

# Çok Atlamalı Verici Anten Seçimli Uzay Kaydırmalı Anahtarlama İçin Hata Performans Analizi

## Error Performance Analysis of Multi-Hop Space Shift Keying with Transmit Antenna Selection

Ferhat Yarkin, İbrahim Altunbaş ve Ertuğrul Başar  
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
İstanbul, Türkiye 34469  
E-mail: {yarkin, ibraltunbas, basarer}@itu.edu.tr

**Özetçe** —Bu bildiri, çok atlamalı anten seçimli uzay kaydırmalı anahtarlama (space shift keying, SSK) sistemi için simge hata olasılığı analizi yapılmıştır. Ele alınan yapıda, her atlamada seçilen antenler üzerinden SSK tekniği uygulanmaktadır. Kaynak ile hedef arasında doğrudan görüş hattının bulunmadığı varsayılan bu sistemde, her bir aktarıcı kendinden bir önceki aktarıcıdan aldığı işareti çöz-ve-aktar (decode-and-forward, DF) ilkesine göre çözmektedir ve karar verilen bilgi bitlerini SSK tekniğine göre seçilen antenlere eşlemektedir. Önerilen sistem için, yaklaşık ve asimptotik simge hata olasılığı hesaplanarak elde edilen sonuçlar bilgisayar benzetimleriyle desteklenmiştir. Önerilen sistemin, çok atlamalı verici anten seçimsiz SSK sisteminden ve yüksek alıcı anten sayısı ve veri hızları için çok atlamalı verici anten seçimli klasik  $M$ -QAM sisteminden daha iyi hata performans sağladığı gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—çok atlama, uzay kaydırmalı anahtarlama, verici anten seçimi, çöz-ve-aktar.

**Abstract**—In this paper, symbol error probability analysis is performed for multihop space shift keying (SSK) system with transmit antenna selection (TAS). In this scheme, SSK is applied on the selected antennas at each hop. It is assumed that there is no line of sight transmission between the source and the destination and each receiving terminal decodes and forwards the received signal from the previous terminal and maps the decided information bits to the selected antennas according to SSK technique. For the proposed system, approximate and asymptotic symbol error probabilities are calculated and the theoretical results are verified by computer simulations. It is shown that the proposed system provides better error performance than the multihop SSK system without TAS, and it is also indicated that the proposed system outperforms conventional  $M$ -QAM system for especially high data rates and sufficient number of receive antennas at the destination.

**Keywords**—Multi-hop, space shift keying, transmit antenna selection, decode-and-forward.

### I. GİRİŞ

Klasik uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) ve uzay kaydırmalı anahtarlama (space shift keying, SSK) tekniklerinde, bilgi bitleri verici anten indislerine eşlenmekte ve

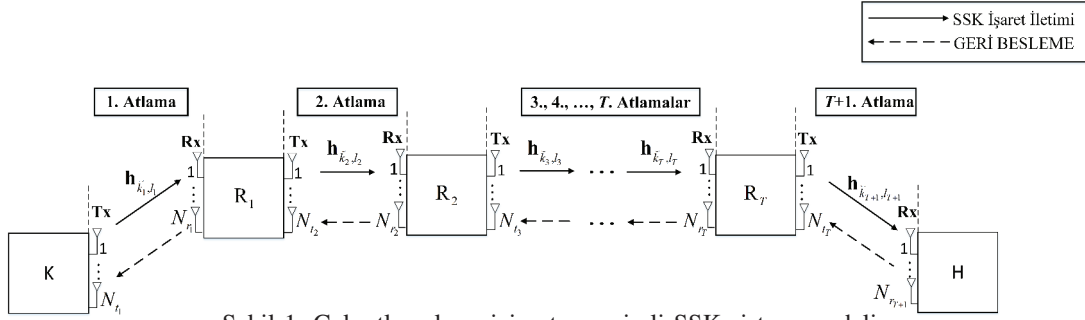
bir iletim aralığında yalnızca bir verici anten iletimdedir. Bu sayede, sistemdeki kanallar arası girişim ve verici antenlerin eşzamanlı çalışması durumu ortadan kalkar [1]–[3]. Ayrıca, verici-alıcı karmaşıklığı da azalmış olur. SM tekniğinin özel bir hali olan SSK tekniğinde, bilgi bitleri yalnızca verici anten indisine eşlendiği için bu tekniğin verici-alıcı karmaşıklığı SM tekniğinin verici-alıcı karmaşıklığından daha az olmaktadır [3].

