



MISO Sistemler İçin Ayarlanabilir Akıllı Yüzey ile Güçlendirilmiş Çift Uzaysal Modülasyon

Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered Double Spatial Modulation for MISO Systems

Burak Ahmet Ozden^{1,2}, Erdogan Aydin¹, Fatih Cogen^{1,3}

¹ Elektrik Elektronik Mühendisliği, İstanbul Medeniyet Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

² Bilgisayar Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

³ Mekatronik Mühendisliği, Türk Alman Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
bozden@yildiz.edu.tr, erdogan.aydin@medeniyet.edu.tr, cogen@tau.edu.tr

Özet

Günümüzde, mobil kullanıcı sayısının hızla artması ve teknolojinin gelişmesine bağlı olarak daha kaliteli iletişim talebi gibi nedenlerden dolayı yüksek performanslı haberleşme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Son zamanlarda ortaya çıkan ve kablosuz sönümlenmeli kanalın bozucu etkilerini azaltan ayarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) teknolojisi ile geleneksel haberleşme sistemlerine göre veri hızını ve sistem performansını ciddi oranda artıran çift uzaysal modülasyon (double spatial modulation, DSM) tekniği yukarıda ifade edilen talep ve ihtiyaçları karşılamayı hedefleyen önemli sistemlerdir. Bu çalışmada, DSM tekniği ve RIS teknolojisinin bir çoklu-giriş tekli-çıkış (multiple-input single-output, MISO) sistem bünyesinde birleştirilmesiyle elde edilen ve kısaca DSM-RIS olarak adlandırılan yeni bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemin performans analizi, M-QAM modülasyonu kullanılarak Rayleigh sönümlenmeli kanallar üzerinde farklı yansıtıcı yüzey ve verici anten sayıları için gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, önerilen DSM-RIS sisteminin performansı literatürdeki önemli emsal sistemlerle karşılaştırılmış ve aynı spektral verimlilikte diğer sistemlere nazaran daha iyi bir hata başarımı sağladığı gözlemlenmiştir.

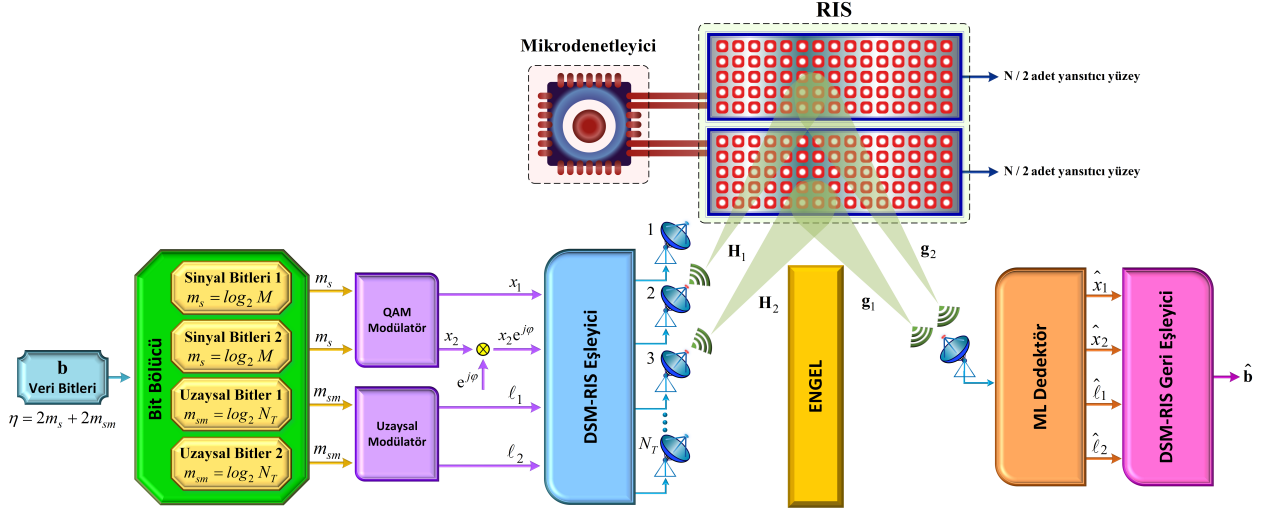
Abstract

Nowadays, high-performance communication systems are needed due to the rapid increase in the number of mobile users and the demand for better quality communication in relation to the development of technology. The reconfigurable intelligent surface (RIS) technology, which has emerged recently and reduces the disruptive effects of the wireless fading channel, and the double spatial modulation (DSM) technique, which significantly increases the data rate and system performance compared to traditional communication systems, are important systems that aim to meet the demands and needs mentioned above. In this study, a new system, which is obtained by combining the DSM technique and RIS technology in a multiple-input single-output (MISO) system called DSM-RIS for short, is proposed. The performance analysis of the proposed system is performed on Rayleigh fading channels using M-QAM modulation for different reflecting surfaces and transmit antenna numbers. Also, the performance of the proposed DSM-RIS system has been compared with the important counterpart systems in the literature and it has been observed that it provides a better error performance than other systems in the same spectral efficiency.

