



天线与电波传播

郭璐

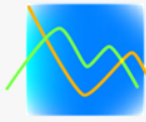
南京理工大学，电光学院通信工程系

2023年春季学期

办公室: 电光院A342

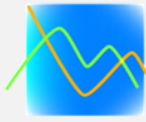
Email: lu.guo@njust.edu.cn





第1章 天线基础知识

- 1.1 基本振子的辐射
- 1.2 发射天线的电参数
- 1.3 互易定理与接收天线的电参数
- 1.4 对称振子
- 1.5 天线阵的方向性
- 1.6 对称振子阵的阻抗特性
- 1.7 无限大理想导电反射面对天线电性能的影响



【例1—2—1】 求出沿 z 轴放置的电基本振子的方向系数。



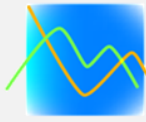
【例1—2—1】 求出沿z轴放置的电基本振子的方向系数。

解：已知电基本振子的归一化方向函数为

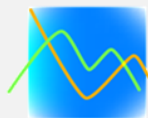
$$F(\theta, \varphi) = |\sin\theta|$$

将其代入方向系数的表达式得

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



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

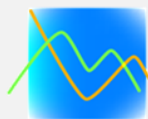


若以分贝表示，则 $D=10\lg 1.5=1.76\text{dB}$ 。可见，电基本振子的方向系数是很低的。为了强调方向系数是以无方向性天线作为比较标准得出的，有时将dB写成dBi，以示说明。

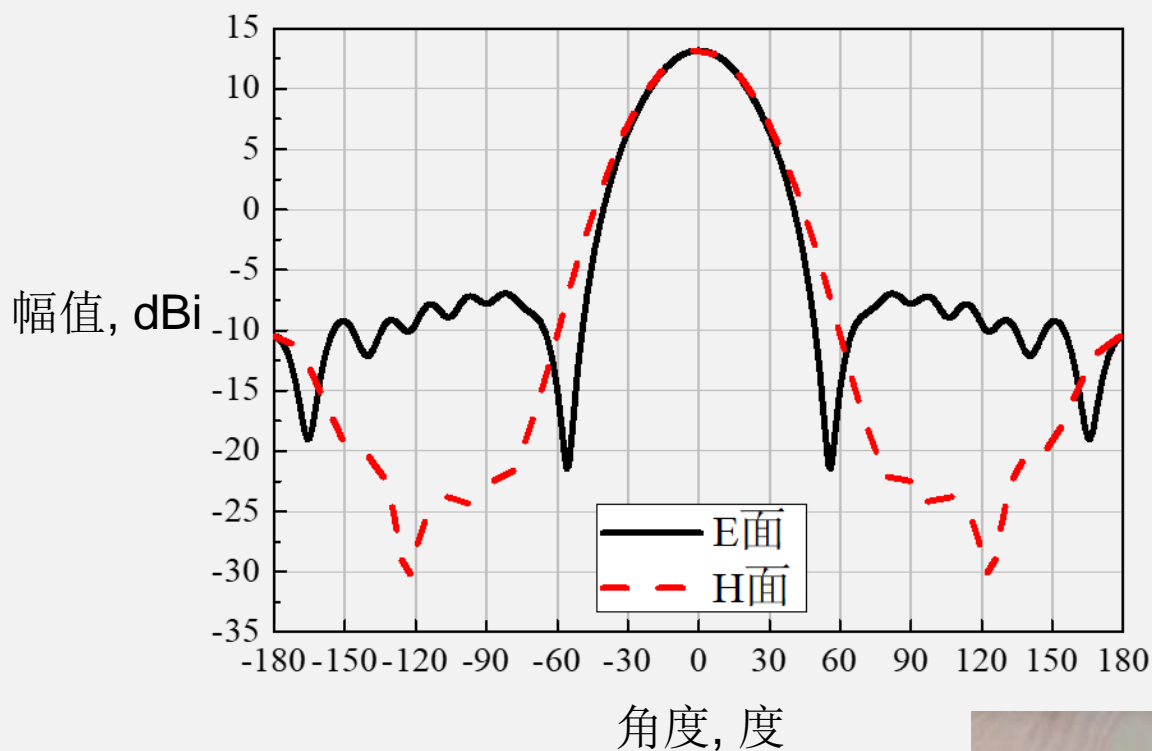
当副瓣电平较低时（-20dB以下），可根据两个主平面的波瓣宽度来近似估算方向系数，即

$$D = \frac{41000}{(2\theta_{0.5E})(2\theta_{0.5H})} \quad (1-2-19)$$

式中波瓣宽度均用度数表示。



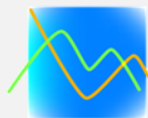
$$D = \frac{41000}{(2\theta_{0.5E})(2\theta_{0.5H})} \quad (1-2-19)$$



E面3分贝波束宽度: 42°

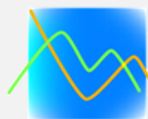
H面3分贝波束宽度: 42°





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

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



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,因此输入天线的实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

