

Sensoriamento Espectral Cognitivo Baseado em Testes Estatísticos em Canais Sujeitos ao Desvanecimento Nakagami- m

Fabrício B. S. Carvalho, Waslon T. A. Lopes e Marcelo S. Alencar

Resumo—O sensoriamento espectral é uma importante ferramenta para a expansão do rádio cognitivo. Este trabalho avalia a adoção de testes estatísticos para otimizar a detecção espectral de oportunidades de ocupação de faixas de frequência temporariamente disponíveis. Características estatísticas de sinais transmitidos em um canal sujeito a desvanecimento Nakagami- m são selecionadas para obter um melhor desempenho do sensoriamento cognitivo. Especificamente, os testes de Jarque-Bera, Curtose e Assimetria são comparados, por meio de simulação, em função de suas probabilidades de detecção em canais sem desvanecimento e em canais sob desvanecimento Nakagami- m . Os resultados de simulação indicam que tais testes estatísticos podem ser efetivamente aplicados ao sensoriamento espectral em canais cognitivos sujeitos a este tipo de desvanecimento.

Palavras-Chave—Sensoriamento Espectral, Rádio Cognitivo, Testes Estatísticos, Desvanecimento Nakagami- m .

Abstract—Spectrum sensing is an important tool for the expansion of cognitive radio. This paper evaluates the use of statistic tests to optimize the spectral detection of available frequency bands for opportunistic occupation. Statistical characteristics of the transmitted signals over a channel subject to Nakagami- m fading are selected to achieve better cognitive sensing performance. More precisely, Jarque-Bera, Kurtosis and Skewness statistic tests are compared via simulation in terms of its detection probabilities in non-fading and over Nakagami- m fading channels. Simulation results indicate that these statistic tests can be effectively applied to cognitive wireless channels that are subjected to fading.

Keywords—Spectrum Sensing, Cognitive Radio, Statistical Tests, Nakagami- m Fading.

I. INTRODUÇÃO

O rádio cognitivo é uma tecnologia que vem ganhando importância devido à escassez do espectro eletromagnético em algumas faixas de frequência e à contínua expansão de novos serviços de comunicações sem fio. Os principais serviços sem fio operam em bandas de frequência praticamente lotadas, o que é um empecilho à expansão e à adição de novos usuários. Neste contexto, o rádio cognitivo permite monitorar o espectro eletromagnético para identificar oportunidades de transmissão em bandas momentaneamente disponíveis [1]

Os serviços licenciados de comunicações sem fio são alocados, normalmente, para seus assinantes, que são denominados *usuários primários* (UP). O usuário primário acessa um serviço cuja banda de frequências foi licenciada ou autorizada

por um órgão regulador de um país e, portanto, possuem a prioridade para ocupar aquele canal específico. Desde que a faixa de frequências considerada não esteja ocupada por um UP, ela pode ser utilizada para que um *usuário secundário* (US) possa operar no canal. Por esta razão, os usuários secundários também podem ser denominados como *usuários cognitivos* (UC) [2].

Neste sentido, melhorar o sensoriamento espectral, para permitir um melhor compartilhamento do espectro de frequências entre diferentes usuários primários e secundários, é um desafio para pesquisadores da área.

Novas técnicas e algoritmos de sensoriamento espectral têm sido propostos para lidar com a ocupação espectral em cenários cognitivos [3]. Porém, o problema do desvanecimento ainda não foi abordado adequadamente. Os efeitos de multipercurso e desvanecimento são usualmente simplificados ao avaliar o sensoriamento espectral, o que constitui uma limitação teórica na análise do sensoriamento espectral.

Este artigo analisa os efeitos do desvanecimento sobre o sensoriamento espectral cognitivo, ao considerar a utilização de testes estatísticos para a determinação da ocupação espectral de um canal eletromagnético. Os testes estatístico de Jarque-Bera, da Curtose e da Assimetria são simulados computacionalmente sob desvanecimento Nakagami- m e comparados com os resultados da detecção espectral sem efeitos de desvanecimento.

