

Çok Kullanımcılı Çok Antenli Sistemlerde İşbirlikli İletim Cooperative Transmission for Multiuser MIMO Systems

Yakup K. Yazarel[†], Defne Aktaş[‡]

[†] Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

[‡] Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilkent Üniversitesi

daktas@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada işbirlikli, çok kullanıcı, ve çok antenli bir haberleşme sisteminde telsiz erişim terminallerinin en iyi veri iletimi tekniğine ortaklaşa karar vermeleri problemini inceliyoruz. Burada pek çok çalışmadan farklı olarak kullanıcıların bireysel başarımlarını hedefleri ve anten başına iletim gücü kısıtlamaları olduğu durumu ele alıyoruz. Önceki bir çalışmamızda bu kısıtlamalar altında en iyi sonucu bulan döngülü bir algoritma sunmuştuk. Ancak bu algoritma merkezi bir yapıda olduğu için tam anlamıyla dağıtılmış şekilde gerçekleştirilememektedir. Bununla birlikte basit yaklaşımlar kullanarak en iyiye yakın bir başarımlar sağlayan ve kısıtlı ve yerel veri iletimi ile gerçekleştirilebilecek etkin bir algoritma öneriyoruz.

Abstract

In this work, we investigate the problem of jointly determining the optimal transmission scheme at the base stations in a cooperative multiuser multiple antenna system. In this optimization problem, different than majority of other works in the literature, we consider the case where there are individual performance targets for the users and per antenna power constraints at the base stations. In an earlier work, we presented an iterative algorithm that computes the solution of this optimization problem. However since the proposed algorithm has a centralized structure, it can not be implemented in a fully distributed nature. Nevertheless by utilizing a simple approximation, we propose a suboptimal algorithm that can be implemented with local and limited information exchange between base stations.

1. Giriş

Çok kullanıcı kablosuz sistemlerde yüksek veri hızları elde etmede en önemli zorluklardan biri kullanıcılar arasındaki çoklu erişim girişimidir. Telsiz erişim terminallerinde (baz istasyonlarında) kullanılan işbirlikli iletim teknikleriyle bu girişimi etkili bir şekilde azaltarak yüksek spektral verimlilik elde etmek mümkündür. Telsiz erişim terminallerinden (TET'lerden) gezgin kullanıcı terminallerine işbirlikli veri iletimi olan sistemler, antenleri coğrafik olarak dağıtılmış bir çoklu girdi çoklu çıktı yayın kanalı olarak modellenilebilir. Bu kanalda hüzme oluşturma (beamforming) tekniği ile doğrusal olmayan ve karmaşıklığı yüksek kirliliği kodlaması (dirty paper coding) tekniğinin birlikte kullanılmasının sistem kapasitesini elde ettiği gösterilmiştir [1]. Ancak hüzme oluşturma teknikleri hem

dağıtılmış olarak daha kolay gerçekleştirilebilmeleri hem de bazı koşullarda en iyiye çok yakın başarımların sergilemeleri [2] nedeniyle işbirlikli sistemler için daha caziptir.

Bu çalışmada TET'lerin mükemmel kanal bilgisine sahip oldukları durumda işbirliği içerisinde en iyi hüzme oluşturma vektörlerini dağıtılmış olarak hesaplamaları problemini ele alıyoruz. Bu en iyileme probleminde enküçültülmek istenen amaç işlevi sistemde harcanan toplam iletim gücüdür ve kısıt kümesi her kullanıcı için bir başarımlar hedefi olarak işaret gücünün toplam girişim ve gürültü güçlerine oranı (SINR) hedefi ve verici antenlerinde harcanan güç kısıtlaması olarak da anten başına ortalama iletim gücü kısıtlamasından oluşmaktadır. Daha önceki bir çalışmamızda bu problemin çözümünü bulan döngülü bir algoritma sunmuştuk [3].

