

Kuvvetlendir-ve-Aktar Röleli İşbirlikli Uzaysal Modülasyon İçin Hata Başarım Analizi

Error Performance Analysis of Cooperative Spatial Modulation with Amplify-and-Forward Relaying

Gökhan Altın, Ertuğrul Başar, Ümit Aygözü, Mehmet E. Çelebi
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
{alting, basarer, aygolu, mecelebi}@itu.edu.tr

Özetçe —Bu çalışmada, rölede ve hedefte çok alıcı antenli kuvvetlendir-ve-aktar yöntemini kullanan işbirlikli uzaysal modülasyon (SM) sistemlerinin bit hata olasılığı analizi yapılmıştır. Literatürdeki işbirlikli SM sistemleri üzerine yapılan çalışmalar, SM sisteminin özel bir hali olan uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) yöntemini ele almış, ayrıca rölede ve hedefte sadece tek bir alıcı anten olduğunu varsaymıştır. Bilindiği gibi, SM'in hata başarımı alıcı anten sayısı ile iyileştiğinden, çok alıcı antenli yapıların incelenmesi daha uygun olacaktır. Yapılan çalışma göstermiştir ki bilgisayar benzetimi ve analitik sonuçlar uyum içindedir. Diğer taraftan, kuvvetlendir-ve-aktar işbirlikli uzaysal modülasyon sistemleri geleneksel M 'li işbirlikli modülasyonlu sistemlere göre işaret gürlüğü oranında (SNR) $R=3$ ve $R=4$ bit/sn/Hz izgesel verimlilik ve $N_r = 2$ alıcı anten sayısı için sırasıyla, 4 ve 8 dB kazanç sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler—İşbirlikli haberleşme, uzaysal modülasyon, kuvvetlendir-ve-aktar, bit hata olasılığı.

Abstract—In this work, bit error rate analysis of amplify-and-forward cooperative spatial modulation (SM) systems with multiple antennas at relay and destination is investigated. Most of the studies in the literature of cooperative SM systems deal with the space shift keying (SSK), which is a special case of SM, and consider the single receive antenna at relay and destination. As it is known, the error performance of SM improves with increasing number of receive antennas, thus, the investigation of multi-antenna systems is essential. It is shown that the computer simulation results and theoretical results are in close match. On the other hand, cooperative SM with amplify-and-forward (AF) relaying provides 4 and 8 dB signal to noise ratio (SNR) gain for $R=3$ and $R=4$ bits/s/Hz spectral efficiency and $N_r = 2$ receive antenna number, respectively, compared to conventional M -ary cooperative modulated systems.

Keywords—Cooperative communications, spatial modulation, amplify-and-forward, bit error probability.

I. GİRİŞ

Uzaysal modülasyon (SM) çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) sistemler için önerilen yeni bir yaklaşımdır [1]. SM'de bilgi

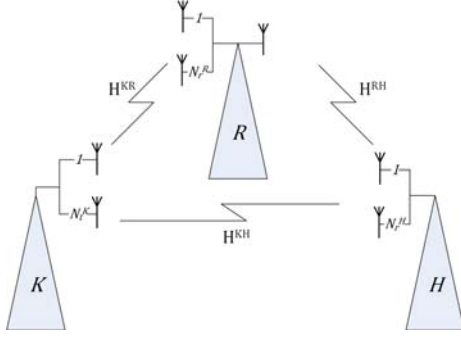
hem anten indisi ile hem de klasik iki boyutlu işaret kümesinden seçilen simgelerle taşınır. M , klasik PSK/QAM modülasyonları için işaret kümesi boyutunu göstermek üzere, N_t sayıda verici antenli SM sistemlerinde $\log_2(N_t M)$ adet bit SM simgelerine eşlenir. Burada ilk $\log_2(N_t)$ adet bit anten indisine eşlenirken, geri kalan bitler ise M -PSK/QAM modülasyonu için ayrılmaktadır. Haberleşme esnasında sadece bir anten etkin olacağından, SM sistemlerinde vericide tek bir radyo frekans katı yeterli olmakta, aynı zamanda kanallar arası girişim de oluşmamaktadır. SM'in özel bir hali olan uzay kaydırmalı anahtarlama (SSK) ise bilgi bitleri sadece anten indisi ile gönderilmekte, PSK/QAM modülasyonu kullanılmamaktadır [2]. SSK ile alıcıda ve vericide basitlik sağlanmasına karşın aynı sayıda verici anten için veri hızında düşüş yaşanmaktadır.

