

Capacidade em Sistemas Massive MIMO: Algoritmos Contínuos e Discretos

Capacity in Massive MIMO Systems: Continuous and Discrete Algorithms

RESUMO

Gabriel Carvalho do Espírito Santo
gabrielsanto@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Lucas Dias Hiera Sampaio
ldsampaio@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

Este trabalho apresenta uma análise comparativa de dois algoritmos de controle de potência em sistemas massive MIMO sob regime de contaminação piloto. O primeiro é um algoritmo cujo domínio é contínuo, o algoritmo de *waterfilling*, já o segundo é um algoritmo discreto de *Bitloading*. Os algoritmos são comparados por meio da vazão do sistema e em termos de melhor e pior taxa de transmissão por usuário.

PALAVRAS-CHAVE: Alocação de recursos, Capacidade de Sistemas Sem-fio, *Waterfilling*, *Bitloading*.

ABSTRACT

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

Direito autorial: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



THIS WORK PRESENTS A STUDY COMPARING TWO POWER CONTROL ALGORITHMS IN MASSIVE MIMO SYSTEMS UNDER PILOT CONTAMINATION REGIME. THE FIRST ONE IS A CONTINUOUS ALGORITHM, THE WATERFILLING ALGORITHM, AND THE SECOND ONE IS A DISCRETE ONE, THE BITLOADING ALGORITHM. THEY WERE COMPARED THROUGH THE TOTAL SYSTEM THROUGHPUT AND IN TERMS OF THE BEST AND WORST USER TRANSMISSION RATE.

KEYWORDS: Resource allocation, Wireless Systems Capacity, *Waterfilling*, *Bitloading*.

INTRODUÇÃO

A criação de novos serviços e plataformas na última década levaram a um aumento considerável da demanda por transmissões sem-fio. Com este objetivo a quinta geração de redes de telecomunicações (5G) tem por objetivo ampliar duas métricas fundamentais: a eficiência energética e a eficiência espectral.

Dentre as tecnologias capazes de aumentar estas métricas está o uso de múltiplas antenas em larga escala, também conhecido como *Massive MIMO* (do inglês, múltiplas antenas de transmissão e múltiplas antenas de recepção em larga escala).

Uma vez que os recursos nestas redes são limitados o uso otimizado dos mesmos torna-se fundamental ao processo de comunicação.

Desta forma, este trabalho apresenta uma análise comparativa do desempenho de algoritmos de controle de recursos discretos e contínuos em sistemas de telecomunicações

MODELO DO SISTEMA

Consideramos um sistema massive MIMO com $L > 1$ células usando o mesmo espectro de banda e K_l terminais móveis conectados em uma única estação base ao qual tem $M \gg K$ antenas. Além disso, assumimos que cada terminal móvel tem uma única antena e que cada estação base usa um sistema de pré-codificação linear antes de transmitir a informação aos usuários, o qual exige conhecimento do CSI (*Channel State Information*). Adicionalmente, consideramos que um sistema TDD (*Time Division Duplex*) é usado. Nas próximas subseções vamos discutir como ocorre a transmissão de treinamento do uplink e informação no downlink.

A. Treinando Uplink

Afim de adquirir CSI em cada intervalo de coerência T_c cada usuário no sistema deve enviar uma sequência piloto através do canal de uplink. O sinal de sequência piloto do uplink recebido pela estação base l é uma matrix $M \times T_p$, onde T_p é o tamanho da sequência piloto e isso pode ser descrito como:

$$\begin{aligned} R_l^u &= \sum_{k=1}^{K_l} \sqrt{p_u} \mathbf{g}_{k,l} S_{k,l}^H + \quad \} \text{Sinal desejado para os usuários} \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^L \sum_{k'=1}^{K_j} \sqrt{p_u} \mathbf{g}_{k',j,l} S_{k',j}^H + \boldsymbol{\eta}_l \quad \} \text{Contaminação piloto/ Interferência} \end{aligned}$$

