

Marcus Vinicius Galletti Arrais

**Efeito do erro de apontamento de antenas
fixadas em plataformas móveis no desempenho
de sistemas de comunicação digital por satélite**

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
Março de 2011



Marcus Vinicius Galletti Arrais

**Efeito do erro de apontamento de antenas
fixadas em plataformas móveis no desempenho
de sistemas de comunicação digital por satélite**

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.

Prof. José Mauro Pedro Fortes

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. Pedro Henrique Gouvêa Coelho

UERJ

Prof. Raimundo Sampaio Neto

Centro de Estudos em Telecomunicações – PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Março de 2011

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

Marcus Vinicius Galletti Arrais

Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás em 2001. É servidor do Departamento de Controle do Espaço Aéreo, e atua na Divisão de Delineamento Técnico do Subdepartamento Técnico, como assessor de telecomunicações para assuntos relacionados ao Serviço Fixo Aeronáutico (SFA) e ao Serviço Móvel Aeronáutico (SMA).

Ficha Catalográfica

Arrais, Marcus Vinicius Galletti

Efeito do erro de apontamento de antenas fixadas em plataformas móveis no desempenho de sistemas de comunicação digital por satélite / Marcus Vinicius Galletti Arrais; orientador: José Mauro Pedro Fortes. – 2011.

85 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 – Tese. 2. Erro de Apontamento. 3. Parâmetros de Desempenho. 4. Comunicações Móveis por Satélite. 5. Plataformas Móveis. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Aos meus pais, por quem sou.

À minha esposa, pelo carinho, paciência e compreensão.

Aos professores do CETUC, e especialmente aos professores José Mauro Pedro Fortes e Raimundo Sampaio Neto, que personificam em sua plenitude o significado da palavra Mestre.

Aos amigos do DECEA, pelo exemplo, incentivo e apoio.

Resumo

Arrais, Marcus Vinicius Galletti ; Fortes, José Mauro Pedro. **Efeito do erro de apontamento de antenas fixadas em plataformas móveis no desempenho de sistemas de comunicação digital por satélite**. Rio de Janeiro, 2011. 85p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O dimensionamento de enlaces digitais de comunicação é realizado com base em objetivos de desempenho a serem satisfeitos por determinados parâmetros, considerando o comportamento aleatório das fontes de degradação do sinal. Em sistemas de comunicação móvel por satélite, o desempenho pode ser fortemente afetado pelo erro de apontamento da antena provocado pelo movimento da plataforma. Neste estudo, é apresentada uma metodologia para a caracterização estatística da degradação conjunta por erro de apontamento e por atenuação por chuvas, e avaliado o efeito dessas fontes de degradação nos diversos parâmetros de desempenho. A metodologia proposta permite dimensionar o sistema de comunicações móveis por satélite, e determinar restrições a serem impostas ao comportamento estatístico do erro de apontamento da antena.

Palavras-chave

Erro de Apontamento; Parâmetros de Desempenho; Comunicações Móveis por Satélite; Plataformas Móveis.

Abstract

Arrais, Marcus Vinicius Galletti ; Fortes, José Mauro Pedro(Advisor). **Effect of moving platforms antenna pointing errors on the performance of digital satellite links**. Rio de Janeiro, 2011. 85p. MSc Thesis — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The design of digital communication links is based on performance objectives to be satisfied by certain link parameters. In mobile satellite communication systems, performance can be strongly affected by the antenna pointing error due to the platform motion. This study presents a methodology for the statistical characterization of the joint degradation due to pointing error and to rain, and evaluates the effect of these degradation sources on the various performance parameters. The proposed methodology allows for the design of the mobile satellite communication systems, and for the determination of constraints to be imposed on the statistical behavior of the antenna pointing errors.

Keywords

Pointing Error; Performance Parameters; Mobile Satellite Communications; Moving Platforms.

