

Verici Anten Seçimi ve İşaret Uzayı Çeşitlemesi Kullanan En Yüksek Oran Birleşimi Tekniğinin Çift ve Tekdüze Anten İlişki Modelleri Altında Başarım Analizi

Serdar Özyurt

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara
sozyurt@ybu.edu.tr

(Geliş/Received: 19.12.2017; Kabul/Accepted: 12.02.2018)

Özet

Verici tarafta anten seçimi ve alıcı tarafta en yüksek oran birleşimi kullanan çok girişli çok çıkışlı bir haberleşme sistemi ele alınmaktadır. Sistemin hata başarımı, ek güç, bant-genişliği/zaman dilimi kullanılmadan ve sistem karmaşıklığında ciddi bir artışa sebep olmadan, işaret uzayı çeşitlemesi kullanılarak artırılmaktadır. Yavaş ve düz Rayleigh sönümlenmeli, verici antenlerin ilişkisiz ve alıcı antenlerin çift veya tekdüze modelleri altında ilişkili olduğu bir senaryo çalışılmıştır. Söz konusu sistem modeli literatürde ilk defa olarak işaret uzayı çeşitlemesi ile beraber incelenmektedir. Sistemin hata başarımı, çift ve tekdüze anten ilişki modelleri altında iki ve dört seviyeli faz kaydırmalı anahtarlama modülasyonu için incelenmektedir.

Anahtar Kelimeler: En yüksek oran birleşimi, verici anten seçimi, işaret uzayı çeşitlemesi, ilişkili antenler.

Performance Analysis of Maximal-Ratio Combining with Transmit Antenna Selection and Signal Space Diversity Under Dual and Uniform Antenna Correlation Models

Abstract

A multiple-input multiple output communication system with transmit antenna selection at the transmit side and maximal-ratio combining at the receive side is assumed. The error performance of the system is increased by utilizing signal space diversity without additional power, bandwidth/time slots and without inducing an important increase in complexity. A slow flat Rayleigh fading scenario with uncorrelated transmit and correlated receive antennas under a dual or uniform model is addressed. The aforementioned system model is investigated with the signal space diversity for the first time in the literature. The error performance of the system is examined under the dual and uniform antenna correlation models for the phase-shift keying modulation with modulation levels of two and four.

Keywords: Maximal-ratio combining, transmit antenna selection, signal space diversity, correlated antennas.

1. Giriş

Hem verici tarafında hem de alıcı tarafında çoklu sayıda anten içeren kablosuz çok girişli çok çıkışlı (ÇGÇÇ) haberleşme sistemleri yeni nesil sistemlerde tek antenli yapılara nazaran oldukça rağbet kazanmıştır. Verici tarafta t antene ve alıcı tarafta r antene sahip bir sistem (txr ÇGÇÇ) ilave bant genişliği/zaman/güç kaynağına ihtiyaç olmaksızın sistem veri hızını ve (ya) sistem güvenilirliğini artırma potansiyeline sahiptir [1]. Teorik çalışmalar ile gösterilmiştir ki bir txr ÇGÇÇ sisteminde kanal kapasitesi (verici ve alıcı arasında güvenli haberleşme için mümkün olan en yüksek veri

gönderim hızı) t ve r 'nin küçük olanı ile doğrusal olarak artmaktadır. ÇGÇÇ sistemlerinin bu uygulaması uzaysal çoklama (spatial multiplexing) olarak adlandırılmaktadır. ÇGÇÇ sistemlerinin tek antenli geleneksel sistemlerin ötesinde getirdiği avantajlardan bir diğeri, vericiye iletilen işaretin birden fazla sayıda bağımsız sönümlenmiş kopyalarının ulaştırılması şeklinde özetlenebilecek, anten çeşitlemesi ismine sahiptir. Sistem güvenilirliğini artırma amaçlı olan anten çeşitlemesi, farklı teknikler ile gerçekleştirilebilir. Bu yöntemlerden yaygın olarak kullanılan biri, verici anten seçimi (VAS) (transmit antenna selection) kullanan en yüksek oran birleşimi (EOB) (maximal-ratio combining) tekniğidir. EOB tekniği, verici tarafta tek antene

