

Sensoriamento Espectral com Receptor por Conversão Direta sob Ruído Impulsivo

Luiz Gustavo Barros Guedes e Dayan Adionel Guimarães

Resumo—O ruído impulsivo pode ser extremamente prejudicial à operação de sistemas eletrônicos em geral, e de sistemas de comunicação em particular, como é o caso dos sensores de espectro em redes de rádios cognitivos. O artigo avalia o desempenho do sensoriamento espectral sob influência de ruído impulsivo. Dois receptores são comparados: um receptor convencional, que não considera aspectos de implementação prática, e um receptor por conversão direta (*direct-conversion receiver*, DCR) que leva em conta tais aspectos. Cinco estatísticas de teste são comparadas nesse cenário. Demonstra-se que o receptor convencional é significativamente sensível ao ruído impulsivo, enquanto o DCR possui inerente imunidade a esse ruído. Demonstra-se também que as diferentes estatísticas de teste apresentam diferentes graus de robustez frente ao ruído impulsivo.

Palavras-Chave—Sensoriamento espectral, ruído impulsivo, receptor por conversão direta, ED, GRRCR, GID, PRIDE, LMPIT.

Abstract—Impulsive noise can be extremely harmful to the operation of electronic systems in general, and of communication systems in particular, as is the case of spectrum sensors in cognitive radio networks. The article evaluates the performance of spectrum sensing when impaired by impulsive noise. Two receivers are compared: a conventional one, which does not consider practical implementation aspects, and a direct-conversion receiver (DCR), which takes these aspects into account. Five test statistics are compared in this scenario. Results show that the conventional receiver is significantly sensitive to impulsive noise, whereas the DCR has inherent immunity to this noise. It is also shown that the different test statistics have different degrees of robustness against impulsive noise.

Keywords—Spectrum sensing, impulsive noise, direct-conversion receiver, ED, GRRCR, GID, PRIDE, LMPIT.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento da procura por novos serviços de telecomunicações sem fio, evidencia-se a necessidade de se acomodar, no espectro de radiofrequência (*radio frequency*, RF), a massiva quantidade de transmissores e receptores prevista para as futuras redes de comunicação [1]. Contudo, atualmente, a atribuição de banda é regida por uma política de alocação fixa que destina uma determinada faixa espectral apenas ao usuário contratante, denominado usuário primário (*primary user*, PU). Enquanto o PU estiver se comunicando, tal faixa está em uso. Porém, ao cessar a comunicação, essa faixa torna-se momentaneamente inutilizada e nenhum outro usuário pode dela fazer uso compartilhado, em caráter secundário.

Luiz Gustavo Barros Guedes, Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: luiz.guedes@mtel.inatel.br; Dayan Adionel Guimarães, Inatel, Santa Rita do Sapucaí-MG, e-mail: dayan@inatel.br. Este trabalho foi financiado em parte pela RNP, com recursos do MCTIC, processo N° 01245.010604/2020-14, sob o projeto Brasil 6G do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, e em parte pelo CNPq e pela FAPEMIG.

Uma possível solução consiste em adotar como alternativa uma nova política, de modo que haja uma flexibilização do uso das faixas espectrais entre os PUs e os chamados usuários secundários (*secondary user*, SU), que não são licenciados [2]. Estes deverão ser capazes de observar oportunidades para utilização compartilhada de banda, de maneira sobreposta ou não às transmissões dos PUs. A tecnologia correspondente à nova política é denominada compartilhamento dinâmico do espectro (*dynamic spectrum sharing*, DSS) ou acesso dinâmico ao espectro (*dynamic spectrum access*, DSA) [3].

O rádio cognitivo (*cognitive radio*, CR) [4] é um tipo de dispositivo que se adequa ao contexto de DSA, por ser uma extensão do rádio definido por *software* (*software defined radio*, SDR) capaz de adaptar suas características de transmissão, por exemplo, de acordo com o meio em que está inserido. Uma das funções cognitivas desse dispositivo emprega a técnica de sensoriamento espectral, a qual visa monitorar o espectro de frequências a fim de encontrar oportunidades de transmissão em bandas licenciadas sem causar interferência danosa aos demais usuários [5].

