

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/340132434>

Performance Analysis of HQAM Based Spatial Modulation over Nakagami-m Fading Channels

Conference Paper · March 2020

DOI: 10.1109/SIU49456.2020.9302497

CITATION

1

READS

84

2 authors:



Fatih Cogen

Turkish-German University

15 PUBLICATIONS 67 CITATIONS

SEE PROFILE



Erdogan Aydin

Istanbul Medeniyet Universitesi

33 PUBLICATIONS 105 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Particle Filter [View project](#)



Code Index Modulation and Spatial Modulation: A New High Rate and Energy Efficient Scheme for MIMO systems [View project](#)

Nakagami- m Sönümlmeli Kanallarda HQAM Tabanlı Uzaysal Modülasyonun Performans Analizi

Performance Analysis of HQAM Based Spatial Modulation over Nakagami- m Fading Channels

Fatih Cogen
Mekatronik Sistemler Mühendisliği
Türk-Alman Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
cogen@tau.edu.tr

Erdogan Aydin
Elektrik-Elektronik Mühendisliği
İstanbul Medeniyet Üniversitesi
İstanbul, Türkiye
erdogan.aydin@medeniyet.edu.tr

Özetçe —Bu çalışmada, yakın zamanda önerilen altıgen karesel genlik modülasyonlu uzaysal modülasyon (HQAM-SM) sisteminin Nakagami- m sönümlmeli kanallar üzerindeki performans analizi sunulmuştur. Performans analizi, Nakagami- m kanal dağılımının fazı tekdüze dağılıma sahip olmayan faz için en genel hali dikkate alınarak yapılmıştır. HQAM, ortalama Hamming uzaklığını en aza indirmek için kod sözcüklerinin altıgen bir yıldız diyagramı şeklinde noktalara atanmasını optimize eder. Bu düzenleme, enerjiyi her zaman geleneksel QAM modülasyonundan daha verimli kullanır ve daha yüksek işaret-gürültü oranlarında (SNR) QAM ile neredeyse aynı performansı sağlar. Bu çalışmada, SM'nin anten indeksine ek olarak geleneksel modüle edilmiş simgelerle veri taşımak yerine, HQAM ile verinin taşınacağı ve geleneksel SM'e kıyasla daha enerji verimli bir sistem Nakagami- m sönümlmeli kanallar için ele alınmıştır. Ele alınan sisteminin başarımlı analizi Nakagami- m sönümlleme kanallarında gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler—Nakagami- m sönümlmeli kanallar, Uzaysal modülasyon, altıgen karesel genlik modülasyonu (HQAM), MIMO sistemler.

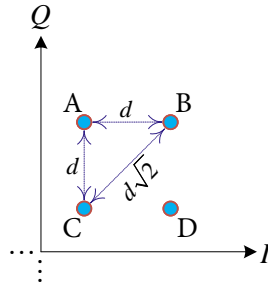
Abstract—In this study, the performance analysis of the recently proposed Hexagonal Square Amplitude Modulation Spatial Modulation (HQAM-SM) system on Nakagami- m fading channels is presented. Performance analysis was performed considering the most general state of the Nakagami- m channel distribution phase for the phase without uniform-distribution. HQAM optimizes the assignment of code words to points in the form of a hexagonal constellation to minimize the average Hamming distance. This arrangement always uses energy more effectively than conventional quadrature amplitude modulation (QAM) and performs almost the same performance as QAM at higher SNRs. In this study, a more energy-efficient system was proposed for Nakagami- m fading channels compared to conventional SM, where SM will carry data with HQAM instead of carrying data with conventional modulated symbols in addition to the antenna index. Performance analysis of the proposed system was carried out in Nakagami- m fading channels.

Keywords—Nakagami- m fading channels, Spatial modulation, Hexagonal square amplitude modulation (HQAM), MIMO systems.

