Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

**Modelamento de Efeitos de Multipercurso
Atmosférico em Enlaces Microondas em
Visibilidade**

Dissertação de Mestrado

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

Rio de Janeiro
Agosto de 2003

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

**Modelamento de Efeitos de Multipercurso Atmosférico em
Enlaces Microondas em Visibilidade**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Alencar da Silva Mello

Rio de Janeiro, Agosto de 2003

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

**Modelamento de Efeitos de Multipercurso Atmosférico em
Enlaces Microondas em Visibilidade**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Luiz Alencar da Silva Mello

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Erasmus Couto Brasil de Miranda

UCP

Prof. Gláucio Lima Siqueira

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Ney Augusto Dumont

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de agosto de 2003

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

Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Graduou-se em Engenharia de Sistemas na Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta - Norte de Santander Colômbia em julho de 2001).

Ficha Catalográfica

Gonzalez Castellanos, Pedro Vladimir

Modelamento de efeitos de multipercurso atmosférico em enlaces microondas em visibilidade / Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos; orientador: Luiz Alencar da Silva Mello. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2003.

86 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Desvanecimento por multipercurso. 3. Duração de eventos de desvanecimento. I. Mello, Luiz Alencar da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A Deus Todo Poderoso e
À Virgem da Torcoroma
A minha Família

Agradecimentos

Ao professor Luiz Alencar da Silva Mello, pela orientação, os ensinamentos, pela compreensão e parceria na realização deste trabalho.

A PUC-Rio pelos auxílios concedidos e a oportunidade. Aos professores das diferentes matérias cursadas pelos ensinamentos e a Rodolfo Sabóia pela ajuda.

A minha família, a meus pais Blanca Lilia e Francisco Antonio, aos meus irmãos em especial ao meu irmão Jaime e a Julia pelo apoio e compreensão nos momentos difíceis, e a minha Natacha quem me acompanhou no final deste projeto.

Aos amigos Luis, Jose Alberto, Tatiana pelo apoio na parte inicial do mestrado. Aos amigos e colegas do PAA Godinho, Marcela, Luciana, Ana Cristina, e Pedro Pablo, pelo companheirismo.

Aos funcionários do CETUC, pelo carinho e atenção em especial a Maria Luzia.

Resumo

Gonzalez Castellanos, Pedro Vladimir. **Modelamento de efeitos de multipercurso atmosférico em enlaces microondas em visibilidade.** Rio de Janeiro, 2003. 86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os desvanecimentos por multipercurso atmosférico são a principal causa de degradação do desempenho de enlaces rádio digitais de alta capacidade, acentuando os efeitos do ruído térmico e da interferência intersimbólica na taxa de bits errados. A previsão da distribuição cumulativa de probabilidades destes desvanecimentos em função de parâmetros do enlace e características rádio climáticas da região é de fundamental importância no projeto de sistemas rádio digitais terrestres.

Existem na literatura técnica métodos para previsão do desvanecimento em enlaces individuais, mas não para um tronco de microondas formado por vários enlaces. Medidas realizadas no Brasil indicam que a usual suposição de decorrelação total entre desvanecimentos profundos em enlaces consecutivos em um mesmo tronco é pessimista, podendo levar a uma indisponibilidade combinada maior do que a real.

Neste trabalho foram analisados dados experimentais de 15 enlaces na região centro-oeste do Brasil e 5 enlaces no Japão e desenvolvido um modelo empírico de previsão da distribuição conjunta do desvanecimento por multipercurso atmosférico conjunta em enlaces adjacentes. O modelo apresenta boa concordância com os resultados experimentais e fornece uma nova expressão para o cálculo da indisponibilidade em troncos de microondas formados por vários enlaces.

Os dados experimentais foram utilizados ainda para modelar a duração de eventos de atenuação por multipercurso em enlaces em visibilidade. Mostrou-se que a distribuição de duração de eventos é bem caracterizada por distribuições de Weibull. Esta caracterização permite a distinção entre eventos de perda de qualidade (duração inferior a 10 segundos) e de indisponibilidade (duração superior a 10 segundos).

Palavras-chave

Desvanecimentos por multipercurso, Desvanecimento conjunto em enlaces consecutivos, Duração de eventos de desvanecimento.

Abstract

Gonzalez Castellanos, Pedro Vladimir. **Modeling atmospheric multipath fading in Line-of-sight microwave links**. Rio de Janeiro, 2003. 86p. MSc. Dissertation – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Multipath fading is the main cause of performance degradation in high capacity line-of-sight microwave links, increasing enhancing the effects of the thermal noise and intersymbol interference in the bit error rate.

Tested methods are available in the literature for the prediction of cumulative probability distribution multipath fading in individual link but not in a microwave network formed by several tandem links. Measurements carried out in Brazil indicate that the usual assumption that deep fade events in consecutive links are totally uncorrelated may be pessimistic for tropical regions and may lead to the prediction excessive multihop links unavailability.

