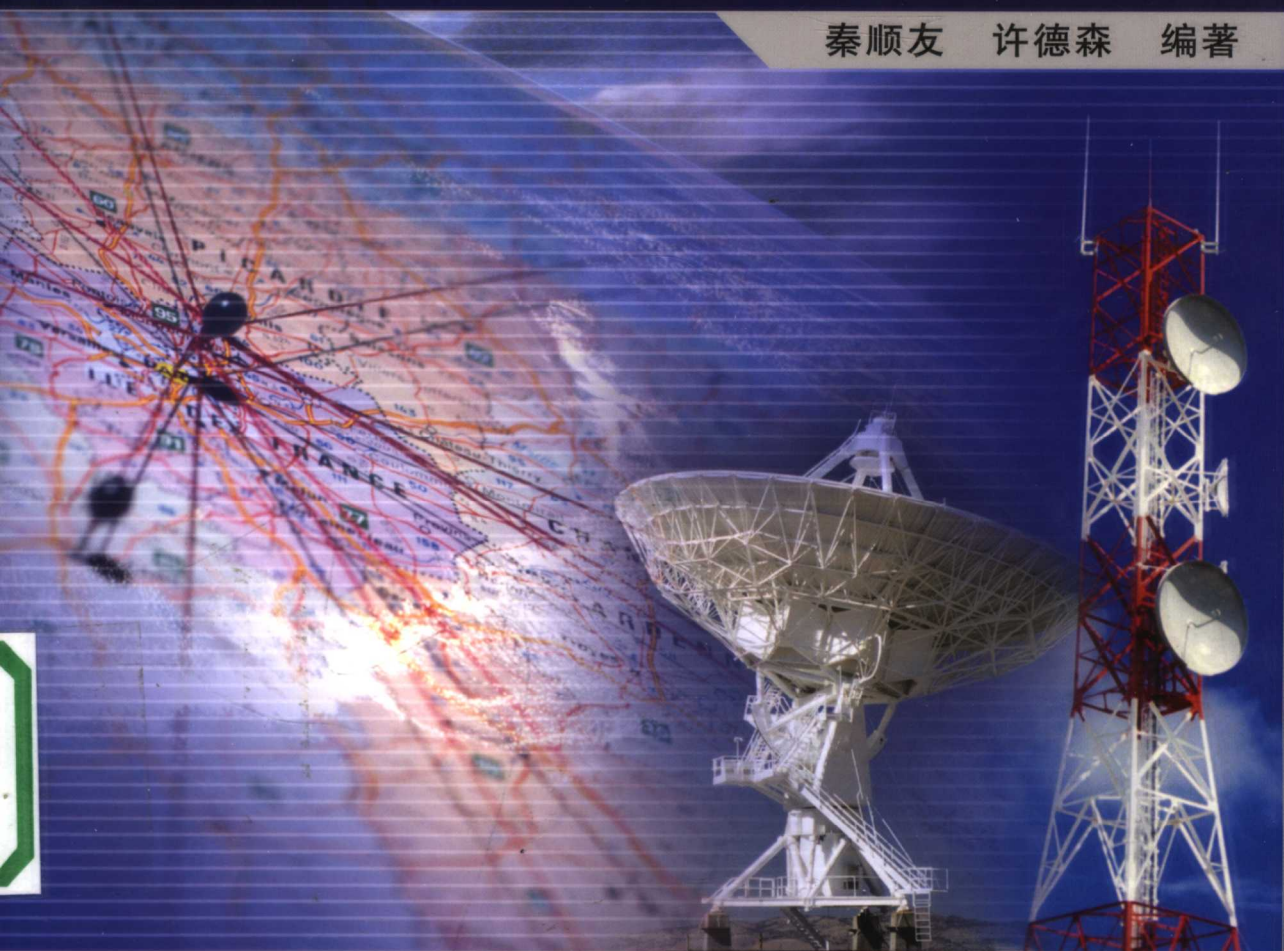


卫星通信 地面站天线 工程测量技术

秦顺友 许德森 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

卫星通信地面站天线 工程测量技术

秦顺友 许德森 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

卫星通信地面站天线工程测量技术/秦顺友, 许德森编著. —北京: 人民邮电出版社, 2006. 3

ISBN 7-115-13774-9

I. 卫... II. ①秦... ②许... III. 卫星通信系统地面站—地面站天线—电性—测量
IV. TN821

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 144701 号

内 容 提 要

本书从卫星通信地面站天线实际工程测试出发, 结合现代地面站天线测试的常用仪器, 系统介绍了卫星通信地面站天线各种电性能指标的半自动或自动化测量技术。内容主要包括天线方向图测试、天线增益测试、天线交叉极化隔离度测试、地面站品质因数测试、天线电压驻波比测试、天线端口隔离度测试和天线馈线测试等。重点讨论了天线方向图和增益的自动化测量技术、数据处理方法和误差修正计算方法, 详细介绍了地面站天线各种电性能指标的测试原理、测试原理方框图和测量方法步骤, 并给出了丰富的工程测量实例及实用的数值计算表格和曲线。

