İşbirlikçi Bilişsel Radyo Sistemleri İçin Kodlama ve Kodçözme Teknikleri, Erişilebilir Veri Hızları ve Kaynak Tahsisi

Proje No:111E108

Doç. Dr. Onur Kaya

Saygın Bakşi

Çağatay Edemen

KASIM 2013

İSTANBUL

ÖNSÖZ

Bu proje Işık Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yürütülmüştür. Projenin başlangıç aşamasındaki katkıları için Araştırma Görevlileri Murat İşleyen ve Mehmet Güneş'e, çizge kuramı konusunda sağladığı değerli katkılar için Doç. Dr. Türker Bıyıkoğlu'na, proje boyunca sağlanan lojistik destek ile konferans destekleri için Işık Üniversitesi'ne, ve bu projeyi maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a içten teşekkürlerimizi sunarız.

İçindekiler

GİRİŞ **1**

LİTERATÜR ÖZETİ **6**

GEREÇ, YÖNTEM VE BULGULAR **13**

1 İki Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı **14**

1.1 İki Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı İçin Güç Tahsisi 14

1.1.1 Sistem Modeli 14

1.1.2 Erişilebilir Veri Hızlarının Enbüyüklenmesi 18

1.1.3 Benzetim Sonuçları 22

1.1.4 Sonuç 25

1.2 Birlikte Çöz-Sıkıştır İlet Tabanlı İşbirlikli Çoklu Erişim 26

1.2.1 Giriş 26

1.2.2 Sistem Modeli 27

1.2.3 Kodlama, Kodçözme ve Veri Hızları 28

1.2.4 Benzetimler ve Sonuçlar 33

2 Üç Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı **36**

2.1 İkili ve Toplu Yardımlaşmaya Dayalı Üç Kullanıcılı İşbirlikli Çoklu Erişim . . 36

2.1.1 Sistem Modeli 36

2.1.2 Kanal Kodlaması ve Kodçözme 38

2.1.3 Benzetim Sonuçları 41

2.2 Bir Birincil, İki İkincil Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalında Toplam Hız Eniyilemesi 46

2.2.1 Sistem Modeli 46

2.2.2 Kanal Kodlaması ve Kodçözme 47

2.2.3 Toplam Veri Hızlarını Eniyileme Problemi 49

2.2.4 Benzetim Sonuçları 53

2.3 Bir Birincil, İki İkincil Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalında İkincil Kullanıcıların Veri Hızı Bölgesinin Eniyilenmesi 57

2.3.1 Alta-serim Sistem Modeli 57

2.3.2 Üste-serim sistem modeli 60
2.3.3 Sistem modeli için güç dağılımındaki eniyileme problemi 62
2.3.4 Benzetim Sonuçları 65

3 Tek Hücreli Çok Kullanıcılı İşbirlikçi Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı 68
3.1 Sistem Modeli 68
3.2 Bilişsel Stratejiler ve Ulaşılabilir Veri Hızları 70
3.2.1 Üste-serim Modeli 70
3.2.2 Alta-serim Modeli 72
3.3 Birleşik En iyi Ortak Seçimi ve Güç Dağıtımı 73
3.3.1 En İyi Ortak Seçimi 75
3.3.2 $C^*_{i,j}$ için Güç Optimizasyonu 75
3.4 Benzetim Sonuçları 82
3.5 Sonuç 84

4 Çok Kullanıcı Çok Alıcılı İşbirlikli Çoklu Erişim Kanalı 85
4.1 FFR Sistem Modeli 85
4.2 Kodlama, Çözme ve Ulaşılabilir Veri Hızları 88
4.3 Birlikte Güç kontrolü ve İşbirlikçi Ortak Seçimi 90
4.4 Benzetim ve Sonuçlar 92
4.5 Sonuç 94

TARTIŞMA VE SONUÇ 95

KAYNAKÇA 100

Şekil Listesi

1 İki kullanıcılı işbirlikli bilişsel çoklu erişim kanalı. 15
2 Güç kontrolü ve kullanıcı işbirliği ile erişilebilen hız bölgeleri. 23
3 Farklı s_{pr} ve s_{sr} değerleri için güç dağılımı. 23
4 Farklı s_{pr} ve s_{ps} değerleri için güç dağılımı. 24
5 İki kullanıcılı işbirliği kanalı. 28
6 $P_1=5$, $P_2=10$, $\sigma_0^2=\sigma_1^2=\sigma_2^2=5$ için veri hızları. 34
7 $P_1=P_2=10$, $\sigma_0^2=\sigma_1^2=\sigma_2^2=1$ için veri hızları. 35
8 Önerilen işbirlikli çoklu erişim modeli. 37
9 İki kullanıcılı Sendonaris vd. (2003), üç kullanıcılı adaptif Edemen ve Kaya (2008b) ve önerilen üç kullanıcılı işbirlikçi haberleşme metodlarının erişilebilir veri hızı değerlerinin karşılaştırılması. 42
10 İki kullanıcılı, üç kullanıcılı çoklu erişim röle kanalı ve önerilen üç kullanıcılı işbirlikçi haberleşme metodlarının erişilebilir veri hızı değerlerinin karşılaştırılması. 43
11 Simetrik ve asimetrik sönümlenme katsayılarında aktif kod sözcüklerinin gösterilmesi. 44
12 İkişerli ve üçerli işbirliği modellerinin toplam erişilebilir veri hızı değerlerinin karşılaştırılması. 45
13 Önerilen sistem modeli. 46
14 Subgradient metodu ile her bir kısıt fonksiyonunda elde edilen toplam veri hızı. 54
15 Önerilen sistem modeli ile referans model karşılaştırması. 55
16 Üç kullanıcılı alta-serim sistem modeli. 58
17 Üç kullanıcılı üste-serim sistem modeli. 61
18 Üç kullanıcılı üste-serim sistem modeli. 66
19 Üç kullanıcılı üste-serim sistem modeli. 67
20 Çok kullanıcılı işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalı. 70
21 Örnek işbirlikçi bilişsel sistem. 75
22 Herhangi bir işbirlikçi bilişsel sistemin çizge eşdeğeri. 76
23 Örnek bir benzetim çalışması sonucu eşleşmeler. 83

24 Sadece güç kontrolüne bağlı kapasite alanları ve işbirlikçi bilişsel sistemde ikincil kullanıcıların veri hızı alanları. 84
25 Önerilen zıt kısmi frekans tekrarı ile klasik kısmi frekans tekrarının kıyaslaması. 87
26 İç ve dış kullanıcılar için karışıma sebep olan kaynakların konumları. 89
27 Uzak kullanıcılar için çözüm basamakları. 91
28 Benzetim sonuçları sistem toplam veri hızları. 93
29 Örnek benzetim sonucunda elde edilen ortak seçimi. 94

Tablo Listesi

1 Önerilen sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı. 38

2 Önerilen sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı. 48

3 Altserim sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı. 59

4 Üste-serim sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı. 62

5 İşbirlikli ve işbirliksiz protokolleri için kullanıcı veri hızı kıyasları. 93

ÖZET

İşbirlikli iletişim ve bilişsel radyo, yeni nesil kablosuz haberleşme ağlarında kapasite ve iletişim kalitesinin artırımı için kilit tekniklerdir. Bu tekniklerin her ikisi de, çevrelerinin farkında olan ve bu farkındalığı gönderim stratejilerini belirlerken kullanabilen akıllı düğümlere dayalı olduğundan, yeni nesil protokollerin tasarımında bir arada ele alınmaları son derece doğaldır. Bu projenin temel amacı, kablosuz ağlarda bu iki tekniği bir arada kullanabilen yeni işbirliği stratejileri geliştirmek, ve bunlar ile elde edilebilecek veri hızlarını özkaynakların verimli tahsisi ile eniyilemektir.

Projede, iki kullanıcı - tek alıcılı, üç kullanıcı - tek alıcılı, çok kullanıcı - tek alıcılı ve çok kullanıcı - çok alıcılı olmak üzere dört farklı işbirlikli çoklu erişim modeli ele alınmıştır. Bunların ilk üçünde, birincil kullanıcılara belirli veri hızı garantileri sağlanırken, ikincil kullanıcıların ya da tüm sistemin veri hızlarını eniyileyen güç tahsisi algoritmaları geliştirilmiştir. Çok kullanıcı - tek alıcılı sistemde, birincil ve ikincil kullanıcılar arası işbirliği çiftler halinde modellendiğinden, ayrıca en iyi işbirlikçi ortak seçimi de ele alınmıştır. Çok kullanıcı - çok alıcılı hücresel sistem modelinde ise, kullanıcıların hem işbirlikçi ortak, hem de alıcı seçimini güç tahsisi ile birlikte veri hızlarını en büyükleyecek şekilde seçebilecekleri bir kaynak tahsisi algoritması geliştirilmiş, hücre kenarındaki kullanıcılar arasında işbirliğini ve alıcı seçimini mümkün kılmak amacıyla özgün bir zıt kısmi frekans tekrarı modeli önerilmiştir. Ele alınan tüm problemlerde, veri hızlarının aynı miktarda kaynak kullanılmasına karşın yardımlaşma sayesinde kayda değer biçimde artırılabildiği gösterilmiştir. Sonuç olarak, proje kapsamında bilgi kuramsal yaklaşımlarla elde edilen temel sonuçlar bilişsel radyo ile işbirlikli iletişimin kablosuz ağlarda bir arada ele alınmasının faydasına ve gerekliliğine işaret etmektedir.

ABSTRACT

Cooperative communication and cognitive radio are key techniques for increasing the capacity and quality of service of the next generation wireless communication networks. Both of these techniques rely on intelligent nodes, which are aware of their surroundings, and are capable of using this awareness to determine their transmit strategies. Therefore, it is quite natural to consider the joint use of these techniques in the design of next generation communication protocols. The main goal of this project is to develop new cooperation strategies capable of combining cognition and cooperation in wireless networks, and to optimize the rates achievable by these strategies via efficient utilization of the available resources.

In this project, we consider four different cooperative multiple access models: two user - single receiver; three user - single receiver, multi user - single receiver and multi user - multi receiver models. The first three models aim to optimize either the rates of the secondary users, or the sum rate of the system, under hard single user rate guarantees for primary users, via power control. In the multi user - single receiver model, the cooperation among the primary and secondary users is modeled as pairwise cooperation, hence, in this scenario, we also solve the optimal partnering problem. In the multi user - multi receiver cellular model, we obtain the jointly optimal power allocation, receiver selection and cooperating partner selection policies that maximize the sum rate of the system. In order to facilitate cooperation among the cell edge users, and receiver selection, we propose a novel complementary fractional frequency reuse scheme, directly tailored for cognitive cooperation.

In all of the problems that were considered, it was shown that despite the same amount of total resources being used, the achievable rates can be increased significantly, thanks to cooperation. In conclusion, the fundamental results obtained in this project, based on information theoretic approaches, point to the usefulness, and the necessity of joint consideration of cognition and cooperation in wireless networks.

GİRİŞ

Kablosuz iletişim kanalı, her ne kadar sinyallerin serbestçe yayılması nedeniyle yarattıkları karışım ile başa çıkmayı gerektirdiği için zorlu bir kanal modeli olsa da, bu sinyalleri karışım olarak değil de ek bilgi olarak algılayıp faydalanabilecek akıllı cihazların gitgide daha erişilebilir hale gelmesi sayesinde de yeni haberleşme protokollerinin tasarımı açısından pek çok iyileştirmeye gebedir.

Kablosuz kanalların, kullanıcıların gönderdikleri sinyallerin biribirleri tarafından duyulabilmesi sonucu ortaya çıkan çeşitleme özelliğine kullanıcı işbirliği çeşitlemesi adı verilir. Bu sayede, gönderi yapacak kullanıcıların aynı zamanda diğer kullanıcıların mesajları için röle vazifesi görebilecek akıllı düğümler olarak seçilmesiyle, söz konusu çeşitleme veri hızlarında kazanca dönüştürülebilir. Bu doğrultuda uygulanan, ve genel olarak işbirlikçi haberleşme adı verilen tekniklerin temelleri rölenin kendi gönderecek mesajı bulunmadığı en basit işbirlikçi model olan röle kanalına dayanmasına karşın, son yıllarda röle olarak görev yapacak kullanıcıların da kendilerine ait mesajları bulunduğu durum da yoğun bir biçimde araştırılmıştır. Bu projede ele alınan sistemler de, iletişime dahil olan tüm düğümlerin gönderilecek mesajlara sahip olduğu, ve bunlardan bazılarının işbirliği yaparak gönderilerini gerçekleştirdiği modellere dayalıdır.

Kablosuz teknolojilerin artan popülerliği nedeniyle, hem bu teknolojileri kullanan farklı uygulamaların, hem de kullanıcıların sayısı hızla artmakta, bu da güç, frekans, zaman, hatta haberleşmenin sürdüğü ortam gibi kaynakların daha etkin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Özellikle frekans tayfının farklı uygulamalara atanması ile kullanılabilir frekanslar gitgide azalmış, bu nedenle daha önce birtakım uygulamalar/amaçlar için atanmış frekans aralıklarının daha etkin kullanımı, hatta yeni uygulamalarda ikincil kullanıcılar tarafından paylaşımı önem kazanmıştır. Bu noktada, öncelikli olarak frekans bandını akıllı bir biçimde kullanmak amacı ile, bilişsel radyo (BR) adı verilen bir teknoloji hızla ön plana çıkmıştır. Bugün algılandıkları şekilleri ile, bilişsel kullanıcılar, bulundukları ortamın, o ortamdaki diğer kullanıcıların aktivitesi, gönderdikleri sinyaller, kullandıkları kod sözcükleri ve kanal durumları açısından farkında olan, ve gönderilerini, birincil kullanıcıların iletişimini kötü yönde etkilememek kaydı ile bunlara göre planlayan kullanıcılardır. Bu açıdan bakıldığında, ilk ortaya atıldığında daha çok frekans tayfındaki boşlukları kestirerek kullanma prensibi ile önerilen örgüleme (interweave), ya da birincil kullanıcılarda bir limit dahilinde karışıma göz yuman alta-serim (underlay) gibi tekniklerle ön plana çıkan BR teknolojisinin ötesinde, gönderime

daha aktif olarak katılan, ve diğer kullanıcıların sinyal/kodsözcüklerini hesaba katarak haberleşen bilişsel kullanıcılara dayalı üste-serim (overlay) yöntemine eğilim son yıllarda gitgide artmaktadır. Bu noktada, BR ile işbirlikçi iletişimin dayandığı prensiplerin kesiştiği açıktır: Her iki yaklaşımda da, kablosuz ortamın sağladığı yan bilgi, ve bundan yararlanan akıllı ve yetenekli düğümler kilit rol oynamakta, ve gelecek nesil sistemlerde kullanılacak bilişsel tekniklerin, işbirliğine dayalı olması kaçınılmaz olarak görülmektedir.

Bu projede, hem işbirlikçi haberleşme çerçevesinde bilinen tekniklerin, BR terminalleri içeren sistemlere uyarlanması, hem de, doğrudan bilişsel kanallara özel işbirlikçi kodlama/kodçözme stratejilerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Buna göre, temel amaç, birincil kullanıcıların veri hızlarını aynı seviyede tutarken, ya da artırırken, ikincil kullanıcıların da erişebilecekleri en yüksek hızlara ulaşmalarını sağlayacak kodlama/kodçözme ve kaynak tahsisi tekniklerinin bilgi kuramsal bir çerçevede geliştirilmesidir. Son yıllarda, ikincil kullanıcıların, birincil kullanıcılara yardım ederek kendi mesajlarını da gönderdiği sistemler ele alınmaya başlanmıştır, ancak bu sistemlerin büyük çoğunluğu, bilişsel kullanıcıların birincil kullanıcının mesajını önceden bildiği varsayımından hareket etmektedir. Çoğunluğu son beş yıl içerisinde yayımlanan daha az sayıdaki çalışmada ise, daha gerçekçi bir yaklaşım ele alınmakta, birincil kullanıcılara ait bilginin elde ediliş şekli de incelenen modele dahil edilmektedir. Bu yaklaşıma, literatürde nedensel bilişsel radyo (causal cognitive radio) adı verilmiştir, ve bu projede geliştirilen tüm tekniklerin daha gerçekçi olan bu yaklaşımı takip etmesine özen gösterilmiştir.

Tüm bunların ışığında, bu projede ele alınan modeller ve kullanılan yaklaşımlar şöyle özetlenebilir: Projede, çoğunlukla üste-serim (overlay) tekniğini kullanan, nedensel BR modelleri ele alınmış, ve kullanıcıların işbirliği yaptığı protokoller geliştirilmiştir. Öte yandan, bazı özgün alta-serim yöntemleri de irdelenmiş, ve performans kıyasları için kullanılmıştır. Üste-serim kullanıldığında, birincil kullanıcılara yardım ederek onlara 'rüşvet veren' bilişsel kullanıcıların bu yolla kendilerine alıcıda fazladan karışım yaratma hakkı 'satın alarak', akılcı kaynak tahsisi yöntemleri ile veri hızlarını artırabildikleri gösterilmiştir. BR sistemleri, bilgi kuramı çerçevesinde, çoğunlukla girişim kanalı modeli ile ilişkilendirilmekle birlikte, tek bir alıcının bulunduğu, ve hem birincil, hem de ikincil (bilişsel) kullanıcıların aynı ağa dahil olduğu çoklu erişim sistemleri, kaynakları akıllıca kullanmak esasına dayalı BR tekniğinin anlamlı bir biçimde uygulanabileceği bir modeldir. Örneğin, bir WLAN sisteminde, aynı erişim noktasını kullanan kullanıcılardan, ağa daha sonra dahil olanının bir BR olarak algılanması,

ve bu sayede normalde var olan kullanıcılara dağıtılmış olan kaynaklara ortak olarak kullanıcı kapasitesini artırması son derece doğaldır. Buna göre, proje kapsamında, ağırlıklı olarak bilişsel işbirlikçi bir çoklu erişim kanal modeli ele alınmıştır.

Kullanılan model ne olursa olsun, BR fikrinin doğası gereği, birincil kullanıcı(lar)ın kodlama yapısının, ortamda bilişsel kullanıcılar olmasından etkilenmeyecek, ya da en az oranda etkilenecek (örneğin, yalnızca gönderi güçlerini seçecek) şekilde yapılması tercih edilmelidir. Ancak, bu, birincil kullanıcı(lar)ın kodsözcüklerini baştan işbirliğine de elverecek şekilde seçmesine engel değildir, BR'lerin yokluğunda, aynı kodlama yapısının alıcıda da değişmeyecek yöntemlerle çözülmesi yeterlidir. Bu projede ele alınan işbirliği modelleri bu esaslara uygundur.

İşbirlikli bilişsel protokollerin geliştirilmesinde, çoklu erişim modellerinde daha ziyade çöz-ilet stratejisine dayanan blok Markov bindirmeli kodlama kullanılmıştır. Projede geliştirilen tüm işbirliği tekniklerinde amaç, erişilebilir veri hızlarını (bu hızlar, hem birincil, hem de bilişsel kullanıcıların hızları olabilir) karakterize etmek, ve eniyilemektir. Bu nedenle, kodlama/kodçözme stratejilerine bağlı olarak veri hızı ifadeleri türetilmiş, tahsisi ile eniyilenmiştir.

Projede çözülen belli başlı problemler, ve yapılan katkılar şöyledir:

- İki kullanıcılı bilişsel işbirlikli bir çoklu erişim kanal modeli, ve bu modelde kullanılabilecek kanala uyarlanabilir bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiştir. Birincil kullanıcının veri hızını tekli gönderim limitinin altına düşürmeden, sistemin toplam veri hızını ya da ikincil kullanıcının veri hızını eniyileyen kanala uyarlı bir güç tahsisi stratejisi geliştirilmiştir. Bu bölümün sonuçları Kaya ve Isleyen (2012)'de yayınlanmıştır.

- İki kullanıcılı işbirlikli bir çoklu erişim kanal modeli için sıkıştır ilet ve çöz ilet stratejilerini bir arada kullanan, böylelikle kullanıcılardan birinin ya da her ikisinin, işbirlikçi ortağın mesajını sadece kısmen çözmesine izin veren bir model için, bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiş, erişilebilir veri hızları elde edilmiştir. Bu bölümün sonuçları Gunes ve Kaya (2012)'de yayınlanmıştır.

- Üç kullanıcılı işbirlikli bilişsel bir çoklu erişim kanalı için, üç farklı model için kodlama ve kodçözme yapıları geliştirilmiş, ve karşılık gelen erişilebilir veri hızı ifadeleri elde edilmiştir. Öncelikle tüm kullanıcıların işbirliği yapabileceği referans bir model

geliştirilerek, bu model için yeni bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiş, ikişerli ve toplu işbirliğinin bir arada kullanılması ile veri hızlarının önemli oranda artabileceği gösterilmiştir. Daha sonra bu modelden hareketle, bir birincil iki ikincil kullanıcının olduğu işbirlikli bilişsel ağlarda, ikincil kullanıcıların hem biribirlerine, hem de birincil kullanıcıya yardım edebildikleri üste-serim'e dayalı protokoller önerilmiş, ve erişilebilir toplam veri hızları ile, ikincil kullanıcıların erişilebilir veri hızı bölgelerinin güçler cinsinden enbüyüklenmesi problemleri ayrı ayrı çözülmüştür. Ayrıca, birincil kullanıcının farklı seviyelerde işbirliğine katıldığı modeller kadar, işbirliğine hiç dahil olmadığı alta-serim tipi bir model de irdelenmiştir. Bu bölümün sonuçlarının bir kısmı Edemen ve Kaya (2013)'te yayınlanmıştır.

- Çok kullanıcılı, tek hücreli işbirlikli bilişsel bir çoklu erişim kanalı için, kullanıcıları birer birincil ve ikincil kullanıcıdan oluşan çiftlere bölerek, bu çiftlerin dik frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) kullanması yordamıyla biribirleri ile karışım yaratmadan işbirlikli olarak haberleşmelerini sağlayan bir model önerilmiştir. Bu modelde, hem en iyi birincil-ikincil kullanıcı eşleştirme problemi, hem de OFDMA alt kanalların her birinde kullanılan alt işbirliği sözcüklerinin her birine güçlerin en iyi şekilde atanması problemi, ortak olarak çözülmüştür. Bu problemler, sistemin toplam veri hızını eniyileme amacı ile, ve sistemdeki ikincil kullanıcıların toplam veri hızlarını eniyileme amacı ile ayrı ayrı ele alınmıştır. Ayrıca, hangi ikincil kullanıcının hangi birincil kullanıcının frekans kaynaklarını kullanacağının belirlendiği, ve güç kontrolünün en iyi şekilde yapıldığı bir alta-serim modeli için de kaynak tahsisi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümün sonuçları, Baksi ve Kaya (2014)'te yayınlanmak üzere kabul edilmiştir.

- Çok kullanıcılı, çok hücreli işbirlikli bir çoklu erişim kanalı için, kullanıcıların yine OFDMA yardımıyla ikişerli dik gruplara ayrılarak işbirlikli olarak gönderim yapabildiği bir modelde, öncelikle işbirliğinin çok hücreli senaryoda sürebilmesi, ve hücre kenarındaki kullanıcıların işbirliğinden fayda sağlayabilmesi için zıt kısmi frekans tekrarı (CFFR) adı verilen özgün bir frekans planlama tekniği önerilmiştir. Bu teknik için, hücreler arası girişim modelleri elde edilmiş, sonucunda da tüm sistemin toplam veri hızını enbüyükleyen, güç tahsisi, işbirlikçi ortak seçimi ve alıcı seçimi stratejileri birlikte bulunmuştur. Bu çalışmamızın sonuçları, Baksi vd. (2013)'te yayınlanmıştır.

Özet olarak, bilgi ve iletişim kuramı alanlarında, pek çok farklı kanal modelinde, gelecek

nesil kablosuz sistemler için denektaşı olarak kullanılabilecek üst limitler bu proje kapsamında geliştirilmiştir.

LİTERATÜR ÖZETİ

Kablosuz teknolojilerin artan popülerliği nedeniyle, hem bu teknolojileri kullanan farklı uygulamaların, hem de kullanıcıların sayısı hızla artmakta, bu da güç, frekans, zaman, hatta haberleşmenin sürdüğü ortam gibi kaynakların daha etkin kullanımını zorunlu kılmaktadır. Öte yandan, kablosuz kanallar sistem tasarımcıları için pek çok zorluğu da beraberinde getirmektedir: bu kanalların yayılım özelliği nedeniyle, ağdaki her kullanıcı eş zamanlı olarak ortama eriştiğinde, alıcılarda geleneksel iletişim sistemlerinde çoklu erişim karışımı olarak nitelendirilen problem ortaya çıkmaktadır. Fakat, karışım olarak nitelendirilen sinyaller, aslında kablosuz ortamca bize bedava olarak sağlanılan, ve akıllıca tasarlanmış protokollerce işbirliği için kullanılabilecek birer ilave bilgi, yani ek kaynaktan başka bir şey değildir.

Bu kaynaktan yararlanmanın bir yolu, kullanıcıların aldıkları bu bilgileri işbirliği yapmak için kullanmasıdır. Çünkü kullanıcılar biribirlerinin mesajlarını kısmen çözebildiğinde, güçlerini birleştirmek suretiyle bir yapay çoklu anten sistemi gibi davranarak ortak kodlama sayesinde çeşitlilik kazancına ulaşabilir, ve daha yüksek veri hızlarına çıkabilirler. İlave bilgiyi akıllıca kullanmanın bir diğer yolu ise, kablosuz ortamda halihazırda kendilerine atanmış kaynakları kullanarak iletişimini devam ettiren kullanıcılar varken, aynı ortamı paylaşan kullanıcıların bu bilgi ışığında onların iletişim kalitesini etkilemeden sisteme dahil olması prensibine dayanan bilişsel radyo yaklaşımıdır.

Kullanıcı işbirliği, teorik temeller açısından bilişsel radyodan çok daha eski bir yaklaşım olup, bilişsel radyolarda kullanılan bazı teknikler de aslında bu işbirlikçi yaklaşımlardan hareketle geliştirildiğinden, önce kullanıcı işbirliği konusunda proje içeriği ile de doğrudan ilgili olan belli başlı sonuçları özetleyecek, daha sonra da bilişsel radyo ile ilgili bir literatür özeti vereceğiz. Bunu yaparken, zaman zaman bu iki ilintili yaklaşımın doğal olarak bir araya geldiği noktaları da vurgulayacağız. Zaten bu proje de, bilişsel radyo ile işbirlikçi iletişimin dayandığı prensiplerin kesiştiği noktalar olan, kablosuz ortamın ilave bilgi sağlaması, ve bundan yararlanan akıllı veyetenekli düğümlerin bulunması hususlarını bir arada etkin olarak değerlendirebilen protokollerin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Kablosuz iletişim ağlarında kullanıcı işbirliği fikri son yıllarda çok ön plana çıkmış olmasına karşın, kökleri oldukça eski bilgi kuramsal sonuçlara dayanır. İşbirliğinin en basit formu, ilk olarak Van der Meulen (1971) tarafından ele alınan, daha sonra Cover ve El Gamal'in çığır açan Cover ve El Gamal (1979) makalelerinde kapasite ve erişilebilir veri hızı teoremleri ile, kodlama ve kodçözme teknikleri önerdikleri röle kanalıdır (relay channel). Röle

kanalında bir kaynak, bir röle, bir alıcı vardır. Burada tek amaç kaynağın mesajını rölenin de yardımı ile alıcıya aktarmaktır. Literatürde kablosuz kanallarda işbirliğini ele alan çoğu çalışma, bu tipte tek taraflı yönlendirmeyi ele almaktadır. Ancak, böyle stratejiler, bu proje kapsamındakli modellerde olduğu gibi, röle olarak görev verilen düğümlerin kendi mesajları da olduğu durumda uygun değildir, zira günümüzde iletişim sistemlerinde aynı anda pek çok kullanıcıya yüksek veri hızlarında hizmet vermek gerekmektedir.

Karşılıklı işbirliği sistemlerinin temelleri, yine 1980'li yılların başlarında çözülen iki göndericili temel bilgi kuramsal problemlere dayanır Cover ve Leung (1981); Willems ve van der Meulen (1983); Willems (1983); Willems ve van der Meulen (1985). Öncelikle, Cover ve Leung (1981), kullanıcıların kanal çıktısına tam erişimi olduğu bir model için erişilebilir veri hızlarını elde etmişlerdir. Hemen sonrasında, Willems ve van der Meulen (1983), göndericilerden yalnızca birine geri besleme olması durumunda da aynı veri hızlarına ulaşılabildiğini göstermişlerdir. Yine Willems (1983), kullanıcıların birbirlerine sonlu kapasiteye sahip bir bağlantıları olduğu ve bu sayede kısmi işbirliği yaptıkları durumda, kanalın kapasitesini bulmuş; daha sonra ise kullanıcıların birbirlerinden "kopya çektiği" çeşitli senaryolarda yine kanal kapasitesi Willems ve van der Meulen (1985)'te elde edilmiştir . Bu tip kanal modelleri, sınırlı işbirliği imkanı olan daha gerçekçi kanalların erişilebilir veri hızlarına birer üst limit vermeleri açısından önemlidir. Ayrıca, benzer modeller, bilişsel radyo çerçevesinde, bilişsel kullanıcıların nedensel olmayan (non-causal) bilgiye sahip olduğu durumları da kapsamaktadır.

Kablosuz iletişim kanallarının bilgiyi yayıcı özelliğini tam olarak modelleyen iki kullanıcılı çoklu erişim kanalı modeli ise, Carleial (1982) ve sonrasında da Willems vd. (1983) tarafından ele alınan genel geri beslemeli çoklu erişim kanalı modelidir. Bu modele göre, kullanıcılara farklı iki kanal çıktısı geri beslenmektedir, ve bu çıktılar kablosuz kanallarda "kulak misafiri olunan" bilgiyi simgelemektedir. Bu model için Carleial tarafından elde edilen ilk erişilebilir veri hızı bölgesi, Willems vd. (1983) tarafından blok Markov bindirmeli kodlama ve geriye doğru kodçözme yöntemleri kullanılarak hem daha basitleştirilmiş, hem de büyütülmüştür. Bu sonuçlar, yakın geçmişte Sendonaris vd. (2003) tarafından sönümlenmeli Gauss gürültü dağılımlı bir kanal için uygulanarak, vaat ettikleri yüksek kazançlar sayesinde işbirlikçi iletişim konusunun çok hareketlenmesini sağlamıştır.

İşbirliği için bindirmeli kodlama yöntemi yüksek veri hızları veren bir teknik olmasına karşın, oldukça karmaşık kodlama ve kodçözme gerektirir. Alternatif olarak, bilişsel sistemlerde

de sıkça başvurulan, ve ortak bilgiyi zaman bölmeli (iki ya da daha fazla fazlı) olarak sağlayan işbirliği protokolleri de kullanılabilir. Bunlara bir örnek, Laneman vd. (2004) tarafından, zaman bölmeli bir işbirliği sisteminin kesinti analizinin yapıldığı çalışmalardır.

Özellikle son yıllarda, bahsi geçen çalışmalarla tetiklenen işbirlikçi iletişim konusunda önemli oranda gelişme kaydedilmiştir. Bunlar arasında kayda değer bir ilerleme yönü, işbirlikçi kullanıcı sayısının ikiden fazla olduğu durumlardır. Ancak bu yöndeki çalışmalar, yine çoğunlukla yalnızca yardım etmeye adanmış röleler (dedicated relays), ya da çok sayıda kullanıcıya hizmet eden tek röle gibi sistemlere sınırlı kalmıştır. Bu çalışmalardan belli başlıları Sankaranarayanan vd. (2004)'teki çoklu erişim röle kanalları (Multiple Access Relay Channels), Xie ve Kumar (2004)'teki tek göndericili çok seviyeli röle kanalları (Single Source Multiple Level Relay Channels), Schein (2001)'deki, paralel röle ağlarıdır (Parallel Relay Networks). Röle kanallarla ilgili diğer bilgi kuramsal sonuçları içeren çok iyi bir derleme Kramer vd. (2005)'te bulunabilir.

Ancak çok yakın dönemde, çok kullanıcılı sistemlerde karşılıklı işbirliğine yer veren ilk çalışmalar yapılmış, Edemen ve Kaya (2008a) ve Edemen ve Kaya (2008b)'de erişilebilir veri hızları açısından kayda değer artışlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Bu çalışmalarda, her üç kullanıcının da mesajlarının bulunduğu, ve işbirliğine katıldıkları bir çoklu erişim kanalı için, kanal durumuna uyarlanan kodçözme yöntemleri ve blok Markov kodlama kullanan değişken kodlama stratejileri ele alınmıştır. Bu üç kullanıcılı modeller, bu projede ele alınan bilişsel işbirlikçi çoklu erişim konusu için temel teşkil etmektedir, zira bilişsel işbirlikçi iletişim, örneğin kullanıcılardan birinin (birincil kullanıcı) diğer kullanıcıların mesajlarını çözmeye çalışmadığı, diğer ikisinin ise işbirliğine katıldığı durumları içerdiğinden, kodlama açısından tümüyle işbirlikçi olan Edemen ve Kaya (2008a) ve Edemen ve Kaya (2008b)'deki sistemlerin bir özel durumu olarak görülebilir. Ancak, burada dikkat edilmesi gereken husus, birincil kullanıcılarda ilave bir minimum veri hızı kısıtı olduğudur. Bu nedenle de, işbirlikçi bilişsel radyolar için erişilebilir veri hızlarının bulunması, ve eniyilenmesi problemi, salt işbirliğine dayalı olan Edemen ve Kaya (2008a) ve Edemen ve Kaya (2008b)'deki problemlerden daha kısıtlayıcı ve kapsamlıdır.

İşbirlikçi iletişim ile erişilebilecek veri hızlarının eniyilenmesi için ele alınması gereken önemli bir konu, işbirlikçi sistemler için kaynak tahsisi, özellikle de güç kontrolüdür. Bu konudaki çok sayıdaki çalışma, yine rölelerin kendi mesajlarının bulunmadığı durumlar üzerine yoğunlaşmış olup, kodlama ve kodçözme yapılarının daha karmaşık olduğu, çöz-ilet stratejisi

kullanan karşılıklı işbirlikçi sistemler konusunda özkaynak tahsisi sonuçları oldukça sınırlıdır. Oysaki, bu konudaki Kaya ve Ulukus (2007) çalışması, en iyi güç kontrolü uygulandığında hem işbirliği stratejisinin beklenene göre çok daha basitleştiğini, hem de erişilebilir hızların oldukça arttığını göstermektedir. Güç kontrolü gibi kaynak tahsisi yaklaşımları, işbirlikçi bilişsel radyo sistemleri için de mutlaka ele alınması gereken konulardandır, ve birincil kullanıcılardaki veri hızı kısıtlarının sağlanması için kilit rol oynadığından, bu yaklaşımların geliştirilmesi bu projenin de temel hedefini teşkil etmektedir.

Kablosuz kanallardaki akıllı kullanıcıların ortamları hakkında edindikleri ilave bilgiyi kullanarak aksi takdirde gerçekleştiremeyecekleri iletişimi mümkün kılmaları prensibine dayanan bilişsel radyo fikri, ilk olarak Mitola tarafından Mitola (2000)'de ortaya atılmıştır. Bilişsel radyo için temel motivasyon şudur: Frekans tayfının farklı uygulamalara atanması ile kullanılabilir frekanslar gitgide azalmış, bu nedenle daha önce birtakım uygulamalar ve amaçlar için atanmış frekans aralıklarının daha etkin kullanımı, hatta yeni uygulamalarda ikincil kullanıcılar tarafından paylaşımı önem kazanmıştır. Yapılan araştırmalarda da atanmış frekans bantlarının hiç etkin biçimde kullanılamadığı, ve frekans boşlukları içerdiği ortaya çıkmıştır, bkz. Shared Spectrum Company (2005); FCC Spectrum Policy Task Force (2002). Bu nedenle, bilişsel radyolar ilk gündeme geldiklerinde öngörülen başlıca çalışma prensibi, frekans tayfındaki bu boşlukları sezerek, bunları mevcut (birincil) kullanıcılara en az seviyede girişim yaratacak şekilde değerlendirmeye dayanan, 'örgüleme' (interweave) tekniği olmuştur. Bu teknik, ortamı dinleme, aktivite belirleme, ve boşlukları paylaşma gibi aşamalar gerektirdiğinden, Haykin (2005)'te detaylandırılan pek çok kendine has güçlüğü de beraberinde getirmektedir.

Bilişsel radyoların frekans-zaman-uzayda boş olan boyutlarda gönderim yapmak yerine, kullanılmakta olan kaynakları paylaşarak gönderim yapmaları durumunda, ortaya eğer ikincil kullanıcıların alıcıları birinciller ile aynı ise (örneğin ortak bir baz istasyonu) Liao (1972)'deki gibi bir çoklu erişim kanalı modeli, eğer alıcıları farklı ise de en basit hali ilk kez Sato (1977)'de incelenen, Carleial (1978)'de de bugünkü bildiğimiz adı verilen girişim kanalı (interference channel) modeli çıkmaktadır. Her iki durumda da, birincil kullanıcıların hedef alıcılarındaki sinyalleri, ikincil kullanıcıların girişimine maruz kalır. Bu girişimi de farklı şekillerde ele almak mümkündür.

Bunlardan ilki, özellikle tayfa yayma ve ultra genişbant iletişim tekniklerinin getirileri sayesinde daha avantajlı hal alan, Zhao ve Sadler (2007)'de ele alınan 'alta-serim' (underlay)

yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda bilişsel (ikincil) kullanıcılar, birincil kullanıcıların iletişimlerini bozulmadan devam ettirebilecekleri şekilde, onlara kabul edilebilir bir limit dahilinde girişim yaratarak eş zamanlı olarak gönderim yaparlar. Tayfa yayma teknikleri ile, ikincil kullanıcıların güçlerinin çok geniş bir banda yayılması sayesinde, bu kullanıcıların oluşturduğu girişimin gürültü tabanının altında kalması sağlanabilir. Alta-serim yaklaşımının uygulanmasında, FCC Spectrum Policy Task Force (2002)'nin de önerisi üzerine, bazı çalışmalar girişimin gücü yerine, girişim sıcaklığı adı verilen bir ölçütü de gözetebilmektedir. Alta-serim teknikleri uygulayan bilişsel sistemler girişim limitli sistemler olduğundan, bu sistemler için güç tahsisi çok önemli bir konudur. Genellikle, alıcılardaki girişim gücü kısıtı, ikincil göndericilerdeki gönderim gücü kısıtlarına bire bir dönüştürülebilir. Alta-serim konusundaki güç kontrolü algoritmaları oldukça yaygın olarak araştırılmıştır, bu çalışmalara birkaç örnek Wang ve Zhu (2007) Wang vd. (2007), Xing vd. (2007)'dir. Ancak bunlar hedef fonksiyonlarının yapıları sayesinde bu projenin konusu olan işbirlikli sistemlerdeki kaynak tahsisine göre oldukça basitçe çözülebilen problemlerdir. Bu projede, alta-serim tekniği kullanan bilişsel radyolar, daha çok üste-serim tekniği ile elde edilen sonuçlar için kıyaslama amacıyla ele alınmış, öte yandan, alta-serim durumunda ikincil kullanıcıların kendi aralarında işbirliği yaptığı özgün bir model de önerilmiştir.

Goldsmith vd. (2009)'a göre, bugün algılandıkları şekilleri ile, bilişsel kullanıcılar, bulundukları ortamın, o ortamdaki diğer kullanıcıların aktivitesi, gönderdikleri sinyaller, kullandıkları kod sözcükleri ve kanal durumları açısından farkında olan, ve gönderilerini, birincil kullanıcıların iletişimini kötü yönde etkilememek kaydı ile bunlara göre planlayan kullanıcılardır. Bu açıdan bakıldığında, ilk ortaya atıldığında daha çok frekans tayfındaki boşlukları kestirerek kullanma prensibi ile önerilen örgüleme (interweave), ya da birincil kullanıcılarda bir limit dahilinde karışıma göz yuman alta-serim (underlay) gibi tekniklerle ön plana çıkan bilişsel radyo teknolojisinin ötesinde, gönderime daha aktif olarak katılan, ve diğer kullanıcıların sinyal/kodsözcüklerini hesaba katarak haberleşen bilişsel kullanıcılara dayalı üste-serim (overlay) yöntemi daha cezbedicidir, ve bu projedeki temel yaklaşımı teşkil etmektedir.

Üste-serim tekniklerine literatürdeki eğilim son yıllarda hızla artmıştır. Bu sistemlerin bilgi kuramsal incelemesinde, genellikle iki kullanıcı iki alıcıdan oluşan bir girişim kanalı ele alınmaktadır. Üste-serim uygulayan bilişsel kullanıcılar, mevcut kullanıcıların mesajlarını edinerek, bu bilgiyi Costa (1983)'te önerilen kirli kağıt kodlaması gibi teknikler ile kendi mesajlarını girişimsiz olarak yollamak için kullanabilecekleri gibi, birincil kullanıcıların me-

sajlarını göndermelerine yardımcı olmak suretiyle, kendi üste serdikleri mesajları nedeniyle birincil alıcılara oluşturulan ilave girişimin kötüleştirici etkisini tam olarak nötralize edecek şekilde alıcıda birincil kullanıcının mesajına karşılık gelen gücü artırabilirler.

Örneğin, iki kullanıcı iki alıcıdan oluşan, ve bilişsel kullanıcının birincil kullanıcının mesajını önceden bildiğinin varsayıldığı Jovicic ve Viswanath (2009)'da bunu sağlayacak bir protokol önerilmiş, hatta ikincil kullanıcının gücünün ne kadarını birincil kullanıcı ile yardımlaşmak için ayırması gerektiği bulunmuştur. Eşzamanlı ve bağımsız bir çalışma olan Wu vd. (2007)'de de, girişim kanalındaki kullanıcılardan birinin mesajının diğerindeki mesajların altkümesi olduğu, ve sonuç olarak aynı bilişsel senaryoya karşılık geldiği bir sistem incelenmiş, ve benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı bilişsel kanal modeli için Jiang ve Xin (2008)'de bu kez, girişim kanallarında bilinen en iyi veri hızlarına Han ve Kobayashi (1981) erişen, hız ayrıştırma (rate splitting) tekniği kodlama ve kodçözme yöntemine eklenerek, erişilebilir veri hızı ifadeleri elde edilmiştir. Yine aynı model için, hız ayrıştırmanın her iki kullanıcı için de yapıldığı, ve her iki kullanıcıdaki Gel'fand Pinsker (GF) kodlamasının (bkz. Gel'fand ve Pinsker (1980)), Jiang ve Xin (2008)'deki gibi paralel değil de, ardışık olarak gerçekleştirildiği bir sistem Marić vd. (2008)'de ele alınmıştır. Bahsedilen bu kanal modellerinin en büyük eksiği, bilişsel radyo konusunu ele alan pek çok modelde olduğu gibi birincil kullanıcının bilgisinin bilişsel kullanıcı tarafından nedensel olmayan bir şekilde (non-causal) olarak bilindiğinin varsayılmasıdır.

Ortak bilginin oluşturulma aşamasının da dikkate alındığı, daha gerçekçi nedensel bilişsel radyo modeli, ilk olarak Devroye vd. (2006)'da çalışılmıştır. Burada, bilişsel kullanıcının birincil kullanıcının bilgisine erişmesi için zaman bölmeli iki fazlı protokoller önerilmiş, ve yine hız ayrıştırma tekniğinden ve GF kodlamasından yararlanılmıştır. Tuninetti (2007)'de, geribeslemeli karışım kanalı modeli incelenmiştir. Seyedmehdi vd. (2007)'de hız bölümleme ve blok Markov bindirmeli kodlama uygulanarak, 2x2 bir girişim kanalında tek taraflı bilişsel iletişim için erişilebilir hızlar elde edilmiştir. Bu hız ifadeleri, Seyedmehdi vd. (2009)'da kirli kağıt kodlaması tekniğinin de ilave edilmesi ile geliştirilmiştir. Cao ve Chen (2008)'de, nedensel olmayan bilişsel radyo için Marić vd. (2008)'de geliştirilen tekniklerin, farklı bir hız ayrıştırma metoduyla nedensel bir bilişsel radyo sistemine uygulandığı görülmektedir. Rini vd. (2009)'da ise, yukarıda sayılan referanslarda önerilen tekniklerin eriştiği veri hızlarının tümünü kapsayan, hız ayrıştırma, bindirmeli kodlama ve Marton kodlamasının bir arada ele alınması sayesinde elde edilen sonuçlara varılmıştır. Rini vd. (2009)'a benzer teknikler

yarı çift zamanlı Gauss gürültülü bir bilişsel kanala Chatterjee vd. (2010)'da uygulanmıştır. Bilişsel radyo modeline tam olarak uymasa da çift taraflı işbirliğini ele alan, ve çöz ilet stratejisine ilave olarak sıkıştır ilet stratejisini de kullanan Li vd. (2010); ve yine sıkıştır ilet senaryosunu birden fazla röle için ilk kez ele alan Xie (2009) de, projede ele alınan bazı tekniklerle benzeşen yayınlardır.

