İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EŞLEMELİ TOPLAMSAL MODÜLASYONLU İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra YÜKSEL ÖZCAN

Anabilim Dalı : Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Programı : Telekomünikasyon Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ

Haziran 2011

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın oluşması boyunca yardımlarını esirgemeyen, Telekomünikasyon Mühendisliği alanında bilgi ve birikimlerinin önünde her zaman saygıyla eğileceğim sayın Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ'ne saygı ve şükranlarımı sunarım. Bana bugüne kadar her konuda yardımcı olan, beni destekleyen, her zaman yanımda olduklarını bildiğim aileme minnettarım. Varlığı beni mutlu etmeye yeten, çalışmam sırasında yaşadıklarımın tümünü benimle paylaşarak yükümü hafifleten eşim Sinan ÖZCAN'a teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans süreci boyunca verdikleri desteklerden dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Mayıs 2011 Büşra YÜKSEL ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
KISALTMALAR ..... **vii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xiii**
SUMMARY ..... **xv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Konuyla İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar 1
1.2 Tezin Konuya Katkıları 4
2. TELSİZ İLETİŞİM KANALLARINDA SÖNÜMLEME **7**
2.1 Kanal Bileşenlerinin Tanımları 8
2.1.1 Çok Yollu Yayılım τmax 8
2.1.2 Doppler Yayılımı fd 8
2.1.3 Uyum Zamanı Tc 8
2.1.4 Uyum Band Genişliği Bc 9
2.2 Sönümlemeli Kanalların Sınıflandırılması 9
2.2.1 Zayıflama (Büyük Ölçek Sönümlemesi) 10
2.2.2 Sönümleme (Küçük Ölçek Sönümlemesi) 10
2.2.2.1 Çok Yollu Yayılımın Etkisiyle Sönümleme 11
Düz Sönümleme
Frekans Seçici Sönümleme
2.2.2.2 Doppler Etkisiyle Sönümleme 12
Yavaş sönümleme
Hızlı Sönümleme
2.3 Sönümlemeli Kanal Modelleri 12
2.3.1 Rayleigh Dağılımı 12
2.3.2 Ricean Dağılımı 13
2.3.3 Nakagami Dağılımı 14
3. İŞBİRLİKLİ İLETİM ve TEMELLERİ **17**
3.1 Aktarıcı Kanal 17
3.2 Yarı-çift Yönlü ve Tam-çift Yönlü Aktarım 18
3.3 İşbirlikli iletişim 19
3.4 İşaret Aktarım Protokolleri 22
3.4.1 Çöz ve Aktar 22
3.4.2 Yükselt ve Aktar 23
3.4.3 Kodlamalı İşbirliği 25
4. FIRSATÇI İLETİŞİM **29**
4.1 Kanal modeli 29
4.2 Temel Fırsatçı İletişim 30

4.3 Geliştirilmiş Fırsatçı İletişim 32
4.3.1 İletişim Modeli 33
4.3.2 Servis dışı Kalma Olasılığı 35
4.3.3 Hızlanma Oranı 38
4.3.4 Başarım Değerlendirmesi 39
5. TOPLAMSAL MODÜLASYONLU İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM 41
5.1 Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli İletişim Sistem Modeli 41
5.2 Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli iletişim Sistemlerinin Karmaşıklığı ve Başarımı 44
5.3 Servis Dışı Kalma Olasılığı 45
5.3.1 İşbirliksiz İletişim 45
5.3.2 Klasik Çöz-ve-Aktar İşbirlikli İletişim 46
5.3.3 Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli İletişim 48
5.3.4 Başarım Sonuçları 49
6. EŞLEMELİ TOPLAMSAL MODÜLASYONLU İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM .. 51
6.1 Çok Kullanıcılı Sistemlerde Seçimli İşbirliği 51
6.1.1 Sistem Modeli 52
6.1.2 Röle Seçim Yöntemleri 53
6.1.2.1 Optimum Röle Seçim Yöntemi 54
6.1.2.2 Sıralı Röle Seçim Yöntemi 56
6.1.2.3 Dağıtılmış Röle Seçim Yöntemi 58
6.2 Yeni Bir Yapı: Eşlemeli Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli İletişim 58
6.2.1 Sistem Modeli 59
6.2.2 Kanal modeli 60
6.2.3 Grupların Belirlenmesi 62
6.2.3.1 Optimum Grup Belirleme Yöntemi 62
Optimum Grup Belirleme Yönteminde İletişim Senaryolarını Belirleme Algoritması
Optimum Grup Belirleme Yönteminde İletişim Senaryolarının Karşılıklı Bilgi Miktarları
Optimum Grup Belirleme Yöntemi Karmaşıklığı
6.2.3.2 Sıralı Grup Seçme Yöntemi 74
6.2.3.3 Grup Seçme Yöntemlerinin Karşılaştırılması 76
6.2.4 Servis Dışı Kalma Olasılığının Hesabı 77
6.2.4.1 Dirichlet Süreç Karışımları ile Tüm Sistemin Servis Dışı Kalma Olasılığının Hesabı 80
6.2.5 Başarım Sonuçları 84
7. SONUÇLAR 91
KAYNAKLAR 93
ÖZGEÇMİŞ 95

KISALTMALAR

AWGN : Additive White Gaussian Noise (Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü)
ASK : Amplitude Shift Keying (Genlik Kaydırmalı Anahtarlama)
BER : Bit Error Rate (Bit Hata Olasılığı)
BPSK : Binary Phase Shift Keying (İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama)
CRC : Cyclic Redundancy Check (Çevrimsel Artıklık Denetimi)
CSI : Channel State Information (Kanal Durum Bilgisi)
CTS : Clear-to-Sent (Dinlemeye Hazır Paketi)
DPM : Dirichlet Process Mixtures (Dirichlet Süreç Karışımları)
DSTC : Distributed Space Time Codes (Dağıtılmış Uzay Zaman Kodları)
FDMA : Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
FP : Flag Packet (Bayrak Paketi)
GK : Gauss Karışımı
LOS : Line of Sight (Görüş Çizgisi)
MAC : Medium Access Control (Ortam Erişim Kontrolü)
MAP : Maximum A Posteriori Probability (En Büyük Sonsal Olasılık)
MIMO : Multi-Input Multi-Output (Çok-Girişli Çok-Çıkışlı)
OFDM : Ortogonal Frequency Division Multiplexing (Dik Frekans Bölmeli Çoğullama)
RTS : Ready-to-Sent (Göndermeye Hazır Peketi)
SNR : Signal-to-Noise Ratio (İşaret Gürültü Oranı)
TDMA : Time Division Multiple Access (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim)
TM : Toplamsal Modülasyon

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 6.1 : Kullanıcı Sayısı 4 Olduğu Durumda Optimum Grup Belirleme Yöntemi için İletişim Senaryoları ve Her bir Grubun Karşılıklı Bilgi Miktarı 72
Çizelge 6.2 : Kullanıcı Sayısı 6 Olduğu Durumda Optimum Grup Belirleme Yöntemi için İletişim Senaryoları 73
Çizelge 6.3 : 4 ve 6 kullanıcılı sistemlerin karmaşıklık değerleri 74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Telsiz iletişimde verici ve alıcı arası yollar. 7
Şekil 2.2 : Doppler yayılımı 9
Şekil 2.3 : Sönümlemenin sınıflandırılması. 11
Şekil 3.1 : Temel aktarıcı kanal modeli [10]. 18
Şekil 3.2 : Çeşitlemesiz durumda ortam erişim kontrolü [3]. 19
Şekil 3.3 : Tekrarlama temelli ortam erişim kontrolü [3]. 20
Şekil 3.4 : Uzay zaman kodlu ortam erişim kontrolü [3]. 20
Şekil 3.5 : a) Temel MIMO b) İşbirlikli iletişim sonucu oluşan MIMO 21
Şekil 3.6 : Çöz-ve-Aktar çeşitlemesi [19] 22
Şekil 3.7 : Kuvvetlendir-ve-Aktar çeşitlemesi [19]. 24
Şekil 3.8 : Kodlamalı işbirliği çeşitlemesi [19]. 26
Şekil 3.9 : Kodlamalı işbirliği çeşitlemesi çerçeve iletimi [19] 26
Şekil 4.1 : Temel fırsatçı iletişim modeli. 31
Şekil 4.2 : Geliştirilmiş fırsatçı iletişim durumları. 33
Şekil 4.3 : Olasılık bölgeleri . (a) $P(h_b < h_s < \mu_1)$ (b) $P(h_s < h_b < \mu_2)$ 35
Şekil 4.4 : 2 röle için servis dışı kalma olasılıkları. 39
Şekil 4.5 : 3 röle için servis dışı kalma olasılıkları. 40
Şekil 4.6 : 5 röle için servis dışı kalma olasılıkları. 40
Şekil 5.1 : Kaynak, hedef ve röle arasındaki kanal modellerinin gösterimi. 42
Şekil 5.2 : İşbirliksiz iletişim, işbirlikli iletişim ve toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin zaman dilimlerindeki iletimlerinin gösterimi 42
Şekil 5.3 : $s1 = \pm 1$ ve $s2 = \pm 1$ olduğu durumda $1 - \gamma 2s1 + \gamma s2$ 'nin işaret uzayındaki olası değerleri . 43
Şekil 5.4 : **B1** işareti için hedefteki alıcı yapısı 44
Şekil 5.5 : Toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim ve çöz-ve-aktar işbirlikli iletimin servis dışı kalma olasılıklarının karşılaştırılması. 49
Şekil 6.1 : **(a)** I. zaman dilimi : si kaynağı $P2$ Watt güç ile diğer kaynaklara ve hedefe iletim yapıyor. **(b)** II. zaman dilimi : $D(si) = n$ olmak üzere, $D(si)$ kümesi içerisinden en iyi röle seçilmiştir. En iyi röle $P2k$ Watt güç ile hedefe iletim gerçekleştiriyor. (k; seçilen en iyi rölenin yardımcı olduğu toplam kaynak sayısıdır.) 53
Şekil 6.2 : n kullanıcılı gruplar ve bu grupların hedef ile toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimi. 60
Şekil 6.3 : İki kullanıcıdan oluşan bir grup için kanal modeli 62
Şekil 6.4 : $\boldsymbol{M = 4}$ için sıralı grup seçme algoritması. 78
Şekil 6.5 : Grup seçme yöntemlerinin karşılaştırılması. 77
Şekil 6.6 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=5 dB için Dirichlet süreç karışım modeli ile bulunan olasılık dağılım işlevinin benzetim ile bulunan olasılık dağılım işlevi ile karşılaştırılması. 83

Şekil 6.7 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=5 dB için teorik olarak bulunan servis dışı kalma olasılığının benzetim ile bulunan servis dışı kalma olasılığı ile karşılaştırılması. 85
Şekil 6.8 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=15 dB için Dirichlet süreç karışımları modeli ile bulunan olasılık dağılım işlevinin benzetim ile bulunan olasılık dağılım işlevi ile karşılaştırılması. 85
Şekil 6.9 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=15 dB için teorik olarak bulunan servis dışı kalma olasılığının benzetim ile bulunan servis dışı kalma olasılığı ile karşılaştırılması. 86
Şekil 6.10 : SNR 5 dB ve SNR 15 dB için tüm benzetim ve teorik servis dışı kalma olasılığı eğrilerinin bir arada gösterimi. 86
Şekil 6.11 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği ve eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin 4 kullanıcı için servis dışı kalma olasılıkları. 88
Şekil 6.12 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği ve eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin 6 kullanıcı için servis dışı kalma olasılıkları. 88
Şekil 6.13 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği ve eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin 8 kullanıcı için servis dışı kalma olasılıkları 89
Şekil 6.14 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yönteminin kullanıcı sayısı değişirken servis dışı kalma olasılığı üzerindeki etkisi. 89
Şekil 6.15 : Eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin kullanıcı sayısı değişirken servis dışı kalma olasılığı üzerindeki etkisi 90

EŞLEMELİ TOPLAMSAL MODÜLASYONLU İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM

ÖZET

Bu tezde, röle seçmeli işbirlikli iletişim için geliştirilmiş fırsatçı iletişim olarak adlandırılan yeni bir iletişim yöntemi önerilmekte, literatürde verilen temel fırsatçı iletişim yöntemi ile karşılaştırılmaktadır. Geliştirilmiş fırsatçı iletişim yönteminde, kaynak, hedefle arasındaki kanalın niteliğine göre işbirliği yapıp yapmayacağına karar vermektedir. Kaynak-hedef arası kanal, en iyi röle ile işbirliği durumunda kullanılacak kanallardan daha iyi ise işbirliğine gerek duyulmamakta, iletişim tek zaman diliminde tamamlanmakta, böylece iletim hızı da artmaktadır. Kaynak-hedef arasında en iyi röle üzerinden oluşan kanal, kaynak hedef arasındaki doğrudan kanaldan daha iyi ise işbirliği yapılmakta ancak iletim yalnızca röle üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kaynak ve hedef arasında temel işbirlikli iletimde olduğu gibi doğrudan bir kanal kullanılmamaktadır. Geliştirilmiş fırsatçı iletişim için servis dışı kalma olasılıkları elde edilerek, önerilen yöntemin temel fırsatçı iletişime göre daha iyi başarım sağladığı ortaya konmaktadır.

Bu tezde ikinci olarak, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi olarak adlandırılan yeni bir iletişim yöntemi önerilmekte ve literatürde verilen çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi ile karşılaştırılmaktadır. Eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminde, birden fazla kullanıcı olduğu kabul edilmiştir. Kullanıcılar gruplar içerisinde, toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi ile iletimlerini gerçekleştirir. Kullanıcıların hangi grupta yer alacağı belirli bir algoritmaya göre belirlenir. Eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin servis dışı kalma olasılıkları elde edilerek, önerilen yöntemin çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemine göre daha iyi başarım sağladığı gösterilmiştir. Buna ek olarak, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin, çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemden iki kat daha yüksek iletim hızına sahip olduğu gösterilmiştir.

PAIRED SUPERPOSITION MODULATED COOPERATIVE COMMUNICATION

SUMMARY

In this thesis, a new communication method for relay selection cooperative communication, called advanced opportunistic relaying is suggested, and compared with the basic opportunistic communication method given in the literature. In the advanced opportunistic relaying method, source decides on cooperation in accordance with the properties of the channel between the destination. In case the channel between source and destination is better off compared to the channels to be used in case of the best relay cooperation, no cooperation is required and communication is completed within one time slot, hence communication rate increases. In case the channel via the best relay between source and desstination is better off compared to the direct channel, communication is done only through relay selection. No direct channel as in the basic cooperative communication is utilised between source and destination. Outage probabilities for the advanced opportunistic relaying is obtained and it is shown that the proposed method has better performance than basic opportunistic relaying.

In this thesis, as a second proposal, a new communication method called paired superposition modulated cooperative communication is suggested and compared with selective cooperation method in multi-user systems given in the literature. It is accepted that more than one user exist in the paired superposition modulated cooperative communication method. Users communicate each other via superposition modulated cooperative communication method within groups. Assignment of users to groups is determined according to an algorithm. Outage probabilities for the superposition modulated cooperative communication method is obtained and it is shown that the proposed method has better performance than selective cooperation method in multi-user systems. In addition, it is shown that paired superposition modulated cooperative communication method has two fold higher communication rate compared to the multi-user systems selective cooperation method.

1. GİRİŞ

1.1 Konuyla İlgili Literatürde Yapılan Çalışmalar

İletişim hizmetlerinin kullanım oranlarının hızla artması yeni nesil telsiz iletişim sistemlerinden daha kaliteli, daha geniş bir alanı kapsayan, daha fazla güç ve band verimliliği sağlayan sistem beklentisini de beraberinde getirmiştir. Bir gezgin iletişim sisteminin başarımı üstündeki en büyük kısıtlamalardan biri yol kayıplarıdır. Alıcı ve verici arasında doğrudan yol varsa, işaret zayıflaması çok fazla olmayabilir. Ancak iletilen ana dalga, çevrede bulunan bina, arazi gibi engellere çarparak yansıyabilir, kırılabilir veya saçılabilir. Bu durumda işaret birçok yoldan alıcıya ulaşacaktır. İşte telsiz iletişim sistemlerinde kullanılan kanallarda görülen en önemli bozucu etki bu çok yollu yayılımdan kaynaklanan sönümlemedir. Sönümleme işareti çarpımsal bir etkiyle bozmaktadır [1]. Sönümlemenin etkisini azaltarak hata başarımını toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) altındaki kanalın başarımına yaklaştırmak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en etkin olanı; işareti farklı kanallardan ileterek farklı sönümlemelere maruz kalmasını sağlama mantığına dayanan çeşitlemedir. Çeşitleme birçok farklı şekilde yapılarak işaretin kopyalarının alıcıya iletilmesi sağlanabilir. Bu çeşitleme tekniklerinden bazıları frekans çeşitlemesi, zaman çeşitlemesi, uzay (anten) çeşitlemesi, polarizasyon çeşitlemesi, varış açısı çeşitlemesi ve verici çeşitlemesidir. Bu çeşitleme teknikleri arasında en önemlilerinden birisi band genişliği artımına veya gecikmeye neden olmayan verici çeşitlemesidir. Verici çeşitlemesi gönderilen işaretin değişik versiyonlarının birden fazla kaynaktan iletilmesi ile yapılmaktadır. Alıcıya değişik sönümleme katsayıları ile gelmiş işaretlerin birleştirilip çözülmesi ile de başarım artmaktadır.

Vericide ve alıcıda birden fazla anten kullanan sistemlere çok-girişli çok-çıkışlı (multi-input multi-output MIMO) sistemler denir. MIMO sistemlerin avantajları yapılan araştırmalarla ortaya konmuştur. Ancak MIMO sistemler, alıcıda ve vericide birden fazla anten gerektirdiği için uygulamada boyut, donanım ve maliyet problemleri yaratmaktadır. Özellikle gezgin iletişim birimlerine birden fazla antenin yerleştirilmesi önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu sorunlar göz önüne alınarak,

MIMO sistemler gibi avantajlı olabilecek tek antenli iletişim birimleri kullanan bir iletişim yöntemi geliştirilmiştir. İşbirlikli çeşitleme olarak adlandırılan bu yöntem ile alıcı veya vericiye anten eklemeksizin, ortamda bulunan diğer kullanıcıların antenleri kullanılarak sanal bir MIMO sistem yaratmak amaçlanmaktadır. İşbirlikli iletişim modelinde röle olarak adlandırılan ve hedefe iletim sırasında kaynağa yardımcı olan düğümler bulunmaktadır. Röleler, kaynaktan aldıkları işareti hedefe iletmeden önce birtakım işlemler uygularlar. Rölenin aktarım için uygulayacağı protokoller Laneman ve Wornell tarafından [2]'de *yükselt-ve-aktar*, *çöz-ve-aktar* ve *seçimli ve artırımlı aktarım* olarak adlandırılmıştır. Lenaman ve Wornell bir diğer çalışmalarıyla [3] dağıtılmış uzay zaman kodlarını gündeme getirmişler ve bu sistemin tam çeşitleme kazancı sağladığını göstermişlerdir.

Kaynağın işbirliği yapabileceği röle sayısı birden fazla olduğunda bu rölelerden kaynakla hedef arasında en iyi kanalı oluşturan röleyi seçmek ve bununla işbirliği gerçekleştirmek de olanaklıdır. Bu iletişim modeline *temel fırsatçı iletişim* adı verilmiştir.

İşbirlikli çeşitleme sönümlemeye karşı iyi bir çözüm gibi görünse de röle sayısı arttıkça iyi başarım elde etmek zorlaşır.MIMO sistemler için pek çok uzay zaman kodu olmasına rağmen, işbirlikli iletişmde uzay zaman kodlarını kullanmak çok zor ve karmaşıktır. İşbirlikli iletim de sisteme dahil olan röle sayısı sabit değildir. Örneğin, çöz-ve-aktar yapılarda bir rölenin sisteme dahil olabilmesi için iletimden önce başarılı çözme yapması gerekir. Kuvvetlendir-ve-aktar yapılarda ise röle tarafından alınan işaret-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio SNR) önemlidir. Eğer gürültünün gücü işaretin gücünün yanında büyükse sistem gürültüyü güçlendirir. Bu nedenlerden sistemdeki röle sayısı genellikle rastgeledir ve belirli sayıda röleler için tasarlanmış uzay-zaman kodlarında yeniden değişiklik yapmak gerekir.

Ayrıca birçok uç birimi kullanarak sanal anten dizileri oluşturmak önemli ölçüde koordinasyon gerektirir. Farklı birçok verici arasında eşzamanlama sağlamak için farklı algoritmalar kullanılabilir. Ancak bu ek gereksinimler iletişimin neredeyse her katmanında (layer) yenilikler gerektirir.

İşbirlikli çeşitlemenin tüm bu sorunlarına çözüm getirmek amacıyla fırsatçı çeşitleme yöntemi önerilmiştir. Fırsatçı iletişim yönteminde M adet röle arasından "en iyi" röle iletime yardımcı olması için seçilir. Sistemin çeşitleme kazancı röle sayısı kadardır.

Bu yöntemde "en iyi" rölenin seçimi kanalın ani ölçümlerine dayanır. En iyi rölenin seçimi için sisteme binen ek yük işbirlikli çeşitlemenin neden olduğu ek yüke göre azdır. Fırsatçı iletişimde iki fazlı iletim söz konusudur. Birinci fazda kaynak hedef ve röleye iletim yaparken, ikinci fazda röle hedefe iletim yapmaktadır. Hedefe iki farklı zamanda ulaşan bilgi uygun şekilde birleştirilerek çeşitleme sağlanmış olur. [4]'de önerilen bu yapıda röleler *kanal durum bilgilerini* (CSI) hedef ve kaynaktan aldıkları paketler ile kestirirler. Kestirdikleri kanal durum bilgileri ile kendilerinin "en iyi" röle olup olmadığını anlarlar. Böylece dağıtılmış olarak her röle kendi başına, iletişimde yer alıp almayacağına karar verir. İkinci fazda seçilen tek bir röle ile iletim gerçekleşeceği için kullanılan uzay-zaman kodlaması da basitleşir. Fırsatçı çeşitleme tekniği basitliğinden ötürü varolan donanıma kolayca uygulanabilir. Fırsatçı çeşitleme basit fizikzel katmanı ile işbirlikçi çeşitlemeye iyi bir alternatif olmuşturmaktadır.

İşbirlikli çeşitlemeye göre, fırsatçı çeşitlemenin getirdiği üstünlükleri özetlemek gerekirse; fırsatçı çeşitlemede kanalın ani durumları göz önüne alınarak "en iyi" röle seçilir. Fırsatçı çeşitleme, iletim için gerekli uzay-zaman kodlarının karmaşıklığını azaltarak donanımı basitleşmiştir. Ayrıca fırsatçı çeşitlemede, işbirliği yapan uç birimler arasındaki koordinasyon minimum ek yükle sağlanabilmektedir.

Temel fırsatçı iletişimin sağladığı üstünlükler bir önceki alt bölümde sıralanmıştır. Ancak fırsatçı iletişim'de iletim iki fazda gerçekleşmektedir. Bu da iletim hızında kayıp anlamına gelmektedir. Bu aşamada iletim hızını artırıcı yöndeki çalışmalar dikkat çekici olmuştur. Larsson ve Vojcic [5]'deki çalışmalarında iletim hızını artıran toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modelini önermişlerdir. Bu yöntemde, kaynak kendi işaretini bir güç katsayısı ile, aktaracağı işareti de farklı bir güç katsayısı ile çarpıp aynı anda gönderir. Böylece bu iletim band verimliliğini iki kat artırır. Toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim bir kirli kağıt kodlaması [6] örneğidir. Bir kullanıcı diğerine iletim yaptığında diğer kullanıcının aldığı işaretin bir kısmı zayıflamış kendi verisini barındırır. Kullanıcı kendi verisini bildiği için aldığı işaretten veriye ait kod sözcüğünü çıkarır ve toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimi sürdürür. Hedefe bu şekilde yapılan bir iletimin kanal sığasını değiştirmemesi kirli-kağıt kodlamasının bir sonucudur [6].

Toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim ile ilgili çalışmalar sonraları iteratif MAP kod çözücülere odaklanmıştır [7]. [8]'deki çalışmada ise iki boyutlu işaret uzayının

döndürülmesine dayalı toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletim önerilmiştir. Ding ve Cowan [9]'daki çalışmalarında toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletimi çok kullanıcılı sistemlere taşımışlar ve bu sistemlerdeki başarım sonuçlarını değerlendirmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada, çeşitleme-çoğullama ikilmini (diversity-multiplexing tradeoff) ayrıntılı olarak incelemişlerdir.

1.2 Tezin Konuya Katkıları

Bu çalışmada, röle seçmeli işbirlikli iletişim için geliştirilmiş fırsatçı iletişim olarak adlandırılan yeni bir iletişim yöntemi önerilmekte, literatürde verilen temel fırsatçı iletişim yöntemi ile karşılaştırılmaktadır. Geliştirilmiş fırsatçı iletişim yönteminde, kaynak hedefle arasındaki kanalın niteliğine göre işbirliği yapıp yapmayacağına karar vermektedir. Kaynak-hedef arası kanal, en iyi röle ile işbirliği durumunda kullanılacak kanallardan daha iyi ise işbirliğine gerek duyulmamakta, iletişim tek zaman diliminde tamamlanmakta, böylece iletim hızı da artmaktadır. Kaynak-hedef arasında en iyi röle üzerinden oluşan kanal, kaynak hedef arasındaki doğrudan kanaldan daha iyi ise işbirliği yapılmakta ancak iletim yalnızca röle üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kaynak ve hedef arasında temel işbirlikli iletimde olduğu gibi doğrudan bir kanal kullanılmamaktadır. Geliştirilmiş fırsatçı iletişim için servis dışı kalma olasılıkları elde edilerek, önerilen yöntemin temel fırsatçı iletişime göre daha iyi başarım sağladığı ortaya konmaktadır. Ayrıca bilgisayar benzetimleri ile elde edilen servis dışı kalma olasılıkları kuramsal olarak da doğrulanmıştır.

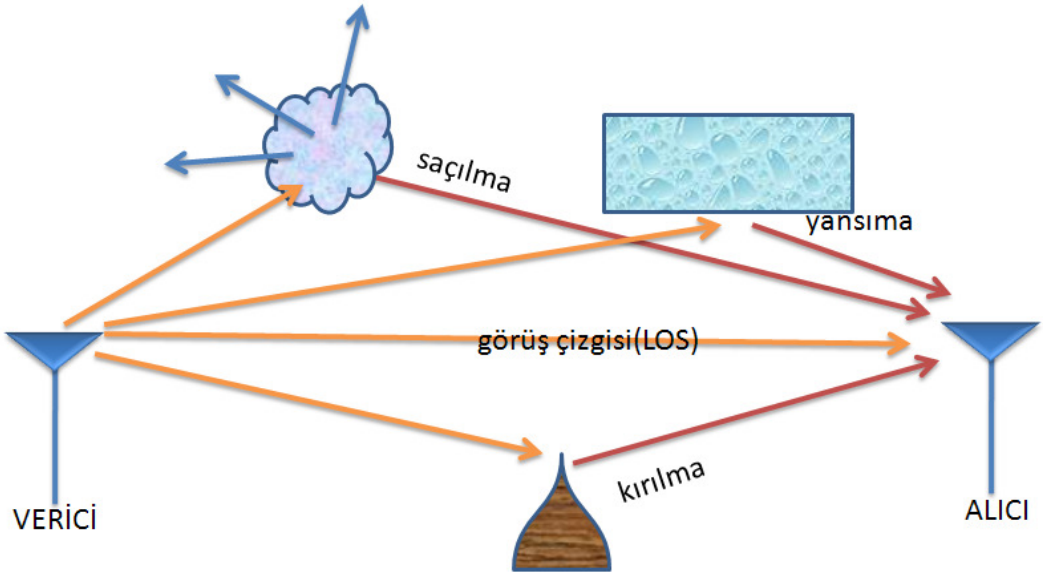
Bir iletişim modelini incelerken ya da tasarlarken çok kullanıcılı bir yapı ve bu yapı içerisinde kaliteli iletişimi göz önüne almak tek başına yeterli olmamaya başlamıştır. Günümüzde iletişim sistemleri iletişim kaliteleri yanında iletişim hızları ile de değerlendirilmektedir. Bu nedenle iletişim sistemlerinde başarımı artırmak adına iletişim hızından taviz vermek istenmez hale gelmiştir. Bu çalışmada, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modeli önerilmiştir. Bu önerilmiş olan yapı çok kullanıcılı sistemlerde iletim başarımını artırmanın yanında iletim hızından da taviz vermemeyi garanti etmektedir. Bu modelde kullanıcılar belirli bir algoritmaya göre gruplar oluşturur ve oluşan gruplar kendi içlerinde toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletim yöntemi ile iletişimlerini gerçekleştirirler. Önerilen yapı Beres'in [10] çalışmasındaki iletişim modeli ile servis dışı kalma olasılıkları açısından karşılaştırılmıştır. Eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin

hem servis dışı kalma olasılığı olarak daha iyi başarıma sahip olduğu görülmüş hem de hızda iki kart artış elde edilmiştir.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde telsiz iletişim kanallarında sönümlemenin etkisi ele alınmıştır. Üçüncü bölümde işbirlikli iletim hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde, temel fırsatçı iletişim protokolü tanıtılmış ve bu protokole alternatif olarak geliştirilmiş fırsatçı iletişim yöntemi önerilmiştir. Beşinci bölümde, toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin kuramsal servis dışı kalma olasılığı, yapılan bilgisayar benzetimleriyle doğrulanmış ve klasik çöz-ve-aktar işbirlikli iletişim yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Altıncı bölümde, Beres'in [10] çalışmasında önermiş olduğu çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Daha sonra bu yöntemden daha üstün başarıma sahip, band verimliğini de artıran *eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim* yöntemi önerilmiştir.

2. TELSİZ İLETİŞİM KANALLARINDA SÖNÜMLEME

Telsiz iletişim kanallarının en önemli özelliklerinden biri alıcı ve verici arasında birçok farklı yolun bulunmasıdır. Farklı yolların varlığı, vericiden yollanan işaretin alıcıya değişik biçimlerde ulaşmasına neden olacaktır [1]. Bu yollar Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Telsiz iletişimde verici ve alıcı arası yollar.

Bir gezgin iletişim sisteminin başarımı üstündeki en büyük kısıtlamalardan biri yol kayıplarıdır. Alıcı ve verici arasında doğrudan var olan yola görüş çizgisi (LOS, Line of Sight) denilmektedir. Görüş çizgisi varsa, işaret zayıflaması çok fazla olmayabilir [1]. Fakat alıcı ve verici arasındaki tek yol her zaman görüş çizgisi değildir. İletilen ana dalga, çevrede bulunan bina, arazi gibi engellere çarparak yansıyabilir, kırılabilir veya saçılabilir [11].

Elektromanyetik dalga, iletim yolu içerisinde dalga boyundan daha büyük bir nesne ile karşılaşırsa yansıma meydana gelir. Kırılma; elektromanyetik dalganın binaların keskin bölümlerine çarpması ile oluşur. Son olarak saçılma, alıcı ve verici arasında elektromanyetik dalganın dalga boyundan daha küçük nesnelerin olduğu bölgelerde meydana gelir [1]. Özellikle şehir bölgelerinde, çoğu zaman alıcı ve vericinin doğrudan birbirini görmesi yani görüş çizgisinin oluşması mümkün değildir. Bu

durumda alıcı ve verici arasındaki iletişim yansıma, kırılma ve saçılma ile sağlanmaktadır [12].

Yukarıda anlatılan yansıma, kırılma ve saçılma gibi etkiler işaretin gücünün farklı şekillerde azalmasına neden olmaktadır.

2.1 Kanal Bileşenlerinin Tanımları

2.1.1 Çok Yollu Yayılım (τ_{max})

Gezgin telsiz iletişim sistemlerinde çevrede bulunan evler, binalar ya da ağaçlar iletilen dalgayı yansıtıcı etkiye sahiptir. Bu engellerden yansıyan dalga engele çarpmadan önceki dalgadan farklı genlik ve faza sahip olarak yoluna devam edecektir. Böylece, alıcıya farklı yönlerden farklı gecikmelerle işaretler ulaşmış olacaktır. Maksimum zaman gecikmesi olarak da bilinen çok yollu yayılım, sönümlemeli kanalda iletilen işaretin alıcıda ilk ve son görünümü arasındaki farka denilmektedir [12].

2.1.2 Doppler Yayılımı (f_d)

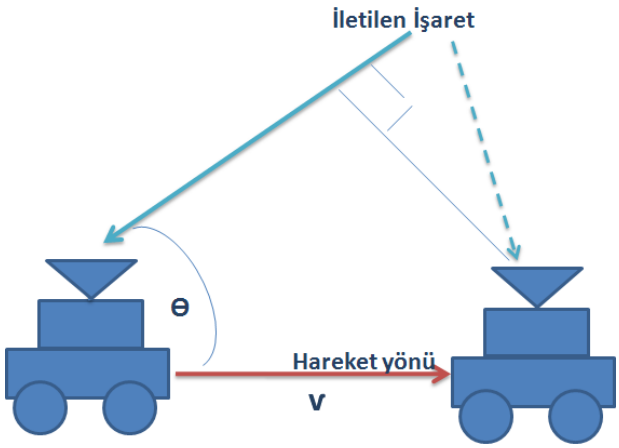
Verici veya alıcının birbirlerine göre hareketli olduğu durumda, birinden gönderilen işaretin frekansı diğerinde hareket etkisi nedeni ile kayar, bu kayma miktarı Doppler frekansı olarak adlandırılır. Doppler frekansı ;

$$f_d = \frac{v f_c \cos\theta}{c} \qquad \textbf{(2.1)}$$

şeklinde olup pozitif ve negatif değerler alabilir. Burada f_c iletilen işaret frekansını, v gezgin birimin hızını, c ışık hızını, θ alınan işaretin gezgin birimin hareketine göre geldiği açıyı göstermektedir [13]. Bu bileşenler Şekil 2.2'de de gösterilmiştir. $\cos\theta$=1 olduğu durumda maksimum Doppler kayması oluşacaktır. Maksimum Doppler kayması maksimum sönümlemeye yol açar. Doppler kayması sonucu iletilen işaret alıcıda *Doppler Spektrumunun* sıfırdan farklı olduğu bir aralığa yayılır. Bu olaya *Doppler Yayılımı* denir.

