



Marcus Vinícius dos Santos Fernandes

**Modelagem de Canais de Comunicações Digitais
Sujeitos a Erros em Surtos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Marco Antônio Grivet Mattoso Maia
Co-orientador: Prof. Ernesto Leite Pinto

Rio de Janeiro

Abril de 2010



Marcus Vinícius dos Santos Fernandes

**Modelagem de Canais de Comunicações Digitais
Sujeitos a Erros em Surtos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia
Orientador

Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Ernesto Leite Pinto
Co-Orientador
IME

Prof. Pedro Henrique Gouvêa Coelho
UERJ

Prof. José Mauro Pedro Fortes
Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Raimundo Sampaio Neto
Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Marcelo Roberto Baptista Pereira Luis Jimenez
Centro de Estudos de Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Rodolfo Sabóia Lima de Souza
Inmetro

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de abril de 2010

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

Marcus Vinícius dos Santos Fernandes

Graduado como Engenheiro em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Militar de Engenharia em 1994, e Mestre em Engenharia Elétrica - Processamento de Sinais, pelo Instituto Militar de Engenharia em 2002.

Ficha Catalográfica

Fernandes, Marcus Vinícius dos Santos

Modelagem de canais de comunicações digitais sujeitos a erros em surtos / Marcus Vinícius dos Santos Fernandes ; orientador: Marco Antônio Grivet Mattoso Maia; co-orientador: Ernesto Leite Pinto. – 2010.

103 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Erros em surtos. 3. Modelos escondidos de Markov. 4. Canal de comunicações. I. Maia, Marco Antônio Grivet Mattoso. II. Pinto, Ernesto Leite. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, esposa e filha.

Agradecimentos

Aos Professores Marco Antônio Grivet Mattoso Maia e Ernesto Leite Pinto, pela orientação técnico-científica e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À minha esposa Maria Inês e filha Marina Letícia, pelo incentivo, apoio, compreensão e amor dedicados.

Aos meus pais, Walter Fernandes e Maria Bernadete, pelo amor e pela sólida educação que me proporcionaram.

Aos amigos e colegas de trabalho pelo incentivo.

Aos professores do CETUC, pela amizade e ensinamentos.

Aos funcionários do CETUC, e do Departamento de Engenharia pela amizade e apoio administrativo.

Ao Comando e companheiros do Instituto Militar de Engenharia pelo apoio à realização da presente Tese.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

Resumo

Fernandes, Marcus Vinícius dos Santos; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso (Orientador); Pinto, Ernesto Leite (Co-orientador). **Modelagem de Canais de Comunicações Digitais Sujeitos a Erros em Surto**. Rio de Janeiro, 2010. 103p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A ocorrência de erros em surto é observada principalmente em canais sem fio. Para a análise e melhor entendimento deste tipo de erro, a fim de se melhorar os projetos de sistemas de comunicações digitais, uma modelagem mais precisa, de canais com esta característica, torna-se necessária. Uma diversidade de métodos de estimação de parâmetros tem sido estudada, principalmente aquelas baseadas nos Modelos Escondidos de Markov (HMM do inglês). Em geral cada método é focado em um sistema de comunicações específico, sobre uma camada específica. Neste trabalho é proposto um novo método baseado em um HMM com uma estrutura particular, que permite a dedução de expressões analíticas para todas as estatísticas de interesse. A estrutura do modelo proposto permite a geração de eventos que ocorrem numa sequência binária de dados sujeita a surtos de erro, de acordo com a definição de surtos de erro do CCITT. O modelo proposto possui um número fixo de apenas sete parâmetros, mas o seu número de estados cresce com um de seus parâmetros, que aumenta a precisão, mas não a complexidade. Este trabalho adotou técnicas de otimização, associadas aos métodos de Máxima Verossimilhança e *Particle Swarm Optimization* (PSO) a fim de realizar a estimação dos parâmetros do modelo proposto. Os resultados demonstram que o modelo proposto permite a caracterização precisa de canais com memória de diversas origens.

Palavras-chave

Erros em surtos, Modelos Escondidos de Markov, canal de comunicações.

