

İki Yönlü Dik Uzaysal Modülasyon

Two-way Quadrature Spatial Modulation

Zehra Yiğit, Ertuğrul Başar

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak, İstanbul.

yigitz@itu.edu.tr, basarer@itu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, iki kullanıcının dik uzaysal modülasyon (quadrature spatial modulation (QSM)) iletim tekniği kullanarak, yarı çift-yönlü (half-duplex) bir röle yardımı ile haberleşmesini sağlayan iki-yönlü QSM sistemi önerilmiştir. Buna göre, birinci zaman diliminde, eşit hızlı iki kullanıcı, bilgilerini, QSM iletim tekniği ile yarı çift-yönlü bir röleye iletmektedir. İkinci zaman diliminde ise, iki kullanıcıdan röleye gelen bilgi simgeleri ortak olarak çözüldükten sonra bit düzeyinde XOR (ayrıcılık veya) işlemi uygulanarak, QSM iletim tekniği ile kullanıcılara gönderilmektedir. Her kullanıcı, röleden gönderilen bilgi ile kendi bilgisine XOR işlemi uygulayarak diğer kullanıcının bilgisine ulaşmaktadır. QSM için tasarlanan sistem, aynı şekilde referans bir yapı olabilmeye açısından uzaysal modülasyon (spatial modulation (SM)) sistemi için de gerçekleştirilmiştir. İki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin kuramsal hata analizi yapılarak ortalama bit hata olasılığı (ABEP) elde edilmiştir. Ayrıca farklı bant verimlilikleri ve MIMO yapıları için iki-yönlü QSM ve iki-yönlü SM sistemlerinin hata başarımları karşılaştırılmıştır.

1. Giriş

İlk kez üçüncü nesil haberleşme sistemleri ile hayatımıza giren çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) iletim teknikleri telsiz haberleşme sistemlerinin hizmet kalitesini, tek-girişli tek-çıkışlı (SISO) iletim tekniklerine göre önemli derecede artırmıştır. MIMO sistemlerinde çoğullama ve çeşitleme kazancı sağlamak için sırasıyla uzaysal çoğullama (spatial multiplexing (SMX)) ve uzay-zaman blok kodlama (space-time block coding (STBC)) gibi iletim teknikleri tasarlanmıştır. STBC iletim teknikleri ile bilginin, farklı zaman aralıklarında, farklı antenler üzerinden alıcıya ulaştırılarak verici anten çeşitlemesi elde edilmesi amaçlanmaktadır [1]. SMX teknikleri ile birden çok bilgi işaretinin verici antenler üzerinden aynı anda alıcıya ulaştırılması sağlanmaktadır. Literatürde sıkça karşılaşılan SMX iletim tekniklerinden biri olan Vertical-Bell Labs layered space-time (V-BLAST) [2] tekniğinde, bütün verici antenlerin aynı anda iletimde olması, alıcı kısmında üssel olarak artan optimum kod çözme karmaşıklığına ve kanallar arası girişim (inter-channel interference (ICI))'e neden olmaktadır. V-BLAST iletim tekniğinde, alıcıda daha düşük kod çözme karmaşıklığı sağladıkları için optimum hata başarımları sağlayan en büyük olabirlikli (maximum likelihood (ML)) sezim tekniği yerine en küçük karesel hata (minimum mean square error (MMSE)) gibi optimum olmayan alıcılar kullanılmaktadır. Bu da hata başarımlarını oldukça kötüleştirir.

Uzaysal modülasyon (spatial modulation (SM)) [3] sisteminde, bilgi, faz kaydırmalı anahtarlama (phase shift keying

(PSK)) veya dik genlik modülasyonu (quadrature amplitude modulation (QAM)) işaret kümelerinin elemanlarının yanı sıra anten indisleri ile de taşınmaktadır. SM tekniğinde, geleneksel MIMO iletim tekniklerinden farklı olarak, verici antenlerden sadece biri etkinleştirilerek bilginin bu etkin anten indisi üzerinden iletilmesi sağlanmaktadır. Böylece, alıcıda hem ICI girişim oluşmamakta, hem de sezim karmaşıklığı SMX sistemlere göre oldukça azalmaktadır. Bu da SM tekniğini alternatif bir MIMO iletim tekniği haline getirmektedir [4, 5].

Literatürde SM üzerine yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Sadece anten indislerini bilgi taşımak için kullanılan uzay kaydırmalı anahtarlama (space-shift keying (SSK)) [6] tekniği, SM yaklaşımının işbirlikli iletişim sistemlerine uygulandığı [7, 8] iletim teknikleri, klasik SM sisteminin etkin anten sayısı artırılarak çoğullama kazancı sağlayan genelleştirilmiş SM (generalised SM (GSM)) sistemleri [9–12] ve Alamouti STBC iletim ilkesini kullanarak, SM'e verici anten çeşitlemesi kazandıran STBC-SM [13], SM üzerine yapılmış en dikkat çeken çalışmalardandır.

Dik uzaysal modülasyon (quadrature spatial modulation (QSM)) [14] sistemi ise son zamanlarda SM üzerine yapılan en özgün çalışmalardandır. QSM sisteminde, M modülasyon seviyesi olmak üzere, karmaşık M -QAM işaret kümesine ait bilgi simgesi, gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak, her bir kısım SM yaklaşımı ile ilişkin etkin antenleri üzerinden birbirinden bağımsız bir şekilde iletilmektedir. Bilgi simgesinin, gerçek ve sanal kısımlarını ileten taşıyıcılar (sin ve cos) arasındaki 90° 'lik faz farkından dolayı, alıcıda ICI oluşmamaktadır. QSM sistemi, literatürdeki SM üzerine yapılmış en güncel çalışmalardan biri olmasına rağmen, araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmektedir.

