

WILEY

国防电子信息技术丛书

Modern Antenna Design, Second Edition

# 现代天线设计

(第二版)

[美] Thomas A. Milligan 著

郭玉春 方加云 张光生 等译

詹毅 张建强 校



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

# 现代天线设计

(第二版)

Modern Antenna Design

Second Edition

[美] Thomas A. Milligan 著

郭玉春 方加云 张光生 等译

詹毅 张建强 校



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书从天线工程师的角度介绍现代各类型天线的基本原理、特点, 回避繁冗的数学分析, 直接给出多种天线的设计方法和步骤, 同时还给出大量的供设计人员查询的设计图表和许多领域的天线设计实例。天线设计师可根据设计要求和用途快速选定天线型式, 快速算出天线的约略尺寸。主要内容包括辐射结构和数值方法, 口径分布和阵列综合, 偶极子、缝隙、环形天线和微带天线, 高斯波束分析和波导喇叭天线, 反射面天线, 透镜天线, 行波天线, 非频率天线和相控阵等。

本书适用于通信、雷达及相关领域的各类天线设计师和研究人员使用, 也可以供高等院校相关专业的博士生和硕士生阅读参考。

MODERN ANTENNA DESIGN, Second Edition

ISBN: 978-0-471-45776-3

THOMAS A. MILLIGAN

Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc.

All rights reserved. This translation published under license.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the back cover are unauthorized and illegal.

本书简体中文版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Inc 授予电子工业出版社。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封底贴有 John Wiley & Sons, Inc 防伪标签, 无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2012-5741

## 图书在版编目 (CIP) 数据

现代天线设计: 第2版 / (美) 托马斯·A. 米利根 (Thomas A. Milligan) 著; 郭玉春等译. —北京: 电子工业出版社, 2018.7

(国防电子信息技术丛书)

书名原文: Modern Antenna Design, Second Edition

ISBN 978-7-121-34366-7

I. ①现… II. ①托… ②郭… III. ①天线设计 IV. ①TN82

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 122932 号

责任编辑: 竺南直

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 27.5 字数: 704 千字

版 次: 2018 年 7 月第 1 版 (原著第 2 版)

印 次: 2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: [davidzhu@phei.com.cn](mailto:davidzhu@phei.com.cn)。

## 译 者 序

本书是首席工程师 Milligan 先生的作品，他是从一个天线设计师的角度为设计者和使用者编写的。在内容和编写方式上，这本书与常见的理论性天线专著和天线手册都不同，它避开了复杂的数学分析，而是通过理论精炼获得天线设计要点，侧重于各类天线的基本原理、设计方法和设计步骤的阐述。另外，书中还提供了大量的可供设计师查询的工程图表和设计实例。

作者是一名专业的天线设计师，曾在洛克希德·马丁航天系统公司专门从事微波天线的设计和分析，其设计的天线被用于美国航空航天局火星和金星探测任务。因此，作者在取材方面选取的是工程中经常要用到的内容，覆盖了现代天线设计中的许多重要议题，同时也包含了一些天线设计的新方法。第二版中还增加了天线设计中所必需的数值计算方法，融合了作者天线教学课程中的内容。全书首先讨论天线的基本概念，然后以每个特定的主题展开，全书共 12 章。第 1 章讲述天线的一些基本概念和特性；第 2 章主要介绍天线工程中使用的各类数值方法，包含矩量法、物理光学、时域有限差分法等；第 3 章是天线阵列；第 4 章对各种口径分布以及阵列综合做了详细的阐述；第 5 章是偶极子、缝隙和环形天线，包括各种形式的巴伦；第 6 章是微带天线；第 7 章是喇叭天线，包括高斯波束分析；第 8 章是反射面天线；第 9 章是透镜天线，包括靴带透镜和伦伯透镜；第 10 章是行波天线；第 11 章是非频变天线，主要介绍工程中大量使用的各种形式的螺旋天线和对数周期天线；第 12 章是关于相控阵专题的论述。

由于本书侧重于实际天线的设计，作者还讨论了工程设计中遇到的天线安装和利用周围物体增强天线性能等问题。通过阅读本书，天线设计者和使用者可根据自己的需求快速选定天线型式并给出约略尺寸，进而利用现有的电磁仿真软件完成具体设计，这是该书的一个显著特点，因此非常适合从事天线工程设计的人员和研究人员参考。

