



C-MRC TABANLI KİPLEME ÇÖZ VE İLET PROTOKOLÜ İLE İKİ YÖNLÜ RÖLELİ KANALLARDA BİRLEŞİK AĞ-KANAL KODLAMASI

(JOINT NETWORK-CHANNEL CODING WITH C-MRC BASED DEMODULATE AND FORWARD PROTOCOL IN TWO-WAY RELAY CHANNELS)

Özgür ÖZDEMİR*, Ali Özgür YILMAZ**

ÖZET/ABSTRACT

Sayısal aktarma tabanlı işbirlikli telsiz ağlarının sistem karmaşıklığını ve enerji sarfiyatını azaltmak için yapılan araştırma faaliyetleri rölenin aldığı işaretlerde kod çözme yerine kipleme çözme yaptığı kipleme çöz ve ilet tasarımını ortaya çıkarmıştır. Öte yandan işbirlikli en yüksek oranlı birleştirme (İEYOB), iletim verimini düşüren çevrimsel artıklık denetimi (ÇAD) kodlardan faydalanmaksızın sayısal aktarmada hata yayılımı ile mücadele etmede kullanılan yüksek performanslı düşük karmaşıklıkla önemli bir başka tekniktir. Bu çalışmada iki kullanıcının bir röle aracılığı ile veri alışverişi yaptığı iki yönlü röle kanalları için İEYOB tabanlı kipleme çöz ve ilet protokolünü önerilmektedir. İletim süresi, birinci ve ikinci fazların kullanıcıların kodlamasız veya konvolüsyonel kodlamalı verilerinin iletimine tahsis edildiği zamanda üç faza ayrılmıştır. Röle, demodülasyondan sonra bit düzeyinde XOR'lanmış paketi üçüncü fazda kullanıcılara iletmektedir. Rayleigh sönmülemeli kanallardaki sayısal sonuçlar önerilen yaklaşımın tam çeşitleme seviyesi sağladığını göstermektedir.

Research activities to reduce the system complexity and energy consumption of digital relaying based cooperative wireless networks have yielded the demodulate-forward scheme where the relay performs demodulation, instead of decoding, on the received signals. On the other hand, cooperative maximal ratio combining (C-MRC) is another high-performance low-complexity technique used to combat error propagation in digital relaying without exploiting CRC codes which decreases the transmission efficiency. In this study, we propose a C-MRC based demodulate and forward protocol for two-way relay channels where two users exchange information via a relay. The transmission is divided into three phases in time where the first and second phases are allocated to the transmissions of uncoded or convolutionally encoded data of the users. After demodulation, the relay broadcasts the bit-wise XOR-ed packet to the users in the third phase. The numerical results for Rayleigh fading show that the proposed approach provides full diversity gain.

ANAHTAR KELİMELER/KEYWORDS

İki yönlü röleli iletişim, İşbirlikli en yüksek oranlı birleştirme, Kipleme çöz ve ilet protokolü, Ağ kodlaması
Bi-directional relaying, Cooperative maximal ratio combining (C-MRC), Demodulate and forward protocol, NetworkCoding

* Selçuk Ün., Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 42075, KONYA

** Orta Doğu Teknik Ün., Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, 06651, ANKARA

1. GİRİŞ

İşbirlikli çeşitleme, fiziksel anten dizileri ile elde edilen geleneksel anten çeşitlemesine bir alternatif olarak ortaya atılmıştır (Sendonaris vd., 2003; Laneman vd., 2004). İşbirlikli bir telsiz iletişim sistemi, sahip oldukları kaynakları sanal bir anten dizisi oluşturarak çeşitleme kazancı elde etmek üzere paylaşan bir grup telsiz terminalinden oluşur. Toplam terminal sayısının yanı sıra, genel olarak analog ve sayısal olarak sınıflandırılan işaret aktarma (relaying) yöntemleri de işbirlikli bir ağın performansını belirleyen önemli parametrelerdendir. Analog aktarmanın kullanıldığı işbirlikli telsiz ağlarda alınan işaretler ölçeklendirilerek iletilirken, sayısal aktarmanın kullanıldığı yapılarda sezildikten (detection) sonra aktarılmaktadır. Kodlama teknikleri ve ağ protokolleri ile kullanıma çok yakın oluşu ve uygulamada pahalı RF zincirleri gerektirmeyişi, sayısal aktarma tekniklerinin analog aktarmaya göre üstün taraflarıdır.

Kod çöz ve ilet (decode and forward) ve kipleme çöz ve ilet (demodulate and forward) protokolleri önde gelen sayısal aktarma tekniklerindedir (Laneman vd., 2004; Eckford vd., 2006). Kod çöz ve ilet protokolü rölede karmaşık kod çözme ve kodlama işlemleri gerektirirken kipleme çöz ve ilet protokolünde röle aldığı işaret üzerinde sadece kipleme çözme (demodulation) işlemi gerçekleştirmektedir. Sistem karmaşıklığını, güç ve zaman tüketimini önemli ölçüde azaltan kipleme çöz ve ilet yaklaşımı, ile verilen çalışmalarda sırasıyla düşük yoğunlukta üreteç matrisi (Low Density Generator Matrix) ve yinelemeli biriktirici (Repeat Accumulate) kodlar ile kullanılmıştır (Eckford ve Adve, 2006; Oenning vd., 2001; Divsalar vd., 2008). Eckford vd.'de ise rölenin kaynağın verisinin yanı sıra kendine ait veriyi de ilettiği bir algoritma, kipleme çöz ve ilet yaklaşımı ile birlikte kullanılarak analizleri gerçekleştirilmiştir (Eckford vd., 2008).

