

Telsiz Ağlarda Farksal Ağ Kodlaması

Differential Network Coding in Wireless Networks

Özgür Özdemir¹, Ali Özgür Yılmaz²

1. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Selçuk Üniversitesi
{ozgur,sherdem}@selcuk.edu.tr

2. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
aoyilmaz@metu.edu.tr

Özetçe

Bu bildiri iki kullanıcının bir röle aracılığı ile farksal ikili modülasyon ve ağ kodlamasından yararlanarak veri alış verişi yaptığı üç terminalli bir iletişim senaryosu ele alınmaktadır. Kanal zamanda üç alt dilime ayrılmış, birinci ve ikinci zaman dilimleri kullanıcıların farksal kodlanmış verisinin iletimine tahsis edilmiştir. Demodülasyondan sonra röle, XOR işlemi yapılmış ve farksal kodlanmış paketi üçüncü zaman diliminde kullanıcılara göndermektedir. Bu iletişim yapısı için en yüksek olabirlikli sezime dayalı optimum ve basitleştirilmiş karar kuralları türetilmiştir. Rayleigh sönlümesi için elde edilen sayısal sonuçlar, önerilen her iki algoritmanın da tam çeşitleme kazancı sağladığını göstermektedir. Benzetimler ayrıca, farksal ağ kodlamalı iletimin klasik dört zaman dilimli iki yönlü röleli iletişime göre hem toplam hızda 4/3 oranında bir artış sağladığını hem de işaret-gürültü oranı (SNR) arttıkça daha iyi BER performansı verdiğini göstermiştir.

Abstract

In this paper a three-terminal communication scenario where two users exchange information by employing differential binary modulation and network coding via a relay is considered. The transmission is divided into three slots in time where the first and second slots are allocated to the transmission of differential encoded data of the users. After demodulation, the relay broadcasts the bit-wise XOR-ed and differential encoded packet to the users in the third slot. The optimum detector and a simplified decision algorithm are derived based on the maximum likelihood rule. The numerical results for Rayleigh fading show that both of the proposed algorithms provide full diversity order. The simulations also demonstrate that the proposed differential network coded transmission not only offers a sum-rate gain of up to 4/3 compared to classical bi-directional relaying with four communication slots but also provides better BER performance as the signal to noise ratio increases.

1. Giriş

İnternet, multimedya uygulamaları ve gelecek nesil iletişim sistemlerinde ihtiyaç duyulan yüksek kapasite ve iletişim hızlarına erişmek üzere ortaya atılmış olan işbirlikli iletişim tekniği günümüzün en popüler araştırma sahalarındandır.

İşbirlikli iletişim çok kullanıcılı telsiz sistemlerin doğasında mevcut olan uzaysal çeşitlemeden faydalanma fikri üzerine kuruludur. Söz konusu uzaysal çeşitleme, kaynağın verisinin hedefe iletiminde komşu kullanıcıların da görev almasıyla meydana gelen çoklu iletim yolları ile sağlanır.

