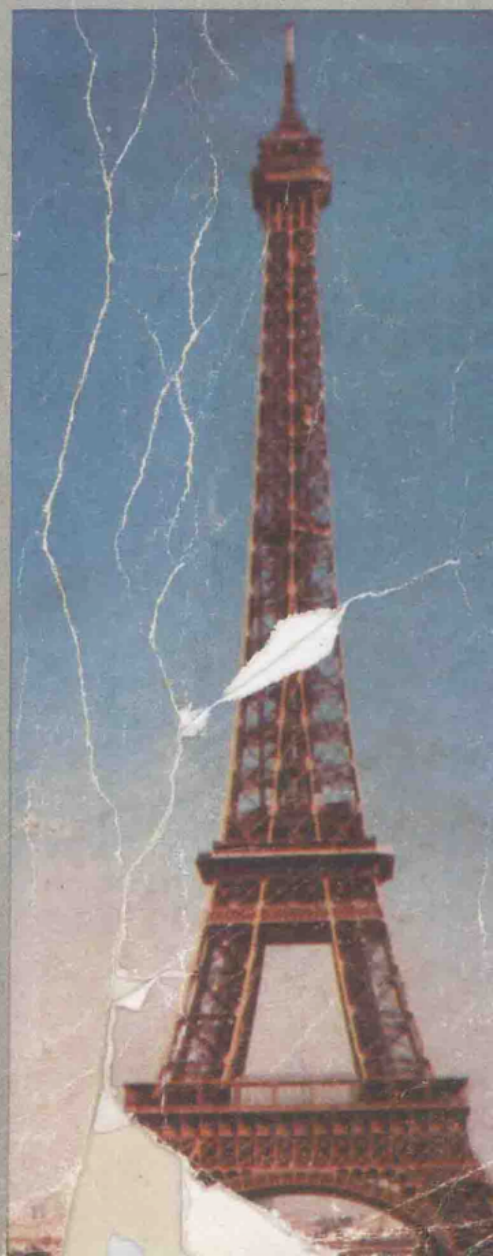


天线原理与应用

李斌颖 编著

TI ANXI AN
YUANLI
YUYINGYONG
LANZHOU DA
XUE CHU BAN SHE

兰州大学出版社



甘字登字第80号

天线原理与应用

李斌颖 编著

第 1 版

第 1 次印刷

兰州大学出版社

(甘肃兰州)

第 1 版

第 1 次印刷

第 1 版

第 1 次印刷

兰州大学出版社

兰州 730000

兰州大学出版社

1993年8月第1版

730000-1-1

1993年8月第1版

第1次印刷

730000-1-1

(甘)新登字第 08 号

天线原理与应用

李斌颖 编著

天线原理与应用

李斌颖 编著

兰州大学出版社出版

(兰州大学校内)

定西地区印刷厂印刷

甘肃省新华书店发行

开本:787×1092毫米 1/16

印张:31.25

1993年6月第1版

1993年6月第1次印刷

字数:792千字

印数:1-1000册

ISBN7-311-00602-3/O·82 定价:28.50元

前 言

本书根据编者多年为兰州大学无线电物理专业本科生和硕士研究生讲授的《天线原理》和《天线理论基础》课程讲义和讲稿及从事天线理论研究之心得,并博取国内外相关学科领域的前辈和同仁所做的精辟论述与科学著作,整理修订融会补充而成。经兰州大学教材编审委员会审定推荐出版。

作为天线理论与技术的基础教材,本书旨在强调明晰天线的物理概念、深入阐述天线的基本原理;具体分析天线的研究方法、重点介绍天线的实际应用。为考虑其系统完备,使之成为较适用的高等学校教学及工程技术参考用书,全书篇幅较大,内容显已超过一学期教学量的时限。但对引导高年级本科生及低年级研究生学习或为相关专业技术人员参考,尚有必要。

在编写过程中,曾得到郝臻、张英林二位教授的中肯建议及陈玉清、李彩云、吴燕云、江志学等同志的帮助与支持,使本书更臻完善并及时面世。在此一并深致谢意。同时感谢本书所及大量参考资料的诸位作者。

限于本人水平与能力,书中错误、欠妥与不足之处在所难免。敬请读者不吝指正。

李斌颖 1993年4月于兰州

绪 论

一、天线的功能

众所周知,对于任何无线电技术工程设施,无论其用途如何,例如:通信、广播、电视、测向、雷达、导航等等,都无一不是靠无线电波亦即电磁波传递信息来实现的。而无线电波的发射和接收,则又全凭天线来完成,天线就是向空间发射电磁波或由空间接收电磁波的装置。因此,所有以自由空间为电磁波传播媒质的无线电系统,无一例外地都必须具有天线装置。于是,天线及其馈电系统,便成为收发设备与自由空间之间的连接环节。

天线具有两方面的功能:其一是能量变换;其二是定向辐射或接收。即:对于发射天线来说,其作用是将馈线输入的射频电流能量,转换为电磁波能量,并将其集中辐射到空间预定的方向上形成辐射场分布;而对于接收天线来说,其作用则是将空间预定方向传来的电磁波截获,并将其还原为射频电流,再经馈线输入于接收机。

虽然任何随时间变化的电流,原则上都能产生电磁辐射,形成天线效应。但能够辐射和接收电磁波的单元,并不一定都可用作为天线,因为一副具体的实用天线,必须是一个电磁开放系统,并且还应满足一定的参数要求,如效率、方向性及带宽等。

鉴于天线具有上述两方面的作用,故将天线首先可以看成是一个能量变换器。为此,天线必须有效地完成能量转换,亦即要求高效率、低损耗;其次,天线又是一个定向辐射器,以其自身固有的方向性,将电磁能量集中辐射到自由空间的一定方向上。为此,则应根据不同用途的要求,来选择具有不同方向性的天线。

