

# Yüksek-Hızlı Genelleştirilmiş Uzaysal Modülasyon

## High-Rate Generalized Spatial Modulation

Zehra Yiğit, Ertuğrul Başar  
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye  
{yigitz,basarer}@itu.edu.tr

**Özetçe**—Bu çalışmada, çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) iletişim sistemleri için yeni bir yüksek-hızlı genelleştirilmiş uzaysal modülasyon sistemi önerilmiştir. Bu sistemde vericiye gelen bilgi bitleri, iki farklı modülasyonlu simgeyi ve bu simgeleri iletecek etkin antenlerin indislerini belirlemektedir. Buna göre veri simgelerinden biri seçilen bir antenden doğrudan iletilirken, diğeri ise  $M$ 'li faz kaydırmalı anahtarlama ( $M$ -PSK) modülasyon türüne göre belirlenmiş bir optimum açı kadar döndürülerek seçilen diğer bir antenden iletilmektedir. Önerilen sistemin ilişkisiz Rayleigh sönümlenmeli kanallar için ortalama bit hata olasılığı (ABEP) analizi yapılmıştır. Kapsamlı bilgisayar benzetimleri ile önerilen yüksek-hızlı genelleştirilmiş uzaysal modülasyon (HR-GSM) sisteminin klasik uzaysal modülasyon (SM), genelleştirilmiş SM (GSM), genelleştirilmiş uzaysal indis modülasyonu (GSIM) ve dik SM (QSM) sistemlerine göre daha iyi hata başarımı sağladığı gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—MIMO sistemler, uzaysal modülasyon (SM), genelleştirilmiş uzaysal modülasyon (GSM).

**Abstract**—In this study, a new high-rate generalized spatial modulation scheme is proposed for multiple-input multiple-output (MIMO) communications systems. In this scheme, two modulated symbols and the indices of the active two transmit antennas which are used in the transmission of these symbols are determined according to the incoming data bits. One of the data symbols is directly transmitted from a selected transmit antenna while the other one is transmitted from another selected transmit antenna with a rotation angle which is optimized for  $M$ -PSK signal constellations. The average bit error probability of the proposed system is analyzed for uncorrelated Rayleigh fading channels. It is shown via comprehensive computer simulations that the proposed high-rate generalized spatial modulation (HR-GSM) scheme provides significantly better error performance than classical SM, generalized SM (GSM), generalized spatial index modulation (GSIM) and quadrature SM (QSM) schemes.

**Keywords**—MIMO systems, spatial modulation (SM), generalized spatial modulation (GSM).

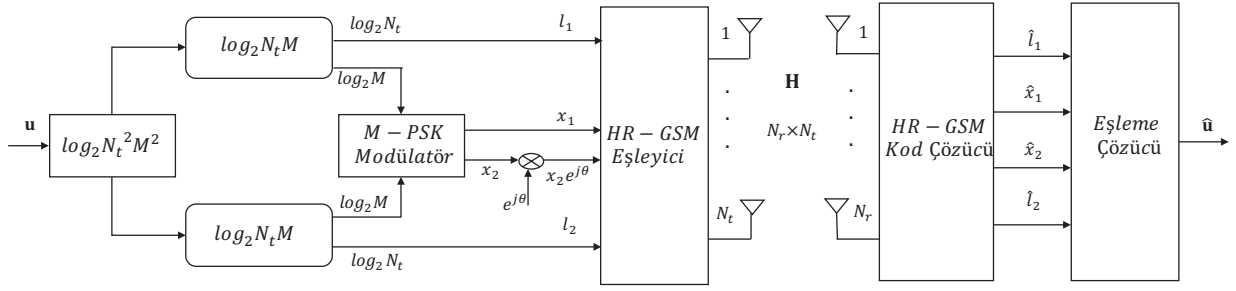
## I. GİRİŞ

Çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) iletişim sistemleri, tek verici/alıcı antenli sistemlere göre bant ve enerji verimliliğini önemli derecede artırma kapasitesine sahiptir. Ancak Vertical Bell Labs layered Space-Time (V-BLAST) [1] gibi geleneksel MIMO sistemlerinde tüm antenler aynı anda iletimde olduğu için bu sistemlerin alıcı kısmında kanallar arası girişimden dolayı sezim karmaşıklığı oldukça fazla olmaktadır.

