

面向 **21** 世纪

高等学校信息工程类专业系列教材

天线与电波传播

Antennas and Radio Wave Propagation

宋 铮 张建华 黄 冶 编著

西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>



本书围绕天线与电波传播两大内容展开。全书共 12 章,前 7 章为天线部分,各章内容分别为:天线基础知识、简单线天线、行波天线、非频变天线、缝隙天线与微带天线、面天线、智能天线;后 5 章为电波传播部分,各章内容分别为:电波传播的基础知识、地面波传播、天波传播、视距传播、地面移动通信中接收场强的预测。

本书力求兼顾信息量大、行文简洁的特点,追踪当前热点技术及应用,介绍了智能天线等新技术;书中的大量图表体现了 MATLAB 在天线与电波传播领域中的有效应用,附录给出了典型的 MATLAB 程序;关键词附有英文注释;各章配有习题。

本书的适用对象为电子工程、通信工程专业的大学本科学学生;此书也可供其它专业选用以及通信及天线工程技术人员参考。

为了充分利用多媒体教学手段,本教材配有多媒体课件,以辅导该课程的教学。

图书在版编目(CIP)数据

天线与电波传播=Antennas and Radio Wave Propagation/宋铮等编著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2003.7

(面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1250-4

I. 天… II. 宋… III. ① 天线-高等学校-教材 ② 电波传播-高等学校-教材

IV. ① TN82 ② TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 042884 号

策 划 马乐惠

责任编辑 夏大平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88227828 88201141 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb001@163.com xdupfxb001@sina.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2003 年 7 月第 1 版 2005 年 5 月第 3 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16.875

字 数 392 千字

印 数 10 001~18 000 册

定 价 24.00 元(含光盘)

ISBN 7-5606-1250-4/TN·0226(课)

XDUP 1521001-3

*** 如有印制问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版

(2) 半功率点波瓣宽度(Half Power Beam Width, HPBW) $2\theta_{0.5E}$ 或 $2\theta_{0.5H}$: 指主瓣最大两边场强等于最大值的 0.707 倍(或等于最大功率密度的一半)的两辐射方向之间的夹角, 又叫 3 分贝波束宽度。如果天线的方向图只有一个强的主瓣, 其它副瓣均较弱, 则它的定向辐射性能的强弱就可以从两个主平面内的半功率点波瓣宽度来判断。

(3) 副瓣电平(Side Lobe Level, SLL): 指副瓣最大值与主瓣最大值之比, 一般以分贝表示, 即

$$\text{SLL} = 10 \lg \frac{S_{\text{av}, \text{max}2}}{S_{\text{av}, \text{max}}} = 20 \lg \frac{E_{\text{max}2}}{E_{\text{max}}} \quad \text{dB} \quad (1-2-8)$$

式中, $S_{\text{av}, \text{max}2}$ 和 $S_{\text{av}, \text{max}}$ 分别为最大副瓣和主瓣的功率密度最大值; $E_{\text{max}2}$ 和 E_{max} 分别为最大副瓣和主瓣的场强最大值。副瓣一般指向不需要辐射的区域, 因此要求天线的副瓣电平应尽可能地低。

(4) 前后比: 指主瓣最大值与后瓣最大值之比, 通常也用分贝表示。

1.2.4 方向系数

上述方向图参数虽能从一定程度上描述方向图的状态, 但它们一般仅能反映方向图中特定方向的辐射强弱程度, 未能反映辐射在全空间的分布状态, 因而不能单独体现天线的定向辐射能力。为了更精确地比较不同天线之间的方向性, 需要引入一个能定量地表示天线定向辐射能力的电参数, 这就是方向系数(Directivity)。

方向系数的定义是: 在同一距离及相同辐射功率的条件下, 某天线在最大辐射方向上的辐射功率密度 S_{max} (或场强 $|E_{\text{max}}|$ 的平方) 和无方向性天线(点源)的辐射功率密度 S_0 (或场强 $|E_0|$ 的平方) 之比, 记为 D 。用公式表示如下:

$$D = \frac{S_{\text{max}}}{S_0} \bigg|_{P_r=P_{r0}} = \frac{|E_{\text{max}}|^2}{|E_0|^2} \bigg|_{P_r=P_{r0}} \quad (1-2-9)$$