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, verici anten seçiminin (transmit antenna selection, TAS) [4], [5] ve işbirlikli haberleşmenin [6], [7] SM ve SSK tekniklerinin performansını önemli oranda iyileştirdiğini göstermektedir. [4]'te SM için düşük karmaşıklığa sahip bir anten seçim tekniği ortaya atılmış ve bu durumda SM tekniğinin klasik MIMO sistemlerden daha iyi hata performansı verdiği gösterilmiştir. [5]'te ideal olmayan bir anten seçim tekniği SSK tekniği için önerilmiş ve bu sistem için yaklaşık simge hata olasılığı ifadesi çıkarılmıştır. [6]'da, kaynak, röle ve hedeften oluşan işbirlikli sistemde kaynaktan verici anten seçimi uygulanmış ve bu sistemin klasik MIMO sistemlere göre sağladığı üstünlükler ortaya konmuştur. [7]'de ise, kuvvetlendir-ve-aktar (amplify-and-forward, AF) ve çöz-ve-aktar (decode-and-forward, DF) ilkesine göre çalışan iki ayrı SSK sistemin hata performans analizi yapılmıştır.

Birçok iletişim sisteminde, kaynak ve hedef arasındaki uzaklığa veya engellere bağlı olarak doğrudan görüş hattı yoktur. Bu durumda çok atlamalı sistemler kullanılarak, kapsama alanı ve iletişimin güvenilirliği artırılabilir. Ayrıca, kaynak ile hedef arasında çok sayıda atlama olması, vericinin yüksek güç kullanma ihtiyacını da ortadan kaldırır [8]. Bilgimiz dahilinde, birkaç çalışma dışında SSK tekniği ile çok atlamalı sistemleri birleştiren çalışma bulunmamaktadır. Bu alanda yapılan en kapsamlı çalışma olan [9]'da, her atlamada SSK tekniği uygulanan ve doğrudan görüş hattı bulunan paralel çok atlamalı sistemlerin hata analizi yapılmaktadır.

Bu çalışmada, SSK, TAS tekniklerinin ve çok atlamalı sistemlerin sağladığı üstünlüklerden yararlanmak amacıyla, her bir atlamada SSK ve TAS tekniği uygulanan çok atlamalı bir yapı önerilmektedir. Bu yapıda, kaynak ile hedef arasında doğrudan görüş hattı bulunmamaktadır ve kaynaktan gönderilen işaret röleler üzerinden hedefe ulaşmaktadır. Her atlamanın verici kısmında [5]'teki anten seçim tekniği ile seçilen antenler üzerinden SSK tekniği uygulanmaktadır ve her atlamada işarete DF [10] prensibine göre karar verilmektedir. Önerilen

Bu çalışma 114E607 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.



Şekil 1: Çok atlamalı verici anten seçimli SSK sistem modeli.

yapı için yaklaşık simge hata olasılığı ifadesi elde edilmektedir. Ayrıca, sisteme ait asimptotik simge hata olasılığı analizi de yapılmaktadır. Elde edilen kuramsal sonuçlar bilgisayar benzetim sonuçlarıyla desteklenmektedir.

## II. SİSTEM MODELİ

Çalışmada ele alınan çok atlamalı işbirlikli ve verici anten seçimli SSK sistem yapısı Şekil 1’de görülmektedir. Burada, kaynak (K) ile hedef (H), doğrudan hat olmaksızın, aralarındaki  $T$  adet röle,  $R_m$  ( $m = 1, \dots, T$ ), yardımıyla iletişim yapmaktadır. Dolayısıyla, kaynaktan gönderilen işaret  $T+1$  atlama sonrasında hedefe ulaşmaktadır. Sisteme ait  $i$ . ( $i = 1, \dots, T+1$ ) atlamada  $N_{t_i}$  verici anten ve  $N_{r_i}$  alıcı anten bulunmaktadır.  $c \geq 1$  bir tamsayı ve  $N_s = 2^c$  olmak üzere,  $i$ . atlamada  $N_s$  anten  $N_{t_i}$  anten arasından seçilmekte ve seçilen antenler üzerinden SSK tekniği uygulanmaktadır. Dolayısıyla, kaynaktan ve her rölenin verici kısmında yalnızca bir tane RF devresinin kullanılması yeterlidir. Her rölenin ve hedefin yalnızca kendinden önceki atlamaya ilişkin kanal bilgisine sahip olduğu ve her atlamada hatasız bir geri besleme kanalının olduğu varsayılmaktadır. Seçilen antenlere ait indis bilgisi, bu geri besleme kanalları yardımıyla alıcından (Rx) vericiye (Tx) iletilmektedir. Buna ek olarak, her atlamada, röleler çözdükleri işaretleri doğru olup olmasına bakmaksızın bir sonraki aktarıcıya iletmektedir, dolayısıyla hata yayılımı göz önünde bulundurulmaktadır.

