



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ANTEN SEÇİMLİ AĞ KODLAMALI
İŞBİRLİKLİ MIMO SİSTEMLERİN RİCIAN
SÖNÜMLEMELİ KANALLARDAKİ
PERFORMANSI

Burak DUMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Burak Duman tarafından hazırlanan “Anten Seçimli Ağ Kodlamalı İşbirlikli MIMO Sistemlerin Rician Sönümlenmeli Kanallardaki Performansı” adlı tez çalışması 16/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Uğur TAŞKIRAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Burak DUMAN

Tarih: 16.06.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANTEN SEÇİMLİ AĞ KODLAMALI İŞBİRLİKLİ MIMO SİSTEMLERİN RICIAN SÖNÜMLEMELİ KANALLARDAKİ PERFORMANSI

Burak DUMAN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR

2022, 58 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR
Dr. Öğr. Üyesi Uğur TAŞKIRAN
Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN**

Alıcı ve vericide fiziksel anten dizileri konumlandırılarak anten çeşitleme kazancı sağlama fikrine dayanan çok girişli çok çıkışlı (MIMO) sistemler sundukları önemli kapasite artışları sayesinde günümüzün artan iletişim ihtiyaçlarını karşılamada önde gelen teknolojilerden birisi haline gelmişlerdir. Bununla birlikte telsiz terminallerde çok sayıda anten kullanımı önemli maliyet ve karmaşıklık artışlarına neden olmaktadır. Bu problemi çözmek için önerilmiş olan anten seçim tekniğinde alıcı ve vericide sistem performansını maksimum yapan antenler seçilerek iletişimde kullanılmaktadır. Anten seçim tekniğinin MIMO sistemlerde karşılaşılan boyut, maliyet ve karmaşıklık artışı problemlerini çözebildiğini gösteren literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur.

Telsiz iletişim sistemlerinde anten çeşitleme kazancı sağlayan bir başka yaklaşım, kaynak ile hedef arasındaki iletişime röle olarak adlandırılan komşu terminallerin yardımcı olduğu işbirlikli iletişim tekniğidir. İşbirlikli telsiz ağlarda röle terminallerinde kullanılan başlıca işaret işleme yöntemleri analog aktarma (AR) ve sayısal aktarma (DR) olarak sınıflandırılabilir. Bu yüksek lisans tez çalışmasında odaklanılan DR tekniğinde röle terminalleri aldıkları işareti çözdükten sonra hedefe tekrar iletir. Röledeki sezim hatalarının meydana getirdiği performans kayıpları DR tabanlı telsiz işbirlikli ağlarda karşılaşılan en önemli problemdir. Hata yayılımı adı verilen bu problem ile mücadele için en yüksek olabilirlik (ML) sezimi, işbirlikli en yüksek oran birleştirmesi (C-MRC), seçimli aktarma (SR), logaritmik olabilirlik oranı (LLR) tabanlı sezim ve sanal gürültü (VN) tabanlı sezim gibi literatürde birçok farklı teknik önerilmiştir.

Ağ kodlaması tekniği röle terminallerinin aldıkları işaretleri birleştirerek yeni paketler oluşturması fikrine dayanır ve işbirlikli telsiz haberleşme sistemlerinin spektral verimliliğini artırmakta kullanılır. Çok sayıda kullanıcının ortak bir hedefe bir röle terminali yardımıyla bağımsız veri iletimi yaptığı çoklu erişim röle kanalı (MARC) işbirlikli telsiz ağ kodlamasının önde gelen uygulamalarındandır. Bu yüksek lisans tez çalışmasında iki kullanıcı, bir röle ve bir hedeften oluşan, terminallerinde anten dizilerinin bulunduğu DR tabanlı bir MARC yapısının Rician sönümlenmeli kanallardaki performansı simülasyon sonuçları ile analiz edilmiştir. İlk iki fazda kullanıcıların iletimde oldukları, üçüncü fazda rölenin ağ kodlanmış veri paketini iletmediği üç fazlı bir iletim protokolü incelenmiştir ve kullanıcılar ile hedef arasında doğrudan linklerin bulunduğu varsayılmıştır. Bu yüksek lisans tezinde kullanılan anten seçim kriterlerinde ilgili alıcı ve verici terminallerde sadece bir anten seçilip aktif edilmiştir. Hata yayılımı probleminin neden olduğu performans düşüşleri ile mücadele için ise röledeki hata olasılığının hedefte göz önüne alındığı ML karar kuralından faydalanılmıştır. İncelenen sistem modelinin çeşitleme kazancı sağladığı simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağ kodlaması, Anten seçimi, İşbirlikli telsiz ağlar, MIMO sistemler, ML karar kuralı, Sayısal aktarma, Rician sönümlemesi



ABSTRACT

MS THESIS

PERFORMANCE OF NETWORK-CODED COOPERATIVE MIMO SYSTEMS WITH ANTENNA SELECTION OVER RICIEN FADING CHANNELS

Burak DUMAN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Özgür ÖZDEMİR

2022, 58 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Özgür ÖZDEMİR

Asst. Prof. Dr. Uğur TAŞKIRAN

Asst. Prof. Dr. Ayşe Elif CANBİLEN

Multiple-input multiple-output (MIMO) systems, which are based on the idea of obtaining antenna diversity gain by deployment of physical antenna arrays at the receiver and transmitter, have become one of the leading technologies in meeting today's increasing communication demands due to the significant capacity increases they offer. However, exploiting a large number of antennas in wireless terminals causes significant increase in the cost and complexity of the system. In the antenna selection technique proposed to solve this problem, antennas in the receiver and/or transmitter that maximize the system performance are selected and used in transmission. Many studies exist in the literature that show that antenna selection technique can solve the size, cost and complexity increase problem encountered in MIMO systems.

Another approach that provides antenna diversity gain in wireless communication systems is the cooperative diversity technique, in which the transmission between the source and the destination is assisted by neighboring terminals called relays. The leading signal processing strategies used in relay terminals of cooperative wireless networks can be classified as analog relaying (AR) and digital relaying (DR). In the DR technique, which is focused on in this master thesis, the relay terminals retransmit the received signal to the destination after decoding it. Performance losses due to the detection errors at the relays are the most important problem encountered in DR-based wireless cooperative networks. Many different techniques have been proposed in the literature to combat this problem called error propagation such as maximum likelihood (ML) detection, cooperative maximum ratio combining (C-MRC), selective relaying (SR), log-likelihood ratio (LLR) transmission and virtual noise (VN) based detection.

Network coding technique is based on the idea that relay terminals obtain new packets by combining the signals they receive and is exploited to increase the spectral efficiency of cooperative wireless communication systems. Multiple access relay channel (MARC) is one of the leading applications of cooperative wireless network coding, where multiple users transmit their independent data to a common destination with the help of a relay terminal. In this master thesis, the performance of a DR-based MARC structure consisting of two users, one relay and one destination was obtained by simulation results over Rician fading channels where multiple antennas are located at the terminals. A three-phase transmission protocol in which the users transmit in the first two phases and the relay forwards the network encoded data packet in the third phase is considered and it is assumed that direct links exist between the users and the destination. In the antenna selection criteria utilized in this master thesis, only

one antenna has been selected and activated at the corresponding receiver and the transmitter terminals. In order to combat the performance losses due to the error propagation problem, the maximum likelihood (ML) decision rule has also been employed where the erroneous transmission probability from the relay is considered at the destination. It has been shown by simulation results that the examined system model provides diversity gain.

Keywords: Antenna selection, Cooperative wireless networks, Digital relaying, MIMO systems, ML decision rule, Network coding, Rician fading.



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışması boyunca değerli bilgilerini ve katkılarını benden esirgemeyen danışmanım Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sn. Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR'e ve bu süreçte bana sabırla destek veren annem Gülgin DUMAN ve babam Prof. Dr. Rüstem DUMAN'a teşekkürü borç bilirim.

Burak DUMAN
KONYA-2022



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	5
3.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal.....	5
3.2. Sönümlenmeli Kanallar	5
3.2.1. Rayleigh sönümlenmeli kanal.....	6
3.2.2. Rician Sönümlenmeli Kanal	7
3.2.3. Nakagami-m sönümlenmeli kanal	9
3.3. Çeşitleme Teknikleri.....	10
3.3.1. Zaman çeşitlemesi.....	10
3.3.2. Frekans çeşitlemesi	11
3.3.3. Anten çeşitlemesi	11
3.4. Maksimum Oran Birleştirme (Maximum Ratio Combining, MRC) Tekniği	13
3.5. Anten Seçim Tekniği	15
3.6. Ağ Kodlaması	17
3.6.1. TWC için sistem modeli	17
3.6.2. MARC için sistem modeli	19
3.6.3. Anten seçimli MARC için sistem modeli	21
3.7. Hata Yayılımıyla Mücadele Teknikleri	23
3.7.1. ML tabanlı sezim	24
3.7.2. C-MRC tekniği	26
3.7.3. LLR iletimi tekniği	28
3.7.4. SR tekniği	30
3.7.5. VN tabanlı sezim tekniği	32
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	35
4.1. ML Sezim Tabanlı TWC Senaryosunun Performansı	35
4.2. LLR İletimi Tabanlı TWC Senaryosunun Performansı	37
4.3. SR Tabanlı TWC Senaryosunun Performansı	39
4.4. ML Sezim Tabanlı MARC Yapısı	41
4.5. LLR İletimi Tabanlı MARC Yapısı.....	43
4.6. MARC Yapısında Kullanıcı Seçimli Aktarma	44
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	48

5.1. Sonuçlar	48
5.1.1. Anten seçimli MARC modeli için simülasyon sonuçları	48
5.2. neriler	53
KAYNAKLAR	54



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E_b	: Bit enerjisi
E_s	: Sembol enerjisi
$E[.]$: Beklenen değer operatörü
N_0	: Gürültünün güç spektral yoğunluğu
h	: Kanal sönümlenme katsayısı
K	: Rician parametresi
$\text{sgn}[.]$: Reel bir sayının işaretini alma operatörü
$\text{Re}[.]$: Kompleks bir sayının reel kısmını alma operatörü
y	: Alınan işaret
x	: Vericiden iletilen işaret
z	: Gürültü terimi
ϵ_r	: Röleden hatalı iletim yapma olasılığı
Ω	: Toplam işaret gücü
σ^2	: Varyans
γ	: Anlık işaret-gürültü oranı
$\bar{\gamma}$: Ortalama işaret-gürültü oranı

Kısaltmalar

AR	: Analog aktarma (Analog relaying)
AWGN	: Toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (Additive white Gaussian noise)
BER	: Bit hata oranı (Bit error rate)
BFSK	: İkili frekans kaydırmalı anahtarlama (Binary frequency shift keying)
BPSK	: İkili faz kaydırmalı anahtarlama (Binary phase shift keying)
C-MRC	: İşbirlikli maksimum oran birleştirme (Cooperative maximal ratio combining)
DR	: Sayısal aktarma (Digital relaying)
LLR	: Logaritmik olabilirlik oranı (Log-likelihood ratio)
LOS	: Doğrudan görüş hattı (Line-of-sight)
MARC	: Çoklu erişim röle kanalı (Multiple access relay channel)
MIMO	: Çok girişli çok çıkışlı (Multiple input multiple output)
MISO	: Çok girişli tek çıkışlı (Multiple input single output)
ML	: Maksimum olabilirlik (Maximum likelihood)
MRC	: Maksimum oran birleştirmesi (Maximum ratio combining)
PDF	: Olasılık yoğunluk fonksiyonu (Probability density function)
PSK	: Faz kaydırmalı anahtarlama (Phase shift keying)
RF	: Radyo frekansı (Radio frequency)
SER	: Sembol hata oranı (Symbol error rate)
SIMO	: Tek girişli çok çıkışlı (Single input multiple output)
SISO	: Tek girişli tek çıkışlı (Single input single output)
SNR	: İşaret-gürültü oranı (Signal-to-noise ratio)
SR	: Seçimli aktarma (Selective relaying)
TWC	: İki yönlü röleli iletişim (Two-way relaying)
TWRC	: İki yönlü röleli iletişim kanalı (Two-way relay channel)
VN	: Sanal gürültü (Virtual noise)

1. GİRİŞ

Telsiz iletişim sistemleri, son yıllarda hızla gelişerek yaygın hale gelmiştir. Sağlık sektöründen, ulaşım sistemlerine, savunma teknolojilerinden meteorolojiye kadar pek çok alanda telsiz iletişim sistemlerindeki gelişmelerden faydalanılırken, kullanıcı sayısı da her geçen gün artmaktadır (Wen ve ark., 2013). Telsiz iletişim sistemlerine olan bu yoğun talebe ek olarak nesnelerin interneti gibi önümüzdeki dönemde yaygınlaşacağı tahmin edilen yeni uygulamalar sayesinde gelecekteki mobil iletişim trafiğinin, günümüz şartlarına göre bin kattan fazla büyüme göstermesi beklenmektedir. Sağladığı önemli kapasite artışı ve bağlantı kalitesinin yanı sıra sundukları düşük hata oranı ve iletim gecikmesi ile de 5G teknolojilerinin hızla artan bu servis kalitesi ve kapasitesi yüksek telsiz haberleşme ihtiyacını karşılamada öncü rol üstleneceği öngörülmektedir (Li ve ark., 2014).

Çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemler hem alıcı hem de verici tarafında anten dizileri bulundurarak anten çeşitlemesi sağlamak suretiyle işaret sönümlenmesi ile mücadele eden ve önemli kapasite artışları veren yapılarıdır (Foschini ve Gans, 1998). Böylelikle internet, hücresel mobil iletişim sistemleri ve multimedya hizmetleri gibi günümüz haberleşme sistemlerindeki baş döndürücü gelişmelerin gerektirdiği başarımların seviyesini sağlayabilmektedirler. Bu avantajlarına rağmen MIMO sistemlerde karşılaşılan temel sorun birden fazla sayıda anten kullanımını sonucu ortaya çıkan RF katı (radio frequency chain) sayısı artışlarıdır. Alıcı ve/veya vericide sistem performansını maksimum yapan antenlerin aktif edilmesi prensibine dayanan anten seçim tekniğinin, artan RF katı sayısı sonucu ortaya çıkan donanım karmaşıklığı ve maliyet sorunlarını ortadan kaldırmakla birlikte MIMO sistemlerin sunduğu başarımların muhafaza edebildiği gösterilmiştir (Bahceci ve ark., 2003; Chen ve ark., 2005; Heath ve ark., 2001; Özdemir ve ark., 2006).

Anten çeşitleme kazancının fiziksel anten dizileri kullanılarak elde edildiği MIMO sistemlerin yanı sıra literatürdeki bir başka önemli anten çeşitleme kazancı sağlayan yaklaşım işbirlikli çeşitlemedir (Cover ve Gamal, 1979). İşbirlikli iletişim teknolojisinde hedefe olan iletimde ortamda bulunan diğer kullanıcıların (relay, röle) birbirleriyle kaynaklarını paylaşması ve sanal anten dizileri oluşturularak anten çeşitleme kazancının elde edilmesi söz konusudur (Laneman ve ark., 2004; Sendonaris ve ark., 2003). Rölede gerçekleşen işaret işleme yaklaşımına göre analog aktarma (analog relaying, AR) veya sayısal aktarma (digital relaying, DR) protokollerinden

birisi kullanılabilir. AR protokolünde röleler kaynaktan gelen gürültülü işareti alır ve kuvvetlendirerek hedefe iletir. DR protokolünde ise röle kaynaktan gelen işareti çözer ve hedefe gönderir.

Belirli bir veri hızına daha az güç tüketimi ile erişilmesine imkân tanınması ve ağ kapsama alanını genişletmede kullanılabilmesi işbirlikli iletişim sistemlerinin önde gelen avantajlarıdır (Sendonaris ve ark., 2003). Öte yandan mevcut radyo terminallerinin yarı çift yönlü çalışma kısıtlaması ve röle terminallerinin kaynak verisini tekrar iletmesi zorunluluğu işbirlikli iletişim sistemlerinin spektral verimliliğini sınırlandırmaktadır. Paket düzeyinde kodlama yaklaşımı temelli bir teknik olan ağ kodlaması, işbirlikli iletişim sistemlerinde ortaya çıkan bu spektral verimlilik kayıplarını azaltmada kullanılabilecek bir yaklaşımdır (Ahlsvede ve ark., 2000). İki kullanıcının bir röle yardımıyla karşılıklı veri iletimi yaptığı iki yönlü röleli iletişim (two-way relaying, bi-directional relaying, TWC) ile kullanıcı terminallerin bağımsız veri bloklarını müşterek bir hedefe bir röle terminaliyle iletildiği çoklu erişim röle kanalı (multiple access relay channel, MARC), kablosuz ağ kodlaması uygulamalarının son yıllarda en ilgi görenlerindedir (Larsson ve ark., 2006; Liu ve ark., 2008; Kramer ve Wijnngaarden, 2000).

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde tez konusu ile doğrudan ilişkili olan, literatürdeki mevcut çalışmaların özeti sunulmuştur. Üçüncü bölümde sönmülemeli kanallar, çeşitleme ve anten seçim tekniklerinden bahsedilmiştir. Araştırma sonuçları ve tartışma bölümü ile sonuçlar ve öneriler bölümlerinde ise sırasıyla bu tez çalışmasında elde edilen genel sonuçlar ile tez konusu ile ilişkili üzerinde çalışılabilecek diğer araştırma alanları verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Beşinci nesil (5G) ve ötesi iletişim sistemlerinin gerektirdiği servis kalitesinin elde edilmesinde işbirlikli iletişim modellerinin kullanıldığı çok antenli terminallerden oluşan tasarımların önemli bir rol oynayacağı görülmektedir (Kumar ve ark., 2021; Afana ve ark., 2016). Bu bağlamda çok antenli terminallerden oluşan işbirlikli ağların kapasitesinin bulunmasına yönelik bir çalışma yapılmıştır (Wang ve ark., 2005). Yuksel ve Erkip'in (2007) çalışmasında ise çok sayıda kaynak, çok sayıda hedef ve çok sayıda röle terminali içeren genel birçok antenli ağ, değişik sistem konfigürasyonları için çeşitleme ve çoklama ödünleşmesi (diversity and multiplexing tradeoff) perspektifinden ele alınmıştır. Sıkıştır ve ilet (compress-and-forward) stratejisinin kullanıldığı işbirlikli MIMO ağları Simoens ve ark. (2010) tarafından incelenmiştir. Su ve Rong (2019), kaynak-hedef arasında doğrudan linkin bulunmadığı iki atlamalı çok antenli işbirlikli ağ yapısını ele alarak rölenin de kendi bilgisini ilettiği bir haberleşme modelinin AR protokolü için optimizasyon problemini araştırmışlardır.

Donanım karmaşıklığını ve maliyetleri önemli ölçüde azaltan anten seçim tekniklerinin gerek sadece verici ve alıcı terminallerden oluşan klasik MIMO sistemlerde, gerekse de verici ve alıcı terminallerin yanı sıra röle terminallerinin de yer aldığı röleli MIMO kanallarda (MIMO relay channels) kullanımı ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Jiang ve Cimini, 2012; Wang ve ark., 2010; Zhang ve ark., 2007; Zhou ve ark., 2014; Krishna ve Bhatnagar, 2015; Brante ve ark., 2013). Örneğin Jiang ve Cimini (2012), MIMO sistemlerde enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için verici ve alıcıdaki iletim gücünü, aktif anten sayısını ve anten alt kümelerini birlikte optimize eden bir algoritma geliştirmişlerdir. Wang ve ark. (2010), MIMO sistemler için hızlı bir alıcı anten seçim algoritması geliştirmiş, bu algoritmayla orijinal kanal matrisinin bir alt matrisini doğrudan ve hızlı bir şekilde arayarak optimum kanal matrisini elde etmeyi amaçlamışlardır. Zhang ve ark. (2007), kanal durum bilgisi geri beslemesinden faydalanarak optimum anten seçimi yapan, en yüksek oran birleştirmeli bir klasik MIMO sistem modeli geliştirmişlerdir. Zhou ve ark. (2014), güç tüketiminin dikkate alındığı çöz-aktar protokollü bir MIMO sistemi için yinelemeli bir anten seçim algoritması önermişlerdir. Krishna ve Bhatnagar (2015), tek röle tabanlı çöz-aktar protokollü işbirlikli MIMO sistemi için ortak bir anten ve yol seçim tekniği modeli oluşturmuşlardır. Kaynak-hedef ve kaynak-röle yolunda işaret-gürültü oranını (signal-to-noise ratio, SNR) maksimize eden iki strateji ortaya konmuş, teorik sonuçlar

simülasyonlarla desteklenmiştir. Bütünleşik anten ve yol seçimiyle çeşitleme kazancı da artmaktadır. Brante ve ark. (2013), çeşitli anten seçimli işbirlikli MIMO tasarımlarının enerji etkinliğini kıyaslamışlardır. Amarasuriya ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada AR protokolü ile çalışan bir işbirlikli MIMO sistemi için üç farklı verici anten seçimi stratejisinin performanslarını tüm kanal sönümlene katsayılarının Nakagami-m dağılımlı olması durumunda incelemişlerdir.

İşbirlikli haberleşmede çoğu zaman iletim hızından feragat ederek hata performansında iyileşme sağlanır. Bu nedenle iletim hızını artırabilmek için ağ kodlaması (network coding) tekniği önerilmiştir. Röle düğümlerine gönderilmiş olan veri paketleri bu teknikle birleştirilerek iletim hızında ciddi bir artış sağlanır. Ağ kodlamasının önde gelen uygulamaları iki kullanıcının bir röle terminali üzerinden karşılıklı bağımsız veri iletimi yaptığı iki yönlü röleli iletişim kanalı (bi-directional relaying, two-way relay channel, TWRC) ile çok sayıda kullanıcının bir röle terminali üzerinden ortak bir hedefe iletim gerçekleştirdiği çoklu erişim röle kanalıdır (multiple access relay channel, MARC). Zhang ve Cai (2017), çok atlamalı bir TWRC modelini ele almışlardır. Eslamifar ve ark. (2012), rölenin çok antenli olması durumunda iki zaman diliminde gerçekleşen bir TWRC senaryosunu incelemişlerdir. Pham ve ark. (2010), kullanıcılarda ve rölede çok sayıda antenin bulunduğu bir TWRC yapısında kanal kestirimi problemini çalışmışlardır. Li ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada kullanıcılardan birisinin çok antenli, röleler ile diğer kullanıcının tek antenli olduğu bir TWRC modelinde AR protokolü için ortak röle ve anten seçim problemini ele almışlardır. Lu ve ark. (2014), MARC yapıları için yeni bir ortak kanal-ağ kodlaması tekniği ortaya koyarak enerji verimliliği yüksek bir algoritma sunmuşlardır. Lee ve ark. (2014), her bir düğümün birden fazla anten içerdiği DR protokolü ile çalışan MARC yapısını incelemiştir. Chun ve ark. (2013), kullanıcıların bir, röleler ve hedeflerin ise çok sayıda anten içerdiği bir MARC modelini ele alarak sistemin uçtan uca kesinti olasılığı belirlenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde telsiz iletişim kanallarının modellenmesinde kullanılan ve sistem başarımının belirlenmesinde etkili olan temel kavramlar verilecektir.

