

**Tiago Travassos Vieira Vinhoza**

**Estruturas e Algoritmos Adaptativos para  
Detecção às Cegas de Sinais DS-CDMA**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção Do título de Doutor em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Raimundo Sampaio Neto

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2007

**Tiago Travassos Vieira Vinhoza**

**Estruturas e Algoritmos Adaptativos para  
Detecção às Cegas de Sinais 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 requisito parcial 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. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia**

PUC-Rio

**Prof. Pedro Henrique Gouvêa Coelho**

UERJ

**Prof. Marcello Luiz Rodrigues de Campos**

Coppe-UFRJ

**Prof. Jacques Szczupak**

Engenho

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 7 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.

### **Tiago Travassos Vieira Vinhoza**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase em Telecomunicações pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 1999. Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica com área de concentração em Sistemas de Comunicações pela PUC-Rio, 2003.

#### Ficha Catalográfica

Vinhoza, Tiago Travassos Vieira

Estruturas e Algoritmos Adaptativos para Detecção às Cegas de Sinais DS-CDMA / Tiago Travassos Vieira Vinhoza; orientador: Raimundo Sampaio Neto. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2007.

v., 108 f: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. DS-CDMA. 3. Receptores Cegos. 4. Detecção Multiusuário. 5. Supressão de Interferência. 6. Filtragem Adaptativa. I. Sampaio Neto, Raimundo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

à minha mãe Rosane e a meu pai José Alberto.

## Agradecimentos

Ao professor Raimundo Sampaio Neto, pela orientação, dedicação, incentivo e ajuda ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Laboratório de Sistemas do CETUC: José Mauro Fortes, Weiler Finamore, José Roberto Boisson de Marca e Abraham Alcain pela formação recebida.

Ao professor Jacques Szczupak pelo aprendizado nos cursos de Filtros Digitais e Filtros Adaptativos.

Aos professores Marcello Luiz Rodrigues de Campos, Pedro Henrique Gouvêa Coelho e Marco Antônio Grivet Mattoso Maia pelas sugestões.

Ao professor Rodrigo Caiado de Lamare pelo apoio ao longo dos quatro anos de doutorado que contribuiu de forma decisiva na minha formação como pesquisador.

Aos demais professores da PUC-Rio que ao longo de 12 anos contribuíram para a minha formação.

Aos meus pais, à minha irmã Luiza e a toda minha família pela confiança, carinho e incentivo.

Aos amigos do CETUC, em especial aos do Laboratório de Sistemas de Comunicações, pelo ótimo ambiente de trabalho proporcionado e aos colegas de pesquisa Fabian Backx, César Medina e Bernardo Costa pelos enriquecedores debates.

A todos os demais funcionários do CETUC e do Departamento de Engenharia Elétrica.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## Resumo

Vinhoza, Tiago Travassos Vieira; Sampaio Neto, Raimundo. **Estruturas e Algoritmos Adaptativos para Detecção às Cegas de Sinais DS-CDMA**. Rio de Janeiro, 2007. 108p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese apresenta novas estruturas e algoritmos adaptativos para detecção às cegas de sinais DS-CDMA. São investigados receptores cegos com restrições lineares baseados nas funções custo de mínima variância (CMV) e módulo constante (CCM). Algoritmos adaptativos do tipo Affine-Projection para estimação dos parâmetros do receptor são desenvolvidos e seu desempenho em estado estacionário é analisado. Também são apresentados algoritmos adaptativos para estimação às cegas do canal de comunicações. Em seguida, novas estruturas de canceladores de interferência são propostas. Primeiramente um cancelador de interferência paralelo (PIC) linear baseado na função custo CCM é proposto. Em seguida é desenvolvido um novo esquema não-supervisionado de cancelamento sucessivo de interferência (SIC), baseado no conceito de arbitragem paralela. Por fim, é apresentado um esquema híbrido (HIC) que combina a estrutura SIC com uma estrutura multi-estágio, resultando em melhores estimativas para detecção e desempenho uniforme para os usuários do sistema.

## Palavras-chave

DS-CDMA. Receptores Cegos. Detecção Multiusuário. Supressão de Interferência. Filtragem Adaptativa.