Sumário

1	Introdução	12
2	Descrição do Problema	14
2.1	Degradação causada pela atenuação por chuvas	15
2.2	Degradação conjunta causada por chuvas e erro de apontamento da antena	16
3	Modelagem Matemática	17
3.1	Relacionamento entre os Parâmetros de Desempenho e a Razão E_b/N_0	17
3.2	Caracterização Estatística da Degradação por Chuvas	23
3.3	Caracterização Estatística da Degradação por Erro de Apontamento da Antena	25
3.4	Caracterização Estatística da Degradação Conjunta por Chuvas e por Erro de Apontamento	30
3.5	Cálculo dos parâmetros de desempenho a partir da caracterização estatística das variáveis aleatórias a eles relacionadas	31
4	Resultados Numéricos	35
4.1	Influência do diâmetro da antena da estação móvel no desempenho do sistema	36
4.2	Dimensionamento do enlace de comunicações móveis por satélite	46
5	Conclusões	72
A	Aspectos sobre a Teoria da Probabilidade	76
B	Relacionamentos entre os Parâmetros de Desempenho	79
B.1	Relacionamento entre b e r_{eb}	79
B.2	Relacionamento entre r_{eb} e r_{es}	81
B.3	Relacionamento entre r_{eb} e r_{ses}	81
B.4	Relacionamento de r_{eb} e r_{ses} com r_{bbe}	83

Lista de figuras

3.1	Curva de desempenho de BER da modulação QPSK em função da razão $e = (E_b/N_0)_{CS} - z$.	19
3.2	Relação entre a taxa de erro de bit e a probabilidade de bloco errado, para diversos valores de N_B e $\alpha = 10$.	20
3.3	Relação entre a taxa de erro de bit e a probabilidade de segundo errado, para diversos valores de N_B e de n , com $\alpha = 10$.	21
3.4	Relação entre a taxa de erro de bit e a probabilidade de segundo severamente errado, para diversos valores de N_B e de n , com $\alpha = 10$.	22
3.5	Relação entre a taxa de erro de bit e a taxa de bloco errado de fundo, para diversos valores de N_B e de n , com $\alpha = 10$.	23
3.6	FDPC da atenuação causada pela chuva	24
3.7	FDPC da atenuação por chuva, considerando os limitantes inferior e superior.	25
3.8	Função Densidade de Probabilidade do erro de apontamento para diversos valores de γ e δ .	27
3.9	Diagrama de radiação de uma antena com $d = 0,5$ m, $f = 14,2$ GHz e $n = 1$.	28
3.10	Função Distribuição de Probabilidade da degradação causada pelo erro de apontamento.	30
3.11	Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa da degradação causada pelo erro de apontamento.	31
3.12	Função Distribuição de Probabilidade Cumulativa da degradação conjunta.	32
4.1	Variação do diagrama de radiação com o diâmetro da antena.	36
4.2	Influência do diâmetro da antena na FDPC da degradação conjunta.	37
4.3	Influência do diâmetro da antena na FDPC da taxa de erro de bit.	38
4.4	Influência do diâmetro da antena na FDPC da probabilidade de bloco errado.	39
4.5	Influência do diâmetro da antena na FDPC da probabilidade de segundo errado.	40
4.6	Influência do diâmetro da antena na FDPC da probabilidade de segundo severamente errado.	41
4.7	Influência do diâmetro da antena na FDPC da taxa de bloco errado de fundo.	42
4.8	Influência do diâmetro da antena na \overline{BER} .	43
4.9	Influência do diâmetro da antena na EBR.	44
4.10	Influência do diâmetro da antena na ESR.	44
4.11	Influência do diâmetro da antena na SESR.	45
4.12	Influência do diâmetro da antena na \overline{BBER} .	45
4.13	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit: $C_b(10^{-8}) < 3,6 \times 10^{-4}$ - Cenário 1: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	49
4.14	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo errado: $ESR < 3,5 \times 10^{-3}$ - Cenário 1: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	50