3.1. Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal

Bozucu etki olarak sadece toplamsal beyaz Gauss gürültüsünün (additive white Gaussian noise, AWGN) bulunduğu kanal modeli telsiz haberleşme sistemlerinde karşılaşılan en basit kanal tiplerinden birisidir. Bu kanal modelinde alınan işaret y , vericiden iletilen işaret x ile z gürültü sürecinin toplamıdır ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = x + z \quad (3.1)$$

Gauss dağılımına sahip bir rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu (probability density function, pdf) aşağıdaki gibidir:

$$f_N(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(n-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty \leq n \leq \infty \quad (3.2)$$

Burada m ortalamayı, σ^2 varyansı temsil etmektedir.

3.2. Sönümlenmeli Kanallar

AWGN kanalı alıcı ve verici arasında bulunan yansıtıcı nesnelere ve hareketlilik nedeniyle zamanla değişen bir iletim karakteristiğine sahip olan telsiz iletişim kanallarını modellemede yetersiz kalmaktadır. Telsiz iletim ortamındaki saçıcı nesnelere nedeniyle oluşan çok yollu iletim (multipath propagation), gölgeleme (shadowing) ve yol kaybı (path loss) gibi faktörler alıcı antene gelen işaretin genlik ve fazında dalgalanmalar meydana getirerek sönümleme (fading) etkisini oluştururlar.

Sönümlenmeli kanallarda işaretin frekans bileşenlerinin kanal tarafından eşit şekilde etkilendiği bant genişliğine kanalın uyumluluk bant genişliği (coherence bandwidth) denir. Uyumluluk bant genişliği işaret bant genişliğinden yüksek ise düz

(frekans seçici olmayan) sönümlenme oluşurken, uyumluluk bant genişliği işaret bant genişliğinden düşük ise frekans seçici sönümlenme meydana gelir. Düz sönümlenmeli bir telsiz kanalda alıcıda oluşan işaret şu ifade ile belirlenir:

$$y = h.x + z \quad (3.3)$$

Burada h , vericiden gönderilen işareti çarpımsal olarak bozan kanal sönümlenme katsayısını, z ise alıcıda oluşan AWGN terimini belirtmektedir. Gürültü terimi z Gauss dağılımlı bir rastlantı değişkeni olarak modellendiği gibi kanal sönümlenme katsayısı da rastgele dağılmış yansıtıcılar ve çok yol etkisi gibi faktörler nedeniyle bir rastlantı değişkeni olarak modellenir.

Sönümlenmeli kanalları modellemede sıklıkla kullanılan dağılımlardan bazıları Rayleigh, Rician ve Nakagami-m olarak verilebilir.

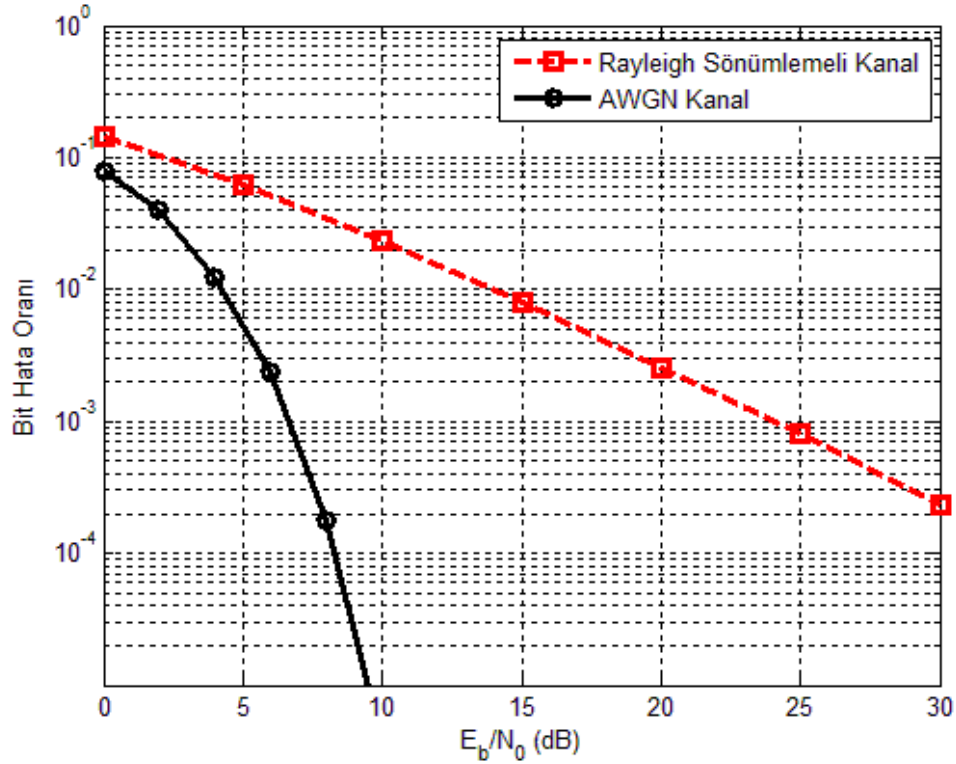
3.2.1. Rayleigh sönümlenmeli kanal

Alıcı ile verici arasında doğrudan görüş hattının (line of sight, LOS) bulunmadığı, ortamdaki saçıcı nesnelere yansıyan işaretlerle iletim sağlandığı kanal tipine Rayleigh sönümlenmeli kanal modeli denir. Saçıcı sayısının yeterince çok olması halinde alınan işaretin zarfı Rayleigh dağılımlı olurken faz $(-\pi, \pi)$ aralığında düzgün dağılımlı bir rastlantı değişkeni olarak modellenebilir. Rayleigh dağılımlı bir X rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde verilebilir:

$$f_X(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/2\sigma^2}, \quad x \geq 0 \quad (3.4)$$

Bu durumda X rastlantı değişkeninin ortalama değeri ve varyansı sırasıyla

$$m_X = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma^2, \quad \sigma_X^2 = \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \sigma^2 \text{ şeklinde olur.}$$



Şekil 3.1. BPSK işaretlemesi için Rayleigh sönümlenmeli kanal ile AWGN kanalın BER performansları

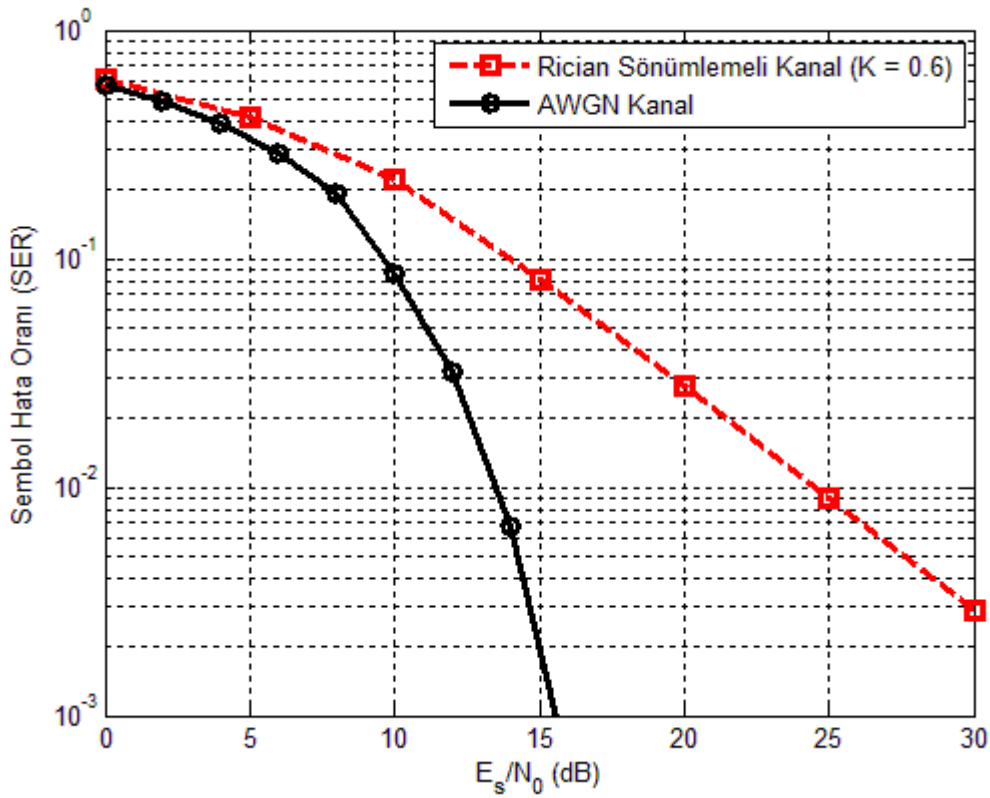
Şekil 3.1’de Rayleigh sönümlenmeli kanal ile AWGN kanalın BPSK işaretlemesi için bit hata oranı (bit error rate, BER) performansı karşılaştırması sunulmuştur. Sistemin SNR değeri E_b / N_0 oranı ile tanımlanmış olup burada E_b bit enerjisini N_0 ise gürültünün güç spektral yoğunluğunu göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü üzere sönümleme telsiz iletişim sistemlerinin performansında önemli bir düşüşe yol açmaktadır.

3.2.2. Rician Sönümlenmeli Kanal

İletişim ortamındaki saçıcı nesnelere yansıyan işaret bileşenlerinin yanı sıra alıcı ile verici arasında LOS bileşeninin de bulunduğu kanal türü Rician sönümlenmeli kanallardır. Saçıcı sayısının yeterince çok olması halinde saçılmalı bileşen Rayleigh dağılımlı olacaktır. LOS hattından gelen işaret bileşenine saçılmalı bileşenler eklendiğinde ise Rician sönümleme modeli elde edilir. Rician dağılımlı bir x rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde verilebilir:

$$f_x(x) = \frac{2x(1+K)}{\Omega} e^{-\frac{(1+K)x^2}{\Omega}} I_0\left(2x\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}\right), \quad x \geq 0 \quad (3.5)$$

Burada $I_0(\cdot)$ birinci tip sıfır mertebeli düzenlenmiş Bessel fonksiyonudur. Ω toplam işaret gücüdür. K , doğrudan gelen ve saçılmış işaret bileşenlerinin güç oranlarını gösteren Rician parametresidir. $K = 0$ durumunda Rayleigh sönümlenmeli kanal, $K = \infty$ durumunda ise sönümleme etkisi ortadan kalkarak AWGN kanalı elde edilir. Şekil 3.2’de 8-PSK modülasyonunun $K = 0.6$ durumunda Rician sönümlenmeli kanallardaki performansı ile AWGN kanaldaki sembol hata oranı (symbol error rate, SER) başarımını karşılaştırılmıştır. Burada E_s sembol enerjisini, N_0 ise gürültünün güç spektral yoğunluğunu göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi sönümleme etkisi telsiz iletişim sistemlerinde önemli performans kayıplarına yol açmaktadır.



Şekil 3.2. Rician sönümlenmeli kanal ile AWGN kanalın 8-PSK işaretlemesi için SER performansları

3.2.3. Nakagami-m sönümlenmeli kanal

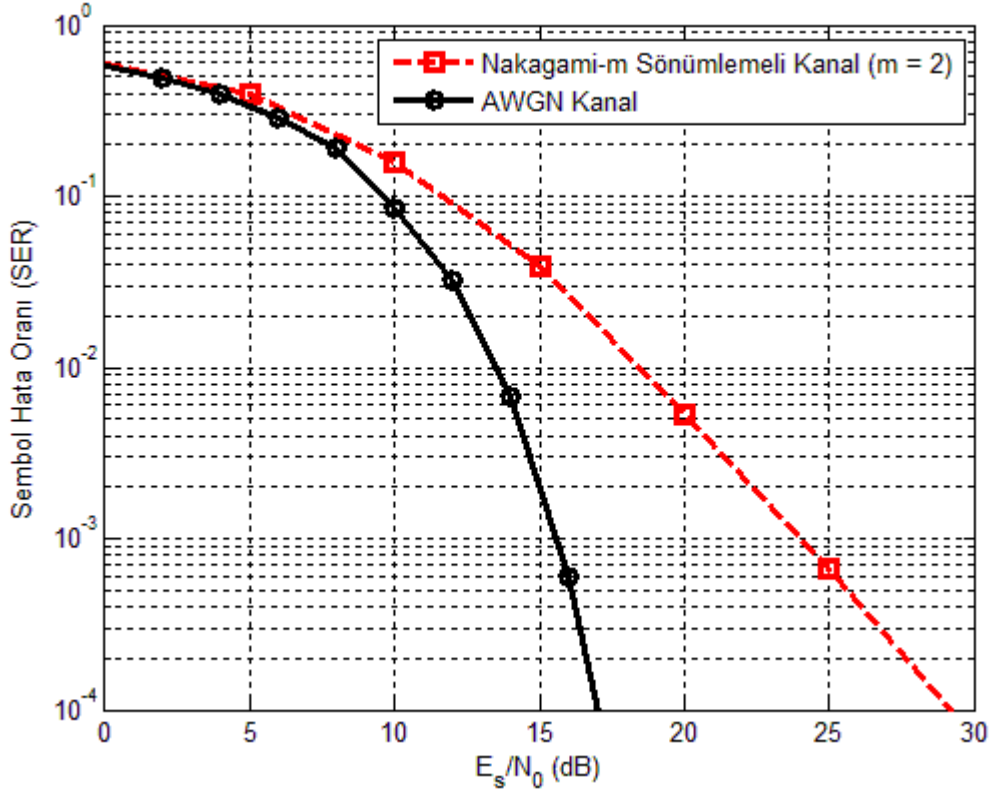
Nakagami-m dağılımı, Rayleigh ve Rician dağılımlarını da kapsayan ve yaygın olarak kullanılan bir telsiz iletişim kanal modelidir. Nakagami sönümlenme parametresi olarak tanımlanan m , $\frac{1}{2}$ ile ∞ arasında değerler alabilir. Nakagami-m dağılımına sahip bir x rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde tanımlıdır:

$$f_x(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right), \quad x \geq 0 \quad (3.6)$$

Burada $m = \frac{1}{2}$ için tek yönlü Gauss kanalı, $m = 1$ olduğunda Rayleigh sönümlenmeli kanal, $m \rightarrow \infty$ için ise AWGN kanalı elde edilmektedir. Ayrıca Rician parametresi K ile Nakagami sönümlenme parametresi m arasında (3.7)'deki gibi bir ilişki bulunmaktadır. (Simon ve Alouini, 2000).

$$K \cong \frac{\sqrt{m^2 - m}}{m - \sqrt{m^2 - m}} \quad (3.7)$$

Şekil 3.3'te 8-PSK modülasyonunun $m = 2$ durumunda Nakagami-m sönümlenmeli kanallardaki performansı ile AWGN kanaldaki SER başarımı karşılaştırılmıştır. Burada E_s sembol enerjisini, N_0 ise gürültünün güç spektral yoğunluğunu göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi sönümlenme etkisi telsiz iletişim sistemlerinde önemli performans düşüşlerine neden olmaktadır.



Şekil 3.3. Nakagami-m sönümlmeli kanal ($m = 2$) ile AWGN kanalın 8-PSK işaretlemesi için SER performansları

3.3. Çeşitleme Teknikleri

Çeşitleme sönümlenmenin bozucu etkileri ile mücadele etmek ve iletim için gereken gücü azaltmak üzere önerilmiş bir teknik olup iletilmek istenen işaretin birden fazla kopyasının bağımsız sönümlmeli kanallardan alıcıya gönderilmesi prensibine dayanır. Gönderilen bu kopyaların tümünün yüksek sönümlmeye maruz kalma olasılığı düşük olduğundan alıcıda uygun birleştirme teknikleri kullanılarak yüksek performanslı bir iletim gerçekleştirilebilir. Önde gelen çeşitleme yaklaşımları zaman çeşitlemesi, frekans çeşitlemesi ve anten çeşitlemesi olarak verilebilir.

3.3.1. Zaman çeşitlemesi

Zaman çeşitlemesinde mesaj işaretinin kopyaları farklı zaman aralıklarında iletilerek birbirinden bağımsız sönümlenme elde edilir. Bu teknikte birbiri ardına gelen zaman aralıkları arasında en az kanal impuls yanıtının değişmediği süre olarak

tanımlanan uyumluluk zamanı kadar fark olmalıdır. İşaret kopyaları arasında bu şekilde zaman aralıkları bırakılarak birbirine yakın sönümlenme seviyelerinin oluşmasının önüne geçilir. Bu teknik hızlı değişen telsiz kanallarda kullanılmaya daha uygundur.

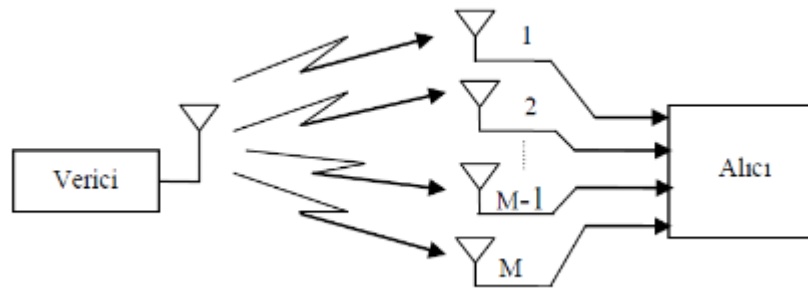
3.3.2. Frekans çeşitlemesi

Frekans çeşitlemesinde mesaj işaretinin kopyaları farklı frekanslar kullanılarak iletilirler. Alınan işaretlerin bağımsız sönümlenmeye uğrayabilmeleri için kullanılan frekanslar arasında en az kanalın uyumluluk bant genişliği kadar fark olması gereklidir. Frekans çeşitlemesi tekniği uyumluluk bant genişliği küçük olan frekans seçici sönümlenmeli kanallarda kullanıma daha elverişlidir.

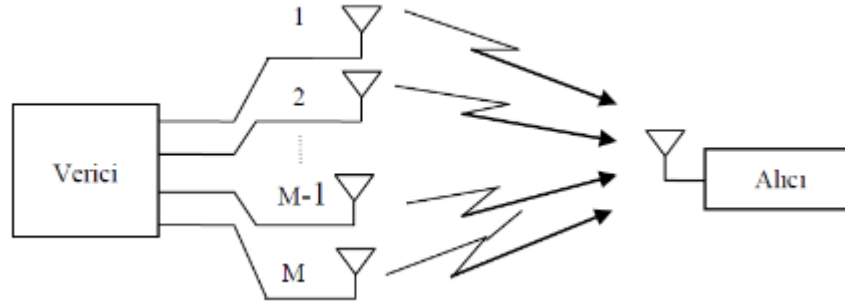
3.3.3. Anten çeşitlemesi

Klasik anten çeşitlemeli sistemlerde alıcı ve/veya vericide fiziksel anten dizileri konumlandırılarak bağımsız sönümlenmeli kanallar oluşturulur ve çeşitleme kazancı elde edilir.

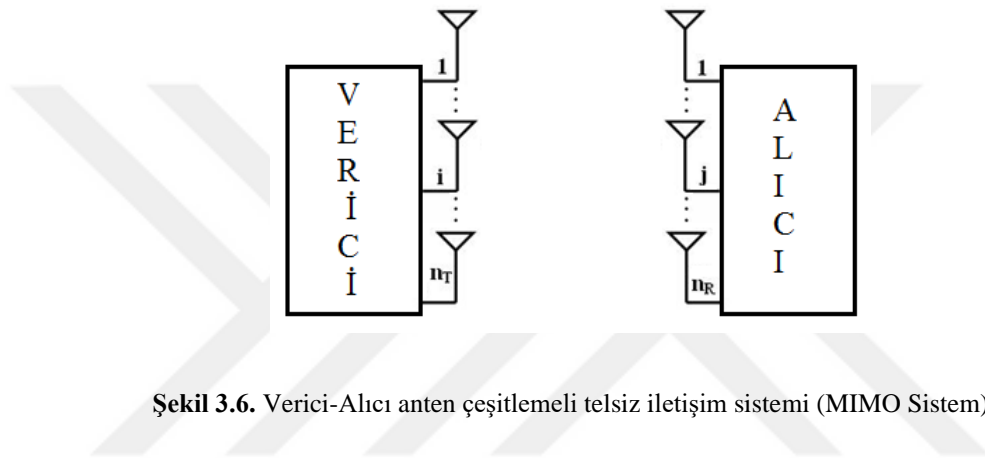
Klasik anten çeşitlemeli sistemler fiziksel anten dizilerinin konumlandırıldığı birime göre alıcı, verici ve verici-alıcı anten çeşitlemesi olmak üzere üç kategoride incelenebilir. Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da anten çeşitlemeli sistemler görülmektedir.



