**Trabalho Final de Mestrado – Parte 1**

**Alunas:** Bárbara Cássia Florentino Rosa e Beatriz Bastos Assis

**Professor:** Samuel Baraldi Mafra

**Matéria:** Princípios de Simulação de Sistemas de Comunicação (TP547)

**Semestre / Ano:** 1° Semestre / 2025

**Estudo de Distribuição de Autovalores em Canais RIS via Simulação de Monte Carlo**

**1. Introdução**

Neste trabalho, foi realizada uma simulação de Monte Carlo para estimar a distribuição dos autovalores da matriz de correlação espacial R de uma Superfície Inteligente Reconfigurável (RIS). A metodologia e as análises foram baseadas no artigo:

* Título: *Rayleigh Fading Modeling and Channel Hardening for Reconfigurable Intelligent Surfaces*
* Autores: Emil Bjornson e Luca Sanguinetti
* Fonte: IEEE *Wireless Communications Letters*, Vol. 10, No. 4, Abril 2021.

O objetivo foi reproduzir resultados apresentados no artigo, explorando também conceitos como *rank* efetivo e *hardening* (dureza) de canal.

**2. Tema e Metodologia**

O artigo investiga como a estrutura espacial da RIS impacta em propriedades chave do canal, como a matriz de correlação espacial e a distribuição de autovalores. Utiliza-se um modelo de *Fading Rayleigh* espacialmente correlacionado, adequado a superfícies reconfiguráveis.

Este modelo, considerado i.i.d (independente e identicamente distribuído) é comumente utilizado em tecnologias de múltiplas antenas, mas o artigo argumenta que esse modelo não é fisicamente aplicável quando se utiliza RIS em um ambiente de espalhamento isotrópico.

Para isso, foi implementada uma simulação de Monte Carlo, em que múltiplas ondas planas incidem aleatoriamente sobre a superfície, modelando o ambiente isotrópico de espalhamento. Ele também desenvolve a modelagem do *fading* para os canais entre o transmissor e a RIS, bem como entre a RIS e o receptor, utilizando uma configuração geométrica de superfície retangular.

Os autores apresentam resultados que demonstram como a correlação espacial e o comportamento do SNR (taxa de sinal-ruído) diferem em relação aos modelos tradicionais.

**3. Contexto Teórico**

O artigo propõe um modelo matemático para o canal entre transmissor, RIS e receptor, considerando a geometria física da superfície. É utilizado um modelo de espalhamento isotrópico tridimensional para derivar as distribuições e correlações dos canais H1 (transmissor - RIS) e H2 (RIS - receptor).

A RIS é uma tecnologia bidimensional composta por N elementos controláveis com tamanho inferior ao comprimento de onda que moldam e direcionam os sinais de maneira mais eficiente. Ela é implementada em um ambiente de espalhamento isotrópico, em que os componentes multipercurso são distribuídos uniformemente sobre o semi-espaço à sua frente, que é caracterizado pela função de densidade de probabilidade (PDF).

Visto que o ambiente de espalhamento isotrópico dá origem ao desvanecimento de *Rayleigh* (característica percebida em comunicações móveis onde não há predominância direta entre a antena transmissora e a receptora), e como qualquer RIS implementada em uma grade retangular é sujeito a desvanecimento espacialmente correlacionado, esse desvanecimento tem um impacto negativo no desempenho do canal devido às variações na relação sinal-ruído (SNR) que ele cria.

Objetiva-se então realizar simulações de Monte Carlo para verificar a convergência do ganho de SNR e o endurecimento do canal (fenômeno que ocorre em sistemas com muitos elementos, no qual o comportamento do canal se torna mais previsível e menos aleatório à medida que o número de elementos aumenta) comparando cenários com e sem caminho direto, além de configurações com fases ótimas e aleatórias.

**4. Reprodução dos Resultados**

Foi reproduzida a curva de distribuição dos autovalores da matriz de correlação R para os diferentes espaçamentos:

* d = λ/8;
* d = λ/4;
* d = λ/2.

Os resultados confirmaram os comportamentos descritos por Bjornson e Sanguinetti (2021):

* Redução do *rank* efetivo com espaçamentos menores;
* Autovalores decaindo rapidamente em escala logarítmica.

**5. Desenvolvimento do Código**

O código foi desenvolvido em *Python* na versão 3.13, utilizando as bibliotecas:

* *NumPy*;
* *Matplotlib*.

Ele encontra-se publicado no repositório *GitHub*, podendo ser acessado através do *link*:

<https://github.com/barbara-rosa05/TP547>

**6. Considerações Finais**

O trabalho conseguiu reproduzir e validar os resultados do artigo de referência, reforçando a compreensão sobre os efeitos da correlação espacial em superfícies reconfiguráveis, o impacto do espaçamento dos elementos na capacidade do canal e o fenômeno de *hardening* da SNR em canais RIS.

A escolha de L = 100 ondas planas na simulação foi fundamentada academicamente, visando maior robustez estatística. Aulin mostra que, para uma distribuição de ondas planas com amplitudes e fases aleatórias, o sinal resultante converge para uma distribuição complexa Gaussiana (isto é, o modelo *Rayleigh* para a amplitude) à medida que o número de ondas aumenta. Quanto maior o número de ondas L, melhor a aproximação do processo de soma para uma variável Gaussiana por aplicação do Teorema Central do Limite (CLT). Apesar de que no código L = 50 funcione muito bem, para reforçar a aproximação da distribuição *Rayleigh* no limite, um L de 100 pode ser citado como uma possível variação para maior fidelidade.

O cálculo do *rank* efetivo, aproximado da matriz R para cada espaçamento, reforçou a conclusão de que a dimensão efetiva do espaço de canal diminui com a redução do espaçamento entre elementos.

Por fim, na análise de *hardening*, calculando a variância normalizada da SNR, verificou-se que a dispersão da SNR diminui conforme o número de elementos N aumenta. O comportamento segue a teoria, convergindo para valores determinísticos.