



Bernardo Rodrigues da Costa

**Equalização de canal em sistemas com
transmissão em blocos**

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
Co-Orientador: Prof. Rodrigo Caiado de Lamare

Rio de Janeiro
Dezembro de 2007



Bernardo Rodrigues da Costa

**Equalização de canal em sistemas com
transmissão em blocos**

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

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Rodrigo Caiado de Lamare

Co-Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Marco Grivet

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Jacques Szczupak

ENGENHO

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Dezembro de 2007

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

Bernardo Rodrigues da Costa

Graduou-se em Engenharia Elétrica (Telecomunicações) e Engenharia de Produção na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em Julho de 2004 (Rio de Janeiro, Brasil).

Ficha Catalográfica

da Costa, Bernardo Rodrigues

Equalização de canal em sistemas com transmissão em blocos / Bernardo Rodrigues da Costa; orientador: Raimundo Sampaio Neto; co-orientador: Rodrigo Caiado de Lamare. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

v., 113 f: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. OFDM. 3. Processamento de sinais para comunicações. 4. Transmissão digital em blocos. 5. Equalização. 6. Filtragem adaptativa. 7. Equalizadores com decisão realimentada. I. Sampaio-Neto, Raimundo. II. de Lamare, Rodrigo Caiado. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

À toda minha família.

Agradecimentos

À toda minha família, amigos e pessoas que me transmitiram incentivo por essa jornada, em especial à minha avó Jassiva e ao meu pai José Leonardo, por me proporcionar o suporte necessário para que este trabalho chegasse ao seu fim.

À Mariana, por todo carinho e compreensão na fase final desta dissertação.

Aos colegas de trabalho da Telespazio Brasil, principalmente Carlos Amaral e Claudio Mastroiani, pois tornaram possível a coexistência entre trabalho e estudo.

Aos professores Weiler Finamore, José Mauro P. Fortes, Jacques Szczupak, Gláucio Siqueira e Raimundo Sampaio Neto. Todas as aulas em seus respectivos cursos foram excelentes.

À todos funcionários do departamento de Engenharia Elétrica e do CETUC.

Aos colegas do CETUC, pois sempre proporcionaram um ambiente amigável de pesquisa e aprendizado conjunto. Em especial, ao amigo Tiago Vinhoza, pois sem seus incontáveis auxílios este trabalho, por certo, não teria chegado ao seu final.

Ao co-orientador deste trabalho, professor Rodrigo de Lamare que, mesmo à distância, foi quem delineou os primeiros passos desta dissertação e por ter colaborado sempre que preciso ao longo da mesma.

Ao orientador deste trabalho, o professor Raimundo Sampaio Neto que, mesmo em momentos mais difíceis de sua vida, foi sempre solícito com minhas eternas dúvidas e por ter sempre as respostas para elas. Fica aqui, todo o meu respeito e admiração.

Resumo

da Costa, Bernardo Rodrigues; Sampaio-Neto, Raimundo; de Lammare, Rodrigo Caiado. **Equalização de canal em sistemas com transmissão em blocos**. Rio de Janeiro, 2007. 113p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A necessidade pela transmissão em altas taxas, por exemplo nos novos sistemas de TV Digital de alta definição, telefonia celular de terceira e quarta geração, DSL e etc, trazem consigo um problema: o aumento dos múltiplos percursos no canal de comunicações (principalmente nas interfaces aéreas), dando origem ao fenômeno de interferência intersimbólica (IES). Este trabalho investiga o desempenho de sistemas de transmissão com uma única portadora (SC ou *single-carrier*) com equalização linear no domínio da frequência. Diferentes algoritmos recursivos são apresentados para implementar estes filtros FIR. Além dos equalizadores lineares, uma estrutura não-linear é introduzida, onde decisões passadas do decisor de mínima distância são utilizadas para mitigar os efeitos da IES na detecção dos símbolos subseqüentes. Este arranjo é conhecido como equalização/filtragem com decisões realimentadas (DFE ou *Decision Feedback Equalizers*). Por último, os resultados obtidos com o sistema SC nas diferentes configurações de filtragem na recepção são comparados com os resultados do já estabelecido sistema OFDM. A transmissão OFDM se dá com múltiplas portadoras, onde as frequências das sub-portadoras são ortogonais entre si, permitindo que a informação seja enviada de forma paralela. Resultados mostram que os sistemas SC-FDE tem desempenho superior aos sistemas OFDM.