Şekil 3.4. Alıcı anten çeşitlemeli telsiz iletişim sistemi (Single input multiple output system, SIMO sistem)

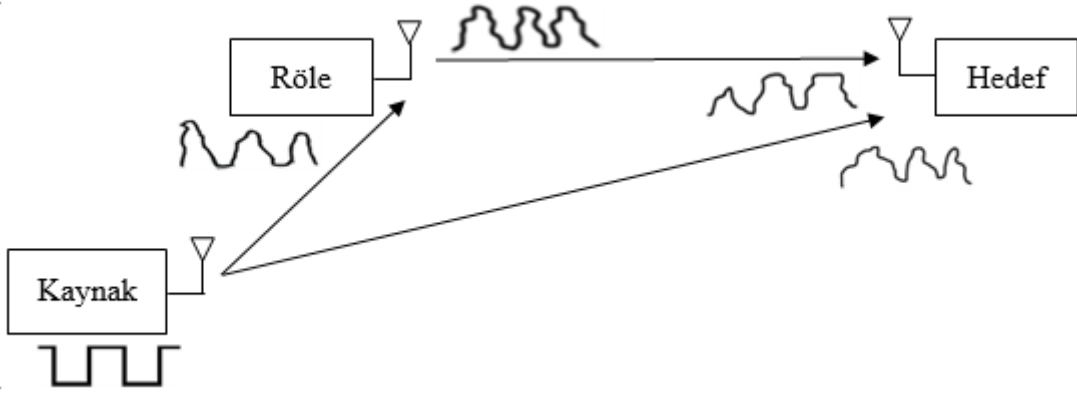


Şekil 3.5. Verici anten çeşitlemeli telsiz iletişim sistemi (Multiple input single output system, MISO sistem)

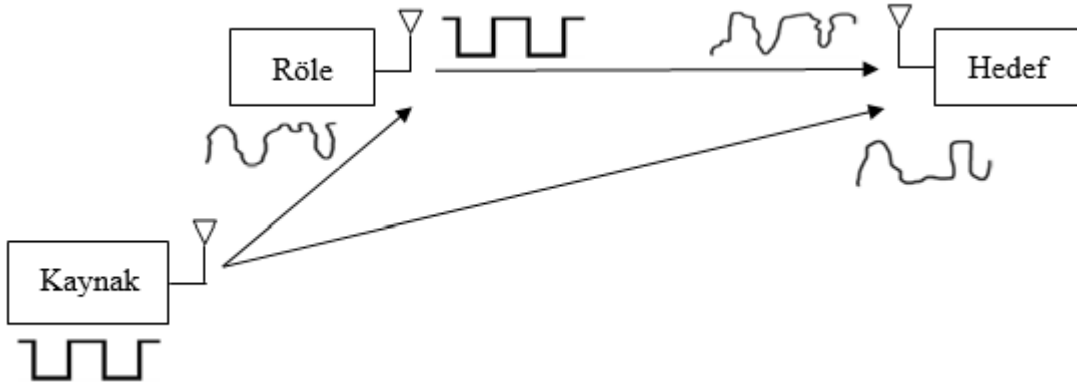


Şekil 3.6. Verici-Alıcı anten çeşitlemeli telsiz iletişim sistemi (MIMO Sistem)

İşbirlikli çeşitleme adı verilen bir başka anten çeşitleme yönteminde ise verici ile alıcı arasındaki iletişime ortamda bulunan ve röle olarak isimlendirilen diğer telsiz terminallerin yardım etmesi, böylelikle sanal anten dizileri oluşturularak anten çeşitleme kazancı elde edilmesi söz konusudur. İşbirlikli çeşitlenmeli sistemlerde röle(ler)de yapılan işaret işleme yöntemine bağlı olarak iki tür aktarma protokolü mevcuttur. Bunlardan AR protokolünde röle(ler) kaynaktan gelen gürültülü işareti doğrudan kuvvetlendirerek hedefe iletir. DR protokolünde ise röle kaynak verisini elde ettikten sonra hedefe gönderir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de sırasıyla AR ve DR protokolleri gösterilmektedir. Bu tez çalışmasında DR protokolü tabanlı MARC yapıları incelenmiştir.



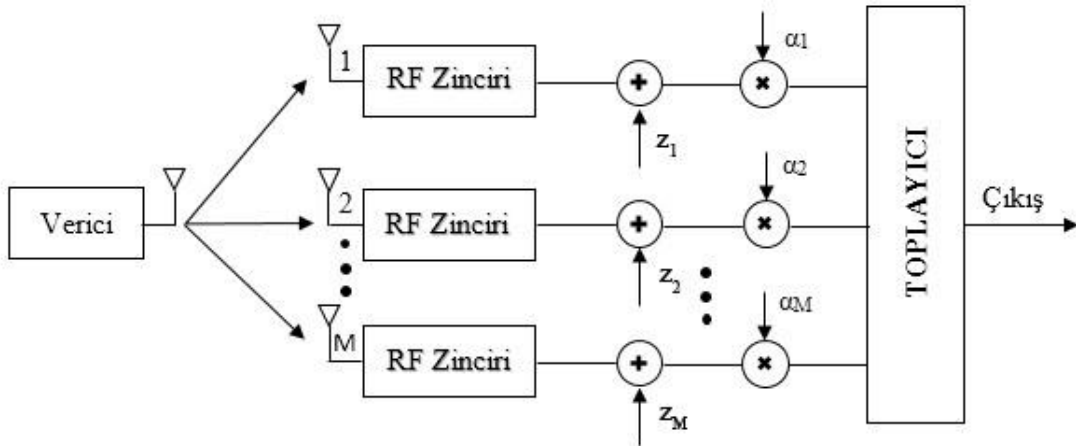
Şekil 3.7. AR protokolü



Şekil 3.8. DR protokolü

3.4. Maksimum Oran Birleştirme (Maximum Ratio Combining, MRC) Tekniği

Aynı işaretin birbirinden bağımsız sönümlenmeye maruz kalan farklı kopyalarının çeşitleme teknikleri kullanılarak alıcı tarafına iletilmesi halinde bu işaretler alıcıda birleştirilerek toplam SNR değerinde artış sağlanmaya çalışılır. Literatürde anahtarlamalı birleştirme, seçmeli birleştirme, eşit kazançlı birleştirme ve MRC gibi birleştirme teknikleri bulunmaktadır. Bunlardan MRC yöntemi optimum birleştirme yöntemi olarak bilinir. Bununla birlikte MRC tekniği bütün kanallara ait sönümlenme katsayılarının (h_i) bilinmesini gerektirdiğinden karmaşıklığı diğer birleştirme tekniklerine nispeten yüksektir. Doğrusal bir birleştirme yöntemi olan MRC yaklaşımının blok şeması Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Alıcı anten çeşitlemeli sistemde MRC tekniğinin blok şeması

Her işaretin belli katsayılarla çarpılıp toplandığı bu teknikte y_i , i . kanaldan alınan işaret olmak üzere ($i = 1, \dots, M$) birleştirici çıkışındaki alınan işaret şu şekilde ifade edilebilir:

$$y = \sum_{i=1}^M \alpha_i y_i \quad (3.8)$$

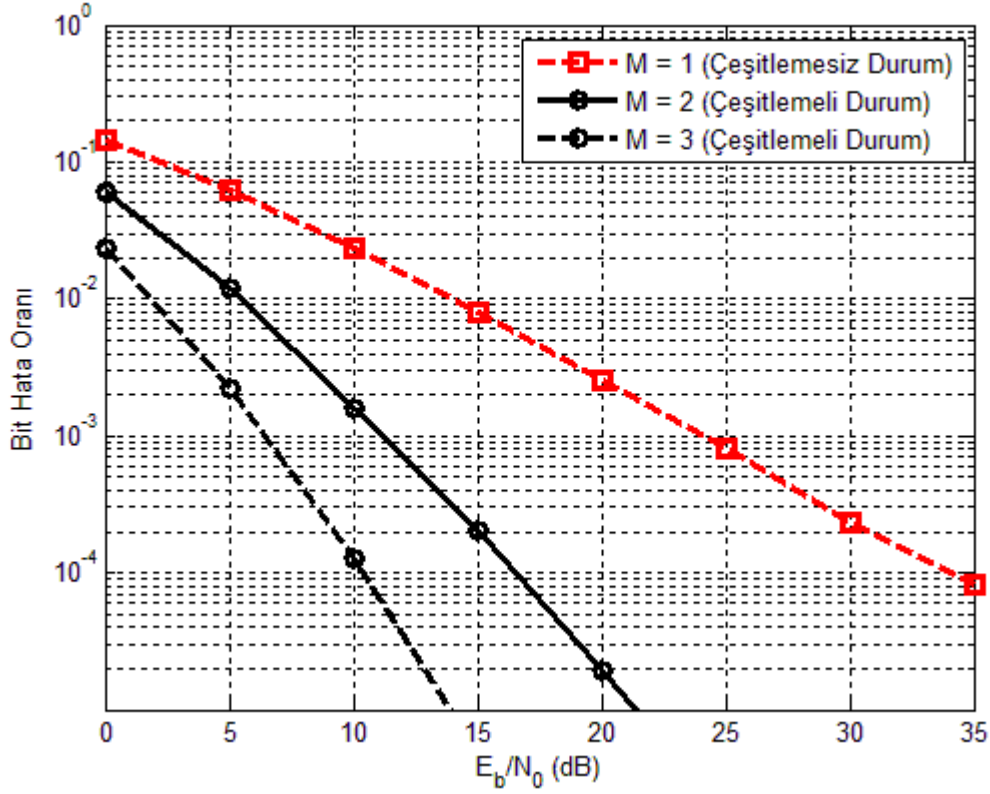
Burada geçen katsayılar aşağıdaki gibi alınmalıdır:

$$\alpha_i = h_i^* \quad (3.9)$$

Antenlerden alınan işaretler ise şu şekilde verilebilir:

$$y_i = h_i x + z_i \quad (3.10)$$

Burada z_i gürültüyü, x ise vericiden gönderilen işareti göstermektedir.

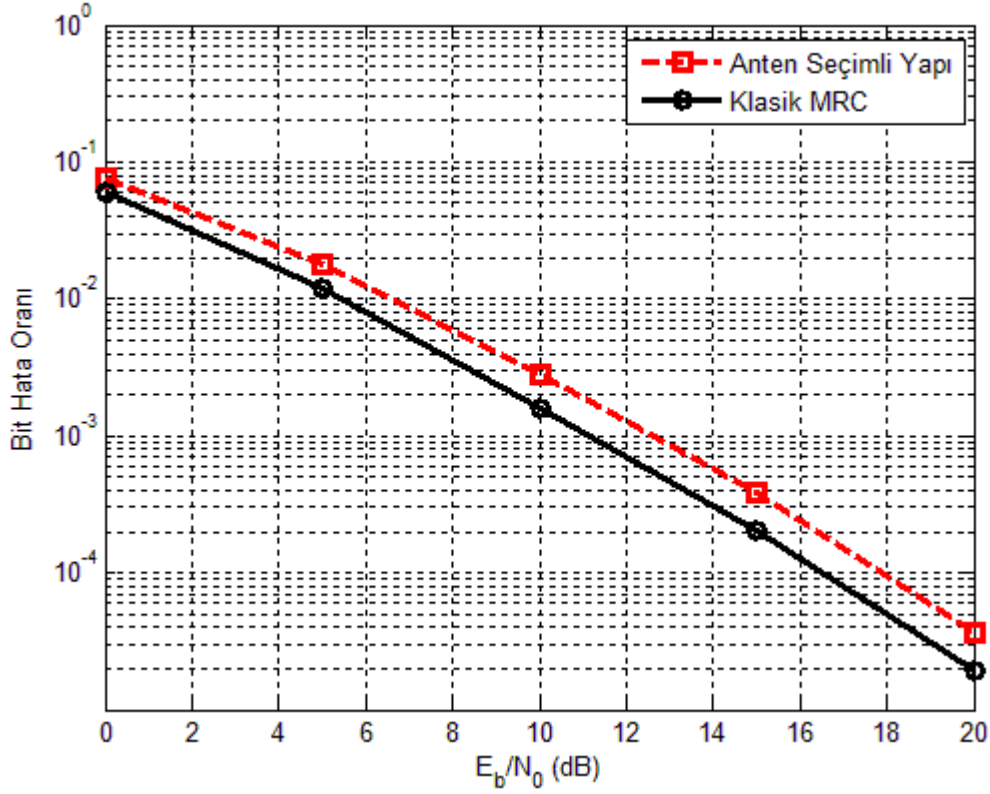


Şekil 3.10. MRC tekniğinin kullanıldığı alıcı anten çeşitlenmeli sistemlerin BPSK işaretlemesi ve Rayleigh sönümlenmesi durumunda BER performans eğrileri

Şekil 3.10'da BPSK işaretlemesi için anten çeşitlenmeli sistemlerin MRC tekniği ile performans eğrileri sunulmuştur. Bu eğriler elde edilirken h_i sönümlenme katsayıları sıfır ortalamalı ve boyut başına $1/2$ varyanslı kompleks Gauss rastgele değişkenleri olarak modellenerek Rayleigh sönümlenmeli durum ele alınmıştır. z_i gürültü terimleri ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0 / 2$ varyanslı kompleks Gauss rastgele değişkenleri olarak tanımlanmışlardır. E_b ise bit enerjisini göstermektedir. Şekilde verilen BER eğrileri incelendiğinde alıcıda anten sayısı (M) arttıkça performansın üstel bir şekilde iyileşerek anten çeşitleme kazancı elde edildiği görülmektedir.

3.5. Anten Seçim Tekniği

Verici ve/veya alıcıda çok sayıda anten konumlandırma fikri telsiz iletişim sistemlerinin kapasitesinde önemli iyileşmeler sunmasına karşın her bir antene bağlanması gereken RF zincirleri nedeniyle beraberinde önemli boyut, maliyet ve karmaşıklık artışı getirmektedir.



Şekil 3.11. BPSK işaretlemesi ve iki alıcı anten ($M = 2$) durumunda MRC tekniğinin kullanıldığı alıcı anten çeşitlemeli yapı ile anten seçimli yapının performans karşılaştırması

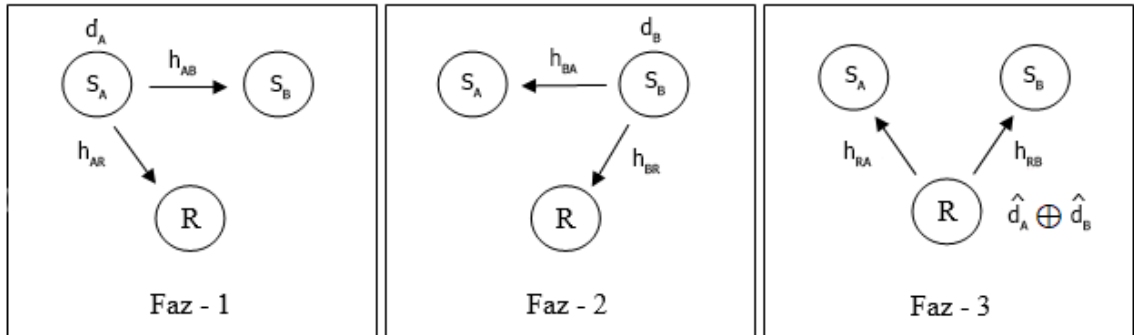
Çok sayıda anten arasından en iyi kümenin seçilerek iletişimde aktif hale getirilmesi prensibine dayanan anten seçim tekniği, klasik çok antenli yapıların sağladığı çeşitleme kazancı seviyesini muhafaza ederken gerekli RF zinciri sayısında düşüş sağlayarak boyut, maliyet ve karmaşıklık artışlarının önüne geçebilmektedir.

Şekil 3.11'de anten seçimli alıcı anten çeşitlemeli yapı ile MRC tekniğinin kullanıldığı klasik alıcı anten çeşitlemeli sistemin performansı toplam anten sayısı $M = 2$ alınarak karşılaştırılmıştır. h_1 ve h_2 sistemdeki Rayleigh sönümlenme katsayılarını göstermektedir. Kanal kazancı ($|h_i|^2$, $i \in \{1, 2\}$) daha büyük olan alıcı anten seçilerek aktif hale getirilmiş ve seçilen aktif alıcı antendeki işaret demodüle edilmiştir. Görüldüğü gibi 10^{-4} seviyesindeki bir BER için anten seçimli sistemde klasik yapıya göre yaklaşık 1.6 dB'lik bir SNR kaybı oluşurken iki eğrinin eğimi aynı olmaktadır. Bu durum anten seçim tekniğinin çeşitleme kazancında herhangi bir kayba neden olmadığını göstermektedir.

3.6. Ağ Kodlaması

Kullanıcı paketlerinin akıllı yöntemler kullanılarak birleştirilmesi fikrine dayanan ağ kodlaması tekniği, işbirlikli telsiz iletişim sistemlerinin spektral verimliliğini artırmaya yönelik ortaya konmuş yenilikçi bir yaklaşımdır (Ahlsvede ve ark., 2000). Literatürdeki önde gelen ağ kodlamalı işbirlikli telsiz iletişim modellerinden birisi iki yönlü röleli iletişim (two-way relaying, bi-directional relaying, TWC) olarak bilinen iki kullanıcının bir röle aracılığıyla karşılıklı bağımsız veri iletimi gerçekleştirdikleri yapıdır. Bir başka önemli sistem modeli ise iki veya daha fazla kullanıcının bağımsız veri bloklarını müşterek bir hedefe bir röle terminali üzerinden ilettiği çoklu erişim röle kanalıdır (multiple access relay channel, MARC). Bu bölümde DR protokolünün kullanıldığı TWC ve MARC yapılarının performansları incelenecektir.

3.6.1. TWC için sistem modeli



Şekil 3.12. Üç fazlı ağ kodlamalı TWC protokolü

Şekil 3.12'de üç fazdan oluşan bir TWC modeli gösterilmiştir. Tüm terminallerin tek anten içerdiği, yarı çift yönlü çalıştığı ve iletimde BPSK işaretlenmesinin kullanıldığı durum ele alınmıştır. İletim protokolünün ilk fazı S_A kullanıcısının iletimine ayrılmış olup bu fazdaki iletim sonucu dinlemedeki S_B kullanıcısı ile röle terminalinde (R) oluşan işaretler sırasıyla aşağıdaki gibi verilebilir:

$$y_{B,1} = h_{AB} \sqrt{E_s} x_A + z_{B,1} \quad (3.11)$$

$$y_{R,1} = h_{AR} \sqrt{E_s} x_A + z_{R,1} \quad (3.12)$$

Burada E_s sembol enerjisini, $x_A = (-1)^{d_A}$ ve $d_A \in \{0, 1\}$ S_A kullanıcılarından iletilen BPSK sembolünü ve veri bitini, h_{AB} ve h_{AR} sırasıyla $S_A \rightarrow S_B$ ve $S_A \rightarrow R$ linklerine ilişkin sönmleme katsayılarını, $z_{B,1}$ ve $z_{R,1}$ ise S_B ve R terminallerinde oluşan gürültüyü göstermektedir.

İkinci faz S_B kullanıcılarının iletimine ayrılmıştır. Bu fazdaki iletim sonucu dinlemedeki terminallerde oluşan işaretler şu şekildedir:

$$y_{A,2} = h_{BA} \sqrt{E_s} x_B + z_{A,2} \quad (3.13)$$

$$y_{R,2} = h_{BR} \sqrt{E_s} x_B + z_{R,2} \quad (3.14)$$

(3.13) ve (3.14) ifadelerinde $x_B = (-1)^{d_B}$ S_B kullanıcılarından iletilen BPSK sembolünü, $d_B \in \{0, 1\}$ bu kullanıcının veri bitini, h_{BA} ve h_{BR} sırasıyla $S_B \rightarrow S_A$ ve $S_B \rightarrow R$ linklerine ilişkin sönmleme katsayılarını $z_{A,2}$ ve $z_{R,2}$ ise sırasıyla S_A ve R terminallerinde oluşan gürültü terimlerini göstermektedir.

Röle terminali birinci ve ikinci fazda aldığı işaretlerden $\hat{d}_A, \hat{d}_B \in \{0, 1\}$ ile gösterilen S_A ve S_B kullanıcılarının veri biti kestirimlerini elde eder. Daha sonra bunları $d_R = \hat{d}_A \oplus \hat{d}_B$ işlemi ile birleştirerek ağ kodlanmış veri bitini oluşturur ve üçüncü faz iletimini aşağıdaki gibi gerçekleştirir:

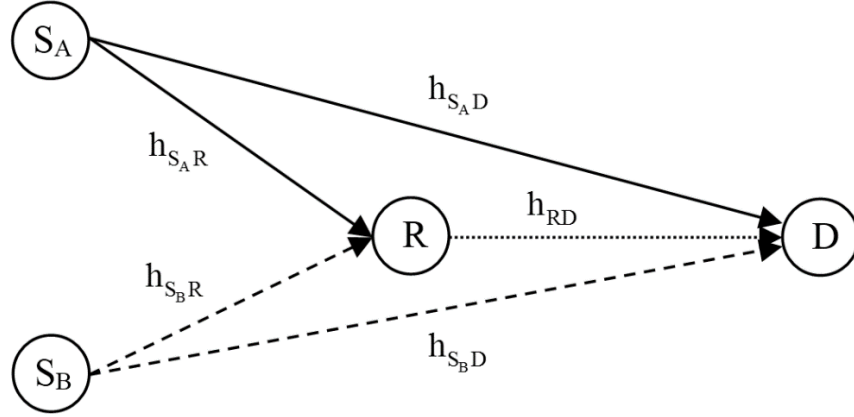
$$y_{A,3} = h_{RA} \sqrt{E_s} x_R + z_{A,3} \quad (3.15)$$

$$y_{B,3} = h_{RB} \sqrt{E_s} x_R + z_{B,3} \quad (3.16)$$

(3.15) ve (3.16) ifadelerinde $x_R = (-1)^{d_R}$ ağ kodlanmış BPSK sembolü, h_{RA} ve h_{RB} sırasıyla $S_R \rightarrow S_A$ ve $S_R \rightarrow S_B$ linklerine ilişkin sönmleme katsayılarını, $z_{A,3}$ ve $z_{B,3}$ ise ilgili alıcı terminallerde oluşan gürültü terimlerini göstermektedir. Bu çalışmada kanallarda karşılıklılık (reciprocity) prensibinin (Smith, 2004) geçerli olduğu durum ($h_{ij} = h_{ji}$) ele alınmıştır. $i \rightarrow j$ ($i \in \{A, B\}$, $j \in \{A, B, R\}$) linkine ilişkin anlık ve ortalama SNR değerleri sırasıyla $\gamma_{ij} = |h_{ij}|^2 E_s / N_0$ ve $\bar{\gamma}_{ij} = E[|h_{ij}|^2] E_s / N_0$ ifadeleri ile

belirlenmektedir. Burada $E[\cdot]$ operatörü beklenen değer almaktadır. İşarete eklenen toplamsal beyaz Gauss kanal gürültü terimleri ise ortalaması sıfır ve boyut başına varyansı $N_0/2$ olan karmaşık Gauss rastlantı değişkenleri biçiminde modellenmektedir.

