



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

天线工程手册

Antenna Engineering Handbook

主编 聂在平



电子科技大学出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

Antenna Engineering Handbook

天线工程手册

主编 聂在平



电子科技大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

天线工程手册 / 聂在平主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-5647-2166-4

I. ①天… II. ①聂… III. ①天线—技术手册 IV. ①TN82-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 005669 号

天线工程手册

主编 聂在平

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

出 版 人: 徐守仁

特邀编辑: 张 俊 朱 丹

责任编辑: 周 岚 雷晓丽

责任校对: 刘 愚

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸: 185mm×260mm 印张 96.75 字数 2848 千字

版 次: 2014 年 7 月第一版

印 次: 2014 年 7 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-2166-4

定 价: 680.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

前 言

天线是通信、雷达、导航、遥测、遥感、射频识别等现代无线信息系统射频前端中极为重要的部件。作为天线设计的工具书,《天线工程手册》是无线电工程师最为重要的工具书之一。2002年,由电子科技大学林昌禄教授任主编,聂在平教授任副主编的国内第一本《天线工程手册》由电子工业出版社出版。该书刚一出版就受到热烈的欢迎,很快即告售罄,完全出乎大家的预料。之后的近十年中,很多读者来函询问购书事宜都无法满足,不能不说是一大憾事。作为当下国内天线设计方面最为全面的工程手册,该手册的出版对从事各类无线信息系统设计、研发的科研院所和相关单位,特别是具体从事天线设计、研发的工程师及高校师生具有较大的实用意义和参考价值。但是,由于当时条件所限,加之时间匆忙,该手册内容中错、漏、笔误甚多,亟须勘误和补正。同时,近十多年天线理论的发展和天线工程技术的进步亦应在本手册中有所反映。正是出于上述考虑,我们组织了高校和科研院所的青年教师和青年专家对《天线工程手册》2002年版进行勘误、修订、补正;并结合天线工程技术的新发展,增加了若干章节内容。由于原主编林昌禄教授已仙逝,现由原副主编聂在平教授负责新版相关内容的修订和增补,并由电子科技大学出版社重新出版《天线工程手册》,希望能弥补以前的种种遗憾。

从内容上说,此次出版的《天线工程手册》既包含了天线理论和技术基础的各个主要方面,如基本概念、电磁场基本理论、电磁辐射原理及相关分析方法等;也按照工程分类方法对各大天线门类,包括线天线、口径天线、阵列天线等进行了全面、深入的归纳;同时,结合实际应用需求,整理了若干类不同用途的天线,包括通信、雷达、测向等各类应用的天线形式及相关设计方法;另外,还单独开列了天线散射、天线测量等方面的专题。为使本手册在生产、科研活动中能体现出较高的应用效率,本手册淡化了过程推导,重点对各类天线的基本原理、设计方法、电性能、相关参数影响等进行归纳总结,并力求以公式、图表、曲线等方式展现出来,让读者更容易借鉴和使用。同时,也给出了大量的实例供读者在设计时参考。

此次出版的《天线工程手册》共30章。除勘误、修订、补正之外,大部分章节内容同于2002年版。为反映近年来天线技术新的发展,在此次出版中增加了若干新的章节内容。其中,信号处理天线、时域天线、移动通信天线、天线的雷达散射截面这4章是在2002年版的基础上充实了大量内容或大篇幅重写而完成的。第18章信号处理天线的新内容主要由电子科技大学杨鹏博士撰写,而第2节数字阵列天线和第30章第11节数字阵列天线测量技术则由中国船舶重工集团公司第724研究所天线微波部主任、研究员陈文俊博士撰写;

第 19 章时域天线的新内容由电子科技大学副教授欧阳骏博士撰写；第 22 章移动通信天线的新内容由电子科技大学副教授宗显政博士撰写；第 28 章天线的雷达散射截面的新内容由电子科技大学何十全博士撰写。第 18 章信号处理天线的全部内容由中国船舶重工集团公司第 724 研究所天线微波部主任、研究员陈文俊博士审稿；而其他所撰写的文稿则由厦门大学副教授刘颜回博士审稿。需要说明的是，在本次出版过程中，更正了 2002 年版中部分文字、公式、图表等方面的错误。在此，还要感谢中国电子科技集团公司 29 所徐利明博士、华为技术有限公司伍裕江博士的意见、建议及帮助。

