

Métodos de Pré-codificação e de Alocação de Potência em Sistemas *Cell-free*

Thaís C. Sampaio, Maria Clara R. Lobão, e Yuri C. B. Silva.

Resumo— Considerando a evolução dos sistemas de comunicações móveis, o conceito de comunicação *cell-free* surge como uma oportunidade de se alcançar maiores taxas e utilizar os recursos de forma mais eficiente. Este estudo realiza uma análise, por meio de simulações computacionais, de técnicas de pré-codificação e de alocação de potência, demonstrando que é possível obter ganhos mediante seu uso combinado em cenários *cell-free*.

Palavras-Chave— MIMO, *cell-free*, alocação de potência, pré-codificação.

I. INTRODUÇÃO

Durante a quinta geração (*fifth generation*, 5G), com o crescente número de usuários e a necessidade de fornecer altas taxas de dados, o uso de múltiplas entradas múltiplas saídas (*multiple-input multiple-output*, MIMO) em cenários *cell-free* [1] surge como uma alternativa capaz de aprimorar a transmissão de dados, latência e integridade do sinal. Essa escolha oferece também melhor desempenho quando comparado a uma rede MIMO multicelular, de acordo com estudos recentes [2]. O objetivo deste estudo é a análise desse cenário considerando métodos diferentes de pré-codificação e de alocação de potência, comparando as taxas e as relações sinal-ruído por meio de implementações computacionais e utilizando como base referências recentes relacionadas ao tema. Os resultados obtidos revelam coerência com a literatura.

II. MODELO DO SISTEMA

Consideramos uma rede que possui N_a pontos de acesso (*access points*, APs) e N_u terminais móveis (*user equipments*, UEs), na qual cada usuário possui uma única antena e cada AP está equipado com N_t antenas. Nesse cenário, todos os APs se comunicam com todos os usuários no sistema. Modelamos o canal de propagação $\mathbf{h}_{k,a} \in \mathbb{C}^{N_t}$ entre o k -ésimo usuário e o a -ésimo AP como

$$\mathbf{h}_{k,a} = \sqrt{\beta_{k,a}} \mathbf{g}_{k,a}, \quad (1)$$

na qual $\beta_{k,a}$ e $\mathbf{g}_{k,a}$ correspondem, respectivamente, ao coeficiente da perda de percurso e sombreamento e aos coeficientes de pequena escala entre o a -ésimo AP e o k -ésimo usuário. Assume-se desvanecimento Rayleigh e o coeficiente de larga escala $\beta_{k,a}$ obedece ao modelo em [2]

$$\beta_{k,a} = 10^{\frac{PL_{k,a}}{10}} 10^{\frac{\sigma_{sh} z_{k,a}}{10}}, \quad (2)$$

Thaís C. Sampaio, Maria Clara R. Lobão, Yuri C. B. Silva, Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio (GTFL), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil. E-mails: {thaisc, mclararodrigues}@alu.ufc.br, yuri@gtel.ufc.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

em que $PL_{k,a}$ é a perda de percurso em dB e σ_{sh} e $z_{k,a}$ representam o desvio padrão e a correlação espacial do sombreamento, respectivamente. O vetor de canal conjunto de um usuário com relação a todos os APs é dado por $\mathbf{h}_k = [\mathbf{h}_{k,1}^T \dots \mathbf{h}_{k,N_a}^T]^T \in \mathbb{C}^{N_t N_a}$, e a matriz total de canal é dada por $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1 \dots \mathbf{h}_{N_u}]^T \in \mathbb{C}^{N_u \times N_t N_a}$. A matriz de pré-codificação $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N_t N_a \times N_u}$ é descrita na seção II-A.

A. Pré-codificação

1) *Zero-forcing (ZF)*: Consiste na transmissão conjunta considerando a matriz total \mathbf{H} , na qual todos os sinais que não sejam o sinal desejado são considerados interferência e cancelados a partir da pseudo inversa da matriz de canal [3].

$$\mathbf{W}_{ZF} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H. \quad (3)$$

2) *Singular Value Decomposition (SVD)*: Nessa abordagem, realiza-se a decomposição em valores singulares e depois projeta-se o canal no espaço nulo seguido de projeção no espaço de sinal, para que os usuários estejam sob zero interferência e concentre-se energia no espaço útil de sinal, de forma semelhante à abordagem em [4].

