

Enerji Verimli ve Anten Seçim Tabanlı Yeni bir İndis Modülasyonu Tekniği A New Energy Efficient and Antenna Selection Based Index Modulation Technique

Fatih Cogen^{*¶}, Burak Ahmet Ozden^{¶§}, Erdogan Aydin[¶]

^{*}Turkcell 6GEN. Lab, Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş., İstanbul, Türkiye.

[¶]Elektrik-Elektronik Mühendisliği, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

[§]Bilgisayar Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Email: fatih.cogen@turkcell.com.tr, bozden@yildiz.edu.tr, erdogan.aydin@medeniyet.edu.tr.

Özetçe —Bu çalışmada, yüksek veri hızlı ve enerji verimli iletişim teknikleri olan kod indis modülasyonu (code index modulation, CIM), uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) ve enerji verimli altıgen karesel genlik modülasyonu (hexagonal QAM, HQAM) teknikleri birleştirilerek CIM-HQAM-SM adında yeni bir çoklu giriş çoklu çıkış tekniği sunulmuştur. Önerilen sistemde, gelen bilgi bitleri modüle edilmiş sembolleri, aktif verici anten indislerini ve bunlara karşılık gelen yayıcı kod indislerini belirlediğinden, veri bitleri sadece modüle edilmiş semboller tarafından değil, ayrıca aktif anten ve yayıcı kodlarının indisleri tarafından da iletilir. Dolayısıyla önerilen sistem daha az iletim gücü harcarken literatürdeki SM ve karesel SM (quadrature SM, QSM) yöntemlerine kıyasla daha iyi hata performansı sağlamaktadır. Ayrıca, sistem performansının iyileştirilmesi için önerilen sistem COAS tekniğiyle güçlendirilmiştir. Önerilen sistemin performans analizleri Rayleigh sönmülemeli kanallar için gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Kod indis modülasyonu, uzaysal modülasyon, altıgen karesel genlik modülasyonu (HQAM), MIMO sistemler.

Abstract—In this paper, a new multiple input multiple output technique called CIM-HQAM-SM is presented by combining the high data rate and energy-efficient communication techniques of code index modulation (CIM), spatial modulation (SM), and energy-efficient hexagonal quadrature amplitude modulation (HQAM). In the proposed system, since the incoming information bits determine the modulated symbols, the active transmit antenna indices, and the corresponding spreading code indices, the data bits are transmitted not only by the modulated symbols but also by the active antenna and spreading code indices. Therefore, the proposed system consumes less transmission power and provides better error performance compared to the SM and quadrature SM (QSM) methods in the literature, and shows similar performance with the CIM-SM system. Moreover, the proposed system is enhanced with COAS technique to improve the system performance. The performance analysis of the proposed system is performed for Rayleigh fading channels.

Keywords—Code index modulation, spatial modulation, hexagonal quadrature amplitude modulation (HQAM), MIMO systems.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1515 Öncül Araştırma ve Geliştirme Laboratuvarları Destek Programı kapsamında 5229901 - 6GEN. Lab: 6G ve Yapay Zeka Laboratuvarı kapsamında desteklenmiştir. Ayrıca, bu çalışma TÜBİTAK 1001 (Destek Numarası: 123E513) tarafından desteklenmiştir. Projelere verdiği destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimizi sunarız.

979-8-3503-8896-1/24/\$31.00 ©2024 IEEE

I. GİRİŞ

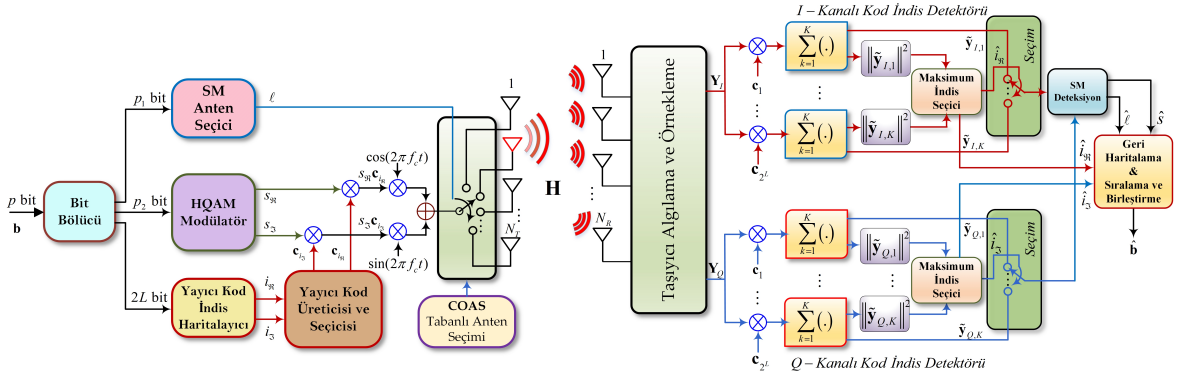
Son teknolojik gelişmeler, video konferans, büyük dosya paylaşımı, yüksek kaliteli video ve ses yayını gibi uygulamaların artmasıyla birlikte kablosuz iletişim sistemleri için yüksek veri hızlarına olan talebi artırmıştır. Ayrıca, yeni-nesil kablosuz ağlarındaki kullanıcı sayısının muazzam artışı enerji tüketimini ciddi şekilde artırması beklenmektedir. Neticede, indis modülasyonu (index modulation, IM) ve çok-girişli çok-çıkışlı (multiple-input multiple-output, MIMO) sistemleri için yüksek veri hızlarına sahip enerji verimli kablosuz iletişim sistemlerinin tasarımı büyük önem kazanmıştır [1]–[3].

