Estudo do Impacto da Formatação de Pulso em Modulação Espacial

Carlos Aurélio Faria da Rocha, Didier Le Ruyet e Bartolomeu F. Uchôa Filho

***Resumo*—Modulação espacial (SM) é uma técnica recente de transmissão *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) na qual uma parte da informação é transmitida pelo índice que indica uma antena ativa. A outra parte da informação é transmitida enviando-se um símbolo de uma modulação digital por esta antena. Uma vantagem de SM sobre outras técnicas MIMO é que apenas uma cadeia de RF é necessária. Entretanto, como na SM tradicional a seleção de antena ativa se dá na taxa símbolo, a duração do pulso de transmissão é limitada, resultando em redução da eficiência espectral, fato que é normalmente negligenciado na literatura. Visando mitigar este problema, Ishibashi and Sugiura propuseram recentemente uma técnica que faz uso de cadeias de RF adicionais, transmitindo os símbolos alternando-se entre estas cadeias. Uma análise da eficiência espectral foi por eles realizada considerando um pulso do tipo cosseno levantado. Neste artigo, outros formatos de pulsos mais bem localizados no tempo e na freqüência, tais como os pulsos *prolate spheroidal wave function* (PSWF) e Gaussiano, são propostos, visando aumentar a eficiência espectral do sistema. Resultados de simulação revelam que com os pulsos propostos podemos melhorar significantemente a eficiência espectral do esquema SM em relação a outros pulsos considerados na literatura.**

***Palavras-Chave*—Modulação espacial, *prolate spheroidal wave function* (PSWF), pulso Gaussiano, chaveamento de antenas, eficiência espectral.**

***Abstract*— Spatial modulation (SM) is a recent *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) transmission technique in which part of the information is transmitted by the index indicating an active antenna. The other part of the information is transmitted by sending a symbol from a digital modulation through this antenna. An advantage of SM over other MIMO techniques is that a single RF chain is required. However, since in traditional SM the active antenna selection is made at the symbol rate, the duration of the transmission pulse is limited, resulting in a bandwith efficiency reduction, a fact that is normally neglected in the literature. Aiming at mitigating this problem, Ishibashi and Sugiura have recently proposed a technique that makes use of additional RF chains, where the symbols are transmitted alternately by the RF chains. They performed a spectral efficiency analysis assuming a raised-cosine pulse. In this paper, other shaping pulses better localized both in time and frequency, such as the prolate spheroidal wave function (PSWF) or Gaussian pulses, are proposed, aiming at improving the system's spectral efficiency. Simulation results reveal that with the proposed pulses we can significantly improve the SM spectral efficiency as compared to other pulses considered in the literature.**

***Keywords*—Spatial Modulation, prolate spheroidal wave function (PSWF), Gaussian pulse, antenna switching, spectral efficiency.**

I. INTRODUÇÃO

Sistemas *Multiple-Input Multuple-Output* (MIMO) com elevado número de antenas (sistemas MIMO massivos) poderão ser eventualmente padronizados e utilizados nos sistemas celulares de 5ª geração. Atualmente, diversas pesquisas estão sendo realizadas para se determinar os benefícios dos sistemas MIMO massivos sob diferentes considerações. Em [1], os autores mostraram que uma estação base (BS) fazendo uso simultâneo de um grande número de antenas transmissoras pode servir um número igualmente grande de usuários compartilhando ganho de multiplexagem entre eles. Porém, o custo do *hardware* neste caso é enorme, visto que um número muito elevado de cadeias de RF se faz necessário.

Para contornar esse problema, uma técnica de transmissão MIMO conhecida como Modulação Espacial (SM – *Spatial Modulation*) foi recentemente proposta [2,3]. Em SM, apenas uma fração das N_T antenas do transmissor é utilizada para a transmissão de informação. Esta técnica se notabilizou pela economia conseguida em termos do número de cadeias de RF que são utilizadas a cada período de símbolo. Nas primeiras propostas [3,4], apenas uma única cadeia de RF era utilizada, isto é, através de um processo de chaveamento para uma única antena. Neste caso, uma parte da informação transmitida é associada ao índice da antena, e a outra, ao ponto de uma determinada constelação de sinais. A eficiência espectral resultante é $\log_2(M.N_T)$ bits/s/Hz, em que M é o número de pontos da constelação e considera-se N_T como potência de 2.