Este trabalho é organizado da seguinte maneira: a Seção II introduz o conceito de sensoriamento espectral; a Seção III aborda o sensoriamento espectral baseado em testes estatísticos; na Seção IV as características do modelo de desvanecimento de Nakagami- m são detalhadas; os parâmetros de simulação e os resultados obtidos para o sensoriamento espectral cognitivo sob desvanecimento Nakagami- m são demonstrados na Seção V e as conclusões deste trabalho são tratadas na Seção VI.

II. SENSORIAMENTO ESPECTRAL

O rádio cognitivo permite avaliar o espectro de frequências, de modo a identificar oportunidades de transmissão em faixas temporariamente disponíveis [4]. Por sua vez, o sensoriamento espectral é a etapa que identifica as bandas de frequência que podem ser utilizadas oportunisticamente pelos usuários cognitivos [5].

A detecção espectral verifica se as faixas de frequência disponíveis estão momentaneamente livres ou ocupadas, enquanto

que o sensoriamento espectral verifica se há usuários primários operando nas bandas licenciadas [6]. Caso não existam UP's utilizando os canais disponíveis, as lacunas espectrais (que correspondem às bandas eletromagnéticas que não estão sendo utilizadas e que podem ser utilizadas pelos usuários cognitivos para operarem oportunisticamente [7]) são identificadas.

Ao detectar a operação de um usuário licenciado, o usuário cognitivo deve desocupar o canal. O usuário licenciado tem a prioridade na ocupação e utilização da faixa de frequência identificada, ao passo que o usuário secundário deve ser capaz de passar a operar em outras bandas disponíveis e continuar sua operação sem penalizações aos seus usuários [8].

A abordagem tradicional adota um teste de hipóteses para monitorar a banda analisada e determinar se ela está ocupada ou livre. Um sensor espectral típico executa um teste de hipóteses para determinar se um canal está ocupado ou não [9]. Este teste de hipóteses é dado a seguir, para o caso da transmissão e detecção de sinais no tempo [10]:

$$y(t) = \begin{cases} w(t), & \text{se } H_0 \\ x(t) + w(t), & \text{se } H_1, \end{cases} \quad (1)$$

em que a hipótese H_0 refere-se ao fato de que o canal está livre, uma vez que apenas o ruído branco aditivo gaussiano (AWGN) $w(t)$ foi detectado; já a hipótese H_1 indica que o canal está ocupado, uma vez que tanto o sinal transmitido $x(t)$ quanto o ruído AWGN foram detectados [6]. O modelo do ruído AWGN $w(t)$ considerado tem média zero e é uma gaussiana complexa circular simétrica [11].

A partir de tais hipóteses, o desempenho de um detector espectral é caracterizado por probabilidades relativas às hipóteses consideradas. As probabilidades de maior interesse para o sensoriamento espectral são [12]:

- Probabilidade de detecção (P_d): é a probabilidade de que a decisão seja pela hipótese H_1 quando H_1 é verdadeira. Ou seja: $P_d = \text{Prob}(\text{sinhal detectado}|H_1)$; o receptor detecta que o canal está ocupado, e este realmente está;
- Probabilidade de falso alarme ou falsa detecção (P_{fa}): probabilidade de que o teste decida erradamente que o canal está ocupado quando na realidade ele está livre; isto é, $P_{fa} = \text{Prob}(\text{sinhal detectado}|H_0)$ [13];
- Probabilidade de não-deteção (P_{md}): é definida como o complemento da probabilidade de detecção; o sinal primário não é detectado embora esteja ocupando a banda de frequências. Assim, $P_{md} = 1 - P_d = \text{Prob}(\text{sinhal não ser detectado}|H_1)$ [6], [14].

O cenário ótimo de detecção espectral é observado ao maximizar P_d enquanto se minimiza P_{fa} [13], [14].

Algumas das principais técnicas de sensoriamento espectral adotadas em aplicações de rádio cognitivo são [6], [14], [15]:

- Detecção de Energia (DE);
- Detecção por Filtros Casados (MF - *Matched Filter*);
- Cicloestacionaridade;
- Detecção baseada na Covariância;
- Diversas estratégias de sensoriamento propõem algoritmos híbridos, levando a melhores resultados quando comparados aos observados com as técnicas individuais [16].

