

## İşaret Uzaı Çeşitliliği ve Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeyler Aracılığıyla Kablosuz Haberleşme Başarımının Arttırılması

İrem YÜCE<sup>1\*</sup>, Mustafa Anıl REŞAT<sup>2</sup>, Serdar ÖZYURT<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Ankara, Türkiye

\*<sup>1</sup> iremyuce8991@gmail.com, <sup>2</sup> maresat@aybu.edu.tr, <sup>3</sup> sozyurt@ybu.edu.tr

(Geliş/Received: 22/01/2025;

Kabul/Accepted:11/04/2025)

**Öz:** Bu çalışmada, ikili faz kaydırmalı anahtarlama ve dörtlü faz kaydırmalı anahtarlama modülasyon teknikleri için, işaret uzaı çeşitliliği (SSD) ve yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler (RIS) kullanan tek giriş tek çıkış sistemlerinin performansı araştırılmaktadır. Bu kapsamda, Rayleigh sönümlmeli kanallar altında analog ve nicemlenmiş RIS kurulumları karşılaştırılmaktadır. Her iki RIS yapılandırması da bit hata oranı performansını RIS olmayan sistemlere kıyasla önemli ölçüde artırmaktadır. Buna karşılık, analog RIS kurulumunun, nicemleme hataları sebebiyle ortam faz kaymalarından daha fazla etkilenen nicemlenmiş RIS kurulumuna kıyasla hata performansı üzerinde önemli ölçüde daha az etkisi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, SSD kullanımı sayesinde sadece çok küçük bir karmaşıklık artışıyla hata performansı oldukça iyileşmektedir. Bu açıdan, RIS ve SSD tekniklerinin birlikte kullanımı, 5G ve ötesi ağların taleplerini karşılamak için uygun maliyetli ve enerji verimli çözümler sağlama potansiyelini gerçekleştirebilecek bir alternatif olarak sunulmaktadır.

**Anahtar kelimeler:** Yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler, ikili faz kaydırma anahtarlama, dörtlü faz kaydırma anahtarlama, tek giriş tek çıkış, işaret uzaı çeşitliliği, nicemleme hatası.

## Augmenting Wireless Communication Performance through Signal Space Diversity and Reconfigurable Intelligent Surfaces

**Abstract:** This study investigates the enhancement of the performance of single input single output communication systems, employing binary phase shift keying and quadrature phase shift keying modulation schemes, through the integration of signal space diversity (SSD) and reconfigurable intelligent surfaces (RIS). The study conducts a comparative analysis of analog and quantized RIS configurations under Rayleigh fading conditions. The findings reveal that both architectures significantly improve the bit error rate performance relative to conventional non-RIS-assisted systems. Specifically, the analog RIS configuration demonstrates greater resilience in mitigating error performance degradation, whereas the quantized RIS configuration exhibits higher susceptibility to phase distortions arising from quantization-induced inaccuracies. Furthermore, the incorporation of SSD results in a marked improvement in error performance while incurring only a minimal increase in system complexity. These results underscore the potential of integrating RIS and SSD as a cost-effective and energy-efficient solution, particularly in addressing the stringent reliability and performance requirements of 5G and beyond networks.

**Keywords:** Reconfigurable intelligent surfaces, binary phase shift keying, quadrature phase shift keying, single input single output, signal space diversity, quantization error.

### 1. Giriş

Geçtiğimiz birkaç on yılda kablosuz iletişim teknolojisi, daha yüksek veri hızları, gelişmiş güvenilirlik ve artırılmış spektrum verimliliği hedefleri doğrultusunda önemli ilerlemeler kaydetmiştir [1]. Geleceğin iletişim teknolojileri olan beşinci nesil kablosuz iletişim (5G) ve altıncı nesil kablosuz iletişim (6G), daha hızlı, daha güvenilir ve daha yoğun bağlantılar sağlama ihtiyacının bir sonucu olarak kablosuz sistemlerin evriminde önemli bir sıçrama sağlayacaktır [2]. Bu gelişmeler, yalnızca sürekli iyileştirmeler değil, aynı zamanda veri trafiği, cihaz sayısındaki artış ve çeşitli kullanım koşullarının üstesinden gelmek için yapılan temel değişikliklerdir [3]. 5G, veri hızları, gecikme süreleri ve bağlantı yoğunluğu açısından önemli kazanımlar sağlamış olsa da 6G vizyonu daha da ileriye giderek terabit/saniye düzeyinde veri hızları, gerçek zamanlı etkileşim ve fiziksel ve dijital alanlar arasında kesintisiz entegrasyon hedeflemektedir [4]. Bu hedefe ulaşmak için kablosuz ağların çevreleriyle nasıl etkileşim kurduğunu değiştirmek çok önemlidir [5]. Geleneksel ağlar, yayılma ortamını sabit ve kontrol edilemez bir faktör olarak ele alarak yalnızca verici ve alıcı uçlardaki gelişmiş donanım ve algoritmalara güvenir [6]. Bununla birlikte, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler (RIS) gibi yeni teknolojiler, elektromanyetik dalgaların nasıl yayıldığını

\* Sorumlu yazar: [iremyuce8991@gmail.com](mailto:iremyuce8991@gmail.com). Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0009-0005-3926-9108, <sup>2</sup> 0000-0002-3741-7358, <sup>3</sup> 0000-0002-9612-6227

sürekli olarak kontrol etme yeteneğine sahiptir [7]. RIS, kablosuz iletişim kanallarının sinyal gücünü, kapsama alanını ve enerji verimliliğini artırmak ve daha akıllı, daha uyarlanabilir bir iletişim ekosistemi oluşturmak için yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır [8]. 6G kablosuz ağları ilerledikçe, RIS özellikle 100 GHz'in üzerindeki frekanslarda iletişim ve konumlandırma yeteneklerini geliştirmede önemli bir rol oynayacaktır [1].

