

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

**ÇOKLU ERİŞİM RÖLE KANALLARINDA EVRE UYUMSUZ  
İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM TEKNİKLERİ**

**MUHAMMET ALİ KARABULUT**

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

**DANIŞMAN  
YRD. DOÇ. DR. HACI İLHAN  
EŞ DANIŞMAN  
DR. ÖZGÜR ÖZDEMİR**

**İSTANBUL, 2015**

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

**ÇOKLU ERİŞİM RÖLE KANALLARINDA EVRE UYUMSUZ**  
**İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM TEKNİKLERİ**

Muhammet Ali KARABULUT tarafından hazırlanan tez çalışması 19.08.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Eş Danışman**

Dr. Özgür ÖZDEMİR  
Selçuk Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Özgür ÖZDEMİR  
Selçuk Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Tansal GÜÇLÜOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Hasari ÇELEBİ  
Gebze Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ender Mete EKŞİOĞLU  
İstanbul Teknik Üniversitesi

---

---

---

---

---

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2015-04-03-YL01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

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

## ÖNSÖZ

---

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardımını ve bilgisini esirgemeyen, bu tezin oluşmasında büyük emek harcayan değerli danışman hocalarım Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN ve Dr. Özgür ÖZDEMİR'e en içten dileklerle teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca verdikleri destekten dolayı tüm çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm eğitim hayatım boyunca bana gösterdikleri her türlü destek ve sevgi için başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme çok çok teşekkür ederim.

Bu tezi benim için çok önemli kişi olan rahmetli dedeme adıyorum.

Ağustos, 2015

Muhammet Ali KARABULUT

## İÇİNDEKİLER

---

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ .....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT .....	xiii
<b>BÖLÜM 1</b>	
<b>GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1    Literatür Özeti .....	1
1.2    Tezin Amacı .....	2
1.3    Hipotez .....	3
1.4    Giriş.....	4
<b>BÖLÜM 2</b>	
<b>KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KANAL MODELLERİ VE SÖNÜMLEME .....</b>	<b>7</b>
2.1    Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal Modeli .....	7
2.2    Sönümlenmeli Kanal Karakteristikleri .....	8
2.2.1    Kanal Parametreleri .....	8
2.3    Kanalların Sınıflandırılması .....	9
2.3.1    Yavaş Sönümlenmeli Kanallar .....	9
2.3.2    Hızlı Sönümlenmeli Kanallar .....	10
2.3.3    Frekans Seçici Kanal .....	10
2.3.4    Frekans Seçici Olmayan (Düz) Kanal .....	10
2.4    Sönümlenmeli Kanal Modelleri.....	11
2.4.1    Rayleigh Sönümlenmeli Kanal Modeli.....	11
2.4.2    Rician Kanal Modeli.....	12
2.4.3    Nakagami-m Kanal Modeli .....	13

2.5	Çeşitleme Teknikleri .....	14	
2.5.1	Zaman Çeşitlemesi .....	14	
2.5.2	Frekans Çeşitlemesi.....	15	
2.5.3	Uzay (Anten) Çeşitlemesi.....	15	
<b>BÖLÜM 3</b>			
<b>SAYISAL MODÜLASYON TEKNİKLERİ.....</b>			<b>16</b>
3.1	Genlik Kaydırmalı Anahtarlama .....	16	
3.2	Faz Kaydırmalı Anahtarlama .....	17	
3.3	Frekans Kaydırmalı Anahtarlama .....	19	
<b>BÖLÜM 4</b>			
<b>İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEME.....</b>			<b>21</b>
4.1	İşbirlikli Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan Aktarma Yöntemleri .....	22	
4.1.1	Kuvvetlendir ve aktar (AF) .....	22	
4.1.2	Çöz ve aktar (DF) .....	23	
4.2	İşbirlikli Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan İletişim Protokolleri .....	24	
4.2.1	Protokol I .....	24	
4.2.2	Protokol II .....	24	
4.2.3	Protokol III .....	24	
<b>BÖLÜM 5</b>			
<b>MARC SİSTEMİ VE ÖZELLİKLERİ .....</b>			<b>26</b>
5.1	MARC Sistem Yapısını Kullanan İşbirlikli Haberleşme Sistem Modeli .....	27	
5.1.1	DPSK Modülasyonlu MARC Sistemi Analizi .....	28	
5.1.2	BFSK Modülasyonlu MARC Sistemi Analizi .....	29	
5.1.3	ML Kestirim Kuralı .....	30	
5.1.4	Simülasyon Sonuçları .....	33	
5.2	Link Uyarlamalı İletim Tabanlı MARC Sistemi .....	38	
5.2.1	Sistem Analizi .....	39	
5.2.2	LAR Tabanlı DPSK Modülasyonlu MARC Sistemi .....	39	
5.2.3	LAR Tabanlı BFSK Modülasyonlu MARC Sistemi .....	40	
5.2.4	ML Kestirim Kuralı .....	40	
5.2.5	Simülasyon Sonuçları .....	41	
<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>			<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>			<b>46</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>			<b>50</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$T_m$	Maksimum zaman gecikmesi
$B_c$	Uyumluluk band genişliği
$D_f$	Doppler frekans kayması
$T_c$	Uyumluluk zamanı
$\sigma_{ij}^2$	Varyans
$E[.]$	Ortalama
$K$	Rice faktörü
$m$	Nakagami parametresi
$\Gamma(.)$	Gamma işlevi
$z_D^i(n)$	Hedefteki gürültü işareti
$z_R^i(n)$	Röledeki gürültü işareti
$E_b$	Bit başına ortalama enerji
$E_S$	Simge enerjisi
$N_0$	Beyaz gürültü tek yönlü güç spektral yoğunluğu
$h_{ij}$	Kanal sönümlenme katsayısı
$\alpha$	Link uyarlamalı güç katsayısı

## KISALTMA LİSTESİ

---

AF	Kuvvetlendir ve İlet (Amplify and Forward)
AWGN	Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü (Additive White Gaussian Noise)
BER	Bit Hata Oranı (Bit Error Rate)
BFSK	İkili Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Binary Frequency Shift Keying)
D	Hedef (Destination)
DF	Çöz ve İlet (Decode and Forward)
DPSK	Farksal İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Binary Phase Shift Keying)
FSK	Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency Shift Keying)
MIMO	Çok Girişli Çok Çıkışlı (Multi Input Multi Output)
ML	En Büyük Olabilirlikli (Maximum Likelihood)
LAR	Link Uyarlamalı İletim (Link Adaptive Relaying)
PDF	Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (Probability Density Function)
PSK	Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying)
R	Röle (Relay)
S	Kaynak (Source)
SNR	İşaret-Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio)



## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Çok yollu sönümlenme .....9
Şekil 2. 2	Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu .....12
Şekil 2. 3	Rician dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu .....13
Şekil 2. 4	Nakagami-m dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu .....14
Şekil 3. 1	ASK demodülatörünün blok diyagramı .....17
Şekil 3. 2	BPSK işareti .....18
Şekil 3. 3	DPSK demodülatörünün blok diyagramı .....19
Şekil 3. 4	BFSK demodülatörünün blok diyagramı .....20
Şekil 4. 1	İşbirlikli iletişim modeli .....22
Şekil 4. 2	Kuvvetlendir ve aktar yöntemi .....23
Şekil 4. 3	Çöz ve aktar yöntemi .....23
Şekil 5. 1	N kaynaklı MARC sistem modeli .....28
Şekil 5. 2	N = 2 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin evre uyumlu ve evre uyumsuz algılama karşılaştırılması sonuçları .....34
Şekil 5. 3	N = 2 için DPSK modülasyonlu MARC sisteminin hızlı sönümlenmeli kanallardaki simülasyon sonuçları .....35
Şekil 5. 4	N = 4 için DPSK modülasyonlu MARC sisteminin hızlı sönümlenmeli kanallardaki simülasyon sonuçları .....35
Şekil 5. 5	N = 2 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin yavaş sönümlenmeli kanallardaki simülasyon sonuçları .....36
Şekil 5. 6	N = 3 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin yavaş sönümlenmeli kanallardaki simülasyon sonuçları .....37
Şekil 5. 7	N = 4 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin yavaş sönümlenmeli kanallardaki simülasyon sonuçları .....37
Şekil 5. 8	N = 3 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin hızlı sönümlenmeli kanallardaki simülasyon sonuçları .....38
Şekil 5. 9	N = 2 için hızlı sönümlenmeli Nakagami-m kanallarında MARC sisteminin simülasyon sonuçları .....42
Şekil 5. 10	N = 2 için hızlı sönümlenmeli Nakagami-m kanallarında MARC sisteminin simülasyon sonuçları .....43
Şekil 5. 11	N = 4 için hızlı sönümlenmeli Nakagami-m kanallarında MARC sisteminin simülasyon sonuçları .....43

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 4. 1 Protokol I.....	24
Çizelge 4. 2 Protokol II.....	24
Çizelge 4. 3 Protokol III.....	25

## ÇOKLU ERİŞİM RÖLE KANALLARINDA EVRE UYUMSUZ İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM TEKNİKLERİ

Muhammet Ali KARABULUT

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN

Eş Danışman: Dr. Özgür ÖZDEMİR

Telsiz haberleşme sistemlerinde karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi sönmüledir. İşaret gücünün düşmesine neden olan sönmüleme etkisinin çözümünde kullanılan yöntemlerden biri çeşitlemedir. Çeşitleme uzay, zaman ve frekans gibi boyutlarda yapılmaktadır. Bu yaklaşımlardan uzay (anten) çeşitlemesi özellikle çok girdili çok çıktılı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) sistemlerde kullanıldığı ve sağladığı üstün performans artışı ve diğer çeşitleme teknikleri ile birlikte kullanıma elverişli olması nedeniyle öne çıkmaktadır. Ancak, çoklu anten kullanmak baz istasyonları için uygun olmasına karşın, boyut ve batarya gücü sınırları nedeniyle gezgin birimler için çok uygun değildir ve bu engele alternatif bir çözüm olarak, “işbirlikli iletişim” tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. İşbirlikli röleli iletişimde, kaynaktan gönderilen mesajlar hedefe iletilirken, hücre içindeki uygun diğer kullanıcılar veya röleler üzerinden genelde kuvvetlendir ve ilet (amplify and forward, AF) veya çöz ve ilet (decode and forward, DF) gibi aktarma yöntemleriyle iletilmektedir. İşbirlikli iletişimde, gezgin birimler tek verici / tek alıcı antene sahip olsalar bile tüm sistemde dağıtılmış (distributed) anlamda uzay çeşitlemesi elde edilebilmektedir. Son yıllarda yapılan araştırmalarda, işbirlikli röleli sistemlerin, işbirliği yapılmayan sistemlere göre aynı işaret-gürültü oranında (Signal-to-noise ratio, SNR) hata başarımını iyileştirebileceği ve iletim hızını artırabileceği görülmüştür.

İşbirlikli iletişim sistemlerinde ortaya çıkan önemli problemlerden birisi, mevcut radyo terminallerinin aynı frekans bandında hem alıcı hem verici olarak çalışmaması nedeniyle ortaya çıkan ve sistemdeki terminal sayısı ile orantılı olarak artan spektral verimlilik kayıplarıdır. Söz konusu band genişliği azalması problemini ortadan kaldırmak üzere röle düğümlerinin aldıkları işaretleri birleştirip yeni paketler oluşturarak hedefe iletim yaptığı ağ kodlaması yaklaşımı önerilmiştir [6]. Böylelikle iletilen paket sayısı azaltılarak ağ kapasitesinde artış, gecikmenin ve tampon belleğin azalması, yönlendirmenin basitleşmesi ve paket iletim gücünün düşmesi gibi birçok önemli avantaj elde edilmektedir. Çok sayıda kullanıcının bir veya daha fazla sayıda röle üzerinden ortak bir hedefe iletim yaptığı çoklu röle erişim kanalı (Multiple Access Relay Channel, MARC) ağ kodlamasının önde gelen uygulamalarındandır.

İşbirlikli iletişim sistemlerinin üzerine yapılmış çalışmaların büyük çoğunluğunda alıcı terminallerde kanal durum bilgisinin mükemmel bir şekilde bulunduğu ve evre uyumlu (coherent) algılama yapıldığı varsayılmaktadır. Kanalin iletilen sembolün hızına göre yavaş değişmesi halinde vericiden gönderilen pilot dizileri ile alıcının düzgün bir kanal kestirimi yapması sağlanabilmektedir. Bununla birlikte kanalın hızlı değiştiği ve taşıyıcı frekansının hatalı kullanıldığı bazı durumlarda kanal kestirim maliyeti oldukça artabilmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için evre uyumsuz iletişim önerilmiştir.

Bu tezde DF tabanlı işbirlikli röle sistemlerinde çoklu erişim röle kanalları (MARC) ile ilgili algoritmalar incelenerek yeni algoritmalar önerilmiştir. Bu sistemlerde farklı kablosuz kanal yapıları ele alınmıştır. Öncelikle ele alınan sistemlerin hata performansları yani Monte Carlo benzetimleri bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir ve türetilen teorik sonuçlarla örtüştüğü gözlemlenmiştir.

Ayrıca, bu tezde DF tabanlı işbirlikli röle sistemleri için hata yayılımını azaltıcı metodlar kullanılmış ve yeni yöntemler önerilerek sistem başarımları araştırılmıştır. DF tabanlı işbirlikli telsiz iletişim sistemlerinde röledeki sezim hatalarının hedefteki başarımları olumsuz etkilemesi sonucu hata yayılımına sebep olmaktadır. Bu problem için çözümler literatürde genelde tek antenli sistemler için önerilmiştir. En büyük olabilirlik (Maximum likelihood, ML) tabanlı sezim, logaritmik olabilirlik (Log-likelihood ratio, LLR) tabanlı iletim, en yaygın kullanılan hata yayılımını azaltıcı yöntemlerdir.

Sonuç olarak, bu tezdeki çalışmalarla gelecekteki telsiz iletişim ağları tasarımlarına yeni yöntemler önerilerek ve çeşitli senaryolardaki analizlerle yardımcı olunması sağlanacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Evre uyumsuz işbirlikli iletişim, çöz ve ilet, çoklu iletişim röle kanalı, en büyük olabilirlikli birleştirici

**NONCOHERENT COOPERATIVE SYSTEMS  
in MULTIPLE ACCESS RELAY CHANNEL**

Muhammet Ali KARABULUT

Department of Electronics and Communications Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Assist. Prof. Hacı İLHAN

Co-Adviser: Dr. Özgür ÖZDEMİR

Fading is one of the most important problems encountered in the wireless communication system. Diversity is one of the methods used in the solution causes power of sign which a decrease fading effect. Diversity can be obtained in space, time and frequency. From these approaches space (antenna) diversity especially multiple input multiple output (MIMO) systems provide superior performance gains than other diversity techniques. Although using multiple co-located antennas can be feasible for base stations, it is not quite appropriate for mobile units due to battery, power and size limitations, thus cooperative communication techniques have become a popular alternative solution to MIMO systems. In cooperative communication networks nodes (users or relays) help the transmission of the message to the destination by using amplify and forward (AF) or decode and forward (DF) relaying methods. This achieves spatial diversity gains in a distributed manner even if the users have single antennas. Recent research have shown that the relay/cooperative systems lead to better error performance and higher transmission rates compared to non-cooperative systems at the same signal-to-noise ratio (SNR).

One of the most important problems that emerge in realization of cooperative communication systems is the spectral efficiency loss increasing with the number of cooperative terminals which is due to the half-duplex constraint of existing radio terminals. Network coding concept is one of the effective approaches proposed in the literature to overcome this bandwidth bottleneck where relay nodes combine the detected signals, create new data streams and transmit them to the destination. By performing such operations on incoming data at information routing nodes, not only the achievable throughput of the network is improved but also the delay in the system, total transmission power and the amount of required buffer memory are decreased. The Multiple Access Relay Channel (MARC) in which several users transmit to a single destination via one or more relays is one of the prominent applications of network coding.

Most of the studies on wireless cooperative communication systems assume that the channel state information (CSI) of the links is perfectly known by the relays and the destination and coherent detection is performed at the receiver terminals. Although the CSI is likely be obtained in slow fading scenarios via estimation from training sequences in the protocol headers, this approach is not practical in block and fast fading environments where the channel changes rapidly. Moreover, channel estimation by training sequences increases complexity of the system and causes reduction in the transmission rate. The main technique proposed to overcome this problem is noncoherent communication.

In this thesis, the effects of multiple access relay channel (MARC) on the error performance of the DF based cooperative systems have been investigated over Rayleigh and Nakagami-m fading channel models by using noncoherent modulation techniques such as binary frequency shift keying (BFSK) and differential phase shift keying (DPSK) for variable location of relay terminals. It is also observed that the Monte-Carlo simulations results verified the theoretical ones.

In addition, in this thesis, error propagation reduction techniques and development of new methods have been investigated. Error propagation occurs in DF based wireless cooperative communication systems due to the detection errors at the relay terminals affecting the performance of cooperative systems in a negative manner. Maximum likelihood (ML) detection, log-likelihood ratio (LLR) transmission, are most widely used methods to reduce error propagation.

**Keywords:** Noncoherent Cooperative communications, decode and forward, multiple access relay channel, maximum likelihood estimation

#### 1.1 Literatür Özeti

Alıcı ve verici terminallerin her ikisinde birden çok sayıda anten kullanılması ile elde edilen MIMO haberleşme modelinin çok yüksek kapasite artışları sağlayarak, bağlantı kalitesi ve düşük verici gücü gibi ihtiyaçları karşılamakta önemli bir yere sahip olduğunu gösteren literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur [1]. MIMO sistemler diğer tek antenli sistemlere göre karmaşık sistemlerdir. MIMO sistemlerin karmaşıklığını düşürmek için anten seçimi kullanılabilir. Klasik MIMO sistemlerin kullanımı hücresel sistemlerin baz istasyonları için uygun olmasına karşın, boyut, maliyet ve donanım karmaşıklığı açısından gezgin birimler için çok uygun değildir. Bu probleme bir çözüm olarak işbirlikli çeşitleme tekniği önerilmiştir [2-3]. Literatürde işbirlikli çeşitleme teknikleri geliştirilerek MIMO sistemlerin sağlamış olduğu hata başarımlarının yakalanması hedeflenmiştir. Ve bu işbirlikli sistemlerde genellikle kanal yapısı olarak Rayleigh, Rician ve Nakagami dağılımları kullanılmaktadır.

