



Marcelo Molina Silva

**Avaliação de Algoritmos de Detecção de
Espaços Espectrais Brancos para
Aplicações de Rádio Cognitivo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro

Março de 2014



Marcelo Molina Silva

**Avaliação de Algoritmos de Detecção de
Espaços Espectrais Brancos para
Aplicações de Rádio Cognitivo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de
Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Carlos Vinicio Rodríguez Ron

Co-orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Leni Joaquim de Matos

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

INMETRO

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de março de 2014

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcelo Molina Silva

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações, na Universidad Católica Boliviana "San Pablo" UCB (La Paz – Bolívia).

Ficha Catalográfica

Silva, Marcelo Molina

Avaliação de algoritmos de detecção de espaços espectrais brancos para aplicações de rádio cognitivo / Marcelo Molina Silva; orientador: Luiz Alencar Reis da Silva Mello.– 2014.

129 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Rádio cognitivo. 3. Intervalos espectrais. 4. Algoritmos de detecção. 5. Complexidade computacional. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus queridos pais Andrés Molina e
Rebeca Silva, aos meus queridos irmãos,
sobrinhos e cunhados.

Agradecimentos

Graças a Deus, acima de todas as coisas, esta é mais uma prova de sua presença em minha vida.

Ao Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello, orientador deste trabalho, pela confiança e orientação ao longo deste projeto e, ainda mais, por sua amizade.

Ao Calos Vinicio Rodríguez Ron, co-orientador deste trabalho, e Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos, por sua colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Andrés Molina e Rebeca Silva, por todo o amor, força e pelas palavras de apoio nos momentos mais difíceis, que me deram todos os dias. Foram, são e sempre serão meu exemplo a seguir.

Aos meus irmãos: Andrés, Alejandra e Fernanda por cada momento que estiveram ao meu lado e todo o amor, que eu não tenho palavras para dizer o quanto eu aprecio e admiro vocês.

Aos meus cunhados: Carla, Giovanni, Pablo e meus sobrinhos: Andres, Fernando, Ignacio e para o bebê (Sebastian) da minha irmã Alejandra que esperamos ansiosos, por todo apoio em todo este tempo.

A Gricel, Fabricio, Fatima e Sandra pela amizade incondicional, por estar cada momento a meu lado, por oferecer uma amizade tão valiosa, brigado por cada momento que vivi ao lado de vocês.

A Lucia e Luciana por abrir as portas de sua casa dando-me o carinho de uma família aqui no Rio de Janeiro.

A meus amigos do CETUC, especialmente a Jennifer, Junior e Romar além de serem meus companheiros de aula formamos uma bela amizade, Beatriz, Alex e Uwe, pela sua amizade e colaboração na elaboração deste trabalho, a meus amigos da Bolívia que também estudam no CETUC: Ariel, Carlos, Daniel, Diego, Mauricio, Teddy, pela sua amizade e apoio ao longo deste trabalho.

A meus amigos da Bolívia, que apesar da distância mantemos essa amizade, muito obrigado pelo apoio de cada um de vocês.

À Fundação Capes e a PUC-Rio pelo fomento da bolsa durante a realização deste trabalho.

Resumo

Molina Silva, Marcelo; da Silva Mello, Luiz Alencar Reis. **Avaliação de Algoritmos de Detecção de Espaços Espectrais Brancos para Aplicações de Rádio Cognitivo**. Rio de Janeiro, 2014. 129p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o desenvolvimento tecnológico no setor de telecomunicações, o espectro radioelétrico está quase totalmente ocupado com um grande número de múltiplas atribuições para os muitos serviços sem fio de aplicação comercial e, também, não comercial, tais como defesa, controle de tráfego aéreo e exploração científica. O espectro eletromagnético é um recurso natural precioso e escasso, por isso, importantes esforços estão sendo direcionados para o desenvolvimento de rádios cognitivos, com capacidade de sensoriar o uso do espectro e utilizar frequências momentaneamente disponíveis de forma oportunista. O rastreamento e a utilização de intervalos espectrais, ou *white spaces*, através da tecnologia de rádios cognitivos, permitirá aumentar a eficiência de uso do espectro com a introdução de novos serviços de telecomunicações a serem explorados por usuários secundários, obrigados a não interferir ou a provocar interferência muito limitada nos usuários primários. O objetivo geral deste trabalho é avaliar os principais algoritmos de detecção dos intervalos espectrais (Detector de Energia, Detecção do Valor Absoluto de Covariância, Sensoriamento de Covariância Espectral) por meio de simulações com dados experimentais obtidos em campanhas de medições e testes em laboratório. Os algoritmos foram testados para avaliar o seu desempenho em termos de probabilidade de detecção dada uma probabilidade de falso alarme requerida, complexidade computacional e robustez quanto a relações sinal-a-ruído baixas. Os dados experimentais utilizados provêm de campanhas de medidas realizadas em ambiente urbano na faixa de 3.5 GHz.

