

Efeito de Erro de Compensação de Fase em Transmissão Assistida por RIS

Cesar Augusto Martins Moraes Filho e Carlos Rafael Nogueira da Silva

Resumo—Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RIS - *Reconfigurable Intelligent Surfaces*) são consideradas uma tecnologia-chave para os sistemas sem fio de próxima geração, com potencial para ampliar a cobertura das redes, melhorar a eficiência espectral e mitigar interferências. Essas melhorias são alcançadas por meio de um ajuste preciso nas propriedades de reflexão dos elementos da RIS, proporcionando um controle dinâmico do ambiente de propagação do sinal. Neste trabalho, analisamos o desempenho de um sistema de comunicação com link direto assistido por RIS com sinais sujeitos ao desvanecimento Rayleigh, Nakagami- m , e Rice, avaliando o impacto causado por erros de compensação de fase na RIS. Os resultados demonstram que a precisão na compensação de fase é essencial para maximizar os benefícios proporcionados por essa tecnologia, pois erros elevados de fase podem degradar significativamente o desempenho do sistema, aumentando a taxa de erro de bit e anulando os ganhos esperados em condições ideais.

Palavras-Chave—canal de desvanecimento, comunicação sem fio, erros de compensação de fase, superfícies inteligentes reconfiguráveis, taxa de erro de bit.

Abstract—Reconfigurable Intelligent Surfaces (RISs) are considered a key technology for next-generation wireless systems, with the potential to extend network coverage, improve spectral efficiency, and mitigate interference. These improvements are achieved through a precise adjustment of the reflective properties of the RIS elements, enabling dynamic control of the signal propagation environment. In this work, we analyze the performance of a communication system with a direct link assisted by RIS with signals subject to Rayleigh, Nakagami- m , and Rice fading, evaluating the impact of phase compensation errors in the RIS. The results demonstrate that accuracy in phase compensation is essential to maximize the benefits provided by this technology, as high phase errors can significantly degrade system performance, increasing the bit error rate and eliminating the expected gains under ideal conditions.

Keywords—bit error rate, fading channel, phase compensation errors, reconfigurable intelligent surfaces, wireless communication.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por conectividade e altas taxas de transmissão, impulsionada pela proliferação de dispositivos conectados à rede e pela rápida evolução das redes sem fio, apresenta desafios cada vez mais complexos para os sistemas de comunicação modernos. Além disso, assegurar cobertura confiável, eficiência espectral elevada e uma gestão inteligente de recursos tornou-se uma prioridade essencial para viabilizar tecnologias emergentes, como a internet das coisas (IoT -

internet of things) massiva [1], [2] e a implementação de redes 6G [3]. Essas demandas destacam a necessidade urgente de soluções inovadoras capazes de superar as limitações impostas pelas tecnologias atualmente empregadas.

Nesse cenário, as tecnologias múltiplas entradas e múltiplas saídas massivas (mMIMO - *massive multiple-input multiple-output*) [4]–[6], comunicação em terahertz (THz) [7]–[9] e RIS [10]–[13] emergem como soluções promissoras para redes sem fio de próxima geração. A tecnologia mMIMO utiliza um grande número de antenas para aumentar drasticamente a eficiência espectral e a capacidade de conexões simultâneas, sendo considerada uma das tecnologias fundamentais para viabilizar o 6G. A comunicação em terahertz oferece soluções para demandas crescentes de conectividade em regiões remotas e aplicações de alta densidade de dados, embora ainda enfrente desafios relacionados à atenuação severa do sinal e à alta complexidade de implementação. Por último, as RISs consistem em superfícies compostas por elementos refletivos controláveis que manipulam ondas eletromagnéticas incidentes, alterando sua fase, amplitude e polarização. Isso permite criar ambientes de propagação favoráveis, ampliando a cobertura, mitigando interferências e melhorando a eficiência energética dos sistemas de comunicação.