3) *Maximum Ratio (MR)*: De acordo com [1], esse é um método de baixa complexidade, apresentando desempenho quase ótimo quando há grande número de antenas no AP, com

$$\mathbf{w}_{k,a} = \sqrt{\rho_{k,a}} \frac{\mathbf{h}_{k,a}^*}{\sqrt{E\{\|\mathbf{h}_{k,a}\|^2\}}}, \quad (4)$$

em que $\rho_{k,a} \geq 0$ é a potência que o AP a está atribuindo para transmitir para o UE k .

4) *Minimum Mean Square Error (MMSE)*: Essa abordagem minimiza o erro quadrático médio (MSE). Ela não necessariamente elimina toda a interferência inter-simbólica, mas melhora o condicionamento da matriz a ser invertida por meio do fator λ .

$$\mathbf{W}_{MMSE} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \lambda \mathbf{I}_{N_u})^{-1} \mathbf{H}^H. \quad (5)$$

B. Alocação de Potência

1) *Alocação de Potência Proporcional (PPA)*: Essa técnica divide a potência máxima para o AP a , $P_{B,a}$, de maneira proporcional à intensidade do canal [2]. Assim, usuários com bons coeficientes de canal receberão parcela maior da potência.

$$P_{k,a} = P_{B,a} \frac{\gamma_{k,a}}{\sum_j \gamma_{j,a}}. \quad (6)$$

Nessa expressão, $P_{k,a}$ é a potência transmitida do AP a para o usuário k e $\gamma_{k,a} = E[\mathbf{h}_{k,a}^H \mathbf{h}_{k,a}]$.

2) *Alocação de Potência via Waterfilling (WF)*: Esse tipo de alocação é calculada atendendo à expressão em [2]:

$$P_{k,a} = (\nu_a - L_{k,a})^+, \quad (7)$$

na qual $L_{k,a} = \sigma^2/\gamma_{k,a}$ e ν_a representa o nível de potência obtido pelo algoritmo de *waterfilling*.

C. Restrição de Potência

A seleção dos vetores de pré-codificação deve satisfazer a uma restrição de potência por base [3]. Dada a matriz preliminar de transmissão $\overline{\mathbf{W}}$, já incluindo a alocação de potência descrita na seção anterior, projeta-se uma matriz de transmissão $\mathbf{T} = \overline{\mathbf{W}}\Omega$ satisfazendo

$$\text{Tr} \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{T}_k^{[a]} \mathbf{T}_k^{[a]H} \right) \leq P_{B_a}, \quad (8)$$

na qual $\mathbf{T}_k^{[a]}$ corresponde à matriz de transmissão do AP a para o usuário k . A solução para o problema é dada por

$$\Omega = \mu \mathbf{I}, \quad \mu = \min_{a=1,2,\dots,N_a} \left(\frac{P_{B_a}}{\|\overline{\mathbf{W}}^{[a]}\|_F^2} \right), \quad (9)$$

em que Ω é uma matriz diagonal $N_u \times N_u$.

III. ANÁLISE COMPUTACIONAL

Para a simulação¹, considera-se $N_a = 100$ APs com quatro antenas cada e $N_u = 60$ UEs equipados com uma única antena cada. Os APs estão espaçados uniformemente em uma malha quadrada de 1 km² e os UEs são posicionados aleatoriamente nesta área. Cada AP transmite, no máximo, $P_{B_a} = 200$ mW. Considera-se também $\tau = 200$ sorteios de canal. Os demais parâmetros para modelagem da perda de percurso e cálculo da taxa são definidos na Tabela I. As curvas em Fig. 1 e Fig. 2 representam os resultados obtidos através das simulações.