全书各章节的翻译安排如下：前言、第 1 章、第 3 章、第 4 章和第 9 章由郭玉春翻译，第 2 章由华军、陈美良、卢新祥和郭玉春翻译，第 5~8 章由张光生翻译，第 10 章由方加云翻译，第 11 章和第 12 章由卢新祥翻译。全书由詹毅和张建强校对，最后由郭玉春统一校阅。本书的翻译出版得到了中国电子科技集团公司首席科学家杨小牛和通信信息控制与安全技术国家级重点实验室的大力支持，在此表示衷心的感谢。

本书在书写上非常口语化，翻译过程中我们尽量保持了作者的写作风格，同时也修正了一些错误。中译本的图示、符号形式及其正斜体等沿用了英文原版的写作风格，特此说明，由于译者理论水平有限，尽管经过仔细的校对，但还是难免存在错漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

译 者

# 前 言

这本书是从我个人站在一个业内设计师的角度来撰写的，主要适用于其他天线设计师和使用者。我有时会准备一些天线课程并做一些该类课程的教学工作，这些经历帮助我在天线这一学科建立了一套系统的方法。在过去的十年里，我主编了 IEEE 天线期刊的“天线设计笔记”专栏。通过这一编辑工作，我得以将我个人的设计笔记和其他人提供给我的许多想法汇集起来，形成这本我认为设计师应该知道的思想汇编。

本书囊括了天线学科的系统性方法。每个作者都喜欢读者能把他的书从头读到尾，但我的职业经历使我编写的这本书可以跳跃着阅读。不过，书中第 1 章还是介绍了每个使用者和设计师都应该知道的那些主题。因为我要全面地讨论天线设计，包括天线的安装，因此周围物体对天线的影响以及如何利用它们增强响应也属于我要讨论的范畴。为便于理解基本原理，我们研究的都是自由空间的理想天线。然而，实际情况会有点不同。

我并没有绘制两个参数之间的单线图，而是通过一遍一遍的运算生成了用于计算的刻度尺。由于我很少使用由他人提供的程序汇集，且每一代人学习的计算机语言各不相同，年轻的工程师会发现我的程序古里古怪，因此我并没有提供一套计算机程序。您将会编写自己的程序来学习。

IEEE 天线与传播协会将 1952~2000 年发表的所有材料做成了数字化档案，这改变了我们的研究方法。我并没有引用大量的参考书目，因为我认为再也没必要这样做了。数字化档案的搜索引擎就能够提供详尽的清单。我只提了那些我认为特别有用的论文。成套的学报可以在图书馆中得到，而会议资料中有价值的信息却不能。我已经挖掘了这些信息，包括许多有用的设计思路，并把其中一些纳入这本书中。在这一领域，40 年前的出版物仍然是有用的，我们没必要重复研究这些方法。行业内许多巧妙的构思通常只发表一次，因此，就我个人而言，我将一次又一次地求助于这些材料，因为所有图书的空间都是有限的。

与第一版一样，我很享受写这本书的乐趣，因为我想对这一有价值的领域表达我的观点。虽然可用的信息量是巨大的且它的数学描述掩盖了这些想法，但我希望我的解释能帮助您开发出新的产品或者使用已有的产品。

感谢那些曾经和我交流过想法并使我获得知识的作者们，特别是那些行业内的作者。就我个人而言，我要感谢洛克希德·马丁公司的设计师们，他们鼓励我并审阅了初稿，特别是 Jeannette McDonnell, Thomas Cencich, Donald Huebner 和 Julie Huffman。

# 目 录

第 1 章 天线特性	1
1.1 天线的辐射	1
1.2 增益	3
1.3 有效面积	4
1.4 路径损耗	4
1.5 雷达距离方程和散射截面	5
1.6 为何用天线	6
1.7 方向系数	7
1.8 方向系数估计	8
1.8.1 笔形波束	8
1.8.2 蝶形或全向方向图	10
1.9 波束效率	12
1.10 输入阻抗失配损耗	13
1.11 极化	14
1.11.1 圆极化分量	14
1.11.2 惠更斯源极化	16
1.11.3 各极化分量之间的关系	17
1.11.4 天线的极化响应	17
1.11.5 天线旋转时的相位响应	19
1.11.6 部分增益	20
1.11.7 圆极化的幅度测量	20
1.12 矢量有效高度	20
1.13 天线因子	22
1.14 天线间的互耦	22
1.15 天线噪声温度	23
1.16 通信链路预算和雷达作用距离	26
1.17 多径效应	28
1.18 地面传播	28
1.19 多径衰落	30
参考文献	31
第 2 章 辐射结构和数值方法	32
2.1 辅助矢量势	33
2.1.1 电流源辐射	33
2.1.2 磁流源辐射	37
2.2 口径: 惠更斯源近似	38
2.2.1 近场区和远场区	41

