

Aplicação de Controle Adaptativo de Potência e Seleção de Usuários para a Otimização da Vazão em Sistemas NOMA MIMO Massivo

Marcos N. L. de Carvalho¹, Álisson A. Cardoso¹, Flávio H. T. Vieira¹

¹Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Universidade Federal de Goiás (UFG)
Caixa Postal 131 – 74.605-010 – Goiânia – GO – Brasil

{marcosnlc4, alsnac}@gmail.com, flavio@emc.ufg.br

Resumo. *Propõe-se neste artigo um esquema de alocação adaptativa de potência em conjunto com seleção de usuários para o enlace de descida de um sistema NOMA MIMO massivo com o objetivo de reduzir a taxa de erro de bit (BER - Bit Error Rate) e maximizar a vazão dos usuários. Para avaliar o desempenho do algoritmo proposto, foram realizadas simulações considerando diferentes algoritmos de alocação de potência dos usuários.*

Abstract. *This paper proposes an adaptive power allocation scheme in conjunction with user selection for the downlink of a massive NOMA MIMO system in order to reduce the bit error rate (BER) and maximize the users' throughput. To evaluate the performance of the proposed algorithm, simulations were performed considering different users power allocation algorithms.*

1. Introdução

O desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação móvel foram motivados por requisitos cada vez maiores referentes à taxa de transmissão, confiabilidade e latência. Além da melhoria de outras características, o 5G também tem como desafio a otimização da vazão de dados dos usuários [Luo and Zhang 2016].

Alguns pesquisadores acreditam que o esquema de modulação do 4G LTE, Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* - OFDM) talvez não seja o mais adequado para atender às necessidades do 5G devido à algumas limitações, como confinamento espectral ruim causado pela elevada emissão fora de banda, problemas com comunicações de alta mobilidade, dentre outras [Luo and Zhang 2016]. Ademais, o OFDM faz uso do prefixo cíclico para garantir a ortogonalidade entre as portadoras, o que dificulta a redução da latência [Luo and Zhang 2016]. Portanto, há a necessidade de se encontrar técnicas de modulação e multiplexação que sejam mais adequadas para a realidade do 5G.

Dentre os esquemas de modulação existentes, o Acesso Múltiplo Não Ortogonal (*Non-Orthogonal Multiple Access* - NOMA) vem se destacando como um forte candidato para ser utilizado nas redes 5G devido às suas vantagens, como a compatibilidade com sistemas de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple Input Multiple Output* - MIMO), a qual possibilita que múltiplos usuários sejam servidos simultaneamente, melhorando o desempenho da rede. A ideia chave do NOMA conside-

rado no presente trabalho é explorar o domínio da potência para realizar a multiplexação dos sinais, empregando cancelamento de interferência nos receptores dos usuários [Luo and Zhang 2016] [Ali et al. 2016b] [Ding et al. 2016] [Islam et al. 2017].

Nesse contexto, propõe-se neste artigo um esquema de alocação adaptativa de potência com seleção dos melhores usuários para o enlace de descida de um sistema NOMA MIMO com o objetivo de reduzir a Taxa de Erro de Bit (*Bit Error Rate* - BER) e maximizar a vazão dos usuários. Como considera-se um sistema multiusuário, utiliza-se a técnica Codificação *Dirty Paper* (*Dirty Paper Coding* - DPC) para o cancelamento de interferências entre usuários [Cho et al. 2010]. O desempenho do esquema proposto de alocação adaptativa de potência para os usuários foi comparado com outros esquemas como: alocação fixa, aleatória, algoritmo de [Ali et al. 2016a] (Adaptativo 1) e o algoritmo de [Zamani et al. 2018] (Adaptativo 2). Para tanto, implementou-se um sistema NOMA MIMO em MATLAB® para realizar simulações.

2. Modelo de Transmissão

Neste trabalho, utilizamos a técnica DPC como método de pré-codificação do sinal a ser transmitido para o enlace de descida de um modelo NOMA MIMO multiusuário [Cho et al. 2010]. Nessa técnica, os dados são pré-codificados de modo que o efeito da interferência possa ser cancelado. Portanto, é necessário que os ganhos do canal sejam completamente conhecidos no lado do transmissor para que a técnica DPC seja implementada [Cho et al. 2010].

