

# Geniş Ölçekli MIMO Sistemler için Dik Uzaysal Modülasyon Quadrature Spatial Modulation for Large Scale MIMO Systems

Zehra Yiğit, Ertuğrul Başar

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
yigitz@itu.edu.tr, basarer@itu.edu.tr

**Özetçe** —Bu bildiri, geniş ölçekli MIMO sistemler için dik uzaysal modülasyon (QSM) ve uzay-zaman blok kodları (STBCs) bir araya getirilerek ikinci dereceden verici anten çeşitlemesi sağlayan yeni bir çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) iletim sistemi önerilmiştir. Önerilen uzay-zaman kodlu dik uzaysal modülasyon (ST-QSM) sisteminde, toplam verici anten sayısı, iki gruba bölünmektedir ve her bir grubun anten sayılarına göre iki, dört veya sekiz antenli STBC iletim prensipleri,  $M$ 'li dik genlik modülasyonlu ( $M$ -QAM) iki karmaşık işaretin gerçek ve sanal kısımlarının iletiminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, ST-QSM sisteminin ortalama bit hata olasılığı (ABEP) elde edilmiştir. Ayrıca, kapsamlı bilgisayar benzetimleri ile aynı bant verimliliği altında ST-QSM sisteminin, QSM, uzay-zaman kodlu uzaysal modülasyon (STBC-SM) ve Alamouti STBC sistemlerine göre daha iyi hata başarımı sergilediği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—MIMO sistemleri, uzaysal modülasyon (SM), dik uzaysal modülasyon (QSM), uzay-zaman blok kodları (STBCs).

**Abstract**—In this paper, a new multiple-input multiple-output (MIMO) transmission system, which is called space-time quadrature spatial modulation (ST-QSM), and combines quadrature spatial modulation (QSM) with space time block codes (STBCs) in order to achieve second order transmit diversity gain, is proposed. In the proposed ST-QSM scheme, the number of transmit antennas is subdivided into two groups and STBC systems with two, four and eight antennas, depending on the number of antennas in each group, are used to transmit real and imaginary parts of two  $M$ -ary quadrature amplitude modulation ( $M$ -QAM) symbols. The theoretical error probability analysis of the ST-QSM system is performed and the average bit error probability (ABEP) is obtained. Moreover, it is shown by extensive computer simulations that the ST-QSM system shows better error performance than QSM, space-time coded spatial modulation (STBC-SM) and Alamouti STBC systems.

**Keywords**—MIMO systems, spatial modulation (SM), quadrature SM (QSM), space-time block codes (STBCs).

## I. GİRİŞ

Çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) sistemler, iletim kapasitesi

Bu çalışma 114E607 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

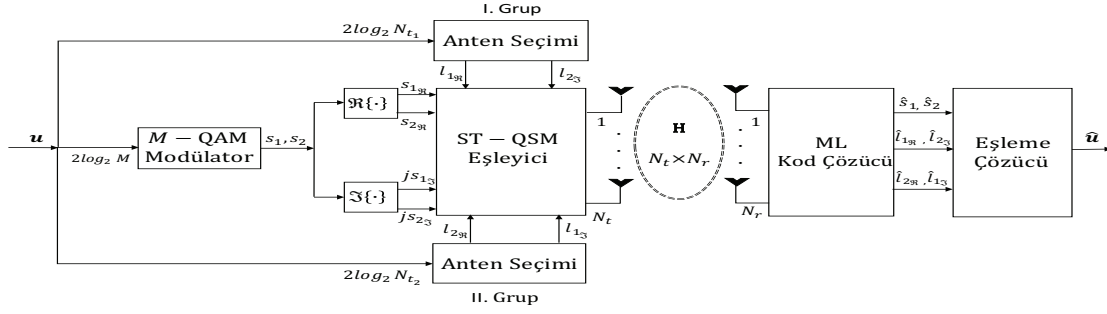
ve bant verimliliğini tek-girişli tek-çıkışlı (SISO) sistemlerine göre önemli ölçüde arttıran sistemlerdir. Son yıllarda, artan yüksek veri hızı ihtiyacı ve buna karşılık bant sınırlılığı, araştırmacıları uzaysal çoğullama (SMX) ve uzay zaman blok kodları (STBCs) gibi çoğullama veya çeşitleme kazancı sağlayan yüksek verimli yeni MIMO iletim sistemlerini geliştirmeye yöneltmektedir.

