

线设计

AI
TIANXIAN
SHEJI

林昌禄 陈海 吴为公 编著
人民邮电出版社

73.45T-
326

近代天线设计

林昌禄 陈海 吴为公 编著



人民邮电出版社

9110074

内 容 简 介

本书介绍了近代多种天线的基本原理、特点，设计方法和步骤。

本书避免繁冗的数学推导，侧重于实用，有大量的工程图表和设计计算实例，可供直接使用。

近代天线设计

林昌禄 陈海 吴为公 编著

责任编辑：俞天林 田秀兰

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本：850×1168 1/32 1990年8月 第 一 版
印张：26 页数：416 1990年8月河北第1次印刷
字数：690千字 印数：1-2 500册

ISBN7-115-04242-X/TN·362

定价：11.50元

前 言

本书是按具有一定基础知识和实际经验的天线设计者和使用者之需要而编写的，主要讲述近代各类天线的设计原理和方法。它既不同于理论性强的天线专著，也不同于天线手册，而是侧重于各类天线的基本原理、特点、设计方法和步骤的阐述，并有大量的工程图表和设计计算实例。通过阅读本书，设计者或使用者可根据自己的要求和用途较快地选定天线型式和约略尺寸，进而细致地进行具体设计和制作。本书在取材方面尽量将近代一些新型天线设计方法和步骤包含进去，并注意避免繁冗的数学分析。

全书共十三章。除第一章讲述天线的一些基础知识和基本理论，以利后面各章阅读外，其余章节讲述各类具体天线的原理和设计方法。原则上，各类天线并不受用途范围的限制，设计者或使用者可按自己的具体条件选用和设计。

本书由电子科技大学林昌禄教授主编，其中第一、五、十、十一、十三章由林昌禄执笔，第二、四、七、八章由陈海执笔，第三、六、九、十二章由吴为公执笔。由于作者水平有限，难免有不妥或错误之处，敬请读者指正。

编著者 1987.10

目 录

第一章 天线辐射原理	(1)
1.1 天线的基本辐射特性	(1)
1.2 电流源的辐射	(16)
1.3 磁流源的辐射	(21)
1.4 线阵的辐射	(24)
1.5 孔径的辐射	(54)
第二章 偶极和单极天线	(98)
2.1 圆柱形天线	(98)
2.2 双锥天线	(107)
2.3 折合天线	(109)
2.4 套筒偶极天线	(115)
2.5 开路折合套筒单极子	(118)
2.6 天线的有效高度	(120)
2.7 单极天线	(122)
2.8 平衡器	(131)
2.9 匹配方法	(139)
第三章 缝隙天线	(156)
3.1 巴比涅——布克(Babinet—Booker)原理.....	(156)
3.2 理想导电平面上的矩形缝隙天线	(160)
3.3 环形缝隙及槽口天线	(172)
3.4 圆柱和椭圆柱导体上的缝隙天线	(181)
3.5 波导馈电的缝隙	(190)

3.6	缝隙天线的数值计算方法	(202)
3.7	基本缝隙波导阵的设计方法	(207)
3.8	谐振式缝隙波导阵的设计	(211)
3.9	非谐振式缝隙波导阵的设计	(215)
3.10	缝隙波导阵的功率容量	(220)
3.11	公差和制造技术	(223)
第四章	环天线	(225)
4.1	电小环天线	(225)
4.2	大圆环	(240)
4.3	屏蔽环天线	(252)
4.4	多角形环天线	(254)
4.5	铁氧体环天线	(264)
第五章	行波天线	(266)
5.1	引言	(266)
5.2	行波天线的基本原理	(266)
5.3	长线天线	(270)
5.4	表面波天线	(281)
5.5	漏波天线	(300)
5.6	螺旋天线	(310)
5.7	八木天线	(327)
5.8	背射天线	(340)
第六章	非频变天线	(352)
6.1	阿基米德平面螺旋天线	(353)
6.2	等角螺旋天线	(356)
6.3	圆锥对数螺旋天线	(362)
6.4	对数周期偶极子天线	(370)

