

Relatório Técnico: Análise de Simulação de Sistema ISAC Cell-Free Massive MIMO

Gabriel Werneck de Oliveira Linhares

12 de dezembro de 2025

1 Modelo de Sistema e Geometria

O sistema simula um ambiente tridimensional (3D) onde Múltiplos Pontos de Acesso (APs - *Access Points*) servem simultaneamente Usuários (UEs - *User Equipments*) e realizam sensoriamento de Alvos (*Targets*).

1.1 Configuração do Cenário

- **APs** ($M = 16$): Distribuídos em uma grade quadrada 4×4 numa área de $100 \times 100 \text{ m}^2$, com altura $H_{AP} = 11.5 \text{ m}$.
- **UEs** ($K = 3$): Distribuídos aleatoriamente (processo de Monte Carlo), com altura $H_{UE} = 1.5 \text{ m}$.
- **Alvo** ($L = 1$): Posição aleatória, com altura $H_{TGT} = 0.0 \text{ m}$.
- **Antenas**: $N_{rx} = 8$ por AP e $N_{tx} = 4$ por UE.

1.2 Clustering de Sensoriamento

O código implementa uma arquitetura centrada no alvo/usuário. Um subconjunto de APs ($M_{SENSING} = 4$), correspondendo aos mais próximos do alvo, é selecionado para realizar o sensoriamento. O restante dos APs ($M - M_{SENSING}$) foca nas tarefas de comunicação.

2 Modelagem do Canal (Física da Propagação)

O código modela dois tipos distintos de canais: o canal de comunicação direto e o canal de sensoriamento (eco do radar).

2.1 Perda de Percurso e Sombreamento (Large-Scale Fading)

Função associada: `get_path_loss_shadowing`

A perda de percurso (*Path Loss*) em dB segue o modelo Log-Distância com sombreamento Log-Normal:

$$PL(d)_{dB} = \alpha + 10\gamma \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f_c) + X_\sigma \quad (1)$$

Onde:

- $\alpha = 28.0$: Perda de referência.
- $\gamma = 2.2$: Expoente de perda de percurso.
- $X_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{sh}^2)$: Variável aleatória de sombreamento com $\sigma_{sh} = 12$ dB.
- $\beta = 10^{-PL/10}$: Ganho de canal em escala linear.

2.2 Canal de Comunicação (Small-Scale Fading - Rician)

Função associada: `create_rician_channel`

O canal entre o UE k e o AP m é modelado como Rician, ideal para cenários com forte componente de visada direta (LoS - *Line of Sight*):

$$\mathbf{H}_{k,m} = \sqrt{\beta_{k,m}} \left(\sqrt{\frac{\kappa}{\kappa + 1}} \mathbf{H}_{LoS} + \sqrt{\frac{1}{\kappa + 1}} \mathbf{H}_{NLoS} \right) \quad (2)$$

- **Componente LoS (\mathbf{H}_{LoS}):** Calculada pelo produto externo dos vetores de resposta do array (*Steering Vectors*) baseados nos ângulos físicos de saída (AoD) e chegada (AoA).

$$\mathbf{H}_{LoS} = \mathbf{a}_{rx}(\theta_{AoA}, \phi_{AoA}) \mathbf{a}_{tx}^H(\theta_{AoD}, \phi_{AoD}) \quad (3)$$

- **Componente NLoS (\mathbf{H}_{NLoS}):** Rayleigh puro, modelado como $\mathcal{CN}(0, 1)$.
- **Fator K (κ):** Definido como 3.0 dB, determinando a predominância do componente LoS.

2.3 Canal de Sensoriamento (Modelo Bi-estático)

O sensoriamento é modelado como um canal de "eco" que percorre o trajeto: Transmissor (UE) \rightarrow Alvo \rightarrow Receptor (AP).

$$\mathbf{H}_{sens} = \alpha_{RCS} \sqrt{\beta_{UE \rightarrow Alvo} \cdot \beta_{Alvo \rightarrow AP}} \cdot G_{RCS} \cdot (\mathbf{a}_{rx} \mathbf{a}_{tx}^H) \quad (4)$$

- **RCS (*Radar Cross Section*):** Modelado pela variável complexa α_l (modelo Swerling I), representando a flutuação lenta da seção reta do radar.

- **Perda de Percurso Dupla:** O produto dos ganhos de canal $\beta_1 \cdot \beta_2$.
- **RCS Gain:** Um ganho linear de 92.0 dB é aplicado para compensar a perda severa de propagação dupla e viabilizar o sensoriamento na simulação.

