

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - EPUSP

Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle - PTC

Área de Sistemas Eletrônicos

Canceladores de Interferência Multiusuário

Aplicados a Sistemas DS/CDMA

de Múltipla Taxa

Taufik Abrão

São Paulo, Fevereiro de 2001

Taufik Abrão

Canceladores de Interferência Multiusuário  
Aplicados a Sistemas DS/CDMA  
de Múltipla Taxa

Tese de Doutorado submetida à ESCOLA POLITÉCNICA  
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO como parte dos requisitos necessários  
à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Paul Jean Etienne Jeszensky

São Paulo, Fevereiro de 2001

Abrão, Taufik

Canceladores de Interferência Multiusuário Aplicados a Sistemas DS/CDMA de Múltipla Taxa  
São Paulo, março de 2001  
pp. 388

Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle - Área de Sistemas Eletrônicos

1. Telefonia Celular; 2. CDMA de Terceira Geração; 3. Detecção Multiusuário;  
4. Canceladores de Interferência Subtrativos; 5. Múltipla Taxa

Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.  
Área de Sistemas Eletrônicos

# Resumo

Este trabalho foi realizado concomitante ao processo de padronização dos sistemas de comunicação móveis de terceira geração (3G). O universo de investigação deste trabalho aborda esquemas de múltipla taxa em associação a detectores multiusuário (MuD) visando atender de forma eficiente as distintas exigências de serviços em sistemas móveis 3G. Este trabalho investiga novas estruturas de detecção MuD para sistemas de comunicação móveis DS-CDMA (*Direct Sequence – Code Division Multiple Access*) em canais AWGN e com desvanecimento Rayleigh Plano combinando Canceladores de Interferência Subtrativos (IC) Não-Lineares a esquemas de acesso de múltipla taxa do tipo Ganho de Processamento Múltiplo (MPG) e Códigos Múltiplos (MC).

As contribuições originais deste trabalho relacionado ao estudo de novas estruturas receptoras multiusuário de alta capacidade e desempenho em ambiente multitaxa podem ser sintetizadas a seguir:

- proposta e determinação de desempenho de cinco novas arquiteturas de detectores multiusuário baseados no cancelamento de interferência paralelo e híbrido multiestágio capazes de detectar sinais DS-CDMA com distintas taxas de informação;
- desenvolvimento de um modelo analítico para a determinação do desempenho de Canceladores de Interferência Paralelo (PIC) Parcial Multiestágio com decisor do tipo *hard* e *tanh* em canais AWGN e Rayleigh Plano;
- comparação de desempenho de detectores PIC multiestágio lineares e não-lineares de taxa única em canais AWGN e Rayleigh Plano a partir de extensa simulação Monte Carlo.

# Abstract

This work was accomplished concomitant with the standardization process for third generation mobile systems (3G). That being so naturally the investigation universe includes Multi-user Detection (MuD) in conjunction with multirate schemes seeking to assist in an efficient way the different demands of services in 3G mobile systems.

This work investigates new MuD structures for mobile DS-CDMA (Direct Sequence-Code Division Multiple Access) communication systems in AWGN (Additive White Gaussian Noise) and flat fading Rayleigh channels combining no linear Interference Cancellers (IC) to two types of multirate access schemes: Multiple Processing Gain (MPG) and Multiple Codes (MC).

The original contributions of this work related to new MuD structures for high capacity acting in a multirate scenario can be synthesized as:

- Proposal and performance determination for five new MuD structures based on multistage parallel and hybrid interference cancellation schemes which detect DS-CDMA signals with different information rates;
- Development of an analytical model for multistage Parallel Interference Cancellers (PIC) performance determination with *hard* and Tanh decision detectors in AWGN and flat fading Rayleigh channels;
- Comparison of linear and no linear decision detectors for multistage PIC based receivers in a single rate scenario in AWGN and flat fading Rayleigh channels from extensive Monte Carlo simulation.

## **Agradecimentos**

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Paul Jean Jeszensky pela sua excepcional compreensão, apoio, orientação e dedicação manifestados durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Estadual de Londrina e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES/PICDT, pelo apoio financeiro prestado nos dois últimos anos da elaboração deste trabalho.

