



Ana Gabriela Correa Mena

**Análise de interferência envolvendo satélites
em órbitas elípticas altamente inclinadas e
receptores do serviço fixo terrestre: modelagem
probabilística do ângulo de elevação das
antenas dos receptores 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
Agosto de 2013



Ana Gabriela Correa Mena

**Análise de interferência envolvendo satélites
em órbitas elípticas altamente inclinadas e
receptores do serviço fixo terrestre: modelagem
probabilística do ângulo de elevação das
antenas dos receptores 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.

Prof. José Mauro Pedro Fortes

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Paulo Roberto Rosa Lopes Nunes

IME

Prof. Raimundo Sampaio Neto

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de Agosto de 2013

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

Ana Gabriela Correa Mena

Graduou-se em Engenharia em Eletrônica e Telecomunicações na Universidad Técnica Particular de Loja UTPL (Loja-Ecuador).

Ficha Catalográfica

Correa Mena, Ana Gabriela

Análise de interferência envolvendo satélites em órbitas elípticas altamente inclinadas e receptores do serviço fixo terrestre: modelagem probabilística do ângulo de elevação das antenas dos receptores terrestres/ Ana Gabriela Correa Mena; orientador: José Mauro Pedro Fortes. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2013.

66 f: il.(color.) ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Interferência. 3. Modelagem probabilística. 4. Satélites em órbitas elípticas altamente inclinadas. 5. Serviço fixo terrestre. I. Fortes, José Mauro Pedro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A mis padres y hermanos, por motivarme a luchar por mis sueños.
Al amor de mi vida Juan Pablo, por demostrarme su apoyo incondicional.

Agradecimentos

A Deus, por suas bênçãos constantes.

A minha família, pelo apoio, estímulo e amor incondicional.

Às pessoas que me incentivaram e fizeram possível meu ingresso ao mestrado.

Ao professor José Mauro Fortes, por sua orientação, paciência e confiança valiosos no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Raimundo Sampaio, pelos conhecimentos transmitidos e por sua colaboração ao permitir-me o uso dos equipamentos que estão a seu serviço.

Aos colegas do CETUC, pela amizade e por gerar um ambiente agradável de trabalho.

Ao Governo Brasileiro, à Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio), e o apoio financeiro provido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelos auxílios concedidos.

Resumo

Correa Mena, Ana Gabriela; Fortes, José Mauro Pedro. **Análise de interferência envolvendo satélites em órbitas elípticas altamente inclinadas e receptores do serviço fixo terrestre: modelagem probabilística do ângulo de elevação das antenas dos receptores terrestres**. Rio de Janeiro, 2013. 66p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O compartilhamento de frequências entre sistemas de comunicações por satélite e sistemas terrestres tem sido objeto de estudos desde o aparecimento dos primeiros sistemas comerciais de comunicações por satélite. Um caso particular que tem despertado o interesse dos operadores de sistemas terrestres diz respeito à interferência produzida pelos enlaces descendentes de sistemas de satélite que utilizam órbitas elípticas altamente inclinadas (Highly Elliptical Orbit - HEO) nos receptores do Serviço Fixo Terrestre (Fixed Service - FS). Os trabalhos encontrados na literatura, envolvendo este tipo de interferência, apresentam análises que consideram a hipótese simplificadora de que todos os receptores vítima do Serviço Fixo Terrestre têm suas antenas receptoras com elevação zero graus. No presente trabalho é feita uma análise probabilística da interferência agregada produzida por satélites de múltiplos sistemas HEO sobre receptores do Serviço Fixo Terrestre na faixa de 18 GHz, na qual o ângulo de elevação da antena receptora dos sistemas FS considerados é modelado por uma variável aleatória com função densidade de probabilidade conhecida. A modelagem matemática desenvolvida é aplicada a dois cenários envolvendo múltiplos sistemas HEO interferentes. Mais especificamente, um dos cenários considera três sistemas HEO com satélites operando apenas no hemisfério norte e o outro, três sistemas HEO com satélites operando tanto no hemisfério norte quanto no sul. Os resultados obtidos são comparados àqueles que utilizam a hipótese de que as antenas receptoras de todos os sistemas FS considerados têm ângulo de elevação zero.