3 Estratégias de Beamforming

O código compara duas estratégias de precodificação (formação de feixe):

3.1 SVD (Singular Value Decomposition)

Função associada: `get_svd_beamforming`

- Supõe conhecimento perfeito do estado do canal (CSI).
- Realiza a decomposição $\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$.
- O vetor de beamforming \mathbf{w} é a primeira coluna de \mathbf{V} (maior valor singular).
- **Matematicamente:** Maximiza o ganho do array na direção do auto-espaço dominante do canal efetivo.

3.2 Angular (Line-of-Sight) - Baseado em Posição

Função associada: `get_angular_beamforming`

- Baseia-se apenas na geometria (posições conhecidas de UE e AP).
- Aponta o feixe fisicamente para a direção do receptor ou alvo:

$$\mathbf{w} = \mathbf{a}_{tx}(\theta_{geom}, \phi_{geom}) \quad (5)$$

- **Análise:** É subótimo em canais com muito multipath (NLoS), mas robusto se o CSI instantâneo for desconhecido.

4 Cálculo de SINR e Alocação de Potência

A parte crítica da simulação ISAC é o compromisso (*trade-off*) de potência entre as funcionalidades.

4.1 Divisão de Potência (Power Splitting)

A potência total P_{total} é dividida entre Comunicação (P_c) e Sensoriamento (P_s):

$$P_c = \eta P_{total}, \quad P_s = (1 - \eta) P_{total} \quad (6)$$

Onde o parâmetro η assume valores no conjunto $\{0.9, 0.5, 0.1\}$.

4.2 Equação de SINR

Função associada: `calculate_sinr`

A relação Sinal-Ruído-Interferência (SINR) para o usuário k é dada por:

$$\text{SINR}_k = \frac{P_{signal} |\mathbf{H}_k \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k} P_{interf} |\mathbf{H}_k \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_n^2} \quad (7)$$

- **Interferência Cruzada:** O modelo considera que a potência dedicada ao sensoriamento age como interferência para a comunicação (escala com p_c) e vice-versa (escala com $1 - p_c$).
- **Ruído (σ_n^2):** Ruído térmico calculado para uma largura de banda de 20 MHz e figura de ruído de 5 dB.

5 Análise dos Resultados

Os resultados são apresentados via CDF Empírica (eCDF) da SINR. A análise dos cenários revela:

Cenário (a) 90% Com. / 10% Sens.

- **Comunicação (Azul):** Desempenho excelente e consistente (8-10 dB).
- **Sensoriamento (Verde):** Desempenho pobre (≈ -15 dB) devido à baixa potência.
- **Beamforming:** O SVD supera ligeiramente o Angular, extraindo mais energia do canal.

Cenário (b) 50% Com. / 50% Sens.

- **Ponto de Equilíbrio:** Curvas convergem para o centro (≈ 0 dB).
- A comunicação sofre degradação drástica comparada ao cenário (a) devido à redução de potência útil e aumento da interferência do sinal de sensoriamento.

Cenário (c) 10% Com. / 90% Sens.

- **Inversão:** O sensoriamento atinge alto desempenho (≈ 6 dB), enquanto a comunicação cai para níveis inutilizáveis (< -10 dB).
- **Variância:** O sensoriamento apresenta maior variância (curva menos íngreme) devido à natureza estocástica dupla do canal de radar (RCS + sombreamento duplo).

6 Análise Detalhada da Simulação e Resultados Visuais

A análise das Curvas de Distribuição Cumulativa Empírica (eCDF) geradas pela simulação revela o comportamento fundamental de sistemas ISAC limitados por interferência. A seguir, detalha-se a conexão entre a implementação matemática e o resultado visual observado.

6.1 Física da Propagação: Decaimento e Channel Hardening

A distinção visual entre a inclinação das curvas de Comunicação (Azul) e Sensoriamento (Verde) é consequência direta dos modelos de perda de percurso implementados:

- **Comunicação (Decaimento $\propto d^{-2.2}$):** O sinal percorre apenas o trajeto UE \rightarrow AP. A arquitetura *Cell-Free* com $M = 16$ APs proporciona alta macrodiversidade. Isso resulta no fenômeno de *Channel Hardening* (Endurecimento do Canal), visível nos gráficos como curvas azuis extremamente íngremes (quase verticais). Isso indica baixa variância na SINR: a maioria dos usuários experimenta uma qualidade de serviço muito similar.
- **Sensoriamento (Decaimento $\propto d^{-4.4}$):** O sinal percorre o trajeto de ida e volta (UE \rightarrow Alvo \rightarrow AP). Matematicamente, a perda de percurso é aplicada duas vezes:

$$P_{rx} \propto P_{tx} \cdot \beta_{UE \rightarrow Alvo} \cdot \beta_{Alvo \rightarrow AP} \cdot \sigma_{RCS} \quad (8)$$

Como resultado, as curvas verdes são menos íngremes e apresentam uma "cauda longa" à esquerda. Pequenas variações na posição do alvo causam flutuações severas na potência recebida, demonstrando a fragilidade do canal de radar bi-estático.