Nesse sentido, o estudo e aprimoramento das RISs são cruciais devido ao seu potencial de revolucionar a maneira como os sinais são propagados em redes sem fio. Diferentemente de tecnologias como mMIMO e comunicação em terahertz, que enfrentam desafios significativos em termos de consumo energético e atenuação de sinal, as RISs oferecem uma solução mais econômica e eficiente, utilizando elementos passivos para moldar o ambiente de propagação. Isso não apenas reduz os custos operacionais, mas também possibilita uma integração mais ampla em diferentes cenários, incluindo áreas urbanas densas e regiões remotas. Além disso, compreender o comportamento estatístico dos canais assistidos por RIS é essencial para explorar ao máximo suas capacidades e otimizar o desempenho de sistemas sem fio em termos de cobertura, confiabilidade e eficiência espectral.

Vários estudos têm abordado o desempenho das comunicações auxiliadas por RIS. Em [14], uma análise baseada em simulações foi conduzida, na qual o canal RIS, do transmissor ao receptor, foi modelado utilizando as distribuições de Rayleigh e Rice. Os autores em [15] modelaram este canal utilizando uma distribuição Nakagami- m dupla e também derivaram a taxa de erro de bit (BER - bit error rate) exata para esquemas de modulação por amplitude em quadratura e chaveamento por deslocamento de fase binária (BPSK - *binary phase shift keying*). Em [16], os autores avaliaram a probabilidade de

cobertura em redes de comunicação assistidas por RIS que utilizam canais Nakagami- m , incorporando a transmissão de *link* direto entre a estação base e os equipamentos de usuário em seu modelo. Em [17], examinou-se o desempenho de um sistema RIS com dois projetos de deslocamento de fase sobre o desvanecimento Nakagami- m , e em [18], foi realizada uma exploração aprofundada do desempenho de um sistema assistido por RIS em canais de desvanecimento generalizados.

Neste trabalho, o desempenho de um sistema de comunicação assistido por uma RIS será analisado quando os sinais transmitidos estão sujeitos ao desvanecimento de multipercorso do tipo Rayleigh, Nakagami- m , e Rice. Em particular, o efeito de erros na compensação de fase para cada um desses cenários será observado na métrica da probabilidade de erro de bit. Adicionalmente, será obtida a potência do canal equivalente entre o transmissor e o receptor, considerando erros na compensação de fase.

O restante do trabalho é dividido como se segue: a Seção II apresenta o modelo de um sistema de comunicação assistido por RIS e revisita os modelos de canal Rayleigh, Nakagami- m , e Rice; a Seção III analisa o modelo da RIS considerando erros na compensação de fase; a Seção IV mostra as simulações realizadas e discute os resultados obtidos; a Seção V conclui o trabalho com uma análise final dos resultados e sugestões para pesquisas futuras.

II. PRELIMINARES

A. Modelo de Sistema

Consideramos um cenário onde um transmissor de antena única se comunica com um receptor de antena única. Uma RIS com N elementos é posicionada estrategicamente entre o transmissor e o receptor para melhorar o *link* de comunicação, e também é considerado um *link* direto entre o transmissor e o receptor. Nesse contexto, o sinal que chega ao receptor pode ser descrito como segue:

$$y = z \left(h_{T,R} + \sum_{i=1}^N h_{T,i} h_{i,R} e^{j(\theta_{T,i} + \theta_{i,R} - \theta_i)} \right) + v, \quad (1)$$

em que z é o símbolo transmitido e v denota o ruído aditivo branco gaussiano (AWGN - *additive white gaussian noise*) com média zero e variância N_0 . $h_{T,R}$ representa o ganho do canal do *link* direto entre o transmissor e o receptor, e $h_{T,i}$ e $h_{i,R}$ correspondem, respectivamente, ao ganho de canal entre o transmissor e o i -ésimo elemento reflexivo, e entre esse elemento e o receptor. $\theta_{T,i}$ e $\theta_{i,R}$ são as fases dos canais entre o transmissor e o i -ésimo elemento, e entre esse elemento e o receptor, respectivamente. θ_i é a correção de fase, sendo que, em um sistema ideal, $\theta_i = \theta_{T,i} + \theta_{i,R}$.

