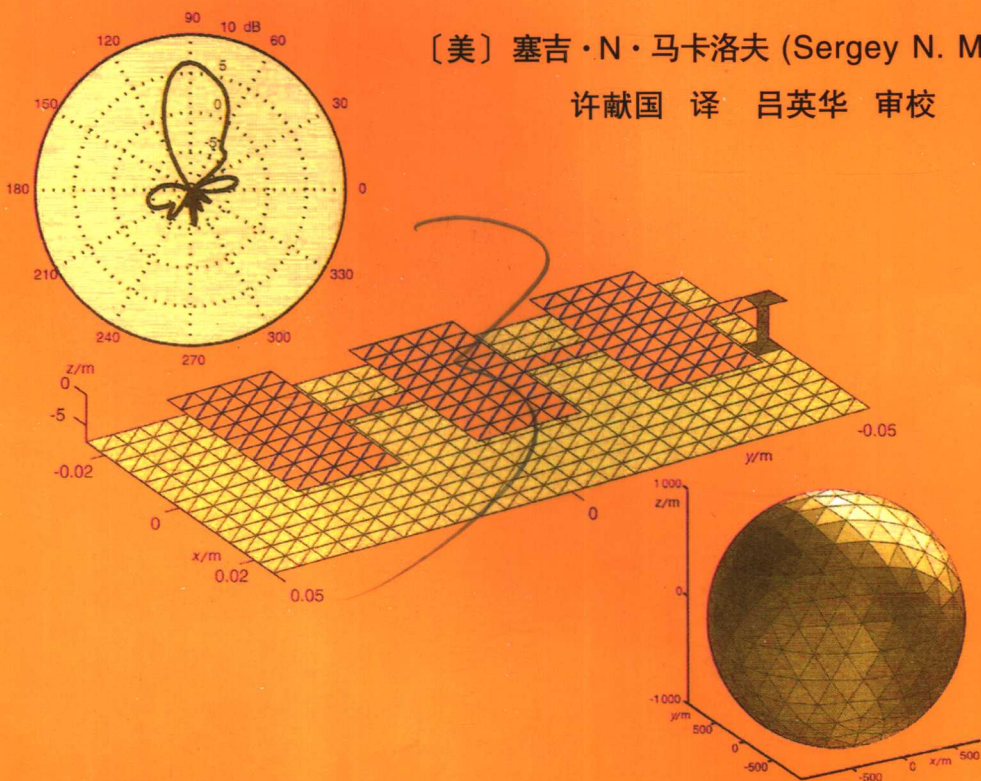


通信天线建模与 MATLAB 仿真分析

[美] 塞吉·N·马卡洛夫 (Sergey N. Makarov)

许献国 译 吕英华 审校



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

Antenna and EM Modeling with MATLAB

Copyright © 2002 by John Wiley and Sons, Inc., New York. All rights reserved.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language

edition published by John Wiley & Sons, Inc.

通信天线建模与 MATLAB 仿真分析

Copyright © 2002 by John Wiley and Sons, Inc., New York. All rights reserved.

版权所有。英文版翻译由 John Wiley & Sons 有限公司授权。

著作权合同登记号 图字:01-2004-5709

图书在版编目(CIP)数据

通信天线建模与 MATLAB 仿真分析/(美)马卡洛夫(Makarov, S. N.)著;许献国译. —北京:北京邮电大学出版社,2006

ISBN 7-5635-1197-0

I. 通... II. ①马... ②许... III. ①无线电通信—天线—系统建模 ②通信系统—系统仿真—软件包, MATLAB IV. ①TN82②TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 054769 号

书 名: 通信天线建模与 MATLAB 仿真分析

作 者: 许献国 (译)

责任编辑: 张珊珊

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

北方营销中心:电话:010-62282185 传真:010-62283578

南方营销中心:电话:010-62282902 传真:010-62282735

E-mail:publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 14.25

字 数: 308 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1197-0/TN·457

定 价: 29.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

序

自赫兹和马克尼发明天线以来,天线已成为最广泛应用的电子设备之一。但是,由于电磁场理论的抽象性和实际天线结构的多样性和复杂性,天线设计被看成是一项十分艰难的专门任务。