2.1.3 Uyum Zamanı (T_c)

Kanalın darbe yanıtının etkin olarak değişken olmadığı, kanal karakteristiğindeki değişimlerin çok küçük olduğu süreyi ifade etmektedir.



Şekil 2.2 : Doppler yayılımı.

Sönümlemeli kanaldan alınan iki örnek eğer uyum zamanından daha az bir zaman aralığı ile ayrılmışsa aralarında yüksek ilişki söz konusudur [13].

2.1.4 Uyum Band Genişliği (B_c)

Çok yollu yayılım sonucu alıcıya çeşitli yollardan farklı gecikmelerle işaretler gelmektedir. Maksimum zaman gecikmesi (çok yollu yayılım) τ_{max} olmak üzere uyum band genişliği,

$$B_c = \frac{1}{\tau_{max}} \tag{2.2}$$

şeklinde ifade edilir. Bu band genişliği boyunca kanal transfer fonksiyonu neredeyse sabittir ve bir işaretin spektral bileşenlerini eşit kazanç ve doğrusal fazda geçirmektedir [12].

2.2 Sönümlemeli Kanalların Sınıflandırılması

Gezgin iletişim kanallarında işaretin gücünün azalmasına neden olan etkileri iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Bunlardan ilki büyük ölçek sönümlemesidir. Büyük ölçek sönümlemesine aynı zamanda yol kaybı ya da zayıflama da denilmektedir. İşaretin gücünün azalmasına neden olan ikinci etken ise küçük ölçek sönümlemesidir. Küçük ölçek sönümlemesi kısa mesafelerde ve küçük zaman aralıklarında işaretin genliğinde meydana gelen ani değişiklikler olup sadece sönümleme adı ile de kullanılmaktadır [1].

2.2.1 Zayıflama (Büyük Ölçek Sönümlemesi)

Zayıflama olarak da bilinen büyük ölçek sönümlemesi uzun mesafeden kaynaklanan yol kayıplarından ya da yüksek binaların ve tepelerin meydana getirdiği gölgeleme etkilerinden kaynaklanmaktadır.

Zayıflama etkisi altında alıcıya gelen işaret gücü:

$$P_r = \beta . d^{-\vartheta} . P_t \quad , d > 0 \tag{2.3}$$

şeklindedir. Bu ifadedeki katsayılar;

P_r: Alıcı işaret gücü

P_t: Verici işaret gücü

d : Alıcı ve verici arasındaki mesafe

ϑ : Yol kaybı kuvveti (path loss exponent)

β : Frekans ve diğer faktörlere bağlı parametre

olarak tanımlanır.

Bu ifadede yer alan yol kaybı kuvveti (path loss exponent) [2,12] aralığında değerler alan bir büyüklüktür. Yol kaybı kuvvetinin (ϑ) aldığı bu değerler alıcı ve verici arasında işaretin yayıldığı çevrenin koşullarına bağlıdır. Alıcı ve verici arasında hiçbir engelin bulunmadığı serbest uzayda ϑ parametresi iki değerini alırken, şehir bölgelerinde bu değer altıya kadar çıkmaktadır. (2.3) denklemini seçilen bir d_0 referans uzaklığına göre tekrar ifade edersek, d uzaklığında bulunan alıcıdaki işaret gücü:

$$P_r(d)_{dBm} = 10 \log_{10}[P_r(d_0)] + 10v \log_{10}\left[P_r\left(\frac{d_0}{d}\right)\right] \tag{2.4}$$

şeklinde olacaktır [1]. Bu çalışmada büyük ölçek sönümlemeleri ihmal edilmiş, herhangi bir zayıflama etkisinin olmadığı varsayılmıştır.

2.2.2 Sönümleme (Küçük Ölçek Sönümlemesi)

Sönümleme olarak da bilinen küçük ölçek sönümlemesi, vericiden alıcıya iletilen işaretin genlik ve fazındaki ani değişimler olarak tanımlanmaktadır. Küçük ölçek sönümlemesi iki ana nedene bağlı olarak oluşmaktadır. Bunlardan ilki çok yollu

yayılım diğeri ise Doppler yayılımıdır. Genel olarak sönümlemeye neden olan bu iki etki kanalın zamanla değişen karakteristiği sonucu ortaya çıkar. Sönümlemeli kanalların oluşum nedenleri Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.3 : Sönümlemenin sınıflandırılması.

2.2.2.1 Çok Yollu Yayılımın Etkisiyle Sönümleme

Çok yollu yayılımın etkisiyle iletilen işaret düz ya da frekans seçici sönümlemeye uğrayabilir. Kanalların frekans seçiciliğini belirleyen en önemli etken uyum band genişliğidir.

Düz Sönümleme:

Kanalın uyum band genişliği iletilen işaretin band genişliğinden büyükse, işaret düz sönümlemeli olarak modellenebilir. Düz sönümlemeli kanalın çok yollu yapısı, iletilen işaretin spektral karakteristiğinin alıcıda aynen korunmasını sağlar. Ancak; çok yolun etkisiyle kanal kazancında değişmeler olacak bu da alıcıdaki işaretin gücünün zamanla değişmesine neden olacaktır. Bu nedenle, sönümleme olmayan kanallara oranla aynı hata başarımını elde edebilmek için gönderilecek işaretin gücünü artırmak gerekecektir [13].

Frekans Seçici Sönümleme:

Kanalın uyum band genişliği işaret band genişliğinden küçükse, işaretimiz frekans seçici sönümlemeli olarak modellenebilir. Geniş bantlı işaretler genellikle frekans seçici sönümlemeye maruz kalır ve iletilen işaretin frekans bileşenleri birbirinden bağımsız sönümlenir. Başka bir ifadeyle; alıcıdaki işaret iletilen işaretin zayıflamış ve gecikmiş birçok bileşeninden oluşacaktır. Bu durumda alıcıda işaret bozulmaya uğramış olur [13].

2.2.2.2 Doppler Etkisiyle Sönümleme

Hızlı ve yavaş sönümleme arasındaki ayrım, sönümlemeli kanalların matematiksel olarak modellenmesi ve bu kanallar üzerindeki iletişim sistemlerinin başarımlarını hesaplamak açısından önemlidir. Hızlı ve yavaş sönümleme kavramları kanalın uyum zamanı T_c ile ilgilidir.

Yavaş sönümleme:

Gezgin birimin hareketi kanalda f_d Hz civarında değişiklik meydana getirir. Eğer darbe süresi çok kısaysa, hareketten kaynaklanan değişiklikler çok yavaş olacak, iletim üzerinde hiç etki bırakmayacak veya çok az etki bırakacaktır. Başka bir deyişle, darbe süresinin tersi ile hesaplanan işaret band genişliği, maksimum Doppler kaymasından daha fazla ise; kanal çok yavaşça değişecektir ve yavaş sönümlemeli kanal oluşacaktır [1].

Hızlı Sönümleme:

Darbe süresi büyükse gezgin birimin hareketinden kaynaklanan değişiklikler hızlı olacaktır ve bu sebeple iletim etkilenecektir. Bu kanallarda dikkat edilmesi gereken bir nokta; hızlı sönümleme durumunda alıcının kararları iki veya daha fazla simge süresince alınan işaretin gözlemlerine dayanıyorsa, bir simge aralığından diğerine sönümleme değişimini göz önünde bulundurmak gerekir. Başka bir deyişle; hızlı sönümlemede sönümleme katsayısı her simge süresi boyunca sabit fakat simgeden simgeye değişecektir [1].

2.3 Sönümlemeli Kanal Modelleri

2.3.1 Rayleigh Dağılımı

Rayleigh dağılımı, gezgin iletişim kanallarında alıcı ve verici arasında görüş çizgisinin bulunmadığı durumda düz sönümlemeye uğramış işaretin alıcıdaki zarfının

istatistiksel olarak zamanla değişimini tanımlamak için kullanılır. Görüş çizgisi bulunmadığı durumda alıcıya gelen işaret engellerden yansıyan bileşenlerin toplamı olup,

$$r(t) = I\cos(2\pi f_c t) - Q\sin(2\pi f_c t) \tag{2.5}$$

şeklinde ifade edilir. I ve Q alıcıya gelen işaretin dik bileşenleri olmak üzere,

$$I = \sum_{i=1}^{N} a_i \cos\varphi_i \quad ve \quad Q = \sum_{i=1}^{N} a_i \sin\varphi_i \tag{2.6}$$

şeklinde ifade edilir. Engellerin yerleri tamamen rastgele ise, $\varphi_i \in [0,2\pi]$ aralığında düzgün dağılımlıdır [1]. Ayrıca engellerden yansıyarak gelen bileşenlerin sayısı yeterince çoksa Merkezi Limit Teoremi'ne göre alınan işaretin dik bileşenleri I ve Q istatistiksel bağımsız, sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı Gauss dağılımlı olacak ve zarfı Rayleigh dağılımı verecektir. Rayleigh dağılımı,

$$P_{Rayleigh}(r) = \begin{cases} \dfrac{r}{\sigma^2}\exp\left(-\dfrac{r^2}{2\sigma^2}\right) & 0 \le r \le \infty \\ 0 & r < 0 \end{cases} \tag{2.7}$$

Şeklinde modellenir. Rayleigh dağılımının ortalama değeri,

$$r_{mean} = E[r] = \int_0^{\infty} r.\rho(r).dr = \sigma\sqrt{\frac{\pi}{2}} \tag{2.8}$$

olarak bulunur. Rayleigh dağılımının varyansı ise,

$$\sigma_r^2 = E[r^2] - E^2[r] = \int_0^{\infty} r^2.\rho(r).dr - \sigma^2\frac{\pi}{2} = \sigma^2\left(2 - \frac{\pi}{2}\right) \tag{2.9}$$

şeklinde olacaktır [5].

2.3.2 Ricean Dağılımı

Gezgin iletişim kanallarında, alıcı ve verici arasında görüş çizgisi varsa alıcıdaki işaret doğrudan alınan işaret ve birçok rastgele yoldan yansıyarak gelen bağımsız işaretlerin toplamı şeklinde olacaktır. Yansıyan birleşenlerin zarfının Rayleigh

dağılımlı olduğunu söylemiştik. Bu doğrudan yolla gelen işaret çok yollu işarete belirli bir bileşen ekler. Bu bileşen sıfırdan farklı ortalamalı bir Gauss rastgele değişkeni oluşturur. Sonuç olarak alıcıya gelen işaretin zarfı,

$$P_{Ricean}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A_0^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA_0}{\sigma^2}\right) \quad \textbf{(2.10)}$$

olasılık yoğunluk işlevi ile ifade edilen Ricean dağılımlıdır. Burada,

$I_0(.)$: Sıfır dereceli birinci çeşit Bessel işlevi

A_0 : Doğrudan gelen işaretten ortaya çıkan bileşen

biçimindedir.

Ricean katsayısı doğrudan bileşenin gücünün diğer yollardan gelen bileşenlerin güçlerine oranı olup,

$$K(dB) = 10 \log_{10}\left(\frac{A_0^2}{2\sigma^2}\right) \quad \textbf{(2.11)}$$

şeklindedir. Eğer $K = -\infty$ ise doğrudan yoldan gelen bileşen yok demektir ve Ricean dağılımı, Rayleigh dağılımı haline gelir. Aynı zamanda Ricean katsayısının artması doğrudan bileşenin gücünün artması anlamındadır ve $K \gg 1$ değerleri için Ricean dağılımı, Gauss dağılımına benzer [11].

2.3.3 Nakagami Dağılımı

Rayleigh ve Ricean modellerinde, farklı yollardan gelen saçılma bileşenlerinin eşit olduğu varsayılmaktadır. Nakagami kanal modelinde ise, daha genel olarak bileşenlerin ve saçılma bileşenlerinin farklı kuvvetlerde olabileceği kabul edilmektedir. Olasılık yoğunluk işlevi;

$$P_R(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} exp\left(-\frac{mr^2}{\Omega}\right), r \geq 0 \quad \textbf{(2.12)}$$

şeklindedir. Burada,

$\Gamma(.)$: Gama işlevi,

$$\Omega = < A^2 >, \quad \textbf{(2.13)}$$

$$m = \frac{< A^2 >^2}{< A^2 - \Omega >^2} \tag{2.14}$$

şeklinde ifade edilir. Burada m Nakagami katsayısıdır. Nakagami dağılımı, $m = 1/2$ ise tek yönlü Gauss, $m = 1$ ise Rayleigh, $m > 1$ ise Ricean dağılımı haline gelir [14].

3. İŞBİRLİKLİ İLETİM ve TEMELLERİ

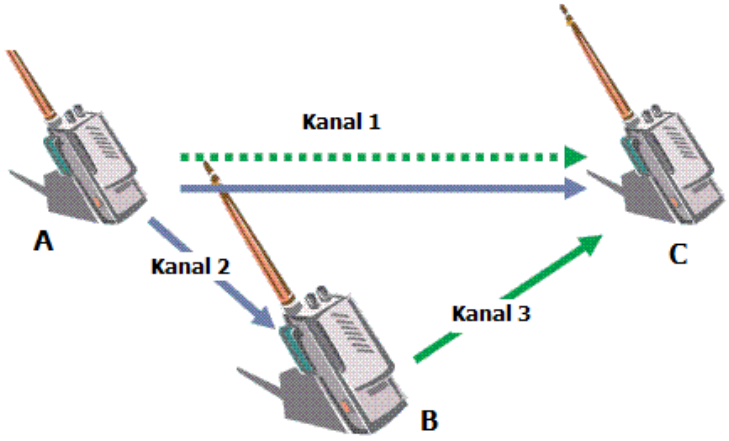
Alıcıda sönümleme, iletilen işaretin alıcıya bozulmuş olarak ulaşması ya da iletilen işaretin gücünün alıcıda değişmesi ile ortaya çıkmaktadır. Sönümleme etkisini azaltarak hata başarımını toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) durumundakine yaklaştırmak için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları; yayılmış spektrum, kodlama, dik frekans bölmeli çoğullama (OFDM), güçlü modülasyon teknikleri olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerde biri de işbirlikli iletişim olarak tanımlanabilir. Bu bölümde, işbirlikli iletim konusunda yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilecek, aktarıcı kanal modeli tanıtılacak ve aktarım protokollerinden bahsedilecektir.

3.1 Aktarıcı Kanal

Telsiz iletişim kanallarında toplamsal gürültüye ek olarak işareti çarpımsal bir etkiyle bozan sönümleme vardır. Bu bozulmayı azaltmak için işaretin birbirinden bağımsız kopyaları farklı kanallar üzerinden alıcıya gönderilerek çeşitleme yapılır. İşte işaretin bağımsız kopyasını ileten bu kanala *aktarıcı kanal* denilmektedir. İlk olarak aktarıcı kanal Van der Meulen tarafından [15]'deki çalışmada incelenmiştir. Cover ve El Gamal [16] üç düğümlü aktarıcı kanallar konusunda işbirlikli iletimin temeli sayılabilecek çalışmalarda bulunmuşlardır.

En temel haliyle aktarıcı kanal modeli üç uçlu bir yapı içerir. Bu yapının bir ucunda bilgiyi üreten kaynak (source), diğer ucunda bilginin gönderileceği hedef (destination) , bir diğer ucunda ise kaynak ve hedef arasındaki iletimi iyileştirmek amacı ile aktarımı gerçekleştiren aktarıcı/röle (relay) bulunmaktadır. Şekil 3.1'de görüldüğü üzere A' dan yapılan yayın B'nin işbirliği ile Kanal 2 ve Kanal 3 üzerinden C'ye ulaşmaktadır. Ayrıca A ve C arasındaki iletişim doğrudan bir yol olan Kanal 1 üzerinden de sağlanmaktadır. Bu örnekte A kaynak, B röle, C ise hedef görevindedir. B' den C' ye bir yayın olduğu durumda ise B- C arasındaki doğrudan

iletişim Kanal 3 üzerinden yapılırken, A'nın işbirliği ile Kanal 2 ve Kanal 1 üzerinden C'ye ulaşılır.



Şekil 3.1 : Temel aktarıcı kanal modeli [10].

Bilgi üreten kaynağın S, aktarıcı birimin R, hedefin ise D olarak adlandırıldığını düşünelim. Kavramsal olarak bilgi hedefe iki modda aktarılmaktadır. (a) S ileletmekte ve (R,D) almaktadır, bu mod çoklu-iletim (broadcast) olarak adlandırılmaktadır. (b) (S,R) iletmekte ve D almaktadır, bu moda çoklu-erişim (multiple-access) denir. Sözü edilen iki mod sonucunda aktarma modelleri aşağıdaki gibi sıralanabilir :

S→(R,D); (S,R)→D (en genel aktarım modeli)

S→R; (S,R) →D (D, S'den ilk modda gelen işareti ihmal eder)

S→(R,D); R→(D) (S ikinci modda iletim yapmaz)

S→R; R→D (çok-aktarımlı iletişim (multi-hop communication))

3.2 Yarı-çift Yönlü ve Tam-çift Yönlü Aktarım

Yarı-çift yönlü aktarım modelinde aktarıcı eş zamanlı olarak aynı bandta iletim ve alım yapamamaktadır. Diğer bir değişle gönderilen işaret ve alınan işaret dik olmak zorundadır. Bu işaretler arasındaki diklik, zaman bölgesinde, frekans bölgesinde veya zaman-frekans düzleminde birbirine dik olabilecek işaret kümelerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir.

Tam çift yönlü aktarım modelinde, aktarıcı eş zamanlı olarak aynı banddan iletim ve alım yapabilmektedir. Bundan dolayı gönderilen işaret ile alınan işaret birbirine girişmektedir. Kuramsal olarak bu iki işaretin aktarıcıda birbirinde ayrılması

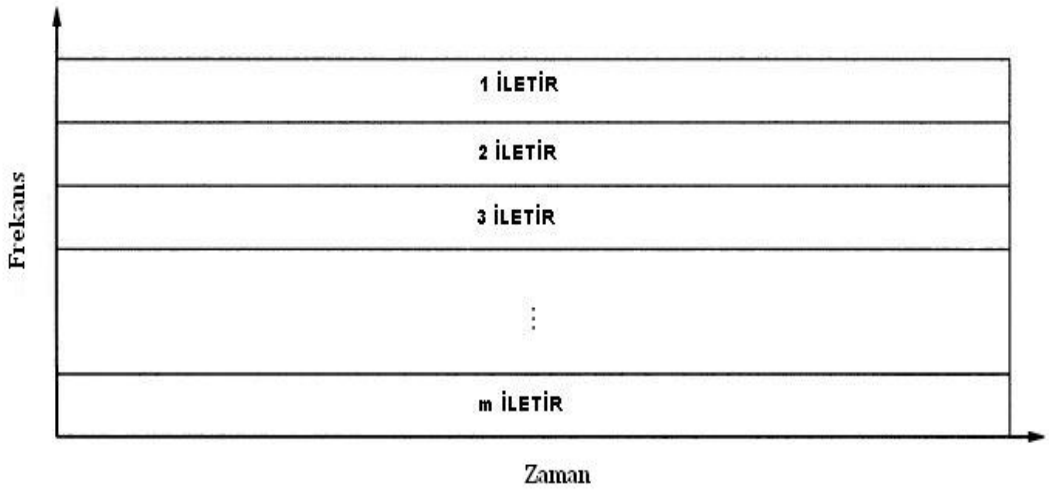
mümkündür. Çünkü aktarıcı kendi ilettiği işareti bilmektedir ve alınan işaretten ilettiği işareti çıkararak aktarılacak olan işareti elde edebilir. Ancak pratikte ortaya çıkan girişimin yok edilmesi işaretin tamamen bozulmasına neden olabilmektedir. Çünkü iletilen işaret alınan işaretten 100-150dB daha güçlüdür [17]. Bu nedenle, işbirlikli iletişim konusunda yapılan çalışmalar çoğunlukla yarı-çift yönlü aktarım yöntemine dayalı sistemlerdir.

3.3 İşbirlikli iletişim

İşbirlikli iletişim aktarıcı kanalın birden fazla bilgi kaynağına genelleştirilmişidir. İşbirlikli iletişimde, her bir bilgi kaynağı değişik yöntemlerle hem bilgiyi iletmekte hem aktarmaktadır.

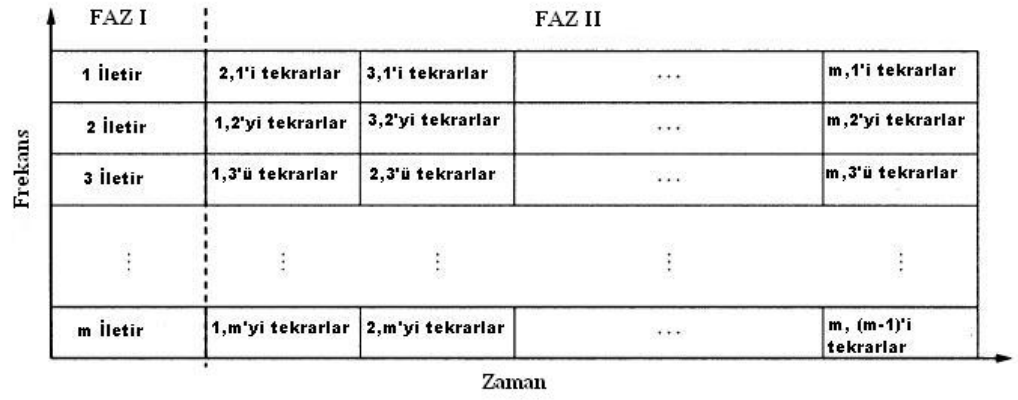
En genel haliyle işbirlikli iletişimi anlamak için ortam erişim kontrolü (MAC, Medium-Access Control) protokolünü inceleyelim.

Ortam erişim kontrolü; $M = \{1,2,3, \dots, m\}$ kümesi m adet iletim uç birimini göstermek üzere bu uç birimleri içerisinden herhangi bir uç biriminin kaynak olduğu ve bu M kümesi dışındaki bir hedefe iletim yaptığı durumunu ifade etmektedir. Öyleyse s kaynak terminali olmak üzere $s \in M$ olduğu söylenebilirken, $d(s)$ varış terminali için $d(s) \notin M$ denilebilmekte ve olası röleler $M - \{s\}$ şeklinde ifade edilebilmektedir [3].



Şekil 3.2 : Çeşitlemesiz durumda ortam erişim kontrolü [3].

Şekil 3.2'de m adet verici uç birimi birbirine dik alt kanallardan diğer verici uç birimleri ile eşzamanlı olarak iletim gerçekleştirmekte olduğu gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Tekrarlama temelli ortam erişim kontrolü [3].

Şekil 3.3'te tekrarlama temelli işbirlikli çeşitleme uygulanmış bir sistem görülmektedir. m adet işaret m farklı uç biriminde (rölede) tekrarlanarak iletilmektedir. Burada röleler kendilerine gelen kaynak işaretlerinin her birini kuvvetlendirerek ya da tamamen çözüp tekrar ileterek tekrarlama işlemini gerçekleştirirler. Alıcı ise, bu işaretleri birleştirir ve bu şekilde çeşitleme kazancı elde etmiş olur. Tekrarlama temel olarak dik (ortogonal) alt kanallarla yapılmaktadır. Özetleyecek olursak, Şekil 3.3 farklı kaynak terminalleri için zamanda ve frekansta kanal tahsisini göstermektedir. Genel olarak s kaynağı ve $d(s)$ varış noktası için, $M - \{s\}$ röleleri önceden belirlenmiş sırayla tekrar edebilirler [3].



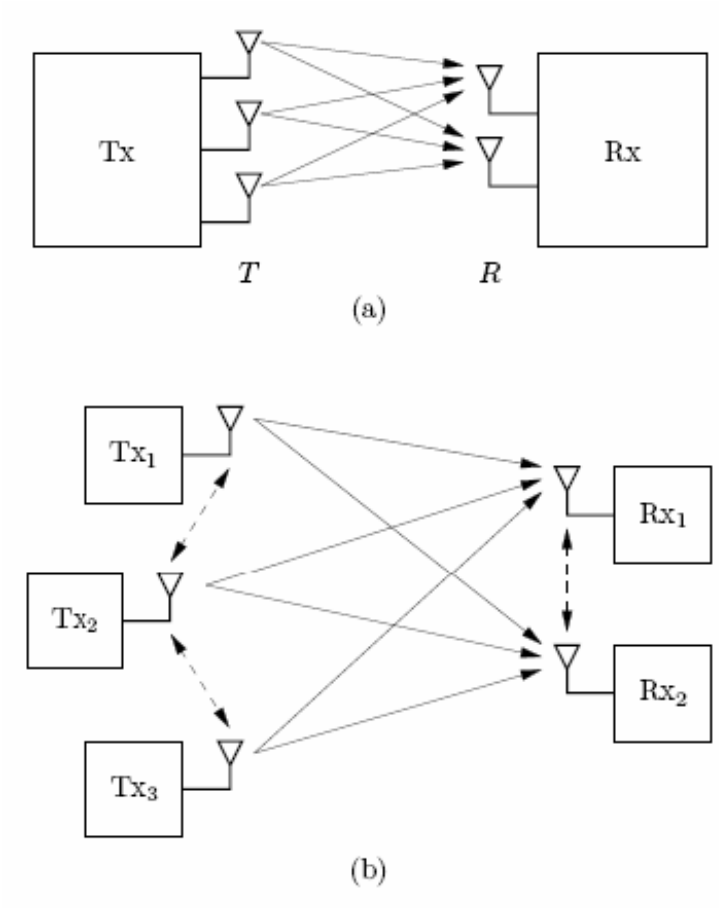
Şekil 3.4 : Uzay zaman kodlu ortam erişim kontrolü [3].

Şekil 3.4'te uzay zaman kodlu işbirlikli çeşitleme yapısı için kanal tahsisi gösterilmiştir. s kaynağı göstermek üzere $D(s)$ ile de, s kaynağının mesajını çözebilen röle kümesi ifade edilmektedir. Şekil 3.4'te toplam m adet kaynak birinci zaman aralığında (FAZ I) iletecekleri verileri sahip oldukları rölelere

iletmektedirler. Ardından ikinci zaman aralığında (FAZ II) her röle eşzamanlı olarak işaretin bulunduğu banddan uzay-zaman kodlamalı olarak hedefe iletimi gerçekleştirmektedir [3].

Uzay-zaman kodlamalı işbirlikli çeşitleme modeli, tekrarlamalı iletim modellerine göre zamanı daha verimli kullanmaktadır. Tekrarlamalı işbirliğinde kaynaktan gönderilen işaret röle tarafından tekrarlanılarak iletilir. Bu durumda, röle kendi kanalını tekrar için kullanmış olur ve bu tekrarlama band verimliliğini azaltır. Band verimliliğindeki bu azalma, bazı sınırlı geri beslemeler kullanılarak düzeltilebilir. Uzay zaman kodlamalı işbirlikli çeşitleme modelinde ise band verimliliğini azaltan bu tekrarlamalar ortadan kaldırılmıştır. Böylelikle geri besleme kullanmadan uzaysal (anten) çeşitlemeden yaralanılmakta dolayısıyla daha yüksek band verimliliği sağlanmaktadır.

Yukarıda da açıklandığı üzere; işbirlikli çeşitlemeli sistem bir çok giriş-çok çıkışlı (MIMO) sistem şeklini alır. Temel çok giriş-çok çıkışlı yapı ve işbirlikli iletişim sonucunda oluşan çok–giriş çok çıkışlı yapı Şekil 3.5'te verilmiştir.



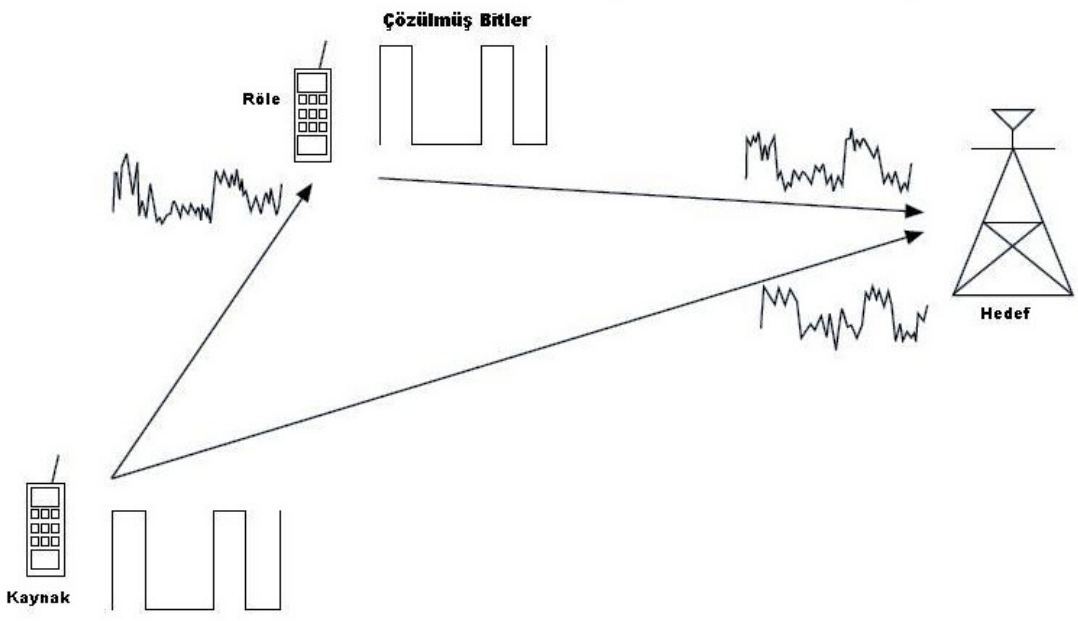
Şekil 3.5 : a) Temel MIMO. b) İşbirlikli iletişim sonucu oluşan MIMO.

3.4 İşaret Aktarım Protokolleri

Kaynak tarafından gönderilen işaretler röleler tarafından alındıktan sonra tekrar iletilecektir. Aktarıcı kanallar ve işbirliğinin kullanılmasıyla çeşitleme kazancının elde edilmesi için oluşturulan bazı protokollar bu bölümde incelenmiştir.

3.4.1 Çöz ve Aktar

Bu yöntem, işbirliğine yardım edecek rölenin kaynaktan gönderilen bilgi dizisini alma, algılama ve tekrar (decode-and-forward) iletme temeline dayanmaktadır. Şekil3.6'da bu yöntemin üç uç birimi arasında nasıl gerçekleştiği gösterilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi birinci fazda röle kaynaktan gönderilen işareti almakta ve kodunu çözmektedir. İkinci fazda ise röle aldığı bu işareti hedefe iletmektedir. Yani kaynaktan gönderilen işaret röleye gelmekte ve onun üzerinden hedefe iletilmektedir. Kaynakla hedef arasındaki iletişim ise birinci fazda gerçekleşebileceği gibi ikinci fazda röle ile eşzamanlı olarak da gerçekleşebilmektedir. Sonuç olarak, kaynaktan doğrudan gönderilen işaretle röleden aktarılarak gönderilen işaret alıcıda toplanmaktadır [18].



Şekil 3.6 : Çöz-ve-Aktar çeşitlemesi [19].

Bu yöntemde ara kanalda (kaynak ve röle arası) işareti toplamsal olarak bozan gürültü hedefe iletimden önce işaretin rölede çözülmesi sonucu ortadan kaldırılmaktadır. Fakat kaynak tarafından gönderilen işaret röleye sönümlemeli kanal

üzerinden gelmektedir. Çeşitlemesiz gelen bu işaretin rölede hatalı çözülme olasılığı vardır.

Birinci fazda kaynaktan röleye bilgi dizisinin gönderildiği durumda i. röle tarafında alınan işaret;

$$x_{SR} = \sqrt{E_{SR}}.s_i.h_{SR} + n_R \quad \textbf{(3.1)}$$

şeklindedir. Burada E_{SR} kaynaktan röleye iletilen işaretin rölede alınan enerjisi, s_i kaynaktan röleye iletilen işaret, h_{SR} kaynak ile röle arasındaki sönümleme katsayısı (kanal kazancı) ve n_R röledeki gürültü büyüklükleridir. Daha sonra alınan bu işaret rölede çözülerek tekrar iletilecektir. Sonuç olarak, kaynaktan doğrudan gönderilen işaretle röleden aktarılarak gönderilen işaret alıcıda toplanacak ve alıcıdaki işaret şu şekilde tanımlanacaktır:

$$x_D = \sqrt{E_{RD}}.\hat{s_i}.h_{RD} + \sqrt{E_{SD}}.s_k.h_{SD} + n_D\,. \quad \textbf{(3.2)}$$

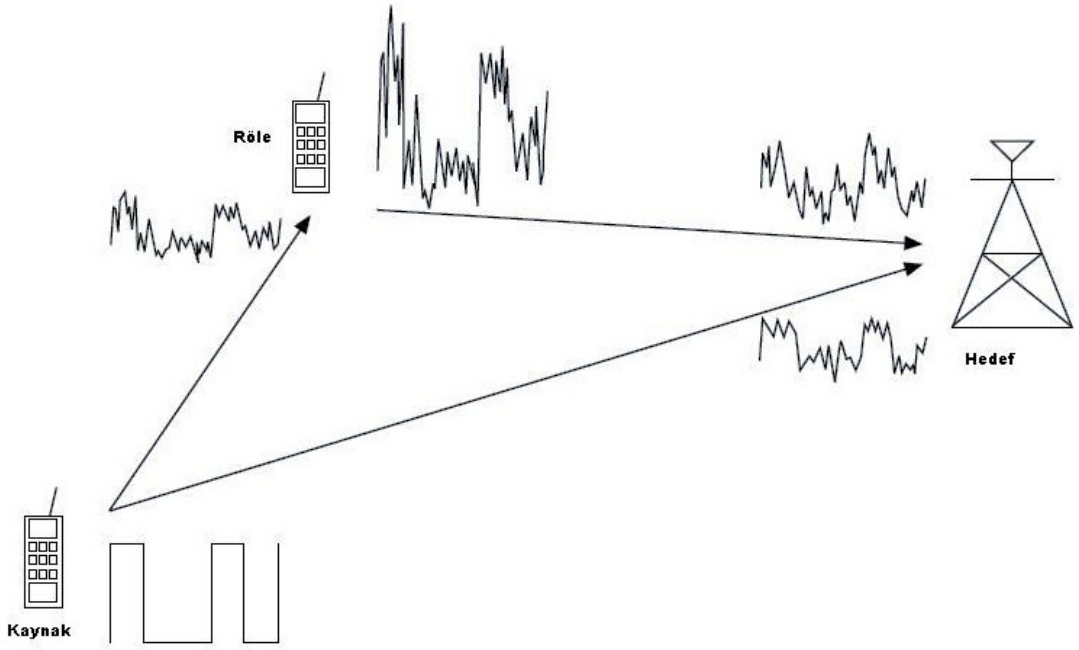
Burada ise, E_{RD} hedefe röleden aktarılan işaretin hedefte alınan enerjisi, $\hat{s}_i$ i.röle tarafından çözülen işaret, h_{RD} röle ile hedef arasındaki kanalın sönümleme katsayısı, E_{SD} hedefe kaynaktan doğrudan iletilen işaretin hedefte alınan enerjisi, s_k kaynaktan hedefe iletilmek istenen işaret, h_{SD} kaynak ile hedef arasındaki kanalın sönümleme katsayısı ve n_D hedefte görülen toplam gürültüdür.