5G ve ilerisi için tasarlanan yüksek hızlı iletişim sistemleri, genellikle geniş M 'li yıldız diyagramlarını kullanır. Karesel genlik modülasyonu (quadrature amplitude modulation, QAM) yaygın olsa da, enerji verimliliği açısından ideal değildir. QAM, enerji açısından alt-optimaldir, ancak enerji tasarrufu artık zorunluluk olduğundan, daha verimli alternatifler aranmaktadır. Bu bağlamda, altıgen yıldız diyagramları, enerjiyi en aza indirgeyerek çözüm sunar. Altıgen QAM (hexagonal QAM, HQAM), geleneksel QAM'e göre enerji verimliliği açısından üstünken, yüksek sinyal gürültü oranında (signal-to-noise ratio, SNR) benzer performans sergiler [4]–[6].

MIMO tekniklerinden en önemlilerinden biri de uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) tekniğidir. SM yönteminde, hem alıcı hem de verici çoklu antenlerle donatılarak her iletim zaman aralığında sadece bir anten aktif hale getirilir. Böylece, kanallar arası girişim engellenir ve iletişim sisteminin karmaşıklığı büyük ölçüde azalır. SM düzeninde, aktif anten indisleri de iletilen veri sembollerine ek bilgi taşımak için kullanılır. Bu yaklaşımla, veri hızı, aktarım anten sayısına bağlı olarak logaritmik olarak artar. Karesel SM (quadrature SM, QSM) sistemi, SM tekniğine kıyasla aktif anten sayısını ikiye katlayarak veri hızını artırmayı hedefler [4], [7], [8].

Kod indis modülasyonu (code index modulation, CIM) sistemi, ekstra bilgi aktarımı için yayıcı kod indislerini kullanır. CIM düzeninde, bilgi bitlerinin bir kısmı modüleli simgeyi seçerken, diğer kısmı ise yayıcı kod indislerini seçer. Seçilen yayıcı kod, modüleli simge ile çarpılır ve enerji harcamadan iletilir. Alıcı kısmında, yayıcı kod indisleri, basit bir korelatör yardımıyla belirlenir; ardından alınan simge demodüle edilir ve tahmin edilir. Bu düzenle, veri bitlerinin bir kısmı modüleli sinyal ile doğrudan kanal üzerinden iletilirken, diğer kısmı herhangi bir enerji harcamadan iletilen sinyale gömülerek taşınır. Bu nedenle, CIM sistemi, veri hızını ve sistemin verimliliğini artırırken enerji tüketimini de azaltır [9], [10].

Anten seçim teknikleri, MIMO sistemlerinin verimini artırmakta kullanılan stratejiler arasındadır. Bu yaklaşımla, MIMO



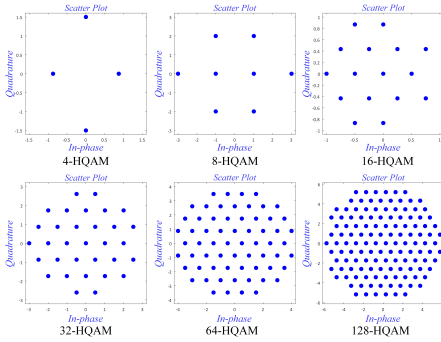
Şekil 1: CIM-HQAM-SM tekniğinin sistem modeli

tabanlı iletişim, seçilen antenler vasıtasıyla en uygun koşullar altında yürütülür; bu da iletişimin niteliğini ciddi anlamda iyileştirir [11]. Kapasiteye odaklı anten seçimi (COAS) yöntemi, sadeliğiyle dikkat çeker ve en verimli anten seçimini, en yüksek kanal değerlerine sahip vektörler arasından seçerek gerçekleştirir [12]. Bu metot, iletişim sistemlerinde kalite ve performansı artırarak önemli bir avantaj sağlar [2].