RIS, sinyal yayılımını optimize etmek için faz kaymalarını değiştirme yeteneğine sahip programlanabilir yansıtıcı birim hücrelerden oluşur [9]. Bu, sinyal-gürültü oranlarını iyileştirir ve zorlu, görüş hattı olmayan ortamlarda bile güvenilir bir iletişim sağlar [10]. RISlerin gelen dalgaları manipüle etme ve yapıcı girişim oluşturma yetenekleri, geçici engeller ve kullanıcı hareketliliği gibi zorluklarla başa çıkmayı sağlamaktadır [11]. Elektromanyetik dalgaların fazını, genliğini ve polarizasyonunu değiştirebilen programlanabilir elemanlarla donatılan RIS, dinamik sinyal optimizasyonu sağlar [12]. Bu elemanlar akıllıca yapılandırıldığında, RIS sinyal gücünü artırır, sönmlemeyi azaltır ve hata oranını iyileştirir. Bu özellikler, RISi çoklu yol yayılımına sahip kentsel ortamlar gibi karmaşık senaryolar için etkili bir çözüm haline getirir [9, 13]. Geleneksel rölelerin aksine, RIS aktif amplifikasyon gerektirmez ve bu nedenle uygun maliyetli ve enerji açısından verimli bir alternatif sunar. Karmaşık modülasyon teknikleriyle birleştirildiğinde, RISin enerji tüketiminde ve spektral verimlilikte önemli iyileştirmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, RIS teknolojileri, nesnelerin interneti (IoT), akıllı şehirler ve otonom araçlar gibi uygulamalarda güvenilir iletişim sağlayarak yaygın zorlukları hafifletir [10,12]. Örneğin, RISlar, elektromanyetik dalgaların fazını ve genliğini dinamik olarak kontrol ederek, karmaşık yansıma ortamlarında sinyal yayılımını optimize eder ve bu sayede IoT cihazları arasında daha güvenilir ve enerji verimli iletişim sağlar [13]. Bu, akıllı şehirlerde sensör ağlarının etkinliğini artırır ve otonom araçların güvenli veri alışverişini destekler.

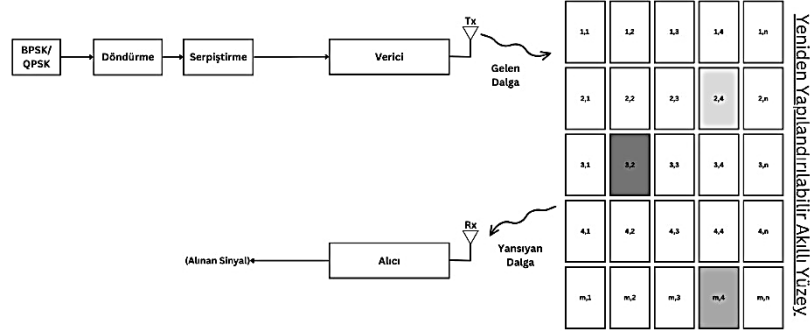
Geleneksel çeşitlilik yöntemleri zaman, frekans, kod ve uzay boyutlarının birden çok kere kullanımını içermektedir [14]. Öte yandan, işaret uzayı çeşitliliği (SSD) hata performansını artırırken sadece modüle edilmiş sembollerden oluşan işaret uzayındaki hali hazırda bulunan dikgenliği kullanan, düşük karmaşıklıkla bir çeşitlilik tekniğidir. SSD sisteminde iki prosedür uygulanmaktadır: biri, sinyal takımıyıldızını optimum bir döndürme açısı ile döndürmeyi içerirken, diğeri koordinat serpiştirme ile ilgilidir [15]. SSD ilk olarak, takımıyıldız sembollerinin döndürülmesini kullanarak, orijinal sembolleri her bir işaret noktası ayrı I ve Q bileşenlerine sahip olacak şekilde yeniden düzenlemektedir [16]. Kanal sönmleme katsayılarının birbirinden bağımsızlığını sağlamak için bu süreç belirli bir stratejiye göre belirlenmiş bir I/Q serpiştirme yöntemiyle birleştirilerek, ek karmaşıklık veya kaynak ihtiyacı olmaksızın çeşitlilik sağlanır ve genel sistem verimliliği artırılır [17]. SSD, özellikle çok sayıda anten kullanarak çeşitliliğin sağlanamadığı tek giriş tek çıkış (SISO) sistemlerinde oldukça etkilidir. Rayleigh sönmlemesi bağlamında, SSD tüm sinyal boyutlarında eşzamanlı derin sönmleme olasılığını azaltarak düşürmektedir [11,18].

Kablosuz haberleşme sistemlerinde sinyal, çevresel etkiler nedeniyle farklı yollar üzerinden alıcıya ulaşarak Rayleigh sönmlemeye uğrar [19]. Rayleigh sönmleme modeli, yoğun kentsel bölgeler ve iç mekân haberleşme sistemleri gibi gerçekçi kablosuz ortamları modellemek için sıklıkla kullanılır [20]. Bu çalışma, Rayleigh sönmlemesi koşulları altında SISO sistemlerindeki bit hata oranı (BER) performansı üzerinde RIS ve SSD tekniklerinin etkisini incelemekte ve analog RIS ile nicemlenmiş RIS yapılandırmalarını karşılaştırarak bunların güçlü ve zayıf yönlerini değerlendirmektedir. SSD tekniğinin takımıyıldız rotasyonu ve koordinat serpiştirme teknikleri, sinyal dayanıklılığını artırırken; RIS, kablosuz ortamı dinamik olarak optimize ederek sönmlemeyi azaltmakta ve sinyal kalitesini iyileştirmektedir [21]. Ayrı faz kaydırma kullanan nicemlenmiş RIS, BER performansını hafifçe etkileyen küçük bir nicemleme gürültüsü sunmasına rağmen, RIS kullanılmayan sistemlere kıyasla üstün bir performans sergilemektedir. Bu durum, nicemlenmiş RIS ortamının bütçeye duyarlı kablosuz ağlar için pratik ve uygun maliyetli bir seçenek haline getirmektedir [22]. Öte yandan, analog RIS, sinyal dayanıklılığını ve hata oranının doğruluğunu önemli ölçüde iyileştiren gelişmiş faz kontrolü sağlamaktadır [23]. Ancak, daha yüksek karmaşıklık seviyesi, donanım tasarımı ve enerji verimliliği açısından zorluklar yaratmakta ve bu da analog RIS ortamını düşük güç tüketimi ve basitlik gerektiren uygulamalar için daha az uygun kılmaktadır [24]. Bu araştırma, zorlu ortamlarda RIS yapılandırmalarının spektral ve enerji verimliliğini artırma potansiyelini vurgulamakta ve performans ile uygulama karmaşıklığı arasındaki dengeyi detaylı bir şekilde ele almaktadır. Bu entegrasyon, BPSK ve QPSK şemalarının otonom araçlar ve IoT cihazları gibi uygulamalarda üstün BER performansı göstermesini ve böylece bu modülasyon tekniklerinin yeni nesil ağlarda güvenilir ve verimli iletişimin temel taşı haline gelmesini sağlayabilir.