式中 P_r 、 P_{r0} 分别为实际天线和无方向性天线的辐射功率。无方向性天线本身的方向系数为 1。

因为无方向性天线在 r 处产生的辐射功率密度为

$$S_0 = \frac{P_{r0}}{4\pi r^2} = \frac{|E_0|^2}{240\pi} \quad (1-2-10)$$

所以由方向系数的定义得

$$D = \frac{r^2 |E_{\text{max}}|^2}{60P_r} \quad (1-2-11)$$

因此, 在最大辐射方向上

$$E_{\text{max}} = \frac{\sqrt{60P_r D}}{r} \quad (1-2-12)$$

上式表明, 天线的辐射场与 $P_r D$ 的平方根成正比, 所以对于不同的天线, 若它们的辐射功率相等, 则在同是最大辐射方向且同一 r 处的观察点, 辐射场之比为

$$\frac{E_{\text{max}1}}{E_{\text{max}2}} = \frac{\sqrt{D_1}}{\sqrt{D_2}} \quad (1-2-13)$$

若要求它们在同一 r 处观察点辐射场相等, 则要求

$$\frac{P_{r1}}{P_{r2}} = \frac{D_2}{D_1} \quad (1-2-14)$$

即所需要的辐射功率与方向系数成反比。

天线的辐射功率可由坡印廷矢量积分法来计算, 此时可在天线的远区以 r 为半径做出包围天线的积分球面:

$$P_r = \iint_S S_{av}(\theta, \varphi) \cdot ds = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S_{av}(\theta, \varphi) r^2 \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-2-15)$$

由于

$$S_0 = \frac{P_{r0}}{4\pi r^2} \Big|_{P_{r0}=P_r} = \frac{P_r}{4\pi r^2} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi S_{av}(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-2-16)$$

所以, 由式(1-2-9)可得

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

由天线的归一化方向函数(见式(1-2-4))可知

$$\frac{S_{av}(\theta, \varphi)}{S_{av,max}} = \frac{E^2(\theta, \varphi)}{E_{max}^2} = F^2(\theta, \varphi)$$

方向系数最终计算公式为

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi} \quad (1-2-18)$$

显然, 方向系数与辐射功率在全空间的分布状态有关。要使天线的方向系数大, 不仅要求主瓣窄, 而且要求全空间的副瓣电平小。

【例 1-2-1】 求出沿 z 轴放置的电基本振子的方向系数。

解 已知电基本振子的归一化方向函数为

$$F(\theta, \varphi) = |\sin\theta|$$

将其代入方向系数的表达式得

$$D = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin^3\theta d\theta d\varphi} = 1.5$$

若以分贝表示, 则 $D = 10 \lg 1.5 = 1.76 \text{ dB}$ 。可见, 电基本振子的方向系数是很低的。

为了强调方向系数是以无方向性天线作为比较标准得出的, 有时将 dB 写成 dBi, 以示说明。

当副瓣电平较低时(−20 dB 以下), 可根据两个主平面的波瓣宽度来近似估算方向系数, 即

$$D = \frac{41\,000}{(\theta_{0.5E})(\theta_{0.5H})} \quad (1-2-19)$$

式中波瓣宽度均用度数表示。

如果需要计算天线其它方向上的方向系数 $D(\theta, \varphi)$, 则可以很容易得出它与天线的最大方向系数 D_{\max} 的关系为

$$D(\theta, \varphi) = \frac{S(\theta, \varphi)}{S_0} \bigg|_{P_r = P_{r0}} = D_{\max} F^2(\theta, \varphi) \quad (1-2-20)$$

1.2.5 天线效率

一般来说, 载有高频电流的天线导体及其绝缘介质都会产生损耗, 因此输入天线的功率并不能全部地转换成电磁波能量。可以用天线效率(Efficiency)来表示这种能量转换的有效程度。天线效率定义为天线辐射功率 P_r 与输入功率 P_{in} 之比, 记为 η_A , 即

$$\eta_A = \frac{P_r}{P_{in}} \quad (1-2-21)$$

辐射功率与辐射电阻之间的联系公式为 $P_r = \frac{1}{2} I^2 R_r$, 依据电场强度与方向函数的联系公式(1-2-1), 则辐射电阻的一般表达式为

$$R_r = \frac{30}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi f^2(\theta, \varphi) \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (1-2-22)$$