2.2.2	惠更斯源	42
2.3	边界条件	42
2.4	物理光学	43
2.4.1	给定电流的辐射场	44
2.4.2	物理光学应用	45
2.4.3	等效电流	47
2.4.4	电抗理论和互耦	48
2.5	矩量法	49
2.5.1	电抗理论的使用	49
2.5.2	广义矩量法	50
2.5.3	细线矩量法代码	51
2.5.4	表面和体矩量法代码	51
2.5.5	矩量法模型举例	52
2.6	时域有限差分法	54
2.6.1	实现	54
2.6.2	中心差分求导	54
2.6.3	麦克斯韦方程组的有限差分	55
2.6.4	时间步的稳定性	56
2.6.5	数值色散和稳定性	56
2.6.6	计算存储和时间	57
2.6.7	激励	57
2.6.8	波导喇叭算例	58
2.7	物理光学和几何绕射理论	59
2.7.1	费马原理	60
2.7.2	偶极子的 H 面方向图	60
2.7.3	矩形喇叭的 E 面方向图	62
2.7.4	矩形喇叭的 H 面方向图	63
2.7.5	射线的幅度变化	63
2.7.6	穿过焦散面的附加相移	64
2.7.7	斯涅耳定理和反射	64
2.7.8	反射对极化的影响	65
2.7.9	曲面反射	65
2.7.10	射线追踪	66
2.7.11	边缘绕射	66
2.7.12	劈绕射	68
2.7.13	尖角绕射	68
2.7.14	等效电流	68
2.7.15	曲面绕射	69
	参考文献	69

第 3 章 阵列	71
3.1 两元阵	72
3.2 $N$ 元线阵	75
3.3 汉森-伍德亚德端射阵	79
3.4 相控阵	79
3.5 栅瓣	81
3.6 多波束	81
3.7 平面阵	83
3.8 平面阵的栅瓣	84
3.9 互阻抗	86
3.10 扫描盲区和阵元方向图	86
3.11 互耦的阵列馈电补偿	87
3.12 阵增益	88
3.13 阵元指向任意的阵列	90
参考文献	92
第 4 章 口径分布和阵列综合	93
4.1 幅度渐削和相位误差效率	93
4.1.1 可分离矩形口径分布	95
4.1.2 圆对称分布	95
4.2 简单线源分布	96
4.3 泰勒单变量线源分布	98
4.4 泰勒 $\bar{n}$ 线源分布	100
4.5 边缘为零的泰勒线源分布	104
4.6 修正泰勒分布和任意副瓣的埃利奥特法	106
4.7 贝利斯线源分布	108
4.8 伍德沃德线源综合	111
4.9 谢昆诺夫单位圆法	114
4.10 道尔夫-切比雪夫线阵	117
4.11 维尔纳夫阵综合	118
4.12 连续分布的零点抽样法	119
4.13 傅里叶级数的赋形波束阵综合	120
4.14 ORCHARD 阵列综合法	122
4.15 串馈阵和行波阵综合	130
4.16 圆口径	133
4.17 圆形高斯分布	134
4.18 汉森单变量圆形分布	135
4.19 泰勒圆口径分布	136
4.20 贝利斯圆口径分布	138
4.21 平面阵	140



4.22	平面阵的卷积技术	141
4.23	口径遮挡	144
4.24	平方相位误差	146
4.25	对称圆口径分布的波束效率	148
	参考文献	149
<b>第5章</b>	<b>偶极子、缝隙和环形天线</b>	<b>151</b>
5.1	驻波电流	152
5.2	辐射电阻(电导)	153
5.3	巴比涅-布克原理	155
5.4	位于地平面上的偶极子	155
5.5	安装在有限大地平面上的偶极子	157
5.6	交叉偶极子产生圆极化	161
5.7	超级旋转场或蝙蝠翼天线	163
5.8	角形反射器	165
5.9	单极子	168
5.10	套筒天线	169
5.11	带反射腔的偶极子天线	170
5.12	折合偶极子	172
5.13	并联馈电	173
5.14	盘锥天线	173
5.15	巴仑	174
5.15.1	折叠式巴仑	175
5.15.2	套筒式或 Bazooka 巴仑	176
5.15.3	开槽同轴线巴仑	177
5.15.4	半波长巴仑	177
5.15.5	烛台形巴仑	178
5.15.6	铁氧体芯巴仑	178
5.15.7	烛台形铁氧体巴仑	179
5.15.8	变换器巴仑	179
5.15.9	同轴线渐变锥削式巴仑	179
5.15.10	天然巴仑	180
5.16	小环	180
5.17	ALFORD 环	181
5.18	谐振环	182
5.19	四臂螺旋	182
5.20	带背腔的缝隙	184
5.21	带状线串联缝隙	184
5.22	浅腔体的十字缝隙天线	186
5.23	波导馈电的缝隙	187
5.24	矩形波导壁上的缝隙	187