Notasyon: Bu çalışmada büyük ve koyu harfler matrisleri, küçük ve koyu harfler ise vektörleri temsil etmektedir.  $N \times N$  boyutundaki bir birim matris  $\mathbf{I}_N$  ile belirtilmiştir. Diyagonalinde  $x_1, \dots, x_N$  olan bir diyagonal matris  $\text{diag}(x_1, \dots, x_N)$  ile gösterilmiştir. Dairesel olarak simetrik karmaşık Gauss dağılımı ise  $\mathcal{CN}(\cdot, \cdot)$  ile ifade edilmiştir [25].

## 2. Sistem Modeli

Bu bölümde, çalışmada önerilen sistem modeli ele alınmıştır. Şekil 1, çalışmada ortaya konan RIS destekli ve SSD kullanan bir kablosuz iletişim sistemini göstermektedir. İletilmek istenen dijital veri, BPSK veya QPSK modülasyon teknikleriyle işlenir; ardından faz döndürme ve serpiştirme işlemleriyle sinyal, parazit ve çok yollu yayılmaya karşı dayanıklı hale getirilir. Bu sinyal, verici tarafından ortama iletilir ve RIS üzerinden yansıtılarak alıcıya yönlendirilir, yani verici ve alıcı arasında doğrudan iletişim yoktur. RIS, faz ve genliği ayarlanabilir pasif elemanlardan oluşur ve gelen sinyali alıcıya en uygun şekilde yansıtmakla görevlidir. Diyagramda koyu renkle gösterilen hücreler, aktif olarak yansıtma yapan RIS elemanlarını temsil eder. Bu yapı sayesinde, kanal koşulları iyileştirilerek daha güvenilir ve verimli bir iletişim sağlanır.



Şekil 1. Sistem modeli

Vericide BPSK veya QPSK modülasyon şemalarına göre üretilen semboller, SSD tekniği kapsamında BPSK modülasyonu için saat yönünün tersine 45 derecelik, QPSK modülasyonu için ise saat yönünün tersine 30 derecelik bir döndürme açısıyla döndürülmektedir. Burada ortalama sembol enerjisinin  $E_s$  olduğu kabul edilmiştir. Bu kapsamda bir iletim periyodunda üretilen bir sembolü  $s_k = s_{kl} + js_{kQ}$  olarak tarif edebiliriz ( $k \in \{1,2,3, \dots\}$ ) [26]. Burada  $s_{kl}$ ,  $s_k$  sembolünün I bileşenini gösterirken,  $s_{kQ}$  ise Q bileşenini göstermektedir. Daha sonra döndürülmüş semboller üzerinde koordinat serpiştirmesi uygulanarak,  $x_k$  sembolleri elde edilmektedir [26]. Burada  $x_k = s_{\alpha l} + js_{\beta Q}$  olmaktadır ( $\alpha, \beta \in \{1,2,3, \dots\}$  ve  $\alpha \neq \beta$ ) [27]. Bu sayede modüle edilmiş bir sembolün I ve Q bileşenlerine etki eden kanal kazançları arasındaki korelasyon katsayısı sıfıra eşit olmaktadır [27].

Vericiden iletilen  $x$  sembolleri, verici ile alıcı arasında yer alan RIS vasıtasıyla yansıtılarak alıcıya iletilmektedir. Bu iletim süreci sonucunda alıcıda alınan sinyal:

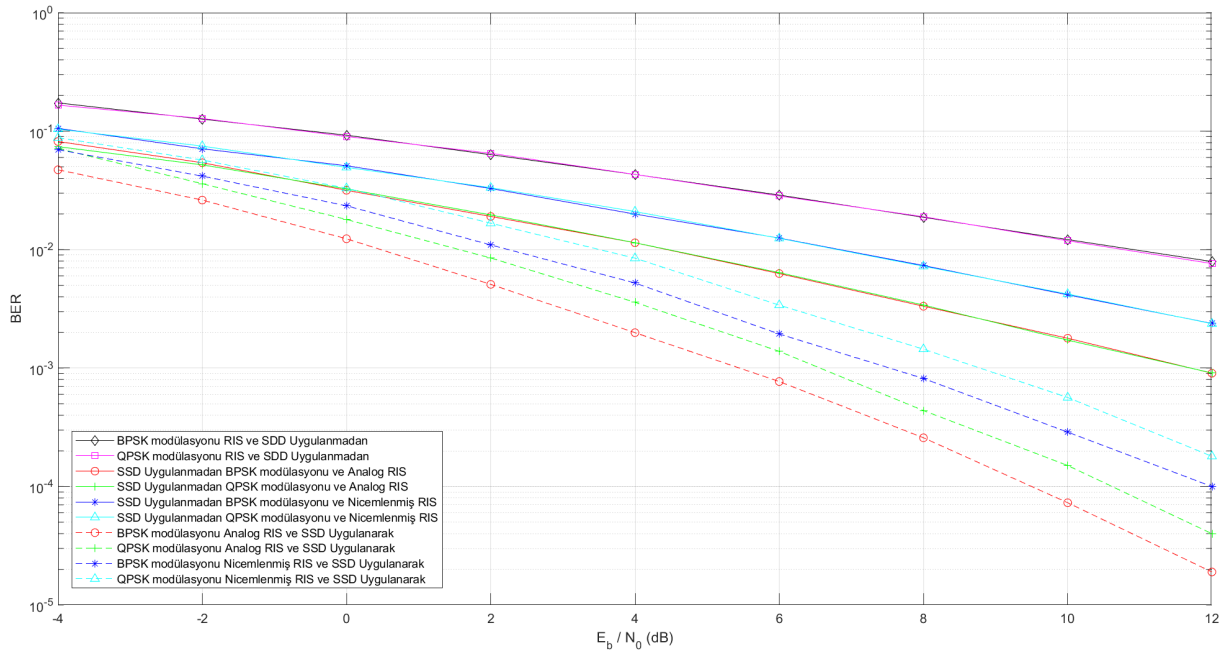
$$y = \sqrt{\rho} \mathbf{h}_{sr}^H \mathbf{\Theta} \mathbf{h}_{rd} x + n \quad (1)$$