Bu çalışmada, yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için önerilen yüksek veri hızlı ve enerji verimli CIM-HQAM-SM tekniği önerilmiştir ve bu yöntemin ayrıca COAS tekniği ile de performansı bir adım öteye taşınmıştır. Önerilen sistemin hata başarımı SM ve QSM teknikleri ile karşılaştırılmıştır.

II. HQAM TAKIMYILDIZLARI

Şekil 2'de $M = 4, 8, \dots, 128$ için HQAM takımyıldızları sunulmuştur. Burada, HQAM takımyıldız yapılarının, sembol ayırt edilebilirliğini muhafaza ederken iletimde gereken enerji miktarının nasıl düşürüldüğü ve böylece enerji tasarruflu olduğu görülmektedir [5].

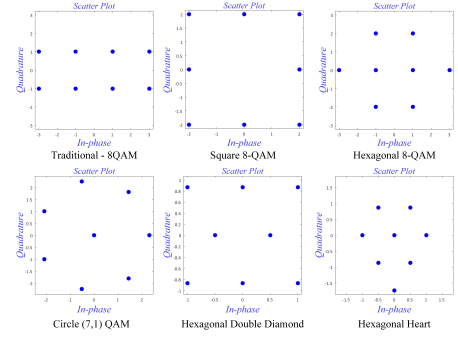


Şekil 2: HQAM Takımyıldızları

Ortalama güç ve takımyıldız figür niteliği (constellation figure of merit, CFM), çeşitli takımyıldızların kalitesini değerlendirmek için bir ölçüt olarak hizmet eder. Genel olarak, daha yüksek CFM'ye sahip bir takımyıldızın daha iyi performansa sahip olduğu kabul edilir. Adil bir karşılaştırma için CFM, boyut başına aynı sayıda bit kodlayan takımyıldızları değerlendirmek için uygulanmalıdır. Ayrıca, CFM bir takımyıldızın SNR'yi ne kadar verimli kullandığının bir göstergesi olarak da görülebilir.

Ortalama güç (P_{avg}) ve CFM (ε) hesaplamaları Şekil 3'de gösterilen ve Tablo I'de ayrıntıları verilen 8'li takımyıldız şemaları kullanılarak yapılacaktır. Tablo I'de sunulan verilerden, basit QAM şemaları ile HQAM, Daire (7,1) (circular QAM, CQAM), altıgen çift elmas (hexagonal double diamond QAM, DDQAM) ve altıgen kalp (hexagonal heart, HHQAM) takımyıldız şemaları değerlendirildiğinde, bunların geleneksel

QAM ve kare QAM (square QAM, SQAM) takımyıldızlarına kıyasla sırasıyla %16.67, %22.53, %81.25 ve %81.25 enerji verimliliği iyileştirmeleri sunduğu görülmektedir. Bu bulgular göz önünde bulundurulduğunda, DDQAM ve HHQAM şemalarının kullanılması, sadece yüksek enerji verimliliği sergilemekle kalmayıp aynı zamanda çeşitli çalışmalarda belgelendiği gibi önemli CFM değerlerine sahip oldukları için avantajlı görünmektedir.



Şekil 3: $M = 8$ için HQAM Takımyıldızları

III. SİSTEM MODELİ

CIM-HQAM-SM tekniğinin sistem modeli Şekil 1'de sunulmuştur. Sistem N_T verici anten, N_R alıcı anten ve $2L$ Walsh Hadamard kodlarından oluşmaktadır. COAS tekniği ile bu toplam N_T verici anten üzerinden en iyi kanal koşullarına sahip N_ψ adet anten seçilecektir.

Önerilen tekniğin verici yapısı dikkate alındığında, $p \times 1$ boyutlarındaki $\mathbf{b}$ vektörü T_s sembol periyodu boyunca iletilecek ikili bilgi vektörüdür. Burada, $p = p_1 + p_2 + 2L$ bit olmak üzere p üç alt bloğa ayrılır; $p_1 = \log_2(N_\psi)$, $p_2 = \log_2(M)$ ve $2L$ bit. Bu bloklar için, p_2 bitleri bir HQAM sembolü seçer, $2L$ bitleri I ve Q bileşenlerinin yayıcı kodlarını seçer, $p_1 + 2L$ bitleri hem I hem de Q bileşenleri ile iletirken, p_1 bitleri SM'nin anten indislerinde iletir. Sonuç olarak, CIM-HQAM-SM sisteminin vericisinden de görülebileceği gibi, yayılmış sembol dizileri SM şeması tarafından etkinleştirilen tek anten üzerinden iletir.