Sayısal aktarma tabanlı röleli iletişim sistemlerinde karşılaşılan temel sorun, röledeki sezim hataları sonucu ortaya çıkan hedef terminal(ler)deki etkin işaret-gürültü oranı düşüşleridir. Hata yayılımı (error propagation) olarak isimlendirilen bu durum, sistemin çeşitleme seviyesinde kayda değer azalmalara yol açmaktadır (Elfituri vd., 2007). Röleden sadece hatasız algılanan veri bloklarının aktarımına izin verildiği çevrimsel artıklık kodu ÇAD kodlama tabanlı yaklaşımlar, hata yayılımından kaynaklanan performans düşüşlerinin önüne geçmede önerilen yollardan biridir (Hunter ve Nusratinia, 2006). Ancak ÇAD kodlama, sistemin bant genişliği verimliliğini düşürdüğü gibi, rölede ek kod çözme ve kodlama işlemleri gerektirdiğinden maliyetleri ve karmaşıklığı arttırmaktadır. En yüksek olabilirlikli (EYO) sezim, link uyarlamalı işbirlikli iletim (LUIİ), işaret gürültü oranı tabanlı seçici aktarma (Selective Relaying) ve işbirlikli en yüksek oranlı birleştirme (Cooperative Maximal Ratio Combining) ÇAD kodlama kullanmaksızın hata yayılımından kaynaklanan çeşitleme kazancı düşüşlerini ortadan kaldırabilen önde gelen tekniklerdir (Chen ve Lancman, 2006; Liu ve Su, 2007; Su, 2007; Ju ve Kim, 2009; Wang vd., 2008; Onat vd., 2008; Wang vd., 2007).

ML tabanlı sayısal aktarmalı yaklaşım, röledeki olası tüm sembol sezim durumlarının hedef tarafından göz önüne alınarak gönderilen sembol için karar verilmesi prensibine

dayanmakta olup optimum çözümü sunar (Ju ve Kim, 2009). Bu yönüyle literatürdeki diğer yaklaşımlar için performans üst sınırı olarak kabul edilebilir. Buna karşın, iletimde kullanılan işaret kümesinin eleman sayısı arttıkça alıcıdaki EYO sezim kuralının karmaşıklığı da üstel olarak artmaktadır. EYO tabanlı tekniklerin bir diğer dezavantajı da performans analizinin zorluğudur. Literatürde kaynak-röle-hedeften oluşan üç düğümlü tek yönlü iletim senaryosunun EYO sezime dayalı performansını inceleyen birçok çalışma olmasına karşın, söz konusu çalışmalarda analiz zorluğu nedeniyle kaynak-röle ve röle-hedef arası kanalın ortalama hata olasılığı kullanılmış, performansın tam değerini veren anlık hata olasılığına dayalı matematiksel ifadeler sunulamamıştır. Chen ve Lancman, Liu ve Su, Su çalışmalarında ikili frekans kaydırmalı anahtarlama ve ikili faz kaydırmalı anahtarlama (İFKA) gibi ikili modülasyon tekniklerinin EYO alıcı durumunda performansları incelenmiştir (Chen ve Lancman, 2006; Liu ve Su, 2007; Su, 2007). Ju ve Kim ise EYO tekniğinin, ikiden fazla elemanlı işaret kümeleri için performansını irdelenmiş ve basitleştirilmiş bazı karar kuralları göstermiştir (Ju ve Kim, 2009).

Hata yayılımının neden olduğu performans düşüşlerine karşı önerilen diğer yaklaşımlar arasında LUIİ ve SA önemli bir yer tutmaktadır (Wang vd., 2008; Onat vd., 2008). LUIİ yaklaşımı, röle gücünün kaynak-röle ve röle-hedef kanallarının kazancına bağlı bir katsayı ile ölçeklendirilmesi fikrine dayanır. SA tekniği ise LUIİ yaklaşımının özel bir hali olup, rölenin var olan kanalların durumuna göre iletime geçmesi veya sessiz kalması ile gerçekleştirilir. Her iki teknik te kaynak-röle linki dışında başka linklerin durum bilgisinin rölede var olmasını gerektirdiğinden işaretleşmeyi ve röle karmaşıklığını önemli ölçüde arttırmaktadır. Gerek LUIİ ve SA tekniklerinde görülen bu röle karmaşıklığını, gerekse de EYO yaklaşımında ortaya çıkan ve işaret kümesinin eleman sayısı arttıkça üstel olarak artan hedefteki sezim kuralının karmaşıklığını ortadan kaldıran bir diğer yaklaşım İEYOB'dir. İEYOB tekniğinde röleden ve hedeften gelen işaretler klasik en yüksek oranlı birleştirme (EYOB)'de olduğu gibi ölçeklendirilerek birleştirilir. Ancak İEYOB yaklaşımında klasik EYOB'den farklı olarak röleden gelen işaretin çarpıldığı katsayı, kaynak-röle arası iletimin bit hata olasılığı ile orantılı bir şekilde değiştirilmektedir. Böylelikle sezim karmaşıklığı rölede ölçeklendirmeye gerek kalmadan ve kullanılan işaret kümesinin boyutundan bağımsız olarak önemli ölçüde düşürülerek hata yayılımından kaynaklanan performans kayıpları ortadan kaldırılmaktadır.