1. Giriş

Her alanda akıllı cihazların ortaya çıkmasıyla internete bağlı cihazların sayısının artması, kablosuz bağlantıya olan talebin yükselmesi, internet ortamında var olan dosyalara ek olarak aynı zamanda kullanıcıların da çok sayıda yüksek boyutlu paylaşım yapımları veri trafiğini artırmaktadır. Buna ek olarak, hızla gelişen teknolojilerin başında olan yapay zekâ, nesnelerin interneti ve sanal gerçeklik gibi teknolojiler yüksek hızlı ve yüksek kapasiteli veri iletimine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle yüksek başarılı, yüksek hızlı, yüksek güvenilirlikli ve düşük hatalı haberleşme sistemleri her geçen gün daha da önemli hale gelmektedir [1].

İndis modülasyon (index modulation, IM) tekniği, bilgi iletimi için neredeyse ekstrasından bir kaynak kullanmadığı için haberleşme dünyasında yeni bir çığır açmıştır. Yapılan çalışmalarda, IM tekniğinin entegre edildiği sistemlerin veri hızını artırmasının yanı sıra hata başarımını da ciddi oranda iyileştirdiği gösterilmiştir [2]. Ayrıca, IM tekniğinde veri bitleri iletim sinyalinde gömülü olarak iletildiği için fazladan bilgi taşınması için ya hiç enerji harcanmaz ya da oldukça az enerji harcanır [3–6]. IM, geleneksel olarak simgelerle bilgi taşınmasına ek olarak iletim antenlerinin, RF aynalarının, yayıcı kodların, ön kodlayıcı matrislerinin, rölelerin vb. aktif/pasif olma durumlarını değiştirerek fazladan bilgi iletimini mümkün kılar [7, 8]. IM tabanlı haberleşme sistemleri her geçen gün artarak literatüre eklenmeye devam etmektedir. En popüler IM şemalarından biri olan uzaysal modülasyon (spatial modulation, SM) tekniği Mesleh tarafından [9]’da önerildiğinden beri bu alanda birçok yeni çalışmayı tetiklemiş ve hala haberleşme dünyasına büyük bir katkı sağlamaktadır. SM tekniğinde, aktif anten indisleri üzerinden fazladan veri iletimi için uzaysal boyut kullanılarak spektral verimlilik artırılır. SM’de, her seferinde vericide sadece bir anten aktif olduğu için kanallar arası girişim ve verici antenler arasındaki senkronizasyon problemi ortadan kalkmaktadır. Ayrıca SM tekniği, düşük alıcı karmaşıklığı, yüksek spektral verimlilik ve düşük enerji tüketimi gibi önemli avantajlar sağlamaktadır [10, 11]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarla SM tekniği geliştirilerek yukarıda sıralanan avantajların artması ve/veya daha da ileriye taşınması sağlanmaktadır. Örneğin, [12]’de geleneksel SM tekniğinde aktif olan anten sayısını iki katına çıkararak spektral verimliliği arttıran yüksek veri hızı yeni bir IM sistemi olan çift SM (double SM, DSM) sistemi önerilmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlara göre aynı spektral verimlilikte DSM sistemin geleneksel SM sistemine göre daha iyi bir hata başa-



Şekil 1. DSM-RIS Sistem Modeli.

rımı sağladığı görülmektedir. [13]'de sönmülemeli kanalın bozucu etkilerini ortadan kaldıran yeni bir SM tekniği önerilmiştir. Önerilen bu yeni SM tekniği geleneksel SM tekniğine göre ciddi performans iyileşmesi sağlamıştır.