Uzaysal modülasyon (SM), bir MIMO sistemin verici antenlerinden sadece birini etkinleştirerek kanallar arası girişimi (ICI) tamamen ortadan kaldırabilen ve tek-girişli tek-çıkışlı (SISO) sistemlere göre bant verimliliğini önemli ölçüde artırabilen bir MIMO iletim tekniğidir [2]. SM tekniğinde iletilen bilgi bitleri modülasyonlu simgeyi belirlemenin yanı sıra etkin antenin indisini de belirlemektedir. Böylece  $M$ 'li faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) ya da dik genlik modülasyonlu (QAM) işaretler, etkin antenlerin üzerinden iletilerek ICI tamamen ortadan kaldırılmaktadır. SM'in alıcı kısmında ise optimum en büyük olabilirlikli (ML) sezici [3] ile işaret kümesinin elemanları ve kullanılacak bütün olası verici antenler göz önünde bulundurularak etkin antenin indisine ve modülasyonlu işarete ortak bir karar verilmektedir.

SM yaklaşımı klasik MIMO yöntemlere daha basit şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Ancak SM'in en büyük dezavantajı özellikle artan verici anten sayısı ve modülasyon dereceleri ile bant verimliliğinin V-BLAST'ın çok altında kalmasıdır. Bu nedenle son yıllarda SM'in bant verimliliğini arttırmak üzere bazı çalışmalar yapılmıştır. Genelleştirilmiş uzaysal modülasyon (GSM) tekniği ile etkin anten sayısı artırılarak, klasik SM'e göre bant verimliliğinin daha da artırılması sağlanmıştır [4], [5]. GSM sisteminde, birden çok verici anten etkinleştirilerek aynı modülasyonlu işaret eş zamanlı bir şekilde etkin antenler üzerinden iletilmektedir. Böylece birden çok anten indisine bilgi taşındığı için klasik SM'e göre bant verimliliği artışının yanı sıra GSM'de etkin antenler üzerinden aynı işaretin taşınmasından dolayı klasik SM'de olduğu gibi ICI oluşmamaktadır. GSM sisteminde varolan birden çok anten üzerinden aynı işaretin iletilmesi kısıtı, [6]'da önerilen genelleştirilmiş uzaysal indis modülasyonu (GSIM) ile ortadan kaldırılmaktadır. Bu tekniğe göre, gelen bilgi bitleri etkin anten kombinasyonu ile etkin anten sayısı kadar modülasyonlu simgeyi belirlemektedir. Ardından belirlenen bu simgeler sırasıyla seçilen çoklu etkin antenler üzerinden iletilmektedir. GSM tekniğine kıyasla gelen bilgi bitleri, etkin anten sayısı kadar modülasyonlu işareti de belirlediğinden dolayı bant verimliliği daha da artırılmış olmaktadır.

SM'in bant verimliliğini arttırmayı amaçlayan güncel çalışmalardan biri de dik uzaysal modülasyon (QSM)'nin önerildiği [7]'de gerçekleştirilmiştir. QSM sisteminde, GSM ve GSIM'de olduğu gibi etkin antenlerin sayısı artırılarak bant verimliliğinin artırılması amaçlanmaktadır. QSM sisteminde belirlenen karmaşık modülasyonlu işaret, gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak, gerçek kısım seçilen etkin antenlerden biri üzerinden, sanal kısım ise seçilen aynı veya başka bir