6.5	地面上的对数周期偶极天线	(389)
6.6	其它形式的对数周期天线	(398)
第七章 喇叭天线		(407)
7.1	矩形口径喇叭 (角锥喇叭)	(408)
7.2	圆形口径喇叭	(420)
7.3	多模圆口径喇叭	(427)
7.4	复模喇叭	(433)
7.5	波纹喇叭	(450)
7.6	盒式喇叭	(458)
7.7	双锥喇叭	(461)
7.8	螺旋——圆锥喇叭天线	(463)
第八章 反射面天线		(466)
8.1	几何光学	(466)
8.2	抛物反射面天线的几何关系	(472)
8.3	抛物反射面天线的口径分布损失	(474)
8.4	溢漏的近似和振幅渐变的折衷	(477)
8.5	相位误差损失和轴向散焦	(479)
8.6	象散	(482)
8.7	馈源扫描	(483)
8.8	随机相位误差	(486)
8.9	物理光学	(489)
8.10	反射面引起的馈源失配	(492)
8.11	圆锥曲面的反射	(493)
8.12	双反射面天线	(495)
8.13	G/T (增益/噪声温度)	(504)
8.14	偏馈反射面天线	(506)
8.15	球形反射面天线	(508)

8.16	球形反射面天线的副反射面修正	(512)
8.17	赋形反射面天线	(513)
8.18	金属板构成的反射面天线	(523)
第九章	透镜天线	(534)
9.1	透镜的基本工作原理	(534)
9.2	透镜表面公式	(539)
9.3	分区透镜	(546)
9.4	金属平板透镜	(553)
9.5	表面失配和介质损耗	(564)
9.6	双表面透镜	(568)
9.7	Bootlace透镜和Luneburg透镜	(576)
第十章	微带天线	(580)
10.1	概述	(580)
10.2	矩形微带天线	(587)
10.3	圆形微带天线	(609)
10.4	微带天线阵	(623)
10.5	圆极化微带天线	(636)
10.6	多频微带天线	(642)
第十一章	相控阵天线	(648)
11.1	相控阵的基本概念	(648)
11.2	相控阵的设计原理	(648)
11.3	相控阵辐射器的设计	(674)
11.4	相控阵移相器的选择	(680)
11.5	相控阵馈电网络的设计	(698)
11.6	相控阵的带宽	(710)
11.7	频率扫描天线阵	(715)

第十二章	自适应天线阵	(730)
12.1	引言.....	(730)
12.2	自适应天线的基本原理.....	(731)
12.3	最小约束功率.....	(745)
12.4	<i>Davies</i> 波束形成器.....	(748)
12.5	具有 N 个复数加权系数的多零点形成器.....	(752)
12.6	旁瓣对消器.....	(756)
12.7	自适应天线基本算法.....	(766)
第十三章	天线阵综合	(775)
13.1	天线阵综合概念.....	(775)
13.2	谢昆诺夫(<i>Schelkunoff</i>)单位圆法	(776)
13.3	道尔夫—契比雪夫(<i>Dolph-Chebyshev</i>) 天线阵综合.....	(786)
13.4	富氏(<i>Fourier</i>)变换法	(799)
13.5	伍氏(<i>Woodward</i>)抽样法	(805)
13.6	平面阵综合.....	(810)

第一章 天线辐射原理

1.1 天线的基本辐射特性

一、天线的辐射图

置于坐标系原点的天线，通常沿径向辐射球面波，当场点距离很远时，可近似为平面波。平面波能简化电磁场问题的计算工作。电磁波的传播方向和功率密度是以玻印亭矢量来描述的，它是电场和磁场的矢量积，常用 \vec{S} 表示，即

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}^* \quad W/m^2 \quad (1-1)$$

式中， \vec{H}^* 是磁场的共轭复数。远区中，磁场正比于电场，比例常数是自由空间波阻抗 η_0 ，其值为 376.7 欧。因此，式(1-1)可写为

$$|\vec{S}| = S = \frac{|\vec{E}|^2}{\eta_0} \quad W/m^2 \quad (1-2)$$

因为玻印亭矢量是电场和磁场的矢量积，所以它垂直于电、磁场矢量所确定的平面，三者形成右手坐标系 (\vec{E} , \vec{H} , \vec{S})。

置于球心的小偶极天线，其周围的电、磁场包括随离开天线的距离 R 按 $1/R$, $1/R^2$, $1/R^3$ 减小的各项。正比于 $1/R^2$, $1/R^3$ 各项的功率密度随距离的增加而减小的量比球面积的增加量要大得多，这就是近区场。在近区内，只有电磁能量的相互交换，基本上无能量辐射。远区场中玻印亭矢量的 $1/R^2$ 项（即 $1/R$ 的场项）才表示辐射功率，因为球面积是随 R^2 增加的，它给出恒定的积，所有靠内球面的辐射功率全部将传播到靠外的球面上。由于通过每个球面

