yi ve Kim işbirlikli en büyük oran birleştirme tekniğinin (Cooperative maximum ratio combining, C-MRC) optimum ML tekniği ile neredeyse aynı performansa sahip olduğunu ve daha az karmaşık bir yöntem olduğunu göstermiş ve C-MRC tekniğini röle seçimiyle birleştirmişlerdir [31].

Yukarıda da bahsedildiği gibi DF tekniğinde karşılaşılan problemlerden biri rölede sinyalin yanlış algılanmasıdır. Bundan dolayı oluşan hata yayılımını önlemek için kullanılan bir yöntem olan sanal gürültü (virtual noise, VN) tekniği son yıllarda geliştirilen bir demodülasyon tekniğidir [15]. Buradaki temel fikir rölede gerçekleşen algılama hatalarının, hedef terminalde sanal gürültü olarak eklenmesidir. Bu yeni konsept hesaplama karmaşıklığını ortadan kaldırmakta ve tam çeşitlilik sağlamaktadır.

[15]'de VN tabanlı demodülasyon yaklaşımı farklı işbirlikli sistem modelleri için uygulanmıştır.

Bir sonraki bölümlerde C-MRC ve VN teknikleri hakkında detaylı bilgi verilecektir.

6.1 Sistem Modeli 1

Bu çalışmada da Şekil 4.4'de verilen sistem modeli kullanılmaktadır. Kaynak (S), röleler (R) ve hedef (D) terminalleri hareketsiz varsayılmıştır. Bundan dolayı kanal değişkenleri h_{SD} , h_{SR_k} ve g_{R_kD} Nakagami- m dağılımına sahiptir. Rölelerde DF tekniği kullanılmaktadır.

Kanalın rastgele değişkeni $H \in \{h_{SD}, h_{SR_k}, g_{R_kD}\}$ 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu [37]'deki gibidir:

$$p_H(h) = \frac{2m^m h^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mh^2}{\Omega}\right). \quad (6.1)$$

Burada $\Gamma(\cdot)$ Gamma fonksiyonu [37] olup, $\Omega = E\{H^2\}$, $m = \Omega/E[H^2 - \Omega^2] \geq 0.5$ biçimindedir. $E[\cdot]$ ortalama alma işlemini göstermektedir. Burada $m = 1$ olduğunda Rayleigh dağılımı elde edilmektedir.

Ele alınan işbirlikli sistemde S ile D arasındaki iletişim iki fazda gerçekleşmektedir. İlk fazda kaynak iletimde röle ve hedef dinlemede, ikinci fazda ise kaynak suskun iken röle iletimde hedef dinlemededir. İlk faz sonunda k . röle ve hedefteki işaretler,

$$y_{SR_k} = \sqrt{E_s} x h_{SR_k} + n_{SR_k}, \quad (6.2)$$

$$y_{SD} = \sqrt{E_s} x h_{SD} + n_{SD} \quad (6.3)$$

biçiminde verilebilir. Burada x kaynak tarafından gönderilen BPSK simgesini n_{SR_k} ve n_{SD} sırasıyla, k . röledeki ve hedefteki sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks beyaz Gauss gürültülerini göstermektedir. E_s ise kaynaktan iletilen simgenin enerjisini göstermektedir.

İkinci fazda röle \hat{x}_k simgesine karar vererek hedefe iletir. Bu durumda hedefteki işaret,

$$y_{R_k D} = \sqrt{E_s} \hat{x}_k g_{R_k D} + n_{R_k D} \quad (6.4)$$

biçiminde olur. Burada $n_{R_k D}$ hedefteki sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks beyaz Gauss gürültüsünü göstermektedir. γ_{SR_k} , $\gamma_{R_k D}$ ve γ_{SD} sırasıyla, $S \rightarrow R_k$, $R_k \rightarrow D$ ve $S \rightarrow D$ linklerine ilişkin ani SNR ifadeleri olmak üzere,

$$\gamma_{SR_k} = \left(E_s / N_0 \right) \left| h_{SR_k} \right|^2 \quad (6.5)$$

$$\gamma_{R_k D} = \left(E_s / N_0 \right) \left| g_{R_k D} \right|^2 \quad (6.6)$$

$$\gamma_{SD} = \left(E_s / N_0 \right) \left| h_{SD} \right|^2 \quad (6.7)$$

biçiminde verilebilir. γ_b en iyi röledeki anlık SNR olmak üzere,

$$\gamma_b = \max_{k \in R} \left\{ \min \left(\gamma_{SR_k}, \gamma_{R_k D} \right) \right\} \quad (6.8)$$

şeklinde tanımlanır [52]. (6.8)'de verilen röle seçim algoritması kullanılarak k . rölenin seçilmesi durumunda röleye gelen işaret ML karar kuralına göre çözülür ve \hat{x}_k simgesine karar verilir:

$$\hat{x}_k = \arg \min_{x \in \{-1, 1\}} \left| y_{SR_k} - \sqrt{E_s} x h_{SR_k} \right|^2. \quad (6.9)$$

6.1.1 Röle Seçim Algoritması ve Hata Performans Analizi

İşbirlikli haberleşmede hedefe gelen işaretleri birleştirmede kullanılacak olan tekniklerden bahsedilmiştir. Bu bölümde birleştirme tekniklerinden olan en büyük oran birleştirici (MRC) ve işbirlikli en büyük oran birleştirici (C-MRC) yöntemleri incelenecektir.

A. En Büyük Oran Birleştirici (MRC)

AF kullanan işbirlikli sistemler için iyi sonuçlar verdiği bilinen MRC tekniğinin, DF kullanan sistemde birinci ve ikinci faz sonunda elde edilen y_{SD} ve $y_{R_k D}$ işaretlerini birleştirmek için kullanıldığını varsayalım. Bu durumda hedef birimindeki birleştirilmiş işaret,

$$y_D = \omega_{SD} y_{SD} + \omega_{R_k D} y_{R_k D} \quad (6.10)$$

ile verilebilir. $S \rightarrow D$ ve $R_k \rightarrow D$ linklerinin sönmüleme katsayılarının fonksiyonu olan ve

$$\omega_{SD} = h_{SD}^* \quad \text{ve} \quad \omega_{R_k D} = g_{R_k D}^* \quad \text{biçiminde tanımlanan ağırlık terimleri (6.10)'da yerine}$$

konulursa,

$$y_D = h_{SD}^* y_{SD} + g_{R_k D}^* y_{R_k D} \quad (6.11)$$

elde edilir. Burada $(.)^*$ konjuge alma işlemidir.

iki faz sonunda hedefteki SNR değeri $\beta = \gamma_b + \gamma_{SD}$ olarak ifade edilebilir. β 'nin PDF'ini γ_b ve γ_{SD} 'nin PDF'lerinin konvolüsyonu olarak hesaplanır:

$$f(\beta) = \int_0^\beta f_{\gamma_{SD}}(x) f_{\gamma_b}(\beta - x) dx. \quad (6.12)$$

Hedefteki hata olasılığı ifadesi,

$$P_e = P_{prop} P_{SR_k} + (1 - P_{SR_k}) P_{MRC} \quad (6.13)$$

biçiminde yazılabilir [55]. Burada P_{prop} hata yayılım olasılığını göstermekte ve BPSK modülasyonu için

$$P_{prop} \approx \frac{\bar{\gamma}_b}{\bar{\gamma}_b + \bar{\gamma}_{SD}} \quad (6.14)$$

olarak yazılabilir. $\bar{\gamma}_b$, γ_b 'nin ve $\bar{\gamma}_{SD}$ ise γ_{SD} 'nin ortalama değerlerini göstermektedir.

(6.13)'de verilen P_{SR_k} ise seçilen röledeki hata olasılığıdır ve

$$P_{SR_k} = \int_0^\infty \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{x}) f_{\gamma_{SR_k}}(x) dx \quad (6.15)$$

olarak hesaplanır. $f_{\gamma_{SR_k}}(\cdot)$, γ_{SR_k} 'nin PDF ifadesi ve $erfc(\cdot)$ ise tamamlayıcı hata fonksiyonudur [33]. P_{MRC} , direk ve röle üzerinden gelen sinyallerin birleştirilmesiyle oluşan hata olasılığı olmak üzere aşağıdaki şekilde hesaplanır [55]:

$$P_{MRC} = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} erfc(\sqrt{\beta}) f(\beta) d\beta. \quad (6.16)$$

Bu denklemler (6.13) numaralı denklemde yerine konularak sistemin hata olasılığı ifadesi bulunmuş olur.

