

# Desempenho do Sensoriamento Espectral com Múltiplas Antenas sob Sinais Correlacionados

Lucas dos Santos Costa e Dayan Adionel Guimarães

**Resumo**—No sensoriamento espectral cooperativo centralizado com fusão de decisões, terminais de usuários secundários sensoriam uma banda do espectro de radiofrequência, enviando para um centro de fusão as decisões locais por eles tomadas por meio de estatísticas de teste locais. No centro de fusão é tomada a decisão global sobre o estado de ocupação da banda sensoriada a partir da combinação lógica das decisões locais recebidas. Neste artigo avalia-se o desempenho desta classe de sensoriamento espectral sob o efeito da correlação entre os sinais recebidos por terminais secundários equipados com múltiplas antenas. Embora se saiba que a existência de correlação entre os sinais recebidos por tais terminais possa degradar o desempenho do sensoriamento, os resultados aqui apresentados mostram que ela pode ser benéfica em diferentes níveis, a depender das estatísticas de teste locais utilizadas.

**Palavras-Chave**—Sensoriamento espectral, rádio cognitivo, fusão de decisões, correlação.

**Abstract**—In centralized cooperative spectrum sensing with decision fusion, secondary user terminals sense a radio frequency band, sending to a fusion center the local decisions made based on local test statistics. At the fusion center, the global decision on the occupation state of the sensed band is made based on the logical combination of the received local decisions. This article evaluates the performance of this class of spectrum sensing under the effect of correlation between the signals received by secondary terminals equipped with multiple antennas. Although it is known that the existence of correlation between signals received by such terminals can degrade the spectrum sensing performance, the results presented herein show that correlation can be beneficial at different levels, depending on the local test statistics used.

**Keywords**—Spectrum sensing, cognitive radio, decision fusion, received signals correlation.

## I. INTRODUÇÃO

O expressivo aumento da demanda por serviços de telecomunicações é o principal motivo do atual problema de escassez do espectro de radiofrequências [1]. Tal problema tende a se agravar com a chegada das redes de quinta geração (*fifth generation*, 5G) dos sistemas de comunicação e da Internet das coisas (*Internet of things*, IoT), já que ambas pretendem interconectar um número massivo de transceptores [2].

Na política de alocação fixa de espectro em vigor, os órgãos reguladores concedem o direito exclusivo de uso de determinadas bandas a usuários contratantes, chamados de usuários primários (*primary users*, PUs). Tal política, no entanto, tem sido considerada inadequada ao novo cenário das telecomunicações, o que motiva a busca por soluções que

minimizem o problema da escassez espectral tomando por base o fato de que o espectro de radiofrequências está sendo subutilizado, revelando bandas ociosas em certas localizações e horários [3]. A exploração da subutilização do espectro é vista como uma possível solução para o problema supracitado, uma vez que as faixas já contratadas poderiam ser compartilhadas com usuários secundários (*secondary users*, SUs), os quais teriam permissão para fazer uso oportunista das faixas primárias quando estas estiverem vagas.

O conceito de rádio cognitivo (*cognitive radio*, CR) [4] surgiu recentemente como um possível viabilizador da política de acesso dinâmico ao espectro (*dynamic spectrum access*, DSA). Dentre as várias funções cognitivas de um CR como dispositivo secundário está justamente a habilidade de identificar bandas ociosas para subsequente uso compartilhado com a rede primária. Tal identificação é realizada por meio do sensoriamento espectral [5]. A principal restrição é que os SUs devem operar de forma transparente às transmissões primárias, o que significa que as transmissões secundárias não devem causar qualquer tipo de interferência prejudicial às primárias, ou ao menos deve-se garantir que as interferências secundárias sejam mantidas abaixo de um patamar máximo preestabelecido pela rede primária.

O sensoriamento do espectro, quando realizado de forma independente por cada SU, está sujeito a degradações de desempenho provocadas por fenômenos tais como o desvanecimento multipercurso, o sombreamento do sinal primário e os terminais escondidos. O sensoriamento espectral cooperativo (*cooperative spectrum sensing*, CSS) reduz a influência desses fenômenos, explorando a diversidade espacial produzida pelos SUs em cooperação, elevando assim a acurácia na determinação do estado de ocupação da banda sensoriada [6].