SSK tekniğinde, hata olasılığı kanal katsayıları arasındaki Öklid uzaklığına dayandığı için, anten seçimini bu uzaklığı en büyük olacak şekilde yapmak en iyi hata performansını vermektedir. Ancak, bu Öklid uzaklıkları ortak kanal katsayıları içerdiği için istatistiksel olarak bağımlıdır. Dolayısıyla, SSK için en iyi anten seçiminin matematiksel analizini yapmak oldukça zordur. Bu yüzden, bu çalışmada anten seçim tekniği olarak [5]’de önerilen teknik kullanılmaktadır. Bu teknikte de hala bağımlı değişkenler olmasına rağmen, gerçek hata olasılığına oldukça yakın matematiksel ifadeler çıkarılabilmektedir [5]. Bu seçim tekniğinde,  $N_{t_i}$  anten  $N_{t_i}/N_s$  ayrıntı alt küme ayrılır.  $k_i$ ,  $i$ . atlamadaki alt küme indisini göstermek üzere,  $i$ . atlamadaki her alt küme için en küçük karesel Öklid uzaklığı  $d_{k_i} = \min_{q, \hat{q}=1, \dots, N_s, q \neq \hat{q}} \|\mathbf{h}_{k_i, q} - \mathbf{h}_{k_i, \hat{q}}\|^2$  ile gösterilir.

Burada,  $\mathbf{h}_{k_i, q}$  ve  $\mathbf{h}_{k_i, \hat{q}}$ ,  $\mathbf{H}_{k_i} \in \mathbb{C}^{N_{r_i} \times N_s}$  matrisinin sırasıyla  $q$ . ve  $\hat{q}$ . sütunlarını ifade etmektedir.  $\mathbf{H}_{k_i}$  ise elemanları  $\mathcal{CN}(0, 1)$  dağılımına sahip  $i$ . atlamadaki verici ile alıcı arasındaki  $\mathbf{H}_i \in \mathbb{C}^{N_{r_i} \times N_{t_i}}$  kanal matrisinin  $k_i$ . alt kümesini ifade etmektedir.  $i$ . atlamada seçilen alt küme ise, bütün ayrıntı alt kümeler arasından en büyük  $d_{k_i}$  değerine sahip olandır [5] ve

$$\check{k}_i = \arg \max_{k_i} \{d_{k_i}\} \quad (1)$$

ile gösterilir. Burada, anten seçiminin her atlamada yalnızca o atlamaya ait kanal katsayıları göz önünde bulundurularak yapıldığına dikkat edilmelidir.

Toplam iletişim  $T + 1$  atlamada gerçekleşir. İlk atlamada, bir grup bilgi biti seçilen antenlerin indislerine eşlenir. Burada SSK tekniği kullanıldığı için, seçilen antenlerden yalnızca bir tanesi iletimdedir. İletimde olan anten ortalama olarak  $E_s$  enerjisi göndermektedir. İlk atlamadan sonraki  $T - 1$  atlamada, her bir röle kendisine gelen işareti çözerek bilgi bitlerine karar verir ve karar verilen bilgi bitleri kaynaktaki gibi seçilen antenlerin indislerine eşlenir. Rölelerde de SSK tekniği kullanıldığı için röleler tarafından gerçekleştirilen her atlamada da yalnızca bir anten iletimdedir ve iletimde olan anten ortalama olarak  $E_s$  enerjisi gönderir.  $T + 1$ . atlamada ise,  $T$ . röle hedefe işaret gönderir. Hedefte alınan işarete karar verilerek, kaynak ile hedef arasındaki iletişim tamamlanmış olur. Burada  $l_i$ ,  $i$ . atlamada iletimde olan anten indisini göstermek üzere,  $i$ . atlamada alınan işaret vektörü