Eşitlik (1) ile gösterilebilir. Burada  $\rho$  kaynak tarafından iletilen sembol için ayrılmış olan iletim gücünü,  $\mathbf{h}_{sr} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \beta_{sr} \mathbf{I}_N)$ , verici ve RIS arasındaki kanalı,  $\mathbf{h}_{rd} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \beta_{rd} \mathbf{I}_N)$  RIS ile alıcı arasındaki kanalı temsil etmektedir [25].  $\mathbf{\Theta} = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N})$  RIS tarafından oluşturulan faz kaymalarını temsil eden diyagonal bir matris olup bu faz kaymaları,  $\theta_N$  değerleri ile gösterilmekte olup, belirli bir aralıkta  $[-\pi, \pi]$  değişebilmektedir. ( $\beta_{sr}$  ve  $\beta_{rd}$  büyük ölçekli sönmüleme katsayılarıdır). Bu denklemde yer alan  $\mathbf{\Theta}$  matrisi, RIS elemanlarının uyguladığı faz kaymalarını belirlemektedir ve değerlerine bağlı olarak hem analog RIS hem de nicemlenmiş RIS senaryolarını temsil edebilir. Analog RIS durumunda,  $\mathbf{\Theta}$  matrisindeki faz değerleri sürekli olup istenen fazlar tam olarak uygulanabilirken; quantized RIS durumunda ise bu faz değerleri belirli ayrık seviyelere nicemlenmiştir. Son olarak,  $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$  alıcı tarafındaki gürültüyü temsil etmekte olup sıfır ortalamalı ve  $\sigma^2$  varyansına sahip kompleks normal dağılımlı bir rastgele değişken olarak modellenmektedir [25].

Nicemlenmiş RIS senaryosu için ise donanım kısıtlamaları sebebiyle yansıtıcı faz değerleri  $\{\phi_i\}_{i=1}^N$  pratikte sadece sonlu sayıda ayrık değerler alabilmektedir. Ayrık değerlerin sayısını  $2^b$  ile ve nicemleme seviye sayısının  $b$  ile gösterildiği durumda yansıtıcı fazları düzgün olarak nicemlenebilmektedir ve bu durumda ayrık fazlar  $\{0, \frac{2\pi}{2^b}, \dots, \frac{(2^b-1)2\pi}{2^b}\}$  ile gösterilebilmektedir. Bu durumda eş dağılımlı faz kuantalama hatası  $[-\frac{\pi}{2^b}, \frac{\pi}{2^b}]$  aralığındadır [28]. Nicemlenmiş RIS sistemleri, donanım kısıtlamalarına rağmen kablosuz iletişimde performans artırıcı etkiler gösterebilmekte ve spektral verimliliği optimize etmektedir [29].

### 3. Numerik Sonuçlar

Bu çalışmada, Rayleigh sönümleme etkisi altında SISO sistemlerinin hata performansını iyileştirmek amacıyla RIS ve SSD teknikleri entegre edilmiştir. Vericide semboller BPSK veya QPSK modülasyon şemalarına göre üretilmektedir. Daha sonra ise, orijinal modülasyon şeması BPSK modülasyonu için saat yönünün tersine 45 derecelik, QPSK modülasyonu için ise saat yönünün tersine 30 derecelik bir döndürme açısıyla döndürülmektedir. Bu şartlar altında, RISin analog ve nicemlenmiş yapılandırmaları karşılaştırılmış ve SSD tekniğinin sağladığı kazançlar analiz edilmiştir. Simülasyonlar, farklı RIS eleman sayıları ve nicemleme seviyeleri parametreleri altında gerçekleştirilerek, RIS ve SSD teknolojilerinin birlikte kullanımının BER üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bölümde, benzetimler sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar sunulmakta ve önerilen sistemin performans iyileştirmeleri değerlendirilmektedir. Farklı sistem yapılandırmalarında BER performansını değerlendirmek için yapılan analizlerde, bit başına enerji/gürültü güç oranı  $\left(\frac{E_b}{N_0}\right)$  temel alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, RIS ve SSD tekniklerinin BPSK ve QPSK modülasyonlarıyla çalışan SISO sistemler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

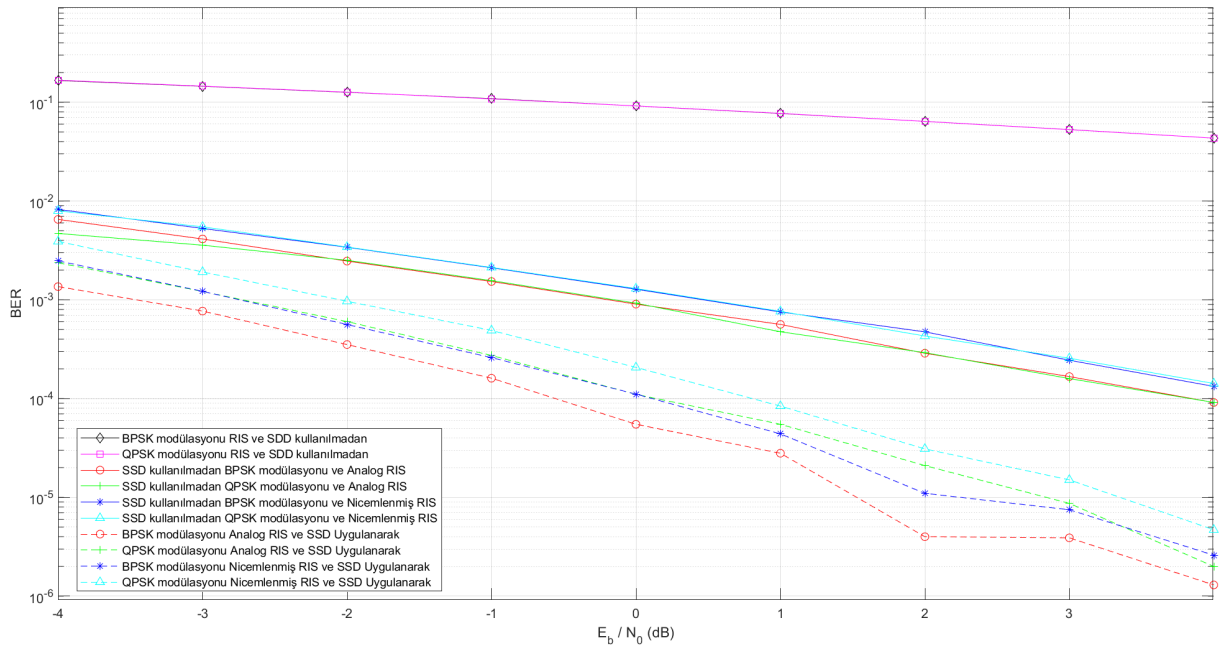


Şekil 2. RIS sayısı = 2 ve Nicemleme biti = 1 durumu.