此外,根据发射天线和接收天线,对能量转换其工作过程相反的特点,表明了两者的可逆性。正像发电机和电动机的可逆性一样,发电机将机械能转变为电能,而电动机则将电能转变为机械能,二者彼此是可逆的。

天线的可逆性不仅表现于,同一付天线可任意作为发射天线或接收天线使用,其结构形式完全不变。同时还表现于,同一付天线无论用于发射还是用于接收,其特性参数也都完全一样,这在理论和实验中都得到了充分证明,亦即天线的互易定理。

二、天线的概况

1873年英国物理学家麦克斯韦(Maxwell)建立的电磁理论奠定了天线的理论基础。1887年德国物理学家赫兹(Hertz)在电磁波产生的经典实验中,首次使用了天线。即赫兹偶极子或基本振子。它由两个相距甚近的小球组成,采用火花放电激励电磁波辐射,接收使用环天线。100多年来,天线理论和技术,随无线电电子科学技术的发展而迅速地成长,目前业已成为一个独立而完整的学科体系。多种多样的天线类型,广泛用于各个领域,天线在开拓和发展无线电技术中,已经起了和正在起着重要的突破性的作用,其技术的发展前景将无可限量。

为全面概括地了解天线的现状,并展望其未来的发展。在此,不妨对过去的年代,做一简要的回顾。

20世纪初,无线电技术主要用于长波无线电通信。1901年意大利物理学家马可尼(Marconi)最先使用大型天线实现远洋通信,其发射天线采用50根下垂铜线组成,顶部用水平横线

连在一起,横线牵引在两个支撑塔上。这就是付之实用的第一付天线,即马可尼天线,亦称垂直接地天线或单极天线。当时,相应提出了该天线的理论分析和工程设计方法。

早期,天线的发展受到振荡源的限制,大约到1920年,三极管出现,可以产生1MHz连续波之后,谐振式半波天线才得以实现。1925年前后,人们发现短波能够被电离层反射,可用于远距离通信,于是便相继产生了一些新型定向短波天线,例如同相天线、V形天线等。但是,由于电离层受太阳辐射的影响,昼夜不同、四季变化,本身并不稳定。为了解决由此引起的每天早晚更换通信波长而必须改调天线的麻烦,又陆续出现了各种短波波段的宽频带天线,例如倍波天线、菱形天线、笼形天线等。

30年代中期,由于微波电子器件速调管和磁控管的产生,以及二次世界大战军事上的需要,雷达技术得到了迅速发展,从而要求天线具有很强的方向性,于是各种新型的微波天线,如喇叭天线、抛物面天线、透镜天线等,开始发展并应用起来。与此同时,有关天线的理论基础、原理分析和计算方法,开始逐渐形成了一门独立学科。此外,随着频率提高波长变短,电磁波的似光特性进一步表现出来。从而为射电天文、航天技术、卫星通信、定位、导航等方面的研究和应用开拓了广阔的前景,使超短波及微波天线的应用范围日益广泛,不仅在上述各方面,而且在电视及调频广播等方面也普遍应用起来。随之出现了螺旋天线、对数周期天线、微带天线及蝙蝠翼形天线等多种形式的宽频带超短波天线。特别是超短波八木天线自1926年问世以来经久不衰,到现在仍占有非常重要的地位。

近20年以来,由于电子技术、空间技术和计算机技术的飞速发展,促使天线为适应和满足各种不同用途的要求,其形式和种类也日益增多,性能指标不断改进提高。例如双反射面卡塞格伦天线得到了广泛地应用,球面反射器也受到了极大的重视。单脉冲天线、多波束天线、合成口径天线、自适应天线、有源天线、与频率无关天线等,也颇为人们所关注。另外,由于遥感技术的发展,天线的散射特性、瞬时特性以及天线在导体或等离子体中的辐射特性也都引起了广泛的重视。

随着现代科学技术的发展,要求雷达应具有搜索、引导、跟踪等多种功能及强抗干扰能力;而对于通信系统则要求具有更大的信息容量。为此,时域天线这一新课题逐渐发展起来。同时还出现了微波全息天线及非正弦波天线等新领域。

此外,在航天与卫星技术中,对天线结构特别提出了小型、轻便、平嵌等一系列要求,因此,微带天线近年得到迅速发展,类型不断增多,相应课题的研究正在开展,许多成功的设计已在空间电子学和常规天线领域中获得了广泛的应用。

天线理论与技术的发展,进一步加深了人们对电磁场辐射特性的认识。天线的基本概念可以由两种方式进行解释,其一是在天线结构上施加外电压激励起强迫振荡电流而产生电磁辐射,如振子天线等。其二是将电磁波引入到天线结构引起感应电流而产生辐射场,如反射面天线等。因此,天线理论的主要问题是求解载流天线结构的电磁辐射特性及电磁波的散射、绕射场分布。在此,有必要强调散射与绕射这两个概念的意义与区别,当电磁波在传播途径上,遇到障碍物如理想导体时,在其上将感应出电流和电荷,这些电流和电荷产生的附加场称为散射场,总场为入射场和散射场的矢量和。而绕射场只是散射场的一部分,凡偏离了几何光学定律的散射场,都称为绕射场。散射场包含着绕射场和反射场。它们都属于电磁场的边界值问题。即根据边界条件——激励条件与辐射条件(即无限远区的边界条件),求解麦克斯韦方程或波动方程的问题。对此,通常为了便于求解,总是首先从给定天线电流分布或口径场分布,来求解辐射场这一比较简单的问题开始,再根据边界条件建立以电流分布为待求函数的积分方程。从

而将问题转化为求解积分方程的问题。因此,天线理论的基本问题,便归结为求解偏微分方程或积分方程问题。求解这些方程的方法可分为三类:即严格解析法、近似解析法和数值法。

