



SINIRLI GERİBESLEMELİ HABERLEŞME İÇİN ALICIDAKİ SNR TABANLI KOD VE ANTEN/RÖLE SEÇİMİ

(RECEIVED SNR BASED CODE AND ANTENNA/RELAY SELECTION
FOR LIMITED FEEDBACK COMMUNICATION)

Ali EKŞİM*, Mehmet E. ÇELEBİ**

ÖZET/ABSTRACT

Sınırlı geribeslemeli çok-girdili çok-çıkıtlı (ÇGÇÇ) haberleşme sisteminde kod seçimi ve verici anten seçimi yaygın olarak kullanılır. Eğer vericideki bir antenin kanal kazancı diğer antenlerin kanal kazançlarına göre çok büyükse verici anten seçimi kullanmak alıcısındaki Sinyalin Gürültüye Oranı (SGO)'nu artırır. Buna karşılık, vericideki antenlerin kanal kazançları birbirlerine yakın değerlerde ise kod seçimi kullanmak alıcısındaki SGO'yu artırır. Bu makalede, ÇGÇÇ haberleşmesinde alıcısındaki SGO'yu arttırmak için uyarlamalı kod ve anten seçimi önerilmiştir. Bu teknikte, fazladan bir bitlik geribesleme kullanılarak verici anten seçimine ve kod seçimine göre alıcıda daha iyi bir SGO değeri elde edilir. Detaylı benzetimler göstermiştir ki, üç verici anten için uyarlamalı kod ve anten seçiminde kullanılacak 4 bitlik geribesleme, kod seçimi olarak kullanılan genişletilmiş dengeli uzay-zaman blok kodlamanın ideal geribesleme başarımını elde etmektedir. İdeal geribesleme ise kanal durum bilgisinin vericide tam olarak bilinmesini gerektirir. Ayrıca, önerilen teknik işbirlikli haberleşmeye uygulanmış ve benzer başarımlar sağlanmıştır. Önerilen tekniğin ÇGÇÇ ile işbirlikli haberleşmesine uygulanmasındaki fark, anten seçimi yerine röle seçiminin yapılmasıdır.

Code selection and transmit antenna selection are widely used in limited feedback multi input multi output (MIMO) communication system. When one of the antenna channel gains is much higher than the other antenna channel gains; using antenna selection method increases received Signal-to-Noise Ratio (SNR) at the receiver. However, when antenna channel gains are close to each other; using code selection method increases the received SNR at the receiver. In this paper, we propose an adaptive code and antenna selection scheme to increase the received SNR at the destination for MIMO system. In this technique, using one additional feedback bit yields improved SNR at the destination compared to using solely code or transmit antenna selection method. Detailed simulations show that adaptive code and antenna selection with four bit feedback yields a performance of the extended balanced space-time block coding with ideal feedback which requires exact channel state information at the transmitter. In addition, the proposed technique is applied into the cooperative communication and similar performance improvement is observed. The difference between MIMO and cooperative communication is using relay selection instead of antenna selection.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

Anten seçimi, Röle seçimi, Dengeli uzay-zaman blok kodlama, Sınırlı geribesleme

Antenna selection, Relay selection, Balanced space-time block coding, Limited feedback

* Tübitak-UEKAE, P.K. 74, Gebze 41470, KOCAELİ

** İstanbul Teknik Ün., Elektronik-Haberleşme Mühendisliği, Maslak, İSTANBUL

1. GİRİŞ

Kablosuz ağların hedefi gerçek-zamanlı uygulamaları düşük güç tüketimiyle, yüksek spektral verimlilikle ve hizmet kalitesiyle gerçekleştirmektir. Bunlara ek olarak, sinyaldeki sönümlenme ise kablosuz ağlardaki en önemli problemdir. Bu kısıtlamalar çeşitleme teknikleriyle karşılanabilir (Vucetic ve Yuan, 2003). Çeşitleme teknikleri iletilen sinyalin bağımsız sönümlenmeye uğramış kopyalarını alıcıda birleştirilmesini sağlar. Çeşitleme tekniklerinden birisi de verici anten çeşitlemesi'dir. Bu teknikte, iletilen bandın ve iletilen gücün artırılmasına gerek yoktur. Sadece baz istasyonundaki anten sayısını artırmak gerekir (Vucetic ve Yuan, 2003). Eğer kanal durum bilgisi (KDB) vericide elde edilirse, verici anten seçimi (VAS)'yle veya hüzmeye şekillendirmeye çeşitleme avantajı sağlanır (Gore ve Paulraj, 2002; Ganesan ve Stoica, 2001). İki durumda da KDB, alıcıdan vericiye geribesleme bitleriyle iletilir. VAS'da en iyi anten veya verici antenlerden bir küme seçilerek vericide anlık hata olasılığını minimize eder. Hüzmeye şekillendirmede ise vericide mükemmel KDB elde edilmesi gereklidir. Bunun için sınırsız sayıda geribesleme biti kullanılması gereklidir (Andersen, 2000). Buna karşılık geribesleme kanalının bantgenişliği sınırlıdır. Bu durumda alıcı KDB'yi kuantalayarak verici hüzmeye şekillendirme vektörü oluşturur. Alıcıya bu vektörü düşük hızlı ve sınırlı bantgenişliğine sahip geribesleme kanalından iletir (Love vd., 2003; Mondal ve Health, 2004¹; Mondal ve Health, 2004²; Mondal vd., 2005).

Kod seçimi, VAS'a alternatif bir tekniktir. Kod seçimi tekniklerinden biri olan Dengeli Uzay-Zaman Blok Kodlama (DUZBK) tam hızı ve tam çeşitlemeyi herhangi sayıda iletim anteni için sağlar (Çelebi vd., 2007). Bu teknikte alıcı, seçilen kodu birkaç bit geribeslemeyle vericiye iletir. DUZBK'nın sağladığı kodlama kazancı sınırlı olduğundan VAS, üç verici anten için hatasız geribesleme durumunda daha iyi başarımlar sağlar. DUZBK'nın kodlama kazancını artırmak için Genişletilmiş Dengeli Uzay-Zaman Blok Kodlama (GDUZBK) tekniği önerilmiştir (Ekşim ve Çelebi, 2009¹; Ekşim ve Çelebi, 2009²).

