

# Desvio de Feixe em Arquiteturas RIS: Caracterização, Modelagem e Oportunidades

Rafael Augusto Pedriali, Bryan Fernando Sarango Rodríguez, Carlos Rafael Nogueira da Silva e Fernando Darío Almeida García

**Resumo**—Sistemas de comunicação 6G e além (*Beyond 6G* – B6G) demandam arquiteturas flexíveis, capazes de operar em múltiplas bandas e em frequências elevadas, incluindo faixas sub-THz. Nesse contexto, as superfícies inteligentes reconfiguráveis (*reconfigurable intelligent surfaces* – RISs) destacam-se por possibilitarem o controle programável da propagação eletromagnética e a sinergia com outras tecnologias habilitadoras do 6G. Contudo, quando operam fora da frequência de projeto, surge o fenômeno de *beam squint*, que desloca o feixe refletido e compromete o alinhamento espacial. Neste trabalho, investiga-se esse efeito em um enlace *downlink* assistido por RIS, considerando desvanecimento de Rice, correlação espacial de Jakes e estratégias de *beamforming*. Os resultados mostram que variações de frequência incidentes sobre as RISs alteram a distribuição espacial de energia, podendo causar o desalinhamento entre a RIS e o usuário. Por outro lado, o *beam squint* pode ser explorado como um mecanismo funcional de redistribuição espacial da energia em arquiteturas multibanda/multiusuário.

**Palavras-Chave**—*Beam squint*, Comunicações sub-THz, Redes 6G/B6G, RIS.

## I. INTRODUÇÃO

A evolução das redes móveis rumo ao 6G tem sido impulsionada pela necessidade de suportar serviços cada vez mais exigentes em termos de capacidade, latência, eficiência e inteligência da infraestrutura. Em comparação com o 5G, espera-se que os sistemas 6G operem sob requisitos significativamente mais rigorosos, envolvendo taxas de transmissão mais elevadas, conectividade massiva, maior eficiência espectral e energética, além de níveis mais avançados de confiabilidade e segurança. Para atender a essas demandas, diversas tecnologias emergentes têm sido apontadas como candidatas promissoras para os sistemas 6G e além (*Beyond 6G* – B6G). Entre elas, destacam-se as Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (*Reconfigurable Intelligent Surfaces* – RIS), que permitem o controle dinâmico e eficiente do ambiente de propagação eletromagnética, as tecnologias de transceptores operando nas faixas de frequências sub-Terahertz (sub-THz) e THz, fundamentais para viabilizar taxas na ordem de Terabits por segundo; o sensoriamento e comunicação integrados (*integrated sensing and communication* – ISAC), que unifica as capacidades da

rede celular e de radar, o uso de Inteligência Artificial (IA) nativa na camada física para otimização contínua de recursos e a evolução geométrica dos arranjos massivos de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*massive multiple input multiple output* – M-MIMO) em direção ao MIMO ultramassivo [1].

Nesse contexto, a RIS entra com propostas promissoras, pois além de ser uma tecnologia ainda em amadurecimento, ela pode se integrar a diversas tecnologias habilitadoras do 6G. Entretanto, em implementações convencionais, uma RIS é tipicamente configurada em uma frequência de operação de referência e com uma geometria fixa entre seus elementos. Quando essa mesma RIS é excitada por sinais em uma frequência diferente daquela adotada no projeto, a distribuição espacial de fases deixa de ser preservada, tornando inadequada a configuração previamente definida da superfície. Como consequência, o feixe refletido sofre desvio angular, dando origem ao fenômeno de *beam squint*. Esse efeito torna-se limitante em cenários multibanda e em aplicações de banda larga, nas quais uma mesma RIS deve atender a diferentes bandas de frequências simultaneamente [2].

Embora o fenômeno de *beam squint* seja tradicionalmente tratado como um efeito indesejado nos sistemas de comunicação, ele também pode ser analisado sob uma perspectiva funcional, na qual o desvio angular do feixe é previsto e explorado de forma intencional para atender usuários deslocados da direção originalmente projetada ou para ampliar a cobertura espacial do sistema, como em arquiteturas ISAC assistidas por RIS. Nesses sistemas, feixes gerados a partir da multiplexação em frequência incidem sobre a superfície da RIS com o propósito de gerar desvios de feixe controlados, proporcionando uma dispersão angular no ambiente. Após a reflexão na RIS, os feixes são direcionados aos objetos do ambiente, em que cada onda eletromagnética refletida por um objeto produz assinaturas distintas de espalhamento em função da frequência. Essa diversidade espacial e espectral pode ser ativamente explorada para o sensoriamento avançado e o radiomapeamento do ambiente. Isso inclui tarefas como caracterização geométrica, identificação de bordas, estimativa das dimensões dos objetos, inferência de propriedades dos materiais, o que configura uma linha de pesquisa ainda emergente, porém altamente promissora para o ecossistema B6G [3].