的功率是相同的，故有

$$4\pi R_1^2 S_{1av} = 4\pi R_2^2 S_{2av} \quad (1-3)$$

式中，平均功率密度正比于 $1/R^2$ 。我们考虑同一坐标立体角内的两个球面上的不同面积，天线仅沿径向辐射，故没有功率沿 θ 或 ϕ 方向行进，功率仅在两个面积之间形成的立体角功率流管内行进，这表明不仅整个球面上的平均波印亭矢量正比于 $1/R^2$ ，而且球面上每一部分功率密度也正比于 $1/R^2$ ，即

$$S_1 R_1^2 \sin\theta d\theta d\varphi = S_2 R_2^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-4)$$

为了消去 $1/R^2$ 以及今后设计计算方便，我们定义一个辐射强度 $U(\theta, \varphi)$ 如下

$$U(\theta, \varphi) = S(R, \theta, \varphi) R^2 \quad W/\text{cubic angle} \quad (1-5)$$

辐射强度与辐射方向有关，这种关系以相对刻度描绘出来就是天线的辐射图，或称天线的方向图。一般用三种相对刻度描绘：

(1)线性（功率方向图），(2)平方根（场强方向图），(3)分贝(dB)。分贝刻度用得较多，因为它能更方便地表示出旁瓣电平值。

天线方向图的类型有多种，如全方向性（水平面）波束、铅笔形波束、扇形波束、各种赋形波束等。

图1.1绘出了方向图中的许多特性，图中半功率波束宽度也称为主瓣宽度，在一些场合常使用1/10功率和零值功率宽度。

二、方向性系数

天线的方向性系数 D 定义为天线的辐射强度与平均辐射强度之比，即

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\text{辐射强度}}{\text{平均辐射强度}} = \frac{U(\theta, \varphi)}{U_0} \quad (1-6)$$

式中的平均辐射强度 U_0 实际上是辐射功率被球面积除，因此可以从辐射强度 $U(\theta, \varphi)$ 沿球面积分再除以 4π 来求得，即

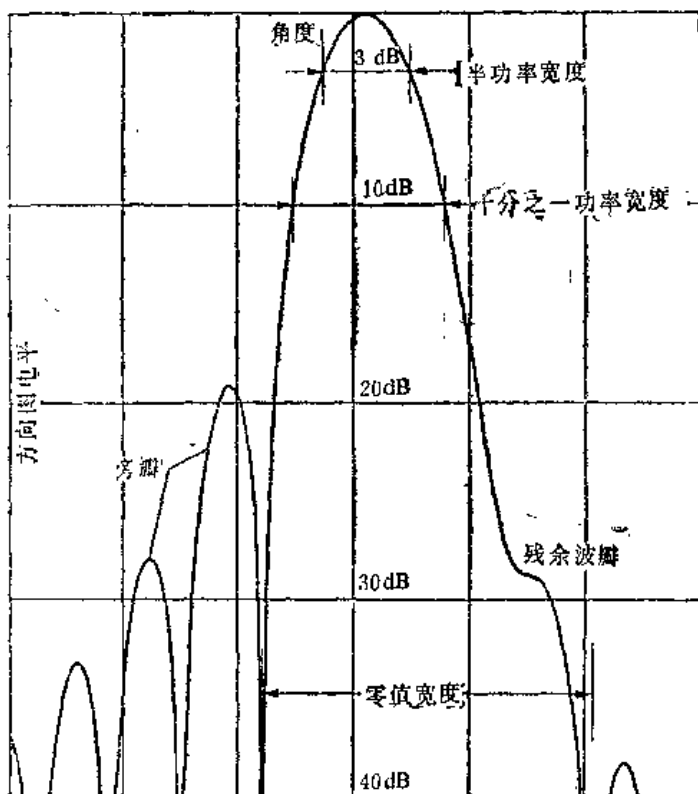


图 1.1 天线方向图特性

$$U_0 = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-7)$$

由于辐射强度与电场强度平方成正比，故方向性系数也可写为

$$D(\theta, \varphi) = \frac{E^2(\theta, \varphi)}{E_0^2} \quad (\text{相同辐射功率}) \quad (1-8)$$