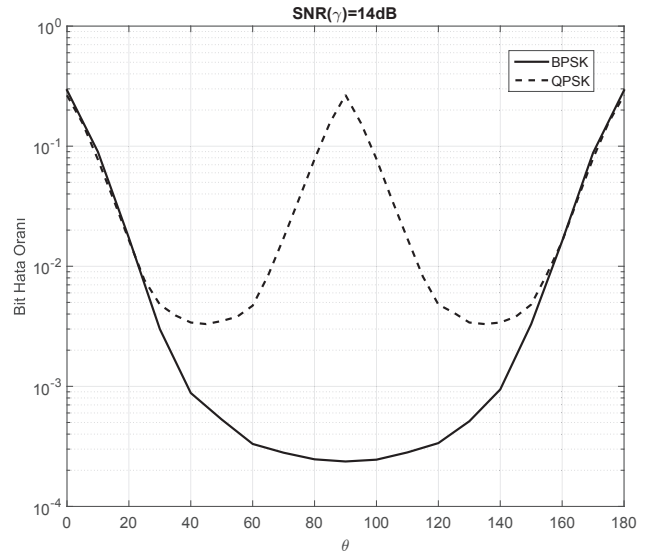
Şekil 1. HR-GSM Sistem Modeli

etkin anten üzerinden alıcıya iletilmektedir. QSM'de iletilen işaretler birbirine dik olduğu için SM'e benzer şekilde ICI oluşmamaktadır.

Bu çalışmada, yeni bir yüksek-hızlı genelleştirilmiş uzaysal modülasyon (HR-GSM) sistemi önerilmiştir. Önerilen HR-GSM sisteminde yukarıda sözü geçen genelleştirilmiş SM sistemlerinde olduğu gibi etkin anten sayısı artırılarak bant verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Buna göre gelen bilgi bitleri iki etkin verici antenin indislerini ve buna ilişkin iki modülasyonlu simgeyi belirlemektedir. Bu simgelerden biri belirlenen ilk etkin anten üzerinden doğrudan iletilmekte, diğeri ise  $M$ -PSK modülasyon türüne göre belirlenmiş optimum açı olan  $\theta$  kadar döndürülerek ikinci etkin anten üzerinden iletilmektedir. Modülasyonlu işaretlerden biri optimum açı kadar döndürülerek iletildiğinden dolayı işaretlerin birbirlerine karışması engellenmiş ve birden fazla etkin verici anten kullanılarak klasik SM'e göre bant verimliliğini artırılması sağlanmıştır. HR-GSM tekniğinin bilgisayar benzetimleri ile aynı bant verimliliği altında klasik SM, GSM, GSIM ve QSM sistemleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca ilişkisiz Rayleigh sönmülemeli kanallar için HR-GSM sisteminin teorik hata analizi yapılarak bilgisayar benzetimi ve teorik sonuçların uyum içinde olduğu kanıtlanmıştır. Bölüm II'de HR-GSM sisteminin modeli sunulmuştur. Bölüm III'te hata analizi gerçekleştirilmiştir. Bölüm IV'te bilgisayar benzetimleri verilmiş ve Bölüm V'te bildiri sonlandırılmıştır.

Tablo I. HR-GSM SİSTEMİNİN  $N_t = 2$  VE BPSK İÇİN İLETİM VEKTÖRLERİ

| Bitler | HR-GSM         | Bitler | HR-GSM         |
|--------|----------------|--------|----------------|
| 0000   | $[1 + j \ 0]$  | 1000   | $[j \ 1]$      |
| 0001   | $[1 - j \ 0]$  | 1001   | $[-j \ 1]$     |
| 0010   | $[-1 + j \ 0]$ | 1010   | $[j \ -1]$     |
| 0011   | $[-1 - j \ 0]$ | 1011   | $[-j \ -1]$    |
| 0100   | $[1 \ j]$      | 1100   | $[0 \ 1 + j]$  |
| 0101   | $[1 \ -j]$     | 1101   | $[0 \ 1 - j]$  |
| 0110   | $[-1 \ j]$     | 1110   | $[0 \ -1 + j]$ |
| 0111   | $[-1 \ -j]$    | 1111   | $[0 \ -1 - j]$ |



Şekil 2. HR-GSM sisteminin BPSK ve QPSK modülasyonları için elde edilmiş optimum döndürme açıları

