



Roque André Ciufó Poeys

**Efeitos de multipercursos atmosféricos em enlaces de
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: Luis Alencar Reis da Silva Mello

Rio de Janeiro

Setembro de 2004



Roque André Ciufó Poeys

**Efeitos de multipercursos atmosféricos em enlaces de
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 Reis da Silva Mello
PUC-RIO

Rodolfo Sabóia Lima de Souza
PUC-RIO

Marta Pudwell Chaves de Almeida
Wings Telecom

Paulo Pereira Loureiro
Embratel

Erasmus Couto Brazil de Miranda
UCP

José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 3 de setembro de 2004

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

Roque André Ciufu Poeys

Graduou-se em Engenharia Elétrica, ênfase em Sistemas Eletrônicos, em julho de 1989, na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Trabalha como Analista de Redes e Serviços de Telecomunicações na Embratel desde abril de 1999. É Professor de Telecomunicações da Escola Técnica Estadual Ferreira Viana desde março de 1998. Em fevereiro de 2002, iniciou no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu mestrado na área de eletromagnetismo aplicado.

Ficha Catalográfica

Poeys, Roque André Ciufu

Efeitos de multipercursos atmosféricos em enlaces de microondas em visibilidade / Roque André Ciufu Poeys ; orientador: Luis Alencar Reis da Silva Mello. - Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

94 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Propagação multipercurso. 3. Desvanecimento seletivo. 4. Sistema rádio digital. 5. Predição de falha. I. Mello, Luiz Alencar Reis da Silva. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha esposa Rita, pela força do seu amor, pelo apoio constante e intenso e por sua dedicação e confiança durante todo o período de estudos e a nossa filha Lívia, o maior e o melhor presente de nossas vidas.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Luiz Alencar Reis da Silva Mello pelo apoio, estímulo e dedicação durante todas as etapas deste trabalho.

Ao engenheiro Sergio Pinho da Embratel pela ajuda, incentivo e dedicação sincera durante as etapas de pesquisa.

Aos engenheiros Lauro Fernando Santos Maia e Jorge de Souza Santos da Embratel pelo apoio e colaboração, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao professor Ney R. Dhein, por ter me dado a oportunidade de iniciar este mestrado.

Aos meus amigos e colegas da Embratel e do Cetuc, por todo apoio, colaboração e palavras de incentivo.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

A FAETEC e a PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho dificilmente poderia ter sido realizado.

Resumo

Poeys Ciufó, Roque André . **Efeitos de multipercursos atmosféricos em enlaces de microondas em visibilidade.** Rio de Janeiro, 2004. 94p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As variações que ocorrem na estrutura da troposfera ao longo do tempo em relação à sua condição mediana provocam diversos fenômenos que fazem variar aleatoriamente o nível de sinal recebido num enlace rádio. Estas variações aleatórias são denominadas desvanecimentos. Os desvanecimentos são normalmente classificados em rápidos e lentos. Os desvanecimentos rápidos estão geralmente associados ao efeito de multipercurso atmosférico que é fortemente dependente da frequência, sendo por isto denominados desvanecimentos seletivos, e são a principal causa de degradação do desempenho de enlaces rádio digitais de alta capacidade. Os modelos existentes para a caracterização estatística do desvanecimento por multipercurso são semi-empíricos e baseados em dados experimentais obtidos em regiões de clima temperado, acarretando uma má estimativa quando aplicados a regiões de clima tropical e equatorial. Neste trabalho é apresentada uma avaliação dos métodos existentes para previsão do desempenho de enlaces rádio digitais de alta capacidade, a partir da utilização de dados reais de desempenho extraídos de medidas em um tronco rádio de alta capacidade numa região tropical.

Palavras-chave

Propagação Multipercurso; Desvanecimento Seletivo; Sistema Rádio Digital; Predição de Falha.

Abstract

Poeys Ciufó, Roque André . **Effects of atmospheric multipath in line-of-sight microwave systems**. Rio de Janeiro, 2004. 94p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The variations which happen in the troposphere layers throughout the time in relation to the median condition of the signal cause various phenomena that change the received signal level at digital radio relay systems randomly. The random changes are named fading. Fading is normally classified as fast or slow. The former is normally associated with the atmospheric multipath propagation and is strongly dependent on frequency; therefore, this is named selective fading and it is normally the cause of performance degradation in high capacity digital radio relays. The existing models for statistics of multipath fading are semi-empirical and based on experimental data extracts from regions the climate of which is temperate; and this gives a rough estimate with respect to the tropical and equatorial zones. This work presents an evaluation of existing methods of performance prediction for high capacity digital radio relay systems using real performance data obtained from measures of a high capacity digital radio link in operation in the tropical region.

Key Words

Multipath Propagation; Selective Fading; Digital Radio Relay Systems; Outage Prediction.

Sumário

1	Introdução	13
2	Fundamentos de Propagação	15
2.1.	Propagação em Espaço Livre	15
2.2.	Balanço de Potência	16
2.2.1.	Limiar do Receptor	16
2.2.2.	Nível de Recepção Nominal	17
2.2.3.	Margem de Desvanecimento	17
2.3.	Refratividade e Raio Equivalente	18
2.3.1.	Refratividade	18
2.3.2.	Raio Equivalente da Terra	20
2.4.	Propagação em Visibilidade	21
2.5.	Efeito das Variações da Refratividade	24
2.6.	Condições Anômalas da Atmosfera	26
2.7.	Desvanecimento em enlaces de micro-ondas	30
3	Metodologias para Análise de Desempenho	34
3.1.	Recomendação ITU-T G.826	35
3.1.1.	Camadas da Rede de Transporte	35
3.1.2.	Definição e medidas dos blocos	36
3.1.3.	Parâmetros e eventos de desempenho quanto a erros	36
3.1.4.	Objetivos de desempenho quanto a erros (qualidade)	38
3.1.5.	Divisão dos objetivos ponta a ponta da via	38
3.2.	Recomendação F. 1092-1	40
3.3.	Recomendação ITU-R F.695	43
3.4.	Recomendação ITU-R F. 1093-1	45
3.4.1.	Considerações sobre a Propagação	45
3.4.2.	Contramidas aos efeitos da propagação	46
3.4.3.	Cálculo das probabilidades de falhas.	46