Mais tarde, uma versão generalizada da modulação espacial foi introduzida na literatura e ficou conhecida como *Generalized Spatial Modulation* (GSM) [5]. Em GSM, mais de uma antena é ativada a cada período de símbolo, enquanto o mesmo símbolo (ou símbolos diferentes) é transmitido por estas antenas, o que resulta em um aumento tanto na confiabilidade da transmissão quanto da eficiência espectral.

Em [6], uma versão GSM para sistemas multiusuário com MIMO massivo na BS é proposta. Neste esquema, técnicas de pré-codificação são adotadas, o que requer o conhecimento da informação do estado do canal no transmissor (CSIT). Possivelmente por ser a aquisição deste CSIT um processo custoso, sobretudo em sistemas *Frequency Division Duplexing*

Carlos Aurélio Faria da Rocha e Bartolomeu F. Uchôa Filho¸ Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil, Didier Le Ruyet, CEDRIC/LAETITIA Laboratory, Conservatoire National des Arts et Metiers, 75003 Paris, France E-mails: carlos.aurelio@ufsc.br, uchoa@eel.ufsc.br, didier.le_ruyet@cnam.fr Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (306145/2013-8 e 400703/2014-9).

(FDD), a grandessíssima maioria dos trabalhos em SM encontrados na literatura considera a ativação de uma ou poucas antenas, e sendo assim este é o cenário alvo de investigação do presente trabalho.

Embora negligenciado pela maioria dos autores, SM apresenta um problema prático que merece uma atenção especial. O chaveamento das antenas, que ocorre na taxa de símbolo, impõe naturalmente um limite à duração dos pulsos de transmissão, que resulta numa expansão espectral. Até onde os autores têm conhecimento, apenas dois trabalhos sobre SM publicados na literatura apresentam um estudo sobre o efeito do chaveamento das antenas na eficiência espectral [7,8].

Em [7], um pulso de formatação foi projetado para um sistema SM com uma única cadeia de RF. Este pulso foi utilizado para realizar uma análise de desempenho justa entre duas modulações *Space Shift Keying* (SSK). Portanto, os autores não se preocuparam em realizar uma análise comparativa de desempenho com sistemas MIMOs convencionais.

Por outro lado, em [8] é realizada uma análise mais detalhada sobre o efeito do chaveamento das antenas no esquema SM. Os autores observaram que a utilização de um pulso do tipo Nyquist não seria possível na prática, visto que uma antena permanece ativa apenas por um período de símbolo. Como solução, eles propuseram um pulso de transmissão raiz quadrada do cosseno levantado (RRC) truncado com duração $2KT$ segundos, em que K é um inteiro positivo e T corresponde ao intervalo de símbolo em uma transmissão convencional. Note que $2KT$ segundos é o tempo durante o qual uma dada antena deve permanecer ativa. Por outro lado, para conseguir uma taxa de transmissão de $D/2KT$ símbolos por segundo, um número correspondente a D cadeias de RF deve ser empregado, e a transmissão sequencial dos símbolos é feita alternando-se ciclicamente as D cadeias de RF.

É importante ressaltar que na solução em [8] a utilização de D cadeias de RF não se traduzem em um aumento do número de bits transmitidos em um intervalo de modulação, de $\log_2(N_T)$ para $\log_2\binom{N_T}{D}$, como seria esperado em um esquema GSM. Na verdade, as cadeias de RF adicionais servem apenas ao propósito de contornar a restrição prática supramencionada.

A análise em [8] é restrita a pulsos do tipo raiz quadrada do cosseno levantado, e assim, peca por falta de abrangência. Além disso, os resultados apresentados dão a falsa impressão de que um sistema SM seria praticamente inviável para constelações de ordens mais elevadas.

No presente artigo realizamos uma análise mais detalhada sobre a utilização de pulsos RRC em sistemas SM e estendemos esta análise para os pulsos *Prolate Spheroidal Wave Function* (PSWF) de ordem zero e Gaussiano. Como vantagem, para manter uma taxa de pouco menos de um símbolo por intervalo de modulação, a adoção dos pulsos PSWF e Gaussiano requer do sistema SM a utilização de, no máximo, duas cadeias de RF (antenas ativas), contra as quase $2K$ cadeias necessárias com a adoção do pulso RRC. Mais detalhes sobre esta proposta serão delineados a seguir.