İşbirlikli sistemlerde ortaya çıkan problemlerden biri, mevcut radyo terminallerinin yarı-çift yönlü çalışma sınırlaması nedeniyle oluşan ve işbirliği yapan terminal sayısı ile orantılı olarak artan verimlilik kayıplarıdır. Bu problemin etkisini azaltan etkin tekniklerden birisi paket düzeyinde kodlama yaklaşımına dayanan ağ kodlamasıdır [4]. Kullanıcı terminallerin bağımsız veri bloklarını ortak bir hedefe bir röle terminali yardımıyla ilettiği çoklu erişim röle kanalı (Multiple Access Relay Channel, MARC) son zamanlarda önemli ilgi görmüş kablosuz ağ kodlaması uygulamalarındandır [5]. Ağ

kodlamasının, röle-hedef kanalının kapasitesinin düşük olması veya sistemdeki kaynakların sayısının fazla olması durumunda yararlı olması beklenmektedir.

İşbirlikli iletişim sistemlerinde terminal sayısının artması pilot işaretleme ile sönmüleme katsayılarının belirlenmesi suretiyle evre uyumlu (coherent) iletişimde kanal durum bilgisinin bulunduğu ve kanalın iletilen sembolün hızına göre yavaş değişmesi halinde vericiden gönderilen pilot dizileri ile alıcının düzgün bir kanal kestirimi yapması sağlanabilmektedir. Dolayısıyla evre uyumlu algılamada kanal kestirimi yapmanın maliyetini artırmaktadır. Ayrıca senkronizasyon tekniklerinin kullanışlı olmamasından dolayı evre uyumsuz (noncoherent) algılamaya göre pratik değildir. Evre uyumsuz sistemlerin bir diğer avantajı ise taşıyıcı fonksiyonlar alıcı tarafta tekrar oluşturulmadıkları için devre yapıları evre uyumlu olanlara göre daha basittir. Ayrıca kanal durum bilgisi (CSI) hedefte mevcut olmadığında, evre uyumsuz algılama sistemi kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada evre uyumsuz (noncoherent) iletişim tekniklerinin işbirlikli iletişim sistemlerindeki performansına odaklanılmıştır.

Bu tezde DF tabanlı çoklu röleli işbirlikli sistemler ele alınmaktadır. DF tekniğini kullanan işbirlikli sistemlerde önde gelen hata yayılımı ile mücadele teknikleri arasında ML tabanlı sezim [6] gösterilebilir. Ayrıca, MARC ile ilgili literatürdeki çalışmaların bir kısmı [7-10]'deki gibidir. Bu tezde hata yayılımını önleyici tekniklerin çoklu erişim röle kanalı ile hata başarımları analizleri yapılmıştır.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu tezin amacı, ilerleyen teknoloji ile birlikte hayatımızda vazgeçilmez bir yer teşkil eden telsiz iletişim sistemlerinin performansını arttıracak yöntemlerin önerilip çeşitli kanal modelleri üzerinde performanslarının incelenmesidir. Çok kullanıcı bir telsiz ağdaki terminallerin birbirlerinin iletişimine yardımcı olmasının ağ verimliliğini önemli ölçüde artırdığı son yıllarda yapılan çalışmalarla gösterilmiştir. İşbirlikli iletişim adı verilen bu yaklaşımda kaynaktan hedefe veri iletiminde kaynağı dinleyen ve sanal baz istasyonu görevi gören röle gibi komşu kullanıcıların da görev alması sağlanmaktadır. Böylelikle kaynağın göndermiş olduğu verinin çok sayıda kanaldan hedefe iletimi mümkün hale getirilerek performans artışı elde edilmektedir. Kullanılan sistemde çok



sayıda kaynak, bir röle ve bir hedef terminali kullanılması durumunda sistem performansı daha da artmaktadır. İşbirlikli iletişim ağları, röle terminallerinde gerçekleştirilen işaret işleme yaklaşımına göre genel olarak analog ve sayısal aktarmalı ağlar olarak sınıflandırılabilirler. Analog aktarmanın (AF) kullanıldığı işbirlikli telsiz ağlarda alınan işaretler üzerinde kuvvetlendirme işlemi yapılarak hedefe yeniden iletilmektedir. Sayısal aktarmanın (DF) kullanıldığı yapılarda ise kaynak verisi tekrar elde edildikten sonra kodlanıp hedefe aktarılır. AF tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde röledeki gürültü bileşeni de kuvvetlendirilmiş olmasına rağmen hedef birim, işaretin iki bağımsız sönümlenmeli şeklini aldığı için daha iyi bir karar verir. DF tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde kaynak-röle arası kanaldaki bozucu etkiler sonucu oluşan hata yayılımı problemi sistem performansında önemli düşmelere neden olmaktadır. Literatürde hata yayılımı problemini farklı açılardan ele alarak özgün çözümler sunan başlıca teknikler: ML tabanlı sezim, işbirlikli en büyük oran birleştirilmesi (Cooperative maximum ratio combining, C-MRC) ve toplamsal sanal gürültü modeli (Virtual noise, VN) olarak verilebilir. Bu tekniklerden ML tabanlı sezim tek röleli sistemlerde kullanıma daha uygundur [11].

Bu tezde hata yayılımını azaltıcı bu yöntemler kullanılarak tek antenli çok kaynaklı DF tabanlı işbirlikli sistemlerin, farklı kanal yapılarında hata performansları araştırılıp incelenmiştir. Ayrıca hedefte ML kestirim kuralı kullanılarak, farklı kanal yapıları ve kaynak sayıları için DF tabanlı işbirlikli sistemlerin hata performans analizleri yapılmıştır.

### **1.3 Hipotez**

İşbirlikli iletişim sistemlerinde röledeki algılama hatalarının neden olduğu hata yayılımı problemine karşı geliştirilmiş literatürde değişik teknikler bulunmaktadır. Bu tezde, amaç bölümünde evre-uyumsuz algılama durumunda MARC sistem yapısının performansının incelenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca hata yayılımı ile mücadele tekniklerinin MARC sistem modelinde, farklı kanal yapılarındaki (Rayleigh, Nakagami) performans incelemesinin yapılması ve geliştirilmesi de hedeflenmiştir.

Bu tez beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde giriş yapılmaktadır. İkinci bölümde kablosuz iletişim sistemlerinde kanal yapıları ve sönümlenme etkilerinden

bahsedilmiştir. Sönümlenme hakkında bilgi verildikten sonra, kanal parametreleri, kanalların sınıflandırılması ve sönümlenmeli kanallar hakkında detaylı olarak açıklama yapılmıştır. Ayrıca bu bölümde çeşitleme teknikleri verilip, neden çeşitlemeye ihtiyaç duyulduğundan bahsedildikten sonra temel çeşitleme teknikleri tanıtılmıştır. Çeşitleme teknikleri başlığı altında alıcıda birleştirme yöntemleri anlatılmıştır. Üçüncü bölümde tezin konusunu oluşturan işbirlikli çeşitlemeye giriş yapılmış ve rölede kullanılan aktarma yöntemlerinden bahsedildikten sonra, kullanılan iletişim protokolleri verilmiş ve çoklu röleli sistemler üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde DF kullanan Rayleigh sönümlenmeli kanallar için MARC yapısı kullanan işbirlikli sistem ele alınmış ve evre uyumsuz BFSK ve DPSK modülasyonları için sistemin performansı incelenmiştir. Beşinci bölümde Nakagami-m sönümlenmeli kanallar için MARC tabanlı işbirlikli sistemin hata performansı evre uyumsuz BFSK ve DPSK modülasyonları kullanarak incelenmiştir. Sonrasında ise kullanılan sistemin Monte-Carlo benzetim sonuçları sunulmuştur. Son bölümünde ise evre uyumsuz BFSK ve DPSK modülasyonları MARC tabanlı işbirlikli sistemler ele alınarak, hata yayılım problemine çözüm olarak önerilen tekniklerden ML kestirimi üzerinde detaylı olarak durulmuş ve elde edilen Monte-Carlo benzetim sonuçları verilmiştir. Sonuçlar bölümüyle tez sonlandırılmıştır.

#### **1.4 Giriş**

Kablosuz haberleşme sistemlerinin günlük hayattaki kullanım oranının son yıllarda hızlı bir şekilde artış göstermesi, daha hızlı ve kaliteli veri iletimi ve mevcut telsiz kaynakların daha verimli kullanımı ihtiyaçlarını beraberinde getirmiştir. Telsiz haberleşme sistemlerinde, iletim ortamında bulunan yüksek binalar, dağlar, vb. ve terminallerden en az birinin mobil olması iletim kanalının zaman ve frekans uzaylarındaki karakteristiğinin rastgele ve sürekli olarak değişmesine neden olmaktadır. Kanalın dürtü cevabının zamanla değişmesi alıcıda elde edilen işaretin zarfının, çok-yollu sönümlenme sonucu fazlasıyla bozulmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle, telsiz haberleşme sistemlerinde amaç, hedeflenen veri iletimi düzeyini, çok-yollu sönümlenme faktörünün bozucu etkisinden mümkün olduğunca arındırarak sağlamak olmuştur [12]. Alıcı ve verici terminallerin her ikisinde birden çok sayıda anten kullanılması ile elde edilen MIMO haberleşme modelinin çok yüksek kapasite artışları

sağlayarak, bağlantı kalitesi ve düşük verici gücü gibi ihtiyaçları karşılamakta önemli bir yere sahip olduğunu gösteren literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur [13-14]. MIMO sistemler diğer tek antenli sistemlere göre karmaşık sistemlerdir. MIMO sistemlerin karmaşıklığını düşürmek için anten seçimi kullanılabilir. Klasik MIMO sistemlerin kullanımı hücreli sistemlerin baz istasyonları için uygun olmasına karşın, boyut, maliyet ve donanım karmaşıklığı açısından gezgin birimler için çok uygun değildir. Buna bir çözüm olarak işbirlikli çeşitleme tekniği önerilmiştir [2-3]. İşbirlikli çeşitlemede temel fikir, kaynak-hedef arasındaki iletişimin ortamdaki röle adı verilen terminallerin yardımı ile yapılmasıdır. AF ve DF yöntemleri, işbirlikli haberleşme sistemlerinde rölede kullanılan başlıca aktarma yöntemlerindedir [15]. AF yöntemi kaynaktan gönderilen sinyalin kuvvetlendirilip iletilmesi ilkesine dayanırken, DF yönteminde ise kaynaktan gönderilen sinyal rölede çözülüp tekrar kodlanarak hedefe iletilmektedir [16-17]. DF tekniğinde önde gelen hata yayılımı ile mücadele teknikleri arasında en büyük olasılıklı (Maximum likelihood, ML) tabanlı sezim [18] ve link uyarlamalı iletim (link adaptive relaying, LAR) gösterilebilir.

İşbirlikli iletişim sistemlerinde ortaya çıkan önemli problemlerden birisi, mevcut radyo terminallerinin aynı frekans bandında hem alıcı hem verici olarak çalışmaması nedeniyle ortaya çıkan ve sistemdeki terminal sayısı ile orantılı olarak artan spektral verimlilik kayıplarıdır. Literatürde, söz konusu band genişliği azalması problemini ortadan kaldırmak üzere röle düğümlerinin aldıkları işaretleri birleştirip yeni paket verileri oluşturarak hedefe iletim yaptığı ağ kodlaması yaklaşımı önerilmiştir [19]. Böylelikle iletilen paket sayısı azaltılarak ağ kapasitesinde artış, gecikmenin ve tampon belleğin azalması, yönlendirmenin basitleşmesi ve paket iletim gücünün düşmesi gibi birçok önemli avantaj elde edilmektedir. Çok sayıda kullanıcının bir veya daha fazla sayıda röle üzerinden ortak bir hedefe iletim yaptığı çoklu röle erişim kanalı (MARC) ağ kodlamasının önde gelen uygulamalarındandır. Bu sistem modeli üzerinde yapılan çalışmalardan olan [7-8]'de kullanıcı seçimi tabanlı bir MARC modeli incelenmiştir. [20]'da ise AWGN (beyaz gauss gürültülü) kanallar için kafes kodların kullanımının MARC modelinde sağladığı avantajlardan bahsedilmektedir. Literatürde bulunan işbirlikli sistemlerle ilgili çalışmalarda genellikle kanal yapısı olarak Rayleigh, Rician ve Nakagami dağılımları kullanılmaktadır [21-23]. Yapılan çalışmalarda çoklu erişim röle

kanalına sahip işbirlikli sistemlerde ML kestirim kullanılması sistem performansını iyileştirdiği görülmüştür [18].

---

### KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMLERİNDE KANAL MODELLERİ VE SÖNÜMLEME

Kablosuz haberleşme sistemlerinde iletişim esnasında vericiler tarafından iletilen işaretler saçılma, yansıma, kırılma ve kırınım gibi dalga yayılım etkilerine eğilimlidirler. İletim sonunda alıcıdaki işaret ise tüm bu çok yollu yayılım sonucu gelen işaretlerin toplamıdır. Tüm bu yollardan iletilen işaretlerin genliklerinde ve fazlarında farklılıklar olabilir dolayısıyla alıcıdaki toplam işaretin genlik ve faz bileşenlerinde de değişimler gözlemlenebilir. Sönümlenme (fading) olarak adlandırılan bu olay, işaret yapısının da bozulmasına yol açar.

#### 2.1 Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü Kanal Modeli

Toplamsal Beyaz Gauss Gürültülü (Additive White Gaussian Noise, AWGN) kanal modeli, haberleşme sistemlerinde en fazla karşılaşılan bozucu etki modelidir. Bu model, alınan işareti bozma yönünde eklenmiş istatistiksel olarak bağımsız gürültü örneklerinin toplamından oluşur. Gürültü örneklerinin genliği bir Gauss olasılık yoğunluk işlevine (probability density function, PDF) sahiptir. Bu gürültü örnekleri, birbirlerinden bağımsız oldukları için, kendi öz ilinti fonksiyonları ideal olarak bir darbedir. Buna göre, AWGN kanalın güç spektral yoğunluğu tüm frekanslar için düzdür. Bu yüzden bütün işaret frekansları, AWGN kanalı vasıtasıyla özdeş olarak küçültülmüştür. Aynı zamanda, AWGN kanalın genellikle durağan (quasi-static) olduğu ve davranışının zamanla değişmediği kabul edilir. Bu kabuller nedeniyle bir AWGN kanalı, gezgin radyo kanal davranışını uygun şekilde modelleyemez. Haberleşme

sistemleri için çok yollu kanal modeli, kullanımı AWGN kanal modelinden daha zor olan bir kanal modelidir. AWGN'nin olasılık yoğunluk fonksiyonu

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad -\infty < x < \infty. \quad (1)$$

şeklindedir [15]. Burada  $\mu$  beklenen değer,  $\sigma^2$  varyansı göstermektedir.

## 2.2 Sönümlmeli Kanal Karakteristikleri

Hiçbir kanal modeli ideal olmakla birlikte, iletişimdeki sönümlleme dikkate alındığında AWGN gezgin kablosuz iletişim sistemlerini uygun olarak modelleyememektedir. Bu nedenle zamanla değişen kanal karakteristiğini modellemek için sönümlmeli kanal modelleri kullanılmaktadır [24].

### 2.2.1 Kanal Parametreleri

Kablosuz haberleşmede sönümlmeli bir kanalı karakterize etmek için bazı parametreler tanımlanmaktadır. Bu parametreler Doppler yayılımı, uyumluluk band genişliği, uyumluluk süresi ve çok yollu yayılım olarak sayılabilir [25].

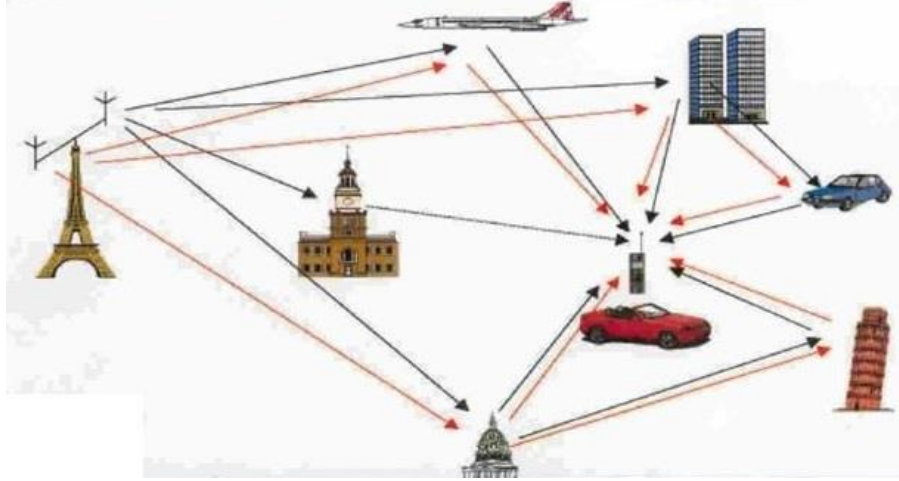
#### A. Doppler Yayılımı

Kısaca dalga özelliği gösteren herhangi bir fiziksel varlığın frekans ve dalga boyu'nun hareketli (yakınlaşan veya uzaklaşan) bir gözlemci tarafından farklı zaman veya konumlarda farklı algılanması olayıdır. Fazdaki ve genlikteki değişimler zamanla değişen çok yollu sönümlmeye sebep olur. Dalga boyunun küçük hareketleri bile toplam dalgada farklılıklara neden olabilir. Doppler yayılımı, iletilen işaretin Doppler Spektrumunun sıfırdan farklı olduğu frekans aralığını göstermektedir. Spektral genişlemenin miktarı gezgin birimin göreceli hızına ve işaretin geliş açısına bağlıdır [25]. Doppler yayılımı  $B_d$  ile ifade edilmektedir.

