

# Análise de Algoritmos Distribuídos de Formatação de Feixes em Cenário de Ondas Milimétricas

Ezequias M. S. de Santana Jr., Anderson L. de Araújo, Yuri C. B. Silva, Walter C. Freitas Jr.

**Resumo**—Este artigo de iniciação científica trata sobre a análise de alguns algoritmos distribuídos de formatação de feixes em um cenário de ondas milimétricas considerando uma rede sem fio com interferência entre os usuários, onde cada usuário possui múltiplas antenas transmissoras e múltiplas antenas receptoras. É verificada a aplicabilidade em um cenário de quinta geração, com um modelo de canal de ondas milimétricas.

**Palavras-Chave**—quinta geração, formatação de feixes, sistemas MIMO, ondas milimétricas, algoritmos distribuídos.

## I. INTRODUÇÃO

Em uma rede com interferência composta de múltiplos pares transmissor-receptor, que se comunicam por um canal sem fio compartilhado por outros usuários, os efeitos da interferência mútua se fazem presentes, prejudicando a recepção dos sinais entre cada par. Em um cenário de quinta geração (*fifth generation*, 5G) [1], que apresenta redes mais densas, estratégias para o controle de interferência são fundamentais.

Considerando que os nós de uma rede celular podem cooperar entre si, coordenando recursos entre cada estação base (*base station*, BS) visando um melhor desempenho [2], é possível utilizar a formatação de feixes (*beamforming*, BF) para combater a interferência via direcionamento de feixes. Nesses sistemas de múltiplas entradas - múltiplas saídas (*multiple-input multiple-output*, MIMO) os nós compartilham as informações dos coeficientes de BF calculados localmente a partir das informações de estado do canal direto e dos interferentes, caracterizando a formatação de feixes distribuída (*distributed beamforming*, DBF).

Em [3], algoritmos distribuídos de formatação de feixes são apresentados e analisados quanto ao seu desempenho em um cenário MIMO interferente, considerando um modelo de canal com elementos Gaussianos complexos independentes e identicamente distribuídos (*i.i.d.*). O trabalho desenvolvido neste artigo de iniciação científica visa analisar o desempenho de alguns desses algoritmos, considerando sua aplicabilidade a sistemas 5G com transmissão na faixa de ondas milimétricas.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II são introduzidos os modelos de sistema considerados neste trabalho. Na Seção III são apresentados brevemente os algoritmos avaliados. A análise dos resultados obtidos encontra-se na Seção IV e na Seção V são apresentadas as conclusões e perspectivas.

E. M. S. de Santana Jr., A. L. de Araújo, Y. C. B. Silva, W. C. Freitas Jr., Grupo de Pesquisa em Telecomunicações sem Fio (GTEL), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Brasil. E-mails: {ezequias, yuri, walter}@gtel.ufc.br, lourencoanderson@alu.ufc.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

## II. MODELO DO SISTEMA

Foi considerado um sistema MIMO interferente com  $I$  usuários (pares transmissor-receptor), onde a  $j$ -ésima BS possui  $M_j$  antenas e o  $i$ -ésimo receptor, terminal móvel (*user equipment*, UE), possui  $N_i$  antenas. As matrizes  $\mathbf{H}_{ij} \in \mathbb{C}^{N_i \times M_j}$  contêm os ganhos complexos de canal entre cada antena transmissora e cada antena receptora. O sinal recebido por cada UE é representado pelo vetor  $\mathbf{y}_i \in \mathbb{C}^{N_i}$ , o ruído é dado pelo vetor  $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{N_i}$  e o vetor de símbolos transmitidos por cada BS é dado por  $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{M_i}$ . O sistema é definido por

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{ii}\mathbf{x}_i + \sum_{j \neq i} \mathbf{H}_{ij}\mathbf{x}_j + \mathbf{n}_i \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}, \quad (1)$$

onde o primeiro termo representa o sinal desejado pelo receptor  $i$ , seguido da contribuição dos interferentes e do ruído.

