

Antenna Measurement Engineering Handbook

天线测量

实用手册

第2版

王玖珍 薛正辉◎编著

广泛性

本书不但介绍了先进的天线测量仪器设备、系统设计、场地选择等，还介绍了各种天线的主要参数的测量方法、步骤及测量技巧。

实用性

各章节内容都有具体的操作方法和典型的测量案例分析，贴近工程实际，工程技术人员可以通过学习本书内容，参照具体操作方法，完成工程实际任务。

先进性

本书介绍的天线测量系统、仪器都是国内外知名产品，这些产品的技术先进性、可拓展性等代表着天线测量的发展方向。

规范性

本书内容撰写规范，涉及的标准、协议、接口等符合国内、国际标准。



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Antenna Measurement Engineering Handbook

天线测量

实用手册

第2版

王玖珍 薛正辉◎编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

天线测量实用手册 / 王玖珍, 薛正辉编著. — 2版

. — 北京: 人民邮电出版社, 2018.3

ISBN 978-7-115-47626-5

I. ①天… II. ①王… ②薛… III. ①微波天线—测量技术—技术手册 IV. ①TN822-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第001394号

内 容 提 要

本书从天线远场测量和近场测量两个方面介绍了天线测量的基本方法、测量仪器设备、系统设计、场地选择等,此外还介绍了天线的主要参数的测量方法、步骤与技巧。各章内容都配有具体的操作方法,可以指导相关人员完成工程实际任务。

本书可供从事天线研究、企业生产的工程技术人员参考使用,同时还可以作为高等院校天线工程专业师生的参考书。

◆ 编 著 王玖珍 薛正辉

责任编辑 李 强

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

固安县铭成印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 20.25

2018年3月第2版

字数: 449千字

2018年3月河北第1次印刷

定价: 88.00元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前 言

自 2013 年 1 月《天线测量实用手册》面世以来，该书得到业内广大读者的热情关注，初版印刷 4000 册，在短短两年内销售一空，可见社会及技术领域研究人员对天线产品质量的重视和对学习天线测量技术的渴求。

本书出版后，我们经常接到热心读者的催询，因而欣闻人民邮电出版社有再版意向之时，我们也非常乐见其成。同时，移动通信、北斗导航、航空航天等领域新型天线已经出现，原书内容有些滞后，亟待更新。尽管我们时间和精力有限，不可能将此书做成天线测量的百科全书，但我们会想尽办法满足热心读者的需求。出于以上两个方面的考虑，我们愿意对原书进行修订。

在新版书中，我们对个别章节进行了适当修改和增容，主要是增加了第 8 章。第 8 章重点介绍了手机天线测量、微波通信天线测量、天线罩测量及相控阵天线测量等技术。

当前，天线技术之发展日新月异，正处于原理、功能、结构和材料等不断革新之繁荣时期。相信本书的再版会给天线这个大花园添枝加叶，会给后人启迪而在此基础上逐渐拓展，盼本书能对广大读者有所裨益。

本书的再版得到东君伟博士、谭成德、李志新、麦国亮等专家的建议、帮助，在此一并致谢。

编者

2017 年 8 月

目 录

第 1 章 天线测量入门知识.....	1
1.1 天线测量的意义、任务、内容、发展历史.....	1
1.1.1 意义	1
1.1.2 任务	1
1.1.3 内容	1
1.1.4 发展历史.....	2
1.2 电磁波的特性.....	2
1.2.1 电磁波的频率、波长.....	2
1.2.2 电磁波的辐射、传播和衰减.....	4
1.2.3 电磁波的反射、散射和二次辐射.....	4
1.2.4 对电磁辐射的防护.....	4
1.3 天线的基本概念.....	6
1.3.1 天线的定义、功用和分类.....	6
1.3.2 天线测量的典型配置.....	7
1.3.3 天线测量中的互易性.....	7
1.3.4 近场和远场.....	7
1.3.5 天线辐射特性测量法分类.....	9
1.4 天线的基本电参数.....	10
1.4.1 方向图.....	10
1.4.2 副瓣和半功率波束宽度.....	13
1.4.3 增益	14
1.4.4 输入阻抗.....	16
1.4.5 电压驻波比、反射系数、回波损耗 (RL)	16
1.4.6 天线的有效长度和有效面积.....	18
1.4.7 天线效率.....	19
1.4.8 天线极化.....	19
1.4.9 天线带宽.....	21
1.4.10 天线噪声温度.....	22