sahip ve alıcı tarafta birden çok sayıda antene sahip bir kablosuz haberleşme sisteminde, alıcı antenlerin her birinde alınan sinyallerin faz uyumlu olarak ve alıcıdaki sinyal-gürültü gücü oranını en yüksek dereceye çıkartacak şekilde birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır [1,2]. Diğer taraftan, radyo frekansı (RF) yükseltme devrelerinin antenlere göre daha yüksek maliyette olmaları anten seçim tekniklerini cazip hale getirmiştir. Bunlardan, tek anten temelli verici anten seçimi, vericide tam kanal bilgisine ihtiyaç duyulmaması ve bir adet RF yükseltme devresinin yeterli olması gibi önemli avantajlar barındırmaktadır. Mevzubahis avantajlarından ötürü VAS kullanan EOB tekniği araştırmacılar tarafından sıklıkla çalışılmıştır [3-11]. Literatürde modülasyon çeşitlemesi olarak da bilinen işaret uzayı çeşitlemesi (İÜÇ) (signal space diversity) [12], iletilen işaretlerin oluşturduğu işaret uzayındaki birbirine dik bazların (orthogonal basis) kullanılmasıyla sistemin çeşitleme seviyesinin artırılması esasına dayanmaktadır. İÜÇ, faz kaydırmalı anahtarlama (FKA) (phase-shift keying) modülasyonu gibi iki boyutlu işaret diyagramı kullanan sistemlerde iki aşamada gerçekleştirilebilir [13,14]: 1. İşaret diyagramı uygun bir şekilde döndürülerek, herhangi bir sembolün eşfazlı (in-phase, I) bileşeninin diğer sembollerin I bileşenlerinden farklı olması sağlanır. Aynı durum, işaret diyagramındaki sembollerin dik (quadrature, Q) bileşenleri için de geçerlidir. Bunun amacı, işaret diyagramında herhangi bir sembolün her bir bileşeninin ait olduğu sembolü tanımlamak için yeterli bilgiye sahip olmasını sağlamaktır. 2. İletilen sembolün bileşenlerinin kanal tarafından bağımsız sönmüleme etkilerine maruz kalmasının temin edilmesidir. Bu koşul, vericide ve alıcıda sırasıyla bileşen serpiştirici ve bileşen geri serpiştirici kullanılarak sağlanabilir. İÜÇ'nin FKA ile beraber kullanılması durumunda sistemin çeşitleme seviyesinin, ilave algılama karmaşıklığına neden olmadan, iki katına çıkarılabileceği gösterilmiştir [13,14]. Literatürde İÜÇ'nin hem tek antenli sistemler ile hem de ÇGÇÇ sistemleri ile beraber kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu konuda kısa bir literatür özeti için kaynaklar kısmında [10] numaralı makaleye başvurulabilir.

Bu çalışmada, VAS ve EOB kullanan bir txr ÇGÇÇ sistemi İÜÇ ile birleştirilmekte ve

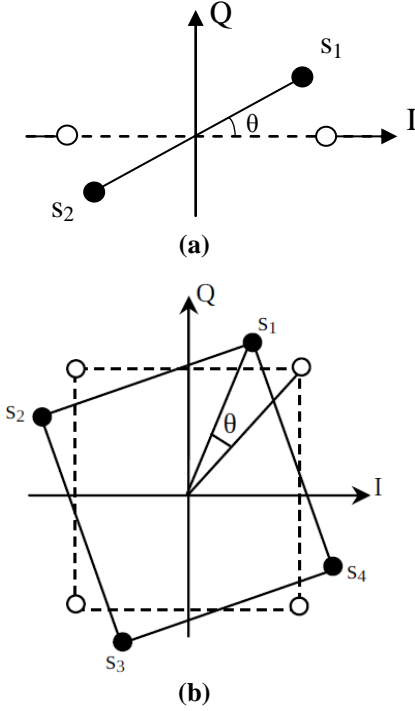
sistemin hata başarımı yavaş düz Rayleigh sönmülemeli kanallar üzerinde incelenmektedir. Verici antenlerin ilişkisiz, alıcı antenlerin ilişkili olduğu bir senaryo iki ve dört seviyeli FKA modülasyonu altında analiz edilmektedir. Böyle bir durum, verici antenlerin aralarında yeterince mesafe ile konumlandırılabilmesi fakat benzer bir imkanın hareketli kullanıcıda daha zor olduğu aşağı hat (baz istasyonundan hareketli kullanıcıya) haberleşme sistemlerinde sıklıkla karşılaşılabilmektedir. İki antenin ilişkisiz olması için aralarında bulunması gereken mesafe ortamdaki saçıcıların miktarına ve sinyal dalga boyuna bağlıdır. Alçak irtifada saçıcıların çok olduğu bir ortamda bulunan hareketli kullanıcı için komşu antenler arasındaki mesafenin dalga boyunun yaklaşık olarak yarısı olması antenlerin ilişkisiz olması için yeterlidir [1]. Diğer taraftan, yüksek irtifada saçıcıların göreceli olarak daha az bulunduğu bir ortamda bulunan baz istasyonları için antenlerin ilişkisiz olması ancak komşu antenler arasındaki mesafenin en azından birkaç dalga boyu olması ile sağlanabilir [2]. Yukarıda bahsedilen sistem modeli alıcı antenler arasındaki ilişki üssel (exponential) olarak [10]'da analiz edilmiştir. Farklı olarak, alıcı antenler arasındaki ilişkinin çift (dual) ve tekdüze (uniform) modelleri ile temsil edildiği durumlar bu çalışmada ele alınmıştır. Hem çift ve hem de tekdüze anten ilişki modelleri literatürde kullanılan ve pratik uygulamalarda karşılıkları bulunan modellerdir [2].