Son olarak, proje konusu ile yakın, fakat çok daha basit modelleri ele alan bazı çalışmalara dikkat çekmek istiyoruz. Nagananda ve Kishore (2010)'da, bu projedeki çoklu erişim modeline benzer bir model ele alınmış, fakat birincil kullanıcının mesajlarının bir bölümünün hazır olarak ikincil kullanıcılarda bilindiği varsayılmıştır. Aynı yazarların, daha önce de benzer nedensel olmayan yaklaşımlarla ele aldıkları problemler bulunmakla birlikte, bunların tümü bu projede ele alınan problemin basitleştirilmiş birer durumuna karşılık gelmektedir. Öte yandan, bilişsel radyo kanallarında kaynak tahsisi konusunda yapılan literatür taramaları, daha önce de belirtildiği gibi bu tür çalışmaların çoğunlukla alta-serim tekniği uygulayan sistemlerde yapıldığını göstermektedir. Bu çalışmalardan proje konusu ile kısmen ilgili olup da, bilişsel çoklu erişim kanalları hakkında yapılan bir tanesi Zhang vd. (2009)'dur, fakat bu çalışmada bilgi kuramsal kapasite eniyilenmeye çalışılsa da işbirliği hesaba katılmamaktadır. Bir diğer ilgili olabilecek çalışma, Chen vd. (2008)'dir ancak bu da alta-serim tipinde bir model ele almaktadır. Bu nedenle, bu projede işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalları için yapılan güç kontrolü çalışmaları, literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

Sonuç olarak, ortak bilginin oluşturulması için harcanması gereken güçleri dikkate alan, üste-serime dayalı, tek ya da çok hücreli bilişsel işbirlikli çoklu erişim kanalları için kaynak tahsisi konusu, literatürde bilgi kuramsal olarak ele alınmamıştır. Bu nedenle, giriş bölümünün son paragrafında listelenen tüm çalışmalar, bu projenin işbirlikli iletişim ve bilişsel radyo literatürüne özgün katkılarını teşkil etmektedir.

GEREÇ, YÖNTEM VE BULGULAR

Bu projede, dört farklı işbirlikli ve bilişsel çoklu erişim kanal modeli bilgi kuramsal olarak ele alınmıştır. Bunlar, iki kullanıcı bir alıcılı, üç kullanıcı bir alıcılı, çok kullanıcı bir alıcılı ve çok kullanıcı çok alıcılı modellerdir. Bu modellerin tamamında, Shannon tipi rastgele kodlama yöntemi ile erişilebilecek veri hızları elde edilmiş, ve mümkün olan durumlarda dışbükey eniyileme kuramından bilinen tekniklerle veri hızları ya da veri hızı bölgelerini eniyileyen güç tahsisi algoritmaları üretilmiştir. Çok kullanıcılı modellerde ise, çizge kuramı yardımı ile en iyi işbirlikçi ortak seçimi, ve çok alıcılı durum için en iyi alıcı seçimi problemi de çözülmüştür. Dört farklı kanal modeli için çözülen problemler, aşağıda ayrı birer bölüm olarak sunulacaktır.

1 İki Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı

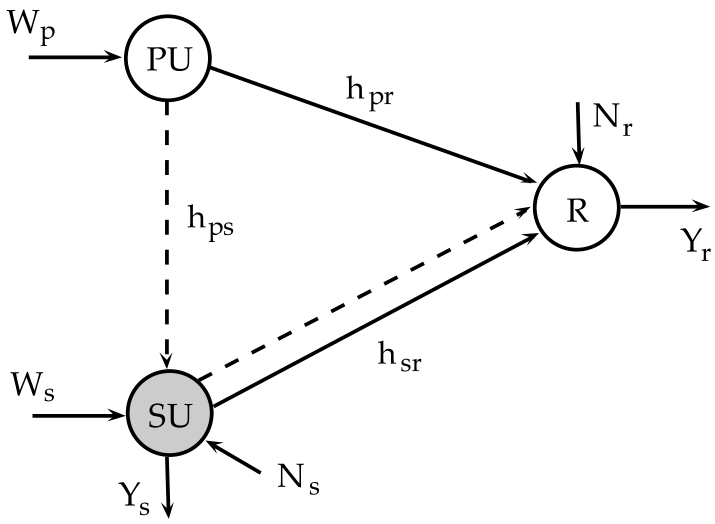
Bu bölümde, projede çözülen pek çok problemin temelini oluşturan iki gönderici bir alıcıdan oluşan işbirlikli çoklu erişim kanal modeli ele alınacaktır. Bu kanal modeli için, belli başlı iki çalışma gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilkinde, işbirliği yapan kullanıcılardan birinin birincil kullanıcı, diğerinin ikincil kullanıcı olduğu durumda, toplam veri hızını veya ikincil kullanıcı veri hızını eniyileyen güç tahsisi algoritmaları geliştirilmiştir. İkincisinde ise, çoklu erişim kanallarında karşılıklı işbirliğinin hem çöz-ilet, hem de sıkıştır ilet stratejilerine eş zamanlı olarak izin verilerek gerçekleştirilebilmesi için kodlama teknikleri ve karşılık gelen erişilebilir veri hızı bölgeleri elde edilmiştir. Bu çalışmalar, sırasıyla aşağıdaki alt bölümlerde sunulacaktır.

1.1 İki Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı İçin Güç Tahsisi

Projenin bu ilk bölümünde, tek alıcılı iki kullanıcılı bir kablosuz işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalında, sistemdeki tüm kullanıcıların veri hızını veya ikincil kullanıcının veri hızını eniyileyen güç kontrol stratejileri elde edilmiştir. Birer tane birincil ve ikincil kullanıcıdan oluşan işbirlikli bilişsel tek hücreli bir sistemde, anlık güç değerlerinin kanal katsayıları cinsinden eniyilenmesi gerçekleştirilmiştir. İşbirliği, blok Markov bindirmeli kodlama yöntemiyle, çöz-ilet yaklaşımı ile sağlanmıştır. Birincil kullanıcının, tek başına en iyi güç kontrolü stratejisi ile elde edebileceği en iyi veri hızı hesaplanarak bilişsel modelde bir kısıt olacak şekilde belirlenmiştir. İkincil kullanıcı, birincil kullanıcı ile işbirliği çerçevesinde, birincil kullanıcının veri hızının alt limitten aşağıya inmeyeceğinin garantisini verecek şekilde sisteme dahil edilmiştir. Birincil ve ikincil kullanıcıların güç kontrolü sayesinde, birincil kullanıcının veri hızının veya birincil ve ikincil kullanıcıların toplam veri hızlarının en iyilenmesi amaçlanmıştır.

1.1.1 Sistem Modeli

Ele alınan bilişsel çoklu erişim modelinde, bir birincil, bir de ikincil kullanıcı aynı kanalı paylaşmakta, sırasıyla bağımsız W_p ve W_s mesajlarını bir alıcıya iletmeyi hedeflemektedir. İkincil kullanıcı, kanalı dinlemek suretiyle birincil kullanıcının mesajının bir bölümünü çözer ve alıcıya aktarır. Şekil 1'de gösterilen bu kanal modeli, aşağıdaki gibi modellenebilir.



Şekil 1: İki kullanıcılı işbirlikli bilişsel çoklu erişim kanalı.

$$Y_r = h_{pr}X_p + h_{sr}X_s + N_r, \tag{1}$$

$$Y_s = h_{ps}X_p + N_s, \tag{2}$$

Burada h_{pr}, h_{sr} and h_{ps} sırasıyla birincil kullanıcı alıcı, ikincil kullanıcı alıcı ve birincil kullanıcı ikincil kullanıcı arasındaki frekans seçici olmayan sönümlenme katsayılarının genlikleridir. N_r and N_s alıcı ve ikincil kullanıcıdaki; 0 ortalamalı, σ_r^2 ve σ_s^2 varyanslı bağımsız beyaz Gauss gürültüsü değerlerini göstermektedir. X_p and X_s sırasıyla birincil ve ikincil kullanıcılarca gönderilen kodsözcükleridir.

Bu kanal modeli, ya klasik aktarım kanalının, rölenin de göndereceği bir mesaja sahip olduğu duruma genellenmesi olarak; ya da Willems vd. (1983); Sendonaris vd. (2003)'te ele alınan, genel geribeslemeli bir çoklu erişim kanalının, kullanıcılardan birinden beklenen işbirliğinin iptal edildiği bir özel durumu olarak görülebilir. Biz burada ikinci yaklaşımı ele alıyor, ve Sendonaris vd. (2003)'teki bindirmeli blok Markov kodlama tekniğini modifiye ediyoruz.

Buna göre, birincil kullanıcının mesajı, iki alt mesaja bölünebilir: $W_p = (W_{pr}, W_{ps})$. Altmesaj W_{pr} alıcıya doğrudan gönderilen mesaja karşılık gelirken, altmesaj W_{ps} hem alıcı hem de ikincil kullanıcı tarafından çözülecek kısma karşılık gelir. İkincil kullanıcının mesajı ise, birincil kullanıcının bilişsel model gereği ikincil kullanıcıya yardım etmemesi gerektiği için bölütlenmeden gönderilir. Daha sonra, bu mesajlar normalize edilmiş Gauss dağılımlarından

seçilen rastgele kodsözcüklerine aşağıdaki kurala göre atanır.

$$X_{sr}(W_s(b), W_{ps}(b-1)) \tag{3}$$

$$X_{pr}(W_{pr}(b), W_{ps}(b-1)) \tag{4}$$

$$X_{ps}(W_{ps}(b), W_{ps}(b-1)) \tag{5}$$

$$C(W_{ps}(b-1)) \tag{6}$$

Burada X_{sr} ve X_{pr} b numaralı bloktaki taze bilgi olan $W_{sr}(b)$ ve $W_{pr}(b)$'yi doğrudan alıcıya göndermek için, X_{ps} birincil kullanıcı tarafından, ikincil kullanıcının bir sonraki bloktaki olası işbirliğine imkan vermek üzere, C ise her iki kullanıcı tarafından, birincil kullanıcının bir önceki bloktaki mesajı $W_{ps}(b-1)$'i işbirlikli olarak göndermek amacıyla kullanılır. Esas kodsözcükleri ise, bu alt kodsözcüklerini, Kaya ve Ulukus (2007)'de de olduğu gibi güç kontrolüne de imkan verecek şekilde, güç değerleri ile çarpıp toplamlarını alarak oluşturulur.

$$X_p = \sqrt{P_{pr}(\mathbf{h})}X_{pr} + \sqrt{P_{ps}(\mathbf{h})}X_{ps} + \sqrt{P_{pc}(\mathbf{h})}C, \tag{7}$$

$$X_s = \sqrt{P_{sr}(\mathbf{h})}X_{sr} + \sqrt{P_{sc}(\mathbf{h})}C. \tag{8}$$

Kanal durum vektörü $\mathbf{h} = [h_{pr}, h_{ps}, h_{sr}]$ olarak tanımlanmış olup, güç değerleri bu anlık kanal durum vektörünün bir fonksiyonu olarak seçilmektedir. Öte yandan, kullanıcıların gönderi güçlerinin sağlaması gereken ortalama güç kısıtları şöyle verilir:

$$P_p(\mathbf{h}) = P_{pr}(\mathbf{h}) + P_{ps}(\mathbf{h}) + P_{pc}(\mathbf{h}) \tag{9}$$

$$P_s(\mathbf{h}) = P_{sr}(\mathbf{h}) + P_{sc}(\mathbf{h}) \tag{10}$$

$$E\Big[P_i(\mathbf{h})\Big] \leq \bar{P}_i \text{ where } i \in \{p, s\} \tag{11}$$

Erişilebilir veri hızlarını elde etmeden önce, (7)-(8) eşitlikleri ile verilen modelin bilişsel radyo modeline uygunluğunu açıklamak yerinde olacaktır. Bilişsel çoklu erişim kanallarında, birincil kullanıcıların gönderileri ikincil kullanıcının varlığından kayda değer bir biçimde etkilenmemelidir. Öte yandan, işbirlikli üste-serim senaryosunda, birincil kullanıcıdan belli bir oranda katkı kaçınılmazdır. Önerdiğimiz modelde, bu katkı minimum seviyede tutulmakta-

dır. Şöyle ki, ikincil kullanıcının varlığından bağımsız olarak, birincil kullanıcı her zaman (7) ile verilen kodlama tekniğini (9) ile verilen güç değerlerini kullanarak uygulayabilir. Güç değerleri, potansiyel olarak alıcıdan geri besleme ile bildirilen değerler olup, ikincil kullanıcı sistemde olmasa da güç kontrolü için benzer yaklaşım kullanılacaktır. Bu nedenle, birincil kullanıcının gönderi stratejisine yaptığı tek güncelleme, kodsözcüklerine atadığı güçlerin değerlerini alıcının isteği üzerine değiştirmekle sınırlıdır. Bu da demektir ki, aslında birincil kullanıcı ikincil kullanıcının varlığından bağımsız bir biçimde gönderisini sürdürebilir. İkincil kullanıcı mevcut olup, işbirliği için gönüllü olduğunda, W_{ps} mesajını X_{ps} kodsözcüğünden çözer, bunu yaparken de X_{pr} kod sözcüğünü gürültü olarak kabul eder. Dikkat edilmelidir ki kod sözcüğü C halihazırda çözülmüş olan mesajlara karşılık geldiğinden, ikincil kullanıcı tarafından bilinir ve gürültü olarak alınmasına gerek yoktur. Bu durumda, ikincil kullanıcı kendi kod sözcüğü X_{sr}'yi gönderirlen, kodsözcüğü C'yi işbirlikli olarak ilave eder. Böylelikle kodsözcüğü X_{sr}'nin alıcıda birincil kullanıcıya yarattığı karışım nedeniyle oluşabilecek potansiyel veri hızı kaybı C'den gelecek evreuyum kazancıyla telafi edilebilir, hatta kazanca dönüştürülebilir.

Alıcı geriye doğru kodçözme kullandığında Kaya ve Ulukus (2007)'deki sonuçların uygun şekilde uygulanması ile erişilebilir veri hızı bölgesinin

$$R_p < E\left\{ \log\left[1+s_{pr}P_{pr}(\mathbf{h})\right]+\log\left[1+\frac{s_{ps}P_{ps}(\mathbf{h})}{s_{ps}P_{pr}(\mathbf{h})+1}\right]\right\} \tag{12}$$

$$R_s < E\left\{ \log\left[1+s_{sr}P_{sr}(\mathbf{h})\right]\right\} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} R_p+R_s \leq \min\Bigg\{ & E\Big\{ \log\left[1+s_{pr}P_{pr}(\mathbf{h})+s_{sr}P_{sr}(\mathbf{h})\right] \\ & +\log\left[1+\frac{s_{ps}P_{ps}(\mathbf{h})}{s_{ps}P_{pr}(\mathbf{h})+1}\right]\Big\}, E\Big\{\log(A)\Big\}\Bigg\} \end{aligned} \tag{14}$$

şeklinde elde edilebileceği gösterilebilir. Burada $A = 1+s_{pr}P_p(\mathbf{h})+s_{sr}P_s(\mathbf{h})+2\sqrt{s_{pr}s_{sr}P_{pc}P_{sc}}$ olarak tanımlanmıştır. Kısıtlar (12)-(14) ile sınırlanan R_p ve R_s birincil ve ikincil kullanıcıların veri hızlarına karşılık gelmektedir. Notasyonun sadeliği için, gürültü gücü ile normalize edilmiş sönümlenme katsayıları $s_{ij} = h_{ij}^2/\sigma_j^2$, $i \in \{p,s\}$ and $j \in \{s,r\}$, $i \neq j$ olarak tanımlanmıştır.

Bu noktada, bilişsel radyo düzeneği nedeniyle klasik işbirlikli iletişim çerçevesinden kritik

bir sapma yapılması gerektiğini vurgulamak gereklidir. Yukarıdaki kısıtları sağlayan her veri hızı çifti bilişsel senaryoda erişilebilir olarak nitelendirilemez, zira birincil kullanıcının veri hızının, alıcıya tek başına gönderim yapıyor olsaydı elde edeceği veri hızından daha düşük olmadığını garanti etmek gereklidir. Üstelik, birincil kullanıcının uygulayabileceği en iyi tek kullanıcılı güç kontrolü stratejisi olan su doldurma Goldsmith ve Varaiya (1997) tekniğini kullandığını varsayarak, veri hızı alt sınırını buna göre belirlemek gereklidir. Bu yüzden,

$$R_p \geq E\Big\{ \log\Big[1 + P_p^{\star}(h_{pr}) s_{pr}\Big]\Big\} \triangleq B^{*} \tag{15}$$

kısıtı da (12)-(14) kısıtlarına eklenmelidir. Burada $P_p^{\star}(h_{pr})$ tek kullanıcılı gönderim için $E[P_p^{\star}(h_{pr})] = \bar{P}_p$ kısıtını sağlayan en iyi güç tahsisi, B^{*} ise sonuçta elde edilen en büyük işbirliksiz birincil kullanıcı veri hızıdır.

Bir sonraki alt bölümde, işbirlikli bilişsel çoklu erişim modeli için güç eniyileme problemini iki farklı ister ile çözeceğiz: Bunlardan ilki, toplam veri hızı enbüyüklenmesi olup, birincil kullanıcının işbirliğine izin vermesi için ilave teşvik veren bir yaklaşımdır. İkincisi ise, ikincil kullanıcı veri hızı enbüyüklenmesi olup, birincil kullanıcıya performans kaybına sebep olmadan ikincil kullanıcıya mümkün olan en büyük kazancı sağlamayı hedeflemektedir.

1.1.2 Erişilebilir Veri Hızlarının Enbüyüklenmesi

İlk olarak Kaya ve Ulukus (2007)'de bilişsel olmayan işbirlikli çoklu erişim kanalı için, $s_{ps} > s_{pr}$, durumunda en iyi stratejinin $P_{pr}(\mathbf{h}) = 0$ olarak seçmek olduğunu hatırlamak gereklidir. Bu, birincil kullanıcının işbirliksiz gönderisine hiç güç ayrılmasına gerek olmadığı anlamına gelmektedir. Bu bölüm boyunca, anlatımın ve denklemlerin sadeliği açısından sistemin sürekli bu kanal sıralaması kabulü altında çalıştığını varsayacağız, zira $s_{ps} < s_{pr}$ ise işbirliğini iptal etmek her zaman mümkün olacaktır. Bu problemin tüm kanal durumlarını kapsayan, ayrıca mesafeye bağlı bir yol kaybı modelini de dikkate alan çok daha genel bir çözümü daha sonra Bölüm 3'te çok kullanıcılı bir model için sunulacakır.

Kısıtlar (12)-(14) içine $P_{pr}(\mathbf{h}) = 0$ değerinin yerleştirilmesi ile, $\mathbf{P}(\mathbf{h}) = [P_{ps}(\mathbf{h}), P_{pc}(\mathbf{h}), P_{sr}(\mathbf{h}), P_{sc}(\mathbf{h})]$ olarak tanımlandığında güç eniyileme problemi aşağıdaki dışbükey formda ifade edilebilir:

$$\max_{\mathbf{P(h)}} \quad \alpha R_p + R_s \tag{16}$$

$$\text{s.t.} \quad R_p \leq E\Big[\log\Big(1 + s_{ps}P_{ps}(\mathbf{h})\Big)\Big] \tag{17}$$

$$R_s \leq E\Big[\log\Big(1 + s_{sr}P_{sr}(\mathbf{h})\Big)\Big] \tag{18}$$

$$R_p + R_s \leq E\Big[\log\Big(A\Big)\Big] \tag{19}$$

$$R_p \geq B^{\star} \tag{20}$$

$$E\Big[P_{ps}(\mathbf{h}) + P_{pc}(\mathbf{h})\Big] \leq \bar{P}_p \tag{21}$$

$$E\Big[P_{sr}(\mathbf{h}) + P_{sc}(\mathbf{h})\Big] \leq \bar{P}_s \tag{22}$$

$$P_{ps}(\mathbf{h}), P_{pc}(\mathbf{h}), P_{sr}(\mathbf{h}), P_{sc}(\mathbf{h}) \geq 0 \tag{23}$$

Dikkat edilmelidir ki, (16) problemi en genel haliyle yazılmış olup, $\alpha = 1$ için toplam veri hızı enbüyüklemesine, $\alpha = 0$ içinse ikincil kullanıcı veri hızı enbüyüklemesine dönüşür. Burada her iki problem paralel olarak ele alınacak, ikisi arasındaki farklar ortaya çıktıkça vurgulanacaktır.

Öncelikle (17)-(23) kısıtlarının her birine Lagrange çarpanları atanarak, Lagrange fonksiyonu

$$\begin{aligned}
\mathcal{L} =& \alpha R_p + R_s + \gamma_1\Big\{E\Big[\log\Big(1 + s_{ps}P_{ps}(\mathbf{h})\Big)\Big] - R_p\Big\} \\
&+ \gamma_2\Big\{E\Big[\log\Big(1 + s_{sr}P_{sr}(\mathbf{h})\Big)\Big] - R_s\Big\} \\
&+ \gamma_3\Big\{E\Big[\log\Big(A\Big)\Big] - R_p - R_s\Big\} + \gamma_4\Big\{R_p - B^{\star}\Big\} \\
&+ \lambda_1\Big\{P_p - E\Big[P_{ps}(\mathbf{h}) + P_{pc}(\mathbf{h})\Big]\Big\} \\
&+ \lambda_2\Big\{P_s - E\Big[P_{sr}(\mathbf{h}) + P_{sc}(\mathbf{h})\Big]\Big\} \\
&+ \mu_1 P_{ps}(\mathbf{h}) + \mu_2 P_{pc}(\mathbf{h}) + \mu_3 P_{sr}(\mathbf{h}) + \mu_4 P_{sc}(\mathbf{h})
\end{aligned} \tag{24}$$

elde edilir. Birincil ve ikincil kullanıcıların güç bileşenlerine ve veri hızı değişkenlerine göre kısmi türev alınıp, tamamlayıcı gevşeklik kısıtları uygulandığında, aşağıdaki Karush Kuhn Tucker koşullarının güç değerlerinin en iyiliği için gerekli ve yeterli olduğu gösterilebilir.

$$\lambda_1 \geq \gamma_1 \frac{s_{ps}}{1 + s_{ps}P_{ps}(\mathbf{h})} + \gamma_3 \frac{s_{pr}}{A} \tag{25}$$

$$\lambda_2 \geq \gamma_2 \frac{s_{sr}}{1 + s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h})} + \gamma_3 \frac{s_{sr}}{A} \tag{26}$$

$$\lambda_1 \geq \gamma_3 \frac{s_{pr}\sqrt{P_{pc}(\mathbf{h})} + \sqrt{s_{pr} s_{sr} P_{sc}(\mathbf{h})}}{A\sqrt{P_{pc}(\mathbf{h})}} \tag{27}$$

$$\lambda_2 \geq \gamma_3 \frac{s_{sr}\sqrt{P_{sc}(\mathbf{h})} + \sqrt{s_{pr} s_{sr} P_{pc}(\mathbf{h})}}{A\sqrt{P_{sc}(\mathbf{h})}} \tag{28}$$

$$1 = \gamma_2 + \gamma_3 \tag{29}$$

$$\alpha + \gamma_4 = \gamma_1 + \gamma_3 \tag{30}$$

Kısıtlar (25), (26), (27), (28)'in eşitlikle sağlanması, ancak, karşılık gelen güçler $P_{ps}(\mathbf{h})$, $P_{sr}(\mathbf{h}), P_{pc}(\mathbf{h}), P_{sc}(\mathbf{h})$'in pozitif olması ile mümkündür. Lagrange çarpanları da, atandıkları kısıtları sağlayacak şekilde seçilir.

Öncelikle toplam veri hızı eniyilemesi problemini çözmek için $\alpha = 1$ olarak seçilsin. (29) ve (30) eşitliklerine göre $\gamma_1 = \gamma_2 + \gamma_4$ elde edilir. Burada iki durumu ayrı ayrı ele almak çözüme kolayca ulaşmayı sağlayacaktır: Eğer $\gamma_4 = 0$ ise, (20) aktif olmadığından, birincil kullanıcının veri hızı halihazırda bilişsel gönderi veri hızı alt kısıtını sağlar. Bu durum, bilişsel olmayan sadece işbirlikli senaryoya indirgenir, ve Kaya ve Ulukus (2007)'deki yaklaşımları takip ederek, (25)-(28) denklemlerinin uzun bir manipülasyonu sonunda, $\gamma_1 = \gamma_2 = 1 - \gamma_3$ olduğu da dikkate alınarak,

$$P_{ps}(\mathbf{h}) = \left(\frac{\gamma_2(\lambda_2 s_{pr} + \lambda_1 s_{sr})}{\lambda_1^2 s_{sr}} - \frac{1}{s_{ps}} \right)^+, \tag{31}$$

$$P_{sr}(\mathbf{h}) = \left(\frac{\gamma_2(\lambda_2 s_{pr} + \lambda_1 s_{sr})}{\lambda_2^2 s_{sr}} - \frac{1}{s_{sr}} \right)^+, \tag{32}$$

$$P_{pc}(\mathbf{h}) = \frac{\frac{1-\gamma_2\left(s_{pr}+\lambda_1 s_{sr}/\lambda_2\right)}{\lambda_1} - D}{(s_{pr} + \lambda_1 s_{sr}/\lambda_2)^2} s_{pr}, \tag{33}$$

$$P_{sc}(\mathbf{h}) = \frac{\frac{1-\gamma_2\left(s_{sr}+\lambda_2 s_{pr}/\lambda_2\right)}{\lambda_2} - D}{(s_{sr} + \lambda_2 s_{pr}/\lambda_1)^2} s_{sr}, \tag{34}$$

olarak bulunur. Burada $D = 1 + s_{pr} P_{ps}(\mathbf{h}) + s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h})$, olarak tanımlıdır. Yalnız dikkat edilmelidir ki, (33) ve (34)'ten elde edilen $P_{pc}(\mathbf{h})$ ve $P_{sc}(\mathbf{h})$ değerlerinin her ikisi de pozitif olmalıdır. Aksi takdirde, $P_{pc}(\mathbf{h})$ ve $P_{sc}(\mathbf{h})$ değerlerinin her ikisini de (25) and (26) eşitsizliklerinde sıfıra eşitleyerek, (25) ve (26) eşitsizliklerini $P_{ps}(\mathbf{h})$ ve $P_{sr}(\mathbf{h})$ için tekrar çözmek

gereklidir. Bu çözümler aşağıdaki ikinci derece denklemin pozitif kökleri olarak elde edilir:

$$a_i P_{ij}(\mathbf{h})^2 + b_i P_{ij}(\mathbf{h}) + c_i = 0, \quad \{i,j\} \in \{\{p,s\},\{s,r\}\} \tag{35}$$

Buradaki katsayılar

$$\begin{aligned}(a_p; b_p; c_p) &= (\lambda_1 s_{pr} s_{ps}; \lambda_1(s_{pr} + s_{ps} + s_{ps} s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h}) \\ &\quad - s_{pr} s_{ps}); \lambda_1(1 + s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h})) \\ &\quad - \gamma_2(s_{ps} + s_{ps} s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h}) - s_{pr} - s_{pr})) \\ (a_s; b_s; c_s) &= (\lambda_2 s_{sr}^2; \lambda_2(2 s_{sr} + s_{pr} s_{sr} P_{ps}(\mathbf{h})) - s_{sr}^2; \\ &\quad \lambda_2(1 + s_{pr} P_{ps}(\mathbf{h})) - \gamma_2(s_{pr} s_{sr} P_{ps}(\mathbf{h})) - s_{sr})\end{aligned}$$

olarak güçlere bağlıdır.

Diğer olası durum olan $\gamma_4 > 0$, durumunda, (20) eşitlikle sağlanır, yani, birincil kullanıcı veri hızı alabileceği en küçük değere eşit kabul edilir. Fakat bu durumda şu kilit gözlem yapılabilir: Artık toplam veri hızı eybüyüklemesi problemi ikincil kullanıcı veri hızı enbüyüklemesine denk hale gelmiştir, ve ikincil kullanıcı veri hızı enbüyüklemesi probleminin çözümü, toplam veri hızı enbüyüklemesi probleminin çözümünü de sağlayacaktır. Bu nedenle, doğrudan $\alpha = 0$ kabulüyle, ve (20) eşitsizliğinde eşitliği zorlayarak, problem γ_4 değişkeni üzerinden çözülebilir. KKT koşulları ve sonuçta elde edilen en iyi güç değeri ifadeleri bir önceki durumla neredeyse özdeştir; yalnızca (31)'daki γ_2 değişkenini γ_1 ile değiştirmek yeterlidir. (29)-(30) kısıtları kullanılarak, artık iki Lagrange parametresi γ_4 ve γ_2 (ya da, bunun yerine γ_1 ve γ_2) üzerinden bir bölerek arama yapılması gereklidir. Yine, işbirliği sinyallerinin güçlerinin negatif çıktığı durumda, bunlar sıfır kabul edilmeli, ve $P_{ps}(\mathbf{h})$, $P_{sr}(\mathbf{h})$ değişkenleri (35) denkleminden,

$$\begin{aligned}(a_p; b_p; c_p) &= (\lambda_1 s_{pr} s_{ps}; \lambda_1(s_{pr} + s_{ps} + s_{ps} s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h})) \\ &\quad - (\gamma_1 - \gamma_2 + 1) s_{pr} s_{ps}; \lambda_1(1 + s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h})) \\ &\quad - \gamma_1(s_{ps} + s_{ps} s_{sr} P_{sr}(\mathbf{h})) - (1 - \gamma_2) s_{pr}) \\ (a_s; b_s; c_s) &= (\lambda_2 s_{sr}^2; \lambda_2(2 s_{sr} + s_{pr} s_{sr} P_{ps}(\mathbf{h})) - s_{sr}^2; \\ &\quad \lambda_2(1 + s_{pr} P_{ps}(\mathbf{h})) - \gamma_2(s_{pr} s_{sr} P_{ps}(\mathbf{h})) - s_{sr})\end{aligned}$$

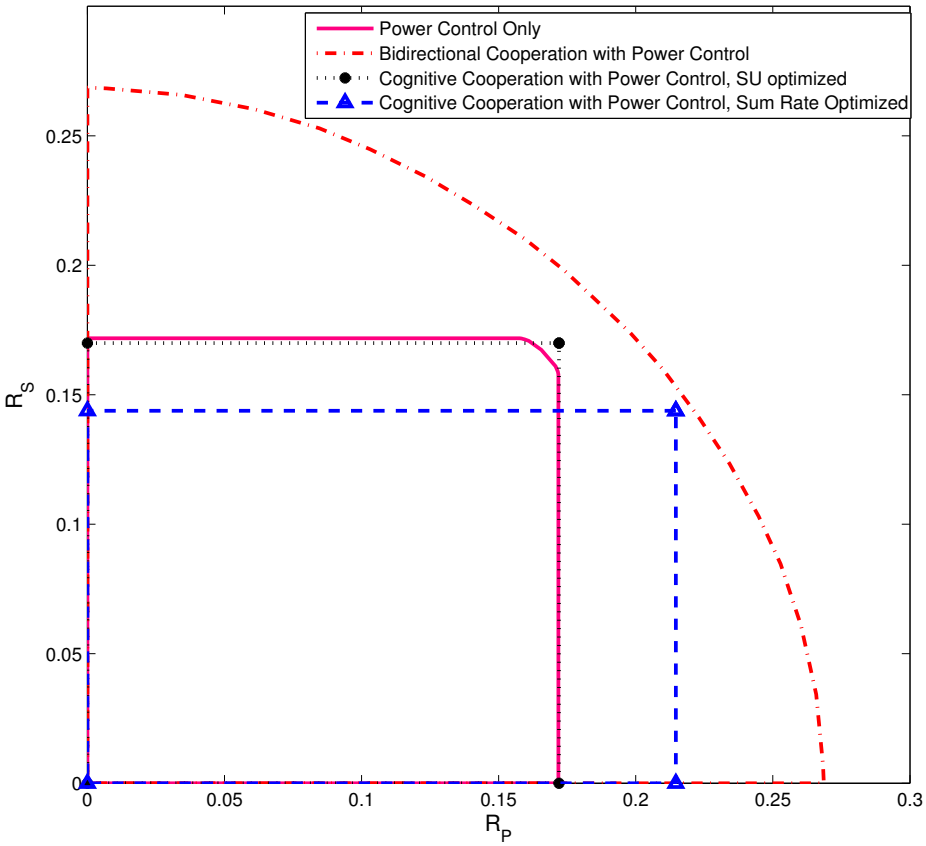
katsayıları kullanılarak tekrar çözülmelidir.

Bu bölümde geliştirilen eniyi güç tahsisi politikasının önemli bir özelliği, bu politikayı kullanıcılar üzerinden döngüsel olarak elde etmenin mümkün oluşudur. Bu yaklaşım, Lagrange çarpanlarını sistematik olarak arayarak en iyi çözüme ulaşabilmemizi sağlamaktadır. Bu algoritmanın sonuçları takip eden alt bölümde sunulacaktır.

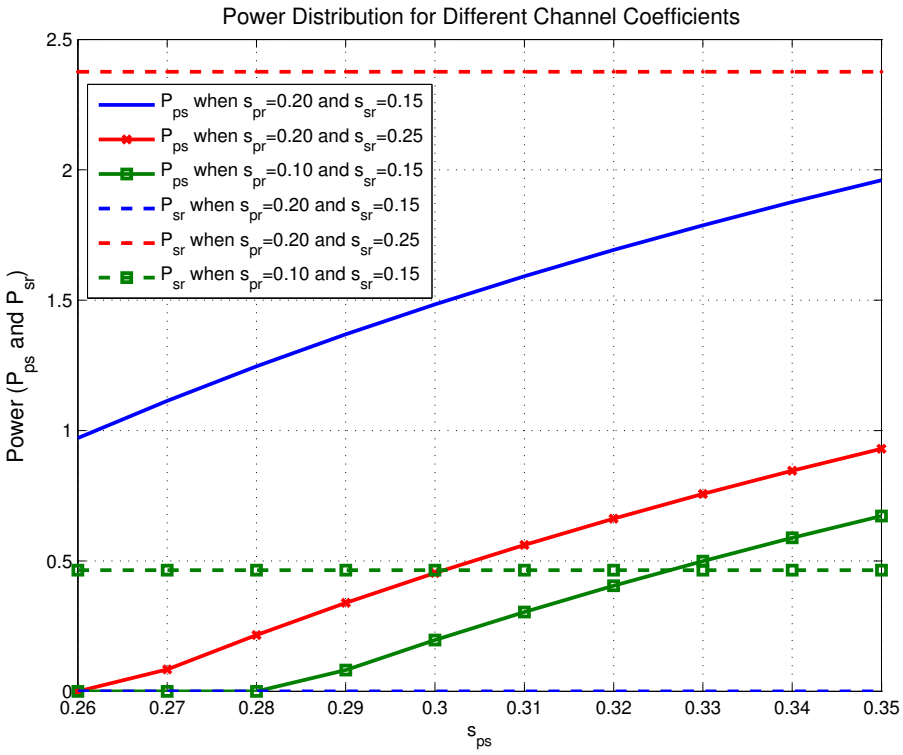
1.1.3 Benzetim Sonuçları

Bu alt bölümde, önerdiğimiz güç tahsisi algoritmasının performansı bazı nümerik örnekler üzerinden değerlendirilecektir. Benzetimlerde Her kullanıcının ortalama gücü, ve gürültü sinyallerinin varyansları 1 olarak kabul edilmiştir. Birincil kullanıcılardan ikincil kullanıcılara olan linklerin, birincil kullanıcı alıcı arası linklerden her zaman daha kuvvetli olması varsayımını sağlatabilmek için, sönümlenme katsayılarının düzgün dağılımlı olduğu, ve birincil - ikincil kullanıcı linki için $\{0.26, 0.27, ..., 0.35\}$ kümesinden, kullanıcı alıcı linkleri için ise $\{0.025, 0.050, ..., 0.25\}$ kümesinden değerler aldığı varsayılmıştır. Bu varsayım, gerçek bir ağ modelinde elbette geçerli olmayacaktır, burada yalnızca güç ifadelerinin bazı özelliklerini inceleyebilmek, ve veri hızı bölgelerini şu ana kadar sunulan kodlama yapısına bağlı olarak oluşturabilmek için yapılmıştır. Daha gerçekçi Rayleigh sönümlenmeli ve yol kayıplı kapsamlı bir model, Bölüm 3'te ele alınacaktır.

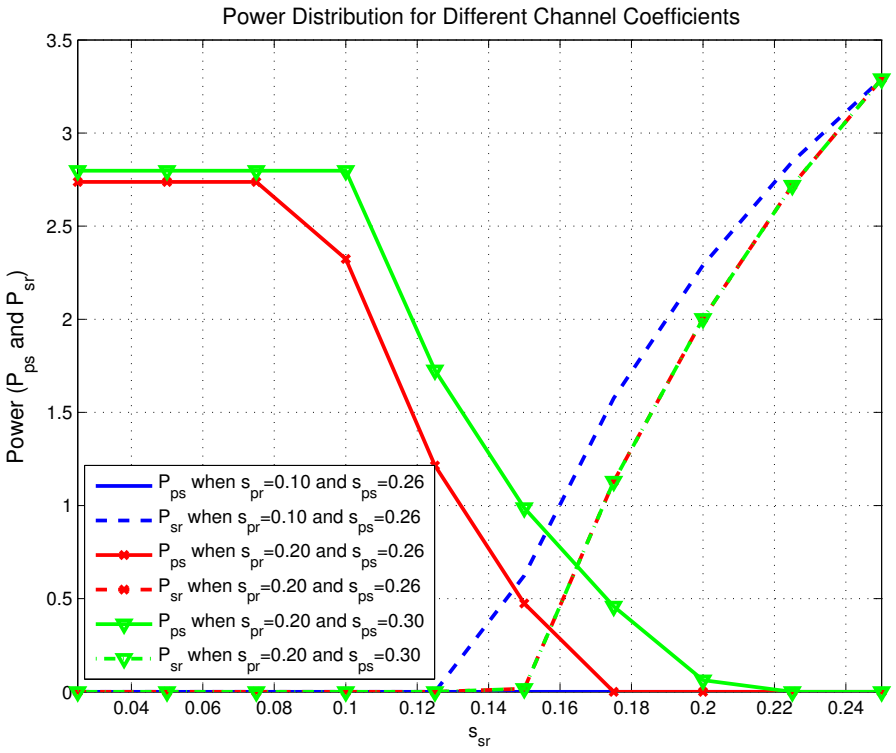
Şekil 2 hem toplam veri hızının, hem de ikincil veri hızının enbüyüklenmesi ile elde edilen erişilebilir veri hızı bölgelerini göstermektedir. Toplam veri hızı enbüyüklemesi için, önerilen güç kontrolü stratejisinin birincil kullanıcının kendi başına erişebileceği veri hızını kayda değer biçimde artırdığı görülmektedir. Hatta, neredeyse iki yönlü işbirliği durumunda elde edilebilecek veri hızı çiftlerine yakın bir performans elde edilebilmektedir. Bu sonucun ilgi çekici yanı, birincil kullanıcıyı bilişsel işbirliği senaryosuna teşvik edici bir performans ortaya koymasıdır. Bu durumda, ikincil kullanıcı 0.144 sembol/gönderi hızına erişirken, birincil kullanıcı, çok daha yüksek bir değer elde edebilmekte, toplam veri hızı 0.358 sembol/gönderi'yi bulmaktadır. İkincil kullanıcı veri hızı enbüyüklenmesi için, birincil kullanıcının veri hızının tam olarak tek başına gönderiyor olsaydı en iyi güç tahsisi ile elde edebileceği değere sabitlenmesi gerekir. Bu nedenle, öncelikle bu değer işbirliksiz veri hızı bölgesi elde edilerek bulunmuş, ve 0.172 sembol/gönderi olarak belirlenen bu değer, B^* olarak seçilmiştir. Noktalı çizgiler ile gösterilen veri hızı bölgesi, işbirlikli bilişsel iletişim ile elde edilebilen veri hızlarını göstermekte, ve en iyi veri hızı noktası olan köşede, ikincil kullanıcının veri hızının



Şekil 2: Güç kontrolü ve kullanıcı işbirliği ile erişilebilen hız bölgeleri.



Şekil 3: Farklı s_{pr} ve s_{sr} değerleri için güç dağılımı.



Şekil 4: Farklı s_{pr} ve s_{ps} değerleri için güç dağılımı.

0.17 sembol/gönderi çıktığı, bunun da iki kullanıcının da işbirliği yapmadıkları ama birlikte güç kontrolü yapabildikleri durumda elde edilebilecek 0.158 sembol/gönderi'lik hızın daha üzerinde olduğu görülmektedir.

Şekil 3'te, en iyi güç dağılımları s_{ps} kanal parametresinin fonksiyonu olarak verilmiştir. Burada, kullanıcı - alıcı kanal sönümlenme değerleri, s_{pr} ve s_{sr}, sırasıyla üç farklı değer kümesine sabitlenmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi P_{ps} değerinin artan s_{ps} ile artması normaldir, zira birincil kullanıcı avantajlı kanal durumunu fırsat bilerek daha fazla ortak bilgi yaratma yoluna gidecektir. Burada (31) ifadesinden de öngörüldüğü gibi su doldurma tipi bir güç tahsisi gözlenmektedir. Birincil kullanıcı - alıcı linkindeki sönümlenme parametresi s_{pr} iyileştikçe, su seviyesi, ve dolayısıyla P_{ps} güç değeri de yükselmektedir; çünkü ikincil kullanıcıya gönderilen X_{ps} alıcıda da alınmakta, ve birincil kullanıcı bundan faydalanmaktadır. Kanal parametresi s_{sr} arttıkça ise, P_{ps} gücü düşmektedir. Bu da şuna bağlanabilir: iyi bir ikincil kullanıcı - alıcı linki daha önceden oluşturulmuş olan ortak bilgiyi C kodsözcüğü aracılığıyla göndermek için iyi bir fırsattır, bu yüzden birincil kullanıcı P_{ps} gücünü azaltarak yerine P_{pc} gücünü artıracak, böylelikle evreuyum kazancını büyütecektir. İkincil kullanıcının gücü, beklendiği üzere s_{ps} değerine bağlı değildir, ancak artan s_{pr} ile azalmaktadır (işbirliğine imkan

vermek için) ve s_{sr} ile monoton artmaktadır.

Şekil 4'te, bu kez ikincil kullanıcının güç dağılımı s_{sr} kanal parametresinin bir fonksiyonu olarak çizilmiş, s_{pr} and s_{ps} değerleri sabit tutulmuştur. İkincil kullanıcıdan alıcıya doğru olan kanal iyileştikçe, ikincil kullanıcının kendi gönderimine ayırdığı güç beklenen şekilde artmakta, birincil kullanıcıya ayırdığı güç ise azalmaktadır; ancak bu durum ancak belli bir kanal kalitesinden sonra gerçekleşmektedir. Bunun sebebi, s_{sr} düşük iken, kanalın daha çok ortak bilgi oluşturmak için kullanılması gerekliliğidir. Bu durum özellikle s_{ps} güçlü iken gözlenmektedir. s_{sr} arttıkça, ikincil kullanıcı gücünün bir bölümünü kendisi için kullanmaya başlar. Belli bir s_{sr} değerinin üzerinde, birincil kullanıcı X_{ps} sözcüğünü göndermeyi bırakarak, C kodsözcüğünü göndermeyi tercih eder, aynı zamanda da ikincil kullanıcının kanalı daha etkin kullanmasına izin verir. Beklendiği üzere, P_{sr} değeri C gönderilirken s_{ps} parametresinden bağımsızdır, bkz. (32).