3.6.2. MARC için sistem modeli



Şekil 3.13. İki kullanıcılı MARC yapısı

Şekil 3.13'te sunulan MARC yapısı, iki kullanıcının ortak bir hedefe bir röle yardımı ile veri ilettiği bir sistem modelidir. Ağdaki tüm terminallerin tek anten içerdiği, yarı çift yönlü çalıştığı ve iletimde BPSK işaretlemesinin kullanıldığı durum ele alınmıştır. İletim protokolünün ilk fazı S_A kullanıcısının iletimine ayrılmış olup bu fazdaki iletim sonucu dinlemedeki hedef (D) ile röle terminalinde (R) oluşan işaretler sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$y_{D,1} = h_{S_A,D} \sqrt{E_s} x_A + z_{D,1} \quad (3.17)$$

$$y_{R,1} = h_{S_A,R} \sqrt{E_s} x_A + z_{R,1} \quad (3.18)$$

Burada E_s sembol enerjisini, $x_A = (-1)^{d_A}$ ve $d_A \in \{0,1\}$ S_A kullanıcısından iletilen BPSK sembolünü ve veri bitini, $h_{S_A,D}$ ve $h_{S_A,R}$ sırasıyla $S_A \rightarrow D$ ve $S_A \rightarrow R$ linklerine ilişkin sönmüleme katsayılarını, $z_{D,1}$ ve $z_{R,1}$ ise D ve R terminallerinde birinci fazda oluşan gürültüyü göstermektedir.

İkinci faz, S_B kullanıcısının iletimine ayrılmıştır. Bu fazdaki iletim sonucu dinlemedeki terminalerde oluşan işaretler şu şekildedir:

$$y_{D,2} = h_{S_B D} \sqrt{E_s} x_B + z_{D,2} \quad (3.19)$$

$$y_{R,2} = h_{S_B R} \sqrt{E_s} x_B + z_{R,2} \quad (3.20)$$

(3.19) ve (3.20) ifadelerinde $x_B = (-1)^{d_B}$ S_B kullanıcısından iletilen BPSK sembolünü, $d_B \in \{0, 1\}$ bu kullanıcının veri bitini, $h_{S_B D}$ ve $h_{S_B R}$ sırasıyla $S_B \rightarrow D$ ve $S_B \rightarrow R$ linklerine ilişkin sönmüleme katsayılarını, $z_{D,2}$ ve $z_{R,2}$ ise sırasıyla D ve R terminalerinde ikinci fazda meydana gelen gürültü terimlerini göstermektedir.

Röle terminali birinci ve ikinci fazda aldığı işaretlerden $\hat{d}_A, \hat{d}_B \in \{0, 1\}$ ile gösterilen S_A ve S_B kullanıcılarının veri biti kestirimlerini elde eder. Daha sonra bunları $d_R = \hat{d}_A \oplus \hat{d}_B$ işlemi ile birleştirerek ağ kodlanmış veri bitini oluşturur ve üçüncü faz iletimini aşağıdaki gibi gerçekleştirir:

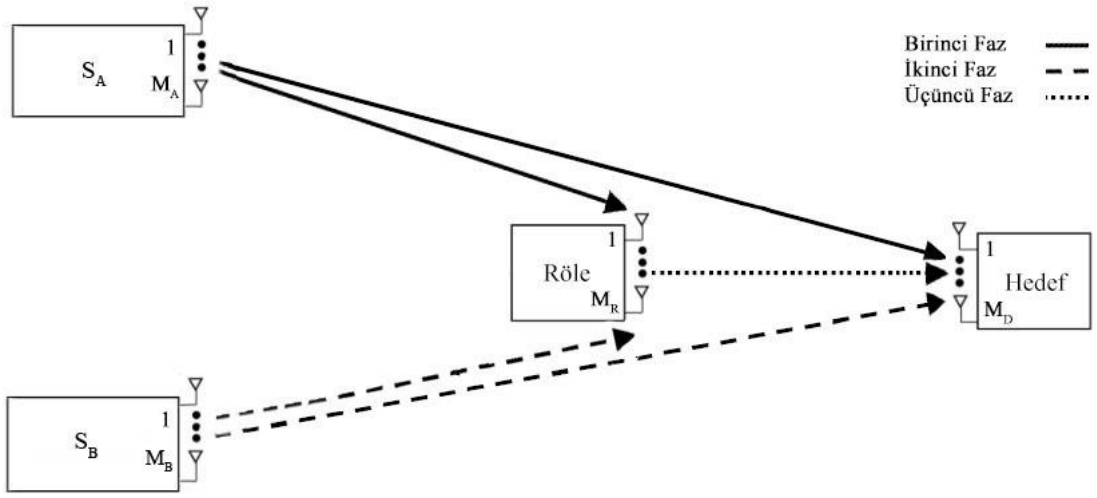
$$y_{D,3} = h_{RD} \sqrt{E_s} x_R + z_{D,3} \quad (3.21)$$

(3.21) ifadesinde h_{RD} , $R \rightarrow D$ linkine ilişkin sönmüleme katsayısını, $x_R = (-1)^{d_R}$ ağ kodlanmış BPSK sembolü ve $z_{D,3}$ hedefte oluşan gürültüyü göstermektedir.

İşarete eklenen toplamsal beyaz Gauss kanal gürültü terimleri ise ortalaması sıfır ve boyut başına varyansı $N_0/2$ olan karmaşık Gauss rastlantı değişkenleri biçiminde modellenmektedir. $i \rightarrow j$ ($i \in \{S_A, S_B, R\}$, $j \in \{R, D\}$) linkine ilişkin anlık ve ortalama SNR değerleri sırasıyla $\gamma_{ij} = |h_{ij}|^2 E_s / N_0$ ve $\bar{\gamma}_{ij} = E[|h_{ij}|^2] E_s / N_0$ ifadeleri ile belirlenmektedir.

3.6.3. Anten seçimli MARC için sistem modeli

Bu tez çalışmasında Şekil 3.14'te gösterilmiş olan iki kullanıcının ortak bir hedefe bir röle yardımıyla iletim yaptığı çoklu erişim röle kanalı incelenmektedir. S_i ($i = A, B$) kullanıcısına ait veri bloğu $d_i = [d_i(1) \ d_i(2) \ \dots \ d_i(L)]$ şeklindedir ve iletimde kullanılan BPSK sembol bloğu ise $x_i = [x_i(1) \ x_i(2) \ \dots \ x_i(L)]$ olarak verilmektedir ($x_i(n) = (-1)^{d_i(n)}$, $n = 1, 2, \dots, L$).



Şekil 3.14. Rölede ve Hedefte Anten Dizilerinin Bulunduğu Çoklu Erişim Röle Kanalı

Sistemdeki tüm terminallerin aynı zaman diliminde ve aynı frekans aralığında hem alıcı hem de verici olarak çalışmadıkları, yarı çift yönlü (half-duplex) modda görev yaptıkları varsayılmaktadır. Kullanıcı terminallerindeki anten sayıları M_A ve M_B ile gösterilirken röle ve hedef terminallerindeki anten sayıları sırasıyla M_R ve M_D olarak alınmaktadır. S_i ($i = A, B$) kullanıcısı ile röle ve hedef terminalleri arasındaki iletişim kanallarını gösteren $M_i \times M_R$ ve $M_i \times M_D$ boyutlu kanal matrisleri sırasıyla H_i ve G_i olarak verilirken röle-hedef arasındaki MIMO sistem ise $M_R \times M_D$ boyutlu ve elemanları $\alpha_{p,q}$ ($p = 1, 2, \dots, M_R$ ve $q = 1, 2, \dots, M_D$) olan A kanal matrisi ile gösterilmektedir. Sistemdeki tüm kanalların Rician sönümlmeli oldukları varsayılmıştır.

İletim eşit süreli üç fazdan oluşmaktadır. İlk faz S_A kullanıcının iletimine ayrılmış olup bu faz sonunda röle ve hedefte oluşan işaretler sırasıyla şu şekilde verilebilir:

$$y_{AR}(n) = h_{k_1, u_1}^A \sqrt{E_s} x_A(n) + z_{AR}(n) \quad (3.22)$$

$$y_{AD}(n) = g_{k_1, v_1}^A \sqrt{E_s} x_A(n) + z_{AD}(n) \quad (3.23)$$

Burada k_1 , u_1 ve v_1 sırasıyla S_A , röle ve hedef terminallerindeki seçilip aktif edilen antenlerin indisleridir. h_{k_1, u_1}^A ve g_{k_1, v_1}^A ise sırasıyla H_A ve G_A kanal matrislerinin ilgili elemanlarıdır. z_{AR} ve z_{AD} ise gürültü terimlerini belirtmektedir. İkinci faz S_B kullanıcının iletimine ayrılmış olup bu faz sonunda röle ve hedefte oluşan işaretler sırasıyla şu şekildedir:

$$y_{BR}(n) = h_{k_2, u_2}^B \sqrt{E_s} x_B(n) + z_{BR}(n) \quad (3.24)$$

$$y_{BD}(n) = g_{k_2, v_2}^B \sqrt{E_s} x_B(n) + z_{BD}(n) \quad (3.25)$$

k_2 , u_2 ve v_2 sırasıyla S_B , röle ve hedef terminallerindeki seçilip aktif edilen antenlerin indisleridir. h_{k_2, u_2}^B ve g_{k_2, v_2}^B ise sırasıyla H_B ve G_B kanal matrislerinin ilgili elemanlarıdır. z_{BR} ve z_{BD} ise gürültü terimlerini göstermektedir.

Röle ilk iki faz boyunca kullanıcılardan aldığı iletimleri $\hat{x}_A(n) = \text{sgn} \left\{ \text{Re} \left\{ y_{AR}(n) (h_{k_1, u_1}^A)^* \right\} \right\}$ ve $\hat{x}_B(n) = \text{sgn} \left\{ \text{Re} \left\{ y_{BR}(n) (h_{k_2, u_2}^B)^* \right\} \right\}$ işlemleri ile çözdükten sonra $x_R(n) = \hat{x}_A(n) \hat{x}_B(n)$ işlemi ile ağ kodlanmış BPSK sembol bloğunu elde eder. Burada $\text{sgn}(\cdot)$ operatörü reel bir sayının işaretini alırken $\text{Re}(\cdot)$ operatörü kompleks bir sayının reel kısmını almaktadır. Röle ele ettiği ağ kodlanmış sembolü üçüncü fazda hedefe iletir. Son fazda hedefte oluşan işaret aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$y_{RD}(n) = \alpha_{u_3, v_3} \sqrt{E_s} x_R(n) + z_{RD}(n) \quad (3.26)$$

u_3 ve v_3 sırasıyla röle ve hedef terminalindeki seçilip aktif edilen antenlerin indisleridir. α_{u_3, v_3} ise sırasıyla A kanal matrisinin ilgili elemanıdır. z_{RD} ise gürültü terimidir.

Yukarıda verilen ifadelerde E_s sembol iletim enerjisini belirtmektedir. Gürültü terimleri bağımsız, ortalaması sıfır ve boyut başına varyansı $N_0/2$ olan kompleks Gauss rastlantı değişkenleri biçiminde modellenmiştir. Bu durumda birinci fazda link anlık SNR değerleri $\gamma_{AR} = E_s |h_{k_1 u_1}|^2 / N_0$ ve $\gamma_{AD} = E_s |g_{k_1 v_1}|^2 / N_0$, ikinci fazda link anlık SNR değerleri $\gamma_{BR} = E_s |h_{k_2 u_2}|^2 / N_0$ ve $\gamma_{BD} = E_s |g_{k_2 v_2}|^2 / N_0$, ve üçüncü faz linkinin anlık SNR değeri $\gamma_{RD} = E_s |\alpha_{u_3, v_3}|^2 / N_0$ şeklinde belirlenir.

3.7. Hata Yayılımıyla Mücadele Teknikleri

İşbirlikli haberleşme sistemlerinde röle, çeşitli aktarma yöntemlerini kullanarak kaynaktan aldığı işareti işler ve hedefe iletir. Sistem performansını doğrudan etkileyen bu yöntemlerden en yaygın iki aktarma stratejisi DR ve AR olarak verilebilir. DR tekniğinde röle kaynak işaretini çözüp tekrar modüle ederek hedefe iletirken AR tekniğinde kaynaktan gelen gürültülü işaret kuvvetlendirilerek aktarılır. DR tekniğinin en önemli dezavantajı röledeki sezim hataları sonucu ortaya çıkan hata yayılımı probleminin sebep olduğu performans düşüşleridir (Onat ve ark., 2008). Öte yandan işaretin yanı sıra gürültünün de kuvvetlendirilerek iletiliyor olması AR tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde karşılaşılan en önemli sorundur. Literatürde bu iki tekniği değişik durumlarda karşılaştıran çalışmalar bulunmaktadır (Levin ve Loyka, 2012; Farhadi ve Beaulieu, 2009; Fan ve Thompson, 2009). Kodlama teknikleri ile kullanıma çok elverişli oluşu DR tekniğinin AR tekniğine göre üstün tarafı olup (Levin ve Loyka, 2012) bu tez çalışmasında DR protokolü üzerine çalışılmıştır.

Hata yayılımı sonucunda sistemin uçtan uca SNR değerinde azalmalar ve sistem performansında kayda değer düşüşler meydana gelir. Sayısal aktarmalı işbirlikli iletişim sistemlerinde hata yayılımı ile mücadele için önerilmiş belli başlı teknikler maksimum olabilirlikli (maximum likelihood, ML) sezim, işbirlikli maksimum oran birleştirme (Cooperative MRC, C-MRC), logaritmik olabilirlik oranı (Log-Likelihood Ratio, LLR) tabanlı iletim, SNR tabanlı seçimli aktarma (Selective Relaying, SR) ve sanal gürültü (Virtual Noise, VN) tabanlı sezim olarak verilebilir. Aşağıda verilen alt bölümlerde bu

teknikler hakkında genel bilgiler Şekil 3.8’de görülen kaynak, röle ve hedeften meydana gelen üç terminalli DR tabanlı işbirlikli ağ esas alınarak sunulmuştur. Söz konusu sistemde h_{SD} , h_{SR} ve h_{RD} sırasıyla kaynak-hedef, kaynak-röle ve röle-hedef arasındaki kanalların sönmüleme katsayılarını göstermekte olup boyut başına ortalaması sıfır ve varyansı $1/2$ olan kompleks rastlantı değişkenleri biçiminde modellenmektedir. E_s sembol enerjisi ve N_0 gürültünün güç spektral yoğunluğu olmak üzere ilgili linklerin

anlık SNR değerleri $\gamma_{SD} = \frac{E_s |h_{SD}|^2}{N_0}$, $\gamma_{SR} = \frac{E_s |h_{SR}|^2}{N_0}$ ve $\gamma_{RD} = \frac{E_s |h_{RD}|^2}{N_0}$ olarak

tanımlanabilir. İletişim protokolü iki fazdan oluşmaktadır. İlk fazda kaynak iletimde röle ve hedef dinlemedir. İlk faz boyunca alıcılarda oluşan işaretler şu şekilde verilebilir:

$$y_{SD} = h_{SD} \sqrt{E_s} x + z_{SD} \quad (3.27)$$

$$y_{SR} = h_{SR} \sqrt{E_s} x + z_{SR} \quad (3.28)$$

Burada $x \in \{-1, +1\}$ BPSK veri sembolünü, z_{SD} ve z_{SR} ise gürültü terimlerini göstermektedir. İkinci fazda röleden iletilen terim \hat{x} olmak üzere ikinci fazda hedefte meydana gelen işaret şöyle verilebilir:

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{E_s} \hat{x} + z_{RD} \quad (3.29)$$

(3.29) ifadesinde z_{RD} gürültüyü belirtmektedir. Tüm gürültü terimleri boyut başına ortalaması sıfır ve varyansı $N_0/2$ olan kompleks Gauss rastlantı değişkenleri biçiminde modellenmektedir.

3.7.1. ML tabanlı sezim

ML tabanlı sezim yönteminde rölede karşılaşılabilecek tüm sezim durumları göz önüne alınarak hedef terminalde karar verme işlemi gerçekleştirilir (Chen ve Laneman, 2006). Bu nedenle optimum sezim yöntemi olarak düşünülebilir. Ancak rölede oluşabilecek tüm durumların göz önüne alınması işaret kümesinin eleman sayısı arttıkça karmaşıklığın artmasına yol açmaktadır (Ju ve Kim, 2009).

Şekil 3.8’de verilen kaynak, röle ve hedeften meydana gelen üç terminalli DR tabanlı işbirlikli iletişim sistemini ele alalım. ML tabanlı sezim kullanılan bir sistem modelinde (3.27) ifadesindeki ikinci fazda röleden iletilen işaret $\hat{x} = \text{sgn}\{\text{Re}\{y_{\text{SR}} h_{\text{SR}}^*\}\}$ ile belirlenir. Bu durumda BPSK işaretlemesi için alıcıdaki ML karar kuralı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\Lambda(y_{\text{SD}}, y_{\text{RD}}) = \ln \left\{ \frac{p(y_{\text{SD}} | x=1)p(y_{\text{RD}} | x=1)}{p(y_{\text{SD}} | x=-1)p(y_{\text{RD}} | x=-1)} \right\} \begin{matrix} x=1 \\ > \\ < \\ x=-1 \end{matrix} \begin{matrix} 0 \\ \\ \\ \end{matrix} \quad (3.30)$$

Yukarıda geçen $p(y_{\text{SD}} | x)$ ve $p(y_{\text{RD}} | x)$ terimleri sırasıyla doğrudan ve röleden gelen işaretlerin koşullu olabilirlik fonksiyonlarıdır. ML karar kuralında röledeki hata olasılığı hedefte dikkate alındığından şu ifade yazılabilir:

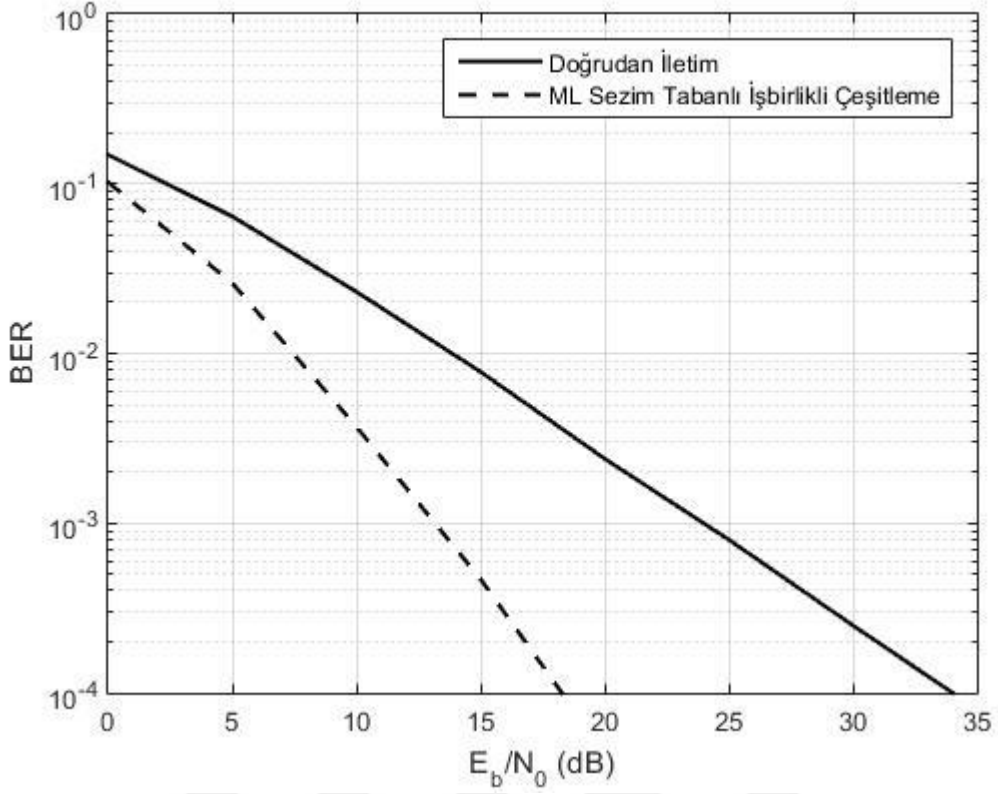
$$p(y_{\text{RD}} | x) = \varepsilon_r p(y_{\text{RD}} | \hat{x} \neq x) + (1 - \varepsilon_r) p(y_{\text{RD}} | \hat{x} = x) \quad (3.31)$$

Burada ε_r röleden hatalı iletim yapma olasılığıdır. BPSK işaretlemesi için aşağıdaki ifadeler yazılabilir (Proakis ve Salehi, 2000):

$$\varepsilon_r = Q(\sqrt{2\gamma_{\text{SR}}}) \quad (3.32)$$

$$Q(x) = \left(1/\sqrt{2\pi}\right) \int_x^{\infty} \exp(-t^2/2) dt \quad (3.33)$$

Şekil 3.15’te, Şekil 3.8’de verilen DR tabanlı işbirlikli çeşitlemeli sistemin BPSK işaretlemesi için ve Rayleigh sönümlenmeli kanal durumunda hedefte ML karar kuralı kullanılması halinde sunduğu performans eğrisi ile doğrudan iletimin performans eğrisi görülmektedir. Sağlıklı bir karşılaştırma yapılabilmesi için doğrudan iletimde sembol enerjisi röleli iletme göre iki kat fazla alınmıştır. Görüldüğü gibi röleli iletimde BER performansı doğrudan iletime göre iyileşmektedir ve işbirlikli çeşitleme kazancı sağlanmaktadır.



