

Rodrigo Caiado de Lamare

**Estruturas e Algoritmos para
Detecção Multiusuário e
Supressão de Interferência
em Sistemas DS-CDMA**

TESE DE DOUTORADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica

Rio de Janeiro
Dezembro de 2004

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Rodrigo Caiado de Lamare

**Estruturas e Algoritmos para Detecção
Multiusuário e Supressão de Interferência
em Sistemas DS-CDMA**

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. Raimundo Sampaio Neto

Rio de Janeiro
Dezembro de 2004



Rodrigo Caiado de Lamare

**Estruturas e Algoritmos para Detecção
Multiusuário e Supressão de Interferência
em Sistemas DS-CDMA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Raimundo Sampaio Neto

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. José Mauro Pedro Fortes

PUC-Rio

Prof. Jacques Szczupak

PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

PUC-Rio

Prof. Paulo Sérgio Ramirez Diniz

COPPE-UFRJ

Prof. Marcello Luiz Rodrigues de Campos

COPPE-UFRJ

Prof. Ernesto Leite Pinto

IME

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Dezembro de 2004

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

Rodrigo Caiado de Lamare

Graduou-se em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e obteve o grau de Mestre em Ciências de Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Comunicações pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Ficha Catalográfica

de Lamare, Rodrigo C.

Estruturas e Algoritmos para Detecção Multiusuário e Supressão de Interferência em Sistemas DS-CDMA/ Rodrigo Caiado de Lamare; orientador: Raimundo Sampaio Neto. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

v., 203 f: il. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia – Teses. 2. Sistemas de comunicação. 3. Processamento de sinais para comunicações. 4. Estimativa adaptativa de parâmetros. 5. Sistemas DS-CDMA. 6. Supressão de interferência. 7. Cancelamento de interferência. I. Sampaio Neto, Raimundo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

aos meus pais

Agradecimentos

ao Professor Raimundo Sampaio Neto, pela orientação e dedicação ao longo do trabalho.

aos Professores, pela formação recebida durante os cursos.

aos funcionários e colegas estudantes do CETUC que, ao criar um ambiente agradável para pesquisa, contribuíram para este trabalho.

ao CNPQ, pelo apoio financeiro.

Resumo

de Lamare, Rodrigo C.; Sampaio Neto, Raimundo. **Estruturas e Algoritmos para Detecção Multiusuário e Supressão de Interferência em Sistemas DS-CDMA**. Rio de Janeiro, 2004. 203p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese apresenta novas estruturas e algoritmos para detecção multiusuário e supressão de interferência em sistemas DS-CDMA. São investigadas estruturas baseadas em redes neurais recorrentes para projeto de receptores com decisão realimentada e desenvolvidos algoritmos adaptativos para combater a interferência de múltiplo acesso e a interferência entre símbolos. Novos algoritmos baseados na minimização da taxa de erro de bits são examinados e generalizados para esquemas de detecção com cancelamento de interferência. Para situações onde uma seqüência de treinamento não é disponibilizada, é considerado um novo critério de projeto às cegas de receptores com restrições lineares baseado na função custo módulo constante. Algoritmos adaptativos às cegas baseados neste novo critério são usados para estimar os parâmetros de um receptor linear e do canal de comunicações. São também desenvolvidos novos mecanismos às cegas de ajuste do passo para algoritmos do tipo gradiente estocástico em receptores lineares com base no critério de mínima variância com restrições. Com base nos critérios de mínima variância e módulo constante com restrições, são desenvolvidos critérios de projeto às cegas para receptores com decisão realimentada e propostos algoritmos adaptativos para essas estruturas. Um novo esquema de cancelamento sucessivo de interferência baseado no conceito de arbitragem é proposto e incorporado a uma estrutura de recepção com decisão realimentada para o enlace reverso. Em seguida, o novo esquema de cancelamento de interferência é combinado com uma estrutura iterativa que emprega múltiplos estágios, resultando em melhores estimativas do receptor e um desempenho uniforme para os usuários. Finalmente, são apresentadas novas estruturas de recepção com posto reduzido, baseadas em filtros FIR interpolados e interpoladores variantes no tempo, e desenvolvidos algoritmos adaptativos às cegas e supervisionados para o novo esquema.