Öte yandan, işbirlikli haberleşme son yıllarda çokça araştırılan konular arasında yer almaktadır. İşbirlikli haberleşmede kaynak (K) birinci zamanda kendi bilgisini röleye (R) ve hedefe (H) göndermektedir. İkinci zamanda, R aldığı bilgiyi çözüp tekrar kodlayarak (çöz-ve-aktar) veya sadece kuvvetlendirerek (kuvvetlendir-ve-aktar) H'ye gönderir. Böylelikle sanal bir MIMO yapı oluşturularak sönmülemeye karşı önlem alınır ve aynı zamanda geniş bir kapsama alanı sağlanmış olur [3].

Literatürde bu iki yöntemin birleştirilmesi ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır [4]- [9]. Bu çalışmalar da genel olarak SSK yöntemini ele almış, R'de ve H'de ise tek alıcı anten olduğunu varsaymıştır. İşbirlikli SM sistemiyle ilgili yapılan [8]'deki çalışmada ilk defa işbirlikli SM sistemi ele alınmıştır. Burada, R'nin çöz-ve-aktar yapısını kullandığı ve yine R'nin tek alıcı ve verici antene sahip olduğu öngörülmüştür. Özellikle çöz-ve-aktar SM sistemlerinde tek verici antenli R alınan işareti çözdükten sonra tekrar bir SM işaretine eşleyemeyecektir.

Bilindiği kadarıyla literatürde bulunan işbirlikli SM sistemlerine ait çalışmalar çoğunlukla SSK modülasyonu kullanmakta, aynı zamanda R'de ve H'de tek antenli yapıları ele almaktadır. Bilindiği gibi, SM sistemlerinin klasik haberleşme sistemlerine göre BER başarımının yüksek olması için alıcı anten sayısının iki ve daha fazla olması gerekmektedir. Bu çalışmada, kaynağın, rölenin ve hedefin çok antenli olduğu ve rölede en büyük oranlı birleştirme (maximum ratio combining, MRC) kullanan işbirlikli SM sistemlerinin bit hata olasılığı analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu sistem klasik modülasy-

Bu çalışma 114E607 proje numarası ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmektedir.



Şekil 1: Kuvvetlendirir-ve-aktar röleli, işbirlikli uzaysal modülasyonlu sistem modeli.

onlu işbirlikli sistemler ile de karşılaştırılmıştır. Bilgisayar benzetimleri sonucunda görülmüştür ki analitik sonuçlarla benzetim sonuçları uyum içindedir ve işbirlikli SM sistemleri klasik işbirlikli sistemlere göre hata başarımında iyileşme sağlamaktadır.

Bildirinin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. II. ve III. bölümlerde sırasıyla, sistem modeli ve kuvvetlendirir-ve-aktar işbirlikli SM sistemine ait bit hata olasılığı analizi verilmiştir. Kuramsal sonuçlar ile bilgisayar benzetim sonuçları IV. bölümde gösterilmiştir. Bölüm V ise sonuçlar verilmektedir.

Bildiri boyunca kullanılan gösterimler ise şu şekildedir. Vektör ve matris sırasıyla, kalın küçük harf ve kalın büyük harf olarak yazılmıştır. $(\cdot)^T$ evrik işlemini, $(\cdot)^H$ Hermisyen evrik işlemini ve $\|\cdot\|$ vektör/matrisin Öklit/Frobenius normunu göstermektedir. Karmaşık değerli matrisin boyutları $\mathbb{C}^{m \times n}$ ile belirtilmiştir. $\Pr\{\cdot\}$ ve $E\{\cdot\}$ sırasıyla, bir olayın olasılığını ve beklenen değer işlemini göstermektedir. $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ ise sıfır ortalamalı, σ^2 varyanslı çevrimsel simetrik karmaşık Gauss dağılımını ifade etmektedir. $F_X(x)$ ve $f_X(x)$ ise sırasıyla birikimli dağılım işlevini ve olasılık yoğunluk işlevini göstermektedir.