II. MODELO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO SM

Inicialmente, faremos uma revisão do esquema SM com uma única cadeia de RF. O transmissor possui N_T antenas disponíveis e o receptor é equipado com N_R antenas. O vetor $\boldsymbol{y}(t)$ que representa os sinais recebidos é dado por

$$\boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{H}(\tau,t) * \boldsymbol{x}(t)\,, \tag{1}$$

em que

$$\boldsymbol{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) & x_2(t) & \cdots & x_{N_T}(t) \end{bmatrix}^T$$

é o vetor dos sinais transmitidos e $\boldsymbol{H}(\tau,t)$ é a matriz N_R x N_T do canal MIMO.

Como apenas uma antena das N_T disponíveis está ativa no sistema SM, o sinal na saída da i-ésima antena é dado por

$$x_i(t) = \sum_k a_{k,i}\, g(t - kT_s)\,, \tag{2}$$

em que $g(t)$ é o pulso de formatação, T_s é o período de símbolo,

$$a_{k,i} = \begin{cases} 0, & b_k \neq i \\ a_k, & b_k = i \end{cases},$$

a_k são os símbolos tomados de uma constelação linear e $b_k \in \{1,2,..,N_T\}$ são os símbolos para a seleção da i-ésima antena, isto é, b_k é responsável pelo mapeamento de um ponto da constelação no domínio espacial.

A fim de aumentar a eficiência do esquema SM, consideramos a disponibilidade de mais de uma cadeia de RF (D>1) no transmissor. Então, temos que

$$\begin{aligned} x_i(t) = \sum_k & a_{Dk,i}\, g(t - DkT_s) + a_{Dk+1,i}\, g(t - (Dk+1)T_s) \\ & + \cdots + a_{Dk+D-1,i}\, g(t - (Dk+D-1)T_s) \end{aligned} \tag{3}$$

A Figura 1 ilustra o caso para D=2.

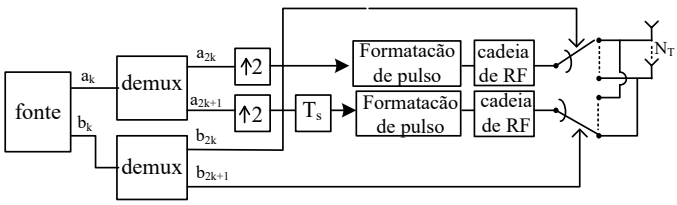


Fig. 1 - O transmissor do sistema SM.

As funções PSWFs, também conhecidas como *Slepian Functions*, são soluções da equação diferencial dada por [9]

$$\int_{-T/2}^{T/2} \psi_n(\tau) \frac{sen\,[\Omega(t-\tau)]}{\pi(t-\tau)} d\tau = \lambda_n \psi_n(t) \tag{4}$$

em que $\psi_n(t)$ são as PSWFs de ordem n, λ_n é a concentração de energia de $\psi(t)$ que está em um intervalo de tempo [-$T/2$,$T/2$], e c é dada por c=$T\Omega/2$, em que Ω é a largura de faixa do pulso PSWF e T é a duração do pulso. λ_n é dada por

$$\lambda_n = \frac{\int_{-T/2}^{T/2} |\psi_n(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |\psi_n(t)|^2 dt} \tag{5}$$

Neste artigo utilizamos a PSWF de ordem zero como pulso de formatação, isto é,

$$g(t) = \psi_0(t), \tag{6}$$

além dos pulsos Gaussiano e RRC que são expressos por:

$$g(t) = e^{-\pi t^2}, \tag{7}$$

e
$$g(t) = \frac{\operatorname{sen}\left(\frac{\pi t}{T}(1-\alpha)\right) + \frac{4\alpha t}{T}\cos\left(\frac{\pi t(1+\alpha)}{T}\right)}{\frac{\pi t}{T}\left(1-\left(4\alpha\frac{t}{T}\right)^2\right)}, \tag{8}$$

respectivamente. Nas nossas simulações, todos os pulsos foram normalizados à energia unitária.

