

# 有限大底板微带天线分析软件包的研究与实现

刘汉<sup>†</sup>, 姜水桥, 李有

(国防科技大学 信息通信学院, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 开发了一款用于有限大底板微带天线计算的软件包。利用矩量法对微带天线进行三角形和四面体剖分, 将阻抗矩阵分为导体对导体作用、导体对介质作用、介质对导体作用和介质对介质作用的 4 类阻抗矩阵; 通过计算 4 类阻抗矩阵, 求得电流系数, 完成对天线性能的分析; 最后基于矩阵实验室编程环境, 实现软件包。通过与 FEKO 软件的仿真结果对比表明, 该软件包操作简单、可视性强、计算精度较高, 可用于有限大底板微带天线的分析和计算。

**关键词:** 有限大底板; 微带天线; 矩阵实验室; 软件包

**中图分类号:** TN823

**文献标志码:** A

## Research and Implementation of Software Package for Analysis Microstrip Antenna with Finite Base Plate

LIU Han<sup>†</sup>, JIANG Shuiqiao, LI You

(College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** A software package for the calculation of microstrip antenna with finite base plate is developed. The microstrip antenna is partitioned into triangle and tetrahedron using moment method. The impedance matrix is divided into four types: conductor-to-conductor, conductor-to-medium, medium-to-conductor and medium-to-medium. By calculating the four types of impedance matrix, the current coefficient is obtained and the performance of the antenna is analyzed. Finally, the software package is implemented based on matrix laboratory (MATLAB) programming environment. Compared with the simulation results of FEKO software, the software package has the advantages of simple operation, high visibility and high calculation accuracy. It can be used for the analysis and calculation of microstrip antenna with finite base plate.

**Key words:** finite base plate; microstrip antenna; matrix laboratory (MATLAB); software package

随着无线通信技术的发展, 具有良好性能的天线吸引了科研人员的目光, 微带天线<sup>[1-2]</sup>由于具有尺

寸小、剖面低、易于集成等优点, 逐渐成为了研究热点。微带天线理论研究方法主要有传输线模型法、空

\* 收稿日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61871387), National Natural Science Foundation of China(61871387); 国防科技大学科研计划项目(ZK19-06)

作者简介: 刘汉(1988—), 男, 安徽庐江人, 国防科技大学讲师, 博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: lujiangliuhan@sina.com

腔模型法和全波分析法等. 对于传统的微带天线, 在基板厚度  $h$  和波长  $\lambda$  满足  $h < 0.01\lambda$  时, 以上方法均适用, 但是在  $h \geq 0.01\lambda$  情况下, 必须考虑场在贴片垂直方向的变化, 此时, 传输线模型法和空腔模型法不适用, 只能应用全波分析法. 全波分析法中的矩量法<sup>[3]</sup>是基于积分运算的算法, 具有很高的精度, 目前广泛地应用于天线的研究设计中. 本文将利用矩量法对微带天线进行研究, 实现有限大底板微带天线分析的软件包, 并将软件包仿真结果与 FEKO<sup>[4-5]</sup> 计算结果进行对比, 验证软件包的正确性. 该软件包操作简单、可视性强、计算精度较高, 并且可以与优化算法<sup>[6-7]</sup>结合, 完成对微带天线的自动优化设计.

## 1 RWG-SWG 混合基函数微带天线的矩量法分析

矩量法中所采用的格林函数<sup>[8]</sup>表征的常常是一些特殊的边界情形, 如平面分层、柱面分层及球面分层天线等, 且它们在推导时, 理论上都认为这些分层结构是无限大的, 故可以利用格林函数法进行研究. 对于有限大结构天线的分析, 难以推导出其对应的并矢格林函数, 故不能采用类似格林函数的分析方法, 但能将微带天线的介质以四面体剖分, 利用定义在四面体对上的基函数(SWG)<sup>[9]</sup>模拟介质中的电位移矢量和三角面对基函数(RWG)<sup>[10]</sup>模拟天线导体部分的面电流分布, 那么就可直接利用自由空间中的格林函数实现有限大介质和金属混合体的仿真计算.