$$\mathbf{y}_i = \sqrt{E_s} \mathbf{h}_{\check{k}_i, l_i} s_i + \mathbf{n}_i \quad (2)$$

ile gösterilir. Burada,  $\mathbf{H}_{\check{k}_i} \in \mathbb{C}^{N_{r_i} \times N_s}$  matrisi  $\mathbf{H}_i$  kanal matrisi içindeki alt kümeler arasından seçilen matrisi göstermek üzere,  $\mathbf{h}_{\check{k}_i, l_i}$ ,  $\mathbf{H}_{\check{k}_i}$  matrisinin  $l_i$ . sütunudur.  $\mathbf{n}_i$ ,  $i$ . atlamadaki toplamsal beyaz Gauss gürültü (additive white Gaussian noise, AWGN) vektörüdür.  $\mathbf{n}_i$  vektörünün elemanları  $\mathcal{CN}(0, N_0)$  dağılımlıdır.  $s_i$  ise,  $i$ . atlamada o atlamaya ait vericiden alıcıya gönderilen  $E_s$  enerjili SSK işaretidir. Röleler DF prensibine göre çalıştığı için, her bir röle tarafından gönderilen işaret bir önceki atlamada röle tarafından alınıp karar verilen işarete göre oluşturulur. Dolayısıyla, hata yayılımı göz önüne alındığı için her atlamada gönderilen işaret farklı olabilir. Her bir rölede ve hedefte iletimde olan anten indisine en büyük olabilirlik (maximum likelihood) tekniğine göre karar verilmektedir ve  $i$ . atlamada karar verilen anten indisini şu şekilde gösterilir:

$$\hat{f}_i = \arg \min_{f_i=1, \dots, N_s} \|\mathbf{y}_i - \sqrt{E_s} \mathbf{h}_{\check{k}_i, f_i}\|^2. \quad (3)$$

## III. PERFORMANS ANALİZİ

Bu kısımda, ele alınan sistemin yaklaşık ve asimptotik simge hata olasılığı analizi iki ayrı alt başlıkta incelenmiştir.

### A. Yaklaşık Simge Hata Olasılığı Analizi

Burada, anlık simge hata olasılığı için en yakın komşu yaklaşımını (nearest neighbor approach) [11] kullanarak sistemin yaklaşık simge hata olasılığı ifadesi çıkarılacaktır. Her atlamada SSK kullanıldığı ve her atlamadaki kanal katsayılarının

dağılımı aynı olduğu için, bu yaklaşımı kullanarak  $i$ . atlama için verici anten indisinin hatalı olarak  $l_i^e$ 'ye çözülmesinin ortalama olasılığı şu şekilde yazılabilir [11, (5.45)]:

$$P_i \approx zE \left[ Q \left( \sqrt{\frac{E_s d_{k_i}^2}{2N_0}} \right) \right] = z \int_0^\infty Q \left( \sqrt{\frac{E_s d_{k_i}^2}{2N_0}} \right) f_{d_{k_i}}(x) dx. \quad (4)$$

Burada,  $d_{k_i} = \|\mathbf{h}_{k_i, l_i} - \mathbf{h}_{k_i, l_i^e}\|^2$  ve her alt küme için  $z = 2/N_s$  şeklinde tanımlıdır. Her atlamadaki hata olasılığını yaklaşık olarak bulmak için, her atlamaya ait alt kümelerdeki  $\binom{N_s}{2}$  adet Öklid uzaklığı bağımsız kabul edilebilir [5]. Bu tarz bir yaklaşımın hata olasılığını belirlemede etkili bir yöntem olduğu bilinmektedir [6]. Öte yandan bu karesel Öklid uzaklıkları ki-kare dağılımına sahiptir. Buradan hareketle,  $i$ . atlamadaki her alt küme için en küçük karesel Öklid uzaklığına ait olasılık yoğunluk işlevi (probability density function, PDF), [5, (6)] ile

$$f_{d_{k_i}}(x) = \binom{N_s}{2} \left[ e^{-\frac{x}{2}} \sum_{\omega=0}^{N_{r_i}-1} \frac{x^\omega}{2^\omega \omega!} \right] \binom{N_s}{2}^{-1} \frac{e^{-\frac{x}{2}} x^{N_{r_i}-1}}{2^{N_{r_i}} (N_{r_i}-1)!} \quad (5)$$

