

郑文泉, 万国宾, 赵雨辰, 等. 同轴馈电微带天线输入阻抗的高效精确计算[J]. 电波科学学报, 2014, 29(2): 265-269. doi: 10. 13443/j. cjors. 2013030402

ZHENG Wenquan, WAN Guobin, ZHAO Yuchen, et al. Efficient calculation of input impedance of probe-fed microstrip antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(2): 265-269. (in Chinese). doi: 10. 13443/j. cjors. 2013030402

同轴馈电微带天线输入阻抗的高效精确计算

郑文泉 万国宾 赵雨辰 秦 涛

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129)

摘 要 提出了一种高效精确计算同轴馈电微带天线输入阻抗的方法. 采用等效磁流环模型模拟同轴馈电, 通过深入研究该馈电模型的激励电场, 提出一种改进的数值积分路径以避免激励电场中的奇异点, 在此基础上, 对贴片在线面连接处作细化处理来模拟连接处剧烈变化的电流, 结合分层介质格林函数, 采用空域矩量法计算了方形和圆形同轴馈电微带天线的输入阻抗. 计算结果与仿真软件结果吻合较好, 证明了该方法的正确性.

关键词 同轴馈电微带天线; 等效磁流环; 空域矩量法; 输入阻抗

中图分类号 TN821 **文献标志码** A **文章编号** 1005-0388(2014)02-0265-05

Efficient calculation of input impedance of probe-fed microstrip antennas

ZHENG Wenquan WAN Guobin ZHAO Yuchen QIN Tao

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China)

Abstract An efficient method for the calculation of input impedance of probe-fed microstrip antennas is proposed. The equivalent magnetic current frill is used to model the coax aperture. The characteristics of the electric field excited by the equivalent magnetic current frill are researched and an improved integration path is proposed to avoid the singularities of the electric field. Based on this, a refinement treated to the mesh at the junction is adopted to model the acute variation of the current, and spatial moment of method is used to calculate the input impedance of square and circle microstrip antennas with closed-form Green's Functions for stratified media. The numerical results are presented to validate the method.

Key words probe-fed microstrip antennas; equivalent magnetic current frill; spatial moment of method; input impedance

引 言

微带贴片天线以重量轻、剖面低、易于集成等诸多优点而得到广泛的应用, 其分析方法也受到人们的重点关注. 在空域采用矩量法(Method of Mo-

ments, MOM)求解积分方程^[1-3]是微带结构电磁特分析的主流方法之一, 其中同轴馈电微带天线线面电流的连续性以及激励源的处理一直是比较棘手的问题.

线面连接处电流连续性的处理方法一般可分为

收稿日期: 2013-03-04

联系人: 郑文泉 E-mail: zhengwenquan2006@yahoo. com. cn

两大类:面模型^[4-6]和线面模型^[7-9].面模型是将探针等效为金属导带,贴片导体面和金属带均采用 RWG(Rao-Wilton-Glisson)三角面元剖分^[10].此时金属导带与贴片连接处被视为公共边,从而保证电流连续性;线面模型是将探针等效为细导线,通过采用附加模基函数^[11]来保证该处电流的连续性.上述两种模型都可通过结合分层介质格林函数^[12],采用空域的混合位积分方程方法准确分析天线的电磁特性.然而,采用面模型时需保证馈电边长度为探针半径的四倍^[4],而线面模型无此限制.

目前文献中激励源通常用单位电压源和单位电流源两种模型模拟.对于单位电压源,常用的馈电模型可分为 δ 函数模型和等效磁流环模型.文献[5]采用 δ 函数电压源模型,结合体面积分方程的方法分析了同轴馈电共形微带天线的辐射特性.文献[6]在文献[5]的基础上,通过提出一种新的脉冲屋顶混合基函数,提高了计算效率.文献[8]采用等效磁流环模型准确计算了几种典型形状同轴馈电微带贴片天线的雷达散射截面,这为准确分析同轴馈电微带天线辐射特性提供了思路.文献[9]采用单位电流源模型分析了几种不同形状同轴馈电微带天线的辐射特性,并给出了单位电流源模型下输入阻抗的计算公式.上述三种馈电模型中, δ 函数电压源和单位电流源模型多用于探针半径与探针高度之比和探针半径与工作波长之比都很小的情况;等效磁流环模型计算精度较高,适用范围较广,但在求解由等效磁流引起的激励电场时涉及到了复杂的零阶和一阶 Sommerfeld 积分^[13],而该激励电场中的一阶 Sommerfeld 积分包含奇点以及具有高振荡性的贝塞尔函数,通常只能通过非常耗时的数值积分方法来计算.