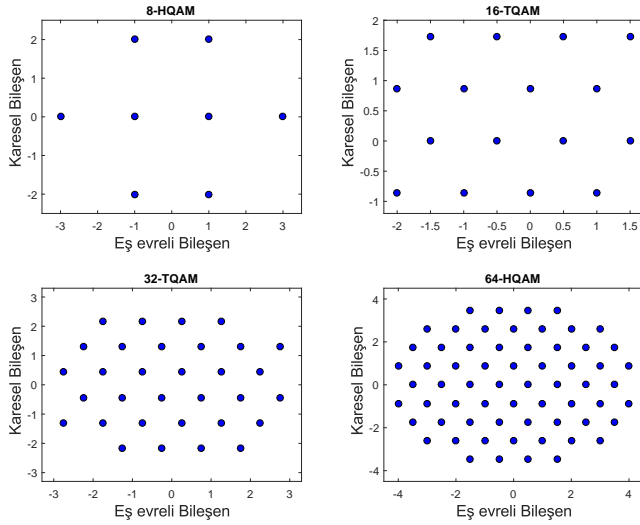
I. GİRİŞ

Günümüzde akıllı cep telefonları, tabletler ve akıllı saatler gibi kablosuz iletişim cihazları neredeyse hayatımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Enerji verimliliğine gitgide daha fazla değer verilen mobil teknolojiler, kullanıcılarına her yıl biraz daha fazla veri hızı ve daha nitelikli kullanıcı deneyimi vaat etmektedir. Bunun yanı sıra, akıllı cep telefonu kullanıcılarının önemli bir çoğunluğu telefonlarındaki internet veri hızından tam olarak memnun değildir. Son zamanlarda; çevrimiçi oyun, yüksek kaliteli video konferans, büyük dosya aktarımı gibi birçok ihtiyaç dünyada her geçen gün önem kazanmaktadır. Bu yüzden; mobil veri bant genişliği için artan talep, sınırlı kaynaklar, son yıllarda enerji verimli modülasyon tekniklerine duyulan ihtiyaç gibi parametreler göz önüne alındığı zaman yeni modülasyon tekniklerinin kullanılmasını ve/veya mevcut tekniklerin iyileştirilmesinin gerekli olduğu su götürmez bir gerçektir [1], [2].

"5G ve ötesi" haberleşme teknolojisinin gereksinimlerini karşılayabilmek için, önerilen yeni yüksek hızlı iletişim sistemleri, yüksek dereceli M -ary ($M \in \{64, 128, 256, 512, 1024, \dots\}$) yıldız diyagramlarını kullanırlar. Karesel genlik modülasyonunu (quadrature amplitude modulation, QAM) gibi meşhur yıldız diyagramlarının uygulanması kolay olsa da bu yıldız diyagramları simgeleri mümkün olduğunca enerji verimli bir şekilde birleştiremez. Sadeliği ve kullanım kolaylığı nedeniyle, QAM tekniği genellikle yeni nesil yüksek hızlı çalışmalarda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, QAM tipi yıldız diyagramları için belirli bir ortalama iletilen simge gücü için "optimal" olmadığı, ancak "alt-optimal (sub-optimal)" olduğu bilinmektedir. Günümüz dünyasında, enerji verimliliğinin bir ihtiyaç haline geldiği bilinmektedir ve optimum enerji verimli yıldız diyagramlarının geliştirilmesi ve kullanılması gerektiği bir gerçektir. Enerji verimliliği hedefine ulaşan altıgen yıldız diyagramları, belirli bir ortalama iletilen simge gücü için iletilen gücü en aza indiren yıldız diyagramı sorununa bir çözüm olarak tasarlanmıştır. Yapılan çalışmalar, Altıgen QAM'in (Hexagonal QAM, HQAM) geleneksel QAM tekniklerine kıyasla enerji verimliliği açısından avantajlar sağladığını ve bit hata oranı bağlamında yüksek işaret gürültü



Şekil 1: 16-QAM Yıldız Diyagramı



Şekil 2: HQAM Yıldız Diyagramları

oranında (signal to noise ratio, SNR) benzer performanslar sağladığını göstermiştir [3], [4].