Palavras-chave

OFDM. Processamento de sinais para comunicações. Transmissão digital em blocos. Equalização. Filtragem adaptativa. Equalizadores com decisão realimentada.

Abstract

da Costa, Bernardo Rodrigues; Sampaio-Neto, Raimundo; de Lammare, Rodrigo Caiado. **Channel equalization in block transmission systems**. Rio de Janeiro, 2007. 113p. MsC Thesis — Department of Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The demand for high rate transmission systems, for example in HDTV, third and fourth generation cellular telephony, DSL and so on, causes the rise of a problem: The multipath communications channel (specially in wireless communications), which leads to intersymbol interference phenomenon (ISI). The present work investigates the performance of single-carrier (SC) transmission systems with frequency-domain linear equalization. Different recursive algorithms are presented in order to implement these FIR filters. Besides the linear equalizers, a non-linear structure is introduced, where the past decisions made by the detectors are used to mitigate the effect of ISI on the detection of the forthcoming symbols. This set is known as Decision Feedback Equalizers (DFE). Finally, the results of the aforementioned systems are compared to the well-known OFDM. OFDM transmission relies on sub-carriers, frequency orthogonal to each other, in which the data is sent in a parallel basis. The results obtained show that SC-FDE systems outperform OFDM systems.

Keywords

Single-carrier transmission. Signal processing for communications. Digital transmission. Frequency domain equalization. Adaptive filters. OFDM.

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Organização deste trabalho	16
1.2	Notação adotada	17
2	Transmissão e recepção de sinais em portadora única	18
2.1	Transmissão de sinais em única portadora	18
2.1.1	ZP	19
2.1.2	CP	20
2.1.3	União dos modelos matriciais	20
2.1.4	Filtragem e envoltória complexa	21
2.2	Recepção de sinais em portadora única	21
2.2.1	Bloco recebido CP	25
2.2.2	Bloco recebido ZP	26
2.3	Modelo do canal equivalente	27
2.3.1	Canal fixo	28
2.3.2	Canal variante no tempo	28
2.4	Equalização no domínio do tempo	30
2.4.1	Equalizador <i>Zero-Forcing</i> no domínio do tempo	30
2.4.2	CP-TDE-ZF	31
2.4.3	ZP-TDE-ZF	31
2.4.4	CP-TDE-MMSE	32
2.4.5	ZP-TDE-MMSE	32
2.5	Equalização no domínio da frequência	32
2.5.1	Propriedade das DFTs	34
2.5.2	CP-FDE-ZF	34
2.5.3	ZP-FDE-ZF	36
2.5.4	CP-FDE-MMSE	37
2.5.5	Observação sobre equalizadores MMSE e ZF para sistemas CP-SC-FDE	37
2.5.6	ZP-FDE-MMSE	38
2.6	Resultados de simulação	38
2.6.1	Custo computacional	39
2.6.2	Desempenho	41
2.7	Considerações Finais	45
3	Equalização adaptativa no domínio da frequência	46
3.1	Equalização adaptativa	46
3.2	LMS - <i>Least Mean Square</i>	49
3.3	NLMS - <i>Normalized Least Mean Square</i>	50
3.4	RLS - <i>Recursive Least Squares</i>	51
3.5	Modo orientado à decisão (<i>Decision Directed</i>)	54
3.6	Resultados de simulação	55
3.6.1	Estimação com seqüência de treinamento reduzida	69
3.6.2	Canal fixo	69
3.7	Considerações Finais	71

