Um Esquema de Comunicação MIMO Multiusuário com Modulação Espacial

Robinson Pizzio*
IFSC, Dept. de Eletrônica
Florianópolis, SC, Brazil
robinson.pizzio@ifsc.edu.br

Bartolomeu F. Uchôa-Filho
GPqCom/LCS/EEL/UFSC
Florianópolis, SC, Brazil
uchoa@eel.ufsc.br

ABSTRACT

In this paper we propose a multiple-input, multiple-output (MIMO) multiuser communication scheme with spatial modulation. The motivation is to improve the system's spectral efficiency, by sending information through the index which indicates a subset of active antennas. An improved method based on phase shifts at the base station increases the spatial detectability. Computer simulation shows the improved bit-error rate over a reference scheme under the same spectral efficiency.

Keywords

Spatial Modulation; Vehicular ad hoc Networks; 5G

1. INTRODUÇÃO

Modulação espacial (SM) é um paradigma relativamente novo para sistemas de comunicação com múltiplas antenas (MIMO) [3, 11], no qual informação é dividida em duas sequências, uma mapeada em símbolos de uma constelação de sinais clássica, como QAM, e outra usada para selecionar (ou ativar) uma única antena transmissora ou, na chamada Modulação Espacial Generalizada (GSM) [4, 10], ativar um subconjunto de N_t' de um total de N_t antenas transmissoras disponíveis. O sinal é então transmitido pelas antenas do subconjunto ativado, cujos índices são usados para transportar informação extra. Como consequência, $\lfloor \log_2(M) \rfloor + \left\lfloor \log_2 \binom{N_t}{N_t'} \right\rfloor$ bits são enviados em uma única transmissão utilizando a mesma largura de banda e exigindo menos cadeias de RF que sistemas MIMO tradicionais. Graças às várias vantagens sobre outras técnicas MIMO, SM tornou-se um tópico de pesquisa bastante importante e está sendo considerada como uma técnica MIMO promissora a ser adotada em futuros sistemas de comunicação sem fio [11].

A maioria da literatura sobre SM considera sistemas ponto a ponto de usuário único. Recentemente SM foi considerada como formato de modulação no contexto de sistemas MIMO multiusuário. Em [6], os autores consideram um sistema *uplink* com K usuários enviando, simultaneamente, informação independente para uma estação rádio base (BS) e esta realiza detecção multiusuário por máxima-verossimilhança (ML) para identificar qual antena transmissora de cada usuário foi ativada e qual símbolo da modulação clássica foi transmitido pelas antenas. Em outra recente onda de publicações [5, 9], a chamada Modulação Espacial de Recepção (R-SM) foi introduzida. A novidade deste sistema é que um subconjunto das antenas de recepção, ao invés de antenas de transmissão, é ativado como um meio de transmitir informação. Naturalmente, isto só é possível com o conhecimento do estado do canal no transmissor (CSIT) e através da utilização de pré-codificação.

Cabe ressaltar que entende-se por uma antena receptora ativa no contexto de R-SM como uma antena em que o sinal recebido é o sinal originalmente transmitido ("limpo") adicionado de ruído. Ou seja, o pré-codificador é projetado de modo a entregar a um subconjunto de antenas receptoras ativas o sinal pretendido livre de interferência inter-canais (ICI), enquanto todas as outras antenas receptoras estão recebendo apenas interferência. O detector de SM deve ser capaz de diferenciar entre estes dois estados de recepção.

O recente trabalho de Humadi et al. [5] considera a R-SM no *downlink* para um sistema MIMO multiusuários. Uma BS equipada com N_t antenas transmissoras produz K *stream* de bits de informação independente que serão transmitidos para K usuários diferentes, cada um equipado com N_r antenas receptoras. Em cada transmissão e para cada usuário, $\lfloor \log_2(M) \rfloor$ bits são mapeados em uma constelação de sinal convencional (p. ex. QAM) e $\left\lfloor \log_2 \binom{N_r}{N_r'} \right\rfloor$ bits são utilizados para selecionar um subconjunto de antenas receptoras dos usuários. Novamente, supõe-se CSIT e a BS depende de pré-codificação para ativar um subconjunto diferente de antenas receptoras em cada unidade usuária. Este tipo de modulação é referida como Modulação Espacial Generalizada de Recepção em Sistema MIMO Multiusuário (MU-R-GSM).