İşbirlikli iletişimin temelleri bir kaynak, bir röle ve bir hedef terminalinden oluşan röleli bir kanalın incelendiği [1]'de verilen çalışmaya dayanmaktadır. Sendonaris vd.'nin önerdiği [2] ve Laneman vd.'nin [3] geliştirdiği işbirlikli iletişim sistemlerinin klasik röleli sistemlerden temel farkı, kullanıcıların hem kaynak hem de röle görevi yapabilmesidir. Sendonaris vd. [2]'deki çalışmada işbirlikli iletişim sistemlerinin kapasite bölgesi, servis dışı kalma olasılıkları ve kapsama alanı konuları araştırılmış ve kod bölme çoklu erişim uygulaması incelenmiştir. Buna karşın Laneman vd. ise düşük karmaşıklıkta tekrarlar tabanlı algıla-ilet, kuvvetlendir-ilet, seçimli iletim ve artımlı iletim protokollerini önererek bunların servis dışı kalma olasılık ifadelerini türetmiş ve algıla-ilet dışındakilerin tam çeşitleme kazancı sağladığını göstermiştir [4]. Önerilen bu tekrarlar tabanlı protokoller tam çeşitleme kazancı vermesine karşın, her kullanıcıya bir alt kanal tahsis edilmesi zorunluluğunu beraberinde getirmesi nedeniyle sistemin spektral verimliliğini kullanıcı sayısı ile orantılı olarak düşürmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmaya yönelik geliştirilmiş yaklaşımlardan en önemlisi paket düzeyinde kodlama yaklaşımına dayanan ağ kodlamasıdır [5]. [5-6]'daki çalışmalarda birçok iletişim senaryosunun iki kullanıcının karşılıklı veri iletimine dayandığı göz önüne alınmış ve ağ kodlamasının iki kullanıcı ve bir röleden oluşan üç terminalli telsiz ağlardaki uygulamaları incelenmiştir. Bu çalışmalarda ağ kodlamalı protokollerin tam çeşitleme kazancı sağlayarak spektral verimliliği iyileştirdiği servis dışı kalma olasılıkları hesaplanarak gösterilmiştir.

İşbirlikli iletişim sistemleri üzerine yapılmış çalışmaların büyük çoğunluğunda alıcı terminallerde kanal durum bilgisinin mükemmel bir şekilde bulunduğu ve evre uyumlu algılama yapıldığı varsayılmaktadır. Kanalın sembol hızına göre yavaş değişmesi halinde vericiden gönderilen pilot dizileriyle alıcının düzgün bir kanal kestirimi yapması sağlanabilmektedir. Bununla birlikte kanalın hızlı değiştiği veya taşıyıcı frekansının hatalı kullanıldığı bazı durumlarda kanal kestirimi güç olabilmekte ve maliyeti oldukça artırabilmektedir. Bu sorun alıcı ile vericinin doğrudan haberleştiği tek antenli noktadan noktaya telsiz sistemlerde,

verinin ardışık iki sembol arasındaki faz farkında kodlanarak iletilmesi fikrine dayanan farksal modülasyon tekniği ile çözülebilmektedir [7]. Farksal modülasyon yaklaşımı bu avantajına karşın, kanal durum bilgisinin alıcıda mükemmel olarak bulunduğu sistemlere göre bir miktar performans düşüşüne neden olmaktadır. Kestirimi yapılması gereken kanal sayısının daha fazla olması nedeniyle kanal kestirimi probleminin daha yoğun hissedildiği çok girdili çok çıktılı (Multiple Input Multiple Output, MIMO) sistemlerde farksal tekniklerin bir uzantısı olan farksal uzay-zaman kodlar [8-9] kullanılmaktadır. İşbirlikli iletişim sistemlerinde ise kaynağı hedefe bağlayan kanal sayısı MIMO sistemlerden de fazla sayıdadır. Örneğin vericide N, alıcıda bir antenin bulunduğu bir MIMO sistemde N tane kanal katsayısı belirlenmesi gerekirken, aynı seviyede çeşitleme kazancı veren N-1 röleden oluşan bir işbirlikli iletişim sisteminde 2N-1 kanala ait katsayıların kestirimi gerekir [10]. Bu durum işbirlikli iletişim sistemlerinde evre uyumlu olmayan algılama tekniklerinin önemini artırmaktadır. Buradan hareketle Chen ve Laneman [11]'de işbirlikli iletişim sistemleri için evre uyumlu olmayan demodülasyon teknikleri sunmuştur. Zhao ve Li, farksal modülasyonlu işbirlikli iletişim sistemleri için kuvvetlendiriletiler ve algıla-ilet protokolleri önererek performans analizlerini yapmıştır [10]. Cui vd. [12], toplam iletim süresini iki zaman dilimine ayırarak genellikle birbirini görmeyen iki kullanıcının bir röle üzerinden haberleştiği üç terminalli bir sistem için ağ kodlamalı farksal iletim teknikleri sunmuştur. Biz ise çeşitleme kazancının elde edilebileceği, birbirini gören terminalerin üç zaman diliminde haberleştiği bir senaryoyu ele alacağız.