onde k, l, k' e j são respectivamente, usuário, células de interesse, usuários interferentes e células adjacentes indexadores. Além do mais, $R_l^u \in \mathbb{C}^{M \times T_p}$, p_u é a potência de transmissão do uplink, $S_{k,l} \in \mathbb{C}^{T_p \times 1}$ é a sequência piloto enquanto que $(\cdot)^H$ é o operador Hermitiano e é equivalente ao transposto complexo conjugado, $\boldsymbol{\eta}_l \in \mathbb{C}^{M \times T_p}$ é a matriz do ruído onde os elementos são complexas variáveis aleatórias Gaussianas com média zero e variância igual a $N_0 B$ onde N_0 é o ruído de densidade espectral de potência e B o sistema de largura de banda. Finalmente, $\mathbf{g}_{k,j,l} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é o ganho do canal entre o k -ésimo usuário da célula j e a estação base da célula l , ao qual representa a grande escala de fading ($\beta_{k,j,l}$) e a pequena escala fading ($h_{k,j,l}$), ou seja:

$$\mathbf{g}_{k,j,l} = \sqrt{\beta_{k,j,l}} \mathbf{h}_{k,j,l}$$

onde $\mathbf{h}_{k,j,l} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é independente e identicamente distribuído nas complexas variáveis aleatórias Gaussianas com média zero e única variância, enquanto isso $\beta_{k,j,l}$ é o efeito de path loss e shadowing. Assumimos um modelo simplificado para o path loss, ou seja:

$$\beta_{k,j,l} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \left(\frac{d_0}{d_{k,j,l}} \right)^\gamma S_{k,j,l}$$

onde λ é o comprimento de onda, d_0 é a distância de referência, $d_{k,j,l}$ é a distância (em metros) do k -ésimo usuário da célula j para a estação base na célula l . Finalmente $\gamma \in [2, 8]$ é o expoente do path loss que está diretamente relacionado ao cenário onde a comunicação wireless toma lugar e $S_{k,j,l}$ é a variável aleatória distribuída log-normal do shadowing com média zero e variância $10^{\frac{\sigma_s^2}{10}}$ onde $\sigma_s^2 \in [4, 13]$ para canais exteriores (RAPPAPORT, T. S).

Supomos o uso do código fator de espalhamento variável ortogonal ou OVFSF (orthogonal variable spreading factor) para gerar a sequência piloto ao qual são designados para cada usuário através da alocação da sequência piloto hipermatriz $\Phi \in \{0, 1\}^{K_l \times T_p \times L}$ onde os elementos são definidos como:

$$\Phi_{k,q,l} = \begin{cases} 0 & \text{sequência piloto não é alocada} \\ 1 & \text{sequência piloto é alocada} \end{cases}$$

Entretanto, na ordem para verificar se dois usuários têm a mesma sequência piloto nós calculamos o produto interno dos seus vetores de alocação da sequência piloto, ou seja, $\Phi_{k,l} \in \{0, 1\}^{T_p}$ é o vetor de alocação da sequência piloto para o usuário k da célula l , então $\Phi_{k,l}^T \Phi_{k',j}$ é 1 se o usuário k da célula l usa a mesma sequência piloto como o usuário k' da célula j e zero caso contrário.

B. Downlink Transmission

Como mencionado anteriormente cada estação base usa um sistema de pré-codificação linear baseado no seu CSI estimado na ordem de transmissão aos terminais móveis. Levando isso em consideração, deixamos $x_l[x_{1,l}, \dots, x_{K_l,l}]^T$ ser o símbolo a ser transmitido para cada usuário da célula l e $\mathbf{W}_l \in \mathbb{C}^{M \times K_l}$ a matrix de pré-codificação linear ao qual é uma função de CSI estimado. O sinal enviado pela estação base l para os usuários K_l é:

