https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2019

Algoritmo de Controle de Potência Distribuído para Sistemas Massive MIMO Baseado no Equilíbrio de Verhulst

Distributed Power Control Algorithm for Massive MIMO Systems based on Verhulst Equilibrium

Frank Jun Sasada
franksasada@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil

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

RESUMO

Este trabalho propõe o uso de um algoritmo de controle de potência utilizando como base o equilíbrio de Verhulst para realizar a distribuição da potência em um sistema MIMO (*multiple input multiple output*) em larga escala. O equilíbrio de Verhulst diz que populações não podem crescer em progressão geometricamente indefinidamente devido a obstáculos que proporcionam resistência, como limitações de comida e espaço. Se estabelecem as condições do treinamento de *uplink*, a transmissão de *downlink*, assim como o problema de otimização e tipos de interferência, como perda de percurso e sombreamento e por fim o funcionamento do algoritmo para alcançar o melhor controle de potência para o sistema.

PALAVRAS-CHAVE: DPCA. MIMO massivo. Equilíbrio de Verhulst.

Recebido: 19 ago. 2019.

Aprovado: 01 out. 2019.

ABSTRACT

This work use an algorithm to power control using Verhulst equilibrium base to do distribution of power in a massive MIMO (multiple input multiple output) system. The Verhulst equilibrium says that populations cannot grow progressively geometrically, due to obstacles that provide resistance, like food and space limitations. The definitions for uplink training, downlink transmission, as well the optimization problem and types of interference such as path loss and shadowing, finally how algorithm works to achieve the best power control for the system are established.

KEYWORDS: DPCA. Massive MIMO. Verhulst Equilibrium.

INTRODUÇÃO

O tráfego de dados por meio das redes sem fio vem crescendo de forma exponencial na última década. Em 2014 houve uma elevação em 69 por centro no tráfego global de dados móveis. A crescente demanda fomenta a criação de novas tecnologias para que possa ser suprida, logo, a proposta de criação da quinta geração de comunicação móvel (5G) é fundamental para que os serviços de comunicação possam ser ofertados (ELIJAH, 2016).

Dentre as diferentes tecnologias que serão protagonistas no 5G, é importante citar os sistemas MIMO em larga escala, nos quais utiliza-se uma grande quantidade de antenas nas torres de transmissão. A escolha é justificada por se tratar de um sistema de transmissão mais robusta e confiável ao mesmo tempo em que garante maior eficiência espectral e energética. Adicionalmente, os sistemas MIMO em larga escala possibilitam ganhos de multiplexação, processamento linear simples nos terminais móveis, o que reduz custo de componentes e o consumo de bateria (LARSSON, 2014).

Utilizando conceitos usuais de alocação de recursos para um sistema de dezenas de terminais com centenas de subportadores e complexidade seria imensa, felizmente, em sistemas *massive* MIMO o efeito de endurecimento do canal torna as variações do canal insignificantes ao domínio da frequência e dependem principalmente da *large-scale* fading no domínio do tempo, que normalmente varia de 100 a 1000 vezes mais lento que o *small-scale* fading. O que torna os conceitos convencionais de alocação de recursos desnecessários, todo o espectro pode ser alocado simultaneamente para cada terminal ativo. E as decisões de controle de potência são feitas em conjunto para todas as subportadoras baseadas apenas nas características de *large-scale* fading (BJÖRNSON, 2016).

MODELO DO SISTEMA

Em um sistema MIMO massivo com $L > 1$ células usando a mesma banda de espectro e K_l terminais móveis conectados com uma única estação base que possui $M \gg K_l$ antenas. Assumindo que cada terminal móvel tem uma única antena e que cada estação base usa pré-codificação linear antes da informação de transmissão de *downlink* para seus usuários, que precisa de conhecimento do CSI (*channel state information*). Como um esquema de TDD (*time division duplexing*) é usado, o canal de *uplink e downlink* são os mesmos.

Para adquirir o CSI em cada intervalo de coerência T_c cada usuário do sistema deve enviar uma sequência piloto através do canal de *uplink*. O sinal de *uplink* da sequência piloto recebida pela estação base l é uma matriz $M \times T_p$ onde T_p é o tamanho da sequência piloto que pode ser descrito como:

$$R_l^u = \sum_{k=1}^{K_l} \sqrt{p_u}\, g_{k,l,l}\, s_{k,l}^H + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq l}}^{L} \sum_{k'=1}^{K_j} \sqrt{p_u}\, g_{k',j,l}\, s_{k',j}^H + \eta_l \tag{1}$$