O sensoriamento espectral pode ser realizado de forma isolada e independente por cada SU, ou pode se valer de cooperação entre vários SUs. No entanto, o desvanecimento multipercurso [6] provocado do sinal primário, bem como possíveis áreas de sombra de cobertura da rede primária, podem fazer com que o sensoriamento espectral isolado, feito individualmente pelos SUs, sofra degradação, sendo preterido em relação ao sensoriamento cooperativo (*cooperative spectrum sensing*, CSS), feito por um conjunto de SUs [5].

Além dos fatores relacionados à propagação do sinal de RF, sabe-se que ruído e interferências também degradam o desempenho do sensoriamento espectral. Em se tratando do ruído, a sua forma onipresente é o ruído térmico gerado nos próprios receptores. No entanto, em certos ambientes, também se faz presente o ruído impulsivo que, como o próprio nome sugere, corresponde a sinais esporádicos de curta duração e elevada intensidade. Por outro lado, a susceptibilidade de um sensor de espectro a tais efeitos de degradação, especialmente ao ruído impulsivo, depende da construção do receptor. Na literatura referente ao sensoriamento espectral, é convencional o uso de um modelo de receptor que não leva em conta o típico processamento do sinal recebido realizado em receptores reais. Sendo assim, torna-se interessante avaliar o desempenho de receptores com arquiteturas mais realistas ao detectar um sinal contaminado com ruído impulsivo.

A. Trabalhos Relacionados

Em [7] é proposto um modelo de receptor por conversão direta que considera aspectos realistas em sua implementação. A justificativa para tal trabalho foi a ausência de pesquisas que apontam as possíveis influências impostas pelo circuito de recepção na avaliação de desempenho de sistemas destinados ao sensoriamento espectral, especificamente no caso do CSS com fusão de dados.

O modelo proposto em [7] foi aperfeiçoado em [8], almejando-se melhor adequá-lo às estruturas de receptor por conversão direta comumente presentes em SDRs reais. Além disso, buscou-se aprimorar as características do modelo do canal de sensoriamento, deixando-o mais flexível por meio de um canal com fator de Rice [6, p. 212] aleatório, bem como níveis de ruído e de sinal recebidos variantes no tempo. Destaca-se também a ausência de normalizações de potência do ruído e do sinal, assim como no ganho do canal, cuja presença, em [7], provocou mudanças indesejáveis nas estatísticas obtidas após um longo intervalo de observação.

Nos artigos mais recentes que propõem avaliação de desempenho do sensoriamento espectral sob ruído impulsivo, não se faz menção ao uso de um receptor que considere aspectos realistas em sua implementação. Cita-se [9] - [10] como exemplos de estudos que utilizam um modelo de ruído não-Gaussiano para caracterizar o ruído impulsivo, levando em conta um receptor convencional.

Em [11] faz-se a análise de desempenho das estatísticas de teste baseadas em autovalores sob duas abordagens. A primeira considera os efeitos provocados pela presença de ruído impulsivo e a segunda avalia o desempenho do sistema utilizando tanto o receptor por conversão direta (*direct-conversion receiver*, DCR) proposto em [7], quanto o receptor convencional.

B. Contribuições e Organização do Artigo

Neste artigo, avalia-se o desempenho de um sistema destinado a CSS com fusão de dados, sob influência de ruído impulsivo, usando o receptor convencional e o DCR aprimorado de [8] para o detector de energia (*energy detector*, ED), o detector pela razão entre centros e raios de Gerschgorin (*Gerschgorin radii and centers ratio*, GRCR), os detectores baseados no índice de Gini (*Gini index detector*, GID) e no índice de Pietra-Ricci (*Pietra-Ricci index detector*, PRIDe) e o detector baseado no teste local invariante (*locally most powerful invariant test*, LMPIT). O contexto no qual se insere a presente análise, como motivação, se refere a uma rede cognitiva acústica subaquática (*underwater cognitive acoustic network*, UCAN) [12], na qual o ruído impulsivo é gerado por um crustáceo conhecido como camarão-de-estalo (*snapping shrimp*) [13].