Dessa forma, este trabalho aborda o fenômeno do *beam squint* como uma característica inerente às RISs convencionais que impõe novos desafios operacionais. Evidencia-se que o controle de feixe em sistemas de próxima geração exigirá abordagens que transcendam o ajuste tradicional de fases focado em diretividade simples, integrando o comportamento em frequência da superfície aos requisitos de transceptores

R. A. Pedriali, B. F. S. Rodríguez e F. D. A. García estão vinculados ao laboratório Wireless and Artificial Intelligence (WAI), Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL), Santa Rita do Sapucaí, MG, 37536-001, Brasil (e-mail: rafael.pedriali@posdoc.inatel.br; bryan.rodriguez@dtel.inatel.br; fernando.almeida@inel.br); C. R. N. da Silva está vinculado ao Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), Uberaba, MG, Brasil (e-mail: carlos.nogueira@uftm.edu.br). Este trabalho foi financiado pelo Projeto Brasil 6G com suporte de RNP/MCTI (Grant 01245.010604/2020-14), e pelo Projeto xGMobile (Code XGM-AFCT-2025-8-1-1) com recursos de EMBRAPII/MCTI (Grant 052/2023 PPI IoT/Manufatura 4.0), por FAPEMIG (Grant Nos. APQ-03162-24, APQ-04523-23, APQ-05305-23, PPE-00124-23, RED-00194-23), e por FINEP (nº 1060/2 contrato 01.25.0883.00).

sub-THz, redes ISAC e arranjos MIMO ultramassivos. Com base nessa premissa, este trabalho tem o objetivo de investigar e caracterizar o impacto do *beam squint* em arquiteturas RIS em termos da relação sinal-ruído (*signal to noise ratio* - SNR) e como a frequência de operação de RISs com espaçamento fixo entre elementos influencia o direcionamento de feixes em cenários multibanda. A análise contempla frequências desde a faixa de micro-ondas até bandas sub-THz, permitindo caracterizar o comportamento do fenômeno de *beam squint* em diferentes regimes de operação.

## II. MODELO DO SISTEMA

Considere um sistema de comunicação *downlink* assistido por RIS, no qual o enlace direto entre estações rádio-base (*base stations* - BSs) e o equipamento do usuário (*user equipment* - UE) encontra-se obstruído. Nessa configuração, a comunicação é viabilizada por um enlace em cascata BS<sub>1</sub>-RIS-UE, no qual o sinal transmitido pela BS<sub>1</sub> é refletido pela RIS em direção ao UE. Adicionalmente, assume-se a existência de uma segunda estação transmissora, denotada por BS<sub>2</sub>, posicionada nas proximidades da BS<sub>1</sub> e operando em uma frequência portadora distinta. Embora a RIS tenha sido inicialmente programada para a portadora associada à BS<sub>1</sub>, investiga-se a possibilidade de utilização da mesma superfície para suportar também a transmissão proveniente da BS<sub>2</sub> em outra frequência de operação. Essa hipótese destaca cenários multibanda, nos quais uma mesma infraestrutura refletora pode ser compartilhada por enlaces ortogonais em frequência.

### A. Fenômeno de Beam Squint

A configuração descrita anteriormente conduz naturalmente à análise do fenômeno de *beam squint*. Como a RIS é programada a partir de uma frequência de referência, sua distribuição de fases e o espaçamento elétrico entre os elementos tornam-se compatíveis com uma condição específica de operação. Quando a mesma superfície é excitada por sinais em outras frequências, essa compatibilidade deixa de ser preservada, de modo que a configuração previamente definida da RIS já não corresponde à nova condição de propagação.

Em termos físicos, isso ocorre porque a fase acumulada ao longo da estrutura depende diretamente do número de onda  $k = 2\pi/\lambda$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda, sendo inversamente proporcional à frequência. Como o espaçamento físico entre os elementos do arranjo permanece fixo, uma variação na frequência altera a relação entre a geometria da estrutura e a progressão de fase necessária para o correto direcionamento do feixe. Como consequência, o lóbulo principal é deslocado da direção originalmente projetada, fazendo com que o máximo de energia passe a ocorrer em outra posição espacial [4].