Palavras-chave

interferência; modelagem probabilística; satélites em órbitas elípticas altamente inclinadas; serviço fixo terrestre

Abstract

Correa Mena, Ana Gabriela; Fortes, José Mauro Pedro(Advisor). **Interference analysis involving highly inclined elliptical orbit satellites and fixed service receivers: probabilistic modeling of the fixed service receiver antenna elevation angle** . Rio de Janeiro, 2013. 66p. MSc. Dissertation — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Frequency sharing between satellite systems and terrestrial fixed service (FS) systems has been object of studies since the onset of commercial satellite communication systems. A particular case of interest refers to the interference produced by the downlink of highly elliptical orbit satellite systems (HEO) into fixed service receivers. In the literature, studies involving this type of interference have presented analyzes that consider the simplifying assumption that all victim fixed service receivers have their receiving antennas with zero degree elevation angle. In this work a probabilistic analysis is used to evaluate the aggregate interference produced by the satellites of multiple highly elliptical orbit satellite systems into fixed service receivers operating in the 18 GHz frequency band. The FS receiving antenna elevation angle is modeled as a random variable with known probability density function. The proposed mathematical model is applied to two scenarios involving multiple interfering HEO systems. More specifically, the first scenario considers three interfering HEO systems having satellites that operate only in the northern hemisphere. In the second scenario, three HEO systems with satellites that operate in both the northern and southern hemisphere are considered. The obtained results are compared to those resulting from analyses that use the hypothesis that the receiving antennas of all the FS victim systems have a zero degree elevation angle.

Keywords

interference; probabilistic modelling; highly inclined elliptical orbits; fixed service

Sumário

1	Introdução	13
2	Descrição do Problema	15
2.1	Critérios de proteção	16
2.2	Tipos de análise	19
3	Modelagem Matemática	22
4	Resultados Numéricos	31
5	Conclusão	57
A	Aspectos da Mecânica Orbital	60
B	Geometria	64

Lista de figuras

2.1	Intereferência produzida por vários satélites	15
2.2	Posicionamento dos receptores na simulação por rotas	20
2.3	Posicionamento dos receptores na simulação estação-a-estação	21
3.1	CDFs da interferência agregada de três sistemas HEO do tipo A sobre um receptor FS localizado em (20°S, 30°W), para apontamentos da antena receptora do FS correspondentes a azimutes que variam de 0° a 360° e ângulo de elevação de 0°.	27
3.2	CDFs da interferência agregada de três sistemas HEO do tipo A sobre um receptor FS localizado em (20°S, 30°W), para apontamentos da antena receptora do FS correspondentes a azimutes que variam de 0° a 360° e ângulo elevação modelada por uma variável aleatória de Tikhonov com parâmetro $\sigma^2 = 0.1$.	28
3.3	Ilustração do nível y_1 da razão I/N que é excedido com probabilidade 0.2	29
4.1	Trilhas terrestres correspondentes a um único sistema HEO do tipo A	32
4.2	Trilhas terrestres correspondentes a um único Sistema HEO do tipo B	32
4.4	Trilhas terrestres correspondentes a três sistemas HEO do tipo B	32
4.3	Trilhas terrestres correspondentes a três sistemas HEO do tipo A	33
4.5	Máscara de Densidade de Fluxo de Potência RR-21	34
4.6	Diagrama de radiação da antena receptora do Serviço Fixo Terrestre	35
4.7	Função Densidade de Probabilidade de Tikhonov	37
4.8	Função Distribuição de Probabilidade de Tikhonov	37
4.9	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 30°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	39
4.10	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 20°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	39
4.11	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 10°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	40
4.12	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 0°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	40
4.13	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 10°S, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	41
4.14	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 20°S, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	41
4.15	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 30°S, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	42

4.16	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 30°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	43
4.17	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 20°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	43
4.18	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 10°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	44
4.19	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 0°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	44
4.20	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 10°S, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	45
4.21	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 20°S, ganho da antena do receptor FS 32 dBi. Note que no caso dos critérios de proteção de curto prazo, níveis de interferência em excesso maiores que zero ocorrem com probabilidades menores que 6×10^{-5} .	46
4.22	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistema HEO do tipo A. Latitude do receptor FS 30°S, ganho da antena do receptor FS 32 dBi. Note que no caso dos três critérios de proteção, níveis de interferência em excesso maiores que zero ocorrem com probabilidades menores que 6×10^{-5} .	47
4.23	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas tipo HEO do B. Latitude do receptor FS 30°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	48
4.24	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 20°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	49
4.25	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 10°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	49
4.26	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 0°N, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	50
4.27	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 10°S, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	50
4.28	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 20°S, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	51
4.29	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 30°S, ganho da antena do receptor FS 48 dBi	51

4.30	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 30°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	52
4.31	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 20°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	53
4.32	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 10°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	53
4.33	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 0°N, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	54
4.34	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 10°S, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	54
4.35	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 20°S, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	55
4.36	Distribuição cumulativa de probabilidade da interferência em excesso. Três sistemas HEO do tipo B. Latitude do receptor FS 30°S, ganho da antena do receptor FS 32 dBi	55
A.1	Parâmetros Orbitais	60
A.2	Orientação de uma órbita elíptica	62
B.1	Transição de base	64
B.2	Relacionamento entre as coordenadas polares e retangulares	65

Lista de tabelas

4.1	Parâmetros orbitais dos sistemas HEO	31
4.2	Características técnicas dos receptores FS	33