Şekil 2’de gösterilen simülasyon sonuçları iki RIS elemanına sahip ve bir bitlik nicemleme gürültü seviyesinde çalışan bir sistem senaryosuna dayanmaktadır. RIS bulunmayan, Analog RIS veya SSD içermeyen sistemler, beklendiği üzere en yüksek BER değerlerini sergilemiştir. BER değeri  $10^{-4}$  olduğunda, analog RIS ve SSD kullanımı, nicemlenmiş RIS ve SSD yöntemine kıyasla QPSK modülasyonu için 3,3 dB, BPSK modülasyonu için ise 3,52 dB ek kazanç sağlamaktadır. Ayrıca, aynı sistem içinde QPSK modülasyonunun kullanılması, BPSK modülasyonuna kıyasla kazançta azalmaya neden olmaktadır. Bu azalma analog RIS ve SSD entegrasyonunda 1,28 dB, nicemlenmiş RIS ve SSD ile kullanımında ise 1,12 dB olarak gözlemlenmiştir. Genel olarak, Tablo 1’de de gözlemlediğimiz üzere; analog RIS, nicemlenmiş RISa kıyasla daha üstün hata performansı sunarken, SSD metodunun entegrasyonu BER değerlerinde önemli bir iyileşme sağlamaktadır. Bununla birlikte, BPSK modülasyonu, çoğu durumda QPSK modülasyonuna kıyasla daha yüksek kazanç sunmaktadır. Özellikle BER değerinin  $10^{-4}$  olduğu senaryolarda, analog RIS ve SSD tekniklerinin birlikte kullanımı en büyük avantajı sağlamaktadır. Bu bulgular, RIS ve SSD entegrasyonunun sinyal dayanıklılığı ve enerji verimliliğini artırmada kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

**Tablo 1.** RIS sayısı = 2 ve Nicemleme biti = 1 durumu.

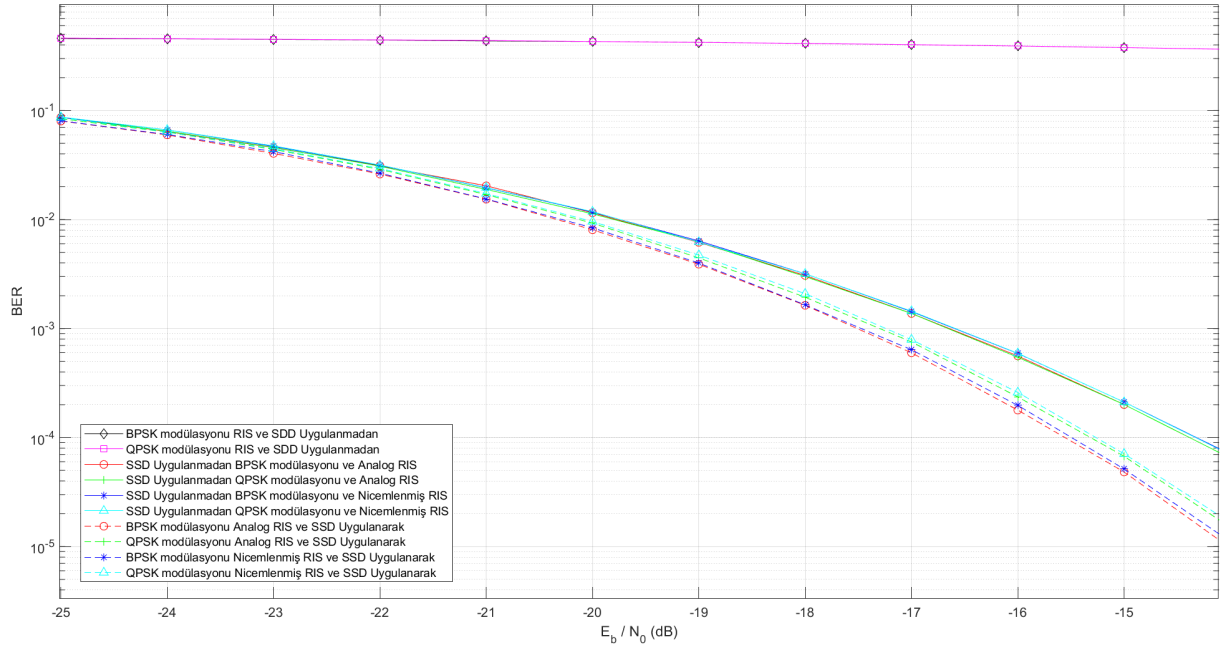
| Modülasyon  | Yapılandırma Karşılaştırması           | Kazanç (dB) | BER Seviyesi |
|-------------|----------------------------------------|-------------|--------------|
| <b>QPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD  | 3,3         | $10^{-4}$    |
| <b>QPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Analog RIS (no SSD)  | 1,28        | $10^{-4}$    |
| <b>QPSK</b> | Nicemlenmiş RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS | 1,12        | $10^{-4}$    |
| <b>BPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD  | 3,52        | $10^{-4}$    |

**Şekil 3.** RIS sayısı = 4 ve Nicemleme biti = 2 durumu.

Şekil 3'te dört RIS elemanı ve iki bitlik nicemleme gürültü seviyesine sahip bir sistem senaryosu incelenmiştir. Bu senaryoda, RIS ve SSD içermeyen sistemler beklendiği üzere çok yüksek bir hata seviyesinde kalmıştır. BER değeri  $10^{-4}$  olduğunda, analog RIS ve SSD kullanılan QPSK modülasyonu, nicemlenmiş RIS ve SSD kullanılan QPSK modülasyonuna kıyasla 1,14 dB daha yüksek kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, BPSK modülasyonunun analog RIS ve SSD ile kullanımı, nicemlenmiş RIS ile kullanılan BPSK modülasyonuna kıyasla 0,6 dB daha fazla kazanç sunmaktadır. Yalnızca analog RIS kullanan sistemlere kıyasla, analog RIS ve SSD tekniklerinin entegre edildiği QPSK modülasyonu 4,3 dB, BPSK modülasyonu ise 4,1 dB ek kazanç sağlamaktadır. Öte yandan, yalnızca nicemlenmiş RIS içeren sistemlere kıyasla, SSD ile birlikte kullanılan nicemlenmiş RIS destekli QPSK modülasyonu 3,5 dB, BPSK modülasyonu ise 4 dB daha yüksek kazanç elde etmektedir. BER değeri  $10^{-5}$  seviyesine düştüğünde, analog RIS ve SSD ile desteklenen QPSK modülasyonu, nicemlenmiş RIS ve SSD kullanılan QPSK modülasyonuna kıyasla 0,7 dB daha fazla kazanç sağlamaktadır. Ayrıca, analog RIS ve SSD kullanılarak gerçekleştirilen BPSK modülasyonu ile nicemlenmiş RIS ve SSD kullanılan QPSK modülasyonu arasında da 0,7 dB'lık bir kazanç farkı gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, RIS ve SSD teknolojilerinin birlikte kullanımının kablosuz haberleşme sistemlerinin performansını önemli ölçüde artırdığını ve Tablo 2'de de görüldüğü gibi, özellikle zorlu kanal koşullarında hata oranını düşürerek iletişim güvenilirliğini en üst düzeye çıkardığını ortaya koymaktadır.

