

高等学校教材

有源天线原理与应用

沈铁汉



西安交通大学出版社

高等学校教材

有源天线原理与应用

沈铁汉

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书系统地叙述和分析了有源天线的构成、工作原理、电性能参数及计算,以及它们的设计和应用。选材新颖,阐述深入浅出,除理论分析外还有典型电路及实验结果。适用于高等学校无线电技术专业的本科生、研究生学习,亦可供有关教师和天线工程技术人员参考。

有源天线原理与应用

沈 铁 汉

责任编辑 陆 薇

*

西安交通大学出版社出版

(邮政编码:710049)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经营

*

开本 787×1092 1/32 印张 7.875 字数:164千字

1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

印数:1—1500

ISBN7-5605-0408-6/TN·30 定价:2.05元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的六个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986—1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规则。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等共400余种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点

和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

机械电子工业部电子类教材办公室

前 言

本书作为教材,由电磁场与微波技术教材编审委员会天线与电波教材编审小组评选审定,并推荐出版。

哈尔滨船舶工程学院刘懋恒教授主审了本书。编、审者均依据天线与电波教材编审小组审定的编写大纲编写、审阅。

本课程的参考教学时数为40学时。其主要内容为:导论;有源天线统一模型;无线电收信系统中的噪声;有源接收放大天线通论和专论;有源功率放大发射天线;有源天线阵。本教材从改进普通无源天线的性能、克服其一定局限性出发,基于无线电波感应器或辐射器一体化,结合有源电路而引出有源天线,注重联系其特性的基本理论,系统地叙述和分析了有源天线的构成、工作原理、电性能参数及计算,以及它们的设计和应用,本书选材新颖,阐述深入浅出,除理论分析外还有典型电路及实验结果。书末附有主要参考书籍和文献。

本书适用对象为高等学校无线电技术专业本科生、研究生,宜在学过《天线原理》课程后学习;亦可供其它有关专业选用。

感谢刘懋恒教授认真审阅本教材稿及所提供的意见。编者水平有限,书中难免还有一些缺点错误,衷心希望读者批评指正。

沈铁汉

1989年8月

7AL68/02

目 录

第一章 导 论

- 1.1 无线电通信系统馈线中的基本关系 (1)
- 1.2 无线电通信方程 (5)
- 1.3 天线的基本概念与定义 (8)
- 1.4 电小无源天线..... (10)
- 1.5 有源天线的特点..... (21)
- 1.6 有源天线的分类..... (24)
- 1.7 全书梗概..... (26)

第二章 有源天线的统一模型

- 2.1 有源天线的统一模型..... (27)
- 2.2 有源器件的外部参数..... (29)
- 2.3 等效网络法分析..... (34)
- 2.4 矩量法分析..... (37)

第三章 无线电收信系统中的噪声

- 3.1 放大器及馈线噪声..... (48)
- 3.2 天线噪声温度..... (55)
- 3.3 三种典型无线电收信系统..... (62)

第四章 有源接收放大天线通论

- 4.1 基本电性能..... (71)

- 4.2 电性能要求..... (82)
- 4.3 两种高频有源接收放大天线 (101)

第五章 有源接收放大天线专论

- 5.1 用有源耦合网络连接电小感应器和高增益前置放大器 (108)
- 5.2 有源接收放大天线的一种设计方法 (118)
- 5.3 有源接收放大天线的性能限制 (130)
- 5.4 调谐式有源接收放大单振子天线 (133)
- 5.5 鞭-环形有源接收放大天线的信号和噪声分析 (142)

第六章 有源功率放大发射天线

- 6.1 有源功率放大发射天线简论 (158)
- 6.2 鞭-环形有源功率放大发射天线..... (166)
- 6.3 低高度有源功率放大发射天线 (180)
- 6.4 单振子有源功率放大发射天线 (183)
- 6.5 有源功率放大发射天线的统一模型及其分析 (186)
- 6.6 有源功率放大发射天线外参数计算 (195)

第七章 有源天线阵

- 7.1 二元有源天线阵 (199)
- 7.2 天线间的互耦及有源天线阵设计 (205)
- 7.3 抑制有源单振子互耦及其应用 (216)
- 7.4 环形有源天线阵 (224)