No CSS centralizado com fusão de decisões, objeto do presente artigo, cada um dos SUs em cooperação colhe amostras do sinal primário e com elas forma uma estatística de teste com o propósito de decidir localmente sobre o estado de ocupação da banda sensoriada. As decisões dos SUs são então transmitidas, por um canal de controle, ao centro de fusão (*fusion center*, FC) da rede secundária, onde é tomada a decisão global a partir da combinação lógica das decisões locais recebidas dos SUs. Tal decisão global é então informada aos SUs, os quais, utilizando algum protocolo de acesso, fazem uso da banda considerada ociosa.

Dentre as várias estatísticas de teste existentes, destacam-se aquelas baseadas em detecção de energia, em propriedades cicloestacionárias do sinal primário, em filtragem casada [5], aquelas que utilizam os autovalores da matriz de covariância amostral (*sample covariance matrix*, SCM) do sinal

L. dos S. Costa e D. A. Guimarães, Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel, Santa Rita do Sapucaí, MG, e-mails: lucass@inatel.br e dayan@inatel.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01250.075413/2018-04, sob o projeto Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Inatel.

recebido [7], e outras mais recentes formadas por simples operações sobre os elementos da SCM, tais como o teste invariante de maior potência local (*locally most powerful invariant test*, LMPIT) [8], o teste baseado nos raios e centros dos círculos de Gerschgorin (*Gerschgorin radii and centers ratio*, GRCR) [9] e o teste baseado no índice de Gini (*Gini index detector*, GID) [10].

A correlação entre os sinais recebidos pelos SUs em cooperação, por exemplo aquela produzida pelo sombreamento, pode prejudicar o desempenho do sensoriamento cooperativo devido à diminuição do benefício obtido pela diversidade espacial promovida pelos SUs. Por outro lado, quando os SUs operam com múltiplas antenas, o que também gera diversidade espacial, mas em menor escala, os sinais recebidos pelas várias antenas apresentam algum nível de correlação devido à proximidade entre elas, potencialmente degradando o desempenho do sensoriamento. No entanto, há relatos em pesquisas que demonstram benefício da existência de correlação no desempenho do sensoriamento espectral [11], [12], o que motiva a análise deste fenômeno em diferentes técnicas de detecção.

Neste artigo analisa-se o desempenho do CSS com fusão de decisões, aplicando os detectores LMPIT, GRCR e GID nos SUs, considerando que estes estão sob efeito de correlação entre os sinais recebidos pelas suas múltiplas antenas de sensoriamento. A escolha dos detectores supracitados se deu em função da baixa complexidade<sup>1</sup>, aliada à robustez destes frente a variações nas potências do sinal recebido e do ruído de recepção, bem como do fato de serem cegos, ou seja, de não demandarem qualquer informação *a priori* sobre o sinal primário ou sobre a variância do ruído de recepção.

O restante do artigo está assim organizado: a Seção II descreve o modelo de sistema e estabelece a notação utilizada ao longo do texto. Resultados numéricos obtidos por simulação computacional são apresentados e discutidos na Seção III. A Seção IV conclui o trabalho e lista oportunidades de pesquisas relacionadas ao tema.

## II. MODELO DE SISTEMA

No sensoriamento espectral a tomada de decisões sobre o estado de ocupação da banda sensoriada pode ser considerada como um teste binário de hipótese, em que  $\mathcal{H}_0$  e  $\mathcal{H}_1$  são as hipóteses nula e alternativa que representam a ausência e a presença de sinal primário, respectivamente. Matematicamente, as  $N$  amostras complexas recebidas em cada uma das  $L$  antenas do  $m$ -ésimo SU,  $m = 1, 2, \dots, M$ , são armazenadas na matriz  $\mathbf{Y}_m \in \mathbb{C}^{L \times N}$ , dada por

$$\mathbf{Y}_m = (\mathbf{h}_m^T \mathbf{Q})^T \mathbf{x} + \mathbf{V}_m, \quad (1)$$

em que  $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ ,  $\mathbf{Q} \in \mathbb{R}^{L \times L}$ ,  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ ,  $\mathbf{V}_m \in \mathbb{C}^{L \times N}$  e  $T$  denota transposição matricial. A matriz  $\mathbf{V}_m \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_m^2 \mathbf{I})$  contém amostras complexas independentes e identicamente distribuídas (*independent and identically distributed*, i.i.d.) de ruído aditivo Gaussiano branco (*additive white Gaussian*