şeklinde bulunur. Seçilen alt küme olan  $d_{k_i}$  için PDF ise sıra istatistiği yardımıyla  $f_{d_{k_i}}(x) = \left(\frac{N_{t_i}}{N_s}\right) \left(F_{d_{k_i}}(x)\right)^{\binom{N_{t_i}}{N_s}-1} f_{d_{k_i}}(x)$  şeklinde elde edilir. Dolayısıyla,  $d_{k_i}$  için PDF aşağıdaki gibi olacaktır:

$$f_{d_{k_i}}(x) = \frac{\binom{N_{t_i}/N_s}{2} \binom{N_s}{2}}{2^{N_{r_i}} (N_{r_i}-1)!} \sum_{j=0}^{\binom{N_{t_i}}{N_s}-1} (-1)^j \binom{\binom{N_{t_i}}{N_s}-1}{j} \times e^{-\frac{x}{2} \binom{N_s}{2} (j+1)} \left[ \sum_{\omega=0}^{N_{r_i}-1} \frac{x^\omega}{2^\omega \omega!} \right] \binom{N_s}{2}^{(j+1)-1} x^{N_{r_i}-1}. \quad (6)$$

(6)'daki PDF ifadesi (4)'te yerine konulursa,  $i$ . atlamadaki yaklaşık simge hata olasılığı ifadesi [5], [6]

$$P_i \approx \frac{2N_{t_i} \binom{N_s}{2}}{(N_s)^2 \Gamma(N_{r_i})} \sum_{a=0}^{N_{t_i}-1} \sum_{v=0}^Q \sum_{p=0}^{g_v} \binom{N_{t_i}}{a} \binom{N_{t_i}}{a} C_v(N_{r_i}, N_s, a) \times \left(\frac{E_s}{N_0}\right)^v (-1)^a (g_v!) \left(1 - \frac{4\lambda_a}{(E_s/N_0)^2} + 1\right)^{-\frac{1}{2}} (g_v+1) \times \left(\frac{g_v+p}{p}\right) \left(\frac{1 + \frac{4\lambda_a}{(E_s/N_0)^2} + 1}{2}\right)^{-\frac{1}{2}p} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Burada,  $\lambda_a = \binom{N_s}{2}(a+1)$ ,  $Q = (N_{r_i}-1)(\lambda_a-1)$ ,  $g_v = N_{r_i} + v - 1$  ve  $C_v(N_{r_i}, N_s, a) \left[ \sum_{\omega=0}^{N_{r_i}-1} \frac{(xN_0/E_s)^\omega}{\omega!} \right]^{\lambda_a-1}$  ifadesinin açılımındaki  $x^v$  teriminin katsayısını ifade etmektedir. Burada,  $N_s = 2$  için, (7)'deki yaklaşıklık ifadesi eşitliğe dönüşür.

(7)'de  $i$ . atlamaya ait yaklaşık simge hata olasılığı ifadesi verilmektedir. Her atlama birbirinden bağımsız olduğu için ele alınan çok atlamalı sistemin yaklaşık simge hata olasılığı

$$P \approx 1 - \prod_{i=1}^{T+1} (1 - P_i) \quad (8)$$

ile bulunur.

## B. Asimptotik Simge Hata Olasılığı Analizi

[12]'de kanıtlandığı üzere, bir telsiz iletişim sistemi için uçtan uca işaret gürültü oranı rastlantı değişkenine ait PDF sıfır etrafında, bir başka deyişle  $x \rightarrow 0^+$  için,  $f(x) = \beta x^\nu + \text{HOT}$  şeklinde yazılabiliyorsa, bu PDF'ten yararlanarak sisteme ait çeşitleme ve kodlama kazançları bulunabilir. Burada HOT yüksek dereceden terimleri ifade etmektedir.  $d_{k_i}$  rastlantı değişkenine ait (5)'te verilen PDF, sıfır etrafında şu şekilde yazılabilir [12]:

$$f_{d_{k_i}}(x) \approx \binom{N_s}{2} \frac{x^{N_{r_i}-1}}{2^{N_{r_i}} (N_{r_i}-1)!} + \text{HOT}. \quad (9)$$