II. SİSTEM MODELİ

Kaynak (K), röle (R) ve hedef'ten (H) oluşan bir işbirlikli sistem yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Kaynağın verici anten sayısı N_t^K , rölenin ve hedefin alıcı anten sayıları sırasıyla N_r^R ve N_t^H alınmıştır (R'de kuvvetlendirir-ve-aktar yöntemi kullanıldığı için tek verici anten yeterlidir). K-R arası $\mathbf{H}^{KR} \in \mathbb{C}^{N_r^R \times N_t^K}$, K-H arası $\mathbf{H}^{KH} \in \mathbb{C}^{N_t^H \times N_t^K}$ ve R-H arası $\mathbf{h}^{RH} \in \mathbb{C}^{N_t^H \times 1}$ MIMO kanal matrislerinin/vektörünün her bir elemanı $\mathcal{CN}(0, \sigma_h^2)$, $\sigma_h^2 = 1$ ile modellenmiş ve düz sönmülemeli Rayleigh kanal yapısına uymaktadır. l aktif anten indisini, x_q M-PSK/QAM simgelerini göstermek üzere, birim enerjili, $E[\mathbf{x}^H \mathbf{x}] = 1$, SM simgeleri $\mathbf{x} = \underbrace{[0, 0, \dots, 0]_{l-1}}_{l-1}, \underbrace{[x_q, 0, \dots, 0]_{N_t-l}}_{N_t-l}^T =$

$[l, x_q]$ olarak belirtildiğinde, birinci zamanda R ve H'de alınan işaretler,

$$\mathbf{y}^{KH} = \mathbf{h}_l^{KH} x_q + \mathbf{n}^{KH} \quad (1)$$

$$\mathbf{y}^{KR} = \mathbf{h}_l^{KR} x_q + \mathbf{n}^{KR}, \quad (2)$$

olacaktır. Burada, $N_r^{H(R)} \times 1$ boyutlu $\mathbf{h}_l^{KH(KR)}$ vektörü MIMO kanal matrisinin l . sütununu göstermekte, $\mathbf{H}^{KH(KR)} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1^{KH(KR)} & \mathbf{h}_2^{KH(KR)} & \dots & \mathbf{h}_{N_t}^{KH(KR)} \end{bmatrix}$ ve her bir elemanı bağımsız, aynı dağılımlı (i.i.d) $\mathcal{CN}(0, \sigma_h^2)$, $\sigma_h^2 = 1$ olarak ifade edilmektedir. \mathbf{n} ise $N_r^{R,H} \times 1$ boyutlu, bileşenleri çift yönlü güç spektral yoğunluğu $N_0/2$ olan ve $\mathcal{CN}(0, N_0)$ dağılımı gösteren toplamsal beyaz Gauss gürültü vektörüdür.

R aldığı işareti MRC ile birleştirdiğinde alınan işaret

$$\begin{aligned} y^R &= \frac{(\mathbf{h}_l^{KR})^H}{\|\mathbf{h}_l^{KR}\|} \mathbf{y}^{KR} \\ &= \|\mathbf{h}_l^{KR}\| x_q + \frac{(\mathbf{h}_l^{KR})^H}{\|\mathbf{h}_l^{KR}\|} \mathbf{n}^{KR} \end{aligned} \quad (3)$$

olacaktır. İkinci zamanda R bu işareti kuvvetlendirerek H'ye göndermektedir. H'de alınan işaret ise,

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^{RH} &= A \mathbf{h}^{RH} y^R + \mathbf{n}^{RH} \\ &= G \mathbf{h}^{RH} \|\mathbf{h}_l^{KR}\| x_q + \tilde{\mathbf{n}} \end{aligned} \quad (4)$$

olacaktır. Burada $A = \sqrt{\frac{1}{N_r^R \sigma_h^2 + N_0}}$ röledeki sabit kuvvetlendirme çarpanıdır. Yapılan basitleştirmeden sonra gürültü, bileşenleri $\mathcal{CN}(0, N_0)$ dağılımı gösteren $\tilde{\mathbf{n}}$ vektörü olarak yazılabilmekte ve $G = \sqrt{\frac{A^2}{A^2 \|\mathbf{h}^{RH}\|^2 / N_r^D + 1}}$ şeklinde ifade edilmektedir.

