

TURING

图灵电子与电气工程丛书

WILEY

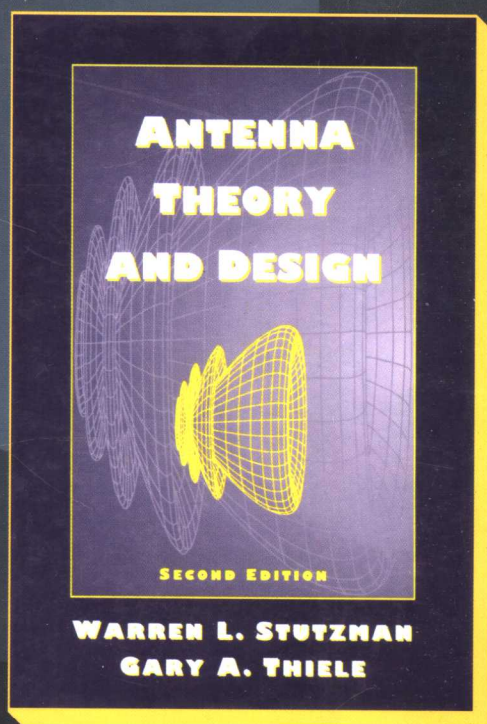
天线理论与设计

Antenna Theory
and Design

(第2版)

(Second Edition)

[美] Warren L. Stutzman 著
Gary A. Thiele 译
朱守正 安同一



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

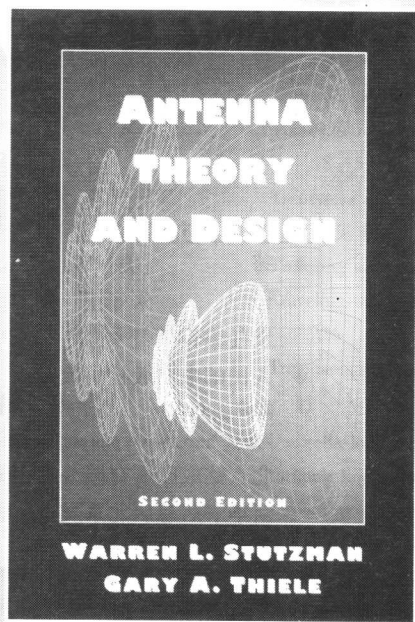
TURING

图灵电子与电气工程丛书

天线理论与设计

Antenna Theory (第2版)
and Design
(Second Edition)

[美] Warren L. Stutzman 著
Gary A. Thiele
朱守正 安同一 译



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

天线理论与设计 / (美) 斯塔兹曼 (Stutzman, W. L.), (美) 蒂尔 (Thiele, G. A.) 著;
朱守正译. —北京: 人民邮电出版社, 2006.10
(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 7-115-15055-9

I. 天... II. ①斯... ②蒂... ③朱... III. 天线—基本知识 IV. TN82
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 084590 号

内 容 提 要

本书是 W. L. Stutzman 和 G. A. Thiele 所著《天线理论与设计》第 2 版的中译本。原作者都曾担任 IEEE - AP 学会主席,在天线领域造诣颇深。

本书是一本教科书,包括天线基础、天线技术和常用天线设计三方面内容。侧重于原理的说明、天线系统的评估和设计技术。其特色是不过分依赖数学,突出材料的实用性,详细介绍计算电磁学的天线应用。该书已广泛地用于美国的大学教学,也被实践工程师们普遍使用。国内的一些学校也在使用本书作为参考。

本书是一本很好的本科生、研究生天线教科书,也可供教师和工程技术人员参考。

图灵电子与电气工程丛书

天线理论与设计 (第 2 版)

-
- ◆ 著 [美] Warren L. Stutzman Gary A. Thiele
译 朱守正 安同一
责任编辑 舒立
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 700 × 1000 1/16
印张: 39.5
字数: 819 千字 2006 年 10 月第 1 版
印数: 1-5 000 册 2006 年 10 月北京第 1 次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2006-1272 号

ISBN 7-115-15055-9/TN·2818

定价: 69.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

版 权 声 明

Original edition, entitled *Antenna Theory and Design (Second Edition)* by Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, ISBN 0-471-02590-9, published by Wiley Publishing, Inc. Copyright © 1998 John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

Translation edition published by POSTS & TELECOM PRESS Copyright 2006.