Vericideki antenlerin birinin kanal kazancı diğer antenlerin kanal kazançlarına göre çok yüksekse ve sınırlı sayıda geribesleme biti vericiden elde edilebiliyorsa, bütün verici antenleri eşit güçle iletimde kullanmak alıcıdaki SGO, değerini düşürür. Bu durumda en iyi anteni kullanmak en iyi çözümdür. Buna karşılık, antenlerin kanal kazançları birbirlerine yakın değerlerde ise ve sınırlı sayıda geribesleme yapılabiliriyorsa bütün antenleri eşit güçle iletim için kullanmak alıcıdaki SGO'yu artırır. Bu makalede sınırlı geribeslemeli uyarlamalı kod ve anten seçimi yapan ve alıcıdaki SGO'yu arttıran bir karma teknik önerilmiştir. Gezgin kullanıcı, kod seçimi ve anten seçimine göre fazladan 1 bitlik bilgiyi hedefe iletterek vericinin en iyi antenden veya bütün antenlerden en iyi GDUZBK kullanarak iletim yapılmasını sağlar (Ekşim ve Çelebi, 2010²).

Son kullanıcıdaki maliyet, donanım ve mobil terminallerdeki boyutsal sınırlamalar nedeniyle telsiz kullanıcılarında çoklu iletim antenleri pek çok uygulamada kullanılamaz. Araştırmacılar bu problemin çözümü için uzaysal çeşitlemeyi ağdaki farklı kullanıcıların antenlerini kullanarak gerçekleştirmektedir. Bu tip çeşitleme, işbirlikli çeşitleme olarak adlandırılır (Laneman vd., 2001; Sendonaris vd., 2003¹; Sendonaris vd., 2003²; Nabar vd., 2004; Tang ve Valenti, 2001). Burada, sanal anten dizileri oluşturularak kanaldaki korelasyonla oluşan olumsuz etki ve mobil terminaldeki yer problemi ortadan kaldırılır.

İşbirlikli haberleşme için herhangi sayıdaki gezgin kullanıcıdan tam çeşitlemeyi ve tam hızı sağlamak için İşbirlikli Dengeli Uzay Zaman Blok Kodlama (İDUZBK) önerilmiştir (Ekşim ve Çelebi, 2007). Rôle olarak kullanılacak gezgin kullanıcı sayısı sınırlı olduğunda, İDUZBK'da elde edilecek kodlama kazancı sınırlıdır. Kodlama kazancını işbirlikli haberleşmede de artırmak için GDUZBK işbirlikli haberleşmeye uygulanmış ve Genişletilmiş İşbirlikli Dengeli Uzay-Zaman Blok Kodlama (GİDUZBK) olarak adlandırılmıştır (Ekşim ve

Çelebi, 2009³). Bu makalede önerilen uyarlamalı kod ve anten seçim tekniği işbirlikli haberleşmeye adapte edilmiş ve uyarlamalı kod ve röle seçimi olarak adlandırılmıştır. Buradaki tek fark en iyi kanala sahip antenin yerine kaynaktan gelen verileri doğru çözen röleler arasından en iyi röle-hedef kanalına sahip rölenin seçilmesidir. Bu yöntemde hedef kullanıcı, çok girdili tek çıktılı (ÇGTÇ) haberleşmede olduğu gibi fazladan 1 bit geribesleme yaparak hedef kullanıcıdaki SGO'yu eniyilemeye çalışır.

İkinci kısımda sistem modeli, üçüncü kısımda GDUZBK, dördüncü bölümde ÇGTÇ haberleşmesi için önerilen uyarlamalı kod ve anten seçimi, beşinci bölümde işbirlikli haberleşme için önerilen uyarlamalı kod ve röle seçimi, altıncı bölümde başarımlı analizi anlatılacaktır. Son bölümde ise makalenin ortaya çıkardığı sonuçlar özetlenecektir.

2. SİSTEM MODELİ

Bu çalışmada, ÇGTÇ ve işbirlikli haberleşme olmak üzere iki farklı sistem modeli kullanılmıştır.

2.1. ÇGTÇ Sistem Modeli

ÇGTÇ sistem modeli, bir baz istasyonu ve bir gezgin kullanıcıyı içerir. Baz istasyonunda N adet anten bulunmasına karşılık gezgin kullanıcıda 1 adet anten bulunmaktadır. Bütün kanallar birbirinden istatistiksel olarak bağımsız dairesel karmaşık Gauss değişkeni olarak modellenebilen Rayleigh sönümlenmeli kanal olarak kabul edilmiştir. $i=1,2,\dots,N$ için h_i baz istasyonunun i . anteni ile gezgin kullanıcı arasındaki kanal katsayısıdır.

Kanallar duruğumsu olarak modellenmiş ve bir çerçeve boyunca değişmedikleri kabul edilmiştir. Ancak, kanallar bir çerçeveden diğerine istatistiksel bağımsız olarak değişmektedirler. Gezgin kullanıcının kanalları pilot tonların yardımıyla tam olarak kestirebildiği varsayılmıştır. Gürültü, sıfır ortalamalı ve σ^2 varyanslı dairesel karmaşık rastgele değişken olan toplamsal beyaz Gauss olarak modellenmiştir. M -PSK modülasyonu kullanılmıştır.

2.2. İşbirlikli Sistem Modeli

İşbirlikli sistem modeli, rastgele ve birbirinden bağımsız olarak konumlanmış bir kaynak, bir hedef ve n adet röleden oluşmaktadır. Bütün mobil terminallerin bir antene sahip oldukları ve aynı anda hem iletim hem de alım yapamadıkları varsayılmıştır. Rölelerin seçmeli aktarma (*selective relaying*) tekniğini kullandıkları kabul edilmiştir (Wang vd., 2007). Bütün kanallar birbirinden istatistiksel olarak bağımsız dairesel karmaşık Gauss değişkeni olarak modellenebilen Rayleigh sönümlenmeli kanal olarak kabul edilmiştir. $i=1,2,\dots,n$ için h_{ki} kaynak ile i . röle arasındaki kanal katsayısı ve h_{rih} i . röle ile hedef arasındaki kanal katsayısıdır.

Kanallar duruğumsu olarak modellenmiş ve bir çerçeve boyunca değişmedikleri kabul edilmiştir. Ancak kanallar, bir çerçeveden diğerine istatistiksel bağımsız olarak değişmektedir. Bütün rölelerin kendi kaynak-röle kanallarının tam olarak kestirebildikleri kabul edilmiştir. Hedefin ise röle-hedef kanallarını tam olarak kestirebildiği varsayılmıştır. Gürültü, sıfır ortalamalı ve σ^2 varyanslı dairesel karmaşık rastgele değişken olan toplamsal beyaz Gauss olarak modellenmiştir. M -PSK modülasyonu kullanılmıştır.

