

OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO E SENSORIAMENTO CONJUNTO EM CENÁRIO CELL-FREE

Gabriel W. O. Linhares, Yuri C. B. Silva

Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio (GTEL),
 Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil.
 gabriel.werneck@alu.ufc.br, yuri@gtel.ufc.br



1. Introdução

Sistemas de sexta geração (6G) propõem a integração nativa de serviços de comunicação e sensoriamento, uma tecnologia conhecida como **Comunicação e Sensoriamento Integrados (ISAC)**. Redes **Cell-Free (CF)** utilizam uma arquitetura Cloud-Radio Access Network (C-RAN) para eliminar fronteiras de célula e prover um serviço mais uniforme.

Este trabalho foca em um cenário ISAC *Cell-Free* de **uplink**, onde múltiplos Usuários (UEs) com múltiplas antenas transmitem simultaneamente sinais de comunicação e de sensoriamento para os Pontos de Acesso (APs). O desafio central é gerenciar a **interferência mútua** entre esses dois serviços. O objetivo é analisar o *trade-off* de desempenho do sistema ao variar a alocação de potência entre comunicação e sensoriamento.

Como contribuição principal, foi analisado a robustez de duas técnicas de *beamforming* (BF) — SVD e Angular — em um ambiente mais realista, introduzindo um canal Rician (com *multipath*) no enlace de comunicação.

2. Metodologia

Foi implementada uma simulação de Monte Carlo (1000 realizações) em Python.

2.1 Cenário de Simulação

Tabela 1: Parâmetros da Simulação.

Parâmetro	Valor
Nº de APs (M) / UEs (K)	16 (Grade 4x4) / 3
Antenas por AP (N_{rx}) / UE (N_{tx})	8 / 4
Área da Simulação	100m × 100m
Cluster de Sens. ($M_{SENSING}$)	4 APs
Alocação de Potência	90/10, 50/50, 10/90
Realizações do Monte Carlo	1000
Canal de Comunicação	Rician ($K = 3.0$ dB)
Canal de Sensoriamento	LoS com Ganho RCS (92 dB)