## II. HR-GSM SİSTEM MODELİ

HR-GSM sisteminin blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Buna göre,  $N_t$  verici anten sayısı,  $N_r$  de alıcı anten sayısı olmak üzere belli bir işaretleme aralığında vericiye gelen  $u$  bit dizisi  $m = \log_2(N_t^2 M^2)$  adet bilgi biti içermektedir.  $m$  uzunluklu bit dizisi iki farklı modülasyonlu işareti ve etkin antenlerin indislerini belirlemek üzere eşit  $\log_2(N_t M)$  uzunluklu iki alt kısma ayırılır. Modülasyonlu çıkışındaki  $x_1$  simgesi  $l_1$  indisli verici anten üzerinden doğrudan iletilmektedir.  $x_2$  simgesi ise, Şekil 2'de BPSK ve QPSK modülasyonları için bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiş olan ve en iyi bit hata oranı (BER) başarımını gösteren optimum  $\theta$  döndürme açısı ile döndürülerek  $l_2$  indisli verici anten üzerinden iletilmektedir. Şekil 2'de gösterilen optimum döndürme açılarının bulunmasında işaret gürültü oranı (SNR) 14 dB alınmış ve  $\theta$ ,  $0^\circ - 180^\circ$  arasında  $1^\circ$ 'lik aralıklarla değiştirilerek bit hata oranı değerleri hesaplanmıştır. Şekil 2'den görüldüğü gibi HR-GSM sisteminde BPSK modülasyonu için elde edilmiş optimum döndürme açısı  $\theta = 90^\circ$  iken QPSK modülasyonu için  $\theta = 45^\circ$ 'dir. HR-GSM için telsiz kanaldan iletilecek  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$  vektörü:

$$\mathbf{x} = [0 \ \dots \ 0 \ x_1 \ 0 \ \dots \ 0 \ x_2 e^{j\theta} \ 0 \ \dots \ 0]^T \quad (1)$$

şekindedir. Burada  $x_1$  ve  $x_2$  sırasıyla  $\mathbf{x}$ 'in  $l_1$  ve  $l_2$ 'inci elemanlarıdır. Tablo 1'de anten indisleri ile taşınan bitler mavi renkle gösterilerek HR-GSM sisteminin  $N_t = 2$  ve BPSK için iletim vektörleri verilmiştir.  $\mathbf{H}$ , Rayleigh sönmüleme katsayılarını içeren  $N_r \times N_t$  boyutlu kanal matrisi ve  $\mathbf{n}$ ,  $N_r \times 1$  boyutlu, 0 ortalamalı,  $N_0$  varyanslı karmaşık toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) vektörü olmak üzere alınan işaretler şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \\ &= \mathbf{h}_{l_1}x_1 + \mathbf{h}_{l_2}x_2e^{j\theta} + \mathbf{n}. \end{aligned} \quad (2)$$

$l_1, l_2 \in \{1, 2, \dots, N_t\}$  olmak üzere  $\mathbf{h}_{l_1}$  ve  $\mathbf{h}_{l_2}$  sırasıyla  $\mathbf{H}$  kanal matrisine ait  $l_1$  ve  $l_2$ 'inci sütunları göstermektedir.

HR-GSM sisteminin alıcısında  $\mathbf{H}$  kanal katsayıları matrisinin tamamen bildiği kabul edilerek optimum ML sezici  $x_1$  ve  $x_2$ 'nin elemanları olduğu  $M$ -PSK işaret kümesinin tüm elemanlarını ve seçilebilecek bütün  $l_1$  ve  $l_2$  etkin anten indislerini göz önünde bulundurarak ortak bir karar vermektedir. Bunun için ML sezici aşağıda gösterildiği gibi  $N_t^2 M^2$  adet metrik hesabı yapmaktadır:

$$[\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{l}_1, \hat{l}_2] = \arg \min_{x_1, x_2, l_1, l_2} \|\mathbf{y} - (\mathbf{h}_{l_1}x_1 + \mathbf{h}_{l_2}x_2e^{j\theta})\|^2. \quad (3)$$

(3)'te  $\|\cdot\|$  vektör normunu göstermektedir.

### III. HR-GSM SİSTEMİNİN HATA ANALİZİ

Bu bölümde önerilen HR-GSM sistemin teorik hata analizi yapılmıştır. Bunun için öncelikle koşullu çiftsel hata olasılığı (CPEP) hesaplanmış, ardından kanal katsayıları üzerinden ortalama alınarak koşulsuz çiftsel hata olasılığı (UPEP) elde edilmiş ve ortalama bit hata olasılığı (ABEP) için bir üst sınır sunulmuştur.

