



Leni Joaquim de Matos

**Influência da Vegetação na Dispersão
dos Sinais Rádio-Móveis**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Gláucio Lima Siqueira

Rio de Janeiro
Setembro de 2005



Leni Joaquim de Matos

**Influência da Vegetação na Dispersão
dos Sinais Rádio-Móveis**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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.

Dr. Gláucio Lima Siqueira

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações –
PUC-Rio

Dr. Luiz Alencar Reis da Silva Mello

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Dr. Luiz Costa da Silva

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Dr. Julio César Rodrigues Dal Bello

UFF

Dr. Murilo Bresciani de Carvalho

UFF

Dr. Alexandre Santos de La Veja

UFF

Dr. Eduardo Javier Arancibia Vasquez

CLARO RJ/ES

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de setembro de 2005

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

Leni Joaquim de Matos

Graduou-se em Engenharia Elétrica com Habilitação em Eletrônica e Telecomunicações, na UERJ, em 1977. Obteve o título de Mestre em Ciências, no IME, em 1981. Lecionou em cursos de graduação de diversas universidades e em cursos de pós-graduação no IME e UnB. Desde 1985 é professora da UFF onde lecionou diversas disciplinas, foi coordenadora de curso de graduação, de extensão e vice-chefe de departamento. Atua como orientadora de projetos finais e de dissertações de mestrado, participa de bancas de graduação, de pós-graduação e de concursos para professores. Atualmente é Assessora de Ensino do Centro Tecnológico da UFF, leciona uma disciplina no curso de graduação e outra no de mestrado em Engenharia de Telecomunicações.

Ficha Catalográfica

Matos, Leni Joaquim de

Influência da vegetação na dispersão dos sinais rádio-móveis / Leni Joaquim de Matos ; orientador: Gláucio Lima Siqueira. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

215 f. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Propagação em vegetação. 3. Sondagem em banda larga. 4. Parâmetros de dispersão. 5. Dispersão na vegetação. I. Siqueira, Gláucio Lima. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica . III. Título.

CDD: 621.3

Ao meu esposo e filhos

Agradecimentos

Ao professor orientador, Dr. Gláucio Lima Siqueira, pela grande cooperação no trabalho desenvolvido, amizade, estímulo e compreensão.

Ao Ex-Diretor e Professor do CETUC, PhD. Luiz Costa da Silva, pelo carinho com que me recebeu neste Centro e pela ajuda nos momentos em que necessitei.

Ao Dr. Júlio César Rodrigues Dal Bello, professor da UFF, pelo incentivo, apoio e cooperação.

Ao professor MsC. Abelardo Podcameni pela ajuda nas dúvidas relacionadas à parte de componentes, equipamentos e medidas em RF.

Ao professor MsC. Marbey Mosso pela grande colaboração na confecção do oscilador de RF e pelas dúvidas por ele sanadas.

Ao Dr. Alexandre dos Santos de la Vega, professor da UFF, pela grande cooperação na parte de eletrônica, circuitos digitais e processamento de sinais.

Ao Dr. Murilo Bresciani de Carvalho, professor da UFF, pela paciência, incentivo e dedicação na parte de eletrônica e circuitos digitais, tanto no projeto quanto nos testes em laboratório.

Ao Engenheiro Frederico Fernandes Neves, cuja participação no projeto da parte digital e na apuração dos testes foi primordial para a execução da sonda.

Aos senhores funcionários do CETUC, aqui representados por Rogério Pereira da Silva e Brás Simão, pela inestimável contribuição na execução do projeto.

À ANRITSU Eletrônica Ltda, sempre pronta a colaborar, pelo empréstimo do gerador de RF para a realização das medições em campo.

Aos amigos do CETUC Robson, Luis Henrique, Janaína, Maurício, Glaucinho, Sidney, Fabrício, João Felipe, Eduardo, Bruno Palhares e Dudu que muito colaboraram tanto nas dúvidas, na prática de laboratório, programação como nas campanhas de medidas.

