

**İŞBİRLİKLİ TELSİZ HABERLEŞMEDE
MELEZ OTOMATİK TEKRAR İSTEĞİ YÖNTEMLERİ**

**HYBRID AUTOMATIC REPEAT REQUEST METHODS IN
COOPERATIVE WIRELESS COMMUNICATIONS**

İBRAHİM ÖZKAN

**Doç. Dr. Emre Aktaş
Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim - Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2014

İBRAHİM ÖZKAN'ın hazırladığı **İşbirlikli Telsiz Haberleşmede Melez Otomatik Tekrar İsteği Yöntemleri** adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet Şafak

Başkan

Doç. Dr. Emre Aktaş

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Yakup Sabri Özkazanç

Üye

Yrd. Doç. Dr. Berkan Dülek

Üye

Doç. Dr. Tolga Girici

Üye

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Fatma SEVİN DÜZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

... / ... / 20...

İbrahim Özkan

ÖZET

İŞBİRLİKLİ TELSİZ HABERLEŞMEDE MELEZ OTOMATİK TEKRAR İSTEĞİ YÖNTEMLERİ

İBRAHİM ÖZKAN

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emre Aktaş

Temmuz 2014, 109 sayfa

Telsiz haberleşme sistemlerinde, hatasız iletişim kurmak sönümlenme ve gürültü gibi etkenlerden dolayı oldukça güç bir durumdur. Bu durumu aşmak amacıyla çeşitli iletişim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin başında kanal kodlaması gelir. Bu yöntemde, paketlerin çeşitli algoritmalar kullanılarak kodlanması ve bu şekilde alıcıya iletilmesi amaçlanır. Alıcının bu kodları kullanması ile paket hatalarını tespit ederek hatalı paketlerin tekrar gönderim (TG) isteğiyle yeniden gönderilmesi sağlanır. Ancak, paket hatalarının oldukça yüksek sıklıkla yaşanması durumunda, tekrar gönderim sayısının artması sistem başarımında olumsuz etkiye neden olacağından, hatalı olduğu tespit edilen paketlerin tekrar gönderim isteği olmaksızın alıcıda düzeltilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, paketlere hata düzeltmeye yönelik kodlar eklenerek gönderilmesi ve hataların alıcıda düzeltilmediği durumda tekrar gönderim isteğine başvurulmuş melez tekrar gönderim yöntemleri (MTG) oluşturulmuştur. Bu sayede tekrar gönderim sayısının azaltılması hedeflenmiştir.

Tekrar gönderim yöntemlerinin yanı sıra, değişen kanal koşullarında, verimliliği arttırmaya yönelik, farklı kiplenme - kodlama (UKK) çiftleri belirleyerek paketlerin gönderilmesi hedeflenmiştir. Bu sayede kanal koşuluna en uygun olduğu düşünülen kiplenme - kodlama çifti kullanılarak, hem iyi hem de kötü kanal koşullarında iletişimin verimli bir şekilde sürdürülmesi hedeflenmiştir.

Telsiz kanallarda, sönümlenmeden kaynaklanan sorunları aşmak için geliştirilen çözümlerden birisi de işbirlikli ağlardır. İşbirlikli haberleşme sayesinde, farklı kanallardan elde edilen bilgi ile birlikte alıcıda çeşitleme kazancı yaratılarak sistem başarımının artırılması hedeflenmiştir.

Bu tez kapsamında, melez tekrar gönderim yöntemlerinin, zamanla ilintili değişen Rayleigh sönümlenmeli kanallarda, uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemiyle birlikte kullanılması ve gerek işbirliksiz gerekse işbirlikli gönderim yöntemleri için araştırılması hedeflenmiştir. Farklı gönderim yöntemlerinin kıyaslanması amacıyla, paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik temel ölçütler olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otomatik Tekrar Gönderim, Melez Otomatik Tekrar Gönderim, İşbirlikli Haberleşme, Kanal Kodlama, Uyarlamalı Kipleme - Kodlama, Sönümlenmeli Kanal, İzgesel Verimlilik, Paket Kayıp Oranı

ABSTRACT

HYBRID AUTOMATIC REPEAT REQUEST METHODS IN COOPERATIVE WIRELESS COMMUNICATIONS

İBRAHİM ÖZKAN

**Master of Science, Department of
Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Doç. Dr. Emre Aktaş

July 2014, 109 pages

In wireless communication systems, it is quite difficult to maintain an error-free communication because of fading and presence of noise. In order to overcome this problem, many different communication techniques are developed. Channel coding is one of the primer techniques among them. In channel coding, it is aimed to transmit the packets to the receiver after coding by some variety of algorithms. The receiver is supposed to detect the erroneously received packets by using these codes and request a retransmission (ARQ). It is aimed to correct the packet errors at the receiver side, if possible, since the performance of the system will be affected adversely especially when packet errors are frequently encountered. To achieve this objective, hybrid automatic repeat request (HARQ) methods are developed with packets are supplied with error correcting codes in order to correct the errors to decrease the request for retransmissions and request a retransmission only if the errors are not correctable.

In addition, retransmission methods, adaptive modulation - coding (AMC) technique is developed in order to increase the efficiency of the transmission in varying channel conditions. By using this technique, it is aimed to maintain the communication efficiently, in both poor and good channel conditions by transmitting the packets by choosing the optimum modulation and coding pair for the individual channel conditions.

In wireless communications, cooperative network is one of the solutions to overcome

the fading problem. In cooperative networks, it is desired to increase the system performance, by exploiting the diversity gain due to the information obtained from different channels.

In this thesis, it is aimed to investigate the performance of the hybrid automatic repeat request techniques, using together with the adaptive modulation - coding technique in correlated Rayleigh fading channels for both non-cooperative and cooperative networks. Packet loss rate and spectral efficiency are the main criteria in order to make comparison between different transmission methods.

Keywords: Automatic Repeat Request, Hybrid Automatic Repeat Request, Cooperative Communication, Channel Coding, Adaptive Modulation - Coding, Fading Channel, Spectral Efficiency, Packet Loss Rate

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluŐmasında sağladığı değerli fikir ve yardımlarından öte, gösterdiği anlayıŐ ve sabır dolayısıyla sayın Doç. Dr. Emre Aktaş'a teşekkür ederim.

Bilgi ve deneyimlerini paylaŐan değerli jüri üyelerine teşekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni daima destekleyen anneme ve babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	ix
ÇİZELGELER	xiii
KISALTMALAR	xiv
SÖZLÜK DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. TELSİZ İLETİŞİMDE KANAL MODELİ	5
2.1. Gürültü	5
2.2. Yayılım Yolu Kaybı	6
2.3. Sönümlenme	6
2.3.1. Sönümlenmeli Kanallar İçin İstatistiksel Modeller	7
2.3.1.1. Rayleigh Sönümlenme	7
2.3.1.2. Rice Sönümlenme	7
2.3.2. Sönümlenmeli Kanal Kategorileri	8
2.3.2.1. Düz sönümlenme ve Frekans Seçici Sönümlenme	8
2.3.2.2. Yavaş Sönümlenme ve Hızlı Sönümlenme	9
3. HATA KONTROL YÖNTEMLERİ	10
3.1. Kanal Kapasitesi	10
3.2. Kanal Kodlama	12
3.2.1. Çevrimli Artıklık Sınaması	12
3.2.2. Evrişimli Kodlar	13
3.3. Otomatik Tekrar Gönderim İsteği (ARQ)	15

3.3.1. Dur ve Bekle Tekrar Gönderim Yöntemi	16
3.3.2. N Paket Geri Git Tekrar Gönderim Yöntemi	17
3.3.3. Seçici Tekrarla Tekrar Gönderim Yöntemi	18
3.4. Melez Tekrar Gönderim Yöntemleri	18
3.4.1. Tip - I Melez Tekrar Gönderim	19
3.4.1.1. Chase Birleştirme	19
3.4.2. Melez Tekrar Gönderim Tip - II	20
3.4.3. Melez Tekrar Gönderim Tip - III	21
4. İŞBİRLİKLİ TİP - I MELEZ TEKRAR GÖNDERİM YÖNTEMİ VE UYARLAMALI KİPLEME - KODLAMA	22
4.1. Kapsam	22
4.2. Sistem Başarım Ölçütleri	23
4.3. İşbirlikli Çeşitleme	24
4.4. Kanal Modeli ve Uyarlamalı Kiplleme - Kodlama	26
4.4.1. SNR Eşik Değerlerinin Belirlenmesi	30
4.5. Tekrar Gönderim Yöntemleri	32
4.5.1. İşbirliksiz Tekrar Gönderim	33
4.5.2. İşbirlikli Tekrar Gönderim I	33
4.5.3. İşbirlikli Tekrar Gönderim II	35
5. BENZETİM VE ANALİZ	38
5.1. Senaryo I	39
5.1.1. İşbirliksiz Gönderim	39
5.1.2. İşbirlikli Gönderim I	45
5.1.3. İşbirlikli Gönderim II	50
5.2. Senaryo II	52
5.2.1. İşbirliksiz Gönderim	53
5.2.2. İşbirlikli Gönderim I	54

5.2.3. İşbirlikli Gönderim II	57
5.3. Senaryo III	58
5.3.1. İşbirliksiz Gönderim	59
5.3.2. İşbirlikli Gönderim I	66
5.3.3. İşbirlikli Gönderim II	74
5.4. Senaryo IV	78
5.4.1. İşbirliksiz Gönderim	78
5.4.2. İşbirlikli Gönderim I	79
5.4.3. İşbirlikli Gönderim II	83
5.5. Senaryo V	84
5.5.1. İşbirliksiz Gönderim	84
5.5.2. İşbirlikli Gönderim I	86
5.5.3. İşbirlikli Gönderim II	87
6. BULGULAR	89
6.1. Senaryo I, Seanryo II ve Senaryo V Karşılaştırımı	89
6.2. Senaryo I, Senaryo III ve Senaryo IV Karşılaştırımı	94
7. SONUÇLAR	98
KAYNAKLAR	101
EK A	106
A.1. En Yüksek Oran Birleştirme	106
ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. TBGG Kanal modeli	10
Şekil 3.2. Sönümlenmeli kanal modeli	11
Şekil 3.3. Evrişimli kodlayıcı, Kod oranı = 1/2, $K = 3$	14
Şekil 3.4. Dur ve bekle tekrar gönderim yöntemi	16
Şekil 3.5. N Paket geri git tekrar gönderim yöntemi, $N = 7$	17
Şekil 3.6. Tip - II melez tekrar gönderim için sistem modeli	21
Şekil 4.1. Tip - I melez tekrar gönderim yönteminde uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin kullanılması	22
Şekil 4.2. İşbirlikli gönderim modeli	25
Şekil 4.3. Uyarlamalı kipleme - kodlama için kanal SNR aralıkları	27
Şekil 4.4. İşbirliksiz gönderim için akış diagramı	34
Şekil 4.5. İşbirlikli gönderim I için akış diagramı	35
Şekil 4.6. İşbirlikli gönderim II için akış diagramı	37
Şekil 5.1. C_n İfadesinin UKK mod 0 için çözüm bölgeleri	48
Şekil 5.2. Senaryo I için üç farklı gönderim yönteminin paket kayıp oranlarının analitik ve benzetim sonuçları	52
Şekil 5.3. Senaryo I için üç farklı gönderim yönteminin izgesel verimliliklerinin analitik ve benzetim sonuçları	53
Şekil 5.4. Senaryo II için üç farklı gönderim yönteminin paket kayıp oranlarının analitik ve benzetim sonuçları	59
Şekil 5.5. Senaryo II için üç farklı gönderim yönteminin izgesel verimliliklerinin analitik ve benzetim sonuçları	60
Şekil 5.6. Senaryo III işbirliksiz gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1} \leq \gamma_{px}$ koşulu)	63

Şekil 5.7. Senaryo III işbirliksiz gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK Mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_n + \Gamma_k \leq \gamma_{px} < \Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}$ koşulu)	64
Şekil 5.8. Senaryo III işbirliksiz gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\gamma_{px} < \Gamma_n + \Gamma_k$ koşulu)	66
Şekil 5.9. Senaryo III işbirliksiz gönderim yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları	67
Şekil 5.10. Senaryo III işbirliksiz gönderim yönteminde tüm UKK modlar için izgesel verimlilik sonuçları	68
Şekil 5.11. Senaryo III işbirlikli gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\gamma_{px} < \Gamma_n$ koşulu)	69
Şekil 5.12. Senaryo III işbirlikli gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_n \leq \gamma_{px} < \Gamma_{n+1}$ koşulu)	70
Şekil 5.13. Senaryo III işbirlikli gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_{n+1} < \gamma_{px}$ koşulu)	72
Şekil 5.14. Senaryo III işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları	73
Şekil 5.15. Senaryo III işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları	75
Şekil 5.16. Senaryo III işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları	76
Şekil 5.17. Senaryo III işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modlar için izgesel verimlilik sonuçları	77
Şekil 5.18. Senaryo IV işbirliksiz gönderim yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları	79
Şekil 5.19. Senaryo IV işbirliksiz gönderim yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları	80

Şekil 5.20. Senaryo IV işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları	81
Şekil 5.21. Senaryo IV işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları	82
Şekil 5.22. Senaryo IV işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları	84
Şekil 5.23. Senaryo IV işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları	85
Şekil 5.24. Senaryo V için üç farklı gönderim yönteminin paket kayıp oranlarının analitik ve benzetim sonuçları	88
Şekil 5.25. Senaryo V için üç farklı gönderim yönteminin izgesel verimlilik sonuçları	88
Şekil 6.1. İşbirlikli gönderim I yönteminde paket kayıp oranı sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı	90
Şekil 6.2. İşbirlikli gönderim I yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo II için karşılaştırımı	91
Şekil 6.3. İşbirlikli gönderim I yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı	91
Şekil 6.4. İşbirlikli gönderim II yönteminde paket kayıp oranı sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı	92
Şekil 6.5. İşbirlikli gönderim II yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo II için karşılaştırımı	93
Şekil 6.6. İşbirlikli gönderim II yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı	93
Şekil 6.7. İşbirlikli gönderim I yönteminde paket kayıp oranlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırımı .	94
Şekil 6.8. İşbirlikli gönderim I yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırımı	95
Şekil 6.9. İşbirlikli gönderim II yönteminde paket kayıp oranlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırımı .	96

Şekil 6.10. İşbirlikli gönderim II yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırımı	97
Şekil A.1. Çok Antenli Lineer Birleştirme Modeli	106

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Farklı yayılım ortamları için yol kaybı sabitleri	6
Çizelge 4.1. Tercih edilen uyarlamalı kipleme - kodlama modları ve bu modlara ait parametreler	30
Çizelge 4.2. SNR eşik değerleri	32
Çizelge 4.3. $\bar{\gamma} = 10$ dB ortalama SNR ve ρ_5 zarf ilinti katsayısı için kanal durum geçiş matrisi	32
Çizelge 4.4. $\bar{\gamma} = 20$ dB ortalama SNR ve ρ_0 zarf ilinti katsayısı için kanal durum geçiş matrisi	32

KISALTMALAR

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
ACK	Acknowledgement
CB	Chase Birleştirme
CRC	Cyclic Redundancy Check
ÇAS	Çevrimli Artıklık Sınaması
DBTG	Dur ve Bekle Tekrar Gönderim
FEC	Forward Error Correction
HDK	Hata Düzelten Kodlar
HTK	Hata Tespit Eden Kodlar
İV	İzgesel Verimlilik
KDB	Kanal Durum Bilgisi
LOS	Line Of Sight
MTG	Melez Tekrar Gönderim
NACK	Negative Acknowledgement
NGTG	N Paket Geri Git Tekrar Gönderim
PKO	Paket Kayıp Oranı
RCPC	Rate - Compatible Punctured Convolutional Code
RTT	Round Trip Time
SNR	Signal to Noise Ratio
STG	Seçici Tekrar Gönderim
TBGG	Toplanır Beyaz Gauss Türü Gürültü
TG	Tekrar Gönderim
UKK	Uyarlamalı Kipleme - Kodlama

SÖZLÜK DİZİNİ

Chase Birleştirme	: Chase Combining
Çevrimli Artıklık Sınaması	: Cyclic Redundancy Check
Çok Yollu Sönümlenme	: Multipath Fading
Çöz ve İlet	: Decode and Forward
Evrişimli Kodlama	: Convolutional Coding
Geri Besleme	: Feedback
Gidiş Geliş Gecikmesi	: Round Trip Time
Görüş Hattı	: Line of Sight
Gürültü	: Noise
İleri Yönlü Hata Düzeltken Kodlama	: Forward Error Correction Coding
İşaret Gürültü Oranı	: Signal to Noise Ratio
İzgesel Verimlilik	: Spectral Efficiency
İzgesel Güç Yoğunluğu	: Power Spectral Density
Kanal Durum Bilgisi	: Channel State Information
Kanal Kodlama	: Channel Coding
Kayan Yazmaç	: Shift Register
Kodlanmış İşbirliği	: Coded Cooperation
Melez Otomatik Tekrar İsteği	: Hybrid Automatic Repeat Request
Olasılık Dağılım Fonksiyonu	: Probability Density Function
Onay	: Acknowledgement
Otomatik Tekrar İsteği	: ARQ
Sönümlenme	: Fading
Toplanır Beyaz Gauss Türü Gürültü	: Additive White Gaussian Noise
Uyarlamalı Kiplenme - Kodlama	: AMC
Uyumlu Evre Süresi	: Coherence Time
Uyumlu Frekans Bandı	: Coherence Bandwidth
Yol Kaybı	: Path Loss
Yükselt ve İlet	: Amplify and Forward

1. GİRİŞ

İletişim sistemlerinin bireylerin gündelik hayatında giderek daha fazla yer alması ve telsiz haberleşme sistemlerinin gelişimi, birbirlerini karşılıklı olarak etkilemektedir. Telsiz iletişim sistemlerinin bireysel kullanıcılar tarafından yaygın bir biçimde kullanılmasının ilk örneklerinden birisi birinci nesil (1G) iletişim sistemidir. Birinci nesil iletişim sistemlerinde temel amaç, kullanıcılara analog ses hizmeti vermektir. İkinci nesil (2G) iletişim sistemlerinde ise kullanıcılara sayısal ses iletişimi imkanı sunulmuştur. İkinci nesille birlikte telsiz iletişim sistemleri dünya çapında yaygınlık kazanmıştır. Giderek gelişen teknolojiye paralel olarak, veri iletişimi gezgin telsiz iletişim sistemlerinde de talep edilen bir özellik olmuştur. Veri iletişiminin ikinci nesille başlamasına rağmen, artan veri hızı talebi yeni arayışlara neden olmuştur. Bu talebi karşılamak için üçüncü nesil (3G) iletişim sistemleri kullanıcıların hizmetine sunulmuştur. Günümüzde üçüncü nesil iletişim sistemlerinin karşılayamadığı artan veri hızı talebiyle birlikte birçok merkezde dördüncü nesil (4G) iletişim sistemleri geliştirilme aşamasında olup, kısıtlı da olsa ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır [1, 2].

Dördüncü nesil iletişim sistemlerinde veri hızının artırılmasının yanında, güç kullanımı, kapsama ve frekans bandı kullanımı gibi konularda iyileştirme yapılması hedeflenmiştir. Ayrıca, dördüncü nesil iletişim sistemlerinde hücreli ağların yanında tasarsız ağlar da önem kazanan bir husustur. Bu kapsamda kullanıcılar arasında işbirliği önem kazanan bir kavram haline gelmiştir [3, 4].

İşbirlikli haberleşme sistemlerinde, iletişim halinde olan iki kullanıcıya ek olarak en az bir kullanıcının varlığı gereklidir. Bu sayede, işbirlikli iletişim sistemleri, kullanıcıların tek antenli olsalar dahi, çeşitleme kazancından yararlanmalarını sağlayarak sistem başarımını olumlu yönde etkilerler [5]. Alıcı, birbirinden bağımsız en az iki kanaldan elde ettiği sinyalleri kullanarak uzamsal çeşitleme kazancı elde eder. Benzer şekilde, farklı zamanlarda tekrar gönderimler sayesinde, zaman çeşitlemesinden yararlanır. Buna ek olarak, işbirliğine gerek duyulmadığı takdirde, röle görevi gören kullanıcılar devre dışı kalarak kaynakların daha verimli kullanılması sağlanabilir [6].

Kablosuz kanallarda, bir paketin hatasız olarak iletimi, çok yönlü sönmüleme ve gölge-

leme gibi nedenlerden ötürü kablolu iletişim sistemlerine göre daha düşük olasılıkla gerçekleşen bir durumdur. Kablosuz iletişimde bu sorunu aşmak için kanal kodlama tekniği tercih edilen tekniklerden birisidir. Shannon'un kapasite teoremine göre, kanal kapasitesini aşmamak şartıyla, çeşitli kodlar kullanılarak hatasız iletişim gerçekleştirilebilir [7]. Bu nedenle, telsiz iletişim ağlarında oluşabilecek hataları kontrol edebilmek amacıyla çeşitli kanal kodlama teknikleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler, bilginin kodlanarak gönderilmesi ve alıcıda elde edilen paketteki muhtemel hataların düzeltilmesi ilkesine dayanır. Bu tür hata düzelten kodlama yöntemlerine, ileri yönlü hata düzelten kodlar (FEC Coding - Forward Error Correction Coding) adı verilir [8]. Ancak bu tür yöntemlerde kullanılan kodlama tekniğine bağlı olarak, kodun hata düzeltebilme yeteneği değişebilir ve bazı paketleri hatalı olmasına rağmen kabul etmek zorunda kalabilir.

İleri yönlü hata düzeltme yönteminin, özellikle olumsuz kanal koşullarında karşılaşılan bu eksikliğini gidermek amacıyla, tekrar gönderim yöntemleri kullanılabilir [9]. Tekrar gönderim yöntemlerinde, gönderim sırasında oluşabilecek hataları alıcıda tespit etmek amacıyla paketler hata tespit eden kodlar ile gönderilir. Alıcı, elde ettiği paketlerden birinde hata tespit etmesi durumunda, vericiden paketin tekrar gönderimini talep eder. Bu şekilde hatalı paketlerin sisteme kabul edilmesi engellenmiş olur. Geleneksel tekrar gönderim yöntemiyle, hata düzelten kodlama yönteminin birleştirilmesi sonucu melez tekrar gönderim yöntemleri oluşturulmuştur. Melez tekrar yöntemlerinin kullanılmasıyla, iletişim sistemlerine alıcıda hata düzeltebilme yeteneği kazanıdırılmıştır. Bu sayede, kablosuz gönderim sistemlerinde karşılaşılan, özellikle kötü kanal koşullarında gecikme ve iyi kanal koşullarında kanal kapasitesinin verimsiz kullanılması gibi sorunlar giderilmeye çalışılmıştır [10]. Melez tekrar gönderim yöntemleri, temel olarak üç gruba ayrılabilirler. Bunlar Tip - I melez tekrar gönderim, Tip - II melez tekrar gönderim ve Tip - III melez tekrar gönderim yöntemleri olarak adlandırılabilirler [11]. Melez tekrar gönderim yöntemleri, yeni nesil iletişim sistemlerinde oldukça rağbet gören ve hala araştırmalara konu olan yöntemlerdir [12, 13, 14, 15].

Tip - I melez tekrar gönderim yöntemi, bilgi paketlerinin hata tespit eden kodlar ve hata düzelten kodlarla birlikte gönderilmesiyle, hataların alıcıda düzeltilmesi, hataların düzeltilmediği durumda ise tekrar gönderimlerle hatasız iletişim sağlanmasını amaçlar.

Bu yöntemde, hatalı olduğu tespit edilen bir paket için yapılan tekrar gönderimler ilk gönderimle özdeştir. Tip - I melez tekrar gönderim yönteminin bir çeşidi olan Chase birleştirme yönteminde ise hatalı olduğu tespit edilen bir paket, alıcıda saklanır ve tekrar gönderimlerle birlikte işlenerek hatasız paket elde edilmeye çalışılır [16, 17].

Tip - I melez tekrar gönderim yönteminin aksine, Tip - II melez tekrar gönderim yöntemi, sabit kod oranı kullanmak yerine değişen kod oranları kullanmaktadır. Gönderilen paketin alıcıda hatasız olarak çözülememesi durumunda, her gönderimde daha fazla hata düzeltme kapasitesi sağlayan kod parçaları gönderilir. Bu sayede değişen kanal koşullarında etkin bir kodlama sistematığı geliştirilmiştir [18, 19].

İşbirlikli haberleşmenin melez tekrar gönderim yöntemleriyle birlikte kullanılmasıyla etkili iletişim sistemleri oluşturulabilir. İşbirlikli ağlarda röle, elde ettiği paketleri alıcıya ulaştırabileceği gibi, alıcıya paketin kendisini göndermeksizin fazladan kod bilgisi göndererek de paket hatalarının düzeltilmesine katkıda bulunabilir [20, 21, 22, 23].

Sönümlenmeli kanallarda işbirlikli gönderim ve kodlama dışında giderek yaygınlaşan bir yöntem ise uyarlamalı kipleme - kodlama (UKK) yöntemidir. Bu yöntemde kanal kapasitesinin etkin bir şekilde kullanılması amacıyla, sönümlenmeli kanalın değişimine uyumlu olarak değişen kipleme yöntemleriyle kodlama oranları birlikte kullanılarak, kanal kapasitesinin daha verimli kullanılması hedeflenmiştir [24, 25].

Tez kapsamında, gerek işbirlikli gerekse işbiriksiz telsiz ağlarda, Tip - I melez tekrar gönderim ve uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemlerinin birlikte kullanıldığı gönderim yöntemleri incelenmiştir. Tip - I melez tekrar gönderim yönteminde, Chase birleştirmenin kullanılmasıyla sistem başarımında oluşacak değişimin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. İşbiriksiz tekrar gönderim ve işbirlikli tekrar gönderim yöntemlerini kıyaslamak amacıyla, paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik göz önünde bulundurulmuştur. Analitik olarak elde edilen paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadeleri benzetim sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır. Bu tezde incelenen işbirlikli tekrar gönderim yöntemi, [17]'de incelenen özgün yöntemdir. Belirtilen çalışmada benimsenen sönümlenmeli kanal modelinin daha gerçekçi temellere oturtularak incelenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, Chase birleştirmenin en yüksek oran birleştirme kullanılarak gerçekleştirildiği Tip - I melez tek-

rar gönderim yönteminin, gerçekçi kanal koşullarında incelenmesi de yeni bir çalışma olarak kabul edilebilir.

Bu tezin geri kalan kısmı şu şekilde özetlenebilir. İkinci bölümde, benzer çalışmalarda yaygın olarak kullanılan kablosuz kanal modelleri özetlenmiş ve sönümlenmeli kanal modellerinin karakterize edilmesinde gözetilen temel kavramlara değinilmiştir.

Üçüncü bölümde, sönümlenmeli kanallarda, kanal kapasitesini değerlendirmek amacıyla kullanılan hata kontrol yöntemlerine değinilmiştir. Bu yöntemlerden, hata düzelten kodlar kapsamında çevrimli artıklık sınamasına (ÇAS), hata düzelten kodlar (HDK) kapsamında ise evrişimli kodlamaya yer verilmiştir.

Dördüncü bölümde, tez kapsamında incelenecek olan, Tip - I melez tekrar gönderim yöntemi olan Chase birleştirme ve uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemi tanıtılmıştır. Bu iki yöntemin birlikte kullanılması durumunda, gerekli sistem parametrelerinin nasıl elde edildiği anlatılmıştır. Bunun dışında, tez kapsamında incelenen, işbiriksiz ve işbirlikli gönderim yöntemlerinin işleyiş yapısına değinilmiştir. Gönderim yöntemlerinin kıyaslanması amacıyla kullanılacak olan paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadeleri tanımlanmıştır.

Beşinci bölümde, Chase birleştirme ve uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemlerinin birinin ya da her ikisinin kullanılmasıyla oluşturulan beş farklı iletişim senaryosu tanıtılmıştır. Bu senaryolar, işbiriksiz ve iki farklı işbirlikli gönderim yöntemi için de incelenmiştir. Bütün iletişim senaryoları için analitik sonuçlar elde edilerek benzetim sonuçlarıyla birlikte sunulmuştur.

Altıncı bölümde, analiz ve benzetim yoluyla elde edilen sonuçların karşılaştırmalı olarak yorumlanması ve sonuçlandırılması amaçlanmıştır.

Son bölümde, yapılan çalışmaların sonuçlarıyla ilgili yorumlar ve çıkarımlar yer almaktadır.

2. TELSİZ İLETİŞİMDE KANAL MODELİ

Telsiz iletişim sistemlerinde, vericiyi ve alıcıyı çevreleyen ortam kanal olarak adlandırılır. Dolayısıyla iletişim sisteminin tasarımında kanal davranışının bilinmesi hayati önem taşır.

2.1 Gürültü

Gürültü, iletişim sistemlerinde sinyallerin gönderiminde ve işlenmesinde olumsuz etkisi olan ve üzerinde sınırlı kontrole sahip olunan istenmeyen sinyallerin genel adıdır. Olumsuz etkilerinden dolayı iletişim sistemleri ortamdaki gürültü tarafından kısıtlanmıştır. Gürültünün başlıca türleri alıcıdaki termal gürültü, insan yapımı gürültü, atmosferik ve galaktik gürültü olarak sınıflandırılabilir [26].

Gürültüyü istatistiksel olarak incelemek için Toplanır Beyaz Gauss türü Gürültü (TBGG) modeli benimsenmiştir. Bu modele göre alıcıda elde edilen sinyal, vericinin gönderdiği özgün sinyal ile gürültünün toplanması ile oluşan özgün sinyalin bozulmuş halidir. Gürültünün tüm frekanslarda eşit spektral güç yoğunluğuna ve Gauss türü olasılık dağılım fonksiyonuna sahip olduğu varsayılmıştır. Eşitlik 2.1'de ortalama değeri sıfır, değişintisi σ_w^2 olan Gauss türü olasılık dağılım fonksiyonu verilmiştir.

$$f_w(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2}} \exp\left(-\frac{w^2}{2\pi\sigma_w^2}\right) \quad (2.1)$$

Bu durumda, karmaşık değerli Gauss türü gürültü ise w_R ve w_I özdeş ve birbirinden bağımsız iki Gauss türü dağılım olmak üzere, Eşitlik 2.2'deki gibi ifade edilir.

$$w = w_R + jw_I \quad (2.2)$$

Karmaşık Gauss gürültünün değişintisi ve karmaşık bileşenlerinin değişintileri ile spektral güç yoğunluğu N_0 ile arasında Eşitlik 2.3'te ve Eşitlik 2.4'te belirtilen ilişki mevcuttur.

$$\frac{\sigma_w^2}{2} = \sigma_{w_R}^2 = \sigma_{w_I}^2 \quad (2.3)$$

$$\sigma_w^2 = \frac{N_0}{2} \quad (2.4)$$

2.2 Yayılım Yolu Kaybı

Hem teorik hem de deneysel çalışmalar, alınan ortalama sinyal gücünün uzaklıkla ters orantılı olarak logaritmik azaldığını ortaya koymuştur. Bu sonuçtan yola çıkarak, vericiden d_0 referans uzaklığında alınan sinyal gücünün $P_r(d_0)$ olarak ifade edilmesi durumunda, d uzaklığında alınan sinyal gücü $P_r(d)$, Eşitlik 2.5 ile belirlenebilir.

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^\alpha \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'te yer alan α ise yol kaybı sabitidir. Yol kaybı sabiti kanalın özelliklerine göre değişim gösterir ve boş uzay için $\alpha = 2$ iken diğer durumlarda 2'den farklı olacaktır [27].

Yayılım Ortamı	Yol Kaybı Sabiti, α
Boş Uzay	2
Kentsel Alan	2.7 - 3.5
Gölgelenmiş Kentsel Alan	3 - 5
İç mekan (LoS)	1.6 - 1.8
İç mekan	4 - 6

Çizelge 2.1. Farklı yayılım ortamları için yol kaybı sabitleri

2.3 Sönümlenme

Telsiz iletişim kanalında yer alan nesnelere, sinyallerin kırılmasına, saçılmasına ve yansımaya sebep olarak çok yollu bir ortam oluştururlar. Çok yollu bir ortamda, vericiden çıkan sinyaller, alıcıya farklı yollar izleyerek ulaşır. Dolayısıyla, alıcıda elde edilen sinyal, vericinin gönderdiği özgün sinyalin rastgele faz kaymasına, genlik değişimine ve zaman gecikmesine maruz kalmış kopyalarının toplamı şeklinde olur. Bu durum çok yollu sönümlenme olarak tanımlanmıştır [28].

Alıcı ile vericinin konumlarının değişmesi ya da telsiz iletişim kanalının yapısının zamanla farklılaşmasından ötürü sinyallerin ortamdaki davranışları rastgele değişimler gösterir. Bunun haricinde, telsiz kanalların yapısına bağlı olarak, çok yollu sönümlenme davranışları farklılıklar gösterecektir. Bu nedenle telsiz kanalların incelenmesi farklı istatistiksel modeller temel alınarak yapılır.

2.3.1 Sönümlmeli Kanallar İçin İstatistiki Modeller

2.3.1.1 Rayleigh Sönümlleme

Rayleigh sönümlmeli kanal modeli, vericiden çıkan sinyallerin telsiz iletişim kanalında doğrudan (Line of Sight - LoS) bileşen olmaksızın çok sayıda farklı yollar takip ederek alıcıya ulaşması durumunu incelemek için kullanılan sönümlleme modellerinden biridir. Çok sayıda farklı yolu takip ederek alıcıya ulaşan karmaşık değerli sinyallerin toplamının karmaşık bileşenleri, merkezi limit teoremine göre, ortalama değeri $\mu_{h_R} = \mu_{h_I} = 0$, değişimleri $\sigma_{h_R}^2 = \sigma_{h_I}^2 = \sigma^2$ olan Gauss türü dağılıma sahiptir [29].

$$h = h_R + jh_I \quad (2.6)$$

Alıcıda elde edilen karmaşık değerli h sinyalinin zarf değeri ise Rayleigh dağılımlı olup, olasılık dağılım fonksiyonu Eşitlik 2.7'deki gibi ifade edilir .

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right), r \geq 0 \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.7'de olasılık dağılım fonksiyonu verilen r zarf değeri, sönümlleme katsayısı olarak adlandırılır. Sönümlleme katsayısına bağlı olarak, alıcıda elde edilen sinyal gücünün ortalama değeri ise

$$P_{ort} = E\{r^2\} = 2\sigma^2 \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir ve alıcıda alınan sinyal gücünün olasılık dağılım fonksiyonu Eşitlik 2.9'da belirtildiği gibi üssel dağılıma sahiptir.

$$f_P(p) = \frac{1}{P_{ort}} \exp\left(-\frac{p}{P_{ort}}\right), p \geq 0 \quad (2.9)$$

2.3.1.2 Rice Sönümlleme

Rice sönümlleme, Rayleigh sönümllemede olduğu gibi çok yollu sönümlleme bileşenlerine ilaveten vericiden çıkıp hiçbir engele maruz kalmadan alıcıya ulaşan baskın LoS

sinyali mevcut olduğunda kullanılan modeldir. Bu modele göre, Eşitlik 2.6'daki alıcıda elde edilen karmaşık değerli sinyal Eşitlik 2.10'daki hale dönüşür [29].

$$h = A + h_R + jh_I \quad (2.10)$$

Eşitlik 2.10'da yer alan A değeri, alıcıya doğrudan ulaşan LoS sinyalini temsil eder. Bu durumda elde edilen karmaşık değerli h sinyalinin zarf değerinin olasılık dağılım fonksiyonu ise

$$p_R(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right), r \geq 0 \text{ ve } A \geq 0 \quad (2.11)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 2.11'de yer alan $I_0(\cdot)$ modifiye edilmiş birinci tür sıfırıncı dereceden Bessel fonksiyonudur. Ayrıca, Eşitlik 2.11'deki σ^2 , Bölüm 2.3.1.1'de belirtilen çok yollu sönümlenme karmaşık bileşenlerinin değışintisiyle aynıdır.

Rice sönümlenmeyle ilgili önemli bir ifade ise Rice sönümlenme parametresidir. Bu parametre doğrudan sinyal gücünün sönümlenmiş sinyal gücüne oranını verir ve Eşitlik 2.12'deki gibi ifade edilir.

$$K = \frac{A}{2\sigma^2} \quad (2.12)$$

K parametresinin sıfıra eşit olduğu durumda kanal, Rayleigh sönümlenmeli kanala dönüşürken, K parametresinin çok büyük olduğu durumda ise TBGG kanala dönüşür.

2.3.2 Sönümlenmeli Kanal Kategorileri

Çok yollu sönümlenmeli kanallarda, alıcıda elde edilen sinyaldeki bozulma zaman ve frekans uzayında farklı etkiler gösterir ve ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Sönümlenmeli kanallar temel olarak, frekans seçici olan / olmayan ve zamanla değışen / değışmeyen olarak iki farklı açıdan sınıflandırılırlar.

2.3.2.1 Düz sönümlenme ve Frekans Seçici Sönümlenme

Çok yollu sönümlenmeli kanallarda, vericiden gönderilen bir işaretin alıcıya ulaşan kopyaları farklı yollar izlediğinden, alıcıya ulaşmaları için geçen zamanlarda farklılıklar ola-

caktır. Bu kopyaların ilki ile sonuncusu arasındaki gecikme, T_m , kanalın frekans uza-
yında davranışını tespit etmek için kullanılan bir parametre olarak kabul edilmiştir [30].

- İletişimde kullanılan sembol süresi T_s olarak gösterilecek olursa, $T_m < T_s$ duru-
munda, kanal frekans seçici olmayan ya da düz sönümlenmeli kanal olarak sınıf-
landırılır ve kanalın kullanılan frekans bandının tamamında benzer ölçüde sönüm-
leme yaptığı düşünülür. Aksi durumda, gönderilen farklı işaretler, alıcıda üst üste
binerek karışıklığa yol açacaktır.
- Bir başka ifadeyle, $\Delta f_c = 1/T_m$ kanalın uyumlu frekans genişliği olarak tanımlanır.
Kullanılan frekans genişliği, ($W = 1/T_s$), Δf_c 'den büyük ise frekans seçici kanal,
küçük ise frekans seçici olamayan (düz sönümlenmeli) kanal olarak adlandırılır.

