

Plataforma de Simulação Gráfica para Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis

John Sugahara, Pedro H. C. de Souza e Luciano Leonel Mendes

Resumo— Este trabalho propõe uma plataforma baseada em *Unity Engine* para a simulação gráfica de sistemas de comunicações assistidas por RISs (*Reconfigurable Intelligent Surfaces*). Projetada para gerar visualizações da propagação do sinal, a plataforma desenvolvida facilita a interpretação de dados de simulação oriundos desses sistemas, tradicionalmente apresentados de forma pouco intuitiva. Será demonstrado que a visualização gráfica gerada pela plataforma evidencia fenômenos de propagação de maneira acessível. Além disso, o trabalho também explora os princípios de funcionamento de sistemas RIS, destacando sua relevância para as futuras redes móveis 6G.

Palavras-Chave— RIS, visualização gráfica, sistemas de comunicação, 6G, *Unity Engine*.

Abstract— This work proposes a visualization platform based on the *Unity Engine* for the graphical simulation of RIS-aided communication systems. This platform allows the visualization of the signal propagation, facilitating the interpretation of simulation data from such communication systems, which are typically presented in a inaccessible format. We demonstrate that the proposed graphical platform can enhance the visualization of signal propagation phenomena. Moreover, this work also explores the principles of RIS systems, showing their relevance for the future sixth generation of mobile networks (6G).

Keywords— RIS, graphical visualization, communication systems, 6G, *Unity Engine*.

I. INTRODUÇÃO

A evolução das redes de comunicação sem fio, impulsionada pelo avanço das redes móveis 5G e pelos esforços na padronização das futuras redes móveis 6G [1], tem trazido novas exigências em termos de eficiência espectral, latência e confiabilidade. Nesse cenário, a transmissão do sinal pelo meio de propagação continua sendo um dos principais desafios, já que o sinal transmitido é afetado por fenômenos como reflexão, difração, espalhamento e interferência, caracterizando a propagação por múltiplos percursos [2].

Tradicionalmente, o meio de propagação é tratado como um elemento fixo do sistema de comunicações, ou seja, suas propriedades inerentes não podem ser alteradas ou controladas. No entanto, as RISs (*Reconfigurable Intelligent Surfaces*) surgem como uma alternativa para modificar esse paradigma, permitindo a obtenção de controle sobre o canal sem fio [3]. Para isso, a RIS é composta por diversos elementos capazes de ajustar a fase do sinal incidente, possibilitando a

reflexão controlada das ondas eletromagnéticas. Isso permite alinhar os sinais de forma construtiva em regiões específicas do espaço [4], aumentando a potência recebida e melhorando a cobertura do sinal, além de reduzir interferências. Sendo assim, a RIS demonstra-se útil principalmente em cenários de propagação onde não há um caminho livre e desobstruído entre o transmissor e o receptor, isto é, em cenários sem linha de visada direta ou NLOS (*non-line-of-sight*).

Para a análise de desempenho da RIS em sistemas de comunicações, usualmente são empregadas simulações computacionais. Essas simulações geram grandes volumes de dados representando a intensidade do sinal em diferentes posições do espaço, permitindo assim que se realize a predição de cobertura do sinal. Entretanto, quando esses dados são apresentados de forma não interativa, sua interpretação se torna limitada. Também há uma carência de ferramentas que permitam a visualização espacial interativa desses dados, dificultando a análise de métricas relevantes como regiões de cobertura e áreas de sombra. Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma plataforma de simulação gráfica baseada na linguagem *C#* usando o software *Unity Engine* como ferramenta para a análise de desempenho da RIS.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: a Seção II introduz os princípios das RISs e a modelagem da comunicação assistida pela RIS; a Seção III descreve a plataforma desenvolvida e a Seção IV traz a visualização dos resultados obtidos; e, por fim, a Seção V conclui o trabalho.