本书简体中文版由 Wiley Publishing, Inc. 授权人民邮电出版社独家出版。
版权所有,侵权必究。

译 者 序

本书是 W. L. Stutzman 和 G. A. Thiele 合著《天线理论与设计》一书第 2 版的中译本。两位作者都曾担任 IEEE 的天线与传播学会的主席,在天线领域与计算电磁学领域有相当高的造诣。本书是很好的介绍天线理论和技术的图书,自 1981 年首版以来,广泛地用作美国大学的天线教科书,而且被工程师广泛使用。译者在 1984 年开始接触该书的第 1 版,并多次在研究生的天线教学中参考该书。这次有机会将其译成中文,介绍给更多的中国读者,感到非常荣幸。

本书的第 2 版根据天线技术的发展和应用的需要,对第 1 版的内容进行了修改与扩展,介绍了天线的若干新领域,增加了微带天线、系统中的天线与天线测量等内容,对计算电磁学部分作了较大的扩展。因此全书既保持了第 1 版的简明性,又更贴近天线领域的新进展。

本书是很具特色的天线教科书。其特点是强调原理的理解及分析和天线系统设计技术的推演;没有特别依赖数学而是直接给出必需的算式;基础内容的处理使其可在分析实际天线中直接使用;介绍了大量实际应用的的天线形式;尤其与众不同的是对天线分析和设计的有力工具——计算电磁学方法作了相当详细的阐述,并提供了不少实例。

这是一本很好的天线教科书。主要内容包括天线基础和定义,天线阵理论,线天线,谐振天线,宽带天线,口径天线,天线综合,系统中的天线与天线测量,矩量法,时域有限差分法、几何绕射理论和物理绕射理论等在天线中的运用。

根据作者的介绍以及译者多年来在教学中对该书的使用体会,本书可用于多种教学安排:全书可作为硕士生的天线课教程;其第 1~6 章可用于本科生的天线课程,加上第 7、8、9 章的一部分作为教学参考;第 10~12 章可单独作为学习计算电磁学方法的教材。当然本书也可作为从事无线领域工作的工程师的参考书。

本书由朱守正和安同一教授合译。安同一翻译了本书的第 1~5、7 章和第 6 章的 1~3 节,以及前言、附录和索引;朱守正翻译了第 8~12 章,以及第 6 章的 4~7 节。在翻译的过程中得到了高新筑、翁轶峰、安彤、吴有丽、朱玮、安奕、何国荣、王志清、高新镇等的帮助,在此谨表谢意。

由于时间仓促、水平有限,译稿难免存在不妥之处,恳请读者指正。

译 者

2006 年 4 月

前 言

自从本书第1版于1981年出版以来,天线的应用领域(主要在无线通信方面)有了很大扩展。此外,近年来天线中重要的新领域已经显露头角。本书第2版已扩展到了包括天线的若干新领域。覆盖了微带天线(5.8节),还增加了系统中的天线与天线测量(第9章)。此外,天线阵的处理(第3章)、宽带天线(第6章)和口径天线(第7章)有了扩展。而且,自第1版写成后,计算电磁学(CEM)有了很大进展,其部分原因是由于采用了更加复杂的天线和天线系统。第2版将第10章中的矩量法作了扩展,在第11章中介绍了时域有限差分(FD-TD)法用于天线的简要处理方法,在第12章高频方法中加进了物理绕射理论(PTD)。第2版的目标是既要保持第1版的简明性,同时又要增加现代内容。

本书是一本教科书,它已广泛地用于大学教学。因此,其首要目的是强调原理的理解及分析和设计天线系统的技术的推演。本书论及的基础知识和天线都有现成的参考手册进行补充。我们发现,不仅学生,而且专业工程师也在广泛使用第1版。这是由于材料的实用性和基础内容的处理可直接用于实际天线的分析。本书的第1~6章和第9章可以反映出这一点,这几章没有特别依赖数学,很少使用微积分。

本书从三方面考察了天线:天线基础、天线技术和常用天线设计。开头四章强调天线基础。由于学生可能对天线接触很少,第1章中介绍了许多天线基础。从麦克斯韦方程组导出天线理论,同时对天线如何辐射给出了物理解释。对四种类型的天线单元(电小天线、谐振天线、宽带天线和口径天线)作了介绍。天线学科有自己的术语体系,与其他工程领域不同,所以第1章包含了许多天线术语的定义。第2章分析了简单的辐射系统(如偶极子)以巩固第1章学过的原理,并为读者进一步分析天线系统(如第3章的天线阵)提供了基础。在本书中早早地论及天线阵,为的是运用基本的数学工具,介绍天线上的电流分布与其空间辐射特性之间的关系。此外,天线阵如今已广泛地运用于实践中。在第4章中讨论线源天线,由它引导出天线的连续形式,它紧接着天线(天线阵)的离散处理。

第5~7章详细地介绍常用天线单元。第5章综述了实践中常用的谐振天线单元,包括振子天线、八木天线和微带贴片天线。第6章论述宽带天线,诸如螺旋线天线、螺旋天线和对数周期天线。第7章讨论了口径天线。这些章节着重于运用第1~4章介绍的基础弄清工作原理并提出了一些设计指导。如果合适,会给出数值模型、实验模型或基于理论公式的计算。此外,为便于估计性能参数,还往往给出经验公式。

为了主瓣赋形和低旁瓣应用,在第8章中讨论天线阵综合和连续天线。第9章讨

论天线作为部件在系统中的应用,还介绍了天线的测量。

正如前述,第10~12章介绍计算电磁学(CEM)方法,用于计算简单天线单元以及大而复杂的天线系统。此处和全书其他部分一样,没有列出实际的程序语句。多种多样的计算环境和高水平的数学应用软件包,使得这样做不合适也不必要。某些关键的计算和可视化天线软件包可以在万维网(World Wide Web)上找到(见附录G)。