Bu çalışmada, QSM sisteminin, işbirlikli sistemlere uyarlandığı iki-yönlü QSM sistemi önerilmiştir. Bu sistemde, QSM iletim tekniğini kullanan iki kullanıcı, bir yarı-çift yönlü (half-duplex) röle yardımı ile iletişmektedir. Birinci zaman diliminde, her bir kullanıcıdan röleye QSM iletim tekniği kullanılarak bilgi simgeleri gönderilmektedir. Röle, aldığı işaretleri çözerek, kullanıcılara ait bilgi bitlerine birlikte karar vermektedir. Daha sonra, iki kullanıcıya ait kestirilen bilgiler bit düzeyinde XOR (ayrıcılık veya) işlemine tabi tutulmakta ve yeni oluşturulan bit dizisinin karşılık geldiği QSM iletim vektörü, ikinci zaman diliminde kullanıcılara tekrar gönderilmektedir. Her bir kullanıcı, röleden aldığı bilgiyi bit düzeyinde çözdükten sonra kendi bilgisine XOR işlemine tabi tutarak karşıdaki kullanıcının bilgisine ulaşmaktadır. Önerilen bu iki-yönlü iletim sistemi, iki-yönlü SM adı altında, klasik SM sistemine de uyarlanmıştır. İki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin kuramsal hata analizi yapılarak ortalama bit hata olasılığı (average bit error probability (ABEP)) başarımları elde edilmiştir. Ayrıca, farklı

MIMO yapıları için, iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin BER başarımları bilgisayar benzetimleri ile gerçekleştirilmiştir.

Gösterimler: Bu çalışmada, matrisler kalın büyük harfler ile ve vektörler ise kalın küçük harfler ile gösterilmektedir. $(\cdot)^T$, $(\cdot)^*$ ve $(\cdot)^H$ sırasıyla evriği, karmaşık eşleniği ve Hermisyen eşleniğini göstermektedir. $\|\cdot\|$, matrisler için Frobenius ve vektörler için ise Öklid normunu göstermek için kullanılmaktadır. $\det(\cdot)$, $\text{rank}(\cdot)$ sırasıyla determinanı ve rankı göstermektedir. $\Re(\mathbf{x})$ karmaşık \mathbf{x} vektörünün gerçek kısmını, $\Im(\mathbf{x})$ sanal kısmını, M , işaret kümesinin eleman sayısını, $P(\cdot)$ bir olayın olasılığını, $Q(\cdot)$, standart Gauss dağılımının kuyruk olasılığını, $\mathcal{CN}(m_x, \sigma_x^2)$, m_x ortalamalı, σ_x^2 varyanslı karmaşık Gauss dağılımını, \oplus ayrıcalıklı veya (XOR) işlemini göstermektedir.

2. Dik Uzaysal Modülasyon (QSM)

Güncel SM iletim tekniklerinden biri olan dik uzaysal modülasyon (QSM) [14], GSM sistemlerinde olduğu gibi iletimdeki anten sayısı artırılarak klasik SM yapısının bant verimliliğini arttırmak için tasarlanan özgün bir MIMO iletim tekniğidir. QSM tekniğinde, M -QAM'li karmaşık bilgi işareti gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak ilişkin etkin antenleri üzerinden iletilmektedir.

İşaret uzayı Şekil 1'de verilen QSM tekniğinde, $u = \log_2(M) + 2 \log_2(N_t)$ uzunluğundaki bit dizisinin, ilk $\log_2(M)$ biti ile belirlenen karmaşık $s = s_{\Re} + js_{\Im}$ bilgi simgesi, gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak bu bilgi simgesinin gerçek kısmı (s_{\Re}) ve sanal kısmı (s_{\Im}), sırasıyla her biri $\log_2(N_t)$ bit ile belirlenen $l_{1\Re}$ ve $l_{1\Im}$ indisli antenler üzerinden, birbirlerinden bağımsız olarak klasik SM yaklaşımı ile iletilmektedir, $l_{\Re}, l_{\Im} \in \{1, 2, \dots, N_t\}$. QSM sisteminde, s_{\Re} ve s_{\Im} ileten taşıyıcılar arasındaki 90° lik faz farkı alıcıda, ICI oluşmasının önüne geçmektedir. QSM için iletim vektörü: $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$:

$$\mathbf{x} = [0 \dots 0 \underbrace{s_{\Re}}_{l_{\Re}} 0 \dots 0 \underbrace{js_{\Im}}_{l_{\Im}} 0 \dots 0]^T \quad (1)$$

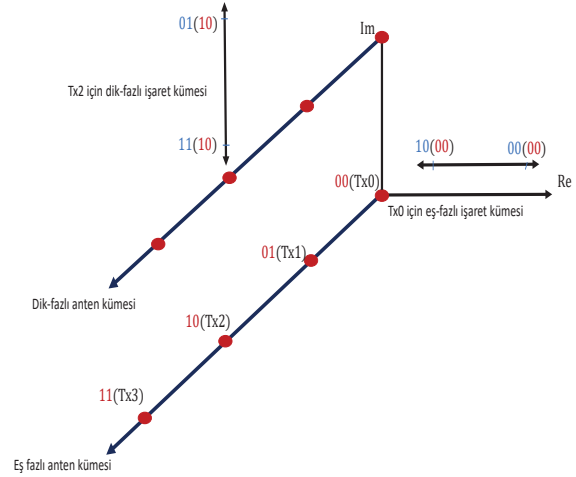
olarak gösterilebilmektedir. \mathbf{H} ve \mathbf{n} sırasıyla elemanları $\mathcal{CN}(0, N_0)$ ve $\mathcal{CN}(0, 1)$ dağılımlı ve bağımsız ve eşdağılımlı (independent and identically distributed (i.i.d)) raslantı değişkenlerinden oluşmakta ve alıcıya gelen işaret şu şekildedir:

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_{l_{\Re}} s_{\Re} + j \mathbf{h}_{l_{\Im}} s_{\Im} + \mathbf{n}. \quad (2)$$

$\mathbf{h}_{l_{\Re}}$ ve $\mathbf{h}_{l_{\Im}}$ sırasıyla \mathbf{H} kanal matrisinin l_{\Re} ve l_{\Im} 'inci sütun vektörleri olmak üzere QSM yapısının alıcı kısmında, ML sezim tekniği kullanılarak M -QAM işaret kümesinin iletilen karmaşık s bilgi simgesine ve etkin anten indislerine ortak karar verilmektedir:

$$\left[\hat{l}_{\Re}, \hat{l}_{\Im}, \hat{s} \right] = \arg \min_{l_{\Re}, l_{\Im}, s} \|\mathbf{y} - (\mathbf{h}_{l_{\Re}} s_{\Re} + j \mathbf{h}_{l_{\Im}} s_{\Im})\|^2. \quad (3)$$

QSM iletim tekniği, oldukça yeni bir çalışma olmasına rağmen araştırmacılar tarafından büyük bir ilgi görmektedir. [14]'te önerilen QSM sisteminin, kusurlu veya kusursuz kanal kestirimi durumunda Rayleigh [15], Nakagami [16], Rician [17], Weibull [18] ve α - μ , κ - μ ve η - μ gibi sönümlenmeli kanallar için [19, 20] hata başarımları analizi yapılmıştır. QSM sisteminin, alıcıda, optimum sezicisinin kod çözme karmaşıklığını düşürmek için sıkıştırılmış algılama (compressive sensing (CS)) [21, 22],



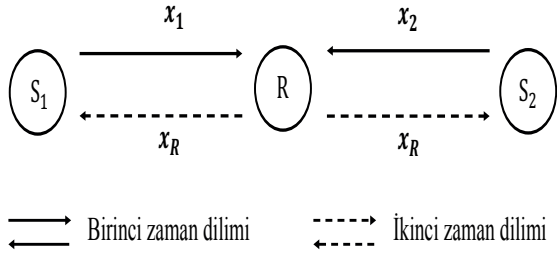
Şekil 1: QSM sisteminin işaret uzayı.

küresel kod çözme (sphere decoder (SD)) [23], ilişkili ve ilişkisiz Rayleigh kanallar için MMSE tabanlı [24] düşük karmaşıklıkla alıcı yapıları tasarlanmıştır. QSM ve klasik işbirlikli iletişim sistemlerinin bir araya getirilmesi ile [25, 26] ve iletim bandının daha verimli kullanılması için QSM tabanlı bilişsel radyo (cognitive radio) teknikleri [27–29] geliştirilmiştir. Ayrıca, [30–32]'de yüksek-hızlı kablosuz iletim tekniklerinde kullanılan ve yeni nesil haberleşme sistemleri için umut verici bir iletim tekniği olarak görülen milimetre dalga (millimeter-wave (mmW)) teknolojileri de QSM sistemi ile biraraya getirilerek QSM tabanlı mmW sistemler tasarlanmıştır. Ayrıca QSM'den esinlenerek yüksek hızlı bir SM şeması önerilmiştir [33].

3. İki Yönlü Dik Uzaysal Modülasyon

Ağ kodlama (network coding), ilk kez [34]'de, birden fazla kullanıcının, bir röle yardımı ile bilgi alış-verişinde buldukları işbirlikli iletişim sistemleri olarak tanımlanmıştır. Ağ kodlama tekniğinde, iki farklı kullanıcıdan röleye iletilen bilgi, doğrudan kullanıcılara iletilmek yerine, bit seviyesinde XOR işlemine tabi tutulmakta ve oluşan yeni bilgi, kullanıcılara aynı anda gönderilmektedir. Daha sonra, her bir kullanıcı, gelen bilgiden, kendi bilgisini çıkararak karşı kullanıcının bilgisini elde etmektedir. İki kullanıcının, fiziksel katmanda, ağ kodlama tekniği ile bilgi alış-verişi yapma fikri, ilk kez [35]'de ortaya atılmış ve daha sonraki çalışmalarda, fiziksel katman ağ kodlama (physical layer network coding (PLNC)) [36] olarak adlandırılmıştır. PLNC'nin bir uygulaması olarak iki-yönlü röleli iletişim sistemleri (two-way relay communication (TWRC)) geliştirilmiştir [37]. Literatürde, TWRC sisteminin, klasik MIMO iletim teknikleri ile birleştirildiği [38, 39] çalışmaların yanı sıra, alternatif bir MIMO iletim tekniği olarak görülen klasik SM sistemiyle birleştirildiği [40, 41] çalışmalar da mevcuttur.

Önerilen iki yönlü iletim tekniğinde, S_1 ve S_2 kullanıcıları klasik SM veya QSM iletim sistemlerini kullanarak iki zaman aralığında sadece veri alan veya veri ileten yarı çift-yönlü bir röle (R) yardımıyla iletişime geçmektedir. Birinci zaman aralığında, her iki kullanıcıdan gelen işaretler R 'de ortak olarak çözülür. İkinci zaman diliminde R 'de bit düzeyinde kestirilen işaretler XOR işlemi ile tek bir SM/QSM işareti olarak S_1 ve S_2 kul-



Şekil 2: İki-yönlü QSM ve SM sistem şeması.

lanıcılarına tekrar gönderilmektedir. R 'den gönderilen işaret S_1 ve S_2 kullanıcılarında yine bit düzeyinde çözülmektedir. Her bir kullanıcıda çözülen bitler kendi bilgi bitleri ile XOR işlemine tabi tutularak karşıdaki kullanıcının bilgisi elde edilmektedir.