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

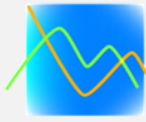


辐射功率与辐射电阻之间的联系公式

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

$$|E(r, \theta, \varphi)| = \frac{60I}{r} f(\theta, \varphi) \quad (1-2-1)$$

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



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

电基本振子辐射电阻？

$$f(\theta, \varphi) = f(\theta) = \frac{\pi l}{\lambda} |\sin \theta|$$

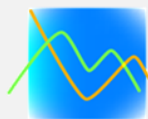


$$R_r = \frac{30}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} f^2(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta d\varphi \quad (1-2-22)$$

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

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

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

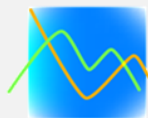


类似于辐射功率和辐射电阻之间的关系，也可将损耗功率 P_l 与损耗电阻 R_l 联系起来，即

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

R_l 是归算于电流 I 的损耗电阻，这样

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



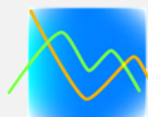
一般来讲，损耗电阻的计算是比较困难的，但可由实验确定。从式(1—2—25)可以看出，若要提高天线效率，必须尽可能地减小损耗电阻和提高辐射电阻。

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

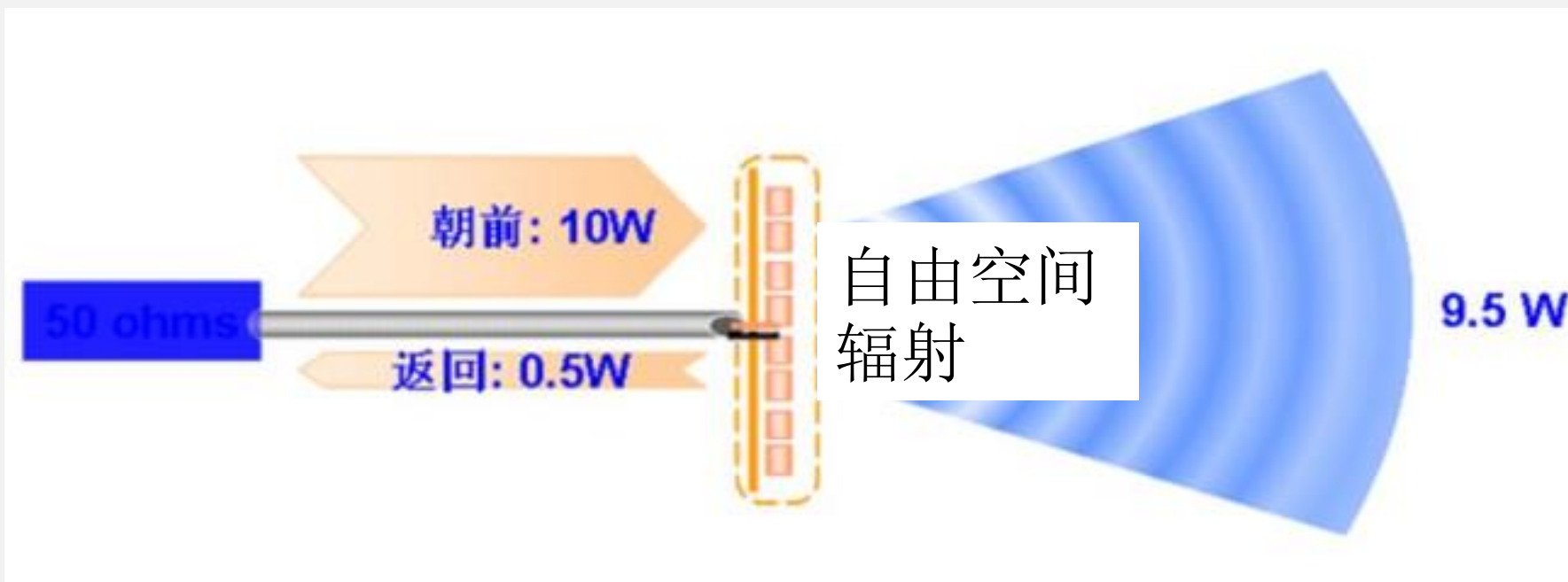
通常，超短波和微波天线的效率很高，接近于1。

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

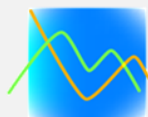
$$\eta_\Sigma = (1 - |\Gamma|^2) \eta_A \quad (1-2-26)$$



$$\eta_{\Sigma} = (1 - |\Gamma|^2) \eta_A$$



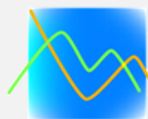
此天线的辐射效率是多少？总效率是多少？功率反射系数是多少？电压反射系数是多少，所对应的分贝数又是多少？



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，它只取决于方向图；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：

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



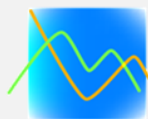
式中 P_{in} 、 P_{in0} 分别为实际天线和理想无方向性天线的输入功率。理想无方向性天线本身的增益系数为1。

