

**ÇOK RÖLELİ İŞBİRLİKLİ VE OTOMATİK TEKRAR
İSTEKLİ HABERLEŞME KANALLARINDA
UYARLAMALI KİPLEME VE KODLAMA**

**ADAPTIVE MODULATION AND CODING IN MULTIPLE
RELAY COOPERATIVE COMMUNICATION CHANNELS
WITH AUTOMATIC REPEAT REQUEST**

CANSU SUNU

**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

CANSU SUNU'nun hazırladığı "**Çok Röleli İşbirlikli ve Otomatik Tekrar İstekli Haberleşme Kanallarında Uyarlamalı Kipleme ve Kodlama**" 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. Seniha Esen Yüksel

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Berkan Dölek

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Ayşe Melda Yüksel Turgut

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...

Cansu SUNU

ÖZET

ÇOK RÖLELİ İŞBİRLİKLİ VE OTOMATİK TEKRAR İSTEKLİ HABERLEŞME KANALLARINDA UYARLAMALI KİPLEME VE KODLAMA

CANSU SUNU

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emre Aktaş

Temmuz 2014, 75 sayfa

Kablosuz teknolojisi bilgi işaretlerinin kablo kullanılmadan gönderilmesi için en önemli teknolojidir. Kablosuz teknoloji gezgin telefonlarda, Wi-Fi, hücresel veri servisleri, kablosuz algılayıcı ağlar gibi kablosuz veri haberleşme sistemlerinde kullanılır. Bu uygulamalarının yanında, sağlık ve bilgisayar arayüz cihazlarında da kullanılmaktadır. Kablosuz veri haberleşmesinde, yüksek veri hızları ve servis kalitesine olan talep günden güne artmaktadır. Bu nedenle, uygulanabilirlik kısıtı altında, yeni gelişmeler ya da eski tekniklerin bir arada kullanılması üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında, uyarlamalı kipleme ve kodlama işbirlikli haberleşme sistemlerine uygulanmıştır. Uyarlamalı kipleme ve kodlama hali hazırda EDGE, HSPA, Wi-Fi gibi birçok kablosuz veri iletişimde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar işbirlikli haberleşmenin iletişim performansını arttırdığı gösterilmiştir. Bu çalışma ile uyarlamalı kiplemeli ve kodlamalı işbirliksiz ve işbirlikli haberleşme sistemleri, ilintili yavaş değişen sönümlenme kanalları için analiz edilmiştir. İletişim kanalının yavaş değişen doğası kullanılarak uyarlamalı kipleme ve kodlamalı işbirliksiz ve işbirlikli sistemler için veri hacmi ve ortalama paket gecikmesi formülasyonları oluşturulmuştur. İşbirlikli sistem analizine tek röleli olarak başlanmıştır. Daha sonra röle sayısı N olarak arttırılmıştır. Analizden sonra benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan analizler benzetim sonuçları ile desteklenmiştir. Sonuç olarak uyarlamalı kipleme ve kodlama ile işbirlik birlikte kullanıldığında sistem performansında kazanç sağlandığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz Haberleşme, Uyarlamalı Kipleme ve Kodlama(UKK), İşbirlikli Haberleşme, Çok Röleli İşbirlik, Otomatik Tekrar İsteği

ABSTRACT

ADAPTIVE MODULATION AND CODING IN MULTIPLE RELAY COOPERATIVE COMMUNICATION CHANNELS WITH AUTOMATIC REPEAT REQUEST

CANSU SUNU

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

Supervisor: Doç. Dr. Emre Aktaş

July 2014, 75 pages

Wireless technology is the most important technique for transferring information signals without using cable. Wireless is used for mobile telephones, wireless data communication such as Wi-Fi, cellular data service, mobile satellite communication and wireless sensor networks. Other than these applications, wireless technology is used for medical technologies and computer interface devices. In wireless data communication systems, high data rates and quality services are demanded more day by day. For this reason, under the practicability constraint, new developments or combination of old techniques must be studied. In this thesis work, adaptive modulation and coding is combined with cooperative communications. Adaptive modulation and coding is already used in many wireless data communication systems such as EDGE, HSPA and Wi-Fi. Cooperative communication is shown that transmission performance can be enhanced. With this work, non-cooperative and cooperative communication with adaptive modulation and coding is analyzed for correlated slow fading channels. Using slowly changing nature of the communication channels, analytical formulation for throughput and average packet delay are derived for both non-cooperative and cooperative cases. Cooperative system study is begun with one relay network. Then, number of relay is increased to N relays. After analytical work, non-cooperative and cooperative communication with adaptive modulation and coding systems are simulated. In conclusion, it is shown that adaptive modulation and coding with cooperation provides gain to the transmission performance and

analytical formulations can be used for analyzing the system performance.

Keywords: Wireless Communication, Adaptive Modulation and Coding(AMC), Co-operative Communication, Multiple Relay Cooperation, Automatic Repeat Request

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında ilgisi, yardımları ve yol gőstericilięi için danıőmanım Doç. Dr. Emre Aktaş'a

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve beni daima destekleyen anneme, babama ve kardeőime

Tezin hazırlanıő sūresi boyunca destekleri ve teőviki hiç eksik olmayan araőtırma gőrevlisi arkadaşlarım Uygur Demir'e ve İbrahim Őzkan'a

teőekkūrū bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
SÖZLÜK DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. HATA DENETİMİ VE UYARLAMALI KİPLEME VE KODLAMA İLE İLGİLİ ÖN BİLGİLER	5
2.1. Hata Denetimi - Otomatik Tekrar İsteği	5
2.1.1. Dur ve Bekle OTİ	7
2.1.2. N-Paket Geri Git OTİ	8
2.1.3. Seçici Tekrarlama OTİ	10
2.2. Uyarlamalı Kipleme ve Kodlama	11
3. KANAL MODELİ	15
3.1. Nakagami-m Kanalin İstatistiksel Özellikleri	15
3.2. Kanalin Zamanla Değişiminin Modellenmesi - Markov Zincir Modeli	17
4. UYARLAMALI KİPLEME VE KODLAMALI İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME	21
5. UKK'LI İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME ANALİZİ	27
5.1. UKK'lı İşbirliksiz Haberleşme	27
5.2. Tek Röleli UKK'lı İşbirlikli Haberleşme Sistemi	28
5.2.1. GD'lerin Ortalama Veri Hacim Hesapları	31
5.2.2. Paket Gönderim Süresinin Kanal Durum Süresini Aşma Olasılığı	38
5.3. Çok Röleli UKK'lı İşbirlikli Haberleşme Sistemi	44

5.3.1. GD'lerin Kararlı Hal Olma Olasılıkları	46
6. BENZETİM BULGULARI.....	53
7. SONUÇ	66
KAYNAKLAR.....	70
ÖZGEÇMİŞ	74

ŞEKİLLER

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Haberleşme Modeli	5
Şekil 2.2. Dur ve Bekle Yöntemi	8
Şekil 2.3. N-Paket Geri Git Yöntemi	9
Şekil 2.4. Seçici Tekrarlama Yöntemi	10
Şekil 3.1. Nakagami-m dağılımı ile Rayleigh ($m = 1$) ve Rice ($m > 1$) dağılımlarının karşılaştırılması	17
Şekil 4.1. Basit İşbirlikli Haberleşme Modeli	22
Şekil 4.2. IEEE 802.11 DKİ işleyişi	24
Şekil 4.3. UKK'lı İşbirlikli Haberleşme	25
Şekil 5.1. İşbirliksiz Haberleşme Modeli	27
Şekil 5.2. UKK'lı İşbirlikli Haberleşme	28
Şekil 5.3. Tek röleli UKK'lı işbirlikli haberleşme sistemi için Gönderim Durumları (GD)	31
Şekil 5.4. GD_4 için işbirlikli model	33
Şekil 5.5. İki sekmeli paket gönderimi	36
Şekil 5.6. Çok Röleli Haberleşme İşbirlikli Haberleşme Sistemi	45
Şekil 6.1. Kipleme ve Kodlama Modları, İşbirliksiz UKK ve İşbirlikli UKK kullanımı sonucunda izge verimliliği	53
Şekil 6.2. $m = 1$ için İşbirliksiz UKK'da hedef PHO'nun veri hacmine etkisi	54
Şekil 6.3. $m = 3$ için İşbirliksiz UKK'da hedef PHO'nun veri hacmine etkisi	55
Şekil 6.4. $m = 5$ için İşbirliksiz UKK'da hedef PHO'nun veri hacmine etkisi	55
Şekil 6.5. İşbirliksiz UKK'da $PHO_{azami} = 0.1$ için m parametresinin etkisi	56
Şekil 6.6. İşbirliksiz UKK'da $PHO_{azami} = 0.01$ için m parametresinin etkisi	57
Şekil 6.7. İşbirliksiz UKK'da $PHO_{azami} = 0.001$ için m parametresinin etkisi	57
Şekil 6.8. İşbirliksiz ve İşbirlikli UKK sistemlerinin benzetim ve analitik olarak $m = 1$ için karşılaştırılması	58
Şekil 6.9. İşbirliksiz ve İşbirlikli UKK sistemlerinin benzetim ve analitik olarak $m = 3$ için karşılaştırılması	59

Şekil 6.10. İşbirliksiz ve İşbirlikli UKK sistemlerinin benzetim ve analitik olarak $m=5$ için karşılaştırılması	59
Şekil 6.11. İşbirliksiz ve İşbirlikli UKK sistemlerinin kullanım dışı kalma olasılıkları	61
Şekil 6.12. İşbirlikli UKK sisteminde röle sayısının İşbirliksiz UKK sistemine göre $m=1$ için veri hacmi kazancı	61
Şekil 6.13. İşbirlikli UKK sisteminde röle sayısının İşbirliksiz UKK sistemine göre $m=3$ için veri hacmi kazancı	63
Şekil 6.14. İşbirlikli UKK sisteminde röle sayısının İşbirliksiz UKK sistemine göre $m=5$ için veri hacmi kazancı	63
Şekil 6.15. Ortalama paket gecikmesinin İşbirlikli UKK sisteminde Röle sayısı ile işbirliksiz UKK sistemine göre $m=1$ için değişimi	64
Şekil 6.16. Ortalama paket gecikmesinin İşbirlikli UKK sisteminde Röle sayısı ile işbirliksiz UKK sistemine göre $m=3$ için değişimi	65
Şekil 6.17. Ortalama paket gecikmesinin İşbirlikli UKK sisteminde Röle sayısı ile işbirliksiz UKK sistemine göre $m=5$ için değişimi	65

ÇİZELGELER

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. UKK modları eğri uydurma katsayıları	13
Çizelge 5.1. İşbirliksiz UKK'lı Sistem için $Prob(E)$	43
Çizelge 5.2. İşbirlikli UKK'lı Sistem için $Prob(E)$	44
Çizelge 5.3. 0 dB ortalama kanal İGO için röle sayısı ile kanal güncellenme süresine bağlı $Prob(E)$	52
Çizelge 5.4. 5 dB ortalama kanal İGO için röle sayısı ile kanal güncellenme süresine bağlı $Prob(E)$	52

SİMGELER VE KISALTMALAR

BPSK	Binary Phase Shift Keying
ÇGÇÇ	Çok Girişli Çok Çıkışlı
Çİ	Çöz ve İlet
DB	Dur ve Bekle
DIFS	DCF Interframe Space
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
FBÇE	Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim
GD	Gönderim Durumu
GEK	Gilbert-Elliott Kanalı
HSPA	High Speed Packet Access
İA	İletime Açık
İGO	İşaret Gürültü Oranı
İH	İletime Hazır
İHD	İleri Hata Düzeltme
KBÇE	Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim
KGS	Kanal Güncellenme Süresi
Kİ	Kodlu İşbirlik
NGG	N-Paket Geri Git
OTİ	Otomatik Tekrar İsteği
ÖTGÇ	Öncelik Tabanlı Geri Çekme
PHO	Paket Hata Oranı
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RA	Röle Alıcı
SDMZ	Sonlu Durumlu Markov Zinciri
SIFS	Short Interframe Space
ST	Seçici Tekrarlama
TAÇE	Taşıyıcı Algılamalı Çoklu Erişim
UKK	Uyarlamalı Kiplleme ve Kodlama

VA	Verici Alıcı
VR	Verici Rôle
Yi	Yükselt ve İlet
ZBÇE	Zaman Bölüşümlü Çoklu Erişim

SÖZLÜK DİZİNİ

Bitişik	: Adjacent
Çarpışma Engelleme	: Collision Avoidance
Çarpışma Yakalama	: Collision Detection
Çok Girişli Çok Çıkışlı	: Multiple Input Multiple Output
Çoklu Erişim Çarpışma Engelleme	: Multiple Access Collision Avoidance
Dağılım Kordinasyon Fonksiyonu	: Distributed Coordination Function
Dilimli	: Slotted
Doğrusal Blok Kod	: Linear Block Code
Dur ve Bekle	: Stop and Wait
Eğri Uydurma	: Curve Fitting
Eşlik Denetimi	: Parity Check
Evrişimli Kod	: Convolutional Code
Fiziksel Katman	: Physical Layer
Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim	: Frequency Division Multiple Access
Geri Çekme	: Back Off
Gezgin	: Mobile
Gönderme Çeşitlemesi	: Transmit Diversity
Grup Ortalaması	: Ensemble Average
Hata Düzeltme	: Error Correction
Hata Yakalama	: Error Detection
Hata Yığılması	: Error Burst
Hizmet Dışı	: Outage
Hücresele Ağ	: Cellular Network
İki Fazlı Kaydırmalı Anahtarlama	: Binary Phase Shift Keying
İletime Açık	: Clear to Send
İletime Hazır	: Ready to Send
İlinti	: Correlation
İşaret Gürültü Oranı	: Signal to Noise Ratio
Kanal Durum Bilgisi	: Channel State Information
Karesel Genlik Kipleme	: Quadrature Amplitude Modulation
Karşılıklı Bilgi Miktarı	: Mutual Information

Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim	: Code Division Multiple Access
Mantıksal Bağlantı Katmanı	: Logical Link Layer
Maruz Uçbirim Problemi	: Exposed Terminal Problem
Nokta Kordinasyon Fonksiyonu	: Point Coordination Function
N-Paket Geri Git	: Go Back N
Olasılık Kütle Fonksiyonu	: Probability Mass Function
Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu	: Probability Density Function
Onay	: Acknowledgement
Ortalama Paket Gecikmesi	: Average Packet Delay
Ortalama Sönümlenme Süresi	: Average Fade Duration
Ortama Erişim Denetimi	: Medium Access Control
Öncelik Temelli Geri Çekme	: Priority Based Back Off
Plansız Kablosuz Ağ	: Ad Hoc Wireless Network
Red	: Negative Acknowledgement
Saklı Uçbirim Problemi	: Hidden Terminal Problem
Seğici Tekrarlama	: Selective Repeat
Serpiştirme	: Interleaving
Servis Kalitesi	: Quality of Service
Seviye Geçiş Sayısı	: Level Crossing Rate
Sonlu Durum Markov Zinciri	: Finite State Markov Chain
Taşıyıcı Algılamalı Çoklu Erişim	: Carrier Sense Multiple Access
Uçbirim	: Terminal
Veri Bağlantı Katmanı	: Data Link Layer
Veri Hacmi	: Throughput
Zaman Bölüşümlü Çoklu Erişim	: Time Division Multiple Access

1. GİRİŞ

Teknoloji dünyasında yaşadığımız bu günlerde en yaygın olarak kullanılan ve giderek talebin arttığı kol haberleşme teknolojisidir. Günümüz insanları istediği an ve yerden, istediği kişiye ya da bilgiye ulaşmak istiyor. 1970'lerde birinci-nesil (1N) gezgin iletişim sistemlerinde analog ses iletişimi ile kablosuz haberleşmenin kullanımı herkese açıldı. Daha sonra gelen yıllarda ikinci-nesil (2N) ile ses iletişimi sayısal olarak kullanıma sunuldu. 2000'lerin başında gezgin iletişim kullanıcıları üçüncü-nesil (3N) ile ses iletişimin yanında veri iletişimi, görüntülü konuşma ve internet erişimi imkanı buldular.

3N'den sonra gezgin iletişim cihazları hayatımızın bir parçası haline geldi. İnternetin yaygınlaşması ile kablosuz cihazlara olan ilgi de arttı. Teknoloji geliştikçe izlediğimiz filmlerin, dinlediğimiz müziklerin kalitelerin artması ile kapladıkları veri büyüklüğü de arttı. Kullandığımız gezgin iletişim cihazları ya da kablosuz cihazlar olsun istediğimiz veriye en iyi kalite ile ulaşmak istiyoruz. Bu da kullanılan iletişim kanalının servis kalitesine önemli bir yük bindiriyor. Her geçen gün talep edilen veri hızı giderek artmaktadır. Bunun yanında servis kalitesini ve veri hızını arttırmak için çalışmalar her geçen gün artmaktadır.

Klasik kablosuz haberleşme sistemlerinde alıcı verici arasında bağlantı sağlandıktan sonra iletişim tek bir kipleme ve kodlama üzerinden devam etmekteydi. Kablosuz kanallar doğasından kaynaklı olarak gönderilen veride hatalara neden olmaktadır. Bu sebeple kiplemenin yanında hata yakalayıcı ve/veya düzeltici kodlar kullanılır. Bu sayede alıcıya sunulan verinin güvenilirliği sağlanmış olur. Tek bir kodlama ve kipleme kullanmak kanal kapasitesini verimsizleştirdiği için kanal durumuna göre kodlama ve kiplemenin değiştirildiği uyarlamalı kipleme ve kodlama tekniği geliştirilmiştir.

Uyarlamalı kipleme ve kodlama sayesinde kanal durumu iyi olan kullanıcılara daha yüksek hızda veri iletişimi yapma imkanı sağlar. Kötü kanal koşullarında ise veri hızını düşürerek servis kalitesini kaybetmeden veri iletişimine devam etmesini sağlar. Bu sayede kullanıcılar sistemden kopmamış olur. Uyarlamalı kipleme ve kodlamanın kullanılması için gerekli en önemli şart kanal durum bilgisinin verici tarafında bulunmasıdır. Ayrıca vericideki kanal durum bilgisinin sıklıkla güncellenmesi gerekir. Bu güncelleme sıklıkla yapılmazsa iki durum gerçekleşebilir. Birincisi kanal durumundan daha iyi koşulları gerektiren kodlama ve kipleme çifti kullanılarak iletişim

başarısız olmasına neden olunabilir. İkincisi ise kanal durumundan daha kötü koşullarda çalışabilen kodlama ve kipleme çifti kullanılarak kanal izge verimliliği boşa harcanmış olur. Örneğin ikinci-nesil sistemin bir parçası olan EDGE iki farklı kipleme ve kodlama tekniği kullanılmaktadır [14]. Üçüncü-nesil sistemlerde de aynı şekilde gürültülü kanal koşullarında düşük indeksli kipleme kullanılırken daha iyi kanallarda yüksek indeksli kipleme kullanılmaktadır [15].

Yapılan çalışmalarda uyarlama kipleme ve kodlamanın (UKK) sistem performansına etkileri araştırılmıştır. Uyarlamalı kipleme ve kodlamanın Nakagami-m sönümlenmeli kanallarda kapasiteye etkisi araştırılmıştır [4]. Uyarlamasız duruma göre kapasite kazancı ortaya konulmuştur. Kipleme ve kodlama uyarlaması ile birlikte iletişim gücünde uyarlama yapıldığında sabit güçte kipleme ve kodlama uyarlamasına göre küçük bir kazanç sağladığı da gösterilmiştir. Nakagami-m sönümlenme kanallarında kuyruklama ve fiziksel katman birleştirilerek gecikme, veri hacmi ve paket kaybolma oranı üzerine çalışılmıştır [6]. Yapılan çalışma sonucunda analiz yöntemi ve uygulama alanları ile ilgili bilgi verilmiştir.

UKK'da kullanılacak kipleme ve kodlama çiftlerin seçimi üzerine çalışmalarda bulunulmuştur. Bu çalışmalar izge verimliliğini arttırmaya yöneliktir. Bilinen kipleme tekniklerinin aralarında kalan izge boşluklarını doldurmak için ara değerlerde kipleme teknikleri geliştirilmiştir [7]. Örneğin 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM ve 64-QAM arasında çalışmak üzere sırası ile 6-QAM, 12-QAM, 24-QAM ve 48-QAM kipleme teknikleri geliştirilmiştir. Bu sayede 32-QAM için kötü, 16-QAM için çok iyi olan kanallar koşullarında ara değer kipleme tekniği olan 24-QAM tekniği ile kapasite eğrisi daha düzgün olmaktadır. Ara değer kipleme teknikleri kullanımı ortalama kanal işaret gürültü oranında (İGO) kazanç sağladığı gösterilmiştir.

Uyarlamalı kipleme ve kodlama tekniğinin yanında kullanıcı işbirliğinin de sistem performansını artırdığı gösterilmiştir. Tek antenli kullanıcıların birbirlerinin antenlerini kullanarak çok antenli sistem yararlarından faydalanmalarına imkan sağlayan işbirlik teknikleri tanımlanmıştır [44]. Bu teknikler Yükselt-ve-İlet (Yİ), Çöz-ve-İlet (Çİ) ve Kodlu-İşbirlik (Kİ) olmak üzere üç tanedir. Tanımlanan işbirlik yöntemlerinin sistem gereksinimleri ve uygulama çıkarımları yapılmıştır. İşbirliğinin gelecek haberleşme sistemlerinde kullanılabilirliğinden bahsedilmiştir.

İşbirlikli haberleşmenin farklı protokol katmanlarında kendini gösterebileceği ve kat-

manlar arasında tasarım ve eniyileme için çok çeşitli fırsatlar sağladığı gösterilmiştir [43]. İşbirlikli haberleşmenin sağladığı yararlar şöyle sayılabilir. Yüksek uzamsal çeşitleme sayesinde hem küçük ölçekli hem de gölge sönümlenmesine karşı dayanıklıdır. Yüksek veri hacmi, düşük paket gecikmesi sayesinde yüksek veri hızlarına ulaşılabilir. Ağ koşullarına uyarlanabilir olduğundan fırsatçı kullanıma ve ağ enerji ve bant genişliğinin tekrar dağıtımına imkan sağlamaktadır.

İşbirlikli haberleşme yapılırken amaç sadece tek bir kullanıcıya yönelik performans kazancı sağlamak değildir. İşbirliği yapılarak birden fazla kullanıcı aynı anda verilerini alıcıya gönderebilir. İşbirliği teknikleri ortamda bulunan işbirliğe istekli kullanıcı sayısı ile çeşitlendirilebilir. Çok kullanıcıli ortamlarda çeşitli işbirlikli haberleşme modelleri oluşturulmuş ve karşılaştırmaları yapılmıştır [8].

Bu tez çalışmasındaki amaç işbirlikli haberleşme ile uyarlamalı kipleme ve kodlama tekniğini birleştirerek iletişim performansını arttırmayı hedefleyen yöntemleri incelemektedir. Bu oluşturulan sistem modeline işbirlikli UKK sistemi denilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar çoğu zaman benzetimler kullanılarak yapılmıştır [9, 10]. Analiz yapılan işbirlikli UKK çalışmalarında ise yapılan varsayımlar iletişim kanalı için gerçekçi değildir [11, 12, 13]. Bu varsayıma göre iletişim kanalı bir paket doğru alınıncaya kadar tam ilintili ya da ilintisiz kabul edilmektedir. Bu varsayım sönümlenme kanallarının doğası gereği uygun olmayabilir.

İşbirlikli UKK çalışmalarında genellikle Rayleigh sönümlenme kanal modeli kullanılmaktadır. Rayleigh sönümlenme modeline göre iletişim sırasında verici ve alıcı arasında görüş hattı bulunmaz. Rayleigh ya da Rice sönümlenme modelleri yerine Nakagami-m sönümlenme kullanılması, daha geniş bir çerçevede inceleme yapılmak istenmesindedir. Bu sayede karasal haberleşmeden iç mekan çokyollu yayılımına kadar geniş çapta kanal istatistiksel olarak modellenebilmektedir [17, 19]. Ayrıca iyonosfer radyo bağlantıları da modellenirken kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde hata denetimi ve uyarlamalı kipleme ve kodlama ile ilgili ön bilgi verilmiştir. Hata denetiminin öneminden ve denetimde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Uyarlamalı kipleme ve kodlama ile ilgili detaylı bilgi verilmiştir. Çalışmada kullanılan kipleme ve kodlama çiftleri belirlenmiştir.

Üçüncü bölümde kanal modeli verilmiştir. Bu bölümde Nakagami-m sönümlenme

kanalının istatistiksel özellikleri verilmiştir. Kanal zaman örnekleri arasındaki ilinti göz önünde buldurularak zamanla değişimi modellenmiştir. Kanalin zamanla değişimi modellenirken Markov zincir modeli kullanılmıştır.

Dördüncü bölümde uyarlamalı kipleme ve kodlamalı işbirlikli haberleşme sistemi anlatılmıştır. İşbirlikli UKK sisteminde kullanılan hata denetim yönteminden, kullanılacak UKK modunun seçiminden, tekrar gönderimlerin nasıl yapılacağından bahsedilmiştir.

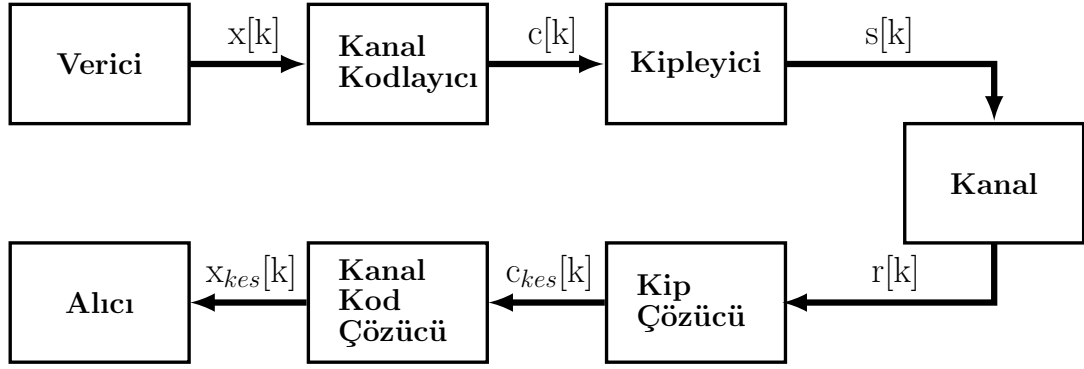
Beşinci bölümde işbiriksiz ve işbirlikli UKK sistemleri için veri hacminin ve ortalama paket gecikmesinin analizi yapılmıştır. Analiz yapılırken işbiriksiz UKK sisteminden başlanıp tek röleli işbirlikli UKK sisteme sonra da çok röleli sisteme geçiş yapılmıştır. Çok röleli işbirlikli haberleşme sisteminin ilintili Nakagami-m sönümlenmeli kanaldaki veri hacminin formüsel olarak hesaplanması gösterilmiştir.

Altıncı bölümde işbirlikli ve işbiriksiz UKK sistemlerinin benzetim çalışması yapılmıştır. Yapılan benzetim çalışmaları analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizin doğruluğu benzetim sonuçları ile desteklenerek gösterilmiştir.

Yedinci bölümde bu tezde yapılan çalışmalar yorumlanmıştır. Ayrıca ileride yapılabilecek olası çalışmalara değinilmiştir.

2. HATA DENETİMİ VE UYARLAMALI KİPLEME VE KODLAMA İLE İLGİLİ ÖN BİLGİLER

Haberleşme sistemleri verici, kanal kodlayıcı, kipleyci, kanal, kip çözücü, kanal kod çözücü ve alıcıdan oluşmaktadır. Verici ve alıcı bilgi iletişimde bulunun iki uçbirimdir. İletişimde kullanılan bilgiye örnek olarak ses, müzik, resim, video ya da veri dosyası verilebilir. İletişimin gerçekleştiği kanalın neden olduğu hataların kestirilmesi için kanal kodlayıcı ve kanal kod çözücü sırası ile vericide ve alıcıda kullanılır. Bu sayede gönderilen bilgide hata olup olmadığı anlaşılabilir, hatalı bilginin yeniden gönderilmesi sağlanır. Kanal modellenirken, yapılan çalışmanın isabetliliği açısından modelenecek çevrenin koşullarına uygun bir kanal modelinin seçilmesi gerekmektedir [1].