### B. Modelo de Canal

Para descrever o comportamento do sistema, assume-se que BS<sub>1</sub> e BS<sub>2</sub> possuem  $M$  antenas, a RIS é composta por  $N$  elementos refletivos, e  $K$  UEs equipados com uma antena. Além disso, considera-se a presença de uma componente de linha de visada (*Line of Sight* - LoS) nos enlaces BS-RIS e RIS-UE, o que justifica a adoção do modelo de desvanecimento

Rice para esses canais. Nesta hipótese, o sinal recebido pelo usuário pode ser descrito por

$$\mathbf{y} = (\mathbf{G}^H \mathbf{\Theta} \mathbf{H})^H \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

em que  $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$  representa a matriz de canal do enlace entre a BS e a RIS,  $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times K}$  representa a matriz de canal do enlace entre a RIS e o usuário,  $\mathbf{\Theta} \in \mathbb{C}^{N \times N}$  é a matriz diagonal de coeficientes complexos aplicada aos elementos da RIS,  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  é o vetor de sinais transmitidos, o operador  $(\cdot)^H$  denota o operador Hermitiano e  $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{K \times 1} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2 \mathbf{I}_K)$  representa o ruído gaussiano branco aditivo com potência  $\sigma_n^2$  e  $\mathbf{I}_K$  é a matriz identidade de ordem  $K$ .

As matrizes de canal  $\mathbf{G}$  e  $\mathbf{H}$  são compostas, respectivamente, pelos coeficientes  $g_{n,m} \triangleq [\mathbf{G}]_{n,m}$  e  $h_{n,k} \triangleq [\mathbf{H}]_{n,k}$ . Esses coeficientes são modelados de forma a incorporar efeitos relevantes de propagação, incluindo perda de percurso, componente vetorial de propagação, desvanecimento estocástico e correlação espacial entre elementos da RIS, resultando em uma representação mais realista do cenário de comunicação considerado. A matriz de configuração da RIS é dada por  $\mathbf{\Theta} = \text{diag}([\alpha_1 e^{j\theta_1} \ \dots \ \alpha_N e^{j\theta_N}])$ , em que  $\alpha_n$  e  $\theta_n$  representam, respectivamente, a amplitude e a fase associadas ao  $n$ -ésimo elemento da RIS, com  $n = 1, \dots, N$ , e  $j = \sqrt{-1}$  é a unidade imaginária. Em RISs passivas ideais, usualmente considera-se  $\alpha_n = 1$ , de modo que o controle da superfície ocorre predominantemente por meio do ajuste das fases  $\theta_n$ , responsáveis por redirecionar o feixe incidente na RIS para a região de interesse.

Para modelar as matrizes de canal  $\mathbf{G}$  e  $\mathbf{H}$  é utilizada a estrutura da Eq. (2), tanto para os coeficientes de canal do enlace BS-RIS, denotados por  $g_{n,m} \triangleq [\mathbf{G}]_{n,m}$ , quanto para os coeficientes do enlace RIS-UE, denotados por  $h_{n,k} \triangleq [\mathbf{H}]_{n,k}$ , com a devida adequação dos índices. Assim, a matriz de canal completa é modelada por

$$\mathbf{G}_C = \check{\mathbf{G}} \odot \bar{\mathbf{G}} \odot \tilde{\mathbf{G}}_C \quad (2)$$

em que  $\odot$  denota o produto de Hadamard. Em nível escalar, o  $(n, m)$ -ésimo coeficiente de canal é dado por  $g_{n,m} = \check{g}_{n,m} \bar{g}_{n,m} \tilde{g}_{n,m}$ . Nessa decomposição,  $\check{\mathbf{G}}$  representa a atenuação por perda de percurso,  $\bar{\mathbf{G}}$  descreve a contribuição vetorial da propagação,  $\tilde{\mathbf{G}}$  modela o desvanecimento multipercurso e o subscrito  $C$  indica a correlação do arranjo à matriz de canal.