严格解析法是将天线上的源和空间的电磁场视为一个整体,按电磁场边值问题,求解偏微分方程的严格解,对此有两种解法,即分离变量法和格林函数法——积分法。但对于积分方程的严格求解往往都很困难,因而比较少见,到目前为止,在天线领域内得到严格解的问题不多,只有极少数几何形状简单的天线,才能得到严格解,而且一般也都非常复杂。例如,在利用分离变量法,求解波动方程时,只有当天线外表面与可分离变量的坐标系的一个坐标面完全重合,或与该坐标系的几个坐标面部分重合时才能奏效。为此而采用的坐标系及其相应的坐标变换,可能已经相当复杂。由于能够求出严格解的问题非常有限,因此,利用近似解就很有必要了。近似解析法是天线工程中最常用的求解方法。此法较为简单,是将天线上的场源分布和天线周围的电磁场分布分为两个彼此独立无关的问题来看待。首先利用近似的方法确定天线上的场源分布,然后再根据已经求得的场源分布,去求解天线以外空间的电磁场。近似法主要可分为:微扰法、变分法、迭代法及经典的高频技术,如几何光学法、物理光学法、几何绕射法及物理绕射法等。60年代以来,由于计算机运算速度的不断提高,及其存贮能力逐渐扩展,同时有关电磁场问题的数值计算和渐近计算取得了重要发展。因而,天线理论分析和计算方法也相应得到了新的进展。关于数值解法,又可分为纯数值解和矩量法。在纯数值解中,以差分代替微分;以求和代替积分。然后用电子计算机进行数值计算。而在矩量法中,则采用取内积的方法,将微分方程或积分方程分为矩阵方程,然后再用电子计算机求解矩阵方程。

当前乃至今后若干年内,天线技术还需要在以下课题中进行大量的研究工作:*

1、研究各种型式的天线性能的改进及其有关的 RF 器件,这主要包括高效、低耗、弱副瓣和宽频带或多频共用。

2、研究双极化或极化捷变的并具有宽频带性能的天线。

3、研究灵巧的集成化的阵列馈源及其混合型天线,使之既能满足一定的指标要求,又要造价低,而且可以机动。

4、研究作为天线和微波器件用的微带和带线、混合微波集成电路和单片微波、毫米波、亚毫米波分系统集成电路,研制新型毫米波和亚毫米波的传输线。

5、研究天线所在的环境及其在环境中的综合与最佳设计问题,既要研究处理环境问题的理论模型,又要研究环境问题的测试方法,并利用计算机辅助设计来处理。

6、研究多功能自控天线,研究“隐身”天线及其对抗措施,研究天线的电磁兼容及测量用的毫米波和亚毫米波探头。

7、改进天线和天线罩材料及其设计、加工和检测方法,以及采用新材料、新工艺带来的新问题。

8、研究场强、干扰和天线测量的新方法、新仪器,对各种不同媒质中的感应场、辐射场的测量及场区划分作进一步探讨,研究极低付瓣电平的测试,并建立其测试标准和校准范围。

9、研究超大型天线和极小型天线的设计、加工、测量及维护使用等有关问题。

10、研制新型天线和提出新的天线概念。

在此基础上,要使天线系统实现多波束、多极化、多频段、高效率、高精度、高可靠性;低功耗、低付瓣、低造价;以及小型化、集成化、自动化。在今后的年代,天线技术将面对相关科技

* 都世民,“天线技术展望”,电子科学技术 1986.4.

术发展形势的挑战,向更深、更宽的领域里探索,寻求更多更大更快更新的突破的飞跃。

另外还应指出,天线与发射机或接收机的连接部件,即馈线系统,其形式随频率而异,可以用双线或四线传输线、同轴电缆、波导及微带线等等。自然,其中还应包括相应的连接、旋转关节、调配装置及天线开关等单元。由于馈线系统和天线的联系十分紧密,因此,有时将天线和馈线系统作为一个部件,统称天线馈线设备,或简称天馈系统、甚至简称天线装置。

三、天线的分类

目前实际应用的天线,种类十分繁多,形式层出不穷。就其用途、结构、形式、特性及原理,也都各不相同。为了便于研究,人们对天线进行了分类。然而,由于各自的观点不同,分类的方法也不尽一样,至今对天线类别的划分尚无统一准则。一般常见的分类方法大致为:

I、按使用方式分类,可分为发射天线、接收天线和收发共用天线。

II、按使用目的分类,可分为广播天线、电视天线、通信天线、雷达天线、导航天线及测向天线等。

III、按结构型式分类,可分为线天线和面天线。

IV、按特性分类,例如:1、以方向特性划分,可分为强方向性天线、弱方向性天线、定向天线、全向天线、针状波束天线及扇形波束天线等。2、以极化特性划分,可分为线极化——垂直极化和水平极化天线、圆极化——左旋圆极化和右旋圆极化天线及椭圆极化天线。3、以频带特性划分,可分为窄频带天线、宽频带天线及超宽频带天线。

V、按馈电形式分类,可分为对称天线、不对称天线、驻波天线和行波天线等。

VI、按使用波段分类,可分为超长波天线、长波天线、中波天线、短波天线、超短波天线及微波天线等。

VII、按外形结构分类,可分为T形天线、V形天线、例L形天线、菱形天线、环形天线、螺旋天线、喇叭天线、透镜天线、反射面天线、相控阵天线及微带天线等。

此外,近年来还发展了一些新型天线,也可自成一类,例如:单脉冲天线、自适应天线等等。

总之,天线的分类方法很多,对于研究天线各有方便之处。由于天线的类别和型式不胜枚举,我们在学习和研究过程中,不可能也无必要逐个进行分析讨论。因为,虽然天线类型有别,但其基本辐射原理与计算方法却基本近似或相同。因此,只要选择典型加以研究,充分掌握天线的基本原理和分析方法,便可融会贯通,灵活运用于任何具体天线的问题中去。