3. GENİŞLETİLMİŞ DENGELİ UZAY-ZAMAN BLOK KODLAMA

GDUZBK, Dik Uzay-Zaman Blok Kodlamanın uzatma matrisiyle çarpılmasından elde edilebilir (Ekşim ve Çelebi, 2010¹). Alamouti kodu tam hızlı, tam çeşitlemeli ve dik tek kod olduğu için GDUZBK'nın elde edilmesinde Alamouti kodu kullanılır (Alamouti, 1998; Ekşim ve Çelebi., 2010¹). Kod matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$C=XW \quad (1)$$

Burada X Alamouti kodunu ve W ise kertesini 2 olan $2 \times N$ boyutlu matrisi göstermektedir. Aşağıdaki örnek GDUZBK'nın üç verici anten için nasıl üretileceğini göstermektedir. Aşağıdaki GDUZBK iletim matrisi baz istasyonu tarafından iletilecek olsun.

$$C_1 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & as_2 \\ -s_2^* & s_1^* & as_1^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada $a=e^{j2\pi m/q}$ ve $m=0, 1, \dots, q-1$ olmak üzere q geri besleme bitinin genişletilme seviyesini göstermektedir. C_1 matrisinin satır ve sütunları üç gezgin kullanıcı tarafından iki zaman aralığında sırayla iletilecektir. C_1 , Alamouti kodu ile Eşitlik 1'deki gibi elde edilebilir.

$$X = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a \end{bmatrix} \quad (3)$$

GDUZBK'da istenilen sayıda farklı kod üretilebilir. Gösterilebilir ki GDUZBK'da elde edilebilecek olası kod sayısı $q^{N-2}(2^{N-1}-1)$ 'dir (Ekşim ve Çelebi, 2009¹). $N \geq 3$ olmak üzere bütün kod sözcüklerini kullanabilmek için $N-1 + \lceil (N-2)\log_2 q \rceil$ geri besleme biti gereklidir. Burada $\lceil \cdot \rceil$ fonksiyonu içerisindeki değeri, argümana eşit veya büyük en küçük tamsayıya çevirir. Bu bitlerin $N-1$ tanesi tam çeşitlemeyi sağlarken $\lceil (N-2)\log_2 q \rceil$ tanesi ise ekstra SGO kazancı sağlar.

4. UYARLAMALI KOD VE ANTEN SEÇİMİ

Uyarlamalı kod ve anten seçiminde gezgin kullanıcı, gezgin kullanıcıdaki SGO'yu artırmak için anten seçimi veya bir kod seçim tekniği olan GDUZBK için gerekli geribesleme bitlerine ek olarak fazladan 1 bitlik bilgiyi baz istasyonuna bildirir.

4.1. Üç Verici Anten İçin

Gezgin kullanıcı, Algoritma 1'i kullanarak verici anten seçimi veya kod seçimi kullanacağına karar verir.

Algoritma 1

Gezgin kullanıcı

$$\frac{1}{3} \left(|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + 2 \max \begin{pmatrix} \text{Re}\{ah_1^*h_2\}, \\ \text{Re}\{ah_1^*h_3\}, \\ \text{Re}\{ah_2^*h_3\} \end{pmatrix} \right) \geq \max(|h_1|^2, |h_2|^2, |h_3|^2) \quad (4)$$

eşitsizliği sağlanırsa kod seçimine, sağlanmazsa anten seçimine karar verir ve baz istasyonuna seçimini bildirir. Burada $\max(\cdot)$ operatörü, içerdiği elemanların en büyüğünü ve $\text{Re}\{\cdot\}$ operatörü ise reel kısmını alır.

Baz istasyonunda üç verici anteni bulunduğu ve gezgin kullanıcı kod seçiminin anlık SGO değerini maksimize edeceğini hesaplırsa, baz istasyonuna kullanılacak iletim matrisi bilgisini ve geribesleme a değerini bildirir. 3 verici anten için elde edilebilecek iletim matrisleri

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & as_2 \\ -s_2^* & s_1^* & as_1^* \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & as_1 \\ -s_2^* & s_1^* & -as_2^* \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_3 = \begin{bmatrix} s_1 & as_1 & s_2 \\ -s_2^* & -as_2^* & s_1^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

olarak verilebilir. İki geribesleme biti, en yüksek kodlama kazancını sağlayan GDUZBK matrisinin seçimi için, bir geribesleme biti kod seçimi bilgisinin iletimi için, ve $k = \lceil \log_2 q \rceil$ olmak üzere k bit geribesleme a 'nın seçiminde kullanılır.

GDUZBK'nın kod çözümü yapılsa gezgin kullanıcıda elde edilen işaret

$$\hat{s}_i = \sqrt{\frac{P}{3}} \left[|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + 2 \max \begin{pmatrix} \text{Re}\{ah_1^*h_2\}, \\ \text{Re}\{ah_1^*h_3\}, \\ \text{Re}\{ah_2^*h_3\} \end{pmatrix} \right] s_i + n_i \quad i=1,2. \quad (6)$$

olarak bulunur (Ekşim ve Çelebi, 2009¹). Burada P iletim gücünü, n_1 ve n_2 ise gezgin kullanıcıdaki doğrusal işleme sonucundaki gürültüyü göstermektedir.

Eğer gezgin kullanıcı verici anten seçiminin anlık SGO değerini artıracığını hesaplırsa, baz istasyonuna hangi antenin kullanılacağı bilgisi için iki bitlik geribesleme ve anten seçiminin yapılacağı bilgisi içinde 1 bitlik geribesleme yapar. Verici anten seçimi yapılsa gezgin kullanıcıda elde edilecek işaret

$$\hat{s}_i = \sqrt{P} \max(|h_1|^2, |h_2|^2, |h_3|^2) s_i + w_i \quad i=1,2. \quad (7)$$

olarak bulunur. Burada w_1 ve w_2 , gezgin kullanıcıdaki doğrusal işleme sonucundaki gürültüyü göstermektedir.

Çizelge 1'de Algoritma 1 kullanıldığında verici anten seçimi ve kod seçiminin kullanım yüzdeleri gösterilmiştir. Geribesleme bitinin genişletme seviyesi yükseldikçe kod seçiminin gezgin kullanıcıdaki SGO değeri artacağından kullanım yüzdesi de yükselmektedir. Baz istasyonunda üç verici anten bulunduğu kod seçiminin başarımı ideal geribesleme ile sınırlı olduğundan alıcıdaki SGO'yu arttırmak için sınırlı geribeslemeli sistemlerde verici anten seçimi kullanılmalıdır.