Şekil 2.1. Haberleşme Modeli

Vericiden gönderilecek $x[k]$ işareti, kanal kodlayıcısında kullanılan sistemin karakteristiğine bağlı olarak hata-bulucu ve/veya hata-düzeltilici kodla kodlanarak $c[k]$ işareti oluşturulur. Kodlanmış işaret, kipleyci tarafından belirli bir işaret yıldız kümesi kullanarak kanalda yayılabilecek işarete, $s[k]$, çevrilir. Kanaldan alınan işaret, $r[k]$, alıcı tarafında kip çözücü tarafından, vericide kullanılan işaret yıldız kümesi ile çözer ve vericideki kodlanmış işaretin bir kestirimini, $c_{kes}[k]$, oluşturur. Kanal kod çözücü kullanılarak $c_{kes}[k]$ içinde bulunan hatalar algılanır ve/veya düzeltilerek gönderilen bilgi kestirilir, $x_{kes}[k]$.

2.1 Hata Denetimi - Otomatik Tekrar İsteği

Veri iletişimde en önemli kaygılardan birisi, haberleşme kanalında meydana gelen hataların denetimidir. Hata denetimi olmadığı durumlarda iletilen verinin güvenilirliği

ortadan kalkar. Bu problemi çözmek için kodlama kullanılmalıdır. Kodlama iki şekilde olabilir. Bunlar hata yakalayıcı ya da hata düzeltici kodlardır [24, 25, 26, 27, 28]. Hata denetiminde, otomatik tekrar isteği (OTİ) ve ileri hata düzeltme (İHD) olmak üzere temel olarak iki yöntem bulunmaktadır.

OTİ'de, belirli bir tekrar gönderim protokolünün yanında düşük oranlı hata yakalayıcı kod kullanılmaktadır. Hata yakalayıcı kod olarak (n,k) 'lı doğrusal blok kod olabilir. (n,k) 'lı doğrusal blok kodda k bitlik bilgi verisi gönderime hazır olduğunda bu veriye $n-k$ kadar eşlik denetim bitleri eklenerek n bitlik kodlu kelime oluşturulur. Alıcı kısmına iletilen kodlu kelime kanal gürültüsü vb. nedenlerle bozulmaya uğrar. Bu bozulmaların sonucunda alınan kelimedeki iletim hataları meydana gelebilir.

Alıcı tarafından bir kelime alındığında, alıcı bu kelimeye ait sendrom oluşturur. Sendrom çözücü tarafından oluşturulan, alınan kelimenin doğruluğuna ilişkin verilecek kararda kullanılacak olan, ikili kelimedir. Hesaplanan sendrom sıfıra eşit ise alınan kelime bir kodlu kelimedir ve içinde hata yoktur. Bu karar sonrasında alınan kelimedeki eşlik denetim bitleri çıkarılarak kullanıcıya veri iletilir. Eğer hesaplanan sendrom sıfıra eşit değilse, hata yakalanmış olur ve alınan kelime kullanımdan düşürülerek geri bildirim kanalından kodlu kelimenin tekrar gönderilmesi isteği yapılır. Tekrar gönderim kodlu kelime doğru alınıncaya kadar devam eder.

Bu hata denetim yönteminde, alıcı tarafından hata yakalanamadığı durumlarda hatalı veri kullanıcıya iletilir. Uygun hata yakalayan kodlar kullanıldığı sürece hata yakalanamama olasılığı çok küçük yapılabilir [30, 31, 32]. Veri iletişimde, hata denetimi yapılırken OTİ yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. OTİ'nin yaygın kullanılmasıdaki neden basit ve sistem güvenilirliği yüksek olmasıdır. Bunun yanında bir dezavantajı ise kanal hata oranı yükseldikçe, iş çıkarımı sabit kalmayıp hızlı bir şekilde düşmektedir.

İHD hata denetiminde, iletim sırasında meydana gelen hataları düzeltmek için blok ya da evrişimli (convolutional) hata düzeltici kod kullanılır. OTİ'de olduğu gibi, veri bitlerine eşlik denetim bitleri eklenerek kodlu kelime oluşturulur. Alıcı tarafında alınan kelimedeki hata yakalandığında, hatanın bulunduğu yer belirlenmeye ve düzeltilmeye çalışılır. Hata düzeltme işlemi uygulandıktan sonra çözülen kelime kullanıcıya iletilir. Kelimenin hatalı olarak kullanıcıya sunulması, hatanın yakalanamadığı ya da bulunduğu yerin tespit edilemediği zamanlarda meydana gelir. İHD'de tekrar gönde-

rim olmadığından, OTİ'den farklı olarak geri besleme kanalına ihtiyaç duyulmaz. İş çıkarımı sabit olmakla birlikte, sistemde kullanılan kod oranına bağlıdır.

İHD hata denetim sistemlerinin de birkaç dezavantajı bulunmaktadır. Alıcı tarafında bir kelime yakalandığında bu kelime çözülür ve hatalı olsa da olmasa da kullanıcıya iletilir. Çözücü hata olasılığı, yakalanmayan hata olasılığından çok daha büyük olduğundan, İHD sistemlerinin güvenilirliği düşüktür. Yüksek güvenilirlik sağlamak istendiği zaman ise güçlü ve uzun hata düzeltici kodlar kullanılmalıdır. Bu sebeplerden dolayı OTİ, paket anahtarlama haberleşme ağlarında İHD'ye göre daha fazla tercih edilmektedir. Geri besleme kanalının olmadığı ya da tekrar gönderimin mümkün olmadığı iletişim sistemlerinde İHD tercih edilmektedir.

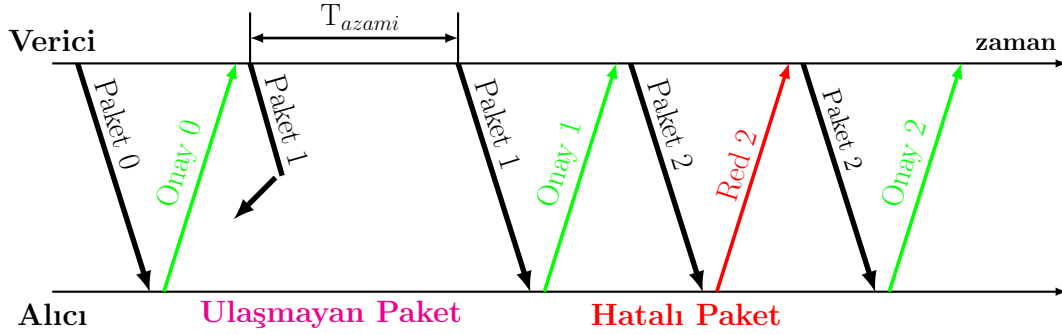
Farklı OTİ yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler birbirinden tekrar gönderimlerin nasıl olacağı yönünde farklılık taşımaktadır. Yeniden gönderimdeki protokol değişikliği, verici ve alıcıda gönderilecek olan veri paketlerinin nasıl saklanacağı, hangi sıra ile yeniden gönderileceğinde farklılıklara neden olur. Farklı yöntemlerin oluşturulmasındaki temel neden, kanal hata oranı arttıkça karşılaşılan problemler ile mücadele etmektir. Bu problemin başında iş çıkarımının hızla düşmesi gelmektedir. Bu hızlı düşüş, tekrar gönderimlerde zamanın boşa harcanmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca verici alıcı arasında sinyal gidiş dönüş gecikmesi arttıkça bu problem önem kazanmaktadır. Uzun gecikme, uydu ve uzun mesafe karasal haberleşme sistemlerinde çok karşılaşılmaktadır.

OTİ'de üç temel tekrar gönderim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar Dur ve Bekle (DB), N-Paket Geri Git (NGG) ve Seçici Tekrarlama (ST) yöntemleridir. Bu yöntemler tekrar gönderim yöntemine göre iki gruba ayrılabilir. Birincisi paket gönderimi alıcıdan gelecek geri bildirim beklediği yöntem olan DB yöntemidir. İkincisi de alıcıdan geri besleme beklemeden paketlerin sürekli gönderildiği NGG ve ST yöntemleridir.

2.1.1 Dur ve Bekle OTİ

En basit OTİ yöntemidir. Verici paketleri tek tek gönderir. Her paket gönderiminden sonra pakete ait onay/red cevabını bekler ve bu sırada kanal boş durumdadır. Bir pakete ait cevap gelmediğinde ise bu paketin hatalı alındığı varsayılır ve verici ilgili paketi tekrar gönderir. Cevap bekleme süresi, kanal gecikmesinin en az iki katı olmalıdır. Paketin doğru alındığını bildiren onay sinyali alındığında, verici yeni pakete

geçer ve işlem tekrar başlar. İlgili paket için alınan red sinyali sonrasında ise paket tekrar gönderilir ve bu işlem paket alıcı tarafından onaylanıncaya kadar devam eder. Paketin yolda kaybolduğu durumda ise paket için beklenen cevap süresi dolar ve paket tekrar gönderilir. Alıcı hatalı bir paket aldığında hatalı paketi arabellekten çıkarır ve paketin yeni kopyasını bekler.



Şekil 2.2. Dur ve Bekle Yöntemi

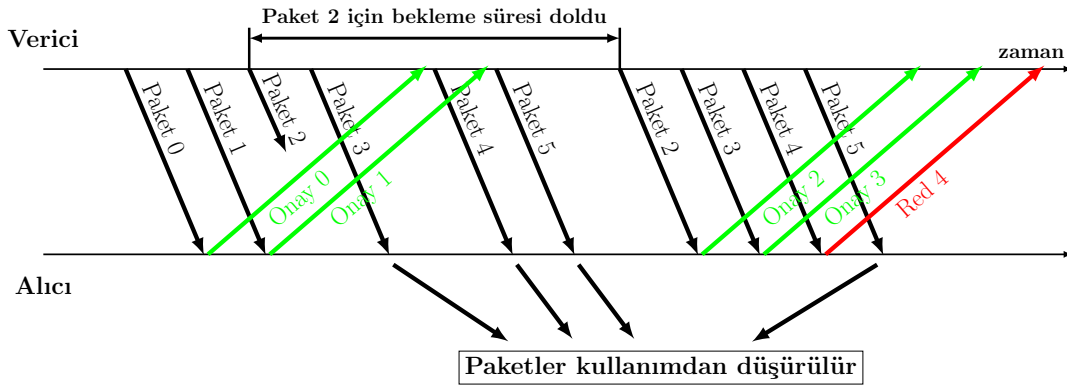
Şekil 2.2'de DB OTİ'nin işleyiş prensibi görülmektedir. Tekrar gönderimlerde alıcı tarafından paketlerin karıştırılmaması için her bir paket numaralandırılmıştır. Paket 0 gönderildikten sonra vericiye gelen onay sinyali ile yeni pakete, yani Paket 1'e, geçilmiştir. Paket 1'in kanal koşulları sebebi ile kaybolması sonucunda alıcı tarafından bir paket algılanmamıştır. Bu sebeple vericiye bir cevap gelmez ve verici T_{azami} süre bekledikten sonra Paket 1'i tekrar göndermiştir. Paket 2'de de ilk gönderimde oluşan hata sonucunda vericiye gelen red sinyali tekrar gönderimi tetikler.

DB OTİ yönteminde, verici tarafında her seferinde bir paket yollandığından ve alıcı tarafında tek bir paket beklendiğinden, bir paket uzunluğunda arabellek yeterli olmaktadır. Bu sebeple DB OTİ diğer yöntemlere göre karmaşıklığı en düşük olan yöntemdir. Karmaşıklığı en düşük olmasının yanında kanaldan yararlanma oranı da en düşük olandır. Her bir paket için cevap beklenildiği için kanalın boş geçen zamanları verimsizliğe neden olmaktadır.

2.1.2 N-Paket Geri Git OTİ

DB OTİ'de kanal gecikmesi arttıkça iş çıkarım oranı azaldığından paketlerin tek tek gönderilmesi yerine N sayıda paketin sıra ile sürekli bir şekilde gönderildiği N-Paket Geri Git OTİ yöntemi geliştirilmiştir. Böylelikle kanaldan yararlanma oranı arttırılmıştır. N-Paket geri git yönteminde numaralandırılmış paketler sıra ile gönderilir ve her

bir paket için onay/red cevabı beklenir. Alıcı tarafında paketler alındıkça onay sinyali gönderilir. Hatalı bir paket alındığında red sinyali gönderilir ve sonra gelen bütün paketler hatalı olup olmadığına bakılmaksızın kullanımdan düşürülür. Red sinyali alınan paket için verici geri gider ve ilgili paketten itibaren paketleri tekrar geri gönderir. Gönderilen bir paket kanal koşullarından dolayı yolda kaybolduğunda alıcı bir sonraki paketi alır ve kaybolan paket için red sinyali gönderir. Kaybolan paket için bir başka yöntem ise zaman aşım prosedürüdür. Zaman aşımına göre kaybolan paket yüzünden yanlış sırada paket alındığında gelen paketler ihmal edilir ve bir cevap sinyali gönderilmez. Verici tarafında ise paketlerin cevap süresini takip eden bir zamanlayıcı bulunur. Zamanlayıcıdaki süre dolduktan sonra paketin hatalı olduğu varsayılır ve tekrar gönderim işlemi başlar.



Şekil 2.3. N-Paket Geri Git Yöntemi

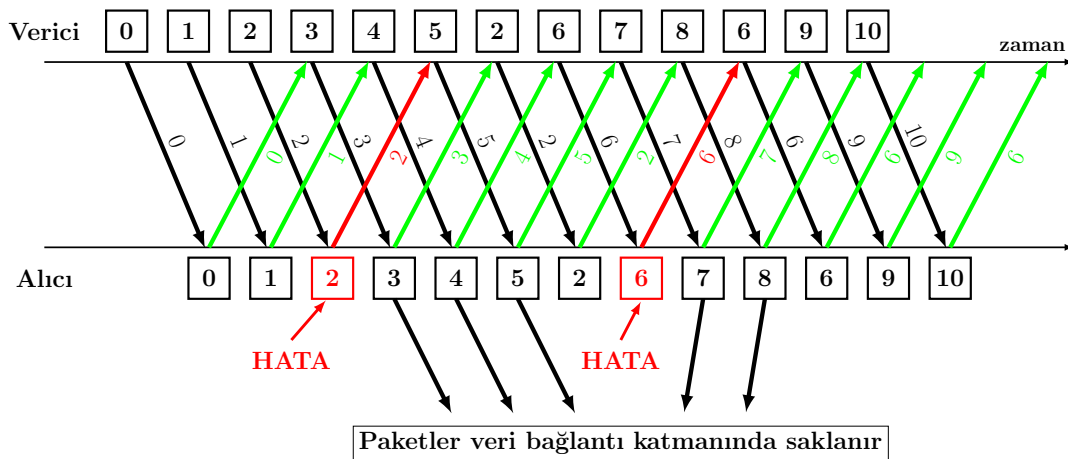
Şekil 2.3'de $N=4$ için NGG OTİ işleyişi gösterilmektedir. Numaralandırılmış paketler sürekli olarak gönderilmeye başlanır. Alınan her paket için alıcı tarafından onay/red sinyali gönderilmektedir. $N=4$ olduğundan dolayı Paket 3'ten sonra paket gönderimi durmuştur. Önceki paketler onaylandıktan sonra yeni paket gönderimi yapılır. Bu yöntemde cevabı alınmamış en fazla dört paket olabilir. Paket 2 yolda kaybolduğu için Paket 3 kullanımdan düşürülmüştür. Vericide zamanlayıcı süresi bitince Paket 2 için tekrar gönderim işlemi başlar. Paket 2 ile ondan sonra gelen gönderilmiş bütün paketler tekrar gönderilir.

NGG OTİ'nin dezavantajı hatalı paket alındığında sonrasında gelen bütün paketlerin hatalı olup olmamasına bakılmaksızın ihmal edilmesi doğru olarak gönderilen paketlerin tekrar gönderilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu da iletimde boşa harcan-

masına neden olmaktadır. Böylelikle işaret gidiş dönüş süresi artıkcı iş çıkarım oranında ciddi kayıplara neden olmaktadır. NGG yönteminin donanımsal ve alıcı verici arasındaki uyum DB yöntemine göre daha fazladır. DB yönteminde alıcı ve vericide bir paketlik arabellekler yeterli olmasına rağmen NGG yönteminde vericide N paketlik arabellek bulunması gerekmektedir. Alıcıda bir paketlik arabellek yeterlidir. Çünkü hatalı paketten sonraki bütün paketler kullanımdan düşürüldüğü için fazladan arabellek ihtiyacı yoktur.

2.1.3 Seçici Tekrarlama OTİ

NGG yöntemi, yüksek veri hızlarında ve büyük sinyal gidiş dönüş sürelerinde, hatalı paketten sonraki paketler durumları ne olursa olsun kullanımdan düşürüldükleri için başarız olmaya başlıyor. Bu sorun Seçici Tekrarlama Otomatik Tekrar İsteği (ST OTİ) yöntemi ile çözülebilmektedir. ST OTİ’de paketler numaralandırılmış bir şekilde sürekli gönderilmektedir. Sürekli gönderilecek paket sayısı N paket ile sınırlandırılmıştır. Her paket için onay/red cevabı gönderilmektedir. Alıcıda hatalı paket algılandığında sonrasındaki gelen paketler NGG’deki gibi kullanımdan düşürülmez. Alınan bütün paketler hatalı olup olmadığı denetlenir. Hatalı paketler kullanımdan düşürülür ve doğru paketler veri bağlantısı katmanında saklanır. Vericiye gelen her onay cevabı ile vericideki paketler arabellekten çıkarılır. Red cevabı alınan paketlerin tekrar gönderimi planlanarak yapılır.



Şekil 2.4. Seçici Tekrarlama Yöntemi

Şekil 2.4’te görüldüğü üzere Paket 2 hatalı alınmış ve daha sonra gelen Paket 3, 4 ve 5 için hatasız kararı verilmiştir. Hatasız olan paketler veri bağlantısı katmanında

bekler. Bu işlem bütün paketler için uygulanır.

Bütün paketlerin hata denetiminden geçtiği ve doğru olanların saklanıp hatalı olanların tekrar gönderildiği ST OTİ yönteminde, paketler N büyüklüğünde bir pencerede gönderildiğinden cevabı beklenen bütün paketlerin vericide saklanması gerekiyor. Bu yüzden N paketlik arabelleğe ihtiyaç duyulur. Alıcıda ise hatalı paketlerden sonra gelen doğru paketlerin saklanması için yine N paket büyüklüğünde arabelleğe ihtiyaç vardır. Bu de ST OTİ'nin masrafını arttırmaktadır. Ayrıca doğru paketlerin saklanıp hatalı paketlerin tekrar gönderimlerinden kaynaklanan paket sırasının bozulmasının giderilmesi sistem karmaşıklığını arttırmaktadır [29].

2.2 Uyarlamalı Kipleme ve Kodlama

Çoğu kipleme ve kodlama tekniği sönümlenme koşullarına uyarlanabilir şekilde tasarlanmamaktadır. Bunun yerine sistemin çalışacağı yerdeki en kötü kanal koşullarına göre tasarlanır. Uyarlamasız methodlar kötü kanal koşullarında kabul edilebilir performans göstericek şekilde sabit bir bağlantı payı ihtiyacı duyarlar. Uyarlamasız kipleme ve kodlama kullanılması, tam kanal kapasitesinden yetersiz faydalanmaya neden olmaktadır. Uyarlamalı kipleme ve kodlama kullanımı, kanal durumuna göre kullanılan kip ve kod değiştirildiği için kanal kapasitesinin verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır.

Uyarlamalı kipleme ve kodlamanın kullanılabilmesi için kanal durum bilgisinin alıcı ve vericide doğru ve güncel olarak bulunması gerekmektedir. Alıcı tarafından kanal kestirimi yapıldıktan sonra, vericiye iletilmesi ile iletim gücü ve hızı uyarlanarak Shannon kapasitesine ulaşılabilir [2]. Uyarlamalı kipleme ve kodlama, iletimde kullanılan işaret yıldız kümesinin gücünü, büyüklüğünü ve süresini değiştirdiği için hata yığılması önlenmekte ve serpiştirme (interleaving) ihtiyacı duymamaktadır. Bunun yanında, hassas kanal kestirimi ve kestirilen kanalın en küçük gecikme ile vericiye iletilmesi önemlidir. Bu tezde, alıcıda mükemmel kanal kestirimi yapıldığı ve kestirim bilgisinin vericiye geribeslenmesinde sıfır gecikme ile taşındığı varsayımı yapılmıştır. Yapılan kestirimdeki hataların ve geribeslemedeki gecikmenin uyarlamalı kipleme üzerindeki etkisi [3]'te incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kestirimde 1 dB'den az hatanın olması ve geribesleme kanalındaki gecikmenin de $0.001/f_o$ 'den az olması durumunda en az performans bozulması olduğu gösterilmiştir.

Önemli diğer bir nokta ise vericinin uyarlamalı kipleme ve kodlama planını ne sıklıkla güncellemesi gerektiğidir. İyi bir kestirim yapılabilmesi için birkaç işaret süresinin geçmesi gerekmektedir. Kipleme ve kodlama planının güncellenme süresinin belirlenmesinde çalışılan kanalın istatistiksel özelliklerinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Kanalın blok sönümlenme özelliği bulunduğundan en büyük kod bloğu uzunluğu kanal blok uzunluğunun $1/10$ 'u olarak seçilmiştir. Böylelikle hem mükemmel kanal kestirimi için alıcıya yeterli süre tanınmış hem de kanal değişim süresi istatistiksel olarak aşılmamıştır.

Bu çalışmada kullanılan uyarlamalı kipleme ve kodlama (UKK) modları şu şekildedir.

- $\frac{1}{2}$ evrişimli kodlu ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK).
- $\frac{1}{2}$ evrişimli kodlu dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama (QPSK).
- $\frac{3}{4}$ evrişimli kodlu dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama (QPSK).
- $\frac{1}{2}$ evrişimli kodlu 16'lı karesel genlik kipleme (QAM).
- $\frac{3}{4}$ evrişimli kodlu 16'lı karesel genlik kipleme (QAM).

İletişimde kullanılan paket veri bit miktarı sabit olarak seçilmiştir. Bu seçimin bir sonucu olarak UKK modlarının paket süreleri (T_{mod_n}) ve kanal güncellenme süresi (T_{KGS}) arasındaki ilişki Eş 2.1a ve Eş 2.1b'de verilmiştir.

$$T_{KGS} = 10T_{mod_1} \quad (2.1a)$$

$$T_{mod_1} = 2T_{mod_2} = 3T_{mod_3} = 4T_{mod_4} = 6T_{mod_5} \quad (2.1b)$$

Seçilen UKK modlarının hangi sönümlenme seviyelerinde kullanılacağına seçilmesinde, servis kalitesi belirteci olan hedef paket hata oranı ve modların paket hata oranı fonksiyonları kullanılmaktadır. Modların paket hata oran fonksiyonları yapılan benzetim sonucu eğri uydurma tekniği ile üssel olarak Eş 2.2'deki şekilde tanımlan-

Çizelge 2.1. UKK modları eğri uydurma katsayıları

	Mod 1	Mod 2	Mod 3	Mod 4	Mod 5
Kipleme	BPSK	QPSK	QPSK	16 QAM	16 QAM
Kod oranı	1/2	1/2	3/4	1/2	3/4
a_n	39074.4	33026.4	24408	15217.2	16081.2
g_n	6.963	3.398	1.676	0.7796	0.3543
γ_{pn}	0.5154	1.0066	1.8604	3.3934	7.6226

mıştır. Benzetim sırasında paket uzunluğu olarak 1080 bit kullanılmıştır.

$$PHO_n(\gamma) = \begin{cases} 1 & , \gamma \leq \gamma_{pn} \\ a_n \exp(-g_n \gamma) & , \gamma > \gamma_{pn} \end{cases} \quad (2.2)$$

Eğri uydurma katsayıları a_n , g_n ve γ_{pn} Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Verilen hedef paket hata oranına (PHO_{azami}) göre UKK modlarının başlangıç işaret gürültü oranı (İGO) seviyeleri Eş 2.3'teki gibi bulunabilir.

$$\Gamma_n = \begin{cases} 0, & , n = 0 \\ \frac{1}{g_n} \ln\left(\frac{a_n}{PHO_h}\right) & , n = 1, \dots, N_n \\ \infty & , n = N_n + 1 \end{cases} \quad (2.3)$$

Eş 2.3'teki N_n sistemde kullanılan UKK mod sayısını ifade etmektedir. Mod 0 olarak tanımlanan aralık (İGO= $[0, \Gamma_1)$) kanal durumunun iletişime uygun olmadığı hizmet dışı (outage) durumunu ifade eder. Modların kullanılacağı sınır değerler belirlendikten sonra her bir modun ortalama hata oranı

$$\overline{PHO}_n = \begin{cases} 1 & , n = 0 \\ \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} a_n \exp(-g_n \gamma) p_\gamma(\gamma) d\gamma & , n = 1, \dots, N_n \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\overline{PHO}_n = \begin{cases} 1 & , n = 0 \\ a_n m^m \frac{(\Gamma(m, b_n \gamma_m) - \Gamma(m, b_n \gamma_{n+1}))}{Pr(n) \Gamma(m) (\bar{\gamma})^m b_n^m} & , n = 1, \dots, N_n \end{cases} \quad (2.5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Eş.2.5'te $b_n = \frac{m}{\bar{\gamma}} + g_n$ ve tamamlanmamış Gamma fonksiyonu $\Gamma(a, b) = \int_0^b z^{a-1} \exp(-z) dz$ olarak tanımlanmıştır. $p_\gamma(\gamma)$ kanal işaret gürültü oranının olasılıksal dağılımını ifade etmektedir ve Bölüm 3'te incelenecektir.

3. KANAL MODELİ

Kablosuz haberleşme kanallarında, gönderilen işaretin alıcıya ulaşmadan önce farklı engellere çarpmasından kaynaklı, aynı işaretin farklı genlik ve evreli kopyaları alıcıya ulaşır. Bunun yanında verici, alıcı ve saçılmaya (yansıma, kırılma , kırınım) neden olan engeller hareket halinde ise, alıcı verici arasındaki kanal zamanla değişiyor demektir. Bu olaya sönümlenme denir. Sönümlenme sonucunda alıcıda alınan işaret genliği ve evresi zamanla değişim göstermektedir. Alıcıda alınan işaret matematiksel olarak

$$r = hs + n \quad (3.1)$$

şeklinde gösterilmektedir. r alıcıda sönümlenme sonucunda alınan işareti, s verici tarafından gönderilen işareti ve n karmaşık Gauss türü gürültüyü tanımlar. Sönümlenme genliği, h , farklı yollardan gelen işaretlerin genliklerinin fazör toplamını ifade etmektedir.

3.1 Nakagami-m Kanalin İstatistiksel Özellikleri

Günümüzde, kablosuz kanal istatistiğini iyi bir şekilde yansıtan bir çok kanal modeli bulunmaktadır. Bu modellerin arasında Nakagami-m modeli en çok ilgi gören modeller arasındadır. Nakagami-m modeli çok-yollu kara gezgin yayılımından iç-mekan gezgin yayılımına, geniş bir çerçevede modelleme yapılmasına imkan sağlar [17, 20]. Ayrıca direk görüş hattının bulunduğu sistemlerde (Rice sönümlenme), Nakagami-m modeli matematiksel olarak işlem kolaylığı sağlamaktadır. Sönümlenme genliğinin Nakagami-m olasılık yoğunluk fonksiyonu (OYF) Eş 3.2'de verilmiştir.

$$p_h(h) = \frac{2m^m h^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mh^2}{\Omega}\right) \quad (3.2)$$

Nakagami-m OYF değişkenleri $m = E^2[h^2]/var(h^2)$, $\Omega = E[h^2]$ dir. $h_{rms} = \sqrt{\Omega}$ ve Gamma fonksiyonu $\Gamma(m) = \int_0^{\infty} x^{m-1} \exp(-x) dx$ şeklinde tanımlanmıştır [18]. Alınan işaret güç oranının (İGO) dağılımı Eş 3.3'te Gamma olasılık yoğunluk fonksiyonu olarak verilmiştir.

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\Gamma(m)\bar{\gamma}^m} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}\right) \quad (3.3)$$

Ortalama alınan İGO $\bar{\gamma} = E[\gamma]$ şeklinde hesaplanır. Sönümlenme parametresi m tanımlı olduğu aralıkta ($m > \frac{1}{2}$) farklı sönümlenme modellerine denk gelmektedir. Bunlar;

- $m = \frac{1}{2}$, tek- taraflı Gauss sönümlenmeyi,
- $m = 1$, Rayleigh sönümlenmeyi,
- $m > 1$, Rice sönümlenmeyi,
- $m = \infty$, sönümlenmenin olmadığı durumu tanımlamaktadır [19].

