

Uzaysal Modülasyon Kullanan Bir İşbirlikli Spektrum Paylaşım Protokolü için Bit Hata Başarımı

Bit Error Performance of A Cooperative Spectrum Sharing Protocol Using Spatial Modulation

Seda Üstünbaş, Ertuğrul Başar, Ümit Aygözü
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
{ustunbass, basarer, aygolu}@itu.edu.tr

Özetçe —Bu bildiri de ikincil kullanıcılarda uzaysal modülasyon (SM) uygulayan bir spektrum paylaşım protokolü için bit hata analizi yapılmıştır. Bu protokole birincil verici (PT) M 'li faz kaydırmalı anahtarlama (M -PSK) modülasyonu kullanırken, ikincil verici (ST) uzaysal modülasyon (N_t verici ve M -PSK) uygulayarak kendi bilgisine göre seçtiği antenden PT'nin işaretini seçimli çöz-ve-aktar röle stratejisiyle iletir. Birincil kullanıcının bilgisinin M -PSK, ikincil kullanıcı bilgisinin ise anten indisi ile taşınmaları iki kullanıcının birbirlerine olan karşılıklı girişimini azaltmaktadır. Bit hata olasılığı için üst sınırlar hesaplanarak elde edilen sonuçlar bilgisayar benzetimleriyle desteklenmiştir. Protokolün başarımı işbiriksiz durumla ve her iki kullanıcıda M -PSK modülasyonu uygulayan referans sistemle karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler—Bilişsel radyo; uzaysal modülasyon.

Abstract—In this work, bit error probability for a spectrum sharing protocol applying spatial modulation (SM) at secondary users is derived. In the protocol primary transmitter (PT) applies M -ary phase shift keying (M -PSK) modulation while secondary transmitter (ST) employs spatial modulation (N_t antennas and M -PSK) to send primary M -PSK signal with respect to selective decode-and-forward strategy from the antenna it choose according to its own information. Carrying primary information by M -PSK modulation whereas secondary information by antenna indexes mitigates mutual interference between users. Upper bounds for bit error probability are analytically derived and supported via computer simulations. Performance of the protocol is compared with non-cooperation case and a reference system using M -PSK modulation at both users.

Keywords—Cognitive radio; spatial modulation.

I. GİRİŞ

Gelişen telsiz iletişim sistemleri ve artan kullanıcı sayısı ile birlikte, spektrumda yeterli frekans bandı bulunamamaktadır. Spektrumun verimsiz kullanımı da göz önüne alınarak artan spektral yığılmanın önüne geçmek için bilişsel radyo ağları geliştirilmiştir [1]. Bilişsel radyo ağlarında iki çeşit kullanıcı bulunur: Birincil kullanıcılar spektrumun asıl sahibi olan lisanslı kullanıcılar. İkincil kullanıcılar ise belirli koşullar altında lisanslı spektruma erişebilen bilişsel aygıtlardır. İkincil kullanıcılar birincil kullanıcıların başarımlarını iyileştirmeleri veya negatif etkilememeleri koşullarıyla lisanslı spektrumdan yararlanabilirler. Asıl problem iki kullanıcının birbirlerine

olan karşılıklı girişimidir [2]. Literatürde kullanıcıların birbirlerine olan karşılıklı girişimlerini azaltmayı amaçlayan farklı protokoller önerilmiştir. [3]'te güç paylaşımı yardımıyla sistemlerin birbirlerine olan girişimleri azaltılmaya çalışılmıştır. Ancak ikincil kullanıcı gücünün çoğunu birincil sistemin başarımını garantilemek için harcamakta, kendi iletişimini daha kötü koşullar altında gerçekleştirmek zorunda kalmaktadır.

Diğer taraftan uzaysal modülasyon (SM) son yıllarda çok dikkat çeken çok girişli çok çıkışlı (MIMO) bir iletişim tekniğidir [4], [5]. SM'de hem verici hem de alıcı çok antenli olup bilgi iletiminde anten indisleri de geleneksel modülasyon tekniklerinin (M -PSK/QAM) yanı sıra kullanılırlar.