本文旨在提出一种高效精确计算同轴馈电微带天线输入阻抗的方法.文中采用等效磁流环模型模拟同轴馈电,通过深入研究该馈电模型的激励电场,提出一种改进的数值积分路径以避免激励电场中的奇点,在此基础上,在线面连接处对贴片剖分作细化处理,并结合分层介质格林函数,采用空域矩量法计算方形和圆形同轴馈电微带天线输入阻抗.通过与仿真软件作对比,验证该方法的正确性.

1 等效磁流环模型的建立

用同轴探针对平面微带天线激励时,相当于在探针与接地板的交界处加一电压源.等效磁流环电压源模型如图1所示,假定同轴线的口径处有横向

电磁场(Transverse Electric and Magnetic Field, TEM)模式的场,且同轴线的内芯和外皮之间的激励电压为 V ,则同轴线口径处的电场可表示为^[14]

$$E_\rho(\rho) = \frac{V}{\rho \ln(b/a)}, z=0, a < \rho < b \quad (1)$$

式中 a 和 b 分别是同轴线的内径和外径.

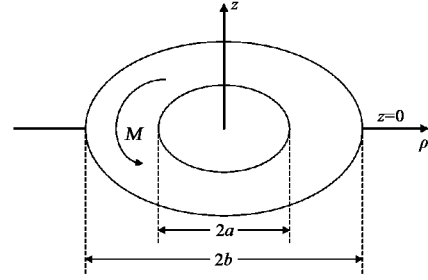


图1 等效磁流环电压源模型

由镜像理论可得相应的等效磁流,该磁流在贴片和探针导体表面激励起的电场 $E_\rho^i(r)$ 和 $E_z^i(r)$ 可分别表示为

$$E_\rho^i(r) = K \int_0^\infty V_v^e \cdot \mathbf{JJ}_0 \cdot \mathbf{J}_1(k_\rho \rho) dk_\rho; \quad (2)$$

$$E_z^i(r) = \frac{K}{j\omega\epsilon_0\epsilon_r} \int_0^\infty I_v^e \cdot \mathbf{JJ}_0 \cdot \mathbf{J}_0(k_\rho \rho) \rho dk_\rho. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{JJ}_0 = \mathbf{J}_0(k_\rho a) - \mathbf{J}_0(k_\rho b)$; $\mathbf{J}_n$ 为 n 阶第一类贝塞尔函数, $n=0,1$; ϵ_r 为介质的相对介电常数; $K = V/\ln(b/a)$; V_v^e 和 I_v^e 为文献[12]中的传输线格林函数.式(2)和式(3)又可分别表示成如下形式为

$$E_\rho^i(r) = 2\pi K \cdot S_1 \{ \mathbf{JJ}_0 \cdot \mathbf{V}_v^e / k_\rho^2 \}; \quad (4)$$

$$E_z^i(r) = \frac{2\pi K}{j\omega\epsilon_0\epsilon_r} \cdot S_0 \{ \mathbf{JJ}_0 \cdot \mathbf{I}_v^e \}. \quad (5)$$

式中 S_1 和 S_0 分别为一阶和零阶 Sommerfeld 积分^[13].由式(4)可知,该积分内核函数的分母中含有 k_ρ^2 项,当 $k_\rho \rightarrow 0$ 时,内核函数将会变成无穷大;另外,式(4)和式(5)的内核函数中都包含 $\mathbf{JJ}_0$ 项,这涉及到了贝塞尔函数,而贝塞尔函数自身的高振荡性将会导致积分内核函数也出现振荡.在这种情况下要想精确求解式(2)和式(3)通常只能采用数值积分的方法.

2 激励电场的分析

采用数值积分方法计算 Sommerfeld 积分时一般分为 C_1 和 C_2 两部分,如图2所示.第一部分积分 C_1 为有限区间 $(0, s)$,通常选用曲线积分路径来避开积分中可能存在的奇点;第二部分积分 C_2 为无限区间 (s, ∞) .对于第一部分积分 C_1 ,可采用椭圆曲线

积分快速准确求解;对于第二部分积分 C_2 ,可采用矩阵束(Matrix Pencil Method, MPM)方法对积分内核函数作近似处理,具体表达式为^[15]

$$\int_s^\infty f(k_\rho) dk_\rho = \int_0^\infty f(q) dq \approx - \sum_{m=1}^M \frac{R_m}{v_m}. \quad (6)$$