Çalışma genelinde şu notasyon kullanılmıştır: $E\{\cdot\}$, $\exp(\cdot)$, $|\cdot|$, $(\cdot)^H$, j ve $\|\cdot\|$ sırasıyla beklenen değeri, üssel fonksiyonu, kompleks sayılar için normu (reel sayılar için mutlak değeri), eşlenik devriği (conjugate transpose), $\sqrt{-1}$ 'i ve Öklid normunu göstermektedir. Matrisler ve vektörler sırasıyla büyük ve küçük siyah (bold) harflerle gösterilmiştir. Skalar değerler normal yazı tipi ile ifade edilmiştir.

2. Sistem Modeli

Tek kullanıcı, t verici antene ve r alıcı antene sahip bir ÇGÇÇ haberleşme sistemi ele alınmaktadır. Alıcıda alınan kompleks temelbant işaret $\mathbf{z} = \mathbf{h}\mathbf{x} + \mathbf{n}$ şeklinde yazılabilir. Burada, $r \times 1$ 'lik kompleks \mathbf{h} vektörünün i . elemanı, seçilen verici anten ile i . alıcı anten arasındaki

sönümlenme katsayısını temsil etmektedir. Ayrıca, x skaları temelbant iletilen işareti ve \mathbf{n} ($r \times 1$ 'lik kompleks vektör) alıcıda eklenen beyaz Gauss gürültüsünü (EBGG) ifade etmektedir. EBGG'nin tek taraflı güç spektral yoğunluğunu N_0 ile ve birim matrisi \mathbf{I} ile temsil etmek üzere şu ilişki yazılabilir: $E\{\mathbf{nn}^H\} = N_0\mathbf{I}$. Modüle edilmiş işaret s_i ($i \in \{1,2,\dots,M\}$) döndürülmüş M-FKA işaret diyagramından gelmektedir ($M \in \{2,4\}$). Döndürülmüş ve orijinal 2-FKA (binary PSK, BPSK) ve 4-FKA (quadrature PSK, QPSK) işaret diyagramları sırasıyla Şekil 1.a ve Şekil 1.b'de gösterilmiştir.



Şekil 1. a) Döndürülmüş (●) ve orijinal (○) 2-FKA işaret diyagramları. **b)** Döndürülmüş (●) ve orijinal (○) 4-FKA işaret diyagramları.

Vericide $|s_i|^2 = E_s$ olacak şekilde bir enerji sınırlandırması bulunmaktadır ($M=2$ için $|s_i|^2 = E_b$). Burada, E_s (E_b) sembol (bit) başına tahsis edilmiş enerjiyi temsil etmektedir. İşaret diyagramında bütün sembollerin eşit olasılığa sahip olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca, verici antenlerin ilişkisiz ve alıcı antenlerin ilişkili olduğu bir durum ele alınmaktadır. Anten ilişki modeli olarak bu çalışmada iki farklı model kullanılmıştır: çift anten ilişki modeli ve tekdüze