式中， $E(\theta, \varphi)$ 是天线在 (θ, φ) 方向某点产生的场强， E_0 是点源天线在同一点产生的场强。

另外，方向性系数也可定义为在 (θ, φ) 方向某点产生相同电场强度条件下，点源天线的总辐射功率与该天线总辐射功率之比，即

$$D(\theta, \varphi) = \frac{P_{or}}{P_r} \quad (\text{相同电场强度}) \quad (1-9)$$

若未指明角度方向 (θ, φ) ，一般均指在最大辐射方向的方向性系数，这时

$$\begin{aligned} D &= \frac{U_{\max}}{U_0} = \frac{E^2_{\max}}{E_0^2} \quad (\text{相同辐射功率}) \\ &= \frac{P_{or}}{P_{r\max}} \quad (\text{相同电场强度}) \end{aligned} \quad (1-10)$$

三、增益

方向性系数是以辐射功率为基点，没有考虑天线将输入功率转换为辐射功率的效率。为了更完整地描述天线特性，特以天线输入功率为基点定义一个增益。因此，天线增益是表征将输入给它的功率按特定方向辐射的能力。对输入功率为 P_{in} ，效率为1的点源天线而言，由于在所有方向的辐射相等，故在距离 R 处的辐射功率密度 S 应是以 R 为半径的球面积除以 P_{in} ，即

$$S = \frac{P_{in}}{4\pi R^2} \quad (1-11)$$

一个实际天线的功率就是在某辐射方向上功率密度的增加量，即

$$S(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi) \frac{P_{in}}{4\pi R^2} \quad (1-12)$$

式中， $G(\theta, \varphi)$ 就是天线的增益。显然，天线增益的增大是靠定向辐射使其他方向的功率密度小于点源天线的值。我们也可以仿式(1-12)，将辐射强度写为

$$U(\theta, \varphi) = G(\theta, \varphi) \frac{P_{in}}{4\pi} \quad (1-13)$$

如果未指明特定方向 (θ, φ) ，一般均指最大辐射方向的增益，

于是有

$$G = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{in}} \quad (1-14)$$

由于辐射强度与电场强度平方成正比，因此，天线增益可以定义为

$$G(\theta, \varphi) = \frac{E^2(\theta, \varphi)}{E_0^2} \quad (\text{相同输入功率}) \quad (1-15)$$

或者

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P_{oin}}{P_{in}(\theta, \varphi)} \quad (\text{相同电场强度}) \quad (1-16)$$

对最大辐射方向而言

$$\begin{aligned} G &= \frac{E^2_{\max}}{E_0^2} \quad (\text{相同输入功率}) \\ &= \frac{P_{oin}}{P_{in, \max}} \quad (\text{相同电场强度}) \end{aligned} \quad (1-17)$$

例1-1

试根据天线方向性系数与增益的基本定义，导出两者的关系。

解：由式(1-17)知

$$\begin{aligned} G &= \frac{P_{oin}}{P_{in, \max}} = \frac{P_{oin}}{P_{or}} \cdot \frac{P_{or}}{P_{r, \max}} \cdot \frac{P_{r, \max}}{P_{in, \max}} \\ &= \eta_0 \cdot D \cdot \eta_A \end{aligned}$$