第2章 天线测量仪器设备介绍.....	23
2.1 频谱分析仪	23
2.1.1 概述	23
2.1.2 组成及工作原理.....	24
2.1.3 参数定义及相互关系.....	24
2.1.4 频谱分析仪的自校准.....	25
2.1.5 使用频谱分析仪应注意的问题.....	26
2.2 信号发生器	27
2.2.1 概述	27
2.2.2 主要技术性能指标.....	27
2.2.3 组成及工作原理.....	28
2.2.4 典型产品的操作使用.....	31
2.2.5 主要性能检验.....	33
2.3 网络分析仪	35
2.3.1 概述	35
2.3.2 基本组成.....	35
2.3.3 基本工作原理.....	40
2.3.4 如何实现传输与反射测量.....	42
2.3.5 优化测量.....	44
2.3.6 如何进行系统校准.....	46
2.4 传输线（馈线）	48
2.4.1 矩形波导管传输线.....	49
2.4.2 椭圆波导.....	50
2.4.3 同轴电缆.....	51
2.5 同轴连接器	54
2.5.1 同轴连接器分类.....	54
2.5.2 使用注意事项.....	56
2.6 放大器	57
2.6.1 功率放大器（PA）	57
2.6.2 低噪声放大器（LNA）	57
2.7 转台及控制器.....	58
2.7.1 主要性能.....	58
2.7.2 转台的分类.....	58
2.7.3 转台及伺服控制器.....	61
2.7.4 转台精度和误差分析.....	61
第3章 天线电路参数的测量.....	65
3.1 电压驻波比的测量.....	65
3.1.1 经典的测量线（开槽线）测量法.....	65

3.1.2	标量网络分析仪测量法.....	68
3.1.3	矢量网络分析仪测量法.....	70
3.2	衰减测量.....	72
3.2.1	衰减测量基本原理.....	72
3.2.2	网络分析仪的传输测量法.....	74
3.2.3	网络分析仪的反射测量法.....	76
3.3	天线噪声温度的测量.....	78
3.3.1	测量目的.....	78
3.3.2	天线的噪声温度的估算.....	78
3.3.3	Y 因子法测量原理.....	79
3.3.4	测量系统.....	80
3.3.5	测试步骤.....	81
3.3.6	如何提高噪声温度的测量精度.....	81
3.4	无源互调测量.....	81
3.4.1	无源互调概念.....	81
3.4.2	无源互调分析仪介绍.....	83
3.4.3	测试系统安装.....	84
3.4.4	校准.....	85
3.4.5	测试步骤.....	85
3.4.6	测试结果的判别.....	86
第 4 章	天线测试场的设计、建造和鉴定测试.....	87
4.1	设计要点.....	87
4.1.1	选取最小测试距离的准则.....	87
4.1.2	地面及环境反射影响的考虑.....	87
4.1.3	干扰的抑制.....	88
4.1.4	选择合适的测试场类型.....	88
4.2	测试场常见类型.....	88
4.2.1	高架测试场.....	88
4.2.2	斜天线测试场.....	90
4.2.3	地面反射测试场.....	91
4.2.4	常规远场的比较和选择.....	92
4.3	微波暗室.....	93
4.3.1	主要参数.....	93
4.3.2	设计、建造.....	94
4.3.3	检验.....	96
4.4	紧缩场.....	101
4.4.1	概念.....	101
4.4.2	紧缩场 CATR 简介.....	102

