



Maiquel dos Santos Canabarro

**Análise e Síntese de Refletores Circularmente Simétricos
pelos Métodos da Ótica Física e Correntes de Franja**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: José Ricardo Bergmann
Co-orientador: Flávio José Vieira Hasselmann

Rio de Janeiro
Maio de 2009



Maiquel dos Santos Canabarro

**Análise e Síntese de Refletores Circularmente
Simétricos pelos Métodos da Ótica Física e
Correntes de Franja**

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.

Dr. José Ricardo Bergmann

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Flávio José Vieira Hasselmann

Co-Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Luiz Costa da Silva

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Dr. Fernando José da Silva Moreira

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Dr. José Eugênio Leal

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

Rio de Janeiro, 29 de maio de 2009

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

Maiquel dos Santos Canabarro

Graduou-se em Engenharia Elétrica, em julho de 2006, na Universidade Federal de Santa Maria. Em agosto do mesmo ano, iniciou no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu mestrado na Área de Eletromagnetismo Aplicado.

Ficha Catalográfica

Canabarro, Maiquel dos Santos

Análise e síntese de refletores circularmente simétricos pelos métodos da ótica física e correntes de franja / Maiquel dos Santos Canabarro; orientadores: José Ricardo Bergman, Flávio José Vieira Hasselmann. – 2009.

110 f. ; 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. Síntese de antenas refletoras. 3. Antenas para satélite. 4. Antenas omnidirecionais. 5. Análise de antenas refletoras. I. Bergmann, José Ricardo. II. Hasselmann, Flávio José Vieira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

A minha família, em especial aos meus pais Miriam e Verci, e a minha esposa
Camila.

Agradecimentos

Ao meu Orientador Dr. José Ricardo Bergmann pelas incansáveis orientações, pela paciência, e principalmente pelos ensinamentos ao longo de nosso trabalho e por acreditar em mim.

Ao meu Co-Orientador Dr. Flávio José Vieira Hasselmann pelas orientações e paciência durante as etapas desse trabalho.

Ao Dr. Nelson Jorge Schuch por me mostrar a importância das nossas liberdades.

A minha Família: meus irmãos Rita e Moisés, os meus tios Ana e Wilson e em especial aos meus pais Miriam e Verci pelo carinho e por proporcionar minha educação.

A meus sogros Dalva e Aldenir, aos meus cunhados Gilson e Francisco pelo apoio e carinho.

A minha esposa, Camila, por acreditar no projeto de vida que juntos estamos construindo dia a dia, pelo amor, pelo carinho, pelos incansáveis incentivos ao longo do percurso deste trabalho.

Ao Dr. Cássio Gongalvez do Rego, UFMG, pelas informações teóricas sobre sua Tese.

Aos colegas do CETUC, Sandro, Djeisson, Ramariz, Marco Aurélio, Fabrício,

André, Rafael pela amizade e companheirismo no dia a dia do trabalho.

Aos amigos Robinson, Fábio e João Paulo pela acolhida no momento em que cheguei aqui no Rio.

Aos funcionários da PUC-Rio, em especial a as Anas Sergio, a Célia e a Alcina.

A CAPES, ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais esse trabalho não poderia ter sido realizado.

A Deus, por nos mostrar a energia do Universo todos os dias, e assim nos ensinado a viver a vida com sabedoria.

Resumo

Canabarro, Maiquel dos Santos; Bergmann, José Ricardo; Hasselmann, Flávio José Vieira. **Análise e Síntese de Refletores Circularmente Simétricos pelos Métodos da Ótica Física e Correntes de Franja**. Rio de Janeiro, 2009. 110p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O projeto de antenas refletoras para a geração de feixes modelados envolve a construção de algoritmos baseados em métodos de análise eletromagnética associados a técnica de otimização. Em geral, estes algoritmos demandam considerável tempo de processamento computacional, impondo limites para sua utilização intensiva na exploração de diferentes conjuntos de especificações e na busca de soluções mais compactas. Neste trabalho, será considerada a síntese de antenas refletoras circularmente simétricas para a geração de feixes modelados circularmente simétricos. Em função das características de simetria da antena, simplificações serão introduzidas na formulação do problema, reduzindo substancialmente o tempo de processamento e viabilizando sua utilização intensiva. Para a análise eletromagnética da antena refletora serão consideradas as aproximações da Ótica Física (PO) e das correntes de franja (CF). Considerando alimentadores radiando um campo com dependência azimutal $n=1$, o algoritmo foi adaptado e aplicado no modelamento de antena refletora para atender as especificações do CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite). Para alimentadores com dependência azimutal $n=0$, foram considerados sistemas de antenas omnidirecionais de um e dois refletores para a geração de diagramas modelados no plano vertical. Para estes dois tipo de sistema, o algoritmo de modelamento foi utilizado para maximizar o diagrama em direção e para produzir diagramas com dependência do tipo cossecante ao quadrado no plano vertical. A validação da técnica de análise eletromagnética desenvolvida foi obtida comparando os resultados com os gerados via Métodos dos Momentos.