<sup>1</sup>Pelo que se sabe, estes são os detectores cegos e robustos de menor complexidade já desenvolvidos, adicionalmente possuindo a propriedade de taxa de falso alarme constante (*constant false alarm rate*, CFAR).

*noise*, AWGN) de média zero e variância  $\sigma_m^2$ , o qual representa o ruído térmico de recepção, sendo  $\mathbf{I}$  uma matriz identidade de ordem  $L$ . O vetor  $\mathbf{x}$  contém amostras i.i.d. Gaussianas de média nula e variância  $\sigma_x^2$  que representam o sinal primário e o vetor  $\mathbf{h}_m = \{h_{lm}\}$  contém amostras i.i.d. de ganhos dos canais de sensoriamento entre o transmissor primário e a  $l$ -ésima antena do  $m$ -ésimo SU,  $l = 1, 2, \dots, L$ . Tais amostras são Gaussianas complexas de média nula, com valores fixos durante cada intervalo de sensoriamento, modelando assim canais de sensoriamento com desvanecimento Rayleigh plano e lento. Considera-se, sem perda de generalidade, que os ganhos médios de potência dos canais de sensoriamento são unitários, ou seja  $\mathbb{E}\{|h_{lm}|^2\} = 1$ , garantindo que a potência média do sinal primário recebido nos SUs seja igual à potência média do sinal transmitido. A razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) média nos SUs é, então, dada por  $M\sigma_x^2 / \sum_{m=1}^M \sigma_m^2$ .

A matriz triangular superior  $\mathbf{Q}$  em (1), representada por

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1L-1} & q_{1L} \\ 0 & q_{22} & \cdots & q_{2L-1} & q_{2L} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & q_{L-1L-1} & q_{L-1L} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & q_{LL} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

resulta da decomposição de Cholesky [13] da matriz simétrica  $\mathbf{A}$  dada por

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \rho & \cdots & \rho^{|1-L+1|} & \rho^{|1-L|} \\ \rho & 1 & \cdots & \rho^{|2-L+1|} & \rho^{|2-L|} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \rho^{|L-1-1|} & \rho^{|L-1-2|} & \cdots & 1 & \rho \\ \rho^{|L-1|} & \rho^{|L-2|} & \cdots & \rho & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

tal que  $\mathbf{A} = \mathbf{Q}^T \mathbf{Q}$ , sendo  $0 \leq \rho \leq 1$  o coeficiente de correlação entre os sinais recebidos em diferentes pares de antenas de cada SU.

O elemento da  $i$ -ésima linha e  $j$ -ésima coluna da matriz  $\mathbf{A}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, L$ , é dado por

$$a_{ij} = \rho^{|i-j|}. \quad (4)$$

Por sua vez, o elemento da  $i$ -ésima linha e  $j$ -ésima coluna de  $\mathbf{Q}$  é calculado como

$$q_{ij} = \begin{cases} \sqrt{a_{ij}}, & i = 1, j = i, \\ a_{ij}/q_{ii}, & i = 1, j \neq i, \\ \sqrt{a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} q_{kj}^2}, & i > 1, j = i, \\ (a_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} q_{ki}q_{kj})/q_{ii}, & i > 1, j \neq i. \end{cases} \quad (5)$$

Ressalta-se que o modelo de correlação adotado não faz uso de dados como a frequência de operação, a distância entre as antenas e aqueles relacionados ao ambiente de propagação, tais como direções de chegada do sinal, dispersão temporal e em frequência, o que o torna simples e apropriado ao presente estudo por permitir analisar o desempenho do sensoriamento espectral sob qualquer nível de correlação dos sinais nas antenas dos SUs apenas por meio da variação de  $\rho$ .