A componente de perda de percurso é dada por

$$\check{g}_{n,m} = \sqrt{\frac{\beta \lambda^2}{(4\pi d_{n,m})^2}}, \quad (3)$$

em que  $\beta$  representa o ganho de antena,  $d_{n,m} = \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m - \mathbf{s}_n\|$  denota a distância entre o  $m$ -ésimo elemento de um arranjo e o  $n$ -ésimo elemento do outro arranjo, onde  $\mathbf{r}$  representa o vetor que conecta os elementos centrais dos dois arranjos, enquanto  $\mathbf{s}_m$  corresponde ao vetor de posição relativo que conecta o elemento central de seu respectivo arranjo à  $m$ -ésima posição, de forma análoga ao vetor  $\mathbf{s}_n$ .

A componente de fase de propagação do canal é dada por

$$\bar{g}_{n,m}(\mathbf{r}, \mathbf{s}_m, \mathbf{s}_n) = e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} d_{n,m}}, \quad (4)$$

a qual descreve o deslocamento de fase introduzido pela propagação do sinal entre os elementos considerados.

Para modelar o desvanecimento estatístico, adota-se neste trabalho a distribuição de Rice, devido à componente LoS dominante superposta às contribuições aleatórias de multipercurso. Dessa forma, os coeficientes de desvanecimento são gerados por  $\tilde{g}_{n,m} = (x_{n,m} + p) + j(y_{n,m} + q)$ , em que  $x_{n,m}$  e  $y_{n,m}$  são variáveis aleatórias Gaussianas independentes, com média zero e variância  $\sigma^2$ , associadas, respectivamente, às componentes em fase e em quadratura. Os termos  $p$  e  $q$  correspondem à componente determinística dominante do canal. Sob essas condições, o fator de Rice é dado por  $\varepsilon_K = (p^2 + q^2)/(2\sigma^2)$ .

### C. Modelo de Correlação de Jakes

O modelo também considera a presença de correlação espacial entre os elementos da RIS, de modo a representar de forma mais realista o comportamento do canal em estruturas compactas e eletricamente densas. Essa configuração induz dependência estatística entre os coeficientes do canal. Para modelar esse efeito, emprega-se o modelo de correlação de Jakes, usualmente empregado sob a hipótese de espalhamento angular isotrópico dos multipercursos.

Nesse modelo, a correlação entre dois elementos da RIS é expressa em função da distância entre eles. Assim, define-se uma matriz de correlação quadrada de ordem  $N$ , denotada por  $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ , cujos elementos são  $\mu_{a,b} \triangleq [\mathbf{J}]_{a,b} = J_0\left(\frac{2\pi\delta_{a,b}}{\lambda}\right)$ , em que  $\delta_{a,b}$  representa a distância entre o  $a$ -ésimo e o  $b$ -ésimo elementos do arranjo e  $J_0(\cdot)$  denota a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero [5].

Dessa forma, a correlação espacial de Jakes é aplicada apenas às componentes aleatórias de média zero, mantendo inalteradas as componentes determinísticas dominantes ( $p$  e  $j q$ ). Assim, a raiz matricial  $\mathbf{J}^{\frac{1}{2}}$  correlaciona apenas as variáveis aleatórias Gaussianas que formam o desvanecimento de Rice dos canais. Isto é, os canais correlacionados  $\tilde{\mathbf{G}}_C \in \mathbb{C}^{N \times M}$  e  $\tilde{\mathbf{H}}_C \in \mathbb{C}^{N \times K}$  são obtidos de forma análoga a [5] por

$$\tilde{\mathbf{G}}_C = \mathbf{J}^{\frac{1}{2}} \left[ \tilde{\mathbf{G}} - (p_G + j q_G) \mathbf{1}_{N \times M} \right] + (p_G + j q_G) \mathbf{1}_{N \times M}, \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_C = \mathbf{J}^{\frac{1}{2}} \left[ \tilde{\mathbf{H}} - (p_H + j q_H) \mathbf{1}_{N \times K} \right] + (p_H + j q_H) \mathbf{1}_{N \times K}, \quad (6)$$

em que  $\mathbf{1}_{N \times M}$  e  $\mathbf{1}_{N \times K}$  correspondem a matrizes de uns com dimensões  $N \times M$  e  $N \times K$ , respectivamente.

### D. Técnicas de Beamforming e Desempenho do Enlace

O *beamforming* é uma técnica de processamento espacial aplicada a arranjos de antenas com o objetivo de configurar o padrão de radiação eletromagnética, concentrando energia em direções de interesse. Esse comportamento é obtido por meio do ajuste coordenado de amplitude e/ou fase dos sinais associados aos elementos do arranjo, possibilitando a formação de feixes direcionais. No contexto deste trabalho, consideram-se duas estratégias complementares de *beamforming*: ativa e passiva. O *beamforming* ativo é realizado na BS, por meio da precodificação dos sinais transmitidos, com o objetivo de maximizar métricas de desempenho do enlace, como a SNR. O *beamforming* passivo é implementado na RIS por meio da reconfiguração das fases de seus elementos refletivos, de modo a promover a combinação construtiva das componentes refletidas e redirecionar a energia para a região de interesse.