#### B. Çok Yollu Yayılım

Şekil 2.1'de de görüldüğü gibi çok yollu yayılım, sönümlmeli bir kanalda alıcıda, iletilen işaretin doğal ve insan yapımı nesnelere kırılma, saçılma ve yansımaları sonucu ortaya çıkar. Bundan dolayı alıcıya işaretin birçok yönden farklı gecikmeli, zayıflamalı ve fazla

kopyaları gelir. Bu yüzden çok yoldan gelen işaretlerin alıcıdaki toplamı alınan işaretin gücünde dalgalanmalara sebebiyet verir. Bu dalgalanmalar sönümlenme olarak adlandırılır. Çok yol sönümlenmesine ek olarak çok yol yayılımı iletilen sinyalin alıcıya ulaşması için gerekli olan zamanı uzatır. Zamandaki bu dağılım gecikme yayılımı olarak adlandırılır. Çok yollu yayılım  $T_m$  ile gösterilir.



Şekil 2. 1 Çok yollu sönümlenme

### C. Uyumluluk Band Genişliği

Belirli bir işaretin spektral bileşenlerinin, yaklaşık olarak aynı kazanç ve doğrusal fazda geçebildiği kanalın genişliği, uyumluluk band genişliği olarak adlandırılır. Uyumluluk band genişliği  $B_c$  ile gösterilmektedir. Çok yollu yayılımla arasındaki ilişki,  $B_c \approx 1/T_m$  şeklindedir [25].

### D. Uyumluluk Süresi

Kanalın darbe yanıtının değişmediği zaman aralığına uyumluluk süresi denilmektedir.  $T_c$  ile ifade edilmektedir. Bundan dolayı eğer simge süresi  $T_c$  'den küçük olursa simgenin iletim boyunca zamanda değişmediği varsayılır [25].

## 2.3 Kanalların Sınıflandırılması

### 2.3.1 Yavaş Sönümlenmeli Kanallar

Sönümlenmeli kanalın zamanla değişim periyodunun, kanalın iletilen sembolün hızına göre yavaş değişmesi durumunda kanal yavaş sönümlenmeli (slow fading) kanal olarak

adlandırılır. Kanalin, iletilen işarete zaman uzayında verdiği cevap, iletilen işaretin sembol süresinden daha uzun bir süre için sabittir. Bu sönümlenme tipine sahip kanallarda iletilen işaretin tek bir sönümlenme katsayısı ile işlem gördüğü kabul edilmektedir.

### **2.3.2 Hızlı Sönümlenmeli Kanallar**

Bu kanal modelinde yavaş sönümlenmeli kanalın durumuna ters olarak, sönümlenmeli bir kanalın zamanla değişim periyodu, kablosuz kanaldan iletilen işaretlerin sembol sürelerinden küçük ise kanal hızlı sönümlenmeli (fast fading) kanal olarak adlandırılır. Bundan dolayı iletilen işaretlerin farklı sayıda ve değerde sönümlenme katsayısı ile çarpımsal olarak etkileştikleri söylenebilmektedir.

### **2.3.3 Frekans Seçici Kanal**

Belirli bir işaretin spektral bileşenlerinin yaklaşık olarak aynı kazanç ve doğrusal fazda geçebildiği kanalın band genişliği, iletilen işaretin band genişliğinden daha dar ise, iletilen işaretlerin frekans spektrumuna farklı sönümlenme katsayıları etkiler. Bu sönümlenme tipinde, iletilen işaretin frekans bileşenleri farklı etkilere maruz kaldığından, kablosuz haberleşme kanalı frekans seçici olarak adlandırılmaktadır. Frekans seçici sönümlenme sonucunda iletilen işaretin frekans spektrumu bozulur.

### **2.3.4 Frekans Seçici Olmayan (Düz) Kanal**

Sönümlenmeli kablosuz haberleşme kanallarında, iletilen işaretin band genişliği kanalın uyumluluk band genişliğinden daha küçük band genişliğine sahip ise, kanaldan iletilen işaretler frekans seçici olmayan sönümlenmeye yani aynı sönümlenme katsayısına maruz kalırlar. Diğer bir ifadeyle, frekans seçici olmayan kanal modeli, kanalın frekans spektrumunun iletilen işaretin frekans spektrumu boyunca düz olması durumudur. Yani frekans seçici olmayan sönümlenmeye uğrayan bir işaretin spektral yapısı bozulmaz. Frekans seçici olmayan sönümlenmeye aynı zamanda düz sönümlenme de denilmektedir.



## 2.4 Sönümlmeli Kanal Modelleri

Kablosuz haberleşme kanalının sönümlleme etkisi, zamana bağlı değişimi öngörülemeyen ve rastgele oluşan yansıma, kırılma, zayıflama ve saçılma olaylarından meydana geldiğinden sönümlleme katsayılarının uzun dönemdeki durumları üzerine geliştirilen istatistiksel modeller kullanılmaktadır. Literatürde, rastgele değişkenleri ve rastgele süreçleri modellemek amacıyla önerilmiş birçok istatistiksel model bulunmaktadır. Kablosuz kanalın sönümlleme etkisini modellemek amacıyla kullanılan modeller içerisinde en fazla karşılaşılanları, Rayleigh, Rician ve Nakagami- $m$  dağılımlarıdır.

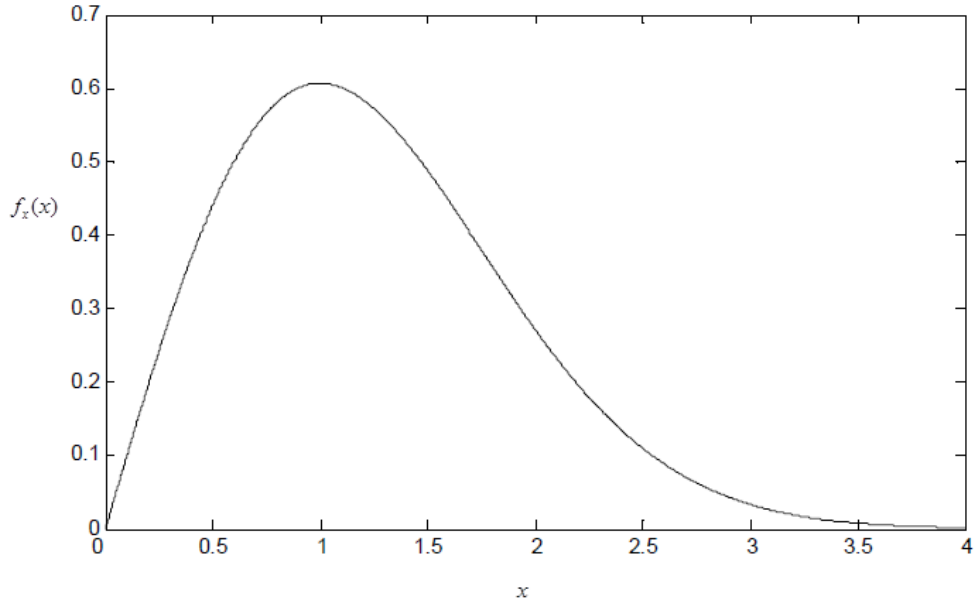
### 2.4.1 Rayleigh Sönümlmeli Kanal Modeli

Alıcı ve verici arasında doğrudan bir iletim yolunun olmadığı durumlarda, iletişim tamamiyle çevredeki binalardan yansıma, kırılma ve saçılmalar sonucu alıcıya ulaşan işaretlerle gerçekleşmektedir. İletilen işaretlerin bileşenlerinin sıfır ortalamalı ve aynı varyanslı rastgele değişkenli olması durumunda, bu işaretin zarfı Rayleigh dağılımlı olmaktadır. Rayleigh dağılımlı rastgele değişkenin PDF ifadesi [25],

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

biçimindedir. Burada  $\Omega = E[x^2]$  kanalın ortalama gücünü temsil etmektedir.

Rayleigh sönümlmeli kanal, hata performansını en kötü etkileyen kanal türünden biridir. Hata performans analizleri yapılırken önemli olan sistemin en kötü durumda gösterdiği performans olduğundan literatürde genellikle Rayleigh sönümlmeli kanal kullanılmaktadır. Rayleigh dağılımının PDF ifadesi Şekil 2. 2'deki gibidir.



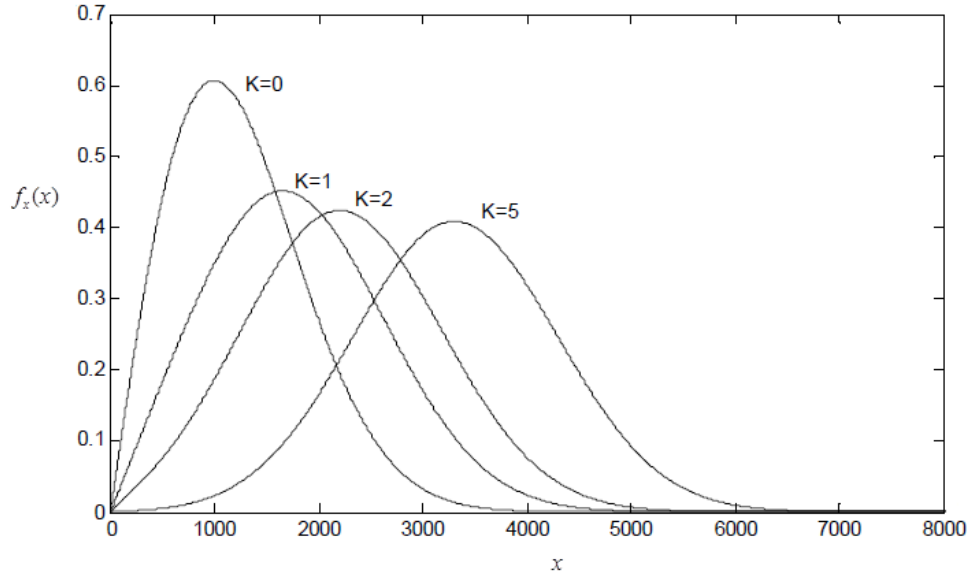
Şekil 2. 2 Rayleigh dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu

#### 2.4.2 Rician Kanal Modeli

Kablosuz haberleşme sisteminde alıcı ve verici arasında doğrudan iletimin bulunması ya da diğer iletim yollarına kıyasla daha baskın bir iletim yolunun bulunması durumunda, sönmüleme katsayılarının Rician dağılımlı olduğu görülmektedir. Bu kanal modelinin oluşmasını sağlayan Gauss süreçlerin varyansları aynı iken, ortalamaları sıfırdan farklı olabilmektedir. Burada, doğrudan iletim yolunun ya da baskın iletim yolunun ortalama gücünü belirleyen etken de Gauss süreçlerinin sıfırdan farklı ortalamalarıdır. Rician dağılımında vericiden alıcıya direkt ulaşan işaretin gücü ile yansıyarak ulaşan işaretlerin gücünün oranını gösteren bir  $K$  parametresi bulunmaktadır. Rician dağılımına ait PDF ifadesi  $K$  parametresine bağlı olarak

$$f_x(x) = \frac{2x(1+K)}{\Omega} \exp\left(-K - \frac{(1+K)x^2}{\Omega}\right) I_0\left(2x\sqrt{\frac{K(1+K)}{\Omega}}\right), \quad x \geq 0 \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $\Omega$  kanalın ortalama gücüdür. Rician dağılımı  $K = \infty$  olması durumunda AWGN kanala,  $K = 0$  olması durumunda ise Rayleigh kanala yakınsamaktadır [25]. Rician dağılımın  $K$  parametresine göre değişimi Şekil 2. 3'deki gibidir.



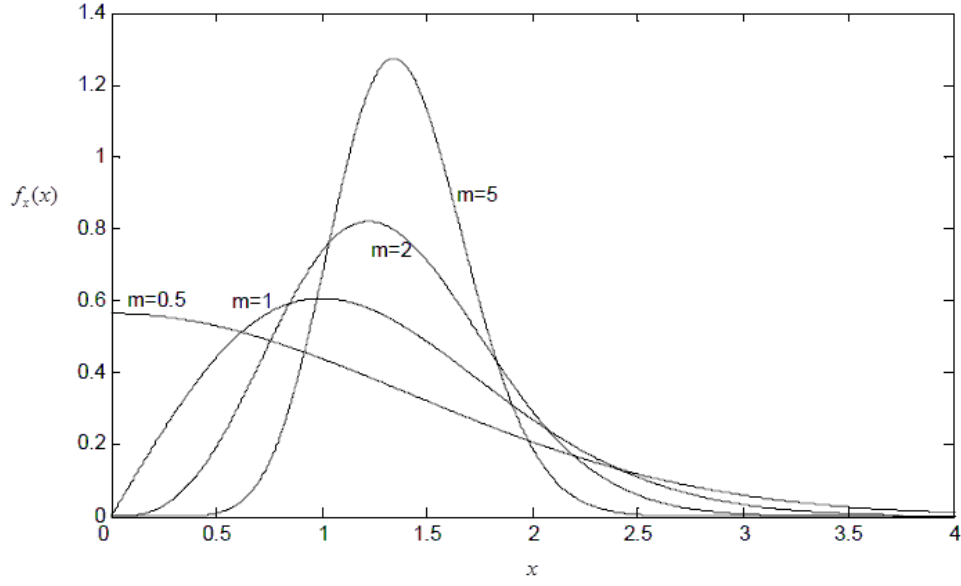
Şekil 2. 3 Rician dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu

### 2.4.3 Nakagami-m Kanal Modeli

Nakagami- $m$  sönümlenme modeli Rayleigh ve Rician sönümlenme modellerine kıyasla daha genel bir dağılım olup uzun mesafelerdeki hızlı sönümlenmeleri karakterize eden bir kanal modelidir. Bu sönümlenme modeline ilişkin dağılımın PDF ifadesi

$$f_x(x) = \frac{2m^m x^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mx^2}{\Omega}\right), \quad x \geq 0, \quad m \geq \frac{1}{2} \quad (4)$$

şeklinde verilmektedir. Burada  $\Gamma(\cdot)$  Gamma fonksiyonudur. Nakagami sönümlenme parametresinin çok büyük değerlerinde  $m \rightarrow \infty$  olduğunda AWGN kanala yakınsar. Bunun yanında  $m$  parametresinin 1 ve 0.5 değerlerinde, sönümlenmeli kanal sırasıyla Rayleigh ve tek taraflı Gauss kanal modellerine dönüşür [26]. Nakagami- $m$  dağılımının  $m$  parametresine göre değişimi Şekil 2. 4'deki gibidir.



Şekil 2. 4 Nakagami-m dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu

## 2.5 Çeşitleme Teknikleri

İşaret gücünde dalgalanmalara neden olan sönümlenme probleminin çözümünde kullanılan yöntemlerden biri çeşitlemedir. Uygulanma şekilleri ve uygulandıkları birimler çok farklı olabilsede çeşitlemede ana fikir, alıcıda iletimi yapılan işaretin birbirinden bağımsız sönümlenme etkilerine maruz kalmış kopyalarının gönderilerek veri kaybı olasılığını azaltmaktır [27-28].

Bağımsız sönümlenmeli iletişim kanalları oluşturmak için geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır. İşaretleri, farklı zaman aralıklarında, farklı taşıyıcı frekanslar kullanarak ya da farklı anten polarizasyonlarında iletmek sırasıyla zaman, frekans ve uzay (anten) çeşitlemesi sağlamaktadır. Bunun gibi, çeşitleme sağlamak amacıyla geliştirilen birçok farklı prensibi benimseyen teknik mevcuttur.

### 2.5.1 Zaman Çeşitlemesi

Zaman çeşitlemesinde ana fikir istenilen işaretin farklı zaman dilimlerinde iletilmesidir. Böylelikle alıcıda bağımsız sönümlenmeye maruz kalmış işaretler elde edilmiş olur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, birbirini takip eden zaman dilimleri arasındaki zaman ayrımı en azından kanalın uyumluluk süresi kadar olmasıdır [15]. Uyumluluk süresinin ise gezgin birimin hızına bağlı olduğu düşünüldüğünde, gezgin birimin çok

yavaş hareket etmesi durumunda istenmeyen gecikmeler ve yüksek güç gerektiren durumlar ortaya çıkabilir.

### **2.5.2 Frekans Çeşitlemesi**

Frekans çeşitlemesinde aynı işaret birbirinden farklı frekanslarda gönderilmektedir. Bu sayede alıcıya farklı sönümlenme etkilerine maruz kalmış işaretler gelmektedir. Frekans çeşitlemesinde frekans aralığının uyumluluk band genişliğinden büyük olması gerekmektedir. Aksi halde semboller arası girişim meydana gelmektedir. Bu tekniğin dezavantajı, kullanılan kanal sayısı kadar alıcı gerektirmesi ve birden fazla frekans kullanıldığından dolayı band verimliliğinin düşmesidir.

### **2.5.3 Uzay (Anten) Çeşitlemesi**

Uzay (anten) çeşitlemesi verici ve/veya alıcıda kullanılan kanalları oluşturması prensibine dayanır. Anten sayısını arttırarak bağımsız iletişim hem alıcı hem de verici tarafta çoklu anten kullanımı ile elde edilen çok girdili çok çıktılı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) sistemler sağladıkları üstün performans artışı ve diğer çeşitleme teknikleri ile birlikte kullanıma elverişli olmaları nedeniyle öne çıkan anten çeşitlemeli sistemlerdir. Anten çeşitleme tekniklerinin en büyük avantajı, fazladan band genişliği ve iletim gücü artımı gerektirmemesidir. Bağımsız sönümlenme elde edilmesi için dikkat edilmesi gereken durum, antenler arasındaki mesafenin gezgin iletişim için,  $\lambda$  dalga boyu olmak üzere,  $0,5 \lambda - 0,8 \lambda$  arası olmalıdır [29].

