

Esquemas Cooperativos Incrementais para Canais Relay de Múltiplo Acesso

Dimas Irion Alves, Cristian Müller, Renato Machado e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

Resumo— Este trabalho apresenta um novo esquema cooperativo e uma proposta de otimização para sistemas de comunicação sem fio com canais *relay* de múltiplo acesso (MARC). O novo esquema visa tornar os sistemas MARC mais compatíveis com os utilizados na atualidade, fazendo com que sua presença seja transparente aos nós fonte, reduzindo significativamente a complexidade de sincronismo da rede cooperativa. A otimização explora o contexto de múltiplas constelações de sinais, com o intuito de aumentar a robustez a erros de transmissão. Uma comparação com um esquema de referência é realizada através de simulações computacionais e os resultados revelam que o esquema proposto é adequado para redes cooperativas, em que a estação *relay* possui apenas uma única antena, apresentando pequena perda de razão sinal-ruído (SNR) porém com um ganho de taxa de transmissão. Por outro lado, a otimização proposta apresentou um ganho de SNR.

Palavras-Chave— MARC, estação *relay*, múltiplas antenas, sistema cooperativo.

Abstract— In this work, a novel cooperative scheme is presented and an optimization is proposed for wireless communications systems with multiple relay channels (MARC). The scheme aims at making the MARC systems more compatible with the current ones, by rendering its presence transparent to the source nodes, thus significantly reducing the complexity of the cooperative network synchronism. The optimization exploits the context of multiple signal constellations, aiming at increasing the robustness against transmission errors. A comparison with a reference scheme is carried out by computer simulations, and the results reveal that the proposed scheme matches well with cooperative networks with single-antenna relay station, presenting a small signal-to-noise ratio (SNR) loss but a gain in transmission rate. On the other hand, the proposed optimization yields an SNR gain.

Keywords— MARC, relay station, multiple antennas, cooperative communications.

I. INTRODUÇÃO

No últimos anos, o interesse em sistemas cooperativos vem crescendo em função dos ganhos de desempenho e robustez, obtidos através da exploração adequada da diversidade espacial de nós distribuídos ao longo da rede de comunicação [1], [2]. Mais especificamente, pode-se explorar a natureza difusora do canal de comunicação sem fio de modo a emular um sistema *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) virtual, através da utilização de nós, denominados *relays*, posicionados

geralmente entre fonte e destino, resultando na redução de efeitos degenerativos do sinal, causados principalmente pelo desvanecimento de multi-percurso [3].

Baseados nos ganhos associados à utilização de sistemas cooperativos, padrões emergentes de comunicações sem fio, como o *Long Term Evolution Advanced* (LTE-Advanced), vêm considerando o emprego de *relays* na elaboração de novas técnicas de transmissão. As técnicas de comunicação cooperativa podem considerar a utilização de estações MIMO, estações *relay* (exclusivas ou dedicadas), coordenação de interferência inter-células e utilização de técnicas *Coordinated MultiPoint* (CoMP) na transmissão e na recepção [4], [5]. Para as estratégias CoMP, acrescentam-se nós *relay* (estações *relay*), posicionados estrategicamente entre os nós fonte (usuários) e as estações rádio-base (*evolved Node B* - eNB), com o propósito de aumentar a área de cobertura da célula e se obter ganhos de *throughput* para o sistema [6].

Apesar dos benefícios previamente citados, o uso de sistemas cooperativos geralmente incorre numa perda de eficiência espectral. A fim de lidar com este problema, diversos esquemas de transmissão foram propostos. Uma possível solução para este problema é o uso de seleção dinâmica de *relays*, que reduz o número de *relays* utilizados por quadro de transmissão, mantendo o ganho de diversidade espacial como se todos os nós *relay* estivessem sendo utilizados [7]. Outra maneira atrativa de tratar este problema é através da utilização de processamento multiusuário, o qual prevê uma rede com múltiplas fontes e múltiplos *relays*, em que os nós fonte podem transmitir simultaneamente, e os *relays* situados em diferentes *clusters* (ou células) podem ser selecionados para atuarem como agentes colaboradores [8], [9].