$$\mathbf{y}_l = \sum_{k=1}^{K_l} \sqrt{p_{k,l}} \mathbf{w}_{k,l} x_{k,l}$$

O escalar $x_{k,l}$ representa o símbolo de dados enviados pela estação base l ao usuário k e a potência da unidade, ou seja, $E[|x_{k,l}|^2] = 1$. Entretanto, $p_{k,l}$ representa a potência de transmissão usada para amplificar o sinal particular do usuário k . O vetor $\mathbf{W}_{k,l} \in \mathbb{C}^M$ é a pré-codificação linear que determina a diretividade espacial do sinal e é diferente para cada um dos usuários. Sendo $\mathbf{G}_l = [g_{1,l,l}, \dots, g_{K_l,l,l}]$ e $\mathbf{P}_l = K_l \begin{bmatrix} \frac{1}{p_{1,l}} & & \\ & \dots & \\ & & \frac{1}{p_{K_l,l}} \end{bmatrix} \mathbf{I}$ onde \mathbf{I} é a matriz identidade. Consequentemente, considerando um sistema de *Maximum Transmission Ratio* (MRT) a matriz de pré-codificação é definida como $\mathbf{W}_l = \mathbf{G}^*$.

Portanto, a pós-deteção da taxa do sinal interferência mais ruído para o usuário k da célula l pode ser definida como:

$$\delta_{k,l} = \frac{p_{k,l} |g_{k,l,l} \mathbf{W}_{k,l}|^2}{\sigma_{k,l}^2 + \sum_{j \neq l} \sum_{k'}^{K_j} \Phi_{k,l}^T \Phi_{k',j} p_{k',j} |g_{k',j,l} \mathbf{W}_{k',j}|^2}$$

e a capacidade do usuário considerando a equação de Shannon-Harley é:

$$R_{k,l} = \left(\frac{T - T_p}{T} \right) B \log_2(1 + \delta_{k,l})$$

Onde $T > T_p$ é o intervalo total de transmissão e B é o sistema de comprimento de banda.

PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO E ALGORITMOS

A soma da taxa de maximização do problema é um problema de alocação de recurso bem conhecido como pode ser descrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{maximize } \mathbf{P} \quad & J(\mathbf{P}) = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} R_{k,l} \\ \text{Sujeito à} \quad & (C.1) \sum_{k=1}^{K_l} p_{k,l} \leq P_l^{\max}, \forall l \\ & (C.2) p_{k,l} \geq 0, \forall k \text{ and } l \end{aligned} \quad (1)$$

onde (C.1) é a restrição de potência total por estação base e (C.2) é a restrição não negativa de potência. Note que, na intenção de maximizar $J(\mathbf{P})$ todas as informações de pré-codificação como bem estimado CSI devem ser compartilhadas através de todas as células no cluster.

A. O Algoritmo de Waterfilling

Descrito primeiramente no trabalho de R. G. Gallager (1968) o algoritmo de waterfilling é uma interpretação geométrica do Lagrangiano do problema de otimização (1). De forma geral a potência de cada usuário do sistema pode ser encontrada por meio de duas equações:

$$p_{k,l} = \left[\frac{B}{\log_2 \mu} - \frac{1}{\theta_{k,l}} \right]^+$$

Onde:

$$\mu = \frac{K_l B}{\log 2} \left(P_l^{\max} - \sum_{k=1}^{K_l} \frac{1}{\theta_{k,l}} \right)^{-1}$$

B. Algoritmo de BitLoading

O algoritmo de bitloading é responsável em cada uma de suas interações calcular o custo em termos de potência para aumentar a taxa de transmissão de cada usuário do sistema em 1 bit/s/Hz. A cada iteração o usuário com a menor taxa é escolhido e tem sua taxa aumentada. O processo se repete até que a potência disponível no sistema seja distribuída em sua totalidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de avaliar o desempenho de ambos algoritmos o seguinte cenário de simulação, descrito pela Tabela 1 é proposto:

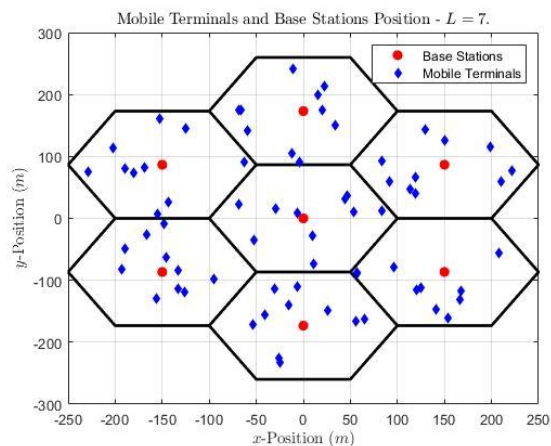
Tabela 1 – Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Valor
Número de Células (L)	7
Raio da Célula	100 metros
Número de Usuários Por Célula (K)	10
Variância do Sombreamento	4 dB
Expoente da Perda de Percurso	4
Largura de Banda	20 MHz
Número de Antenas por Célula (M)	100
Potência Máxima Por Célula	1mW
Número de Realizações (<i>Trials</i>)	1000

Fonte: do autor.

O sistema é composto por células hexagonais cujas estações rádio-base estão centralizadas, e os usuários são posicionados de forma aleatória e uniformemente. As sequências piloto utilizadas por cada usuário no sistemas são distribuídas de forma aleatória de tal sorte a não existir interferência intra-celular.

Figura 1 – Cenário de Simulação



Fonte: do autor.

A Tabela 2 resume os resultados obtidos por meio de simulação no cenário adotado.

Tabela 1 – Parâmetros de Simulação

Métrica (média em 1000 <i>Trials</i>)	Valor no Waterfilling (Contínuo)	Valor no BitLoading (Discreto)
Taxa Total do Sistema	16,54 Gbps	15,60 Gbps (-5,7%)
Maior taxa de usuário no Sistema	465,13 Mbps	456,93 Mbps (-1,7%)

Métrica (média em 1000 <i>Trials</i>)	Valor no Waterfilling (Contínuo)	Valor no BitLoading (Discreto)
Maior taxa de usuário no Sistema	128,65 Mbps	76,68 Mbps (-40,4%)

Fonte: do autor.

É possível observar que a diferença de desempenho entre o algoritmo discreto e contínuo em termos absolutos de taxa total do sistema é marginal e corresponde a uma redução de 5,67% quando comparamos o discreto ao contínuo.

Todavia, esta diferença torna-se expressiva ao analisarmos o cenário do pior usuário do sistema, i.e. o usuário que percebe a pior combinação de condição do canal e interferência inter-celular. Neste caso, a redução do algoritmo discreto em relação ao contínuo passa a ser de 40,4% cuja taxa média sai de aproximadamente 129 Mbps para 76,6 Mbps.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo sobre o impacto da discretização do controle de potência em sistemas massive MIMO sob regime de contaminação piloto. As simulações indicaram que a diferença entre os algoritmos contínuos e discretos é marginal em termos absolutos, porém tem um alto impacto na taxa média de transmissão dos usuários com piores condições de canal e sob maior regime de interferência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 11, pp. 3590–3600, nov 2010.
- S. C. Tripathi, A. Trivedi, and S. Rajoria, "Power optimization of cell free massive mimo with zero-forcing beamforming technique," in 2018 Conference on Information and Communication Technology (CICT), Oct 2018, pp. 1–4
- YING HU; FEI ZHANG; CHUNGUO LI; YI WANG; RUI ZHAO. "Energy Efficiency resource allocation in downlink cell-free massive MIMO system". Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8266599>. Acesso em: 31 jul. 2019.
- RAPPAPORT, T. S. "Wireless Communications Principles and Practice" Ed. Prentice Hall, 2002.
- R. G. Gallager, Information Theory and Reliable Communication. New York: Wiley, 1968.