Consideremos K Equipamentos de Usuário (EUs) independentes em um sistema MIMO. A Estação Base (EB) e cada EU são equipadas com N_B e N_U antenas, respectivamente. Sejam $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_B \times 1}$ o sinal transmitido pela EB e $\mathbf{y}_u \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ o sinal recebido pelo u -ésimo EU, $u = 1, 2, \dots, K$. O sinal recebido pelo u -ésimo EU é dado por: $\mathbf{y}_u = \mathbf{H}_u^{DL} \mathbf{x} + \mathbf{z}_u, u = 1, 2, \dots, K$, onde $\mathbf{H}_u^{DL} \in \mathbb{C}^{N_{M,u} \times N_B}$ é a matriz do canal *down-link* entre a EB e o u -ésimo EU e $\mathbf{z}_u \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ é o ruído aditivo modelado como um vetor aleatório gaussiano complexo simétrico circular de média zero em cada u -ésimo EU [Cho et al. 2010].

Seja $N_{M,u}$ o número de antenas para o u -ésimo EU, $u = 1, 2, \dots, K$. Para o sinal do u -ésimo EU $\tilde{\mathbf{x}}_u \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$, o sinal recebido $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N_U \times 1}$ é dado pela Equação (1).

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}^{DL} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{z} = \mathbf{LQ} \tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{z} \quad (1)$$

onde \mathbf{L} e \mathbf{Q} são as matrizes triangular e unitária provenientes da decomposição triangular-ortogonal da matriz do canal \mathbf{H}^{DL} . Com a técnica DPC, elimina-se potenciais interferências aplicando uma matriz de pré-codificação ao sinal transmitido, obtida da decomposição \mathbf{LQ} da matriz \mathbf{H}^{DL} .

3. Alocação de Potência e Seleção de Usuários

As equações para o cálculo da potência para os usuários com intuito de maximizar vazão apresentadas em [Zamani et al. 2018] foram utilizadas no presente trabalho de forma adaptativa, ou seja, a cada intervalo de tempo $t \in T$, atualiza-se os valores de potência, onde T é o intervalo total para a execução do algoritmo

Neste trabalho, propõe-se selecionar os usuários com maior projeção sobre o espaço ortogonal aos usuários previamente selecionados, em conjunto com a alocação adaptativa de potência 2. O esquema proposto foi denominado de Adaptativo 2 + Seleção nos gráficos.

Para o Algoritmo **Adaptativo 2**, o problema de otimização para maximizar a vazão do sistema NOMA MIMO é formulado como:

$$\begin{aligned} & \underset{p}{\text{maximizar}} \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{p_k |\hat{g}_k|^2}{|\hat{g}_k|^2 \sum_{j=1}^{k-1} p_j + p\sigma_\epsilon^2 + \sigma^2} \right) \\ & \text{sujeito a:} \\ & \text{C1: } \sum_{k=1}^K p_k \leq p \\ & \text{C2: } p_k \geq (\omega_j - 1) \left(\sum_{j=1}^{k-1} p_j + \frac{p\sigma_\epsilon^2 + \sigma^2}{|\hat{g}_k|^2} \right), \forall k = 1, 2, \dots, K. \end{aligned} \quad (2)$$

onde $\omega_j = 2^{R_j^{\min}}$, R_j^{\min} é a taxa de dados mínima exigida para o j -ésimo usuário, \hat{g}_k é o ganho estimado do k -ésimo usuário, p é a potência total alocada para os usuários, σ_ϵ^2 é a variância da distribuição Gaussiana complexa do erro de estimação do canal e σ^2 é a variância do ruído Gaussiano branco aditivo complexo.

