

Análise de desempenho do sensoriamento espectral utilizando cicloestacionariedades em sistemas SIMO

Pedro Thiago Valério de Souza¹, Vinicius Samuel Valério de Souza¹

¹Departamento de Engenharias e Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)
Caixa Postal 17 – 59.900-970 – Pau dos Ferros – RN – Brazil

{pedro.souza, viniciussamuel}@ufersa.edu.br

Abstract. *The performance of spectral sensing by cyclostationary analysis is affected by channels with time-varying fading. This work presents an analysis of the performance of the spectral sensing using cyclostationary analysis in systems using multiple receiving antennas. The goal in the use of multiple receiving antennas is to generate a greater diversity of the information, in order to mitigate the effect of the fading. Results were obtained of the rate of detection of modulated signals considering a probability of false alarm of 10 %, according to the IEEE 802.22 standard. The results obtained by computer simulation indicate a higher detection rate when multiple antennas are used when compared in scenarios that use only one receiving antenna.*

Resumo. *O desempenho do sensoriamento de sinais por análise de cicloestacionariedades é afetado por canais com desvanecimento variante no tempo. Este trabalho apresenta uma análise de desempenho do sensoriamento espectral utilizando cicloestacionariedades em sistemas que utilizam múltiplas antenas de recepção. O objetivo na utilização de múltiplas antenas receptoras é gerar uma maior diversidade da informação, de forma a mitigar o efeito do desvanecimento. Foram obtidos resultados da taxa de detecção de sinais modulados considerando uma probabilidade de falso alarme de 10%, conforme o padrão IEEE 802.22. Os resultados obtidos por simulação computacional indicam uma taxa de detecção superior quando utiliza-se múltiplas antenas, quando comparados em cenários que utilizam apenas uma antena receptora.*

1. Introdução

A disseminação das tecnologias de comunicações sem fio tem ocasionado um aumento na demanda por espectro eletromagnético [Coutinho 2011]. Em particular, estudos científicos demonstram que a questão de acesso ao espectro é mais significativo do que a escassez física desse recurso [Farias et al. 2011].

Diante disso, a comunidade científica têm estudado uma nova política de alocação do espectro, denominada de acesso dinâmico ao espectro (*Dynamic Spectrum Access - DSA*) [Souza 2017], em que o sistema de rádio deve verificar porções livres do espectro eletromagnético [Gardner 1994], através de alguma técnica de sensoriamento espectral [Farias et al. 2011].

Um dos métodos de sensoriamento espectral amplamente difundido, devido a robustez em cenários com baixa relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio - SNR*),

é o sensoriamento por análise de cicloestacionariedades [Da Costa 1996]. Todavia, conforme demonstrado na literatura [Souza 2017, Farias et al. 2011, Gardner 1994, Chaudhari et al. 2016, Rawat 2016], o desvanecimento variante no tempo prejudica o desempenho do sensoriamento por cicloestacionariedades. Uma forma possível para combater o efeito do desvanecimento consiste em utilizar várias antenas receptoras [Chaudhari et al. 2016, Rawat 2016].

Dessa maneira, neste trabalho, é realizada a análise de uma arquitetura de sensoriamento por análise de cicloestacionariedades em um cenário de comunicação com múltiplas antenas receptoras, caracterizando um sistema SIMO (*Single-Input Multiple-Output*). Conforme será apresentado nos resultados, a arquitetura de sensoriamento analisada nesse trabalho apresenta desempenho superior (em termos de taxa de detecção de sinais de comunicação), quando comparada a um arquitetura que utiliza apenas uma antena receptora, em um esquema de recepção SISO (*Single-Input Single-Output*).

O restante do trabalho está detalhado da seguinte forma: Na Seção 2 apresenta-se o modelo de sistema utilizado. Na Seção 3 apresenta-se os resultados de simulação. Por fim, na Seção 4 realiza-se algumas conclusões acerca do trabalho.