Şekil 3.15. Doğrudan iletim ile ML sezim tekniğinin kullanıldığı DR tabanlı işbirlikli çeşitlemeli sistemlerin BPSK işaretlemesi ve Rayleigh sönümlemesi durumunda BER performans eğrileri

3.7.2. C-MRC tekniği

Klasik alıcı anten çeşitlemeli sistemlerde alıcıda MRC tekniği kullanılarak işaretler birleştirilirken kullanılan katsayılar (3.9) ifadesinde sunulmuştu. Şekil 3.8’de verilen DR protokolünün kullanıldığı bir işbirlikli çeşitlemeli sistemde kaynaktan ve röleden gelen işaretlerin birleştirilmesinde kullanılan katsayılar röledeki sezim hatalarından dolayı (3.9) ifadesinde verildiğinden farklı alınmak zorundadırlar. C-MRC adı verilen yaklaşımda Şekil 3.8’de verilen sistem modeli için söz konusu katsayıların (3.34) ve (3.35)’teki gibi alınması gerektiği (Wang ve ark., 2007)’de gösterilmiştir.

$$\alpha_{SD} = h_{SD}^* \quad (3.34)$$

$$\alpha_{RD} = \frac{\gamma_e h_{RD}^*}{\gamma_{RD}} \quad (3.35)$$

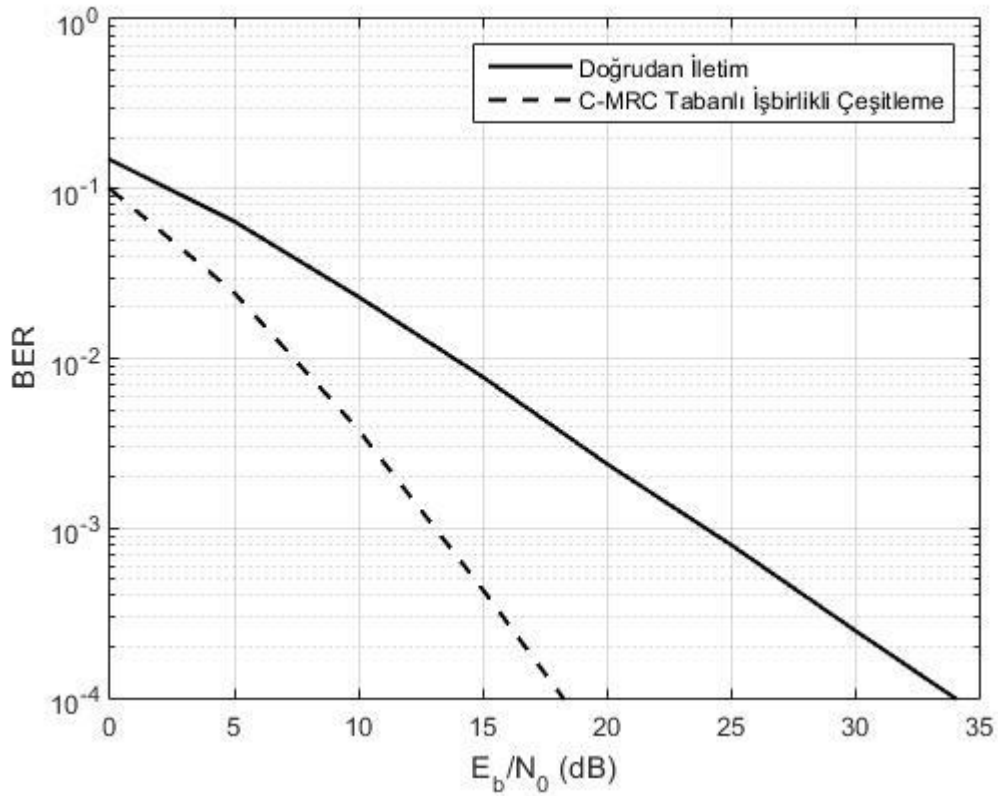
Burada γ_e , kaynak-röle-hedef linkinin eşdeğer SNR değeri olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Wang ve ark., 2007):

$$\gamma_e = P_{BER}^{-1} \left[P_{BER}^e (\gamma_{SR}, \gamma_{RD}) \right] \quad (3.36)$$

Kaynak-röle-hedef linkinin eşdeğer BER değeri şu formülle hesaplanır (Proakis ve Salehi, 2000):

$$P_{BER}^e (\gamma_{SR}, \gamma_{RD}) = P_{BER} (\gamma_{SR}) [1 - P_{BER} (\gamma_{RD})] + P_{BER} (\gamma_{RD}) [1 - P_{BER} (\gamma_{SR})] \quad (3.37)$$

Burada $P_{BER} (\gamma)$, kullanılan işaret kümesi için anlık bit hata olasılığı fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 3.16. Doğrudan iletim ile C-MRC tekniğinin kullanıldığı DR tabanlı işbirlikli çeşitlemeli sistemlerin BPSK işaretlemesi ve Rayleigh sönümlenmesi durumunda BER performans eğrileri

Şekil 3.16’da, Şekil 3.8’de verilen DR tabanlı işbirlikli çeşitlemeli sistemin hedefte işbirlikli MRC tekniği kullanılması halinde sunduğu performans görülmektedir. Şekildeki BER başarımlar eğrileri BPSK işaretlenmesi için elde edilmiştir. Bu eğriler elde edilirken tüm linklere ilişkin sönümlenme katsayıları sıfır ortalamalı ve boyut başına $1/2$ varyanslı kompleks Gauss rastgele değişkenleri olarak modellenerek Rayleigh sönümlenmeli durum ele alınmıştır. Gürültü terimleri ise sıfır ortalamalı boyut başına $N_0 / 2$ varyanslı kompleks Gauss rastgele değişkenleri olarak tanımlanmışlardır. E_s sembol enerjisini göstermektedir. Doğrudan iletimde sembol enerjisi röleli ilettime göre iki kat fazla alınarak sağlıklı mukayese yapılması sağlanmıştır. Görüldüğü gibi röleli iletimde BER performansı doğrudan ilettime göre iyileşmektedir ve işbirlikli çeşitleme kazancı sağlanmaktadır.

3.7.3. LLR iletimi tekniği

LLR iletimi tekniğinde röle kaynağın veri bitlerinin LLR değerlerini belirleyerek hedefe iletir. Bu durumda ikinci fazda hedefte oluşacak işaret, normalizasyon ve LLR terimi şu şekilde verilebilir:

$$y_{RD}(n) = h_{RD} A_{LLR} L_r(n) + z_{RD}(n) \quad (3.38)$$

$$A_{LLR} = \sqrt{E_s / \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |L_r(n)|^2 \right]} \quad (3.39)$$

$$L_r(n) = \frac{4\sqrt{E_s} \operatorname{Re}[y_{SR}(n) h_{SR}^*]}{N_0} \quad (3.40)$$

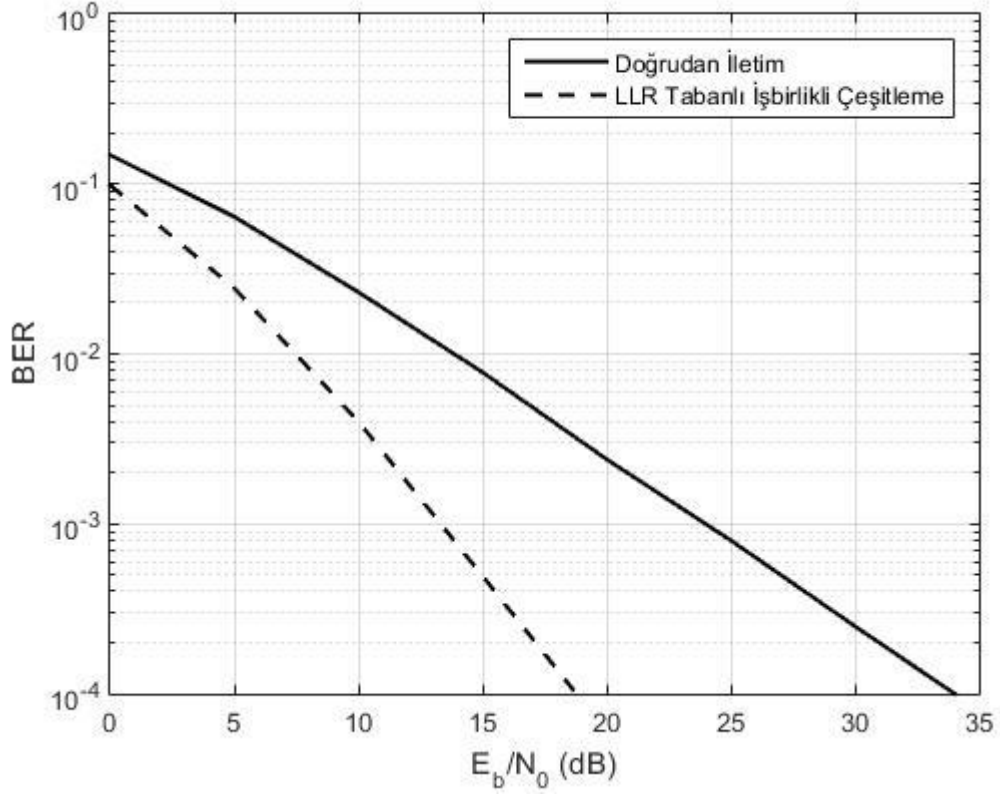
Hedefteki karar kuralı ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} x(n) &= 1 \\ \hat{L}_r(n) + L_d(n) &\begin{matrix} > \\ < \end{matrix} 0 \\ x(n) &= -1 \end{aligned} \quad (3.41)$$

Burada $\hat{L}_r(n)$ terimi röleden iletilen $L_r(n)$ teriminin kestirimidir (Bao ve ark., 2007). $L_d(n)$ ise birinci fazdaki doğrudan iletim bağlantısından elde edilen LLR değerleri olup aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$L_d(n) = \frac{4\sqrt{E_s} \operatorname{Re}[y_{SD}(n)h_{SD}^*]}{N_0} \quad (3.40)$$

Şekil 3.17’de LLR iletimine dayalı işbirlikli sistem ile doğrudan iletim sisteminin performans eğrileri verilmiştir. Doğrudan iletimde sembol enerjisi röleli iletime göre iki kat fazla alınarak sağlıklı mukayese yapılması sağlanmıştır. Görüldüğü gibi LLR tabanlı röleli iletimde BER performansı doğrudan iletime göre iyileşmektedir ve işbirlikli çeşitleme kazancı sağlanmaktadır.



Şekil 3.17. Doğrudan iletim ile LLR tekniğinin kullanıldığı DR tabanlı işbirlikli çeşitlemeli sistemlerin BPSK işaretlemesi ve Rayleigh sönümlenmesi durumunda BER performans eğrileri

3.7.4. SR tekniği

SR tekniği işbirlikli ağdaki kanalların durum bilgileri göz önüne alınarak rölenin kaynak işaretini iletmesi veya sessiz kalması ile prensibine dayanır (Onat ve ark., 2008). Şekil 3.8’de verilen DR protokolünün kullanıldığı üç terminalden oluşan işbirlikli çeşitlemeli sistemde ilk fazda kaynak iletimde röle ve hedef dinlemedir. Bu durumda ilk faz boyunca alıcılarda oluşan işaretler aşağıdaki gibi verilebilir:

$$y_{SD} = h_{SD} \sqrt{E_s} x + z_{SD} \quad (3.43)$$

$$y_{SR} = h_{SR} \sqrt{E_s} x + z_{SR} \quad (3.44)$$

Rölenin ikinci fazda iletim yapmaksızın sessiz kalma durumu m_0 , iletim yapması durumu m_1 olmak üzere her iki durumda sistemin uçtan uca BER değerleri sırasıyla řu Şekilde belirlenebilir (Onat ve ark., 2008):

$$P_e^{m_0} = Q\left(\sqrt{2\gamma_{SD}}\right) \quad (3.45)$$

$$P_e^{m_1} = P_{SR} P_{prop} + [1 - P_{SR}] P_{coop} \quad (3.46)$$

Burada P_{SR} kaynak-röle arası bağlantının hata olasılığını, P_{prop} ile P_{coop} sırasıyla röleden hatalı iletim yapılması halinde ve rölede hatasız algılama yapılması durumunda hedefte hatalı karar verme olasılıklarını göstermekte olup aşağıdaki gibi hesaplanabilecekleri (Onat ve ark., 2008)’de gösterilmiştir.

$$P_{SR} = Q\left(\sqrt{2\gamma_{SR}}\right) \quad (3.47)$$

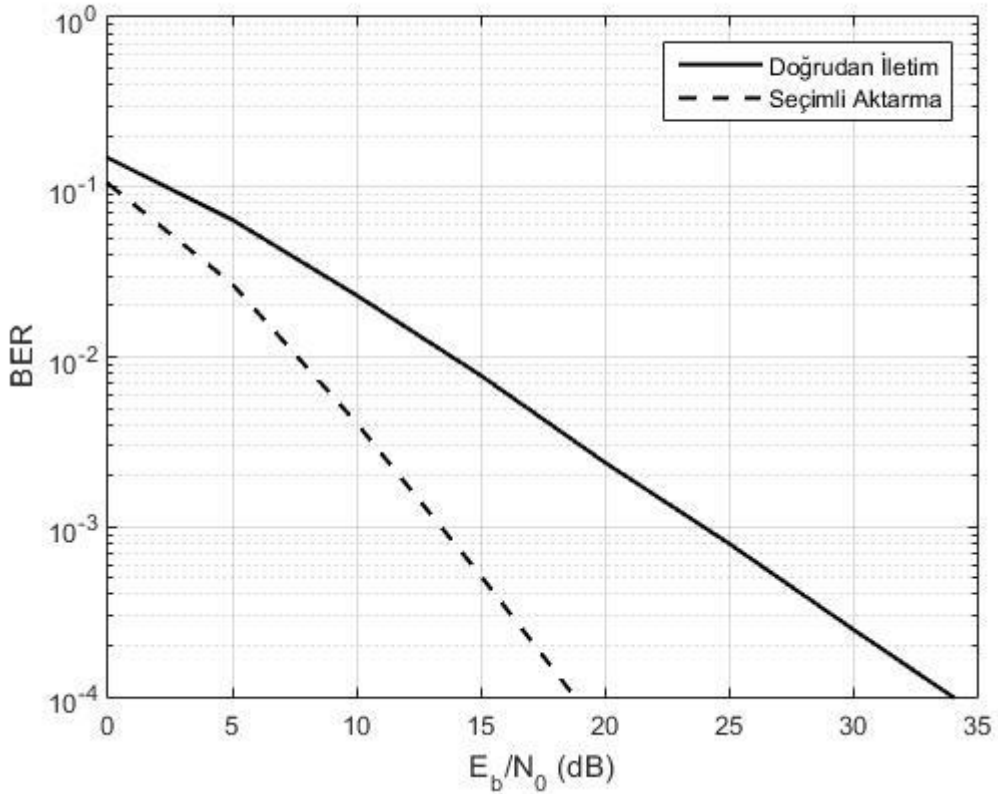
$$P_{coop} = Q\left(\sqrt{2(\gamma_{SD} + \gamma_{RD})}\right) \quad (3.48)$$

$$P_{prop} = Q\left(\frac{\gamma_{SD} - \gamma_{RD}}{\sqrt{(\gamma_{SD} + \gamma_{RD})/2}}\right) \quad (3.49)$$

Rölenin ikinci fazda çalışma biçimi ise (3.50)'deki metrikle belirlenmektedir (Onat ve ark., 2008). Röle ikinci fazda iletim yapma kararı alırsa hedefe gelen işaretler MRC tekniği ile birleştirilmektedir.

$$P_e^{m_0} \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} P_e^{m_1} \quad (3.50)$$

Şekil 3.18'de SR tekniğinin kullanıldığı işbirlikli sistem ile doğrudan iletim sisteminin performans eğrileri verilmiştir. Doğrudan iletimde sembol enerjisi röleli iletime göre iki kat fazla alınarak doğru mukayese yapılması sağlanmıştır. Görüldüğü gibi SR tabanlı röleli iletimde BER performansı doğrudan iletime göre iyileşmektedir ve işbirlikli çeşitleme kazancı sağlanmaktadır.



Şekil 3.18. Doğrudan iletim ile SR tekniğinin BPSK işaretlemesi ve Rayleigh sönmülemesi durumunda BER performans eğrileri

3.7.5. VN tabanlı sezim tekniği

VN tabanlı sezim tekniği rölede oluşan sezim hatalarının hedefte sanal gürültü adı verilen ek bir gürültü terimi şeklinde modellenmesi fikrine dayanır (Kim ve ark., 2011; Bozdağ ve ark., 2013). VN tabanlı sezim tekniğinin kullanıldığı Şekil 3.8'deki gibi kaynak, röle ve hedeften meydana gelen üç terminall DR tabanlı işbirlikli iletişim sisteminde ilk fazda kaynak iletimi gerçekleştirildikten sonra hedef ve rölede oluşacak işaretler ML ve C-MRC tabanlı sistemlere benzer şekilde sırasıyla aşağıdaki gibi verilebilir:

$$y_{SD} = h_{SD} \sqrt{E_s} X + z_{SD} \quad (3.51)$$

$$y_{SR} = h_{SR} \sqrt{E_s} X + z_{SR} \quad (3.52)$$

VN tabanlı sezim tekniğinde rölede oluşan algılama hatası, hedefte sanal gürültü olarak adlandırılan ek bir gürültü terimi biçiminde modellendiğinden ikinci zaman diliminde hedefte oluşan işaret aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Kim ve ark., 2011):

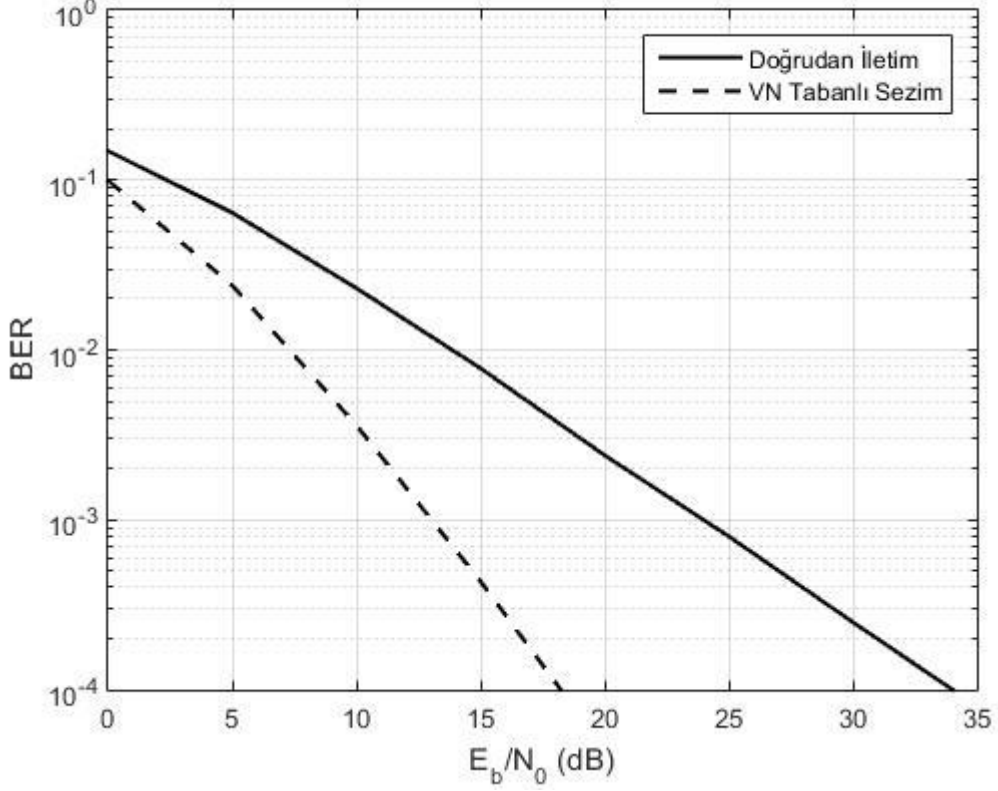
$$\begin{aligned} y_{RD} &= h_{RD} \sqrt{E_s} X_R + z_{RD} \\ &= h_{RD} \sqrt{E_s} X + h_{RD} \sqrt{E_s} e_R + z_{RD} \\ &= h_{RD} \sqrt{E_s} X + z_V + z_{RD} \end{aligned} \quad (3.53)$$

Burada z_V terimi sanal gürültüyü temsil etmektedir. e_R teriminin ortalaması sıfır varyansı $N_0 / |h_{SR}|^2$ olan bir Gauss rastlantı değişkeni biçiminde alınabileceği (Kim ve ark., 2011)'de gösterilmiştir. Bu durumda BPSK işaretleşmesi için hedefteki karar kuralı şu şekilde verilebilir (Kim ve ark., 2011):

$$\hat{x} \approx \arg \max_{x \in \{-1, +1\}} \exp \left(- \frac{|y_{SD} - h_{SD} \sqrt{E_s} X|^2}{N_0} - \frac{|y_{RD} - h_{RD} \sqrt{E_s} X|^2}{\sigma_V^2} \right) \quad (3.54)$$

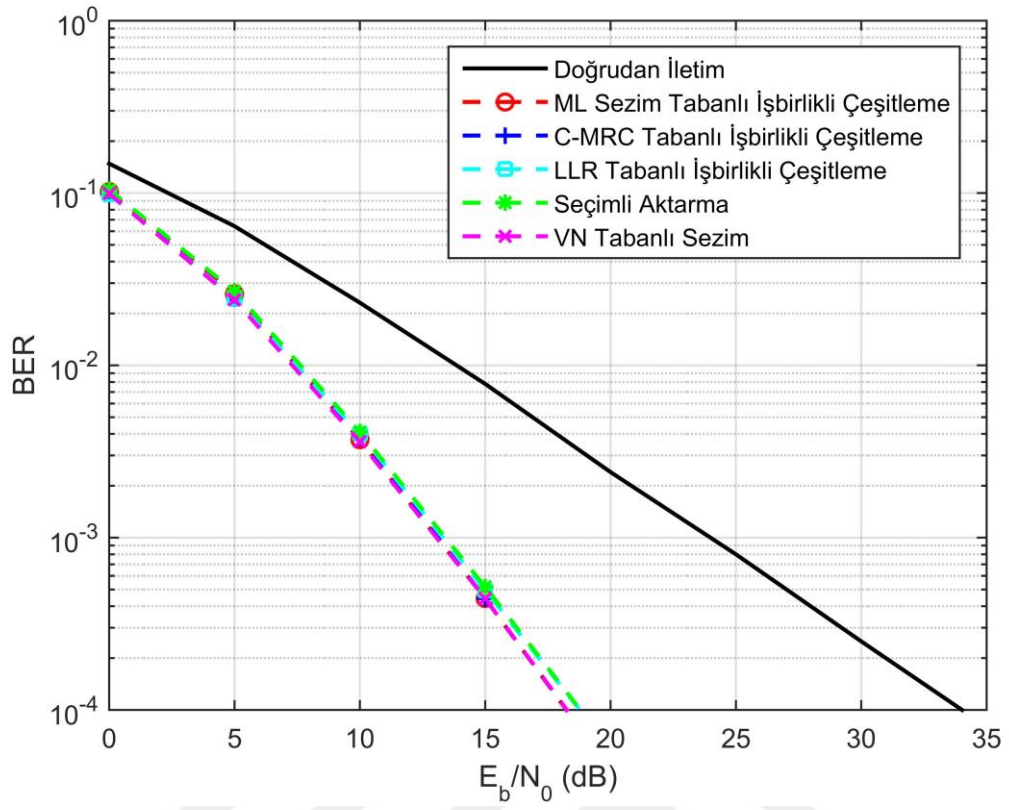
Burada $\sigma_V^2 = \left(1 + \frac{|h_{RD}|^2}{|h_{SR}|^2} \right) N_0$ hedefteki etkin gürültünün varyansındır.