本手册是在 2013 年度国家出版基金的资助下出版的，我们对国家出版基金委表示由衷的感谢。该手册由电子科技大学出版社出版，在出版过程中得到了出版社各位领导的大力支持，在此一并感谢。

由于本手册此次出版的工作量极为浩大，同时限于作者、编者的水平和精力，错、漏及不妥之处在所难免，敬请广大读者直言批评、指正。

编 者

2014 年 2 月于四川成都

TIANXIAN GONGCHENG SHOUC

天线工程手册



目 录

第 1 篇 天线基础

第 1 章 引言	1
1.1 天线功能	1
1.2 天线类型	1
1.3 场区划分	2
1.4 功率传输	4
第 2 章 天线的基本参数	6
2.1 天线方向图	6
2.2 方向性系数	9
2.3 天线增益	12
2.4 天线阻抗	12
2.5 天线有效长度和有效面积	14
2.6 天线效率	15
2.7 天线极化	15
2.8 天线带宽	16
2.9 天线噪声温度	17
第 3 章 电磁场的基本原理	19
3.1 麦克斯韦方程和电磁场边界条件	19
3.2 格林函数与叠加原理	24
3.3 场的互易原理	25
3.4 惠更斯原理和克希荷夫近似	26
3.5 二重性原理	27
3.6 巴俾涅原理	28
3.7 镜像原理	31
3.8 场的相似变换原理	31
3.9 场的唯一性定理	33
第 4 章 电磁辐射的基本理论和基本公式	34
4.1 电流元的辐射	34
4.2 磁流元的辐射	36
4.3 离散阵列辐射	37
4.4 线源辐射	40



4.5	孔径辐射	42
4.6	孔径增益及其限制	44
第 5 章	接收天线	48
5.1	接收天线等效电路、匹配以及天线有效面积	48
5.2	天线的有效高度矢量	49
5.3	阻抗失配与极化失配	50
5.4	接收天线的噪声温度	50
5.5	收、发路径损失	51
第 6 章	低频辐射分析方法	53
6.1	线辐射体场的积分表达式	53
6.2	典型天线的数值特征	56
6.3	频域分析方法	62
6.4	时域分析方法	73
6.5	数值解的正确性检查	88
第 7 章	高频辐射分析方法	89
7.1	引言	89
7.2	波前、射线和几何光学	90
7.3	物理光学场	98
7.4	几何绕射理论和一致性几何绕射理论	101
7.5	等效电磁流法	145
7.6	物理绕射理论及其修正	148
 第 2 篇 天线设计 		
第 8 章	偶极与单极天线	157
8.1	引言	157
8.2	直线形偶极天线	157
8.3	V 形偶极天线	174
8.4	折线与曲线偶极天线	180
8.5	其他形式的偶极天线	183
8.6	单极天线	199
8.7	偶极子加载	231
8.8	电小天线	236
8.9	匹配与平衡	237
8.10	小结	256

第 9 章 环天线	259
9.1 引言	259
9.2 电小环天线	259
9.3 电大圆环天线	264
9.4 屏蔽式圆环天线	276
9.5 多角形环天线	278
9.6 双三角形环天线	282
9.7 加载环天线	289
第 10 章 隙缝天线	294
10.1 引言	294
10.2 波导隙缝的形式	294
10.3 隙缝的归一化等效阻抗(导纳)解析式	296
10.4 隙缝的电参数	301
10.5 隙缝阵列天线	310
10.6 匹配隙缝阵列天线	325
10.7 窄边隙缝的交叉极化辐射和抑制方法	328
10.8 加工误差对隙缝阵列天线的影晌	331
10.9 功率容量	332
第 11 章 行波天线	335
11.1 行波天线的基本原理	335
11.2 长线天线与 V 形天线	336
11.3 菱形天线	340
11.4 螺旋天线	346
11.5 八木天线	357
11.6 表面波天线	364
11.7 漏波天线	379
第 12 章 宽频带天线	397
12.1 宽频带天线的基本概念	397
12.2 宽带振子天线	399
12.3 加载天线	410
12.4 非频变天线	424
12.5 宽频带喇叭天线	448
12.6 超宽频带接收天线	458
12.7 宽频带匹配技术	462
第 13 章 线阵和平面阵	480
13.1 阵列天线基础	480