3.4.2 Yükselt ve Aktar

İşbirlikli aktarım protokollerinden bir diğeri yükselt ve aktar (amplify-and-forward) çeşitlemesidir. Bu yöntem, işbirliğine yardım edecek rölenin kaynaktan gönderilen bilgi dizisini alma, kuvvetlendirme ve tekrar iletme temeline dayanmaktadır. Şekil3.7'de bu yöntemin üç uç birimi arasında nasıl gerçekleştiği gösterilmiştir. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi birinci fazda röle kaynaktan gönderilen işareti gürültülü olarak alır ve kuvvetlendirir. İkinci fazda ise röle bu işareti hedefe iletir. Kaynakla hedef arasındaki iletişim ise, birinci fazda gerçekleşebileceği gibi ikinci fazda da gerçekleşebilmektedir. Sonuç olarak, kaynaktan doğrudan gönderilen işaretle röleden aktarılarak gönderilen işaret alıcıda birleştirilerek iletilen bite karar verilir [19].

Bu yöntemde ara kanalda (kaynak ve röle arası) işareti toplamsal olarak bozan gürültü yükseltilmekte ve iletim bu şekilde gerçekleştirilmektedir. Gürültü

yükseltilmesi bu çeşitlemedeki dezavantajdır. Ancak çeşitlemesiz duruma göre, gürültü yükseltilse bile alıcı iki bağımsız işaret biçimi aldığı için hata yapma olasılığı azalacaktır.



Şekil 3.7 : Kuvvetlendir-ve-Aktar çeşitlemesi [19].

Kuvvetlendir ve aktar çeşitlemesinde birinci fazda kaynaktan hedefe ve röleye bilgi dizisinin gönderildiği durumda i. röle tarafında alınan işaret;

$$x_{SR} = \sqrt{E_{SR}}.s_i.h_{SR} + n_R \qquad \textbf{(3.3)}$$

şeklindedir. Burada E_{SR} kaynaktan röleye iletilen işaretin rölede alınan enerjisi, s_i kaynaktan röleye iletilen işaret, h_{SR} kaynak ile röle arasındaki sönümleme katsayısı ve n_R ise röledeki gürültü büyüklükleridir. Daha sonra alınan bu işaret rölede kuvvetlendirilerek tekrar iletilecektir. Buna göre röleden hedefe ulaşan işaret;

$$x_{RD} = \sqrt{\frac{E_{RD}}{E_{SR}.\left|h_{RD}^{i}\right|^2 + E[n_R^2]}}\, x_{SR}h_{RD} + n_{RD} \qquad \textbf{(3.4)}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada ise, E_{SD} röleden hedefe iletilen işaretin hedefte alınan enerjisi, h_{RD} kaynak ile röle arasındaki sönümleme katsayısı ve n_{RD} ise röle ile hedef arasındaki kanal gürültü büyüklüklerini göstermektedir.

Sonuç olarak, kaynaktan doğrudan gönderilen işaretle röleden aktarılarak gönderilen işaret alıcıda toplanacak ve alıcıdaki işaret şu şekilde tanımlanacaktır:

$$x_D = x_{RD} + \sqrt{E_{SD}} \, . s_k . h_{SD} + n_D \, . \qquad \textbf{(3.5)}$$

Burada ise, E_{SD} kaynaktan hedefe doğrudan iletilen işaretin hedefte alınan enerjisi, s_k kaynaktan hedefe iletilmek istenen işaret, h_{SD} kaynak ile hedef arasındaki kanalın sönümleme katsayısı ve n_D hedefte görülen toplam gürültüdür.

3.4.3 Kodlamalı İşbirliği

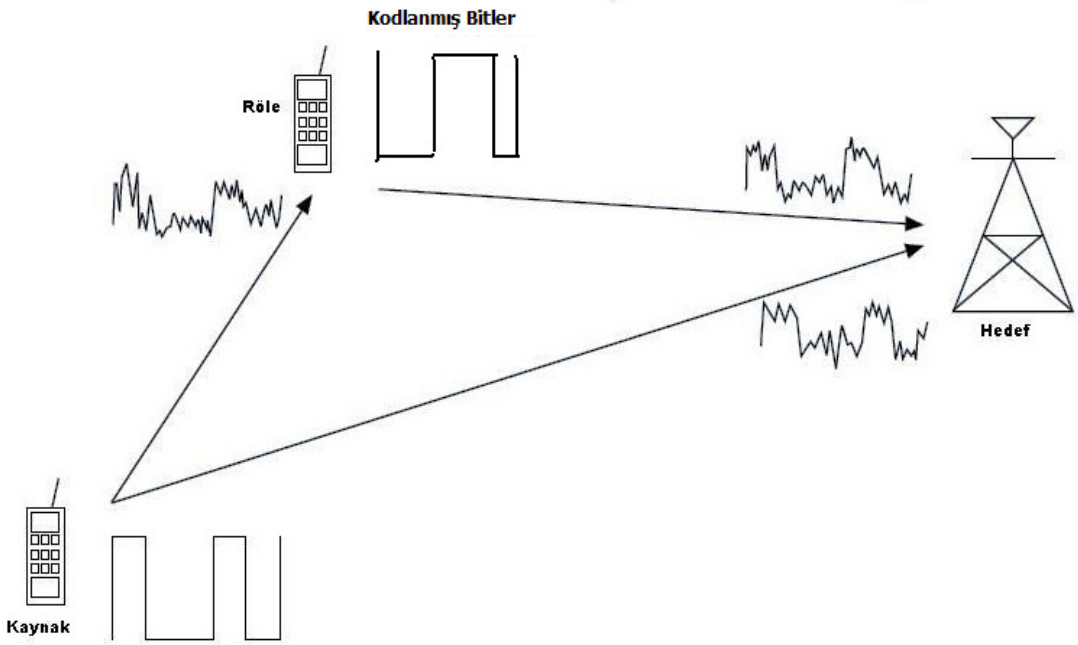
Kodlamalı işbirliği (coded cooperation), işbirlikli iletişim ile kanal kodlamasını birleştirerek kodlama kazancına olanak sağlayan bir işbirliği çeşididir. Kodlamalı işbirliği, iki bağımsız sönümlemeli kanaldan her kullanıcının kod sözcüğünün farklı parçalarının gönderilmesi temeline dayanır [19]. Şekil 3.8'de her kullanıcının iki bağımsız sönümlemeli kanaldan kod sözcüklerini göndermesi ile kodlamalı işbirliği çeşitlemesinin gerçekleşmesi görülmektedir.

Kodlamalı işbirliği çeşitlemesinde her kullanıcı hem bilgi gönderme işlevini gerçekleştirebilmekte hem de diğer bir kullanıcının da aktarıcı kanalı görevini üstlenebilmektedir. Kullanıcılar kaynak bilgilerini çevrimsel artıklık denetimi (cyclic redundancy check-CRC) kodlarıyla genişletilmiş bloklara ayırırlar. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi her kullanıcı iletmek istediği bilgi bitlerini N_1 ve N_2 bitten oluşan iki bölüme bölerek tekrar kodlar. Yani her kullanıcının alıcıya göndereceği toplam kod sözcüğü N_1+N_2 bitten oluşmaktadır.

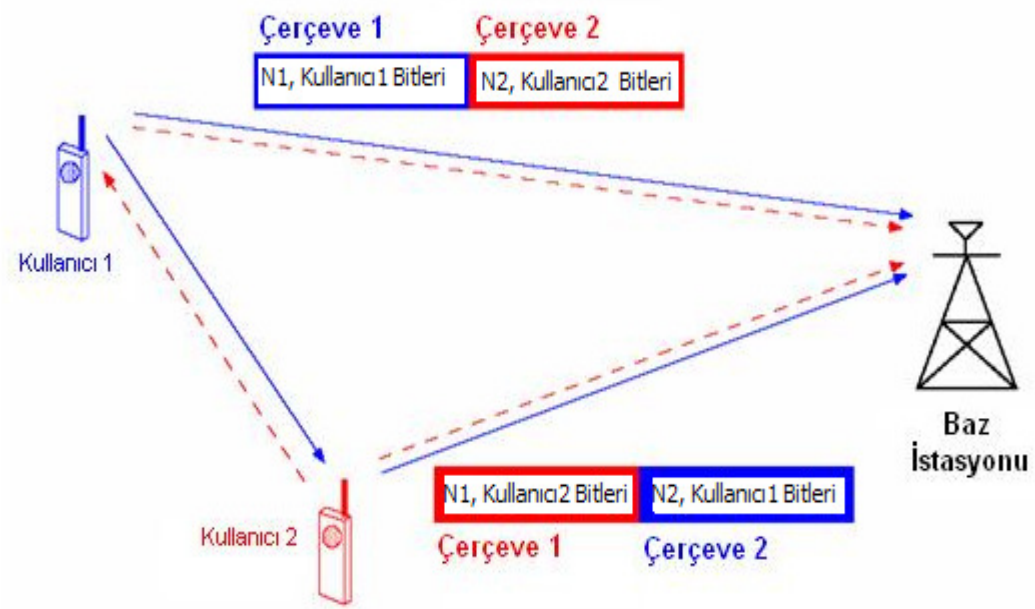
Kullanıcının ileteceği bilgi süresi de N_1 ve N_2 bitlerinin sürelerine bölünür. Bu zaman aralıklarına çerçeve denilmektedir. Birinci çerçevede, her kullanıcı N_1 bitlik kendine ait kod parçası içeren bir kod sözcüğünü alıcıya iletir. Bütün kullanıcılar da aynı zamanda diğer ortak kullanıcıların kod sözcüklerini çözme işlemlerini gerçekleştirirler. CRC kodlarına bakarak da, bu bitleri doğru çözüp çözmediğini kontrol eder. Eğer CRC kodlarına göre başarı sağlandıysa, ikinci çerçeve aralığında her kullanıcı ortak kullanıcının N_2 bitlik kod parçasını iletir. Aksi durumda, kullanıcı kendi N_2 bitlik kod parçasını iletir. Böylece her kullanıcı toplam kod sözcüğü boyutu olan $N_1 + N_2$ bitlik veri iletimini gerçekleştirmiş olur [19].

Kod sözcükelerinin doğru çözülüp çözülmemesine göre dört farklı durum oluşabilir:

- Her iki kullanıcı işbirliği yapar.
- Sadece birinci kullanıcı işbirliği yapar.
- Sadece ikinci kullanıcı işbirliği yapar.
- Her iki kullanıcı da işbirliği yapamaz.



Şekil 3.8 : Kodlamalı işbirliği çeşitlemesi [19].



Şekil 3.9 : Kodlamalı işbirliği çeşitlemesi çerçeve iletimi [19].

Ancak bu oluşabilecek dört farklı durum için de bütün kullanıcılar iki zaman dilimi boyunca toplam $N_1 + N_2$ bit iletir. İşbirliği derecesi de N_2/N olarak tanımlanır.

4. FIRSATÇI İLETİŞİM

Kaynağın işbirliği yapabileceği röle sayısı birden fazla olduğunda bu rölelerden kaynakla hedef arasında en iyi kanalı oluşturan röleyi seçmek ve bununla işbirliği gerçekleştirmek de olanaklıdır**.** İşbirliğinde kullanılan röle sayısı sabit olmasına rağmen, işbirliğine katılabilecek röle sayısını artırmanın çeşitleme düzeyine, dolayısı ile hata başarımına etkisi tartışılacaktır. Bu bölümde öncelikle kanal tanıtılarak, temel fırsatçı iletişim modeli tartışılacak ardından bu yapıya alternatif olarak sunulan geliştirilmiş fırsatçı iletişim yöntemi açıklanacaktır.

4.1 Kanal modeli

Bu modelde bir kaynak, bir hedef ve kullanılabilir M adet röle vardır. t anında bir $x(t)$ işaretinin kanaldaki bir A düğümünden diğer bir B düğümüne iletildiğini varsayalım. Bu iletişim modelinde, A düğümü iletim yapan kaynak (S) ya da röle (R) olabilir. B düğümü ise dinleme yapan röle (R), hedef (D) olabilmektedir. İletilen bu $x(t)$ işareti kanalda sönümlemeden ve toplamsal Gauss beyaz gürültüsünden etkilenir. Bu durumda alıcı düğümdeki işaret;

$$y_B(t) = h_{AB}.x(t) + n_B(t) \quad \textbf{(4.1)}$$

biçiminde yazılabilir. Burada h_{AB} ile kanal sönümleme katsayısı gösterilmektedir. Bir iletişim periyodu boyunca sönümleme katsayısının değişmediği yani kana alın duruğumsu (quasi static) olduğu varsayılmıştır. Ayrıca kanal sönümleme katsayıları düz (flat fading) zarfı Rayleigh sönümlemeli olarak modellenmiştir. Buna göre kanal sönümleme katsayısı karmaşık Gauss dağılımlı olarak;

$$h_{AB} \sim CN(0,1/\lambda_{AB}) \quad \textbf{(4.2)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu modelde kanal sönümleme katsayısının ortalaması sıfır, varyansı $1/\lambda_{AB}$'dir. λ_{AB} yol kaybına bağlı bir parametredir. Yol kaybı olmadığı durumda varyans 1'e eşit olacaktır. Kanal gücü ise kanal sönümleme katsayısının

karesi olarak ifade edilmiş olup istatistiksel bağımsız üstel dağılımlıdır. Buna göre kanal kazancı $|h_{AB}|^2$'nin olasılık yoğunluk işlevi;

$$p_{|h_{AB}|^2}(x) = \lambda_{AB}\, exp(-\lambda_{AB} x) \quad , x \geq 0 \tag{4.3}$$

biçimindedir. Burada x ile $|h_{AB}|^2$'nin olurlu değeri gösterilmektedir. Röle ve hedefteki gürültüler ise istatistiksel bağımsız $\sigma^2 = N_0$ varyanslı, sıfır ortalamalı karmaşık Gauss dağılımlı olarak modellenmiştir. Buna göre gürültü bileşeni;

$$n_B \sim CN(0, \sigma^2) \tag{4.4}$$

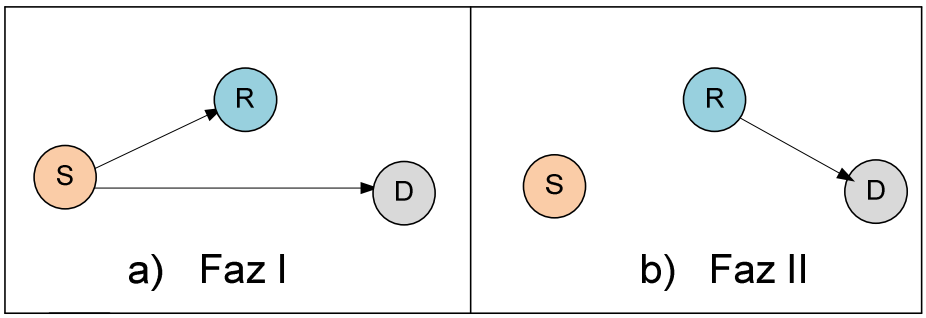
şeklinde olacaktır. Bu modelde düğümler aynı anda hem iletim hem dinleme yapamamaktadır. Aynı anda yapılan iletimler birbirine dik kanallarla (TDMA, FDMA gibi) gerçekleştirilmektedir. Ayrıca fiziksel katmanda kanal durum bilgileri (CSI) bulunmamaktadır. Rölede çöz ve aktar protokolü kullanılmaktadır. Adil bir karşılaştırma yapabilmek için temel fırsatçı iletişimde [4] ve yeni önerilen geliştirilmiş fırsatçı iletişimde, iletim için harcanan toplam gücün (P_{tot}) aynı olduğu kabul edilmiştir. Kanaldaki işaret-gürültü oranı (*SNR*) ise P_{tot}/N_0 olarak tanımlanmıştır.

Temel işbirlikli iletişimde iki fazlı iletişim söz konusudur. T kanal uyum zamanını göstermek üzere kaynak, uyum zamanının birinci yarısında iletim yaparken, röle uyum zamanının ikinci yarısında iletim yapmaktadır. Kanal uyum zamanının birinci yarısına Faz I, ikinci yarısına da Faz II denilebilir [3]. Buna göre Faz I ve Faz II için harcanan toplam güç eşit ve $P_{tot}/2$'dir. Geliştirilmiş işbirlikli iletişimde kanal durumlarına göre tek fazlı ya da iki fazlı iletişim söz konusudur. Bu durumların neler olduğu ileriki bölümlerde açıklanacaktır. Ancak bu yöntemde, tek fazlı iletim var ise toplam gücün tamamı bu tek fazda harcanır. İki fazlı iletim durumu oluşmuş ise toplam gücün yarısı ($P_{tot}/2$) birinci fazda, diğer yarısı da ikinci fazda harcanır.

4.2 Temel Fırsatçı İletişim

Fırsatçı röle seçiminin amacı, M röle içerisinden kaynak ve hedef arasında en iyi kanalı oluşturacak olan röleyi seçmek ve çeşitlemeyi bu röle yardımı ile gerçekleştirmektir. Kaynak ve i. röle arasındaki telsiz kanal sönümleme katsayısı h_{Si}, ve yine i. röle ile hedef arasındaki telsiz kanal sönümleme katsayısı h_{iD} ile göstersin.

Bu katsayılar iki uç birim arasındaki yayılım yolunu modellemekte ve kanal uyum zamanı ile belirtilen sürede değişmektedir.



Şekil 4.1 : Temel fırsatçı iletişim modeli.

Fırsatçı röle seçiminde en iyi iletim yapabilecek olan röle kanalın bu değişen anlık h_{Si} ve h_{iD} büyüklüklerine göre seçilmektedir. Öyleyse, h_{Si} ve h_{iD} büyüklükleri değişmeden bir an önce en iyi röle seçilmeli ve çeşitleme gerçekleştirilmelidir [4].

Bu yöntemde, her kullanıcının kaynak ve hedefi dinleyebildiği yani kaynak ve hedeften paket alabildiği ayrıca her bir rölenin kendine ait bir saatinin olduğu varsayılmıştır. Röle saatleri başlangıçta aynı değere ayarlanmış durumdadır ve her röle yaptığı ölçümlere göre saat bilgisini değiştirebilmektedir. Bu varsayımlar altında en iyi rölenin nasıl seçildiğini inceleyelim. Bunun için röleler tarafından kanal sönümleme katsayıları kestirilmelidir. Öncelikle kaynak tarafından *göndermeye hazır paketi* (Ready-to-Sent,RTS) yayınlanır. Bu paket ile her röle kendisi ile kaynak arasındaki kanal sönümleme katsayısı olan h_{Si} değerini kestirir. Daha sonra hedef tarafından *dinlemeye hazır paketi* (Clear-to-Sent,CTS) yayınlanır. Bu paket ile de her röle hedef ile arasındaki kanalın sönümleme katsayısı olan h_{iD} değerini kestirir. Kaynak hedeften gönderilen CTS paketini dinlemek zorunda değildir [4]. Her röle, kestirdiği kanal sönümleme katsayıları olan h_{Si} ve h_{iD} ile kendisinin en iyi röle olup olmadığını anlamaya çalışır. Bunun için bu büyüklükler yardımı ile birtakım işlemler yapar ve kendine ait bir h_i değeri hesaplar .

$$h_i = min\{|h_{Si}|^2 \mid |h_{iD}|^2\} \ , i \in \{1,2,3,\dots M\} \qquad \textbf{(4.5)}$$

olmak üzere her röle kaynak ya da hedefle arasındaki kanallardan en küçük sönümleme katsayısını h_i değeri olarak saklar. Röle saatleri başlangıçta aynı α değerine ayarlanmış durumdadır. Her röle hesapladığı bu h_i değerine göre kendi saatini $T_i = \alpha/h_i$ değerine ayarlar ve saat bu değerden geri saymaya başlar. Saati en

önce sonlanan röle kendisinin en iyi röle olduğunu bildiren bir bayrak paketini (Flag Packet, FP) kaynağa, hedefe ve diğer rölelere yollar. Paketleri alan röleler saatlerini tekrar α değerine ayarlarlar ve bir sonraki iletim için kaynaktan ve hedeften RTS ve CTS paketlerini beklemeye başlarlar. $T_i = \alpha/h_i$ eşitliğinden görüldüğü gibi saati en çabuk sonlanan röle h_i değeri en büyük olan röledir. Böylece en iyi röle belirlenmiş olur [4].

Şekil 4.1'de temel fırsatçı iletişim modelinin iki fazı görülmektedir. Bu modele ait servis dışı kalma olasılığı [20];

$$P_{out} = (1 - exp(-\lambda_{SD} 2\mu)) \prod_{i=1}^{M} [1 - exp(-\lambda_i \mu)] \quad \textbf{(4.6)}$$

olmaktadır. Burada $\mu = (2^{2R} - 1)/SNR$ şeklindedir. Ayrıca;

$$\lambda_i = \left(\frac{\lambda_{Si}}{(1/2)} + \frac{\lambda_{iD}}{(1/2)} \right) \quad \textbf{(4.7)}$$

şeklinde ifade edilir.

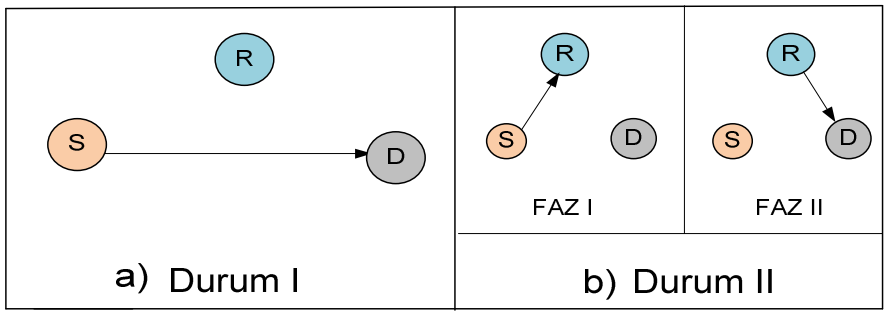
4.3 Geliştirilmiş Fırsatçı İletişim

Temel fırsatçı iletişimde, kaynak en iyi kanala sahip olan röleyi kullanarak eline geçen fırsatı değerlendirmiş olur. Ancak her zaman kaynak-hedef arasındaki doğrudan kanal, en iyi rölenin sağlayacağı kanaldan kötü olmayabilir. Bu durumda kaynak için röle ile işbirliği yapmak başarımı düşürecektir. Bu çalışmada, kaynağa da bir saat eklenmekte ve böylece kaynak-hedef arasındaki kanalın niteliği ölçülmeye çalışılmaktadır. Kaynak ve hedef arasındaki kanalın niteliğine göre işbirliği yapılıp yapılmayacağına karar verilmektedir. Kaynak-hedef arası doğrudan kanal, rölenin oluşturduğu kanallardan daha iyi ise işbirliğine gerek olmadığına karar verilmekte ve iletişim tek fazda tamamlanmaktadır. Bu da iletişim hızının artması anlamına gelmektedir.

Ayrıca bu çalışmada, temel işbirlikli iletişimin tersine, hedef, iletişimin iki fazında da dinleme durumunda olmak zorunda değildir. Son zamanlarda, işbirlikli çeşitleme konularında iletim gücünü optimize etme problemi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak gerçek iletişim sistemlerinde, bir düğümün iletim durumunda

harcadığı güç, dinleme ve bir işlem gerçekleştirdiği meşgul durumlarında harcadığı güce hemen hemen eşdeğerdir. Örneğin 4.74 V ile çalışan 802.11 arabirim kartı iletim durumunda 284 mA, dinleme durumunda 190 mA, bir işlem gerçekleştirdiği meşgul durumunda 156 mA harcar. Kart uyku durumunda iken ise yalnızca 10mA harcamaktadır. Bu nedenle gücün verimli kullanıldığı bir telsiz iletişim sistemindeki düğümler gerekmediği sürece dinleme, iletim ve meşgul durumlarında olmamalıdır. Düğümün uyku durumunda bulunma periyodunu artırmak, güç verimliliğini artırmak anlamındadır [21].

4.3.1 İletişim Modeli



Şekil 4.2 : Geliştirilmiş fırsatçı iletişim durumları.

Geliştirilmiş fırsatçı iletişim şöyle gerçekleşmektedir: kaynak tarafından temel fırsatçı iletişimde olduğu gibi bir RTS paketi yayınlanır. Bunu alan röleler kendisi ile kaynak arasındaki kanal sönümleme katsayısı olan h_{Si} değerini kestirir. Hedef tarafından yayınlanan CTS paketi ile de her röle hedef ile arasındaki kanalın sönümleme katsayısı olan h_{iD} değerini kestirir. Bu aşamada kaynak tarafından da CTS paketi alınır ve böylece kaynak da kendisi ile hedef arasındaki kanalın sönümleme katsayısı olan h_{SD} değerini kestirir. Bu yapıda, kaynak ve rölelerde birer saat olduğunu belirtmiştik. Bu saatlerin hepsi başlangıçta α değerine ayarlıdır. Kaynak ve röleler kanal durum bilgilerini elde ettikten sonra bu bilgileri kullanarak saatlerini çalıştırmaya başlarlar. i. röle saatinin başlangıç değerini aşağıdaki şekilde ayar:

$$h_i = min\left\{\frac{1}{2}|h_{Si}|^2 \middle| \frac{1}{2}|h_{iD}|^2\right\}, i \in \{1,2,\dots M\}, \quad \textbf{(4.8)}$$

$$T_i = {}^{\alpha}/_{h_i} \quad . \quad \textbf{(4.9)}$$

Kaynak ise saatinin başlangıç değerini;

$$T_s = {}^{\alpha}/_{h_s} \quad \textbf{(4.10)}$$

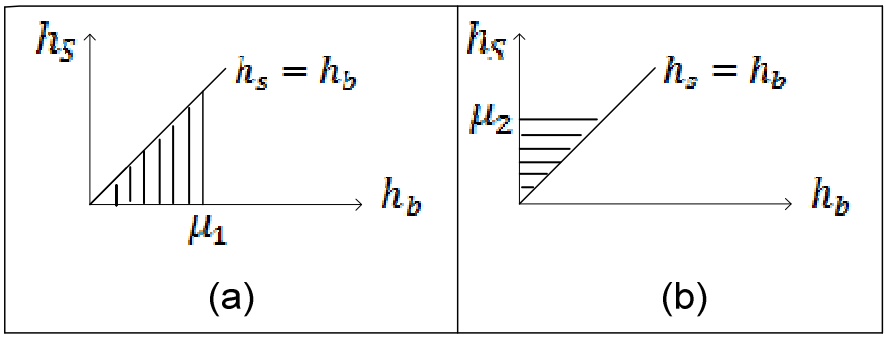
olarak ayarlar. Burada;

$$h_s = |h_{SD}|^2 \quad \textbf{(4.11)}$$

şeklindedir. Röleler ve hedef, saatlerini ayarladıkları bu T_i ve T_s değerlerinden geriye doğru saymaya başlarlar. Saati en önce sonlanan düğüm bir bayrak paketi (FP) yayınlar. Bayrak paketini alan tüm düğümler saatlerini durdurur ve iletişimde yer almayacaklarını anlarlar. Bayrak paketini alan hedef ise bayrak paketinin kaynaktan mı yoksa röleden mi alındığını anlar. Hedef bayrak paketini röleden almış ise iletişim röle üzerinden Şekil 4.2b'de gösterildiği gibi iki fazlı olarak gerçekleşecektir. İletişimin iki fazlı olarak gerçekleşeceğini anlayan hedef ilk zaman aralığında kaynak yayınını dinlemek zorunda değildir. Hedef ilk zaman aralığında uyku durumundadır. İkinci zaman aralığında dinleme durumuna geçer bu da iletişimde gücün verimli kullanılması anlamına gelir. Düğümlerin uyku durumunda kalma periyodunu artırmak gücün verimli kullanılmasını sağlar. Hedef, bayrak paketini kaynaktan aldığında iletişim kaynak ve hedef arasındaki doğrudan kanal yardımıyla Şekil 4.2a'da görüldüğü gibi gerçekleşir. İkinci bir faza gerek duyulmaz. Buna göre, bayrak paketini kaynaktan alan hedef iletişimin tek fazlı olarak gerçekleşeceğini de anlamış durumdadır. Hedefin tekrar bir paket yayınlayarak rölelere iletişimde yer almayacaklarını söylemesine gerek yoktur. Çünkü saati ilk biten kaynağın yayınladığı bayrak paketi tüm röleler tarafından da alınmış durumdadır. Bu paketi alan röleler işbirliğinde yer almayacaklarını anlamış, saatlerini sonlandırmış ve uyku durumuna geçmişlerdir. Bu durumda, iletişim tek fazlı olarak gerçekleştiği, ikinci bir faza gerek duyulmadığı için hız artmıştır. Ayrıca rölelerin dinleme durumunda kalmasına gerek kalmamıştır. Yani röleler uyku durumuna geçmiştir. Böylece iletişimde güç artırımı sağlanmıştır. Burada dikkati çeken bir nokta ise röle seçiminde (4.8) ifadesindeki ½ katsayılarıdır. Bu katsayılar Şekil 4.2' de gösterilen *Durum I* in oluşması halinde, iletişim esnasında toplam gücün yarısının kaynak-röle arasında, yarısının röle-hedef arasında harcanacağı anlamındadır. $|h_{Si}|^2$ ve $|h_{iD}|^2$ değerlerine ait katsayıların birbirine eşit olması nedeniyle en iyi röle seçimi bundan etkilenmez. Ancak bu çalışmada tek başına en iyi röleyi belirlemek yeterli değildir.

Burada en iyi röleyi belirlemenin yanı sıra iletişimin işbirlikli ya da işbirliksiz (doğrudan) gerçekleşeceğini de belirlemek önemlidir. Bunun için hedefin saatini röle saatleri ile adil bir şekilde karşılaştırmak ve tüm saatleri uygun bir başlangıç değerine ayarlamak gerekir. Bu adil karşılaştırmayı sağlayabilmek için h_i değerinin belirlenmesinde ½ katsayısı kullanılmıştır.

4.3.2 Servis dışı Kalma Olasılığı



Şekil 4.3 : Olasılık bölgeleri . (a) $P(h_b < h_s < \mu_1)$ (b) $P(h_s < h_b < \mu_2)$

Kanal sönümleme katsayılarının rastlantısal olması nedeniyle göz önüne alınan kanalın sığası C, bir rastlantı değişkenidir. Belirli bir anda veri iletim hızı *R'* nin kanal sığasının üzerine çıkması, alıcıdaki hata olasılığının 1'e yaklaşması anlamındadır. Bu nedenle *C<R* olayına servis dışı kalma olayı, bu olayın olasılığına da servis dışı kalma olasılığı, denir. Bu bölümde önerilen iletişim modeli için bu olasılık hesaplanacaktır.

Röle saatinin başlangıç değerini belirleyen ve denklem (4.8) ile tanımlanan h_i bir rastlantı değişkenidir. Bu rastlantı değişkeni iki üstel dağılımlı rastlantı değişkeninin minimumudur. Bu durumda h_i rastlantı değişkeni de üstel dağılımlıdır ve parametresi kendini oluşturan iki rastlantı değişkeninin parametreleri toplamıdır. Buna göre h_i rastlantı değişkenin olasılık yoğunluk işlevi;

$$p_{h_i}(x) = \lambda_i exp(-\lambda_i x) \quad , x \geq 0 \qquad \textbf{(4.12)}$$

olasılık dağılım işlevi;

$$F_{h_i}(x) = 1 - exp(-\lambda_i x) \ , x \geq 0 \qquad \textbf{(4.13)}$$

şeklindedir.

Bu denklemlerdeki x ile h_i' nin olurlu değeri gösterilmektedir. Ayrıca λ_i (4.7)'deki şekliyle kullanılmıştır.