Foi considerado que o ruído em cada UE é decorrelacionado e modelado como um processo aditivo Gaussiano branco (*additive white Gaussian noise*, AWGN) de média nula e variância  $\sigma^2$  e que os sinais transmitidos por cada BS estão sujeitos à restrição de potência transmitida unitária

$$\mathbb{E}[\|\mathbf{x}_i\|^2] \leq 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, I\}. \quad (2)$$

Também foi considerado que apenas um único fluxo de símbolos é transmitido, logo o BF de cada BS  $i$  é representado pelo vetor  $\mathbf{v}_i \in \mathbb{C}^{M_i}$  e o sinal transmitido é definido por  $\mathbf{x}_i = \mathbf{v}_i s_i$ , onde  $s_i \in \mathbb{C}$  representa o símbolo transmitido.

No receptor, o filtro de recepção é definido por  $\mathbf{g}_i \in \mathbb{C}^{N_i}$  e é aplicado em  $\mathbf{y}_i$  para estimar  $s_i$ . Por fim, a relação sinal-ruído mais interferência (*signal-to-interference-plus-noise ratio*, SINR) para cada usuário  $i$  é definida por:

$$\gamma_i = \frac{|\mathbf{g}_i^T \mathbf{H}_{ii} \mathbf{v}_i|^2}{\sum_{j \neq i} |\mathbf{g}_i^T \mathbf{H}_{ij} \mathbf{v}_j|^2 + \|\mathbf{g}_i\|^2 \sigma^2}. \quad (3)$$

## III. ALGORITMOS DISTRIBUÍDOS

Como discutido em [3], deseja-se otimizar a escolha dos coeficientes de formatação de feixes  $\mathbf{v}_i$  e os filtros de recepção  $\mathbf{g}_i$  entre os usuários de forma que a eficiência total do sistema seja maximizada. Para isso, foi definido o problema

$$\max_{\substack{\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_I \\ \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_I}} \sum_{i=1}^I u_i(\gamma_i), \quad \text{sujeito a } \|\mathbf{v}_i\|^2 \leq 1, \forall i \quad (4)$$

onde a função  $u_i(\gamma_i)$  representa a capacidade de cada par BS-UE, sendo definida por  $\log(1 + \gamma_i)$ .

Estratégias para encontrar soluções subótimas para o problema não-convexo apresentado em (4) consistem de algoritmos onde os coeficientes de BF (precodificadores) e filtros de

recepção são computados iterativamente de forma distribuída [3]. A formatação de feixes distribuída consiste na atualização autônoma dos precodificadores por cada transmissor e dos filtros de recepção por cada receptor a partir da troca de informações sobre o estado local do canal entre os nós da rede [2]. Dada a atribuição de um conjunto de filtros de transmissão e recepção inicial, todos os  $I$  pares atualizam seus precodificadores e, após isso, atualizam seus filtros de recepção simultaneamente, levando em consideração os novos coeficientes de BF com cada usuário anunciando a sua atualização pelos canais de sinalização da rede.

Dentre os algoritmos apresentados em [3], este trabalho considera a análise dos seguintes três algoritmos, descritos de forma simplificada a seguir.

- *Selfish-Updates*: Estratégia de atualização dos coeficientes em que cada usuário procura aumentar sua própria SINR sem considerar os efeitos da interferência sobre os demais usuários da rede.
- MMSE: Neste método, cada atualização procura minimizar a soma dos erros quadráticos médios entre o símbolo transmitido e o símbolo recebido para cada usuário, i.e.,  $\sum_i \epsilon_i = \sum_i E[|s'_i - s_i|^2]$ , sujeito à restrição (2).
- Adaptive Weighted - MMSE (AW-MMSE): Este método procura minimizar a soma ponderada dos erros quadráticos médios entre o símbolo transmitido e o símbolo recebido para cada usuário  $\sum_i w_i \epsilon_i$ , onde  $w_i$  representa o peso atribuído ao  $i$ -ésimo usuário, que é atualizado e adaptado de acordo com o valor de  $\epsilon_i$  de cada usuário a cada iteração.

#### IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS

##### A. Parâmetros de Simulação

O cenário consiste de um sistema MIMO interferente com  $I = 7$  usuários e  $N = M = 4$  antenas. Cada algoritmo foi executado até atingir um número máximo de 100 iterações e tem como resultado o valor dos coeficientes de BF que serão utilizados no cálculo de (4). Para cada valor de relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR), definida em dB, foram calculados os valores da soma de  $u_i$  e traçados os gráficos de capacidade, em termos de bits por uso do canal [bpcu].