### SAYISAL MODÜLASYON TEKNİKLERİ

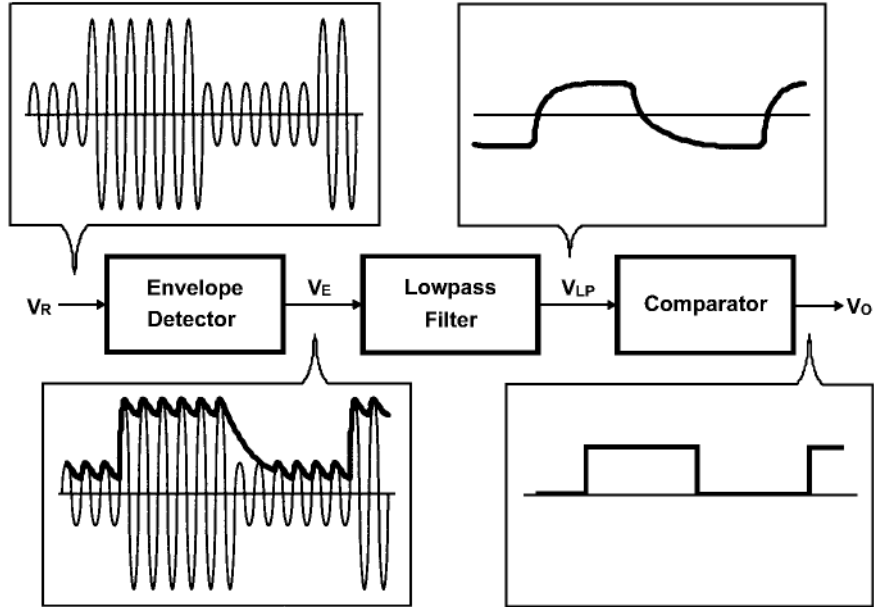
Gelişen işaret işleme teknolojisinin getirdiği kolaylıklardan faydalanabilmek amacıyla geliştirilen sayısal sistemlerin uygulama sahaları içerisinde en büyük paya sahip alanlardan biri sayısal haberleşme sistemleridir. Sayısal modülasyon teknikleri, gerek kodlama ve kod çözme işlemlerinin uygulanmasına imkan vermesinden dolayı gerekse gürültüye ve diğer bozucu ortam etkilerine karşı analog modülasyon tekniklerine oranla daha düşük hassasiyetli olması nedeniyle, günümüzde modern haberleşme sistemleri için vazgeçilmez olmaktadır.

Sayısal modülasyon teknikleri içerisinde, taşıyıcı işaretin genlik, frekans veya faz değerlerinin iletilmek istenen işarete göre modüle edilmesi fikrine dayanan genlik kaydırmalı anahtarlama, faz kaydırmalı anahtarlama ve frekans kaydırmalı anahtarlama önemli bir yere sahiptir.

#### 3.1 Genlik Kaydırmalı Anahtarlama

Genlik kaydırmalı anahtarlama (Amplitude Shift Keying, ASK) modülasyonunda bilgi sinyalinin genliği artarken taşıyıcı sinyalinin de genliği artar. En üst seviyeye bilgi sinyalinin pozitif alternanstaki maksimum değerinde ulaşılır. Bilgi sinyalinin genliği düşmeye başladığında taşıyıcı sinyalinde genliği düşer. En alt seviyeye bilgi sinyalinin negatif alternanstaki maksimum seviyesinde ulaşılır. Genel olarak genlik modülasyonun oluşumu bu şekilde açıklanabilir. ASK modülasyonda, taşıyıcının genliği gönderilmek istenilen bilgi işaretine göre değiştirilir. 1 bitini göndermek için taşıyıcı özel bir genlikle, 0 bitini göndermek için ise başka bir özel genlik ile gönderilir. Bu arada taşıyıcının frekansı sabit tutulur. Tek başına diğer sayısal modülasyon türlerine göre

daha verimsiz olduğundan, ani kazanç değişimlerinden ve gürültüden daha fazla etkilendiğinden günümüzde yaygın olarak kullanılan bir modülasyon tipi değildir. ASK modülasyonunun demodülatör diyagramı Şekil 3. 1'deki gibidir.



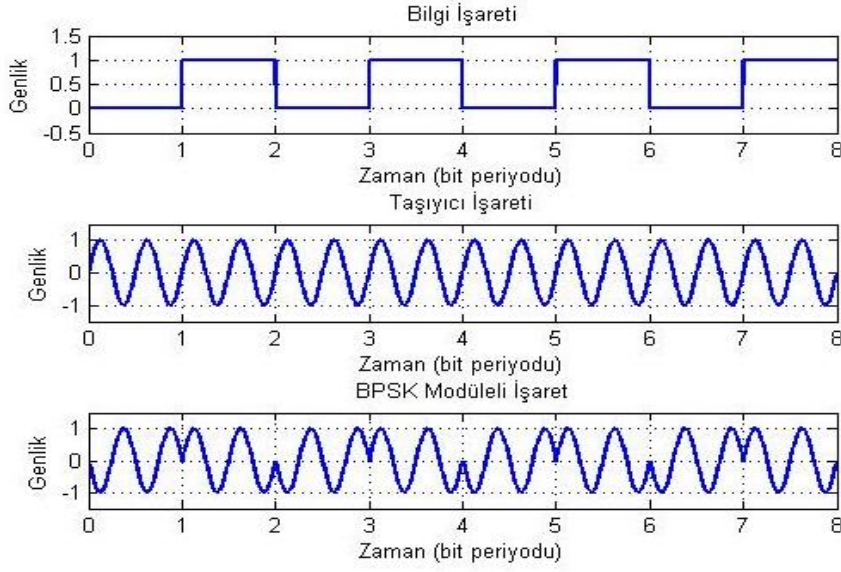
Şekil 3. 1 ASK demodülatörünün blok diyagramı

### 3.2 Faz Kaydırmalı Anahtarlama

Faz kaydırmalı anahtarlama (Phase Shift Keying, PSK) modülasyonunda temel fikir iletilmesi amaçlanan sayısal mesaj işaretine karşı düşen ayrık bir faz değerine sahip bir taşıyıcı işaret üretilmesidir. İkili işaretler için faz kaydırmalı anahtarlama bir taşıyıcının fazı sayısal işaretin iki seviyesine bağlı olarak iki değer arasında değiştirilir. PSK modülasyonunda, modülatörün girişine uygulanan bit dizisi içinden  $k$  bitlik gruplara karşılık modülatörün çıkışında  $M = 2^k$  tane faz değerinden birine sahip bir dalga formu üretilmektedir. Burada,  $M$  modülasyon seviyesini göstermektedir. Ayrıca bu değer artması göreceli olarak veri iletim hızını ve band verimliliğini artırıp, sistemin hata performansında düşüslere neden olmaktadır.

İkili faz kaydırmalı anahtarlama (Binary Phase Shift Keying, BPSK) modülasyonu tekniğinde, faz modülasyonu temel alınıp bilgi işaretinin bit değerine göre taşıyıcı işaretin fazı değiştirilip BPSK modüleli işaret elde edilir. Bir çıkış fazı 1 mantık düzeyini diğeri ise 0 mantık düzeyini temsil eder ve sayısal giriş sinyali değiştiğinde çıkış

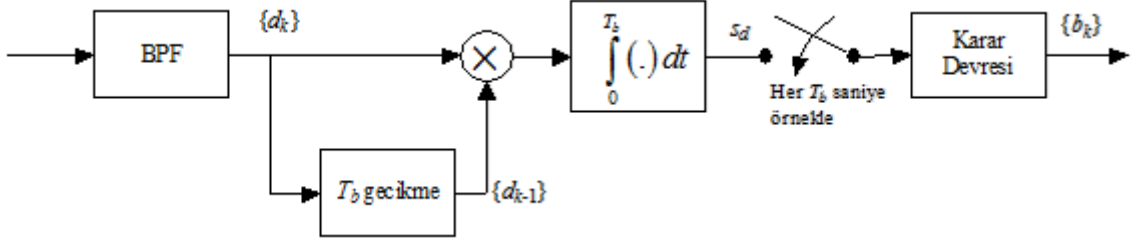
taşıyıcısının fazı  $180^\circ$  farklı iki açı arasında kayar. BPSK modülasyonu sonucu ortaya çıkan işaret Şekil 3. 2'deki gibidir.



Şekil 3. 2 BPSK işareti

Alternatif olarak sabit sinyal referansı ile çalışmak yerine referansı kendinden alan sistemler de vardır. Bu sistemde modülatör sabit referansa göre fazın kendisi yerine alınan sinyalin fazındaki değişiklikleri veri olarak belirler. Böyle bir düzen ardışıl fazlar arasındaki değişiklikleri esas aldığından buna da farksal faz kaydırmalı anahtarlama (Differential Phase Shift Keying, DPSK), referans işaretinin bir kopyasını gerektirmediğinden dolayı normal PSK'ya göre oldukça daha basit şekilde işlenebilmekte ve yürütülebilmektedir. Aynı zamanda DPSK farksal algılama çeşitli birleştirme teknikleriyle birlikte alıcıdaki karmaşıklık ve performans arasındaki dengeyi önemli bir ölçüde sağlayan yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [15]. DPSK'da alınmış olan işaret bir sembol zaman dilimi geciktirilerek gelen işaretin demodülasyonu için kullanılır. Bu sayede alıcıda harici bir osilatöre gereksinim ortadan kalkar ve daha basit bir alıcı ile haberleşme gerçekleştirilir. DPSK demodülasyonunda bir önceki zaman dilimindeki sembol için alınan taşıyıcı kullanılarak o anki sembolün çözülmesi gerçekleştirilir. DPSK modülasyonunun demodülatör blok diyagramı Şekil 3. 3'teki gibidir.



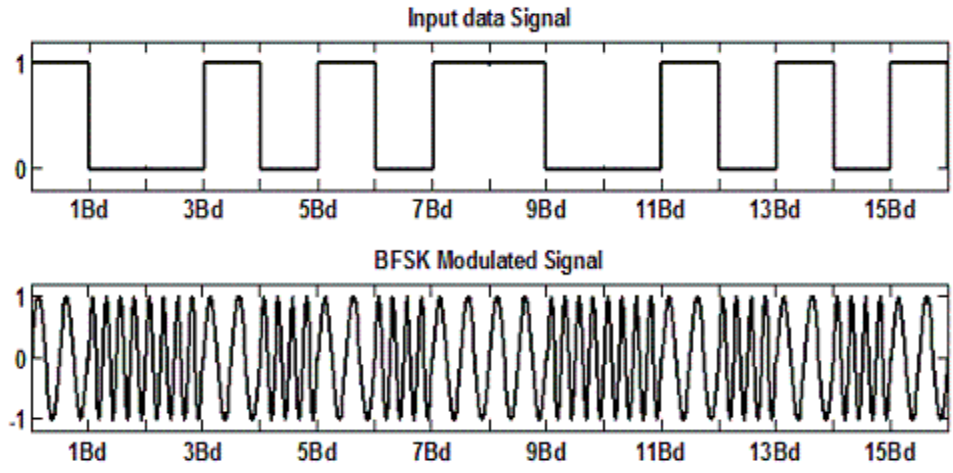


Şekil 3. 3 DPSK demodülatörünün blok diyagramı

### 3.3 Frekans Kaydırmalı Anahtarlama

Frekans kaydırmalı anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK) modülasyonu, iletilmesi amaçlanan sayısal mesaj işareti karşılığında ayrı bir frekans değerine sahip bir dalga formunun üretilmesi fikrine dayanmaktadır. Yüksek güçlü vericilerde SNR'ın çok küçük olması istenir. Yüksek güçlü genlik modülasyonlu vericilerde SNR problem yaratacak kadar büyük olur. Bu problemden kurtulmak için frekans modülasyonu geliştirilmiştir. Frekans modülasyonunda bilgi işaretinin genliğine göre taşıyıcı işaretin frekansı değişir. Temel band işaretin sadece iki değerden birini aldığı varsayıldığından, modülasyon işlemi bir anahtarlama işlevi olarak düşünülebilir. FSK'da taşıyıcı işaretin ani frekansı, sayısal işarete bağlı olarak iki veya daha çok değer arasında anahtarlanabilir. FSK modülatörü de PSK modülatörüne benzer olarak  $M = 2^k$  tane olurlu dalga formundan birini üretmektedir. Burada, olurlu dalga formlarının her biri farklı frekanslı taşıyıcıdır. PSK modülasyonlu işaretlerinden farklı olarak,  $M$  değerinin artması hem veri iletim hızını arttırırken hem de iletim için gerekli band genişliğini arttırmaktadır. Ayrıca bu değer artması, sistemin hata performansında iyileşmeye neden olmaktadır.

İkili frekans kaydırmalı anahtarlama (Binary Frequency Shift Keying, BFSK), sayısal bilginin 0 ve 1 bitlerine bağlı olarak aynı genlik ve fazdaki taşıyıcının frekansının iki farklı değerden biri seçilmesiyle elde edilen modülasyon tipidir. Taşıyıcının genliği istenen hata olasılığına ve kullanılan güce göre ayarlanırken, fazı genelde sıfır seçilir. BFSK modülasyonu sonucu oluşan işaret Şekil 3. 4'deki gibidir.



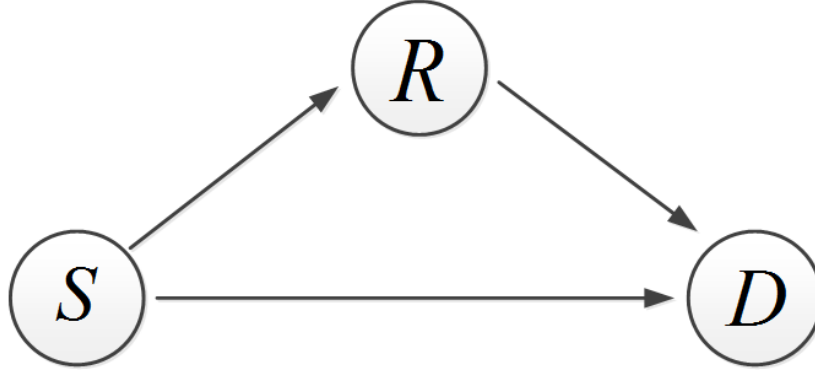
Şekil 3. 4 BFSK modülasyonu sonucu oluşan işaret

### İŞBİRLİKLİ ÇEŞİTLEME

Önceki bölümlerde temel çeşitleme teknikleri başlığı altında sönümlemenin negatif etkilerine karşı kullanılan çeşitleme tekniklerinden bahsedildi. Bunlardan uzay (anten) çeşitlemesinin kullanıldığı MIMO sistemlerin en önemli avantajlarından biri verici ve alıcı çeşitlemesine olanak sağlamalarıdır. Fakat pratikte gezgin kullanıcılar üzerine çok sayıda anten yerleştirmek mümkün olmamaktadır. Bu yüzden de MIMO sistemlerinin sağlayacağı kazançlar elde edilememekte ve gerek maliyet, gerek donanım, gerekse boyut sınırlamalarından dolayı MIMO sistemler gezgin kullanıcılar için kullanışlı olmamaktadır [30].

Son yıllarda tek antenli birimler kullanarak, MIMO avantajlarının elde edilebileceği bir sistem olan işbirlikli haberleşme sistemleri üzerinde durulmuştur. Yapılan araştırmalar, yeni nesil iletişim sistemlerinin gerektirdiği yüksek veri hızı seviyelerine ulaşmada, daha geniş bir kapsama alanı ihtiyacını karşılamada ve daha iyi bir servis kalitesine ulaşmada yeni bir anten çeşitleme yaklaşımı olan işbirlikli çeşitleme tekniğinin önemli bir yere sahip olacağını göstermektedir [30]. İşbirlikli kablosuz iletişim sistemlerinde sanal bir anten dizisi oluşturularak çeşitleme kazancı elde edilmektedir. İşbirlikli iletişim yaklaşımına yönelik öncü çalışmalar Van Der Meulen tarafından yapılmıştır [31]. Bu çalışmada Cover ve El Gamal'ın yaptıkları çalışmayla röle kanalları için ideal işbirlikli haberleşme konusu daha da genişletilmeye çalışılmıştır [32]. Daha sonralarda, Laneman'ın yaptığı çalışmaları ile işbirlikli çeşitleme yeniden önem kazanmıştır [33].

Klasik bir işbirlikli sistem yapısı Şekil 4. 1'de görülmektedir. Bu sistem kaynak (source, S), röle (relay, R) ve hedef (destination, D) adı verilen üç birimden oluşmaktadır.



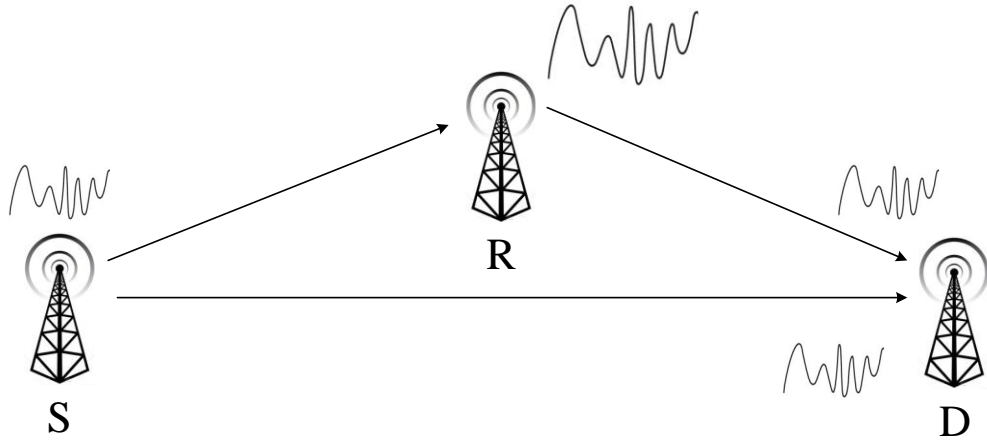
Şekil 4. 1 İşbirlikli iletişim modeli

#### 4.1 İşbirlikli Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan Aktarma Yöntemleri

İşbirlikli haberleşmede röle terminalinin görevi kendisine gelen işareti hedefe iletmektir. Fakat burada dikkat edilmesi gereken nokta rölenin işareti nasıl bir işaret işleme tekniği kullanarak ileteceği konusudur. Burada bahsedilen işaret işleme teknikleriyle aktarma yöntemleri kastedilmektedir. Kullanılan bu aktarma yöntemlerinin sistemin performansına etkileri oldukça fazladır. İşbirlikli haberleşme sistemlerinde temel olarak rölede kuvvetlendir ve aktar (amplify and forward, AF), çöz ve aktar (decode and forward, DF) yöntemleri kullanılmaktadır [2].