En iyi rölenin, en büyük h_i değerine sahip olan röle olduğu (4.9)'dan görülmektedir. Buna göre en iyi röle için $h_b = \max_i h_i$ şeklinde olacaktır. Burada h_b bir rastlantı değişkenidir. M röle olduğu durumda h_b rastlantı değişkenine ilişkin olasılık dağılım işlevi;

$$F_{h_b}(x) = \prod_{i=1}^{M} [1 - exp(-\lambda_i x)] \quad , x \geq 0 \tag{4.14}$$

şeklinde olacaktır. Yol kaybı olmadığı durumda $\forall i \ \lambda_i = \lambda$ olacağından, h_b rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk işlevi (4.15)'deki gibidir.

$$p_{h_b}(x) = M\lambda exp(-\lambda x) * (1 - exp(-\lambda x))^{M-1}, x \geq 0 \tag{4.15}$$

Burada x, h_b rastlantı değişkeninin olurlu değerini göstermektedir. Kaynak saati ise denklem (4.10) ve (4.11)'de görüldüğü şekilde belirlenmektedir. Burada h_s rastlantı değişkeni de üstel dağılımlıdır. h_s rastlantı değişkeninin olasılık yoğunluk işlevi;

$$p_{h_s}(y) = \lambda_{SD}\, exp(-\lambda_{SD} y) \quad , y \geq 0 \tag{4.16}$$

şeklindedir.

h_s rastlantı değişkeninin olasılık dağılım işlevi;

$$F_{h_s}(y) = 1 - exp(-\lambda_{SD} y) \quad , y \geq 0 \tag{4.17}$$

şeklindedir. Burada y, h_s rastlantı değişkenin olurlu değerini göstermektedir. Son olarak h_s ve h_b rastlantı değişkenlerinin ortak olasılık yoğunluk işlevini tanımlayalım. Bu değişkenler birbirinden istatistiksel bağımsızdır. Buna göre h_s ve h_b'ye ait ortak olasılık yoğunluk işlevi (4.18)'de verilmektedir.

$$\begin{aligned} p_{h_b,h_s}(x,y) &= p_{h_b}(x) * p_{h_s}(y) \\ &= \lambda_{SD} \exp(-\lambda_{SD} y) * M\lambda exp(-\lambda x)\ (1 - \exp(-\lambda x))^{M-1} \quad x, y \geq 0 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Tüm bu rastlantı değişkenlerini tanımladıktan sonra servis dışı kalma olasılığını hesaplayalım. Servis dışı kalma olasılığı, Şekil 4.2'de gösterilen Durum I ve Durum

II için hesaplanan koşullu olasılıkların, bu durumların oluşması olasılıkları ile çarpılarak toplanması ile elde edilir. Servis dışı kalma olasılığı (4.19)'daki gibidir.

$$P_{out} = P_{out}(Durum\ I \mid h_s > h_b)P(h_s > h_b) + P_{out}(Durum\ II \mid h_s < h_b)P(h_s < h_b) \quad \textbf{(4.19)}$$

Durum I için koşullu olasılık (4.20)'deki gibidir.

$$\begin{aligned} P_{out}(Durum\ I \mid h_s > h_b) &= P\{log_2(1 + SNR|h_{SD}|^2) < R \mid h_s > h_b\} \\ &= P(h_S < \mu_1 \mid\ h_s > h_b) \\ &= \frac{P(h_b < h_S < \mu_1)}{P(h_s > h_b)} \end{aligned} \quad \textbf{(4.20)}$$

(4.20)'de görülen koşullu olasılığı Durum I in oluşması olasılığı ile çarparsak;

$$P_{out}(Durum\ I \mid h_s > h_b)P(h_s > h_b) = P(h_b < h_S < \mu_1) \quad \textbf{(4.21)}$$

elde edilir. Burada $\mu_1 = (2^R - 1)/SNR$ şeklindedir. Benzer şekilde *Durum II* için koşullu olasılık incelenirse (4.22) ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} &P_{out}(Durum\ II \mid h_s < h_b) \\ &= P\left\{\frac{1}{2}log_2(1 + SNR|h_{Sb}|^2) < R \cup \frac{1}{2}log_2(1 + SNR|h_{Sb}|^2) < R \;\middle|\; h_S < h_b\right\} \\ &= P(h_b < \mu_2 \mid\ h_S < h_b) = \frac{P(h_S < h_b < \mu_2)}{P(h_S < h_b)}\ . \end{aligned} \quad \textbf{(4.22)}$$

(4.22)'de görülen koşullu olasılığı *Durum II* nin oluşması olasılığı ile çarparsak;

$$P_{out}(Durum\ II \mid h_s < h_b)P(h_s < h_b) = P(h_S < h_b < \mu_2) \quad \textbf{(4.23)}$$

elde edilir.

Burada $\mu_2 = (2^{2R} - 1)/SNR$ biçimindedir. Sonuç olarak servis dışı kalma olasılığı;

$$P_{out} = P(h_b < h_S < \mu_1) + P(h_S < h_b < \mu_2) \quad \textbf{(4.24)}$$

şeklinde ifade edilir. (4.24)'de görülen iki olasılığı hesaplayalım. h_b ve h_s rastlantı değişkenlerinin ortak olasılık yoğunluk işlevinin Şekil 4.3(a)'da görülen taralı alan üstünden integrali $P(h_b < h_S < \mu_1)$ olasılığına eşittir. Buna göre bu olasılık;

$$P(h_b < h_S < \mu_1) = \int_0^{\mu_1} \int_0^{x} p_{h_b,h_s}(x,y)dy\,dx \tag{4.25}$$

$P(h_s < h_b < \mu_2)$ olasılığı ise h_b ve h_s rastlantı değişkenlerinin ortak olasılık yoğunluk işlevinin Şekil 4.3b'de görülen taralı alan üstünden integraline eşittir. Buna göre;

$$P(h_s < h_b < \mu_2) = \int_0^{\mu_2} \int_0^{y} p_{h_b,h_s}(x,y)dx\,dy \tag{4.26}$$

yazılır. $M = 3$ röle için bu integralin sonuçu (4.27) ve (4.28)' de verilmiştir.

$$P(h_b < h_S < \mu_1) = \frac{1}{195}\begin{pmatrix} 128 + 15\,exp(-13\mu_1) - 65\,exp(-9\mu_1) \\ +117\,exp(-5\mu_1) - cosh(\mu_1) + sinh(\mu_1) \end{pmatrix} \tag{4.27}$$

$$P(h_S < h_b < \mu_2) = \begin{pmatrix} \frac{67}{195} + \frac{12\exp(-13\mu_2)}{13} - exp(-12\mu_2) - \frac{8exp(-9\mu_2)}{3} + \\ 3\,exp(-8\mu_2) + \frac{12\exp(-5\mu_2)}{5} - 3\exp(-4\mu_2) \end{pmatrix} \tag{4.28}$$

4.3.3 Hızlanma Oranı

Geliştirilmiş fırsatçı iletişim yönteminde, temel fırsatçı iletişim yöntemine göre hızlanma görülür. Bunun nedeni, geliştirilmiş fırsatçı iletişimde tek fazlı iletimin de söz konusu olmasıdır. Kaynak hedef arası kanal röle kanallarından daha iyi ise iletim işbirliksiz olarak gerçekleşir. Bu durumda iletişim için tek bir zaman aralığı yeterlidir.

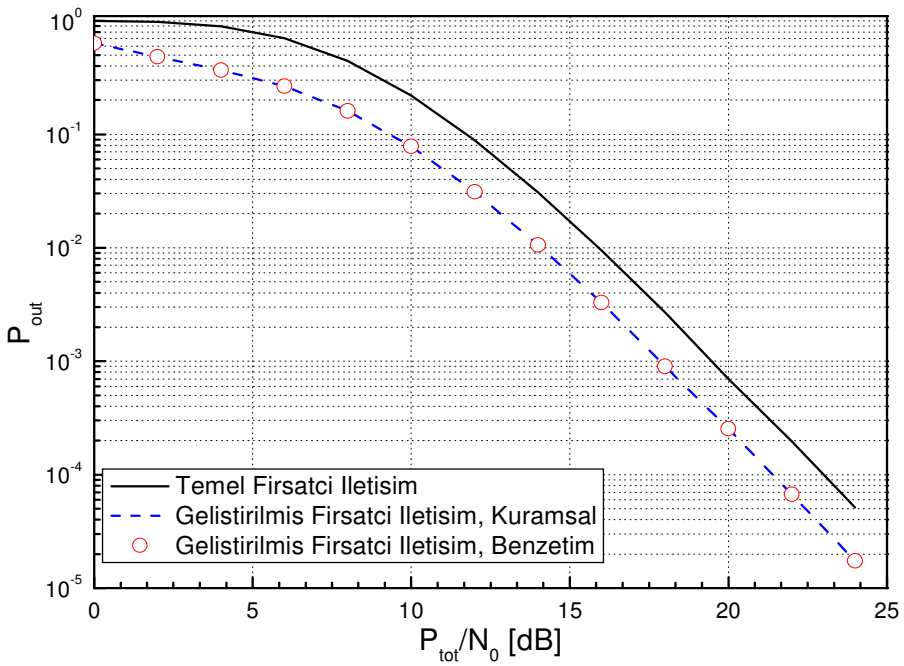
Öyleyse bu modelin temel fırsatçı iletişime göre hızlanma oranı;

$$P(h_b < h_s) = P(h_b - h_s < 0) = \int_0^{\infty} \int_0^{y} p_{h_b,h_s}(x,y)dxdy \tag{4.29}$$

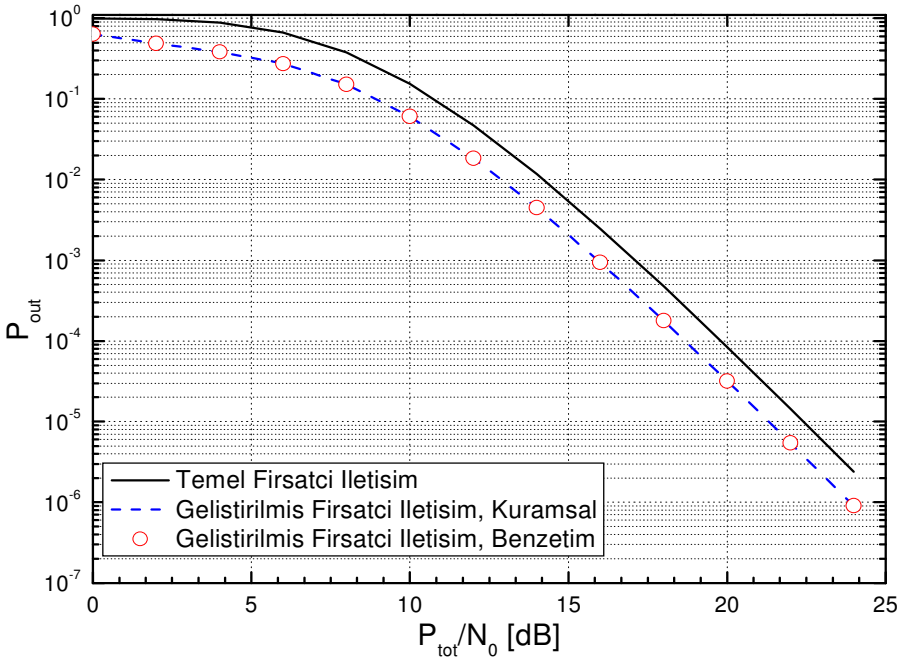
olarak ifade edilir.

4.3.4 Başarım Değerlendirmesi

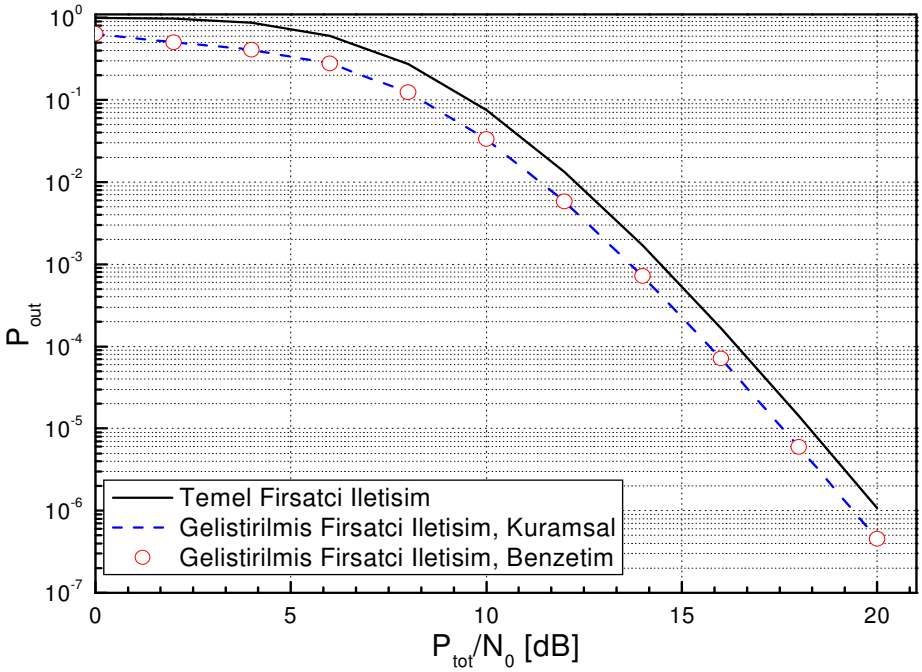
Bu bölümde iki, üç ve beş röle olduğu durumlar için temel fırsatçı iletişim yöntemi ve geliştirilmiş fırsatçı iletişim yönteminin servis dışı kalma olasılıkları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar yapılırken R=1bps/Hz olarak seçilmiştir. Ayrıca, kanal sönümleme katsayılarının varyansları 1 olarak seçilmiş ve böylece yol kaybının olmadığı kabul edilmiştir ($1/\lambda_{AB} = 1$). Şekil 4.4-4.6'dan servis dışı kalma olasılığının geliştirilmiş fırsatçı iletişim yönteminde daha düşük olduğu görülmektedir. İki röle için geliştirilmiş fırsatçı iletişim yaklaşık 1.6dB'lik iyileşme sağlamıştır. Servis dışı kalma olasılığının iyileşmesinin yanı sıra tek fazlı iletim de gerçekleşebildiği için hızda da artış söz konusudur. Röle sayısı iki olduğu için geliştirilmiş fırsatçı iletişim yönteminin temel fırsatçı iletişim yöntemine göre hızlanma oranı %71 mertebelerindedir. Üç röle olduğu durumda servis dışı kalma olasılığı açısından Şekil4.5'den de görüldüğü üzere yaklaşık 1.1 dB iyileşme sağlanmıştır. Hızda ise %65 oranında artış sağlanmıştır. Röle sayısı 5'e çıkarıldığında servis dışı kalma olasılığında yaklaşık 0.7dB'lik iyileşme görülmüştür. Hızlanma oranı ise %59 olmuştur.



Şekil 4.4 : 2 röle için servis dışı kalma olasılıkları.



Şekil 4.5 : 3 röle için servis dışı kalma olasılıkları.



Şekil 4.6 : 5 röle için servis dışı kalma olasılıkları.

5. TOPLAMSAL MODÜLASYONLU İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM

Buraya kadar anlatılan işbirlikli çeşitleme protokolleri zaman bölmeli iletişime dayanmaktaydı. Yani kaynak kullanıcı kendisi için ayrılmış olan zaman dilimini iki faza ayırır. Birinci fazda kullanıcı kendine ait işareti iletirken ikinci fazda işbirliği içinde bulunduğu kaynağın işaretini iletir. Bu yöntemle çeşitleme derecesi artırılmış ve sistemin servis dışı kalma olasılığı (outage probability) azaltılmıştır. Ancak, bu şekilde çalışan bir sistem spektral verimliliği azalmaktadır.

İşbirlikli iletişimdeki spektral verimliliği artırmak için [5,22,23]'da çeşitli işbirliği yöntemleri önerilmiştir. [22,23]'da önerilen yöntemde, kaynak kullanıcının aynı anda iletim ve dinleme yapmasına olanak verilmiştir. Bölüm 3.2'de tam çift yönlü aktarım başlığı altında anlattığımız bu yöntemin girişim gibi bazı kısıtlarının bulunduğundan ve ortam erişim kontrolü açısından problemler oluşturduğundan bahsedilmiştir.

Spektral verimliliği artıran diğer bir protokol [5]'da önerilmiştir. Bu protokolde, kullanıcı hem kendi işaretini hem de kaynağın işaretini aynı anda iletir. Bunu sağlamak için kendi işaretini daha yüksek bir güç katsayısı ile, aktaracağı işareti ise daha düşük bir güç katsayısı ile çarparak toplar ve gönderir. Bu yönteme toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim (superposition modulated cooperative diversity) denilmektedir.

Bu bölümde toplamsal modülasyonlu (TM) işbirlikli iletişimden bahsedilecektir.

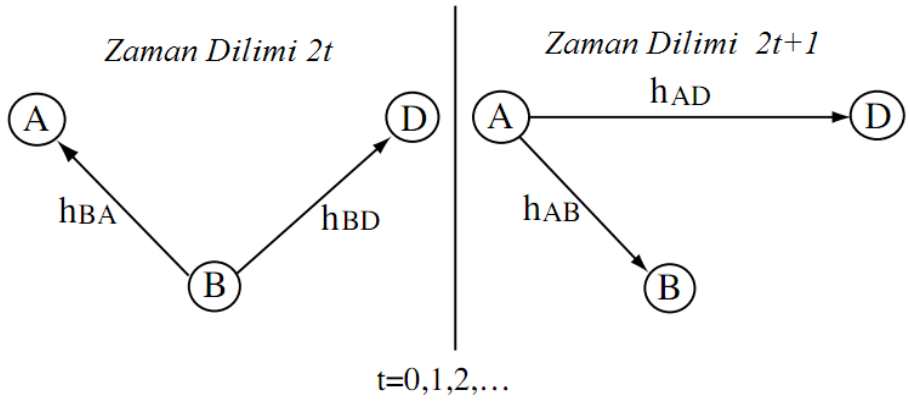
5.1 Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli İletişim Sistem Modeli

$\{A_k, B_k\}$ paketlerini D ile adlandırılan kaynağa gönderilen A , B iki kullanıcılı telsiz iletişim ortamını düşünelim. Bu iletişim yönteminde kullanıcı, kendi işaretini ve aktaracağı işareti belli güç katsayıları ile çarptıktan sonra toplayarak gönderir.

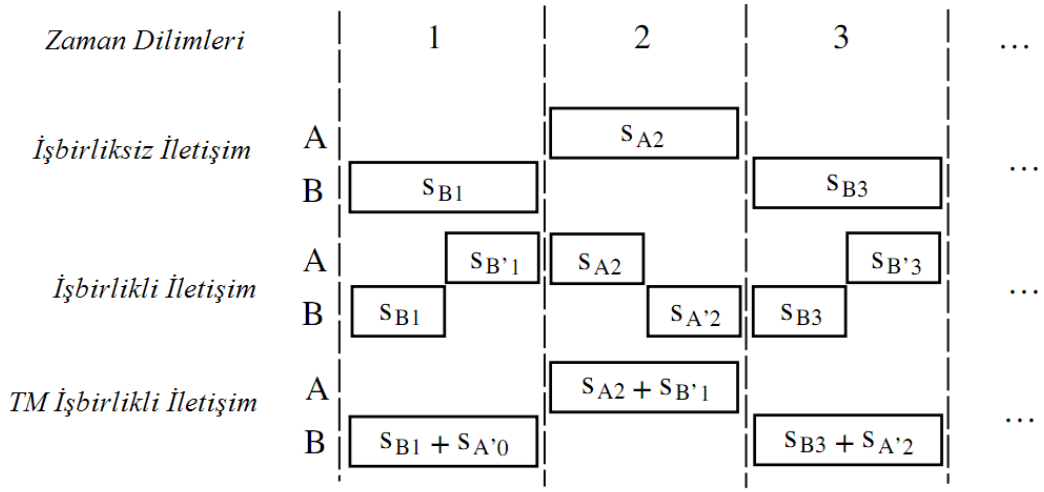
Toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim iki zaman diliminde gerçekleşir. Şimdi bu zaman dilimlerindeki iletişimin ayrıntılarını inceleyelim.

Birinci Zaman Dilimi: Birinci zaman diliminde B kullanıcısı kendisine ait B_1 veri paketini bir önceki zaman diliminde A kullanıcısından almış olduğu A_1' veri paketi

ile toplayarak gönderir. B düğümü kendine ait veri paketi için $1-\gamma^2$ gücünü kullanırken, işbirliği içinde olduğu A kullanıcısının veri paketi için γ^2 kadar güç harcar. B düğümü tarafından tüm iletişim için birim güç harcanır.



Şekil 5.1 : Kaynak, hedef ve röle arasındaki kanal modellerinin gösterimi.



Şekil 5.2 : İşbirliksiz iletişim, işbirlikli iletişim ve toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin zaman dilimlerindeki iletimlerinin gösterimi.

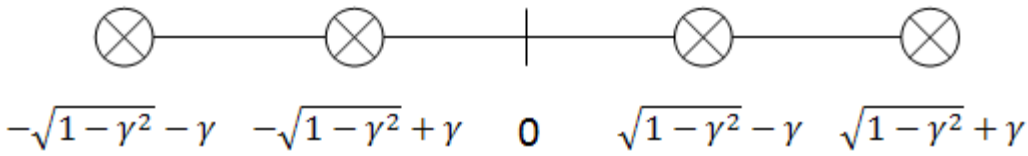
Hedef (D) ve A düğümü tarafından alınan işaretler:

$$y_{D_1}(t) = h_{BD}\left[\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)s_{B_1}(t) + \gamma s_{A_0'}(t)\right] + e_{D_1}(t)\ , \qquad \textbf{(5.1)}$$

$$y_{A_1}(t) = h_{BA}\left[\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)s_{B_1}(t) + \gamma s_{A_0'}(t)\right] + e_A(t)\ . \qquad \textbf{(5.2)}$$

şeklindedir. Burada $s(t)$ iletilen işaret, h_{BA} kanalın sönümleme katsayısını ve $e(t)$ toplamsal gürültüyü göstermektedir.$(.)_1$ ile de birinci zaman dilimi gösterilmiştir. Burada $s_{B_1}(t)$ ve s'_{A_0} modüle edilmiş işaretlerdir. Bu işaretleri düğümden bağımsız

olarak inceleyelim. Herhangi bir X kullanıcısının l.ci veri paketi $s_{X,l} = \left(s_{X,l,1}, s_{X,l,2}, \dots, s_{X,l,L}\right)$ şeklinde göstersin. Her veri paketi L adet simgeden oluşur. n.ci simge $s_{X,l,n}$ şeklinde gösterilir ve $b_{X,l,n}^{k}$ bilgi bitlerinin kodlanmış ve modüle edilmiş halidir. Burada $k = 1,2, \dots, M$ şeklindedir. Şekil 5.4'de s_{B_1} ve $s_{A_1'}$ BPSK modülasyonlu olduğu durumda $\left\{\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)s_{B_1}(t),\ \gamma s_{A_0'}(t)\right\}$ 'in uzaydaki olası konumları verilmiştir.



Şekil 5.3 : $s_1 = \pm 1$ ve $s_2 = \pm 1$ olduğu durumda $\sqrt{1-\gamma^2}s_1 + \gamma s_2$ 'nin işaret uzayındaki olası değerleri.

A düğümü 1. Zaman dilimi sonunda aldığı $y_{A_1}(t)$ işaretinden B_1simgesini Şekil5.5'de görülen alıcı yardımı ile çözer. Bu alıcı bir kanal çözücü ve bir yumuşak MAP demodülatörüne sahiptir. Burada dikkat çeken bir nokta A düğümünün A_0 simgesini kolayca çözebileceğidir. Çünkü orijinal A_0simgesi A düğümü tarafından iki zaman dilimi önce iletilmiştir. Dolayısı ile A düğümü A_0 simgesinin orijinal halini zaten bilmektedir.

<u>İkinci zaman dilimi</u>: İkinci zaman diliminde A düğümü A_2 simgesini iletecektir. Bu zaman diliminde *A* düğümü bir önceki zaman diliminde çözmüş olduğu B_1işaretini (B_1 işaretinin çözülmüş hali doğru ve yanlış çözülme durumu söz konusu olacağı için B_1' olarak adlandırılacaktır.) A_2 ile toplayarak gönderir. Birinci zaman diliminde olduğu gibi *A* düğümü kendi işareti olan A_2 paketi için $1-\gamma^2$ kadar güç harcarken B düğümünün bir önceki zaman diliminde göndermiş olduğu ve kendi çözmüş olduğu B_1' işareti için γ^2 kadar güç harcar. 2.zaman dilimi sonunda hedefte alınan işaret:

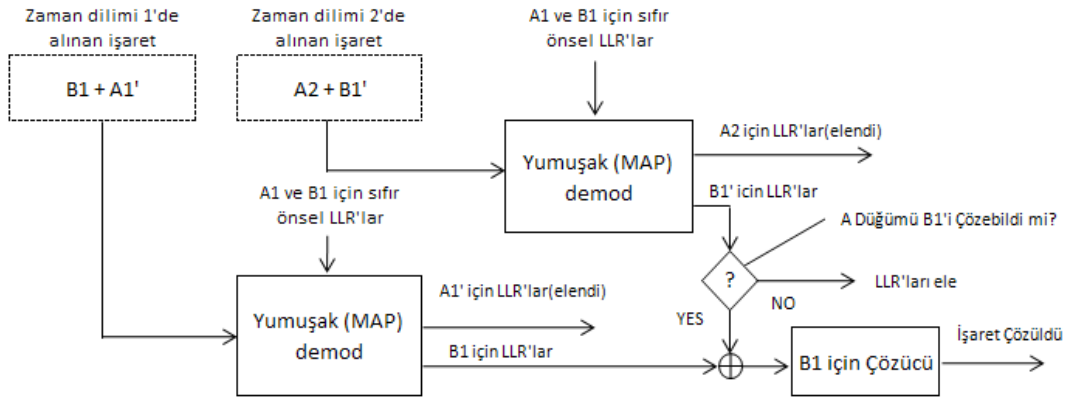
$$y_{D_2}(t) = h_{AD}\left[\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)s_{A_2}(t) + \gamma s_{B_1'}(t)\right] + e_{D_2}(t) \qquad \textbf{(5.3)}$$

şeklindedir. Hedefte Şekil 5.5'te görülen alıcı yapısı ile B_1 paketi $y_{D_1}(t)$ ve $y_{D_2}(t)$ alınan işaretleri kullanılarak çözülür. Şekil 5.5'de görülen yumuşak MAP demodülatörü (5.7) yardımı ile bilgi biti b_k için sonsal logaritmik olabilirlik oranını (pisteriori log likelihood ratio) hesaplar.

$$L(b_k|y)$$

$$= \log\left(\frac{\sum_{\{s_1,s_2\}\in S_\gamma:b_k=1} exp\left(\frac{1}{2\sigma^2}\left(y-\gamma h s_1-\sqrt{1-\gamma^2}hs_2\right)^2\right)P(s_1)P(s}{\sum_{\{s_1,s_2\}\in S_\gamma:b_k=0} exp\left(\frac{1}{2\sigma^2}\left(y-\gamma h s_1-\sqrt{1-\gamma^2}hs_2\right)^2\right)P(s_1)P(s}\right) \quad \textbf{(5.4)}$$

Burada, y alınan işarettir. $\{s_1, s_2\}$ ortak olarak demodüle edilen simgelerdir. h kanal kazancı ve σ^2 boyut başına gürültü varyansıdır. Ayrıca, $P(s_1)$ ve $P(s_2)$, s_1, s_2 simgelerinin önsel olasılıklarıdır (priori probobility).



Şekil 5.4 : $\mathbf{B_1}$ işareti için hedefteki alıcı yapısı .

İletişim, zaman dilimi 2 ve 3'de de A_1 paketini çözebilmek için aynı şekilde devam eder.

5.2 Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli iletişim Sistemlerinin Karmaşıklığı ve Başarımı

İşaret uzayındaki düzeyleri Şekil5.4'de verilen toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişlimin kullanıldığı ikili faz kaydırmalı anahtarlama (BPSK) modülasyonlu sistemi düşünelim.

Bu sistemde $\gamma^2 = 0.5$ için işaret uzayındaki düzeyler birbirine karışır. Benzer şekilde $\gamma^2 = 0$ için de toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modelinin hata başarımı işbirliksiz iletişimin hata başarımına denk hale gelir. Bu nedenle, $0 < \gamma^2 < 0.5$ seçilmelidir.

Toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modelinin çalışabilmesi için, B düğümü A düğümüne gönderdiği paketin toplamsal modülasyonlu olup olmadığını söylemek

durumundadır. Bu problem gönderilen her bir çerçeve içerisine bir tane bayrak biti yerleştirilerek çözülür. Bu eklenen bayrak bitinin sisteme getireceği yük çerçeve uzunluğunun büyüklüğüne bağlı olarak ihmal edilebilir. Bu bayrak biti de diğer bilgi bitleri gibi sistemin başarımının ölçüldüğü SNR değerinde kodlamasız BPSK modülasyonu ile gönderilebilir.

Sistem karmaşıklığı olarak klasik işbirlikli iletişim modeli ile toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modelinin aynı olduğu söylenebilir. Çünkü her iki modelde de iki alıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alıcılardan biri aktarım yapacak olan düğümde (örneğin A), diğeri ise hedeftedir. Bu alıcıların yapılarını detaylı inceleyebilmek için iki modelde hangi tür modülasyonların kullanıldığını bilmeliyiz. Örneğin toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modeli içim BPSK modülasyonu kullandığı durumda, klasik çöz-ve-aktar işbirlikli iletişim için 4-ASK kullanılmalıdır. Bunun nedeni, toplamsal modülasyonlu iletişimin spektral verimliliğinin iki kat daha iyi olmasıdır. Böylece sistem karmaşıklığı olarak toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim ile klasik işbirlikli iletişim modelinin karmaşıklıkları aynı olur.

5.3 Servis Dışı Kalma Olasılığı

Bu bölümde öncelikle işbirliksiz iletişim, klasik çöz ve aktar işbirlikli iletişim modellerinin servis dışı kalma olasılıkları ve çeşitleme dereceleri hesaplanacaktır. Sonrasında toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modelinin servis dışı kalma olasılığı hesaplanarak bu yöntemler karşılaştırılacaktır.

5.3.1 İşbirliksiz İletişim

Bir A düğümünden D alıcısına gönderilen işaret:

$$y_{non-coop} = h_{AD}s_A + e \tag{5.5}$$

şeklindedir. D'ye yapılan bu iletimin servis dışı kalma olasılığı:

$$\begin{aligned} P_{out-NC} &= P\{I(h_{AD}) < R\} \\ &= P\{\log(1 + SNR_{AD}|h_{AD}|^2) < R\} = P\left\{|h_{AB}|^2 < \frac{2^R-1}{SNR_{AD}}\right\} \end{aligned} \tag{5.6}$$

olarak tanımlanır. Kanal sönümleme katsayılarının (h_{AD}) rastlantısal olması nedeniyle göz önüne alınan kanalın sığası C, bir rastlantı değişkenidir. Belirli bir

anda veri iletim hızı R' nin kanal sığasının üzerine çıkması, alıcıdaki hata olasılığının 1'e yaklaşması anlamındadır. Bu nedenle $I(h_{AD}) < R$ olayına servis dışı kalma olayı, bu olayın olasılığına da servis dışı kalma olasılığı, denir. Burada $I(h_{AD})$ kanal sığasını göstermektedir. λ_{AD}^2 ile h_{AD} kanal sönümleme katsayısının varyansı gösterilmiştir. Kanal sönümleme katsayısı h_{AB}'nin Rayleigh dağılımlı olduğu kabul edilirse, $|h_{AB}|^2$ üstel dağılımlı olur. Bu durumda (5.9)'daki olasılık:

$$P_{out-NC} = 1 - \exp\left(\frac{\lambda_{AD}(2^R - 1)}{SNR_{AD}}\right) \quad \textbf{(5.7)}$$

şeklinde olur. Yüksek işaret gürültü oranlarında çeşitleme düzeyi aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$d \cong -\lim_{SNR\to\infty} \frac{\log(P_{out})}{\log(SNR)}. \quad \textbf{(5.8)}$$

5.3.2 Klasik Çöz-ve-Aktar İşbirlikli İletişim

İlk zaman diliminde A düğümünün B düğümüne iletim yaptığını düşünelim. Bu sistemde A,B düğümlerinin iletim güçleri ve iletim hızları aynı kabul edilsin. Ayrıca düğümler (A,B,D) arasındaki uzaklıkların etkisi göz önünde bulundurulmasın. Bu durumda iki kullanıcının bulunduğu klasik çöz ve aktar işbirlikli iletim sisteminin servis dışı kalma olasılığı;

$$P_{out-ÇA} = P_{out-NC}P_{NC} + P_{out-C}P_C \quad \textbf{(5.9)}$$

şeklinde tanımlanır. Burada işaretin A düğümünden B düğümüne iletilirken B düğümünde doğru çözülüp çözülemediği durumları söz konusudur. Bu durumda çöz ve aktar işbirlikli iletişim modelinin servis dışı kalma olasılığı, işbirlikli iletişim gerçekleştiği durumda servis dışı kalma olasılığı ve B düğümünün A dan gelen bilgiyi çözemediği durumda servis dışı kalma olasılıklarına bağlıdır. (5.12)'deki olasılıkları açıkladıktan sonra, bu olasılıkların hesaplamasını ele alalım.

P_{out-NC} ile işbirliksiz iletişim gerçekleştiği durumda (B düğümü A düğümünden gelen işareti doğru çözemediği durumda) servis dışı kalma olasılığı gösterilmiştir. Bu olasılık (5.10)'da hesaplanmıştır.

P_{NC} ile bir düğümden diğer düğüme (örneğin, B düğümünden A düğümüne) gelen işaretin doğru çözülememe olasılığı gösterilmiştir. Bu durumun ortaya çıkması için A ve B düğümleri arasındaki kanalda servis dışı kalma olayının gerçekleşmiş olması gerekir. Bu olayın olasılığı da:

$$P_{NC} = 1 - \exp\left(\frac{\lambda_{AB}(2^{2R}-1)}{SNR_{AB}}\right) \quad \textbf{(5.10)}$$

biçimindedir. P_{out-C} ile işbirlikli iletişim gerçekleştiği durumda servis dışı kalma olasılığı gösterilmiştir. Bu olasılık, A ve D arasındaki yolda ya da B ve D arasındaki yolda servis dışı kalma olayının oluşmasına bağlıdır.

$$P_{out-C} = \left(1 - \exp\left(\frac{\lambda_{AD}(2^{2R}-1)}{SNR_{AD}}\right)\right)\left(1 - \exp\left(\frac{\lambda_{BD}(2^{2R}-1)}{SNR_{BD}}\right)\right) \quad \textbf{(5.11)}$$

P_C ile işbirlikli iletimin gerçekleşme olasılığı gösterilmiştir. Bu olasılık:

$$P_C = 1 - P_{NC} = \exp\left(\frac{\lambda_{AB}(2^{2R}-1)}{SNR_{AB}}\right) \quad \textbf{(5.12)}$$

şeklindedir.

