

Eleonora Alves Manhães de Andrade

**Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de
Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros
de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. José Mauro Pedro Fortes

Rio de Janeiro
Abril de 2008

Eleonora Alves Manhães de Andrade

**Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de
Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros
de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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. José Mauro Pedro Fortes

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Dr. Emanuel Paiva de Oliveira Costa

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Raimundo Sampaio Neto

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 11 de Abril de 2008

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

Eleonora Alves Manhães de Andrade

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações pela Universidade Federal Fluminense

Ficha Catalográfica

Andrade, Eleonora Alves Manhães de

Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres / Eleonora Alves Manhães de Andrade; orientador: José Mauro Pedro Fortes. - 2008.

98 f: il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008
Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Disponibilidade. 3. Desempenho de erro. 4. Métodos de Predição. 5. Análise conjunta.
I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Ao meu professor José Mauro Fortes, pela orientação neste estudo.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio e incentivo.

Aos colegas da PUC, pela companhia e apoio nos momentos de dúvidas e necessidades.

À CAPES, ao CNPq e à PUC-Rio, pelo auxílio concedido.

Resumo

Andrade, Eleonora Alves Manhães de; Fortes, José Mauro Pedro. **Consideração Conjunta da Atenuação por Chuvas e de Interferências Externas na Estimação dos Parâmetros de Desempenho de Enlaces Digitais Terrestres**. Rio de Janeiro, 2008. 98p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Recomendações específicas da União Internacional de Telecomunicações estabelecem objetivos de desempenho para enlaces de comunicações digitais terrestres. Esses objetivos impõem restrições a parâmetros tais como a taxa de segundos errados, a taxa de segundos severamente errados e a taxa de erro de bloco de fundo, a partir dos quais se define a disponibilidade do enlace. Os valores destes parâmetros são afetados por diversos fatores de degradação, sendo os principais deles a atenuação devido a chuvas e a interferências. Neste estudo é apresentada uma metodologia para a estimação destes parâmetros que considera, de forma conjunta, os efeitos devidos a essas degradações. O estudo considera, de forma analítica, as relações entre os diversos parâmetros envolvidos, e a caracterização estatística de cada um deles. Resultados numéricos ilustram o uso dos estimadores desenvolvidos no trabalho em situações de interesse prático.

Palavras-chave

Disponibilidade. Desempenho de erro. Métodos de Predição. Análise conjunta.

Abstract

Andrade, Eleonora Alves Manhães de; Fortes, José Mauro Pedro. **Joint Effect of Rain Attenuation and Interference in the Estimation of Fixed Service Link Performance Parameters**. Rio de Janeiro, 2008. 98p. MsC Thesis — Department of Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Specific recommendations published by The International Telecommunications Union establish performance objectives for digital communication links. These objectives impose constraints to parameters like the errored second rate, the severely errored second rate and the background block error ratio. Based on these parameters is defined the link availability. The values of these parameters are affected by various degradation factors, being the attenuation due to rain and external interferences the principal ones. This study presents a methodology to estimate the performance parameters for the parameters that jointly considers the effects due to these two degradations and uses analytical relations among the parameters involved as well as their statistical characterization. Numerical results illustrate the use of the developed estimators in situations of practical interest.

Keywords

Availability. Error Performance. Prediction Methods. Joint Analysis.

Sumário

1	Introdução	12
2	Descrição do Problema	14
2.1	Definição dos Parâmetros de Desempenho de Erro	14
2.2	Relacionamento entre as variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} e b	18
3	Estimativa dos Parâmetros de desempenho de erro	30
3.1	Efeito da atenuação devida à chuva	37
3.2	Efeito da degradação devida à chuva e à interferência externa	40
4	Resultados Numéricos	44
4.1	Caso 1: Receptor localizado na latitude $20^{\circ}S$	46
4.2	Caso 2: Receptor localizado na latitude 0°	61
4.3	Caso 3: Receptor localizado na latitude $20^{\circ}N$	75
5	Conclusões	89
	Referências Bibliográficas	91
A	Cálculo do valor esperado de uma variável aleatória a partir de sua Função Distribuição de Probabilidade	93
B	Limitantes para o valor esperado de variáveis aleatórias não negativas definidas em um intervalo finito, quando a FDPC não é conhecida em todo o intervalo	95
C	Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa da atenuação devido à chuva.	97
C.1	Estatística anual da atenuação devida à chuva	97
C.2	Estatística da atenuação devida à chuva para o pior mês	98

