



Technology of Satellite Communications Earth
Station on Space Tracking Ship

航天测量船 卫星通信地球站技术

● 张建飞◎编著

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

Technology of Satellite Communications Earth
Station on Space Tracking Ship

航天测量船 卫星通信地球站技术

● 张建飞◎编著

人民邮电出版社

北 京

图书在版编目 (CIP) 数据

航天测量船卫星通信地球站技术 / 张建飞 编著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2018. 11

ISBN 978-7-115-49255-5

I. ①航… II. ①张… III. ①测量船—卫星通信地面站—研究 IV. ①TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第199689号

内 容 提 要

本书根据新一代航天远洋测量船船载卫星通信地球站工程设计、建设与实际应用,结合近几年有关船载卫星通信地球站课题开展的成果和一线岗位实际的工作经验,全面地对船载卫星通信地球站相关知识、通信信道终端、天线伺服控制以及设备系统管理等技术进行了介绍,具有较高的推广应用价值。本书主要内容包括卫星通信基础知识、信道传输技术及设备、站监控、通信链路计算、天线伺服、位置检测、驱动与传动、天线稳定及跟踪、船载天线故障预警与诊断技术等,同时介绍了船载卫星通信地球站常用仪器仪表的性能和基本操作,提供了船载卫星通信地球站系统设备维护和性能指标测试方法。

本书可以作为船(舰)载卫星通信系统专业的技术用书,也可以作为从事机载、车载等其他移动载体卫星通信和自动控制专业工作的工程技术人员和科技工作者的技术和业务参考用书。

◆ 编 著 张建飞

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: 23.75

2018 年 11 月第 1 版

字数: 549 千字

2018 年 11 月河北第 1 次印刷

定价: 148.00 元

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

反盗版热线: (010)81055315

序

航天测量船是航天测控网中的海上活动测控站，是我国航天测控网的重要组成部分，承担了载人航天、月球探测、卫星导航、技术试验等重大航天工程航天器在相关轨道段的海上测控任务。

测量船通信系统是航天测控通信网中的一个信息交换节点，也是测量船工程的重要组成部分，关系着测量船海上测控能力保证、工作与生活环境保障及海上航行安全。卫星通信是航天测量船岸船通信的重要手段。测量船船载卫星通信地球站（以下简称船载卫通站）除了具有普通卫星地面站所有的链路设备 and 功能之外，还具有天线能快速和高精度跟踪卫星目标，抗风、抗振、抗强电磁干扰和抗构件扭曲，防水、防盐雾和防腐蚀等特点。

测量船船载卫星通信自 20 世纪 80 年代开始装备并应用以来的 30 多年中，经过不断的技术改造和工程建设，整体系统和技术得到迅猛发展。天线口径从 5m 增加到 7.3m，带宽从几十 kbit/s 提高到几十 Mbit/s，通信手段从单站单线路发展到多站多线路业务。在测量船卫星通信技术发展和工程建设过程中，几代通信科技人员投入了毕生的精力和智慧，积累了丰富的实践经验，取得了丰硕成果，形成了具有航天测量船特色的通信系统建设程序和装备体系。

本书作者长期从事船舶海上卫星通信工程和技术工作，参与第二代和第三代船载卫通站的研制工作，有着丰富的实践经验。为紧跟通信新技术发展步伐，适应航天海上测控通信系统建设标准、模式的深刻变化，作者编著了本书。书中对船载卫通站的信道终端、天线伺服控制以及设备系统管理等进行了全面介绍，结合实际给出了通信链路计算案例和技术指标测试方法，内容丰富，实用性强。

本书使用对象为从事航天海上测控通信系统尤其是船载卫星通信系统的工程技术人员和科研管理人员，也可作为从事机载、车载等其他移动载体卫星通信工程技术人员的业务参考用书。希望本书对广大读者理解和掌握船载卫通站技术及系统建设和问题分析方法上能够起到实际的指导作用，有益于航天海上测控通信学科建设和人才培养，不断提高海上测控通信科研试验技术水平。