##### 4.1.1 Kuvvetlendir ve aktar (AF)

Bu yöntemde röle, kaynak tarafından gönderilen gürültülü işareti kuvvetlendirerek alıcıya iletir. Alıcı ise kaynak ve röleden gelen işaretleri uygun yöntemlerle birleştirir ve iletilmiş olan işarete karar verir. Bu yöntem uygulaması basit bir yöntem olmakla birlikte, röledeki gürültü bileşeni de kuvvetlendirildiği için sistemin hata performansı açısından bu bir dezavantaj olarak görülebilmektedir. Buna rağmen, alıcıya aynı işaretin birbirinden bağımsız ve farklı sönümlere maruz kalmış kopyaları geldiği için sistem tam çeşitleme kazancı sağlar. AF aktarma yöntemini kullanan işbirlikli haberleşme sistemi Şekil 4. 2'deki gibidir.

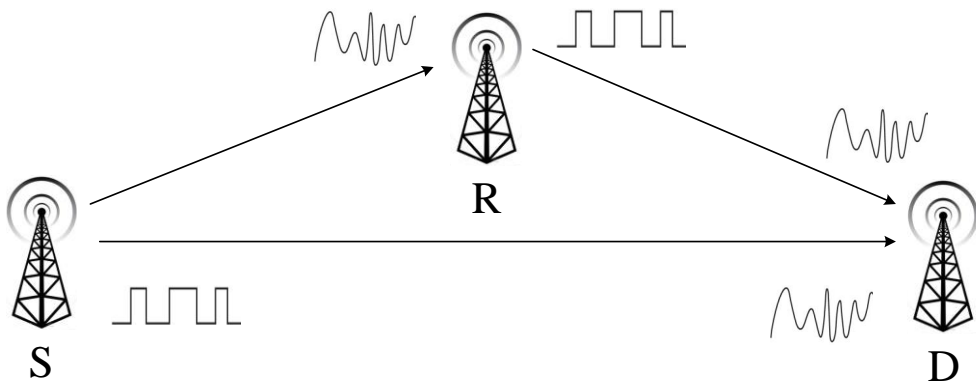


Şekil 4. 2 Kuvvetlendir ve aktar yöntemi

#### 4.1.2 Çöz ve aktar (DF)

Bu yöntemde, röle işbirliği yaptığı kaynaklardan gelen işareti alıp, kod çözme işlemiyle işbirliği yaptığı kaynağın ilettiği bitleri elde eder ve tekrar kodlayarak hedefe iletir. Hedef ise hem kaynaklardan hem de röleden gelen işaretleri uygun yöntemlerle birleştirerek kaynak tarafından iletilmiş olan bitlere karar verir.

DF tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde karşılaşılan en önemli problem, kaynak ile röle arasındaki kanalın bozucu bazı etkiler sonucu rölede algılama hatalarının oluşması ve röleden hedefe hatalı bitlerin gönderilmesidir. Böyle bir durumda çeşitleme kazancı görülmeyebilir. DF aktarma yöntemini kullanan işbirlikli haberleşme sistemi Şekil 4. 3'deki gibidir.



Şekil 4. 3 Çöz ve aktar yöntemi

## 4.2 İşbirlikli Haberleşme Sistemlerinde Kullanılan İletişim Protokolleri

### 4.2.1 Protokol I

İşbirlikli haberleşmede iletişimde en fazla kullanılan protokollerin başında Protokol I gelmektedir [2]. Bu protokolde ilk zaman diliminde kaynak, röle ve hedefe iletim yaparken, ikinci zaman diliminde ise röle hedefe iletim yapmaktadırlar. Çizelge 4. 1' de zaman aralıkları ve yapılan iletimler gösterilmiştir.

Çizelge 4. 1 Protokol I

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

### 4.2.2 Protokol II

Bu protokole göre ilk iletim zaman diliminde kaynak, röle ve hedefe iletim yaparken, ikinci zaman diliminde ise kaynak ve röle hedefe iletim yaparlar. İkinci protokole ilişkin gönderilen işaretler Çizelge 4. 2'de sunulmuştur.

Çizelge 4. 2 Protokol II

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

### 4.2.3 Protokol III

Bu protokole göre birinci zaman diliminde kaynak sadece röleye iletim yapar. İkinci zaman diliminde ise kaynak ve röle hedefe iletim yaparlar. Üçüncü protokole ilişkin zaman aralıkları ve yapılan iletimler Çizelge 4. 3'de sunulmuştur.

Çizelge 4. 3 Protokol III

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

### MARC SİSTEMİ VE ÖZELLİKLERİ

İşbirlikli iletişim sistemlerinde ortaya çıkan önemli problemlerden birisi, mevcut radyo terminallerinin aynı frekans bandında hem alıcı hem verici olarak çalışmaması nedeniyle ortaya çıkan ve sistemdeki terminal sayısı ile orantılı olarak artan spektral verimlilik kayıplarıdır. Literatürde, söz konusu bant genişliği azalması problemini ortadan kaldırmak üzere röle düğümlerinin aldıkları işaretleri birleştirip yeni paketler oluşturarak hedefe iletim yaptığı ağ kodlaması yaklaşımı önerilmiştir [19]. Böylelikle iletilen paket sayısı azaltılarak ağ kapasitesinde artış, gecikmenin ve tampon belleğin azalması, yönlendirmenin basitleşmesi ve paket iletim gücünün düşmesi gibi birçok önemli avantaj elde edilmektedir. Çok sayıda kullanıcının bir veya daha fazla sayıda röle üzerinden ortak bir hedefe iletim yaptığı çoklu röle erişim kanalı (Multiple Access Relay Channel, MARC) ağ kodlamasının önde gelen uygulamalarındandır.

İşbirlikli iletişim sistemlerinin üzerine yapılmış çalışmaların büyük çoğunluğunda alıcı terminallerde kanal durum bilgisinin mükemmel bir şekilde bulunduğu ve evre uyumlu (coherent) algılama yapıldığı varsayılmaktadır. Bununla birlikte kanalın hızlı değiştiği ve taşıyıcı frekansının hatalı kullanıldığı bazı durumlarda kanal kestirim maliyeti artabilmektedir. Kestirim yapılması gereken kanal sayısının fazla olduğu MIMO sistemlerde kanal kestirim sorunu daha çok hissedilmektedir [37]. İşbirlikli iletişim sistemlerinde ise kaynağı hedefe bağlayan kanal sayısı MIMO sistemlerden fazladır [37]. Ayrıca senkronizasyon tekniklerinin kullanışlı olmamasından dolayı evre uyumsuz (noncoherent) algılamaya göre pratik değildir. Evre uyumsuz sistemlerin bir diğer avantajı ise taşıyıcı fonksiyonlar alıcı tarafta tekrar oluşturulmadıkları için devre



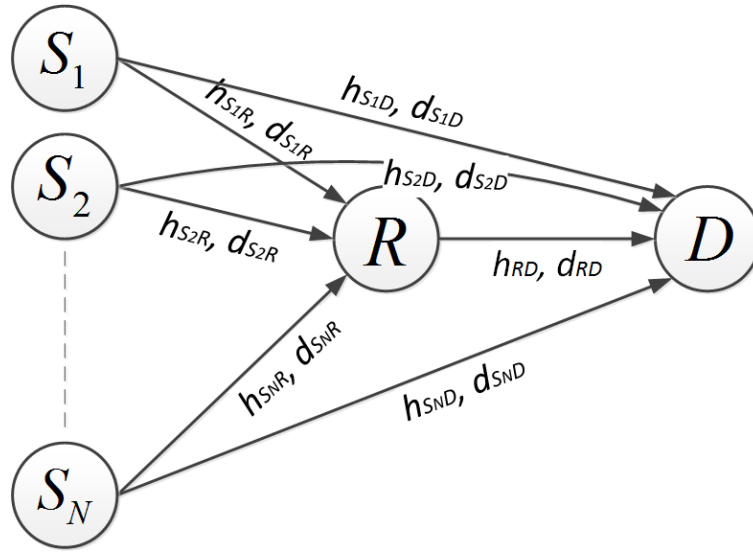
yapıları evre uyumlu olanlara göre daha basittir. Ayrıca kanal durum bilgisi hedefte mevcut olmadığında, evre uyumsuz algılama sistemi kullanılması gerekmektedir [34]. Bu nedenle bu tez çalışmasında evre uyumsuz (noncoherent) iletişim tekniklerinin işbirlikli iletişim sistemlerindeki performansına odaklanılmıştır.

Kanal kestirim sorunu ortadan kaldırmak üzere önerilmiş başlıca iki teknik, evre uyumsuz farksal modülasyon ve evre uyumsuz frekans kaydırmalı anahtarlama (Frequency Shift Keying, FSK). Kanal kestirim gereksinimini ortadan kaldıran bir teknik olan evre-uyumsuz FSK için ise bazı önemli çalışmalar [6], [35]'de sunulmuştur. Literatürde ilk olarak [5]'de hata yayılımı ile mücadele için evre uyumsuz ikili FSK (BFSK) modülasyonu kullanan işbirlikli MARC sistem modeli önerilmiştir. Hedefte en büyük olabirlikli (Maximum Likelihood, ML) kestirim yapılması halinde ikili FSK (Binary FSK, BFSK) modülasyonunun ortalama bit hata oranı analizleri (Bit Error Rate, BER) [6]'da incelenmiştir. Ayrıca [36]'da evre-uyumsuz FSK modülasyonu kullanan iki yönlü bir haberleşme sisteminin hızlı Rayleigh sönümlenme kanallarındaki performansı incelenmiştir. Kanal kestirim gereksinimini ortadan kaldıran diğer bir teknik olan farksal ikili faz kaydırmalı anahtarlama (DPSK), verinin ardışık iki sembol arasındaki faz farkının da kodlanarak iletilmesi fikrine dayanır. DPSK modülasyonu çeşitli birleştirme teknikleriyle birlikte kullanıldığında hedef terminalindeki karmaşıklık azaltılacak ve hata performansında önemli bir ölçüde artış sağlanacaktır. DPSK modülasyonu tekniğinin işbirlikli iletişim sistemlerindeki performansını inceleyen çalışmalara örnek olarak [37-38] verilebilir. Hedefte en büyük olabirlikli (Maximum Likelihood, ML) kestirim yapılması halinde DPSK modülasyonu kullanan işbirlikli sistemin ortalama bit hata oranı analizleri (Bit Error Rate, BER) [39]'da incelenmiştir.

### **5.1 MARC Sistem Yapısını Kullanan İşbirlikli Haberleşme Sistem Modeli**

Bu bölümde Şekil 5. 1'de gösterilmiş olan ve  $N$  adet ( $N \geq 2$ ) kaynaklı ( $S$ ) ve tek röleli ( $R$ ) MARC sistem yapısı ele alınmıştır. Tüm kanalların hızlı Rayleigh sönümlenmesi olması durumunda evre uyumsuz BFSK modülasyonu ve evre uyumsuz DPSK modülasyonu için hedef ( $D$ ) terminalinde önerilen sistemin hata performans analizi yapılmıştır. Sistemdeki tüm düğümlerin tek antenli ve yarı-duplex olduğu varsayılmıştır. İletim protokolü zamanda dik  $N + 1$  bölüme ayrılmıştır. Kaynaklar verilerini ardışık olarak ilk  $N$

zaman diliminde röle ve hedefe iletirler.  $(N + 1)$ 'inci zaman diliminde ise kaynaktan alınan sinyaller rölede çözüldükten sonra ağ kodlanarak hedefe iletilir. Son olarak da hedefte röleden ve kaynaktan gelen sinyaller ML kestirim kuralı yardımıyla çözülerek kaynaklardan gönderilen veri bitlerine karar verilir. Ele alınan sistemdeki kaynak, röle ve hedef terminalleri arasında girişim gibi etkenlerin olmadığı ve kaynak ile hedef terminalleri arasındaki mesafenin normalize edilip rölenin hareketli olduğu varsayılmıştır.



Şekil 5. 1 N kaynaklı MRC sistem modeli

Şekil 5. 1'de,  $h_{ij}$  ve  $d_{ij}$  ( $i \in \{S_1, S_2, \dots, S_N, R\}$ ), ( $j \in \{R, D\}$ ),  $i \neq j$  sırasıyla kompleks sönümlenme katsayılarını ve  $i$ - $j$  düğümleri arasındaki mesafeyi göstermektedir. Kanal katsayıları ve gürültü terimleri ortalaması sıfır ve boyut başına varyansları sırasıyla  $\sigma_{ij}^2 / 2$  ve  $N_0 / 2$  olan kompleks Gauss rastlantı değişkenleri biçiminde modellenmiştir.  $E_s$  sembol iletim enerjisi olmak üzere  $i$ - $j$  terminalleri arası işaret-gürültü oranının (Signal to Noise Ratio, SNR) anlık değeri  $\gamma_{ij} = E_s |h_{ij}|^2 / N_0$  ve ortalama değeri  $\bar{\gamma}_{ij} = E_s \sigma_{ij}^2 / N_0$  şeklinde tanımlanmıştır. Burada  $|h_{ij}|$  Rayleigh dağılımlı olduğu kabul edilmiştir.

### 5.1.1 DPSK Modülasyonlu MRC Sistemi Analizi

Kaynakların veri bitleri  $u_{S_i}(n)$  olmak üzere DPSK modülasyonlu semboller  $x_{S_i}(n) = x_{S_i}(n-1)(-1)^{u_{S_i}(n)}$  biçiminde kodlanmaktadır. Bu farksal kodlama işlemi  $S_1$ ,

$S_2, \dots, S_N$  kullanıcılarının  $i = 1, 2, \dots, N$  zaman dilimindeki sıralı iletimleri sonucunda hedef ve rölede alınan gürültülü işaretler

$$y_D^i(n) = h_{S_i D} \sqrt{E_S} x_{S_i}(n) + z_D^i(n) \quad (5)$$

$$y_R^i(n) = h_{S_i R} \sqrt{E_S} x_{S_i}(n) + z_R^i(n) \quad (6)$$

biçiminde olup referans sembol  $x_{S_i}(0) = 1$  olarak alınmaktadır. Burada  $z_D^i(n)$  ve  $z_R^i(n)$  sırasıyla hedef ve röledeki gürültü terimlerini göstermektedir.

Röle aldığı işaretleri

$$\begin{aligned} \hat{u}_{S_i}(n) &= 0 \\ \text{Re} \left\{ y_R^i(n) [y_R^i(n-1)]^* \right\} &> 0 \\ &< 0 \\ \hat{u}_{S_i}(n) &= 1 \end{aligned} \quad (7)$$

karar kuralı ile demodüle eder. (7) ifadesinde  $\hat{u}_{S_i}(n)$  terimi,  $S_i$  kullanıcısının rölede sezilen veri bitini göstermektedir. Röle,  $u_R(n) = \hat{u}_{S_1}(n) \oplus \dots \oplus \hat{u}_{S_N}(n)$  işlemi ile elde ettiği kullanıcı veri bloklarını ağ kodlayarak tek bir blok haline getirir. Burada  $\oplus$  XOR işlemini göstermektedir. Daha sonra röle ağ kodlanan  $u_R(n)$  veri bitlerini kullanarak DPSK modülasyonlu  $x_R(n) = x_R(n-1)(-1)^{u_R(n)}$  sembolleri elde ederek hedefe göndermektedir. Referans sembolü  $x_R(0) = 1$  olarak alınmaktadır. Son fazda röle terminalinin iletimi sonucu hedefte alınan gürültülü işaret ise,

$$y_D^{N+1}(n) = h_{RD} \sqrt{E_S} x_R(n) + z_D^{N+1}(n) \quad (8)$$

olarak belirtilebilir.

### 5.1.2 BFSK Modülasyonlu MARC Sistemi Analizi

$S_1, S_2, \dots, S_N$  kullanıcılarının  $i = 1, 2, \dots, N$  fazlarındaki sıralı iletimleri sonucunda röle ve hedefte görülen gürültülü işaretler,

$$y_{D,1}^i(n) = h_{S_i D} \sqrt{E_S} u_{S_i}(n) + z_{D,1}^i(n), \quad (9)$$

$$y_{R,1}^i(n) = h_{S_i R} \sqrt{E_S} u_{S_i}(n) + z_{R,1}^i(n), \quad (10)$$

$$y_{D,2}^i(n) = h_{S_i D} \sqrt{E_S} [1 - u_{S_i}(n)] + z_{R,2}^i(n), \quad (11)$$

$$y_{R,2}^i(n) = h_{S_i R} \sqrt{E_S} [1 - u_{S_i}(n)] + z_{R,2}^i(n) \quad (12)$$

biçimindedir. Burada  $y_{j,1}^i(n)$  ve  $y_{j,2}^i(n)$  terimleri ( $j \in \{R, D\}$ ) ikili BFSK işaretlemesindeki birinci ve ikinci alt-bant işaretlerini,  $u_{S_i}(n)$  terimi  $S_i$  kullanıcısının veri bitini,  $z_{R,1}^i(n)$  ve  $z_{R,2}^i(n)$  ise gürültü terimlerini göstermektedir.

Röle aldığı işaretleri

$$\left| y_{R,1}^i(n) \right|^2 - \left| y_{R,2}^i(n) \right|^2 \begin{matrix} \hat{u}_{S_i}(n)=0 \\ > \\ < \\ \hat{u}_{S_i}(n)=1 \end{matrix} 0 \quad (13)$$

karar kuralı ile demodüle eder. (13) ifadesinde  $\hat{u}_{S_i}(n)$  terimi,  $S_i$  kullanıcısının rölede sezilen veri bitini göstermektedir. Röle,  $u_R(n) = \hat{u}_{S_1}(n) \oplus \dots \oplus \hat{u}_{S_N}(n)$  işlemi ile elde ettiği kullanıcı veri bloklarını ağ kodlayarak tek bir blok haline getirir. Burada  $\oplus$  XOR işlemini göstermektedir. Son fazda röle iletimi sonucu hedefte oluşan gürültülü işaret ise,

$$y_{D,1}^{N+1}(n) = h_{RD} \sqrt{E_S} u_R(n) + z_{D,1}^{N+1}(n), \quad (14)$$

$$y_{D,2}^{N+1}(n) = h_{RD} \sqrt{E_S} [1 - u_R(n)] + z_{D,2}^{N+1}(n). \quad (15)$$

olarak belirtilebilir.