Palavras-chave

Processamento de sinais para comunicações, estimação adaptativa de parâmetros, sistemas DS-CDMA, supressão de interferência, cancelamento de interferência, receptores com decisão realimentada.

Abstract

de Lamare, Rodrigo C.; Sampaio Neto, Raimundo. **Structures and Algorithms for Multiuser Detection and Interference Suppression in DS-CDMA Systems**. Rio de Janeiro, 2004. 203p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents new structures and algorithms for multiuser detection and interference suppression in DS-CDMA systems. Structures based on recurrent neural networks are investigated for decision feedback receivers and adaptive algorithms are developed for combatting multiple access interference and intersymbol interference. New algorithms based on the minimization of the bit error rate are examined and generalized for detection schemes with interference cancellation. For situations where a training sequence is not available, a new blind criterion, based on the constant modulus cost function with linear constraints is considered. Based on this novel criterion, blind adaptive algorithms are used for estimating the parameters of linear receivers and the channel. New blind adaptive mechanisms for adjusting the step size of stochastic gradient algorithms, using the constrained minimum variance criterion, are also presented for estimating the parameters of linear receivers and the channel. Based on constrained minimum variance and constrained constant modulus criteria, the blind design of decision feedback structures is considered and blind adaptive algorithms are derived. A new successive interference cancellation scheme using the concept of arbitration is proposed and incorporated within a decision feedback structure for uplink scenarios. Then, the new interference cancellation scheme is combined with an iterative structure that employs multiple stages, resulting in improved receiver estimates and providing uniform performance over the users. Finally, novel reduced-rank receiver structures, based on interpolated FIR filters with time-varying interpolators, are presented and blind and supervised adaptive algorithms are developed for this new scheme.

Keywords

Communications signal processing, adaptive parameter estimation, DS-CDMA systems, interference suppression, interference cancellation, decision feedback detection.

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Modelos de Sinais para Sistemas DS-CDMA	7
2.1	Modelo Assíncrono para os Enlaces Direto e Reverso	9
2.2	Modelo Síncrono para o Enlace Direto	12
2.3	Modelo Síncrono para o Enlace Reverso	14
3	Receptores com Redes Neurais Recorrentes	15
3.1	Receptores com Decisão Realimentada e Filtros Lineares	16
3.2	Receptores Neurais com Decisão Realimentada	18
3.3	Algoritmos Adaptativos para o Receptor Neural DF	21
3.4	Simulações	22
4	Receptores baseados na Mínima Taxa de Erro	33
4.1	Minimização da BER em Receptores com Decisão Realimentada	36
4.2	Algoritmos Adaptativos	38
4.3	Método de <i>Averaging</i> para Aceleração da Convergência	42
4.4	Simulações	43
5	Receptores Lineares às Cegas	54
5.1	Receptores Lineares de Mínima Variância	58
5.2	Algoritmos Adaptativos SG às Cegas baseados na Mínima Variância	61
5.3	Mecanismos às Cegas de Passo Variável	63
5.4	Análise de Convergência	69
5.5	Receptores Lineares Baseados na Função Custo CM com Restrições	77
5.6	Algoritmos Adaptativos Baseados no Critério CCM	79
5.7	Simulações	82
6	Receptores com Decisão Realimentada às Cegas	101
6.1	Receptores com Decisão Realimentada às Cegas	102
6.2	Detecção Iterativa com Arbitragem Paralela	107
6.3	Algoritmos Adaptativos às Cegas	112
6.4	Simulações	118
7	Receptores com Posto Reduzido usando Filtros Interpolados e Interpoladores Adaptativos	129
7.1	Receptores Lineares Interpolados	132
7.2	Algoritmos Adaptativos	137
7.3	Análise de Convergência e Propriedades	143
7.4	Simulações	151
8	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	166
8.1	Resumo dos Resultados e Discussão	166
8.2	Direções Futuras	170