6.2 Comparativo de Processamento: SVD vs. Angular

O código compara o desempenho do Beamforming Ótimo (SVD - Linha Sólida) contra o Beamforming Geométrico (Angular - Linha Tracejada):

- **SVD ($\mathbf{w} \in \text{span}(\mathbf{H})$):** A estratégia SVD explora tanto o componente de visada direta (LoS) quanto os componentes de espalhamento (NLoS) do canal Rician ($K = 3$ dB). Por isso, a curva sólida aparece sistematicamente à direita (maior SINR), oferecendo um ganho de processamento de 1 a 2 dB.
- **Angular ($\mathbf{w} \in \text{span}(\mathbf{a}_{tx})$):** Baseado puramente na trigonometria da posição, este método ignora a energia contida nos multicaminhos, resultando em desempenho inferior.

6.3 A Matemática da Interferência

O fator determinante para o deslocamento das curvas entre os cenários (a), (b) e (c) é a modelagem da interferência cruzada. A simulação resolve a seguinte relação de compromisso:

$$\text{SINR}_{Comm} \approx \frac{\eta P_{total} |\mathbf{h}_{desejado}|^2}{(1 - \eta) P_{total} |\mathbf{h}_{interf}|^2 + \sigma_{ruído}^2} \quad (9)$$

Onde η é o fator de divisão de potência. O aumento de η não apenas aumenta o numerador (sinal útil), mas diminui linearmente o denominador (interferência).

6.4 Análise por Cenário de Alocação

6.4.1 Cenário (a): 90% Comunicação / 10% Sensoriamento

- **Comunicação:** Opera com alta potência e baixa interferência vinda do radar. A SINR média é elevada (≈ 10 dB).
- **Sensoriamento:** Sofre duplamente: recebe apenas 10% da potência de transmissão e enfrenta uma interferência de 90% da potência total vinda da comunicação. O resultado é uma SINR degradada (≈ -15 dB).

6.4.2 Cenário (b): 50% Comunicação / 50% Sensoriamento

- Observa-se a convergência das curvas para ≈ 0 dB.
- A comunicação sofre uma queda abrupta em relação ao cenário anterior não apenas pela redução de 3 dB na potência de sinal (metade), mas principalmente pelo surgimento de uma forte interferência intra-sistema causada pelo sinal de sensoriamento.

6.4.3 Cenário (c): 10% Comunicação / 90% Sensoriamento

- Ocorre a inversão de desempenho. O sensoriamento torna-se viável (≈ 6 dB) enquanto a comunicação torna-se inoperante.
- Nota-se que, mesmo com 90% de potência, a curva de sensoriamento não atinge a mesma verticalidade da curva de comunicação do cenário (a), reafirmando a natureza estocástica mais agressiva do canal de radar.

6.5 Conclusão da Análise

A simulação valida que o sistema opera em um regime limitado por interferência (*Interference-Limited regime*). Conclui-se que:

1. O uso de informação de estado de canal (CSI) através do SVD é crítico para margens de ganho em cenários de baixa SINR.
2. A topologia *Cell-Free* garante robustez ao link de comunicação.
3. Para operação conjunta eficiente, o simples particionamento de potência é insuficiente devido à severa perda de percurso do radar; técnicas avançadas de cancelamento de interferência são mandatórias para evitar a degradação mútua observada no cenário 50/50.

7 Output de referência da análise

90/10:

COM SVD - Média: 8.84 dB, Mediana: 8.70 dB

COM Ang - Média: 6.83 dB, Mediana: 6.76 dB

SEN SVD - Média: -12.38 dB, Mediana: -12.52 dB

SEN Ang - Média: -13.81 dB, Mediana: -12.42 dB

50/50:

COM SVD - Média: -0.71 dB, Mediana: -0.84 dB

COM Ang - Média: -2.71 dB, Mediana: -2.79 dB

SEN SVD - Média: -2.84 dB, Mediana: -2.98 dB

SEN Ang - Média: -4.27 dB, Mediana: -2.88 dB

10/90:

COM SVD - Média: -10.25 dB, Mediana: -10.38 dB

COM Ang - Média: -12.25 dB, Mediana: -12.33 dB

SEN SVD - Média: 6.70 dB, Mediana: 6.56 dB

SEN Ang - Média: 5.28 dB, Mediana: 6.66 dB

8 Gráfico do resultado