2.3.2.2 Yavaş Sönümlenme ve Hızlı Sönümlenme

Alıcı, verici ve kanalı oluşturan nesnelerin en azından birinin konum değiştirmesi so-
nucu, kanalın sinyal üzerindeki etkisinde zamanla değişim gözlenecektir. Hareketten
kaynaklanan bu değişimin etkisini incelemek için en yüksek Doppler frekansı, $f_{d,max}$, ile
ters orantılı olarak tanımlanan kanalın uyumluluk süresi Δt_c ile sembol süresi T_s göz
önünde bulundurulmalıdır. Kanal uyumluluk süresi, $\Delta t_c = \frac{1}{2f_{d,max}}$ olarak tanımlanmıştır.

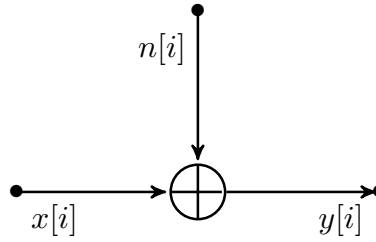
- Kanal uyumluluk süresinin, sembol süresinden büyük olması durumunda, kanal
yavaş değişen kanal olarak adlandırılır. Bu durumda, sembol süresi boyunca ka-
nal tepkisinin değişmediği varsayılır.
- Aksi durumda, $\Delta t_c < T_s$, kanal tepkisi bir sembol süresi içinde değişimler göste-
recek ve alıcıda elde edilen sinyalde bozulmalara yol açacaktır.

3. HATA KONTROL YÖNTEMLERİ

Shannon'un kapasite teoremine göre [7], kanal kapasitesini aşmamak suretiyle, uygun bir kodlama yöntemi kullanılarak bilginin hatasız olarak gönderilmesinin mümkün olduğu teorik olarak gösterilmiştir.

3.1 Kanal Kapasitesi

Şekil 3.1'de ayrık zamanlı TBGG kanalında giriş - çıkış ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 3.1. TBGG Kanal modeli

Bu modele göre $x[i]$, i anında kanal girişi, $y[i]$ kanal çıkışı ve $n[i]$ ise toplanır beyaz Gauss türü gürültüyü temsil eder ve aralarındaki ilişki Eşitlik 3.1'deki gibi ifade edilir.

$$y[i] = x[i] + n[i] \quad (3.1)$$

Bu modele göre, sabit B genişliğinde frekans bandında ve P sabit sembol gücü ile iletim yapıldığında, kanalda sinyal gücü - gürültü gücü oranı (SNR)

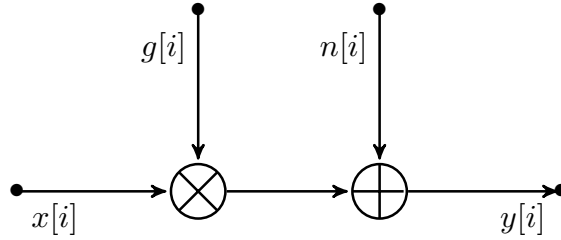
$$\gamma = \frac{P}{N_0 B} \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 3.2'de yer alan N_0 gürültünün spektral güç yoğunludur. Bu durumda, [7]'de belirtildiği gibi kanal kapasitesi

$$C = B \log_2(1 + \gamma) \quad (3.3)$$

olarak belirlenebilir.

Eşitlik 3.3'te yer alan sonuç TBGG kanallar için geçerli olup sönümlenmeli kanallar için geçerli değildir. Bu durumda, iletişim modeli Şekil 3.2'deki gibi güncellenebilir.



Şekil 3.2. Sönümlenmeli kanal modeli

Şekil 3.2'de yer alan $g[i]$, kanal girişinden bağımsız güç kazancı olarak adlandırılır ve sönümlenmenin karakterine bağlı olarak, $p(g)$ olasılık dağılım fonksiyonuna göre zamanla bağımsız değişebileceği gibi ilintili bir şekilde de değişebilir.

Bu modele göre, alıcıda elde edilecek anlık sinyal gücü - gürültü gücü oranı

$$\gamma[i] = g^2[i] \frac{P}{BN_0} \quad (3.4)$$

olarak hesaplanabilir. Bu durumda B , N_0 ve P sabit olduğundan ortalama SNR değeri $g^2[i]$ 'nin dağılımına bağlı olarak ifade edilir [31]. Alıcının, $g^2[i]$ bilgisine (Kanal Durum Bilgisi - KDB) sahip olması halinde, ergodik kanal kapasitesi Eşitlik 3.5'teki gibi hesaplanır [32].

$$C_s = \int_0^{\infty} B \log_2(1 + \gamma) p_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (3.5)$$

Jensen eşitsizliğine göre sönümlenmeli kanal kapasitesi, ortalama SNR değerine bağlı olarak, Eşitlik 3.6'daki gibi elde edilir [33].

$$C_s \leq B \log_2(1 + \bar{\gamma}) \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6'da yer alan sonuca göre, kanal durum bilgisinin sadece alıcıda olduğu durumda sönümlenme, kanal kapasitesini düşürmektedir.

3.2 Kanal Kodlama

Bölüm 3.1'de belirtildiği gibi Shannon kapasitesine ulaşabilmek için telsiz kanallarda bilgiyi çeşitli kodlama yöntemleri kullanarak iletmek gerekir. Bu kodlar genel olarak hata tespit eden kodlar (HTK) ve hata düzelten kodlar (HDK) olarak iki sınıfa ayrılabilir [8, 34]. Hata düzelten kodlar, ileri yönlü hata düzeltmede (Forward Error Correction, FEC) bilgi paketine fazladan bitler ekleyerek hatanın alıcıda düzeltilmesini hedefler. Alıcı, pakette bir hata tespit ettiği durumda, FEC bilgisinden yararlanarak hatayı düzeltmeye çalışır. Buna karşılık hata tespit eden kodlar kullanıldığında, alıcı hatalı olduğunu tespit ettiği paketleri düzeltemez ve tekrar gönderimini talep eder.

3.2.1 Çevrimli Artıklık Sınaması

Hata tespit eden kodların yaygın olarak kullanılan örneklerinden birisi lineer blok kodların bir çeşidi olan Çevrimli Artıklık Sınaması (Cyclic Redundancy Check - CRC) olarak belirtilebilir [35]. Bu tür kodlarda her k bitlik bilgiye karşılık, $n - k$ uzunluğunda eşlik denetimi bitleri eklenir. Böylelikle n uzunluğunda kod kelimesi elde edilir.

Çevrimli Artıklık Sınaması yönteminde üretilen kod bir polinom olarak ifade edilir. Bu polinomun katsayıları ise kodun elemanları olarak belirlenmiştir. Alıcıda elde edilen kod kelimesinin geçerliliği, önceden belirlenmiş başka bir polinoma bölünerek denetlenir. Bu polinom, X değişkeniyle ifade edilecek olursa;

- $T(X)$: n bit uzunluğundaki kod kelimesi.
- $D(X)$: k bit uzunluğundaki bilgi, $T(X)$ kod kelimesinin ilk k biti.
- $P(X)$: önceden belirlenmiş $n - k + 1$ uzunluğundaki denetim polinomu.

Kod kelimesinin alıcıya hatasız ulaşması durumunda, $T(X)/P(X)$ bölümü kalansız sonuçlanmalıdır.

Alıcının elde ettiği kod kelimesine ait polinom Eşitlik 3.7'deki gibi ifade edilebilir.

$$T(X) = X^{n-k}D(X) + R(X) \quad (3.7)$$

Bu sonuçtan hareketle Eşitlik 3.8'deki gibi bölüm ve kalan polinomları ifade elde edilebilir.

$$\frac{X^{n-k}D(X)}{P(X)} = Q(X) + \frac{R(X)}{P(X)} \quad (3.8)$$

Gönderimin alıcıda hatasız elde edildiğini anlamak için

$$\frac{T(X)}{P(X)} = \frac{X^{n-k}D(X)}{P(X)} + \frac{R(X)}{P(X)} \quad (3.9)$$

ifadesi kalansız sonuçlanmalıdır. Eşitlik 3.7'yi Eşitlik 3.9'da yerine koyarsak,

$$\frac{T(X)}{P(X)} = Q(X) + \frac{R(X) + R(X)}{P(X)} \quad (3.10)$$

elde edilir. Herhangi bir polinomun kendisiyle Modulo 2 toplamı sıfır olacağından Eşitlik 3.10'un sonucu kalansız gerçekleşecek ve alıcıda elde edilen kod kelimesinin hatasız iletildiğini gösterecektir [35].

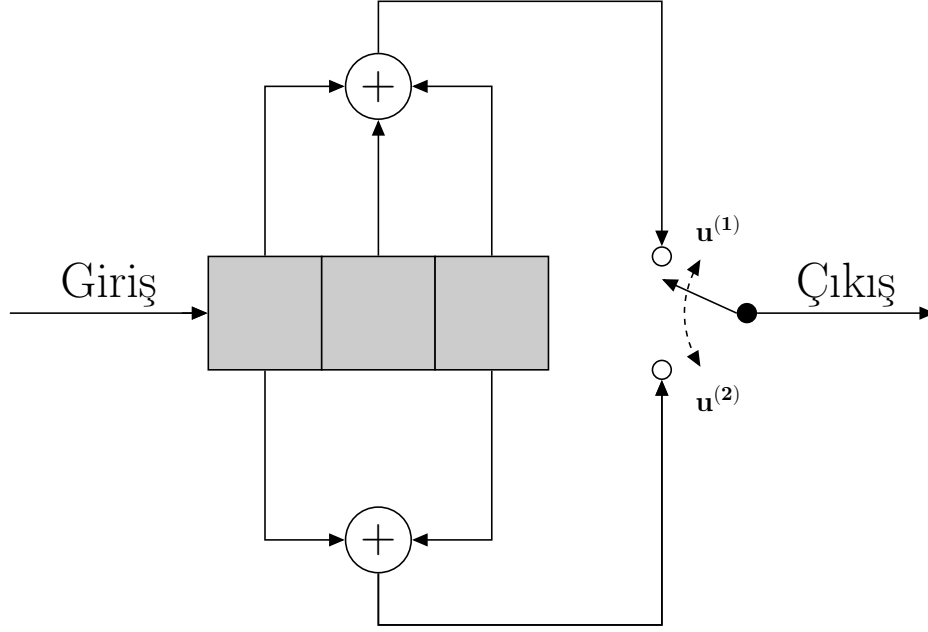
3.2.2 Evrişimli Kodlar

Evrişimli kodlar, hata düzelten kodlar sınıfına girer. Evrişimli kodlanmış bir paket alıcıya ulaştığında hatalı olduğu tespit edilirse, hatalar alıcıda çözülmeye çalışılır.

Lineer blok kodlamada, girişteki uzun bilgi k uzunluğundaki parçalara ayrılır ve her bir parçaya karşılık karşılık olarak n uzunluğundaki bir kod kelimesi üretilir. Üretilen bu kod kelimeleri diğer kod kelimelerden bağımsız olarak elde edilir. Lineer blok kodların aksine evrişimli kodlamada, bilginin uzunluğundan bağımsız olarak kodlayıcıya ulaşan semboller evrişimli olarak kodlanarak kod kelimesi elde edilir. Dolayısıyla oluşturulan kod kelimesinin sembolleri arasında kodlayıcının yapısına bağlı olarak bir ilintiden bahsedilebilir. Ayrıca blok kodlar ile istenilen oranda kod kelimesi yaratılabilmesine karşın,

evrişimli kodlarda bu mümkün değildir. Evrişimli kodlarda kod oranını değiştirmek için kod oranı uyumlu silme örüntüsü (RCPC) yöntemi kullanılabilir [36].

Evrişimli kodlayıcılar, üç farklı parametreyle tanımlanabilirler. Bunlar, girişteki sembol sayısı k , çıkıştaki sembol sayısı n ve hafıza derecesi m olarak adlandırılırlar [37]. Şekil 3.3'te örnek bir evrişimli kodlayıcı şeması yer almaktadır.



Şekil 3.3. Evrişimli kodlayıcı, Kod oranı = 1/2, $K = 3$

Bu şemaya göre, evrişimli kodlayıcıda bulunan kayan yazmaçların (Shift Register) arasındaki Modulo-2 toplayıcı bağlantıları birer üretici vektör olarak Eşitlik 3.11'deki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} \mathbf{g}^{(1)} &= (g_0^{(1)} g_1^{(1)} g_2^{(1)}) = (111) \\ \mathbf{g}^{(2)} &= (g_0^{(2)} g_1^{(2)} g_2^{(2)}) = (101) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Bu durumda, evrişimli kodlayıcının giriş sembolleri

$$\mathbf{x} = (\cdots, \mathbf{x}_{-1}, \mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \cdots) \quad (3.12)$$

olarak ifade edilecek olursa, çıkış sembolleri sırasıyla Eşitlik 3.13'teki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}\mathbf{u}^{(1)} &= (\dots, \mathbf{u}_{-1}^{(1)}, \mathbf{u}_0^{(1)}, \mathbf{u}_1^{(1)}, \dots) \\ \mathbf{u}^{(2)} &= (\dots, \mathbf{u}_{-1}^{(2)}, \mathbf{u}_0^{(2)}, \mathbf{u}_1^{(2)}, \dots)\end{aligned}\quad (3.13)$$

Bir başka ifadeyle,

$$\mathbf{u}^{(i)} = \mathbf{x} * \mathbf{g}^{(i)}, \quad i = 1, 2 \quad (3.14)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 3.14'teki * işareti, evrişim işlemini tanımlamaktadır.

Evrişimli kodların başarımı, en küçük Hamming uzaklığına göre belirlenir. En küçük Hamming uzaklığı, herhangi iki kod kelimesi arasındaki farklı sembol sayılarından en küçüğü olarak ya da sıfırdan farklı kodlardan ağırlığı en küçük olan olarak ifade edilir.

3.3 Otomatik Tekrar Gönderim İsteği (ARQ)

İleri yönlü hata düzeltmenin (Forward Error Correction - FEC) haricinde otomatik tekrar gönderim isteği de yaygın olarak kullanılan bir hata kontrol yöntemidir. ARQ yönteminde, ileri yönlü hata düzeltmenin aksine, paketlere hata düzelten kodlar yerine hata tespit eden kodlar (CRC gibi) eklenerek gönderilir. Bu durumda, alıcı elde ettiği bir paketin hatalı olup olmadığına karar verir. Bir paketin hatalı olduğu tespit edilmiş ise vericiye olumsuz geri bildirim (NACK - Negative Acknowledgment), hatasız alındığına karar verilmiş ise olumlu geri bildirim (ACK - Acknowledgment) sinyallerini geri besleme kanalı üzerinden göndererek hatalı paketlerin tekrar gönderimini sağlar [8].

Geri besleme kanalının mümkün olmadığı ya da iletişim sisteminin gecikmelere karşı direncinin düşük olduğu durumlarda, ileri yönlü hata düzeltme yöntemi, ARQ yöntemine kıyasla tercih edilen bir yöntemdir. Bunun haricinde, ARQ yönteminde karşılaşılan başlıca olumsuzluk, düşük SNR değerlerinde oldukça fazla sayıda tekrar gönderim gerektirmesi ve gecikmelere yol açmasıdır. Bu yüzden düşük SNR değerlerinde ARQ başarımı da düşüktür. Buna karşın, ileri yönlü hata düzeltme yönteminde karşılaşılan sorun, kod hatalarını düzeltmek her zaman mümkün olmadığı için ARQ kadar güvenilir

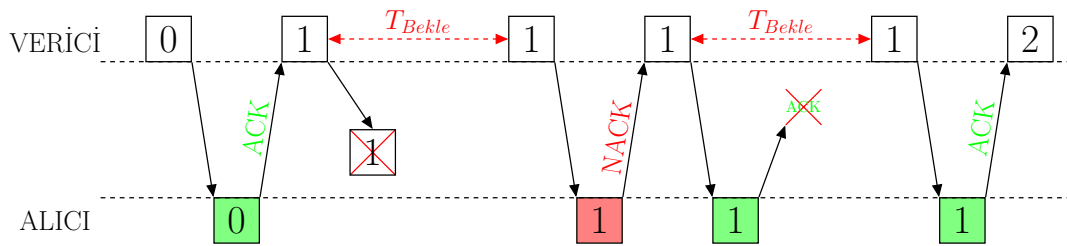
olmamasıdır. Ayrıca ileri yönlü hata düzeltme yönteminde, özellikle yüksek SNR değerlerinde, hata düzelten kodlara çoğu zaman lüzum olmaması sebebiyle iletişim hızı olumsuz etkilenebilmektedir [9].

ARQ yöntemleri temel olarak üç farklı sınıfa ayrılabilir.

- Dur ve Bekle Tekrar Gönderim Yöntemi (DBTG)
- N Paket Geri Git Tekrar Gönderim Yöntemi (NGTG)
- Seçici Tekrarla Tekrar Gönderim Yöntemi (STG)

3.3.1 Dur ve Bekle Tekrar Gönderim Yöntemi

Dur ve bekle tekrar gönderim yöntemi (DBTG), tekrar gönderim yöntemleri arasında en basit olanıdır. Bu hata kontrol yönteminde, verici, bilgi paketine hata düzelten kodlar ekleyerek oluşturduğu kod kelimesini alıcıya gönderdikten sonra, alıcıdan paketin akıbetiyle ilgili geri bildirim bekler. Alıcının ACK sinyali göndermesi durumunda, yeni bir kod kelimesi gönderilir. Alıcıdan NACK sinyali gelmesi durumunda ise aynı kod kelimesi tekrar gönderilir. Bir paketin tekrar gönderilmesi sistemde belirlenen en çok tekrar gönderim sayısına ulaşıldığında, başka bir deyişle sistemde tanımlanmış en çok gecikme süresine ulaşıldığında paketin tekrar gönderimine son verilir [38].



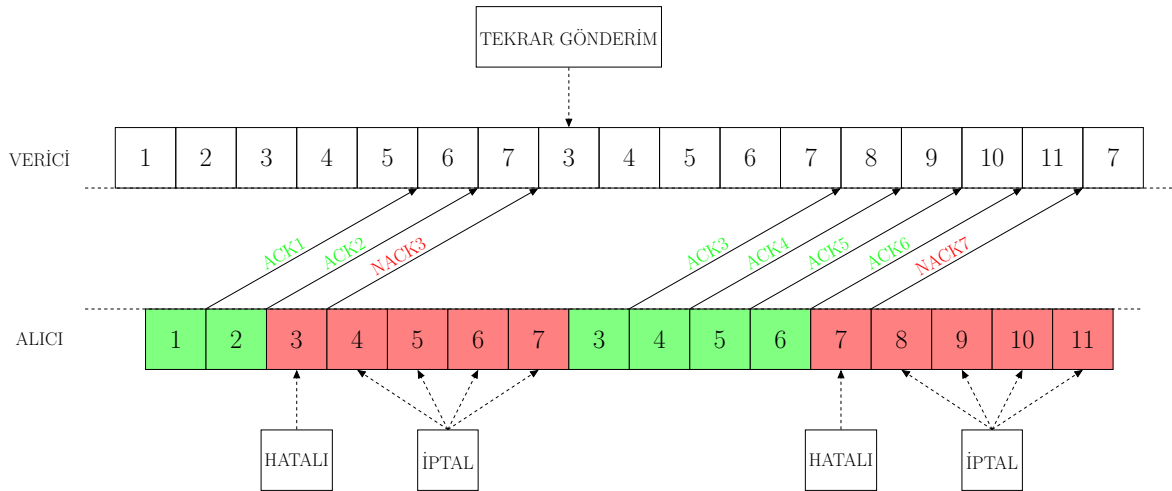
Şekil 3.4. Dur ve bekle tekrar gönderim yöntemi

Şekil 3.4'te DBTG yönteminde karşılaşılabilecek bazı durumlar özetlenmiştir. Buna göre 0 numaralı paket alıcıya ilk gönderimde başarılı iletilmiş olduğundan alıcı buna karşılık olarak ACK sinyali göndermiştir. ACK sinyalini alan verici ise 1 numaralı sıradaki paketi göndermiştir. Ancak 1 numaralı paket alıcıya ulaşmamıştır. Bu durumda alıcı herhangi bir

geri bildirim yapamayacağından, verici paketin akıbetini öğrenmek için bekleyebileceği azami süreyi, T_{Bekle} , bekler ve tekrar gönderim yapar. Aynı paketin tekrar gönderimi alıcıya hatalı ulaştığından, alıcı olumsuz geri bildirim yapar. Olumsuz geri bildirim sinyalini alan verici, 1 numaralı paketi tekrar gönderir ve bu paket alıcıya hatasız ulaşır. Buna istinaden alıcı, olumlu geri bildirim gönderir fakat vericiye ulaştıramaz. Bu durumda verici paketin akıbetinden haberdar olamayacağı için, bekleyebileceği en uzun süreyi geçirdikten sonra tekrar gönderimi gerçekleştirir. Başarılı alınan 1 numaralı paket için olumlu geri bildirim vericiye ulaştıktan sonra, yeni bir paketin gönderimine geçilebilir.

3.3.2 N Paket Geri Git Tekrar Gönderim Yöntemi

N Paket geri git tekrar gönderim yönteminde (NGTG), DBTG yönteminin aksine verici, yeni bir paket göndermek için alıcıdan cevap beklemez. Bunun yerine, verici bir paketin gönderimini gerçekleştirir gerçekleştirmez yeni bir paketin gönderimine başlar. Vericinin gönderdiği paketin akıbetini öğrenebilmesi için, paketin alıcıya ulaşması, alıcıda hatalı olup olmadığına karar verilmesi ve geri besleme sinyalinin vericiye ulaşması gerekir. Bu süre (Round-Trip Time - RTT) boyunca vericiye NACK sinyali ulaşmazsa yeni paketlerin gönderimi devam eder. Verici, bir paketin hatalı olduğuna dair NACK sinyali aldığı takdirde, ilgili paketi ve RTT boyunca gönderdiği $N - 1$ paketi tekrar gönderir.



Şekil 3.5. N Paket geri git tekrar gönderim yöntemi, $N = 7$

Şekil 3.5'te $N = 7$ için NGTG yönteminde karşılaşılabilecek bir senaryo özetlenmiştir. Bu senaryoda, 3 numaralı paketin alıcıda hatalı olduğu tespit edilmiş ve bu paket

için *NACK3* sinyali gönderilmiştir. Verici, *NACK3* sinyalini alana kadar geçen süre boyunca yeni paketlerin gönderimine devam etmiştir, fakat alıcıda bu paketler, hatalı olup olmadığına bakılmaksızın iptal edilmiştir. Vericinin *NACK3* sinyalini almasından sonra, 3 numaralı paketten itibaren tekrar gönderimler başlar.

NGTG yöntemi, kanalın sürekli kullanımını sağladığı için DBTG yöntemine göre daha verimlidir. Ancak RTT süresinin uzun olduğu durumlarda bu üstünlüğünü yitirebilir. Bu durumun başlıca nedeni ise hatalı olup olmadığına bakılmadan $N - 1$ paketin tekrar gönderimidir.

3.3.3 Seçici Tekrarla Tekrar Gönderim Yöntemi

Seçici tekrarla tekrar gönderim (STG) yönteminde, NGTG yöntemine benzer olarak, kanal sürekli olarak kullanılır. Bu yöntemde farklı olarak, alıcıda hatalı alınan bir paketten sonra, ulaşan paketler hatasız alınmışsa iptal edilmeyip kabul edilirler. Verici, önceden belirlenmiş sayıda paketin gönderimini tamamladıktan sonra, alıcının talep ettiği hatalı paketlerin tekrar gönderimini gerçekleştirir ve ilgili paketler alıcıda ait oldukları pencerede sıraya yerleştirilirler. Bu sayede NGTG yönteminde karşılaşılan verimsizlik aşılmış olur. Buna karşın STG tekrar gönderim yöntemi, burada sıralanan üç gönderim yöntemi arasında en verimli olması rağmen, tasarım açısından en karmaşık olanıdır [39].

3.4 Melez Tekrar Gönderim Yöntemleri

Geleneksel tekrar gönderim yöntemlerinde, sistem başarımı sabit olmayıp doğrudan doğruya kanal durumuna bağlı olarak değişiklik gösterir. Özellikle elverişsiz kanal koşullarında tekrar gönderim isteği oldukça artacağından sistem başarımı olumsuz etkilenir.

İleri yönlü hata düzeltme yönteminde ise paket hatalarının alıcıda düzeltilmesi hedeflenmiştir. Ancak, özellikle kötü kanal koşullarında tercih edilen kodlama yöntemine bağlı olarak, ileri yönlü hata düzeltme yöntemi sınırlı bir etkiye sahiptir. Bu yüzden, hatalı paketlerin hatasızmış gibi değerlendirilmesi ve alıcıda işlenmesi gibi istenmeyen durumlara yol açabilir.

Daha etkin bir gönderim sistemi oluşturmak için ileri yönlü hata düzeltme yönteminin hata düzeltme kabiliyeti ile tekrar gönderim yönteminin hata ayıklama özelliklerinin birleştirilebileceği yöntemler çeşitli çalışmalarda incelenmiştir [11, 23, 40]. Bu iki yöntemin birleştirilmesiyle geleneksel tekrar gönderim yöntemlerine kıyasla tekrar gönderim sayısının azaltılması, ileri yönlü hata düzeltme yöntemine kıyasla da hatalı paketlerin ayıklanması bakımından daha iyi sonuçlar hedeflenmiştir.

İki hata kontrol yönteminin birleştirilmesiyle oluşturulan hata kontrol yöntemine, melez tekrar gönderim yöntemi (MTG) adı verilmiştir. Melez tekrar gönderim yöntemleri üç temel türde incelenebilir.

3.4.1 Tip - I Melez Tekrar Gönderim

Bu gönderim yönteminde, geleneksel tekrar gönderim yöntemlerinden farklı olarak, hataların alıcıda düzeltilebilmesi için paketler hata düzelten kodlama (FEC) kullanılarak gönderilir. Gönderim sırasında oluşan hatalar, kodun düzeltme kabiliyeti dahilinde ise bu hatalar düzeltilir. Aksi durumda ise paketin tekrar gönderimi talep edilir. Tip - I melez tekrar gönderim yönteminde (MTG) bir paket için yapılan tüm gönderimler özdeştir.

Tip - I MTG yönteminde, bir paket için yapılan gönderimler alıcıda tek başlarına değerlendirilebileceği gibi çeşitli yöntemler kullanılarak farklı gönderimler birlikte de değerlendirilebilir [41, 16]. Bir paket için yapılan gönderimin hatalı olduğu tespit edilmiş olsa dahi diğer gönderimlerle birleştirildiğinde hatasız paket elde etmeye yardımcı olabileceği farklı çalışmalarda incelenmiştir [17, 42].

3.4.1.1 Chase Birleştirme

Tip - I Chase birleştirme (CB) melez tekrar gönderim yönteminde, hatalı paketlerin alıcıda silinmeyip aynı paketin diğer gönderimleri ile işlenmesiyle sistem başarımının artırılması hedeflenmiştir. Bu yöntemde, her gönderim için gönderim sırasında maruz kaldığı kanal koşullarına bağlı olarak güvenilirlik katsayısı belirlenir. Bu katsayı kullanılarak, aynı paket için yapılan birden fazla sayıdaki hatalı gönderimler bit seviyesinde karşılaştırma yapılabileceği gibi paket seviyesinde güvenilir paket de seçilebilir [16]. Bunun dışında, bir paket için yapılan gönderimler zaman çeşitlemesinden yararlanılarak

da alıcıda en yüksek oran birleştirme (Maximal Ratio Combining - MRC) kullanılarak da çözülmeye çalışılabilir [17].

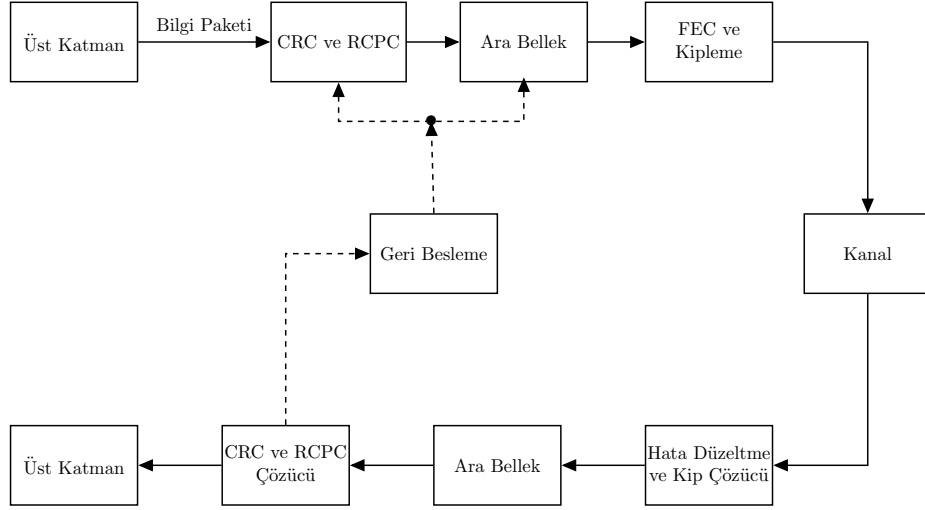
3.4.2 Melez Tekrar Gönderim Tip - II

Tip - I melez tekrar gönderim yönteminde, bir paket için yapılan tüm gönderimler özdeşdir. Bu nedenle değişen kanal koşullarında sistem başarımını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu durumun iki temel nedeni vardır.

- Her gönderimde sabit bir kod oranı kullanıldığı için iyi kanal koşullarında hata düzelten kodlara ihtiyaç olmayabilir. Bu durum sistemde verimsizliğe yol açar.
- Kötü kanal koşullarında ise tercih edilen kod oranı hataları düzeltmede yetersiz kalabilir.

Tip - II melez tekrar gönderim yöntemi, bu durumların üstesinden gelmek için önerilmiştir [43]. Tip - II melez tekrar gönderim yönteminde, gönderilecek bilgi paketine hata tespit eden kod bitleri eklenir ve RCPC yöntemiyle kod parçalarına ayrılırlar [36]. Bu parçaların uygun biçimde birleştirilmesiyle, $1 \geq C_1 > C_2 > \dots > C_M$ olacak şekilde kod ailesini oluşturan farklı oranlarda kodlar elde edilir. C_M başlangıçta elde edilen düşük kod oranına (en güçlü) sahip kodu temsil eder. Bu kodlar birbirleriyle uyumlu olarak oluşturulur. Bu durumda C_j kod kelimesinde yer alan tüm bitler daha düşük kod oranına sahip C_j kod kelimesinde de kullanılmaktadır.

Şekil 3.6'da RCPC kullanılan Tip - II melez tekrar gönderim yöntemi, temel hatlarıyla gösterilmektedir. İlk gönderimde C_1 kod kelimesi gönderilir ve hatalı olması durumunda alıcıda saklanır ve vericiden sıradaki kod parçası talep edilir. Bu durumda, vericinin gönderdiği kod parçası ile ilk gönderim birleştirildiğinde C_2 kod oranına sahip daha güçlü başka bir kod kelimesi elde edilir. Hatanın devam etmesi durumunda yeni bir kod parçası talep edilir ve önceki gönderimlerle birleştirilerek daha güçlü kod kelimesi elde edilir. Bu işlem, paketin alıcıda hatasız olarak alınmasına ya da C_M ana kod kelimesine ulaşana kadar devam eder.



Şekil 3.6. Tip - II melez tekrar gönderim için sistem modeli

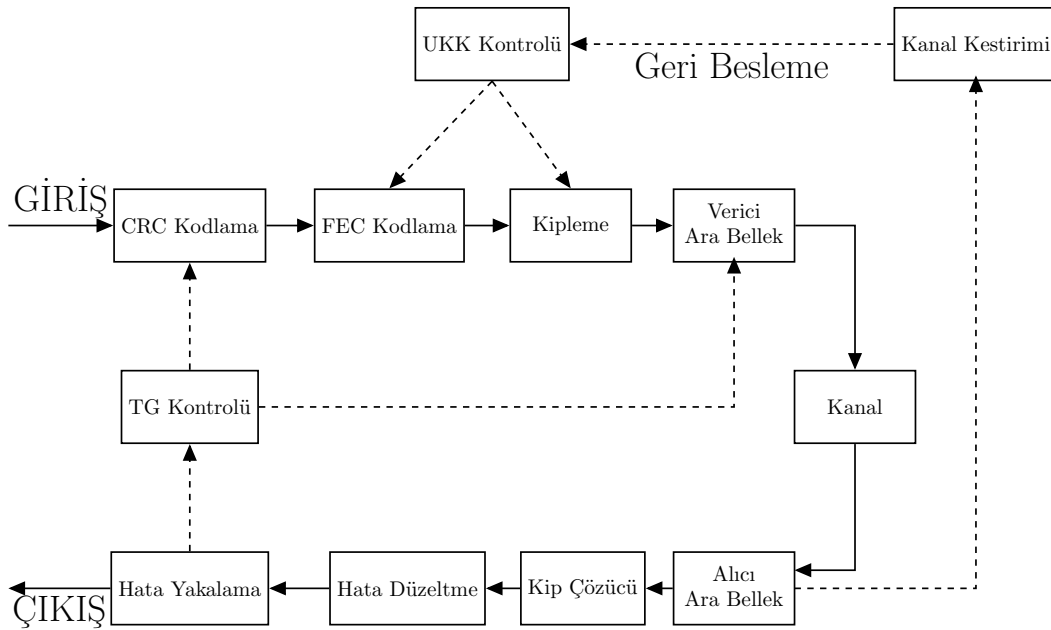
3.4.3 Melez Tekrar Gönderim Tip - III

Tip - II melez TG yönteminde, paketlerin hatalı alınması halinde, verici oluşturduğu güçlü kodun parçalarını alıcıya gönderir. Gönderilen her kod parçası önceki gönderimlerle birleştirildiğinde anlamlı yeni bir kod kelimesi oluşturur. Tip - III melez tekrar gönderim yönteminde ise farklı olarak, bir paket için yapılan her gönderim kendi başına değerlendirilebilirken aynı zamanda önceki gönderimlerle çeşitli sıralamalarla birleştirilerek çözülebilir. Bu sayede gönderilen paketlerde oluşan hatalara karşı fazladan hata düzeltme kabiliyetine erişilmiş olur [44].

4. İŞBİRLİKLİ TİP - I MELEZ TEKRAR GÖNDERİM YÖNTEMİ VE UYARLAMALI KİPLEME - KODLAMA

4.1 Kapsam

Bu tez kapsamında, bilgi paketlerinin telsiz ağlarda iletiminde, Tip - I melez tekrar gönderim yönteminin uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemiyle birlikte kullanılması hedeflenmiştir. Bu durumda, Şekil 4.1'de olduğu gibi bilgi paketleri, hata tespit etmek amaçlı (CRC Kodlama) kodlanır. Bu işlemden sonra kanal durum bilgisine göre seçilen bir kipleme yöntemi ve kod oranı çifti (UKK modu) seçilerek hataların alıcıda düzeltilebilmesi amacıyla evrişimli kodlanır (FEC Kodlama).



Şekil 4.1. Tip - I melez tekrar gönderim yönteminde uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin kullanılması

Tip - I melez tekrar gönderim dahilinde, bir paket için yapılan özdeş gönderimlerin alıcıda Chase birleştirme (CB) yöntemiyle işlenmesinin sistem başarımına katkısının incelenmesi ayrıca hedeflenmiştir. Chase birleştirmenin kullanıldığı durumda, bir paket için yapılan ilk gönderim hatasız olarak alınmasa dahi alıcıda saklanarak sonraki gönderimlerle en yüksek oran birleştirme (MRC) kullanılarak birleştirilmektedir.

Kipleme - kodlama çiftinin kanal durum bilgisine göre belirlenmesinden ötürü kanalın zamanla değişimi önem kazanmaktadır. Bu durumda benimsenen telsiz kanal modeli düz sönümlmeli, yavaş değişen Rayleigh kanal olarak belirlenmiştir. Ayrıca, ardışık gönderimlerde kanalın zamanla ilintili olarak değiştiği kabul edilmiştir. Tip - I melez tekrar gönderimde kanalın zamanla değişiminden faydalanmak amacıyla tercih edilen uyarlamalı kipleme - kodlamanın etkisinin incelenmesi ayrıca hedeflenmiştir.

Son olarak, sönümlmeli kanallarda bir röle sayesinde oluşturulan işbirlikli çeşitlemenin, işbiriksiz durumla kıyaslanması hedeflenmiştir. İşbirlikli çeşitleme kapsamında, iki farklı işbirliği yöntemi tanımlanarak ayrı ayrı incelenmiştir.

4.2 Sistem Başarım Ölçütleri

İncelenen gönderim yöntemlerinin kıyaslanmasına yönelik paket kayıp oranı (PKO) ve izgesel verimlilik (İV) ölçütleri göz önünde bulundurulmuştur.

- **Paket Kayıp Oranı (PKO)**: Tez kapsamında incelenecek tüm gönderim modellerinde herhangi bir paket için en çok gönderim sayısı iki olarak kısıtlanmıştır. İki gönderim sonunda alıcıda hatasız olarak elde edilemeyen paketler, kayıp paket olarak belirlenecek ve yeni bir paketin gönderimine geçilecektir. Buna göre paket kayıp oranı,

$$PKO = \frac{\text{Kayıp Paketlerin Sayısı}}{\text{Gönderilen Tüm Paketlerin Sayısı}} \quad (4.1)$$

olarak ifade edilir.

- **İzgesel Verimlilik (İV)**: Alıcıda hatasız olarak elde edilmiş paketlerin etkin veri hızı oranıdır. İzgesel verimlilik,

$$iV = \frac{\text{Başarılı İletilen Toplam Bit Sayısı}}{\text{Başarılı Paketleri İletmek İçin Kullanılan Toplam Sembol Sayısı}} \quad (4.2)$$

olarak tanımlanmıştır.

