

天 地

卷 一 内 容 目 录

第一章 绪论

134 --
905

天 线

谢宗浩 刘雪樵 编

北京邮电学院出版社

(京)新登字162号

内 容 提 要

全书共四章，包括线天线、面天线与电波传播三部分内容。主要讲述天线的工作原理、电性能参数、设计方法；地波传播、天波传播、对流层电波传播。具体介绍的常用线天线有：单极天线、偶极天线、同相水平天线、引向天线、宽频带天线、行波天线、螺旋天线、电视发射天线与移动通信天线等；常用的面天线有喇叭天线、抛物面天线与卡塞格伦天线等。

本书适用于无线电类专业专科学生及相应的无线电培训班学生，也可供天线工程技术人员参考。

天 线

作 者 谢宗浩 刘雪峰

责任编辑 王守平

*

北京邮电学院出版社出版

邮编100088 海淀区学院路42号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京通县向阳印刷厂印刷

*

850×1168毫米 1/32 印张6.375 字数164千字

1992年4月第一版 1992年4月第一次印刷

印数，1-4250册

ISBN 7-5635-0074-x/TN·22

定价：2.25元

目 录

绪 论

第一章 天线理论基础

第一节	发射天线基本电参数	(4)
第二节	接收天线基本电参数	(18)
第三节	基本辐射源的辐射特性	(22)

第二章 线天线

第一节	对称振子	(35)
第二节	天线阵的方向性	(47)
第三节	线天线阵的阻抗特性	(62)
第四节	直立天线	(69)
第五节	简单振子天线	(72)
第六节	同相水平天线	(76)
第七节	引向天线与折合振子	(82)
第八节	对数周期天线	(87)
第九节	菱形天线	(92)
第十节	螺旋天线	(98)
第十一节	简单振子天线的馈电平衡器	(104)
第十二节	电视发射天线	(108)
第十三节	移动通信天线	(115)

第三章 面式天线

第一节	分析面式天线辐射场的方法	(120)
-----	--------------	-------

第二节	平面口面上场分布对辐射特性的影响	(121)
第三节	喇叭天线	(133)
第四节	抛物面天线	(141)
第五节	双反射面天线	(155)
第六节	其它类型的反射面天线	(166)

第四章 电波传播

第一节	概述	(170)
第二节	地波与天波	(173)
第三节	对流层电波传播	(180)

习 题

参考文献

绪 论

通信、广播、电视、雷达和导航等无线电系统，都是通过无线电波传递信息的，因此，都需要有辐射和接收无线电波的装置。这种有效地辐射或接收无线电波的装置称之为天线。所以天线是无线电系统中不可缺少的组成部分。我们在这里强调“有效地”，是因为任何不完全屏蔽的高频电路都会泄漏或接收部分无线电波，由于它们不能有效地辐射或接收无线电波，所以不能称它们为天线。

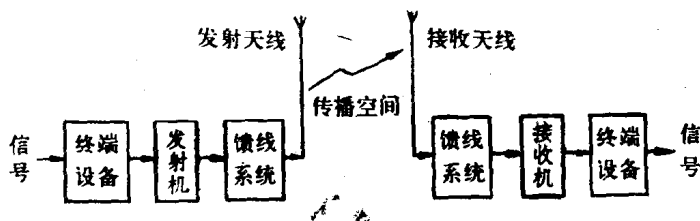


图0-1 无线电通信信道简单方框图

图0-1 是无线电系统中信号通道的简单方框图。已调信号经发射机产生已调高频振荡电流送到馈线，馈线以束缚电磁波的形式传送到发射天线，发射天线再把它转变成自由电磁波向周围空间辐射；在接收端，接收天线接收空间传来的电磁波，将其转变成束缚电磁波，经馈线到接收机解调还原成信号。

由此可见，天线的功能除了有效地辐射或接收电磁波外，还应完成束缚电磁波与同频无线电波之间的转换。

为了适应各种不同用途的要求，设计了不同的各类天线。为了便于研究，可按不同情况进行分类。如按工作性质分类有发射

天线、接收天线和收发共用天线；按用途分有通信天线、广播天线、电视天线、雷达天线和导航天线等；按工作波长分有长波、超长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线和微波天线；按天线上的电流分布分行波天线和驻波天线；还可按天线的特性、结构外形等分类方法。目前大多数的教科书都采用按天线主要结构分类分为线天线和面天线两大类。我们把天线的长度远大于横截面线度的天线称为线天线，它广泛用作长、中、短波天线；天线线度尺寸远大于波长的金属或介质面面状天线称为面天线，它主要用于微波波段。超短波波段的有的用线天线有的则用面天线。这种分类方法的优点是可先介绍线天线再介绍面天线，这不但符合天线由长波发展到微波的历史，而且阐述时可由浅入深、循序渐进。所以我们也采用这一分类方法。

