

Janaina Ferreira Macêdo

**Caracterização
Espaço-Temporal do Canal
Rádio Móvel**

Uma Implementação da Sondagem
em Frequência

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-graduação em
Eletromagnetismo Aplicado

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2003

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Janaina Ferreira Macêdo

Caracterização Espaço-Temporal do Canal Rádio Móvel

Uma Implementação da Sondagem em Frequência

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Eletromagnetismo Aplicado do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Gláucio Lima Siqueira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2003



Janaina Ferreira Macêdo

**Caracterização Espaço-Temporal do Canal
Rádio Móvel**

Uma Implementação da Sondagem em Frequência

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Eletromagnetismo Aplicado do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Orientador
CETUC / PUC-Rio

Prof. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

CETUC / PUC-Rio

Prof. Rodrigo Pinto Lemos

Universidade Federal de Goiás

Eduardo Javier Aracibia Vásquez

TIM Celular

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Fevereiro de 2003

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

Janaina Ferreira Macêdo

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Goiás (Goiás, Brasil). Especializou-se em Telecomunicações, Eletromagnetismo Aplicado a Propagação de Sinais, Medidas e Modelagem de Canais Rádio Móveis

Ficha Catalográfica

Macêdo, Janaina Ferreira

Caracterização Espaço-Temporal do Canal Rádio Móvel/ Janaina Ferreira Macêdo; orientador: Prof. Gláucio Lima Siqueira. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

[13], 98 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 – Teses. 2. Telecomunicações. 3. Canal Rádio Móvel. 4. Dispersividade Espaço-Temporal. 5. Ângulo de Chegada. 6. Analisador Vetorial I. Siqueira, Gláucio Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, Josmar e Neuza

Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Gláucio Lima Siqueira

Ao professor Marbey M. Mosso pela ajuda e colaboração

Ao professor Luis Costa pela paciência e atenção no início da minha caminhada no CETUC

Aos funcionários do CETUC, em especial a Rogério da Silva Pereira e Brás Simão da Cruz, que colaboraram na construção do *setup* de medidas, e Ana Sérgio

Ao CNPq, órgão financiador de parte deste trabalho

Aos colegas do CETUC, sempre presentes: Prof^a Leni Joaquim, Renata Costa, Hebert Zampier, Daniel Brodbekier, Marcelo Corrêa, Eduardo Garnier, Leonardo Duarte e Vivian Carvalho (que também colaborou nas medidas)

Aos amigos Robson Vieira e Tatiana Coelho Vieira - que são minha família aqui no Rio de Janeiro, e também, a Warley Rocha e Lara de Almeida Mendonça

À Lúcia e Luiz Macêdo, e toda minha família, pelo apoio, estímulo e amizade

Ao Luiz Henrique, meu companheiro, o maior incentivador deste trabalho.

Resumo

Macêdo, Janaina Ferreira; Siqueira, Gláucio Lima. **Caracterização Espaço-Temporal do Canal Rádio Móvel**. Rio de Janeiro, 2003. 98p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta os resultados da investigação da utilização da Técnica de Sondagem em Frequência na estimação de dispersividade Espaço-Temporal do Canal Rádio Móvel. Modificações na técnica clássica de varredura em frequência foram implementadas: um conjunto de antenas denominado *array* foi construído e calibrado e um algoritmo de pós-processamento do sinal medido foi testado. Foi realizada uma campanha de medidas em três ambientes diferentes para averiguar a aplicabilidade do conjunto. Foram obtidos bons resultados, demonstrando a eficiência da metodologia de medidas aplicada.

Palavras-chave

Sondagem em Frequência; Canal Rádio Móvel; Ângulo de Chegada

Abstract

Macêdo, Janaina Ferreira; Siqueira, Gláucio Lima. **Space-Time Characterization of the Mobile Radio Channel**. Rio de Janeiro, 2003. 98p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the results of an investigation of the use of the Frequency Sounding technique in Mobile Radio Channel's Space-Time Dispersion characterization. Hence, some changes in the classical Frequency Sounding Technique were employed: a set of antennas was built and calibrated and an algorithm for signal post processing was tested. A measurement campaign was carried out on three different environments to test the applicability of the set as a whole. Very good results showed the efficiency of the measurements methodology applied.