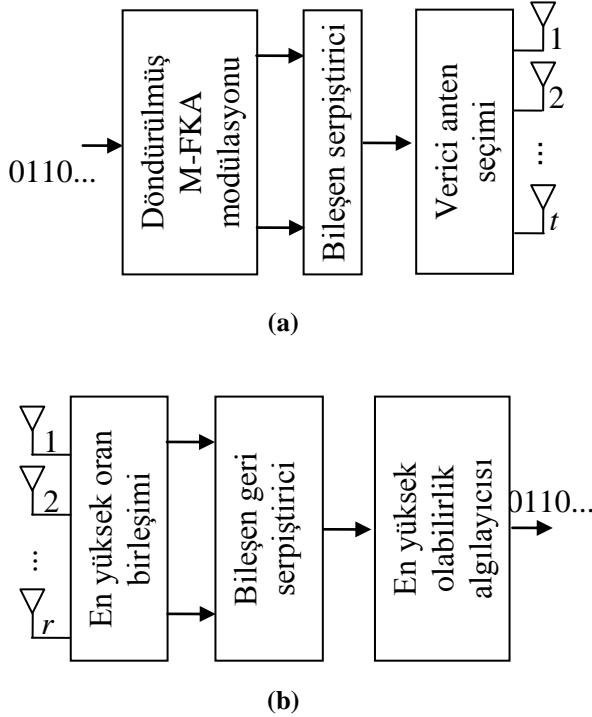
anten ilişki modeli. Kanal matrisi olarak i . satır k . sütun elemanı, k . verici (anten seçimi öncesi) ve i . alıcı antenler arasındaki sönümlenme katsayısını temsil eden $r \times t$ 'lik kompleks \mathbf{H} matrisini düşünelim. Bu durumda; $\mathbf{H} = \mathbf{R}^{1/2} \tilde{\mathbf{H}}$ yazılabilir ki burada $\tilde{\mathbf{H}}$, elemanları sıfır ortalamaya sahip birim varyanslı (normunun karesinin beklenen değeri bir olan) bağımsız aynen dağılmış (BAD) kompleks Gauss rastgele değişkenleri olan $r \times t$ 'lik bir matrisdir. Boyutu $r \times r$ olan \mathbf{R} matrisi, alıcı antenlerin ilişki yapısını belirleyen ilişki matrisidir. $[\mathbf{R}]_{i,k}$, \mathbf{R} matrisinin i . satır k . sütun elemanını ifade etmek üzere herhangi iki komşu alıcı anten arasındaki ilişki katsayısını ρ ile gösterelim. Bu durumda, çift anten ilişki modeli ve tekdüze anten ilişki modeli için sırasıyla

$$[\mathbf{R}]_{i,k} = \begin{cases} 1 & , \quad i = k, \\ \rho & , \quad |i - k| = 1, \\ 0 & , \quad \text{diğer,} \end{cases} \quad (1)$$

ve

$$[\mathbf{R}]_{i,k} = \begin{cases} 1 & , \quad i = k, \\ \rho & , \quad \text{diğer,} \end{cases} \quad (2)$$

yazılabilir. Alıcıda \mathbf{H} matrisinin bilindiği varsayılmaktadır. Alıcı ile verici arasında, verici anten seçimi sebebiyle, $\lceil \log_2 t \rceil$ 'lik ($\lceil \log_2 t \rceil, \log_2 t$ 'den büyük en küçük tam sayıyı göstermektedir) düşük hıza sahip bir geri besleme hattı olduğu kabul edilmiştir. Bunun dışında, vericide kanal bilgisi bulunmamaktadır. Sistemin verici ve alıcı blok diyagramları sırasıyla Şekil 2.a ve Şekil 2.b'de verilmiştir. Vericide öncelikle döndürülmüş M-FKA işaret diyagramı yardımıyla bitler modüle edilmiş sembollere eşlenir. Akabinde her bir sembolün I ve Q bileşenleri birbirlerinden bağımsız bir şekilde bileşen serpiştiricilerden geçirilir. Dolayısıyla, iletilen temelbant işaretin (x) reel ve imajiner kısımları iki farklı modüle edilmiş sembolden gelmektedir. Bir sembol iletimi için vericide sadece bir anten kullanılmaktadır.



Şekil 2. a) . Önerilen sistemin verici blok diyagramı.
b) Önerilen sistemin alıcı blok diyagramı.

Alicı, \mathbf{H} matrisinin en yüksek norma sahip olan sütununa tekabül eden verici anten indeksini belirler ve bunun bilgisini hatasız bir geri besleme kanalı vasıtasıyla verici ile paylaşır. Alıcıda, alınan temel bant işaret EOB işlemine tabi tutulur. Bu bağlamda, $(\mathbf{h}^H/\|\mathbf{h}\|)\mathbf{z}$ işlemi uygulanır ve

$$(\mathbf{h}^H/\|\mathbf{h}\|)\mathbf{z} = \|\mathbf{h}\| x + (\mathbf{h}^H/\|\mathbf{h}\|) \mathbf{n}$$