De acordo com [Zamani et al. 2018], as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) são necessárias e suficientes para obter a solução ótima do problema de otimização em (2). Assim, as alocações de potência ótimas para o usuário com menor ganho ($k = 1$) de canal e para os demais usuários do sistema NOMA MIMO ($k = 2, 3, \dots, K$) são descritas pelas Equações (3) e (4), respectivamente:

$$p_1 = \frac{p}{\prod_{k=2}^K \omega_k} - \sum_{j=2}^K \frac{(\omega_j - 1)(\sigma_\epsilon^2 p + \sigma^2)}{\prod_{l=2}^j \omega_l |\hat{g}_k|^2} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} p_k = & \frac{(\omega_k - 1)p}{\prod_{j=k}^K \omega_j} + \frac{(\omega_k - 1)(\sigma_\epsilon^2 p + \sigma^2)}{\omega_k |\hat{g}_k|^2} - \\ & \sum_{j=k+1}^K \frac{(\omega_k - 1)(\omega_j - 1)(\sigma_\epsilon^2 p + \sigma^2)}{\prod_{l=k}^j \omega_l |\hat{g}_k|^2} \end{aligned} \quad (4)$$

Utilizou-se o algoritmo de Projeções Sucessivas para selecionar os melhores usuários na transmissão. Nesse algoritmo, considera-se inicialmente todos os usuários como candidatos e, em seguida, seleciona-se o usuário com maior ganho e atualiza-se o conjunto de usuários selecionados. Na primeira iteração, calcula-se o espaço ortogonal aos

usuários selecionados e realiza-se a projeção do vetor de ganho de cada candidato nesse espaço. Por fim, seleciona-se o candidato com maior projeção e atualiza-se o conjunto de usuários selecionados. O procedimento é repetido até que se tenha completado as seleções [Yoo and Goldsmith 2006]. O processo é descrito pelas Equações (5) à (7):

$$\mathbf{H} = \left[\mathbf{h}_{\xi_1}^T, \dots, \mathbf{h}_{\xi_{|\xi|}}^T \right] \quad (5)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{I} - \mathbf{H} (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (6)$$

$$\zeta_i = \left\| \mathbf{N} \mathbf{h}_i^T \right\|^2, \forall i \in \Omega \xi \quad (7)$$

onde \mathbf{H} é a matriz de ganhos dos usuários selecionados que, a cada iteração, aumenta sua dimensão em um até que $|\xi| = N$, $\mathbf{h}_{\xi_i} = [h_{1,\xi_i}, \dots, h_{N_T,\xi_i}]$, \mathbf{N} é o espaço ortogonal aos usuários selecionados, calculado por meio da subtração da matriz identidade pela matriz pseudo-inversa do canal aplicada à matriz do canal. ζ_i corresponde à métrica de seleção e é calculada pela norma da projeção do vetor do i -ésimo usuário sobre o espaço N , onde $\xi = \xi \cup \{k\}$ representa o conjunto de usuários selecionados. A variável Ω representa o conjunto de índices de usuários candidatos. Por fim, k é o índice do usuário selecionado na iteração, dado por $k = i_{\zeta_i}$. Utiliza-se como critério de seleção os usuários com maiores valores de ξ .

4. Simulações e Resultados

Para avaliar o desempenho da proposta de alocação adaptativa de potência com seleção de usuários, desenvolveu-se um programa em MATLAB[®] para simular quatro cenários para a alocação de potência dos usuários: fixa, aleatória e adaptativa 1 e adaptativa 2. Considerou-se um sistema consistindo de uma EB com 96 antenas transmissoras enviando dados em um enlace de descida para 96 EUs com uma antena receptora cada. Aplicou-se o algoritmo seleção para ordenar os melhores EUs. O número total de bits transmitidos, a largura de banda de um bloco de recurso e a potência total alocada para o sistema foram 200kbits, 180kHz e 5dBm, respectivamente. Avaliou-se o comportamento do sistema variando a SNR entre 0 e 40dB. Considerou-se 1000 intervalos para a execução do algoritmo.

Para a simulação com alocação aleatória de potência, gerou-se valores aleatórios (utilizando distribuição uniforme) de potência para cada usuário em cada iteração sobre o tempo total. Para a simulação com alocação fixa de potência, alocou-se valores fixos iguais a $p/(N_K N_U)$ para todos os usuários do sistema.