III. SENSORIAMENTO ESPECTRAL BASEADO EM TESTES ESTATÍSTICOS

Uma alternativa recente para a otimização das técnicas de sensoriamento espectral é baseada em testes estatísticos [17]. Determinadas características estatísticas dos sinais transmitidos (geralmente obtidas a partir dos momentos de ordens superiores) podem ser adotadas na obtenção de um melhor desempenho dos testes executados [12].

O emprego de estatísticas parciais do sinal transmitido vem atraindo crescente interesse dos pesquisadores da área de comunicações sem fio, em virtude das dificuldades no cálculo das informações do sinal primário [6]. O sinal transmitido pelo usuário primário, em um canal sujeito ao ruído aditivo gaussiano branco, segue uma distribuição de probabilidades específica; quando o sinal do usuário primário não é detectado, o usuário cognitivo detecta apenas uma variável aleatória gaussiana de média zero [18].

Como a função densidade de probabilidade (fdp) e os parâmetros estatísticos do sinal AWGN são conhecidos, o usuário secundário dispõe de informações adequadas para decidir sobre se uma banda de frequências está ou não temporariamente disponível. Desta maneira, o uso de estatísticas do sinal detectado auxilia na predição sobre a ocupação do canal [12].

Os métodos de sensoriamento espectral baseados em testes estatísticos buscam determinar a distribuição de probabilidades de um conjunto de amostras. Esta abordagem é conhecida como teste de aderência (GOF - *Goodness Of Fit*). Com relação às distribuições hipotéticas, as hipóteses consideradas são [6]:

- H_0 , se os dados aderem à distribuição;
- H_1 , se os dados não aderem à distribuição.

As probabilidades de detecção e de falso alarme são os principais parâmetros para avaliar o desempenho dos testes de aderência. Em termos das conhecidas probabilidades de detecção e de falsa detecção, os testes de aderência são avaliados em termos da P_{fa} (o que equivale à probabilidade de rejeitar H_0 quando a hipótese é verdadeira) e de P_d (probabilidade de aceitar H_0 quando a hipótese é verdadeira).

Testes estatísticos têm sido adotados para auxiliar na tarefa do sensoriamento espectral e identificação de oportunidades de ocupação cognitiva [12]. O sensoriamento espectral é considerado como um teste de hipóteses não-paramétrico (em que não se dispõe de nenhuma suposição ou estimativa das distribuições de probabilidades dos dados avaliados) [19].

Um sinal transmitido por um usuário primário em um canal sujeito ao ruído AWGN segue uma determinada distribuição de probabilidades. Quando o sinal não é transmitido, o usuário secundário detecta apenas a variável aleatória do ruído aditivo gaussiano branco [20]. Como a distribuição de probabilidades e os parâmetros estatísticos do ruído AWGN são conhecidos, o usuário cognitivo toma a decisão acerca da ocupação de uma lacuna espectral por meio destes parâmetros. Ou seja, o UC executa um teste de aderência para comparar as estatísticas do sinal detectado no canal com uma fdp específica [17].

Se o sinal do usuário primário é transmitido, o usuário cognitivo detecta uma distribuição de probabilidades diferente

das características da gaussiana (referente ao ruído AWGN). Assim, o UC interpreta que o canal está ocupado e identifica que há uma oportunidade de ocupação oportunística do canal avaliado quando o resultado do teste de aderência é comparado com o limiar λ definido pelo usuário secundário [12]. Quando o valor do teste estatístico for maior do que o limiar adotado, então o detector considera que o canal estará ocupado; no caso contrário (se o resultado do teste estatístico estiver abaixo do limiar selecionado), o usuário cognitivo interpreta que o canal está disponível; isto caracteriza uma oportunidade de ocupação espectral [21].