5.25	圆形波导缝隙	191
5.26	波导缝隙阵列	192
5.26.1	非谐振阵列	193
5.26.2	谐振阵列	195
5.26.3	改进的设计方法	195
	参考文献	196
<b>第6章 微带天线</b>		199
6.1	微带天线方向图	200
6.2	微带贴片带宽和表面波效率	203
6.3	矩形微带贴片天线	209
6.4	四分之一波长贴片天线	215
6.5	圆形微带贴片	218
6.6	圆极化贴片天线	220
6.7	紧缩型贴片	222
6.8	直接馈电的层叠型贴片	224
6.9	孔缝耦合层叠型贴片	226
6.10	贴片天线馈电网络	228
6.11	串馈阵	229
6.12	微带偶极子	230
6.13	微带福兰克林阵	231
6.14	微带天线的机械特性	232
	参考文献	232
<b>第7章 喇叭天线</b>		235
7.1	矩形喇叭(锥形)	236
7.1.1	波束宽度	237
7.1.2	最佳矩形喇叭	239
7.1.3	按给定的波束宽度进行设计	242
7.1.4	相位中心	242
7.2	圆形口径喇叭	243
7.2.1	波束宽度	245
7.2.2	相位中心	246
7.3	圆形(圆锥)波纹喇叭	247
7.3.1	标量喇叭	249
7.3.2	波纹的设计	250
7.3.3	塞形喇叭	250
7.3.4	矩形波纹喇叭	251
7.4	波纹地面	251
7.5	高斯波束	253
7.6	脊波导喇叭	256

7.7	盒形喇叭	260
7.8	T形棒馈电的缝隙天线	262
7.9	多模圆形喇叭	263
7.10	双锥喇叭	263
	参考文献	264
<b>第8章</b>	<b>反射面天线</b>	<b>266</b>
8.1	抛物反射面的几何	266
8.2	抛物反射面天线的口径分布损失	268
8.3	溢漏的近似和幅度渐变的折中	270
8.4	相位误差损耗和轴向散焦	271
8.5	像散	273
8.6	馈源扫描	273
8.7	随机相位误差	276
8.8	焦平面的场	278
8.9	反射面引起的馈源失配	279
8.10	前后比	280
8.11	偏馈反射面天线	281
8.12	圆锥曲面的反射	285
8.13	双反射面天线	287
8.13.1	馈源遮挡	288
8.13.2	绕射损失	289
8.13.3	卡塞格伦天线的公差	291
8.14	馈源和副反射面支撑杆的辐射	292
8.15	双反射面天线的 $G/T$ (增益/噪声温度)	296
8.16	偏轴双反射面天线	296
8.17	偏馈双反射面天线	299
8.18	喇叭反射面天线和 Dragonian 双反射面天线	300
8.19	球形反射面天线	302
8.20	赋形反射面天线	304
8.20.1	柱形反射面天线的综合	305
8.20.2	圆对称反射面天线的综合	305
8.20.3	形成赋形波束的双曲反射面天线	308
8.20.4	双赋形反射面天线	309
8.21	赋形和多波束反射面天线的优化综合	311
	参考文献	312
<b>第9章</b>	<b>透镜天线</b>	<b>316</b>
9.1	单面透镜	316
9.2	分区透镜	318
9.3	一般两表面透镜	321

