

天线设计手册

主编 A. W. 拉奇 K. 米尔恩
A. D. 奥尔弗 P. 奈特



解放军出版社

天线设计手册

翻 译 (按章节顺序)

李亚军 刘维莉 高风玉 蔡杏仙 罗小武
孙广祥 牛忠霞 姚定一 李善文 叶堂隆

校 米鹤颐 孟建锡 柳智厚

总审校 茅于宽

解 放 军 出 版 社

军 政 图 书 教 材

解 放 军 出 版 社

天线设计手册

中国人民
解放军 信息工程学院

解放军出版社出版发行

(北京平安里三号)

信息工程学院印刷厂印刷

开本 787 × 1092 毫米 1/16 75.25 印张 1875 千字数

1988 年 6 月 第 1 版

1988 年 6 月 (郑州) 第 1 次印刷

ISBN 7-5065-0569-x/TN.7

前 言

《天线设计手册》是继1977年在伦敦电气工程师学会举行的一次天线与传播问题专业组会议后，两位编辑在一次讨论中构思出来的。最初想编写一部论述天线设计原理与应用的著作，主要侧重前十年天线的发展情况。为了提供一部全面论述从低频到微波频段范围天线设计的论著，本书向天线领域中享有国际声望的专家们约稿。

然而，由于工作量过大，完全实现这项任务受到了限制。本书删去了很多值得讨论的课题，因而，尽管这套书无疑涉及面很广，但编者认为还可编写几册书来补充它。为最大限度压缩文章篇幅，我们要求撰稿者仅在影响理解设计原理，而现有书籍又无法直接查找的地方，才引入详细的理论叙述。虽然本书注重提供大量对天线设计过程有用的公式和数据，但一开始就认为：充分理解所涉及的基本原理，对良好的设计实践与促进革新是很有必要的。

过去几十年间，对天线及相应的设计和测量技术的发展所作的巨大努力，或许并不令人振奋。电磁波频谱资源是有限的，随着通信、导航和雷达系统应用的迅猛增加，要更有效地传播和接收电磁辐射，将遇到越来越大的困难。频谱拥挤不仅导致对辐射器件工作性能的要求越来越高，而且迫使人们去寻求更先进的设计方法。

对更精确设计的需求与强有力的数字计算机相结合，使天线设计从经验方法逐步转变成数学科学。这一倾向在波长较短的领域中更为明显。在那里，数字计算机和数学方法相结合已在准光学天线设计中获得广泛应用。建立在几何光学、物理光学、几何绕射理论、付里叶变换理论和球面波分析基础上的计算机程序，目前已成为现代天线设计的基本工具。这些分析方法创造性的应用，不仅改进了天线辐射特性的计算，而且加深了对某些基本物理现象的理解。

本书第一卷提供了数学背景知识和在设计反射器天线与透镜天线（包括主馈源）中使用的各种数学方法的大量实例。准光学天线（包括混合结构，在该结构中，反射器和透镜与一复杂的阵列馈源连用）特别适于计算机辅助设计方法的应用，因而可改进其主要的工作性能。这些课题将在第一卷的二至六章论述。

低、中增益的微波天线用途很广，其一种应用是作为初级馈源。第七章为各种辐射器提供了设计数据，其中包括：螺旋线天线、螺旋形天线、缝隙天线、微带天线、背射天线、介质棒天线和喇叭天线。

改进天线性能，同时必须相应地改进电测量技术。过去十年中，天线度量学取得了大量有意义的进展。这一重要领域的主要发展情况在第一卷最后一章讨论。

阵列天线的基本原理和设计，是过去十年间人们注意的焦点。虽然在全面利用大型相控阵天线方面仍存在成本高的障碍，但可以预料，阵列天线的应用将逐日俱增。基于本书对这种技术重要性的认识，第二卷前五章都用来介绍阵列技术。其中涉及的课题除信号处理阵外，还包括线阵、面阵、共形阵以及圆环阵。很明显，阵列天线与集成电路相结合，将为未来天线性能的灵活性与低价格带来很多方便。

