



丛书

天 线 测 量 技 术

电子工业部第十四研究所

天 线 测 量 技 术

Gary E. Evans

阮馨远 总校

电子工业部第十四研究所

内 容 简 介

本书系统、科学地论述了天线测量技术的最新成果。细致介绍了天线测试用到的光学机械和电子技术,引进了口径天线的天线效率、给定极化的天线部分增益、椭圆极化矢量相位、极化失配因子、辐射球、退化瓣、时域天线测量等新概念,对近场扫描技术以及由近场测量结果进行专门处理而确定天线参数全息的方法作了全面深入的讨论,描述了圆柱场测试法和平面近场测试法,深刻分析了各种测试中的误差,提出了相应的校正措施。

本书实用性极强,对雷达、导航、通信、广播、电视测向、射电天线、遥控等电子工程专家以及本科高年级学生、研究生、教师来说是一本难得的新颖的参考书。

Antenna Measurement Techniques

Gary E. Evans

Artech House, Inc. 1990

ISBN 0--89006--375-3

*

天线测量技术

责任编辑 周南

*

《SSS》丛书编辑部出版

十四所研究所情报信息中心印刷厂印制

*

内部书号:SSS-018

出版序言

天线实验测量对天线性能参数的精确确定非常重要。用理论方法分析和设计天线并预测天线性能通常是理想化的,只有依据实验测量才能精确确定天线的性能参数。

天线场测量通常是作为辅助工具使用的,而本书将其系统化、理论化,通过引进测试用到的光学、机械和电子技术以及其它天线新概念,使近场—远场变换建立在严格的科学基础上,提出了平面近场测试是产品设计开发阶段的诊断测量,圆柱面测试是简单通用型测试方法。书中对多种天线测试中的误差进行了全面深刻的分析,给出了相应的校正措施,为天线测试的可靠度以及提高产品性能寻找一条崭新的路。

全书共分九章,第一章介绍天线场术语及试验程序;第二、三、四章分别叙述远场测试距离、内容、方法和对场地的要求;第五、六章分别为压缩场和近场,提出在有限线度的微波暗室内进行天线测量是现代高性能天线研究的必要手段;第七章介绍雷达截面积测量;第八章时域天线测量;第九章阵列单元互耦研究。全书系统、全面、科学地论述了天线测量技术的最新成果,对从事雷达、导航、广播、电视测向、射电天线、遥控等方面研究工作的人员很有帮助,所以我们组织有关人员与本所情报室合作,翻译出版此书,以期推进天线测量技术的研究和发展。

本书的出版得到有关领导和专家的大力支持,情报室的丁燮华、吕康平、陈琳、陈玲、朱宝明、陆萍、钱惠萍等同志参加了该书的部分编校、描图工作。在此表示衷心感谢。由于我们水平有限、时间又比较仓促,因此,虽然我们尽了较大的努力,难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

电子工业部第14研究所五部 邵智民

1997年2月

前 言

天线作为一种硬件,是收发讯道之间的关键接口。现代计算技术的进展,可用数值方法分析和设计天线,预测天线性能,但是理论分析通常是理想化的,要精确地确定天线性能的参数,必须依据于实验测量。

“天线测量技术”一书,是1990年出版的新书,它细致地介绍了天线测试用到的光学的、机械的和电子的技术。书中主要资料来源于美国威斯豪斯电气有限公司,都是经过了实践的检验,具有很大的工程实用价值。

如果说以往的天线场测量仅仅是服务于其它学科的工具,那么本书把天线测量技术描述为自成系统的、正确的科学理论,它引进了一些新的概念,如口径天线的天线效率、给定极化的天线部分增益、椭圆极化矢量的相位、极化失配因子、辐射球、退化瓣、时域天线测量等,对于延拓设计者的电路有极大的裨益。

本书对于人们关心的近场扫描技术作了全面地阐述,对于由近场测量结果进行专门处理而确定天线参数全息的方法作了极为深入的讨论,使近场—远场变换建立在严格的科学基础上,并且指出平面近场测试更适用于产品设计开发阶段的诊断测量,配合在很宽频带内的扫描技术,使实验更加快速、清晰、对缩短产品生产周期、降低研制费用、保证产品质量有很重要意义。