Onde k, l, k' e j são, respectivamente, o usuário, a célula, usuários interferindo e os indexadores das célula adjacentes. Além disso, $R_l^u \in \mathbb{C}^{M \times T_p}$, p_u é a potência de transmissão do *uplink*, $s_{k,l}^H \in \mathbb{C}^{T_p \times 1}$ é a sequência piloto com o operador hermitiano que é equivalente ao conjugado complexo transposto, $\eta_l \in \mathbb{C}^{M \times T_p}$ é a matriz do ruído cujos elementos são variáveis Gaussianas complexas aleatórias com média zero e variância igual a $N_0 B$ onde N_0 é a densidade espectral da potência do ruído[1] e B a largura da banda do sistema. Finalmente, $g_{k,l,l} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é o ganho do canal entre o k-ézimo usuário da célula j e a estação base da célula l, representando o *large-scale fading* ($\beta_{k,j,l}$) e o *small-scale fading* ($h_{k,j,l}$) isto é:

$$g_{k,j,l} = \sqrt{\beta_{k,j,l}}\ h_{k,j,l} \tag{2}$$

onde $h_{k,j,l} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ são independentes e são variáveis complexas aleatórias Gaussianas distribuídas identicamente com média zero e variância unitária, enquanto $\beta_{k,j,l}$ sãos os efeitos de perda de percurso e sombreando, assumindo o modelo simplificado de perda de percurso como:

$$\beta_{k,j,l} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0}\right)^2 \left(\frac{d_0}{d_{k,j,l}}\right)^{\gamma} \mathcal{S}_{k,j,l} \tag{3}$$

onde λ é o comprimento de onda d_0 é a distância de referência[2], $d_{k,j,l}$ é a distância em metros do k-ézimo usuário da célula j para a estação base na célula l, $\gamma \in [2,8]$ é o expoente de perda de percurso que é diretamente relacionado com o cenário de comunicação *wireless* toma lugar e $\mathcal{S}_{k,j,l}$ é uma variável aleatória log-normal de sombreamento com média zero e variância $10^{\frac{\sigma_S^2}{10}}$ onde $\sigma_S^2 \in [4,13]$ para canais de ambiente externos.

Supondo o uso do código OVSF (*orthogonal variable spreading factor)* para gerar as sequências piloto que são designadas para cada usuário através da hipermatriz de alocação da sequência piloto $\Phi \in \{0,1\}^{K_l \times T_p \times L}$ cujo elementos são definidos como:

$$\varphi_{k,q,l} = \begin{cases} 0\ sequência\ piloto\ não\ está\ alocada \\ 1\ sequência\ piloto\ está\ alocada \end{cases} \tag{4}$$

Então, para estar verificando dois usuários que possuem a mesma sequência piloto nós calculamos o produto de seus vetores de alocação da sequência piloto, isto é, $\varphi_{k,l} \in \{0,1\}^{T_p}$ é o vetor de alocação da sequência piloto do usuário k da célula l , então $\varphi_{k,l}^T \varphi_{k',j}$ é 1 se o usuário k da célula l usa a mesma sequência piloto do usuário k' da célula j e zero caso contrário.

Como dito anteriormente cada estação base usa pré-codificador linear em suas estimativas CSI para transmitir a seus terminais móveis. Levando em consideração, deixando $x_l \triangleq [x_{1,l}, \dots, x_{K_l,l}]^T$ ser os símbolos para serem transmitidos para cada usuário da célula l para seus usuários K_l é:

$$y_l = \sum_{k=1}^{K_l} \sqrt{p_{k,l}}\ w_{k,l}\ x_{k,l} \qquad (5$$

O escalar $x_{k,l}$ representa o símbolo de dados enviado pela estação base l para o usuário k e possui potência unitária, isto é, $\mathbb{E}\left[\left|x_{k,l}\right|^2\right] = 1$. Além disso, $p_{k,l}$ representa a potência de transmissão usado para amplificar o sinal particular do usuário k. O vetor $w_{k,l} \in \mathbb{C}^M$ é o pré-codificador linear que determina a direção espacial do sinal que é diferente para cada pré-codificador considerado. Sendo

[1] O ruído PSD (N_0) é igual a Boltzmann Constant multiplicado pela temperatura, sendo aproximado $4{,}11\ .\ 10^{-21}$ a 25 °C.

[2] Tipicamente, $d_0 \in [1,10]$ metros para ambiente internos e $d_0 \in [10,100]$ metros para ambientes externos.