Daha önce de belirtildiği üzere,  $d_{k_i}$ ,  $i$ . atlamadaki verici antenlerin oluşturduğu ayrık bir alt kümeye ait en düşük Öklid uzaklığını ifade eden rastlantı değişkenidir. Dolayısıyla, bu rastlantı değişkeni tarafından sağlanan çeşitleme ve kodlama kazançları sırasıyla,  $G_{d_i}^{\min} = N_{r_i}$  ve  $G_{c_i}^{\min} = \frac{1}{2} \left[ \binom{N_s}{2} \frac{\Gamma(N_{r_i}+1/2)}{2\sqrt{\pi}(N_{r_i}!)} \right]^{-\frac{1}{N_{r_i}}}$

şekindedir [12]. Burada, her atlamada  $N_{t_i}/N_s$  adet Öklid uzaklığından en büyüğüyle ilgilendiğimiz için, [12, (15)] yardımıyla,  $i$ . atlamadaki çeşitleme ve kodlama kazançları sırasıyla,

$$G_{d_i} = \sum_{l=1}^{N_{t_i}} N_{r_i} = \frac{N_{t_i} N_{r_i}}{N_s} \quad \text{ve}$$

$$G_{c_i} = \left[ \frac{2 \binom{N_{t_i}}{N_s}^{-1} \pi \left( \binom{N_{t_i}}{N_s} - 1 \right)^{1/2} \Gamma(G_{d_i} + \frac{1}{2})}{(G_{c_i}^{\min})^{G_{d_i}} (\Gamma(N_{r_i} + \frac{1}{2}))^{\frac{N_{t_i}}{N_s}}} \right]^{-\frac{1}{G_{d_i}}} \quad (10)$$

olur. Buradan  $i$ . atlamaya ait yaklaşık simge hata olasılığı [12]

$$\bar{P}_i \approx (G_{c_i} E_s / N_0)^{-G_{d_i}} \quad (11)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade, (8)'de yerine konulursa, sistemin asimptotik simge hata olasılığı  $\bar{P} \approx 1 - \prod_{i=1}^{T+1} (1 - \bar{P}_i)$  şeklinde yazılabilir. Bu ifade de yaklaşık olarak [13]

$$\bar{P} \approx 1 - \prod_{i=1}^{T+1} (1 - \bar{P}_i) \approx \sum_{i=1}^{T+1} \bar{P}_i \quad (12)$$

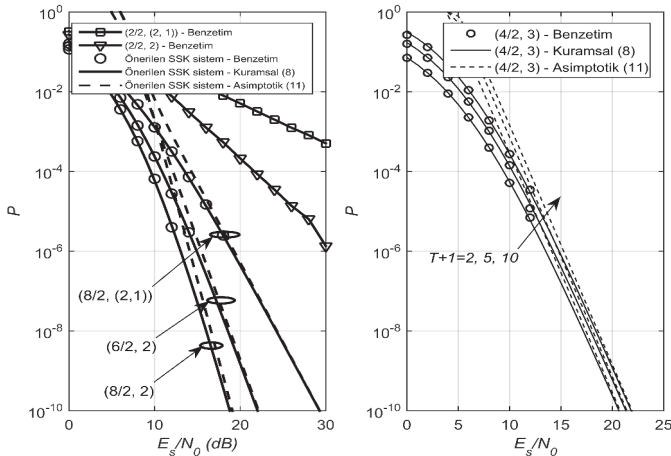
şeklinde yazılabilir. Dolayısıyla, yüksek işaret-gürültü oranı değerlerinde sistemin simge hata olasılığı performansı en zayıf atlama yani en kötü çeşitleme derecesine sahip atlama tarafından belirlenir [13]. Buradan, sistemin çeşitleme derecesi

$$d = \min_{i=1, \dots, T+1} \left( \frac{N_{t_i} N_{r_i}}{N_s} \right) \quad (13)$$

biçiminde olduğu gösterilebilir.