Bu çalışmada ele alınan protokole [6], birincil sistem M -PSK modülasyonu kullanırken, ikincil sistem SM (N_t verici ve M -PSK modülasyonu) uygulayarak birincil sistem için seçimli çöz-ve-aktar röle görevi görür. SM sayesinde kullanıcıların birbirine olan girişimi azaltılmış ve dolayısıyla güç paylaşımı problemi ortadan kaldırılmıştır. Bit hata olasılıklarına ilişkin hata olasılığı üst sınırları türetilmiş, farklı modülasyon düzeyleri ve N_t değerleri için hesaplanıp bilgisayar benzetimleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar işbiriksiz durumla ve [3]'te verilen referans sistemle karşılaştırılarak daha önce tarafımızdan önerilen protokolün [6] üstünlüğü ortaya konulmuştur.

II. SİSTEM MODELİ

Ele alınan bilişsel radyo ağ modeli Şekil 1'de verilmiştir. Birincil ve ikincil sistemlerin verici - alıcı çiftleri sırasıyla PT - PR ve ST - SR ile gösterilmiştir. Tüm iletim iki fazdan oluşur: Düz-çizgili geçişler birinci iletim fazını, kesikli-çizgili geçişler ikinci iletim fazını gösterir. Şekil 1'de, $d_i, i = 1, 2, 3, 4$ iki düğüm arasındaki normalize uzaklığı belirtmektedir. Normalizasyon PT - PR arasındaki doğrudan hattın uzaklığı $d_1 = 1$ olacak şekilde yapılmıştır. ν yol kaybı katsayısı olmak üzere $h_1, h_{2j}, h_{3j}, h_{4j}, (j = 1, 2, \dots, N_t)$ sönümleme katsayıları sıfır ortalamalı, $d_i^{-\nu}$ varyanslı karmaşık Gauss rastlantı değişkenleridir (r.d.). Alıcılarda kanal katsayılarının ideal olarak elde edildiği ve bütün gürültü bileşenlerinin sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı toplamsal beyaz Gauss gürültüsü (AWGN) örnekleri olduğu varsayılmıştır. Birincil ve ikincil verici güçleri sırasıyla P_p ve P_s olarak verilmiştir. Bir X r.d. için $f(x)$ olasılık

yoğunluk işlevi (pdf) olmak üzere, moment üretme işlevi (MGF) $\mathcal{M}_X(t) = E[e^{tx}] = \int_{-\infty}^{\infty} e^{tx} f(x) dx$ 'dir.

Birincil kullanıcı klasik M -PSK modülasyonu, ikincil kullanıcı ise SM (N_t verici ve M -PSK modülasyonu) tekniğini uygulamaktadır. Birinci iletim fazında PR'de ve ST'nin j . ($j = 1, 2, \dots, N_t$) anteninde alınan işaretler sırasıyla,

$$y_{PR1} = \sqrt{P_p} h_{1j} x_p + n_{PR1}, \quad (1)$$

$$y_{STj} = \sqrt{P_p} h_{2j} x_p + n_{STj} \quad (2)$$

olup burada n_{PR1} ve n_{STj} , sırasıyla PR'deki ve ST'nin j . antenindeki AWGN gürültü örnekleridir. Birincil sistem başarımını iyileştirmek amacıyla röle görevi gören ST, birinci iletim fazında gönderilen işareti tüm antenleriyle alıp en büyük oranlı birleştirme (MRC) yoluyla birleştirerek $y_{ST} = \sum_{j=1}^{N_t} h_{2j}^* y_{STj}$ işaretini oluşturur ve x_p işareti için

$$\tilde{x}_p = \arg \min_{x_p} \left| y_{ST} - \sum_{j=1}^{N_t} |h_{2j}|^2 x_p \right|^2 \quad (3)$$