As ideias em [5] motivaram o presente trabalho, no qual propomos uma generalização adicional. No método aqui proposto, assim como em [5], tem-se uma BS equipada com N_t antenas transmissoras que produz K *stream* de bits de informação independente a ser transmitido para K usuários diferentes, cada um equipado com $N_r^{(k)}$ antenas receptoras. A componente espacial da informação para um usuário específico é transmitida de forma similar ao MU-R-GSM. Entretanto, no método proposto uma constelação diferente de símbolos é pretendida para cada antena receptora "ativa", o que acarreta em uma melhor eficiência espectral. Além disso, também temos informação comum sendo transmitida

*Prof. Pizzio também pertence ao GPqCom/LCS/EEL/UFSC.

In: Sessão de Posteres, 2016, Teresina. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Sistemas Multimídia e Web. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2016. v. 2.

ISBN: 978-85-7669-332-1

©SBC – Sociedade Brasileira de Computação

para todos os usuários. Um cenário típico para este método seria as redes veiculares (VANET) [1], em que carros recebem informação independente (destinada para cada carro), bem como informação comum (destinada para todos os carros). Esta informação comum pode ser uma propaganda, boletim meteorológico, condições do tráfego a frente, etc.

As novas características do método proposto exigem o projeto especializado de um pré-processamento na BS e um pós-processamento em cada unidade receptora baseados na decomposição em valores singulares (SVD) [7]. Até onde sabemos, o esquema MIMO multiusuário proposto é o primeiro a utilizar SM no receptor e no transmissor simultaneamente.

Neste trabalho, o critério de *zero-forcing* (ZF) é adotado. A ideia é inverter parcialmente o canal na BS e deixar que cada usuário descubra a parte restante para resolver o problema, ou seja, o pós-processamento complementar necessário.

Este artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção 2, o modelo do sistema juntamente com o esquema proposto são apresentados. Na Seção 3, uma modificação simples nas matrizes de pré e pós-processamento é introduzida, objetivando aprimorar a detecção dos sinais na SM. Alguns resultados de simulações comparativas em termos de taxa de erro de bit (BER) são apresentados na Seção 4. Finalmente, na Seção 5, algumas conclusões são apresentadas e trabalhos futuros são indicados.

2. MODELO DE SISTEMA E ESQUEMA PROPOSTO

Considera-se um sistema *downlink* em que uma BS deseja enviar informação para K usuários. Dois tipos de informação são considerados. Uma delas é a informação independente direcionada para cada usuário e a outra é a informação comum a qual é enviada a todos os usuários. No primeiro tipo, o *stream* de bits é dividido em duas sequências. Uma é mapeada em uma modulação M-QAM convencional e a outra é utilizada no esquema R-SM, ou seja, os bits são utilizados para selecionar um subconjunto de $N_r'^{(k)}$ antenas receptoras *ativas* de $N_r^{(k)}$ antenas receptoras disponíveis na k-ésima unidade usuária. Informação *multicast* (o segundo tipo) é transmitida através da seleção de um subconjunto de N_t' antenas transmissoras ativas (ATAs) de um total de N_t antenas transmissoras disponíveis na BS. O sistema proposto (MU-TR-GSM) é mostrado na Fig. 1.

Quanto à informação espacialmente modulada, tem-se que $\mathbf{s} \in \mathcal{S}^{K\times 1}$ é o vetor de dados espaciais cuja k-ésima componente, $s_k \in \mathcal{S} \subseteq \left\{0, \ldots, \binom{N_r^{(k)}}{N_r'^{(k)}} - 1\right\}$, representa o índice do subconjunto das antenas receptoras *ativas* para o usuário k. A ideia é enviar $N_r'^{(k)}$ símbolos QAM diferentes para estas $N_r'^{(k)}$ antenas receptoras *ativas*. Portanto, a BS pode enviar até $N_r'^{(k)}\lfloor \log_2(M)\rfloor + \left\lfloor \log_2 \binom{N_r^{(k)}}{N_r'^{(k)}} \right\rfloor$ bits para cada usuário. Além disso, define-se $s_{\text{all}} \in \mathcal{S}_{\text{all}} \subseteq \left\{0, \ldots, \binom{N_t}{N_t'} - 1\right\}$ como o índice do subconjunto de ATAs para todos os usuários. Neste caso, até $\lfloor \log_2 \binom{N_t}{N_t'} \rfloor$ bits de informação espacial comum são enviados para todos os usuários.