本书以简捷清晰的方式全面地阐述了天线的理论、数值建模和设计方法。特别是书中采用了矩量法和 Matlab 软件工具,使各种结构的天线都能用简单的 Matlab 脚本程序以可视化的方式完成。读者在本书的引导下可以轻松地操作 Matlab 软件工具,这就使得读者只需要将主要精力集中于天线结构、数值建模和天线特性分析等方面,而不必要在各种编程语言和编调程序方面花过多的时间。读者只需要根据天线分析的需要输入必要的结构数据,再将有关的 Matlab 脚本程序按一定顺序组合起来,不需要经过繁琐的编译过程就可以运行并得到可视化的结果。正如作者所说,本书可以使复杂的天线分析像一次兴奋的旅行一样轻松愉快。Matlab 软件包是最为普及的一种计算机工具软件,加上 Matlab 脚本程序的简捷和可读性,本书实际上创造了一种处理电磁工程问题的新模式。这种模式不但能应用于天线设计,还可以应用于电磁兼容设计和其他采用计算电磁学方法的工程和科研之中,其工程应用的意义和价值是显而易见的。

译者读过本书后竟爱不释手,决心翻译出来献给同行专家共享为快。我在讲授博士生专业必修课程——“计算电磁学的数值方法”——时结识了许献国同志,对他的想法十分赞同,并极力鼓动和支持他早日将翻译本问世。尽管许献国同志投入了大量的精力,十分认真地翻译每一个句子,我也对全书进行了认真地校对,但是由于原版书中的内容宽广、还讨论了许多新的天线结构设计问题、实践性又强,故此,译文中难免有失当、疏误之处,敬请读者不吝赐教。

吕英华

2006年5月8日

前 言

本书应用标准 Matlab 软件对基本的射频、无线通信天线及微波结构进行建模、优化,由矩量法获得全波解。涉及的天线结构从简单的偶极子到贴片天线以及贴片天线阵列,还考虑了一些特殊类型的天线,如分形天线。

书中的天线理论介绍仅用以提供必要的背景知识。各章的 Matlab 源程序和天线结构生成程序均保存在本书配套光盘中相应的 Matlab 目录下。我们鼓励读者进一步发展、改进或替换这些程序,以满足各自的不同需求。

Matlab 软件支持矩量法应用,因为它内建有高效的矩阵求解程序。本书应用 Rao-Wilton-Glisson(RWG)基函数、电场积分方程和边馈电模型来建立阻抗矩阵。

Matlab 的一个诱人特点是拥有品种繁多的二维和三维可视化工具。这些工具使得天线分析像旅行一样轻松愉快。Matlab 6 第 12 版还有内建的网格生成器,允许我们以简单直观的方式建立结构复杂的天线。

用作教材时,本书主要与 Balanis 的《天线理论》一书配套使用,作为相应的仿真和开发工具。本书使用时删去部分章节后仍不失其连续性。

感谢审阅人给本书的建议和建设性批评意见。我的学生 Tony Garcia 和 Anuja Apte 对本书作了许多修正。感谢 John Wiley & Sons 公司的全体员工对出版本书的兴趣和大力支持。还要感谢 James Mink 博士,正是他才使本书得以付梓。

最后,我还要感谢爱妻 Natasha 在诸多方面的支持,不再一一细说。

Sergey N. Makarov

(美)麻萨诸塞州伍斯特技术学院电气与计算机工程系

目 录

第 1 章 引 言

1.1 Matlab	1
1.2 天线理论	1
1.3 Matlab 程序	2
1.4 天线结构	3
1.5 分析方法和阻抗矩阵	4
1.6 线天线和贴片天线	5
1.7 Matlab 循环和天线优化	6
1.8 速度和阻抗矩阵的最大维数	6
1.9 各章概要	7
本章参考文献	8

第 2 章 接收天线:散射算法

2.1 引 言	10
2.2 程序序列	11
2.3 天线结构的生成	12
2.4 RWG 边元	14
2.5 阻抗矩阵	15
2.6 矩量方程和表面电流	17
2.7 表面电流可视化	18
2.8 偶极子天线的感应电流	20
2.9 蝴蝶结天线的感应电流	22
2.10 缝隙天线的感应电流	23
2.11 使用 Matlab 编译器	25