本书所描述的圆柱场测试是现代设计师最希望采用的方法,它的旋转装置简单,能够计算整个空间的方向图,使用价值极高。

本书对各种天线测试中的误差实行全面而又深刻的分析,同时提出了相应的校正措施,从而为提高产品性能和测试的可靠度寻找一条崭新的路。

本书第一章介绍了天线场术语及试验程序,第二章、第三章和第四章分别描述了远场测试距离、内容、方法和对场地的要求。第五章压缩场、第六章近场指出了在有限线度的微波暗室内进行天线测量已成为现代研究高性能天线的必要手段,并且切实可行。第七章介绍雷达截面积测量。虽然这不属于天线实验,但与第八章时域处理有十分密切的关系,对于消除最困难的天线测试场地环境和地面绕射影响提供了潜在的能力,这也是超低副瓣天线测试所必要解决的问题。第九章着重于阵列单元互耦的实验研究,对天线工作者有指导作用。

总之本书系统、全面、科学地论述了天线测量技术的最新成果,实用性极强,对雷达、导航、通信、广播、电视测向、射电天线、遥控等电子工程专家来说是一本难得的新颖的参考书。

目 录

前 言

第一章 天线测试	(1)
1.1 引言	(1)
1.1.1 天线测试基础	(2)
1.1.2 定义	(3)
1.2 测试场的类型	(11)
1.2.1 高架测试场	(12)
1.2.2 地面测试场	(12)
1.2.3 压缩测试场	(13)
1.2.4 近场测试场	(16)
1.2.5 雷达截面积测试场	(17)
参考文献	(18)
第二章 远场设计	(19)
2.1 引 言	(19)
2.2 场地设计	(20)
2.2.1 场地位置	(20)
2.2.2 场地的几何形状	(21)
2.3 源设计	(30)
2.3.1 功率	(30)
2.3.2 源天线	(34)
2.4 接收场地设计	(36)
2.4.1 定位	(36)
2.4.2 接收和记录	(40)
2.4.3 场的探测	(46)
2.5 地面测试场	(47)

2.6 机载和行星源	(53)
参考文献	(59)
第三章 远场天线测试	(60)
3.1 引言	(60)
3.2 方向图测试	(60)
3.2.1 波瓣宽度和波束形状	(60)
3.2.2 副瓣	(63)
3.3 增益和方向性	(67)
3.3.1 增益标准	(67)
3.3.2 增益变换测量	(70)
3.3.3 绝对增益测量	(71)
3.3.4 有源增益	(73)
3.4 极化	(78)
3.4.1 线极化	(80)
3.4.2 圆极化	(82)
3.5 瞄准	(87)
参考文献	(91)
第四章 远场方向图误差	(92)
4.1 引言	(92)
4.2 误差估算	(93)
4.2.1 场的非均匀性	(93)
4.2.2 反射	(95)
4.2.3 仪器设备限制	(97)
4.3 误差校正	(101)
4.3.1 场探头法	(102)
4.3.2 栅栏	(105)
4.3.3 场地长度的影响	(107)
4.4 天线误差	(114)
4.4.1 误差类型	(114)

4.4.2	误差分析	(115)
4.4.3	天线成像	(120)
4.4.4	公差	(126)
	参考文献	(130)
第五章	压缩测试场	(132)
5.1	引言	(132)
5.2	房间设计	(135)
5.2.1	构形	(135)
5.2.2	吸收材料	(138)
5.3	馈源设计	(141)
5.4	反射器设计	(144)
	参考文献	(148)
第六章	近场测试	(150)
6.1	引言	(150)
6.2	平面近场	(152)
6.2.1	场地设计	(153)
6.2.2	探头	(156)
6.2.3	探头定位器	(160)
6.2.4	计算	(163)
6.2.5	阵列分析	(166)
6.3	误差	(167)
6.4	圆柱和球面扫描	(176)
6.5	时间预测	(178)
	参考文献	(185)
第七章	雷达截面积	(187)
7.1	引言	(187)
7.2	RCS 场地构形	(189)
7.2.1	室外场地	(193)
7.2.2	室内场地	(193)