B. Modelos de Desvanecimento

1) *Rayleigh*: Seja $R > 0$, um sinal de desvanecimento que segue a distribuição Rayleigh com valor rms $\hat{r}^2 = \mathbb{E}[R^2]$. A função de densidade de probabilidade (PDF - *probability density function*) de R é dada por

$$f_R(r) = \frac{2r}{\hat{r}^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\hat{r}^2}\right). \quad (2)$$

O n -ésimo momento de R é dado por

$$\mathbb{E}[R^n] = \hat{r}^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{2}\right), \quad (3)$$

em que $\Gamma(x)$ denota a função gama [19, Eq. (6.1.1)].

2) *Nakagami- m* : Seja $R > 0$ um sinal de desvanecimento que segue a distribuição Nakagami- m com valor rms $\hat{r}^2 = \mathbb{E}[R^2]$. A PDF de R é dada por

$$f_R(r) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)} \frac{r^{2m-1}}{\hat{r}^{2m}} \exp\left(-m \frac{r^2}{\hat{r}^2}\right), \quad (4)$$

em que $m > 0$ está relacionado com o número de *clusters* de multipercorso. O n -ésimo momento de R é obtido por

$$\mathbb{E}[R^n] = \frac{\hat{r}^n}{m^{n/2}} (m)_{n/2}, \quad (5)$$

em que $(a)_b$ denota a função Pochhammer [19, Eq. (6.1.22)].

3) *Rice*: Seja $R > 0$, um sinal de desvanecimento que segue a distribuição Rice com valor rms $\hat{r}^2 = \mathbb{E}[R^2]$. A PDF de R é dada por

$$f_R(r) = \frac{2(1+\kappa)r}{\exp(\kappa)\hat{r}^2} e^{-\frac{(1+\kappa)r^2}{\hat{r}^2}} I_0\left(\frac{2\sqrt{\kappa(1+\kappa)}r}{\hat{r}}\right) \quad (6)$$

em que $\kappa > 0$ é a razão entre a potência da componente dominante e a potência das componentes espalhadas, e $I_\nu(x)$ é a função modificada de Bessel do primeiro tipo e ordem ν [19, Eq. (9.6.10)]. O n -ésimo momento é dado por

$$\mathbb{E}[R^n] = \frac{\hat{r}^n}{(1+\kappa)^{n/2}} \Gamma\left(1 + \frac{n}{2}\right) L_{\frac{n}{2}}(-\kappa), \quad (7)$$

em que $L_\nu(x)$ representa o polinômio de Laguerre [19, Eq. (22.2.13)].

III. ERRO NA COMPENSAÇÃO DE FASE

A RIS permite um controle das fases dos sinais refletidos por seus elementos reflexivos. Esse controle é essencial para otimizar a propagação do sinal, garantindo que os sinais refletidos pela RIS se combinem de forma construtiva no receptor, melhorando assim a qualidade do sinal recebido.

No entanto, o processo de compensação de fase não é perfeito. Erros podem ocorrer no ajuste das fases devido a limitações nos sistemas de controle de fase, imprecisões nos algoritmos ou imperfeições nos elementos reflexivos. Esses erros na compensação de fase, que são aleatórios, afetam o desempenho do sistema, reduzindo a eficiência da RIS e comprometendo a qualidade do sinal refletido.

Portanto, considerando que as imperfeições no sistema ocasionem um erro na compensação de fase, o modelo em (1) pode ser reescrito como

$$y = z \left(h_{T,R} + \sum_{i=1}^N h_{T,i} h_{i,R} e^{j\theta_i} \right) + v, \quad (8)$$

em que θ_i é o erro na compensação de fase da i -ésima unidade refletora.