Alıcıda, bir paket için yapılan gönderimlerin Chase birleştirme ile birleştirildiği gönderim yöntemlerinde, bir paketin ilk gönderimi ile tekrar gönderimleri özdeş olaca-

ğından, veri hızı oranı her iki gönderim için de R bit/sembol olarak ifade edilirse, başarılı alınan bir paketin izgesel verimliliğe katkısı,

$$IV = \frac{R}{1 + N_{TG}} \quad (4.3)$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlik 4.3'te yer alan N_{TG} , bir paketin başarılı iletimi için yapılan toplam tekrar gönderim sayısıdır.

N_p sayıda bit içeren bir paketin başarılı alınması için yapılan ilk ve tekrar gönderimlerin veri hızı oranları, sırasıyla R_1 bit/sembol ve R_2 bit/sembol olması halinde, paketin izgesel verimliliğe katkısı,

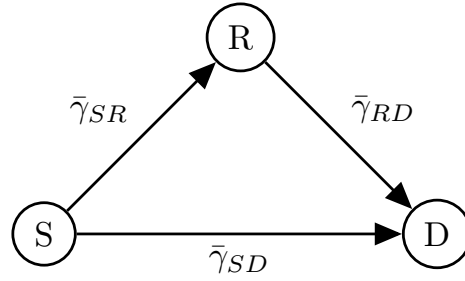
$$\begin{aligned} IV &= \frac{N_p}{\frac{N_p}{R_1} + \frac{N_p}{R_2}} \\ &= \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned} \quad (4.4)$$

olarak hesaplanabilir.

4.3 İşbirlikli Çeşitleme

Telsiz kanallarda maruz kalınan sönümlemeden ve gölgelemeden dolayı kullanıcıların elde ettiği sinyaller, iletişime elvermeyecek ölçüde baskılanabilir. Uzamsal çeşitleme, zaman çeşitleme ve frekans çeşitleme gibi yöntemler bu sorunu aşmak için kullanılagelen yöntemler olmuştur. Uzamsal çeşitleme, konumları itibariyle birbirlerinden ayrılmış olan kullanıcıların, birbirlerinden bağımsız sönümlemeye maruz kalmasından faydalanmak amacıyla ortaya konulmuş bir yöntemdir [46].

Bu nedenle, tercih edilen çeşitleme yönteminden bağımsız olarak, çok sayıda anten kullanmak, sağladığı uzamsal çeşitlemeden dolayı tercih edilen bir teknik olmuştur. Ancak, maliyet ve boyut bakımından elverişli olmadığı durumlarda uygulaması zor olabilen bir yöntemdir. Bu sınırlamayı aşmak, kullanıcılar arasında işbirliği yaparak mümkün olabilir [59]. İşbirliği durumunda, kullanıcılar sadece kendi paketlerini değil, aynı zamanda işbirliği halinde olduğu bir başka kullanıcının da paketlerini gönderebilir. Bu durumda kullanıcılar, bant genişliği ve güç gibi kaynaklarını paylaşarak daha etkili bir iletişim sistemine ulaşabilirler.



Şekil 4.2. İşbirlikli gönderim modeli

Şekil 4.2'de işbirlikli gönderim yöntemini görselleştiren basit bir model gösterilmektedir. Bu modele göre $\bar{\gamma}_{ij}$, i ve j kullanıcıları arasındaki kanalın ortalama SNR değerini temsil eder. Kullanıcılar arasındaki kanallar birbirlerinden bağımsız olarak sönümlenmeye maruz kalırlar. Bu durumda kullanıcılar arası işbirliği, herhangi bir kullanıcının kanalı iletişim yapmaya müsait olmadığı takdirde, üçüncü bir kullanıcı (röle) üzerinden iletişim yapmayı mümkün kılabilir.

İşbirlikli gönderim yöntemlerinde, rölenin işbirliğine dahil olması ve elde ettiği paketleri hedef kullanıcıya iletmesine dair, temel olarak üç farklı işbirliği yönteminden bahsetmek mümkündür. Bunlar, çöz - ilet (Decode - Forward) işbirliği, yükselt - ilet (Amplify-Forward) işbirliği ve kodlanmış işbirliği (Coded Cooperation) olarak isimlendirilebilir.

Yükselt - ilet yönteminde, işbirliği yapan kullanıcı elde ettiği sinyali çözmeye çalışmaksızın hedef kullanıcıya iletir. Bu durumda, bilgi sinyaliyle birlikte gürültü sinyali de yükseltilecektir. Ancak hedef kullanıcı iki farklı kanaldan elde ettiği sinyalleri işleyerek başarılı sonuçlar elde edebilir [60].

Kodlanmış işbirliği yönteminde, kullanıcılar birbirlerine ait olan paketler için kanal kodlarının bir kısmını paylaşırlar. Bu sayede bir pakette meydana gelen hataları düzeltmek için birden fazla bağımsız kanaldan elde edilen kod kelimesi ile alıcıda paket hatalarının azaltılması hedeflenmiştir [61].

Çöz - ilet yönteminde, röle, vericiden elde ettiği sinyali çözebilmesi halinde işbirliğine katılabilir. Aksi takdirde işbirliği gerçekleşmez. Röle, gönderilen paketi hatasız alması

durumunda, tekrar kodlayarak alıcıya iletir. Alıcıda paketler çeşitli yöntemlerle birleştirilebileceği gibi tek başlarına da değerlendirilebilirler. Bu tez dahilinde incelenen işbirlikli gönderim modelleri, çöz - ilet yöntemini kullanmaktadır.

4.4 Kanal Modeli ve Uyarlamalı Kipleme - Kodlama

Tez kapsamında iletim yapılan kanalların zamanla değişimini incelemek için yavaş değişen, düz Rayleigh sönümlmeli kanallar olduğu kabul edilmiştir ve sıfır ortalamalı topları beyaz Gauss türü gürültü modeli kullanılmıştır. Analtik ifadeler ve benzetim sonuçları bu doğrultuda elde edilmiştir.

Bu varsayımlar altında, kanalın bir paket gönderim süresi boyunca değişmediği kabul edilmiştir. Buna göre, gönderilen bir paket için alıcıda elde edilen sinyal

$$y = hs + n \quad (4.5)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 4.5'te yer alana h sönümlmeli kanal katsayısı, s gönderilen sinyali ve n ise TBGG gürültüyü temsil eder. Bu durumda alıcıda elde edilen anlık sinyal gücü - gürültü gücü oranı P_T sabit gönderim gücü ve N_0 gürültü gücü olmak üzere

$$\gamma = |h|^2 \frac{P_T}{N_0} \quad (4.6)$$

olarak ifade edilebilir. Anlık SNR değerinin olasılıksal dağılımı, ortalama SNR değeri $\bar{\gamma}$ olmak üzere, Eşitlik 2.9'da ve Eşitlik 3.4'te belirtildiği gibi

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad \gamma \geq 0 \quad (4.7)$$

olasılık dağılım fonksiyonu ile ifade edilir.

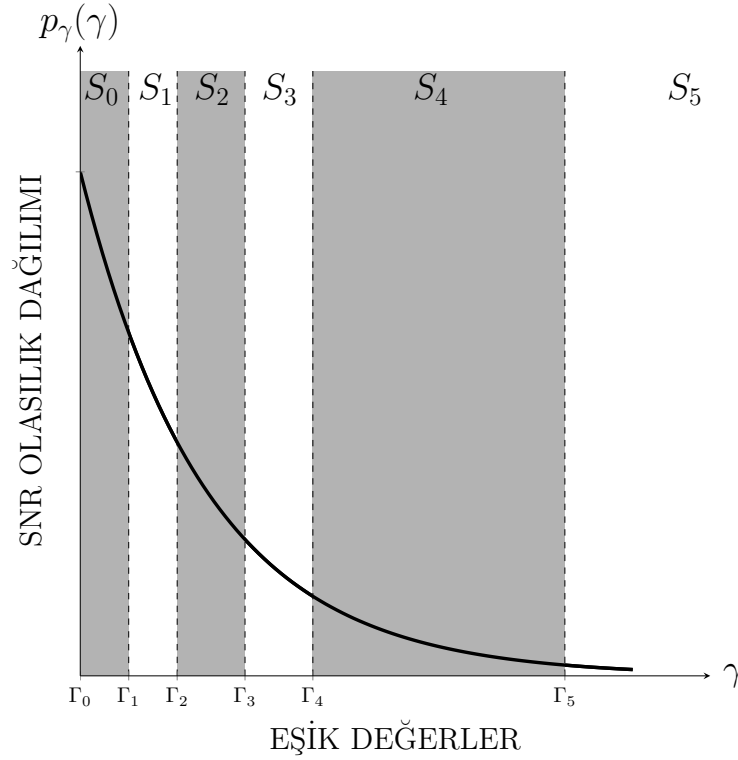
Sönümlmeli kanallarda, kanalın zamanla değişen özelliğinden ötürü tercih edilen kipleme - kodlama şemasının kanalın durumuna göre değiştirilmesinin sistem başarımına etkileri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir [48, 49, 50]. Bu çalışmalarda, kanal değişiminden yararlanarak farklı gönderim güçleri, kipleme ve kodlama yöntemleri ya da bu

sayıların farklı kombinasyonlarının kullanılması durumunda sistemde daha yüksek etkin veri hızlarının elde edilmesi hedeflenmiştir.

Her gönderimde sabit gönderim gücü kullanıldığı takdirde uyarlamalı kipleme ve kodlama yöntemine göre, kanalda elde edilebilecek anlık SNR aralığı

$$[\Gamma_n, \Gamma_{n+1}) \quad , \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (4.8)$$

olarak ifade edilen $N+1$ örtüşmeyen ve ardışık aralıklara bölünür. Kanalin anlık SNR değerinin bu aralıklardan birinde kalması durumunda gönderilecek bilgi paketi, bu aralığa atanmış kipleme ve kodlama çiftine göre işlendikten sonra gönderim yapılır. Bu kodlama ve kipleme çiftleri uyarlamalı kipleme - kodlama modu (UKK modu) şeklinde adlandırılır. Rayleigh sönümlenmeli bir kanalda, kanalın anlık SNR değerinin $N + 1$ aralıktan birinde olma olasılığı ise



Şekil 4.3. Uyarlamalı kipleme - kodlama için kanal SNR aralıkları

$$\pi_n = \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma = \exp\left(-\frac{\Gamma_n}{\bar{\gamma}}\right) - \exp\left(-\frac{\Gamma_{n+1}}{\bar{\gamma}}\right) \quad (4.9)$$

olarak ifade edilir.

Bu aralıkların herbirinde farklı kipleme ve kodlama çifti tercih edildiğinden veri hızı oranı değişim göstermektedir. Sembol oranının sabit olduğu durumda, farklı UKK modu için farklı paket süreleri söz konusu olacaktır. Bu durumda herhangi bir UKK modu için paket süresi $T_f^{(n)}$,

$$T_f^{(n)} = \frac{N_p}{R_n R_s} \quad (4.10)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 4.10'da yer alan N_p paket uzunluğunu, R_s sembol oranını, R_n ise veri hızı oranını temsil eder. Bu tez kapsamında, paket uzunlukları $N_p = 1080 \text{ bit}$, sembol oranı $R_s = 15000 \text{ sembol/saniye}$ olarak belirlenmiştir.

Kanalın ardışık gönderimlerde zamanla değişimini incelemek için Markov modeli benimsenmiştir. Bu durumda, UKK modları için tanımlanan SNR aralıkları kanal durumlarına karşılık gelecektir ve ilgili kanal durumları S_0, S_1, \dots, S_{N+1} olarak ifade edilir. Kanalın t ayrık zamanında S_n durumunda olma durumunu incelemek için Ψ_t ayrık zamanlı Markov sürecini tanımlayacak olursak, $\Psi_t = n$ olarak ifade edilir. Paket süresine ve t anında kanalın durumuna bağlı olarak her gönderimden sonra kanalın başka bir duruma geçme olasılıkları ise $(N + 1) \times (N + 1)$ boyutunda Markov model matrisinin, $P = [P_{n,k}^{T_f^{(x)}}]$, elemanlarını oluşturur. Bu matrisin elemanları, kanal sönümlenme sürecinin özilinti fonksiyonuna bağlı olarak hesaplanır. Jakes modeline göre Rayleigh sönümlenme sürecinin zarf ilinti katsayısı

$$\rho_x = J_0^2(2\pi f_d \tau) \quad (4.11)$$

olarak hesaplanır [51]. Eşitlik 4.11'de yer alan $J_0(\cdot)$ sıfırıncı dereceden modifiye edilmiş Bessel fonksiyonu, f_d en yüksek Doppler frekansı ve τ ise iki gönderim arasında geçen süre olarak belirtilir ve seçilen UKK modu x için Eşitlik 4.10'daki gibi ifade edilir.

Bu bilgiler doğrultusunda, kanalın t anında S_n , ($n = 0, 1, \dots, N$) kanal durumundan $t + T_f^{(x)}$ süre sonra S_k , ($k = 0, 1, \dots, N$) kanal durumuna geçme olasılığı, $P_{n,k}^{T_f^{(x)}}$, Eşitlik 4.12'deki gibi ifade edilir [52].

$$\begin{aligned} P_{n,k}^{T_f^{(x)}} &= \text{Prob} \left(\Psi_{t+T_f^{(x)}} = k \mid \Psi_t = n \right) \\ &= \frac{1}{\pi_n} \int_{\zeta_n}^{\zeta_{n+1}} \int_{\zeta_k}^{\zeta_{k+1}} p_{r_1, r_2}(r_1, r_2; \rho_x) dr_1 dr_2 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Eşitlik 4.12'de yer alan $\zeta_i = \sqrt{\frac{\Gamma_i}{\gamma}}$ olarak hesaplanır ve kanalın ortalama SNR değerine normalize edilmiş kanal durum eşik değerleri olarak ifade edilir. Aynı eşitlikteki $p_{r_1, r_2}(r_1, r_2; \rho_x)$ ise r_1 ve r_2 sönümlenme zarf değerlerinin birleşik iki değişkenli Rayleigh olasılık dağılım fonksiyonudur ve

$$p_{r_1, r_2}(r_1, r_2; \rho_x) = \frac{4r_1 r_2}{1 - \rho_x} \exp \left(-\frac{r_1^2 + r_2^2}{1 - \rho_x} \right) I_0 \left(\frac{2r_1 r_2 \sqrt{\rho_x}}{1 - \rho_x} \right) \quad (4.13)$$

olarak ifade edilir [51]. Eşitlik 4.12 ile ifade edilen $P_{n,k}^{T_f^{(x)}}$ durum geçiş olasılıkları [53]'te yer alan nümerik yöntemlerle bulunabilir.

Kanalın zamanla değişimini incelemeyi tamamlamak için Eşitlik 4.8'de ifade edilen SNR eşik değerlerinin bulunması gerekir. SNR eşik değerleri ise doğrudan doğruya tercih edilen uyarlamalı kipleme - kodlama parametreleriyle ilgilidir. Bu nedenle, öncelikle tez kapsamında kullanılacak UKK mod parametreleri tanımlanacak, daha sonra da kanal durumlarını tanımlayan SNR eşik değerleri ifade edilecektir.

Zamanla değişen kanal koşullarında kullanılmak üzere belirlenen UKK parametreleri Çizelge 4.1'de belirtildiği gibidir [54].

Çizelge 4.1'de yer alan a_n , g_n ve γ_{pn} parametreleri, Tip - I melez tekrar gönderim yöntemine göre ileri yönlü hata düzeltmek (FEC) amacıyla $\mathbf{g} = [133, 171]$ üretici polinomuna göre evrişimli kodlanmış ve belirtilen kipleme yöntemi kullanılarak gönderilmiş paketlerin hata olasılıklarını modellemek için kullanılır. Bu modele göre, n UKK modunda

	Mod 0	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5
<i>Kipleme</i>	BPSK	BPSK	QPSK	QPSK	16-QAM	64-QAM
Kod oranı	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4	3/4
Veri Hızı Oranı, $R_n(\text{bit/sembol})$	0.50	0.50	1.00	1.50	3.00	4.50
a_n	1525.9	1525.9	424.06	27.429	133.27	60.556
g_n	6.0354	6.0354	2.6532	0.8483	0.2430	0.0553
γ_{pn}	1.2146	1.2146	2.2802	3.9038	20.1332	74.2056

Çizelge 4.1. Tercih edilen uyarlamalı kipleme - kodlama modları ve bu modlara ait parametreler

gönderilmiş bir paketin anlık SNR değerinin γ olması durumunda, paket hata olasılığı (PHO),

$$PHO_n(\gamma) = \begin{cases} 1 & , 0 \leq \gamma \leq \gamma_{pn} \\ a_n \exp(-g_n \gamma) & , \gamma > \gamma_{pn} \end{cases} \quad (4.14)$$

olarak belirlenmiştir [55]. Bu yaklaşım, evrişimli kodlanmış paketler için paket hata olasılıklarının analitik olarak elde edilmesi zorlaştığından Monte Carlo benzetim yöntemi kullanılarak elde edilmiştir ve birçok çalışmada gerek bit hata oranı gerekse paket hata oranı için kullanılmıştır [50, 56, 57].

4.4.1 SNR Eşik Değerlerinin Belirlenmesi

Kanalın zamanla değişimini incelemek ve kanal durumuna göre seçilmesi gereken UKK modlarını atamak için kanal durumlarının eşik değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunun için bağ katmanında tekrar gönderim yöntemini ve fiziksel katmanda uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemini birlikte incelemek gerekir.

Gönderim yöntemlerinde gecikme sorununu aşmak için tekrar gönderim sayısı N_{TG} olarak sınırlanmıştır ve bu tez kapsamında herhangi bir paket için en çok tekrar gönderim sayısı bir olarak sınırlandırılmıştır. Tekrar gönderim sayısındaki sınırlandırmadan dolayı hatasız iletişim mümkün olmayacaktır [58]. Bu durumda gönderim sistemi gereksinimlerine göre anlık paket hata oranının P_0 gibi belli bir değerden düşük olması beklenmektedir. Tekrar gönderim sayısının N_{TG} ile sınırlandırıldığı bir gönderim sisteminde

ise paket kayıp oranı, P_L , ile P_0 arasında Eşitsizlik 4.15'teki gibi bir ilişki kurulabilir [54].

$$P_0^{N_{TG} + 1} \leq P_L \quad (4.15)$$

Alıcıda, tekrar gönderimlerin MRC kullanılarak birleştirilmesi durumunda Eşitsizlik 4.15

$$PHO_n(\gamma_0)PHO_n(\gamma_0 + \gamma_1) \cdots PHO_n(\gamma_0 + \gamma_1 + \cdots + \gamma_{N_{TG}}) \leq P_L \quad (4.16)$$

olarak ifade edilebilir. Tekrar gönderim sayısının bir ile sınırlandırıldığı durum için

$$\begin{aligned} PHO_n(\gamma_0)PHO_n(\gamma_0 + \gamma_1) &\leq P_L \\ a_n \exp(-g_n \gamma_0) a_n \exp(-g_n(\gamma_0 + \gamma_1)) &\leq P_L \end{aligned} \quad (4.17)$$

olarak ifade etmek mümkündür. Eşitsizlik 4.16'da ve Eşitsizlik 4.17'de yer alan γ_i bir paket için yapılan gönderimler sırasındaki kanal SNR değerlerini ifade eder. $P_L = 10^{-4}$ olarak belirlenmiş bir gönderim sisteminde, düz sönümlmeli ve yavaş değişen Rayleigh kanal modeli göz önünde bulundurulduğunda $\gamma_0 = \gamma_1$ olarak kabul edilebilir. Bu varsayımdan yola çıkarak, SNR eşik değerleri Eşitlik 4.18'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \Gamma_0 &= 0, \\ \Gamma_n &= \frac{1}{3g_n} \ln \left(\frac{a_n^2}{P_L} \right), \quad n = 1, 2, \dots, N - 1 \\ \Gamma_N &= \infty \end{aligned} \quad (4.18)$$

Eşitlik 4.18'de elde edilen SNR eşik değerleri, Eşitlik 4.8'de belirtilen eşik değerlerdir. Kanalin anlık SNR değerinin Bu aralıklar arasında kalması durumunda paketler Çizelge 4.1'de özellikleri verilmiş UKK modları kullanılarak gönderilecektir.

Eşitlik 4.18'de elde edilen çözümde Çizelge 4.1'deki UKK mod parametleri kullanılması durumunda gönderim sistemi için belirlenen SNR eşik değerleri Çizelge 4.2'deki gibi elde edilir. Belirtilen eşik değerler, sönümlmeli kanalın zamanla değişimini incelemek için kullanılacak Eşitlik 4.8'de belirtilen kanal durumlarının sınırlarını belirler.

Eşik Değerler	Γ_0	Γ_1	Γ_2	Γ_3	Γ_4	Γ_5	Γ_6
	0	1.3184	2.6773	6.2217	26.0564	104.9878	∞

Çizelge 4.2. SNR eşik değerleri

Çizelge 4.2'de yer alan SNR eşik değerlerine göre, kanal durum matrisine örnek olarak çeşitli ortalama SNR değerleri ve ilinti katsayıları için örenkeler Çizelge 4.3'te ve Çizelge 4.4'te olduğu gibidir.

		TEKRAR GÖNDERİM					
		S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
İLK GÖNDERİM	S_0	0,5915	0,2613	0,1358	0,0114	0	0
	S_1	0,3879	0,2973	0,2710	0,0438	0	0
	S_2	0,2072	0,2530	0,4034	0,1364	0	0
	S_3	0,0509	0,1229	0,4031	0,4231	0	0
	S_4	0	0,0003	0,0107	0,8920	0,0970	0
	S_5	0	0	0	0	0,9995	0,0005

Çizelge 4.3. $\bar{\gamma} = 10$ dB ortalama SNR ve ρ_5 zarf ilinti katsayısı için kanal durum geçiş matrisi

		TEKRAR GÖNDERİM					
		S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
İLK GÖNDERİM	S_0	0,0412	0,0302	0,0621	0,2244	0,3991	0,2430
	S_1	0,0399	0,0266	0,0624	0,2284	0,3939	0,2488
	S_2	0,0390	0,0310	0,0571	0,2249	0,3972	0,2508
	S_3	0,0418	0,0276	0,0565	0,2211	0,4084	0,2446
	S_4	0,0372	0,0280	0,0542	0,2125	0,3979	0,2677
	S_5	0,0349	0,0241	0,0540	0,2017	0,3986	0,2867

Çizelge 4.4. $\bar{\gamma} = 20$ dB ortalama SNR ve ρ_0 zarf ilinti katsayısı için kanal durum geçiş matrisi

4.5 Tekrar Gönderim Yöntemleri

Tez kapsamında, üç farklı tekrar gönderim yöntemi incelenmiştir. Bunlar sırasıyla

- İşbirliksiz Tekrar Gönderim
- İşbirlikli Tekrar Gönderim I

- İşbirlikli Tekrar Gönderim II

olarak adlandırılmıştır. Bütün gönderim yöntemlerinde bir paket için en fazla tekrar gönderim sayısı, bir olarak sınırlandırılmıştır. Dolayısıyla bir paket için en fazla iki kere gönderim yapılır. Bu gönderimler sonucunda paket hatasız olarak elde edilemez ise kayıp olarak bildirilir ve yeni bir paketin gönderimine geçilir.

4.5.1 İşbirliksiz Tekrar Gönderim

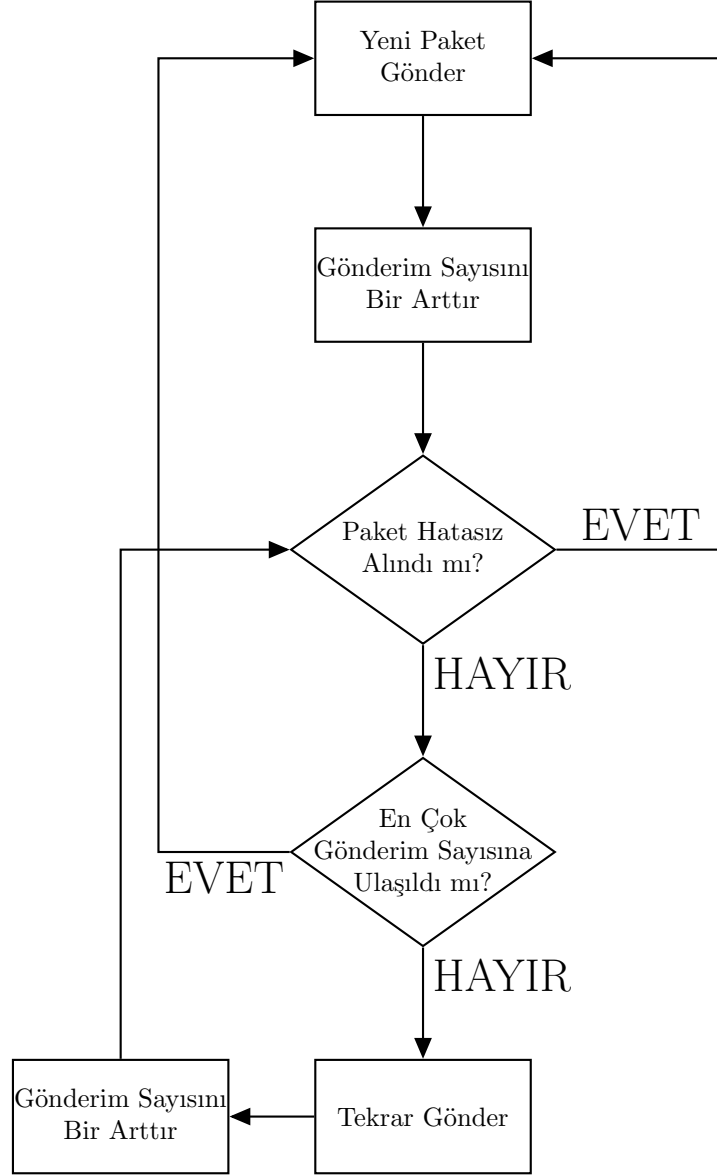
İşbirliksiz gönderimde, sadece kaynak (*S*) ve hedef (*D*) olmak üzere iki kullanıcının tek bir telsiz kanal üzerinden yaptığı iletişim modellenmiştir. İlk gönderimde başarılı bir şekilde çözülemeyen paket için kaynak kullanıcısı tekrar gönderim yapar. Şekil 4.4'te işbirliksiz gönderim için sade bir akış diagramı yer almaktadır.

Şekil 4.4'te yer alan akış diagramında, gönderimi yapılan her yeni paket için gönderim sayısını güncelleyen bir sayaç mevcuttur. Tekrar gönderim sayısının sınırlandırıldığı takdirde, bir paket için izin verilen en çok gönderim sayısına ulaşıldığında, tekrar gönderimden vazgeçilir ve yeni bir paketin gönderimi başlar. Paketin başarılı alınıp alınmadığı ise Eşitlik 4.14'te belirtilen yaklaşımla modellenmiştir.

4.5.2 İşbirlikli Tekrar Gönderim I

Bu gönderim modelinde, kaynak ve hedef kullanıcıları, üçüncü bir kullanıcının işbirliği ile paket hatalarının azaltılması hedeflenmektedir. Bu gönderim yöntemi, doğrudan gönderim ve işbirliği aşaması olarak iki aşamada özetlenebilir. Buna göre;

- **Doğrudan Gönderim Aşaması:** İlk aşamada, kaynak kullanıcı ilk gönderimi gerçekleştirir. Bu gönderim, hem hedef (*D*) kullanıcı hem de röle (*R*) kullanıcısı tarafından çözülmeye çalışılır. Eğer hedef kullanıcı gönderilen paketi hatasız olarak elde edebilir ise işbirliğine gerek kalmaz ve yeni bir paketin gönderimi başlar. İlk gönderimde hedef kullanıcının başarısız olması durumunda, ikinci aşamaya geçilir.
- **İşbirliği Aşaması:** İlk gönderimin hedef kullanıcı tarafından hatasız olarak alınmaması durumunda, rölenin ilk gönderimi hatasız olarak çözüp çözemediğine



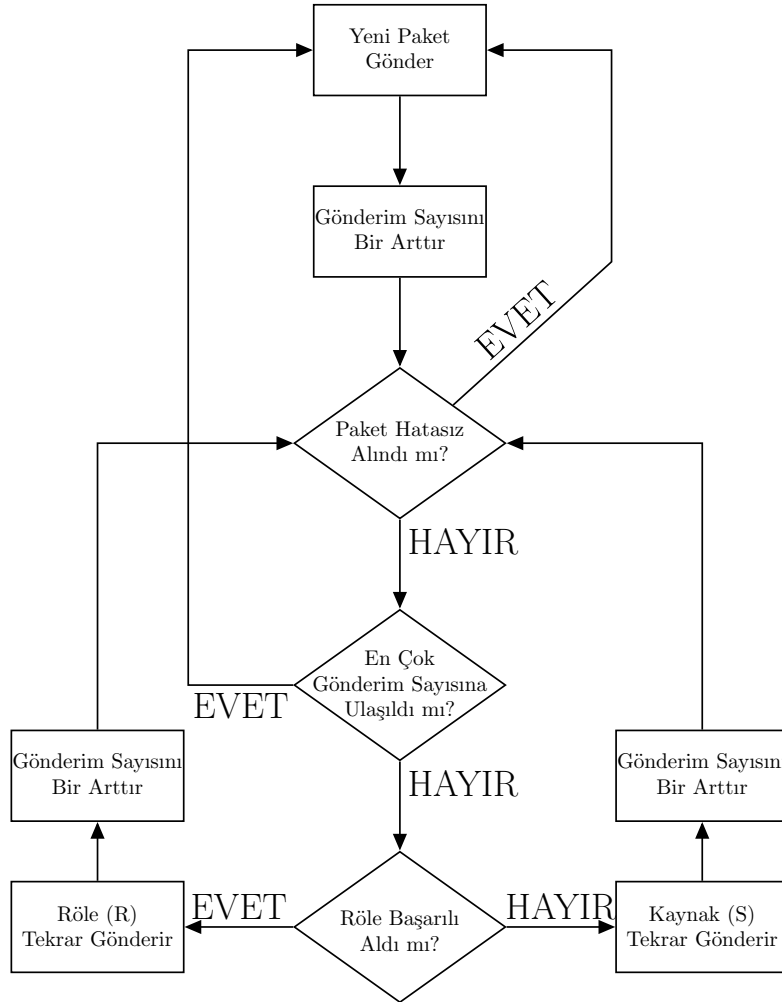
Şekil 4.4. İşbirliksiz gönderim için akış diagramı

bakılır. Rölenin başarılı olması durumunda, işbirliği aşaması başlar. Bu aşamada tekrar gönderim röle tarafından gerçekleştirilir. İlk gönderimin röle tarafından başarılı alınamaması durumunda ise tekrar gönderim yine kaynak kullanıcı tarafından gerçekleştirilir. Bu durumda gönderim yöntemi işbirliksiz gönderim yöntemine indirgenir.

Şekil 4.5'te işbirlikli gönderim I yöntemini özetleyen akış diagramı yer almaktadır. Bu digramda, gönderilen paketin röle tarafından başarılı alınıp alınmadığı doğrudan gönderimden farksız olarak sınanır ve yine Eşitlik 4.14'te ifade edildiği gibi modellenmiştir. Aynı zamanda, bir paket için tekrar gönderim sayısının sınırlandırıldığı durumda, gönderim sayısı hem işbirlikli gönderimde hem de doğrudan gönderimde güncellenir.

4.5.3 İşbirlikli Tekrar Gönderim II

İşbirlikli gönderim II yöntemi, önceki işbirlikli gönderim yöntemine benzer olarak iki aşamadan oluşur. İki gönderim yönteminde farklılık yaratan kısım röle kullanıcısının gönderime dahil olması koşuludur. Bunun dışındaki hususlarda bir değişiklik yoktur. Bu du-



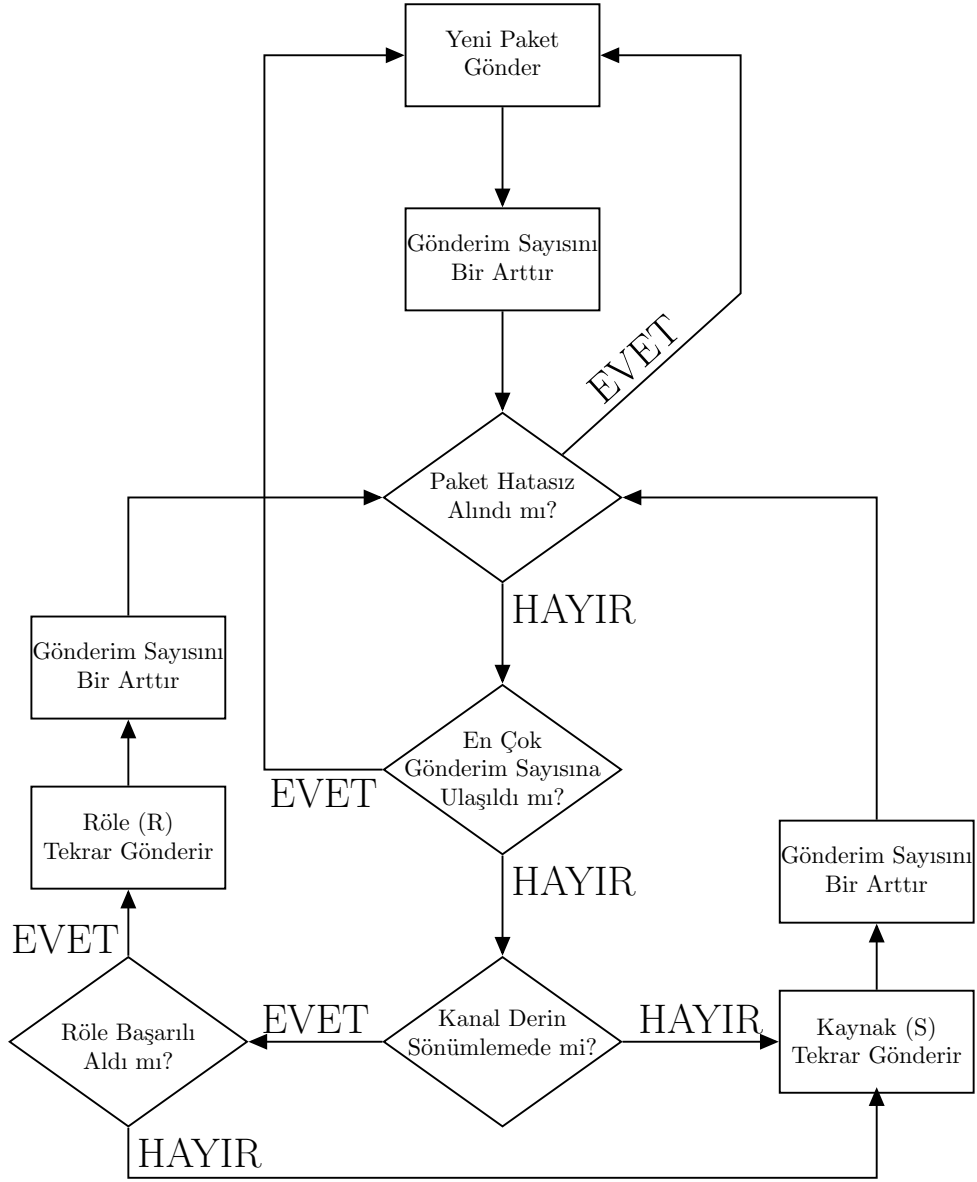
Şekil 4.5. İşbirlikli gönderim I için akış diagramı

rumda işbirlikli gönderim II yönteminde doğrudan gönderim ve işbirlikli gönderim aşamaları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- **Doğrudan Gönderim Aşaması:** İlk aşamada, kaynak kullanıcı, ilk gönderimi gerçekleştirir. Bu gönderim, hem hedef (D) kullanıcı hem de röle (R) kullanıcısı tarafından çözülmeye çalışılır. Eğer hedef kullanıcı gönderilen paketi hatasız olarak elde edebilirse işbirliğine gerek kalmaz ve yeni bir paketin gönderimi başlar. İlk gönderimde hedef kullanıcının başarısız olması durumunda, ikinci aşamaya geçilir.
- **İşbirliği Aşaması:** İlk gönderimin hedef kullanıcı tarafından hatasız olarak alınmaması durumunda, kaynak ve hedef kullanıcıları arasındaki kanalın (Doğrudan kanal) durumuna göre karar verilir. Eğer doğrudan kanal derin sönümlemede ise ilk gönderimin röle tarafından çözümlenip çözümediğine bakılır. İlk gönderimin röle tarafından başarılı olarak çözümlenmiş olması durumunda, tekrar gönderim röle tarafından gerçekleştirilir. Rölenin başarısız olması durumunda ise doğrudan kanalın derin sönümlemede olmasına rağmen tekrar gönderim kaynak tarafından gerçekleştirilir. Doğrudan kanalın derin sönümlemede olması ve ilk gönderimin röle tarafından hatasız olarak çözümlenmesi durumunda ise röle işbirliğine dahil olur ve tekrar gönderim röle tarafından gerçekleştirilir. Doğrudan kanalın ikinci gönderimde derin sönümlemede olmaması durumunda ise tekrar gönderim, rölenin durumuna bakılmaksızın kaynak tarafından gerçekleştirilir.

Şekil 4.6'te yer alan akış diagramı işbirlikli gönderim II yöntemini özetlemektedir.

Doğrudan kanalın derin sönümlemede olması durumu, gönderim esnasında anlık SNR değerinin, Bölüm 4.4'te tanımlanan ve Bölüm 4.4.1'de belirlenen $\Gamma_0 \leq \gamma < \Gamma_1$ eşik değerleri arasında olması olarak tanımlanmıştır. Sınırları belirlenmiş olan bu SNR aralığı kanal durumlarından S_0 olarak tanımlanmıştır ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir. İşbirlikli gönderim II yönteminde, kanalın S_0 durumunda olması, tekrar gönderimin röle ya da kaynak tarafından yapılmasının belirlenmesi açısından önem kazanmıştır.