H'de en büyük olabilirlik kestirimi uygulandığında karar metriği,

$$\begin{aligned} [\hat{l}, \hat{x}_q] &= \arg \min_{l, q} \left(\|\mathbf{y}^{KH} - \mathbf{h}_l^{KH} x_q\|^2 \right. \\ &\quad \left. + \|\mathbf{y}^{RH} - G \mathbf{h}^{RH} \|\mathbf{h}_l^{KR}\| x_q\|^2 \right) \end{aligned} \quad (5)$$

olmaktadır.

III. ORTALAMA BİT HATA OLASILIĞI HESABI

Ortalama bit hata olasılığı (ABEP) birleşim üst sınırı şu şekilde ifade edilebilir (Bölüm 12, [10])

$$\begin{aligned} ABEP &\leq \frac{1}{N_t M \log_2(N_t M)} \\ &\times \sum_{l=1}^{N_t} \sum_{q=1}^M \sum_{k=1}^{N_t} \sum_{p=1}^M N([l, x_q] \rightarrow [k, x_p]) APEP. \end{aligned} \quad (6)$$

Burada, $N([l, x_q] \rightarrow [k, x_p])$, $[l, x_q]$ ve $[k, x_p]$ SM simgeleri arasındaki hatalı bit sayısı ve APEP ise, $[l, x_q]$ simgesi gönderildiğinde hatalı olarak $[k, x_p]$ simgesinin alınma olasılığını gösteren ortalama çiftsel hata olasılığıdır.

A. Ortalama Çiftsel Hata Olasılığı

Hedefte ortalama çiftsel hata olasılığı (PEP),

$$APEP = E \left\{ Q \left(\sqrt{\gamma^{KH} + \gamma^{KRH}} \right) \right\} \quad (6)$$

$$M_{\gamma^{KRH}}(s) = 1 - \sum_{k=0}^{N_r^R-1} \sum_{m=0}^k \binom{k}{m} s \left(\frac{C}{\alpha}\right)^{\frac{N_r^H+m+k-1}{2}} \frac{(N_r^H+m)!}{C^m (N_r^H-1)!} \left(\frac{1}{\alpha} + s\right)^{-\frac{N_r^H+m+k+1}{2}} e^{\frac{C}{2(1+\alpha s)}} W_{-\frac{N_r^H+m+k+1}{2}, \frac{N_r^H+m-k}{2}} \left(\frac{C}{2(1+\alpha s)}\right) \quad (17)$$

olarak hesaplanacaktır. (6)'da γ^{KH} ile γ^{KRH} ifadeleri sırasıyla,

$$\gamma^{KH} = \frac{\|\mathbf{h}_l^{KH} x_q - \mathbf{h}_k^{KH} x_p\|^2}{2N_0} \quad (7)$$

$$\gamma^{KRH} = \frac{|G|^2 \|\mathbf{h}^{RH}\|^2 \|\mathbf{h}_l^{KR}\| |x_q| - \|\mathbf{h}_k^{KR}\| |x_p|^2}{2N_0} \quad (8)$$

olacaktır. Buradan APEP, Craig formülü sayesinde moment üretme işlevi yardımıyla şu şekilde hesaplanacaktır (Bölüm 4, [10])

$$APEP = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} M_{\gamma^{KH}} \left(\frac{-1}{2 \sin^2(\theta)}\right) M_{\gamma^{KRH}} \left(\frac{-1}{2 \sin^2(\theta)}\right) d\theta. \quad (9)$$

O halde, (7) ve (8)'in moment üretme işlevlerinin bulunması gerekmektedir. $\rho = 1/N_0$ olmak üzere $\kappa = \frac{\rho}{2} \|\mathbf{h}_l^{KH} x_q - \mathbf{h}_k^{KH} x_p\|^2$ olarak tanımlandığında düz Rayleigh sönümlenmeli kanallarda κ , Gamma dağılımı (buradaki özel durum için aslında Erlang dağılımıdır) gösterecektir, $\kappa \sim \text{Gamma}(N_r^H, \bar{\rho})$ [11]. Burada,

$$\bar{\rho} = \begin{cases} \frac{\rho}{2} |x_q - x_p|^2 & l = k \\ \frac{\rho}{2} (|x_q|^2 + |x_p|^2) & l \neq k \end{cases} \quad (10)$$

olarak ifade edilmektedir. Moment üretme işlevi ise,

$$M_{\gamma^{KH}}(s) = (1 - \bar{\rho}s)^{-N_r^H} \quad (11)$$

olacaktır.