2018.9.17

前 言

卫星通信是当今海上船舶船岸通信的重要手段, 航天远洋测量船船载卫星通信地球站(以下简称船载卫通站)包含信道终端、天线结构、伺服驱动和系统监控四大部分。信道终端部分除了具有普通卫星地球站所有的链路设备和功能之外, 还具有各单元双机热备份、智能或人工主备切换、抗干扰、防震动等船载卫通站特点; 天线结构部分具有防水、防盐雾和防腐蚀、抗风、抗振动和抗扭曲等特点; 伺服驱动部分具有天线状态控制、陀螺稳定平台、目标方向自跟踪等特点; 系统监控部分具有本站监控和远程监控、智能故障诊断和处理等功能。拥有一套性能优良的天线伺服驱动及稳定跟踪系统是船载卫通站区别于其他一般陆地卫通站的显著特点。

本书共分 14 章。第 1 章为绪论, 介绍了卫星通信及船载卫通站的基本概念和特点。第 2 章为卫星通信基础, 介绍了电波传输、通信卫星、卫星通信体制、差错控制及基本技术参数。第 3 章为天线与馈源技术, 介绍了抛物面天线、船载天线座架及微波馈源网络技术。第 4 章为信道传输技术及设备, 介绍了调制解调与编码、变频器等技术。第 5 章为站监控技术, 介绍了站内监控与集中监控技术及其设计。第 6 章为卫星通信链路计算, 介绍了卫星通信电波特性和链路计算方法。第 7 章为天线伺服技术, 介绍了伺服系统的分类、基本组成和工作原理, 船载卫通站伺服系统体制和基本构成。第 8 章为位置检测系统, 介绍了感应同步器和轴角检测与编码技术。第 9 章为驱动与传动技术, 介绍了步进、直流和交流伺服系统, 传动间隙的影响及其补偿等技术。第 10 章为船摇隔离技术, 介绍了船摇隔离及稳定技术, 外引导隔离和陀螺环路的预期特性。第 11 章为天线跟踪技术, 介绍了船载卫通站天线常用的程序、步进、圆锥扫描和单脉冲跟踪的几种跟踪方式, 同时介绍了天线极化与极化跟踪、海上动态校相技术。第 12 章为天线伺服传动系统故障预警技术, 介绍了船载站天线故障预警系统方案设计及相关技术。第 13 章为船载卫通站指标测试, 介绍了船载卫通站伺服系统和信道系统及主要终端设备的指标测试方法。第 14 章为船载卫通站常用仪器、仪表, 主要介绍了频谱分析仪、误码测试仪、信号发生器、数字示波器等仪器的主要功能、性能和基本操作。

本书根据作者所掌握的基础理论和专业理论知识, 结合长期的工作实践经验, 对船载卫通站技术进行了论述。在编写本书过程中, 得到中国电子科技集团公司第五十四研究所、北京跟踪与通信技术研究所、中国交通通信信息中心和中国卫星海上测控部的大力支持,

汪春霆、周兆清、张振庄、张文静、秦顺友和韩文泽等同志对书稿编写方案提出宝贵意见并提供了大量资料素材，赵文华、周锦标、刘冰、傅敏辉和瞿元新等同志对编写工作进行了指导，黄昆、丁广、林习良等同志对书稿进行了审阅和校正，许生旺、童咏章、李志刚、沈小青、高申翔、田兆平、孔令志、陈小青、周启荣、昌纪师等同志对编写工作提供了帮助，在此我表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，敬请读者批评指正。