四、本书的宗旨

天线是一门电磁理论应用的科学,属于电磁工程范畴,其特点是物理概念和应用数学的紧密结合,对于天线的教学,需要分两个阶段进行,第一阶段是本科生的天线课,第二阶段是研究生的天线课,在第一阶段,由于受到数理基础的限制,只能着重讲解天线的物理概念、天线最基本的理论原理,和天线的各种型式及其实际应用等方面。在此原则上应尽量避免或少用较深的数学方法,对一些重要公式的推导,和重要结论的证明,力求简明严谨,概念清晰。同时阐明各种典型天线形式的机理性能、用途和发展趋势,以介绍天线的全貌,讲术系统的基础知识,分析天线原理的物理本质,而不过分追究较深的数学理论问题。

至于第二阶段的课程,则必须在强调物理概念的同时,结合数学进行教学,利用必要的数学工具,分析和处理天线的理论问题。这实际上是一门数学物理课程,其中几乎涉及到数理方程和数理方法的所有方面。在此,对各种形式的天线都作为边界值问题来处理,从而得到

各种天线的数学处理方法。

本书作为天线原理基础教材,不准备详细介绍求解天线电磁场问题的各种严格理论,而是首先求解基本辐射单元(电流元、磁流元和惠更斯元)的电磁场,并利用电磁场的迭加原理再求得天线的辐射场。其次分析、讨论各种典型实用天线的型式、结构、特性、原理及基本计算方法。由于天线问题比较复杂,形式种类十分繁多,在此不可能面面俱到,仅以此基础理论原理启迪思维提供学习参考。使读者掌握天线的基本原理;熟悉天线的分析方法;领会天线的设计计算原则;了解天线主要参数的测量技术。从而,为进一步学习天线理论、从事天线设计、开展天线科研及创立新型天线奠定基础。

目 录

| | | | |
|-------------------------------------|------|------------------------------------|-------|
| 绪论 | (1) | § 4-5 天线辐射特性受地面影响时的变化 | (74) |
| 第一章 天线的基本参数 | (1) | 第五章 阵列天线综述 | (78) |
| § 1-1 辐射功率、损耗功率、天线功率及 天线效率 | (1) | § 5-1 均匀直线型阵天线 | (78) |
| § 1-2 天线的方向特性 | (3) | § 5-2 谢昆诺夫单位圆及其应用 | (88) |
| § 1-3 天线的阻抗特性 | (7) | § 5-3 线性阵天线的综合法 | (93) |
| § 1-4 天线的极化特性 | (8) | § 5-4 圆形阵天线 | (104) |
| § 1-5 天线的频率特性 | (9) | § 5-5 平面阵与立体阵天线 | (107) |
| § 1-6 天线的有效长度和有效口径 | (9) | § 5-6 阵列天线的阻抗 | (110) |
| § 1-7 夫利斯传输方程和雷达测距方程 .. | (11) | 第六章 行波天线与宽频带天线 | (112) |
| § 1-8 天线的噪声温度 | (13) | § 6-1 行波天线 | (112) |
| 第二章 基本辐射单元及其辐射特性 | (15) | § 6-2 菱形天线 | (114) |
| § 2-1 电磁辐射的场方程与位函数 | (15) | § 6-3 引向天线 | (121) |
| § 2-2 电磁辐射的物理概念 | (20) | § 6-4 背射天线 | (131) |
| § 2-3 基本振子辐射理论 | (22) | § 6-5 圆柱螺旋天线 | (133) |
| 第三章 线性振子辐射基本分析 | (30) | § 6-6 双圆锥天线 | (141) |
| § 3-1 对称振子的电流分布 | (30) | § 6-7 等角螺旋天线 | (143) |
| § 3-2 对称振子的辐射场 | (31) | § 6-8 对数周期天线 | (148) |
| § 3-3 对称振子的方向性图 | (33) | § 6-9 翼形天线 | (161) |
| § 3-4 对称振子的方向性系数 | (35) | § 6-10 双环天线 | (169) |
| § 3-5 对称振子的辐射功率与辐射阻抗 | (36) | 第七章 环天线与开缝天线 | (175) |
| § 3-6 对称振子的输入阻抗 | (38) | § 7-1 电小圆环天线 | (175) |
| § 3-7 折合振子 | (50) | § 7-2 电流均匀分布的圆环天线 | (180) |
| § 3-8 线振子馈电系统的平衡转换装置 | (54) | § 7-3 电流非均匀分布的圆环天线 | (183) |
| 第四章 耦合振子系统辐射特性及地面 的影响 | (59) | § 7-4 矩形环天线 | (184) |
| § 4-1 耦合振子的辐射场 | (59) | § 7-5 磁性环天线 | (187) |
| § 4-2 方向图相乘积法则 | (63) | § 7-6 巴俾涅原理 | (189) |
| § 4-3 耦合振子的阻抗分析及感应 电势法 | (67) | § 7-7 理想开缝天线 | (191) |
| § 4-4 镜像原理 | (73) | § 7-8 波导开缝天线 | (194) |
| | | § 7-9 波导开缝阵天线 | (199) |
| | | 第八章 接收天线原理 | (203) |
| | | § 8-1 应用互易定理分析接收天线 的特性 | (203) |
| | | § 8-2 接收天线的等效电路及最大功率 传输条件 | (206) |