B. İşbirlikli En Büyük Oran Birleştirici (C-MRC)

DF kullanan işbirlikli sistemlerde hedefte kullanılabilecek olan sezme tekniklerinden MRC, ML ve C-MRC [14], [56]'da ele alınmıştır. ML sezim tekniğinin eleman sayısı yüksek olan işaretleşme modellerinde karmaşıklığın yüksek olması sebebiyle C-MRC tekniği tercih edilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan sistem modelinde y_{SD} ve y_{R_kD} işaretlerini birleştirmek için C-MRC tekniğinden faydalanılabilir. Bu durumda hedefteki karar kuralı,

$$\hat{x} = \arg \min_{x \in A_x} \left| \omega_{SD} y_{SD} + \omega_{R_kD} y_{R_kD} - (\omega_{SD} h_{SD} + \omega_{R_kD} g_{R_kD}) x \right|^2 \quad (6.17)$$

olur. Burada A_x kullanılan işaret kümesi olup BPSK modülasyonu için $A_x = \{-1, +1\}$ şeklindedir.

Klasik MRC tekniğinde birleştirici çıkışında SNR değerinin maksimum olması için ağırlıkların $\omega_{SD} = h_{SD}^*$ ve $\omega_{R_kD} = g_{R_kD}^*$ olarak seçildiği MRC kısmında verilmişti. Kaynak-röle linkinin SNR değerinin düşük olması ve rölede karar verilen sembolün \hat{x}_k , kaynaktan gönderilen sembole eşit olmaması durumunda katsayıların bu şekilde seçilmesi hedefte önemli SNR düşüşleri meydana getirir. Bunu önlemek için önerilen C-MRC tekniğinde S→D linkine ilişkin ağırlık katsayısı $\omega_{SD} = h_{SD}^*$ olarak alınırken

$$\omega_{R_kD} = \left(\gamma_{eq,k} / \gamma_{R_kD} \right) g_{R_kD}^* \quad (6.18)$$

biçiminde seçilir. Burada $\gamma_{eq,k}$ terimi S→R→D linkinin eşdeğer SNR değeri olup

$$\gamma_{eq,k} = \frac{1}{\alpha} \left\{ Q^{-1} \left[P_{eq}^b \left(\gamma_{SR_k}, \gamma_{R_kD} \right) \right] \right\} \quad (6.19)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [14]. (6.19) ifadesinde $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt$, α

BPSK modülasyonu için 2 seçilen bir katsayı ve,

$$P_{eq}^b \left(\gamma_{SR_k}, \gamma_{R_kD} \right) = \left[1 - P_{SR_k}^b \left(\gamma_{SR_k} \right) \right] P_{R_kD}^b \left(\gamma_{R_kD} \right) + \left[1 - P_{R_kD}^b \left(\gamma_{R_kD} \right) \right] P_{SR_k}^b \left(\gamma_{SR_k} \right) \quad (6.20)$$

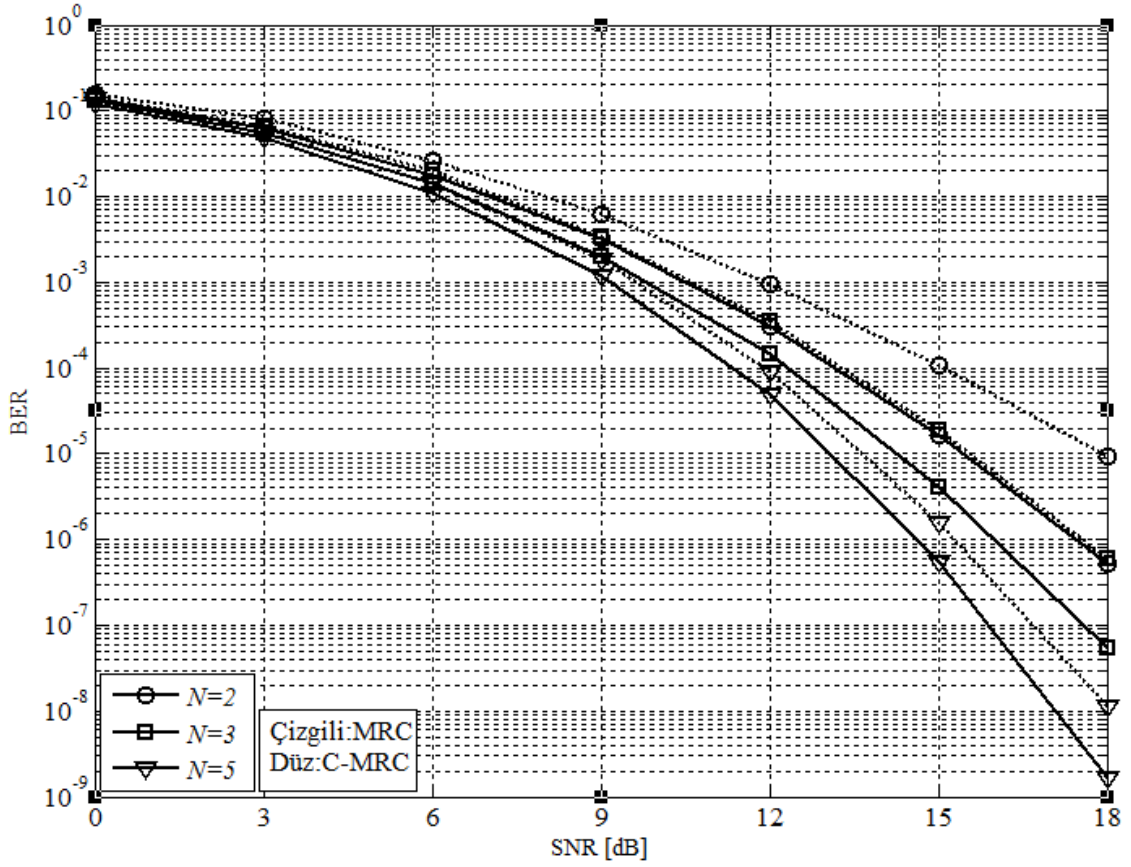
olarak hesaplanan $P_{eq}^b \left(\gamma_{SR_k}, \gamma_{R_kD} \right)$ terimi $S \rightarrow R \rightarrow D$ linkinin bit hata olasılığını

göstermektedir. Yüksek SNR değerlerinde, $\gamma_{\min} = \min \left\{ \gamma_{R_kD}, \gamma_{SR_k} \right\}$ olmak üzere

$\gamma_{eq} \approx \gamma_{\min}$ olarak alınabilir.