III. ANÁLISE DA TÉCNICA DE CHAVEAMENTO

A – Uma Cadeia de RF (1 antena ativa)

Considerando a utilização de uma única cadeia de RF, a *i*-ésima antena ficará ativa durante toda a duração do pulso e a próxima só será ativada após o término deste. A Figura 2 exemplifica a transmissão de uma sequência de pulsos PSWF com duração de $2KT$=$2T$ =2 segundos. Neste caso, evita-se a interferência entre antenas (IAI) e interferência entre símbolos ao custo de uma menor eficiência espectral.

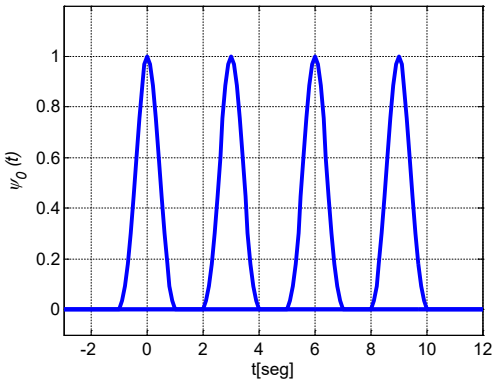


Fig. 2 - Transmissão de pulsos PSWF.

Note que a máxima taxa de transmissão que pode ser atingida sem IAI é de $1/2T$ símbolos por segundo, o que ocorre quando as bases dos pulsos se tocarem. Esta mesma taxa também pode ser obtida via pulsos Gaussiano ou RRC com duração de $2T$ segundos. Porém, estes dois últimos pulsos têm uma resposta em frequência pior do que a do pulso PSWF, como ilustra a Figura 3. A utilização de pulsos RRCs mais longos, por exemplo, com duração de $4T$ ou $6T$, melhoram a resposta em frequência, porém com um custo de uma pior taxa de transmissão.

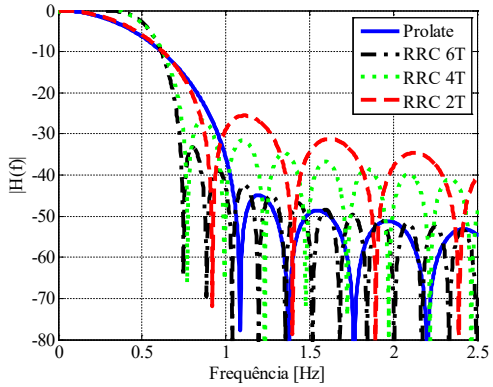
Para efeito de uma comparação mais detalhada entre os diferentes pulsos, a Tabela I mostra a eficiência espectral medida pelo produto $T_s.B_w$, em que T_s é o período de símbolo e B_w é a largura de faixa medida nos pontos de -30dB e -40dB das respostas em frequência mostradas na Figura 3. Claramente, o pulso PSWF tem o melhor desempenho.

B – Duas Cadeias de RF (Duas Antenas Ativas)

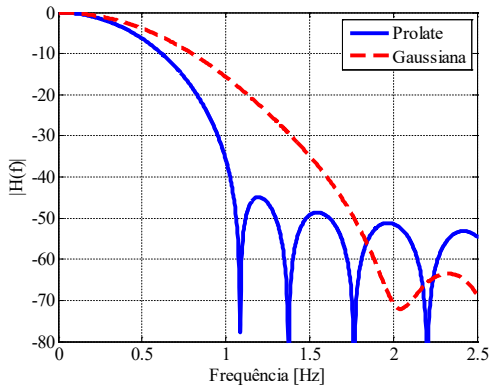
Consideremos agora a existência de D=2 cadeias de RF. A duração dos pulsos é mantida em $2KT$=$2T$=2 segundos. Alternando-se os símbolos entre as duas cadeias de RF, tem-se a taxa de transmissão dada por 1 símbolo a cada T =1 segundo, como mostra a Figura 4 para pulsos PSWF. Fica evidente a necessidade da utilização de duas cadeias de RF (antenas) para se obter essa taxa de transmissão.

No receptor, após o filtro casado, os pulsos terão a largura dobrada e, neste caso, ocorrerá interferência entre símbolos (IES) significativa, conforme ilustra a Figura 5. A IES também ocorre para os pulsos gaussiano e RRC com duração de $2T$ segundos.

Note que pode-se minimizar a IES utilizando um pulso



(a)



(b)

Fig. 3 - (a) Resposta em frequência dos pulso PSWF e RRC's; (b) Resposta em frequência dos pulso PSWF e Gaussiano.