9.4	单面或相切透镜	324
9.5	金属平板透镜	325
9.6	表面失配和介质损耗	327
9.7	双曲透镜的馈源扫描	328
9.8	双表面透镜	329
9.8.1	无彗星差轴对称介质透镜	329
9.8.2	给定口径分布的轴对称介质透镜	331
9.9	靴带透镜	332
9.10	伦伯透镜	333
	参考文献	334
<b>第 10 章</b>	<b>行波天线</b>	<b>335</b>
10.1	行波天线概述	335
10.1.1	慢波	338
10.1.2	快波(漏波结构)	339
10.2	长线天线	340
10.2.1	贝弗利天线	340
10.2.2	V形天线	341
10.2.3	菱形天线	342
10.3	八木-宇田天线	343
10.3.1	多馈八木天线	349
10.3.2	谐振环八木天线	350
10.4	波纹杆(雪茄)天线	352
10.5	介质杆(聚苯乙烯杆)天线	354
10.6	螺旋线天线	356
10.6.1	螺旋模式	357
10.6.2	轴向模	357
10.6.3	螺旋天线的馈电	358
10.6.4	长螺旋天线	359
10.6.5	短螺旋天线	360
10.7	短背射天线	360
10.8	渐变槽线天线	362
10.9	漏波结构	365
	参考文献	366
<b>第 11 章</b>	<b>非频变天线</b>	<b>368</b>
11.1	天线模式的模式展开	370
11.2	阿基米德螺旋	371
11.3	等角螺旋	372
11.4	螺旋天线的模式分析	374
11.5	螺旋构建和馈电	378

11.5.1	螺旋构建	378
11.5.2	巴仑馈电	379
11.5.3	无限巴仑	379
11.5.4	波束形成器和同轴线馈电	380
11.6	螺旋和波束形成器测量	380
11.7	馈电网络和天线相互作用	381
11.8	调制臂宽螺旋	382
11.9	圆锥对数螺旋天线	383
11.10	模式 2 圆锥对数螺旋天线	387
11.11	圆锥对数螺旋天线馈电	388
11.12	对数周期偶极天线	388
11.12.1	对数周期偶极天线馈电	392
11.12.2	相位中心	393
11.12.3	张角	394
11.12.4	对数周期偶极天线阵列	394
11.13	其他对数周期类型	395
11.14	对数周期天线馈电抛物面天线反射器	397
11.15	V 型对数周期阵列	400
11.16	背腔平面对数周期天线	401
	参考文献	402
<b>第 12 章</b>	<b>相控阵</b>	<b>405</b>
12.1	恒相位移相器 (移相器)	406
12.2	量化的波瓣	408
12.3	阵列误差	410
12.4	非均匀和随机阵元阵列	411
12.4.1	线性间距锥削阵列	411
12.4.2	圆形空间锥削阵列	413
12.4.3	统计稀疏阵列	414
12.5	阵列单元方向图	415
12.6	馈电网络	417
12.6.1	并联馈电	417
12.6.2	串联馈电	418
12.6.3	可变功分器和移相器	419
12.6.4	巴特勒矩阵	419
12.6.5	空间馈电	421
12.6.6	用均匀幅度子阵列锥削馈电网络	421
12.7	任意阵列中方向图零点的形成	423
12.8	相控阵在通信系统中的应用	424
12.9	相控阵的近场测量	425
	参考文献	427

# 第1章 天线特性

开篇探讨天线如何辐射是编写天线书籍的一种方式。首先从麦克斯韦方程组入手，推导出电磁波。在冗长的包含大量数学的探讨之后，本章讨论了电磁波是如何在导体上激励起电流的。本章的下半部分讨论的是电流辐射及其产生的电磁波。你可能已经研究过这个问题，若想使你的背景知识更深一步，可查阅电磁学方面的书籍。电磁学从数学上给出了对天线辐射的理解，并保证了其严密性以防止错误。我们跳过这些公式的讨论，直接进入实践环节。

由电流而实现天线辐射非常重要。天线的设计就是控制电流产生预期的辐射分布，即方向图。在许多情况下，问题是如何防止电流引起的辐射，比如在电路中。当电流与它的返回电流之间分开一定距离时，它就会产生辐射。简单地讲，我们的设计应使两个电流靠近以减少辐射。在一些讨论中电流分布会被忽略，而是考虑其导出量，如口径上的场、缝隙或微带贴片边缘的磁流。你会发现我们是利用概念来理解或去简化其数学推导的。

天线将受约束的电路场转换为可传播的电磁波，根据互易定理，它也可接收电磁波功率。由麦克斯韦方程可知，任何随时间变化的电场或磁场产生相对应的场并形成电磁波。电磁波有两个正交的场，它沿着由相互垂直的电场和磁场确定的平面的法线方向传播。电场、磁场和传播方向形成右手坐标系。传播的电磁场强度按离开源的距离的  $1/R$  减小，而静态场则以  $1/R^2$  降低。在一定程度上，任何时变场的电路都具有辐射能力。