## Abstract

Vinhoza, Tiago Travassos Vieira; Sampaio Neto, Raimundo. **Structures and Adaptive Algorithms for Blind Detection of DS-CDMA Signals**. Rio de Janeiro, 2007. 108p. PhD Thesis — Department of Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents new structures and adaptive algorithms for blind detection of DS-CDMA signals. Linearly constrained minimum variance (CMV) and constant modulus (CCM) receivers are investigated. Blind adaptive Affine-Projection like algorithms for receiver parameter estimation are derived and its steady-state performance is analyzed. Blind adaptive channel estimation algorithms are also presented. This work also proposes new interference cancellation structures. Firstly, a blind linear parallel interference canceller (PIC) based on the CCM cost function is proposed. Secondly, a new non-supervised serial interference canceller (SIC) based on the parallel arbitration concept is developed. Finally, an hybrid interference cancellation scheme (HIC) which combines SIC and multiple PIC stages is presented.

## Keywords

DS-CDMA. Blind Receivers. Multiuser Detection. Interference Suppression. Adaptive Filtering.

## Sumário

1	Introdução	<b>13</b>
1.1	Organização da Tese	14
2	Modelo de Sinais DS-CDMA	<b>16</b>
2.1	Sistema DS-CDMA Assíncrono - Canal Reverso	16
2.2	Sistema DS-CDMA Assíncrono - Enlace Direto	20
2.3	Sistema DS-CDMA Síncrono - Enlace Reverso	21
2.4	Sistema DS-CDMA Síncrono - Enlace Direto	21
2.5	Revisão de Detecção Multiusuário	22
2.5.1	Receptor Convencional	22
2.5.2	Receptor Ótimo	24
2.5.3	Decorrelator e Receptor MMSE	25
2.5.4	Detecção Multiusuário por Grupos	26
3	Receptores Cegos Lineares	<b>28</b>
3.1	Receptores de Mínima Variância	30
3.1.1	Receptores de Mínima Variância para Canais com um percurso	30
3.1.2	Receptores de Mínima Variância para Canais Multipercurso	31
3.2	Receptor Melhorado e Estimação de Canal	33
3.3	Receptores baseados na função custo módulo constante	34
3.3.1	Receptores CCM para Canais Planos	34
3.3.2	Receptores CCM para Canais Multipercurso	35
3.4	Simulações e Resultados	35
4	Algoritmos Adaptativos para Supressão de Interferência	<b>40</b>
4.1	Algoritmos Adaptativos para Receptores MV	41
4.1.1	Algoritmo SG para canais com um percurso	41
4.1.2	Algoritmo SG para canais multipercurso	42
4.1.3	Algoritmo tipo RLS para canais multipercurso	42
4.1.4	Algoritmo tipo Affine-Projection	43
4.2	Algoritmos Adaptativos para Receptores CM	45
4.2.1	Algoritmo SG para canais multipercurso	45
4.2.2	Algoritmo tipo RLS para canais multipercurso	46
4.2.3	Algoritmo tipo Affine-Projection	46
4.3	Análise dos Algoritmos em Estado Estacionário	48
4.3.1	Algoritmo CMV SG	49
4.3.2	Algoritmo CMV Affine-Projection	50
4.3.3	Algoritmo CCM SG	54
4.4	Resultados para Supressão de Interferência em CDMA	55
4.5	Simulações e Resultados	56
5	Canceladores de Interferência Cegos	<b>63</b>
5.1	PIC Cego Adaptativo baseado no Critério CCM	64
5.2	Simulações e Resultados	66



5.3	Estruturas Não-Lineares Canceladoras de Interferência com Restrições Lineares	70
5.3.1	Cancelador de Interferência Serial (SIC)	71
5.3.2	Cancelador de Interferência Híbrido (HIC)	72
5.4	Cancelamento de Interferência Iterativo Baseado em Arbitragem Paralela e no Critério de Módulo Constante	73
5.4.1	Receptores SIC Iterativos (IT-SIC)	73
5.4.2	Receptores HIC iterativos (IT-HIC)	76
5.5	Simulações e Resultados	77
6	Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros	86
	Referências Bibliográficas	87
A	Método iterativo para obtenção do maior e do menor autovalor de uma matriz hermitiana	98
B	Análise de convexidade da função custo CCM	101
C	Uso de $\mathbf{R}_k$ na estimação de canal	104
D	Obtenção dos passos normalizados	105
D.1	CMV-SG	105
D.2	CCM-SG	106
D.3	CMV-AP	107
	Sumário das notações	108