2. Arquitetura de Sensoriamento Proposta

Neste trabalho foi implementado um sistema de transmissão SIMO, apresentado na Figura 1. O canal de comunicações foi modelado como Rayleigh, plano e não seletivo. Assumindo um esquema SIMO com N_R antenas receptoras, o sinal recebido pela m -ésima antena, denominado de $y_m(t)$, será dado por [Proakis and Salehi 2001]:

$$y_m(t) = s(t)h_m(t) + \eta_m(t), \quad m = 1, 2, \dots, N_R \quad (1)$$

em que $s(t)$ é o sinal transmitido, $h_m(t)$ é a atenuação devido ao canal e $\eta_m(t)$ é uma função relacionada ao ruído do canal.

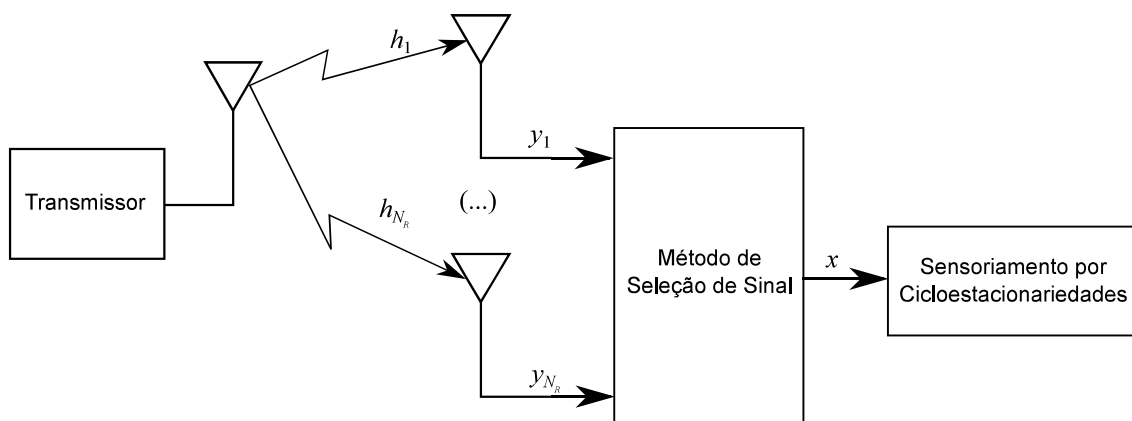


Figura 1. Esquema de transmissão utilizado no trabalho.

A arquitetura de sensoriamento espectral consiste em duas etapas: (i) o critério de combinação de sinal e (ii) o decisor por características cicloestacionárias.

O método de combinação do sinal tem como objetivo combinar o feixe de sinais recebidos por cada uma das antenas receptoras (y_1, \dots, y_{N_R}), gerando um sinal $x(t)$,

que é mais robusto ao efeito do desvanecimento do que os sinais recebidos individuais [Proakis and Salehi 2001]. Neste texto implementou-se o método da combinação por razão máxima (*Maximum Ration Combining* - MRC). Dessa forma o sinal $x(t)$ pode ser obtido como [López-Valcarce et al. 2009]:

$$x(t) = \sum_{j=1}^{N_R} y_j(t) h_j^*(t) \quad (2)$$

A etapa de decisão faz uso das características cicloestacionárias de segunda ordem do sinal $x(t)$, calculado conforme Equação (2). Quando a teoria de processos cicloestacionários de segunda ordem é aplicada ao sensoriamento espectral, duas funções importantes são utilizadas: a Função de Densidade de Correlação Espectral (*Spectral Correlation Density Function* - SCD) e o Perfil Alfa [Souza 2017].