3.4.3.1. Métodos da Curva de Assinatura	47
3.4.3.2. Cálculo de falha usando a assinatura	48
3.5. Recomendação ITU-R P.530-10	51
3.5.1. Conceitos básicos	51
3.5.2. Perda por Propagação	52
3.5.2.1. Desvanecimento devido a multipercurso e mecanismos relacionados	53
3.5.2.1.1. Método para pequenas percentagens de tempo (desvanecimentos muito profundos)	53
3.5.2.1.2. Predição de falha não seletiva	55
3.5.3. Redução da discriminação de polarização cruzada (XPD)	55
3.5.3.1. Predição de falha por deterioração de XPD devido a efeitos que ocorrem durante condições de ar claro.	56
3.5.4. Distorção devido aos efeitos da propagação	57
3.5.4.1. Predição de falha em sistemas digitais sem proteção	58
3.5.5. Técnicas para aliviar os efeitos da propagação por multipercurso	59
3.5.5.1. Técnicas com diversidade	59
3.5.5.1.1. Predição de falhas em sistemas digitais usando diversidade de espaço	60
3.5.6. Predição total de falha	62
4 Enlaces testados e metodologia	63
4.1. Levantamento e coleta dos dados de desempenho do tronco rádio	63
4.1.1. Características da localização geográfica do tronco rádio.	63
4.1.2. Topologia do tronco rádio	65
4.1.3. Características do equipamento rádio empregado	66
4.1.4. Metodologia empregada para obtenção dos dados de desempenho	67
4.2. Cálculo da predição de desempenho do tronco rádio CBA – GNA	71
5 Previsão de desempenho e análise dos resultados	75
5.1. Análise do tronco rádio baseado nas medições realizadas nas Seções de Multiplexação (SMS)	75
5.2. Análise do tronco rádio baseado nas medições feitas nas Seções de Regeneração (SRS)	76
5.2.1. Cálculo do desempenho total do tronco rádio através dos resultados das Seções de Regeneração	76

5.2.2. Análise do desempenho do tronco através das Seções de Regeneração	78
5.2.3. Comparação dos resultados medidos e calculados para as Seções de Regeneração	80
5.3. Estudo de modificações no modelo de predição de desempenho	84
5.3.1. Objetivo de SESR	84
5.3.2. Análise do fator geoclimático(K)	87
6 Conclusões	90
7 Referências bibliográficas	93
8 Anexos	95

Lista de figuras

Figura 1: K mínimo versus comprimento do enlace rádio	22
Figura 2: Distribuição de probabilidades do gradiente de refratividade G	24
Figura 3: Encurvamento dos raios causado pela refração	25
Figura 4: Gradientes normais	26
Figura 5: Gradientes anômalos com gradiente de refratividade positivo (sub-refração)	26
Figura 6: Gradientes anômalos com gradiente de refratividade negativo (super-refração)	27
Figura 7: Efeito do desvanecimento plano num sinal rádio de 3590 MHz	31
Figura 8: Perfil de um enlace com multipercurso	32
Figura 9: Efeito do desvanecimento rápido (seletivo) num sinal de 3590 MHz	32
Figura 10: Desvanecimento do sinal	33
Figura 11: Circuito de referência hipotético com 27500 Km	39
Figura 12: Classificação precisa do clima brasileiro	64
Figura 13: Tronco CBA-GNA	71
Figura 14: Perfil do lance Serra Azul – Mineiros	72
Figura 15: Perfil do lance Serra Azul – Jataí	72
Figura 18: Gráfico linha SESR medido x SESR calculado por SRS.	82
Figura 19: Gráfico de dispersão SESR medido x SESR calculado por SRS	82
Figura 20: SESR medido x SESR calculado por SRS sem diversidade	83
Figura 21: SESR medido x SESR calculado por SRS com diversidade	83
Figura 22: Relação entre TEB e percentual de blocos errados para vários tipos de modulação (Rádio de 140 Mbps)	86
Figura 23: Curva de assinatura do rádio Alcatel 6G – 155 Mbps	87
Figura 24: Comparação do fator geoclimático do modelo com o fator K corrigido	88
Figura 25: Comparação do fator geoclimático medido com o ajustado	89

Lista de tabelas

Tabela 1: Valores importantes do fator K e do gradiente da refratividade	21
Tabela 2: Bits/bloco, ESR, SESR e BBER para várias taxas de transmissão	36
Tabela 3: Objetivos de desempenho definidos na Recomendação ITU-R F.1092	42
Tabela 4: Valores de kn para vários métodos de modulação, sem equalizadores.	50
Tabela 5: Localização geográfica das estações do tronco CBA-GNA	65
Tabela 6: Comprimento dos lances do tronco CBA-GNA	66
Tabela 7: Características técnicas do rádio Alcatel 9662LH	67
Tabela 8: Análise dos dados medidos nas Seções de Multiplexação	75
Tabela 9: SESR medido em outubro 2003 por Seção de Regeneração	77
Tabela 10: Comparação SESR medido x SESR calculado pior mês.	81