Neste trabalho, considera-se um sistema com um único usuário, assim a matriz  $\mathbf{H}_C$  reduz a um vetor denominado de  $\mathbf{h}_C \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ . O modelo de *beamforming* ativo utiliza a técnica de precodificação de transmissão por razão máxima (*Maximum Ratio Transmission* – MRT), amplamente empregada em sistemas de usuário único devido à sua simplicidade analítica e à sua capacidade de alinhar coerentemente os sinais transmitidos, promovendo a formação de feixes direcionais e a concentração de energia na direção do UE. Nessa abordagem, o vetor de precodificação  $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  é ajustado com base no canal efetivo do usuário. O vetor de precodificação é dado por  $\mathbf{w} = \frac{\mathbf{c}^H}{\|\mathbf{c}\|}$ , em que  $\mathbf{c}$  representa o vetor de canal entre a BS e o receptor, podendo abranger genericamente tanto os efeitos de correlação espacial do modelo de Jakes quanto a assistência de uma RIS, sem perda de generalidade [6].

Na RIS, o *beamforming* passivo é obtido por meio de um procedimento iterativo de maximização da SNR, no qual as fases dos  $N$  elementos da superfície são ajustadas com base na resposta efetiva do enlace refletido e no vetor de precodificação da BS, até a convergência, em que a reconfiguração da RIS é dada por [7]

$$\Theta = \text{diag} \left[ \exp \left( -j \arg \left( \mathbf{w}^H \mathbf{G}_C^H \text{diag}(\mathbf{h}_C) \right) \right) \right], \quad (7)$$

em que  $\text{diag}(\cdot)$  cria uma matriz diagonal cujos elementos da diagonal principal são os elementos do vetor de entrada. Por meio dessa formulação iterativa, os deslocamentos de fase aplicados aos elementos da RIS compensam a defasagem acumulada ao longo do enlace do canal efetivo, promovendo o alinhamento coerente das componentes refletidas e, consequentemente, a maximização da potência direcionada ao usuário considerado.

Com base na configuração da RIS e no vetor de precodificação adotado na BS, o desempenho do sistema é avaliado por meio da SNR, que relaciona a potência do sinal desejado à potência do ruído no receptor, dada por [6]

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{signal}}}{\sigma_n^2} = \frac{\left| (\mathbf{G}_C^H \Theta \mathbf{h}_C)^H \mathbf{w} \right|^2}{\sigma_n^2}, \quad (8)$$

em que  $P_{\text{signal}}$  é a potência do sinal desejado no ponto de interesse. Assim, a potência recebida é determinada pela combinação entre o canal efetivo em cascata, a configuração da RIS e o vetor de *beamforming*, assumindo sinal transmitido com potência unitária normalizada.

A potência de ruído é calculada a partir da densidade espectral de potência de ruído e da largura de banda do sistema, sendo dada por  $\sigma_n^2 = 10^{\frac{N_0}{10} - 3} \text{ BW}$ , em que  $N_0$  é a densidade espectral de potência de ruído, em dBm/Hz, e BW representa a largura de banda do sistema em Hertz.

## III. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÃO

Utilizando os conceitos discutidos neste trabalho, apresentam-se os resultados numéricos considerando um conjunto de parâmetros fixos comum a todas as figuras analisadas. Nos cenários, adotam-se uma RIS composta por  $N = 41$  elementos refletivos, a BS<sub>1</sub> e a BS<sub>2</sub> com  $M = 61$  antenas, frequência de operação da RIS igual a  $f_c = 10,7$  GHz, largura de banda de 50 MHz e potência de transmissão de 10 W por antena. Além disso, considera-se o usuário