在实际中，许多天线都是在天线罩后或在天线罩内工作的。在此情况下，天线罩的电磁特性应视为实现整个系统性能的一个因素。第十四章论述了这一重要课题，并为各种类型的

天线罩提供了设计数据。

第二卷最后几章讨论从低频到超高频频段的天线和同轴元件的设计。一般来说，这些频段上的设计数据没有微波频段内的设计数据多。借此机会，本书把有关的设计资料汇集在一起，其中包括广为分散和相当稀少的文献中的设计资料。

在编写这两卷书的过程中，编者非常感谢书中的各位作者，他们都是各自专业领域中的著名专家，在百忙中抽出时间组织和准备稿件，并以超凡的耐心参加这项耗时几年才完成的工程。这里论及的工作，是许多工程师和科学家经过多年努力完成的。尽管编者作出了明显的努力来确保参考文献和称誉的准确性，但仍难免出现错误和疏忽，在此望多加原谅。

作为编者，我们试图将各个来稿编纂成相互联系的整体，因此对来稿作了某些修改或删除。我们愿对由此引起的各章中的删节、印刷错误及其它失误负责，并敬请读者指出这些问题，以便在将来的版本中更正。虽然我们努力使文章中的标号标准化，但是，这两卷书体现了二十八位作者的成果和个人风格，因工作量过大，故未考虑到各章之间全面的相互协调。矢量符号有的采用黑体字 E 或 H 表示，有的则用加横杠表示，如 \bar{E} 、 \bar{H} 。参考文献、方程式及图表均按章节顺序编号。参考文献列在每章之后。各卷尾附有广泛的索引。

编者希望这部手册对实际设计工程师和研究天线理论的学生有参考价值，在编写过程中，认为读者至少应具备电磁理论和天线技术的专业知识，这里所提供的成文材料写得十分详细，足以将具有这一水平的读者的研究引向深入。第一章中对天线基本特性的介绍，指出了所需要的基础知识，包括了进一步深入研究的参考文献。

最后，让我们向那些承诺使用图表、照片和其它资料的各组织和学会表示衷心的感谢。

译者的话

本书是英国1983年出版的THE HANDBOOK of ANTENNA DESIGN (A. W. Rudge等编)的中译本。全书分上下两卷,共十八章。各章作者都是国际上杰出的天线专家。内容包括近年来天线研究方面的最新成果,从甚低频到微波各波段的新型天线和工作体制。在叙述方法上,既考虑到天线设计和实际应用的需要,又有理论上简单明确的叙述。书中图表和应用实例多而清晰,是一本难得的天线设计工具书和实用性很强的无线电工程专著,可供天线理论研究、工程设计和制造、安装、测试和科技人员、无线电工程技术人员及大专院校师生参考。解放以来,我国仅在1965年出版过一本天线工程手册(译自美国的)且仅出版了上册,因此,本书的中文版将填补这一空白。

上卷包括天线基本原理、反射镜天线、透镜天线和馈源的设计方法和应用实例,介绍了混合天线、低增益和中等增益微波天线的设计应用及天线测量的各种实际问题。下卷包括各种天线阵(线阵、面阵、共形阵和圆形阵等)的基本原理和设计方法,阵信号处理天线和天线罩。从甚低频到微波各个波段的的天线、馈电单元和传输线的设计方法以及应用实例等内容。

本书的翻译工作是集体完成的。李亚军、刘维莉合译第1~3章,高风玉译第4~7章,蔡杏仙译第8章,罗小武译第9章,孙广祥译第10~12章,牛忠霞译第13、14章,姚定一译第15章,李善文译第16、17章,叶堂隆译第18章。柳智厚、孟建锡校对了部分书稿,米鹤颐统校了全部书稿;茅于宽教授在百忙中,花了很多精力,仔细地总审校了全部书稿;吴成英、樊玉仙、吴楚等同志在翻译过程中也曾给予帮助;高风玉、牛忠霞、李善文等同志为本书的出版、印刷做了大量的工作,在此一并感谢。

由于我们水平有限,书中不妥或错误之处诚望读者批评指正。

于郑州解放军信息工程学院

1987年3月

序 言

由著名学者所编著的“天线设计手册”是一本实用价值很高的书。它提供天线的基本原理以及各种天线的设计准则；它用清晰的物理概念说明各种天线的性能和限制。对近廿年来发展起来的处理天线问题的理论介绍既简洁又明确，为进一步深入学习提供了坚实的基础。对目前各种高性能的新型天线的设计也有详细的介绍。它是大学本科生和研究生的好参考书；更是天线理论研究与实际工作者必备的手册。本书的翻译出版将为我国天线工作者提供一本好书。

