



Rodrigo Pereira David

**Técnica de Estimação de Canal Utilizando
Símbolos Pilotos em Sistemas OFDM**

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. Raimundo Sampaio Neto

Rio de Janeiro
Maio de 2007



Rodrigo Pereira David

**Técnica de Estimação de Canal Utilizando
Símbolos Pilotos em Sistemas OFDM**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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. Raimundo Sampaio Neto
Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. José Mauro Pedro Fortes

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Pedro Henrique Gouvêa Coelho
UERJ

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 14 de maio de 2007

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

Rodrigo Pereira David

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações na Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) em julho de 2002

Ficha Catalográfica

David, Rodrigo Pereira

Técnica de estimação de canal utilizando símbolos pilotos e sistemas OFDM / Rodrigo Pereira David ; orientador: Raimundo Sampaio Neto. – 2007.

132 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Transmissão Digital. 3. OFDM. 4. Estimação de Canal. 5. Algoritmos Adaptativos. I. Sampaio Neto, Raimundo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

**Para meus filhos, Frederico e Arthur,
em todos os momentos da minha vida.**

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Raimundo Sampaio Neto pela sua dedicação no ensino e por sua excelente orientação desta dissertação de Mestrado.

Ao colega Aureo Serrano de Marins Neto pela contribuição fundamental para o desenvolvimento da minha dissertação.

À Star One e à PUC-Rio pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ser realizado.

Aos meus pais Domingos e Regina pelo amor e apoio sempre presentes.

À minha esposa Alessandra pelo companheirismo e compreensão nesta etapa de minha vida.

Resumo

Pereira David, Rodrigo; Sampaio Neto, Raimundo (Orientador). **Técnica de Estimação de Canal Utilizando Símbolos Pilotos em Sistemas OFDM**. Rio de Janeiro, 2007. 132p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem como finalidade explorar uma técnica de redução do erro de estimativas da resposta de frequência discreta do canal geradas por símbolos piloto em sistemas de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Nesta técnica, uma transformação linear projeta o vetor que contém as estimativas obtidas inicialmente no subespaço em que a verdadeira resposta de frequência do canal tem que estar, resultando em uma redução da variância do erro das estimativas. A aplicação conjunta desta técnica com filtragem adaptativa para a estimação da resposta de frequência do canal também está no contexto desta dissertação. Os resultados dos experimentos são analisados em termos da taxa de erro de bit média obtida e da convergência dos algoritmos adaptativos empregados nas etapas de estimação de canal no receptor.

Palavras-chave

Estimação de Canal, Filtragem Adaptativa, OFDM.

Abstract

Pereira David, Rodrigo; Sampaio Neto, Raimundo (Advisor). **Pilot Assisted Channel Estimation for Signal Detection in OFDM Systems**. Rio de Janeiro, 2007. 132p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work studies a technique for error reduction in estimates of the discrete channel frequency response obtained with aid of pilot symbols in OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) transmission systems. In this technique the vector that contains the initial discrete channel frequency response estimate is projected into the subspace where the true channel frequency response has to lie, yielding a new channel estimate with a reduced error variance. The joint application of this technique with adaptive filtering for channel estimation is also developed herein. The performance of the proposed methods is analyzed in terms of the mean bit error rate achieved and of the convergence of the adaptive channel estimation algorithms used in the receiver.

Keywords

Digital Transmission; OFDM; Channel Estimation; Adaptive Algorithms.

Sumário

1. Introdução	12
2. Técnica de Transmissão OFDM	15
2.1. Transmissão e Recepção do sinal OFDM	20
2.2. Geração e detecção dos sinais por meio de IDFT/DFT	23
2.3. Intervalo de guarda – sistemas CP e ZP-OFDM	25
2.4. Processamento do sinal OFDM na transmissão e recepção	27
2.5. Vantagens e desvantagens do uso da técnica a OFDM	29
3. Modelo discreto de transmissão de sinais OFDM	32
3.1. Transmissão e recepção de sinais CP-OFDM	36
3.2. Transmissão e recepção de sinais ZP-OFDM	41
3.3. Modelagem dos Canais de Propagação	45
3.3.1. Desvanecimento Multipercurso	46
3.3.2. Resposta ao Impulso de um Canal Multipercurso	48
3.3.3. Tipos de Desvanecimento Multipercurso	53
3.3.4. Modelagem Canal de Propagação	56
4. Estimação de Canal	59
4.1. Estimação de canal utilizando símbolos piloto e matriz purificadora	61
4.1.1. Estimação de canal Pós-DFT com símbolos piloto em sistemas CP-OFDM	66
4.1.2. Estimação de canal Pós-DFT com símbolos piloto em sistemas ZP-OFDM	69
4.2. Estimação de canal Pré-DFT com símbolos piloto	69
4.3. Desempenho do esquema de estimação proposto nos sistemas CP-OFDM e ZP-OFDM	74
5. Estimação de Canal Adaptativa com Símbolos Piloto	82
5.1. Estimação de Canal Adaptativa utilizando algoritmo LS	88
5.1.1. Algoritmo LS Recursivo (RLS - <i>Recursive Least Squares</i>)	92
5.2. Desempenho do esquema de estimação de canal adaptativo RLS nos sistemas CP-OFDM e ZP-OFDM	99
5.2.1. Desempenho do esquema de estimação de canal adaptativo RLS nos sistemas CP- OFDM e ZP-OFDM para canal fixo	101
5.2.2. Desempenho do esquema de estimação de canal adaptativo RLS nos sistemas CP-OFDM e ZP-OFDM para canal variante	111
6. Conclusão	125
7. Referências bibliográficas	128
8. Apêndice	130