Son zamanlarda, ayarlanabilir akıllı yüzey (reconfigurable intelligent surface, RIS) tabanlı haberleşme sistemleri araştırmacıların oldukça ilgisini çekmektedir. Kablosuz sönmülemeli kanalın bozucu etkilerini en aza indirerek sinyal kalitesini ve kapsama alanını artıran RIS teknolojisi kablosuz haberleşmeye yeni bir boyut kazandırmıştır. RIS'ler, elektromanyetik dalgaları kontrol edebilen üstün özelliklere sahip pasif elemanlardan oluşan akıllı yüzeylerdir. Kablosuz ortamda iletişim gerçekleşirken, ortamdaki nesnelere yüzünden özellikle uzun mesafelerde iletilen sinyalin yayılımı olumsuz etkilenir ve çok fazla kayıp ortaya çıkar [14]. İletim ortamındaki nesnelere çarpan sinyal yansıma, kırınım ve saçılma gibi bozucu etkilerle maruz kalarak sönmülenir. Bu bozucu sönmüleme etkisi sinyal kalitesini etkileyen en büyük faktörlerden biridir. Mikrodenetleyici gibi elektronik cihazlarla kontrol edilen RIS'ler kendilerine gelen elektromanyetik sinyallerin yansıma ve saçılma gibi karakteristiklerini kontrol ederek sinyal üzerindeki bozucu etkileri azaltır [15, 16]. RIS'ler üstün özellikleri ile diğer geleneksel haberleşme teknolojilerinden ayrılmaktadırlar. Çoğunlukla pasif malzemeler içerdikleri için dışarıdan enerji kaynağına ihtiyaç duymamaları, düşük maliyetli ve yüksek performanslı olmaları, herhangi bir dönüştürücüye ya da güç yükselteciye ihtiyaç duymadıkları için alıcı gürlütüsünden etkilenmemeleri ve bina cepheleri, direkler, insan kıyafetleri gibi birçok yüzeye kolayca konuşlandırılabilmeleri bu üstün özelliklerinden bazılarıdır [17, 18]. RIS'ler sağladıkları bu önemli avantajlar nedeniyle araştırmacıları bu alanda birçok çalışma yapmaya itmiştir. Örneğin [19]'da RIS tabanlı uzay kaydırmalı anahtarlama (space shift keying, SSK) sistemi önerilmiştir. Önerilen sistemin, alıcı karmaşıklığını artırmadan yüksek enerji verimliliği sağladığı ve geleneksel SSK sistemine göre çok daha iyi bir hata başarımı sağladığı gözlemlenmiştir. [20]'de ise yazarlar kısaca RIS-IM olarak adlandırılan RIS tabanlı bir IM sistem önermişlerdir. Önerilen RIS-IM sistemi diğer bir indis modülasyon şeması olan SM tekniği ile karşılaştırılmış ve daha yüksek sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio, SNR) kazancı sağladığı görülmüştür. Ayrıca alıcı tarafta SM tekniği, uzay zaman blok kodlamalı RIS tekniği ile birleştirilerek [21] numaralı çalışmada su-

nulmuştur.

Bu çalışmada, yüksek veri hızlı DSM tekniği ile hata başarımını iyileştiren RIS teknolojisinin birleştirilmesinden oluşan ve kısaca DSM-RIS olarak adlandırılan yüksek performanslı yeni bir sistem önerilmiştir. Önerilen sistemin geleneksel SM tabanlı RIS (SM-RIS) sistemine göre hem daha iyi bir bit hata oranı (bit error rate, BER) performansı sergilediği hem de daha yüksek spektral verimlilik sağladığı gözlemlenmiştir. Önerilen DSM-RIS sisteminin diğer parametreleri sabit tutulup verici anten sayısı ve yansıtıcı yüzey sayıları değiştirilerek bu parametrelerin sistem performansına ne şekilde ve hangi ölçüde etki ettiği BER başarımları eğrileri ile sunulmuş ve yorumlanmıştır. Ayrıca önerilen DSM-RIS sistemi, RIS ile güçlendirilmiş ortam tabanlı modülasyon (RIS-empowered media based modulation, MBM-RIS), dikgen SM tabanlı RIS (quadrature SM-RIS, QSM-RIS) ve SM-RIS sistemleriyle karşılaştırılmış ve aynı spektral verimlilikte önerilen DSM-RIS sisteminin daha iyi bir hata başarımı sağladığı gösterilmiştir.

2. Sistem Modeli

Bu çalışmada, kısaca DSM-RIS olarak adlandırılan ve geleneksel SM tekniğine göre iki kat daha yüksek spektral verimliliğe sahip olan DSM tekniği tabanlı RIS sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem modeli Şekil 1'de sunulmuştur. Ele alınan sistem modelinde, verici yapısında N_T adet verici anten yer almaya karşın alıcı yapısında ise bir adet alıcı anten yer almaktadır. Ayrıca, verici ve alıcı arasındaki iletişimi sağlayan N adet ayarlanabilir akıllı yüzey RIS elemanlarının üzerinde yer almaktadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi bu N adet yansıtıcı yüzeylerin yarısını birinci RIS elemanı diğer yarısını ise ikinci RIS elemanı içermektedir. Bu ayarlanabilir akıllı yüzeyler, bir mikrodenetleyici tarafından kontrol edilerek vericiden gönderilen sinyalin SNR değerini maksimum yapacak şekilde faz döndürmesi yaparak gelen sinyali alıcıya iletirler.

DSM-RIS sisteminde, bilgi bitleri aktif verici anten indisleri ve M -QAM simge uzayından seçilen simgeler üzerinden taşınmaktadır. DSM-RIS sisteminde, geleneksel SM sisteminde farklı olarak vericide bilgi bit dizilişine göre her iletim anında bir yerine iki verici anten aktif olmaktadır. Bu aktif olan verici antenlerin her birinden de seçilmiş M -QAM simgeleri iletilmektedir. Dolayısıyla geleneksel SM sistemine kı-

Tablo 1. DSM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS Sistemlerinin Veri Hızlarının Karşılaştırılması [bits/s/Hz].