Yakın zamanda literatürde benzer en iyileme problemlerini ele alan pek çok çalışma vardır, örneğin [4–10]. Bunlardan bir kısmı, kullanıcı sayısının artmasıyla sonuçta en iyi çözüme yaklaşan ancak kanalın dikgen olmaması durumunda en iyinin çok altında başarımlar veren ve girişimi tamamen engellemeyi hedefleyen sıfıra zorlayan (zero forcing) hüzme oluşturma tekniğine odaklanmıştır [6, 7, 10]. Diğer bir grup çalışmada toplam sistem gücü kısıtlaması altında sistem kapasitesini enüyükleyen ya da kullanıcı başına başarımlar hedefleri altında toplam sistem gücünü enküçülten en iyi hüzme vektörlerini bulan algoritmalar sunulmuştur [4, 5]. Ancak toplam sistem gücü kısıtlaması pratik sistemler için gerçekçi değildir; her verici antenin iletebileceği en yüksek güç, güç yükseltici devresinin kısıtlı doğrusal erimi ile sınırlıdır. Dolayısıyla [3, 6–10]'de anten başına iletim gücü kısıtlaması olan durum ele alınmıştır.

Pratikte uygulanabilir işbirlikli iletim için TET'lerin merkezi bir kontrol ünitesine gereksinim duymadan aralarında kısıtlı veri iletimi ile en iyi hüzme vektörlerini bulabilmeleri daha caziptir. Ancak yukarıda bahsettiğimiz çalışmalarda önerilen tekniklerin tam anlamıyla dağıtılmış olarak gerçekleştirilmesi mümkün değildir. Bu çalışmada [3]'te sunduğumuz algoritmada basit yaklaşımlar kullanarak TET'lerin aralarında kısıtlı ve yerel iletilerle en iyiye yakın iletim tekniğini buldukları bir algoritma sunuyoruz. Sayısal benzetim çalışmalarıyla önerilen dağıtılmış algoritmanın başarımlarını, en iyi sonucu bulan merkezi algoritmanınki ile karşılaştırıyoruz.

2. Sistem Modeli

Toplam N adet TET anteni ve K adet tek antenli gezici kullanıcı terminali olan bir işbirlikli sistem ele alıyoruz. Kullanıcılar ve TET'ler arasındaki kanalları frekans seçici olmayan kanal olarak modelliyoruz ve kanalların tüm sistem elemanları tarafından bilindiğini varsayıyoruz. Tüm TET'lerce gönderilen işaret vektörünü $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_N]^T$, i . kullanıcıya olan kanal kazançlarını $1 \times N$ boyundaki kanal vektörü \mathbf{h}_i^H olarak tanımlarsak i . kullanıcıdaki alınan işaret

$$y_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{x} + n_i \quad (1)$$

olarak verilir. Bu denklemde n_i kullanıcıdaki sıfır ortalamalı σ^2 değişintili karmaşık Gauss gürültüyü temsil etmektedir.

TET'ler doğrusal bir iletim tekniği olan hüzme oluşturma tekniğini kullandıkları için iletilen işaret

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K s_k \mathbf{w}_k \quad (2)$$

şeklinde ifade edilebilir; burada s_k birim enerjili k . kullanıcıya gönderilecek bilgi simgesini, \mathbf{w}_k bu kullanıcı için $N \times 1$ boyundaki hüzme vektörünü belirtmektedir. Böylelikle k . kullanıcıya atanan güç $\tilde{P}_k = \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k$ ve n . TET anteninde harcanan iletim gücü ise $\hat{P}_n = E[|x_n|^2] = \left(\sum_{j=1}^K \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \right)_{nn}$ olarak verilir. Bu bildiriye genel bir \mathbf{A} matrisinin (i,j) elemanı \mathbf{A}_{ij} olarak gösterilmektedir.