### 5.1.3 ML Kestirim Kuralı

Hedef, kullanıcılardan gelen işaretler ile röleden gelen ağ kodlanmış işareti çeşitleme kazancı elde edilecek şekilde birleştirmelidir. Bu çalışmada bu amaca ulaşmak üzere

$$\bar{u}_{S_1}(n), \bar{u}_{S_2}(n), \dots, \bar{u}_{S_N}(n) = \arg \max_{u_{S_1}(n), u_{S_2}(n), \dots, u_{S_N}(n), u_R(n) \in \{0,1\}} P[u_{S_1}(n), u_{S_2}(n), \dots, u_{S_N}(n), u_R(n)] \quad (16)$$

şeklinde ifade edilebilecek olan ML karar kuralı kullanılmıştır. Burada  $\bar{u}_{S_i}(n)$ ,  $S_i$  kullanıcısına ait hedefte karar verilen veri bitini,  $P[u_{S_1}(n), u_{S_2}(n), \dots, u_{S_N}(n), u_R(n)]$

ifadesi ise kaynaklara ait veri bitleri ile ağ kodlanmış veri bitinin ortak olasılığını göstermektedir ve

$$P[u_{S_1}(n), u_{S_2}(n), \dots, u_{S_N}(n), u_R(n)] = P[u_{S_1}(n)] \times \dots \times P[u_{S_N}(n)] \times P[u_R(n) | u_{S_1}(n), u_{S_2}(n), \dots, u_{S_N}(n)] \quad (17)$$

ile belirlenir. (17) ifadesinde

$$P[u_R(n) | u_{S_1}(n), u_{S_2}(n), \dots, u_{S_N}(n)] = \begin{cases} 1 - \varepsilon_R, & u_R(n) = \hat{u}_R(n) \\ \varepsilon_R, & u_R(n) \neq \hat{u}_R(n) \end{cases} \quad (18)$$

biçiminde hesaplanır. Burada  $\hat{u}_R(n) = u_{S_1}(n) \oplus \dots \oplus u_{S_N}(n)$ 'dir. (17)'deki diğer olasılık terimleri,

$$P[u_{S_i}(n) = 0] \approx \left(1 + e^{L_{S_i}(n)}\right)^{-1}, \quad (19)$$

$$P[u_{S_i}(n) = 1] \approx 1 - \left(1 + e^{L_{S_i}(n)}\right)^{-1}, \quad (20)$$

$$P[u_R(n) = 0] \approx \left(1 + e^{L_R(n)}\right)^{-1}, \quad (21)$$

$$P[u_R(n) = 1] \approx 1 - \left(1 + e^{L_R(n)}\right)^{-1} \quad (22)$$

ile belirlenir ( $i = 1, 2, \dots, N$ ). Yukarıdaki ifadelerde geçen olabilirlik terimleri DPSK modülasyonu için

$$L_{S_i}(n) = \frac{y_D^i(n-1)^* y_D^i(n) + y_D^i(n-1) y_D^i(n)^*}{N_0} \quad (23)$$

$$L_R(n) = \frac{y_D^{N+1}(n-1)^* y_D^{N+1}(n) + y_D^{N+1}(n-1) y_D^{N+1}(n)^*}{N_0} \quad (24)$$

şeklinde ifade edilebilir. BFSK modülasyonu için ise

$$L_{S_i}(n) = \frac{E_S \sigma_{S_i,D}^2 \left( |y_{D,1}^i(n)|^2 - |y_{D,2}^i(n)|^2 \right)}{\left( E_S \sigma_{S_i,D}^2 + N_0 \right) N_0} \quad (25)$$

$$L_R(n) = \frac{E_S \sigma_{RD}^2 \left( |y_{D,1}^{N+1}(n)|^2 - |y_{D,2}^{N+1}(n)|^2 \right)}{\left( E_S \sigma_{RD}^2 + N_0 \right) N_0} \quad (26)$$

şeklinde verilebilirler. (18)'de verilen  $\varepsilon_R$  terimi röleden hatalı iletim yapma olasılığıdır ve

$$\varepsilon_R = \sum_{m=1}^{N'} \sum_{\mathbf{b} \in \mathbf{B}_{N,2m-1}} (\varepsilon_1)^{b_1} \times \dots \times (\varepsilon_N)^{b_N} \times (1 - \varepsilon_1)^{1-b_1} \times \dots \times (1 - \varepsilon_N)^{1-b_N} \quad (27)$$

ifadesiyle hesaplanabilir [34]. Burada  $[\cdot]$  taban fonksiyonu olmak üzere  $N' = \lfloor (N+1)/2 \rfloor$ ,  $\mathbf{B}_{M,2m-1}$  uzunluğu  $M$  olan ve  $2m-1$  adet sıfırdan farklı eleman içeren tüm ikili vektörlerin kümesini göstermektedir ve  $\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_M]$  şeklindedir. Rayleigh sönümlmeli kanallarda  $\varepsilon_i$  ise  $S_i \rightarrow R$  linkinin ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) hata olasılığı olup evre uyumsuz DPSK modülasyonu için

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2 + 2\bar{\gamma}_{S_i,R}} \quad (28)$$

ve BFSK modülasyonu için

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2 + \bar{\gamma}_{S_i,R}} \quad (29)$$

ile bulunur [40].

BFSK modülasyonu için verilen (25) ve (26) nolu eşitliklerdeki logaritmik terimleri ( $L \in L_{S_1}(n), L_{S_2}(n), L_R(n)$ ) parçalı doğrusal birleştirici (piecewise linear combiner) üzerinden matematiksel yaklaşım olarak aşağıdaki eşitlik gibi ifade edilip bit hata olasılığı hesaplanabilir.

$$f_{PL}(L) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & , L < -5 \text{ için} \\ \frac{L-5}{10} & , -5 < L < 5 \text{ için} \\ 0 & , 5 < L \text{ için} \end{array} \right\} \quad (30)$$

Her iki kaynaktan 1 bir bitinin yollandığı daha sonra rölenin bu bitleri  $\oplus$  XOR komutuyla ağ kodlayıp 0 bitine dönüştürerek hedefe ulaştırdığı varsayılmıştır. (17) nolu eşitliğin maksimum olduğu durum incelendiğinde bu durumun

$P_r = P[u_{S_1}(n) = 1] \times P[u_{S_2}(n) = 1] \times P[u_R(n) = 0 | u_{S_1}(n) = 1, u_{S_2}(n) = 1]$  olduğu görülmektedir.

Bu durumu içeren olasılıklar tam 12 durum olup aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
P_r &= P_r(L_1 < -5) P_r(L_2 < -5) P_r(L_3 < -5) + P_r(L_1 < -5) P_r(L_2 < -5) P_r(L_3 > 5) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(L_2 < -5) P_r(-5 < L_3 < 5) + P_r(-5 < L_1 < 5) P_r(L_2 < -5) P_r(L_3 < -5) \\
&+ P_r(-5 < L_1 < 5) P_r(L_2 < -5) P_r(-5 < L_3 < 5) + P_r(-5 < L_1 < 5) P_r(L_2 < -5) P_r(5 < L_3) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(-5 < L_2 < 5) P_r(L_3 < -5) + P_r(L_1 < -5) P_r(-5 < L_2 < 5) P_r(-5 < L_3 < 5) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(-5 < L_2 < 5) P_r(5 < L_3) + P_r(-5 < L_1 < 5) P_r(-5 < L_2 < 5) P_r(L_3 < -5) \\
&+ P_r(-5 < L_1 < 5) P_r(-5 < L_2 < 5) P_r(L_3 > 5) + P_r(-5 < L_1 < 5) P_r(-5 < L_2 < 5) P_r(-5 < L_3 < 5)
\end{aligned} \tag{31}$$

Yukarıda belirtilen durumlar ayrı ayrı tekrar incelendiğinde bazı durumların kendi içerisinde birkaç durum içerdiği görülmüştür. Dolayısıyla aşağıda verilen ifade en kapsamlı olarak 23 olasılık durumunu içermektedir. Tüm durumların toplamı bit hata olasılığını vermektedir.

$$\begin{aligned}
P_r &= P_r(L_1 < -5) P_r(L_2 < -5) P_r(L_3 < -5) + P_r(L_1 < -5) P_r(L_2 < -5) P_r(L_3 > 5) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(L_2 < -5) P_r(-5 < L_3 < 5) + P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(L_2 < -5) P_r(L_3 < -5) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(5 < L_3) + P_r(0 < L_1 < -5) P_r(L_2 < -5) P_r(0 < L_3 < -5) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(0 < L_3 < -5) + P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(L_2 < -5) P_r(5 < L_3) \\
&+ P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(0 < L_3 < 5) + P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(L_2 < -5) P_r(0 < L_3 < 5) \\
&+ P_r(0 < L_1 < 5) P_r(L_2 < -5) P_r(L_3 > 5) + P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(-5 < L_3 < 0) \\
&+ P_r(0 < L_1 < 5) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(L_3 < 5) + P_r(0 < L_1 < 5) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(0 < L_3 < 5) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(0 < L_3 < 5) + P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(0 < L_2 < 5) P_r(0 < L_3 < 5) \\
&+ P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(5 < L_3) + P_r(0 < L_1 < 5) P_r(L_2 < -5) P_r(0 < L_3 < 5) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(0 < L_2 < 5) P_r(0 < L_3 < 5) + P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(0 < L_2 < 5) P_r(5 < L_3) \\
&+ P_r(L_1 < -5) P_r(0 < L_2 < 5) P_r(5 < L_3) + P_r(L_1 < -5) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(L_3 < -5) \\
&+ P_r(-5 < L_1 < 0) P_r(-5 < L_2 < 0) P_r(L_3 < -5)
\end{aligned} \tag{32}$$

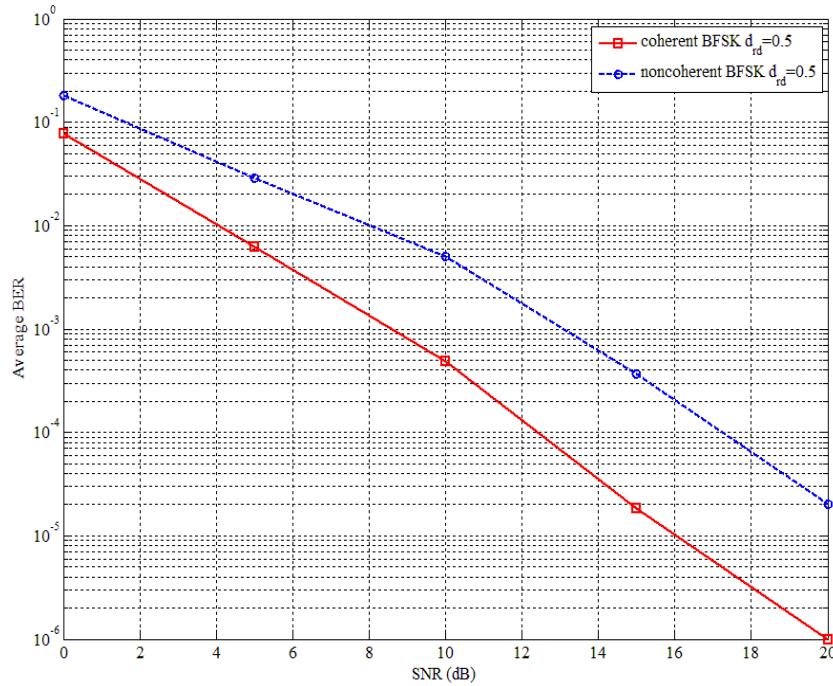
#### 5.1.4 Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, evre uyumsuz BFSK ve DPSK modülasyonları kullanan ML tabanlı MARC modelinin hızlı ve yavaş Rayleigh sönümlmeli kanallar için Monte-Carlo simülasyon sonuçları iki ve dört kaynak kullanılarak elde edilmiştir. Performans karşılaştırmaları  $BER = 10^{-5}$  için gerçekleştirilmiştir.

Bu varsayımların gerçekçiliği şu model üzerinde açıklanabilir:  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki kanal varyansı ( $i \in \{S, R\}, j \in \{R, D\}$ )  $\sigma_{ij}^2 = d_{ij}^{-\nu}$  olarak modellenebilir. Burada  $d$ ,  $i$

düğümünden  $j$  düğüme olan mesafeyi,  $v$  ise yol kaybı katsayısını belirtmektedir.  $v$  yeryüzündeki kayıplı ortamlar için genelde 4 alınarak işleme katılır.

Şekil 5. 2’de BFSK modülasyonlu sistemde evre uyumlu ve evre uyumsuz algılama durumdaki karşılaştırılma incelenmiş olup açıkça sistemde evre uyumlu algılama yapılması durumunda performansın daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

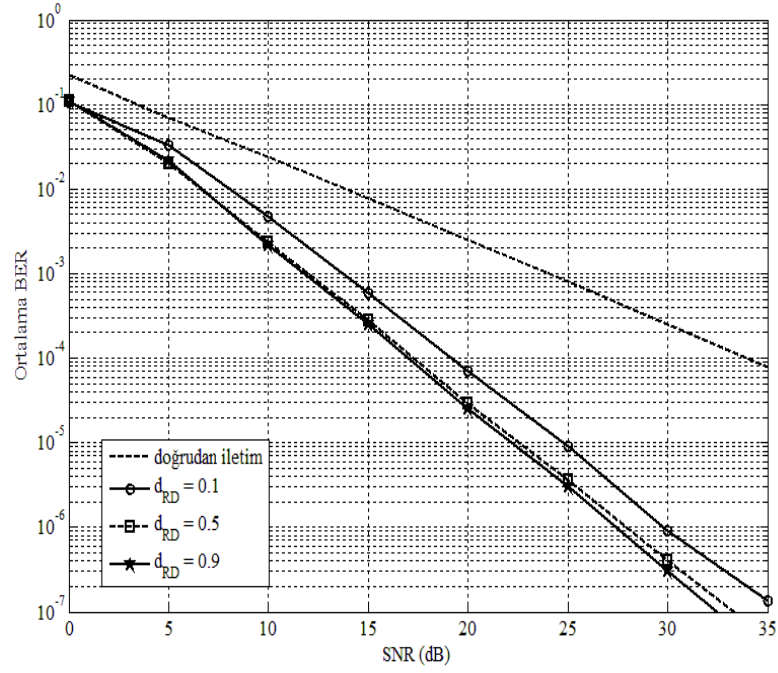


Şekil 5. 2  $N = 2$  için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin evre uyumlu ve evre uyumsuz algılama karşılaştırılması sonuçları

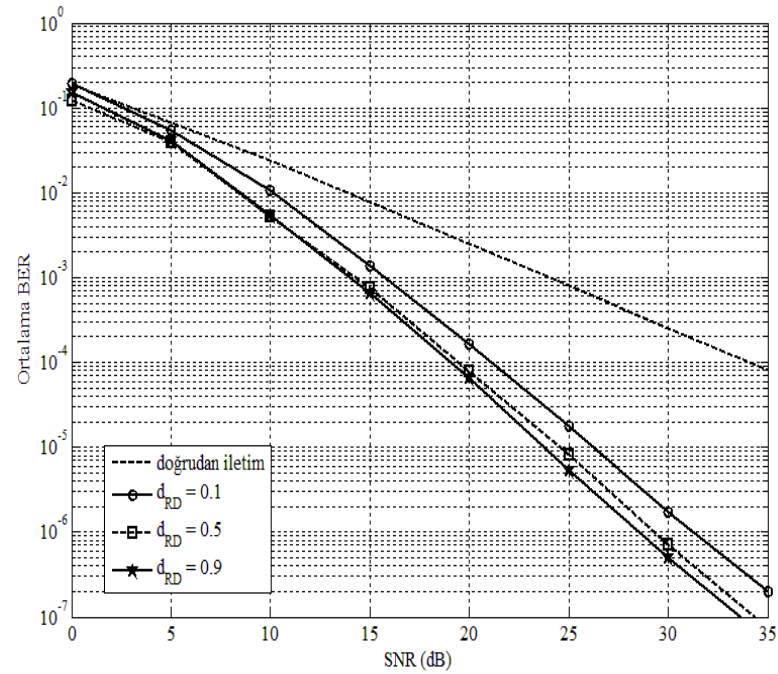
Şekil 5. 3 ve Şekil 5. 4’te sırasıyla  $N = 2$  ve  $N = 4$  adet kullanıcı ve DPSK modülasyonu için rölenin olmadığı direk iletim yapıldığı durumun, rölenin kaynaklara yakın olduğu durumun ( $d_{RD} = 0.9$ ), rölenin hedef ile kaynaklar arasında olduğu durumun ( $d_{RD} = 0.5$ ) ve rölenin hedefe yakın olduğu durumun ( $d_{RD} = 0.1$ ) hızlı sönmeli kanallardaki hata performans eğrileri verilmiştir. Elde edilen eğrilerin eğimlerinden ele alınan tüm durumlarda tam çeşitleme kazancı elde edildiği ve en iyi başarımın rölenin kaynaklara daha yakın olduğu durumda ( $d_{RD} = 0.9$ ) sağlandığı görülmektedir. Kaynak sayısı arttıkça yaklaşık 0.5 dB’lik küçük SNR kayıpları doğmaktadır. Elde edilen tüm



eğrilerde  $S_i \rightarrow D$  linklerine ilişkin varyans değerleri 1 kabul edilmiştir ( $\sigma^2_{S_i D} = \dots = \sigma^2_{S_N D} = 1$ ).