Rice dağılımının, Nakagami- m ile olan bağıntısı iki temel formül ile gösterilmiştir [19]. Rice dağılımını tanımlamakta kullanılan iki değişken bulunmaktadır. Bu değişkenler k , açık görüş hattı işareti ile saçılmış işareti arasındaki güç oranı, ve σ^2 , saçılmış dalganın gücü, şeklindedir. Rice dağılımı değişkenlerinin (k, σ^2), Nakagami- m dağılımı değişkenleri ile bağıntısı [19]'da

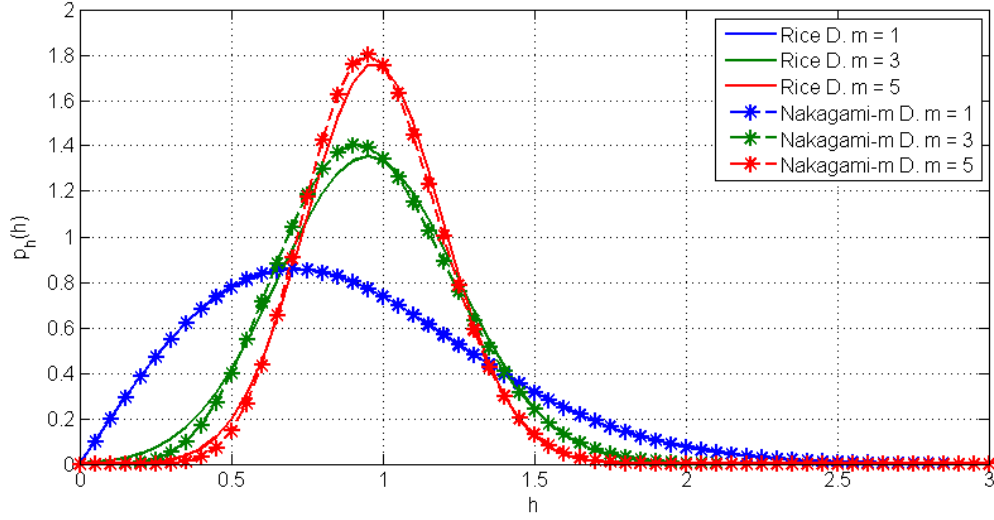
$$m = \frac{(1 + k)^2}{2k + 1} \quad (3.4)$$

$$\sigma^2 = \frac{\Omega}{2} \left(1 - \sqrt{1 - m^{-1}}\right) \quad (3.5)$$

şeklinde verilmiştir.

Eş 3.4 ve Eş 3.5'te verilen ilinti kullanılarak oluşturulan sönümlenme işaretleri denk istatistiksel özellikler göstermektedir [21]. Özel bir durum olan $m = 1$, eşdeğeri $k = 0$, durumunda Nakagami- m dağılımı Rayleigh dağılımına dönüşmektedir. $m > 1$ olan durumda, $k > 0$, Şekil 3.1'de görüldüğü üzere Nakagami- m dağılımı Rice dağılımının yaklaşımı şeklindedir.

Nakagami- m dağılımının sönümlenme istatistikleri olan seviyeden geçiş sayısı (level crossing rate) ve ortalama sönümlenme süresi (average fade duration) [22]'de verilmiştir. Seviye geçiş sayısı, L_R , belirli bir seviye olan R 'den sönümlenme zarfı h 'ın pozitif ya da negatif tarafa doğru saniyede geçiş sayısıdır [23]. Ortalama sönümlenme süresi, T_R , ise sönümlenme zarfı h 'ın belirli bir R seviyesinin altında kaldığı



Şekil 3.1. Nakagami-m dağılımı ile Rayleigh ($m = 1$) ve Rice ($m > 1$) dağılımlarının karşılaştırılması

ortalama süredir [23]. Seviye geçiş sayısı ve ortalama sönümlenme süresi matematiksel olarak sırası ile Eş 3.6 ve Eş 3.7’de verilmiştir.

$$L_R = \sqrt{2\pi} f_m \frac{m^{m-\frac{1}{2}}}{\Gamma(m)} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2) \quad (3.6)$$

$\rho = R/h_{rms}$ olarak tanımlanmış ve f_m Hertz cinsinden enbüyük Doppler kaymasıdır.

$$T_R = \frac{\Gamma(m, m\rho^2)}{\sqrt{2\pi} f_m m^{m-\frac{1}{2}} \rho^{2m-1} \exp(-m\rho^2)} \quad (3.7)$$

Tamamlanmamış Gamma fonksiyonu,

$$\Gamma(a, b) = \int_0^b z^{a-1} \exp(-z) dz \quad (3.8)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

3.2 Kanalın Zamanla Değişiminin Modellenmesi - Markov

Zincir Modeli

1950’lerin sonlarına doğru, Gilbert ve Elliott telefon hatlarında hata yığılmasını modellemek için hafızaya sahip iki durumlu kanal modeli kullandılar. Bu basit model hata yığılmalı kanalların kapasite ve hata oranı hesaplanmasını kolaylaştırdı. Bu

kanal modeli Gilbert-Elliott Kanalı (GEK) olarak bilinir. Yaklaşık 30 yıl sonra, 2N kablosuz haberleşme sistemlerinin tasarımında GEK ve geliştirilmiş hali olan Sonlu Durumlu Markov Kanal (SDMK) modeli kullanıldı. 1990'ların ortalarından bu yana GEK ve SDMK modeli frekans seçici olmayan kanalların modellenmesinde çokça kullanılmaktadır. SDMK modeli çok amaçlı kullanımının yanında, uygun kanal parametrelerinin seçimi ile zamanla değişen kanalların özünü yansıtabilir.

Hafızalı sönümlenmeli kanallar gezgin kablosuz haberleşmede yaygındır [33]. 90'ların ortasında sayısal hücreli ağların gelmesi ve yaygınlaşması ile, hafızalı sönümlenmeli kanalların doğru modellenmesi önem kazandı. Bu kanal modelleri, tasarımcılara sistem performansını, yani kanal kodlarının hata düzeltme yeteneklerinin ölçülmesine ya da paket iş çıkarma oranının hesaplanmasına yardımcı olmuştur. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki kanal modellenmesi hafızasız olarak yapıldığında hafızalı olanlara göre sistem performansı daha düşüktür [34].

Hafızalı sönümlenmeli kanal modellenmesinde, kanal İGO'sunun zamanla alınan örnekleri arasındaki ilinti kullanılarak N dereceli Sonlu Durumlu Markov Zincir (N-SDMZ) modeli kullanılır. SDMZ'deki N parametresi kanal modellenmesinde, şimdiki zaman örneğinin kaç zaman önceki örneklerle ilintili olduğunu ifade etmektedir. [35]'te birinci dereceden SDMZ modelinin yavaş değişen Rayleigh Sönümlenme için yeterli olduğunu göstermiştir. Birinci dereceden SDMZ modelinin analizinde kanal İGO örneklerinin geçmiş zamanlı örnekleri ile olan karşılıklı bilgi miktarı kullanılmıştır. Şimdiki zamandaki örneğe kendisinden iki örnek ve öncesinden sağlanan bilgi ihmal edilebilir düzeyde olduğundan birinci dereceden SDMZ modelinin doğru bir model olduğu kanıtlanmıştır.

[36]'da Rice Sönümlenmeli kanal için SDMZ modeli incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda yavaş değişen kanallar için birinci dereceden SDMZ modelinin yeterli bir model olduğu gösterilmiştir. Ayrıca kanal değişim hızının model derecesine olan etkisi incelenmiş ve kanal değişim hızı arttıkça model derecesinin de artırılması gerektiği ortaya konulmuştur. [38]'deki Rayleigh sönümlenme SDMZ modelinden yola çıkarak [37]'de birinci dereceden SDMZ modelinin yavaş değişen Nakagami-m sönümlenme kanalları için de uygun olduğu gösterilmiştir.

SDMZ modeli oluşturulurken kanal İGO birbiri ile kesişmeyen aralıklara ayrılır ve her bir aralığa Markov durumu denir. Yavaş değişen sönümlenmeli kanalların modellen-

mesinde, sadece bitişik olan aralıklar arasında geçişin olduğu varsayımı yapılabilir. Bu varsayım kanalın yavaş değişme özelliğinden kaynaklı olarak, kanal İGO'sunda ani sıçramalar olmayacağından geçerli bir varsayımdır. Bu varsayıma göre Markov durumları oluşturulurken üç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler şu şekildedir.

1. Her bir Markov durumunun, kararlı halde meydana gelme olasılıklarının eşit olarak seçildiği yöntemdir [39].
2. Oluşturulacak kanal İGO aralıklarının eşit ortalama sönümlenme sürelerine sahip olacak şekilde ayarlandığı yöntemdir. Seçilen süre, iletişimde kullanılan paketlerin sürelerine uygun olarak ayarlanması gerekir [40].
3. Bitişik olmayan Markov durumları arasındaki geçiş olasılığının en küçük yapıldığı yöntemdir [41]. Bu yöntemde göre varsayımsal olarak bitişik olmayan Markov durumlar geçişlerin olmaması yeterli değildir. Bitişik olmayan durumlar arasındaki geçişin belli bir eşik değer altında kalması gerekmektedir. [41]'da yapılan çalışmalar sonucunda bu yöntemin diğer yöntemlerden daha iyi performans sağladığı gösterilmiştir.

Bu tezde, kanalda yapılan iletişimde uyarlamalı kiplenme ve kodlama uygulandığından, literatürde verilen İGO aralık ayırma yöntemleri SDMZ modelinde kullanılamıyor. Bu yöntemler yerine, hedef servis kalitesine göre belirlenen UKK modlarının İGO aralıkları birer Markov durumu olarak tanımlanmıştır. Kanalın yavaş değişme özelliğinden dolayı, bu yöntemle belirlenen Markov durumları, sadece bitişik olan durumlar arasında geçişe sahip olma varsayımını desteklemektedir.

Bölüm 2.2'de UKK'dan ve seçilen modların kullanılacağı İGO aralıklarının (Markov durumlarının) sınır değerlerinin hesaplanmasından bahsedilmiştir (Eş 2.3). Buna göre Markov durumları arasındaki geçiş olasılığı matrisi, $(N_n + 1) \times (N_n + 1)$ boyutunda

$$P_g = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & 0 & \cdots & 0 \\ P_{1,0} & P_{1,1} & P_{1,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & P_{N_n-1,N_n-2} & P_{N_n-1,N_n-1} & P_{N_n-1,N_n} \\ 0 & \cdots & 0 & P_{N_n,N_n-1} & P_{N_n,N_n} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

şeklindedir.

Durum geçiş olasılıkları

$$P_{n,l} = 0, \quad |l - n| \geq 2 \quad (3.10)$$

$$P_{n,n+1} = \frac{L_{n+1} T_{KDS}}{Pr(n)} \quad (3.11)$$

$$P_{n,n-1} = \frac{L_n T_{KDS}}{Pr(n)} \quad (3.12)$$

$$P_{n,n} = \begin{cases} 1 - P_{n,n+1} - P_{n,n-1}, & 0 < n < N_n \\ 1 - P_{0,1}, & n = 0 \\ 1 - P_{N_n, N_n-1}, & n = N_n \end{cases} \quad (3.13)$$

şekilde hesaplanmaktadır [42]. L_n İGO düzey geçiş oranını ve $Pr(n)$ n'inci Markov modun kararlı halde olma olasılığıdır. Eş 2.3'te hesaplanan İGO seviyeleri kullanılarak L_n ve $Pr(n)$ hesaplanışı Eş 3.14 ve Eş 3.15'te sırası ile verilmiştir.

$$L_n = \frac{\sqrt{2\pi} f_d}{\Gamma(m)} \left(\frac{m\Gamma_n}{\tilde{\gamma}} \right)^{m-0.5} \exp\left(-\frac{m\Gamma_n}{\tilde{\gamma}}\right) \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} Pr(n) &= \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_\gamma(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{\Gamma(m, \frac{m\Gamma_n}{\tilde{\gamma}}) - \Gamma(m, \frac{m\Gamma_{n+1}}{\tilde{\gamma}})}{\Gamma(m)} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Eş 3.14 ve Eş 3.15'teki f_d en büyük Doppler kaymasını, $\Gamma(a)$ Gamma fonksiyonunu ve $\Gamma(a, b)$ tamamlanmamış Gamma fonksiyonunu ifade eder. $\Gamma(a, b)$ Eş 3.8'de ve $\Gamma(a)$ Eş 3.16'da verilmiştir.

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} z^{a-1} \exp(-z) dz \quad (3.16)$$

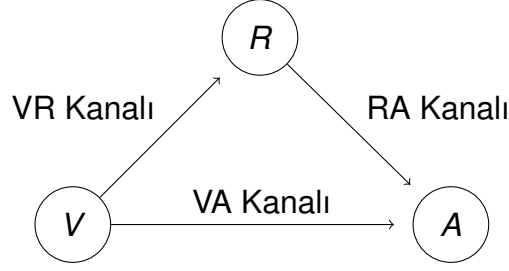
4. UYARLAMALI KİPLEME VE KODLAMALI İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME

Çok Girişli Çok Çıkışlı (ÇGÇÇ) kablosuz haberleşme sistemlerinin avantajları yaygın bir şekilde kabul görmüş durumdadır. ÇGÇÇ sistemler, belirli bir gönderme çeşitlemesi seçilerek kablosuz standartları ile birleştirilmiştir. Gönderme Çeşitlemesi (GÇ - Transmit Diversity) genellikle alıcıda birden fazla antene ihtiyaç duyar. Fakat, çoğu kablosuz cihazlar büyüklük, maliyet ve donanımsal kısıtlar yüzünden sadece bir antenle kısıtlı kalırlar. Çok kullanıcılı ortamlar, tek antenli kullanıcıların birbirlerinin antenlerini kullanarak sanal çoklu anten vericisi oluşturulmasına imkan sağlar. Böylelikle gönderme çeşitlemesi başarılabilir. Bu yöntemle işbirlikli haberleşme denir.

İşbirlikli kablosuz haberleşmede, hücreli (planlı) ya da plansız (ad hoc) kablosuz ağlarda ortamda bulunan bütün kablosuz cihazlar kullanıcı olarak adlandırılır. Bu kullanıcıların işbirliğinde bulunmalarındaki temel amaç kendi etkin servis kalitesi ölçütlerini, ki bunlar fiziksel katmanda ölçülen bit hata oranını, blok hata oranını, kullanım dışı kalma olasılığını iyileştirmektir. İşbirlikli haberleşme sistemlerinde verici alıcı dışında kalan, ortamı kullanmaya izni olmayan kullanıcılar boşta beklemektense devam eden veri iletişimine yardım etme isteğinde bulunabilirler.

Kullanıcılar arasında işbirliği farklı yöntemlerle yapılabilir. İşbirliği sırasında verici ve alıcı dışında kalan yardıma istekli kullanıcılara röle ismi verilir. Bunlar yükselt ve ilet, çöz ve ilet, kodlu işbirlik yöntemleridir. Bu yöntemlerde gönderme çeşitliliği sağlamak için aynı verinin farklı kopyaları farklı yerlerden (kullanıcılardan) gönderilmesi sonucunda, alıcı tarafında bir birleştirme işleminden geçerek asıl veri hatasız bir şekilde elde edilmeye çalışılır. [44, 45]'te basit işbirlikli sistemlerde, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi alıcı verici ve bir röleden oluşan sistemler, işbirlik yöntemlerine genel bir bakış ve inceleme yapılmıştır.

Yükselt ve ilet (Yİ) yönteminde verici tarafından yayınlanan veri sinyali hem alıcı hem de röle tarafından sönümlenmiş ve gürültülü kopyaları alınır. Daha sonra röle tarafından alınan sönümlenmiş gürültülü kopya yükseltılarak alıcıya iletilir. Bu sırada röledeki kopya sinyaldeki gürültüde yükseltilmiş olur ve alıcıdaki toplam gürültü gücü artar. [46]'da yükselt ve ilet yöntemi önerilmiş ve analizi yapılmıştır. Yine aynı yayında bu methodun yüksek İGO'larında en iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Yükselt ve ilet



Şekil 4.1. Basit İşbirlikli Haberleşme Modeli

yöntemi diğer yöntemlere göre uygulanması ve analizi daha kolaydır. Bunun yanında performans kazancı diğer yöntemlere göre daha düşüktür. Yükselt ve iletdeki performans kazancı, alıcıda kullanıcılar arasındaki kanalın anlık durumu bilindiğinde, en iyi çözme kullanılarak arttırılabilir.

Çöz ve ilet (Çİ) yönteminde, vericiden alınan veri kopyası çözme işlemine tabi tutularak sinyalin içinde bulunan sönümlenme ve gürültünün elenmesi amaçlanmaktadır. Böylelikle alıcıda alınan gürültü gücü düşürülmüş ve birleştirme sonrasında hata yapılma olasılığı düşürülmüştür. Rölede yapılan çözme işlemi sadece kullanılan kipleme yöntemine göre analog sinyalden, sayısal sinyale dönüştürmeye yöneliktir. Çözülen kopyanın doğru yanlışlığı ile ilgili bir işlem yapılmaz. Hata denetimi olmadığından, hatalı veri kopyası alıcıya iletilebilir. Röleden gönderilen hatalı verideki hatalı yerlerde, röle alıcı kanalında tekrar hata oluşarak doğru duruma dönüşebilir. Aynı şekilde hatasız yerlerde de hata oluşabilir. Alıcıda yapılan birleştirme işleminden sonra alınan sonuçlar göstermiştir ki çöz ve ilet yöntemi, yükselt ve ilet yöntemine göre daha iyi performans göstermektedir [46, 47].

Kodlu işbirlik (Kİ) yönteminde [48, 49], kodlama işbirlikle bütünleştirilmiştir. Bu yöntemde, kullanıcının kodlu kelimesi iki parçaya ayrılır. İlk parça kullanıcı tarafından alıcıya gönderilir. Röle görevi yapan diğer kullanıcı ise aldığı ilk parçayı çözerek ikinci parçayı doğru bir şekilde çözerse ikinci parçayı elde edebilir. Röle tarafından elde edilen ikinci parça röle tarafından gönderilir. Alıcıda yapılan birleştirme işleminden sonra kodlu kelime çözülerek asıl veri elde edilir. Röle tarafından ikinci parça elde edilemezse sistem işbiriksiz duruma geçer ve ikinci parça verici tarafından gönderilir. Bu üç yöntemin performans karşılaştırmaları [44]'da yapılmıştır. Düşük İGO bölgesinde Yİ ve Çİ yöntemleri etkisini kaybederek işbiriksiz yöntemden daha kötü sonuç vermektedir. Kİ yöntemi ise bütün İGO bölgelerinde işbiriksiz yöntem kadar iyi ya da daha iyi performans göstermektedir.

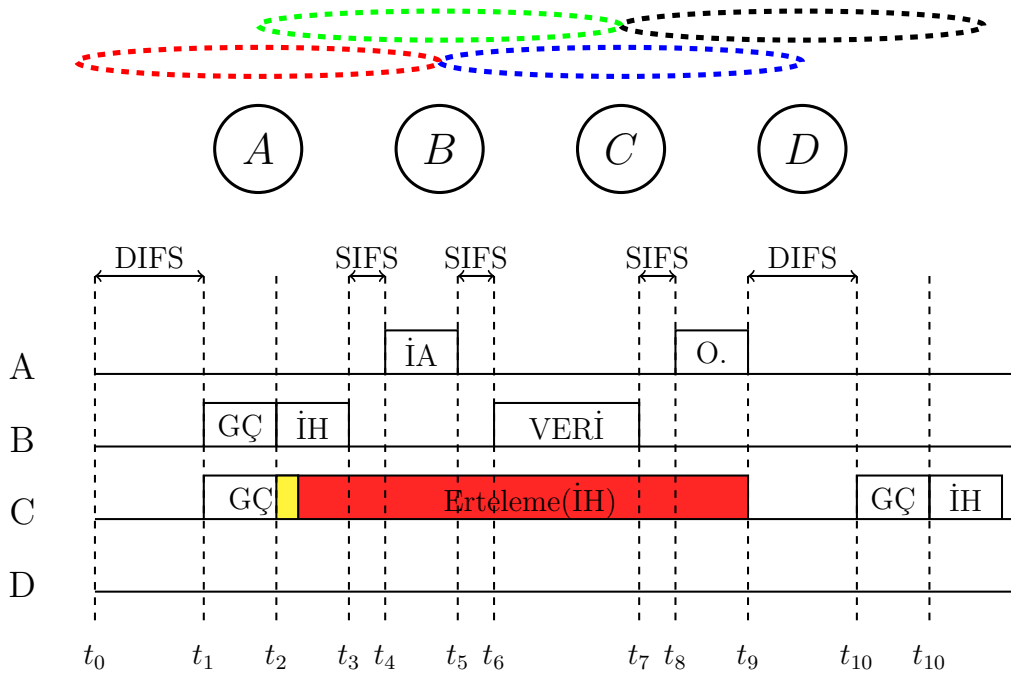
Kablosuz çok kullanıcıli ortamlarda, gönderilecek veriye sahip olan kullanıcıların ortama nasıl erişip iletme başlayacakları belirli kurallar içerisinde olmaktadır. Bu kurallar Veri Bağlantı Katmanının (VBK) bir alt katmanı olan Ortama Erişim Denetimi (OED) alt katmanında bulunur. Bu alt katmanda adresleme ve kanala nasıl erişileceği belirlenir. OED alt katmanı, Fiziksel Katman (FK) ile VBK'nın diğer bir altkatmanı olan Mantıksal Bağlantı (MB) alt katmanı arasında bir arayüz gibi davranır.

OED yöntemleri iki gruba ayrılır. Bunlar mücadelesiz ortama erişim ve mücadele temelli ortama erişimdir. Mücadelesiz ortama erişimde Jeton Tabanlı (JT), Zaman Bölüşümlü Çoklu Erişim (ZBÇE - TDMA), Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim (FBÇE - FDMA) ve Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim (KBÇE - CDMA) ve benzeridir. JT'de bütün kullanıcılar jeton denilen özel işareti almadan ortama erişmeleri mümkün değildir. ZBÇE, FBÇE ve KBÇE yöntemlerinde ise sırası ile zamanda, frekansta ve kodlama ile ayrılmıştır.

IEEE 802.11 iki farklı modda OED protokolü ile belirlenir. Birincisi Dağıtım Koordinasyon İşlevi (DKİ - Distributed Coordination Function/DCF), ikincisi Nokta Koordinasyon İşlevidir (NKİ - Point Coordination Function/PCF) [56, 57, 58]. IEEE 802.11 DKİ, TAÇE/ÇE yöntemini temel alarak oluşturulmuştur. DKİ plansız kablosuz ağlarda, NKİ ise bir merkeze bağlı altyapıya sahip kablosuz ağlarda kullanılır.

Şekil 4.2'deki IEEE 802.11 DKİ işleyişini inceleyecek olursak. B uçbirimi A'ya, aynı zamanda C uçbirimi D'ye veri göndermek istediğinde ortamı DIFS (DCF Interframe Space - DKİ Çerçeve Arası Boşluk) süre dinlerler. Bu zaman zarfında ortam boş ise rassal olarak Geri-Çekme (GÇ) süresi başlatılır. GÇ süresi TAÇE/ÇE'deki gibi çarpışmaları önlemek amacı ile kullanılır. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere B uçbiriminin GÇ süresi C uçbirimininkinden daha kısadır. Bu sayede C gerisayım yaparken B ortama erişir. B'nin yayınladığı İH sinyali ile ortam artık meşgul duruma geçer. C'nin GÇ süresi bittiğinde ortam artık boş değildir ve İH sinyali yayınlanıyordur. Bu durumda C'nin yapabileceği tek şey gönderimini ertelemek olur. Erteleme süresi İH sinyali içerisindeki veri uzunluk bilgisi kullanılarak hesaplanır. C'nin erteleme bit-tikten sonra ortamı tekrar dinlemeye başlar ve DIFS süresi boyunca ortam boş ise yine GÇ süresi başlatır. Bu sürenin sonunda da ortamı boş bulursa ortama erişim sağlayabilir.

Bu tezde kullanılan sistem modelinde ortama erişim IEEE 802.11 DKİ yöntemi ile



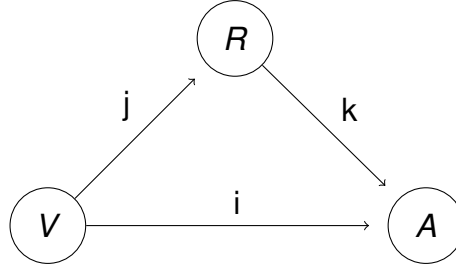
Şekil 4.2. IEEE 802.11 DKİ işleyişi

yapılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan İH, İA ve Onay/Red sinyalleri kullanılarak kanal kestirimi yapılır ve yine aynı sinyaller içerisinde kanal durum bilgileri diğer uç-birimlere gönderilir. İşbirlikli haberleşme modelinde ortama ilk erişen kullanıcı verici konumunda, verinin gönderileceği kullanıcı alıcı konumunda ve ortama erişim izni olmayan kullanıcılardan istekli olanlar ise röle konumuna geçer.

Bir tane rölenin bulunduğu basit işbirlikli haberleşme modelini ele alalım (Şekil 4.1). Verici ortama eriştiğinde, İH sinyali gönderir. Bu sinyali alan alıcı ve röle, verici ile arasındaki kanal kestirimini yapar. Bu durumda VR kanal bilgisi rölede VA kanal bilgisi alıcıda bulunur. Alıcı tarafından yayınlanan İA cevabında VA kanal bilgisi de yer alır. Böylelikle verici VA kanalını öğrenmiş olur. İA sinyalini alan röle, Bu sinyal sayesinde hem VA kanalını öğrenir hemde RA kanalını kestirmiş olur. Kanal kestiriminin yapılmasındaki amaç işbirlikli sistemimize uyarlamalı kipleme ve kodlama özelliği ekleneceğindedir. Kanal durum bilgisi olmadan UKK modu seçildiğinde yapılacak olan haberleşmenin güvenilirliği ortadan kalkar.

Haberleşmede kullanılacak UKK modlarımız sıfırdan beşe kadar numaralandırılmıştır. Bölüm 2.2'de birden beşe kadar olanlardan bahsedilmiştir. Sıfır ile numara-

landırılan UKK modu, iletişimin yapılamadığı kullanım dışı modudur (Outage mode). Bu modda gönderilecek olan bir paketin hatalı olma olasılığı %100'dür. Bu sebeple kanal bu modda ise paket gönderimi yapılmaz.



Şekil 4.3. UKK'lı İşbirlikli Habeleşme

Artık kanalların durumu UKK modları ile ilişkilendirildiğinden, VA, VR, RA kanalları sırası ile i , j , k olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.3). Bu noktadan itibaren kanallar i , j , k olarak adlandırılacaklardır.

UKK'lı işbirlikli sistemin çalışma prensibi şu şekildedir. Vericiden gönderilecek olan veri paketinin UKK modu i olarak seçilir. İşbirlik durumunda röleden veri paketi yeniden gönderilse bile UKK modu hala i 'dir. Tek istisnası $i = 0$ olan durumdur. Bu durumda i kanalından iletişim mümkün değildir ve röle üzerinden veri paketi gönderilir. Veri paketleri için yeniden gönderim sınırlaması yoktur. Alıcı paketi alıncaya kadar yeniden gönderim yapılır. Kanal değişimi verici ve röleler tarafından sürekli takip edilir.

Bir paket ilk gönderiminde verici tarafından i modu ile gönderir. Alıcı paketi kontrol eder ve vericiye onay/red cevabı verir. Bu sırada röle paketi alır ve hatalı olup olmadığını kontrol eder. Röle paketi doğru aldıysa arabelleğinde saklayarak aktif duruma geçer ve alıcı tarafından gönderilecek red sinyalini bekler. Röle paketi hatalı almış ise pasif durumda kalır ve verici tarafından paket gönderimi yapılmasını bekler. Onay/red sinyallerinin içerisinde i kanalının durum bilgisi de bulunmaktadır. Alıcı tarafından onay cevabı yayınlanırsa verici yeni pakete geçer ve aktif röle arabelleğinde bulunan paketi kullanımdan düşürür. Alıcı red sinyali yayınlanmış ise işbirlikli evre başlar. Bu evrede röle pasif durumda ise yeniden gönderim verici tarafından yapılır. Sistem işbirliksizmiş gibi davranır. Röle aktif ise, verici ile röle arasında paket yeniden gönderim seçimi yapılması gerekir. Bu seçim Öncelik Temelli Geri Çekme (ÖT-GÇ) kullanılarak yapılır [59]. Bu yöntemde geriçekme süresi rassal olmaktan

çıkış kanal durumuna bağlı olarak belirlenir, t_i .

$$t_i = \frac{T_{azami}}{I} \quad (4.1)$$

Eş 4.1'deki T_{azami} sabit bir sayıdır ve en büyük geriçekme süresini belirler. I ile tanımlanan değişken i ya da k kanalını ifade eder ve ikisi için de geri çekme süresi hesaplanır. Bu sayede kanal modu yüksek olan uçbirimden paket yeniden gönderimi yapılır. Yeniden gönderim paket doğru alınıncaya kadar aynı şekilde devam eder. Sistem benzetiminde ve analizinde kolaylık sağlamak amacı ile aktif rölelerin yeniden gönderimde bulunabilmesi için k kanalının (RA kanalının) i kanalından (VA kanalından) her zaman daha yüksek mod aralığında olması gerekmektedir. Bir paket ilk defa gönderileceğinde ya da yeniden gönderimi yapılacağında kanal durumu değişebilir. Bu durumda paket için kullanılacak olan UKK modu her zamanki gibi i olarak güncellenir ve işlemler devam eder.