Kullanıcıların karmaşık girişim engelleyici ya da azaltıcı teknikler kullanmadıkları ve işbirliği yapmadıkları varsayılırsa, i . kullanıcı için aşağıda tanımlanan işaret gücünün gürültü ve girişim güçlerine oranı bir başarımlı hedefi olarak alınabilir:

$$\text{SINR}_i = \frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_i|^2}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^K |\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

3. Merkezi İşbirlikli İletim Algoritması

Kullanıcıların her biri için muhtemelen farklı servis kalitesi hedeflerine karşılık gelen bireysel SINR gereksinimleri (γ_i , $i \in [1, \dots, K]$) ve her TET anteni başına güç kısıtlaması (P_n , $n \in [1, \dots, N]$) altında toplam iletim gücünü enküçülten hüzme vektörlerini hesaplayan bir algoritmayı ele alıyoruz. Bu en iyileme problemini matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$\min_{\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K} \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k \quad (4)$$

$$\left(\sum_{j=1}^K \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \right)_{nn} \leq P_n \quad n = 1, \dots, N, \quad (5)$$

$$\frac{|\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_i|^2}{\sum_{k \neq i} |\mathbf{h}_i^H \mathbf{w}_k|^2 + \sigma^2} \geq \gamma_i \quad i = 1, \dots, K. \quad (6)$$

Bu en iyileme problemi dışbükey olmasa da $\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k$ 'in gerçek olması kısıtlaması altında eşdeğer bir ikinci dereceden konik programlama problemine dönüştürülebilir [8]. Güçlü ikilik (strong duality) koşullarının sağlandığı ispatlanabildiğinden

bu problemi eşdeğer (dual) Lagrangian problemi kullanarak çözmek mümkündür. Bu yöntem ile en iyi hüzme vektörlerini hesaplayan döngülü bir algoritmayı [3]'te sunmuştuk. Burada kısaca özetliyoruz.

1. Algoritmanın başlangıç aşaması: $t \leftarrow 0$. Elemanları güç kısıtlamalarına karşılık gelen ikilik (dual) değişkenlerinden oluşan köşegen matrisin başlangıç değeri $\mathbf{Q}^{(0)}$ olarak herhangi bir matris atanır.

2. $t \leftarrow t + 1$.

3. Aşağıdaki denklem başarımlı hedeflerine karşılık gelen ikilik değişkenleri olan $\lambda^{(t)}$ için sabit noktalı döngüleme (fixed point iteration) tekniğiyle çözümler:

$$\lambda_k^{(t)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\gamma_k} \right) \mathbf{h}_k^H \left(\mathbf{I} + \mathbf{Q}^{(t-1)} + \sum_{j=1}^K \lambda_j^{(t)} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right)^\dagger \mathbf{h}_k} \quad (7)$$

Burada \mathbf{I} birim matrisi ve $(\cdot)^\dagger$ sözde-evrięi (pseudoinverse) temsil etmektedir.

4. Aşağıdaki denklem kullanılarak $\hat{\mathbf{w}}_k^{(t)}$ hesaplanır:

$$\hat{\mathbf{w}}_k^{(t)} = \left(\mathbf{I} + \mathbf{Q}^{(t-1)} + \sum_{j=1}^K \lambda_j^{(t)} \mathbf{h}_j \mathbf{h}_j^H \right)^\dagger \mathbf{h}_k. \quad (8)$$

5. $\mathbf{G}^{(t)}$ matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\mathbf{G}_{ij}^{(t)} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_i} |\mathbf{h}_i^H \hat{\mathbf{w}}_i^{(t)}|^2 & i = j \\ -|\mathbf{h}_i^H \hat{\mathbf{w}}_j^{(t)}|^2 & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

Hüzme vektörleri $\mathbf{w}_k^{(t)} = \sqrt{\delta_k^{(t)}} \hat{\mathbf{w}}_k^{(t)}$ şeklinde hesaplanır. Burada $\delta_k^{(t)} = \sigma^2 \sum_{j=1}^K ((\mathbf{G}^{(t)})^{-1})_{kj}$ şeklinde alınır.

6. $\mathbf{Q}^{(t)}$ 'nin köşegenleri aşağıdaki şekilde güncellenir:

$$q_n^{(t)} = \max \left(0, q_n^{(t-1)} + \mu_t (\text{diag}(\mathbf{b}^{(t)}) - \Phi) \right), \quad (10)$$

Bu denklemde $\mathbf{b}_n^{(t)} = \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k^{(t)} (\mathbf{w}_k^{(t)})^H \right)_{nn}$, Φ elemanları anten güç kısıtlamaları olan köşegen matrisi ve μ_t adım büyüklüğünü temsil etmektedir. Adım büyüklüğü $\mu_t = 1/t$ olarak alınabilir [8].