本书只考虑时谐场，与时间相关的相量符号记为  $e^{j\omega t}$ 。向外传播的波为  $e^{-j(kR-\omega t)}$ ，其中  $k$  为波数，为  $2\pi/\lambda$ ， $\lambda$  是波长，即  $c/f$ ，其中  $c$  是光速（在自由空间为  $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ）， $f$  是频率。增大与源的距离，波的相位会减小。

对双线传输线，场被束缚其上。单根线上的电流将产生辐射，但只要地面返回路径在附近，其辐射几乎会被另外线路的辐射抵消，因为这两者相位相差  $180^\circ$  且波传输的距离相同。按照波长计算，随着线间距越来越远，两个电流产生的场在所有的方向将不再抵消。在某些方向，每条线上电流的辐射相位延迟并不相同，从而产生功率辐射。利用靠近地面的回路可阻止电路的辐射，因此，高速逻辑电路需要地面来减少辐射和不必要的串扰。

## 1.1 天线的辐射

置于坐标系中心的天线，通常沿着径向辐射球面波。当场点距离很远时，球面波可近似为平面波。平面波非常有用，因为它们可以简化问题，但由于需要无穷大功率的源，所以物理上并不存在这种波。

电磁波的传播方向和功率密度可用坡印廷（Poynting）矢量来描述，它是电场和磁场的矢量积，常用  $\mathbf{S}$  表示：

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* \quad \text{W/m}^2$$

场的幅度通常都用均方根值（RMS）表示，式中  $\mathbf{H}^*$  是磁场的共轭复数。在远区场，电场与磁场成正比，比例常数为自由空间波阻抗  $\eta$  ( $376.73 \Omega$ )。

$$|\mathbf{S}| = S = \frac{|\mathbf{E}|^2}{\eta} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-1)$$

由于坡印廷矢量是电场和磁场的矢量积, 因此它与电场和磁场都垂直, 三者构成了右手坐标系:  $(\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{S})$ 。

考虑一对同心球, 天线置于中心。天线周围的场随着  $1/R$ ,  $1/R^2$ ,  $1/R^3$  等各项而减小。常数项需要辐射功率随着距离而增长, 这样功率并不能守恒。对于与  $1/R^2$ ,  $1/R^3$  和更高项成正比的各场项, 功率密度随着距离的增加而减小的量比球面积的增加量要快得多。内球上的能量比外球上的能量要大, 这部分能量并不辐射, 但围绕着中心天线来回交换, 这就是近场项。只有坡印廷矢量的  $1/R^2$  项 (场的  $1/R$  项) 表示辐射功率, 因为球面积是随着  $R^2$  增加的, 它给出恒定的积, 所有辐射功率通过内球面全部传播到外球面上。输入电抗的符号取决于近场占优场的类型: 电 (容性的) 或磁 (感性的)。由于是近场, 在谐振点 (零电抗) 两者的储能是相等的。储能增加, 则电路的  $Q$  值增加, 阻抗带宽变窄。

远离天线时, 我们只考虑辐射场和功率密度。由于同心球的功率流相同, 则

$$4\pi R_1^2 S_{1,\text{avg}} = 4\pi R_2^2 S_{2,\text{avg}}$$

平均功率密度与  $1/R^2$  成正比。考虑同一坐标立体角内的两个球上不同的面元。天线仅沿径向方向辐射, 因此, 没有功率沿  $\theta$  或  $\phi$  方向传播。功率在两个面元之间的通量管内流通, 不仅仅是平均坡印廷矢量与  $1/R^2$  成正比, 而且每一部分的功率密度也与  $1/R^2$  成正比, 即

$$S_1 R_1^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi = S_2 R_2^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi$$

对于辐射波, 既然  $S$  正比于  $1/R^2$ , 那么电场  $E$  就与  $1/R$  成正比。为了消去  $1/R^2$  以及计算上方便, 定义辐射强度为

$$U(\theta, \phi) = S(R, \theta, \phi) R^2 \quad \text{W/solid angle}$$

辐射强度只与辐射方向有关, 且在所有的距离上都相同。探针围绕着天线沿着一个圆 (常数  $R$ ) 移动, 可测出天线的相对辐射强度 (方向图)。当然, 在通常情况下都是天线旋转而探针固定。