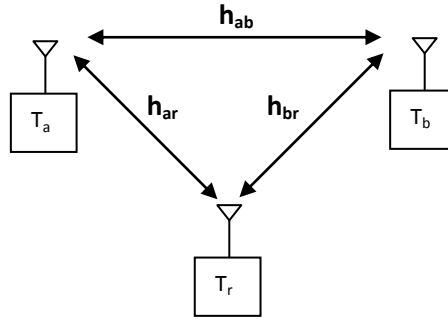
Literatürde kaynağın bir veya daha fazla sayıda röle yardımıyla hedefe veri ilettiği tek yönlü iletişim sistemlerinin EYO, LUIİ, SA ve İEYOB tabanlı performans analizlerine ilişkin çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Özdemir ve Yılmaz'ın çalışmasında ise iki kullanıcının bir röle üzerinden karşılıklı veri alışverişinde bulunduğu iki yönlü röleli iletişim senaryosunun EYO tabanlı performans analizini sunmuştur (Özdemir ve Yılmaz., 2010; Larsson vd., 2005; Kim vd., 2007). İki yönlü röleli iletişim yaklaşımının LUIİ, SA ve İEYOB teknikleri ile performansı şimdiye kadar henüz irdelenmemiştir. Bu nedenle bu çalışmada üç fazlı iki yönlü röleli iletişim senaryosunun kanal kodlamasız ve kanal kodlamalı kipleme çöz ve iletilme protokolü ile İEYOB tabanlı performansı incelenmiştir. İkinci kısımda sistem modeli, üçüncü kısımda ise önerilen alıcı yapıları verilmiştir. Dördüncü bölümde simülasyon sonuçları

sunulmuştur.

2. SİSTEM MODELİ

İki yönlü röleli iletişimde bir röle terminali (T_r) yardımıyla birbirlerine veri iletmek isteyen kullanıcıların (T_a ve T_b) meydana getirdiği, genel yapısı Şekil 1'de verilmiş olan üç terminalli bir telsiz ağ söz konusudur.

Kanal zamanda dik üç alt kanala ayrılarak birinci ve ikinci fazlar kullanıcılara, üçüncü faz rölenin ağ kodlamalı iletimine tahsis edilmiştir. Tüm terminaller aynı anda hem alıcı hem verici olarak çalışamayan (half-duplex) tek antenli birimlerdir. $d_i = [d_i^1 \ d_i^2 \ \dots \ d_i^L]$, T_i ($i \in \{a,b\}$) kullanıcısının $A_M = \{\exp(j2\pi m/M), m = 0, 1, \dots, M-1\}$ ile verilen M-PSK sembol kümesini kullanarak iletmek istediği, $d_i^j = [d_{i,1}^j \ d_{i,2}^j \ \dots \ d_{i,L}^j]$ ($j = 1, 2, \dots, L$) biçiminde ℓ bitlik toplam L tane bloğa ayrılmış veri dizisini gösterir. Kanal kodlamasının kullanılmadığı iletim modelinde blok uzunluğu $l = \log_2 M$ olarak alınırken, k girişli n çıkışlı bir (k, n) konvolüsyonel kod kullanılması halinde $l = k$ şeklindedir. Kanal kodlamalı durumda d_i^j veri bloğunun kodlayıcı çıkışında oluşturduğu kod sözcüğü $c_i^j = [c_{i,1}^j \ c_{i,2}^j \ \dots \ c_{i,n}^j]$ ile gösterilmektedir. $x_i = [x_i^1 \ x_i^2 \ \dots \ x_i^L]$, kanal kodlamalı iletimde c_i^j kod sözcüklerine karşı gelen $x_i^j = [x_{i,1}^j \ x_{i,2}^j \ \dots \ x_{i,L}^j]$ ($j = 1, 2, \dots, L$) sembol bloklarının oluşturduğu sembol dizisidir. Kodlamasız iletim durumunda ise x_i^j , d_i^j veri bloğunun iletiminde kullanılan sembolünü göstermektedir.



Şekil 1. Üç terminalli telsiz ağ

İlk zaman diliminde, T_a kullanıcısı iletimde olup, dinlemedeki T_b ve T_r terminallerinde oluşan işaretler sırasıyla

$$y_b^1(t) = h_{ab} \sqrt{E_s} X_a(t) + z_b^1(t) \quad (1)$$

$$y_r^1(n) = h_{ar} \sqrt{E_s} X_a(t) + z_r^1(t) \quad (2)$$

şeklindedir. Benzer şekilde ikinci zaman diliminde T_b kullanıcısı verisini dinlemedeki T_a ve T_r 'ye iletir. Bu zaman dilimi sonunda alıcı terminallerde sırasıyla

$$y_a^2(t) = h_{ab} \sqrt{E_s} x_b(t) + z_a^2(t) \quad (3)$$

$$y_r^2(t) = h_{br} \sqrt{E_s} x_b(t) + z_r^2(t) \quad (4)$$

işaretleri elde edilir. Eşitlik 1-Eşitlik 4, E_s sembol iletim enerjisini, h_{ij} ($j \in \{b,r\}$) i-j terminalleri arası sıfır ortalamalı boyut başına $\sigma_{ij}^2/2$ varyanslı kompleks Gauss rastgele değişkeni şeklinde modellenen sönümlenme katsayısını göstermektedir. Kanal sönümlenme katsayılarının ilgili alıcı terminaller tarafından mükemmel bir şekilde bilindiği varsayılacaktır. z_k^f ($k \in \{a,b,r\}$, $f \in \{1,2,3\}$) ise k terminalinde f fazında meydana gelen ve sıfır ortalamalı boyut başına $N_0/2$ varyanslı kompleks Gauss rastgele değişkeni biçiminde tanımlanan toplamsal beyaz Gauss kanal gürültüsünü belirtmektedir. i-j terminalleri arası işaret gürültü oranının anlık ve ortalama değerleri ise sırasıyla $\gamma_{ij} = |h_{ij}|^2 E_s / N_0$ ve $\bar{\gamma}_{ij} = \sigma_{ij}^2 E_s / N_0$ şeklinde tanımlanmaktadır.