Bulduğumuz tüm bu olasılıkları (5.12)'de yerine yazarsak:

$$P_{out-\text{ÇA}} = \begin{pmatrix} \left(1 - \exp\left(\frac{\lambda_{AB}(2^{2R}-1)}{SNR_{AB}}\right)\right)\left(1 - \exp\left(\frac{\lambda_{AD}(2^{2R}-1)}{SNR_{AD}}\right)\right) + \\ \exp\left(\frac{\lambda_{AB}(2^{2R}-1)}{SNR_{AB}}\right)\left(1 - \exp\left(\frac{\lambda_{AD}(2^{2R}-1)}{SNR_{AD}}\right)\right) \\ \left(1 - \exp\left(\frac{\lambda_{BD}(2^{2R}-1)}{SNR_{BD}}\right)\right) \end{pmatrix} \quad \textbf{(5.13)}$$

Bu çalışmada kanal sönümleme katsayılarının varyansları birim olarak alınmıştır. Ayrıca, daha önce de belirtildiği gibi tüm SNR değerleri eşit olarak kullanılmıştır.

$$\lambda_{AB} = \lambda_{AD} = \lambda_{BD} = 1\ , \quad \textbf{(5.14)}$$

$$SNR_{AB} = SNR_{AD} = SNR_{BD} = SNR\ . \quad \textbf{(5.15)}$$

Bu kabullerle (5.16)'daki servis dışı kalma olasılığını tekrar yazarsak:

$$P_{out-ÇA} = \left(1 - \exp\left(\frac{(2^{2R}-1)}{SNR}\right)\right)^2 \left(1 + \exp\left(\frac{(2^{2R}-1)}{SNR}\right)\right) \quad \textbf{(5.16)}$$

ifadesini elde ederiz.

(5.19)'daki $P_{out-ÇA}$ servis dışı kalma olasılığını (5.11)'de yerine yazarsak çeşitleme derecesi (5.20)'deki gibi olur.

$$d_{ÇA} = \lim_{SNR\to\infty} \frac{\left(1 - \exp\left(\frac{(2^{2R}-1)}{SNR}\right)\right)^2 \left(1 + \exp\left(\frac{(2^{2R}-1)}{SNR}\right)\right)}{\log(SNR)} \quad \textbf{(5.17)}$$

5.3.3 Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli İletişim

(5.4), (5.5) ve (5.6) denklemlerini toplamsal modülasyonlu işbirliğinin gerçekleştiği ve gerçekleşmediği durumları da göz önüne alarak matrissel olarak tekrar yazmaya çalışalım.

$$y_{D_1}(t) = \begin{cases} h_{BD}\left[\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)s_{B_1}(t) + \gamma s_{A_0'}(t)\right] + e_{D_1}(t) & , |h_{AB}|^2 > \dfrac{2^{2R}-1}{SNR} \\ h_{BD}s_{B_1}(t) + e_{D_1}(t) & , |h_{AB}|^2 < \dfrac{2^{2R}-1}{SNR} \end{cases} \quad \textbf{(5.18)}$$

ve

$$y_{D_2}(t) = \begin{cases} h_{AD}\left[\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)s_{A_2}(t) + \gamma s_{B_1'}(t)\right] + e_{D_2}(t) & , |h_{AB}|^2 > \dfrac{2^{2R}-1}{SNR} \\ h_{AD}s_{A_2}(t) + e_{D_2}(t) & , |h_{AB}|^2 < \dfrac{2^{2R}-1}{SNR} \end{cases} \quad \textbf{(5.19)}$$

işaretlerini matrise yerleştirdiğimiz durumda:

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{H\Gamma s}(t) + \boldsymbol{e}(t) \quad \textbf{(5.20)}$$

biçiminde yazılabilir. Burada $\boldsymbol{y}(t) = \{y_{D_2}(t), y_{D_1}(t)\}^T$, $\boldsymbol{H} = diag\{h_{AD}, h_{BD}\}$,

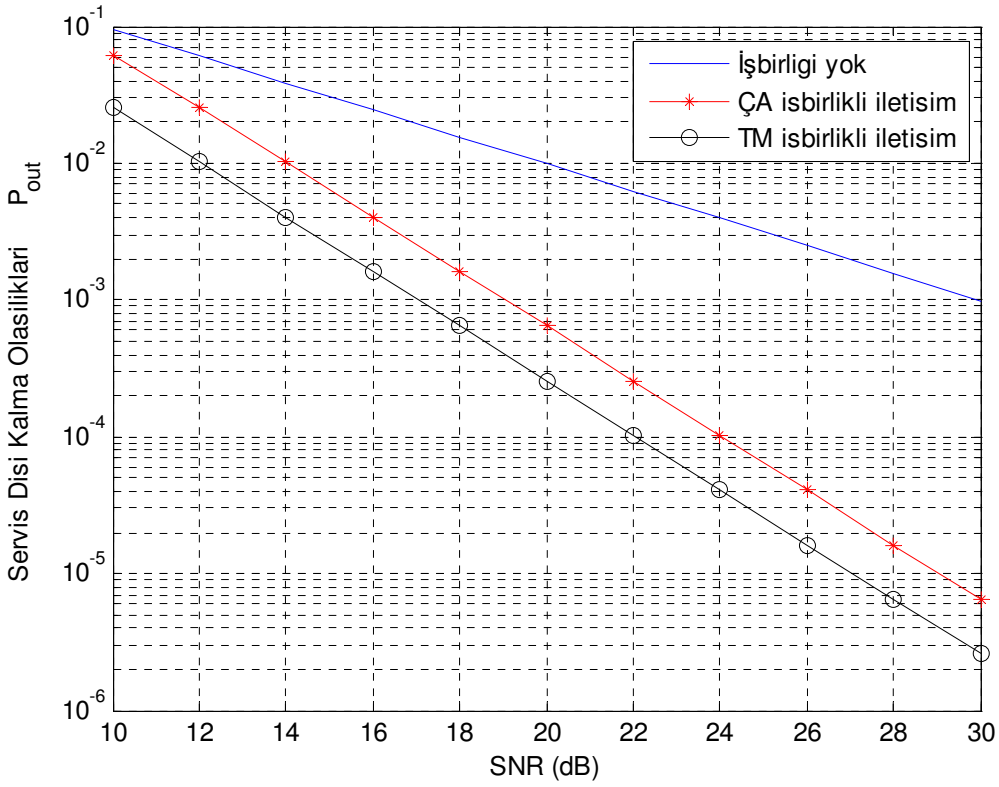
$\boldsymbol{e}(t) = \{e_{D_2}(t), e_{D_1}(t)\}^T$ ve $\boldsymbol{s}(t) = \{s_{A_2}(t), s_{B_1}(t), s_{A_1'}(t)\}^T$ şeklindedir. Burada $\boldsymbol{\Gamma}$ kanalın durumuna bağlı olarak değişir.

$$\Gamma_0 = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\gamma^2} & \gamma & 0 \\ 0 & \sqrt{1-\gamma^2} & \gamma \end{bmatrix} \quad , \qquad \Gamma_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{5.21}$$

şeklinde olur. Yüksek SNR değerleri için $P(\Gamma = \Gamma_0) \to 1$ olacaktır. Tüm bu bilinenlerden yola çıkılarak servis dışı kalma olasılığı [9]:

$$P_{out-TM} = \frac{1}{SNR^2 \lambda_1 \lambda_2} \left(1 + \exp\left(2\tilde{R}\ (2\tilde{R} - 1)\right)\right) \tag{5.22}$$

şeklindedir. Burada $\lambda_1 = 1 + \gamma\sqrt{1-\gamma^2}$, $\lambda_2 = 1 - \gamma\sqrt{1-\gamma^2}$ ve $\tilde{R} = R\ln(2)$ dir.



Şekil 5.5 : Toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim ve çöz-ve-aktar işbirlikli iletimin servis dışı kalma olasılıklarının karşılaştırılması.

5.3.4 Başarım Sonuçları

Bu bölümde işbirliksiz iletişim, klasik çöz-ve-aktar çeşitlemesi ve toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemlerinin servis dışı kalma olasılıkları karşılaştırılmıştır. Burada $R = 1bit/simge$ seçilmiştir. Ayrıca $\gamma = 0.1$ olarak alınmıştır. Şekil 5.6'da verilen eğriler için SNR(dB)=10 ve 30 arasında değişmektedir. Ayrıca bu benzetim için kullanıcı ve röle arasında hatasız iletim

yapıldığı varsayılmıştır. Şekil 5.6'dan da görüldüğü üzere, toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin ve klasik çöz-ve-aktar işbirlikli iletişim modellerinin çeşitleme dereceleri aynıdır ve 2'dir. Ayrıca 10^{-4} değeri için toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim klasik çöz ve aktar işbirlikli iletişimde yaklaşık 2dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

6. EŞLEMELİ TOPLAMSAL MODÜLASYONLU İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM

Çok giriş-çok çıkışlı (MIMO) sistemlerin avantajları yapılan araştırmalar sonucu ortaya konmuştur. Bu sistemlerin sağladığı avantajlar özellikle verici çeşitlemesi kullanılan yerlerde daha açık bir şekilde görülmüştür. Ancak verici çeşitlemesi gezgin birimler için boyut, maliyet ve donanım sınırlamaları nedeni ile uygulamada problem yaratmaktadır. Dağıtılmış telsiz iletişim sistemlerinde, işbirlikli çeşitleme ve röleler yardımı ile iletişim MIMO sistemlerin avantajlarını korumakta ve donanım büyüklüğü olarak getirdiği dezavantajı ortadan kaldırmaktadır. Dolayısıyla bu yapılar verici çeşitlemesini gezgin birimler için de uygulanabilir kılan sanal bir çok-giriş-çok çıkışlı sistem gibi düşünülebilir.

Bu bölümde, birden fazla kullanıcının bulunduğu iletişim senaryoları ele alınacaktır. Birden fazla kullanıcının bulunduğu ortamlarda iletişimi gerçekleştirmek için birçok yöntem önerilmiştir. *Dağıtılmış uzay zaman kodları* (DSTC) da bu yöntemlerden biridir [24]. Ancak, dağıtılmış uzay zaman kodlamasında, dağınık olarak bulunan birçok uç birimi kullanarak sanal anten dizileri oluşturmak önemli ölçüde koordinasyon gerektirir. Farklı birçok verici arasında eşzamanlama sağlamak için değişik algoritmalar kullanmak gerekir. Bu ek gereksinimler neredeyse iletişimin her katmanında yenilikler kaçınılmaz hale gelecektir. Birden fazla kullanıcının bulunduğu iletişim senaryoları için dağıtılmış uzay zaman blok kodlarına alternatif olarak *çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği (selection cooperation in multi-source networks)* yöntemi [10]'da önerilmiştir. Bu bölümde, çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi ayrıntılı olarak incelenecektir. Daha sonra bu yöntemden daha üstün başarıma sahip, aynı zamanda band verimliğini de artıran *eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim* yöntemi açıklanacaktır.

6.1 Çok Kullanıcılı Sistemlerde Seçimli İşbirliği

İşbirlikli iletişim modelinde kullanıcının kendi anten sayısını artırmadan başka kullanıcılarla işbirliği içerisine girip çeşitlemeli iletişim gerçekleştirdiğini biliyoruz.

İşbirlikli iletişimin sağladığı bu avantajdan yola çıkarak Beres [10]'da yeni bir yöntem önermiştir. Bu yöntem bu bölümde ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

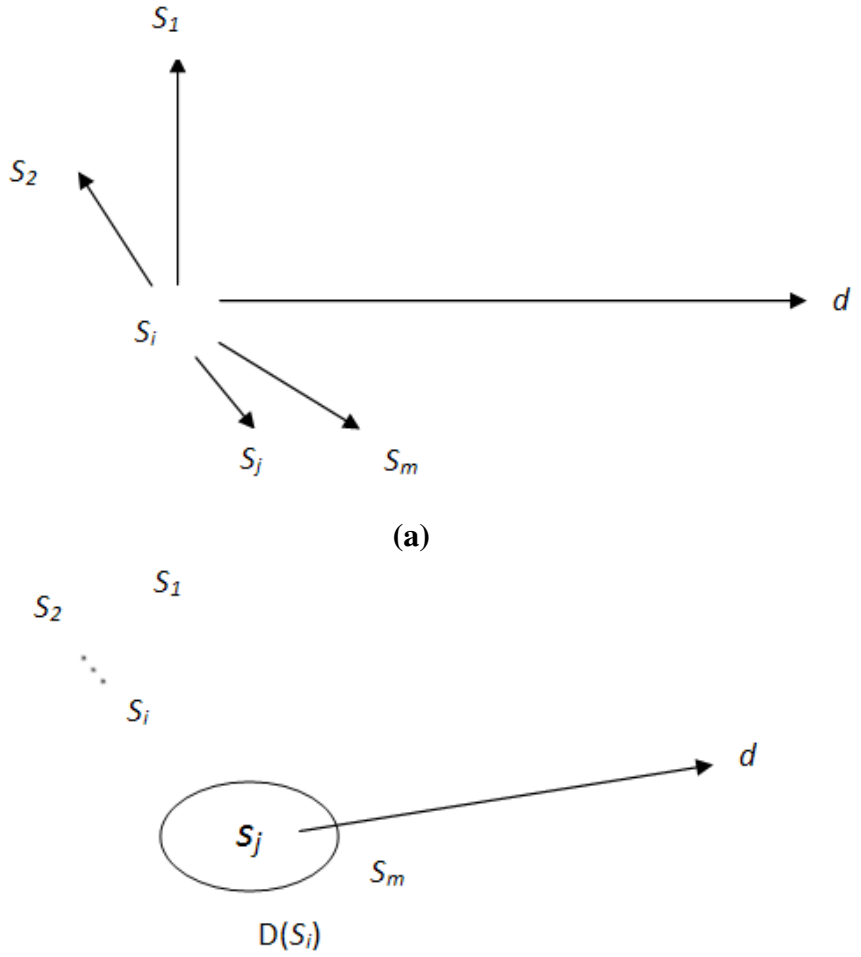
6.1.1 Sistem Modeli

Sistemde M kullanıcı olduğunu düşünelim. $s \in M$ olmak üzere, modelde s ile kaynak düğümler gösterilsin. d, sistemdeki hedef düğümü ifade etmek için kullanılsın. Ayrıca, r ile iletime yardımcı olan röle düğümleri ifade edilsin. Bu modelde, M kullanıcı içerisindeki her bir düğüm hedefe iletilecek bilgisi olan birer kaynak düğümüdür. Aynı zamanda, sistemdeki her bir düğüm iletişime yardımcı olacak potansiyel birer röledir. Bu modelde, her bir kullanıcı için P Watt kadar bir güç kısıtlaması vardır. Kullanıcı ister tek başına iletim yapsın, ister işbirliği ile iletimini gerçekleştirsin, ileteceği bilgi için kendi vericisinde ve rölede P Watt'dan fazla güç harcayamaz.

Seçimli işbirliği yapısında, kullanıcılar aynı anda iletişim yapabilmektedir. Bu, bir rölenin aynı anda birden fazla kaynağa işbirliği için yardım edebilir durumda olması anlamına gelir. Bir rölenin, aynı anda birden fazla kaynakla işbirliği yapıyor olması, röle seçimi sırasında güç kısıtlamasını da göz önünde bulundurmayı gerektirir [10]. Seçimli işbirliği modeli ile [4]'de önerilen model aynı gibi gözükmektedir. [4]'da yalnızca tek bir kaynak, olası $M-1$ röleden birini seçerek hedefe iletim yapmaktadır. Yani [4] modelinde tek bir zaman aralığında yalnızca bir kaynak iletim yapar. [10] modelinde ise kaynakların aynı anda iletim yapma yeteneği vardır. Ayrıca [4]'de bir röle yalnızca bir kaynak tarafından kullanılabilmektedir. Oysa ki [10]'da bir röle birden fazla kaynak tarafından en iyi röle olarak belirlenmiş olabilir.

Seçimli işbirliği modelinde iletişim iki zaman diliminde gerçekleşir. İlk zaman diliminde, kullanıcı hedefe ve diğer rölelere $P/2$ Watt'lık güç ile iletim yapar. Birinci zaman dilimi sonrasında $M-1$ röle işareti çözer. Her düğüm gönderilen işareti doğru çözüp çözmediğine karar verir. Eğer s_j, s_i'den gönderilen işareti doğru olarak çözdüyse kendisini s_i kaynağının gönderdiği işareti doğru çözen diğer düğümlerin de bulunduğu $D(s_i)$ kümesinin bir elemanı olarak ilan eder. $D(s_i)$ kümesinin n elemanlı olduğunu düşünelim. Yani gönderilen işareti doğru çözen n röle olsun. İkinci zaman diliminde, ilk zaman diliminde kullanıcı işaretini doğru çözen n röleden en iyisi belirli bir kurala göre seçilerek iletim bu röle yardımıyla gerçekleştirilir. İletişime yardımcı olacak röle, yardımcı olacağı tüm kaynaklar için

toplam $P/2$ Watt'lık güç harcayabilir. Bu rölenin k kullanıcıya yardımcı olacağı düşünülürse her bir kullanıcı için $P/2k$ Watt'lık güç harcayabilir. İletişim modeli Şekil 6.1'deki gibidir.



Şekil 6.1 : **(a)** I. zaman dilimi : s_i kaynağı $P/2$ Watt güç ile diğer kaynaklara ve hedefe iletim yapıyor. **(b)** II. zaman dilimi : $|D(s_i)| = n$ olmak üzere, $D(s_i)$ kümesi içerisinden en iyi röle seçilmiştir. En iyi röle $P/2\,k$ Watt güç ile hedefe iletim gerçekleştiriyor. (k; seçilen en iyi rölenin yardımcı olduğu toplam kaynak sayısıdır.)

6.1.2 Röle Seçim Yöntemleri

Sistem modeli başlığı altında en iyi rölenin belirli bir yöntemle seçildiği varsayılmıştır. Bu bölümde kaynakların ve rölelerin güç kısıtları göz önüne alınarak geliştirilen röle seçim yöntemlerinden ve bu yöntemlerin uygulama karmaşıklıklarından bahsedilecektir. Güç kısıtlamasının röle seçimi üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek için söyle basit bir örneği inceleyelim. İki kaynak

düğüm, s_1 ve s_2 aynı r rölesini kendileri için en iyi röle olarak belirlemiş olsun. r rölesinin toplamda yardımcı olacağı kaynaklar için harcayacağı güç $P/2$ kadardır. Ancak iki kaynak birden aynı r rölesini seçmiş olduğu için s_1 ve s_2 kaynaklarının her biri için harcayabileceği güç $P/4$'e düşer. Ancak, sistemde boşta olan ve $P/2$'lik güç harcayabilecek olan bir başka röle s_1 ve s_2 kullanıcılarından biri için daha iyi başarım sağlayacak olabilir. Bu nedenle kaynağa uygun röle atanması rölenin sahip olduğu güç de düşünülerek gerçekleştirilmelidir. [10] de röle-kaynak eşlemesi için 3 yöntem önerilmiştir. Bunlar, *optimum röle seçimi*, *sıralı röle seçimi* ve *dağıtılmış röle seçimi* yöntemleridir.

6.1.2.1 Optimum Röle Seçim Yöntemi

Bu alt başlıkta, çok kullanıcılı bir sistemde optimum röle seçim yöntemi ve bu yöntemin karmaşıklığı anlatılacaktır.

s_i kaynağı ve d hedefi arasında iletişim gerçekleşeceğini varsayalım. $r_{s_j} \in D(s_i)$ olsun. $r_{s_j} \in D(s_i)$ ile s_j kaynağının s_i kaynağı için röle görevini üstlendiği ve s_i kaynağının gönderdiği işareti doğru çözen röle kümesi içerisinde olduğu ifade edilmiştir. Buna göre, r_{s_j} rölesi kullanıldığı durumda s_i kaynağı ve d hedefi arasındaki karşılıklı bilgi miktarı;

$$I_{s_i d;r_{s_j}} = \frac{1}{2}\log\left(1 + SNR_1\left|h_{s_i,d}\right|^2 + SNR_2\left|h_{r_{s_j},d}\right|^2\right) \quad , i \in M \; ve \; j \in n \qquad \textbf{(6.1)}$$

şeklindedir. Burada $h_{s_i,d}$ ile s_i kaynağı ve d hedefi arasındaki, $h_{r_{s_j},d}$ ile de r_{s_j} rölesi ile d hedefi arasındaki kanal sönümleme katsayısı ifade edilmiştir. Buna göre herhangi iki A ve B düğümü arasındaki kanal sönümleme katsayısı karmaşık Gauss dağılımlı olarak;

$$h_{AB} \sim CN(0,1/\lambda_{AB}) \qquad \textbf{(6.2)}$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu modelde kanal sönümleme katsayısının ortalaması sıfır, varyansı $1/\lambda_{AB}$'dir. λ_{AB} yol kaybına bağlı bir parametredir. Yol kaybı olmadığı durumda varyans 1'e eşit olacaktır. Kanal gücü ise kanal sönümleme katsayısının karesi olarak ifade edilmiş olup istatistiksel bağımsız üstel dağılımlıdır. Kanaldaki işaret-gürültü oranları SNR_1ve SNR_2 olarak tanımlanmıştır. Burada SNR_1 kaynak ve

hedef ararsındaki yolun işaret gürültü oranı olup $(\frac{P}{2})/N_0$'a eşittir. SNR_2 ise röle ve hedef arasındaki yolun işaret gürültü oranıdır ve $(\frac{P}{2k})/N_0$'a eşittir. Burada k, r_{s_j} rölesinin işbirliği içinde bulunduğu toplam kaynak sayısını ifade eder.

$i = 1,2,3,\dots,M$ ve $r_{s_j} \in D(s_i)$ olmak üzere, $D(s_i)$ kümesi içerisinde s_i kaynağına yardım edebilecek tüm röleler için karşılıklı bilgi miktarı $I_{s_i,d;r_{s_j}}$ hesaplanır. En iyi iletişimi sağlayacak olan optimum röleler,

$$\{r(s_1),\dots,r(s_M)\} = arg \max_{\forall r_{s_x} \in D(s_1),\dots,r_{s_y} \in D(s_M)} min\left\{I_{s_1 d;r_{s_x}},\dots,I_{s_M d;r_{s_y}}\right\} \qquad \textbf{(6.3)}$$

şeklinde belirlenir. Burada $r(s_i)$ ile s_i kullanıcısına atanmış röle ifade edilmektedir. Bu yöntemin işleyişini bir örnekle açıklamaya çalışalım. Optimum şekilde iletim gerçekleştirmek isteyen 3 kullanıcılı bir sistem olsun ($M = 3$). Öncelikle, s_1 kullanıcısı için üç ayrı karşılıklı bilgi miktarı hesaplanır. $I_{s_1 d;r_{s_1}}$; s_1 kullanıcısının diğer kullanıcılarla işbirliği yapmadığı durum için, $I_{s_1 d;r_{s_2}}$; s_1 kullanıcısının s_2 kullanıcısı ile işbirliği yaptığı durum için, $I_{s_1 d;r_{s_3}}$ ise s_1 kullanıcısının s_3 kullanıcısı ile işbirliği yaptığı durum için hesaplanan karşılıklı bilgi miktarlarıdır. Aynı şekilde $s_2$ve s_3 kullanıcıları için de üç ayrı karşılıklı bilgi miktarı hesaplanır. Buna göre, $I_{s_2 d;r_{s_2}}$; s_2 kullanıcısının diğer kullanıcılarla işbirliği yapmadığı durum için, $I_{s_2 d;r_{s_1}}$; s_2 kullanıcısının s_1 kullanıcısı ile işbirliği yaptığı durum için, $I_{s_2 d;r_{s_3}}$ ise s_2 kullanıcısının s_3 kullanıcısı ile işbirliği yaptığı durum için hesaplanan karşılıklı bilgi miktarlarıdır. Ayrıca, $I_{s_3 d;r_{s_3}}$; s_3 kullanıcısının diğer kullanıcılarla işbirliği yapmadığı durum için, $I_{s_3 d;r_{s_1}}$; s_3 kullanıcısının s_1 kullanıcısı ile işbirliği yaptığı durum için, $I_{s_3 d;r_{s_1}}$ ise s_3 kullanıcısının s_1 kullanıcısı ile işbirliği yaptığı durum için hesaplanan karşılıklı bilgi miktarlarıdır. s_1, $\left\{I_{s_1 d;r_{s_1}}, I_{s_1 d;r_{s_2}}, I_{s_1 d;r_{s_3}}\right\}$ karşılıklı bilgi miktarlarını göz önüne alarak işbirliksiz iletişim, r_{s_2} ile işbirlikli iletişim ya da r_{s_3} ile işbirlikli iletişim gerçekleştirebilir. Öyleyse, s_1 için üç farklı şekilde iletişim söz konusudur. Aynı şekilde s_2 ve s_3 kullanıcıları için de üç farklı şekilde iletişim söz konusudur. Böylece s_1, s_2 ve s_3'ü bir arada düşündüğümüz zaman, bu üç kullanıcı 27 farklı şekilde iletim gerçekleştirilebilir. Öyleyse, üç kullanıcı için 27 farklı iletim senaryosu söz konusudur.

Her bir iletişim senaryosu için karşılıklı bilgi miktarı hesaplanır. l. iletişim senaryosu için karşılıklı bilgi miktarı;

$$I_l = min\left\{I_{s_1 d;r_{s_x}}, \dots, I_{s_3 d;r_{s_y}}\right\} \; x, y \in \{1,2,3\} \quad , l \in \{1,2, \dots ,27\} \tag{6.4}$$

şeklindedir. Bu iletişim senaryolarından maksimum karşılıklı bilgi miktarına sahip senaryo seçilir. Yani;

$$max\{I_l\} \quad l \in \{1,2, \dots ,27\} \tag{6.5}$$

koşulunu sağlayan iletişim senaryosu seçilir. 3 kullanıcı için bir iletişim senaryosunun seçilebilmesi için 27 karşılaştırma işlemine gereksinim duyulur. Buna göre M kullanıcılı bir sistem için M^M farklı şekilde iletim gerçekleştirmek mümkündür. Bu M^M farklı iletimi birbiri ile karşılaştırarak en iyi iletimi bulmak gerekir. M^M karşılaştırma yapmak pratikte olanaksızdır. Ayrıca bu yöntemde M^M iletim seçeneğinden en iyi olanını seçmek için bir merkezi birime (centeral unit) gereksinim vardır. Bu yöntem optimum bir yöntemdir ancak uygulanması olanaklı değildir [10].

6.1.2.2 Sıralı Röle Seçim Yöntemi

Bu yöntemde röle ataması ilk kaynaktan başlayarak ilerler. Kendine yardımcı olacak röleyi seçen ilk kaynak s_1 kaynağıdır. Kendine yardımcı olacak röleyi en son seçen kaynak ise s_M kaynağıdır. Bu nedenle bu yönteme sıralı röle seçim yöntemi denilmiştir.

s_1, gönderdiği bilgiyi doğru çözen $D(s_1)$ kümesi içerisindeki tüm röleler için karşılıklı bilgi miktarını;

$$I_{s_1 d;r_{s_j}} = \frac{1}{2}\log\left(1 + SNR_1\left|h_{s_i,d}\right|^2 + SNR_2\left|h_{r_{s_j},d}\right|^2\right) \;, \qquad j \in n \tag{6.6}$$

şeklinde hesaplar. İşbirliği yapacağı röle,

$$r(s_1) = \arg\max\{I_{s_1 d;r_{s_j}}\} \tag{6.7}$$

ifadesini sağlayan röledir. Daha sonra, s_2 gönderdiği bilgiyi doğru çözen röle kümesi $D(s_2)$ içinden en iyi iki röle olan (r_{s_j}, r_{s_k})'i seçer. Bu iki en iyi röleyi (6.7)'deki gibi

seçer. Eğer s_2 kullanıcısı için en iyi röle r_{s_j} rölesi ise ve s_1 kaynağı tarafından kullanılmıyorsa r_{s_j} rölesi s_2 kaynağı için en iyi olarak seçilir. Eğer s_2 kullanıcısı için en iyi röle r_{s_j} rölesi ise ve r_{s_j} rölesi s_1 kaynağının da en iyi rölesi ise *merkezi birim* (centeral unit) hangi rölenin s_2 kaynağı tarafından kullanılacağını belirler. Merkezi birim, r_{s_j} rölesinin gücünün ikiye bölünerek kullanılacağını hesaba katarak sırasıyla;

$$I_{s_2 d;r_{s_k}} = \frac{1}{2}\log\left(1 + SNR\left|h_{s_2 d}\right|^2 + SNR\left|h_{r_{s_k} d}\right|^2\right) \ , \tag{6.8}$$

$$I_{s_2 d;r_{s_j}} = \frac{1}{2}\log\left(1 + SNR\left|h_{s_2 d}\right|^2 + \frac{SNR}{2}\left|h_{r_{s_j} d}\right|^2\right) \ , \tag{6.9}$$

$$I_{s_1 d;r_{s_j}} = \frac{1}{2}\log\left(1 + SNR\left|h_{s_1 d}\right|^2 + \frac{SNR}{2}\left|h_{r_{s_j} d}\right|^2\right) \tag{6.10}$$

büyüklüklerini hesaplar. Burada işaret gürültü oranı, $SNR = (\frac{P}{2})/N_0$ biçimindedir. Merkezi birim, $I_{s_2 d;r_{s_k}}$ ile $min\left\{I_{s_2 d;r_{s_j}}, I_{s_1 d;r_{s_j}}\right\}$ değerini karşılaştırır. $I_{s_2 d;r_{s_k}}$ daha büyük ise r_{s_k}röle olarak s_2 kaynağına atanır. Aksi durumda, r_{s_j}, s_2 kaynağına röle olarak atanır. İlk iki kaynak için röle ataması yapıldıktan sonra sıra s_3 kaynağı için röle atamasına gelir. Bu röle atama işlemi s_M kaynağının da rölesi belirlenene kadar devam eder.

Genel bir örnek olarak, s_i kaynağı için sıralı röle atama işlemini gerçekleştirelim. Öncelikle s_i kaynağı için $D(s_i)$ kümesindeki en iyi i adet röle (6.7)'yle belirlenir. En iyi röle r_{s_j} ise ve hiçbir kaynak tarafından kullanılmıyorsa s_i kaynağının rölesi olarak belirlenir. Eğer r_{s_j} başka N_j kaynak tarafından kullanılıyorsa, bu N_j adet kaynağın ve s_i kaynağının karşılıklı bilgi miktarı r_{s_j} rölesinin kullanıldığı durum için hesaplanır. Karşılıklı bilgi miktarları hesaplanırken r_{s_j} rölesinin güç kısıtlamasının $P/(N_j + 1)$ olduğu unutulmamalıdır. N_j; r_{s_j}rölesini daha önce kullanan toplam kaynak sayısını ifade etmektedir. s_i kaynağı da r_{s_j} rölesini kullanacağı için r_{s_j} tarafından kullanılan kaynak sayısı $(N_j + 1)$ olacaktır. Böylece $(N_j + 1)$ adet karşılıklı bilgi miktarı, $P/(N_j + 1)$ güç kısıtlaması göz önüne alınarak yeniden hesaplanır. Hesaplanan $(N_j + 1)$ adet karşılıklı bilgi miktarlarının en küçüğü seçilerek r_{s_j} rölesi ile ilişkilendirilir. Daha sonra bu işlemler s_i rölesine ait en iyi ikinci röle için tekrarlanır.

En iyi ikinci röle kullanılarak hesaplanan karşılıklı bilgi miktarlarının yine en küçüğü seçilerek bu en iyi ikinci röle ile ilişkilendirilir. Tüm bu işlemler s_i rölesine ait en iyi i. röleye kadar tekrarlanır. Merkezi birim, her röle için hesapladığı ve rölelerle ilişkilendirdiği en küçük karşılıklı bilgi miktarlarından en büyüğünü seçer. Seçtiği bu en büyük karşılıklı bilgi miktarı hangi röle ile ilişkilendirilmişse o röleyi s_i kaynağına yardımcı olması için atar.

Bu işlem tüm kaynaklar için röle belirleninceye kadar devam eder. Bu iteratif yöntem optimum röle seçim algoritmasından daha kolay olsa da karmaşıklığı M sistemdeki toplam kullanıcı sayısını ifade etmek üzere, O($M!$) kadardır. O($M!$) karşılaştırma yapan bir sistemin pratikte çalışması olanaklı değildir [10].

6.1.2.3 Dağıtılmış Röle Seçim Yöntemi

Her bir kullanıcı diğer kullanıcılardan bağımsız olarak kaynak ve hedef arasındaki kanal kazancınını maksimum yapan röle ile işbirliği yapacağına karar verir. s_i kullanıcısı için en iyi röle;

$$r(s_i) = \arg \max_{r_{s_k} \in D(s_i)} \left\{ \left| h_{r_{s_k} d} \right|^2 \right\} , \qquad k = 1,2, \dots, |D(s_i)| \tag{6.11}$$

şeklinde belirlenir. $|D(s_i)|$ ile s_i kaynağının gönderdiği bilgiyi doğru çözen röle kümesinin eleman sayısı ifade edilmektedir. Burada bir rölenin kaç kaynak tarafından en iyi olarak seçileceği bilinmemektedir. Bu nedenle bir röle en kötü durumda her kullanıcı tarafından kullanılıyormuş gibi düşünülür. Bu nedenle, her rölenin işbirliği esnasında P/M kadarlık güç kullanmasına izin verilir. Burada M ile sistemdeki toplam kaynak sayısı ifade edilmektedir. Bu yöntemi röle seçim algoritması olarak belirlemiş bir sistemin merkezi birime ihtiyacı yoktur ve bu yöntem en kötü durumda O(M^2) karşılaştırma gerektirir.

Dağıtılmış röle seçim yöntemi pratikte gerçeklenebilir bir yöntemdir. Bu üç röle seçim yöntemi servis dışı kalma olasılıkları açısından karşılaştırıldığında aralarında çok büyük farklılıklar olmadığı görülmüştür[10].