Palavras-chave

Rádio cognitivo; intervalos espectrais; algoritmos de detecção; complexidade computacional.

Abstract

Molina Silva, Marcelo; da Silva Mello, Luiz Alencar Reis. **Evaluation of Detection Algorithms of Spectral White Spaces for Cognitive Radio Applications.** Rio de Janeiro, 2014. 129p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the technological development of the telecommunications industry, the radio spectrum is almost fully occupied with a large number of multiple assignments for wireless services for both commercial and non-commercial applications, such as defense, air traffic control and scientific exploration. The electromagnetic spectrum is a precious and scarce natural resource. Therefore, a considerable effort is being directed at the development of cognitive radios, capable of sensing the spectrum and using momentarily available frequency bands in an opportunistic way. The tracking and using of these spectral intervals, or white spaces, using cognitive radio technology will enhance the efficiency of the spectrum use and allow the introduction of new telecommunications services to be exploited by secondary users, obliged not to interfere or produce very limited interference to primary users. The aim of this study is to evaluate the main algorithms for detection of spectral intervals (Energy Detector, Detection of Covariance Absolute Value, Spectral Covariance Sensing) through simulations with experimental data obtained in field measurements campaigns. The algorithms were tested to evaluate their performance in terms of detection probability given a required false alarm probability, computational complexity and robustness in low signal-to-noise conditions. The experimental data used comes from the measurements campaigns in urban environments at the 3.5 GHz band.

Keywords

Cognitive radio; spectral intervals; detection algorithms; computational complexity.

Sumário

| | | |
|--------|--|----|
| 1 | Introdução | 14 |
| 1.1. | Espectro de radiofrequências | 16 |
| 1.2. | Alocação do espectro radioelétrico para comunicações sem fio | 17 |
| 1.3. | Rádio cognitivo e sensoriamento do espectro | 19 |
| 1.4. | Objetivos | 20 |
| 1.5. | Organização do Trabalho | 21 |
| 2 | Rádio Cognitivo | 22 |
| 2.1. | Mobilidade espectral. | 24 |
| 2.2. | Identificação de Localização | 25 |
| 2.3. | Acesso dinâmico e Descoberta de Rede / Sistema | 25 |
| 2.4. | Modulação / Codificação Adaptativa | 26 |
| 2.5. | Controle de Potência de Transmissão | 26 |
| 2.6. | Compartilhamento do Espectro | 26 |
| 2.7. | Sensoriamento do Espectro | 28 |
| 2.8. | Arquitetura da Rede de Rádio Cognitivo | 29 |
| 2.8.1. | Arquitetura de Rede | 29 |
| 2.8.2. | Sistema Primário e Sistema de Rádio Cognitivo | 33 |
| 2.8.3. | <i>Links</i> em CRNs | 34 |
| 3 | Sensoriamento de Espectro | 37 |
| 3.1. | Desafios no sensoriamento do espectro | 43 |
| 3.1.1. | Requisitos de <i>Hardware</i> | 43 |
| 3.1.2. | Problema do Terminal Escondido | 44 |
| 3.1.3. | Espalhamento de Espectro | 45 |
| 3.1.4. | Duração entre Intervalos em Sensoriamentos | 47 |
| 3.2. | Métricas de Desempenho para o Sensoriamento Espectral. | 47 |
| 3.2.1. | Detecção de Energia (ED - Energy Detector) | 49 |
| 3.2.2. | Valor absoluto de covariância (CAV) | 54 |
| 3.2.3. | Sensoriamento Espectral de Covariância (SCS) | 57 |