Şekil 4.6. İşbirlikli gönderim II için akış diagramı

5. BENZETİM VE ANALİZ

Bu bölümde, temel olarak Tip - I melez tekrar gönderim yönteminin Rayleigh sönümlenmeli kanallarda incelenmesi amaçlanmıştır. Tip - I melez tekrar gönderim yöntemiyle birlikte Chase birleştirmenin etkisinin ayrıca gözlemlenmesi hedeflenmiştir. İntitli sönümlenen telsiz kanalların zamanla değişiminden dolayı daha etkili bir gönderime ulaşmak için uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin kullanılmasının, gönderim başarımına etkisi ayrıca incelenmiştir. Tüm bu yöntemler, işbiriksiz gönderimde olduğu gibi Bölüm 4.5'te özetlenen iki farklı işbirlikli gönderim yöntemine uyarlanarak işbirliğinin etkisi gözlemlenmiştir. Bu tekniklerin birlikte kullanılmasıyla dört farklı sistem modeli tanımlanmıştır. Bunlar,

- **Senaryo I :** Bu senaryoda, Tip - I melez tekrar gönderim yönteminde, kaynak kullanıcının göndereceği paketler, sönümlenmeli kanalın durumuna göre bir UKK modu seçilerek gönderilir. Bir paketin, gerek işbiriksiz gönderim gerekse işbirlikli gönderim yöntemlerinde, muhtemel tekrar gönderimleri alıcıda Chase birleştirme ile birleştirileceğinden dolayı, tekrar gönderimlerde kanalın durumunun değişmesine rağmen UKK modu değişmez.
- **Senaryo II :** Senaryo I'den farklı olarak Chase birleştirmenin kullanılmadığı senaryodur. Bu durumda, bir paket için yapılan gönderimler alıcıda birleştirilmeyip tek başlarına değerlendirilirler. Bu yüzden kanal durumuna bağlı olarak, bir paketin tekrar gönderimi ilk gönderimle aynı UKK moduna sahip olmak zorunda değildir.
- **Senaryo III :** Bu senaryoda, sönümlenmeli kanalın zamanla değişiminden bağımsız olarak tek bir UKK modu seçilerek gönderim yapılır. Bir paket için yapılan tüm gönderimler alıcıda Chase birleştirme yöntemiyle birleştirilir. Uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemi devre dışı bırakıldığından bu senaryo, Çizelge 4.1'de belirtilen beş farklı UKK modu için ayrı ayrı değerlendirilecektir.
- **Senaryo IV :** Senaryo IV'te, uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin devre dışı bırakıldığı ve bir paket için yapılan tüm gönderimlerin tek başlarına değerlendirildiği durum incelenecektir. UKK yönteminin devre dışı bırakılmasından dolayı, Senaryo III'te olduğu gibi beş farklı UKK modu için ayrı ayrı incelenecektir.

- **Senaryo V:** Son durumda ise, Senaryo I'de incelenen gönderim yöntemlerinde, Chase birleştirmenin devre dışı bırakılmasıyla sistem başarımındaki değişim gözlemlenmeye çalışılacaktır. Bu senaryonun, Senaryo II'den farkı ise, paketlerin tekrar gönderimleri Chase birleştirme kullanılmamasına rağmen ilk gönderimleriyle özdeş olmasıdır. Dolayısıyla, Senaryo I'de olduğu gibi, doğrudan kanal durumuna göre belirlenen UKK modu tekrar gönderimlerde de aynı olacaktır.

Yukarıda özetlenen tüm senaryolar, işbiriksiz gönderim yöntemi ve tanımlanmış iki farklı işbirlikli gönderim yöntemi için geçerlidir. Bu gönderim yöntemlerinin karşılaştırılması için Bölüm 4.2'de tanımlanmış olan paket kayıp oranı (PKO) ve izgesel verimlilik (İV) başarımları değerlendirilecektir.

5.1 Senaryo I

5.1.1 İşbiriksiz Gönderim

İşbiriksiz gönderim yönteminde, gönderilecek paket doğrudan kanal durum bilgisine göre belirlenen UKK modu ile işlendikten sonra gönderimi yapılır ve alıcıdan paketin akıbetine dair geri bildirim beklenir. Geri bildirimlerin hatasız olarak elde edildiği varsayılmıştır. Geri bildirim olumlu (ACK) olması durumunda yeni bir paketin gönderimine geçilir. Gönderilecek yeni paket, önceki kanal kullanımı sırasında paket uzunluğuna bağlı olarak ilintili olarak değişen sönmülemeli kanalın yeni kanal durumuna göre belirlenen bir UKK modu atanarak gönderilir. Geri bildirim olumsuz olması (NACK) durumunda ise kanal durumunun değişimine bakılmaksızın ilk gönderimle aynı UKK modu kullanılarak tekrar gönderim yapılır. Tekrar gönderimin alıcıya ulaşmasından sonra, hatalı olarak elde edilen ilk gönderim ile tekrar gönderim, Chase birleştirme gereği en yüksek oran birleştirme kullanılarak birleştirilir. Tekrar gönderim sonucunda da bir paket hatasız olarak elde edilememiş ise kayıp olarak bildirilir ve yeni bir paketin gönderimine geçilir.

Bu koşullarda, n 'inci UKK modu seçilerek gönderilmiş bir paket için yapılan ilk gönde-

rimin hatalı olma olasılığı Eşitlik 5.1'deki gibi ifade edilebilir.

$$A_n(\bar{\gamma}_{SD}) = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} PHO_n(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad (5.1)$$

Eşitlik 5.1'in UKK modu 0 için çözümü,

$$A_0(\bar{\gamma}_{SD}) = \left[\frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(0)} - \frac{g_0 \bar{\gamma}_{SD} \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) + a_0 \exp\left(-\left(g_0 + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \Gamma_1\right)}{(g_0 \bar{\gamma}_{SD} + 1) P_{\bar{\gamma}_{SD}}(0)} \right] \quad (5.2)$$

olarak bulunabilir.

Diğer UKK modlarında, ($n = 1, \dots, 5$), yapılan gönderimler için ise,

$$A_n(\bar{\gamma}_{SD}) = a_n \left[\frac{\exp\left(-\left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \Gamma_n\right) - \exp\left(-\left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \Gamma_{n+1}\right)}{(g_n \bar{\gamma}_{SD} + 1) P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \right] \quad (5.3)$$

olarak bulunur. Eşitlik 5.1'de yer alan $P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)$, kaynak ve hedef kullanıcı arasındaki sönmülemeli kanalın ilk gönderimde S_n , $n = \{0, 1, \dots, 5\}$, durumlarından birinde olma olasılığıdır ve γ_{SD} kaynak ile verici arasındaki kanalın anlık SNR değeri, $\bar{\gamma}_{SD}$ ise ortalama SNR değeri olmak üzere Eşitlik 5.4'teki gibi ifade edilir. Dolayısıyla bir paketin n 'inci UKK modunda gönderilme olasılığı olarak da değerlendirilebilir.

$$P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) = \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} = \exp\left(-\frac{\Gamma_n}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) - \exp\left(-\frac{\Gamma_{n+1}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.1'de yer alan $PHO_n(\cdot)$ ise Eşitlik 4.14'te belirtilen paket hata olasılıklarını modellemek için kullanılan yaklaşımdır. a_n , g_n ve γ_{pn} sabitleri ise gönderim yapılan UKK moduna bağlı parametrelerdir ve Çizelge 4.1'de her mod için belirtilmiştir. Son olarak integral sınırlarını belirten Γ_n ve Γ_{n+1} ise n 'inci kanal durumunun sırasıyla alt ve üst sınırlarını belirtir ve Bölüm 4.4.1'de bahsedildiği gibi bulunmuş olup, Çizelge 4.2'de belirtilmiştir.

İlk gönderimin hedef kullanıcıda hatasız alınmadığı durumda, kaynak kullanıcı aynı UKK modunu kullanarak tekrar gönderim yapacaktır. Bu durumda, hedef kullanıcıda ilk gönderimden elde edilen paket ile tekrar gönderimde elde edilen paket, MRC kullanılarak birleştirilecektir ve bu şekilde birleştirilen paketler hatasız olarak çözülmeye çalışılacaktır. MRC kullanımından ötürü iki gönderime ait kanal SNR değerleri hedef kullanıcıda toplanarak işlenecektir ve hata modeline bu şekilde uyarlanacaktır.

Kanalın ilintili olarak sönümlendiği göz önünde bulundurulacak olursa, iki gönderim sonunda alıcıda elde edilecek toplam SNR değerinin olasılık dağılım fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir [62].

$$p_{\gamma_o}(\gamma_o) = \frac{1}{2\rho\bar{\gamma}_o} \left[\exp\left(-\frac{\gamma_o}{(1+\rho)\bar{\gamma}_o}\right) - \exp\left(-\frac{\gamma_o}{(1-\rho)\bar{\gamma}_o}\right) \right] \quad (5.5)$$

$$\gamma_o = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (5.6)$$

Eşitlik 5.5'te yer alan γ_o ise iki gönderimin MRC yöntemiyle birleştirilmesi sonucu elde edilen toplam SNR değeridir. Aynı zamanda $\bar{\gamma}_o$ ortalama SNR değeri her iki gönderim için özdeş olan ortalama SNR değeridir ve gönderimlerin doğrudan kanal üzerinden yapıldığı durumda, $\bar{\gamma}_{SD}$ olarak ifade edilebilir.

Bu durumda, iki gönderimin MRC kullanılarak birleştirilmesinden sonra alıcıda yapılan çözme işleminin ortalama hatalı olma olasılığı ise aşağıdaki gibidir.

$$B_{nk} = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \int_{\Gamma_n + \Gamma_k}^{\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}} PHO_n(\gamma_o) p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \quad (5.7)$$

Eşitlik 5.7'deki ifade, ilk gönderimin S_n kanal durumunda, tekrar gönderimin ise S_k kanal durumunda yapıldığı durumda ortalama paket hata olasılığını ifade eder. İlk gönderim sırasında kanal durumu S_n olduğu için gönderilen paket n 'inci UKK modunda olacaktır. Dolayısıyla kanalın S_n durumundan S_k durumuna geçmesi için gereken süre Eşitlik 4.10'da ifade edildiği gibi $T_f^{(n)}$ olacaktır. Buna bağlı olarak da iki gönderim arasındaki ilinti katsayısı $\rho = J_0(2\pi f_d T_f^{(n)})$ olarak hesaplanır. İntegral sınırları $\Gamma_n + \Gamma_k$ ve $\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}$ ise MRC çıkış SNR değerinin sırasıyla alt ve üst sınırlarını belirler. Bunun nedeni ilk gönderimin S_n kanal durumunda, yani $\Gamma_n \leq \gamma_1 < \Gamma_{n+1}$ aralığında olması, tekrar gönderimin

ise S_k kanal durumunda, yani $\Gamma_k \leq \gamma_2 < \Gamma_{k+1}$ aralığında gerçekleştirilmesidir. Dolayısıyla MRC işlemi sonucunda elde edilecek çıkış SNR değeri $\Gamma_n + \Gamma_k \leq \gamma_o < \Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}$ aralığında olur.

Eşitlik 5.7'de yer alan $P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k)$ ifadesi MRC çıkış SNR değerinin aralığına bağlı olarak Eşitlik 5.8'deki gibi hesaplanır.

$$P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k) = \int_{\Gamma_n + \Gamma_k}^{\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}} p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \quad (5.8)$$

Her iki gönderimin S_0 kanal durumunda gerçekleştiği durum için ($n = 0, k = 0$), Eşitlik 5.9'daki gibi ifade edilir

$$P_{\tilde{\gamma}_o}(S_0; S_0) = \int_0^{2\Gamma_1} p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \quad (5.9)$$

ve sonuç olarak Eşitlik 5.10'daki gibi sonuçlanır.

$$P_{\tilde{\gamma}_o}(S_0; S_0) = \frac{1 + \rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\Gamma_1}{\tilde{\gamma}_o(1 + \rho)}\right) \right) \dots - \frac{1 - \rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{2\Gamma_1}{\tilde{\gamma}_o(1 - \rho)}\right) \right) \quad (5.10)$$

Diğer tüm durumlar için ise Eşitlik 5.11'deki gibi ifade edilir.

$$P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k) = \frac{1 + \rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}}{\tilde{\gamma}_o(1 + \rho)}\right) \right) \dots - \frac{1 - \rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}}{\tilde{\gamma}_o(1 - \rho)}\right) \right) \dots - \frac{1 + \rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_n + \Gamma_k}{\tilde{\gamma}_o(1 + \rho)}\right) \right) \dots + \frac{1 - \rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_n + \Gamma_k}{\tilde{\gamma}_o(1 - \rho)}\right) \right) \quad , n \wedge k \neq 0 \quad (5.11)$$

Bu durumda nihai olarak, Eşitlik 5.7’de ifade edilen, ikinci gönderimden sonra alıcıda çözme işleminin başarısız olmasının ortalama hata olasılığı, her iki gönderimin S_0 kanal durumunda gerçekleşmesi koşuluyla

$$\begin{aligned}
 B_{00} &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_o}(S_0; S_0)} \int_0^{2\Gamma_1} PHO_0(\gamma_o) p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \quad (5.12) \\
 &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_o}(S_0; S_0)} \left[\int_0^{\gamma_{p0}} p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o + \int_{\gamma_{p0}}^{2\Gamma_1} a_0 \exp(-g_0 \gamma_o) p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \right]
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlik 5.12 ’de yer alan integral ifadesinin iki parçaya ayrılmasının nedeni Eşitlik 4.14’te ifade edilen pakat hata olasılığı yaklaşımına göre, γ_{pn} değerinden daha düşük değerler için kesinlikle hatalı olacağı kabul edilmiştir ve bu durum sadece UKK mod 0 için geçerlidir. Diğer durumlarda γ_{p0} değeri gönderim yapılan kanal durumunun alt sınırından daha düşük değerde olacağı için benzer durum söz konusu değildir.

Bu durumda Eşitlik 5.12, aşağıdaki gibi sonuçlandırılabilir.

$$\begin{aligned}
 B_{00} &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_o}(S_0; S_0)} \left[\frac{1+\rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right) \right) \dots \quad (5.13) \right. \\
 &- \frac{(1-\rho)}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right) \right) \dots \\
 &+ \frac{(1+\rho)}{2\rho(1+g_0\bar{\gamma}_o(1+\rho))} \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right) \dots \\
 &- \frac{a_0(1+\rho)}{2\rho(1+g_0\bar{\gamma}_o(1+\rho))} \exp\left(-2\Gamma_1 \left(\frac{g_0\bar{\gamma}_o(1+\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)} \right) \right) \dots \\
 &- \frac{(1-\rho)}{2\rho(1+g_0\bar{\gamma}_o(1-\rho))} \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right) \dots \\
 &\left. + \frac{a_0(1-\rho)}{2\rho(1+g_0\bar{\gamma}_o(1-\rho))} \exp\left(-2\Gamma_1 \left(\frac{g_0\bar{\gamma}_o(1-\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)} \right) \right) \right]
 \end{aligned}$$

Diğer durumlar ($n \wedge k \neq 0$) için B_{nk} ortalama hata olasılıklarını ise

$$\begin{aligned}
B_{nk} = & \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \left[\frac{a_n}{2\rho(1 + g_n\bar{\gamma}(1 + \rho))} \exp\left(-(\Gamma_n + \Gamma_k) \left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}(1 + \rho)}\right)\right) \cdots \right. \\
& - \frac{a_n}{2\rho(1 + g_n\bar{\gamma}(1 + \rho))} \exp\left(-(\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}) \left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}(1 + \rho)}\right)\right) \cdots \\
& - \frac{a_n}{2\rho(1 + g_n\bar{\gamma}(1 - \rho))} \exp\left(-(\Gamma_n + \Gamma_k) \left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}(1 - \rho)}\right)\right) \cdots \\
& \left. + \frac{a_n}{2\rho(1 + g_n\bar{\gamma}(1 - \rho))} \exp\left(-(\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}) \left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}(1 - \rho)}\right)\right) \right] \quad (5.14)
\end{aligned}$$

olarak ifade etmek mümkündür.

İlk ve tekrar gönderim sonucunda alıcıda çözme işleminin sonucunun ortalama olarak hatalı olma olasılıkları elde edildikten sonra, Bölüm 4.2'de ifade edilen paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik başarımları ölçütleri hesaplanabilir. Senaryo I işbirliksiz gönderim için paket kayıp oranı, ilk gönderimin sonucunun başarısız olmasına istinaden gerçekleştirilen tekrar gönderim sonucunda da başarısız olması durumunu ifade eder. Bu durumda tekrar gönderim kendi başına değerlendirilmeyip, alıcıda saklanan ilk gönderimle MRC yöntemi kullanılarak birleştirilerek değerlendirilir. Bu durumda Senaryo I işbirliksiz gönderim için ilk gönderim, sönümlenmeli kanalın bulunabileceği altı farklı kanal durumdan herhangi birinde yapıldığı ve tekrar gönderim esnasında kanalın yine altı farklı kanal durumundan herhangi birinde olabileceği düşünülürse, paket kayıp oranı

$$PKO_{DT}^{(l)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} B_{nk} \quad (5.15)$$

analitik olarak ifade edilebilir. Eşitlik 5.15'te yer alan $P_{n,k}^{T_f^{(n)}}$ ifadesi kanalın ilk gönderimin paket süresi olan $T_f^{(n)}$ sürede S_n durumundan S_k durumuna geçme olasılığını ifade eder. Paketin işleneceği UKK modu ilk gönderim sırasındaki kanal durumuna göre belirleneceğinden n 'nci UKK modunun paket süresi geçerlidir.

Senaryo I işbiriksiz gönderim için bir diğer başarımlık ölçütü olan izgesel verimlilik ise

$$IV_{DT}^{(I)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_n \left[(1 - A_n(\bar{\gamma}_{SD})) + \frac{1}{2} A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_i^{(n)}} (1 - B_{nk}) \right] \quad (5.16)$$

olarak ifade edilebilir. Bölüm 4.2'de yer alan tanıma göre izgesel verimlilik, paketin veri hızı oranının, paketin başarılı olarak hedef kullanıcıya ulaştırılabilmesi için yapılan gönderim sayısına bölünmesi ile elde edilir. Bu durumda bir paket için yapılan en çok gönderim sayısı iki ile sınırlandırıldığına göre, ilk gönderimde başarılı alınan paketin izgesel verimliliğe katkısı, veri hızı oranı R_n kadar olacak ancak iki gönderim sonunda başarılı alınan bir paketin katkısı ise yarıya düşecektir. Eşitlik 5.16'da bu ifade matematiksel olarak yer almaktadır. Her UKK modu için belirlenen veri hızı oranı R_n değerleri, Çizelge 4.1'de bulunabilir.

5.1.2 İşbirlikli Gönderim I

İşbirlikli I gönderim yönteminde, Şekil 4.2'de gösterilen üç kullanıcılu ağın incelenmesi hedeflenmiştir. Belirtilen ağ yapısına göre, S kaynak kullanıcıyı, D hedef kullanıcıyı, R ise röle kullanıcıyı temsil eder. Bu kullanıcılar arasındaki kanallar birbirlerinden bağımsız düz sönümlenmeli Rayleigh kanallar olarak modellenmiştir. Kullanıcılar arasındaki kanalların ortalama SNR değerleri, $\bar{\gamma}_{SD}$, $\bar{\gamma}_{SR}$ ve $\bar{\gamma}_{RD}$ olarak belirtilmiştir. Bunlar sırasıyla kaynak ve hedef kullanıcı arasındaki, kaynak ve röle kullanıcı arasındaki ve röle ve kaynak kullanıcı arasındaki kanalların ortalama SNR değerlerini temsil eder. Ayrıca Bölüm 2.2'de belirtildiği üzere, kullanıcılar arasındaki farklı sönümlenmeli kanal koşulları gereği, ortalama SNR değerleri arasındaki ilişki

$$4\bar{\gamma}_{SD} = \bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}_{RD} \quad (5.17)$$

olarak belirlenmiştir.

Tez kapsamında tüm işbirlikli gönderim yöntemlerinde belirtilen kanal modeli esas alınacaktır.

Senaryo I işbirlikli gönderim yöntemlerinde, bir paketin gönderimi için atanan UKK modu, doğrudan kanalın durumuna göre belirlenir, tekrar gönderimlerde işbiriksiz du-

rumda olduğu gibi aynı UKK modu kullanılır. Bu durum rölenin işbirliğine dahil olması durumunda da geçerlidir. Dolayısıyla Çizelge 4.2'de yer alan kanal durum eşik değerleri işbirlikli gönderim yöntemleri için de geçerli olacaktır.

İşbirlikli I gönderim I yönteminde, rölenin işbirliğine dahil olması koşulu, kaynak kullanıcı tarafından gerçekleştirilen ilk gönderimin başarısız olması ve gönderilen paketin röle tarafından hatasız olarak çözülmesi şeklinde tanımlanmıştır ve ayrıntılı olarak Bölüm 4.5'te ifade edilmiştir.

Bu koşullar altında ilk gönderimin başarısız olması durumu, işbirliksiz gönderim yönteminde bulunduğu gibi Eşitlik 5.1 ile ifade edilir. Tekrar gönderimin gerçekleşmesinden sonra, hedef kullanıcıda Chase birleştirme sonucunun hatalı olarak bildirilmesinin ortalama olasılığı ise iki farklı durum göz önünde bulundurularak incelenmek zorundadır. Bunun nedeni tekrar gönderimin bizzat kaynak kullanıcı tarafından yapıldığı durum ile röle kullanıcısı tarafından yapıldığı durumların farklılık göstermesidir.

Tekrar gönderimin kaynak kullanıcı tarafından yapılması durumunda, ortalama hata olasılığı, yine işbirliksiz gönderimde olduğu gibi Eşitlik 5.7'de ifade edildiği gibidir.

Tekrar gönderimin röle tarafından gerçekleştirildiği durumda ise alıcıda ortalama hata olasılığı, doğrudan ve röle kanallarının bağımsız olmasından ötürü

$$C_n = \frac{1}{P_{\gamma_{SD}}(n)} \int_0^{\infty} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} PHO_n(\gamma_{SD} + \gamma_{RD}) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \quad (5.18)$$

genel olarak tüm S_n kanal durumları için ifade edilebilir.

Eşitlik 5.18'de belirtilen ortalama hata olasılığı C_n , ilk gönderimin doğrudan kanal durumu S_0 olması halinde, yani gönderilen paketin UKK mod 0 seçilerek işlendiği durum

için

$$\begin{aligned}
C_0 &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(0)} \left[\int_0^{\gamma_{p0}-\gamma_{SD}} \int_0^{\gamma_{p0}} p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \dots \right. \\
&+ \int_{\gamma_{p0}-\gamma_{SD}}^{\infty} \int_0^{\gamma_{p0}} a_0 \exp(-g_0(\gamma_{SD} + \gamma_{RD})) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \dots \\
&\left. + \int_0^{\infty} \int_{\gamma_{p0}}^{\Gamma_1} a_0 \exp(-g_0(\gamma_{SD} + \gamma_{RD})) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \right]
\end{aligned} \tag{5.19}$$

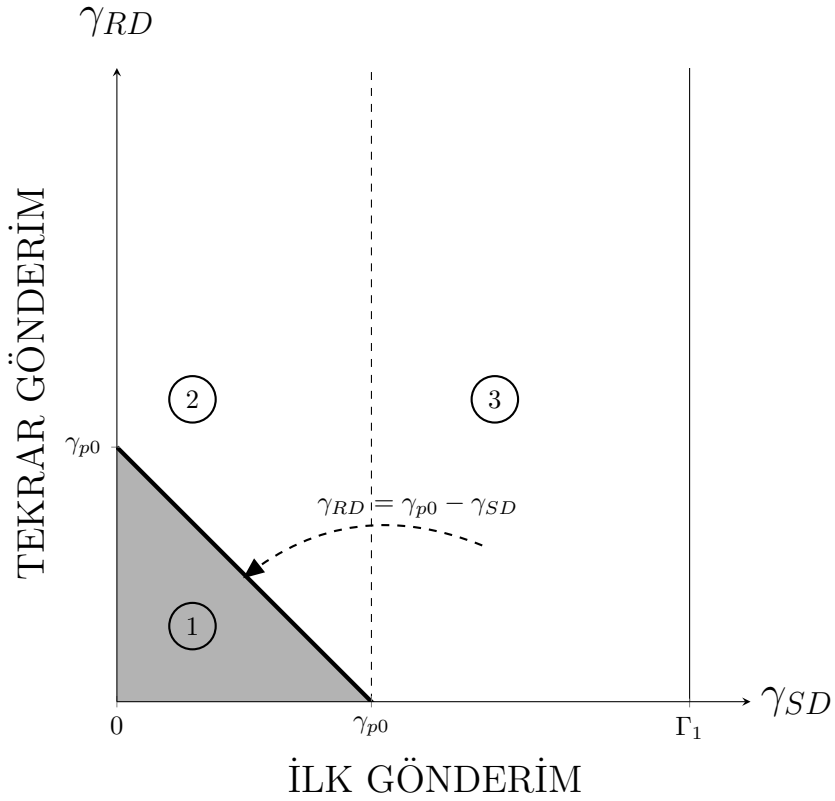
olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 5.19'da yer alan integral sınırları Şekil 5.1'de ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Şekilde yer alan ① ile işaretli bölgede paket hata olasılığı bir iken, ② ve ③ ile işaretlenmiş bölgelerde birden daha küçük değerler alır. İntegral sınırları bu durum göz önünde bulundurularak üç parçalı olarak çözümlür.

Eşitlik 5.19'da yer alan ifadenin açık çözümü ise

$$\begin{aligned}
C_0 &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(0)} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) - \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}} \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \dots \right. \\
&+ \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}} \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\gamma_{p0} \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD} \bar{\gamma}_{RD}}\right)\right) \dots \\
&+ \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{(1 + g_0 \bar{\gamma}_{RD})(\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD})} \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \dots \\
&- \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{(1 + g_0 \bar{\gamma}_{RD})(\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD})} \exp\left(-\gamma_{p0} \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD} \bar{\gamma}_{RD}}\right)\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \dots \\
&\left. + \frac{1}{(1 + g_0 \bar{\gamma}_{SD})(1 + g_0 \bar{\gamma}_{RD})} \left(\exp\left(-\frac{\gamma_{p0}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) - a_0 \exp\left(\Gamma_1 \left(g_0 + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right)\right) \right) \right]
\end{aligned} \tag{5.20}$$

olarak elde edilir.



Şekil 5.1. C_n İfadesinin UKK mod 0 için çözüm bölgeleri

İlk gönderimin S_0 kanal durumu dışında gerçekleştirildiği tüm durumlar için $C_n, n \neq 0$ ifadesi

$$C_n = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \int_0^{\infty} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} a_n \exp(-g_n(\gamma_{SD} + \gamma_{RD})) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \quad (5.21)$$

integralinin çözümüyle bulunur. Eşitlik 5.21'in çözümü ise,

$$C_n = \frac{a_n \left[\exp\left(-\Gamma_n \left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right)\right) - \exp\left(-\Gamma_{n+1} \left(g_n + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right)\right) \right]}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) (1 + g_n \bar{\gamma}_{SD}) (1 + g_n \bar{\gamma}_{RD})} \quad (5.22)$$

olarak elde edilebilir.

İşbirlikli gönderim yöntemlerinde bir diğer önemli husus ise gönderilen paketlerin röle tarafından başarılı olarak çözülüp çözülmemesi durumudur. Bu durum çöz - ilet işbirliği

yapan rölenin işbirliğine dahil olmasını belirler. Kaynak tarafından gönderilen paketlerin röle tarafından hatalı olarak çözülmesinin ortalama olasılığı Eşitlik 5.23'teki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned}
A_n(\bar{\gamma}_{SR}) &= \int_0^{\infty} P H O_n(\gamma_{SR}) p_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR} \\
&= \int_0^{\gamma_{pn}} p_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR} + \int_{\gamma_{pn}}^{\infty} a_n \exp(-g_n \gamma_{SR}) p_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR}
\end{aligned} \tag{5.23}$$

Eşitlik 5.23'ün açık çözümü ise

$$A_n(\bar{\gamma}_{SR}) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{pn}}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) + \frac{1}{(1 + g_n \bar{\gamma}_{SR})} \exp\left(-\frac{\gamma_{pn}}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \tag{5.24}$$

olarak elde edilir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak, Senaryo I işbirlikli gönderim I yöntemi için paket kayıp oranı elde edilebilir. İlk gönderimin kaynak kullanıcı tarafından γ_{SD} SNR değeriyle yapıldığı ve doğrudan kanalın S_n kanal durumunda olduğu durumda, UKK mod n seçilerek paket gönderimi yapılacaktır. Kaynak kullanıcı tarafından yapılan ilk gönderim, hem hedef kullanıcı tarafından hem de röle kullanıcısı tarafından çözülmeye çalışılacaktır. Hedef kullanıcıda çözme işlemi hatasız sonuçlanmadığı takdirde, röle kullanıcısının sonucu önem kazanır. Bu durumda röle kullanıcısı paketi hatasız elde etmiş ise işbirlikli gönderim yapılır ve röle ile hedef kullanıcıları arasındaki kanalın durum bilgisinden bağımsız olarak ilk gönderimle aynı UKK modu ile tekrar gönderim yapılır. Tekrar gönderimin hedef kullanıcı tarafından yapılması durumunda ise, işbirlikli gönderim yöntemi, işbirliksiz gönderim yöntemine indirgenir ve doğrudan kanalın değişiminden bağımsız olarak aynı UKK modu kullanılır.

Bu bilgiler dahilinde, paket kayıp oranı

$$P K O_{CT1}^{(l)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \left[(1 - A_n(\bar{\gamma}_{SD})) C_n + A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_i^{(n)}} B_{nk} \right] \tag{5.25}$$

olarak ifade edilir.

Paket hata oranından hareketle işbirlikli gönderim I yöntemi için izgesel verimlilik aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$IV_{CT1}^{(I)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_n \left[(1 - A_n(\bar{\gamma}_{SD})) + \frac{1}{2} A_n(\bar{\gamma}_{SD})(1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR}))(1 - C_n) \cdots \right. \quad (5.26)$$

$$\left. + \frac{1}{2} A_n(\bar{\gamma}_{SD}) A_n(\bar{\gamma}_{SR}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T(n)} (1 - B_{nk}) \right]$$

İşbirliksiz gönderimde olduğu gibi, bir paketin ilk gönderimde başarılı olması durumunda izgesel verimliliğe katkısı R_n kadar olacaktır. Aksi durumda, başarılı elde edilen bir paket iki gönderim sonunda elde edilebileceğinden izgesel verimliliğe katkısı yarıya düşecektir. Bunun sonucunda, Eşitlik 5.26'da parantez içinde yer alan ilk terim, ilk gönderim sonucunda hatasız elde edilen paketlerin katkısını, ikinci terim ilk gönderimin kaynak, tekrar gönderimin röle tarafından gerçekleştirildiği durumda hatasız elde edilen paketlerin katkısını ve son terim ise ilk ve tekrar gönderimlerin kaynak tarafından gerçekleştirildiği durumda başarılı iletilen paketlerin katkısını ifade eder.

5.1.3 İşbirlikli Gönderim II

İşbirlikli gönderim II yönteminde, işbirlikli gönderim I için Bölüm 5.1.2'de tanımlanan kanal modeli ve işbirlikli ağ yapısı bu gönderim yöntemi için de geçerlidir. İki işbirlikli gönderim yöntemini birbirinden ayıran husus ise Bölüm 4.5'te de ayrıntılı olarak belirtildiği gibi rölenin işbirliğine dahil olması koşuludur. Bu gönderim yönteminde, rölenin işbirliğine dahil olması için ilk gönderimin başarısız olması sonrasında, doğrudan kanalın derin sönümlemede, yani S_0 kanal durumunda, olması gerekir. Bu koşulun oluşması durumunda, röle ilk gönderimi hatasız olarak çözmüş ise tekrar gönderimi gerçekleştirebilir. Doğrudan kanalın derin sönümlemede olmaması durumunda ise tekrar gönderim yine kaynak tarafından gerçekleştirilir.

Bu koşullar altında, Eşitlik 5.1, Eşitlik 5.7, Eşitlik 5.18 ve Eşitlik 5.23 ifadeleri bu gönderim yöntemi için de geçerlidir.

Senaryo I işbirlikli gönderim II yöntemi için, paket kayıp oranı

$$PKO_{CT2}^{(I)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \left[\sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} B_{nk} + P_{n,0}^{T_f^{(n)}} A_n(\bar{\gamma}_{SR}) B_{n0} \cdots \right. \\ \left. + P_{n,0}^{T_f^{(n)}} (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) C_n \right] \quad (5.27)$$

olarak ifade edilir.

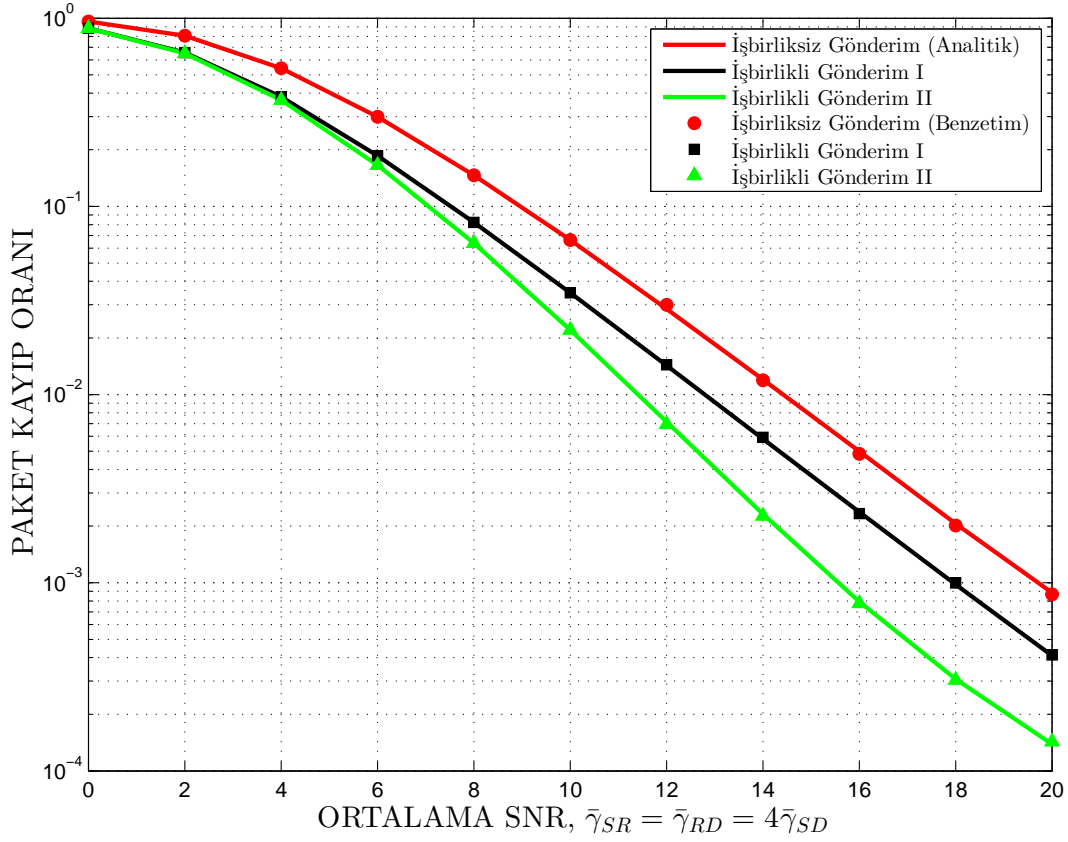
İşbirlikli gönderim II yöntemi için izgesel verimlilik ise Eşitlik 5.28'deki gibi olur.

$$IV_{CT2}^{(I)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_n \left[(1 - A_n(\bar{\gamma}_{SD})) + \frac{1}{2} A_n(\bar{\gamma}_{SD}) A_n(\bar{\gamma}_{SR}) P_{n,0}^{T_f^{(n)}} (1 - B_{n0}) \cdots \right. \\ \left. + \frac{1}{2} A_n(\bar{\gamma}_{SD}) (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) P_{n,0}^{T_f^{(n)}} (1 - C_n) + \frac{1}{2} A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} (1 - B_{nk}) \right] \quad (5.28)$$

Eşitlik 5.28'de parantez içinde yer alan ilk terim, ilk gönderimde hatasız olarak alınan paketlerin izgesel verimliliğe katkısını, ikinci terim, doğrudan kanalın derin sönümlemede ve rölenin ilk gönderimi hatasız çözemediği, dolayısıyla tekrar gönderimin kaynak kullanıcı tarafından yapıldığı durumda başarılı iletilen paketlerin katkısını, üçüncü terim ilk gönderimin başarısız olduğu durumda doğrudan kanalın S_0 durumunda olduğu ve rölenin ilk gönderimi hatasız çözdüğü durumda başarılı olarak alınan paketlerin katkısını, son terim ise doğrudan kanalın derin sönümlemede olmadığı dolayısıyla işbirlikli gönderimin devre dışı kaldığı durumda başarılı alınan paketlerin katkısını ifade eder.

Senaryo I için üç farklı gönderim yöntemi için de analitik olarak elde edilen paket kayıp oranı (PKO) ve izgesel verimlilik ifadeleri (İV) benzetim sonuçlarıyla da doğrulanmıştır. Her üç gönderim yöntemine ait PKO sonuçları Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Şekil 5.3'te ise Senaryo I kapsamında tanımlanan üç farklı gönderim yöntemine ait hem analitik olarak hem de benzetim yoluyla elde edilmiş İV sonuçları gösterilmektedir.