ifadesi elde edilir. Arkasından, $(\mathbf{h}^H/\|\mathbf{h}\|)\mathbf{z}$ işaretinin I (reel) ve Q (imajiner) bileşenleri, vericideki serpiştirici çiftinin ters işlemine uygulayan bileşen geri serpiştirici çiftine verilir. Herhangi bir s modüle edilmiş sembolü için, verici geri serpiştirici çifti çıkışındaki işaret $y = y_I + j y_Q = (y_I, y_Q) = (g_1 s_I + w_I, g_2 s_Q + w_Q)$ şeklinde yazılabilir. Burada, s_I ve s_Q sırasıyla modüle edilmiş s sembolünün I ve Q bileşenlerini göstermektedir. Ayrıca, g_1 ve g_2 , s sembolünün I ve Q bileşenlerini etkileyen BAD sönmüleme katsayılarını ifade etmektedir. İlaveten, w_I ve w_Q geri serpiştirici çifti çıkışındaki EBGG terimlerini temsil eden BAD sıfır ortalamalı ve $N_0/2$ varyansa sahip Gauss rastgele değişkenleridir. En yüksek olabirlik algılayıcısı, işaret diyagramındaki semboller arasından

$$\|(y_I + j y_Q) - (g_1 \hat{s}_I + j g_2 \hat{s}_Q)\|$$

metriğini en aza indirgeyen \hat{s} sembolü lehine karar verir.

3. Başarım Analizi

Bu bölümde, önerilen sistemin hata başarımı çift ve tekdüze alıcı anten ilişki modelleri altında istatistiksel yöntemler ile incelenmektedir. İletilen modüle edilmiş işaretin I ve Q bileşenlerini etkileyen sönmüleme katsayıları g_1 ve g_2 ile alakalı şu iki tanımlama yapılsın: $\gamma_1 = g_1^2$ ve $\gamma_2 = g_2^2$. Vericiden modüle edilmiş bir s sembolü iletildiği zaman alıcıda algılayıcının hatalı olarak \tilde{s} sembolü ($s \neq \tilde{s}$) lehine karar vermesi olasılığı olarak tanımlanan çiftsel hata olasılığı (ÇHO) aşağıdaki şekilde yazılabilir [10]:

$$P(s \rightarrow \tilde{s}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} h(\Delta_I^2, \phi, N_0) h(\Delta_Q^2, \phi, N_0) d\phi. \quad (3)$$

Burada, $\Delta_I = s_I - \tilde{s}_I$ ve $\Delta_Q = s_Q - \tilde{s}_Q$ olarak tanımlanmıştır ($\Delta_I \neq 0, \Delta_Q \neq 0$). Ayrıca,

$$h(x, \phi, N_0) = \frac{x}{4N_0 \sin^2 \phi} \int_0^{\infty} \exp\left(-\gamma \frac{x}{4N_0 \sin^2 \phi}\right) F_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (4)$$

olarak tanımlıdır [10]. Yukarıda $F_\gamma(\gamma)$, BAD γ_1 ve γ_2 rastgele değişkenlerinin biriken dağılım fonksiyonunu (BDF) göstermektedir. Saat yönünün tersine θ açısı kadar döndürülmüş bir M-FKA işaret diyagramına ait herhangi iki farklı sembol s_i ve s_k için

$$\Delta_I = \sqrt{E_s} (\cos(\theta_i + \theta) - \cos(\theta_k + \theta))$$

ve

$$\Delta_Q = \sqrt{E_s} (\sin(\theta_i + \theta) - \sin(\theta_k + \theta))$$

yazılabilir. Burada, θ_i ve θ_k sırasıyla orijinal (döndürülmemiş) işaret diyagramında s_i ve s_k 'nin faz açılarıdır. 2-FKA modülasyonu için (3)'teki ÇHO ifadesi aynı zamanda bit hata olasılığına (P_b) da eşit olmaktadır. Önerilen sistemin 4-FKA modülasyonu altındaki sembol hata olasılığı (P_s)

için aşağıdaki birleşim üst sınır (union bound) formülünden [1] yararlanılmaktadır:

$$P_s \leq \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^M P(s_i \rightarrow s_k). \quad (5)$$

Yukarıdaki ifadede s_i ($i \in \{1,2,\dots,M\}$) işaret diyagramındaki sembolleri ve $P(s_i \rightarrow s_k)$, s_i ve s_k arasındaki CHO'yu (s_i iletildiğinde algılayıcının hatalı olarak s_k lehine karar verme olasılığını) göstermektedir. \mathbf{R} ilişki matrisinin özdeğerleri, $F_\gamma(\gamma)$ üzerinde önemli etkiye sahiptir. Takip eden iki başlık altında, çift ve tekdüze anten ilişki modelleri için önerilen sisteme dair BDF'ler ayrı ayrı incelenmiş ve her iki durum altında işaret diyagramına uygulanması gereken en uygun döndürme açıları $M=2$ ve $M=4$ için elde edilmiştir.