Bilinen bir  $\mathbf{H}$  kanal matrisi üzerinden (1)'de verilen  $\mathbf{x}$  vektörünün iletilip, alıcıda yanlışlıkla  $\hat{\mathbf{x}}$ 'ya karar verildiği kabul edilsin. Bu durumda CPEP şu şekilde hesaplanır:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}|\mathbf{H}) &= P(\|\mathbf{y} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}\|^2 > \|\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}\|^2) \\ &= P(\|\mathbf{H}\mathbf{x}\|^2 - \|\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}\|^2 - \Re\{\mathbf{y}^H(\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}})\} > 0) \\ &= P(D > 0). \end{aligned} \quad (4)$$

Burada  $D$ , ortalaması  $-\|\mathbf{H}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})\|^2$ , varyansı  $2N_0\|\mathbf{H}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})\|^2$  olan Gauss dağılımlı bir raslantı değişkeni olmak üzere CPEP

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}|\mathbf{H}) = Q\left(\sqrt{\frac{\|\mathbf{H}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})\|^2}{2N_0}}\right) \quad (5)$$

olarak hesaplanabilir.  $Q(\cdot)$  işlevinin alternatif gösterimi  $Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp(-x^2/\sin^2\theta) d\theta$  ile CPEP şu şekilde ifade edilebilir:

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}|\mathbf{H}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{H}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})\|^2}{4N_0 \sin^2\theta}\right) d\theta. \quad (6)$$

UPEP ise CPEP'in  $\mathbf{H}$  matrisi üzerinden moment üretme işlevi (MGF) yaklaşımı ile ortalaması alınarak şu şekilde

hesaplanabilir [8]:

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta + \frac{\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2}{4N_0}} d\theta. \quad (7)$$

Bu integralin kapalı formda çözümü [8]'de verilmiştir. Son olarak UPEP'ten yararlanarak APEP şu şekilde hesaplanmıştır:

$$P_b \approx \frac{1}{m2^m} \sum_{\mathbf{x}} \sum_{\substack{\hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{x}} \neq \mathbf{x}}} P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) e(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}). \quad (8)$$

(8)'de  $m$ ,  $\mathbf{x}$ 'nin taşıdığı bit sayısını,  $e(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})$  ise her çiftsel hata olayında  $\mathbf{x}$  ve  $\hat{\mathbf{x}}$  arasındaki toplam hatalı bit sayısını göstermektedir.

### IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde HR-GSM sisteminin farklı bant verimlilikleri için klasik SM [2], GSM [4], GSIM [6] ve QSM [7] sistemleri ile hata başarımı karşılaştırılması yapılmıştır. Tüm sistemlerin BER başarımları alıcıdaki SNR ( $\gamma$ ) değerlerine göre elde edilmiştir. Bilgisayar benzetimlerinde referans alınan GSM ve GSIM sistemlerinin etkin anten sayıları, önerilen sistemle adil bir kıyaslama yapılabilmesi açısından  $N_u = 2$  olarak seçilmiştir. Bütün karşılaştırmalarda, her sistem için alıcı anten sayısı  $N_r = 4$  alınmıştır.

Şekil 3'te HR-GSM sisteminin BPSK ve QPSK modülasyonları için analitik olarak elde edilmiş ABEP eğrileri verilmiştir. Şekil 3'ten görüldüğü üzere benzetim sonuçları ile (8)'den elde edilen analitik sonuçlar uyum içerisindedir.