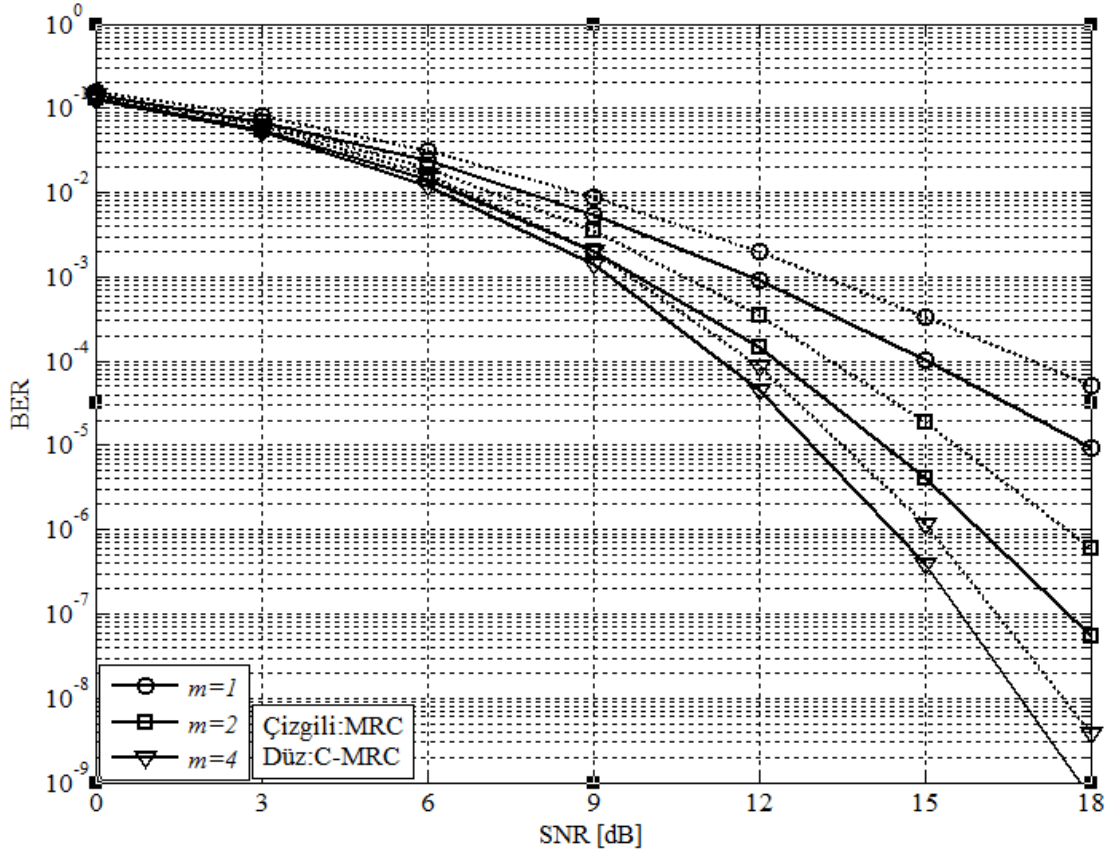
6.1.2 Benzetim Sonuçları

Bu bölümde önerilen DF tabanlı röle seçimli işbirlikli telsiz iletişim sisteminde, hedefte MRC ve C-MRC kullanılması durumunda elde edilen performansı gösteren benzetim sonuçları sunulacaktır. Benzetimlerde BPSK modülasyonu kullanılmıştır ve kanallar Nakagami- m dağılımlıdır. Paket uzunluğu 260 bit ve gürültü varyansı $N_0 = 1$ alınmıştır. Simülasyon eğrilerinde $SNR = E_s/N_0$ olarak tanımlıdır. Benzetim sonuçları farklı röle sayıları ($N = 2, 3, 5$) ve m parametresinin değişik değerleri için ($m = 1, 2, 4$) elde edilmiştir.



Şekil 6. 1 BPSK modülasyonu için $m=2$ olması durumundaki MRC ve C-MRC hata performansları

Şekil 6.1'de görülen grafikte Nakagami- m kanalında m parametresinin 2 olması durumunda ($m = 2$) röle sayısı $N = 2, 3$ ve 5 olduğundaki MRC ve C-MRC performansları karşılaştırılmıştır. Beklenildiği gibi C-MRC'nin performansı MRC'ye göre daha iyidir. $BER = 10^{-5}$ değerinde C-MRC ile MRC arasındaki SNR farkı $N = 2, 3$ ve 5 için sırasıyla yaklaşık olarak 2,48, 1,28, ve 0,56 dB dir. Röle sayısı arttıkça sistem performansında iyileşme görülmektedir.



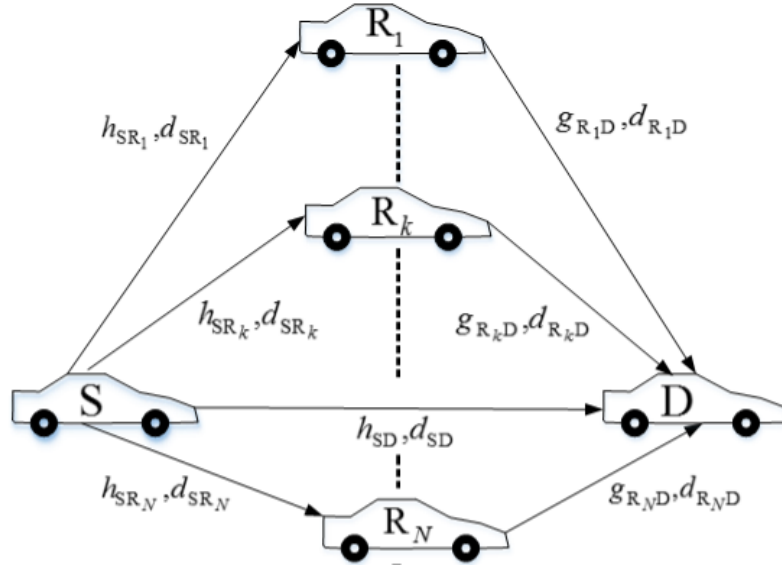
Şekil 6. 2 BPSK modülasyonu için $N = 3$ olması durumundaki MRC ve C-MRC hata performansları

Şekil 6.2’de ise röle sayısının 3 ($N = 3$) ve $m = 1, 2, 4$ olması durumundaki işbirlikli sistemin hata performansı incelenmiştir. Sönümlenme parametresi $m = 1$ olması durumu Rayleigh kanal durumuna denk gelmektedir. m değerinin artması durumunda BER değerinin düştüğü yani hata performansının iyileştiği görülmektedir. $BER = 10^{-4}$ değerinde C-MRC ile MRC arasındaki SNR farkı $m = 1, 2$ ve 4 için sırasıyla yaklaşık olarak 1,88, 0,96, ve 0,57 dB dir.

6.2 Sistem Modeli 2

Bu çalışmada araç-araç haberleşmesi için DF tabanlı işbirlikli bir sistem ele alınmıştır. DF tekniğinde karşılaşılan, rölede sinyalin yanlış algılanmasından dolayı oluşacak hata yayılımını azaltmak için hedefte VN tekniği kullanılmıştır.

Burada kullanılan sistem modeli Şekil 6.3’de görüldüğü gibi kaynak (S), hedef (D) ve N adet röle (R) terminalerinden oluşmaktadır. Her terminal half-duplex (yarı-duplex) modda çalışmakta ve tek anten içermektedir.



Şekil 6. 3 Sistem modeli

Kaynak ve k . röle, k . röle ve hedef ve kaynak ile hedef arasındaki normalize uzaklıklar sırasıyla d_{SR_k} , d_{R_kD} ve d_{SD} olarak ifade edilmiştir. $S \rightarrow R_k$, $R_k \rightarrow D$ ve $S \rightarrow D$ linklerinin kompleks sönümlenme katsayıları ise, h_{SR_k} , g_{R_kD} ve h_{SD} olarak gösterilmiştir. Tüm linklerin genlikleri kaskat Nakagami- m dağılımı olarak modellenmiştir. Kaskat Nakagami- m dağılımı Q adet Nakagami- m parametresinin çarpımından oluşmaktadır. Örnek olarak, $h_{SR_k} = h_{SR_k}^1 \dots h_{SR_k}^Q$, $g_{R_kD} = g_{R_kD}^1 \dots g_{R_kD}^Q$, $h_{SD} = h_{SD}^1 \dots h_{SD}^Q$ burada Q kaskatlık derecesini göstermektedir. Nakagami- m dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (6.1)'de verildiği gibi,

$$f_X(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right) \quad (6.21)$$

biçimindedir.

Bu çalışmada hedefin pilot sinyal yollama (pilot signalling) yöntemi ile kanalların durum bilgisine sahip olduğu, en iyi kanal şartlarına sahip röleyi hesapladığı ve seçilen rölenin indeksini diğer rölelere geribildirim linki ile bildirdiği varsayılmıştır.