作 者

2018年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 卫星通信简介	1
1.1.1 卫星通信基本概念	1
1.1.2 卫星通信系统的分类	2
1.1.3 卫星通信工作频段	3
1.1.4 卫星通信的特点	4
1.2 卫星通信地球站	5
1.2.1 卫通站的分类	7
1.2.2 卫通站设备组成	10
1.3 测量船船载移动卫通站	12
1.3.1 系统组成	12
1.3.2 内外关系	15
1.3.3 主要性能指标	16
1.3.4 主要特点	17
第 2 章 卫星通信基础	18
2.1 电波传输	18
2.1.1 自由空间的电波传播	18
2.1.2 电波传播方式	21
2.1.3 电波传播中的衰落特性	22
2.1.4 卫星通信链路	25
2.1.5 卫星链路抗衰落技术	28
2.2 通信体制	30
2.2.1 多址联接技术	30
2.2.2 多址分配制度	31
2.2.3 调制解调方式	33
2.2.4 信源编码技术	34
2.2.5 差错控制编码技术	36

2.3 通信卫星	36
2.3.1 卫星运行轨道及分类	36
2.3.2 通信卫星的组成	38
2.3.3 卫星载波覆盖范围	40
2.3.4 地球静止卫星	41
第3章 天线与馈源技术	44
3.1 天线技术	44
3.1.1 天线的功能	44
3.1.2 卫通站天线的基本组成及其作用	44
3.1.3 卫星通信天线的常用类型	45
3.1.4 天线主要技术参数	49
3.1.5 测量船船载卫通天线简介	51
3.2 馈源技术	54
3.2.1 多模馈源喇叭	55
3.2.2 TE_{21} 模耦合器	56
3.3 天线极化技术	57
3.3.1 线极化	57
3.3.2 圆极化	58
3.3.3 天线极化转换工作原理	58
第4章 信道传输技术及设备	59
4.1 调制解调与编码技术	59
4.1.1 调制解调技术	59
4.1.2 信道编码技术	62
4.1.3 调制解调器简介	66
4.2 变频器	76
4.2.1 变频器的组成及分类	76
4.2.2 变频器的工作原理	79
4.2.3 上变频器	82
4.2.4 下变频器	85
4.3 微波功率放大器	89
4.3.1 微波功率放大器的作用及特点	90
4.3.2 微波功率放大器的组成	90
4.3.3 微波功率放大器原理及性能	91
4.4 低噪声放大器	93
4.4.1 低噪声放大器的作用	93
4.4.2 低噪声放大器的工作原理	94

4.4.3 低噪声放大器分系统的组成及控制.....	95
4.4.4 低噪声放大器简介	97
4.5 射频光纤传输系统	99
4.5.1 射频光纤传输系统在卫通站中的应用	99
4.5.2 工作原理	99
4.5.3 备份模式	100
4.5.4 参数指标	101
第 5 章 站监控技术.....	102
5.1 概述	102
5.2 系统组成及工作原理	103
5.2.1 系统组成	103
5.2.2 工作原理	104
5.2.3 工作模式	105
5.3 主要功能	105
5.3.1 站内监控软件的主要功能	105
5.3.2 集中监控软件的主要功能	106
5.3.3 技术指标要求	107
5.3.4 使用要求	107
5.4 监控项目	107
5.4.1 监控范围	107
5.4.2 监视控制项目	108
5.5 主要工作流程	108
5.5.1 站内监控流程	108
5.5.2 集中监控流程	109
5.6 站内监控设计	110
5.7 集中监控设计	112
5.8 网管信道分析	114
第 6 章 卫星通信链路计算.....	116
6.1 卫星通信电波传播特性	116
6.1.1 自由空间传播损耗	116
6.1.2 大气损耗	117
6.2 噪声系数和噪声温度	118
6.3 卫星链路计算	119
6.4 卫星链路计算实例	122
6.4.1 典型卫星参数	122
6.4.2 地球站有关参数	123