# Conteúdo

<b>Resumo</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Sinopse dos Capítulos . . . . .	8
<b>2 Revisão sobre Detectores Multiusuário</b>	<b>10</b>
2.1 Modelo Discreto para Sistema DS/CDMA . . . . .	11
2.1.1 Transmissão . . . . .	11
2.1.2 Modelo para DS-CDMA Síncrono (S-CDMA) em canal AWGN . . . . .	11
2.1.3 Modelo para DS-CDMA Assíncrono (A-CDMA) em canal AWGN . . . . .	14
2.1.4 Canal Rayleigh . . . . .	16
2.2 Medidas de Desempenho . . . . .	17
2.2.1 Eficiência Assintótica Multiusuário, AME . . . . .	17
2.2.2 Resistência ao Efeito Near-Far, NFRes . . . . .	19
2.2.3 Probabilidade de Erro de Bit, $P_e$ . . . . .	20
2.2.4 Robustez Near-Far, $\Upsilon$ . . . . .	21
2.3 Detectores Multiusuário Lineares . . . . .	23
2.3.1 Convencional . . . . .	25
2.3.2 Decorrelator . . . . .	26
2.3.3 Detector Multiusuário Linear de Mínimo Erro Quadrático Médio (MMSE) . . . . .	28
2.3.4 Desempenho para o Decorrelator e MMSE: AME, NFres e BER . . . . .	29
2.4 Canceladores de Interferência Subtrativos . . . . .	36

2.4.1	Canceladores de Interferência Sucessivo .....	38
2.4.2	Decisores e Formas de Cancelamento em IC .....	44
2.4.3	Cancelamento de Interferência com Decisão Realimentada (ZF-DF ou DDF) .....	48
2.4.4	Canceladores de Interferência Paralelo .....	53
2.4.5	Cancelamento de Interferência de Grupo (GIC) ou Híbrido (HIC) .....	85
2.4.6	Eficiência Assintótica e Resistência ao Efeito <i>Near-Far</i> em IC .....	88
2.5	Estimativa de Parâmetros em MuD .....	89
2.5.1	Robustez dos Detectores MuD - Influência da estimativa dos Parâmetros no Desempenho .....	90
2.5.2	Estimativas de Parâmetros em IC .....	91
2.6	Canal com Desvanecimento .....	92
2.6.1	Causas do Desvanecimento .....	92
2.6.2	Tempo e Banda de Coerência .....	95
2.6.3	Canal com Desvanecimento Plano em Frequência .....	96
2.6.4	Canal com Desvanecimento Seletivo em Frequência .....	97
2.6.5	Implementação de Canais com Desvanecimento Rayleigh .....	99
2.6.6	Receptor Convencional RAKE .....	107
<b>3</b>	<b>Desempenho de Canceladores de Interferência Paralelos</b> .....	<b>109</b>
3.1	Comparação de Desempenho de Detectores MuD-IC em canal AWGN .....	109
3.1.1	Resultados de Simulação MCS em canal AWGN e Recepção Coerente BPSK .....	110
3.2	Métodos para a Análise de Sistemas com Desvanecimento .....	128
3.2.1	Ordenação Estatística .....	128
3.2.2	Análise Unificada .....	128
3.3	Desempenho Analítico para Canceladores de Interferência Paralelo Multiestágio .....	138
3.3.1	Cancelamento Paralelo Multiestágio para a Interferência Cocanal .....	138
3.3.2	BER Analítico para PIC-HD e PIC-SD Tanh Multiestágio .....	140
3.3.3	Variância para o Erro de Bit Cancelado .....	142
3.3.4	Minimizando a Variância do Erro de Bit Cancelado .....	144
<b>4</b>	<b>Sistemas DS/CDMA de Múltipla Taxa</b> .....	<b>155</b>
4.1	Esquema de Múltipla Taxa por Código Múltiplo, MC .....	156
4.1.1	Esquema Combinação Paralela (PC/SS) .....	157