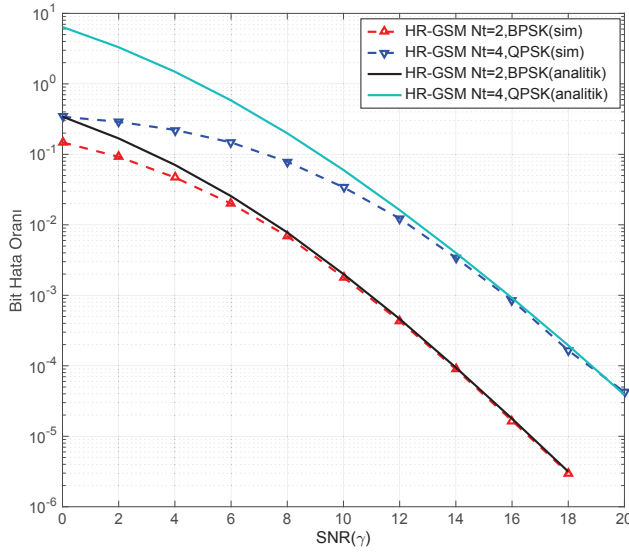
Bant verimliliği  $m = 4$  bits/sn/Hz ve verici anten sayısı  $N_t = 2$  olmak üzere klasik SM için 8-QAM, QSM için QPSK kullanıldığında, Şekil 4'ten görüldüğü gibi HR-GSM sisteminin QSM ile aynı hata başarımını gösterdiği, klasik SM'e göre ise 2dB SNR kazancı sağladığı görülmüştür.

Şekil 5'te  $m = 6$  bits/sn/Hz bant verimliliği için karşılaştırmalar yapılmıştır. GSM için 16-QAM, GSIM ve QSM için QPSK, HR-GSM için BPSK modülasyonu kullanıldığında HR-GSM sisteminin QSM ile aynı, GSM ve GSIM'den ise daha iyi hata başarımını sağladığı görülmüştür.

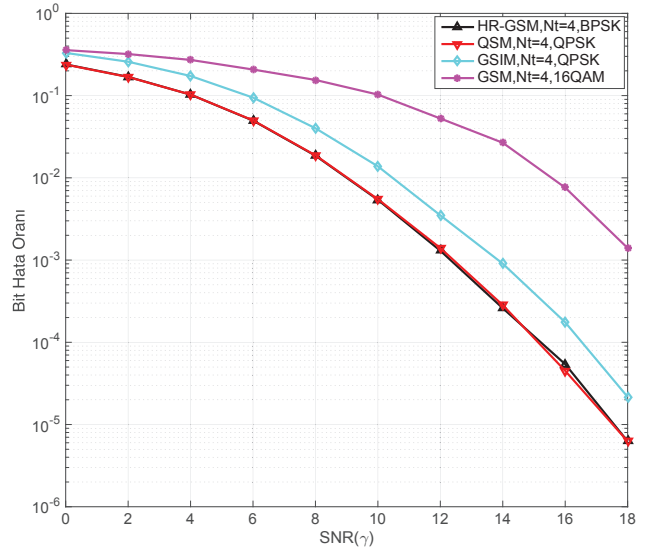
Şekil 6'da ise  $m = 8$  bits/sn/Hz bant verimliliği için karşılaştırmalar yapılmıştır. Tüm sistemlerin verici anten sayıları  $N_t = 4$  olmak üzere GSM için 64-QAM, GSIM için 8-QAM, QSM için 16-QAM ve HR-GSM için QPSK kullanılması durumunda Şekil 6'dan görüldüğü gibi HR-GSM sisteminin referans GSM, GSIM ve QSM'den daha iyi hata başarımını sağladığı görülmüştür.