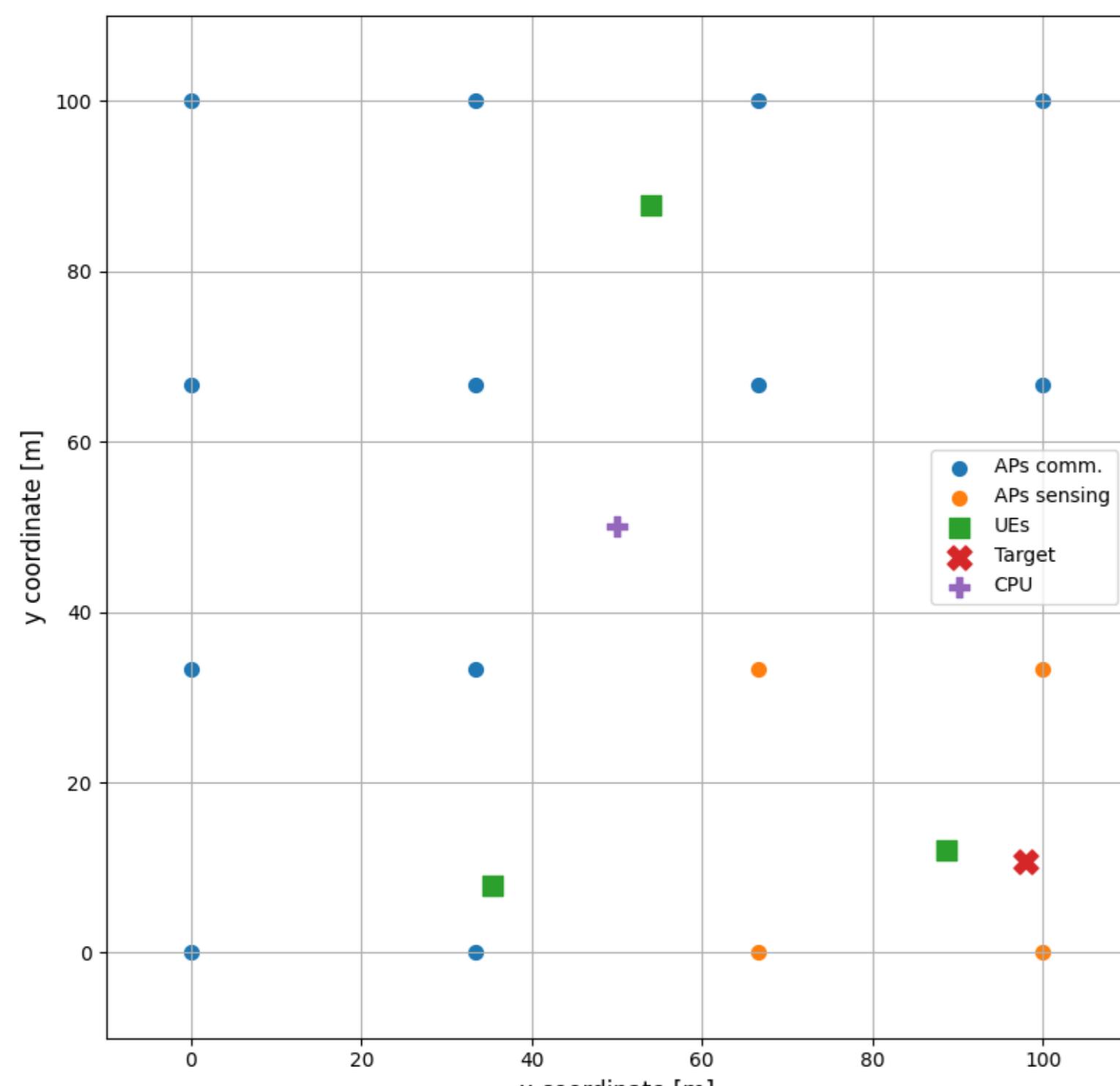


Figura 1: Visualização do Cenário ($M=16$, $K=3$) e a formação do cluster de sensoriamento.

A Tabela 1 detalha os parâmetros deste cenário:

Topologia da Rede: Existem 16 Pontos de Acesso (APs) e 3 Usuários (UEs) distribuídos em uma área de 100m × 100m. Os APs estão dispostos em uma grade 4x4.

Configuração de Antenas: Cada AP possui 8 antenas (N_{rx}) e cada UE possui 4 antenas (N_{tx}).

Modelos de Canal: São usados dois modelos de canal distintos. O canal de **comunicação** é Rician com $K = 3.0$ dB (indicando que há um caminho de linha de visada (LoS) e caminhos de *multipath*). O canal de **sensoriamento** é modelado apenas como LoS.

Parâmetros de Teste: A simulação analisa três diferentes alocações de potência (90/10, 50/50, 10/90) e utiliza um "Cluster de Sensoriamento" composto por 4 APs.

2.2 Modelagem de Canal

O sistema é limitado pela interferência mútua.

Canal de Comunicação (H_c): Usa um modelo Rician (Eq. 1) com $K=3\text{dB}$, introduzindo *multipath* (NLoS) além do caminho LoS, com β_c representando a perda de percurso na comunicação.

$$H_c = \sqrt{\beta_c} \left(\sqrt{\frac{K}{K+1}} H_{LoS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} H_{NLoS} \right) \quad (1)$$

Canal de Sensoriamento (H_s): Modela o caminho UE→Alvo→AP. Sofre perda de percurso dupla ($\beta_1 \cdot \beta_2$), onde α_l representa o parâmetro *radar cross section* (RCS), G_{RCS} é um fator de ajuste do modelo, e \mathbf{a}_{rx} e \mathbf{a}_{tx} são os vetores de apontamento de recepção e transmissão, respectivamente

$$H_s = \alpha_l \sqrt{\beta_1 \beta_2 G_{RCS}} \cdot (\mathbf{a}_{rx} \mathbf{a}_{tx}^H) \quad (2)$$

2.3 Beamforming e Avaliação

A relação sinal-ruído mais interferência (SINR) [1] foi calculada para duas técnicas com recepção *Maximum Ratio (MR) combining*:

SVD BF: O beamformer w adapta-se ao canal completo (incluindo *multipath*).