2.12 在 Linux 下使用 Matlab	26
2.13 结 论	26
本章参考文献	27
习 题	28

第 3 章 远场和近场算法

3.1 引 言	30
3.2 程序序列	31
3.3 表面电流辐射	31
3.4 远 场	33
3.5 空间点的辐射场	33
3.6 辐射密度/强度分布	34
3.7 天线方向性	36
3.8 天线增益(理想情况)	38
3.9 天线有效孔径	39
3.10 结 论	40
本章参考文献	40
习 题	41

第 4 章 偶极子和单极子天线:辐射算法

4.1 引 言	43
4.2 程序序列	44
4.3 细导线的带模型	45
4.4 馈电模型	45
4.5 偶极子天线的电流分布	47
4.6 输入阻抗	49
4.7 单极子天线	50
4.8 单极子天线的阻抗	54
4.9 辐射强度、辐射功率和增益	55
4.10 辐射电阻和传输功率	57

4.11 方向性图	58
4.12 接收天线	61
4.13 弗里斯传输公式	62
4.14 结 论	63
本章参考文献	64
习 题	65

第 5 章 环天线

5.1 引 言	69
5.2 环网格和馈电边	70
5.3 环天线的电流分布	72
5.4 小环的输入阻抗	74
5.5 小环的辐射强度	75
5.6 小环的辐射方向图	76
5.7 小环向大环的过渡:轴向辐射器	78
5.8 螺旋天线——法向模	80
5.9 螺旋天线——轴向模	82
5.10 结 论	85
本章参考文献	85
习 题	87

第 6 章 天线阵列:参数扫描

6.1 引 言	89
6.2 阵列生成器:线阵列和圆阵列	90
6.3 阵列端阻抗	93
6.4 二元阵列的阻抗和辐射功率	94
6.5 如何组织 Matlab 循环	96
6.6 阵列的网络方程	96
6.7 方向性控制	97
6.8 垂射阵列	98

6.9 端射阵列	101
6.10 图乘法则	103
6.11 理论和仿真的比较	104
6.12 端射阵列的优化:相位循环	105
6.13 Hansen-Woodyard 模型	107
6.14 端射阵列的功率图	110
6.15 相控(扫描)阵	111
6.16 接地面上的蝴蝶结阵列	112
6.17 关于阻抗矩阵的维数	115
6.18 结 论	116
本章参考文献	117
习 题	118

第 7 章 宽带天线:频率扫描

7.1 引 言	120
7.2 程序序列	121
7.3 待研究的天线结构	122
7.4 偶极子天线的阻抗和功率谐振	125
7.5 偶极子天线的辐射功率、回路损耗和增益	127
7.6 与 NEC 偶极子天线模型比较	129
7.7 使用德洛内函数生成蝴蝶结天线网格	131
7.8 蝴蝶结天线的阻抗	131
7.9 蝴蝶结天线的辐射功率和增益	133
7.10 蝴蝶结天线的辐射强度分布	134
7.11 涡状天线的网格	136
7.12 涡状天线的阻抗、功率和增益	138
7.13 涡状天线的辐射强度分布	141
7.14 多带天线:Sierpinski 分形天线	142
7.15 Sierpinski 分形天线的阻抗、功率和增益	143
7.16 结 论	146
本章参考文献	148
习 题	149

第 8 章 超宽带通信天线:时域分析

8.1 引 言	153
8.2 程序序列	154
8.3 入射电压脉冲	156
8.4 表面离散化和馈电模型	157
8.5 频率循环	159
8.6 表面电流分布	159
8.7 天线输入阻抗	160
8.8 天线辐射强度、增益	162
8.9 辐射方向图	163
8.10 天线—自由空间转移函数	164
8.11 天线—天线转移函数	166
8.12 离散傅里叶变换	167
8.13 接收电压脉冲	168
8.14 阻抗失配	170
8.15 负载上的电压脉冲	172
8.16 结 论	173
本章参考文献	173
习 题	175

第 9 章 天线加载:集总元件

9.1 引 言	177
9.2 程序序列	177
9.3 集总电阻、电感和电容	178
9.4 测 试	180
9.5 电阻性和电容性加载的效果	180
9.6 结 论	182
本章参考文献	184
习 题	184

第 10 章 贴片天线

10.1 引言	186
10.2 程序序列	187
10.3 探针馈电模型	188
10.4 天线结构的生成	189
10.5 输入阻抗、回路损耗和辐射方向图	191
10.6 对贴片宽度的要求	194
10.7 一个实际例子	196
10.8 介质模型	198
10.9 介质模型的精度	199
10.10 结论	202
本章参考文献	202
习 题	203