Sendo $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T, \ldots, \mathbf{x}_K^T]^T \in \mathcal{M}^{\left(\sum_{k=1}^K N_r'^{(k)}\right)\times 1}$ o vetor de dados de informação, em que $\mathbf{x}_k \in \mathcal{M}^{N_r'^{(k)}\times 1}$ é o subvetor cuja n-ésima componente, $x_k(n)$, representa o símbolo de uma constelação convencional de sinal complexo $\mathcal{M}$ (com $|\mathcal{M}| = M$) a ser transmitido para a n-ésima antena receptora *ativa* do usuário k.

Assumindo CSIT, a transmissão é realizada através de pré-processamento adequado do vetor de dados $\mathbf{x}$ na BS. Entretanto, ao contrário do processamento do sinal em [5], no esquema aqui proposto a ICI será totalmente removida somente após detecção e pós-processamento complementar em cada unidade usuária, como visto na Fig. 1.

Para tal, sendo a matriz de ganhos de canal definida por $\mathbf{H} = \left[\mathbf{H}^{(1)^T} \cdots \mathbf{H}^{(k)^T} \cdots \mathbf{H}^{(K)^T}\right]^T$, em que $\mathbf{H}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_r^{(k)}\times N_t}$ é a submatriz de ganhos de canal associada ao usuário k. Nenhuma suposição estatística específica se faz necessária neste momento para $\mathbf{H}$. Entretanto, assumimos que a matriz $\mathbf{H}$ é conhecida pela BS e que o usuário k conhece apenas a submatriz associada a ele, $\mathbf{H}^{(k)}$, mas não possui conhecimento algum de outra submatriz $\mathbf{H}^{(\widetilde{k})}$, para $k \neq \widetilde{k}$. Para o usuário k, define-se também a matriz $\mathbf{H}_{s_{\text{all}}}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_r^{(k)}\times N_t'}$ formada pelas N_t' colunas de $\mathbf{H}^{(k)}$ associadas à informação espacial comum s_{all} e a matriz $\mathbf{H}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_r'^{(k)}\times N_t'}$ formada pelas $N_r'^{(k)}$ linhas de $\mathbf{H}_{s_{\text{all}}}^{(k)}$ associada à informação espacial s_k. Assumimos que $\mathbf{H}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}$, para todo $k \in \{1, \ldots, K\}$, é uma matriz de posto completo e que a condição $N_t' \geq \sum_{k=1}^K N_r'^{(k)}$ é satisfeita [7].

A SVD desta matriz é dada por

$$\mathbf{H}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} = \mathbf{U}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} \left[\mathbf{\Lambda}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}, \mathbf{0}\right] \left(\mathbf{V}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}\right)^H, \quad (1)$$

em que $\mathbf{U}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}$ é uma matriz unitária de dimensão $N_r'^{(k)} \times N_r'^{(k)}$, $\mathbf{\Lambda}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}$ é uma matriz diagonal de $N_r'^{(k)} \times N_r'^{(k)}$ e $\left(\mathbf{V}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}\right)^H$ é uma matriz unitária de $N_t' \times N_t'$.

Uma decomposição adicional em (1) resulta em $\mathbf{H}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} = \mathbf{U}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} \left[\mathbf{\Lambda}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}, \mathbf{0}\right] \begin{bmatrix} \left(\mathbf{V}_{1,s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}\right)^H \\ \left(\mathbf{V}_{2,s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}\right)^H \end{bmatrix}$, de forma que $\mathbf{H}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} = \mathbf{U}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} \mathbf{\Lambda}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)} \left(\mathbf{V}_{1,s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}\right)^H$, em que $\left(\mathbf{V}_{1,s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}\right)^H$ tem dimensão $N_r'^{(k)} \times N_t'$.