Yüksek modülasyon derecelerinde D'de anten indisi hatası ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan hata sadece modülasyonlu işaretlerden kaynaklanacaktır. O halde $\mathbf{h}_l^{KR} = \mathbf{h}_k^{KR} = \mathbf{h}^{KR}$ olacak ve buradan (8)'deki ifade düzenlendiğinde,

$$\gamma^{KRH} \approx \frac{\|\mathbf{h}^{RH}\|^2 \|\mathbf{h}^{KR}\|^2 N_r^D |x_q - x_p|^2}{2N_0 (\|\mathbf{h}^{RH}\|^2 + N_r^D (N_r^R \sigma_h^2 + N_0))} \quad (12)$$

yazılabilecektir. $X = \|\mathbf{h}^{RH}\|^2$, $Y = \frac{N_r^D \|\mathbf{h}^{KR}\|^2 |x_q - x_p|^2}{2N_0}$ ve $C = N_r^D (N_r^R \sigma_h^2 + N_0)$ tanımlamaları yapılırsa, γ^{KRH} 'nin birikimli dağılım işlevi,

$$F_{\gamma^{KRH}}(\gamma) = \Pr \left(\frac{XY}{X+C} \leq \gamma \right) \quad (13)$$

olarak yazılacak ve buradan,

$$F_{\gamma^{KRH}}(\gamma) = \int_0^\infty \Pr \left(\frac{XY}{X+C} \leq \gamma \mid X \right) f_X(x) dx \quad (14)$$

yardımla hesaplanacaktır. (14)'de X , $\text{Gamma}(N_r^H, \sigma_h^2 = 1)$ ve Y ise $\alpha = \frac{N_r^D |x_q - x_p|^2}{2N_0}$ durumunda $\text{Gamma}(N_r^R, \alpha)$

dağılımlarını göstermektedir. Matematik işlemlerinden sonra γ^{KRH} 'nin birikimli dağılım işlevi (3.471.9, [12]) yardımıyla,

$$F_{\gamma^{KRH}}(\gamma) = 1 - \sum_{k=0}^{N_r^R-1} \sum_{m=0}^k \binom{k}{m} \frac{2e^{-\frac{\gamma}{\alpha}} \beta^{N_r^H+m+k}}{C^m k! (N_r^H-1)!} K_\nu(2\beta) \quad (15)$$

olarak hesaplanabilir. Burada, $\nu = N_r^H + m - k$, $\beta = \sqrt{\frac{\gamma C}{\alpha}}$ ve $K_\nu(\cdot)$ ise ikinci türden değiştirilmiş Bessel işlevidir (8.407, [12]).

Buradan, moment üretme işlevi Laplace dönüşümü yardımıyla hesaplanırsa,

$$M_{\gamma^{KRH}}(s) = s\mathcal{L} \{F_{\gamma^{KRH}}(\gamma)\} \quad (16)$$

olarak verilebilecektir. (16)'nın analizi yapıldığında sayfanın üst kısmında verilen (17) eşitliği elde edilecektir. Eşitlikteki $W_{\lambda,\mu}(z)$, Whittaker işlevidir (9.22-9.23 [12]).