Experimental data obtained in measurements of multipath fading in 15 pairs of tandem links located in the center-western region of Brazil were analyzed to provide cumulative distributions of attenuation in each pair. Similar results are available in the literature for 5 pairs of links in Japan.

Based on these results, an empirical model was developed for the prediction of the joint probability distribution the multipath fading in adjacent links was developed. The attenuation simultaneously exceeded in both links for given percentage of time can be predicted as a function of the equiprobable values of attenuation exceeded in the individual links, path lengths and operation frequency.

The predicted distributions show good agreement with the experimental results and provide an expression for the calculation of unavailability of line-of-sight tandem links.

The experimental data had been used still to model the duration of events of attenuation for multipath of links in visibility. One revealed that the distribution of duration of events well is characterized by distributions of Weibull. This characterization allows the distinction between events of loss of quality (lowest duration at 10 seconds) and of non-availability (higher duration the 10 seconds).

Keywords

Multipath fading, Simultaneous fading in multihops links, Duration events of attenuation.

Sumário

1 Introdução	14
2 Conceitos Básicos	17
2.1. Perda em Espaço Livre	17
2.2. Propagação Sobre Terra Plana	19
2.3. Efeitos da atmosfera na propagação	20
2.3.1. Refratividade da atmosfera	21
2.3.2. Gradiente da refratividade	22
2.3.3. Efeitos refrativos na curvatura do raio - o fator K	24
2.4. Efeitos da Difração	27
2.5. Reflexões no Solo	28
2.6. Desvanecimento em enlaces rádio	28
2.6.1. Desvanecimento por multipercurso atmosférico	29
2.6.2. Desvanecimentos planos	30
2.7. Modelos de previsão da distribuição de probabilidades dos desvanecimentos por multipercurso	31
2.7.1. Modelo de previsão do ITU-R (Recomendação P.530-7)	32
2.7.2. Modelo de ITU-R (Recomendação P.530-10)	35
2.8. Modelo do ITU-R para enlaces em tronco	37
2.9. Duração de Desvanecimentos	38
3 Descrição do experimento e resultados das medidas	39
3.1. Sistema de Medidas	43
3.2. Sistema de aquisição e análise de dados	44
3.2.1. Unidade de Aquisição de Dados	44
3.2.2. Programas de pré-processamento de dados	45
3.2.3. Edição de séries temporais	45
3.2.4. Programa de análise estatística de dados	46
3.2.5. Resultados experimentais	47
4 Previsão da atenuação em enlaces consecutivos	48
4.1. Método para previsão da atenuação conjunta	49

4.1.1. Desenvolvimento do método empírico	49
4.1.2. Avaliação da precisão do método de previsão	52
4.2. Método de previsão com dependência micro-climática	56
4.2.1. Avaliação da precisão do método com micro-climas	59
4.3. Comparação geral dos modelos de previsão	62
 5 Duração de eventos de desvanecimento	 65
5.1. Modelamento da duração de eventos de desvanecimento	65
5.2. Ajuste de distribuições usando a distribuição de Weibull	68
5.3. Ajuste de distribuições usando a distribuição Normal	70
5.4. Comportamento dos parâmetros β e η da distribuição de Weibull	71
 6 Conclusões e sugestões	 75
 7 Referências Bibliográficas	 78
 8 Anexo A - Séries Temporais da Atenuação Conjunta Para os enlaces analisados e comparação com os modelos desenvolvidos.	 80

Lista de figuras

Figura 2.1 Propagação Sobre Terra Plana	20
Figura 2.2 Valores mensais de No para o mês de fevereiro	23
Figura 2.3 Valores mensais de No para o mês de agosto	24
Figura 2.4 Horizonte geométrico e de uma onda de rádio	24
Figura 2.5 Curvatura do raio para diferentes valores de K	25
Figura 2.6 Registro do sinal recebido, serie temporal.	29
Figura 3.1 Distribuição geográfica dos locais de medida	42
Figura 3.2 Set-up Experimental de Aquisição dos dados	43
Figura 3.3 Serie temporal da potencia recebida visualizada no programa tsedit.exe	46
Figura 3.4 Exemplo de distribuições de atenuação para um par de enlaces	47
Figura 4.1 Atenuação conjunta contra atenuação mínima entre os enlaces individuais	49
Figura 4.2 Atenuação conjunta contra distância mínima entre os enlaces individuais	50
Figura 4.3 Atenuação conjunta contra distância máxima entre os enlaces individuais	50
Figura 4.4 Atenuação conjunta contra frequência de operação	50
Figura 4.5 Valores de atenuação conjunta previstos contra medidos	53
Figura 4.6 Valores da distribuição de resíduos	53
Figura 4.7 Comparação do modelo com os dados medidos do site Barracão Queimado (Brasil)	55
Figura 4.8 Comparação do modelo com os dados medidos do site Santa Luzia (Brasil)	55
Figura 4.9 Comparação do modelo com os dados medidos do site Futago (Japão)	55
Figura 4.10 Comparação do modelo com os dados medidos do site Awagatake (Japão)	56
Figura 4.11 Regiões de micro-climáticas dos enlaces	58
Figura 4.12 Valores de atenuação conjunta previstos contra medidos	59
Figura 4.13 Valores da distribuição de resíduos	60
Figura 4.14 Comparação do modelo com os dados medidos em Itiquira	60
Figura 4.15 Comparação do modelo com os dados medidos em Santa Luzia	61