HQAM modülasyonlu karmaşık sembol genel formda şu şekilde verilebilir: $s = s_R + js_I$. Burada s_R ve s_I sırasıyla s 'nin reel ve imajiner bileşenleridir. s_R ve s_I , p_2 bit dizisine göre seçilir. s_R ve s_I , $2L$ bit dizisi tarafından seçilen $\mathbf{c}_{i_R}$ ve $\mathbf{c}_{i_I}$ yayıcı kodları tarafından yayılır, burada yayıcı kodları ± 1 'den oluşur. Sonuç olarak, yayılmış $s_R \mathbf{c}_{i_R}$ ve $s_I \mathbf{c}_{i_I}$ sinyalleri, p_1 bit dizisi ile etkinleştirilen ℓ . antenden I ve Q bileşenleri aracılığıyla iletir. Bu hareketle, CIM-HQAM-SM alıcısı tarafından alınan sönmülemeye uğramış ve gürültülü

TABLO I: $M = 8$ için HQAM Şemalarının CFM ve $\mathcal{P}_{avg}$ değerleri

Takımıyıldız	$\mathcal{P}_{avg}$	ε
QAM	6	0.6667
SQAM	6	0.6667
HQAM	5	0.8
CQAM	4.6482	0.86055
DDQAM	1.1250	0.8889
HHQAM	1.1250	0.8889

sinyal aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$y(t) = \sum_{k=1}^K \left(s_{\Re} c_{i_{\Re},k} p(t - kT_c) \cos(2\pi f_c t) + s_{\Im} c_{i_{\Im},k} p(t - kT_c) \sin(2\pi f_c t) \right) h_{\ell}(t) + n(t), \quad (1)$$

Burada $p(t)$ $[0, T_c]$ zaman periyodunda birim dikdörtgen darbe şekillendirme filtresi, T_c yayıcı kodunun çip süresi, $h_{\ell}(t)$ $\ell = 1, 2, \dots, N_{\psi}$, Rayleigh sönümlmeli kanal dürtü yanıtı ve $n(t) \sim \mathcal{C}(0, N_0)$ sıfır ortalama ve boyut başına $N_0/2$ varyansa sahip karmaşık bir Gauss rastgele sürecidir. Sinyal modelinin I ve Q bileşenleri benzer bir yapıya sahip olduğundan, (1)'de verilen sinyal modeli I ve Q bileşenleri için ayrı ayrı yeniden yazılabilir. Böylece, kanal çıkışında mükemmel taşıyıcı kestirimi ve örnekleme yapıldıktan sonra, r . alıcı antenin ($r = 1, 2, \dots, N_R$) k . gürültülü çip sinyali ($k = 1, 2, \dots, K$) I ve Q bileşenlerinin her ikisi için aşağıdaki gibi olacaktır:

$$y_I = s_{\Re} c_{i_{\Re}} h_{\ell} + n_I, \quad y_Q = s_{\Im} c_{i_{\Im}} h_{\ell} + n_Q, \quad (2)$$

Burada, gösterimi basitleştirmek için r ve k argümanlarını atmak evlâ olacaktır. Ayrıca, $i_{\Re}, i_{\Im} = 1, 2, \dots, 2^L$ şeklindedir; h_{ℓ} sıfır ortalama ve $\sigma_h^2 = 1$ varyansa sahip Rayleigh sönümlleme kanal katsayısıdır. n_I ve n_Q sırasıyla I ve Q bileşenlerinin toplamsal beyaz gauss gürültülü (additive white gaussian noise, AWGN) gürültü terimleridir ve $n, n = n_I + n_Q$ şeklinde yazılabilir. Böylece, (2)'nin vektörel gösterimi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{Y}_I = s_{\Re} \mathbf{h}_{\ell} \mathbf{c}_{i_{\Re}}^T + \mathbf{N}_I, \quad \mathbf{Y}_Q = s_{\Im} \mathbf{h}_{\ell} \mathbf{c}_{i_{\Im}}^T + \mathbf{N}_Q, \quad (3)$$