A. Potência do Canal

A potência do canal é definida como o segundo momento do sinal de desvanecimento. Seja $H = h_{T,R} + \sum_{i=1}^N h_{T,i} h_{i,R} e^{j\theta_i}$, a potência de H pode ser obtida como em (9) no topo da próxima página, em que $j = \sqrt{-1}$ é a unidade imaginária e considerando que os sinais propagam por canais independentes.

Até onde os autores têm conhecimento, não há um modelo de distribuição de probabilidade para o erro de fase. Assim consideraremos um erro de fase uniformemente distribuído entre θ_{min} e θ_{max} , independente entre as células. Dado isso, podemos obter o valor esperado para $\cos(\theta_i)$ e para $\exp(j(\theta_i - \theta_k))$ como

$$\mathbb{E}[\cos(\theta_i)] = \frac{\sin(\theta_{max}) - \sin(\theta_{min})}{\theta_{max} - \theta_{min}}, \quad (10)$$

e

$$\mathbb{E}[\exp(j(\theta_i - \theta_k))] = \frac{2(1 - \cos(\theta_{max} - \theta_{min}))}{(\theta_{max} - \theta_{min})^2}, \quad (11)$$

respectivamente.

1) *Rayleigh*: Seja um cenário em que os canais entre transmissor-RIS, RIS-receptor e transmissor-receptor são independentes e identicamente distribuídos (iid) e seguem o desvanecimento Rayleigh. Substituindo os momentos em (9), obtemos a potência do canal equivalente entre transmissor e receptor como

$$\mathbb{E}[|H|^2] = \hat{r}^2 + \frac{\hat{r}^2}{4} \left(\frac{\pi^{3/2} N \hat{r} (\sin(\theta_{max} - \theta_{min}))}{\theta_{max} - \theta_{min}} \right) + \frac{N \hat{r}^4}{8} \left(8 - \frac{\pi^2 (1 - N)(1 - \cos(\theta_{max} - \theta_{min}))}{(\theta_{max} - \theta_{min})^2} \right). \quad (12)$$

2) *Nakagami- m* : Para um ambiente Nakagami- m iid, a potência é obtida como

$$\mathbb{E}[|H|^2] = \hat{r}^4 + N \hat{r}^8 + \hat{r}^2 \left(\frac{2N(m)_{1/2}^3 \sin(\theta_{max} - \theta_{min})}{m^{3/2}(\theta_{max} - \theta_{min})} \right) + \hat{r}^3 \frac{2(N-1)N \hat{r} \Gamma(\frac{1}{2} + N)^4 (1 - \cos(\theta_{max} - \theta_{min}))}{m^2 \Gamma(m)^4 (\theta_{max} - \theta_{min})^2} \quad (13)$$

3) *Rice*: Para um ambiente Rice iid, a potência é fornecida em (14).

IV. EFEITO DO ERRO NA COMPENSAÇÃO DE FASE NA PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT

Nesta seção, apresentaremos o desempenho do sistema em termos da probabilidade de erro de bit considerando uma modulação 4-QAM assistida por uma RIS com $N = 100$ elementos refletor. A simulação foi realizada por um processo de Monte Carlo em que foram geradas 100000 realizações do canal.

A Fig. 1 mostra a BER para o modelo de desvanecimento Rayleigh levando em consideração o *link* direto, o canal ideal sem erros na compensação de fase, e o canal direto assistido por RIS com erros na compensação de fase uniformemente distribuídos para vários valores de θ_{min} e θ_{max} . Para um erro pequeno, representado por $(-\pi/20 < \theta_i < \pi/20)$, a curva se

assemelha à curva do sinal ideal, e para um erro significativo, representado por $(-\pi < \theta_i < \pi)$, a curva se sobrepõe à curva do canal direto, evidenciando a influência negativa do erro de compensação de fase no sistema com RIS.