本书通俗易懂, 可操作性和适用性强, 可供从事卫星通信、天线设计与调试、无线电测量、地面站验收、维护与管理等方面的工程技术人员阅读, 亦可供大专院校相关专业的老师、高年级学生和研究生用作参考书。

卫星通信地面站天线工程测量技术

-
- ◆ 编 著 秦顺友 许德森
责任编辑 杨 凌
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京顺义振华印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销
 - ◆ 开本: 787 × 1092 1/16
印张: 14
字数: 341 千字
印数: 1 - 3 000 册
 - 2006 年 3 月第 1 版
2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-13774-9/TN · 2531

定价: 30.00 元

读者服务热线: (010) 67129258 印装质量热线: (010) 67129223

前 言

天线测试是解决天线问题的重要手段，其主要任务是：通过天线测试可以检验天线理论设计的正确性；通过天线测试可以检验天线电性能指标是否达到设计要求；通过天线实验研究，对测量结果进行分析总结，进一步改进天线设计等。

随着现代天线技术的发展，微波测量仪器的进步，以及现代计算机技术的发展，天线测量技术在国内外都得到了迅速的发展。在一些经典的天线测量著作中，比较偏重的是天线测量的基本原理，而本书试图从天线实际工程测量出发，以现代卫星通信地面站天线测量为背景，结合现代天线远场测量常用仪器及设备（微波频谱分析仪和计算机），系统介绍了卫星地面站天线各种电性能参数的半自动化或自动化测量技术，重点讨论了天线方向图和增益的测量技术、数据处理和误差修正方法，全面介绍了卫星通信地面站天线各种电参数的测量原理、测量仪器配置图、实际的测量方法步骤和数据处理方法，并结合实际的工程测量，给出了大量的工程测量实例。

全书共分为11章。第1章概述，简单介绍了天线的概念及功用，卫星通信地面站天线的发展过程，现代卫星通信地面站天线的新技术，以及现代卫星通信地面站天线的设计目标及发展趋势；第2章介绍了地面站天线基本电参数的定义及其计算；第3章介绍了目前天线远场测量常用的接收机，即微波频谱分析仪的原理，以及频谱仪使用应注意的问题，以HP8566B频谱仪为例，对频谱仪的主要功能进行了描述；第4章介绍了卫星源法测量天线的预备知识，如天线对准卫星的位置计算、天线对准卫星的调试方法、极化调整方法、天线转动速度测量，以及卫星源法测量天线的电道计算；第5章系统介绍了远场法测量天线方向图原理、测量方法和数据处理技术，着重讨论了自动化测量技术，以专题的形式研究了方向图测量误差及修正处理方法，最后介绍了天线测量系统灵敏度和动态范围的概念及改善方法；第6章介绍了地面站天线增益常用测量方法和测量原理，以专题的形式研究了天线增益测量误差及修正处理方法，强调了数值计算在现代天线增益测量中的应用；第7章介绍了天线交叉极化方向图和偏轴交叉极化隔离度的测量原理和方法，分析了交叉极化隔离度测量的不定性；第8章介绍了地面站 G/T 测量的常用方法，重点介绍了载噪比直接法测量地面站系统 G/T 的原理、方法和误差分析；第9章介绍了地面站天线电压驻波比和天线端口隔离度的测量原理和方法；第10章介绍了地面站天线常用的馈线，即矩形波导、椭圆波导和低损耗同轴电缆，以及这些馈线电参数的常用计算公式，重点介绍了天线馈线插入损耗和电压驻波比的测量原理和方法；第11章介绍了电磁辐射的环境安全标准及地面站天线近区功率密度的计算方法和测量方法，根据计算或测量的近区功率密度同国标或军标安全限值进行对比，可确定地面站天线辐射灾害区。

本书是作者多年来从事天线设计及天线测量技术研究成果和实际工程测试经验的总结，同时参考了国内外文献及近年来出版的地面站天线测量方法。其突出特点是可操作性强，适用性强。介绍的天线电参数测量原理和方法均是远场法测量天线的常用方法，给出了大量实际工程测量结果，适合于从事卫星通信、无线电测量、天线设计与测试、地面站维护和管理

等工程技术人员使用。

向给予作者帮助和支持的领导、同事和朋友表示致谢！特别是中国电子科技集团公司第五十四研究所天线伺服专业部天线室天线测试课题组的陈辉高级工程师和王小强工程师，书中有些实验是作者同他们一起完成的，有的工程测量数据来源于他们撰写的实验测试报告，在此向他们表示诚挚的感谢；另外，特别要指出的是，该书的顺利完成，自始至终得到了杨群辉高级工程师的支持、鼓励和帮助，在此亦表示感谢！

