

5 Conclusões

O crescente interesse no uso de tecnologias de rádio cognitivo como forma de aumentar a eficiência de uso do espectro rádio elétrico tem motivado a pesquisa de diferentes técnicas sensoramento espectral. Numerosas propostas de algoritmos de detecção têm sido apresentadas. Uma boa revisão destas técnicas é apresentada em [45] e [46].

As técnicas de sensoramento espectral podem ser classificadas em duas grandes categorias: detecção cega e detecção das características do sinal. O algoritmo de detecção cega mais simples é o Detector de Energia (DE) [47] que, entretanto, sofre severa degradação quando cresce a incerteza da potência de ruído no canal [48-50]. Métodos mais robustos de detecção cega são o Sensoriamento de Covariância Espectral (SCS - Spectral Covariance Sensing) e o sensoriamento do Valor Absoluto de Covariância (CAV) [22].

Estes três algoritmos são discutidos neste trabalho pela comparação da complexidade computacional e pela determinação de suas probabilidades de detecção em um caso real, utilizando dados experimentais de medições em campo.

A técnica de detecção de energia é a de menor complexidade computacional pois requer apenas a determinação da média e desvio padrão do nível de sinal detectado e a comparação do resultado com um limiar de ruído. Em ambientes nos quais a incerteza sobre o limiar de ruído é baixa, o detector de energia é a melhor alternativa, pela facilidade de implementação. Neste trabalho, a análise realizada com dados experimentais medidos em um ambiente urbano real mostrou que, para valores de relação sinal ruído acima de -10 dB, o ED provê probabilidade de detecção correta muito próxima de 1.

Os algoritmos CAV e SCS apresentam complexidade computacional mais elevada, sendo que a do SCS excede a do CAV por um fator $M+2$, onde M é o número de multiplicações requeridas. Entretanto, a análise mostrou que para baixos valores de relação sinal ruído o desempenho dos algoritmos de covarianza apresenta degradação de desempenho suave, enquanto que a probabilidade de

detecção do DE colapsa. Dentre o CAV e o SCS, este último é o que apresenta maior robustez, com probabilidade de detecção correta muito próxima de 1 para relação sinal ruído até - 20 dB.

A análise levou em conta, ainda, o efeito da largura banda de detecção. Foram consideradas bandas de 7, 3.5 e 1.7 MHz. A técnica SCS foi a que apresentou menor degradação de desempenho.

Os resultados obtidos em condições reais indicam a superioridade da técnica SCS sobre as técnicas CAV e ED, pela maior sensibilidade e robustez quanto a baixas relações sinal-ruído.

Como algoritmo de detecção cega, o SCS exige menos recursos para seu funcionamento, em comparação com algoritmos de detecção de características do sinal, que requerem informações precisas e detalhadas, como intervalo de sincronização, tipo de modulação e estrutura de pacotes.

Pelos resultados obtidos, verificou-se o fato que o limiar está relacionado com a probabilidade de falso alarme requerida. Assim, o desempenho dos detectores será afetado se forem usados mecanismos agressivos que resultem em mais falsos negativos (*Estimativa Incorreta - UP Presente*) ou mecanismos conservadores que apresentam mais falsos positivos (*Estimativa Incorreta - UP Ausente*). Se a probabilidade de falso alarme requerida for muito pequena, com o objetivo de evitar interferência, muitas oportunidades de espectro serão perdidas. Por outro lado, para uma alta probabilidade de falsa alarme requerida, conseguiremos muitas oportunidades de espectro, mas aumentará a interferência dos usuários secundários sobre os UPs.

5.1. Contribuições da pesquisa

Dentre as contribuições da pesquisa, podem-se destacar:

- Este estudo teve o intuito principal de avaliar os principais algoritmos de detecção ED, CAV e SCS para o sensoriamento espectral não cooperativo, por meio de dados experimentais obtidos em campanhas de medições e simulação computacional.

- Os três algoritmos foram avaliados dentro as especificações do padrão IEEE 802.16, por meio de dados experimentais obtidos das campanhas de medições na faixa de 3.5 GHz, em área urbana no Rio de Janeiro.
- O desempenho dos algoritmos foi analisado pela comparação de suas probabilidades de detecção para diferentes probabilidades de falso alarme requeridas.
- A análise foi realizada considerando três diferentes bandas de detecção, 7 MHz, 3.5 MHz e 1.7 MHz, para permitir a avaliação do efeito deste parâmetro.
- Foi apresentada, ainda, uma comparação da complexidade computacional dos algoritmos de detecção, através do cálculo teórico do número de operações por símbolo detectado.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos que possam vir a ser feitos como continuidade deste, destacam-se:

- Realizar a comparação dos algoritmos com diferentes modulações, como por exemplo 2PSK, 4PSK, 8PSK, 16QAM, 64QAM.
- Realizar a comparação com dados medidos em outras faixas de frequência (p. ex. 2,5 GHz, de interesse para sistemas LTE) e em outros ambientes de medição, como regiões suburbanas e rurais, e ainda em ambientes fechados.
- Montagem de *setups* implementando os algoritmos em rádios cognitivos reais, fazendo uso de USRPs para testar o desempenho em um ambiente real. O anexo B apresenta os conceitos de rádio definido por *software*, as características do *GNU Radio* e exemplos de implementação como um primeiro passo para este desenvolvimento.