茅于宽

西北电讯工程学院教授、
中国电子学会
天线专业学会主任

目 录

第一章	天线的基本特性	
1.1	引言	1
1.2	电磁场	4
1.3	互易原理	6
1.4	辐射源周围的场区划分	7
1.5	方向图	9
1.6	增益、方向性和效率	12
1.7	极化特性	16
1.8	阻抗	19
1.9	带宽	20
1.10	天线噪声温度	21
1.11	场等效原理	22
1.12	孔径辐射	23
1.13	阵列辐射	29
1.14	电流元辐射	32
1.15	行波源的辐射	34
1.16	频率无关天线	35
1.17	天线的再辐射	36
1.18	参考文献	38
第二章	准光学天线分析方法	
2.1	引言	39
2.2	反射器分析的基本散射理论	39
2.2.1	曲面微分几何	39
2.2.2	渐近解: 波前与射线	42
2.2.3	用于反射器的几何光学	43
2.2.4	物理光学	47
2.2.5	标量物理光学	52
2.2.6	几何边缘绕射理论	56
2.3	球面波原理	63
2.3.1	基本特性	63
2.3.2	球面波系数的计算	75
2.4	参考文献	80
第三章	准光学天线设计与应用	
3.1	主焦馈抛物面反射器	84
3.1.1	主要的辐射特性	84
3.1.2	不规则曲面误差的影响	84
3.1.3	馈源散焦	86

3.1.4	孔径遮挡	92
3.1.5	伞状反射器	104
3.2	卡塞格伦系统	106
3.2.1	几何设计依据	106
3.2.2	效率分析	111
3.2.3	改进的设计方法	122
3.2.4	等效抛物面	122
3.2.5	极化扭转反射器	122
3.2.6	频率选择副反射器	123
3.3	偏置抛物面反射器天线	123
3.3.1	引言	123
3.3.2	单偏置反射器分析	126
3.3.3	单偏置反射器天线的电性能	132
3.3.4	多点波束天线设计过程	147
3.3.5	双反射器偏置天线	156
3.4	其它反射器类型	164
3.4.1	成形波束光学反射器	164
3.4.2	球形反射器	168
3.4.3	非球形扫描反射器	169
3.4.4	其它类型	172
3.5	成形波束反射器	173
3.5.1	成形波束反射器天线设计	174
3.5.2	成形波束反射器技术的实例	177
3.6	反射器结构与材料	185
3.6.1	地面天线系统	187
3.6.2	星载反射器系统	189
3.6.3	开伞式宇宙飞船反射器	196
3.6.4	未来开伞式天线	197
3.7	透镜天线	199
3.7.1	用于多波束天线的约束透镜	199
3.7.2	约束透镜的计算机模拟	211
3.8	低噪声天线	215
3.8.1	引言	215
3.8.2	热噪声分量	215
3.8.3	空间通信地面站天线	217
3.8.4	减小干扰的低副瓣	219
3.8.5	噪声消除技术	221
3.9	参考文献	222
第四章	初级馈源天线	
4.1	一般原理	234

4.2	极化的定义	236
4.3	偶极子照射和孔径场	237
4.4	实际偶极子型馈源	210
4.5	主焦单喇叭和波导馈源	212
4.6	多模喇叭馈源	214
4.7	混合模喇叭馈源	247
4.8	跟踪馈源	255
4.9	多倍频程宽频带初级馈源	257
4.10	初级馈源的数学模型	259
4.11	偏置反射器天线的初级馈源	271
4.12	参考文献	279
第五章	混合天线	
5.1	引言	283
5.2	混合天线系统的口径扫描基本原理	283
5.2.1	引言	283
5.2.2	平面口径: 变换、正交波束和扫描极限	284
5.2.3	没有付里叶变换的扫描系统: 横向馈源	288
5.2.4	口径后面有一种付里叶变换: 多波束系统	288
5.2.5	具有双变换的付里叶扫描系统: 重叠子阵原理	289
5.3	限定扇形区域扫描的混合反射面系统	293
5.3.1	引言	293
5.3.2	偏轴抛物面的扫描特性	293
5.3.3	偏轴反射面的横向馈源	294
5.3.4	偏轴抛物面的付里叶变换馈源	298
5.3.5	抛物面截面的偏轴特性	300
5.3.6	双反射面和反射面—透镜限定的扫描系统	303
5.4	混合透镜 / 阵列扫描系统	306
5.4.1	引言	306
5.4.2	扫描透镜 / 阵列组合	307
5.4.2.1	限定扇形区域扫描	307
5.4.2.2	圆顶帽天线	313
5.4.3	透镜馈源和反射阵列	315
5.5	辐射方向图控制	316
5.5.1	边瓣控制	316
5.5.2	混合系统中有源方向图的控制	319
5.6	参考文献	320
第六章	多波束天线	
6.1	引言	323
6.2	MBA 的组成和性能特点	323
6.2.1	MBA 系统的组成	323

