

Dikgen Frekans Bölmeli Çoklu Erişim Sistemlerinde Telsiz Erişim Terminallerinin İşbirliği

Base Station Cooperation in Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) Systems

Turgut Barış Tokel, Defne Aktaş

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi, Ankara

{tokel, daktas}@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Gelecek nesil kablosuz iletişim sistemlerinde öngörülen veri hızlarına ulaşabilmek için bu sistemlerde frekans yeniden kullanım oranının 1 olmasına ihtiyaç vardır, bu ise özellikle hücre sınırlarındaki kullanıcıların önemli ölçüde hücreler arası girişime maruz kalmalarına neden olur. Telsiz erişim terminaleri arasında işbirliği hücreler arası girişimin azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu bildiri de çok hücreli, çok girdili çok çıktılı, dikgen frekans bölmeli çoklu erişim sistemlerinde telsiz erişim terminalerinden kullanıcılara işbirlikli veri iletimi problemini ele alıyoruz. Telsiz erişim terminalerinin aralarında kısıtlı ileti paylaşımı ile çizelgeleme ve veri iletimi yaptıkları etkin bir işbirlikli algoritma öneriyoruz.

Abstract

Achieving the targeted data rates for next generation wireless communication systems requires using frequency reuse ratio 1 in these systems, but this in turn results in significant intercell interference observed especially by the users near cell edges. Cooperation between the base stations plays an important role in reducing the intercell interference. In this paper, we consider the problem of cooperative data transmission from the base stations to the users in multicellular multiple input multiple output (MIMO) orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) systems. We propose an efficient cooperative scheduling and data transmission scheme, requiring limited information exchange between the base stations.

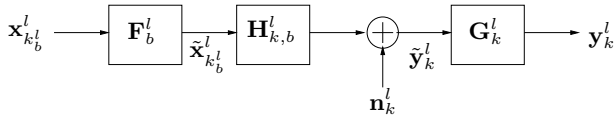
1. Giriş

Çok girdili çok çıktılı dikgen frekans bölmeli çoklu erişim teknikleri sistem kapasitesini önemli ölçüde arttırmaları nedeniyle WiMAX (IEEE802.16e standardı) [1] gibi günümüz kablosuz iletişim teknolojilerinin vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Bununla birlikte bu sistemlerden tam verim alınabilmesi için vericilerde tam bir kanal bilgisi gerekmektedir. Literatürde bu varsayımla hareket eden, çok hücreli dikgen frekans bölmeli sistemler için kaynak dağıtımı ve çizelgeleme konusunda çalışmalar mevcuttur [2, 3]. Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim sistemleri çok taşıyıcılı olduklarından kullanıcılardan telsiz erişim terminallerine ciddi mik-

tarda kanal bilgisi geribeslemesi yapılmasını gerektirmektedir. Bu pratik bir yöntem olmadığından geribesleme miktarını sınırlayarak en iyiye yakın başarımlar sağlayan yöntemler aranmaktadır [4]. Ancak yukarıda sözü geçen çalışmalarda çok girdili çok çıktılı sistemler göz önüne alınmamıştır.

Özellikle vericide kanal bilgisinin kısıtlı olduğu çok girdili çok çıktılı sistemlerde rasgele hüzmeye oluşturma yöntemi caziptir [5]. Bu yöntemde göre telsiz erişim terminalerinde kullanıcılarda da bilinen sözde rasgele birimcil (unitary) hüzmeye oluşturma matrisleri kullanılır. Eğer sistemde yeterince fazla kullanıcı varsa, bu yöntem ile birlikte kullanılan uygun bir kullanıcı çizelgeleme algoritması ile yüksek sistem spektral verimliliği elde edilebilir. Bununla birlikte çok taşıyıcılı sistemlerin sağladığı frekans çeşitlemesinden yararlanabilmek için her ara taşıyıcıya bu taşıyıcıda en iyi başarımlar sağlayan kullanıcı çizelgelenmelidir. Bu da kullanıcılardan telsiz erişim terminalerine yüksek miktarda geribesleme yapılmasını gerektirir. Bu geribesleme yükünü azaltmak için ara taşıyıcılar ara kanallara gruplanıp kullanıcı çizelgelemesi ara kanal bazında yapılabilir. Eğer ara kanallar arasındaki ilinti yüksek değilse frekans çeşitlemesinden fazla bir kayıp olmadığı görülür [6]. Rasgele hüzmeye oluşturma ve ara kanal bazında kullanıcı çizelgeleme yöntemi [7]'de ele alınmış, ancak hücreler arası girişim göz ardı edilmiştir.