A fim de melhorar o desempenho de sistemas cooperativos, recentemente foram propostos protocolos híbridos de transmissão, os quais combinam diferentes protocolos com o intuito de reduzir suas respectivas desvantagens, aumentar a capacidade do sistema e reduzir a taxa de erro de bit (BER) [10], [11]. Dentre os vários possíveis protocolos de comunicação, o protocolo *Decode, Remodulate and Forward* (DreMF), proposto em [12], merece destaque pela sua utilização nos protocolos híbridos explorados neste trabalho. Nele, o *relay* decodifica e remodula o sinal recebido em uma constelação de símbolos, antes de realizar o encaminhamento (a retransmissão) do sinal. Note que, caso seja escolhida uma constelação de ordem menor, ocorrerá uma diminuição na eficiência espectral do sistema para melhorar sua robustez a erro, enquanto que, utilizando uma constelação de ordem superior, o *relay* promove uma melhor eficiência espectral às custas de uma maior taxa de erros.

Dimas Irion Alves e Cristian Müller, Universidade Federal do Pampa, Alegrete-RS, Brasil, E-mails: dimasirion977@gmail.com, cristianmuller.50@gmail.com

Dimas Irion Alves, Cristian Müller e Bartolomeu F. Uchôa-Filho, Grupo de Pesquisa em Comunicações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, E-mail: uchoua@ieee.org.

Renato Machado, Grupo de Processamento de Sinais e Comunicações, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, Brasil, E-mail: renatomachado@ieee.org.

O emprego de modulação adaptativa em sistemas cooperativos, vem contribuindo para a obtenção de boas relações de custo-benefício entre eficiência espectral e taxa de erro de bit [13], [14]. Mesmo com todas as vantagens obtidas com a utilização de comunicações cooperativas, existem alguns aspectos que dificultam sua aplicação para as atuais tecnologias. Um deles é que, para redes com mais de um *relay*, nem sempre todos os *relays* estão disponíveis, o que impossibilita o uso de protocolos fixos, resultando no aumento de complexidade de hardware e do processamento envolvido [15]. Além dos aspectos de complexidade, a questão de sincronismo é extremamente importante para sistemas cooperativos. Os protocolos tradicionais são extremamente sensíveis a erros de sincronismo [16], [17], o que vêm contribuindo para o aumento no número de trabalhos na área de sistemas cooperativos assíncronos [18].

Este trabalho propõe a otimização de um esquema de transmissão cooperativo baseado no esquema apresentado em [19]. A otimização é fundamentada em modulação adaptativa, visando melhorar a robustez do sistema. O esquema proposto é simples e menos dependente de sincronismo, quando comparado com a proposta apresentada [19].

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira. A Seção II introduz o modelo de sistema. A Seção III apresenta o esquema proposto em [19] e a nova solução proposta. Na Seção IV, apresentam-se os resultados de simulação para avaliação de desempenho do esquema proposto. Algumas considerações finais são apresentadas na Seção V, concluindo o trabalho.

II. MODELO DE SISTEMA

O sistema consiste em N nós fonte, S_i , em que $i = 1, \dots, N$, uma *relay station*, R , com M antenas e um nó destino, D . O modelo está ilustrado na Fig. 1.

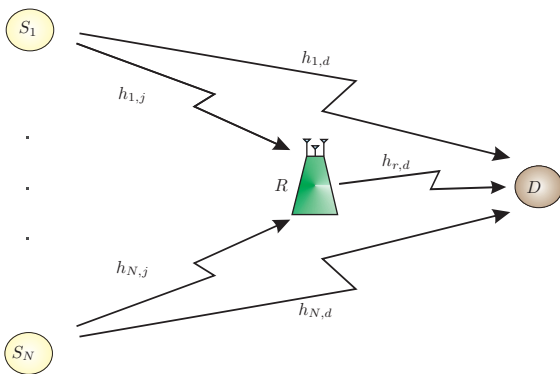


Fig. 1. Ilustração do modelo do sistema para N nós fonte, uma estação *relay* MIMO e um nó destino. Os nós fonte e o nó destino são equipados com uma única antena.