kararını verir. ST, x_p işaretini doğru çözerse, ikinci iletim fazında kendi $n = \log_2 N_t$ bilgi bitine bakarak N_t anteni arasından j . anteni seçip bu antenden PR'ye ve SR'ye x_p işaretini iletir. PR'de ikinci iletim fazında alınan işaret,

$$y_{PR2} = \sqrt{P_s} h_{3j} x_p + n_{PR2} \quad (4)$$

olup burada h_{3j} ST'nin j . anteni ile PR arasındaki kanalın sönmleme katsayısını, n_{PR2} ise PR'deki AWGN gürültü örneğini gösterir. x_p işareti için en büyük olabilirlikli çözme [5] (ML) ile

$$\hat{x}_p = \arg \min_{x_p, j} \left\{ \left| y_{PR1} - \sqrt{P_p} h_{1j} x_p \right|^2 + \left| y_{PR2} - \sqrt{P_s} h_{3j} x_p \right|^2 \right\}. \quad (5)$$

kararı verilir. ST, x_p işaretine hatalı karar verdiğinde ikinci iletim fazında sessiz kalacağından PR sadece birinci iletim fazında aldığı y_{PR1} işaretine göre x_p işaretine karar verir:

$$\hat{x}_p = \arg \min_{x_p, j} \left| y_{PR1} - \sqrt{P_p} h_{1j} x_p \right|^2. \quad (6)$$

İkinci iletim fazında ST iletim yaparsa, SR'de alınan işaret

$$y_{SR} = \sqrt{P_s} h_{4j} x_p + n_{SR} \quad (7)$$

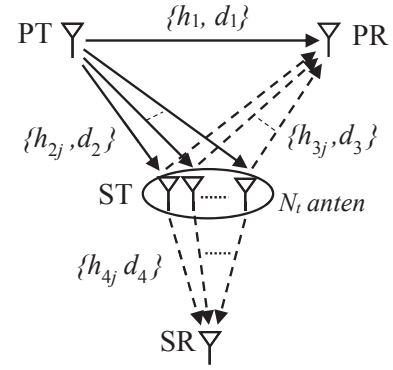
olup h_{4j} ST'nin j . anteni ile SR arasındaki kanalın sönmleme katsayısı, n_{SR} SR'deki AWGN gürültü örneğidir. y_{SR} [8]'de verildiği gibi uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) işareti olarak düşünülebilir ve j ile taşınan bilgi,

$$\hat{j} = \arg \min_{x_p, j} \left| y_{SR} - \sqrt{P_s} h_{4j} x_p \right|^2 \quad (8)$$

şeklinde çözülür. Unutulmamalıdır ki [8]'den farklı olarak x_p de ST'nin j . anteninden gönderilmiştir. Bu farklılık anten indisi çözülürken göz önünde bulundurulmalıdır.

III. BİT HATA OLASILIĞI ANALİZİ

Bu bölümde, yukarıda açıklanan protokol için birincil ve ikincil sistemlerin bit hata olasılığı üst sınır ifadeleri hesaplanacaktır. Bundan sonraki alt bölümlerde $P_p = P_s = 1$ varsayılacaktır.



Şekil 1: Ele Alınan Bilişsel Radyo Ağ Yapısı

A. Birincil Sistem Bit Hata Olasılığı

PR, ST'den gelen SM işareti [5]'te verilen optimum SM alıcı yapısını kullanarak çözdüğünde sadece birincil M -PSK işaretini doğru çözmekle ilgilenir. Dolayısıyla anten indisi hatalı çözülsün bile bu durum PR için bir hata oluşturmaz. ST birinci iletim fazında aldığı birincil işareti doğru çözerse, PT \rightarrow PR ve ST \rightarrow PR kanallarından oluşan çoklu erişim kanalı (MAC) analiz edilir. Aksi takdirde ST iletime katılmayacağından PT \rightarrow PR arasındaki doğrudan kanal düşünülerek hata olasılığı hesaplanır. Bu açıklamalar ışığında birincil sistem için bit hata olasılığı (BEP),