本课程学习的重点是天线的基本理论与基本分析方法；典型天线的工作原理和电气特性。电波的传播空间是无线电信道的一部分，这里也适当地介绍了电波传播的部分基本知识。

本书作为无线电通信类专业的专科教材。本课程的教学参考时数为36学时。

书中采用国际单位制，称为SI单位制。

第一章 天线理论基础

天线的理论基础是电磁场理论。在电磁场课中已学过了电偶极子的辐射,天线课程中称它为电基本振子。电基本振子的辐射理论是天线理论的基础。所以在介绍天线理论之前,先列出电磁场课中得到的载有 $Ie^{j\omega t}$ 高频电流的电基本振子的下列基本结论:

1. 远区辐射场

当电基本振子置于球坐标 Z 轴且位于原点时,它在自由空间的远区辐射场只有 E_θ 和 H_φ 两个分量

$$\begin{cases} E_\theta = \frac{jIl\beta^2 \sin\theta}{4\pi r \omega \epsilon_0} e^{-j\beta r} \\ H_\varphi = \frac{jIl\beta \sin\theta}{4\pi r} e^{-j\beta r} \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, l 电基本振子的长度,

ϵ_0 自由空间介电常数 $(1/36\pi) \times 10^{-9}$ F/m,

β 电波传播相移常数。

代入 $\beta = 2\pi/\lambda$, $\beta/\omega\epsilon_0 = 120\pi$, (1-1)式就可改写为下式

$$\begin{cases} E_\theta = j \frac{60\pi Il}{\lambda r} \sin\theta e^{-j\beta r} \\ H_\varphi = j \frac{Il}{2\lambda r} \sin\theta e^{-j\beta r} \end{cases} \quad (1-2)$$

2. 辐射功率 P_E

电基本振子的辐射功率 P_E 可用下式计算

$$P_E = 80\pi^2 I^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2 \quad (1-3)$$

3. 辐射电阻 R_r

电基本振子的辐射电阻 R_r 的计算公式如下

$$R_r = \frac{P_r}{I^2} = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda} \right)^2 \quad (1-4)$$

第一节 发射天线基本电参数

为了评价天线的电性能，有必要定义一套表示天线各种电性能的电参数。在这一节中讨论发射天线的电参数。

为了发射，天线要从馈线获得最大功率，就要考虑与馈线的匹配问题，这就引出天线输入阻抗的概念。天线的输入阻抗应和馈线特性阻抗相匹配。

天线要把来自馈线的能量最大限度地转变为自由电波辐射出去，这就引出天线的效率问题。

为了更好地利用辐射能量，天线所辐射的能量应尽可能集中到接收天线所在的方向上去，这就要求天线具有定向辐射的能力；若在全方位都可能有接收天线的话，则要求发射天线在全方位均匀地辐射能量。这就引出天线的方向性、方向性图、方向性系数、波瓣宽度和副瓣电平等概念。

为了易于测量与计算，把天线的方向系数与效率的乘积定义为天线的增益。

不同的天线可以辐射不同极化的电磁波，如线极化、圆极化和椭圆极化。圆极化和椭圆极化中又有左旋和右旋之分。为此，引入天线极化的概念。

上面引出的电参数都随天线工作频率的变化而变化，我们把电参数数值不劣于规定值的频率范围称之为天线的频带宽度，简称带宽。

下面分别介绍这些电性能参数。

一、辐射方向图

天线辐射的电磁波能量在空间的分布是不均匀的,天线的辐射方向性图(简称为方向图)是用来表示天线的辐射参量随空间方位变化的图形。这里的辐射参量可以是辐射的功率通量密度、场强、相位或极化。不特别说明的话,辐射方向图是指功率通量密度的空间分布或场强振幅的空间分布,即功率方向图与场强方向图。

当天线置于坐标原点时,在等距离 r 的球面上各点的功率通量密度或场强振幅随方位 θ 、 φ 变化的曲面称为功率方向图或场强方向图,它们的数学表示式称为功率方向函数 $|p(\theta, \varphi)|$ 或场强方向函数 $|f(\theta, \varphi)|$ 。