7. Yakınsama koşulu sağlanmadıysa 2. basamağa dönülür.

En iyileme probleminin bir çözümü olduğu durumlarda sunulan algoritmanın bu çözüme her zaman yakınsadığı gösterilebilir. Algoritmanın detayları için okuyucuyu [3]'e yönlendiriyoruz.

4. Dağıtılmış İşbirlikli İletim Algoritması

Bir önceki bölümde sunulan iletim algoritması sistemdeki tüm TET'lerin birbiriyle ileti paylaşımını gerektirdiğinden gerçekleşmesi için merkezi bir kontrol ünitesine ihtiyaç vardır. Oysa ki işbirlikli iletim tekniklerinin pratik sistemlerde kullanılması için tam anlamda dağıtılmış, yani TET'ler arasında kısıtlı miktarda ve yerel veri iletimine dayalı, iletim algoritmaları tercih edilir. Bu bölümde yukarıda sunulan algoritmayı

bazı yaklaşıklıklar kullanarak tam anlamda dağıtılmış olarak gerçekleyen ve en iyiye yakın başarımları sağlayan bir algoritmayı öneriyoruz.

Bu bölümde geliştirilen algoritma için bu çok kullanıcı sistemdeki kanalda yerel çoklu erişim girişimi olduğunu varsayıyoruz. Bu yerel girişim, kanalı Markov bir yapıda modellememize imkan tanımaktadır. Tüm kullanıcıların kanal vektörlerini bir matrisin sıraları olacak şekilde alt alta sıralarsak, bu kanal matrisinin aşağıdaki gibi üçlü köşegen bir yapısı olduğu varsayılmaktadır.

$$\mathbf{H}_{ij} = \begin{cases} \alpha_j, & i = j \\ \alpha_j^f, & i = j + 1 \\ \alpha_j^b, & i = j - 1 \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (11)$$

Burada her TET'in sadece bir anteni olduğu, $N = K$, i . kullanıcının i . TET'e en yüksek kanal kazancı olduğu ve yalnızca iki başka TET'ten girişim gözlemediği varsayılmıştır. Bu model Wyner'in [11]'de önerdiği basit doğrusal hücre dizini modelinin genelleştirilmesidir. Pratik sistemler için basit bir model olsa da temel ilkelerin kolayca kavranmasına olanak verdiği için seçilmiştir.

Yukarıdaki algoritma incelendiğinde (8)'de verilen $\hat{\mathbf{w}}_k$ vektörünün en küçük hata ortalamasının karesi (minimum mean square error (MMSE)) hüzme vektörü yapısında olduğu görülür. Ayrıca sabit noktalı döngülü metodun kullanıldığı 3. basamakta aşağıdaki gözlem kullanılabilir:

$$\lambda_k^{(t)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{\gamma_k}\right) \mathbf{h}_k^H \hat{\mathbf{w}}_k^{(t)}}. \quad (12)$$

Köşegenleri başarımlar hedeflerine karşılık gelen ikilik değişkenleri λ_k olan köşegen matrisi Λ olarak tanımlayalım. Dolayısıyla verilen bir Λ için $\hat{\mathbf{w}}_k$ vektörlerini dağıtılmış bir algoritma ile hesaplırsak, her TET sabit noktalı denklemi (12)'yi kullanarak yerel olarak çözebilir.