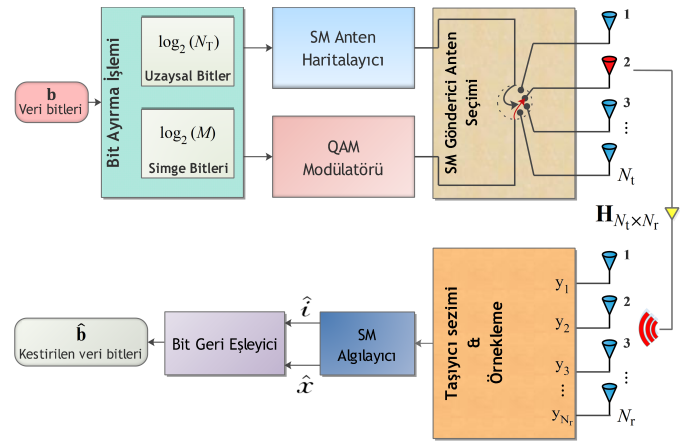
Bu bildirinin yapı taşlarını oluşturan bir diğer teknik ise uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) tekniğidir ve araştırmacılar tarafından son yıllarda çokça çalışılmıştır. SM tekniğinde; verici, bir seferde tek bir radyo frekansı zinciri kullanırken anten dizisinin birçok avantajından yararlanır. Bilgi bitlerinin bir kısmı geleneksel modüle edilmiş simgelerle iletilirken, diğer kısmı ise antenlerin indeksleri üzerinde herhangi bir enerji harcamadan iletilir. Bu teknikte, iletişim kurulurken her zaman aralığı için sadece bir anten etkinleştirilir ve bu anten üzerinden iletişim sağlanır. Bu akılcı yapı ile beraber, kanallar arası girişim tamamen elimine edilir, enerji-verimliliği artar ve devre karmaşıklığı azalır. [5].

Bu çalışmada, yeni nesil kablosuz iletişim sistemleri için önerilen yüksek veri hızlı ve enerji verimli HQAM-SM tekniğinin Nakagami- m sönümlenmeli kanallarda kuramsal hata analizi yapılarak ortalama bit hata olasılığı (ABEP) elde edilmiştir. Ayrıca, farklı bant verimliliklerinde Nakagami- m sönümlenmeli QAM-SM sistemi ile hata başarımı karşılaştırılmıştır.

II. SİSTEM MODELİ

A. HQAM Yıldız Diyagramları

İki nokta arasındaki Öklid mesafesinin, Şekil 1'deki gibi, d olduğu ve gürültünün genliğinin $d/2$ olduğu varsayalım. Alınan sinyal ideal noktadan $d/2$ kadar uzakta ise, kesin olarak tespit edilebilir. Ancak, BC arasındaki mesafenin $d\sqrt{2}$ olduğu görülmektedir. Böylece, alınan sinyal BC doğrultusunda ise,



Şekil 3: HQAM-SM Sisteminin Sistem Modeli

gürültünün genliği $\frac{d\sqrt{2}}{2}$ 'den az olduğu sürece iletilen nokta doğru şekilde elde edilebilir. Bu nedenle, alınan tüm sinyallerin gürültü genliğini $d/2$ ile sınırlamak gerekli değildir. Aksine, HQAM'de böyle bir verimlilik sorunu yoktur, HQAM'de noktalar arasındaki mesafeler eşittir. Aynı güç varsayımı altında, geleneksel QAM simge ayırımı açısından "sub-optimal" olarak adlandırılırken HQAM ise "optimal" olarak adlandırılır [6].

Şekil 2'de, çeşitli HQAM şemaları verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu yapılar enerji verimliliği açısından geleneksel QAM'den daha iyidir ve yüksek SNR'larda QAM ile neredeyse aynı bit hata performans oranına sahiptir. Bu nedenle, enerji verimliliği bir sorun haline geldiğinde, HQAM şemalarının kullanımı daha önemlidir.

Altıgen yıldız diyagramları, minimum simge ayırma sorununa potansiyel çözümler getiren rasyonel tekniklerdir. [3] ve [4]'de QAM, HQAM ve TQAM¹ sistemleri için farklı senaryoların "minimum birim simge ayırımı" açısından yıldız diyagramı karşılaştırmaları verilmiştir [4].

B. Uzaysal Modülasyon

HQAM-SM sisteminin sistem modeli Şekil 3'de gösterilmiştir. HQAM-SM sistemi, şekilde de görüldüğü üzere, N_t iletim anteni ve N_r alıcı antenden oluşur. Mevcut sistemde, SM'nin aktif anten indeksine ek olarak, geleneksel QAM yıldız diyagramı yerine HQAM yıldız diyagramı kullanılmaktadır.

Sistem modeli ele alındığı zaman, \mathbf{b} 'nin iletilecek bilgi biti vektörü olduğu görülmektedir. Sistemin vericisinde, $1 \times p$ boyutuna sahip \mathbf{b} vektörü, $p = p_1 + p_2$ olacak şekilde, $p_1 = \log_2(N_t)$ ve $p_2 = \log_2(M)$ bitlik alt vektör gruplarına ayrılır ve haberleşme bu alt vektörler ile sağlanır. Alıcıya gelen gürültülü ve sönümlenmeye uğramış sinyal aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

burada \mathbf{x} , HQAM simgesidir. \mathbf{H} , $N_r \times N_t$ boyutuna sahip Nakagami- m dağılımlı kablosuz iletişim kanalıdır. \mathbf{n} ise sıfır ortalamalı, N_0 varyanslı karmaşık Gauss rastgele gürültüsüdür, yani $CN(0, \sigma_n^2 = N_0)$.