A Função de Densidade de Correlação Espectral - $S_x^\alpha(f)$ - é definida como a correlação estatística entre componentes espectrais f e $f + \alpha$ do sinal $x(t)$ [Da Costa 1996]:

$$S_x^\alpha(f) = \lim_{W \rightarrow \infty} \frac{1}{W} E [X_W^*(f) X_W(f + \alpha)] \quad (3)$$

em que α é a frequência cíclica, f é uma frequência (em Hz) e $X_W(f)$ é a transformada de Fourier do sinal $x(t)$ em uma janela de duração finita W .

Por sua vez, denomina-se de perfil alfa a projeção da SCD em um plano ortogonal a f , para valores de $\alpha > 0$ [Souza et al. 2018]:

$$\rho(\alpha) = \frac{\max_f [S_x^\alpha(f)]}{\max_{f,\alpha} [S_x^\alpha(f)]}. \quad (4)$$

A etapa de decisão por características cicloestacionárias fundamenta-se no princípio do ruído estacionário não possui valores de Densidade de Correlação Espectral para valores de $\alpha \neq 0$ [Gardner 1994]. Dessa maneira utiliza-se uma técnica de detecção por limiar, com métrica de decisão definida como:

$$\varepsilon = \rho(\alpha = \alpha_i) \quad (5)$$

em que α_i é um valor de frequência cíclica escolhido tal que coincida com os picos do perfil alfa do conjunto de modulações a serem sensoriadas. Neste trabalho, deseja-se sensoriar modulações BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), que possuem uma raia no cicloespectro localizada em $\alpha_i = 2F_c$ (em que F_c é a frequência da portadora) [Gardner 1994].

Supondo a existência do sinal de comunicações na referida faixa de espectro, o valor da métrica de sensoriamento ε tenderá a um valor unitário (dado que o perfil alfa é normalizado). Contudo, se uma determinada faixa de espectro estiver desocupada, o sinal observado para o sensoriamento será composto apenas pelo ruído Gaussiano branco, e o valor da métrica de sensoriamento ε tenderá para valores próximos a zero.

Admitindo-se um valor sub-ótimo de decisão ξ , determinado a partir da probabilidade de falso alarme desejada para a arquitetura de sensoriamento, o processo de decisão sobre a ocupação de uma determinada faixa do espectro consiste no seguinte teste binário de hipótese:

- Se $\varepsilon < \xi$, então a faixa de espectro analisada está desocupada;
- Se $\varepsilon > \xi$, então a faixa de espectro analisada está ocupada.

3. Resultados numéricos

Nesta seção apresenta-se os resultados de simulação referentes ao desempenho da arquitetura de sensoriamento espectral apresentada na Seção 2 considerando um esquema com uma, três, cinco e sete antenas receptoras.

O sinal a ser sensoriado é definido por constelação BPSK com os parâmetros descritos na Tabela 1. A estimação do perfil alfa foi realizada por meio do algoritmo CPD (*Cyclic Periodogram Detection*) [Zhang and Xu 2007], com os parâmetros apresentados na Tabela 2. Para a obtenção do perfil de desvanecimento do canal foi utilizado o modelo de Jakes [Jakes and Cox 1994], com uma frequência Doppler normalizada de $f_D T_s = 0.0062$ e ordem de canal de 82.

Tabela 1. Parâmetros do sinal simulado para o sensoriamento espectral.

Característica	Parametrização
Frequência da Portadora	$f_c = 1024\text{Hz}$
Frequência de amostragem	$f_s = 4096\text{Hz}$
Quantidade de amostras do sinal em banda base	4.096 amostras
Sobreamostragem	16 amostras/símbolo
Fator de <i>roll-off</i>	0.5

Tabela 2. Parâmetros do algoritmo CPD utilizado na estimação do perfil alfa.

Característica	Parametrização
Quantidade de Blocos (L)	8
Tamanho de Bloco (N)	512
Suavização (M)	8

Tomando-se como base o padrão IEEE 802.22, que regulamenta alguns requisitos do sensoriamento espectral, deseja-se uma probabilidade de falso alarme constante de 10% [Coutinho 2011]. Dado que não foi possível encontrar uma relação algébrica entre a probabilidade de falso alarme para um dado limiar, obteve-se por simulação uma curva que relaciona esses dois parâmetros. Essa curva é apresentada na Figura 2. Cada ponto da curva foi obtido como uma média das decisões tomadas em 500 testes.