II. SUPERFÍCIES INTELIGENTES RECONFIGURÁVEIS

Ao se lançar mão das RISs, torna-se possível criar condições de propagação favoráveis ao sinal transmitido e assim melhorar consideravelmente a qualidade do sinal recebido. Isso é feito pela configuração das fases de cada elemento refletor da RIS, sem a necessidade de regeneração ou amplificação do sinal. No entanto, definir a combinação ótima de fases não é trivial. Como o objetivo deste trabalho está na interpretação dos dados gerados pelo modelo de propagação, não será detalhado aqui o processo de configuração da RIS. Para os leitores interessados, em [5] estão disponíveis mais informações acerca da configuração da RIS e sobre o modelo de propagação investigado neste trabalho. Sendo assim, segue uma breve explicação do cenário de comunicações utilizado como referência.

Observe na Figura 1 que é representada uma micro-célula onde se encontram um transmissor, *Access Point* (AP), e um receptor, *User Equipment* (UE). Para aprimorar a transmissão de sinais entre o AP e a UE, considera-se a utilização da RIS

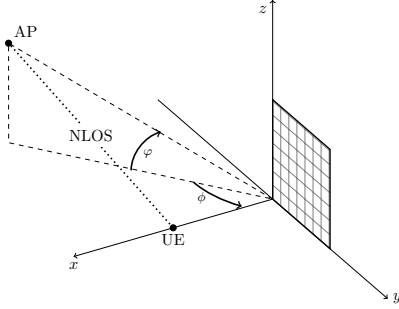


Fig. 1. Diagrama para sistemas de comunicação assistidos pela RIS no espaço de coordenadas (x, y, z) .

com N refletores ou elementos. Desta forma, o modelo de propagação é constituído por um canal direto entre o AP e a UE, o qual não está em linha de visada direta (NLOS), e pelos canais em cascata entre o AP-RIS (RIS-UE), sendo nesse caso ambos os canais em *Line-of-sight* (LOS). Além disso, de acordo com o modelo de propagação tridimensional, também tem-se os ângulos de azimute ϕ , bem como os respectivos ângulos de elevação φ , ilustrados na Figura 1.

Na próxima seção, é descrita a arquitetura da plataforma de simulação gráfica do cenário ilustrado na Figura 1, seguido pela visualização dos resultados.

III. ARQUITETURA DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO GRÁFICA

A arquitetura da plataforma de simulação gráfica é baseada em módulos independentes, responsáveis por leitura de dados, interpolação espacial e visualização gráfica, permitindo assim flexibilidade e organização no processamento. Os dados processados estão em formato CSV (*comma-separated values*) e contêm coordenadas espaciais associadas a valores de intensidade do sinal. Esses dados são normalizados e então submetidos a técnicas de interpolação espacial para a reconstrução da curva de nível que representa a distribuição de intensidade do sinal. Já os módulos principais de visualização gráfica são responsáveis pela geração de superfícies tridimensionais e pela visualização em formato de mapas de calor, compartilhando um *pipeline* comum de processamento de dados, o que garante consistência na representação dos dados.

Em resumo, o processamento dos dados segue um fluxo sequencial composto por cinco etapas principais: (i) leitura dos dados a partir de arquivos CSV, contendo coordenadas espaciais e intensidade de sinal; (ii) organização dos pontos em uma grade espacial estruturada; (iii) aplicação de interpolação espacial para estimar valores intermediários; (iv) normalização da intensidade do sinal em relação a um valor de referência; e (v) geração da visualização tridimensional.

Portanto, a plataforma proposta possibilita uma análise mais intuitiva da distribuição de intensidade do sinal. Além disso, oferece recursos de visualização segmentada em quadrantes, facilitando a análise no ambiente simulado. Na sequência, os principais elementos da arquitetura são detalhados.

A. Módulo de Visualização Gráfica Tridimensional

O módulo `RISContourMeshGenerator` constrói uma malha tridimensional a partir de dados discretos, permitindo também a segmentação por quadrantes, onde a visualização pode ser restrita a regiões específicas do espaço. Os valores de sinal são organizados em uma grade espacial e interpolados para gerar uma superfície contínua, de tal forma que a altura da superfície e a cor são definidas a partir da intensidade do sinal normalizado. O trecho abaixo ilustra o cálculo em cada vértice:

```
1 | float interpolatedValue = BilinearInterpolate(
    |     gridX, gridZ);
2 | float normalizedSignal = Mathf.Clamp01(
    |     interpolatedValue / csvReferenceMax);
3 |
4 | float worldX = Mathf.Lerp(uniqueX[0], uniqueX[
    |     originalWidth - 1], u);
5 | float worldZ = Mathf.Lerp(uniqueZ[0], uniqueZ[
    |     originalHeight - 1], v);
6 |
7 | float y = normalizedSignal * heightScale;
8 |
9 | vertices.Add(new Vector3(worldX, y, worldZ));
10 | colors.Add(colorGradient.Evaluate(
    |     normalizedSignal));
```