De posse de  $\mathbf{Y}_m$ , o  $m$ -ésimo SU computa a matriz de covariância amostral  $\mathbf{R}_m \in \mathbb{C}^{L \times L}$  que, doravante removendo

o índice  $m$  para simplificação da notação, é dada por

$$\mathbf{R} = \frac{1}{N} \mathbf{Y} \mathbf{Y}^\dagger, \quad (6)$$

em que  $\dagger$  denota o conjugado transposto. Em seguida, cada SU forma a estatística de teste LMPIT, GRRCR ou GID [8]–[10], de acordo com

$$T_{\text{LMPIT}} = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L |c_{ij}|^2, \quad (7)$$

$$T_{\text{GRRCR}} = \frac{\sum_{i=1}^L \sum_{j \neq i}^L |r_{ij}|}{\sum_{i=1}^L r_{ii}}, \quad (8)$$

$$T_{\text{GID}} = \frac{\sum_{k=1}^{L^2} |r_k|}{\sum_{k=1}^{L^2} \sum_{u=i}^{L^2} |r_k - r_u|}. \quad (9)$$

Em (7),  $c_{ij}$  é o elemento da  $i$ -ésima linha e  $j$ -ésima coluna da matriz  $\mathbf{C} = \mathbf{D}^{-1/2} \mathbf{R} \mathbf{D}^{-1/2}$ , para  $i, j = 1, 2, \dots, L$ , em que  $\mathbf{D}$  é uma matriz diagonal com  $d_{ii} = r_{ii}$ , com  $r_{ii}$ ,  $i = 1, 2, \dots, L$ , denotando os elementos da diagonal principal de  $\mathbf{R}$ . Em (8), o numerador e o denominador são as somas dos raios e dos centros dos círculos de Gerschgorin associados à matriz  $\mathbf{R}$ , respectivamente, e  $r_{ij}$  é o elemento da  $i$ -ésima linha e  $j$ -ésima coluna de  $\mathbf{R}$ . Já em (9),  $r_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, L^2$ , é o  $k$ -ésimo elemento do vetor  $\mathbf{r}$  formado pelo empilhamento de todas as colunas da matriz  $\mathbf{R}$ .

A estatística de teste computada em cada SU é comparada com um limiar de decisão, gerando-se o conjunto de  $M$  decisões locais que são subsequentemente enviadas ao FC para combinação e decisão global. A combinação é feita via regras de decisão E (AND), OU (OR) e majoritária (MAJ). Na regra E o FC decide em favor de  $\mathcal{H}_1$  se todas as decisões recebidas forem em favor de  $\mathcal{H}_1$ . Na regra OU basta que uma decisão recebida seja em favor de  $\mathcal{H}_1$  para que o FC decida em favor de  $\mathcal{H}_1$ . Já na regra MAJ uma decisão final em favor de  $\mathcal{H}_1$  é tomada quando mais da metade das decisões recebidas são em favor de  $\mathcal{H}_1$ .

O desempenho do sensoriamento espectral é comumente avaliado por meio das probabilidades de detecção,  $P_d$ , e de falso alarme,  $P_{fa}$ , no FC.  $P_d = \Pr\{\text{decisão} = \mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_1\}$  é a probabilidade de se decidir em favor de  $\mathcal{H}_1$  dado que a banda sensoriada está de fato ocupada. Já  $P_{fa} = \Pr\{\text{decisão} = \mathcal{H}_1 | \mathcal{H}_0\}$  é a probabilidade de se decidir em favor de  $\mathcal{H}_1$  dado que a banda sensoriada está na verdade vaga.

É desejável ter altos valores de  $P_d$  e baixos valores de  $P_{fa}$ . A detecção do sinal primário com alta probabilidade traduz-se em redução da probabilidade de se causar interferência na rede primária devido a uma transmissão oportunista realizada em uma banda ocupada, mas erroneamente detectada como desocupada. Por outro lado, baixas probabilidades de falso alarme correspondem a pequenas chances de se considerar ocupada uma banda que de fato está ociosa, elevando as chances de uso oportunista do espectro, o que por sua vez eleva a vazão de dados na rede secundária.