## IV. NÜMERİK SONUÇLAR

Bu bölümde, çok atlamalı anten seçimli SSK sisteme ait kuramsal yaklaşık ve asimptotik simge hata olasılığı analizleri bilgisayar benzetimleriyle doğrulanmaktadır. Burada, atlama sayısının, kaynak ve rölelerdeki verici anten sayısının, seçilen anten sayısının ve alıcı anten sayısının farklı değerleri için hata performansı sonuçları verilmektedir. Ayrıca, karşılaştırma amacıyla, her atlamada işaret-gürültü oranını en büyük yapacak şekilde anten seçimi yapılan klasik çok atlamalı  $M$ -QAM sistemin de hata performansı sonuçları verilmektedir. Benzetimlerde her atlamada verici anten sayısı eşit olarak seçilmiştir. Şekillerde,  $(N_t/N_s, N_r)$  ve  $(N_t/N_s, N_r)$  ( $M$ -QAM) sırasıyla SSK ve  $M$ -QAM sistem kullanılan, her atlamada  $N_s$  antenin  $N_t$  verici anten arasından seçildiği ve her atlamada  $N_r$  alıcı anten olan durumu göstermektedir.



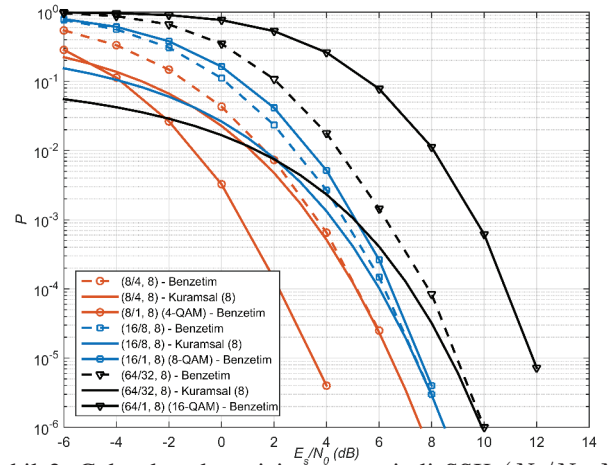
Şekil 2: Çok atlamalı verici anten seçimli SSK  $(N_t/N_s, N_r)$ ,  $(N_t/N_s, (N_r, N_{r_3}))$  sistemlerin simge hata olasılığı performansı.

Şekil 2’de, üç atlamalı  $(T + 1 = 3)$   $(N_t/N_s, N_r)$  sistemin ve çok atlamalı  $(T + 1 \in \{2, 5, 10\})$   $(4/2, 3)$  sistemin simge hata olasılığı performansı görülmektedir. Burada, hedefteki alıcı anten sayısının  $(N_{r_3})$  rölelerdeki alıcı anten sayısından  $(N_r)$  farklı olduğu durum,  $(N_t/N_s, (N_r, N_{r_3}))$  ile gösterilmektedir. Şekil 2’deki eğriler,  $N_t \in \{2, 4, 6, 8\}$ ,  $N_s = 2$ ,  $N_r \in \{2, 3\}$ ,  $N_{r_3} = 1$  ve  $T + 1 \in \{2, 3, 5, 10\}$  için elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere benzetim sonuçları ile kuramsal sonuçlar tam bir uyum içindedir ve asimptotik sonuçlar da benzetim sonuçlarıyla oldukça uyumludur. Sistem performansı verici anten sayısı  $N_t$  arttıkça iyileşmektedir. Ayrıca, (13)’ten,  $(8/2, (2, 1))$ ,  $(6/2, 2)$  ve  $(8/2, 2)$  sistemlerine karşılık gelen eğrilerin çeşitleme dereceleri sırasıyla 4, 6 ve 8 olarak hesaplanır. Simge hata olasılığı eğrilerinin eğimlerinden görüldüğü üzere, hesaplanan değerler bilgisayar benzetimleriyle tutarlıdır. Ayrıca, Şekil 2’nin sağ tarafından görüldüğü üzere, atlama sayısı arttıkça hata performansı çok fazla etkilenmemektedir. Atlama sayısı  $T + 1 = 2$  değerinden  $T + 1 = 10$  değerine çıkarıldığında bile, simge hata olasılığının  $10^{-5}$  değeri için, sistem performansı yaklaşık  $1.4$  dB kötüleşmektedir.