$$P_b^P = P_b^{PT \rightarrow PR} P_{PT \rightarrow ST} + (1 - P_{PT \rightarrow ST}) P_{MAC}^{PR} \quad (9)$$

olup $P_b^{PT \rightarrow PR}$, PT \rightarrow PR arasındaki doğrudan hattın bit hata olasılığı, $P_{PT \rightarrow ST}$, PT \rightarrow ST arasındaki kanalın simge hata olasılığı (SEP) ve P_{MAC}^{PR} ise PR'ye gelen MAC kanalın bit hata olasılığını gösterir. Rayleigh düz sönmlemeli kanallarda M -PSK modülasyonu kullanan tek-girişli tek-çıkışlı (SISO) sistemler için BEP ifadesi [7]'de,

$$P_b^{PT \rightarrow PR} \cong \frac{1}{\max(\log_2 M, 2)} \times \sum_{i=1}^{\max(M/4, 1)} \left(1 - \sqrt{\frac{\mu_i}{1 + \mu_i}} \right) \quad (10)$$

şeklinde verilmiş olup burada E_b bit başına enerji olmak üzere $\mu_i = E_b (\log_2 M) (\sin^2(2i - 1)\pi/M) / N_0$ şeklinde tanımlıdır. Seçimli iletim stratejisini benimsemiş olan ST, x_p işaretini simge olarak doğru çözemese sessiz kalacağından, PT \rightarrow ST kanalı için BEP yerine SEP ifadesi göz önüne alınmaktadır. ST'nin SM sayesinde sahip olduğu N_t adet antenin hepsi işaret alımında etkin olup aldıkları işareti MRC ile birleştirirler. Bu sayede PT \rightarrow ST kanalında alıcı çeşitlemesi sağlanarak ST'nin iletime katılma olasılığı artırılmış olur. Rayleigh düz sönmlemeli M -PSK modülasyonu kullanan SIMO kanallar için SEP [7],

$$P_{PT \rightarrow ST} = (M - 1)/M - \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{c}{1 + c}} \left\{ \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \alpha \right) \sum_{k=0}^{N_t - 1} \binom{2k}{k} \frac{1}{[4(1 + c)]^k} + \sin(\tan^{-1} \alpha) \sum_{k=1}^{N_t - 1} \sum_{i=1}^k \frac{T_{ik}}{(1 + c)^k} [\cos(\tan^{-1} \alpha)]^{2(k-i)+1} \right\} \quad (11)$$

olup burada $T_{ik} = \binom{2k}{k} / \left[\binom{2(k-i)}{k-i} 4^i [2(k-i) + 1] \right]$,
 $\alpha = \sqrt{\frac{c}{1+c}} \cot \frac{\pi}{M}$, $c = E[|h_{2j}|^2] \frac{E_b \log_2 M}{N_0} \sin^2 \frac{\pi}{M}$ ve (.)
binom katsayıdır.

PR düğümüne gelen MAC kanal için BEP üst sınır ifadesi optimum SM alıcı için aşağıdaki gibi hesaplanır: SM işaret olan $s = (j, x_p)$ iletilip $\hat{s} = (\hat{j}, \hat{x}_p)$ işaretine hatalı olarak çözüldüğünde, (5)'ten karar metriği $m(y, x_p; h_1, h_{3j}) = |y_{PR1} - h_1 x_p|^2 + |y_{PR2} - h_{3j} x_p|^2$ şeklinde hesaplanır ve koşullu çiftsel hata olasılığı (CPEP),

$$\begin{aligned} P^{MAC}(s \rightarrow \hat{s} | h_1, h_{3j}) \\ &= P(m(y, s; h_1, h_{3j}) \geq m(y, \hat{s}; h_1, h_{3j}) | h_1, h_{3j}) \\ &= P(D \geq 0 | h_1, h_{3j}) \end{aligned} \quad (12)$$

olmak üzere karar değişkeni şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned} D &= -|h_1 x_p - h_1 \hat{x}_p|^2 - |h_{3j} x_p - h_{3j} \hat{x}_p|^2 \\ &\quad - 2 \operatorname{Re} \{n_{PR1}^* (h_1 x_p - h_1 \hat{x}_p) + n_{PR2}^* (h_{3j} x_p - h_{3j} \hat{x}_p)\}. \end{aligned}$$