Röledeki kod çözme işlemlerini ortadan kaldırarak daha basit bir yapı elde etmek üzere ortaya konmuş olan kipleme çöz ve ilet yaklaşımında röle $y_r^1(t)$ ve $y_r^2(t)$ işaretleri üzerinde kod çözme işlemi yerine çok daha basit olan kipleme çözme işlemini uygulayarak sırasıyla \hat{x}_a ve \hat{x}_b M-PSK sembol dizilerini oluşturur. Bu sembol dizilerine karşı gelen veri bitlerinin doğrudan XOR işlemi ile birleştirilmesi ile elde edilen ağ kodlanmış x_r dizisi üçüncü fazda iletilir ve kullanıcılarda

$$y_a^3(t) = h_{ar} \sqrt{E_s} x_r(t) + z_a^3(t) \quad (5)$$

$$y_b^3(t) = h_{br} \sqrt{E_s} x_r(t) + z_b^3(t) \quad (6)$$

işaretleri oluşur.

3. İEYOB TABANLI KİPLEME ÇÖZ VE İLET TEKNİĞİ İLE İKİ YÖNLÜ RÖLELİ İLETİŞİM

Bu bölümde hata yayılımının yol açtığı çeşitleme seviyesi düşüşlerini ortadan kaldırmak üzere önerilmiş olan İEYOB tekniği, kipleme çöz ve ilet protokolünün kullanıldığı sadece ağ kodlamalı ve bütünlük ağ-kanal kodlamalı iki yönlü röleli iletişime uygulanarak kullanılan alıcı yapıları sunulmuştur (Wang vd., 2007). Önerilen algoritmalar T_b terminaline gelen $y_b^1(n)$ ve $y_b^3(n)$ işaretleri üzerinde anlatılmıştır. Aynı yaklaşım ikinci ve üçüncü fazda T_a terminalinde elde edilen işaretler üzerinde de uygulanarak çift yönlü röleli iletim gerçekleştirilir.

3.1. Kanal Kodlamasız İletim için Alıcı Yapısı

İEYOB yaklaşımında, hedefe doğrudan gelen işaret ile röleden gelen işaret, işaret-gürültü oranı artacak biçimde belirli katsayılarla çarpılarak birleştirilir. Wang vd.'nin çalışmasındaki Eşitlik 8'de iletimde herhangi bir kanal kodunun kullanılmadığı tek yönlü röleli iletişim kanalı için verilen birleştirme işlemi, bu çalışmada ağ kodlamalı kanal kodlamasız çift yönlü röleli kanal için

$$\mathbf{x}_a(t) = \arg \min_{\mathbf{x} \in \mathcal{A}_M} \left| w_d y_b^1(t) \mathbf{x}^* + w_r y_b^3(t) \mathbf{x}_r^* - \sqrt{E_s} (w_d \mathbf{h}_{ab} + w_r \mathbf{h}_{br}) \right|^2 \quad (7)$$

biçiminde genelleştirilmiştir (Wang vd., 2007). Burada x_r röleden gönderilmesi muhtemel sembol olup, x sembolüne karşı gelen veri bloğu ile T_b 'den ikinci fazda gönderilmiş olan veri bloğunun XOR işlemi ile birleştirilmesi ile oluşan ağ kodlanmış bloğa karşı gelen sembolü göstermektedir. $(.)^*$ operatörü ise eşlenik işlemi belirtmektedir. Klasik EYOB yaklaşımında $w_d = (\mathbf{h}_{ab})^*$ ve $w_r = (\mathbf{h}_{br})^*$ olarak alınmaktadır. Ancak söz konusu katsayıların bu şekilde seçilmesi önemli performans kayıpları oluşturmaktadır (Elfituri vd., 2007). İEYOB tekniğinde ise $w_d = (\mathbf{h}_{ab})^*$ olarak alınırken röleden gelen işarete ilişkin katsayı $w_r = \gamma_e (\mathbf{h}_{br})^* / \gamma_{br}$ şeklindedir (Wang vd., 2007). Burada γ_e terimi T_a - T_r - T_b linkinin eşdeğer işaret-gürültü oranı olup

$$\gamma_e = P_{BER}^{-1} (P_{BER}^E (\gamma_{ar}, \gamma_{br})) \quad (8)$$

ile belirlenmektedir (Wang vd., 2007). Eşitlik 8'de geçen T_a - T_r - T_b linkinin eşdeğer bit hata olasılığı

$$P_{BER}^E (\gamma_{ar}, \gamma_{br}) = \left\{ P_{BER} (\gamma_{ar}) [1 - P_{BER} (\gamma_{br})] \right\} \left\{ P_{BER} (\gamma_{br}) [1 - P_{BER} (\gamma_{ar})] \right\} \quad (9)$$

biçiminde tanımlanmaktadır (Wang vd., 2007). Burada $P_{BER} (\gamma)$, M-PSK kiplemesi için anlık bit hata olasılık fonksiyonudur. İFKA için bu fonksiyon $P_{BER} (\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma})$ şeklinde olup

$Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ ile belirlenir (Proakis, 2000). Eşitlik 9'u hesaplayabilmek için T_b

terminalinin h_{ar} sönmüleme katsayısını bilmesinin gerekliliğinden doğan işaretleşme yoğunluğu, eşdeğer bit hata olasılığı hesabında T_a - T_r linkinin anlık bit hata olasılığının yerine ortalama bit hata olasılığı $\bar{P}_{BER} (\gamma_{ar})$ kullanılarak azaltılabilir. Bu durumda yeni eşdeğer bit hata olasılık fonksiyonu

$$P_{BER}^E (\gamma_{ar}, \gamma_{br}) \approx \left\{ \bar{P}_{BER} (\gamma_{ar}) [1 - P_{BER} (\gamma_{br})] \right\} \left\{ P_{BER} (\gamma_{br}) [1 - \bar{P}_{BER} (\gamma_{ar})] \right\} \quad (10)$$

halini alır.