| | | | |
|------------------------------|-------|-------------------------------|-------|
| § 8-3 接收天线的有效面积 | (207) | § 12-4 旋转抛物面天线的辐射场 | (346) |
| § 8-4 接收天线的方向性 | (207) | § 12-5 空间衰减因子 | (352) |
| § 8-5 接收天线上的电流分布 | (209) | § 12-6 旋转抛物面天线的方向性系数和增益 | (353) |
| § 8-6 接收天线的热噪声 | (211) | § 12-7 旋转抛物面天线的馈源 | (358) |
| 第九章 口径天线绕射理论基础 | (214) | § 12-8 抛物面天线的技术公差 | (360) |
| § 9-1 口径天线绕射理论的基本问题 | (214) | § 12-9 抛物面天线的结构 | (363) |
| § 9-2 口径天线理论的辅助源法 | (215) | § 12-10 抛物面影区辐射的几何绕射理论 | (365) |
| § 9-3 等效原理 | (221) | § 12-11 球形反射面天线 | (370) |
| § 9-4 口径天线理论的矢量位法 | (223) | § 12-12 双反射面天线 | (372) |
| § 9-5 口径天线理论的波动光学法 | (226) | 第十三章 微带天线 | (386) |
| § 9-6 口径天线理论的平面波谱法 | (234) | § 13-1 微带天线的辐射机理 | (386) |
| § 9-7 口径场绕射的天线场区域划分 | (239) | § 13-2 微带天线辐射场的分析 | (387) |
| § 9-8 口径天线理论的几何光学法 | (242) | § 13-3 矩形微带天线基本分析 | (391) |
| § 9-9 口径天线理论的几何绕射理论 | (245) | § 13-4 矩形微带天线的设计 | (395) |
| § 9-10 平面口径的绕射 | (254) | § 13-5 实际矩形微带天线的设计考虑 | (399) |
| 第十章 喇叭天线 | (281) | § 13-6 圆形微带天线基本分析 | (403) |
| § 10-1 波导端口的辐射 | (281) | § 13-7 圆形微带天线的设计 | (409) |
| § 10-2 喇叭天线的内场及其口径场 | (283) | § 13-8 实际圆形微带天线的设计考虑 | (413) |
| § 10-3 喇叭天线的辐射场及其方向性 | (292) | § 13-9 矩形和圆形微带天线典型特性的比较 | (415) |
| § 10-4 喇叭天线的增益 | (297) | 第十四章 非正弦波辐射概论 | (416) |
| § 10-5 喇叭天线的设计 | (301) | § 14-1 赫兹电振子辐射 | (416) |
| § 10-6 圆锥喇叭 | (303) | § 14-2 谐振辐射器 | (418) |
| § 10-7 喇叭天线的相位中心 | (305) | § 14-3 大电流辐射器 | (420) |
| § 10-8 多模喇叭 | (309) | § 14-4 片状辐射器 | (422) |
| § 10-9 波纹喇叭 | (312) | § 14-5 时变天线电流、激励电压和辐射功率 | (424) |
| 第十一章 透镜天线 | (318) | § 14-6 功率与能量辐射效率 | (427) |
| § 11-1 介质透镜天线原理及其剖面的计算 | (319) | § 14-7 大电压辐射器 | (432) |
| § 11-2 分区介质透镜 | (320) | § 14-8 行波天线 | (434) |
| § 11-3 金属—介质透镜 | (322) | 第十五章 天线参数测量 | (438) |
| § 11-4 金属加速透镜的工作原理 | (327) | § 15-1 天线的缩比模型 | (438) |
| § 11-5 分区加速透镜 | (328) | § 15-2 天线输入阻抗的测量 | (440) |
| § 11-6 透镜通带的确定和折射率的选择 | (329) | § 15-3 天线方向图的测量 | (446) |
| § 11-7 透镜天线的技术公差 | (330) | § 15-4 天线增益系数的测量 | (458) |
| § 11-8 透镜表面的反射 | (333) | § 15-5 天线相位中心的测定 | (462) |
| § 11-9 消除透镜表面反射的方法 | (335) | 附录 I 半波振子互阻抗表 | (465) |
| § 11-10 透镜口径面上的场幅度分布 | (336) | 附录 I 正弦和余弦积分函数表 | (483) |
| 第十二章 反射面天线 | (338) | 参考书目 | (486) |
| § 12-1 旋转抛物面的主要几何特性 | (338) | | |
| § 12-2 旋转抛物面表面电流分布 | (340) | | |
| § 12-3 旋转抛物面口径场分布 | (344) | | |

第一章 天线的基本参数

为了定量地描述天线的各种特性,必须定义相应的技术参数,如天线效率、辐射电阻、输入阻抗、增益系数、方向图主瓣宽度、副瓣电平、有效长度及噪声温度等等。以表征天线的性能指标。

然而,天线装置不仅是一种无线电技术设备,同时也是一种工程建筑,特别是大型超大型天线。因此对天线的质量指标,不但要着眼于电气特性,同时还应考虑到机械特性。如结构的繁简,体积的大小,强度的可靠及使用的便利等。

在本书中,我们只讨论天线的电气特性参数,而且着重于发射天线,至于天线的机械特性参数将不予涉及。

§ 1-1 辐射功率、损耗功率、天线功率及天线效率

一、辐射功率 P_r

天线向自由空间辐射的电磁波功率,称为辐射功率。

由于辐射功率全部耗散在天线周围的自由空间,所以它具有有功功率特性。于是,便可用辐射电阻的概念来表示辐射功率。

辐射电阻 R_r 定义为:当天线中激励起某一电流强度时,天线辐射电磁波的能力。在数量上,辐射电阻可视为一个电阻,当该电阻上的电流等于天线电流时,在它上面所消耗的功率即为天线的辐射功率。其表达式为

$$R_r = \frac{P_r}{I^2} \quad (1-1)$$

式中 I 通常确定为天线电流的幅值。即以波腹电流作为归算辐射电阻的参考标准。

从天线辐射消耗功率的观点来看,辐射电阻与一般电路中的欧姆电阻,概念完全相似。显然,辐射电阻与辐射功率相比,可以在更大程度上确切地说明天线的质量。因为辐射功率不仅取决于天线的性质,而且还与天线中的电流强度有关。然而辐射电阻却唯一的决定于天线本身结构特性,因此,采用辐射电阻的概念,更能简化天线的有关计算。

辐射电阻的大小决定于天线的尺寸、形状及馈源的波长等,例如,基本振子的辐射电阻为: $R_r = 80\pi^2 \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2$, 其中 l 为振子臂长度、 λ 为电流波长。

由于天线的任务是辐射(或接收)电磁波能量,故在设计及装置天线时,总是适当地选择其尺寸和形状,使其辐射电阻 R_r 尽量大些。另外,天线的架设高度对其辐射电阻也有影响,主要表现在当高度小于 $\lambda/4$ 时,辐射电阻随高度降低而迅速减小。