13.2	线阵	481
13.3	平面阵	497
13.4	方向性和信噪比的最佳比	504
13.5	方向图综合	507
第 14 章	微带天线	519
14.1	引言	519
14.2	微带贴片天线	522
14.3	微带振子天线和微带隙缝天线	556
14.4	宽频带、多频段和频率捷变技术	566
14.5	微带线形天线与微带线阵	573
14.6	微带面阵天线	583
第 15 章	喇叭天线	596
15.1	引言	596
15.2	主模喇叭天线	602
15.3	双模喇叭天线	615
15.4	多模喇叭天线	622
15.5	波纹喇叭天线	634
15.6	组合喇叭天线	647
15.7	其他形式的喇叭	657
15.8	校正喇叭口面场的相位分布与透镜天线	662
第 16 章	反射面天线	669
16.1	基本方法和基本公式	669
16.2	单反射面天线——抛物面天线	673
16.3	双反射面天线	681
16.4	赋形双反射面天线	691
16.5	对称双镜天线的效率分析	693
16.6	单偏置抛物面天线	698
16.7	双偏置抛物面天线	708
16.8	波束扫描反射面天线	712
16.9	溅散板馈源天线	723
16.10	喇叭抛物面天线	728
16.11	抛物柱面天线	730
16.12	等强度线波束天线	732
第 17 章	相控阵天线	736
17.1	相控阵天线参数计算公式	736

17.2	相控阵天线辐射方向性和旁瓣的控制	744
17.3	阵元辐射器的选择	750
17.4	移相器的选择	757
17.5	相控阵馈电网络的设计	764
17.6	相控阵天线的带宽	771
17.7	相控阵天线宽带和宽角匹配方法	776
17.8	相控阵的量化误差	779
17.9	频率扫描天线阵	784
第 18 章	信号处理天线	791
18.1	引言	791
18.2	数字阵列天线	791
18.3	自适应波束形成	805
18.4	空间谱估计技术	824
18.5	自适应抗干扰天线系统	832
第 19 章	时域天线	843
19.1	时域天线的研究对象及指标	843
19.2	时域(瞬变)电磁场	843
19.3	瞬变电磁场响应和波形不畸变条件	845
19.4	时域电流元天线	847
19.5	时域磁流元天线	848
19.6	天线时域响应	851
19.7	常见时域单元天线之 Vivaldi 天线	855
19.8	常见时域单元天线之 TEM 喇叭天线	860
19.9	常见时域单元天线之 UWB 单极天线	864
19.10	常见时域单元天线之加载行波天线	868
19.11	时域阵列天线	875
19.12	时域口径辐射与时域面天线	881

第 3 篇 天线应用

第 20 章	圆极化天线	886
20.1	引言	886
20.2	圆极化波的特性与参数	886
20.3	圆极化器	890
20.4	电磁振子圆极化天线	916
20.5	螺旋天线	919
20.6	隙缝圆极化天线	925



20.7	微带圆极化天线	926
20.8	反射器圆极化天线	935
20.9	变极化天线	939
20.10	其他圆极化天线	941
第 21 章	长、中、短波和超短波通信天线	949
21.1	长、中波通信天线的设计考虑	949
21.2	长、中波通信天线的基本形式及方向性	949
21.3	Γ 形与 T 形天线	951
21.4	笼 T 形天线	960
21.5	高 Q 铁氧体加感天线	962
21.6	短波通信天线设计	968
21.7	水平极化与垂直极化短波通信天线	972
21.8	宽带短波通信天线	988
21.9	超短波通信天线设计	1003
21.10	超短波接力通信天线	1005
21.11	短波、超短波移动通信天线	1010
第 22 章	移动通信天线	1016
22.1	引言	1016
22.2	无线移动通信体制及信道模型	1017
22.3	移动终端天线	1019
22.4	无线通信基站天线	1047
22.5	直放站天线、微基站天线及其他覆盖服务的天线	1063
22.6	无线移动终端天线的测试	1068
第 23 章	卫星通信天线	1078
23.1	卫星通信天线发展状况	1078
23.2	对称型双反射镜卫星通信地球站天线的设计	1080
23.3	对称双镜天线的赋形技术	1092
23.4	卫星通信天线获得低旁瓣的方法	1106
23.5	对称型双镜卫星通信天线旁瓣源的分析与计算	1109
23.6	馈源的设计与选择	1121
23.7	多波束卫星通信地球站天线	1133
23.8	跟踪体制及选择	1137
第 24 章	雷达天线	1146
24.1	雷达天线的一般设计要求	1146
24.2	笔形波束天线	1152