(11) ve (17), (9)'da yerine konularak APEP hesaplanabilecektir. Ancak bu integralin alınması yalnızca sayısal yöntemler ile gerçekleştirilebilmektedir. Sayısal yöntemlerin kullanılması durumunda ise aşağıdaki şekilde bir yaklaşım da yapılabilecektir:

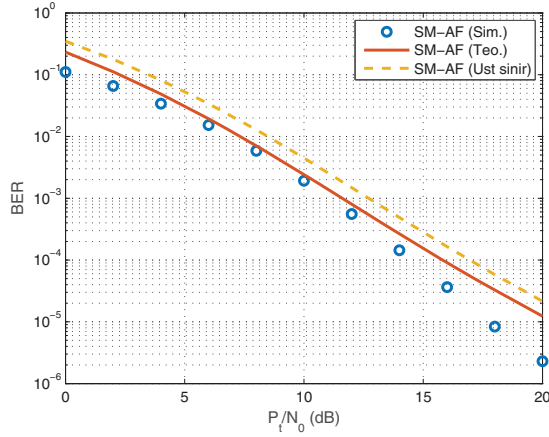
$$APEP < \frac{1}{\pi} M_{\gamma^{KH}} \left(\frac{1}{2}\right) M_{\gamma^{KRH}} \left(\frac{1}{2}\right). \quad (18)$$

IV. BENZETİM SONUÇLARI

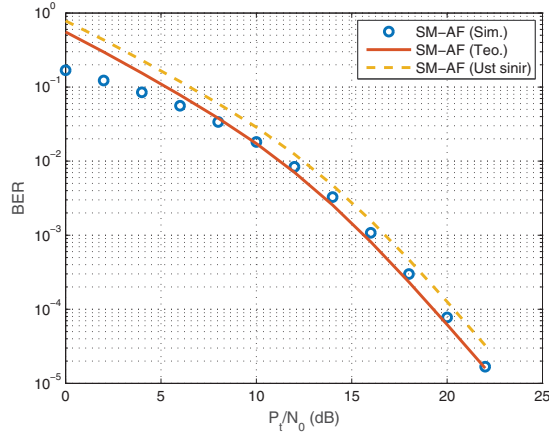
Bu bölümde, kuvvetlendir-ve-aktar işbirlikli SM sistemlerinin analitik sonuçları ve bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Monte Carlo benzetimleri alınan toplam güce karşılık gürültü oranının, P_t/N_0 , işlevi olarak en az 10^6 kanal kullanımı için gerçekleştirilmiş ve analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Toplam güç kaynakta ve rölede harcanan gücün toplamı olarak, $P_t = P_K + P_R$ ile ifade edilmektedir. Tüm başarımlar değerlendirilmelerinde K'de ve R'de birim güç harcandığı varsayılmıştır.

Şekil 2 ve 3'te kuvvetlendir-ve-aktar 8-PSK SM sisteminin matematiksel analizi ve bilgisayar benzetimleri verilmiştir. Şekil 2'de kaynakta $N_t^K = 2$ verici anten, rölede $N_r^R = 2$ alıcı anten (rölede MRC kullanıldığı için tek verici anten yeterli olacaktır) ve hedefte $N_r^H = 2$ anten için sonuçlar görülmektedir. Şekil 3'te ise aynı analizler 16-PSK SM için yapılmıştır. Görüldüğü gibi, modülasyon derecesinin artması ile kuramsal eğri ve bilgisayar benzetim sonuçları uyum içerisinde olmaktadır. Aynı zamanda (18) ise bu sonuçlara bir üst sınırdır.

Şekil 4'te $R = 3$ ve $R = 4$ bit/sn/Hz bant verimlilik değerleri için kuvvetlendir-ve-aktar işbirlikli SM ile hem rölede hem hedefte en büyük oranlı birleştirme kullanan klasik 8-PSK ve 16-PSK modülasyonlu işbirlikli sistemlerin karşılaştırması verilmiştir. SM'de belirli bir anda sadece tek bir verici anten etkin olduğundan, klasik sistem için verici anten sayısı $N_t = 1$



Şekil 2: $N_t^K = 2$, 8-PSK SM için kuvvetlendir-ve-aktar röleli uzaysal modülasyon sistemi bit hata olasılığı. ($N_r^R = N_r^H = 2$ ve $N_t^R = 1$)