习 题

参考文献

第一章 导 论

本章叙述连接发信机和发信天线或连接接收天线和收信机的馈线中的基本关系；导出无线电通信方程，其中突出了天线电性能在无线电通信中的作用；在此基础上综述天线基本概念，引出有源天线问题；概述电小无源天线，指出其性能局限性；陈述有源天线特性，分类；最后简单介绍全书内容。

1.1 无线电通信系统馈线中的基本关系

任何无线电通信系统，广义言之，包括通信、电视和雷达等，不外乎由发信分系统、收信分系统及二者之间的无线电信道所组成。无论发信分系统还是收信分系统都是自信号源经馈线向负载传输信号。图 1-1 表示长为 l 的馈线，输入端 1-1' 连接信号源，用均方根 (RMS) 值源电压 U ，串联输出阻抗 Z_s 表示，输出端 2-2' 连接负载，用负载阻抗 Z_L 表示。发信分系统中信号源是发信机，负载是发射天线；收信分系统中信号源是接收天线，负载是收信机。天线一般有“明确”的电路端与馈线相连。

通常使用均匀馈线，其分布参数——每单位长度电阻、电感、电导、电容为沿线不变的 R, L, G, C ，则特性阻抗、传输常数亦沿线不变为

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (1-1)$$

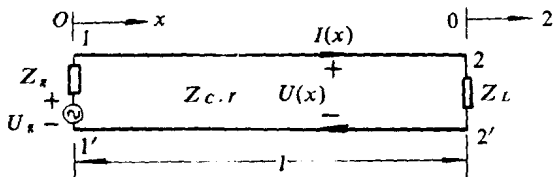


图 1-1 馈线及信号源、负载

$$r = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (1-2)$$

式中, $Z = R + j\omega L$, $Y = G + j\omega C$, $\omega = 2\pi f$, f ——信号源频率;
 α ——衰减常数, β ——相移常数(波数)。一般低损耗馈线,
 $Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{实数}$, 本书仅限于这种实际情况。沿馈线分布电
 压、电流、阻抗为

$$U(x) = \frac{U_s Z_c e^{-rx}}{Z_s + Z_c} \left[\frac{1 + \Gamma_1 e^{2rx}}{1 - \Gamma_s \Gamma_1} \right] \quad (1-3)$$

$$I(x) = \frac{U_s e^{-rx}}{Z_s + Z_c} \left[\frac{1 - \Gamma_1 e^{2rx}}{1 - \Gamma_s \Gamma_1} \right] \quad (1-4)$$

$$Z(x) = \frac{1 + \Gamma_1 e^{2rx}}{1 - \Gamma_s \Gamma_1} Z_c \quad (1-5)$$

或者, 由 $x = l + z$ (源端 1-1', $x = 0$; 负载端 2-2', $z = 0$), 它们
 又可表示为

$$U(z) = \frac{U_s Z_c e^{-r(l+z)}}{Z_s + Z_c} \left[\frac{1 + \Gamma_L e^{2rz}}{1 - \Gamma_s \Gamma_L} \right] \quad (1-6)$$

$$I(z) = \frac{U_g e^{-\gamma(l+z)}}{Z_g + Z_c} \left[\frac{1 - \Gamma_L e^{2\gamma z}}{1 - \Gamma_L \Gamma_g} \right] \quad (1-7)$$

$$Z(z) = \frac{1 + \Gamma_L e^{2\gamma z} Z_c}{1 - \Gamma_L e^{2\gamma z}} Z_c \quad (1-8)$$

式中

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_c}{Z_L + Z_c}, \quad \Gamma_1 = \frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = \Gamma_L e^{-2\gamma l} \quad (1-9)$$

$$\Gamma_g = \frac{Z_g - Z_c}{Z_g + Z_c}, \quad \Gamma_2 = \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} = \Gamma_g e^{-2\gamma l}$$

