

İşbirlikli Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemleri için Röle Seçim Teknikleri Relay Selection Techniques for Network Coded Cooperative Systems

Semiha Tedik Başaran, Güneş Karabulut Kurt

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
İstanbul Teknik Üniversitesi
tedik@itu.edu.tr, gkurt@itu.edu.tr

Öz

Bu çalışmada pratikte uygulanabilir bir işbirlikli ağ kodlamalı dik frekans bölmeli çoklu erişim (NCC-OFDMA) sistem tasarımı hedeflenmiştir. Bu amaçla, iletimde kullanılacak kaynak atama problemlerinin çözümü için yöntemler geliştirilmiştir. Kaynak atama problemleri olarak OFDMA alttaşıyıcılarının seçimi, bu alttaşıyıcıların çıkış güçlerinin belirlenmesi ve iletime yardımcı olması için kullanılacak rölelerin seçimi ele alınmıştır. İlgili sistem modeli ikili çoklu-grafik (hyperdiagram) yapıları kullanılarak oluşturulmuş ve bu sistemde optimum kaynak ataması için Hungarian yöntemi tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Sistem başarımı benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: İşbirlikli ağ kodlama, OFDMA, ikili eşleme, alt-taşıyıcı atama, güç atama.

Abstract

In this work, design of a practically applicable network-coded-cooperative orthogonal frequency division multiple access (NCC-OFDMA) system is targeted. With this goal, techniques to address the associated resource allocation problems during the communication process are developed. As resource allocation problems, selection of the OFDMA subcarriers, determination of their transmit power level and selection of the relay nodes to aid communication are considered. The associated system model is constructed through bipartite hyperdiagrams and a Hungarian method based algorithm is proposed for optimum resource allocation. The system performance is quantified via simulation results.

Keywords: Network coded cooperation, OFDMA, bipartite matching, subcarrier allocation, power allocation.

1. Giriş

Telsiz haberleşmede gittikçe artan kullanıcı taleplerini karşılamak amacıyla mevcut kaynakların, yani frekans spektrumu ve iletim gücünün, etkili bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Bu amaca yönelik olarak telsiz kanalın haberleşme sistemleri üzerindeki bozucu etkilerinden kurtularak daha yüksek başarımda haberleşebilmek için işbirlikli/röleli sistemler literatürde önerilmiştir [1], [2]. Bu çalışmalarda röle sistemleri kuvvetlendir ve aktar (amplify and forward, AF) ile çöz ve aktar (decode and forward, DF) olmak üzere iki temel yöntemde dayanmaktadır. AF tekniğinde

röle, kaynaktan gelen işaretin sadece genliğini yükseltir ve hedefe gönderir. DF tekniğinde ise röle, kaynaktan gelen işareti çözer ve hedefe gönderir. Bahsedilen çalışmalarda genellikle röle biriminin yarı çift yönlü (half-duplex) iletişim yaptığı kabul edilerek veri gönderme ve alma işlemleri için birbirine dik (zaman veya frekans bölmeli) kanallar kullanılmaktadır. Böylece toplam ergodik kanal sığasının sadece %50 'sinin kullanılabilmesi mümkün olmaktadır.

İşbirlikli haberleşme sistemleri, fiziksel boyutun küçük olmasından dolayı çok-antenli (multi-antenna) alıcı ve/veya verici yapılarının kullanılmadığı durumlarda çeşitleme kazancını arttırarak sistem başarımını iyileştirmek için kullanılır. İşbirlikli iletişimden dolayı oluşan kazanç, işbirlikli çeşitleme (cooperative diversity) kazancı olarak da isimlendirilir [3], [4]. İşbirlikli haberleşme sistemleri sanal olarak çok girişli-çok çıkışlı (multi-input multi-output, MIMO) anten sistemleri oluşturup MIMO yapıların kullanılmadığı durumlarda uzamsal (spatial) çeşitleme kazancının elde edilmesini, telsiz haberleşme kanalının yayıcı (broadcast) etkisini kullanarak sağlarlar [5]. Klasik işbirlikli iletişim sistemleri zaman bölmeli çoklu erişim (time division multiple access, TDMA) tekniğini kullanır. İşbirlikli iletişimde, başka bir birimin iletişime yardımcı olması, gerekli olan toplam zaman dilimi sayısını arttırmakta ve böylece band verimliliği düşmektedir. Bu problemi gidermek için farklı kullanıcıların aynı röleyi kullanarak birbirleri ile iletişim yapmasını sağlayan ağ kodlama teknikleri kullanılabilir.