6.2.2	MBA 的结构	325
6.2.3	方向图形成	326
6.2.4	波束扫描	329
6.2.5	主要的限制	332
6.2.6	自由度 (DOF)	337
6.3	波束形成网路 (BFN)	338
6.3.1	具有环行器开关的 BFN	339
6.3.2	具有可变功率分配器的 BFN	341
6.3.3	转换系统	343
6.3.4	具有 VPD 和可变移相器的 BFN	344
6.3.5	其它类型的波束形成网路	345
6.4	方向图综合	346
6.5	特性评价	347
6.6	参考文献	353
第七章	低和中等增益的微波天线	
7.1	引言	354
7.2	螺旋天线和横向螺旋天线	354
7.2.1	引言	354
7.2.2	螺旋天线 (单绕螺旋天线)	354
7.2.3	多线、双线和四线绕制的螺旋天线	358
7.2.4	多线绕制的圆锥螺旋天线	360
7.2.5	平面螺旋天线	362
7.3	缝隙天线	365
7.3.1	基本概念	365
7.3.2	背腔式缝隙天线	366
7.3.3	宽波段缝隙天线: T 型隔板馈电和单级缝隙天线	367
7.4	微带天线	369
7.4.1	引言	369
7.4.2	微带传输线的基本特性	369
7.4.3	微带谐振器的辐射机理	371
7.4.4	矩形微带天线的辐射方向图	372
7.4.5	方向系数和增益	373
7.4.6	导纳和等效网络	374
7.4.7	谐振器的 Q 值	377
7.4.8	非矩形形状的谐振器	377
7.4.9	微带天线阵	378
7.5	背射天线	380
7.5.1	短背射天线	380
7.5.2	长背射天线	381
7.5.3	设计方法	383

7.6	介质天线	385
7.6.1	长圆柱介质棒	385
7.6.2	短圆柱介质棒	393
7.6.3	非圆柱形的介质天线	394
7.7	简单喇叭天线	396
7.7.1	扇型喇叭	396
7.7.2	角锥喇叭	401
7.7.3	圆锥喇叭	402
7.8	多模喇叭	404
7.8.1	多模矩形喇叭	404
7.8.2	多模圆锥喇叭	406
7.9	波纹喇叭	406
7.9.1	波纹面的传播性	406
7.9.2	波纹圆柱波导	407
7.9.3	波纹圆锥喇叭	410
7.10	参考文献	411
第八章	天线测量	
8.1	引言	412
8.2	场地考虑	412
8.2.1	一般概念	412
8.2.2	距离准则	413
8.3	阻抗测量	415
8.4	电流分布测量	416
8.5	近场扫描技术	418
8.5.1	引言	418
8.5.2	平面技术	421
8.5.3	柱扫描	429
8.5.4	球面技术	432
8.5.5	扫描技术的比较	438
8.5.6	近场扫描的测试场	440
8.5.7	平面波合成技术	441
8.6	中距离技术	444
8.6.1	紧缩测试场	444
8.6.2	散焦技术	445
8.6.3	外推技术	447
8.7	一般的远场测量	451
8.7.1	方向性 (ESG)	451
8.7.2	增益 (ESG)	453
8.7.3	相位中心	458
8.7.4	轴线测量	462