二、损耗功率 P_l

耗散在地面、天线导体或介质、绝缘子以及周围物体上的功率,总称为损耗功率。该功率也

是有功功率,故也可用损耗电阻的概念来表示损耗功率。

损耗电阻 R_l 定义为:当天线中激励起某一电流强度时,天线在能量变换过程中的功率损耗量。损耗电阻在数量上也可看成是一个电阻,即当该电阻上的电流等于天线电流时,在它上面所耗散的功率即为损耗功率。其表达式为

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

式中 I 为天线电流的幅值。

天线的损耗包括天线系统的热损耗、介质损耗和感应损耗等。

三、天线功率 P_a

发射机馈送至天线输入端的功率即为天线功率。该功率包括辐射功率与损耗功率,即:

$$P_a = P_r + P_l = I_a^2(R_r + R_l)$$

仿照上面同样的假设,与天线功率相对应的电阻,即为天线电阻 R_a 可表示为

$$R_a = \frac{P_a}{I^2} \quad (1-3)$$

式中 I 为天线电流的幅值。

显然,天线电阻与辐射电阻和损耗电阻的关系为 $R_a = R_r + R_l$

电阻 R_a 、 R_r 和 R_l 均为天线的参量。

应当指出:由于天线上的电流分布往往是不均匀的,如驻波天线。因此,依照上面定义所给出的电阻参量,应该归算于天线某一确定的截面,通常,在没有特别说明的情况下,电阻 R_r 、 R_l 、 R_a 分别指归算于波腹电流或天线馈入端电流的辐射电阻、损耗电阻、天线电阻。

四、天线效率 η_a

天线效率粗略的可定义为天线的辐射功率 P_r 与输入的总功率 P_a 之比,即

$$\eta_a = \frac{P_r}{P_a} = \frac{I^2 R_r}{I^2 R_a} = \frac{R_r}{R_r + R_l} = \frac{1}{1 + \frac{R_l}{R_r}} \quad (1-4)$$

可见,天线效率将用于计算天线输入端和天线结构内的损耗。这些损耗首先是天线与馈线失配引起的反射损耗,其次是功率损耗,包括导体损耗和介质损耗。

概括起来,天线总效率 η_a 可写为

$$\eta_a = \eta_r \eta_c \eta_d$$

其中 $\eta_r = 1 - |\Gamma|^2$ 为反射效率, η_c 与 η_d 分别为导体效率与介质效率。这里的 $\Gamma = (Z_{in} - Z_c)/(Z_{in} + Z_c)$ 为天线输入端的电压反射系数,其 Z_{in} 为天线的输入阻抗, Z_c 为馈线的特性阻抗。

通常计算 η_c 和 η_d 是非常困难的。故一般由实验确定,但测量中仍不能将它们严格分开,因而天线总效率的表达式常写为

$$\eta_a = \eta_r \eta_{cd} = \eta_{cd}(1 - |\Gamma|^2) \quad (1-5)$$

式中 $\eta_{cd} = \eta_c \eta_d$ 为天线辐射效率。

欲提高天线效率,必须提高辐射电阻降低损耗电阻。超短波天线一般辐射电阻大,损耗小,

效率高几乎接近于 1。长、中波天线往往电长度 l/λ 较小,辐射电阻不高,损耗较大,效率很低。为此,通常可在天线末端加顶,从而使天线辐射部分的电流分布更趋均匀,将会增大辐射电阻提高效率。另外,在天线底部地面上加设地网,可降低地面损耗,也能提高天线效率。

§ 1-2 天线的方向特性

天线向空间辐射的电磁波能量在各个不同方向上的分布,通常总是不均匀的,它取决于天线自身固有的辐射特性,即天线的方向性。任何一种天线,无论其形式繁简,都具有确定的方向性。甚至基本振子也不例外。完全没有方向性而均匀辐射的天线,在实际天线中是不存在的。只有假设的理想点源,可以认为是唯一无方向性,产生均匀辐射的天线。人们以此作为定量分析和比较实际天线方向性的标准。对于天线的方向特性,分别由以下参量来表示。

一、天线方向性图

天线的辐射电磁场在固定距离上随空间角坐标 (θ, φ) 分布的图形,称为天线的方向图,也叫做天线波瓣图或辐射方向图。天线方向图可以用辐射功率通量密度表示,也可以用辐射场强表示。以功率通量密度表示的称为功率方向图,以场强表示的称为场强方向图。它们的数学表达式分别称为功率方向性函数或场强方向性函数。

天线在 θ, φ 方向辐射的电场强度 $E(\theta, \varphi)$ 的大小可以写为:

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

式中 A_0 是与方向无关的常数; $f(\theta, \varphi)$ 即场强方向函数。于是由上式可得

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

实际上,在天线方向图中,无论是用功率通量密度还是用场强,通常总是以其归一化值来表示,即将空间方向图最大值化为 1,称为归一化方向图。假设 $p(\theta, \varphi)$ 和 $E(\theta, \varphi)$ 分别为 (θ, φ) 方向的功率密度和电场强度,则其归一化功率方向图 $P(\theta, \varphi)$ 和归一化场强方向图 $F(\theta, \varphi)$ 分别为:

$$P(\theta, \varphi) = \frac{p(\theta, \varphi)}{p_m} \quad (1-7)$$

和

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

式中 p_m 和 E_m 分别为功率密度和场强的最大值。而且: $P(\theta, \varphi) \propto F^2(\theta, \varphi)$