Burada, $\mathbf{Y}_I = [\mathbf{y}_{I,1} \dots \mathbf{y}_{I,K}]$ ve $\mathbf{Y}_Q = [\mathbf{y}_{Q,1} \dots \mathbf{y}_{Q,K}]$ şeklindedir; $\mathbf{y}_{I,k}$ ve $\mathbf{y}_{Q,k}$ sırasıyla $\mathbf{Y}_I$ 'nin ve $\mathbf{Y}_Q$ 'nin k . sütunudur. $\mathbf{h}_{\ell}$, $N_R \times N_{\psi}$ boyutlarındaki kanal matrisi olan $\mathbf{H}$ 'in ℓ . sütunudur. $\mathbf{H}$ 'in satırları alıcı anten indis bilgilerini, sütunları ise verici anten indis bilgilerini taşır. $\mathbf{H}, \mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \mathbf{h}_2 \dots \mathbf{h}_{N_{\psi}}]$ olarak ifade edilebilir; $\mathbf{c}_{i_{\Re}}$ ve $\mathbf{c}_{i_{\Im}}$ $K \times 1$ boyutlu Walsh Hadamard kodlarıdır. $\mathbf{N}_I$ ve $\mathbf{N}_Q$ AWGN matrisidir.

Şekil 1'in alıcı yapısında gösterildiği gibi, alıcı terminalinde I ve Q bileşenlerinin her biri için geri yayma işleminden sonra, dalların her biri yayıcı kodu indislerini, aktif anten indislerini ve iletilen sembol dizilerini, yani $(\hat{i}_{\Re}, \hat{i}_{\Im}, \hat{\ell}, \hat{s})$ kestirmek için kullanılır. Burada, CIM-HQAM-SM sisteminin karmaşıklığını azaltmak için, $\hat{\ell}$ ve $\hat{s}$ kestirimleri SM detektörü tarafından kod indislerinin $(\hat{i}_{\Re}, \hat{i}_{\Im})$ kestirimleri kullanılarak gerçekleştirilecektir. Bu nedenle, alıcı tarafında gösterildiği gibi seçim bloğu kullanılarak, kestirilen $(\hat{i}_{\Re}, \hat{i}_{\Im})$ indisleri geri yayılmış vektör setine geri beslenir. Ardından, SM detektörünün girişine yalnızca $(\hat{i}_{\Re}, \hat{i}_{\Im})$ indisleriyle ilişkilendirilen $\mathbf{y}_{\hat{i}_{\Re}}$ ve $\mathbf{y}_{\hat{i}_{\Im}}$ geri yayılmış veri vektörleri uygulanır. Bu şekilde sistemin karmaşıklığı büyük ölçüde azaltılır. Böylece, ilk olarak, yayıcı kodu indisleri korelatör dalları kullanılarak örnekleme sinyalinden kestirilir. Bunu yapmak için, $\mathbf{Y}_I$ ve $\mathbf{Y}_Q$ matrisleri her dalda karşılık gelen yayıcı kodu $\mathbf{c}_i$ ile çarpılır ve $T_s = KT_c$ periyodu boyunca toplanır. Böylece, hem I hem de Q bileşenleri için i .

korelatörün geri yayılmış çıkışı aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{y}}_{I,i} &= \mathbf{Y}_I \mathbf{c}_i = [\mathbf{y}_{I,1} \mathbf{y}_{I,2} \dots \mathbf{y}_{I,K}] \mathbf{c}_i \\ \tilde{\mathbf{y}}_{Q,i} &= \mathbf{Y}_Q \mathbf{c}_i = [\mathbf{y}_{Q,1} \mathbf{y}_{Q,2} \dots \mathbf{y}_{Q,K}] \mathbf{c}_i, \end{aligned} \quad (4)$$

burada, $i = 1, 2, \dots, 2^L$ şeklindedir. Bu noktadan hareketle, $\tilde{\mathbf{y}}_{I,i}$ ve $\tilde{\mathbf{y}}_{Q,i}$ 'nin r . elemanı sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{I,i}^r &= \sum_{k=1}^K c_{i,k} y_{I,k} = \sum_{k=1}^K c_{i,k} (s_{\Re} c_{i_{\Re},k} h_{\ell} + n_{I,k}) \\ &= \begin{cases} s_{\Re} h_{\ell} E_c + \tilde{n}_I, & \text{eğer } i = \hat{i}_{\Re} \text{ ise} \\ \tilde{n}_I, & \text{eğer } i \neq \hat{i}_{\Re} \text{ ise} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{y}_{Q,i}^r &= \sum_{k=1}^K c_{i,k} y_{Q,k} = \sum_{k=1}^K c_{i,k} (s_{\Im} c_{i_{\Im},k} h_{\ell} + n_{Q,k}) \\ &= \begin{cases} s_{\Im} h_{\ell} E_c + \tilde{n}_Q, & \text{eğer } i = \hat{i}_{\Im} \text{ ise} \\ \tilde{n}_Q, & \text{eğer } i \neq \hat{i}_{\Im} \text{ ise} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