Keywords

Frequency Sounding; Mobile Radio Channel; Angle of Arrival

Conteúdo

1	Introdução	13
1.1	Estimação Espaço-Temporal e Sistemas Futuros	14
1.2	Objetivo	15
1.3	Revisão Bibliográfica	16
2	Canal Espaço-Temporal	18
2.1	Ambiente e Parâmetros do Sinal	18
2.2	Modelos Espaço-Temporais	23
3	Métodos de Processamento de Sinais	26
3.1	Amostragem Espacial	26
3.2	Métodos Convencionais	28
3.3	Métodos Subespaciais	30
3.4	Métodos Paramétricos	31
4	Construção e Configuração do <i>Setup</i> de Medidas	32
4.1	Construção do <i>Setup</i> de Medidas	32
4.2	Calibração	38
4.3	Configuração do Analisador Vetorial	40
5	Metodologia de Análise	43
5.1	Geração de Matrizes Apontamento	43
5.2	Algoritmo de Filtragem Espacial	45
5.3	Validação do <i>Setup</i> e do Método de Análise	49
5.4	Investigações	50
6	Análise de Medidas	51
6.1	Cenários de Medidas	51
6.2	Análise dos Resultados	56
6.3	Análise Estatística	86
7	Conclusão	87
7.1	Limitações da Técnica	88
7.2	Realização e Análise das Medidas	89
7.3	Trabalhos Futuros	90
A	Método dos Multiplicadores de Lagrange	92
	Referências Bibliográficas	93

Lista de Figuras

2.1	A Propagação por Multipercursos	19
2.2	Perfil de Potência de Retardos Equivalente	21
2.3	Exemplo de uma Resposta Espaço-Temporal	22
3.1	Defasamento Espacial para uma Frente de Onda que Atinge um <i>Array</i> Linear	27
3.2	Diagrama de Blocos do <i>Beamforming</i> Clássico	29
4.1	Canal Rádio Móvel como DUT de um Analisador Vetorial	34
4.2	<i>Switch</i> Utilizado	34
4.3	Esquema de Ligação dos <i>Switches</i>	36
4.4	Diagrama do <i>Setup</i>	37
4.5	<i>Setup</i> Final	38
4.6	Exemplo do Posicionamento do <i>Array</i>	40
4.7	Exemplo de Amplitude e Fase de uma Varredura Completa no <i>Array</i> Circular	42
5.1	Exemplo das 64 Direções Assumidas pelo <i>Array</i>	44
5.2	Processo de Limpeza da Matriz <i>Y</i>	48
5.3	Análise da Matriz de Apontamento na Direção 26	49
6.1	Planta do Estacionamento da PUC/Rio	53
6.2	Planta do Centro de Estudos em Telecomunicações da PUC/Rio - CETUC	54
6.3	Planta do 4 ^o andar do Ed. Cardeal Leme	55
6.4	Esquema de Apresentação dos Resultados	57
6.5	Medida ESTAC1	58
6.6	Medida ESTAC2	59
6.7	Medida CETUC1	61
6.8	Medida CETUC2	62
6.9	Medida CETUC3	63
6.10	Medida CETUC4	64
6.11	Medida ESQUINA1	66
6.12	Medida ESQUINA2	67
6.13	Medida ESQUINA3	68
6.14	Medida CETUC1r	70
6.15	Medida CETUC2r	71
6.16	Medida CETUC3r	72
6.17	Medida CETUC4r	73
6.18	Medida CETUC5r	74
6.19	Medida LEME1	76
6.20	Medida LEME2	77
6.21	Medida LEME3	78
6.22	Medida LEME4	79
6.23	Medida LEME5	81

6.24	Medida LEME6	82
6.25	Medida LEME7	83
6.26	Medida LEME8	84
6.27	Medida LEMESALA	85

Lista de Tabelas

4.1	Analisador Vetorial HP1614ET	33
4.2	Especificações do <i>Switch</i>	35
4.3	Sequência de Bits Enviados pela Porta Paralela para Escolha das Antenas	35
4.4	Especificações dos Amplificadores	37
4.5	Maior Coeficiente de Reflexão, na Banda de Interesse, para os Elementos do <i>Array</i> Circular	39
4.6	Comparação para Diferentes Configurações do Analisador Vetorial	41
5.1	Configuração versus Número de Iterações	50
6.1	Estatísticas de Dispersividade Angular e Temporal	86

So don't worry about a thing
'Cause every little thing is gonna be alright
So don't worry about a thing
Every little thing is gonna be alright

Rise up this morning
Smiled with the rising sun
Three little birds
Pitch by my doorstep
Singing sweet songs
Of melodies pure and true

Saying: "This is my message to you"

Bob Marley, *Three Little Birds*.