为了学习本书,必须了解所需的知识背景。并不是要求读者完全掌握下述科目,但接触过它们是很有好处的。就像在工程和物理中通常要求的那样,假定读者已学过电磁学的基本课程。要用到常用数学,包括复数、三角、矢量代数和主要的坐标系统(直角、柱、球)。矢量运算在许多场合要用到,标量积分也经常用到。

本书可方便地用于多种教学安排,包括入门水平和高级水平。作为第一类课程,本书用于高年级选修课或研究生的入门课。一学期的导论课通常包括第1~6章。对硕士课程,可加上第7、8、9章的一部分。在一季的高年级课程中,可省略第3、4、5章的后面部分。第二类课程可专注于先进设计、综合与系统,使用第7、8、9章。另外,第二类课程也可以专攻计算方法,使用第10~12章。

为了帮助读者和准备进一步自学,本书包含了一些特色。术语的定义根据IEEE的标准定义。每章的末尾给出的参考文献都注明出处,以利于进一步阅读。此外,附录H中的文献目录按技术内容分类列出文献来源。附录还给出了有关无线电频谱方面的知识、材料的数据和一些重要的数学关系。

作者感谢许多为第2版提供有益帮助的人们。全部书稿的审阅者们(其中有两位还是第1版的审阅者)为本书的安排和若干技术问题提供了实质性的帮助。在草稿的课堂试讲中许多学生提供了关键的修改意见。此外,要特别感谢那些给予评阅的人,包括Keith Carver(5.8和6.2节)、David Jackson(5.8节)、Ahmad Safaai-Jazi(6.2和8.4节)、David Olver(第11章)、Buck Walter(4.4和10.12节)、Gerald Ricciardi(5.8节)、Marco Terada(7.6节)和Krish Pasala(12.15节)。作者之一(Gary Thiele)向他的儿子E. T. Thiele特别表示感谢,因为在很长一段时间里,他与作者在FD-TD方面进行了有价值的讨论,而且他审阅了第11章,得出了其中若干图解说明中的数据。

最后,意识到在我们准备两个版本期间,我们的夫人Claudia和Jo Ann长时间受到了忽视,孩子们Darren和Dana以及Eric、Scott和Brad也一样,特此致歉。

Warren L. Stutzman
Gary A. Thiele

目 录

第1章 天线基础与定义	1	2.4.2 小环天线	65
1.1 绪论	1	2.5 通信系统中的天线	70
1.2 天线如何辐射	4	2.6 电小天线的实际考虑	75
1.3 天线综述	8	参考文献	76
1.4 电磁学基础	11	习题	77
1.5 关于辐射问题的麦克斯韦方程 组的解	15	第3章 天线阵	80
1.6 理想偶极子	18	3.1 线阵的阵因子	81
1.7 辐射方向图	22	3.2 均匀激励的等间距线阵	91
1.7.1 辐射方向图基础	22	3.2.1 阵因子的表达式	91
1.7.2 线电流的辐射	22	3.2.2 主瓣扫描和束宽	94
1.7.3 远场条件和场区	26	3.2.3 普通端射阵	95
1.7.4 辐射场的推导步骤	28	3.2.4 汉森-伍德亚德端射阵	97
1.7.5 辐射方向图的定义	30	3.3 方向图乘积	99
1.7.6 辐射方向图的参数	32	3.4 均匀激励等间距直线阵的方 向性	104
1.8 方向性和增益	33	3.5 非均匀激励的等间距线阵	108
1.9 天线阻抗、辐射效率和短振子	39	3.6 互耦	113
1.10 天线极化	43	3.6.1 互耦的阻抗效应	113
参考文献	46	3.6.2 包含互耦的阵列方向图的 计算	116
习题	47	3.7 多维阵	118
第2章 若干简单的辐射系统与天 线实践	51	3.8 相控阵和阵的馈电技术	120
2.1 电小振子	51	3.8.1 扫描原理	121
2.2 振子	54	3.8.2 用于波束扫描的馈电网络	123
2.3 完纯导电地平面上方的天线	57	3.8.3 扫描盲区	125
2.3.1 镜像理论	57	3.9 天线阵展望	125
2.3.2 单极子	60	参考文献	126
2.4 小环天线	62	习题	126
2.4.1 对偶性	63		