3.2. Bütünleşik Ağ-Kanal Kodlamalı Kipleme Çöz ve İlet Protokolü için Alıcı Yapısı

Kanal kodlamasız iletim modeli için bir önceki bölümde verilen İEYOB yaklaşımı kodlamalı iletimin çözümüne uyarlanabilir. Bunun için konvolüsyonel kodlamalı iletimlerin çözümünde kullanılan Viterbi ve MAP algoritmalarındaki durum geçiş olasılıkları

$$P(s_a^j \rightarrow s_a^{j+1}) = P(d_a^j) \prod_{t=(j-1)n+1}^{j.n} \frac{\exp\left(-\|y_{C-MRC}(t) - m_D\|^2 / N'_0\right)}{(\pi N'_0)} \quad (11)$$

şeklinde yeniden düzenlenmiştir. Burada s_a^j kafesin bulunduğu durumu, d_a^j gelen veri bloğunu, s_a^{j+1} ise kafesin bir sonraki durumunu göstermektedir. $y_{C-MRC}(t)$ ile verilen birleştirilmiş işaretin beklenen değeri m_D ve varyansı N'_0 ise sırasıyla

$$y_{C-MRC}(n) = w_d y_b^1(n) x^* + w_r y_b^3(n) x_r^*(n) \quad (12)$$

$$m_D = (w_d h_{ab} + w_r h_{br}) \sqrt{E_s} \quad (13)$$

$$N'_0 = (w_d h_{ab} + w_r h_{br}) N_0 \quad (14)$$

ile belirlenir. Kodlamalı durumda rölede kod çözme yerine kipleme çözme işlemi yapıldığından Eşitlik 12 ve Eşitlik 13'te geçen birleştirme katsayıları w_d ve w_r kodlamasız durumdaki gibi elde edilmektedir.

3.3. Kanal Kodlamasız İletim ve Bütünleşik Ağ-Kanal Kodlamalı Kipleme Çöz ve İlet Protokolü için EYO Tabanlı Optimum Alıcı Yapısı

EYO alıcı yapısı, önceki bölümlerde verilen İEYOB alıcı yapılarına göre optimum çözümü sunar (Wang vd., 2007). Kanal kodlamasız iletim halinde, EYO tabanlı çift yönlü röleli kanal modeli için hedefteki karar kuralı

$$\hat{x}_0(t) = \arg \max_{x, x_1, x_2 \in A_M, x_r \neq x_s} \left\{ (1 - \varepsilon_r) \exp \left[-\frac{|y_b^1(t) - h_{ab} \sqrt{E_s} x_a(t)|^2 + |y_b^3(t) - h_{br} \sqrt{E_s} x_r(t)|^2}{\pi N_0} \right] + \varepsilon_r \exp \left[-\frac{|y_b^1(t) - h_{ab} \sqrt{E_s} x_a(t)|^2 + |y_b^3(t) - h_{br} \sqrt{E_s} x_s(t)|^2}{\pi N_0} \right] \right\} \quad (15)$$

biçimindedir. Burada

$$\varepsilon_r = \left[1 - P_{BER}(y_{ar}) \right] \left[1 - P_{BER}(y_{br}) \right] + P_{BER}(y_{br}) P_{BER}(y_{ar}) \quad (16)$$

ile belirlenen röleden hatalı iletim yapma olasılığıdır. Eşitlik 15, iletimde kullanılan işaret kümesinin eleman sayısı olan M değerinin artması ile birlikte hedefteki hesaplama karmaşıklığının da üstel olarak

artacağını göstermektedir. İFKA modülasyonu için (M=2) bu hesaplama karmaşıklığı minimum düzeye iner ve (15) ile belirlenen EYO algılayıcı yapısı

$$\begin{aligned} \hat{x}_d(t) = \arg \max_{x, x_r \in A_M} & \left\{ (1 - \varepsilon_r) \exp \left[- \frac{|y_b^1(t) - h_{ab} \sqrt{E_s} x_a(t)|^2 + |y_b^3(t) - h_{br} \sqrt{E_s} x_r(t)|^2}{\pi N_0} \right] + \right. \\ & \left. \varepsilon_r \exp \left[- \frac{|y_b^1(t) - h_{ab} \sqrt{E_s} x_a(t)|^2 + |y_b^3(t) - h_{br} \sqrt{E_s} x_r(t)|^2}{\pi N_0} \right] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

halini alır (Wang vd., 2007).

Kanal kodlamasız iletim durumu için yukarıda verilen EYO yaklaşımı kanal kodu olarak konvolüsyonel kodların kullanıldığı kanal kodlamalı iletim modeline uyarlanabilir. Bunun için hedefte çalıştırılan Viterbi ve MAP kod çözme algoritmalarının durum geçiş olasılıklarının, Eşitlik 11'dekine benzer şekilde, Eşitlik 15 ve Eşitlik 17 kullanılarak yeniden düzenlenmesi yeterlidir.