1.1.4 Sonuç

Bu bölümde, sönümlenmeli çoklu erişim kanalları için işbirlikli üste-serime dayalı bir bilişsel model önerilmiş, ve biri toplam veri hızlarını eniyileyen, diğeri ise ikincil kullanıcı veri hızını eniyileyen iki güç kontrolü algoritması geliştirilmiştir. En iyi güç tahsisi için kullanılması gereken güç ifadeleri hem analitik olarak türetilmiş, hem de döngüsel bir algoritma yoluyla çözümü sağlanmıştır. Kullanıcıların hangi kanal durumlarında hangi tip haberleşme sinyalleri gönderdikleri güçlerin kanal durumlarına bağlı değişimi incelenmek suretiyle belirlenmiştir. Erişilebilir veri hızı bölgelerinde kayda değer artışlar elde edilebileceği gösterilmiş, ve işbirliği ve bilişsel radyo kavramlarının bir arada kullanılmasının doğal ve faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

1.2 Birlikte Çöz-Sıkıştır İlet Tabanlı İşbirlikli Çoklu Erişim

Bu bölümde, iki kullanıcılı bir işbirlikçi çoklu erişim kanalı için çöz-ilet ve sıkıştır-ilet tekniklerinin eşzamanlı kullanılmasına dayalı kodlama ve kodçözme teknikleri geliştirilmiş, ve karşılık gelen erişilebilir veri hızı ifadeleleri türetilmiştir. Sonuçlar, bilinen bazı çift yönlü işbirliği stratejilerinin veri hızları ile kıyaslayarak, iki tekniğin bir arada kullanılmasının erişilebilir veri hızı bölgesini genişletebildiği benzetimler yolu ile gösterilmiştir.

1.2.1 Giriş

Aktarıcı bir düğüm yardımı ile haberleşmeye imkan veren aktarım kanalı, ilk olarak Van der Meulen (1971)'de ele alınmıştır. Bu kanal modeli için, daha sonraları literatürde çöz-ilet (DF) ve sıkıştır-ilet (CF) olarak adlandırılacak olan iki temel kodlama tekniği Cover ve El Gamal (1979)'da geliştirilmiş, hatta bu iki tekniğin bir kombinasyonu Cover ve El Gamal (1979, Theorem 7)'de sunulmuştur. Bahsi geçen (DF) ve (CF) protokolleri, Kramer vd. (2005)'te birden fazla aktarıcı olan durum için genellenmiştir. DF ve CF dışında çok yaygın olarak bilinen bir diğer protokol de yükselt-ilettir (AF), ancak bu teknik gürültü gücünü de yükseltmesi nedeniyle çoğunlukla CF ve DF'den kötü sonuç vermektedir. Bu yönde bir benzetim, ve çok sayıda referans yine Kramer vd. (2005)'te sunulmuştur. Yine temel üç düğümlü aktarım kanalında dik olmayan yükselt-ilet (NAF), sıkıştır-ilet (CF), daha basit bir versiyonu olan kestir-ilet (EF) ve karma aktarım stratejileri Yang vd. (2008)'de ele alınmıştır. Karma aktarım, gecikme kısıtlı kapasite temel alınarak uzun-dönem-ortalama güç kısıtı altında en iyi sonucu vermiştir. Literatürde tek kaynaklı CF, DF ve AF protokollerini, ve bunların karma kullanımlarını irdeleyen daha pek çok yayın bulunmakla birlikte, ele alacağımız çift yönlü işbirliği modeli kapsamında doğrudan kullanılacak sonuçlar haricinde, aktarım kanalları hakkındaki çok sayıda değerli referansa burada yer veremiyoruz. Bu bölümün ana amacı, *çift yönlü* işbirliği tekniklerinde çeşitliliğe imkan tanıyarak daha yüksek veri hızlarına ulaşabilecek; aynı zamanda da ele alacağımız modelin özel durumu olarak görülebilecek işbirlikçi bilişsel radyo ağları gibi sistemlerde, ikincil kullanıcıların birincil kullanıcı sinyallerini tam olarak çözmeye gerek duymadan işbirliği yapmalarını sağlayabilecek sıkıştırma tabanlı yöntemler geliştirmektir.

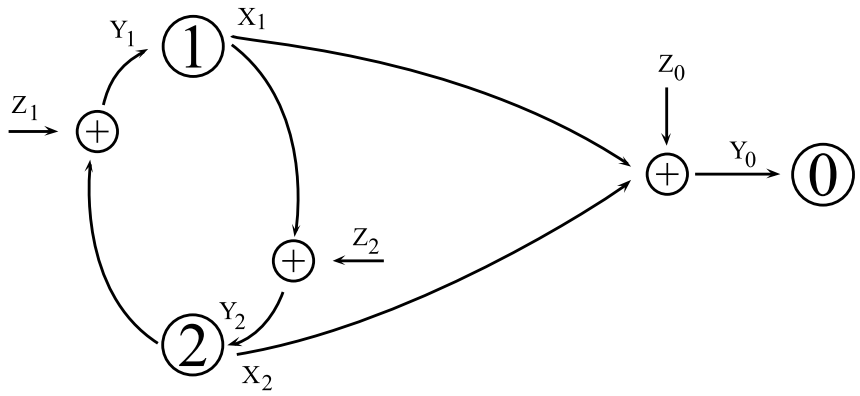
CF ve DF protokollerini iki yönlü aktarıma uygulayan çalışmalardan biri Gunduz vd. (2008)'dir, ancak Gunduz vd. (2008)'de kullanıcılar birbirlerinin sinyallerini doğrudan almamakta, iki yönlü aktarım adanmış bir ek aktarıcı tarafından yapılmaktadır. Karşılıklı

işbirliğine izin veren bir çoklu erişim kanalı (ÇEK) modeli için, Gauss gürültülü kanallarda DF protokolü ile erişilebilir veri hızları Sendonaris vd. (2003)'te elde edilmiştir. Karşılıklı CF kullanan sistemlerle ilgili çalışmalar ise daha sınırlıdır: ele alacağımız modele en yakın model, bilgi kuramsal güvenlik çerçevesinde, gizlilik kriterlerini de hesaba katarak Ekrem ve Ulukus (2008)'de çalışılmıştır. Bu modelden gizlilik kısıtları çıkarılarak veri hızı bölgeleri yeniden tanımlandığında, salt CF uygulayan bir işbirlikçi kanal modeli elde edilebilir. ÇEK'lerde, eşzamanlı olarak karşılıklı CF ve DF'in beraber kullanımına dayalı olarak bildiğimiz tek kodlama tekniği, kısaca Khojastepour vd. (2004) bildirisinde sunulmuş, bu tekniğe ait erişilebilir hız bölgesi hesaplanmış, ve Gauss gürültülü kanala uygulanmıştır. Sonuçlar oldukça ümit verici görünse de, kodlama stratejisinin detayları verilmemiştir; ve erişilebilir veri hızı hesaplarında bazı kısıtların dikkate alınmadığı, bu nedenle fazla iyimser sonuçlar elde edildiği tarafımızca düşünülmektedir. Son olarak, tek yönlü aktarım kanalı için, Cover ve El Gamal (1979, Theorem 7)'ye alternatif olabilecek, birleşik CF ve DF'ye dayalı kodlama ve çözümleme stratejilerinin yakın dönemde Chong ve Motani (2011)'de incelendiğini, ve ardışık geriye doğru çözümleme (SeqBack) ve eşzamanlı geriye doğru çözümleme (SimBack) adı verilen iki yeni yöntem geliştirildiğini vurgulamak gereklidir. Bu yöntemlerin sonuçlarının Cover ve El Gamal (1979, Theorem 7)'den daha iyi sonuç verebildiği görülmektedir. Bu nedenle, projenin bu bölümünde, Chong ve Motani (2011)'de sunulan teknikler, çift yönlü işbirliğine genellenecektir.

Bu bölümün devamında, CF ve DF tekniklerinin eşzamanlı olarak ve göndericiler arasında çift-yönlü işbirliğine izin verecek şekilde kullanıldığı bir ÇEK'in erişilebilir veri hızlarını elde ediyoruz. Veri hızı bölgelerini, hem önerdiğimiz kodlama tekniklerinin özel bir durumu olarak elde edilen çift yönlü CF stratejisi ile, hem de literatürde bilinen birtakım çift yönlü işbirliği stratejileri ile kıyaslayarak, bu iki tekniğin birarada kullanılmasının erişilebilir veri hızı bölgesini genişlettiğini benzetimlerle gösteriyoruz.

1.2.2 Sistem Modeli

Bu bölümde, Şekil 5'te gösterilen, işbirlikçi çoklu erişim kanal modeli ele alınmaktadır. Alıcı 0, göndericiler ise 1 ve 2 numaralı düğümler olarak tanımlandığında, $j \in \{0, 1, 2\}$ numaralı düğümde alınan Y_j sinyali, aynı alıcıdaki sıfır ortalama ve σ_j^2 varyanslı Gauss dağılımlı gürültü N_j ve ortalama güçleri P_1 be P_2 ile sınırlı olan gönderilen sinyaller X_1 ve X_2 cinsinden şöyle ifade edilir:



Şekil 5: İki kullanıcılı işbirliği kanalı.

$$Y_0 = X_1 + X_2 + Z_0 \tag{36}$$

$$Y_1 = (X_1 + X_2 + Z_1) - X_1 = X_2 + Z_1 \tag{37}$$

$$Y_2 = (X_1 + X_2 + Z_2) - X_2 = X_1 + Z_2 \tag{38}$$

Bu modelde, göndericilerin kendi sinyallerini bildikleri için aldıkları sinyalden çıkarabildiği varsayılmıştır. Bu bölüm boyunca, vektörler koyu renkli semboller $\mathbf{a}$ ile, herhangi bir a değişkenin kestirilmiş hali $\hat{a}$ ile, önceki bloktaki değeri ise a' ile, Gauss kapasite fonksiyonu ise kısaca $C(a) = \frac{1}{2}\log_2(1+a)$ ile gösterilecektir.

1.2.3 Kodlama, Kodçözme ve Veri Hızları

Kod kitabı oluşturulması

Kullanılacak teknikler bir tür blok Markov bindirmeli kodlama, ve geriye doğru kodçözmedir. Gönderici 1'in (G_1), $\mathcal{W}_1 \triangleq \left\{1, \ldots, 2^{nR_1}\right\}$ kümesinde değer alan mesajı w_1; w_{1d}, w_{10}, w_{1c} olmak üzere üç bağımsız parçaya bölünür, ve bu alt mesajlar sırasıyla $\mathcal{W}_{1d} \triangleq \left\{1, \ldots, 2^{nR_{1d}}\right\}$, $\mathcal{W}_{10} \triangleq \left\{1, \ldots, 2^{nR_{10}}\right\}$, $\mathcal{W}_{1c} \triangleq \left\{1, \ldots, 2^{nR_{1c}}\right\}$ kümelerinden değer alır. Ayrıca, işbirlikçi ortakta sıkıştırmanın gerçekleştirilmesi için rastgele seleleme kullanılacağından, $\mathcal{W}_1$'in bir alt kümesi olan $\mathcal{Z}_{12} \triangleq \left\{1, \ldots, 2^{nR_{12}}\right\}$ kümesinden değer alan z_{12} alt mesajı da tanımlanır. Gönderici 2'nin (G_2) alt mesajları ve bunların değer kümeleri de simetrik olarak tanımlanır. Bu durumda, $R_1 = R_{1d} + R_{10} + R_{1c}$ ve $R_2 = R_{2d} + R_{20} + R_{2c}$'dir. Kod kitabı oluşturulma prosedürü aşağıda özetlenmiştir.

- $2^{n(R_{1d}+R_{2d})}$ adet $\mathbf{u}$ dizisi oluşturulur, ve $\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})$, şeklinde her $w'_{1d} \in \mathcal{W}_{1d}$, $w'_{2d} \in \mathcal{W}_{2d}$

çiftine atanır.

- Her $\mathbf{u}$ için, $2^{nR_{1d}}$ adet $\mathbf{x}_{1d}$ dizisi oluşturulur, ve her $w_{1d} \in \mathcal{W}_{1d}$ için $\mathbf{x}_{1d}\{w_{1d}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$ için, $2^{nR_{2d}}$ $\mathbf{x}_{2d}$ dizisi oluşturulur, ve her $w_{2d} \in \mathcal{W}_{2d}$ için $\mathbf{x}_{2d}\{w_{2d}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$ için, $2^{nR_{10}}$ $\mathbf{x}_{10}$ dizisi oluşturulur, ve her $w_{10} \in \mathcal{W}_{10}$ için $\mathbf{x}_{10}\{w_{10}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$ için, $2^{nR_{20}}$ $\mathbf{x}_{20}$ dizisi oluşturulur, ve her $w_{20} \in \mathcal{W}_{20}$ için $\mathbf{x}_{20}\{w_{20}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$ için, $2^{nR_{12}}$ $\mathbf{x}_{12}$ dizisi oluşturulur, ve her $z'_{12} \in \mathcal{Z}_{12}$ için $\mathbf{x}_{12}\{z'_{12}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$ için, $2^{nR_{21}}$ $\mathbf{x}_{21}$ dizisi oluşturulur, ve her $z'_{21} \in \mathcal{Z}_{21}$ için $\mathbf{x}_{21}\{z'_{21}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$ ve $\mathbf{x}_{12}$ için, $2^{nR_{1c}}$ $\mathbf{x}_{1c}$ dizisi oluşturulur, ve her $w_{1c} \in \mathcal{W}_{1c}$ için $\mathbf{x}_{1c}\{w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$ ve $\mathbf{x}_{21}$ için, $2^{nR_{2c}}$ $\mathbf{x}_{2c}$ dizisi oluşturulur, ve her $w_{2c} \in \mathcal{W}_{2c}$ için $\mathbf{x}_{2c}\{w_{2c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}\}$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$, $\mathbf{x}_{1d}$, $\mathbf{x}_{2d}$, $\mathbf{x}_{21}$, $\mathbf{x}_{2c}$, $\mathbf{x}_{20}$ için, $2^{nR_{21}}$ $\hat{\mathbf{y}}_2$ dizisi oluşturulur, ve her $z_{21} \in \mathcal{Z}_{21}$ için $\hat{\mathbf{y}}_2(z_{21}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{21}(z'_{21}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{20}(w_{20}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2c}(w_{2c}, \mathbf{x}_{21}, \mathbf{u}))$ şeklinde atanır.

- Her $\mathbf{u}$, $\mathbf{x}_{1d}$, $\mathbf{x}_{2d}$, $\mathbf{x}_{12}$, $\mathbf{x}_{1c}$, $\mathbf{x}_{10}$ için $2^{nR_{12}}$ $\hat{\mathbf{y}}_1^n$ dizisi oluşturulur, ve her $z_{12} \in \mathcal{Z}_{12}$ için $\hat{\mathbf{y}}_1^n$ $(z_{12}, \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})$ $\mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(w_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}))$ şeklinde atanır.

Bu prosedür, kolaylıkla ayrık hafızasız işbirlikçi çoklu erişim kanallarına da genellenebilecek şekilde ve detayda sunulmuştur. Ancak buradan itibaren Gauss gürültülü kanal modellerine yoğunlaşılacaktır. Buna göre, G_1, yukarıda oluşturulan $\mathbf{u}$, $\mathbf{x}_{1d}$, $\mathbf{x}_{10}$, $\mathbf{x}_{12}$ ve $\mathbf{x}_{1c}$ alt-kodsözcüklerinin rastgele elemanları olan U, X_{1d}, X_{10}, X_{12} ve X_{1c}'yi, sırasıyla 1, P_{1d}, P_{10},

P_{12} ve P_{1c} varyanslarına sahip bağımsız Gauss dağılımlarından seçer, $U_1 = U\sqrt{P_{u1}}$ olarak günceller ve hepsini üstüste bindirerek gönderir. G_2'nin toplam kod sözcüğü de $U_2 = U\sqrt{P_{u2}}$ alınarak benzer şekilde oluşturulur:

$$X_1 = X_{1c} + X_{12} + X_{1d} + X_{10} + U_1 \tag{39}$$

$$X_2 = X_{2c} + X_{21} + X_{2d} + X_{20} + U_2 \tag{40}$$

Güç değerleri, $P_1 = P_{1c} + P_{12} + P_{1d} + P_{10} + P_{u1}$ ve $P_2 = P_{2c} + P_{21} + P_{2d} + P_{20} + P_{u2}$ kısıtlarını sağlamak zorundadır. Bu noktada, kodsözcüklerinin parçalarını oluşturan yukarıdaki değişkenlerin, işbirliği protokolümüzdeki rollerinin neler olduğunu kısaca özetlemek faydalı olacaktır. Anlatımın özlüğü için yalnızca G_1'e yoğunlaşalım: X_{1d} G_2'de çözülmek üzere gönderilen mesajı, X_{1c} G_2 tarafından sıkıştırılmak üzere gönderilen mesajı, X_{10} doğrudan alıcıda çözülecek mesajı, X_{12} G_2'nin bir önceki blokta sıkıştırılmak üzere gönderdiği sinyalin sıkıştırılmış halini, U ise her iki göndericinin bir önceki blokta X_{1d} ve X_{2d} aracılığıyla paylaştıkları ortak mesajları taşıyan kodsözcükleridir. Yukarıdaki kodsözcüğü oluşturma prosedüründe adı geçmesine karşın X_1 ifadesinde doğrudan yer almayan $\hat{Y}_1$ ara değişkeni, alınan sinyali rastgele seleleyerek, sıkıştırılmak üzere gönderilen sinyal hakkında alıcıya yardımcı olacak daha kaba bir bilgi oluşturmak amacıyla kullanılacaktır. Buna göre, sıkıştırma gürültüsü adı vereceğimiz, $\sigma^2_{w_1}$ ve $\sigma^2_{w_2}$ varyanslı N_{w1} ve N_{w2} Gauss dağılımlı değişkenleri, göndericilerde alınan sinyallere eklenerek, $\hat{Y}_1 = Y_1 + N_{w1}$, $\hat{Y}_2 = Y_2 + N_{w2}$ ara değişkenleri elde edilir. Bir sonraki alt bölümde, kodlama ve kodçözme stratejileri detaylandırılacak, ve karşılık gelen veri hızı kısıtları türetilecektir.

Göndericilerde Kodlama ve Kodçözümü

G_1'in z'_{12}, w'_{2d} mesajlarını bir önceki bloktan bildiğini varsayalım. G_1, w_{2d} mesajını çözmek için, $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{2d}(\hat{w}_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_1, \mathbf{y}_1)$ sinyallerini birlikte tipik yapan $\hat{w}_{2d}$'yi bulur. Hata olasılığının sıfıra gitmesi için, bu mesaja ait hız aşağıdaki kısıtı sağlamalıdır:

$$R_{2d} < I(X_{2d}; Y_1|U, X_1) \tag{41}$$

Daha sonra G_1, $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_1(\hat{z}_{12}, \mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(w_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(w_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d})), \mathbf{y}_1)$ sinyallerini birlikte tipik yapan

$\hat{z}_{12}$'yi kestirir. Bunun için,

$$R_{12} > I(Y_1; \hat{Y}_1|U, X_1, X_{2d}) \tag{42}$$

olması gereklidir. Benzer şekilde, G_2 için sağlanması gereken kısıtlar, aşağıdaki gibi bulunur:

$$R_{1d} < I(X_{1d}; Y_2|U, X_2), \tag{43}$$

$$R_{21} > I(Y_2; \hat{Y}_2|U, X_2, X_{1d}). \tag{44}$$

Alıcıda Kodçözümü

Alıcı kodçözmeye son blokta aldığı sinyalden başlar ve geriye doğru ardışık kodçözme Chong ve Motani (2011) tekniğinin ÇEK için genellediğimiz bir türünü uygular. Herhangi i. blok için, kodçözme işlemi şöyle gerçekleşir: $w_{1d}, z_{21}, w_{2d}, z_{12}$ mesajlarının $i+1$ numaralı blokta doğru olarak çözüldüğü varsayılsın. Alıcı, $(\mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d})), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d})), \mathbf{y}_0)$ kodsözcüklerini birlikte tipik yapacak tek bir çift $\hat{w}'_{1d}$ ve $\hat{w}'_{2d}$ belirlemeye çalışır. Dilenildiği kadar yüksek olasılıkla $\hat{w}'_{1d} = w'_{1d}$, $\hat{w}'_{2d} = w'_{2d}$ elde edilmesi için şu kısıt sağlanmalıdır:

$$R_{1d} + R_{2d} < I(Y_0; U, X_{1d}, X_{2d}) \tag{45}$$

Daha sonra alıcı, $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(\hat{w}_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{20}(\hat{w}_{20}, \mathbf{u}), \mathbf{y}_0)$ sinyallerini birlikte tipik yapan bağımsız $\hat{w}_{10}$ ve $\hat{w}_{20}$ çiftini çözer. Çoklu erişim kanalları için bilinen sonuçlara dayanarak, yüksek olasılıkla $\hat{w}_{10} = w_{10}$ ve $\hat{w}_{20} = w_{20}$ olması için gerekli kısıtlar

$$R_{10} < I(X_{10}; Y_0|U, X_{20}, X_{1d}, X_{2d}) \tag{46}$$

$$R_{20} < I(X_{20}; Y_0|U, X_{10}, X_{1d}, X_{2d}) \tag{47}$$

$$R_{10} + R_{20} < I(X_{10}, X_{20}; Y_0|U, X_{1d}, X_{2d}) \tag{48}$$

şeklinde kolayca elde edilir. Bu noktadan sonra alıcı, sıkıştırılmış bilgileri çözer. Bunun için, önce $\hat{z}'_{12}$ ve $\hat{z}'_{21}$ indislerini belirlemek üzere, birlikte tipiklik koşulunu sağlayan $(\mathbf{u}(\hat{w}'_{1d}, \hat{w}'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{10}(w_{10}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{20}(w_{20}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_1(z_{12}, \mathbf{x}_{12}(\hat{z}'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{10}, \mathbf{x}_{1c}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_2(z_{21}, \mathbf{x}_{21}(\hat{z}'_{21}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{20}, \mathbf{x}_{2c}, \mathbf{u}), \mathbf{y}_0)$ sinyalleri aranır. Yüksek olasılıkla $\hat{z}'_{12} = z'_{12}$ ve $\hat{z}'_{21} = z'_{21}$ elde edilmesi için gerekli kısıtlar, Ekrem ve Ulukus (2008)'de yalnızca sıkıştır ilet için ve Chong ve Motani (2011)'de yalnızca tek taraflı aktarım için elde edilen kısıtlara benzer şe-

kilde şöyle bulunur:

$$R_{12} < I(X_{12}, \hat{Y}_1; Y_0|U, X_{1d}, X_{2d}, X_{21}) \tag{49}$$

$$R_{21} < I(X_{21}, \hat{Y}_2; Y_0|U, X_{1d}, X_{2d}, X_{12}) \tag{50}$$

$$\begin{aligned} R_{12} + R_{21} < {} & I(X_{12}, X_{21}; Y_0|U, X_{1d}, X_{2d}) \\ & + I(\hat{Y}_2; Y_0|U, X_{1d}, X_{2d}, X_{12}, X_{21}) \\ & + I(\hat{Y}_1; Y_0|U, X_{1d}, X_{2d}, X_{12}, X_{21}) \end{aligned} \tag{51}$$

Son olarak, alıcı $(\mathbf{u}(w'_{1d}, w'_{2d}), \mathbf{x}_{1d}(w_{1d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2d}(w_{2d}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{12}(z'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{21}(z'_{21}\mathbf{u}), \mathbf{x}_{1c}(\hat{w}_{1c}, \mathbf{x}_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{2c}(\hat{w}_{2c}, \mathbf{x}_{21}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_1(z_{12}, \mathbf{x}_{12}(\hat{z}'_{12}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{10}, \mathbf{x}_{1c}, \mathbf{u}), \hat{\mathbf{y}}_2(z_{21}, \mathbf{x}_{21}(\hat{z}'_{21}, \mathbf{u}), \mathbf{x}_{1d}, \mathbf{x}_{2d}, \mathbf{x}_{20}, \mathbf{x}_{2c}, \mathbf{u}), \mathbf{y}_0)$ sinyallerinin birlikte tipiklik kontrolü yoluyla $\hat{w}_{1c}$ ve $\hat{w}_{2c}$ mesajlarını çözer. Yüksek olasılıkla $\hat{w}_{1c} = w_{1c}$ ve $\hat{w}_{2c} = w_{2c}$ olması için

$$R_{1c} < I(X_{1c}; \hat{Y}_2, Y_0|U, X_{10}, X_{1d}, X_{12}, X_2) \tag{52}$$

$$R_{2c} < I(X_{2c}; \hat{Y}_1, Y_0|U, X_{20}, X_{2d}, X_{21}, X_1) \tag{53}$$

$$\begin{aligned} R_{1c}+R_{2c} < {} & I(X_{1c}, X_{2c}; \hat{Y}_1, \hat{Y}_2, Y_0|U, X_{10}, X_{20}, \dots \\ & \dots X_{1d}, X_{2d}, X_{12}, X_{21}) \end{aligned} \tag{54}$$

sağlanması gereklidir. Böylelikle, aşağıdaki ana sonuç elde edilmiş olunmaktadır.

Teorem 1. *İki kullanıcılı işbirlikçi ÇEK için*

$$\begin{aligned} R_1 &< \min\{(43)+(52)+(46), (45)+(52)+(46)\} \\ R_2 &< \min\{(41)+(53)+(47), (45)+(53)+(47)\} \\ R_1 + R_2 &< \min\{(43)+(41)+(54)+(48), (45)+(54)+(48)\} \end{aligned}$$

ile verilen veri hızları, ortalama güç kısıtlarını ve

$$(49) > (42), \quad (50) > (44), \quad (51) > (42) + (44) \tag{55}$$

kısıtlarını sağlamak koşuluyla erişilebilirdir.

Kısıtlar (41), (43), (45), (46)-(48), (52)-(54), Gauss dağılımlı kodsözcükleri için hesaplandı-

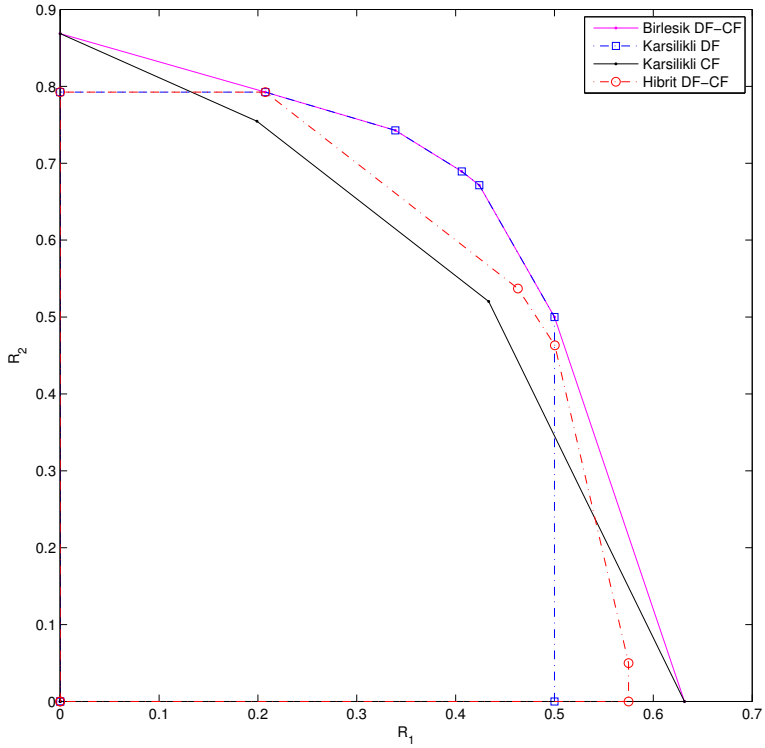
ğında,

$$
\begin{aligned}
R_{1d} &< C\left(\frac{P_{1d}}{P_{1c}+P_{12}+P_{10}+\sigma_2^2}\right)\\
R_{2d} &< C\left(\frac{P_{2d}}{P_{2c}+P_{21}+P_{20}+\sigma_1^2}\right)\\
R_{1d}+R_{2d} &< C\left(\frac{P_{1d}+P_{u1}+P_{u2}+P_{2d}+2\sqrt{P_{u1}P_{u2}}}{P_{10}+P_{1c}+P_{12}+P_{20}+P_{2c}+P_{21}+\sigma_0^2}\right)\\
R_{10} &< C\left(\frac{P_{10}}{P_{1c}+P_{12}+P_{2c}+P_{21}+\sigma_0^2}\right)\\
R_{20} &< C\left(\frac{P_{20}}{P_{1c}+P_{12}+P_{2c}+P_{21}+\sigma_0^2}\right)\\
R_{10}+R_{20} &< C\left(\frac{P_{10}+P_{20}}{P_{1c}+P_{12}+P_{2c}+P_{21}+\sigma_0^2}\right)\\
R_{1c} &< C\left(\frac{P_{1c}(\sigma_2^2+\sigma_{w_2}^2+\sigma_0^2)}{(\sigma_2^2+\sigma_{w_2}^2)\sigma_0^2}\right)\\
R_{2c} &< C\left(\frac{P_{2c}(\sigma_1^2+\sigma_{w_1}^2+\sigma_0^2)}{(\sigma_1^2+\sigma_{w_1}^2)\sigma_0^2}\right)\\
R_{1c}+R_{2c} &< C\Big(\frac{P_{1c}+P_{2c}}{\sigma_0^2}+\frac{P_{1c}}{\sigma_2^2+\sigma_{w_2}^2}+\frac{P_{2c}}{\sigma_1^2+\sigma_{w_1}^2}\\
&\quad+\frac{P_{1c}P_{2c}(\sigma_1^2+\sigma_{w_1}^2+\sigma_2^2+\sigma_{w_2}^2+\sigma_0^2)}{\sigma_0^2(\sigma_1^2+\sigma_{w_1}^2)(\sigma_2^2+\sigma_{w_2}^2)}\Big)
\end{aligned}
$$

ifadelerini elde ederiz. Sıkıştırma gürültülerinin sağlaması gereken (55) numaralı kısıtlar da benzer şekilde hesaplanmış, ancak yerden kazanmak için burada sıralanmamıştır. Bir sonraki kısımda, elde ettiğimiz veri hızlarını bilinen bazı tekniklerle kıyaslayacağız.

1.2.4 Benzetimler ve Sonuçlar

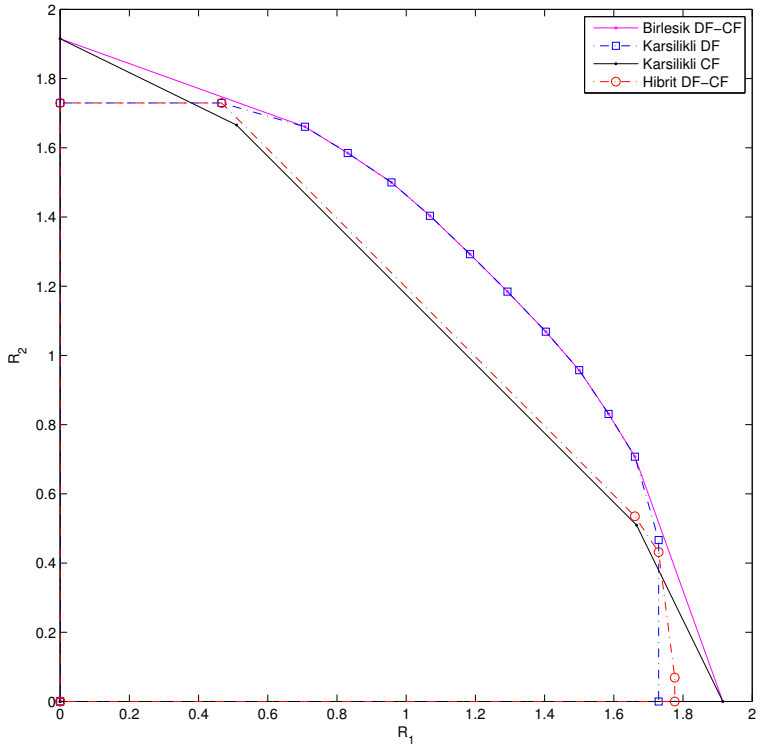
Bu bölümde, işbirlikçi ÇEK için birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği ile erişilebilen veri hızlarını, yine önerdiğimiz tekniğin özel bir durumu olan çift taraflı sıkıştır-ilet, Sendonaris vd. (2003)'te verilen çift taraflı çöz-ilet, ve Li vd. (2009)'da ele alınan, ve G_1'in G_2'nin mesajını çözdüğü, G_2'nin ise G_1'in mesajını sıkıştırdığı hibrit teknikle erişilebilen veri hızları ile kıyaslıyoruz. Örnek olarak iki senaryo ele alınmıştır. Şekil 6'da verilen ilk senaryoda, G_1-alıcı ve G_1-G_2 linkleri aynı kalitede, yine G_2-alıcı ve G_2-G_1 linkeri de kendi içlerinde aynı kalitedir; ancak G_2 daha fazla güce sahiptir. Bu durumda, yardımlaşma sonucunda G_2'nin G_1'e olan katkısının daha fazla olması beklenmektedir. Ancak, çöz ilet stratejisi önce ortak bilgi oluşturmak durumunda olduğundan, bu da G_1'in gönderi gücüyle sınırlandığından, G_1'in



Şekil 6: $P_1 = 5$, $P_2 = 10$, $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 5$ için veri hızları.

yalnızca çöz-ilet'e dayalı bir işbirliğinden fazla fayda görmesi beklenmemelidir. Öte yandan, G_2'nin yüksek gücü sayesinde G_1'in mesajını kestirmek zorunda kalmadan yalnızca sıkıştırarak göndermesinin, kullanıcı 1 açısından daha faydalı olması beklenmektedir. Bu sonuçlar, Şekil 6'da gözlemlenmektedir. Önerdiğimiz birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği, diğer tekniklere göre kayda değer bir gelişme sağlamaktadır. Dikkate değer bir nokta, toplam veri hızının eniyilenmesi için halen çöz-ilet stratejisinin daha avantajlı olduğu, sıkıştır-ilet stratejisinin ise daha ziyade asimetrik durumlarda, kullanıcılardan birine yardım için daha uygun olduğudur. Şekil 7'de, bu kez tüm linklerin eşit kalitede olduğu bir durum ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, yine öncekilere paraleldir, ve beklendiği üzere simetriktir.

Sonuç olarak, gerek burada sunulan figürlerde, gerekse diğer pek çok benzetim çalışmasında, düğümler arasındaki kanalların göreli kalitelerine ve düğümlerin güçlerine göre, çöz-ilet ve sıkıştır ilet stratejilerinden farklı seviyede kazançlar elde edebildiği gözlenmekle birlikte, önerdiğimiz birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği hem tek başına gönderi hızlarını, hem de toplam veri hızlarını enbüyüklemeye imkan verdiğinden, bilinen tekniklere göre daha iyi sonuçlara ulaşabildiği açıktır. Ancak burada önemli bir gözlem, birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği ile erişilen veri hızı bölgelerinin, yine özel bir durum olarak geliştirdiğimiz çift taraflı sıkıştır-ilet



Şekil 7: $P_1 = P_2 = 10$, $\sigma_0^2 = \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = 1$ için veri hızları.

tekniği ile, tek başına çöz ilet tekniğinin eriştikleri veri hızlarının dışbükey zarfı olduğu, yani bu iki tekniğin zaman bölmeli olarak kullanılması ile de elde edilebileceğidir. Bunun, uyguladığımız ardışık geriye doğru kodçözmenin bir sonucu olduğu düşünülmekte, birlikte geriye doğru kodçözme Chong ve Motani (2011) ile daha da iyi veri hızlarının elde edilebileceği öngörülmektedir.

Öte yandan, elde edilen veri hızı ifadelerinin karmaşıklığı, ve çöz-ilet statejisine kıyasla çok büyük bir gelişme sağlamadığı göz önüne alındığında, bilişsel işbirliği modellerimizde çöz-ilet stratejisinin kullanılmasına karar verilmiştir.

2 Üç Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı

Bu bölümde, üç kullanıcı bir alıcıdan oluşan bir çoklu erişim kanal modeli, üç farklı senaryoda ele alınacaktır. Öncelikle, tüm kullanıcıların biribirleri ile yardımlaşabildiği bir model için kodlama stratejileri ve erişilebilir veri hızı ifadeleri elde edilecektir. Daha sonra, bu modelden hareketle kullanıcılardan birinin birincil kullanıcı olarak atandığı, kalan ikisinin ise hem birincil kullanıcıya, hem de biribirlerine yardım ederek bilişsel işbirlikli sistemin toplam veri hızını enbüyüklediği bir model ele alınacaktır. Son olarak ise, yine ikincil kullanıcıların birincil kullanıcıya yardım ettiği, ancak birincil kullanıcının işbirliğinden bağımsız olarak gönderilerini sürdürdüğü daha gerçekçi bir model, tümüyle ikincil kullanıcıların veri hızı bölgelerini en geniş hale getirebilmek amacıyla çözülecektir. Bu modellerin her biri, aşağıdaki alt bölümlerde ele alınmıştır.

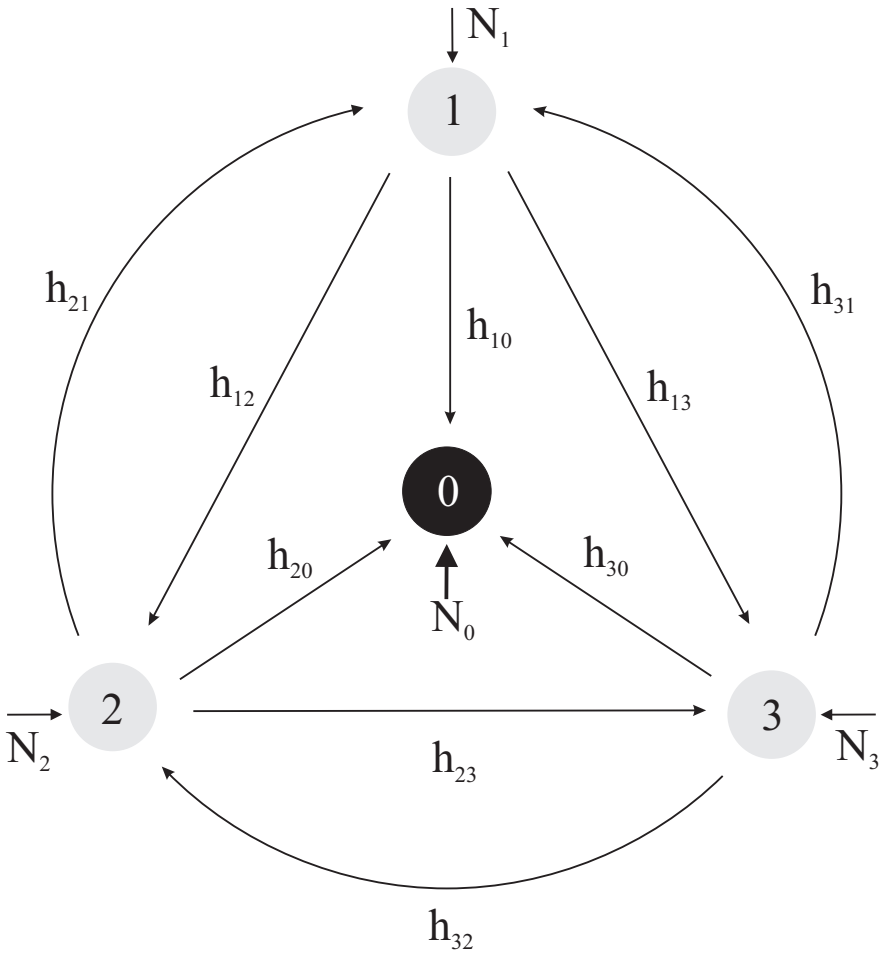
2.1 İkili ve Toplu Yardımlaşmaya Dayalı Üç Kullanıcılı İşbirlikli Çoklu Erişim

Bu bölümde üç kullanıcı için simetrik (tüm kullanıcıların eşit mesaj çözme becerisine sahip olduğu) bir sistem modeli önerip, daha sonraki Bölüm 2.2 ve 2.3'te ise bu modelin bilişsel haberleşmeye uyarlanması ile ilgili çalışmalar sunulacaktır.

2.1.1 Sistem Modeli

Şekil 8'de gösterilen sistem modelinde 1, 2, 3 nolu düğümler kullanıcıları, 0 nolu düğüm ise hedef alıcıyı temsil etmektedir. Kullanıcıların hedef alıcıya yönelik sönümlenme katsayıları sırasıyla h_{10}, h_{20}, h_{30}, kullanıcıların kendi aralarındaki sönümlenme katsayıları h_{12}, h_{13}, h_{21}, h_{23}, h_{31}, h_{32} olarak gösterilmiştir. Kanal katsayılarının (sönümlenme değerlerinin) bir sembol periyodu boyunca sabit olduğu varsayılmaktadır. N_0, N_1, N_2 ve N_3 değişkenleri ise hedef alıcı ve kullanıcılardaki birbirlerinden bağımsız, sıfır ortalamalı ve σ^2 varyanslı Gauss kanal gürültüsü olarak tanımlanmaktadır. Bir sonraki bölümlerde verilecek olan erişilebilir veri hızı denklemlerinde ifade edilen $s_{ij} = \frac{h_{ij}}{\sigma_j^2}$ ise normalleştirilmiş kanal katsayılarıdır. Tam çift yönlü Gauss çoklu erişim kanalı için önerilen üç kullanıcılı sistem modelinde hem kullanıcıların hem de hedef alıcının aldığı sinyalleri şöyle yazılabilir.

$$Y_0 = \sqrt{h_{10}}X_1 + \sqrt{h_{20}}X_2 + \sqrt{h_{30}}X_3 + N_0 \tag{56}$$



Şekil 8: Önerilen işbirlikli çoklu erişim modeli.

$$Y_1 = \sqrt{h_{21}}X_2 + \sqrt{h_{31}}X_3 + N_1 \tag{57}$$

$$Y_2 = \sqrt{h_{12}}X_1 + \sqrt{h_{32}}X_3 + N_2 \tag{58}$$

$$Y_3 = \sqrt{h_{13}}X_1 + \sqrt{h_{23}}X_2 + N_3 \tag{59}$$

Burada X_1, X_2 ve X_3, hem hedefe hem de kullanıcıların birbirlerine iletecekleri bilgileri içeren gönderilen sinyallerdir. Y_0 hedefteki alınan sinyali, Y_1, Y_2 ve Y_3 ise sırasıyla Kullanıcı 1, 2 ve 3 için alınan sinyalleri belirtmektedir. Kullanıcılar tarafından yollanan kod sözcükleri ve ilgili güç değerleri aşağıda belirtilmiştir.

$$X_1 = \sqrt{P_{12}}X_{12} + \sqrt{P_{13}}X_{13} + \sqrt{P_{X_{1U}}}X_{1U} + \sqrt{P_{U_{12}}}X_{U_{12}} + \sqrt{P_{U_{13}}}X_{U_{13}} + \sqrt{P_{U_1}}X_U \tag{60}$$

$$X_2 = \sqrt{P_{21}}X_{21} + \sqrt{P_{23}}X_{23} + \sqrt{P_{X_{2U}}}X_{2U} + \sqrt{P_{U_{21}}}X_{U_{21}} + \sqrt{P_{U_{23}}}X_{U_{23}} + \sqrt{P_{U_2}}X_U \tag{61}$$

$$X_3 = \sqrt{P_{31}}X_{31} + \sqrt{P_{32}}X_{32} + \sqrt{P_{X_{3U}}}X_{3U} + \sqrt{P_{U_{31}}}X_{U_{31}} + \sqrt{P_{U_{32}}}X_{U_{32}} + \sqrt{P_{U_3}}X_U \tag{62}$$

Kullanıcıların harcamış oldukları güç değerleri aşağıda belirtilen kısıtlara uymalıdır. Burada P_1, P_2 ve P_3 sırasıyla Kullanıcı 1, 2 ve 3'ün kod sözcüklerini yollamak için kullanabilecekleri güç değerlerinin ortalamasını tanımlamaktadır.

$$P_{1XU} + P_{12} + P_{13} + P_{U_{12}} + P_{U_{13}} + P_{1U} \leq P_1 \tag{63}$$

$$P_{2XU} + P_{21} + P_{23} + P_{U_{21}} + P_{U_{23}} + P_{2U} \leq P_2 \tag{64}$$

$$P_{3XU} + P_{31} + P_{32} + P_{U_{13}} + P_{U_{32}} + P_{3U} \leq P_3 \tag{65}$$

2.1.2 Kanal Kodlaması ve Kodçözme

Yukarıda tanımlanmış olan X_1, X_2 ve X_3 kod sözcükleri blok Markov kodlama tekniği ile üretilmiş sözcüklerdir. Kodlama stratejisinin detayları Tablo 1'de belirtilmiştir.