Çizelge 1. Verici anten seçimi ve kod seçiminin üç verici anten için kullanım yüzdeleri

	Verici anten seçimi	Kod seçimi
Bir bit genişletilmiş geribesleme ($k=1$)	% 63.80	% 36.20
İki bit genişletilmiş geribesleme ($k=2$)	% 51.19	% 48.81
İdeal geribesleme (İdeal)	% 45.20	% 54.80

4.2. Dört Verici Anten İçin

Gezgin kullanıcı Algoritma 2'yi kullanarak verici anten seçimi veya kod seçimi kullanılacağına karar verir.

Algoritma 2

Gezgin kullanıcı

$$\frac{1}{4} + 2 \max \left[\begin{array}{l} |h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2 \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_2\} + \text{Re}\{bh_1^*h_3\} + \text{Re}\{a^*bh_2^*h_3\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_2\} + \text{Re}\{bh_1^*h_4\} + \text{Re}\{a^*bh_2^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_3\} + \text{Re}\{bh_1^*h_4\} + \text{Re}\{a^*bh_3^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_2^*h_3\} + \text{Re}\{bh_2^*h_4\} + \text{Re}\{a^*bh_3^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_2\} + \text{Re}\{bh_3^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_3\} + \text{Re}\{bh_2^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_2^*h_3\} + \text{Re}\{bh_1^*h_4\} \right] \end{array} \right] \geq \max_i (|h_i|^2) \quad i=1,\dots,4. \quad (8)$$

eşitsizliği sağlanırsa kod seçimine, sağlanmazsa anten seçimine karar verir ve baz istasyonuna seçimini bildirir.

Baz istasyonunda dört verici anten bulunduğu ve gezgin kullanıcı kod seçiminin anlık SGO değerini maksimize edeceğini hesaplırsa, baz istasyonuna kullanılacak iletim matrisi bilgisini ve geribesleme a ve b değerini bildirir. 4 verici anten için elde edilebilecek iletim matrisleri

$$\begin{aligned} C_1 &= \begin{bmatrix} s_1 & as_1 & bs_1 & s_2 \\ -s_2^* & -as_2^* & -bs_2^* & s_1^* \end{bmatrix} & C_2 &= \begin{bmatrix} s_1 & as_1 & s_2 & bs_1 \\ -s_2^* & -as_2^* & s_1^* & -bs_2^* \end{bmatrix} \\ C_3 &= \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & as_1 & bs_1 \\ -s_2^* & s_1^* & -as_2^* & -bs_2^* \end{bmatrix} & C_4 &= \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & as_2 & bs_2 \\ -s_2^* & s_1^* & as_1^* & bs_1^* \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

$$C_5 = \begin{bmatrix} s_1 & as_1 & s_2 & bs_2 \\ -s_2^* & -as_2^* & s_1^* & bs_1^* \end{bmatrix} \quad C_6 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & as_1 & bs_2 \\ -s_2^* & s_1^* & -as_2^* & bs_1^* \end{bmatrix}$$

$$C_7 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & as_2 & bs_1 \\ -s_2^* & s_1^* & as_1^* & -bs_2^* \end{bmatrix}$$

olarak verilebilirler. Burada $a=e^{j2\pi m/q}$ ve $b=e^{j2\pi n/q}$ dir. Üç geribesleme biti, en yüksek kodlama kazancını sağlayan GDUZBK matrisinin seçimi için, bir geribesleme biti kod seçimi bilgisinin iletimi için, ve $2k$ bit geribesleme ise a ve b 'nin seçimin için kullanılır.

GDUZBK'nın kod çözümü yapılırsa gezgin kullanıcıda elde edilen M -PSK simgeleri

$$\hat{s}_i = \frac{\sqrt{P}}{2} \left[\begin{array}{l} \left(|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2 \right) \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_2\} + \text{Re}\{bh_1^*h_3\} + \text{Re}\{a^*bh_2^*h_3\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_2\} + \text{Re}\{bh_1^*h_4\} + \text{Re}\{a^*bh_2^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_3\} + \text{Re}\{bh_1^*h_4\} + \text{Re}\{a^*bh_3^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_2^*h_3\} + \text{Re}\{bh_2^*h_4\} + \text{Re}\{a^*bh_3^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_2\} + \text{Re}\{bh_3^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_1^*h_3\} + \text{Re}\{bh_2^*h_4\} \right], \\ \left[\text{Re}\{ah_2^*h_3\} + \text{Re}\{bh_1^*h_4\} \right] \end{array} \right] s_i + \eta_i \quad i = 1, 2. \quad (10)$$

olarak bulunur (Ekşim ve Çelebi, 2009¹). Burada η_1 ve η_2 gezgin kullanıcıdaki gürültüyü göstermektedir.

Eğer gezgin kullanıcı anten seçiminin anlık SGO değerini arttıracığını hesaplırsa, baz istasyonuna kullanılacak anten bilgisi için iki bit, geribesleme ve anten seçimi içinde 1 bit kullanılır. Anten seçimi yapılırsa gezgin kullanıcıda elde edilecek işaret

$$\hat{s}_i = \sqrt{P} \max(|h_1|^2, |h_2|^2, |h_3|^2, |h_4|^2) s_i + \tau_i \quad i=1,2. \quad (11)$$

olarak bulunur. Burada τ_1 ve τ_2 gezgin kullanıcıdaki gürültüyü göstermektedir.

Çizelge 2'de Algoritma 2 kullanıldığında anten ve kod seçiminin kullanım yüzdeleri gösterilmiştir. Geribesleme bitinin genişletme seviyesi yükseldikçe kod seçiminin gezgin kullanıcıdaki SGO değeri artacağından kullanım yüzdesi de yükselmektedir.

5. UYARLAMALI KOD VE RÖLE SEÇİMİ

ÇGTÇ haberleşmesi için önerilen uyarlamalı kod ve anten seçimi 4. bölümde anlatılmıştı. Bu teknik işbirlikli haberleşmeye uygulanmış ve uyarlamalı kod ve röle seçimi olarak adlandırılmıştır. Uyarlamalı kod ve röle seçimi protokolünde röleler, seçmeli aktarma tekniğini kullanırlar (Wang vd., 2007). Bu teknikte röleler sadece doğru olarak kod çözdükleri mesajları iletirler. Seçmeli aktarmada rölelerin hataları tesbit edebilmesi amacıyla çevrimsel

artık kodlaması (*Cyclic Redundancy Check, (CRC)*) gibi fazladan bilgiler iletilen veriye eklenir (Wang vd., 2007).