Ağ kodlamanın telsiz iletişim kanalında sağladığı faydalar [6] çalışmada önerildikten sonra [7], [8] çalışmalarında işbirlikli yapıya ağ kodlama tekniklerinin eklenmesi önerilmiştir. Bu yolla ağ kodlamalı sistemlerden çeşitleme kazancı da elde edilebilmektedir. Bu sistemler ağ kodlamalı işbirlikli (network coded cooperative, NCC) sistemler olarak isimlendirilir.

NCC sistemlerin bilgi kuramsal başarımlarının belirlenmesi ile ilgili yapılan öncü çalışmalar TDMA tabanlı sistemlerin çeşitleme-çoğullama ödünleşimi (diversity-multiplexing tradeoff, DMT) değerlerini incelemişlerdir [9], [10]. [9] çalışmasında yazarlar rölelerin işaret kalitesine göre dinamik olarak ağ kodlama kararı verdiği bir sistemi ele almışlardır. M adet röle bulunduran bir sistemde çeşitleme kazancının ağ

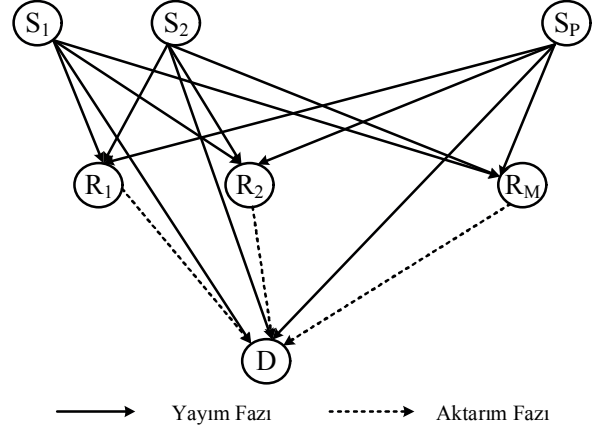
kodlama ile $M + 1$ 'e çıkartılabileceğini ve aynı zamanda spektral verimliliğin arttırılabildiğini göstermişlerdir. Bununla beraber, telsiz iletişim kanalının bozucu etkisi nedeniyle, hedef düğümde her durumda diğer kaynaklardan gönderilen veri doğru olarak çözülemeyebilmektedir. Bu nedenle hedef ile kaynak arası çeşitleme kazancı sadece 2 olmaktadır. Bu çeşitleme kazancının artırılması için Topakkaya ve Wang tarafından yapılan [10] çalışmasında birçok kaynak ve hedef düğüm için röle düğümlerde RNC kullanan işbirlikli sistem (random network coded cooperation, RNCC) ve gerekirci ağ kodlama kullanan işbirlikli sistem (deterministic network coded cooperation, DNCC) önerilmiştir. Bu sistemlerin DMT analizleri yapılmıştır. İki düğüm arasında ağ kodu olarak yüksek mesafede ayrıştırılabilir (maximum distance separable, MDS) kodların sistematik olarak kullanımının tam çeşitleme kazancının elde edilebilmesi için yeterli olduğu gösterilmiştir.

NCC tekniğini içeren [11]-[13] çalışmaları OFDM sistemleri için geliştirilmiştir. NCC-OFDM sistemlerinde spektral verimlilik arttırılabılırken aynı zamanda alıcı yapısı da basitleştirilebilmektedir. Bu öncül çalışmalarda [11] bit hata oranını, [12] ağdaki veri hızını ve [13] ise toplam sığayı (sum capacity) maksimize edecek kaynak yönetimini ele almaktadır. OFDM sistemlerinin birden çok kullanıcı için geliştirilmiş hali olan dik frekans bölme çoklu erişimdir (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA).

İşbirlikli ağ kodlamalı sistemler hakkındaki öncül çalışma Chen, Kishore ve Li tarafından 2006 yılında yapılmıştır [7]. Bu sistemlerde ağ kodlamanın yararlarına ek olarak düğümler arasında işbirliği yapılarak uzamsal çeşitleme kazancı sağlanabilmektedir. İlk çalışmalar tek kaynak ve hedef düğüm kullanılarak yapılmış, ilerleyen aşamalarda kaynak ve hedef sayıları arttırılmıştır [7], [14], [15]. Literatürdeki bazı çalışmalarda ağ kodlama ile iletim yapan birimler arasında önceliklendirme yapılması da önerilmiştir. Bu şekilde bazı kaynak düğümlerin çeşitleme kazancı arttırılarak sistem hata başarımı iyileştirilebilmektedir [16], [17].