$E[D] = m_d = -(|h_1 x_p - h_1 \hat{x}_p|^2 + |h_{3j} x_p - h_{3j} \hat{x}_p|^2)$,
 $Var(D) = \sigma_d^2 = 2N_0 (|h_1 x_p - h_1 \hat{x}_p|^2 + |h_{3j} x_p - h_{3j} \hat{x}_p|^2)$
şekindedir. Burada n_{PR1} ve $n_{PR2} \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ olup, PR alıcısındaki AWGN gürültü örneklerini gösterir.

Gauss $Q(\cdot)$ işlevinin diğer biçimi olan Craig formülü $Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sin^2\theta}\right) d\theta$ kullanılarak

$$\begin{aligned} P^{MAC}(s \rightarrow \hat{s} | h_1, h_{3j}) &= P(D \geq 0 | h_1, h_{3j}) = Q\left(-\frac{m_d}{\sigma_d}\right) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{|h_1 x_p - h_1 \hat{x}_p|^2 + |h_{3j} x_p - h_{3j} \hat{x}_p|^2}{4N_0 \sin^2\theta}\right) d\theta \end{aligned} \quad (13)$$

yazılır. (13)'ün kanal sönmüleme katsayıları üzerinden beklenen değeri alınarak ortalama çiftsel hata olasılığı (APEP), MGF yardımıyla,

$$P^{MAC}(s \rightarrow \hat{s}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^2 \left(1 - \sqrt{\frac{c_k}{1+c_k}}\right) \prod_{n=1(n \neq k)}^2 \left(\frac{c_k}{c_k - c_n}\right) \quad (14)$$

olarak yazılır. Burada $c_1 = |x_p - \hat{x}_p|^2 / (4N_0)$ ve $c_2 = \lambda / (4N_0)$ 'dir. Anten indisi doğru çözümlerse, $\lambda = d_3^{-\nu} |x_p - \hat{x}_p|^2$, çözülemezse $\lambda = 2d_3^{-\nu}$ olmalıdır. Bunlar (14)'te yerine koyularak MAC kanal için BEP üst sınır ifadesi

$$P_{MAC}^{PR} \leq \frac{1}{MN_t} \sum_s \sum_{\hat{s}} P^{MAC}(s \rightarrow \hat{s}) \frac{e(s \rightarrow \hat{s})}{k} \quad (15)$$

ile verilir. Burada $e(s \rightarrow \hat{s})$, s işareti \hat{s} 'ye hatalı çözüldüğünde oluşacak hatalı bit sayısını gösterir ve $k = \log_2 M$ 'dir. Sonunda, (10), (11) ve (15), (9)'da yerine koyulursa birincil sistem için bit hata olasılığı üst sınır ifadesi bulunur. Birincil sistem için yalnızca M -PSK işaretin önemli olduğu ve anten indisindeki hatalı kararların birincil sistem için hata oluşturmadığı unutulmamalıdır.

B. İkincil Sistem Bit Hata Olasılığı

SM kullanan ST, kendi $n = \log_2(N_t)$ bilgi bitini göz önüne alarak N_t anteni arasından ilişkin anteni seçer ve birincil işareti bu antenden iletir. İkincil sistem için bilgi anten indisleri ile taşındığından ele alınan protokole SR tarafından bakıldığında sistemin uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) [8] gibi çalıştığı söylenebilir. İkincil sistem için BEP ifadesi birkaç farklılıkla birincil sistemde izlenen yol ile hesaplanabilir. (8)'den yola çıkarak karar metriği $m(y, x_p; h_{4j}) = |y_{SR} - h_{4j} x_p|^2$ ve karar değişkeni