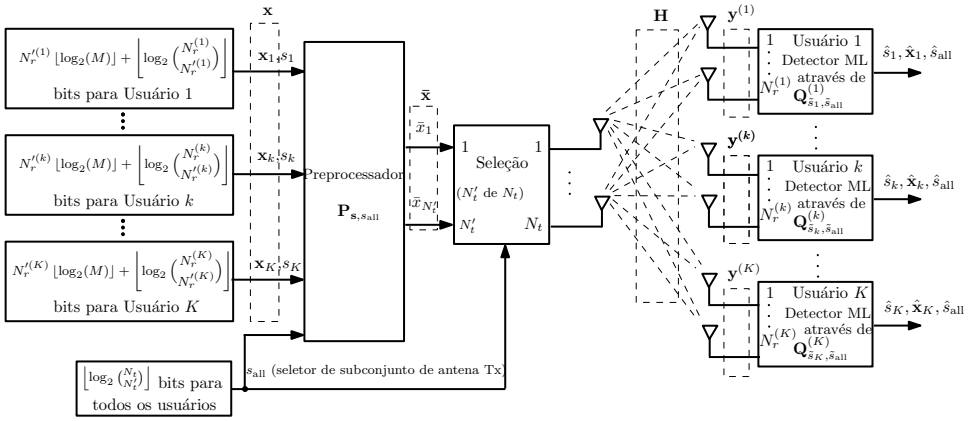
Dado $\mathbf{s}$ e $\mathbf{s}_{\text{all}}$, a matriz de pré-processamento é dado por

$$\mathbf{P}_{\mathbf{s},s_{\text{all}}} = \mathbf{V}_{1,\mathbf{s},s_{\text{all}}} \left[\mathbf{V}_{1,\mathbf{s},s_{\text{all}}}^H \mathbf{V}_{1,\mathbf{s},s_{\text{all}}}\right]^{-1} \boldsymbol{\beta}_{\mathbf{s},s_{\text{all}}}, \quad (2)$$

em que $\mathbf{V}_{1,\mathbf{s},s_{\text{all}}}$ tem dimensão $N_t' \times \sum_{k=1}^K N_r'^{(k)}$ e é definida como $\mathbf{V}_{1,\mathbf{s},s_{\text{all}}} = \left[\mathbf{V}_{1,s_1,s_{\text{all}}}^{(1)}, \ldots, \mathbf{V}_{1,s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}, \ldots, \mathbf{V}_{1,s_K,s_{\text{all}}}^{(K)}\right]$ e $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{s},s_{\text{all}}} = \text{diag}\left\{\boldsymbol{\beta}_{s_1,s_{\text{all}}}^{(1)}, \cdots, \boldsymbol{\beta}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}, \cdots, \boldsymbol{\beta}_{s_K,s_{\text{all}}}^{(K)}\right\}$, em que $\boldsymbol{\beta}_{s_k,s_{\text{all}}}^{(k)}$ pode ser utilizado para controle de potência ou outros propósitos, como apresentado na Seção 3. Geralmente esses betas são definidos como uma função das matrizes de subcanal do usuário [7] já que, supostamente, ambos, transmissor e receptor, conhecem esta informação. Entretanto, isto não representa uma restrição já que transmissor e receptor concordam sobre um valor comum.

Os dados pré-processados, $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{P}_{\mathbf{s},s_{\text{all}}}\mathbf{x}$, são transmitidos através das N_t' antenas selecionadas de acordo com a informação espacial s_{all}. O vetor de sinal recebido pelo usuário k é dado por $\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{H}_{s_{\text{all}}}^{(k)}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{n}^{(k)} = \mathbf{H}_{s_{\text{all}}}^{(k)}\mathbf{P}_{\mathbf{s},s_{\text{all}}}\mathbf{x} + \mathbf{n}^{(k)}$, em que $\mathbf{n}^{(k)} \in \mathbb{C}^{N_r^{(k)}\times 1}$ é o vetor de ruído.