[18] çalışmasında kanal kalitesine (dolayısıyla işaret gürültü oranına) göre röle düğümünün iletim protokolüne katılıp katılmaması durumları incelenmiştir. Bu sayede sistem başarımı daha da arttırılabilmektedir. Birden fazla röle düğümü ile ağ kodlamalı işbirlikli sistemlerin çeşitleme derecesinin arttırılabildiği [19]'da gösterilmiştir. Bu sistemlerde kod çözme karmaşıklığını düşürebilecek şekilde, rastgele ağ kodlama kullanan bir yapı [20] çalışmasında sunulmuştur. Bu çalışmada, önerdiğimiz sisteme benzer olarak OFDM tabanlı (genişbant) model kullanılmamıştır. Benzer sistemlerde rölelerde çok sekmeli yapılar da incelenmiştir [21].

NCC-OFDMA sisteminin pratikte kullanılabilmesi için sistemin yapısı gereği oluşan kaynak atama problemlerine akıllı yaklaşımlar getirilmelidir. Alt-taşıyıcıların, onların güç değerlerinin ve iletimde kullanılacak röle birimlerinin seçimi gerekmektedir. Buna rağmen, NCC-OFDMA sisteminin kaynak atama problemlerine yönelik çözümler henüz literatürde bulunmamaktadır. Bu makalede, NCC OFDMA sistemlerde kaynak atama problemlerine ikili eşleme (bipartite matching) tabanlı yaklaşımlar önerilmektedir. Önerilen Hungarian tekniği tabanlı algoritma optimum kaynak atama çözümlerini vermektedir.



Şekil 1: NCC-OFDMA için kullanılan sistem modeli.

2. Sistem Modeli

2.1. Ağ Kodlama

P tane kaynak düğümü, M tane röle düğümü ve bir tane alıcı düğümden oluşan NCC-OFDMA sistemi Şekil 1'de verilmektedir. Kaynak düğümleri ve alıcı düğümleri S_i ve R_j ile temsil edilmektedir ($i = 1, \dots, P$, $j = 1, \dots, M$). Sistemde toplam N adet alt taşıyıcı bulunmaktadır. NCC-OFDMA sisteminde iletim iki fazda tamamlanmaktadır. Bunlardan ilki yayım fazıdır. Yayım fazında kaynak düğümleri kendilerine atanmış olan OFDMA alt-taşıyıcılarının seçimini, bunların güçlerinin belirlenmesini ve alt-taşıyıcılara bitlerin atanmasını sistem başarımını optimize ederek sağlarlar ve bu şekilde veri iletimi yaparlar. İletilen işaretler hem röle düğümleri hem de hedef düğümleri tarafından alınır. Güç optimizasyonu, bit atamaları ve alt-taşıyıcı seçimi aşağıda detayları açıklanacağı üzere ikili diyagramlarda eşleme ile yapılmaktadır. Bu fazda ağ kodlama yapılmamaktadır. Buna göre ilk fazda röle düğümleri ve alıcı düğüm tarafından alınan işaretler sırasıyla şu şekilde tanımlanır:

$$Y_{s,r_j}[n] = \sqrt{\rho_i[n]} c_i[n] H_{s,r_j}[n] X_i[n] + W_{s,r_j}[n] \quad (1)$$

$$Y_{s,d}[n] = \sqrt{\rho_i[n]} c_i[n] H_{s,d}[n] X_i[n] + W_{s,d}[n]$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1.$$

Burada ρ_i , S_i kaynağı için her bir alt-taşıyıcının ortalama iletim gücünü ifade etmektedir. $W_{s,r_j}[n]$ ($W_{s,d}[n]$) j . röle (alıcı) düğümündeki sıfır ortalamalı birim varyanslı Gauss gürültü terimidir. $H_{s,r_j}[n]$ ($W_{s,d}[n]$), i . kaynak ve j . röle (alıcı) düğümleri arasındaki iletim kanalının frekans cevabını göstermektedir. Bu denklemde, $c_i[n]$, n . alt-taşıyıcının i . kaynak düğümü tarafından kullanılıp kullanılmadığını ifade eden gösterge (indicator) fonksiyonudur ve

$$c_i[n] = \begin{cases} 1, & n \text{ alt-taşıyıcı } i \text{ kaynağa atanmış ise} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (2)$$

olarak tanımlanmaktadır.