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

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

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

无耗情况下方向系数和增益系数的关系？

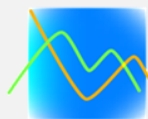


由此可见，**增益系数**是综合衡量天线能量转换效率和方向特性的参数，它是方向系数与天线效率的乘积。在实际中，天线的最大增益系数是比方向系数更为重要的电参量，即使它们密切相关。

根据上式，可将式（1—2—12）改写为

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

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



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1W的天线和一个增益系数为2、输入功率为5W的天线在最大辐射方向上具有同样的效果，所以又将 $P_r D$ 或 $P_{in} G$ 定义为天线的有效辐射功率。

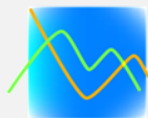
$$E_{\max} = \frac{\sqrt{60 P_r D}}{r} = \frac{\sqrt{60 P_{in} G}}{r} \quad (1-2-30)$$

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。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。

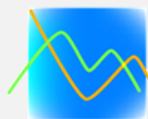


图1—2—6显示了某一时刻，以+z轴为传播方向的线极化的场强矢量线在空间的分布图。

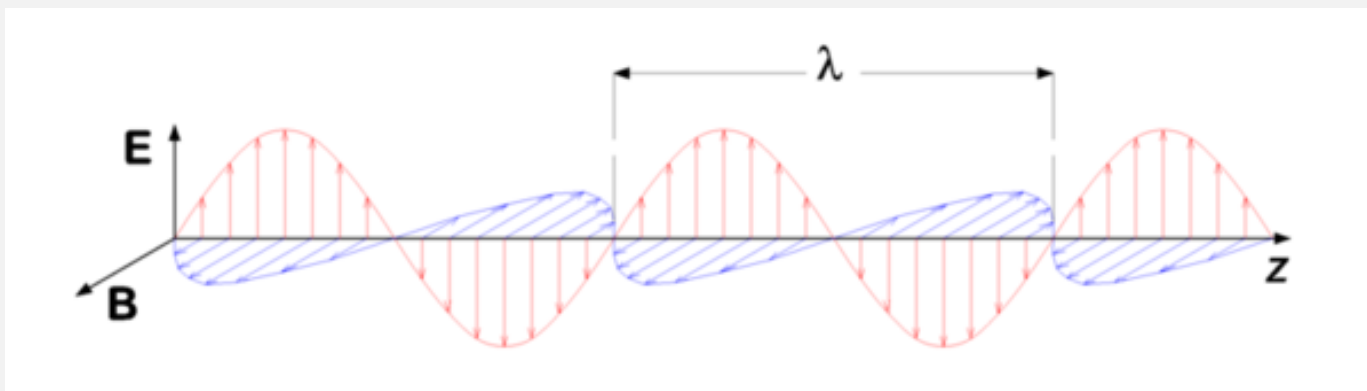
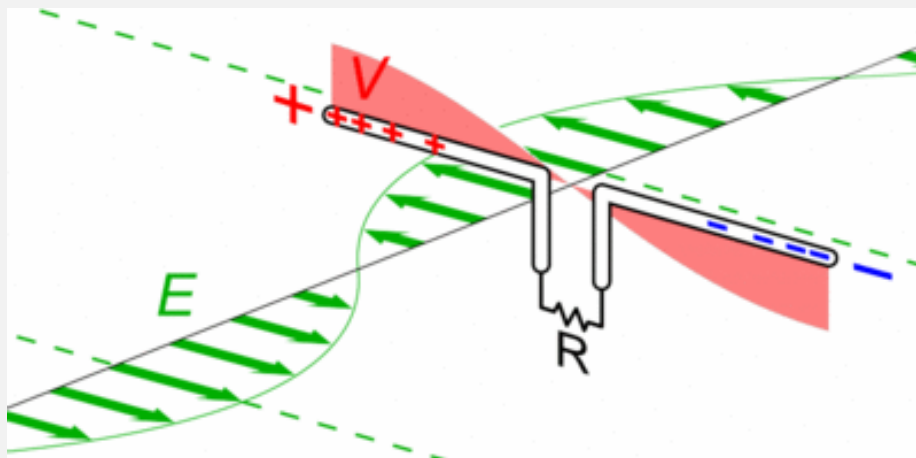


图1—2—6 某一时刻线极化的场强矢量线在空间的分布



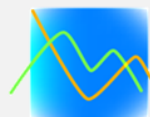


图1—2—7和图1—2—8显示了某一时刻，以 $+z$ 轴为传播方向的右、左旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图。要注意到，固定时间的场强矢量线在空间的分布旋向与固定位置的场强矢量线随时间的旋向相反。椭圆极化的旋向定义与圆极化类似。