Considera-se que os canais estão sujeitos a um desvanecimento do tipo plano, Rayleigh, quase-estático, com quadros de transmissão de comprimento de L símbolos. Os canais são estatisticamente idênticos e independentes. Nas avaliações realizadas neste trabalho, não se levou em conta questões de posicionamento relativo entre os nós e a estação

relay, portanto não sendo necessária a modelagem de efeitos de desvanecimento em larga escala.

Outras considerações para o modelo são: *i*) os coeficientes do canal são conhecidos nos receptores; *ii*) os nós operam no modo de transmissão *Half-Duplex*; *iii*) utiliza-se o protocolo de transmissão *Time-Division Multiple-Access Relay Channel* (TDMARC) [20], no qual os nós fonte transmitem as suas informações em um mesmo *slot* de tempo e o *relay*, em outro; *iv*) a potência total transmitida por *slot* de tempo é P ; *v*) existe um canal de retorno livre de erros e atrasos entre o nó destino e os nós fonte; *vi*) assume-se que as transmissões sejam sincronizadas.

III. O ESQUEMA COOPERATIVO

A. O Esquema de Referência

O esquema utilizado como base para este trabalho foi proposto anteriormente pelos autores em [19]. No primeiro *slot* de tempo, as fontes transmitem suas informações para a estação *relay* e para o nó destino simultaneamente. A informação de cada nó fonte i consiste em um quadro de L símbolos, os quais pertencem a uma constelação S de energia média unitária. Os vetores recebidos pelo nó destino e pela j -ésima antena da estação *relay* podem ser descritos como

$$\mathbf{y}_{s,r,j} = \sum_{i=1}^N \sqrt{P_1} h_{i,j} \mathbf{s}_i + \eta_{s,r} \quad (1)$$

e

$$\mathbf{y}_{s,d} = \sum_{i=1}^N \sqrt{P_1} h_{i,d} \mathbf{s}_i + \eta_{s,d}, \quad (2)$$

em que $\mathbf{s}_i$ é o vetor de símbolos transmitidos pelo i -ésimo nó fonte, $h_{i,j}$ e $h_{i,d}$ são os coeficientes dos canais existentes entre os pares fonte-*relay* e fonte-destino. $\eta_{s,r}$ e $\eta_{s,d}$ representam ruídos Gaussianos, brancos, independentes, identicamente distribuídos, de média zero, de matriz de covariância $N_0 \mathbf{I}_L$, e P_1 é a potência transmitida por cada nó fonte.

A detecção destes sinais na estação *relay* e no nó destino é feita através da utilização de um receptor de máxima verossimilhança (ML - *Maximum Likelihood*), podendo ser representadas como

$$\{\hat{\mathbf{s}}_{r,i}\}_{i=1}^N = \arg \min_{\mathbf{s}'_i \in S^L} \left[\sum_{j=1}^M \left| \mathbf{y}_{s,r,j} - \sum_{i=1}^N (\sqrt{P_1} h_{i,j} \mathbf{s}'_i) \right|^2 \right] \quad (3)$$

e

$$\{\hat{\mathbf{s}}_{d,i}\}_{i=1}^N = \arg \min_{\mathbf{s}'_i \in S^L} \left[\left| \mathbf{y}_{s,d} - \sum_{i=1}^N (\sqrt{P_1} h_{i,d} \mathbf{s}'_i) \right|^2 \right]. \quad (4)$$

Na prática, cada vetor $\mathbf{s}_i$ terá sua codificação própria, contendo redundância a qual poderá ser utilizada para correção de erros e para checar a integridade do quadro. Um exemplo de código que pode ser utilizado com este propósito é o *cyclic-redundant check* (CRC), sabendo-se que (3) e (4) deverão ser substituídos pelos decodificadores correspondentes de cada código.