A	Normalização dos Passos dos Algoritmos SG em Receptores Lineares CMV	172
A.1	Derivação do Passo Normalizado: Percurso Único	172
A.2	Derivação do Passo Normalizado: Multi-percurso	173
B	Propriedades de Convergência da Técnica CCM	174
C	Normalização dos Passos dos Algoritmos CCM-SG em Receptores Lineares	177
D	Normalização dos Passos dos Algoritmos SG em Receptores DF	179
D.1	Derivação do Passo Normalizado: Caso CCM-SG	179
D.2	Derivação do Passo Normalizado: Caso CMV-SG	180
E	Normalização dos Passos dos Algoritmos SG em Receptores Lineares Interpolados	182
F	Propriedades de Convergência do Método Iterativo com Filtros Inter- polados e Interpoladores Variantes no Tempo	184
F.1	Projeto do Receptor Interpolado MMSE	184
F.2	Projeto do Receptor Interpolado CMV	186

Lista de Figuras

2.1	Enlace direto.	7
2.2	Enlace reverso.	8
2.3	Diagrama em blocos do receptor centralizado.	8
2.4	Diagrama em blocos do receptor descentralizado.	9
3.1	Diagrama em blocos de um receptor DF.	17
3.2	Estrutura da seção direta do receptor multiusuário adaptativo baseada em uma rede neural recorrente.	19
3.3	Diagrama em blocos do receptor multiusuário adaptativo com decisão realimentada e uma rede neural recorrente na seção direta e um filtro linear FIR na seção realimentada.	20
3.4	Desempenho em termos de BER para os receptores em um canal AWGN com $K = 3$ usuários.	24
3.5	Desempenho em termos de BER dos receptores versus número de usuário em um canal AWGN com $E_b/N_0 = 6dB$.	24
3.6	Desempenho em termos de BER dos receptores em um canal invariante no tempo e seletivo em frequência com função de transferência dada por $H(z) = 1 - 0.25z^{-1} + 0.4z^{-2}$ e AWGN para $K = 3$ usuários.	25
3.7	Desempenho em BER versus número de usuários em um canal invariante no tempo e seletivo em frequência com função de transferência dada por $H(z) = 1 - 0.25z^{-1} + 0.4z^{-2}$ e AWGN com $E_b/N_0 = 8dB$.	26
3.8	Desempenho em BER versus E_b/N_0 dos MUDs em um canal plano em frequência com desvanecimento de Rayleigh e AWGN para 3 usuários.	26
3.9	Desempenho em BER versus número de usuários dos MUDs em um canal plano em frequência com desvanecimento de Rayleigh e AWGN com $E_b/N_0 = 10dB$.	27
3.10	Desempenho em BER versus E_b/N_0 para os receptores em canais seletivos em frequência com desvanecimento de Rayleigh e AWGN para $K = 3$ usuários.	28
3.11	Desempenho em BER versus número de usuários em canais seletivos em frequência com desvanecimento de Rayleigh e AWGN para $E_b/N_0 = 10dB$.	28
3.12	Convergência em termos de BER dos MUD em um canal plano em frequência com desvanecimento de Rayleigh e AWGN, $E_b/N_0 = 10$ dB e $K = 4$ usuários em um cenário onde os terminais móveis se deslocam com velocidade de 80km/h. Os parâmetros dos algoritmos são $\mu_w = 0.005$, $\mu_n = 0.005$ e $\mu_f = 0.0015$.	30
3.13	Desempenho em BER versus E_b/N_0 dos MUDs em um canal plano em frequência com desvanecimento de Rayleigh e AWGN, em um cenário onde os terminais móveis se deslocam com velocidade de 80km/h. Os parâmetros dos algoritmos são $\mu_w = 0.005$, $\mu_n = 0.005$ e $\mu_f = 0.0015$.	30