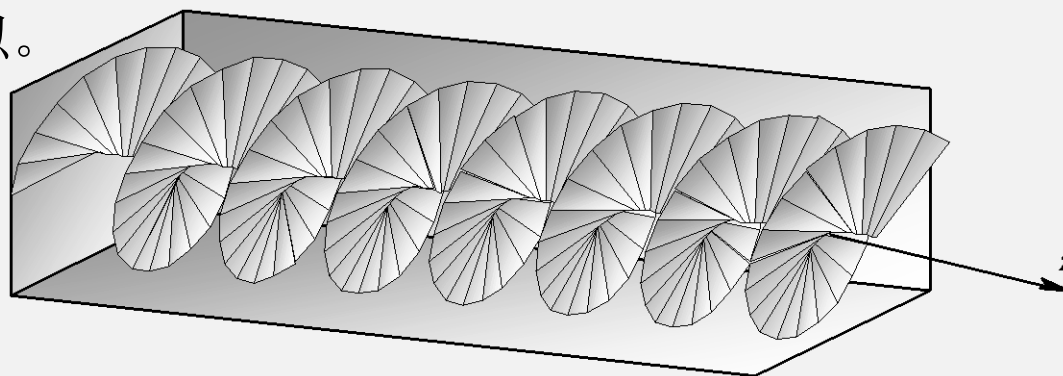


图1—2—7 某一时刻右旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图
(以 z 轴为传播方向)

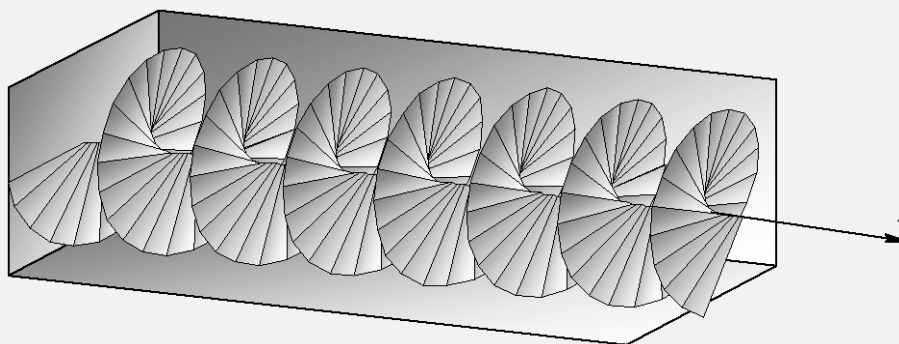
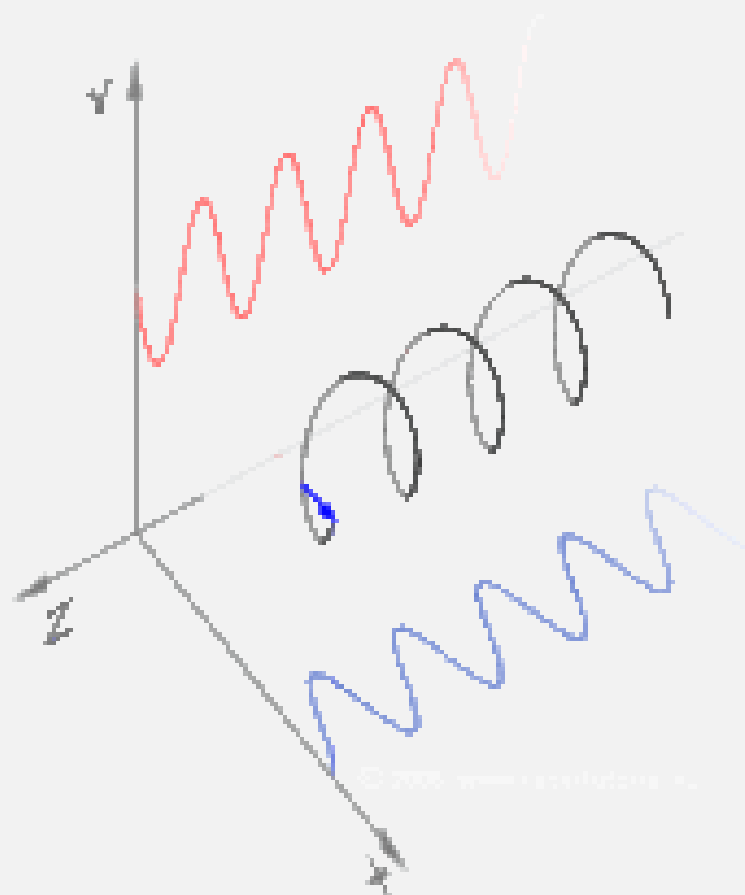
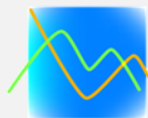
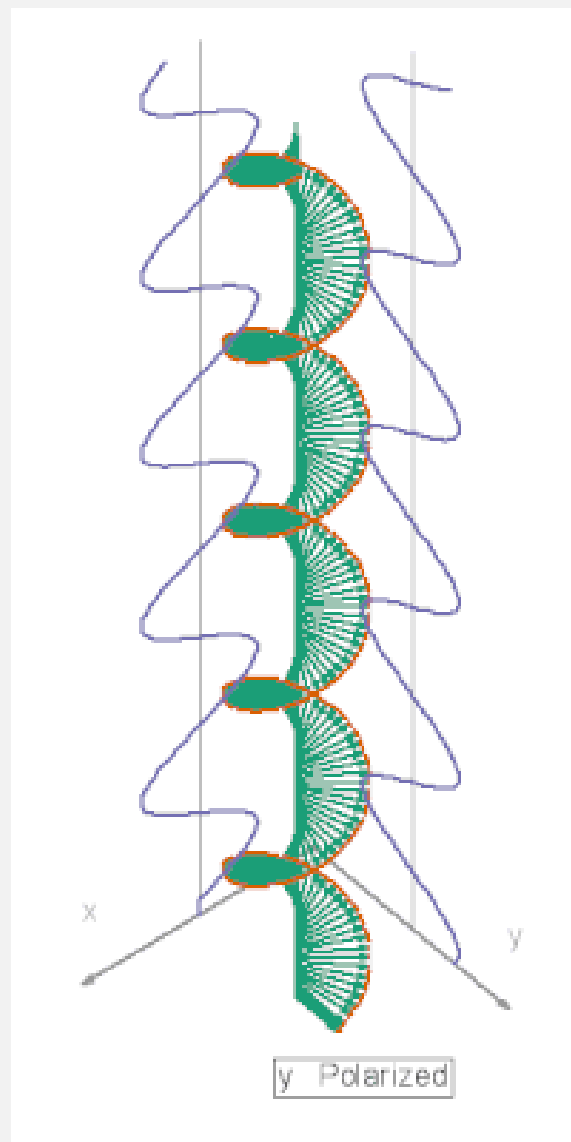
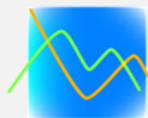