Após a recepção do sinal, verifica-se a ocorrência ou não de erros para os quadros recebidos. Caso haja erros, como parte do esquema base, o receptor informa a todos os outros nós da rede, através de um canal de realimentação, a necessidade de uma transmissão provida da estação *relay*, e informa também qual antena deve ser utilizada na transmissão. A seleção da antena é feita de modo a maximizar a razão sinal-ruído (SNR) instantânea do sistema. O número de bits de realimentação necessários é

$$b = \lceil \log_2(M + 1) \rceil. \quad (5)$$

Caso exista um segundo *slot* de tempo, a estação *relay* utiliza o protocolo DreMF. Este protocolo consiste na decodificação de sinais e na modificação de sua modulação original, antes que sua retransmissão seja realizada pela estação *relay*. Neste artigo, considera-se que o *relay* realizará a remodulação dos símbolos transmitidos pelas N fontes em um único símbolo pertencente a uma constelação de ordem superior. Por exemplo, considerando duas fontes utilizando a constelação BPSK, o *relay* combinará estes símbolos de modo a utilizar uma constelação QPSK. No esquema proposto, a estação *relay* opera com constelações PSK, para o caso de dois ou três nós fonte, e constelações QAM para o caso de $N \geq 4$. O sinal recebido no nó destino no segundo *slot* de tempo pode ser expresso da seguinte forma

$$\mathbf{y}_{r,d} = \sqrt{P_2} h_{r,d} \hat{\mathbf{s}}_r + \eta_{r,d}, \quad (6)$$

em que $\hat{\mathbf{s}}_r \in S_h^L$ é a versão remodulada dos sinais recebidos pelo *relay* no primeiro *slot* de tempo, $h_{r,d}$ representa o ganho do canal entre *relay* e destino, $\eta_{r,d}$ representa o ruído Gaussiano, independente, identicamente distribuído, de média zero e de matriz de covariância $N_0 \mathbf{I}_L$, e P_2 é a potência transmitida no segundo *slot* de tempo. A detecção no nó destino utiliza um detector ML, o qual pode ser descrito da seguinte maneira

$$\hat{\mathbf{r}}_d = \arg \min_{\mathbf{s}_k \in S_h^L} \left[\left\| \mathbf{y}_{r,d} - (\sqrt{P_2} h_{r,d} \mathbf{s}_k) \right\|^2 \right], \quad (7)$$

em que S_h é a modulação de ordem superior utilizada no *relay*, que é dependente do número de fontes e das modulações consideradas pelos nós fonte.

B. Otimização do Sistema

No esquema proposto em [19], existe uma grande perda de recursos no segundo *slot* de tempo, devido à retransmissão da informação de todas as fontes, caso tenha ocorrido algum erro no primeiro *slot* de tempo. Com o aumento da SNR média do sistema, a probabilidade de que mais de um quadro, transmitido simultaneamente pelas fontes, esteja errado, decai significativamente. Além disso, em [19], a informação de quais quadros contêm erros não é conhecida pelo nó *relay*.

A otimização proposta neste trabalho faz uso do canal de realimentação para que o destino informe quais quadros a estação *relay* deve transmitir, o que a permite trabalhar com modulações de ordem inferior, melhorando a robustez do sistema. Por exemplo, em um sistema com 4 fontes utilizando modulação BPSK, a estação *relay* deverá ser hábil a modular a informação nas seguintes constelações, de acordo com a

quantidade de quadros corrompidos: BPSK, QPSK, 8-PSK ou 16-QAM.

Esta modulação adaptativa ocorrida na estação *relay* promove um aumento da robustez do sistema ao custo de uma maior complexidade de processamento na estação *relay* e no nó destino. Além do custo em processamento, haverá uma demanda maior no canal de retorno em função do número maior de combinações entre os nós fonte, de acordo com a identificação de frames corrompidos. Desta forma, o número de bits de realimentação para o sistema otimizado é dado por

$$b = \lceil \log_2(M) \rceil + N. \quad (8)$$

C. Esquema Proposto Baseado em Adaptabilidade

O esquema de [19], denominado base, possui um bom *tradeoff* entre robustez a erros e taxa de transmissão. Porém, ele necessita de um sincronismo complexo e torna difícil a inserção e remoção de usuários (nós fonte) na rede. A fim de tornar o sistema mais adaptado às aplicações atuais buscou-se minimizar estes efeitos, em troca da perda de parte do seu desempenho.