	Blok I	Blok II
Kullanici I	$X_{12}(w_{12}(1), U_{12}(0), U(0))$	$X_{12}(w_{12}(2), U_{12}(1), U(1))$
	$X_{13}(w_{13}(1), U_{13}(0), U(0))$	$X_{13}(w_{13}(2), U_{13}(1), U(1))$
	$X_{1U}(w_{1U}(1), U(0))$	$X_{1U}(w_{1U}(2), U(1))$
	$U(w_{1U}(1))$	$U(w_{1U}(2))$
	$U_{12}(w_{12}(1), w_{21}(1))$	$U_{12}(w_{12}(2), w_{21}(2))$
	$U_{13}(w_{13}(1), w_{31}(1))$	$U_{13}(w_{13}(2), w_{31}(2))$
Kullanici II	$X_{21}(w_{21}(1), U_{21}(0), U(0))$	$X_{21}(w_{21}(2), U_{21}(1), U(1))$
	$X_{23}(w_{23}(1), U_{21}(0), U(0))$	$X_{23}(w_{23}(2), U_{23}(1), U(1))$
	$X_{2U}(w_{2U}(1), U(0))$	$X_{2U}(w_{2U}(2), U(1))$
	$U(w_{2U}(1))$	$U(w_{2U}(2))$
	$U_{21}(w_{12}(1), w_{21}(1))$	$U_{21}(w_{12}(2), w_{21}(2))$
	$U_{23}(w_{23}(1), w_{32}(1))$	$U_{23}(w_{23}(2), w_{32}(2))$
Kullanici III	$X_{31}(w_{31}(1), U_{31}(0), U(0))$	$X_{31}(w_{31}(2), U_{31}(1), U(1))$
	$X_{32}(w_{32}(1), U_{32}(0), U(0))$	$X_{32}(w_{32}(2), U_{32}(1), U(1))$
	$X_{3U}(w_{3U}(1), U(0))$	$X_{1U}(w_{3U}(2), U(1))$
	$U(w_{3U}(1))$	$U(w_{3U}(2))$
	$U_{13}(w_{13}(1), w_{31}(1))$	$U_{13}(w_{13}(2), w_{31}(2))$
	$U_{31}(w_{23}(1), w_{32}(1))$	$U_{31}(w_{23}(2), w_{32}(2))$

Tablo 1: Önerilen sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı.

Burada w_{1U}, w_{2U} ve w_{3U} sırasıyla Kullanıcı 1, 2 ve 3'ün hedef alıcıya yolladığı ve kendilerine ait bilgileri içeren alt mesajlardır. Aynı zamanda bu alt mesajlar diğer kullanıcılarda da çözümlenip, alıcı tarafta üçlü evre uyumlu bir kazanç sağlanması için de kullanılacak olan U mesajının birer fonksiyonudur. Buna benzer şekilde kullanıcıların ikili olarak biribirleri ile paylaştıkları alt mesajlar da bulunmaktadır. Kullanıcı 1 ve 2'nin w_{12}, w_{21} alt mesajlarını kendi aralarında çözümlemelerine karşılık, bu alt mesajlar Kullanıcı 3'te çözümlenmediği için

bu kullanıcıda girişime sebep olacaktır. Fakat hedef alıcıda elde edilecek olan ikili evre uyum kazancı göz önünde bulundurulduğunda bu durum kabul edilebilir olarak düşünülebilir. Benzer mesajlaşma Kullanıcı 1-3 ve Kullanıcı 2-3 arasında da oluşmaktadır. Yukarıda tanımlanan Markov kodlama ve hedef alıcıda uygulanan geriye dogru çözümleme yöntemine bağlı olarak aşağıdaki erişilebilir veri hızı kısıtları ortaya çıkarılmaktadır. Hedef alıcı, Kullanıcılar 1, 2 ve 3'te tüme gönderim ve çoklu erişim kısıtları düşünüldüğünde, hedef alıcıda

$$R_{12}+R_{21} \leq E\left[\log 1+s_{10}(P_{12}+P_{U_{12}})+s_{20}(P_{21}+P_{U_{21}})+G_1\right] \tag{66}$$

$$R_{13}+R_{23} \leq E\left[\log 1+s_{10}(P_{13}+P_{U_{13}})+s_{30}(P_{31}+P_{U_{31}})+G_2\right] \tag{67}$$

$$R_{23}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{20}(P_{23}+P_{U_{23}})+s_{30}(P_{32}+P_{U_{32}})+G_3\right] \tag{68}$$

$$\begin{aligned} R_{12}+R_{21}+R_{13}+R_{31} \leq E\left[\log 1+s_{10}(P_{12}+P_{U_{12}}+P_{U_{13}})+s_{20}(P_{21}+P_{U_{21}})\right. \\ \left.+s_{30}(P_{31}+P_{U_{31}})+G_1+G_2\right] \end{aligned} \tag{69}$$

$$\begin{aligned} R_{12}+R_{21}+R_{23}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{10}(P_{12}+P_{U_{12}})+s_{20}(P_{21}+P_{U_{21}}+P_{U_{23}})\right. \\ \left.+s_{30}(P_{31}+P_{U_{32}})+G_1+G_3\right] \end{aligned} \tag{70}$$

$$\begin{aligned} R_{13}+R_{31}+R_{23}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{10}(P_{13}+P_{U_{13}})+s_{20}(P_{23}+P_{U_{23}})\right. \\ \left.+s_{30}(P_{31}+P_{U_{31}}+P_{U_{32}})+G_2+G_3\right] \end{aligned} \tag{71}$$

$$\begin{aligned} R_{12}+R_{13}+R_{21}+R_{23}+R_{31}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{10}(P_{12}+P_{13}+P_{U_{12}}+P_{U_{13}})\right. \\ +s_{20}(P_{21}+P_{23}+P_{U_{21}}+P_{U_{23}}) \\ +s_{30}(P_{31}+P_{32}+P_{U_{31}}+P_{U_{32}}) \\ \left.+G_1+G_2+G_3\right] \end{aligned} \tag{72}$$

$$\begin{aligned} R_1+R_2+R_3 \leq E\left[\log 1+s_{10}P_1+s_{20}P_2+s_{30}P_3\right. \\ \left.+G_1+G_2+G_3+G_4\right]; \end{aligned} \tag{73}$$

kullanıcılarda ise,

$$R_{1XU} \leq E\left[\log 1+s_{12}P_{1XU}/I_2\right] \tag{74}$$

$$R_{1XU} \leq E\left[\log 1+s_{13}P_{1XU}/I_3\right] \tag{75}$$

$$R_{2XU} \leq E\left[\log 1+s_{21}P_{2XU}/I_1\right] \tag{76}$$

$$R_{2XU} \leq E\left[\log 1+s_{23}P_{2XU}/I_3\right] \tag{77}$$

$$R_{3XU} leq E\left[\log 1+s_{31}P_{3XU}/I_1\right] \tag{78}$$

$$R_{3XU} \leq E\left[\log 1+s_{32}P_{3XU}/I_2\right] \tag{79}$$

$$R_{31} \leq E\left[\log 1+s_{31}P_{31}/I_1\right] \tag{80}$$

$$R_{21} \leq E\left[\log 1+s_{21}P_{21}/I_1\right] \tag{81}$$

$$R_{12} \leq E\left[\log 1+s_{12}P_{12}/I_2\right] \tag{82}$$

$$R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{32}P_{32}/I_2\right] \tag{83}$$

$$R_{13} \leq E\left[\log 1+s_{13}P_{13}/I_3\right] \tag{84}$$

$$R_{23} \leq E\left[\log 1+s_{23}P_{23}/I_3\right] \tag{85}$$

$$R_{21}+R_{31} \leq E\left[\log 1+s_{21}P_{21}+s_{31}P_{31}/I_1\right] \tag{86}$$

$$R_{12}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{12}P_{12}+s_{32}P_{32}/I_2\right] \tag{87}$$

$$R_{13}+R_{23} \leq E\left[\log 1+s_{13}P_{13}+s_{23}P_{23}/I_3\right] \tag{88}$$

$$R_{2XU}+R_{21}+R_{31} \leq E\left[\log 1+s_{21}(P_{21}+P_{2XU})+s_{31}P_{31}/I_1\right] \tag{89}$$

$$R_{21}+R_{3XU}+R_{31} \leq E\left[\log 1+s_{21}P_{21}+s_{31}(P_{31}+P_{3XU})/I_1\right] \tag{90}$$

$$R_{2XU}+R_{21}+R_{3XU}+R_{31} \leq E\left[\log 1+s_{21}(P_{21}+P_{2XU})+s_{31}(P_{31}+P_{3XU})/I_1\right] \tag{91}$$

$$R_{1XU}+R_{12}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{12}(P_{12}+P_{1XU})+s_{32}P_{32}/I_2\right] \tag{92}$$

$$R_{12}+R_{3XU}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{12}P_{12}+s_{32}(P_{32}+P_{3XU})/I_2\right] \tag{93}$$

$$R_{1XU}+R_{12}+R_{3XU}+R_{32} \leq E\left[\log 1+s_{12}(P_{12}+P_{1XU})+s_{32}(P_{32}+P_{3XU})/I_2\right] \tag{94}$$

$$R_{1XU}+R_{13}+R_{23} \leq E\left[\log 1+s_{13}(P_{13}+P_{1XU})+s_{23}P_{23}/I_3\right] \tag{95}$$

$$R_{13}+R_{2XU}+R_{23} \leq E\left[\log 1+s_{13}P_{13}+s_{23}(P_{23}+P_{2XU})/I_3\right] \tag{96}$$

$$R_{1XU}+R_{13}+R_{2XU}+R_{23} \leq E\left[\log 1+s_{13}(P_{13}+P_{1XU})+s_{23}(P_{23}+P_{2XU})/I_3\right] \tag{97}$$

kısıtlarının sağlanması gereklidir. Buradaki G_1, G_2, G_3 ve G_4 hedef alıcıda elde edilen ikili ve üçlü evre uyum sinyalleri olup.

$$G_1 = 2\sqrt{s_{10}s_{20}P_{U_{12}}P_{U_{21}}}$$
$$G_2 = 2\sqrt{s_{10}s_{30}P_{U_{13}}P_{U_{31}}}$$
$$G_3 = 2\sqrt{s_{20}s_{30}P_{U_{23}}P_{U_{32}}}$$
$$G_4 = 2(\sqrt{s_{10}s_{20}P_{U_1}P_{U_2}} + \sqrt{s_{10}s_{30}P_{U_1}P_{U_3}} + \sqrt{s_{20}s_{30}P_{U_2}P_{U_3}})$$

şeklinde, I_1, I_2 ve I_3 ise kullanıcı tarafında yukarıda bahsi geçen alt mesajların çözümlenme-

mesinden dolayı oluşan girişim ifadeleri olup

$$I_1 = 1 + s_{21}(P_{23} + P_{U_{23}}) + s_{31}(P_{32} + P_{U_{32}}) + 2\sqrt{s_{21}s_{31}P_{U_{23}}P_{U_{32}}}$$
$$I_2 = 1 + s_{12}(P_{13} + P_{U_{13}}) + s_{32}(P_{31} + P_{U_{31}}) + 2\sqrt{s_{12}s_{32}P_{U_{13}}P_{U_{31}}}$$
$$I_3 = 1 + s_{13}(P_{12} + P_{U_{12}}) + s_{23}(P_{21} + P_{U_{21}}) + 2\sqrt{s_{13}s_{23}P_{U_{12}}P_{U_{21}}}$$

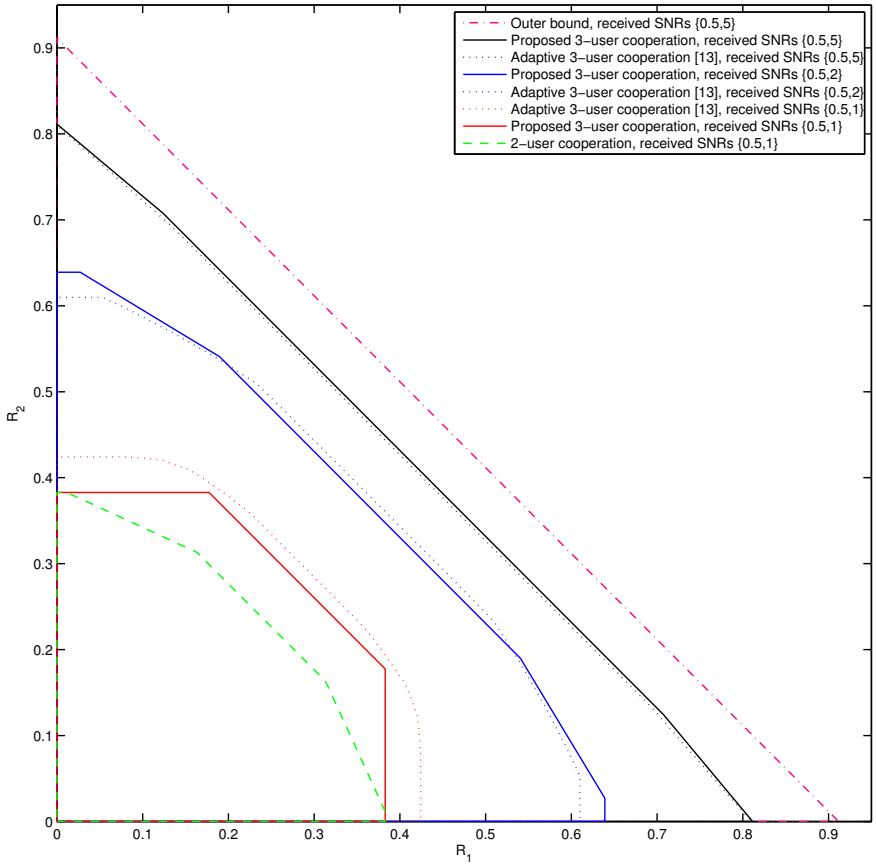
şeklinde tanımlanır.

Bu veri hızı kısıtları oldukça karmaşık bir küme oluşturduğundan, performansı ölçmenin en iyi yolu örnek veri hızı bölgelerini benzetimler yoluyla üretmektir. Bir sonraki alt bölümde, ilgili benzetim sonuçları sunulmaktadır.

2.1.3 Benzetim Sonuçları

Önerilen sistem modeline bağlı olarak elde edilen tüm erişilebilir veri hızı bölgesi daha önceki alt bölümlerde tanımlanmış olan veri hızı kısıtları tarafından elde edilmektedir. Önerdiğimiz modelin performans değerlendirmesi, iki farklı kanal sönümlenme katsayıları ile gerçekleştirilmiştir. Varılan en önemli sonuçlardan bir tanesi özellikle kullanıcıların hedef alıcıya yönelik olan link kalitesi düşük olduğunda üçlü evre uyum kazancının, hedef alıcıdaki toplam veri hızı değeri üzerindeki etkisinin oldukça fazla olduğudur.

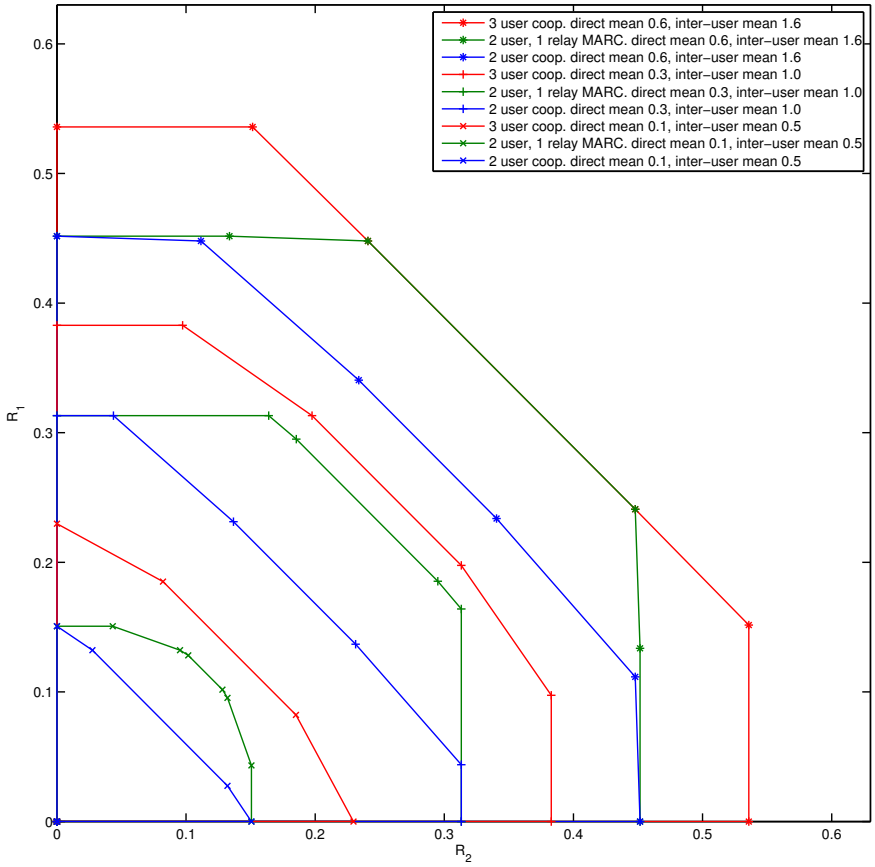
Şekil 9'de önerdiğimiz sistem modeli daha önceki çalışmalarımızdan biri olan üç kullanıcılı adaptif işbirlikçi sistem modeli Edemen ve Kaya (2008b) ve referans model olarak aldığımız iki kullanıcılı işbirlikçi sistem modeli Sendonaris vd. (2003) ile karşılaştırılmıştır. Kullanıcıların hedef alıcı ve biribirleri arasındaki sönümlenmeli kanal katsayı çiftleri sırasıyla {0.5-1}, {0.5-2} ve {0.5-5} olarak tanımlanmıştır. Bu katsayı çiftlerinin seçilmesinde sırasıyla kullanıcılar arasındaki link kalitesinin arttığı durumların gözlenmek istenmesi yatmaktadır. Benzetim sonuçlarının daha kolay yorumlanabilmesi için şekillerde $R_3 = 0$ olarak alınmıştır. Bu durum kullanıcı 3'ün diğer iki kullanıcıya röle gibi davrandığı duruma denk gelmektedir. {0.5-1} sönümlenmeli kanal katsayısı çifti için elde edilen ilk gözlem, her iki üç kullanıcılı modelin de iki kullanıcılı modele oranla daha iyi bir performans gösterdiğidir. Bu tamamen üç kullanıcılı sistemlerde olan ikili ve üçlü evre uyum kazançlarının etkisiyle açıklanabilmektedir. Bunun yanı sıra, {0.5-2} kanal sönümlenme katsayı çiftinden {0.5-5} katsayı çiftine doğru giden benzetim sonuçları incelendiğinde önerdiğimiz modelin her seferinde adaptif modele oranla daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, özellikle kullanıcılar arası



Şekil 9: İki kullanıcılı Sendonaris vd. (2003), üç kullanıcılı adaptif Edemen ve Kaya (2008b) ve önerilen üç kullanıcılı işbirlikçi haberleşme metodlarının erişilebilir veri hızı değerlerinin karşılaştırılması.

kanal kalitesinin arttığı durumda, adaptif modelde tanımlanmamış olan ve her üç kullanıcıda ortak olarak çözümlenen w_U alt mesajının varlığıdır. Kanal kalitesi arttıkça, kullanıcılar w_U alt mesajını çok daha yüksek bir veri hızı değerinde çözümleyebilecek ve böylece w_U'nun bir fonksiyonu olan ortak U alt mesajı ile hedef alıcıda daha yüksek bir toplam veri hızı değerine ulaşabileceklerdir. Toplam veri hızındaki artış, {0.5-2} sönümlenmeli kanal katsayı çiftinden itibaren anlaşılmaktadır.

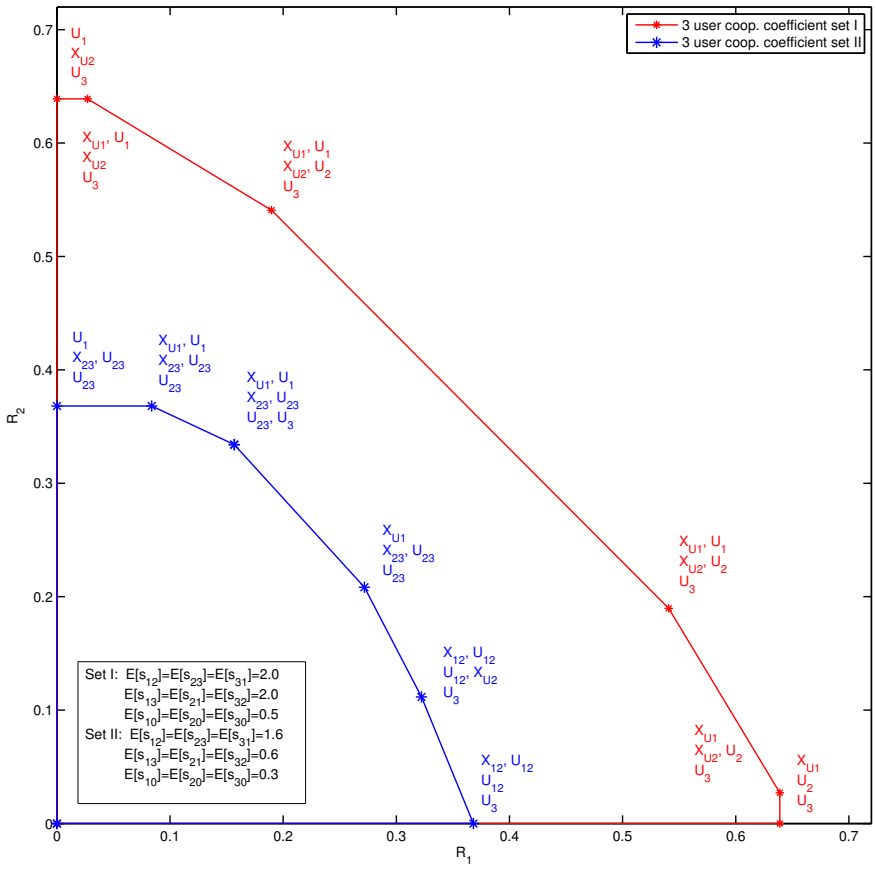
Şekil 10'da ise önerdiğimiz model, üç kullanıcılı işbirlikçi modelin bir alt modeli sayılabilecek olan üç kullanıcılı çoklu erişim röle kanalı ile karşılaştırılmıştır. Bu sistem modelinde, iki kullanıcı hedef alıcıya doğru kendi mesajlarını yollarken, üçüncü bir kullanıcı ise gücünün bir kısmını bir kullanıcının mesajını tekrar etmek, kalan kısmını ise diğer kullanıcının mesajının tekrar etmek amacıyla kullanmaktadır. Bir başka deyişle diğer iki kullanıcı için röle gibi davranmaktadır. Bu sistem modeli ile karşılaştırmamızın en büyük nedeni, özellikle benzetim sonuçlarının yorumlanmasında kullanıcı 3'ün röle gibi davrandığı $R_3 = 0$ durumunun incelenmesidir. Kullanıcılar arası link kalitesinin hedef alıcıya yönelik olan link kalitesine



Şekil 10: İki kullanıcılı, üç kullanıcılı çoklu erişim röle kanalı ve önerilen üç kullanıcılı işbirlikçi haberleşme metodlarının erişilebilir veri hızı değerlerinin karşılaştırılması.

oranla daha iyi olduğu bir durumda, buradaki sonuçlardan elde edilen en büyük çıkarım, önerdiğimiz modelde ikili evre uyum mesajlarının toplam veri hızının artmasına yönelik olan etkisinin yanı sıra, kullanıcıların bireysel veri hızı değerlerine olan olumlu etkisidir. Çoklu erişim röle kanalı modelinde kullanıcılar birbirlerin mesajlarını çözmedikleri için, bireysel veri hızı değerlerinde bir artış beklenmemektedir. Oysaki önerdiğimiz modelde, kullanıcılar birbirlerininde mesajlarını çözmekte ve buna bağlı olarak evre uyum mesajlarını yaratmaktadırlar. Bu sayede hem bireysel hem de toplam veri hızında artış gözlemlenmektedir.

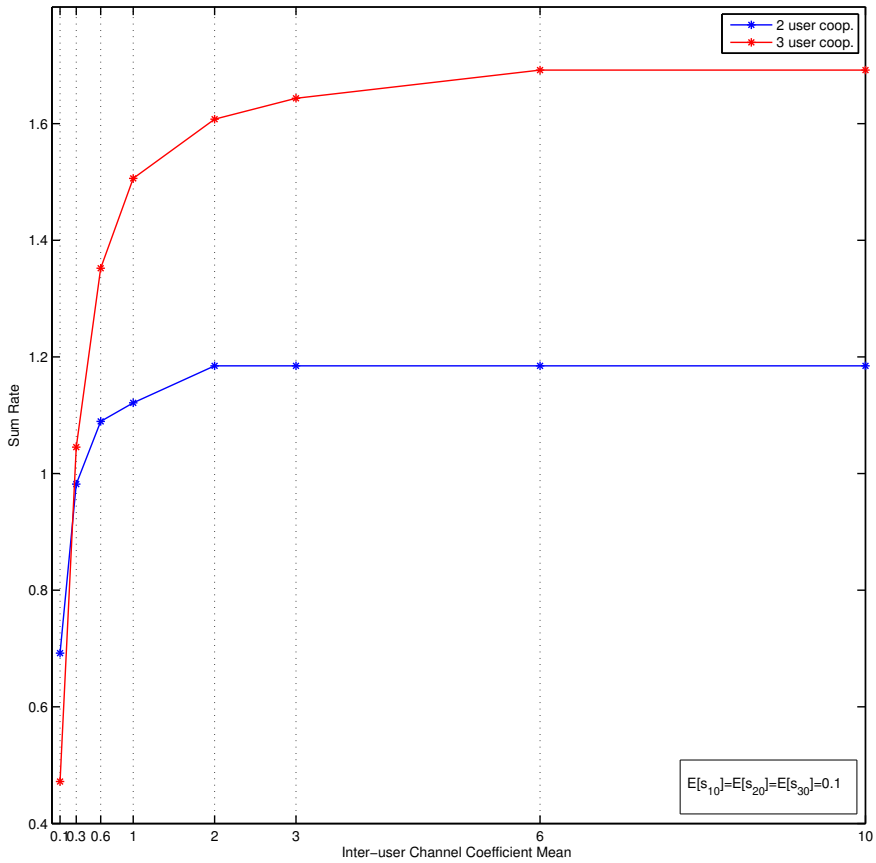
Şekil 11'de iki farklı sönümlenme katsayısı (simetrik (Set 1) ve asimetrik (Set 2)) için hangi kod sözcüklerinin aktif olduğunu bulmaya çalıştık. Bu şekilde simetrik ve asimetrik kanal durumlarında önerilen modelin performansı hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır. Simetrik sönümlenmede ve önerdiğimiz gibi kullanıcıların eşit çözümleme kabiliyeti olduğu durumda kullanıcılar güçlerinin tamamını ortak mesaj olan U alt mesajının gönderilmesine harcamayı tercih etmektedirler. Çünkü önerilen sisteminde simetrik bir kodlama stratejisine sahip olmasından ötürü bu mesaj her kullanıcıda eşit bir veri hızı kısıtı ile çözümlenecek



Şekil 11: Simetrik ve asimetrik sönümlenme katsayılarında aktif kod sözcüklerinin gösterilmesi.

ve hedef alıcıya doğru yollanacaktır. Hedef alıcıda oluşacak olan üçlü evre uyum kazancı sayesinde de yüksek bir toplam veri hızı değeri elde edilebilecektir. Asimetrik sönümlenmede ise üçlü evre uyum kazancının yanı sıra kullanıcılarda ikili evre uyum kazancı da etkin olmaya başlamıştır. Bir kullanıcının kanal durumunun diğerine göre kötü olduğu bir durumda kullanıcılar her üç kullanıcının toplam ulaşılabilir veri hızını artırmaktansa ikili evre uyum kazancının artırılması adına ikili işbirlikçi alt mesajların yollanmasına ağırlık vermektedir.

Şekil 12'de ise kullanıcı başına düşen güç ve toplam bantgenişliği sabit kabul edilerek, kullanıcıların üçerli ve ikişerli gruplanması arasındaki toplam veri hızı değerlerinin karşılaştırılması incelenmektedir. Bu incelemede özellikle, hedef alıcıya yönelik kanal sönümlenme katsayısı sabit tutulup, kullanıcılar arası kanal sönümlenme katsayının ortalamasının 0.1'den 6 değerine kadar değiştirilmesiyle, kullanıcılar arasındaki link kalitesinin arttığı durumda toplam veri hızındaki artış gösterilmiştir. Üç kullanıcılı iletişimin kullanıcılar arası kanal kalitesinin çok kötü olduğu durumlar haricinde, ikişerli işbirliğinden daha avantajlı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda işbirlikçi haberleşmenin de doğasına ters olan kullanıcılar arası

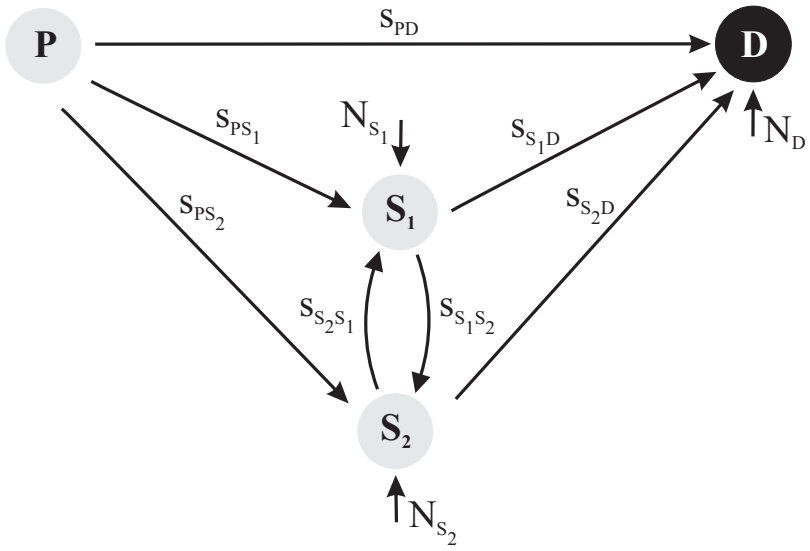


Şekil 12: İkişerli ve üçerli işbirliği modellerinin toplam erişilebilir veri hızı değerlerinin karşılaştırılması.

link kalitesinin kötü olduğu durumlarda kullanıcıları çok daha fazla işbirlikçi mesajla haberleşmeye zorlamanın, toplam veri hızının düşmesine neden olduğu anlaşılmaktadır.

2.2 Bir Birincil, İki İkincil Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalında Toplam Hız Eniyilemesi

2.2.1 Sistem Modeli



Şekil 13: Önerilen sistem modeli.

Şekil 13'te gösterilen sistem modelinde Kullanıcı P göreceli olarak diğer iki kullanıcıya oranla hedef alıcıya (D nolu birim) daha uzakta bulunan birincil kullanıcıdır. Kullanıcılar S_1 ve S_2 ise bilişsel kullanıcılardır. Kullanıcıların hedef alıcıya yönelik kanal katsayıları sırasıyla $\{s_{PD},\ s_{S_1D},\ s_{S_2D}\}$ ile, Kullanıcı P'den diğer kullanıcılara yönelik kanal katsayıları ise s_{PS_1}, s_{PS_2} olarak gösterilmiştir. Kullanıcı S_1 ve S_2 arasındaki kanal katsayıları ise $s_{S_{12}}$, $s_{S_{21}}$ olarak adlandırılmıştır. Kanal katsayılarının (sönümlenme değerlerinin) bir sembol periyodu boyunca sabit olduğu varsayılmaktadır. N_0, N_P, N_{S_1} ve N_{S_2} değişkenleri ise hedef alıcı ve mobil kullanıcılardaki birbirlerinden bağımsız, sıfır ortalama ve σ^2 varyanslı Gauss kanal gürültüsü olarak tanımlanmaktadır. Buradan itibaren gürültü varyansları 1 olarak kabul edilecek, erişilebilir veri hızı denklemlerinde ifade edilen kanal katsayıları ise ilgili alıcıdaki gürültü varyansı ile normalleştirilmiş sönümlenmeli kanal katsayılarına karşılık gelecektir.

Önerilen sistem modeline bağlı olarak hem kullanıcıların hem de hedef alıcının aldığı sinyaller aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Y_D = \sqrt{s_{PD}}X_P + \sqrt{s_{S_1D}}X_{S_1} + \sqrt{s_{S_2D}}X_{S_2} + N_D \tag{98}$$

$$Y_{S_1} = \sqrt{s_{PS_1}}X_P + \sqrt{s_{S_{21}}}X_{S_2} + N_{S_1} \tag{99}$$

$$Y_{S_2} = \sqrt{s_{PS_2}} X_P + \sqrt{s_{S_{12}}} X_{S_1} + N_{S_2} \tag{100}$$

Yukarıdaki eşitliklerde, Y_D hedefteki alınan sinyali, Y_{S_1} ve Y_{S_2} ise sırasıyla ikincil kullanıcılarda alınan sinyalleri belirtmektedir. Birincil kullanıcı, ikincil kullanıcılardan gelen sinyalleri alsa da, yollanan mesajları çözmediğinden dolayı yukarıdaki denklemlerde Kullanıcı 1'e ait olan denklemler yazılmamıştır. X_P, X_{S_1} ve X_{S_2} hem hedefe hem de kullanıcıların birbirlerine iletecekleri bilgileri içeren kod sözcükleridir.

2.2.2 Kanal Kodlaması ve Kodçözme

X_P, X_{S_1} ve X_{S_2} kod sözcükleri Bölüm 3.1'deki gibi blok Markov kodlama tekniği ile üretilmiş mesajlardır. Aşağıdaki denklemlerde her bir kullanıcının yolladığı kod sözcükleri, o kod sözcüklerinin bileşenlerine **s** kanal durumunda atanan güç değerleri ile alt kod sözcükleri çarpılarak elde edilmiştir.

$$X_P = \sqrt{P_{PXU}}(\mathbf{s}) X_{PU} + \sqrt{P_{PU}}(\mathbf{s}) U \tag{101}$$

$$X_{S_1} = \sqrt{P_{S_1D}}(\mathbf{s}) X_{S_1D} + \sqrt{P_{2U_{S_{12}}}}(\mathbf{s}) U_{S_{12}} + \sqrt{P_{S_1U}}(\mathbf{s}) U \tag{102}$$

$$X_{S_2} = \sqrt{P_{S_2D}}(\mathbf{s}) X_{S_2D} + \sqrt{P_{3U_{S_{12}}}}(\mathbf{s}) U_{S_{12}} + \sqrt{P_{S_2U}}(\mathbf{s}) U \tag{103}$$

Buradaki güç değerleri için bir önceki bölümdeki modelde olduğu gibi aşağıda belirtilen kısıtların sağlanması gerekmektedir. Burada P_P, P_{S_1} ve P_{S_2} sırasıyla birincil ve ikincil kullanıcıların kod sözcüklerini yollamak için kullanabilecekleri güç değerlerinin ortalamasını tanımlamaktadır.

$$E[P_{PXU}(\mathbf{s}) + P_{PU}(\mathbf{s})] \leq P_P \tag{104}$$

$$E[P_{S_1D}(\mathbf{s}) + P_{2U_{S_{12}}} + P_{S_1U}(\mathbf{s})] \leq P_{S_1} \tag{105}$$

$$E[P_{S_2D}(\mathbf{s}) + P_{3U_{S_{12}}} + P_{S_2U}(\mathbf{s})] \leq P_{S_2} \tag{106}$$

Tablo 2'de yukarıdaki kodsözcüklerinin oluşturulmasında kullanılan kodlama stratejisinin detayları belirtilmiştir. Burada w_{PD}, w_{S_1D} ve w_{S_2D} sırasıyla birincil ve ikincil kullanıcıların hedef alıcıya yolladığı alt mesajlardır. w_{PU} aynı zamanda ikincil kullanıcılarda çözümlenip, bu kullanıcıların birincil kullanıcıya yardımcı olmalarını sağlamaktadır. U kod sözcüğü, her

iki ikincil kullanıcının w_{PU} mesajını çözdükten sonra ürettikleri ve hedef kullanıcıda çözülmesi istenen üçlü evre uyum sinyalidir. Buna benzer bir şekilde ikincil kullanıcılar kendi aralarında işbirlikçi haberleşme yapıp birbilerine bilgilerini $w_{S_{12}}$ ve $w_{S_{21}}$ alt mesajları üzerinden aktarmaktadırlar. İkincil kullanıcılar aynı zamanda bu bilgilerin hedef kullanıcıda da çözülmesi için $U_{S_{12}}$ kod sözcüğünü, $w_{S_{12}}$ ve $w_{S_{21}}$ mesajlarının bir önceki bloktaki değerlerinin birer fonksiyonu olarak üretmektedirler.

	Blok I	Blok II
Birincil	$X_{PU}(w_{PU}(1), U(1))$ $U(w_{PU}(0))$	$X_{PU}(w_{PU}(1), U(2))$ $U(w_{PU}(1))$
İkincil I	$X_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), U_{S_{12}}(1), U(1))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(0), w_{S_{21}}(0))$ $U(w_{PU}(0))$	$X_{S_1D}(w_{S_1D}(2), U_{S_{12}}(2), U(2))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), w_{S_{21}}(1))$ $U(w_{PU}(1))$
İkincil II	$X_{S_{21}}(w_{S_{21}}(1), U_{S_{12}}(1), U(1))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(0), w_{S_{21}}(0))$ $U(w_{PU}(0))$	$X_{S_2D}(w_{S_2D}(2), U_{S_{12}}(1), U(2))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), w_{S_{21}}(1))$ $U(w_{PU}(1))$

Tablo 2: Önerilen sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı.

Yukarıda tanımlanan Markov kodlama ve hedef alıcıda uygulanan geriye doğru çözümleme yöntemine bağlı olarak öncelikle erişilebilir veri hızı kısıtları elde edilmelidir. Hedef alıcı, ve ikincil kullanıcılarda çoklu erişim hız kısıtları düşünüldüğünde, veri hızlarının sağlaması gereken koşullar şöyledir:

Kullanıcı S_1 ve S_2 için:

$$R_{S_1} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_{12}}P_{S_{12}}\Big)\Big] \tag{107}$$

$$R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_{21}}P_{S_{21}}\Big)\Big] \tag{108}$$

$$R_P \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_1}P_{PXU}\Big)\Big] \tag{109}$$

$$R_P \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_2}P_{PXU}\Big)\Big] \tag{110}$$

$$R_P + R_{S_1} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_1}P_{PXU}+s_{S_{21}}P_{S_{21}}\Big)\Big] \tag{111}$$

$$R_P + R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_2}P_{PXU}+s_{S_{12}}P_{S_{12}}\Big)\Big] \tag{112}$$

Hedef alıcı D için:

$$R_{S_1} + R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}+P_{2U_{S_{12}}})+s_{S_2D}(P_{S_{21}}+P_{3U_{S_{12}}}) + C_p\Big)\Big] \tag{113}$$

$$R_P+R_{S_1}+R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(C\Big)\Big] \tag{114}$$

Buradaki C_p, C_t ve C hedef alıcıda elde edilen ikili ve üçlü evre uyum sinyallerini ifade eden değişkenler olup, aşağıdaki gibi tanımlanırlar:

$$C_p = 2\sqrt{s_{S_1D}s_{S_2D}P_{2U_{S_{12}}}P_{3U_{S_{12}}}}$$

$$C_t = 2(\sqrt{s_{PD}s_{S_1D}P_{PU}P_{S_1U}} + \sqrt{s_{PD}s_{S_2D}P_{PU}P_{S_2U}} + \sqrt{s_{S_1D}s_{S_2D}P_{S_1U}P_{S_2U}})$$

$$C = 1+s_{PD}P_P+s_{S_1D}P_{S_1}+s_{S_2D}P_{S_2} + C_p+C_t$$

Kodlama yapısına bakıldığı zaman, hedef alıcıda kullanılan geriye doğru çözümleme metodunun kullanılmasıyla w_{PD} mesajının hatasız bir biçimde çözümlenmesi icin tüm güç değerlerinin kullanılması gerekmektedir. Bu sebeple, hedef alıcıda (R_P) ve $(R_P + R_{S_1}) + (R_{S_2})$ aynı kısıt fonksiyonuna tabidir. Buna bağlı olarak hedef alıcıdaki $(R_P+R_{S_1}+R_{S_2})$ kısıt fonksiyonu, (R_P) kısıt fonksiyonundan daha sıkı olduğundan alıcıda tek başına (R_P) üzerine kısıt koymaya gerek kalmamaktadır.