对于有限大底板的平面微带天线, 仅仅依靠面剖分无法进行有效计算, 需要进行体面混合剖分. 在计算中, 可以选取 RWG-SWG 混合基函数. 其主要计算过程如下.

对于天线金属部分, 利用导体表面切向电场边界条件, 可以得到:

$$[\mathbf{E}^i + \mathbf{E}^s]_t = 0 \quad (1)$$

在介质体内, 电位移矢量与入射电场和反射电场满足:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}') = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}')(\mathbf{E}^i(\mathbf{r}') + \mathbf{E}^s(\mathbf{r}')) \quad (2)$$

式(2)中:

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}') = -j\omega\mathbf{A} - \nabla\phi \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_v = \frac{\mu}{4\pi} \left[ \int_S \mathbf{J}_s G_0 dS' + \int_V \mathbf{J}_v G_0 dV' \right] \quad (4)$$

$$\phi = \phi_s + \phi_v = -\frac{1}{4\pi\omega\boldsymbol{\varepsilon}} \left[ \int_S \nabla' \cdot \mathbf{J}_s G_0 dS' + \int_V \nabla' \cdot \mathbf{J}_v G_0 dV' \right] \quad (5)$$

从式(4)(5)中可以看出, 面电流  $\mathbf{J}_s$  和体电流  $\mathbf{J}_v$  共同对  $\mathbf{A}$  及  $\phi$  起作用, 式中  $G_0$  为自由空间格林函数, 可以表示为:

$$G_0 = \frac{e^{-jk_0R}}{|R|} \quad (6)$$

利用 RWG 基函数,  $\mathbf{J}_s$  可以表示为:

$$\mathbf{J}_s = \sum_{n=1}^N I_n \mathbf{f}_n \quad (7)$$

同样的, 利用 SWG 基函数,  $\mathbf{D}$  和  $\mathbf{J}_v$  可以表示为:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}') = \sum_{m=1}^M D_m \mathbf{q}_m \quad (8)$$

$$\mathbf{J}_v(\mathbf{r}') = \sum_{m=1}^M j\omega D_m \kappa(\mathbf{r}') \mathbf{q}_m(\mathbf{r}') \quad (9)$$

对于导体部分, 利用式(1)(3)和伽略金法, 可以得到:

$$\langle \mathbf{E}^i, \mathbf{f}_m \rangle = j\omega \langle \mathbf{A}, \mathbf{f}_m \rangle + \langle \nabla\phi, \mathbf{f}_m \rangle = j\omega \langle \mathbf{A}_s + \mathbf{A}_v, \mathbf{f}_m \rangle + \langle \nabla\phi_s + \nabla\phi_v, \mathbf{f}_m \rangle \quad (10)$$

同样的, 对于介质部分, 利用式(2)(3)和伽略金法, 可以得到:

$$\langle \mathbf{E}^i, \mathbf{q}_m \rangle = j\omega \langle \mathbf{A}, \mathbf{q}_m \rangle + \langle \nabla\phi, \mathbf{q}_m \rangle + \left( \frac{\mathbf{D}(\mathbf{r}')}{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}')} \cdot \mathbf{q}_m \right) = j\omega \langle \mathbf{A}_v + \mathbf{A}_s, \mathbf{q}_m \rangle + \langle \nabla\phi_v + \nabla\phi_s, \mathbf{q}_m \rangle + \left( \frac{\mathbf{D}(\mathbf{r}')}{\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}(\mathbf{r}')} \cdot \mathbf{q}_m \right) \quad (11)$$

对于所剖分的天线, 认为有  $N$  个 RWG 基函数(包括半 RWG) 和有  $M$  个 SWG 基函数(包括半 SWG), 经过上述分析, 可以得到:

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (12)$$

其中:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\langle \mathbf{E}^i, \mathbf{f}_m \rangle]_{m=1, \dots, N} \\ [\langle \mathbf{E}^i, \mathbf{q}_m \rangle]_{m=1, \dots, M} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{cc} & \mathbf{Z}_{cd} \\ \mathbf{Z}_{dc} & \mathbf{Z}_{dd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{Z}_{ccmn}]_{m,n=1, \dots, N} & [\mathbf{Z}_{cdmn}]_{m=1, \dots, N, n=1, \dots, M} \\ [\mathbf{Z}_{dcnm}]_{m=1, \dots, M, n=1, \dots, N} & [\mathbf{Z}_{ddnm}]_{m,n=1, \dots, M} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} [I_n]_{n=1, \dots, N} \\ [D_n]_{n=1, \dots, M} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式(14)中:  $\mathbf{Z}_{cc}$  为导体对导体作用的阻抗矩阵;  $\mathbf{Z}_{cd}$  为介质对导体作用的阻抗矩阵;  $\mathbf{Z}_{dc}$  为导体对介质作用的阻抗矩阵;  $\mathbf{Z}_{dd}$  为介质对介质作用的阻抗矩阵, 如图 1 所示.

通过上述阻抗矩阵的建立, 通过体面积分方程<sup>[11]</sup>的 MATLAB 编程就可以分析天线的性能.

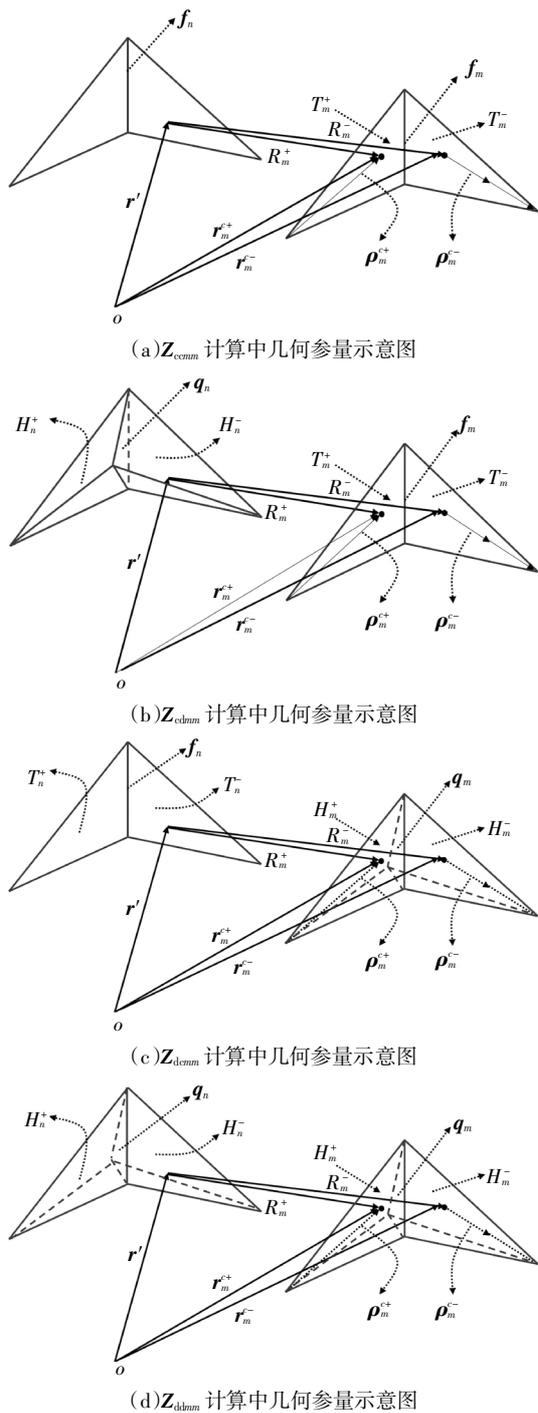


图 1 阻抗矩阵计算的几何参量示意图

Fig.1 Schematic diagram of geometric parameters for impedance matrix calculation

## 2 基于 RWG-SWG 的计算微带天线软件包的实现

为了能够对微带天线进行直观的分析计算,根据上述矩量法理论及推导的计算公式,利用 MATLAB 软件,开发了一个可用于分析有限大底板微带天线的软件包,主界面如图 2 所示.它包含的功能

如下.