第4章 线源	133	6.3.3 锥台天线	228
4.1 均匀线源	133	6.4 套筒天线	230
4.2 渐削线源	142	6.4.1 套筒单极子	230
4.3 远场方向图和源分布之间的傅里叶变换关系	146	6.4.2 套筒振子	231
4.4 超方向性线源	148	6.5 非频变天线的原理	233
参考文献	151	6.6 螺旋天线	235
习题	151	6.6.1 等角螺旋天线	235
第5章 谐振天线:导线和贴片	154	6.6.2 阿基米德螺旋天线	237
5.1 振子天线	154	6.6.3 锥形等角螺旋天线	240
5.1.1 直导线振子	155	6.6.4 相关的结构	240
5.1.2 V形振子	162	6.7 对数周期天线	241
5.2 折合振子天线	164	参考文献	251
5.3 导线天线的馈电	169	习题	253
5.4 八木天线	175	第7章 口径天线	257
5.5 角反射器天线	183	7.1 口径辐射与惠更斯原理	257
5.6 非完纯导电地平面上的线天线	185	7.2 矩形口径	265
5.6.1 真实地球面对方向图的影响	186	7.2.1 均匀矩形口径	265
5.6.2 地平面的构建	190	7.2.2 渐削矩形口径	269
5.7 大环天线	192	7.3 计算增益的方法	272
5.8 微带天线	197	7.3.1 方向性	272
5.8.1 微带贴片天线	197	7.3.2 增益与效率	274
5.8.2 微带阵	202	7.3.3 简单的方向性公式	275
参考文献	204	7.4 矩形喇叭天线	278
习题	206	7.4.1 H面扇形喇叭天线	279
第6章 宽带天线	211	7.4.2 E面扇形喇叭天线	285
6.1 行波线天线	211	7.4.3 角锥喇叭天线	288
6.2 螺旋天线	217	7.5 圆形口径	294
6.2.1 法向模螺旋线天线	218	7.5.1 均匀分布圆形口径	294
6.2.2 轴向模螺旋线天线	220	7.5.2 渐削圆形口径	297
6.3 双锥天线	224	7.6 反射器天线	300
6.3.1 无限双锥天线	224	7.6.1 抛物面反射器天线原理	300
6.3.2 有限双锥天线	226	7.6.2 轴对称抛物面反射器天线	306
		7.6.3 偏心抛物面反射器	311
		7.6.4 双反射面天线	312
		7.6.5 反射器天线的交叉极化与扫描特性	315

7.6.6 反射器天线的增益计算	319	9.7 极化测量	391
7.6.7 其他反射器天线	324	9.7.1 极化图形法	392
7.7 反射器的馈源天线	325	9.7.2 旋转源法	393
7.7.1 场的表达式	325	9.7.3 双源方向图法	394
7.7.2 馈源与反射器匹配	326	9.8 场强测量	395
7.7.3 通用馈源模型	327	参考文献	396
7.7.4 实际使用的馈源天线	329	习题	397
参考文献	332		
习题	334		
第 8 章 天线综合	341	第 10 章 天线的 CEM: 矩量法	400
8.1 综合问题	341	10.1 计算电磁学简介	400
8.1.1 综合问题的表达	341	10.2 矩量法简介	401
8.1.2 综合原理	342	10.3 波克林顿积分方程	402
8.2 线源波束赋形的综合方法	344	10.4 积分方程与基尔霍夫网络方程	405
8.2.1 傅里叶变换法	344	10.5 源的建模	407
8.2.2 伍德沃德-罗森取样法	346	10.6 加权余量和矩量法	412
8.3 线阵波束赋形的综合法	349	10.7 矩量法的另外两种处理方法	417
8.3.1 傅里叶级数法	349	10.7.1 反应	417
8.3.2 伍德沃德-罗森取样法	351	10.7.2 矩量法的线性代数表达	419
8.3.3 波束赋形综合法的比较	353	10.8 数学表达与计算方面的考虑	421
8.4 低旁瓣、窄主瓣方法	354	10.8.1 其他展开函数和权函数	421
8.4.1 道尔夫-契比雪夫线阵法	354	10.8.2 导线的其他电场积分方程	423
8.4.2 泰勒线源法	360	10.8.3 计算时间的考虑	426
8.5 展望	366	10.8.4 托普列兹矩阵	427
参考文献	366	10.8.5 块托普列兹矩阵	427
习题	367	10.8.6 压缩矩阵	428
		10.8.7 验证	428
		10.9 天线与散射体特性计算	429
		10.10 看作 N 口网络的线天线和	
		散射体	431
第 9 章 系统中的天线与天线测量	370	10.10.1 串联接法	431
9.1 天线的接收特性	370	10.10.2 并联接法	434
9.2 天线噪声功率和辐射测量学	375	10.11 天线阵	437
9.3 雷达	377	10.11.1 直线阵	437
9.4 互易性和天线测量	379	10.11.2 圆阵	439
9.5 方向图测量与天线测试场	383	10.11.3 二维平面振子阵	442
9.6 增益测量	388	10.11.4 小结	443
9.6.1 圆极化天线增益测量	389	10.12 天线的雷达截面	443
9.6.2 增益估计	390		