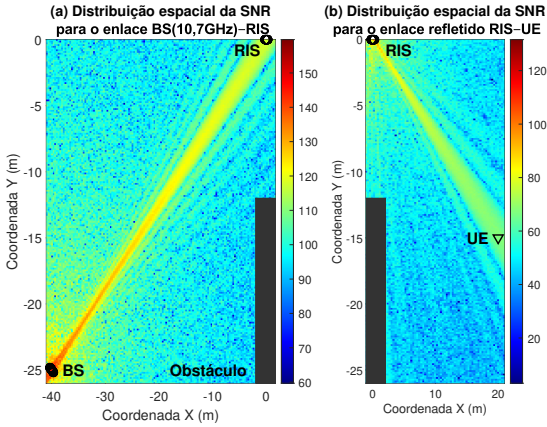


Fig. 1. Configuração de referência do sistema assistido por RIS operando com a portadora  $f = f_c$ : (a) distribuição espacial da SNR em dB no enlace BS-RIS; (b) distribuição espacial da SNR em dB no enlace refletido RIS-UE.

posicionado em (20, -15) metros (m), a RIS em (0, 0) m e as BSs em (-40, -25) m. Para a modelagem do canal, são considerados perda de percurso, contribuição vetorial da propagação, desvanecimento Rice com fator igual a  $\varepsilon_K = 3$  e correlação espacial de Jakes. Dessa forma, as diferenças observadas entre as figuras decorrem exclusivamente da variação da frequência da portadora incidente sobre a RIS. Foram adotadas as frequências de 10,7 GHz e 11,7 GHz para os cenários de micro-ondas, 19,5 GHz para a banda Ka e 144,45 GHz para o cenário sub-THz, todas representativas de aplicações práticas. Nas figuras, os mapas de calor apresentam a SNR expressa em dB, por meio da escala de cores.

A Figura 1 apresenta a configuração de referência do sistema M-MIMO assistido por RIS, considerando operação na frequência  $f_c$ . Na Figura 1(a), observa-se a distribuição espacial da SNR associada ao enlace entre a BS e a RIS, evidenciando a concentração de energia na direção da superfície refletora. Já na Figura 1(b), é mostrada a distribuição espacial da SNR no enlace refletido entre a RIS e o UE, com o feixe adequadamente direcionado para a posição do UE. Nessa configuração, tanto a BS quanto a RIS são modeladas com espaçamento entre antenas e entre elementos igual a  $\lambda_c/2$ , em que  $\lambda_c = c/f_c$  representa o comprimento de onda correspondente à frequência de projeto da RIS.

A Figura 2 ilustra a ocorrência do fenômeno de *beam squint* quando a frequência da portadora incidente é alterada para  $f = 11,7$  GHz, enquanto a RIS permanece configurada com o mesmo espaçamento entre elementos, isto é,  $\lambda_c/2$ . Conforme mostrado na Figura 2(a), o sinal proveniente da BS-RIS continua incidindo sobre a superfície; entretanto, na Figura 2(b), observa-se que o feixe refletido passa a ser desviado da posição original do UE. Esse resultado evidencia que, mesmo para uma variação pequena da portadora, a configuração previamente ajustada da RIS deixa de promover o alinhamento espacial ideal. Ressalta-se que a geometria do sistema e a programação da RIS são as mesmas da Figura 1, diferindo apenas na frequência da portadora incidente.

Com base nessa observação, investigou-se o comportamento do feixe refletido para diferentes frequências incidentes, com o objetivo de analisar como o deslocamento angular evolui em

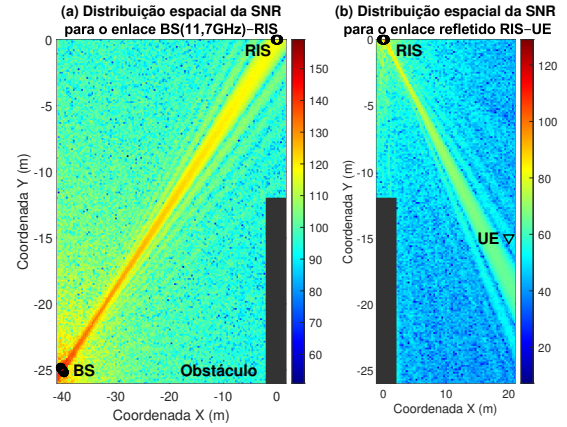


Fig. 2. Ocorrência do efeito de *beam squint* com a portadora em  $f = 11,7$  GHz mantendo-se a RIS projetada com espaçamento  $\lambda_c/2$ : (a) distribuição espacial da SNR no enlace BS-RIS e (b) distribuição espacial da SNR no enlace refletido RIS-UE.