4.15	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo severamente errado: $SESR < 7 \times 10^{-4}$ - Cenário 1: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	51
4.16	Dimensionamento pelo critério da taxa de bloco errado de fundo: $BBER < 1,75 \times 10^{-5}$ - Cenário 1: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	51
4.17	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit: $C_b(10^{-8}) < 3,6 \times 10^{-4}$ - Cenário 2: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,50$ m.	53
4.18	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo errado: $ESR < 3,5 \times 10^{-3}$ - Cenário 2: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,50$ m.	54
4.19	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo severamente errado: $SESR < 7 \times 10^{-4}$ - Cenário 2: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,50$ m.	54
4.20	Dimensionamento pelo critério da taxa de bloco errado de fundo: $BBER < 1,75 \times 10^{-5}$ - Cenário 2: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,50$ m.	55
4.21	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (primeiro ponto da máscara): $C_b(10^{-8}) < 3,6 \times 10^{-4}$ - Cenário 3: $R_b = 6848$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	57
4.22	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (segundo ponto da máscara): $C_b(7 \times 10^{-9}) < 5,4 \times 10^{-3}$ - Cenário 3: $R_b = 6848$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	58
4.23	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (terceiro ponto da máscara): $C_b(6 \times 10^{-9}) < 3,6 \times 10^{-2}$ - Cenário 3: $R_b = 6848$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	58
4.24	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo errado: $ESR < 3,5 \times 10^{-3}$ - Cenário 3: $R_b = 6848$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	59
4.25	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo severamente errado: $SESR < 7 \times 10^{-4}$ - Cenário 3: $R_b = 6848$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	60
4.26	Dimensionamento pelo critério da taxa de bloco errado de fundo: $BBER < 1,75 \times 10^{-5}$ - Cenário 3: $R_b = 6848$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	60
4.27	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (primeiro ponto da máscara): $C_b(10^{-8}) < 3,6 \times 10^{-4}$ - Cenário 4: $R_b = 48960$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	62
4.28	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (segundo ponto da máscara): $C_b(2 \times 10^{-9}) < 5,4 \times 10^{-3}$ - Cenário 4: $R_b = 48960$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	63
4.29	Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (terceiro ponto da máscara): $C_b(10^{-9}) < 3,6 \times 10^{-2}$ - Cenário 4: $R_b = 48960$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	63
4.30	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo errado: $ESR < 7 \times 10^{-3}$ - Cenário 4: $R_b = 48960$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	64
4.31	Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo severamente errado: $SESR < 7 \times 10^{-4}$ - Cenário 4: $R_b = 48960$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	65
4.32	Dimensionamento pelo critério da taxa de bloco errado de fundo: $BBER < 1,75 \times 10^{-5}$ - Cenário 4: $R_b = 48960$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	65

4.33 Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (primeiro ponto da máscara): $C_b(10^{-8}) < 3,6 \times 10^{-4}$ - Cenário 5: $R_b = 150336$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	67
4.34 Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (segundo ponto da máscara): $C_b(2 \times 10^{-9}) < 5,4 \times 10^{-3}$ - Cenário 5: $R_b = 150336$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	68
4.35 Dimensionamento pelo critério da taxa de erro de bit (terceiro ponto da máscara): $C_b(9 \times 10^{-10}) < 3,6 \times 10^{-2}$ - Cenário 5: $R_b = 150336$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	68
4.36 Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo errado: $ESR < 1,4 \times 10^{-2}$ - Cenário 5: $R_b = 150336$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	69
4.37 Dimensionamento pelo critério da taxa de segundo severamente errado: $SESR < 7 \times 10^{-4}$ - Cenário 5: $R_b = 150336$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	70
4.38 Dimensionamento pelo critério da taxa de bloco errado de fundo: $BBER < 3,5 \times 10^{-5}$ - Cenário 5: $R_b = 150336$ kbit/s e $d = 0,30$ m.	70

Lista de tabelas

4.1	<i>Configurações de Blocagem definidas na Recomendação ITU-R S.1521-1.</i>	46
4.2	<i>Máscara para a FDPC da taxa de erro de bit $C_b(B)$.</i>	47
4.3	<i>Objetivos de desempenho para um enlace internacional em termos de ESR, SESR e BBER estabelecidos na Recomendação ITU-R S.1521-1.</i>	47
4.4	<i>Dimensionamento da razão $(E_b/N_0)_{CS}$ mínima para o Cenário 1: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,30$ m.</i>	52
4.5	<i>Dimensionamento da razão $(E_b/N_0)_{CS}$ mínima para o Cenário 2: $R_b = 1664$ kbit/s e $d = 0,50$ m.</i>	56
4.6	<i>Dimensionamento da razão $(E_b/N_0)_{CS}$ mínima para o Cenário 3: $R_b = 6848$ kbit/s e $d = 0,30$ m.</i>	61
4.7	<i>Dimensionamento da razão $(E_b/N_0)_{CS}$ mínima para o Cenário 4: $R_b = 48960$ kbit/s e $d = 0,30$ m.</i>	66
4.8	<i>Dimensionamento da razão $(E_b/N_0)_{CS}$ mínima para o Cenário 5: $R_b = 150336$ kbit/s e $d = 0,30$ m.</i>	71