由于作者水平有限，难免存在不妥之处，诚请读者批评指正。

作 者

2005 年 11 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 天线的概念及功用	1
1.2 卫星通信地面站天线的发展	1
1.3 地面站天线技术的新进展	2
1.3.1 地面站天线的优化设计	2
1.3.2 多频段卫星地面站天线技术	3
1.3.3 高频段卫星通信地面站天线技术	3
1.3.4 多波束卫星通信地面站天线技术	3
1.3.5 VSAT 地面站天线技术	3
1.3.6 自适应阵列天线技术	4
1.4 卫星通信地面站天线技术的发展趋势	4
1.4.1 低旁瓣技术	4
1.4.2 低交叉极化技术	5
1.4.3 扩展带宽和开拓卫星通信的新频段	6
第 2 章 地面站天线基本电参数	7
2.1 天线增益	7
2.1.1 增益的定义	7
2.1.2 天线的有效口径面积和增益的计算公式	8
2.2 天线方向图和半功率波束宽度	9
2.2.1 天线方向图	9
2.2.2 半功率波束宽度	10
2.2.3 旁瓣电平	11
2.3 极化	11
2.3.1 极化的基本概念	11
2.3.2 轴比	12
2.3.3 极化效率	13
2.3.4 极化隔离度	13
2.4 天线噪声温度	14
2.4.1 天线噪声温度的基本概念	14
2.4.2 天线噪声温度的计算	15
2.4.3 天线噪声温度的近似计算	15
2.5 地面站品质因数	16
2.6 天线带宽	17

2.7	反射系数、回波损耗和电压驻波比	18
2.8	端口隔离度	20
第3章	地面站天线测量的主要仪器——频谱仪	21
3.1	频谱仪的分类	21
3.1.1	实时频谱分析仪	21
3.1.2	扫频频谱分析仪	22
3.2	超外差式频谱分析仪的工作原理	22
3.3	频谱仪的主要技术指标及其相互关系	24
3.3.1	最大允许输入电平	24
3.3.2	频谱仪的工作频率范围	25
3.3.3	频谱仪的频率分辨率	25
3.3.4	频谱仪的视频带宽	25
3.3.5	扫频宽度、扫描时间和扫频速度	26
3.3.6	分辨带宽、扫描时间和扫频宽度之间的关系	26
3.3.7	频谱仪的噪声系数和灵敏度	26
3.4	使用频谱仪应注意的问题	27
3.5	常用频谱仪介绍——HP8566B	28
3.5.1	HP8566B 频谱仪的主要性能指标	28
3.5.2	HP8566B 频谱仪的主要功能描述	30
第4章	卫星源法测量天线的预备知识	35
4.1	地面站天线常用测试场综述	35
4.2	天线对准卫星的方位角、俯仰角及极化角的计算	36
4.2.1	计算公式	36
4.2.2	地面站天线指向和极化角旋向的判定方法	36
4.2.3	数值计算实例	37
4.3	地面站天线对准卫星的调试方法	39
4.4	地面站天线极化调整	41
4.4.1	地面站天线极化调整原理	42
4.4.2	地面站天线极化调整程序	42
4.5	地面站天线转动速度的测量	44
4.6	卫星源法测量天线的电道计算	45
4.6.1	功率传输方程	45
4.6.2	测量电道的估算	46
第5章	天线方向图测量	48
5.1	信标塔法测量天线方向图	48
5.1.1	测试条件	48
5.1.2	测量原理	50

5.1.3	测量方法和程序	51
5.1.4	Ku 频段 0.6m 环焦天线方向图测量	52
5.2	利用卫星信标法测量天线接收方向图	53
5.2.1	用卫星信标法测量天线接收方向图的原理	53
5.2.2	用卫星信标法测量天线接收方向图的方法程序	55
5.2.3	C 频段 5m 地面站天线接收方向图测量实例	56
5.3	辅助站法测量地面站天线方向图	57
5.3.1	发射方向图测量	57
5.3.2	接收方向图测量	58
5.4	天线方向图测量的数据处理方法	60
5.4.1	方向图电平的计算方法	60
5.4.2	方向图角度的计算方法	60
5.4.3	方向图方位角的修正	60
5.4.4	压缩现象的修正处理方法	61
5.4.5	载噪比的修正处理方法	61
5.5	地面站天线方向图自动化测量技术	62
5.5.1	天线方向图自动化测量的必要性	62
5.5.2	自动化测量系统的组成	63
5.5.3	天线方向图自动化测量的原理方法	63
5.5.4	自动测量软件及流程图	64
5.5.5	方向图自动化测量的应用举例	65
5.6	天线方向图测量误差分析及修正处理方法	69
5.6.1	有限测试距离对天线方向图的影响	69
5.6.2	测试系统信噪比对天线旁瓣特性的影响	74
5.6.3	角度测量误差对方向图旁瓣特性的影响	78
5.7	天线方向图测试系统灵敏度和动态范围	83
5.7.1	测试系统灵敏度	84
5.7.2	测试系统的动态范围	85
5.7.3	提高测试系统灵敏度和动态范围的方法	85
第 6 章	天线增益测量	88
6.1	射电源法测量天线增益	88
6.1.1	用于天线测量的射电源应具备的条件	88
6.1.2	测量天线的常用射电源	89
6.1.3	射电源轨道的计算	90
6.1.4	射电源法测量天线增益	92
6.1.5	射电星法测量天线增益的误差分析	100
6.2	比较法测量天线增益	102
6.2.1	信标塔法测量天线增益	102
6.2.2	卫星源法测量天线增益	105