6.4.3	信道传输参数	123
6.4.4	链路计算过程及结果	123
第 7 章	天线伺服技术.....	127
7.1	天线伺服系统	127
7.1.1	伺服系统分类	128
7.1.2	基本组成和工作原理	131
7.1.3	伺服系统主要指标	133
7.2	船载卫通站伺服系统	134
7.2.1	稳定和跟踪体制	134
7.2.2	伺服系统跟踪基本原理	134
7.2.3	系统基本构成	135
第 8 章	位置检测系统.....	138
8.1	感应同步器	139
8.1.1	结构	139
8.1.2	工作原理	140
8.1.3	测量方法	141
8.2	轴角检测与编码技术	142
8.2.1	自整角机	142
8.2.2	旋转变压器	147
8.2.3	编码器	153
8.2.4	光电编码器	157
第 9 章	驱动与传动技术.....	160
9.1	步进伺服系统	160
9.1.1	概述	160
9.1.2	步进电动机的分类、结构及特点.....	161
9.1.3	步进电动机的工作原理、主要参数及选用	162
9.1.4	步进电动机的驱动与控制	165
9.2	直流伺服系统	168
9.2.1	直流电动机	168
9.2.2	直流伺服电动机	170
9.2.3	可控硅调压和脉宽调压	173
9.2.4	直流伺服电动机调速系统	178
9.3	交流伺服系统	180
9.3.1	交流电动机及其调速系统	181
9.3.2	异步交流伺服电动机的工作原理.....	185

9.3.3 永磁同步交流伺服电动机	187
9.3.4 双闭环消隙交流伺服驱动功放	189
9.4 伺服传动间隙的影响及其补偿	192
9.4.1 机械传动的间隙	192
9.4.2 传动间隙的影响	193
9.4.3 伺服系统的电消隙传动	193
9.5 典型的伺服驱动系统	196
第 10 章 船摇隔离技术	201
10.1 船摇隔离及稳定	202
10.1.1 稳定精度的度量	202
10.1.2 隔离度表达式	202
10.2 外引导隔离技术	203
10.3 陀螺稳定平台	204
10.3.1 陀螺稳定环路	204
10.3.2 光纤陀螺仪	208
10.4 前馈隔离技术	209
10.4.1 前馈问题	209
10.4.2 前馈补偿	209
10.5 陀螺环路的预期特性	211
10.5.1 陀螺环路结构特性	211
10.5.2 前馈补结构特性	211
10.5.3 搜索位置环	212
第 11 章 天线跟踪技术	213
11.1 概述	213
11.1.1 系统组成	213
11.1.2 跟踪方式	214
11.2 程序跟踪	214
11.2.1 天线角度预报	214
11.2.2 环路控制特点	215
11.3 步进跟踪	215
11.3.1 基本原理	215
11.3.2 同一步式跟踪	216
11.3.3 双向搜索步进跟踪	216
11.3.4 记忆极值式跟踪	217
11.4 圆锥扫描跟踪	218
11.4.1 概述	218

11.4.2	基本原理	218
11.4.3	圆锥扫描跟踪体制	218
11.5	单脉冲跟踪	219
11.5.1	概述	219
11.5.2	跟踪方式	220
11.5.3	测量船卫通站天线 A—E—C 三轴跟踪	223
11.5.4	单脉冲跟踪接收机	225
11.6	极化跟踪	230
11.6.1	极化变换器	231
11.6.2	A—E—C 三轴座架下的极化跟踪特点	232
11.6.3	极化变换网络设计	232
11.6.4	天线高仰角跟踪有关问题	234
11.7	船载天线动态校相	236
11.7.1	基本原理	237
11.7.2	实现动态校相的技术方法	239
11.7.3	动态校相达到的效果	240
第 12 章	天线伺服传动系统故障预警技术	242
12.1	测点布置及传感器	243
12.2	下位机监测软件	244
12.3	上位机数据库	248
12.4	上位机诊断软件	250
12.4.1	人工精密分析工具	251
12.4.2	智能诊断方法	262
第 13 章	船载卫通站指标测试	267
13.1	伺服系统指标	267
13.1.1	船摇隔离度	267
13.1.2	跟踪精度	268
13.1.3	跟踪环路性能	269
13.1.4	动态捕获概率	270
13.2	伺服系统性能	271
13.2.1	天线驱动范围及限位功能	271
13.2.2	伺服整体驱动性能	271
13.2.3	天线动态性能	272
13.2.4	线极化面调整范围	274
13.2.5	码头捕获概率统计	275
13.3	跟踪接收机	276