Para o novo esquema foi feita uma modificação no modelo do sistema de modo que a estação *relay* opera no modo de transmissão *full-duplex*. No primeiro *slot* de tempo a realimentação atua de maneira similar à descrita no esquema base. Porém, a realimentação é considerada apenas pela estação *relay*, ou seja, as fontes irão transmitir dados de maneira contínua. Caso ocorra um erro, a informação do *relay* será retransmitida em conjunto com as novas informações das fontes. Assim, os possíveis sinais recebidos no nó destino são dados por

$$\mathbf{y}_d = \sum_{i=1}^N \sqrt{P_1} h_{i,d} \mathbf{s}_i + \eta_d \quad (9)$$

ou

$$\mathbf{y}_d = \sum_{i=1}^N \sqrt{P_1} h_{i,d} \mathbf{s}_i + \sqrt{P_2} h_{r,d} \hat{\mathbf{s}}_r + \eta_d, \quad (10)$$

em que a recepção e a codificação do *relay* são iguais às realizadas no esquema base. A primeira situação ocorre quando não há erros no instante anterior e a segunda, quando um erro ocorre e uma retransmissão é requisitada. Desta maneira, as fontes que se inserem no sistema não necessitam saber que estão participando de um sistema cooperativo, o que facilita sua entrada e saída do sistema e seu sincronismo durante as transmissões. As detecções ML para as duas possíveis situações mencionadas anteriormente são dadas por

$$\{\hat{\mathbf{s}}_{d,i}\}_{i=1}^N = \arg \min_{\substack{\mathbf{s}'_i \in S^L \\ i=1,\dots,N}} \left[\left\| \mathbf{y}_d - \sum_{i=1}^N (\sqrt{P_1} h_{i,d} \mathbf{s}'_i) \right\|^2 \right] \quad (11)$$

e

$$\{\hat{\mathbf{s}}_{d,i}\}_{i=1}^N = \arg \min_{\substack{\mathbf{s}'_i \in S^L \\ \mathbf{s}_k \in S_h^L \\ i=1,\dots,N}} \left[\left\| \mathbf{y}_d - \sum_{i=1}^N (\sqrt{P_1} h_{i,d} \mathbf{s}'_i) - (\sqrt{P_2} h_{r,d} \mathbf{s}_k) \right\|^2 \right]. \quad (12)$$

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Esta seção apresenta os resultados de simulação, a fim de permitir analisar os esquemas propostos e discutir suas características. Por simplicidade, assumiu-se que os vetores de símbolos consistem em apenas um único símbolo. Considera-se a utilização de um detector de erros ideal no nó destino. Realizaram-se simulações do tipo Monte Carlo com transmissão de 10^8 símbolos por fonte para cada ponto de SNR média. Utilizou-se a constelação BPSK para cada uma das fontes, e a potência de transmissão considerada nos nós fonte foi normalizada uniformemente: $P_1 = P/N$ e $P_2 = P$. A taxa de transmissão é dada por $R = b/T$, em que b é o número total de bits transmitidos e T é o número de *slots* de tempo. É importante dizer que o valor de T depende do protocolo utilizado na transmissão.