Palavras-chave

síntese de antenas refletoras; antenas para satélite; antenas omnidirecionais; análise de antenas refletoras

Abstract

Canabarro, Maiquel dos Santos; Bergmann, José Ricardo (advisor); Hasselmann, Flávio José Vieira (advisor). **Synthesis and Analysis of Circularly Symmetric Reflectors via Physical Optics and Fringe Wave Currents**. Rio de Janeiro, 2009. 110p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The usual algorithms employed in the design of shaped reflector antennas for satellite applications embed an electromagnetic analysis method in an optimization technique. In general, these algorithms demand considerable computation time, limiting its intensive use in the study to explore different sets of specifications and to search for more compact geometries. In this work, it is considered the particular case of the shaping of circularly symmetric reflectors antennas for the generation of circularly symmetric radiation patterns. The use of the reflector surface properties simplifies the formulation of the electromagnetic scattering and substantially reduces the computer time involved in the optimization iteration. For the electromagnetic scattering, the algorithm employed here considers the approximations given by the Physical Optics and Fringe Currents methods. Firstly, the shaping algorithm was applied in the design of a single reflector antenna to comply with the specifications of the China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS). For this case, the feed radiation pattern was represented by model with azimuthal dependence $n=1$. As a second case, the shaping algorithm was applied in the design of single and dual reflector omnidirectional antennas. These antennas were feed by a TEM coaxial horn with azimuthal dependence $n=1$. For these two type of antenna configurations, the modelling algorithm was used to maximize the diagram in one direction or to produce radiation patterns with dependence of the type cosecant to the square in the vertical plan. A Methods of Moments electromagnetic analysis was used to validate the scattering fields yielded by the PO+Fringe currents approximations.

Keywords

Synthesis reflectors antennas; satellite antennas; omni antennas; Analysis reflectors antennas

Sumário

1	Introdução	16
2	Análise de refletores circularmente simétricos alimentados por diagrama $n=1$	19
2.1.	Introdução	19
2.2.	Modelo de alimentador para $n=1$	19
2.3.	Refletores circularmente simétricos	22
2.4.	Determinação do campo distante usando Aproximações da Ótica Física (PO)	24
2.4.1.	Formulação para um único refletor circularmente simétrico	25
2.4.2.	Determinação das correntes equivalentes de borda e correntes de franja	28
2.5.	Validação do algoritmo de análise	36
3	Síntese de refletores circularmente simétricos alimentados por diagrama com dependência azimutal $n=1$	39
3.1	Antenas para cobertura uniforme em satélites de baixa órbita: Caso CBERS	39
3.2	Técnica de otimização de refletores	41
3.3	Solução inicial via síntese ótica	44
3.4	Modelamento de refletores para cobertura do CBERS	47
4	Análise de refletores circularmente simétricos alimentados por diagramas com dependência azimutal $n=0$	59
4.1	Introdução	59
4.2	Modelos de alimentadores com dependência azimutal $n=0$	60
4.3	Formulação para um único refletor circularmente simétrico	63
4.4	Formulação para duplos refletores circularmente simétricos	65
4.5	Correntes de Franja aplicadas na formulação para refletores	

alimentados por alimentadores com dependência azimutal $n=0$	70
4.6 Comparação de resultados de análise de casos descritos na literatura	71
4.6.1 Comparação de resultados de análise de casos com um único refletor	72
4.6.2 Comparação de resultados de análise de antenas com duplos refletores	76
5 Síntese de refletores circularmente simétricos alimentados por diagrama com dependência azimutal $n=0$	81
5.1 Introdução	81
5.2 Caso de antenas refletoras omnidirecional com um único refletor	81
5.2.1 Antenas refletoras omnidirecionais com diagrama do tipo cossecante ao quadrado no plano vertical	92
5.3 Caso de antenas refletoras omnidirecional de duplos refletores	95
6 Considerações Finais	101
Referências Bibliográficas	105
Apêndice A Transformação das integrais duplas em lineares	109