4	Filtros com Realimentação	72
4.1	Análise do bloco recebido <i>single-carrier</i> (SC-FDE)	72
4.1.1	Análise do bloco recebido CP- <i>single-carrier</i> (CP-SC-FDE)	72
4.1.2	Análise do bloco recebido ZP- <i>single-carrier</i> (ZP-SC-FDE)	74
4.2	DFE - Solução MMSE	75
4.3	DFE Adaptativo	78
4.4	Resultados de simulação	80
4.5	Considerações finais	82
5	Sistema OFDM	83
5.1	Introdução ao OFDM	83
5.1.1	Fontes de degradação	85
5.2	Transmissão e recepção OFDM	86
5.2.1	Bloco CP-OFDM	86
5.2.2	Bloco ZP-OFDM	87
5.3	Equalização OFDM-FDE	88
5.3.1	CP- <i>Zero-Forcing</i>	88
5.3.2	CP-OFDM - MMSE	88
5.3.3	Observação sobre equalizadores MMSE e ZF para sistemas CP-OFDM-FDE	89
5.3.4	ZP-OFDM - <i>Zero-forcing</i>	90
5.3.5	ZP-OFDM - MMSE	91
5.4	Equalização adaptativa OFDM-FDE	92
5.4.1	CP-OFDM - RLS	94
5.4.2	ZP-OFDM - RLS	94
5.4.3	ZP-OFDM - RLS (Não diagonal)	95
5.5	Análise do bloco recebido OFDM	96
5.5.1	Análise do bloco recebido CP-OFDM	96
5.5.2	Análise do vetor recebido ZP-OFDM	97
5.6	União dos Modelos	97
5.7	Resultados de simulação	99
5.8	Considerações finais	102
6	Conclusão	103
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	103
	Referências Bibliográficas	106
	Referências Bibliográficas	106
A	Equalizadores <i>MMSE</i>	108
A.1	CP-SC-TDE	109
A.2	ZP-SC-TDE	109
A.3	CP-SC-FDE	109
A.4	ZP-SC-FDE	110
A.5	CP-OFDM-FDE	111
A.6	ZP-OFDM-FDE	112

Lista de figuras

1.1	Diagrama em blocos de a) OFDM e b) <i>single-carrier</i> com equalização no domínio da frequência.	16
2.1	Sinal $r(t)$ observado na recepção	22
2.2	Sinal $r(t)$ amostrado	23
2.3	Perfil de potência (em dB) dos retardos ou <i>power delay profile</i> do canal equivalente considerado.	28
2.4	Exemplo do espectro de Jakes com $f_d^{max} = 100Hz$, $f_c = 900MHz$ e velocidade do terminal móvel $v = 120Km/h$	29
2.5	Modelo do sistema <i>single-carrier</i> com equalização no domínio do tempo.	30
2.6	Modelo do sistema SC com equalização no domínio da frequência.	33
2.7	Complexidade dos algoritmos - Número de operações aritméticas.	40
2.8	Complexidade dos algoritmos - Número de operações aritméticas (zoom em torno de $N = 512$).	40
2.9	Comparação de desempenho entre os equalizadores TDE-ZF e TDE-MMSE no domínio do tempo em canal fixo com transmissão CP e ZP.	41
2.10	Comparação de desempenho entre os equalizadores FDE-ZF e FDE-MMSE em canal fixo com transmissão CP e ZP.	42
2.11	Comparação de desempenho dos equalizadores TDE-ZF e FDE-ZF para diferentes tamanhos de bloco com transmissão CP e ZP.	42
2.12	Comparação de desempenho dos equalizadores TDE-MMSE e FDE-MMSE para diferentes tamanhos de bloco com transmissão CP e ZP.	43
2.13	Comparação de desempenho dos equalizadores TDE-ZF e TDE-MMSE para diferentes tamanhos de bloco com transmissão CP e ZP no domínio do tempo.	43
2.14	Comparação de desempenho dos equalizadores FDE-ZF e FDE-MMSE para diferentes tamanhos de bloco com transmissão CP e ZP no domínio da frequência.	44
3.1	Estrutura da equalização adaptativa no domínio da frequência.	46
3.2	Erro médio quadrático dos algoritmos ZP-SC-FDE-RLS aproximado e original.	53
3.3	Estrutura da equalização adaptativa FDE com decisão direcionada.	54
3.4	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 0dB	55
3.5	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 0dB	56
3.6	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 3dB	56
3.7	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 3dB	57