8.8	散射测量	462
8.9	室外测试场	463
8.9.1	引言	463
8.9.2	误差来源	463
8.9.3	高架天线测试场	465
8.9.4	倾斜测试场	467
8.9.5	地面反射测试场	467
8.10	室内测试场	468
8.10.1	引言	468
8.10.2	矩形室	468
8.10.3	锥形暗室	470
8.11	测试场评价	471
8.11.1	引言	471
8.11.2	基本考虑	472
8.11.3	干涉曲线的分析	473
8.11.4	自由空间 USWR 技术	475
8.11.5	天线方向图比较技术	477
8.11.6	外来反射的诊断	479
8.11.7	反射电平与测试参数的关系	481
8.12	参考文献	483
第九章	线 阵	
9.1	引言	488
9.1	阵激励的设计	488
9.1.1	窄波束低副瓣方向图	490
9.1.2	方向图综合	522
9.1.3	超方向性阵列	531
9.1.4	稀疏阵列	541
9.1.5	阵列的公差与限制	546
9.2	阵馈源	552
9.2.1	谐振阵列	552
9.2.2	行波阵	557
9.2.3	总线馈源和分配馈源	565
9.2.4	移相器和子阵列波瓣	569
9.3	阵元	573
9.3.1	偶极子	573
9.3.2	波导隙缝	578
9.3.3	扫描补偿阵元	581
9.3.4	印刷电路天线	586
9.3.5	中等增益单元	592
9.4	参考文献	592

第十章 平面阵

引言	600
10.1 阵列激励	600
10.1.1 阵列栅格	600
10.1.2 波束宽度	601
10.1.3 栅瓣	604
10.1.4 量化瓣	607
10.1.5 方向性	607
10.1.6 平面阵的激励	611
10.2. 阵列馈源	615
10.2.1 固定波束阵列	615
10.2.2 在一个平面内的电扫描	619
10.2.3 两平面内的电扫描	619
10.3 互耦效应	622
10.3.1 基础知识	623
10.3.2 逐元法	630
10.3.3 周期室法	647
10.3.4 扫描补偿	657
10.4 参考文献	660

第十一章 共形阵

11.1 引言	666
11.2 共形阵的分析	667
11.2.1 通论	667
11.2.2 阵的形态特征	668
11.2.3 内部互耦合和外部互耦合	670
11.2.4 多模口径单元: 广义散射系数	671
11.2.5 互导纳和散射系数	673
11.3 圆柱口径阵	675
11.3.1 导体圆柱上磁流的场	675
11.3.2 互导纳和自导纳的调和级数表达式	676
11.3.3 用几何绕射理论 (GTD) 计算表面场	677
11.3.4 互导纳的几何绕射理论 (GTD) 表达式	679
11.3.5 辐射方向图的计算	683
11.4 大单元数目的圆柱阵: 周期结构法	686
11.4.1 周期无限阵的模式	686
11.4.2 本征激励和本征方向图及其在阵分析中的应用	687
11.4.3 导纳矩阵本征值的计算	689
11.4.4 任意激励阵的“RGP”, 单一激励的单元“RGP”	690
11.4.5 孔径匹配和单元方向图的设计	692
11.4.6 数值举例及其讨论	692

11.5	互导纳的几何绕射理论 (GTD) 计算: 对一般凸形表面的推广	694
11.6	圆锥阵	697
11.6.1	自导纳和互导纳	697
11.6.2	辐射方向图	699
11.7	致谢	704
11.8	附录	704
11.8.1	矩形波导和圆形波导的模式导纳	704
11.8.2	矩形波导和圆形波导辐射器矢量模函数的付立叶变换	705
11.8.3	FOCK 函数	707
11.8.4	大导体圆柱上口径辐射方向图的计算	708
11.8.5	周期圆柱阵的本征激励	711
11.9	参考文献	712
第十二章	圆形阵	
12.1	引言	714
12.2	波束的同相激励	714
12.2.1	宽带性能	716
12.2.2	波束同相方向图的电子扫描	716
12.3	圆形阵的幅模激励和相模激励	718
12.3.1	连续圆形阵相模和幅模的概念	718
12.3.2	有限数目无方向性单元圆形阵中的相模	721
12.3.3	方向性单元圆形阵中的相模	722
12.4	圆形阵中的相模激励网络	725
12.5	圆形阵中的互耦合效应	728
12.6	圆形阵的应用	728
12.6.1	通信应用	728
12.6.2	雷达应用	729
12.6.3	测向技术中的圆形阵	731
12.7	参考文献	735
第十三章	阵信号处理天线	
13.1	引言	737
13.1.1	ASP 系统的应用	737
13.2	雷达用的 ASP 接受系统	738
13.2.1	多波束	738
13.2.2	单元采样多波束	740
13.2.3	多波束与奈奎斯特频率波束扫描的等效	741
13.2.4	泛光发射系统的付瓣电平	744
13.2.5	ASP 与其它雷达处理系统的兼容	744
13.3	组合发射和接收天线系统中的 ASP 技术	745
13.3.1	发射时脉内扫描的角脉冲压缩	745
13.3.2	使用 ASP 的发射和接收阵的稀布问题	746