式中: $q = k_\rho - s$; M 为极点的数量; R_m 是复留数; v_m 是复极点. 为避开由谱域格林函数产生的奇异点, s 通常取为

$$s = k_0(\sqrt{\zeta_{\max}} + 1). \quad (7)$$

式中: $\zeta_{\max} = \max\{\text{Re}\{\epsilon_{ri} \mu_{ri}\}\}$, i 为介质层的编号; k_0 为自由空间的波数. 上述方法可快速准确求解一般形式的 Sommerfeld 积分, 然而对于式(2)和式(3), 由于这两个积分的内核函数中除包含有谱域格林函数外还都涉及到了具有高振荡特性的 JJ_0 项, 因此 s 的取值须进行更改以考虑其影响.

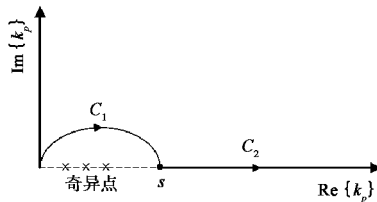


图2 Sommerfeld 积分路径

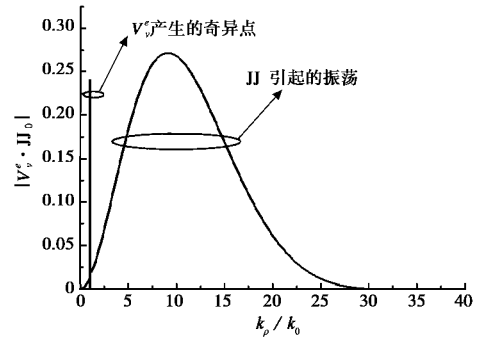
根据谱域格林函数的奇异点分布规律, 结合第一类贝塞尔函数的特性, 可将 s 值作如下改变:

$$s = k_0(\sqrt{\zeta_{\max}} + 1) + \pi/\rho. \quad (8)$$

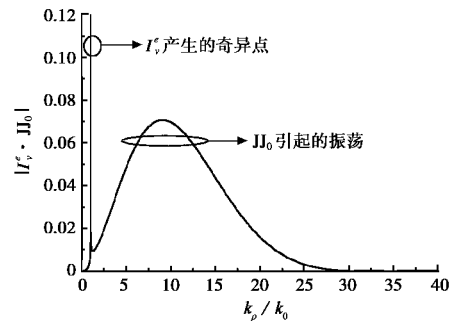
式中: ρ 表示场点和源点之间的水平距离; π/ρ 为第一类贝塞尔函数渐近表达式的半周期^[12]. 通过作上述处理, 可使第一部分积分 C_1 既能够完全绕过积分中可能存在的奇异点, 又可避开由 JJ_0 项引起的振荡.

以式(2)和式(3)在单层介质方形微带天线情况下为例作说明, 方形微带天线的参数如下: 假定坐标原点为贴片中心, 介质高度 $h = 1.59$ mm, 相对介电常数 $\epsilon_r = 2.55$, 频率 $f = 4.65$ GHz, 同轴线内芯半径 $a = 0.635$ mm. 图3(a)计算了场点为0, 源点为 $-0.95h$ 情况下式(2)积分内核函数 $V_v^e \cdot JJ_0$ 随 k_ρ/k_0 的幅值变化, 从图中可以明显看出, 如果 s 按式(7)取值, 即 $s = (\sqrt{2.55} + 1)k_0$, 则只能使第一部分积分 C_1 绕过由谱域格林函数 V_v^e 产生的奇异点, 而未考虑由 JJ_0 产生的振荡. 图3(b)计算了式(3)积分内核函数 $I_v^e \cdot JJ_0$ 随 k_ρ/k_0 的幅值变化. 从图中可知若 s 取式(7)中的值, 则仅能使 C_1 避开由 I_v^e 产生的

奇异点, 这与上面的分析结果一样.



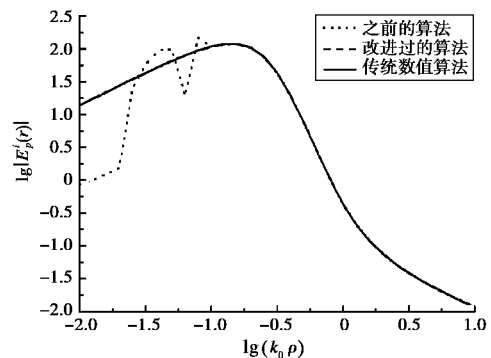
(a) $V_v^e \cdot JJ_0$ 的幅值



(b) $I_v^e \cdot JJ_0$ 的幅值的幅值

图3 激励电场内核函数特性

分别选用式(7)和式(8)中 s 的值, 结合前面方形微带天线的电参数, 计算了激励电场 $E_\rho^i(r)$ 和 $E_z^i(r)$ 的幅度, 并与数值积分方法作对比, 结果如图4(a)、图4(b)所示. 从图中可知, 未改进的方法其电场幅度振荡剧烈, 而改进过的方法与数值积分方法吻合很好. 基于 MATLAB7.1 环境编程, 改进方法和传统数值方法在联想启天 M6900 上的运行时间分别为 16 s 和 4 h 左右.