¹TQAM (triangular QAM, üçgensel QAM), yıldız diyagramı noktalarını üçgen şeklinde düzenleyen özel bir HQAM tekniğidir.

Daha önce de tartışıldığı gibi, SM anten indeksini veri iletimi için ekstra bir boyut olarak kullanır. Bunu yapmak için, bir SM haritalayıcı üretir ve bunun üzerinden simge indeksi ile birleştirilmiş bir yıldız diyagramı vektörü üretir:

$$\mathbf{x}_{iq} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & x_q & 0 & \dots & 0 \\ & & & \uparrow & & & \\ & & & i\text{'inci pozisyon} & & & \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

burada i , aktif anten indeksini ve x_q ise M 'li HQAM yıldız diyagramı kümesinin q 'uncu simgesini temsil eder. Başka bir deyişle, simge iletimi sırasında yalnızca i indeksli anten etkin kalır. Simgenin i 'inci antenden iletilmesi durumunda, kanal çıkışı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_i x_q + \mathbf{n}, \quad (3)$$

ve burada \mathbf{h}_i , \mathbf{H} matrisinin i 'inci, sütunu olarak ifade edilir. Nakagami- m dağılımı şiddetli ila orta derecede sönümlenmeli olan kanalları tanımlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Nakagami sönümleme kanallarının kanal katsayısı aşağıdaki gibi modellenebilir [8]:

$$h_{r,t} = \sqrt{\sum_{i=1}^m |\delta_i^{\Re}|^2} + j \sqrt{\sum_{i=1}^m |\delta_i^{\Im}|^2}, \quad (4)$$

burada $|\delta_i^{\Re}|^2$ ve $|\delta_i^{\Im}|^2$ bağımsız ve eş dağılımlı (i.i.d.) gauss rastgele değişkenleridir ve ortalamaları sıfır, varyansları ise $\sigma_\delta^2 = 1/(2m)$ 'dir.² Nakagami- m sönümleme kanalının zarfı aşağıdaki gibi ifade edilebilir [8]:

$$p(v) = \frac{2m^m v^{2m-1}}{\Gamma(m)} e^{-mv^2}, \quad (5)$$

burada $\Gamma(\cdot)$ ifadesi Gamma Fonksiyonu'dur. Buna ek olarak, faz ifadesinin olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde verilebilir [8]:

$$p(\varphi) = \frac{\Gamma(m) |\sin(2\varphi)|^{m-1}}{2^m \Gamma^2(m/2)}. \quad (6)$$

(6)'dan da anlaşılacağı gibi, Nakagami- m kanalının fazı, sadece $m = 1$ olduğunda tekdüze olur; $m = 1$ olduğu zaman Nakagami- m sönümlemesi Rayleigh sönümlemesine karşılık gelir. Bununla birlikte, herhangi bir $m \neq 1$ için Nakagami sönümleme kanallarının fazı düzgün dağılıma sahip değildir [8].

Ayrıca, ML optimal detektör kullanılarak iletilen uzaysal modüleli veri simgeleri aşağıdaki elde edilir [9]:

$$\begin{aligned} [\hat{i}, \hat{q}] &= \arg \min_{i,q} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_i x_q\|_F^2 \\ &= \arg \min_{i,q} \|\mathbf{u}_{iq}\|_F^2 - 2\Re\{\mathbf{y}^H \mathbf{u}_{iq}\}, \end{aligned} \quad (7)$$

burada, $\mathbf{u}_{iq} = \mathbf{h}_i x_q$, $1 \leq i \leq N_t$, $1 \leq q \leq M$ şeklindedir. Ayrıca, $(\cdot)^H$ hermityen operatördür ve $\|\cdot\|_F^2$ ifadesi de Frobenius norm operatördür.