附录 A 其他三角化网格

A.1 板形网格	207
A.2 立体网格和立体金属栅状网格	207
A.3 腔体模型	209
A.4 带形网格	210
A.5 球形和圆柱形结构	210

附录 B 阻抗矩阵计算

B.1 阻抗矩阵计算	212
B.2 自耦项	213
本章参考文献	214

第 1 章 引 言

1.1 Matlab

标准 Matlab 含有开发简单的交互式“天线工具箱”所需的各个要素。这些要素包括：(1)内建的二维和三维表面和实体的网格生成程序(以下简称为网格生成器)；(2)高效的矩阵求解程序(以下简称为矩阵求解器)；(3)傅里叶分析工具；(4)带旋转、缩放及滚动功能的二维和三维绘图。

到目前为止,已经依托 Matlab 建立了两个与天线有关的电磁软件包:COMSOL 工作组的 Femlab[®] 软件(瑞典、芬兰、美国)和南非波印廷软件有限公司的 SuperNEC。在 SuperNEC 中,用可执行的 C++ 程序进行关键的矩量法计算,而 Matlab 仅充当图形化用户界面的角色。

Femlab 包括大量的有限元模块,其中的“电磁模块”用来在 Matlab 环境下进行似稳和高频场的有限元仿真。它的重点在于似稳和微波分析,而不是天线分析。而且,完整的 Femlab 电磁模块是相当昂贵的。

本书阐述了如何应用标准 Matlab 软件仿真基本的射频、无线通信天线及微波结构的辐射和散射问题。下面阐述矩量法的相关背景知识,包括 Rao-Wilton-Glisson(RWG)基函数、电场积分方程和边馈电模型。

1.2 天线理论

本书在写作时,力求在两方面取得平衡。首先,虽然本书的确提供了一些 Matlab 程

序,但它不是一本编程手册。本书为那些尚不熟悉 Matlab 的读者提供了一些适用的参考书目。

其次,虽然天线理论一直在发展变化,但本书并不是关于天线的一般教材。书中谈到的理论取材于 Balanis 著名的教材——《天线理论》^[1]。所给的大量数值计算实例阐明了如何计算实际应用中的重要天线/目标参数,包括:

- 表面电流分布
- 输入阻抗和回路损耗
- 天线近场
- 天线远场
- 辐射强度和辐射密度
- 雷达散射截面
- 辐射方向图、增益和波束宽度
- 天线转移函数和天线—天线链路
- 天线时域特性

许多章节在编排上直接与 Balanis 的教科书对应。特别地,第 4 章(偶极子和单极子天线)、第 5 章(环天线)、第 6 章(天线阵列)、第 7 章(宽带天线)、第 10 章(贴片天线)补充了 Balanis 书中的第 4、5、6、9、10 和 14 章的有关内容。

1.3 Matlab 程序

书中各章在原书配套光盘中都建有对应的 Matlab 目录,其中包含有相应的 Matlab 源程序和天线网格生成文件。这些程序的顺序执行反映了矩量法逐次的数值计算步骤。在阅读本章之前,读者可以先运行一下这些脚本程序。最后的脚本程序会显示相应章节中第一个例子的结果。

本书的核心由两个相当短的 Matlab 脚本程序(每个不超过 70 行)构成。第一个脚本程序 `impmet.m` 用本章参考文献[2]中开发的算法计算阻抗矩阵 \mathbf{Z} 。这是矩量法最基本的和最重要的步骤。阻抗矩阵使我们能够确定流过天线表面的电流。一旦阻抗矩阵正确编程,其他的工作通常不会构成什么困难。各章的 Matlab 目录都用到了 Matlab 函数 `impmet.m`。

第二个程序 `point.m` 计算无穷小电偶极子或一组偶极子天线在空间任一点的辐射场。这个程序帮助我们确定天线的近场和远场,包括它的辐射方向图和增益。除第 2 章外,其他各章的 Matlab 目录都包含有 Matlab 函数 `point.m`。