在三维坐标中,天线方向图是空间立体模型——三维曲面,称为立体方向图或空间方向图。立体方向图形象直观,但比较复杂且不实用。因此,天线方向图通常是用两个相互垂直的主平面内的方向图来表示,即空间方向图与主平面的交线,称为平面方向图。至于主平面的选取,则可根据实际应用的方便而定。例如对架设在地面上的线天线,由于地面影响比较明显,通常采用水平平面和垂直平面为两个主平面。所谓水平平面是指仰角 $\theta = 90^\circ$ 时,并且与地面平行的平面,在此平面内,功率通量密度或场强随方位角 φ 变化;垂直平面是指方位角 $\varphi =$ 常数且与地面垂直的平面,在此平面内,功率通量密度或场强随着角 θ 变化。此外,在研究线极化天线和微波天线的情况下,通常采用 E 面和 H 面作为两个主平面。其 E 面是指最大辐射方向与电场矢量 E 所在的平面,而 H 面是指最大辐射方向与磁场矢量 H 所在的平面。例如,位于自

由空间的电振子,其 E 面即是包含振子轴且 φ 为常数的子午面;而 H 面则是垂直于振子轴且通过振子中心、 θ 为 90° 的赤道面。但对于磁振子,其 E 面和 H 面则恰好与电振子情况互换。

平面方向图常采用极坐标系或直角坐标系描绘,两种情况各有所长,极坐标方向图比较形象直观。但对很尖锐的方向图难以精确表示。直角坐标方向图,可以足够精确地表示很尖锐的方向图,但给人的感觉却不如极坐标方向图那样一目了然。图1-1是在两种坐标系中描绘的方向图形状。

方向图除了用功率通量密度和场强表示外,还可以用分贝表示,称为分贝方向图。即:

$$f_p(\theta, \varphi) (\text{dB}) = 10 \lg p(\theta, \varphi) = 20 \lg f(\theta, \varphi) \quad (1-9)$$

功率方向图和场强方向图用分贝表示后,便成为分贝方向图。其意义为某方向的功率通量密度或场强相对于最大值下降的分贝数。

方向图形状可以用方向图参数简单地定量描述,通常天线方向图都有多个波束或称叶瓣,其中包含最大辐射方向的叶瓣,称为主瓣。其他叶瓣均称为副瓣或旁瓣。最靠近主瓣的副瓣称为第一副瓣,其余依次类推。与主瓣反向的副瓣,称为后瓣。在整个方向图中,人们最关心的是主瓣、第一副瓣及后瓣的情况,而其他副瓣的大小及分布是比较次要的。

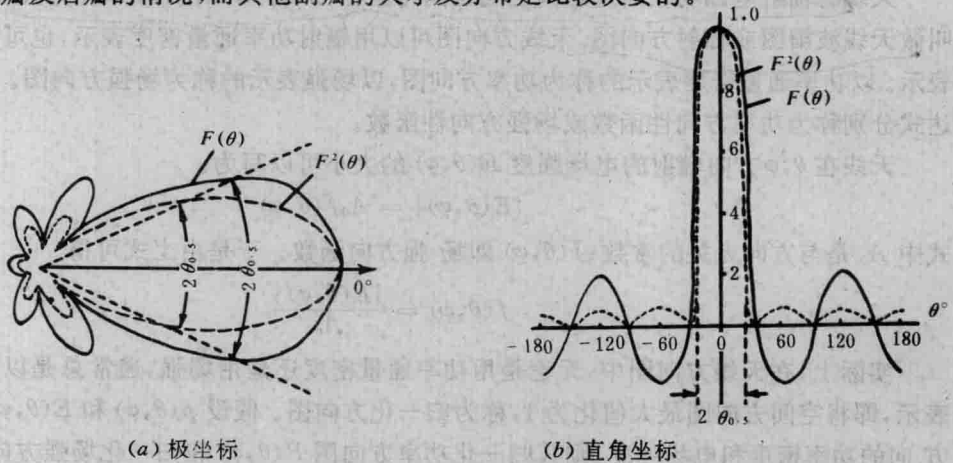


图1-1 两种坐标系中的方向图

1、方向图主瓣宽度

用以表示天线辐射能量集中的程度。对功率方向图而言,方向图主瓣宽度是指功率密度下降为最大辐射方向功率密度一半时的两点(即半功率点)或下降3dB的两方向之间所张的夹角,称为主瓣的半功率点宽度,亦称三分贝波束宽度,常以 $2\theta_{0.5E}$ 和 $2\theta_{0.5H}$ 分别表示 E 和 H 两个主平面上的半功率主瓣宽度。而对场强方向图而言,主瓣宽度则是指电场强度下降到最大辐射方向场强的 $1/\sqrt{2}$ 即0.707倍时两点间所张的夹角。由于功率与场强平方成正比,因此,对于同一付天线的功率方向图和场强方向图具有相同的主瓣宽度,如图1-1所示。

此外,有时在实际应用中也使用零功率主瓣宽度,或称主瓣张角,来表示天线辐射能量的集中程度,即指主瓣最大值两侧的第一零辐射方向之间所张的夹角。常以 $2\theta_{0E}$ 和 $2\theta_{0H}$ 分别表示 E 和 H 两个主平面上的零功率主瓣宽度。

附带提一句,通常除非特别指明,一般讲天线的方向图都是指它的电场方向图。

2、方向图旁瓣电平

以分贝表示的旁瓣相对于主瓣能量的大小或者说是指最大旁瓣的最大值小于主瓣最大值的分贝数。通常以缩写SLL(Side Lobe Level)来表示,即:

$$SLL = 10 \lg \frac{p(\theta_1, \varphi_1)}{p_m} = 20 \lg \frac{|E(\theta_1, \varphi_1)|}{|E_m|} \text{ (dB)} \quad (1-10)$$

式中, $p(\theta_1, \varphi_1)$ 、 P_m 和 $E(\theta_1, \varphi_1)$ 、 E_m 分别表示旁瓣和主瓣最大值的功率通量密度和电场强度。显然, 该旁瓣的最大辐射方向在 θ_1 、 φ_1 的角度上。