若以 $E(\theta, \varphi)$ 表示离天线等距离球面上各点的场强,则

$$|E(\theta, \varphi)| = A_0 |f(\theta, \varphi)| \quad (1-5)$$

式中, A_0 是与方向无关的常数;

即

$$|f(\theta, \varphi)| = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{A_0} \quad (1-6)$$

通常定义归一化方向函数为

$$|P(\theta, \varphi)| = \frac{|S(\theta, \varphi)|}{S_m} \quad (1-7)$$

$$|F(\theta, \varphi)| = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{E_m} \quad (1-8)$$

式中, $|S(\theta, \varphi)|$ 是辐射功率通量密度的空间分布,

S_m 是功率通量密度最大值,

E_m 是电场强度的最大值。

显然

$$|P(\theta, \varphi)| = |F^2(\theta, \varphi)| \quad (1-9)$$

以 $|P(\theta, \varphi)|$ 、 $|F(\theta, \varphi)|$ 在三维坐标中所作的曲面,分别称为功率通量密度、场强的立体方向图。由于立体图形画起来很困难,因此常在两个相互垂直的平面内作方向图,称为主平面方向图。

见图1-1和图1-2。

架设在地面上的线天线，由于受地面影响较大，所以常用水平面与铅垂面为主平面来作水平方向图与垂直方向图。当仰角 Δ 保持为常数，场强随方位角 φ 变化的曲线称为水平方向图；方位角 φ 保持不变，场强随仰角 Δ 变化的曲线称为垂直方向图。

对于超高频天线，通常采用E面与H面作为主平面来作E面和H面方向图，E面指最大辐射方向和电场矢量所在的平面；H面指最大辐射方向和磁场矢量所在的平面。

平面方向图可以用直角坐标，也可以用极坐标。可以把归一化场强值换算成分贝数，以分贝值所作的方向图称为分贝方向图。

采用直角坐标绘制方向图的优点是作分贝方向图后可清晰表现副瓣，缺点不太直观。而用极坐标的优点是图形形象、直观，其缺点是对强方向性天线的低副瓣无法精确地表现出来。

二、主瓣宽度、旁瓣电平

通常，天线的E面或H面方向图都呈花瓣形状，故又称为波瓣图。图1-1中最大辐射方向的波瓣称为主瓣，其余的统称为副瓣或旁瓣，其中位于主瓣正后方的副瓣称之为后瓣。现在可以通过方向图的形状，定义一些有关方向图的参数，以判定天线方向性的好坏。

如果天线仅一个主瓣，辐射功率的集中程度可以用两个主平面的波瓣宽度来衡量。主瓣宽度指主瓣两旁功率密度等于最大功率密度的一半处（或场强值是最大值的0.707倍处）两点之间的夹角。E面、H面的主瓣宽度分别以 $2\theta_{0.5E}$ 和 $2\theta_{0.5H}$ 来表示。主瓣宽度就是指这种半功率点的波瓣宽度。另外，定义一种零功率波瓣宽度，它是指主瓣两旁第一个零辐射方向间的夹角，分别以 $2\theta_{0E}$ 和 $2\theta_{0H}$ 来表示E面和H面的零功率波瓣宽度。