图1—2—8 某一时刻左旋圆极化的场强矢量线在空间的分布图
(以 z 轴为传播方向)



© 2005 www.electronicsw.com



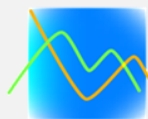


天线不能接收与其正交的极化分量。例如，线极化天线不能接收来波中与其极化方向垂直的线极化波；圆极化天线不能接收来波中与其旋向相反的圆极化分量，对椭圆极化来波，其中与接收天线的极化旋向相反的圆极化分量不能被接收。极化失配意味着功率损失。为衡量这种损失，特定义极化失配因子 ν_p （Polarization-mismatch Factor），其值在0~1之间。



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_{ein} ，把归算于波腹电流 I_m 的有效长度记为 l_{em} 。



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

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

$$\left. \begin{aligned} H_{\varphi} &= j \frac{Il}{2\lambda r} \sin \theta e^{-jkr} \\ E_{\theta} &= j \frac{60\pi Il}{\lambda r} \sin \theta e^{-jkr} \\ H_r &= H_{\theta} = E_r = E_{\varphi} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1-4)$$

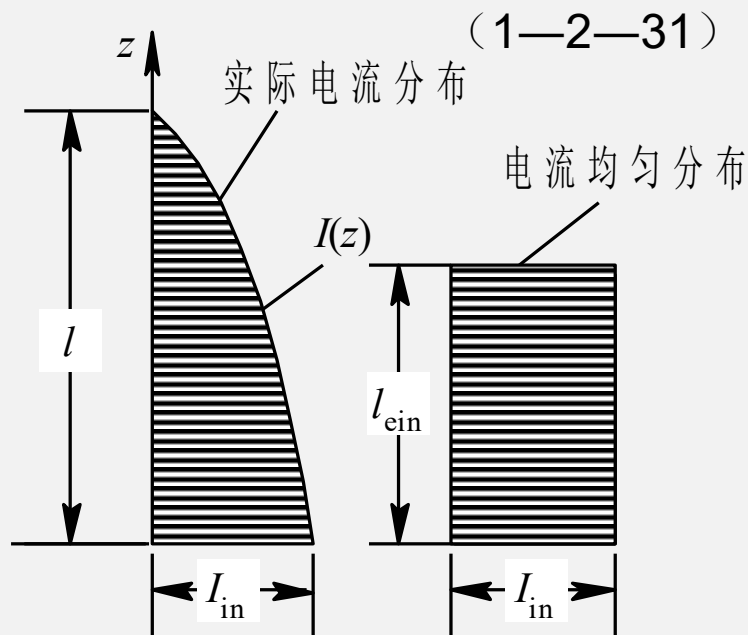
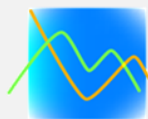
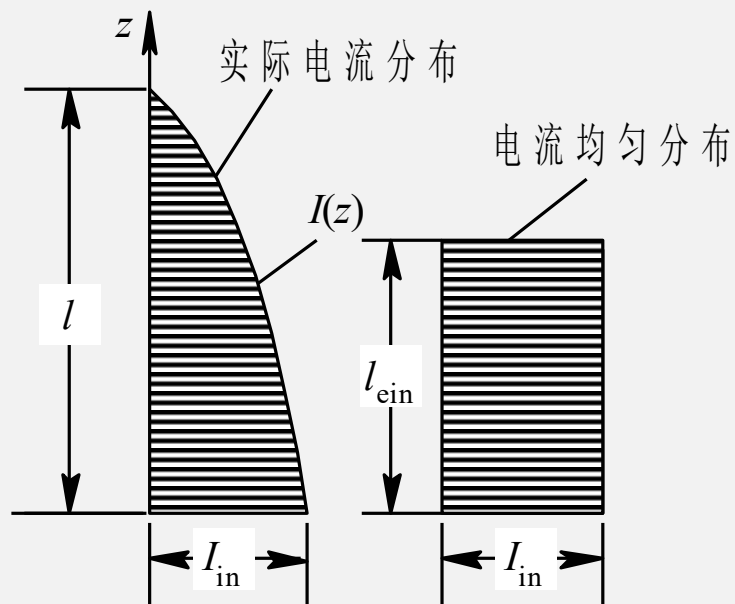