Burada $r = 1, 2, \dots, N_R$ ve E_c yayıcı kodu başına iletilen ortalama enerjidir ve $E_c = \frac{1}{\sqrt{K}} \sum_{k=1}^K c_{i,k}^2$ olarak ifade edilir. Ayrıca, $\tilde{n}_I = \sum_{k=1}^K c_{i,k} n_{I,k}$ ve $\tilde{n}_Q = \sum_{k=1}^K c_{i,k} n_{Q,k}$ Walsh Hadamard kodu ile çarpılan korelasyonlu AWGN terimleridir. (5) ve (6)'dan $\tilde{y}_{I,i}$ 'nin ortalamasının $i = \hat{i}_{\Re}$ iken $s_{\Re} h_{\ell} E_c$ veya $i \neq \hat{i}_{\Re}$ iken 0 olduğu gösterilebilir. Benzer şekilde $\tilde{y}_{Q,i}$ 'nin ortalaması $i = \hat{i}_{\Im}$ iken $s_{\Im} h_{\ell} E_c$ veya $i \neq \hat{i}_{\Im}$ iken 0'dır. Ek olarak, varyanslar şu şekilde yazılabilir: $\sigma_{\tilde{y}_{I,i}}^2 = \sigma_{\tilde{y}_{Q,i}}^2 = E_c N_0$. Geri yayma işlemi hem I hem de Q bileşenleri için tüm geri yayma üzerinden yapıldığında, alıcıda elde edilen vektör kümesi (4) yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathcal{Y}_I = \{\tilde{\mathbf{y}}_{I,1}, \dots, \tilde{\mathbf{y}}_{I,2^L}\}, \quad \mathcal{Y}_Q = \{\tilde{\mathbf{y}}_{Q,1}, \dots, \tilde{\mathbf{y}}_{Q,2^L}\}. \quad (7)$$

Sistemdeki I ve Q bileşenleri için yayıcı kodlarının indislerini tahmin etmek için öncelikle $\mathcal{Y}_I$ kümesindeki $\{\|\tilde{\mathbf{y}}_{I,i}\|^2\}_{i=1}^{2^L}$ ve $\mathcal{Y}_Q$ kümesindeki $\{\|\tilde{\mathbf{y}}_{Q,i}\|^2\}_{i=1}^{2^L}$ vektörlerinin karesel normu alınır ve daha sonra kümelerdeki maksimum elemanların indisleri belirlenir. Walsh Hadamard kodları birbirlerine ortogonal olduklarından, yani, $\sum_{k=1}^K c_{i,k} c_{j,k} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i = j \text{ ise} \\ 0, & \text{eğer } i \neq j \text{ ise} \end{cases}$ normlu vektörün en büyük değerli elemanı da aynı indisler üzerindeki elemana eşittir. Bu noktadan hareketle, normlu vektör kümelerinin maksimum elemanlarının indisleri aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$\hat{i}_{\Re} = \arg \max_i \left\{ \|\tilde{\mathbf{y}}_{I,i}\|^2 \right\}, \quad \hat{i}_{\Im} = \arg \max_i \left\{ \|\tilde{\mathbf{y}}_{Q,i}\|^2 \right\}. \quad (8)$$

$\hat{i}_{\Re}$ ve $\hat{i}_{\Im}$ yayıcı kodu indis detektörleri ile elde edildikten sonra, maksimum olabilirlik (maximum likelihood, ML) tabanlı SM detektörü, $\hat{\ell}$ ve $\hat{s}$ kestirimlerini elde etmek için $(\hat{i}_{\Re}, \hat{i}_{\Im})$ indisleriyle ilişkili $\tilde{\mathbf{y}}_{I,\hat{i}_{\Re}}$ ve $\tilde{\mathbf{y}}_{Q,\hat{i}_{\Im}}$ geri yayılmış sinyalleri üzerindeki (ℓ, s) kombinasyonlarının tümünü dikkate alacaktır. Böylece, CIM-HQAM-SM sisteminin hem I hem de Q bileşenleri için (ℓ, s) parametrelerinin ML kestirimleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} [\hat{\ell}, \hat{s}] &= \arg \min_{\ell, s} \left\{ \left\| \left(\tilde{\mathbf{y}}_{I,\hat{i}_{\Re}} + j \tilde{\mathbf{y}}_{Q,\hat{i}_{\Im}} \right) - E_c s \mathbf{h}_{\ell} \right\|^2 \right\} \\ &= \arg \min_{\ell, s} \left\{ \left\| \boldsymbol{\varphi}_{\ell} \right\|^2 - 2 \operatorname{Re} \left\{ \left(\tilde{\mathbf{y}}_{I,\hat{i}_{\Re}} + j \tilde{\mathbf{y}}_{Q,\hat{i}_{\Im}} \right)^H \boldsymbol{\varphi}_{\ell} \right\} \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

burada, $\varphi_\ell = E_c s \mathbf{h}_\ell$ şeklindedir. Kestirilen $(\hat{i}_R, \hat{i}_S, \hat{\ell}, \hat{s})$ değerleri kullanılarak bit geri eşleştirme tekniği ile $\mathbf{b}$ elde edilir.