这两个程序几乎全部矢量化,速度可与相应的 C++ 可执行文件相比。感兴趣的读者可以试着修改这些程序以提高其性能。

其他的 Matlab 脚本程序用于支持和可视化天线的输入、输出数据。名字以 `rwg` 开头

的程序,例如 `rwg1.m`、`rwg2.m` 和 `rwg3.m`,负责处理天线结构。名字以 `efield` 开头的程序,例如 `efield1.m`、`efield2.m` 和 `efield3.m`,负责计算天线的近场和远场参数。在此,鼓励读者进一步发展、改进或替换这些程序。

1.4 天线结构

如何生成天线网格是一个重要的问题,为此,Matlab 提供了多种做法。一种是使用 Matlab PDE 工具箱内建的网格生成器。通过方便的图形化用户界面,这种网格生成器能产生任意(交叉的)矩形、多边形和圆形平面结构。要将设计扩展到三维结构,通常写一个短的包含 z 轴依赖关系的 Matlab 脚本程序就足够了。

另一种办法是用解析法表示天线结构的边界,再用 Matlab 函数 `delaunay` 将此结构进行德洛内三角化。要处理三维结构,可使用函数 `delaunay3`(三维德洛内棋盘形分割)。这种方法的优点是,不需要 PDE 工具箱且能生成任意三维天线表面和实体网格。另外生成的一些网格可用 ASCII 码方式导入到 Matlab。

本书目前的天线网格生成器库大约覆盖了 15 种基本天线形状。每个天线网格生成器都是一个输出天线结构的 Matlab 脚本程序,可以容易地改变其输入参数(长度、宽度、高度、离散精度等)。为了帮助读者生成自己的天线结构,我们给出了详细的解释和例子。表 1.1 列出了各个网格生成器。

基本形状通过简单的 Matlab 操作就能被弯曲、克隆或相互组合,这在书的正文中会进行解释。特别地,我们能够生成贴片阵列这样的结构。贴片可以是任意形状,既可以位于有限接地面上,也可以位于含金属透镜的有限金属栅格(频率选择性面)上。

表 1.1 各章 Matlab 目录的 Mesh 子目录下的天线网格生成器

	所在章编号
天线	
偶极子/带	4, 6
带反射器的偶极子	4
线性/圆形偶极子阵列	6
有限接地面上的单极子	4, 6
有限接地面上的单极子阵列	4, 6
蝴蝶结天线	6, 7
蝴蝶结天线阵列	6
环天线	5
螺旋天线	5

	所在章编号
天线	
涡状天线	7
分形天线(Sierpinski 分形)	7
有限接地面上的贴片天线	10
有限接地面上的贴片阵列	10
结构	
平板、立方体、球	附录 A
金属栅格(频率选择性面)	10, 附录 A

一些网格生成器(有限接地面上的单极子天线或有限接地面上的贴片天线/阵列)采用 Matlab 鼠标输入,以方便识别天线元。图 1.1 给出了用这种方法生成的一个有限贴片阵列的例子(见第 10 章习题 10.9 和 10.10)。

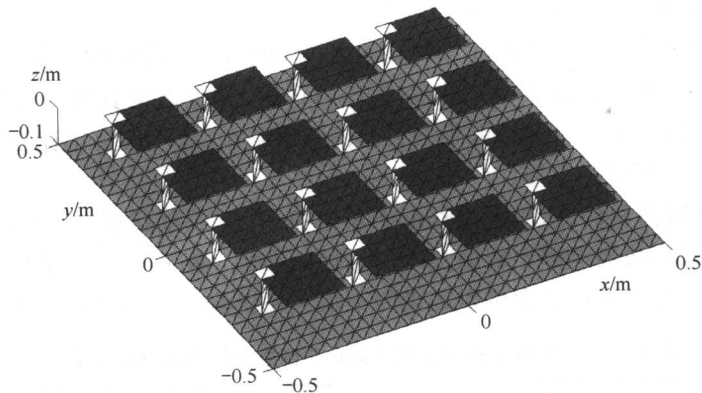


图 1.1 有限接地面上的贴片阵列

1.5 分析方法和阻抗矩阵

本书所用的矩量法以 RWG(Rao-Wilton-Glisson)边元为基础^[2]。首先,待研究金属天线的表面被划分为如图 1.2(a)所示的三角。拥有公共边的每对三角构成相应的 RWG 边元,如图 1.2(b)所示。其中一个三角标以正号,另一个标以负号。边元被赋以矢量函数(基函数):

$$f(\mathbf{r}) = \begin{cases} (l/2A^+) \boldsymbol{\rho}^+(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \text{ 在 } T^+ \text{ 内} \\ (l/2A^-) \boldsymbol{\rho}^-(\mathbf{r}), & \mathbf{r} \text{ 在 } T^- \text{ 内} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.1)$$