Bu çalışmada işbirlikli iletişim sistemlerinde ağ kodlaması tekniği ile farksal modülasyonun bir arada kullanımı incelenmektedir. Böylelikle özellikle hareketliliğin yüksek olduğu ve kanal kestirim maliyetinin arttığı durumlar için, klasik işbirlikli iletişim yaklaşımına dayalı sistemlere göre spektral verimliliği daha yüksek bir sistem elde edilmesi hedeflenmektedir.

2. Sistem Modeli

Birbirlerine veri göndermek isteyen T_a ve T_b kullanıcıları ile bu kullanıcılara yardım eden bir T_r röle terminalinden oluşan, genel yapısı Şekil 1'de verilmiş bir telsiz ağ ele alınacaktır. Pratikte radyo terminallerinin half-duplex çalışıp aynı zamanda ve aynı frekans bandında hem alıcı hem de verici olarak görev yapmadığı göz önüne alınarak mevcut kanal zamanda üç ayrı zaman dilimine ayrılmıştır. İletimde farksal BPSK modülasyonu (DPSK) kullanıldığından kullanıcılar verilerini

$$s_a(n) = s_a(n-1)d_a(n) \quad (1)$$

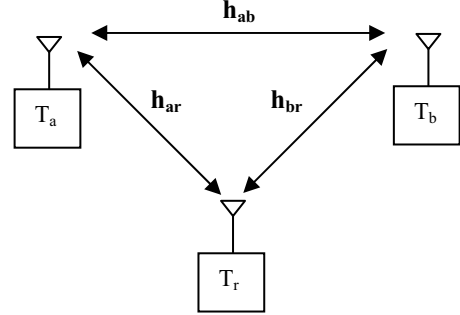
$$s_b(n) = s_b(n-1)d_b(n) \quad (2)$$

biçiminde kodlamaktadır. Burada n sembol aralığını, $d_i(n) = \exp(j\pi u_i(n))$ ($i \in \{a,b\}$) ikili veri bloğuna $u_i(n) \in \{0,1\}$ karşı düşen BPSK işaretleri, s_i ise iletilen farksal kodlanmış sembol dizisini göstermektedir. Referans semboller $s_a(1) = 1$ ve $s_b(1) = 1$ olarak alınmaktadır. Protokolün ilk zaman diliminde T_a iletimde, T_b ve T_r dinlemede olup birinci zaman diliminin sonunda dinlemedeki terminalerde oluşacak işaretler sırasıyla

$$y_b^1(n) = h_{ab}s_a(n) + z_b^1(n), \quad (3)$$

$$y_r^1(n) = h_{ar}s_a(n) + z_r^1(n) \quad (4)$$

şeklinde.



Şekil 1 Üç terminalli telsiz ağ

Benzer biçimde, ikinci zaman diliminde T_b terminali iletimde T_a ve T_r dinlemededir. İkinci zaman diliminin sonunda kullanıcı ve rölede sırasıyla

$$y_a^2(n) = h_{ab}s_b(n) + z_a^2(n) \quad (5)$$

$$y_r^2(n) = h_{br}s_b(n) + z_r^2(n) \quad (6)$$

işaretleri oluşur. (3-6) ifadelerindeki üst indisler zaman dilimini göstermektedir. Röle, (4) ve (6)'da verilen işaretleri

$$\hat{d}_a(n) = \text{sign}\{\text{Re}[y_r^1(n-1)^* y_r^1(n)]\} \quad (7)$$

$$\hat{d}_b(n) = \text{sign}\{\text{Re}[y_r^2(n-1)^* y_r^2(n)]\} \quad (8)$$

şeklinde demodüle ederek [7] \hat{u}_a ve \hat{u}_b veri bloklarını elde eder. Burada sign() operatörü işaret alma işlemini gerçekleştirirken, Re() operatörü kompleks sayının reel kısmını, * operatörü ise eşleniğini almaktadır. Daha sonra röle bu blokları