- 3.14 Desempenho em BER versus número de usuários dos MUDs em um canal plano em frequência com desvanecimento de Rayleigh e AWGN, $E_b/N_0 = 8$ dB em um cenário onde os terminais móveis se deslocam com velocidade de 80km/h. Os parâmetros dos algoritmos são $\mu_w = 0.005$, $\mu_n = 0.005$ e $\mu_f = 0.0015$. 31
- 3.15 Desempenho em BER dos MUDs em um canal seletivo em frequência com desvanecimento de Rayleigh, $E_b/N_0 = 10$ dB e com $K = 4$ usuários em um cenário onde os terminais móveis se deslocam com velocidade de 80km/h. Os parâmetros dos algoritmos são $\mu_w = 0.0025$, $\mu_n = 0.0025$ e $\mu_f = 0.0015$. 31
- 3.16 Desempenho em BER versus E_b/N_0 dos MUDs em um canal seletivo em frequência com desvanecimento de Rayleigh, em um cenário onde os terminais móveis se deslocam com velocidade de 80km/h. Os parâmetros dos algoritmos são $\mu_w = 0.0025$, $\mu_n = 0.0025$ e $\mu_f = 0.0015$. 32
- 3.17 Desempenho em BER versus número de usuários dos MUDs em um canal seletivo em frequência com desvanecimento de Rayleigh, $E_b/N_0 = 8$ dB em um cenário onde os terminais móveis se deslocam com velocidade de 80km/h. Os parâmetros dos algoritmos são $\mu_w = 0.0025$, $\mu_n = 0.0025$ e $\mu_f = 0.0015$. 32
- 4.1 Diagrama em blocos do receptor multiusuário com decisão realimentada. 35
- 4.2 Convergência dos algoritmos com receptores lineares e com decisão realimentada para $E_b/N_0 = 10$ dB e canal com função de transferência $H(z) = 1, 2 + 1, 1z^{-1} - 0, 2z^{-2}$, onde o operador z^{-1} introduz um retardo de um *chip* no sinal transmitido. 44
- 4.3 Desempenho em termos de BER dos MUDs para o canal com $H(z) = 1, 2 + 1, 1z^{-1} - 0, 2z^{-2}$. 45
- 4.4 Desempenho em BER dos receptores versus número de usuários com $E_b/N_0 = 8$ dB e canal $H(z) = 1, 2 + 1, 1z^{-1} - 0, 2z^{-2}$. 46
- 4.5 Desempenho em convergência dos algoritmos para um receptor linear em um canal com $H(z) = 1, 1 + 1, 2z^{-1} - 0, 2z^{-2}$ e $\frac{E_b}{N_0} = 10$ dB. 46
- 4.6 Desempenho em BER versus E_b/N_0 para MUDs lineares em um canal $H(z) = 1, 1 + 1, 2z^{-1} - 0, 2z^{-2}$ e AWGN . 48
- 4.7 Desempenho em convergência dos algoritmos com $E_b/N_0 = 10$ dB em um canal seletivo em frequência com desvanecimento. 48
- 4.8 Desempenho em BER dos receptores DF com $K = 4$. 49
- 4.9 Desempenho em BER versus número de usuários dos MUDs DF com $E_b/N_0 = 12$ dB. 50
- 4.10 Convergência dos algoritmos do tipo gradiente estocástico com $K = 4$ usuários, o móvel move-se com 80 km/h com $E_b/N_0 = 12$ dB. Parâmetros: $\mu_w = 0,001$ para algoritmos convencionais e $\mu_w = 0,0025$ para algoritmos com *averaging*, $\rho = 8\sigma^2$, $\beta = 0,15$ e $\tau = 0,15$. 50