Her üç yöntem için elde edilen, paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik sonuçlarına bakılarak, her iki işbirlikli gönderim yönteminin işbirliksiz gönderim yöntemine kıyasla daha

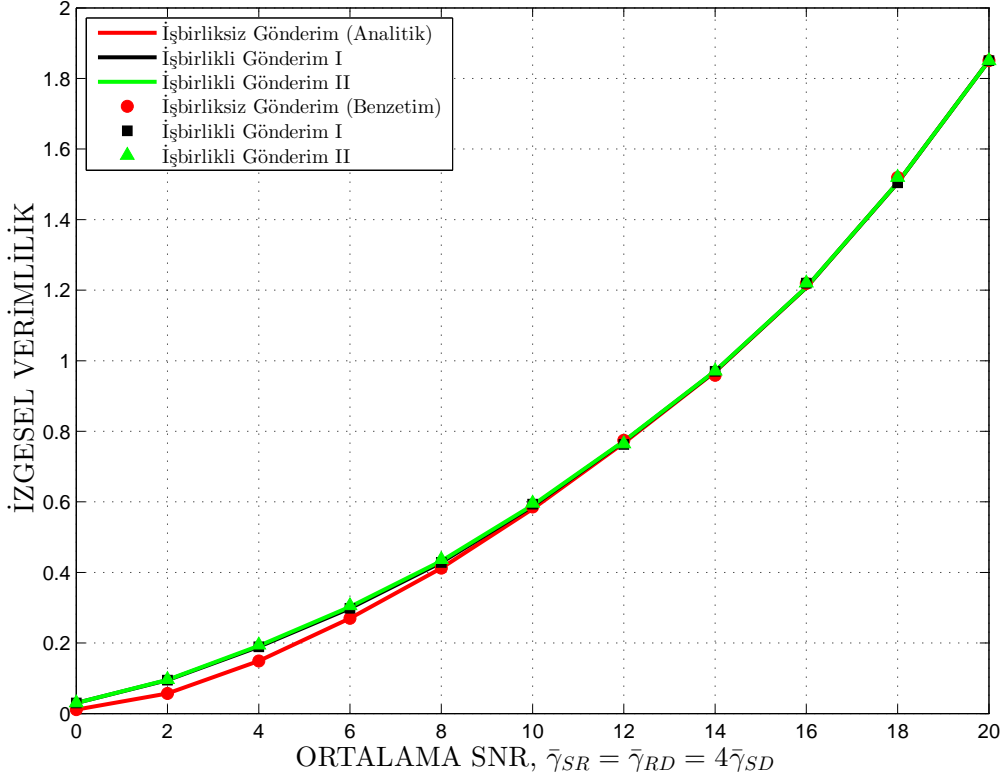


Şekil 5.2. Senaryo I için üç farklı gönderim yönteminin paket kayıp oranlarının analitik ve benzetim sonuçları

iyi sonuçlar verdiği Şekil 5.2'den ve Şekil 5.3'ten anlaşılabilir.

5.2 Senaryo II

Senaryo I'den farklı olarak bu senaryoda, Chase birleştirme kullanılmamaktadır. Dolayısıyla, bir paket için yapılan tekrar gönderimler alıcıda MRC işlemine tabi tutulmacağından, her gönderim ilk gönderimle aynı UKK modunda olmak zorunda değildir. İşbirlikli gönderim modelinde kanallar birbirlerinden bağımsız olarak modellendiği için, doğrudan kanala göre seçilen UKK modu röle kanallarında değişim göstermesi sistem performansında olası değişimlere yol açacaktır.



Şekil 5.3. Senaryo I için üç farklı gönderim yönteminin izgesel verimliliklerinin analitik ve benzetim sonuçları

5.2.1 İşbirlikli Gönderim

İşbirlikli gönderim yönteminde, bir paketin ilk gönderimi, doğrudan kanal durumuna göre seçilen UKK moduna göre işlendikten sonra gerçekleştirilir ve hedef kullanıcının çözmesi beklenir. Hedef kullanıcının, ilk gönderimi hatasız çözememesi durumunda, hatalı alınan paket silinir ve tekrar gönderim başlar. Paketin tekrar gönderimi ise yeni kanal durumuna göre belirlenen UKK modu ile gönderilir. Bu durumda, ilk gönderim ile tekrar gönderim arasında $T_f^{(n)}$ kadar süre geçmiştir ve kanalın yeni durumu bu süreye ve ilk gönderim sırasındaki kanal durumu S_n 'ye bağlı olarak değişecektir. Tekrar gönderimin de başarısız olması durumunda, paket kayıp ilan edilir ve yeni bir paketin gönderimi başlar.

Bu bilgiler doğrultusunda işbirlikli gönderim yönteminin paket kayıp oranı analitik olarak ifade edilebilir. Bu ifadeyi elde etmek için Senaryo I'de kullanılan Eşitlik 5.1 ifadesi

yeterli olacaktır. Buna göre Senaryo II işbirliksiz gönderim yöntemi için paket kayıp oranı

$$PKO_{DT}^{(II)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} A_k(\bar{\gamma}_{SD}) \quad (5.29)$$

olarak ifade edilir.

Eşitlik 5.29'daki paket kayıp oranı eşitliği, şu şekilde ifade edilebilir. Bir paketin ilk gönderimi, doğrudan kanal durumunu, altı farklı kanal durumundan biri olan S_n iken yapılmıştır. Dolayısıyla bu gönderim, n 'nci UKK modu seçilerek yapılmıştır. İlk gönderim boyunca geçen süre ise $T_f^{(n)}$ olarak ifade edilir. Bu süre boyunca doğrudan kanal S_n durumundan S_k durumuna geçmiştir. Tekrar gönderim yeni kanal durumuna göre k 'nci UKK modunda yapılmış olup başarısızlıkla sonuçlanmıştır. İki gönderim sonucunda da hatasız çözülemeyen paket, kayıp olarak ilan edilmiştir.

İşbirliksiz gönderim için izgesel verimlilik ifadesi ise ilk gönderimde başarılı bir paketin veri hızı oranı ile ikinci gönderimde başarılı olarak alınan bir paketin veri hızı oranı hesaba katılarak şu şekilde bulunabilir.

$$IV_{DT}^{(II)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) \left[R_n (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\ \left. + A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 \left(\frac{R_k R_n}{R_n + R_k} \right) P_{n,k}^{T_f^{(n)}} (1 - A_k(\bar{\gamma}_{SD})) \right] \quad (5.30)$$

Eşitlik 5.30'da parantez içindeki ilk ifade, ilk gönderimde başarılı olarak elde edilen paketlerin izgesel verimliliğe katkısını R_n , tekrar gönderim sonucu başarılı olarak elde edilen paketlerin katkısını ise $\frac{R_k R_n}{R_n + R_k}$ olarak ifade eder.

5.2.2 İşbirlikli Gönderim I

Senaryo II işbirlikli gönderim I yönteminde, bir paketin ilk gönderimi kaynak kullanıcı tarafından doğrudan kanal durumuna göre seçilen bir UKK modu ile gerçekleştirilir ve alıcının hatasız çözmesi beklenir. Aynı gönderim röle kullanıcısı tarafından da çözülmeye çalışılır. Paketin alıcı tarafından hatasız çözülememesi ve rölenin hatasız çözmesi duru-

munda tekrar gönderim röle tarafından gerçekleştirilir. Tekrar gönderimin röle tarafından yapıldığı durumda, paketin gönderimi, röle kullanıcısı ile hedef kullanıcı arasındaki kanalın durumuna göre seçilen yeni bir UKK moduna göre yapılır. Rölenin işbirliğine dahil olamadığı durumda ise tekrar gönderim yine kaynak kullanıcı tarafından gerçekleştirilir ve doğrudan kanalın yeni durumuna göre seçilen güncel UKK moduna göre gönderim yapılır.

Bu senaryoda işbirlikli gönderim yöntemlerinde, röle kanalının durumu önem kazandığından Eşitlik 5.4'te doğrudan kanal durumları için kullanılan ifadenin benzeri röle kanalı için Eşitlik 5.31'deki gibi olacaktır.

$$P_{\tilde{\gamma}_{RD}}(n) = \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{RD} = \exp\left(-\frac{\Gamma_n}{\tilde{\gamma}_{RD}}\right) - \exp\left(-\frac{\Gamma_{n+1}}{\tilde{\gamma}_{RD}}\right) \quad (5.31)$$

Bu ifade, röle kanalının altı farklı kanal durumundan biri olan S_n 'de olma olasılığını ifade eder.

Bunun dışında, Senaryo I'de tanımlanan, kaynak kullanıcısı tarafından, n 'ninci UKK modunda gönderilen bir paketin rölede hatalı olarak alınmasının ortalama olasılığı olan Eşitlik 5.23'teki $A_n(\tilde{\gamma}_{SR})$ ifadesi bu senaryo için de geçerli olacaktır. Senaryo II için ayrıca tanımlanması gereken bir başka ifade ise tekrar gönderimin röle tarafından yapılması halinde, tekrar gönderimin ortalama hatalı olma olasılığıdır. Bu olasılık

$$A_n(\tilde{\gamma}_{RD}) = \frac{1}{P_{\tilde{\gamma}_{RD}}(n)} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} PHO_n(\gamma_{RD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{RD} \quad (5.32)$$

olarak ifade edilir ve UKK mod n için çözümü Eşitlik 5.2'de ve Eşitlik 5.3'te olduğu gibi bulunabilir.

İşbirlikli gönderim yöntemlerinde, bir paketin kayıp olarak ilan edilmesi için kaynak kullanıcı tarafından gerçekleştirilen ilk gönderimin başarısız olmasının ardından, röle ya da yine kaynak kullanıcı tarafından yapılan tekrar gönderimin de başarısız olması gerekir.

Bu durumda, Senaryo II işbirlikli gönderim I yöntemi için paket kayıp oranı,

$$\begin{aligned}
 PKO_{CT1}^{(II)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \left[(1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) A_j(\bar{\gamma}_{RD}) \cdots \right. \\
 & \left. + A_n(\bar{\gamma}_{SR}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} A_k(\bar{\gamma}_{SD}) \right] \quad (5.33)
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 5.33'teki ifadede, parantez içindeki ilk terim, n 'inci UKK modunda yapılan ilk gönderimin başarısız olması durumunda tekrar gönderimin röle tarafından j 'inci UKK modunda gerçekleştirilip başarısızlıkla sonuçlanması durumunu ifade eder. İkinci terim ise, rölenin işbirliğine dahil olamadığı ve tekrar gönderimin yine kaynak kullanıcı tarafından gerçekleştirildiği durumda paketin hatasız alınamamasını ifade eder. Son durumda, doğrudan kanal durumu, S_n durumundan S_k durumuna geçmiş ve tekrar gönderim k 'inci UKK modunda gerçekleştirilmiştir.

Senaryo II işbirlikli gönderim I için izgesel verimlilik ifadesi ise,

$$\begin{aligned}
 IV_{CT1}^{(II)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) \left[R_n (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
 & + A_n(\bar{\gamma}_{SD}) (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) \left(\frac{R_j R_n}{R_j + R_n} \right) (1 - A_j(\bar{\gamma}_{RD})) \cdots \\
 & \left. + A_n(\bar{\gamma}_{SD}) A_n(\bar{\gamma}_{SR}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} \left(\frac{R_k R_n}{R_k + R_n} \right) (1 - A_k(\bar{\gamma}_{SD})) \right] \quad (5.34)
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 5.34'teki izgesel verimlilik ifadesinde parantez içindeki ilk terim, ilk gönderimde n 'inci UKK modunda gönderilerek başarılı alınan bir paketin katkısını, ikinci terim, tekrar gönderimin röle tarafından j 'inci UKK modunda gerçekleştirildiği durumda başarılı iletilen bir paketin katkısını ve son terim ise tekrar gönderimin kaynak kullanıcı tarafın-

dan k 'ninci UKK modunda gerçekleştirildiği durumda başarılı alınan bir paketin katkısını ifade eder.

5.2.3 İşbirlikli Gönderim II

Senaryo II işbirlikli gönderim II yönteminde, işbirlikli gönderim I yönteminden farklı olarak, tekrar gönderimlerin doğrudan kanalın derin sönümlemeye olduğu hallerde, röle kullanıcısı tarafından yapılması amaçlanmaktadır. Bunun dışındaki ayrıntılar ile paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadelerini elde etmek için kullanılacak ortalama hata olasılıkları önceki bölümlerde bahsedildiğinden dolayı tekrarlanmayacaktır.

Senaryo II İşbirlikli gönderim II yönteminde bir paket için ortalama kayıp olasılığı,

$$\begin{aligned}
 PKO_{CT2}^{(II)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \left[\sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T(n)} A_k(\bar{\gamma}_{SD}) \cdots \right. \\
 & \left. + P_{n,0}^{T(n)} A_n(\bar{\gamma}_{SR}) A_0(\bar{\gamma}_{SD}) + P_{n,0}^{T(n)} (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 A_j(\bar{\gamma}_{RD}) \right] \quad (5.35)
 \end{aligned}$$

olarak elde edilebilir.

Eşitlik 5.35'te doğrudan kanalın S_n durumunda olmasına istinaden n 'ninci UKK modunda gönderilen ilk gönderim başarısız olmuştur. Buna karşılık parantez içindeki ilk terim, doğrudan kanal durumunun derin sönümlemeye olmadığı durumlarda, tekrar gönderimin yine kaynak tarafından, S_k kanal durumunda yapıldığı ancak başarısız olduğu durumu ifade eder. İkinci terim, doğrudan kanal durumunun derin sönümlemeye olduğu ve rölenin ilk gönderimi hatasız alamadığı durumda, tekrar gönderimin yine kaynak tarafından, S_0 kanal durumunda yapılması sonucu başarısız alınan paketi ifade eder. Parantez içindeki son terim ise doğrudan kanalın derin sönümlemeye olduğu ve rölenin işbirliğine dahil olması durumunda, röle kanalı üzerinden S_j kanal durumunda gönderilen paketin başarısız alınması durumunu ifade eder. Böylelikle, bir paketin kayıp olarak ilan edilmesi için oluşabilecek tüm durumlar kapsanmış olur.

İzgesel verimlilik ifadesi ise

$$\begin{aligned}
IV_{CT2}^{(II)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) \left[R_n(1 - A_n(\bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
& + A_n(\bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_i^{(n)}} \left(\frac{R_k R_n}{R_k + R_n} \right) (1 - A_k(\bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
& + A_n(\bar{\gamma}_{SD}) P_{n,0}^{T_i^{(n)}} A_n(\bar{\gamma}_{SR}) \left(\frac{R_0 R_n}{R_0 + R_n} \right) (1 - A_0(\bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
& \left. + A_n(\bar{\gamma}_{SD}) P_{n,0}^{T_i^{(n)}} (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 \left(\frac{R_j R_n}{R_j + R_n} \right) (1 - A_j(\bar{\gamma}_{RD})) \right] \quad (5.36)
\end{aligned}$$

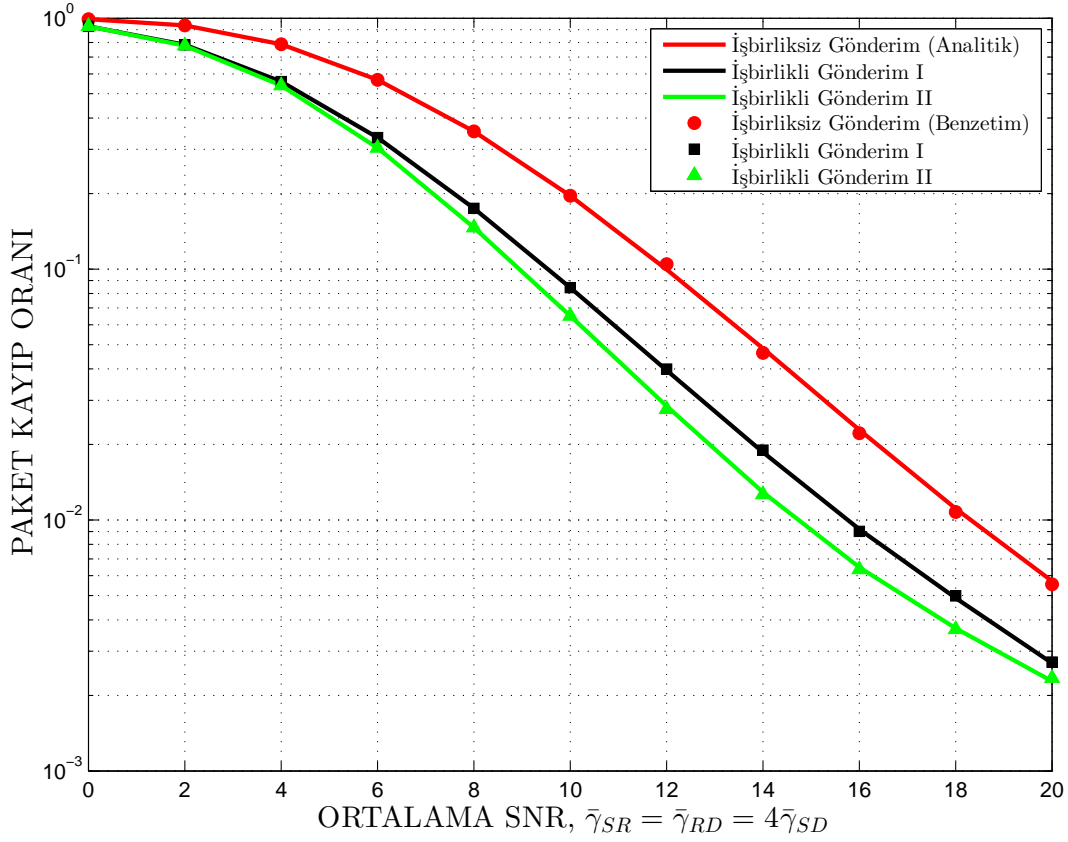
olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 5.36'da parantez içindeki ilk terim, ilk gönderimde hatasız alınan paketin katkısını, ikinci terim, doğrudan kanal durumunun S_0 'dan farklı olduğu durumda tekrar gönderimin kaynak tarafından gerçekleştirildiği durumda başarılı olarak alınan paketin katkısını, üçüncü terim, doğrudan kanal durumunun S_0 olmasına rağmen rölenin işbirliğine dahil olamadığı durumda kaynak tarafından gönderilen bir paketin katkısını, son terim ise tekrar gönderimin röle tarafından yapıldığı durumda başarılı alınan bir paketin katkısını ifade eder.

Şekil 5.4'te görüldüğü gibi paket kayıp oranları için elde edilen benzetim ve analitik sonuçlar örtüşmektedir. Üç farklı gönderim yöntemine ait izgesel verimlilik sonuçları hem analitik çözüm hem de benzetim yöntemiyle Şekil 5.5'teki gibi elde edilmiştir.

5.3 Senaryo III

Bu senaryoda, önceki iki yöntemden farklı olarak, uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemi devre dışı bırakılmıştır. Bu nedenle, kanalın zamanla değişiminden bağımsız olarak, paket gönderimleri Çizelge 4.1'de belirtilen beş farklı UKK modundan tercih edilen birisi kullanılarak yapılacaktır. Dolayısıyla kanal durumlarından bağımsız olarak her durumda aynı UKK modu ile gönderim yapılacaktır. Bunun dışında Senaryo III'te, Senaryo I'de olduğu gibi, alıcıda hatalı olduğu tespit edilen ilk gönderim, tekrar gönderimle birleş-



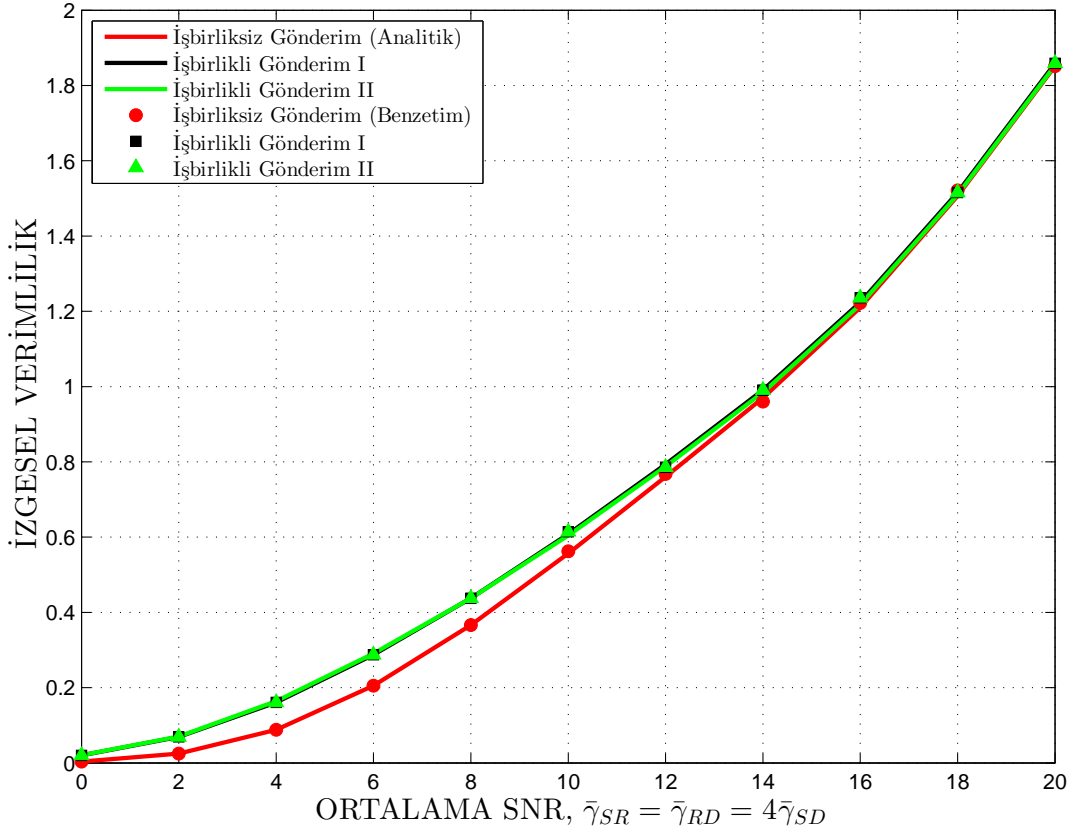
Şekil 5.4. Senaryo II için üç farklı gönderim yönteminin paket kayıp oranlarının analitik ve benzetim sonuçları

tilirmek üzere saklanır. İlk gönderim ve tekrar gönderim Chase birleştirme yöntemiyle birleştirilir.

5.3.1 İşbiriksiz Gönderim

İşbiriksiz gönderim yönteminde, paketler kanal durumundan bağımsız olarak önceden belirlenmiş bir UKK modunda gönderilir. Bu gönderimin başarısız olması durumunda, hatalı olduğu tespit edilen paket alıcıda saklanır ve tekrar gönderim yine aynı UKK modunda yapılır. İki gönderim alıcıda birleştirilerek çözülmeye çalışılır. Paketin hatasız çözülmesi halinde yeni paketin gönderimi başlar, aksi durumda paket kayıp olarak ilan edilir.

Senaryo III işbiriksiz gönderim yöntemi için paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifa-



Şekil 5.5. Senaryo II için üç farklı gönderim yönteminin izgesel verimliliklerinin analitik ve benzetim sonuçları

delerini elde edebilmek için, seçilmiş UKK modunda gönderilen bir paketin ilk gönderiminde ortalama hatalı olma olasılığı

$$A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} PHO_x(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad (5.37)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 5.37, beş farklı UKK modu arasından, UKK mod x seçilmiş olduğu durumda, S_n doğrudan kanal durumunda yapılan ilk gönderimin ortalama hatalı olma olasılığını ifade eder. Eşitlik 5.37'yi değerlendirmek için üç farklı durum göz

önünde bulundurulmalıdır. Bu durumlardan ilki,

$$\begin{aligned}
A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} PHO_x(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad , \Gamma_{n+1} \leq \gamma_{px} \quad (5.38) \\
&= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \\
&= 1
\end{aligned}$$

olarak ifade edilir. Bu durumda gönderilen paketler kesinlikle hatalı olarak kabul edilir. İkinci durum,

$$\begin{aligned}
A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \left[\int_{\Gamma_n}^{\gamma_{px}} p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad \dots \quad (5.39) \right. \\
&\quad \left. + \int_{\gamma_{px}}^{\Gamma_{n+1}} a_x \exp(-g_x \gamma_{SD}) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \right] \quad , \Gamma_n \leq \gamma_{px} < \Gamma_{n+1}
\end{aligned}$$

olarak ifade edilir ve nihai olarak Eşitlik 5.40'taki ifadeye dönüşür.

$$A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) = \left[\frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} - \frac{g_x \bar{\gamma}_{SD} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) + a_x \exp\left(-\left(g_x + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \Gamma_{n+1}\right)}{(g_x \bar{\gamma}_{SD} + 1) P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \right] \quad (5.40)$$

Üçüncü durum ise,

$$A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) = \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} a_x \exp(-g_x \gamma_{SD}) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} \quad , \gamma_{px} < \Gamma_n \quad (5.41)$$

olarak ifade edilir ve açık çözümü

$$A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) = a_x \left[\frac{\exp\left(-\left(g_x + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \Gamma_n\right) - \exp\left(-\left(g_x + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \Gamma_{n+1}\right)}{(g_x \bar{\gamma}_{SD} + 1) P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \right] \quad (5.42)$$

olarak elde edilir.

Senaryo III işbiriksiz gönderimde, ilk gönderimde başarılı alınamayan bir paketin tekrar gönderimi yine kaynak kullanıcı tarafından yapılır ve tekrar gönderim alıcıda ilk gönderimle birleştirilerek çözülür. UKK mod x seçilerek gönderilen bir paketin, ilk gönderiminin S_n , tekrar gönderimin S_k kanal durumunda olması halinde, alıcıda elde edilen birleştirilmiş paketin ortalama hatalı olma olasılığı $B_x(S_n, S_k)$ olarak gösterilir ve Eşitlik 5.43'teki gibi ifade edilir.

$$B_x(S_n, S_k) = \frac{1}{P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \int_{\Gamma_n + \Gamma_k}^{\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}} PHO_x(\gamma_o) p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \quad (5.43)$$

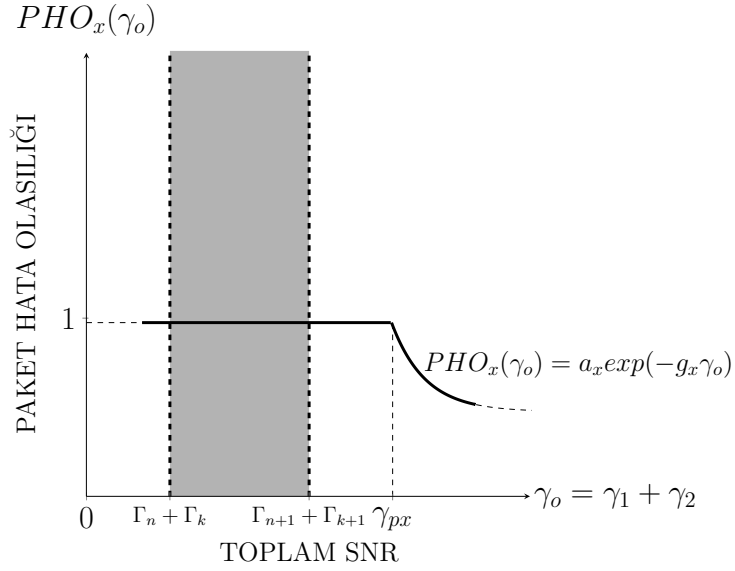
Eşitlik 5.43'te yer alan $p_{\gamma_o}(\gamma_o)$ ve $P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k)$ ifadeleri, ilinti katsayısı $\rho = J_0(2\pi f_d T_f^{(x)})$ olmak kaydıyla Eşitlik 5.5'te ve Eşitlik 5.11'de olduğu gibidir. İki gönderim arasında geçen süre, UKK mod x için paket süresi olan $T_f^{(x)}$ olarak ifade edilebilir.

$B_x(S_n, S_k)$ ifadesini elde etmek için üç farklı durum göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumlardan ilki Şekil 5.6'da gösterildiği gibidir. Şekil 5.6'da gösterilen durum için $B_x(S_n, S_k)$ ifadesi,

$$\begin{aligned} B_x(S_n, S_k) &= \frac{1}{P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \int_{\Gamma_n + \Gamma_k}^{\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}} p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o, \Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1} \leq \gamma_{px} \\ &= 1 \end{aligned} \quad (5.44)$$

olarak bulunur.

İkinci durum ise, Şekil 5.7'de gösterildiği gibidir ve $\Gamma_n + \Gamma_k \leq \gamma_{px} < \Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}$ koşuluyla,



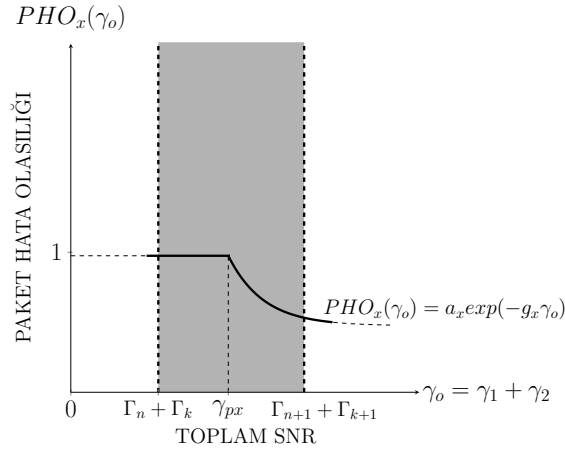
Şekil 5.6. Senaryo III işbirliksiz gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1} \leq \gamma_{px}$ koşulu)

$B_x(S_n, S_k)$ ifadesi,

$$\begin{aligned}
 B_x(S_n, S_k) &= \frac{1}{P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \int_{\Gamma_{n+\Gamma_k}}^{\Gamma_{n+1}+\Gamma_{k+1}} PHO_x(\gamma_o) p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \quad (5.45) \\
 &= \frac{1}{P_{\tilde{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \left[\int_{\Gamma_{n+\Gamma_k}}^{\gamma_{px}} p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o + \int_{\gamma_{px}}^{\Gamma_{n+1}+\Gamma_{k+1}} a_x \exp(-g_x \gamma_o) p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \right]
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.

Şekil 5.7'de belirtilen durumun açık çözümü ise



Şekil 5.7. Senaryo III işbirliksiz gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK Mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_n + \Gamma_k \leq \gamma_{px} < \Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}$ koşulu)

$$\begin{aligned}
B_x(S_n, S_k) &= \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \left[\frac{1+\rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right) \right) \dots \right. & (5.46) \\
&- \frac{(1-\rho)}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right) \right) \dots \\
&- \frac{1+\rho}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_n + \Gamma_k}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right) \right) \dots \\
&+ \frac{(1-\rho)}{2\rho} \left(1 - \exp\left(-\frac{\Gamma_n + \Gamma_k}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right) \right) \dots \\
&+ \frac{(1+\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1+\rho))} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right) \dots \\
&- \frac{a_x(1+\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1+\rho))} \exp\left(-(\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}) \left(\frac{g_x\bar{\gamma}_o(1+\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right)\right) \dots \\
&- \frac{(1-\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1-\rho))} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right) \dots \\
&+ \left. \frac{a_x(1-\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1-\rho))} \exp\left(-(\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}) \left(\frac{g_x\bar{\gamma}_o(1-\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right)\right) \right]
\end{aligned}$$

olarak bulunur.

İşbirliksiz gönderimde $B_x(S_n, S_k)$ ifadesi için son durum ise $\gamma_{px} < \Gamma_n + \Gamma_k$ koşuluyla, Şekil 5.8'de gösterildiği gibi gerçekleşir ve Eşitlik 5.47'deki gibi ifade edilir.

$$B_x(S_n, S_k) = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_o}(S_n; S_k)} \int_{\Gamma_n + \Gamma_k}^{\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}} a_x \exp(-g_x \gamma_o) p_{\gamma_o}(\gamma_o) d\gamma_o \quad (5.47)$$

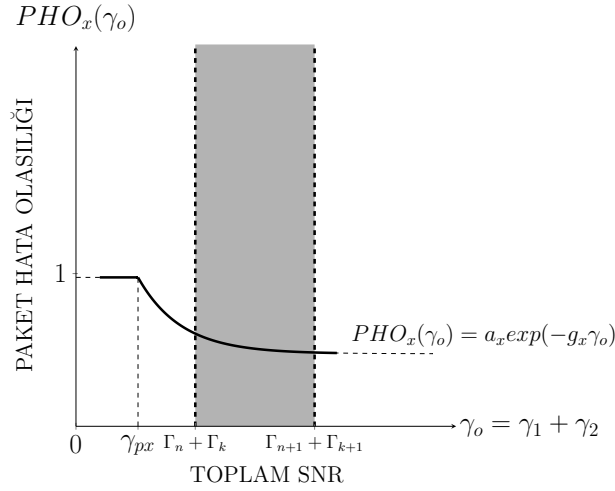
Bu ifadenin açık çözümü ise Eşitlik 5.48'deki gibi olur. Senaryo III işbirliksiz gönderim yönteminin paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadelerini elde etmek için $A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD})$ ve $B_x(S_n, S_k)$ ifadeleri yeterlidir.

$$\begin{aligned} B_x(S_n, S_k) &= \left[\frac{a_x(1+\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1+\rho))} \exp\left(-(\Gamma_n + \Gamma_k) \left(\frac{g_x\bar{\gamma}_o(1+\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right)\right) \right] \dots \quad (5.48) \\ &- \frac{a_x(1-\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1-\rho))} \exp\left(-(\Gamma_n + \Gamma_k) \left(\frac{g_x\bar{\gamma}_o(1-\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right)\right) \dots \\ &- \left[\frac{a_x(1+\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1+\rho))} \exp\left(-(\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}) \left(\frac{g_x\bar{\gamma}_o(1+\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1+\rho)}\right)\right) \right] \dots \\ &+ \frac{a_x(1-\rho)}{2\rho(1+g_x\bar{\gamma}_o(1-\rho))} \exp\left(-(\Gamma_{n+1} + \Gamma_{k+1}) \left(\frac{g_x\bar{\gamma}_o(1-\rho)+1}{\bar{\gamma}_o(1-\rho)}\right)\right) \end{aligned}$$

Bu ifadelerin elde edilmesinden sonra, işbirliksiz gönderim yöntemi için paket kayıp oranı ifadesi Eşitlik 5.49'daki gibi elde edilebilir.

$$PKO_{DT}^{(III)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T(x)} B_x(S_n, S_k) \quad (5.49)$$

Eşitlik 5.49'da, paket gönderimleri için UKK modu x seçilmişken, bir paketin ilk gönderimi altı farklı kanal durumundan, S_n durumunda yapıp hatalı olmuştur. İlk gönderim



Şekil 5.8. Senaryo III işbirliksiz gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\gamma_{px} < \Gamma_n + \Gamma_k$ koşulu)

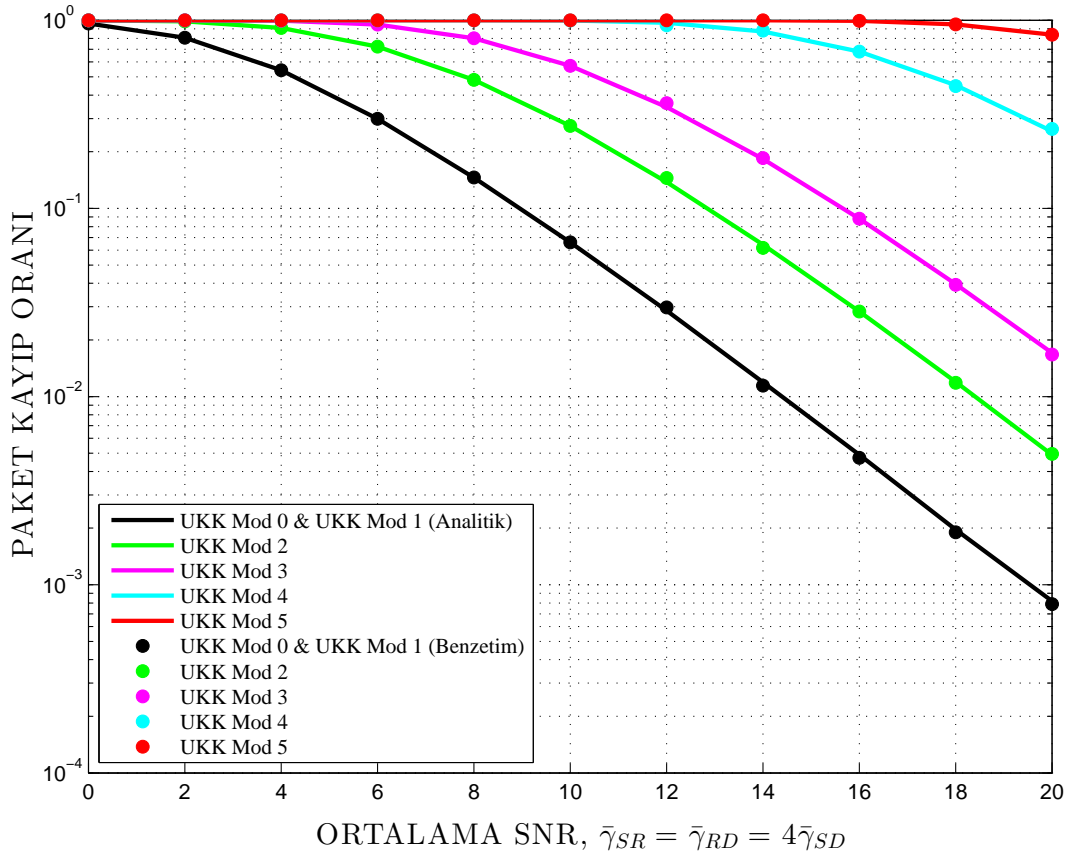
sırasında geçen $T_f^{(x)}$ süre sonra ise kanal durumu S_k olduğunda tekrar gönderim yapılmış olup, bu iki paketin alıcıda birleştirilerek çözülmesi de hatasız sonuçlanmamıştır. Senaryo III işbirliksiz gönderim yöntemi için izgesel verimlilik ifadesi ise,

$$IV_{DT}^{(III)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_x \left[(1 - A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} (1 - B_x(S_n, S_k)) \right] \quad (5.50)$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlik 5.50'de, parantez içindeki ilk terim, ilk gönderimde başarılı olarak alınan bir paketin izgesel verimliliğe katkısını R_x , tekrar gönderimden sonra başarılı olarak alınan bir paketin katkısını ise $\frac{R_x}{2}$ olarak gösterir. Senaryo III'teki tüm gönderim yöntemlerinde önceden belirlenmiş tek bir UKK modu kullanıldığından kanal durumundan bağımsız olarak tüm gönderimlerde aynı veri hızı oranı geçerlidir.