À UFF, especialmente ao Departamento de Engenharia de Telecomunicações, que me licenciou para que fizesse o meu aperfeiçoamento, permitindo o uso de seus laboratórios.

À PUC/RJ pela bolsa de isenção proporcionada, sem a qual não poderia realizar este curso.

Resumo

Matos, Leni Joaquim; Siqueira, Gláucio Lima (Orientador). **Influência da vegetação na dispersão dos sinais rádio móveis**. Rio de Janeiro, 2005. 215p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A influência da vegetação na dispersão dos sinais rádio-móveis é caracterizada através dos parâmetros de dispersão no tempo como o retardo médio, o espalhamento de retardo e a banda de coerência, e dos parâmetros de dispersão na frequência como o Doppler médio, o espalhamento Doppler e o tempo de coerência. Através do desenvolvimento e implementação de uma técnica de sondagem em faixa larga apropriada, medições foram realizadas em dois ambientes, das quais os parâmetros desejados puderam ser extraídos, por processamento. De posse de tais parâmetros, os ambientes vegetados puderam ser caracterizados e analisados e, com isto, os projetos dos sistemas rádio-móveis em ambientes semelhantes podem ser otimizados, sendo alguns exemplos desta melhoria: taxas de transmissão de bits mais adequadas evitando a interferência intersimbólica, o super dimensionamento dos sistemas e o uso desnecessário de equalizadores; limites mínimos de separação estabelecidos para a diversidade em frequência e em tempo e limiares de ruído convenientemente estabelecidos.

Palavras-chave

Propagação em vegetação; sondagem em banda larga; parâmetros de dispersão; dispersão na vegetação; STDCC - *Sweep Time Delay Cross Correlation*.

Abstract

Matos, Leni Joaquim; Siqueira, Gláucio Lima (Advisor). **Influence of vegetation on dispersion of mobile radio signals**. Rio de Janeiro, 2005, 215p. Doctorate Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The influence of vegetation in mobile radio signals dispersion is characterized by the time dispersion parameters like mean delay, delay spread and coherence bandwidth, and the frequency dispersion parameters like mean Doppler shift, Doppler spread and coherence time. An appropriate wideband sounding technique was developed and implemented. Using this technique, two vegetated environments were sounded. The results of calculated parameters from measurements were used to analyse and characterize the vegetated environments. Hence, mobile radio systems on these type of environments can be designed and optimized. Some examples of this optimization are: improvement on throughput, reduction of intersymbolic interference, unnecessary use of channel impairments avoidance techniques like equalizers, establishment of minimum limits for time and frequency diversity and the choice of suitable noise thresholds.

Keywords

Propagation in vegetated areas; wideband sounding; dispersion parameters; dispersion in vegetated areas; STDCC - *Sweep Time Delay Cross Correlation*.

Sumário

1. Introdução	13
2. Caracterização e Parâmetros de Dispersão do Canal Rádio-móvel	20
2.1. Canais determinísticos	21
2.2. Canais aleatórios	24
2.3. Canais reais	26
2.4. Parâmetros de dispersão	31
2.4.1. Retardo médio	32
2.4.2. Espalhamento de retardo (<i>delay spread</i>)	32
2.4.3. Banda de coerência	33
2.4.4. Deslocamento Doppler	34
2.4.5. Espalhamento Doppler	36
2.4.6. Tempo de coerência	36
3. Sistema de Medição Desenvolvido para a Sondagem	38
3.1. Técnica de sondagem STDCC	39
3.2. Sonda STDCC Desenvolvida	50
3.2.1. Geração do Sinal de Teste e Operações Realizadas	50
3.2.2. Simulações Realizadas no Sinal de Teste Transmitido	56
3.2.3. Especificação dos Componentes do Sistema Transmissor	59
3.2.4. Especificação dos Componentes do Sistema Receptor	64
3.3. Calibração dos Osciladores	70
3.4. Testes Iniciais	71
3.5. Especificação das Antenas	73
4. Aquisição e Processamento dos Dados	75
4.1. Aquisição das Medidas	75
4.2. Processamento das Medidas	77
4.2.1. Cálculo do Retardo Médio	78
4.2.2. Cálculo do Espalhamento de Retardo	78
4.2.3. Cálculo da Banda de Coerência	78
4.2.4. Cálculo do Deslocamento Doppler	79
4.2.5. Cálculo do Espalhamento Doppler	82
4.2.6. Cálculo do Tempo de Coerência	82
4.2.7. Programação desenvolvida	83
4.3. <i>Set-up</i> de Medição	87
5. Ambientes de Medidas	90
5.1 Escolha das Rotas	90
6. Obtenção e Análise de Resultados	97
6.1 Análise em Pequena Escala	99
6.1.1 Análise da Dispersão de Sinal no Tempo	103