6.2.3	椭圆极化天线增益测量技术	108
6.2.4	比较法测量天线增益的误差分析及修正处理方法	111
6.3	天线方向图积分法确定天线增益	119
6.3.1	方向图积分法确定天线增益的原理	119
6.3.2	方向图积分区域的确定方法	121
6.3.3	方向图积分法确定天线增益的误差分析与估计	123
6.4	波束宽度法确定天线增益	124
6.4.1	天线方向性系数的半功率波束宽度表示法	124
6.4.2	圆口径天线方向性系数与波束宽度的关系	125
6.4.3	利用波束宽度法测量天线增益的原理和方法	126
6.4.4	波束宽度法测量天线增益的误差分析	128
6.5	卫星链路计算法测量天线增益	129
6.5.1	地面站天线接收增益测量	129
6.5.2	地面站天线发射增益测量	130
6.5.3	卫星链路计算法测量天线增益的工程应用实例	133
第7章	交叉极化隔离度测量	134
7.1	交叉极化方向图测量	134
7.1.1	交叉极化方向图测量原理	134
7.1.2	场地法测量交叉极化方向图的方法程序	135
7.1.3	卫星信标法测量天线接收交叉极化方向图	136
7.1.4	卫星源法测量地面站天线发射交叉极化方向图	137
7.1.5	交叉极化方向图测量的工程应用举例	138
7.2	离轴交叉极化隔离度测量	140
7.2.1	离轴交叉极化隔离度测量原理	140
7.2.2	离轴接收交叉极化隔离度测量的方法程序	141
7.2.3	离轴发射交叉极化隔离度测量的方法程序	141
7.2.4	偏轴交叉极化隔离度的工程测量实例	142
7.3	交叉极化隔离度测量的不定性分析与结果判断	144
7.3.1	交叉极化隔离度测量的不定性分析	144
7.3.2	交叉极化隔离度测量结果的判断方法	145
第8章	G/T 值测量	147
8.1	射电天文法测量地面站 G/T 值	147
8.1.1	射电源的选择	147
8.1.2	射电源测量 G/T 值的原理和方法	147
8.1.3	射电源法可测天线最小口径的确定方法	148
8.2	间接法测量地面站 G/T 值	148
8.2.1	间接法测量 G/T 值的原理和方法	148
8.2.2	间接法测量地面站 G/T 值的工程应用举例	149

8.3 卫星载噪比直接法测量地面站 G/T 值	150
8.3.1 卫星载噪比直接法测量 G/T 值的特点	150
8.3.2 载噪比直接法测量 G/T 值的原理	150
8.3.3 各种修正因子的计算	152
8.3.4 载噪比直接法测量 G/T 值的方法和程序	155
8.3.5 载噪比直接法测量 G/T 值的误差分析与估计	156
8.3.6 载噪比直接法测量 G/T 值的应用实例	157
第9章 天线驻波和端口隔离度的测量	159
9.1 天线电压驻波比测量	159
9.1.1 天线电压驻波比测量原理	159
9.1.2 标量网络分析法测量天线电压驻波比	161
9.1.3 频谱仪法测量天线电压驻波比	162
9.2 天线端口隔离度测量	165
9.2.1 端口隔离度测量原理	165
9.2.2 收发端口隔离度 (R_x/T_x) 测量	166
9.2.3 同频端口隔离度测量	168
第10章 天线馈线测量	170
10.1 常用地面站天线馈线介绍	170
10.1.1 同轴传输线	170
10.1.2 矩形波导	171
10.1.3 椭圆波导	172
10.2 馈线插入损耗测量	174
10.2.1 功率比法测量天线馈线损耗	174
10.2.2 短路驻波法测量波导馈线小衰减	176
10.2.3 波导器件小衰减测量的一种新方法—— Y 因子法	177
10.3 天线馈线电压驻波比测量	180
10.3.1 同轴馈线电压驻波比测量	180
10.3.2 波导馈线电压驻波比测量	181
第11章 地面站天线辐射灾害计算与测量	183
11.1 电磁辐射的环境安全标准	183
11.2 地面站天线近区功率密度的精确计算	184
11.2.1 天线近区场的计算	185
11.2.2 近区功率密度的计算	186
11.2.3 工程计算实例	187
11.3 近区功率密度的估算	190
11.3.1 近区功率密度的估算	190
11.3.2 轴向近区功率密度的计算	191