10.13 实体表面的建模	448	第 12 章 天线的 CEM: 高频方法 ...	515
10.13.1 线栅模型	449	12.1 几何光学法	515
10.13.2 连续表面模型	453	12.2 劈的绕射理论	522
10.14 小结	458	12.3 射线基坐标系	530
参考文献	458	12.4 劈绕射的一致性理论	532
习题	460	12.5 喇叭天线的 E 面分析	536
第 11 章 天线的 CEM: 时域有限		12.6 抛物柱面天线	539
差分法	464	12.7 有限接地平面上缝隙的辐射	542
11.1 FD-TD 方法的麦克斯韦方程	466	12.8 有限接地平面上的单极子的	
11.1.1 三维问题的表达	466	辐射	544
11.1.2 二维问题的表达	467	12.9 等效流的概念	546
11.1.3 一维问题的表达	467	12.10 多重绕射的表达	548
11.2 有限差分与 Yee 算法	468	12.11 曲面的绕射	551
11.3 单元尺寸、数值稳定性和色散 ...	475	12.12 用几何绕射理论扩展矩量法 ...	556
11.4 计算机算法与 FD-TD 实现	478	12.13 物理光学	563
11.5 吸收边界条件	481	12.14 驻相法	568
11.6 源的条件	485	12.15 物理绕射理论	571
11.6.1 源的功能	485	12.16 抛物柱面反射器天线 - PTD ...	576
11.6.2 硬源	486	12.17 小结	578
11.6.3 软源	487	参考文献	579
11.6.4 总场/散射场的表达	488	习题	580
11.6.5 纯散射场的表达	492	附录 A 常用频率表(美国用)	588
11.7 近场与远场	492	附录 B 材料与其他常数的数据	591
11.8 二维例子: E 面扇形喇叭天线 ...	494	附录 C 矢量	593
11.9 天线分析和应用	501	附录 D 三角关系	596
11.9.1 阻抗、效率和增益	502	附录 E 双曲关系	598
11.9.2 完纯导电接地平面上方的		附录 F 数学关系	599
单极子	503	附录 G 计算机软件包	601
11.9.3 Vivaldi 缝隙阵	507	附录 H 参考文献	604
11.10 小结	512	索引	611
参考文献	512		
习题	513		

第 1 章 天线基础与定义

1.1 绪 论

人类之间的通信最早是用声音,通过讲话来实现。有了长距离通信的愿望后,出现了诸如鼓之类的装置。然后,又出现了一些可视的手段如信号旗、烟火等。当然,这些“光通信器件”应用了电磁谱的光部分。只是到人类历史非常近代的时候,通过使用无线电,才将可见光区域以外的电磁谱用于通信。

无线电天线是任何无线电系统的基本部件。天线是一台装置,它为辐射和接收无线电波提供了手段。换言之,它提供了从传输线上的导波到“自由空间”波的转换(在接收时正好相反)。这样,信息可以在异地间传输而不需任何中介结构。携带此信息的电磁波的可能频率则构成电磁频谱(无线电频段在附录 A 中给出)。电磁频谱是人类最巨大的自然资源之一,而天线已经是利用这一资源的装置。下面讨论天线技术的简史^[1~4]和天线的使用。

也许,最早的辐射实验是 1842 年由有线电报的发明者普林斯顿大学的 J. 亨利(Henry)完成的。他在楼上的房间里从电路中“扔出一个火花”,并观察到位于地下室的指针被接收电路中的电流所磁化。这个实验又扩展到间隔 1km。亨利还致力于闪电研究,在他家的屋顶上装了个竖直导线。这些实验标志着线天线的出现。

1875 年爱迪生观察到电报键能够阻隔辐射在此基础上,1885 年,他获得了一个通信系统的专利,其中采用了顶加载的竖直天线。

天线的理论基础基于麦克斯韦方程组。1864 年, J. C. 麦克斯韦(1831—1879)在英国皇家学会发表了这篇论文,它把电力与磁力统一成单一的电磁理论。麦克斯韦还预言,光可以用电磁学来解释,光与电磁扰动二者以同样的速度行进。

1887 年,德国物理学家 H. 赫兹(1857—1894)从实验上证明了麦克斯韦的断言,即电磁作用通过空气传播。赫兹发现,通过适当尺寸达到谐振的带有空气间隙的单个小环,可以产生火花而测得电扰动。赫兹研究的电扰动的主源,由两个处于同一平面的金属板组成,每块板都用导线和电感线圈相连。这种早期天线,有点类似于 2.1 节描述的电容板天线,称为“赫兹振子”。赫兹还建成了环天线。在获得更定向辐射需求的驱动下,他又发明了反射器天线。1888 年,他用锌片制作了一个抛物柱面反射器天线,见图 1-1a。它由沿着焦线放置的振子馈电,工作在 455MHz。

意大利发明家 G. 马可尼(1874—1937)为了最早的电码发送,于 1895 年建立了一个微波抛物柱面反射器,工作在 1.2GHz。但是,他随后的工作却在更低频段以扩大通

信范围。1901年首次穿越大西洋的无线电通信用的发射天线,包括一个接在地和由50根导线做成的48m高扇形单极子系统之间的70kHz火花发生器,见图1-1b。该天线很像6.3节中描述的盘锥形天线的变种。接收天线由风筝支撑。

虽然马可尼被誉为无线电的创始人,但是,美国华盛顿特区的一个牙医和发明家M. Loomis(1826—1886)于1872年获得一项“电报的改进”专利。其中,他描述了使用一个“天线”收发“脉动”。1866年10月,Loomis在弗吉尼亚的蓝脊山向美国的参议员们表演了他的无线信号系统。他使用了由风筝支撑的导线,收发相距约20英里。