IV. CIM-HQAM-SM TEKNİĞİ İÇİN COAS TABANLI ANTEN SEÇİMİ

COAS tekniği, toplam N_T adet verici anten arasından norm karesi en yüksek olan N_ψ adet anten seçilir. COAS tekniği, MIMO iletişim sistemlerinin performansını geleneksel haberleşme sistemlerine kıyasla oldukça iyileştirir.

COAS algoritması adım adım şu şekilde özetlenebilir:

- 1) Kanal matrisi $\mathbf{H}$ içindeki her bir sütun vektörünün Frobenius norm değerleri tek tek belirlenir:

$$\|\mathbf{h}_\alpha\|_F^2, \alpha = 1, 2, \dots, N_T. \quad (10)$$

- 2) Hesaplanan Frob. normlarına sahip sütun vektörleri, norm değerlerine göre en büyükten en küçüğe doğru sıralanır:

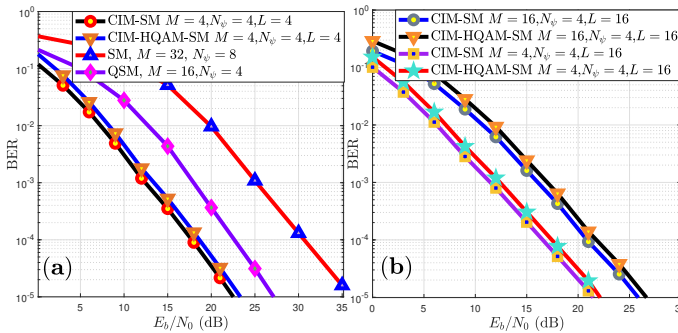
$$\|\mathbf{h}_1\|_F^2 \geq \dots \geq \|\mathbf{h}_{N_\psi}\|_F^2 \geq \|\mathbf{h}_{N_\psi+1}\|_F^2 \geq \dots \geq \|\mathbf{h}_{N_T}\|_F^2. \quad (11)$$

- 3) Kablosuz kanal vektörü $\mathbf{H}_{\text{COAS}}$ 'ın $N_R \times N_\psi$ boyutlu kanal kazanç matrisini oluşturmak için en yüksek N_ψ kanal kazanç vektörleri seçilir.

V. BENZETİM SONUÇLARI

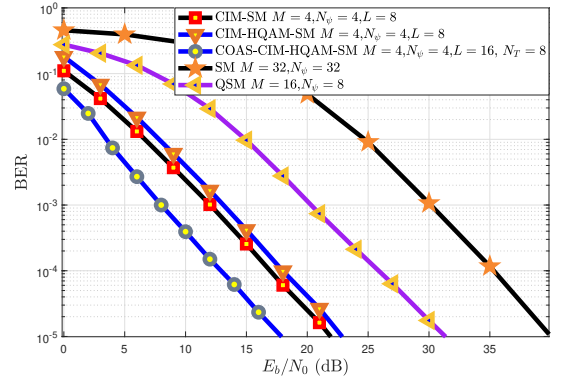
Bu kısımda, incelenen CIM-HQAM-SM sisteminin simülasyon sonuçları, Rayleigh sönümleme kanallarında gösterilmiştir. Simgelerin tahmininde en iyi ML yöntemi tercih edilmiştir. Ortalama bit hata oranı (bit error rate, BER) performans değerleri, Monte Carlo simülasyon tekniği ile hesaplanmıştır. Burada, $\text{SNR}(\text{dB}) = 10 \log_{10}(E_b/N_0)$ formülünde E_b , bit başına düşen ortalama enerjiyi ifade etmektedir. Anten seçimi tekniği olmayan karşılaştırma yöntemleri için $N_T = N_\psi$ olarak seçilmiştir.

Şekil 4(a)'da $p = 8$ bit için CIM-SM, CIM-HQAM-SM, SM ve QSM yöntemlerinin BER başarımları sunulmuştur. Görüldüğü üzere CIM-HQAM-SM yöntemi hem CIM-SM ile çok benzer performanslar göstermektedir hem de enerji verimlidir. Ayrıca, önerilen yöntem, QSM yöntemine neredeyse 5 dB'lik performans sağlarken SM yöntemine ise 12,9 dB'lik performans sağlamaktadır. Şekil 4(b)'de ise CIM-SM ve CIM-HQAM-SM sistemlerinin performans karşılaştırmaları sunulmuştur. Görüldüğü üzere, CIM-HQAM-SM sistemi CIM-SM sistemi ile çok benzer performanslar göstermektedir.