Abstract

Fernandes, Marcus Vinícius dos Santos; Maia, Marco Antonio Grivet Mattoso (Advisor); Pinto, Ernesto Leite (Co-advisor). **Modeling of Digital Communication Channels Under Burst of Errors**. Rio de Janeiro, 2010. 103p. Doctorate Thesis – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The occurrence of error busts is mainly observed in wireless channels. For analysis and a better understanding of such errors, in order to improve the design of communication systems, an accurate modeling of channels with this characteristic is necessary. A lot of parameter estimation methods have been studied, mainly the ones based on Hidden Markov Models (HMM). In general each method is focused in a specific communication system, on a specific layer. In this work it is proposed a new method based on a HMM with particular structure that allows the deduction of analytical expressions for all statistics of interest. The structure of the proposed model permits the generation of events that occur in a binary data sequence subject to bursts of error concerning CCITT error burst definition. The proposed model has a fixed number of only seven parameters but its number of states increase with one of those parameters that increase the accuracy but not the complexity. This work adopted techniques of optimization associated to Maximum Likelihood (ML) and Particle Swarm Optimization (PSO) to perform the parameter estimation to the proposed model. The results show that the proposed model achieves accurate characterization of channels with memory from many different sources.

Keywords

Burst errors, Hidden Markov Models, communication channel.

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Modelagem de erros	16
1.2. Surto de Erro	18
1.3. Proposta deste trabalho	19
1.4. Apresentação do trabalho	20
2. Conceitos básicos	21
2.1. Modelos de Markov	21
2.2. Modelos Escondidos de Markov	22
2.3. HMM aplicado a canais sujeitos a erros em surtos	23
2.4. Modelo de Gilbert-Elliot	24
2.5. Modelo de Fritchman	25
2.6. Estimação de parâmetros do HMM	27
2.6.1. Cálculo da probabilidade de geração da sequência observada	27
2.6.2. Determinação da sequência de estados mais provável	30
2.6.3. Estimação ML de Parâmetros	31
2.6.4. Algoritmo de Baum-Welch	32
2.7. Ferramentas de otimização	36
2.7.1. Particle Swarm Optimization (PSO)	37
2.7.2. A técnica “Branch and Bound” (BB)	39
3. Modelo de surtos proposto	42
3.1. Objetivos	42
3.2. Descrição do modelo	42
3.2.1. Parâmetros	44
3.2.2. Estados	45
3.2.3. Matriz de Probabilidades Transição	46
3.2.4. Probabilidades dos estados em regime permanente	46
3.3. Estatísticas de interesse	48

3.3.1. Probabilidade de erro	49
3.3.2. Probabilidades $P[10^m 1]$ e $P[01^m 0]$	50
3.3.2.1. Cálculo de $P[10^m 1]$	50
3.3.2.2. Cálculo de $P[01^m 0]$	51
3.3.3. Distribuição de gaps	52
3.3.4. Tamanho médio dos gaps	52
3.3.5. Distribuição dos clusters de erro	54
3.3.6. Tamanho médio dos clusters de erro	54
3.3.7. Distribuição de intervalos entre surtos	55
3.3.8. Distribuição de gaps no interior de surtos	55
3.3.9. Função de Auto-correlação	56
3.3.10. Probabilidade $P[1^m 0]$	58
3.3.11. Probabilidade $P[0^m 1]$	59
4. Metodologia para ajuste dos parâmetros do modelo proposto	61
4.1. Função Verossimilhança do modelo	62
4.2. Metodologia de otimização	65
5. Resultados	66
5.1 Estimação do parâmetro L	68
5.2 Validação do método de ajuste do modelo	70
5.3. Equalizador DFE (caso I)	71
5.4. Canal com desvanecimento Rayleigh (caso II)	74
5.4.1 Canal com desvio Doppler de 10^{-1} e E_b/N_0 de 10 dB	75
5.4.2 Canal com desvio Doppler de 10^{-2} e E_b/N_0 de 15 dB	78
5.4.3 Canal com desvio Doppler de 10^{-3} e E_b/N_0 de 15 dB	82
5.5. Decodificador de Viterbi (caso III)	84
5.5.1. Decodificador com probabilidade de erro de entrada de 0,1	85
5.5.2. Decodificador com probabilidade de erro de entrada de 0,05	88
5.6. Influência do emprego do PSO	91
6. Conclusão	94