3.8	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 6dB	57
3.9	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 6dB	58
3.10	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 9dB	58
3.11	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 9dB	59
3.12	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 12dB	59
3.13	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 12dB	60
3.14	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 15dB	60
3.15	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 15dB	61
3.16	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 18dB	61
3.17	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 18dB	62
3.18	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 21dB	63
3.19	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 21dB	64
3.20	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas CP-SC-FDE com RSR = 24dB	64
3.21	Erro médio quadrático dos algoritmos adaptativos nos sistemas ZP-SC-FDE com RSR = 24dB	65
3.22	CP-SC-FDE: Comparativo entre a BER para os diferentes algoritmos adaptativos em canal fixo	66
3.23	ZP-SC-FDE: Comparativo entre a BER para os diferentes algoritmos adaptativos em canal fixo	67
3.24	SC-FDE: Comparativo entre a BER do ZP e CP para os diferentes algoritmos em canal fixo	67
3.25	SC-FDE: Comparativo entre a BER do ZP e CP para os diferentes algoritmos em canal fixo (zoom em torno de 12dB)	68
3.26	SC-FDE-LMS: Comparativo entre a BER do ZP e CP para os diferentes algoritmos em canal fixo com seqüências de treinamento reduzida.	69
3.27	SC-FDE-NLMS: Comparativo entre a BER do ZP e CP para os diferentes algoritmos em canal fixo com seqüências de treinamento reduzida.	70
3.28	SC-FDE-RLS: Comparativo entre a BER do ZP e CP para os diferentes algoritmos em canal fixo com seqüências de treinamento reduzida.	70
4.1	Energia da matriz de erro associada à detecção do bloco CP.	74
4.2	Energia da matriz de erro associada à detecção do bloco ZP.	75
4.3	Estrutura de um sistema de transmissão com FDE-DFE.	76

4.4	Estrutura de um sistema de transmissão com FDE-DFE adaptativo.	79
4.5	Erro médio quadrático do modelo ZP-DFE. Componentes pré-DFE e pós-DFE.	80
4.6	ZP-SC: Probabilidade de erro de bit para sistemas com equalização linear (LE) e com <i>feedback</i> (DFE).	81
4.7	ZP-SC: Probabilidade de erro de bit para sistemas com equalização linear (LE) e com <i>feedback</i> (DFE), Zoom em 12dB.	81
5.1	Espectro ilustrativo de 4 portadoras na técnica OFDM.	84
5.2	4 subportadoras dentro de um símbolo OFDM.	85
5.3	Modelo CP-OFDM com equalização no domínio da frequência.	89
5.4	Estrutura da transmissão/recepção ZP-OFDM com equalização MMSE no domínio da frequência.	91
5.5	Estrutura unificada de transmissão OFDM-FDE.	92
5.6	Energia associada à primeira coluna da matriz de erro relativa ao bloco ZP-OFDM a ser equalizado.	98
5.7	Diagrama em blocos do modelo unificado OFDM/SC, incluindo o estágio de DFE	98
5.8	OFDM: Probabilidade de erro de bit para sistemas com equalização linear(LE).	99
5.9	Probabilidade de erro de bit para sistemas OFDM e SC com equalização linear(LE) FDE-ZF.	100
5.10	Probabilidade de erro de bit para sistemas OFDM e SC com equalização linear(LE) FDE-MMSE.	100
5.11	Probabilidade de erro de bit para OFDM e SC com equalização adaptativa linear.	101
A.1	Módulo das componentes da matriz \mathbf{F}_{MN} para $N = 16$ e $L = 4$.	110
A.2	ZP-SC-FDE: equalização MMSE x aproximado.	111
A.3	ZP-OFDM-FDE: equalização MMSE x aproximado.	113

Lista de tabelas

2.1 Complexidade dos Equalizadores

39