11.4 近区功率密度测量..... 195

11.4.1 近区功率密度测量原理..... 195

11.4.2 近区功率密度测量的方法程序 196

11.4.3 C 频段 13m 天线机房内外微波辐射灾害测量 197

附录 同步通信卫星轨道位置表..... 199

参考文献..... 208

第 1 章 概 述

1.1 天线的概念及功用

在无线电发射和接收系统中，用于发射和接收电磁波的部件（部分）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。

天线的功用首先是实现能量转换，即发射机经传输线输出的射频导波能量转换成无线电波能量向空间辐射（称为发射天线）；或反之，将入射的空间电磁波能量转换成射频导波信号能量传输给接收机（称为接收天线）。天线的另一功用是实现天线特定极化波的定向辐射或接收，即具有特定的方向性和极化。以卫星通信广播电视为例，要求卫星天线的辐射只集中在本国或某一指定的服务区，形成在地球上该区域内等强的波束；另外，随着卫星频谱复用技术的发展，往往要求地面站天线具有双极化能力。例如：国际通信卫星 INTELSAT VI 的 4GHz 发射天线将形成两个具有右旋圆极化的东西半球波束，同时又形成 4 个采用左旋圆极化而照射较小面积的区域波束（多波束天线）。由于同一覆盖区的同频波束间是极化隔离的，而覆盖不同区域的波束间又是空间隔离的，因而对 4GHz 频段实现了六重复用，从而提高了通信容量。另一方面，接收卫星电视信号的地面站天线只需形成一个窄的主波束，指向卫星，接收指定极化，也就是说，地面站天线极化与所接收卫星信号极化匹配。

为了满足上述功用，对地面站天线提出了一系列具体要求，表达这些要求的天线电性能指标称为天线的电参数，例如天线发射增益、天线接收增益、天线方向图、天线交叉极化隔离度、电压驻波比、天线噪声温度和频带带宽等。在许多无线电通信系统中，天线的电参数直接决定整个系统的性能指标。诸如通信卫星的等效全向辐射功率，卫星地面站系统 G/T 值等。

依据天线收发互易原理，一副天线既可用作发射，又可用作接收。也就是说，地面站系统发射和接收功能都是用一副天线来完成的，在馈线传输部分利用双工器或馈源网络分别处理而已。同一副天线，且在同一频率使用情况下，不管是用作发射，还是用作接收，天线的电性能都是完全相同的。所以在分析或测量天线电参数时，只要对发射或接收的任一状态进行分析或测量就可以了。

1.2 卫星通信地面站天线的发展

随着卫星通信技术的发展，相应地，地面站天线技术也得到了很大的发展，其发展大致可以分为以下几个阶段：

1. 地面站天线发展的初级阶段

地面站天线发展的初级阶段，天线效率较低，一般为 50%~55%，天线形式主要是前馈

抛物面天线和常规的未加赋形的卡塞格伦或格里高利天线。天线馈源多半是圆波导或方波导类型的光壁喇叭。在此阶段,天线主要用来解决卫星通信的启用问题,在卫星接收系统中,放大器采用的是常温参放,其本身噪声温度很大,系统对地面站天线的噪声温度要求不高,因此人们没有付出多大的力量深入研究天线。

2. 地面站天线的发展阶段

在此阶段,卫星地面站通信系统使用了致冷参放,其本身噪声温度很低,因此对天线噪声温度和馈源系统所贡献的噪声温度引起了高度的重视,并且提出了以地面站品质因数来衡量卫星通信系统的性能指标,这就要求天线及馈源系统的噪声温度低,天线效率高,从而出现了后馈式的卡塞格伦天线和格里高利天线。

在这一阶段,地面站天线技术的发展主要表现在以下几个方面:首先是对天线的主副镜进行赋形或者说修正,以便获得高效率和高增益;其次,天线馈源多采用多模喇叭和早期使用的波纹喇叭,因此对多模喇叭的等化技术以及波纹喇叭的传播特性和辐射特性进行了广泛、深入的研究。

3. 频谱复用和低旁瓣阶段

随着卫星通信技术的发展,地球同步轨道上的卫星越来越多,卫星间隔越来越小。而地面站天线的旁瓣特性是确定最小卫星间隔、有效利用射频频谱的主要因素;另外,天线辐射方向图直接影响到主波束以外的 *EIRP* (等效全向辐射功率) 和由旁瓣接收的功率;再者,天线的交叉极化性能直接关系到卫星轨道的频谱复用等。总之,为了有效地利用空间资源,避免相邻卫星之间的相互干扰,要求地面站天线具有低旁瓣包络特性;这一阶段,低噪声放大器得到了广泛应用,要求天线和馈源系统所贡献的噪声温度进一步降低。同时,随着卫星通信技术的发展,卫星通信容量已日渐满足不了人们应用的需要,这就促使频谱复用技术研究的发展。所谓频谱复用,就是一个频谱两用,即通过极化正交使用同一频率来发射或接收两路信号。原则上讲,频谱复用可使卫星通信容量增加一倍。