### V. SONUÇLAR

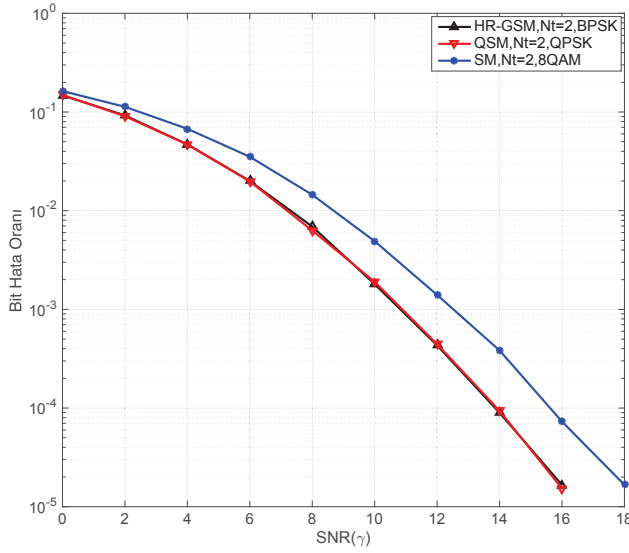
Bu çalışmada yeni bir geliştirilmiş uzaysal modülasyon sistemi önerilmiştir. HR-GSM sisteminde herhangi bir zaman aralığında belirlenen iki işaretten biri doğrudan iletilmekte diğeri ise  $M$ -PSK modülasyonuna göre hesaplanmış optimum döndürme açısı kadar döndürerek seçilen diğer etkin anten üzerinden iletilmektedir. Çalışmada HR-GSM sistemi için ABEP analizi yapılmıştır. Önerilen sistemin referans sistemlere göre yüksek bant verimlilik değerlerinde daha iyi hata başarımı sergilediği kapsamlı benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.



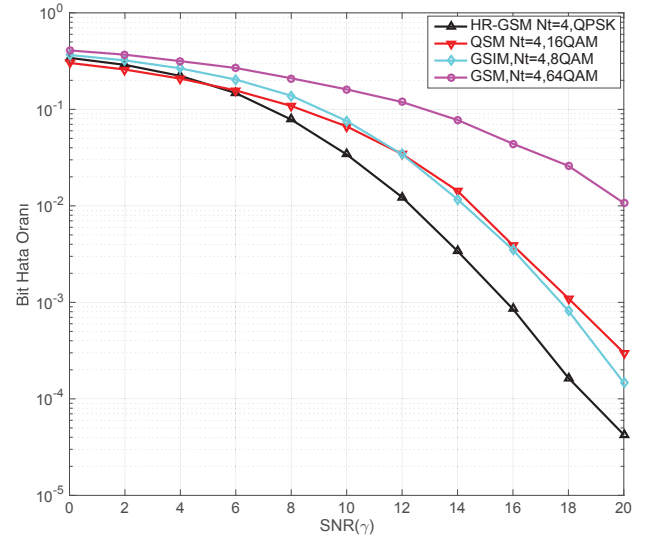
Şekil 3. HR-GSM sisteminin BPSK ve QPSK modülasyonları için analitik ve benzetimlerle elde edilmiş hata başarımları



Şekil 5.  $m = 6$  bits/sn/Hz ve  $N_t = 4$  için SM, QSM ve HR-GSM sistemlerinin hata başarımları karşılaştırması



Şekil 4.  $m = 4$  bits/sn/Hz ve  $N_t = 2$  için SM, QSM ve HR-GSM sistemlerinin hata başarımları karşılaştırması



Şekil 6.  $m = 8$  bits/sn/Hz ve  $N_t = 4$  için SM, QSM ve HR-GSM sistemlerinin hata başarımları karşılaştırması

#### KAYNAKÇA

- [1] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Lab. Tech. J.*, cilt. 1, sayı 2, s. 41-59, 1996.
- [2] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation-a new low complexity spectral efficiency enhancing technique," in *First Int. Conf. Commun. and Netw. in China*. IEEE, s. 1-5, 2006.
- [3] J. Jeganathan, A. Ghayeb, and L. Szczecinski, "Spatial modulation: optimal detection and performance analysis," *IEEE Commun. Lett.*, cilt. 12, sayı. 8, s. 545-547, 2008.
- [4] A. Younis, N. Serafimovski, R. Mesleh, and H. Haas, "Generalised spatial modulation," in *Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*,

*Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on*. IEEE, s. 1498-1502, 2010.

- [5] J. Fu, C. Hou, W. Xiang, L. Yan, and Y. Hou, "Generalised spatial modulation with multiple active transmit antennas," in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*. IEEE, s. 839-844, 2010.
- [6] T. Datta, H. Eshwarajah, and A. Chockalingam, "Generalized space and frequency index modulation," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 2015.
- [7] R. Mesleh, S. S. Ikki, and H. M. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, sayı. 99, s. 1-1, 2014.
- [8] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*. John Wiley & Sons, cilt. 95, 2005.