24.3	扇形波束天线	1152
24.4	赋形波束天线——余割平方天线	1154
24.5	精密跟踪雷达天线——单脉冲天线及馈源设计	1158
24.6	雷达天线的电扫描精度及波束控制	1170
24.7	超视距雷达天线	1181
24.8	合成口径天线	1186
第 25 章	测向天线	1191
25.1	测向系统天线设计原则	1191
25.2	测向系统单元天线	1191
25.3	测向系统的宽孔径天线	1194
25.4	多波束测向	1197
25.5	伏尔与多普勒伏尔地面天线	1204
25.6	塔康天线	1207
25.7	仪表着陆系统和微波着陆系统天线	1210
25.8	环境对测向天线场性能的影响	1214
25.9	测向天线系统的误差分析与性能评估	1219
第 26 章	毫米波天线	1242
26.1	引言	1242
26.2	反射面天线与毫米波馈源	1244
26.3	表面波与漏波天线	1248
26.4	微带天线与其他的印制天线	1283
26.5	集成天线	1293
第 4 篇 相关论题		
第 27 章	天线罩	1298
27.1	一般设计考虑	1298
27.2	外形与结构	1299
27.3	材料选择	1300
27.4	电磁性能设计	1312
第 28 章	天线的雷达散射截面	1329
28.1	天线散射基本理论	1329
28.2	反射面天线的 RCS	1340
28.3	阵列天线的 RCS	1358
28.4	天线 RCS 的减缩	1388
28.5	天线 RCS 的测量	1400



第 29 章 飞行体上的天线	1421
29.1 飞行体上的天线	1421
29.2 椭圆柱面和双曲柱面上的天线	1423
29.3 椭圆柱体上的天线	1437
29.4 圆锥体上的天线	1446
29.5 椭球体上的天线	1453
29.6 飞行体天线的电磁兼容	1460
第 30 章 天线测量	1466
30.1 天线测试场的设计与鉴定	1466
30.2 振幅方向图测量	1472
30.3 增益测量	1483
30.4 极化测量	1493
30.5 相位测量	1497
30.6 近场测量	1502
30.7 阻抗测量	1513
30.8 模型天线法	1519
30.9 射电源法	1521
30.10 天线的时域测量	1527
30.11 数字阵列天线测量	1530

第1篇 天线基础

第1章 引言

1.1 天线功能

天线在无线电设备中的主要功能有两个：第一个是能量转换功能，第二个是定向辐射(或接收)功能。

能量转换功能是指导行波与自由空间波之间的转换，发射天线是将馈线引导的电磁波(高频电流)转换为向空间辐射的电磁波传向远方，接收天线是将空间的电磁波转换为馈线引导的电磁波(高频电流)送给接收机。

定向作用是指天线辐射或接收电磁波具有一定的方向性，根据无线电系统设备的要求，发射天线可把电磁波能量集中在一定方向辐射出去，接收天线可只接收特定方向传来的电磁波。

可以看出，发射天线和接收天线之间的关系类似于发电机与电动机之间的关系，前者是在导行波与自由空间波之间往返变换，后者则在机械能和电能之间往返变换，这种相似性表明：收、发天线之间存在着一定的可逆性。第3章中对互易原理的讨论将证明，只要天线中不含有非线性材料(如铁氧体器件)，同一副天线用作发射和用作接收时，其基本特性保持不变。因此，本手册中讨论的各种类型天线一般都不特别注明它是发射天线或是接收天线(除特殊应用场合外)，都按发射天线处理。