7.3 杂波消除	(194)
7.4 目标成像	(197)
7.5 测试安装架	(204)
参考文献	(206)
第八章 时域天线测量	(208)
8.1 引言	(208)
8.2 综合脉冲	(211)
8.3 CW响应的提取	(213)
8.4 天线成像	(216)
参考文献	(224)
第九章 小辐射器测量	(226)
9.1 引言	(226)
9.2 孤立辐射器	(226)
9.3 阵列辐射器	(228)
9.3.1 单元间互耦	(229)
9.3.2 模拟器	(230)
9.3.3 多模模拟器	(233)
9.3.4 混合模拟器	(235)
9.4 阵列单元方向图	(237)
参考文献	(241)
附录 天线测量定义	(242)

第一章 天线测试

1.1 引言

本书所涉及的天线属于电磁器件,工作于频谱的“微波”波段,大约在 200MHz~50GHz。在此波段以下,天线太大,无法用所讨论的方法来进行测量;而在此波段以上则适合使用光学技术。我们对系统的天线部分进行明确的划分主要有几个原因。天线的物理尺寸是测试设计中的基本参数,而机械运动则是测试的主要部分。更基本的事实是,天线是我们设计的传输线和无限空间之间的界面,并不存在常规理解的输出端口,我们必须对辐射进行适当采样。许多天线测量技术的目的在于如何精确和快速地采样。对于大多数应用目的,一部每个方向有 M 个波长的天线需要 $16\pi M^2$ 个方向图点才能完整地描述它。对一部分普通的天线来说,每边有 20 个波长,则在每个频率和极化上大约需要 20000 次采样。计算机正广泛应用来采集和解译所有数据。

随着生产天线的制造技术和机械设备的复杂化以及设计技术的成熟,我们也许会对如此复杂和全面的测试的必要性提出疑问。为什么方向图不能通过天线样机在有限的试验台上来预测呢?这一问题的主要答案是:除了验证系统特征以外,方向图测试还具有其它新的用途:

1. 关键元件和尺寸的调试;
2. 对不同元件有关数据进行校准和存储;
3. 作为一种检测和质量控制手段;
4. 验证设计;
5. 对误差统计组合进行评估。

大多数天线是互易的,或分成不同的发射和接收通道。一般来说这样更易理解;将天线看成一部发射机,其信号发射到不同的辐射面并在空间各点进行重新组合。但是,大多数方向图将天线视为接收机,从而使数据管理和天线控制能出现在一个地方。在本书中,我们将试图把这两种观点明确地区分开来,并对与信号方向有关的一些特殊情况作一说明。

部分或全面阐述这一问题的有用参考资料很多^[1~5]。IEEE标准^[1]尤其适用于一般情况。Hollis、Lyon以及Clayton等人^[2]的参考文献则详细论述了极化问题。Mensa^[5]的资料对进行RCS成像工作非常重要。

1.1.1 天线测试基础

设计天线主要是向空间给出特定分布的能量,并使损耗和反射达到最小。这种分布就是天线的“方向图”。一般来说,这种分布包括一个高密度(增益)的区域(波束宽度),用来照射目标或与最远距离的另一系统进行通讯联系。在主瓣中,单程增益10%的误差等效于发射功率20%的误差,所以我们希望对高电平进行精确测量。通常,离开主波束的方向上辐射要非常弱,从而避免照射杂波,也免于干扰其它系统或者接收到其它干扰。这就需要测量天线各边和背部的极低电平。尽管对公差的要求不像对增益那么严格,但对质量不良的天线试验场地的设计而言,副瓣电平是最敏感的参数,当要求副瓣为峰值以下50dB或更大时,则必须对场地设计的各个方面格外小心。为了获得完整的方向,其它感兴趣的参数还包括极化、波束方向、零深和反射系数或电压驻波比(VSWR)。这些参数如图1.1所示。