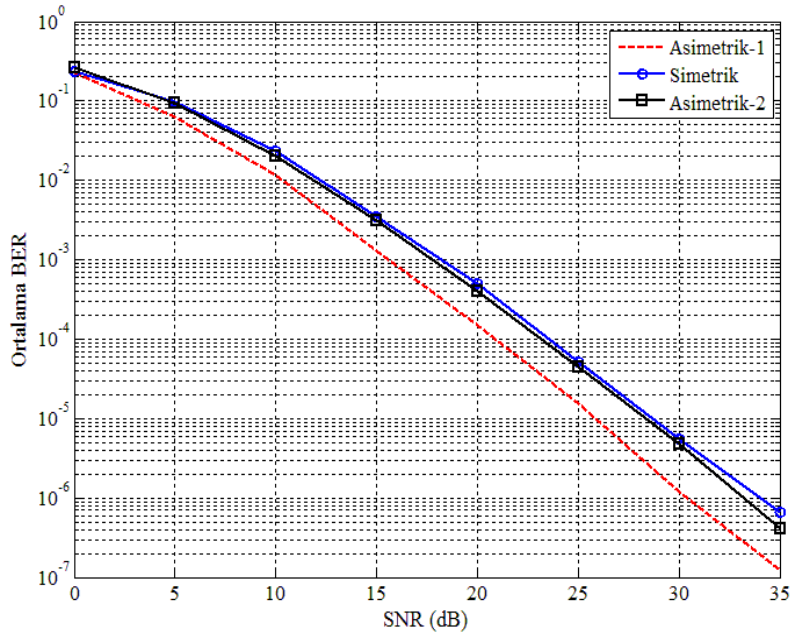


Şekil 5. 3 N = 2 için DPSK modülasyonlu MARC sisteminin hızlı sönmülemeli kanallardaki simülasyon sonuçları

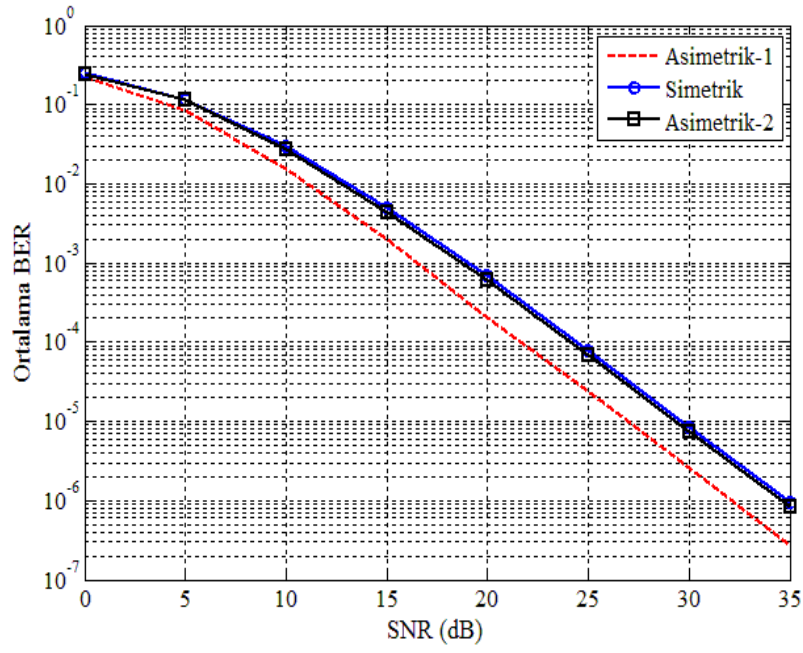


Şekil 5. 4 N = 4 için DPSK modülasyonlu MARC sisteminin hızlı sönmülemeli kanallardaki simülasyon sonuçları

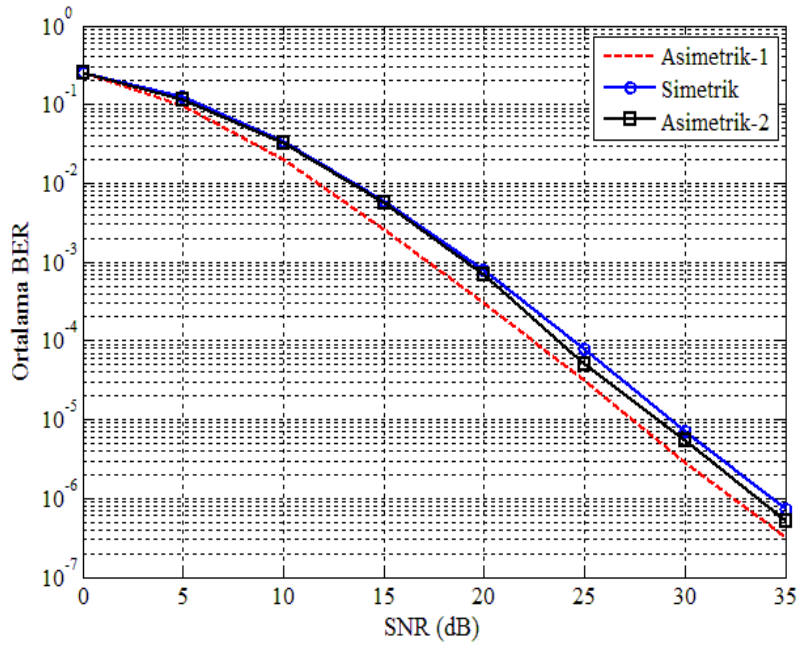
Şekil 5. 5 Şekil 5. 6 ve Şekil 5. 7’de sırasıyla N = 2, N = 3 ve N = 4 adet kullanıcı için BFSK modülasyonlu sistemler incelenmiştir. Rölenin kaynaklara yakın olduğu durumu için  $\sigma^2_{RD} = 1$  ve  $\sigma^2_{S_1R} = \dots = \sigma^2_{S_NR} = 100$  (Asimetrik-1) seçilirken rölenin hedefe yakın olması durumu için  $\sigma^2_{S_1R} = \dots = \sigma^2_{S_NR} = 1$  ve  $\sigma^2_{RD} = 100$  (Asimetrik-2) olarak seçilmiştir. Simetrik sistem modelinde ise tüm kanalların varyansı bir olarak alınmıştır. Şekil 5.8’de ise N = 3 kullanıcı için hızlı sönmülemeli kanallardaki hata performans eğrileri verilmiştir. Elde edilen eğrilerin eğimlerinden ele alınan tüm durumlarda tam çeşitleme kazancı elde edildiği ve en iyi başarıım rölenin kaynaklara daha yakın olduğu modelde (Asimetrik-1) sağlandığı görülmektedir. Bu modülasyon tipinde de kaynak sayısı arttıkça yaklaşık 0.5 dB’lik küçük SNR kayıpları doğmaktadır.



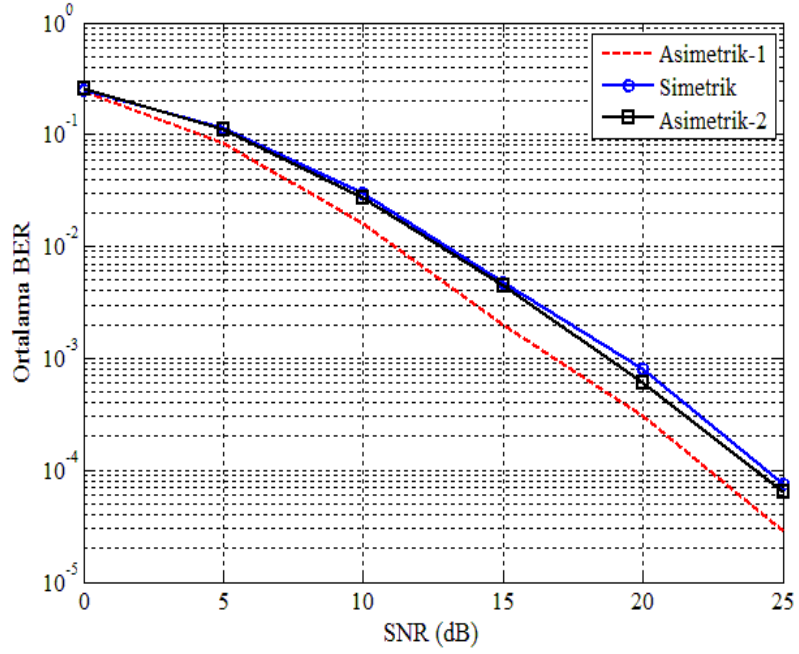
Şekil 5. 5 N = 2 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin yavaş sönmülemeli kanallardaki simülasyon sonuçları



Şekil 5. 6 N = 3 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin yavaş sönmlemeli kanallardaki simülasyon sonuçları



Şekil 5. 7 N = 4 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin yavaş sönmlemeli kanallardaki simülasyon sonuçları



Şekil 5. 8 N = 3 için BFSK modülasyonlu MARC sisteminin hızlı sönmülemeli kanallardaki simülasyon sonuçları

Bölüm 5. 1.'de, işbirlikli kablosuz ağ kodlamalı sistemlerde MARC modelinin evre uyumsuz DPSK ve BFSK modülasyonu kullanılması ve hedefte ML kestirimi yapılması durumunda ortalama BER performansları incelenmiştir. Değişik kullanıcı sayıları ve ağ konfigürasyonlarında hata yayılımından kaynaklanan performans kaybı azaltılarak tam çeşitleme kazancının elde edilebildiği nümerik sonuçlarla gösterilmiştir. Buna ek olarak BFSK ve DPSK işaretlemesi sayesinde pilot dizilere gereksinim ortadan kaldırılmış ve spektral verimliliği yüksek, alıcı karmaşıklığı düşük bir MARC yapısı sunulmuştur.

## 5.2 Link Uyarlamalı İletim Tabanlı MARC Sistemi

Sayısal aktarma tabanlı işbirlikli iletişim sistemlerinde karşılaşılan en önemli problem, röledeki sezim hataları sonucu ortaya çıkan hedef terminal(ler)deki etkin SNR düşüşleridir. Hata yayılımı (error propagation) olarak isimlendirilen bu durum, sistemin çeşitleme derecesinde kayda değer azalmalara yol açmaktadır. Aktarıcıdan sadece hatasız algılanan veri bloklarının iletimine izin verildiği CRC (Çevrimsel Artıklık Kodlaması, Cyclic Redundancy Check) tabanlı yaklaşımlar, hata yayılımından kaynaklanan performans düşüşlerinin önüne geçmede önerilen yollardan biridir. Ancak CRC kodlama, sistemin bant genişliği verimliliğini düşürdüğü gibi, rölede ek kod çözme

ve kodlama işlemleri gerektirdiğinden maliyetleri ve karmaşıklığı artırmaktadır. Ayrıca tek bit hatası olsa dahi aktarma işlemi yapılamamaktadır. LAR (Link Adaptive Relaying, LAR) ve SR (Selective Relaying, SR) hata yayılımının neden olduğu performans düşüşlerine karşı önerilen diğer yaklaşımlar arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu teknikler CRC yaklaşımını kullanmaksızın hata yayılımından kaynaklanan çeşitleme kazancı düşüşlerini ortadan kaldıracak şekilde tasarımıdır. Link uyarlamalı işbirlikli iletişim yaklaşımı, rölenin gücünün kaynak-röle ve röle-hedef kanallarının kazancına bağlı bir katsayı ile ölçeklendirilmesi fikrine dayanır. SR tekniği ise LAR yaklaşımının özel bir hali olup, aktarıcının mevcut kanalların durumuna göre iletme geçmesi veya sessiz kalması ile gerçekleştirilir. Aşağıda LAR tabanlı MARC sisteminin Nakagami-m sönümlenmeli kanallardaki hata performansı ele alınmaktadır.

### 5.2.1 Sistem Analizi

Şekil 5. 1’de verilen N kaynaklı MARC sistem modeli referans alınarak sistem gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma Nakagami-m sönümlenmeli kanallar üzerinde incelenmiştir. Nakagami-m dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) [26]

$$f_h(h) = \frac{2m^m g^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mh^2}{\Omega}\right) \quad (31)$$

şeklinde dir. Burada  $\Gamma(\cdot)$  Gamma fonksiyonunu [41],  $\Omega = E\{h^2\}$  varyansı,  $m = \Omega / E\{h^2 - \Omega^2\} \geq 0.5$  Nakagami-m sönümleme parametresini ve  $E\{\cdot\}$  beklenen değeri göstermektedir. Sönümleme katsayısı  $m=1$  olduğu durumda sistem Rayleigh dağılıma yakınsamaktadır.

### 5.2.2 LAR Tabanlı DPSK Modülasyonlu MARC Sistemi

Evre-uyumsuz DPSK işaretleri,  $i$ . zaman aralığında röle ve hedefte alınan gürültülü işaretler (5) ve (6)’deki eşitlikler gibidir.

Röle aldığı işaretleri (7)’deki eşitlikteki karar kuralıyla demodüle eder. Son fazda yani  $(N + 1)$ ’inci zaman diliminde röle terminalinin iletimi sonucu hedefte alınan gürültülü işaret ise,

$$y_D^{N+1}(n) = h_{RD} \sqrt{\alpha E_S} x_R(n) + z_D^{N+1}(n) \quad (32)$$

olarak belirtilebilir. (32) nolu eşitlikteki link uyarlamalı güç katsayısı

$$\alpha = \frac{\min(\bar{\gamma}_{S_1R}, \bar{\gamma}_{S_2R}, \dots, \bar{\gamma}_{S_NR}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)}{\bar{\gamma}_{RD}} \text{ olup, DPSK modülasyon için } \beta_i = \frac{|y_R^i(n)|^2}{N_0}$$

olarak tanımlanır [40].

### 5.2.3 LAR Tabanlı BFSK Modülasyonlu MARC Sistemi

Evre-uyumsuz BFSK işaretleri için,  $i$ . zaman aralığında rölede ve hedefte alınan gürültülü işaretler (9) ile (12)'deki eşitlikler gibidir.

Röle aldığı gürültülü işaretleri (13)'deki gibi karar kuralı ile demodüle eder. Son fazda röle iletimi sonucu hedefte oluşan gürültülü işaret ise,

$$y_{D,1}^{N+1}(n) = h_{RD} \sqrt{\alpha E_S} [1 - u_R(n)] + z_{D,1}^{N+1}(n), \quad (33)$$

$$y_{D,2}^{N+1}(n) = h_{RD} \sqrt{\alpha E_S} u_R(n) + z_{D,2}^{N+1}(n) \quad (34)$$

şeklinde ifade edilir. (33) ve (34) nolu eşitliklerdeki link uyarlamalı güç katsayısı

$$\alpha = \frac{\min(\bar{\gamma}_{S_1R}, \bar{\gamma}_{S_2R}, \dots, \bar{\gamma}_{S_NR}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)}{\bar{\gamma}_{RD}} \text{ olup, evre uyumsuz BFSK modülasyon için}$$

$$\beta_i = \frac{|y_{R,1}^i(n)|^2 + |y_{R,2}^i(n)|^2}{N_0} \text{ olarak tanımlanır [40].}$$

### 5.2.4 ML Kestirim Kuralı

LAR tabanlı MARC sistemi için kullanılan karar kuralı bir önceki bölümde anlatıldığı gibi (16)-(27) nolu eşitlikler arasındaki gibidir.  $\varepsilon_i$  ise  $S_i \rightarrow R$  linkinin ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) hata olasılığıdır ve Nakagami-m sönümlenmeli kanallarda aşağıdaki gibi ifade edilir

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} \left( \frac{m}{m + k \bar{\gamma}_{S_iR}} \right)^m. \quad (35)$$

Burada, evre uyumsuz BFSK modülasyonu için  $k = 1/2$  ve DPSK modülasyonu için  $k = 1$  alınmaktadır [42].

### 5.2.5 Simülasyon Sonuçları

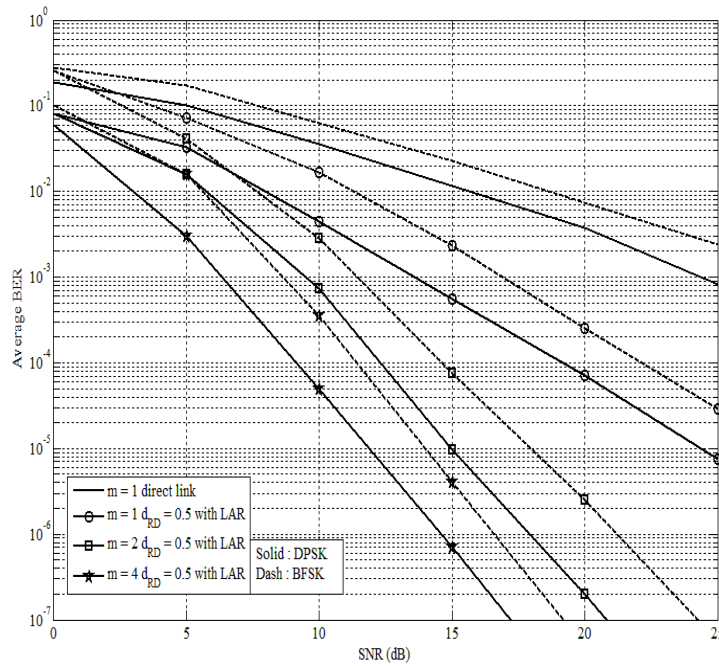
Bu bölümde, ML tabanlı MARC sistem modelinin LAR durumunda hızlı Nakagami-m sönümlmeli kanallardaki hata performansı Monte-Carlo bilgisayar simülasyonları ile evre-uyumsuz BFSK ve DPSK modülasyonu kullanılarak iki ve dört kaynak durumu için elde edilmiştir. Her bir kaynağın birbirine yakın oldukları ve röleye olan mesafelerinin ( $d_{RD}$ ) eşit olduğu varsayılmıştır ( $d_{S_1R} \approx d_{S_2R} \approx \dots \approx d_{S_NR}$ ). Aynı zamanda kaynaklar ve hedef arasındaki mesafenin normalize edildiği kabul edilmiştir ( $d_{S,R} + d_{RD} = 1$ ).  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki kanal varyansı  $\sigma_{ij}^2 = d_{ij}^{-\nu}$  olarak modellenmiştir. Burada  $d$ ,  $i$  düğümünden  $j$  düğümüne olan mesafeyi  $\nu$  ise yol kaybı katsayısını belirtmektedir ve 4 olarak seçilmiştir [6]. Sunulan MARC sistem modeli eğrilerinde kaynakların hedefe doğrudan iletim yaptıkları işbirlikli olmayan sistem durumu da incelenmiştir. Performans karşılaştırmaları BER =  $10^{-5}$  için gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5. 8'de, LAR tabanlı sistemin hata performans analiz eğrileri Nakagami-m sönümlmeli kanallar üzerinde sönümlleme katsayılarının  $m = 1$ ,  $m = 2$ ,  $m = 4$  oldukları, sistemin iki kaynaklı olduğu ( $N = 2$ ) ve ayrıca rölenin tam orta noktada olduğu durumdaki ( $d_{RD} = 0.5$ ) hata performans eğrileri sunulmuştur. DPSK modülasyonun BFSK modülasyonlu duruma göre SNR kazancı sırasıyla yaklaşık 3 dB'dir. Hem DPSK hem de BFSK işaretleşmesinde doğrudan iletim yapıldığı durumun tam çeşitleme kazancı gösterdiği gözlenmektedir. Aynı zamanda ortalama bit hata oranı (BER) performansının sönümlleme katsayısı parametresi  $m$  ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir.