III. HQAM-SM SİSTEMİN NAKAGAMI- m KANALLARDA KURAMSAL HATA ANALİZİ

HQAM-SM tekniğinin ABEP'i, birleşim üst sınırı tekniği kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [10]:

$$BER = \frac{1}{2^p} \sum_{k=1}^{2^p} \sum_{t=1}^{2^p} \frac{e_{k,t}}{p} \bar{P}_e(\mathbf{u}_k \rightarrow \hat{\mathbf{u}}_t), \quad (8)$$

burada $\bar{P}_e(\mathbf{u}_k \rightarrow \hat{\mathbf{u}}_t)$, $\hat{\mathbf{u}}_t$ iletildiğinde \mathbf{u}_k 'e karar vermenin çiftsel hata olasılığını (pairwise error probability, PEP) ifade eder ve $e_{k,t}$ ise ilişkili PEP olayının hatalı bit sayısıdır.

(8)'deki koşullu PEP (conditional PEP, CPEP) kanal matrisi \mathbf{H} 'ya bağlı olup aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \bar{P}_e(\mathbf{u}_k \rightarrow \hat{\mathbf{u}}_t | \mathbf{H}) &= Q\left(\sqrt{\Xi} \|\mathbf{H}\Phi\|_F\right) \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(\frac{-\Xi \|\mathbf{H}\Phi\|_F^2}{2 \sin^2 \theta}\right) d\theta, \end{aligned} \quad (9)$$

burada $\Xi = \frac{1}{2\sigma_n^2}$ ve $\Phi = \mathcal{A}_j - \mathcal{A}_i$ olup $\mathcal{A}_j \in \mathcal{S}$ 'dir ve \mathcal{S} , 2^p boyutlu olup uzaysal simgelerin ve veri simgelerinin tüm olası kombinasyonlarını içerir. (9)'un kanal üzerinden ortalaması alınır, UPEP (unconditional PEP) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\bar{P}_e(\mathbf{u}_k \rightarrow \hat{\mathbf{u}}_t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \mathcal{M}_\varrho\left(\frac{-\Xi}{2 \sin^2 \theta}\right) d\theta, \quad (10)$$

burada $\mathcal{M}_\varrho(\cdot)$ ifadesi $\varrho = \|\mathbf{H}\Phi\|_F^2$ rastgele değişkeninin moment-üretme fonksiyonu (moment generating function, MGF) olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\mathcal{M}_\varrho\left(\frac{-\Xi}{2 \sin^2 \theta}\right) = E\left[\exp\left(\frac{-\Xi}{2 \sin^2 \theta} \varrho\right)\right], \quad (11)$$

burada, $E[\cdot]$ ortalama alma operatürüdür. (10)'deki ϱ değişkeni aşağıdaki gibi ifade edilebilir [10]:

$$\begin{aligned} \varrho &= \|\mathbf{H}\Phi\|_F^2 = \text{Tr}(\mathbf{H}\Phi\Phi^H\mathbf{H}^H) \\ &= \text{vec}(\mathbf{H}^H)^H (\mathbf{I}_{N_r} \otimes \Phi\Phi^H) \text{vec}(\mathbf{H}^H), \end{aligned} \quad (12)$$

burada \mathbf{I}_{N_r} , $N_r \times N_r$ boyutlu kare birim matristir ve $\text{vec}(\cdot)$ ise vektörizasyon operatürüdür. Hermityen matris özelliği kullanılarak (11)'nin MGF'si aşağıdaki gibi ifade edilebilir [11]:

$$\mathcal{M}_\varrho(s) = \frac{\exp\left(s \times \bar{\mathbf{H}}^H \Lambda (\mathbf{I}_{N_t N_r} - s \mathbf{C}_H \Lambda)^{-1} \bar{\mathbf{H}}\right)}{|\mathbf{I}_{N_t N_r} - s \mathbf{C}_H \Lambda|}, \quad (13)$$

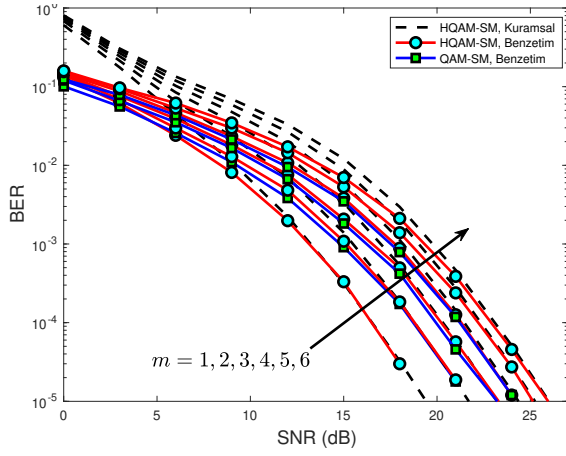
burada, $\Lambda = (\mathbf{I}_{N_r} \otimes \Phi\Phi^H)$. $\bar{\mathbf{H}}$ ve \mathbf{C}_H , sırasıyla Nakagami- m sönümlenmeli kanalın ortalama ve kovaryans matrisi olup aşağıdaki gibi yazılabilir [12]:

$$\bar{\mathbf{H}} = \frac{\Gamma(m/2 + 0.5)}{\Gamma(m/2) \sqrt{m/2}} e^{j\frac{\pi}{4}} \times \text{vec}(\mathbf{1}_{N_r N_t}) \quad (14)$$

$$\mathbf{C}_H = \left(\mathbf{1} - \frac{2}{m} \left(\frac{\Gamma(\frac{m}{2}) + 0.5}{\Gamma(\frac{m}{2})}\right)^2\right) \times \mathbf{I}_{N_r N_t}, \quad (15)$$

burada $\mathbf{1}$, $N_r \times N_t$ boyutlu tüm elemanları 1 olan matristir. (13) eşitliği (10)'de yerine yazılırsa Nakagami- m kanallarda

²(4)'teki m parametresinin tam sayı değerleriyle sınırlanmışlığına dikkat etmek önemlidir. Bununla birlikte, uygulamada, bu kısıtlama ayrılabilir.



Şekil 4: HQAM-SM ve QAM-SM sistemlerinin performans karşılaştırılması ($M = 8, p = 5$ bit ve $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)

HQAM-SM sisteminin UPEP ifadesinin son hali aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\bar{P}_e(\mathbf{u}_k \rightarrow \hat{\mathbf{u}}_t) \leq \frac{1}{2} \frac{\exp \left[-\frac{\Xi}{2} \bar{\mathbf{H}}^H \Lambda \left(\mathbf{I}_{N_t N_r} + \frac{\Xi}{2} \mathbf{C}_H \Lambda \right)^{-1} \bar{\mathbf{H}} \right]}{\left| \mathbf{I}_{N_t N_r} + \frac{\phi}{2} \mathbf{C}_H \Lambda \right|}. \quad (16)$$

(16) ifadesi (8)'de yerine yazılırsa HQAM-SM sisteminin ABER ifadesinin nihai ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$BER \leq \frac{1}{2^p} \sum_{k=1}^{2^p} \sum_{t=1}^{2^p} \frac{e_{k,t}}{2^p} \frac{\exp \left[-\frac{\Xi}{2} \bar{\mathbf{H}}^H \Lambda \left(\mathbf{I}_{N_t N_r} + \frac{\Xi}{2} \mathbf{C}_H \Lambda \right)^{-1} \bar{\mathbf{H}} \right]}{\left| \mathbf{I}_{N_t N_r} + \frac{\phi}{2} \mathbf{C}_H \Lambda \right|}. \quad (17)$$

IV. BENZETİM SONUÇLARI VE TARTIŞMA

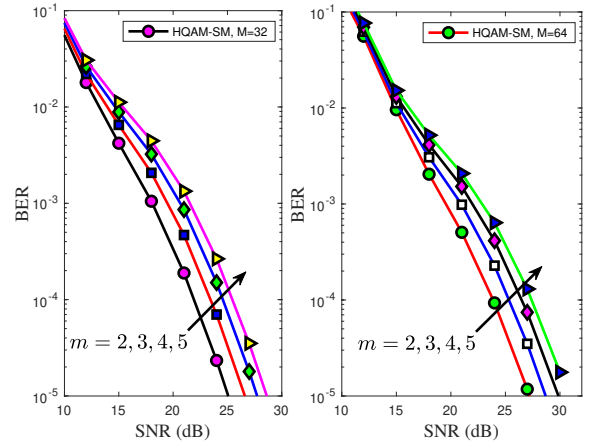
Bu bölümde, ele alınan HQAM-SM sisteminin benzetim sonuçları Nakagami- m sönümlmeli kanallar için sunulmuştur. İletilen simgelerin kestirimi için optimum ML tekniği kullanılmıştır. Ortalama BER başarımları, Monte Carlo benzetim yöntemi ile elde edilmiştir. Burada, $\text{SNR}(\text{dB}) = 10 \log_{10}(E_s/N_0)$ olup E_s ortalama simge enerjisidir. Şekil 4 ve 5 için $N_t = N_r = 4$ olarak seçilmiştir.