与方向系数的计算公式(1-2-18)对比后, 方向系数与辐射电阻之间的联系为

$$D = \frac{120 f_{\max}^2}{R_r} \quad (1-2-23)$$

类似于辐射功率和辐射电阻之间的关系, 也可将损耗功率 P_l 与损耗电阻 R_l 联系起来, 即

$$P_l = \frac{1}{2} I^2 R_l \quad (1-2-24)$$

R_l 是归算于电流 I 的损耗电阻, 这样

$$\eta_A = \frac{P_r}{P_r + P_l} = \frac{R_r}{R_r + R_l} \quad (1-2-25)$$

注意, 上式中 R_r 、 R_l 应归算于同一电流。

一般来讲, 损耗电阻的计算是比较困难的, 但可由实验确定。从式(1-2-25)可以看出, 若要提高天线效率, 必须尽可能地减小损耗电阻和提高辐射电阻。

通常, 超短波和微波天线的效率很高, 接近于 1。

值得提出的是, 这里定义的天线效率并未包含天线与传输线失配引起的反射损失, 考虑到天线输入端的电压反射系数为 Γ , 则天线的总效率为

$$\eta_\Sigma = (1 - |\Gamma|^2) \eta_A \quad (1-2-26)$$

1.2.6 增益系数

方向系数只是衡量天线定向辐射特性的参数, 它只决定于方向图; 天线效率则表示了天线在能量上的转换效能; 而增益系数(Gain)则表示了天线的定向收益程度。

增益系数的定义是: 在同一距离及相同输入功率的条件下, 某天线在最大辐射方向上的辐射功率密度 S_{\max} (或场强 $|E_{\max}|$ 的平方) 和理想无方向性天线(理想点源)的辐射功率密

度 S_0 (或场强 $|E_0|$ 的平方) 之比, 记为 G 。用公式表示如下:

$$G = \frac{S_{\max}}{S_0} \bigg|_{P_{\text{in}}=P_{\text{in0}}} = \frac{|E_{\max}|^2}{|E_0|^2} \bigg|_{P_{\text{in}}=P_{\text{in0}}} \quad (1-2-27)$$

式中 P_{in} 、 P_{in0} 分别为实际天线和理想无方向性天线的输入功率。理想无方向性天线本身的增益系数为 1。

考虑到效率的定义, 在有耗情况下, 功率密度为无耗时的 η_A 倍, 式 (1-2-27) 可改写为

$$G = \frac{S_{\max}}{S_0} \bigg|_{P_{\text{in}}=P_{\text{in0}}} = \frac{\eta_A S_{\max}}{S_0} \bigg|_{P_{\text{r}}=P_{\text{r0}}} \quad (1-2-28)$$

即

$$G = \eta_A D \quad (1-2-29)$$

由此可见, 增益系数是综合衡量天线能量转换效率和方向特性的参数, 它是方向系数与天线效率的乘积。在实际中, 天线的最大增益系数是比方向系数更为重要的电参量, 即使它们密切相关。

根据上式, 可将式 (1-2-12) 改写为

$$E_{\max} = \frac{\sqrt{60 P_{\text{r}} D}}{r} = \frac{\sqrt{60 P_{\text{in}} G}}{r} \quad (1-2-30)$$

增益系数也可以用分贝表示为 $10 \lg G$ 。因为一个增益系数为 10、输入功率为 1 W 的天线和一个增益系数为 2、输入功率为 5 W 的天线在最大辐射方向上具有同样的效果, 所以又将 $P_{\text{r}} D$ 或 $P_{\text{in}} G$ 定义为天线的有效辐射功率。使用高增益天线可以在维持输入功率不变的条件下, 增大有效辐射功率。由于发射机的输出功率是有限的, 因此在通信系统的设计中, 对提高天线的增益常常抱有很大的期望。频率越高的天线越容易得到很高的增益。

1.2.7 天线的极化

天线的极化 (Polarization) 是指该天线在给定方向上远区辐射电场的空间取向。一般而言, 特指为该天线在最大辐射方向上的电场的空间取向。实际上, 天线的极化随着偏离最大辐射方向而改变, 天线不同辐射方向可以有不同的极化。

所谓辐射场的极化, 即在空间某一固定位置上电场矢量端点随时间运动的轨迹, 按其轨迹的形状可分为线极化、圆极化和椭圆极化, 其中圆极化还可以根据其旋转方向分为右旋圆极化和左旋圆极化。就圆极化而言, 一般规定: 若手的拇指朝向波的传播方向, 四指弯向电场矢量的旋转方向, 这时若电场矢量端点的旋转方向与传播方向符合右手螺旋, 则为右旋圆极化, 若符合左手螺旋, 则为左旋圆极化。图 1-2-6 显示了某一时刻, 以 $+z$ 轴为传播方向的 x 方向线极化的场强矢量线在空间的分布图。图 1-2-7 和图 1-2-8 显示了某一时刻, 以 $+z$ 轴为传播方向的右、左旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图。要注意到, 固定时间的场强矢量线在空间的分布旋向与固定位置的场强矢量线随时间的旋向相反。椭圆极化的旋向定义与圆极化类似。