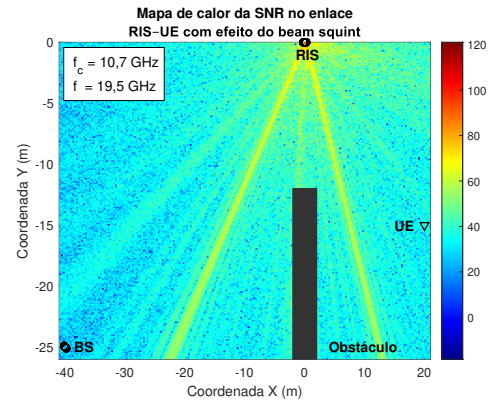


Fig. 3. Distribuição espacial da SNR refletida a partir da RIS considerando a portadora em  $f = 19,5$  GHz, destacando a formação de um novo feixe e um desvio de feixe mais acentuado devido ao fenômeno do *beam squint*.

função da portadora. Resultados para dois cenários adicionais são apresentados nas Figuras 3 e 4.

Na Figura 3, considera-se uma portadora incidente de 19,5 GHz, valor próximo ao dobro da frequência de referência do sistema. Observa-se que o efeito de *beam squint* se torna mais pronunciado, resultando em um deslocamento angular mais acentuado do feixe principal e na formação de um novo feixe refletido em direção distinta daquela originalmente projetada. Esse comportamento evidencia que o aumento da frequência intensifica o desalinhamento espacial introduzido pelo espaçamento fixo entre elementos da RIS. Além disso, nota-se o surgimento de feixes adicionais associados à relação entre a frequência da portadora incidente e a frequência de projeto da superfície. Este fenômeno é decorrente do padrão de interferência construtiva estabelecido pela combinação dos arranjos M-MIMO da BS e da RIS sob condições de defasagem espacial não coincidentes com aquelas previstas para a portadora nominal.

A Figura 4 apresenta um cenário operando em frequência sub-THz, no qual a portadora incidente foi escolhida de forma estratégica para que um dos feixes laterais do padrão refletido incidisse sobre a posição do usuário. Essa frequência foi obtida a partir de uma varredura espectral, na qual se identificou

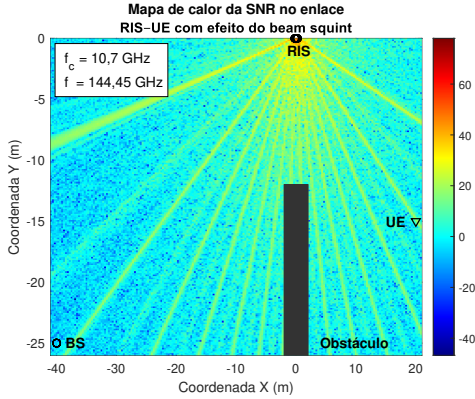


Fig. 4. Distribuição espacial da SNR refletida a partir da RIS considerando a portadora em  $f = 144,45$  GHz e destacando a incidência de um feixe lateral na posição do usuário.

um comportamento recorrente em que os feixes laterais interceptam a posição do UE mesmo fora da frequência nominal do projeto da RIS. Em particular, após extensivas simulações numéricas, observou-se que esse alinhamento ocorre para frequências que seguem a sequência próxima de:

$$f \approx f_c (1 + 2,5v), \quad v \in \mathbb{N}. \quad (9)$$

Para o cenário da Figura 4, tem-se  $v = 5$ , portanto  $f = 10,7(1 + 2,5 \times 5) = 144,45$  GHz. Esse resultado sugere que, embora o *beam squint* seja usualmente tratado como um efeito indesejado, ele também pode revelar oportunidades de exploração dos feixes laterais para suporte à operação multibanda e atendimento de usuários em direções variadas.

#### IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho, investigou-se o fenômeno de *beam squint* em sistemas M-MIMO *downlink* assistidos por RIS, com foco nos impactos provocados pela operação fora da frequência de projeto da superfície. A partir da modelagem adotada e dos resultados obtidos por meio de mapas de calor da SNR, verificou-se que variações na frequência da portadora alteram significativamente a distribuição espacial de energia, promovem o deslocamento angular do feixe refletido e podem induzir a formação de feixes adicionais. Esses resultados evidenciam que, em arquiteturas RIS convencionais, o *beam squint* representa um fator crítico em cenários multibanda e em frequências elevadas. Por outro lado, a análise também mostrou que esse fenômeno não deve ser interpretado apenas como uma limitação, mas pode ser explorado como uma oportunidade de projeto para o redirecionamento espacial controlado da energia e para novas estratégias de operação em sistemas 6G e B6G.