Uma vez que o sistema em questão tem o objetivo de oferecer vazão proporcional, então o índice de justiça (do inglês, *fairness*) de vazão é calculado. O índice de justiça trata-se do grau de distribuição de recursos disponíveis, no caso, vazão total, entre os usuários. Ou seja, N_K EUs competem por conseguir ter uma vazão de dados recebidos pela EB em um instante t . Para calcular o índice de justiça de vazão ($F_V(t)$) em um instante t , utilizou-se a Equação (8) [Rocha and Vieira 2016] [Jain et al. 1984].

$$F_V(t) = \frac{\left[\sum_{i=1}^N V_i(t) \right]^2}{N_K \sum_{i=1}^N V_i^2(t)} \quad (8)$$

onde $V_i(t)$ é a vazão utilizada pelo i -ésimo usuário no instante t .

De acordo com fairness1, se todos os usuários recebem a mesma quantidade de recursos no tempo (t), então $F_V(t)$ é igual a 1 e o sistema é dito 100% justo. O índice diminui, com o aumento da desigualdade da alocação dos recursos entre os usuários [Rocha and Vieira 2016] fairness2. Logo, o cálculo do índice de justiça possibilita mensurar a justiça na distribuição de recursos, neste caso, vazão. Para sistemas onde os usuários possuem uma demanda desigual de recursos, pode-se aferir o índice de justiça por meio da razão entre o recurso alocado e o recurso demandado [Rocha and Vieira 2016] [Jain et al. 1984].

A Figura 1 apresenta o resultado de BER obtido para a simulação realizada com o DPC para 96 antenas de transmissão e 96 EUs. A partir desses resultados, é possível constatar a redução da BER com a utilização dos algoritmos adaptativos da proposta, onde o algoritmo **Adaptativo 2** foi o que obteve menores valores de BER.

A Figura 2 revela o comportamento da vazão total do sistema com o aumento da SNR. Nota-se que os algoritmos adaptativos da proposta obtiveram os maiores valores de vazão, onde os maiores valores de vazão total foram alcançados pelo algoritmo **Adaptativo 2** (proposta).

Finalmente, os resultados de vazão obtidos para cada usuário utilizando o algoritmo **Adaptativo 2** (proposta) é apresentado na Figura 3. Visualmente, a utilização de DPC para o cenário com valores massivos de antenas de transmissão e EUs garante níveis de justiça entre os usuários.

Numericamente, temos a partir da Equação (8), os valores de índice de justiça de vazão para os algoritmos **Adaptativo 1** e **Adaptativo 2** apresentados na Tabela 1. Nota-se que o algoritmo **Adaptativo 2** foi o que obteve maior valor de índice de justiça de vazão.

Tabela 1. Índices de justiça de vazão para cada algoritmo adaptativo com DPC para a simulação com $N_T = 96$, $N_K = 96$, $N_R = 1$.

Simulação	Algoritmo	Índice de Justiça de Vazão
$N_T = 96$, $N_K = 96$, $N_R = 1$	Adaptativo 1	99,12%
$N_T = 96$, $N_K = 96$, $N_R = 1$	Adaptativo 2 (Proposta)	99,73%