1.2 天线类型

随着无线电技术的飞速发展和无线电设备应用场合的日益扩展，已出现了适于不同用途、种类繁多的天线，在天线工程设计中选择哪种类型天线在很大程度上取决于特定应用场合系统的电气和机械方面的要求。

对品种繁多的天线进行分类是一件十分困难的事。若按工作性质可分为发射天线和接收天线两大类；若按用途则可分为通信天线、雷达天线、广播天线、电视天线等；若按频段又可分为长波天线、中波天线、短波天线、微波天线等。但这些分类法都显得笼统，不太科学。

因为有的天线既可作发射又可作接收，甚至可收发共用；有的天线既可用于通信又可用于雷达；有的天线既适用于短波又适用于超短波甚至微波。很难将它归属于哪一类。

本手册将从三个大的方面来讨论天线工程问题，即天线基础、天线设计和天线应用。在天线分类上则按天线辐射方式进行，适当考虑天线结构、工作频段和应用等因素。我们将天线分为四组基本类型：线元天线、行波天线、阵列天线和孔径天线。它们适用的频率范围和天线的大致电尺寸如图1-1所示。如表1-1所示为一些常用天线实例及其归属

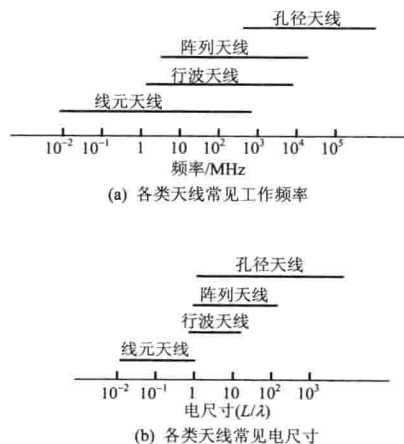


图 1-1 天线分类



的天线类别。

当然，将天线类型简单地划分为这四组基本形式也仅是一种近似，不能说它有十分严密的科学性，因为总还能找到一些例外。但这种分类法有利于读者对本手册的查阅。

表 1-1 天线类型

线元天线	行波天线	阵列天线	孔径天线
单极天线	长线天线	侧射阵	角锥喇叭
偶极天线	菱形天线	端射阵	扇形喇叭
环天线	螺旋天线	直线阵	圆锥喇叭
隙缝天线	八木天线	平面阵	多模喇叭
载体天线	对数周期天线	圆形阵	混合模喇叭
微带天线	慢波天线	共形阵	波纹喇叭
加载天线	快波天线	信号处理阵	抛物面喇叭
有源天线	漏波天线	自适应阵	脊形喇叭
双锥天线	表面波天线	多波束阵	单反射面天线
鞭状天线	长介质棒天线	相控阵	双反射面天线
		密度加权阵	球形反射面天线
		极低副瓣阵	偏置反射面天线
			环焦反射面天线
			切割反射面天线
			孔径扫描天线
			透镜天线
			角形反射面天线
			背射天线

1.3 场区划分

假设将一发射天线置于如图 1-2 所示球坐标系统的原点处，它向周围辐射电磁波，则其周围的电磁波功率密度(或场强)分布一般是距离 r 及角坐标 (θ, φ) 的函数。因此，根据离开天线距离的不同，将天线周围的场区划分为感应场区、辐射近场区和辐射远场区。

1.3.1 感应场区

感应场区是指很靠近天线的区域。在这个场区里，电磁波的感应场分量远大于辐射场，而占优势的感应场之电场和磁场的时间相位相差 90° ，坡印廷矢量为纯虚数，因此，不辐射功率，电场能量和磁场能量相互交替地储存于天线附近的空间内。如图 1-3(a) 所示电尺寸小的偶极天线，其感应场