6.2 Yeni Bir Yapı: Eşlemeli Toplamsal Modülasyonlu İşbirlikli İletişim

Günümüzde yüksek veri hızlarına duyulan, giderek artan gereksinim nedeniyle bir anda tek bir kullanıcının iletim yaptığını düşünen modeller yetersiz kalmaya

başlamıştır. Bletsas [4] çalışmasını tek bir kullanıcının birçok rölenin olduğu ortamda iletimi üzerine kurgulamıştır. Beres [10] çalışmasında bu iletişim modelinin yetersiz olduğunu savunarak çok kullanıcılı sistemler için bu yapıyı düzenleyerek yeni bir model önermiştir. Beres'in [10] da önermiş olduğu model 6.1 alt bölümünde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Bir iletişim modelini incelerken ya da tasarlarken çok kullanıcılı bir yapı ve bu yapı içerisinde kaliteli iletişimi göz önüne almak tek başına yeterli olmamaya başlamıştır. Günümüzde iletişim sistemleri iletişim kaliteleri yanında iletişim hızları ile de değerlendirilmektedir. Bu nedenle iletişim sistemlerinde başarımı artırmak adına iletişim hızından taviz vermek istenmez hale gelmiştir. Beres [10] modelinde çok kullanıcılı bir sistemde iletim kalitesi artırılırken iletim hızında kayıp yaşanmaktadır. Bu bölümde önerilecek olan yapı çok kullanıcılı sistemlerde iletim başarımını artırmanın yanında iletim hızından da taviz vermemeyi garanti etmektedir.

6.2.1 Sistem Modeli

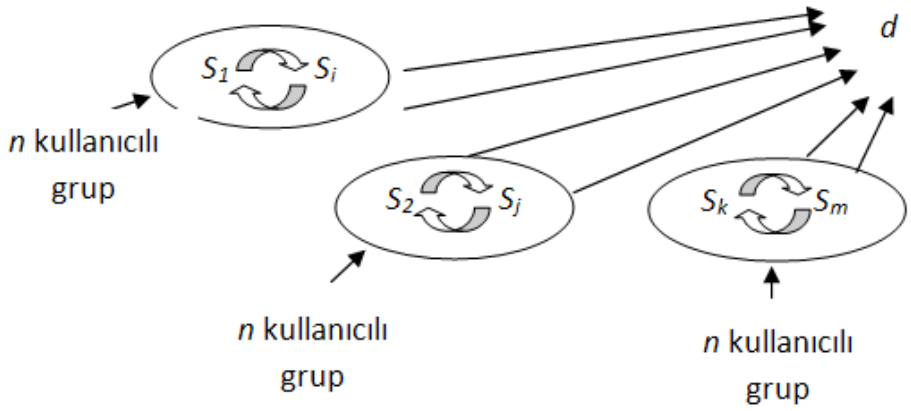
Sistemin M kullanıcıdan oluştuğunu düşünelim. Bu modelde, $n < M$ olmak üzere, sistemdeki n kullanıcı bir araya gelerek iletim gerçekleştirirler. Bu her bir n kullanıcının oluşturduğu yapıya *grup* adı verilmiştir. Gruplar içerisindeki kullanıcılar toplamsal modülasyonlu olarak iletişimlerini gerçekleştirirler. Eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim modelinde, [10]'da olduğu gibi çok kullanıcılı sistem göz önüne alınmıştır. Ayrıca bu modelde kullanıcılar toplamsal modülasyonlu iletişim gerçekleştirdiğinden [10] modelindeki iletim hızındaki kayıp ortadan kaldırılmış olur. Sistem modeli Şekil 6.2'de verilmiştir.

M kullanıcılı bir sistemde n kullanıcının bir araya gelerek iletim gerçekleştirdiğini söylemiştik. Buna göre sistemdeki toplam kullanıcı sayısı,

$$M = n.g + k \tag{6.12}$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada n ile gruptaki kullanıcı sayısı , g ile grup sayısı, k ile de gruplara katılamayan kullanıcı sayısı gösterilmektedir. Her bir grupta n adet kullanıcı bulunmaktadır. Böylece, g adet grup n adet kullanıcı için toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim gerçekleşir. Sistemde gruplar oluşturulurken hangi n kullanıcının bir araya geleceği çeşitli algoritmalar ile belirlenir. Sistemdeki toplam

kullanıcı sayısı olan M, her bir gruptaki kullanıcı sayısı n in bir katı değilse k adet kullanıcının gruplara katılamayacağı açıktır.



Şekil 6.2 : n kullanıcılı gruplar ve bu grupların hedef ile toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimi.

Gruplara katılamayan kullanıcı sayısı;

$$0 \leq k < n \tag{6.13}$$

şeklindedir. $k = 0$ için gruplara giremeyen kullanıcı yok demektir. $k = 1$ ise gruplara giremeyen tek bir kullanıcı vardır ve bu kullanıcı işbirliksiz olarak iletimini gerçekleştirir. $k > 1$ için gruplara giremeyen birden fazla kullanıcı vardır ve bu kullanıcılar yine toplamsal modülasyonlu olarak iletimini gerçekleştirebilir.

Bu çalışmada $n = 2$, $k = 0$ olarak alınmıştır. Ortamda çift sayıda kullanıcı olduğu varsayılmıştır ve bu kullanıcılar her zaman ikişerli gruplar halinde toplamsal modülasyonlu işbirliğini gerçekleştirmektedir. Ayrıca bu modelde iletim hızında kayıp yaşanmaz. Ancak burada önemli olan nokta grupların en iyi şekilde oluşturulmasıdır. Hangi iki kullanıcının birbiri ile toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim gerçekleştireceğine karar verilmesi bu modelin en önemli noktasıdır. Bölüm 6.2.3'de grupların oluşturulması başlığı altında bu konu ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

6.2.2 Kanal modeli

Bu modelde M adet kaynak ve g adet 2 kullanıcıdan oluşan gruplar bulunmaktadır. Sistemdeki bir kaynak diğer kaynaklar için röle olabilmektedirler. 2 kullanıcıdan

oluşan bir grup için kanal modelini detaylandıralım. t anında bir A düğümünden diğer bir B düğümüne iletim yapıldığını varsayalım. Bu iletişim modelinde, A düğümü iletim yapan kaynak (S) ya da röle (R) olabilir. B düğümü ise dinleme yapan röle (R) ya da hedef (D) olabilmektedir. İletilen işaret kanalda sönümlemeden ve toplamsal beyaz Gauss gürültüsünden etkilenir. Bu durumda alıcı düğümdeki işaret;

$$y_B(t) = h_{AB}\left[\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)s_{B_1}(t) + \gamma s_{X_1'}(t)\right] + n_B(t) \quad \textbf{(6.14)}$$

biçiminde yazılabilir. Burada X ile iletişime yardımcı olan düğüm ifade edilmiştir. Yani iletim yapan röle ise X ile bir önceki kaynak düğümü ve $s_{X_1'}(t)$ ile bir önceki zaman diliminde kaynak düğümünden alınan işaret gösterilir. Ancak iletim yapan kaynak düğüm ise X kaynağa yardımcı olan röle düğümünü ve $s_{X_1'}(t)$ bir önceki zaman diliminde röleden alınan işareti ifade eder. Eşitlikte h_{AB} ile kanal sönümleme katsayısı gösterilmektedir. Bir iletişim periyodu boyunca sönümleme katsayısının değişmediği yani kanalın duruğumsu (quasi static) olduğu varsayılmıştır.

Kanal sönümleme katsayıları düz (flat fading) zarfı Rayleigh sönümlemeli olarak modellenmiştir. Buna göre kanal sönümleme katsayısı karmaşık Gauss dağılımlı olarak;

$$h_{AB} \sim CN(0,1/\lambda_{AB}) \quad \textbf{(6.15)}$$

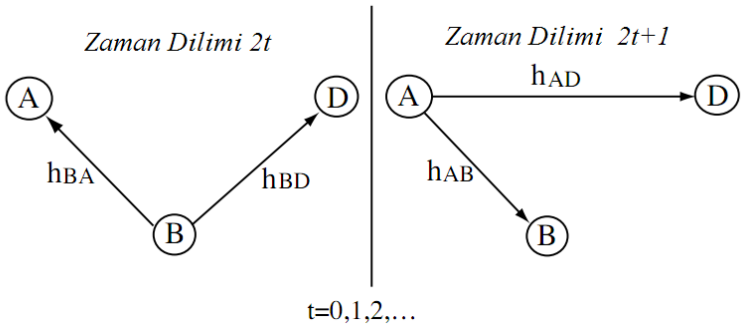
şeklinde ifade edilebilir. Bu modelde kanal sönümleme katsayısının ortalaması sıfır, varyansı $1/\lambda_{AB}$'dir. λ_{AB} yol kaybına bağlı bir parametredir. Yol kaybı olmadığı durumda varyans 1'e eşit olacaktır. Kanal gücü ise kanal sönümleme katsayısının karesi olarak ifade edilmiş olup istatistiksel bağımsız üstel dağılımlıdır. Buna göre kanal kazancı $|h_{AB}|^2$'nin olasılık yoğunluk işlevi;

$$p_{|h_{AB}|^2}(x) = \lambda_{AB}\, exp(-\lambda_{AB}x) \quad , x \geq 0 \quad \textbf{(6.16)}$$

biçimindedir. Burada x ile $|h_{AB}|^2$'nin olurlu değeri gösterilmektedir. Röle ve hedefteki gürültüler ise istatistiksel bağımsız $\sigma^2 = N_0$ varyanslı, sıfır ortalamalı karmaşık Gauss dağılımlı olarak modellenmiştir. Buna göre gürültü bileşeni;

$$n_B \sim CN(0,\sigma^2) \quad \textbf{(6.17)}$$

şeklinde olacaktır. 2 kullanıcıdan oluşan bir grup için açıklanan kanal modeli Şekil 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.3 : İki kullanıcıdan oluşan bir grup için kanal modeli

Bu modelde, düğümler aynı anda hem iletim hem dinleme yapamamaktadır. Aynı anda yapılan iletimler birbirine dik kanallarla (TDMA, FDMA gibi) gerçekleştirilmektedir. Ayrıca fiziksel katmanda kanal durum bilgileri (CSI) bulunmamaktadır. Rölede çöz ve aktar protokolü kullanılmaktadır. Benzetim sonuçlarında yapılan karşılaştırmaların adil olabilmesi için çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği [10] ve yeni önerilen eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemlerinde, iletim için harcanan toplam gücün (P) aynı olduğu kabul edilmiştir. Kanaldaki işaret-gürültü oranı (SNR) ise $(P/2)/N_0$ olarak tanımlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada karşılaştırılan her iki model için de kaynak ve röle arasındaki kanal gürültüsüz varsayılmıştır.

6.2.3 Grupların Belirlenmesi

M adet kullanıcı için en iyi şekilde ikişerli grupların belirlenmesi amaçlanmaktadır. Burada iki grup belirleme yöntemi tanıtılacaktır. Bu grup belirleme yöntemlerinden ilki *optimum grup belirleme yöntemi* olarak adlandırılırken diğer yöntem *sıralı grup belirleme yöntemi* olarak adlandırılacaktır. Her iki yöntemin uygulanabilmesi için sistemde bir merkezi birime gereksinim vardır.

6.2.3.1 Optimum Grup Belirleme Yöntemi

M adet kullanıcıdan 2 kullanıcıya sahip g adet grup oluşturulmak isteniyor. Bu gruplar *optimum grup belirleme yöntemi* ile öyle belirlenmelidir ki, M adet kullanıcıyı herhangi başka bir şekilde 2'li grupladığımızda *optimum grup belirleme yöntemi* ile oluşturulmuş olan sistemden daha kötü sığaya sahip olsun. Bu koşulu

gerçekleyebilmek için M kullanıcıdan oluşturulabilecek olan *2* kullanıcılı tüm iletim senaryoları birbiri ile karşılaştırılmalı ve en yüksek kanal sığasına sahip iletim senaryosu en iyi grup eşlemesi seçilmelidir. Buna göre, bu grup belirleme yönteminde olası tüm iletişim senaryoları için grupların hata başarımları dikkate alınarak optimum grup seçme işlemi gerçekleştirilir. Başka bir değişle, *2* kullanıcıdan oluşan her bir grup için karşılıklı bilgi miktarı hesaplanır. İletişim gerçekleştirecek bir sistemde g adet grup olduğu için toplamda g adet farklı karşılıklı bilgi miktarı hesaplanmış olur. Bu g adet karşılıklı bilgi miktarı karşılaştırılarak en küçük olanı seçilir ve ilgili iletişim senaryosu ile ilişkilendirilir. Daha sonra, iletişim senaryoları ile ilişkilendirilmiş olan bu değerler karşılaştırılır. En büyük değere sahip iletişim senaryosu optimum olarak belirlenir. Böylece optimum gruplar oluşturulmuş olur. Herhangi başka bir iletişim senaryosunun seçilen iletişim senaryosundan daha iyi kanal sığasına sahip olamayacağı da garanti edilmiş olur.

Optimum grup belirleme yönteminde, öncelikle olası iletişim senaryoları belirlenmelidir. Daha sonra belirlenen her bir iletişim senaryosuna ait karşılıklı bilgi miktarı bulunur ve bu bilgi miktarları karşılaştırılarak en iyi iletişim senaryosuna karar verilir. Olası iletişim senaryolarını belirleme algoritması aşağıda açıklandığı gibidir.

Optimum Grup Belirleme Yönteminde İletişim Senaryolarını Belirleme Algoritması

Başlangıç: $i = 1$, toplam kaynak sayısı M, toplam grup sayısı $g = M/2$, kaynak eşleme kümesi $\varphi_0 = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$, $\omega = 0$ toplam iletim senaryosu sayısı olarak belirlenir.

1. *Adım:* φ_{i-1} kümesinden rastgele bir kaynak seçilir. Bu kaynağa s_p diyelim.
2. *Adım:* Rastgele seçilen kaynak ile eşleme yapabilecek φ_i eşleme kümesi oluşturulur. $\varphi_i = \varphi_{i-1} - \{s_p\}$ şeklindedir.
3. *Adım:* 1. adımda seçilen kaynağın φ_i kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri yazılır. Bu eşlemeler; $s_q \in \varphi_i$ olmak üzere $s_p s_q$ şeklindedir. Oluşturulan her bir ikili grup için karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_p s_q}$ hesaplanır.
4. *Adım:* 3. adımda oluşan çiftlerden rastgele bir $s_p s_q$ çifti seçilir, $\varphi_i = \varphi_i - \{s_q\}$ olacak şekilde eşleme kümesi güncellenir. $|\varphi_i| \neq 0$ ise 1. adıma geri

dönülür. Ayrıca, $i = i + 1$ şeklinde güncellenir. $|\varphi_i| = 0$ ise yeni bir iletim senaryosu oluşmuştur ve iletim senaryosu sayısı artırılır, $\omega = \omega + 1$. En sonda yer alan 3. adımdaki bir diğer $s_p s_q$ çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür. Ayrıca, $\varphi_{i-1} = \varphi_{i-2} - \{s_q, s_q\}$ olarak güncellenir. En sonda yer alan 3. adımda seçilecek $s_p s_q$ çifti kalmadıysa bir önceki 3. Adıma geçilir ve $i = i - 1$ ve $\varphi_{i-1} = \varphi_{i-2} - \{s_q, s_q\}$ olarak güncellenir. Daha sonra 1. adıma geri dönülür. Bu algoritma tüm 3. adımlardaki $s_p s_q$ çiftleri bitene kadar devam eder.

4 ve 6 kullanıcı için iletim senaryosu belirleme algoritmasını çalıştıralım.

4 kullanıcı için iletim senaryolarını belirleme algoritması:

Başlangıç: $i = 1, M = 4, \ g = 2, \varphi_0 = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$

1. *Adım:* φ_0 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_1 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_1 = \{s_2, s_3, s_4\}$
3. *Adım:* s_1'in φ_1 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_1 s_2, s_1 s_3, s_1 s_4$ şeklindedir. Bu ikililere ait karşılıklı bilgi miktarları, $I_{s_1 s_2}, I_{s_1 s_3}, I_{s_1 s_4}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_1 s_2$ çifti seçildi. $\varphi_1 = \{s_3, s_4\}$, $|\varphi_1| = 2 \neq 0$ olduğu için 1. adıma geri dönülür. $i = 2$ olarak güncellenir.

1. *Adım*: φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_4\}$
3. *Adım:* s_3'ün φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_3 s_4$ şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_3 s_4}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_3 s_4$ çifti seçildi. $\varphi_2 = \{\}$, $|\varphi_1| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = 1$ olur.

   Oluşan 1. iletim senaryosu, : 1. Grup: $s_1 s_2$ ve, 2. Grup: $s_3 s_4$ şeklindedir. 3. adımdaki bir diğer $s_1 s_3$ çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_1 = \varphi_0 - \{s_1, s_3\} = \{s_2, s_4\}$

1. *Adım*: φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_2 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_4\}$
3. *Adım:* s_2'in φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri,

s_2s_4 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_2s_4}$ hesaplanır.

4. *Adım*: s_2s_4 çifti seçildi. $\varphi_2 = \{\}$, $|\varphi_1| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 2$ olur.
   Oluşan 2. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_3, 2. Grup: s_2s_4 şeklindedir.
   3 adımdaki bir diğer s_1s_4 çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.
   $\varphi_1 = \varphi_0 - \{s_1, s_4\} = \{s_2, s_3\}$

1. *Adım*: φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_2 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_3\}$
3. *Adım:* s_2'in φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_2s_3 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_2s_3}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_2s_3 çifti seçildi. $\varphi_2 = \{\}$, $|\varphi_1| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = 3$ olur.
   Oluşan 3. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_4, 2. Grup: s_2s_3 şeklindedir. 3.adımda seçilecek başka bir s_ps_q çifti kalmadığı için algoritma sonlanır.

<u>6 kullanıcı için iletim senaryolarını belirleme algoritması:</u>

Başlangıç: $i = 1, M = 6,\ \ g = 3, \varphi_0 = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$

1. *Adım:* φ_0 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_1 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_1 = \{s_2, s_3, s_4, s_5, s_6\}$
3. *Adım:* s_1'in φ_1 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_1s_2, s_1s_3, s_1s_4, s_1s_5, s_1s_6$ şeklindedir. Bu ikililere ait karşılıklı bilgi miktarları, $I_{s_1s_2}, I_{s_1s_3}, I_{s_1s_4}, I_{s_1s_5}, I_{s_1s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $g = 1$, s_1s_2 çifti seçildi. $\varphi_1 = \{s_3, s_4, s_5, s_6\}$, $|\varphi_1| = 4 \neq 0$ olduğu için 1. adıma geri dönülür. $i = 2$ olarak güncellenir.

1. *Adım:* φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_4, s_5, s_6\}$
3. *Adım:* s_3'in φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_3s_4, s_3s_5, s_3s_6 şeklindedir. Bu ikililere ait karşılıklı bilgi miktarları, $I_{s_3s_4}, I_{s_3s_5}, I_{s_3s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_3s_4 çifti seçilir. $\varphi_2 = \{s_5, s_6\}$, $|\varphi_2| = 2 \neq 0$ olduğu için 1. adıma geri dönülür. $i = 3$ olarak güncellenir

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_5 olsun.

2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_5'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_5s_6 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_5s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_5s_6 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 1$ olur.

   Oluşan 1. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_2, 2. Grup: s_3s_4 3. Grup: s_5s_6 şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer s_3s_5 çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_3, s_5\} = \{s_4, s_6\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_4 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_4'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_4s_6 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_4s_6 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 2$ olur.

   Oluşan 2. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_2, 2. Grup: s_3s_5 3. Grup: s_4s_6 şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer s_3s_6 çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_3, s_6\} = \{s_4, s_5\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_4 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_5\}$
3. *Adım:* s_4'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_4s_5 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4s_5}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_4s_5 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 3$ olur.

   Oluşan 3. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_2, 2. Grup: s_3s_6 3. Grup: s_4s_5 şeklindedir.

   En sonda yer alan 3. adımda seçilecek bir s_ps_q çifti kalmadığı için, s_ps_q içeren bir önceki 3. adıma geri dönülür. Bu adımdan seçilen ikili s_1s_3 olsun. $i = i - 1 = 2$ ve $\varphi_1 = \varphi_0 - \{s_1, s_3\} = \{s_2, s_4, s_5, s_6\}$ olarak güncellenir.

1. *Adım:* φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_2 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_4, s_5, s_6\}$

3. *Adım:* s_2'in φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_2s_4, s_2s_5, s_2s_6 şeklindedir. Bu ikililere ait karşılıklı bilgi miktarları, $I_{s_2s_4}, I_{s_2s_5}, I_{s_2s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_2s_4 çifti seçilir. $\varphi_2 = \{s_5, s_6\}$, $|\varphi_2| = 2 \neq 0$ olduğu için 1. adıma geri dönülür. $i = 3$ olarak güncellenir

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_5 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_5'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_5s_6 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_5s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_5s_6 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 4$ olur.

   Oluşan 4. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_3, 2. Grup: s_2s_4 3. Grup: s_5s_6 şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer s_2s_5 çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_5\} = \{s_4, s_6\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_4 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_4'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_4s_6 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_4s_6 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 5$ olur.

   Oluşan 5. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_3, 2. Grup: s_2s_5 3. Grup: s_4s_6 şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer s_2s_6 çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_6\} = \{s_4, s_5\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_4 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_5\}$
3. *Adım:* s_4'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_4s_5 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4s_5}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_4s_5 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 6$ olur.

   Oluşan 6. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_3, 2. Grup: s_2s_6 3. Grup: s_4s_5

şeklindedir.

En sonda yer alan 3. adımda seçilecek bir $s_p s_q$ çifti kalmadığı için, $s_p s_q$ içeren bir önceki 3. adıma geri dönülür. Bu adımdan seçilen ikili $s_1 s_4$ olsun. $i = i - 1 = 2$ ve $\varphi_1 = \varphi_0 - \{s_1, s_4\} = \{s_2, s_3, s_5, s_6\}$ olarak güncellenir.

1. *Adım:* φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_2 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_3, s_5, s_6\}$
3. *Adım:* s_3'in φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_2 s_3, s_2 s_5, s_2 s_6$ şeklindedir. Bu ikililere ait karşılıklı bilgi miktarları, $I_{s_2 s_3}, I_{s_2 s_5}, I_{s_2 s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_2 s_3$ çifti seçilir. $\varphi_2 = \{s_5, s_6\}$, $|\varphi_2| = 2 \neq 0$ olduğu için 1. adıma geri dönülür. $i = 3$ olarak güncellenir

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_5 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_5'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_5 s_6$ şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_5 s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_5 s_6$ çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 7$ olur.

   Oluşan 7. iletim senaryosu, : 1. Grup: $s_1 s_4$, 2. Grup: $s_2 s_3$ 3. Grup: $s_5 s_6$ şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer $s_2 s_5$ çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_5\} = \{s_3, s_6\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_3'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_3 s_6$ şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_3 s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_3 s_6$ çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 8$ olur.

   Oluşan 8. iletim senaryosu, : 1. Grup: $s_1 s_4$, 2. Grup: $s_2 s_5$ 3. Grup: $s_3 s_6$ şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer $s_2 s_6$ çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_6\} = \{s_3, s_5\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun.

2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_5\}$
3. *Adım:* s_3'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_3s_5 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_3s_5}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_3s_5 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 9$ olur.

   Oluşan 9. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_4, 2. Grup: s_2s_6 3. Grup: s_3s_5 şeklindedir.

   En sonda yer alan 3. adımda seçilecek bir s_ps_q çifti kalmadığı için, s_ps_q içeren bir önceki 3. adıma geri dönülür. Bu adımdan seçilen ikili s_1s_5 olsun. $i = i - 1 = 2$ ve $\varphi_1 = \varphi_0 - \{s_1, s_5\} = \{s_2, s_3, s_4, s_6\}$ olarak güncellenir.

1. *Adım:* φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_2 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_3, s_4, s_6\}$
3. *Adım:* s_2'in φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_2s_3, s_2s_4, s_2s_6 şeklindedir. Bu ikililere ait karşılıklı bilgi miktarları, $I_{s_2s_3}, I_{s_2s_4}, I_{s_2s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_2s_3 çifti seçilir. $\varphi_2 = \{s_4, s_6\}$, $|\varphi_2| = 2 \neq 0$ olduğu için 1. adıma geri dönülür. $i = 3$ olarak güncellenir.

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_4 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_4'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_4s_6 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_4s_6 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 10$ olur.

   Oluşan 10. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_5, 2. Grup: s_2s_3 3. Grup: s_4s_6 şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer s_2s_4 çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

   $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_4\} = \{s_3, s_6\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_6\}$
3. *Adım:* s_3'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_3s_6 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_3s_6}$ hesaplanır.
4. *Adım*: s_3s_6 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu

oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 11$ olur.

Oluşan 11. iletim senaryosu, : 1. Grup: $s_1 s_5$, 2. Grup: $s_2 s_4$ 3. Grup: $s_3 s_6$ şeklindedir.

3 adımdaki bir diğer $s_2 s_6$ çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

$\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_6\} = \{s_3, s_4\}$

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_4\}$
3. *Adım:* s_3'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_3 s_4$ şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4 s_5}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_3 s_4$ çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 12$ olur.

   Oluşan 12. iletim senaryosu, : 1. Grup: $s_1 s_5$, 2. Grup: $s_2 s_6$ 3. Grup: $s_3 s_4$ şeklindedir.

   En sonda yer alan 3. adımda seçilecek bir $s_p s_q$ çifti kalmadığı için, $s_p s_q$ içeren bir önceki 3. adıma geri dönülür. Bu adımdan seçilen ikili $s_1 s_6$ olsun. $i = i - 1 = 2$ ve $\varphi_1 = \varphi_0 - \{s_1, s_6\} = \{s_2, s_3, s_4, s_5\}$ olarak güncellenir.

1. *Adım:* φ_1 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_2 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_2 = \{s_3, s_4, s_5\}$
3. *Adım:* s_2'in φ_2 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_2 s_3, s_2 s_4, s_2 s_5$ şeklindedir. Bu ikililere ait karşılıklı bilgi miktarları, $I_{s_2 s_3}, I_{s_2 s_4}, I_{s_2 s_5}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_2 s_3$ çifti seçilir. $\varphi_2 = \{s_4, s_5\}$, $|\varphi_2| = 2 \neq 0$ olduğu için 1. adıma geri dönülür. $i = 3$ olarak güncellenir

1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_4 olsun.
2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_5\}$
3. *Adım:* s_4'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, $s_4 s_5$ şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4 s_5}$ hesaplanır.
4. *Adım*: $s_4 s_5$ çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $|\varphi_3| = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 13$ olur.

   Oluşan 13. iletim senaryosu, : 1. Grup: $s_1 s_6$, 2. Grup: $s_2 s_3$ 3. Grup: $s_4 s_5$ şeklindedir.

   3 adımdaki bir diğer $s_2 s_4$ çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür.

$\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_4\} = \{s_3, s_6\}$
1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun. 2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_5\}$ 3. *Adım:* s_3'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_3s_5 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_3s_5}$ hesaplanır. 4. *Adım*: s_3s_5 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $\lvert\varphi_3\rvert = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 14$ olur. Oluşan 14. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_6, 2. Grup: s_2s_4 3. Grup: s_3s_5 şeklindedir. 3 adımdaki bir diğer s_2s_5 çifti seçilerek 1. adıma geri dönülür. $\varphi_2 = \varphi_1 - \{s_2, s_5\} = \{s_3, s_4\}$
1. *Adım*: φ_2 kümesinden rastgele seçilen kaynak s_3 olsun. 2. *Adım:* $\varphi_3 = \{s_4\}$ 3. *Adım:* s_3'in φ_3 kümesindeki kaynaklarla oluşturabileceği tüm ikili eşlemeleri, s_3s_4 şeklindedir. Bu ikiliye ait karşılıklı bilgi miktarı, $I_{s_4s_5}$ hesaplanır. 4. *Adım*: s_3s_4 çifti seçildi. $\varphi_3 = \{\}$, $\lvert\varphi_3\rvert = 0$ olduğu için bir iletim senaryosu oluşmuştur. İletim senaryosu sayısı, $\omega = \omega + 1 = 15$ olur. Oluşan 15. iletim senaryosu, : 1. Grup: s_1s_6, 2. Grup: s_2s_5 3. Grup: s_3s_4 şeklindedir. 3. adımda seçilebilecek hiçbir s_ps_q çifti kalmadığından algoritma sonlanır.

Optimum Grup Belirleme Yönteminde İletişim Senaryolarının Karşılıklı Bilgi Miktarları

Optimum grup belirleme yönteminde iletim senaryoları oluşturulduktan sonra grupların ve daha sonra iletim senaryolarının karşılıklı bilgi miktarı belirlenir. Bunun için iletim senaryolarını belirleme algoritmasının 3. adımda hesaplanan $I_{s_ps_q}$ karşılıklı bilgi miktarı kullanılır. İletim senaryosu belirleme algoritmasında bulunan ω tane iletim senaryosunun g tane grubu vardır. t. iletim senaryosunun l. grubunun karşılıklı bilgi miktarı:

$$I_{t,l} = I_{s_ps_q}, \quad t = 1,2,..\omega, \quad l = 1,2,\dots,g \quad ve \quad p \neq q \in \{1,2,\dots,M\} \qquad \textbf{(6.18)}$$

şeklindedir. Burada s_p ve s_q $t.$ iletim senaryosunun $l.$ grubunun elemanlarıdır. Grupların karşılıklı bilgi miktarları belirlendikten sonra iletim senaryolarının

karşılıklı bilgi miktarları belirlenmelidir. t. iletişim senaryosunun karşılıklı bilgi miktarı;

$$I_t = \min\{I_{t,l}\} \quad ,t = 1,2,..\omega \quad ve \quad l = 1,2,\dots,g \tag{6.19}$$

şeklindedir.