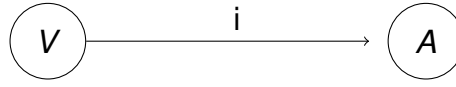
$i = 0$ olduğu durumda ise VA kanalından paket gönderimi yapılamaz. Bu durumda, VR ve RA kanallarının durumu paket gönderimine uygun ise paket gönderimi röle üzerinden devam eder. VR ve RA kanalının uygun olması demek $j \neq 0$ ve $k \neq 0$ demektir. Gönderilecek paketin UKK modu olarak ise $\min(j, k)$ seçilir.

Bir sonraki bölümde UKK'lı işbirlikli haberleşme sisteminin analitik analizi yapılacaktır. Aynı zamanda UKK'lı işbirliksiz haberleşme sisteminde analizi yapılarak karşılaştırılma için kullanılacaktır.

5. UKK'LI İŞBİRLİKLİ HABERLEŞME ANALİZİ

5.1 UKK'LI İşbirliksiz Haberleşme

UKK'lı işbirlikli haberleşme analizine geçmeden, öncelikle UKK'lı işbirliksiz haberleşme model analizi ile başlayalım. UKK'lı işbirliksiz haberleşme modeli Şekil 5.1'de gösterilmiştir. UKK'lı işbirliksiz haberleşme modelinde, verici alıcıya aralarındaki kanal moduna göre paket gönderiminde bulunur. Paket yeniden gönderimleri verici tarafından yapılır. Bu sırada diğer uçbirimler kendi gönderimlerini ertelerler ve ortamda devam eden haberleşme hakkında bir bilgiye sahip olmazlar.



Şekil 5.1. İşbirliksiz Haberleşme Modeli

Bölüm 2.2'de uyarlamalı kipleme ve kodlama kullanılan sistemlerde, modların kararlı halde olma olasılıkları, $Pr(n = i)$, her modun ortalama hata oranının, \overline{PHO}_n , hesaplanması gösterilmiştir.

i modunda paketin hatasız gönderilmesi için geçen gönderme sayısı, X , rastgele bir sayı olup geometrik dağılım ile modellenenir. X 'in olasılık kütle fonksiyonu (OKF)

$$p(X = x) = p_i^{x-1}(1 - p_i) \quad (5.1)$$

şeklindedir. $p_i = \overline{PER}_i$ olarak tanımlanmıştır. X 'in olasılık kütle fonksiyonu kullanılarak, i modu için ortalama gönderim sayısı, $E[X]$, hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} E[X] &= \sum_{x=1}^{\infty} xp(X = x) \\ &= \sum_{x=1}^{\infty} xp_i^{x-1}(1 - p_i) \\ &= (1 - p_i)^{-1} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Böylelikle, i modu için veri hacmi (iş çıkarım oranı), T_i hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
T_i &= \frac{R_i}{E[n]} \\
&= R_i(1 - p_i)
\end{aligned}
\tag{5.3}$$

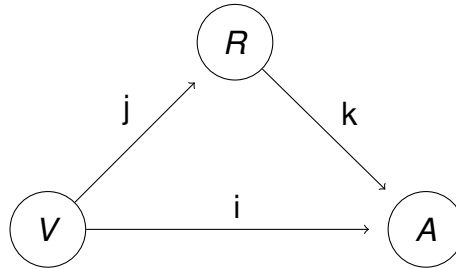
R_i i'inci moda kullanılan gönderim hızıdır. Her bir modun veri hacmi bilindiğine göre, sistemin genel veri hacmi, yani ortalama veri hacmi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
E[T] &= \sum_{i=0}^{N_n} T_i Pr(i) \\
&= \sum_{i=0}^{N_n} R_i(1 - p_i) Pr(i)
\end{aligned}
\tag{5.4}$$

Aynı analiz yaklaşımı kullanılarak UKK'lı işbirlikli haberleşme sistemi analizi yapılabilir.

5.2 Tek Röleli UKK'lı İşbirlikli Haberleşme Sistemi

Şekil 5.2'deki tek röleli UKK'lı işbirlikli haberleşme modelimizi hatırlayalım. Verici alıcıya paket gönderiminde bulunurken röle olarak adlandırılan diğer bir uçbirim vericiye yardım etmek için ortam dinlemesi yapar. Ortam dinlemesi sırasında vericinin paketi doğru alınırsa röle aktif duruma geçer. Aktif durumdaki röle alıcının paket yeniden gönderim isteğini bekler. Röle vericinin paketini hatalı almış ise vericiden yapılacak paket gönderimini bekler.



Şekil 5.2. UKK'lı İşbirlikli Haberleşme

Kanalların kararlı halde UKK modlarında bulunma olasılıkları Eş 5.5'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
Pr_n(n) &= \int_{\Gamma_n}^{\Gamma_{n+1}} p_{\gamma_n}(\gamma_n) d\gamma_n \\
&= \frac{\Gamma(m_n, \frac{m_n \Gamma_n}{\gamma_n}) - \Gamma(m_n, \frac{m_n \Gamma_{n+1}}{\gamma_n})}{\Gamma(m_n)} \quad n \in i, j, k
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Kanal değişmediği sürece, bir paket için seçilen UKK modu sabit kaldığından paket yeniden gönderimi sırasında UKK modları kendilerine ait olmayan kanal İGO aralıklarına maruz kalabilirler Örneğin verici bir paketi gönderirken VA kanalı 3. modda ($i = 3$) olsun. Bu sebeple paket 3. moda göre gönderilecektir. Aynı anda VR kanalının durumu 2. modda ($j = 2$) olsun. Bu durumda paket VR kanalında olması gerekenden daha düşük İGO seviyesi ile karşı karşıya kalır. Bu durumlardaki paket hata oranını belirleyen $PH\Omega$ matrisi tanımlanmıştır. Bu matrisin elemanları şu şekilde hesaplanır.

$$PH\Omega(k, l) = \begin{cases} 1 & \text{if } k = 1 \\ \int_{\Gamma_{l-1}}^{\Gamma_l} a_{k-1} \exp(-g_{k-1}\gamma) p_{\gamma}(\gamma) d\gamma & \text{if } k \neq 1 \end{cases} \tag{5.6}$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda, seçilen bir UKK modu kendi İGO aralığından düşük bir aralıkta bulunursa paket hata oranının yaklaşık olarak 1'dir. Tam aksine, seçilen UKK modu kendi aralığından yüksek bir aralıkta kullanılırsa hata olma olasılığı yaklaşık olarak 0'dır. Bu sebeple $PH\Omega$ matrisi şu şekildedir.

$$PH\Omega(n, l) = \begin{bmatrix} 1 & \overline{PHO}_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & \overline{PHO}_2 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \overline{PHO}_3 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & \overline{PHO}_4 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & \overline{PHO}_5 \end{bmatrix} \tag{5.7}$$

Tek röleli UKK'lı işbirlikli kablosuz sistemde i, j, k 'nın durumuna göre beş farklı Gönderim Durumu (GD) oluşmaktadır. GD'ler Şekil 5.3'te renklendirilmiş olarak gösterilmiştir. GD'ler şu şekildedir.

1. GD_1 : Kırmızı renkle belirtilen kombinasyon, sistemin kullanım dışı kaldığı durumu ifade eder. Bu durumda vericideki paket hiçbir şekilde alıcıya gönderilememektedir. Bu durum matematiksel olarak;

$$(i = 0) \text{ ve } [(j = 0) \text{ veya } (k = 0)] \quad (5.8)$$

şeklinde ifade edilir.

2. GD_2 : Yeşil renkle gösterilen kombinasyon, alıcı tarafından yeniden gönderim isteği yapıldığında, bu gönderimler verici tarafından yapılmaktadır. Bu durumun oluşabilmesi için i kanalının kullanım dışı olmaması ($i \neq 0$) gerekir. Öte yandan j kanalı i kanalına göre daha düşük bir modda olmalı ki gönderilen paketler rölede hatalı olsun ve röle her zaman pasif durumda kalsın. Bir diğer olasılık ise rölenin aktif ya da pasif olmasına bakılmaksızın k kanalının i kanalından daha düşük veya eşit modda ($k \leq i$) bulunmasıdır. Matematiksel olarak ifade edilecek olursa

$$(i > 0) \text{ ve } [(j < i) \text{ veya } (k \leq i)] \quad (5.9)$$

şeklindedir.

3. GD_3 : Mavi renk ile gösterilen durum, rölenin her zaman aktif olduğu durumdur. Ayrıca alıcıdan yeniden gönderim isteği olursa, yeniden gönderim röle tarafından yapılacaktır. Bu durum için i, j, k kanallarının matematiksel ifadesi

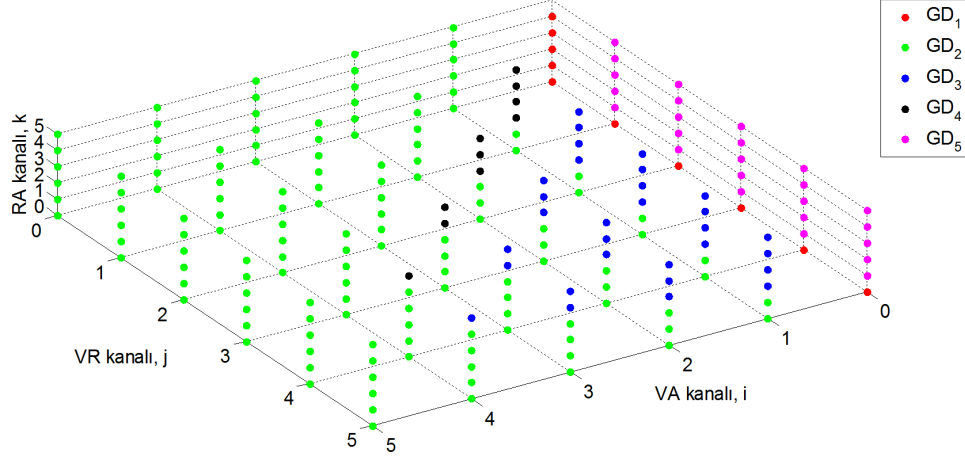
$$(i > 0) \text{ ve } [(j > i) \text{ ve } (k > i)] \quad (5.10)$$

şeklindedir. Eş 5.10'da görüldüğü üzere ($j > i$) rölenin her zaman aktif olacağını ve ($k > i$) aktif rölenin her zaman yeniden gönderim yapacağını ifade eder.

4. GD_4 : Siyah renkle gösterilen durum, rölenin belirli bir olasılıkla aktif durumda olacağı ve yeniden gönderim isteklerinde aktif durumda ise yeniden gönderimi yapacağı durumdur. Matematiksel olarak da

$$(i > 0) \text{ ve } [(j = i) \text{ ve } (k > i)] \quad (5.11)$$

şeklinde ifade edilir. Eş 5.11'de $j = i$ olması verici tarafından kullanılan UKK modu ile VR arasındaki kanalın aynı olmasını ifade eder. Böylelikle röle 1 –



Şekil 5.3. Tek röleli UKK'lı işbirlikli haberleşme sistemi için Gönderim Durumları (GD)

\overline{PHO}_i olasılığı ile aktif duruma geçer. $k > i$ olası, daha önce bahsedildiği gibi röle aktif durumda ise yeniden gönderimlerin röle tarafından yapılacağını gösterir.

5. GD_5 : Pembe ile gösterilen durum, i kanalının (VA kanalının) kullanım dışı kaldığı bu yüzden paket gönderiminin röle üzerinden iki sekmeli iletim şeklinde devam edeceği durumdur. Bu durum için j ve k kanallarının ikisi de kullanım dışı bir İGO aralığında bulunmaması ($j \neq 0$ ve $k \neq 0$) gerekir. Matematiksel olarak Eş 5.12'de ifade edilmiştir.

$$(i = 0) \text{ ve } [(j > 0) \text{ ve } (k > 0)] \quad (5.12)$$

i, j, k kanallarının durumlarına göre oluşan üç boyutlu uzay tamamı ile tanımlanmış oldu. Bu GD'leri kullanarak, GD'lerin ortalama veri hacimleri (iş çıkarım oranları) bulunarak sonradan sistemin genel veri hacmi hesaplanacaktır.

5.2.1 GD'lerin Ortalama Veri Hacim Hesapları

- GD_1 : Bu durumda vericiden paket gönderimi olmadığından veri hacmi sıfırdır.

$$T_i = 0 \quad (5.13)$$

- GD_2 : Bu durumda paket gönderim ve yeniden gönderimleri her zaman verici tarafından yapılmaktadır. Paketin hatasız olarak alıcıya ulaşması için gerekli

gönderim sayısı, X , rastgele bir değişken olup geometrik dağılıma sahiptir. X rastgele değişkeninin olasılıksal yoğunluk dağılımı

$$p(X = x) = p_i^{x-1}(1 - p_i) \quad (5.14)$$

şekindedir. $p_i = \overline{PHO}_i$ olarak tanımlanır. Böylelikle, ortalama gönderim sayısı, $E[X]$

$$\begin{aligned} E[X] &= \sum_{x=1}^{\infty} xp(X = x) \\ &= \sum_{x=1}^{\infty} xp_i^{x-1}(1 - p_i) \\ &= (1 - p_i)^{-1} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Sonuç olarak, GD_1 'de veri hacmi Eş 5.16'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{R_i}{E[X]} \\ &= R_i(1 - p_i) \end{aligned} \quad (5.16)$$

- GD_3 : Bu durumda röle her zaman aktif ve yeniden gönderimlerde k kanalı (RA kanalı) i kanalından (VA kanalından) daha yüksek moda sahiptir. Bu yüzden yeniden gönderimlerde hata olasılığı ($PH\Omega(i, k) = 0, k > i$) sıfırdır ve bir yeniden gönderim yapılır. Buradan yola çıkarak, GD_3 'de paket gönderim sayısı, X , rasgele değişken olup iki farklı değer alabilir. X 'in olasılık kütle fonksiyonu

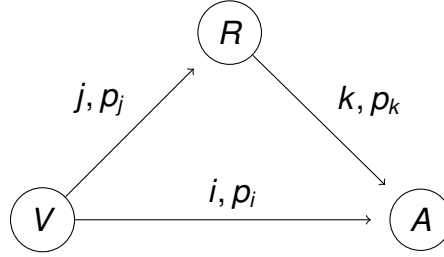
$$p(X = x) \begin{cases} (1 - p_i), & \text{if } x = 1 \\ p_i, & \text{if } x = 2 \end{cases} \quad (5.17)$$

şekildedir. $p_i = \overline{PHO}_i$ olarak tanımlanır. Ortalama yeniden gönderim ve veri hacmi Eş 5.18'de ve Eş 5.19'da sırası ile verilmiştir.

$$\begin{aligned} E[X] &= 1(1 - p_i) + 2p_i \\ &= 1 + p_i \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{R_i}{E[X]} \\ &= \frac{R_i}{(1 + p_i)} \end{aligned} \quad (5.19)$$

- GD_4 : Bu durumda i kanalı (VA kanalı) ile j kanalı (VR kanalı) aynı modda ($i = j$) olduğundan rölenin aktif olması belirli bir olasılığa bağlıdır. Bu olasılık $(1 - p_i)$ 'dir. Aynı zamanda k kanalı (RA kanalı) i kanalından (VA kanalından) daha yüksek bir modda ($k > i$) bulunduğundan yeniden gönderimler röle aktif ise röle tarafından yapılır. Röle tarafından yapılan yeniden gönderimlerde paketin hatalı olma olasılığı sıfırdır ($PH\Omega(i, k) = 0$). Şekil 5.4'te gösterildiği üzere, $p_j = p_i$ ve $p_k = PH\Omega(i, k) = 0$ 'dir.



Şekil 5.4. GD_4 için işbirlikli model

Öncelikle rölenin verici tarafından gönderilen paketi doğru alıp aktif duruma geçmesi için gerekli gönderim sayısı, X_2 , rastgele değişken olarak tanımlayalım. X_2 'nin olasılık kütle fonksiyonu geometrik dağılım olup Eş 5.20'de verilmiştir.

$$p(X_2 = x_2) = p_i^{x_2-1}(1 - p_i) \quad (5.20)$$

Aynı şekilde i kanalında paketin hatasız gönderilmesi için gerekli gönderim sayısı, X_1 , rasgele değişken olarak tanımlanır. X_1 'in de olasılık kütle fonksiyonu geometrik dağılıma sahiptir ve Eş 5.21'de verilmiştir.

$$p(X_1 = x_1) = p_i^{x_1-1}(1 - p_i) \quad (5.21)$$

Bir paketin alıcıya doğru ulaşması için gerekli olan gönderim sayısı, X , rastgele değişkeni olsun. X 'in olasılık kütle fonksiyonunu tanımlamak için birkaç olay tanımlamamız gerekiyor. Bu olaylar;

- ε_1 : i kanalının ilk gönderimde başarılı olması.

$$Prob(\varepsilon_1) = 1 - p_i \quad (5.22)$$

– ε_2 : i kanalının ilk (x-1) gönderimde başarısız olması.

$$\begin{aligned} Prob(\varepsilon_2) &= Prob(X_1 \geq x) \\ &= \sum_{x_1=x}^{\infty} p_i^{x_1-1} (1 - p_i) \\ &= p_i^{x-1} \end{aligned} \quad (5.23)$$

– ε_3 : j kanalının (x-1)'inci gönderimde başarılı olması.

$$\begin{aligned} Prob(\varepsilon_3) &= Prob(X_2 = x - 1) \\ &= p_i^{x-2} (1 - p_i) \end{aligned} \quad (5.24)$$

– ε_4 : j kanalının ilk (x-1) gönderimde başarısız olması.

$$\begin{aligned} Prob(\varepsilon_4) &= Prob(X_2 \geq x) \\ &= \sum_{x_2=x}^{\infty} p_i^{x_2-1} (1 - p_i) \\ &= p_i^{x-1} \end{aligned} \quad (5.25)$$

– ε_5 : i kanalının x'inci gönderimde başarılı olması.

$$\begin{aligned} Prob(\varepsilon_5) &= Prob(X_1 = x) \\ &= p_i^{x-1} (1 - p_i) \end{aligned} \quad (5.26)$$

– ε_6 : k kanalının paket gönderiminde başarılı olması.

$$Prob(\varepsilon_6) = 1 \quad (5.27)$$

Paketin alıcıya ulaşması için gereken gönderim sayısının 1 olması için alıcının ilk gönderimde hatasız paket alması gerekir (ε_1). x 1'den büyük bir değerde paket gönderimi iki şekilde olur. Birincisi, verici (x-1) gönderimde başarısız olmuş, röle (x-1)'inci gönderimde aktif olmuş ve x'inci gönderim röleden gönderilen paket doğru alınmıştır. İkincisi, röle vericinin (x-1) gönderiminde aktif olamamıştır ve verici paketi x'inci gönderimde başarılı olarak iletmiştir. Matematiksel olarak ifade edecek olursak

$$p(X = x) = \begin{cases} Prob(\varepsilon_1) & , x = 1 \\ Prob(\varepsilon_2)Prob(\varepsilon_3)Prob(\varepsilon_6) + Prob(\varepsilon_4)Prob(\varepsilon_5) & , x > 1 \end{cases} \quad (5.28)$$

$$p(X = x) = \begin{cases} (1 - p_i) & , x = 1 \\ p_i^{x-1} p_i^{x-2} (1 - p_i) 1 + p_i^{x-1} p_i^{x-1} (1 - p_i) & , x > 1 \end{cases} \quad (5.29)$$

Sadeleştirildikten sonra $p(X = x)$ aşağıda verilmiştir.

$$p(X = x) \begin{cases} (1 - p_i) & , x = 1 \\ p_i^{2x-3}(1 - p_i^2) & , x > 1 \end{cases} \quad (5.30)$$

$p(X = x)$ 'in geçerli bir olasılık kütle fonksiyonu olduğu Eş 5.31'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} 1 &= \sum_{x=1}^{\infty} p(X = x) \\ &= (1 - p_i) + \sum_{x=2}^{\infty} p_i^{2x-3}(1 - p_i^2) \\ &= (1 - p_i) + p_i = 1 \end{aligned} \quad (5.31)$$

Ortalama paket gönderim sayısı, $E[X]$, ve veri hacmi, T_i , Eş 5.32'de ve Eş 5.33'te sırası ile verilmiştir.

$$\begin{aligned} E[n] &= \sum_{x=1}^{\infty} xp(n = x) \\ &= (1 - p_i) + \sum_{x=2}^{\infty} xp_i^{2x-3}(1 - p_i^2) \\ &= (1 - p_i) + (1 - p_i^2) \left[\frac{p_i(2 - p_i^2)}{(1 - p_i^2)^2} \right] \\ &= \frac{1 + p_i - p_i^2}{1 - p_i^2} \end{aligned} \quad (5.32)$$

$$\begin{aligned} T_i &= \frac{R_i}{E[n]} \\ &= \frac{R_i(1 - p_i^2)}{(1 + p_i - p_i^2)} \end{aligned} \quad (5.33)$$

- GD_5 : Bu durumda i kanalın kullanım dışı olduğundan paket gönderimi röle üzerinden iki sekmeli olarak devam etmektedir. Bu durum Şekil 5.5'te gösterilmiştir. Paket gönderiminde seçilecek olan UKK modu j ve k kanal modlarının en küçüğü ($a = \min(j, k)$) olarak belirlenir. Bunun sebebi UKK modu kendi aralığından daha küçük bir aralıkta kullanıldığında paket hata oranının 1 olmasıdır. Böylelikle j ve k farklı kanal durumlarında olduğunda küçük olan durum seçilirse bir kanalda paket gönderilme olasılığı belirli bir değerde olurken diğer kanalda paket hata oranı 0 olacaktır.



Şekil 5.5. İki sekmeli paket gönderimi

Paketin vericiden alıcıya gönderilinceye kadar gereken gönderim sayısı, X , iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım paketin vericiden röleye gönderilinceye kadar geçen gönderim sayısıdır (X_1). İkincisi kısım ise röleden alıcıya paketin gönderim sayısıdır (X_2). Sonuç olarak toplam gönderim sayısı $X = X_1 + X_2$ şeklindedir.

j kanalında gönderim yapılırken seçilen UKK modu a olduğundan, bu kanaldaki paket hata oranı $p_1 = PH\Omega(a, j)$ olur. j kanalındaki paket gönderim sayısı X_1 'in yoğunluk kütle fonksiyonu ise geometrik dağılıma sahiptir ve Eş 5.34'te verilmiştir.

$$p(X_1 = x_1) = p_1^{x_1-1}(1 - p_1) \quad (5.34)$$

j kanalındaki ortalama paket gönderim sayısı, $E[X_1]$, Eş 5.35'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} E[X_1] &= \sum_{x_1=1}^{\infty} x p(X_1 = x_1) \\ &= \sum_{x_1=1}^{\infty} x p_1^{x_1-1}(1 - p_1) \\ &= (1 - p_1)^{-1} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Aynı yaklaşım ile k kanalında paket hata oranı $p_2 = PH\Omega(a, k)$ 'dir. Bu kanal için paket gönderim sayısı X_2 'nin yoğunluk kütle fonksiyonu geometrik olup Eş 5.36'de verilmiştir.

$$p(X_2 = x_2) = p_2^{x_2-1}(1 - p_2) \quad (5.36)$$

k kanalındaki ortalama paket gönderim sayısı, $E[X_2]$, Eş 5.37'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} E[X_2] &= \sum_{x_2=1}^{\infty} x p(X_2 = x_2) \\ &= \sum_{x_2=1}^{\infty} x p_2^{x_2-1}(1 - p_2) \\ &= (1 - p_2)^{-1} \end{aligned} \quad (5.37)$$

Vericiden çıkan bir paketin alıcıya ulaşması için gereken ortalama gönderim sayısı $E[X]$

$$\begin{aligned}
 E[X] &= E[X_1 + X_2] \\
 &= E[X_1] + E[X_2] \\
 &= (1 - p_1)^{-1} + (1 - p_2)^{-1}
 \end{aligned} \tag{5.38}$$

şekilde hesaplanır.

GD_5 'de veri hacmi ise Eş 5.39'da verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 T_a &= \frac{R_a}{E[X]} \\
 &= \frac{R_a}{(1 - p_1)^{-1} + (1 - p_2)^{-1}}
 \end{aligned} \tag{5.39}$$

Bütün GD'ler için veri hacim formülasyonları hesaplanmıştır. Daha düzenli bir şekilde Eş 5.40'ta verilmiştir.

$$T_{i,j,k} = \begin{cases} 0 & , i = 0 \text{ ve } (j = 0 \text{ veya } k = 0) \\ R_i(1 - p_i) & , i > 0 \text{ ve } (j < i \text{ veya } k \leq i) \\ \frac{R_i}{(1 + p_i)} & , i > 0 \text{ ve } (j > i \text{ ve } k > i) \\ \frac{R_i(1 - p_i^2)}{(1 + p_i - p_i^2)} & , i > 0 \text{ ve } (j = i \text{ ve } k > i) \\ \frac{R_{\min(j,k)}}{(1 - p_1)^{-1} + (1 - p_2)^{-1}} & , i = 0 \text{ ve } (j > 0 \text{ ve } k > 0) \end{cases} \tag{5.40}$$

Eş 5.40'taki $p_i = \overline{PHO}_i$, $p_1 = PH\Omega(\min(j, k), j)$, $p_2 = PH\Omega(\min(j, k), k)$ olarak tanımlanırlar. Sistemin ortalama veri hacmi $E[T]$ ise

$$E[T] = \sum_{i=0}^{N_n} \sum_{j=0}^{N_n} \sum_{k=0}^{N_n} T_{i,j,k} Pr_i(i) Pr_j(j) Pr_k(k) \tag{5.41}$$

şeklindedir.

5.2.2 Paket Gönderim Süresinin Kanal Durum Süresini Aşma Olasılığı

İşbirliksiz ve işbirlikli UKK'lı haberleşme sistemleri için kanal güncellenme süresi, T_{KGS} , ve UKK modlarındaki paket süreleri, T_{mod_n} , arasındaki ilişki şu şekildedir.

- $C T_{mod_1} = T_{KGS} < \Delta t_{uyum}$
C sabiti 1'den büyük bir tam sayıdır. Δt_{uyum} ile ifade edilen parametre kanalın evre uyumluluk süresidir.
- $T_{mod_1} = 2T_{mod_2} = 3T_{mod_3} = 4T_{mod_4} = 6T_{mod_5}$

Buradan hareketle, bir kanal durumu boyunca yapılabilecek paket gönderim sayısı Eş 5.42'de verilmiştir.

$$Y_i = \frac{T_{KGS}}{T_{mod_i}}, \quad 1 \leq i \leq 5 \quad (5.42)$$

İşbirliksiz UKK'lı Sistem

Paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığının hesaplanması için öncelikle olasılıksal olay tanımlaması yapalım.

- E : "Paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşması"
: "Paket gönderim sayısının, kanal güncellenme süresi boyunca yapılabilecek paket gönderimin sayısını aşması"

$$Prob(E) = \sum_{i=0}^5 Prob(E|i)Pr_i(i) \quad (5.43)$$

İşbirliksiz UKK'lı sistem için gönderme sayısı olasılık kütle fonksiyonu

$$Prob(X = x) = p_i^{x-1}(1 - p_i) \quad (5.44)$$

şekilde tanımlanmıştı.

$$\begin{aligned}
Prob(E|i) &= Prob(N > Y_i) \\
&= \sum_{n=Y_i+1}^{\infty} p_i^{n-1} (1 - p_i) \\
&= p_i^{Y_i}
\end{aligned} \tag{5.45}$$

$$Prob(E|i) = \begin{cases} 0 & , i = 0 \\ p_i^{Y_i} & , 1 \leq i \leq 5 \end{cases} \tag{5.46}$$

Eş 5.46'daki $p_i = \overline{PHO}_i$. $i = 0$ 'da $Prob(E|i)$ 'nin sıfır olmasının sebebi bu durumda iken paket gönderiminin yapılmamasıdır(kullanım dışı durum).