TABELA I – 1 Antena ativa

	T_s	B_w (-30dB)	B_w (-40dB)	$T_s.B_w$ (-30dB)	$T_s.B_w$ (-40dB)
RRC	$6T$	$1{,}408/T$	$1{,}852/T$	8,448	11,712
RRC	$4T$	$1{,}84/T$	$4{,}21/T$	7,36	16,84
RRC	$2T$	$2{,}532/T$	$6{,}41/T$	5,064	12,82
Prolate	$2T$	$1{,}8/T$	$2{,}04/T$	3,8	4,08
Gaussiano	$2T$	$2{,}78/T$	$3{,}2/T$	5,56	6,4

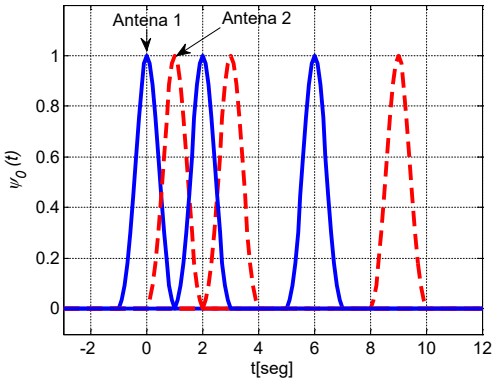


Fig. 4 - Transmissão de pulsos PSWF na taxa de símbolos para duas cadeias de RF (duas antenas ativas).

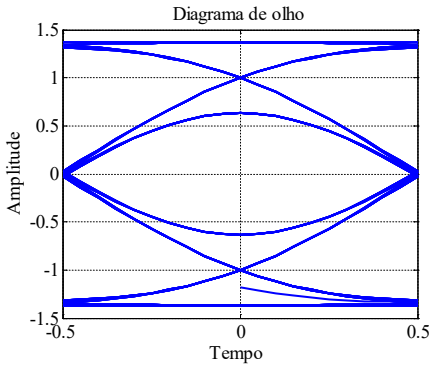


Fig. 5 - Diagrama de olho para o pulso PSWF.

RRC com duração de 4*T* segundos, que é a máxima duração possível deste pulso com a utilização de duas antenas. Porém, o período de símbolo será 4*T* segundos.

Por outro lado, também se pode minimizar a IES, devida à transmissão do pulso PSWF a cada *T* segundos, aumentando o atraso para ativar a segunda antena. A Figura 6 mostra o diagrama de olho quando a segunda antena é ativada 1,3*T* segundos após a ativação da primeira. Neste caso, ainda existe uma IES residual de 10%. Evidentemente, isto leva a uma degradação na taxa de transmissão de 30%. O mesmo procedimento pode ser realizado para os pulsos gaussiano e RRC com duração de 2*T* segundos.

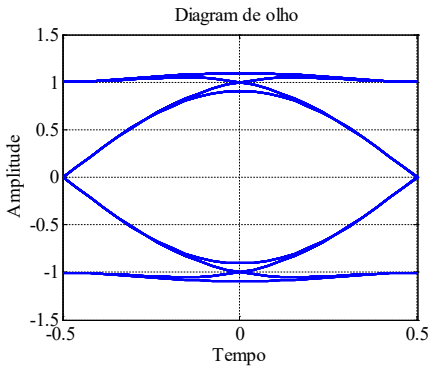


Fig. 6 - Diagrama de olho para o pulso PSWF com a segunda antena ativada a cada 1,3*T*.

A Tabela II mostra a eficiência espectral para o caso de duas antenas ativas. Todos os pulsos apresentados nesta tabela foram projetados para apresentarem uma IES residual de no máximo 10%. Assim, para que tal restrição seja satisfeita, os pulsos com duração 2*T*, isto é, RRC(2T), Prolate e Gaussiano precisam ser transmitidos a intervalos superiores a *T*, a saber: 1,25*T*, 1,3*T* e 1,05*T*, respectivamente. Novamente, o pulso PSWF é o que apresenta melhor desempenho.

TABELA II – Duas Antenas Ativas.