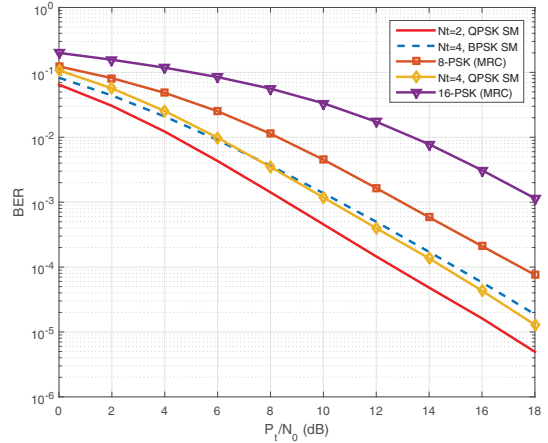


Şekil 3: $N_t^K = 2$, 16-PSK SM için kuvvetlendir-ve-aktar röleli uzaysal modülasyon sistemi bit hata olasılığı. ($N_r^R = N_r^H = 2$ ve $N_t^R = 1$)

seçilmiştir. Her iki sistem için R'de ve H'de alıcı anten sayısı $N_r^R = N_r^H = 2$ 'dir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi kuvvetlendir-ve-aktar yöntemini kullanan işbirlikli haberleşme sistemlerinde aynı izgesel verimlilik için uzaysal modülasyon, klasik yöntemlere göre daha iyi BER başarımı göstermektedir. $R = 3$ ve $R = 4$ bit/sn/Hz izgesel verimlilik için sırasıyla 4 ve 8 dB SNR kazancı görülmektedir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada, kuvvetlendir-ve-aktar yapısını kullanan tek röleli, uzaysal modülasyonlu işbirlikli haberleşme sistemlerinde kaynağın, rölenin ve hedefin çok antenli olması durumunda bit hata analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde bulunan çalışmalarda, SM'in özel bir biçimi olan uzay kaydırmalı anahtarlar sistemlerinin incelenmesi yapılmış ancak burada da rölenin ve hedefin tek antenli olduğu varsayılmıştır. Bilindiği gibi, SM sistemlerinin hata başarımı alıcı anten sayısı ile artmaktadır. Bu nedenle, alıcı anten sayısının iki ve daha fazla



Şekil 4: $R = 3$ ve $R = 4$ bit/sn/Hz izgesel verimlilik için kuvvetlendir-ve-aktar röleli uzaysal modülasyon sistemi ile klasik PSK/QAM kuvvetlendir-ve-aktar sistemi bit hata olasılığı karşılaştırması ($N_r^R = N_r^H = 2$).

olduğu yapıların incelenmesi SM için daha gerçekçi sonuçlar verecektir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi, işbirlikli SM sistemleri klasik işbirlikli sistemlere göre daha yüksek bit hata başarımı sağlamaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. Ahn and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, Jul. 2008.
- [2] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, L. Szczecinski and A. Ceron, "Space shift keying modulation for MIMO channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3692-3703, Jul. 2009.
- [3] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [4] N. Serafimovski, S. Sinanovic, M. Di Renzo, H. Haas, "Dual-hop spatial modulation (Dh-SM)," *IEEE Veh. Tech. Conf., Spring*, Yokohoma, Japan, 2011.
- [5] R. Mesleh, S. S. Ikki ve M. Alwakeel, "Performance analysis of space shift keying with amplify and forward relaying," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 1350-1352, Dec. 2011.
- [6] R. Mesleh, S. S. Ikki, E.-H. M. Aggoune ve A. Mansour, "Performance analysis of space shift keying (SSK) modulation with multiple cooperative relays," *EURASIP J. Advances in Signal Process.*, vol. 2011, pp. 1-10, Sept. 2012.
- [7] R. Mesleh ve S. S. Ikki, "Space shift keying with amplify-and-forward MIMO relaying," *Trans. Emerging Tel. Tech.*, vol. 26, no. 4, pp. 520-531, Apr. 2015.
- [8] R. Mesleh ve S. S. Ikki, "Performance analysis of spatial modulation with multiple decode and forward relays," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 2, no. 4, pp. 423-426, Aug. 2013.
- [9] P. Som ve A. Chockalingam, "End-to-end BER analysis of space shift keying in decode-and-forward cooperative relaying," *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf.*, pp. 3465-3470, Shanghai, China, 2014.
- [10] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2005.
- [11] J. Jeganathan, A. Ghrayeb and L. Szczecinski, "Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no.8, pp.545-547, Aug. 2008.
- [12] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series and Products*, 7th ed. Elsevier/Academic Press, Amsterdam, 2007.