Γ_L, Γ_1 ——在负载端、源端向负载入射波的反射系数, Γ_g, Γ_2 ——在源端、负载端向源入射波的反射系数; Z_1, Z_2 ——在源端向负载看、在负载端向源看(令 $U_r = 0$)的阻抗。诸反射系数的关系为

$$\Gamma_L \Gamma_2 = \Gamma_g \Gamma_1 \quad (1-10)$$

各阻抗与各反射系数的关系为

$$Z_j = \frac{1 + \Gamma_j}{1 - \Gamma_j} Z_c, \quad j = L, g, 1, 2 \quad (1-11)$$

$$\Gamma_j = \frac{Z_j - Z_c}{Z_j + Z_c}, \quad j = L, g, 1, 2 \quad (1-9')$$

各阻抗的电阻部分与各反射系数的关系为

$$R_j = \frac{1}{2}(Z_j + Z_j^*) = \frac{1 - |\Gamma_j|^2}{|1 - \Gamma_j|^2} Z_c = M_j \frac{|Z_c + Z_j|^2}{4Z_c}, \quad j = L, g, 1, 2 \quad (1-12)$$

式中, 右上角 * 号表示共轭复数

$$M_j = 1 - |\Gamma_j|^2 = \frac{4Z_c R_j}{|Z_c + Z_j|^2}, \quad j = L, g, 1, 2 \quad (1-13)$$

称为在各端的阻抗失配因数。馈线上衰减小时, 沿线电压驻波

比

$$S = \frac{1 + |\Gamma_L|}{1 - |\Gamma_L|} \quad (1-14)$$

纯电阻负载, $Z_L = R_L$,

$$S = \frac{R_L}{Z_c}, \text{ 若 } R_L > Z_c \quad (1-15)$$

$$S = \frac{Z_c}{R_L}, \text{ 若 } R_L < Z_c \quad (1-16)$$

信号源经馈线供给负载的输出功率

$$P_L = \frac{|U_s|^2}{4R_s} \times \frac{M_s M_L}{L} \quad (1-17)$$

式中, $\frac{|U_s|^2}{4R_s}$ ——信号源的可用输出功率,即在源端在阻抗共轭匹配条件下信号源的最大输出功率; L ——馈线及阻抗失配所引入的“损耗”因数,

$$\begin{aligned} L &= |1 - \Gamma_L \Gamma_2|^2 e^{2\alpha l} = |1 - \Gamma_s \Gamma_1|^2 e^{2\alpha l} \\ &= |1 - \Gamma_L \Gamma_s e^{-2\tau l}|^2 e^{2\alpha l} \end{aligned} \quad (1-18)$$

信号源供给馈线的输入功率

$$P_1 = \frac{|U_s|^2}{4R_s} \times \frac{M_s M_1}{|1 - \Gamma_s \Gamma_1|^2} = \frac{|U_s|^2}{4R_s} \times \frac{M_s M_1}{L} e^{2\alpha l} \quad (1-19)$$

馈线的效率 η , 为信号源向负载输出功率与向馈线输入功率之比

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_L}{P_1} = \frac{M_L}{M_1} e^{-2\alpha l} = \frac{M_L}{M_1} \times \frac{|1 - \Gamma_L \Gamma_2|^2}{L} = \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{1 - |\Gamma_L|^2 e^{-4\alpha l}} e^{-2\alpha l} \\ &= \frac{1}{\text{ch}2\alpha l + \frac{1}{2} \left(s + \frac{1}{s} \right) \text{sh}2\alpha l} \end{aligned}$$