4.4.3	紧缩场暗室.....	104
4.4.4	典型的紧缩场天线自动测量系统.....	105
第5章	天线远场测量系统的设计、组建.....	107
5.1	系统设计主要考虑的问题.....	107
5.2	系统链路参数的估算.....	107
5.2.1	发射链路的计算.....	108
5.2.2	接收（待测）链路的计算.....	109
5.2.3	系统灵敏度的计算.....	109
5.2.4	系统动态范围的计算.....	111
5.3	测量系统介绍.....	112
5.3.1	采用频谱分析仪测量系统.....	112
5.3.2	采用网络分析仪的天线幅—相测量系统.....	113
5.3.3	用光缆连接的测量系统.....	119
5.3.4	采用无线遥控源端设备的天线测量系统.....	120
5.4	系统软件设计.....	121
5.4.1	主要功能.....	122
5.4.2	测试界面介绍.....	122
第6章	天线辐射参数的远场测量.....	125
6.1	天线方向图的测量.....	125
6.1.1	常规远场法.....	125
6.1.2	卫星信标法.....	135
6.1.3	卫星转发法.....	137
6.1.4	方向图测量误差分析.....	139
6.2	天线增益测量.....	140
6.2.1	比较法.....	141
6.2.2	两相同天线法.....	144
6.2.3	三天线法.....	145
6.2.4	波束宽度法.....	147
6.2.5	方向图积分法.....	148
6.2.6	射电源法.....	149
6.2.7	增益测量误差分析和修正.....	153
6.3	天线相位测量.....	159
6.3.1	天线相位中心的概念.....	159
6.3.2	测量系统配置及基本工作原理.....	159
6.3.3	测量方法.....	160
6.3.4	典型测量案例：喇叭天线相位中心的测量.....	162
6.4	天线极化特性的测量.....	167

6.4.1	线极化天线的极化方向图的测量原理及方法	167
6.4.2	圆极化天线轴比的测量	169
6.4.3	关于天线极化的判断	170
6.4.4	天线极化测量的精度考虑	171
第7章	天线近场测量技术	173
7.1	天线近场测量技术的发展历程	174
7.1.1	天线频域近场测量技术的发展	174
7.1.2	天线时域近场测量技术的起源与发展	175
7.2	天线近场测量技术的特点和技术优势	176
7.2.1	天线近场测量的基本概念和类别	176
7.2.2	频域近场测量的技术特点	178
7.2.3	时域近场测量的技术特点	180
7.3	天线近场测量的基本电磁学原理	182
7.3.1	惠更斯—基尔霍夫原理	182
7.3.2	等效原理	182
7.3.3	表面电磁场的截断问题	183
7.3.4	天线辐射特性的时域近场表征与测试	183
7.4	天线频域与时域近场测量理论	188
7.4.1	三维直角坐标系中电磁场分布与平面波谱之间的关系	188
7.4.2	探头修正理论	195
7.4.3	矩形开口波导探头的辐射场	206
7.5	天线近场测量的误差及其修正	209
7.5.1	频域近场测量误差	210
7.5.2	时域近场测量误差	212
7.6	天线近场测量系统	215
7.6.1	概述	215
7.6.2	硬件分系统	217
7.6.3	软件分系统	223
7.7	典型近场测量系统介绍	230
7.7.1	NSI公司及近场测量系统产品	230
7.7.2	ORBIT/FR公司及近场测量系统产品	230
7.7.3	SATIMO公司及近场测量系统产品	230
第8章	典型天线测量实践	237
8.1	手机天线的测量	237
8.1.1	手机天线性能指标	238
8.1.2	手机天线的有源测量	239
8.1.3	手机天线的无源测量	245

8.2	微波通信天线的测量.....	246
8.2.1	微波通信天线的主要技术指标.....	246
8.2.2	F/B 指标的确定.....	246
8.2.3	测试场地的选择.....	249
8.2.4	测量动态范围的计算.....	249
8.2.5	室外场全自动天线测量系统的设计.....	250
8.2.6	测量案例分析.....	252
8.3	天线罩的测量.....	254
8.3.1	天线罩的主要性能参数.....	255
8.3.2	天线罩测试系统组成原理.....	257
8.3.3	天线罩测试系统原理框图及测试流程.....	259
8.4	相控阵雷达天线的测量.....	260
8.4.1	相控阵雷达天线的主要性能指标.....	260
8.4.2	相控阵天线测试原理及系统组成.....	262
8.4.3	相控阵天线测试流程.....	265
附录 A 天线标准摘录		267
附录 B 微波传输线参考资料.....		299
参考文献		309