Em que a malha é formada pela conexão entre vértices adjacentes:

```
1 | triangles.Add(i0); triangles.Add(i2); triangles.
    |     Add(i1);
2 | triangles.Add(i1); triangles.Add(i2); triangles.
    |     Add(i3);
```

Além disso, a intensidade do sinal é normalizada no intervalo $[0, 1]$ e representada por:

```
1 | float normalizedSignal = Mathf.Clamp01(
    |     interpolatedValue / csvReferenceMax);
2 | Color color = colorGradient.Evaluate(
    |     normalizedSignal);
```

onde a cor é mapeada por um gradiente de cores conforme a intensidade do sinal ((i) azul, (ii) verde e (iii) vermelho): (i) menor intensidade, (ii) média intensidade e (iii) alta intensidade.

1) *Módulo de Visualização de Mapas de Calor Tridimensionais*: O módulo `RISHeatmap3DComplete` utiliza uma abordagem baseada em textura para a visualização da distribuição do sinal. Os valores interpolados são convertidos em cores e aplicados sobre uma superfície tridimensional, resultando em uma representação contínua da distribuição espacial da intensidade do sinal. Diferentemente da malha explícita, essa abordagem prioriza a suavidade visual, mantendo a relação entre altura e intensidade do sinal.

O trecho abaixo ilustra o processo de geração da textura do mapa de calor:

```
1 | float interpolatedValue = GetInterpolatedSignal(
    |     x, z);
2 | float normalizedSignal = Mathf.Clamp01(
    |     interpolatedValue / csvReferenceMax);
3 |
4 | Color pixelColor = colorGradient.Evaluate(
    |     normalizedSignal);
5 |
6 | heatmapTexture.SetPixel(x, z, pixelColor);
```

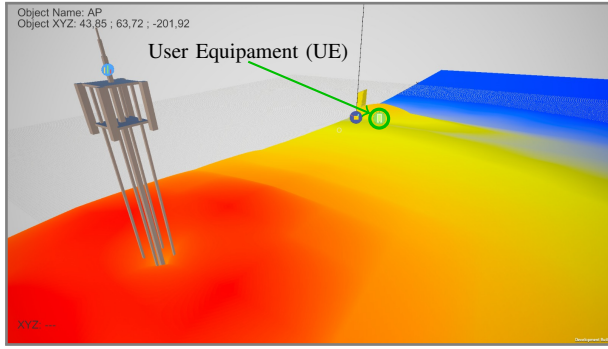


Fig. 2. Distribuição de intensidade do sinal simulada nas imediações do AP.

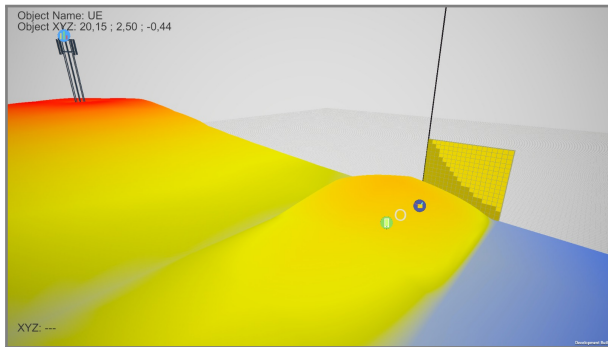


Fig. 3. Distribuição de intensidade do sinal simulada próxima a RIS e a UE.

Importante mencionar que o trecho apresentado representa apenas o núcleo do processo de geração do mapa de calor, omitindo etapas auxiliares de inicialização, controle de atualização e configuração de parâmetros visuais. Na seção seguinte, será detalhado o ambiente da plataforma de simulação gráfica, por meio de visualizações das representações gráficas dos sistemas de comunicação assistidos pela RIS.