有些方向图已经有自己的名称。球面坐标系中角度恒定的方向图被称为圆锥切面 (常数  $\theta$ ) 或大圆切面 (常数  $\phi$ )。当  $\phi=0^\circ$  或  $\phi=90^\circ$  时, 大圆切面就是主平面方向图。其他命名的切面也可以用, 但它们的名称取决于特定的测量定位器。仔细注释这些方向图很有必要, 以避免人们将以不同定位方式测量的各方向图混淆。测量的方向图有三种刻度描绘: (1) 线性 (功率方向图), (2) 平方根 (场强强度), (3) 分贝 (dB)。分贝刻度使用得最多, 因为它可显示更多的低电平响应 (副瓣)。

图 1-1 绘出了方向图中的许多特性。半功率波束宽度有时也被称为波束宽度。在一些应用场合,  $1/10$  功率波束宽度和零点波束宽度也常被使用。该图是偏轴馈电的抛物面

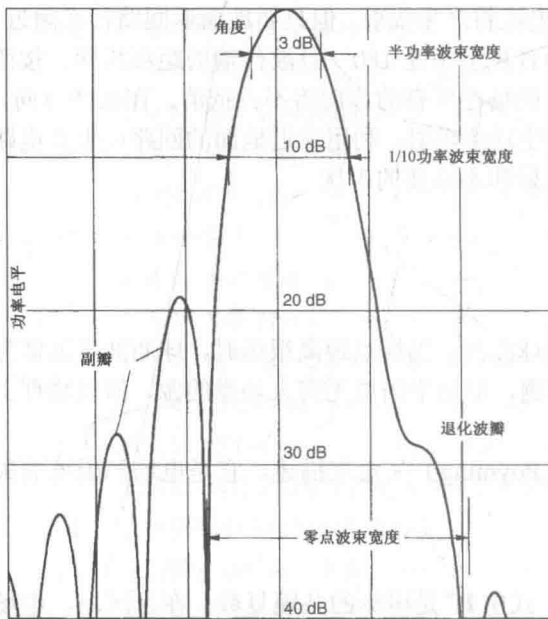


图 1-1 天线方向图特性

天线的方向图。当第一副瓣进入主波束时，退化的波瓣将出现并形成一肩膀。馈源位于抛物线的轴上时，第一副瓣相等。

## 1.2 增益

增益是衡量天线将输入给它的功率按特定方向定向辐射能力的指标，通过峰值辐射强度来测量。考虑输入功率为  $P_0$ ，各向同性天线在距离为  $R$  处的辐射功率密度为： $S=P_0/4(\pi R^2)$ 。由于各向同性天线在所有方向均匀辐射，其辐射功率密度  $S$  为辐射功率除以球面积  $4\pi R^2$ 。这里假定各向同性辐射器效率为 100%。实际天线的增益增加了峰值辐射方向的功率密度，则

$$S = \frac{P_0 G}{4\pi R^2} = \frac{|\mathbf{E}|^2}{\eta} \quad \text{或} \quad |\mathbf{E}| = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{P_0 G \eta}{4\pi}} = \sqrt{S \eta} \quad (1-2)$$

增益是通过限制辐射球其他部分的辐射形成定向辐射而获得的。一般来讲，增益用于描述具有有偏增益方向图的天线特性：

$$\begin{aligned} S(\theta, \phi) &= \frac{P_0 G(\theta, \phi)}{4\pi R^2} \quad (\text{功率密度}) \\ U(\theta, \phi) &= \frac{P_0 G(\theta, \phi)}{4\pi} \quad (\text{辐射强度}) \end{aligned} \quad (1-3)$$

天线的相对功率辐射可用对辐射强度在辐射球表面的积分并除以输入功率  $P_0$  来衡量，或称为天线效率：

$$\frac{P_r}{P_0} = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{G(\theta, \phi)}{4\pi} \sin\theta \, d\theta \, d\phi = \eta_e \quad (\text{效率})$$

式中， $P_r$  是辐射功率。天线的材料损耗或因阻抗失配引起的反射功率降低了天线的辐射功率。在本书中，上式的积分和随后的那些公式用于概念的表达上要比在天线设计过程中的运算操作多得多。在实际中，只有通过理论化简可以找到闭合解时才做精确积分。大多数积分都采用数值方法，把积分分成小段并进行加权求和。用测量值做积分也是有用的，通过平均减少随机误差，从而提高计算结果。