Na Fig. 2, é mostrada a BER para um canal Nakagami- m para vários valores de m e $\theta_{max} = -\theta_{min} = 3\pi/4$. Foi observado que conforme m aumenta, menor a probabilidade de erro de bit do sistema, sendo que $m = 1$ reduz ao caso Rayleigh.

Na Fig. 3, é mostrada a probabilidade de erro de bit para o canal Nakagami- m com $m = 2$ e várias faixas de erro de fase. Para erros de fase variando em faixas pequenas, o resultado foi semelhante ao caso ideal, e para faixas de erro de fase mais significativas, observou-se uma influência destrutiva do erro de fase na RIS, piorando o desempenho do sistema.

As Fig. 4 e 5 mostram a BER para o modelo Rice. Na Fig. 4, manteve-se a faixa de erro de fase constante em $\theta_{max} = -\theta_{min} = 7\pi/10$ e variou-se κ . Na Fig. 5, variou-se a faixa de erro de fase com $\kappa = 5$. Na Fig. 4, observa-se que conforme κ aumenta, menor a probabilidade de erro de bit do sistema. Na Fig. 5, para erros de fase variando em faixas pequenas, a curva se manteve tangente à situação ideal, e para faixas maiores de erros de fase, houve influência destrutiva no canal. Note que $\kappa = 0$ reduz ao caso Rayleigh.

V. CONCLUSÕES

Um sinal modulado com constelação 4-QAM, transmitido por um canal direto assistido por uma RIS com $N = 100$ elementos refletor, foi analisado neste trabalho. Inicialmente, equacionamos o modelo do sistema e, posteriormente, estudamos o impacto de erros na compensação de fase no desempenho do sistema com ênfase na BER para diferentes modelos de desvanecimento: Rayleigh, Nakagami- m , e Rice. O erro de fase foi modelado como uma variável aleatória com distribuição uniforme.

Os resultados obtidos evidenciam que a compensação de fase é um fator crítico para o desempenho de sistemas assistidos por RIS. Em condições ideais, a RIS pode melhorar significativamente a comunicação sem fio, reduzindo a BER e aumentando a robustez do sistema. No entanto, erros na compensação de fase podem degradar substancialmente esse desempenho, tornando essencial a análise detalhada de seus impactos para aplicações práticas.

Nesse contexto, observou-se que, em canais Rayleigh, o erro na compensação de fase pode elevar a BER ao nível do canal direto, anulando os ganhos proporcionados pela RIS. No modelo Nakagami- m , a severidade do impacto dos erros na compensação de fase depende do parâmetro m . Em canais mais dispersivos, sua influência é mais significativa, e grandes faixas de erro de fase podem degradar significativamente o desempenho do sistema. Já no modelo Rice, o fator κ desempenha um papel crucial. Quanto maior κ , maior a resistência do sistema aos erros na compensação de fase. No entanto, em faixas elevadas de erro de fase, ainda ocorre degradação perceptível no desempenho do sistema.

Com base nesses resultados, recomenda-se, como trabalhos futuros, a investigação de estratégias para compensação ativa

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[|H|^2] &= \mathbb{E}[h_{T,R}^2] + \sum_{i=1}^N \mathbb{E}[h_{T,i}^2] \mathbb{E}[h_{i,R}^2] + 2\mathbb{E}[h_{T,R}] \sum_{i=1}^N \mathbb{E}[h_{T,i}] \mathbb{E}[h_{i,R}] \mathbb{E}[\cos(\theta_i)] \\ &+ \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \mathbb{E}[h_{T,i}] \mathbb{E}[h_{i,R}] \mathbb{E}[h_{T,k}] \mathbb{E}[h_{k,R}] \mathbb{E}[\exp(j(\theta_i - \theta_k))] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\mathbb{E}[|H|^2] = \frac{\hat{r}^2}{4} \left(\frac{\pi^{3/2} N \hat{L}_{\frac{1}{2}}(-\kappa)^3 (\sin(\theta_{max}) - \sin(\theta_{min}))}{(1 + \kappa)^{3/2} (\theta_{max} - \theta_{min})} \right) + \frac{N \hat{r}^4}{4} \left(\frac{\pi^2 (N-1) L_{1/2}(-\kappa)^4 \sin^2(\frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{2})}{(1 + \kappa)(\theta_{max} - \theta_{min})^2} + 4 \right) + \hat{r}^2 \quad (14)$$