式中， η_0 是点源天线的效率，其值为1， η_A 是该天线的效率，因此有

$$G = \eta_A D \quad (1-18)$$

可见，天线的增益等于天线的效率与方向性系数之积。

例1-2

已知天线输入功率为3W，增益为15dB，试求离天线10km处的最大功率密度及电场强度。

解：首先将dB值化为比值，即

$$G = 10^{15/10} = 31.62$$

半径为10km的球面积为 $4\pi(10^4)^2 m^2$ ，故功率密度为

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

利用式(1,2)可求得电场强度为

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

四、有效面积

天线的有效面积是表征天线接收外来电磁波的能力。若来波功率密度为 S ，天线接收到的功率为 P_d ，则有效面积 A_e 为

$$A_e = \frac{P_d}{S} \quad (1-19)$$

喇叭、抛物面、透镜等一类孔径天线的有效面积 A_e 与天线的实际几何孔径面积 A 是不相等的，这是由于孔径场分布、材料损耗、失配等多种因素造成。有效面积 A_e 与几何面积 A 之比就是天线孔径效率，即

$$\frac{A_e}{A} = \eta_e \quad (1-20)$$

五、路径损失

我们将发射天线的增益与接收天线的有效面积联系起来可以求得传递功率和路径损失。由接收天线的功率密度式(1-12)和接收功率式(1-19)联立求解就得到路径损失

$$\frac{P_d}{P_t} = \frac{A_{e2} G_1(\theta, \varphi)}{4\pi R^2} \quad (1-21)$$

式中，天线 1 是发射天线，天线 2 是接收天线。 P_d 是接收功率， P_t 是发射功率， A_{e2} 是天线 2 的有效面积， $G_1(\theta, \varphi)$ 是天线 1 的增益， R 是天线 1 与天线 2 之间的距离。

如果天线处于线性、无源、均匀媒质中，且天线本身不含非线性元件，则发射和接收天线是互易的。当天线 2 作发射，天线 1 作接收时，路径损耗则为

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{A_{e1} G_2(\theta, \varphi)}{4\pi R^2} \quad (1-22)$$

因为响应是互易的，故路径损失相等，我们有

$$\frac{G_1}{A_{e1}} = \frac{G_2}{A_{e2}} = \text{常数} \quad (1-23)$$

由于天线是任意的，故其比值应等于常数，由孔径辐射理论可求得此常数为 $(4\pi/\lambda^2)$ ，即

$$\frac{G}{A_e} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \quad (1-24)$$

这样，我们就得到了用收、发天线增益或有效面积表示的路径损失为

$$\frac{P_t}{P_i} = G_1 G_2 \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = \frac{A_{e1} A_{e2}}{\lambda^2 R^2} \quad (1-25)$$

当频率 F 取 MHz，距离 R 取不同单位时，路径损失 PL 可用下式计算

$$PL(\text{dB}) = 32.45 + 20 \lg(FR) - G_1(\text{dB}) - G_2(\text{dB}) \quad (1-26)$$

式中， R 单位为 km 。以海里为 R 单位时得

$$PL(\text{dB}) = 37.80 + 20 \lg(FR) - G_1(\text{dB}) - G_2(\text{dB}) \quad (1-27)$$

例 1-3

试求工作于 4GHz 的 3m 抛物面天线的增益，设天线孔径效率为 55%

解：利用式(1-24)给出的关系知

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_e \quad (1-28)$$

而抛物面天线的圆孔径面积 $A = \pi(D/2)^2$ ，再考虑到式(1-20)，于是得

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta_a = \left(\frac{\pi DF}{C} \right)^2 \eta_a \quad (1-29)$$

式中， D 是直径， η_a 是天线效率， F 是工作频率， C 为光速。

将已知各值代入式(1.29)得

$$G = \left[\frac{\pi(3)(4) \times 10^9}{0.3 \times 10^8} \right]^2 0.55 = 8685 \quad (39.4\text{dB})$$

例1-4

已知发射天线增益为25dB，接收天线增益为20dB，工作频率为2.2GHz，试求通信距离为50km时的路径损失

解：将已知各值代入式(1-26)得

$$\begin{aligned} PL &= 32.45 - 20 \lg(2200 \times 50) - 25 - 20 \\ &= 88.3\text{dB} \end{aligned}$$

六、波束效率

波束效率是指集中于视轴方向特定圆锥内的方向图功率与总方向图功率之比，用辐射强度表示则为

$$\eta_B = \frac{\int_0^{\theta_1} \int_0^{2\pi} U(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi}{\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi} \quad (1-30)$$

可见，波束效率是指天线检测位于主波束($\theta \leq \theta_1$)内目标的能力。式(1-30)的分母可以由式(1-6)和式(1-7)求得为

$$\int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} U(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi = \frac{4\pi U_{\max}}{D} \quad (1-31)$$

这样，式(1-30)可写为