MMSE hüzme vektörlerinin dağıtılmış olarak hesaplanmasında [12]'te sunduğumuz Kalman düzgülendirme (smoothing) prensibine dayalı ileri-geri (forward backward) algoritması kullanılabilir. Sütunları $\hat{\mathbf{w}}_k$ olan matrisi $\hat{\mathbf{W}}$, $\Gamma = \mathbf{I} + \mathbf{Q}$, $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\Gamma^{1/2}$ şeklinde tanımlarsak:

$$\hat{\mathbf{W}} = (\tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{H}}^H + \Gamma)^{\dagger} \tilde{\mathbf{H}}\Gamma^{-1/2}. \quad (13)$$

Bu yapı aşağıdaki gözlem denklemi için doğrusal MMSE kestirim problemine eşleniktir:

$$\Gamma^{-1/2} = \tilde{\mathbf{H}}\hat{\mathbf{W}} + \tilde{\mathbf{N}}. \quad (14)$$

Bu denklemde kestirilen değişken $\hat{\mathbf{W}}$ olarak verilir ve $\tilde{\mathbf{N}}$ matrisinin sütunları sıfır ortalamalı ortak değişinti matrisi Γ olan Gauss vektörleridir. Bu doğrusal MMSE kestirim problemi verilen kanal modeli varsayımı altında [12]'te sunulan dağıtılmış algoritma kullanılarak TET'ler arasında yerel ve kısıtlı miktarda ileti paylaşımı ile çözülebilir.

Merkezi algoritmada hüzme vektörleri, hesaplanan $\hat{\mathbf{w}}_k$ vektörlerinin uygun katsayılarla ölçeklenmiş halleridir. Uygun katsayıları bulabilmek için 3. Bölümde tanımlanan \mathbf{G} matrisinin evriğinin dağıtılmış olarak hesaplanması gerekir. Ancak \mathbf{G}

genelde seyreltik (sparse) bir matris olmadığından bu mümkün değildir. Bununla birlikte köşegen ve iki yan köşegen dışındaki elemanları sıfır olacak şekilde \mathbf{G}' 'yi üçlü köşegen bir matris olarak yaklaşıklarsak [13]'te sunulan Thomas algoritması ile yaklaşık matrisin evriğini dağıtılmış olarak hesaplayabiliriz.

Hüzme vektörlerinin bulunmasından sonra, köşegen \mathbf{Q} matrisinin elemanlarının güncellenmesi için, her TET antenin kullandığı güç ile anten güç kısıtlaması arasındaki farka göre bir güncelleme yapılması gerektiğinden algoritmanın bu kısmı da TET'lerde dağıtılmış olarak kolayca gerçekleştirilebilir.

5. Sayısal Sonuçlar

Sayısal benzetimle önerilen dağıtılmış işbirlikli iletim algoritmasının başarımlarını inceledik. Benzetimlerimizde kanal modeli olarak (11)'de verilen doğrusal hücre dizini modelini varsaydık. Kullandığımız yaklaşıklığın başarımlara etkisini kavrayabilmek için basit bir senaryo ele aldık. 3 adet tek antenli gezgin kullanıcı ve 3 adet tek antenli telsiz erişim terminali simetrik bir hücresel sistem ele aldık. Varsayılan parametreler: $N = K = 3$ ve $i = 1, 2, 3$ için $\alpha_i = 1$, $\alpha_i^f = \alpha_i^b = \alpha$. Kullanıcılar için aynı başarımlar hedefi $\text{SINR}_i = \gamma$ ve verici anten başına güç kısıtlaması olarak da verilen başarımlar hedeflerini kolaylıkla sağlayabilecek kadar yüksek bir güç kısıtlaması verdik.