- 4.11 Convergência dos algoritmos do tipo gradiente estocástico com $K = 4$ usuários, o móvel move-se com 80 km/h com $E_b/N_0 = 12$ dB. Parâmetros: $\alpha = 0,01$, $\delta = 0,0005$ para algoritmos convencionais e $\delta = 0,001$ para algoritmos com *averaging*, $\rho = 8\sigma^2$, $\beta = 0,15$ e $\tau = 0,15$. 51
- 4.12 Desempenho em BER versus número de usuários para algoritmos do tipo gradiente estocástico, em um cenário onde o móvel move-se com 80 km/h com $E_b/N_0 = 10$ dB. Parâmetros: $\mu_w = 0,001$ para algoritmos convencionais e $\mu_w = 0,0025$ para algoritmos com *averaging*, $\rho = 4\sigma^2$, $\beta = 0,15$ e $\tau = 0,15$. 52
- 4.13 Desempenho em BER versus número de usuários para algoritmos do tipo gradiente-Newton, em um cenário onde o móvel move-se com 80 km/h com $E_b/N_0 = 10$ dB. Parâmetros: $\alpha = 0,01$, $\delta = 0,0005$ para algoritmos convencionais e $\delta = 0,001$ para algoritmos com *averaging*, $\rho = 8\sigma^2$, $\beta = 0,15$ e $\tau = 0,15$. 52
- 5.1 Diagrama em blocos de um receptor linear às cegas com base no critério de mínima variância e estimação de canal. 59
- 5.2 Complexidade em termos de operações aritméticas (multiplicações e adições) por símbolo para os mecanismos de passo variável em ambientes com (a) percurso único (b) multi-percurso. 69
- 5.3 Diagrama em blocos de um receptor linear às cegas com base no critério de módulo constante (CM) e estimação de canal. 78
- 5.4 MSE analítico versus desempenho simulado para os mecanismos de passo variável em canal plano em frequência e $K = 5$ usuários. 85
- 5.5 MSE analítico versus desempenho simulado para os mecanismos de passo variável em canal seletivo em frequência e $K = 8$ usuários. 85
- 5.6 MSE analítico versus desempenho simulado para os mecanismos de passo variável em um canal plano em frequência com $K = 5$ usuários. 86
- 5.7 MSE analítico versus desempenho simulado para os mecanismos de passo variável em um canal seletivo em frequência com $K = 8$ usuários. 87
- 5.8 Desempenho em SINR para os mecanismos de passo variável sem desvanecimento e $E_b/N_0 = 15$ dB . 88
- 5.9 Desempenho em SINR para os mecanismos de passo variável com desvanecimento ($f_d T = 0.001$) e $E_b/N_0 = 15$ dB. 88
- 5.10 (a) Desempenho em SINR e (b) Desempenho em MSE dos estimadores de canal para os mecanismos de passo variável sem desvanecimento e $E_b/N_0 = 15$ dB . 89
- 5.11 (a) Desempenho em SINR e (b) valores do passo para os mecanismos em um ambiente não estacionário com canal plano em frequência e AWGN e $E_b/N_0 = 15$ dB . 89
- 5.12 (a) Desempenho em SINR e (b) valores do passo para os mecanismos em um ambiente não estacionário com canal $p_0 = 1$, $p_1 = 0.5$ e $p_2 = 0.5$ e $E_b/N_0 = 15$ dB . 90
- 5.13 Desempenho em BER versus (a) ganho de processamento (N), $L_p = 3$ e (b) número de percursos no canal (L_p) para os mecanismos de passo variável sem desvanecimento e usando seqüências de espalhamento aleatórias. 91

5.14	Desempenho em BER versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K) para os mecanismos com passo variável em canal AWGN e seqüências de espalhamento aleatórias.	92
5.15	Desempenho em BER versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K) para os mecanismos com passo variável em um canal AWGN usando seqüências de espalhamento aleatórias.	93
5.16	Desempenho em BER versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K) para os mecanismos de passo variável sem desvanecimento usando seqüências de espalhamento aleatórias.	93
5.17	Desempenho em BER versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K) para os mecanismos de passo variável sem desvanecimento usando seqüências de espalhamento aleatórias.	94
5.18	Desempenho em BER versus $f_d T$ com (a) seqüências de espalhamento de Gold e dois interferentes com 5 e 10 dB de potência acima do nível do usuário de interesse e (b) seqüências de espalhamento aleatórias e usuários equipotentes na média.	95
5.19	Desempenho em BER versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K) para os mecanismos de passo variável com desvanecimento e seqüências de espalhamento de Gold e dois interferentes com 5 e 10 dB de potência acima do nível do usuário de interesse na média.	95
5.20	Desempenho em SINR para um ambiente estacionário e sem desvanecimento e canal fixo.	97
5.21	Desempenho em SINR para um ambiente não estacionário e com desvanecimento onde usuários entram e saem do sistema.	97
5.22	BER versus E_b/N_0 em um ambiente estacionário e canal fixo.	98
5.23	BER versus E_b/N_0 em um ambiente com desvanecimento.	99
5.24	BER versus número de usuários (K) em um ambiente estacionário e canal fixo.	99
5.25	BER versus número de usuários (K) em um ambiente com desvanecimento.	100
6.1	Diagrama em blocos de um receptor com decisão realimentada às cegas.	103
6.2	Diagrama em blocos do receptor SPA-DF às cegas proposto.	108
6.3	Diagrama em blocos do receptor iterativo de dois estágios com o esquema SPA-DF proposto no primeiro estágio. O segundo estágio pode empregar estruturas S-DF ou P-DF para demodular usuários em ordem reversa com relação ao primeiro ramo do primeiro estágio, que usa a abordagem convencional S-DF.	111
6.4	Diagrama em blocos de um receptor multiusuário DF adaptativo às cegas.	112
6.5	Desempenho em SINR dos algoritmos SG em um cenário não estacionário (a) Canais aleatórios sem desvanecimento com $E_b/N_0 = 12$ dB (b) Canais com desvanecimento com $f_d T = 0,001$ e $E_b/N_0 = 15$ dB.	120