Angular BF: O beamformer w aponta apenas para a direção LoS, ignorando o *multipath*.

3. Resultados e Discussão

A Figura 2 apresenta os resultados quantitativos da SINR para os três cenários de potência.

3.1 Análise do Trade-off de Potência

A alocação de potência funcionou como esperado: a SINR de cada serviço é diretamente proporcional à potência alocada.

- Cenário (a) 90% Comm. / 10% Sens.:** A comunicação (curvas azuis) domina. A SINR mediana (eCDF=0.5) da comunicação foi de **9 dB**. O sensoriamento (verde) ficou em torno de -5 dB.

- Cenário (b) 50% Comm. / 50% Sens.:** Ponto de equilíbrio. SINR mediana da comunicação de 0.6 dB (SVD) e 1.7 dB (Angular). SINR mediana do sensoriamento de -4.5 dB.

- Cenário (c) 10% Comm. / 90% Sens.:** A situação se inverte. O sensoriamento (verde) domina, com SINR mediana de **-4.5 dB**. A comunicação (azul) é prejudicada, com mediana de -7.5 dB.

Isto valida o modelo de interferência mútua e a eficácia da calibração do RCS para estabelecer um balanço de potência realista.

3.2 Análise do Multipath na Comunicação (SVD vs. Angular)

A introdução do *multipath* (Rician $K=3\text{dB}$) apresentou um ligeiro impacto sobre o desempenho da comunicação. Em todos os cenários, as estratégias SVD BF e Angular BF tiveram um desempenho muito parecido. Em geral, o SVD é uma técnica mais robusta: ele se adapta à matriz de canal completa e usa a energia vinda tanto do LoS quanto do NLoS. Em contraste, o Angular BF, ao mirar apenas na direção LoS, se ajusta melhor a cenários com forte linha de visada.

3.3 Análise do Sensoriamento (SVD vs. Angular)

Para o sensoriamento, as curvas "SVD BF (s)" e "Ang. BF (s)" estão **completamente sobrepostas** em todos os

cenários, indicando desempenho idêntico. Este resultado é uma consequência direta da **limitação da modelagem do canal de sensoriamento**, que foi implementado como LoS puro. Neste cenário, ambas as técnicas convergem para a mesma solução: mirar na direção do alvo.