M	N_T	m_{rf}	SM-RIS	MBM-RIS	QSM-RIS	DSM-RIS
8	4	3	5	6	7	10
16	8	7	7	11	10	14
32	16	12	9	17	13	18

ya da DSM-RIS sisteminde, hem verici anten indisinde hem de simgede taşınan bilgi biti miktarı iki katına çıkmaktadır. Ancak DSM-RIS sisteminde simgeler ayrı ayrı değil de aynı anda iletildiğinden simgeler arası girişim meydana gelmektedir. Sistem performansını olumsuz yönde etkileyen bu bozucu etkiyi ortadan kaldırmak için iletilecek olan simgelerden birinin fazı optimum değerde döndürülür. Bu nedenle önerilen DSM-RIS sisteminde iletilecek olan ikinci simgenin fazı φ_{opt} kadar döndürülmektedir. Optimum döndürme açısı φ_{opt} değerleri modülasyon seviyesine göre değişmektedir. Modülasyon seviyesi $M = 2, 4, 8$ ve 16 değerleri için sırasıyla optimum döndürme açıları $\varphi_{opt} = 90^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 70° 'dir [12].

DSM-RIS sisteminin her iki iletim anteni için iletim vektörleri $\mathbf{s}_1 \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ ve $\mathbf{s}_2 \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\mathbf{s}_1 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \underbrace{x_1}_{\ell_1 \text{ 'inci}} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (1)$$

$$\mathbf{s}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \underbrace{x_2 e^{j\varphi}}_{\ell_2 \text{ 'inci}} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

burada $\ell_1, \ell_2 \in \{1, 2, \dots, N_T\}$ olmak üzere x_1 ve $x_2 e^{j\varphi}$ simgelerinin iletileceği aktif antenlerin indislerini ifade etmektedir. Bu aktif anten indisleri simgelerin iletim vektörlerindeki ilgili konumlarını da işaret etmektedir.

Tablo 1'de önerilen DSM-RIS sistemi ile MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerinin [bits/s/Hz] cinsinden veri hızı karşılaştırılması sunulmuştur. Modülasyon seviyesi, verici anten sayısı ve RF ayna sayısına (m_{rf}) bağlı olarak sistemlerin veri hızları elde edilmiştir. Tablo 1'den de kolaylıkla görülebileceği üzere ele alınan tüm durumlarda, önerilen DSM-RIS sistemi diğer sistemlere göre daha yüksek veri hızı sağlamaktadır.

Şekil 1'de sunulan verici yapısı dikkate alındığında, ilk olarak veri bitlerinin içerisinde önerilen sistemin spektral verimliliğine eşit olan $\eta = 2 \log_2(MN_T)$ uzunluklu \mathbf{b} bit dizisi seçilmektedir. Daha sonra, \mathbf{b} vektörü bit bölücüdün geçerek iki adet $1 \times m_s$ uzunluklu ve iki adet $1 \times m_{sm}$ uzunluklu olmak üzere dört alt vektöre ayrılır. $m_s = \log_2(M)$ uzunluklu bit dizileri x_1 ve x_2 M -QAM simgelerini seçerken, $m_{sm} = \log_2(N_T)$ uzunluklu bit dizileri de vericide aktif olacak ℓ_1 ve ℓ_2 indisli verici antenleri seçer. Burada, x_1 simgesi ℓ_1 indisli antenden iletilirken, x_2 simgesi ise fazı φ derece döndürüldükten sonra ℓ_2 indisli aktif anten üzerinden iletilir. Örneğin DSM-RIS sisteminde, $M = 4$ ve $N_T = 8$ için $\mathbf{b} = [0011100111]$ veri bitlerinin iletileceği varsayalım. Burada, $2 \log_2(M) = 4$ bit ($[0011]$) seçilen simgeler üzerinden taşınırken, geri kalan $2 \log_2(N_T) = 6$ bit ($[100111]$) ise aktif anten indisleri üzerinden iletilmektedir. İlk olarak $[00]$ bit dizisi $x_1 = -1 + j$ simgesine eşlenirken, $[11]$ bit dizisi ise $x_2 = 1 - j$ simgesine eşlenir. Ancak burada modülasyon seviyesi $M = 4$ olduğu için ikinci simgenin fazı 45° kaydırılır. Dolayısıyla, $x_2 = (1 - j)e^{j45^\circ} = 1.41j$ olarak güncellenir. Benzer şekilde $[100]$ bit dizisi $\ell_1 = 5$ beşinci verici anten indisine ve $[111]$ bit dizisi ise $\ell_2 = 8$ sekizinci verici anten indisine eşlenir.