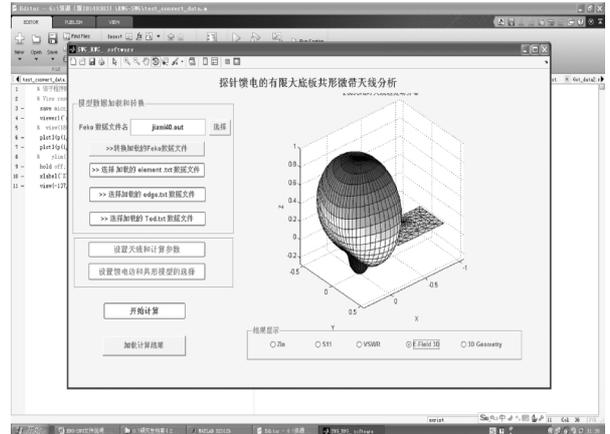


图 2 开发的介质及底板有限大微带天线的软件包主界面

Fig.2 The main interface of the software package for the finite microstrip antenna with dielectric and substrate

### 2.1 参数转换功能

它可以将 Feko 的.out 文件直接读入,转换成 element.txt,edge.txt,tet.txt 文件,分别包含金属三角形面元信息,金属三角形边信息,介质四面体信息;也可以分 3 次分别加载转换好的 txt 文件.

### 2.2 参数的输入功能

参数输入功能包括天线计算参数设置部分,界面如图 3 所示,包括介电常数设置、起止频率设置、辐射计算频点设置.

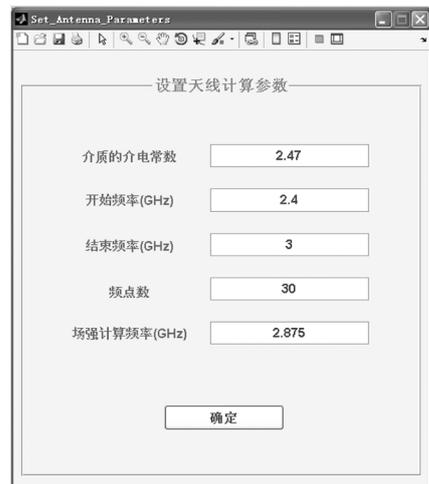


图 3 天线计算参数设置界面

Fig.3 Parameter setting interface for antenna calculation

此外还可以进行天线类型和馈电设置,如图 4 所示.它包括数据转换部分,其功能与主界面的一致.选择天线类型部分主要确定天线是平面、柱面还是球面<sup>[12]</sup>,给了形状后能够便于确定馈电点位置.馈电边信号确定是通过选择馈电边所在的三角形实现,

点击馈电面选择按钮,会出现图 5 界面,通过放大、平移方式设置好位置后,点击空格键鼠标会变为十字线,将十字线中心对准要选择的三角形,点击后变为白色即选中,一次可以选中多个,选完后按 enter 键,即退出回到图 4 界面,同时馈电编号和相应的正负三角形面号将显示在相应窗口内。



图 4 天线类型和馈电设置界面示意图  
Fig.4 Schematic diagram of antenna type and feed setting interface

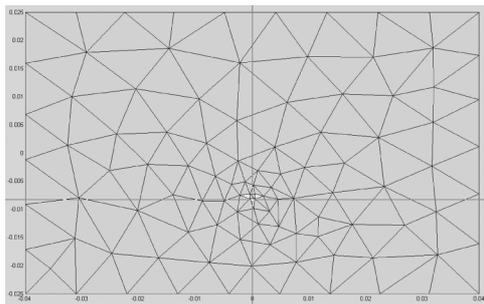


图 5 天线馈电边选择界面示意图  
Fig.5 Schematic diagram of antenna feed side selection interface