4.2	Esquema de Múltipla Taxa de Modulação Mista, MM . . . . .	158
4.3	Esquema de Múltipla Taxa de Comprimento de Sequência Variável, VSL, MPG ou VPG . . . . .	159
4.4	Esquema de Múltipla Taxa de <i>Chipping</i> Variável, VCR . . . . .	163
4.4.1	Taxa de <i>Chipping</i> Variável com Freqüência Deslocada, VCRFS . . . . .	163
4.4.2	Taxa de <i>Chipping</i> Variável com separação de usuários empregando filtros Wiener, VCR-Wiener . . . . .	164
4.5	Códigos de Canalização Ortogonais em esquemas Multitaxa MC e MPG . . . . .	165
4.5.1	Códigos Ortogonais de Walsh–Hadamard . . . . .	165
4.5.2	Códigos de Canalização OVSF . . . . .	166
4.6	Sequências de Espalhamento para Sistemas 3G Multitaxa – Algumas Considerações . . . . .	170
4.6.1	Sequências com Comprimento Potência de 2 para 3G . . . . .	171
4.7	Comparação de Esquemas de Acesso de Múltipla Taxa . . . . .	175
<b>5</b>	<b>Novos Esquemas Multitaxa com Detecção Multiusuário</b>	<b>179</b>
5.1	Parâmetros de Simulação MCS . . . . .	180
5.2	Multitaxa MC associado ao Cancelamento de Interferência Paralelo . . . . .	184
5.2.1	MC–PIC Tanh com usuários de taxa R, 2R e 4R em canal AWGN Assíncrono . . . . .	186
5.3	Multitaxa MPG associado ao Cancelamento de Interferência Paralelo Ponderado por Grupo . . . . .	189
5.3.1	MPG–PICw Tanh com usuários de taxa R, 2R e 4R em canal AWGN Assíncrono . . . . .	191
5.4	Multitaxa MPG associado ao Cancelamento de Interferência Híbrido . . . . .	197
5.4.1	MPG–GSIC com detector PIC na detecção de Grupo . . . . .	197
5.5	Multitaxa Híbrido MC/MPG com Cancelamento de Interferência Híbrido (Série/Paralelo) . . . . .	206
5.5.1	MC/MPG–GSIC Tanh - Resultados de Simulação para Canal Assíncrono AWGN . . . . .	208
5.6	Multitaxa MC com Cancelamento de Interferência Híbrido . . . . .	212
5.6.1	Resultados de Simulação MCS em canal AWGN Assíncrono . . . . .	214
5.7	Discussão . . . . .	219
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>222</b>
<b>A</b>	<b>Acrônimos e Abreviações</b>	<b>224</b>

<b>B Definição dos Principais Símbolos</b>	<b>228</b>
<b>C Notação</b>	<b>230</b>
<b>D Matriz Pseudo Inversa</b>	<b>231</b>
<b>E Propriedades da Matriz de Correlação em um Sistema DS/CDMA</b>	<b>232</b>
<b>F Avaliação de Desempenho via Simulação Monte Carlo</b>	<b>234</b>
<b>G Procedimentos de Simulação</b>	<b>237</b>
G.1 Canal AWGN .....	237
G.2 Canal com Desvanecimento Rayleigh Lento .....	240
<b>H Efeito do número de Amostra por Chip, <math>N_s</math>, sobre o Desempenho MCS</b>	<b>242</b>
<b>I Síntese das Rotinas Implementadas em MatLab</b>	<b>244</b>
I.1 Rotinas Avançadas .....	244
I.1.1 Multitaxa MPG e MC associados aos detectores MuD-IC Tanh (MCS) .....	244
I.2 Rotinas Básicas .....	247
I.2.1 Modelo de Jakes Modificado para Desvanecimento Multipercurso .....	247
I.2.2 Funções para Desempenho de Receptores MuD-IC (MCS) .....	247
I.2.3 Funções e Scripts para Receptores Convencional e MuD Lineares .....	247
I.2.4 Seqüências de Espalhamento – Propriedades de Correlação .....	248
I.2.5 Funções Básicas .....	249
<b>Bibliografia</b>	<b>251</b>