IV. RESULTADOS

A partir das Figuras 2, 3 e 4 observam-se representações gráficas do cenário de comunicações, no qual os posicionamentos dos elementos (i.e. AP, UE e RIS) dados pela Figura 1 estão preservados. Na Figura 2, é demonstrada a distribuição de intensidade do sinal, simulada nas imediações do AP, enquanto a Figura 3 traz a perspectiva de visualização mais próxima da RIS e da UE. As visualizações geradas permitem identificar regiões de alta e baixa intensidade de sinal, evidenciando fenômenos típicos de propagação de sinais. Como exemplo, observe na Figura 2 a perda de intensidade de sinal conforme a distância em relação ao AP, caracterizando a perda por espaço livre. A Figura 3, por sua vez, também ilustra a formação de feixe do sinal refletido pela RIS na direção do UE, demonstrando o aumento local na intensidade do sinal provocado pela RIS.

A plataforma gráfica desenvolvida permite também ajustes visuais diversos, tornando-a mais flexível para diferentes objetivos. A Figura 4, por exemplo, demonstra a visualização da intensidade do sinal para quando se utiliza a interpolação por vizinho mais próximo, ao invés da interpolação bilinear presente nas Figuras 2 e 3. Note na Figura 4 que já não

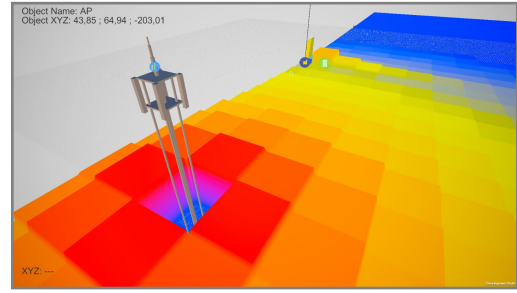


Fig. 4. Intensidade do sinal com a interpolação por vizinho mais próximo.

se obtém praticamente nenhuma suavização na representação gráfica da distribuição do sinal.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de uma plataforma gráfica interativa para visualização de sistemas de comunicação assistidos por RISs. A plataforma baseada na *Unity Engine*, permite a geração de superfícies tridimensionais, mapas de calor tridimensionais e curvas de nível a partir de dados em formato CSV, com interpolação espacial e renderização em tempo real. A plataforma demonstrou-se eficaz para análise da distribuição de intensidade do sinal e interpretação de fenômenos de propagação de sinais, oferecendo recursos como segmentação por quadrantes, controle de transparência e alternância entre modos de visualização. Através da exploração dos principais componentes da *Unity Engine*, como *MeshFilter*, *LineRenderer* e *Texture2D*, além da interação por meio de navegação de câmera e atalhos, verificou-se que utilização dessa plataforma se mostrou adequada para visualização dos sistemas de comunicação investigados.

Como trabalhos futuros, propõe-se a integração com simuladores em tempo real, visualização em realidade virtual e extensão para análise temporal do sinal. Também podem ser explorados cenários de comunicação mais complexos, incluindo sistemas de comunicação com múltiplos usuários, diferentes configurações para RIS e modelos de propagação de sinais mais complexos. Por fim, melhorias de desempenho da plataforma gráfica, como técnicas de *level of detail* e uso de GPU (*graphics processing unit*), podem ser aplicadas para suportar maiores volumes de dados.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Chafii, L. Bariah, S. Muhaidat, and M. Debbah, "Twelve scientific challenges for 6G: Rethinking the foundations of communications theory," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 868–904, 2023.
- [2] D. A. Guimarães, *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [3] M. Di Renzo *et al.*, "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2020.
- [4] E. Björnson, H. Wymeersch, B. Matthiesen, P. Popovski, L. Sanguinetti, and E. de Carvalho, "Reconfigurable Intelligent Surfaces: A signal processing perspective with wireless applications," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 39, no. 2, pp. 135–158, 2022, doi: 10.1109/MSP.2021.3130549.
- [5] P. H. C. d. Souza, M. Khazaei, and L. Leonel Mendes, "Resource-efficient configuration of RIS-aided communication systems under discrete phase-shifts and user mobility," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 73, no. 1, pp. 145–157, 2025.