O subvetor de $\mathbf{y}^{(k)}$ formado por suas $N_r'^{(k)}$ entradas asso-



Estação rádio base

Figure 1: Proposta do Sistema de *downlink* MIMO multiusuário com *multicast* e GSM.

ciadas à informação espacial $\widetilde{s}_k$ é dado por

$$\mathbf{y}^{(k)}_{\widetilde{s}_k} = \mathbf{H}^{(k)}_{\widetilde{s}_k, s_{\text{all}}} \mathbf{P}_{\mathbf{s}, s_{\text{all}}} \mathbf{x} + \mathbf{n}^{(k)}_{\widetilde{s}_k},$$

em que $\mathbf{n}^{(k)}_{\widetilde{s}_k}$ é o subvetor de ruído correspondente à $\mathbf{n}^{(k)}$. Como o usuário k conhece $\mathbf{H}^{(k)}$, ele também conhece $\mathbf{H}^{(k)}_{\widetilde{s}_k, \widetilde{s}_{\text{all}}}$ para todo $\widetilde{s}_k \in \mathcal{S}$ e para todo $\widetilde{s}_{\text{all}} \in \mathcal{S}_{\text{all}}$. Assim, a decomposição em (1) para qualquer tentativa de detecção da informação espacial pode ser feita pelo usuário k. Portanto, a detecção por ML pode ser dada por

$$(\hat{\mathbf{x}}_k, \hat{s}_k, \hat{s}_{\text{all}}) = \arg \min_{\substack{\widetilde{\mathbf{x}}_k \in \mathcal{M}^{N_r'^{(k)} \times 1} \\ \widetilde{s}_k \in \mathcal{S} \\ \widetilde{s}_{\text{all}} \in \mathcal{S}_{\text{all}}}} \left\| \mathbf{y}^{(k)}_{\widetilde{s}_k} - \mathbf{Q}^{(k)}_{\widetilde{s}_k, \widetilde{s}_{\text{all}}} \widetilde{\mathbf{x}}_k \right\|^2, \tag{3}$$

em que $\mathbf{Q}^{(k)}_{\widetilde{s}_k, \widetilde{s}_{\text{all}}} = \mathbf{U}^{(k)}_{\widetilde{s}_k, \widetilde{s}_{\text{all}}} \mathbf{\Lambda}^{(k)}_{\widetilde{s}_k, \widetilde{s}_{\text{all}}} \boldsymbol{\beta}^{(k)}_{\widetilde{s}_k, \widetilde{s}_{\text{all}}}$ é a matriz de pós-processamento com dimensão $N_r'^{(k)} \times N_r'^{(k)}$ através da qual a detecção ML é realizada.

3. APRIMORAMENTO DO MÉTODO

Quando o número de ATAs, N_t', for próximo ao total de antenas transmissoras, N_t, ou quando subconjuntos diferentes de ATAs se sobrepõem em grande parte, a habilidade do usuário em detectar s_{all} pode ser reduzida devido ao alto grau de similaridade entre as matrizes de diferentes subcanais. Isto é especialmente crítico quando $N_r'^{(k)} = 1$, no caso em que a matriz $\mathbf{U}^{(k)}_{s_k, s_{\text{all}}}$ é um escalar. Combater este problema pode necessitar uma seleção reduzida de subconjuntos de ATAs dentre todas as $\binom{N_t}{N_t'}$ possibilidades de subconjuntos, ao custo de um número reduzido de bits de informação comum a ser transmitido para todos usuários.

Alternativamente, no esquema proposto aprimoramos a separabilidade entre sinais SM comuns introduzindo na BS um deslocamento de fase positivo nos símbolos transmitidos de acordo com s_{all}. Este deslocamento de fase pode ser introduzido através de $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{s}, s_{\text{all}}}$, em (2). Esta generalização é útil se diferentes constelações de sinal são utilizadas para diferentes usuários. Na unidade usuária k, os mesmos deslocamentos de fase utilizados no transmissor são aplicados no detector ML.