O zaman $Prob(E)$ şu şekilde ifade edilir.

$$Prob(E) = \sum_{i=1}^5 p_i^{Y_i} Pr_i(i) \tag{5.47}$$

İşbirlikli UKK'lı Sistem

İşbirliksiz durumla benzer şekilde, paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığı aşağıda verilmiştir.

$$P(E) = \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^5 Prob(E|i, j, k) Pr_i(i) Pr_j(j) Pr_k(k) \tag{5.48}$$

$Prob(E|i, j, k)$ 'yı bulmak için, veri hacmi analizinde olduğu gibi GD'lere göre inceleme yapmamız gerekir.

- GD_1 : Bu durumda paket gönderimi olmadığından dolayı paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığı sıfırdır.

$$Prob(E|i, j, k) = 0 \tag{5.49}$$

- GD_2 : Bu durumda yeniden gönderimler verici tarafından yapılıyordu ve paket gönderim sayısı

$$P(X = x) = p_i^{x-1} (1 - p_i) \tag{5.50}$$

şeklindedir. Buradan yola çıkarak

$$\begin{aligned}
Prob(E|i, j, k) &= Prob(X > Y_i) \\
&= \sum_{x=Y_i+1}^{\infty} p_i^{x-1} (1 - p_i) \\
&= p_i^{Y_i} \quad , p_i = \overline{PHO}_i
\end{aligned} \tag{5.51}$$

- GD_3 : Bu durumda yeniden gönderimler röle tarafından yapılıyordu ve yapılan yeniden gönderimde paket hata oranı sıfırdır. Bu durumda paket gönderim sayısı

$$Prob(X = x) \begin{cases} 1 - p_i & , x = 1 \\ p_i & , x = 2 \end{cases} \tag{5.52}$$

şeklindeydi. $Prob(E|i, j, k)$ 'yi tanımlayacak olursak

$$\begin{aligned}
Prob(E|i, j, k) &= Prob(X > Y_i) \\
&= \begin{cases} p_i, & \text{if } Y_i = 1 \\ 0, & \text{if } Y_i > 1 \end{cases} \quad , p_i = \overline{PHO}_i
\end{aligned} \tag{5.53}$$

olarak ifade edilir.

- GD_4 : Bu durumda röle $1 - p_i$ olasılığı ile aktif oluyordu ve aktif olduğu zaman yeniden gönderimler röle tarafında devir alınıp ilk gönderimde başarı sağlanıyordu. Bu durumda paket gönderim sayısı

$$Prob(X = x) \begin{cases} 1 - p_i & , x = 1 \\ p_i^{2x-3} (1 - p_i^2) & , x > 1 \end{cases} \tag{5.54}$$

şeklindedir.

$$\begin{aligned}
Prob(E|i, j, k) &= Prob(X > Y_i) \\
&= \sum_{x=Y_i+1}^{\infty} p_i^{2x-3} (1 - p_i^2) \\
&= p_i^{2Y_i-1} \quad , p_i = \overline{PHO}_i
\end{aligned} \tag{5.55}$$

- GD_5 : Bu durumda i kanalı kullanım dışı olduğundan ($i = 0$) paket iletimi röle üzerinden iki sekmeli olarak devam etmektedir. Bu durumun incelemesi yapılırken iki kısımda yapılması gerekiyor. Birinci kısım $j \neq k$ 'dır. Bu kısımda paketin gönderildiği kanallardan birinin hata olasılığı 0 olduğundan, bu kanaldaki paket gönderim sayısı rastgele değişken olmaktan çıkıp deterministik bir değerdir. Bu değer 1'dir. İkinci kısım ise $j = k$ 'dır. Bu kısımda ise iki kanal da eşit paket hata oranına sahiptir. Kanallardaki paket gönderim sayısı rastgele değişken olup bağımsız ve özdeş dağılımlıdır.

Röle üzerinden iki sekmeli olarak paket gönderiminde seçilecek olan UKK modu j ve k kanallarının en küçük modu olarak seçilmişti ($a = \min(j, k)$). Buradan yola çıkarak paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşma olasılığını iki kısım için de hesaplayalım.

- $j \neq k$: Bu kısımda seçilen UKK moduna göre kanallardaki paket hata oranları $p_j = PH\Omega(a, j)$ ve $p_k = PH\Omega(a, k)$ şeklindedir. j ve k birbirlerine eşit olmadığından kanalların birinde hata oranı sıfır değerinde ise \overline{PHO}_a 'dır. Hatasız kanalda yapılan gönderim sayısı sabit olup 1'dir. Bu durumda toplam gönderim sayısı, X' 'in olasılık kütle dağılımı

$$Prob(X = n) = Prob(X' + 1 = x) \quad (5.56)$$

şeklindedir. X' olarak ifade edilen rasgele değişken hatalı kanaldaki paket gönderim sayısıdır. X' 'in olasılık kütle dağılımı Eş 5.57'de verilmiştir.

$$Prob(X' = x') = p_a^{x'-1} (1 - p_a) \quad (5.57)$$

Paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşma olasılığı ise

$$\begin{aligned} Prob(E|i, j, k) &= Prob(X > Y_a) \\ &= Prob(X' + 1 > Y_a) \\ &= Prob(X' \geq Y_a) \\ &= \sum_{x'=Y_a}^{\infty} p_a^{x'-1} (1 - p_a) \\ &= p_a^{Y_a-1} \end{aligned} \quad (5.58)$$

olarak hesaplanır.

- $j = k$: Bu kısımda paket gönderiminde kullanılan UKK modu $a = \min(j, k) = j = k$ şeklindedir. İki kanaldaki paket gönderim sayısı rastgele değişken-

lerdir ve bağımsız özdeş dağılımları şu şekildedir.

$$Prob(X_j = x_j) = p_a^{x_j-1} (1 - p_a) \quad (5.59)$$

$$Prob(X_k = x_k) = p_a^{x_k-1} (1 - p_a) \quad (5.60)$$

Toplam paket gönderim sayısı, $X = X_j + X_k$ 'nın olasılık kütle dağılımı aşağıda hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} Prob(X = x) &= Prob(X_j + X_k = x) \\ &= \sum_{x_k=1}^x Prob(X_j = x - x_k) Prob(X_k = x_k) \\ &= \sum_{x_k=1}^x p_a^{x-x_k-1} (1 - p_a) p_a^{x_k-1} (1 - p_a) \\ &= (x - 1) p_a^{x-2} (1 - p_a)^2, \quad x \geq 2 \end{aligned} \quad (5.61)$$

Paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşma olasılığı

$$\begin{aligned} Prob(E|i, j, k) &= Prob(X > Y_a) \\ &= \sum_{x=Y_a+1}^{\infty} (x - 1) p_a^{x-2} (1 - p_a)^2 \\ &= p_a^{Y_a-1} [p_a + Y_a - p_a Y_a] \end{aligned} \quad (5.62)$$

olarak hesaplanır.

Bütün GD'ler için paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşma olasılıklarını, $Prob(E|i, j, k)$, hesaplandıktan sonra hepsini daha düzenli bir şekilde yazalım.

$$Prob(E|i, j, k) = \begin{cases} 0, & , (i = 0) \text{ ve } [(j = 0) \text{ veya } (k = 0)] \\ p_i^{Y_i}, & , (i > 0) \text{ ve } [(j < i) \text{ veya } (k \leq i)] \\ p_i, & , Y_i = 1, (i > 0) \text{ ve } [(j > i) \text{ ve } (k > i)] \\ 0, & , Y_i > 1, (i > 0) \text{ ve } [(j > i) \text{ ve } (k > i)] \\ p_i^{2Y_i-1}, & , (i > 0) \text{ ve } [(j = i) \text{ ve } (k > i)] \\ p_a^{Y_a-1}, & , j \neq k, (i = 0) \text{ ve } [(j > 0) \text{ ve } (k > 0)] \\ p_a^{Y_a-1} [p_a + Y_a - p_a Y_a], & , j = k, (i = 0) \text{ ve } [(j > 0) \text{ ve } (k > 0)] \end{cases} \quad (5.63)$$

$Prob(E)$ için Analitik Sonuçlar

İşbirliksiz ve işbirlikli UKK'lı haberleşme sistemleri için kanal durum süresi, T_{KDS} , ve UKK modlarındaki paket süreleri, T_{mod_n} , arasındaki ilişki şu şekildedir.

- $C T_{mod_1} = T_{KGS} < \Delta t_{uyum}$

C sabiti 1'den büyük bir tam sayıdır. Δt_{uyum} ile ifade edilen parametre kanalın evre uyumluluk süresidir.

- $T_{mod_1} = 2T_{mod_2} = 3T_{mod_3} = 4T_{mod_4} = 6T_{mod_5}$

İGO (dB)	0	5	10	15	20	25	30
C= 1	2.11e-3	2.59e-3	1.26e-3	4.57e-4	1.51e-4	4.84e-5	1.54e-5
C= 2	3.27e-5	2.61e-5	1.08e-5	3.70e-6	1.20e-6	3.83e-7	1.21e-7
C= 3	5.11e-7	2.66e-7	9.37e-8	3.05e-8	9.73e-9	3.09e-9	9.77e-10
C= 4	7.97e-9	2.71e-9	8.15e-10	2.51e-10	7.89e-11	2.249e-11	7.86e-12
C= 5	1.24e-10	2.77e-11	7.08e-12	2.07e-12	6.39e-13	2.00e-13	6.32e-14
C= 6	1.94e-12	2.82e-13	6.16e-14	1.71e-14	5.18e-15	1.61e-15	5.08e-16
C= 7	3.03e-14	2.88e-15	5.35e-16	1.41e-16	4.19e-17	1.30e-17	4.09e-18
C= 8	4.73e-16	2.94e-17	4.65e-18	1.16e-18	3.40e-19	1.05e-19	3.29e-20
C= 9	7.38e-18	3.00e-19	4.04e-20	9.56e-21	2.75e-21	8.44e-22	2.64e-22
C= 10	1.15e-19	3.06e-21	3.51e-22	7.88e-23	2.23e-23	6.80e-24	2.13e-24

Çizelge 5.1. İşbirliksiz UKK'lı Sistem için $Prob(E)$

Çizelge 5.1'de işbirliksiz UKK'lı haberleşme sistemi için farklı İGO değerleri için kanal güncellenme süresinin, paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığına olan etkisi gösterilmektedir. Sabit bir İGO değerinde kanal güncellenme süresi, arttırıldıkça paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığı azalmaktadır. Olasılıktaki bu azalış paket gönderimleri sırasında her paket bir kanal durumuna maruz kaldığı söylenebilir. Kanal durum süresi kanalın modellenme özelliğine bağlı olarak, kanal evre uyumluluk süresini aşmayacak şekilde seçilirse yapılan analizin doğruluğu geçerli olur.

Aynı analiz işbirlikli UKK'lı sistem içinde yapıldığında çıkan sonuçlar Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Sistem işbirlikli olduğu zaman paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığı artmaktadır. Bunun en önemli sebebi i kanalının kullanım dışı kadığı zamanlarda paket gönderimin röle üzerinden iki sekmeli olarak devam etmesidir. İki sekmeli paket gönderiminde en az iki gönderim gerekmektedir. Özellikle UKK modu 1'de ve C=1 olduğunda paket gönderimi kanal süresini kesinlikle aşmaktadır. Kanal ortalama İGO değeri arttıkça iki sekmeli gönderim olma olasılığı azaldıkça, işbirlikli sistem işbirliksiz sisteme yaklaşmaktadır. C değeri ar-

İGO (dB)	0	5	10	15	20	25	30
C= 1	2.10e-1	8.92e-2	1.53e-2	2.09e-3	3.21e-4	6.51e-5	1.69e-5
C= 2	3.94e-3	9.40e-4	1.24e-4	1.35e-5	1.39e-6	1.40e-7	1.41e-8
C= 3	7.28e-5	1.02e-5	1.10e-6	1.12e-7	1.13e-8	1.13e-9	1.13e-10
C= 4	1.31e-6	1.11e-7	9.79e-9	9.33e-10	9.18e-11	9.13e-12	9.12e-13
C= 5	2.32e-8	1.20e-9	8.69e-11	7.74e-12	7.45e-13	7.36e-14	7.33e-15
C= 6	4.06e-10	1.29e-11	7.72e-13	6.43e-14	6.05e-15	5.94e-16	5.90e-17
C= 7	7.00e-12	1.39e-13	6.85e-15	5.33e-16	4.91e-17	4.79e-18	4.75e-19
C= 8	1.20e-13	1.49e-15	6.07e-17	4.42e-18	3.99e-19	3.86e-20	3.82e-21
C= 9	2.03e-15	1.59e-17	5.38e-19	3.67e-20	3.24e-21	3.11e-22	3.07e-23
C= 10	3.43e-17	1.70e-19	4.77e-21	3.05e-22	2.63e-23	2.51e-24	2.47e-25

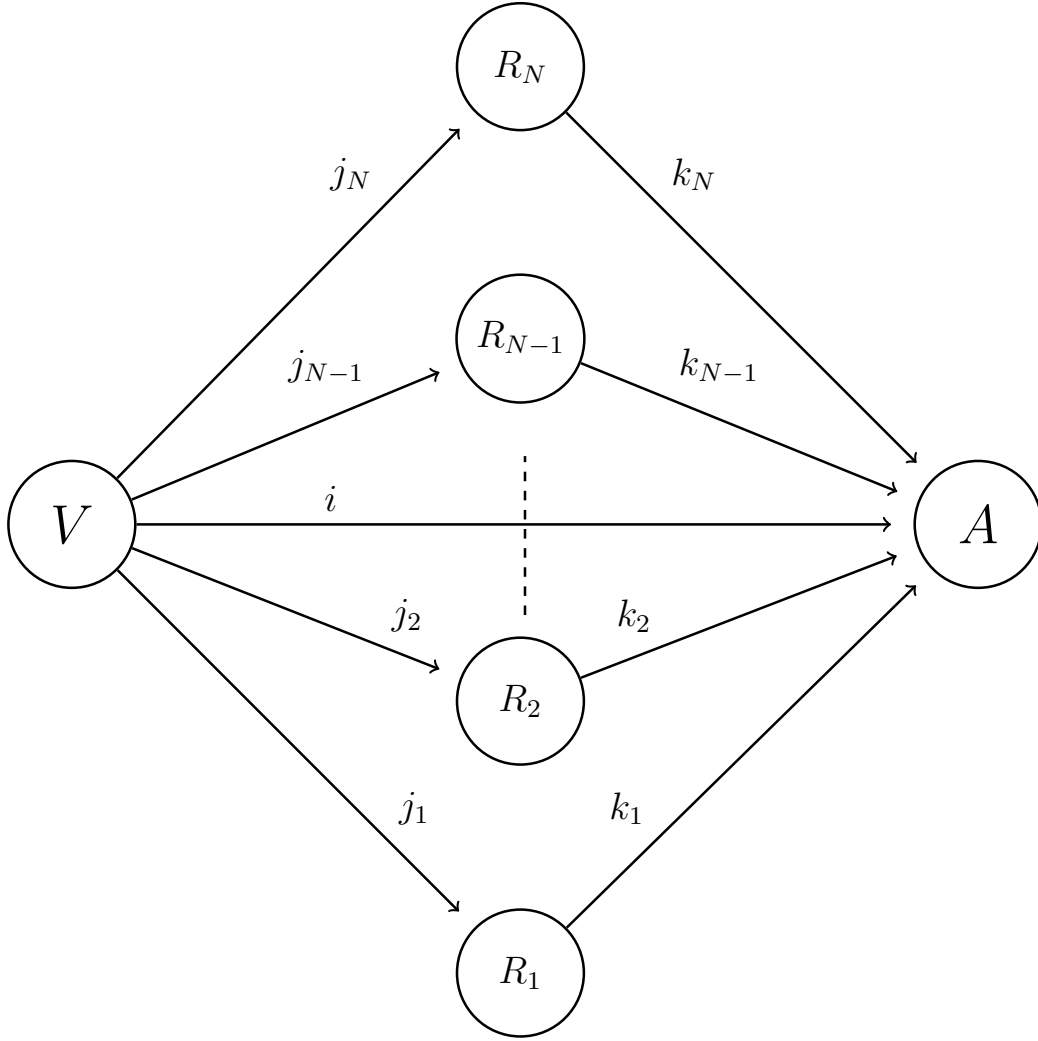
Çizelge 5.2. İşbirlikli UKK'lı Sistem için $Prob(E)$

tıkça işbirlikli sistem düşük İGO'larda daha yüksek olasılık vermesi rağmen yüksek İGO'larda daha düşük olasılık vermeye başlar. Bunun sebebi yüksek İGO'larda iki sekmeli gönderim olmamasının yanında yeniden gönderimlerde röle yardımı ile paket gönderim süresinin düşmesidir.

5.3 Çok Röleli UKK'lı İşbirlikli Haberleşme Sistemi

Çok röleli işbirlikli haberleşme sistemi Şekil 5.6'da gösterilmiştir. Bu sistem alıcı, verici ve N tane röleden oluşmaktadır. Çok röleli sistemin analizini yaparken de tek röledeki GD'ler geçerlidir. Tek röleli durumda i, j, k kanalları 3 boyutlu bir uzay oluşturmaktaydı. Röle sayısı N'ye çıkınca kanal durumlarından oluşan uzay $2N+1$ boyutlu oluyor. Yapılması gereken tek şey $2N+1$ boyutlu uzayı kapsayacak şekilde her GD bölgesinin güncellenmesidir. Bu güncelleme sonucunda $i, j_t|_{t=1}^N, k_t|_{t=1}^N$ bölgeleri aşağıda verilmiştir. $j_t|_{t=1}^N$ kanalları ile $k_t|_{t=1}^N$ kanalları bağımsız özdeş dağılımlara sahiplerdir.

- GD_1 : İşbirlikli sistemde alıcıya paket gönderilememesi için i kanalının kullanım dışı olması gerekir. Rölelerin hepsinde de ya j kanalları ya da k kanalları kullanım dışı olmalıdır. Böylelikle paketin iki sekmeli gönderilmesi mümkün olmaz. Çünkü j kanalı kullanım dışı olanlar paket alamayacak. Benzer şekilde de k kanalı kullanım dışı olan röleler paket alsalar bile bu paketleri gönderemeye-



Şekil 5.6. Çok Röleli Haberleşme İşbirlikli Haberleşme Sistemi

cekler. Bu durumun matematiksel olarak ifadesi şu şekildedir.

$$i = 0 \text{ ve } \bigcap_{t=1}^N [(j_t = 0) \text{ veya } (k_t = 0)] \quad (5.64)$$

- GD_2 : Bu durumda verici yeniden gönderimleri yapacağından bütün rölelerin paket yeniden göndermesi için şartları sağlayamaması gerekiyor. Bunun için ya j kanalları yüzünden pasif durumda kalacaklar ya da aktif olsalar bile k kanalları yüzünden yeniden gönderime hak kazanamayacaklar.

$$i > 0 \text{ ve } \bigcap_{t=1}^N [(j_t < i) \text{ veya } (k_t \leq i)] \quad (5.65)$$

- GD_3 : Bu durumda rölelerden en azından bir tanesi aktif durumda ve yeniden

gönderim için nitelikli olması gerekiyor. Matematiksel olarak ifadesi şu şekildedir.

$$i > 0 \text{ ve } \bigcup_{t=1}^N [(j_t > i) \text{ ve } (k > i)] \quad (5.66)$$

- GD_4 : Bu durumda rölelerden en az bir tanesi i ile aynı modda j kanalına sahip olmalı ve diğer röleler pasif durumda kalmalıdır. Ayrıca bu rölelerin k kanalları i kanalından daha iyi olmalı ki yeniden gönderim sırasında seçilebilsinler. i kanalı ile aynı moda sahip röleler $1 - p_i$ olasılığı ile aktif olmaktadır. Aktif duruma geçen röle tekrar gönderim devam ediyorsa, gönderimi devir alır ve hatasız olarak ilk seferde paketi iletir.

$$i > 0 \text{ ve } \bigcup_{t=1}^N \left([j_t = i \text{ ve } k_t > i] \text{ ve } \bigcap_{\substack{l=1 \\ l \neq t}}^N [(j_l \leq i) \text{ veya } (k_l \leq i)] \right) \quad (5.67)$$

- GD_5 : Bu durumda paket gönderimi röle üzerinden iki sekmeli olarak devam ettiğinden i kanalı kullanım dışı iken en az bir rölenin j ve k kanalları kullanılabilir olmalıdır. Bu durumun matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$i = 0 \text{ ve } \left[\max_t (\min(j_t, k_t)) = a > 0 \right] \quad (5.68)$$

Tek röleli işbirlikli durumda sistemin ortalama veri hacmini ve paket gönderim süresinin kanal durum süresini geçme olasılığını hesaplarken üç tane iç içe toplam kullanılmıştı (Eş 5.41 ve Eş 5.48). Toplam işlemi sayısı sistemdeki kanal durumlarının ifade edilebildiği boyut sayısına eşittir. N röleli sistemde boyut sayısı $2N+1$ 'dir. $2N+1$ toplam iç içe yapılamayacağından toplam sayısını GD sayısına ve GD 'lerdeki mod sayılarına bağlı olarak ifade edersek iç içe toplam sayısı iki tane olmaktadır. Bunun için GD 'lerin kararlı hal olma olasılıklarını N röle sayısına bağlı olarak ifade etmemiz gerekir.

5.3.1 GD 'lerin Kararlı Hal Olma Olasılıkları

1. GD_1 : Bu durumu ifade eden $2N+1$ boyutlu uzaydaki bölgeyi bir olay olarak tanımlayalım.

$$\varepsilon_1 : "i = 0 \text{ ve } \bigcap_{t=1}^N [(j_t = 0) \text{ veya } (k_t = 0)]"$$

$$\begin{aligned} Prob(\varepsilon_1) &= Prob \left(i = 0 \text{ ve } \bigcap_{t=1}^N [(j_t = 0) \text{ veya } (k_t = 0)] \right) \\ &= Prob(i = 0) Prob(j_1 = 0 \text{ veya } k_1 = 0)^N \\ &= Pr_i(0) [Pr_j(0) + Pr_k(0) - Pr_j(0)Pr_k(0)]^N \end{aligned} \quad (5.69)$$

2. GD_2 : Bu durumun kararlı hal olma olasılığını bulmak için tanımlamamız gereken olay şöyledir.

$$\varepsilon_2 : "i > 0 \text{ ve } \bigcap_{t=1}^N [(j_t < i) \text{ veya } (k_t \leq i)]"$$

Bu olayı i kanal durumuna bağlı olarak sistem performans analizlerinde kullanacağımızdan $Prob(\varepsilon_2)$ 'yi değil i ile bileşik olasılığını, $Prob(\varepsilon, i)$, bulmamız gerekiyor.

$$\begin{aligned} Prob(\varepsilon_2, i) &= Prob \left(i = i \text{ ve } \bigcap_{t=1}^N [(j_t < i) \text{ veya } (k_t \leq i)] \right) \\ &= Prob(i = i) Prob(j_1 < i \text{ veya } k_1 \leq i)^N \\ &= Pr_i(i) [Prob(j_1 < i) + Prob(k_1 \leq i) - Prob(j_1 < i)Prob(k_1 \leq i)]^N \\ &= Pr_i(i) \left[\sum_{j=0}^{i-1} Pr_j(j) + \sum_{k=0}^i Pr_k(k) - \sum_{j=0}^{i-1} Pr_j(j) \sum_{k=0}^i Pr_k(k) \right]^N \end{aligned} \quad (5.70)$$

3. GD_3 : Bu durum için olay tanımı ve olayın i ile bileşik olasılığı aşağıda verilmiştir.

$$\varepsilon_3 : "i > 0 \text{ ve } \bigcup_{t=1}^N [(j_t > i) \text{ ve } (k > i)]"$$

$$\begin{aligned}
Prob(\varepsilon_3, i) &= Prob\left(i = i \text{ ve } \bigcup_{t=1}^N [(j_t > i) \text{ ve } (k > i)]\right) \\
&= Prob(i = i) Prob\left(\bigcup_{t=1}^N (j_t > i \text{ ve } k_t > i)\right) \\
&= Pr_i(i) \left[1 - Prob\left(\bigcap_{t=1}^N \overline{(j_t > i \text{ ve } k > i)}\right)\right] \\
&= Pr_i(i) \left[1 - [1 - Prob(j_1 > i \text{ ve } k_1 > i)]^N\right] \\
&= Pr_i(i) \left[1 - \left[1 - \sum_{j=i+1}^{N_n} Pr_j(j) \sum_{k=i+1}^{N_n} Pr_k(k)\right]^N\right] \tag{5.71}
\end{aligned}$$

4. GD_4 : Bu durumda en az bir rölenin j kanalı i kanalı ile aynı modda ve k kanalı i kanalından büyük bir modda olması gerekiyor. Diğer röleler ise ya kesinlikle pasif kalırlar ya da k kanal durumları yüzünden yeniden gönderimde bulunamazlar. Bu durumdaki olay tanımını aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_4: "i > 0 \text{ and } \bigcup_{t=1}^N \left(j_t = i \text{ and } k_t > i \text{ and } \bigcap_{\substack{l=1 \\ l \neq t}}^N (j_l \leq i \text{ or } k_l \leq i) \right) "$$

Bu olayın kararlı hal olasılığının hesaplanması bu tanımla zor olduğundan olayın ifade ettiği olasılık olaylarından gidelim. Bunun için iki şart tanımlayalım. Birincisi rölenin $1 - p_i$ olasılığı ile aktif olacağı ve aktif olduğunda da devam eden yeniden gönderim varsa yeniden gönderimi devir aldığı şarttır.

$$S_1 : j = i \text{ ve } k > i \tag{5.72}$$

İkinci ise rölenin kullanılamaz olduğunu ifade eden şarttır. Bu şarta göre röle ya aktif olamaz ya da aktif olması durumunda da yeniden gönderimde bulunamaz.

$$S_2 : j < i \text{ veya } k \leq i \tag{5.73}$$

Olay ε_4 ile i kanal modunun bileşik olasılığını bulmak için bir alt olay tanımlamamız gerekir. Bu olay ε'_4 : "en az bir röle S_1 'i sağlayacak diğerleri S_2 'yi sağlayacak" şeklindedir. Buna göre $Prob(\varepsilon_4, i)$

$$Prob(\varepsilon_4, i) = Prob(i = i) Prob(\varepsilon'_4) \tag{5.74}$$

şekindedir. $Prob(\varepsilon'_4)$ 'ün olasılığı Eş 5.75'te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
Prob(\varepsilon'_4) &= \sum_{n=1}^N Prob(n \text{ röle } S_1 \text{ şartında, } (N-n) \text{ röle } S_2 \text{ şartında}) \\
&= \sum_{n=1}^N \binom{N}{t} Prob(j = i \text{ ve } k > i)^n Prob(j < i \text{ veya } k \leq i)^{N-n} \\
&= \sum_{n=1}^N \binom{N}{t} Prob(j = i \text{ ve } k > i)^n (1 - Prob(j \geq i \text{ ve } k > i))^{N-n} \\
&= \sum_{n=1}^N \binom{N}{t} \left[Pr_j(i) \sum_{k=i+1}^{N_n} Pr_k(k) \right]^n \left[1 - \sum_{j=i}^{N_n} Pr_j(j) \sum_{k=i+1}^{N_n} Pr_k(k) \right]^{N-n} \\
&= [P(i) + Q(i)]^N - Q^N \tag{5.75}
\end{aligned}$$

Eş 5.75'teki $P(i) = Pr_j(i) \sum_{k=i+1}^{N_n} Pr_k(k)$ ve $Q(i) = 1 - \sum_{j=i}^{N_n} Pr_j(j) \sum_{k=i+1}^{N_n} Pr_k(k)$ olarak tanımlanır.