由该式可见, 旁瓣电平越高 (即负分贝数越小或比值越大), 旁瓣也就越大。反之, 旁瓣电平越低, 旁瓣就越小。

3、方向图前后辐射比

方向图主瓣最大值与后瓣最大值之比的分贝数。以 FRB (Front-to-Back Ratio) 表示, 即:

$$FRB = 10 \lg \frac{p_M}{p_B} = 20 \lg \frac{|E_M|}{|E_B|} \text{ (dB)} \quad (1-11)$$

式中 p_M 和 E_M 分别为主瓣最大值方向的功率通量密度和电场强度; p_B 和 E_B 分别为后瓣最大值方向的功率通量密度和电场强度。

二、辐射强度

天线辐射在确定方向的辐射强度定义为: 天线在其所在空间的单位立体角内所辐射的功率。辐射强度 $U(\theta, \varphi)$ 是一个远场参数, 等于辐射功率密度 p_r 与距离 r 平方的乘积, 即:

$$U(\theta, \varphi) = P_r r^2 = \frac{1}{2Z_w} |\vec{E}(r, \theta, \varphi)|^2 r^2 \quad (1-12)$$

或

$$U(\theta, \varphi) = \frac{1}{2Z_w} r^2 [|E_\theta(r, \theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(r, \theta, \varphi)|^2]$$

$$= \frac{1}{2Z_w} [|E_\theta(\theta, \varphi)|^2 + |E_\varphi(\theta, \varphi)|^2] \quad (1-12a)$$

式中 E_θ 、 E_φ 为远区电场分量; $Z_w = 120\pi \approx 377\Omega$ 为自由空间波阻抗。

可见, 功率方向图也正是辐射强度的量度。当对辐射强度在整个空间 4π 立体角进行积分后, 即可求得天线的总辐射功率:

$$P_r = \oint_{\Omega} U d\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U \sin\theta d\theta d\varphi \quad (1-13)$$

式中 Ω 为空间立体角; $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$ 为立体角元。

三、方向性系数

任何天线都具有其自身固有的方向图, 为了定量地描述某一天线集中辐射能量的程度, 引进了方向性系数的概念。

某天线的方向性系数是以该天线与标准参考天线进行比较而定义的。其量值的大小是以理想的点源天线的方向性系数为单位作为比较的标准。所谓理想点源天线是完全没有方向性的, 亦即在空间的各个方向上辐射强度相等, 其方向图是一个球体。

天线的方向性系数定义为: 在实际天线的辐射功率 P_r 与理想点源天线的辐射功率 P_{r0} 相等的条件下, 实际天线在空间某点所产生的电场强度的平方值 E^2 与点源天线在同一点所产生的电场强度的平方值 E_0^2 之比, 常以 D 表示, 即:

$$D = \frac{E^2}{E_0^2} \Big|_{P_r = P_{r0}} \quad (1-14)$$

由于场强平方与功率成正比,因此,方向性系数也可用另一种形式来定义:在空间某处实际天线产生的场强 E 与理想点源天线产生的场强 E_0 相等时,点源天线的总辐射功率 P_0 与实际天线的总辐射功率 P_r 之比,即

$$D = \frac{P_{r0}}{P_r} \Big|_{E=E_0} \quad (1-15)$$

该定义表明:为在空间某点产生相等的比场强度,点源天线的总辐射功率 P_0 应比定向天线的总辐射功率 P_r 所提高的倍数。

由上述定义可知,由于天线在各个方向辐射的场强并不相等,因此天线的方向性系数自然也将随着观察点的方位不同而不同。在辐射电场强度最强的方向,方向性系数也最大,反之亦然。也就是说在不同的辐射方向上,有不同的方向性系数。通常,如果不加特别注明,所提到的方向性系数均指最大辐射方向的方向性系数。

更一般地讲,天线在某一方向 (θ_0, φ_0) 上的方向性系数 $D(\theta_0, \varphi_0)$ 可定义为:天线在该方向上辐射的功率密度 $p(\theta_0, \varphi_0)$ 与其在其它任何方向辐射功率密度平均值 p_{av} 之比。

$$D(\theta_0, \varphi_0) = \frac{p(\theta_0, \varphi_0)}{p_{av}} \quad (1-16)$$

另外,在天线工程中,天线的方向性系数还常用分贝表示:

$$D(\text{dB}) = 10 \lg D = 10 \lg \frac{p_{r0}}{p_r} = 20 \lg \frac{E}{E_0} = 10 \lg \frac{p(\theta_0, \varphi_0)}{p_{av}} \quad (\text{dB}) \quad (1-17)$$

四、天线增益

天线增益是天线增益系数的简称,也是与标准参考天线进行比较而定义的,标准参考天线为无损耗 ($\eta_a = 1$) 的理想点源天线。

天线增益的定义为:在某实际天线的输入功率 P_a 与无耗点源天线的输入功率 P_{a0} 相同的条件下,该实际天线在空间某点所产生的电场强度的平方值 E^2 与无耗理想点源天线在同一点所产生的电场强度的平方值 E_0^2 之比,称为该天线在该点方向上的增益,常以 G 表示,即:

$$G = \frac{E^2}{E_0^2} \Big|_{P_a=P_{a0}} \quad (1-18)$$

同样,天线增益也可用另一种形式定义,在空间某点处实际天线产生的场强 E 与无耗点源天线产生的场强 E_0 相等时,无耗理想点源天线的输入功率 P_{a0} 与某天线的输入功率 P_a 的比值,称为该天线在该点方向上的增益。即:

$$G = \frac{P_{a0}}{P_a} \Big|_{E=E_0} \quad (1-19)$$

该式表明:在空间某点产生相等电场强度的条件下,点源天线的总输入功率比定向天线的输入功率所提高的倍数。

同样,天线增益也随观察点方向的不同而不同。通常所讲的增益若不特别注明,也是指最大辐射方向上的天线增益。

天线增益通常也用分贝来表示:

$$G(\text{dB}) = 10 \lg G = 10 \lg \frac{P}{P_0} = 20 \lg \frac{E}{E_0} \quad (\text{dB}) \quad (1-20)$$