13.3.3	发射和接收阵的多波束工作	748
13.3.4	发射阵的脉内时间采样	748
13.3.5	脉内频率扫描	748
13.3.6	定向去相关发射波束	750
13.3.7	包括多站系统的其它可采用的结构	752
13.3.8	信号处理技术	752
13.4	乘法信号处理和后解调综合口径技术	754
13.4.1	干涉仪	754
13.4.2	带有乘法处理器的干涉仪	755
13.4.3	相乘阵原理	756
13.4.4	相乘阵的空间频率响应	758
13.4.5	相乘阵的多源激励	760
13.4.6	相乘阵的信、噪特性	761
13.4.7	后解调综合口径天线	762
13.5	相干综合口径天线	764
13.5.1	原理	764
13.5.2	未聚焦综合口径	765
13.5.3	聚焦综合口径	767
13.5.4	最小采样数	769
13.5.5	信号处理硬件	770
13.5.6	雷达的脉冲重复频率 (PRF)	770
13.5.7	多普勒频率解释	770
13.5.8	雷达性能	771
13.5.9	对目标闪烁和运动的响应	771
13.5.10	应用	772
13.6	零向调向	772
13.6.1	引言	772
13.6.2	多重零值点	773
13.6.3	多元零向调向阵	774
13.6.4	正交波束形成网络	776
13.6.5	单零向调向的多元阵	778
13.6.6	付瓣对消器	778
13.6.7	讨论	780
13.7	自适应零向调向系统	782
13.7.1	引言	782
13.7.2	付瓣对消器	783
13.7.3	自适应阵	788
13.8	参考文献	821
第十四章	天线罩	
14.1	引言	825

14.1.1	定义	825
14.1.1	历史与背景	825
14.1.3	结构	825
14.1.4	天线罩的缺点和优点	826
14.2	天线罩的基本要求	828
14.2.1	一般要求	828
14.2.2	环境要求	828
14.3	介质天线罩结构的基本电特性	829
14.3.1	传输参数	829
14.3.2	单层结构的传输	829
14.3.3	A型夹层结构的传输	830
14.3.4	B型夹层结构的传输	832
14.3.5	C型夹层和更多层结构的传输	833
14.4	成形天线罩的设计	838
14.5	天线罩材料	841
14.5.1	材料及其要求	841
14.5.2	纤维加强树脂板	843
14.5.3	树脂纤维板的芯层材料	848
14.5.4	高温材料	851
14.5.5	填充和人造介质	858
14.5.6	抗雨侵蚀的材料	859
14.6	天线罩的结构	860
14.6.1	似球型刚性天线罩(通常在陆地和船上使用)	860
14.6.2	非球型刚性天线罩(空用)	862
14.7	空载天线罩	864
14.7.1	宽带传输天线罩的设计	865
14.7.2	多通带天线罩的设计	872
14.7.3	象差及减小的方法	873
14.7.4	天线罩引起的交叉极化及其减小	877
14.7.5	减小天线罩反射的问题	884
14.7.6	天线罩硬件的影响	887
14.7.7	天线罩硬件引起性能变坏的预测及减小	889
14.8	地面和船载天线罩	889
14.8.1	对地面天线罩环境的考虑	889
14.8.2	空气支撑天线罩	892
14.8.3	刚性天线罩	893
14.9	未来天线罩的发展	898
14.10	致谢(从略)	899
14.11	参考文献	899

第十五章 甚低频、低频和中频天线