İletim iki fazda gerçekleşmektedir. Birinci fazda kaynak BPSK sembol bloğu x 'i iletmektedir. Röle ve hedefte alınan işaretler,

$$y_{\text{SR}_k} = \sqrt{E_s} x h_{\text{SR}_k} + n_{\text{SR}_k} \quad (6.22)$$

$$y_{\text{SD}} = \sqrt{E_s} x h_{\text{SD}} + n_{\text{SD}} \quad (6.23)$$

olur. Burada E_s ortalama sembol enerjisi ve n_{SR_k} ve n_{SD} k . röle ve hedefteki gürültü terimleridir.

ikinci fazda, röle terminali birinci fazda alınan sinyalin kestirimini yapar ve kestirilmiş sinyali, \hat{x}_k , hedefe iletir. Hedefte alınan sinyal aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$y_{\text{R}_k\text{D}} = \sqrt{E_s} \hat{x}_k g_{\text{R}_k\text{D}} + n_{\text{R}_k\text{D}}. \quad (6.24)$$

Burada,

$$\hat{x}_k = \arg \min_{x \in \{-1, 1\}} \left| y_{\text{SR}_k} - \sqrt{E_s} x h_{\text{SR}_k} \right|^2 \quad (6.25)$$

ve $n_{\text{R}_k\text{D}}$ hedefteki gürültü terimidir. (6.22), (6.23) ve (6.24)' deki tüm gürültü terimleri sıfır ortalamalı, $N_0/2$ varyanslı kompleks rastgele değişkenler olarak modellenen AWGN bileşenleridir. $S \rightarrow \text{R}_k$, $\text{R}_k \rightarrow \text{D}$ ve $S \rightarrow \text{D}$ linklerine ait ani SNR değerleri ise sırasıyla,

$$\gamma_{\text{SR}_k} = \frac{E_s |h_{\text{SR}_k}|^2}{N_0}, \gamma_{\text{R}_k\text{D}} = \frac{E_s |g_{\text{R}_k\text{D}}|^2}{N_0} \text{ ve } \gamma_{\text{SD}} = \frac{E_s |h_{\text{SD}}|^2}{N_0} \text{ şeklinde verilir.}$$

6.2.1 Röle Seçim Algoritması ve Hata Performans Analizi

Bu bölümde MRC ve VN tabanlı sistemin hata oranı analizleri yapılacak ve röle seçim kriterinin matematiksel ifadelerine yer verilecektir.

A. MRC Tabanlı Model

$S \rightarrow \text{R}_k \rightarrow \text{D}$ linkine ait uçtan-uça bit hata olasılığı (BER), $P_{eq}^b = \left(\gamma_{\text{SR}_k}, \gamma_{\text{R}_k\text{D}} \right)$,

$$P_{eq}^b \left(\gamma_{\text{SR}_k}, \gamma_{\text{R}_k\text{D}} \right) = \left[1 - P_{\text{SR}_k}^b \left(\gamma_{\text{SR}_k} \right) \right] P_{\text{R}_k\text{D}}^b \left(\gamma_{\text{R}_k\text{D}} \right) + \left[1 - P_{\text{R}_k\text{D}}^b \left(\gamma_{\text{R}_k\text{D}} \right) \right] P_{\text{SR}_k}^b \left(\gamma_{\text{SR}_k} \right) \quad (6.26)$$

şeklindedir. Burada $P_{SR_k}^b$ ve $P_{R_kD}^b$ ifadeleri $S \rightarrow R_k$ ve $R_k \rightarrow D$ linklerine ait BER ifadeleridir ve BPSK modülasyonu için sırasıyla $P_{SR_k}^b = Q\left(\sqrt{2\gamma_{SR_k}}\right)$ ve $P_{R_kD}^b = Q\left(\sqrt{2\gamma_{R_kD}}\right)$ şeklinde hesaplanır, $Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$. $S \rightarrow R_k \rightarrow D$ linkine ait eşdeğer SNR değeri $\gamma_{eq,k}$ [14],

$$\gamma_{eq,k} = \frac{1}{\alpha} \left\{ Q^{-1} \left[P_{eq}^b \left(\gamma_{SR_k}, \gamma_{R_kD} \right) \right] \right\} \quad (6.27)$$

şeklinde olur. Burada $\alpha=2$ olarak alınmıştır. MRC tabanlı sistem için röle seçim kriterlerinden biri,

$$k = \underset{k' \in \{1,2,\dots,N\}}{\operatorname{argmax}} \gamma_{eq,k'} \quad (6.28)$$

biçiminde verilebilir. Burada k seçilen rölenin indeksidir.

Hedefte \mathcal{Y}_{SD} ve \mathcal{Y}_{R_kD} sinyallerini birleştirmek için MRC tekniği kullanıldığında, hedefte birleştirilen sinyal,

$$\mathcal{Y}_D = h_{SD}^* \mathcal{Y}_{SD} + g_{R_kD}^* \mathcal{Y}_{R_kD} \quad (6.29)$$

şeklinde olur. $(\cdot)^*$ ifadesi konjuge simetri operatörüdür. $\gamma_b = \gamma_{eq}$ olması durumunda hedefteki SNR $\beta = \gamma_b + \gamma_{SD}$ olarak yazılabilir ve β değerinin PDF ifadesi (6.12)'de verilen ifade ile hesaplanır.

Uçtan-uça hata olasılığı ise şu şekilde olur [56]:

$$P_e = P_{prop} P_{SR_k} + \left(1 - P_{SR_k}\right) P_{MRC}. \quad (6.30)$$

P_{prop} ifadesi hata yayılım olasılığıdır ve BPSK modülasyonu için (6.14) ifadesindeki gibi hesaplanır.

P_{SR_k} , $S \rightarrow R_k$ linkine ait hata olasılığıdır ve (6.15) numaralı eşitlik ile hesaplanır.

Kaynak-hedef ve röle-hedef sinyallerinin birleştirilmiş sinyalinin hata olasılığı, P_{MRC} ise (6.16) ifadesindeki gibi hesaplanır.

B. Sanal Gürültü Tabanlı Model

VN tabanlı modelde ana fikir sanal gürültüyü, n_v , hedefte gerçekleştirmektir. Rölede meydana gelen algılama hataları sanal gürültünün eklenmesi olarak modellenmiştir [15]. Bu sanal gürültüyü gözönünde bulundurarak ikinci fazda hedefte alınan işareti yeniden yazacak olursak,

$$\begin{aligned} y_{R_k D} &= \sqrt{E_s} \hat{x} g_{R_k D} + n_{R_k D} \\ &= \sqrt{E_s} x g_{R_k D} + \sqrt{E_s} e_r g_{R_k D} + n_{R_k D} \\ &= \sqrt{E_s} x g_{R_k D} + n_v + n_{R_k D} \end{aligned} \quad (6.31)$$

ifadesi bulunur. Burada n_v sıfır ortalama kompleks rastgele değişkendir ve $n_{R_k D}$ 'den bağımsızdır. e_r 'nin varyansı $N_0 / |h_{SR_k}|^2$ 'dir.

VN tabanlı algılama durumunda hedefteki birleştirilmiş işaret şu şekilde verilir [15]:

$$y_D = \omega_{SD} y_{SD} + \omega_{R_k D} y_{R_k D}. \quad (6.32)$$

Buradaki ağırlık terimleri ise,

$$\omega_{SD} = h_{SD}^* / N_0 \quad (6.33)$$

$$\omega_{R_k D} = g_{R_k D}^* / N_0 \left(1 + |g_{R_k D}|^2 / |h_{SR_k}|^2 \right) \quad (6.34)$$

biçimindedir.