第 1 章

天线测量入门知识

1.1 天线测量的意义、任务、内容、发展历史

1.1.1 意义

测量是人类认识和改造客观世界的一种必不可少的手段。没有测量，就没有科学。科学的发展促进了测量技术的提高，测量技术的提高反过来又促进了科学技术的发展。测量技术的水平已被公认为是一个国家的科学技术和现代文化水平的重要标志之一。

天线是无线电设备的重要组成部分，是人们见闻世界的耳目，是人类与太空的联系，是文明社会的组成要素。从赫兹 1886 年建立第一个天线系统，到今天门类众多的天线大家族，天线测量技术不断提高，测量设备不断改进，人们对天线的认识和改造所付出的不懈努力起了巨大的推动作用。

在我国，随着卫星通信、卫星导航定位、微波通信、移动通信、遥测遥控、雷达等领域的飞速发展，天线行业已在国民经济中占据重要地位，尤其是移动通信天线、卫星通信天线、微波通信天线等生产厂家遍布我国各地。为了适应客户高质量的需求，许多厂家花巨额资金建造测量场地、购置了精良仪器，在此情况下，建立测试队伍、培训技术人才，普及天线测量知识、提高测量技术就显得非常重要。

1.1.2 任务

众所周知，由于天线有两方面的特性：电路特性（输入阻抗、辐射电阻、噪声温度、频带宽度等）和辐射特性（方向图、增益、极化等）。所以天线测量的任务就是用试验的方法测定和检测天线的这些特性。天线测量是研究天线的一种重要手段：即可用来检验理论分析的正确性；抽样检验批量生产中天线参数的合格率，以及定期检查现场使用中天线性能的变动。特别是研究一种新型天线时，天线参数的测量更是必不可少的。因此天线测量技术就成了解决天线问题的重要途径，特别是天线技术中某些理论上难以进行定量分析的新课题，更依赖于试验数据进行分析研究。

1.1.3 内容

由于天线测量以测试仪器为手段，以测量天线参数为目的，所以天线测量的基本内容主要是：介绍测量仪器的正确操作使用方法，如何设计、搭建测量系统；针对不同用途的天线参数给出具体的测量方法步骤；依据书中推荐的国家、行业等标准引导你对测试结果进行分析判定。

天线测量的意义表现在给设计者以正确的依据及导向作用，然而任何一种测量都是有误

差的，所以测量过程就是对误差控制的过程。天线测量技术的高低也就主要体现在对测量误差的分析处理上，所以天线测量应以如何正确组建测量系统、正确操作使用仪器和以正确的方法准确测量天线参数为主要内容。

1.1.4 发展历史

在20世纪20年代以前，人们用圆弧上逐点移动法测试HF频段固定天线的水平方向图；20世纪30年代中期则发展了用于天线测试的波导测试元器件和系统；到20世纪40年代天线测试技术提高很快，有关天线的基本测试方法和问题得到解决；20世纪50年代，美国Antlab和Scientific Atlanta(S-A)两个公司已可专业化研制和生产成套天线的测试设备；20世纪60年代，天线测试方法开始更新，大量测试技术文献出现，并逐步开始研究紧缩场法和近场法；20世纪70年代和80年代是天线测试自动化的年代，美国诞生了天线测试技术协会(AMTA)；20世纪90年代以后，近场测试技术得到广泛应用。通过硬件的改进及软件的升级，测试精度和效率在不断提高，测试成本也在逐步降低。

经过几十年的发展，目前国内外都有比较成熟的天线自动测试系统产品，例如以色列Orbit公司生产的天线测试系统、美国MTI公司生产的天线自动测量系统等。测量系统的产品性能指标不断提高，功能进一步增强，可以在0.1~90GHz的频带内自动完成天线远场和近场测量任务。