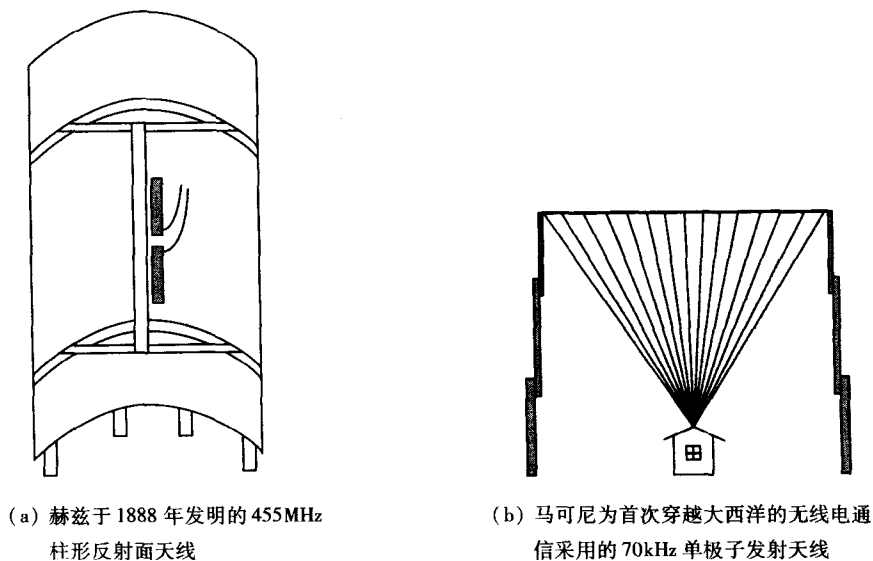


图1-1 早期天线的例子

2 俄罗斯物理学家A. 波波夫(1859—1905)也认识到赫兹发现无线电波的重要性,而且在马可尼的前一年开始研究接收无线电波的各种方式。1897年,他在船与岸之间相隔3海里发送了信号,因此,有意见认为他是第一个在无线电系统中使用天线的人。不过,开发了商用无线电,并开创了越洋通信的还是马可尼。马可尼应该享有无线之父的称号。从此以后,“无线电(radio)”这个名词一直沿用,而“无线(wireless)”后来也重新流行起来。

1912年,无线电协会(WI)和无线电工程师协会(SRE)合并成立无线电工程师学会(IRE)。IRE会刊第一期的第一篇论文是有关天线的,这一事实说明了天线的重要性^[5]。

早年,天线发展受限于是否有现成的信号发生器。约在1920年,De Forest三极管用于产生高达1MHz的连续波信号后,物理上可控尺寸的谐振长度天线(例如,半波振

子)成为可能。就在第二次世界大战前夕,开发出了微波(约1GHz)速调管和磁控管信号发生器与空管波导。这导致了喇叭天线的发展[当然,C. Bose(1858—1937)多年前就在印度制造了第一个电磁喇叭天线]。1934年,在英国和法国之间,首个商用微波无线电话系统(工作在1.8GHz)开始运营。战时的雷达需求催生了大批“现代”天线,诸如巨大的反射器天线、透镜天线和波导缝隙天线阵^[6]。

现在让我们把注意力转向天线的使用。电磁能可以利用传输线传输。但是,如果使用天线,就不需要传导结构。对收发距离为 R ,传输线的功率损耗正比于 $(e^{-\alpha R})^2$,其中 α 是传输线的衰减常数。如果天线用于视距组合中,其功率损耗正比于 $1/R^2$ 。到底用传输线还是用天线?有许多因素要考虑。一般而言,在低频和短距离时,用传输线是现实的。但是,由于有可用带宽,高频有吸引力。当距离变长,频率升高时,使用传输线的成本和信号损失变大,因此,人们更愿意使用天线。一个明显的例外是光纤传输线,它具有很低的损耗。传输线具有不受干扰的优点,在无线电系统中却经常碰到干扰,而且,加放一根电缆就能得到更多的带宽。不过,使用电缆总会带来显著的花费与架设时间。

在某些应用中,使用天线是必需的。例如,移动通信,包括飞机、航天飞机、船舶或地面机动车都需要天线。在广播的场合,天线也很常用,其中一个发射终端能为无限多的接收机服务,这些接收机还可能是移动的(例如轿车收音机)。非广播无线电应用,如城市无线电(警察、消防、公用事业)和业余无线电,也需要天线。此外,个人通信设备,诸如寻呼机、蜂窝电话也是常见场合。

天线还有很多非通信应用,其中包括遥感与工业应用。遥感系统既可以是有的(如雷达),也可以是无源的(如辐射计),分别用于接收目标的散射能量或固有辐射能量。接收到的信号经过处理可推断关于目标或场景的信息。工业应用包括微波加热与干燥。