图 1—2—9



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_{ein} 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

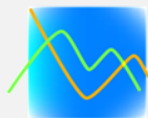
$$E_{\max} = \frac{60\pi I_{in} l_{ein}}{\lambda r} \quad (1-2-32)$$



令上两式相等，得

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

图 1—2—9

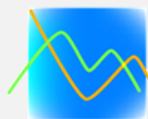


由上式可看出，以高度为一边，则实际电流与等效均匀电流所包围的面积相等。在一般情况下，归算于输入电流 I_{in} 的有效长度与归算于波腹电流 I_m 的有效长度不相等。

引入有效长度以后，考虑到电基本振子的最大场强的计算，可写出线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。



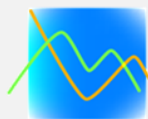
将式（1—2—23）与上式结合起来，还可得出方向系数与辐射电阻、有效长度之间的关系式：

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

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。

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

$$f(\theta, \varphi) = f(\theta) = \frac{\pi l}{\lambda} |\sin \theta|$$



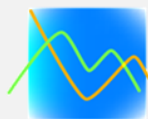
1.2.9 输入阻抗与辐射阻抗

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 Impedance)，即天线的输入阻抗 Z_{in} 为天线的输入端电压与电流之比：

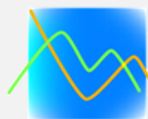
$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} + jX_{in} \quad (1-2-36)$$

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。

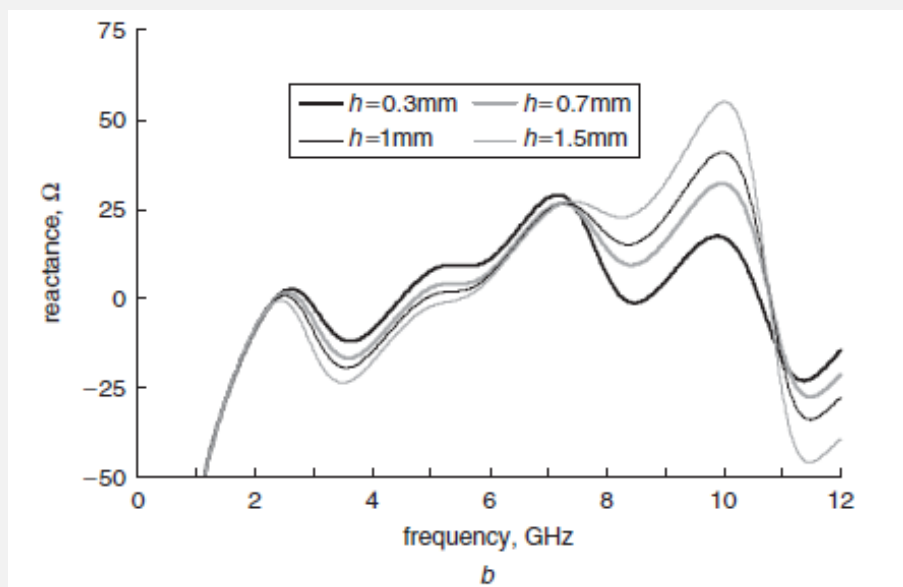
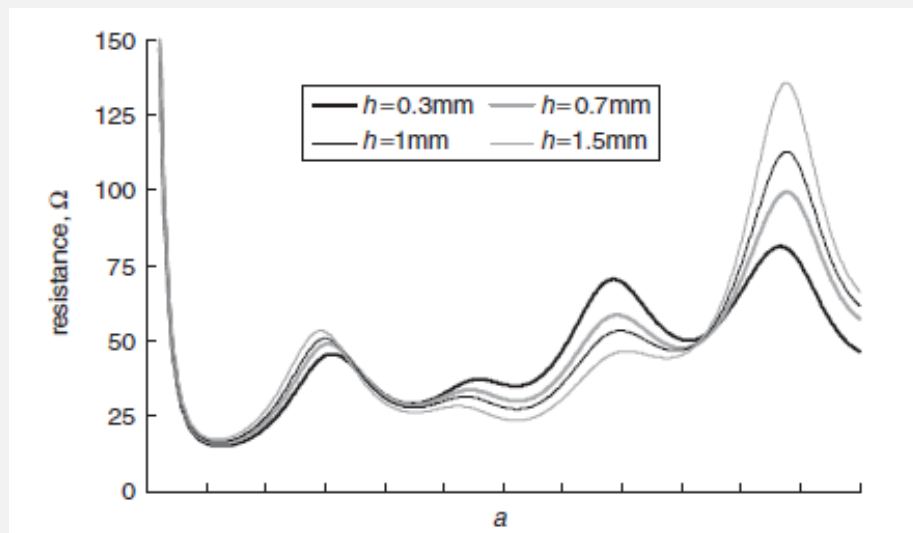
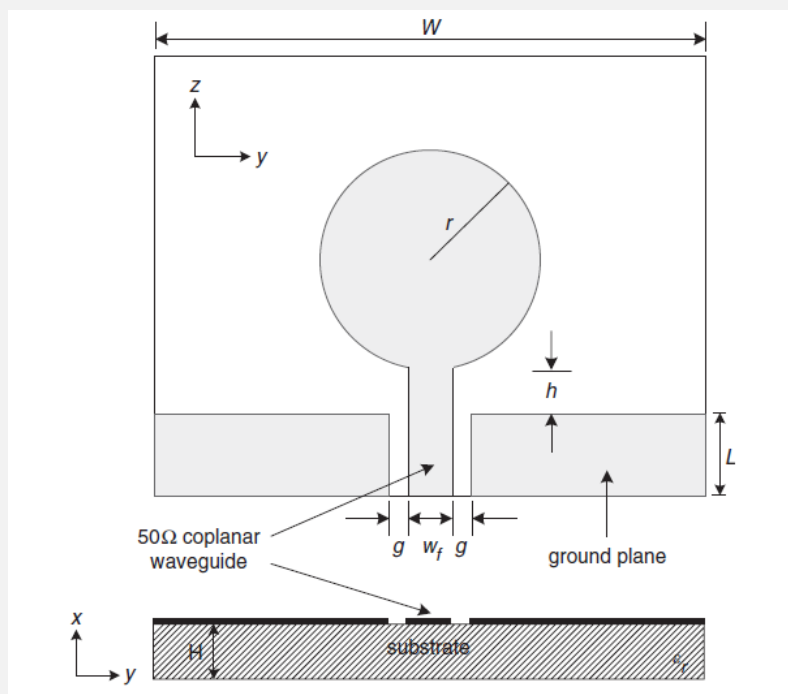