## Lista de figuras

2.1	Enlace Reverso	17
2.2	Filtro Casado ao Pulso de Chip	18
2.3	Enlace Direto	20
3.1	Convergência para canal multipercurso invariante no tempo. $E_b/N_0 = 15\text{dB}$ , $\lambda = 0.995$ , $K=8$ usuários	37
3.2	Convergência para canal multipercurso variante no tempo. $E_b/N_0 = 15\text{dB}$ , $K=8$ usuários, $\lambda = 0.995$ , $f_dT = 10^{-2}$ .	38
3.3	BER versus $E_b/N_0$ para canal multipercurso invariante no tempo, $\lambda = 0.995$	38
3.4	BER versus $E_b/N_0$ para canal multipercurso variante no tempo, $\lambda = 0.995$ , $f_dT = 10^{-2}$ .	39
3.5	BER versus número de usuários para canal multipercurso variante no tempo, $\lambda = 0.995$ , $f_dT = 10^{-2}$ .	39
4.1	BER versus símbolos recebidos para um cenário não estacionário ( $f_dT = 10^{-4}$ ).	58
4.2	SINR versus número de símbolos transmitidos para um cenário de desvanecimento rápido ( $f_dT = 10^{-3}$ ).	59
4.3	Convergência do algoritmo AP para diferentes valores de $P$ .	60
4.4	SINR em estado estacionário versus $E_b/N_0$ para o algoritmo AP.	60
4.5	Convergência e SINR em estado estacionário para sistemas com $K = 8$ e $K = 16$ usuários.	61
4.6	SINR versus passo $\mu_0$ .	62
4.7	Erro médio em excesso do algoritmo CCM-SG: convergência e valor em estado estacionário	62
5.1	SINR versus número de símbolos transmitidos para versão SG, $E_b/N_0 = 15\text{ dB}$ , $K = 12$ usuários e ( $f_dT = 10^{-3}$ ).	67
5.2	SINR versus número de símbolos transmitidos para versão SG, $E_b/N_0 = 15\text{ dB}$ , $K = 12$ usuários e ( $f_dT = 10^{-3}$ ).	68
5.3	(a) BER versus $E_b/N_0$ para CCM-SG, $K = 8$ usuários, (b) BER versus número de usuários CCM-SG, $E_b/N_0 = 15\text{ dB}$ , ( $f_dT = 10^{-3}$ ).	69
5.4	(a) BER versus $E_b/N_0$ para CCM-RLS, $K = 8$ usuários, (b) BER versus número de usuários CCM-RLS, $E_b/N_0 = 15\text{ dB}$ , ( $f_dT = 10^{-3}$ ).	70
5.5	Diagrama de blocos do receptor SIC iterativo (IT-SIC) proposto.	74
5.6	Diagrama de blocos do receptor HIC iterativo (IT-HIC) proposto.	76
5.7	Convergência de BER para receptores utilizando algoritmo tipo SG.	80
5.8	Convergência de BER para receptores utilizando algoritmo tipo RLS.	81
5.9	Convergência de BER para receptores IT-SIC variando número de ordenações $Q$ e usando algoritmo tipo SG.	82
5.10	Desempenho dos estimadores de canal nos receptores SIC.	83
5.11	Convergência da BER para receptores CCM com algoritmo RLS.	84
5.12	BER versus $E_b/N_0$ e número de usuários para receptores utilizando algoritmo RLS.	85

B.1	Função custo CCM para $ A_1 ^2 \nu^2 = 1$ .	103
B.2	Função custo CCM para $ A_1 ^2 \nu^2 = 0.04$ .	103

## Lista de tabelas

A.1	Convergência dos autovalores máximo e mínimo.	100
-----	---	-----