2.2.3 Toplam Veri Hızlarını Eniyileme Problemi

İki kullanıcılı modelde olduğu gibi, birincil kullanıcının tekli gönderimde en iyi güç kontrolü ile elde ettiği veri hızı B^* ile gösterilirse, önerilen sistem modelinde toplam veri hızlarının eniyilenmesi problemi şöyle ifade edilir:

$$\max_{\mathbf{P(s)}} \; R_P + R_{S_1} + R_{S_2} \tag{115}$$

$$\text{s.t.} \quad R_P \geq B^*$$

$$R_{S_1} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\Big)\Big]$$

$$R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_{21}}P_{S_{21}}(\mathbf{s})\Big)\Big]$$

$$R_P \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_1}P_{PXU}(\mathbf{s})\Big)\Big]$$

$$R_P \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_2}P_{PXU}(\mathbf{s})\Big)\Big]$$

$$R_P + R_{S_1} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_1}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\Big)\Big]$$

$$R_P + R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_2}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{21}}P_{S_{21}}(\mathbf{s})\Big)\Big]$$
$$R_P+R_{S_1}+R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PD}P_P(\mathbf{s})+s_{S_1D}P_{S_1}(\mathbf{s})+s_{S_2D}P_{S_2}(\mathbf{s})+C_p+C_t)\Big)\Big]$$
$$E\Big[P_{PXU}(\mathbf{s})+P_{PU}(\mathbf{s})\Big] \leq \bar{P}_P,\ E\Big[P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s})+P_{S_1U}(\mathbf{s})\Big] \leq \bar{P}_{S_1},$$
$$E\Big[P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s})+P_{S_2U}(\mathbf{s})\Big] \leq \bar{P}_{S_2}$$
$$P_{PXU}(\mathbf{s}),\ P_{PU}(\mathbf{s}),\ P_{S_{12}}(\mathbf{s}),\ P_{S_1U}(\mathbf{s}),\ P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s}),\ P_{S_{21}}(\mathbf{s}),\ P_{S_2U}(\mathbf{s}),\ P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}) \geq 0, \forall(\mathbf{s})$$

Yukarıda tanımlanan kısıt fonksiyonları hem kullanıcı hem de hedef alıcıdaki çoklu erişim kanallarina bağlı olarak açık halde yazılmışlardır. Alternatif olarak, enbüyüklenecek olan toplam veri hızı üzerine, alt veri hızlarının tüm kombinasyonları listelenerek doğrudan kısıtlar da konulabilir. Hedef alıcıda çoklu erişim kanalı vasıtasıyla $(R_P+R_{S_1}+R_{S_2})$ toplam veri hızı kısıtı elde edilirken, kullanıcı ve hedef alıcı tarafında ise veri hızı kısıtları $(R_P+R_{S_1})+(R_{S_2})$, $(R_P+R_{S_2})+(R_{S_1})$ ve $(R_P)+(R_{S_1}+R_{S_2})$ kısıtları ile elde edilebilir. Aynı zamanda $(R_P+R_{S_1})+(R_{S_2})$ hedef alıcıda ve Kullanıcı 2'de elde edilen toplam veri hızı kısıtını, $(R_P+R_{S_2})+(R_{S_1})$ hedef alıcıda ve Kullanıcı 3'te elde edilen veri hızını, $(R_P)+(R_{S_1}+R_{S_2})$ ise sırasıyla Kullanıcı 2 ve 3 ile hedef alıcıda elde edilen toplam veri hızını sınırlar. Böylelikle, eşdeğer bir eniyileme problemini aşağıdaki gibi elde ederiz:

$$\max_{\mathbf{P(s)}}\ R_P + R_{S_1} + R_{S_2}$$

s.t. $R_P \geq B^*$

$$(R_P) \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PD}P_P(\mathbf{s})+s_{S_1D}P_{S_1}(\mathbf{s})+s_{S_2D}P_{S_2}(\mathbf{s})+C_p+C_t)\Big)\Big] \tag{116}$$
$$(R_P+R_{S_1})+(R_{S_2}) \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_{21}}P_{S_{21}}(\mathbf{s})\Big)\Big] \tag{117}$$
$$(R_P+R_{S_2})+(R_{S_1}) \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\Big)\Big] + E\Big[\log\Big(1+s_{PS_1}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{21}}P_{S_{21}}(\mathbf{s})\Big)\Big] \tag{118}$$
$$(R_P+R_{S_2})+(R_{S_1}) \leq E\Big[\log\Big(1+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\Big)\Big] + E\Big[\log\Big(1+s_{PS_2}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\Big)\Big] \tag{119}$$
$$(R_P)+(R_{S_1}+R_{S_2}) \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PS_1}P_{PXU}(\mathbf{s})\Big)\Big] + E\Big[\log\Big(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) + s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}))+C_p\Big)\Big] \tag{120}$$

$$
\begin{aligned}
(R_P)+(R_{S_1}+R_{S_2}) \leq\ & E\Big[\log\Big(1+s_{PS_2}P_{PXU}(\mathbf{s})\Big)\Big] \\
& +E\Big[\log\Big(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) \\
& +s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}))+C_p\Big)\Big] \qquad (121)
\end{aligned}
$$

$$
P_{PXU}(\mathbf{s}),\ P_{PU}(\mathbf{s}),\ P_{S_{12}}(\mathbf{s}),\ P_{S_1U}(\mathbf{s}),\ P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s}),\ P_{S_{21}}(\mathbf{s}),\ P_{S_2U}(\mathbf{s}),\ P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}) \geq 0, \forall(\mathbf{s})
$$

Yukarıda tanımlanan kısıt fonksiyonlarını (116)-(121) sırasıyla S_1, S_2, S_3 ,S_4, S_5 olarak tanımlarsak, eniyileme problemi

$$
\begin{aligned}
&\max_{\mathbf{P(s)}}(\min(S_1, S_2, S_3, S_4, S_5)) \\
&\text{s.t.}\quad R_P \geq B^* \\
&\qquad P_{PXU}(\mathbf{s}),\ P_{PU}(\mathbf{s}),\ P_{S_{12}}(\mathbf{s}),\ P_{S_1U}(\mathbf{s}),\ P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s}), \\
&\qquad P_{S_{21}}(\mathbf{s}),\ P_{S_2U}(\mathbf{s}),\ P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}) \geq 0, \forall(\mathbf{s})
\end{aligned}
$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu noktada, kilit gözlem, amaç fonksiyonunun beş tane içbükey fonksiyonun minimumu ile elde edilen, kendisi de içbükey olan bir fonksiyon oluşudur. Ancak, yine minimum işlemleri nedeniyle bu fonksiyon her yerde türevlenebilir değildir. Bu nedenle, eniyileme için türevin bulunmadığı noktalarda alt-gradyan (subgradient) hesaplaması kullanan, izdüşümlü subgradient metodu kullanılmıştır. Süreksizlik noktalarında minimum ifadesinin içindeki herhangi bir fonksiyonun gradyanı aynı zamanda bir alt-gradyan olduğundan, her iterasyonda hangi veri hızı kısıdı aktif ise, onun gradyanı hesaplanarak döngüsel olarak eniyileme gerçekleştirilmiştir. Notasyonun basit tutulması açısından güç değerlerinin anlık kanal değerine bağımlılığını ifadelerimizden düşürelim. Tüm kullanıcıların güçlerini içeren güç vektörü $\mathbf{P} = [P_{PXU}, P_{PU}, P_{S_{12}}, P_{2U_{S_{12}}}, P_{S_2U}, P_{S_{21}}, P_{3U_{S_{12}}}, P_{S_2U}]$ olsun. Bu gradyanlar genel olarak aşağıda tanımlanmıştır.

$$
\nabla S_1 = \left[\frac{\partial S_1}{\partial P_{PXU}}, \frac{\partial S_1}{\partial P_{PU}}, \frac{\partial S_1}{\partial P_{S_{12}}}, \frac{\partial S_1}{\partial P_{2U_{S_{12}}}}, \frac{\partial S_1}{\partial P_{S_1U}}, \frac{\partial S_1}{\partial P_{S_{21}}}, \frac{\partial S_1}{\partial P_{3U_{S_{12}}}}, \frac{\partial S_1}{\partial P_{S_2U}}\right] \qquad (122)
$$

$$
\nabla S_2 = \left[\frac{\partial S_2}{\partial P_{PXU}}, 0, \frac{\partial S_2}{\partial P_{S_{12}}}, \frac{\partial S_2}{\partial P_{2U_{S_{12}}}}, 0, \frac{\partial S_2}{\partial P_{S_{21}}}, \frac{\partial S_2}{\partial P_{3U_{S_{12}}}}, 0\right] \qquad (123)
$$

$$
\nabla S_3 = \left[\frac{\partial S_3}{\partial P_{PXU}}, 0, \frac{\partial S_3}{\partial P_{S_{12}}}, \frac{\partial S_3}{\partial P_{2U_{S_{12}}}}, 0, \frac{\partial S_3}{\partial P_{S_{21}}}, \frac{\partial S_3}{\partial P_{3U_{S_{12}}}}, 0\right] \qquad (124)
$$

$$\nabla S_4 = \left[\frac{\partial S_4}{\partial P_{PXU}}, 0, \frac{\partial S_4}{\partial P_{S_{12}}}, 0, 0, \frac{\partial S_4}{\partial P_{S_{21}}}, 0, 0 \right] \tag{125}$$

$$\nabla S_5 = \left[\frac{\partial S_5}{\partial P_{PXU}}, 0, \frac{\partial S_5}{\partial P_{S_{12}}}, 0, 0, \frac{\partial S_5}{\partial P_{S_{21}}}, 0, 0 \right] \tag{126}$$

Herhangi k numaralı iterasyonda toplam veri hızları için aktif olan kısıt S_j olsun. Bu durumda, hedef fonksiyonunu eniyilemek için, güçleri k numaralı iterasyonda aşağıdaki şekilde güncellemek yeterlidir:

$$\mathbf{P}^{(k+1)} = (\mathbf{P}^{(k)} + \alpha_k \nabla S_j)^{\dagger} \tag{127}$$

Yukarıdaki ifadede, $(\cdot)^{\dagger}$ güç değişkeni için kabul edilebilir bölgeye yapılan izdüşümü işlemini, α_k ise gitgide küçülen, gradyan yönünde atılan adım boyunu göstermektedir. Olası gradyan vektörlerinin (∇S_j, {j=1, ...,5}) sıfırdan farklı elemanlarının tam listesi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{PXU}} = \frac{\mathrm{s_{PD}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{S_{12}}} = \frac{\mathrm{s_{S_1D}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{S_{21}}} = \frac{\mathrm{s_{S_2D}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{PU}} = \frac{\mathrm{s_{PD}} + \frac{\mathrm{P_{S_1U}\, s_{PD}\, s_{S_1D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{PU}\, P_{S_1U}\, s_{PD}\, s_{S_1D}}}} + \frac{\mathrm{P_{S_2U}\, s_{PD}\, s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{PU}\, P_{S_2U}\, s_{PD}\, s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{S_1U}} = \frac{\mathrm{s_{S_1D}} + \frac{\mathrm{P_{PU}\, s_{PD}\, s_{S_1D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{PU}\, P_{S_1U}\, s_{PD}\, s_{S_1D}}}} + \frac{\mathrm{P_{S_2U}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{S_1U}\, P_{S_2U}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{S_2U}} = \frac{\mathrm{s_{S_2D}} + \frac{\mathrm{P_{PU}\, s_{PD}\, s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{PU}\, P_{S_2U}\, s_{PD}\, s_{S_2D}}}} + \frac{\mathrm{P_{S_1U}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{S_1U}\, P_{S_2U}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{2U1}} = \frac{\mathrm{s_{S_1D}} + \frac{\mathrm{P_{3U1}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{2U1}\, P_{3U1}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_1}{\partial P_{3U1}} = \frac{\mathrm{s_{S_2D}} + \frac{\mathrm{P_{2U1}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{2U1}\, P_{3U1}\, s_{S_1D}\, s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C}}$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial P_{PXU}} = \frac{\mathrm{s_{PS_1}}}{\mathrm{P_{PXU}\, s_{PS_1}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial P_{S_{12}}} = \frac{\mathrm{s_{S_1D}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\, P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\, P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial P_{S_{21}}} = \frac{\mathrm{s_{S_2D}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\, P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\, P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial P_{2U1}} = \frac{\mathrm{s_{S_1D}} + \frac{\mathrm{P_{3U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{2U1}\,P_{3U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\,P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\,P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial P_{3U1}} = \frac{\mathrm{s_{S_2D}} + \frac{\mathrm{P_{2U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{S_1U1}\,P_{3U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\,P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\,P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial P_{PXU}} = \frac{\mathrm{s_{PS_1}}}{\mathrm{P_{PXU}\,s_{PS_1}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial P_{S_{12}}} = \frac{\mathrm{s_{S_1D}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\,P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\,P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial P_{S_{21}}} = \frac{\mathrm{s_{S_2D}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\,P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\,P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial P_{2U1}} = \frac{\mathrm{s_{S_1D}} + \frac{\mathrm{P_{3U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{2U1}\,P_{3U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\,P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\,P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_3}{\partial P_{3U1}} = \frac{\mathrm{s_{S_2D}} + \frac{\mathrm{P_{2U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}{\sqrt{\mathrm{P_{2U1}\,P_{3U1}\,s_{S_1D}\,s_{S_2D}}}}}{\mathrm{C_P} + \mathrm{s_{S_1D}\,P_{S_1}} + \mathrm{s_{S_2D}\,P_{S_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_4}{\partial P_{PXU}} = \frac{\mathrm{s_{PS_2}}}{\mathrm{P_{S_{12}}\,s_{S_{12}}} + \mathrm{P_{PXU}\,s_{PS_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_4}{\partial P_{S_{12}}} = \frac{\mathrm{s_{S_{12}}}}{\mathrm{P_{S_{12}}\,s_{S_{12}}} + \mathrm{P_{PXU}\,s_{PS_2}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_4}{\partial P_{S_{21}}} = \frac{\mathrm{s_{S_{21}}}}{\mathrm{P_{S_{21}}\,s_{S_{21}}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_5}{\partial P_{PXU}} = \frac{\mathrm{s_{PS_1}}}{\mathrm{P_{S_{21}}\,s_{S_{21}}} + \mathrm{P_{PXU}\,s_{PS_1}} + 1}$$

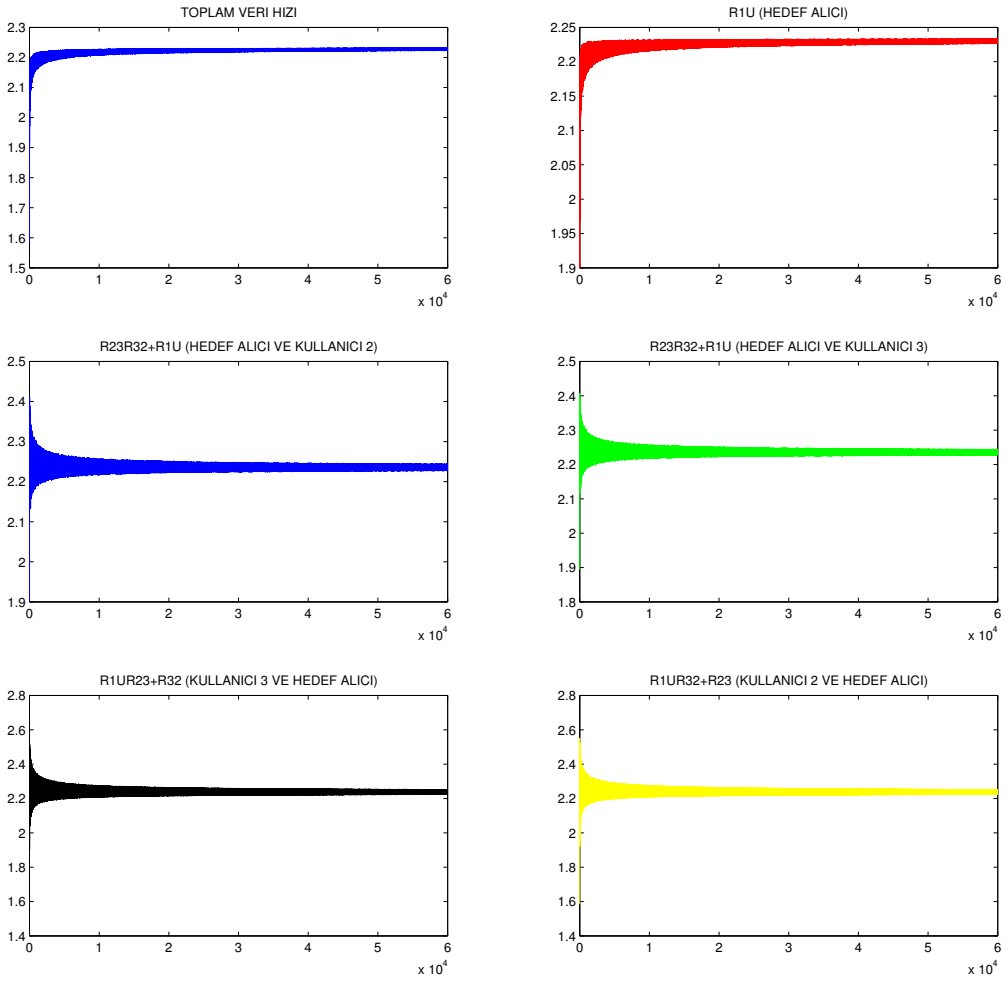
$$\frac{\partial S_5}{\partial P_{S_{12}}} = \frac{\mathrm{s_{S_{12}}}}{\mathrm{P_{S_{12}}\,s_{S_{12}}} + 1}$$

$$\frac{\partial S_5}{\partial P_{S_{21}}} = \frac{\mathrm{s_{S_{21}}}}{\mathrm{P_{S_{21}}\,s_{S_{21}}} + \mathrm{P_{PXU}\,s_{PS_1}} + 1}$$

Alt-gradyan algoritması ile elde edilen veri hızları, ve her iterasyonda toplam veri hızlarını sınırlayan kısıtların nasıl değiştiği, benzetimler yoluyla bir sonraki bölümde irdelenecektir.

2.2.4 Benzetim Sonuçları

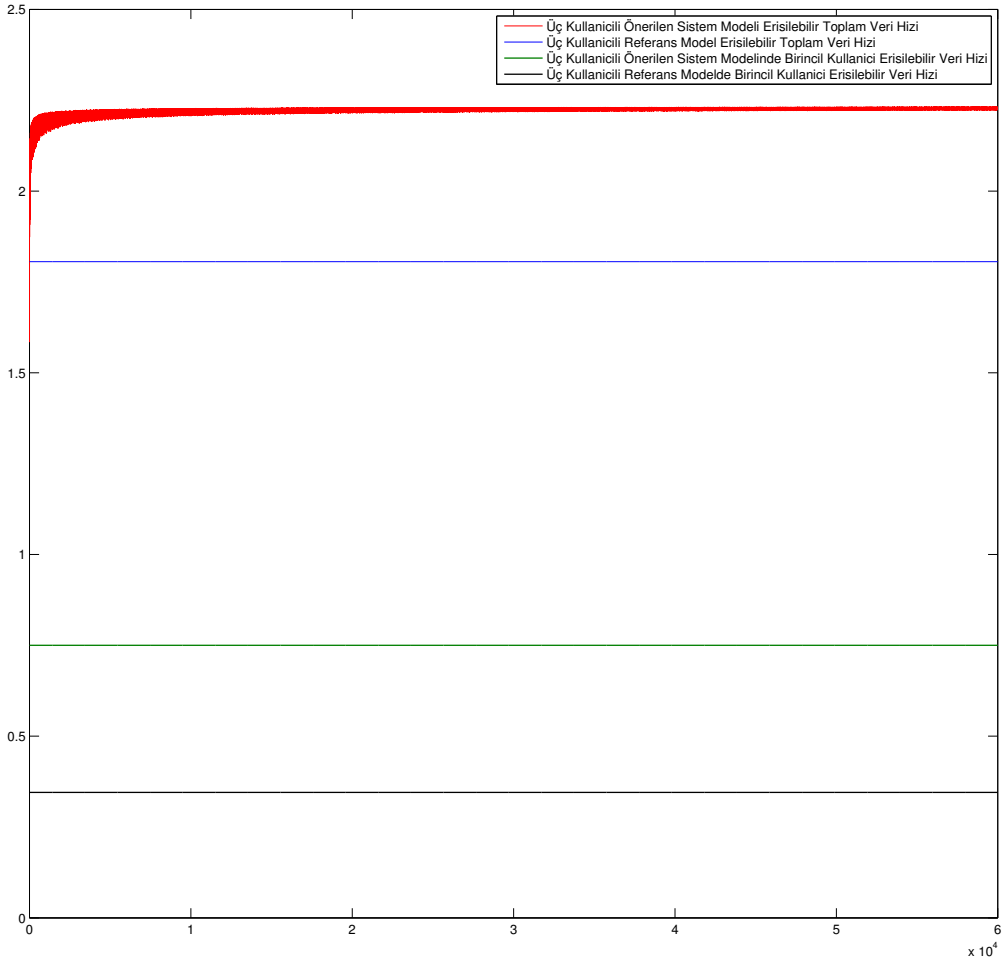
Güç güncellemelerini (127) ifadesine göre yapan, ve bir önceki bölümde anlatılan algoritmanın benzetim çalışmaları yapılmıştır. Şekil 14 ve 15'te sırasıyla Şekil 13'te önerilen modele bağlı olarak, en yüksek toplam veri hızını veren güç dağılımını bulmak için uyguladığımız alt-gradyan metodu ile bulunan toplam veri hızının, referans bir işbirliksiz modeldeki toplam veri hızıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Tüm benzetimler boyunca kullanılan Rayleigh dağılımlı (s_{PD}), (s_{S_1D}, s_{S_2D}, s_{PS_1}, s_{PS_2}) ve ($s_{S_{12}}$, $s_{S_{21}}$) kanal katsayısı kümeleri için sıra-



Şekil 14: Subgradient metodu ile her bir kısıt fonksiyonunda elde edilen toplam veri hızı.

sıyla kullanılan parametre değerleri 0.3, 1.0 ve 3.0 'dır Bu değerlerden de anlaşılacağı gibi, önerilen modelde birincil kullanıcı olan Kullanıcı 1, hedef alıcıya en uzak noktada konumlandırılmış bir kullanıcıdır. Göreceli olarak ikincil kullanıcılar Kullanıcı 2 ve 3 ise hem hedef alıcıya hem de Kullanıcı 1'e eşit mesafeli olarak konumlandırılmıştır. Aynı zamanda kendi aralarında işbirlikçi haberleşme yapan bu ikincil kullanıcılar ise birbirlerine çok yakın olarak konumlandırılmıştır.

Şekil 14'te bir önceki bölümde tanımlanmış olan 5 adet toplam veri hızı kısıtının her bir iterasyonda nasıl en iyi değere yakımsadığı gösterilmektedir. Her bir iterasyon boyunca en düşük değeri veren toplam veri hızı kısıtının gradyanı hesaplanıp, o kısıt içerisindeki güç değerlerinin eniyileştirilmesi yapılmaktadır. Bu bağlamda yüksek olan toplam veri hızı



Şekil 15: Önerilen sistem modeli ile referans model karşılaştırması.

kısıtlarındaki güç değerleri azaltılıp düşük olan toplam veri hızı kısıtlarındaki güç değerleri arttırılmakta ve iterasyon ilerledikçe en iyi değere ulaşılmaktadır.

Şekil 15'te ise subgradient algoritması sonucunda elde edilen toplam veri hızı değerinin referans model olarak kullanılan üç kullanıcılı çoklu erişim kanalındaki toplam veri hızı ile karşılaştırılması bulunmaktadır. Referans modelde bu değer elde edilirken eniyileştirilmiş güç değerleri çok kullanıcılı su doldurma algoritması (water filling) ile bulunmuştur. Bulunan bu değer verilen kanal katsayıları ve toplam güç sınırlamalarına bağlı olarak eniyi değeri tanımlamaktadır. Benzetim sonuçlarından da anlaşılacağı gibi önerilen model, referans modele oranla daha yüksek bir toplam veri hızına ulaşabilmektedir. Bununla beraber önerilen modelle birincil kullanıcının çıkabileceği en yüksek erişilebilir veri hızı referans modelde elde

edilen birincil kullanıcı erişilebilir veri hızı değerinden çok daha yüksektir. Eniyileştirme problemimize geri dönersek, birincil kullanıcı için tanımlanmış olan $R_{1U} \geq B^*$ kısıtının da sağlandığı anlaşılmaktadır.

2.3 Bir Birincil, İki İkincil Kullanıcılı İşbirlikli Bilişsel Çoklu Erişim Kanalında İkincil Kullanıcıların Veri Hızı Bölgesinin Eniyilenmesi

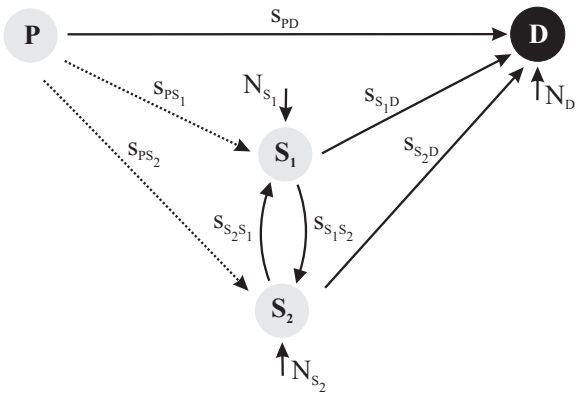
Bu bölümde, bir önceki bölümde önerilen üç kullanıcılı işbirlikli bilişsel haberleşme modeli ele alınmış, ancak problem toplam veri hızının eniyileştirilmesinden, ikincil kullanıcıların veri hızı bölgelerinin eniyileştirilmesi problemine dönüştürülmüştür. Ayrıca, bilişsel radyonun pratik kısıtlarına daha uygun olarak, birincil kullanıcının işbirliğine katılmak için hiç ilave sinyal göndermediği bir yapı ele alınmıştır. Yine, önceki bölümlerdeki çalışmalarımızdan farklı olarak, bilişsel haberleşme metodunun işbirlikçi haberleşme metodu ile birlikte kullanılmasını sağlayan üste-serim modelimize ilaveten, birincil kullanıcı için var olan $R_P \geq B^*$ kısıtının sağlanmaması durumlarda devreye girecek olan bir altserim sistem modeli üzerinde de durulmuştur.

İkincil kullanıcıların veri hızı bölgelerinin eniyilenmesi, bilişsel modellerde daha anlamlı bir problemdir. Bunun nedeni Şekil 15'te açıkça gözükmektedir. Bir önceki önerdiğimiz eniyileme probleminde, birincil kullanıcı için sağlanması gereken $R_P \geq B^*$ kısıtı rahatlıkla sağlanmakta ve hatta üzerine çıkılmaktadır. Bir başka deyişle ikincil kullanıcılar birincil kullanıcının bu değeri sağlaması için harcamaları gereken güç değerinden çok daha yüksek bir güç harcamaktadırlar. Oysaki birincil kullanıcının veri hızının B^* değerine sabitlenmesi ile ikincil kullanıcılar birincil kullanıcının bu kısıtı sağlaması için harcamaları gereken güç değerlerini kendi veri hızlarının arttırılması için harcayabileceklerdir. İkincil kullanıcıların toplam veri hızını arttırmaya yönelik sunulan eniyileme problemi ile ilgili detaylar bir sonraki alt bölümlerde verilecektir.

2.3.1 Alta-serim Sistem Modeli

Şekil 16'da önerilen alta-serim sistem modeli bulunmaktadır. Bu sistem modelinde P, S_1 ve S_2 nolu düğümler sırasıyla birincili kullanıcı ve ikincil kullanıcıları, D nolu düğüm ise hedef alıcıyı tanımlamaktadır. Yine bir önceki bölümde olduğu gibi $\{s_{PD}, s_{S_1D}, s_{S_2D}, s_{S_{12}}, s_{S_{21}}\}$ kullanıcıların kendi aralarındaki ve hedef alıcıya yönelik ilgili alıcılardaki gürültü varyansı ile normalleştirilmiş sönümlenmeli kanal katsayılarını ifade etmektedir.

Önerilen alta-serim sistemmodeline bağlı olarak hem kullanıcıların hem de hedef alıcının



Şekil 16: Üç kullanıcılı alta-serim sistem modeli.

aldığı sinyaller aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$Y_D = \sqrt{s_{PD}}X_P + \sqrt{s_{S_1D}}X_{S_1} + \sqrt{s_{S_2D}}X_{S_2} + N_D \tag{128}$$

$$Y_{S_1} = \sqrt{s_{PS_1}}X_P + \sqrt{s_{S_{21}}}X_{S_2} + N_{S_1} \tag{129}$$

$$Y_{S_2} = \sqrt{s_{PS_2}}X_P + \sqrt{s_{S_{12}}}X_{S_2} + N_{S_2} \tag{130}$$

Kanal Kodlaması ve Kodçözme

Yukarıdaki denklemlerde tanımlanmış olan Y_D hedefteki alınan sinyali, Y_{S_1} ve Y_{S_2} ise sırasıyla ikincil kullanıcılar için alınan sinyalleri belirtmektedir. Bu önerilen alta-serim modelinde de tüme gönderim kanalının doğası gereği birincil kullanıcı, ikincil kullanıcılardan gelen sinyalleri alsa da, yollanan mesajları çözmediğinden yukarıdaki denklemlerde birincil kullanıcıya ait olan denklemler yazılmamıştır. X_P, X_{S_1} ve X_{S_2} hem hedefe hem de kullanıcıların birbirlerine iletecekleri bilgileri içeren kod sözcükleridir ve aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$X_P = \sqrt{P_{PXU}}X_{PXU} \tag{131}$$

$$X_{S_1} = \sqrt{P_{S_{12}}}X_{S_{12}} + \sqrt{P_{U_{S_{12}}}}U_{S_{12}} \tag{132}$$

$$X_{S_2} = \sqrt{P_{S_{21}}}X_{S_{21}} + \sqrt{P_{U_{S_{21}}}}U_{S_{21}} \tag{133}$$

Bu kod sözcüklerini iletecek olan güç değerlerinin ortalaması ise aşağıdaki kısıtları sağlamalıdır:

$$E[P_{PXU}] \leq P_P \tag{134}$$

$$E[P_{S_{12}} + P_{U_{S_{12}}}] \leq P_{S_1} \tag{135}$$

	Blok I	Blok II
Birincil	$X_{PU}(w_{PU}(1))$	$X_{P_U}(w_{PU}(2))$
İkincil I	$X_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), U_{S_{12}}(1))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(0), w_{S_{21}}(0))$	$X_{S_{12}}(w_{S_{12}}(2), U_{S_{12}}(2))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), w_{S_{21}}(1))$
İkincil II	$X_{S_{21}}(w_{S_{21}}(1), U_{S_{21}}(1))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(0), w_{S_{21}}(0))$	$X_{S_{21}}(w_{S_{21}}(2), U_{S_{21}}(1))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), w_{S_{21}}(1))$

Tablo 3: Altserim sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı.

$$E[P_{S_{21}} + P_{U_{S_{21}}}] \leq P_{S_2} \tag{136}$$

Yukarıda tanımlanmış olan X_P, X_{S_1} ve X_{S_2} kod sözcükleri Tablo 3'de özetlenen blok Markov Kodlama yöntemi ile üretilmiştir.

Alta-serim sistem modelinde kullanıcılardan birincil kullanıcı sadece hedef alıcıya yönelik bir alt mesaj yollamaktadır. Ve yollanan bu mesaj bir önceki sistem modellerinin aksine ikincil kullanıcılarda çözümlenmemektedir. Bu da ikincil kullanıcılarda girişim oluşmasına neden olacaktır. İkincil kullanıcılar ise kendi aralarında işbirlikçi haberleşme yapıp biribirlerine bilgilerini $w_{S_{12}}$ ve $w_{S_{21}}$ alt mesajları üzerinden aktarmaktadırlar. İkincil kullanıcılar aynı zamanda bu bilgilerin hedef kullanıcıda da çözülmesi için $U_{S_{12}}$ kod sözcüğünü, bir önceki bloktaki $w_{S_{12}}$ ve $w_{S_{21}}$ mesajlarının bir fonksiyonu olarak üretmektedirler. Bu şekilde tanımlanan blok Markov kodlaması ve hedef alıcıda uygulanan geriye doğru kodçözme yöntemine bağlı olarak, R_P, R_{S_1}, R_{S_2} tarafından sağlanması gereken aşağıdaki erişilebilir veri hızı kısıtları ortaya çıkarılmaktadır.

$$R_{S_1} \leq E\left[\log\left(1+\frac{s_{S_{12}}P_{S_{12}}}{s_{PS_2}P_{PXU}+N_{S_2}}\right)\right] \tag{137}$$

$$R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+\frac{s_{S_{21}}P_{S_{21}}}{s_{PS_1}P_{PXU}+N_{S_1}}\right)\right] \tag{138}$$

$$R_P \leq E\left[\log\left(1+s_{PD}P_{PXU}\right)\right] \tag{139}$$

$$R_{S_1}+R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}+P_{U_{S_{12}}})+s_{S_2D}(P_{S_{21}}+P_{U_{S_{21}}})+C_p\right)\right] \tag{140}$$

$$R_P+R_{S_1}+R_{S_2} \leq E\left[\log\left(C\right)\right] \tag{141}$$

Burada $C_p = 2\sqrt{s_{S_1D}s_{S_2D}P_{U_{S_{12}}}P_{U_{S_{21}}}}$ ve $C = 1+s_{PD}P_P+s_{S_1D}P_{S_1}+s_{S_2D}P_{S_2}+C_p$ şeklinde tanımlanır.

Bu veri hızlarının benzetimlerle değerlendirilmesi, üste-serim yönteminin de geliştirilmesinden sonra yapılacaktır.

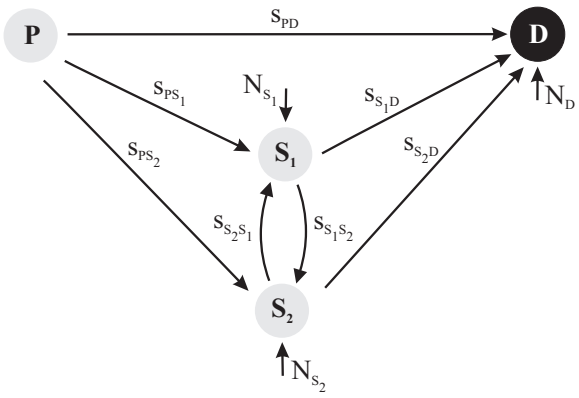
2.3.2 Üste-serim sistem modeli

Bu bölümde, Bölüm 2.2'de önerilen sistem modeline kodlama açısından büyük bir benzerlik gösteren bir üste-serim modeli önerilmektedir. Tek fark, birincil kullanıcıya ait olan X_{PU} mesajının ikincil kullanıcılarda çözümlenmesiyle elde edilen ortak U alt mesajının bu sistem modelinde sadece ikincil kullanıcılar tarafından yollanmasıdır. Birincil kullanıcı, alta-serim sistem modelinde olduğu gibi hedef veri hızı olan $R_P = B^*$ değerinde tutulacak, fakat bu değere ulaşabilmesi için artık ikincil kullanıcılardan yardım da alabilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken şey, ikincil kullanıcıların birincil kullanıcının mesajını çözmesiyle, alıcıdaki kodçözmede birincil kullanıcıya yardım edebildikleri için daha fazla karışım yapma hakkını elde etmelerinin ötesinde, birbirlerine gönderdikleri sinyalleri de birincil kullanıcıdan aldıkları sinyali gürültü olarak kabul etmeleri artık gerekmediği için, daha yüksek veri hızında gönderebilecekleridir. Özellikle birincil kullanıcı ile ikincil kullanıcılar arasındaki linkin çok güçlü olduğu durumlarda, bu ikili etkiden çok fayda sağlanması beklenebilir.

İşbirliği modeline dönecek olursak, $\{s_{PD},\ s_{S_1D},\ s_{S_2D},\ s_{S_{12}},\ s_{S_{21}}\}$ parametrelerinin kullanıcıların kendi aralarındaki ve hedef alıcıya yönelik ilgili alıcılardaki gürültü varyansı ile normalleştirilmiş sönümlenmeli kanal katsayılarını ifade etiği durumda, kullanıcıların ve hedef alıcının aldığı sinyaller ilgili güç değerleri kısıtları ile birlikte aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$X_P = \sqrt{P_{PXU}}X_{PXU} \tag{142}$$

$$X_{S_1} = \sqrt{P_{S_{12}}}X_{S_{12}} + \sqrt{P_{U_{S_{12}}}}U_{S_{12}} + \sqrt{P_{U_{S_1}}}U \tag{143}$$



Şekil 17: Üç kullanıcılı üste-serim sistem modeli.

$$X_{S_2} = \sqrt{P_{S_{21}}} X_{S_{21}} + \sqrt{P_{U_{S_{21}}}} U_{S_{12}} + \sqrt{P_{U_{S_2}}} U \tag{144}$$

$$P_{PXU} \leq P_P \tag{145}$$

$$P_{S_{12}} + P_{U_{S_{12}}} + P_{U_{S_1}} \leq P_{S1} \tag{146}$$

$$P_{S_{21}} + P_{U_{S_{21}}} + P_{U_{S_2}} \leq P_{S2} \tag{147}$$

Kanal Kodlaması ve Kodçözme

Yukarıda da bahsedildiği gibi Tablo 4'ün Tablo 2'den farkı birincil kullanıcının U ortak mesajını oluşturmuyor olmasıdır. Bu durum hedef alıcıda üçlü evre uyum kazancının yok olmasına neden olsa da güç eniyilemesinin daha kolay bir şekilde yapılması için bizlere olanak sağlamaktadır.

Önceki bölümlerde olduğu gibi, blok Markov kodlama ve hedef alıcıda uygulanan geriye doğru kodçözme yöntemine bağlı olarak aşağıdaki R_P, R_{S_1}, R_{S_2} veri hızı kısıtları elde edilmiştir.

$$R_P \leq E\left[\log\left(1 + s_{PS_1} P_{PXU}\right)\right] \tag{148}$$

$$R_P \leq E\left[\log\left(1 + s_{PS_2} P_{PXU}\right)\right] \tag{149}$$

$$R_{S_1} \leq E\left[\log\left(1 + s_{S_{12}} P_{S_{12}}\right)\right] \tag{150}$$

$$R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1 + s_{S_{21}} P_{S_{21}}\right)\right] \tag{151}$$

	Blok I	Blok II
Birincil	$X_{P_U}(w_{P_U}(1))$	$X_{P_U}(w_{P_U}(2))$
İkincil I	$X_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), U_{S_{12}}(1), U(1))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(0), w_{S_{21}}(0))$ $U(w_{P_U}(0))$	$X_{S_{12}}(w_{S_{12}}(2), U_{S_{12}}(2), U(2))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), w_{S_{21}}(1))$ $U(w_{P_U}(1))$
İkincil II	$X_{S_{21}}(w_{S_{21}}(1), U_{S_{21}}(1), U(1))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(0), w_{S_{21}}(0))$ $U(w_{P_U}(0))$	$X_{S_{21}}(w_{S_{21}}(2), U_{S_{21}}(1), U(2))$ $U_{S_{12}}(w_{S_{12}}(1), w_{S_{21}}(1))$ $U(w_{P_U}(1))$

Tablo 4: Üste-serim sistem modeli için blok Markov kodlama yapısı.

$$R_P + R_{S_1} \leq E\left[\log\left(1+s_{PS_1}P_{PXU}+s_{S_{21}}P_{S_{21}}\right)\right] \tag{152}$$

$$R_P + R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{PS_2}P_{PXU}+s_{S_{12}}P_{S_{12}}\right)\right] \tag{153}$$

$$R_{S_1}+R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}+P_{U_{S_{12}}})+s_{S_2D}(P_{S_{21}}+P_{U_{S_{21}}})+C_p\right)\right] \tag{154}$$

$$R_P+R_{S_1}+R_{S_2} \leq E\left[\log\left(C\right)\right] \tag{155}$$

Burada $C_p = 2\sqrt{s_{S_1D}s_{S_2D}P_{U_{S_{12}}}P_{U_{S_{21}}}}$, $C_t = 2\sqrt{s_{S_1D}s_{S_2D}P_{U_{S_1}}P_{U_{S_2}}}$ ve $C = 1+s_{PD}P_P+s_{S_1D}P_{S_1}+s_{S_2D}P_{S_2}+C_p+C_t$ şeklinde tanımlanır.

Yukarıdaki veri hızı kısıtlarında Bölüm 2.2'den farklı olarak ilk dikkati çeken, hedef alıcıdaki üçlü evre kazancının ortadan kalkmasıdır.

2.3.3 Sistem modeli için güç dağılımındaki eniyileme problemi

Bölüm 2.2'den farklı olarak bu bölümde, önerilen üste-serim sistem modeli için ikincil kullanıcıların erişebilecekleri veri hızı kümesini enbüyükleyen kaynak tahsisi bulunacaktır. Kullanıcıların veri hızlarına atanan $\{\mu_1, \mu_2\}$ öncelik katsayıları, dışbükey olduğu bilinen erişilebilir en büyük veri hızı alanının çeperindeki farklı noktaların elde edilmesini sağlamaktadır. Bu

anlamda eniyileme problemi aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\max_{\mathbf{P(s)}} \ \mu_1 R_{S_1} + \mu_2 R_{S_2} \tag{156}$$

$$\begin{aligned}
\text{s.t.} \ \ & R_P \geq B^* \\
& R_{S_1} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_{12}} P_{S_{12}}(\mathbf{s})\right)\right] \\
& R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_{21}} P_{S_{21}}(\mathbf{s})\right)\right] \\
& R_P + R_{S_1} \leq E\left[\log\left(1+s_{PS_2} P_{PXU}(\mathbf{s}) + s_{S_{12}} P_{S_{12}}\right)\right] \\
& R_P + R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{PS_1} P_{PXU}(\mathbf{s}) + s_{S_{21}} P_{S_{21}}\right)\right] \\
& R_{S_1} + R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) + s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s})) + C_p\right)\right] \\
& R_{S_1} + R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PD} P_{PXU}(\mathbf{s}) + s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) \\
& \qquad\qquad + s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s})) + C_p\Big)\Big] \\
& P_{PXU}(\mathbf{s}),\ P_{S_{12}}(\mathbf{s}),\ P_{S_1U}(\mathbf{s}),\ P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s}),\ P_{S_{21}}(\mathbf{s}),\ P_{S_2U}(\mathbf{s}),\ P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}) \geq 0, \forall(\mathbf{s})
\end{aligned}$$

Yukarıda tanımlanmış olan eniyileme probleminde, ikincil kullanıcıların veri hızlarının enbüyüklemesi için birincil kullanıcının veri hızının olabileceği en düşük değer olan $R_P = B^*$ değerine sabitlenmesi gerekir. Bunun sonunda problem,

$$\max_{\mathbf{P(s)}} \ \mu_1 R_{S_1} + \mu_2 R_{S_2} \tag{157}$$

$$\begin{aligned}
& R_{S_1} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_{12}} P_{S_{12}}(\mathbf{s})\right)\right] \\
& R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_{21}} P_{S_{21}}(\mathbf{s})\right)\right] \\
& R_{S_1} \leq E\left[\log\left(1+s_{PS_2} P_{PXU}(\mathbf{s}) + s_{S_{12}} P_{S_{12}}\right)\right] - B^* \\
& R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{PS_1} P_{PXU}(\mathbf{s}) + s_{S_{21}} P_{S_{21}}\right)\right] - B^* \\
& R_{S_1} + R_{S_2} \leq E\left[\log\left(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) + s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s})) + C_p\right)\right] \\
& R_{S_1} + R_{S_2} \leq E\Big[\log\Big(1+s_{PD} P_{PXU}(\mathbf{s}) + s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) \\
& \qquad\qquad + s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s}) + P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s})) + C_p\Big)\Big] - B^* \\
& P_{PXU}(\mathbf{s}),\ P_{S_{12}}(\mathbf{s}),\ P_{S_1U}(\mathbf{s}),\ P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s}),\ P_{S_{21}}(\mathbf{s}),\ P_{S_2U}(\mathbf{s}),\ P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}) \geq 0, \forall(\mathbf{s})
\end{aligned}$$

olarak tekrar ifade edilir. Burada ikincil kullanıcılardan S_1'in diğer ikincil kullanıcı S_2'de ve hedef alıcıda tabi olduğu veri hızı kısıtları

$$R_{S_1} = \min \left(\begin{array}{l} E\left[\log\left(1+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\right)\right], \\ E\left[\log\left(1+s_{PS_2}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{12}}P_{S_{12}}\right)\right] - B^*, \\ E\left[\log\left(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s}))+s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s}))+C_p\right)\right], \\ E[\log(1+s_{PD}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) \\ +s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s}))+C_p)] - B^* \end{array} \right) \quad (158)$$

ve benzer şekilde ikincil kullanıcı S_2'nin diğer ikincil kullanıcı S_1'de ve hedef alıcıda tabi olduğu veri hızı kısıtları

$$R_{S_2} = \min \left(\begin{array}{l} E\left[\log\left(1+s_{S_{21}}P_{S_{21}}(\mathbf{s})\right)\right], \\ E\left[\log\left(1+s_{PS_1}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{21}}P_{S_{21}}\right)\right] - B^*, \\ E\left[\log\left(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s}))+s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s}))+C_p\right)\right], \\ E[\log(1+s_{PD}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) \\ +s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s}))+C_p)] - B^* \end{array} \right) \quad (159)$$

şeklinde tanımlanabilir. Toplam veri hızı kısıtları ise;

$$R_{S_1}+R_{S_2} = \min \left(\begin{array}{l} E\left[\log\left(1+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\right)\right] \\ +E\left[\log\left(1+s_{S_{21}}P_{S_{21}}(\mathbf{s})\right)\right], \\ E\left[\log\left(1+s_{S_{12}}P_{S_{12}}(\mathbf{s})\right)\right] \\ +E\left[\log\left(1+s_{PS_1}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{21}}P_{S_{21}}\right)\right]-B^*, \\ E\left[\log\left(1+s_{PS_2}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{12}}P_{S_{12}}\right)\right] \\ +E\left[\log\left(1+s_{S_{21}}P_{S_{21}}(\mathbf{s})\right)\right]-B^*, \\ E\left[\log\left(1+s_{PS_2}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{12}}P_{S_{12}}\right)\right] \\ +E\left[\log\left(1+s_{PS_1}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_{21}}P_{S_{21}}\right)\right]-2B^*, \\ E\left[\log\left(1+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s}))\right.\right. \\ \left.\left.+s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s}))+C_p\right)\right], \\ E[\log(1+s_{PD}P_{PXU}(\mathbf{s})+s_{S_1D}(P_{S_{12}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{12}}}(\mathbf{s})) \\ +s_{S_2D}(P_{S_{21}}(\mathbf{s})+P_{U_{S_{21}}}(\mathbf{s}))+C_p)]-B^* \end{array} \right) \quad (160)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu durumda eniyileme problemi $\mu_1 > \mu_2$ kabulü altında en basit haliyle aşağıdaki gibi tanımlamamıza olanak vermektedir.

$$\max_{\mathbf{P(s)}} \ (\mu_1 - \mu_2)R_{S_1} + \mu_2(R_{S_1} + R_{S_2}) \tag{161}$$

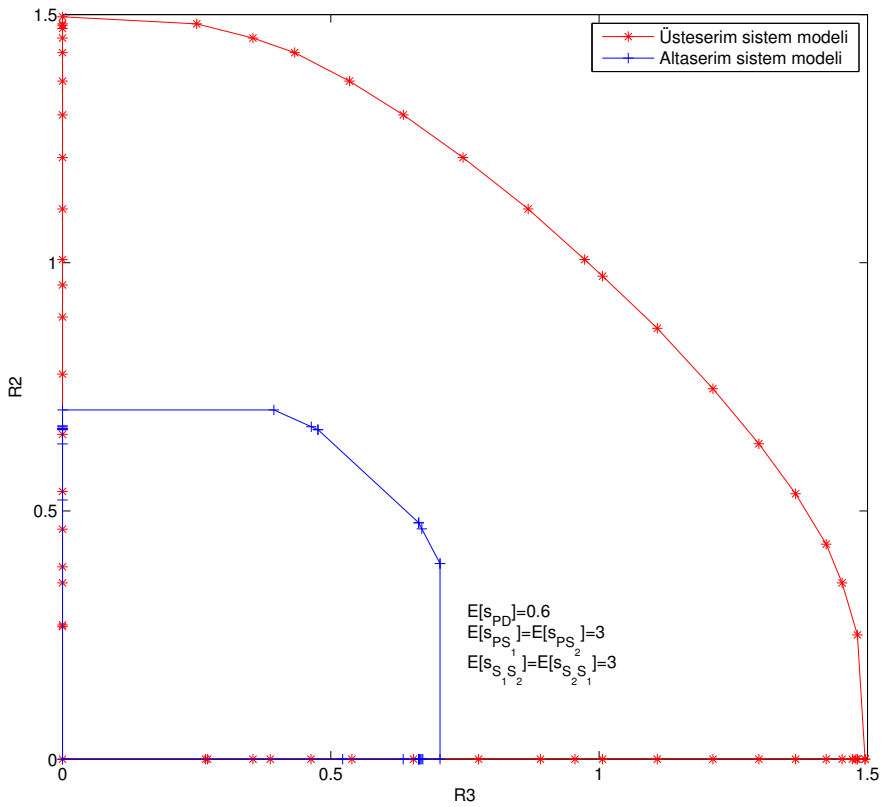
$$P_{PXU}(\mathbf{s}),\ P_{S_{12}}(\mathbf{s}),\ P_{S_1U}(\mathbf{s}),\ P_{2U_{S_{12}}}(\mathbf{s}),\ P_{S_{21}}(\mathbf{s}),\ P_{S_2U}(\mathbf{s}),\ P_{3U_{S_{12}}}(\mathbf{s}) \geq 0, \forall(\mathbf{s})$$

Yukarıda verilen (161), Bölüm 2.2'de olduğu gibi, alt-gradyan yöntemi ile çözülebilir. Alt-gradyan'ın bulunması için (158)'deki denklemlerden aktif olabilecek 4 adet ve (160)'daki denklemlerden ise aktif olabilecek 6 adet olası veri hızı kısıtı için 24 farklı gradyan kümesinden, her iterasyonda aktif olan veri hızı kısıtına ait olan bir tanesinin seçilmesi yeterlidir. Bunun sonucunda, (127)'deki iterasyona göre güncellenen güç vektörleri, her $\{\mu_1, \mu_2\}$ çifti için en iyi çözüme yakınsayacaktır.