WiMAX gibi yeni gelişen kablosuz iletişim sistemlerinde öngörülen veri hızlarına ulaşabilmek için bu sistemlerde frekans yeniden kullanım oranının 1 olmasına ihtiyaç vardır, bu ise özellikle hücre sınırlarındaki kullanıcıların önemli ölçüde hücreler arası girişime maruz kalmalarına neden olur. Telsiz erişim terminaleri arasında işbirliği hücreler arası girişimin azaltılmasında etkin bir yöntemdir. Bu makalede önerdiğimiz telsiz erişim terminalerinin işbirliği içerisinde kullanıcı çizelgeleme ve veri iletimi yaptığı sistem, verici antenleri coğrafik olarak dağıtılmış bir sistem olarak modellenebilir. Bu gözlemden faydalanarak yukarıda belirtilen rasgele hüzmeye oluşturma ve kullanıcı çizelgeleme yöntemlerini tam anlamda dağıtılmış olarak, telsiz erişim terminaleri aralarında kısıtlı miktarda ileti paylaşımı ve kullanıcılardan kısmi kanal durumu geribeslemesiyle gerçekleyen bir işbirlikli veri iletimi algoritması sunuyoruz. Sayısal benzetim çalışmalarıyla işbirlikli ve işbirliklessiz iletim yöntemlerinin başarımlarını karşılaştırıyoruz.



Şekil 1: Özet işaret modeli.

2. Sistem Modeli

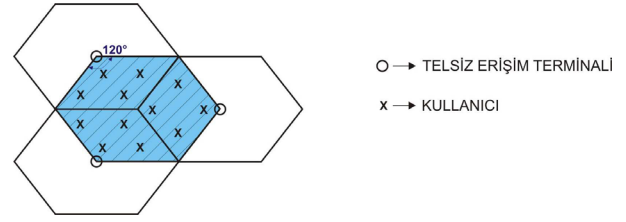
Ele aldığımız bağlantı çok hücreli, çok girdili çok çıktılı bir dikgen frekans bölmeli çoklu erişim sisteminde telsiz erişim terminallerinden kullanıcılara olan iletim bağıdır. Sistemde her biri N_t antenli B adet telsiz erişim terminali (TET) ve her biri N_r antenli K adet kullanıcı olduğunu varsayıyoruz. Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim sisteminde veri iletimi için L veri ara taşıyıcısı olduğunu, bunların S ara kanala gruplandırıldığını ve her hücrede her ara kanalda sadece bir kullanıcı çizelgelendiğini düşünüyoruz. Bu durumda kullanıcı k 'nin ara taşıyıcı l 'de FFT ve çevrimsel öntakı kaldırılması sonucu elde ettiği işaret vektörü

$$\tilde{\mathbf{y}}_k^l = \sum_{b=1}^B \mathbf{H}_{k,b}^l \tilde{\mathbf{x}}_{k_b}^l + \mathbf{n}_k^l, \quad (1)$$

olarak ifade edilir; burada $N_r \times N_t$ boyutlu $\mathbf{H}_{k,b}^l$ matrisi, kullanıcı k ve TET b arasındaki kanal matrisini, k_b^l TET b 'deki ara taşıyıcı l 'ye çizelgelenen kullanıcının indisini, $\tilde{\mathbf{x}}_{k_b}^l$ TET b 'den ara taşıyıcı l 'de gönderilen işaret vektörünü ve \mathbf{n}_k^l toplanır beyaz Gauss gürültü vektörünü temsil etmektedir. Kanal matrisi ve gürültü vektörünün elemanları bağımsız özdeşçe dağılmış sıfır ortalamalı dairesel simetrik karmaşık Gauss dağılımlı rasgele değişkenler olarak modellenir. Gürültü vektörü elemanlarının değışintisi 1, TET b ile kullanıcı k arasındaki uzaklık $d_{k,b}$ ve yol kayıp değışkeni n için kanal matrisinin elemanlarının değışintisi ise $1/(d_{k,b})^n$ olarak alınmıştır.