我国在天线测试技术研究方面起步较晚，直到20世纪80年代才颁布测试方法的标准，一些天线测试技术论著也陆续问世，奠定了我国天线测量技术的理论基础，我国逐步对天线测试设备及技术开始研究。近年来通过开放、引进、消化、创新，我国的天线测量仪器设备正逐步缩小与国际水平的差距，测量技术也随之提高。国内有关院所院校，如河北威赛特科技有限公司、西安科技大学等，自主创新研发生产了天线自动测试系列产品，借用强大的测试软件功能，该产品不但能快速高精度测量天线的性能，而且操作简单方便，系统稳定可靠，目前在国内得到较为广泛的应用。

1.2 电磁波的特性

天线测量是在开放性系统中进行的，电磁波承载着测试信号通过自由空间传播。天线测量每时每刻都在与电磁波打交道。电磁波有着自己的特性和传播规律。为了有效地进行天线测量和进行测量误差的分析，对于从事天线测量的人员来说，学习、了解并且掌握相关的电磁波知识是必要的。电磁波造福于人类，同时也在污染环境，学习了解电磁波的这些辐射特性，增强安全防护意识，避免电磁波辐射可能对我们造成的伤害，是非常重要的。

1.2.1 电磁波的频率、波长

1. 频率与波长

单位时间内电磁波重复的次数，称为电磁波的频率，用 f 表示，单位是赫兹(Hz)。常用单位有千赫兹(kHz)、兆赫兹(MHz)、吉赫兹(GHz)。

波长是频率的“倒数”，用 λ 表示。它是周期性振荡波形相位相同的两点的最小距离。单位是长度量纲，常用单位有米(m)、厘米(cm)、毫米(mm)。波长和频率一样，在天线测量中都

是要经常遇到的，而在分析问题时用波长更为直观方便。波长和频率的关系见式 (1.2.1)。

$$c = \lambda f \quad (1.2.1)$$

其中， c 是电磁波在自由空间的传播速度 ($c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$)。

2. 电磁波的频谱

电磁波的频谱异常广阔，不同频率和波长的电磁波特性和传播方式也不同，所以我们在天线测量中会遇到各种不同的情况。电磁波频谱按频段划分如表 1.2.1 所示。雷达和空间无线电通信频段划分如表 1.2.2 所示。

无线电频率以 Hz (赫兹) 为单位，其表达方式为：

- 3 000kHz 以下 (包括 3 000kHz)，以 kHz (千赫兹) 表示；
- 3MHz 以上至 3 000MHz (包括 3 000MHz)，以 MHz (兆赫兹) 表示；
- 3GHz 以上至 3 000GHz (包括 3 000GHz)，以 GHz (吉赫兹) 表示。

表 1.2.1 电磁波频谱按频段划分

带号	频带名称	频率范围	波段名称	波长范围
-1	至低频 (TLF)	0.03~0.3Hz	至长波或千兆米波	1 000~10 000Mm
0	至低频 (TLF)	0.3~3Hz	至长波或百兆米波	100~1 000Mm
1	极低频 (ELF)	3~30Hz	极长波	10~100Mm
2	超低频 (SLF)	30~300Hz	超长波	1~10Mm
3	特低频 (ULF)	300~3 000Hz	特长波	100~1 000km
4	甚低频 (VLF)	3~30kHz	甚长波	10~100km
5	低频 (LF)	30~300kHz	长波	1~10km
6	中频 (MF)	300~3 000kHz	中波	100~1 000m
7	高频 (HF)	3~30MHz	短波	10~100m
8	甚高频 (VHF)	30~300MHz	米波	1~10m
9	特高频 (UHF)	300~3 000MHz	分米波	1~10dm
10	超高频 (SHF)	3~30GHz	厘米波	1~10cm
11	极高频 (EHF)	30~300GHz	毫米波	1~10mm
12	至高频 (THF)	300~3 000GHz	丝米波或亚毫米波	1~10dmm

表 1.2.2 雷达和空间无线电通信频段划分

字母代码	雷 达		空间无线电通信	
	频谱区域	举例 (GHz)	标称频段	举例 (GHz)
L	1~2	1.215~1.4	1.5GHz	1.525~1.710
S	2~4	2.3~2.5 2.7~3.4	2.5GHz	2.5~2.690
C	4~8	5.2~5.85	4/6GHz	3.4~4.2 4.5~4.8 5.85~7.075