这里, l 是边元的长度, A^\pm 是三角 T^\pm 的面积, 矢量 $\boldsymbol{\rho}^\pm$ 如图 1.2(b) 所示。矢量 $\boldsymbol{\rho}^+$ 从正三角的自由顶点指向观察点 \mathbf{r} 。矢量 $\boldsymbol{\rho}^-$ 从观察点 \mathbf{r} 指向负三角的自由顶点。

天线表面电流(为矢量)是所有边元贡献(1.1)之和, 权是未知系数。这些系数由第 2 章讨论的矩量方程决定。矩量方程是阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的线性系统。

边元的基函数(1.1)近似相应于长度为 $d = |\mathbf{r}^{c^-} - \mathbf{r}^{c^+}|$ 的有限小电偶极子, 如图 1.2(b) 和 (c) 所示。上标 c 表示三角 T^\pm 的中心。这样, 将天线结构分割为 RWG 边元就近似等于将天线电流分割为小的基本电偶极子, 如图 1.2(d) 所示。

阻抗矩阵 \mathbf{Z} 因而描述了不同基本偶极子之间的相互作用。如果边元 m 和 n 被视做小的电偶极子, 阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的元素 Z_{nm} 就表示偶极子 n (通过辐射场) 对偶极子 m 电流的贡献, 反过来, 元素 Z_{mn} 就表示偶极子 m (通过辐射场) 对偶极子 n 电流的贡献。阻抗矩阵的维数等于边元数目。这种贡献可以解析计算(使用有限偶极子的解析解), 或应用电场积分方程求解(EFIE)^[2, 3]。

然而, RWG 边元比图 1.2(d) 所示的简单的有限偶极子有更多优点。特别是, 它们保证了沿细金属带有均匀一致的轴向电流。相应结果由第 4 章提供。这对使用 RWG 边元建模线天线是非常重要的^[5, 6]。

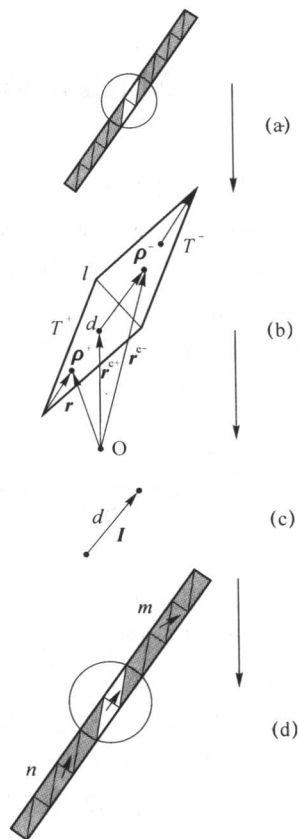


图 1.2 RWG 边元法的原理图及其偶极子解释

1.6 线天线和贴片天线

传统上, 线天线建模被作为一维分段模型加以研究(数值计算程序 NEC)。NEC 背后的理论是一组特殊的积分方程和一组特殊的基函数。这样就必须考虑两种不同的模型: 一种模型适合传导面/片, 另一种适合传导线^[4]。当线与面连接时就会出现问題。

为了避免开发和编制两种独立的算法, 要仔细研究 RWG 边元建模线天线的潜

力^[5, 6]。将线用沿横向只有一个 RWG 边元的细带模型来表示,细带的宽度是线半径的 4 倍。得到的结果令人鼓舞,这种模型真实地重现了偶极子和单极子天线的表面电流分布、输入阻抗和增益。因此,本书使用相同的基函数——RWG 边元——同时描述线天线和贴片天线^[7, 8],这大大简化了单极子天线和探针馈电贴片天线的数学基础和 Matlab 源程序。