5.3.2 İşbirlikli Gönderim I

Senaryo III işbirlikli gönderim I yönteminde, rölenin işbirliğine dahil olması koşulu diğer senaryolarda olduğu gibidir ve bu nedenle tekrarlanmayacaktır. Buna karşın, tekrar gönderimin röle kullanıcısı tarafından yapılması halinde, alıcıda paketlerin birleştirilmesi sonucunun başarısız olmasının ortalama olasılıkları değişiklik gösterecektir.

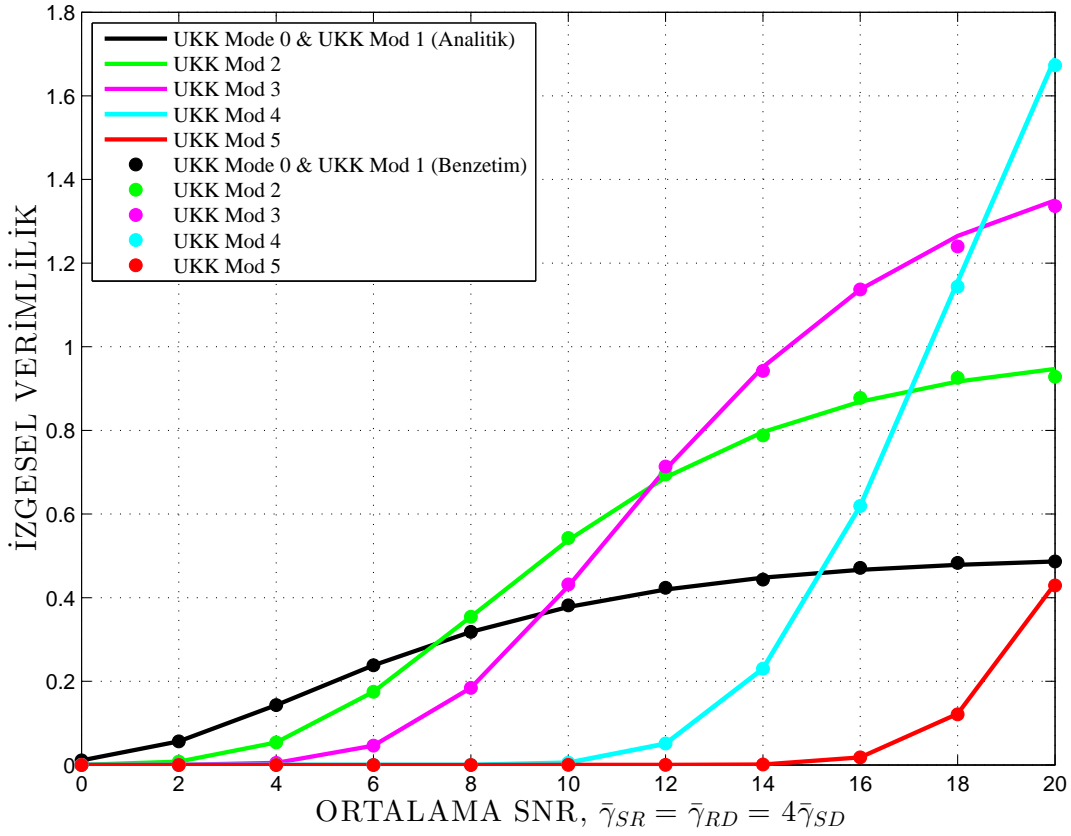


Şekil 5.9. Senaryo III işbiriksiz gönderim yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları

Kaynak kullanıcı tarafından gerçekleştirilen ilk gönderimin ortalama hatalı olma olasılığı ise Eşitlik 5.38’de, Eşitlik 5.40’ta ve Eşitlik 5.42’de olduğu gibi işbirlikli gönderim I yöntemi için de geçerlidir. Aynı şekilde, tekrar gönderimin kaynak kullanıcı tarafından gerçekleştirildiği durumda, Eşitlik 5.44’te, 5.46’da ve 5.48’de ifade edilen ortalama hata olasılıkları işbirlikli gönderim için de geçerlidir.

İlk gönderimin S_n kanal durumunda kaynak kullanıcı tarafından, tekrar gönderimin ise röle kullanıcısı tarafından yapılması halinde, alıcıda ortalama hatalı olasılığı $C_x(S_n)$ olarak Eşitlik 5.51’deki gibi ifade edilir.

$$C_x(S_n) = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \int_0^\infty \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} PHO_x(\gamma_{SD} + \gamma_{RD}) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \quad (5.51)$$



Şekil 5.10. Senaryo III işbirliksiz gönderim yönteminde tüm UKK modlar için izgesel verimlilik sonuçları

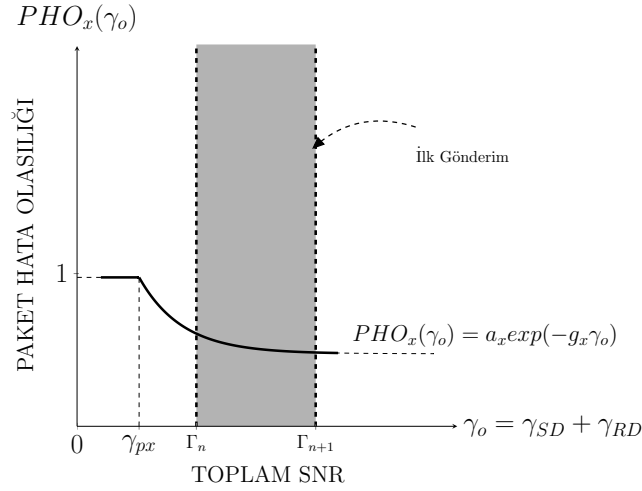
Bu ifadenin çözümü için üç farklı durum göz önünde bulundurulmalıdır. Bunlardan ilki, $\gamma_{px} < \Gamma_n$ koşuluyla Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Şekil 5.11’de belirtilen durumda çözüm,

$$C_x(S_n) = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \int_0^{\infty} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} a_x \exp(-g_x(\gamma_{SD} + \gamma_{RD})) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \quad (5.52)$$

olur. Bu ifadenin açık çözümü ise

$$C_x(S_n) = \frac{a_x \left[\exp\left(-\Gamma_n \left(g_x + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right)\right) - \exp\left(-\Gamma_{n+1} \left(g_x + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right)\right) \right]}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) (1 + g_x \bar{\gamma}_{SD}) (1 + g_x \bar{\gamma}_{RD})} \quad (5.53)$$

olarak bulunur.



Şekil 5.11. Senaryo III işbirlikli gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\gamma_{px} < \Gamma_n$ koşulu)

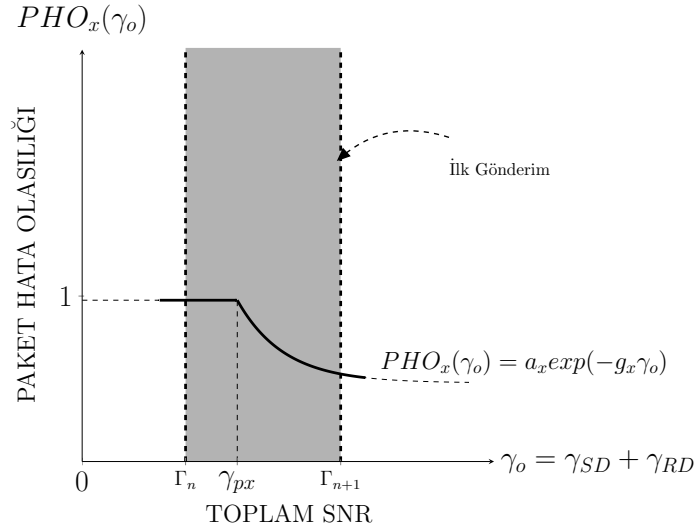
Şekil 5.12'de gösterilen ikinci durumda ise $\Gamma_n \leq \gamma_{px} < \Gamma_{n+1}$ koşuluyla,

$$\begin{aligned}
C_x(S_n) = & \frac{1}{P_{\gamma_{SD}}(n)} \left[\int_0^{\gamma_{px}-\gamma_{SD}} \int_{\Gamma_n}^{\gamma_{px}} p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \cdots \right. \\
& + \int_{\gamma_{px}-\gamma_{SD}}^{\infty} \int_{\Gamma_n}^{\gamma_{px}} a_x \exp(-g_x (\gamma_{SD} + \gamma_{RD})) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \cdots \\
& \left. + \int_0^{\infty} \int_{\gamma_{px}}^{\Gamma_{n+1}} a_x \exp(-g_x (\gamma_{SD} + \gamma_{RD})) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \right] \quad (5.54)
\end{aligned}$$

olarak ifade etmek mümkündür. Bu durumda Eşitlik 5.54'ün açık çözümü ise

$$\begin{aligned}
C_x(S_n) = & \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \left[\exp\left(-\frac{\Gamma_n}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) - \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \dots \right. \\
& - \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\Gamma_n \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD}\bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \dots \\
& + \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\gamma_{px} \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD}\bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \dots \\
& + \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{(1 + g_x \bar{\gamma}_{RD})(\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD})} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\Gamma_n \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD}\bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \dots \\
& - \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{(1 + g_x \bar{\gamma}_{RD})(\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD})} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\gamma_{px} \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD}\bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \dots \\
& \left. + \frac{1}{(1 + g_x \bar{\gamma}_{SD})(1 + g_x \bar{\gamma}_{RD})} \left(\exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) - a_x \exp\left(-\Gamma_{n+1} \left(g_x + \frac{1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right)\right) \right) \right] \quad (5.55)
\end{aligned}$$

olarak elde edilir.



Şekil 5.12. Senaryo III işbirlikli gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_n \leq \gamma_{px} < \Gamma_{n+1}$ koşulu)

Son durum ise, Şekil 5.13'te gösterilen $\gamma_{px} > \Gamma_{n+1}$ koşulunun sağlandığı durumdur. Bu durumda $C_x(S_n)$ ifadesi Eşitlik 5.56'daki gibi ifade edilir.

$$C_x(S_n) = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \left[\int_0^{\gamma_{px} - \bar{\gamma}_{SD}} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \dots \right. \\ \left. + \int_{\gamma_{px} - \bar{\gamma}_{SD}}^{\infty} \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} a_x \exp(-g_x(\gamma_{SD} + \gamma_{RD})) p_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) p_{\gamma_{RD}}(\gamma_{RD}) d\gamma_{SD} d\gamma_{RD} \right] \quad (5.56)$$

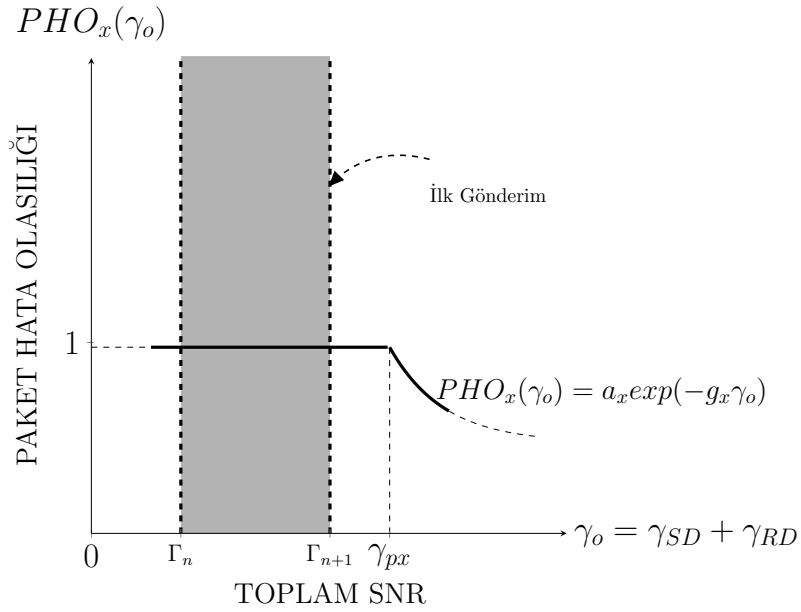
Bu durumda Eşitlik 5.56'daki ifadenin açık çözümü ise,

$$C_x(S_n) = \frac{1}{P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n)} \left[\exp\left(-\frac{\Gamma_n}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) - \exp\left(-\frac{\Gamma_{n+1}}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) \dots \right. \\ - \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\Gamma_n \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD} \bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \dots \\ + \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\Gamma_{n+1} \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD} \bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \dots \\ + \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{(1 + g_x \bar{\gamma}_{RD})(\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD})} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\Gamma_n \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD} \bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \dots \\ - \frac{\bar{\gamma}_{RD}}{(1 + g_x \bar{\gamma}_{RD})(\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD})} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \exp\left(-\Gamma_{n+1} \left(\frac{\bar{\gamma}_{RD} - \bar{\gamma}_{SD}}{\bar{\gamma}_{SD} \bar{\gamma}_{SR}}\right)\right) \right] \quad (5.57)$$

İşbirlikli gönderim yöntemlerinde bir başka önemli ifade ise ilk gönderimin röle tarafından hatalı olarak çözülmesinin ortalama olasılığıdır. Bu ifade ise,

$$A_x(\bar{\gamma}_{SR}) = \int_0^{\infty} PHO_x(\gamma_{SR}) p_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR} \quad (5.58) \\ = \int_0^{\gamma_{px}} p_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR} + \int_{\gamma_{px}}^{\infty} a_x \exp(-g_x \gamma_{SR}) p_{\gamma_{SR}}(\gamma_{SR}) d\gamma_{SR}$$

şeklinde gösterilebilir.



Şekil 5.13. Senaryo III işbirlikli gönderimde tekrar gönderim sonrası toplam SNR değerinin alabileceği değer aralığı, γ_o ve UKK mod x için paket hata olasılığı fonksiyonu ($\Gamma_{n+1} < \gamma_{px}$ koşulu)

Eşitlik 5.58'in açık çözümü ise

$$A_x(\bar{\gamma}_{SR}) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) + \frac{1}{(1 + g_x \bar{\gamma}_{SR})} \exp\left(-\frac{\gamma_{px}}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \quad (5.59)$$

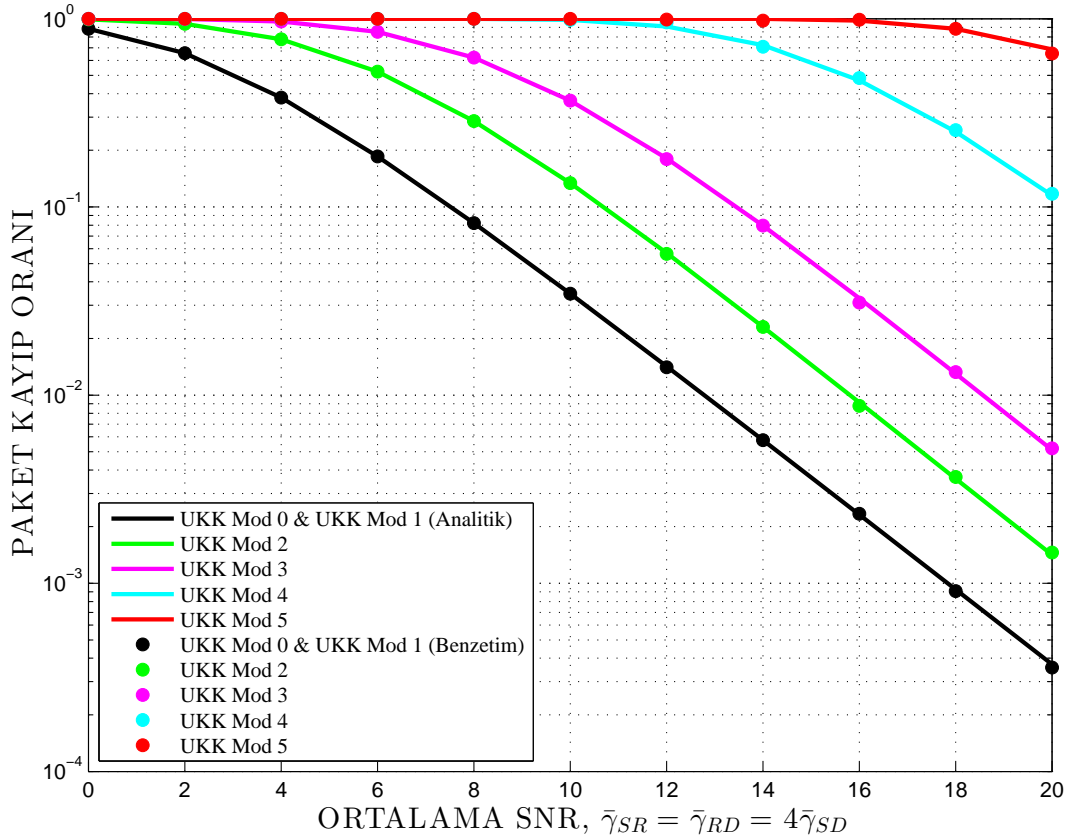
olarak elde edilir.

Bu ifadelerin bulunmasından sonra işbirlikli gönderim için paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadeleri bulunabilir. Senaryo III işbirlikli gönderim I yöntemi için paket kayıp oranı,

$$PKO_{CT1}^{(III)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \left[A_x(\bar{\gamma}_{SR}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} B_x(S_n, S_k) \cdots \right. \\ \left. + (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) C_x(S_n) \right] \quad (5.60)$$

olarak ifade edilir. Eşitlik 5.60'da, UKK modu x ile S_n doğrudan kanal durumunda gön-

derilen bir paket hatasız alınamamıştır. Parantez içindeki ilk terim, rölenin işbirliğine dahil olmadığı durumda, tekar gönderimin kaynak tarafından yapılmasına karşılık gelir. Parantez içindeki ikinci terim ise tekrar gönderimin röle tarafından gerçekleştirildiği duruma karşılık gelir. Her iki durumda da alıcıda, iki gönderim birleştirilerek çözülmeye çalışılmış ancak başarısızlıkla sonuçlanmıştır. Dolayısıyla paket kayıp olarak ilan edilmiştir. Şekil 5.14'te, tüm UKK modları için elde edilmiş analitik ve benzetim sonuçları görülebilir.



Şekil 5.14. Senaryo III işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları

Senaryo III işbirlikli gönderim I yöntemi için izgesel verimlilik ifadesi ise,

$$\begin{aligned}
IV_{CT1}^{(III)} &= \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_x \left[(1 - A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
&+ \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} (1 - B_x(S_n, S_k)) \cdots \\
&\left. + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) (1 - C_x(S_n)) \right]
\end{aligned} \tag{5.61}$$

olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 5.61'de yer alan izgesel verimlilik ifadesinde, parantez içindeki ilk terim, ilk gönderimde başarılı olarak elde edilen bir paketin izgesel verimliliğe katkısını, ikinci terim tekrar gönderimin kaynak tarafından yapılması durumunda başarılı alınan bir paketin katkısını ve son terim ise tekrar gönderimin röle tarafından yapılması halinde başarılı alınan bir paketin katkısını ifade eder. Senaryo III'te tüm gönderimler kanal durumundan bağımsız olarak tek bir UKK modu seçilerek yapıldığından paketlerin veri hızı oranı, R_x , tüm gönderimler için aynıdır. Tekrar gönderimlerde başarılı olarak alınan bir paketin katkısı dolayısıyla $\frac{R_x}{2}$ olarak ifade edilir.

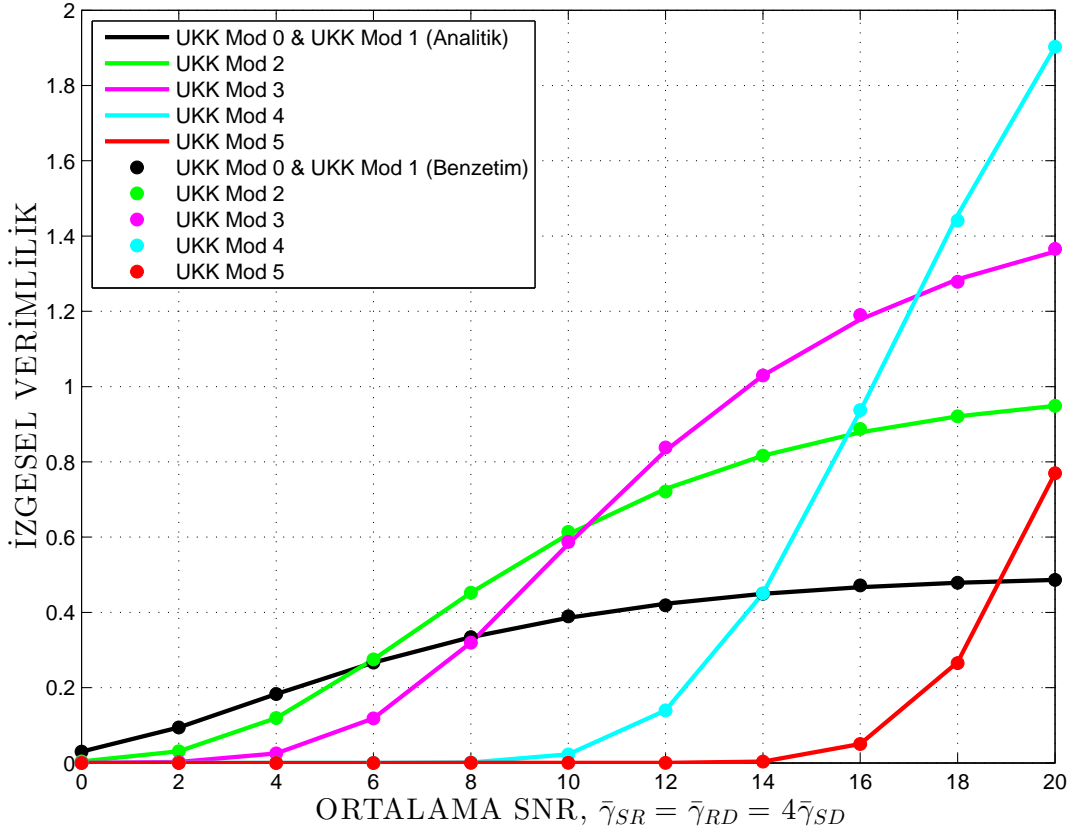
5.3.3 İşbirlikli Gönderim II

Senaryo III işbirlikli gönderim II yöntemi için paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadelerini elde etmek için diğer gönderim yöntemlerinde ifade edilen ortalama hata olasılıkları yeterli olacaktır. Bu nedenle bu bölümde tekrarlanmayacaktır.

İşbirlikli gönderim II yöntemi için paket kayıp oranı ifadesi

$$\begin{aligned}
PKO_{CT2}^{(III)} &= \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \left[\sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} B_x(S_n, S_k) \cdots \right. \\
&\left. + P_{n,0}^{T_f^{(x)}} A_x(\bar{\gamma}_{SR}) B_x(S_n, S_0) + P_{n,0}^{T_f^{(x)}} (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) C_x(S_n) \right]
\end{aligned} \tag{5.62}$$

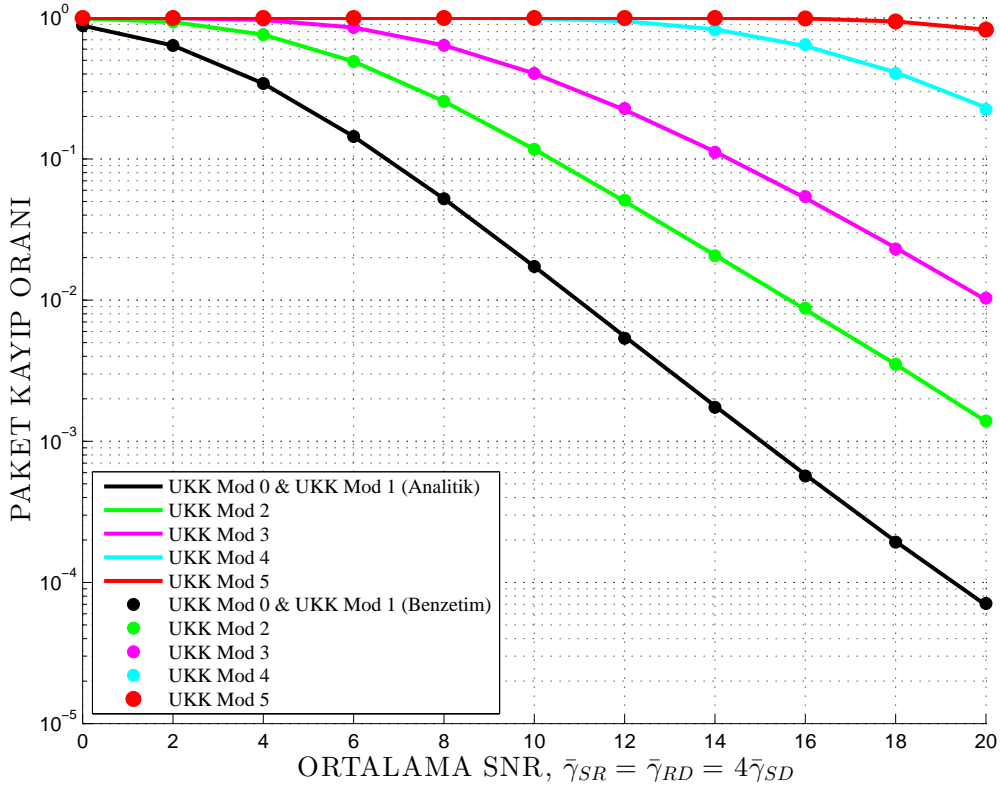
olarak yazılabilir.



Şekil 5.15. Senaryo III işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları

Eşitlik 5.62’de, UKK modu x ile S_n kanal durumunda ilk kez gönderilen bir paket, alıcıda hatasız çözülememiştir. Bu durumda, parantez içindeki ilk terim, doğrudan kanal durumunun S_0 ’dan farklı olduğunda tekrar gönderimin yine kaynak tarafından gerçekleştirildiği durumu ifade eder. İkinci terim, doğrudan kanal durumunun S_0 olduğu ancak rölenin işbirliğine dahil olmadığı durumda tekrar gönderimin yine kaynak tarafından gerçekleştirildiği durumu, son terim ise doğrudan kanal durumunun S_0 olduğu ve tekrar gönderimin röle tarafından gerçekleştirildiği durumu ifade eder. Üç durumda gerçekleşen tekrar gönderimler sonucunda paket hatasız olarak çözülemediğinden kayıp olarak ilan edilmiştir.

Senaryo III işbirlikli gönderim II yöntemi için izgesel verimlilik ifadesi ise Eşitlik 5.69’da



Şekil 5.16. Senaryo III işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları

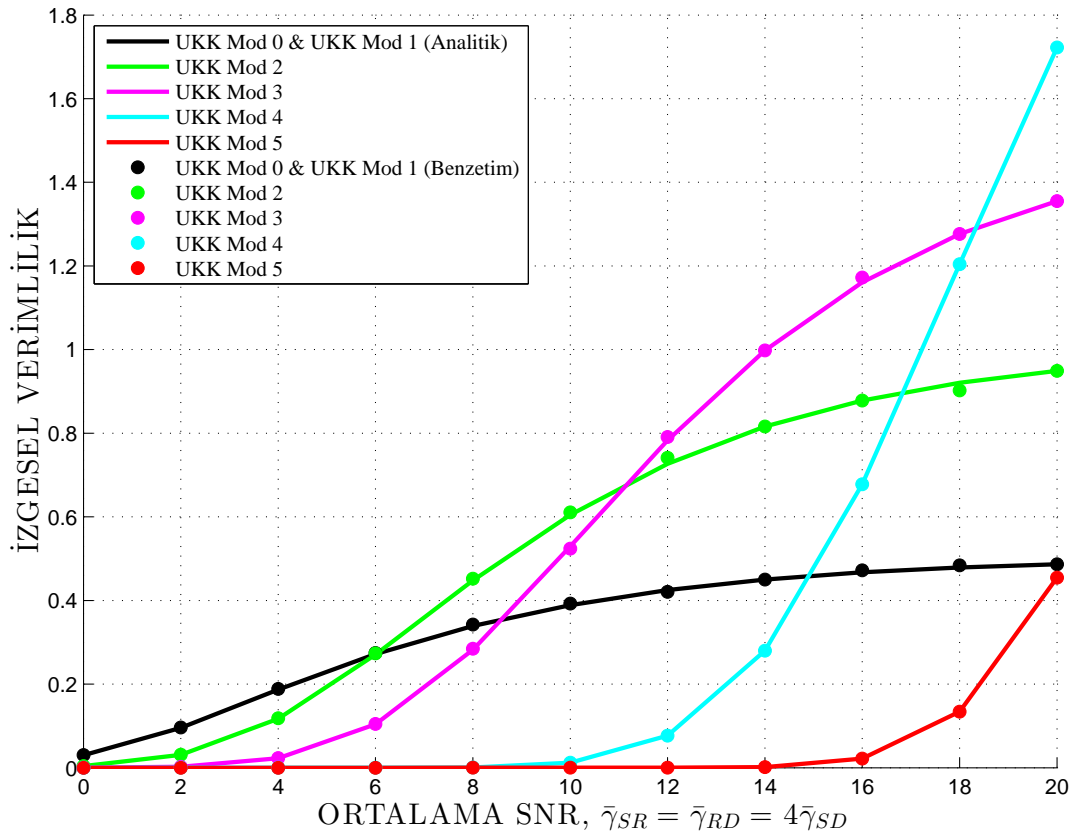
ifade edildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
IV_{CT2}^{(III)} &= \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_x \left[(1 - A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
&+ \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} (1 - B_x(S_n, S_k)) \cdots \\
&+ \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) P_{n,0}^{T_f^{(x)}} A_x(\bar{\gamma}_{SR}) (1 - B_x(S_n, S_0)) \cdots \\
&\left. + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) P_{n,0}^{T_f^{(x)}} (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) (1 - C_x(S_n)) \right] \quad (5.63)
\end{aligned}$$

Eşitlik 5.69'da parantez içinde yer alan ilk terim, ilk gönderimde başarılı olarak alınan

bir paketin izgesel verimliliğe katkısını $\frac{R_x}{2}$ olarak ifade eder. İkinci terim, tekrar gönderimin kaynak tarafından yapıldığı durumda başarılı alınan bir paketin katkısını, üçüncü terim ise doğrudan kanalın derin sönümlenmede olduğu ancak rölenin işbirliğine dahil olamadığı durumda tekrar gönderimin kaynak tarafından S_0 kanal durumunda gerçekleştirildiği zaman başarılı alınan bir paketin katkısını, son terim ise doğrudan kanalın derin sönümlenmede olup tekrar gönderimin röle tarafından yapıldığı durumda başarılı alınan bir paketin katkısını ifade eder. Tekrar gönderimlerde başarılı olarak elde edilen paketlerin izgesel verimliliğe katkıları $\frac{R_x}{2}$ olarak ifade edilmiştir.

İşbirlikli gönderim II yöntemi için paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik sonuçları Şekil 5.16'da ve Şekil 5.17'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.17. Senaryo III işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modlar için izgesel verimlilik sonuçları

5.4 Senaryo IV

Bu gönderim senaryosunda, diğer senaryolarda incelenen uyarlamalı kipleme - kodlama tekniği ile Chase birleştirme devre dışı bırakılmıştır. Dolayısıyla Senaryo III'te olduğu gibi önceden seçilmiş bir UKK modu ile iletişim yapılmaya çalışılır. Bir paket için yapılacak tüm gönderimler tek başlarına değerlendirilir.

5.4.1 İşbirliksiz Gönderim

İşbirliksiz gönderimde, bir paket kanal durumundan bağımsız olarak önceden belirlenmiş bir UKK modu ile işlenerek gönderilir. Paketin alıcıda hatalı alınması durumunda, tekrar gönderim yeni kanal durumunda aynı UKK modu ile tekrarlanır.

İşbirliksiz gönderim için paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadelerini elde etmek için, daha önce diğer gönderim senaryolarında elde edilmiş olan Eşitlik 5.38, Eşitlik 5.40 ve Eşitlik 5.42 ifadeleri yeterlidir.

Bu durumda, Senaryo IV işbirliksiz gönderim yöntemi için paket kayıp oranı

$$PKO_{DT}^{(IV)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} A_x(S_k, \bar{\gamma}_{SD}) \quad (5.64)$$

olarak ifade edilir.

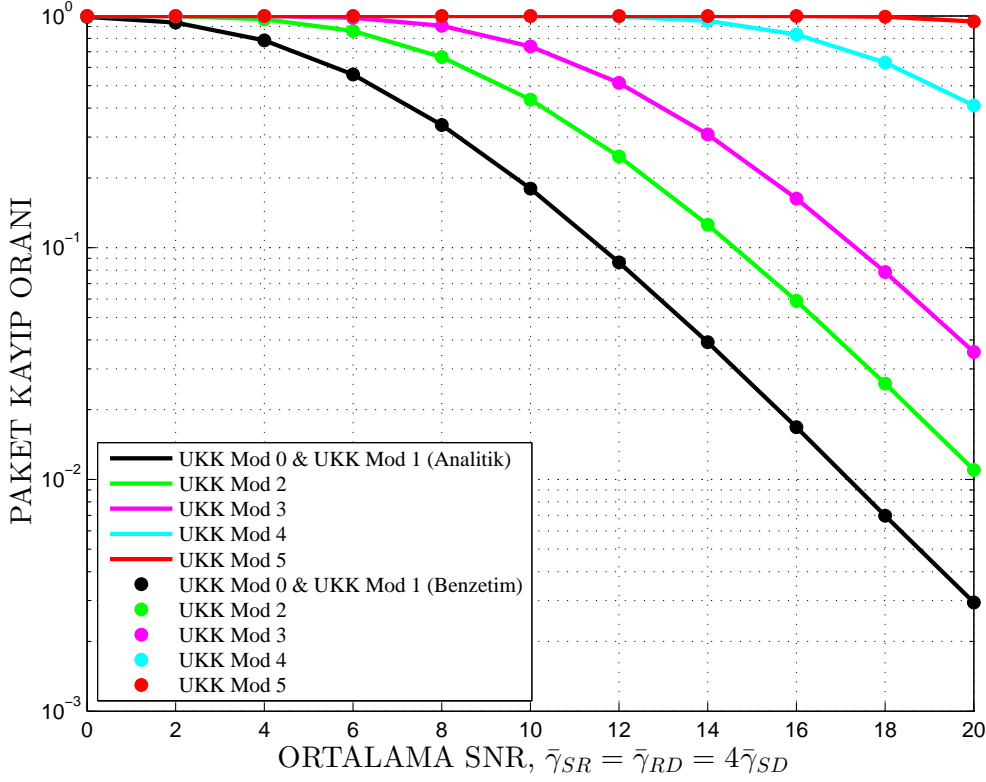
Eşitlik 5.64'te, gönderim yapılacak UKK modu x olarak belirlenmiş ve ilk gönderim S_n kanal durumunda, ikinci gönderim ise $T_f^{(x)}$ süre sonra S_k kanal durumunda yapılmış ancak paket hatasız iletilenmemiştir.

Aynı durumda izgesel verimlilik ifadesi ise

$$IV_{DT}^{(IV)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_x \left[(1 - A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\ \left. + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} (1 - A_x(S_k, \bar{\gamma}_{SD})) \right] \quad (5.65)$$

olarak ifade edilir.

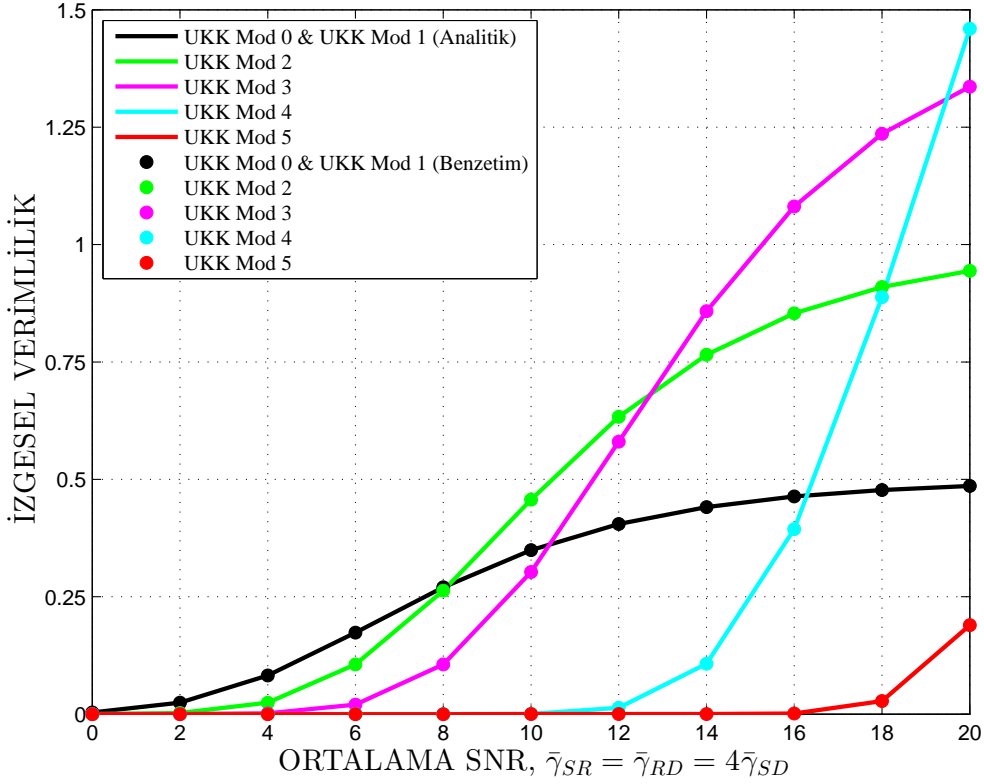
Eşitlik 5.65'teki ifadede, parantez içindeki ilk terim, ilk gönderimde başarılı alınan paketlerin izgesel verimliliğe katkısını R_x olarak, ikinci terim ise tekrar gönderimden sonra alınan bir paketin katkısını ise $\frac{R_x}{2}$ olarak ifade eder.