4. 现有频段的展宽和开拓新频段阶段

拓宽现有的卫星通信频带是一项扩大卫星通信容量既经济又有效的方法。例如,目前将 C 频段收发各 500MHz 带宽拓宽到收发各 800MHz 带宽,已得到了实际应用。

开辟新频段:目前由于 C 频段微波信号密集,尤其在城市,它对卫星通信造成的微波干扰极其严重;此外,C 频段地面站天线规模大,在城市建站有严重的站址环境问题,因此多建在城郊。为了解决上述两个问题,Ku 频段卫星通信技术已得到了广泛的应用和发展,相应地,Ku 频段天线技术也得到了发展。为了进一步拓宽卫星通信的带宽,目前 Ka 频段卫星通信技术在日本、欧美等国家开始启动,并发射有 Ka 频段通信卫星。相信在不久的将来,Ka 频段卫星通信如同 C/Ku 频段一样,将得到广泛的应用和发展,相应地促进了 Ka 频段卫星通信地面站天线及馈源系统的开发和研究。

1.3 地面站天线技术的新进展

1.3.1 地面站天线的优化设计

随着现代地面站天线技术和计算机技术的发展,地面站天线技术已达到优化设计的高技

术状态。目前有地面站天线优化设计软件和数值优化程序。通过优化设计,使地面站天线效率最佳,旁瓣电平低于规定的包络线标准,最高交叉极化电平低于地面站天线入网要求的值。另外,还可以利用计算机软件实现天线结构力学分析和计算,完成地面站天线的机电一体化设计,从而使天线的性能最佳。

1.3.2 多频段卫星地面站天线技术

在卫星通信应用中,多频段共用是扩大卫星通信容量的有效措施之一。所谓多频共用,就是指同一时间内使用多个频段进行通信。目前同步卫星轨道上有很多多频段共用卫星,例如常用的 C/Ku 频段卫星,还有 Ku/Ka 频段卫星、C/X 频段卫星、X/UHF 频段卫星、C/Ku/X 频段卫星、Ku/Ka/L 频段卫星、Ka/L/S 频段卫星、C/Ku/L 频段卫星、C/L 频段卫星、C/S/UHF 频段卫星、Ku/Ka/S 频段卫星、UHF/EHF 频段卫星、S/Ka 频段卫星和 Ku/X 频段卫星等等。目前多频共用的卫星地面站天线也开始应用,多频共用地面站天线设计技术是现代卫星通信地面站天线设计研究的热点之一,其关键技术是多频共用馈源设计技术。

1.3.3 高频段卫星通信地面站天线技术

随着卫星通信技术的飞速发展,在轨的 C 频段和 Ku 频段卫星日益增加,需要开拓新频段。例如 Ka 频段,国际电信联盟给卫星固定业务分配了 Ka 频段,其上行频率为 27.5 ~ 31GHz,下行频率为 17.7 ~ 21.2GHz。自美国 20 世纪 70 年代发射 Ka 频段卫星以来,目前美国、意大利和日本等国家已有 Ka 频段卫星通信系统的应用。特别是从 90 年代开始,一方面 Ka 频段技术和元器件工艺水平取得了进展;另一方面,C 频段应用和轨道位置已趋于饱和,Ku 频段需求量急剧增长已使频谱和轨道位置出现拥挤现象,于是发展 Ka 频段卫星开始提上议事日程。在国外,Ka 频段卫星通信天线已得到应用,国内目前尚无 Ka 频段卫星,也没有系统展开对 Ka 频段卫星通信地面站天线的研究,因此 Ka 频段或更高频段(美国已有 EHF 频段卫星)地面站天线设计研究具有重要的现实意义。

1.3.4 多波束卫星通信地面站天线技术

随着卫星通信技术的发展,卫星轨道日益紧张,同步轨道卫星间隔逐渐缩小,因此用一副地面站天线接收多颗卫星信号的多波束天线显得很有研究价值和应用价值。所谓多波束卫星通信地面站天线,就是指具有两个以上独立可控制波束的天线,且天线的每一个波束能对准一颗卫星,独立地完成接收卫星信号或向卫星发射信号或者发射和接收同时进行。多波束技术使一个地面站系统与多颗卫星实现通信,从而实现了一站多用,既可改变地面站布局,又降低了地面站建站成本;又可为地面站通信系统提供更多的灵活性,其科技价值、经济效益和社会效益将是极为可观的。国外从 20 世纪 70 年代起开始研制多波束天线技术,至今已研制出了很多类型的多波束天线。在地面站应用中,常见的多波束天线有:单镜和双镜抛物面天线、球形镜面天线、抛物环面天线和混合镜面天线等。国内对多波束卫星通信地面站天线的研究虽然起步较晚,但发展较快。由此可见,在卫星通信系统应用中,多波束天线无论是作为卫星有效载荷,还是作为地面站天线,必将发挥着重要的作用。