(a) $E_\rho^i(r)$ 的幅度

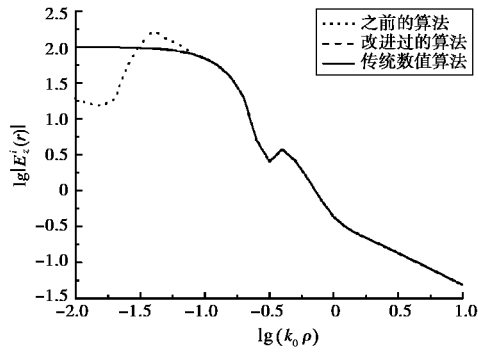
(b) $E_z^i(r)$ 的幅值

图4 激励电场幅度

3 电流连续性的处理及算例验证

为精确模拟线面结合处的电流分布,作两方面处理:首先在选择附加模基函数时,为方便编程计算,采用文献[8]提出的简化附加模基函数来模拟线面连接处的电流分布;其次在贴片剖分时,为模拟馈电点处剧烈变化的电流,对馈电点附近的网格作细化,使接近馈电点的网格更精细.本节将分别针对方形和圆形同轴馈电微带贴片天线进行分析.

3.1 方形微带天线

方形微带天线的介质层高度、相对介电常数以及同轴线内芯半径同上个算例,长度 $L=20.1$ mm,宽度 $W=20.1$ mm,频率 $4.0\sim 4.6$ GHz,假设方形贴片的中心为坐标原点,馈电点位置 $x=-8.75$ mm, $y=0.05$ mm.剖分三角形边的最大长度约为工作波长的 $1/25$.为精确模拟线面连接处剧烈变化的电流,采用增加4个小三角形网格的方法对馈电点附近的网格作加密处理,细化小三角形边的最大长度约为工作波长的 $1/57$.网格细化前后的输入阻抗计算结果如图5所示.从图中可明显看出,馈电点处的网格未作细化时,计算结果与 FEKO 电磁仿真结果相比有较大误差,而细化后的计算结果则吻合很好.

3.2 圆形微带天线

同轴馈电圆形微带天线的结构参数为:半径 $R=20$ mm,取圆形贴片的中心为坐标原点,馈电位置 $x=8.1$ mm, $y=0$ mm,同轴线内芯半径 $a=0.45$ mm,相对介电常数 $\epsilon_r=2.33$,介质高度 $h=2.184$ mm,频率 $2.3\sim 3.0$ GHz.剖分三角形边的最大长度约为工作波长的 $1/25$,在此同样在馈电点处增加4个小三角形网格作细化处理.馈电点附近网格加密前后的数值计算结果如图6所示,由图中可知,细

化后的结果与仿真结果吻合较好.另外,通过对比图5和图6的结果,可发现相同条件下,方形微带天线输入阻抗计算结果与 FEKO 更相近些,这是因为在剖分时圆形微带天线近似等效为多边形,与真实结构有一定差别.