6.1.2 Análise da Dispersão de Sinal na Frequência	120
6.2 Análise em Larga Escala	130
7. Conclusões	135
Referências Bibliográficas	144
APÊNDICE A: Gerador de RF Desenvolvido no CETUC	149
APÊNDICE B: Esquemáticos, <i>Layouts</i> e Disposição dos Componentes nas Placas Impressas	155
APÊNDICE C: EPLD e Sistema Empregado para a sua Gravação	163
APÊNDICE D: Programação <i>MATLAB</i> Empregada na Aquisição das Amostras	166

Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo físico do canal no domínio do tempo	22
Figura 2 - Modelo físico do canal no domínio da frequência	22
Figura 3 - Diagrama esquemático das funções do sistema	23
Figura 4 - Relações entre as funções de correlação do canal	26
Figura 5 - Relações entre as funções de correlação dos canais WSSUS	29
Figura 6 – Diagrama em Blocos do Sistema para Determinação da Resposta do Canal ao Impulso	40
Figura 7 - Diagrama simplificado da sonda STDCC	44
Figura 8 - Curvas Características Normalizadas do Amplificador de Potência	53
Figura 9 - Diagrama em Blocos para Análise do Sinal Modulado	54
Figura 10 - Operações Realizadas no Sinal de Referência	56
Figura 11 - Densidade Espectral de Potência do Sinal à Saída do PA	58
Figura 12 - Diagrama em Blocos do Sistema Transmissor	60
Figura 13 - Diagrama em Blocos do Bloco Digital do Sistema Transmissor	62
Figura 14 - Sistema Transmissor Desenvolvido	64
Figura 15 - Diagrama em Blocos do Sistema Receptor	64
Figura 16 - Circuito Integrador Empregado no Receptor	66
Figura 17- Diagrama Esquemático do Mixer mais Integrador	67
Figura 18 - Sistema Receptor Desenvolvido	70
Figura 19 - Densidade Espectral de Potência do Sinal Medido à Saída do PA	72
Figura 20 - Densidade Espectral de Potência da PN pura, com 5 Amostras/bit	72
Figura 21 - Sistema de Aquisição das Medidas	76
Figura 22 - Perfil de Doppler Relativo à Rota JB2	80
Figura 23 - Sistema de Medição Empregado nos Testes	88
Figura 24 - Vista do Ambiente da PUC-RJ, Fotografada do Transmissor (Rota PUC1)	90
Figura 25 - Vista Aérea do Jardim Botânico do Rio de Janeiro	91
Figura 26 - Rotas de Medição na PUC-RJ e Local do Transmissor	92
Figura 27 - Rotas de Medição no Jardim Botânico-RJ e Local do Transmissor	92
Figura 28 - Rota 1/ Jardim Botânico	93
Figura 29 - Rota 9/ Jardim Botânico	93
Figura 30- Rota 3/ Jardim Botânico	93
Figura 31 - Rota 4/ Jardim Botânico	93
Figura 32 - Rota 6/ Jardim Botânico	94
Figura 33 - Rota 8/ Jardim Botânico	94
Figura 34 - Rota 2/ Jardim Botânico	94
Figura 35 - Rota 7/ Jardim Botânico	94
Figura 36 - Rota 5/ Jardim Botânico	95
Figura 37 - Rota 10/ Jardim Botânico	95
Figura 38 - Rota 1/ PUC-RJ	95
Figura 39 - Rota 2/ PUC-RJ	95
Figura 40 - Rota 3/ PUC-RJ	96

