



Mariana Guimarães Pralon

**Aplicação do Método dos Momentos na Análise de Antenas
Microfita**

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: Prof. José Ricardo Bergmann

Rio de Janeiro
Março de 2012



Mariana Guimarães Pralon

**Aplicação do Método dos Momentos na Análise de Antenas
Microfita**

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.

Prof. José Ricardo Bergmann

Orientador

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Maurício Henrique Costa Dias

Instituto Militar de Engenharia

Prof. Flávio José Vieira Hasselmann

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. Sandro Rogério Zang

Centro de Estudos em Telecomunicações - PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

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

Rio de Janeiro, 20 de março de 2012

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

Mariana Guimarães Pralon

Graduou-se em Engenharia de Comunicações, em novembro de 2005, no Instituto Militar de Engenharia. Em fevereiro de 2007, iniciou no Centro de Estudos em Telecomunicações da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro seu mestrado na área de eletromagnetismo aplicado.

Ficha Catalográfica

Pralon, Mariana Guimarães

Aplicação do método dos momentos na análise de antenas microfita / Mariana Guimarães Pralon; orientador: José Ricardo Bergmann. Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2012.

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

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica - Teses. 2. Antenas Microfita. 3. Método dos Momentos. 4. Funções de Green. 5. Impedância de entrada. I. Bergmann, José Ricardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha amada família.

Agradecimentos

Ao meu professor e orientador, José Ricardo Bergmann, pela dedicação sem limites, pelos ensinamentos e pela paciência, fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa apresentada neste trabalho.

Aos meus pais, por estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida, com apoio incondicional a todas as minhas decisões. Por me entenderem, me acolherem e me consolarem nos momentos difíceis e por participarem de todas as minhas alegrias. Por não medirem esforços na minha educação, me fazendo chegar onde estou hoje. Meu amor e agradecimento por toda a ajuda nesse trabalho.

Ao meu querido irmão, por todos os conselhos e pelo consolo muitas vezes necessário. Por me ouvir e me ensinar muito ao longo dessa caminhada.

Ao meu amado Bruno, pelo apoio incondicional ao meu trabalho. Por me ouvir e compartilhar comigo todas as emoções vividas nesse período. Por todos os ensinamentos. Pela paciência e carinho.

À minha cunhada e amiga Barbara, por todo o carinho durante essa caminhada.

Aos meus chefes no Centro Tecnológico do Exército, General Aléssio Ribeiro Souto, General João Edison Minnicelli e General Claudio Duarte de Moraes, por todo o apoio e por me permitirem realizar este trabalho com muita tranquilidade.

Aos colegas do Centro Tecnológico do Exército.

Aos colegas e funcionários do CETUC e aos funcionários da Vice-Reitoria Acadêmica, pelo carinho e atenção.

À PUC-Rio, por me permitir realizar este trabalho por meio da bolsa de isenção de pagamento.

A Deus.

Resumo

Pralon, Mariana Guimarães; Bergmann, José Ricardo. **Aplicação do Método dos Momentos na Análise de Antenas Microfita**. Rio de Janeiro, 2012. 120p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, o Método dos Momentos é aplicado na análise de antenas microfita excitadas por cabo coaxial, utilizando Funções de Green no modelamento dos campos no interior da camada de dielétrico, o que permite considerar as ondas de superfície excitadas no substrato. Para obter a impedância de entrada da antena microfita, foi implementado um algoritmo numérico para a solução do problema. Neste trabalho, atenção especial é dada à análise de singularidades e ao comportamento assintótico dos integrandos envolvidos na solução numérica do problema. A validação do algoritmo é feita através da comparação com resultados apresentados em referências. Os resultados fornecidos pelo Método dos Momentos são comparados com os obtidos na aplicação de outros métodos na solução do problema. Para esta comparação, são utilizados dois programas comerciais de simulação eletromagnética, o Ansoft HFSS e o CST. São feitas simulações com a variação dos parâmetros de entrada do problema, com o objetivo de assegurar a convergência dos resultados e permitir a comparação com os resultados obtidos pelo Método dos Momentos. São apresentadas diferenças entre os resultados obtidos pelos diversos métodos e analisadas as possíveis causas das discrepâncias.

Palavras-chave

Antenas microfita; Método dos Momentos; funções de Green; impedância de entrada; alimentação por cabo coaxial.

Abstract

Pralon, Mariana Guimarães; Bergmann, José Ricardo (Advisor). **Application of the Method of Moments in the Analysis of Microstrip Antennas**. Rio de Janeiro, 2012. 120p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the present work, the Method of Moments is applied to the analysis of probe fed antennas. The approach uses Green Functions to model the fields within the dielectric layer, which allows to take into account the surface waves excited in the substrate. A numerical algorithm was implemented in order to obtain the microstrip antenna input impedance. The latter is then verified through the comparison with results presented in references. Special attention is given to the analysis of singularities and to the asymptotic behavior of the integrands involved in the numerical solution. A comparison is drawn between the results obtained with the Method of Moments and those obtained with other methods by employing two electromagnetic simulation commercial softwares, Ansoft HFSS and CST. Simulations with different input parameters are performed in order to ensure convergence of the results and allow comparison with results obtained by the Method of Moments. The differences among the results obtained by the several methods addressed in the analysis are presented and the potential causes of them are analyzed.