3.1. Çift anten ilişki modeli

Aşağıdaki sonuç [8, Denklem (12)] yardımıyla elde edilebilir: $\gamma \geq 0$ için

$$F_\gamma(\gamma) = \left[1 - \sum_{i=1}^r \xi_i e^{-\gamma/\lambda_i} \right]^t. \quad (6)$$

Burada, λ_i \mathbf{R} matrisinin i . özdeğerini göstermektedir. Denklem (1) kullanılarak gösterilebilir ki \mathbf{R} matrisi, herhangi bir pozitif tam sayı r değeri için, bütün özdeğerleri birbirlerinden farklı reel sayılar olan bir matrisdir. Ayrıca, (6)'da

$$\xi_i = \lambda_i^{r-1} \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^r \frac{1}{\lambda_i - \lambda_k}$$

olarak tanımlıdır. Denklem (6), (3) ve (4) ile beraber kullanılırsa CHO için şu tam kapalı form ifade elde edilebilir:

$$P(s \rightarrow \tilde{s}) = (t!)^2 \sum_{i=0}^t \sum_{u=0}^t \sum_{\substack{k_1, k_2, \dots, k_r \geq 0 \\ k_1 + k_2 + \dots + k_r = i}} \sum_{\substack{m_1, m_2, \dots, m_r \geq 0 \\ m_1 + m_2 + \dots + m_r = u}} \frac{(-1)^{i+u}}{(t-i)!(t-u)!} \frac{\xi_1^{k_1+m_1} \xi_2^{k_2+m_2} \dots \xi_r^{k_r+m_r}}{k_1! m_1! k_2! m_2! \dots k_r! m_r!} \Psi. \quad (7)$$

Burada,

$$\Psi = \begin{cases} \frac{a+2}{4(a+1)^{3/2}}, & a = b, \\ \frac{a}{\sqrt{a+1}} - \frac{b}{\sqrt{b+1}}, & a \neq b, \\ \frac{1}{2(a-b)}, & \end{cases}$$

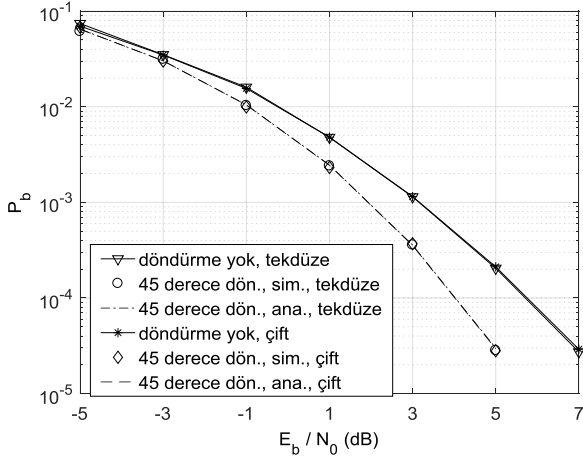
$$a = \left[\frac{\Delta_I^2 / (4N_0)}{\frac{k_1}{\lambda_1} + \frac{k_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{k_r}{\lambda_r}} \right]^{-1}, \quad b = \left[\frac{\Delta_Q^2 / (4N_0)}{\frac{m_1}{\lambda_1} + \frac{m_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{m_r}{\lambda_r}} \right]^{-1}$$

olarak tanımlıdır. Ayrıca; (7)'deki soldan üçüncü toplam, negatif olmayan tam sayı k_1, k_2, \dots, k_r indekslerinin toplamı i 'ye eşit olacak şekilde bütün farklı permütasyonları üzerinden gerçekleştirilmektedir. Eş bir yapı en içteki toplam için de geçerlidir. Denklem (7), [10, Denklem (15)] ile aynı formdadır. Bununla beraber, her iki durumdaki özdeğerler ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$) farklıdır. Bu durumun sebebi olarak hem üssel anten ilişki modeli altında [10] hem de çift anten ilişki modeli altında \mathbf{R} matrisinin birbirlerinden farklı r adet özdeğere sahip olması gerçeği yatmaktadır. 2-FKA modülasyonu için, (7)'yi en aza indirgeyen döndürme açısının $\theta=45^\circ$ olduğu matematiksel olarak gösterilebilir [15]. 4-FKA için en uygun döndürme açısı, (3), (5) ve (7)'nin uygun bir optimizasyon paketi ile beraber kullanılması ile sayısal olarak elde edilebilir.