Şekil 4: a) $N_R = 2$ için CIM-SM, CIM-HQAM-SM, SM, QSM sistemlerinin karşılaştırılması b) $N_R = 2$ ve $M = 4, 16$ için CIM-SM, CIM-HQAM-SM sistemlerinin karşılaştırılması

Şekil 5'de, $p = 10$ bit için CIM-SM, CIM-HQAM-SM, COAS-CIM-HQAM-SM, SM ve QSM yöntemlerinin BER başarımları sunulmuştur. COAS-CIM-HQAM-SM yöntemi CIM-SM ve CIM-HQAM-SM yöntemlerine kıyasla yaklaşık 5 dB;



Şekil 5: $N_R = 2$ için CIM-SM, CIM-HQAM-SM, COAS-CIM-HQAM-SM, SM ve QSM sistemlerinin karşılaştırılması

QSM yöntemine kıyasla 13,27 dB ve SM yöntemine kıyasla 22 dB performans sağlamaktadır. CIM-SM ve CIM-HQAM-SM yöntemleri ise QSM yöntemine kıyasla yaklaşık 8,27 dB ve SM yöntemine kıyasla 17 dB performans sağlamaktadır.

VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada, yeni nesil haberleşme sistemleri için umut verici nitelikte olan SM ve CIM IM teknikleri ile enerji verimli HQAM takımıyla birleştirilerek CIM-HQAM-SM adında yeni bir iletişim sistemi önerilmiştir. Bu önerilen yeni sistem, HQAM tekniğinin doğası gereği geleneksel IM tabanlı QAM tekniğine kıyasla enerji verimliliği açısından daha iyidir. Ayrıca, hata performansını daha da iyileştirmek için COAS tabanlı anten seçim tekniği de önerilen sisteme eklenmiştir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, önerilen sistemin BER başarımının karşılaştırılan sistemlere kıyasla daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] J. Li, S. Dang, M. Wen, Q. Li, Y. Chen, Y. Huang, and W. Shang, "Index modulation multiple access for 6g communications: Principles, applications, and challenges," *IEEE Netw.*, vol. 37, no. 1, pp. 52–60, 2023.
- [2] B. A. Ozden, F. Cogen, and E. Aydin, "Mirror activation pattern selection for energy efficient hexagonal QAM aided media-based modulation," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol. 34, no. 7, p. e4795, 2023.
- [3] B. Nazar and F. S. Hasan, "Joint grouping subcarrier and permutation index modulations based differential chaos shift keying system," *Phys. Commun.*, vol. 61, p. 102213, 2023.
- [4] F. Cogen and E. Aydin, "Performance analysis of Hexagonal QAM constellations on quadrature spatial modulation with perfect and imperfect channel estimation," *Phys. Commun.*, vol. 47, p. 101379, aug 2021.
- [5] C. D. Murphy, "High-order optimum hexagonal constellations," *11th IEEE Int. Symp. on Pers. Indoor and Mobile Radio Commun. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No. 00TH8525)*, vol. 1, pp. 143–146, 2000.
- [6] E. Aydin, "A new hexagonal quadrature amplitude modulation aided media-based modulation," *Int. J. Commun. Syst.*, vol. 34, no. 17, p. e4994, 2021.
- [7] E. Basar, Ü. Aygölü, E. Panayircı, and V. Poor, "MIMO sistemler için gelişmiş uzaysal modülasyon teknikleri," *EMO BİLİMSEL DERGİ*, vol. 1, no. 1, pp. 15–26.
- [8] B. A. Ozden, E. Aydin, and F. Cogen, "Reconfigurable intelligent surface-aided spatial media-based modulation," *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 7, no. 4, pp. 1971–1980, 2023.
- [9] —, "Code index modulation-aided spatial media-based modulation system for future wireless networks," *IEEE Syst. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 3762–3770, 2023.
- [10] F. Cogen, B. A. Ozden, E. Aydin, and N. Kabaoglu, "Reconfigurable intelligent surface-empowered code index modulation for high-rate siso systems," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, pp. 1–1, 2024.
- [11] B. A. Ozden and E. Aydin, "Antenna selection for receive spatial modulation system empowered by reconfigurable intelligent surface," *arXiv*, 2023.
- [12] R. Rajashekar, K. Hari, and L. Hanzo, "Antenna selection in spatial modulation systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 521–524, 2013.