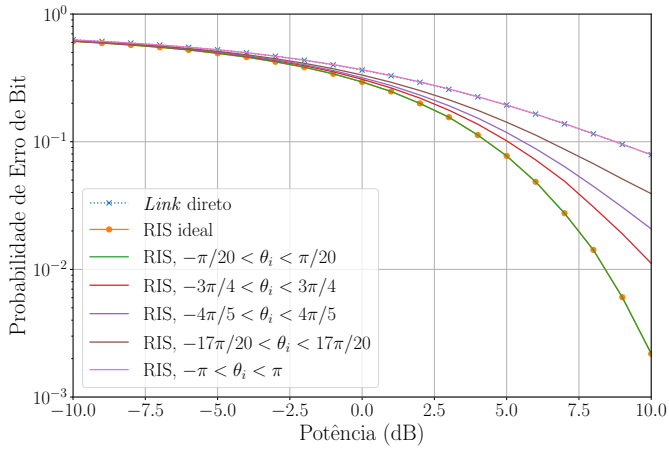


Fig. 1. Efeitos de erros na compensação de fase uniformemente distribuídos em um *link* direto assistido por RIS para o modelo de desvanecimento Rayleigh.

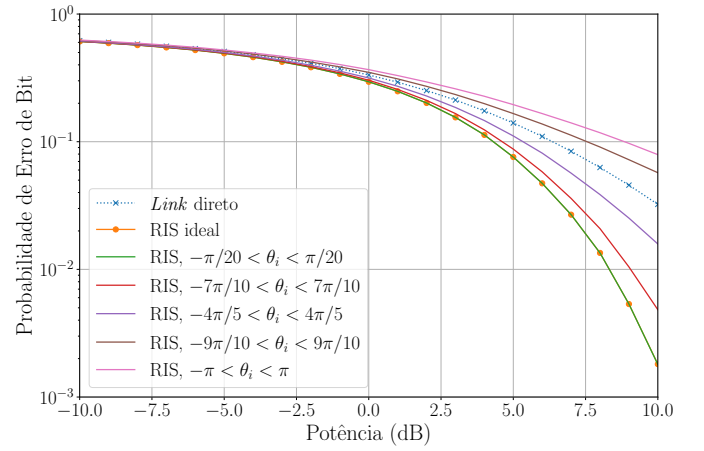


Fig. 3. Efeitos de erros na compensação de fase uniformemente distribuídos em um *link* direto assistido por RIS para o modelo de desvanecimento Nakagami- m , com $m = 2$.

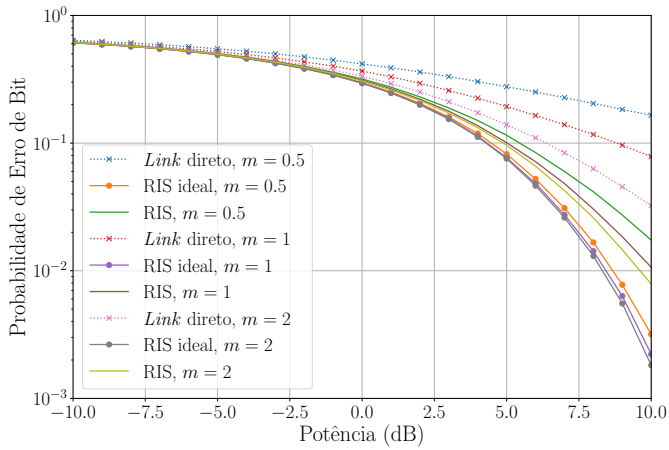


Fig. 2. Efeitos da variação de m em um *link* direto assistido por RIS com erro de fase na faixa $\theta_{max} = -\theta_{min} = 3\pi/4$ para o modelo de desvanecimento Nakagami- m .