13.3.1	输入频率及频率捕获范围	276
13.3.2	AGC 控制范围及特性	278
13.3.3	ΔE 和 ΔC 差斜率及交叉耦合	280
13.4	终端及信道分系统	281
13.4.1	系统电平调整	281
13.4.2	EIRP 能力测试	283
13.4.3	上行功率电平稳定度测试	285
13.4.4	上行线路中频—射频幅度频率特性和群时延特性测试	286
13.4.5	杂散辐射 (不含互调产物) 测试	287
13.4.6	上行系统相位噪声测试	289
13.4.7	下行线路射频—中频负担频率特性和群时延特性测试	291
13.4.8	下行系统相位噪声测试	293
13.4.9	上星自环中继信道、用户信道误码率测试	294
13.4.10	双方对通用户信道、中继信道误码率	295
13.5	终端及信道分系统各环路	296
13.5.1	卫星模拟转发器射频环误码率	296
13.5.2	中频环误码率	297
13.5.3	基带环误码率	298
13.6	信道终端设备	298
13.6.1	低噪声放大器增益—频率特性测试	298
13.6.2	变频器幅度频率响应特性测试	300
13.6.3	变频器群时延特性测试	301
13.6.4	变频器相位噪声测试	303
13.6.5	高功放输出功率测试	304
13.6.6	高功放增益测试	305
13.6.7	高功放增益—频率特性测试	306
13.7	终端及信道分系统任务开通测试	307
13.7.1	系统误码率曲线测试	307
13.7.2	系统 24h 误码率测试	310
13.7.3	调制器输出频谱测试	311
13.7.4	HPA 输出频谱测试	312

第 14 章 船载卫通站常用仪器、仪表

314

14.1	频谱分析仪	314
14.1.1	工作原理	314
14.1.2	技术指标	316
14.1.3	基本操作	319
14.1.4	维护保养及注意事项	326

- 14.2 误码测试仪 327
 - 14.2.1 工作原理 327
 - 14.2.2 技术指标 329
 - 14.2.3 基本操作方法 331
 - 14.2.4 维护保养及注意事项 335
- 14.3 信号发生器 335
 - 14.3.1 工作原理 336
 - 14.3.2 技术指标 337
 - 14.3.3 基本操作 339
 - 14.3.4 维护保养及注意事项 342
- 14.4 数字示波器 343
 - 14.4.1 工作原理 343
 - 14.4.2 技术指标 345
 - 14.4.3 基本操作 347
 - 14.4.4 维护保养及其注意事项 350
- 附录 A 缩略语 352
- 附录 B 风力等级..... 362
- 附录 C 涌浪等级..... 363
- 参考文献 364

第 1 章

绪论

1.1 卫星通信简介

1.1.1 卫星通信基本概念

卫星通信是指利用人造地球卫星作为中继站转发或反射无线电波，在两个或多个地球站之间进行通信。它是宇宙通信形式之一。

通常，以宇宙飞行体或通信转发体为对象的无线电通信称为宇宙通信。它包括 3 种形式：① 地球站与宇宙站之间的通信；② 宇宙站之间的通信；③ 通过宇宙站的转发或反射进行地球站之间的通信。通常人们把第 3 种形式称为卫星通信。这里的地球站是指设置在地球上（包括地面、水面和低层大气中）的无线电通信站。把用于实现通信目的的人造卫星称为通信卫星。图 1-1 所示为一种比较简单的卫星通信系统。它使用 3 颗卫星，卫星通信的波束覆盖了全部通信站所在的地域，各站通信天线均指向卫星，各站通过卫星转发来进行通信。当卫星的运行轨道属于低轨道，并且只能利用一颗卫星进行通信时，那么相距较远的两个地球站便不能同时“看”到卫星了。这时，如果要进行远距离实时通信，必须利用多颗低轨道卫星，这种系统就是通常所说的低轨道移动卫星通信系统；否则，只能采用延迟转发方式，这种系统则称为延迟转发式卫星通信系统。当卫星运行轨道较高时，相距较远的两个地球站便可同时“看”到卫星，并且可将一个地球站发出的信号，经卫星处理后，立即转发给另一地球站。因此，这种系统称为立即转发式卫星通信系统。