Uzaysal modülasyon (SM) [1] tekniğinde, geleneksel (SMX) sistemlerinden [2] farklı olarak mevcut verici antenlerden sadece biri etkinleştirilerek bilgi iletimi bu etkin anten üzerinden yapılmaktadır. Böylece SM sistemi, yalnızca tek bir radyo frekans (RF) zinciri kullanarak kanallar arası girişimi (ICI) engellemekte ve geleneksel SMX sistemlere nazaran alıcı kısımda sezim karmaşıklığını önemli derecede azaltmaktadır. SM tekniği, geleneksel SMX sistemlerine göre enerji verimliliği ve SISO sistemlere göre bant verimliliğinde önemli oranda bir artış sağladığı için son yıllarda, alternatif bir MIMO iletim tekniği olarak kabul görmektedir [3].

Uzay-zaman kodlu SM (STBC-SM) sistemi [4], Alamouti STBC [5] ile SM tekniğini biraraya getirerek, hem çoğullama hem de çeşitleme kazancı sağlayan özgün bir iletim tekniği olarak tasarlanmıştır. STBC-SM sisteminde, bilgi bitleri, iki  $M$ 'li faz kaydırmalı anahtarlama (PSK) veya dik genlik modülasyon (QAM) bilgi simgeleri ilgili etkin verici anten çifti üzerinden iletilmektedir.

Genelleştirilmiş SM sistemi (GSM) [6], etkin verici anten sayısı artırılarak SM sisteminin bant verimliliğini daha da arttırmayı amaçlayan bir iletim sistemidir. GSM sisteminde, etkin verici anten kombinasyonu üzerinden bilgi iletimi yapılmaktadır. Ancak, her bir etkin anten indisi üzerinden aynı veya farklı bilgi simgeleri iletildiği için etkin anten sayısı kadar RF zinciri kullanılmaktadır.

En güncel MIMO iletim sistemlerinden olan dik uzaysal modülasyon (QSM) [7] tekniğinde de etkin anten sayısı artırılarak bant verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır. QSM sisteminde, GSM sistemlerinden farklı olarak, karmaşık bir  $M$ -QAM işareti gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak her bir kısım birbirinden bağımsız olarak seçilen etkin anten indisleri üzerinden iletilmektedir. Böylece, QSM sistemi, tek bir RF zinciri kullanarak bant verimliliğini arttırmanın yanı sıra GSM sistemlerine göre enerji verimliliğini de arttırmaktadır.



Şekil 1. ST-QSM Sistem Modeli

Bu çalışmada, uzay-zaman kodlu QSM (ST-QSM) sistemi, yeni bir geniş ölçekli MIMO iletim sistemi olarak önerilmektedir. ST-QSM sisteminde, verici anten sayısı, her bir grubun verici antenler 2, 4 veya 8 olacak şekilde iki gruba ayrılmaktadır. Karmaşık iki  $M$ -QAM simgesi, gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak her bir kısım, birinci ve ikinci gruba ait birbirinden bağımsız antenler üzerinden iletilmektedir. Daha sonra, birinci ve ikinci grupların verici anten sayılarına göre 2, 4 veya 8 antenli STBC iletim tekniklerini kullanarak, ST-QSM iletim matrisi oluşturulmaktadır. Bu çalışmada, ST-QSM sisteminin ortalama bit hata olasılığı (ABEP) teorik olarak ve Monte Carlo benzetimleri ile elde edilmiştir. Ayrıca, aynı bant verimliliği altında ST-QSM sisteminin bit hata oranı (BER), QSM, STBC-SM ve Alamouti STBC sistemleri ile karşılaştırılarak, referans yapılarına göre daha iyi hata başarımı sağladığı gösterilmektedir.

Bildirinin geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm II'de sistem modeli sunulmuştur. Bölüm III'te sistemin hata analizi yapılmıştır. Bölüm IV'te bilgisayar benzetimleri verilmiş ve Bölüm V'te bildiri sonuçlandırılmıştır.