2.3.4 Benzetim Sonuçları

Yukarıda tanımlanmış olan ikincil kullanıcıların toplam erişilebilir veri hızı kısıtlarının eniyileştirilme problemi döngüsel bir yaklaşım olarak bilinen alt-gradyan metodu ile çözüme ulaştırılmıştır. Bölüm 2.2'den farklı olarak μ_1 ve μ_2 katsayıları, farklı erişilebilir veri hızı noktalarında eniyilenmiş güç dağılımları elde etmemize olanak sağlamaktadır. Benzetimlerimiz boyunca μ_1 ve μ_2 katsayıları 0 ve 1 arasında farklı değerler alarak, hem bireysel erişilebilir veri hızı hem de toplam veri hızı değerlerinin enbüyüklenmesi sağlanabilmektedir. Bu bölümde birincil ve ikincil kullanıcılar için 4 farklı kanal katsayısı grubu, $\{s_{PD}\}$, $\{s_{S_1D},\ s_{S_2D}\}$, $\{s_{S_{12}},\ s_{S_{21}}\}$ tanımlanmıştır. Birincil kullanıcı ikincil kullanıcılara oranla çok daha uzak bir noktaya yerleştirilmiştir ve ikincil kullanıcılar hem birbirlerine hem de hedef alıcıya yönelik eşit uzaklıklara yerleştirilmiştir. Şekil 18'de bu senaryo için erişilebilir veri hızı değerleri görülmektedir.

Şekil 18'de alta-serim modeli için elde edilen benzetim sonucu, birincil kullanıcının sudoldurma algoritması ile elde etmiş olduğu güç dağılımının, Kaya ve Ulukus (2007)'deki gibi işbirliği yapan ikincil kullanıcılarda girişim olarak kabul edildiği durumda ikincil kullancıların veri hızı bölgelerinin enbüyüklenmesi ile elde edilmiştir. Daha önceden de bahsedildiği gibi üste-serim modelinde alta-serim modelinden farklı olarak, ikincil kullanıcılar birincil kullanı-

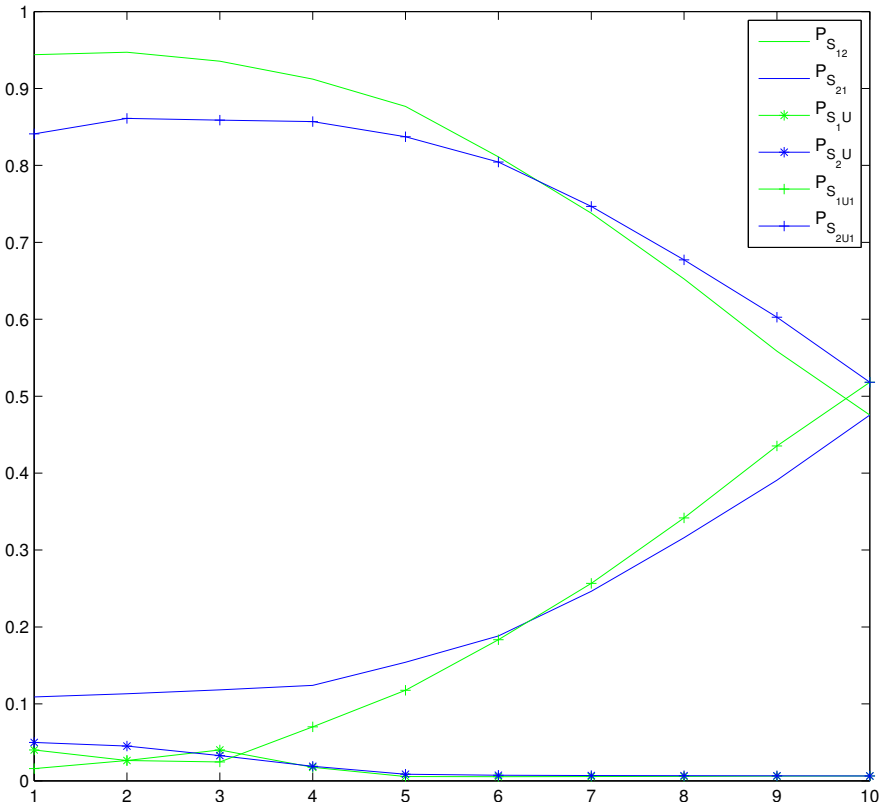


Şekil 18: Üç kullanıcılı üste-serim sistem modeli.

cının bilgilerini de çözmektedirler. Bu sebeple ikincil kullanıcılardaki girişim değeri ortadan kalkmaktadır.

Şekil 19'da ise üste-serim modeli için her bir ikincil kullanıcının, $\mu_1 = 1$' 1 ve $\mu_2 \in \{0, 1\}$'nin ise 0 dan 1'e kadar farklı değerler aldığı eniyileme döngüsü sonunda elde edilen güç dağılım vektörlerinin ortalama değerleri sunulmaktadır. Bu değerler μ_1'in 1 ve μ_2'nin ise 0 dan 1'e kadar 0.1 artımlarla gittiği bir senaryoda gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonucundan da anlaşıldığı gibi eniyileme sırasında μ_2'nin 1'e doğru gittiği sırada (bu durum ikincil kullanıcılar için toplam veri hızının enbüyütmesi anlamına gelir), ikincil kullanıcılardan S_1, diğer ikincil kullanıcı olan S_2'nin veri hızını artırmaya yönelik olarak kendine ait mesajları yollamak için kullandığı $P_{S_{12}}$ değerini azaltıp toplam veri hızını artırmak için diğer ikincil kullanıcıya yardım etmek amacıyla $P_{U_{S_1}}$ değerini artırmaktadır. Benzer şekilde ikincil kullanıcı S_2 ise bunun tam tersi bir şekilde hareket edip ikincil kullanıcı toplam veri hızını arttırmaya çalışmaktadır.

Sonuç olarak, görülmüştür ki, işbirlikli çoklu erişimde kullanıcı sayısı arttıkça, potansiyel işbirliği kazancı da arttığından, sistemdeki toplam kaynaklar sabit olmak kaydıyla toplam veri hızları artabilmektedir. Ayrıca, bilişsel modellerde, birden fazla ikincil kullanıcının var olması,



Şekil 19: Üç kullanıcılı üste-serim sistem modeli.

işbirliğinde kullanılabilecek yaklaşımları çeşitlendirdiğinden, tek ikincil kullanıcılı işbirlikli modele göre çok daha fazla kazanç getirebilmektedir. Buradan, bir birincil kullanıcı ile aynı ağda bulunan ve aynı kaynakları paylaşan bilişsel kullanıcıların birlikte hareket etmesinin gerekliliği sonucunu çıkarabiliriz.

3 Tek Hücreli Çok Kullanıcılı İşbirlikçi Bilişsel Çoklu Erişim Kanalı

Projenin bu bölümünde tek bir hücre içinde düzgün dağılımlı olarak yer alan K adet birincil ve K adet ikincil kullanıcının işbirlikçi senaryo çerçevesinde güç dağılımları ve ortak seçimleri ele alınmıştır. Bu çalışmada, Kaya ve Isleyen (2012) yayınındaki işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalı güç dağılımı stratejisi her kanal durumunda geçerli olacak şekilde genişletilmiş ve bu güç dağılımları üzerinden toplam $2K$ adet kullanıcının en iyi ortak seçimi problemi çözülmüştür. Farklı kullanıcı çiftlerinin iletişimleri, OFDMA sistemi sayesinde diktir, ve birbirlerini etkilememektedir. Bu özelliğin yardımı ile, bilgi kuramı altyapısı kullanılarak her birincil ve ikincil kullanıcı çiftinin alta-serim ve bu bölümde önerilen üste-serim teknikleri ile ulaşılabilir veri hızları, kullanıcıların yer ve güç dağılımlarına bağlı bir fonksiyon olacak şekilde teorik olarak elde edilmiştir. Sonrasında, güç dağılımı ve ortak seçimi problemi iki amaca göre ayrı ayrı çözülmiştür: Veri hızı eniyileme ve ikincil kullanıcı veri hızı eniyileme. Sistemdeki tüm olası kullanıcı çiftlerinin güç dağılımları hesaplandıktan sonra, bulunan ulaşılabilir veri hızlarının bir ayrık çizge üzerindeki ağırlıklar şekline getirilmesi ile ortak seçimi probleminde çizge kuramsal metotlarla çözüme ulaşılmıştır. Ulaşılan sonuçlar, benzetimler ile analiz edilmiştir.

3.1 Sistem Modeli

Sistem, Rayleigh sönümlenmeli işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalında bulunan K tane birincil ve K tane ikincil kullanıcıdan oluşmaktadır. Sistemdeki kullanıcılar, birbirinden ayrık K adet bir birincil ve bir ikincil kullanıcıdan oluşan çift olacak şekilde bölünebilmektedir. Sistemde toplam K adet alt kanal bulunmaktadır ve her bir kullanıcı çiftine OFDMA sistemi kullanılarak bir adet alt kanal tahsisi yapılmıştır. Bu durumda, birbirine paralel K tane işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalı Kaya ve Isleyen (2012) oluşmaktadır. Birincil ve ikincil kullanıcılar, yarıçapı d olan bir daire içine rastgele yerleştirilmişlerdir. Tüm kullanıcıların yerleri ve kanallarına ait istatistiksel durum bilgilerinin alıcıda bilindiği varsayılmaktadır. Kullanıcı çiftlerinin kanal durumuna bağlı güç dağılımı statejisini kullanması sebebiyle, alıcı bu bilgileri en iyi ortak seçimi yapmak için kullanır. Sistemde ortak seçimi alıcı tarafından bir kez yapılır, ve tüm iletişim boyunca eşlenen çiftlerin kullandığı alt kanallar sabit kalmakta-

dır. Kullanıcı çiftleri bir defa alıcı tarafından belirlendikten sonra, herhangi bir çiftin sadece kendileri arasındaki ve kendilerinden alıcıya olan kanal durum bilgilerini bilmesi yeterli olmaktadır. Benzer şekilde, alıcının, sadece işbirliği içindeki kullanıcı çiftlerinin anlık kanal durum bilgilerini bilmesi yeterlidir, işbirliği içinde olmayan birincil ve ikincil kullanıcıların kanal durum bilgilerine ihtiyaç duyulmamaktadır.

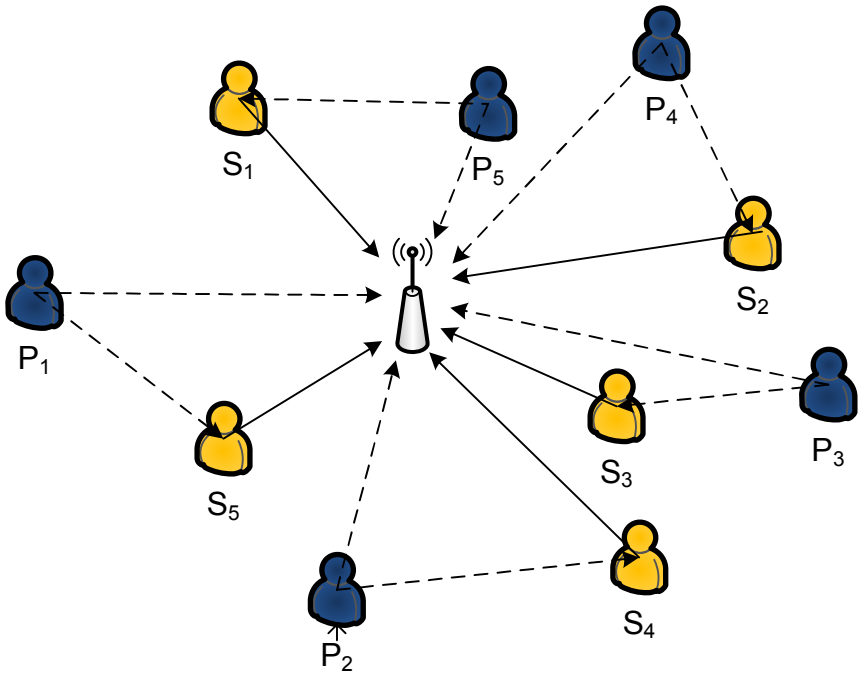
Bu bölüm boyunca, p_i, i sıra numaralı birincil kullanıcıyı, s_j, j sıra numaralı ikincil kullanıcıyı $i, j \in \{1, \ldots, K\}$ olacak şekilde belirtmektedir. $K = 5$ olacak şekilde, olası bir ortak seçimi stratejisi uygulanan örnek bir sistem Şekil 20'de görülmektedir. Ortak çiftleri seçilip sabitlendikten sonra, alıcıya ulaşan sinyal $Y_{r_{ij}}$ ve ikincil kullanıcıya ulaşan sinyaller Y_{s_j} ile gösterilecek şekilde, $\{p_i, s_j\}$ çifti için şöyle yazılabilmektedir:

$$Y_{r_{ij}} = \sqrt{q_{p_i r} d_{p_i r}^{-\beta}} X_{p_i} + \sqrt{q_{s_j r} d_{s_j r}^{-\beta}} X_{s_j} + N_r, \tag{162}$$

$$Y_{s_j} = \sqrt{q_{p_i s_j} d_{p_i s_j}^{-\beta}} X_{p_i} + N_{s_j}. \tag{163}$$

Eşitlikler (162)-(163)'te, X_{p_i} ve X_{s_j} sırasıyla birincil ve ikincil kullanıcıların kod sözcüklerini; $q_{p_i r}$, $q_{s_j r}$ ve $q_{p_i s_j}$ ise sırasıyla p_i'den alıcıya, s_j'den alıcıya ve p_i'den s_j'ye olan düz sönümlenen kanal güç kazançlarını temsil etmektedir. N_r ve N_{s_j} sırasıyla alıcıda ve ikincil kullanıcıdaki sıfır ortalamalı beyaz Gauss gürültüsünü belirtmektedir. Sistemin genel tutarlılığına etki etmeyecek şekilde, kanal güç kazançlarının içine yerleştirilebileceğinden, gürültü varyansları 1 olarak alınmıştır. Denklemlerdeki $d_{p_i r}$, $d_{s_j r}$, ve $d_{p_i s_j}$ değişkenleri, sırasıyla p_i'den alıcıya, s_j'den alıcıya olan, ve p_i ile s_j arasındaki uzaklığı belirtmektedir. β değişkeni ise uzaklığa bağlı sönümlenme katsayısını ifade etmektedir. İfadenin kolaylığı açısından, bu raporda bundan sonra uzaklığa bağlı güç kaybı katsayısını ve kanal durum bilgisini birleştirerek $h_{p_i r} = q_{p_i r} d_{p_i r}^{-\beta}$, $h_{s_j r} = q_{s_j r} d_{s_j r}^{-\beta}$ ve $h_{p_i s_j} = q_{p_i s_j} d_{p_i s_j}^{-\beta}$ değişkenlerini kullanacağız.

İkincil kullanıcıların, kendilerine ulaşan Y_{s_j}, $\{j = 1, \ldots, K\}$, sinyalini kullanıp kullanmamasına bağlı olarak iki farklı model kullanılabilir: üste-serim (işbirlikçi senaryo) ve alta-serim. Sıradaki bölümde, ortak seçimi yapıldıktan ve sabitlendikten sonra her iki model için de sinyal kodlama ve çözme stratejileri, ve bu stratejiler sonucunda elde edilebilecek veri hızları yer almaktadır. Sonrasında da en iyi ortak seçimi problemi teorik olarak ifade edilecektir.



Şekil 20: Çok kullanıcılı işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalı.

3.2 Bilişsel Stratejiler ve Ulaşılabilir Veri Hızları

3.2.1 Üste-serim Modeli

Bu işbirlikçi model, Kaya ve Isleyen (2012) yayınında önerilen modelin rastgele yerleştirilen kullanıcılar ve K adet paralel işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalına genellenmesinden oluşmaktadır. Öncelikle ortak seçiminin yapıldığını ve bu seçimin sabit kaldığını varsayalım. Mesaj oluşturulma prosedürü, Kaya ve Isleyen (2012) yayınındaki prosedürü takip etmektedir: herhangi bir kullanıcı çifti $\{p_i, s_j\}$ için, birincil kullanıcı p_i'nin mesajı $W_{p_i} = (W_{p_i r}, W_{p_i s_j})$ şeklinde iki alt mesaja bölünmektedir. $W_{p_i r}$ alt mesajı alıcıya çözülmesi için direkt olarak gönderilirken, $W_{p_i s_j}$ alt mesajı ise hem alıcı tarafından hem de ikincil kullanıcı s_j tarafından alınıp çözülebilmektedir. İkincil kullanıcı s_j'nin mesajı W_{s_j} bölünmeyip, tek parça halinde bırakılmıştır. Bu mesajlar, Gauss dağılımından rastgele oluşturulmuş kod sözcüklerine atanmıştır, ve yollandıkları kanalların sönümlenme katsayılarına bağlı güç değerleri ile çarpıldıktan sonra toplanarak elde edilen sinyaller şöyle ifade edilebilmektedir:

$$\begin{aligned} X_{p_i} = &\sqrt{P_{p_i r}(\mathbf{h})} X_{p_i r}(W_{p_i r}(b), W_{p_i s_j}(b-1)) \\ &+ \sqrt{P_{p_i s_j}(\mathbf{h})} X_{p_i s_j}(W_{p_i s_j}(b), W_{p_i s_j}(b-1)) \\ &+ \sqrt{P_{p_i c}(\mathbf{h})} C(W_{p_i s_j}(b-1)), \end{aligned} \tag{164}$$

$$X_{s_j} = \sqrt{P_{s_jr}(\mathbf{h})} X_{s_jr}(W_{s_j}(b), W_{p_is_j}(b-1)) + \sqrt{P_{s_jc}(\mathbf{h})} C(W_{p_is_j}(b-1)). \quad (165)$$

Kod sözcükleri X_{s_jr}, X_{p_ir}, X_{p_is} ve C'nin görevleri, Kaya ve Isleyen (2012) ve Sendonaris vd. (2003)'deki ile tamamen paralellik göstermektedir. Her bir kod sözcüğüne gerekli güç miktarı, kanal durum bilgisi vektörü $\mathbf{h} = [h_{p_ir}, h_{p_is_j}, h_{s_jr}]$ ışığında hesaplanarak atanır ve aşağıda belirtilen genel kısıtlara uymak zorundadır.

$$P_{p_i}(\mathbf{h}) = P_{p_ir}(\mathbf{h}) + P_{p_is_j}(\mathbf{h}) + P_{p_ic}(\mathbf{h}) \quad (166)$$

$$P_{s_j}(\mathbf{h}) = P_{s_jr}(\mathbf{h}) + P_{s_jc}(\mathbf{h}) \quad (167)$$

$$E\Big[P_n(\mathbf{h})\Big] \leq \bar{P}_n \text{ where } n \in \{p_i, s_j\}. \quad (168)$$

Bu çalışmada kullanılan üste-serim metodunun, Kaya ve Isleyen (2012)'den en büyük farkı, kanal durum bilgilerinin kullanım şeklinde yatmaktadır. Kaya ve Isleyen (2012)'de, kanal durumlarının her zaman $h_{p_is_j} > h_{p_ir}$ koşulunu sağlayacak şekilde olduğu varsayılmış, ve iki kullanıcılı işbirlikçi çoklu erişim kanalları için Kaya ve Ulukus (2007)'de bulunan en iyi güç dağılımı stratejisi kullanılarak, $P_{p_ir}(\mathbf{h})$ her zaman sıfır olacak şekilde sabitlenmiştir. Bu varsayım ulaşılabilir veri hızı alanının hesabını kolaylaştırmış olup, güçlerde içbükey kalmasını sağlasa da, pratikte kullanılan farklı konumlara sahip çok kullanıcın bulunduğu sistemlerde geçerliliğini yitirmektedir. Her birincil kullanıcı potansiyel olarak bir ikincil kullanıcı ile eşleceği için, bazı kullanıcıların konumları ve kanal sönümlenme istatistiklerine göre alıcıya olan direkt bağlantısının, kullanıcılar arası bağlantısından daha kuvvetli olabileceği gözlemlenmektedir. Bu duruma bağlı olarak, kanal durumlarına göre problemi $\phi_1 \triangleq \{\mathbf{h} \ : \ h_{p_is_j} \geq h_{p_ir}\}$ ve $\phi_2 \triangleq \{\mathbf{h} \ : \ h_{p_is_j} < h_{p_ir}\}$ tanımları ile iki parçaya ayırarak çözebiliriz. Bu durumda, Kaya ve Ulukus (2007) yayındaki bilgiler ışığında, aşağıdaki sonuca ulaşabiliriz.

$$P_{p_ir}(\mathbf{h}) = 0, \qquad \text{if } \mathbf{h} \in \phi_1 \quad (169)$$

$$P_{p_is_j}(\mathbf{h}) = 0, \qquad \text{if } \mathbf{h} \in \phi_2 \quad (170)$$

Sonuç olarak, birincil kullanıcı p_i ve ikincil kullanıcı s_j'nin veri hızlarını sırası ile R_{p_i} ve R_{s_j} olarak tanımlarsak, geriye dönük çözümleme tekniği her iki ϕ_1 ve ϕ_2 durumunda da

uygulanarak aşağıdaki veri hızı alanlarının ulaşılabilir olduğu bulunabilmektedir.

$$R_{p_i} \leq E\Big\{ \log(1+h_{p_ir}P_{p_ir}(\mathbf{h}))|\phi_2 \Big\} Pr[\phi_2] + E\Big\{ \log(1+h_{p_is_j}P_{p_is_j}(\mathbf{h}))|\phi_1 \Big\} Pr[\phi_1] \quad (171)$$

$$R_{s_j} < E\Big\{ \log\Big[1+h_{s_jr}P_{s_jr}(\mathbf{h})\Big] \Big\} \quad (172)$$

$$\begin{aligned} R_{p_i}+R_{s_j} \leq \min \Bigg\{ & E\Big\{ \log(A) \Big\}, \\ & E\Big\{ \log\Big[1+h_{p_ir}P_{p_ir}(\mathbf{h})+h_{s_jr}P_{s_jr}(\mathbf{h})\Big]|\phi_2 \Big\} Pr[\phi_2] \\ & + E\Big\{ \log\Big[1+h_{p_is_j}P_{p_is_j}(\mathbf{h})\Big]|\phi_1 \Big\} Pr[\phi_1] \\ & + E\Big\{ \log\Big[1+h_{s_jr}P_{s_jr}(\mathbf{h})\Big]|\phi_1 \Big\} Pr[\phi_1] \Bigg\} \end{aligned} \quad (173)$$

Bu eşitsizliklerde yazım kolaylığı açısından $A = 1+h_{p_ir}P_{p_i}(\mathbf{h})+h_{s_jr}P_{s_j}(\mathbf{h})+2\sqrt{h_{p_ir}h_{s_jr}P_{p_ic}P_{s_jc}}$ olarak tanımlanmıştır. Bu kısıtlarda dikkat edilmesi gereken önemli nokta, birincil kullanıcının erişebileceği veri hızının, Goldsmith ve Varaiya (1997)'de bulunan, tek kullanıcılı sistemde veri hızını en iyileyen güç dağılımı kullanıldığında elde edeceği veri hızından daha düşük olamayacağının garanti altına alınmasıdır. Bu kısıdı matematiksel olarak ifade etmek istersek,

$$R_{p_i} \geq E\Big\{ \log\Big[1 + P^{\star}_{p_i}(\mathbf{h})h_{p_ir}\Big] \Big\} \triangleq B^* \quad (174)$$

olarak sağlanmalıdır. Burada $P^{\star}_{p_i}(\mathbf{h})$ değişkeni $E[P^{\star}_{p_i}(\mathbf{h})] = \bar{P}_{p_i}$ kısıtını sağlayacak şekilde tek kullanıcılı sistemde veri hızını en iyileyen su doldurma (waterfilling) tekniği ile elde edilmiş güç seviyesini, B^* değişkeni ise bu seviyenin sonucunda elde edilen veri hızını ifade etmektedir.

3.2.2 Alta-serim Modeli

Alta-serim modelinde, birincil ve ikincil kullanıcıların eşleşmesi yapıldıktan sonra, ikincil kullanıcı, iki kullanıcılı çoklu erişim kanalındaki kapasite alanının köşesinde çalışacak şekilde gücünü kullanır. Bu modele alıcı tarafından bakarsak, ikincil kullanıcı s_j'nin yolladığı sinyal, alıcıda birincil kullanıcının sinyali ilk önce gürültü olarak değerlendirek çözülür, birincil kullanıcının sinyali ise daha sonra karışımsız olarak çözülür. Bu sırada birincil kullanıcı p_i,

sinyalini, kendi veri hızını en iyileyecek güç kontrol stratejisi ile yollar. OFDMA'in sağladığı kullanıcı çiftlerinin kanallarının birbirine dik olması sayesinde, her kullanıcı çifti $\{p_i, s_j\}$ için ulaşılabilir veri hızları aşağıda verilmiştir.

$$R_{p_i} = E\left[\log\left(1 + h_{p_i r} P^*_{p_i}(\mathbf{h})\right)\right] \tag{175}$$

$$R_{s_j} = E\left[\log\left(1 + \frac{h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})}{1 + h_{p_i r} P^*_{p_i}(\mathbf{h})}\right)\right] \tag{176}$$

Burada $P^*_{p_i}(\mathbf{h})$, daha önce olduğu gibi kendi hızını en iyileyen tek kullanıcıya ait güç kontrolü seviyesini ifade etmektedir. Bu modelde, birincil kullanıcın ulaşabileceği en düşük veri hızı kısıtı otomatik olarak sağlanmaktadır.

Bir sonraki bölümde, birleşik güç kontrolü stratejisi ve ortak seçimi problemini, hem üste-serim hem alta-serim modelleri için çözeceğiz. Üste-serim tekniği için iki farklı amaç kullanacağız: toplam veri hızı en iyileme ve ikincil kullanıcı veri hızı en iyileme. Toplam veri hızı en iyileme, birincil kullanıcıların işbirliği senaryosuna katılması için bir teşvik oluştururken, ikincil kullanıcı veri hızı en iyilemede ise, birincil kullanıcın veri hızının düşmeyeceği garantisi yine verilmektedir. Alta-serim modelinde işbirliği olmasa da, karışımın düzenlenmesi açısından ortak seçimi problemi yine de önem teşkil etmektedir.

3.3 Birleşik En iyi Ortak Seçimi ve Güç Dağıtımı

Bu bölüme kadar, birincil ve ikincil kullanıclardan oluşan seçilmiş kullanıcı çiftlerinin ulaşılabilir veri hızları, konuma bağlı sönümlenme de dahil olarak kanal durumlarının birer fonksiyonu olarak modellenmiştir. Oysa ki, kullanıcı çiftlerinin ulaşabilecekleri veri hızları, tüm sistemde kullanılan ortak seçim algoritmasına bağlıdır. Sistemde, $K!$ sayıda ortak seçimi yapılabileceği kolaylıkla hesaplanabilir ve bu seçimin de kullanıcı çiftlerinin veri hızlarına göre yapılması gerektiğinden, problemin bağlaşık olduğu ortaya çıkmaktadır. Sistemdeki $K!$ adet ortak eşleme stratejisini Γ ile ifade edersek, her bir uygulanabilir eşleşmeyi Γ_l ($l \in \{1, \ldots, K!\}$) olarak ifade edebiliriz. Dolayısı ile birleşik ortak seçimi ve güç kontrolü problemi matematiksel olarak

$$\begin{aligned} \max_{\substack{\Gamma_l \in \Gamma, \\ \mathbf{P}(\mathbf{h})}} \quad & C_{\Gamma_l}(R_{p_1}, \ldots R_{p_K}, R_{s_1}, \ldots R_{s_K}) \\ s.t. \quad & \{R_{p_i}, R_{s_j}\} \in R_{feasible}, \quad \forall (i,j) \in \Gamma_l \end{aligned}$$

$$E[P_{p_i}] \leq \bar{P}_{p_i}, E[P_{s_j}] \leq \bar{P}_{s_j} \tag{177}$$

olarak ifade edilebilir. Burada kullanılan amaca göre, toplam veri hızını en iyilemek için

$$C_{\Gamma_l}(R_{p_1}, \ldots R_{p_K}, R_{s_1}, \ldots R_{s_K}) = \sum_{(i,j)\in\Gamma_l} R_{p_i} + R_{s_j}, \tag{178}$$

ikincil kullanıcı veri hızını en iyilemek için ise

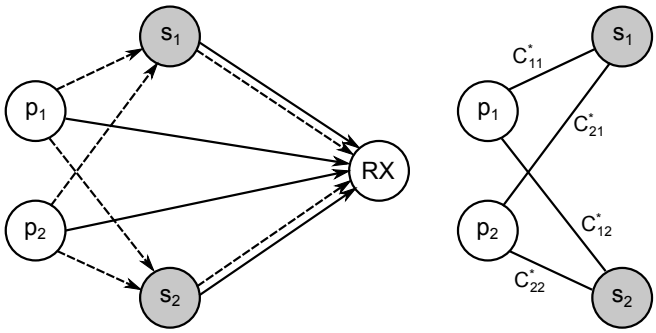
$$C_{\Gamma_l}(R_{p_1}, \ldots R_{p_K}, R_{s_1}, \ldots R_{s_K}) = \sum_{(i,j)\in\Gamma_l} R_{s_j}. \tag{179}$$

kullanılmaktadır.

Desteklenebilir veri hızları kümesi $R_{feasible}$, eşitsizlikler (171)-(174) ile üste-serim modeli için, eşitsizlikler (175)-(176) ile de alta-serim modeli için tanımlanabilir. $\mathbf{P}(\mathbf{h})$'yi sistemdeki tüm güç değişkenleri vektörü olarak tanımlayalım. (177) ile tanımlanan problemin çözümüne ulaşmak için en önemli gözlem, problemin iki parçaya bölünebileceğidir: içte güç optimizasyonu problemi ve dışta ortak eşleme problemi. Daha açıkça ifade edersek,

$$\begin{aligned} &\max_{\Gamma_l\in\Gamma}, \sum_{(i,j)\in\Gamma_l} \max_{\mathbf{P}_i(\mathbf{h}),\mathbf{P}_j(\mathbf{h})} \quad C_{i,j}(R_{p_i}, R_{s_j}) \\ &s.t. \quad \{R_{p_i}, R_{s_j}\} \in R_{feasible}, \quad \forall (i,j) \in \Gamma_l \\ &\qquad E[P_{p_i}] \leq \bar{P}_{p_i}, E[P_{s_j}] \leq \bar{P}_{s_j} \end{aligned} \tag{180}$$

daha önce verilen problem tanımına denktir. Burada, toplam veri hızını en iyilemek için $C_{i,j}(R_{p_i}, R_{s_j}) \triangleq R_{p_i} + R_{s_j}$, ikincil kullanıcı veri hızını en iyilemek için $C_{i,j}(R_{p_i}, R_{s_j}) \triangleq R_{s_j}$ olacak şekilde ifade edilebilir. Denklemdeki $\mathbf{P}_i(\mathbf{h})$ ve $\mathbf{P}_j(\mathbf{h})$ ifadeleri, sırasıyla p_i ve s_j kullanıcılarının güç değişkenleri vektörünü ifade etmektedir. (180) ile ifade edilen problemin ayrıştırılabilmesinin temel sebebi, OFDMA sistemi sayesinde eşleşen kullanıcı çiftlerinin kanallarının diğer çiftlerin kanallarına dik olması, ve bunun sonucunda da güç en iyilemesinin diğer kullanıcı çiftlerinden bağımsız yapılabilmesidir. Bu ayrık çözümün kanıtı, bilişsel olmayan bir sistem için Baksi vd. (2012) yayınında yapılmıştır. İlerleyen bölümlerde, (180) probleminin düşük karmaşıklıklı çözümleri yapılacaktır.



(a) $K = 2$ birincil ve ikincil kullanıcılı örnek bir sistem.

(b) Şekil 21(a)'da görülen sistemin çizge eşdeğeri.

Şekil 21: Örnek işbirlikçi bilişsel sistem.

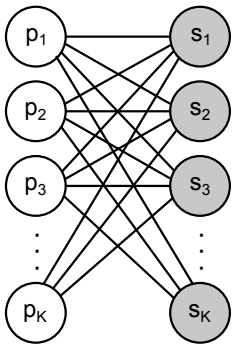
3.3.1 En İyi Ortak Seçimi

Tanımı (180) ile yapılan problemin içteki veri hızının enbüyüklenmesi kısmının tüm olası p_i ve s_j kullanıcı çiftleri için çözüldüğünü varsayalım. Bu durumda K^2 adet kullanıcı çifti olacaktır, dolayısı ile K^2 adet amaç fonksiyonu, yani $C^*_{i,j}$, $\forall i \in \{1,\ldots,K\},\ j \in \{1,\ldots,K\}$, hesaplaması yapılmalıdır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen amaç fonksiyonlarının, ayrık bir çizge oluşturacak şekilde tüm birincil ve ikincil kullanıcıların arasında kenar ağırlıkları olarak koyulması sayesinde, ortak seçim problemi, çizge kuramında en büyük ağırlıklı eşleştirme (maximum weighted matching, (MWM)) problemine dönüşmektedir. Bu problem, Edmonds'ın MWM algoritmasının verimli olarak gerçeklendiği Gabow (1976) yaklaşımı ile $(O(K^3))$'lük polinom zamanda çözülebilmektedir. Şekil 21'de, $K = 2$ birincil ve ikincil kullanıcılı örnek bir sistemin çizge eşdeğeri gösterilmiştir. Genel hali ile, herhangi sayıda kullanıcıya sahip bir sistemin ayrık çizge eşdeğeri Şekil 22 ile gösterilmiştir. Dolayısı ile, en iyi ortak seçimini **polinom zaman**da bulmak için tüm p_i ve s_j kullanıcıları için $C_{i,j}$ değerini en iyileyen güç stratejilerini bulmak yeterli olacaktır. Bir sonraki bölümde bu stratejinin çözümü yer almaktadır.

3.3.2 $C^*_{i,j}$ için Güç Optimizasyonu

Üste-serim Modeli:

Toplam veri hızı en iyileme ve ikincil kullanıcı ver hızı en iyileme problemlerinin çözümü,



Şekil 22: Herhangi bir işbirlikçi bilişsel sistemin çizge eşdeğeri.

$\alpha \in \{0,1\}$ parametresi yardımı ile aynı problem içinde ifade edilebilmektedir.

$$\sum_{\{i,j\}\in\Gamma_l} \max_{\mathbf{P}_i(\mathbf{h}),\mathbf{P}_j(\mathbf{h})} \alpha R_{p_i} + R_{s_j} \tag{181}$$

$$\text{s.t.} \quad R_{p_i} \leq E\Big\{\log(1+h_{p_ir}P_{p_ir}(\mathbf{h}))|\phi_2\Big\}Pr[\phi_2] + E\Big\{\log(1+h_{p_is_j}P_{p_is_j}(\mathbf{h}))|\phi_1\Big\}Pr[\phi_1] \tag{182}$$

$$R_s < E\Big\{\log\Big[1+h_{s_jr}P_{s_jr}(\mathbf{h})\Big]\Big\} \tag{183}$$

$$\begin{aligned} R_{p_i}+R_{s_j} \leq \min\Bigg\{ & E\Big\{\log(A)\Big\}, \\ & E\Big\{\log\Big[1+h_{p_ir}P_{p_ir}(\mathbf{h})+h_{s_jr}P_{s_jr}(\mathbf{h})\Big]|\phi_2\Big\}Pr[\phi_2] \\ & + E\Big\{\log\Big[1+h_{p_is_j}P_{p_is_j}(\mathbf{h})\Big]|\phi_1\Big\}Pr[\phi_1] \\ & + E\Big\{\log\Big[1+h_{s_jr}P_{s_jr}(\mathbf{h})\Big]|\phi_1\Big\}Pr[\phi_1]\Bigg\} \end{aligned} \tag{184}$$

$$R_{p_i} \geq B^\star \tag{185}$$

$$E\Big[P_{p_ir}(\mathbf{h}) + P_{p_is_j}(\mathbf{h}) + P_{pc}(\mathbf{h})\Big] \leq \bar{P}_{p_i} \tag{186}$$

$$E\Big[P_{s_jr}(\mathbf{h}) + P_{sc}(\mathbf{h})\Big] \leq \bar{P}_{s_j} \tag{187}$$

$$P_{p_is_j}(\mathbf{h}), P_{p_ic}(\mathbf{h}), P_{s_jr}(\mathbf{h}), P_{s_jc}(\mathbf{h}) \geq 0 \tag{188}$$

Bu problem tanımında dikkat edilmesi gereken husus, 181 denkleminde $\alpha = 1$ seçilerek toplam veri hızı en iyilenmesi, $\alpha = 0$ seçilerek ise toplam ikincil kullanıcı veri hızı en iyilenmesi problemlerinin ifade edilebileceğidir. Bu problemde veri hızı kısıtları oldukça karmaşık olmasına rağmen, çözüm Kaya ve Isleyen (2012) yayınındaki çözüme benzerlik göstermektedir. Önce (182)-(188) kısıtlarına birer Lagrange çarpanı atayarak, dışbükey eniyileme problemi-

mizi ifade edebiliriz:

$$
\begin{aligned}
\mathcal{L} = {} & \alpha R_{p_i} + R_{s_j} \\
& + \gamma_1 \Bigg\{ E\Big\{ \log(1+h_{p_i r} P_{p_i r}(\mathbf{h})) | \phi_2 \Big\} Pr[\phi_2] \\
& + E\Big\{ \log(1+h_{p_i s_j} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})) | \phi_1 \Big\} Pr[\phi_1] - R_{p_i} \Bigg\} \\
& + \gamma_2 \Bigg\{ E\Big\{ \log\Big(1 + h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})\Big) \Big\} - R_{s_j} \Bigg\} \\
& + \gamma_3 \Bigg\{ E\Big\{ \log(A) \Big\} - R_{p_i} - R_{s_j} \Bigg\} \\
& + \gamma_4 \Bigg\{ E\Big\{ \log\Big[1 + h_{p_i r} P_{p_i r}(\mathbf{h}) + h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})\Big] | \phi_2 \Big\} Pr[\phi_2] \\
& + E\Big\{ \log\Big[1+h_{p_i s_j} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})\Big] | \phi_1 \Big\} Pr[\phi_1] \\
& + E\Big\{ \log\Big[1+h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})\Big] | \phi_1 \Big\} Pr[\phi_1] - R_{p_i} - R_{s_j} \Bigg\} \\
& + \gamma_5 \Bigg\{ R_{p_i} - B^{\star} \Bigg\} \\
& + \lambda_1 \Bigg\{ P_{p_i} - E\Big[P_{p_i r}(\mathbf{h}) + P_{p_i s_j}(\mathbf{h}) + P_{p_i c}(\mathbf{h}) \Big] \Bigg\} \\
& + \lambda_2 \Bigg\{ P_{s_j} - E\Big[P_{s_j r}(\mathbf{h}) + P_{s_j c}(\mathbf{h}) \Big] \Bigg\} \\
& + \mu_1 P_{p_i r}(\mathbf{h}) + \mu_2 P_{p_i s_j}(\mathbf{h}) + \mu_3 P_{p_i c}(\mathbf{h}) \\
& + \mu_4 P_{s_j r}(\mathbf{h}) + \mu_5 P_{s_j c}(\mathbf{h}). \qquad (189)
\end{aligned}
$$

Birincil ve ikincil kullanıcıların güç değişkenlerine ve veri hızı değişkenlerine göre kısmi türev alıp tamamlayıcı gevşeklik kısıtlarını her iki durum için de eklersek, aşağıdaki KKT koşullarının en iyilik açısından gerekli ve yeterli olduğunu söyleyebiliriz. ϕ_1 için,

$$\lambda_1 \geq (\gamma_1 + \gamma_4) \frac{h_{p_i s_j}}{1 + h_{p_i s_j} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})} + \gamma_3 \frac{h_{p_i r}}{A} \qquad (190)$$

$$\lambda_2 \geq (\gamma_2 + \gamma_4) \frac{h_{s_j r}}{1 + h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})} + \gamma_3 \frac{h_{s_j r}}{A}; \qquad (191)$$

ϕ_2 için,

$$\lambda_1 \geq (\gamma_1+\gamma_4)\frac{h_{p_ir}}{1+h_{p_ir}P_{p_ir}(\mathbf{h})} + \gamma_3\frac{h_{p_ir}}{1+h_{p_ir}P_{p_ir}+h_{s_jr}P_{s_jr}} \tag{192}$$

$$\lambda_2 \geq (\gamma_2+\gamma_4)\frac{h_{s_jr}}{1+h_{s_jr}P_{s_jr}(\mathbf{h})} + \gamma_3\frac{h_{s_jr}}{1+h_{p_ir}P_{p_ir}+h_{s_jr}P_{s_jr}} \tag{193}$$

ve $\phi_1 \cup \phi_2$ için,

$$\lambda_1 \geq \gamma_3\frac{h_{p_ir}\sqrt{P_{p_ic}(\mathbf{h})}+\sqrt{h_{p_ir}h_{s_jr}P_{s_jc}(\mathbf{h})}}{A\sqrt{P_{p_ic}(\mathbf{h})}} \tag{194}$$

$$\lambda_2 \geq \gamma_3\frac{h_{s_jr}\sqrt{P_{s_jc}(\mathbf{h})}+\sqrt{h_{p_ir}h_{s_jr}P_{p_ic}(\mathbf{h})}}{A\sqrt{P_{s_jc}(\mathbf{h})}} \tag{195}$$

$$1 = \gamma_2+\gamma_3+\gamma_4 \tag{196}$$

$$\alpha+\gamma_5 = \gamma_1+\gamma_3+\gamma_4 \tag{197}$$

sağlanmalıdır. Güç değişkenleri $P_{p_ir}(\mathbf{h})$, $P_{p_is_j}(\mathbf{h})$,$P_{s_jr}(\mathbf{h})$,$P_{p_ic}(\mathbf{h})$,$P_{s_jc}(\mathbf{h})$ sıfırdan büyük olduğu durumda, kısıtlar (190)- (195) eşitlikle sağlanmaktadır.