Tasarlanan sistemde VN modelde k . röle için BER değeri aşağıdaki şekildedir,

$$\begin{aligned} P_k &= \left(1 - Q(\sqrt{2\gamma_{SR}}) \right) Q \left(\sqrt{\frac{2(\gamma_{SD} + \gamma_{EQ})^2}{\gamma_{SD} + \gamma'_{EQ}}} \right) \\ &+ Q(\sqrt{2\gamma_{SR}}) Q \left(\sqrt{\frac{2(\gamma_{SD} - \gamma_{EQ})^2}{\gamma_{SD} + \gamma'_{EQ}}} \right) \end{aligned} \quad (6.35)$$

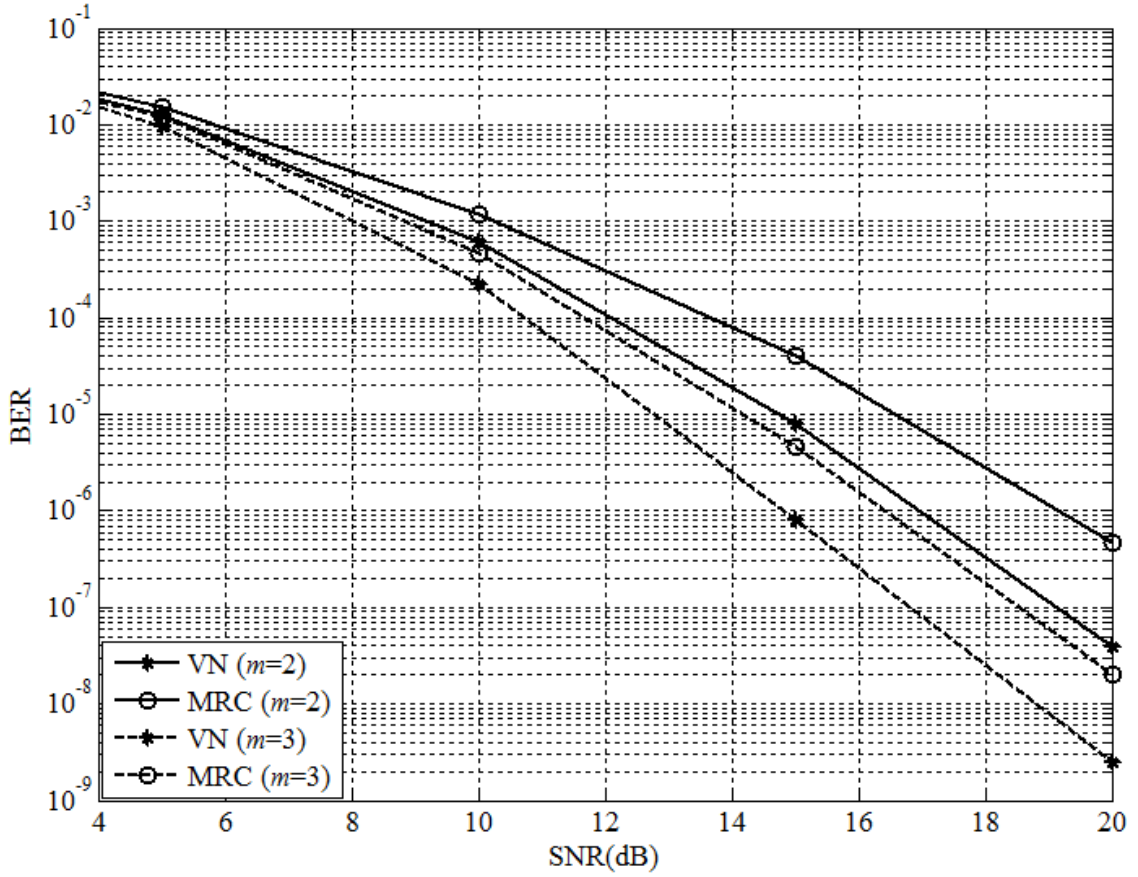
$$\gamma_{EQ} = \frac{|h_{SR_k}|^2 |g_{R_k D}|^2}{\left(|h_{SR_k}|^2 + |g_{R_k D}|^2\right) N_0}, \gamma'_{EQ} = \frac{|h_{SR_k}|^4 |g_{R_k D}|^2}{\left(|h_{SR_k}|^2 + |g_{R_k D}|^2\right) N_0} \quad (6.36)$$

Burada verilen BER ifadesi aşağıda verilen röle seçim algoritmasında kullanılarak en iyi röleye karar verilir.

$$k = \underset{k' \in \{1, 2, \dots, N\}}{\operatorname{argmax}} P_{k'} . \quad (6.37)$$

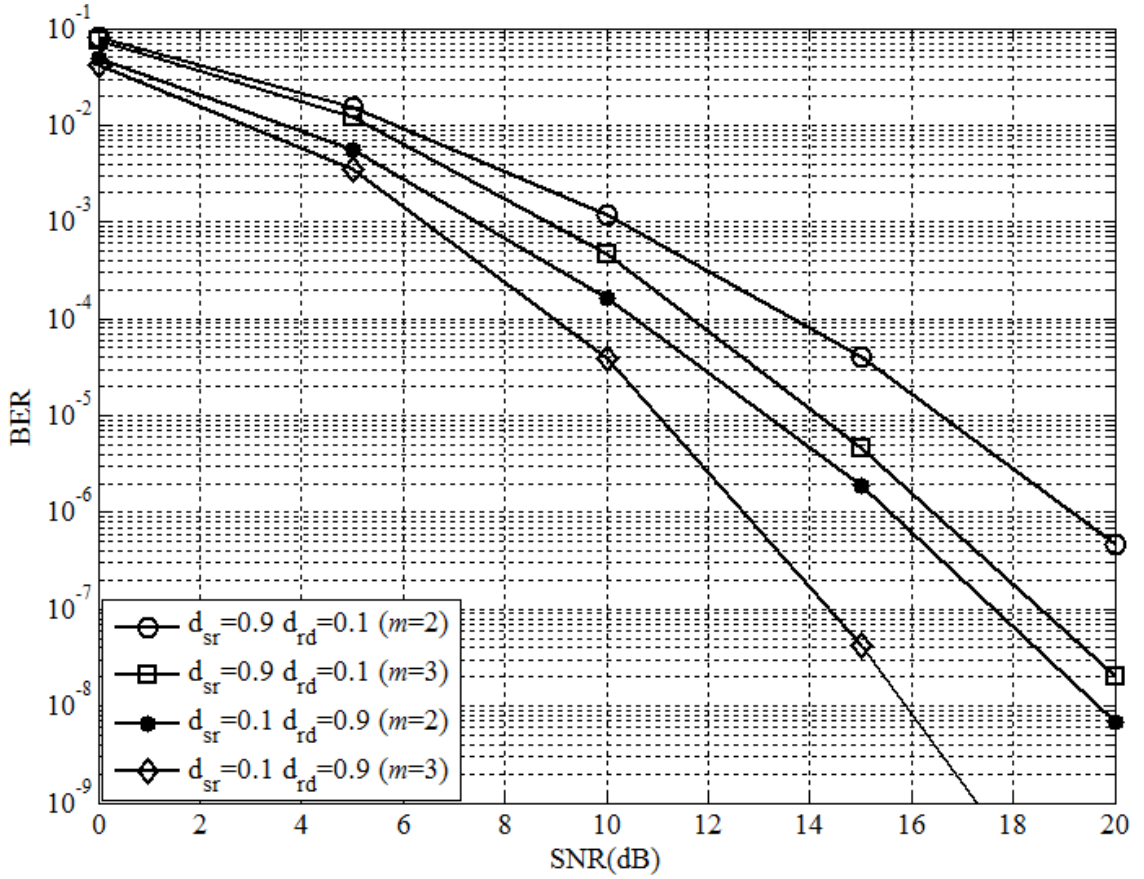
6.2.2 Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, hedefte klasik MRC ve VN teknikleri kullanan röle seçimli DF tabanlı birimlerin hareketli olduğu işbirlikli bir sistemin performansını göstermek için Monte-Carlo simülasyonları sunulacaktır. Kaynak ve hedef arasındaki uzaklık 1'e normalize edilmiş, ve ele alınan sistemin hata performansı rölenin normalize edilmiş farklı konumları için elde edilmiştir. $S \rightarrow D$, $S \rightarrow R_k$ ve $R_k \rightarrow D$ linkleri kaskat Nakagami- m dağılımı olarak modellenmiştir. Kaskatlık derecesi ve sönümlenme parametresi sırasıyla, $Q=1, 2, 4$ ve $m=2, 3$ olarak seçilmiştir. İki terminal arasındaki (i, j) sönümlenme katsayısının varyansı, $\sigma_{ij}^2 = d_{ij}^{-\nu}$ formundaki yol-kayı modeli kullanılarak hesaplanmış ve yol kaybı katsayısı $\nu = 2$ olarak alınmıştır [13]. Röle sayısının $N = 3$ olduğu durum için BPSK modülasyonu ele alınmıştır. Hedefte VN ile MRC tekniklerinin kullanılması durumundaki SNR kazanç farkları $BER=10^{-4}$ olması durumu için verilmiştir.