$$u_r = \hat{u}_a \oplus \hat{u}_b \quad (9)$$

ile tanımlanan XOR işlemi ile birleştirerek ağ kodlaması yapar. Üçüncü zaman diliminde u_r veri bloğu farksal modülasyonla dinlemedeki kullanıcılara iletilir. Bu iletim neticesinde kullanıcılarda

$$y_a^3(n) = h_{ar}s_r(n) + z_a^3(n) \quad (10)$$

$$y_b^3(n) = h_{br}s_r(n) + z_b^3(n) \quad (11)$$

işaretleri elde edilir. Burada $s_r(n)$ ağ kodlamalı farksal modülasyon sembol dizisini göstermektedir. Yukarıdaki ifadelerde geçen h_{ij} ($i \in \{a,b\}$, $j \in \{b,r\}$) i-j terminaleri arasındaki kanal sönmüleme katsayısını z_k^f ($k \in \{a,b,r\}$, $f \in \{1,2,3\}$) ise k terminalinde f zaman diliminde meydana gelen toplamsal beyaz Gauss kanal gürültüsünü göstermektedir. Bu çalışmada geçen sönmüleme katsayıları ve kanal gürültüleri sırasıyla $CN(0, \sigma_j^2)$ ve $CN(0, N_0)$ dağılımına

sahiptir. $CN(\mu, \sigma^2)$ ortalaması μ , varyansı σ^2 olan dairesel simetrik kompleks rastlantı değişkenini göstermektedir. i - j terminalleri arasındaki ortalama işaret-gürültü oranı (SNR) ise $\gamma_{ij} = \sigma_{ij}^2 / N_0$ ile hesaplanır.

Dört zaman dilimli çift yönlü röleli iletişim protokolü olarak da adlandıracağımız klasik çift yönlü işbirlikli iletişim modelinde kanal, zamanda dik dört ayrı alt kanala ayrılır. Protokolün ilk diliminde T_a iletimde T_b ve T_r dinlemededir. İlk zaman dilimi iletimi sonucu T_b ve T_r terminallerinde oluşacak işaretlerin genel ifadesi sırasıyla aşağıda verilmiştir:

$$x_b^1(n) = h_{ab}s_a(n) + w_b^1(n) \quad (12)$$

$$x_r^1(n) = h_{ar}s_a(n) + w_r^1(n) \quad (13)$$

Burada w_b^1 ve w_r^1 kanal gürültüsünü sembolize etmektedir. Röle, farksal demodülasyon işlemini gerçekleştirerek \tilde{u}_a veri bloğunu elde eder. İkinci zaman diliminde röle, \tilde{u}_a veri dizisinin farksal kodlanması ile oluşan s_{ar} sembol dizisini dinlemedeki T_b terminaline iletir:

$$x_b^2(n) = h_{br}s_{ar}(n) + w_b^2(n). \quad (14)$$

Benzer şekilde protokolün üçüncü ve dördüncü zaman dilimlerinde T_b kaynak T_a hedef terminal görevini üstlenir ve iki yönlü iletim tamamlanır.

3. En Yüksek Olabilirlikli Algılama

Bu bölümde ağ kodlamalı çift yönlü işbirlikli iletişim modeli için en yüksek olabilirlikli algılama kuralı türetilecektir. Bunun için (3) ve (11) ifadeleriyle verilen y_b^1 ve y_b^3 işaretleri, DPSK modülasyonunda ardışık iki sembol arasında (1) ifadesi ile verilen ilişki olduğu göz önüne alınarak aşağıdaki gibi yeniden düzenlenmelidir:

$$y_b^1(n) = y_b^1(n-1)d_a(n) + \tilde{z}_b^1(n), \quad (15)$$

$$y_b^3(n) = y_b^3(n-1)d_r(n) + \tilde{z}_b^3(n). \quad (16)$$

$\tilde{z}_b^1(n) = z_b^1(n) - z_b^1(n-1)d_a(n)$ ve $\tilde{z}_b^3(n) = z_b^3(n) - z_b^3(n-1)d_r(n)$ olup dağılımları $CN(0, 2N_0)$ biçimindedir. Bu durumda $y_b^1(n)$ ve $y_b^3(n)$ terimlerinin koşullu olabilirlikleri sırasıyla