除反射特性外,对其它参数来说,天线数据普遍能接受的形式是方向图。根据应用,它一般是用三种形式中的一种来给出。由于极坐标直接给出了天线旋转角。所以它是一种十分明确的形式(图1.2(a))。由于方向图中最感兴趣的部分进入原点就消失了,所以图像受损。最为通用的形式(图1.2(b))是矩形图像,它以方位角为横坐标,电平值为纵坐标。当方向图的三维特性有效时,图1.2(c)中的轮廓

图则非常容易得到。轮廓图可以看成是多个可移动的直线图形的叠加,用计算机便可简单地生成出来,如图 1.2(d)所示。尽管所有这些图中都标出了幅度,但对许多数据处理来说,相位也同样非常重要。不过,相位在图中一般并不标出。

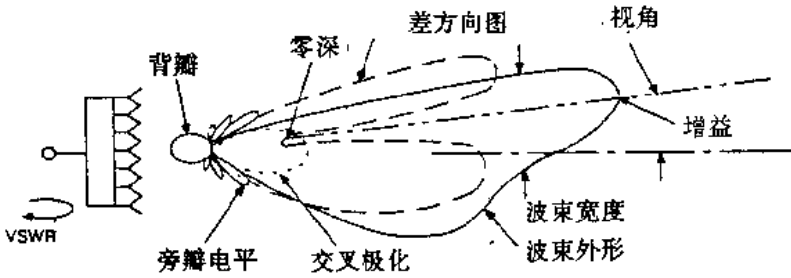


图 1.1 感兴趣的天线基本特性

对每种图形来说,幅度可以相对电压和相对功率或 dB 的形式表示。除极化图外,电压和功率用得很少。因为在低电平情况下它们提供的信息很少。

1.1.2 定义

测试之前,有一个基本的前提条件,那就是我们对许多基本术语要有一致的定义。对这些定义虽不要求符合 IEEE 标准^[6],但它们依然代表着这一领域内专家的最好的共同判断。经他们同意,我们在附录中将一些较为常用的定义翻印出来以作参考。

大多数定义都可以进行自我证明,但增益和极化这两个概念是最难论证的。至少有 6 个增益和方向性定义是有用的。根据是否存在失配、损耗以及极化误差,它们将发生变化。极化可精确定义,但除了最简单的线性情况外,检测却很困难。