##### B. Modelo de Canal

Para as matrizes de canal  $\mathbf{H}_{ij}$ , diferentemente de [3], foi considerado um modelo de canal de ondas milimétricas (*millimeter-wave*, mmWave) simplificado [4], no qual cada *cluster* de espalhamento dos raios entre cada BS e UE contribui com um único raio [5]. Os elementos da resposta ao impulso do canal estão contidos na matriz  $\mathbf{H}$  dada por

$$\mathbf{H} = \sqrt{\frac{NM}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}_r \mathbf{a}_t^H, \quad (5)$$

onde  $L$  representa o número de raios,  $\alpha_l \in \mathcal{CN}(0,1)$  corresponde aos ganhos de perda de percurso associado a cada raio e  $\mathbf{a}_r$  e  $\mathbf{a}_t$  representam os vetores de resposta do arranjo de antenas de cada usuário. Foi assumido um arranjo de antenas linear uniforme (*uniform linear array*, ULA).

##### C. Resultados

Como mostrado na figura 1, o desempenho dos algoritmos em modelo de canal mmWave está de acordo com as curvas apresentadas em [3], alcançando maiores valores de capacidade para os algoritmos baseados no MMSE, com destaque para o AW-MMSE, o qual possui a capacidade de adaptar os pesos  $w_i$ , atribuindo diferentes prioridades para cada usuário no processo de otimização.

Com a mudança das matrizes de canal  $\mathbf{H}_{ij}$ , considerando um cenário 5G com uso de ondas milimétricas e a presença de forte linha de visada juntamente com feixes mais diretivos, os resultados numéricos apresentam um melhor ganho relativo de capacidade, principalmente para baixos valores de SNR, devido à redução da interferência neste tipo de cenário.

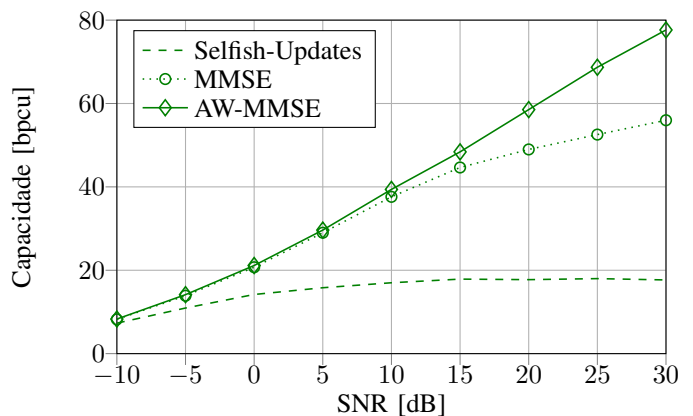


Fig. 1. Curvas de capacidade vs SNR para um sistema com  $I = 7$  usuários e  $N = M = 4$  antenas em cada UE e BS para um canal mmWave.

#### V. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Neste artigo, observamos o desempenho de algoritmos distribuídos em um cenário mmWave. Por meio das aplicações dos algoritmos no cenário estudado, verifica-se que as estratégias baseadas no MMSE apresentam uma evolução satisfatória para a capacidade de canal, reforçando o emprego da descentralização do processamento em um cenário 5G.

Como perspectiva para trabalhos futuros, podemos mencionar: análise de arranjo planar uniforme; consideração de modelos de canal mais realistas; solução do problema distribuído utilizando técnicas de aprendizagem de máquina; entre outros.

#### REFERÊNCIAS

- [1] D. Soldani and A. Manzalini, "Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 10, no. 1, pp. 32–42, Mar. 2015.
- [2] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. Shamai Shitz, O. Simeone, and W. Yu, "Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 9, pp. 1380–1408, Dec. 2010.
- [3] D. A. Schmidt, C. Shi, R. A. Berry, M. L. Honig, and W. Utschick, "Comparison of distributed beamforming algorithms for MIMO interference networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 13, pp. 3476–3489, July 2013.
- [4] O. E. Ayach, R. W. Heath, S. Abu-Surra, S. Rajagopal, and Z. Pi, "Low complexity precoding for large millimeter wave MIMO systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, June 2012, pp. 3724–3729.
- [5] I. Hemadeh, S. Katla, M. El-Hajjar, and L. Hanzo, "Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions and link-budget," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 870–913, Second quarter 2018.