天线不能接收与其正交的极化分量。例如, 线极化天线不能接收来波中与其极化方向垂直的线极化波; 圆极化天线不能接收来波中与其旋向相反的圆极化分量, 对椭圆极化来

式中波瓣宽度均用度数表示。不能表示为公度。式(1-2-5)中, θ_0 为半功率角, θ_0 为半功率角, θ_0 为半功率角。2. 更

如果需计算天线其它方向上的增益系数 $D(\theta, \phi)$, 则可以很容易得出它与天线的最大

方向系数 D_{max} 的关系为 $\frac{D(\theta, \phi)}{D_{max}} = \left| \frac{E(\theta, \phi)}{E_{max}} \right|^2 = \left| \frac{E(\theta, \phi)}{E_0} \right|^2$

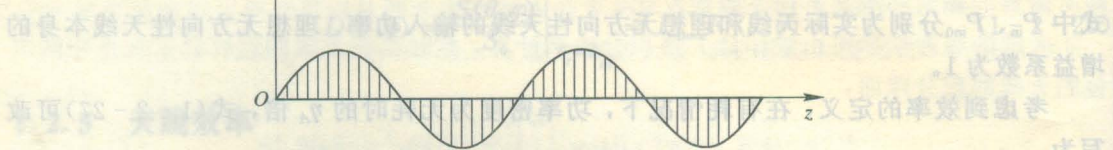


图 1-2-6 某一时刻 x 方向线极化的场强矢量线在空间的分布图 (以 z 轴为传播方向)

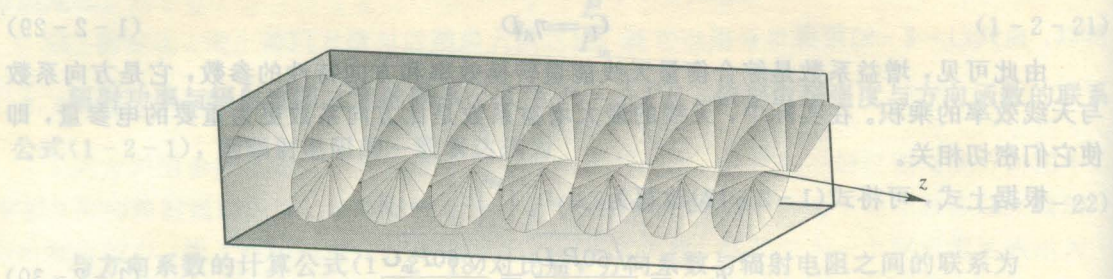


图 1-2-7 某一时刻右旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图 (以 z 轴为传播方向)



图 1-2-8 某一时刻左旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图 (以 z 轴为传播方向)

波, 其中与接收天线的极化旋向相反的圆极化分量不能被接收。极化失配意味着功率损失。为衡量这种损失, 特定义极化失配因子 ν_p (Polarization-mismatch Factor), 其值在 0~1 之间。图 1-2-9 所示为极化失配因子 ν_p 的计算公式。

1.2.8 有效长度

一般而言, 天线上的电流分布是不均匀的, 也就是说天线上各部位的辐射能力不一样。为了衡量天线的实际辐射能力, 常采用有效长度 (Effective Length)。它的定义是: 在保

持实际天线最大辐射方向上的场强值不变的条件下,假设天线上的电流分布为均匀分布时天线的等效长度。通常将归算于输入电流 I_{in} 的有效长度记为 l_{cin} ,把归算于波腹电流 I_m 的有效长度记为 l_{cm} 。

如图 1-2-9 所示,设实际长度为 l 的某天线的电流分布为 $I(z)$,根据式(1-1-4),考虑到各电基本振子辐射场的叠加,此时该天线在最大辐射方向产生的电场为

$$E_{\max} = \int_0^l dE = \int_0^l \frac{60\pi}{\lambda r} I(z) dz = \frac{60\pi}{\lambda r} \int_0^l I(z) dz \quad (1-2-31)$$

若以该天线的输入端电流 I_{in} 为归算电流,则电流以 I_{in} 为均匀分布、长度为 l_{cin} 时天线在最大辐射方向产生的电场可类似于电基本振子的辐射电场,即

$$E_{\max} = \frac{60\pi I_{in} l_{cin}}{\lambda r} \quad (1-2-32)$$

令上两式相等,得

$$I_{in} l_{cin} = \int_0^l I(z) dz \quad (1-2-33)$$

由上式可看出,以高度为一边,则实际电流与等效均匀电流所包围的面积相等。在一般情况下,归算于输入电流 I_{in} 的有效长度与归算于波腹电流 I_m 的有效长度不相等。