### III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Esta seção apresenta, nas Figuras 1, 2 e 3, resultados de desempenho, em termos de curvas características de operação

do receptor (*receiver operating characteristic*, ROC), do CSS com fusão de decisões e com os detectores LMPIT, GRRCR e GID, sob diferentes valores do coeficiente de correlação  $\rho$  entre os sinais recebidos nas antenas de cada SU e para diferentes números de antenas  $L$  em cada SU, considerando as regras de fusão E, OU e MAJ. Cada ponto sobre uma curva ROC apresenta estimativas de  $P_{fa}$  versus  $P_d$  para um dado limiar de decisão  $\gamma$ , obtidas por simulação de Monte Carlo via software MATLAB, a partir de 30.000 eventos de sensoriamento espectral. Considerou-se uma rede primária com um único transmissor primário e uma rede secundária com  $M = 5$  SUs. A atividade do transmissor primário foi modelada como uma variável aleatória de Bernoulli, com 50% do tempo em estado ativo (para o cômputo de  $P_d$ ) e 50% em estado inativo (para o cômputo de  $P_{fa}$ ). A potência do transmissor primário foi considerada unitária e a SNR média nos SUs foi ajustada para  $-10$  dB, levando os SUs a operarem sob situação de ruído não uniforme. Especificamente, os SUs operaram com  $\text{SNR} = \{-12, -11, -10, -9, -8\}$  dB, cada um coletando  $N = 100$  amostras do sinal recebido em cada antena e a cada evento de sensoriamento, para o cômputo de cada estatística de teste sob análise.

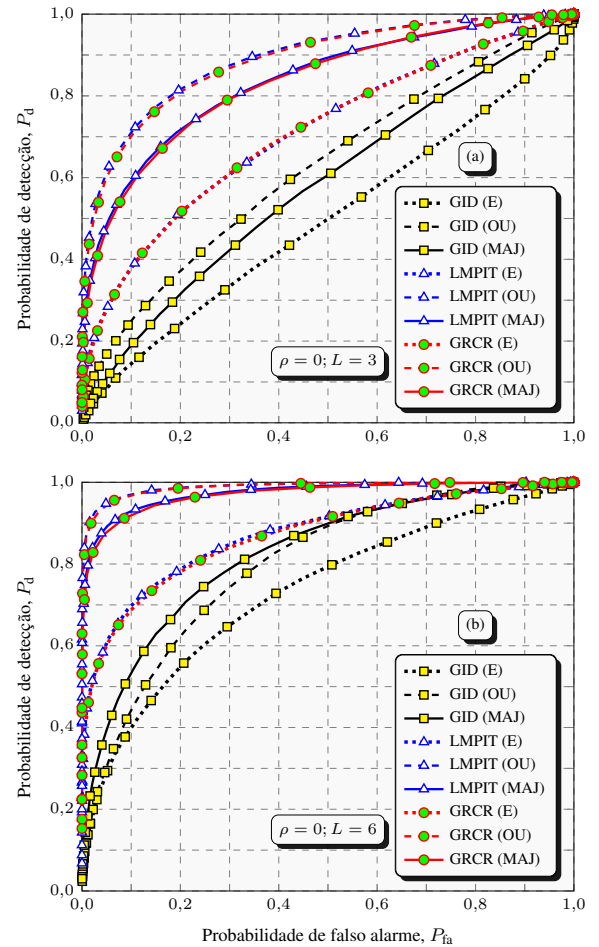


Fig. 1. Desempenho dos detectores LMPIT, GRRCR e GID para  $\rho = 0$ , com  $L = 3$  (a) e  $L = 6$  (b). Esta figura é melhor visualizada em cores.