Alguns algoritmos de sensoriamento espectral, baseados em testes estatísticos, são descritos a seguir:

- Sensoriamento baseado em estatísticas de ordens superiores (HOS): este método de sensoriamento é baseado em estatísticas de ordens superiores (HOS – *Higher Order Statistics*). Este esquema de sensoriamento estima os momentos e cumulantes da terceira até a sexta ordem. Contudo, estas estimativas são complexas e suscetíveis a erros [22].
- Sensoriamento baseado na Curtose: este esquema de sensoriamento espectral, baseado na curtose (momento de quarta ordem) do ruído AWGN, visa determinar se um canal de frequências está ocupado ou não a partir de um teste de hipóteses [23], [24]. Caso o valor da curtose das amostras seja superior a λ , o sistema decide pela hipótese de que o canal está ocupado (H_1); caso contrário, o usuário cognitivo seleciona a hipótese H_0 e interpreta que há uma oportunidade de ocupação espectral. O desempenho deste detector é superior ao obtido por um detector de energia [6].
- Sensoriamento baseado na Assimetria e Curtose: o algoritmo de sensoriamento espectral GHOST (*Goodness of fit HOS Testing*), proposto em [25], é baseado na assimetria e curtose calculadas a partir do espectro do sinal recebido. O método de sensoriamento espectral compara estas estatísticas com o limiar estimado por meio de medidas empíricas do ruído. O desempenho do sistema GHOST é superior ao de um detector de energia, para o mesmo número de amostras [26].
- Sensoriamento baseado no teste de Jarque-Bera (JB): este método de sensoriamento espectral, proposto em [27], utiliza o teste estatístico JB sobre as amostras do sinal transmitido para compará-lo com o valor definido para o limiar λ . Este método aplica uma transformada rápida de Fourier (FFT) às amostras do sinal, de modo a comparar o resultado a uma distribuição de Rayleigh [6]. Outros métodos foram propostos baseados em JB [28], [29].

IV. EFEITOS DO DESVANECIMENTO SOBRE O SENSORIAMENTO ESPECTRAL

Os canais de comunicação sem fio estão sujeitos a diferentes efeitos, ocasionados pelos múltiplos percursos percorridos pelas ondas eletromagnéticas. Ao longo do canal, o sinal transmitido pode sofrer múltiplas reflexões, espalhamentos ou difrações, o que caracteriza o efeito de multipercursos; além disso, as perdas de propagação e sombreamento podem afetar a informação transmitida [6].

O desvanecimento provoca flutuações aleatórias na amplitude e na fase dos sinais transmitidos em um canal sem fio. Tais efeitos levam à degradação no desempenho dos sistemas de comunicação devido ao aumento na taxa de erro [30].

Diferentes modelos de propagação buscam caracterizar as variações de amplitude que afetam os sinais transmitidos, o que leva à modelagem estatística do comportamento do canal em cenários específicos. Alguns dos modelos de desvanecimento mais utilizados na literatura são [31], [32], [33]: Rayleigh, Nakagami- m , Nakagami- q (Hoyt), Nakagami- n (Rice), Weibull, Lognormal, $\alpha - \mu$, $\eta - \mu$, $\kappa - \mu$.

O modelo de desvanecimento investigado neste trabalho é o Nakagami- m , utilizado para modular a propagação de multipercursos para comunicações móveis *indoor* e *links* de rádio para comunicações ionosféricas. A distribuição de Nakagami- m inclui a distribuição de Gauss (para $m = \frac{1}{2}$) e a distribuição de Rayleigh ($m = 1$) como casos especiais; quando $m \rightarrow \infty$, o canal sujeito ao desvanecimento converge para um canal AWGN sem desvanecimento. Para $m < 1$ e $m > 1$, Nakagami- m se aproxima das distribuições de Hoyt e de Rice, respectivamente [31].