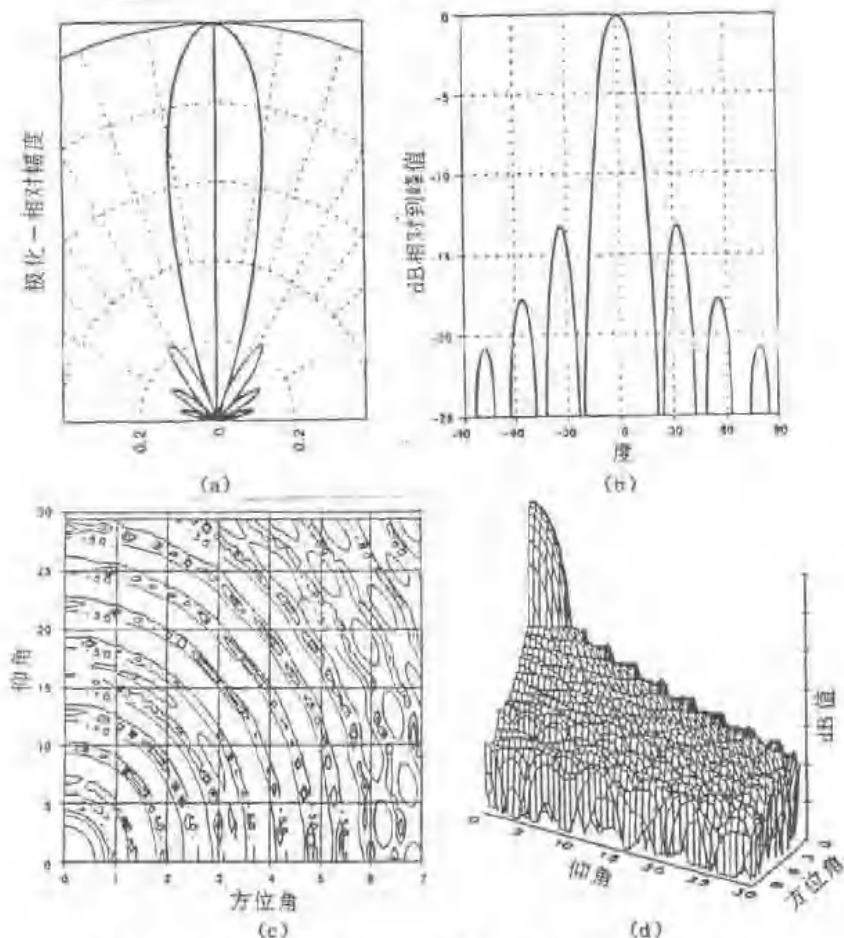


图 1.2 绘图方法;(a)极坐标中的幅度;(b)直角坐标中的 dB;

(c)轮廓图;(d)“瀑布”式图形

增益和方向性

图 1.3 示出了从发射角度考虑可能遇到的各种增益和方向性情况。发生器可能与传输线不匹配,它一般不作为天线参数考虑。从天线方面来讲,一般存在失配和电阻性损耗或是辐射效率,每个都可能包括在内或是不包括在内。从传统角度讲,由于在理论上失配是能够进行调谐的,所以增益和方向性并不包括它。当把失配也考虑在内

时,则使用“实际增益”这个词。当我们仅仅关心波束在空间是如何形成的,而非损耗时,则适合使用“方向性”这个词,其意思是峰值密度与整个空间的平均密度之比。大多数计算所得的方向图确定的是方向性而非增益。

在某些情况下,精确极化并没有信号幅度那么重要。在这种情况下,增益和方向性是由探测器(用于接收空间某点的所有辐射密度)的输入端测定的。如果不是这种情况,则我们要么可以从增益和方向性中将极化效率去除,要么则使用“部分增益”和“部分方向性”这两个术语。由于接收天线没有优化成(极化匹配)待测天线,所以大多均测部分增益,但是这种差别一般可以忽略不计。

其它几种类型的增益非常有用,其定义在用到的地方已给得非常清楚。令人最感兴趣的是孔径的总的方向性,它比锥形的效率产生的实际方向性要高。一般来讲,在波长为 λ 的A区,有效孔径方向性为:

$$D_a = 4\pi A/\lambda^2 \quad (1.1)$$

一般从这一参数着手,陆续去除不同的效率和损耗以达到设计所需的净增益。当放大器被集成到阵列中时,则将会遇到其它增益概念,这将在第三章中加以考虑。

极化

对大多数测试来说,极化并不能引起人们太大的兴趣,而定义的可能复杂性则更可能使人失去兴趣。特别地,我们对各向异性介质的应用忽略不计,只考虑极化能识别电场的方向性。此外,尽管第八章要讨论到短脉冲情况,它有时也可考虑工作于一个单一频率上,它存在一个单独定义的极化形式^[1~3]。在这种情况下,电场和磁场矢量互相正交,并与传播路径正交。当它随时间变化时,极化还可描述出电场矢量的方向性。矢量尖顶的轨迹绘成一个椭圆,其外形和方向性(和旋转方向)则描述着这种极化,如图1.4(c)所示。如果电场矢量保持在包含传播方向的平面内,则椭圆变成了一条线,因此极化也就