## II. SİSTEM MODELİ

Şekil 1'de ST-QSM sisteminin blok şeması verilmiştir. Buna göre, ST-QSM sisteminde, gelen bilgi, iki karmaşık  $M$ -QAM simgesi ve bu simgelerin gerçek ve sanal kısımlarının iletiminde kullanılan anten indisleri ile taşınmaktadır. Birinci ve ikinci gruptaki anten sayılarının 2, 4 veya 8 olmasına göre, sırasıyla Alamouti STBC [5], ABBA STBC [8] veya 8 antenli STBC [9] iletim prensipleri kullanılarak, iletim matrisi oluşturulmaktadır.  $x_{i\alpha}$ ,  $i = \{1, 2, \dots, 8\}$  birbirinden bağımsız  $M$ -li bilgi simgeleri olmak üzere, Alamouti STBC sisteminin genel iletim matrisi,  $(\cdot)^*$  karmaşık eşleniği göstermek üzere;

$$\mathbf{C}_2 = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} \\ -x_{12}^* & x_{11}^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. ABBA STBC sistemi, iki ardışık Alamouti STBC matrisinden oluşmaktadır ve iletim matrisi şu şekilde verilmektedir:

$$\mathbf{C}_4 = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ -x_{12}^* & x_{11}^* & -x_{14}^* & x_{13}^* \end{pmatrix}. \quad (2)$$

8 antenli STBC [9] sisteminin iletim matrisi ise

$$\mathbf{C}_8 = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} \\ -x_{12}^* & x_{11}^* & -x_{14}^* & x_{13}^* & -x_{16}^* & x_{15}^* & x_{18}^* & -x_{17}^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

olarak verilmektedir.

$N_t$  verici ve  $N_r$  alıcı anten sayısı olmak üzere,  $N_t \times N_r$

boyutlu bir MIMO sisteminde, verici antenler  $N_t$ , toplam anten sayıları sırasıyla  $N_{t1}$  ve  $N_{t2}$  ( $N_t = N_{t1} + N_{t2}$ ) olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bilgi iletiminde kullanılan iki karmaşık  $M$ -QAM simgeleri olan  $s_1$  ve  $s_2$ ,  $s_1 = s_{1R} + js_{1I}$  ve  $s_2 = s_{2R} + js_{2I}$  olmak üzere, gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak birinci veya ikinci gruba ait etkin antenler üzerinden iletilmektedir.  $s_1$  sembolünün gerçek kısmı  $s_{1R}$  ve  $s_2$  sembolünün sanal kısmı olan  $js_{2I}$ , birinci gruba ait,  $l_{1R}$ ,  $l_{2I} \in \{1, 2, \dots, N_{t1}\}$  olmak üzere, sırasıyla  $l_{1R}$  ve  $l_{2I}$  indisli etkin antenler üzerinden,  $s_2$  sembolünün gerçek kısmı  $s_{2R}$  ve  $s_1$  sembolünün sanal kısmı olan  $js_{1I}$ , ikinci gruba ait,  $l_{2R}$ ,  $l_{1I} \in \{1, 2, \dots, N_{t2}\}$  olmak üzere, sırasıyla  $l_{2R}$  ve  $l_{1I}$  indisli etkin antenler üzerinden iletilmektedir.  $\mathbf{a}^1 \in \mathbb{C}^{1 \times N_{t1}}$ , birinci gruba ait, ve  $\mathbf{b}^1 \in \mathbb{C}^{1 \times N_{t2}}$  ikinci gruba ait birinci zaman diliminde iletilen iletim vektörleri olmak üzere,  $N_{t1}$  antenli birinci gruba ve  $N_{t2}$  antenli ikinci gruba ait işaret matrisleri, (4)'te sırasıyla  $\mathbf{C}_{N_{t1}}$  ve  $\mathbf{C}_{N_{t2}}$  olarak verilmiştir:

$$\mathbf{C}_{N_{t1}} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}^1 \\ \mathbf{a}^2 \end{pmatrix} \quad \mathbf{C}_{N_{t2}} = \begin{pmatrix} \mathbf{b}^1 \\ \mathbf{b}^2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