影响发射系统类型选择的其他因素包括历史原因、安全与可靠性。在无线电技术可供应用之前,电话公司已经将各种收发终端通过传输线连接在一起了。当今,家用电话公司已将微波无线电和光纤传输线用于长途电话。卫星无线电通信广泛用于国际长途电话。此外,卫星通信系统是将电视节目资料分发给分支台的主要手段。通过卫星直接分发给世界各地消费者的电视节目也与日俱增。而且,用于卫星无线电系统的甚小口径终端(VSAT)也广泛应用于私人数据网,以连接诸如连锁零售店。传输线天生能比无线电提供更好的安全性。然而,采用数字通信的无线电中继可以用编码技术保密。而且,对大多数天线系统不必另加保密。另一个要考虑的因素是可靠性。譬如,无线电信号会受环境条件,如沿信号传输路径上的建筑物、电离层及天气等的影响。尤其是干扰对无线电系统来说总是一种威胁。另一方面,电缆较易因为地震或不慎挖掘而损坏。所有这些因素要同采用传输线和天线的成本综合起来评估。电缆系统常常需要昂贵的土地购置费用或租费,无线电设备每年都在降价而可靠性却在增

加。这个趋势使天平在向使用无线电系统倾斜。电缆通信系统与无线电通信系统在未来都会使用,其选择取决于具体的应用。为了高可靠性,电缆与无线电二者都能用,以提供多样性。

正如我们将看到的,天线不可能像通常在电子学中发生的那样,小型化到被芯片所取代。虽然长期使用的天线类型将一直沿用到遥远的未来,但新的应用还是需要发明新天线系统。例如,更多通信要求导致了个人通信系统(PCS)的问世。从此每个人不用受导线连接的约束,只要带一个小无线电,可以在地球上任何地方使用。电子电气工程师协会(IEEE)新技术方向委员会提出的电技术7个重大挑战性课题,第一个就是“使任何人,在世界上任何地方,在任何时刻,能不接电线或电缆就用通信手段按自己的意愿与外界联系”。“无线”社会只有通过天线才有可能。可以确信,天线的未来一定灿烂辉煌。

本章的下面两节将阐述天线工作的基本原理并概述实际可能遇到的天线类型。第1章的余下部分将用于介绍理论基础与本书要用到的术语。

参考文献可以在每章的末尾找到其出处。此外,在附录H可以找到完整的参考文献。按其论题范围列出了约150本书,有助于学生进一步寻找详细资料。在本书中,尽量遵循IEEE对天线术语的定义(附录H中参考文献1)。

1.2 天线如何辐射

4

天线的数学推导对工程设计而言是必需的,但在此之前先解释一下辐射原理也是有益的。辐射是电磁场中的扰动从扰动源传播开去,因此,波动所携带的总功率,在无耗媒质中不随径向距离而改变。这个扰动是由一个时变电流源产生的,而电流源还有一个变速的电荷分布伴随着。所以,我们的讨论从单个变速电荷的辐射开始。

考虑单个电荷匀速沿图1-2中 z 向运动。在到达 A 点前,静电场力线从电荷出发,沿径向延伸到无穷远,并且随着电荷的运动而运动。在 A 点电荷开始加速(例如,速度增加),直至到达 B 点。然后,它又等速继续前进。该静电场(常常称为库仑场)从电荷出发,沿径向离开电荷。图1-2中半径 r_A 的圆以外的径向电场力线发自处于 A 点的电荷。半径为 r_B 的圆,其圆心在加速时间段 Δt 末尾电荷所在点 B 。在 r_B 以内,电场力线从 B 点沿径向延伸出去。两圆之间的距离等于光在 Δt 时间内所行进的距离,即 $\Delta r = r_B - r_A = \Delta t c$ 。由于电荷运动的速度小于光速,则 $\Delta z \ll \Delta r$,两圆几乎同心。图1-2中表示的距离 Δz ,相对于 Δr ,经过了放大,以便看清楚。在 Δr 区域内的电场力线被连接起来,这是由于在无电荷处电场力线必须连续。明显地,这是场结构被扰动的区域之一。此扰动是由于电荷加速所致,它的结束时间比图1-2所表达的时刻早 r_B/c 。这一扰动向外扩散,而且具有一个横向分量 E_r 。当扰动向无穷远传播的同时,该横向分量持续存在。