	T_s	B_w (-30dB)	B_w (-40dB)	$T_s.B_w$ (-30dB)	$T_s.B_w$ (-40dB)
RRC(4T)	2*T*	1,84/*T*	4,21/*T*	3,68	8,42
RRC(2T)	1,25*T*	2,532/*T*	6,41/*T*	3,15	8,0125
Prolate	1,3*T*	1,9/*T*	2,04/*T*	2,47	2,652
Gaussiano	1,05*T*	2,78/*T*	3,2/*T*	2,919	3,36

IV. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ESPECTRAL

A fim de analisar os diferentes pulsos e configurações, devemos determinar a eficiência espectral total do sistema SM, calculada por:

$$\eta = \frac{1}{T_S B_W}(\log_2 N_T + \log_2 M) \tag{9}$$

Para fins de comparação, utilizaremos a técnica de multiplexagem espacial utilizando um pulso RRC tal que os lóbulos secundários de sua resposta em frequência sejam desprezíveis. Neste caso, a sua largura de faixa é $B_W = (1+\alpha)/T_S$ e a eficiência espectral é dada por:

$$\eta = \frac{D}{T_S B_W}(\log_2 M) = \frac{D}{1+\alpha}(\log_2 M) \tag{10}$$

Note que essa eficiência é alcançada apenas se o número de antenas no receptor for $N_R \geq N_T$, uma restrição que não se faz necessária na SM, que pode ter qualquer número de antenas receptoras (inclusive apenas uma).

Considerando as equações (9) e (10), a condição necessária para que a técnica SM tenha um desempenho melhor do que a técnica de multiplexagem espacial é dada por:

$$N_T > M^{\frac{DT_S B_W - 1 - \alpha}{1+\alpha}} \tag{11}$$

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, analisamos a eficiência spectral versus o número de antenas no transmissor em um sistema SM com *D*=1 e *D*=2 cadeias de RF. As Figuras 7, 8 e 9 mostram a eficiência espectral de diferentes esquemas SM com respeito ao número de antenas, assumindo que a modulação utilizada seja uma QPSK (*M*=4). Na Figura 7, consideramos que somente uma cadeia de RF é disponível e que a eficiência espectral é calculada no ponto -30dB das respostas em frequência mostradas na Figura 3. Como esperado, o pulso PSWF apresenta a melhor eficiência espectral com relação tanto ao pulso RRC quanto ao pulso Gaussiano. Da equação (11), a fim de obtermos um desempenho da técnica SM melhor do que a técnica de multiplexagem espacial, devemos ter $N_T > 11$.

As curvas mostradas na Figura 8 correspondem à utilização de duas cadeias de RF. Como anteriormente, o pulso PSWF proporciona uma eficiência espectral melhor do que a dos pulsos Gaussiano e RRC.

Agora, para que a técnica SM tenha um desempenho melhor do que o da técnica de multiplexagem espacial, é necessário que $N_T > 33$.

Finalmente, a Figura 9 mostra as curvas de eficiência espectral obtidas para o ponto de -40dB das respostas em frequência da Figura 3. Mostramos apenas os resultados obtidos para os pulsos PSWF e Gaussiano para *D*=1 e *D*=2. Aqui, as conclusões são as mesmas em relação às figuras anteriores.

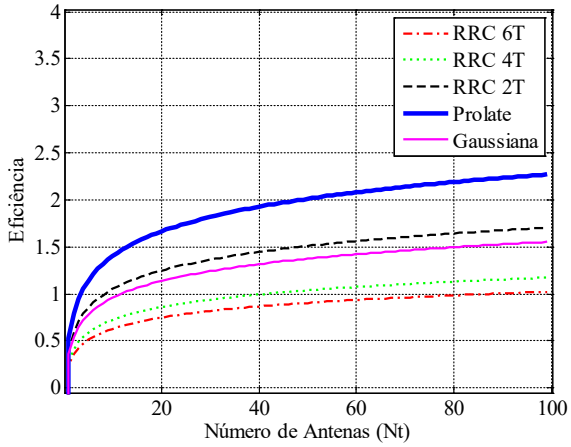


Fig. 7 Eficiência espectral versus número de antenas com D=1, $T_s.B_w$(-30dB) e M=4.