Şekil 3.19’da VN tabanlı sezim tekniğinin BER performans eğrisi sunulmuştur. Görüldüğü gibi işbirlikli iletişim durumunda çeşitleme kazancı elde edilmektedir ve doğrudan iletme göre önemli performans kazancı sağlanmaktadır.



Şekil 3.19. Doğrudan iletim ile VN tabanlı sezim tekniğinin BPSK işaretlemesi ve Rayleigh sönümlenmesi durumunda BER performans eğrileri

Şekil 3.20’deyse ML tabanlı sezim, C-MRC, LLR iletimi, SR ve VN tabanlı sezim tekniklerinin BER performans eğrileri verilmiştir. Tüm hata yayılımıyla mücadele tekniklerinde çeşitleme kazancı elde edildiği görülmektedir ve doğrudan iletme göre önemli performans kazancı sağlanmaktadır.



Şekil 3.20. Doğrudan iletim ile ML, C-MRC, LLR, SR ve VN tabanlı sezim tekniklerinin BPSK işaretlemesi ve Rayleigh sönümlenmesi durumunda BER performans eğrileri

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. ML Sezim Tabanlı TWC Senaryosunun Performansı

ML tabanlı sezim tekniğini kullanan TWC yapısı için S_B kullanıcılarındaki karar kuralı şu şekilde verilebilir (Özdemir ve Yılmaz, 2012):

$$\Lambda(y_{B,1}, y_{B,3} | x_B) = t_0 + (-1)^{d_B} f_{PML}[t_1, \varepsilon_R] \begin{matrix} x_A = 1 \\ > \\ < \\ x_A = -1 \end{matrix} 0 \quad (4.1)$$

Burada geçen t_0 ve t_1 terimleri sırasıyla doğrudan ve röleden gelen işaretlerin koşullu olabilirlik fonksiyonlarıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilebilirler:

$$t_0 = \frac{4\sqrt{E_s} \operatorname{Re}[y_{B,1} h_{AB}^*]}{N_0}, \quad (4.2)$$

$$t_1 = \frac{4\sqrt{E_s} \operatorname{Re}[y_{B,3} h_{RB}^*]}{N_0} \quad (4.3)$$

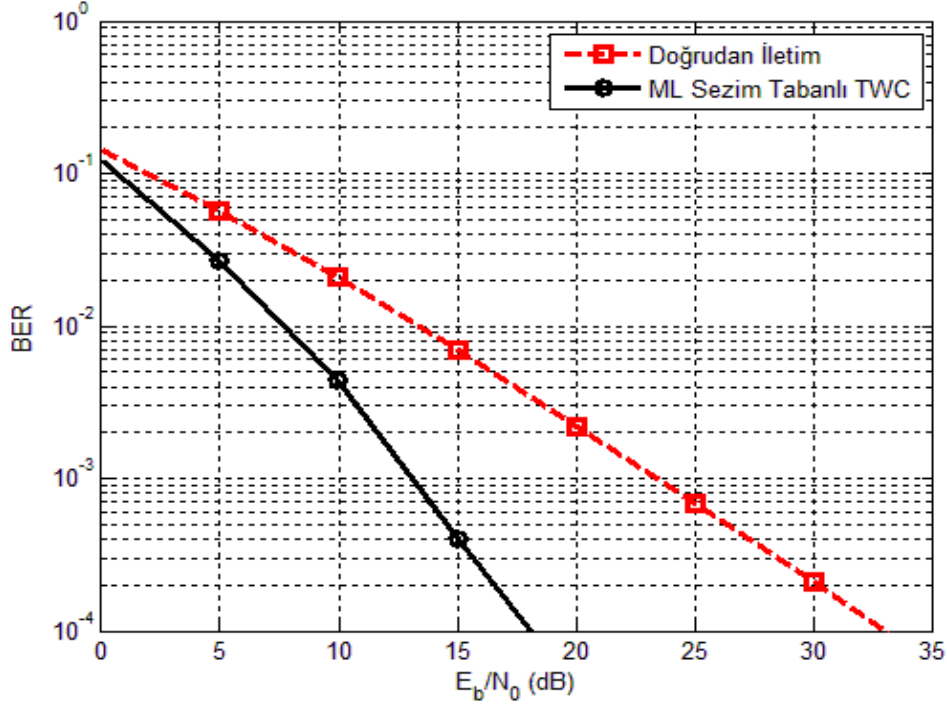
(4.2) ve (4.3) ifadelerinde $(.)^*$ operatörü eşlenik almaktadır. (4.1) ifadesindeki doğrusallaştırma (piece-wise linearization) fonksiyonu ise şu şekilde tanımlanabilir (Kim ve ark., 2011):

$$f_{PML}(x, \varepsilon_R) = \begin{cases} -T_1, & x \leq -T_1 \\ x, & -T_1 \leq x \leq T_1 \\ T_1, & x \geq T_1 \end{cases} \quad (4.4)$$

Burada ε_R röleden hatalı iletim yapma olasılığıdır ve $T_1 = \ln[(1 - \varepsilon_R)/\varepsilon_R]$ ile belirlenir (Chen ve Laneman, 2006). Röleden hatalı iletim yapma olasılığı şu şekilde verilebilir (Özdemir ve Yılmaz, 2012):

$$\varepsilon_R = (1 - \varepsilon_A)\varepsilon_B + \varepsilon_A(1 - \varepsilon_B) \quad (4.5)$$

(4.5)'te verilen eşitlikte ε_A ve ε_B sırasıyla birinci ve ikinci faz iletimleri sonucu röledeki hata olasılıkları olup BPSK sinyalleşmesi için $\varepsilon_A = Q(\sqrt{2\gamma_{AR}})$ ve $\varepsilon_B = Q(\sqrt{2\gamma_{BR}})$ eşitlikleri ile hesaplanır. Benzer işlemler S_a kullanıcılarında da $y_{A,2}$ ve $y_{A,3}$ işaret bileşenleri ile yapılarak iki yönlü iletim tamamlanır.



Şekil 4.1. Doğrudan iletim ile TWC yapısının ML tabanlı sezim durumunda Rician sönümlmeli kanallardaki performansı (Rician parametresi $K = 0.6$ alınmıştır)

Şekil 4.1'de TWC yapısının ML tabanlı sezim durumunda BPSK işaretleşmesi için Rician sönümlmeli kanallardaki simülasyon eğrisi verilmiştir. Bağımsız sönümlleme katsayılarının üç fazlık iletim süresince sabit kalıp daha sonra değişim gösterdiği yarı-durağan durum incelenmiştir. Paket uzunluğu $N = 100$ olarak seçilmiştir. Rician parametresi $K = 0.6$ alınarak doğrudan iletim kanalındaki BER başarımı ile karşılaştırma yapılmıştır. Doğrudan iletimdeki bit enerjisi TWC protokolündeki bit enerjisinden 1.5 kat fazla alınmıştır. Bu şekilde de görüldüğü gibi ML tabanlı TWC yapısı doğrudan iletime göre önemli başarımlar iyileşmesi vermekte ve tam çeşitleme kazancı sağlamaktadır.

4.2. LLR İletimi Tabanlı TWC Senaryosunun Performansı

LLR iletimi tekniğini kullanan TWC yapısı için ilk iki fazın sonunda ilgili alıcılarda oluşan işaretler (3.11-3.14) ifadelerinde verilmiştir. Üçüncü fazda röleden iletilen ve (3.15-3.16) ifadelerinde verilmiş olan ağ kodlanmış terim $x_R = (-1)^{d_R}$ biçiminde değil de $x_R = A_{LLR} L_r$ ile belirlenir. Burada L_r ağ kodlanmış sembolün LLR değerini göstermekte olup aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Zeitler ve ark., 2009):

$$L_r \approx \text{sign}(L_1) \text{sign}(L_2) \min(|L_1|, |L_2|) \quad (4.6)$$

Son fazdaki toplam iletim enerjisinin $E_s N$ olarak sabit kalmasını sağlamak için tanımlanan A_{LLR} normalizasyon terimiye şu şekilde ifade edilebilir (Özdemir ve Yılmaz, 2012):

$$A_{LLR} = \sqrt{E_s / \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |L_r(n)|^2 \right]} \quad (4.7)$$

(4.6) ifadesinde L_1 ve L_2 terimleri rölede birinci ve ikinci fazlarda elde edilen LLR değerleri olup BPSK işaretleşmesi için sırasıyla aşağıdaki gibi belirlenebilirler:

$$L_1 = \frac{4\sqrt{E_s} \text{Re}(y_{R,1} h_{AR}^*)}{N_0}, \quad (4.8)$$

$$L_2 = \frac{4\sqrt{E_s} \text{Re}(y_{R,2} h_{BR}^*)}{N_0} \quad (4.9)$$

Bu durumda S_B kullanıcılarındaki karar kuralı şu şekilde verilebilir:

$$\begin{aligned} & x_A = 1 \\ & (-1)^{d_B} \hat{L}_r + L_d \begin{array}{l} > \\ < \end{array} 0 \\ & x_A = -1 \end{aligned} \quad (4.10)$$

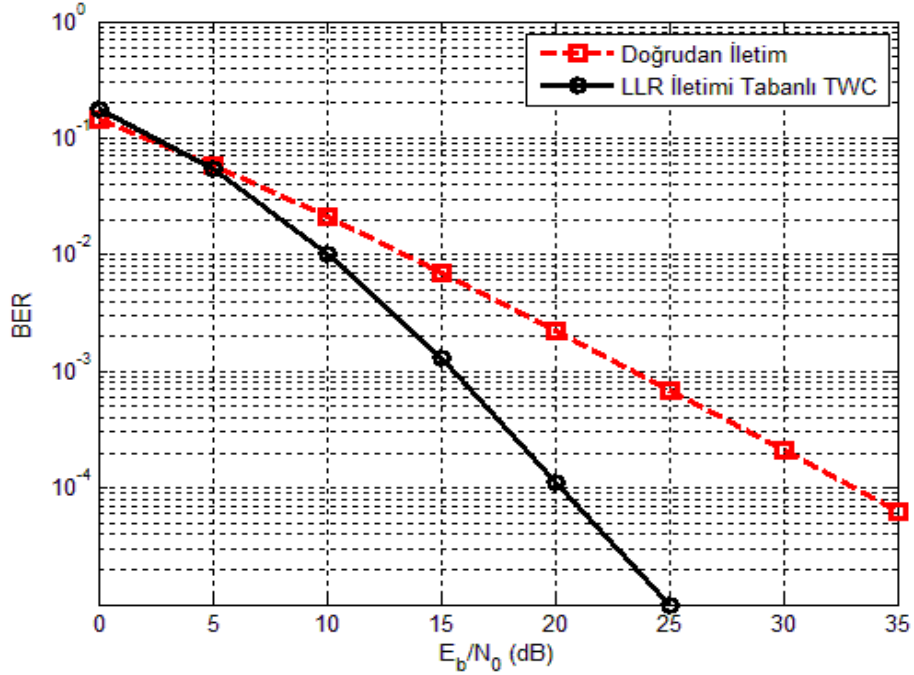
Bu ifadede \hat{L}_r terimi röleden iletilen L_r teriminin kestirimi olup aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\hat{L}_r = \text{Re} \left[y_{B,3} h_{BR}^* / (|h_{BR}|^2 \cdot A_{LLR}) \right] \quad (4.11)$$

$L_d(n)$ terimi doğrudan gelen işaretin sunduğu LLR değerini göstermektedir ve şu şekilde ifade edilebilir:

$$L_d = \frac{4\sqrt{E_s} \text{Re}(y_{B,1} h_{AB}^*)}{N_0} \quad (4.12)$$

Benzer işlemler S_A kullanıcılarında da $y_{A,2}$ ve $y_{A,3}$ işaret bileşenleri ile yapılarak iki yönlü iletim tamamlanır.



Şekil 4.2. Doğrudan iletim ile LLR iletimi tabanlı TWC yapısının Rician sönümlenmeli kanallardaki performansları (Rician parametresi $K = 0.6$ alınmıştır)

Şekil 4.2'de TWC yapısının LLR iletimi durumunda BPSK işaretleşmesi için Rician sönümlenmeli kanallardaki simülasyon eğrisi verilmiştir. Bağımsız sönümlenme katsayılarının üç fazlık iletim süresince sabit kalıp daha sonra değiştiği yarı-durağan

durum incelenmiştir. Paket uzunluğu $N = 100$ olarak seçilmiştir. Rician parametresi $K = 0.6$ alınarak doğrudan iletim kanalındaki BER başarımı ile karşılaştırma yapılmıştır.

Doğrudan iletimdeki bit enerjisi TWC protokolündeki bit enerjisinden 1.5 kat fazla alınmıştır. Bu şekilden de görüldüğü gibi LLR tabanlı TWC yapısı doğrudan iletime göre önemli başarımla iyileşmesi vermekte ve tam çeşitleme kazancı sağlamaktadır.

4.3. SR Tabanlı TWC Senaryosunun Performansı

SR iletimi tekniğini kullanan TWC yapısı için ilk iki fazın sonunda ilgili alıcılarda oluşan işaretler (3.11-3.14) ifadelerini sağlamaktadır. Üçüncü fazda röle aşağıdaki metriği kullanarak üçüncü fazda iletim yapıp yapmayacağına karar vermektedir (Onat ve ark., 2008; Özdemir, 2011):

$$\begin{array}{l} m_1 \\ P_e^{m_0} > P_e^{m_1} \\ < \\ m_0 \end{array} \quad (4.13)$$

Burada rölenin ikinci fazda iletim yapmaksızın sessiz kalma durumu m_0 , iletim yapması durumu m_1 olmak üzere her iki durumda sistemin uçtan uca BER değerleri sırasıyla şu şekilde hesaplanabilir (Onat ve ark., 2008; Özdemir, 2011):

$$P_e^{m_0} = Q\left(\sqrt{2(\gamma_{AB})}\right) \quad (4.14)$$

$$P_e^{m_1} = 0.5(1 - P_A^{m_1})P_B^{m_1} + 0.5(1 - P_B^{m_1})P_A^{m_1} + P_A^{m_1}P_B^{m_1} \quad (4.15)$$

(4.15) ifadesinde geçen olasılık terimleri (Onat ve ark., 2008; Özdemir, 2011)'de şu şekilde verilmiştir:

$$P_A^{m_1} = Q\left(\sqrt{2\gamma_{AR}}\right)Q\left(\frac{\gamma_{AB} - \gamma_{AR}}{\sqrt{(\gamma_{AB} + \gamma_{AR})/2}}\right) + \left[1 - Q\left(\sqrt{2\gamma_{AR}}\right)\right]Q\left(\sqrt{2(\gamma_{AB} + \gamma_{AR})}\right) \quad (4.16)$$

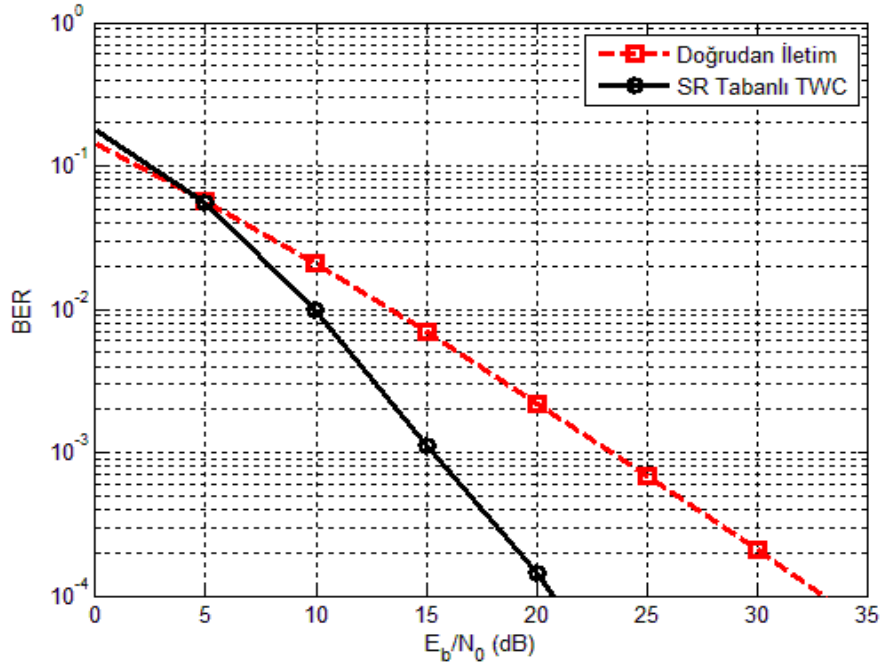
$$P_B^{m_1} = Q(\sqrt{2\gamma_{BR}}) Q\left(\frac{\gamma_{AB} - \gamma_{BR}}{\sqrt{(\gamma_{AB} + \gamma_{BR})/2}}\right) + [1 - Q(\sqrt{2\gamma_{BR}})] Q(\sqrt{2(\gamma_{AB} + \gamma_{BR})}) \quad (4.17)$$

Üçüncü fazda iletim yapılması halinde ilgili alıcılarda oluşacak işaretler şu şekilde verilebilir:

$$y_{A,3} = h_{RA} \sqrt{E_s} x_R + z_{A,3} \quad (4.18)$$

$$y_{B,3} = h_{RB} \sqrt{E_s} x_R + z_{B,3} \quad (4.19)$$

Burada $x_R = (-1)^{d_r}$ ağ kodlanmış BPSK sembolüdür.



Şekil 4.3. Doğrudan iletim ile SR tabanlı TWC yapısının Rician sönümlmeli kanallardaki performansları (Rician parametresi $K = 0.6$ alınmıştır)

Şekil 4.3'te TWC yapısının SR tekniği kullanılması durumunda BPSK işaretlenmesi için Rician sönümlmeli kanallardaki simülasyon eğrisi verilmiştir. Bağımsız sönümlleme katsayılarının üç fazlık iletim süresince sabit kalıp daha sonra değiştiği yarı-durağan durum incelenmiştir. Paket uzunluğu $N = 100$ olarak seçilmiştir.

Rician parametresi $K = 0.6$ alınarak doğrudan iletim kanalındaki BER başarımı ile karşılaştırma yapılmıştır. Doğrudan iletimdeki bit enerjisi TWC protokolündeki bit enerjisinden 1.5 kat fazla alınmıştır. Bu şekilden de görüldüğü gibi SR tabanlı TWC yapısı doğrudan iletime göre önemli başarımlar iyileşmesi vermekte ve tam çeşitleme kazancı sağlamaktadır.

4.4. ML Sezim Tabanlı MARC Yapısı

ML tabanlı alıcı yapısında kullanıcı veri bitlerinin ve röleden iletilen ağ kodlanmış sembolün olası tüm durumları göz önüne alınır. (Özdemir, 2013)'te hedefteki karar kuralının şu şekilde olacağı ifade edilmiştir:

$$\mathbf{d}_A, \mathbf{d}_B = \arg \min_{\bar{d}_A, \bar{d}_B, \bar{d}_R \in \{0,1\}} P(\bar{d}_A, \bar{d}_B, \bar{d}_R) \quad (4.20)$$

(4.20) ifadesindeki $P(\bar{d}_A, \bar{d}_B, \bar{d}_R)$ ortak olasılık terimi şu şekilde belirlenir:

$$P(\bar{d}_A, \bar{d}_B, \bar{d}_R) = P(\bar{d}_A)P(\bar{d}_B) \times P(\bar{d}_R | \bar{d}_A \bar{d}_B) \quad (4.21)$$

(Özdemir, 2013)'te ilgili olasılık terimlerinin şu şekilde hesaplanabileceği gösterilmiştir:

$$P(\bar{d}_A = 1) \approx (1 + e^{L_1})^{-1}, P(\bar{d}_B = 1) \approx (1 + e^{L_2})^{-1} \quad (4.22)$$

$$P(\bar{d}_A = 0) \approx 1 - (1 + e^{L_1})^{-1}, P(\bar{d}_B = 0) \approx 1 - (1 + e^{L_2})^{-1} \quad (4.23)$$

$$P(\bar{d}_R = 1) \approx (1 + e^{L_3})^{-1}, P(\bar{d}_R = 0) \approx 1 - (1 + e^{L_3})^{-1} \quad (4.24)$$

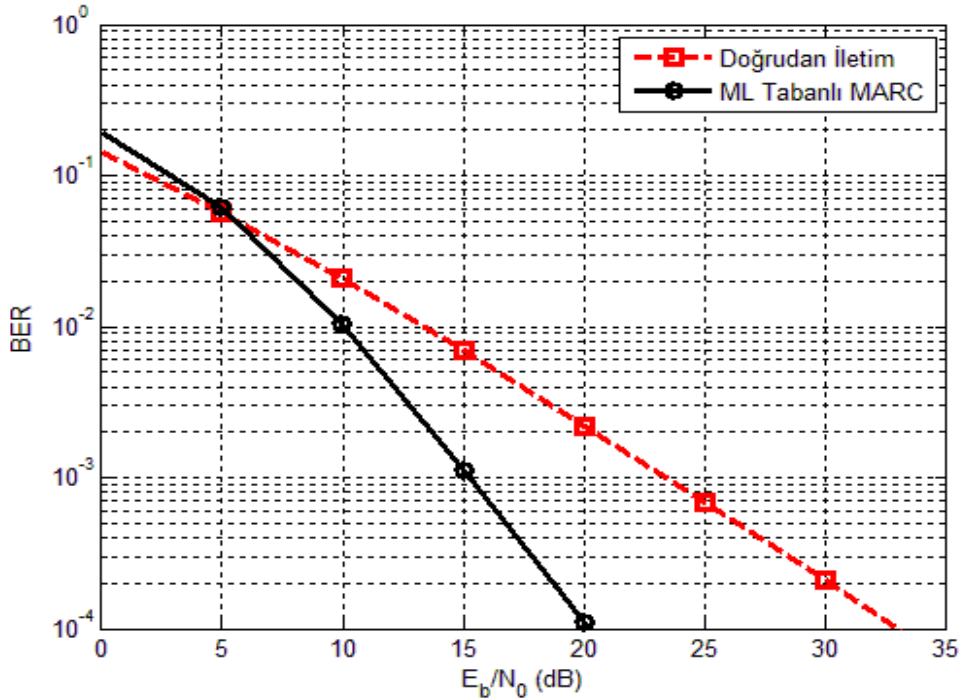
$$P(\bar{d}_R | \bar{d}_A \bar{d}_B) = (1 - \varepsilon_r)P(\bar{d}_R = \bar{d}_A \bar{d}_B) + \varepsilon_r P(\bar{d}_R \neq \bar{d}_A \bar{d}_B) \quad (4.25)$$

(4.22-4.25) ifadelerinde geçen LLR terimleri BPSK işaretlemesi için aşağıdaki gibi belirlenir (Özdemir, 2013):

$$L_1 = \frac{4\sqrt{E_s} \operatorname{Re}(y_{D,1} h_{S_A D}^*)}{N_0}, L_2 = \frac{4\sqrt{E_s} \operatorname{Re}(y_{D,2} h_{S_B D}^*)}{N_0}, L_3 = \frac{4\sqrt{E_s} \operatorname{Re}(y_{RD} h_{RD}^*)}{N_0} \quad (4.26)$$

(4.25) ifadesinde geçen ε_r terimi ise röleden hatalı iletim yapma olasılığıdır ve $\varepsilon_r = (1 - \varepsilon_1)\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2)\varepsilon_1$ ile elde edilir (Özdemir, 2013). Burada $\varepsilon_1 = Q\left(\sqrt{2\gamma_{S_A R}}\right)$ ve $\varepsilon_2 = Q\left(\sqrt{2\gamma_{S_B R}}\right)$ olasılıkları sırasıyla birinci ve ikinci faz iletimleri sonucu rölede oluşan anlık BER değerlerini göstermektedir (Özdemir, 2013).