A função densidade de probabilidade para o desvanecimento Nakagami- m é dada por [32]:

$$p_R(r) = \frac{2m^m r^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp^{-\frac{mr^2}{\Omega}}, r \geq 0 \quad (2)$$

em que $\Omega = E[R^2]$ e o parâmetro (ou figura) de desvanecimento m é definido como a razão entre os momentos, ou seja:

$$m = \frac{(E[R^2])^2}{\text{Var}[R^2]} = \frac{\Omega^2}{E[(R^2 - \Omega)^2]}, m \geq 0.5 \quad (3)$$

V. SIMULAÇÃO DO SENSORIAMENTO ESPECTRAL SUJEITO AO DESVANECIMENTO NAKAGAMI-M

De modo a analisar o efeito do desvanecimento Nakagami- m sobre o sensoriamento espectral cognitivo, foram simuladas transmissões de um sinal BPSK (Chaveamento por Deslocamento de Fase Binário) em um canal sem fio submetido ao ruído AWGN. Os testes estatísticos de Jarque-Bera, Curtose e Assimetria foram empregados para detectar a presença de algum sinal no canal ou para identificar oportunidades de ocupação espectral. As simulações comparam o desempenho dos testes estatísticos quando o canal sem fio é submetido apenas ao efeito do ruído AWGN e quando o desvanecimento de Nakagami- m afeta o canal AWGN. O parâmetro de desvanecimento de Nakagami- m utilizado nas simulações foi $m = 0.5$.

Nas simulações, foi selecionado um valor fixo de amostras do sinal BPSK transmitido: 200. Foram executadas 5.000 simulações de Monte Carlo. A probabilidade de falso alarme foi fixada em $P_{fa} = 0,01$, atendendo ao limiar de detecção CFAR (*Constant False Alarm Rate*), em que a P_{fa} é limitada em baixos patamares e a P_d é maximizada [11].

As amostras consideradas na simulação são divididas em 25 quadros, e submetidas a um processamento de FFT com 2.048 pontos (ou seja, $N_{FFT} = 2.048$). As curvas obtidas

apresentam o desempenho da probabilidade de detecção P_d em função da relação sinal-ruído no receptor.

Os algoritmos baseados nos testes de Jarque-Bera, Curtose e Assimetria foram executados para duas hipóteses distintas: em uma transmissão por um canal AWGN sem desvanecimento; e em um cenário em que o desvanecimento de Nakagami- m é inserido ao canal com ruído aditivo gaussiano.

A. Resultados de Simulação

A Figura 1 apresenta a probabilidade de detecção em função da relação sinal ruído para o teste de Jarque-Bera. Verifica-se que o desempenho do detector baseado neste teste estatístico é afetado pelo desvanecimento Nakagami- m , quando comparado com o desempenho do detector JB em um cenário sem desvanecimento.

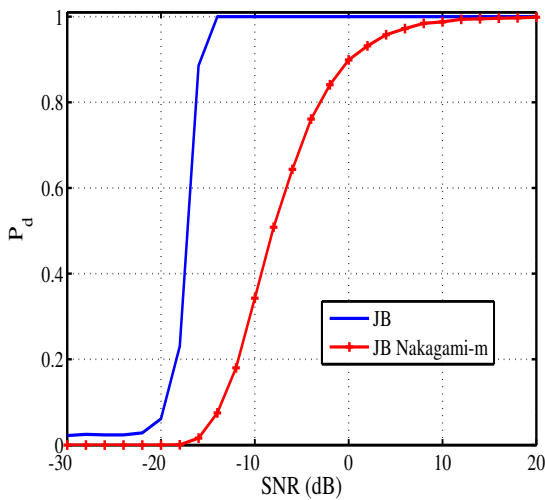


Fig. 1. Probabilidade de Detecção em função da Relação Sinal Ruído para o Teste de Jarque-Bera sob Desvanecimento Nakagami- m (5.000 Simulações de Monte Carlo e 200 Amostras).

As Figuras 2 e 3 ilustram a probabilidade de detecção em função da SNR para os testes de Assimetria e de Curtose, respectivamente. Depreende-se, pelos resultados de simulação, que o desvanecimento Nakagami- m afeta o desempenho destes dois testes, à semelhança do que foi observado para o detector baseado em Jarque-Bera.