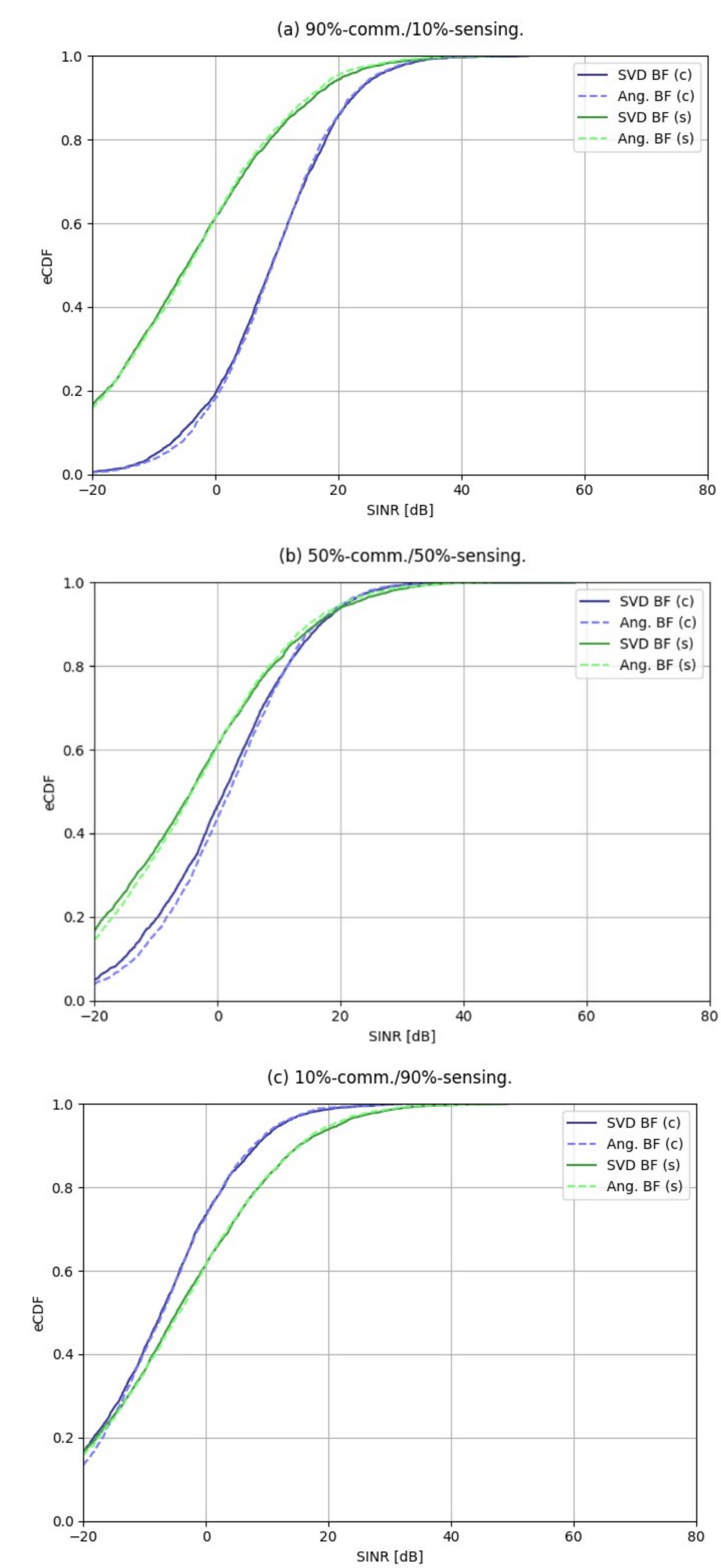


Figura 2: eCDF da SINR [dB] para (a) 90/10, (b) 50/50, (c) 10/90.

4. Conclusão

Esta simulação validou com sucesso o *trade-off* de potência em sistemas ISAC *Cell-Free* de *uplink*, e a calibração do ganho de RCS mostrou-se eficaz para estabelecer um balanço de potência realista entre os serviços.

A comparação entre os beamformers no canal de comunicação Rician ($K=3\text{ dB}$) revelou pontos importantes. O SVD BF (c) demonstrou uma SINR ligeiramente inferior ao Ang. BF (c). No entanto, persiste a sobreposição das curvas de sensoriamento (SVD BF (s) e Ang. BF (s)). Como discutido anteriormente, este resultado é uma consequência direta da manutenção de um modelo de canal LoS puro para o sensoriamento. Em estudos futuros, para uma análise mais robusta, planejamos implementar cenários com canais com maior predominância de NLoS.

Referências

- [1] I. B. Palhano, R. P. Antonioli, Y. C. B. Silva, G. Fodor, W. C. Freitas e M. G. dos Santos, "Power Allocation for Uplink Sensing and Communication in Cell-free ISAC Systems with Multi-Antenna Users and Multibeam," em *2024 IEEE 100th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Fall)*, 2024, pp. 1-7.