Şekil 5.18. Senaryo IV işbiriksiz gönderim yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları

5.4.2 İşbirlikli Gönderim I

Senaryo IV işbirlikli gönderim I yönteminde, paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadelerini elde etmek için daha önceki senaryolarda kullanılan Eşitlik 5.38, Eşitlik 5.40 ve Eşitlik 5.42 ifadeleri bu gönderim yöntemi içinde geçerli olacaktır. Bunun yanı sıra, rölenin tekrar gönderim yapması durumunda, alıcıdaki çözme işleminin ortalama hata olasılığı ise doğrudan kanal için elde edilen Eşitlik 5.37'ye benzer şekilde röle kanalı içinde uyarlanabilir. Bu durum $A_x(S_n, \bar{\gamma}_{RD})$ olarak ifade edilebilir ve UKK modu x ile işlenmiş bir paketin, $\bar{\gamma}_{RD}$ ortalama SNR değerine sahip bir kanaldan S_n kanal durumunda gönderilmesi sonucu hatalı olmasının ortalama değerini temsil eder.



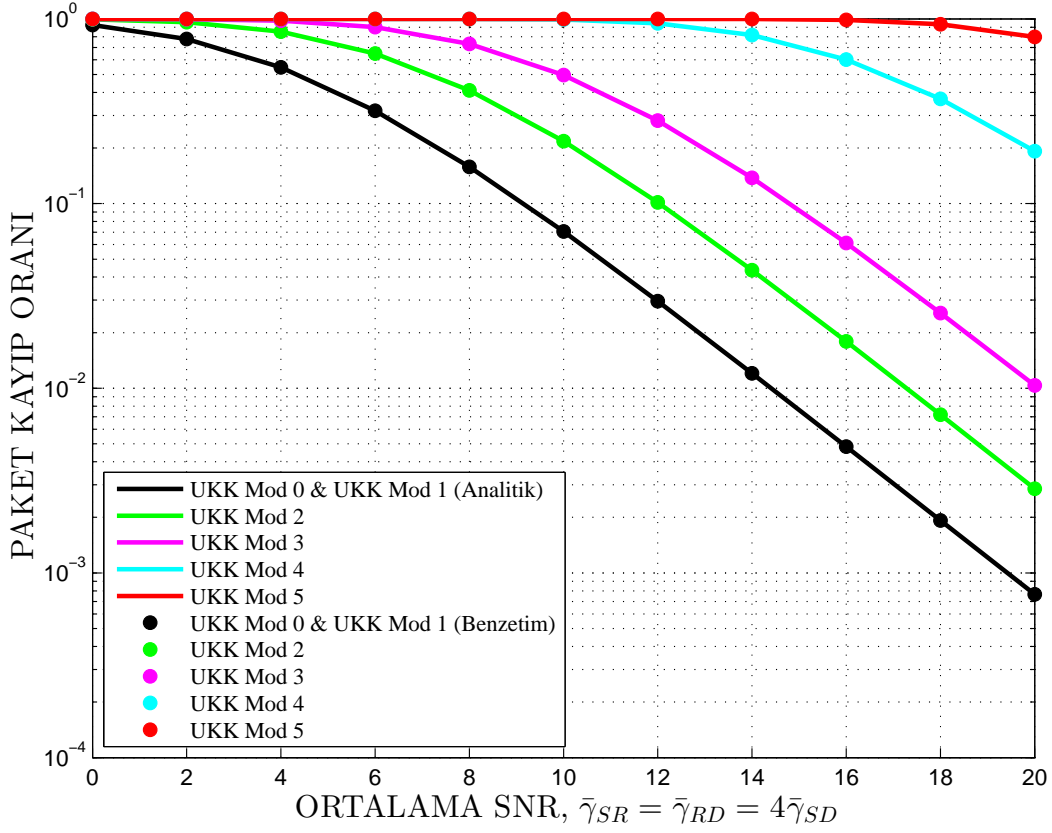
Şekil 5.19. Senaryo IV işbiriksiz gönderim yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları

Bu durumda, Senaryo IV işbirikli gönderim I yöntemi için paket kayıp oranı,

$$\begin{aligned}
 PKO_{CT1}^{(IV)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \left[A_x(\bar{\gamma}_{SR}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_r(x)} A_x(S_k, \bar{\gamma}_{SD}) \cdots \right. \\
 & \left. + (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) A_x(S_j, \bar{\gamma}_{RD}) \right] \quad (5.66)
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.

Eşitlik 5.66'da, UKK modu x seçilerek gönderilen bir paket gönderimi, S_n doğrudan kanal durumunda yapılan ilk gönderiminde başarısız olmuştur. Parantez içindeki ilk terimde, rölenin işbirliğine dahil olmadığı durumda, tekrar gönderimin yine kaynak tarafından S_k kanal durumunda yapılması ve hatasız iletimin gerçekleşmemesi ifade



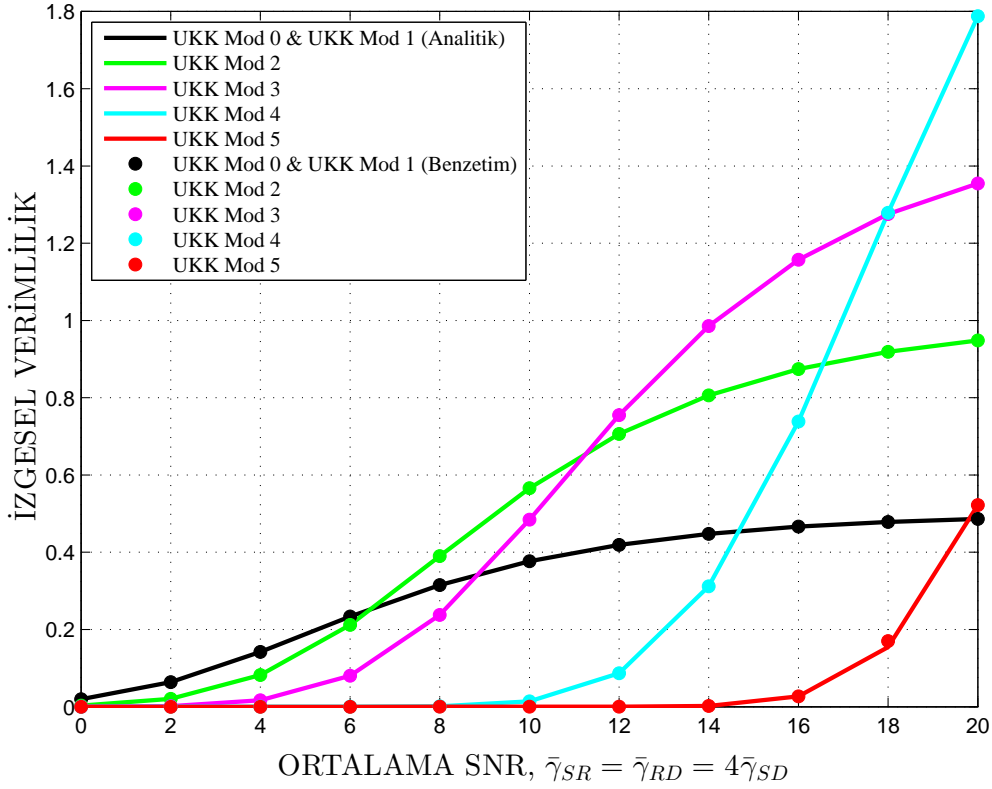
Şekil 5.20. Senaryo IV işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları

edilmiştir. İkinci terim ise, rölenin iş birliğine dahil olduğu durumda S_k kanal durumunda iletim yapması ancak başarısız olmasını ifade eder.

Senaryo IV işbirlikli gönderim I yöntemi için izgesel verimlilik ise Eşitlik 5.67'deki gibi ifade edilir. Bu ifadede, parantez içindeki ilk terim, ilk gönderimde başarılı alınan paketlerin izgesel verimliliğe katkısını, ikinci terim tekrar gönderimin yine kaynak tarafından yapılarak başarılı iletilen paketlerin katkısını, son terim ise tekrar gönderimin röle tara-

ından yapılabarılı iletlen paketlerin katkısını ifade eder.

$$\begin{aligned}
 IV_{CT1}^{(IV)} &= \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_x \left[(1 - A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
 &+ \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) A_x(\bar{\gamma}_{SR}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_i^{(x)}} (1 - A_x(S_k, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
 &\left. + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) (1 - A_x(S_j, \bar{\gamma}_{RD})) \right] \quad (5.67)
 \end{aligned}$$



Şekil 5.21. Senaryo IV işbirlikli gönderim I yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları

5.4.3 İşbirlikli Gönderim II

İşbirlikli gönderim II yöntemi için paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadelerini elde etmek için, işbirlikli gönderim I yönteminde kullanılan ifadeler yeterlidir. Bu durumda, Senaryo IV işbirlikli gönderim II yöntemi için paket kayıp oranı ifadesi, Eşitlik 5.68'deki gibi olur.

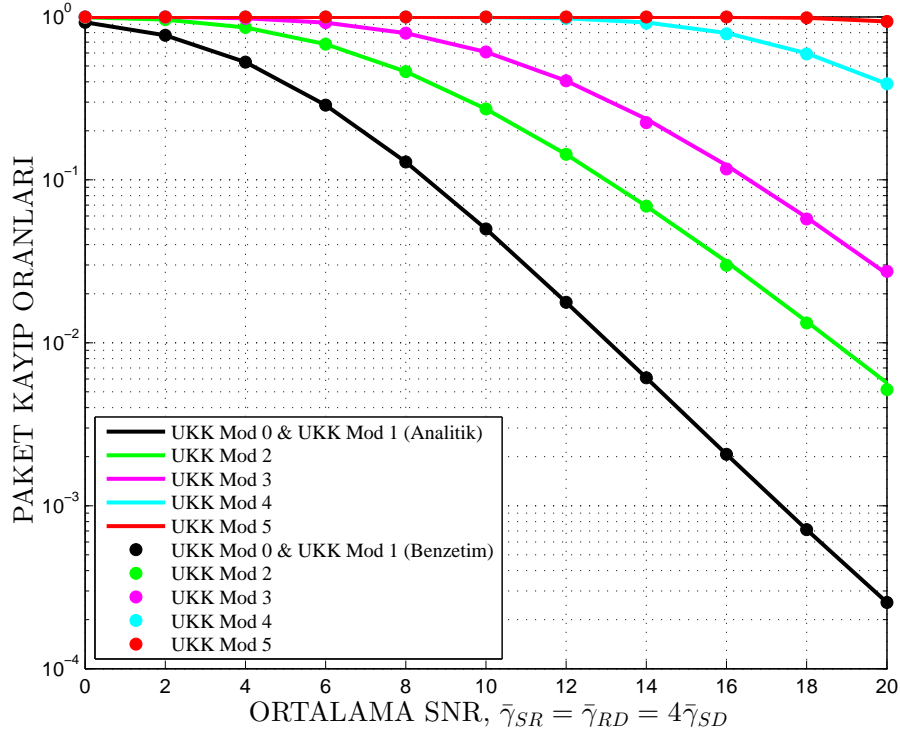
$$\begin{aligned}
 PKO_{CT2}^{(IV)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \left[\sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} A_x(S_k, \bar{\gamma}_{SD}) \cdots \right. \\
 & \left. + P_{n,0}^{T_f^{(x)}} A_x(\bar{\gamma}_{SR}) A_x(S_0, \bar{\gamma}_{SD}) + (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) A_x(S_j, \bar{\gamma}_{RD}) \right] \quad (5.68)
 \end{aligned}$$

Eşitlik 5.68'de, UKK modu x seçilmişken, S_n doğrudan kanal durumunda yapılan ilk gönderim başarısız olmuştur. Buna göre, parantez içindeki ilk terim, doğrudan kanalın derin sönümlemede olmadığından tekrar gönderimin kaynak tarafından yapılması ve hatalı olmasını, ikinci terim doğrudan kanalın derin sönümlemede olmasına rağmen rölenin işbirliğine dahil olmadığı durumda tekrar gönderimin kaynak tarafından yapılması ve hatalı olmasını, son terim ise rölenin işbirliğine dahil olup tekrar gönderimin başarısız olmasını ifade eder.

İzgesel verimlilik ifadesi ise,

$$\begin{aligned}
 IV_{CT2}^{(III)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_x \left[(1 - A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
 & + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(x)}} (1 - A_x(S_k, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
 & + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) A_x(\bar{\gamma}_{SR}) P_{n,0}^{T_f^{(x)}} (1 - A_x(S_0, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
 & \left. + \frac{1}{2} A_x(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) (1 - A_x(\bar{\gamma}_{SR})) P_{n,0}^{T_f^{(x)}} \sum_{j=0}^5 (1 - A_x(S_j, \bar{\gamma}_{RD})) \right] \quad (5.69)
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.



Şekil 5.22. Senaryo IV işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modları için paket kayıp oranları

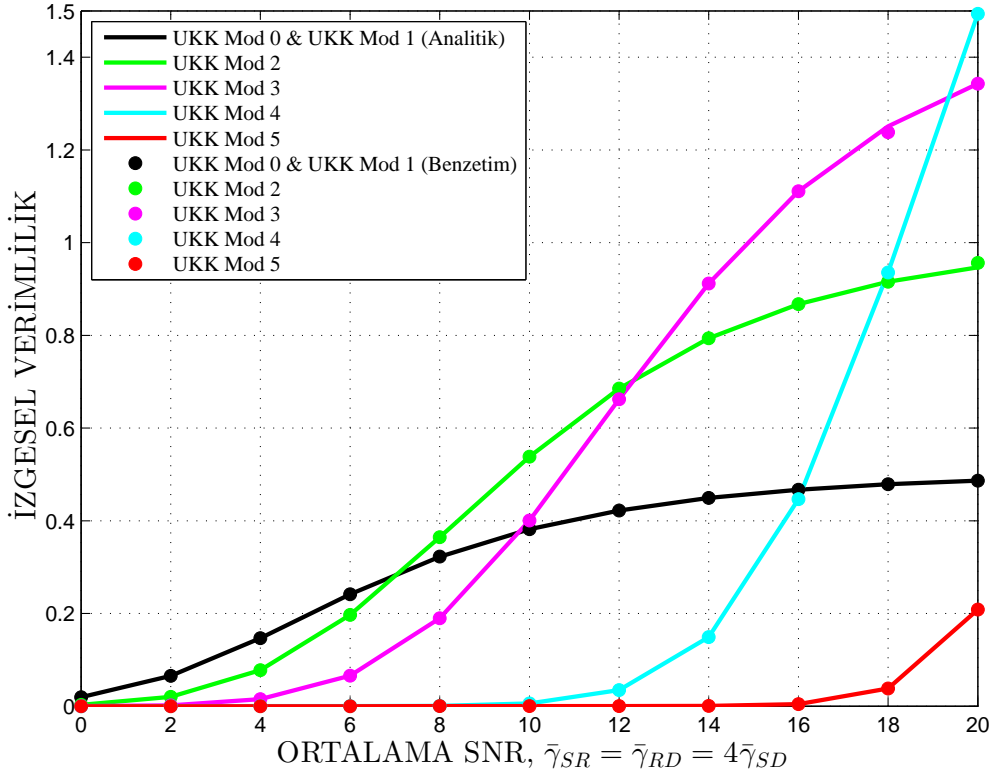
5.5 Senaryo V

Bu gönderim senaryosunda, Senaryo I'de olduğu gibi bir paket için belirlenen UKK modları doğrudan kanal durumuna göre belirlenir. Röle kullanıcısının işbirliğine dahil olduğu durumlarda da paketin tekrar gönderimi, röle kanalının durumundan bağımsız olarak aynı UKK moduna göre gerçekleştirilir. Senaryo I'den farklı olarak tekrar gönderimler alıcıda birleştirilmeyip, her gönderim tek başına değerlendirilir. Bu bilgiler doğrultusunda, paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik ifadelerini elde etmek için daha önce ifade edilen, Eşitlik 5.37 ve Eşitlik 5.58 yeterlidir.

5.5.1 İşbiriksiz Gönderim

Senaryo V işbiriksiz gönderim için paket kayıp oranı ifadesi,

$$PKO_{DT}^{(V)} = \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} A_n(S_k, \bar{\gamma}_{SD}) \quad (5.70)$$



Şekil 5.23. Senaryo IV işbirlikli gönderim II yönteminde tüm UKK modları için izgesel verimlilik sonuçları

olur. Eşitlik 5.70'te, ilk gönderim doğrudan kanal durumunun S_n olmasına istinaden UKK mod n ile yapılmış ve başarısız olmuştur. Aynı paket, $T_f^{(n)}$ süre sonra doğrudan kanal durumu S_k iken UKK mod değişmeksizin tekrar gönderilmiştir. Her iki gönderimin sonucunda hatasız alınamayan paket kayıp olarak ilan edilmiştir. Yeni bir paketin gönderimi ise, doğrudan kanalın yeni durumuna bağlı olarak seçilecek UKK modunda yapılacaktır.

İzgesel verimlilik ifadesi ise

$$\begin{aligned}
 IV_{DT}^{(V)} &= \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_n \left[(1 - A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
 &+ \frac{1}{2} A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} (1 - A_n(S_k, \bar{\gamma}_{SD})) \left. \right] \quad (5.71)
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir. Eşitlik 5.71’de, UKK mod n ile gönderilen bir paketin izgesel verimliliğe katkısı, ilk gönderimde başarılı alınması durumunda R_n olarak, ikinci gönderimde başarılı alınması durumunda ise $\frac{R_n}{2}$ olarak ifade edilmiştir.

5.5.2 İşbirlikli Gönderim I

Senaryo V işbirlikli gönderim I yönteminde, paket kayıp oranı ifadesi,

$$\begin{aligned}
 PKO_{CT1}^{(V)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \left[A_n(\bar{\gamma}_{SR}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} A_n(S_k, \bar{\gamma}_{SD}) \cdots \right. \\
 & \left. + (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) A_n(S_j, \bar{\gamma}_{RD}) \right] \quad (5.72)
 \end{aligned}$$

Eşitlik 5.72’de, paketin ilk gönderimi doğrudan kanal durumu S_n olmasına istinaden UKK mod n ile gönderilmiş ancak başarısız olmuştur. Buna durumda, parantez içindeki ilk terim, rölenin işbirliğine dahil olamadığı durumda tekrar gönderimin kaynak tarafından yeni kanal durumu S_k iken yapılmasını, ikinci terim ise rölenin işbirliğine dahil olması ve tekrar gönderimi röle kanalının S_j durumunda yapılmasını ve başarısız olmasını ifade eder. Her iki tekrar gönderim durumunda da UKK mod n olarak belirlenmiştir.

İşbirlikli gönderim I için izgesel verimlilik ifadesi ise

$$\begin{aligned}
 IV_{CT1}^{(V)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_n \left[(1 - A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
 & + \frac{1}{2} A_n(\bar{\gamma}_{SR}) A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=0}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} (1 - A_n(S_k, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
 & \left. + \frac{1}{2} (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) (1 - A_n(S_j, \bar{\gamma}_{RD})) \right] \quad (5.73)
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.

5.5.3 İşbirlikli Gönderim II

İşbirlikli gönderim II yöntemi için paket kayıp oranı

$$\begin{aligned}
 PKO_{CT2}^{(V)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \left[\sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} A_n(S_k, \bar{\gamma}_{SD}) \cdots \right. \\
 & + (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) P_{n,0}^{T_f^{(n)}} \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) A_n(S_j, \bar{\gamma}_{RD}) \cdots \\
 & \left. + A_n(\bar{\gamma}_{SR}) P_{n,0}^{T_f^{(n)}} A_n(S_0, \bar{\gamma}_{SD}) \right] \quad (5.74)
 \end{aligned}$$

olarak ifade edilebilir.

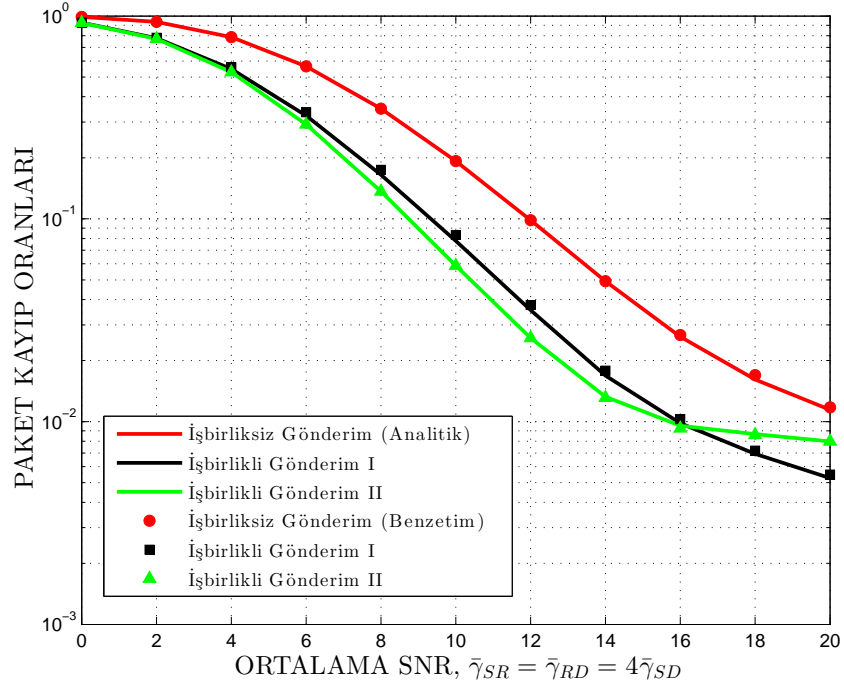
İzgesel verimlilik ifadesi ise

$$\begin{aligned}
 IV_{CT2}^{(V)} = & \sum_{n=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{SD}}(n) R_n \left[(1 - A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \right. \\
 & + \frac{1}{2} A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) A_n(\bar{\gamma}_{SR}) P_{n,0}^{T_f^{(n)}} (1 - A_n(S_0, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
 & + \frac{1}{2} A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) \sum_{k=1}^5 P_{n,k}^{T_f^{(n)}} (1 - A_n(S_k, \bar{\gamma}_{SD})) \cdots \\
 & \left. + \frac{1}{2} A_n(S_n, \bar{\gamma}_{SD}) (1 - A_n(\bar{\gamma}_{SR})) P_{n,0}^{T_f^{(n)}} \sum_{j=0}^5 P_{\bar{\gamma}_{RD}}(j) (1 - A_n(S_j, \bar{\gamma}_{RD})) \right] \quad (5.75)
 \end{aligned}$$

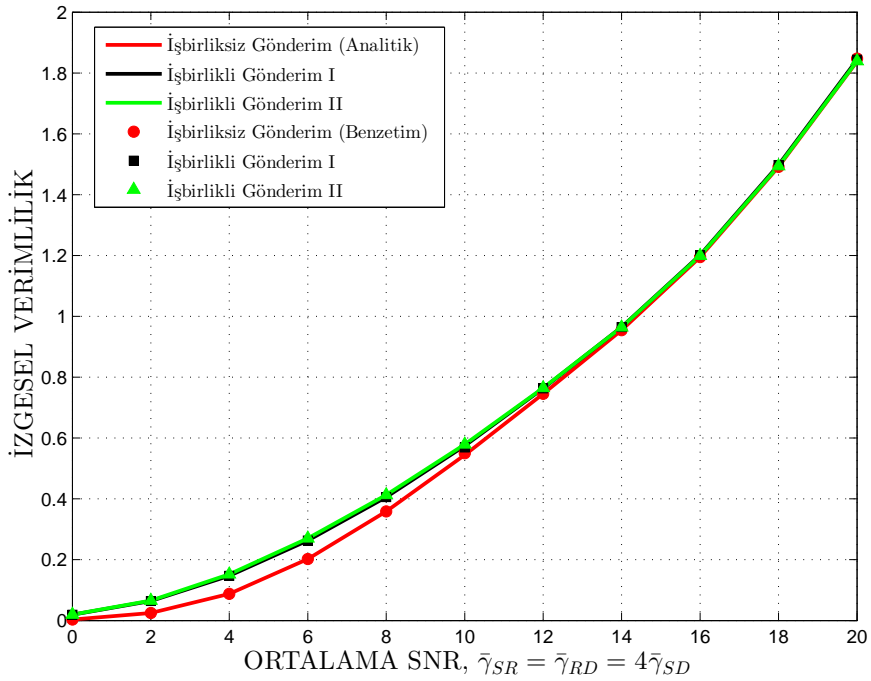
olarak bulunur.

Şekil 5.24'te üç gönderim yönteminin paket kayıp oranlarının analitik ve benzetim yöntemleriyle elde edilen sonuçlar görülebilir.

Üç gönderim yöntemi için izgesel verimlilik sonuçları ise Şekil 5.25'te görülebilir.



Şekil 5.24. Senaryo V için üç farklı gönderim yönteminin paket kayıp oranlarının analitik ve benzetim sonuçları



Şekil 5.25. Senaryo V için üç farklı gönderim yönteminin izgesel verimlilik sonuçları

6. BULGULAR

Bu bölümde, Bölüm 5'te incelenen çeşitli gönderim senaryolarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve sonuçlar çıkarılması hedeflenmiştir.

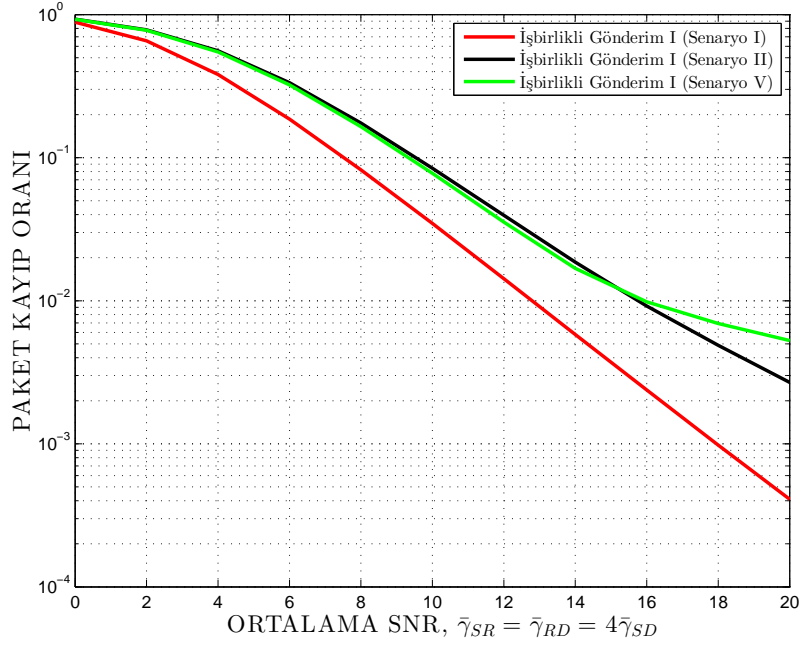
6.1 Senaryo I, Senaryo II ve Senaryo V Karşılaştırması

Chase birleştimenin, sistem başarımına etkisini gözlemlemek amacıyla, Senaryo I'in Senaryo II ve Senaryo V ile paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik bakımından kıyaslanması amaçlanmıştır. Senaryo I'de kullanılan Chase birleştirme yöntemi, Senaryo II'de ve Senaryo V'te kullanılmamıştır. Ayrıca, Senaryo V'te Senaryo II'den farklı olarak, paketlerin tekrar gönderimi kanal durumundan bağımsız olarak, Senaryo I'de olduğu gibi, ilk gönderimle aynı UKK modunda yapılmıştır. Bu nedenle, Senaryo I ile kıyaslanması Chase birleştimenin, sistem başarımına etkisini göstermek için önemlidir. Senaryo II ile Senaryo V arasında ise, paketlerin tekrar gönderimlerinin aynı UKK modunda olmadığı durumda ne gibi değişimler olacağı gözlemlenmek istenmiştir.

Bu durumda, Şekil 6.1'de görülebileceği gibi, işbirlikli gönderim I yöntemi için, üç farklı senaryoda, paket kayıp oranları karşılaştırılmıştır. Şekil 6.1'den de görülebileceği gibi, hatalı paketlerin silinmeyip tekrar gönderimlerle birleştirilmesi, paket kayıp oranında olumlu etki göstermektedir.

Şekil 6.1'de, yer alan sonuca göre, Chase birleştirme kullanılmadığı durumda, paketlerin tekrar gönderimlerinin kanal durumuna göre yeniden belirlenmesi, sistem başarımına özellikle yüksek ortalama SNR değerlerinde olumlu etki yapmıştır. Bu durumun nedeni ise, yüksek ortalama SNR değerlerinde, seçilmesi muhtemel UKK modlarının, tekrar gönderimlerde daha kötü kanal koşullarında gönderilmesi ile paket kayıplarını arttırmasına yol açabilmesi olarak belirtilebilir.

Şekil 6.2'de ise, Senaryo I ve Senaryo II için elde edilen izgesel verimlilik sonuçları birlikte gösterilmektedir. Chase birleştirme kullanılması durumunda, izgesel verimliliğin özellikle düşük ortalama SNR değerlerinde olumlu etkisi gözlemlenebilir. Röle kanalının ortalama SNR değerinin, doğrudan kanala göre daha yüksek olduğu göz önünde bulundurularak, Senaryo II'de ortalama SNR değerinin yükselmesiyle birlikte, izgesel ve-



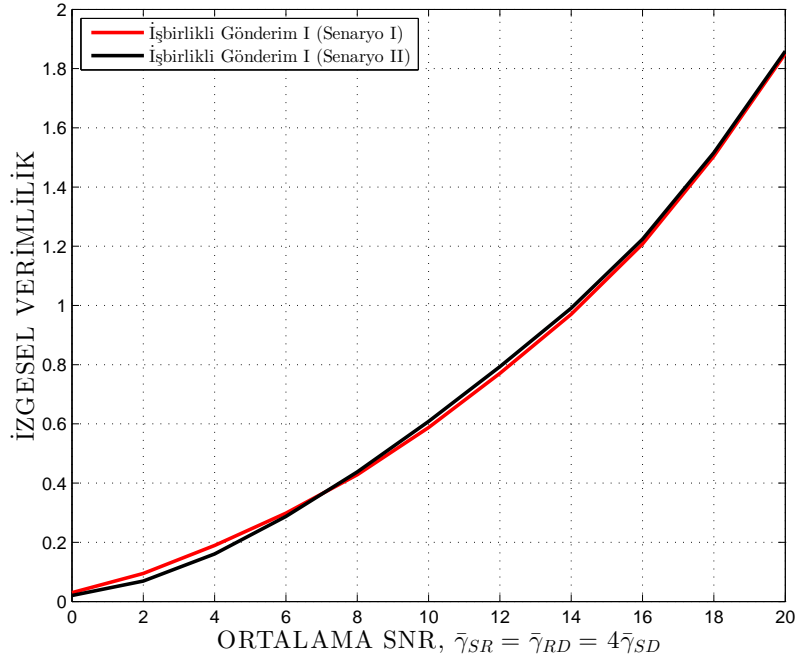
Şekil 6.1. İşbirlikli gönderim I yönteminde paket kayıp oranı sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı

rimlilik bakımından daha iyi sonuç elde edilmiştir. Bunun nedeni, tekrar gönderimlerin röle kanalı üzerinden yapıldığı durumlarda, daha yüksek veri hızı oranına sahip UKK modlarının terchi edilmesidir.

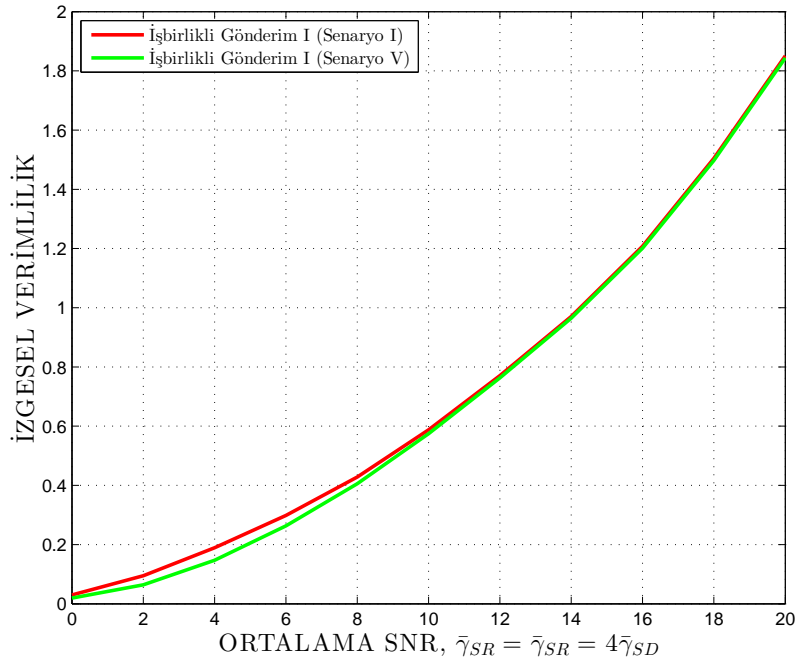
Şekil 6.3'te ise, Senaryo I ve Senaryo V için izgesel verimlilik sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi, Chase birleştirmenin kullanılması, özellikle düşük ortalama SNR değerlerinde paket kayıplarını önleyerek izgesel verimliliğe olumlu katkı sağlamıştır.

Bu çıkarımlar sonucunda, Chase birleştirmenin kullanılmadığı iki farklı senaryo olan, Senaryo II ve Senaryo V için, paket kayıp oranlarından olduğu gibi, her gönderimin kanal durumuna göre seçilmesinden ötürü, izgesel verimlilikte de olumlu sonuç elde edilmiştir.

Tüm bu karşılaştırmalar sonucunda, işbirlikli gönderim I yöntemi için, Chase birleştirmenin kullanılmasının, sistem başarımına katkısı ortaya konulabilir.

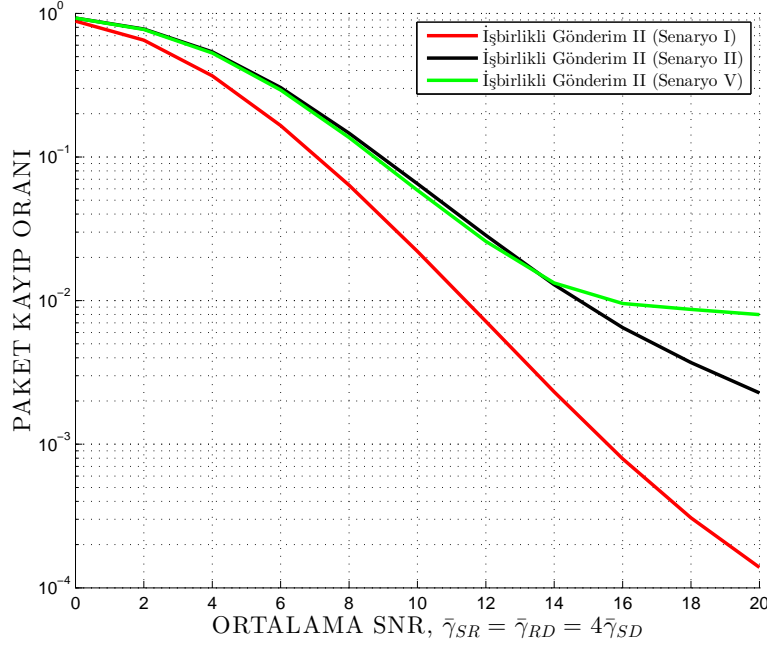


Şekil 6.2. İşbirlikli gönderim I yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo II için karşılaştırımı



Şekil 6.3. İşbirlikli gönderim I yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı

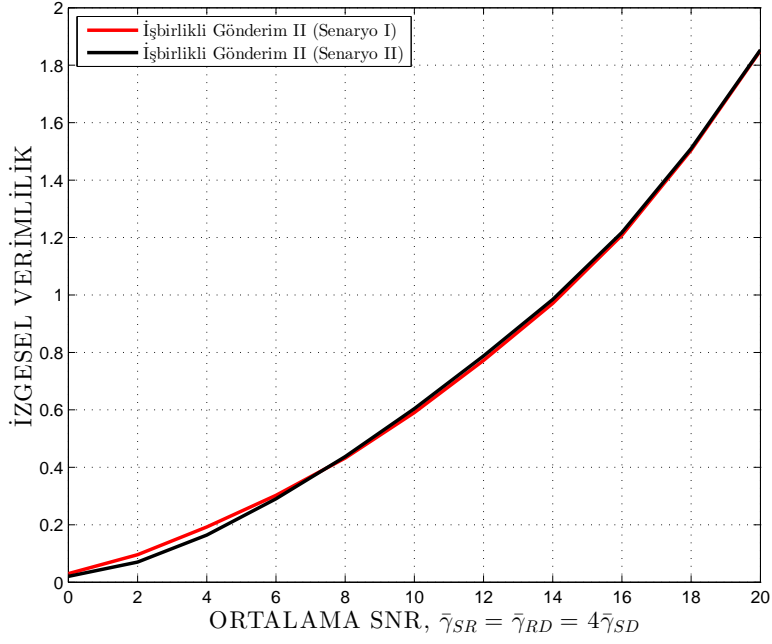
İşbirlikli gönderim II yöntemi için üç senaryoda paket kayıp oranları, Şekil 6.4'te birlikte yer almaktadır. İşbirlikli gönderim I yönteminde olduğu gibi, paket kayıp oranı bakımından, Chase birleştirmenin kullanılması olumlu etkisini göstermektedir.