$$p(y_b^1(n) | y_b^1(n-1), d_a(n)) = \frac{1}{2\pi N_0} \exp \left[-\frac{\|y_b^1(n) - d_a(n)y_b^1(n-1)\|^2}{2N_0} \right] \quad (17)$$

$$p(y_b^3(n) | y_b^3(n-1), d_a(n), d_b(n)) = \frac{K_1}{2\pi N_0} \exp \left[-\frac{\|y_b^3(n) - d_a(n)d_b(n)y_b^3(n-1)\|^2}{2N_0} \right] + \frac{(1-K_1)}{2\pi N_0} \exp \left[-\frac{\|y_b^3(n) + d_a(n)d_b(n)y_b^3(n-1)\|^2}{2N_0} \right] \quad (18)$$

şeklinindedir. Burada $K_1 = (1 - \varepsilon_a)(1 - \varepsilon_b) + (\varepsilon_a \varepsilon_b)$ olup, u_r veri bloğundaki bir bitin rölede hatasız elde etme olasılığıdır

göstermektedir. ε_a ve ε_b terimleri de sırasıyla T_a - T_r ve T_b - T_r arası iletimde bit hata olasılıklarını belirtmektedir. Karar kuralı ise, T_b terminali n anında gönderdiği m ($m \in \{\pm 1\}$) sembolünü bildiğinden

$$\Lambda_m = \log \left[\frac{p[y_b^1(n) | d_a(n) = 1] p[y_b^3(n) | d_a(n) = 1, d_b(n) = m]}{p[y_b^1(n) | d_a(n) = -1] p[y_b^3(n) | d_a(n) = -1, d_b(n) = -m]} \right] \quad (19)$$

ile tanımlanan logaritmik olabilirlik oranı düzenlenerek bulunur. (17) ve (18) ifadesi (19)'da yerine konduğunda ağ kodlamalı çift yönlü işbirlikli iletişim için en yüksek olabilirlikli karar kuralı

$$\text{Re} \left\{ \frac{2y_b^1(n) [y_b^1(n-1)]^*}{N_0} \right\} + d_b(n) f(r) \underset{-1}{\overset{1}{\geq}} 0 \quad (20)$$

olarak elde edilir. Burada

$$f(r) = \ln \left[\frac{K_1 e^{2r} + (1-K_1)}{K_1 + (1-K_1) e^{2r}} \right] \quad (21)$$

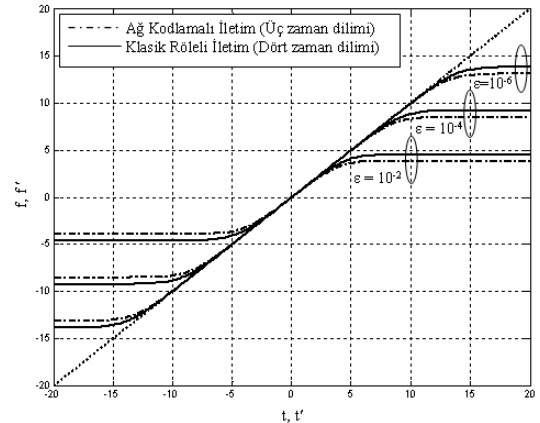
ve $r = \text{Re} \left\{ y_b^3(n) (y_b^3(n-1))^* / N_0 \right\}$ dir. T_a kullanıcılarında, yukarıda verilen karar kuralında $y_b^1(n)$ yerine $y_a^2(n)$, $y_b^3(n)$ yerine $y_a^3(n)$ ve $d_b(n)$ yerine $d_a(n)$ alınarak T_b kullanıcısının veri bloğunu sezilir ve çift yönlü röleli telsiz iletişim gerçekleşir. Dört zaman dilimli iletimde bir yönde veri iletimi için en yüksek olabilirlikli karar kuralı [10]'da