续表

字母代码	雷 达		空间无线电通信	
	频谱区域	举例 (GHz)	标称频段	举例 (GHz)
X	8~12	8.5~10.5	—	—
Ku	12~18	13.4~14.0	11/14GHz	10.7~13.25
		15.3~17.3	12/14GHz	14.0~14.5
K (注)	18~27	24.05~24.25	20GHz	17.7~20.2
Ka (注)	27~40	33.4~36.0	30GHz	27.5~30.0
V	40~75	46~56	40GHz	37.5~42.5
				47.2~50.2

1.2.2 电磁波的辐射、传播和衰减

电磁波由辐射源发出，如果在自由空间中行进，由于没有介质和障碍物的影响，会以光速直线前进。电磁波在自由空间中传播辐射，其能量不会被吸收，也不会发生反射、折射、衍射和散射等现象，是一个能量不断扩散的过程。其能量密度与距离的平方呈反比关系。这种扩散损耗随频率和距离每增加一倍，自由空间的衰减就增加 6dB。在实际中，自由空间是不存在的，地表和对流层的影响会增加附加衰减，所以在天线测量中要尽可能架高天线。

1.2.3 电磁波的反射、散射和二次辐射

电磁波在传播过程中，当遇到与其波长相比拟的物体或者进入另一种介质以后，它的传播方向会改变。这就是电磁波的反射、折射、衍射、散射现象。当电磁波遇到线性导体时，特别是线长为波长 λ 的 1/4、1/2 或整数倍时，电磁波会在导体中感应产生比较大的交变电场，如同又出现了一个辐射体，从而产生了新的二次辐射波。在天线测量中，尤其是在选择测试场地时要尽量避开高压线、电话线等。

1.2.4 对电磁辐射的防护

天线测量是在开环测试系统中进行的，天线测试人员每天都在和看不见摸不着的电磁波打交道，电磁波也会在不知不觉中对你产生伤害，那么如何了解并防护它呢？事实上，我们周围的环境充满了电磁辐射：微波通信及移动通信基站、手机、微波炉、电子医疗器械等。我国政府有关部门根据对部分动物的实验以及对微波环境下工作人员的健康检查结果，于 1979 年提出了一个暂行标准。该标准规定：在 8h/d 连续照射环境中，最大平均辐射功率密度不得超过 $0.038\text{mW}/\text{cm}^2$ ；而在 8h/d 短时间间断照射环境中，辐射量不得超过 $0.3\text{mW}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$ ，最大平均辐射功率密度不允许超过 $5\text{mW}/\text{cm}^2$ ；当功率密度超过 $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 时必须使用个人防护。

1989 年我国颁布了作业场所微波辐射卫生标准 (GB10436-89)，修改和规定了新的电磁辐射卫生标准限量值。

1. 连续波 8h/d 暴露的平均功率密度为 $50\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，平均功率密度按式 (1.2.2) 计算。

$$P_d=400/t \tag{1.2.2}$$

式中, P_d : 容许的辐射平均功率密度, 单位为 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$;

t : 受辐射时间, 单位为 h。

2. 脉冲波(固定辐射)8h/d 平均功率密度为 $25\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 暴露的平均功率密度按式(1.2.3)计算。

$$P_d=200/t \quad (1.2.3)$$

非固定辐射脉冲波的容许强度与连续波相同。

3. 肢体局部辐射(不区分连续波和脉冲波)8h/d 平均功率密度为 $500\mu\text{W}/\text{cm}^2$, 暴露的平均功率密度按式(1.2.4)计算。

$$P_d=4000/t \quad (1.2.4)$$

由国家环境保护局制定的《电磁辐射防护规定》(GB8702-88)中规定: 职业照射, 在每天 8h 工作期间, 任意连续 6min 全身平均的比吸收率(SAR)应小于 $0.1\text{W}/\text{kg}$; 公众辐射环境中, 24h 内任意连续 6min 全身平均的比吸收率(SAR)应小于 $0.02\text{W}/\text{kg}$ 。该规定中还给出了详细的导出限值, 其中职业照射条件下, 在每天 8h 的工作期间内, 电磁辐射场的场量参数在任意连续 6min 内的平均值列于表 1.2.3 中。