$$D = -|h_{4j} x_p - h_{4j} \hat{x}_p|^2 - 2 \operatorname{Re} \{n_{SR}^* (h_{4j} x_p - h_{4j} \hat{x}_p)\}$$

olur. Burada $n_{SR} \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ 'dir. Bu yüzden, ikincil sistem için D karar değişkeninin beklenen değeri $E[D] = m_d = -|h_{4j} x_p - h_{4j} \hat{x}_p|^2$ ve varyansı $Var(D) = \sigma_d^2 = 2N_0 (|h_{4j} x_p - h_{4j} \hat{x}_p|^2)$ ile hesaplanır. İkincil sistem için CPEP ifadesi yine Craig formülü yardımıyla,

$$\begin{aligned} P(D \geq 0 | h_{4j}) &= P^{ST \rightarrow SR}(s \rightarrow \hat{s} | h_{4j}) \\ &= Q\left(-\frac{m_d}{\sigma_d}\right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{|h_{4j} x_p - h_{4j} \hat{x}_p|^2}{4N_0 \sin^2\theta}\right) d\theta \end{aligned} \quad (16)$$

olarak yazılır. (16)'nın kanal sönmüleme katsayısı h_{4j} ye göre beklenen değeri alınıp MGF yardımıyla ikincil sistem için APEP ifadesi hesaplanırsa

$$P^{ST \rightarrow SR}(s \rightarrow \hat{s}) = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\frac{\lambda}{4N_0}}{1 + \frac{\lambda}{4N_0}}}\right) \quad (17)$$

bulunur. Burada anten indisinin hatalı çözümlmesi ikincil sistem için hata oluşturacağından $\lambda = 2d_4^{-\nu}$ olmalıdır. Birincil işaretin hatalı çözülmesi ikincil sistem başarımı açısından hiçbir önem taşımaz. $k = \log_2 N_t$ olmak üzere BEP üst sınır ifadesinde (17) yerine koyulursa ikincil sistem için BEP üst sınırı

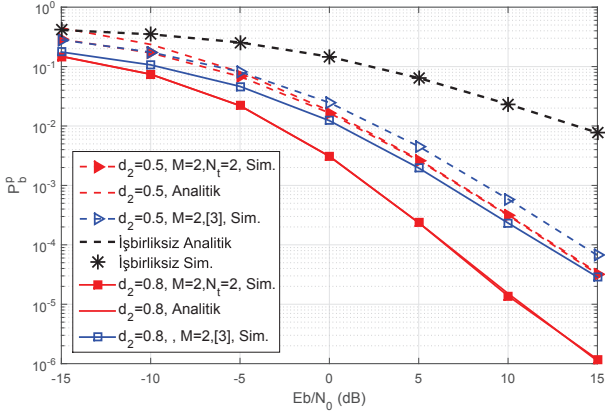
$$P_b^s \leq \frac{1}{MN_t} \sum_s \sum_{\hat{s}} P^{ST \rightarrow SR}(s \rightarrow \hat{s}) \frac{e(s \rightarrow \hat{s})}{k} \quad (18)$$

olarak elde edilir.

IV. BAŞARIM DEĞERLENDİRMESİ

Bu bölümde [6]'da tarafımızdan önerilen protokolün farklı N_t ve M değerleri için BEP başarımları bilgisayar benzetimleri yardımıyla değerlendirilmiş ve önceki bölümde elde edilen analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Üst sınırlarla benzetim sonuçlarının yüksek E_b/N_0 değerlerinde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca protokolün başarımı işbirliksiz duruma ek olarak her iki kullanıcıda da M -PSK modülasyonu uygulayan [3]'teki sistemle karşılaştırılmıştır. Bilgisayar benzetimlerinde ve analitik eğrilerde yol kaybı katsayısı $\nu = 4$ kabul edilmiştir. Sistem topolojisi [3]'teki gibi tek bir doğru üzerinde varsayılarak uzaklıklar $d_3 = |1 - d_2|$, $d_4 = d_2/2$ alınmıştır. [3]'teki PT \rightarrow SR uzaklığı 0.5 alınmıştır.