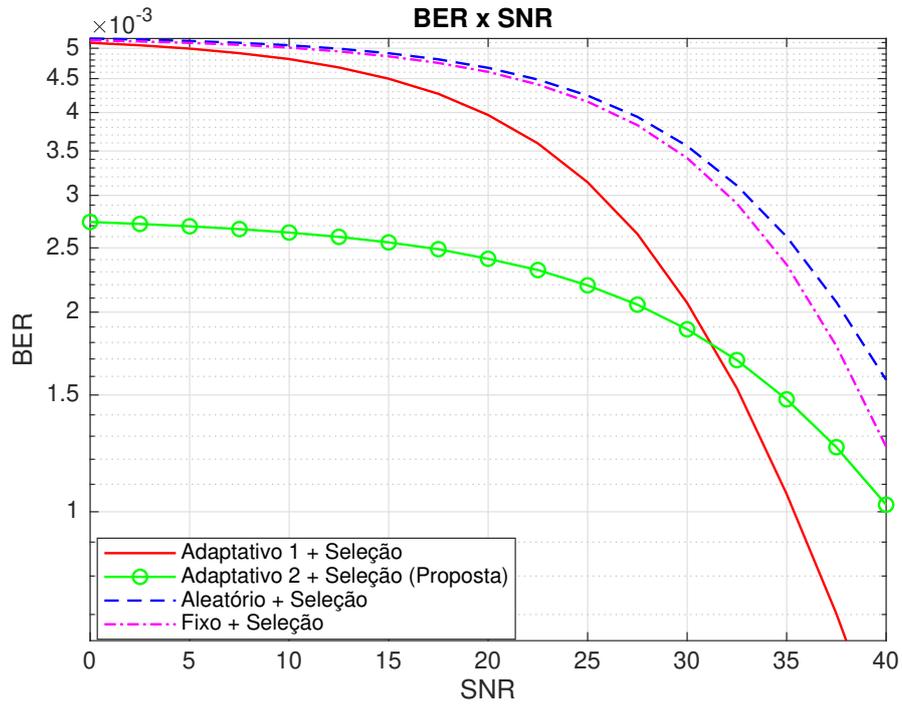


Figura 1. Relação BER versus SNR para o cenário com $N_T = 96$, $N_K = 96$, $N_R = 1$, com seleção de todos os usuários.

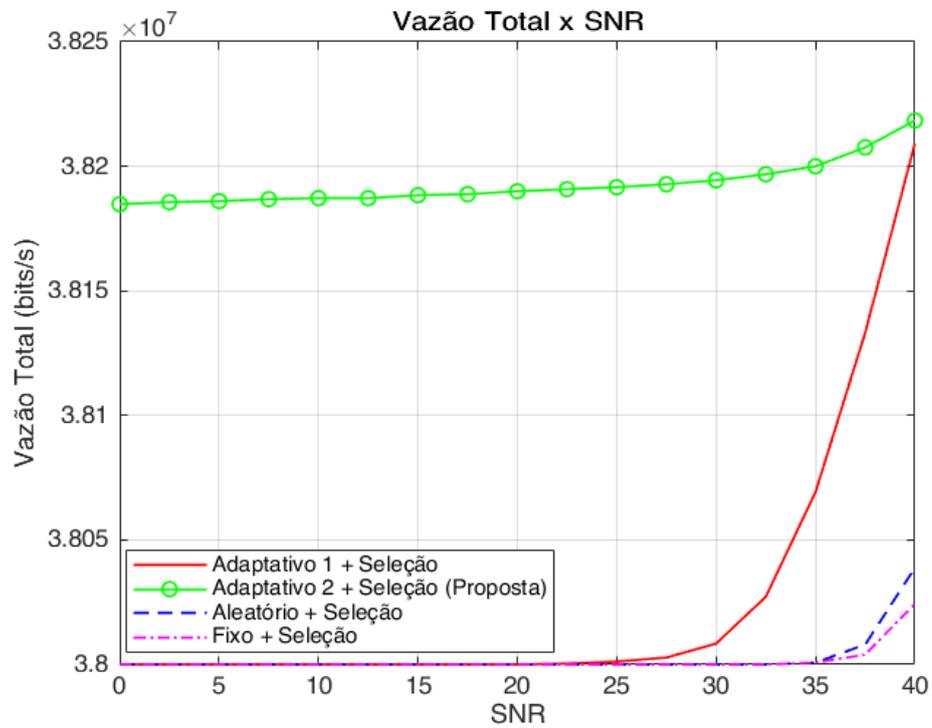


Figura 2. Relação vazão total versus SNR para o cenário com $N_T = 96$, $N_K = 96$, $N_R = 1$, com seleção de todos os usuários.