表 1.2.3 职业照射条件下的导出限值

频率范围 (MHz)	电场强度 (V/m)	磁场强度 (A/m)	功率密度 (W/m^2)
0.1~3	87	0.25	20 ^①
3~30	$150/\sqrt{f}$	$0.40/\sqrt{f}$	$(60/f)$ ^①
30~3 000	28 ^②	0.075 ^②	2
3 000~15 000	$(0.5\sqrt{f})$ ^②	$(0.0015\sqrt{f})$ ^②	$f/1500$
15 000~30 000	61 ^②	0.16 ^②	10

① 系平面波等效值, 供对照参考。

② 供对照参考, 不作为限值; 表中 f 为电磁波频率, 单位为 MHz, 表中数据作了取整处理。

公众照射条件下, 在每天 8h 工作期间内, 电磁辐射场的场景参数在任意连续 6min 内的平均值应满足表 1.2.4 的要求。

表 1.2.4 公众照射条件下的导出限值

频率范围 (MHz)	电场强度 (V/m)	磁场强度 (A/m)	功率密度 (W/m^2)
0.1~3	40	0.1	40 ^①
3~30	$67/\sqrt{f}$	$0.17/\sqrt{f}$	$(12/f)$ ^①
30~3 000	12 ^②	0.032 ^②	0.4
3 000~15 000	$(0.22\sqrt{f})$ ^②	$(0.001\sqrt{f})$ ^②	$f/7500$
15 000~30 000	27 ^②	0.073 ^②	2

① 系平面波等效值, 供对照参考。

② 供对照参考, 不作为限值; 表中 f 为电磁波频率, 单位为 MHz, 表中数据作了取整处理。

1.3 天线的基本概念

1.3.1 天线的定义、功用和分类

1. 天线的定义

我们知道，通信、雷达、导航、广播、电视等无线电设备，都是通过无线电波来传递信息的，都需要有无线电波的辐射和接收。在无线电设备中，用来辐射和接收无线电波的装置称为天线。天线为发射机或接收机与传播无线电波的媒质之间提供所需要的耦合。天线和发射机、接收机一样，也是无线电设备的一个重要组成部分。

2. 天线的功用

天线辐射的是无线电波，接收的也是无线电波，然而发射机通过馈线送入天线的并不是无线电波，接收天线也不能把无线电波直接经馈线送入接收机，其中必须经过能量转换过程。下面我们以前无线电通信设备为例分析一下信号的传输过程，进而说明天线的能量转换作用。

在发射端，发射机产生的已调制的高频振荡电流（能量）经馈电设备输入发射天线（馈电设备可随频率和形式不同，直接传输电流波或电磁波），发射天线将高频电流或导波（能量）转变为无线电波——自由电磁波（能量）向周围空间辐射（见图 1.3.1）；在接收端，无线电波（能量）通过接收天线转变成高频电流或导波（能量）经馈电设备传送到接收机。从上述过程可以看出，天线不但是辐射和接收无线电波的装置，同时也是一个能量转换器，是电路与空间的界面器件。