在一个系统中，发射机的输出阻抗或接收机的输入阻抗与天线的输入阻抗可能并不匹配。峰值增益出现在接收机阻抗与天线共轭匹配的情况下，这意味着电阻部分相同，而电抗部分幅度相同但符号相反。精确的增益测量需要在天线和接收机之间加一个调谐器以使两者共轭匹配。另外，失配损耗必须在测量后通过计算消除。对于一个给定系统，要么单独考虑失配的影响，要么将天线按系统阻抗测量，把失配损耗看做效率的一部分。

例：天线增益为 15 dB，输入功率为 3 W，计算离天线 10 km 处的峰值功率密度。

首先将 dB 增益转换为比值： $G=10^{15/10}=31.62$ 。功率扩散在半径 10 km 的球面上，球面积为  $4\pi(10^4)^2 \text{m}^2$ 。故功率密度为

$$S = \frac{(3 \text{ W})(31.62)}{4\pi \times 10^8 \text{ m}^2} = 75.5 \text{ nW/m}^2$$

由式 (1-2) 求出电场强度为

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{S \eta} = \sqrt{(75.5 \times 10^{-9})(376.7)} = 5333 \mu\text{V/m}$$

虽然增益通常都是相对各向同性天线的，但有些天线的增益也以  $\lambda/2$  偶极子为参考，其全向增益为 2.15 dB。

如果将天线近似为点源，由式 (1-2) 可算出辐射电场强度为



$$E(\theta, \phi) = \frac{e^{-jkR}}{R} \sqrt{\frac{P_0 G(\theta, \phi) \eta}{4\pi}} \quad (1-4)$$

该式只需要天线尺寸与辐射距离  $R$  相比很小即可。式 (1-4) 没有考虑电场的方向, 即极化。电场的单位是伏/米。确定远场方向图可以由式 (1-4) 与  $R$  相乘, 并去掉相位项  $e^{-jkR}$  获得, 因为相位仅仅意味着远区场的参考点为另外一点。远区电场  $E_{\text{ff}}$  的单位是伏:

$$E_{\text{ff}}(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{P_0 G(\theta, \phi) \eta}{4\pi}} \quad \text{或} \quad G(\theta, \phi) = \frac{1}{P_0} \left[ E_{\text{ff}}(\theta, \phi) \sqrt{\frac{4\pi}{\eta}} \right]^2 \quad (1-5)$$

在分析过程中, 我们经常将输入功率归一化到 1W, 这样很容易由电场与常数  $\sqrt{4\pi/\eta} = 0.1826374$  相乘求得增益。

### 1.3 有效面积

天线捕获外来电磁波功率并传递部分功率给终端。若给定入射波的功率密度  $S$  和天线的有效面积  $A_{\text{eff}}$ , 那么传递给天线终端的功率为二者的乘积:

$$P_d = S A_{\text{eff}} \quad (1-6)$$

对于口径天线, 比如喇叭、抛物面或平面阵天线, 其有效面积为天线的物理面积与口径效率的乘积。一般来讲, 材料、口径分布和失配引起的损耗会降低有效面积与物理面积的比值。对于抛物面反射器, 典型口径效率值约为 55%。即使天线的物理面积无穷小, 比如偶极子, 天线因消耗电磁波功率也是有有效面积的。

### 1.4 路径损耗<sup>[1]</sup>

将发射天线的增益与接收天线的有效面积联系起来可以计算传递功率和路径损耗。由接收天线功率密度式 (1-3) 和接收功率式 (1-6) 联立求解得到路径损耗为

$$\frac{P_d}{P_t} = \frac{A_2 G_1(\theta, \phi)}{4\pi R^2}$$

这里, 天线 1 发射, 天线 2 接收。如果天线处于线性、各向同性媒质中, 那么天线的收发方向图是完全相同的 (互易的)<sup>[2]</sup>。当天线 2 发射, 天线 1 接收时, 则路径损耗为

$$\frac{P_d}{P_t} = \frac{A_1 G_2(\theta, \phi)}{4\pi R^2}$$

由于响应是互易的, 故路径损耗相等, 合并并消除相同项后得

$$\frac{G_1}{A_1} = \frac{G_2}{A_2} = \text{常数}$$

由于天线是任意的, 故其比值必须为常数。考虑两个大口径之间的辐射<sup>[3]</sup>, 可获得该常数为

$$\frac{G}{A} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (1-7)$$

这样, 我们就得到了用收发天线增益或者有效面积表示的路径损耗:

$$\frac{P_d}{P_t} = G_1 G_2 \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \frac{A_1 A_2}{\lambda^2 R^2} \quad (1-8)$$