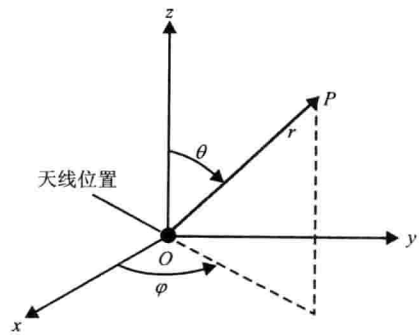


图 1-2 球坐标中的天线

区的外边界是 $\lambda/2\pi$ 。这里, λ 是工作波长。无限大孔径天线不存在感应场区。有限大孔径天线, 在其中心区域感应场区仍可忽略, 只是在孔径边缘附近存在感应场。感应场随离开天线距离的增加而极快衰减, 超过感应场区后, 就是辐射场占优势的辐射场区了。如图 1-3(b) 所示电尺寸大的孔径天线的辐射场区又分为近场区和远场区。

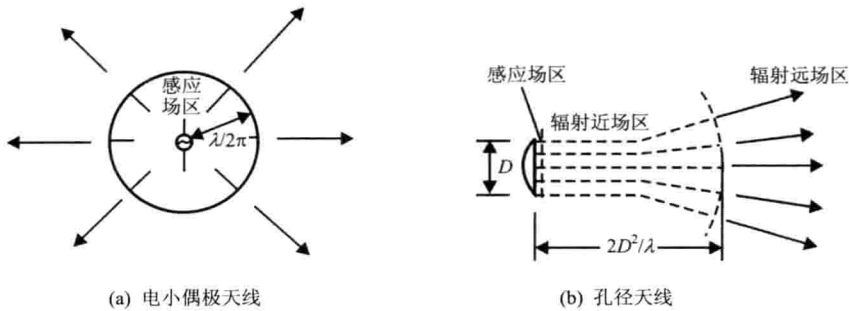


图 1-3 天线周围的场区

1.3.2 辐射近场区

在辐射近场区里电磁场的角分布(即方向图)与离开天线的距离有关, 即在不同距离处天线方向图是不同的。原因如下: (1)由天线各辐射元所建立的场之相对相位关系是随距离而变的; (2)这些场的相对振幅也是随距离而改变的。在辐射近场区的内边界处(即感应区的外边界处), 天线方向图是一个主瓣和副瓣难分的起伏包络。随着离开天线距离的增加, 直到靠近辐射远场区时, 天线方向图的主瓣和副瓣才明显形成, 但零点电平和副瓣电平均较高。

1.3.3 辐射远场区

在辐射近场区的外边就是辐射远场区。这个区域里的特点是: (1)场的大小与离开天线的距离成反比; (2)场的角分布与离开天线的距离无关; (3)方向图主瓣、副瓣和零值点已全部形成。

辐射远场区的起始边界通常规定为

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.1)$$

式中, R 是从观察点到天线的距离; D 是天线孔径的最大线尺寸。

在这个距离上, 孔径中心与孔径边缘到观察点的行程差为 $\lambda/16$, 相应的相位差为 22.5° 。如果在这个距离上对孔径天线的辐射特性进行测量, 其结果与在无穷远距离上测得的结果相差甚微, 在工程上是完全可以接受的。

天线通常是用来向远场区传送能量的, 因此, 天线工作者的主要兴趣也在这一区域上。如图 1-4 所示, 对于孔径线尺寸为 D 、孔径面上相位恒定的大电尺寸天线而言, 远场区的大部分能量集中在 $\pm\lambda/D$ rad 的角空间内; 在靠近天线的地方, 能量主要集中在宽度为 D 的管道内。在近场区的起始部分, 可认为辐射大体上是平行的; 在 $R \geq D^2/2\lambda$ 的过渡区域内, 场以半角为 λ/D rad 的锥形向外发散, 在 $R = D^2/2\lambda$ 处的孔径中心与

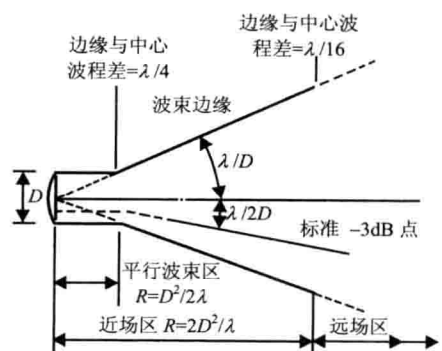


图 1-4 孔径天线的辐射