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde önerilen İEYOB tabanlı kipleme çöz ve ilet yaklaşımının tam çeşitleme kazancı sağladığını gösteren simülasyon sonuçları sunulacaktır. Simülasyonlarda İFKA kiplemesi uygulanmıştır. Bağımsız kanal katsayılarının bir iletim fazı boyunca sabit kaldığı düz Rayleigh sönümlenme durumu incelenmiştir. $\sigma_{ar} = \sigma_{br} = \sigma_{ab}$ alınarak simetrik kanal durumu değerlendirilmiştir. Simetrik kanal yapısı iki kullanıcıda da aynı performansı oluşturacağından eğrilerde bir terminalde meydana gelecek bit hata oranı (Bir Error Rate) verilmiştir. Sonuçlar rölesiz doğrudan iletim ve klasik EYOB performansları ile karşılaştırılmıştır. Sağlıklı bir mukayese yapabilmek için doğrudan iletimde sembol başına düşen güç, röleli iletime göre 1.5 kat fazla alınmıştır. Tüm eğriler, 130 sembolden oluşan çerçeve iletimleri ile elde edilmiştir. Kaynak kodlamalı durumda terminallerde iki durumlu kod oranı 1/2 ve üreteç matrisleri (3,1)_{oktal} olan konvolüsyonel kodlayıcı kullanılmıştır (Lin ve Costello, 2004).

Şekil 2'de verilen performans eğrilerinden de görüldüğü gibi İEYOB tekniği gerek kanal kodlamalı gerekse de kodlamasız iletim durumunda tam çeşitleme kazancı sağlamaktadır. Alıcıda anlık sönümlenme katsayılarının kullanılması halinde kanal kodlamalı iletim, kodlamasız iletime göre yaklaşık 3dB performans artışı sunmaktadır. Röleden hatalı iletim olasılığının dikkate alınmadığı klasik EYOB yaklaşımı ise çeşitleme seviyesinde kayba neden olmaktadır. Bu durum sayısal aktarmanın kullanıldığı sistemlerde, hedefte röle-kaynak arası kanalın durumunun göz önüne alınarak sezim işleminin gerçekleştirilmesinin önemini ortaya koymaktadır.

İEYOB tekniğinin gerektirdiği işaretleşme yükünü azaltmak üzere, Eşitlik 9 ile belirlenen anlık eşdeğer bit hata olasılık fonksiyonu yerine, Eşitlik 10'da verilen ortalama eşdeğer bit hata olasılık fonksiyonundan faydalanılması halinde elde edilecek performans eğrileri de Şekil 2'de gösterilmiştir. Beklendiği gibi anlık değer yerine ortalama değer kullanımı performansta bir miktar düşüşe neden olmaktadır. Bu düşüş sistemin çeşitleme seviyesinde bir azalmaya yol açmamaktadır.

Şekil 3'te İEYOB tekniğinin optimum EYO tabanlı alıcıya göre performansını belirlemek için gerçekleştirilen simülasyon sonuçları verilmiştir. Söz konusu eğrilerden de görüldüğü gibi İEYOB

teknîği gerek kanal kodlamasız gerekse de kanal kodlamalı iletim durumunda optimum alıcı yapısına oldukça yakın bir performans sağlamaktadır. Bu durum, İEYOB tekniği ile önemli bir performans kaybına uğramadan hedefteki kod çözme karmaşıklığında kayda değer azalmalar sağlanabileceğini göstermektedir.

İEYOB tekniğini İFKA modülasyonundan daha yüksek seviyeli işaret kümelerinde test etmek üzere QPSK modülasyonu kullanılmıştır. Şekil 4'te verilen performans eğrilerinden görüldüğü gibi İEYOB yaklaşımı QPSK durumunda da tam çeşitleme kazancı sunmaktadır. Hedefte klasik EYOB tekniği kullanılması halinde çeşitleme seviyesinde düşüş oluşmaktadır. Sistemin sinyalleşme seviyesini azaltmak için sezim işleminde ortalama değer kullanımı İFKA modülasyonunda olduğu gibi performansta bir miktar düşüş oluşturmaya karşın, çeşitleme kazancında bir azalma meydana gelmemektedir.

5. SONUÇ

Sayısal aktarmalı işbirlikli iletişim sistemlerinde ortaya çıkan hata yayılımının neden olduğu performans kayıplarını, ÇAD kodlamaya gerek kalmadan önlemek üzere önerilmiş olan İEYOB tekniği bütünleşik-ağ kanal kodlamalı iki yönlü röleli iletim senaryosuna uyarlanmıştır. İletimde kipleme çöz ve ilet protokolünden faydalanılmıştır. Böylelikle röledeki kod çözme gerekliliği ortadan kaldırılarak sistem karmaşıklığı, zaman ve enerji tüketimi önemli ölçüde düşürülmüştür. Önerilen tasarımın tam çeşitleme kazancı verdiği simülasyonlar ile gösterilmiştir.