Şekil 2'de $M = 2$ ve $N_t = 2$ değerleri için önerilen protokolün birincil sisteminin BEP başarımı verilmiştir. ST'de kullanılan SM'in girişimi azaltması sayesinde, önerilen protokolün [3]'teki sistemden daha iyi olduğu söylenebilir. [3]'te iki kullanıcı için de $M = 2$ olup ST gücünün %75'ini birincil sisteme ayırdığından, hem bu gücün tümünü birincil sisteme ayıramaması nedeniyle hem de ST'nin kendi işaretinin yarattığı girişim nedeniyle birincil sistemin başarımı daha düşüktür.



Şekil 2: $M = 2$, $N_t = 2$ için Birincil Sistemin BEP Başarımı

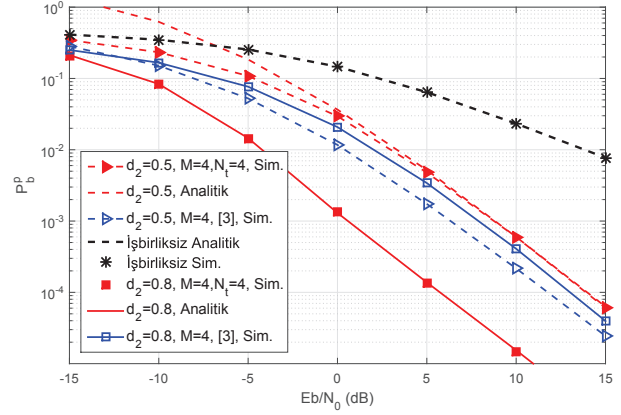
Şekil 2’de $P_b^p = 10^{-4}$ değeri göz önüne alındığında önerilen protokol $d_2 = 0.5$ ve $d_2 = 0.8$ için [3]’teki sisteme göre sırasıyla 1.5 dB ve 5.5 dB E_b/N_0 kazancı sağlar.

Şekil 3’te, $M = 4$ ve $N_t = 4$ için birincil sistemin BEP başarımı verilmiştir. Şekil 3’ten, önerilen protokolün birincil sistem başarımını, işbirliksiz duruma kıyasla önemli oranda iyileştirdiği gözlemlenebilir. [3]’teki protokolde tüm kullanıcılar için $M = 4$ olup ST gücünün %93.75’ini birincil kullanıcıya ayırır. Önerilen protokolde PT \rightarrow ST kanalının uzaklığı için bir eşik değeri vardır; bu değer $d_2^{th} = 0.63$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerin üzerinde, ($d_2 > d_2^{th}$), önerilen protokoldeki birincil sistem, [3]’te verilen protokoldekinden daha iyi başarımlar sergiler. d_2 arttıkça başarımdaki bu iyileşmenin temel nedeni, ST’de iletim yapmış olan anten indisinin PR’de hatalı çözülme olasılığının düşmesidir. ST, PR’ye yaklaştığında birincil sistem başarımı da iyileşerek [3]’teki sistemden daha iyi olmaktadır. Örneğin $P_b^p = 10^{-4}$ değeri ve $d_2 = 0.8$ için, önerilen protokolün birincil sistemi [3]’teki sisteme göre E_b/N_0 ’da 7.3 dB’lik iyileşme sağlar. Hatta birincil sistemde $d_2 = 0.8$ iken, [3]’teki sistemde $d_2 = 0.5$ olduğunda bile, önerilen protokol E_b/N_0 ’da 6 dB’lik iyileşme getirmektedir.