| | |
|---|-----|
| 4 Simulações | 61 |
| 4.1. Complexidade Computacional dos Algoritmos | 61 |
| 4.1.1. Complexidade Computacional do Algoritmo de Detecção de Energia | 61 |
| 4.1.2. Complexidade Computacional do Algoritmo de Valor absoluto de Covariância (CAV). | 62 |
| 4.1.3. Complexidade Computacional do Algoritmo de Sensoriamento Espectral de Covariância (SCS). | 65 |
| 4.1.4. Comparação da Complexidade Computacional dos diferentes Algoritmos de detecção. | 68 |
| 4.2. Metodologia para a comparação das técnicas de detecção | 70 |
| 4.2.1. Dados Experimentais | 71 |
| 4.2.2. Programa <i>Synchromed</i> | 74 |
| 4.2.3. Resultados dos algoritmos de detecção. | 78 |
| 4.2.4. Resultados da simulação do SCS para sinais individuais. | 81 |
| 4.2.5. Efeito da probabilidade de falso alarme | 84 |
| 5 Conclusões | 89 |
| | 90 |
| 5.2. Sugestões para trabalhos futuros | 91 |
| 6 Referências bibliográficas | 92 |
| A Modelo Analítico e Estatístico. | 99 |
| A.1. Para o Detector de Energia (ED) | 99 |
| A.2. Para o Detector do valor absoluto de covariância (CAV) | 104 |
| B Rádio Definido por <i>Software</i> (<i>SDR – Software Defined Radio</i>) | 105 |
| B.1. <i>GNU Radio</i> | 107 |
| B.2. <i>Universal Software Radio Peripheral (USRP)</i> | 111 |
| B.3. Resultados obtidos na simulação usando a USRP. | 112 |
| B.4. Criação de um novo bloco tipo sync. | 118 |
| C Tempo de execução dos algoritmos. | 127 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Evolução do número de acessos. | 15 |
| Figura 1.2: Alocações de espectro no Brasil. | 18 |
| Figura 2.1: Propriedades do Rádio Cognitivo. | 23 |
| Figura 2.2: Vetor de alocação. | 28 |
| Figura 2.3: Rede Infraestruturada. | 30 |
| Figura 2.4: Arquitetura Ad-hoc. | 31 |
| Figura 2.5: Arquitetura de malha. | 32 |
| Figura 2.6: Links em CRNs. | 35 |
| Figura 3.1: Mecanismo de sensoriamento reativo. | 40 |
| Figura 3.2: Mecanismo de sensoriamento proativo. | 41 |
| Figura 3.3: Problema do terminal escondido. | 45 |
| Figura 3.4: Divisão do espectro realizado pelo espalhamento FHSS e os saltos de frequência. | 46 |
| Figura 3.5: Sinal convencional e DSSS | 46 |
| Figura 3.6: Energia recebida comparada com um limiar, com baixa potência de ruído. | 49 |
| Figura 3.7: Exemplo de um sinal OFDM capturado com alta potência de ruído: caso detector de energia (ED). | 50 |
| Figura 3.8: Exemplo de um sinal OFDM capturado com alta potência de ruído: caso - Valor Absoluto de Covariância (CAV). | 55 |
| Figura 4.1: Complexidade Computacional dos Algoritmos: ED, CAV, SCS, para Adições. | 69 |
| Figura 4.2: Complexidade Computacional dos Algoritmos: ED, CAV, SCS, para Multiplicações. | 69 |
| Figura 4.3: Área de serviço usuário primário. | 72 |
| Figura 4.4: Símbolos OFDM. | 72 |
| Figura 4.5: Campanha de medições com uma banda de 7 [MHz] com frequência central de 3.5 [GHz]. | 73 |
| Figura 4.6: Amostra do sinal OFDM tomada a matriz da campanha de medições pelo programa Synchroned. | 75 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.7: No intervalo de início-fim estão as amostras do sinal OFDM, no intervalo de fim-início o ruído. | 75 |
| Figura 4.8: Seleção das amostras do sinal e ruído utilizando Syncromed. | 77 |
| Figura 4.9: Probabilidade de detecção em uma banda de 7 [MHz]. | 78 |
| Figura 4.10: Probabilidade de detecção em uma banda de 3.5 [MHz]. | 79 |
| Figura 4.11: Probabilidade de detecção em uma banda de 1.7 [MHz]. | 80 |
| Figura 4.12: Probabilidade de detecção para sete grupo de sinais. | 82 |
| Figura 4.13: Sete grupos de sinais. | 83 |
| Figura 4.14: Detector de Energia (ED), Banda de 7 [MHz], Pf=5,10,15. | 84 |
| Figura 4.15: Valor Absoluto de Covariância (CAV), Banda de 7 [MHz], Pf=5,10,15. | 85 |
| Figura 4.16: Sensoriamento de Covariância Espectral (SCS), Banda de 7 [MHz], Pf=5,10,15. | 85 |
| Figura 4.17: Detector de Energia (ED), Banda de 3.5 [MHz], Pf=5,10,15. | 86 |
| Figura 4.18: Valor Absoluto de Covariância (CAV), Banda de 3.5 [MHz], Pf=5,10,15. | 86 |