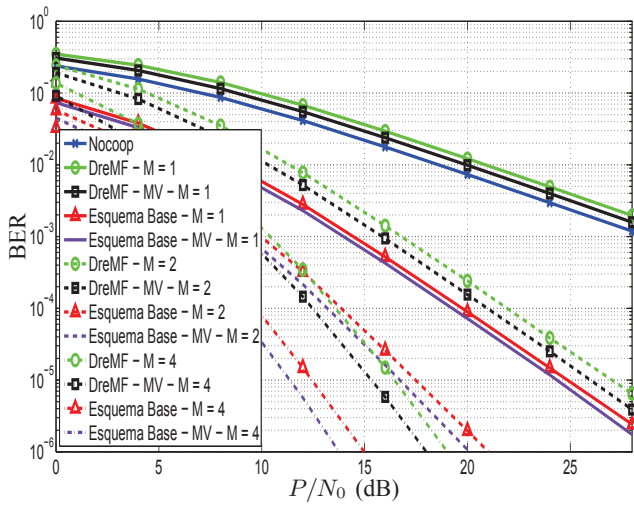


Fig. 2. Comparação de desempenho entre o esquema com modulação variável e o esquema de referência [19] para $N = 2$.

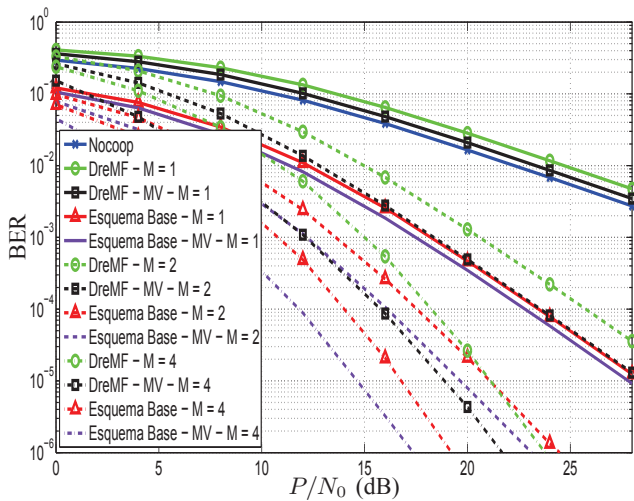


Fig. 3. Comparação de desempenho entre o esquema com modulação variável e o esquema de referência [19] para $N = 3$.

A taxa de BER para a otimização utilizando modulação variável (MV), para $M = 1, 2$ e 4 , considerando duas e

três fontes, respectivamente, é apresentada nas Figs. 2 e 3. Os resultados mostram que o ganho de diversidade do esquema é mantido, enquanto que o uso da otimização resulta em um ganho em termos de SNR. Nota-se que quanto maior for o número de fontes maior será o ganho de SNR obtido com uso da modulação variável. Note que esta otimização também pode ser utilizada no esquema proposto. Caso utilizada, também seria observado um ganho de SNR similar ao apresentado nas Figs. 2 e 3.

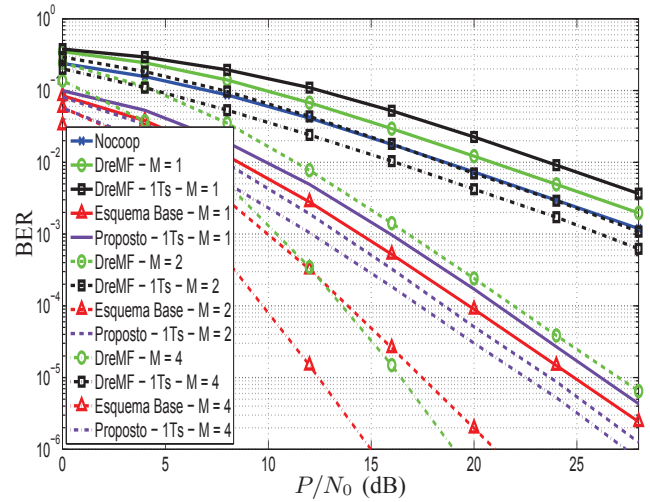


Fig. 4. Comparação entre esquema proposto e esquema de referência [19] para $N = 2$.