Çizelge 2. Verici anten seçimi ve kod seçiminin dört verici anten için kullanım yüzdeleri

	Verici anten seçimi	Kod seçimi
Bir bit genişletilmiş geribesleme ($k=1$)	%44.93	%55.07
İki bit genişletilmiş geribesleme ($k=2$)	%25.67	%74.33
Üç bit genişletilmiş geribesleme ($k=3$)	%21.30	%78.70

Kaynak, iletilecek simgeleri seçmeli aktarma tekniği uygulayarak rölelere iletir. Kaynağın iletildiği simgeleri doğru olarak çözen röleler, 1 bit ileri besleme yaparak hedef kullanıcıyı bilgilendirirler. Hedef kullanıcı, simgeleri doğru çözen rölelerin röle-hedef kanallarını karşılaştırır. Eğer kaynağın iletildiği simgeleri doğru çözen bir rölenin röle-hedef kanal kazancı iletilen simgeleri doğru çözen diğer rölelerin hedef-röle kanal kazançlarına göre çok yüksekse ve sınırlı sayıda geribesleme biti rölelerde elde edilebiliyorsa, iletilen simgeleri doğru çözen bütün röleleri eşit güçle kullanmak hedef kullanıcıdaki SGO değerini düşürür. Bu durumda iletilen simgeleri doğru olarak çözen en iyi hedef-röle kanalına sahip röleyi kullanmak en iyi çözümdür. Buna karşılık, kaynak tarafından iletilen simgeleri doğru olarak çözen rölelerin röle-hedef kanal kazançları birbirlerine yakın değerlerde ise iletilen simgeleri doğru olarak çözen bütün röleleri eşit güçle kullanmak alıcısındaki SGO'yu artırır. Hedef kullanıcı, kod seçimi ve röle seçimine göre fazladan 1 bitlik bilgiyi doğru olarak çözen rölelere ileterek, iletilen simgeleri doğru çözen röleler arasından en iyi röle-hedef kanalına sahip röleden veya bütün doğru çözen rölelerden en iyi GIDUZBK'yı kullanarak iletim yapılmasını sağlar.

Eğer üç röle kaynak tarafından iletilen simgeleri doğru olarak çözerse hedef kullanıcı, Algoritma 3'ü kullanarak röle seçimi veya kod seçimi kullanılacağına karar verir.

Algoritma 3

Hedef kullanıcı

$$\frac{1}{3} \left(|h_{r1h}|^2 + |h_{r2h}|^2 + |h_{r3h}|^2 + 2 \max \begin{pmatrix} \text{Re} \{ ah_{r1h}^* h_{r2h} \}, \\ \text{Re} \{ ah_{r1h}^* h_{r3h} \}, \\ \text{Re} \{ ah_{r2h}^* h_{r3h} \} \end{pmatrix} \right) \geq \max (|h_{r1h}|^2, |h_{r2h}|^2, |h_{r3h}|^2) \quad (12)$$

eşitsizliği sağlanırsa kod seçimine, sağlanmazsa röle seçimine karar verir ve rölelere seçimini bildirir.

Eğer dört röle kaynak tarafından iletilen simgeleri doğru olarak çözerse hedef kullanıcı, Algoritma 4'ü kullanarak röle seçimi veya kod seçimi kullanılacağına karar verir.

Algoritma 4

Hedef kullanıcı

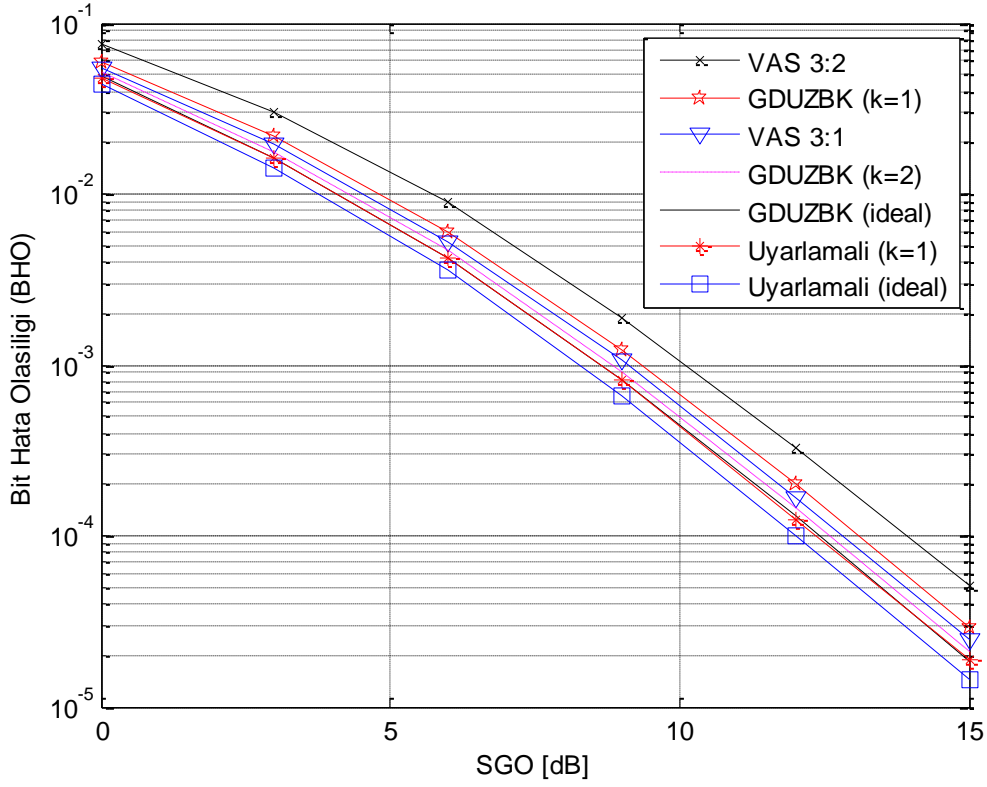
$$\frac{1}{4} \left[\begin{array}{l} |h_{r1h}|^2 + |h_{r2h}|^2 + |h_{r3h}|^2 + |h_{r4h}|^2 \\ \left[\begin{array}{l} \text{Re}\{ah_{r1h}^*h_{r2h}\} + \text{Re}\{bh_{r1h}^*h_{r3h}\} + \text{Re}\{a^*bh_{r2h}^*h_{r3h}\}, \\ \text{Re}\{ah_{r1h}^*h_{r2h}\} + \text{Re}\{bh_{r1h}^*h_{r4h}\} + \text{Re}\{a^*bh_{r2h}^*h_{r4h}\}, \\ \text{Re}\{ah_{r1h}^*h_{r3h}\} + \text{Re}\{bh_{r1h}^*h_{r4h}\} + \text{Re}\{a^*bh_{r3h}^*h_{r4h}\}, \\ \text{Re}\{ah_{r2h}^*h_{r3h}\} + \text{Re}\{bh_{r2h}^*h_{r4h}\} + \text{Re}\{a^*bh_{r3h}^*h_{r4h}\}, \\ \text{Re}\{ah_{r1h}^*h_{r2h}\} + \text{Re}\{bh_{r3h}^*h_{r4h}\}, \\ \text{Re}\{ah_{r1h}^*h_{r3h}\} + \text{Re}\{bh_{r2h}^*h_{r4h}\}, \\ \text{Re}\{ah_{r2h}^*h_{r3h}\} + \text{Re}\{bh_{r1h}^*h_{r4h}\} \end{array} \right] \end{array} \right] \geq \max_i (|h_{rih}|^2) \quad i=1,\dots,4. \quad (13)$$