$\mathbf{C}_{N_{t1}}$  ve  $\mathbf{C}_{N_{t2}}$  matrisleri,  $N_{t1}$  ve  $N_{t2}$  anten sayılarına bağlı olarak (1), (2) veya (3)'de verilen STBC iletim matrislerine karşılık gelmektedir. Böylece,  $\mathbf{a}^2 \in \mathbb{C}^{1 \times N_{t1}}$  ve  $\mathbf{b}^2 \in \mathbb{C}^{1 \times N_{t2}}$ , sırasıyla birinci ve ikinci gruplara ait, ikinci zaman diliminde iletilen iletim vektörleridir. Son olarak, ST-QSM sisteminin iletim matrisi şu şekilde oluşturulmaktadır:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^1 & \mathbf{b}^1 \\ \mathbf{b}^2 & \mathbf{a}^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

oluşturulmaktadır. ST-QSM sistemi ile elde edilen veri hızı  $m = \log_2 M + \log_2 N_{t1} + \log_2 N_{t2}$  bits/sn/Hz 'dir. ST-QSM sisteminin 4, 8 ve 16 verici antenli MIMO sistemler için tasarım örnekleri aşağıda verilmiştir.

### A. $N_t = 4$ için ST-QSM Yapısı

ST-QSM sisteminin  $N_t = 4$  olması durumunda genel iletim matrisi,  $x_{11}, x_{12} \in \{s_{1R}, js_{2I}, s_{1R} + js_{2I}, 0\}$  ve  $x_{21}, x_{22} \in \{s_{2R}, js_{1I}, s_{2R} + js_{1I}, 0\}$  olmak üzere,

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & | & x_{21} & x_{22} \\ -x_{22}^* & x_{21}^* & | & -x_{12}^* & x_{11}^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

olarak verilmektedir.

$2m$  uzunluğundaki  $\{01101101\}$  bilgi bit dizisi verici anten sayısı  $N_t = 4$  olan ve 4-QAM kullanılan bir MIMO sistemi üzerinden iletilmektedir. Verici antenler,  $N_{t1} = N_{t2} = 2$  olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Buna göre, ilk iki  $\{01\}$  bitleri,  $s_1 = -1 - j$  bilgi sembolüne ve sonraki  $\{10\}$  bitleri sırasıyla  $s_1$  sembolünün gerçek kısmı  $s_{1R} = -1$  ve sanal kısmı

$js_{1\mathfrak{S}} = -j$ 'yi iletmek üzere birinci gruba ait  $l_{1\mathfrak{R}} = 2$  ve ikinci gruba ait  $l_{1\mathfrak{S}} = 1$  etkin anten indislerini belirlemektedir. Bu durumda,  $s_1$  simgesinin iletimi  $\mathbf{x}_1 = \underbrace{[0 \ -1]_{N_{t_1}=2}} \mid \underbrace{[-j \ 0]_{N_{t_2}=2}}$

vektörü ile gösterilebilir. Benzer şekilde, geriye kalan  $\{1 \ 1\}$  bitleri  $s_2 = 1 - j$  bilgi sembolüne ve son  $\{0 \ 1\}$  bitleri sırasıyla  $s_2$  sembolünün gerçek kısmı  $s_{2\mathfrak{R}} = 1$  ve sanal kısmı  $js_{2\mathfrak{S}} = j$ 'yi iletmek üzere ikinci gruba ait  $l_{2\mathfrak{R}} = 1$  ve birinci gruba ait  $l_{2\mathfrak{S}} = 2$  etkin anten indislerini belirlemektedir.  $s_2$  simgesinin iletim vektörü ise  $\mathbf{x}_2 = \underbrace{[0 \ -j]_{N_{t_1}=2}} \mid \underbrace{[1 \ 0]_{N_{t_2}=2}}$

olarak gösterilmektedir. Bu durumda ST-QSM iletim matrisinin birinci zaman dilimine ait iletim vektörü  $[\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2] = [\mathbf{a}^1 \mid \mathbf{b}^1] = \underbrace{[0 \ -1 \ -j]_{N_{t_1}=2}} \mid \underbrace{[1 \ -j \ 0]_{N_{t_2}=2}}$  olarak sonuçlanmaktadır.