删除三角形贴片功能与馈电面选择类似,它是为天线优化设置的,通过人工去除贴片,达到优化天线的目的。

2.3 参数显示功能

参数显示功能如图 6 所示.显示内容包括输入阻抗<sup>[13]</sup>、 $S_{11}$ 、驻波比、三维立体方向图和天线几何结构.在进行方向图计算时,显示方向图同时还显示天线的部分结构,便于方向判别。

2.4 加载计算结果功能

结果加载功能是将计算好的结果存储的数据调出来显示和分析,点击加载计算结果会弹出文件对话框,选择所要加载的文件,就可以显示计算结果.该软件包的主要特点有:

- 提供了两种方法,可以将 FEKOCAD 中建立的几何结构剖分网格导入到计算程序中,并可以通

过图形输出窗口三维显示。

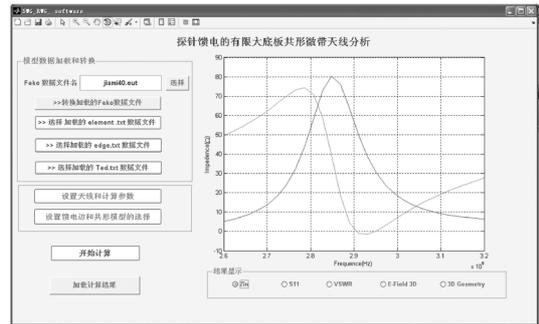


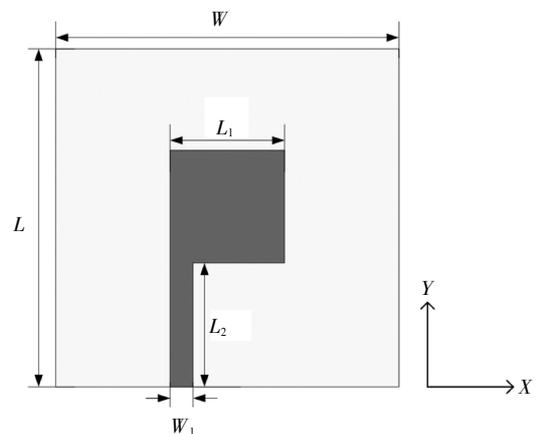
图 6 参数显示界面示意图  
Fig.6 Schematic diagram of parameter display interface

- 理论上,可以实现介质及金属底板有限大平面及共形微带天线的仿真分析与计算。
- 可以通过界面设置馈电点和移除三角形贴片,操作方便。
- 提供了 6 种计算结果查看功能,可以直接加载已计算好的结果数据并进行结果查看;另外,实现三维场分布与天线模型相结合,直观性更强。

下面通过本文开发的软件包仿真一款天线,将其得到的仿真结果与 FEKO 计算结果进行对比,以证明该软件包计算的正确性。

图 7 为所研究天线的结构示意图.该天线制作在相对介电常数  $\epsilon_r = 2.6$ 、厚度  $H = 1\text{ mm}$  的聚四氟乙烯基板上,基板尺寸为  $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ .天线具体尺寸参数如表 1 所示. FEKO 仿真与软件包计算所得到的  $S_{11}$  对比如图 8 所示。

图 8 为天线的 FEKO 仿真结果与软件包计算结果对比图.从图 8 看出,FEKO 仿真结果与软件包计算结果比较吻合,证明了该软件包的正确性和有效性.两者之间的误差来源于算法之间的固有误差,此外在计算过程中采取了近似,所以也会导致误差。