eşitsizliği sağlanırsa kod seçimine, sağlanmazsa röle seçimine karar verir ve rölelere seçimini bildirir.

6. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

Bilgisayar benzetimleriyle ÇGTÇ haberleşmesi için önerilen uyarlamalı kod ve anten seçiminin Bit Hata Olasılığı (BHO) eğrileri QPSK modülasyonu kullanılarak çıkartılmıştır. Bir çerçevenin uzunluğu 130 simge süresi olarak seçilmiştir. Benzetimlerde, bir adet verici anten seçilecekse en iyi anlık kanala sahip anten seçilir ve bu “verici anten seçimi” olarak adlandırılır (VAS $N:1$). Gezgin kullanıcıdaki SGO’yu arttırmak için bütün verici antenlerden iki tanesi seçilir ve seçilen antenler Alamouti kodunu kullanır. En iyi anlık kanala sahip anten çiftinin seçildiği bu teknik ise, “verici anten seçimli Alamouti” (VAS $N:2$) olarak adlandırılmıştır. Karşılaştırmak amacıyla GDUZBK, verici anten seçimi ve verici anten seçimli Alamouti’nin BHO eğrileri de Şekil 1 ve Şekil 2’ye eklenmiştir.

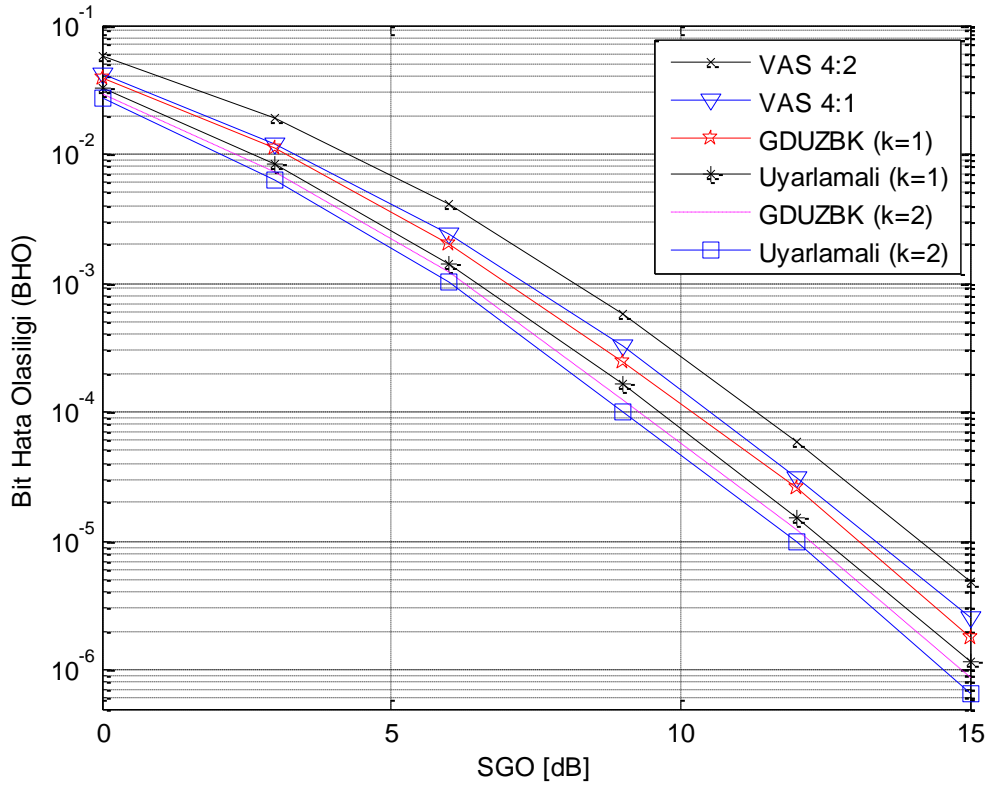
Şekil 1’de baz istasyonunda üç anten bulunduğu ve kod seçimi olarak bir bitle genişletilmiş GDUZBK ve ideal geribesleme yapılmış GDUZBK kullanan uyarlamalı kod ve anten seçimi için BHO eğrileri verilmiştir. Verici anten seçimli Alamouti (VAS 3:2), bir bitle genişletilmiş GDUZBK’dan (GDUZBK ($k=1$)) BHO’nun $P_b=10^{-4}$ değeri için yaklaşık 0.81 dB daha kötü başarımlı gösterir. Buna karşılık, verici anten seçimi (VAS 3:1) bir bitle genişletilmiş GDUZBK’dan yaklaşık 0.29 dB daha iyi başarımlı elde eder. Bunun nedeni geribeslemenin bir bitle genişletilmesi yeteri kadar kodlama kazancı sağlamamasıdır. Eğer geribesleme biti iki bit ile genişletilirse GDUZBK (GDUZBK ($k=2$)), verici anten seçiminden yaklaşık 0.22 dB SGO kazancı sağlar. Uyarlamalı kod ve anten seçiminde kod seçimi olarak eğer bir bitle genişletilmiş GDUZBK kullanılırsa (Uyarlamalı ($k=1$)), GDUZBK’nın ideal geribesleme (GDUZBK (ideal)) başarımlı yakalamaktadır. Önerilen teknikte fazladan 1 bit geribesleme yapılarak GDUZBK’nın ideal başarımlı yakalanmıştır. Eğer uyarlamalı kod ve anten seçimi, kod seçimi olarak ideal geribeslemeli GDUZBK kullanılırsa (Uyarlamalı (ideal)), GDUZBK’nın ideal başarımlıdan yaklaşık 0.39 dB daha iyi başarımlı sağlar.