Lista de figuras

Figura 2.1 – Refletor circularmente simétrico	22
Figura 2.2 - Orientação do vetor unitário normal a superfície.	24
Figura 2.3 - Ângulos e vetores utilizados nas equações das correntes e do coeficiente de difração por uma cunha curva.	30
Figura 2.4 - Ângulos e vetores utilizados nas equações das correntes e dos coeficientes de difração por borda de uma antena refletora.	35
Figura 2.5 – Sub-refletor hiperbólico com excentricidade igual a, $\varepsilon = 2$, implementado no caso.	37
Figura 2.6 – Diagrama de campo espalhado para a polarização	37
Figura 2.7 – Diagrama de espalhamento para o polarização Principal	38
Figura 3.1 – Características da orbita do CBERS.	40
Figura 3.2 – Especificação para o diagrama de radiação para o CBERS.	41
Figura 3.3 – Limites mínimo e máximo das especificação para o diagrama de radiação para o CBERS com faixa de 3 dB.	44
Figura 3.4 – Relação de $\theta(\theta')$ e o principio da conservação de energia no interior do tudo de raios.	45
Figura 3.5 - Geratrizes dos refletores sintetizados pela GO para 50 e 60 cm.	46
Figura 3.6 - Diagrama de radiação do refletor sintetizado pela GO.	47
Figura 3.7 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 5 e 7 termos na Serie de Fourier.	49
Figura 3.8 - Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 8,12 e 16 termos na Série de Fourier.	49
Figura 3.9 – Geratriz dos refletores sintetizados com 5 e 7 termos na Série de Fourier.	50
Figura 3.10 - Geratriz dos refletores sintetizados com mais 8 termos na Série de Fourier.	50
Figura 3.11 – Curvas limites, G_{MAX} e G_{MIN} , para diagrama de radiação de cobertura do projeto Cbers.	51
Figura 3.12 - Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 7 e 8 termos na Série de Fourier.	52

Figura 3.13 - Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 10, 12 e 16 termos na Série de Fourier.	52
Figura 3.14 – Geratriz dos refletores sintetizados com 7 e 8 termos na Série de Fourier.	53
Figura 3.15 – Geratriz dos refletores sintetizados com 10,12 e 16 termos na Série de Fourier.	53
Figura 3.16 – Destaque no diagrama de radiação do sintetizado com 7 termos na Série de Fourier.	54
Figura 3.17 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com diferentes números de termos na Série de Fourier.	54
Figura 3.18 – Geratriz dos refletores sintetizados com 8 a 16 termos na Série de Fourier.	55
Figura 3.19 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 12,14 e 16 termos na Série de Fourier para o refletor de 50 cm.	55
Figura 3.20 – Destaque no diagrama de radiação do sintetizado com 12,14 e 16 termos na Série de Fourier.	56
Figura 3.21 – Diagramas de radiação sintetizados pela PO+CF com 14 termos na Série de Fourier e aplicação dos pesos W_m .	57
Figura 3.22 – Geratriz dos refletores sintetizados com 14 termos na Série de Fourier.	57
Figura 4.1 – Dependência axial dos refletores e alimentador.	60
Figura 4.2 – Corneta coaxial corrugada utilizada na alimentação de antenas refletoras com radiação omnidirecional.	61
Figura 4.3 – Diagrama de radiação da corneta coaxial corrugada.	61
Figura 4.4 – Disposição dos vetores usados no cálculo das correntes induzidas sobre as superfícies dos refletores da antena.	67
Figura 4.5 – Comparação entre os diagrama de radiação do alimentador medido com o gerado por um disco com raios internos e externos iguais 0.43λ e 0.93λ , respectivamente.	72
Figura 4.6 – Configuração da antena refletora de um único refletor com radiação omnidirecional.	73
Figura 4.7 – Diagramas de radiação de uma antena refletora omnidirecional analisada pelos métodos PO, PO+CF e modelo	