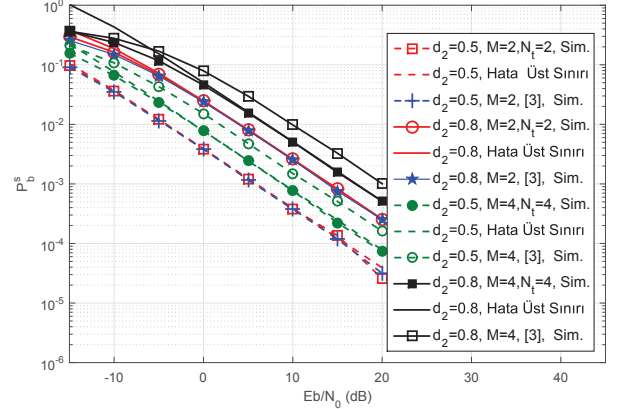
Şekil 4’te ikincil sistem başarımı verilmiştir. [8]’deki açıklamalar ışığında bekleneceği üzere, $N_t = 2$ için önerilen protokol ve [3]’ün ikincil sistemleri benzer başarımlar sergilemektedir. $M = 4$ ve $N_t = 4$ için ikincil sistem başarımının [3]’teki sisteme göre önemli derecede iyileştiği Şekil 4’ten gözlemlenebilir. $M = 4$, $N_t = 4$ ve $d_2 = 0.5$ iken önerilen protokol $P_b^s = 10^{-3}$ hata olasılığına 8.83 dB’de erişirken [3]’teki eşdeğeri ancak 11.87 dB’de bu değere ulaşmaktadır.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, bilişsel radyo ağları için ikincil kullanıcının işbirlikli spektrum paylaşımı sayesinde lisanslı frekans bandına erişebildiği bir protokolün bit hata başarımı incelenmiştir. İşbirlikli spektrum paylaşımı yapan bilişsel radyo ST’de SM kullanılmasının, tüm kullanıcılarının M -PSK modülasyonu kullandığı [3]’teki birincil ve ikincil sistemlerin başarımlarını iyileştirdiği gösterilmiştir. Bu iyileşmenin temel nedeni ikincil kullanıcı bilgisinin anten indisi ile, birincil kullanıcı bilgisinin ise M -PSK modülasyonu ile taşınmasından dolayı kullanıcıların karşılıklı girişiminin azaltılmasıdır. Diğer taraftan önerilen protokolde ST’nin tüm gücü her iki sistem için de kullanılabilir ve güç paylaşımı problemi ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3: $M = 4$, $N_t = 4$ için Birincil Sistem BEP Başarımı



Şekil 4: $M = 4$, $N_t = 4$ için İkincil Sistem BEP Başarımı

[3]’te ST’nin bütün gücünü birincil sisteme ayırmasının neden olduğu hız kısıtının önerilen protokolde yok edilmesine ek olarak [3]’te varolan PT \rightarrow SR kanalını kullanmaya da gerek kalmamıştır. Ayrıca önerilen protokolde ST’de çok anten kullanmak ikincil kullanıcının servis dışı kalma olasılığını düşürmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] E. Biglieri, A. Goldsmith, L. J. Greenstein, N. B. Mandayam ve H. V. Poor, "Principles of cognitive radio", Cambridge University Press, New York, 2013.
- [2] Lu et al., "Ten years of research in spectrum sensing and sharing in cognitive radio", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2012:28.
- [3] Y. Han, A. Pandharipande ve S. H. Ting, "Cooperative decode-and-forward relaying for secondary spectrum access", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 10, Ekim 2009.
- [4] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn ve S. Yun, "Spatial modulation", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol.54, no. 4, Temmuz 2008.
- [5] J. Jeganathan, A. Ghrayeb ve L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis", *IEEE Commun. Letters*, vol. 12, no. 8, Ağustos 2008.
- [6] S. Üstünbaş, E. Başar, ve Ü. Aygözü, "Cooperative spectrum sharing for cognitive radio networks using spatial modulation at secondary users." *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, 2015 23. IEEE, 2015.
- [7] M. K. Simon, M. S. Alouini, "Digital communication over fading channels" 2.Baskı., Wiley, 2005.
- [8] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, L. Szczecinski ve A. Ceron, "Space-shift keying modulation for MIMO channels", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, Temmuz 2009.