Sendo $\Phi_{\text{all}} = \{\phi_0, \ldots, \phi_{|\mathcal{S}_{\text{all}}|-1}\}$ o conjunto de deslocamento de fase, em que $|\mathcal{S}_{\text{all}}| = \binom{N_t}{N_t'}$. Por simplicidade, considere o caso em que a mesma constelação de sinal $\mathcal{M}$ é utilizada para todos usuários. Neste caso, para um dado $s_{\text{all}} \in \mathcal{S}_{\text{all}}$, tem-se que $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{s}, s_{\text{all}}}$ em (2) é dado por $\boldsymbol{\beta}_{\mathbf{s}, s_{\text{all}}} = e^{\phi_{s_{\text{all}}}} \mathbf{I}_{\sum_{k=1}^{K} N_r'^{(k)}}$. Para uma dada constelação de sinal $\mathcal{M}$, o conjunto Φ_{all} deve ser otimizado objetivando o melhoramento de desempenho do detector. Para M-PSK, os deslocamentos de fase devem ser dados por $\phi_{s_{\text{all}}} = \frac{2\pi/M}{|\mathcal{S}_{\text{all}}|} s_{\text{all}}$, em que $s_{\text{all}} \in \mathcal{S}_{\text{all}} = \{0, \ldots, |\mathcal{S}_{\text{all}}| - 1\}$.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, apresenta-se alguns resultados de simulações para o desempenho de erro e compara-se o esquema proposto, MU-TR-GSM, com o descrito em [5]. Deve notar-se que o esquema proposto engloba aqueles em [5] e [7] como casos particulares. Para $N_t' = N_t$, o esquema proposto se reduz à [5] se $N_r'^{(k)} = N_r' < N_r = N_r^{(k)}$ e à [7] se $N_r'^{(k)} = N_r' = N_r = N_r^{(k)}$.

Quando compara-se os dois esquemas, fixa-se o número de cadeias de RF disponíveis na BS (i.e., N_t'), o número máximo de usuários que podem ser atendidos, o número total de bits de informação enviados por usuário e a quantidade total de energia gasta em uma única transmissão MIMO. Desta forma, tenta-se uma forma justa de comparação entre os dois esquemas utilizando os mesmos recursos e transmitindo a mesma quantidade de informação para o mesmo número de usuários.

Nestas simulações, assume-se modelo de canal Rayleigh com desvanecimento quasi-estático, em que o canal permanece constante por um período de símbolos e muda aleatória e independentemente de um período para outro. Isto significa que o *overhead* necessário para aquisição do CSIT pode ser desprezado.

As curvas de BER versus relação sinal-ruído (SNR), obtidas por simulações de Monte Carlo, são mostradas na Fig. 2 para os esquemas indicados na Tabela 1.

Para o cenário descrito na Tabela 1, até 2 usuários podem ser atendidos e um total de 9 bits por transmissão MIMO por usuário é enviado. Por simplicidade, no esquema proposto o tamanho de $\mathcal{S}_{\text{all}}$ terá tamanho bem menor do que $\binom{N_t}{N_t'} = 35,960$. Em particular, a seleção de subconjuntos de ATAs adotado nas simulações segue o seguinte padrão: {111100000000000000000000000000000; 000011110000000000000000000000000; $\cdots$; 000000000000000000000000000001111}, em que 1 (resp., 0)

Table 1: Parâmetros do sistema para simulações

Esquema	N_t	N'_t	N_r	N'_r	$\lvert\mathcal{S}\rvert$	$\lvert\mathcal{S}_{\text{all}}\rvert$	Modulação
1^a	32	4	4	2	4	8	QPSK QPSK
2^b	4	4	4	2	4	—	8-PSK 16-QAM

[a] Esquema proposto MU-TR-GSM.
[b] Modificação do esquema MU-R-GSM proposto em [5].

indica uma antena transmissora ativa (resp., inativa).

Os resultados para o esquema proposto são mostrados com e sem a aplicação desta técnica. Como pode ser observado, o esquema proposto possui desempenho de erro melhor que o esquema em [5]. Isto ocorre, principalmente, devido ao fato de não existir custo energético adicional para enviar bits SM. Assim, quanto mais bits são alocados para a SM, menor será a ordem da constelação QAM necessária para transmitir os bits restantes. Pode-se perceber na Fig. 2 que o efeito positivo de usar o deslocamento de fase para informações SM comuns é significativo mesmo neste cenário em que os subconjuntos de ATAs não se sobrepõem.