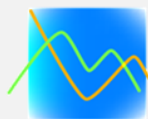
有功功率以损耗和辐射两种方式耗散掉，而**无功功率**则驻存在近区中。

天线的输入阻抗决定于天线的结构、工作频率以及周围环境的影响。输入阻抗的计算是比较困难的，因为它需要准确地知道天线上的激励电流。除了少数天线外，大多数天线的输入阻抗在工程中采用近似计算或实验测定。



超宽带单极子天线

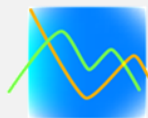




事实上，在计算天线的辐射功率时，如果将计算辐射功率的封闭曲面设置在天线的近区内，用天线的近区场进行计算，则所求出的辐射功率 P_r 同样将含有有功功率及无功功率。如果引入归算电流（输入电流 I_{in} 或波腹电流 I_m ），则辐射功率与归算电流之间的关系为

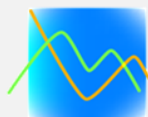
$$\begin{aligned} P_r &= \frac{1}{2} |I_{in}|^2 Z_{r0} = \frac{1}{2} |I_{in}|^2 (R_{r0} + jX_{r0}) \\ &= \frac{1}{2} |I_{mm}|^2 Z_{rm} = \frac{1}{2} |I_m|^2 (R_{rm} + jX_{rm}) \end{aligned} \quad (1-2-37)$$

式中 Z_{r0} 、 Z_{rm} 分别为归于输入电流和波腹电流的辐射阻抗(Radiation Impedance)。 R_{r0} 、 R_{rm} 、 X_{r0} 、 X_{rm} 也为相应的辐射电阻和辐射电抗。



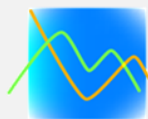
因此，辐射阻抗是一个假想的等效阻抗，其数值与归算电流有关。归算电流不同，辐射阻抗的数值也不同。

Z_r 与 Z_{in} 之间有一定的关系，因为输入实功率为辐射实功率和损耗功率之和；当所有的功率均用输入端电流为归算电流时， $R_{in}=R_{r0}+R_{l0}$ ，其中 R_{l0} 为归算于输入端电流的损耗电阻。



1.2.10 频带宽度

天线的所有电参数都和工作频率有关。任何天线的工作频率都有一定的范围，当工作频率偏离中心工作频率 f_0 时，天线的电参数将变差，其变差的容许程度取决于天线设备系统的工作特性要求。当工作频率变化时，天线的有关电参数变化的程度在所允许的范围之内，此时对应的频率范围称为**频带宽度(Bandwidth)**。根据天线设备系统的工作场合不同，影响天线频带宽度的主要电参数也不同。