Para os três métodos de sensoriamento espectral baseados nos testes estatísticos, verifica-se que, conforme esperado, o desvanecimento Nakagami- m afeta o desempenho das probabilidades de detecção. A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a introdução dos efeitos de desvanecimento melhora o modelo para detecção espectral cognitiva.

A comparação do desempenho dos três testes estatísticos (Jarque-Bera, Curtose e Assimetria) em uma única curva, ilustrada na Figura 4, permite verificar o método que apresenta uma melhor probabilidade de detecção cognitiva. Observa-se que os testes de Jarque-Bera, Curtose e Assimetria apresentam um desempenho similar (suas probabilidades de detecção atingem a unidade em aproximadamente 10 dB). O teste da Assimetria é o que apresentou um melhor desempenho até atingir a $P_d = 1$.

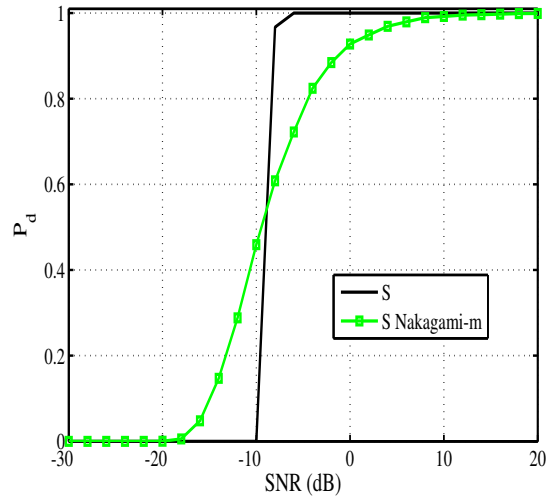


Fig. 2. Probabilidade de Detecção em função da Relação Sinal Ruído para o Teste da Assimetria sob Desvanecimento Nakagami- m (5.000 Simulações de Monte Carlo e 200 Amostras).

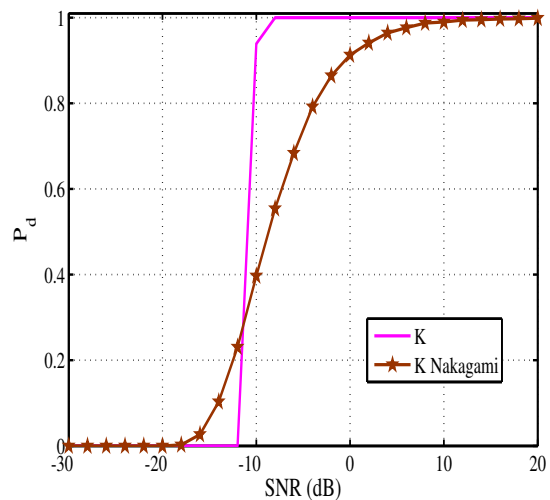


Fig. 3. Probabilidade de Detecção em função da Relação Sinal Ruído para o Teste da Curtose sob Desvanecimento Nakagami- m (5.000 Simulações de Monte Carlo e 200 Amostras).

Estes resultados demonstram o potencial da utilização destes testes estatísticos como uma alternativa ao sensoriamento espectral cognitivo.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma comparação do desempenho de estratégias de sensoriamento espectral cognitivo baseadas em três testes estatísticos. O desempenho dos testes de Jarque-Bera, Curtose e Assimetria foram analisados a partir da probabilidade de detecção em um canal sob desvanecimento Nakagami- m .

Os resultados de simulação comprovam que o desvanecimento afeta o desempenho do sensoriamento espectral. Portanto, um modelo completo e mais eficiente para a detecção