$$\approx \frac{1}{1 + (s + \frac{1}{s})al}, \text{ 若 } 2al \ll 1 \quad (1-20)$$

仅在 $\Gamma_L = 0$ 时

$$\eta = \frac{1}{L} = e^{-2\alpha l} \quad (1-21)$$

1.2 无线电通信方程

为了全貌了解无线电通信系统(图 1-2),并突出天线在其中的作用,本节简单介绍无线电通信方程。

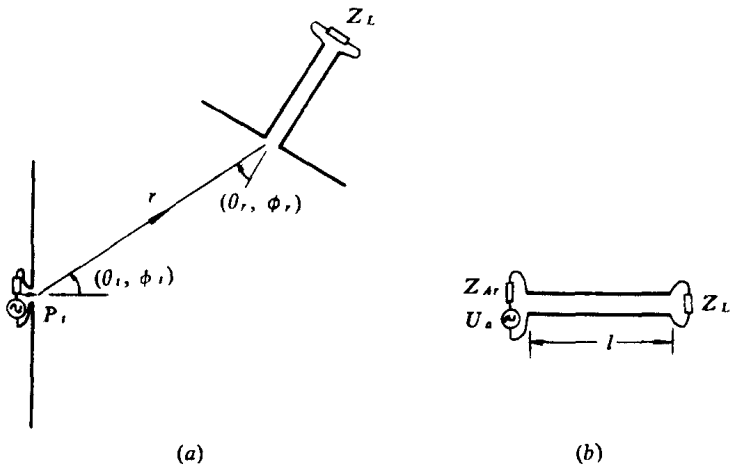


图 1-2 无线电通信系统

问题是:在无线电波自由空间传播条件下,计算无线电线路的接收信号功率。设发信机经馈线供给发射天线的输入功

率为 P_i 。发射天线投射到接收天线的功率通量密度

$$p_i = \frac{P_i G_i(\theta_i, \varphi_i)}{4\pi r^2} \quad (1-22)$$

式中, $G_i(\theta_i, \varphi_i)$ ——发射天线在 (θ_i, φ_i) 方向的增益, 等于其效率乘以在该方向的方向系数, r ——发射和接收两天线之间的直视距离。 p_i 在接收天线输出端产生的开路电压为

$$U_o = h_o \cdot E_i \quad (1-23)$$

式中, h_o ——接收天线的有效高度(或有效长度)矢量, E_i ——发射天线在接收点所生电场强度矢量, 其均方根值为

$$\sqrt{\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} p_i}, \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi \text{——自由空间波阻抗, } \mu_0, \varepsilon_0 \text{——自由空间磁导率, 介电常数。}$$

$h_o \cdot E_i$ 可能的最大值为 $|h_o| \cdot |E_i|$, 发生于 h_o 等于一个实常数乘以 E_i 的共轭复数。一般情形 $|h_o \cdot E_i| < |h_o| \cdot |E_i|$, 称接收天线极化与入射电波极化不匹配。极化失配因数

$$p = \frac{|h_o \cdot E_i|^2}{|h_o|^2 \cdot |E_i|^2} \quad (1-24)$$

用式(1-17)计算负载所吸收的信号功率 P_L , 信号源电压 U_s 为 U_o , 源阻抗 Z_s 为接收天线的输出阻抗 $Z_{Ar} = R_{Ar} + jX_{Ar}$, 对普通无源天线即为它作发射天线时的输入阻抗, 负载阻抗 Z_L 为收信机的输入阻抗, 而

$$P_L = \frac{|U_o|^2}{4R_{Ar}} \frac{M_r M_L}{L} p \quad (1-25)$$

式中, $M_r = 1 - |\Gamma_r|^2 = \frac{4Z_c R_{Ar}}{|Z_c + Z_{Ar}|^2}$ ——接收天线的失配因数, Γ_r ——馈线上在接收天线端向它入射波的反射系数; M_L

$= 1 - |\Gamma_L|^2 = \frac{4Z_c R_L}{|Z_c + Z_L|^2}$ ——收信机的失配因数, Γ_L ——馈线
上在收信机端向它入射波的反射系数, $L = |1 - \Gamma_L \Gamma_L e^{-2\alpha l}|^2 e^{2\alpha l}$ 。

资用接收功率可表成

$$\frac{|U_s|^2}{4R_{Ar}} = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} A_r \quad (1-26)$$

式中, 接收天线有效接收面积 A_r , 为接收天线资用输出功率
与入射波功率通量密度之比, 可证

$$A_r = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad (1-27)$$

或接收天线增益

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

$P_t G_t$ ——发射天线等效全向辐射功率。于是, 接收功率亦可表
成

$$P_L = \frac{P_t G_t}{4\pi r^2} \times \frac{M_r M_L}{L} p A_r \quad (1-29)$$

或

$$P_L = \frac{\lambda^2 P_t}{16\pi^2 r^2} \times \frac{M_r M_L}{L} p G_t G_r \quad (1-30)$$