Her bir gruba ait verici anten sayıları  $N_{t_1} = N_{t_2} = 2$  olduğundan, (4)'te verilen  $\mathbf{C}_{N_{t_1}}$  ve  $\mathbf{C}_{N_{t_2}}$  işaret matrisleri, Alamouti STBC (1) yapısına karşılık gelmektedir. Bu durumda  $\mathbf{C}_{N_{t_1}} = \begin{bmatrix} 0 & -1-j \\ 1-j & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{C}_{N_{t_2}} = \begin{bmatrix} 1-j & 0 \\ 0 & 1+j \end{bmatrix}$  ve ST-QSM iletim matrisi (5)  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 & -1-j & 1-j & 0 \\ 0 & 1+j & 1-j & 0 \end{bmatrix}$  şeklinde oluşturulmaktadır.

### B. $N_t = 8$ ve $N_t = 16$ için ST-QSM Yapısı

$N_t = 8$  için ST-QSM iletim matrisi  $x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14} \in \{s_{1\mathfrak{R}}, js_{2\mathfrak{S}}, s_{1\mathfrak{R}} + js_{2\mathfrak{S}}, 0\}$  ve  $x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24} \in \{s_{2\mathfrak{R}}, js_{1\mathfrak{S}}, s_{2\mathfrak{R}} + js_{1\mathfrak{S}}, 0\}$  olmak üzere,

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ -x_{22}^* & x_{21}^* & -x_{24}^* & x_{23}^* & -x_{12}^* & x_{11}^* & -x_{14}^* & x_{13}^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

olarak verilmektedir. Verici antenler,  $N_{t_1} = N_{t_2} = 4$  olacak şekilde iki gruba ayrılmaktadır. Gelen bilgi bitleri ile karmaşık  $s_1 = 3 + j7$ ,  $s_2 = -1 + j5$  simgeleri ve  $l_{1\mathfrak{R}} = 2$ ,  $l_{1\mathfrak{S}} = 1$ ,  $l_{2\mathfrak{R}} = 3$  ve  $l_{2\mathfrak{S}} = 4$  etkin anten indislerinin belirlendiğini varsayalım. Bu durumda,  $\mathbf{x}_1$  ve  $\mathbf{x}_2$  simgelerine ait iletim vektörleri  $\mathbf{x}_1 = \underbrace{[0 \ 3 \ 0 \ 0]_{N_{t_1}=4}} \mid \underbrace{[j7 \ 0 \ 0 \ 0]_{N_{t_2}=4}}$  ve

$\mathbf{x}_2 = \underbrace{[0 \ 0 \ 0 \ j5]_{N_{t_1}=4}} \mid \underbrace{[0 \ 0 \ -1 \ 0]_{N_{t_2}=4}}$  olmak üzere ve bu durumda,  $\mathbf{x}_1$

ve  $\mathbf{x}_2$  vektörlerinin toplamından oluşan ST-QSM matrisinin birinci zaman aralığındaki iletim vektörü  $[\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2] = [\mathbf{a}^1 \mid \mathbf{b}^1] = \underbrace{[0 \ 3 \ 0 \ j5]_{N_{t_1}=4}} \mid \underbrace{[j7 \ 0 \ -1 \ 0]_{N_{t_2}=4}}$  olarak elde edilmektedir. Birinci ve

ikinci gruba ait anten sayıları  $N_{t_1} = N_{t_2} = 4$  olduğundan, (4)'te verilen  $\mathbf{C}_{N_{t_1}}$  ve  $\mathbf{C}_{N_{t_2}}$  matrisleri, (2)'deki ABBA STBC matrisine karşılık gelmektedir. Böylece, iletim matrisi (5),  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 0 & j5 & j7 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -j7 & 0 & -1 & -3 & 0 & j5 & 0 \end{bmatrix}$  şeklinde oluşturulmaktadır.

Benzer şekilde,  $N_t = 16$  durumunda, verici antenler,  $N_{t_1} = N_{t_2} = 8$  olacak şekilde iki gruba ayrılmaktadır. Birinci ve ikinci gruba ait anten sayıları  $N_{t_1} = N_{t_2} = 8$  olduğundan, her bir gruba ait  $\mathbf{C}_{N_{t_1}}$  ve  $\mathbf{C}_{N_{t_2}}$  matrisleri (3)'te verilen 8 antenli STBC matrisine karşılık gelmektedir. Son olarak,  $N_t = 16$  için ST-QSM iletim matrisi (5)'ten oluşturmaktadır.