Şekil 3’te, her atlamada klasik  $M$ -QAM kullanılan çok atlamalı  $(N_t/1, N_r)$   $(M$ -QAM) sistem ile SSK kullanılan  $(N_t/N_s, N_r)$  sistemin simge hata oranı performansı karşılaştırılmaktadır. Şekil 3’teki eğriler,  $N_t \in \{8, 16, 32\}$ ,  $N_s, M \in \{4, 8, 16\}$ ,  $N_r = 8$  ve  $T + 1 = 4$  için elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, (8)’de verilen yaklaşık simge hata olasılığı ifadesi benzetim sonuçları ile uyumludur ve SSK sistemin üstünlüğü veri hızı arttıkça ortaya çıkmaktadır. Simge hata olasılığının  $10^{-4}$  değeri için,  $(8/1, 8)$   $(4$ -QAM) sistem  $(8/4, 8)$  sistemden yaklaşık  $2.9$  dB hata iyi performansı sağlamasına rağmen,  $(64/32, 8)$  sistem  $(64/1, 8)$   $(32$ -QAM) sistemden yaklaşık  $3.6$  dB daha iyi hata performansı sağlamaktadır. Bu üstünlükler, SSK tekniğini çok sayıda alıcı/verici anten ve atlama içerebilecek olan gelecek nesil iletişim sistemleri için güçlü bir aday haline getirmektedir.

## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, çok atlamalı verici anten seçimli SSK sisteminde ait yaklaşık ve asimptotik simge hata olasılığı ifadeleri elde edilmiştir. Önerilen anten seçimli yapının, çok atlamalı klasik SSK yapıdan daha iyi hata performansı gösterdiği



Şekil 3: Çok atlamalı verici anten seçimli SSK  $(N_t/N_s, N_r)$  sistem ile  $M$ -QAM  $(N_t/N_s, N_r)$   $(M$ -QAM) sistemin hata performansının karşılaştırılması.

görülmüştür. Ayrıca, yeterince yüksek veri hızları ve alıcı anten sayıları için, önerilen sistemin çok atlamalı anten seçimli  $M$ -QAM sistemden daha iyi hata performansı verdiği gösterilmiştir. Elde edilen kuramsal ifadeler benzetim sonuçları ile desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] E. Basar, “Index modulation techniques for 5G wireless networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, pp. 168–175, July 2016.
- [2] M. D. Renzo, H. Haas, A. Ghayeb, S. Sugiura, and L. Hanzo, “Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 1, pp. 56–103, Jan. 2014.
- [3] J. Jeganathan, A. Ghayeb, L. Szczecinski, and A. Ceron, “Space shift keying modulation for MIMO channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3692–3703, July 2009.
- [4] K. Ntontin, M. D. Renzo, A. I. Perez-Neira, and C. Verikoukis, “A low-complexity method for antenna selection in spatial modulation systems,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2312–2315, Dec. 2013.
- [5] K. Ntontin, M. D. Renzo, A. Perez-Neira, and C. Verikoukis, “Performance analysis of antenna subset selection in space shift keying systems,” in *Proc. IEEE CAMAD Conf.*, 2013, pp. 154–158.
- [6] F. Yarkin, I. Altunbas, and E. Basar, “Source transmit antenna selection for space shift keying with cooperative relays,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. PP, no. 99, pp. 1–4, Jan. 2017.
- [7] R. Mesleh, S. S. Ikki, E.-H. M. Aggoune, and A. Mansour, “Performance analysis of space shift keying (ssk) modulation with multiple cooperative relays,” *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2012, no. 1, pp. 201–210, Sep. 2012.
- [8] M. O. Hasna and M. S. Alouini, “Optimal power allocation for relayed transmissions over Rayleigh-fading channels,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 6, pp. 1999–2004, Nov. 2004.
- [9] P. Som and A. Chockalingam, “Performance analysis of space-shift keying in decode-and-forward multihop MIMO networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 1, pp. 132–146, Jan. 2015.
- [10] T. Wang, A. Cano, G. B. Giannakis, and J. N. Laneman, “High-performance cooperative demodulation with decode-and-forward relays,” *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 55, no. 7, pp. 1427–1438, July 2007.
- [11] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [12] Z. Wang and G. B. Giannakis, “A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 8, pp. 1389–1398, Aug. 2003.
- [13] D.-W. Yue, F. C. M. Lau, and Q. Wang, “On the diversity order of a general cooperative relaying communication system,” *Wireless Pers. Comm.*, vol. 77, no. 1, pp. 605–631, July 2014.