Aynı veri hızındaki S_1 ve S_2 kullanıcılarına ait bilgi bit dizileri \mathbf{u}_1 ve \mathbf{u}_2 sırasıyla \mathbf{x}_1 ve \mathbf{x}_2 QSM iletim vektörlerine dönüştürmektedir. Birinci zaman diliminde, $\mathbf{x}_1 \in \mathbb{C}^{N_{t_1} \times 1}$ ve $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{C}^{N_{t_2} \times 1}$ işaretleri, sırasıyla N_{t_1} ve N_{t_2} verici antenler üzerinden, N_r antenli R rölesine iletilmektedir. $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N_r \times N_{t_1}}$, S_1 ve R , $\mathbf{H}_2 \in \mathbb{C}^{N_r \times N_{t_2}}$, S_2 ve R arasındaki kanal matrisleri olmak üzere R 'de alınan $\mathbf{y}_R \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ işaret vektörü:

$$\mathbf{y}_R = \mathbf{H}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{n}_R \quad (4)$$

olarak gösterilmektedir. Alınan \mathbf{y}_R işareti, optimum ML sezici yardımıyla çözülmektedir:

$$[\hat{\mathbf{x}}_1, \hat{\mathbf{x}}_2] = \arg \min_{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2} \|\mathbf{y}_R - (\mathbf{H}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_2 \mathbf{x}_2)\|^2. \quad (5)$$

Sırasıyla, (5)'te kestirilen $\hat{\mathbf{x}}_1$ ve $\hat{\mathbf{x}}_2$ QSM vektörlerine karşılık gelen $\hat{\mathbf{u}}_{R_1}$ ve $\hat{\mathbf{u}}_{R_2}$ bit dizilerine, XOR işlemi uygulanarak \mathbf{u}_R bit dizisi elde edilmektedir:

$$\mathbf{u}_R = \hat{\mathbf{u}}_{R_1} \oplus \hat{\mathbf{u}}_{R_2}. \quad (6)$$

İkinci zaman diliminde, \mathbf{u}_R 'ye karşılık gelen $\mathbf{x}_R \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ QSM işareti S_1 ve S_2 kullanıcılarına gönderilmektedir. Bu durumda, $i \in \{1, 2\}$ olmak üzere i 'nci kullanıcının aldığı işaret vektörü $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^{N_{t_i} \times 1}$:

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_i^T \mathbf{x}_R + \mathbf{n}_i \quad (7)$$

olarak gösterilebilmektedir. (7)'de $\mathbf{H}_i^T \in \mathbb{C}^{N_r \times N_{t_i}}$, \mathbf{H}_i kanal matrisinin evriğini göstermektedir. S_i kullanıcılarına gönderilen \mathbf{x}_R işareti, yine ML sezici yardımıyla çözülmekte ve her bir kullanıcıda, $\hat{\mathbf{x}}_{R_i} \in \mathbb{C}^{N_{t_i} \times 1}$ olarak kestirilmektedir:

$$\hat{\mathbf{x}}_{R_i} = \arg \min_{\mathbf{x}_R} \|\mathbf{y}_i - \mathbf{H}_i^T \mathbf{x}_R\|^2. \quad (8)$$

S_i kullanıcılarında kestirilen $\hat{\mathbf{x}}_{R_i}$ işaret vektörlerinin bit düzeyinde karşılıkları \mathbf{b}_i bit dizisi olmak üzere, her bir kullanıcı, karşı kullanıcının bilgisine, şu şekilde karar vermektedir:

$$\hat{\mathbf{u}}_2 = \mathbf{u}_1 \oplus \mathbf{b}_1, \quad \hat{\mathbf{u}}_1 = \mathbf{u}_2 \oplus \mathbf{b}_2. \quad (9)$$

Önerilen iki yönlü QSM yapısında, aynı hızdaki S_1 ve S_2 kullanıcılarının anten sayıları eşit ($N_{t_1} = N_{t_2} = N_s$) olarak kabul edilmekte, ancak R 'deki alıcı anten sayısı N_r , N_t 'den

Gönderim Tarihi: 27/07/2017 **Kabul Tarihi:** 13/03/2018

aynı veya farklı anten sayısına sahip olabilmektedir. Böylece, sırasıyla M ve M_R , \mathbf{x}_i ve \mathbf{x}_R QSM vektörlerini oluşturan karmaşık simgelerin modülasyon seviyeleri olmak üzere, sistemin bant verimliliği $m = 2 \log_2(N_s) + \log_2(M) = 2 \log_2(N_r) + \log_2(M_R)$ [bit/sn/Hz] olmaktadır. Önerilen iki-yönlü QSM sistemi, $N_r \geq N_s$ için tasarlanmıştır. $N_r > N_s$ olması durumunda; ikinci zaman diliminde, birinci zaman dilimine kıyasla QSM sisteminin etkin anten indislerini belirlemek için daha fazla bilgi bitine ihtiyaç duyulmakta ($2 \log_2 N_r > 2 \log_2 N_s$) dolayısıyla, aynı hızda iletim yapabilmeye için geriye kalan bilgi bitleri ile gerçek ve sanal kısımlarına ilişkin etkin antenleri üzerinden iletmeye üzere daha düşük modülasyonlu ($M_R < M$) bir karmaşık simge belirlenmektedir.