Çizelge 6.1 : Kullanıcı Sayısı 4 Olduğu Durumda Optimum Grup Belirleme Yöntemi için İletişim Senaryoları ve Her bir Grubun Karşılıklı Bilgi Miktarı

		1.Grup		2.Grup	
İletim senaryoları	İletişim senaryoları karşılıklı bilgi miktarı	Grup elemanları	Grubun karşılıklı bilgi miktarı	Grup elemanları	Grubun karşılıklı bilgi miktarı
1	$I_1 = \min\{I_{1,1}, I_{1,2}\}$	$s_1 s_2$	$I_{1,1} = I_{s_1 s_2}$	$s_3 s_4$	$I_{1,2} = I_{s_3 s_4}$
2	$I_2 = \min\{I_{2,1}, I_{2,2}\}$	$s_1 s_3$	$I_{2,1} = I_{s_1 s_3}$	$s_2 s_4$	$I_{2,2} = I_{s_2 s_4}$
3	$I_3 = \min\{I_{3,1}, I_{3,2}\}$	$s_1 s_4$	$I_{3,1} = I_{s_1 s_4}$	$s_2 s_3$	$I_{3,2} = I_{s_2 s_3}$
En iyi İletim Senaryosu		$b = \arg\text{maks}\{I_1, I_2, I_3\}$			

İletim senaryosunu oluşturan gruplardan en kötü karşılıklı bilgi miktarına sahip olan grubun karşılıklı bilgi miktarı iletim senaryosunun karşılıklı bilgi miktarı ile ilişkilendirilmiş olur. Böylece, tüm iletim senaryolarının karşılıklı bilgi miktarları belirlendiğine göre en iyi iletim senaryosu bulunabilir. En yüksek karşılıklı bilgi miktarına sahip iletim senaryosu en iyi iletim senaryosu olarak belirlenir. Öyleyse, en iyi iletim senaryosu b,

$$b = \arg\text{maks}\{I_t\} \quad t = 1,2,\dots,\omega \tag{6.20}$$

şeklinde bulunur. 4 ve 6 kullanıcı için oluşan iletim senaryoları ve karşılıklı bilgi miktarları Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 : Kullanıcı Sayısı 6 Olduğu Durumda Optimum Grup Belirleme Yöntemi için İletişim Senaryoları

		1.Grup		2.Grup		3. Grup	
İletim senaryoları	İletişim senaryoları karşılıklı bilgi miktarı	Grup Elemanları	Grubun karşılıklı bilgi miktarı	Grup Elemanları	Grubun karşılıklı bilgi miktarı	Grup Elemanları	Grubun karşılıklı bilgi miktarı
1	$I_1 = \min\{I_{1,1}, I_{1,2}, I_{1,3}\}$	$s_1 s_2$	$I_{1,1} = I_{s_1 s_2}$	$s_3 s_4$	$I_{1,2} = I_{s_3 s_4}$	$s_5 s_6$	$I_{1,3} = I_{s_5 s_6}$
2	$I_2 = \min\{I_{2,1}, I_{2,2}, I_{2,3}\}$	$s_1 s_2$	$I_{2,1} = I_{s_1 s_2}$	$s_3 s_5$	$I_{2,2} = I_{s_3 s_5}$	$s_4 s_6$	$I_{2,3} = I_{s_4 s_6}$
3	$I_{23} = \min\{I_{3,1}, I_{3,2}, I_{3,3}\}$	$s_1\ s_2$	$I_{3,1} = I_{s_1 s_2}$	$s_3 s_6$	$I_{3,2} = I_{s_3 s_6}$	$s_4 s_5$	$I_{3,3} = I_{s_5 s_5}$
4	$I_4 = \min\{I_{4,1}, I_{4,2}, I_{4,3}\}$	$s_1 s_3$	$I_{4,1} = I_{s_1 s_3}$	$s_2 s_4$	$I_{4,2} = I_{s_2 s_4}$	$s_5 s_6$	$I_{4,3} = I_{s_5 s_6}$
5	$I_5 = \min\{I_{5,1}, I_{5,2}, I_{5,3}\}$	$s_1\ s_3$	$I_{5,1} = I_{s_1 s_3}$	$s_2 s_5$	$I_{5,2} = I_{s_2 s_5}$	$s_4 s_6$	$I_{5,3} = I_{s_4 s_6}$
6	$I_6 = \min\{I_{6,1}, I_{6,2}, I_{6,3}\}$	$s_1 s_3$	$I_{6,1} = I_{s_1 s_3}$	$s_2 s_6$	$I_{6,2} = I_{s_2 s_6}$	$s_4 s_5$	$I_{6,3} = I_{s_4 s_5}$
7	$I_7 = \min\{I_{7,1}, I_{7,2}, I_{7,3}\}$	$s_1 s_4$	$I_{7,1} = I_{s_1 s_4}$	$s_2 s_3$	$I_{7,2} = I_{s_2 s_3}$	$s_5 s_6$	$I_{7,3} = I_{s_5 s_6}$
8	$I_8 = \min\{I_{8,1}, I_{8,2}, I_{8,3}\}$	$s_1 s_4$	$I_{8,1} = I_{s_1 s_4}$	$s_2 s_5$	$I_{8,2} = I_{s_2 s_5}$	$s_3 s_6$	$I_{8,3} = I_{s_3 s_6}$
9	$I_9 = \min\{I_{9,1}, I_{9,2}, I_{9,3}\}$	$s_1 s_4$	$I_{9,1} = I_{s_1 s_4}$	$s_2 s_6$	$I_{9,2} = I_{s_2 s_6}$	$s_3 s_5$	$I_{9,3} = I_{s_3 s_5}$
10	$I_{10} = \min\{I_{10,1}, I_{10,2}, I_{10,3}\}$	$s_1 s_5$	$I_{10,1} = I_{s_1 s_5}$	$s_2 s_3$	$I_{10,2} = I_{s_2 s_3}$	$s_4 s_6$	$I_{10,3} = I_{s_4 s_6}$
11	$I_{11} = \min\{I_{11,1}, I_{11,2}, I_{11,3}\}$	$s_1 s_5$	$I_{11,1} = I_{s_1 s_5}$	$s_2 s_4$	$I_{11,2} = I_{s_2 s_4}$	$s_3 s_6$	$I_{11,3} = I_{s_3 s_6}$
12	$I_{12} = \min\{I_{12,1}, I_{12,2}, I_{12,3}\}$	$s_1 s_5$	$I_{12,1} = I_{s_1 s_5}$	$s_2 s_4$	$I_{12,2} = I_{s_2 s_4}$	$s_3 s_4$	$I_{12,3} = I_{s_3 s_4}$
13	$I_{13} = \min\{I_{13,1}, I_{13,2}, I_{13,3}\}$	$s_1 s_6$	$I_{13,1} = I_{s_1 s_6}$	$s_2 s_3$	$I_{13,2} = I_{s_2 s_3}$	$s_4 s_5$	$I_{13,3} = I_{s_4 s_5}$
14	$I_{14} = \min\{I_{14,1}, I_{14,2}, I_{14,3}\}$	$s_1 s_6$	$I_{14,1} = I_{s_1 s_6}$	$s_2 s_4$	$I_{14,2} = I_{s_2 s_4}$	$s_3 s_5$	$I_{14,3} = I_{s_3 s_5}$
15	$I_{15} = \min\{I_{15,1}, I_{15,2}, I_{15,3}\}$	$s_1\ s_6$	$I_{15,1} = I_{s_1 s_6}$	$s_2 s_5$	$I_{15,2} = I_{s_2 s_5}$	$s_3 s_4$	$I_{15,3} = I_{s_3 s_4}$
En iyi İletim Senaryosu		$b = \arg\maks\{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9, I_{10}, I_{11}, I_{12}, I_{13}, I_{14}, I_{15}\}$					

Optimum Grup Belirleme Yöntemi Karmaşıklığı

Optimum iletim senaryosu iletim senaryosu belirleme algoritmasında bulunan ω senaryodan bir tanesidir. Bu ω senaryodan optimum olanı;

$$b = \arg\ maks\{I_1, I_2, \dots, I_\omega\} \quad \textbf{(6.21)}$$

numaralı senaryodur. Ayrıca optimum senaryoya ait karşılıklı bilgi miktarı;

$$I = maks\{I_1, I_2, \dots, I_\omega\} \quad \textbf{(6.22)}$$

şeklindedir. ω olası iletim senaryo sayısıdır. Bölüm 6.2.2.1.1'de açıklanan iletim senaryolarını belirleme algoritmasından görüldüğü üzere öncelikle M kaynak arasından bir kaynak seçilir ve bu kaynak için bir grup oluşturulur. Burada seçilen kaynak kalan $M-1$ kaynak ile $M-1$ farklı şekilde grup oluşturabilir. Bir grup oluştuktan sonra sistemde $M-2$ kaynak kalmıştır ve bu $M-2$ kaynak arasından tekrar bir kaynak seçilir. Seçilen kaynak kalan $M-3$ kaynak yardımı ile $M-3$ farklı grup oluşturulabilir. Bu algoritma, sistemde 1 kaynak kalıncaya kadar devam eder. Buna göre, M kullanıcı olduğu durum için iletim senaryosu sayısı;

$$\omega = (M-1)!! = (M-1) * (M-3) * \dots * 1 \quad \textbf{(6.23)}$$

şeklinde hesaplanır. İletim senaryoları birbiri ile karşılaştırılarak en iyi iletim senaryosuna karar verilir. ω tane senaryo için yapılması gereken karşılaştırma miktarı $\omega - 1$ tanedir. Buna göre M kullanıcılı bir sistemin karmaşıklığı;

$$\xi_4 = \omega - 1 = (M-1)!! - 1 \quad \textbf{(6.24)}$$

şeklindedir. 4 ve 6 kullanıcı için karşılaştırma sayıları (karmaşıklıklar) Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3 : 4 ve 6 kullanıcılı sistemlerin karmaşıklık değerleri

ξ_4	$(4-1)!! - 1 = 2$
ξ_6	$(6-1)!! - 1 = 5.3.1. = 14$

6.2.3.2 Sıralı Grup Seçme Yöntemi

Bu yöntemde grup belirleme işlemi ilk kaynaktan başlayarak ilerler. İçinde bulunacağı grubu seçen ilk kaynak s_1 kaynağıdır. İçinde bulunacağı grubu seçen son

kaynak ise s_M kaynağıdır. Bu nedenle bu yönteme sıralı grup seçme yöntemi denilmiştir.

Grup seçme işleminin s_1 kullanıcısı için başlayacağını söylemiştik. s_1 herhangi bir s_{i_1} kaynağıyla grup olduğu durumda s_1'in hedef ile arasındaki karşılıklı bilgi miktarı $I_{s_1 d;s_{i_1}}$ şeklinde olsun.($I_{s_1 d;s_{i_1}}$ karşılıklı bilgi miktarının çıkarılışı Bölüm 6.2.3'de verilecektir) . Buna göre, s_1 kaynağının olası tüm diğer kaynaklarla grup oluşturduğu düşünülerek;

$$I_{s_1 d;s_{i_1}} \ , \qquad i_1 = 1,2,3 \dots, M \tag{6.25}$$

hesaplanır. Burada M sistemdeki toplam kullanıcı sayısıdır. Tüm kaynakların tek tek s_1 ile grup oluşturduğu düşünülerek karşılıklı bilgi miktarları hesaplandıktan sonra en iyi grubu belirlemek için hesaplanan bu karşılıklı bilgi miktarlarından en büyüğü seçilir ve s_1 ile ilişkilendirilir. En iyi ortağı seçmek için;

$$s_{i_1} = \arg maks \left\{ I_{s_1 d;s_{i_1}} \right\} \ , \qquad i_1 = 2,3 \dots, M \tag{6.26}$$

algoritması çalışır. Buna göre, s_1 kaynağı için en iyi ortak en büyük karşılıklı bilgi miktarını sağlayan ortak olacaktır. s_1 kaynağı için en iyi ortak belirlenmiştir ve bu kaynak s_{i_1} kaynağıdır. Daha sonra s_2 için en iyi grup belirlenmelidir. s_1 ile grup oluşturan kaynak s_2 kaynağı değil ise ($s_{i_1} \neq s_1$) s_2 için grup belirleme işlemi başlar. Ancak, s_2 için grup belirlerken s_1 ve s_{i_1} kaynakları dikkate alınmayacaktır. Çünkü bu kaynaklar bir grup oluşturmuştur ve yeni bir gruba katılamazlar. Buna göre s_2 için;

$$s_{i_2} = \arg maks \left\{ I_{s_2 d;s_{i_2}} \right\} \ , \qquad i_2 = 3 \dots, M \ , \qquad i_2 \neq \ i_1 \tag{6.27}$$

kaynağı en iyi ortak olacaktır. (6.23) ve (6.24) ifadelerini genelleştirerek herhangi bir s_j kaynağı için en iyi ortak;

$$s_{i_j} = \arg maks \left\{ I_{s_j d;s_{i_j}} \right\} \ , \qquad i_j = j + 1 \dots, M \ , \qquad i_j \neq \ i_q \ , q < j \tag{6.28}$$

kaynağı olacaktır. Bu grup belirleme yönteminin karmaşıklığını inceleyelim. İlk adımda, s_1 kaynağı için en iyi ortak araştırılmaktadır. Buna göre, grupta olan ilk

elemanın s_1 olacağı bellidir. Grupta olacak ikinci eleman geriye kalan $(M-1)$ kaynak arasından seçilecektir. (6.24)'de de görüldüğü gibi s_1 kaynağına en uygun ortağı seçmek için $(M-1)$ tane karşılıklı bilgi miktarı hesaplanmıştır. Buna göre, s_1'e en uygun ortak $(M-1)-1$ karşılaştırma ile bulunur. s_1 kaynağı için en uygun ortak belirlendikten sonra, sistemde $(M-2)$ kaynak kalmıştır ve s_2 kaynağı için en iyi grup araştırılmaktadır. İkinci grupta s_2 kaynağının olacağı bellidir ve s_2'ye en uygun ortak $(M-3)$ kaynak arasından seçilecektir. $(M-3)$ kaynak arasından s_2'ye en uygun ortak (6.25)'de görülen $(M-3)$ adet karşılıklı bilgi miktarının karşılaştırılması ile bulunur. Buna göre, s_2'e en uygun ortak $(M-3)-1$ karşılaştırma ile bulunur. Son adımda, grup olabilecek iki kaynak kalır ve herhangi bir karşılaştırma gerekmeden grup oluşturulmuş olur. Öyleyse, sıralı grup seçme yönteminin karmaşıklığı;

$$\xi = (M-2) + (M-4) + \cdots + 0 \qquad \textbf{(6.29)}$$

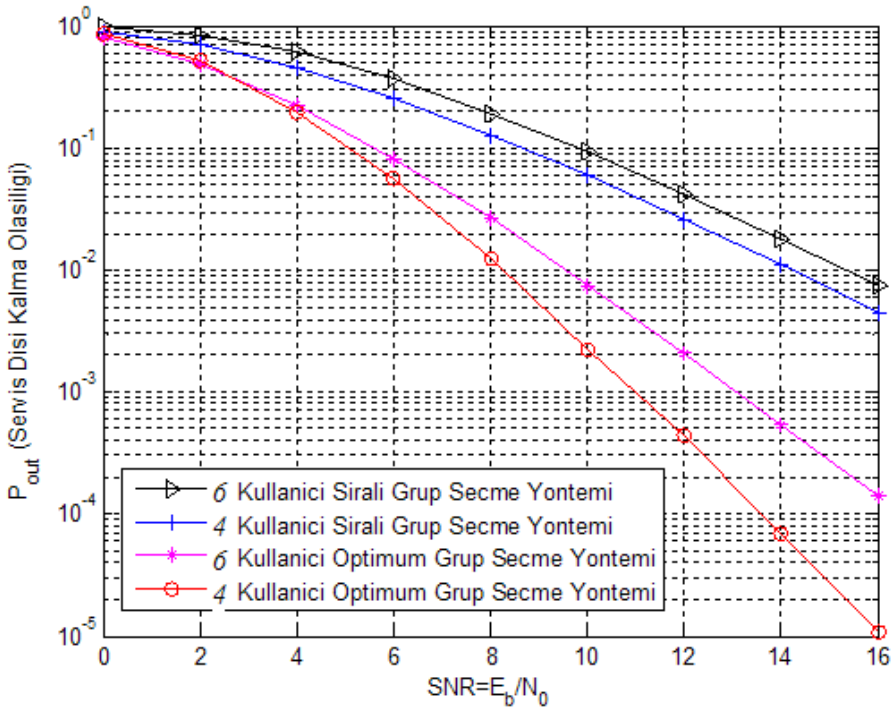
şeklinde olacaktır.

$M = 4$ için sıralı grup seçme algoritmasının işleyişi Şekil 6.4'de verilmiştir.

6.2.3.3 Grup Seçme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde optimum grup seçme yöntemi ile sıralı grup seçme yönteminin karmaşıklıkları ve servis dışı kalma olasılıkları karşılaştırılacaktır.

M kullanıcının bulunduğu bir sistemde optimum grup seçme yönteminin karmaşıklığı $\xi_o = (M-1)!! * \left(\frac{M}{2} - 1\right)$ iken sıralı gurup seçme yönteminin karmaşıklığı $\xi_s = (M-2) + (M-4) + \cdots + 0$ şeklindedir. Her M değeri için $\xi_o > \xi_s$ olacağı açıktır. Karmaşıklık olarak optimum grup seçme yöntemi daha başarısızdır. Grup seçme yöntemlerinin servis dışı kalma olasılıklarının karşılaştırılması Şekil6.1'de verilmiştir. Optimum grup seçme yöntemi başarımı sıralı grup seçme yöntemi başarımına göre oldukça iyidir. Optimum grup seçme yönteminde kullanıcı sayısı arttıkça başarım beklendiği gibi iyileşmektedir. Sıralı grup seçme yöntemi yine beklendiği gibi iyi sonuç vermemiştir. Sıralı grup seçme yönteminde kullanıcı sayısı arttıkça başarım kötüleşmiştir. Sıralı grup seçme yönteminin iyi sonuç vermemesinden dolayı karmaşıklığı yüksek olsa da çalışmanın bundan sonrasında optimum grup seçme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 6.4 : Grup seçme yöntemlerinin karşılaştırılması.

6.2.4 Servis Dışı Kalma Olasılığının Hesabı

Herhangi bir iletişim modelinde hedef ve kaynak arasındaki karşılıklı bilgi miktarı I olsun. I bir rastlantı değişkenidir ve belirli bir anda veri iletim hızı R' nin bu karşılıklı bilgi miktarı I'nın üzerine çıkması, alıcıdaki hata olasılığının 1'e yaklaşması anlamındadır. Bu nedenle $I<R$ olayına servis dışı kalma olayı, bu olayın olasılığına da servis dışı kalma olasılığı, denildiğini önceki bölümlerde belirtmiştik. Bu bölümde önerilen iletişim modeli için servis dışı kalma olasılığı hesaplanacaktır. İki kullanıcı toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yaptıklarında servis dışı kalma olasılığının;

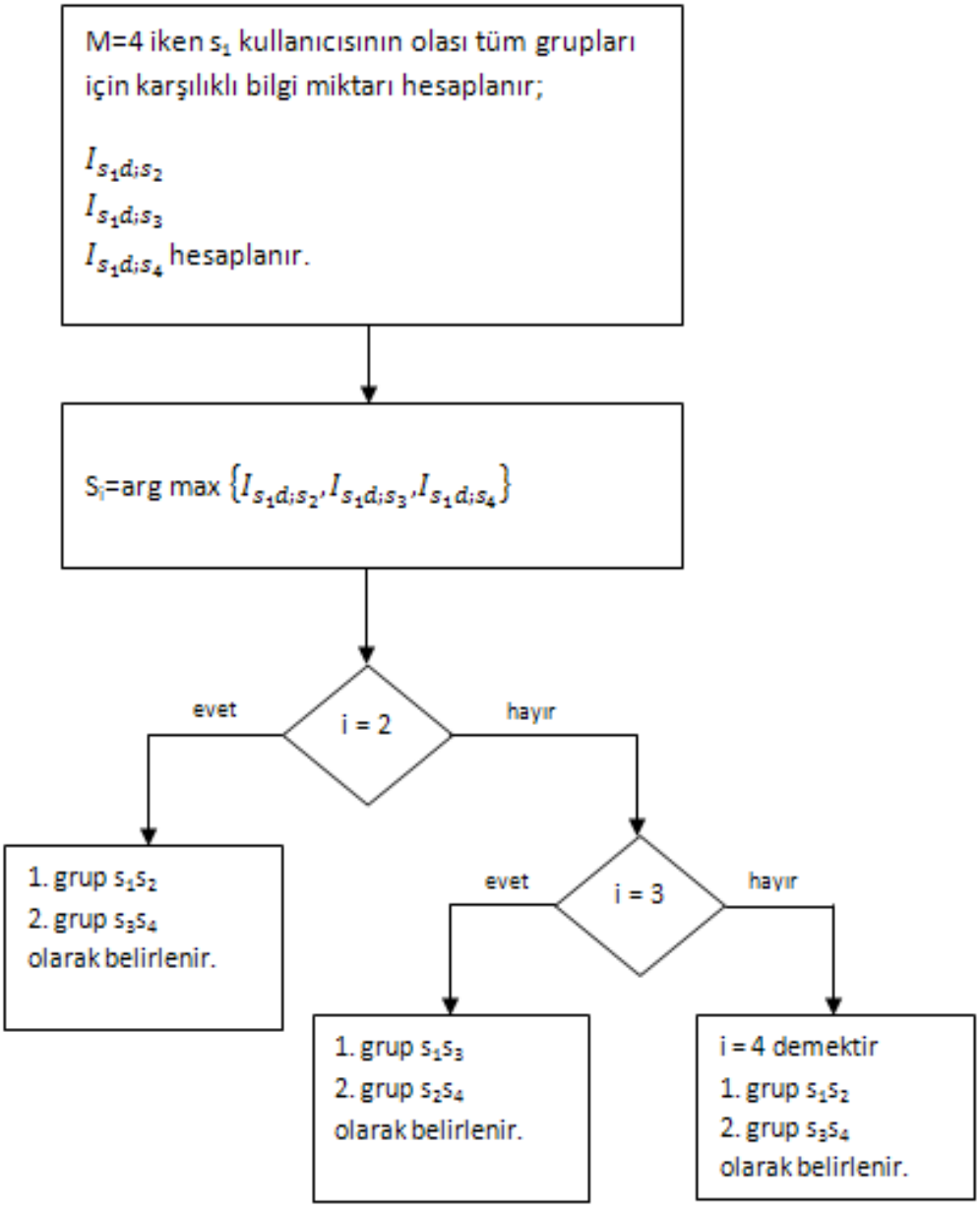
$$P_{out} = \frac{1}{SNR^2\lambda_1\lambda_2}\left(1 + \exp\left(2\tilde{R}\left(2\tilde{R} - 1\right)\right)\right) \qquad \textbf{(6.30)}$$

olacağını Bölüm 5.4.3' te göstermiştik. (6.30)' da $\lambda_1 = 1 + \gamma\sqrt{1-\gamma^2}$, $\lambda_2 = 1 - \gamma\sqrt{1-\gamma^2}$ ve $\tilde{R} = R\ln(2)$ şeklindedir. Burada R ile iletim hızı ve γ ise toplamsal modülasyonda kullanılan güç katsayısıdır. Bu hatırlamadan sonra optimum grup belirleme yöntemi için servis dışı kalma olasılığını hesaplayalım. Bu modelde, oluşturulan her bir grubun servis dışı kalma olasılığı aynıdır. Çünkü, gruplar birbirinden bağımsız olarak oluşturulur. Ayrıca her bir grupta iki kullanıcı olduğu

için bir grubun servis dışı kalma olasılığı (6.30)'daki gibidir. Buna göre, bir i. iletim senaryosundaki j. grubunun servis dışı kalma olasılığı;

$$P_{out-I_{i,j}} = P\left(I_{i,j} < R\right) = F_{i,j}(R)$$
$$= \frac{1}{SNR^2\lambda_1\lambda_2}\left(1 + \exp\left(2\tilde{R}\left(2\tilde{R} - 1\right)\right)\right), \qquad i = 1,2,..\omega \quad ve \quad j = 1,2,..,g \qquad \textbf{(6.31)}$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 6.5 : $\boldsymbol{M = 4}$ için sıralı grup seçme algoritması.

.

i. iletim senaryosu içerisindeki bir grubun servis dışı kalma olasılığı bulunduktan sonra i. iletim senaryosunun servis dışı kalma olasılığı hesaplanmalıdır. Bir iletim senaryosunun karşılıklı bilgi miktarının;

$$I_i = \min\{I_{i,j}\} \quad j = 1,2,\dots,g \tag{6.32}$$

şeklinde olduğunu söylemiştik. Servis dışı kalma olasılığının ise;

$$P_{out-I_i} = P(I_i < R) = \mathrm{P}(\min\{I_{i,j}\} < R) = F_i(R) \tag{6.33}$$

olduğu açıktır. (6.33)'e göre, $I_{i,1},\dots,I_{i,g}$ rastlantı değişkenleri arasındaki en küçük rastlantı değişkeninin olasılık dağılım işlevi bize i. iletişim senaryosunun servis dışı kalma olasılığını verecektir. Böylece iletim senaryosu için servis dışı kalma olasılığını bulma problemi, olasılık dağılım işlevleri birbirinin aynı ve birbirinden tamamen bağımsız olan g tane istatistiksel bağımsız rastlantı değişkenlerinin minimumunun olasılık dağılım işlevini bulmaya dönüşür. Bu problem *sıralı istatistikler (order statistics)* yöntemi ile çözülür.

Sıralı istatistiklere göre, $X_1, X_2, \dots, X_n$ birbirinden tamamen bağımsız rastlantı değişkenleri olsun. Bu rastlantı değişkenlerinin olasılık dağılım işlevleri birbirinin aynısı ve $F_{X_i}(x)$ şeklinde olsun. Buna göre; $X = min\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ rastlantı değişkeninin olasılık dağılım işlevi;

$$F_X(x) = 1 - \left[1 - F_{X_i}(x)\right]^n \tag{6.34}$$

şeklindedir [26]. $I_i = min\{I_{i,1}, I_{i,2}, \dots, I_{i,g}\}$ olduğuna göre, i. iletişim senaryosunun olasılık dağılım işlevi;

$$\begin{aligned} F_{I_i}(R) = P_{out-I_i} = P(I_i < R) &= 1 - \left[1 - F_{i,j}(R)\right]^g \\ &= 1 - \left[1 - P\left(I_{i,j} < R\right)\right]^g \end{aligned} \tag{6.35}$$

şekliyle ifade edilir. (6.35)'de (6.31)'i yerine yazarsak;

$$F_{I_i}(R) = 1 - \left[1 - \frac{1}{SNR^2\lambda_1\lambda_2}\left(1 + \exp\left(2\tilde{R}\left(2\tilde{R} - 1\right)\right)\right)\right]^g \tag{6.36}$$

elde edilir.

i. iletişim senaryosuna ait servis dışı kalma olasılığı bulunduktan sonra tüm sistemin servis dışı kalma olasılığı hesaplanmalıdır. Tüm sisteme ait karşılıklı bilgi miktarı;

$$I = max\{I_1, I_2, \dots, I_\omega\} \quad \textbf{(6.37)}$$

şeklindedir. Burada ω ile iletişim senaryosu sayısı belirtilmektedir. Tüm sistemin servis dışı kalma olasılığı sistemin karşılıklı bilgi miktarının olasılık dağılım işlevidir:

$$P_{out} = P(I < R) = F_I(R). \quad \textbf{(6.38)}$$

Ancak bu olasılık dağılım işlevini *sıralı istatistikler* yöntemi ile hesaplamak mümkün değildir. Çünkü sıralı istatistik ancak rastlantı değişkenleri bağımsız ise uygulanabilir. Oysa iletim senaryolarına ait $I_1, I_2, \dots, I_\omega$ rastlantı değişkenleri istatistiksel bağımsız değildir. Çünkü her I_i rastlantı değişkeni aynı kanal sönümleme katsayılarının birer işlevidir. Tüm sistemin olasılık dağılım işlevini bularak servis dışı kalma olasılığını hesaplamak istatistiksel bağımlılık nedeni ile oldukça zordur. Bu nedenle Dirichlet Süreç Karışımları (*Dirichlet Process Mixtures, DPM*) yöntemi ile tüm sistemin olasılık yoğunluk işlevi bulunmuştur.

6.2.4.1 Dirichlet Süreç Karışımları ile Tüm Sistemin Servis Dışı Kalma Olasılığının Hesabı

Karışım modelleri, veri dağılımlarını parametrik olarak ifade etmeye yarayan modellerdir. Karışım modelleri, çok karmaşık veri dağılımlarını basit dağılımların birleşimi şeklinde modellemeyi mümkün kılar. Modelleme sonucunda, her bir veri noktası karışımı oluşturan elemanlardan bir tanesine atanır. Kullanılan karışım elemanı sayısı veri noktası sayısından çok daha azdır. Bu nedenle, modelleme sonucunda veri noktaları karışım elemanlarının ortaları çevresinde kümelenir. Karışım modellemenin doğal bir sonucu olan bu kümelenme sayesinde, karışım modelleri dağılım modellemenin yanı sıra topaklama (clustering) amacıyla da sıkça kullanılmaktadır. Dirichlet süreci parametresiz dağılımı kullanılarak tanımlanan sonsuz sayıda karışım elemanından oluşan modeller son birkaç yıldır topaklama ve verinin olasılık yoğunluğunu öğrenme amacıyla yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır [27, 28, 29]. Burada, parametresiz dağılım terimi, adının önerdiğinin

tersine parametresi olmayan dağılımlar anlamında değil, sınırsız sayıda parametresi olan modeller anlamında kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, optimum grup belirleme yönteminin sistem karşılıklı bilgi miktarı modeli Gauss dağılımları kullanılarak belirlenmiştir.

Gauss karışımı (GK) modeli veri dağılımı modelleme ve olasılıksal topaklama yapmak için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. K bileşenden oluşan GK modeli eşitliği;

$$p(x_i|\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K) = \sum_{j=1}^{K} \pi_j \mathcal{N}(x_i|\mu_j, S_j) \tag{6.39}$$

Olup burada $\theta_j = \{\mu_j, S_j\}$ j. bileşenin parametreleri, π_j karışım oranları, μ_j ; j. Bileşenin ortalaması, S_j ise varyans matrisinin evriğidir. Bileşen parametrelerinin ortak bir olasılık dağılımı olan G_0'dan elde edildiğini düşünürsek, modeli şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\begin{aligned} x_i|c_i, \Theta &\sim \mathcal{N}(\mu_{c_i}, S_{c_i}) \\ c_i|\pi &\sim Ayrık(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_K) \\ (\mu_j, S_j) &\sim G_0 \\ \pi|\alpha &\sim Dir(\alpha/K, \dots, \alpha/K) \end{aligned} \tag{6.40}$$

Burada $Ayrık(\cdot)$, ayrık (discrete) dağılımı, $Dir(\cdot)$ Dirichlet dağılımını, $(x \mid y)$ x'in koşullu dağılımını, ~ sembolü ise sembolün solundaki değişkenin hangi dağılımı izlediğini göstermektedir.

Bu K bileşenli karışım modelinde karışım oranları π_j parametrelerini tümlev alarak kaldırırsak ve bileşen sayısını sonsuza yakınsatırsak $K \to \infty$ limitinde Dirichlet süreci karışım modelini elde ederiz [28].

Başka bir şekilde ifade edersek, karışım oranlarının dağılımını $Dir(\alpha/K, \dots, \alpha/K)$ olarak tanımlayarak ve bileşen sayısını sonsuz yaparak Dirichlet süreci Gauss karışımı modelini elde edebiliriz.

Bu çalışmada, Dirichlet süreç karışım modeli kullanılarak 4 kullanıcı için SNR=5 dB iken ve SNR=15 dB iken optimum grup belirleme yöntemini kullanan bir sistemin karşılıklı bilgi miktarlarının olasılık dağılım işlevleri Gauss karışımları ile ifade

edilmiştir. Dirichlet süreç karışım modeli, 4 kullanıcılı bir sistemde SNR=5 dB iken optimum grup belirleme yöntemini kullanan bir sistemin karşılıklı bilgi miktarının 3 gauss sürecinden oluştuğunu söylemektedir. Ortalaması μ varyansı S olan bir Gauss dağılımı $\mathcal{N}(\mu, S)$ şeklinde gösterilsin. Optimum röle belirleme yöntemini kullanan 4 kullanıcılı bir sistemin SNR 5 dB iken karşılıklı bilgi miktarı;

$$I = \big((0.35)\mathcal{N}(1.02,0.10\ \ ) + (0.29)\mathcal{N}(1.47,0.06) + (0.36)\mathcal{N}(1.2,0.09)\big) \quad \textbf{(6.41)}$$

şeklinde üç Gauss sürecinin toplamı olarak bulunmuştur.

Sistemin karşılıklı bilgi miktarına ait olasılık yoğunluk işlevi;

$$p(I) = 0.35\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi 0.10}}e^{-\frac{(I-1.02)^2}{0.10}}\right) + 0.29\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi 0.06}}e^{-\frac{(I-1.47)^2}{0.06}}\right) + 0.36\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi 0.09}}e^{-\frac{(I-1.2)^2}{0.09}}\right) \quad \textbf{(6.42)}$$

şeklindedir. Bulunan Gauss karışımının olasılık yoğunluk işlevi ve sistemin benzetim ile elde edilen karşılıklı bilgi miktarına ait olasılık yoğunluk işlevi Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.6'dan görüldüğü üzere, optimum grup belirleme yönteminin benzetim ile elde edilen olasılık yoğunluk işlevi, Dirichlet süreç karışımları yöntemi ile bulunmuş olan olasılık yoğunluk işlevi ile uyuşmaktadır. Buna göre, 4 kullanıcılı optimum grup belirleme yöntemini kullanan bir sistemin karşılıklı bilgi miktarının SNR 5 dB için (6.41)'deki gibi modellenebileceğini söyleyebiliriz. Öyleyse, optimum grup belirleme yöntemini kullanan 4 kullanıcılı bir sistemin SNR 5 dB iken teorik servis dışı kalma olasılığı;

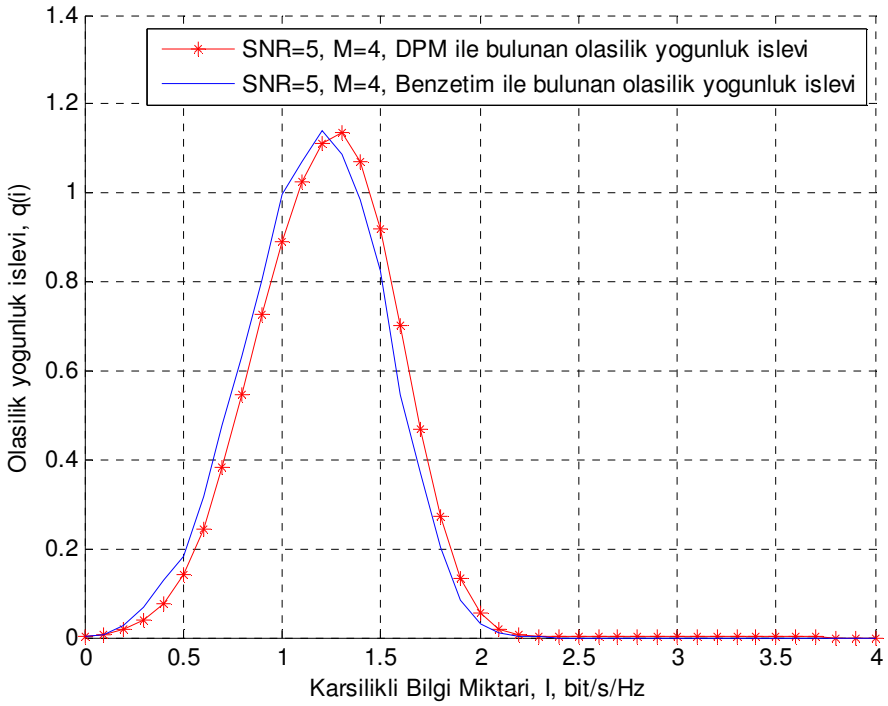
$$P(I < R) = \frac{0.35}{2}\left(1 + erf\left(\frac{I-1.02}{\sqrt{2.0.10}}\right)\right) + \frac{0.29}{2}\left(1 + erf\left(\frac{I-1.47}{\sqrt{2.0.06}}\right)\right) + \frac{0.36}{2}\left(1 + erf\left(\frac{I-1.2}{\sqrt{2.0.09}}\right)\right) \quad \textbf{(6.43)}$$

şeklindedir.

Burada;

$$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2}\, dt \tag{6.44}$$

şeklindedir.



Şekil 6.6 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=5 dB için Dirichlet süreç karışım modeli ile bulunan olasılık dağılım işlevinin benzetim ile bulunan olasılık dağılım işlevi ile karşılaştırılması.

(6.43)'de verilmiş olan teorik servis dışı kalma olasılığı ve benzetim ile elde edilen servis dışı kalma olasılığı eğrileri Şekil 6.7'de verilmiştir. Şekil 6.7'de benzetim ve teorik olarak bulunan servis dışı kalma olasılığı eğrilerinin birbiriyle örtüştüğü görülmektedir. Daha sonra, kullanıcı sayısı yine 4 iken SNR 15 dB'ye çıkarılarak tüm sistemin karşılıklı bilgi miktarı Drichlet süreç karışımları ile modellenmiştir. SNR 15 iken 4 kullanıcının bulunduğu optimum grup belirleme yöntemini kullanan bir sistemin karşılıklı bilgi miktarı;

$$I = \big((0.36)\mathcal{N}(2.7,0.20\ \ ) + (0.28)\mathcal{N}(3.34,0.13) + (0.36)\ \mathcal{N}(2.51, 0.3)\big) \tag{6.45}$$

şeklinde modellenir.