A partir da observação da Figura 2, estipulou-se um limiar de decisão $\xi=0,23$. Utilizando esse limiar para decisão, apresenta-se a Figura 3, que indica a taxa de detecção do sistema de sensoriamento em análise. Cada ponto da curva foi obtido como uma média das decisões tomadas em 1000 testes.

Analisando a Figura 3, observa-se que quanto maior o número de antenas receptoras, melhor é o desempenho do sistema de sensoriamento espectral. O sistema analisado apresenta resultados satisfatórios (taxa de detecção acima de 90%) até a ordem de -13dB para sistemas SIMO, ao passo que com o aumento de número de antenas, o sistema apresenta resultados melhores para SNR mais baixas. Para um quantidade de sete antenas receptoras, o resultado do sensoriamento é satisfatório até a ordem de -20dB.

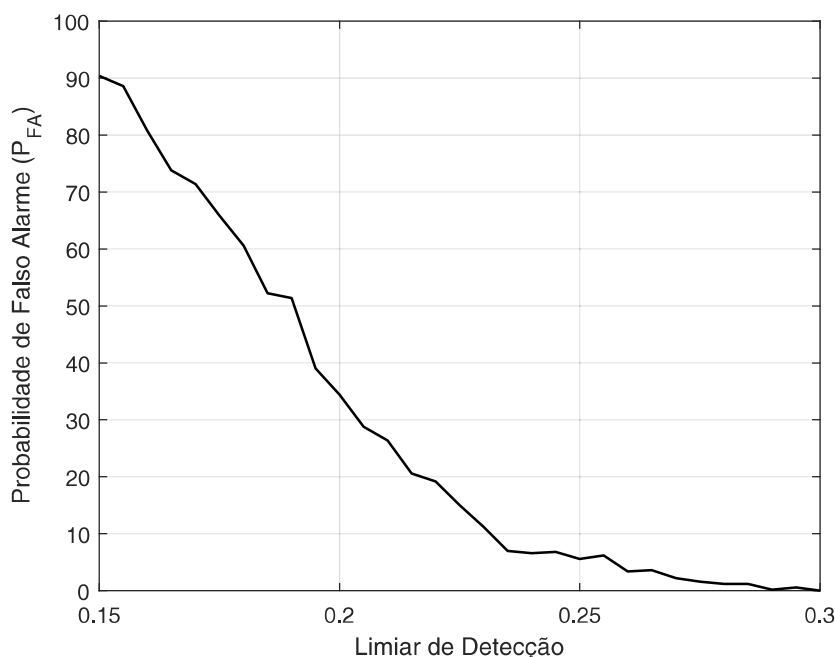


Figura 2. Relação entre a probabilidade de falso alarme e o limiar utilizado para o sensoriamento.