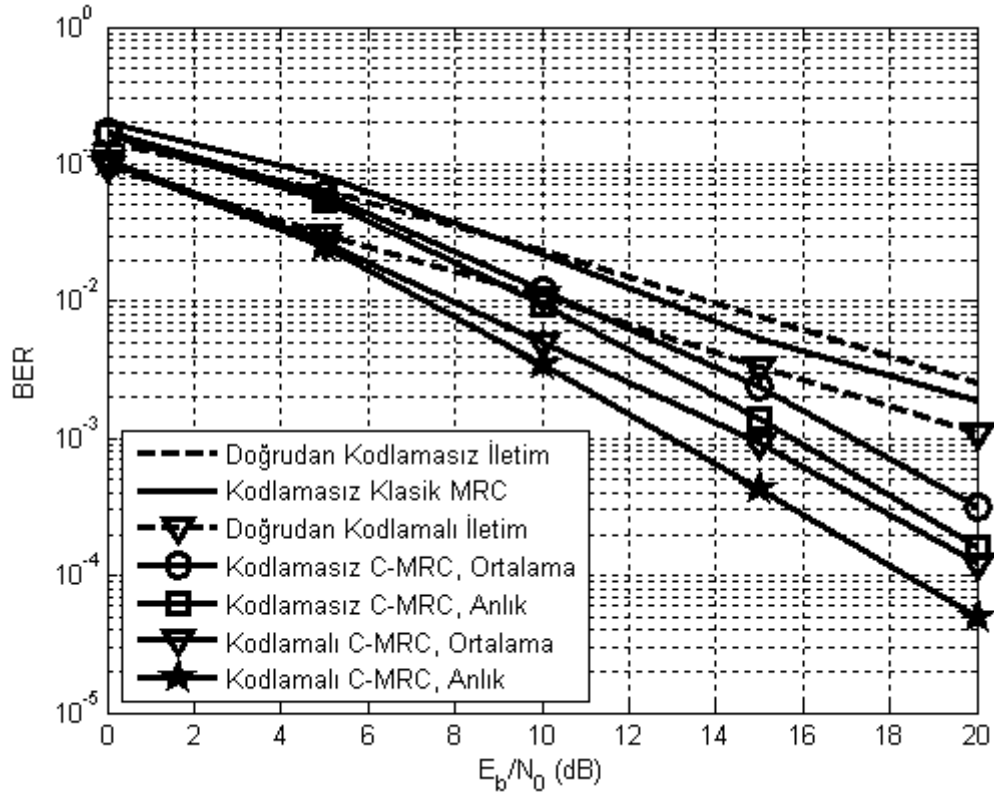
TEŞEKKÜR

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 09101049 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

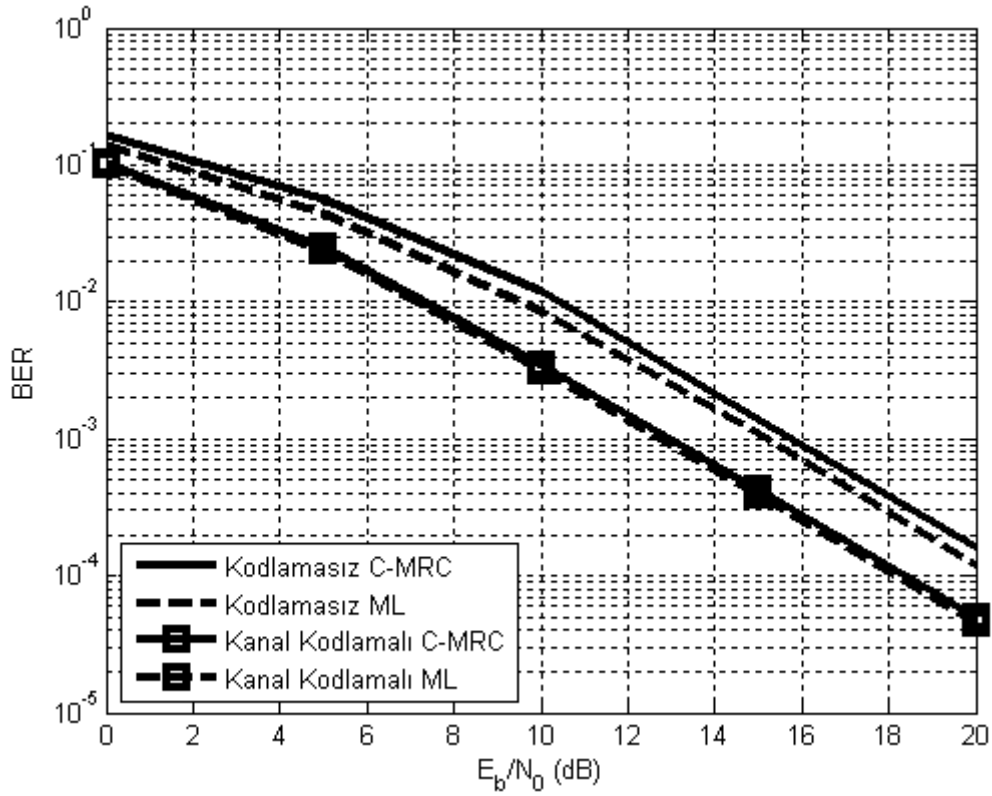
KAYNAKLAR

- Chen D., Laneman J. N. (2006): "Modulation and Demodulation for Cooperative Diversity in Wireless Systems", IEEE Transactions on Wireless Communications, Cilt 5, s. 1785-1794.
- Divsalar D., Jin H., McEliece R. J. (1998): "Coding Theorems for 'Turbo-Like' Codes", Monticello, 36th Annual Allerton Conf. on Comm., Control, and Computing, s. 201-210.
- Eckford A. W., Chu J., Adve R. (2006): "Low Complexity Cooperative Coding for Sensor Networks Using Rateless and LDGM Codes", İstanbul, IEEE International Conference on Communications.
- Eckford A. W., Adve R. (2006): "A Practical Scheme for Relaying in Sensor Networks Using Repeat-Accumulate Codes", New Jersey, Conference on Information Sciences and Systems.
- Eckford A. W., Chu J., Adve R. (2008): "Low Complexity and Fractional Coded Cooperation for Wireless Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Cilt 7, s. 1917-1929.