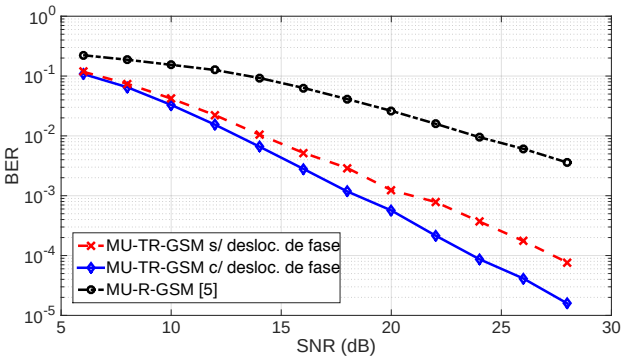


Figure 2: Comparação da BER entre os esquemas da Tabela 1.

5. COMENTÁRIOS FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, um sistema de *downlink* MIMO multiusuário com *multicast* e GSM foi proposto. A inovação deste sistema está no uso de GSM no receptor e no transmissor, simultaneamente, como uma alternativa para transmitir informação. Diversas aplicações, como as VANETs, podem se beneficiar dessa ideia. O sucesso do sistema proposto baseia-se no projeto adequado das matrizes de pré e pós-processamento via SVD. Simulações de Monte Carlo foram realizadas para mostrar a superioridade de desempenho de erro do método quando comparado a esquemas existentes.

As seguintes direções podem ser tomadas como trabalhos futuros. Primeiro, uma análise de desempenho de erro do sistema proposto deve ser desenvolvida. Tal análise pode ser baseada na metodologia proposta em [2, 8].

Observa-se também que no presente trabalho apenas o critério de ZF foi considerado. Outros critérios, como o mínimo erro médio quadrático (MMSE), podem ser explorados.

A complexidade computacional do detector ML usado neste trabalho é relativamente alta. Entretanto, algumas propriedades das matrizes envolvidas no processamento podem ser exploradas de forma a reduzir esta complexidade.

Mais pesquisas sobre estes e outros temas relacionados com o presente trabalho são encorajados devido à importância do GSM para os futuros sistemas de comunicação sem fio 5G.

6. AGRADECIMENTO

O segundo autor gostaria de agradecer ao CNPq pelo suporte financeiro, projetos 306145/2013-8 e 400703/2014-9.

7. REFERENCES

[1] H. T. Cheng, H. Shan, and W. Zhuang. Infotainment and road safety service support in vehicular networking: From a communication perspective. *Mech. Syst. Sig. Process.*, 25(6):2020 – 2038, 2011. Interdisciplinary Aspects of Vehicle Dynamics.

[2] M. Di Renzo and H. Haas. Bit error probability of sm-mimo over generalized fading channels. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 61(3):1124–1144, March 2012.

[3] M. Di Renzo, H. Haas, A. Ghrayeb, S. Sugiura, and L. Hanzo. Spatial modulation for generalized mimo: Challenges, opportunities, and implementation. *Proc. IEEE*, 102(1):56–103, Jan 2014.

[4] J. Fu, C. Hou, W. Xiang, L. Yan, and Y. Hou. Generalised spatial modulation with multiple active transmit antennas. In *2010 IEEE GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*, pages 839–844, Dec 2010.

[5] K. M. Humadi, I. S. Ahmed, and A. Alsanie. Spatial modulation concept for massive multiuser mimo systems. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2014, Article ID 563273:1–9, Feb. 2014.

[6] T. Lakshmi Narasimhan, P. Raviteja, and A. Chockalingam. Generalized spatial modulation in large-scale multiuser mimo systems. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, PP(99):1–1, 2015.

[7] W. Liu, L.-L. Yang, and L. Hanzo. Svd-assisted multiuser transmitter and multiuser detector design for mimo systems. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 58(2):1016–1021, Feb 2009.

[8] A. Stavridis, M. D. Renzo, and H. Haas. Performance analysis of multistream receive spatial modulation in the mimo broadcast channel. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 15(3):1808–1820, March 2016.

[9] A. Stavridis, S. Sinanovic, M. Di Renzo, and H. Haas. Transmit precoding for receive spatial modulation using imperfect channel knowledge. In *2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, May 2012.

[10] J. Wang, S. Jia, and J. Song. Generalised spatial modulation system with multiple active transmit antennas and low complexity detection scheme. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 11(4):1605–1615, April 2012.

[11] P. Yang, M. Di Renzo, Y. Xiao, S. Li, and L. Hanzo. Design guidelines for spatial modulation. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(1):6–26, Firstquarter 2015.