Sonuç olarak, $x_1 = -1 + j$ ve $x_2 = 1.41j$ simgeleri aktif olan beşinci ve sekizinci antenler üzerinden aynı anda gönderilir. Bu örnek dikkate alındığında, \mathbf{s}_1 ve \mathbf{s}_2 iletim vektörleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{s}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \underbrace{-1+j}_{\ell_1=5 \text{ 'inci aktif anten}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{s}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \underbrace{1.41j}_{\ell_2=8 \text{ 'inci aktif anten}} \end{bmatrix}^T. \quad (4)$$

Vericiden iletilen ve RIS elemanlarının yansıtıcı yüzeylerine çarparak alıcıya ulaşan gürültülü sinyal $r \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$ aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$r = \sqrt{E_x} \left[\sum_{n_1=1}^{N/2} h_{n_1, \ell_1} e^{j\phi_{n_1}} g_{n_1} x_1 + \sum_{n_2=\frac{N}{2}+1}^N h_{n_2, \ell_2} e^{j\phi_{n_2}} g_{n_2} x_2 \right] + w, \quad (5)$$

burada, E_x iletilen sinyal enerjisini, \tilde{x}_2 ifadesi x_2 simgesinin φ kadar fazının kaydırılmış halini ($\tilde{x}_2 = x_2 e^{j\varphi}$) ve $w \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ ise sıfır ortalamalı ve N_0 varyanslı toplamsal beyaz Gauss gürültüsünü temsil etmektedir. $h_{n_1, \ell_1} = \alpha_{n_1, \ell_1} e^{-j\theta_{n_1, \ell_1}}$ ve $g_{n_1} = \beta_{n_1} e^{-j\psi_{n_1}}$ sırasıyla birinci simgenin iletildiği verici ile RIS ve RIS ile alıcı arasındaki kanal katsayılarıdır. $h_{n_2, \ell_2} = \alpha_{n_2, \ell_2} e^{-j\theta_{n_2, \ell_2}}$ ve $g_{n_2} = \beta_{n_2} e^{-j\psi_{n_2}}$ ise sırasıyla ikinci simgenin iletildiği verici ile RIS ve RIS ile alıcı arasındaki kanal katsayılarıdır. (5) denklemi, matris-vektör formunda aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir:

$$r = \sqrt{E_x} \left[(\mathbf{H}_1 \mathbf{s}_1)^T \mathbf{\Phi}_1 \mathbf{g}_1 + (\mathbf{H}_2 \mathbf{s}_2)^T \mathbf{\Phi}_2 \mathbf{g}_2 \right] + w, \quad (6)$$

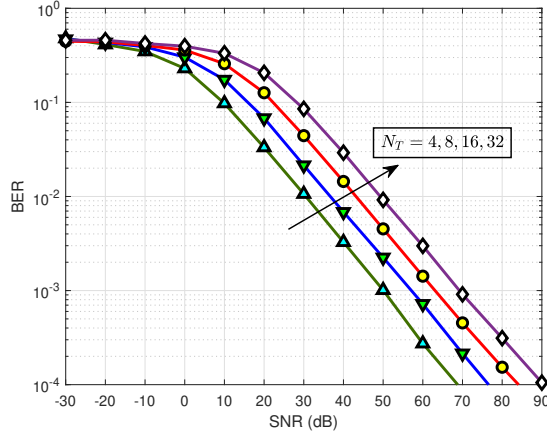
burada, $\mathbf{\Phi}_1 = \text{diag}\{e^{j\phi_1}, e^{j\phi_2}, \dots, e^{j\phi_{\frac{N}{2}}}\}$ ve $\mathbf{\Phi}_2 = \text{diag}\{e^{j\phi_{\frac{N}{2}+1}}, e^{j\phi_{\frac{N}{2}+2}}, \dots, e^{j\phi_N}\}$ şeklinde ifade edilir. $\mathbf{g}_1 = [g_1, g_2, \dots, g_{\frac{N}{2}}]^T$ ve $\mathbf{g}_2 = [g_{\frac{N}{2}+1}, g_{\frac{N}{2}+2}, \dots, g_N]^T$ dir. \mathbf{H}_1 ve \mathbf{H}_2 matrisleri ise sırasıyla aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,N_T} \\ h_{2,1} & \dots & h_{2,N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{\frac{N}{2},1} & \dots & h_{\frac{N}{2},N_T} \end{bmatrix}_{\frac{N}{2} \times N_T}, \quad \mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} h_{\frac{N}{2}+1,1} & \dots & h_{\frac{N}{2}+1,N_T} \\ h_{\frac{N}{2}+2,1} & \dots & h_{\frac{N}{2}+2,N_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & \dots & h_{N,N_T} \end{bmatrix}_{\frac{N}{2} \times N_T}. \quad (7)$$