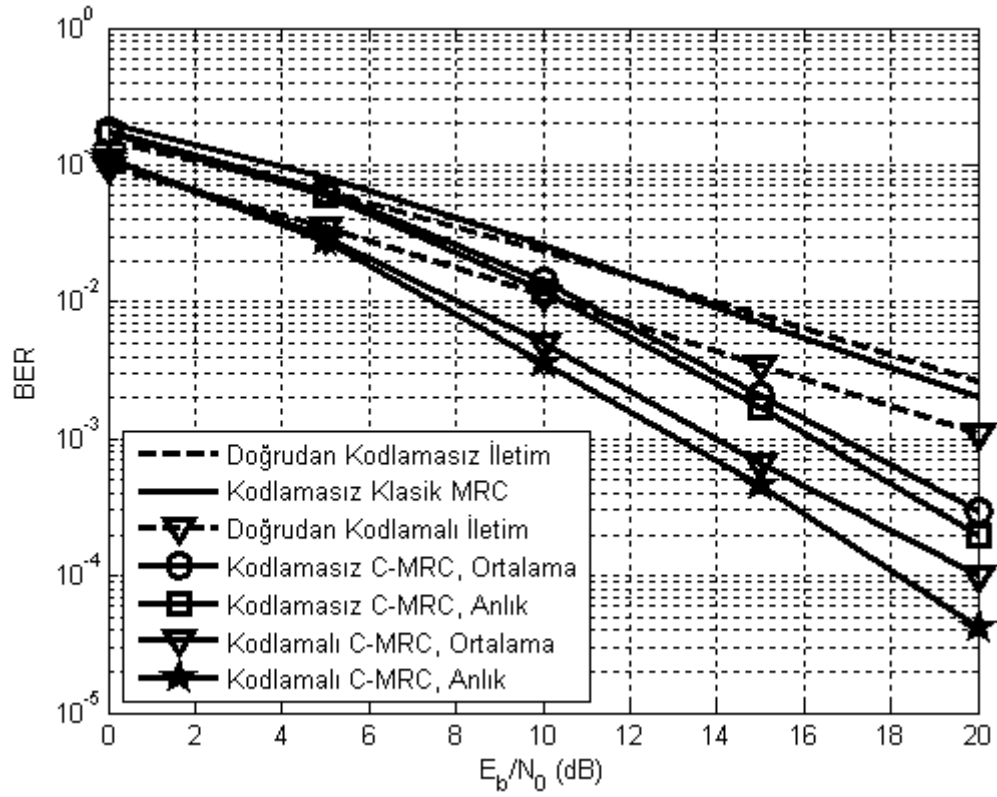
-
- Elfituri M., Hamouda W., Ghayeb A. (2007): "Analysis of A Distributed Coded Cooperation Scheme for Multi-relay Channels", Cairo, IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, s. 454-459.
- Hunter T. E., Nosratinia A. (2006): "Diversity Through Coded Cooperation", IEEE Transactions on Wireless Communications, Cilt 5, s. 283-289.
- Ju M., Kim I. (2009): "ML Performance Analysis of the Decode-and-Forward Protocol in Cooperative Diversity Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Cilt 8, s. 3855-3867.
- Laneman J. N., Tse D. N. C., Wornell G. W. (2004): "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behaviour", IEEE Transactions on Information Theory, Cilt 50, s. 3062-3080.
- Kim S., Mitran P., John C., Ghanadan R., Tarokh V. (2007): "Coded Bi-directional Relaying in Combat Scenarios", Florida, IEEE Military Communications Conference, s. 1-7.
- Larsson P., Johansson N., Sunell K. E. (2005): "Coded Bi-directional Relaying", Stockholm, Scandinavian Workshop on Ad Hoc Networks, s. 851-855.
- Lin S., Costello D. J. (2004): "Error Control Coding Fundamentals and Applications", New Jersey, Pearson Educational International.
- Liu X. ve Su W. (2007): "BER performance analysis of the optimum ML receiver for decode-and-forward cooperative protocol", Honolulu, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, s. 485-488.
- Oenning T. R., Moon J. (2001): "A Low Density Generator Matrix Interpretation of Parallel Concatenated Single Bit Parity Codes", IEEE Trans. Magnetics, Cilt 37, s. 737-741.
- Onat F. A., Adinoyi A., Fan Y., Yanıkoğlu H., Thompson J. S., Marsland I. D. (2008): "Threshold Selection for SNR-based Selective Digital Relaying in Cooperative Wireless Networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, Cilt 7, s. 4226-4237.
- Özdemir Ö., Yılmaz A. Ö (2010): "ML Performance Analysis of Digital Relaying in Bi-directional Relay Channels", Wireless Communications and Mobile Computing, Yayınlanmak üzere kabul edildi.
- Proakis, J. G. (2000): "Digital Communications", New York, McGraw-Hill.
- Sendonaris A., Erkip E., Aazhang B. (2003): "User Cooperation Diversity Part I and Part II", IEEE Transactions on Communications., Cilt 51, s. 1927-1948.
- Su W. (2007): "Performance analysis for a suboptimum ML receiver in decode-and-forward communications", Washington, IEEE Global Telecommunications Conference, s. 2962-2966.
- Wang T., Cano A., Giannakis G. B., Laneman, J. N. (2007): "High-Performance Cooperative Demodulation with Decode-and-Forward Relays", IEEE Transactions on Communications, Cilt 55, s. 1427-1438.
- Wang T., Giannakis G. B., Wang R. (2008): "Smart Regenerative Relays for Link-Adaptive Cooperative Communications", IEEE Transactions on Communications, Cilt 56, s. 1950-1960.



Şekil 2. İFKA kiplemesi ile performans eğrileri



Şekil 3. İFKA kiplemesi ile EYO ve İEYOB tabanlı iletimlerin performans eğrileri



Şekil 4. QPSK kiplemesi ile performans eğrileri