$G_l = [g_{1,l,l}, \dots, g_{K_l,l,l}]$ e $P_l = K_l \left[\frac{1}{p_{1,l}}, \dots, \frac{1}{p_{K_l,l}}\right] \mathrm{I}$ onde I é a matriz de identidade. Então a matriz W_l é definido como>

$$W_l = \begin{cases} G^* \ para\ MRT(maximum - ratio\ transmission) \\ G^*(G^T G^*)^{-1}\ para\ ZF\ (zero - forcing) \\ G^*(G^T G^* + P_l)^{-1}\ para\ MMSE\ (minimum\ mean - square\ error) \end{cases} \quad (6)$$

Além disso, o sinal recebido pelo usuário k da célula l é:

$$\tau_{k,l} = \sqrt{p_{k,l}}\, g_{k,l,l}^H\, w_{k,l}\, x_{k,l} + \eta_{k,l} \sum_{j\neq l}^{L} \sum_{k'=1}^{k_j} \varphi_{k,l}^T\, \varphi_{k',j} \sqrt{p_{k',j}}\, g_{k',j,l}^H\, w_{k',j}\, x_{k',j} \quad (7)$$

Onde $\eta_{k,l}$ é o ruído do receptor, ainda, a pós-detecção do SINR (*signal to interference plus noise ratio)* para o usuário k célula l pode ser definido como:

$$\delta_{k,l} = \frac{p_{k,l} |g_{k,l,l}\, w_{k,l}|^2}{\eta_{k,l} + \sum_{j\neq l}^{L} \sum_{k'=1}^{k_j} \varphi_{k,l}^T \varphi_{k',j}\, p_{k',j} \left|g_{k',j,l}\, w_{k',j}\right|^2} \quad (8)$$

e considerando a equação Shannon-Hartley para capacidade do usuário temos:

$$R_{k,l} = \left(\frac{T - T_p}{T}\right) B \log_2(1 + \delta_{k,l}) \quad (9)$$

Onde $T - T_p$ é o intervalo de transmissão total e B é a largura de banda do sistema. A taxa de transferência da célula e a taxa de transferência do sistema é a soma de todos os usuários em uma célula e a taxa de transferência de todas das células é, respectivamente:

$$R_l = \sum_{k=1}^{K_l} R_{k,l} \quad (10)$$

onde R_l é a taxa de transferência da célula l e:

$$R = \sum_{l=1}^{L} R_l \quad (11)$$

onde R é a taxa de transferência do sistema.

Controle de potência em cenários sob interferência é um problema bem conhecido e pode ser descrito como:

$$\begin{aligned} &\underset{\mathbf{P}}{\text{Minimizar}} && \mathcal{J}(\mathbf{P}) = \sum_{l=1}^{L} \sum_{k=1}^{K_l} p_{k,l} \\ &\text{Sujeito a} && \text{(C.1) } R_{k,l} \geq R_{k,l}^*, \forall\ k\ e\ l \\ & && \text{(C.2) } \sum_{k=1}^{K_l} p_{k,l} \leq P_l^{max}, \forall\ l \\ & && \text{(C,3) } p_{k,l} \geq 0\ , \forall\ k\ e\ l \end{aligned} \quad (12)$$

onde (C.1) é a restrição de taxa mínima, (C.2) é a restrição do total de potência para cada estação base e (C.3) é a restrição de potência não negativa.

Para melhor elaborar o problema de controle de potência, é definido o conjunto de interferências $\mathcal{N}_i$ onde $i = 1, \dots, T_p$, tal que para cada célula l um usuário $k \in \mathcal{N}_i$, se e somente se, $\varphi_{k,i,l} = 1$. Pelo modelo do sistema[3] $|\mathcal{N}_i| = L$ e assumimos que $\mathcal{N}$ elementos são classificado de forma que qualquer $\mathcal{N}_i = \{k_1, \dots, k_{T_p}\}$ implica que k_1 pertence a célula 1, k_2 a célula 2 e assim por diante.

Então, nós podemos reescrever o problema de otimização (12) em T_p subproblemas de otimização independentes:

$$\begin{aligned} &\underset{p_i}{\text{Minimizar}} && \mathcal{J}_i(\mathbf{P}) = \textstyle\sum_{k\in\mathcal{N}_i} p_{k,i} \\ &\text{Sujeito a} && (\text{C},1)\ \delta_{k,i} \geq \delta^*_{k,i}, \forall\, k \in \mathcal{N}_i \\ & && (\text{C},2)\ 0 \leq p_{k,i} \leq P^{max}, \forall\, k \in \mathcal{N}_i \end{aligned} \tag{13}$$

onde $\delta_{k,i}$ é a SINR do usuário $k \in \mathcal{N}_i$ e $\delta^*_{k,i}$ é a SINR que almejamos, considerando que todas as célula possuem a mesma quantidade potência disponível e $P^{max} = \frac{P_L^{max}}{T_p}$.