As demais seções do artigo estão organizadas da seguinte forma: na Seção II, é apresentado o modelo de ruído impulsivo. Na Seção III, apresenta-se o modelo de sinal no receptor convencional, enquanto que, na Seção IV, descreve-se o modelo de DCR. A Seção V contém as estatísticas de teste consideradas no trabalho. Resultados numéricos e discussões

são apresentados na Seção VI. A Seção VII reúne as principais conclusões do artigo.

II. MODELO DE RUÍDO IMPULSIVO

O ruído impulsivo é um sinal aleatório variante no tempo que, esporadicamente, apresenta níveis elevados de amplitude de curta duração.

Os sistemas de sensoriamento espectral que operam em redes cognitivas subaquáticas [12] estão sujeitos ao ruído impulsivo gerado pelo camarão-de-estalo [13], [14]. Devido à movimentação rápida de suas garras em formato de pinça, este crustáceo gera um jato de água de alta velocidade, causando uma abrupta redução de pressão da água com consequente formação e ruptura de bolhas de cavitação. Tal fenômeno gera ruído acústico de grande intensidade, sendo suficiente para causar distúrbios nas comunicações subaquáticas [14].

A distribuição Alfa-Estável Simétrica (*Symmetric α -Stable*, S α S) [15], [16] é comumente utilizada para modelar o ruído impulsivo gerado pelo camarão-de-estalo, embora existam outras distribuições supostamente mais adequadas [17]. Trata-se de uma particularização da distribuição Alfa-Estável que não apresenta função densidade de probabilidade (*probability density function*, PDF) em forma fechada para qualquer parametrização. Uma variável aleatória Alfa-Estável pode ser descrita por sua função característica [18], dada por

$$\Phi(\omega) = \exp \{ j\delta\omega - \gamma|\omega|^\alpha [1 + j\beta \text{sign}(\omega)\kappa(\omega, \alpha)] \}, \quad (1)$$

em que $\kappa(\omega, \alpha) = \tan(\pi\alpha/2)$, para $\alpha \neq 1$, ou $\kappa(\omega, \alpha) = (2/\pi)\log|\omega|$, para $\alpha = 1$ e $\text{sign}(\cdot)$ corresponde à função sinal. O parâmetro $0 < \alpha \leq 2$ é o expoente característico que controla o grau de impulsividade do ruído: quanto menor o seu valor, maior será a impulsividade. Para $\alpha = 2$, a PDF S α S se torna Gaussiana. O parâmetro $-1 \leq \beta \leq 1$ governa a simetria da PDF. O parâmetro $\gamma > 0$ associa-se à dispersão da PDF, controlando, portanto, a intensidade do ruído S α S, com efeito similar ao da variância. Finalmente, tem-se o parâmetro de localização $-\infty < \delta < \infty$.

Neste artigo, considera-se $\beta = 0$ e $\delta = 0$, pois a distribuição do ruído impulsivo de interesse é simétrica em torno de sua média nula, transformando (1) na função característica da distribuição S α S. A Fig. 1 mostra PDFs S α S para diferentes α , $\delta = 0$ e $\gamma = 0,008$, obtidas pela transformada de Fourier inversa da função característica.

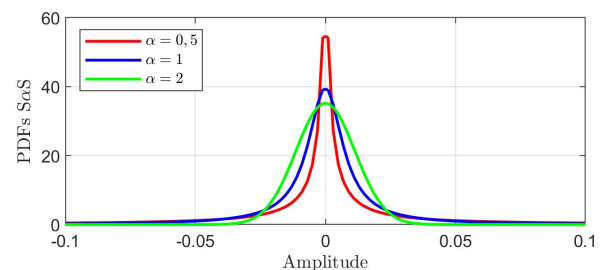


Fig. 1: PDFs S α S para $\delta = 0$ e $\gamma = 0,008$.