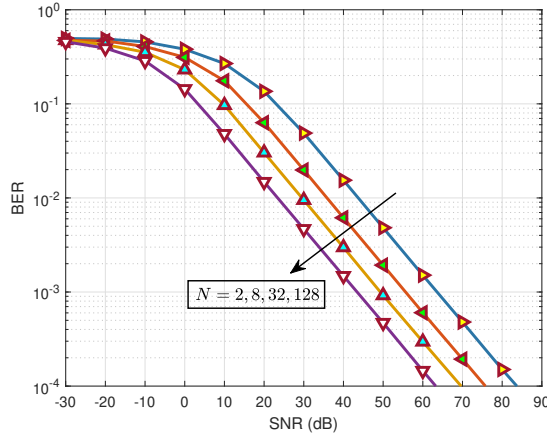
DSM-RIS sisteminde, alıcıdaki anlık SNR değeri aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\gamma = \frac{\sqrt{E_x} \left| \sum_{n_1=1}^{N/2} \alpha_{n_1, \ell_1} \beta_{n_1} e^{(j\phi_{n_1} - j\theta_{n_1} - j\psi_{n_1})} \right|^2}{N_0} + \frac{\sqrt{E_x} \left| \sum_{n_2=\frac{N}{2}+1}^N \alpha_{n_2, \ell_2} \beta_{n_2} e^{(j\phi_{n_2} - j\theta_{n_2} - j\psi_{n_2})} \right|^2}{N_0}. \quad (8)$$

(8)'den kolayca görülebileceği üzere alıcıdaki SNR değerini maksimize etmek için kanal fazları sıfırlanmalıdır. Bu yüzden ϕ_{n_1} ve ϕ_{n_2} ayarlanabilir faz değerleri $\phi_{n_1} = \theta_{n_1, \ell_1} + \psi_{n_1}$ ve $\phi_{n_2} = \theta_{n_2, \ell_2} + \psi_{n_2}$ olarak seçilir. Şekil 1'de yer alan RIS elemanlarının θ_{n_1, ℓ_1} , ψ_{n_1} , θ_{n_2, ℓ_2} ve ψ_{n_2} kanal fazlarını bildiği varsayılmaktadır. Sonuç olarak, RIS elemanları ϕ_{n_1} ve ϕ_{n_2} ayarlanabilir faz değerlerini bu kanal fazlarını sıfırlayacak şekilde belirleyerek alınan sinyal kalitesini artırmaktadır.



Şekil 2. Önerilen DSM-RIS sisteminin $M = 4$, $N = 128$ ve $N_T = 4, 8, 16, 32$ değerleri için BER başarımı.



Şekil 3. Önerilen DSM-RIS sisteminin $M = 4$, $N_T = 2$ ve $N = 2, 8, 32, 128$ değerleri için BER başarımı.

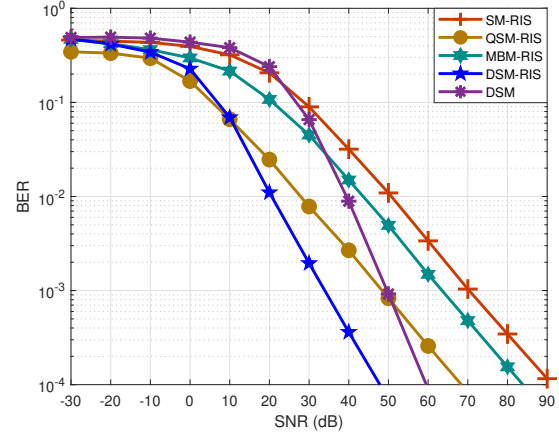
Önerilen DSM-RIS sisteminin optimal enbüyük olabilirlik (maximum likelihood, ML) dedektörü ℓ_1 , ℓ_2 , x_1 ve x_2 parametrelerinin bütün olası kombinasyonlarını deneyerek alınan sinyal üzerinden ℓ_1 , ℓ_2 aktif anten indislerini ve x_1 , x_2 simgelerini kestirir. DSM-RIS sisteminin optimal ML dedektörü aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\left[\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{\ell}_1, \hat{\ell}_2 \right] = \arg \min_{x_1, x_2, \ell_1, \ell_2} \left\| r - \left(\sum_{n_1=1}^{N/2} \alpha_{n_1, \ell_1} \beta_{n_1} x_1 + \sum_{n_2=\frac{N}{2}+1}^N \alpha_{n_2, \ell_2} \beta_{n_2} \bar{x}_2 \right) \right\|^2. \quad (9)$$