Keywords

Microstrip Antennas; Method of Moments; Green functions; input impedance; probe fed antennas.

Sumário

1	Introdução	15
2	Campo Elétrico no <i>Patch</i> Metálico	19
3	Análise Eletromagnética de Antenas Microfita	28
3.1.	Introdução	28
3.2.	Descrição do método de análise	29
3.3.	Diádica de Green	33
3.4.	Análise dos elementos da matriz impedância e do vetor voltagem	34
3.5.	Impedância de entrada ou auto-impedância	37
3.6.	Solução numérica dos elementos da matriz impedância e do vetor voltagem	38
3.6.1.	Primeiro intervalo de integração	44
3.6.2.	Segundo intervalo de integração	45
3.6.3.	Terceiro intervalo de integração	47
3.7.	Funções de Expansão	55
4	Validação do Algoritmo	59
4.1.	Introdução	59
4.2.	Validação do Algoritmo	59
4.3.	Convergência dos resultados do algoritmo com o número de funções de expansão	69
5	Comparação entre Métodos Numéricos	72
5.1.	Introdução	72
5.1.1.	Método numérico utilizado no HFSS	73
5.1.2.	Método numérico utilizado no CST	73
5.1.3.	Modelamento da fonte de excitação	74
5.2.	Análise dos resultados do Ansoft HFSS e CST	76
5.3.	Influência dos parâmetros de entrada	78

5.3.1. Dimensões do plano de terra	79
5.3.2. Análise da malha numérica e estabilidade de resultados	83
5.3.3. Posição da condição de fronteira de radiação	90
5.3.4. Análise do critério de convergência no HFSS	92
5.3.5. Alimentação da antena microfita	95
5.4. Influência da espessura do substrato na impedância de entrada	102
6 Conclusão	107
7 Referências Bibliográficas	111
8 Anexos	113

Lista de figuras

Figura 1.1 – Antena Microfita	15
Figura 2.1 – <i>Patch</i> metálico sobre substrato apoiado em um plano de terra condutor elétrico perfeito infinito	19
Figura 3.1 – Antena microfita com alimentação coaxial	28
Figura 3.2 – Vista lateral da antena microfita	29
Figura 3.3 – Caminho de integração de Z_{mn}^{ij}	40
Figura 3.4 – Convergência da parte real da integral $I_{3,V}$ em coordenadas cartesianas com o número de pontos em α	53
Figura 3.5 – Convergência da parte real da integral $I_{3,V}$ em coordenadas cartesianas com o número de pontos em β	53
Figura 3.6 – Convergência da parte imaginária da integral $I_{3,V}$ em coordenadas cartesianas com o número de pontos em α	54
Figura 3.7 – Convergência da parte imaginária da integral $I_{3,V}$ em coordenadas cartesianas com o número de pontos em β	54
Figura 4.1 – Vista frontal da antena microfita com alimentação coaxial	60
Figura 4.2 – Vista superior do <i>patch</i> metalizado e detalhes da vista lateral da antena	60
Figura 4.3 – Carta de Smith da impedância de entrada – Comparação entre resultados apresentados em [4] e resultados do algoritmo implementado	62
Figura 4.4 – Comparação entre as partes resistivas do resultado em [4] e do resultado obtido por meio do algoritmo implementado	63
Figura 4.5 – Comparação entre as partes reativas do resultado em [4] e do resultado obtido por meio do algoritmo implementado	64
Figura 4.6 – Convergência da parte resistiva da impedância de entrada com o limite superior do terceiro intervalo de integração	65
Figura 4.7 – Convergência da parte reativa da impedância de entrada com o limite superior do terceiro intervalo de integração	66
Figura 4.8 – Convergência da frequência de ressonância da antena	