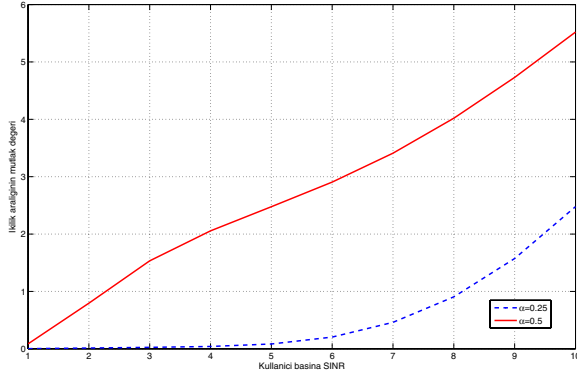
İlk olarak $\gamma = 2$ ve $\alpha = 0.5$ durumunu ele aldık. Burada $\alpha = 0.5$ varsayımının çoklu erişim girişiminin en yüksek olduğu duruma karşılık geldiğine dikkat çekmek isteriz. Önerilen dağıtılmış algoritma yakınsadığında sabit noktalı döngüleme metodunun bulunduğu başarımlar hedeflerine karşılık gelen ikilik değişkenleri $\lambda = [3.796, 5.467, 3.798]^T$ şeklindedir. Bu değerlerle hüzme oluşturma vektörlerini dağıtılmış olarak hesaplamakta kullanılan ve (14)'de verilen eşdeğer doğrusal MMSE kestirim problemi oluşturulur. Daha sonra her kullanıcı için hüzme vektörü $\hat{\mathbf{w}}_k$ 'yi hesaplamak için uygulanan ileri geri algoritmasında her TET bir kere sağındaki ve solundaki TET'lerle uygun iletişimi paylaşır. Bu veri paylaşımından sonra elde edilen $\hat{\mathbf{w}}_k$ vektörleri merkezi algoritmanın buldukları ile aynıdır. Asıl hüzme oluşturma vektörlerini bulmak için uygun ölçekleme katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Bu da \mathbf{G} matrisinin evriğini almayı gerektirir. Sunulan dağıtılmış algoritmada bu matris üçlü köşegen olarak yaklaşıklığından merkezi algoritmayla bulunan en iyi hüzme vektörleri (\mathbf{W}_m) ile yaklaşıklık kullanan dağıtılmış algoritmanın bulunduğu vektörler (\mathbf{W}_d) arasında aşağıdaki fark gözlenir:

$$\mathbf{W}_m = \begin{bmatrix} 2.02 & -0.32 & -0.12 \\ -0.44 & 2.06 & -0.44 \\ -0.12 & -0.32 & 2.02 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

$$\mathbf{W}_d = \begin{bmatrix} 1.94 & -0.32 & -0.11 \\ -0.42 & 2.04 & -0.42 \\ -0.11 & -0.32 & 1.94 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Bulunan \mathbf{W}_d matrisi ile elde edilen başarımlar $\text{SINR}_{1,3} = 1.87$ ve $\text{SINR}_2 = 2$ olarak hesaplanır. Yani ortadaki kullanıcı başarımlar hedefini sağlamış, yandaki iki kullanıcı da hedeflere çok yakın bir başarımlar elde etmiştir.

Dağıtılmış algoritma \mathbf{G} matrisini üçlü köşegen olarak yakınsadığı için orijinal en iyileme problemiyle eşlenik Lagrangian problem arasında bir ikilik aralığı (duality gap) gözlemlenmektedir. Şekil 1'de yukarıdaki kanal modelinde



Şekil 1: Wyner'ın 3 hücreli doğrusal hücre dizini modelinde dağıtılmış algoritmanın ikilik aralığının mutlak değerinin başarımlarına ve girişim miktarına göre değişimi.

değişik girişim faktörü değerleri için farklı başarımlarına karşılık gelen ikilik aralığı değerleri çizilmiştir. Şekilden de gözlemlediğimiz gibi girişim faktörü ve başarımların hedefi arttıkça ikilik aralığının mutlak değerinin de arttığı gözlenmiştir. Bu da merkezi algoritmanın bulunduğu çözümlerle dağıtılmış algoritma arasındaki başarımların farkının göstergesi olarak kullanılabilir. Sabit başarımlar altında kullanıcı sayısının artırıldığı benzetim çalışmalarımızda da benzer gözlemler bulduk. Sonuç olarak benzetim çalışmalarımız önerilen dağıtılmış algoritmanın kullanıcı sayısı ve başarımlarının düşük olduğu durumlarda en iyiye yakın sonuç verdiğini göstermiştir.