III. MODELO CONVENCIONAL

No CSS com fusão de dados, o centro de fusão (*fusion center*, FC) decide sobre o estado de ocupação da banda sensoriada por meio de uma estatística de teste formada a partir das n amostras coletadas por cada um dos m SUs em cooperação. Tais amostras são oriundas dos sinais transmitidos por s PUs. Matematicamente, tem-se

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} + \mathbf{W}, \quad (2)$$

em que $\mathbf{Y} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ é a matriz que contém elementos complexos correspondentes às amostras presentes no FC. As n amostras complexas associadas a cada um dos s PUs arranjam-se na matriz $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{s \times n}$. A matriz de canal $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{m \times s}$ apresenta elementos que correspondem aos ganhos do canal entre o j -ésimo PU e o i -ésimo SU [5]. A parcela de ruído no sistema em questão inclui duas componentes: \mathbf{V} e \mathbf{W} . A matriz $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ modela o ruído aditivo Gaussiano branco (*additive white Gaussian noise*, AWGN) nos SUs. Já a matriz $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{m \times n}$ modela o ruído impulsivo presentes nos rádios, contendo elementos com distribuição $S\alpha S$.

Neste modelo, considera-se que não há influência dos circuitos de recepção no processamento das amostras.

IV. MODELO PARA RECEPTOR POR CONVERSÃO DIRETA

O modelo de sinal para o DCR proposto em [8] foi baseado na estrutura de um típico receptor por conversão direta, cujos detalhes foram aqui omitidos buscando concisão. Tal estrutura deu origem ao modelo apresentado na Fig. 2, o qual foi utilizado como base para simulação computacional.

Cada linha da matriz \mathbf{Y} passa por um filtro de média móvel (*moving-average*, MA) com resposta ao impulso de comprimento L , com o objetivo de modelar os efeitos de filtragem nos sinais transmitidos e recebidos. As amostras de saída de cada um dos filtros são somadas às amostras de DC-*offset* residuais, que formam uma matriz cujos elementos de uma mesma linha são iguais e os de linhas diferentes são independentes e identicamente distribuídos. O controle automático de ganho (*automatic gain control*, AGC) combina os estágios de amplificação promovidos do receptor. As amostras então são digitalizadas pelos SUs para passarem pelo branqueamento. Este processamento é sensível à baixa resolução, sendo necessário ser feito em alta resolução. Após isso, as amostras já branqueadas passam por um novo processo de quantização com baixa resolução para transmissão de dados para o FC, assim ocupando uma banda menor no canal de controle. Considera-se uma transmissão livre de erros impostos pelo canal de controle.

V. ESTATÍSTICAS DE TESTE

O sensoriamento espectral corresponde a um teste de hipótese binário no qual a hipótese nula \mathcal{H}_0 está associada à ausência do sinal primário na banda sensoriada e a hipótese alternativa \mathcal{H}_1 associa-se à presença do sinal primário. O teste é realizado comparando-se uma estatística de teste T com um limiar de decisão λ . Se $T > \lambda$, rejeita-se a hipótese \mathcal{H}_0 . Caso contrário, aceita-se \mathcal{H}_0 .

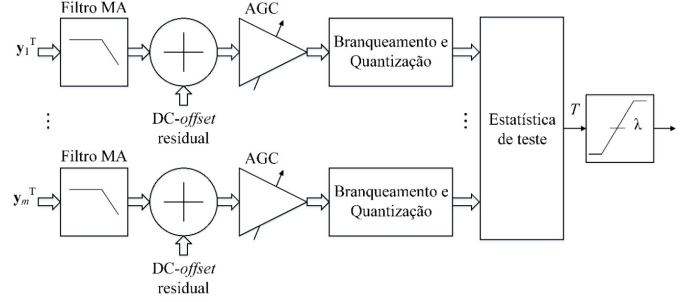


Fig. 2: Modelo de receptor do FC baseado no receptor por conversão direta.

O desempenho do sensoriamento espectral é comumente medido pela probabilidade de detecção, P_d , e pela probabilidade de falso alarme, P_{fa} [5]. A P_d é a probabilidade de se considerar presente o sinal primário na banda sensoriada, estando ele de fato presente, enquanto P_{fa} é a probabilidade de se considerar tal sinal presente, estando ele, na verdade, ausente.

A estatística de teste do ED, considerando CSS com fusão de dados no modelo convencional, é dada por [5]

$$T_{ED} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} \sum_{j=1}^n |y_{ij}|^2, \quad (3)$$

em que σ_i^2 é a variância do ruído Gaussiano no i -ésimo SU e y_{ij} denota a j -ésima amostra coletada pelo i -ésimo SU.