1.3.5 VSAT 地面站天线技术

所谓 VSAT,即甚小口径终端。随着卫星通信技术的快速发展,卫星的 EIRP 不断增大,

从而促使了甚小口径地面站天线在卫星通信系统中得以广泛应用,例如目前正在迅速发展的机载卫星通信系统和车载卫星通信系统等。在这些应用系统中,往往要求天线的电尺寸小,结构紧凑等。但天线的电性能指标仍要满足 ITU 的建议和要求,因此研究新一代高增益、低旁瓣、低交叉极化的甚小口径地面站天线,也是现代卫星通信地面站天线研究的热点之一。

1.3.6 自适应阵列天线技术

自适应阵列天线技术的实际应用正在不断发展,目前出现了许多新的数字化波束形成技术和新的算法。其早期应用有雷达天线的旁瓣对消和机载雷达对消杂波干扰等;近年来,在国外,自适应阵列天线在车载卫星通信中已有应用。常见的天线形式有平板阵列天线和微带阵列天线等。相信在不久的将来,自适应天线研究的进一步突破将使其在飞行体装载、机载、车载和船载等卫星通信系统中有广阔的应用前景。

1.4 卫星通信地面站天线技术的发展趋势

在卫星通信地面站系统入网验证测试中,天线入网验证测试是相当重要的。无论地面站系统入国际卫星通信网还是洲际和国内卫星通信网,在所测指标中,天线指标约占 80% 左右。当然,这只是指标要求的一种数量表现,重要的是为什么有这么多指标要求和每个指标的重要意义。这是因为:首先,在确定同步卫星之间的最小间隔时,地面站天线旁瓣特性是最重要的因素;其次,在同步卫星轨道管理中,无线电频谱的有效利用是第一位的因素,天线的辐射方向图直接关系到无线电频谱的有效利用和复用;第三,天线辐射方向图直接影响主波束以外的 $EIRP$ 和由天线旁瓣接收的功率,因而它涉及到卫星通信系统之间,以及该系统地面站与使用同频段的其他陆地站之间的协调研究和相互干扰的估算。总之,要充分有效利用同步卫星的轨道资源,避免相邻卫星之间的相互干扰,INTELSAT、AsiaSAT、ChinaSAT 和 APT 等世界各卫星组织对地面站天线入网指标都提出了强制性要求。CCIR、ITU、IEC 和 INTELSAT 等组织还花费了大量的人力、物力和时间对地面站天线性能进行了充分研究和分析,不断提出新的要求。下面对地面站天线的主要电性能指标进行综合分析,指出其发展趋势。

1.4.1 低旁瓣技术

目前,世界上很多卫星组织都各自制定了天线的入网要求。但是,最具权威性的仍是 CCIR 报告和建议,以及 INTELSAT 的 IESS 标准。为了阐述天线旁瓣包络的发展趋势,我们依据 CCIR Rec. 580、580-1、580-2、580-3 和 ITU RS. 580-5 以及 IESS-207、IESS-208 和 IESS-601,总结出 1990 年以前、1995 年以前和 1995 年以后天线旁瓣特性的包络要求,从而可看出天线旁瓣包络的发展趋势。

1990 年以前,地面站天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益不应超过如下要求:

当 $D/\lambda \geq 150$ 时,天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益应满足:

$$G = 29 - 25\log(\theta) \quad \text{dBi} \quad (1^\circ \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-1)$$

当 $100 \leq D/\lambda < 150$ 时,天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益应满足:

$$G = 32 - 25\log(\theta) \quad \text{dBi} \quad (1^\circ \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-2)$$

当 $D/\lambda < 100$ 时, 天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益应满足:

$$G = 52 - 10\log(D/\lambda) - 25\log(\theta) \text{ dBi} \quad (100\lambda/D^\circ \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-3)$$

式中, G ——相对于各向同性天线的增益 (dBi);

θ ——偏离主波束的角度 ($^\circ$);

D ——地面站天线直径 (cm);

λ ——工作波长 (cm)。

1990 ~ 1995 年, 对于 $D/\lambda \leq 150$ 的天线, 其旁瓣特性优于上述要求的 3dB, 也就是天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益不应超过如下要求:

当 $D/\lambda \geq 100$ 时, 天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益应满足:

$$G = 29 - 25\log(\theta) \text{ dBi} \quad (1^\circ \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-4)$$

当 $D/\lambda < 100$ 时, 天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益应满足:

$$G = 49 - 10\log(D/\lambda) - 25\log(\theta) \text{ dBi} \quad (100\lambda/D^\circ \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-5)$$

1995 年以后安装的天线, 其天线旁瓣特性要求和设计目标如下:

当 $D/\lambda \geq 50$ 时, 天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益应满足:

$$G = 29 - 25\log(\theta) \text{ dBi} \quad (1^{**} \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-6)$$