İlk önce toplam veri hızı en iyilemesi problemine odaklanırsak, burada $\alpha = 1$ olacak şekilde parametremizi seçmemiz gerekmektedir. (196) ve (197) eşitliklerinden $1+\gamma_5 = \gamma_2+\gamma_3+\gamma_4$ ve $1 = \gamma_1+\gamma_3+\gamma_4$ bağıntıları bulunur. Çözümde ilerlemek için gerekli husus, problem çözümünü ikiye bölmektir: $\gamma_5 = 0$ olduğunda, (185) koşulu zaten sağlanmakta olduğundan pasif hale geçer. Bunun sonucunda problem Kaya ve Ulukus (2007)'deki bilişsel olmayan sistem problemine dönüşür. (190)-(195) denklemlerinden hareketle yapılan uzun çıkarımlar ve $\gamma_3 = 1-(\gamma_2+\gamma_4) = 1-(\gamma_1+\gamma_4)$, $\gamma_1 = \gamma_2$ bağıntıları yardımıyla aşağıdaki sonuç elde edilmiştir. ϕ_1 için,

$$P_{p_is_j}(\mathbf{h}) = \left((\gamma_1+\gamma_4)\frac{(\lambda_2 h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr})}{\lambda_1^2 h_{s_jr}} - \frac{1}{h_{p_is_j}}\right)^+, \tag{198}$$

$$P_{s_jr}(\mathbf{h}) = \left((\gamma_2+\gamma_4)\frac{(\lambda_2 h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr})}{\lambda_2^2 h_{s_jr}} - \frac{1}{h_{s_jr}}\right)^+, \tag{199}$$

$$P_{p_ic}(\mathbf{h}) = \frac{\gamma_3 \frac{\left(h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr}/\lambda_2\right)}{\lambda_1} - D_1}{(h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr}/\lambda_2)^2} h_{p_ir}, \tag{200}$$

$$P_{s_jc}(\mathbf{h}) = \frac{\gamma_3 \frac{\left(h_{s_jr}+\lambda_2 h_{p_ir}/\lambda_1\right)}{\lambda_2} - D_1}{(h_{s_jr}+\lambda_2 h_{p_ir}/\lambda_1)^2} h_{s_jr}, \tag{201}$$

$$\tag{202}$$

ϕ_2 için,

$$P_{p_ir}(\mathbf{h}) = \left((\gamma_1+\gamma_4) \frac{(\lambda_2 h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr})}{\lambda_1^2 h_{s_jr}} - \frac{1}{h_{p_is_j}} \right)^+, \tag{203}$$

$$P_{s_jr}(\mathbf{h}) = \left((\gamma_2+\gamma_4) \frac{(\lambda_2 h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr})}{\lambda_2^2 h_{s_jr}} - \frac{1}{h_{s_jr}} \right)^+, \tag{204}$$

$$P_{p_ic}(\mathbf{h}) = \frac{\gamma_3 \frac{\left(h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr}/\lambda_2\right)}{\lambda_1} - D_2}{(h_{p_ir}+\lambda_1 h_{s_jr}/\lambda_2)^2} h_{p_ir}, \tag{205}$$

$$P_{s_jc}(\mathbf{h}) = \frac{\gamma_3 \frac{\left(h_{s_jr}+\lambda_2 h_{p_ir}/\lambda_1\right)}{\lambda_2} - D_2}{(h_{s_jr}+\lambda_2 h_{p_ir}/\lambda_1)^2} h_{s_jr}. \tag{206}$$

Denklemlerin kolay anlaşılabilmesi açısından $D_1 = 1 + s_{p_ir} P_{p_is_j}(\mathbf{h}) + s_{s_jr} P_{sr}(\mathbf{h})$ ve $D_2 = 1 + s_{p_ir} P_{p_ir}(\mathbf{h}) + s_{s_jr} P_{sr}(\mathbf{h})$ kısaltmaları yapılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta olarak eşitlikler (200), (205) ve (201), (206) aracılığı ile hesaplanan $P_{p_ic}(\mathbf{h})$ ve $P_{s_jc}(\mathbf{h})$ değerlerinin sıfırdan büyük olması gerekliliğidir. Eğer çözüm sonucunda sıfır ya da daha küçük bir değer alırlarsa, sadece bir tane işbirlikçi sinyal olması tamamen verimsiz olacağından, her iki güç de sıfır kabul edilip çözüm yeniden yapılmalıdır. Bu durumda, ϕ_1 için, $P_{p_is_j}(\mathbf{h})$ ve $P_{s_jr}(\mathbf{h})$ değerlerini bulmak amacı ile (190) and (191) denklemleri yeniden çözülmelidir. Çözüm, aşağıda verilen ikinci dereceden denklemin pozitif kökleri olarak bulunur:

$$a_i P_{ij}(\mathbf{h})^2 + b_i P_{ij}(\mathbf{h}) + c_i = 0, \quad \{i,j\} \in \{\{p,s\},\{s,r\}\} \tag{207}$$

Denklemin katsayıları aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned}(a_{p_i}; b_{p_i}; c_{p_i}) = (&\lambda_1 h_{p_ir} h_{p_is_j}; \lambda_1 (h_{p_ir} + h_{p_is_j} \\ &+ h_{p_is_j} h_{s_jr} P_{s_jr}(\mathbf{h}) - h_{p_ir} h_{p_is_j}); \\ &\lambda_1 (1 + h_{s_jr} P_{s_jr}(\mathbf{h})) - (\gamma_2+\gamma_4)\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&(h_{p_i s_j} + h_{p_i s_j} h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h}) - h_{p_i r}) - h_{p_i r}) \\
(a_{s_j}; b_{s_j}; c_{s_j}) &= (\lambda_2 h_{s_j r}^2; \lambda_2 (2 h_{s_j r} + h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})) \\
&\quad - h_{s_j r}^2; \lambda_2 (1 + h_{p_i r} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})) - (\gamma_2 + \gamma_4) \\
&\quad (h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})) - h_{s_j r})
\end{aligned}
$$

ϕ_2 için ise yeniden çözümü yapılacak değişkenler $P_{p_i r}(\mathbf{h})$ ve $P_{s_j r}(\mathbf{h})$ olup (192) and (193) denklemleri yeniden çözülmelidir. Yine önceki duruma benzer bir şekilde, aşağıda katsayıları belirtilen (207) ikinci dereceden denkleminin pozitif kökleri çözümü vermektedir.

$$
\begin{aligned}
(a_{p_i}; b_{p_i}; c_{p_i}) &= (\lambda_1 h_{p_i r}^2; \lambda_1 (2 h_{p_i r} + h_{p_i r} h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h}) \\
&\quad - h_{p_i r}^2); \lambda_1 (1 + h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})) \\
&\quad - (\gamma_2 + \gamma_4) h_{p_i r} h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h}) - h_{p_i r}) \\
(a_{s_j}; b_{s_j}; c_{s_j}) &= (\lambda_2 h_{s_j r}^2; \lambda_2 (2 h_{s_j r} + h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i r}(\mathbf{h})) \\
&\quad - h_{s_j r}^2; \lambda_2 (1 + h_{p_i r} P_{p_i r}(\mathbf{h})) - (\gamma_2 + \gamma_4) \\
&\quad (h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i r}(\mathbf{h})) - h_{s_j r})
\end{aligned}
$$

Burada dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta, $\gamma_3 = 1 - (\gamma_2 + \gamma_4) = 1 - (\gamma_1 + \gamma_4)$ ve $\gamma_1 = \gamma_2$ eşitlikleri dolayısı ile, sadece bir tane Lagrange çarpanı aramanın, en iyi çözüme ulaşmak için yeterli olacağıdır. $\gamma_5 > 0$ koşulunun sağlandığı, veya diğer bir deyişle (185) kısıtının eşitlikle sağlandığı ikinci olası duruma dönersek, birincil kullanıcı veri hızının, alabileceği en düşük değere sabitlenmiş olduğu anlaşılır. Bu koşulda, artık birincil kullanıcı veri hızı değiştirilemeyeceğinden, sadece ikincil kullanıcı veri hızı artırılmaya çalışılabilir, bu durum da aslında ikincil kullanıcılar için toplam veri hızı en iyileme problemine dönüşür. Dolayısı ile, ikincil kullanıcı toplam veri hızı en iyileme probleminin çözümü ile, sistem toplam veri hızı en iyileme probleminin çözümü $\gamma_5 > 0$ durumunda aynıdır. Bunun için $\alpha = 0$ parametresi sabitlenmeli ve γ_5 parametresi değiştirilerek (185) kısıtı eşitlikle sağlanmalıdır. Bu değişiklikler sonucunda KKT koşulları ve sonucunda bulunan güç terimleri, bir önceki toplam veri hızı en iyileme problemindeki çözüme benzerlik göstermektedir. Ancak artık $\gamma_1 = \gamma_2$ eşitliği geçerli olmamakta, dolayısı ile çözüm için iki Lagrange çarpanı aranmak zorundadır. Eşitlikler (196) ve (197) sonucunda $\gamma_1 + \gamma_4$ ve $\gamma_2 + \gamma_4$ Lagrange çarpanları kullanımı gerektiği görülmüştür. Burada asıl aradığımız terimler Lagrange çarpanlarının bağımsız değerleri de-

ğil, onların toplamı olduğundan, toplam iki farklı değer aramamız yeterlidir. Önceki gibi, işbirlikçi güç değerleri negatif olursa, bu değerler sıfıra sabitlenip ikincil kullanıcının veri hızını en iyileyecek şekilde ϕ_1 için $P_{p_i s_j}(\mathbf{h})$, $P_{s_j r}(\mathbf{h})$ ve ϕ_2 için $P_{p_i r}(\mathbf{h})$, $P_{s_j r}(\mathbf{h})$ değerleri yeniden çözülmelidir. Bu işlemler sonucunda aşağıdaki ikinci dereceden denklemin pozitif kökleri sonucu vermektedir.

$$a_i P_{ir}(\mathbf{h})^2 + b_i P_{ir}(\mathbf{h}) + c_i = 0, \quad i \in \{p, s\} \tag{208}$$

Denkelmin katsayıları ϕ_1 için,

$$\begin{aligned}
(a_{p_i}; b_{p_i}; c_{p_i}) = (&\lambda_1 h_{p_i r} h_{p_i s_j}; \lambda_1 (h_{p_i r} + h_{p_i s_j} \\
&+ h_{p_i s_j} h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})) - (\gamma_1 - \gamma_2 + 1) h_{p_i r} h_{p_i s_j}; \\
&\lambda_1 (1 + h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})) - \gamma_1 (h_{p_i s_j} \\
&+ h_{p_i s_j} h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})) - (1 - \gamma_2 - \gamma_4) h_{p_i r}) \\
(a_{s_j}; b_{s_j}; c_{s_j}) = (&\lambda_2 h_{s_j r}^2; \lambda_2 (2 h_{s_j r} + h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})) \\
&- h_{s_j r}^2; \lambda_2 (1 + h_{p_i r} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})) \\
&- (\gamma_2 + \gamma_4)(h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i s_j}(\mathbf{h})) - h_{s_j r})
\end{aligned}$$

ϕ_2 için,

$$\begin{aligned}
(a_{p_i}; b_{p_i}; c_{p_i}) = (&\lambda_1 h_{p_i r}^2; \lambda_1 (2 h_{p_i r} + h_{p_i r} h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})) \\
&- (\gamma_1 - \gamma_2 + 1) h_{p_i r}^2; \lambda_1 (1 + h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})) \\
&- (\gamma_1 + \gamma_4)(h_{p_i r} + h_{p_i r} h_{s_j r} P_{s_j r}(\mathbf{h})) \\
&- (1 - \gamma_2 - \gamma_4) h_{p_i r}) \\
(a_{s_j}; b_{s_j}; c_{s_j}) = (&\lambda_2 h_{s_j r}^2; \lambda_2 (2 h_{s_j r} + h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i r}(\mathbf{h})) \\
&- h_{s_j r}^2; \lambda_2 (1 + h_{p_i r} P_{p_i r}(\mathbf{h})) \\
&- (\gamma_2 + \gamma_4)(h_{p_i r} h_{s_j r} P_{p_i r}(\mathbf{h})) - h_{s_j r})
\end{aligned}$$

şeklinde bulunmuştur.

Alta-serim Modeli:

Alta-serim modelinde, birincil kullanıcı, tek kullanıcılı kanallarda su doldurma yöntemini

kullanarak güç dağılımını belirler. İkincil kullanıcı, bu güç dağılımı stratejisine bağlı olarak kendi güç dağılımı politikasını oluşturur. Dolayısı ile, ikincil kullanıcının veri hızını belirlerken sadece bir tane Lagrange çarpanı λ_{s_j} kullanmak yeterlidir. (180) denklemini (175)-(176) için çözerek, ikincil kullanıcının güç fonskiyonunu elde edilmiştir.

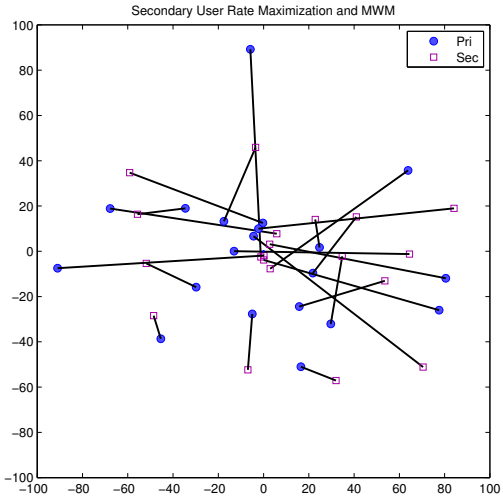
$$P_{s_j}(\mathbf{h}) = \Big(\frac{1}{\lambda_{s_j}} - \frac{1 + h_{p_i r} P^*_{p_i}(\mathbf{h})}{h_{s_j r}}\Big)^+ \tag{209}$$

Sonuç olarak, hem alta-serim hem de üste-serim modellerinde, en iyi güç dağılımı sonuçları $C^*_{i,j}$ hesabı için kullanılabilmektedir. Bu bölümde anlatılan dışbükey problem çözümü, numerik yöntemlerle kullanıcılar üzerinden döngüsel olarak gerçekleştirilebilmektedir. Sıradaki bölümde, bu çözümlerin döngüsel yöntemlerle enzetim çalışmaları yapılmıştır, ve sonuçları incelenmiştir.

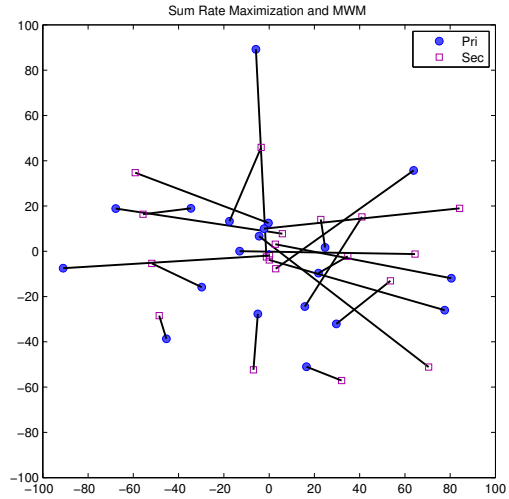
3.4 Benzetim Sonuçları

Benzetim çalışmamızda, $K = 20$ adet birincil ve ikincil kullanıcı, yarıçapı $d = 100m$ olan ve merkezinde alıcı bulunan bir daire üzerine düzgün dağılımlı olarak rastgele yerleştirilmişlerdir. Mesafeye bağlı yol kaybı parametresi $\beta = 2$, gürültü varyansı $\sigma^2 = 1$ seçilmiştir. Hem toplam veri hızı en iyileme, hem de toplam ikincil kullanıcı veri hızı en iyileme problemleri, yukarıda açıklanan en iyi güç dağılımı ve ortak seçim algoritmaları ile çözülmüştür. Karşılaştırma amacı ile aynı sistemde alta-serim metodu uygulanan ardından MWM algoritması kullanılan sonuçlar da elde edilmiştir.

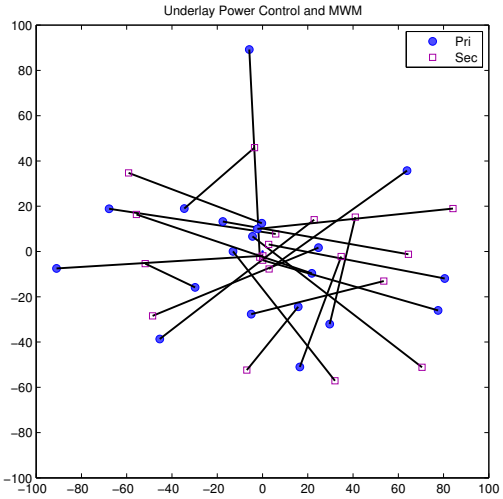
Şekilde 23'te, $K = 20$ olmak üzere, farklı güç dağılım metodları ve MWM algoritması sonucunda oluşan kullanıcı eşleşmeleri görülmektedir. Ortak seçimi, K parametresine bağlı olarak polinomik olarak ölçeklendiğinden, daha büyük K değerleri için benzetim sonuçları alınması da mümkündür. Burada seçilen değer, görsel olarak kolaylık sağlaması açısından belirlenmiştir. Beklenildiği gibi, toplam veri hızı en iyileme amacı ile güç dağılımı yapılıp, eşleşmeler yapıldıktan sonra, sistemde toplam veri hızı en yüksek seviyeye çıkmıştır. İkincil kullanıcı veri hızı toplamı en iyilenmesi amacı ile yapılan güç dağılımı ve sonrasında MWM algoritması ile oluşturulan eşleşmeler sonrasında, yine beklenildiği gibi, sistemin toplam veri hızında düşüş olsa da, ikincil kullanıcıların toplam veri hızının arttığı gözlemlenmektedir. Alta-serim metodu ile MWM uygulamasından çıkan sonuca göre, ikincil kullanıcı veri hızları toplamı, üsteserim metodundan düşük olsa bile, kabul edilebilir bir düzeydedir. Benzetim



(a) İkincil Kullanıcı veri hızı en iyileme amacı ile üste-serim metodu ve MWM: $\sum R_s = 25.92$, $\sum R_p + R_s = 42.82$.



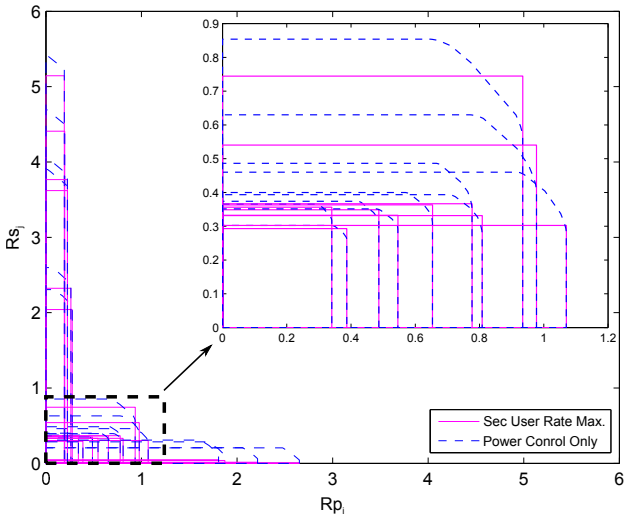
(b) Toplam veri hızı en iyileme amacı ile üste-serim metodu ve MWM: $\sum R_s = 24.66$, $\sum R_p + R_s = 43.52$.



(c) İkincil kullanıcı veri hızı en iyileyen alta-serim metodu ve MWM: $\sum R_s = 25.55$, $\sum R_p + R_s = 42.46$.

Şekil 23: Örnek bir benzetim çalışması sonucu eşleşmeler.

çalışmalarında genel olarak dikkat edilmesi gereken noktalardan birisi de, birbirine yakın olup alıcıya mesafeli olan birincil ve ikincil kullanıcılar işbirliğinden fazlaca kazanç elde ederken, alıcıya yakın olan kullanıcılar için işbirliğiden gelen kazanç çok düşük olmaktadır ve bunun sonucunda, bu kullanıcıların eş seçimi rastgele yapılabilmektedir. Bu gözlem, Şekil 23(a) ve 23(b)'den yapılabilmektedir, ve Şekil 23(a)'nın veri hızı alanları grafiği olan Şekil 24 sayesinde daha derinlemesine incelenebilmektedir. Şekil 24'te, eksenlere yakın olan veri hızı alanları, ya birincil ya da ikincil kullanıcının kanalının eşine kıyasla çok daha iyi olduğu durumları göstermektedir. Ortada kalan ve yakınlaştırılmış görüntüye sahip veri hızı alanları ise, ikincil



Şekil 24: Sadece güç kontrolüne bağlı kapasite alanları ve işbirlikçi bilişsel sistemde ikincil kullanıcıların veri hızı alanları.

kullanıcının, birincil kullanıcı ile işbirliği sayesinde veri hızını arttırdığı çiftlerin veri hızları alanlarına tekabül etmektedir.

3.5 Sonuç

Çalışmanın bu kısmında, işbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalları için güç en iyileme ve ortak seçimi problemlerinin birleşik çözümü yapılmıştır. Güç en iyileme probleminde, sistemin toplam veri hızını en iyilemek amacı ve ikincil kullanıcıların toplam veri hızlarını en iyilemek amaçları ayrı ayrı incelenerek, üste-serim modeli önerilmiştir. Güç kontolünden sonra da çizge kuramından faydalanılarak (MWM) ortak seçimi problemi çözülmüştür. Benzetim çalışmaları sayesinde, özellikle alıcıya olan kanalları yakşalık benzer kalitede olan çiftler için işbirliğinin oldukça karlı olduğu gözlemlenmiştir ve her durumda da, alta-serim modelinden daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

4 Çok Kullanıcı Çok Alıcılı İşbirlikli Çoklu Erişim Kanalı

Projede ele alınan bu son modelde, tek hücreli işbirlikçi kablosuz ağlarda ortak seçimi sonuçları ışığında, çok hücreli kablosuz ağlarda ortak seçimi algoritması bulunması amaçlanmıştır. Tek hücreli senaryoda bulunan sonuçlar, alıcıya yakın bir kullanıcının, alıcıya uzak olan bir kullanıcı ile eşleşmesinin, sistemin toplam veri hızının eniyilenmesi için en iyi strateji olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu sonuç, sistem toplam veri hızını en iyilemek açısından başarılı olsa da, ortak olan iki kullanıcının iletişim kanallarının çoğunlukla alıcıya yakın olan kullanıcı tarafından kullanımına olanak sağlayarak, uzaktaki kullanıcı açısından bir avantaj sağlamaktan uzak olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, iki kullanıcının aralarındaki mesafe dolayısı ile de işbirliğinden elde edilecek potansiyel kazanç oldukça düşük olmaktadır. Ortak bulunmasının daha adil ve işbirliği kazancını artıracak şekilde yapılması için, biribirlerine yakın kullanıcıların birbiri ile eş olmasının sağlanması gerektiği ortadadır. Yakın kullanıcıların birbiri ile eş olması, özellikle uzakta olan kullanıcıların işbirliğinden kazanacağı veri hızını oldukça artıracak ve de iletişim kanallarının daha adil kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

İşbirlikçi senaryoda veri artışının kaynaklarından birisi uygun ortak seçimi olduğundan, olabilecek ortak seçeneklerini artıran bir FFR modeli, işbirliğinden kazanılan toplam kazancı da artırır. Dolayısı ile, ortak seçeneğini artıran bir sistem ihtiyacı kendini göstermektedir. Aynı zamanda, seçilecek ortaklar, çok hücreli yapı nedeniyle çevre hücrelerdeki kullanıcıların konumlarına da bağlı olacağından, frekans tekrarının planlanması da işbirlikçi ortak seçimi ile birlikte yapılmalıdır. Biribirine yakın kullanıcıları eşleştirmenin bir yolu hücre kenarı ve merkezindeki kullanıcıları kısmi frekans tekrarına benzer bir frekans tahsisi ile ayırmak olsa da, literatürde çokça rastlanan kısmi frekans tekrarı (FFR) modelleri, işbirlikçi senaryoya yeterince uygun olmayıp, yeni bir FFR tekniği ihtiyacı bu projede karşılanmıştır.

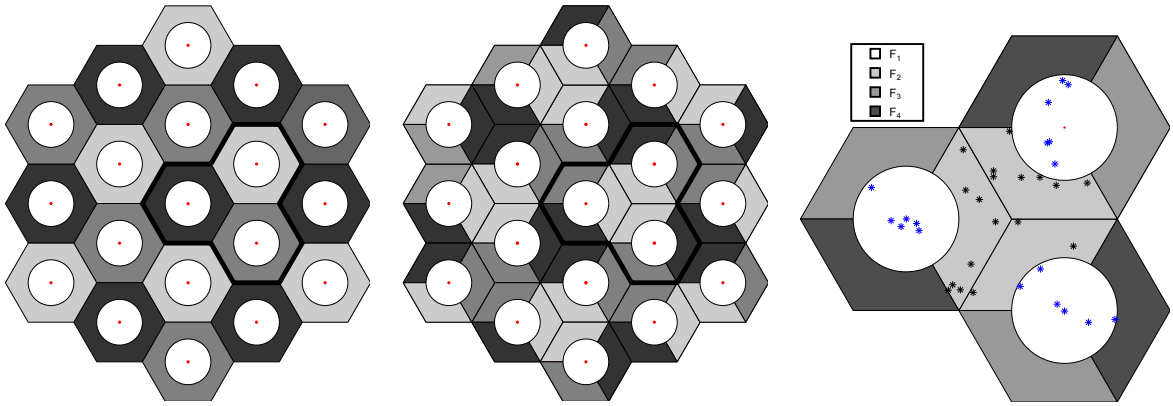
4.1 FFR Sistem Modeli

Kullanıcıların alıcıya göre yakın olanlar ve uzak olanlar şeklinde ayrılması, çok hücreli bir sistem olarak düşünüldüğünde, yeni yaklaşımların uygulanmasına olanak sağlamaktadır. İçinde bulundukları hücrelerindeki alıcılarına uzakta olan kullanıcılar, komşu hücrelerdeki bazı alıcılara da yaklaşık aynı derecede uzak olacağından, bu kullanıcıların kanal durumlarına göre diğer hücrelerdeki alıcılarla da iletişime geçmeleri verim artışı sağlayabilecektir. Bunun so-

nucunda, uzak kullanıcılar için birden fazla uygun alıcı olmakta, ve bu seçenekler arasından kanal durumu en iyi olan alıcıyı kullanarak veri hızını iyileştirmek mümkün olabilmektedir. Bu durumun ayrı bir sonucu olarak, uzak kullanıcıların ortak seçiminde de hücre sınırlaması olmadan diğer hücrelerden de kullanıcı eşleşmesi yapmaları mümkün olabilmektedir.

Hücre içinde yakın ve uzak kullanıcıların ve buna göre frekans bantlarının ayrıldığı bir sistem olarak Kısmi Frekans Tekrarı (Fractional Frequency Reuse, FFR), literatürde son yıllarda gittikçe artan bir popülerliğe sahiptir. FFR üzerine çokça araştırma yapılmış olunup, sıkça kullanılan bir FFR tekniği olarak "Strict FFR" göze çarpmaktadır. Bu teknikte, kullanıcılar her hücre içinde yakındakiler ve uzaktakiler olmak üzere iki gruba ayrılırlar, ve sistemdeki tüm hücreler içerideki kullanıcıların kullanımı için aynı frekans bandını kullanıma sunarlar. Uzaktaki kullanıcılar için ise geleneksel hücre frekans planlaması kullanılır. Bu projede kullanılan "Complementary FFR", yani zıt kısmi frekans tekrarı tekniği, "Strict FFR" tekniğinin daha geliştirilmiş ve işbirlikçi kanallardan daha fazla yarar sağlanmasına olanak sağlayan bir şekli olarak görülebilir. Bu yenilikçi sistemde, "Strict FFR"dan farklı olarak, uzak kullanıcıların kullandığı frekans bandı da 3 farklı sektöre bölünerek, bu sektörlerin herbirisine ayrı bir frekans bandı atanır. Komşu hücreler de bu parçalara bitişik olan her bir parçaya aynı frekans bantlarını atayarak, uzaktaki kullanıcıların farklı hücrelerde olsalar bile aynı frekans bandında yer alarak işbirliği yapmaları olanağını sağlarlar. Alıcılar, baktıkları sektörden gelen sinyalere odaklandıklarından, diğer yönlerdeki aynı frekans bandından gelen sinyallerden etkilenmezler ve bu yenilikçi tekniğin girişimi azaltan diğer bir avatajıdır. Bu iş paketinde, bu FFR tekniği kullanılarak, kullanıcıların birbirleri işbirliği yapacak ortak seçimlerini yapan algoritmalar araştırılmıştır. Örnek bir zıt kısmi frekans tekrarı modeli, klasik kısmi frekans tekrarı ile kıyaslanarak Şekil 25'te gösterilmiştir.

Tüm çalışma boyunca, işbirliği modeli, Bakım ve Kaya (2013) modeliyle aynı olacak şekilde kurgulanmıştır. Sistemdeki tüm hücrelere toplam $12N$ tane kullanıcı koyulmuş (dolayısı ile her hücreye $4N$ kullanıcı düşmektedir), ve her bir kullanıcı çiftine de M adet kanal tahsis edilmiştir. Bazı kanalların tüm hücrelerde tekrar kullanılması sebebi ile, toplamda $4(NM/2)$ adet kanal kullanılmıştır. Kanal atamaları bir kere yapılmış, ve tüm sistem boyunca sabit tutulmuştur. Sistemde, iç hücrelerin yarıçapları $r_{in} = r/2$, hücrelerin yarıçaplarının yarısı olacak şekilde alınmıştır. Rapor boyunca içerideki hücrede kalan kullanıcılara iç kullanıcılar, hücrenin kenarlarına yakın olup iç hücrede yer almayan kullanıcılara dış kullanıcılar denilmektedir. Kullanıcıların dağılımları, bulundukları hücre parçalarının yüzey alanına orantılı



(a) Strict FFR Scheme. (b) Complementary FFR Scheme. (c) Complementary FFR: cluster of interest.

Şekil 25: Önerilen zıt kısmi frekans tekrarı ile klasik kısmi frekans tekrarının kıyaslaması.

olarak yapıldığından, iç hücreye N, dış hücre parçalarına toplam $3N$ kullanıcı düşmektedir. Örnek bir kullanıcı dağılımı Şekil 25(c)'de görülebilmektedir. Bir $b \in \{1, 2, 3\}$ hücresinde yer alan iç hücre içindeki iç kullanıcılar $U_{in,b}$ olarak gösterilmektedir ve bu kullanıcılar kendi aralarında işbirliği yapmaktadırlar. Diğer bir deyişle, iç kullanıcılar ile dış kullanıcılar U_{out} arasında bir işbirliği ve dolayısı ile bir eşleşme mümkün değildir. Tüm kullanıcı çiftlerine $\{i, j\} \in U_{in,b} \times U_{in,b}$ birbirinden ayrı kanallar $S_{ij} \subset F_1$ atanmıştır ve eşleşmedeki her iki kullanıcı aynı anda bu kanala erişim hakkına sahiptir. Dış kullanıcılar U_{out}, kendi aralarında işbirliği yapabilmektedirler. Tüm dış kullanıcı çiftlerine $U_{out} \times U_{out}$, ayrı kanallar $S_{ij} \in F_2$ atanmıştır. Dolayısı ile, F_1 için $nN/2$ adet, F_2 için $3nN/2$ adet kanal kullanılmaktadır. İç veya dış kullanıcılar olmasından bağımsız olarak, sistemdeki kullanıcılar i, j ve alıcı b için, alınan sinyaller eşitlik (210)-(212)'de görülmektedir. N ve I, sırası ile gürültü ve girişim değerlerdir.

$$Y_i = \sqrt{h_{ji}^{(s)} d_{ij}^{-\beta}} X_j^{(s)} + N_i^{(s)} + I_i^{(s)}, \tag{210}$$

$$Y_j = \sqrt{h_{ij}^{(s)} d_{ij}^{-\beta}} X_i^{(s)} + N_j^{(s)} + I_j^{(s)}, \tag{211}$$

$$Y_b = \sqrt{h_{ib}^{(s)} d_{ib}^{-\beta}} X_i^{(s)} + \sqrt{h_{jb}^{(s)} d_{jb}^{-\beta}} X_j^{(s)} + N_b^{(s)} + I_b^{(s)}. \tag{212}$$

Her kullanıcının yolladığı sinyaller, eşitlikler

$$X_i^{(s)} = \sqrt{p_{ib}^{(s)}(\mathbf{h})} X_{ib}^{(s)} + \sqrt{p_{ij}^{(s)}(\mathbf{h})} X_{ij}^{(s)} + \sqrt{p_{U_i}^{(s)}(\mathbf{h})} U^{(s)}, \tag{213}$$

$$X_j^{(s)} = \sqrt{p_{jb}^{(s)}(\mathbf{h})} X_{jb}^{(s)} + \sqrt{p_{ji}^{(s)}(\mathbf{h})} X_{ji}^{(s)} + \sqrt{p_{U_j}^{(s)}(\mathbf{h})} U^{(s)}. \tag{214}$$

ile elde edilir. Görüldüğü gibi bu kod sözcükleri üçer parçaya bölünmüştür ve yollanan sinyallerin toplam gücü sınırlı olmak koşuluyla, her bir parçanın gücü diğer parçalardan bağımsız olarak değişebilmektedir. $X_i^{(s)}$ ve $X_j^{(s)}$ kullanıcılar i ve j'nin yolladığı kod sözcükleri; $h_{ij}^{(s)}$, $h_{ji}^{(s)}$, $h_{ib}^{(s)}$ ve $h_{jb}^{(s)}$ birbirinden bağımsız, aynı dağılım çzellikleri gösteren ait üstel güç sönümlenme katsayılarıdır. d_{ij}, d_{ib} değişkenleri sırasıyla kullanıcı i'den kullanıcı j'ye ve kullanıcı i'den alıcı b'ye olan uzaklığı temsil etmektedir ve β değişkeni de uzaklığa bağlı yol kaybı katsayısıdır.

Sistemde çiftlere ait kanal durum bilgileri $\mathbf{h} = \left\{h_{ij}^{(s)}, h_{ji}^{(s)}, h_{ib}^{(s)}, h_{jb}^{(s)},\ \forall s \in S_{ij}\right\}$, sadece alıcıda ve her çiftin kendisinde bulunmakdadır ve çift eşleşmesi bu bilgilere göre alıcı tarafından yapılmaktadır. Hücreler arası girişim terimleri I_i, I_j and I_b bir sonraki bölümde detaylı olarak incelenecektir.

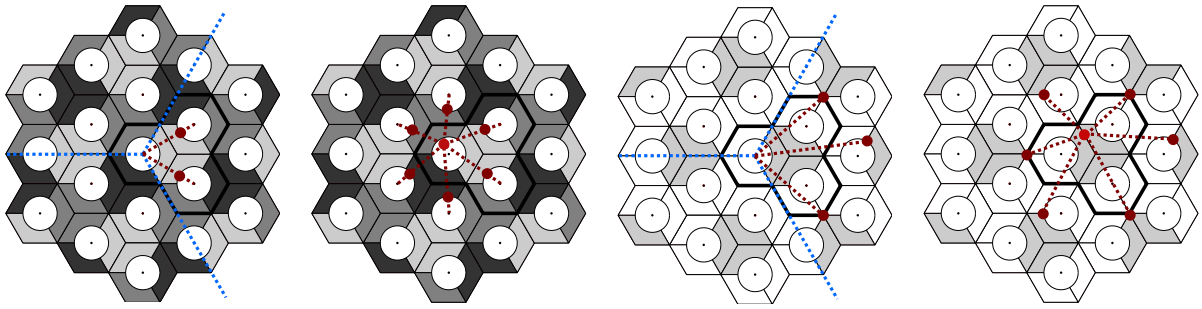
4.2 Kodlama, Çözme ve Ulaşılabilir Veri Hızları

Kullanıcılar i ve j'nin eş olarak seçilmiş olduğunu ve b alıcısı kontrolündeki S_{ij} kanallarına erişim haklarına sahip olduklarını düşünelim. Bakım ve Kaya (2013)'teki işbirliği ve güç dağılımı modeline uygun olarak, i, j kullanıcıları için gerekli veri hızları kısıtları eşitsizlik (215)'te görülmektedir. Bu modelde, kullanıcılar geriye dönük blok Markov kodlama metodu kullanmaktadır. Yollanan mesaj, direkt alıcıya yollanan kısım, ortak yollanan kısım ve işbirliği için oluşturulan kısım olarak sırasıyla $X_{ib}^{(s)}$, $X_{ij}^{(s)}$ ve $U^{(s)}$ şeklinde (213)'teki gibi gösterilir. Burada, kod sözcüklerine atanan güç değerleri ortalaması aşağıdaki genel kısıtı sağlamak zorundadır.

$$\sum_{s\in S_{ij}} E\left[p_{ib}^{(s)}(\mathbf{h}) + p_{ij}^{(s)}(\mathbf{h}) + p_{U_i}^{(s)}(\mathbf{h})\right] \triangleq \sum_{s\in S_{ij}} E\left[p_i^{(s)}(\mathbf{h})\right] \leq \bar{P}_i,$$

Her $\{i, j\}$ çifti ve alıcıları b için ulaşılabilir veri hızları, Bakım ve Kaya (2013) ve Baksi vd. (2012) yayınlarını izleyerek (215) eşitsizliği şeklinde bulunabilir.

$$\begin{aligned}(R_i + R_j)_b \leq \min\Bigg\{ &\sum_{s\in S_{ij}} E\left[\log\left(1 + \frac{h_{ib}^{(s)} d_{ib}^{-\beta} p_i^{(s)}(\mathbf{h}) + h_{jb}^{(s)} d_{jb}^{-\beta} p_j^{(s)}(\mathbf{h})}{{\sigma_b^{(s)}}^2 + I_b}\right.\right. \\ &\left.\left. + \frac{2\sqrt{h_{ib}^{(s)} d_{ib}^{-\beta} h_{jb}^{(s)} d_{jb}^{-\beta} p_{u_i}^{(s)}(\mathbf{h}) p_{u_j}^{(s)}(\mathbf{h})}}{{\sigma_b^{(s)}}^2 + I_b}\right)\right], \\ &\sum_{s\in S_{ij}} E\left[\log\left(1 + \frac{h_{ij}^{(s)} d_{ij}^{-\beta} p_{ij}^{(s)}(\mathbf{h})}{h_{ij}^{(s)} d_{ij}^{-\beta} p_{ib}^{(s)}(\mathbf{h}) + {\sigma_j^{(s)}}^2 + I_j}\right)\right.\end{aligned}$$



(a) Calculation of $I_{b,in}$ (b) Calculation of $I_{in,j}$ (c) Calculation of $I_{b,out}$ (d) Calculation of $I_{out,j}$

Şekil 26: İç ve dış kullanıcılar için karışıma sebep olan kaynakların konumları.

$$+\log\left(1+\frac{h_{ji}^{(s)}d_{ji}^{-\beta}p_{ji}^{(s)}(\mathbf{h})}{h_{ji}^{(s)}d_{ji}^{-\beta}p_{jb}^{(s)}(\mathbf{h})+{\sigma_i^{(s)}}^2+I_i}\right)\Bigg]$$
$$+\sum_{s\in S_{ij}}E\left[\log\left(1+\frac{h_{ib}^{(s)}d_{ib}^{-\beta}p_{ib}^{(s)}(\mathbf{h})+h_{jb}^{(s)}d_{jb}^{-\beta}p_{jb}^{(s)}(\mathbf{h})}{{\sigma_b^{(s)}}^2+I_b}\right)\right]\Bigg\} \tag{215}$$

Bu eşitsizlikte, hücreler arası girişim değerlerinin hesaplanması dikkatle yapılmalıdır. Kullanıcıların geometrileri dolayısı ile, girişim hesapları farklı şekillerde yapılır. İç ve dış kullanıcılar için karışıma sebep olan kaynakların konumları Şekil 26(a)-26(d)'de verilmiştir. Dış kullanıcılar için yalnızca karışıma sebep olan sözde-hücreler gösterilmiştir. Hücre sektörleri, mavi kesikli çizgilerle gösterilmiş olup, alıcılardaki karışımı azaltmak için yararlıdır, ancak kullanıcılardaki karışım tüm birinci katman komşu hücrelerdeki kullanıcı sinyallerinden etkilenir. Sistemin doğası gereği, dört farklı girişim modeli oluşmaktadır: iç kullanıcıdan alıcıya $I_{b,in}$, iç kullanıcıdan iç kullanıcıya $I_{in,j}$, dış kullanıcıdan alıcıya $I_{b,out}$ ve dış kullanıcıdan dış kullanıcıya $I_{out,j}$.

Geometrik olarak hesap yapıldığında, her bir girişim değeri şöyle bulunmaktadır.

$$I_{b,in} = 2\times\bar{P}/(r\sqrt{3}-r_{in})^{\beta} \tag{216}$$
$$I_{b,out} = 2\times\bar{P}/(r\sqrt{7})^{\beta}+\bar{P}/(r\sqrt{10})^{\beta} \tag{217}$$
$$I_{in,j} = \sum_{m=1}^{6}\bar{P}/d_{jm,in}^{\beta} \tag{218}$$
$$I_{out,j} = \sum_{m=1}^{6}\bar{P}/d_{jm,out}^{\beta} \tag{219}$$

Bu denklemde $d_{jm,in}$, iç kullanıcı için ilk seviye komşu hücrelerden girişime sebep olan m'inci kullanıcı (veya alıcı) ile olan uzaklığı göstermektedir. Benzer bir şekilde de $d_{jm,out}$, dış

kullanıcı için ilk seviye komşu hücrelerden girişime sebep olan m'inci kullanıcı (veya alıcı) ile olan uzaklığı göstermektedir. Sonuç olarak, (215) denkleminde, eğer $\{i,j\} \in U_{in,b} \times U_{in,b}$ ise, $\{I_b, I_i, I_j\} = \{I_{b,in}, I_{in,i}, I_{in,j}\}$; eğer $\{i,j\} \in U_{out} \times U_{out}$ ise, $\{I_b, I_i, I_j\} = \{I_{b,out}, I_{out,i}, I_{out,j}\}$ olmaktadır.