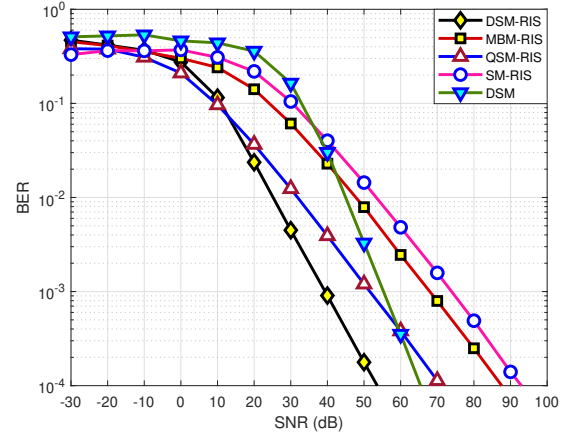
$\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{\ell}_1, \hat{\ell}_2$ değerleri optimal ML dedektör ile kestirildikten sonra Şekil 1'deki sistem modelinde yer alan DSM-RIS geri eşleyici ile kestirilen bit dizisi $\hat{\mathbf{b}}$ elde edilir.

3. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde, önerilen DSM-RIS sisteminin BER performans eğrileri sunulmuş ve DSM sistemi ve MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS gibi popüler RIS tabanlı IM teknikleriyle aynı spektral verimlilikte BER cinsinden performans karşılaştırmaları ele alınmıştır. Ayrıca önerilen DSM-RIS sisteminin BER performansının sistemde kullanılan yansıtıcı yüzey ve anten sa-



Şekil 4. DSM-RIS, DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerinin $\eta = 8$ ve $N = 128$ için BER başarım kıyaslaması.



Şekil 5. DSM-RIS, DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerinin $\eta = 10$ ve $N = 256$ için BER başarım kıyaslaması.

ylarına göre nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Performans analizleri Rayleigh sönümlmeli kanalları üzerinde M -QAM modülasyonu için Monte Carlo simülasyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Performans simülasyonlarında yer alan SNR ifadesi, $\text{SNR}(\text{dB}) = 10 \log_{10}(E_x/N_0)$ olarak tanımlanır ve burada E_x ortalama simge enerjisini temsil etmektedir.

Şekil 2'de, $M = 4$ ve $N = 128$ parametreleri sabit tutulup, değişen verici anten sayısı $N_T = 4, 8, 16, 32$ için önerilen DSM-RIS sistemin performansı sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, verici anten sayısı arttıkça başarımın düştüğü görülmektedir. Fakat, önerilen sistemde verici anten indislerinde ekstra bilgi taşındığı için verici anten sayısı arttıkça birim zamanda iletilen bilgi miktarı da artar. Bu nedenle spektral verimlilik ile hata başarımı arasında ters orantı olduğu görülmektedir.

Şekil 3'te, $M = 4$ ve $N_T = 2$ parametreleri sabit tutulup, değişen RIS elemanı sayısının $N = 2, 8, 32, 128$ önerilen sistem performansını nasıl etkilediği sunulmuştur. Şekil 3'ten de kolayca görülebileceği gibi yansıtıcı yüzey sayısı N arttıkça sistem performansı büyük oranda iyileşmektedir. Bu nedenle RIS tabanlı bir sistemde ihtiyaç duyulan hata başarımına göre uygun sayıda yansıtıcı yüzey sayısı belirlenebilir.

Şekil 4'te, spektral verimliliğin $\eta = 8$ bit olduğu durumda DSM-RIS sistemi ile DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerinin performans eğrileri karşılaştırılmıştır. DSM-RIS/DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemleri için

seçilen parametreler sırasıyla ($M = 8, N_T = 2$), ($M = 4, m_{r,f} = 6$), ($M = 4, N_T = 8$) ve ($M = 2, N_T = 128$) şeklindedir. Elde edilen performans sonuçlarına göre DSM-RIS sisteminin karşılaştırılan diğer sistemlerden daha iyi bir hata performansına sahip olduğu görülmüştür. Önerilen DSM-RIS sistemi, sırasıyla SM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve DSM sistemlerine göre 10^{-4} BER değerinde 43.55 dB, 36.06 dB, 20.55 dB ve 11.69 dB SNR kazancına sahiptir.

Şekil 5'te, Şekil 4'e benzer olarak, DSM-RIS sistemi ile DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerinin performans karşılaştırmaları sunulmuştur. Ancak burada tüm sistemler için spektral verimlilik $\eta = 10$ bit ve yansıtıcı yüzey sayısı $N = 256$ olarak seçilmiştir. Ayrıca DSM-RIS/DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemleri için sırasıyla ($M = 8, N_T = 4$), ($M = 8, m_{r,f} = 7$), ($M = 4, N_T = 16$) ve ($M = 4, N_T = 256$) değerleri seçilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi spektral verimlilik artırıldığında da DSM-RIS sistemi DSM, MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemlerine kıyasla daha iyi bir BER başarımı sağlamaktadır. Ayrıca, önerilen DSM-RIS sistemi, SM-RIS, MBM-RIS, QSM-RIS ve DSM sistemlerine göre 10^{-4} BER değerinde sırasıyla 39.35 dB, 34 dB, 17.42 dB ve 11.84 dB SNR kazancı sağlamaktadır.