Uma análise conjunta das Figuras 1, 2 e 3 revela o grau de sensibilidade dos detectores LMPIT, GRRCR e GID frente

às variações do nível de correlação e do número de antenas em cada SU: tanto o LMPIT quanto o GRCC se mostraram pouco sensíveis à variação de  $\rho$ , com esperada melhoria com aumento de  $L$  devido ao aumento da ordem da diversidade espacial promovida pelas múltiplas antenas e consequente aumento da ordem da SCM. O detector GID também obteve a melhoria esperada devido ao aumento de  $L$ , mas de forma menos expressiva que nos casos dos detectores LMPIT e GRCC. Surpreendentemente, o detector GID obteve significativa melhoria de desempenho com o aumento de  $\rho$ , situação já observada em outros casos publicados na literatura [11], [12], como já mencionado. Nota-se também que, de forma geral, independente do nível de correlação, do número de antenas ou do teste estatístico empregado, a regra OU alcançou melhor desempenho que as regras E e MAJ.

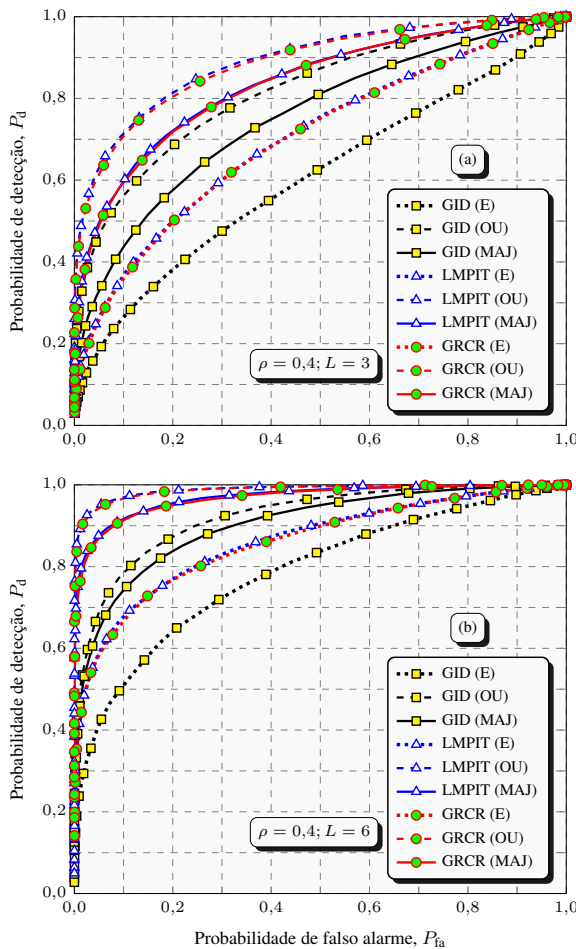


Fig. 2. Desempenho dos detectores LMPIT, GRCC e GID para  $\rho = 0,4$ , com  $L = 3$  (a) e  $L = 6$  (b). Esta figura é melhor visualizada em cores.

Uma análise um pouco mais detalhada mostra que, embora os detectores LMPIT e GRCC tenham se mostrado pouco sensíveis à variação de  $\rho$ , na Figura 3(b) percebe-se que houve ligeira queda de desempenho desses detectores com o aumento da correlação, em relação aos resultados mostrados nas Figuras 1(b) e 2(b).

O detector GID obteve o pior desempenho com  $\rho = 0$ . Neste caso, o aumento do número de antenas também não trouxe grandes melhorias de desempenho. Em outras palavras,

o aumento da diversidade espacial ao nível das antenas dos SUs não teve grande influência nos desempenhos do detector GID. Por outro lado, os resultados mostraram que se o nível de correlação for suficientemente alto o detector GID pode alcançar melhores desempenhos que os demais, mesmo com o menor número de antenas considerado,  $L = 3$ .

A maior correlação foi consideravelmente mais benéfica aos desempenhos do detector GID do que o aumento do número de antenas. Uma comparação entre a Figura 1(b), a Figura 2(a) e a Figura 3(a), por exemplo, mostra que com  $\rho = 0,8$  e  $L = 3$  o detector GID obteve melhores desempenhos que com  $\rho = 0$  e  $L = 6$ , e com  $\rho = 0,4$  e  $L = 6$ .