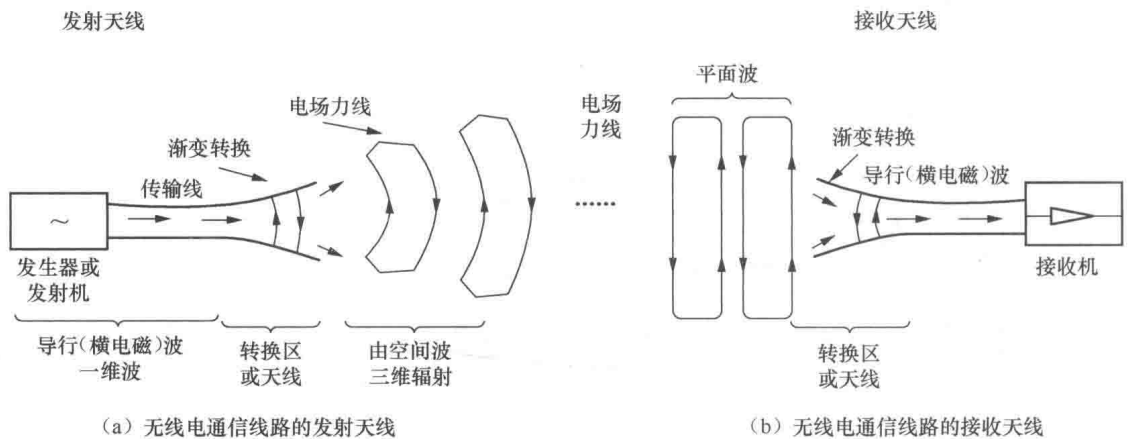


图 1.3.1 天线能量转换原理示意图

3. 天线的分类

要给品种繁多的天线分类是一件非常困难的事情。但不同用途、不同频段的天线，在测量技术要求及方法上都有所不同，下面对天线进行大致分类。

- (1) 按工作性质分为：发射天线、接收天线和收发共用天线。
- (2) 按用途分为：通信天线、雷达天线、广播天线、电视天线、导航、跟踪、遥测天线等。
- (3) 按波长分为：长波、中波、短波、超短波、微波及毫米波天线等。

(4) 按频段分：极低频、超低频、甚低频、中频、高频、特高频天线等。

(5) 按波段分：L、S、C、X、Ku、K、Ka 等。

另外，我们还可以按结构形式分为面天线和线天线等。

1.3.2 天线测量的典型配置

大多数普通天线的测量是测定其远场的辐射特性，如方向图（幅度、相位、极化）、旁瓣电平、增益、频带宽度等。本节将定义这些测量的基本概念。

图 1.3.2 为测量辐射特性的典型配置。基本步骤是将一副发射或接收的源天线放在相对于待测天线（AUT）的远场位置上，待测天线架设在可旋转平台上，旋转待测天线，借以采集大量方向图取样值，实现天线辐射特性的测量。由于天线是电磁开放系统，测试环境对测量结果将产生影响，因此必须合理选择测试场地，尽量实现无反射的环境，如建造微波暗室等。

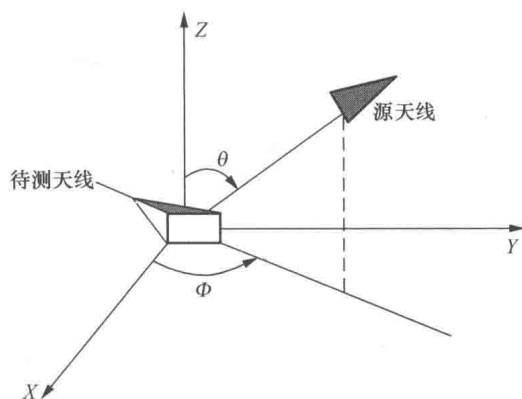


图 1.3.2 测量天线辐射特性的典型配置

1.3.3 天线测量中的互易性

天线测量中被测天线的工作状态可以是发射状态，也可以是接收状态。这可根据测量的内容、设备、场地条件等因素灵活选择。由天线互易原理得知，两种工作状态测量该天线参数的结果应该是一致的。

然而在实际测量中，互易原理必须在一定条件下才能应用。

1. 天线必须是线性的、无源的，如卫星电视接收天线，其馈源与高频头（LNB）为一体化的，不能用作发射。

2. 收发系统阻抗匹配要良好。虽然待测天线和源天线之间存在多次反射，但由于自由空间传播的衰减，这种影响并不严重。源天线、馈线、信号源、待测天线、馈线及接收机，它们相互间的阻抗匹配是满足互易原理的重要条件。

3. 调换天线时，收发支路无有源器件，如功率放大器、低噪声放大器、混频器等。

1.3.4 近场和远场

天线是一种能量转换装置，发射天线将导行波转换为空间辐射波，接收天线则把空间辐射波转换为导行波。因此，一副发射天线可以视为辐射电磁波的波源，其周围的场强分布一般都是离开天线距离和角坐标的函数。通常，根据离开天线距离的不同将天线周围的场区划