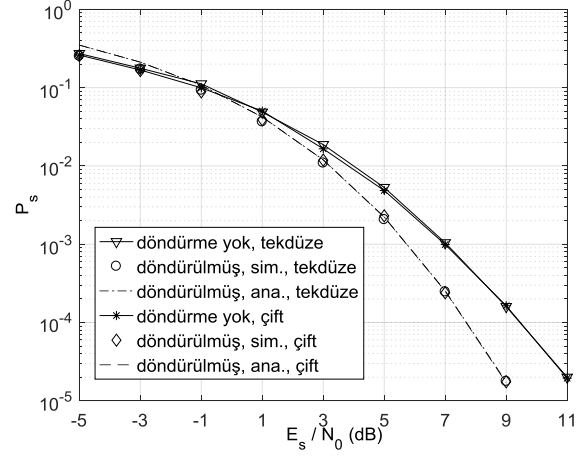
3.2. Tekdüze anten ilişki modeli

Aşağıdaki sonuç [8, Denklem (12)] yardımıyla elde edilebilir: $\gamma \geq 0$ için

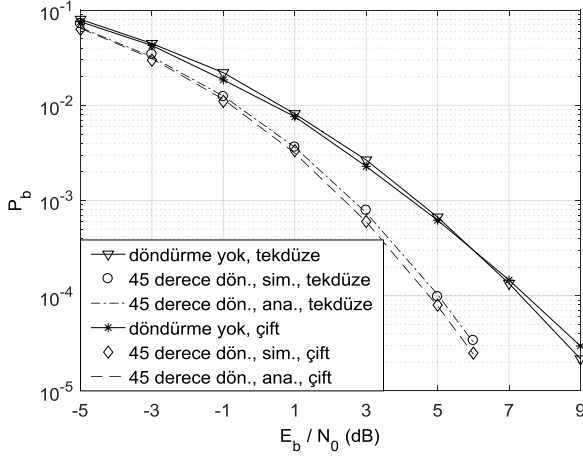
$$F_\gamma(\gamma) = \left[1 - \left(\frac{e^{-\gamma/\lambda_1}}{\left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{r-1}} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \sum_{i=1}^{r-1} \frac{\Gamma(i, \gamma/\lambda_2)}{(i-1)! \left(1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{r-i}} \right) \right]^t. \quad (8)$$



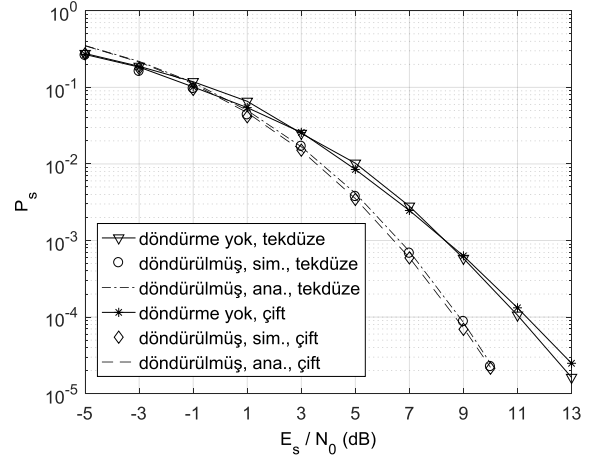
Şekil 4. $\rho = 0.15$, $t = 2$, $r = 3$ için önerilen ve orijinal sistemlerin 2-FKA altında bit hata olasılığı başarımları.



Şekil 6. $\rho = 0.15$, $t = 2$, $r = 3$ için önerilen ve orijinal sistemlerin 4-FKA altında bit hata olasılığı başarımları.



Şekil 5. $\rho = 0.7$, $t = 2$, $r = 3$ için önerilen ve orijinal sistemlerin 2-FKA altında bit hata olasılığı başarımları.



Şekil 7. $\rho = 0.7$, $t = 2$, $r = 3$ için önerilen ve orijinal sistemlerin 4-FKA altında bit hata olasılığı başarımları.

Şekil 5'te, önerilen sistem 2-FKA modülasyonu altında orijinal sistem ile $\rho=0.7$ için karşılaştırılmıştır. Önceki şekilde olduğu gibi teorik ve simülasyon sonuçları arasında oldukça iyi seviyede bir uyum gözlemlenmektedir. Ayrıca, önerilen sistem tekdüze ve çift ilişki modelleri için orijinal sisteme göre sırasıyla 2.2 dB ve 2.5 dB (10^{-4} bit hata olasılığı için) kazanç getirmektedir. Şekil 6'da, önerilen sistem 4-FKA modülasyonu altında orijinal sistem ile $\rho=0.15$ için sembol hata olasılığı açısından karşılaştırılmıştır. Şekil 4'e benzer olarak incelenen iki ilişki modeli için de benzer başarımlar gözlemlenmektedir. İki ilişki modeli altında da önerilen sistem orijinal sisteme göre 10^{-4} sembol hata olasılığında yaklaşık 1.8 dB getiri sağlamaktadır.