Sonuç olarak, önerilen DSM-RIS sisteminin kıyaslanan sistemlere göre daha iyi bir hata başarımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, önerilen DSM-RIS sistemi, kıyaslanan sistemlerden daha yüksek spektral verimlilik sağlamaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, yüksek veri hızı ve yüksek hata başarımına sahip yeni bir sistem olan DSM-RIS sistemi önerilmiştir. DSM-RIS sisteminin performansı, DSM sistemi ve yaygın olarak tercih edilen RIS tabanlı IM teknikleri olan MBM-RIS, QSM-RIS ve SM-RIS sistemleriyle karşılaştırılmıştır. Tüm karşılaştırma sonuçları göre önerilen DSM-RIS sisteminin kıyaslanan diğer sistemlerden aynı spektral verimlilik için daha iyi bir BER performansına sahip olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, DSM-RIS sisteminin belirli parametrelere bağlı olarak performansın nasıl değiştiği gözlemlenmiş ve yorumlanmıştır. Ayrıca, DSM-RIS sistemi ve karşılaştırılan diğer sistemlerin veri hızı analizleri yapılmış ve önerilen DSM-RIS sisteminin bahsi geçen diğer sistemlere göre daha yüksek veri hızı sağladığı gözlemlenmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions," *IEEE Open j. Commun. Soc.*, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
- [2] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 7, pp. 168–175, 2016.
- [3] F. Cogen, E. Aydin, N. Kabaoglu, E. Basar, and H. Ilhan, "Generalized code index modulation and spatial modulation for high rate and energy-efficient MIMO systems on rayleigh block-fading channel," *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 1, pp. 538–545, 2021.
- [4] E. Aydin, "EDAS/COAS based antenna selection for code index modulation aided spatial modulation," *Electrica*, vol. 19, no. 2, pp. 113–119, 2019.
- [5] F. Cogen and E. Aydin, "Hexagonal quadrature amplitude modulation aided spatial modulation," *2019 11th Int. Conf. on Elect. and Electron. Eng. (ELECO)*, November 2019.
- [6] E. Aydin and H. Ilhan, "SNR-based relay selection scheme for cooperative relay networks," in *Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf.*, pp. 448–453, 2015.
- [7] T. Mao, Q. Wang, Z. Wang, and S. Chen, "Novel index modulation techniques: A survey," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 21, no. 1, pp. 315–348, 2019.
- [8] E. Aydin, "A new hexagonal quadrature amplitude modulation aided media-based modulation," *Int. J. of Commun. Syst.*, vol. 34, no. 17, p. e4994, 2021.
- [9] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, no. 4, pp. 2228–2241, 2008.
- [10] M. Di Renzo, H. Haas, A. Ghayeb, S. Sugiura, and L. Hanzo, "Spatial modulation for generalized MIMO: Challenges, opportunities, and implementation," *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 1, pp. 56–103, 2014.
- [11] Y. Bian, X. Cheng, M. Wen, L. Yang, H. V. Poor, and B. Jiao, "Differential spatial modulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 7, pp. 3262–3268, 2015.
- [12] Z. Yigit and E. Basar, "Double spatial modulation: A high-rate index modulation scheme for MIMO systems," *Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, pp. 347–351, 2016.
- [13] E. Aydin and H. Ilhan, "A novel SM-based MIMO system with index modulation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 2, pp. 244–247, 2016.
- [14] B. A. Ozden, M. Tuylu, and E. Erdogan, "Performance analysis of UAV relaying using energy harvesting," *2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pp. 1–4, 2020.
- [15] E. Basar, "Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 3187–3196, 2020.
- [16] X. Yuan, Y.-J. A. Zhang, Y. Shi, W. Yan, and H. Liu, "Reconfigurable-intelligent-surface empowered wireless communications: Challenges and opportunities," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 2, pp. 136–143, 2021.
- [17] A. Khaleel and E. Basar, "Reconfigurable intelligent surface-empowered MIMO systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 3, pp. 4358–4366, 2021.
- [18] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 4157–4170, 2019.
- [19] A. E. Canbilen, E. Basar, and S. S. Ikki, "Reconfigurable intelligent surface-assisted space shift keying," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 9, no. 9, pp. 1495–1499, 2020.
- [20] Y. Hussein, M. Assaad, and H. Sari, "Reconfigurable intelligent surface index modulation with signature constellations," in *2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1–7, 2021.
- [21] F. Bayar, O. Salan, H. Ilhan, and E. Aydin, "Space-time block coded reconfigurable intelligent surface-based received spatial modulation," *arXiv*, 2022.