| Figura 4.19: Sensoriamento de Covariância Espectral (SCS), Banda de 3.5 [MHz], Pf=5,10,15. | 87 |
| Figura 4.20: Detector de Energia (ED), Banda de 1.7 [MHz], Pf=5,10,15. | 87 |
| Figura 4.21: Valor Absoluto de Covariância (CAV), Banda de 1.7 [MHz], Pf=5,10,15. | 88 |
| Figura 4.22: Sensoriamento de Covariância Espectral (SCS), Banda de 1.7 [MHz], Pf=5,10,15. | 88 |
| Figura B.1: Componentes do <i>Hardware</i> . | 105 |
| Figura B.2: Arquitetura do SDR. | 106 |
| Figura B.3: Esquema do funcionamento da plataforma GNU Radio em conjunto com o Universal Software Radio Peripheral. | 108 |
| Figura B.4: Blocos de processamento do GNU Radio. | 110 |
| Figura B.5: Diagrama simplificado de blocos do USRP. | 112 |
| Figura B.6: Dial Ton (GNU-Radio). | 114 |
| Figura B.7: Diagrama para a transmissão. | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figura B.8: Diagrama de Blocos (GNU-Radio) para a transmissão. | 115 |
| Figura B.9: Diagrama de Blocos na Recepção. | 115 |
| Figura B.10: Diagrama de Blocos (GNU-Radio) para a recepção. | 116 |
| Figura B.11: Sinal no domínio da Frequência (GNU-Radio). | 116 |
| Figura B.12: Sinal no domínio do Tempo (GNU-Radio). | 117 |
| Figura B.13: Ocupação da largura de banda (GNU-Radio). | 117 |
| Figura B.14: Tela do terminal. | 118 |
| Figura B.15: Resposta do Terminal. | 119 |
| Figura B.16: Lugar no diretório onde se encontra o file sync_prov.h (Descargas\gr-inmetro\include\inmetro). | 120 |
| Figura B.17: Dentro do file sync_prov.h. | 120 |
| Figura B.18: Lugar no diretório onde se encontra o file sync_prov_impl.h (Descargas\gr-inmetro\lib). | 121 |
| Figura B.19: Dentro do file sync_prov_impl.h. | 121 |
| Figura B.20: Lugar no diretório onde se encontra o file sync_prov_1_impl.cc (Descargas\gr-inmetro\lib). | 122 |
| Figura B.21: Dentro do file sync_prov_1_impl.cc. | 122 |
| Figura B.22: Dentro do file sync_prov_1_impl.cc. | 123 |
| Figura B.23: Lugar no diretório onde se encontra o file inmetro_sync_prov.xml (Descargas\gr-inmetro\grc). | 123 |
| Figura B.24: Dentro do file inmetro_sync_prov.xml. | 124 |
| Figura B.25: Terminal, comando make. | 125 |
| Figura B.26: Terminal comando. | 125 |
| Figura B.27: GNU-Radio-Companion. | 126 |
| Figura C.1: Porcentagem dos tempos de processamento para a banda de 1.75 [MHz]. | 128 |
| Figura C.2: Porcentagem dos tempos de processamento para a banda de 3.5 [MHz]. | 128 |
| Figura C.3: Porcentagem dos tempos de processamento para a banda de 7 [MHz]. | 129 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1.1: Tipos de serviços para cada frequência. | 17 |
| Tabela 2.1: Possível Uni-direcional Link no CRN | 34 |
| Tabela 3.1: Possíveis decisões tomadas pelo mecanismo de detecção de usuários primários. | 37 |
| Tabela 4.1: Complexidade computacional da média para o detector de energia. | 62 |
| Tabela 4.2: Complexidade computacional do desvio padrão para o detector de energia. | 62 |
| Tabela 4.3: Complexidade computacional para o cálculo das autocorrelações do valor absoluto de covariância (CAV). | 63 |
| Tabela 4.4: Complexidade computacional para a matriz covariância C do valor absoluto de covariância (CAV). | 64 |
| Tabela 4.5: Complexidade computacional para o teste estatístico do valor absoluto de covariância (CAV). | 64 |
| Tabela 4.6: Complexidade computacional para a obtenção da matriz $z(n)$ do sensoriamento espectrais de covariância (SCS). | 65 |
| Tabela 4.7: Complexidade computacional para a obtenção da matriz M do sensoriamento espectral de covariância (SCS). | 66 |
| Tabela 4.8: Complexidade computacional para a matriz covariância C do sensoriamento espectral de covariância (SCS). | 66 |
| Tabela 4.9: Complexidade computacional para o teste estatístico do sensoriamento espectral de covariância (SCS). | 67 |
| Tabela 4.10: Complexidade computacional dos três algoritmos avaliados. | 68 |
| Tabela 4.11: Outras operações matemáticas | 70 |
| Tabela C.1: Tempo de Rodagem dos programas ED, CAV, SCS | 127 |