6.6	Desempenho em SINR dos algoritmos RLS em um cenário não estacionário (a) Canais aleatórios sem desvanecimento com $E_b/N_0 = 12$ dB (b) Canais com desvanecimento com $f_d T = 0,0025$ e $E_b/N_0 = 15$ dB.	121
6.7	Desempenho em SINR dos algoritmos RLS com detectores iterativos para diferentes L com $E_b/N_0 = 12$ em um ambiente estacionário com canais aleatórios usando o critério (a) CCM (b) CMV.	121
6.8	Desempenho em SINR dos algoritmos SG com $E_b/N_0 = 15$ em ambiente não estacionário com desvanecimento ($f_d T = 0,001$) usando (a) CCM e (b) CMV.	122
6.9	Desempenho em SINR dos algoritmos RLS com $E_b/N_0 = 15$ em ambiente não estacionário com desvanecimento ($f_d T = 0,0025$) usando (a) CCM e (b) CMV.	123
6.10	Desempenho em BER dos algoritmos SG em ambiente estacionário com canais aleatórios versus (a) E_b/N_0 com $K = 12$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	124
6.11	Desempenho em BER dos algoritmos SG em ambiente não estacionário com desvanecimento ($f_d T = 0,001$) versus (a) E_b/N_0 com $K = 8$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	124
6.12	Desempenho em BER dos algoritmos RLS em um ambiente estacionário com canais aleatórios versus (a) E_b/N_0 com $K = 12$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	125
6.13	Desempenho em BER dos algoritmos RLS em um ambiente não estacionário com desvanecimento ($f_d T = 0,0025$) versus (a) E_b/N_0 com $K = 10$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	125
6.14	Desempenho em BER dos algoritmo CCM-SG em um ambiente dinâmico versus (a) E_b/N_0 com $K = 8$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	126
6.15	Desempenho em BER dos algoritmo CMV-SG em um ambiente dinâmico versus (a) E_b/N_0 com $K = 8$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	126
6.16	Desempenho em BER dos algoritmo CMV-RLS em um ambiente dinâmico versus (a) E_b/N_0 com $K = 10$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	127
6.17	Desempenho em BER dos algoritmo CMV-SG em um ambiente dinâmico versus (a) E_b/N_0 com $K = 10$ usuários e (b) número de usuários (K) com $E_b/N_0 = 15$ dB.	127
6.18	Desempenho em BER individual dos receptores em ambiente dinâmico versus índice do usuário para algoritmos (a) SG e (b) RLS.	128
6.19	Desempenho em BER individual dos receptores iterativos em ambiente dinâmico versus índice do usuário para algoritmos (a) CCM-RLS e (b) CMV-RLS.	128
7.1	Diagrama em blocos da estrutura do receptor com posto reduzido.	133
7.2	Diagrama em blocos da estrutura do receptor AIFIR.	137