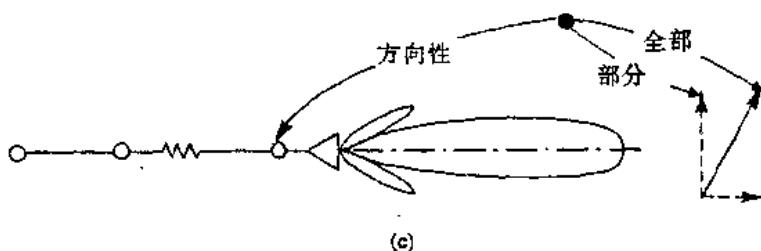
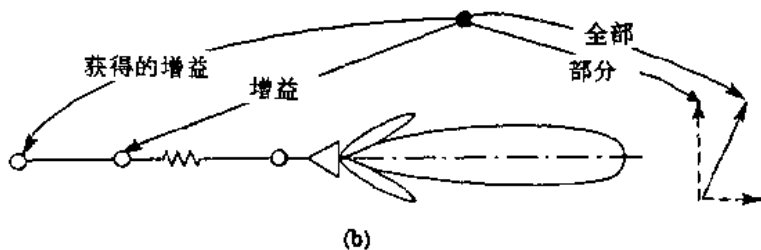
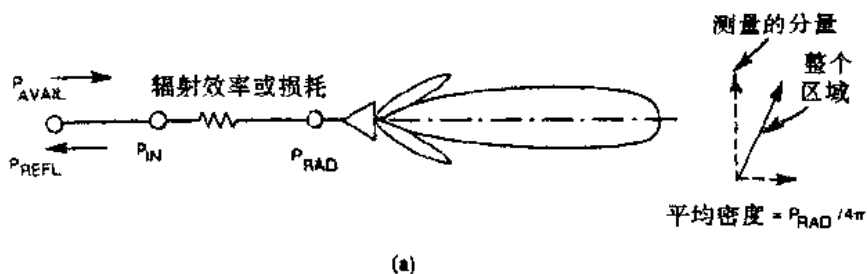


图 1.3 增益和方向性定义

(a)术语； (b)增益； (c)方向性

是线性极化,如果随着时间的变化而矢量值保持恒定,则椭圆将变成一个圆,因而极化也就是圆极化。注意:看着传播方向(沿 z 轴),随着时间的变化不断观察 z 轴上某个固定点的旋转情况,从而可以确定旋转方向。右手方向和左手方向分别是顺时针的和逆时针的。将极化描述为某一时刻内的一个空间变量,将会引起不少麻烦:右手方向将沿路径逆时针旋转,也就是说,右手方向此时将与左手方向相对

应。由于图 1.4(b)中的螺旋线不会随着时间变化而旋转成螺旋状，所以还存在显形问题，它在 z 方向上整个平移。因此，我们更喜欢提时间变量。

另外还有一个更为有用的概念：极化域可表示成两个正交分量（见 Gillespie 的文献〔3〕）之和，正交分量可以是线性的、圆形或是椭圆。例如，如果我们在 x 轴范围最大的一刻选择为时间基点，则一任意的椭圆极化矢量 \mathbf{E} 在频率为 f 时可再分为 x 和 y 分量（即 E_x 和 E_y ）：

$$\mathbf{E} = E_x \cos(2\pi f \cdot t) \mathbf{x} + E_y \cos(2\pi f \cdot t + \gamma) \mathbf{y} \quad (1.2)$$

相位前置量 γ 决定着极化偏离线性极化的大小。如果它为零，则 E_x 和 E_y 简单地就是峰值电场在两个轴上的投影。当两个分量相等且 γ 为 $\pm\pi/2$ 时，则会产生圆极化。在这种情况下：

$$\mathbf{E} = E_x \cos(2\pi f \cdot t + \tau) \mathbf{x} + E_y \cos(2\pi f \cdot t + \tau \pm \pi/2) \mathbf{y} \quad (1.3)$$

其中，相位延迟 τ 也被计入在内，从而允许使用相同的时间基点。

可以证明，任何极化均可分为右旋和左旋圆分量。图 1.5 对构成任意椭圆极化的两种方进行了比较。适当地引伸开来，这种结构可用于图 1.6 中庞加莱 (Poincare) 球面〔7〕的推导，这个球面用图解方式标出了球面上所有可能的极化方式。除了有助于目测外，球面的应用取决于这一特性：球面两点间的间距决定着两种极化正交性的范围。辐射极化和所需极化之间的间距决定着极化效率。如果球面两点间的角度设为 2ζ ，则其效率为 $\eta = \cos^2\zeta$ 。对于直径上相对的两个点来说，如左手和右手圆极化， $\zeta = 90^\circ$ ， $\eta = 0$ 。对于相距 $1/4$ 圆周的点来说，如其它圆极化和任意线性化， $\zeta = 45^\circ$ ， $\eta = 1/2$ 。椭圆极化一般用轴比、平面内的轴旋转（斜度）以及旋转方向来描述。在第三章中我们将会发现，其它概念比如椭圆度和对消比可由此导出。