Şekil 1. Baz istasyonunda üç anten için BHO

Şekil 2’de baz istasyonunda dört anten bulunduğunda ve kod seçimi olarak GDUZBK’nın bir bitle ve iki bitle genişletilmiş GDUZBK kullanan uyarlamalı kod ve anten seçiminin BHO eğrileri verilmiştir. Verici anten seçimli Alamouti (VAS 4:2) ile verici anten seçimini (VAS 4:1) karşılaştırılırsa, verici anten seçimi BHO’nun $P_b=10^{-5}$ değeri için yaklaşık 0.78 dB daha iyi başarımlar gösterir. Buna karşılık bir bitle genişletilmiş GDUZBK (GDUZBK (k=1)), verici anten seçimine göre yaklaşık 0.29 dB daha iyi başarımlar gösterir. Uyarlamalı kod ve anten seçiminde kod seçimi olarak bir bitle genişletilmiş GDUZBK kullanılırsa (Uyarlamalı (k=1)), GDUZBK’ya göre yaklaşık 0.57 dB daha iyi başarımlar gösterir. Eğer geribesleme biti iki bit ile genişletilirse GDUZBK (GDUZBK (k=2)), bir bitle genişletilmiş GDUZBK kullanan uyarlamalı kod ve anten seçimine göre fazladan 0.25 dB SGO kazancı sağlar. Uyarlamalı kod ve anten seçiminde kod seçimi olarak iki bitle genişletilmiş GDUZBK kullanılırsa (Uyarlamalı (k=2)), GDUZBK’nın iki bitle genişletilmiş başarımlarından yaklaşık 0.27 dB daha iyi başarımlar elde eder.

Yukarıdakilere ek olarak işbirlikli haberleşme için önerilen uyarlamalı kod ve röle seçiminin BHO eğrileri QPSK modülasyonu kullanılarak çıkartılmıştır. Bir çerçevenin uzunluğu 130 simge süresi olarak seçilmiştir. Benzetimlerde, bir adet röle seçilecekse kaynak tarafından iletilen simgeleri doğru olarak çözen röleler arasından en iyi anlık hedef-röle kanala sahip röle seçilir ve bu “röle seçimi” olarak adlandırılmıştır (RS n:1). Hedef kullanıcıdaki SGO’yu arttırmak için kaynaktan iletilen simgeleri doğru çözen bütün rölelerden en iyi hedef-röle kanalına sahip bir çift röle seçilir ve seçilen röleler Alamouti kodunu kullanarak çözdükleri simgeleri hedefe iletirler. Bu teknik, “röle seçimli Alamouti” (RS n:2) olarak adlandırılmıştır. Karşılaştırmak amacıyla GDUZBK, röle seçimi ve röle seçimli Alamouti’nin BHO eğrileri de Şekil 3’e eklenmiştir.



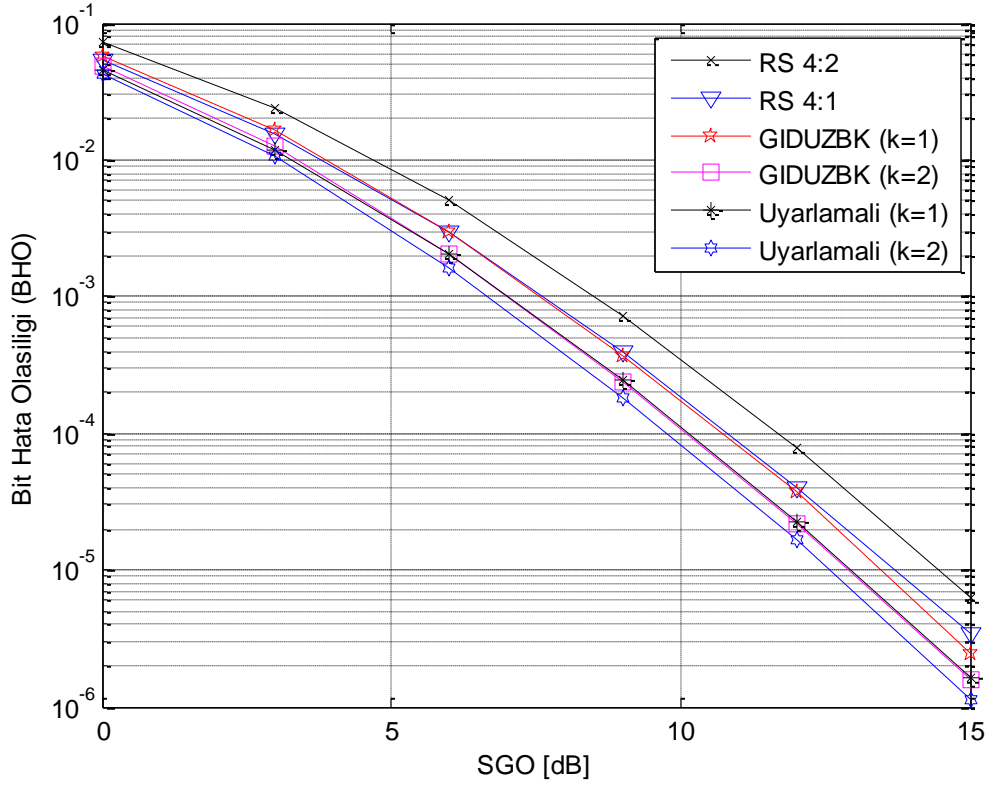
Şekil 2. Baz istasyonunda dört anten için BHO

İşbirlikli haberleşme benzetimlerinde, röle-hedef kanallarının kaynak-röle kanallarına göre daha iyi kanallara sahip olduğu kabul edilmişlerdir. Kaynak-röle arası kanalların SGO'su ile röle-hedef kanallarının SGO'su arasındaki fark, Farksal Sinyalin Gürültüye Oranı (FSGO) olarak adlandırılır.