当 $D/\lambda < 50$ 时, 天线方向图 90% 的旁瓣峰值增益应满足:

$$G = 32 - 25\log(\theta) \text{ dBi} \quad (1^{**} \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-7)$$

其中, * 表示当 $D/\lambda < 100$ 时, 这个角度应为 $100\lambda/D$ 。

IESS 对 $D/\lambda < 50$ 的天线提出了天线旁瓣包络的设计目标为:

$$G = 29 - 25\log(\theta) \text{ dBi} \quad (1^{**} \leq \theta \leq 20^\circ) \quad (1-8)$$

在国际电信联盟无线电部门 (ITU-R) S. 580-5 中, 对 $D/\lambda < 50$ 的天线其旁瓣特性要求仍在研究之中。但是, ITU 提出: 对于 $D/\lambda \geq 22$ (Ku 频段) 的偏馈天线和 $D/\lambda \approx 26$ 的 Ku 频段微带阵天线, 其旁瓣特性仍要满足 $29 - 25\log(\theta)$ 。

由此可见, 随着卫星通信技术的迅速发展, 卫星资源日益紧张, 为了有效地利用卫星轨道资源, 减少相邻卫星的相互干扰, 世界各卫星组织对地面站天线旁瓣的包络要求越来越严格。特别是天线直径与波长比 (即天线电尺寸) 扩展到 50, 也就是说, C 频段 $D \geq 2.34\text{m}$ (频率 $f = 6.425\text{GHz}$) 和 Ku 频段 $D \geq 1.04\text{m}$ (频率 $f = 14.5\text{GHz}$) 的天线宽角旁瓣特性要满足 $29 - 25\log(\theta)$ 的强制要求。而且 INTELSAT 提出, 对于 $D/\lambda < 50$ 的天线, 其设计目标仍要满足 $29 - 25\log(\theta)$ 。显然, 超低旁瓣的地面站天线 (特别是 VAST 天线) 的设计研究, 是从事卫星通信地面站天线设计研究的重要课题。

1.4.2 低交叉极化技术

对于圆极化或线极化通信制式的地面站天线来说, 对地面站天线的圆极化天线轴比和线极化隔离度都提出了强制性的要求。例如 INTELSAT 组织要求线极化地面站天线交叉极化隔离度 $XPD \geq 30\text{dB}$; 而对于圆极化地面站天线, 当 $D \geq 4.5\text{m}$ 时, 天线轴比 $AR \leq 1.06$ (交叉极化隔离度不低于 30.7dB); 当 $2.5\text{m} \leq D \leq 4.5\text{m}$ 时, $AR \leq 1.09$ (交叉极化隔离度不低于 27.3dB); 对于 $D \leq 2.5\text{m}$ 的天线, $AR \leq 1.30$ (交叉极化隔离度不低于 17.7dB)。并提出了圆极化天线轴比的设计目标均为 1.06。可见, 随着卫星通信技术的发展, 地面站天线的交叉极化隔离度 (或轴比) 要求越来越严格, 这是因为采用正交极化是增加对地静止卫星轨道容量的有效方法。可实现卫星和地面站天线主波束内的频谱复用, 避免正交极化同频道的

相互干扰；可减少相邻的或重叠卫星点波束之间的干扰；可减小卫星间隔，还可以减少相同卫星的大功率链路对小功率链路的干扰，从而保证高质量的卫星通信。因此，地面站天线研究设计人员必须考虑提高新一代天线的技术指标，以达到地面站天线入网要求。

1.4.3 扩展带宽和开拓卫星通信的新频段

所谓带宽，是指地面站天线满足一定电性能指标的工作频段范围。随着新一代宽频带卫星的上天，要求地面站通信天线带宽要扩展。例如：应用 INTELSAT VI 和 VII 代星，对于 C 频段卫星通信天线，其带宽要求为 575MHz，也就是说，地面站天线发射频段为 5 850 ~ 6 425MHz，接收频段为 3 625 ~ 4 200MHz；而应用 INTELSAT VIII A 代星，频段扩展到 800MHz，即地面站天线发射频段为 5 850 ~ 6 650MHz，接收频段为 3 400 ~ 4 200MHz。由此可见，天线系统的各分系统（例如馈源、网络等）都必须在上述频带内正常工作。因此，研究宽带卫星通信天线也是现代卫星通信天线设计研究的重要课题之一。

另外，目前 Ku 频段卫星通信应用相当广泛，设计 C/Ku 频段兼容的卫星通信天线，也是当天线设计研究的重要课题。随着卫星通信技术的发展，不断开拓卫星通信应用的新频段。例如 Ka 频段卫星通信系统，目前在欧、美、日等发达国家已发射了 Ka 频段卫星，并且得到了应用。我国目前尚是空白，开拓 Ka 频段卫星通信天线，也是地面站天线设计研究面临的新课题。