5. GD_5 : Bu durumda i kanalı kullanım dışı ve paket gönderimi j ve k kanalı kullanıma uygun olan en iyi röle üzerinden iki sekmeli gönderilecek. Bu durumdaki olay tanımımız aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_5 : "i = 0 \text{ ve } \left[\max_t(\min(j_t, k_t)) = a > 0 \right]$$

$$\begin{aligned}
Prob(\varepsilon_5, a) &= Prob\left(i = 0 \text{ ve } \left[\max_t(\min(j_t, k_t)) = a \right]\right) \\
&= Prob(i = 0) Prob\left(\max_t(\min(j_t, k_t)) = a\right) \tag{5.76}
\end{aligned}$$

Eş 5.77'de $Prob(\max_t(\min(j_t, k_t)) = a)$ 'in olasılığını hesaplayalım.

$$\begin{aligned}
Prob(\max_t(\min(j_t, k_t)) = a) &= Prob(\max_t(\min(j_t, k_t)) \leq a) - Prob(\max_t(\min(j_t, k_t)) \leq a - 1) \\
&= [Prob(\min(j_1, k_1) \leq a)]^N - [Prob(\min(j_1, k_1) \leq a - 1)]^N \\
&= [1 - Prob(\min(j_1, k_1) > a)]^N - [1 - Prob(\min(j_1, k_1) > a - 1)]^N \\
&= \left[1 - \sum_{j=a+1}^{N_n} Pr_j(j) \sum_{k=a+1}^{N_n} Pr_k(k) \right]^N - \left[1 - \sum_{j=a}^{N_n} Pr_j(j) \sum_{k=a}^{N_n} Pr_k(k) \right]^N \tag{5.77}
\end{aligned}$$

$Prob(\max_t(\min(j_t, k_t)) = a)$ olasılığı iki alt olaydan oluşmaktadır. Bu alt olaylar;

- (a) Alt olay E_5^1 : Seçilen rölede $j = k$.
- (b) Alt olay E_5^2 : Seçilen rölede $j \neq k$.

şeklinde. Alt olayların oluşturulmasındaki neden veri hacmi, paket süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığının hesaplarında kullanılacak olmasıdır.

Alt olay E_5^1 'in gerçekleşmesi için en az bir rölede $j = k = a$ (S_5^1) şartı sağlanmalı ve diğer rölelerde $j < a$ veya $k < a$ (S_5^2) şartı bulunmalıdır. Bu alt olayın olasılık hesabı GD_4 ile benzerlik göstermektedir.

$$\begin{aligned}
Prob(E_5^1) &= \sum_{n=1}^N Prob(n \text{ röle } S_5^1 \text{ şartında, } (N-n) \text{ röle } S_5^2 \text{ şartında}) \\
&= \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} [Prob(j = a \text{ ve } k = a)]^n [Prob(j < a \text{ veya } k < a)]^{N-n} \\
&= \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} [Prob(j = a \text{ ve } k = a)]^n [1 - Prob(j \geq a \text{ ve } k \geq a)]^{N-n} \\
&= \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} [Pr_j(a)Pr_k(a)]^n \left[1 - \sum_{j=a}^{N_n} Pr_j(a) \sum_{k=a}^{N_n} Pr_k(a) \right]^{N-n} \\
&= [P^1(a) + Q^1(a)]^N - Q^1(a)^N
\end{aligned} \tag{5.78}$$

Eş 5.78'deki $P^1(a) = Pr_j(a)Pr_k(a)$ ve $Q^1(a) = 1 - \sum_{j=a}^{N_n} Pr_j(a) \sum_{k=a}^{N_n} Pr_k(a)$ şeklinde tanımlanmıştır.

Alt olay E_5^2 'nin hesaplanması bütün olasılıktan alt olay E_5^1 'in olasılığının çıkarılması ile elde edilebilir.

$$Prob(E_5^2) = Prob(\max_t(\min(j_t, k_t)) = a) - Prob(E_5^1) \tag{5.79}$$

GD olasılıklarına ve UKK moduna bağlı olarak veri hacmi;

$$\begin{aligned}
E[T] &= \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{t=1}^6 T(\varepsilon_t, i) Prob(\varepsilon_t, i) \\
&= \sum_{i=1}^{N_n} \sum_{t=2}^6 T(\varepsilon_t, i) Prob(\varepsilon_t, i)
\end{aligned} \tag{5.80}$$

şeklindedir. Eş 5.80'deki ε_t ve $T(\varepsilon_t, i)$ aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_t = \begin{cases} GD_1, & t = 1 \\ GD_2, & t = 2 \\ GD_3, & t = 3 \\ GD_4, & t = 4 \\ GD_5 \text{ ve } j = k, & t = 5 \\ GD_5 \text{ ve } j \neq k, & t = 6 \end{cases} \quad (5.81)$$

$$T(\varepsilon_t, i) = \begin{cases} 0, & t = 1 \\ R_i(1 - p_i), & t = 2 \\ \frac{R_i}{(1 + p_i)}, & t = 3 \\ \frac{R_i(1 - p_i^2)}{(1 + p_i - p_i^2)}, & t = 4 \\ \frac{R_i}{2(1 - p_i)^{-1}}, & t = 5 \\ \frac{R_i}{1 + (1 - p_i)^{-1}}, & t = 6 \end{cases} \quad (5.82)$$

Çok Röleli İşbirlikli UKK'lı Haberleşme Sistemi için $Prob(E)$:

Çok röleli işbirlikli UKK'lı haberleşme sistemleri için paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığı iki farklı ortalama kanal İGO'su için Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4' verilmiştir. 0 dB ortalama kanal İGO'sunda işbirliksiz sistemden işbirlikli sisteme geçişte paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığı yaklaşık olarak 100 katına çıkmaktadır. Sabit kanal süresi için röle sayısının artması (en fazla 10 röle için) paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığını düşürse de bu olasılık işbirliksiz sisteme göre hep yüksek kalmaktadır.

5 dB ortalama kanal İGO'su için paket gönderim süresinin kanal güncellenme süresini aşma olasılığı işbirliksiz sistemden işbirlikli sisteme geçildiğinde 0 dB'deki gibi yaklaşık 100 katına çıkmaktadır. Bu ortalama İGO değerinde röle sayısı artıkça (en fazla 10 röle) olasılık değeri işbirliksiz sisteme yaklaşıyor. Hatta kanal güncellenme

süresi arttıkça işbirlikli sistem olasılığı işbirliksiz sistemden daha düşük değerlere ulaşıyor.

0 dB	C = 1	C = 2	C = 3	C = 4	C = 5	C = 6	C = 7	C = 8	C = 9	C = 10
N = 0	2.11e-3	3.27e-5	5.11e-7	7.97e-9	1.24e-10	1.94e-12	3.03e-14	4.73e-16	7.38e-18	1.15e-19
N = 1	2.20e-1	4.22e-3	7.92e-5	1.45e-6	2.58e-8	4.54e-10	7.89e-12	1.36e-13	2.31e-15	3.91e-17
N = 2	3.17e-1	5.90e-3	1.09e-4	1.96e-6	3.48e-8	6.07e-10	1.05e-11	1.79e-13	3.04e-15	5.13e-17
N = 3	3.47e-1	6.27e-3	1.14e-4	2.02e-6	3.55e-8	6.15e-10	1.05e-11	1.79e-13	3.03e-15	5.09e-17
N = 4	3.42e-1	5.99e-3	1.07e-4	1.88e-6	3.26e-8	5.59e-10	9.53e-12	1.61e-13	2.71e-15	4.53e-17
N = 5	3.19e-1	5.42e-3	9.50e-5	1.65e-6	2.83e-8	4.82e-10	8.16e-12	1.37e-13	2.29e-15	3.82e-17
N = 6	2.89e-1	4.76e-3	8.22e-5	1.41e-6	2.39e-8	4.04e-10	6.79e-12	1.13e-13	1.89e-15	3.12e-17
N = 7	2.56e-1	4.11e-3	6.99e-5	1.18e-6	1.99e-8	3.33e-10	5.55e-12	9.22e-14	1.52e-15	2.51e-17
N = 8	2.25e-1	3.51e-3	5.89e-5	9.86e-7	1.64e-8	2.73e-10	4.51e-12	7.44e-14	1.22e-15	2.00e-17
N = 9	1.97e-1	2.98e-3	4.94e-5	8.18e-7	1.35e-8	2.22e-10	3.65e-12	5.98e-14	9.78e-16	1.59e-17
N = 10	1.71e-1	2.52e-3	4.13e-5	6.78e-7	1.11e-8	1.81e-10	2.96e-12	4.82e-14	7.83e-16	1.27e-17

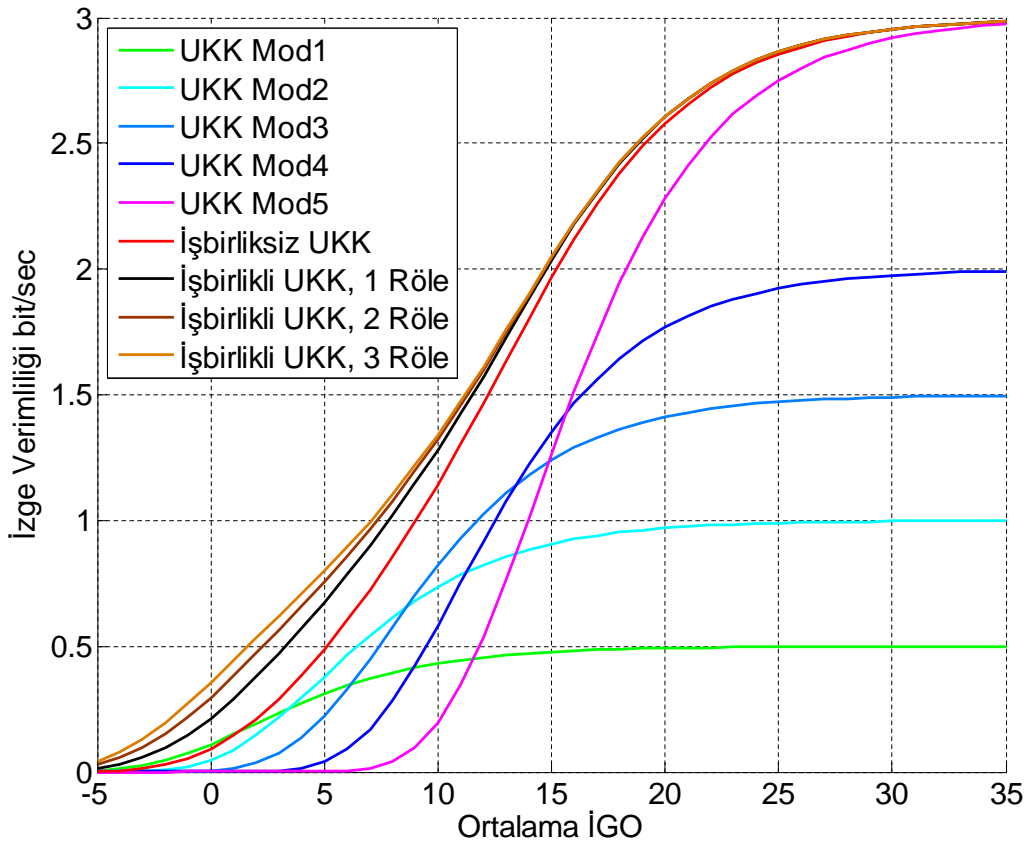
Çizelge 5.3. 0 dB ortalama kanal İGO için röle sayısı ile kanal güncellenme süresine bağlı $Prob(E)$

5 dB	C = 1	C = 2	C = 3	C = 4	C = 5	C = 6	C = 7	C = 8	C = 9	C = 10
N = 0	2.59e-3	2.61e-5	2.66e-7	2.71e-9	2.77e-11	2.82e-13	2.88e-15	2.94e-17	3.00e-19	3.06e-21
N = 1	9.77e-2	1.10e-3	1.27e-5	1.45e-7	1.63e-9	1.82e-11	2.01e-13	2.22e-15	2.43e-17	2.65e-19
N = 2	6.84e-2	7.26e-4	8.16e-6	9.11e-8	1.01e-9	1.11e-11	1.22e-13	1.32e-15	1.44e-17	1.55e-19
N = 3	3.80e-2	3.72e-4	4.09e-6	4.47e-8	4.87e-10	5.29e-12	5.72e-14	6.16e-16	6.62e-18	7.10e-20
N = 4	2.02e-2	1.75e-4	1.88e-6	2.03e-8	2.18e-10	2.33e-12	2.49e-14	2.65e-16	2.82e-18	3.00e-20
N = 5	1.11e-2	7.95e-5	8.43e-7	8.94e-9	9.47e-11	1.00e-12	1.06e-14	1.12e-16	1.18e-18	1.24e-20
N = 6	6.75e-3	3.56e-5	3.72e-7	3.91e-9	4.09e-11	4.29e-13	4.49e-15	4.69e-17	4.91e-19	5.13e-21
N = 7	4.68e-3	1.59e-5	1.64e-7	1.71e-9	1.78e-11	1.84e-13	1.92e-15	1.99e-17	2.07e-19	2.14e-21
N = 8	3.68e-3	7.07e-6	7.25e-8	7.49e-10	7.74e-12	7.99e-14	8.26e-16	8.53e-18	8.81e-20	9.09e-22
N = 9	3.20e-3	3.15e-6	3.20e-8	3.29e-10	3.39e-12	3.49e-14	3.59e-16	3.69e-18	3.80e-20	3.90e-22
N = 10	2.95e-3	1.41e-6	1.42e-8	1.45e-10	1.49e-12	1.53e-14	1.57e-16	1.61e-18	1.65e-20	1.69e-22

Çizelge 5.4. 5 dB ortalama kanal İGO için röle sayısı ile kanal güncellenme süresine bağlı $Prob(E)$

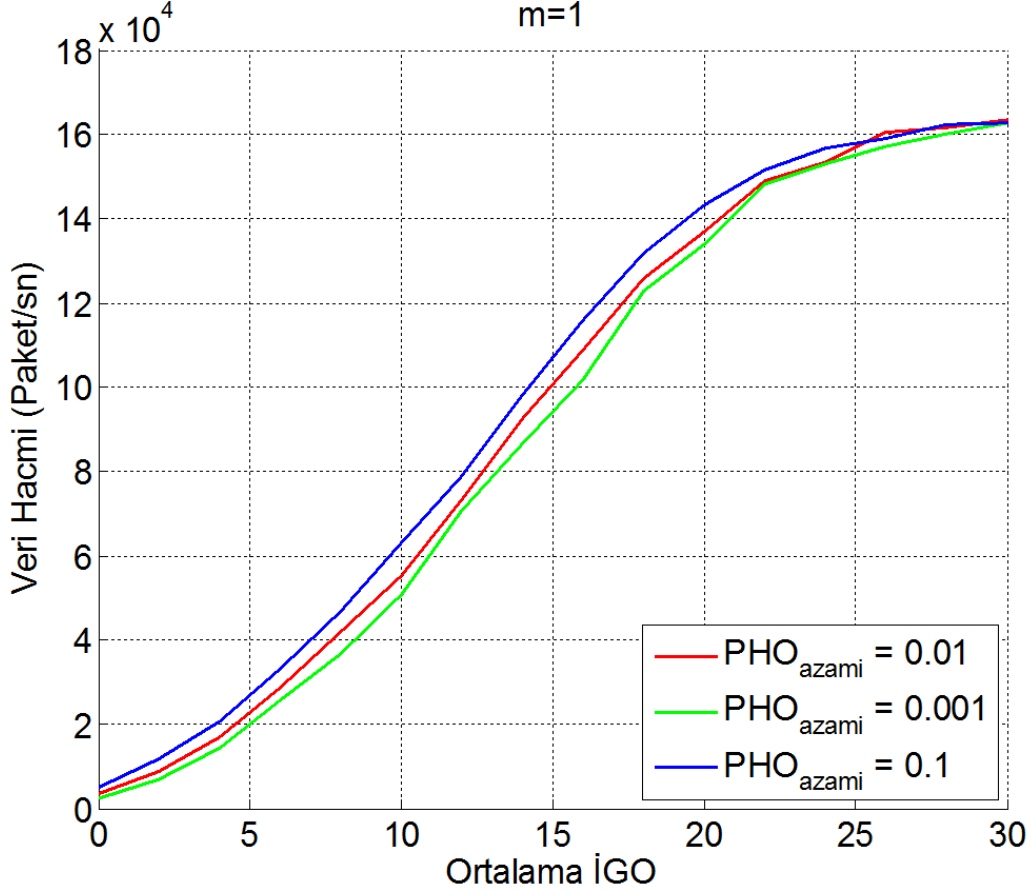
6. BENZETİM BULGULARI

UKK'lı işbirlikli haberleşme sisteminin benzetim ve analizi yapılırken vericinin sürekli göndericek paketi olduğu varsayımı yapılmıştır. İletişim başladığında kanal kestirimleri İH ve İA sinyalleri ile yapılır ve diğer uçbirimlere iletilir. Paket gönderimlerinde ise kestirim yapıldıktan sonra diğer uçbirimlere iletimi Onay/Red sinyalleri ile yapılır. Onay/Red sinyali paket alımı ile oluşturulur ve anlık olarak yayılımı yapılır. Onay/Red sinyallerinin süresi, paket süresinin yanında çok küçük kaldığı için izge verimliliği, veri hacmi ve ortalama gecikme analizlerinde ihmal edilmiştir.



Şekil 6.1. Kipleme ve Kodlama Modları, İşbirliksiz UKK ve İşbirlikli UKK kullanımı sonucunda izge verimliliği

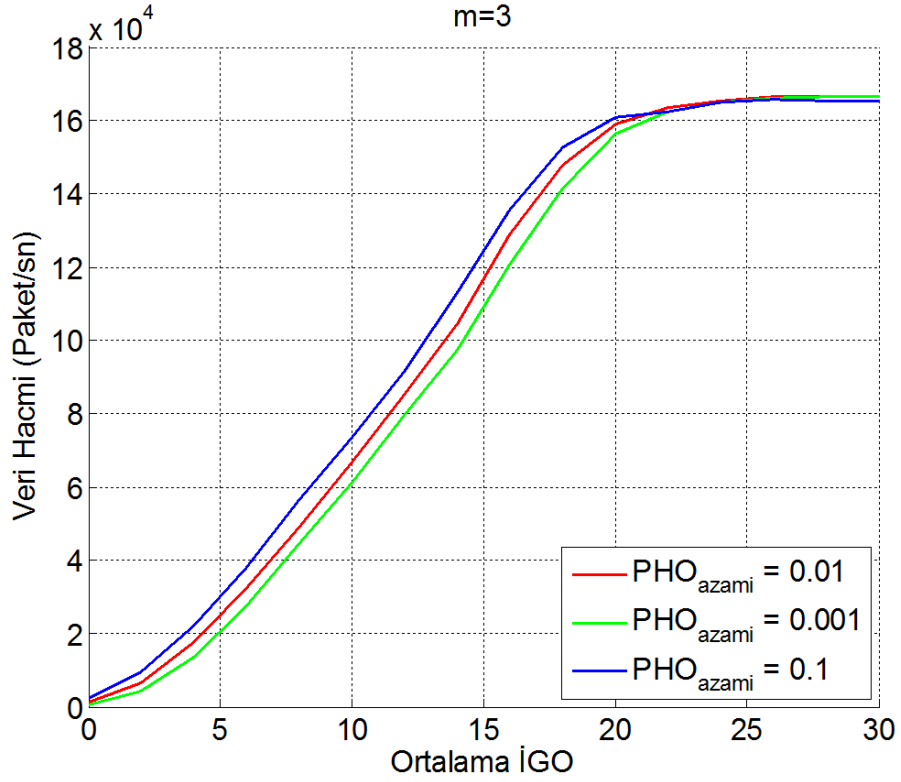
Şekil 6.1'de, işbirliksiz ve işbirlikli UKK sistemlerinde kullanılan beş modun ayrı ayrı ve işbirliksiz ve işbirlikli UKK olarak kullanıldığında izge verimliliği verilmiştir. İzge verimliliği ortalama İGO'ya bağlı olduğundan izge verimliliğinde kazanç gözükmemektedir. Bunun sebebi anlık İGO değerinin ortalama İGO seviyesi etrafında azalıp artmasındandır. Örneğin anlık İGO seviyesi 10 dB olsaydı sadece 3. mod kullanılacaktı. Ama



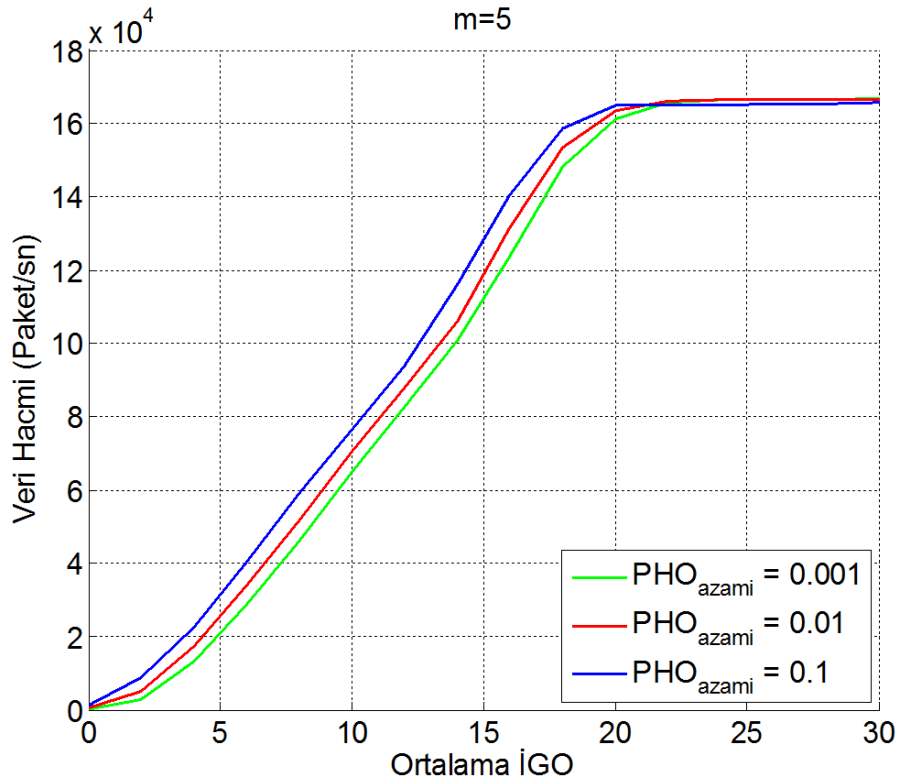
Şekil 6.2. $m = 1$ için İşbirliksiz UKK'da hedef PHO'nun veri hacmine etkisi

ortalama 10 dB İGO denildiğinde sistemin bulunduğu UKK modu sadece 3. mod olmamakla birlikte diğer UKK modlarında da bulunabilir. Düşük verimlilikte bir kipleme ve kodlama çifti kullanıldığında düşük ortalama İGO seviyelerinde yeterli performans gösterirken yüksek ortalama İGO seviyelerine çıkıldıkça doyum noktasına ulaşmaktadır. Yüksek izge verimliliği sağlayan kipleme ve kodlama çiftinde ise düşük İGO seviyelerinde verimlilik çok düşüktür ve yüksek İGO seviyelerinde ise doyuma ulaşınca kadar izge verimliliği yükselmektedir.

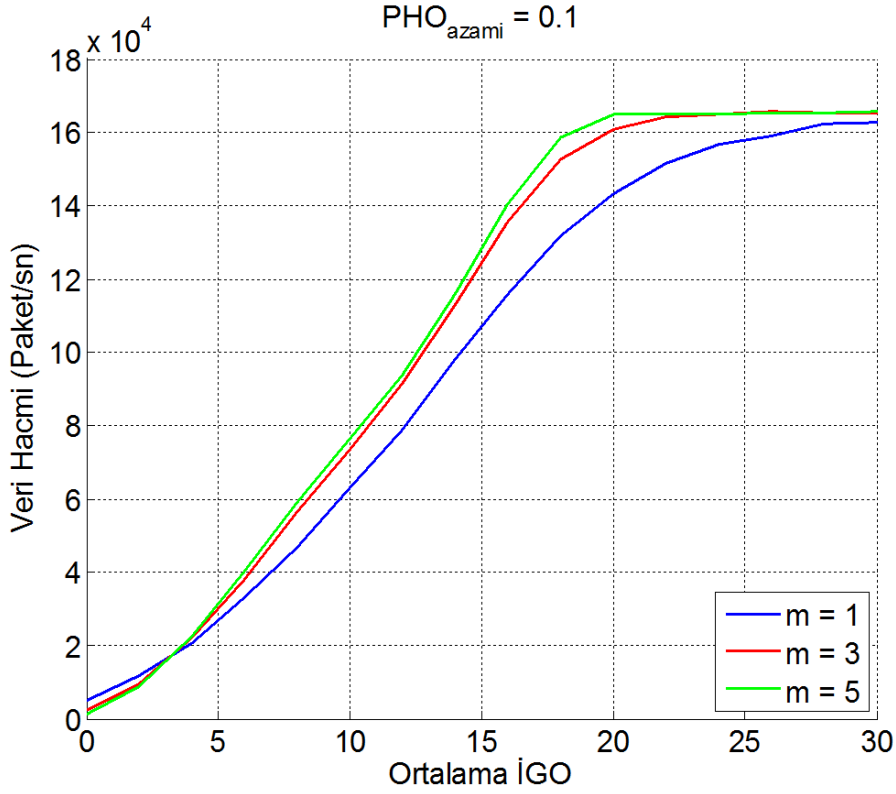
İletişim kanalında, tek bir kipleme ve kodlama çiftinin kullanılması kanalın kipleme ve kodlama çiftinin özelliğine bağlı olarak verimsiz kullanılmasına neden olmaktadır. Bu sebeple belirli servis kalitesi kısıtı altında bu kipleme ve kodlama çiftleri bir arada kullanılabilir. Bu şekilde kullanımlarda iletişim sadece verici ve alıcı katılıyorsa işbirliksiz UKK, verici ve alıcı dışında etraftaki uçbirimler de katılıyorsa işbirlikli UKK denir.



Şekil 6.3. $m = 3$ için İşbirliksiz UKK'da hedef PHO'nun veri hacmine etkisi



Şekil 6.4. $m = 5$ için İşbirliksiz UKK'da hedef PHO'nun veri hacmine etkisi

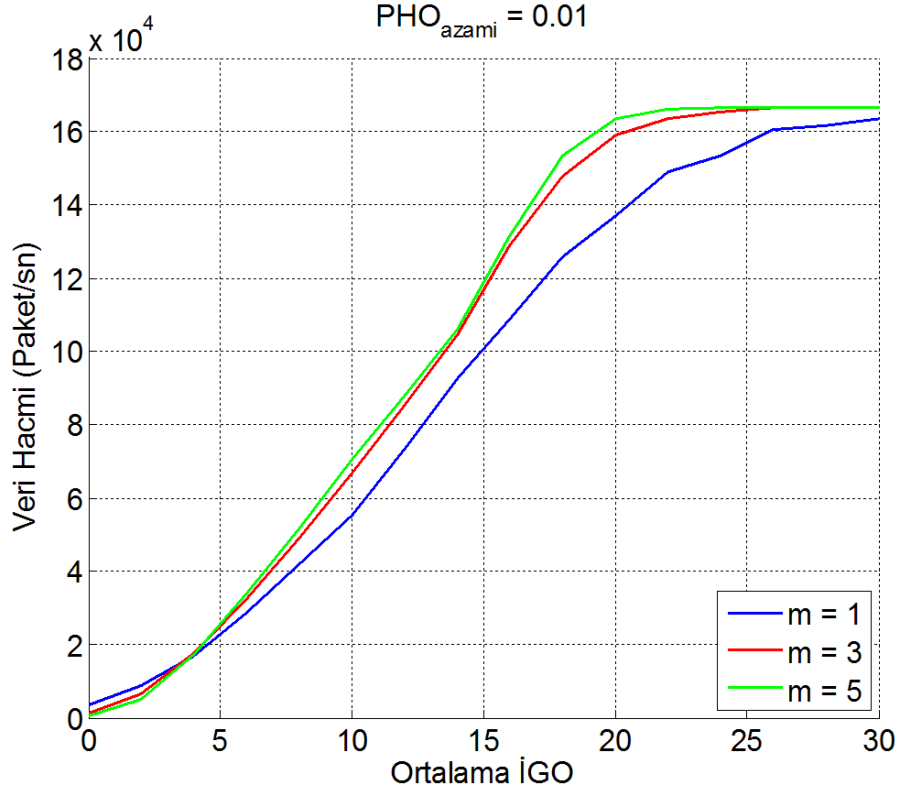


Şekil 6.5. İşbirliksiz UKK'da $PHO_{azami} = 0.1$ için m parametresinin etkisi

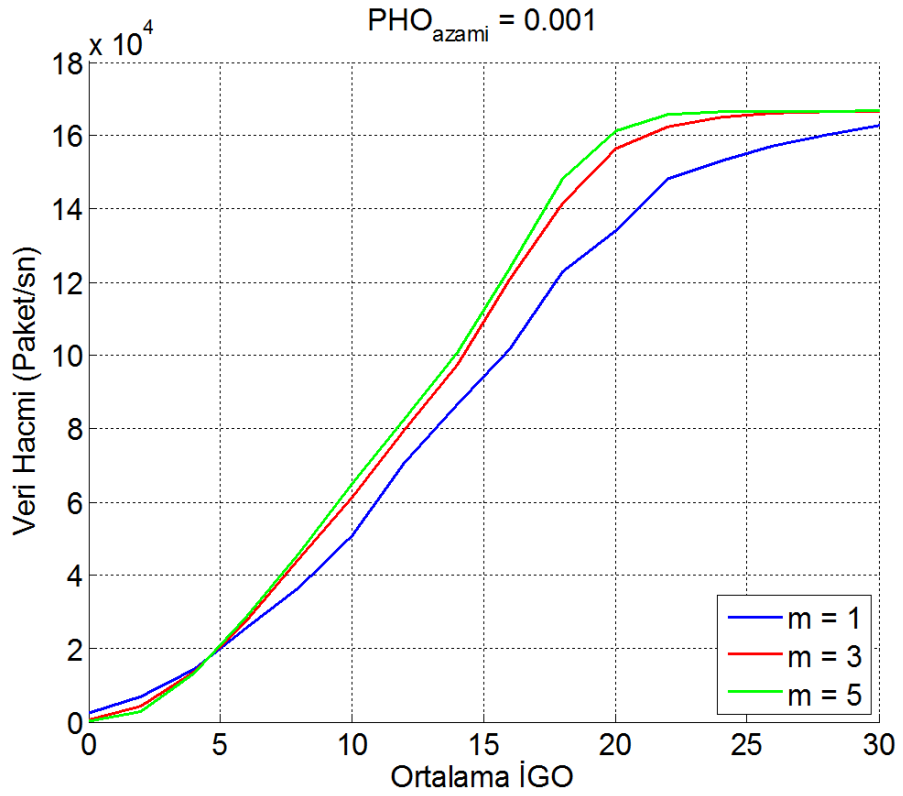
İşbirliksiz UKK sisteminde izge verimliliği UKK'da kullanılan kipleme ve kodlama çiftlerinin izge verimliliğinin birleşimi olur. Bu şekilde iletişim izge verimliliği kipleme ve kodlama çiftlerinin en küçük izge verimliliği ile en büyük izge verimliliği arasında ortalama İGO'ya bağlı olarak değişir. Sistem işbirlikli olduğu zaman ise işbirliğin verdiği kazanç ile izge verimliliği arttırılmış olur.