引入有效长度以后,考虑到电基本振子的最大场强的计算,可写出天线辐射场强的一般表达式为

$$|E(\theta, \varphi)| = |E_{\max}| F(\theta, \varphi) = \frac{60\pi I l_e}{\lambda r} F(\theta, \varphi) \quad (1-2-34)$$

式中 l_e 与 $F(\theta, \varphi)$ 均用同一电流 I 归算。

将式(1-2-23)与上式结合起来,还可得出方向系数与辐射电阻、有效长度之间的关系式:

$$D = \frac{30k^2 l_e^2}{R_r} \quad (1-2-35)$$

在天线的设计过程中,有一些专门的措施可以加大天线的等效长度,用来提高天线的辐射能力。

1.2.9 输入阻抗与辐射阻抗

天线通过传输线与发射机相连,天线作为传输线的负载,与传输线之间存在阻抗匹配问题。天线与传输线的连接处称为天线的输入端,天线输入端呈现的阻抗值定义为天线的输入阻抗(Input Resistance),即天线的输入阻抗 Z_{in} 为天线的输入端电压与电流之比:

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad (1-2-36)$$

其中, R_{in} 、 X_{in} 分别为输入电阻和输入电抗,它们分别对应有功功率和无功功率。有功功率以损耗和辐射两种方式耗散掉,而无功功率则驻存在近区中。

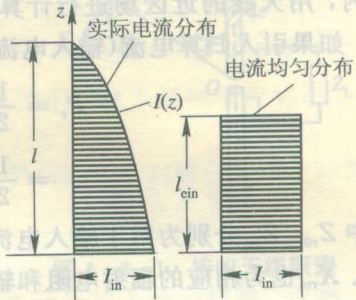


图 1-2-9



XDUP 152100

封面设计：雅树

面向21世纪高等学校计算机、信息工程类专业系列教材

- ◆ 新编C语言程序设计教程
- ◆ 计算机软件基础
- ◆ 微型计算机原理
- ◆ 微机组成与接口技术
- ◆ 软件工程与开发技术
- ◆ 软件工程与数据库概论
- ◆ 数据库原理
- ◆ 操作系统教程（配学习指导书）
- ◆ 数据结构——C语言描述（配学习指导书）
- ◆ 汇编语言程序设计
- ◆ Internet技术及其应用教程
- ◆ 现代网络技术
- ◆ 信息系统分析和设计
- ◆ 程序设计与C语言（配学习指导书）
- ◆ 面向对象程序设计教程
- ◆ Java语言程序设计教程
- ◆ 多媒体技术
- ◆ 编译原理
- ◆ 计算机系统设计
- ◆ 计算机系统结构
- ◆ 离散数学（配学习指导书）
- ◆ 自动控制原理
- ◆ 电子商务概论
- ◆ 电子商务系统及其设计
- ◆ 电路分析基础
- ◆ 信号与系统
- ◆ 模拟电子电路基础
- ◆ 电子线路基础（配学习指导书）
- ◆ 电子技术基础实验
- ◆ 数字电路与逻辑设计
- ◆ 数字电路与系统设计
- ◆ 数字信号处理
- ◆ 通信电子线路
- ◆ 通信电子技术
- ◆ EDA技术及应用（第二版）
- ◆ 现代DSP技术
- ◆ 电子线路CAD实用教程
- ◆ 可编程器件原理与应用
- ◆ 新编单片机原理与应用
- ◆ 应用电视技术
- ◆ 传感器原理及工程应用
- ◆ 电磁场与电磁波
- ◆ 天线与电波传播
- ◆ 计算机通信网
- ◆ 多媒体通信技术
- ◆ 现代通信系统
- ◆ 现代通信网概论
- ◆ 现代交换原理与技术
- ◆ 数字通信原理与技术（第二版）
- ◆ 通信原理与通信技术（配学习指导书）
- ◆ 通信原理
- ◆ 移动通信
- ◆ 卫星通信
- ◆ 光纤通信
- ◆ 信息理论
- ◆ 编码理论
- ◆ 网络安全与保密
- ◆ 电子信息类专业英语

ISBN 7-5606-1250-4



9 787560 612508 >

ISBN 7-5606-1250-4/TN·0225（课）

定价：24.00元（含光盘）