TET b 'den ara taşıyıcı l 'de gönderilen işaret vektörü $\tilde{\mathbf{x}}_{k_b}^l = \mathbf{F}_b^l \mathbf{x}_{k_b}^l$ şeklinde hesaplanır. Burada \mathbf{F}_b^l TET b 'nin ara taşıyıcı l 'de kullandığı $N_t \times Q$ boyutunda rasgele birimcil hüzmeye oluşturma matrisidir. TET b 'de ara taşıyıcı l 'de çizelgelenen kullanıcı k_b^l 'nin bu taşıyıcıda gönderilmek üzere Q adet bağımsız veri simge sürüsü olduğu varsayılır ve veri simge vektörü $\mathbf{x}_{k_b}^l$ 'nin elemanları bağımsız özdeşçe dağılmış sıfır ortalamalı ve P değışintili dairesel simetrik karmaşık Gauss dağılımlı rasgele değışkenler olarak modellenir. Bildiride işaret modelini basit tutmak için her kullanıcının aynı sayıda veri simge sürüsü olduğu ve her kullanıcıya aynı miktarda güç tahsis edildiği varsayılmıştır. Bu durumda sistemin toplam iletim gücü $P_t = BLQP$ olarak hesaplanır. Alıcı karmaşıklığını azaltmak için kullanıcı k , ara taşıyıcı l 'de gönderilen veri simge vektörü \mathbf{x}_k^l 'in elemanlarını bireysel olarak sezmek amacıyla, alınan $\tilde{\mathbf{y}}_k^l$ vektörünü alıcı hüzmeye matrisi \mathbf{G}_k^l ile işleyerek Q boyutunda $\mathbf{y}_k^l = \mathbf{G}_k^l \tilde{\mathbf{y}}_k^l$ vektörünü oluşturur. TET b ile kullanıcı k arasında ara taşıyıcı l için işaret modeli Şekil 1'de özetlenmiştir.

Kullanıcıların birbirileri ve kendi veri simge sürüsü elemanları arasındaki girişimi bastırarak işaret işleme yöntemleri izlemediği varsayılırsa, bu iki girişim kaynağı veri simgelerinin seziminde ek bir Gauss gürültü olarak modellenebilir.



Şekil 2: Üç hücreli işbirlikli iletim sistemi.

3. İşbirlikli Çizelgeleme ve Veri İletimi

Telsiz erişim terminaleri halihazırda birbirlerine yüksek veri kapasiteli kablolu veya kablosuz hatlarla bağlıdır. Dolayısıyla aralarında ileti paylaşımı yaparak ara kanallarda çizelgelenen kullanıcılar ve bu kullanıcılara nasıl veri iletimi yapılacağına birlikte karar verebilirler. Bu nedenle özellikle yüksek girişime maruz kalan hücre sınırlarındaki kullanıcılara işbirlikli iletim yapılabilir ve uzamsal çeşitlemeden faydalanmak suretiyle bu kullanıcılarda erişilen veri hızlarında ciddi artışlar sağlanabilir. Ancak hücrelerde her ara taşıyıcıda sadece bir kullanıcının verisi iletildiği için bu işbirlikli sistem antenleri dağıtılmış bir çok girdili çok çıktılı tümegönderim sistemi olarak modellenemez. Bu gözlemlerden faydalanarak önerdiğimiz işbirlikli çizelgeleme ve veri iletimi algoritmasını bu bölümde özetliyoruz.