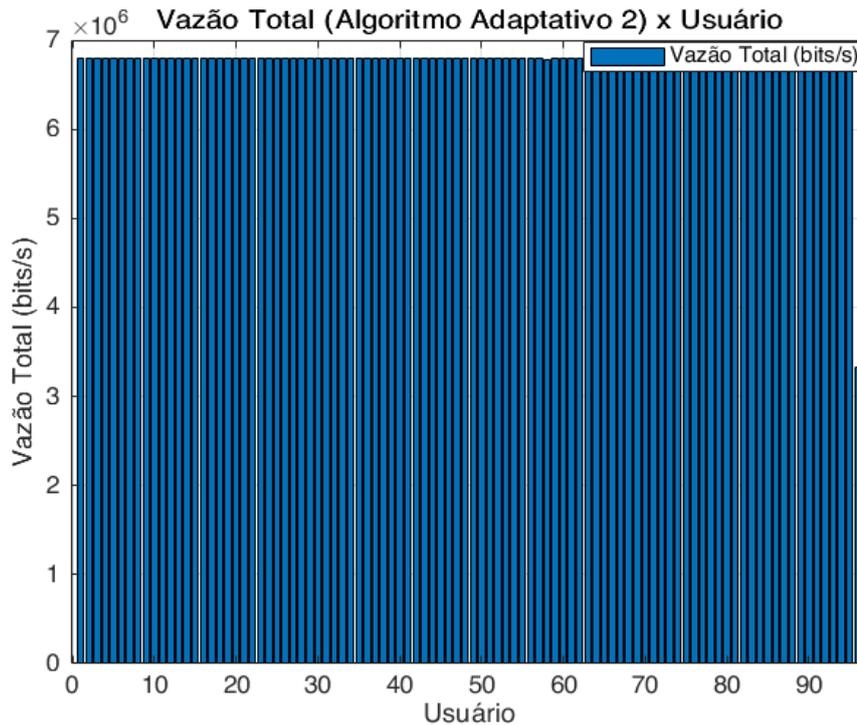


Figura 3. Vazão total por usuário com utilização do algoritmo Adaptativo 2 para o cenário com $N_T = 96$, $N_K = 96$, $N_R = 1$, com DPC.

5. Conclusão

É proposto neste trabalho um esquema de alocação adaptativa de potência e seleção iterativa dos usuários para a redução da BER e maximização da vazão do sistema. Os resultados obtidos a partir das simulações, mostram que a proposta do trabalho aumenta a vazão dos usuários e reduz a BER e aumenta a vazão de dados dos usuários, quando comparado aos demais métodos considerados para a alocação de potência. Constatou-se também que o esquema proposto garante elevados níveis de justiça entre os usuários, uma vez que todos os usuários obtêm níveis próximos de vazão total.

Como trabalhos futuros, pretende-se modelar o sistema para um cenário mais real utilizando um modelo de canal Rayleigh e também pretende-se analisar o comportamento da simulação ao se variar outros parâmetros da simulação, tais como o número de antenas de transmissão e o número de antenas de recepção por usuário.

Referências

- Ali, S., Hossain, E., and Kim, D. I. (2016a). Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Downlink Multiuser MIMO Systems: User Clustering, Beamforming and Power Allocation. *IEEE Access*.
- Ali, S., Tabassum, H., and Hossain, E. (2016b). Dynamic User Clustering and Power Allocation for Uplink and Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) systems. *IEEE Access*.

- Cho, Y. S., Kim, J., Yang, W. Y., and Kang, C. G. (2010). *MIMO-OFDM Wireless Communication with MATLAB*, volume 1. John Willey & Sons, 1st edition.
- Ding, Z., Adachi, F., and Poor, H. V. (2016). The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple ACCESS.
- Islam, S. M. R., Zeng, M., and Dobre, O. A. (2017). NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency.
- Jain, R. K., Chiu, D. W., and Hawe, W. R. (1984). *A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System*. *ACM Transaction on Computer Systems*.
- Luo, F. L. and Zhang, C. (2016). *Signal Processing For 5G: Algorithms and Implementations*. John Willey & Sons, 1st edition.
- Rocha, F. G. C. and Vieira, F. H. T. (2016). Alocação de recursos em redes sem fio ofdm multiusuário utilizando modelagem multifractal adaptativa. *Tese de Doutorado - Universidade Federal de Goiás*.
- Yoo, T. and Goldsmith, A. (2006). On the Optimality of Multiantenna Broadcast Scheduling Using Zero-Forcing Beamforming. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pages 528–541.
- Zamani, M. R., Eslami, M., and Khorramizadeh, M. (2018). Optimal Sum-Rate Maximization in a NOMA System with Channel Estimation Error. *26th ICEE (Iranian Conference on Electrical Engineering)*, pages 720–724.