Sistemin karşılıklı bilgi miktarına ait olasılık yoğunluk işlevi;

$$p(I) = 0.36\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi 0.20}}e^{-\frac{(I-2.7)^2}{0.20}}\right) + 0.28\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi 0.13}}e^{-\frac{(I-3.34)^2}{0.06}}\right) + 0.36\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi 0.03}}e^{-\frac{(I-2.51)^2}{0.09}}\right) \quad \textbf{(6.46)}$$

şeklindedir. Bulunan Gauss karışımının olasılık yoğunluk işlevi ve sistemin benzetim ile elde edilen karşılıklı bilgi miktarına ait olasılık dağılım işlevi Şekil 6.8'de verilmiştir. Şekil 6.8'den görüldüğü üzere, optimum grup belirleme yönteminin benzetim ile elde edilen olasılık yoğunluk işlevi, Dirichlet süreç karışımları yöntemi ile bulunmuş olan olasılık yoğunluk işlevi ile uyuşmaktadır. Buna göre, 4 kullanıcılı optimum grup belirleme yöntemini kullanan bir sistemin karşılıklı bilgi miktarının SNR 15 dB için (6.44)'deki gibi modellenebileceğini söyleyebiliriz.

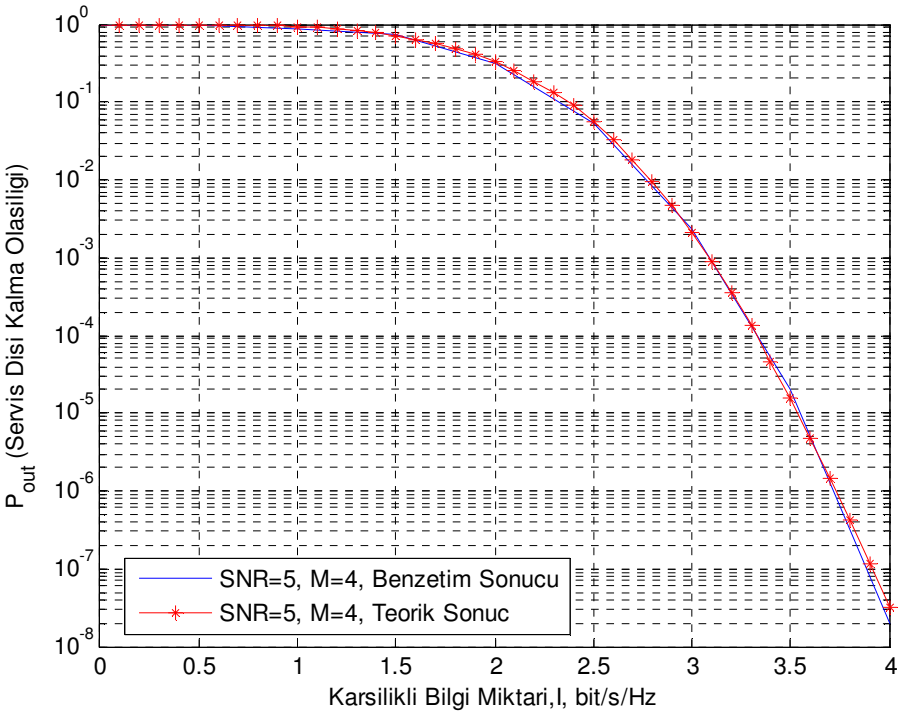
Buna göre, optimum grup belirleme yöntemini kullanan 4 kullanıcılı bir sistemin SNR 15 dB iken teorik servis dışı kalma olasılığı;

$$P(I < R) = \frac{0.36}{2}\left(1 + erf\left(\frac{I-1.27}{\sqrt{2.0.20}}\right)\right) + \frac{0.28}{2}\left(1 + erf\left(\frac{I-3.34}{\sqrt{2.0.13}}\right)\right) + \frac{0.36}{2}\left(1 + erf\left(\frac{I-2.51}{\sqrt{2.0.03}}\right)\right) \quad \textbf{(6.47)}$$

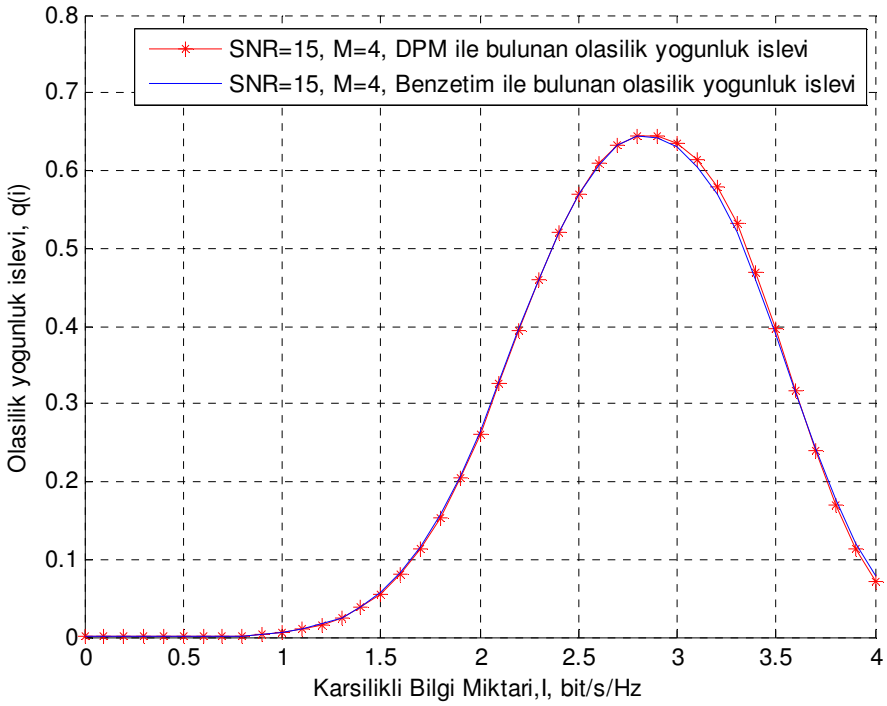
şeklindedir. (6.46)'de verilmiş olan teorik servis dışı kalma olasılığı ve benzetim ile elde edilen servis dışı kalma olasılığı eğrileri Şekil 6.9'da verilmiştir. Şekil 6.9'da benzetim ve teorik olarak bulunan servis dışı kalma olasılığı eğrilerinin birbiriyle örtüştüğü görülmektedir.

6.2.5 Başarım Sonuçları

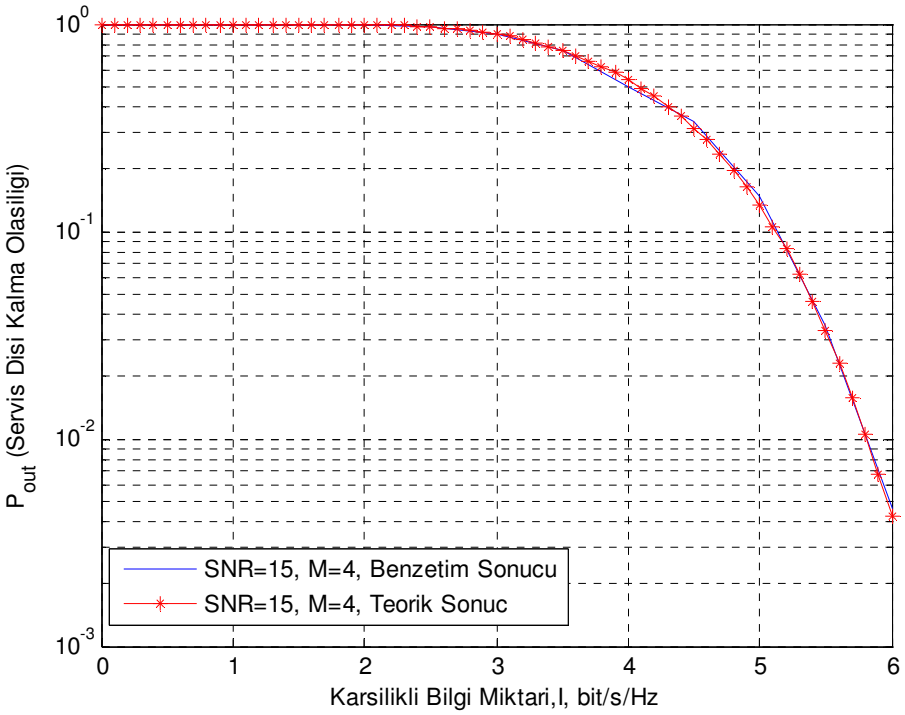
Şekil 6.11'de 4 kullanıcı için *çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi* ile *eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin* servis dışı kalma olasılıkları verilmiştir. 10^{-2} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin 1.8 dB kazanç sağladığı görülmektedir. 10^{-3} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi yine kazanç sağlamaktadır. Ancak eşlemeli toplamsal modülasyonlu



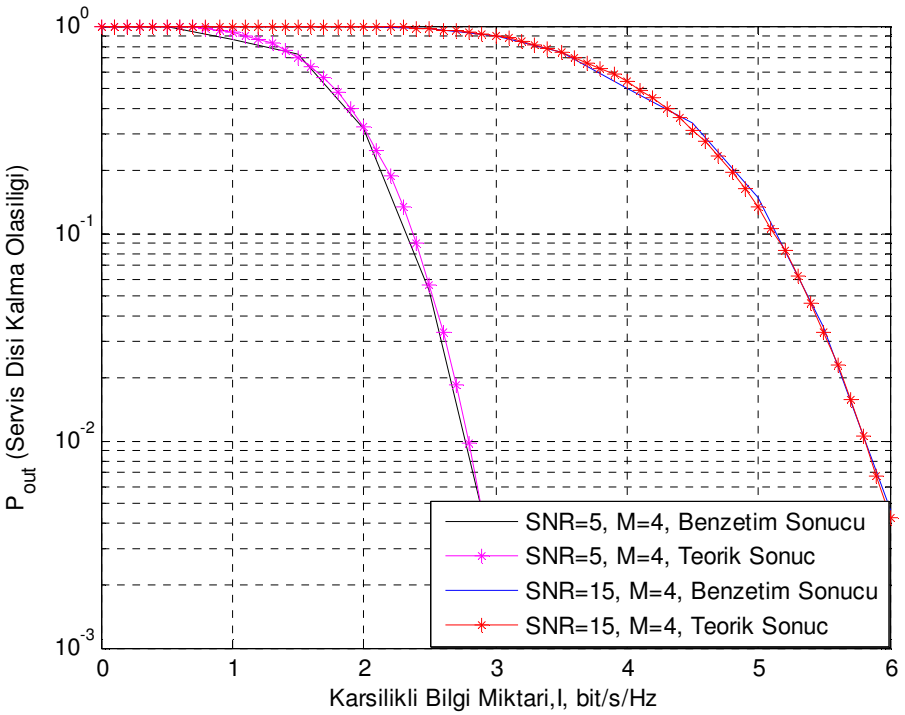
Şekil 6.7 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=5 dB için teorik olarak bulunan servis dışı kalma olasılığının benzetim ile bulunan servis dışı kalma olasılığı ile karşılaştırılması.



Şekil 6.8 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=15 dB için Dirichlet süreç karışımları modeli ile bulunan olasılık dağılım işlevinin benzetim ile bulunan olasılık dağılım işlevi ile karşılaştırılması.



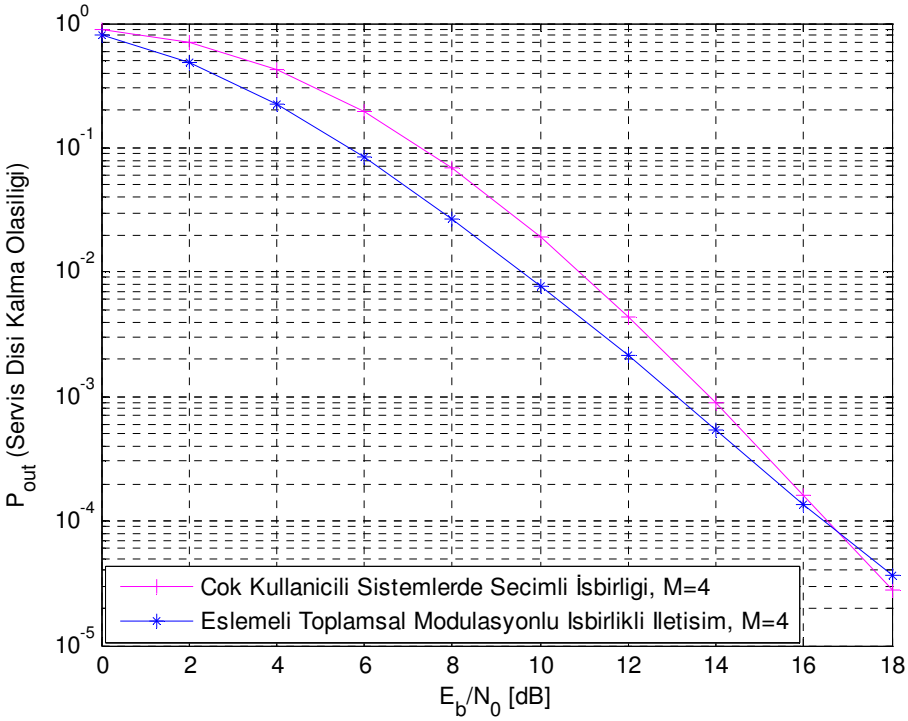
Şekil 6.9 : Kullanıcı sayısı 4 ve SNR=15 dB için teorik olarak bulunan servis dışı kalma olasılığının benzetim ile bulunan servis dışı kalma olasılığı ile karşılaştırılması.



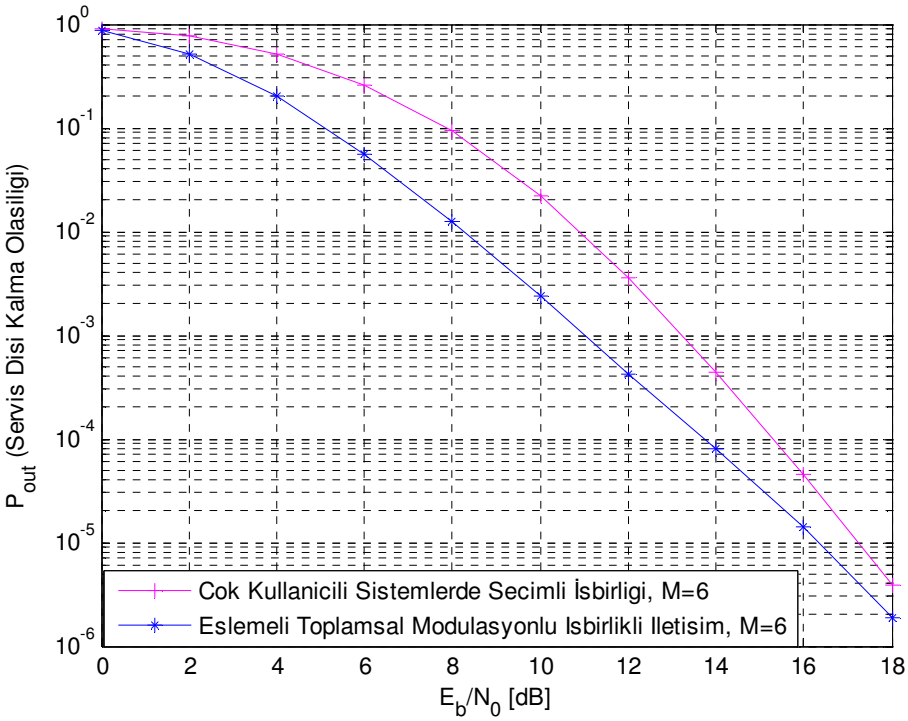
Şekil 6.10 : SNR 5 dB ve SNR 15 dB için tüm benzetim ve teorik servis dışı kalma olasılığı eğrilerinin bir arada gösterimi.

işbirlikli iletişim yönteminin sağladığı kazanç 0.8 dB'e düşmüştür. 7.10^{-5} servis dışı kalma olasılığına her iki yöntem de 16.8 dB'de ulaşmışlardır SNR 16.8 dB değerini geçtikten sonra çok kullanıcılı sistemlerde işbirliği yönteminin daha iyi başarıma sahip olduğu görülmüştür.

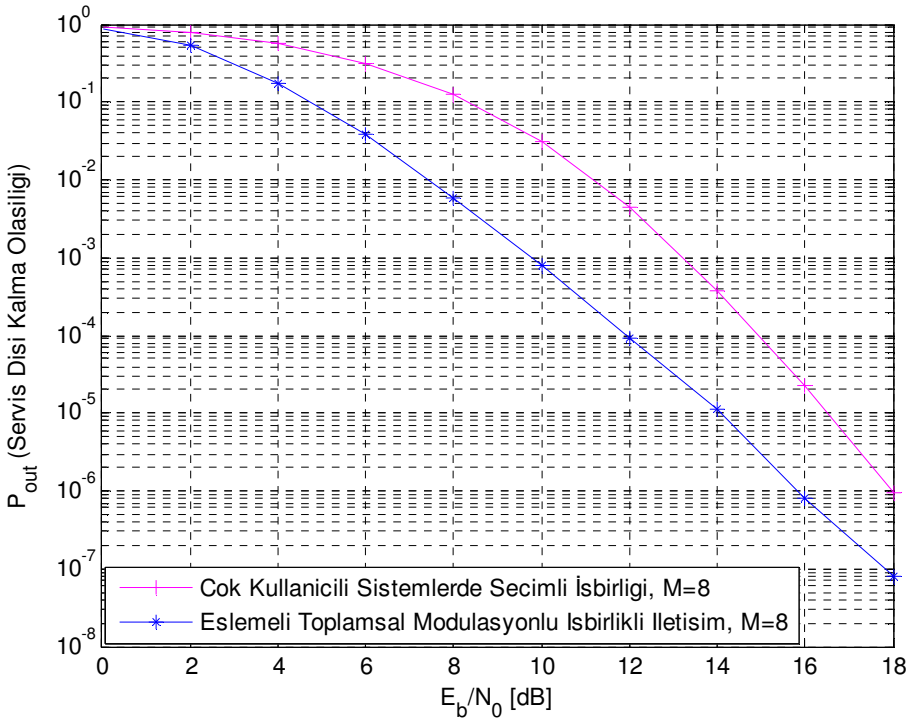
Şekil 6.12'de 6 kullanıcı için çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi ile eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin servis dışı kalma olasılıkları verilmiştir. 10^{-2} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin 3 dB kazanç sağladığı görülmektedir. 10^{-3} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin kazancı 2 dB'dir. 10^{-4} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi yine kazanç sağlamaktadır. Ancak eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin sağladığı kazanç 1.2 dB'e düşmüştür. 6 kullanıcı için çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi ile eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi karşılaştırıldığında her E_b/N_0 değerinde eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin daha başarılı olduğu görülmüştür. Ancak E_b/N_0 değeri artıkça sistemlerin başarımı birbirine yaklaşmaktadır. Şekil 6.14'de kullanıcı sayısı artırıldığında çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yönteminin servis dışı kalma olasılığı verilmiştir. Şekil6.14'de E_b/N_0 değeri 12 dB'den sonra kullanıcı sayısı arttıkça servis dışı kalma olasılığının iyileştiği görülmektedir. Burada E_b/N_0'ın 12dB'den önceki değerlerinde servis dışı kalma olasılığının kullanıcı sayısından bağımsız gibi görünmesinin nedeni; bu eğrinin çizdirilirken kaynak-röle arasındaki yolun gürültüsüz olarak alınmasıdır. Şekil 6.15'de eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin kullanıcı sayısı değişirken servis dışı kalma olasılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kullanıcı sayısı arttıkça servis dışı kalma olasılığının düştüğü görülmektedir. Şekil 6.13'de 8 kullanıcı için çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi ile eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin servis dışı kalma olasılıkları verilmiştir. 10^{-3} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin 3.8 dB kazanç sağladığı görülmektedir. 10^{-4} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin kazancı 3 dB'dir. 10^{-6} servis dışı kalma olasılığında, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi yine kazanç sağlamaktadır. Ancak eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin



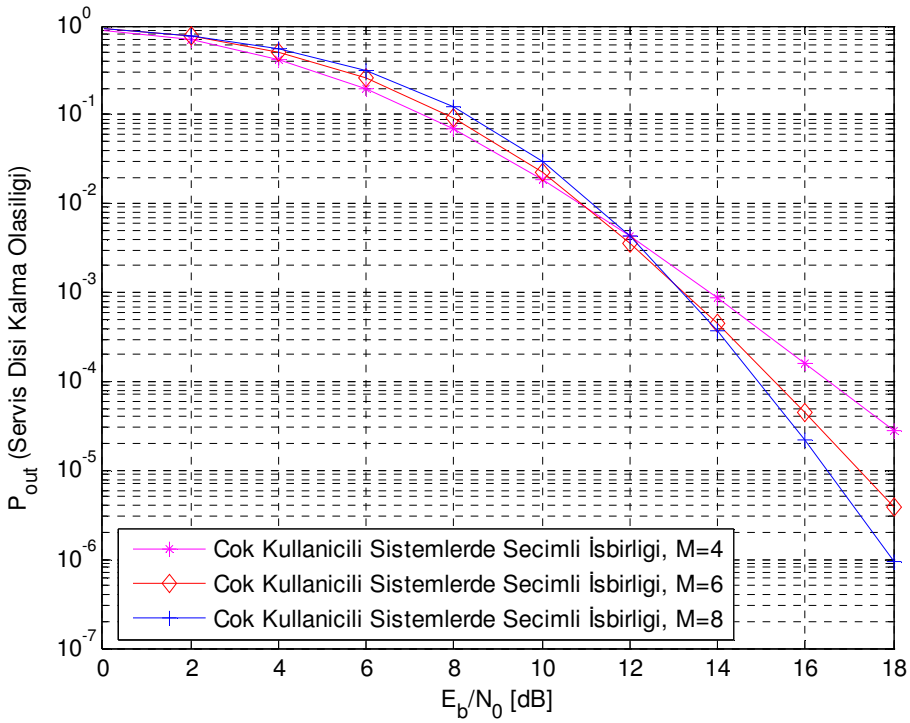
Şekil 6.11 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği ve eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin 4 kullanıcı için servis dışı kalma olasılıkları.



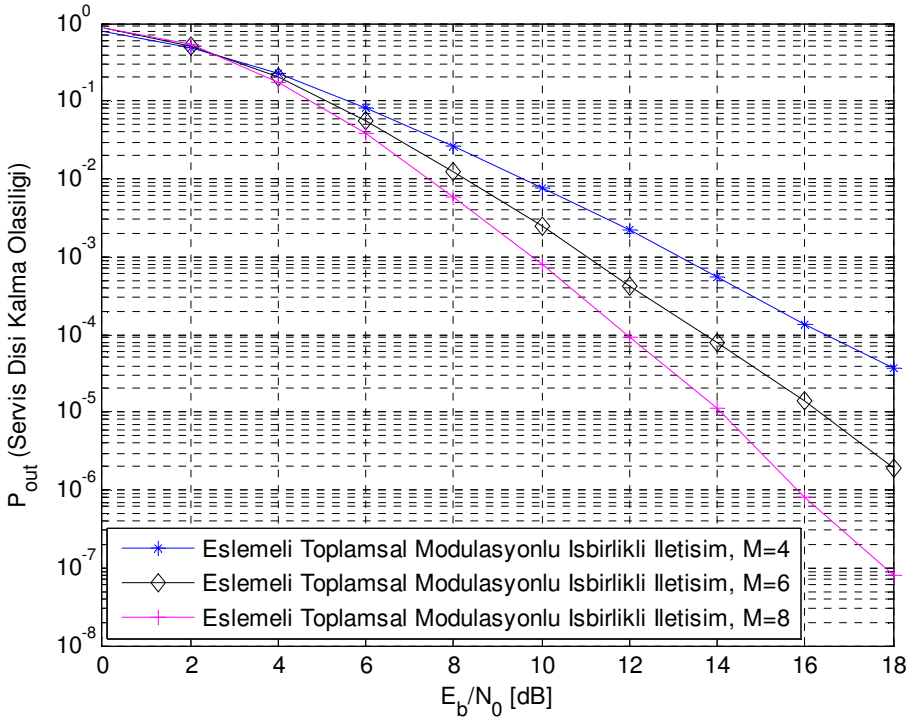
Şekil 6.12 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği ve eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin 6 kullanıcı için servis dışı kalma olasılıkları.



Şekil 6.13 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği ve eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişimin 8 kullanıcı için servis dışı kalma olasılıkları .



Şekil 6.14 : Çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yönteminin kullanıcı sayısı değişirken servis dışı kalma olasılığı üzerindeki etkisi.



Şekil 6.15 : Eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin kullanıcı sayısı değişirken servis dışı kalma olasılığı üzerindeki etkisi .

sağladığı kazanç 2.2 dB'e düşmüştür. 8 kullanıcı için çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği yöntemi ile eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi karşılaştırıldığında her E_b/N_0 değerinde eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin daha başarılı olduğu görülmüştür. Ancak E_b/N_0 değeri artıkça sistemlerin başarımları birbirine yaklaşmaktadır.

Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 birlikte incelendiğinde kullanıcı sayısı artırıldığında eşlemeli işbirlikli iletişimin çok kullanıcılı işbirlikli iletişime göre başarımının artarak iyileştiğini görmekteyiz. Kullanıcı sayısı artırıldığında iki yöntemin başarımları arasındaki fark giderek artmaktadır.

7. SONUÇLAR

Röleli işbirlikli iletişimde, sistem başarımını artırmak için en iyi röleyi belirleme ve bu röle ile işbirlikli çeşitleme yapmak etkin bir yaklaşımdır. Ancak kaynak-hedef arası kanal en iyi rölenin oluşturduğu kanallardan daha iyi olabilir. Bu durumda işbirliği yapmak başarımı artırmayacaktır. Bu tezde önerilen yöntemde, kaynak-hedef arası kanalın, en iyi rölenin oluşturduğu kanallardan daha iyi olduğu durumda işbirliği yapmaksızın doğrudan iletişim gerçekleştirilmiştir. Kaynak-hedef arası kanal kötü iken ise atlamalı (two-hop) yapı kullanılmıştır. Geliştirilmiş fırsatçı iletişim olarak adlandırdığımız bu yöntemin, her zaman en iyi röle ile işbirliği yapan temel fırsatçı iletişim modeline göre daha üstün olduğu gösterilmiştir. Geliştirilmiş fırsatçı iletişim yönteminin temel fırsatçı iletişim yönteminden yapısal olarak farkı kaynak düğümünün de kendine ait bir saatinin olmasıdır. Temel fırsatçı iletişimde olduğu gibi, yeni yaklaşımda da kaynak ve röleler fiziksel katmanlarında kanal durum bilgilerine (CSI) sahip değillerdir. Geliştirilmiş fırsatçı iletişimde kaynak hedef arası kanal, röleli kanaldan daha iyi ise iletim tek fazlı gerçekleşir. Böylece hızda da artış sağlanır. Ayrıca, tek fazlı iletişimin gerçekleşeceği durumda rölelerin dinleme durumunda olmaları gerekmez. İletişime katılmayacaklarını anladıklarında, uyku durumuna geçerek güç tasarrufu sağlarlar. Temel işbirlikli iletişimde her zaman iki fazlı iletim söz konusudur. İki fazda da hedef sürekli dinleme durumunda olmalıdır. Geliştirilmiş fırsatçı iletişimde ise işbirliği olsa dahi hedef birinci fazda uyku durumundadır.

Bu tezde ikinci olarak, *eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi* önerilmiştir. Bu modelde sistemde birden fazla kullanıcı olduğu kabul edilmiştir. Kullanıcılar kendilerine en uygun grupların içerisinde yer alır ve iletişim bu şekilde gerçekleştirilir. Kullanıcıların hangi grupta yer alacağı belirli bir algoritmaya göre belirlenir. Gruplar içerisindeki kullanıcılar toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi ile iletimlerini gerçekleştirir. Böylece iletim hızı klasik işbirlikli iletişime göre iki kat artmış olur. Eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yöntemi için servis dışı kalma olasılıkları bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiştir. Bu model

için kuramsal sonuçlar da hesaplanarak bilgisayar benzetimleri ile örtüştüğü gösterilmiştir. Ayrıca [10] ‘da önerilen “ çok kullanıcılı sistemlerde seçimli işbirliği ” yöntemi ile önerilmiş olan yeni yöntem karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirliği yönteminin daha düşük servis dışı kalma olasılığı sağladığı görülmüştür. Buna ek olarak, eşlemeli toplamsal modülasyonlu işbirlikli iletişim yönteminin [10]’da önerilen yöntemden iki kat daha yüksek iletim hızına sahip olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Jafarkhani, H.,** 2005. *Space-Time Coding Theory and Practice*, University of California, Irvine, 6-50.

[2] **Tarokh, V., Jafarkhani, H. ve Calderbank A. R.,** 1999. Space-Time Block Codes For Orthogonal Designs, *IEEE Transactions On Information Theory* , Vol. 45, No. 5, 1456- 1467.

[3] **Laneman, J.N. and Wornell, G.W.,** 2003. Distributed Space TimeCoded Protocols for Exploiting Cooperative Diversity in Wireless Networks. *IEEE Transactions On Information Theory*, Vol. 49, 2415-2425.

[4] **Bletsas, A., Lippman, A. and Reed, D. P.,** 2006. A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 24, No.3 March.

[5] **Larsson, E. G. And Vojcic, B. R.,** 2005. Cooperative Transmit Diversity based on Superposition Modulation, *IEEE Commun. Letters*, 9, 778-780.

[6] **Costa, M.**, 1983. Writing on Dirty Paper, *IEEE Transactions On Information Theory*, 29, 439-441.

[7] **Bui, T. and Yuan J.,** 2007. Iterative Approaches of Cooperative Transmission, Based on Superposition Modulation , *Proc. ISCIT'07*, 1423-1428.

[8] **Ishii, K.,** 2007. Superposition Modulated Cooperative Diversity for Half-duplex Scenario, *Journal of Communications*, 2, 20-27.

[9] **Ding, Z., Ratnarajah, T. and Cowan, C.C.F.,** 2007. On the Diversity-Multiplexing Tradeoff for Wireless Cooperative Multiple Access Systems, *IEEE Trans. Signal Process*., 55, 4627-4638.

[10] **Beres, E. and Adve R.,** 2008. Selection cooperation in Multi-Source Cooperative Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol.7, No. 1, 118-127.

[11] **Proakis, J. G. and Salehi , M.,** 1994. Communications Systems Engineering, Prentice - Hall.

[12] **Sklar B.,** 1997. Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems, *IEEE Communications Magazine*, 90- 109.

[13] **Stüber, G. L.,** 2000. Principles of Mobile Communication. Kluwer Academic Publishers.

[14] **Simon, M.K. and . Alouini M.S.,** 2000. Digital Communication over Fading Channels: *A Unified Approach to Performance Analysis*, 24-30.

[15] **V. der Meulen, E. C.,** 1971. Three-terminal Communication Channels, *Adv. Appl. Prob.*, 3, 120-154.

[16] **Cover, T. M. and El Gamal A. A.,** 1979. Capacity theorems for the relay channels, *IEEE Transactions On Information Theory*, Vol. 25, 572-584.

[17] **Laneman, J.N., Tse, D. N. C. and Wornell G. W.,** 2004. ,Cooperative Diversity in Weireless Networks: Efficient protocols and outage behaviour . *IEEE Transactions On Information Theory*, Vol. 50, 3062-3080.

[18] **Scaglione, A., Goeckel, D. L., Laneman, J. N.,** 2006. *Cooperative Communications in Mobile Ad Hoc Networks,* IEEE Signal Processing Magazine, September.

[19] **Nosratinia, A.,** 2004. *Cooperative Communication in Wireless Networks,* IEEE Communications Magazine, October.

[20] **Bletsas, A.**, 2005. Intelligent Antenna Sharing in Cooperative Diversity Wireless Network, *Ph.D. Dissertation, MIT Media Lab*, September.

[21] **Kurtis Kredo, I. and Mohapatra, P**., 2007. Medium Access Control in Wireless Sensor Networks, *Computer Networks*, Vol. 51, No. 4, 961-994.

[22] **Azarian, K., Gamal, H. E., Schniter P.,** 2005. On the Achievable Diversity-Multipexing Tradeoff in Half-duplex Cooperative Channels, *IEEE Trans. On Inf. Theory*, Vol. 51, 4152-4172.

[23] **Nabar, R. U., Bolcskei, H., Kneubuhler, F.W.,** 2004. Fading Relay Channels: Performance Limits and Space-Time Signal Design, *IEEE Trans. J. Sel. Areas Commun*, Vol.22, 1099-1109.

[24] **Barbarossa, S. and Scutari, G.,** 2004. Distributed Space-Time Coding for Multihop Networks, *IEEE International Conf. Commun., ICC 2004*, 916-920.

[25] **Uysal M. and Canpolat O.,**2005**.** On the Distributed Space-Time Signal Design for Large Number of Relay Terminals, *IEEE Wireless Commun. Networking Conf.*, 990-994.

[26] **A. Papoulis**, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 2. Baskı, New York: McGraw Hill, 1984.

[27] **Daumé III , H. and Marcu, D.**, 2005. A Bayesian Model for Supervised Clustering with the Dirichlet Process Prior, *Journal of Machine Learning Research*, vol. 6, 1551–1577.

[28] **Teh Y. W., Jordan M. I., Beal M. J., and Blei D. M.,** 2006. Hierarchical Dirichlet processes, Journal of the American Statistical Association, Vol. 101, No. 476, 1566–1581.

[29] **Teh Y. W.**, Hierarchical Bayesian nonparametric models with applications, in Bayesian Nonparametrics: Principles and Practice, N. Hjort, C. Holmes, P. Mueller, and S. Walker, Eds. Cambridge University Press, to appear.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Büşra YÜKSEL ÖZCAN

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 21.03.1984

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- B.Yüksel, Ü.Aygölü, "Geliştirilmiş Fırsatçı İletişim", *HABTEKUS09, Haberleşme Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu,* Y.T.Ü., İstanbul, Aralık 2009.
- B.Yüksel, Ö.Oruç, Ü.Aygölü, "En İyi Röle ile İşbirlikli İletişim ve Uzay Zaman Kodlaması ile Karşılaştırılması", *HABTEKUS08, Haberleşme Teknolojileri ve Uygulamaları Sempozyumu,* Y.T.Ü., İstanbul, Ekim 2008.