3.1. İki Yönlü QSM Sisteminin Kuramsal Hata Analizi

Bu bölümde, iki-yönlü QSM sisteminin ABEP analizi yapılmıştır. P_R , röledeki, P_{S_1} ve P_{S_2} ise sırasıyla S_1 ve S_2 kullanıcılarının hata olasılıkları olmak üzere, bütün sistemin hata olasılığı:

$$\begin{aligned} P_E &= 1 - ((1 - P_R)(1 - P_{S_1})(1 - P_{S_2})) \\ &= P_R + 2P_S - P_S^2 - 2P_R P_S + 2P_R P_S^2 \\ &\approx P_R + 2P_S \\ &\approx P_R + 2P_{S_i} \quad i \in \{1, 2\} \end{aligned} \quad (10)$$

olarak hesaplanmıştır. Buna göre, (4)'te verilen \mathbf{y}_R alınan işareti:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_R &= \mathbf{H}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_2 \mathbf{x}_2 + \mathbf{n}_R \\ &= \underbrace{[\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2]}_{\mathbf{H}} \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{x}} + \underbrace{\mathbf{n}_R}_{\mathbf{n}} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n} \end{aligned} \quad (11)$$

olarak tekrar yazılabilmektedir. (11)'de, $N_t = N_{t_1} + N_{t_2}$ olmak üzere, $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$ yeni kanal matrisi ve $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ iletim vektörünü göstermektedir. $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T \ \mathbf{x}_2^T]^T$ ve $\mathbf{H} = [\mathbf{H}_1 \ \mathbf{H}_2]$ olmak üzere \mathbf{x} 'in R 'de yanlışlıkla $\hat{\mathbf{x}}$ olarak çözüldüğünü varsayalım. Bu durumda, R 'deki koşullu çiftsel hata olasılığı (conditional error probability (CPEP))

$$P(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{H}) = P(\|\mathbf{y} - \mathbf{H} \mathbf{x}\|^2 > \|\mathbf{y} - \mathbf{H} \hat{\mathbf{x}}\|^2) \quad (12)$$

olarak hesaplanmaktadır. Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra CPEP,

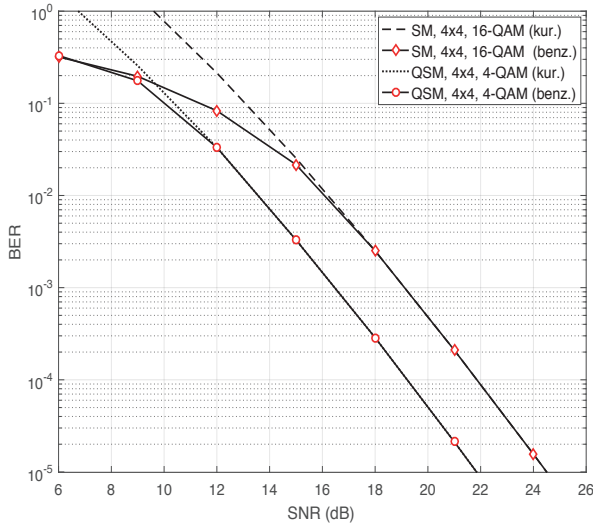
$$P_R(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}} | \mathbf{H}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{\|\mathbf{H}(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})\|^2}{4N_0 \sin^2 \theta}\right) d\theta. \quad (13)$$

olarak tekrar yazılabilmektedir. Moment üretme işlevi (moment generating function (MGF)) yaklaşımı ile \mathbf{H} üzerinden (13)'ün ortalaması alınarak çiftsel hata olasılığı (pairwise error probability (PEP)) hesaplanmaktadır:

$$P_R(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \theta + \frac{\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\|^2}{4N_0}} \right)^{N_r} d\theta. \quad (14)$$

Son olarak, R 'deki ABEP, [42]'tan faydalanılarak

$$P_R \approx \frac{1}{2m2^{2m}} \sum_{\mathbf{x}} \sum_{\substack{\hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{x}} \neq \mathbf{x}}} P_R(\mathbf{x} \rightarrow \hat{\mathbf{x}}) e_R(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) \quad (15)$$



Şekil 3: $m = 6$ bit/sn/Hz için iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin kuramsal ve benzetimlerle elde edilen BER başarımları.

olarak hesaplanmaktadır. (15)'te $e_R(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})$ her bir PEP olayında gerçekleşen hatalı bit sayısını göstermektedir.

Benzer şekilde, R 'de çözülen $\hat{\mathbf{x}}$ vektörünün S_1 ve S_2 'den gönderilen işaret vektörlerine karşılık gelen bilgi bitleri (6)'te XOR işlemine tabi tutularak \mathbf{x}_R QSM iletim vektörüne dönüştürülmekte ve ikinci zaman diliminde, \mathbf{x}_R , S_1 ve S_2 kullanıcılarına tekrar gönderilmektedir. \mathbf{x}_R 'nin S_i kullanıcıсында yanlışlıkla $\hat{\mathbf{x}}_{R_i}$ 'ye çözüldüğünü varsayalım. Bu durumda S_i kullanıcıсында CPEP:

$$P_{S_i}(\mathbf{x}_R \rightarrow \hat{\mathbf{x}}_{R_i} | \mathbf{H}_i^T) = Q\left(\sqrt{\frac{\|\mathbf{H}_i^T(\mathbf{x}_R - \hat{\mathbf{x}}_{R_i})\|^2}{2N_0}}\right) \quad (16)$$

olmaktadır. Gerekli sadeleştirmeler yapıldıktan sonra S_i kaynağındaki hata olasılığı:

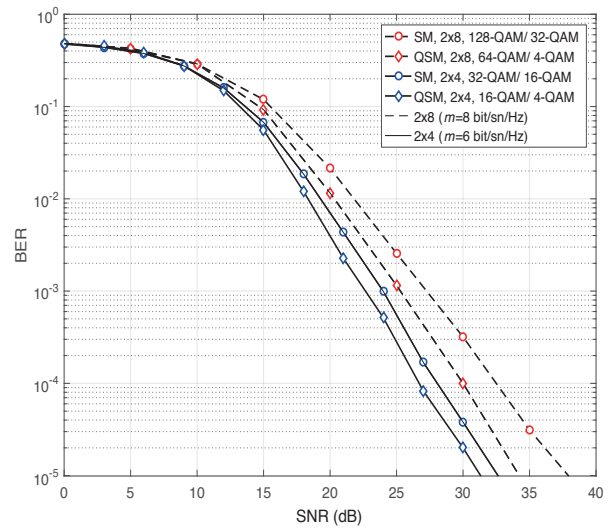
$$P_{S_i} \approx \frac{1}{m2^m} \sum_{\mathbf{x}_R} \sum_{\substack{\hat{\mathbf{x}}_{R_i} \\ \hat{\mathbf{x}}_{R_i} \neq \mathbf{x}_R}} P(\mathbf{x}_R \rightarrow \hat{\mathbf{x}}_{R_i}) e_{S_i}(\mathbf{x}_R, \hat{\mathbf{x}}_{R_i}) \quad (17)$$

olarak hesaplanmaktadır. (17)'de, $P_{S_i}(\mathbf{x}_R \rightarrow \hat{\mathbf{x}}_{R_i})$, S_i kaynağındaki PEP ve $e_{S_i}(\mathbf{x}_R, \hat{\mathbf{x}}_{R_i})$, her bir PEP olayındaki hatalı bit sayısını göstermektedir.

İki-yönlü QSM sisteminin hata oranı, sırasıyla (15) ve (17)'de elde edilen R ve S_i kullanıcılarındaki hata oranları toplamından (10)'da verildiği gibi elde edilmektedir.

3.2. Benzetim Sonuçları

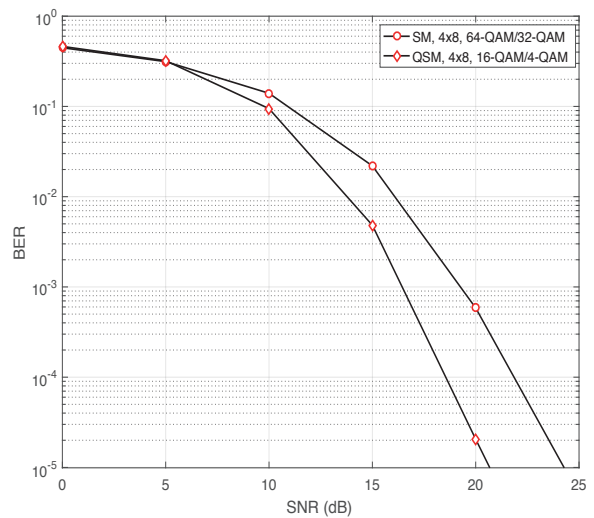
Bu bölümde, ilk olarak, iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin hata analizi yapılarak, kuramsal olarak ve bilgisayar benzetimleri ile ABEP başarımları elde edilmiştir. Ayrıca, farklı bant verimlilikleri için röledeki anten sayısının kullanıcılarındaki anten sayısına eşit ya da farklı olduğu durumlar için iki-yönlü SM ve QSM sistemlerinin hata başarımları elde edilmiştir. Bit hata oranı (bit error rate (BER)) başarımları her bir alıcı antendeki ortalama işaret gürültü oranı (signal to noise ratio (SNR))'na göre çizdirilmiştir.



Şekil 4: $m = 6$ ve 8 bit/sn/Hz için 2×4 ve 2×8 iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin BER başarımları.

Şekil 3'te, S_1 ve S_2 kullanıcılarının ve R rölesinin 4-antenli olması durumunda ve $m = 6$ bit/sn/Hz bant verimliliği altında, iki-yönlü 4-QAM'li QSM ve 16-QAM'li SM sistemlerinin ABEP başarımları kuramsal olarak ve bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiştir. Yüksek SNR değerleri için, benzetim sonuçlarının, kuramsal sonuçlarla tutarlılık gösterdiği görülmektedir.

Şekil 4'te, $m = 6$ ve $m = 8$ bit/sn/Hz için, R 'nin sırasıyla 4 ve 8 alıcı antenli, S_1 ve S_2 kullanıcılarının 2 verici antenli, olması durumunda, iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin bit hata oranı başarımları verilmiştir. Buna göre, $m = 6$ bit/sn/Hz durumunda birinci zaman diliminde, iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinde, kullanıcılarından röleye sırasıyla 16-QAM'li QSM ve 32-QAM'li SM vektörü iletilirken, ikinci zaman diliminde, iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinde, röleden kullanıcılarına sırasıyla 4-QAM'li QSM ve 16-QAM'li SM vektörü gönderilmektedir. Benzer şekilde,



Şekil 5: $m = 8$ bit/sn/Hz için 4×8 iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin BER başarımları.

$m = 8$ bit/sn/Hz bant verimliliği altında iki-yönlü QSM ve SM sistemleri için, 2-antenli kullanıcılardan R' 'ye sırasıyla, 64-QAM'li ve 128-QAM'li SM vektörü iletilmekte, buna karşılık, ikinci zaman diliminde, 8-antenli röleden kullanıcılara, sırasıyla, 4-QAM'li QSM ve 32-QAM'li SM vektörü iletilmektedir. Bilgisayar benzetimleri sonucunda, $m = 6$ ve $m = 8$ bit/sn/Hz için iki-yönlü QSM, iki-yönlü SM sistemine göre 1.5 ve 2.5 dB SNR kazancı sağladığı görülmektedir.