(a)正视图



(b) 背视图

图 7 天线的结构

Fig.7 Structure of antenna

表 1 天线结构中的尺寸参数

Tab.1 Size parameters of antenna structure mm

$L$	$W$	$W_1$	$L_1$	$L_2$	$L_3$
15	15	1	5	5	4

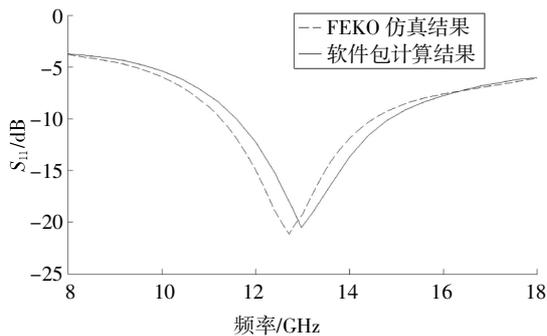


图 8 天线的 FEKO 仿真结果与软件包计算结果对比

Fig.8 Comparison of FEKO simulation results and software package calculation results of antenna

### 3 结论

本文首先利用 RWG-SWG 混合基函数的矩量法对微带天线的分析计算,将计算矩阵分为 4 类:导体对导体作用、导体对介质作用、介质对导体作用和介质对介质作用,得到阻抗矩阵和电流系数的表达式.在上述分析的基础上,利用 MATLAB 软件开发了友好界面的软件包,该软件包操作简单、可视性强、计算精度较高,可用于分析介质及金属底板有限大微带天线,为以后结合优化算法设计微带天线提供了有效的方法.

### 参考文献

[1] PRINCY M P, KRISHNAMOORTHY K, MOHAMMAD S S, *et al.*

Dispersion-engineered transmission line loaded slot antenna for UWB applications [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(2): 323–327.

[2] YAO H, ZHAO Z, DING X, *et al.* Compact UWB slot antenna utilizing traveling-wave mode based on slotline transitions [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(1): 140–150.

[3] XU Y, YANG H, SHEN R, *et al.* Scattering analysis of multiobject electromagnetic systems using stepwise method of moment [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(3): 1740–1747.

[4] CHAI S R, GUO L X, LI K, *et al.* Combining CS with FEKO for fast target characteristic acquisition [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, 66(5): 2494–2504.

[5] STEVEN W. Radiated fields of patch antennas—A comparison of simulated and analytic results [C]//2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium (ACES). Miami: IEEE, 2019: 1–2.

[6] DAI C, SONG Q. Heuristic computing methods for contact plan design in the spatial-node-based Internet of Everything [J]. *China Communications*, 2019, 16(3): 53–68.

[7] HICHAM C, MEHDY K, OKEZIE O, *et al.* Simplified speed control of permanent magnet synchronous motors using genetic algorithms [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(4): 3563–3574.

[8] EDA K K A, ALI Y. Numerical calculation of 2-D inhomogeneous media Green’s function and some applications in electromagnetic scattering problems [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(1): 369–377.

[9] ZHANG L M, SHENG X Q. Discontinuous Galerkin volume integral equation solution of scattering from inhomogeneous dielectric objects by using the SWG basis function [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(3): 1500–1504.

[10] SEUNG M S. Implementation of loop co-tree basis functions for E-FIE formulation at low frequency [J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2019, 13(1): 118–121.

[11] LI X J, LIN L, CHEN Y P, *et al.* VSIE-based domain decomposition method with simplified prism vector basis functions for planar thin dielectric-conductor composite objects [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, 17(9): 1608–1612.

[12] ZHU Y J, LI J, ZHANG X, *et al.* A 3-D printed spherical antenna with bandwidth enhancement under operation of dual resonance [J]. *IEEE Access*, 2020(8): 19345–19352.

[13] 周逢道, 连士博, 徐飞, 等. 近地表电磁探测发射系统控制技术 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(8): 100–105.

ZHOU F D, LIAN S B, XU F, *et al.* Control Technology of near-surface electromagnetic detection transmitting system [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(8): 100–105. (In Chinese)