**Tablo 2.** RIS sayısı = 4 ve Nicemleme biti = 2 durumu.

| Modülasyon  | Yapılandırma Karşılaştırması           | Kazanç (dB) | BER Seviyesi |
|-------------|----------------------------------------|-------------|--------------|
| <b>QPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD  | 1,14        | $10^{-4}$    |
| <b>BPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD  | 0,6         | $10^{-4}$    |
| <b>QPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Analog RIS (no SSD)  | 4,3         | $10^{-4}$    |
| <b>BPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Analog RIS (no SSD)  | 4,1         | $10^{-4}$    |
| <b>QPSK</b> | Nicemlenmiş RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS | 3,5         | $10^{-4}$    |
| <b>BPSK</b> | Nicemlenmiş RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS | 4,0         | $10^{-4}$    |
| <b>QPSK</b> | Analog RIS+SSD vs Nicemlenmiş RIS+SSD  | 0,7         | $10^{-5}$    |

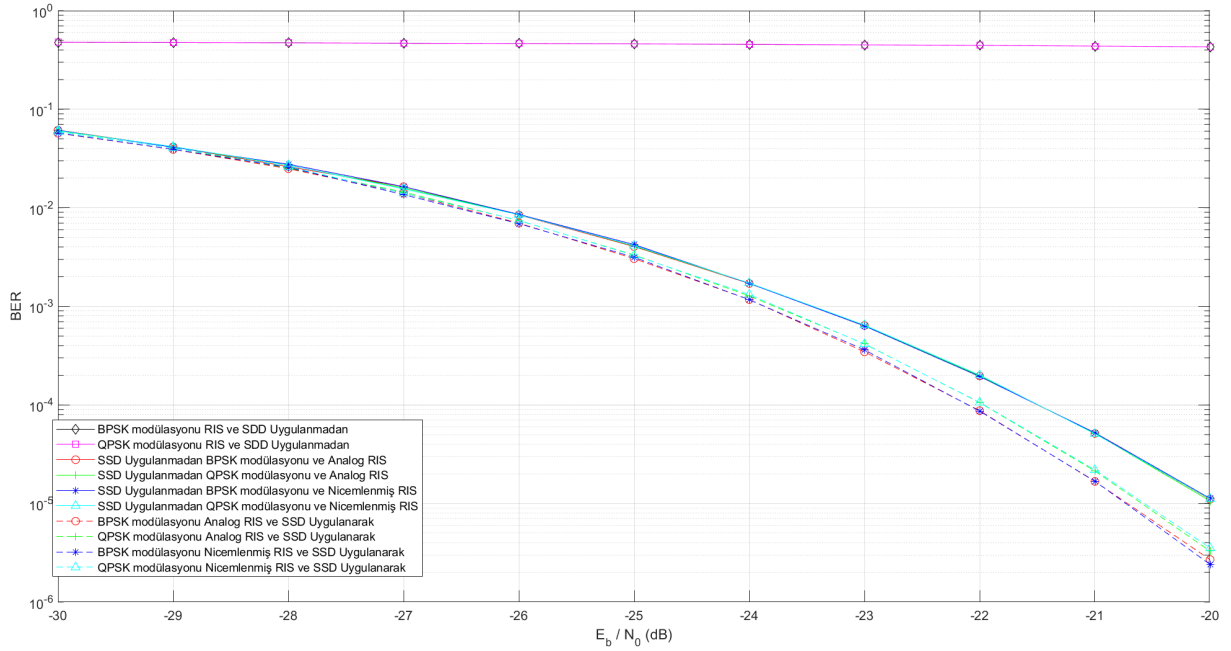
**Şekil 4.** RIS sayısı = 16 ve Nicemleme biti = 4 durumu.

Şekil 4'te 16 RIS elemanı ve 4 bitlik nicemleme gürültü seviyesine sahip bir senaryo değerlendirilmiştir. BER seviyesi  $10^{-3}$  değerine yaklaştıkça, performans iyileştirmeleri belirgin bir şekilde artmakta ve SSD tekniğinin etkisi daha da ön plana çıkmaktadır. Bu koşullar altında, QPSK modülasyonunun nicemlenmiş RIS veya analog RIS ile birlikte SSD kullanılarak uygulanması, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 0,7 dB kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, BPSK modülasyonu 0,9 dB kazanç elde ederek, bu BER seviyesinde QPSK şemasına kıyasla daha üstün bir performans sergilemektedir. BER seviyesi  $10^{-4}$ 'e düştüğünde, kazanç artışı daha da belirgin hale gelmektedir. Bu durumda, nicemlenmiş RIS veya analog RIS ile birlikte SSD kullanılan QPSK modülasyonu, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 1,0 dB kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, SSD ile entegre edilen nicemlenmiş RIS veya analog RIS destekli BPSK modülasyonu, SSD içermeyen sistemlere kıyasla 1,2 dB'lık bir performans artışı sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, SSD tekniğinin hem nicemlenmiş RIS hem de analog RIS tabanlı iletişim sistemlerinin BER performansını önemli ölçüde iyileştirdiğini ve bu etkinin özellikle düşük BER seviyelerinde daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Tablo 3'te de görüldüğü gibi, BPSK modülasyonu, QPSK

modülasyonuna kıyasla istikrarlı bir şekilde daha yüksek kazanç sağlamakta olup, düşük hata oranlarının kritik olduğu haberleşme senaryolarında daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, RIS elemanlarının sayısının 16'ya çıkarılmasıyla birlikte sistem performansı artmakta ve bu durum, gelişmiş RIS ve SSD tekniklerinin entegrasyonunun, güvenilir ve yüksek performanslı kablosuz iletişim sistemlerinin geliştirilmesi açısından kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