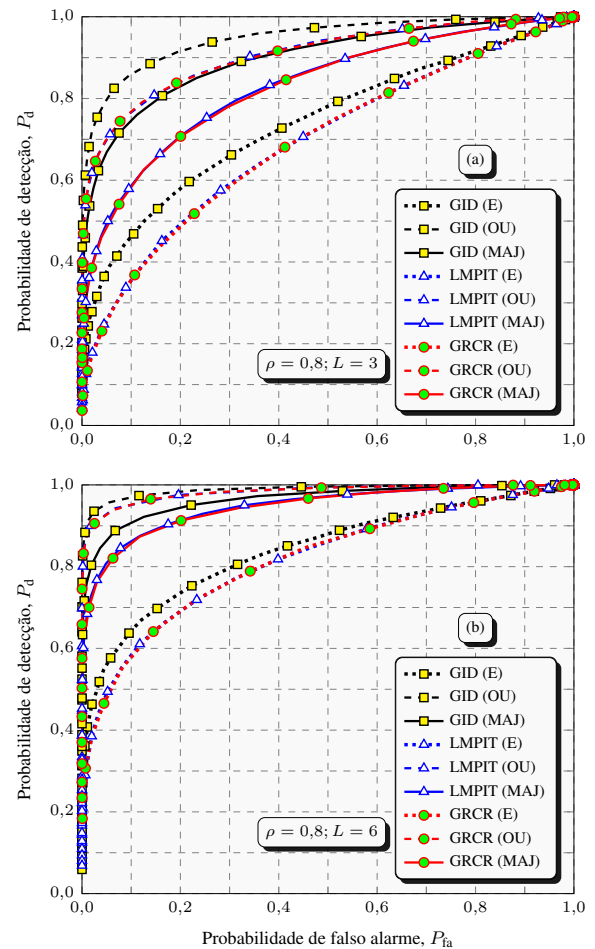


Fig. 3. Desempenho dos detectores LMPIT, GRCC e GID para  $\rho = 0,8$ , com  $L = 3$  (a) e  $L = 6$  (b). Esta figura é melhor visualizada em cores.

Levando em conta: i) que o detector GID tem desempenho melhorado à medida que surge, no canal de sensoriamento, percurso de propagação dominante (visada direta, por exemplo) entre o transmissor primário e os receptores secundários [10], e ii) que neste tipo de canal a variabilidade do desvanecimento multipercursos é reduzida em comparação à situação de inexistência de percurso dominante [14, p. 212], atribui-se a significativa melhoria de desempenho desse detector com o aumento de  $\rho$  a um certo tipo de combinação (soma) coerente dos sinais recebidos pelas múltiplas antenas, cujo efeito de redução de variabilidade é similar àquele observado quando há percurso de propagação dominante.

#### IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foram avaliados os desempenhos dos detectores LMPIT, GRCR e GID no sensoriamento espectral cooperativo centralizado, com fusão de decisões, sob o efeito da correlação dos sinais recebidos nas antenas dos rádios cognitivos secundários em cooperação. Os cenários de sensoriamento analisados envolveram a variação do nível de correlação e do número de antenas em cada rádio. Foram analisadas as regras de fusão de decisões OU, E e MAJ.

Os resultados mostraram que a regra OU obteve melhor desempenho em todos os cenários, independentemente do teste estatístico, do número de antenas ou do nível de correlação. Ao contrário do que se esperava, o aumento da correlação não prejudicou os desempenhos dos detectores na maioria dos casos, em outros possibilitando melhorias.

Os desempenhos dos detectores LMPIT e GRCR foram prejudicados em apenas um caso com o aumento da correlação. Já o detector GID surpreendentemente melhorou de forma significativa seu desempenho com o aumento da correlação. Observou-se ainda que o benefício da diversidade espacial pelo aumento do número de antenas por rádio ocorreu em todos os detectores, mas foi mais expressivo nos detectores LMPIT e GRCR.