Çok hücreli bir sistemde her hücrede her biri 120 derecelik üç sektör olduğu varsayılır. Bu durumda hücreler arası girişim sadece, Şekil 2'de betimlenen üç komşu hücrenin sektörlerinin keşitdiği alanda etkili olacaktır, şekilde gölgelenen alanda birörnek dağıldığı varsayılan kullanıcılara üç hücredeki TET'lerin işbirlikli iletim yaptığı durum ele alınmaktadır. Sistemi basitleştirmek için TET'ler arasındaki eşzamanlamanın mükemmel olduğu varsayılır. Kanal bilgisi geribeslemesini kısıtlamak için kullanıcılar ara kanal bazında çizelgelenir. Her hücrede her ara kanalda sadece bir kullanıcı çizelgelenir. Her kullanıcının üç TET'ten kendisine olan kanal matrislerini mükemmel olarak bildiği varsayılır. Kullanıcılar TET'lerdeki sözde rasgele hüzmeye oluşturma matrislerini de bildiklerinden veri hızlarını enbüyütmek için hüzmeye oluşturma matrisleri \mathbf{G}_k^l 'yi en küçük ortalama karesel hata hüzmeye oluşturma matrisi olarak seçerler.

Herhangi bir ara kanalda çizelgelenen kullanıcılar için aşağıda listelenen iki farklı iletim stratejisi altında elde edilen veri hızları hesaplanır:

1. Ara kanalda her kullanıcıya sadece kendi hücredeki TET tarafından veri iletilir.
2. Ara kanalda kullanıcıya üç TET birlikte işbirlikli iletim yapar.

Her kullanıcı bu iki farklı iletim stratejisi altında her ara kanal s 'de erişebilecekleri veri hızlarını, $R_k^{(i)}(s)$, kendi hücredeki TET'e geribesleme iletimi olarak gönderir. Dikgen frekans bölmesi nedeniyle ara kanaldaki veri hızı, ara kanaldaki tüm ara taşıyıcılarda erişilen veri hızlarının toplamıdır. Kullanıcı k 'nin l ara taşıyıcısında erişebileceği toplam veri hızı $R_k^l = \sum_q \log_2(1 + \text{SINR}_{k,q}^l)$ olarak hesaplanır. Burada $\text{SINR}_{k,q}^l$ kullanıcı k 'nin ara taşıyıcı l 'de gönderilen veri simge vektörünün q . elemanının gördüğü sinyal gücünün girişim artı gürültü gücüne

oranını ifade eder. Bu değer işbirliksiz iletim için

$$\text{SINR}_{k,q}^l = \frac{|(\mathbf{A}_{k,b_k^l}^l)_{qq}|^2}{\sum_{j,b} |(\mathbf{A}_{k,b}^l)_{qj}|^2 - |(\mathbf{A}_{k,b_k^l}^l)_{qq}|^2 + \frac{1}{P} \sum_j |(\mathbf{G}_k^l)_{qj}|^2}, \quad (2)$$

işbirlikli iletim için ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{SINR}_{k,q}^l = \frac{|\sum_b (\mathbf{A}_{k,b}^l)_{qq}|^2}{\sum_{j:j \neq q} |\sum_b (\mathbf{A}_{k,b}^l)_{qj}|^2 + \frac{1}{P} \sum_j |(\mathbf{G}_k^l)_{qj}|^2}. \quad (3)$$

Burada, $(\mathbf{A})_{ij}$ \mathbf{A} matrisinin (i, j) elemanını temsil eder. $\mathbf{A}_{k,b}^l = \mathbf{G}_k^l \mathbf{H}_{k,b}^l \mathbf{F}_b^l$ ise $b : k_b^l = k$ olarak tanımlanır.