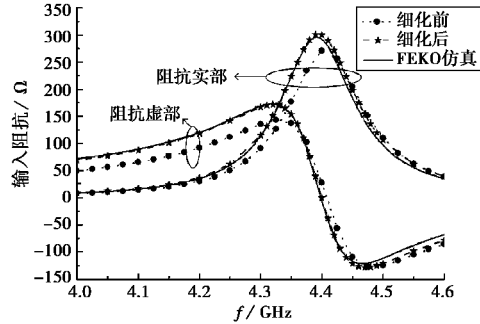


图5 方形贴片天线的输入阻抗

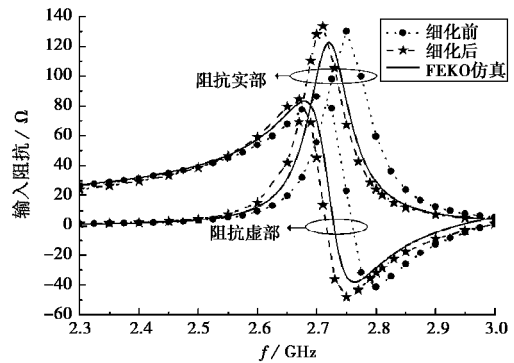


图6 圆形贴片天线的输入阻抗

4 结论

本文提出了一种高效精确计算同轴馈电微带天线输入阻抗的方法.通过深入研究等效磁流环中激励电场的函数特性,提出了一种改进的数值积分路径以避开激励电场中的奇异点,在此基础上,在线面连接处对贴片剖分作细化处理,并结合分层介质格林函数,采用空域矩量法计算了几种典型形状微带天线的输入阻抗.计算结果表明:采用改进的数值积分路径可以快速准确地实现等效磁流环馈电模型,而与线面连接处对贴片剖分作细化处理这一措施相结合,可使本文方法具有较高的计算效率和精度.

参考文献

- [1] WANG Chaofu, LING Feng, JIN Jianming. A fast full-wave analysis of scattering and radiation from large finite arrays of microstrip antennas[J]. IEEE

- Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(10): 1467-1474.
- [2] 雷娟, 万继响, 付光, 等. MOM快速全波分析微带天线阵[J]. 电波科学学报, 2005, 20(1): 100-104.
- LEI Juan, WAN Jixiang, FU Guang, et al. Rapid full-wave solutions of microstrip antenna arrays using MoM[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(1): 100-104. (in Chinese)
- [3] BERTUCH T, VIPIANA F, VECCHI G. Efficient analysis of printed structures of arbitrary shape on coated cylinders via spatial-domain mixed-potential Green's function[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(3): 1425-1439.
- [4] BALANIS C A. Antenna Theory: Analysis and Design[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2005.
- [5] HE Mang, CHEN Qiang, YUAN Qiaowei, et al. A simple strip model in the volume-surface integral equation for analysis of arbitrary probe-fed conformal microstrip antennas[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 530-533.
- [6] ZHANG Kang, HE Mang, XU Xiaowen, et al. An efficient solution of the volume-surface integral equation for electromagnetic scattering and radiation of the composite dielectric-conductor objects with reduced number of unknowns[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(2): 798-808.
- [7] POZAR D M, NEWMAN E H. Analysis of a monopole mounted an edge or a vertex[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(3): 401-408.
- [8] MICHALSKI K. A RCS computation of coax-loaded microstrip patch antennas of arbitrary shape[J]. Electromagnetics, 1994, 14(1): 33-62.
- [9] DAMIANO J P, PAPIERNIK A. Survey of analytical and numerical models for probe-fed microstrip antennas[J]. IEE Proc-H, 1994, 141(1): 15-22.
- [10] RAO S M, WILTON D R, GLISSON A W. Electromagnetic scattering from surfaces of arbitrary shape[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1982, 30(3): 409-418.
- [11] JEULAND H, UGUEN B, CHASSAY G, et al. Numerical and experimental processes for the analysis of a wire antenna mounted on a metallic body[J]. Microwave Opt Technol Lett, 1997, 15(5): 267-272.
- [12] MICHALSKI K A, MOSIG J R. Multilayered media Green's Functions in integral equation formulations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(3): 508-517.
- [13] MICHALSKI K A. Extrapolation methods for sommerfeld integral tails[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(10): 1405-1418.
- [14] HALL R C, MOSING J R. Vertical monopoles embedded in a dielectric substrate[J]. IEE Proceedings, 1989, 136(6): 462-468.
- [15] YUAN Mengtao, SARKAR T K. Computation of the sommerfeld integral tails using the matrix pencil method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(4): 1358-1362.

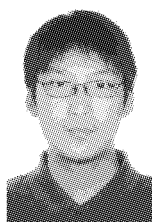
作者简介



郑文泉 (1986—), 男, 江西人, 西北工业大学电子信息学院电子科学与技术专业博士研究生。主要从事双频微带天线的辐射与散射特性、平面反射阵天线方面的研究工作。



万国宾 (1967—), 男, 河南人, 西北工业大学电子信息学院教授, 博士生导师。主要从事天线罩分析与设计、天线理论及电磁散射数值分析等方面的研究工作。



赵雨辰 (1986—), 男, 陕西人, 西北工业大学电子信息学院电子科学与技术专业博士研究生。主要从事吸波结构及其等效电磁模型方面的工作。

秦涛 (1986—), 男, 陕西人, 西北工业大学电子科学与技术专业博士研究生。主要从事微带天线的辐射及散射特性方面的研究工作。