- 7.3 Desempenho de convergência em MSE para os resultados analíticos e simulados versus número de símbolos recebidos usando o algoritmo LMS no modo de treinamento. 154
- 7.4 Desempenho de convergência em MSE para o resultados analíticos e simulados versus número de símbolos recebidos usando o algoritmo SG às cegas. 155
- 7.5 Projeto assistido dos filtros interpoladores. Algoritmos (a) NLMS com $E_b/N_0 = 12$ dB e (b) RLS com $E_b/N_0 = 12$ dB. 156
- 7.6 Projeto às cegas dos filtros interpoladores. Algoritmos (a) SG com $E_b/N_0 = 15$ dB e (b) do tipo RLS com $E_b/N_0 = 15$ dB. 157
- 7.7 Desempenho de SINR para receptores (a) MMSE e (b) CMV (ou autodidatas). 158
- 7.8 Desempenho de SINR com algoritmos NLMS e canal dado por $p_0 = 1$, $p_2 = 0.5$ e $p_4 = 0.3$ (espaçados por $2T_c$) (a) $E_b/N_0 = 8$ dB e 3 interferentes com níveis de potência 7 dB acima do sinal desejado (b) $E_b/N_0 = 12$ dB com desvanecimento e onde as potências recebidas dos interferentes variam em torno daquela do sinal desejado com variáveis aleatórias do tipo log-normal com desvio padrão associado de 3 dB. 159
- 7.9 Desempenho de SINR dos receptores com desvanecimento e canal dado por $p_0 = 1$, $p_2 = 0.7$ e $p_4 = 0.5$ (espaçados por $2T_c$) e algoritmos RLS com (a) $E_b/N_0 = 12$ dB e 3 interferentes com níveis de potência 10 dB acima do usuário desejado e (b) $E_b/N_0 = 15$ dB onde as potências recebidas dos interferentes variam em torno daquela do sinal de interesse com variáveis aleatórias do tipo log-normal com desvio padrão associado de 3 dB. 159
- 7.10 Desempenho de SINR dos algoritmos SG às cegas e canal com $p_0 = 1$, $p_2 = 0.5$ e $p_4 = 0.5$ (espaçados por $2T_c$) onde 2 interferentes trabalham com um nível de potência 7 dB acima do sinal desejado que opera com (a) sem desvanecimento e $E_b/N_0 = 12$ dB e (b) $E_b/N_0 = 15$ dB e com desvanecimento. 160
- 7.11 Desempenho de SINR dos algoritmos do tipo RLS às cegas onde 2 interferentes trabalham com um nível de potência 7 dB acima do sinal desejado que opera com (a) $E_b/N_0 = 15$ com desvanecimento e canal dado por $p_0 = 1$, $p_2 = 0.5$ e $p_4 = 0.5$ (espaçados por $2T_c$) dB e (b) $E_b/N_0 = 15$ dB sem desvanecimento, canais aleatórios de 3 percursos, onde em cada repetição o atraso do segundo percurso (τ_2) é descrito por uma vau entre 1 e 4 chips e o terceiro dado por uma vau entre 1 e $(5 - \tau_2)$ chips e as potências recebidas dos interferentes variam com variáveis aleatórias do tipo log-normal com desvio padrão associado de 3 dB. 161
- 7.12 Desempenho em BER para os receptores MMSE versus (a) E_b/N_0 e (b) Número de usuários (K). 162
- 7.13 Desempenho em BER para os receptores CMV versus (a) E_b/N_0 e (b) Número de usuários (K). 162
- 7.14 Desempenho em BER dos algoritmos NLMS em canal com desvanecimento versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K). 164

7.15	Desempenho em BER dos algoritmos RLS em canal com desvanecimento versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K).	164
7.16	Desempenho em BER dos algoritmos SG às cegas em canal com desvanecimento versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K).	165
7.17	Desempenho em BER dos algoritmos do tipo RLS às cegas em canal com desvanecimento versus (a) E_b/N_0 e (b) número de usuários (K).	165
F.1	(a) Superfície de Desempenho de Erro da função $f(v, w) = (1 - w * r * v)^2$ (b) Curvas de contorno mostrando que a função não exibe mínimos locais e possui múltiplos mínimos globais.	186
F.2	Superfície de Desempenho de Erro do Projeto dos Receptores Interpolados MMSE com $E_b/N_0 = 15dB$.	187
F.3	Superfície de Desempenho de Erro do Projeto dos Receptores Interpolados CMV com $E_b/N_0 = 15dB$.	188

Lista de Tabelas

5.1	Complexidade computacional adicional dos mecanismos de passo variável para canais com percurso único.	68
5.2	Complexidade computacional adicional dos mecanismos de passo variável para canais com multi-percurso.	69
5.3	Parâmetros para os mecanismos de passo variável: convergência para o mesmo MSE.	84
5.4	Parâmetros otimizados para os mecanismos de passo variável: convergência para o menor MSE.	86