Considerando o DCR, a estatística de teste do ED se torna

$$T_{ED_{dcr}} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i^2 \sigma_i^2} \sum_{j=1}^n |y_{ij}|^2, \quad (4)$$

sendo g_i a variável correspondente à composição dos ganhos estabelecidos pelo AGC no i -ésimo SU [8].

A estatística de teste do detector GRCR é dada por [19],

$$T_{GRCR} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m |r_{ij}|}{\sum_{i=1}^m r_{ii}}, \quad (5)$$

com r_{ij} sendo o elemento da i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz de covariância amostral (*sample covariance matrix*, SCM) computada no FC por meio de

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

em que \dagger corresponde à operação de transposição conjugada.

As estatísticas de teste dos detectores GID [20] e PRIDE [21] são dadas respectivamente por

$$T_{GID} = \frac{\sum_{i=1}^{m^2} |r_i|}{\sum_{i=1}^{m^2} \sum_{j=1}^{m^2} |r_i - r_j|} \quad (7)$$

e

$$T_{PRIDE} = \frac{\sum_{i=1}^{m^2} |r_i|}{\sum_{i=1}^{m^2} |r_i - \bar{r}|}, \quad (8)$$

em que r_i é o i -ésimo elemento do vetor \mathbf{r} , formado pelo empilhamento das colunas de \mathbf{R} , e $\bar{r} = (1/m^2) \sum_{i=1}^{m^2} r_i$.

Por fim, para o detector LMPIT [22] tem-se

$$T_{LMPIT} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |c_{ij}|^2, \quad (9)$$

em que c_{ij} é o elemento da i -ésima linha e j -ésima coluna da matriz $\mathbf{C} = \mathbf{E}^{-1/2} \mathbf{R} \mathbf{E}^{-1/2}$, sendo \mathbf{E} uma matriz diagonal cujos elementos são iguais aos da diagonal principal da SCM.

De acordo com [8], os detectores GRRCR, GID, PRIDe e LMPIT apresentam uma menor complexidade computacional e, em sendo cegos, não necessitam de nenhuma informação a respeito do ruído, ao contrário do ED que precisa. São também considerados detectores robustos por apresentarem pequena ou nenhuma mudança em seu desempenho com a variação temporal do ruído, do sinal recebido ou de ambos [5].

VI. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, são apresentados resultados de simulação computacional do CSS modelado convencionalmente e por meio do modelo DCR, na ausência e na presença de ruído impulsivo.

Os resultados são apresentados em termos da curva característica de operação do receptor (*receiver operating characteristic*, ROC) que mostra P_d versus P_{fa} , para os detectores ED, GRRCR, GID, PRIDe e LMPIT. Inseriu-se também a área sob a curva (*area under the curve*, AUC) ROC como métrica auxiliar. Cada ponto sobre uma ROC foi gerado a partir de 50000 eventos de Monte Carlo, usando o software Matlab, cujo código está disponível em [23].

Considerou-se um transmissor PU e $m = 6$ sensores de espectro, cada um deles efetuando a coleta de $n = 300$ amostras complexas do sinal recebido em cada intervalo de sensoriamento, corrompidas ou não corrompidas com ruído impulsivo, de acordo com a análise desejada.

Adotou-se $-11,42$ dB como valor de razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR) de referência para as simulações, a fim de se verificar de maneira mais adequada a influência da impulsividade no desempenho, uma vez que esse valor, na situação de ausência de ruído impulsivo, faz com que a ROC do detector PRIDe alcance $P_{fa} = 0,1$ e $P_d = 0,9$ no modelo de receptor convencional. Escolheu-se como referência o detector PRIDe, pois ele apresenta o melhor desempenho dentre os detectores estudados, quando usado o receptor convencional.