As análises dos resultados mostraram que a existência de correlação entre os sinais recebidos pode ser benéfica, contribuindo para um melhor desempenho no sensoriamento espectral cooperativo em cenários práticos. Portanto, em uma análise mais completa poder-se-ia avaliar os desempenhos de outros testes estatísticos, bem como adotar cenários ainda mais realistas do ponto de vista de implementação. Por exemplo, poder-se-iam adotar diferentes níveis de correlação entre os rádios ou até mesmo admitir que os níveis de correlação possivelmente variam ao longo do tempo.

Como o detector GID foi desenvolvido para prover melhores desempenhos em canais de sensoriamento com percurso de propagação dominante entre o transmissor primário e os receptores secundários, acredita-se que a correlação entre os sinais recebidos por múltiplas antenas nestes canais possa beneficiar o detector GID ainda mais. Esta é uma oportunidade interessante de investigação em trabalhos futuros.

Ressaltam-se também outras oportunidades de novas investigações levando em conta modelos mais realistas: i) de correlação dos sinais recebidos por múltiplas antenas, ii) de variações temporais de potências de sinal e de ruído nos terminais secundários, iii) de variação temporal do fator de Rice do canal de sensoriamento, o qual governa a razão entre a intensidade de percurso de propagação dominante e aquela referente aos demais percursos, e iv) de erros nos canais de

controle que transportam as decisões dos terminais secundários para o centro de fusão.

Por fim, conjectura-se que, a não ser nos casos em que SUs estejam sob sombreamento correlacionado, as conclusões apresentadas anteriormente permaneceriam as mesmas se diferentes quantidades de terminais secundários fossem adotadas. Em outras palavras, conjectura-se que os desempenhos relativos obtidos com as estatísticas de teste adotadas permaneceriam os mesmos nestes casos. Especificamente, conclusões idênticas puderam ser feitas a partir de um teste com  $M = 3$  SUs.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Y. Arjoune and N. Kaabouch, "A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions," *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/1/126>
- [2] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, "What will 5G be?" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, Jun. 2014.
- [3] M. A. McHenry, P. A. Tenhula, D. McCloskey, D. A. Roberson, and C. S. Hood, "Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal," in *Proc. of the first int. workshop on Technology and policy for accessing spectrum*. ACM, 2006, p. 1.
- [4] F. Hu, B. Chen, and K. Zhu, "Full spectrum sharing in cognitive radio networks toward 5G: A survey," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15 754–15 776, 2018.
- [5] Y. Arjoune and N. Kaabouch, "A comprehensive survey on spectrum sensing in cognitive radio networks: Recent advances, new challenges, and future research directions," *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019.
- [6] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey," *Physical commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, 2011.
- [7] B. Nadler, F. Penna, and R. Garello, "Performance of eigenvalue-based signal detectors with known and unknown noise level," in *Commun. (ICC), 2011 IEEE Int. Conf. on*. IEEE, 2011, pp. 1–5.
- [8] D. Ramirez, J. Via, I. Santamaria, and L. L. Scharf, "Locally most powerful invariant tests for correlation and sphericity of gaussian vectors," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 4, pp. 2128–2141, April 2013.
- [9] D. A. Guimarães, "Robust test statistic for cooperative spectrum sensing based on the Gerschgorin circle theorem," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 2445–2456, 2018.
- [10] —, "Gini index inspired robust detector for spectrum sensing over Ricean channels," *Electronics Lett.*, vol. 55, pp. 713–714(1), June 2019. [Online]. Available: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el.2018.7375>
- [11] V. Upadhyay and D. Jaliyal, "Blind non-parametric statistics for multichannel detection based on statistical covariances," in *IEEE 14th Int. Symp. on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"(WoWMoM)*, 2013, pp. 1–6.
- [12] Y. Kanemiyo, Y. Tsukamoto, H. Nakabayashi, and S. Kozono, "MIMO channel model with propagation mechanism and the properties of correlation and eigenvalue in mobile environments," *Int. J. of Antennas and Propagation*, vol. 2012, 2012.
- [13] A. Krishnamoorthy and D. Menon, "Matrix inversion using Cholesky decomposition," in *2013 Signal Process.: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applicat. (SPA)*, Sep. 2013, pp. 70–72.
- [14] D. A. Guimarães, *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with VisSim/Comm*. Springer-Verlag, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-01359-1.