$$\text{Re} \left\{ \frac{2x_b^1(n) [x_b^1(n-1)]^*}{N_0} \right\} + f'(r') \underset{-1}{\overset{1}{\geq}} 0 \quad (22)$$

olarak verilmektedir. Yukarıda geçen $f'(r')$ fonksiyonu

$$f'(r') = \ln \left[\frac{\varepsilon_a + (1 - \varepsilon_a) e^{2r'}}{\varepsilon_a e^{2r'} + (1 - \varepsilon_a)} \right] \quad (23)$$

ve $r' = \text{Re} \left\{ x_b^2(n) (x_b^2(n-1))^* / N_0 \right\}$ dir [10]. Aynı karar kuralı T_a terminalinde u_b veri bloğunun belirlenmesinde de kullanılarak klasik çift yönlü röleli iletişim tamamlanır.



Şekil 2: $\varepsilon = \varepsilon_a = \varepsilon_b$ için $f(t)$ ve $f'(t)$ fonksiyonlarının grafikleri

Şekil-2'deki $t = 2r$ ve $t' = 2r'$ alınarak oluşturulan $f(t)$ ve $f'(t')$ fonksiyonlarının grafiklerinden, karar kuralında

$$f(t) \approx f_D(t) = \begin{cases} -T & t \leq -T \\ t & -T \leq t \leq T \\ T & t \geq T \end{cases} \quad (24)$$

biçiminde doğrusallaştırma yapmak suretiyle [10] daha basit alıcı yapıları oluşturulabileceği görülmektedir. Burada $T = \ln[K_1/(1-K_1)]$ şeklindedir. Bu durumda karar kuralı

$$\operatorname{Re} \left\{ \frac{2y_b^1(n)[y_b^1(n-1)]^*}{N_0} \right\} + d_b(n)f_D(t) \geq 0 \quad (25)$$

haline gelir.

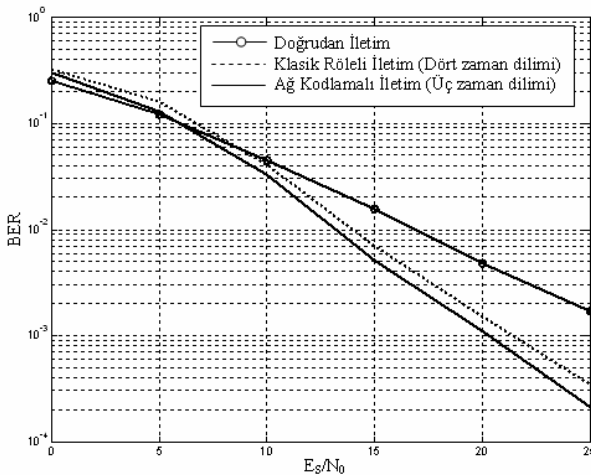
4. Benzetim Sonuçları

Bu bölümde ağ kodlamalı ve klasik çift yönlü röleli iletişim (two-way relaying veya bi-directional relaying) senaryolarının benzetim sonuçları sunulacaktır. i-j terminaleri arasındaki ortalama işaret-gürültü oranı (SNR) $\gamma_{ij} = \sigma_{ij}^2/N_0$ olmak üzere tüm linklerin ortalama SNR'larının eşit olduğu ($\gamma_{ar} = \gamma_{ab} = \gamma_{br}$) simetrik kanal durumu göz önüne alınmıştır. Kullanıcılarda önceki bölümlerde elde edilmiş olan en yüksek olabilirlikli ve doğrusallaştırılmış karar kuralları kullanılmış ve sonuçlar rölesiz doğrudan DPSK iletim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Taşıyıcı frekansı hatasının bir paket boyunca doğrusal olarak $\pi/2$ radyanlık faz farkına sebep olduğu durum incelenmiştir. Sağlıklı bir mukayese yapabilmek için üç zaman dilimli iletimde