O sinal primário modela as flutuações da envoltória de um sinal modulado e filtrado sendo, portanto, variáveis aleatórias Gaussianas complexas com média zero e variância dependente da SNR média presente na entrada de cada SU. Para atender as características de processamento impostas pelo DCR, os demais parâmetros são: relação sinal-DC-offset (*signal-to-DC-offset ratio*, SDCR) igual a 5 dB; número de níveis de quantização (considerando a baixa resolução), $N_q = 8$; fator de ultrapassagem (*overdrive factor*, f_{od}) do ganho do AGC, que controla o nível da amostra na entrada do conversor analógico-digital e seu possível ceifamento, igual a 1,2; resposta ao impulso do filtro MA com comprimento $L = 30$.

Os níveis de sinal recebido e de ruído são variáveis e o fator de Rice foi considerado como uma variável aleatória Gaussiana de média $\mu_K = 1,88$ dB e desvio padrão $\sigma_K = 4,13$ dB [8]. Por fim, os parâmetros da distribuição S α S foram configurados por meio da estimação dos parâmetros de dois ruídos reais de camarão-de-estalo, obtidos por aquisição de dados via hidrofones, com $\alpha = 1,577$ e $\alpha = 1,795$, e com fator de escala ajustado em $\gamma = 0,1$. O ruído S α S foi gerado via comando `random` do Matlab.

A Fig. 3 mostra as ROCs e AUCs dos modelos convencional e DCR na ausência de ruído impulsivo. Percebe-se uma discreta degradação no desempenho do segundo em relação ao primeiro, pois o modelo convencional superestima o desempenho do sensoriamento espectral sob presença apenas de ruído branco [8], que é o caso em questão. O modelo DCR é mais realista, de modo que os efeitos provocados por ele são evidenciados nos gráficos: para a mesma P_{fa} , tem-se menor P_d . De forma similar, analisando-se a AUC, verificam-se valores menores para todos os detectores sob o modelo DCR. Dentre todos os detectores, destaca-se discretamente o PRIDe.

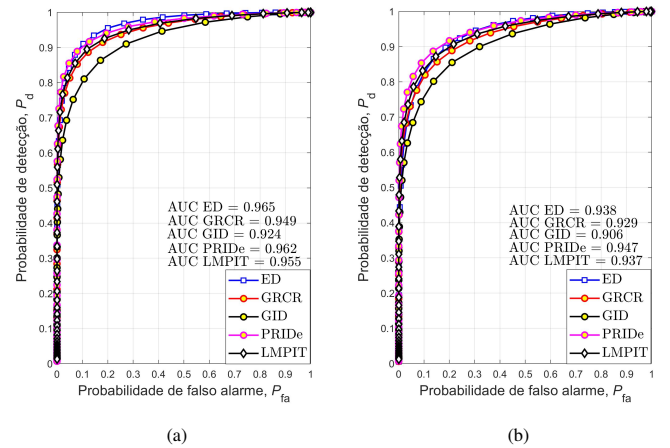


Fig. 3: P_d versus P_{fa} na ausência de ruído impulsivo: modelo convencional (3a), modelo DCR (3b).

Por meio da Fig. 4 nota-se que é significativa a robustez frente ao ruído impulsivo ($\alpha = 1,577$) proporcionada pelo modelo DCR, exceto no caso do ED, o qual apresenta o pior desempenho sob ambos os modelos, tendo sua ROC sobre a linha de não-discriminação ($P_d = P_{fa}$). Em outras palavras, os detectores GRRCR, PRIDe, GID e LMPIT são bastante robustos frente ao ruído impulsivo graças à inerente robustez do modelo DCR. A influência do ruído impulsivo é bem mais perceptível no modelo convencional. Novamente, destaca-se o detector PRIDe sob o modelo DCR, o que confere a esse detector grande atratividade para implementação prática.

Na Fig. 5, tem-se uma condição de impulsividade menor do que aquela considerada na Fig. 4, posto que o α aumentou de 1,577 na Fig. 4 para 1,795 na Fig. 5. Uma redução na impulsividade implica em uma situação mais próxima à ausência de ruído impulsivo, o que se pode notar pela similaridade entre as curvas da Fig. 5b em relação à Fig. 3b. O ED continua sofrendo significativa degradação ao ter sua ROC posicionada sobre a linha de não-discriminação. O GID apresentou uma melhora sob o modelo DCR, quando comparado ao convencional. Mais uma vez, destaca-se o desempenho superior do detector PRIDe, agora, sob ambos os modelos.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o desempenho do sensoriamento espectral cooperativo com fusão de dados, sob ruído Gaussiano