#### A. Perspectivas e Trabalhos Futuros

Em implantações densas de RIS, o reduzido espaçamento entre elementos aumenta a correlação espacial, limitando o desempenho e os ganhos de diversidade. Nesse contexto, as RISs fluidas (*fluid RIS* – FRIS) mitigam esse efeito ao selecionar dinamicamente elementos fracamente correlacionados, explorando de forma mais eficiente a diversidade espacial e aumentando a confiabilidade do enlace. Assim, como continuidade natural deste trabalho, propõe-se a substituição da RIS

convencional por uma FRIS [5], [8]. O objetivo é introduzir um mecanismo de ajuste do espaçamento efetivo entre os elementos da superfície em função da frequência da portadora incidente,  $f_p$ . Nesse caso, o espaçamento entre elementos passa a ser adaptado para  $\lambda_p/2$ , com  $\lambda_p = c/f_p$ , permitindo que a FRIS acompanhe a nova frequência de operação e, consequentemente, reduza os efeitos de dispersão angular induzidos pelo *beam squint*. Adicionalmente, pretende-se investigar uma fundamentação analítica rigorosa para a expressão empírica apresentada em (9), estabelecendo sua relação com a geometria da RIS, as condições de interferência construtiva, a recorrência dos feixes laterais e o comportamento espectral associado ao fenômeno de *beam squint*.

Outra oportunidade promissora consiste em aproveitar o espaçamento fixo entre os elementos da RIS como parâmetro de projeto para diferentes frequências da portadora, de modo a induzir, de forma controlada, desvios angulares dependentes da frequência. Sob essa perspectiva, o aparente desalinhamento do feixe deixa de ser interpretado como erro e passa a ser empregado como mecanismo deliberado de reposicionamento espacial da energia irradiada, permitindo que o feixe seja intencionalmente desviado para que o direcionamento efetivo ocorra na região de interesse.

Por fim, essas estratégias podem ser integradas por meio de uma arquitetura híbrida de IA, combinando aprendizado por reforço profundo para o controle on-line da RIS/FRIS, redes neurais em grafos para a coordenação multiusuário e multibanda, e aprendizado guiado por modelo para incorporar restrições operacionais e físicas ao processo de otimização. O objetivo é ajustar dinamicamente a configuração da RIS/FRIS, permitir o reaproveitamento da infraestrutura em múltiplos cenários operacionais e maximizar o compartilhamento de recursos entre diferentes aplicações. Essa integração tende a ser particularmente relevante em ambientes complexos e dinâmicos, visando à obtenção de elevada eficiência espectral, energética e estrutural.

#### REFERÊNCIAS

- [1] E. Hossain and A. Vera-Rivera, “6G cellular networks: Mapping the landscape for the IMT-2030 framework,” *IEEE Trans. Technol. Soc.*, vol. 6, no. 4, pp. 377–392, 2025.
- [2] Y. Chen, D. Chen, and T. Jiang, “Beam-squint mitigating in reconfigurable intelligent surface aided wideband mmwave communications,” in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, 2021, pp. 1–6.
- [3] J. Li, S. Zhang, Z. Li, J. Ma, and O. A. Dobre, “User sensing in RIS-aided wideband mmWave system with beam-squint and beam-split,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 2, pp. 1304–1319, 2025.
- [4] S. K. Garakoui, E. A. M. Klumperink, B. Nauta, and F. E. van Vliet, “Phased-array antenna beam squinting related to frequency dependency of delay circuits,” in *Proc. 41st Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, 2011, pp. 1304–1307.
- [5] F. Rostami Ghadi, K.-K. Wong, F. Javier López-Martínez, G. C. Alexandropoulos, and C.-B. Chae, “Performance analysis of wireless communication systems assisted by fluid reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 14, no. 12, pp. 3922–3926, 2025.
- [6] E. Björnson, J. Hoydis, and L. Sanguinetti, *Massive MIMO Networks: Spectral, Energy, and Hardware Efficiency*, ser. Foundations and trends in signal processing. Now Publishers, 2017.
- [7] Q. Sun, H. Liu, S. Yan, T. A. Tsiftsis, and J. Yuan, “Joint receive and passive beamforming optimization for RIS-assisted uplink RSMA systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 12, no. 7, pp. 1204–1208, 2023.
- [8] M. Khazaei et al., “Exact statistical characterization and performance analysis of fluid reconfigurable intelligent surfaces,” 2026. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2603.28974>