1.7 Matlab 循环和天线优化

本书讨论了两种 Matlab 循环:代表某天线参数(如阵列天线的阵元间隔、馈电电压相位等)变化的循环和频率循环。参数循环对于天线阵列(第 6 章)来说很重要。频率循环对于宽带天线(第 7 章)和超宽带或脉冲天线(第 8 章)很重要。当天线结构很大时(阻抗矩阵大小超过 1000×1000),这些循环执行起来会相当慢。Matlab 有诸如从优化工具箱到神经网络工具箱以及第三方的遗传工具箱等广泛的优化方法可供选择,然而,本书并未采用这些工具箱。

1.8 速度和阻抗矩阵的最大维数

表 1.2 概述了图 1.1 所示天线(空气介质贴片天线)的填充阻抗矩阵 Z 和求解系统矩量方程所需的处理器时间。该结构有 3 101 个 RWG 边元和 $3\ 101 \times 3\ 101$ 的阻抗矩阵。表中分别列出了填充阻抗矩阵所需的时间(T_1)和求解矩量方程所需的时间(T_2)。求解矩量方程时,应用了内建的 Matlab 求解器(高斯消去法)。在表 1.2 最后一行的这种情况下,我们使用外壳脚本程序在四处理器机器上同时运行 4 个 Matlab 进程,这就使得实际运行时间只及单进程时的 1/4。

表 1.2 平均运行时间(3 101×3 101 的阻抗矩阵)

机器配置	操作系统	Matlab	T_1 /分钟	T_2 /分钟
奔腾 IV, 1.7 GHz, 系统主板 WT70-EC, 1 GB RAM	Windows ME	Matlab 6 (版本 12)	4.5	2.5
同上	同上	Matlab 编译器 (版本 2.1)	4.1	2.5

续表

机器配置	操作系统	Matlab	T_1 /分钟	T_2 /分钟
同上	Linux (内核版本 2.2.19)	Matlab 6 (版本 12)	3.5	2.5
IBM Netfinity 6 000 R Series 350, 4×700 MHz Intel Xeon CPU, 每个有 2 MB 缓存	Linux (内核版本 2.4.14) 支持“对称多处理器”	Matlab 6 (版本 12)	1.5	0.7

第 2 章介绍了 Matlab 编译器的使用,第 6 章末尾讨论了阻抗矩阵的最大维数。简言之,尽管可以生成大至 $5\,000 \times 5\,000$ 的复阻抗矩阵并将其保存在硬盘上,但是不可能获得矩阵方程的直接解(高斯消去法),这时会出现警告信息“Out of memory”(内存不足),使用标准 Matlab 帮助所提供的建议也无法解决此问题。因此,阻抗矩阵的实际最大维数不应超过 $4\,000 \times 4\,000$ 。

1.9 各章概要

第 2 章介绍了天线的散射算法。本章的目的是在入射电磁信号为给定方向和极化的平面波时,确定天线表面电流分布。本章讨论了金属板、偶极子天线、蝴蝶结天线和缝隙天线的散射,它们产生的表面电流分布是被关注的主要参数。本章所有的天线结构都由 Matlab PDE 工具箱的网格生成器产生。

第 3 章讨论了天线的近场和远场参数。本章的目的是在表面电流分布给定时确定辐射场。本章引入了天线方向性、增益和有效孔径,讨论了输出二维和三维辐射方向图的 Matlab 脚本程序。

第 4 章介绍了天线辐射算法,该算法由第 2 章和第 3 章中的各程序组合而成,目的是在天线馈电电压信号给定时确定天线阻抗和辐射场。本章还详细讨论了电压馈电(δ 间隙)的概念。本章的研究对象为偶极子和单极子天线,有关的天线结构或者由自定义的 Matlab 短程序生成,或者借助 Matlab PDE 工具箱生成。第 4 章还介绍了接收天线的概念,并说明了在发射天线馈电电压给定时如何计算接收电压。我们将弗里斯传输公式和精确仿真做了比较,证明了弗里斯公式因丢失相位信息而产生的局限性。

第 5 章将天线辐射算法用于环天线。单环天线囊括了电小、电大和中等尺寸的环天线。考虑了中馈螺旋天线的法向和轴向工作模式。天线结构由相应的网格生成器产生,修改生成程序可产生圆锥螺旋、接地面上的单极子螺旋、背腔螺旋等结构。

第 6 章讨论天线阵列。我们考虑了偶极子、单极子和蝴蝶结阵列。多电压馈电和阵列端阻抗是天线阵列的重要概念。本章讨论了两种基本阵列类型——垂射式和端射式,