Şekil 3'te dört röleli sistem için FSGO 5dB olarak kabul edilmiştir. Uyarlamalı kod ve röle seçimi eğer bir bitle genişletilmiş GİDUZBK kullanırsa (Uyarlamalı (k=1)), iki bit ile genişletilmiş GİDUZBK (GİDUZBK (k=2)) ile yaklaşık aynı başarıyı göstermektedir. Uyarlamalı kod ve röle seçiminde iki bitle genişletilmiş GİDUZBK kullanılırsa (uyarlamalı (k=2)), GİDUZBK'nın iki bitle genişletilmiş başarımından yaklaşık 0.3 dB daha iyi başarıyı gösterir. Benzetimler göstermiştir ki, ÇGTÇ siteminde olduğu gibi başarıyı arttırmak için anlık SGO'ya göre uyarlamalı kod ve röle seçimi, sadece kod seçimi ve sadece röle seçimine göre daha iyi bir başarı elde etmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ÇGTÇ haberleşme sisteminde başarıyı arttırmak için anlık SGO'ya göre uyarlamalı kod ve anten seçimi önerilerek sadece kod seçimi ve sadece anten seçimine göre başarı artırılmıştır. Benzetimler göstermiştir ki, baz istasyonunda 3 adet verici anten bulunduğu uyarlamalı kod ve anten seçiminde kullanılacak 4 bitlik geribesleme GDUZBK'nın ideal geribesleme başarımını yakalamıştır. Önerilen teknikle alıcıda VAS ve GDUZBK'nın elde ettiği SGO'dan daha iyi bir SGO değeri elde etmektedir. Yapılan detaylı benzetimlerden de görülebileceği gibi baz istasyonunda az sayıda anten bulunduğu VAS kullanılmalıdır.



Şekil 3. Seçmeli röleme kullanıldığında ve FSGO 5dB alındığında dört röle için BHO

Ayrıca, önerilen teknik işbirlikli haberleşmeye uygulanmış ve uyarlamalı kod ve röle seçimi olarak adlandırılmıştır. ÇGTÇ haberleşme sisteminde olduğu gibi işbirlikli haberleşmede de hedef kullanıcıda SGO artışı sağlanmıştır. Önerilen tekniğin ÇGÇÇ ile işbirlikli haberleşmesine uygulanmasındaki fark, işbirlikli haberleşmede anten seçimi yerine röle seçiminin yapılmasıdır.

TEŞEKKÜR

Mehmet E. Çelebi'nin çalışmalarının bir kısmı TÜBİTAK projesi tarafından karşılanmıştır (Proje No.107E022).

KAYNAKLAR

- Alamouti S. (1998): "A Simple Transmit Diversity Scheme for Wireless Communications", IEEE J. Sel. Areas Commun., Cilt 16, s. 1451-1458.
- Andersen J.B. (2000): "Antenna Arrays in Mobile Communications: Gain, Diversity and Channel Capacity", IEEE Antenna and Propagation Magazine, Cilt 42, No. 2, s. 12-16.
- Çelebi M.E., Şahin S., Aygölü A. (2007): "Full Rate Full Diversity Space Time Block Codes for More Than Two Transmit Antenna", IEEE Transaction on Wireless Commun., Cilt 6, No. 1, s. 16-19.
- Ekşim A., Çelebi M. E. (2007): "Diversity Enhancement with Cooperative Balanced Space-Time Block Coding", IEEE PIMRC Sempozyumu, Atina, Yunanistan, 3-6 Eylül.

- Ekşim A., Çelebi M. E. (2009¹): “Extended Balanced Space-Time Block Coding for Wireless Communications”, IET Signal Processing, Cilt 3, No. 6, s. 456-467.
- Ekşim A., Çelebi M. E. (2009²): “Extended Cooperative Balanced Space-Time Block Coding for Increased Efficiency in Wireless Sensor Networks”, LNCS Networking 2009, 5550, s. 456-467.
- Ekşim A., Çelebi M. E. (2009³): “Extended Cooperative Balanced Space Time Block Coding in Wireless Networks for Spectral Efficiency”, IEEE 17. Sinyal İşleme ve Haberleşme Konferansı, Antalya, 9-11 Nisan.
- Ekşim A., Çelebi M. E. (2010¹): “Performance Improvement of Binary Sensor-Based Statistical Space-Time Block Code Cooperative Diversity Using Limited Feedback”, IETE Technical Review, Cilt 27, No. 1, s. 57-64.
- Ekşim A., Çelebi M. E. (2010²): “Received SNR Based Code and Antenna Selection for Limited Feedback Communication”, IEEE 18. Sinyal İşleme ve Haberleşme Konferansı, Diyarbakır, 22-24 Nisan.
- Ganesan G., Stoica P. (2001): “Utilizing Space-Time Diversity for Wireless Communications”, Wireless Personal Commun., Cilt 18, s. 149-163.
- Gore D., Paulraj A. J. (2002): “MIMO Antenna Subset Selection with Space-Time Coding”, IEEE Trans. Signal Process., Cilt 50, s. 2580-2588.
- Laneman J. N., Wornell G. W., Tse D. N. C. (2001): “An Efficient Protocol for Realizing Cooperative Diversity in Wireless Networks”, IEEE ISIT Konferansı, Washington D.C., ABD.
- Love D. J., Health Jr R. W., Strohmer T. (2003): “Grassmannian Beamforming for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Systems”, IEEE Transactions on Information Theory, Cilt 49, No. 10, s. 2735-2747.
- Mondal B., Health Jr R. W. (2004¹): “An Upper Bound on SNR for Limited Feedback MIMO Beamforming Systems”, International Theory Workshop, San Antonio, TX, ABD, 24-29 Ekim.
- Mondal B., Health Jr R. W. (2004²): “Adaptive Feedback for MIMO Beamforming Systems”, IEEE 5th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Lizbon, Portekiz, 11-14 Temmuz.
- Mondal B., Samanta R., Health Jr R. W. (2005): “Frame Theoretic Quantization for Limited Feedback MIMO Beamforming Systems”, International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, Maui, HI, 13-16 Haziran.
- Nabar R. U., Bolcskei H., Kneubuhler F. W. (2004): “Fading Relay Channels: Performance Limits and Space-Time Signal Design”, IEEE J. Select. Areas Commun., Cilt 22, No. 6, s. 1099-1109.
- Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. (2003¹): “User Cooperation Diversity Part I: System Description”, IEEE Trans. Commun. Cilt 51, No. 11, s. 1927-1938.
- Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. (2003²): “User Cooperation Diversity Part II: Implementation Aspects and Performance Analysis”, IEEE Trans. Commun. Cilt 51, No. 11, s. 1939-1948.
- Wang Y., Valenti M. C. (2001): “Coded Transmit Macrodiversity: Block Space-Time Codes Over Distributed Antennas” IEEE Veh. Technol. Konferansı, Rodos, Yunanistan, s. 1435-1438, 6-9 Mayıs.
- Vucetic B., Yuan J. (2003): “Space-Time Coding”, Wiley Press.
- Wang T., Cano A., Giannakis G. B., Laneman J. N. (2007): “High-Performance Cooperative Demodulation with Decode-and-Forward Relays”, IEEE Trans. Commun., Cilt 55, No. 7, s. 1427-1438.