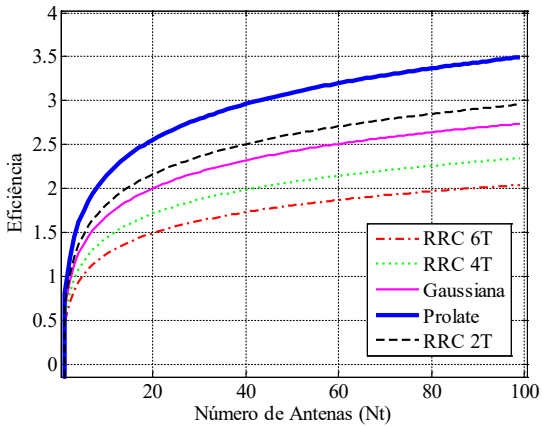


Fig. 8 Eficiência espectral versus número de antenas com D=2, $T_s.B_w$(-30dB) e M=4.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo, o efeito do chaveamento de antenas na técnica de modulação espacial com ativação de uma única antena foi investigado em detalhes. O chaveamento, que ocorre na taxa de símbolo, impõe limite à duração do pulso de transmissão, levando a uma expansão espectral que em geral é ignorada na literatura. Um trabalho recentemente publicado propõe o uso adicional de cadeias de RF, associado a um esquema de transmissão com o pulso cosseno levantado, que atenua o problema. No presente artigo, outros formatos de pulso mais bem localizados no tempo e na frequência são propostos. Uma análise seguida de resultados numéricos revela que a

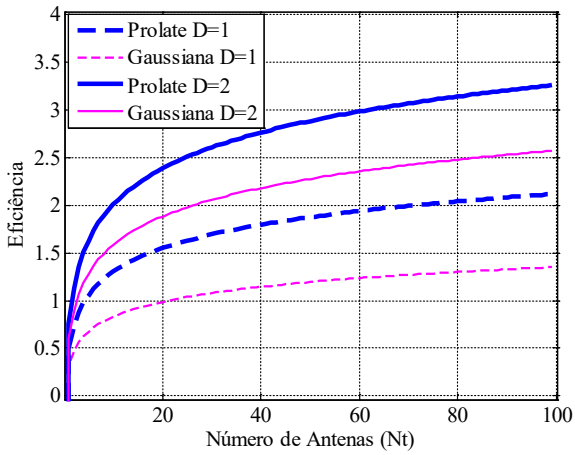


Fig. 9 Eficiência espectral versus número de antenas com $T_s.B_w$(-40dB) e M=4.

adoção dos novos pulsos proporciona uma maior eficiência espectral e torna a modulação espacial mais atrativa do que a multiplexagem espacial a partir de um número menor de antenas transmissoras.

REFERÊNCIAS

[1] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin and R. Zhang, "An overview of massive MIMO: benefits and challenges," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, Oct. 2014.

[2] R. Mesleh, H. Haas, C.W. Ahn, and S. Yun, Spatial modulation-OFDM, the *Proceedings of the 11th International OFDM-Workshop* 2006 (InOWo"06), 2006.

[3] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn and S. Yun, "Spatial Modulation - A New Low Complexity Spectral Efficiency Enhancing Technique," 2006 First International Conference on Communications and Networking in China, pp. 1-5, Beijing, 2006

[4] J. Jeganathan, "Space shift keying modulation for MIMO channels," M.A.Sc. thesis, Dept. Elect. Eng., Concordia University, Montreal, QC, Aug. 2008.

[5] A. S. Younis, R. N. Mesleh, H. Haas, "Generalised Spatial Modulation", *2010 Conference Record of the Forty Fourth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* (ASILOMAR), pp. 7-10, Nov. 2010.

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

[7] M. Di Renzo, D. De Leonardis, F. Graziosi, and H. Haas, "Space Shift Keying (SSK-) MIMO with practical channel estimates," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, no. 4, pp. 998–1012, Apr. 2012.

[8] K. Ishibashi and S. Sugiura, "Effects of Antenna Switching on Band-Limited Spatial Modulation," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 345-348, Aug. 2014.

[9] D. Slepian. "Prolate spheroidal wave functions, fourier analysis and uncertainty-V: The discrete case," *Bell System Technical Journal*, 57, 1978.

[10] C.C. Cha, M. Nakagawa, H. G. Zhang, Z. Zhou, "PSWF-based direct-sequence UWB transmission using orthogonal ternary code sets," *IEEE Consumer Communications and Networking Conf.*, vol. 2, pp. 686–690, Jan. 2006.