Şekil 6.2'de sönümlenme parametresi, $m = 1$, için farklı hedef PHO'ları, PHO_{azami} , için veri hacmi verilmiştir. Görüldüğü üzere hedef PHO düşürüldükçe veri hacminde azalma olmaktadır. Bunun sebebi PHO_{azami} değeri UKK modlarının hangi İGO seviyelerinde kullanılacağını belirlemesidir. PHO_{azami} azaldıkça UKK modlarının kullandıkları İGO seviyeleri yükselmektedir. Bu da aynı İGO seviyesinde PHO_{azami} azaldıkça daha düşük izge verimliliğindeki UKK modu kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum sönümlenme parametresi $m = 3$ için Şekil 6.3'de ve $m = 5$ için Şekil 6.4'de verilmiştir.

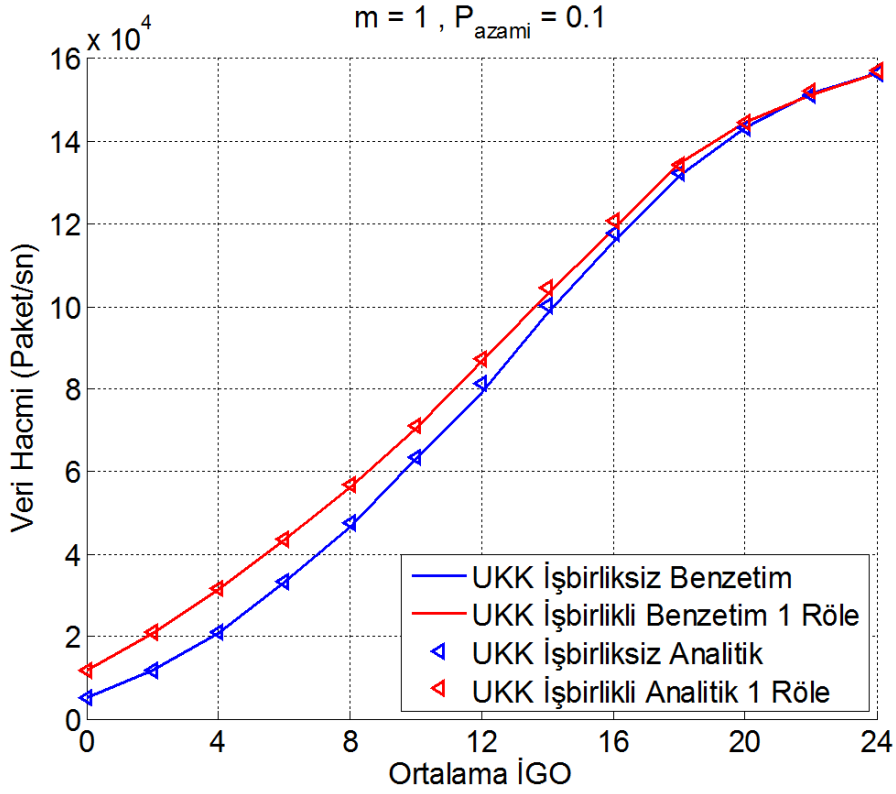
PHO_{azami} kısıtı 0.1, 0.01 ve 0.001 olduğunda aynı veri hacmini sağlamak için ortalama İGO değerinin yaklaşık olarak 1 dB arttırılması gerekmektedir. Bu etki bütün m değerleri için gözlenmektedir. Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 karşılaştırıldığında



Şekil 6.6. İşbirliksiz UKK'da $PHO_{azami} = 0.01$ için m parametresinin etkisi



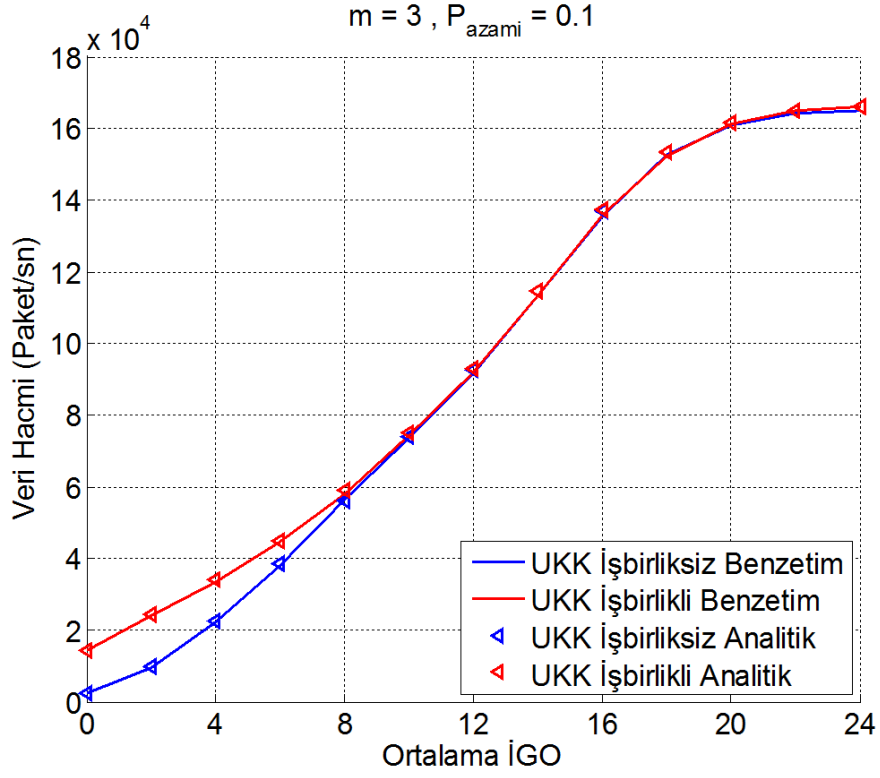
Şekil 6.7. İşbirliksiz UKK'da $PHO_{azami} = 0.001$ için m parametresinin etkisi



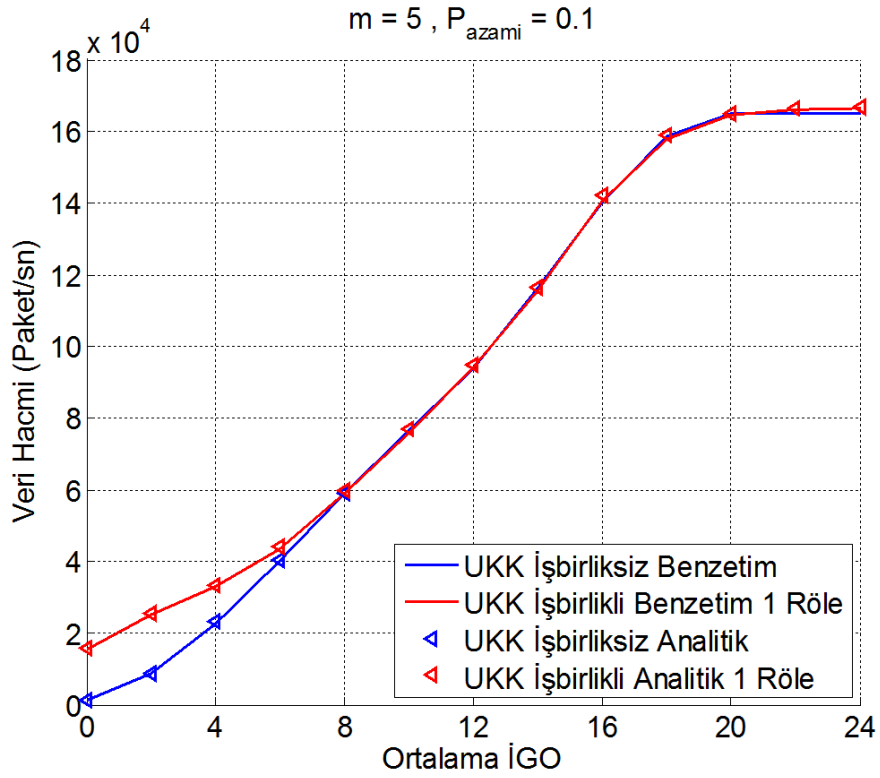
Şekil 6.8. İşbiriksiz ve İşbirikli UKK sistemlerinin benzetim ve analitik olarak $m = 1$ için karşılaştırılması

m değeri arttıkça veri hacminin doyuma ulaşması için gerekli ortalama İGO seviyesi düşmektedir. Burda neden istatistiksel olarak kanal İGO'sunun dağılımına bağlıdır. m değeri arttıkça ortalama İGO değeri etrafında olma olasılığı artarak ortalama İGO etrafında dar bir çerçevede bulunmaya başlar. Bu da sistemin daha çabuk en yüksek moda bulunmaya başlaması ve veri hacmi doyum noktasına ulaşmasına neden olmaktadır.

Bütün sönümlenme parametrelerinde PHO_{azami} değerinin etkisi aynı olmaktadır. Bununla birlikte PHO_{azami} için sönümlenme parametresinin etkisine bakılması sistem performansı incelemesi için gereklidir. $PHO_{azami} = 0.1$ için veri hacmi Şekil 6.5'de verilmiştir. Sönümlenme parametresi, m , değeri artarken veri hacminde de artış görülmektedir. m değeri artmaya devam ettiğinde veri hacmindeki kazanç azalmaktadır. Bunun sebebi daha önce de değinildiği üzere sabit ortalama İGO'da m parametresi arttıkça kanal İGO değerinin istatistiksel olarak dağılımları, ortalama İGO etrafında m parametresine bağlı olarak dar bir çerçevede bulunması ile istatistiksel olarak büyük çoğunlukta aynı UKK modunda bulunmaya başlamasıdır.



Şekil 6.9. İşbiriksiz ve İşbirlikli UKK sistemlerinin benzetim ve analitik olarak $m = 3$ için karşılaştırılması



Şekil 6.10. İşbiriksiz ve İşbirlikli UKK sistemlerinin benzetim ve analitik olarak $m = 5$ için karşılaştırılması

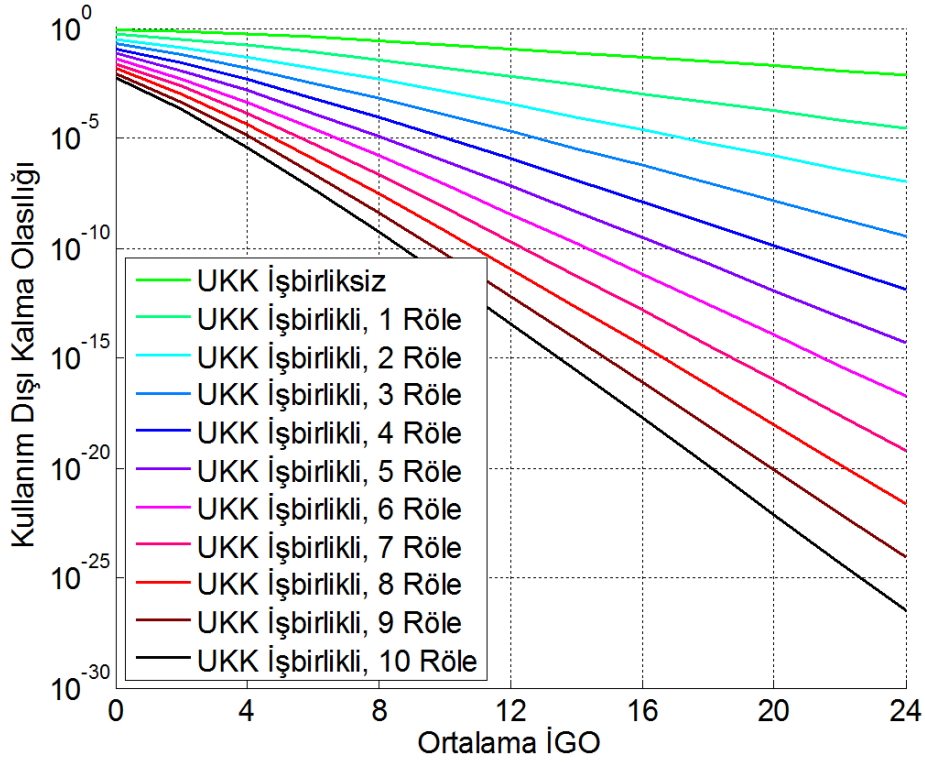
Farklı PHO_{azami} değerlerinin bütün sönümlenme değerlerinde aynı etkiyi yaptığı gibi, sönümlenme parametresi de bütün PHO_{azami} değerinde aynı etkiyi göstermektedir. Bu durum Şekil 6.6 ve Şekil 6.7'de sırası ile $PHO_{azami} = 0.01$ ve $PHO_{azami} = 0.001$ için gösterilmektedir. İşbiriksiz UKK sisteminde sabit sönümlenme değerine karşılık değişken PHO_{azami} kısıtı ve sabit PHO_{azami} kısıtına karşılık değişken sönümlenme parametresinin veri hacmine etkisi incelendiğinde en büyük veri hacmi elde edilmesi için PHO_{azami} kısıtının 0.1 ve sönümlenme parametresi değerinin olabildiğince büyük olması sonucu çıkarılabilir. Sönümlenme parametresi verici ve alıcının konumuna bağlı olması ile birlikte arada bulunan yansıtıcı ve kırıcı yüzeylere de bağlıdır. Bu sebeple denetimimizde olan parametre PHO_{azami} kısıtı olup işbirlikli sistem için en büyük veri hacmini sabit sönümlenme için sağlamaktadır.

Şekil 6.8'de $m = 1$ için işbiriksiz UKK ile İşbirlikli UKK sistemlerinin benzetim ve analitik sonuçları gösterilmiştir. UKK işbirlikli ve bir röleli olarak kullanıldığında sistem doyum noktasına ulaşıncaya kadar işbiriksiz UKK'ya göre veri hacmi kazancı göstermektedir. Yapılan analiz, benzetim sonuçları ile örtüşmektedir. Bu da yapılan analitik çözümün doğruluğunu göstermektedir.

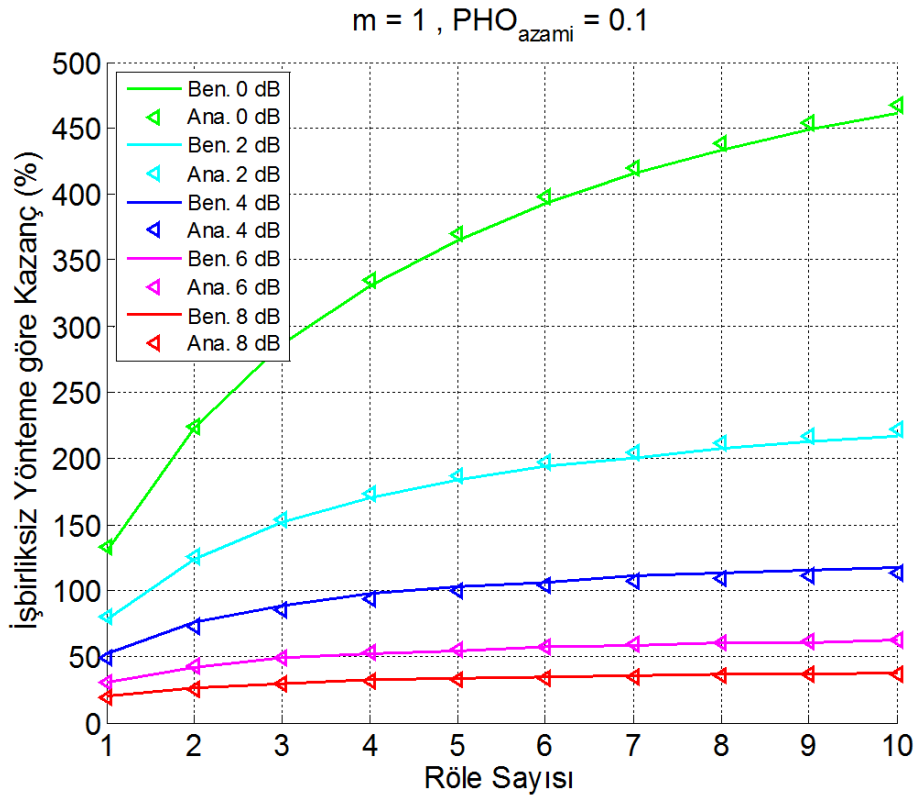
Analiz sırasında yapılan paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşmama varsayımı doğru bir varsayım olduğu sonucu çıkarılabilir. Bu varsayım sonrasında paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşma olasılığının en büyük değeri 0 dB kanal ortalama İGO'sunda $Prob(E) = 2.20e-1$ olarak hesaplanmıştır. Bu olasılık değeri yüksek gözükmesine rağmen benzetimde yapılan zaman ortalaması ile analiz sırasında yapılan grup ortalaması birbirini desteklemektedir.

Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'de de $m = 3$ ve $m = 5$ için sırası ile işbiriksiz ve işbirlikli UKK sistemlerinin veri hacimleri benzetim ve analitik olarak karşılaştırılmıştır. $m = 1$ için işbiriksiz UKK ve işbirlikli UKK sisteminin aynı veri hacmine ulaşması 22-24 dB civarında olurken $m = 3$ için bu değer 10-12 dB'lere inmektedir. Buna neden olan durum ise kanal İGO'sunun istatistiksel dağılımından kaynaklı olarak kullanım dışı kalma olasılığını ve işbirliğine olan ihtiyacın m değeri arttıkça daha çabuk düşürmesidir. Şekil 6.10'de $m = 5$ için işbiriksiz UKK ile işbirlikli UKK sistemlerinin veri hacimlerinin aynı seviyeye gelmesi daha çabuk olduğu gözlemlenmektedir.

İşbirlikli UKK'da yardıma istekli röle sayısının artması iletişimin kullanım dışı kalma olasılığına etkisi Şekil 6.11'de verilmiştir. Sistemin kullanım dışı kalması ile kastedi-



Şekil 6.11. İşbiriksiz ve İşbirlikli UKK sistemlerinin kullanım dışı kalma olasılıkları



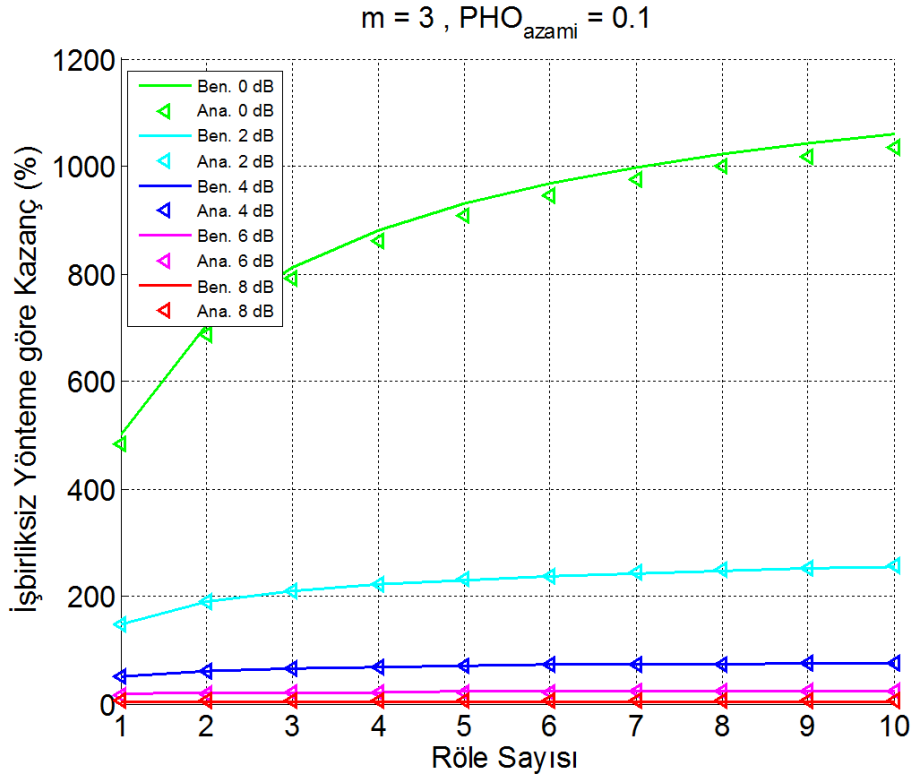
Şekil 6.12. İşbirlikli UKK sisteminde röle sayısının İşbiriksiz UKK sistemine göre $m = 1$ için veri hacmi kazancı

len durum verici tarafından alıcıya iletilmek üzere paket gönderilemediği durumdur. Bu olasılık röle sayısı ile yaklaşık olarak üssel olarak azalmaktadır. Sabit kullanım dışı kalma olasılığı için az sayıda rölenin bulunduğu durumda ortalama İGO'dan kazanç yüksektir. Röle sayısındaki artış ile birlikte ortalama İGO'dan kazanç artarak azalmaktadır. Örneğin 10^{-5} 'lik en büyük kullanım dışı kalma olasılığı için işbiriksiz UKK sisteminde minimum ortalama kanal İGO seviyesi 34 dB olması gerekirken, işbirlikli UKK sisteminde bir röle için bu değer 24 dB civarına inmektedir. Bu da 10 dB'lik kazanç demektir. Röle sayısı iki olduğunda gerekli en küçük ortalama kanal İGO seviyesi 17 dB'ye inerek, bir röleli sisteme göre 7 dB'lik kazanç sağlamaktadır. Röle sayısı on olduğunda ise gerekli en küçük ortalama kanal İGO seviyesi 4 dB'nin altına inmektedir.

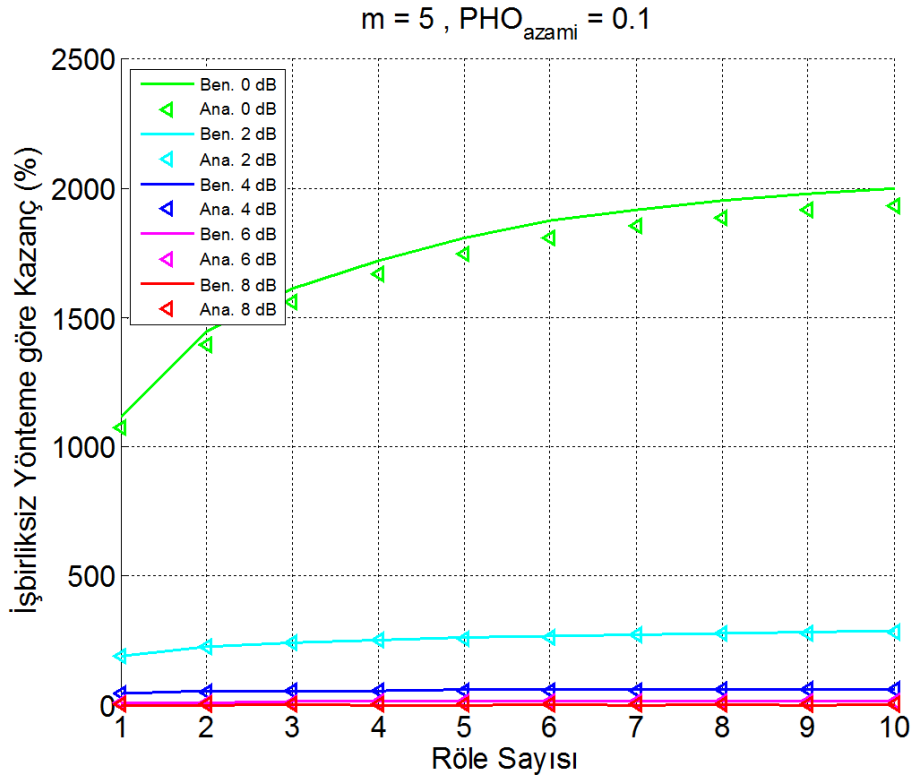
İşbirlikli UKK sistemde röle sayısının veri hacmine olan etkisinin incelemesi Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de $m = 1$, $m = 3$ ve $m = 5$ için sırası ile gösterilmiştir. Buna göre düşük ortalama İGO seviyelerinde işbiriksiz UKK sistemine göre veri hacmi kazancı röle sayısı arttıkça azalarak artmaktadır. Belli bir röle sayısından sonra sistem veri hacmindeki kazanç doyum noktasına ulaşmaktadır. Ortalama İGO seviyesi arttıkça işbirlikli UKK sisteminin veri hacmi doyum noktasına ulaşması için gerekli röle sayısı azalmaktadır.

Şekil 6.13'de işbiriksiz UKK sistemine göre bir röleli işbirlikli UKK sistemin 0 dB ortalama İGO'da veri hacminde %140'lık bir kazanç varken röle sayısı arttıkça bu değer 18 röleli işbirlikli UKK sisteminde %490'lık kazanç ile doyuma ulaşmaktadır. Ortalama İGO seviyesi 2 dB olduğunda veri hacmindeki kazanç 1 rölede %80 ile başlayıp 13 rölede %225 ile doyum noktasına ulaşmaktadır. Ortalama İGO seviyesi yükseldikçe daha öncede gösterildiği gibi işbirlik kazancı düşmekte ve aynı zamanda veri hacminde doyum noktasına ulaşması için gerekli röle sayısı azalmaktadır. Örneğin 8 dB ortalama İGO'da veri hacmindeki kazanç 1 rölede %20 ile başlayıp 4 rölede %30 ile doyum noktasına ulaşmaktadır.