7. Referências bibliográficas	96
Apêndice A. Notação matricial	99
Apêndice B. Técnicas de otimização	102

Lista de figuras

Figura 2.1 – Cadeia de Markov de 3 estados.	22
Figura 2.2 – Modelo de Gilbert-Elliott.	25
Figura 2.3 – Modelo de Fritchman-SES de N estados.	26
Figura 3.1 – Diagrama de estados do Modelo Proposto.	43
Figura 3.2 – Diagrama de estados equivalente ao estado e_2	57
Figura 4.1 – Modelo de transição	62
Figura 5.1 – Levantamento do melhor valor do parâmetro L para o modelo proposto para os casos I e II	69
Figura 5.2 – Levantamento do melhor valor parâmetro L para o modelo proposto para o caso III.	69
Figura 5.3 – Resultados de validação do método de ajuste dos parâmetros do modelo proposto.	70
Figura 5.4 – Estimativas da distribuição de surtos de erros para o Caso I.	71
Figura 5.5 – Estimativas da função autocorrelação para o Caso I.	72
Figura 5.6 – Estimativas da distribuição de gaps para o Caso I.	72
Figura 5.7 – Estimativas da distribuição de comprimentos de intervalos entre surtos para o Caso I.	73
Figura 5.8 – Estimativas da função Probabilidade de erros por bloco para um bloco de tamanho 300 ($P(m,300)$) para o Caso I.	74
Figura 5.9 – Estimativas distribuição de surtos de erro para o Caso II.a.	75
Figura 5.10 – Estimativas da distribuição de gaps para o Caso II.a.	76
Figura 5.11 – Estimativas da distribuição de comprimentos de intervalos entre surtos para o Caso II.a.	76
Figura 5.12 – Estimativas da função autocorrelação (BECF) para o Caso II.a.	77

Figura 5.13 – Estimativas da função Probabilidade de erros por bloco de tamanho 300, $P(m,300)$, para o Caso II.a.	78
Figura 5.14 – Estimativas da distribuição de surtos de erro para o Caso II.b.	79
Figura 5.15 – Estimativas da distribuição de gaps para o Caso II.b.	79
Figura 5.16 – Estimativas da distribuição de comprimentos de intervalos entre surtos para o Caso II.b.	80
Figura 5.17 – Estimativas da função autocorrelação (BECF) para o Caso II.b.	81
Figura 5.18 – Estimativas da função Probabilidade de erros por bloco de tamanho 300 ($P(m,300)$), para o Caso II.b.	81
Figura 5.19 – Estimativas da distribuição de surtos de erro para o Caso II.c.	82
Figura 5.20 – Estimativas da distribuição de gaps para o Caso II.c.	83
Figura 5.21 – Estimativas da distribuição de comprimentos de intervalos entre surtos para o Caso II.c.	83
Figura 5.22 – Estimativas da função Probabilidade de erros por bloco de tamanho 300 ($P(m,300)$), para o Caso II.c.	84
Figura 5.23 – Estimativas da distribuição de comprimentos de surtos de erro para o Caso III.a.	85
Figura 5.24 – Estimativas da distribuição de gaps para o Caso III.a.	86
Figura 5.25 – Estimativas da distribuição de comprimentos de intervalos entre surtos para o Caso III.a.	86
Figura 5.26 – Estimativas da função autocorrelação (BECF) para o Caso III.a.	87
Figura 5.27 – Estimativas da função Probabilidade de erros por bloco de tamanho 300 ($P(m,300)$), para o Caso III.a.	88
Figura 5.28 – Estimativas da distribuição de comprimentos de surtos de erro para o Caso III.b.	89
Figura 5.29 – Estimativas da distribuição de gaps para o Caso III.b.	89
Figura 5.30 – Estimativas da distribuição de comprimentos de intervalos entre surtos para o Caso III.b.	90

Figura 5.31 – Estimativas da função autocorrelação (BECF) para o Caso III.b.	90
Figura 5.32 – Estimativas da função Probabilidade de erros por bloco de tamanho 300, $P(m,300)$, para o Caso III.b	91
Figura 5.33 – Estimativas obtidas sem o emprego do PSO no ajuste do modelo proposto.	92
Figura 5.34 – Estimativas obtidas com o emprego do PSO no ajuste do modelo proposto.	93

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Funções dos estados.

45