Şekil 6. 4 Rölenin hedefe yakın olduğu konumda hata performans eğrileri

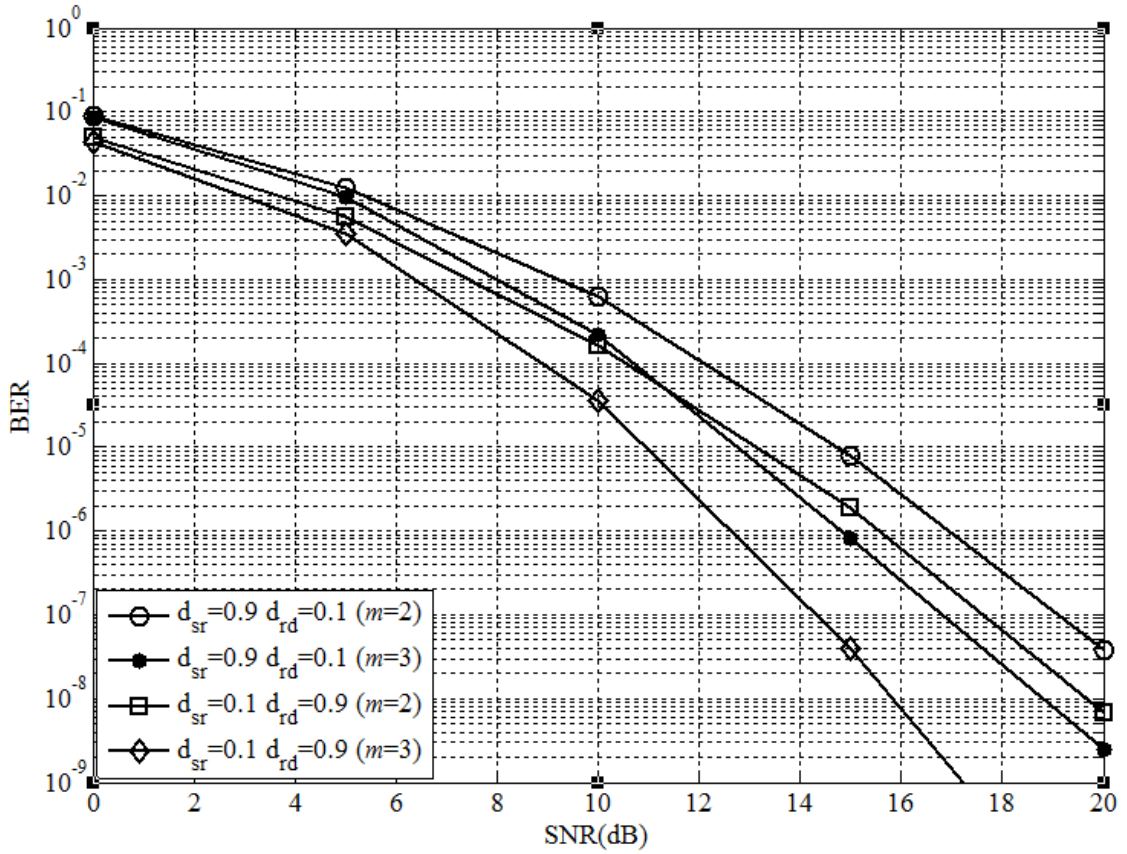
Şekil 6.4'de $Q = 2$, $m = 2, 3$ ve $d_{sr} = 0,9$ durumlarında ele alınan sistemin ortalama BER eğrileri sunulmuştur. Şekilden görüldüğü gibi $m = 2$ ve $m = 3$ durumlarında, VN tabanlı röle seçim senaryosu, MRC tabanlı olan sisteme göre sırasıyla yaklaşık 2 dB ve 3 dB 'lik bir performans artışı sağlamıştır. Aynı zamanda VN tabanlı sistemde $m = 2$ ve $m = 3$ olması durumundaki SNR farkı yaklaşık 1,5 dB iken, aynı koşullarda MRC tabanlı sistem için bu farkın yaklaşık olarak 2 dB olduğu da Şekil 6.4'den görülebilmektedir.



Şekil 6. 5 Hedefte klasik MRC kullanılması durumundaki hata performans eğrileri

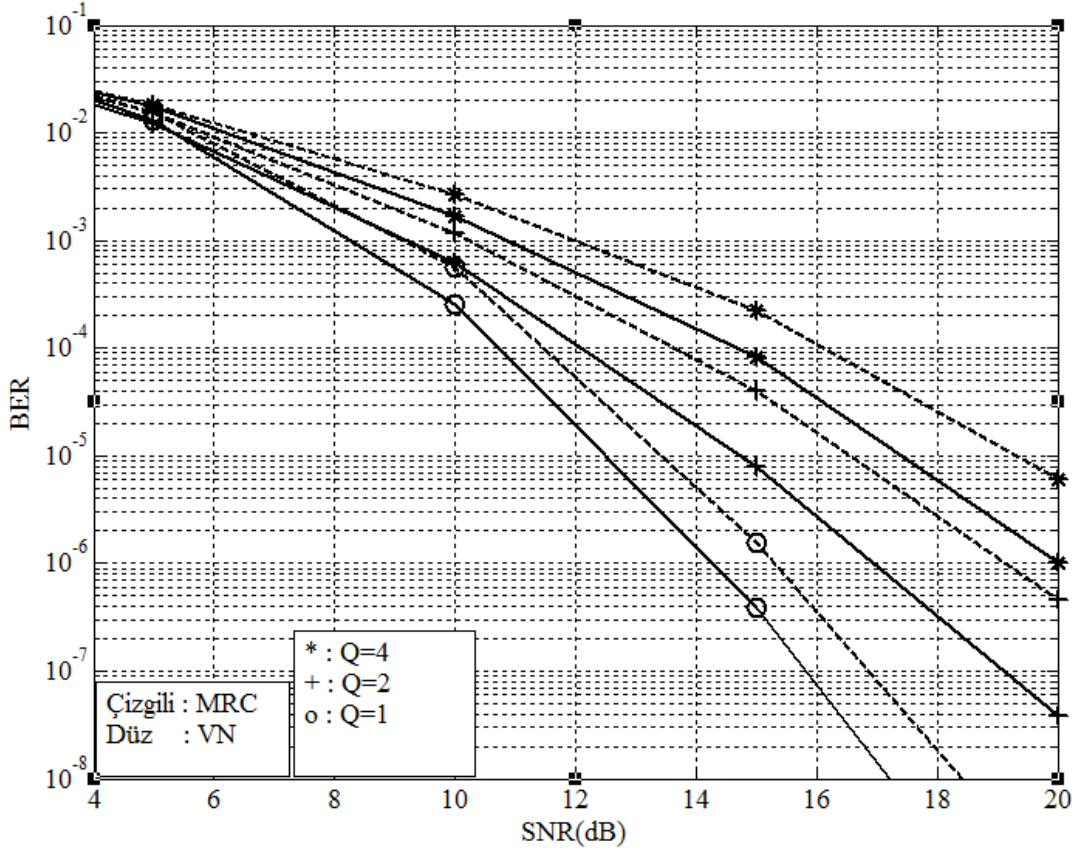
Şekil 6.5’de röle konumlarının $d_{sr}=0,1$ ve $d_{sr}=0,9$, kaskatlık derecesinin $Q=2$ ve sönmüleme parametresinin $m=2$ ve $m=3$ olduğu ve hedefte MRC tekniğinin kullanılması durumunda sistemin ortalama BER simülasyonları görülmektedir. Görüldüğü gibi hem $m=2$ hem de $m=3$ olması durumu için $d_{sr}=0,9$ olduğu yani rölenin hedefe yakın olduğu durumlarda, $d_{sr}=0,1$ olduğu duruma göre yaklaşık olarak 3 dB’lik SNR kaybı oluşmaktadır. Uzaklıkla beraber algılama hata olasılığının da artması beklenen bir sonuçtur. Röle lokasyonunun $d_{sr}=0,1$ ve $d_{sr}=0,9$ olduğu durumlarda sönmüleme parametresinin artmasıyla oluşan performans artışı sırasıyla 1,8 dB ve 2 dB civarındadır.