Lista de figuras

2.1	Taxa de erro de bit para sistemas QPSK	16
2.2	Taxa de erro de bit para sistemas QAM-M	17
2.3	Probabilidade de bloco errado r_{eb} para $N_B = 801$ e $\alpha = 10$	19
2.4	Probabilidade de segundo errado r_{es} para $N_B = 801$, $\alpha = 10$ e $n = 192000$	21
2.5	Probabilidade de segundo severamente errado r_{ses} para $\alpha = 10$	23
2.6	Probabilidade de bloco errado de fundo r_{bbe} para $\alpha = 10$	28
2.7	Variáveis r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} como função da taxa de erro de bit b para $\alpha = 10$, $n = 2000$ e $N_B = 3424$	29
3.1	Probabilidade de bloco errado de fundo r_{bbe}	33
3.2	Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QPSK	35
3.3	Relação entre a Taxa de Erro de Bit e o fator de degradação para a modulação QAM-128	36
4.1	Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300°	48
4.2	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital A)	49
4.3	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital A)	50
4.4	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude de $20^\circ S$, longitude de 300° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	51
4.5	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude de $20^\circ S$, longitude de 300° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	51
4.6	Taxa de bloco errado para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	52
4.7	Taxa de segundo errado para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	53
4.8	Taxa de segundo severamente errado para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	53
4.9	Taxa de bloco errado de fundo para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° e Estrutura orbital A	54
4.10	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($C_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ S$ e longitude de 300° (Estrutura orbital B)	55
4.11	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° (Estrutura orbital B)	56
4.12	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ S$, longitude 300° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	57
4.13	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ S$, longitude 300° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	57
4.14	Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ S$ e longitude 300° e Estrutura orbital B	58

4.15	Taxa de segundo errado para latitude $20^{\circ}S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B	59
4.16	Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^{\circ}S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B	59
4.17	Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^{\circ}S$ e longitude 300° e Estrutura orbitl B	60
4.18	Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de 0° e longitude de 310°	62
4.19	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($p_y(\gamma)$) de y para latitude de 0° e longitude de 310° (Estrutura orbital A)	63
4.20	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude 0° e longitude 310° (Estrutura orbital A)	64
4.21	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	65
4.22	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	65
4.23	Taxa de bloco errado para latitude 0° e longitude 310°	66
4.24	Taxa de segundo errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A	67
4.25	Taxa de segundo severamente errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A	67
4.26	Taxa de bloco errado de fundo para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital A	68
4.27	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($p_y(\gamma)$) de y para latitude de 0° e longitude de 310° (Estrutura orbital B)	69
4.28	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude 0° e longitude 310° (Estrutura orbital B)	70
4.29	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	71
4.30	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude 0° , longitude 310° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	71
4.31	Taxa de bloco errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	72
4.32	Taxa de segundo errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	73
4.33	Taxa de segundo severamente errado para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	73
4.34	Taxa de bloco errado de fundo para latitude 0° e longitude 310° e Estrutura orbital B	74
4.35	Função Distribuição Cumulativa de x para latitude de $20^{\circ}N$ e longitude de 77°	76
4.36	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($p_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^{\circ}N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital A)	77
4.37	Função Distribuição Cumulativa de z para latitude $20^{\circ}N$ e longitude 77° (Estrutura orbital A)	78
4.38	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^{\circ}N$, longitude 77° (Estrutura orbital A e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	79

4.39	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital A e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	79
4.40	Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	80
4.41	Taxa de segundo errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	81
4.42	Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	81
4.43	Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital A	82
4.44	Função Densidade de Probabilidade ($p_y(\gamma)$) e Função Distribuição Cumulativa ($p_y(\gamma)$) de y para latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital B)	83
4.45	Função Distribuição Cumulativa de z para na latitude de $20^\circ N$ e longitude de 77° (Estrutura orbital B)	84
4.46	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital B e modulação QPSK) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 39$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	85
4.47	FDPC das variáveis aleatórias r_{eb} , r_{es} , r_{ses} e r_{bbe} para latitude $20^\circ N$, longitude 77° (Estrutura orbital B e modulação QAM-128) e $(E_b/N_0)_{cs[dB]} = 49$ dB (curva sólida : chuva, curva tracejada : chuva e interferência)	85
4.48	Taxa de bloco errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	86
4.49	Taxa de segundo errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	87
4.50	Taxa de segundo severamente errado para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	87
4.51	Taxa de bloco errado de fundo para latitude $20^\circ N$ e longitude 77° e Estrutura orbital B	88

Lista de tabelas

2.1	<i>Valores de n (blocos/s) e N_B (bits/bloco) para links do sistema SDH</i>	24
2.2	<i>Valores de n (blocos/s) e N_B (bits/bloco) para links do sistema PDH</i>	24
4.1	<i>Localização dos receptores</i>	44
4.2	<i>Características do enlace terrestre</i>	44
4.3	<i>Características técnicas dos sistemas HEO</i>	45