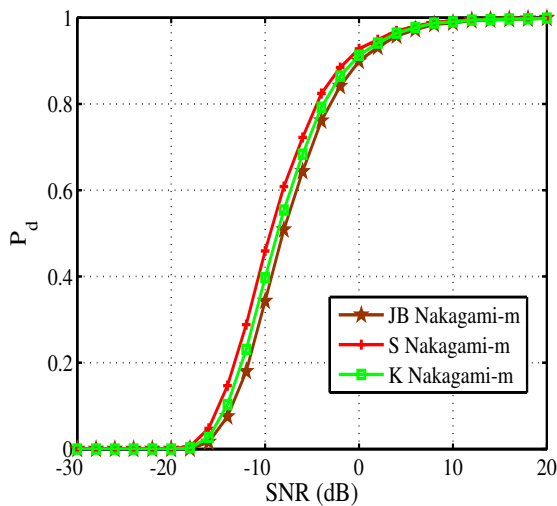


Fig. 4. Comparação das Probabilidade de Detecção em função da Relação Sinal Ruído para os Teste de Jarque-Bera, Assimetria e Curtose sob Desvanecimento Nakagami-m (5.000 Simulações de Monte Carlo e 200 Amostras).

espectral de um canal cognitivo deve levar em consideração a influência do desvanecimento no processo de sensoriamento.

Como sequência deste trabalho, pretende-se comparar o desempenho dos testes estatísticos em canais sujeitos a outros modelos de desvanecimento. Ademais, é importante verificar a viabilidade dos testes estatísticos como ferramenta para o sensoriamento espectral cooperativo, principalmente no tocante à complexidade computacional, que influencia o tempo de processamento.