Şekil 4.4'te MARC yapısının ML tabanlı sezim durumunda BPSK işaretlemesi için Rician sönümlenmeli kanallardaki simülasyon eğrisi verilmiştir. Rician parametresi $K = 0.6$ alınarak doğrudan iletim kanalındaki BER başarımı ile karşılaştırma yapılmıştır. Doğrudan iletimdeki bit enerjisi MARC protokolündeki bit enerjisinden 1.5 kat fazla alınmıştır. Bu şekilden de görüldüğü gibi ML tabanlı MARC yapısı doğrudan iletime göre önemli başarımla iyileşmesi vermekte ve tam çeşitleme kazancı sağlamaktadır.



Şekil 4.4. Doğrudan iletim ile MARC yapısının ML tabanlı sezim durumunda Rician sönümlenmeli kanallardaki performansı (Rician parametresi $K = 0.6$ alınmıştır)

4.5. LLR İletimi Tabanlı MARC Yapısı

Bu alt bölümde LLR iletimi tekniğini kullanan MARC yapısının evre uyumsuz (noncoherent) ikili frekans kaydırmalı anahtarlama (Binary Frequency Shift Keying, BFSK) işaretlenmesi durumunda Rayleigh sönümlenmesi için performansı incelenecektir (Özdemir, 2022). Şekil 3.13'teki gibi bir iki kullanıcılı MARC yapısında S_A ve S_B kullanıcılarının veri bitleri sırasıyla $d_A, d_B \in \{0, 1\}$ ile gösterilsin. İlk fazda S_A ikinci fazda ise S_B kullanıcılarının iletimleri neticesinde rölede oluşan işaret bileşenleri sırasıyla aşağıdaki gibi verilebilirler (Özdemir, 2022):

$$y_{R,1} = \begin{bmatrix} y_{R,1}^1 \\ y_{R,1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{S_A R} \sqrt{E_s} (1 - d_A) + z_{R,1}^1 \\ h_{S_A R} \sqrt{E_s} d_A + z_{R,1}^2 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$y_{R,2} = \begin{bmatrix} y_{R,2}^1 \\ y_{R,2}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{S_B R} \sqrt{E_s} (1 - d_B) + z_{R,2}^1 \\ h_{S_B R} \sqrt{E_s} d_B + z_{R,2}^2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

Benzer şekilde ilk iki faz sonunda hedefte meydana gelen işaretler sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Özdemir, 2022):

$$y_{D,1} = \begin{bmatrix} y_{D,1}^1 \\ y_{D,1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{S_A D} \sqrt{E_s} (1 - d_A) + z_{D,1}^1 \\ h_{S_A D} \sqrt{E_s} d_A + z_{D,1}^2 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

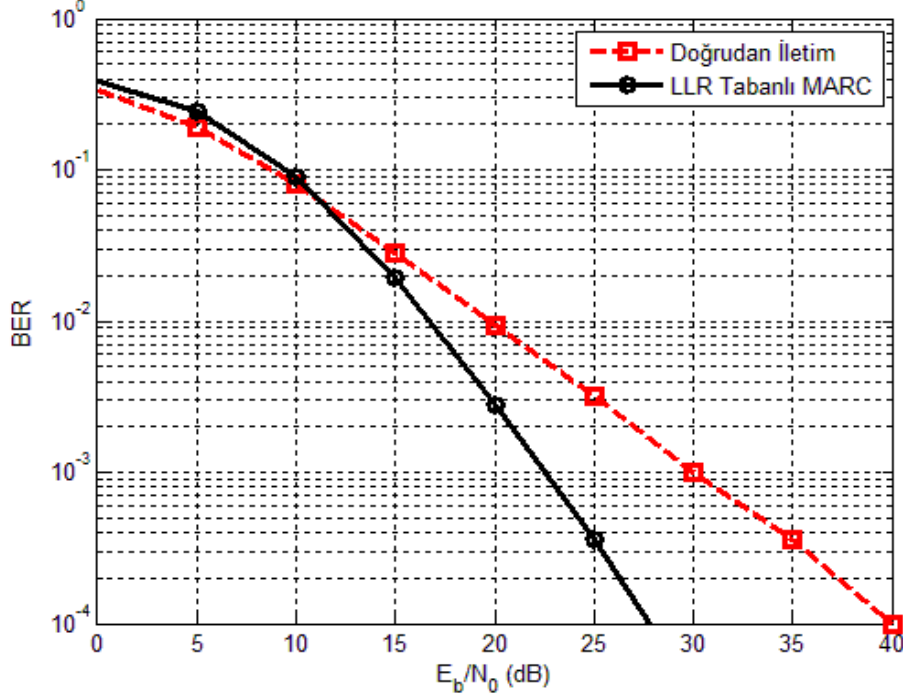
$$y_{D,2} = \begin{bmatrix} y_{D,2}^1 \\ y_{D,2}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{S_B D} \sqrt{E_s} (1 - d_B) + z_{D,2}^1 \\ h_{S_B D} \sqrt{E_s} d_B + z_{D,2}^2 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Rölenin üçüncü fazda hedefe yaptığı iletim ise şu şekilde verilebilir (Özdemir, 2022):

$$y_{D,3} = h_{RD} A_{LLR} L_N \begin{bmatrix} 1 - d_R \\ d_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{D,3}^1 \\ z_{D,3}^2 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Burada $d_R = \hat{d}_A \oplus \hat{d}_B$ ağ kodlanmış veriyi, \hat{d}_A ve \hat{d}_B sırasıyla birinci ve ikinci fazda röledeki veri biti kestirimlerini, L_N ağ kodlanmış veri bitinin LLR değerini, A_{LLR} ise

toplam iletim enerjisini sabitleyen normalizasyon terimini göstermektedir (Özdemir, 2022). L_N ve A_{LLR} terimlerini veren formüller (Özdemir, 2022)'de sırasıyla (9) ve (10) ifadelerinde sunulmuştur. Hedefteki karar kuralının çıkarılması ise (Özdemir, 2022)'de geçen Bölüm-3'te detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 4.5. Doğrudan iletim ile MARC modelinin LLR iletimi durumunda Rayleigh sönümlmeli kanallardaki performansları

Şekil 4.5'te MARC yapısının LLR iletimi durumunda evre-uyumsuz BFSK işaretlenmesi için Rayleigh sönümlmeli kanallardaki simülasyon eğrisi verilerek doğrudan iletim senaryosu ile karşılaştırma yapılmıştır. Doğru bir kıyaslama yapabilmek için doğrudan iletimdeki bit enerjisi MARC protokolündeki bit enerjisinden 1.5 kat fazla alınmıştır. Bu şekilden de görüldüğü gibi LLR iletimi tabanlı MARC yapısı doğrudan iletime göre önemli başarımlar iyileşmesi vermekte ve tam çeşitleme kazancı sağlamaktadır.

4.6. MARC Yapısında Kullanıcı Seçimli Aktarma

Bu alt bölümde (Özdemir, 2013) ve (Özdemir, 2012)'de sunulan kullanıcı seçimine dayalı MARC modeli verilecektir. Bu modelde bazı kullanıcı terminallerinin

verileri ağ kodlama tekniklerinin uygulanabileceği şekilde hem doğrudan kanal üzerinden hem de röle aracılığıyla hedefe iletilirken, diğer terminaller yalnızca doğrudan kanalı kullanırlar (Özdemir, 2012). İletimleri röle tarafından dinlenecek, kodu çözülecek ve yeniden iletilecek olan tüm kullanıcıların optimal alt kümesi, ağın kanal durum bilgisi kullanılarak sistemin BER değerini en aza indirecek şekilde hedef terminal tarafından belirlenir (Özdemir, 2012). Hedef, belirli bir geri besleme biti sayısı aracılığıyla röleye optimum kullanıcı terminali alt kümesini iletir (Özdemir, 2012).

$\bar{\mathbf{d}}_{S_A} = [\bar{d}_{S_A}(1) \ \bar{d}_{S_A}(2) \ \dots \ \bar{d}_{S_A}(L)]$ ve $\bar{\mathbf{d}}_{S_B} = [\bar{d}_{S_B}(1) \ \bar{d}_{S_B}(2) \ \dots \ \bar{d}_{S_B}(L)]$, iki kullanıcıyı bir MARC sisteminde sırasıyla S_A ve S_B kullanıcılarının hedef terminalde elde edilen veri bloklarını belirtsin (Özdemir, 2013). Seçimli aktarma yaklaşımında rölenin m_0 , m_1 , m_2 ve m_3 olmak üzere dört ayrı strateji uygulaması söz konusudur. m_0 stratejisinde röle iletim yapmaz ve kullanıcılar verilerinin doğrudan kanallar üzerinden gönderirler. Bu durumda hedefteki BER değeri şu şekilde bulunabilir:

$$P_{m_0} = \frac{Q\left(\sqrt{2\gamma_{S_A D}}\right) + Q\left(\sqrt{2\gamma_{S_B D}}\right)}{2} \quad (4.32)$$

m_1 stratejisinde S_A kullanıcılarının verisi hem doğrudan kanal hem de röle tarafından iletilirken S_B kullanıcılarının verisi sadece doğrudan kanal üzerinden gönderilir. m_1 stratejisinde hedefteki BER değeri aşağıdaki formülle ifade edilebilir (Onat ve ark., 2008; Özdemir, 2013):

$$P_{m_1} = \frac{\left[\varepsilon_1 Q\left(\frac{\gamma_{S_A D} - \gamma_{S_A R}}{\sqrt{(\gamma_{S_A D} + \gamma_{S_A R})/2}}\right) + (1 - \varepsilon_1) Q\left(\sqrt{2(\gamma_{S_A D} + \gamma_{S_A R})}\right) + Q\left(\sqrt{2\gamma_{S_B D}}\right) \right]}{2} \quad (4.33)$$

m_2 stratejisinde S_B kullanıcılarının verisi hem doğrudan kanal hem de röle tarafından iletilirken S_A kullanıcılarının verisi sadece doğrudan kanal üzerinden gönderilir. m_2 stratejisinde hedefteki BER ifadesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Onat ve ark., 2008; Özdemir, 2013):

$$P_{m_2} = \frac{\left[\varepsilon_1 Q \left(\frac{\gamma_{S_B D} - \gamma_{S_B R}}{\sqrt{(\gamma_{S_B D} + \gamma_{S_B R}) / 2}} \right) + (1 - \varepsilon_1) Q \left(\sqrt{2(\gamma_{S_B D} + \gamma_{S_B R})} \right) + Q \left(\sqrt{2\gamma_{S_A D}} \right) \right]}{2} \quad (4.34)$$

m_3 stratejisinde röleden ağ kodlamalı iletim yapılır ve bu durumda hedefteki bit hata olasılığı şu şekilde hesaplanabilir (Özdemir, 2012; Özdemir, 2013):

$$P_{m_3} = \sum_{\substack{\bar{d}_{S_A}(n), \bar{d}_{S_B}(n), d_R(n) \in \{0,1\} \\ \bar{d}_{S_A}(n) \neq \bar{d}_{S_B}(n)}}} \Pr \{d_R(n) | d_{S_A}(n), d_{S_B}(n)\} \Pr \{\bar{d}_{S_A}(n), \bar{d}_{S_B}(n) | d_{S_A}(n), d_{S_B}(n), d_R(n)\} \quad (4.35)$$

Buradaki ifadeler aşağıdaki gibi ifade edilebilirler (Özdemir, 2012):

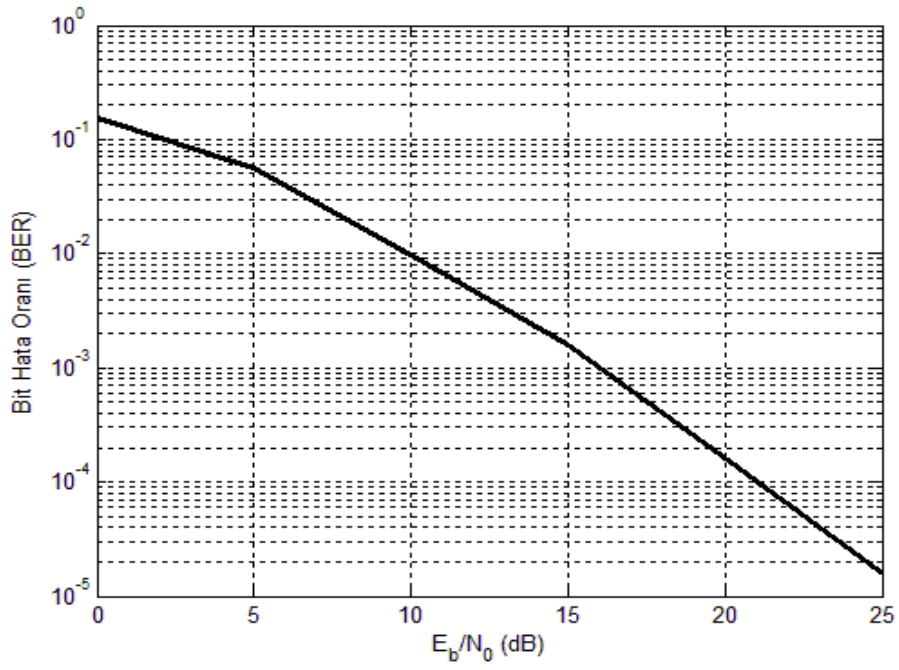
$$\Pr \{\bar{d}_{S_A}(n), \bar{d}_{S_B}(n) | d_{S_A}(n), d_{S_B}(n), d_R(n)\} = \Pr \left\{ \gamma_S [\bar{d}_{S_A}(n), \bar{d}_{S_B}(n), \bar{d}_{S_A}(n) \oplus \bar{d}_{S_B}(n)] | \gamma_S [d_{S_A}(n), d_{S_B}(n), d_R(n)] \right\} \quad (4.36)$$

$$\gamma_S(a, b, c) = (-1)^a \gamma_{RD} + (-1)^b \gamma_{S_A D} + (-1)^c \gamma_{S_B D} \quad (4.37)$$

$$\Pr \{d_R(n) | d_{S_A}(n), d_{S_B}(n)\} = \begin{cases} 1 - \varepsilon_R & d_R(n) = \tilde{d}_R(n) \text{ için} \\ \varepsilon_R & d_R(n) \neq \tilde{d}_R(n) \text{ için} \end{cases} \quad (4.38)$$

$$\tilde{d}_R(n) = d_{S_A}(n) \oplus d_{S_B}(n) \quad (4.39)$$

Şekil 4.6'da MARC yapısının seçimli aktarma durumunda BPSK işaretlemesi için Rayleigh sönümlmeli kanallardaki simülasyon eğrisi verilmiştir. Eğri elde edilirken kanal varyansları $\sigma_{ij}^2 = 1$, $i \rightarrow j$ ($i \in \{S_A, S_B, R\}$, $j \in \{R, D\}$) alınmıştır. Görüldüğü gibi yukarıda sunulan seçimli aktarma stratejisi tam çeşitleme kazancı sunmaktadır.



Şekil 4.6. MARC modelinin seçimli aktarma durumunda Rayleigh sönümlmeli kanallardaki performansı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Röle terminallerinin kullanıcılardan aldıkları veri paketlerini birleştirerek yeni paketler elde etmek suretiyle hedeflere iletim yapması fikrine dayanan ağ kodlaması sayesinde iletilen toplam paket sayısının azaltılması sağlanmaktadır. Böylelikle klasik işbirlikli ağlara göre spektral verimlilikte artış, yönlendirmenin basit hale gelmesi ve paket iletim gücünün azalması gibi birçok önemli üstünlük sağlanmaktadır.

İki veya daha fazla sayıda kullanıcının bir veya daha fazla röle terminali yardımıyla ortak bir hedefe veri gönderdiği MARC, ağ kodlamasının işbirlikli telsiz ağlardaki önemli bir uygulamasıdır. Bu bölümde kullanıcıların, rölenin ve hedefin çok antenli düğümler olarak ele alındığı ve anten seçim tekniklerinin kullanıldığı Bölüm 3.6.3'te verilmiş olan MARC sistem modeli için $K = 0.6$ alınarak Rician sönümlemeli kanallarda elde edilmiş simülasyon sonuçları sunulmuştur. Hata yayılımı probleminin neden olduğu performans düşüşleri ile mücadele için ise röledeki hata olasılığının hedefte göz önüne alındığı Bölüm 4.5'te detayları verilmiş olan en yüksek olabilirlik (ML) karar kuralından faydalanılmıştır. İncelenen sistem modelinin çeşitleme kazancı sağladığı simülasyon sonuçları ile gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında incelenen sistem modelinin hedefte klasik MRC, seçimli birleştirme tekniklerinin kullanıldığı ve rölelerin hedefe her zaman iletimde olmayabildiği literatürdeki mevcut çalışmalardan (Chiodi ve ark., 2020) en önemli farkı röle ve hedefte ML sezim tekniğinin kullanılmış olması ve rölenin her durumda iletim yapmasıdır. Hata yayılımı ile mücadelede C-MRC tekniğinin kullanıldığı ve anten seçiminin incelenmediği literatürdeki çalışmalardan (Nasri ve ark., 2013; Renzo, 2014) bir başka farklı tarafı ise hata yayılımı ile mücadelede ML tekniğinin kullanılmış olmasıdır.

5.1.1. Anten seçimli MARC modeli için simülasyon sonuçları

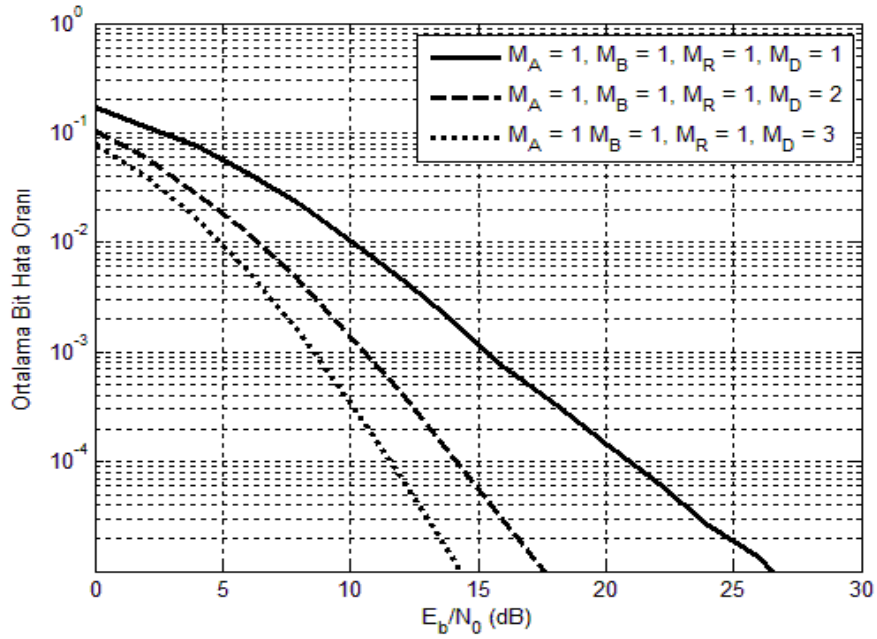
Şekil 5.1'de $M_A = M_B = M_R = 1$ ve $M_D = 1, 2, 3$ durumlarında elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri verilmiştir. Eğriler elde edilirken birinci, ikinci ve üçüncü fazlarda hedefteki alıcı anten seçim kriterleri sırasıyla şu şekilde alınmıştır:

$$v_1 = \arg \max_{i=1,2,\dots,M_D} |g_{1,i}^A|^2 \quad (5.1)$$

$$v_2 = \arg \max_{j=1,2,\dots,M_D} |g_{1,j}^B|^2 \quad (5.2)$$

$$v_3 = \arg \max_{q=1,2,\dots,M_D} |\alpha_{1,q}|^2 \quad (5.3)$$

Burada v_1 , v_2 ve v_3 hedefte seçilen tek aktif alıcı antenlerin indislerini göstermektedir. Şekil 5.1'de sunulan eğrilerin eğimlerinden görüldüğü gibi hedefteki toplam anten sayısı arttıkça elde edilen çeşitleme kazancı da artmaktadır.