6. Sonuç

Bu çalışmada işbirlikli çok kullanıcılu çok antenli bir sistemde en iyi hüzme oluşturma vektörlerini sistemdeki telsiz iletim terminallerinin birlikte hesapladıkları bir algoritma sunuyoruz. Literatürdeki pek çok çalışmadan farklı olarak kullanıcıların her biri için farklı servis kalitesi isteklerine karşılık gelen farklı sinyal gücünün girişim artı gürültü güçlerine oranı hedefleri ve her TET anteni için farklı iletim gücü kısıtlamaları durumunu ele aldık. Bu kısıtlamalar altında sistemdeki toplam iletim gücünü en küçükten hüzme vektörlerini hesaplayan bir algoritmayı daha önceki bir çalışmamızda sunmuştuk. Ancak bu algoritmanın gerçekleştirilmesi için merkezi bir kontrol ünitesine ihtiyaç duyulduğundan pratik sistemlerde uygulanması mümkün değildir. Bununla birlikte sistemdeki çoklu erişim girişiminin yerel olduğu durumlar için bazı yaklaşımlar kullanarak merkezi algoritmanın dağıtılmış olarak gerçekleştirilmesi mümkündür ve bunu sağlayan bir algoritmayı burada öneriyoruz. Sayısal benzetim çalışmalarımız, sistemdeki kullanıcı sayısı ve kullanıcılar için başarımlarının çok yüksek olmadığı durumlarda dağıtılmış algoritmanın merkezi algoritmanın başarımına yakınsadığını göstermiştir. Böylelikle bu çalışma ile hücresel sistemlerde dağıtılmış algoritmalarla işbirlikli iletim tekniklerinin gerçekleştirilmesi konusunda ilk adımı atmış oluyoruz.

7. Teşekkür

Bu çalışma Avrupa Birliği Altıncı Çerçeve Programı Marie Curie Eylemleri International Reintegration Grant MIRG-CT-2005-029179 ve TÜBİTAK Kariyer EEEAG-107E199 projelerince desteklenmiştir.

8. Kaynakça

- [1] W. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai, "The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 3936–3964, Sep. 2006.
- [2] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528–541, Mar. 2006.
- [3] Y. K. Yazarel and D. Aktas, "Downlink beamforming under individual SINR and per antenna power constraints," in *Proc. IEEE PACRIM Conf.*, Victoria, Canada, Aug. 2007, pp. 422–425.
- [4] M. Schubert and H. Boche, "Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 18–28, Jan. 2004.
- [5] A. Wiesel, Y. C. Eldar, and S. Shamai, "Linear precoding via conic optimization for fixed MIMO receivers," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 54, no. 1, pp. 161–176, Jan. 2006.
- [6] G. J. Foschini, K. Karakayali, and R. A. Valenzuela, "Coordinating multiple antenna cellular networks to achieve enormous spectral efficiency," *IEE Proc. Commun.*, vol. 153, no. 4, pp. 548–555, Aug. 2006.
- [7] F. Boccardi and H. Huang, "Optimum power allocation for the MIMO-BC zero-forcing precoder with per-antenna power constraints," in *Proc. CISS Conf.*, Princeton, NJ, Mar. 2006, p. 504.
- [8] W. Yu and T. Lan, "Transmitter optimization for the multi-antenna downlink with per-antenna power constraints," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 55, no. 6, pp. 2646–2660, Jun. 2007.
- [9] A. Tölli, M. Codreanu, and M. Juntti, "Linear cooperative multiuser MIMO transceiver design with per BS power constraints," in *Proc. IEEE ICC Conf.*, Glasgow, Scotland, Jun. 2007, pp. 4991–4996.
- [10] A. Wiesel, Y. C. Eldar, and S. Shamai, "Optimal generalized inverses for zero forcing precoding," in *Proc. CISS Conf.*, Baltimore, MD, Mar. 2007, pp. 130–134.
- [11] A. D. Wyner, "Shannon-theoretic approach to a Gaussian cellular multiple access channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 40, no. 6, pp. 1713–1727, Nov. 1994.
- [12] B. L. Ng, J. E. Evans, S. V. Hanly, and D. Aktas, "Transmit beamforming with cooperative base stations," in *Proc. IEEE ISIT Conf.*, Adelaide, Australia, Sep. 2005, pp. 1431–1435.
- [13] S. Conte and C. de Boor, *Elementary Numerical Analysis*. Mc-Graw Hill, 1972.