Şekil 5'te, $m = 8$ bit/sn/Hz bant verimliliği için, iki-yönlü QSM ve iki-yönlü SM sistemlerinin BER başarımları verilmiştir. Buna göre, birinci zaman diliminde, 4-antenli kullanıcılardan R' 'ye 16-QAM'li QSM ve 64-QAM'li SM vektörü iletilirken, ikinci zaman diliminde, 8-antenli R' 'den kullanıcılara, 4-QAM'li QSM ve 32-QAM'li SM vektörü iletilmektedir. Benzetim sonuçları, iki-yönlü QSM'in iki-yönlü SM sistemine göre yaklaşık 4 dB SNR kazancı sağladığını göstermektedir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, QSM iletim tekniğinin işbirlikli iletişim sistemlerine uyarlandığı iki-yönlü QSM sistemi önerilmiştir. Bu sisteme göre, QSM iletim tekniği kullanan iki kullanıcı, yarı çift-yönlü bir röle yardımı ile bilgi alış-verişinde bulunmaktadır. Birinci zaman aralığında, kullanıcılar kendi bilgilerini röleye iletmektedir. Röle, iki kullanıcıya ait bilgileri çözdükten sonra kesirilen bilgilerin bit düzeyinde karşılıklarını XOR işlemine tabi tutarak, oluşan yeni bit dizisini, QSM iletim tekniği ile kullanıcılara geri göndermektedir. Önerilen iki-yönlü iletim sistemi, klasik SM tekniği için de gerçekleştirilerek iki-yönlü SM olarak tanımlanmıştır. Önerilen iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin hata analizi yapılarak, hata başarımları için üst sınır elde edilmiştir. Son olarak, röledeki anten sayısının kullanıcılardaki anten sayıları ile aynı veya farklı olduğu durumlar için iki-yönlü QSM ve SM sistemlerinin hata başarımları bilgisayar benzetimleri ile elde edilmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] H. Jafarkhani, *Space-time coding: theory and practice*. Cambridge University Press, 2005.
- [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] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation—a new low complexity spectral efficiency enhancing technique," in *Commun. Netw., 2006. (ChinaCom'06)*. IEEE, 2006, pp. 1–5.
- [4] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, 2016.
- [5] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, "Index modulation techniques for next-generation wireless networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16 693–16 746, 2017.
- [6] J. Jeganathan, A. Ghayeb, L. Szczecinski, and A. Ceron, "Space shift keying modulation for mimo channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3692–3703, 2009.

Gönderim Tarihi: 27/07/2017 Kabul Tarihi: 13/03/2018

- [7] N. Serafimovski, S. Sinanovic, M. Di Renzo, and H. Haas, "Dual-hop spatial modulation (Dh-SM)," in *IEEE 73rd Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, 2011, pp. 1–5.
- [8] S. Narayanan, M. Di Renzo, F. Graziosi, and H. Haas, "Distributed spatial modulation: A cooperative diversity protocol for half-duplex relay-aided wireless networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 5, pp. 2947–2964, 2016.
- [9] A. Younis, N. Serafimovski, R. Mesleh, and H. Haas, "Generalised spatial modulation," in *Proc. Signals, Sys. Comput.*, 2010, pp. 1498–1502.
- [10] J. Fu, C. Hou, W. Xiang, L. Yan, and Y. Hou, "Generalised spatial modulation with multiple active transmit antennas," in *Proc. IEEE Globecom Workshops*, 2010, pp. 839–844.
- [11] T. Datta, H. S. Eshwaraiah, and A. Chockalingam, "Generalized space-and-frequency index modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 7, pp. 4911–4924, 2016.
- [12] C.-C. Cheng, H. Sari, S. Sezginer, and Y. T. Su, "Enhanced spatial modulation with multiple signal constellations," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 6, pp. 2237–2248, Jun. 2015.
- [13] 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, 2011.
- [14] 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.
- [15] R. Mesleh and S. S. Ikki, "On the impact of imperfect channel knowledge on the performance of quadrature spatial modulation," in *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, 2015, pp. 534–538.
- [16] A. Younis, R. Mesleh, and H. Haas, "Quadrature spatial modulation performance over Nakagami- m fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 12, pp. 10 227–10 231, 2016.
- [17] M. M. Alwakeel, "Quadrature spatial modulation performance analysis over Rician fading channels," *J. of Commun.*, vol. 11, no. 3, 2016.
- [18] S. Koila, N. Neha, and U. Sripathi, "Performance of spatial-modulation and spatial-multiplexing systems over Weibull fading channel," in *IEEE Int'l Conf. Computing and Netw. Commun. (CoCoNet)*, 2015, pp. 389–394.
- [19] O. S. Badarneh and R. Mesleh, "Performance of quadrature spatial modulation with imperfect channel information over correlated α - μ fading channels," in *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, 2016, pp. 1–5.
- [20] —, "A comprehensive framework for quadrature spatial modulation in generalized fading scenarios," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 7, pp. 2961–2970, 2016.
- [21] L. Xiao, P. Yang, S. Fan, S. Li, L. Song, and Y. Xiao, "Low-complexity signal detection for large-scale quadrature spatial modulation systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 11, pp. 2173–2176, 2016.
- [22] Z. Yigit and E. Basar, "Low-complexity detection of quadrature spatial modulation," *IET Electron.Lett.*, vol. 52, no. 20, pp. 1729–1731, 2016.