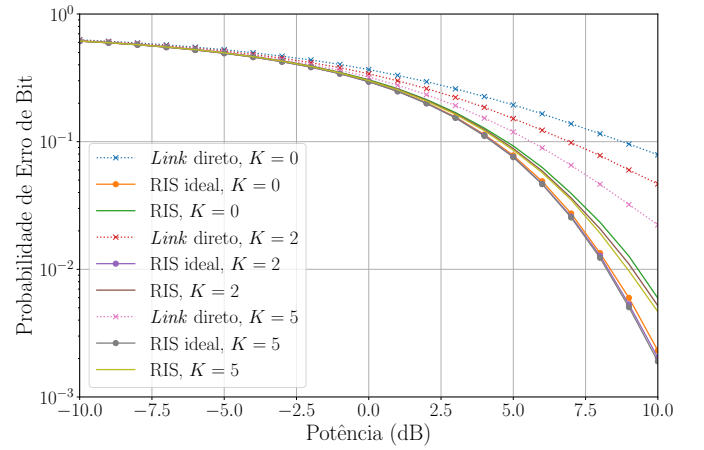


Fig. 4. Efeitos da variação de κ em um *link* direto assistido por RIS com erro de fase na faixa $\theta_{max} = -\theta_{min} = 7\pi/10$ para o modelo de desvanecimento Rice.

de fase, a análise do impacto da mobilidade dos usuários no desempenho do sistema e a implementação experimental de sistemas assistidos por RIS. Esses estudos podem contribuir significativamente para o avanço das comunicações sem fio, explorando ao máximo o potencial das RISs na melhoria da eficiência espectral, confiabilidade, e cobertura de redes sem

fio de próximas gerações.

REFERÊNCIAS

- [1] S. J. Ramson, S. Vishnu, and M. Shanmugam, "Applications of internet of things (IoT) – an overview," in *2020 5th International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*, 2020, pp. 92–95.

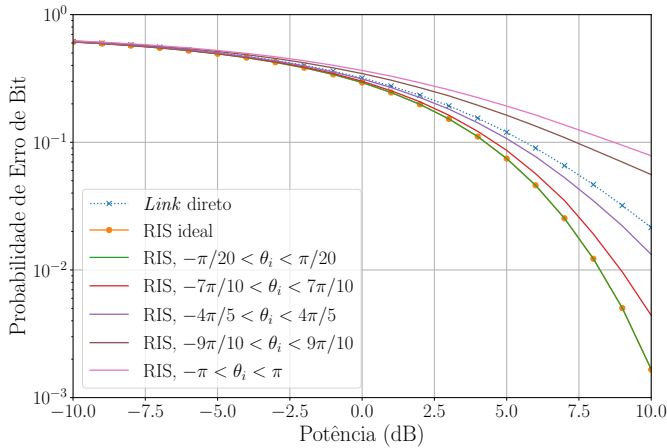


Fig. 5. Efeitos de erros na compensação de fase uniformemente distribuídos em um link direto assistido por RIS para o modelo de desvanecimento Rice, com $\kappa = 5$.

[2] T. Illakya, B. Keerthana, K. Murugan, P. Venkatesh, M. Manikandan, and K. Maran, "The role of the internet of things in the telecom sector," in *2024 International Conference on Communication, Computing and Internet of Things (IC3IoT)*, 2024, pp. 1–5.

[3] C.-X. Wang, X. You, X. Gao, X. Zhu, Z. Li, C. Zhang, H. Wang, Y. Huang, Y. Chen, H. Haas, J. S. Thompson, E. G. Larsson, M. D. Renzo, W. Tong, P. Zhu, X. Shen, H. V. Poor, and L. Hanzo, "On the road to 6g: Visions, requirements, key technologies, and testbeds," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 905–974, 2023.