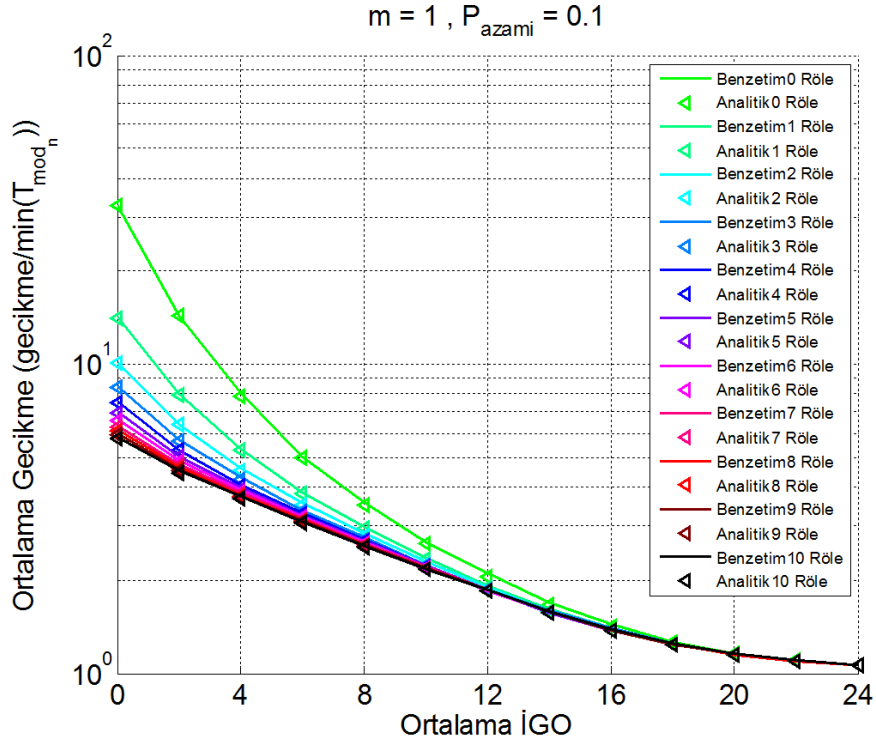
Şekil 6.14 ve Şekil 6.8'de $m = 3$ ve $m = 5$ için röle sayısına ve ortalama İGO seviyesine bağlı kazançlar gösterilmiştir. Daha önce tek röleli sistemde sönümlenme parametresinin değeri arttıkça işbirlik ihtiyacının daha çabuk ortadan kalktığı belirtilmişti. Bu şekillerde de bu etki görülmektedir. Düşük ortalama İGO seviyelerinde örneğin $m = 3$ için 0 dB'de tek rölede %500 kazanç ile başlayarak 15 rölede %1070



Şekil 6.13. İşbirlikli UKK sisteminde röle sayısının İşbirlikli UKK sistemine göre $m = 3$ için veri hacmi kazancı



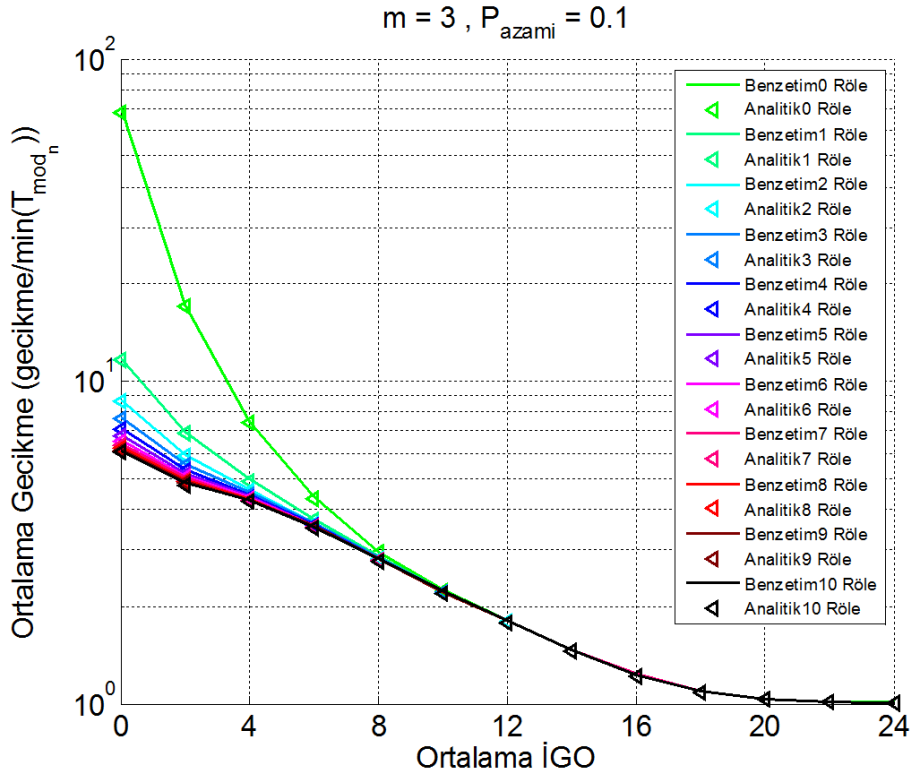
Şekil 6.14. İşbirlikli UKK sisteminde röle sayısının İşbirlikli UKK sistemine göre $m = 5$ için veri hacmi kazancı



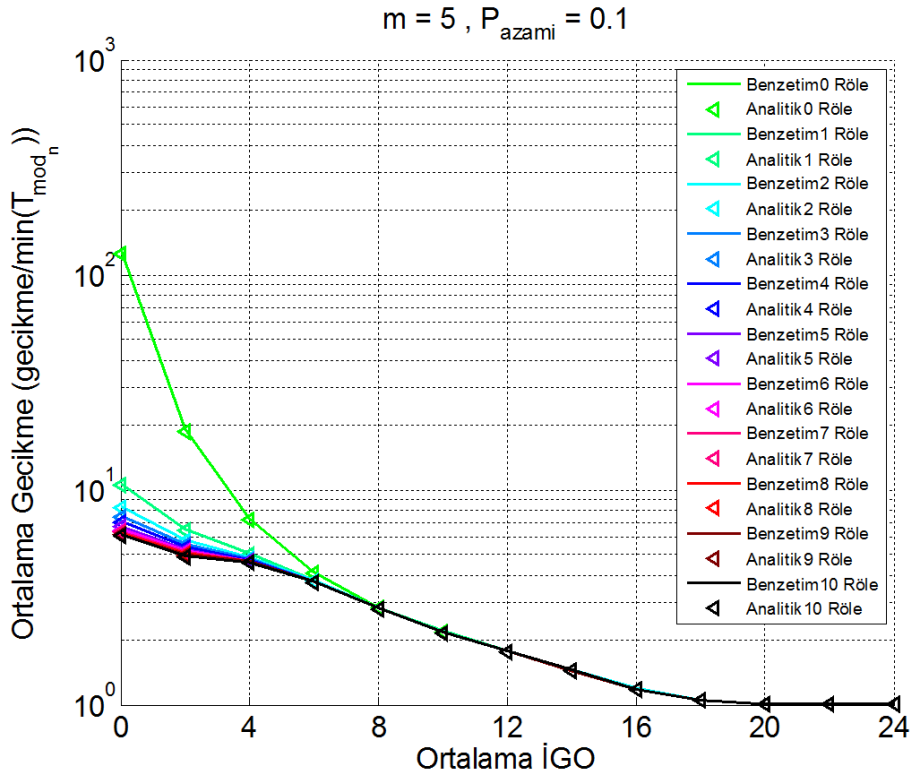
Şekil 6.15. Ortalama paket gecikmesinin İşbirlikli UKK sisteminde Röle sayısı ile işbirliksiz UKK sistemine göre $m = 1$ için değişimi

kazanç ile doyum noktasına ulaşmaktadır. 2 dB ortalama İGO seviyesine baktığımızda kazanç %150 ile başlayarak %260'da doyum noktasına ulaşmaktadır. Yüksek ortalama İGO seviyelerinde veri hacmi doyum noktası en fazla 3 ya da 4 röle ile sağlanmaktadır. $m = 5$ içinde aynı yorumlar yapılabilir. Sönümlenme parametresi ne kadar büyük olursa düşük ortalama İGO bölgesinde kazanç çok yüksekse de etkisi 6-8 dB seviyelerinde kaybolmakta ve sıfırlanmaktadır.

Veri hacminin yanı sıra da performans ölçüsü olan ortalama paket gecikmesi incelenmiştir. Ortalama paket gecikmesi en küçük paket süresi cinsinde verilmiştir. İşbirliksiz UKK sistemde düşük İGO bölgesinde istatistiksel dağılımdan kaynaklı olarak sönümlenme parametresi artarken ortalama paket gecikmesi artmasına rağmen ortalama İGO artışı ile ortalama paket gecikmesi hızlı bir şekilde azalmaktadır. Durum işbirlikli olduğu zaman sönümlenme parametresi artsa da düşük ya da yüksek ortalama İGO fark etmeksizin ortalama paket gecikmesi azalmaktadır. Tabii veri hacminde olduğu gibi ortalama paket gecikmesi de belirli ortalama İGO seviyesinden sonra işbirliksiz UKK sistemi ile aynı sonucu vermektedir. Röle sayısı arttıkça ortalama paket gecikmesi sönümlenme parametresine bağlı olarak olabilecek en küçük değerine yaklaşır. Bu yaklaşım veri hacminin doyuma ulaşması ile benzeşiktir.



Şekil 6.16. Ortalama paket gecikmesinin İşbirlikli UKK sisteminde Röle sayısı ile işbirliksiz UKK sistemine göre $m = 3$ için değişimi



Şekil 6.17. Ortalama paket gecikmesinin İşbirlikli UKK sisteminde Röle sayısı ile işbirliksiz UKK sistemine göre $m = 5$ için değişimi

7. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, yavaş değişen sönümlenme kanallarında uyarlamalı kipleme ve kodlamanın, işbirlikli kablosuz haberleşme sistemlerine uygulandığında, sistem performansını nasıl etkilediği incelenmiştir. İşbirlikli UKK sistemi incelenirken işbiriksiz UKK modeli ile karşılaştırma yapılmıştır. Ayrıca işbirlikli UKK sistem modeli incelenirken tek röleli basit modelden başlanıp röle sayısı N olacak şekilde arttırılmıştır. Veri hacmi ve ortalama paket gecikmesi analitik olarak incelenmiştir. Analitik sonuçların doğruluğu benzetim sonuçları ile desteklenmiştir.

Uyarlamalı kipleme ve kodlama kullanılan sistemlerde kullanılacak UKK modlarının nasıl seçileceği ve seçilen UKK modlarının hangi İGO seviyelerinde kullanılacağına seçiminde kullanılan teknikler incelenmiştir. Servis kalitesi olarak anlık en büyük paket hata oranı kısıtı seçilmiştir. Bu kısıta göre seçilen UKK modlarının başlangıç İGO değerleri bulunabilir. Uyarlamalı kipleme ve kodlama için 0-30 dB ortalama İGO aralığında altı farklı UKK modu seçilmiştir. Bu modlardan birincisi servis kalitesinin sağlanamadığı, sistemin kullanım dışı kaldığı durum olarak tanımlanmıştır. Diğer modlar kipleme ve kodlama çiftinden oluşturulmuştur. Seçilen UKK modları kipleme ve kodlama çiftinden oluştuğu ve veri bitleri evrişimli kodla kodlandığı zaman paket hata oranı belirli bir fonksiyonla tanımlanamaktadır. Her bir UKK modu için benzetim çalışmaları ile paket hata oranları elde edilip üssel olarak fonksiyon olarak tanımlandı. Bu fonksiyonlar kullanılarak her UKK modu için kullanılacağı İGO aralıkları oluşturuldu.

İletişimde kullanılacak kablosuz kanalların istatistiksel modeli olarak Nakagami-m sönümlenme kanal modeli kullanılmıştır. Nakagami-m sönümlenme kanalları ifade etmek için kullanılan sönümlenme parametresinin ve ortalama İGO değerinin UKK sistemleri üzerine etkisi incelenmiştir. Kanal zamanla yavaş değişen frekans seçici olmayan sönümlenme kanalı olarak modellenmiştir. Kanalin zamanla alınan örnekleri birbirleri ile ilintili olarak tanımlanmıştır. Kanalin zamanla değişimi Markov zincir modeli ile modellenmiştir. UKK modlarının kullanılacağı İGO aralıkları Markov zincir modelindeki durumları ifade eder. Kanal zamanla yavaş değişen olarak modellendiği için Markov zincir modeline göre kanal durumları arasındaki geçiş sadece komşu İGO aralıkları arasında bulunur. Komşu olmayan Markov durumları arasındaki geçiş olasılığının azaltılması UKK modlarının seçilmesinde etkili olmuştur.

Kanal modeli ve UKK modları belirlendikten sonra işbiriksiz ve işbirlikli UKK sistemlerinin çalışma prensipleri belirlenmiştir. Analiz sırasında gönderilen paketlerin kanal güncellenme süresini aşmadığı varsayımı yapılmıştır. İşbiriksiz sistem için kanal durumuna göre ortalama paket gönderim sayısı bulunarak veri hacmi hesaplanmıştır. Her kanal durumu için hesaplanan veri hacmi grup ortalaması alınarak sistemin genel veri hacmi formülasyonu oluşturulmuştur. Ortalama paket gönderim sayısı kullanılarak ortalama paket gecikmesi yine grup ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

İşbirlikli UKK sisteminin analizi sırasında önce tek röleli basit işbirlikli sistem modelinden başlanmıştır. Bu modelde kanal durum süresi boyunca yeniden gönderimlerin nasıl olacağı üç kanal (VA, VR ve RA kanaları) tarafından belirlenir. Bu kanallara bağlı olarak beş farklı gönderim durumu oluşturuldu. Oluşturulan gönderim durumlarında ortalama paket gönderim sayısı hesaplandı. Ortalama paket gönderim sayısı kullanılarak her bir gönderim durumu için veri hacmi ve ortalama paket gecikmesi bulundu. Bu hesaplar yapıldıktan sonra grup ortalaması alınarak sistemin genel veri hacmi ve ortalama paket gecikmesi hesaplandı.

İşbirlikli sistemde röle sayısı N olarak arttırıldığında kanalların durumları $2N+1$ boyutlu bir uzay oluşturmaktadır. Bu uzayda her gönderim durumunun tanımlı olduğu bölgeler N değerine bağlı olarak güncellendi. Gönderim durumlarındaki veri hacmi ve ortalama paket gecikmesi bilindiğinden gerekli olan gönderim durumlarının UKK moduna bağlı kararlı hal olma olasılıklarının bulunmasıdır. Eğer bu olasılıklar hesaplanmaz ise UKK mod sayısı N_n olarak tanımlandığı durumda $2N+1$ boyutlu uzayın taranması N_n^{2N+1} toplamla olur. Gönderim durumlarının UKK moduna bağlı kararlı hal olasılıkları sayesinde gerekli toplam sayısı $5N_n$ 'e indirgenmektedir. Bu sayede N röleli ve N_n UKK modlu sistemin performans hesapları kolaylıkla yapılmaktadır. Aynı zamanda $N=0$ (yani İşbiriksiz UKK) olduğunda işbiriksiz sistem analizi ile aynı formülasyona indirgenmektedir.

Analiz sırasında yapılan paket gönderiminin kanal durum süresini aşmama varsayımının ne kadar doğru olduğunun incelenmesi için paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşma olasılığı hesaplandı. İşbirlikli durumda iki sekmeli gönderim yapıldığı için paket gönderim süresinin kanal durum süresini aşma olasılığı artmaktadır. Kanal durum süresine, röle sayısına ve ortalama kanal İGO'suna bağlı olarak değerleri hesaplandı. Kanal durum süresi yeteri kadar büyük olduğunda paket gön-

derim süresinin kanal durum süresini geçme olasılığı düşürülmüş oldu. Bu seçimde yavaş değişen kanalın evre uyum süresi de etkili olmuştur.

Uyarlamalı kipleme ve kodlama kullanımının izge verimliliği üzerine etkisi incelendi. İletişim sırasında tek bir kipleme ve kodlama kullanıldığında kipleme ve kodlama çiftine bağlı olarak kanal belli İGO seviyelerinde verimli olarak kullanıldığı gösterilmiştir. Düşük İGO seviyelerinde hata oranı yüksek olduğu için kanaldan veri gönderilemez ve izge verimliliği sıfır olur. Yüksek İGO seviyelerinde ise hata oranı yeteri kadar düşüktür ve kip-kod oranına bağlı olarak izge verimliliği sabitlenir. 0-30 dB ortalama İGO seviyesine beş farklı kipleme ve kodlama çifti yerleştirildiğinde bu İGO seviyelerinde işbiriksiz sistem kanal tek bir kipleme ve kodlama çifti kullanımına göre daha verimli kullanıldığı gösterilmiştir. Tek röleli işbirlikli sisteme uyarlamalı kipleme ve kodlama uygulandığında işbiriksiz sisteme göre izge verimliliğinde kazanç sağladığı gösterildi.

Yapılan analizlerin doğruluğunun gösterilmesi için benzetim çalışmaları yapıldı. Benzetim çalışmaları sonucunda yapılan analizlerin geçerliliği doğrulanmış oldu. İşbiriksiz UKK sisteminde veri hacminin en büyük olabilmesi için gerekli servis kalitesi kısıtı olan PHO_{azami} 'nin değeri 0.1 olarak bulundu. Bu değer kullanılarak işbiriksiz UKK ve işbirlikli UKK sistemleri karşılaştırıldı.

Tek röleli işbirlikli UKK sisteminde düşük ortalama İGO seviyelerinde sönümlenme parametresi arttıkça veri hacmindeki kazanç da artmaktadır. Kanal İGO'sunun istatistiksel özelliğine bağlı olarak yüksek sönümlenme parametresinde kanal ortalama İGO'su arttıkça daha hızlı bir şekilde işbiriksiz UKK ile aynı performansa sahip olduğu gösterilmiştir.

Çok röleli işbirlikli UKK sisteminde, sabit ortalama İGO seviyesinde röle sayısı arttıkça veri hacmindeki kazanç azalarak artmaktadır. Aynı zamanda ortalama paket gecikmeside azalmaktadır. Düşük ortalama İGO seviyelerinde veri hacminin doyuma ulaşması için gerekli röle sayısı fazla olup ortalama İGO seviyesi arttıkça veri hacminin doyuma ulaşması için gerekli olan röle sayısı azalmaktadır.

Bu tezde yapılan çalışmaların ileriki aşamasında işbirlikli uyarlamalı kipleme ve kodlamalı sistemin hızlı değişen kanallarda performans incelemesi ve analizi üzerine çalışmalarda bulunulabilir. Diğer yandan ortamda bulunan kullanıcılarda birden fazla

anten bulunması durumunda çok girdili çok çıktılı sistemde işbirlikli UKK sisteminin analizi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Haykin, S., Moher, M., *Communication Systems*, John Wiley & Sons, **2010**.
- [2] Goldsmith, A.J., Varaiya, P., Capacity of Fading Channels with Channel Side Information, *IEEE Transactions on Information Theory*, 43, 1986-1992, **1997**.
- [3] Goldsmith, A.J., Chua, S.-G., Variable-Rate Variable-Power MQAM for Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 45, 1218-1230, **1997**.
- [4] Alouini, M.-S., Goldsmith, A.J., Adaptive Modulation over Nakagami Fading Channels, *Wireless Personal Communications*, 13, 119-143, **2000**.
- [5] Sweeney, P., *Error Control Coding From Theory To Practice*, John Wiley & Sons, **2002**.
- [6] Liu, Q., Zhou, S., Giannakis, G.B., Cross-Layer Modelling of Adaptive Wireless Links for QoS Support in Multimedia Networks, *First International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks(QSHINE)*, 68-75, **2004**.
- [7] Lei, A.T., Araki, K., A Group of Modulation Schemes for Adaptive Modulation, *11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems(ICCS)*, 864-869, **2008**.
- [8] Kramer, G., Gastpar, M., Gupta, P., Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks, *IEEE Transactions on Information Theory*, 51, 3037-3063, **2005**.
- [9] Chen, H., Ahmed, M.H, Throughput Enhancement in Cooperative Diversity Wireless Networks Using Adaptive Modulation, *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 527-530, **2008**.
- [10] Strinati, E.C., Yang, S., Belfiore, J.C., Adaptive Modulation and Coding for Hybrid Cooperative Networks, *IEEE International Conference on Communications*, 4191-4195, **2007**.
- [11] Mardani, M., Harsini, J.S., Lahouti, F., Eliasi, B., Joint Adaptive Modulation-Coding and Cooperative ARQ for Wireless Relay Networks, *IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems*, 319-323, **2008**.
- [12] Lin, Z., Erkip, E., Ghosh, M., Adaptive Modulation for Coded Cooperative Systems, *IEEE 6th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 615-619 , **2005**.
- [13] Lin, Z., Erkip, E., Ghosh, M., Rate Adaptation for Cooperative Systems, *IEEE Global Telecommunications Conference*, 1-5, **2006**.
- [14] Furuskar, A., Mazur, S., Muller, F., Olofsson, H., EDGE: enhanced data rates for GSM and TDMA/136 evolution, *IEEE Personal Communications*, 6, 56-66, **1999**.

- [15] Asai, T., Higuchi, K., Sawahashi, M., Field experiments on multipath interference canceller associated with AMC in HSDPA, *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference(VTC)* , 3, 1624-1628, **2003**.
- [16] Doufexi, A., Armour, S., Butler, M., Nix, A., Bull, D., McGeehan, J., A Comparison of the HIPERLAN/2 and IEEE 802.11a Wireless LAN Standards, *IEEE Communicatios Magazine*, 40, 172-180, **2002**.
- [17] Simon, M.K., Alouini, M.-S., A Unified Approach to the Performance Analysis of Digital Communication over Generalized Fading Channels, *Proceedings of the IEEE*, 86, 1860 - 1877, **1998**.
- [18] Yacoub, M.D., Bautista, ,J.E.V., Guerra de Rezende Guedes, L., On Higher Order Statistics of the Nakagami-m Distribution, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 48, 790-794, **1999**.
- [19] Nakagami, M., The m-distribution-A general formula of intensity distribution of rapid fading, *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, Oxford, England, 3-36, **1960**.
- [20] Aulin, T., Charactristics of Digital Mobile Radio Channel, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 30, 45-53, **1981**.
- [21] Dersch, U., Rüeegg, R.J., Simulation of the time and frequency selective outdoor mobile radio channel, *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, 42, 338-344, **1993**.
- [22] Rice, S.O., Mathematical Analysis of Random Noise, *The Bell System Technical Journal*, 23, 282-332, **1944**.
- [23] Stüber, G.L, Lecture Notes of EE6604 Personal & Mobile Communications, <http://users.ece.gatech.edu/stuber/6604/lectures2013-fall.html>, (Aralık,**2014**).
- [24] Berklekamp, E.R., *Algebraic Coding Theory*, New York, McGraw-Hill, **1968**.
- [25] Clark, Jr., G.C., Cain, J.B., *Error-Correction Coding for Digital Communications*, New Jersey, Plenum Press, **1981**.
- [26] Lin, S., Costello, Jr., D.J., *Error Control Coding: Fundamentals and Applications*, New Jersey, Prentice-Hall, **1983**.
- [27] MacWilliams, F.J., Sloane, N.J.A., *Theory of Error-Correcting Codes*, Amsterdam, North Holland, **1977**.
- [28] Peterson, W.W., Weldon, Jr., E.J., *Error-Correcting Codes*, 2nd Ed., Cambridge, MA: MIT Press, **1972**.
- [29] Leon-Garcia, A., Widjaja, I., *Communication Networks*, 2nd Ed., McGraw Hill, **2006**.
- [30] Kasami, T., Klove, T., Lin, S., On The Probability of Undetected Error of Linear Block Codes, *Global Telecommunications Conference*, 3, 1111-1113, Miami, FL, USA, **1982**.

- [31] Kasami, T., Klove, T., Lin, S., Error detection with linear block codes, *IEEE Transaction on Information Theory*, 1, 131-136, **1983**.
- [32] Fujiwara, T., Kitai, A., Yamamura, S., Kasami, T., Lin, S., On The Probability of Undetected Error for Shortened Cyclic Hamming Codes, *Proceeding Fifth Conference on Information Theory and Its Application*, Hachimantai, Japan, **1982**.
- [33] Proakis, J.G., *Digital Communications*, 4th Ed., New York, McGraw-Hill, **2000**.
- [34] Goldsmith, A.J., Varaiya, P., Capacity, Mutual Information and Coding for Finite-State Markov Channels, *IEEE Transaction on Information Theory*, 42, 868-886, **1996**.
- [35] Wang, H.S., Chang, P-C., On Verifying the First-Order Markovian Assumption for a Rayleigh Fading Channel Model, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 45, 353-357, **1996**.
- [36] Pimentel, C., Falk, T.H., Lisboa, L., Finite-State Markov Modelling of Correlated Rician-Fading Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 53, 1491-1501, **2004**.
- [37] Ramesh, A., Chockalingam, A., Milstein, L.B., A First-Order Markov Model for Correlated Nakagami-m Fading Channels, *IEEE International Conference on Communications(ICC)*, 5, 3413-3417, **2002**.
- [38] Zorzi, M., Rao, R.R., Milstein, L.B., On the Accuracy of First-Order Markov Model for Data Transmission on Fading Channels, *Fourth IEEE International Conference on Universal Personal Communications(ICUPC)*, 211-215, **1995**.
- [39] Wang, H.S., Moayeri, N., Finite-State Markov Channel - A Useful Model for Radio Communication Channels, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 44, 163-171, **1995**.
- [40] Zhang, Q., Kassam, S.A., Finite-State Markov Model for Rayleigh Fading Channels, *IEEE Transactions on Communications*, 47, 1688-1692, **1999**.
- [41] Park, J.M., Hwang, G.U., Mathematical Modeling of Rayleigh Fading Channels Based on Finite State Markov Chains, *IEEE Communications Letters*, 13, 764-766, **2009**.
- [42] Wang, X., Liu, Q., Giannakis, G.B., Analyzing and Optimizing Adaptive Modulation Coding Jointly With ARQ for QoS-Guaranteed Traffic, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56, 710-720, **2007**.
- [43] Liu, P., Tao, Z., Lin, Z., Erkip, E., Panwar, S., Cooperative Wireless Communications: A Cross-Layer Approach, *IEEE Wireless Communications*, 13, 84-92, **2006**.
- [44] Nosratinia, A., Hunter, T.E., Hedayat, A., Cooperative Communication in Wireless Networks, *IEEE Communications Magazine*, 42, 74-80, **2004**.

- [45] Scaglione, A., Goeckel, D.L., Laneman, J.N., Cooperative Communications in Mobile Ad Hoc Networks, *IEEE Signal Processing Magazine*, 23, 18-29, **2006**.
- [46] Laneman, J.N., Wornell, G.W., Tse, D.N.C., An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks, *IEEE International Symposium on Information Theory*, **2001**.
- [47] Sendonaris, A., Erkip, E., Aazhang, B., User Cooperation Diversity Part I and Part II, *IEEE Transactions on Communications*, 51, 1927-1948, **2003**.
- [48] Hunter T.E., Nosratinia, A., Cooperative Diversity through Coding, *IEEE International Symposium on Information Theory*, **2002**.
- [49] Hunter, T.E., Nosratinia, A., Diversity Through Coded Cooperation, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5, 283-289, **2004**.
- [50] Tanenbaum, A.S., *Computer Networks*, 3rd Edition, Prentice Hall, **1996**.
- [51] Karn, P., MACA a new channel access method for packet radio, *Proceedings of the ARRL/CRRL Amateur Radio 9th Computer Networking Conference*, 9, 134-140, **1990**.
- [52] Bhargavan, V., Demers, A., Shenker, S., Zhang, L., MACAW A Media Access protocol for wireless LANs, *Proceedings of Association for Computing Machinery's Special Interest Group on Data Communications(ACM SIGCOMM)*, London, UK., **1994**.
- [53] Fullmer, C.L., Garcia-Luna-Aceves, J.J., Floor Acquisition Multiple Access (FAMA) for packet-radio networks, *Proceedings of Association for Computing Machinery's Special Interest Group on Data Communications(ACM SIGCOMM)*, Cambridge, MA, USA., **1995**.
- [54] Ye, W., Jeidemann, J., Estrin, D., An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, *Proceedings of the IEEE Computer and Communication Societies(INFOCOM)*, 3, 1567-1576, **2002**.
- [55] Rappaport, T.S., *Wireless Communication Principle and Practice*, 2nd Edition, Prentice Hall, **1996**.
- [56] IEEE 802.11 Working Group, *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, **1997**.
- [57] O'Hara, B., Petrick, A., *IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion*, IEEE Press, New York, **1999**.
- [58] Crow, B.P., Widjaja, I., Kim, J.G., Sakai, P.T., IEEE 802.11, Wireless Local Area Networks, *IEEE Communication Magazine*, 35, 116-126, **1997**.
- [59] Yi, L., Hong, J., A New Cooperative Communication MAC Strategy for Wireless Ad Hoc Networks, *6th IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science(ICIS)*, 569-574, **2007**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı: Cansu SUNU

Doğum Yeri: İstanbul

Medeni Hali: Bekar

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

Adresi: Dodurga Mahallesi Türkkonut Cömertler Sitesi 5. Blok No: 35 Yenimahalle / ANKARA

Eğitim

Lise: Adem Tolunay 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

İspanyolca : Başlangıç

İş Deneyimi

Temmuz 2010-Eylül 2010 : KoçSistem Bilgi ve İletişim Hizmetleri A.Ş., ANTALYA

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

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

İşbirlikli Haberleşme Kanallarında Uyarlamalı Kipleme ve Kodlama, *SIU 2014*, Sinyal İşleme Kurultayı, Trabzon, Türkiye, 2014.