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Ortogonalidade no domínio da frequência	19
Figura 2.2 – Ortogonalidade no domínio do tempo	20
Figura 2.3 – Equivalente banda básica do esquema geral de receptor ótimo utilizando correlator (projeção nas bases)	21
Figura 2.4 – Detalhamento da transmissão e recepção para o sistema OFDM	28
Figura 3.1 – Transmissão do sinal OFDM	33
Figura 3.2 – Conversor Analógico/Digital	34
Figura 3.3 – Recepção do Sinal OFDM	34
Figura 3.4 – Modelo equivalente para recepção OFDM	35
Figura 3.5 – Modelo discreto de transmissão CP-OPFM	37
Figura 3.6 – Modelo discreto de recepção CP-OFDM	37
Figura 3.7. – Sinal de transmissão ZP-OFDM	41
Figura 3.8 – Sinal de recepção ZP-OFDM	42
Figura 3.9 – Envoltória de um sinal em um ambiente rádio móvel	46
Figura 3.10 – Fenômeno do Multipercurso	46
Figura 3.11 – Envoltória do sinal recebido em um ambiente rádio móvel	47
Figura 3.12 – Exemplo de resposta ao impulso de um canal multipercurso	49
Figura 3.13 – Exemplo de resposta ao impulso de um canal multipercurso estacionário	50
Figura 3.14 – Perfil de potência do retardo	51
Figura 3.15 – Resposta impulsiva do canal em faixa estreita	54
Figura 3.16 – Espectro de Potência Doppler	55
Figura 4.1 – Modelo de estimação de canal Pós-DFT utilizando matriz purificadora	66
Figura 4.2 – Magnitude da resposta em frequência para $h_L = [0.8677 \ 0.4339 \ 0.2169 \ 0.1085]^T$	68
Figura 4.3 – CP-OFDM - Canal Fixo – Erro Médio Quadrático das Estimativas Zero-Forcing e Zero-Forcing Refinadas para $E_b/N_o=10dB$	69
Figura 4.4 – Magnitude da resposta em frequência para $h_L = [0.8677 \ 0.4339 \ 0.2169 \ 0.1085]^T$	73
Figura 4.5 – ZP-OFDM - Canal Fixo – Erro Médio Quadrático das Estimativas <i>Zero-Forcing</i> e <i>Zero-Forcing</i> Refinadas para $E_b/N_o=13dB$	74
Figura 4.6 – Processamentos alternativos para estimação refinada de canal Pré-DFT	79
Figura 4.7 – CP-OFDM - Canal Fixo - Estimação Proposta de Canal com Pilotos	84
Figura 4.8 – CP-OFDM - Canal Fixo - Estimação Proposta de Canal com Pilotos	85
Figura 4.9 – CP-OFDM - Canal Fixo - Degradação do desempenho das estimativas purificadas	86

Figura 4.10 – ZP-OFDM - Canal Fixo - Degradação do desempenho das estimativas purificadas	87
Figura 5.1 – CP-OFDM - Canal Fixo - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS-comprimento do canal conhecido a priori	102
Figura 5.2 – CP-OFDM - Canal Fixo – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	103
Figura 5.3 – ZP-OFDM - Canal Fixo - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS-comprimento do canal conhecido a priori	104
Figura 5.4 – ZP-OFDM - Canal Fixo – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	105
Figura 5.5 – CP-OFDM - Canal Fixo - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS-comprimento G da faixa de guarda utilizado para estimar o comprimento do canal	107
Figura 5.6 – CP-OFDM - Canal Fixo – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	108
Figura 5.7 – ZP-OFDM - Canal Fixo - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS-comprimento G da faixa de guarda utilizado para estimar o comprimento do canal	109
Figura 5.8 – ZP-OFDM - Canal Fixo – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	110
Figura 5.9 – CP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-5}$ - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS	112
Figura 5.10 – CP-OFDM - Canal Variante $f_d T_{ofdm}=10^{-5}$ – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	113
Figura 5.11 – CP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-4}$ - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS	114
Figura 5.12 – CP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-4}$ – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	115
Figura 5.13 – CP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-3}$ - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS	116
Figura 5.14 – CP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-3}$ – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	117
Figura 5.15 – ZP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-5}$ - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS	118
Figura 5.16 – ZP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-5}$ – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	119
Figura 5.17 – ZP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-4}$ - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS	120
Figura 5.18 – ZP-OFDM - Canal Variante $fdT_{ofdm}=10^{-4}$ – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	121

Figura 5.19 – ZP-OFDM - Canal Variante $fdTofdm=10^{-3}$ - Estimação de Canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS	122
Figura 5.20 – ZP-OFDM - Canal Variante $fdTofdm=10^{-3}$ – Erro Médio Quadrático entre as estimativas de canal com Pilotos utilizando algoritmo RLS com matriz purificadora e sem matriz purificadora	123