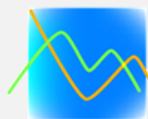
根据频带宽度的不同，可以把天线分为窄频带天线、宽频带天线和超宽频带天线。

若天线的最高工作频率为 f_{\max} ，最低工作频率为 f_{\min} 。
对于窄频带天线，常用相对带宽，即

$$[(f_{\max} - f_{\min}) / f_0] \times 100\%$$

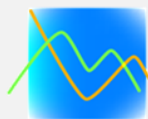
来表示其频带宽度。

而对于超宽频带天线，常用绝对带宽，即 f_{\max} / f_{\min} 来表示其频带宽度。

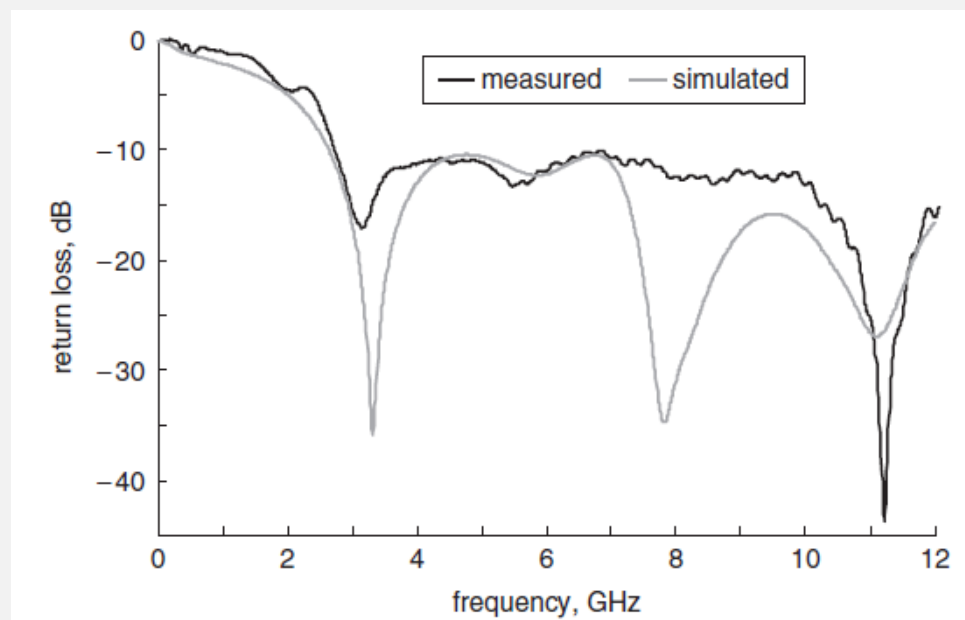
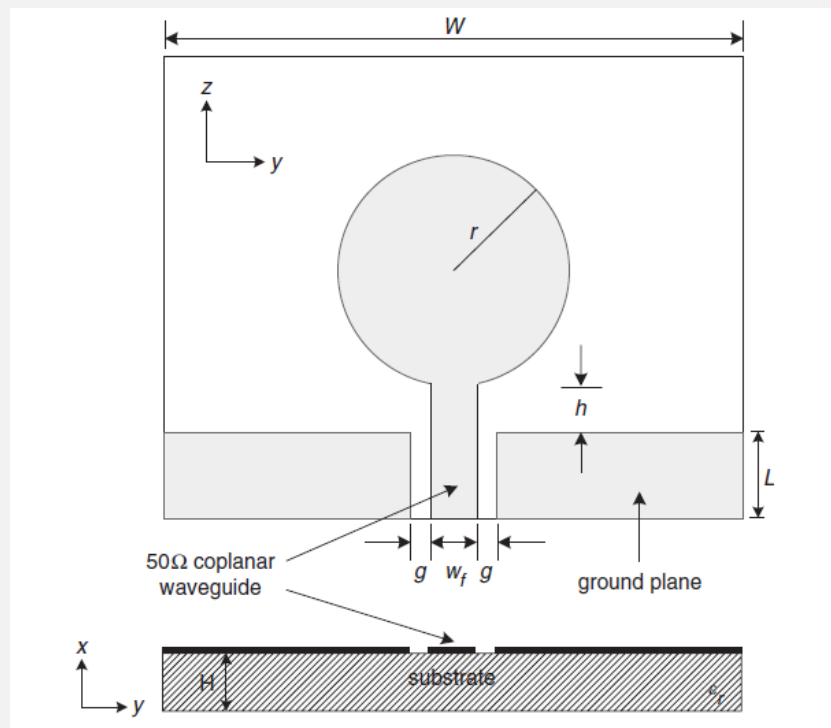


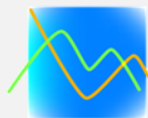
通常，相对带宽只有百分之几的为窄频带天线，例如引向天线；相对带宽达百分之几十的为宽频带天线，例如螺旋天线；绝对带宽可达到几个倍频程的称为超宽频带天线，例如对数周期天线。





超宽带单极子天线





作业：

◆ P47 习题一

第1、2、4、5、8、9题

谢谢！