TABELA I PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.	
Ruído Térmico	-174 dBm/Hz
Frequência	$f_0 = 1,9$ GHz
Largura de banda	$W = 20$ MHz

Como pode-se ver na Fig. 1, as simulações utilizando pré-codificação via MMSE mostraram taxas similares às obtidas via ZF, com o MMSE oferecendo desempenho ligeiramente melhor para baixos valores de relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) e convergindo para o ZF em altas SNRs, como esperado. A alocação de potência não teve impacto significativo no desempenho do ZF e MMSE, uma vez que o canal equivalente obtido por esses pré-codificadores não apresenta variação perceptível entre os diferentes canais, não havendo margem para a atuação do método de alocação de potência. O MR, por sua vez, obteve o pior desempenho, pois não realizou cancelamento da interferência. Por fim, o método com pré-codificação SVD e alocação de potência via

¹Implementada em Python usando a biblioteca NumPy.

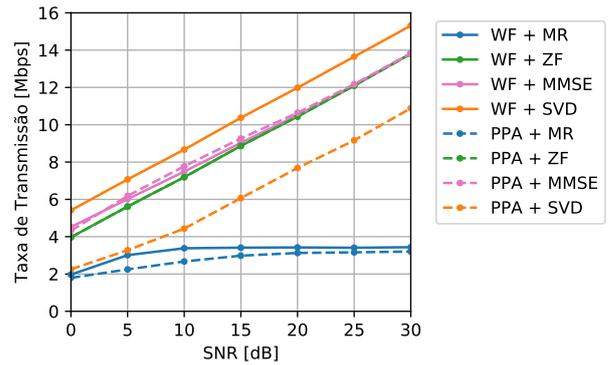


Fig. 1. Taxa de transmissão média em função da SNR para um sistema *cell-free* com os parâmetros de simulação da Tabela I.

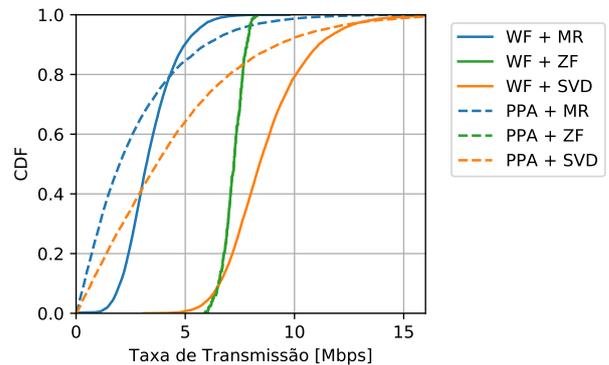


Fig. 2. Curvas de CDF da taxa de transmissão para um sistema *cell-free* com os parâmetros de simulação da Tabela I e SNR = 10 dB.

WF alcançou o melhor desempenho. A Fig. 2 apresenta as curvas de CDF da taxa de transmissão, considerando uma SNR de 10 dB. Para melhorar a visualização, não foi apresentado o resultado do MMSE, que possui um desempenho muito próximo ao ZF. Considerando os métodos de pré-codificação efetivamente impactados pela alocação de potência, no caso do MR e o SVD, percebe-se que o WF possui um desempenho bem melhor que o PPA em termos de taxa de transmissão.

IV. CONCLUSÕES

Por meio deste estudo foi possível verificar o impacto que os mecanismos de pré-codificação e de alocação de potência possuem sobre o desempenho de um sistema *cell-free*. As perspectivas futuras deste estudo consideram: um maior número de antenas, tendendo para o caso massivo; consideração de aspectos práticos; aplicação de técnicas mais robustas, incluindo o aprendizado de máquina.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Scalable cell-free massive MIMO systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 7, pp. 4247–4261, Jul. 2020.
- [2] C. D'Andrea, A. Garcia-Rodriguez, G. Geraci, L. G. Giordano, and S. Buzzi, "Cell-free massive MIMO for UAV communications," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. Workshops (ICC)*, May 2019, pp. 1–6.
- [3] H. Zhang and H. Dai, "Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks," *EURASIP J. on Wireless Commun. and Netw.*, vol. 2004, no. 2, pp. 222–235, 2004.
- [4] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 461–471, Feb. 2004.