$$\gamma_{ar} = \gamma_{ab} = \gamma_{br} = \frac{2E_s}{3N_0}, \text{ dört zaman dilimli iletimde ise}$$

$$\gamma_{ar} = \gamma_{ab} = \gamma_{br} = \frac{E_s}{2N_0} \text{ alınıp, doğrudan iletimde sembol}$$

başına düşen gücün röleli iletime göre iki kat fazla olması sağlanmıştır. Burada E_s sembol gücünü göstermektedir. Rayleigh sönmülemeli kanal durumu incelenmiştir. Simetrik kanal iki kullanıcıda da aynı performansı oluşturacağından şekillerde bir terminalde oluşacak bit hata oranı (BER) verilmiştir.



Şekil 3: En yüksek olabilirlikli karar kuralının performansı

Şekil-3'de, ağ kodlamalı çift yönlü işbirlikli iletişim için çıkarılan en yüksek olabilirlikli karar kuralının performansı, doğrudan iletim ve klasik çift yönlü işbirlikli iletişim ile karşılaştırılmaktadır. Görüldüğü gibi ağ kodlaması spektral verimliliği %33 oranında artırırken tam çeşitleme kazancı da vermektedir. Doğrusallaştırılmış karar kuralı için yapılan benzetimler en yüksek olabilirlikli karar kuralı için elde edilen performans eğrisi ile hemen hemen aynı eğriyi vermekte olduğundan gösterimi bozmamak için ayrıca doğrusallaştırılmış kural eğrileri verilmemiştir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada farksal modülasyonun kullanıldığı röle destekli iki yönlü haberleşmede ağ kodlamasının sağladığı performans kazancı incelenmiştir. Tek röleli ve iki kullanıcı bir sistem için en yüksek olabilirlikli sezim tabanlı iki farklı alıcı yapısı önerilmiş ve söz konusu alıcılara tam çeşitleme kazancı elde edildiği benzetimlerle gösterilmiştir. Nümerik sonuçlar, ağ kodlamasının spektral verimlilik kazancına ek olarak yüksek SNR değerlerinde BER performansını da iyileştirdiğini göstermektedir.

6. Kaynakça

- [1] Meulen, V. D. "Three-terminal communication channels", *Adv. Appl. Prob.*, 3, 1971.
- [2] Sendonaris, A., Erkip, E. and Aazhang, B. "User Cooperation Diversity Part I and Part II", *IEEE Trans. Commun.*, 51(11): 1927-1948, 2003.
- [3] Laneman, J.N., Tse, D.N.C., Wornell, G.W. "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behaviour", *IEEE Trans. Inf. Theory*, 50(12):3062-3080, 2004.
- [4] Ahlswede, R., Cai, N., Li, S.-Y. R. and Yeung, R. W. "Network information flow", *IEEE Trans. Inf. Theory*, 46(4):1204-1216, 2000.
- [5] Larsson, P., Johansson, N. and Sunell, K.-E. "Coded bi-directional relaying", *Scandinavian Workshop on Wireless ad-hoc Networks*, 5, 2005.
- [6] Liu, C.-H. and Xue, F. "Network Coding for Two-Way Relaying: Rate Region, Sum Rate and Opportunistic Scheduling", *ICC*, 2008.
- [7] Proakis, J. G., *Digital Communication*, McGraw-Hill, 2000.
- [8] Hughes, B.L. "Differential space-time modulation", *IEEE Trans. Info. Theory*, 46(7): 2567-2578, 2000.
- [9] Tarokh, V. and Jafarkhani, H. "A differential detection scheme for transmit diversity", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 18(7): 1169-1174, 2000.
- [10] Zhao, Q., and Li, H. "Differential Modulation for Cooperative Wireless Systems", *IEEE Transactions On Signal Processing*, 55(5): 2273-2283, 2007.
- [11] Chen, D. and Laneman, J.N. "Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 5(7):1785-1794, 2006.
- [12] Cui, T., Gao, F., Tellambura C. "Physical Layer Differential Network Coding for Two-way Relay Channels", *IEEE Global Communications Conference Journal*, 2008.