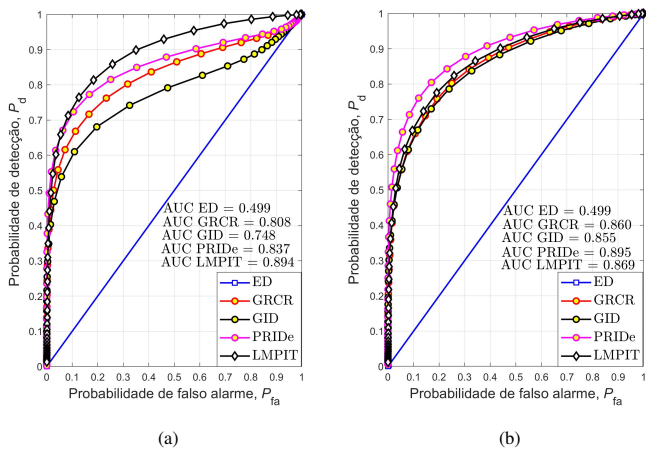


Fig. 4: P_d versus P_{fa} na presença de ruído impulsivo com $\alpha = 1,577$: modelo convencional (4a), modelo DCR (4b).

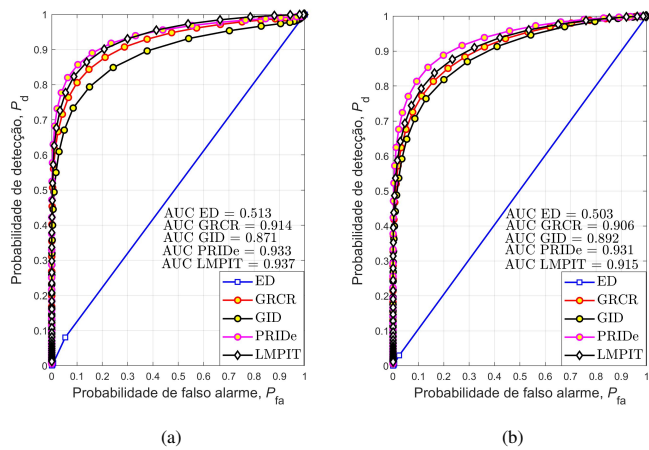


Fig. 5: P_d versus P_{fa} na presença de ruído impulsivo com $\alpha = 1,795$: modelo convencional (5a), modelo DCR (5b).

e sob ruído Gaussiano mais ruído impulsivo S α S. Foram comparados o receptor convencional e o DCR, com os detectores ED, GRCR, GID, PRIDe e LMPIT. Os resultados alcançados sob diferentes impulsividades revelaram que, à medida que o ruído se torna mais impulsivo, o DCR apresenta maior robustez frente ao ruído impulsivo. Na presença de apenas ruído Gaussiano, o modelo convencional, por não levar em conta aspectos realistas em sua implementação, proporciona um desempenho superestimado. Em todos os resultados, destacou-se o atrativo desempenho do detector PRIDe e o desempenho sofrível do detector ED sob ruído impulsivo.