aproximado comprando com o MoM.	74
Figura 4.8 – Diagramas de radiação de uma antena refletora omnidirecional analisada pelos métodos PO, PO+CF alimentados pela expansão de ondas esféricas comparado com o MoM.	75
Figura 4.9 – Antena refletora de duplo refletora configurada com um subrefletor parabólico e um principal dado por uma cônica.	76
Figura 4.10 – Diagramas de radiação da antena refletora omnidirecional com dois refletores analisadas pelo PO, PO+CF e MoM.	77
Figura 4.11 – Diagramas de radiação da antena refletora PACO analisadas pelo PO, PO+CF, alimentada pela expansão de ondas esféricas, e MoM.	78
Figura 4.12 – Antena refletora de duplo refletores configurada OADE.	79
Figura 4.13 – Diagrama de radiação da antena refletora OADE, analisada pelos métodos PO, PO+PTD alimentada pela expansão de ondas esféricas e pelo MoM.	80
Figura 5.1 – Deslocamento no eixo de simetria para aplicação de <i>tilt</i> no ganho máximo.	82
Figura 5.2 – Diagrama de uma antena omnidirecional com o ganho máximo deslocado para 96°.	83
Figura 5.3 – Diagrama de radiação da antena refletora omnidirecional com máximo ganho descolado para 105°.	84
Figura 5.4 – Geratrizes das antenas com ganho máximo em 96° e 105° comparados a parábola a 90°.	84
Figura 5.5 – Geratrizes anômala gerada pela otimização para maximizar o ganho da antena refletora omnidirecional do caso 7_3.	86
Figura 5.6 – Diagrama de Radiação da análise PO+CF da otimização para maximizar o ganho da antena refletora omnidirecional.	87
Figura 5.7 – Geratrizes geradas pelas otimizações para maximizar o ganho da antena refletora omnidirecional.	88
Figura 5.8 – Diagrama de Radiação gerados pela análise PO+CF da otimização para maximizar o ganho com V_S fixo.	89
Figura 5.9 – Geratrizes geradas pelas otimizações para maximizar o ganho com V_S fixo.	89

Figura 5.10 – Geratrizes geradas pelas otimizações para maximizar o ganho com V_S fixo, com discrepâncias.	90
Figura 5.11 – Diagrama de Radiação gerados pela análise PO+CF da otimização para maximizar o ganho com V_S e W_A fixos.	91
Figura 5.12 – Superfícies geradas pelas otimizações para maximizar o ganho com V_S e W_A fixos.	91
Figura 5.13 – Perfil de ganho dado pela função cossecante ao quadrado com os limites.	92
Figura 5.14 – Diagramas de radiação gerados pela análise (PO+CF) com 9,11 e 13 termos na Série de Fourier.	93
Figura 5.15 – Diagrama de radiação da Figura 5.14 em destaque para a região de interesse na otimização.	94
Figura 5.16 – Superfícies modeladas com 9, 11 e 13 termos na Série de Fourier.	94
Figura 5.17 – Antena refletora de duplo refletores configurada OADE.	95
Figura 5.18 – Diagramas de radiação, analisados por PO+CF, das otimizações do refletor principal com 3 e 11 termos na Série de Fourier.	96
Figura 5.19 – (a) Geratrizes das superfícies dos refletores principais otimizadas com 3 e 11 termos; (b) diferenças entre a geratriz inicial e as modeladas.	97
Figura 5.20 – Corrente induzida sobre o refletor principal pela fonte primária 3 e 11 termos na Série de Fourier comparado com sem otimização.	97
Figura 5.21 – Diagramas de radiação analisados por PO+CF das otimizações do subrefletor com refletores otimizados com 3 e 11 termos.	98
Figura 5.22 – (a) Geratrizes das superfícies do subrefletores otimizados de acordo com seus refletores principais; (b) diferenças entre o subrefletor inicial e os modelados.	99
Figura 5.23 – Distribuição das correntes induzidas sobre o refletor principal após as otimizações no subrefletor.	100

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Resultado das otimizações para família 3.	86
Tabela 5.2 – Resultado dos melhores casos das otimizações realizadas pelas famílias 3,5,7 e 9.	87
Tabela 5.3 – Resultado das otimizações realizadas na antena refletor com radiação omnidirecional na busca de maximizar o ganho com V_S fixo.	88
Tabela 5.4- – Resultado das otimizações realizadas na antena refletor com radiação omnidirecional na busca de maximizar o ganho com V_S e W_A fixos.	91
Tabela 5.5 – Configurações da OADE.	95