Şekil 4'de, $M = 8$ ve $m = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ olması durumunda HQAM-SM ve QAM-SM yöntemlerinin $p = 5$ bit için BER başarımlarını göstermektedir. Burada, 2 bit anten indeksinde 3 bit ise simgede taşınmaktadır.

Şekil 5'de, $M = 32, 64$ ve $m = 2, 3, 4, 5$ olması durumunda HQAM-SM yöntemlerinin (a) $p = 7$ bit ve (b) $p = 8$ bit için BER başarımlarını göstermektedir. Şekil 5'de (a) ve (b) için TQAM yıldız diyagramı kullanılmıştır. Burada, Şekil 5a için 2 bit anten indeksinde 5 bit simgede taşınırken Şekil 5b'de ise 2 bit anten indeksinde 6 bit simgede taşınmaktadır. Sonuç olarak, yüksek SNR değeri için HQAM-SM yöntemi QAM-SM yöntemi ile benzer performansa sahiptir. Ayrıca, Şekil 4 ve 5'den görüleceği üzere m parametresinin değeri arttıkça sistemin performansı kötüleşmektedir.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 5G ve ötesi haberleşme sistemleri için umut verici nitelikte olan SM ve HQAM sistemleri birleştirilerek,



Şekil 5: HQAM-SM sisteminin performansı ($m = 2, 3, 4, 5$, (a) $M = 32, p = 7$ bit (b) $M = 64, p = 8$ bit)

HQAM-SM olarak adlandırılan enerji verimli ve yüksek veri hızlı yeni bir MIMO iletim tekniği Nakagami- m sönümlmeli kanallar için önerilmiştir. Bu önerilen yeni teknik, HQAM'ın doğası gereği geleneksel SM tekniğine kıyasla enerji verimliliği açısından daha iyidir ve aynı zamanda daha düşük enerjilerde simge ayırımı açısından daha avantajlıdır. Bilgisayar simülasyon sonuçları ile, önerilen HQAM-SM sisteminin Nakagami- m kanallarda, daha az iletim enerjisi tüketirken SM şemasına kıyasla yüksek SNR'da eşdeğer hata performansı sağladığı gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] X. Ge and W. Zhang, *5G Green Mobile Commun. Networks*. Springer, 2019.
- [2] S. Li, L. Da Xu, and S. Zhao, "5G Internet of Things: A survey," *J. of Ind. Inf. Integration*, vol. 10, pp. 1–9, 2018.
- [3] F. Cogen and E. Aydin, "Hexagonal quadrature amplitude modulation aided spatial modulation," in *2019 11th Int. Conf. on Elect. and Electron. Eng. (ELECO)*. IEEE, November 2019.
- [4] C. D. Murphy, "High-order optimum hexagonal constellations," in *11th IEEE Int. Symp. on Pers. Indoor and Mobile Radio Commun. PIMRC 2000. Proceedings (Cat. No. 00TH8525)*, vol. 1. IEEE, 2000, pp. 143–146.
- [5] R. Mesleh and A. Alhassi, *Space Modulation Techniques*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2018.
- [6] G. Xingxin, L. Mingquan, and F. Zhenming, "Asymmetric hexagonal QAM based OFDM system," in *IEEE 2002 Int. Conf. on Commun., Circuits and Systems and West Sino Expositions*, vol. 1. IEEE, 2002, pp. 299–302.
- [7] M. Nakagami, "The m -distribution—A general formula of intensity distribution of rapid fading," in *Statistical methods in radio wave propagation*. Elsevier, 1960, pp. 3–36.
- [8] M. Yacoub, G. Fraidenraich, and J. Santos Filho, "Nakagami- m phase-envelope joint distribution," *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 5, pp. 259–261, 2005.
- [9] J. Jeganathan, A. Ghayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: Optimal detection and performance analysis," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 545–547, Aug. 2008.
- [10] M. Simon and M. S. Alaoui, *Digit. Commun. over Fading Channels*. New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [11] G. L. Turin, "The characteristic function of hermitian quadratic forms in complex normal variables," *Biometrika*, vol. 47, no. 1/2, pp. 199–201, 1960.
- [12] R. Mesleh, S. S. Ikki, and H. M. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 6, pp. 2738–2742, June 2015.