TET b , ara kanal s ve her iletim stratejisi için kendisine geribeslenen veri hızlarının en büyüğünü, $R_b^{(i)}(s) = \max_k R_k^{(i)}(s)$, hesaplar. Telsiz erişim terminaleri bu iki veri hızı bilgisini aralarında paylaşarak sistemin ara kanal s 'deki toplam veri hızı $C(s)$ 'yi aşağıdaki gibi hesaplarlar.

$$C(s) = \max_i C_i(s), \quad (4)$$

$$C_1(s) = R_1^{(1)}(s) + R_2^{(1)}(s) + R_3^{(1)}(s), \quad (5)$$

$$C_2(s) = \max(R_1^{(2)}(s), R_2^{(2)}(s), R_3^{(2)}(s)). \quad (6)$$

Böylece ara kanal s 'de hangi kullanıcıların çizelgelendiğine ve hangi veri iletim stratejisinin kullanılacağına karar verilmiş olur. Bu bilgi veri iletim diliminden önce tümegönderim iletimi olarak bütün kullanıcılara iletilir. Bu işbirlikli algoritmada $C_1(s)$ işbirliksiz iletim durumunda elde edilen veri hızına karşılık geldiği için işbirliğinin getirisi olmadığı durumlarda algoritmanın işbirliksiz iletimin seçilmesine olanak sağladığına dikkat çekmek isteriz. Ancak bunun karşılığında işbirlikli yöntemde fazladan geribesleme yükü ve TET'ler arasında ileti paylaşımı gerekmektedir.

Son olarak Bölüm 4'te de gösterildiği gibi yukarıda özetlenen işbirlikli algoritmada çizelgelemede kullanılan eniyileme ölçütü toplam veri hızını enbüyütmek olduğu için kullanıcılar arasında adil bir çizelgeleme olmaz. Kullanıcılara orantılı adil bir çizelgeleme [5] hedefleniyorsa, kullanıcılar TET'lere, anlık veri hızlarını, zamana göre ortalaması alınmış veri hızlarının tersi ile ağırlıklandırarak geri beslemelidirler.

4. Sayısal Sonuçlar

İşbirliğinin getireceği kazancı araştırmak için önerdiğimiz işbirlikli çizelgeleme ve veri iletimi algoritmasının başarımı ile işbirliksiz (geleneksel) çizelgeleme ve veri iletimi yönteminde elde edilen başarım, farklı toplam iletim güçleri altında karşılaştırıldı. İşbirliksiz iletim yönteminde her telsiz erişim terminali sadece kendi hücreindeki kullanıcılara veri iletir ve kullanıcıların çizelgelenmesi sadece kendi hücreindeki kullanıcılardan geribeslenen veri hızlarına göre yapılır. Başarım karşılaştırmasında kullanıcı çizelgeleme aşaması için iki farklı eniyileme ölçütü ele alınmıştır: Toplam (tüm kullanıcılar ve ara kanallar üzerinden) veri hızı ve orantılı adil çizelgeleme için toplam zamana göre ortalaması alınmış veri hızı.

Bu iki iletim yönteminin başarımı sayısal benzetim çalışmalarıyla karşılaştırılmıştır. Benzetimde kullanılan

Tablo 1: Sayısal Benzetimde Kullanılan Değişkenler

Verici anten sayısı (N_t)	2
Alıcı anten sayısı (N_r)	2
Veri simge sürüsü sayısı (Q)	2
FFT uzunluğu (F)	512
Veri ara taşıyıcı sayısı (L)	384
Ara kanal sayısı (S)	8
Hücre sayısı (B)	3
Hücre yarıçapı	1000 m
Yol kaybı değişkeni (n)	3.8
Lognormal gölgeleme standart sapması	8 dB

değişkenler Tablo 1'de özetlenmiştir. Elde edilen ortalama veri hızlarının toplam kullanıcı sayısına göre değişimi incelenmiştir. Veri hızları, 100 değişik kullanıcı dağılım senaryosu ve her senaryo için de 100 farklı kanal gerçekleştirilmesi ve rasgele hüzmeye oluşturma matrisleri için kullanılan kod tablosu üzerinden ortalama alınarak hesaplanmıştır.

Şekil 3'te çizelgeleme en yüksek toplam veri hızı ölçütüne göre yapılmış ve işbirlik başarım kazancı farklı toplam iletim güçleri (P_t) için karşılaştırılmış ve bunun için aşağıdaki metrik tanımlanmıştır.