### C. ST-QSM Sisteminin Alıcı Yapısı

ST-QSM iletim matrisi  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{2 \times N_r}$ ,  $\mathcal{CN}(0, N_0)$  dağılımlı toplamsal beyaz Gauss gürültü (AWGN) matrisi ve

$\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_r}$ ,  $\mathcal{CN}(0, 1)$  dağılımlı kanal matrisi olmak üzere, alınan işaret matrisi  $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{2 \times N_r}$ , şu şekilde elde edilmektedir:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{H} + \mathbf{N}. \quad (8)$$

ST-QSM sisteminin alıcı kısmında,  $\mathbf{H}$  matrisinin kanal kat-sayılarının tamamen bilindiği kabul edilerek, en büyük olasılıklı (ML) sezici kullanılmaktadır. ML sezici, karmaşık  $s_1$  ve  $s_2$  işaretlerinin elemanı oldukları  $M$ -QAM işaret kümesinin bütün elemanları ve birinci ve ikinci anten gruplarına ait bütün anten indisleri dikkate alınarak  $\hat{s}_1, \hat{s}_2$  sembollerine ve  $\hat{l}_{1\mathfrak{R}}, \hat{l}_{1\mathfrak{S}}, \hat{l}_{2\mathfrak{R}}$  ve  $\hat{l}_{2\mathfrak{S}}$  anten indislerine ortak karar vermektedir.

$$[\hat{s}_1, \hat{s}_2, \hat{l}_{1\mathfrak{R}}, \hat{l}_{1\mathfrak{S}}, \hat{l}_{2\mathfrak{R}}, \hat{l}_{2\mathfrak{S}}] = \arg \min_{s_1, s_2, l_{1\mathfrak{R}}, l_{1\mathfrak{S}}, l_{2\mathfrak{R}}, l_{2\mathfrak{S}}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\mathbf{H}\|_F^2. \quad (9)$$

(9)'da  $\|\cdot\|$  Frobenius normunu göstermektedir.

### III. ST-QSM SİSTEMİNİN HATA ANALİZİ

Bu bölümde, ST-QSM sisteminin hata analizi yapılmıştır. Gönderilen  $\mathbf{X}_k$  matrisinin, alıcıda hatalı bir şekilde  $\hat{\mathbf{X}}_l$ 'e karar verildiği göz önünde bulundurularak ortalama bit hata olasılığı (ABEP) için bir üst sınır şu şekilde elde edilmiştir:

$$P_b \approx \frac{1}{2^{2m}} \sum_{k=1}^{2m} \sum_{l=1}^{2m} \frac{P(\mathbf{X}_k \rightarrow \hat{\mathbf{X}}_l) e(\mathbf{X}_k, \hat{\mathbf{X}}_l)}{2m}. \quad (10)$$

(10)'da,  $P(\mathbf{X}_k \rightarrow \hat{\mathbf{X}}_l)$  çiftsel hata olasılığı (PEP) ve  $e(\mathbf{X}_k, \hat{\mathbf{X}}_l)$  her bir hata olayında,  $\mathbf{X}_k$  ve  $\hat{\mathbf{X}}_l$  arasındaki hatalı bit sayısını göstermektedir. ST-QSM sisteminin koşullu çiftsel hata olasılığı (CPEP) [10]

$$P(\mathbf{X}_k \rightarrow \hat{\mathbf{X}}_l | \mathbf{H}) = Q \left( \sqrt{\frac{\|(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_l)\mathbf{H}\|_F^2}{2N_0}} \right) \quad (11)$$

şeklinde gösterilmektedir.  $Q(x)$ ,  $Q$ -işlevi olmak üzere,  $Q(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp(-x^2/\sin^2 \theta) d\theta$  alternatif gösterimi ile CPEP:

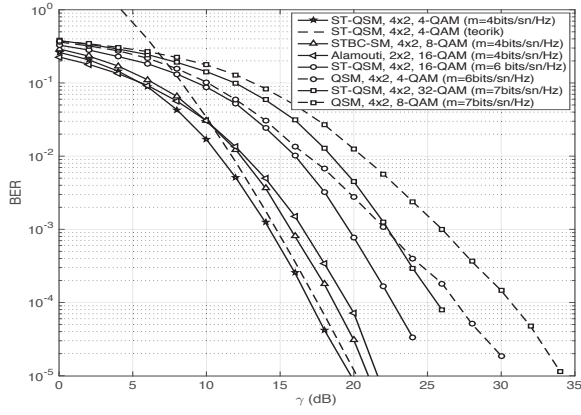
$$P(\mathbf{X}_k \rightarrow \hat{\mathbf{X}}_l | \mathbf{H}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp \left( -\frac{\|(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_l)\mathbf{H}\|_F^2}{4N_0 \sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (12)$$

ile hesaplanmaktadır. Bu durumda PEP, (12)'nin, moment üreteç matrisi (MGF) yaklaşımı [10] ile  $\mathbf{H}$  matrisi üzerinden ortalaması alınarak şu şekilde elde edilmektedir:

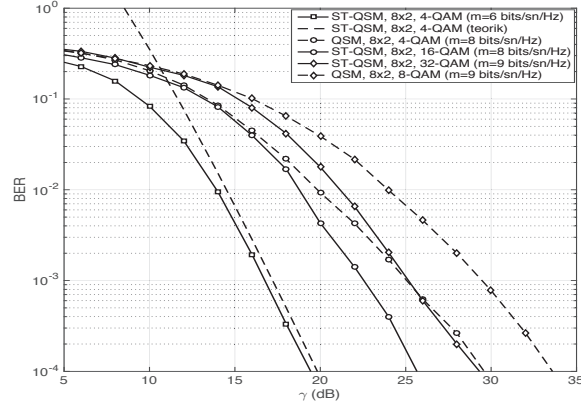
$$P(\mathbf{X}_k \rightarrow \hat{\mathbf{X}}_l) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left( \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta + \frac{c_{1k,l}}{4N_0}} \right)^{N_r} \left( \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta + \frac{c_{2k,l}}{4N_0}} \right)^{N_r} d\theta. \quad (13)$$

(13)'de  $c_{1k,l}$  ve  $c_{2k,l}$ ,  $(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_l)(\mathbf{X}_k - \hat{\mathbf{X}}_l)^H$  matrisinin sıfır olmayan özdeğerlerini göstermektedir. Önerilen sistemde, (5)'te verilen özel yapısı nedeniyle sıfırdan farklı iki özdeğer vermektedir.  $c_{1k,l} = c_{2k,l} = c_{k,l}$  olması durumunda PEP:

$$P(\mathbf{X}_k \rightarrow \hat{\mathbf{X}}_l) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left( \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta + \frac{c_{k,l}}{4N_0}} \right)^{2N_r} d\theta \quad (14)$$



Şekil 2. 4, 6 ve 7 bits/sn/Hz bant verimliliği için  $4 \times 2$  ST-QSM,  $4 \times 2$  QSM,  $4 \times 2$  STBC-SM ve  $2 \times 2$  Alamouti STBC sistemlerinin BER başarımları



Şekil 3. 6, 8 ve 9 bits/sn/Hz bant verimlilikleri için  $8 \times 2$  ST-QSM ve  $8 \times 2$  QSM sistemlerinin BER başarımları

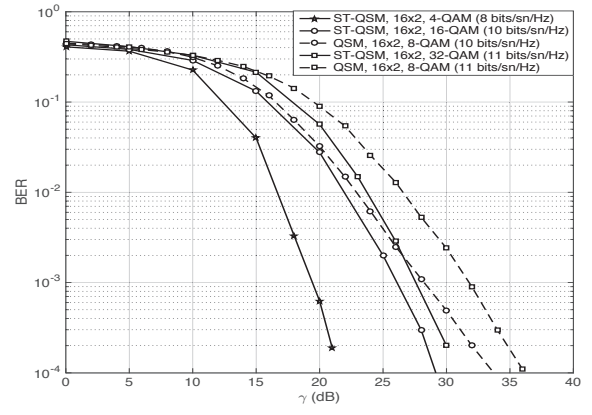
(14)'e indirgenmektedir.