$X_i[n] \in \mathcal{X}$, n . alt-taşıyıcıdan gönderilen modüle edilmiş işaretir. \mathcal{X} , modülasyonda kullanılan işaret kümesini (signal constellation) ifade etmektedir ve ağ kodlamada notasyonun basit kalması için $|\mathcal{X}| = q$ olarak tanımlanabilir. Modülasyon seviyelerinin genellikle 2'nin kuvveti olarak seçilmesi dolayısıyla bu varsayım, sistemin gerçekleşmesinde önemli bir kısıt oluşturmamaktadır. Örneğin BPSK modülasyonu için $\sqrt{E_m}$ ortalama iletim enerjisini gösterirken, $q = 2$ ve

$$X_i[n] = \begin{cases} +\sqrt{E_m}, & c_i[n] = 1, b_i[n] = 1 \text{ ise}, \\ -\sqrt{E_m}, & c_i[n] = 1, b_i[n] = 0 \text{ ise}, \\ 0, & c_i[n] = 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (3)$$

olmaktadır. Burada $b_i[n]$, i . kaynak düğümden n . alt-taşıyıcı kullanarak gönderilen biti ifade etmektedir. İlk fazda gönderilen i . kaynak düğüme ait işaret, j . röle düğümü tarafından en büyük olasılıklı (maximum likelihood, ML) alıcı yapısı ile

$$\hat{X}_i^j[n] = \arg \min_{\tilde{X} \in \mathcal{X}} |Y_{s_i r_j}[n] - H_{s_i r_j}[n] \tilde{X}| \quad (4)$$

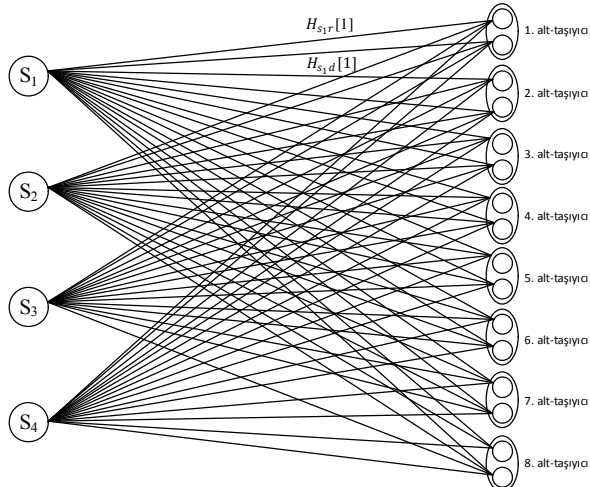
olarak kestirilebilir. Burada sıfır zorlamalı (zero forcing, ZF) karar verici, minimum ortalama karesel hata (minimum mean square error, MMSE) veya $X \in \mathcal{X}$ elemanlarının eşit olasılıkla seçilmemesi durumunda en yüksek sonsal olasılıklı (maximum a posteriori) karar verici teknikleri de kullanılabilir. İkinci faz aktarım fazıdır. Bu fazda röle birimleri öncelikli olarak kaynaktan alınan işaretleri çözerler. Çözülen işaretler rastgele ağ kodlama katsayıları kullanılarak kodlanır. Bu şekilde ağ kodlama sisteme eklenmiş olur. Röle birimleri ağ kodlanmış işaretleri tekrar modüle ederek hedef birimlere iletirler. Hedef birimlerden alınan işaret

$$Y_{r_j d}[n] = \sqrt{\rho_i[n]} c_i[n] H_{r_j d}[n] Z_i[n] + W_{r_j d}[n], \quad (5)$$

olarak yazılabilir. Burada $Z_i[n]$, i . röle biriminden iletilen modüle edilmiş işaretir ve herhangi bir ağ kodlama tekniği için $i \in \mathcal{R}$ olmak üzere,

$$Z_j[n] = f_{j,n}(\hat{X}_1^j[n], \hat{X}_2^j[n], \dots, \hat{X}_p^j[n]) \quad (6)$$

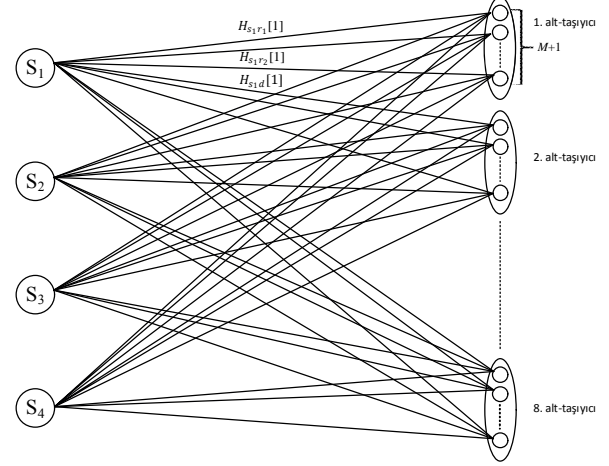
şeklinde hesaplanabilir. Burada $f_{j,n}(\cdot)$ fonksiyonu, j . rölede n . alt-taşıyıcı için kullanılan ağ kodlama fonksiyonunu ifade etmektedir.