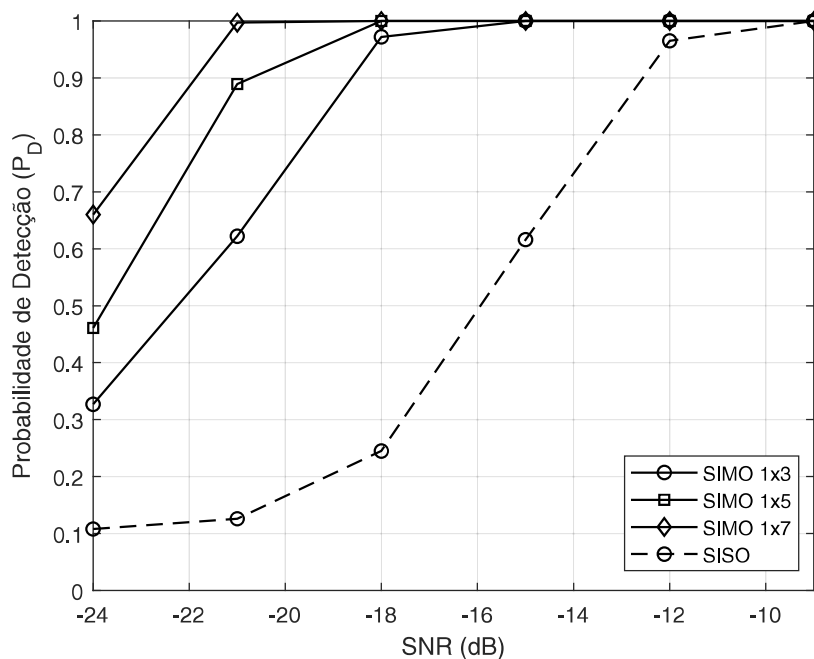


Figura 3. Probabilidade de detecção do sinal de comunicação da arquitetura de sensoriamento proposta.

4. Conclusões

Neste trabalho apresentou-se a análise de desempenho do sensoriamento espectral por cicloestacionariedades em sistemas SIMO. A partir dos resultados de simulações obtidos, pode-se constatar que com o aumento no número de antenas receptoras, o desempenho da arquitetura de sensoriamento espectral tende a melhorar.

Em trabalhos futuros pretende-se investigar o efeito de algumas variáveis que não foram modeladas, como desvanecimento seletivo, ruído não-Gaussiano e o erro na estimação dos parâmetros do canal. Além disso, pretende-se investigar o desempenho de uma arquitetura de classificação automática de modulação, utilizando um esquema de múltiplas antenas receptoras.

Referências

- Chaudhari, S., Kosunen, M., Mäkinen, S., Oksanen, J., Laatta, M., Ojaniemi, J., Koivunen, V., Ryyänen, J., and Valkama, M. (2016). Performance evaluation of cyclostationary-based cooperative sensing using field measurements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(4):1982–1997.
- Coutinho, P. S. (2011). Detecção de energia para rádios cognitivos usando gnu radio e usrp2. *Trabalho de Conclusão de Curso, UFRJ*.
- Da Costa, E. L. (1996). Detection and identification of cyclostationary signals. Technical report, NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA.
- Farias, A., Melo, C. E. N., and Dias, R. V. (2011). Uma abordagem a métodos de sensoriamento do espectro aplicados a rádio cognitivo.
- Gardner, W. A. (1994). Cyclostationarity in communications and signal processing. Technical report, STATISTICAL SIGNAL PROCESSING INC YOUNTVILLE CA.
- Jakes, W. C. and Cox, D. C. (1994). *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE Press.
- López-Valcarce, R., Vazquez-Vilar, G., and Álvarez-Díaz, M. (2009). Multiantenna detection of multicarrier primary signals exploiting spectral a priori information. In *2009 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, pages 1–6. IEEE.
- Proakis, J. G. and Salehi, M. (2001). *Digital communications*, volume 4. McGraw-hill New York.
- Rawat, D. B. (2016). Evaluating performance of cognitive radio users in mimo-ofdm-based wireless networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 5(5):476–479.
- Souza, P. T. V. d. (2017). Análise da codificação wavelet em sistemas de rádio com acesso dinâmico ao espectro. Master's thesis, Brasil.
- Souza, P. T. V. d., Souza, de, V. S. V., Fontes, A. I. R., and Silveira, L. F. Q. d. (2018). Projeto de constelações com símbolos não-equiproáveis adequadas ao sensoriamento espectral por características cicloestacionárias utilizando *Simulated Annealing*. *XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*.
- Zhang, Z. and Xu, X. (2007). Implementation of cyclic periodogram detection on vee for cognitive radio. In *Global Mobile Congress (GMC'2007)*, pages 1–5.