副瓣代表了天线在不需要方向的辐射或接收的能力，所以希

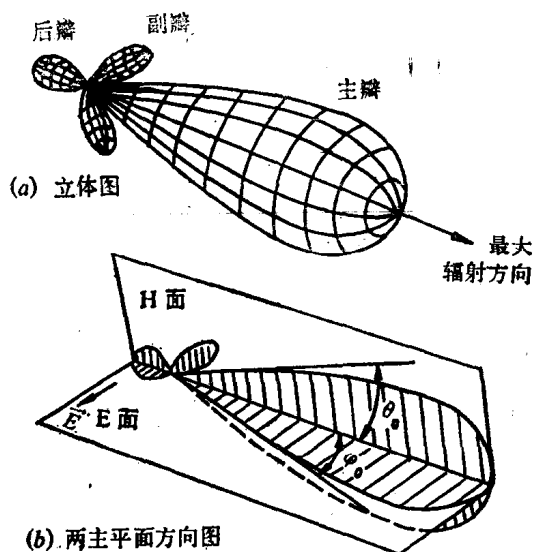


图1-1 天线方向图

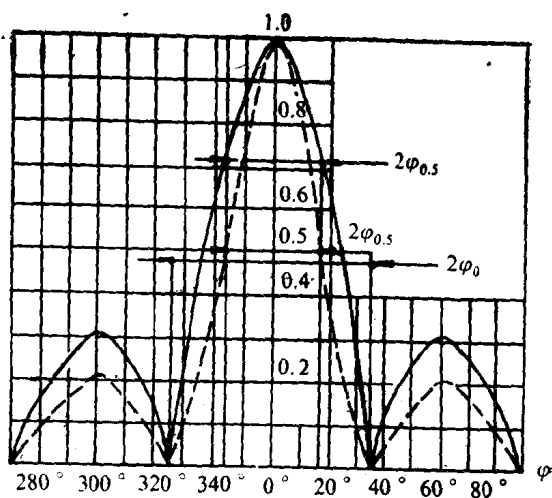
望它越小越好。副瓣电平通常是指主瓣旁第一个副瓣的最大值（通常是最大副瓣的最大值）小于主瓣最大值的分贝数，记为FSLL，可按下式计算

$$FSLL = 10 \lg \frac{S_{1m}}{S_{0m}} = 20 \lg \frac{|E_{1m}|}{|E_{0m}|} \quad (1-10)$$

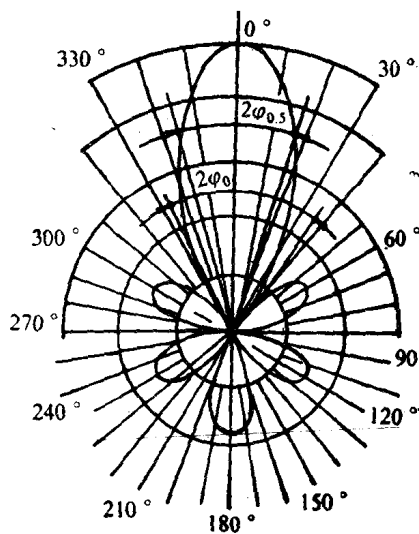
式中， S_{1m} 、 E_{1m} 分别代表最大副瓣功率通量密度和电场强度的最大值，

S_{0m} 、 E_{0m} 分别代表主瓣功率通量密度和电场强度的最大值。

而主瓣最大值与后瓣最大值之比的分贝数称为前后辐射比或反向防护度。



(a) 直角坐标归一化场强方向图(实线)
及归一化功率方向图(虚线)



(b) 极坐标归一化场强方向图

图1-2 天线平面方向图

三、方向系数 D

虽然方向图形象地表现了天线的方向特性，但它不能定量地确定方向特性的优劣；波瓣宽度在一定程度上给出了天线方向性好坏的量值，但也只是一种直观的量度，并不能精确地表征天线的方向性。为了定量地描述方向性的大小，我们定义了方向系数这一参数（有叫方向性系数的，也有叫方向性增益的）。它的定义是：某一天线的方向系数是它在最大辐射方向上某处的辐射功率通量密度与无方向天线在同样辐射功率的条件下于该处辐射功率通量密度的比值，记作 D 。这里说的无方向性天线是一种理想天线，认为该天线在空间具有均匀辐射的能力，这样 D 可表示为

$$D = \frac{|S_m|}{|S_0|} \Big|_{P_z = P_0} = \frac{|E_m|^2}{|E_0|^2} \Big|_{P_z = P_0} \quad (1-11)$$

式中， S_m, E_m 是被研究天线最大辐射方向上某处的辐射功率通量密度及场强；

S_0, E_0 是同样辐射功率条件下理想天线于该处的辐射功率通量密度及场强；

P_z, P_0 是被研究天线与理想天线的辐射功率。

对于任意方向的方向性系数记为 $D(\theta, \varphi)$ ，则

$$\begin{aligned} D(\theta, \varphi) &= \frac{|E_m F(\theta, \varphi)|^2}{|E_0|^2} \Big|_{P_z = P_0} \\ &= D |F^2(\theta, \varphi)| \end{aligned} \quad (1-12)$$

对于无方向性天线的功率通量密度 S_0 有如下关系式

$$|S_0| = \frac{P_0}{4\pi r^2} = \frac{P_z}{4\pi r^2}$$

或

$$|S_0| = \frac{|E_0|^2}{120\pi}$$

则有
$$|E_0| = \frac{30P_0}{r^2} = \frac{30P_z}{r^2} \quad (1-13)$$

把(1-13)式代入(1-11)式中, 得

$$D = \frac{r^2 |E_m|^2}{30P_z} \quad (1-14)$$

或
$$|E_m| = \frac{\sqrt{30P_z D}}{r} \quad (1-15)$$

而任意方向的场强可用下式计算:

$$|E(\theta, \varphi)| = \frac{\sqrt{30P_z D}}{r} |F(\theta, \varphi)| \quad (1-16)$$