Şekil 2: Alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram ($P = 4, N = 8$ ve $M = 1$).

Alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram $P = 4, N = 8$ ve $M = 1$ durumunda Şekil 2'de verilmektedir.

S_1, S_2, S_3 ve S_4 yayım fazında iletim yapan düğümleri göstermektedir. İletim yapan her bir düğümlerle her bir alt-taşıyıcıyı bağlayan iki yol bulunmaktadır. Bu yollardan ilki kaynak ve röle düğümü arasındaki bağlantıdır diğeri ise verici



Şekil 3: Çok röleli durumda alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram ($P = 4, N = 8$ ve $M > 1$).

ve alıcı birim arasındaki doğrudan iletim kanalıdır. Örneğin 1. alt-taşıyıcı ve S_1 arasında iki adet bağlantı bulunmaktadır,

bunlar: $H_{s_1 d}[1]$ ve $H_{s_1 r_1}[1]$. Birden fazla bağlantı olabilmesi nedeniyle incelenen diyagram bir ikili hiperdiyagramdır. Alt-taşıyıcı ve güç atama probleminde elde edilen diyagram yapısı, M adet rölenin olduğu durumda gösterilen ikili hiperdiyagram biçiminde genelleştirilebilir.

Çok röleli durumda alt-taşıyıcı atanması için geliştirilmiş olan ikili hiperdiyagram $P = 4, N = 8$ ve $M > 1$ durumu için Şekil 3'te gösterilmiştir. İletim yapan her bir kaynak düğümüyle her bir alt-taşıyıcıyı bağlayan $M + 1$ tane yol bulunmaktadır. Örneğin 1. alt-taşıyıcı ve S_1 arasında $M + 1$ tane bağlantı bulunmaktadır, bunlar: $H_{s_1 r_1}[1], \dots, H_{s_1 r_M}$ ve $H_{s_1 d}$. Burada SNR sistemdeki ortalama işaret gürlüğü oranı ve $u \in \{s_i r_j, s_i d, r_j d\}$ iken R_u , u bağlantısı için gerekli hedef iletim oranını göstermektedir. u bağlantısı ise $|H_u[n]|^2 \geq 2^{R_u} - 1 / SNR$ durumunda sağlanmaktadır. Güç atama tekniği yine bağlantı sayısını en yüksek hale getirmek üzere kullanılmaktadır.

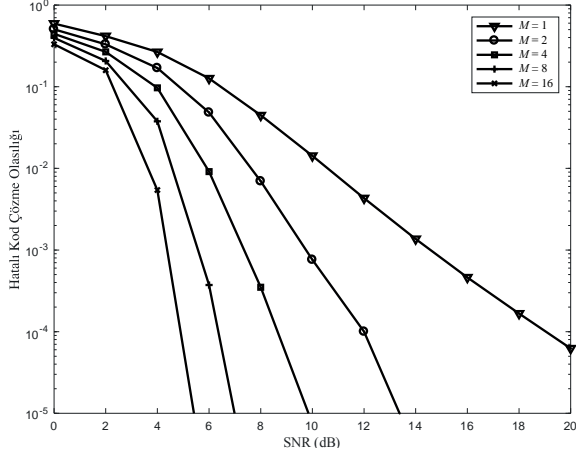
3. Ağ Kodlamalı OFDMA Sistemleri için Birleşik Güç ve Alt-Taşıyıcı Atama Tekniği

OFDMA sisteminde herhangi bir bağlantının güvenli iletim sağlayabilmesi için gerekli minimum güç seviyesi Rayleigh sönmülemeli kanallar için şu şekilde hesaplanır:

$$P_u \geq \frac{\sigma_n^2 (2^{N_c R_u} - 1)}{|H_u|^2} = P_u^L. \quad (7)$$

Burada R_u , her bir alt-taşıyıcı için gerekli hızdır. Kanaldaki toplam evreyumluluk band genişliği sayısı L olmak üzere $N_c = N/L$, her bir evreyumluluk band genişliğindeki alt-taşıyıcı sayısını göstermektedir. Evreyumluluk band genişliği, kanalın düz olarak tanımlanabildiği frekans aralığı