com o limite superior do terceiro intervalo de integração	66
Figura 4.9 – Convergência da resistência de ressonância da antena com o limite superior do terceiro intervalo de integração	67
Figura 4.10 – Variação da resistência de ressonância com posição da alimentação obtida com algoritmo implementado com um modo	68
Figura 4.11 – Variação da resistência de ressonância com posição da alimentação obtida com algoritmo implementado com três modos	69
Figura 4.12 – Parte resistiva da impedância de entrada para diferentes N_y	70
Figura 4.13 – Parte reativa da impedância de entrada para diferentes N_y	71
Figura 5.1 – Distribuição de campo elétrico na porta de excitação - HFSS	75
Figura 5.2 – Antena microfita	76
Figura 5.3 – Parte resistiva da impedância de entrada obtida pelo HFSS, CST e Método dos Momentos	77
Figura 5.4 – Parte reativa da impedância de entrada obtida pelo HFSS, CST e Método dos Momentos	78
Figura 5.5 – Plano de terra finito utilizado no HFSS e no CST	79
Figura 5.6 – Parte resistiva da impedância de entrada para diferentes dimensões do plano de terra no HFSS	80
Figura 5.7 – Parte reativa da impedância de entrada para diferentes dimensões do plano de terra no HFSS	81
Figura 5.8 – Campo elétrico distante no plano $\phi = 0^\circ$	82
Figura 5.9 – Campo elétrico distante no plano $\phi = 90^\circ$	82
Figura 5.10 – Vista superior da antena	84
Figura 5.11 – Cabo coaxial de alimentação	84
Figura 5.12 – Malha numérica da porta de alimentação	85
Figura 5.13 – Malha numérica da camada de isolante do cabo coaxial	86
Figura 5.14 – Malha do condutor interno do coaxial com densidade igual a 5 células por comprimento de cabo coaxial	86
Figura 5.15 – Malha do condutor interno do coaxial com densidade igual a 50 células por comprimento de cabo coaxial	87

Figura 5.16 – Comparação entre a parte resistiva da impedância de entrada obtida com uso de malha de 5 células e 50 células por comprimento de cabo coaxial	87
Figura 5.17 – Comparação entre a parte reativa da impedância de entrada obtida com uso de malha de 5 células e 50 células por comprimento de cabo coaxial	88
Figura 5.18 – Comparação entre a parte resistiva da impedância de entrada para malha de diferentes densidades	89
Figura 5.19 – Comparação entre a parte reativa da impedância de entrada para malhas de diferentes densidades	89
Figura 5.20 – Variação da parte resistiva da impedância de entrada com a altura do bloco de ar da condição de radiação	91
Figura 5.21 – Variação da parte reativa da impedância de entrada com a altura do bloco de ar da condição de radiação	92
Figura 5.22 – Parte resistiva da impedância de entrada para diferentes valores do parâmetro Delta S no HFSS	93
Figura 5.23 – Parte reativa da impedância de entrada para diferentes valores do parâmetro Delta S no HFSS	94
Figura 5.24 – Variação da impedância de entrada com a frequência de solução da malha numérica	95
Figura 5.25 – Cabo coaxial utilizado nas simulações do CST e HFSS	96
Figura 5.26 – Parte resistiva da impedância de entrada para diferentes comprimentos de cabo coaxial no HFSS	97
Figura 5.27 – Parte reativa da impedância de entrada para diferentes comprimentos de cabo coaxial no HFSS	97
Figura 5.28 – Parte resistiva da impedância de entrada para diferentes comprimentos de cabo coaxial no CST	98
Figura 5.29 – Parte reativa da impedância de entrada para diferentes comprimentos de cabo coaxial no CST	98
Figura 5.30 – Parte resistiva da impedância de entrada para diferentes raios internos de cabo coaxial no HFSS	100
Figura 5.31 – Parte reativa da impedância de entrada para diferentes raios internos de cabo coaxial no HFSS	100

Figura 5.32 – Parte resistiva da impedância de entrada para diferentes raios internos de cabo coaxial no CST	101
Figura 5.33 – Parte reativa da impedância de entrada para diferentes raios internos de cabo coaxial no CST	101
Figura 5.34 – Parte resistiva da impedância de entrada obtida pelo HFSS em comparação com o resultado obtido pelo MoM para dielétrico de espessura 0,794 mm	103
Figura 5.35 – Parte reativa da impedância de entrada obtida pelo HFSS em comparação com o resultado obtido pelo MoM para dielétrico de espessura 0,794 mm	103
Figura 5.36 – Parte resistiva da impedância de entrada obtida pelo HFSS em comparação com o resultado obtido pelo MoM para dielétrico de espessura 1,588 mm	104
Figura 5.37 – Parte reativa da impedância de entrada obtida pelo HFSS em comparação com o resultado obtido pelo MoM para dielétrico de espessura 1,588 mm	104
Figura 5.38 – Parte resistiva da impedância de entrada obtida pelo HFSS em comparação com o resultado obtido pelo MoM para dielétrico de espessura 3,176 mm	105
Figura 5.39 – Parte reativa da impedância de entrada obtida pelo HFSS em comparação com o resultado obtido pelo MoM para dielétrico de espessura 3,176 mm	105

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Comparação entre $I_{3,V}^{polar}$ e $I_{3,V}^{cartesiana}$	52
Tabela 4.1 – Dimensões da antena	61
Tabela 4.2 – Impedância de entrada da antena	63
Tabela 5.1 – Frequência de Ressonância	106