Se pode notar que o problema de otimização (13) é parecido com o problema original de controle de potência DS/CDMA (*Direct Sequence Code Division Multiple Acess*) Para $Z_i \in \mathbb{R}^{L\times L}$ seja a matriz de interferência normalizada para $\mathcal{N}_i = \{k_1, k_2, \dots, k_L\}$, assim cada elemento $z_{jj'}$ é:

$$z_{jj'} = \begin{cases} 0 & j = j' \\ \dfrac{\delta^*{}_{k_j,j}\left|g_{k_{j'},j',j}\, w_{k_{j'},j'}\right|^2}{\left|g_{k_j,j,j}\, w_{k_j,j}\right|^2} & j \neq j' \end{cases} \tag{14}$$

onde $\delta^*{}_{k_j,j}$ é o SINR que almejamos para o usuário $k_j \in \mathcal{N}_i$ da célula j.

Agora definimos o vetor de ruído normalizado $n \in \mathbb{R}^{1\times Z}$:

$$n = \left[\frac{\delta^*{}_{k_1,1}\,\sigma^2}{\left|g_{k_1,1,1}\, w_{k_1,1}\right|^2}\right], \dots, \frac{\delta^*{}_{k_L,L}\,\sigma^2}{\left|g_{k_L,L,L}\, w_{k_L,L}\right|^2} \tag{15}$$

onde σ^2 é a potência AWGN.

Então resolvendo o problema de otimização (13) é o mesmo que resolver o seguinte sistema linear (BOCK, 1964):

$$(\mathrm{I} - \mathrm{Z})\, p = n \tag{16}$$

onde **I** é a matriz de identidade, **Z** é a matriz da interferência normalizada, $\boldsymbol{n}$ é o vetor de ruído normalizado e $\boldsymbol{p} = \left[p_{k_1}, 1, \dots, p_{k_L}, L\right]$.

O vetor solução p^* de (2) é dado por:

[3] Assumindo que o número de usuários é o mesmo para cada célula.

$$p^* = (\mathrm{I} - \mathrm{Z})^{-1}\, n \tag{17}$$

Como a inversão de uma matriz possui um custo computacional e informação dos usuários, o CSI e vetor de precodificação podem não ser compartilhados entre todas as células, então nós introduzimos um DPCA baseado no equilíbrio de Verhulst (SAMPAIO, 2011).

O DPCA baseado no equilíbrio de Verhulst é um algoritmo interativo que acontece na estação base e atualiza a cada iteração a potência de transmissão dos usuários de acordo com a seguinte equação (GROSS, 2011):

$$p_{k_{l,}l}[t+1] = (1+\alpha)p_{k_{l,}l}[t] - \alpha\left(\frac{\delta_{k_{l,}l}[t]}{\delta^*{}_{k_{l,}l}}\right)p_{k_{l,}l}[t] \tag{18}$$

onde $p_{k_{l,}l}[t]$ é a potência alocada para o usuário $k_l \in \mathcal{N}_i$ da célula l na iteração t, $\alpha \in (0{,}1)$ é o fator de velocidade da convergência, $\delta_{k_{l,}l}[t]$ é o SINR observado na iteração t e $\delta^*{}_{k_{l,}l}$ é o SINR almejado.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a CNPq pela oportunidade e apoio a este estudo. Além disso, sou grato a meu orientador pela paciência e dedicação ao me dar assistência e atenção quando precisei, e aos meus familiares pelo apoio e carinho em todos os momentos.

REFERÊNCIAS

BJÖRNSON, E.; LARSSON, E. G.; MARZETTA, T. L. **Massive MIMO: ten myths and one critical question.** IEEE Communications Magazine, vol. 54, p. 114-123, 2016.

BOCK F.; EBSTEIN B. **Assignment of transmitter power control by linear programming.** IEEE Trans. Eletromag. Compt., vol. 2, no. 36, 1964.

ELIJAH, O.; LEOW, C. Y.; RAHMAN, T. A.; NUNOO, S.; ILIYA, S. Z. **A comprehensive survey of pilot contamination in massive mimo – 5g system.** IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 18, p.905-923, 2016.

GROSS T. J.; ABRÃO T.; JESZENSKY P. J. E. **Distributed power control algorithm for multiple access systems based on verhulst model.** AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 65, no. 4, pp. 361 – 372, 2011. Disponível em: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841110001287

LARSSON, E. G.; EDFORS, O.; TUFVESSON, F.; MARZETTA, T. L. **Massive mimo for next generation wireless systems.** IEEE Communications Magazine, vol. 52, p.186-195, 2014.

SAMPAIO L. D. H.; LIMA M. F.; PROENÇA M. L.; ABRÃO T. **Power-rate allocation in ds/cdma systems based on discretized verhulst equilibrium.** IEEE Latin America Transactions, vol. 9, no. 5, pp. 681–689, Sep. 2011.