G_t, A_r, G_r 通常指发射天线最大辐射方向增益, 接收天线最大
接收方向有效接收面积、增益, 不然应代之以 $G_t(\theta_t, \varphi_t)$ 、
 $A_r(\theta_r, \varphi_r)$ 、 $G_r(\theta_r, \varphi_r)$ 。上式称为弗里斯(Friis)无线电通信方
程, 是就发射和接收天线位于自由空间推导出来的, 在此基础
上附加某些因数可推广到更复杂的实际情况。

从通信方程可知, 无线电系统为了获得高电平接收信号,
除了在发信端提高发射天线输入功率(降低发信机输出阻抗、
发射天线输入阻抗同馈线特性阻抗的失配程度, 减小损耗因

数),并提高发射天线增益之外,就收信方面而言,应降低接收天线输出阻抗、收信机输入阻抗同馈线特性阻抗的失配程度,减少损耗因数,改善极化匹配,提高接收天线的有效高度、有效接收面积或增益。

1.3 天线的基本概念与定义

任何无线电系统都是由无线电信道及终端设备所组成。天线是无线电发信或收信终端设备中用来有效辐射或接收无线电波的装置。简言之,发射天线是无线电波辐射器,接收天线则是无线电波感应器。在无线电系统中,天线是发信机-馈线与无线电信道之间,或无线电信道与馈线-收信机之间必不可少的接口设备。

这样定义天线,是就其功能的效果而言。从接口功能设备中发生的过程来看,天线是波变换器:发射天线把发信机所激发、经馈线传输来的导行电磁波变换为自由电磁波向空间传播;接收天线则把自空间传播来的自由电磁波变换为导行电磁波、经馈线传输去激励收信机;发信机或收信机若不经馈线(或馈线极短)而直接与天线相连,天线便是集点参数电路电磁场与自由电磁波变换器,或者反之。

作为无线电波辐射器或感应器,天线基本结构必须取开放形式的金属杆或面,称为“线天线”或“面天线”。线天线在其输入端连接发信机-馈线,或在其输出端连接馈线-收信机。面天线中的喇叭天线亦如此。面天线中的反射面天线,是由馈源及反射面组成,馈源本身仍是较小的天线;馈源的辐射波在反射面上激发出分布电荷、电流再辐射电磁波,或自外空间传播

来的无线电波在反射面上激发出分布电荷、电流，其辐射波为馈源所接收。发射天线辐射无线电波，根本上说，是发信机-馈线在天线上激励起的变速运动分布电荷和变化分布电流在辐射无线电波。电磁波场是推迟场——在观察点的场滞后于波源的相位的变化部分与二者的距离成正比、与波速成反比。辐射场与场的推迟性有着密切的联系。天线上分布电荷、电流所辐射的全部诸成分无线电波，由于天线构形开放而产生有效的合成无线电波，即产生有效的波变换。诸成分波由叠加而形成合成波，称为波的干涉。除了波变换之外，天线的另一项最重要基本特性——辐射无线电波的方向性，是由各种无线电波的波程差（它是由于场的推迟性而形成的，且与方向有关）所导致的相位差，在相干时产生合成无线电波的场强度及相位与方向有关造成的。接收天线接收无线电波，根本上说，是自空间传播来的无线电波在天线上感应出分布电压激发经馈线传输的导行波去激励收信机，特别是天线上分布感应电压所激发的全部诸成分导行波由于天线构形开放而产生有效的、其强度基于波场的推迟性而与入射天线的无线电波的方向有关的合成导行波，即产生有效的波变换和天线接收无线电波的方向性。

天线历来是单纯的波变换器，其结构内未装置有源电路，在发生波变换前后天线不处理所传输信号。这里所谓“处理”主要指的是信号放大，亦可包括振荡、检波或变频（混频）等，系统是在用馈线与天线级联的发信机或收信机中处理信号的。

然而，自 60 年代以来，天线科技工作者在弱方向性天线领域突破常规开发了另一类所谓有源天线。有源天线是无