**Tablo 3.** RIS sayısı = 16 ve Nicemleme biti = 4 durumu.

| Modülasyon  | Yapılandırma Karşılaştırması | Kazanç (dB) | BER Seviyesi |
|-------------|------------------------------|-------------|--------------|
| <b>QPSK</b> | RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan  | 0,7         | $10^{-3}$    |
| <b>BPSK</b> | RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan  | 0,9         | $10^{-3}$    |
| <b>QPSK</b> | RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan  | 1,0         | $10^{-4}$    |
| <b>BPSK</b> | RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan  | 1,2         | $10^{-4}$    |



**Şekil 5.** RIS sayısı = 32 ve Nicemleme biti = 6 durumu.

Şekil 5'te RIS eleman sayısının 32 olduğu ve 6 bitlik nicemleme gürültü seviyesinin ele alındığı bir senaryo değerlendirilmiştir. BER seviyesi  $10^{-4}$ 'e düştüğünde, kazanç iyileştirmeleri devam etmekte ve RIS ile SSD entegrasyonunun etkisi daha belirgin hale gelmektedir. Analog RIS ve SSD ile birlikte kullanılan QPSK modülasyonu, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 0,4 dB kazanç sağlamaktadır. Benzer şekilde, BPSK modülasyonunun nicemlenmiş RIS veya analog RIS ile birlikte SSD kullanılarak uygulanması ya da QPSK modülasyonunun nicemlenmiş RIS ve SSD ile entegrasyonu, yalnızca analog RIS veya SSD içermeyen nicemlenmiş RIS kullanan sistemlere kıyasla ek 0,5 dB kazanç sunarak sınırlı bir iyileştirme sağlamaktadır. Bu bulgular hem BPSK hem de QPSK modülasyonlarının SSD entegrasyonundan faydalandığını, ancak BPSK şemasının bir miktar daha üstün performans sergilediğini göstermektedir. BER seviyesi  $10^{-5}$ 'e düştüğünde, kazanç artışı daha da belirgin hale gelmektedir. RIS ve SSD tekniklerinin birlikte kullanıldığı sistemler, yalnızca RIS içeren ancak SSD entegrasyonu bulunmayan sistemlere kıyasla 0,7 dB ek kazanç sağlamaktadır. Bu sonuçlar, SSD'nin sistem performansını artırmadaki kritik rolünü vurgulamakta olup, farklı modülasyon şemaları ve RIS yapılandırmaları genelinde güvenilir bir kazanç avantajı sunduğunu ortaya

koymaktadır. Elde edilen bulgular, SSD teknolojisinin hem nicemlenmiş hem de analog RIS tabanlı haberleşme sistemlerinin hata performansını, özellikle düşük BER seviyelerinde, önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Tablo 4’te de görüldüğü gibi, BPSK modülasyonu, QPSK şemasına kıyasla daha yüksek kazanç sağlayarak, hata oranının minimum seviyeye indirilmesinin kritik olduğu senaryolarda daha avantajlı bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, RIS elemanlarının sayısının 32’ye çıkarılmasıyla sistem performansı daha da iyileşmekte ve bu durum, ileri düzey RIS ve SSD tekniklerinin entegrasyonunun, yüksek verimli ve güvenilir kablosuz haberleşme ağlarının geliştirilmesi açısından önemli bir katkı sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Tablo 4.** RIS sayısı = 32 ve Nicemleme biti = 6 durumu.

| Modülasyon        | Yapılandırma Karşılaştırması            | Kazanç (dB) | BER Seviyesi |
|-------------------|-----------------------------------------|-------------|--------------|
| <b>QPSK</b>       | Analog RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan      | 0,4         | $10^{-4}$    |
| <b>BPSK</b>       | Nicemlenmiş RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan | 0,5         | $10^{-4}$    |
| <b>QPSK</b>       | Nicemlenmiş RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan | 0,5         | $10^{-4}$    |
| <b>Tüm modlar</b> | RIS+SSD vs RIS/ SSD olmayan             | 0,7         | $10^{-5}$    |

Bu çalışma kapsamında yapılan analizler, RIS ve SSD yöntemlerinin Rayleigh sönümleme koşulları altında çalışan SISO sistemlerinin BER performansını iyileştirmede kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle, RIS teknolojisi sayesinde elektromanyetik ortamın aktif olarak yeniden şekillendirilebilmesi, sinyal yayılım koşullarının optimize edilmesini sağlamaktadır. Analog RIS, faz kaymalarını daha hassas bir şekilde kontrol edebilmesi nedeniyle sürekli olarak nicemlenmiş RİStan daha iyi performans sergilemektedir. Ancak, nicemlenmiş RIS, düşük karmaşıklık, donanım maliyeti ve enerji tüketimi açısından kısıtlı uygulamalar için avantajlı bir alternatif sunmaktadır. SSD tekniğinin takımıyıldız döndürme ve koordinat serpiştirme teknikleriyle çeşitlilik kazancı sağlaması, sönümleme etkisini önemli ölçüde azaltmakta ve hata oranını düşürerek sistem güvenilirliğini artırmaktadır. Özellikle, RIS ve SSD teknolojilerinin birlikte kullanımı, kablosuz haberleşme sistemlerinin spektral ve enerji verimliliğini artırarak 6G gibi ileri nesil haberleşme ağları için güçlü bir çözüm sunmaktadır.

#### 4. Sonuç ve Yorumlar

Bu çalışmada, RIS ve SSD tekniklerinin, Rayleigh sönümleme koşulları altında SISO sistemlerinin performansı üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Çalışma, farklı modülasyon teknikleri (BPSK ve QPSK) ile RIS ve SSD entegrasyonunun BER üzerinde önemli ölçüde iyileştirme sağladığını ortaya koymuştur. Simülasyon sonuçları, RISın sinyal gücünü artırarak sönümlemenin etkilerini azaltmada ve SSD tekniğinin sistem dayanıklılığını artırarak hata oranlarını düşürmede oldukça etkin olduğunu göstermiştir. Bütün bu avantajlarının yanında SSD yapısı gereği sadece çok az bir karmaşıklık artışı getirmektedir. Bu bulgular, ileri nesil kablosuz iletişim sistemlerinde RIS ve SSD teknolojilerinin güçlü birer aday teknoloji olduğunu kanıtlamış ve ileri nesil ağlar için önemli bir katkı sunmuştur.