Figura 41 - Rota 4/ PUC-RJ	96
Figura 42 – Rota 5/ PUC-RJ	96
Figura 43 - Rota 5 (Vista da Tx)	96
Figura 44 – Características das Funções de Correlação do Canal WSSUS	98
Figura 45 – Perfis na rota JB1A	102
Figura 46 – Perfil de Retardos da Rota JB3C	103
Figura 47 – Perfil de Retardos Reduzido da Rota JB3C	104
Figura 48 – Limiar de Fleury	117
Figura 49 – Variabilidade do Sinal Recebido nas Rotas	119
Figura 50 – Exemplo de um Perfil de Espalhamento Doppler da Rota JB2	121
Figura 51 – Perfil de Espalhamento Doppler da Rota JB7	122
Figura 52 – Perfil de Espalhamento Doppler da Rota JB5	123
Figura 53 – Perfil de Espalhamento Doppler da Rota PUC6	124
Figura 54 – Tempo de Coerência x Espalhamento Doppler para a Rota JB7A	129
Figura 55 – Tempo de Coerência x Espalhamento Doppler para a Rota PUC6	129
Figura 56 – Resposta Impulso: a) Rota PUC1 e b) Rota PUC6	131
Figura 57 – Resposta Impulso: a) Rota PUC1V e b) Rota PUC6V	132
Figura 58 – Perfis de Retardo ao Longo da Rota	133
Figura 59 – Perfis de retardo ao Longo da Rota JB1A	134
 Apêndice A	
Figura 1 - Diagrama em Blocos de um Circuito Oscilador	149
Figura 2 - Vista da Cavidade Ressonante	151
Figura 3 - Diagrama em Blocos do Gerador de RF	152
Figura 4 - Gerador de RF Desenvolvido no CETUC	153
 Apêndice B	
Figura 1 - Diagrama Esquemático do Bloco Digital do Sistema Transmissor	156
Figura 2 - <i>Layout</i> da Placa Impressa do Transmissor/Lado da Solda (L.S.)	157
Figura 3 - <i>Layout</i> da Placa Impressa do Transmissor/Lado dos Componentes	158
Figura 4 - Disposição dos Componentes na Placa Impressa do Transmissor	159
Figura 5 - Disposição dos Componentes na Placa Impressa do Receptor	160
Figura 6 - Layout do Circuito Mixer Mais Integrador	161
Figura 7 - Disposição dos Componentes na Placa Impressa do Mixer mais Integrador	162
 Apêndice C	
Figura 1 - Cabo de Conexão da Porta Paralela do PC à Placa de Teste	164
Figura 2 - Disposição Final dos Pinos de Entrada e Saída do EPLD	165

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Retardo e Banda de Coerência Relativos às Medidas na PUC/RJ	108
Tabela 2 – Retardo e Banda de Coerência Relativos às Medidas no Jardim Botânico/RJ	110
Tabela 3 – Rotas na Vegetação e Relação com os Retardos Eficazes	113
Tabela 4 – Doppler e Tempo de Coerência Relativos às Medidas na PUC/RJ	125
Tabela 5 – Doppler e Tempo de Coerência Relativos às Medidas no Jardim Botânico/RJ	127
Tabela 6 – Variação dos Parâmetros de Dispersão no Tempo, nos Grupos de Rotas	140
Tabela 7 – Variação dos Parâmetros de Dispersão na Frequência, nos Grupos de Rotas	142