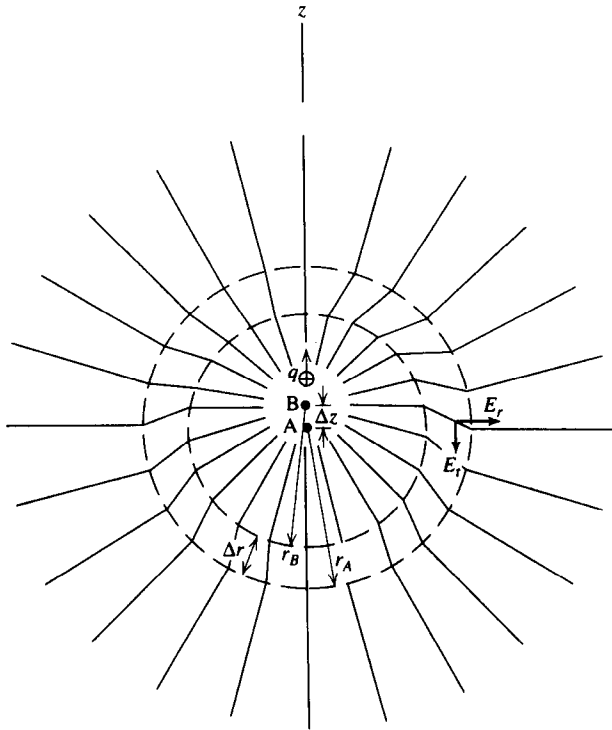


图 1-2 说明一个被加速的电荷粒子是怎样辐射的。电荷 q 沿 $+z$ 方向匀速运动直至 A 点 ($t=0$ 时刻), 此后, 它加速到达 B 点 ($t=\Delta t$ 时刻), 再保持匀速。此处所示的电场力线是电荷通过 B 点后 r_B/c 时刻的

5

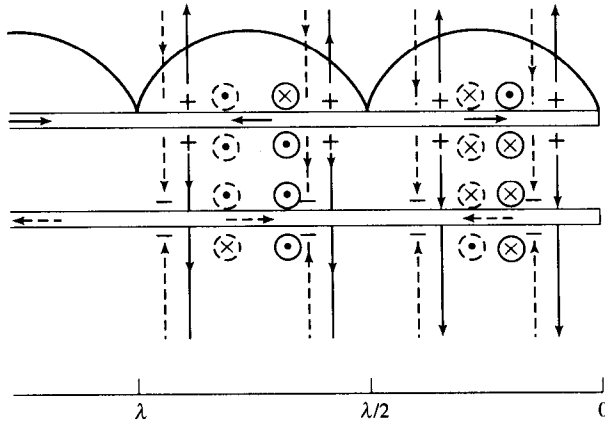
这个例子说明辐射是一种扰动。它可以直接类比于将一颗石子丢进平静的湖中所激起的瞬态波动, 在石子消失以后很长时间内, 从受击点出发的湖表面的扰动不停地沿径向传播开去。如果电荷被往返加速 (即振荡), 一个有规律的扰动就建立起来, 而辐射也就会持续。设计出天线就是用以支持电荷振荡。

在加速运动电荷的例子中, 很明显, 辐射具有方向性。图 1-2 中, 在垂直于电荷加速度的方向上扰动最大, 而在本章中我们将会看到垂直于直线天线方向产生最大辐射。

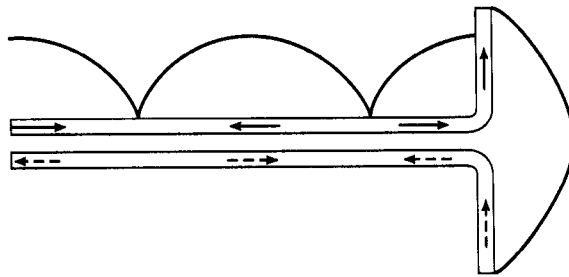
现在来解释一个实际天线是怎样工作的。为此, 先从图 1-3 的开路传输线着手, 导线上有一个驻波图, 导线终端的电流幅度为零, 离开终端每半个波长都是零点。两导线上的电流方向相反, 如图 1-3a 中箭头所示。在传输线中, 导线导引着波, 而由电场及磁场显露的能量则存在于环绕导体的区域中。电场从导线上的电荷出发或终止, 并且与导线垂直。磁场则环绕导线。注意, 所有的场在导线之间增强, 在其他地方抵消。

6

对于导线之间距离远小于一个波长的情况,都是这样,而且,通常也是这种情况。如果导线终端向外弯曲如图 1-3b 所示,导线之间增强的场就暴露在空间。注意,在两半的垂直线上,这里每段为四分之一波长,电流不再像传输线中那样方向相反,而是都向上。实际上,偶极子上的电流是如图所示近似于正弦,不过,传输线上的电流已不再是纯驻波。因为,与开路端相比,天线呈现的阻抗匹配有了改善。图 1-3b 是对电流峰值条件的情况。随着时间的推移,电流振荡将出现,产生的扰动将沿线传播开去,很像单个电荷被加速那样。



(a) 示出了电流、电荷和场的开路传输线。电场用实线表示。磁场用箭头表示,实线表示由顶端导线产生,虚线表示由底端导线产生



(b) 终端向外弯曲的传输线所产生的半波振子的峰值电流

图 1-3 从开路传输线向振子天线的演进

与振荡偶极子的电荷分布相关联的场随时间的变化如图 1-4^[7]所示。这与具有相等相反分离电荷的静电偶极子类似。这里电荷分布以频率 f 振荡。当处于终端的电荷分布振荡时,电流在电荷之间流动且处处均匀。这就是 1.6 节的理想偶极子。在图 1-4 中,频率 f 的振荡电流(周期 $T = 1/f$)比时刻 $t = 0$ 早开启 $1/4T$ 。向上流动的电流在偶极