Şekil 6.6 VN tabanlı sistem için $Q=2$ olması durumunda rölenin farklı konumları ve sönmüleme katsayısının farklı değerleri için ortalama BER performansını göstermektedir. Röle terminali hedefe yaklaştıkça $m=2$ ve $m=3$ değerleri için sırasıyla 1,6 dB ve 2 dB’lik bir SNR kaybı söz konusudur.



Şekil 6. 6 Hedefte VN kullanılması durumunda hata performans eğrileri

MRC ve VN modelleri için farklı Q değerlerindeki performans karşılaştırması ise Şekil 6.7'de verilmiştir. Hem klasik MRC hem de VN yaklaşımları için kaskatlık derecesi düştükçe ortalama BER performansının arttığı görülmektedir. $Q = 1, 2$ ve 4 olması durumunda MRC modelli sistemde gerçekleşen SNR kaybı VN tabanlı sisteme göre sırasıyla yaklaşık olarak $0,8$ dB, $1,9$ dB ve $1,2$ dB'dir.



Şekil 6. 7 Rölenin hedefe yakın olduğu ($d_{sr} = 0,9$) durumda farklı Q değerleri için hata performans eğrileri

Çizelge 6.1 de farklı röle lokasyonları, farklı kaskatlık dereceleri Q ve farklı sönümlenme katsayıları m , için VN ve MRC teknikleri karşılaştırılarak, SNR kazançları verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi röle kaynağa yakın olduğu durumda, $d_{sr} = 0,1$, hem VN hem de MRC modelleri aynı ortalama BER performansını göstermektedir.

Çizelge 6. 1 BER= 10^{-4} değeri için VN SNR kazancı

Sönümlenme parametresi (m)	Kaskatlık derecesi (Q)	$d_{sr}(0,9)$ $d_{rd}(0,1)$	$d_{sr}(0,1)$ $d_{rd}(0,9)$
2	1	0,75dB	0 dB
	2	1,55dB	0 dB
	4	1,42dB	0 dB
3	2	0,95dB	0 dB

SONUÇLAR

Bu tezde ilk olarak röle seçimli AF tabanlı işbirlikli bir sistem ele alınmıştır. Sistemde kaynak- k . röle ve k . röle-hedef linkleri Rayleigh iken, kaynak-hedef linki ise çift (double) Rayleigh sönümlmeli kanal olarak modellenmiştir. Ele alınan sistemin, PDF, CDF ve MGF analitik ifadeleri elde edilmiştir. Sonrasında CDF ifadesi kullanılarak sistemin servis kesilme olasılığı ve MGF ifadesi kullanılarak sistemin sembol hata olasılığı sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarında da görüldüğü gibi işbirlikli sistemin performansı röle seçimi yapılarak iyileştirilebilmektedir. Ayrıca elde edilen simülasyon sonuçları tüm kanalların Rayleigh olması durumundaki sistem performansının, kaynak-hedef linkinin çift (double) Rayleigh olduğu durumdaki performanstan daha iyi olduğunu göstermiştir.

İkinci çalışmada ise DF tabanlı röle seçimli bir işbirlikli telsiz iletişim sisteminde hedefte MRC ve C-MRC kullanılması durumundaki hata performans analizi Nakagami- m kanallar için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi C-MRC kullanan sistemin hata performansı, MRC kullanıldığı durumdaki performansına göre çok daha iyidir. Röle sayısı ve sönümlleme parametresi m değeri arttıkça SNR kazancı da artmaktadır.

Üçüncü olarak kaynak-hedef, kaynak- k . röle ve k . röle-hedef linkleri kaskat Nakagami- m dağılıma sahip, röle seçimli araçlararası işbirlikli bir sistemin performans analizi yapılmıştır. Hedefte klasik MRC tekniği ve VN yöntemi ile beraber MRC tekniği kullanılması durumundaki simülasyon sonuçları sunulmuştur. Sonuçlardan, kaskatlık derecesi Q parametresinin azalmasıyla, sönümlleme parametresinin, m , artmasıyla sistemin performansının arttığı sonucuna varılmaktadır. Ayrıca rölenin lokasyonunun

hedefe yakın olduğu durumda, hedefte MRC tekniği ile beraber sanal gürültü yönteminin kullanılmasıyla da ele alınan sistemin performansı artmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Telatar, I.E., (1999). "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", Eur. Trans. Telecommun., 10: 585-595.
- [2] Burr, A., (2005). "MIMO wireless systems: overcoming the problems of convenience", International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 23-26 Sept. 2005, Singapore.
- [3] Trung, H.D., Benjapolakul, W. ve Araki, K., (2007). "A study on the channel capacity of multiple-input multiple output (MIMO) wireless system", IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, 2-4 July 2007, Singapore.
- [4] Blaunstein, N., ve Yarkoni, N., (2006). "Capacity and spectral efficiency of MIMO wireless systems in multipath urban environments with fading", First European Conference on Antennas and Propagation, 6-10 Nov. 2006, Nice.
- [5] Chen, Z., Yuan, J., ve Vucetic, B., (2005). "Analysis of transmit antenna selection/maximal ratio combining in Rayleigh fading channels", Trans. on Vehicular Technology, 54: 1312-1321.
- [6] İlhan, H., ve Altunbaş, İ (2006). "Klasik uzay-zaman kafes kodlarını kullanan işbirlikli çeşitlenmeli sistemler için hata performans analizi", Elektrik - Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ve Fuarı Bildirileri, 6-10 Aralık 2006, Bursa.
- [7] Laneman, J.N., Wornell, G.W. ve Tse, D.N.C., (2001). "An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks", Proc. IEEE International Symposium on Information Theory, 24-29 June 2001, Washington, D.C., USA.
- [8] Sendonaris, A., Erkip, E., ve Aazhang, B., (1998). "Increasing uplink capacity via user cooperation diversity", in Proc. IEEE International Symposium on Information Theory, 16-21 August 1998, Cambridge, MA.
- [9] Laneman, J., Tse, D. ve Wornell, G., (2004). "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behaviour", IEEE Trans. Inf. Theory, 50: 3062-3080.
- [10] Sendonaris, A., Erkip, E. ve Aazhang, B., (2003). "User cooperation diversity Part I: System description", IEEE Trans. Commun., 51: 1927-1938.