Şekil 7'de, önerilen sistem 4-FKA modülasyonu altında orijinal sistem ile $\rho=0.7$ için karşılaştırılmıştır. Önerilen sistem tekdüze ve çift ilişki modelleri için orijinal sisteme göre sırasıyla 2.1 dB ve 2.5 dB (10^{-4} sembol hata olasılığı için) kazanç getirmektedir. Hem Şekil 6'da hem de Şekil 7'de teorik ve simülasyon sonuçları arasında yüksek seviyede mutabakat bulunmaktadır. Yukarıdaki şekillerden görülebileceği üzere, önerilen tekniğin orijinal tekniğin ötesinde getirdiği kazanç ρ arttıkça artmaktadır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, VAS ve EOB kullanan bir *txr* ÇGÇÇ sistemi İÜÇ ile birleştirilmiş ve sistemin hata başarımı yavaş düz Rayleigh sönümlenmeli kanallar üzerinde incelenmiştir. Verici antenlerin ilişkisiz, alıcı antenlerin ilişkili olduğu bir senaryo iki ve dört seviyeli FKA modülasyonu altında analiz edilmiştir. Anten ilişki modeli olarak çift ve tekdüze ilişki modelleri kullanılmıştır. Mevzubahis sistem modeli literatürde ilk defa olarak İÜÇ ile birleştirilerek ele alınmıştır. İki ve dört seviyeli FKA modülasyonu işaret diyagramları için en uygun döndürme açıları elde edilmiştir. Önerilen sistemin, ciddi bir karmaşıklık artışına sebep olmadan, orijinal sistemin ötesinde kayda değer bir hata başarımı sağladığı gösterilmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Tse, D. and Viswanath, P. (2005). Fundamentals of Wireless Communications. Cambridge University Press.
- [2] Simon, A.K. and Alouini, M.S. (2000). Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis. John Wiley & Sons.
- [3] Thoen, S., Van der Perre, L., Gyselinckx, B. and Engels, M. (2001). Performance analysis of combined transmit-SC/receive-MRC. *IEEE Trans. Commun.*, **49(1)**: 5-8.
- [4] Win, M.Z., Beaulieu, N.C., Shepp, L.A., Logan, B.F. and Winters, J.H. (2003). On the SNR penalty of MPSK with hybrid selection/maximal ratio combining over i.i.d. Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. Commun.*, **51(6)**: 1012-1023.
- [5] Chen, Z., Yuan, J. and Vucetic, B. (2005). Analysis of transmit antenna selection/maximal-ratio combining in Rayleigh fading channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **54(4)**: 1312-1321.
- [6] Chen, Z., Chi, Z., Li, Y. and Vucetic, B. (2009). Error performance of maximal-ratio combining with transmit antenna selection in flat Nakagami-m fading channels. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, **8(1)**: 424-431.
- [7] Romero-Jerez, J.M. and Goldsmith, A.J. (2009). Performance of multichannel reception with transmit antenna selection in arbitrarily distributed Nakagami fading channels. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, **8(4)**: 2006-2016.
- [8] Ferdinand, N.S. and Rajatheva, N. (2011). Unified performance analysis of two-hop amplify-and-forward relay systems with antenna correlation. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, **10(9)**: 3002-3011.
- [9] Yang, N., Suraweera, H.A., Collings, I.B. and Yuen, C. (2013). Physical layer security of TAS/MRC with antenna correlation. *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, **8(1)**: 254-259.
- [10] Özyurt, S. and Kucur, O. (2018). Performance analysis of maximal ratio combining with transmit antenna selection and signal space diversity under exponential antenna correlation. *IET Commun.*, e-first article.
- [11] Özyurt, S. and Kucur, O. (2017). Performance analysis of signal space diversity with transmit antenna selection and maximal ratio combining. *IEEE 25th Sig. Process. Commun. App. Conf.*, Antalya, Turkey.
- [12] Boule, K. and Belfiore, J.C. (1992). Modulation scheme designed for Rayleigh fading channel. *26th Annual Conf. Inf. Sciences Sys.*, Princeton, USA.
- [13] Taricco, G. and Viterbo, E. (1996). Performance of component interleaved signal sets for fading channels. *Electron. Lett.*, **32(13)**, 1170-1172.
- [14] Slimane, S.B. (1998). An improved PSK scheme for fading channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **47(2)**: 703-710.
- [15] Özyurt, S. and Kucur, O. (2018). Zero-forcing beamforming with signal space diversity. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **67(1)**: 812-816.
- [16] Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (1972). Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Press.