#### Kaynaklar

- [1] Siddiqui MU, Arfeen A. Multi-antenna arrays and high frequency communication for B5G/6G networks: State-of-the-art, issues, and future research directions. Inf 2024; 15(8): 442.
- [2] Siddiky MNA, Rahman ME, Uzzal MS, Kabir HMD. A comprehensive exploration of 6G wireless communication technologies. Comput 2025; 14(1): 15.
- [3] Banafaa M, Shaye A, Din J, Azmi MH, Alashbi A, Daradkeh YI, Alhammadi A. 6G mobile communication technology: Requirements, targets, applications, challenges, advantages, and opportunities. Alex Eng J 2023; 64: 245–274.
- [4] Asghar MZ, Memon SA, Hämäläinen J. Evolution of wireless communication to 6G: Potential applications and research directions. Sustainability 2022; 14(10): 6356.
- [5] Wang J, Tang W, Han Y, Jin S, Li X, Wen CK, Cheng Q, Cui TJ. Interplay between RIS and AI in Wireless Communications: Fundamentals, Architectures, Applications, and Open Research Problems. IEEE J Sel Areas Commun 2021;39(8):2271–2288.

- [6] Amodu OA, Nordin R, Abdullah NF, Busari SA, Abu-Samah A, Otung I, Ali M, Behjati M. Technical Advancements Toward RIS-Assisted NTN-Based THz Communication for 6G and Beyond. *IEEE Access* 2024;12:183153–183181.
- [7] Chen W, Lin X, Lee J, Toskala A, Sun S, Chiasserini CF, Liu L. 5G-Advanced Toward 6G: Past, Present, and Future. *IEEE J Sel Areas Commun* 2023;41(6):1592–1619.
- [8] Bae J, Khalid W, Lee A, Lee H, Noh S, Yu H. Overview of RIS-Enabled Secure Transmission in 6G Wireless Networks. *Digit Commun Netw* 2024;10(6):1553–1565.
- [9] Jahanbakhsh Basherlou H, Ojaroudi Parchin N, See CH. Antenna Design and Optimization for 5G, 6G, and IoT. *Sensors* 2025;25(5):1494.
- [10] Abualhayjaa M, Centeno A, Butt MM, Sehier P, Tran DH, Imran MA, Mohjazi L. RIS-Assisted UAV for IoT Data Harvesting. In: *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshops (ICC Workshops)*; 2024 Jun 9. p. 816–821.
- [11] Ren Y, Zhu Y, Zhang X, Jiang F, Lu G. Computation Efficiency Maximization in UAV and RIS Assisted NOMA-MEC Networks for Emergency Communications. In: *Proc. IEEE Wireless Commun Netw Conf (WCNC)*; 2024 Apr 21. p. 1–6.
- [12] Zhang M, Su Z, Xu Q, Qi Y, Fang D. Energy-Efficient Task Offloading in UAV-RIS-Assisted Mobile Edge Computing with NOMA. In: *Proc. IEEE INFOCOM Workshops (INFOCOM WKSHPS)*; 2024 May 20. p. 1–6.
- [13] William Marques Guerra D, Carlos Marinello J, Hossain E, Abrão T. Energy-Efficient Uplink Transmission in RIS-Aided M-MIMO IoT Systems. In: *Massive MIMO Future Wirel Commun Syst Technol Appl* 2025:151–188.
- [14] Shaiek H. Multi-carrier waveforms for 5G and beyond systems: from power amplifier impairments to energy efficiency enhancement [dissertation]. Paris (France): Conservatoire Natl Arts Métiers; 2022.
- [15] Sikri A, Mathur A, Kaddoum G. Joint Impact of Phase Error, Transceiver Hardware Impairments, and Mobile Interferers on RIS-Aided Wireless System over  $\kappa$ - $\mu$  Fading Channels. *IEEE Commun Lett* 2022;26(10):2312–2316.
- [16] Barrueco J, Montalban J, Iradier E, Angueira P. Constellation Design for Future Communication Systems: A Comprehensive Survey. *IEEE Access* 2021;9:89778–89797.
- [17] Sikri A, Mathur A, Kaddoum G. Signal Space Diversity-Based Distributed RIS-Aided Dual-Hop Mixed RF-FSO Systems. *IEEE Commun Lett* 2022;26(5):1066–1070.
- [18] Rahbari D, Ahmed F, Jenihhin M, Alam MM, Le Moullec Y. Reliability-Critical Computation Offloading in UAV Swarms. *IEEE Syst J* 2024.
- [19] Kang W. A Probabilistic Shaping Scheme for MIMO Systems with Signal Space Diversity. In: *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*; 2022 Apr 10. p. 251–255.
- [20] Poddar H, Ju S, Shakya D, Rappaport TS. A Tutorial on NYUSIM: Sub-Terahertz and Millimeter-Wave Channel Simulator for 5G, 6G, and Beyond. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2024;26(2):824–857.
- [21] Verma GD, Mathur A. Performance Improvement of FSO Communication Systems Using Hybrid-ARQ Protocols. *Appl. Opt.* 2021;60(19):5553–5563.
- [22] He Y, Qi W, Shen P, Lu L. Reconfigurable Intelligent Surfaces Aided Parallel RF and FSO Communications Using Adaptive Combining. In: *Proc. SPIE Spectral Technol Appl* 2024;13283:592–605.
- [23] Nour CA. Signal Definition and Resource Management Techniques for Upcoming Communication and Broadcasting Systems [dissertation]. Lorient (France): Univ. Bretagne Sud; 2020.
- [24] Song W, Rajak S, Dang S, Liu R, Li J, Chinnadurai S. Deep Learning Enabled IRS for 6G Intelligent Transportation Systems: A Comprehensive Study. *IEEE Trans Intell Transp Syst* 2022;24(11):12973–12990.
- [25] Mora HC, Orozco NG, Chiliguano PT, De Almeida C. Enabling Signal Space Diversity for MU-MIMO/OFDMA Cellular Systems That Employ Frequency Diversity. *IEEE Access* 2019;7:111204–111221.
- [26] Van Chien T, Tu LT, Chatzinotas S, Ottersten B. Coverage Probability and Ergodic Capacity of Intelligent Reflecting Surface-Enhanced Communication Systems. *IEEE Commun Lett* 2020;25(1):69–73.
- [27] Haque AU, Saeed M, Siddiqui FA. Comparative Study of BPSK and QPSK for Wireless Networks over NS2. *Int J Comput Appl* 2012;41(19):8–12.
- [28] Li D. Ergodic Capacity of Intelligent Reflecting Surface-Assisted Communication Systems with Phase Errors. *IEEE Commun Lett* 2020;24(8):1646–1650.
- [29] Khaleel A, Basar E. Phase Shift-Free Passive Beamforming for Reconfigurable Intelligent Surfaces. *IEEE Trans Commun* 2022;70(10):6966–6976.