Figura 4.16 Comparação dos modelos com os dados medidos em Funtago	61
Figura 4.17 Comparação do modelo com os dados medidos em Awagatake	61
Figura 4.18 Valor médio do erro relativo	63
Figura 4.19 Desvio padrão do erro relativo	63
Figura 4.20 Desvio padrão do erro relativo	63
Figura 5.1 Arquivo de saída do programa temp	67
Figura 5.2 Duração de eventos dos níveis de 5 ate 20 dB	67
Figura 5.3 Duração de eventos dos níveis de 25 ate 40 dB	68
Figura 5.4 Densidade de probabilidade de Weibull (linha cheia), contra os dados medidos, enlace Alto Araguaia - Alto Garças, nível de 5 dB	69
Figura 5.5 Densidade de probabilidade de Weibull (linha cheia), contra os dados medidos, enlace Cacoal - Alto Garças, nível 10 dB	69
Figura 5.6 Densidade de probabilidade de Weibull (linha cheia), contra os dados medidos, enlace Barracão Queimado-Nova Oeste, nível 15 dB	69
Figura 5.7 Média, desvio padrão e valor RMS do erro relativo do ajuste da densidade de probabilidades da duração de eventos pela distribuição de Weibull	70
Figura 5.8 Média, desvio padrão e valor RMS do erro relativo do ajuste da densidade de probabilidades da duração de eventos pela distribuição Normal	71
Figura 5.9 Parâmetro β contra o nível de atenuação e a distância	72
Figura 5.10 Parâmetro β contra a distância e a frequência	72
Figura 5.11 Parâmetro β contra a frequência e o nível	72
Figura 5.12 Parâmetro β contra a inclinação e o nível	73
Figura 5.13 Parâmetro η contra o nível e a distancia	73
Figura 5.14 Parâmetro η contra a distância e a frequência	74
Figura 5.15 Parâmetro η contra a frequência e o nível	74
Figura 5.16 Parâmetro η contra a inclinação e o nível	74
Figura A.1 Comparação do modelo com os dados medidos em Futago	80
Figura A.2 Comparação do modelo com os dados medidos em Yanbara	80
Figura A.3 Comparação do modelo com os dados medidos em Awagatake	81
Figura A.4 Comparação do modelo com os dados medidos em Tsukude	81
Figura A.5 Comparação do modelo com os dados medidos em Santa Luzia	81
Figura A.6 Comparação do modelo com os dados medidos em ingleses	82
Figura A.7 Comparação do modelo com os dados medidos em Itiquira	82
Figura A.8 Comparação do modelo com os dados medidos em Rondonópolis	82

Figura A.9 Comparação do modelo com os dados medidos em Araguaia	83
Figura A.10 Comparação do modelo com os dados medidos em Mineiros	83
Figura A.11 Comparação do modelo com os dados medidos em Jataí	83
Figura A.12 Comparação do modelo com os dados medidos em Livramento	84
Figura A.13 Comparação do modelo com os dados medidos em Fza Sta Luzia	84
Figura A.14 Comparação do modelo com os dados medidos em B. Queimado	84
Figura A.15 Comparação do modelo com os dados medidos em Iracema	85
Figura A.16 Comparação do modelo com os dados medidos em Cacoal	85
Figura A.17 Comparação do modelo com os dados medidos em Jaru	85
Figura A.18 Comparação do modelo com os dados medidos em São Pedro	86

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Valores do coeficiente C_0 para as três faixas de alturas da antena mais baixa e os três tipos de terreno	33
Tabela 3.1 Número de enlaces por frequência da portadora	40
Tabela 3.2 Dados dos enlaces que foram analisados	41
Tabela 4.1 Erro Relativo da Media e o desvio padrão	54
Tabela 4.2 Valores do parâmetro rádio climático	57
Tabela 4.3 Média, desvio padrão e valor RMS do erro percentual	59
Tabela 4.4 Valor médio do erro relativo	62
Tabela 4.5 Desvio padrão do erro relativo	62
Tabela 4.6 Valor RMS do erro relativo	62