[4] F. A. Pereira de Figueiredo, "An overview of massive mimo for 5g and 6g," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 6, pp. 931–940, 2022.

[5] P. Gupta, D. Prajapati, E. Sharma, and D. Ghosh, "Spatially correlated multi-pair massive mimo relaying with rician channel and phase shifts," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 4, pp. 4844–4850, 2023.

[6] O. Elijah, S. K. Abdul Rahim, W. K. New, C. Y. Leow, K. Cumanan, and T. Kim Geok, "Intelligent massive mimo systems for beyond 5g networks: An overview and future trends," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 102 532–102 563, 2022.

[7] A. Shafie, N. Yang, C. Han, J. M. Jornet, M. Juntti, and T. Kürner, "Terahertz communications for 6g and beyond wireless networks: Challenges, key advancements, and opportunities," *IEEE Network*, vol. 37, no. 3, pp. 162–169, 2023.

[8] W. Jiang, Q. Zhou, J. He, M. A. Habibi, S. Melnyk, M. El-Absi, B. Han, M. D. Renzo, H. D. Schotten, F.-L. Luo, T. S. El-Bawab, M. Juntti, M. Debbah, and V. C. M. Leung, "Terahertz communications and sensing for 6g and beyond: A comprehensive review," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 26, no. 4, pp. 2326–2381, 2024.

[9] E. N. Papasotiriou, A.-A. A. Boullogeorgos, M. Francis De Guzman, K. Haneda, and A. Alexiou, "A new look to thz wireless links: Fading modeling and capacity assessment," in *2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2021, pp. 1–5.

[10] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. Di Renzo, and N. Al-Dhahir, "Reconfigurable intelligent surfaces: Principles and opportunities," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1546–1577, 2021.

[11] C. Pan, H. Ren, K. Wang, J. F. Kolb, M. El-kashlan, M. Chen, M. Di Renzo, Y. Hao, J. Wang, A. L. Swindlehurst, X. You, and L. Hanzo, "Reconfigurable intelligent surfaces for 6g systems: Principles, applications, and research directions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 6, pp. 14–20, 2021.

[12] M. Jian, G. C. Alexandropoulos, E. Basar, C. Huang, R. Liu, Y. Liu, and C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Overview of hardware designs, channel models, and estimation techniques," *Intelligent and Converged Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 1–32, 2022.

[13] Z. Zhang and L. Dai, "Reconfigurable intelligent surfaces for 6g: Nine fundamental issues and one critical problem," *Tsinghua Science and Technology*, vol. 28, no. 5, pp. 929–939, 2023.

[14] K. T. Y. C. T. V. K. and A. Srivastava, "Performance evaluation of ris under different wireless communication standards and channel models," in *2023 2nd International Conference on Edge Computing and Applications (ICECAA)*, 2023, pp. 133–136.

[15] R. C. Ferreira, M. S. P. Facina, F. A. P. De Figueiredo, G. Fraidenraich, and E. R. De Lima, "Bit error probability for large intelligent surfaces under double-nakagami fading channels," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 750–759, 2020.

[16] H. Ibrahim, H. Tabassum, and U. T. Nguyen, "Exact coverage analysis of intelligent reflecting surfaces with nakagami-m channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 1, pp. 1072–1076, 2021.

[17] D. Selimis, K. P. Peppas, G. C. Alexandropoulos, and F. I. Lazarakis, "On the performance analysis of ris-empowered communications over nakagami-m fading," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 7, pp. 2191–2195, 2021.

[18] I. Trigui, W. Ajib, W.-P. Zhu, and M. D. Renzo, "Performance evaluation and diversity analysis of ris-assisted communications over generalized fading channels in the presence of phase noise," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 3, pp. 593–607, 2022.

[19] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*. Washington, DC: US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1972.