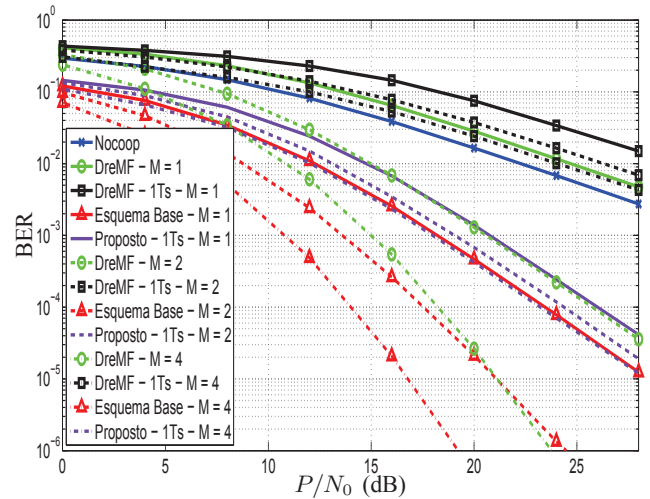


Fig. 5. Comparação entre esquema proposto e esquema de referência [19] para $N = 3$.

A BER para o esquema proposto utilizando apenas um *slot* de tempo (1Ts), para $M = 1, 2$ e 4 , considerando duas e três fontes, respectivamente, é apresentada nas Figs. 4 e 5. Os resultados mostram que para o caso de $M = 1$ o sistema proposto apresenta apenas uma perda de SNR quando comparado com o esquema base, em troca de um ganho de taxa de transmissão, uma redução dos problemas relacionados ao sincronismo e uma redução da complexidade de inserção

de usuários nas redes, destacando-se que tais características aumentam a sua aplicabilidade em redes cooperativas. Porém, para $M > 1$ o sistema perde seu ganho de diversidade, o que mostra que a técnica tradicional de seleção de antenas não alcança ganhos de diversidade para sistemas de múltiplo acesso. Desta maneira, o sistema utilizando a técnica tradicional de seleção de antenas mostra-se pouco atrativo para sistemas MARC com estações *relay* com múltiplas antenas.

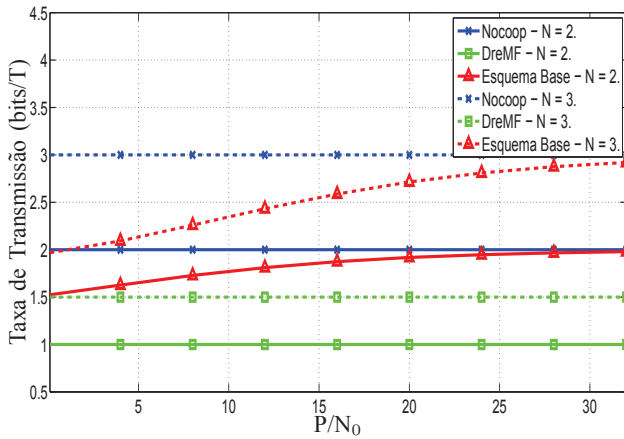


Fig. 6. Taxa de transmissão dos protocolos utilizados.

A Fig. 6 apresenta a taxa de transmissão para os protocolos considerados neste trabalho. É importante notar que a taxa de transmissão depende diretamente das modulações utilizadas pelas fontes e pelo número de fontes. Nota-se que o número de antenas utilizado influencia apenas na robustez (taxa de erro de bit). Além disso, é válido ressaltar que o sistema com modulação variável apresentará a mesma taxa de transmissão do esquema base, enquanto que o esquema proposto apresentará a mesma taxa de transmissão daquele sem cooperação (Nocoop).

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma otimização fundamentada em modulações variáveis e um novo esquema de transmissão para um sistema de comunicação sem fio cooperativo, baseado em múltiplo acesso ao *relay*, os quais foram fundamentados em um esquema proposto pelos autores previamente. Foi observado que o esquema utilizando a modulação variável alcança um ganho de SNR, quando comparado com o previamente proposto, e que este ganho aumenta com o aumento do número de nós fonte, em troca de um aumento no número de bits de realimentação. Logo, em termos práticos, torna-se importante verificar se o sistema possui recursos suficientes para a utilização desta otimização.