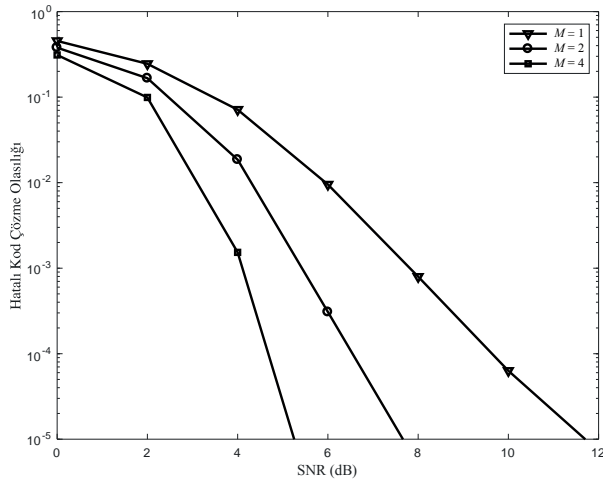
olarak tanımlanmaktadır. Bu durum kanalın, uyumluluk band genişliği içinde tüm spektral bileşenler için yaklaşık olarak eşit kazançlı olduğu anlamına gelmektedir. Aynı evreyuyluluk band genişliği içerisindeki alt-taşıyıcıların eşit kazançlı olduğu ve farklı uyumluluk band genişliği içerisindeki kanal kazançlarının bağımsız olduğu varsayılmıştır [22].



Şekil 4: NC sistemi için değişik sayılarda röle kullanılması durumunda elde edilen servis kesinti olasılığı başarımları.

Her bir alt-taşıyıcı sadece bir kullanıcıya atanabilmektedir. Hedeflenen iletim hızları alt-taşıyıcı başına denk düşecek şekilde tutulmuştur.

OFDMA sistemlerde birleşik alt taşıyıcı ve güç atamasını gerçekleştiren Hungarian tabanlı bir algoritma [23]'te tarafımızdan önerilmiştir. Bu algoritmanın detayları Çizelge 1'de verilmektedir. Çizelge 1'de satır 2, \mathcal{M} eşleşmesinin toplam maliyetini minimize etmeyi amaçlayan Hungarian yöntemini çalıştırır. Hungarian yöntemi, çift yönlü grafiklerde minimum maliyetli mükemmel eşlemeyi hesaplar [24]. \mathcal{G} 'nin minimum maliyetini hesaplayabilmek için u linkinin maliyeti P_u^L ile belirtilmiştir. Hungarian yönteminde P_u^L değerleri, yöntemin girişi olarak ele alınır. $O(N^3)$ işleminden sonra, Hungarian yöntemi çıkış olarak \mathcal{M} 'i verir. \mathcal{M} alt-taşıyıcı atamalarını gerçekleştirir. Toplam güç P_T sınırını aşmadığı sürece maksimum sayıda kullanıcıya servis verilebilir.



Şekil 5: NCC sistemi için değişik sayılarda röle kullanılması durumunda elde edilen servis kesinti olasılığı başarımları

Çizelge 1: Birleşik Güç ve Alt-Taşıyıcı Atama Algoritması

1: (7)'ye göre P_u^L değerlerine karar ver ve bu değerlerle \mathcal{G} matrisini oluştur.
2: Alt-taşıyıcı ataması için Hungarian yöntemini [24] uygula. // \mathcal{G} , Hungarian yönteminin giriş matrisidir. // \mathcal{M} , Hungarian yönteminin çıkışındaki eşleme kuralıdır.
3: Azalan şekilde Sırala: $P_i := P_u^L$
4: $U' = \emptyset$ ve $M^* = M$
5: for $i \leftarrow 1, P$, gerçekte
6: tekrarla
7: eğer $\sum_{i \in \{U, U'\}} P_i > P_T$
8: $U' = U' \cup \{u_i\}$
9: $M^* = M, M(U')$
10: $\sum_{i \in \{U, U'\}} P_i \leq P_T$ doğruysa
11: // Çıkış olarak M^* 'ı ver ve algoritmayı durdur.

Çizelge 2: Röle Seçimi için Birleşik Güç ve Alt-Taşıyıcı Atama Algoritması

1: for $j \leftarrow 1, M$, gerçekte
2: j . röle için (7)'ye göre P_u^L değerlerine karar ver ve bu değerlerle \mathcal{G} matrisini oluştur.
3: Alt-taşıyıcı ataması için Hungarian yöntemini [24] uygula. // \mathcal{G} , Hungarian yönteminin giriş matrisidir. // \mathcal{M} , Hungarian yönteminin çıkışındaki eşleme kuralıdır.
4: Azalan şekilde Sırala: $P_i := P_u^L$
5: $U' = \emptyset$ ve $M^* = M$
6: for $i \leftarrow 1, P$, gerçekte
7: tekrarla
8: eğer $\sum_{i \in \{U, U'\}} P_i > P_T$
9: $U' = U' \cup \{u_i\}$
10: $M^* = M, M(U')$
11: $P_j = \sum_{i \in \{U, U'\}} P_i$, $P_j \leq P_T$ doğruysa
12: Çıkış olarak M_j^* 'ı ver.
13: $M = \max_{j=1, M} M_j^* $ olarak belirle.
14: Eğer $ M > 1$, P_j değeri minimum olan röle seçilir.