Şekil 5.1. $M_A = M_B = M_R = 1$ ve $M_D = 1, 2, 3$ durumlarında Rician sönümlenmeli kanallarda ($K = 0.6$) BPSK işaretlemesi ile elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri

Şekil 5.2'de $M_R = 1, 2, 3$ ve $M_A = M_B = M_D = 1$ elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri sunulmuştur. Eğriler elde edilirken birinci ve ikinci fazlarda röledeki alıcı anten seçim kriterleri sırasıyla şu şekilde alınmıştır:

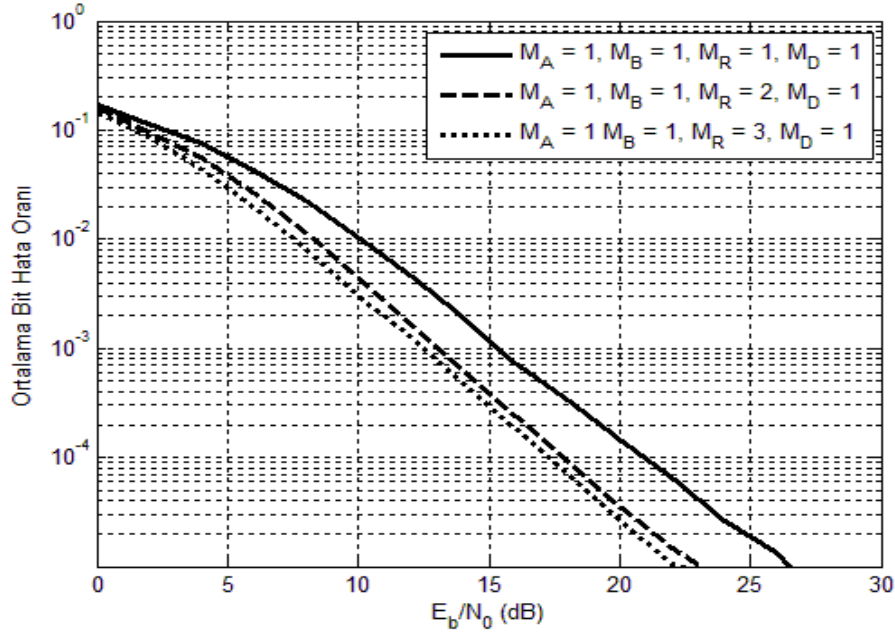
$$u_1 = \arg \max_{i=1,2,\dots,M_R} |h_{1,i}^A|^2 \quad (5.4)$$

$$u_2 = \arg \max_{j=1,2,\dots,M_R} |h_{1,j}^B|^2 \quad (5.5)$$

Burada u_1 ve u_2 rölede seçilen tek aktif alıcı antenlerin indislerini göstermektedir. Üçüncü fazda verici anten seçim kriteri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$u_3 = \arg \max_{q=1,2,\dots,M_R} |\alpha_{q,1}|^2 \quad (5.6)$$

Burada u_3 rölede seçilen antenin indisidir. Eğrilerden görüldüğü gibi röledeki anten sayısının artışı SNR kazancı sağlarken çeşitleme kazancı sunmamaktadır.



Şekil 5.2. $M_R = 1, 2, 3$ ve $M_A = M_B = M_D = 1$ durumlarında Rician sönümlmeli kanallarda ($K = 0.6$) BPSK işaretlemesi ile elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri

Şekil 5.3'te $M_A = M_B = 1$, $M_R = 2$ ve $M_D = 2, 3$ durumlarında BPSK işaretlemesi ile elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri sunulmuştur. Eğriler elde edilirken birinci fazda röledeki ve hedefteki alıcı anten seçim kriterleri sırasıyla şu şekilde alınmıştır:

$$u_1 = \arg \max_{j=1,2,\dots,M_R} |h_{1,j}|^2 \quad (5.7)$$

$$v_1 = \arg \max_{j=1,2,\dots,M_D} |g_{1,j}|^2 \quad (5.8)$$

u_1 ve v_1 sırasıyla rölede ve hedefte seçilen tek aktif alıcı antenlerin indislerini belirtmektedir. İkinci fazda röledeki ve hedefteki alıcı anten seçim kriterleri sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

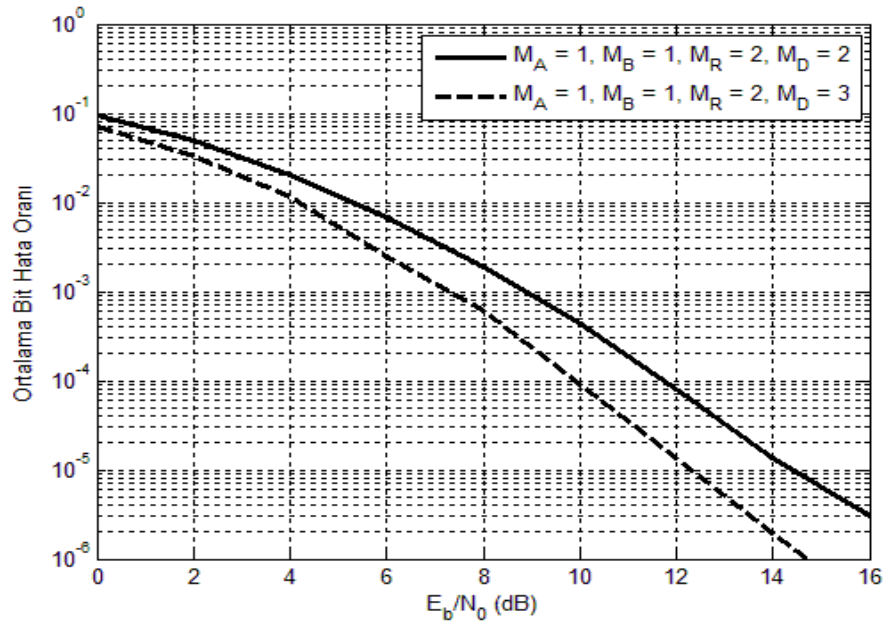
$$u_2 = \arg \max_{j=1,2,\dots,M_R} |h_{2,j}|^2 \quad (5.9)$$

$$v_2 = \arg \max_{j=1,2,\dots,M_D} |g_{2,j}|^2 \quad (5.10)$$

u_2 ve v_2 sırasıyla rölede ve hedefte seçilen tek aktif alıcı antenlerin indisleridir. Üçüncü fazda verici-alıcı anten seçim kriteri şu şekilde verilebilir:

$$u_3, v_3 = \arg \max_{\substack{p=1,2,\dots,M_R \\ q=1,2,\dots,M_D}} |\alpha_{p,q}|^2 \quad (5.11)$$

u_3 ve v_3 sırasıyla röle ve hedefte seçilen antenlerin indisleridir.

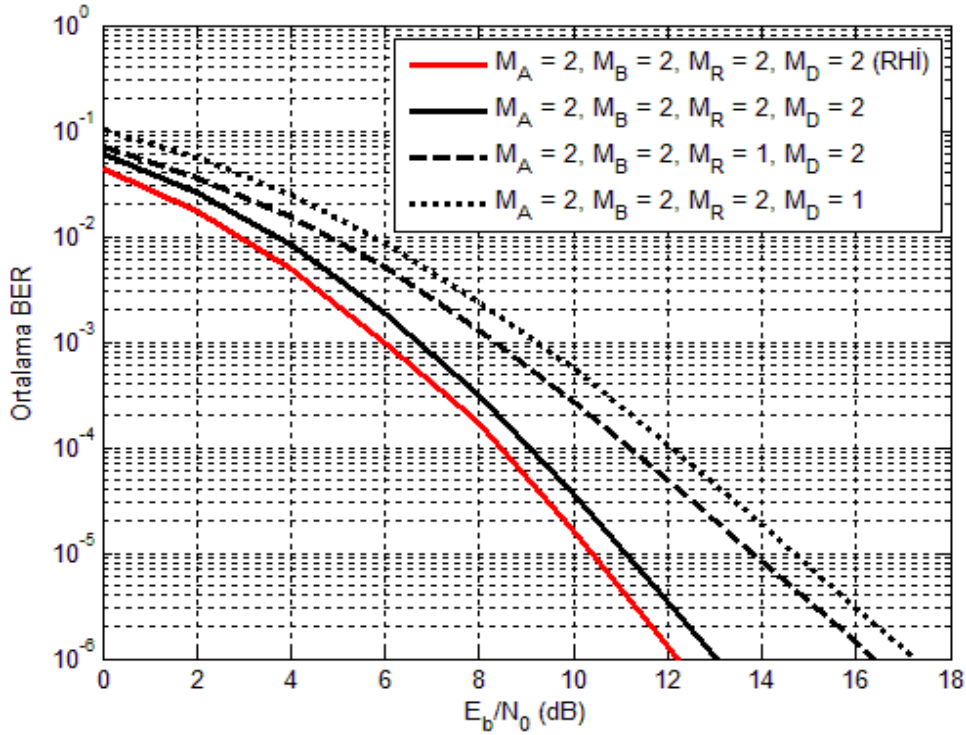


Şekil 5.3. $M_A = M_B = 1$, $M_R = 2$ ve $M_D = 2, 3$ durumlarında Rician sönmülemeli kanallarda ($K = 0.6$) BPSK işaretlemesi ile elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri

Şekil 5.4'te $M_A = M_B = 2$, $M_R = 1, 2$ ve $M_D = 1, 2$ durumlarında elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri verilmiştir. Eğriler elde edilirken kullanılan anten seçim kriteri şu şekilde ifade edilebilir:

$$k_1, k_2, u_1, u_2, u_3, v_1, v_2, v_3 = \arg \min (P_{S_A D} + P_{S_B D} + P_{S-R-D}) \quad (5.12)$$

$P_{S_A D}$ ve $P_{S_B D}$ sırasıyla $S_A \rightarrow D$, $S_B \rightarrow D$ linklerin anlık hata olasılıklarıdır. P_{S-R-D} ise kaynaklar-röle-hedef linkinin eşdeğer hata olasılığıdır. Şekil 5.4'te görülen RHİ (röleden hatasız iletim) eğrisi $M_A = M_B = M_R = M_D = 2$ durumunda ve rölede hata yapılmaması halinde hedefte oluşan ortalama BER değerini göstermektedir. RHİ, aynı anten sayıları için röleden hatalı iletim yapılabildiği durum ile aynı çeşitleme kazancına sahiptir, ancak beklendiği gibi yaklaşık 0.8 dB'lik bir SNR kazancı sağlamaktadır. Röleden hatalı iletim yapılabildiği $M_A = M_B = M_R = 2$, $M_D = 1$ ve $M_A = M_B = M_D = 2$, $M_R = 1$ durumlarındaysa eşit çeşitleme kazancı elde edilmektedir ve $M_A = M_B = M_D = 2$, $M_R = 1$ durumu $M_A = M_B = M_R = 2$, $M_D = 1$ durumuna göre yaklaşık 1 dB değerinde bir SNR kazancı vermektedir.



Şekil 5.4. $M_A = M_B = 2$, $M_R = 1, 2$ ve $M_D = 1, 2$ durumlarında Rician sönümlenmeli kanallarda ($K = 0.6$) BPSK işaretlemesi ile elde edilen ortalama BER performansı simülasyon eğrileri

5.2. Öneriler

Bu yüksek lisans tez çalışmasında DR protokolünün kullanıldığı ağ kodlamalı ve anten seçimli işbirlikli MIMO sistemlerin Rician sönümlmeli kanallardaki performansı konusu araştırılmıştır. İki kullanıcı, bir röle ve bir hedef terminalinden oluşan, üç fazlı bir iletim senaryosuna sahip çoklu erişim röle kanalı modeli ele alınmıştır. Kaynaklar ile hedef arasında doğrudan linkin bulunduğu durum incelenerek terminallerdeki değişik anten sayıları için anten seçim kriterleri sunulmuştur. Röle ve hedefte ML karar kuralından faydalanılarak hata yayılımının neden olduğu performans düşüşleri ile mücadele edilmiştir. Ele alınan sistem modelinin çeşitleme kazancı sağladığı bilgisayar simülasyonları ile gösterilmiştir.

İleriye dönük araştırma konuları arasında incelenen sistem modeli için matematiksel analizlerin gerçekleştirilmesi, güç optimizasyonu probleminin incelenmesi, farklı hata yayılımı teknikleri için performans karşılaştırmaları, çok sayıda röle durumunda bütünleşik anten/röle seçim teknikleri, değişik modülasyon türleri için sistemin kesinti olasılığı, BER ve SER ifadelerinin belirlenmesi verilebilir.

KAYNAKLAR

- Afana, A., Erdogan, E. and Ikki, S., 2016, Quadrature spatial modulation for cooperative MIMO 5G wireless networks, *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Washington, 1-5.
- Ahlsvede, R., Cai N. and Li, S-Y.R., 2000, Network information flow, *IEEE Transactions on Information Theory*, 46 (4), 1204-1216.
- Amarasuriya, G., Tellambura, C. and Ardakani, M., 2011, Performance analysis framework for transmit antenna selection strategies of cooperative MIMO AF relay networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60 (7), 3030-3044.
- Bahceci, I., Duman, T.M. and Altunbasak, Y., 2003, Antenna selection for multiple-antenna transmission systems: performance analysis and code construction, *IEEE Transactions on Information Theory*, 49 (10), 2669-2681.
- Bao, Y. Lee, T.H. and Saltoğlu, B., 2007, Comparing density forecast models, *Journal of Forecasting*, 26 (3), 203--225.
- Brante, G., Stupia, I., Souza, R.D. and Vandendorpe, L., 2013, Outage probability and energy efficiency of cooperative MIMO with antenna selection, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12 (11), 5896-5907.
- Bozdağ, A., İlhan, H. and Özdemir, Ö., 2013, Link adaptive relaying with virtual noise based detection in cooperative wireless networks, *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Haspolat, 1-4.
- Chen, D. and Laneman, J.N., 2006, Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5 (7), 1785-1794.
- Chen, Z., Yuan, J. and Vucetic, B., 2005, Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 54 (4), 1312-1321.
- Chiodi, M. A, Rebelatto, J. L, Rayel, O. K., Souza, R. D, 2020, Energy-Efficiency of Selective Relaying in a MIMO Network-Coded Cooperative System, *IEEE Access*, 8, 92322 – 92331.
- Chun, Y.J., Kim, D.I. and Kim, S.W., 2013, Optimization of network coded MIMO transmission in multiple-access relay network, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12 (5), 2436-2444.
- Cover, T. and Gamal, A.E., 1979, Capacity theorems for the relay channel, *IEEE Transactions on Information Theory*, 25 (5), 572-584.
- Eslamifar, M., Chin, W.H., Yuen, C. and Guan, Y.L., 2012, Performance analysis of two-step bi-directional relaying with multiple antennas, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11 (12), 4237-4242.

- Fan, Y. and Thompson, J., 2007, MIMO configurations for relay channels: Theory and practice, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6 (5), 1774-1786.
- Farhadi, G. and Beaulieu, N., 2009, On the ergodic capacity of multi-hop wireless relaying systems, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8 (5), 2286-2291.
- Foschini, G.J. and Gans, M.J., 1998, On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas, *Wireless Personal Communications*, 6, 311-335.
- Heath, R.W., Sandhu, S. and Paulraj, A., 2001, Antenna selection for spatial multiplexing systems with linear receivers, *IEEE Communications Letters*, 5 (4), 142-144.
- Jiang, C. and Cimini, L.J., 2012, Antenna selection for energy-efficient MIMO transmission, *IEEE Wireless Communications Letters*, 1 (6), 577-580.
- Ju, M. and Kim, I., 2009, ML performance analysis of the decode-and-forward protocol in cooperative diversity networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8 (7), 3855-3867.
- Kim, D., Kim, H. M. and Im, G.H., 2011, Improved network-coded cooperative transmission with low-complexity adaptation to wireless channels, *IEEE Transactions on Communications*, 59 (10), 2916-2927.
- Kramer, G. and van Wijnngaarden, A.-J., 2000, On the white gaussian multiple-access relay channel, *IEEE International Symposium on Information Theory*, Sorrento, 40.
- Krishna, V.S. and Bhatnagar, M.R., 2015, A joint antenna and path selection technique in single-relay-based DF cooperative MIMO networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65 (3), 1340-1353.
- Kumar, M.H., Sharma, S., Thottappan, M. and Deka, K., 2021, Precoded spatial modulation-aided cooperative NOMA, *IEEE Communications Letters*, 25 (6), 2053-2057.
- Laneman, J.N., Tse, D.N.C. and Wornell, G.W., 2004, Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behaviour, *IEEE Transactions on Information Theory*, 50 (12), 3062-3080.
- Larsson, P., Johansson, N. and Sunell, K.E., 2006, Coded bidirectional relaying, *63rd IEEE Vehicular Technology Conference*, Melbourne, 1-5.
- Lee, C.P., Lin, S.C., Su, H.J. and Poor, H.V., 2014, Multiuser lattice coding for the multiple-access relay channel, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 13 (7), 3539-3555.

- Levin, G. and Loyka, S., 2012, Amplify-and-forward versus decode-and-forward relaying: Which is better?, *22th International Zurich Seminar on Communications (IZS)*, Zurich, 123-126.
- Li, J., Cimini, L.J., Ge, J. and Zhang, C., 2016, Optimal and suboptimal joint relay and antenna selection for two-way amplify-and-forward relaying, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15 (2), 980-993.
- Li, Q., Niu, H., Papathanassiou, A. and Wu, G., 2014, 5G network capacity: Key elements and technologies, *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 9, 71-78.
- Liu, C-H. and Xue, F., 2008, Network coding for two-way relaying: rate region, sum rate and opportunistic scheduling, *IEEE International Conference on Communications*, Beijing, 1-6.
- Lu, P-S., Zhou, X., Anwar, K. and Matsumoto, T., 2013, Joint adaptive network-channel coding for energy-efficient multiple-access relaying, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63 (5), 2298-2305.
- Nasri, A., Schober, R. and Uysal, M., 2013, Performance and optimization of network-coded cooperative diversity systems, *IEEE Trans. Commun.*, 61 (3), 1111-1122.
- Onat, F.A., Adinoyi, A., Fan, Y., Yanıkömeroğlu, H., Thompson, J.S. and Marsland, I.D., 2008, Threshold selection for SNR-based selective digital relaying in cooperative wireless networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7 (1), 4226-4237.
- Özdemir, Ö., Altunbaş, İ. and Bayrak, M., 2006, Error performance of super-orthogonal space-time trellis codes with transmit antenna selection, *14th European Signal Processing Conference*, Florence, 1-5.
- Özdemir, Ö., 2011, Telsiz sistemlerde çift yönlü röleli haberleşme, Doktora, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1-128.
- Özdemir, Ö. and Yılmaz, A.Ö., 2012, ML performance analysis of digital relaying in bi-directional relay channels, *Wireless Communications & Mobile Computing*, 12 (8), 676-688.
- Özdemir, Ö., 2012, User selective relaying in multiple access relay channels, *20th International Conference on Software (SoftCOM)*, Split, 1-5.
- Özdemir, Ö., 2013, Mitigating error propagation in multiple access relay channels, *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, Haspolat, 1-4.
- Özdemir, Ö., 2022, Evre-uyumsuz BFSK modülasyonu ile LLR iletimi tabanlı çoklu erişim röle kanalları, *The 30th IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications (SIU 2022)*, Safranbolu.

- Pham, T-H., Liang, Y-C., Nallanathan, A. and Garg H.K., 2010, Optimal training sequences for channel estimation in bi-directional relay networks with multiple antennas, *IEEE Transactions on Communications*, 58 (2), 474-479.
- Proakis, J. and Salehi, M., 2000, Digital communications, Fifth edition, Hackett, M., and Buzcek, L.K., *McGraw-Hill Higher Education*, New York, 1-1170.
- Renzo, M. D, 2014, On the achievable diversity of repetition-based and relay selection network-coded cooperation, *IEEE Transactions on Communications*, 62 (7), 2296-2313.
- Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B., 2003, User cooperation diversity part I and part II, *IEEE Transactions on Communications*, 51 (11), 1927-1948.
- Simoens, S., Munoz-Medina, O., Vidal, J. and Del Coso, A., 2009, Compress-and-forward cooperative MIMO relaying with full channel state information, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58 (2), 781-791.
- Simon, M.K. and Alouini, M-S., 2000, Digital communication over fading channels: A unified approach to performance analysis, Second edition, *Wiley-IEEE Press*, 1-936.
- Smith, G.S., 2004, A direct derivation of a single-antenna reciprocity relation for the time domain, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52 (6), 1568-1577.
- Su, Q. and Rong, Y., 2018, Two-hop AF MIMO relay system optimization with own information from the relay node, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 67 (4), 930-945.
- Wang, B., Zhang, J. and Host-Madsen, A., 2005, On the capacity of MIMO relay channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 51 (1), 29-43.
- Wang, B.H., Hui, H.T. and Leong, M.S., 2010, Global and fast receiver antenna selection for MIMO systems, *IEEE Transactions on Communications*, 58 (9), 2505-2510.
- Wang, T., Cano, A., Giannakis, G.B. and Laneman, J.N., 2007, High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays, *IEEE Transactions on Communications*, 55(7), 1427-1438.
- Wen, T. and Zhu, P., 2013, 5G: A technology vision, *Whitepaper*, Huawei Technol. Co., Ltd.
- Yuksel, M. and Erkip, E., 2007, Multiple-antenna cooperative wireless systems: A diversity-multiplexing tradeoff perspective, *IEEE Transactions on Information Theory*, 53 (10), 3371-3393.

- Zeitler, G., Koetter, R., Bauch, G. and Widmer, J., 2009, On quantizer design for soft values in the multiple-access relay channel, *IEEE International Conference on Communications*, Dresden, 1-5.
- Zhang, H. and Cai, L., 2017, Bi-directional multi-hop wireless pipeline using physical-layer network coding, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 16 (12), 7950-7965.
- Zhang, X., Chen, F. and Wang, W., 2007, Outage probability study of multiuser diversity in MIMO transmit antenna selection systems, *IEEE Signal Processing Letters*, 14 (3), 161-164.
- Zhou, X., Bai, B. and Chen W., 2014, Iterative antenna selection for decode-and-forward MIMO relay systems under a holistic power model, *IEEE Communications Letters*, 18 (12), 2237-2240.