可见辐射功率相同时, 采用方向性天线在同距离上产生的场强是无方向性天线产生的场强的 $\sqrt{D}$ 倍, 而功率通量密度为 D 倍。

在半径为 r 的球面上, 对功率通量密度的积分就是辐射功率, 由

$$P_z = R_e \oint_s (E \times H^*) \cdot dS = \frac{r^2 |E_m|^2}{120\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$$

代入(1-14)式, 得最大辐射方向方向系数

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} \quad (1-17)$$

工程中常用分贝数表示

$$D(\text{dB}) = 10 \lg D \quad (1-18)$$

另外, 我们可以通过辐射功率的公式, 找到方向系数与辐射电阻的关系。由 P_z

$$P_z = \frac{r^2 |E|^2}{120\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$$

再考虑到(1-5)式和 $A_0 = \frac{60 |I_M|}{r}$ (见(1-2)式, 电基本振子

$$|E| = \frac{60\pi |I|}{\lambda r} = \frac{60 |I_M|}{r}, \text{ 故 } A_0 = \frac{60 |I_M|}{r}, \text{ 所以}$$

$$P_r = \frac{30 |I_m|^2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$$

则辐射电阻为

$$R_r = \frac{30}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi$$

考虑到 $f(\theta, \varphi) = f_m F(\theta, \varphi)$, 代入(1-17)式有

$$D = \frac{120 f_m^2}{R_r} \quad (1-19)$$

式中 f_m 为 $f(\theta, \varphi)$ 的最大值。

若求任意方向的 $D(\theta, \varphi)$, 可表示为

$$D(\theta, \varphi) = \frac{120 f^2(\theta, \varphi)}{R_r} \quad (1-19)'$$

一般线式天线的方向系数小于10, 短波强方向性天线的方向系数可达数百; 而微波大口径反射面天线的方向系数可达 $10^3 \sim 10^4$ 数量级。

四、天线效率 η_A

天线不可能把输入给它的输入功率 P_{in} 全部辐射出去, 总有一部分要损耗掉, 如天线导线中的热损耗、介质中的介质损耗、地电流的损耗、天线近旁物体吸收电磁波引起的损耗; 又如在面天线中还有馈源的泄漏损耗与遮挡损耗等。仿照辐射电阻的引入方法, 引入损耗电阻 R_L , 若总的损耗功率是 P_L , 认为流过 R_L 上的电流值等于天线电流 I , 则

$$R_L = \frac{P_L}{I^2} \quad (1-20)$$

定义天线的效率是天线的辐射功率 P_r 与其输入功率 P_{in} 之比, 记为 η_A

$$\eta_A = \frac{P_r}{P_{in}} \quad (1-21)$$

若代入 $P_{in} = P_r + P_L$, 则

$$\eta_A = \frac{P_r}{P_r + P_L} = \frac{R_r}{R_r + R_L} \quad (1-22)$$

由此可见, 要提高天线效率则要增加辐射电阻, 降低损耗电阻。

若把输给馈线的功率记为 P_ϕ , 则可定义馈线效率为 η_ϕ , η_ϕ 用下式计算

$$\eta_\phi = \frac{P_{in}}{P_\phi} \quad (1-23)$$

η_ϕ 取决于馈线中的行波系数、馈线的衰减常数和长度。行波系数则和馈线与天线的匹配情况有关。计及馈线效率, 那末天线系统总效率 η 表示为

$$\eta = \eta_A \cdot \eta_\phi \quad (1-24)$$

五、增益系数 G

事实上, η_A 很难由实验方法测定的, 主要是 P_r 难以通过测量来获得。为此, 引入增益系数 G , 令

$$G = \frac{|E_m|^2}{|E_0|^2_{P_{in}=P_0}} \quad (1-25)$$

与方向系数 D 的定义相比, 只是以天线的输入功率替代了辐射功率, 由于 P_{in} 是可以实测的, 所以使增益系数 G 成为可实测的量了。

下面我们推导增益系数 G 、方向系数 D 和天线效率 η_A 三者之间的关系。把 (1-21) 式代 (1-15) 式, 得

$$|E_m^2| = \frac{30 P_{in} \eta_A D}{r^2} \quad (1-26)$$

又由 (1-13) 式

$$|E_0^2| = \frac{30 P_0}{r^2} = \frac{30 P_{in}}{r^2}$$

代入 (1-25) 式, 得

$$G = \eta_A \cdot D \quad (1-27)$$