- [23] I. Al-Nahhal, O. Dobre, and S. Ikki, "Quadrature spatial modulation decoding complexity: Study and reduction," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 2017.
- [24] J. Li, X. Jiang, Y. Yan, W. Yu, S. Song, and M. H. Lee, "Low complexity detection for quadrature spatial modulation systems," *Wireless Personal Commun.*, pp. 1–13, 2017.
- [25] A. Afana, R. Mesleh, S. Ikki, and I. E. Atawi, "Performance of quadrature spatial modulation in amplify-and-forward cooperative relaying," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 240–243, 2016.
- [26] A. Afana, E. Erdogan, and S. Ikki, "Quadrature spatial modulation for cooperative MIMO 5G wireless networks," in *IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016, pp. 1–5.
- [27] A. Afana, I. Atawi, S. Ikki, and R. Mesleh, "Energy efficient quadrature spatial modulation MIMO cognitive radio systems with imperfect channel estimation," in *IEEE Int. Conf. Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*, 2015, pp. 1–5.
- [28] A. Afana, S. Ikki, R. Mesleh, and I. Atawi, "Spectral-efficient quadrature spatial modulation cooperative amplify and forward spectrum-sharing systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 3, pp. 2857–2861, 2017.
- [29] I. A. Mahady, A. Afana, R. Mesleh, S. Ikki, and I. Atawi, "Cognitive MIMO quadrature spatial modulation systems with mutual primary-secondary co-channel interference," in *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, 2016, pp. 1–5.
- [30] R. Mesleh and A. Younis, "Capacity analysis for LOS millimeter-wave quadrature spatial modulation," *Springer Wireless Netw.*, pp. 1–10, 2017.
- [31] A. Younis, N. Abuzgaia, R. Mesleh, and H. Haas, "Quadrature spatial modulation for outdoor millimeter-wave communications: Capacity analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2017.
- [32] R. Mesleh and A. Younis, "LOS millimeter-wave communication with quadrature spatial modulation," in *IEEE Int. Symp. Signal Proc. Inf. Technol. (ISSPIT)*, 2016, pp. 109–113.
- [33] Z. Yigit and E. Basar, "Double spatial modulation: A high-rate index modulation scheme for MIMO systems," in *Wireless Commun. Systems (ISWCS), 2016 Int. Symp.* IEEE, 2016, pp. 347–351.
- [34] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. W. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, 2000.
- [35] Y. Wu, P. A. Chou, S.-Y. Kung *et al.*, "Information exchange in wireless networks with network coding and physical-layer broadcast," MSR-TR-2004, Tech. Rep., 2005.
- [36] S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. Lam, "Hot topic: Physical-layer network coding," in *Proc. 12th Annu. Int. Conf. Mobile Comput. and Netw.* ACM, 2006, pp. 358–365.
- [37] P. Popovski and H. Yomo, "Physical network coding in two-way wireless relay channels," in *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC'07)*, 2007, pp. 707–712.
- [38] D. Gunduz, A. Goldsmith, and H. V. Poor, "MIMO two-way relay channel: Diversity-multiplexing tradeoff analysis," in *IEEE Signals, Systems and Computers, 42nd Asilomar Conf.*, 2008, pp. 1474–1478.
- [39] I. Hammerstrom, M. Kuhn, C. Esli, J. Zhao, A. Wittneben, and G. Bauch, "MIMO two-way relaying with transmit csi at the relay," in *IEEE Signal Processing Advances in Wireless Commun. (SPAWC), 8th Workshop*, 2007, pp. 1–5.
- [40] X. Xie, Z. Zhao, M. Peng, and W. Wang, "Spatial modulation in two-way network coded channels: Performance and mapping optimization," in *IEEE Personal Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC), 2012 IEEE 23rd Int. Symp.*, 2012, pp. 72–76.
- [41] Y. Yang, "Spatial modulation exploited in non-reciprocal two-way relay channels: Efficient protocols and capacity analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 7, pp. 2821–2834, 2016.
- [42] M. K. Simon and M.-S. Alouini, *Digital communication over fading channels*. John Wiley & Sons, vol. 95, 2005.



Zehra Yiğit

Zehra Yiğit lisans derecesini 2013 yılında Gaziantep Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden, yüksek lisans derecesini 2017 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden almıştır. Halen, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde, doktora öğrencisi olup araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgili alanları, MIMO iletişim teknikleri, uzay-zaman kodlama, işbirlikli haberleşme sistemleridir.



Ertuğrul BAŞAR

Ertuğrul Başar lisans derecesini 2007 yılında İstanbul Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden, yüksek lisans ve doktora derecelerini ise sırasıyla 2009 ve 2013 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden (İTÜ-EHMB) almıştır. Dr. Başar, 2011-2012 akademik yılını ise, ABD'de bulunan Princeton Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü bünyesinde araştırmacı olarak geçirmiştir. 2009-2014 yılları arasında araştırma görevlisi olarak görev aldığı İTÜ-EHMB'de, 2014-2017 yılları arasında yardımcı doçent doktor olarak görev yapmıştır. Dr. Başar, 2017 yılından itibaren ise aynı bölümde doçent olarak görev yapmaktadır. Dr. Başar'ın ilgi alanları gelecek nesil (5G ve ötesi) telsiz iletişim sistemleri, çok-girişli çok-çıkışlı (MIMO) sistemler, uzay-zaman kodlama, indis modülasyonu, dalga formu tasarımı, haberleşme için işaret işleme ve görünür ışıkla haberleşmedir. 2016 yılında Institute of Electrical and Electronics Engineers Kıdemli Üyesi (IEEE Senior Member) olan Dr. Başar halen IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, IEEE ACCESS ve Physical Communication (Elsevier) dergilerinde Associate Editor (Yardımcı Editör) olarak görev almaktadır.

Dr. Başar, 2017 Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) Üstün Başarılı Genç Bilim İnsanı (GEBİP) Ödülü, 2017 IEEE Türkiye Teşvik Ödülü, 2016 International Conference on Communications En İyi Makale Ödülü, 2013 Yılı İTÜ En İyi Doktora Tezi Ödülü ve 2011 EMO Yılın En İyi Makalesi Ödülü sahibidir.