Bu makalede önerdiğimiz NCC-OFDMA sistemler için röle seçimli birleşik güç ve alt-taşıyıcı atama algoritması ise Çizelge 2’de verilmiştir. Burada önceki yöntemden farklı olarak her bir röle için Hungarian tabanlı birleşik güç ve alt-taşıyıcı algoritması yardımıyla olası alt-taşıyıcı ve kullanıcı eşlemelerine karar verilir. Bu rölelerden en fazla eşlemeye sahip olan ya da eşit sayıda eşleme olması durumunda en az güç kullanılan durumdaki röle iletim için seçilir. Böylece, sistemde minimum güç harcanarak maksimum sayıda kullanıcının iletim yapması sağlanır.

4. Sayısal Sonuçlar

Bu bölümde önerilen algoritma kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar verilecektir. NCC-OFDMA sistemi $P = 4$, $N = 8$ parametrelerine sahiptir. Ayrıca güç koşulu P_T , N' ’ye eşit seçilmiştir. Farklı röle sayılarına göre elde edilen benzetim sonuçları incelenecektir.

Doğrudan görüş linklerinin olmadığı NC kullanılan OFDMA sistemi için alt-taşıyıcı, güç ve röle seçimini yapan algoritma kullanılarak elde edilen sonuçlar Şekil 4’te verilmiştir. Bu şekilde değişik sayıda röle içeren NC sistemi için elde edilen kesinti olasılığı sonuçları verilmektedir. Her bir durumda sadece tek bir röle seçilerek iletim yapılmaktadır. Şekilden görüldüğü üzere sistemdeki röle sayısının artması servis kesinti olasılığını iyileştirmektedir. Çeşitleme kazancının sistemdeki röle sayısı ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir.

NCC sistemi için elde edilen tek röle seçimi sonuçları ise Şekil 5’te verilmektedir. NC sisteminde elde edilen sonuçlarda da gözlemlendiği üzere, röle sayısı arttıkça servis kesinti olasılığı başarımla iyileşmektedir. Yine, çeşitleme kazancı röle sayısının artmasıyla ortaya çıkmaktadır.

5. Sonuçlar

Çalışmamızda pratikte uygulanabilir bir NCC-OFDMA sisteminin tasarımı hedeflenmiştir. Bu kapsamda NCC-OFDMA sistemlerde, kullanıcılar arasında adaletli atamayı sağlayarak rastgele ağırlıklandırılmış grafik yardımıyla minimum güç kullanılan eşleme sağlanmıştır. Böylece toplam iletim gücü birleşik olarak azaltılarak, kesintideki kullanıcı sayısını minimize eden ve röle seçimini gerçekleştiren eniyileme algoritması önerilmiştir.

Her bir kullanıcı-alt-taşıyıcı çiftinin gerekli iletim güç seviyesi bir alttaşıyıcının kesinti olasılığına göre belirlenmektedir. Her bir rölenin iletim için seçilmesi durumunda elde edilecek servis kesinti olasılığı, algoritma yardımıyla belirlenmiştir. Önerilen teknik kullanılarak NCC-OFDMA sistemlerin yüksek başarımla seviyesinde kullanımı mümkün olmaktadır.

6. Kaynaklar

- [1] J. Laneman and G. Wornell, “Distributed space-time-coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415–2425, Oct. 2003.
- [2] R. Nabar, H. Bolcskei, and F. Kneubuhler, “Fading relay channels: performance limits and space-time signal design,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1099 – 1109, Aug. 2004.