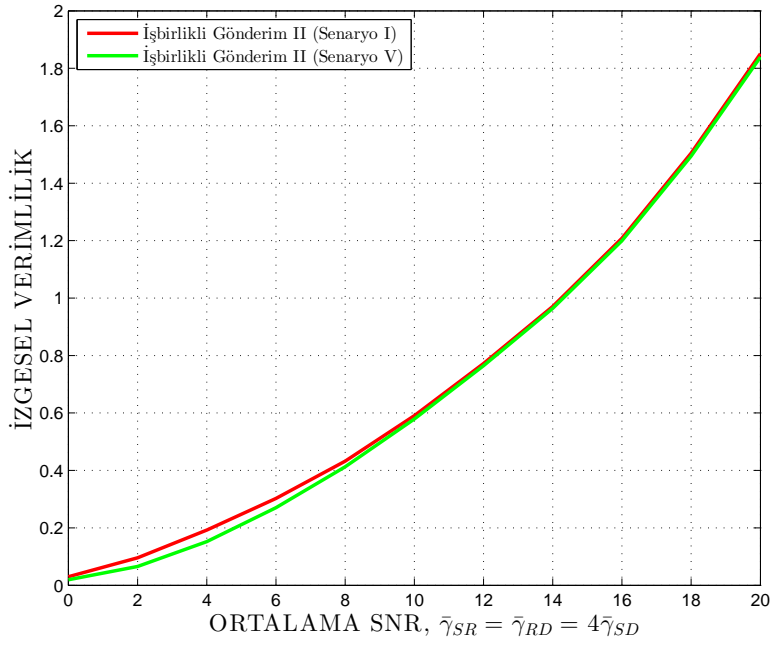
Şekil 6.4. İşbirlikli gönderim II yönteminde paket kayıp oranı sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı

Senaryo V için, yüksek ortalama SNR bölgesinde, paket hata oranı, giderek yatay bir seyir izlemektedir. Şekil 5.24'ten de görülebileceği gibi, işbirlikli gönderim II yönteminde, rölenin sağladığı uzamsal çeşitleme giderek azalmaktadır. Bunun nedeni, yüksek ortalama SNR değerlerinde, doğrudan kanalın, derin sönümlemede olma durumunun giderek daha az sıklıkla gerçekleşmesidir. Bu nedenle, rölenin işbirliğine dahil olması önlenmektedir. Senaryo V'te Tekrar gönderimlerin ilk gönderimle aynı UKK modunda yapıldığı göz önünde bulundurulacak olursa, yüksek ortalama SNR bölgesinde, işbirlikli gönderim II yöntemi giderek işbirliksiz gönderime yaklaşır.

Senaryo I ve Senaryo II arasında, Şekil 6.5'te ve Şekil 6.6'dan görüleceği gibi, izgesel verimlilik sonuçlarına göre, işbirlikli gönderim I'de olduğuna benzer şekilde sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 6.5. İşbirlikli gönderim II yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo II için karşılaştırımı

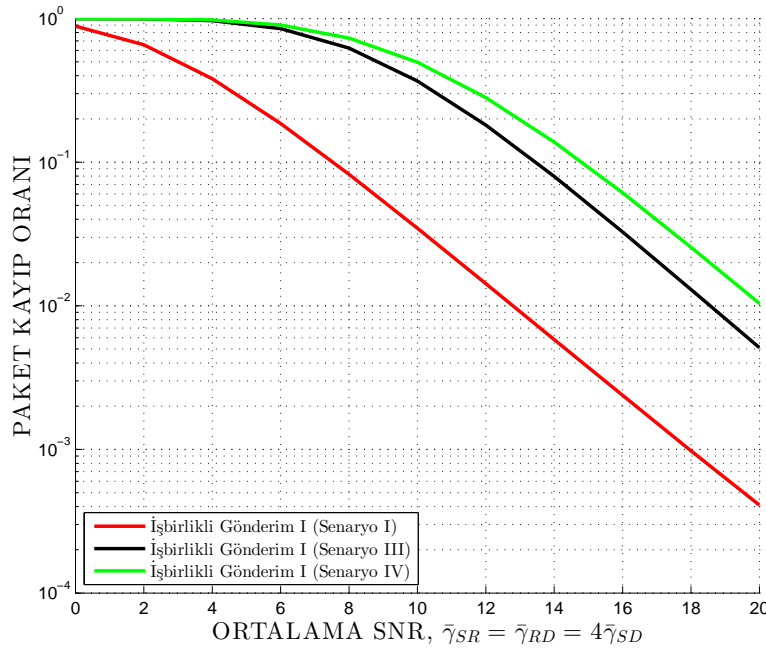


Şekil 6.6. İşbirlikli gönderim II yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I ve senaryo V için karşılaştırımı

6.2 Senaryo I, Senaryo III ve Senaryo IV Karşılaştırması

Bu bölümde, uyarlamalı kipleme - kodlamanın ve Chase birleştirmenin birlikte kullanıldığı Senaryo I ile, uyarlamalı kipleme - kodlamanın kullanılmadığı Senaryo III ve Senaryo IV, paket hata oranı ve izgesel verimlilik bakımından, işbirlikli gönderim I ve işbirlikli gönderim II için kıyaslanacaktır.

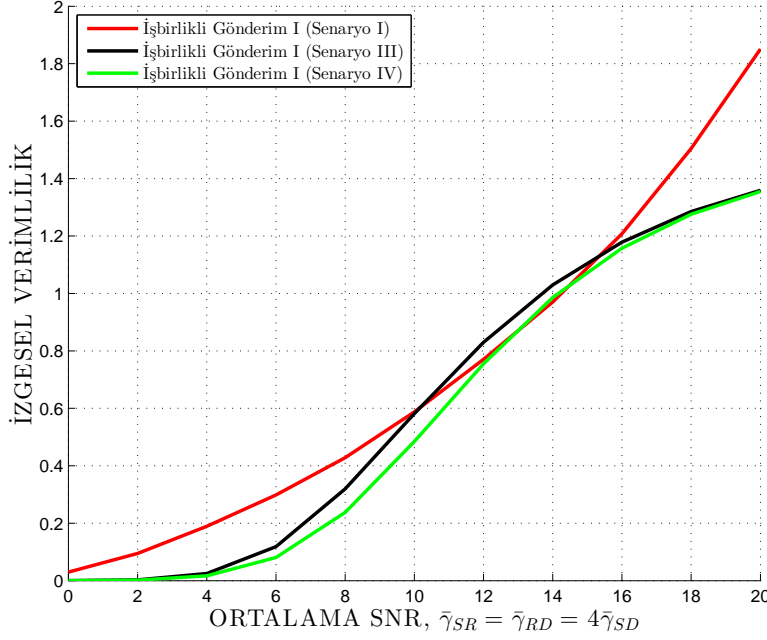
Senaryo III'te ve Senaryo IV'te, uyarlamalı kipleme - kodlama kullanılmadığı için, mevcut her UKK modu ayrı ayrı önceki bölümde incelenmişti. Dolayısıyla bir karşılaştırma yapabilmek için beş farklı UKK modundan, UKK mod 3 seçilecektir. Bu karşılaştırma sonucunda, uyarlamalı kipleme - kodlamanın iletişim sistemlerine etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Diğer UKK modları için önceki bölümde yer verilen sonuçlara bakılabilir.



Şekil 6.7. İşbirlikli gönderim I yönteminde paket kayıp oranlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırması

Şekil 6.7'de görüldüğü gibi, Chase birleştirme ve uyarlamalı kipleme - kodlamanın birlikte kullanıldığı Senaryo I, paket kayıp oranları bakımından diğer her iki senaryoya üstünlük sağladığı görülebilir. Aynı şekilde, Senaryo III ve Senaryo IV arasında da bir karşılaştırma yapmak mümkündür. Uyarlamalı kipleme - kodlamanın kullanılmadığı her

iki senaryoda, Chase birleştirmenin kullanıldığı Senaryo III'ün Senaryo IV'e göre paket kayıp oranı bakımından üstünlük sağladığı ortadadır. Şekil 6.7'de sadece UKK Mod 3 için karşılaştırma yapılmış olsa da aynı üstünlük diğer UKK modları için de geçerlidir.



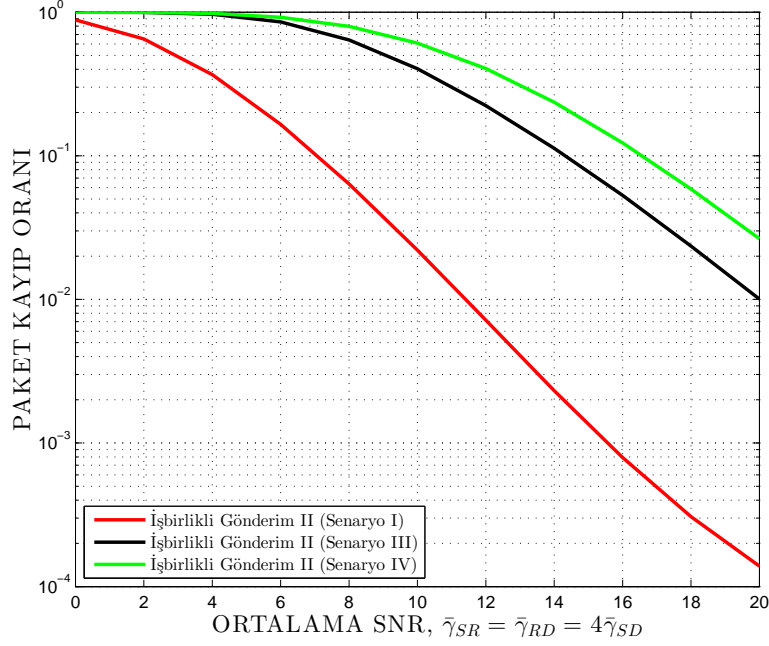
Şekil 6.8. İşbirlikli gönderim I yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırması

Şekil 6.8'de ise, üç farklı senaryo için izgesel verimlilik sonuçları karşılaştırılmak istenmiştir. İncelenen SNR aralığının geneli düşünülecek olursa, Senaryo I'in, izgesel verimlilik yönünden diğer iki senaryoya göre üstünlük sağladığı görülebilir. Senaryo III ve Senaryo IV için, sadece UKK Mod 3 için karşılaştırma yapılmış olsa da, diğer UKK modları için de benzer üstünlükten bahsedilebilir. Ayrıca, paket kayıp oranında olduğu gibi, Chase birleştirmenin kullanıldığı Senaryo III'ün Chase birleştirmenin kullanılmadığı Senaryo IV'e göre üstünlüğü görülebilir.

Bu karşılaştırmalarda, Senaryo III'ü ve Senaryo IV'ü temsilen sadece UKK Mod 3 seçilmesine rağmen, benzer üstünlük diğer modlarda da devam etmektedir. Sadelik açısından sadece UKK Mod 3 ile karşılaştırma yapılması tercih edilmiştir.

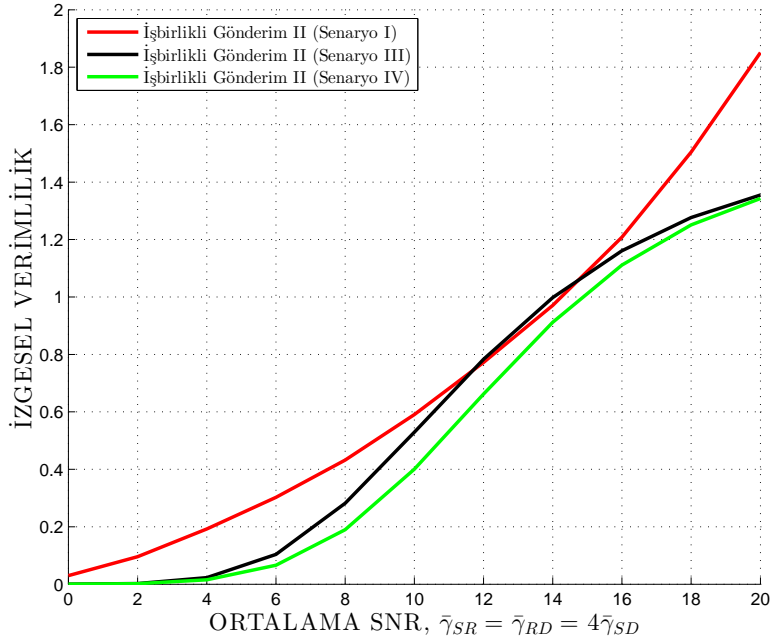
İşbirlikli I gönderim yönteminde olduğu gibi, aynı karşılaştırmalar işbirlikli gönderim II

yöntemi için de yapılabilir. Bu durumda paket kayıp oranı bakımından karşılaştırmayı Şekil 6.9'da görüldüğü gibi Senaryo I, diğer iki senaryoya üstünlük sağlamıştır. Benzer şekilde, Chase birleştirmenin kullanıldığı Senaryo III'ün, Chase birleştirmenin kullanılmadığı Senaryo IV'e göre üstünlüğü şekilden görülebilir. Şekil 6.9'da sadece UKK Mod 3 için yapılan karşılaştırma diğer UKK modları için de geçerlidir.



Şekil 6.9. İşbirlikli gönderim II yönteminde paket kayıp oranlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırımı

İşbirlikli gönderim II yönteminde paket kayıp oranları için yapılan karşılaştırma, izgesel verimlilik için ise Şekil 6.10'da görülebilir. Şekil 6.10'da gösterildiği gibi Chase birleştirmenin uyarlamalı kipleme - kodlama ile birlikte kullandığı durumda, diğer senaryolara üstünlük sağladığı görülebilir. Bunun dışında, Senaryo III'ün, Chase birleştirme sayesinde sağladığı Senaryo IV'e göre üstünlüğü görülebilir.



Şekil 6.10. İşbirlikli gönderim II yönteminde izgesel verimlilik sonuçlarının senaryo I, senaryo III (UKK Mod 3) ve senaryo IV (UKK Mod 3) için karşılaştırımı

7. SONUÇLAR

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda, Tip - I melez tekrar gönderim yönteminin uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemiyle birlikte kullanılmasının, işbiriksiz ve işbirlikli gönderim yöntemlerinde etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bunun dışında Tip - I melez tekrar gönderim yönteminin bir türü olan Chase birleştirmenin katkısı incelenmiştir. Önceki bölümlerde tanımlanan ve incelenen beş farklı senaryo için paket kayıp oranları ve izgesel verimlilik sonuçları elde edilmiştir. Tez kapsamında incelenen gönderim yöntemleri için elde edilen analitik sonuçlar, benzetim yöntemleriyle de doğrulanmaya çalışılmıştır. Elde edilen analiz ve benzetim sonuçları ilintili düz sönümlenen Rayleigh kanallar için elde edilmiştir. Bu sayede, incelenen gönderim yöntemlerinin daha gerçekçi bir temel üzerine oturtulması amaçlanmıştır.

Ayrıca, işbiriksiz gönderim yöntemine ilaveten iki farklı işbirlikli gönderim yöntemi tanımlanmıştır. Tanımlanan işbirlikli gönderim II yöntemi ile röle kullanıcısının işbirliğine dahil olması kanalın derin sönümlemeye olması koşullarına bağlanarak, daha az işbirliğine ihtiyaç duyan bir gönderim yöntemi tasarlanması amaçlanmıştır.

Senaryo I'de, Chase birleştirme ve uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan gönderim yöntemi hem işbiriksiz hem de işbirlikli durumlar için incelenmiştir. Bu senaryodan elde edilen sonuçlara göre, doğrudan kanala ilaveten, işbirliğine dahil olan bir röle kanalının varlığı hem paket kayıp oranı hem de izgesel verimlilik bakımından katkı sağladığı görülmüştür. Senaryo I özelinde, işbirlikli gönderim II yöntemi, işbirlikli gönderim I yöntemine göre paket kayıp oranı bakımından üstünlük sağlamıştır. İşbirlikli gönderim II yönteminde, röle, ancak doğrudan kanal derin sönümlemeye olduğu durumda işbirliğine dahil olacağından, artan ortalama SNR değeri ile bu durum ortadan kalkacaktır. Böylelikle, alıcıda elde edilen iki gönderime ait SNR değeri ilintili olacaktır. İşbirlikli gönderim I yönteminde ise, tekrar gönderim bağımsız bir kanaldan yapılacaktır. Bu durumda, kanalların ilintili sönümlendiği göz önünde bulundurulursa, işbirlikli gönderim II yönteminde elde edilecek toplam SNR değerinin daha yüksek olması muhtemeldir.

Senaryo II'de ise, Chase birleştirmenin kullanılmadığı Tip - I melez tekrar gönderim

yöntemiyle birlikte uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemi kullanılmıştır. Bu durumda Chase birleştirme kullanılmadığı takdirde, paket kayıp oranı bakımından, gerek işbirliksiz gerekse iki farklı işbirlikli gönderim yöntemlerinde, sistem başarımı zayıflamıştır. Paketlerin tekrar gönderimlerinin, aynı UKK modunda olması koşulu ortadan kalkması durumunda izgesel verimlilik sonuçlarında düşük ortalama SNR değerlerinde ise aynı durum söz konusudur.

Senaryo III'te, uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin devre dışı bırakılmasıyla, paket kayıp oranı ve izgesel verimlilik sonuçlarının ne ölçüde değişeceği gözlemlenmek istenmiştir. Uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin kullanılmaması durumunda, mevcut beş farklı UKK modu için ayrı ayrı incelenerek sonuçlar elde edilmiştir. Beş farklı UKK modu için elde edilen sonuçlara göre, paket kayıp oranı bakımından, paket gönderimlerinin UKK mod 0 ile yapılması durumunda en iyi sonuç elde edilmiştir. Ancak belirtilen UKK modu ile izgesel verimlilik bakımından ulaşılabilecek en yüksek değer 0.5 bit/sembol ile sınırlı kalmıştır. İzgesel verimlilik kriterinde, en yüksek sonuç UKK mod 4 ile elde edilmiştir. Ancak bu sonuç kanal durumunun oldukça iyi olduğu koşullarda ortaya çıkmış, kötü kanal koşullarında ise aynı başarımlar elde edilememiştir. Dolayısıyla, değişen kanal koşullarında, uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin kullanılmasının katkıları ortaya konulmuştur. Bu sayede paket kayıp oranı ve izgesel verimliliğin birlikte iyileştirilmesi hedeflenmiştir. İşbirliksiz gönderim yöntemi için elde edilen sonuçların, işbirlikli gönderim yöntemlerinin her ikisi için de geçerli olduğu görülmüştür.

Senaryo IV'te ise, Senaryo III'te olduğu gibi uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin olmadığı durumda, Chase birleştirmenin etkisi gözlemlenmek istenmiştir. Bu senaryoda, elde edilen sonuçlar gerek işbirliksiz gerekse işbirlikli gönderim yöntemleri için kıyaslanacak olursa, Chase birleştirmenin her UKK modunda olumlu etkisi ortaya konulabilir. Senaryo III'te olduğu gibi, paket kayıp oranı bakımından en iyi sonuç UKK mod 0 ile elde edilse de, iyi kanal koşullarında ancak belli bir seviyeye ulaşmıştır. Dolayısıyla, Chase birleştirme kullanılsa dahi, değişen kanal koşullarında, uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin etkisi ortaya konulmuştur.

Son durumda ise, Senaryo I'e benzer olarak uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemi kullanılmaktadır. Ancak Chase birleştirmenin devre dışı kaldığı bu senaryoda, yine Se-

naryo l'e benzer olarak bir paket için yapılan tekrar gönderimin aynı UKK moduyla yapılması şartı bulunur. Senaryo I ile kıyaslanacak olursa, Chase birleştirmenin katkısı gözlemlenebilir. Paket kayıp oranları bakımından, Senaryo l'de Chase birleştirmenin sağladığı üstünlük ortadan kalktığı görülür. Aynı durum izgesel verimlilik sonuçları için de geçerli olmuştur. Ayrıca, işbirlikli gönderim yöntemleri bakımından, Senaryo l'de, işbirlikli gönderim II yönteminin, işbirlikli gönderim I yöntemine göre sağladığı üstünlük giderek artan ortalama SNR değerlerinde ortadan kalkmıştır. Yüksek SNR değerlerinde ise, işbirlikli gönderim II yöntemi, işbirliksiz gönderim yöntemine benzer davranış sergilemeye başlamıştır. Bunun nedeni ise, artan ortalama SNR değerlerinde, kanalın derin sönümlemede olma durumunun ortadan kalkması ve Chase birleştirmenin devre dışı bırakılmasıdır.

Bu çalışmalar sonucunda, sönümlemeli kanallarda uyarlamalı kipleme - kodlama yönteminin kullanılmasıyla, değişen kanal koşullarına en uygun UKK modunun seçilmesinin gerek paket kayıp oranı gerekse izgesel verimlilik açısından kayda değer katkılar elde edildiği görülmüştür. Bunun dışında, Tip - I melez tekrar gönderim yöntemlerinde, Chase birleştirmenin sistem başarımına olumlu etkisi ortaya konulmuştur. Hem uyarlamalı kipleme - kodlama yöntemi hem de Chase birleştirmenin birlikte kullanılmasıyla, değişen kanal koşullarında sistem başarımının olumlu yönde değişimi gözlemlenmiştir. İşbirlikli gönderim yöntemlerinin incelenmesi ile, uzamsal ve zaman çeşitlemesinden faydalanmanın sistem başarımına katkısı incelenmiştir.

Bu tez kapsamında elde edilen sonuçlar, ileriki çalışmalarda Tip - II ve Tip - III melez tekrar gönderim yöntemleri için temel teşkil edebilir. Ayrıca incelenen işbirlikli gönderim yöntemlerinde, röle kanalının farklı durumlar için modellenmesi ile değişik durumlar incelenebilir. Bununla beraber, bu çalışma kapsamında tek bir rölenin varlığı incelenmiş olup, röle sayısının artırılması ya da rastgeleleşmesi durumunda farklı durumlar incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Zvonar, Z., Jung, P., Kammerlander K., *GSM: Evolution Towards 3rd Generation Systems*, The Kluwer Academic Publishers, Boston, **1999**.
- [2] Frattasi, S., Fathi, H., Fitzek, F.H.P., Prasad, R., Katz, M.D., Defining 4G Technology From the Users Perspective, *IEEE Network*, 20, 1, 35-41, **2006**.
- [3] Stanojev, I., Simeone, O., Bar-Ness, Y., You, C., Performance of Multi-Relay Collaborative Hybrid-ARQ Protocols over Fading Channels, *IEEE Communications Letters*, 10, 7, 522-524, **2006**.
- [4] Goldsmith, A., *Wireless Communications*, Cambridge University Press, **2005**.
- [5] Spencer, Q.H., Peel, C.B., Swindlehurst, A.L., Haardt, M., An Introduction to the Multi-User MIMO Downlink, *IEEE Communications Magazine*, 42, 10, 60-67, **2004**.
- [6] Zhao, B., Valenti, M.C., Practical Relay Networks: A Generalization of Hybrid-ARQ, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23, 1, 7-18, **2005**.
- [7] Shannon, C.E., A Mathematical Theory of Communication, *Bell Systems Technical Journal*, 27, 379-423, 623-656, October, **1948**.
- [8] Lin, S., Costello, D.J., *Error Control Coding*, 2nd Edition, Prentice-Hall, **1999**.
- [9] Lin, S., Yu, P., A Hybrid ARQ Scheme with Parity Retransmission for Error Control of Satellite Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 7, 30, 1701-1719, **1982**.
- [10] Abdelmoumen, R., Malli, M., Barakat, C., Analysis of TCP Latency over Wireless Links Supporting FEC/ARQ-SR for Error Recovery, *IEEE International Conference on Communications*, 7, 3994-3998, **2004**.
- [11] Rocher, E.Y., Pickholotz, R., An Analysis of the Effectiveness of Hybrid Transmission Schemes, *IBM Journal of Research and Development*, 14, 4, 426-433, **1970**.
- [12] Szczecinski, L., Duhamel, P., Rahman, M., Adaptive Incremental Redundancy for HARQ Transmission with Outdated CSI, *IEEE Global Telecommunications Conference 2011*, 5-9 December, Houston, TX, USA, 1-6, **2011**.
- [13] Roongta, A., Shea, J.M., Reliability-based Hybrid ARQ and Rate-Compatible Punctured Convolutional (RCPC) Codes, *Wireless Communications and Networking Conference*, 21-25 March, 4, Gainesville, FL, USA, 2105-2109, **2004**.
- [14] Kallel, S., Link, R., Bakhtiyari, S., Throughput Performance of Memory ARQ Schemes, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48, 3, 891-899, **1999**.

- [15] Rasmussen, K.L., Wicker, B.S., The Performance of Type - I Trellis Coded Hybrid - ARQ Protocols over AWGN and Slowly Fading Channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 40, 2, 418-428, **1994**.
- [16] Chase, D., Code Combining - A Maximum Likelihood Decoding Approach for Combining an Arbitrary Number of Noisy Packets, *IEEE Transactions on Communications*, 33, 5, 385-393, **1985**.
- [17] Shi, F., Yuan, D., Cross-Layer Combination of Cooperative HARQ with AMC in Wireless Ad-hoc Networks, *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems*, 19-21 November, Guangzhou, Singapore, **2008**.
- [18] Cheng, J.F., Coding Performance of Hybrid ARQ Schemes, *IEEE Transactions on Communications*, 54, 6, pp. 1017-1029, **2006**.
- [19] Frenger, P., Parkvall, S., Dahlman, E., Performance Comparison of HARQ with Chase Combining and Incremental Redundancy for HSDPA, *IEEE Vehicular Technology Conference*, 7-11 October, Stockholm, Sweden, 3, 1829-1833, **2001**.
- [20] Morillo, J., Garcia, V.J., A Cooperative ARQ protocol with Frame Combining, *Springer, Wireless Networks*, 17, 4, 937-953, **2011**.
- [21] Tomasin, S., Levorato, M., Zorzi, M., Analysis of Outage Probability for Cooperative Networks with HARQ, *IEEE International Symposium on Information Theory*, 24-29 June, Nice, France, 2716-2720, **2007**.
- [22] Tomasin, S., Levorato, M., Zorzi, M., A Steady State Analysis of Coded Cooperative Networks with HARQ Protocol, *IEEE Transactions on Communications*, 57, 8, 2391-2401, **2009**.
- [23] Harsini, J.S., Lahouti, F., Levorato, M., Zorzi, M., Analysis of Non-Cooperative and Cooperative Type II Hybrid ARQ Protocols with AMC over Correlated Fading Channels, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10, 3, 877-889, **2011**.
- [24] Zalonis, A., Miliou, N., Dagres, T., Polydoros, A., Bogucka, H., Trends in Adaptive Modulation and Coding, *Advances in Electronics and Telecommunications*, 1, 1, **2010**.
- [25] Döttling, M., Michel, J., Raaf, B., A Hybrid ARQ and Adaptive Modulation and Coding Schemes for High Speed Downlink Packet Access, *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, 18 September, Munchen, Germany, 3, 1073-1077, **2002**.
- [26] Haykin S., *Communication Systems*, 4th Edition, John Wiley and Sons, **2001**.
- [27] Rappaport, T., *Wireless Communications*, McGraw Hill International Editions Electrical Engineering Series, **1999**.
- [28] Proakis, J.G., *Digital Communications*, 4th Edition, McGraw-Hill International Editions Electrical Engineering Series, **2001**.

- [29] Simon, M., Alouni, M.S., A Unified Approach to the Performance Analysis of Digital Communication over Generalized Fading Channels, *Proceedings of the IEEE*, 86, 9, 1860-1877, **1998**.
- [30] Sklar, B., Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems Part II: Mitigation, *IEEE Communications Magazine*, 35, 7, 90-100, **1997**.
- [31] Alouni, M.S., Goldsmith, A.J., Capacity of Rayleigh Fading Channels Under Different Adaptive Transmission and Diversity Combined Techniques, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48, 4, 1165-1181, **1999**.
- [32] Goldsmith, A.J., Varaiya, P.P., Capacity of fading channels with channel side information, *IEEE Transactions on Information Theory*, 43, 6, 1986-1992, **1997**.
- [33] Cover, T., Thomas, J., *Elements of Information Theory*, 2nd Edition, Wiley Series, **2006**.
- [34] Clark, G., Weldon, E., Cain, J., *Error-Correction Coding for Digital Communications*, Plenum Press, New York, **1981**.
- [35] Peterson, W.W., Brown, D.T., Cyclic Codes for Error Detection, *Proceedings of IRE*, 49, 1, 228-235, **1961**.
- [36] Hagenauer, J., Rate Compatible Punctured Convolutional Codes (RCPC codes) and Their Applications, *IEEE Transactions on Communications*, 36, 389-400, **2002**.
- [37] Sklar, B., *Digital communications Fundamentals and Applications*, 2nd Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, **2002**.
- [38] Lin, S., Costello, D.J., Miller, M., Automatic-Repeat-Request Error-Control Schemes, *IEEE Communications Magazine*, 22, 12, 5-17, **1984**.
- [39] Tanenbaum, A.S., *Computer Networks*, 5th Edition, Prentice Hall, **2011**.
- [40] Zhang, Q., Kassam, S., Hybrid ARQ with Selective Combining for Fading Channels, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17, 5, 867-880, **1999**.
- [41] Sindhu, P., Retransmission Error Control with Memory, *IEEE Transactions on Communications*, 25, 5, 473-479, **1977**.
- [42] Stanojev, I., Simeone, O., Bar-Ness Y., Performance Analysis of Collaborative Hybrid-ARQ Protocols over Fading Channels, *Communications Letters*, 10, 7, 522-524, **2006**.
- [43] Lugand, L., Costello, D.J., A Comparison of Three Hybrid ARQ Schemes Using Convolutional Codes on a Non Stationary Channel, *IEEE Global Communications Conference*, 702-706, **1982**.

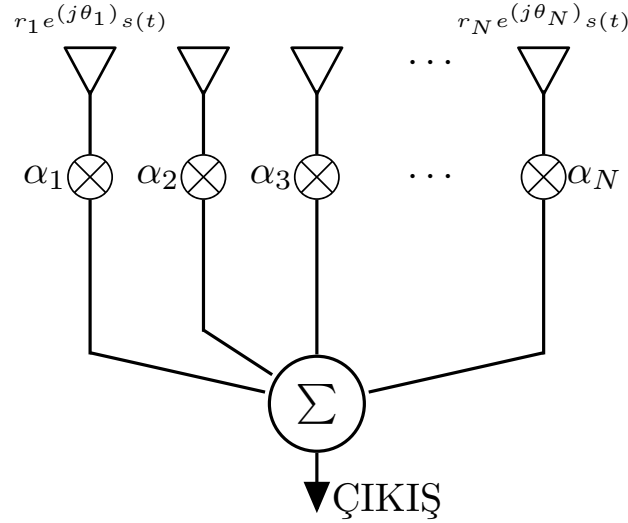
- [44] Kallel, S., Complementary Punctured Convolutional Codes and Their Applications, *IEEE Transactions on Communications*, 43, 6, 2005-2009 **1995**.
- [45] Laneman, J.N., Tse, D.N., Wornell, G.W., Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior, *IEEE Transactions on Information Theory*, 50, 12, 3062-3080, **2004**.
- [46] Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B., User Cooperation Diversity, Part I: System Description, *IEEE Transactions on Communications*, 51, 11, 1927-1938, **2003**.
- [47] Sendonaris, A., Erkip, E., Aazhang, B., User Cooperation Diversity, Part II: System Description, *IEEE Transactions on Communications*, 51, 11, 1939-1948, **2003**.
- [48] Cavers, J.K., Variable-Rate Transmission for Rayleigh Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 20, 15-22, **1972**.
- [49] Webb, W.T., Steele, R., Variable Rate QAM for Mobile Radio, *IEEE Transactions on Communications*, 43, 2223-2230, **1995**.
- [50] Goldsmith, A.J., Alouini, M.S., Adaptive modulation over Nakagami Fading Channels, *Kluwer Journal of Wireless Communications*, 13, 12, 119-143, **2000**.
- [51] Jakes, W.C., *Microwave Mobile Communications*, Wiley IEEE-Press, **1974**.
- [52] Tan, C.C, Beaulieu, N.C., On the First-Order Markov Modeling for the Rayleigh Fading Channel, *IEEE Communications Letters*, 48, 12, 2032-2040, **2000**.
- [53] Simon, M.K., Alouini, M.S., A Simple Single Integral Representation of the Bivariate Rayleigh Distribution, *IEEE Communications Letters*, 2, 128-130, **1998**.
- [54] Xu, L., Yuan, D., Wang, C., Performance Analysis and Comparison of HARQ Schemes in Cross Layer Design, *IEEE Fourth International Conference on Communications and Networking in China*, 26-28 August, 1-5, Xian, China **2009**.
- [55] Wang, X., Liu, Q., Giannakis, G.B., Analysing and Optimizing Adaptive Modulation and Coding Jointly with ARQ for QoS-Guaranteed Traffic, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56, 2, 710-720, **2009**.
- [56] Hole, K.J., Holm, H., Oien, G.E., Adaptive Multidimensional Coded Modulation over Flat Fading Channels, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 18, 1153-1158, **2000**.
- [57] Goldsmith, A.J., Chua, S.G., Adaptive Coded Modulation for Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 46, 595-602, **1998**.
- [58] Malkamaki, E., Leib, H., Performance of Truncated Type - II Hybrid ARQ Schemes with Noisy Feedback over Block Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 48, 1477-1487, **2000**.

- [59] Meulen, E.V.D., Three-terminal Communication Channels, *IEEE Transactions on Information Theory*, 3, 120-154, **1971**.
- [60] Laneman, J.N., Wornell, G.W., Tse, D.N.C, An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks, *Proceedings IEEE International Symposium on Information Theory*, 14-29 June, Washington, DC, USA, 294, **2001**.
- [61] Hunter, T.E., Nosratinia, A., Diversity Through Coded Cooperation, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5,2, 283-289, **2006**.
- [62] Dietze, K., Dietrich, C.B., Stutzman, W.L., Analysis of a Two-Branch Maximal Ratio and Selection Diversity System with Unequal SNRs and Correlated Inputs for a Rayleigh Fading Channel, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1, 2, 274-281, **2002**.

EK A

A.1 En Yüksek Oran Birleştirme

Çok yollu sönümlmeli kanalların olumsuz etkisini gidermek için alıcı çeşitlemesi (Receive Diversity) kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, alıcı tarafında birden fazla anten kullanılarak vericiden çıkan çok yollu sönümlmeye maruz kalan sinyalin farklı zaman gecikmesine, farklı fazlara ve genliklere sahip birden fazla kopyası birleştirilerek sistem başarımı artırılması hedeflenmektedir. Birden fazla anten kullanılarak gerçekleştirilen birleştirme işlemi çeşitli şekillerde yapılabilir.



Şekil A .1. Çok Antenli Lineer Birleştirme Modeli

Şekil A.1'de gösterildiği gibi alıcıda N sayıda anten kullanarak $s(t)$ sinyalinin farklı faz ve genliklere sahip kopyaları α_n katsayıları ile çarpılarak toplanmaktadır. Bu katsayılardan sadece biri sıfırdan farklı olursa, tek antenli alıcı haline gelir ve çeşitleme ortadan kalkar. Çeşitleme yöntemleri arasındaki fark ise karmaşık α_n katsayılarının seçimiyle ortaya çıkar.

Bu tezde incelenen gönderim yöntemlerinde, alıcıda en yüksek oran birleştirme (Maximal Ratio Combining - MRC) yöntemi kullanılmıştır. En yüksek oran birleştirme yön-

teminde, Şekil A.1'de gösterilen α_n katsayıları sıfırdan farklıdır. Anten katsayıları, sinyaller arasındaki faz farkını ortadan kaldırmak için karmaşık α_n katsayılarının fazları, $\angle\alpha_n = -\theta_n$ olarak belirlenmesi halinde, çıkışta elde edilecek sinyalin zarf değeri

$$r = \sum_{n=1}^N \alpha_n r_n \quad (\text{A.1})$$

olarak ifade edilir. Her antenin özdeş gürültü güç yoğunluğuna maruz kaldığı varsayımında çıkıştaki toplam gürültü güç yoğunluğu

$$N_T = \sum_{n=1}^N \alpha_n^2 N_0 \quad (\text{A.2})$$

olur. Bu durumda çıkışta elde edilen SNR ise

$$\gamma_T = \frac{r^2}{N_T} = \frac{1}{N_0} \frac{\left(\sum_{n=1}^N \alpha_n r_n\right)^2}{\sum_{n=1}^N \alpha_n^2} \quad (\text{A.3})$$

olur.

Eşitlik A.3'te elde edilen SNR değerinin olabileceği en yüksek değerde olması için Swartz eşitsizliği kullanılarak katsayılar $\alpha_n^2 = \frac{r_n^2}{N_0}$ olarak elde edilir. Bu durum, güçlü sinyallerin yükseltilmesi ve zayıf sinyallerin bastırılması anlamına gelir [4].

Anten katsayılarının belirlenmesi sonucu, çıkıştaki SNR

$$\gamma_T = \sum_{n=1}^N \frac{r_n^2}{N_0} = \sum_{n=1}^N \gamma_n \quad (\text{A.4})$$

olarak elde edilir.

Eşitlik A.4'ten de görüldüğü gibi en yüksek oran birleştiricinin çıkışında elde edilen SNR, iki antenden elde edilen sinyallerin SNR değerlerinin toplamı olarak ifade edilir.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: İbrahim ÖZKAN

Doğum Yeri: Antalya

Medeni Hali: Bekar

E-posta: ozkan@ee.hacettepe.edu.tr

Adresi: İstasyon Mahallesi Karanfil Sokak No: 20 D: 6 Sincan / ANKARA

Eğitim

Lise: Alanya Ayşe Melehat Erkin Anadolu Lisesi, ANTALYA

Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, ANKARA

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi

İş Deneyimi

ONS İletişim Hizmetleri Ltd. Şti., Eylül 2011 - Eylül 2012: Saha Mühendisi, ANKARA

Hacettepe Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Eylül 2013 - . . . : Araştırma Görevlisi, ANKARA

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

İşbirlikli Melez Tekrar Gönderim Ağları, *İ. Özkan, E. Aktaş*, SİU 2014, Sinyal İşleme Kurultayı, Trabzon, Türkiye