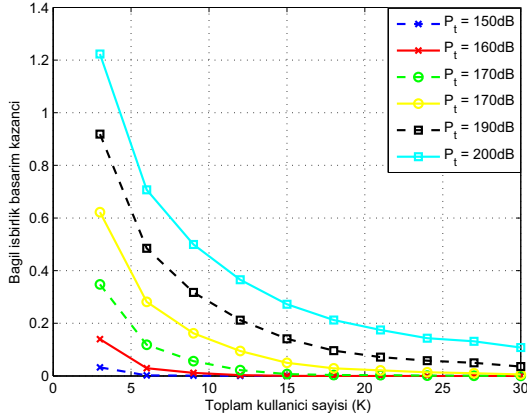
$$\text{Bağıl işbirlik başarım kazancı} = \frac{C_{\text{işli}} - C_{\text{işsiz}}}{C_{\text{işsiz}}} \quad (7)$$

Burada, $C_{\text{işli}}$ işbirlikli toplam veri hızını, $C_{\text{işsiz}}$ ise işbirliksiz toplam veri hızını temsil etmektedir.

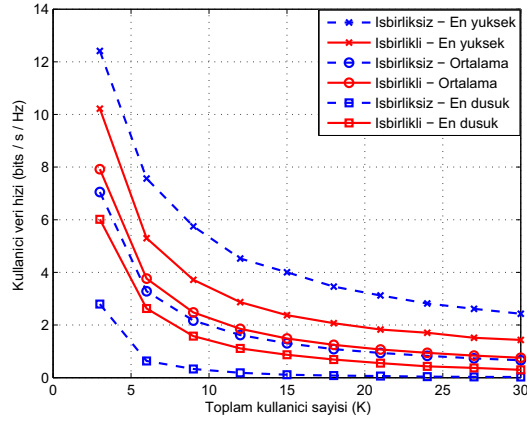
En yüksek toplam veri hızı gibi kullanıcıların adil çizelgelenmesinin hedeflenmediği çizelgeleme algoritmalarında, kullanıcı sayısı arttıkça işbirliği kazanımları azalmaktadır. Bunun nedeni kullanıcı sayısı yüksek olduğunda telsiz erişim terminalerinin kendi hücreleri içinde her zaman çok iyi anlık kanala sahip hücre sınırlarından uzak bir kullanıcı bulabilmeleridir. Şekilde, beklenildiği gibi toplam iletim gücü (P_t) arttıkça işbirlik başarım kazancının arttığı gözlenmektedir; çünkü bu durumda hücreler arası girişim başarımında daha baskın bir etken olmaktadır.

Çizelgelemenin daha adil yapıldığı orantılı adil çizelgeleme algoritmasında işbirlikli ve işbirliksiz yöntemlerle elde edilen kullanıcı veri hızları, toplam iletim gücü $P_t = 170$ dB için Şekil 4'te karşılaştırılmıştır. Şekilde iki yöntemde kullanıcıların elde ettikleri en yüksek, en düşük ve ortalama veri hızları betimlenmiştir. İşbirliğinin kazanımları adil çizelgeleme durumunda çok daha açık bir şekilde görülmektedir. Bu çizelgeleme yönteminde sistem, kanal koşullarına bağlı olmadan bütün kullanıcılar için eşit süre harcamaya çalışmaktadır [5]. İşbirliği kullanıldığı zaman en yüksek kullanıcı hızı daha düşük olsa da, hem ortalama kullanıcı hızı hem de en düşük kullanıcı hızı işbirliksiz yöntemde daha yüksek olmaktadır. Bunun nedeni işbirliksiz yöntemde, sistemdeki telsiz erişim terminaleri sadece kendi hücrelerinde adil bir çizelgeleme yaparken, işbirlikli yöntemde sistemdeki bütün kullanıcılar arasında adil bir çizelgeleme yapılmasıdır.