REFERÊNCIAS

- [1] N. B. CARVALHO; A. CIDRONALI e R. GOMEZ-GARCIA. *White Space Communication Technologies*. 1st Edition, Cambridge University Press, 2015.
- [2] S. HAYKIN. *Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Vol. 23, No 2, p. 201-220, 2005.
- [3] F. B. S. de CARVALHO et al. *Signal Processing Applications for Cognitive Networks: State of the Art*. 22nd European Signal Processing Conference - EUSIPCO, pp. 840-844, 2014.
- [4] A. GHASEMI e E. S. SOUSA. *Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks: Requirements, Challenges and Design Trade-offs*. IEEE Communications Magazine. No 4, p. 32-39, 2008.
- [5] S. HAYKIN; D. J. THOMSON e J. H. REED. *Spectrum Sensing for Cognitive Radio*. Proceedings of the IEEE. Vol. 97, No 5, p. 849-877, 2009.
- [6] F. B. S. de CARVALHO ; W. T. A. LOPES e M. S. ALENCAR. *Análise dos Efeitos do Desvanecimento Sobre o Sensoriamento Espectral Cognitivo*. 16º Simpósio de Microondas e Optoeletrônica e 11º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (CBMag) - MOMAG 2014, 2014.
- [7] E. BIGLIERI et al. *Principles of Cognitive Radio*. Cambridge University Press, 2013.
- [8] R. TANDRA; S. M. MISHRA e A. SAHAI. *What is a Spectrum Hole and What Does It Take to Recognize One?* Proceedings of the IEEE. Vol. 97, No. 5, p. 824 - 848, 2009.
- [9] E. H. GISMALLA e E. ALSUSA. *On the Performance of Energy Detection Using Bartlett's Estimate for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Systems*. IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 60, Nº. 7, pp. 3394-3404, 2012.
- [10] L. LU et al. *Ten Years of Research in Spectrum Sensing and Sharing in Cognitive Radio*. Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking, doi:10.1186/1687-1499-2012-28, 2012.
- [11] E. AXELL et al. *Spectrum Sensing for Cognitive Radio: State-of-the-Art and Recent Advances*. IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 29, No. 3, pp. 101-116, 2012.
- [12] F. B. S. de CARVALHO et al. *A Spectrum Sensing Algorithm Based on Statistic Tests for Cognitive Networks Subject to Fading*. 22nd European Signal Processing Conference - EUSIPCO, pp. 850-854, 2014.
- [13] T. YÜCEK e H. ARSLAN. *A Survey of Spectrum Sensing Algorithms for Cognitive Radio Applications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 11 , Issue 1, pp 116 - 130, 2009.
- [14] R. UMAR e A. U. H. SHEIKH. *A Comparative Study of Spectrum Awareness Techniques for Cognitive Radio Oriented Wireless Networks*. Physical Communication, 23 pág., 2012.
- [15] F. B. S. de CARVALHO ; W. T. A. LOPES e M. S. ALENCAR. *Performance of Cognitive Spectrum Sensing Based on Energy Detector in Fading Channels*. International Conference on Communication, Management and Information Technology - ICCMIT 2015, Praga, Rep. Tcheca, 2015.
- [16] F. B. S. de CARVALHO ; W. T. A. LOPES e M. S. ALENCAR. *Analysis of Hybrid Techniques for Energy Consumption Optimization in Cognitive Wireless Sensor Networks*. V International Workshop on Telecommunications. INATEL – Santa Rita do Sapucaí, 2013.
- [17] H. WANG et al. *Spectrum Sensing in Cognitive Radio using Goodness Of Fit Testing*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 8, No. 11, pp. 5427 - 5430, 2009.
- [18] J. M. TARONGI e A. CAMPS. *Normality Analysis for RFI Detection in Microwave Radiometry*. Remote Sensing, No. 2, pp. 191 - 210, 2010.
- [19] S. ROSTAMI; K. ARSHAD e K. MOESSNER. *Order-Statistic Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio*. IEEE Communications Letters, Vol. 16, Nº. 5, pp. 592-595, 2012.
- [20] T. XU et al. *A Survey on Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks*. KSII Transactions on Internet and Information Systems, Vol. 8, No. 11, pp. 3751-3774, 2014.
- [21] J. S. ROCHA; J. E. P. FARIAS e M. S. ALENCAR. *Sensoriamento Espectral Baseado em Testes Estatísticos: Uma Revisão Bibliográfica*. Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação, Vol. 3, No. 2, pp. 20 - 27, 2013.
- [22] A. N. MODY. *Spectrum Sensing of the DTV in the Vicinity of the Video Carrier Using Higher Order Statistics*. IEEE Std. 802.22-07/0370r0, 2007.
- [23] A. SUBEKTİ et al. *A Blind Spectrum Sensing Method for DTV Signal Detection*. International Conference of Information and Communication Technology (ICICT), pp. 269-272, 2013.
- [24] A. SUBEKTİ; SUGIHARTONO e A. B. SUKSMONO. *Kurtosis Based Spectrum Sensing for Cognitive Wireless Cloud Computing Network*. International Conference on Cloud Computing and Social Networking (ICCCSN), pp. 1-4, 2012.
- [25] D. DENKOVSKI; V. ATANASOVSKI e L. GAVRILOVSKA. *GHOST: Efficient Goodness-Of-Fit HOS Testing Signal Detector for Cognitive Radio Networks*. IEEE ICC - Cognitive Radio and Networks Symposium, 2012.
- [26] J. S. ROCHA; J. E. P. FARIAS e M. S. ALENCAR. *Spectrum Sensing Based on Normality Test*. International Microwave and Optoelectronics Conference - IMOC 2013, Rio de Janeiro, 2013.
- [27] L. LU; H. C. WU e S. S. IYENGAR. *A Novel Robust Detection Algorithm for Spectrum Sensing*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 29, Nº 2, pp. 305-315, 2011.
- [28] A. SUBEKTİ et al. *A Jarque-Bera Test Based Spectrum Sensing for Cognitive Radio*. 8th International Conference on Telecommunication Systems Services and Applications (TSSA), pp. 1-4, 2014.
- [29] I. SAJAN e E. M. MANUEL. *Cooperative Jarque-Bera Statistic Based Spectrum Sensing Using MIMO Decision Fusion*. Fourth International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC), pp. 274-277, 2014.
- [30] A. GOLDSMITH. *Wireless Communications*. Cambridge University Press, New York, USA, 2005.
- [31] M. K. SIMON e M. S. ALOUINI. *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis*. John Wiley & Sons, Inc, 2000.
- [32] J. G. PROAKIS e M. SALEHI. *Digital Communications*. The McGraw-Hill Companies, 5th Ed., 2008.
- [33] M. D. YACOUB. *The $\alpha - \mu$ Distribution: A Physical Fading Model for the Stacy Distribution*. IEEE Transactions On Vehicular Technology, Vol. 56, No. 1, pp. 27 - 34, 2007.