#### IV. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, ST-QSM sisteminin  $N_t = 4$  ve 8 durumları için teorik ABEP ve bilgisayar benzetim sonuçları verilmiştir. Ayrıca, farklı bant verimlilikleri altında ST-QSM sisteminin, QSM [7], Alamouti STBC [5] ve STBC-SM [4] ile bit hata oranı karşılaştırılmaları verilmiştir.  $\gamma$  alıcısındaki işaret gürültü oranı (SNR) olmak üzere, hata başarımları eğrileri  $\gamma$  değerlerine göre elde edilmiştir. Bütün durumlar için alıcı anten sayısı  $N_r = 2$  olup ve  $M$ -QAM işaret kümesinde Gray eşleme kullanılmıştır.

Şekil 2'de,  $4 \times 2$  ST-QSM ve QSM sistemleri için 6, 7 ve bits/sn/Hz bant verimlilikleri altında ST-QSM ve QSM sistemlerinin BER başarımları karşılaştırılmıştır. ST-QSM sisteminin QSM'e göre oldukça iyi bir başarımları sağladığı görülmektedir.  $4 \times 2$  ST-QSM sisteminin, ABEP eğrileri teorik olarak ve bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiştir. Ayrıca, 4 bits/sn/Hz bant verimliliği için  $4 \times 2$  ST-QSM sistemi,  $4 \times 2$  STBC-SM ve  $2 \times 2$  Alamouti STBC sistemleri ile BER başarımları karşılaştırılmıştır. ST-QSM sisteminin, referans sistemlere oranla daha iyi hata başarımları sergilediği görülmektedir.

Şekil 3'te  $8 \times 2$  ST-QSM sisteminin 4-QAM için ABEP değerleri teorik olarak ve bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiştir. Teorik ve benzetim sonuçlarının uyum içerisinde oldukları açıkça görülmektedir. Ayrıca, Şekil 3'te 8 ve 9 bits/sn/Hz ve Şekil 4'te  $16 \times 2$  sisteminin 8, 10 ve 11 bits/sn/Hz



Şekil 4. 8, 10 ve 11 bits/sn/Hz bant verimlilikleri için  $16 \times 2$  ST-QSM ve  $16 \times 2$  QSM sistemlerinin BER başarımları

bant verimlilikleri için ST-QSM ve QSM sistemlerinin BER karşılaştırılmaları verilmiştir. ST-QSM sisteminin verici anten çeşitlenmesinden dolayı QSM sistemine göre daha iyi hata başarımları sağladığı görülmektedir.

#### V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, QSM sistemi ve STBC sistemlerinin birleştirilmesi ile oluşturulan ve ikinci dereceden verici anten çeşitlenmesi sağlayan yeni bir geniş ölçekli MIMO iletim sistemi olarak tasarlanan ST-QSM şeması önerilmiştir. Önerilen ST-QSM sisteminin, hata analizi yapılarak ABEP değerleri teorik olarak ve bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiştir. Ayrıca, ST-QSM sisteminin BER başarımları aynı bant verimlilikleri altında QSM, STBC-SM ve Alamouti STBC sistemleri ile de karşılaştırılıp, bu referans yapılaraya göre daha iyi başarımları sergilediği gösterilmiştir.

#### KAYNAKÇA

- [1] P. Yang, M. Di Renzo, Y. Xiao, S. Li, and L. Hanzo, "Design guidelines for spatial modulation," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 17, no. 1, pp. 6–26, 2015.
- [2] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Lab. Tech. J.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–59, 1996.
- [3] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, Jul. 2016.
- [4] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Space-time block coded spatial modulation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 3, pp. 823–832, Mar. 2011.
- [5] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, Oct. 1998.
- [6] J. Wang, S. Jia, and J. Song, "Generalised spatial modulation system with multiple active transmit antennas and low complexity detection scheme," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 4, pp. 1605–1615, Apr. 2012.
- [7] R. Mesleh, S. S. Ikki, and H. M. Aggoune, "Quadrature spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 6, pp. 2738–2742, Jun. 2015.
- [8] O. Tirkkonen, A. Boariu, and A. Hottinen, "Minimal non-orthogonality rate 1 space-time block code for 3+ tx antennas," in *Symp. Spread-Spectrum Techn. Appl. (ISSSTA 2000)*. IEEE, pp. 429–432, Sept. 2000.
- [9] H. Jafarkhani, *Space-time coding: theory and practice*. Cambridge University press, 2005.
- [10] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*. John Wiley & Sons, 2005.