- [3] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, “User cooperation diversity. part I. system description,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.
- [4] J. Laneman, D. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [5] L. Zheng and D. Tse, “Diversity and multiplexing: a fundamental trade-off in multiple-antenna channels,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1073–1096, May 2003.
- [6] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, “Network information flow,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, July 2000.
- [7] Y. Chen, S. Kishore, and J. Li, “Wireless diversity through network coding,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, vol. 3, pp. 1681–1686, Apr. 2006.
- [8] S. Katti, H. Rahul, W. Hu, D. Katabi, M. Medard, and J. Crowcroft, “XORs in the air: Practical wireless network coding,” in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 3, pp. 497–510, June 2008.
- [9] C. Peng, Q. Zhang, M. Zhao, Y. Yao, and W. Jia, “On the performance analysis of network-coded cooperation in wireless networks,” in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 8, pp. 3090–3097, Aug. 2008.
- [10] H. Topakkaya and Z. Wang, “Wireless network code design and performance analysis using diversity-multiplexing tradeoff,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 2, pp. 488–496, Feb. 2011.
- [11] H. Gacanin and F. Adachi, “Broadband analog network coding,” in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 5, pp. 1577–1583, May 2010.
- [12] X. Wang, Y. Xu, and Z. Feng, “Physical-layer network coding in OFDM system: Analysis and performance,” in *Proc. Conference on Communications and Networking in China*, pp. 139–143, Aug. 2012.
- [13] B. Han, W. Wang, and M. Peng, “Optimal resource allocation for network coding in multiple two-way relay OFDM systems,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1642–1647, Apr. 2012.
- [14] M. Fareed, M. Uysal, and T. Tsiftsis, “Error-rate performance analysis of cooperative OFDMA system with decode-and-forward relaying,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 5, pp. 2216–2223, June 2014.
- [15] A. Nasri, R. Schober, and M. Uysal, “Performance and optimization of network-coded cooperative diversity systems,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 3, pp. 1111–1122, Mar. 2013.
- [16] M. Iezzi, M. Di Renzo, and F. Graziosi, “Network code design from unequal error protection coding: Channel-aware receiver design and diversity analysis,” in *Proc. IEEE International Conference on Communications*, pp. 1–6, June 2011.
- [17] —, “Closed-form error probability of network-coded cooperative wireless networks with channel-aware detectors,” in

- Proc. *Global Telecommunications Conference*, pp. 1–6, Dec 2011.
- [18] C. Peng, Q. Zhang, M. Zhao, and Y. Yao, “On the performance analysis of network-coded cooperation in wireless networks,” in Proc. *IEEE International Conference on Computer Communications*, pp. 1460–1468, May 2007.
- [19] T. Lv, S. Li, and W. Geng, “Combining cooperative diversity and network coding in uplink multi-source multi-relay networks,” in *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2013, no. 1, pp. 1–10, 2013.
- [20] J. T. Seong and H. N. Lee, “Predicting the Performance of Cooperative Wireless Networking Schemes With Random Network Coding,” in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 8, pp. 2951–2964, Aug. 2014.
- [21] Z. Tang, H. Wang, Q. Hu and C. Li, “Performance Analysis of Multi-User Multi-Round Linear Network Coded Cooperation,” in *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 1767–1770, Oct. 2014.
- [22] C. Y. Wong, R. Cheng, K. Lataief, and R. Murch, “Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 1747–1758, Oct. 1999.
- [23] S. T. Basaran and G. K. Kurt, “Joint subcarrier and power allocation in OFDMA systems for outage minimization,” in *IEEE Communications Letter*, vol. 20, no. 10, pp. 2007–2010, Oct. 2016.
- [24] H. W. Kuhn, “The Hungarian method for the assignment problem,” *Naval Research Logistics Quarterly*, vol. 2, pp. 83–97, 1955.



Semiha TEDİK BAŞARAN

Semiha Tedik Başaran Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği alanında lisans ve yüksek lisans derecelerini, İstanbul Teknik Üniversitesi, sırasıyla 2011 ve 2013 yıllarında aldı. Halen aynı bölümde doktora çalışmalarını sürdürürken araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Çalışmalarında, tam çift yönlü iletişim, ağ kodlama, kablolu haberleşme ve işbirlikli haberleşme üzerine odaklanmaktadır.



Güneş KARABULUT KURT

Güneş Karabulut Kurt lisans derecesini 2000 yılında Boğaziçi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde tamamladı. 2002 yılında yüksek lisans derecesini ve 2006 yılında doktora derecesini elektrik mühendisliği alanında, Kanada'nın Ontario eyaletindeki Ottawa Üniversitesi'nden aldı. 2000-2005 yılları arasında Ottawa Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2005-2006 arasında akıllı anten tasarımı ve uygulamaları hakkında TenXc şirketinde, 2006-2008 arasında çok taşıyıcılı modem tasarımı konusunda Edgewater şirketinde çalıştı. 2008 yılında Avrupa Birliği'nin Marie Curie-IRG programı ile Türkiye'ye dönerek Turkcell şirketinde araştırma geliştirime grubunda çalıştı. 2010 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü'ne Yardımcı Doçent olarak katıldı ve 2013 yılında Doçent unvanı aldı. Güneş Karabulut Kurt'un araştırma konuları çok taşıyıcılı, çok antenli iletişim sistemleri, OSI katmanları-arası güvenlik sistemleri, telsiz şebeke optimizasyonu ve bilişsel şebekelerdir.