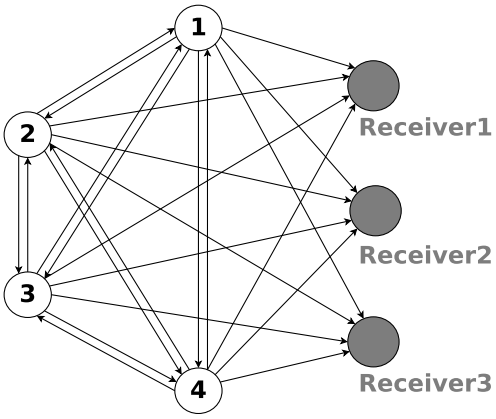
4.3 Birlikte Güç kontrolü ve İşbirlikçi Ortak Seçimi

Sistemin toplam veri hızı, kanalların birbirine dik olması sebebi ile iç ve dış kullanıcı çiftlerinin toplam veri hızlarının toplanması ile elde edilebilir. Dolayısı ile, iç ve dış kullanıcıların güç kontrolleri biribirlerinden bağımsız olarak en iyilenebilmektedir. İç kullanıcıların toplam veri hızı en iyilemesi için alıcı seçimi olmadığından problem, hücreler arası girişim eklenmiş birleşik güç kontrolu ve eş seçim problemine dönüşmektedir Baksi vd. (2012). Dolayısı ile burada dış kullanıcıların toplam veri hızı en iyilemesi problemine odaklanacağız. OFDMA sayesinde dik kanalların avantajını kullanarak, tüm sözde hücrelerdeki dış kullanıcıların problemleri ayrı ayrı çözülebilmektedir. Dolayısı ile, amaç, aşağıda belirtilen problemi çözmeye dönüşmektedir.

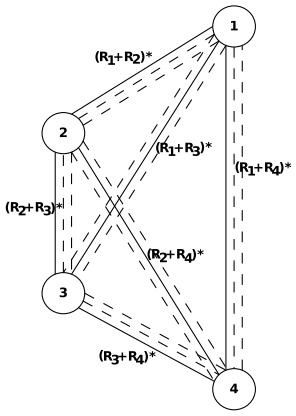
$$\begin{aligned} \max_{\substack{\Gamma_l \in \Gamma, \\ b_{ij} \in \{1,2,3\}, \\ \mathbf{p}(\mathbf{h})}} \quad & \sum_{\{i,j\} \in \Gamma_l} (R_i + R_j)_{b_{ij}} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{s \in S_{ij}} E\left[p_{ib_{ij}}^{(s)}(\mathbf{h}) + p_{ij}^{(s)}(\mathbf{h}) + p_{U_i}^{(s)}(\mathbf{h})\right] \leq \bar{P}_i, \\ & (R_i + R_j)_{b_{ij}} \text{ satisfies (215)}, \quad \forall \{i,j\} \in \Gamma_l, \end{aligned} \tag{220}$$

Bu denklemde Γ_l, bir sözde hücredeki dış kullanıcılar kümesi U_{out}'un iki kullanıcılı bir parçasını belirtmektedir. Γ ise, tüm ayrık parçaların birleşiminden oluşan kümeyi temsil etmektedir. b_{ij}, kullanıcılar $\{i,j\}$ tarafından seçilmiş alıcıyı, $\mathbf{p}(\mathbf{h})$ tüm kanal durumlarına ait güç değerlerinin vektörü olarak temsil edilmektedir.

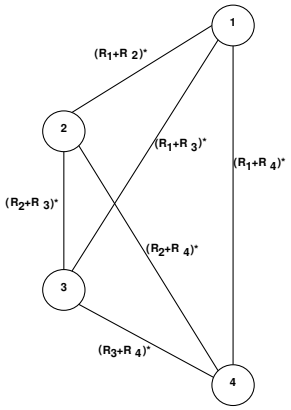
Birleşik en iyileme problemi çözümü, güç kontrolu ve ortak seçim problemlerinin çözümlerinin birbirinin sonuçlarına bağlı olaması sebebi ile oldukça zor olmaktadır. Tüm olasılıkları deneyen bir çözüm tabii ki işlevsel olmayacaktır. Burada çözümün püf noktası, Baksi vd. (2012) yayınında olduğu gibi, problemin çizge kuramında bilinen ağırlıklı eşleme problemine dönüştürülebildiğini fark edebilmektir. Eğer tüm olası kullanıcı çiftlerinin güç optimizasyonu birbirlerinden bağımsız olarak yapılırsa, bulunan veri hızları, çizge üzerinde ağırlık



(a) 3 Alıcılı Sistem Çizgesi



(b) 3 Alıcılı Ağırlıklı Çizge



(c) Yönsüz Denk Çizge

Şekil 27: Uzak kullanıcılar için çözüm basamakları.

olarak temsil edilebilmektedir. Örnek olarak, basit bir dört kullanıcılı sistem Şekil 27(a)'te görülebilmektedir. Hesaplamalardan sonra oluşan ağırlıklı çizge Şekil 27(b)'de gözlemlenebilmektedir. Ağırlıklı çizgede her çiftin seçebileceği üç farklı alıcı vardır. Ancak bu alıcılardan birisini seçip iletişimlerini sadece birisi ile yapmaktadırlar. Bu özellik şöyle açıklanabilir. Öncelikle kullanıcılar i ve j'nin birbiri ile eş olarak seçildiğini ve alıcı olarak da b alıcısını seçtiklerini varsayalım. Eğer sistemde herhangi bir başka $b' \neq b$ alıcısı $(R_i+R_j)_b < (R_i+R_j)_{b'}$ olacak şekilde varsa, b alıcısı bu çift için seçenekler arasından atılır ve b' alıcısı daha iyi bir veri hızı sağlar. Bu değişiklik diğer kullanıcılar için bir fark yaratmayacaktır. Bu durum, b'nin en iyi bir çözüm olmadığını gösterir, dolayısı ile en sonda seçilen alıcı en iyi olacaktır. En son bu işlemler tüm çiftler için tamamlanınca, sistem Şekil 27(c)'de görülen son halini almaktadır. Dolayısı ile, birleşik güç kontrolü ve ortak seçimi problemi iki aşamada çözülebilen bir duruma getirilmiştir.

$$\max_{\Gamma_l \in \Gamma,} \sum_{\{i,j\} \in \Gamma_l} \max_{k} \max_{\mathbf{p}_i(\mathbf{h}), \mathbf{p}_j(\mathbf{h})} (R_i + R_j)_k,$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{s\in S_{ij}} E\left[p_{ik}^{(s)}(\mathbf{h})+p_{ij}^{(s)}(\mathbf{h})+p_{U_i}^{(s)}(\mathbf{h})\right] \leq \bar{p}_i, \quad \forall\{i,j\}\in\Gamma_l$$

$$R_i + R_j \text{ satisfy (215)}, \quad \forall\{i,j\}\in\Gamma_l. \tag{221}$$

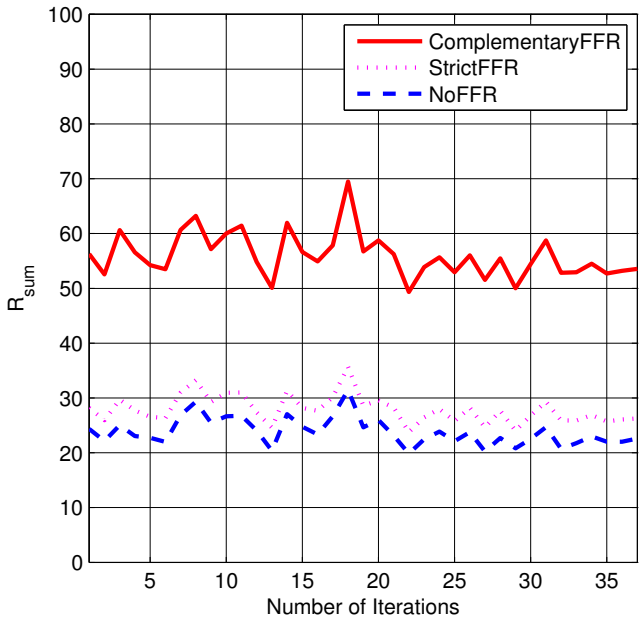
Güç kontrolü ve alıcı seçimi aşamalarından sonra, problem aşağıdakine dönüşür:

$$\max_{\Gamma_l\in\Gamma,} \quad \sum_{\{i,j\}\in\Gamma_l} (R_i + R_j)^*. \tag{222}$$

Problem artık iki aşamalı bir problem olarak incelenebilir. İlk aşamada, tüm olası kullanıcı çiftlerinin veri hızları hesaplanır ve ikinci aşamada oluşan çizge üzerinden ağırlıklı eşleme algoritması (MWM Gabow (1976)) ile ortak seçimi en iyi olarak yapılabilmektedir. Ortak seçiminde en etkili faktörlerden birisi de kullanıcıların konumları olduğundan, yukarıda sunulan en iyi çözümün sonuçlarını gözlemleyerek, daha basit ve sadece kullanıcıların yer bilgilerine göre eşleşme yapan bir deneyimsel bir algoritma üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Bu algoritmada iç kullanıcılar için, Baksi vd. (2012) yayınındaki buluşsal algoritmalardan Algoritma E kullanılmaktadır. Dış kullanıcılar için ise farklı bir yöntem izlenilmektedir. Bir sözde hücre içindeki tüm dış kullanıcılar, bir liste halinde tutulur, birbirine en yakın kullanıcılar eşleştirilerek listeden çıkarılır ve listede kullanıcı kalmayıncaya kadar bu yaklaşım tekrar edilir. Bu algoritmanın performansı bir sonraki bölümde incelenecektir.

4.4 Benzetim ve Sonuçlar

Benzetimde, 3 komşu hücre kullanımıştır ve kolaylık açısından, merkezlerdeki yakın kullanıcılar ile, her hücrenin sektörlerinden bir tanesindeki kullanıcılar ele alınmıştır. Kullanıcılar, bulundukları alana düzgün dağılımlı olarak rastgele yerleştirilmiştir. Kullanıcı sayıları her bir hücre için $4N = 24$ olarak, bulundukları sektörün alanına göre belirlenmiştir ve her bir sektör ile yakın kullanıcıların içinde bulundukları dairelere 6 tane kullanıcı gelecek şekilde belirlenmiştir. Hücrelerin yarıçapları $r = 2r_{in} = 100m$ seçilmiştir. Her kullanıcı çiftine iki adet kanal verilmiştir. Kısmi frekans tekrarı sistemi kullanıldığında üç hücredeki toplam kanal sayısı 60 olmaktadır. Kısmi frekans kullanımı uygulanmadığında ise, kanal sayısı itibari ile her hücrede sadece 20 kullanıcı desteklenebilmektedir, ve benzetimde her hücredeki en kötü durumdaki 4 kullanıcı bloke edilmektedir. Veri hızı en iyileme sadece merkezdeki sözde hücre içindeki dış kullanıcılar ve tüm iç kullanıcılar için yapılmış olup, iç kullanıcıların veri



Şekil 28: Benzetim sonuçları sistem toplam veri hızları.

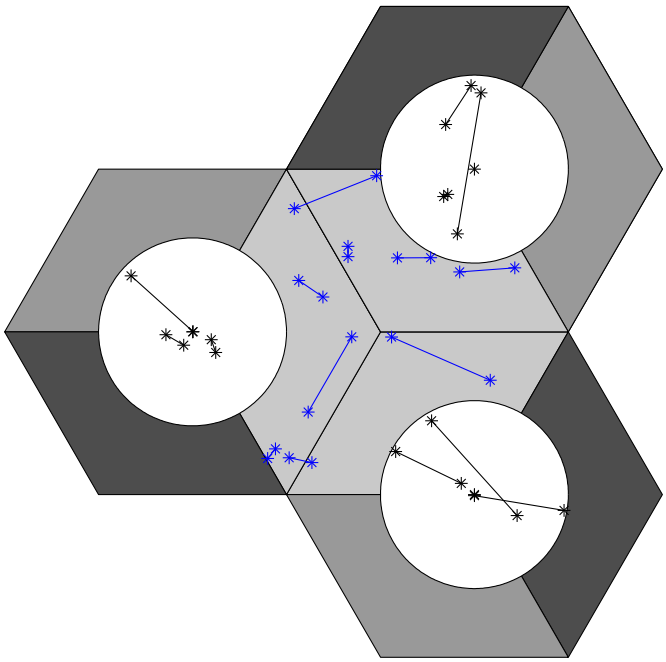
hızları tek hücreye göre ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

Benzetimde, dört farklı sistem karşılaştırılmıştır. Yenilikçi "zıt FFR", gelenekselleşmiş "Strict FFR", en geleneksel hücresel ağ tipi olarak FFR kullanmayan sistem modeli ve buluşsal kullanıcı konumuna bağlı algoritma. Şekil 28'de, farklı benzetimlerde alınan sonuçlar, dört farklı sistem için toplam veri hızları cinsinden karşılaştırılmaktadır. Önerilen "zıt FFR" sistemi her zaman en iyi olurken, deneyimsel konum tabanlı sistem oldukça yakın bir sonuç vermektedir. "Strict FFR" sistemi ve geleneksel sistemde alınan sonuçlar birbirlerine yakın olmakla beraber, önerilen sisteme göre çok düşük kalmışlardır.

User Pair	No FFR User Rates	Strict FFR User Rates	Comp. FFR Sum rate
12-16	1.20 - 1.14	1.20 - 1.14	4.92
6-17	0.99 - 1.21	0.99 - 1.21	4.29
2-5	0.98 - 0.84	0.98 - 0.84	4.24
3-10	0.75 - 0.78	0.75 - 0.78	3.88
4-14	0.71 - 0.75	0.71 - 0.75	3.76
8-11	1.01 - 1.10	1.01 - 1.10	3.44
1-9	0.69 - x	0.69 - 0.65	3.37
15-18	x - x	0.68 - 0.59	3.13
7-13	0.80 - x	0.80 - 0.68	3.07

Tablo 5: İşbirlikli ve işbirliksiz protokolleri için kullanıcı veri hızı kıyasları.

Şekil 29'da bir benzetim çalışmasından örnek bir eşleşme görülmekte ve Tablo 5'te, farklı



Şekil 29: Örnek benzetim sonucunda elde edilen ortak seçimi.

kullanıcı çiftlerinin veri hızları incelenebilmektedir. Görüldüğü üzere önerilen sistem işbirliğini artırmakta ve tek hücreli sisteme Baksi vd. (2012) kıyasla daha adil bir sistem oluşturmaktadır.

4.5 Sonuç

Bu bölümde yapılan çalışmalar, tek alıcılı senaryoda Baksi vd. (2012) elde edilen sonuçlar ışığında daha adil çok hücreli bir sistem araştırmasını kapsamaktadır. Çalışmada, literatürde işbrilikçi senayo ile kısmi frekans kullanımı fikirlerinin beraber kullanılması eksiği doldurulmuş ve yeni bir sistem öne sürülmüştür. Yapılan analitik çözümler ile en iyi sonuçlar yakalanarak, benzetim çalışmaları ile eski sistemlere kıyaslaması yapılmıştır.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Giriş ve literatür özeti bölümlerinde açıkça ifade edildiği gibi, işbirlikli iletişim ve bilişsel radyo, yeni nesil kablosuz haberleşme ağlarında kapasite ve iletişim kalitesinin artırımı için kilit tekniklerdir. Her iki teknik de, literatürde geçtiğimiz on yıl içerisinde ayrı ayrı çok yoğun yer bulmuş, mevcut olan kaynakların akıllı düğümlerce daha etkin kullanımı için pek çok yaratıcı yaklaşım literatürde sunulmuştur. Öte yandan bu iki teknik son derece benzer prensiplere dayanmasına rağmen, işbirliği ve bilişsel gönderimin bir arada ele alındığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Ayrıca, üste-serim yaklaşımını kullanan, nedensel veri edinme kısıtlarına uyan bilişsel radyo sistemlerinde, çoklu erişim modeli hemen hiç ele alınmamış, yine bu sistemlerde işbirlikli haberleşme ve güç tahsisinden elde edilebilecek kazançlar araştırılmamıştır. Bu nedenle bu projede, bu eksikleri gidermek amaçlanarak, kablosuz çoklu erişim ağlarında bilişsel radyo ve işbirliği tekniklerini, birincil kullanıcıların gönderilerini fazla değiştirmeden, ve erişebilecekleri veri hızlarını hiçbir şekilde düşürmeden bir arada kullanabilecek yeni işbirliği stratejileri geliştirilmiş, ve bunlar ile elde edilebilecek veri hızları özkaynakların verimli tahsisi ile eniyilenmiştir.

Projede bilgi kuramsal yaklaşımlar izlenmiş, böylelikle daha pratik sistem tasarımı için performans denektaşı teşkil edecek, ya da yol gösterecek belli başlı algoritmalar geliştirilmiştir. Projede dört ana kanal modeli ele alınmıştır. Bunların her biri için yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar daha önce bölümlerin içinde tartışılmış olmakla beraber, burada problemler bazında tekrar özetlenecektir.

- **İki kullanıcı bir alıcılı işbirlikli çoklu erişim kanal modeli**

  - Sönümlenmeli iki kullanıcılı bilişsel işbirlikli bir çoklu erişim kanal modeli için üste-serime dayalı bir bilişsel model geliştirilmiş, ve biri toplam veri hızlarını eniyileyen, diğeri ise ikincil kullanıcı veri hızını eniyileyen iki güç kontrolü algoritması geliştirilmiştir. En iyi güç tahsisi için kullanılması gereken güç ifadeleri hem analitik olarak türetilmiş, hem de döngüsel bir algoritma yoluyla çözümü sağlanmıştır. Kullanıcıların hangi kanal durumlarında hangi tip haberleşme sinyalleri gönderdikleri güçlerin kanal durumlarına bağlı değişimi incelenmek suretiyle belirlenmiştir. Erişilebilir veri hızı bölgelerinde kayda değer artışlar elde edilebileceği gösterilmiş, ve işbirliği ve bilişsel radyo kavramlarının bir arada kullanılmasının doğal ve faydalı olduğu sonucuna varılmıştır.

– İki kullanıcılı işbirlikli bir çoklu erişim kanal modeli için sıkıştır ilet ve çöz ilet stratejilerini bir arada kullanan, böylelikle kullanıcılardan birinin ya da her ikisinin, işbirlikçi ortağın mesajını sadece kısmen çözmesine izin veren bir model için, bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiş, erişilebilir veri hızları elde edilmiştir. Düğümler arasındaki kanalların göreceli kalitelerine ve düğümlerin güçlerine göre, çöz-ilet ve sıkıştır ilet stratejilerinden farklı seviyede kazançlar elde edilebildiği gözlenmiş, önerilen birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği hem tek başına gönderi hızlarını, hem de toplam veri hızlarını enbüyüklemeye imkan verdiğinden, bilinen tekniklere göre daha iyi sonuçlara ulaşabildiği görülmüştür. Öte yandan, birleşik çöz/sıkıştır ilet tekniği ile erişilen veri hızı bölgelerinin, yine proje kapsamında geliştirilen çift taraflı sıkıştır-ilet tekniği ile, tek başına çöz ilet tekniğinin eriştikleri veri hızlarının dışbükey zarfı olduğu, yani bu iki tekniğin zaman bölmeli olarak kullanılması ile de elde edilebileceği gözlenmiştir. Elde edilen veri hızı ifadelerinin karmaşıklığı, ve çöz-ilet statejisine kıyasla çok büyük bir gelişme sağlamadığı göz önüne alındığında, bilişsel işbirliği modellerimizde çöz-ilet stratejisinin kullanılmasına karar verildiğinden, bu model projede daha fazla ele alınmamıştır. Ancak, bu çalışmanın ilginç bir uzantısı ardışık geriye doğru kodçözmenin yerine birlikte geriye doğru kodçözme Chong ve Motani (2011) kullanıldığında erişilecek veri hızlarının incelenmesi olabilir.

- **Üç kullanıcı bir alıcılı işbirlikli çoklu erişim kanal modeli**

  – Üç kullanıcılı kanallarda, öncelikle tüm kullanıcıların işbirliği yapabileceği referans bir model geliştirilerek, bu model için yeni bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiş, ikişerli ve toplu işbirliğinin bir arada kullanılması ile veri hızlarının önemli oranda artabileceği gösterilmiştir. İki kullanıcılı sistemlerde bilinen blok Markov bindirmeli kodlamanın üç kullanıcı sistemlere genellenmesinin çok da basit olmadığı, kodlama yapısında önemli farklılıklar olduğu görülmüştür. Benzetimler yolu ile veri hızı bölgelerinin elde edilmesiyle, ikili işbirliği ve üçlü işbirliğinden elde edilecek kazançların kıyaslanması mümkün olmuştur. Görülmüştür ki, artan işbirlikçi kullanıcı sayısı ile, işbirliği çeşitlemesi arttığından veri hızları da daha iyileşmektedir. Öte yandan, erişilebilir veri hızı ifadeleri, çok sayıda kısıta bağlı olduğundan, özellikle eniyileme problemlerinde kullanılmaları oldukça güçtür. Bu

çalışmanın sonunda, üçlü işbirliğinin ikili işbirliğine bir alternatif olarak düşünülebileceği, ancak daha fazla sayıda kullanıcının eşzamanlı işbirliğine izin vermenin yaratacağı analiz güçlüğü ile karşılaşmak yerine, ikili ve üçlü işbirlikli modelleri temel yapı blokları olarak alan işbirliği protokollerinin daha pratik olacağı kanısına varılmıştır. Bu nedenle, projenin kalan bölümlerinde hep bu yaklaşım kullanılmıştır.

– Üç kullanıcılı işbirliği modelinden hareketle, bir birincil iki ikincil kullanıcının olduğu işbirlikli bilişsel ağlarda, ikincil kullanıcıların hem biribirlerine, hem de birincil kullanıcıya yardım edebildikleri üste-serim'e dayalı bir protokol önerilmiş, ve erişilebilir toplam veri hızlarının güçler cinsinden enbüyüklenmesi problemi çözülmüştür. Birincil kullanıcı diğer kullanıcılara yardım etmediğinden, güç eniyilemesi daha kolay çözülebilir bir problem halini almıştır. Alt-gradyan algoritması ile, kullanıcıların hangi işbirliği sinyallerine ne kadar güç kullanmaları gerektiği bulunduğundan, bu tip çözümler aynı zamanda işbirliğinde hangi kanal durumlarında hangi sinyallerin aktif olduğu bilgisini de vermesi açısından önemlidir. Görülmüştür ki, ikincil kullanıcıların sistemin toplam veri hızını enbüyüklemek amacıyla işbirliğine gönüllü olmaları kendileri açısından faydalı değildir, zira toplam veri hızındaki kazancın büyük bölümü doğrudan birincil kullanıcının veri hızı artışından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, ikincil kullanıcıların veri hızı bölgelerinin enbüyüklenmesi problemine geçilmiştir.

– İkincil kullanıcıların veri hızı bölgelerinin enbüyüklenmesi problemi, birincil kullanıcının ortak işbirliği sinyali göndermediği bir modelde incelenmiş, ikincil kullanıcıların birincil kullanıcı mesajını çözüp, birincil kullanıcıya yardım ettikleri gibi, biribirleri ile de işbirliği yaptıkları bir bilişsel model incelenmiştir. Bu model, birincil kullanıcının gönderi politikası değişmediği için bilişsel düzeneğe en uygun model olarak göze çarpmaktadır. Ayrıca, bu kısımda ikincil kullanıcıların yardımlaştığı, ama birincil kullanıcının veri hızını tek kullanıcılı kanal veri hızında sabit tuttukları alta-serim tipi bir model de irdelenmiştir. Sonuçta, üste-serim modelinin ikincil kullanıcılar açısından çok daha yüksek veri hızlarına imkan tanıdığı gösterilmiştir.

- **Çok kullanıcı bir alıcılı işbirlikli bilişsel çoklu erişim kanal modeli**

  Çok kullanıcılı çoklu erişim kanallarında, önceki bulgularımızın ışığında ikişerli işbirliği modeli benimsenmiştir. Bu nedenle, her birincil kullanıcı için bir ikincil işbirlikçi ortak bulunması önerilmiştir. İşbirlikçi bilişsel çoklu erişim kanalları için güç en iyileme ve ortak seçimi problemlerinin birleşik çözümü yapılmıştır. Güç en iyileme probleminde, sistemin toplam veri hızını en iyilemek amacı ve ikincil kullanıcıların toplam veri hızlarını en iyilemek amaçları ayrı ayrı incelenerek, üste-serim modeli önerilmiştir. Güç kontolünden sonra da çizge kuramından faydalanılarak (MWM) ortak seçimi problemi çözülmüştür. Benzetim çalışmaları sayesinde, özellikle alıcıya olan kanalları yaklaşık benzer kalitede olan çiftler için işbirliğinin oldukça karlı olduğu gözlemlenmiştir ve her durumda da, alta-serim modelinden daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmanın doğal bir devamı, bilişsel yapı korunarak çok hücreli sistemlerde kaynak tahsisi ve ortak seçimi probleminin çözümü olabilir. Bu yönde en önemli adım olan frekans tahsisi ile birlikte girişimin modellenerek işbirliğine uygun bir çoklu erişim modeli geliştirilmesi, projenin son bölümünde ele alınmış, ancak bilişsel duruma genellenmemiştir; bu devam niteliğindeki bir çalışma olarak önerilmektedir.

- **Çok kullanıcı çok alıcılı işbirlikli bilişsel çoklu erişim kanal modeli**

  Bu bölümde yapılan çalışmalar, tek alıcılı senaryoda elde edilen sonuçlar ışığında daha adil çok hücreli bir sistem araştırmasını kapsamaktadır. Tek hücreli modellerde, alıcıya yakın olan kullanıcıların, çok uzak olan kullanıcılarla işbirlikçi çift oluşturmaya eğilimli olduğu, fakat bunun uzaktaki kullanıcıya yardım etmekten ziyade, kanalına el koyarak kendi veri hızını artırmaya yaradığı görülmüştür. Bu nedenle çok hücreli modelde, hücre kenarındaki kullanıcıların işbirliğini teşvik edebilecek zıt kısmi frekans tekrarına dayalı bir işbirliği protokolü geliştirilmiştir. Bu protokol, hem hücre bölümlemeye dayalı FFR yapısı ile karışım yönetimini etkin yapması, hem kullanıcılara sadece işbirlikçi ortak değil, alıcı seçme imkanını da tanıması, hem de güç tahsisi ile sönünlenen OFDMA kanalının çeşitleme kazancından faydalanabilmesi sayesinde, çok ümit vaadeden veri hızı artışlarına imkan vermiştir. Bu yaklaşımla, hem hücre kenarı kullanıcılarına daha adil veri hızları vermek mümkün olmuş, hem de işbirliksiz sistemlere kıyasla iki kata

yakın veri hızı artışı sağlanmıştır. Bu çalışmanın çok ilginç bir uzantısı, alıcıların da kendi aralarında işbirliği yapabildiği durumdaki kaynak tahsisidir. Elbette, bu modelin bilişsel bir senaryoya genellenmesi de ilginç bir araştırma konusudur.

Sonuç olarak, işbirliği ve bilişsel radyo yaklaşımlarının bir arada kullanımının bilgi kuramsal analizleri sonucunda veri hızlarının artırılabilmesi açısından oldukça ümit verdiği, aynı zamanda sistem karmaşıklığını her iki tekniğin teker teker kullanılmasına kıyasla hemen hemen hiç değiştirmeyeceği düşünülürse, bu tekniklerin bir arada kullanımının gelecek nesil kablosuz haberleşme sistemleri için mutlaka dikkate alınması gereken bir yaklaşım olduğu bu proje sonucunda varılan temel kanılardır.

Kaynakça

Bakım, S. ve Kaya, O. 2013. "Power Control for Two User Cooperative OFDMA Channels". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 12(1):258–267.

Baksi, S. ve Kaya, O. 2014. "Optimal Primary-Secondary user Pairing and Power Allocation in Cognitive Cooperative Multiple Access Channels". In *International Conference on Networking and Communications, CNC Workshop*.

Baksi, S., Kaya, O., ve Biyikoglu, T. 2012. "Optimal and near-optimal partner selection algorithms in cooperative OFDMA". In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) 2012*, pages 475–479.

Baksi, S., Kaya, O., ve Biyikoglu, T. 2013. Enabling cooperation, resource allocation and receiver selection across cells: Complementary fractional frequency reuse. In *IEEE Personal, Indoor and Mobile Communications Conference 2013.*, London, UK.

Cao, Y. ve Chen, B. 2008. "Interference channel with one cognitive transmitter". In *42nd Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2008*, pages 1593–1597.

Carleial, A. 1978. "Interference channels.". *IEEE Transactions on Information Theory*, 24(1):60–70.

Carleial, A. 1982. "Multiple-access channels with different generalized feedback signals". *IEEE Transactions on Information Theory*, 28(6):841–850.

Chatterjee, D., Wong, T. F., ve Oyman, O. 2010. "On achievable rate regions for half-duplex causal cognitive radio channels". In *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT), 2010*, pages 435–439.

Chen, Y., Yu, G., Zhang, Z., Chen, H.-H., ve Qiu, P. 2008. "On cognitive radio networks with opportunistic power control strategies in fading channels". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(7):2752–2761.

Chong, H.-F. ve Motani, M. 2011. "On achievable rates for the general relay channel". *IEEE Transactions on Information Theory*, 57(3):1249–1266.

Costa, M. 1983. "Writing on dirty paper". *IEEE Transactions on Information Theory*, 29(3):439–441.

Cover, T. ve El Gamal, A. 1979. "Capacity theorems for the relay channel". *IEEE Transactions on Information Theory*, 25(5):572–584.

Cover, T. ve Leung, C. 1981. "An achievable rate region for the multiple-access channel with feedback". *IEEE Transactions on Information Theory*, 27(3):292–298.

Devroye, N., Mitran, P., ve Tarokh, V. 2006. "Achievable rates in cognitive radio channels". *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(5):1813–1827.

Edemen, C. ve Kaya, O. 2008a. "Achievable Rates for the Three User Cooperative Multiple Access Channel". In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2008*, pages 1507–1512.

Edemen, C. ve Kaya, O. 2008b. "Channel Adaptive Encoding and Decoding Strategies and Rate Regions for the Three User Cooperative Multiple Access Channel". In *IEEE Global Telecommunications Conference, 2008*, pages 1–5.

Edemen, C. ve Kaya, O. 2013. "A new block Markov coding strategy for pairwise and collective cooperation in the three user MAC". In *2013 First International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, pages 152–156.

Ekrem, E. ve Ulukus, S. 2008. "Effects of cooperation on the secrecy of multiple access channels with generalized feedback". In *42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2008.*, pages 791–796.

FCC Spectrum Policy Task Force 2002. "Report of the Spectrum Efficiency Working Group,Tech. Rep. 02-135." [online]. available: http://www.fcc.gov/sptf/files/sewgfinalreport_1.pdf. Technical report, FCC Spectrum Policy Task Force.

Gabow, H. N. 1976. "An efficient implementation of Edmonds' algorithm for maximum matching on graphs". *Journal of the ACM (JACM)*, 23(2):221–234.

Gel'fand, S. ve Pinsker, M. 1980. "Coding for channel with random parameters". *Probl. Contr. and Inform. Theory*, 9(1):19–31.

Goldsmith, A., Jafar, S. A., Maric, I., ve Srinivasa, S. 2009. "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective". *Proceedings of the IEEE*, 97(5):894–914.

Goldsmith, A. ve Varaiya, P. 1997. "Capacity of fading channels with channel side information". *IEEE Transactions on Information Theory*, 43(6):1986–1992.

Gunduz, D., Tuncel, E., ve Nayak, J. 2008. "Rate regions for the separated two-way relay channel". In *46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, 2008*, pages 1333–1340.

Gunes, M. ve Kaya, O. 2012. "Joint decode/compress and forward based cooperative multiple access". In *IEEE 20th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012*, pages 1–4.

Han, T. ve Kobayashi, K. 1981. "A new achievable rate region for the interference channel". *IEEE Transactions on Information Theory*, 27(1):49–60.

Haykin, S. 2005. "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(2):201–220.

Jiang, J. ve Xin, Y. 2008. "On the achievable rate regions for interference channels with degraded message sets". *IEEE Transactions on Information Theory*, 54(10):4707–4712.

Jovicic, A. ve Viswanath, P. 2009. "Cognitive radio: An information-theoretic perspective". *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(9):3945–3958.

Kaya, O. ve Isleyen, M. 2012. "Power control in the cognitive cooperative multiple access channel". In *46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), 2012*, pages 1–5.

Kaya, O. ve Ulukus, S. 2007. "Power Control for Fading Cooperative Multiple Access Channels". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 6(8):2915–2923.

Khojastepour, M. A., Sabharwal, A., ve Aazhang, B. 2004. "Improved achievable rates for user cooperation and relay channels". In *IEEE International Symposium on Information Theory, 2004.*, page 4.

Kramer, G., Gastpar, M., ve Gupta, P. 2005. "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks". *IEEE Transactions on Information Theory*, 51(9):3037–3063.

Laneman, J., Tse, D., ve Wornell, G. 2004. "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior". *IEEE Transactions on Information Theory*, 50(12):3062–3080.

Li, Q., Li, K. H., ve Teh, K. C. 2009. "An achievable rate region of cooperative multiple-access channels with hybrid CF and DF cooperation". *IEEE Communications Letters*, 13(8):591–593.

Li, Q., Li, K. H., ve Teh, K. C. 2010. "An Achievable Rate Region for the Cognitive Interference Channel With Causal Bidirectional Cooperation". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(4):1721–1728.

Liao, H. H.-J. 1972. *"Multiple Access Channels."*. PhD thesis, University of Hawaii.

Marić, I., Goldsmith, A., Kramer, G., vd. 2008. "On the capacity of interference channels with one cooperating transmitter". *European Transactions on Telecommunications*, 19(4):405–420.

Mitola, J. 2000. *"Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio"*. PhD thesis, KTH, Stocholm, Sweden.

Nagananda, K. ve Kishore, S. 2010. "A class of three-user multiple access cognitive radio channels: an achievable rate region". In *IEEE Global Telecommunications Conference 2010*, pages 1–5.

Rini, S., Tuninetti, D., ve Devroye, N. 2009. "State of the cognitive interference channel: a new unified inner bound". *arXiv preprint arXiv:0910.3028*.

Sankaranarayanan, L., Kramer, G., ve Mandayam, N. 2004. "Capacity Theorems for the Multiple-Access Relay Channel". In *42nd Allerton Conf. on Communications, Computing and Control, Monticello, IL*.

Sato, H. 1977. "Two-user communication channels". *IEEE Transactions on Information Theory*, 23(3):295–304.

Schein, B. 2001. *"Distributed Coordination in Network Information Theory"*. PhD thesis, MIT.

Sendonaris, A., Erkip, E., ve Aazhang, B. 2003. "User cooperation diversity - Part 1: System description". *IEEE Transactions On Communications*, 51(11):1927–1938.

Seyedmehdi, S. H., Jiang, J., Xin, Y., ve Wang, X. 2009. "An improved achievable rate region for causal cognitive radio". In *IEEE International Symposium on Information Theory, 2009.*, pages 611–615.

Seyedmehdi, S. H., Xin, Y., ve Lian, Y. 2007. "An achievable rate region for the causal cognitive radio". In *Annual Allerton Conference on Communications Computing and Control 2007*.

Shared Spectrum Company 2005. "Spectrum occupancy measurements over six different locations. [Online]. Available: http://www.sharedspectrum.com/papers/spectrum-reports". Technical report, Shared Spectrum Company.

Tuninetti, D. 2007. "On interference channel with generalized feedback (IFC-GF)". In *IEEE International Symposium on Information Theory 2007*, pages 2861–2865.

Van der Meulen, E. C. 1971. "Three-terminal communication channels". *Adv. Appl. Prob.*, 3:120–154.

Wang, W., Peng, T., ve Wang, W. 2007. "Optimal power control under interference temperature constraints in cognitive radio network". In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2007*, pages 116–120.

Wang, X. ve Zhu, Q. 2007. "Power control for cognitive radio based on game theory.". In *Int. Conf. Wireless Commun., Networking and Mobile Computing, 2007*, pages 1256–1259.

Willems, F. 1983. "The discrete memoryless multiple access channel with partially cooperating encoders". *IEEE Transactions on Information Theory*, 29(3):441–445.

Willems, F. ve van der Meulen, E. 1983. "Partial feedback for the discrete memoryless multiple access channel". *IEEE Transactions on Information Theory*, 29(2):287–290.

Willems, F. ve van der Meulen, E. 1985. "The discrete memoryless multiple-access channel with cribbing encoders". *IEEE Transactions on Information Theory*, 31(3):313–327.

Willems, F., van der Meulen, E., ve Schalkwijk, J. 1983. "An achievable rate region for the multiple access channel with generalized feedback". In *Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Monticello, IL, 1983*.

Wu, W., Vishwanath, S., ve Arapostathis, A. 2007. "Capacity of a class of cognitive radio channels: Interference channels with degraded message sets". *IEEE Transactions on Information Theory*, 53(11):4391–4399.

Xie, L. ve Kumar, P. 2004. "A network information theory for wireless communication: Scaling laws and optimal operation". *IEEE Transactions on Information Theory*, 50(5):748–767.

Xie, L.-L. 2009. "An Improvement of Cover/El Gamal's Compress-and-Forward Relay Scheme". *arXiv preprint arXiv:0908.0163*.

Xing, Y., Mathur, C. N., Haleem, M. A., Chandramouli, R., ve Subbalakshmi, K. 2007. "Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints". *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 6(4):423–433.

Yang, J., Gunduz, D., Brown, D., ve Erkip, E. 2008. "Resource allocation for cooperative relaying". In *42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2008*, pages 848–853.

Zhang, R., Cui, S., ve Liang, Y.-C. 2009. "On ergodic sum capacity of fading cognitive multiple-access and broadcast channels". *IEEE Transactions on Information Theory*, 55(11):5161–5178.

Zhao, Q. ve Sadler, B. M. 2007. "A survey of dynamic spectrum access". *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(3):79–89.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. ONUR KAYA
Proje No:	111E108
Proje Başlığı:	İşbirlikçi Bilişsel Radyo Sistemleri İçin Kodlama Ve Kodçözme Teknikleri, Erişilebilir Veri Hızları Ve Kaynak Tahsisi
Proje Türü:	Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	IŞIK Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2011 - 01/10/2013
Onaylanan Bütçe:	95565.0
Harcanan Bütçe:	66399.64

TÜBİTAK

Öz:	İşbirlikli iletişim ve bilişsel radyo, yeni nesil kablosuz haberleşme ağlarında kapasite ve iletişim kalitesinin artırımı için kilit tekniklerdir. Bu tekniklerin her ikisi de, çevrelerinin farkında olan ve bu farkındalığı gönderim stratejilerini belirlerken kullanabilen akıllı düğümlere dayalı olduğundan, yeni nesil protokollerin tasarımında bir arada ele alınmaları son derece doğaldır. Bu projenin temel amacı, kablosuz ağlarda bu iki tekniği bir arada kullanabilen yeni işbirliği stratejileri geliştirmek, ve bunlarla elde edilebilecek veri hızlarını özkaynakların verimli tahsisi ile eniyilemektir. Projede çözülen belli başlı problemler şöyledir: -İki kullanıcılı bilişsel işbirlikli bir çoklu erişim kanal modeli, ve bu modelde kullanılabilecek kanala uyarlanabilir bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiştir. Birincil kullanıcının veri hızını tekli gönderim limitinin altına düşürmeden, sistemin toplam veri hızını ya da ikincil kullanıcının veri hızını eniyileyen kanala uyarlı bir güç tahsisi stratejisi geliştirilmiştir. -İki kullanıcılı işbirlikli bir çoklu erişim kanal modeli için sıkıştır ilet ve çöz ilet stratejilerini bir arada kullanan, böylelikle kullanıcılardan birinin ya da her ikisinin, işbirlikçi ortağın mesajını sadece kısmen çözmesine izin veren bir model için, bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiş, erişilebilir veri hızları elde edilmiştir. -Üç kullanıcılı işbirlikli bilişsel bir çoklu erişim kanalı için, üç farklı model için kodlama ve kodçözme yapıları geliştirilmiş, ve karşılık gelen erişilebilir veri hızı ifadeleri elde edilmiştir. Öncelikle tüm kullanıcıların işbirliği yapabileceği referans bir model geliştirilerek, bu model için yeni bir blok Markov kodlama tekniği önerilmiş, ikişerli ve toplu işbirliğinin bir arada kullanılması ile veri hızlarının önemli oranda artabileceği gösterilmiştir. Bu modelden hareketle, bir birincil iki ikincil kullanıcının olduğu işbirlikli bilişsel ağlarda, ikincil kullanıcıların hem biribirlerine, hem de birincil kullanıcıya yardım edebildikleri üste-serim'e dayalı protokoller önerilmiş, ve erişilebilir toplam veri hızları ile, ikincil kullanıcıların erişilebilir veri hızı bölgelerinin güçler cinsinden enbüyüklenmesi problemleri ayrı ayrı çözülmüştür. Ayrıca, birincil kullanıcının farklı seviyelerde işbirliğine katıldığı modeller kadar, işbirliğine hiç dahil olmadığı alta-serim tipi bir model de irdelenmiştir. -Çok kullanıcılı, tek hücreli işbirlikli bilişsel bir çoklu erişim kanalı için, kullanıcıları birer birincil ve ikincil kullanıcıdan oluşan çiftlere bölerek, bu çiftlerin dik frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA) kullanması yordamıyla biribirleri ile karışım yaratmadan işbirlikli olarak haberleşmelerini sağlayan bir model önerilmiştir. Bu modelde, hem en iyi birincil-ikincil kullanıcı eşleştirme problemi, hem de OFDMA alt kanalların her birinde kullanılan alt işbirliği sözcüklerinin her birine güçlerin en iyi şekilde atanması problemi, ortak olarak çözülmüştür. Bu problemler, sistemin toplam veri hızını eniyileme amacı ile, ve sistemdeki ikincil kullanıcıların toplam veri hızlarını eniyileme amacı ile ayrı ayrı ele alınmıştır. Ayrıca, hangi ikincil kullanıcının hangi birincil kullanıcının frekans kaynaklarını kullanacağının belirlendiği, ve güç kontrolünün en iyi şekilde yapıldığı bir alta-serim modeli için de kaynak tahsisi gerçekleştirilmiştir. -Çok kullanıcılı, çok hücreli işbirlikli bir çoklu erişim kanalı için, kullanıcıların yine OFDMA yardımıyla ikişerli dik gruplara ayrılarak işbirlikli olarak gönderim yapabildiği bir modelde, öncelikle işbirliğinin çok hücreli senaryoda sürebilmesi, ve hücre kenarındaki kullanıcıların işbirliğinden fayda sağlayabilmesi için zıt kısmi frekans tekrarı (CFFR) adı verilen özgün bir frekans planlama tekniği önerilmiştir. Bu teknik için, hücreler arası girişim modelleri elde edilmiş, tüm sistemin toplam veri hızını birlikte enbüyükleyen, güç tahsisi, işbirlikçi ortak seçimi ve alıcı seçimi stratejileri bulunmuştur.
Anahtar Kelimeler:	Bilişsel Radyo, Çoklu Erişim, İşbirlikli İletişim, Güç Kontrolü, Veri Hızları, Kısmi Frekans Tekrarı
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Power control in the cognitive cooperative multiple access channel (Bildiri), 2- Birleşik Çöz/Sıkıştır ve İlet Tabanlı İşbirlikçi Çoklu Erişim (Bildiri), 3- Power Control in the Cognitive Cooperative Multiple Access Channel (Bildiri), 4- Birleşik Çöz/Sıkıştır ve İlet Tabanlı İşbirlikçi Çoklu Erişim (Bildiri)1- Power control in the cognitive cooperative multiple access channel (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 2- Joint Decode/Compress and Forward based Cooperative Multiple Access. (Bildiri - Ulusal Bildiri - Sözlü Sunum), 3- Optimal Primary-Secondary user Pairing and Power Allocation in Cognitive Cooperative Multiple Access Channels (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 4- PARTNER SELECTION AND RESOURCE ALLOCATION IN SINGLE-CELL, MULTI-CELL AND COGNITIVE COOPERATIVE MULTIPLE ACCESS CHANNELS (Tez - Yüksek Lisans Tezi), 5- Enabling Cooperation, Resource Allocation and Receiver Selection Across Cells: Complementary Fractional Frequency Reuse. (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 6- A New Block Markov Coding Strategy for Pairwise and Collective Cooperation in the Three User MAC, (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),

TÜBİTAK