- [11] Sendonaris, A., Erkip, E. ve Aazhang, B., (2003). "User cooperation diversity Part II: Implementation aspects and performance analysis", IEEE Trans. Commun., 51: 1939-1948.
- [12] Nosratinia, A. ve Hunter, T.E., (2006). "Diversity through coded cooperation", IEEE Trans. Wireless Commun., 5: 283-289.
- [13] Chen, D. ve Laneman, J.N., (2006). "Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, 5 (7): 1785-1794.
- [14] Wang, T., Cano, A., Giannakis, G.B., ve Laneman, J.N., (2007). "High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays", IEEE Trans. Commun., 55 (7): 1427-1438.
- [15] Kim, D., Kim, H.-M. ve Im, G.-H.,(2011). "Improved network-coded cooperative transmission with low-complexity adaptation to wireless channels", IEEE Trans. on Commun., 59 (10): 2916-2926.
- [16] Anghel, P.A., ve Kaveh, M., (2004). "Exact symbol error probability of a cooperative network in a Rayleigh-fading environment", IEEE Trans. Wireless Commun., 3: 1416-1421.
- [17] Fareed, M.M., ve Uysal, M., (2008). "BER-Optimized power allocation for fading relay channels", IEEE Trans. Wireless Commun., 7: 2350-2359.
- [18] Nabar, R.U., Bölcskei, H., ve Kneubuhler, F.W., (2004). "Fading relay channels: performance limits and space-time signal design", IEEE J. Select. Areas Commun., 22: 1099-1109.
- [19] Zhao, Q., Li, H. ve Wang, P., (2008). "Performance of cooperative relay with binary modulation in Nakagami-m fading channels", IEEE Trans. Veh. Technol., 57: 3310-3315.
- [20] Akki, A.S., ve Haber, F., (1986). "A statistical model of mobile-to-mobile land communication channel", IEEE Trans. Veh. Technol., 35: 2-7.
- [21] Kovacs, I.Z., (2002). Radio channel characterization for private mobile radio systems, Doktora Tezi, Aalborg University.
- [22] Andersen, J.B., (2002a). "Statistical distributions in mobile communications using multiple scattering", URSI General Assembly, The Netherlands.
- [23] Andersen, J.B., ve Kovacs, I.Z., (2002b). "Power distributions revisited", COST 273 TD(02) 004, Guildford, UK.
- [24] Adinoyi, A., Fan, Y., Yanikomeroglu, H., Poor, H.V. ve Al-Shaalan, F., (2009). "Performance of selection relaying and cooperative diversity", IEEE Trans. Wireless Commun., 8: 5790-5794.
- [25] Alexandropoulos, G.C., Papadogiannis, A. ve Berberidis, K., (2010). "Performance analysis of cooperative networks with relay selection over Nakagami- m fading channels", IEEE Signal Process. Lett., 17: 441-444.
- [26] İlhan, H. ve Akin, A.İ., (2012). "Performance analysis of AF relaying cooperative systems with relay selection over double Rayleigh fading

- channels”, 6th International Conference on and Signal Processing Communication Systems, 12-14 Aralık 2012, Gold Coast.
- [27] Akın, A.İ., İlhan, H. ve Özdemir, Ö., (2013). “Çöz ve İlet Tabanlı Röle Seçimli İşbirlikli Sistemlerin Hata Performans Analizi”, 21. Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı, 24-26 Nisan 2013, Girne.
- [28] Bletsas, A., Khisti, A., Reed, D.P. ve Lippman, A., (2006). “A simple cooperative diversity method based on network path selection,” IEEE J.Select. Areas Commun., 24: 659-672.
- [29] Beres, E. ve Adve, R., (2008). “Selection cooperation in multi-source cooperative networks,” IEEE Trans. Wireless Commun., 7: 118-127.
- [30] İbrahim, A.S., Sadek, A.K., Su, W. ve Liu, K.J.R., (2006). “Relay selection in multi-node cooperative communications: When to cooperate and whom to cooperate with?,” in Proc. IEEE GLOBECOM 2006, California, USA.
- [31] Yi, Z. ve Kim, I.M., (2008). “Diversity order analysis of the decode-and-forward cooperative networks with relay selection,” IEEE Trans. Wireless Commun., 7: 1792-1799.
- [32] Proakis, J.G., ve Salehi, M., (1994). “Communication system engineering”, Practice-Hall. New Jersey.
- [33] Simon, M.K., ve Alouini, M.S., (2005). “Digital communication over fading channels”, 2nd Ed., John Wiley & Sons.
- [34] Sklar, B., (1997). “Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems part I: characterization”, IEEE Commun. Mag., 35: 90-100.
- [35] Stüber, G.L., (2000). “Principles of Mobile communication”, Kluwer Academic Publishers.
- [36] Nakagami, M., (1960). “The m-distribution a general formula of intensity distribution of rapid fading, statistical methods of radio wave propagation”, pergamon, New York.
- [37] Lee, Y. ve Tsai, M.H., (2009). “Performance of decode-and-forward cooperative communications over Nakagami-m fading channels,” IEEE Trans. Wireless Commun., 58: 1218-1227.
- [38] Erceg, V., Fortune, S.J., Ling, J., Rustako, A. ve Valenzuela, R., (1997). “Comparisons of computer-based propagation prediction tool with experimental data collected in urban microcellular”, IEEE Journal on Selected Areas in communications, 15 (4): 677-684.
- [39] İlhan, H., (2011). Kaskat Sönümlenmeli Kanallar için İşbirlikli Sistem Tasarımı ve Hata Başarım Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [40] Rappaport, T.S., (1996). Wireless communications: Principles and practice, Prentice Hall.
- [41] Gibson, J.D., (1999). “The communication handbook”, 2nd ed., CRC Press, Springer.

- [42] Goldsmith, A., (2005). *Wireless Communications*, Cambridge University Press, United States of America.
- [43] Hourani, H., (2005). "An Overview of Diversity Techniques in Wireless Communication Systems", Postgraduate Course in Radio Communications, Helsinki.
- [44] Jafarkhani, H., (2005). *Space-time coding theory and practice*, Cambridge University Press., Cambridge.
- [45] Vucetic, B. ve Yuan, H., (2003). *Space-time coding*, John Wiley and Sons., New York, USA.
- [46] Meulen, E.C.V., (1971). "Three-terminal communication channels", *Adv. Appl. Prob.*, 3: 120-154.
- [47] Cover, T.M.ve Gamal, A.A.E., (1979). "Capacity theorems for the relay channel", *IEEE Trans. Inf. Theory*, 25: 572-584.
- [48] Laneman, J.N. ve Wornell, G.W., (2003). "Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks", *IEEE Trans. Inform. Theory*, 49: 2415-2425.
- [49] Uysal, M., (2005). "Maximum achievable diversity order for cascaded Rayleigh fading channels," *IET Electronics Letter*, 41: 1289-1290.
- [50] İlhan, H., Uysal, M. ve Altunbaş, İ., (2009). "Cooperative diversity for inter-vehicular communication: performance analysis and optimization," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 58 (7): 3301-3310.
- [51] Gradshteyn, I.S. ve Ryzhik, M.I., (2007). *Table of integrals, series and products*, Academic Press, 7nd ed.
- [52] Torabi, M., Haccoun, D. ve Ajib, W., (2010). "Performance analysis of cooperative diversity with relay selection over non-identically distributed links," *IET Commun.*, 4: 596-605.
- [53] İlhan, H., Altunbaş, İ. ve Uysal, M., (2010). "Novel distributed space-time trellis codes for relay systems over cascaded Rayleigh fading," *IEEE Commun. Lett.*, 14: 1140-1142.
- [54] Wolfram Research, *The Wolfram Function Site*, <http://functions.wolfram.com>, 14 Haziran 2013.
- [55] Tourki, K., Alouini, M.-S. ve Yang, H.-C., (2010). "Exact performance analysis of decode-and-forward opportunistic relaying", *IEEE SPAWC*, 20-23 June 2010, Marrakech.
- [56] Wang, T., Cano, A. ve Giannakis, G.B., (2005). "Efficient demodulation in cooperative schemes using decode-and-forward relays," In *Proc. 39th Asilomar Conf. Signals Syst. Computers*, 1051-1055.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ayşe İpek AKIN
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.07.1989 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : a.ipekakin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektronik Müh.	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü	2011
Lise	Fen Bilimleri	Ümraniye Anadolu Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013	Marmara Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Bildiri

1. İlhan, H. ve Akın, A.İ. (2012). "Performance analysis of AF relaying cooperative systems with relay selection over double rayleigh fading channels". IEEE ICSPCS. Gold Coast, Avustralya.

2. Akın, A.İ., İlhan, H. ve Özdemir, Ö. (2013).”Çöz ve ilet tabanlı röle seçimli işbirlikli sistemlerin hata performans analizi” IEEE SİU. Girne, KKTC.
3. Akın, A. İ., İlhan, H. ve Özdemir, Ö. (2013).”Relay Selection for Decode-and-Forward Cooperative Vehicular Networks with Virtual Noise Modelling”. 13th International Conference on ITS Telecommunications. Tampere, Finlandiya.

Proje

1. AF ve DF Tabanlı İşbirlikli Sistemlerde Röle Seçimi, Yıldız Teknik Üniversitesi (Araştırmacı)
2. İşbirlikli/Röleli Sistemlerde Karmaşıklık Azaltıcı Yöntemler Ve Hata Başarım Analizleri, TÜBİTAK (Bursiyer öğrenci)