Şekil 5'te ise sabit kullanıcı sayısı için, değişen toplam iletim gücüne göre en küçük kullanıcı veri hızları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi işbirliği kullanılmadığı takdirde en düşük veri hızları artan iletim gücü ile geliştirilememekte, fakat işbirliği kullanılırsa en düşük hızlar önemli ölçüde artırılabilir.



Şekil 3: En yüksek toplam veri hızı çizelgesinde bağıl işbirlik başarımlarının karşılaştırılması.

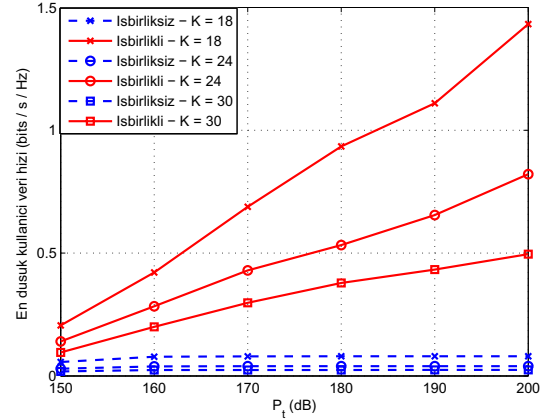


Şekil 4: Orantılı adil çizelgeleme yönteminde kullanıcı veri hızı karşılaştırılması ($P_t = 170$ dB).

5. Sonuç

Bu bildiriye, frekans yeniden kullanım oranı 1 olan çok hücreli, çok girdili çok çıktılı, dikgen frekans bölümlü çoklu erişim sistemlerinde telsiz erişim terminallerinden kullanıcılara işbirlikli veri iletimi problemini ele aldık. Kullanıcıların kanal durumu hakkında kısıtlı geribesleme yaptıkları ve telsiz erişim terminalleri arasında da kısıtlı ileti paylaşımı gerektiren etkin bir işbirlikli çizelgeleme ve veri iletimi algoritması önerdik.

Sayısal benzetim çalışmaları, özellikle hücreler arası girişimin etkin olduğu, yüksek toplam iletim gücü senaryolarında işbirlikli kazancının yüksek olduğunu göstermiştir. İşbirlikli kazanımları adil çizelgeleme yönteminde daha açık bir şekilde görülmektedir. İşbirlikli, hücre sınırlarındaki kullanıcılara da kabul edilebilir veri hızları sağlayabildiğinden, özellikle hücreler arası girişimin baskın olduğu koşullarda, toplam sistem verimliliğini fazla düşürmeden kullanıcıların en düşük veri hızı gereksinimlerini de sağlayabilmektedir. Önerdiğimiz algoritmanın geribesleme yükünü daha da azaltmak amacıyla kullanıcıların girişim seviyelerini dikkate alarak geribesleme yaptıkları şekilde algoritmayı geliştirme çalışmalarımız sürmektedir.



Şekil 5: Orantılı adil çizelgeleme yönteminde en düşük kullanıcı veri hızı karşılaştırılması.

6. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK Kariyer Programı EEEAG-107E199 projesi ve Avrupa Birliği 7. Çerçeve Programı WiMAGIC (kontrat no. INFISO-ICT-215167) projesi tarafından desteklenmiştir.

7. Kaynakça

- [1] *Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems*, IEEE 802.16e-2005 Std.
- [2] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 1747–1758, Oct. 1999.
- [3] H. Kim, Y. Han, and J. Koo, "Optimal subchannel allocation scheme in multicell OFDMA systems," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Milan, Italy, May 2004, pp. 1821–1825.
- [4] S. Gault, W. Hachem, and P. Ciblat, "Performance analysis of an OFDMA transmission system in a multicell environment," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 5, pp. 740–751, Apr. 2007.
- [5] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277–1294, June 2002.
- [6] J. G. Andrews, A. Gnosh, and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. Prentice Hall, 2007.
- [7] C. Han, A. Doufexi, S. Armour, J. McGeehan, and Y. Sun, "Random beamforming OFDMA for future generation cellular communication systems," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Baltimore, MD, USA, Sept. 2007, pp. 516–520.