Já o novo esquema mostrou-se interessante para a aplicação em redes atuais, visto que ele reduz significativamente as necessidades de sincronismo impostas por redes cooperativas. Porém, para estações *relay* com mais de uma antena, a técnica de seleção de antenas tradicional mostrou-se pouco interessante. Um tópico interessante de estudo é verificar quais técnicas de transmissão MIMO poderiam ser utilizadas neste

sistema, e em outros sistemas de múltiplo acesso, de modo a garantir ganho de diversidade e reduzir necessidades de sincronismo.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES/PROEX, pelo CNPq e pelo Exército Brasileiro.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity part I: System description," *IEEE Transaction on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, 2003.
- [2] Z. Shen, A. Papasakellariou, D. Gerstenberger, and F. Xu, "Overview of 3GPP LTE-Advanced carrier aggregation for 4G wireless communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 2, pp. 122–130, 2012.
- [3] K. J. R. Liu, A. K. Sadek, W. Su, and A. Kwasinski, *Cooperative Communications and Networking*, 1st ed. Cambridge University Press, 2009.
- [4] S. W. Peters, K. A. Panah, and R. H. Jr., "Relay architectures for 3gpp lte-advanced," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2009, 2009.
- [5] T.-T. Tran, Y. Shin, and O.-S. Shin, "Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-Advanced," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2012, no. 2, 2012.
- [6] S. Bi and Y. J. Zhang, "Outage-optimal TDMA based scheduling in relay-assisted MIMO cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 4, pp. 1488–1499, 2012.
- [7] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 9, pp. 3450–3460, 2007.
- [8] L. Xie and P. R. Kumar, "Multisource, multidestination, multirelay wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3586–3595, 2007.
- [9] I. F. Akyildiz, D. M. Gutierrez-Estevez, and E. C. Reyes, "The evolution to 4g cellular systems: Lte-advanced," *Physical Communication*, vol. 3, no. 4, pp. 217–244, 2010.
- [10] H. Ding, J. Ge, D. B. da Costa, and Z. Jiang, "A new efficient low-complexity scheme for multi-source multi-relay cooperative networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 716–722, 2011.
- [11] T. Liu, L. Song, Y. Li, Q. Huo, and B. Jiao, "Performance analysis of hybrid relay selection in cooperative wireless systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 3, pp. 779–788, 2012.
- [12] A. H. Bastami and A. Olfat, "Selection relaying schemes for cooperative wireless networks with adaptive modulation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 60, no. 4, pp. 1539–1558, 2011.
- [13] Y. Zhang, Y. Ma, and R. Tafazolli, "Modulation-adaptive cooperation schemes for wireless networks," in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, May 2008, pp. 1320–1324.
- [14] K.-S. Hwang, Y. chai Ko, and M.-S. Alouini, "Performance analysis of incremental opportunistic relaying over identically and non-identically distributed cooperative paths," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 4, pp. 1953–1961, April 2009.
- [15] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 659–672, 2006.
- [16] H. Wan, J.-F. Diouris, and G. Andrieux, "Time synchronization for cooperative communication in wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 63, no. 4, pp. 977–993, 2012.
- [17] S. Jagannathan, H. Aghajan, and A. Goldsmith, "The effect of time synchronization errors on the performance of cooperative miso systems," in *Global Telecommunications Conference Workshops, 2004. GLOBECOM Workshops 2004. IEEE*, Nov 2004, pp. 102–107.
- [18] S. Wei, D. Goeckel, and M. Valenti, "Asynchronous cooperative diversity," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 6, pp. 1547–1557, June 2006.
- [19] D. Irion Alves, R. Machado, A. Piccinini Legg, and B. Uchoa-Filho, "Cooperative multiple-access scheme with antenna selection and incremental relaying," in *Telecommunications Symposium (ITS), 2014 International*, Aug 2014, pp. 1–5.
- [20] A. Winkelbauer and G. Matz, "Joint network-channel coding in the multiple-access relay channel: Beyond two sources," in *Communications Control and Signal Processing (ISCCSP), 2012 5th International Symposium on*, May 2012, pp. 1–5.