AGRADECIMENTOS

Ao Capitão-de-Mar-e-Guerra RM1-T, Marcos Vinícius da Silva Simões, Grupo Acústica Submarina, Marinha do Brasil, ref. Ofício n° 239/IEAPM-MB, e ao Prof. Dr. José Santo Guiscafré Panaro, Universidade Federal Fluminense (UFFRJ), pela disponibilização dos arquivos de áudio gravados referentes ao ruído de camarão-de-estalo.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Matimikko-Blue, S. Yrjölä, and P. Ahokangas, "Spectrum management in the 6G era: The role of regulation and spectrum sharing," in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [2] Federal Communications Commission, FCC, *Spectrum Policy Task Force Report*. FCC, 2002. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=p9MQtwAACAAJ>.
- [3] D. A. Guimarães, E. J. T. Pereira, A. M. Alberti, and J. V. Moreira, "Design guidelines for database-driven Internet of Things-enabled dynamic spectrum access," *Sensors*, vol. 21, no. 9, 2021, doi: 10.3390/s21093194.
- [4] J. Mitola and G. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, 1999.
- [5] D. A. Guimarães, "Spectrum sensing: A tutorial," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 37, no. 1, pp. 10–29, Feb. 2022. [Online]. Available: <https://jcis.sbrt.org.br/jcis/article/view/811>
- [6] —, *Digital Transmission: A Simulation-Aided Introduction with Vis-Sim/Comm*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Verlag, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-01359-1.
- [7] D. A. Guimaraes and R. A. A. de Souza, "Implementation-oriented model for centralized data-fusion cooperative spectrum sensing," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 11, pp. 1804–1807, 2012.
- [8] D. A. Guimarães and E. J. T. Pereira, "Influence of a direct-conversion receiver model on the performance of detectors for spectrum sensing," *Journal of Communication and Information Systems*, vol. 36, no. 1, p. 173–183, Nov. 2021. [Online]. Available: <https://jcis.sbrt.org.br/jcis/article/view/789>
- [9] A. Halaki, C. Manohar, S. Gurugopinath, and R. Muralishankar, "Entropy-based spectrum sensing under symmetric alpha stable impulsive noise," in *2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 2019, pp. 140–145.
- [10] A. Mehrabian, M. Sabbaghian, and H. Yanikomeroglu, "Spectrum sensing for symmetric α -stable noise model with convolutional neural networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 8, pp. 5121–5135, 2021.
- [11] D. A. Guimarães, R. A. A. De Souza, and A. N. Barreto, "Performance of cooperative eigenvalue spectrum sensing with a realistic receiver model under impulsive noise," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 2, no. 1, pp. 46–69, 2013. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2224-2708/2/1/46>
- [12] M. Chandar, "An underwater cognitive acoustic network strategy for efficient spectrum utilization," *Applied Acoustics*, 01 2021.
- [13] D. Lohse, B. Schmitz, and M. Versluis, "Snapping shrimp make flashing bubbles," *Nature*, vol. 413, pp. 477–8, 11 2001.
- [14] Y. Yang, S. Qin, C. Di, J. Qin, D. Wu, and J. Zhao, "Research on claw motion characteristics and cavitation bubbles of snapping shrimp," *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2020, p. 6585729, Sep. 2020.
- [15] P. Georgiou, P. Tsakalides, and C. Kyriakakis, "Alpha-stable modeling of noise and robust time-delay estimation in the presence of impulsive noise," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 1, no. 3, pp. 291–301, 1999.
- [16] T. Shongwe, A. J. H. Vinck, and H. C. Ferreira, "A study on impulse noise and its models," *SAIEE Africa Research Journal*, vol. 106, no. 3, pp. 119–131, 2015.
- [17] A. Mahmood and M. Chitre, "Optimal and near-optimal detection in bursty impulsive noise," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 42, no. 3, pp. 639–653, 2017.
- [18] M. Shao and C. Nikias, "Signal processing with fractional lower order moments: stable processes and their applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 81, no. 7, pp. 986–1010, 1993.
- [19] D. A. Guimarães, "Robust test statistic for cooperative spectrum sensing based on the gerschgorin circle theorem," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 2445–2456, 2018.
- [20] —, "Gini index inspired robust detector for spectrum sensing over ricean channels," *Electronics Letters*, 11 2018.
- [21] —, "Pietra-ricci index detector for centralized data fusion cooperative spectrum sensing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 10, pp. 12 354–12 358, 2020.
- [22] D. Ramirez, J. Via, I. Santamaria, and L. L. Scharf, "Locally most powerful invariant tests for correlation and sphericity of gaussian vectors," *IEEE transactions on information theory*, vol. 59, no. 4, pp. 2128–2141, 2013.
- [23] D. A. Guimarães, "Código Matlab para Análise de Desempenho dos Detectores ED, GRCR, GID, PRIDe e LMPIT sob Ruído Impulsivo e Receptor por Conversão Direta," May. 2022. [Online]. Available: https://www.dropbox.com/s/xjnutzcn7q2me3v/Matlab_SBrt2022.m?dl=0.