Şekil 5. 9'da, önerilen LAR tabanlı sistemdeki ortalama BER performansı sönümlleme katsayı parametresi  $m = 2$  olduğu zaman, rölenin farklı konumlardaki durumu ve kaynak sayısının  $N = 2$  olduğu durum incelenmiştir. Aynı zamanda ortalama BER performansı LAR kullanılmadığı durumu içeren sistemle karşılaştırılmıştır. LAR'lı sistemin performansı LAR'sız sistemin performansından daha iyi olduğu açıkça gözlemlenmiştir. Bununla birlikte rölenin konumunun kaynaklara yakın olduğu durumda ortalama BER performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Normalize mesafelerin  $d_{RD} = 0.9$  ve  $d_{RD} = 0.1$  oldukları durumlarda SNR kazançları LAR'lı ve

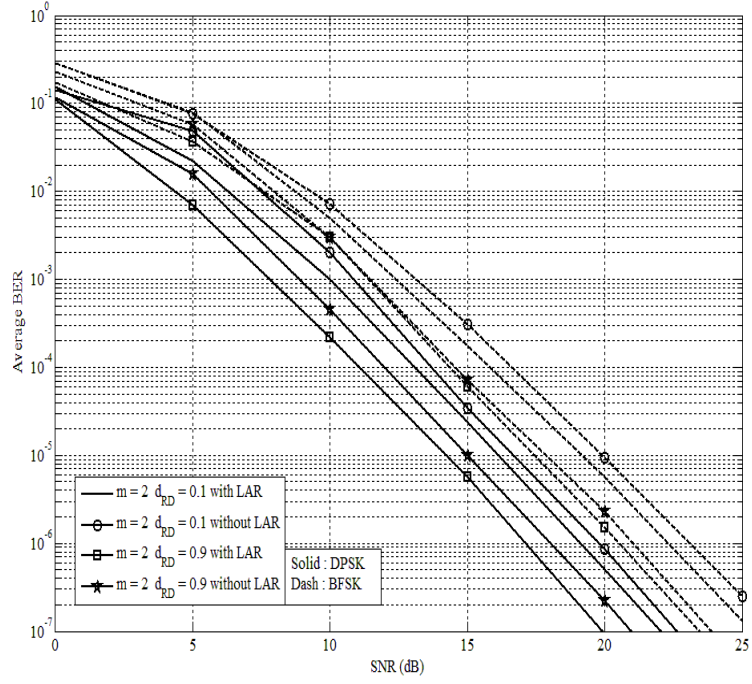
LAR'sız durumdaki BER eğrileri arasındaki SNR kazançları sırasıyla yaklaşık 0.25 dB ve 0.75 dB'dir. DPSK modülasyonu için, LAR'lı ve LAR'sız BER eğrilerindeki SNR kazançları rölenin konumunun  $d_{RD} = 0.9$  ve  $d_{RD} = 0.1$  olduğu durumlarda sırasıyla yaklaşık olarak 0.75 dB ve 0.50 dB'dir.

Şekil 5. 10'da, önerilen sistemin ortalama BER performansı sonuçları sönümleme katsayı parametresi  $m = 2$  olduğu zaman, rölenin farklı konumlardaki durumu ve kaynak sayısının  $N = 4$  olduğu durum incelenmiştir. Diğer şekillerdeki gibi LAR'lı sistemin performansı LAR'sız sistemin performansından daha iyi olduğu açıkça gözlemlenmiş ve ayrıca rölenin konumunun kaynaklara yakın olduğu durumda ortalama BER performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Mesafelerin  $d_{RD} = 0.9$  ve  $d_{RD} = 0.1$  oldukları durumlarda SNR kazançları LAR'lı ve LAR'sız durumdaki BER eğrileri arasındaki SNR kazançları sırasıyla yaklaşık 0.25 dB ve 0.50 dB'dir. DPSK modülasyonu için, LAR'lı ve LAR'sız BER eğrilerindeki SNR kazançları rölenin konumunun  $d_{RD} = 0.9$  ve  $d_{RD} = 0.1$  olduğu durumlarda sırasıyla yaklaşık olarak 0.50 dB ve 0.25 dB'dir. Bütün şekillerde de görüldüğü gibi evre-uyumsuz DPSK modülasyonun ortalama BER performansı daha iyidir ve tam çeşitleme kazancı sağlanmıştır.

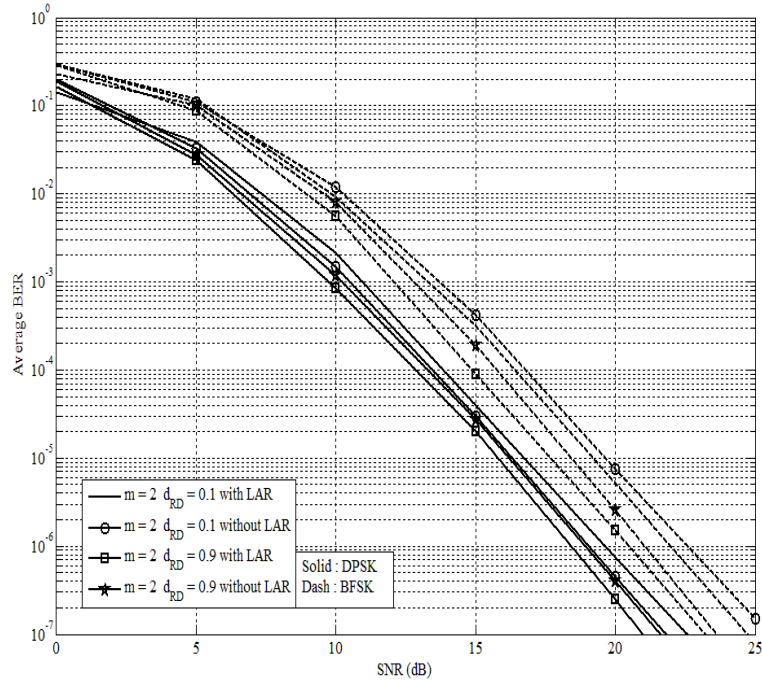


Şekil 5. 9 N = 2 için hızlı sönümlemeli Nakagami-m kanallarında MARC sisteminin simülasyon sonuçları





Şekil 5. 10  $N = 2$  için hızlı sönmülemeli Nakagami-m kanallarında MARC sisteminin simülasyon sonuçları



Şekil 5. 11  $N = 4$  için hızlı sönmülemeli Nakagami-m kanallarında MARC sisteminin simülasyon sonuçları

Tez çalışmasının bu bölümünde (5. 2), işbirlikli kablosuz ağ kodlamalı sistemlerde önde gelen bir iletim modeli olan MARC modelinin Nakagami-m sönümlenmeli kanallar üzerinde evre-uyumsuz BFSK ve DPSK modülasyonlu durumları için ortalama BER performansı incelenmiştir. Hata yayılımı problemi ile mücadelede LAR yaklaşımından faydalanılmıştır. Değişik kullanıcı sayıları ve ağ konfigürasyonlarında tam çeşitleme kazancının elde edilebildiği nümerik sonuçlarla gösterilmiştir. Buna ek olarak evre-uyumsuz modülasyon işaretleşmesi sayesinde pilot dizilere gereksinim ortadan kaldırılmış ve spektral verimliliği yüksek, alıcı karmaşıklığı düşük bir MARC yapısı sunulmuştur.

## SONUÇ VE ÖNERİLER

---

Bu tezde, iletişim teknolojileri ve kanal kodlama esasları kapsamında günümüzde güncelliğini koruyan ve üzerinde çalışmalar yapılan, çöz ve aktar yöntemini kullanan MARC sistemi evre-uyumsuz BFSK ve DPSK modülasyonu için ele alınmıştır. Kaynak, röle ve hedef linkleri Rayleigh ve Nakagami-m sönümlenmeli kanallar olarak modellenmiştir. Simülasyon ve teorik sonuçlarında da görüldüğü gibi işbirlikli sistemin performansı MARC sistem yapısı ile iyileştirilebilmekte ve simülasyon ve teorik sonuçlar birbiriyle örtüşmektedir. Ayrıca elde edilen benzetim sonuçları tüm kanalların Nakagami-m olması durumundaki sistem performansının, Rayleigh olduğu durumdaki performanstan daha iyi olduğunu göstermiştir. Sonuçlardan, sönümlenme parametresi  $m$  değerinin artmasıyla sistemin performansının iyileştiği görülmektedir. Dahası elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi ML kullanan sistemin hata performansı, rölenin kaynaklara yakın olduğu durumda çok daha iyidir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Telatar, E., (1999). "Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels", *European Trans. on Telecom.*, 10(6): 585-596.
- [2] Laneman, J. N., Wornell, G. W. ve Tse, D. N. C., (2001). "An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks", *Proc IEEE ISIT*, 294.
- [3] Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B., (1998). "Increasing Uplink Capacity Via User Cooperation Diversity", *Proc IEEE ISIT*. 16-21 Ağustos 1998, Cambridge.
- [4] Guan, W., Liu, K. J. R., (2012). "Mitigating Error Propagation for Wireless Network Coding", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(10): 3632-3643.
- [5] Karabulut, M. A., Özdemir, Ö. ve İlhan, H., (2014). "Network Coded Noncoherent Cooperative Communication", *22<sup>st</sup> Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 23-25 Nisan 2014, Trabzon.
- [6] Chen, D. and Laneman, J. N., (2006). "Modulation and Demodulation for Cooperative Diversity in Wireless Systems," *IEEE Trans. Wireless Communication*, 5(7): 1785-1794.
- [7] Özdemir Ö., (2012). "User Selective Relaying in Multiple Access Relay Channels", *IEEE 20th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks*, 11-13 Eylül 2012, Split.
- [8] Özdemir, Ö., (2013). "Mitigating Error Propagation in Multiple Access Relay Channels", *21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 24-26 Nisan 2013, KKTC.
- [9] Ding, Y., Li, G., (2012). "Multiple-access Relay Channel with Direct Network Coding", *IEEE 14th International Conference on Commun. Technology*, 9-11 Kasım 2012, Chengdu.
- [10] Das Menghwar, G., Mecklenbrauker, C. F., (2014). "Network Coding Based Multiple-access Channel with a Dedicated-relay Versus Cooperative Communications", *IEEE 4th International Confer. on Wireless Commun., Vehicular Technology, Inf. Theory (VITAE)*, 11-14 Mayıs 2014, Aalborg.

- [11] Sendonaris, Erkip, E., Aazhang, B., (2003). "User Cooperation Diversity - Part I and Part II: System description", *IEEE Transactions on Communication*, 51(11): 1927-1938.
- [12] Proakis, J. G., (2000). Digital Communications, McGraw-Hill, New York.
- [13] Liu, J., Shroff, N. B. and Sherali, H. D., (2012). "Optimal Power Allocation in Multi-relay MIMO Cooperative Networks: Theory and Algorithms", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 30(2): 331-340.
- [14] Abdaoui, A., Ikki, S. S. and Ahmed, M. H., (2010). "Performance Analysis of MIMO Cooperative Relaying System Based on Alamouti STBC and Amplify-and-forward Schemes", *IEEE International Conf. on Communications (ICC)*, 23-27 Mayıs 2010, Cape Town.
- [15] Proakis, J. G., Salehi, M., (1994). Communication System Engineering, Practice-Hall, New Jersey.
- [16] Meulen, V. D., (1971). "Three-terminal Communication", *Advances in Applied Probability*, 3(1): 120-154.
- [17] Tian, J., Zhao, Q. and Yu, F. Q., (2011). "Non-coherent Detection for Two-way AF Cooperative Communications in Fast Rayleigh Fading Channels," *IEEE Trans. Communication*, 59(10): 2753-2762.
- [18] Sharma, G. V. V., Ganwani, V., Deai, U. B. and Merchant S. N., (2009). "Performance Analysis of Maximum Likelihood Decode and Forward Cooperative Systems in Rayleigh Fading," *IEEE International Conf. on Communications (ICC)*, 14-18 Haziran 2009, Dresden.
- [19] Cai, N., Li, S.-Y. R. and Yeung, R. W., (2000). "Network Information Flow," *IEEE Transactions on Information Theory*, 46(4): 1204-1216.
- [20] Soussi, M. El, Zaidi, A. and Vandendorpe, L., (2010). "Network Coding for the Multiple Access Relay Channel Using Lattices," *ISABEL 3<sup>rd</sup> International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Commun. Technologies*, 7-10 Kasım, Roma.
- [21] Akin, A. I., (2013). AF ve DF Tabanlı İşbirlikli Sistemlerde Röle Seçimi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Dogan, H., (2009). FSK/PSK Modülasyonlu Röleli ve İşbirlikli Sistemler, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] Coskun, A., (2010). Anten Seçimli Haberleşme Sistemlerinin Nakagami-*m* Sönümlmeli Kanallarda Performansı, Yüksek Lisans Tezi, GYTE Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [24] Sklar, B., (1997). "Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems part I: Characterization", *IEEE Commun. Mag.*, 35: 90-100.
- [25] Stüber, G. L., (2000). Principles of Mobile Communication, Kluwer Academic Publishers.

- [26] Nakagami, M., (1960). "The m-distribution a General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading, Statistical Methods of Radio Wave Propagation", Pergamon, New York.
- [27] Goldsmith, A., (2005). Wireless Communication, Cambridge University Press.
- [28] Rappaport, T. S., (2002). Wireless Communications, 2nd Ed., Prentice Hall.
- [29] Gibson, J. D., (1999). The Communication Handbook, 2nd Ed., CRC Press, Springer.
- [30] İlhan, H., (2011). Kaskat Sönümlenmeli Kanallar için İşbirlikli Sistem Tasarımı ve Hata Başarım Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] Meulen, E. C. V., (1971). "Three-terminal Communication Channels", *Adv. Appl. Prob.*, 3: 120-154.
- [32] Cover, T. M. ve Gamal, A. A. E., (1979). "Capacity Theorems for the Relay Channel", *IEEE Trans. Inf. Theory*, 25: 572-584.
- [33] Laneman, J. N., Tse, D. N. C., and Wornell, G. W., (2004). "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behaviour", *IEEE Trans. Inf. Theory*, 50(12): 3062-3080.
- [34] Geza, K. and Michael, P. K., (1998). "The Role of Synchronization in Digital Communications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Fundamental Theory and Applications*, 45(11): 927-936.
- [35] Valenti, M. C., Torrieri, D. and Ferrett, T., (2011). "Noncoherent Physical-layer Network Coding with FSK Modulation: Relay Receiver Design Issues," *IEEE Trans. Commun.*, 59(9): 2595-2604.
- [36] Tian, J., Zhao, Q. and Yu, F. Q., (2011). "Non-coherent Detection for Two-way AF Cooperative Communications in Fast Rayleigh Fading Channels," *IEEE Trans. Communication*, 59(10): 2753-2762.
- [37] Zhao, Q., Hoboken, N. J., Li, H., (2007). "Differential Modulation for Cooperative Wireless Systems", *IEEE Transactions on Signal Processing*, 55(5): 2273-2283.
- [38] Himsoon, T., Siritwongpairat, W.P., Su, W. and Liu, K. J. R., (2008). "Differential Modulations for Multinode Cooperative Communications", *IEEE Transactions on Signal Processing*, 56(7): 2941-2956.
- [39] Liu, P., Kim, Il-M. and Gazor, S., (2013). "Maximum-Likelihood Detector for Differential Amplify-and-forward Cooperative Networks," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 62(8): 4097-4104.
- [40] Wang, T., Wang, R. and Giannakis, G., (2008). "Smart Regenerative Relays for Link-adaptive Cooperative Communications," *IEEE Trans. Commun.*, 56(11): 1950-1960.
- [41] Lee, Y. ve Tsai, M. H., (2009). "Performance of Decode-and-forward Cooperative Communications over Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 58: 1218-1227.

- [42] Simon, M. K. and Alouini, M. S., (2002). "A Unified Approach to the Probability of Error for Noncoherent and Differentially Coherent Modulations over Generalized Fading Channels," *IEEE Tran. on Commun.*, 46(12): 1625-1638.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Muhammet Ali KARABULUT  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :18.01.1987 İstanbul  
**Yabancı Dili** :İngilizce  
**E-posta** :mali.karabulut@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Mustafa Kemal Üniversitesi	2010
Lise	Fen	Orhan Cemal Fersoy Lisesi	2005

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2013-(Halen)	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2012	Alstom Transport	Bakım Onarım Mühendisi



## YAYINLARI

### Bildiri

1. **Karabulut M. A.,** Özdemir Ö. ve İlhan H., (2015). "Link Adaptive Relaying with Noncoherent BFSK and DPSK Modulations in Multiple Access Relay Channels," *IEEE Wireless Telecommunication Symposium (WTS)*, 15-17 Nisan 2015, New York.
2. **Karabulut M. A.,** Özdemir Ö. ve İlhan H., (2015). "Farksal Modülasyon Kullanan İşbirlikli İletişim," *IEEE 23<sup>rd</sup> Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 16-19 Mayıs 2015, Malatya.
3. **Karabulut M. A.,** Özdemir Ö. ve İlhan H., (2014.) "Ağ Kodlamalı Evre Uyumsuz İşbirlikli İletişim," *IEEE 22<sup>nd</sup> Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 23-25 Nisan, Trabzon.

### Proje

1. Çoklu Erişim Röle Kanallarında İşbirlikli İletişim Teknikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi BAP (Araştırmacı)
2. İşbirlikli/Röleli Sistemlerde Karmaşıklık Azaltıcı Yöntemler ve Hata Başarım Analizleri, TÜBİTAK (Bursiyer öğrenci)