当卫星的运行轨道在赤道平面内，其高度大约为 35 786km 时，它的运行方向与地球自转的方向相同，围绕地球一周的公转周期大约为 24h，和地球自转的周期相等（也称同步）时，从地球上看去，卫星如同静止一样，所以称其为静止卫星。利用静止卫星作中继站组成的通信系统称为静止卫星通信系统或同步卫星通信系统。若以 120° 的等间隔在静止轨道上配置 3 颗卫星，则在地球表面除了两极地区未受到卫星天线波束的覆盖外，其他区域均在覆盖范围之内，而且其中一部分区域还是两个静止卫星天线波束覆盖的重叠地区。因此，借助于重叠地区内地球站的中继，便可以实现不同卫星覆盖区的地球站的通信。这样，只要用 3 颗等间隔配置的静止卫星就可以实现全球通信。这一特点显然是任何其他通信手段所不具备的。目前，由国际通信卫星组织（Intelsat）负责建立的

世界卫星通信系统就是利用静止卫星实现全球通信。该全球通信网担负着 80% 的国际通信业务和全部国际电视转播业务。

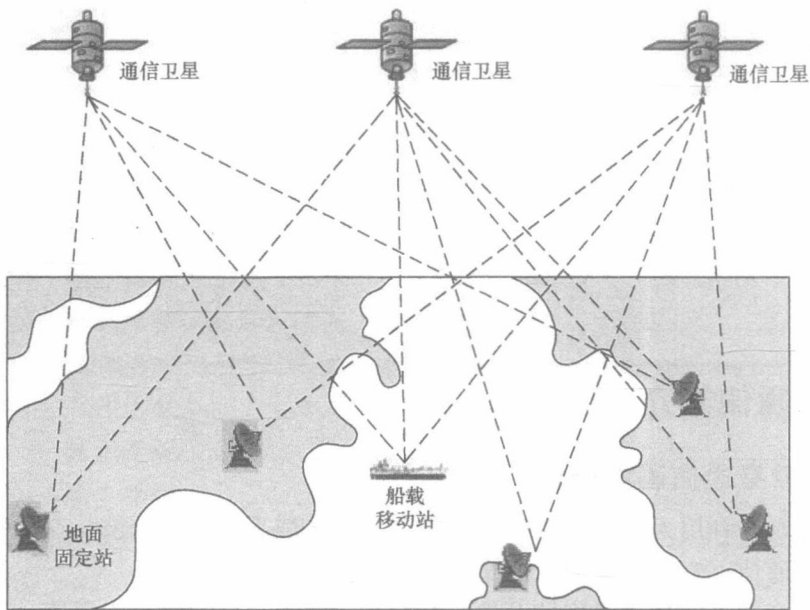


图 1-1 卫星通信系统示意

1.1.2 卫星通信系统的分类

卫星通信系统，可从以下几个方面进行分类。

(1) 按卫星相对地面运行轨道分类

- 地球同步静止轨道卫星通信系统（GEO）；
- 非同步轨道卫星通信系统（包括中高轨道：MEO；低高轨道：LEO）。

(2) 按通信覆盖区的范围分类

- 国际卫星通信系统；
- 国内卫星通信系统；
- 区域卫星通信系统。

(3) 按卫星制式分类

- 随机卫星通信系统（是指卫星高度为数千至一万千米的不同随机轨道卫星）；
- 相位卫星通信系统（轨道上有若干卫星等间隔地运行）；
- 静止卫星通信系统。

(4) 按用户性质分类

- 公用（商用）卫星通信系统；
- 专用卫星通信系统；
- 军用卫星通信系统。

(5) 按业务种类分类

- 固定业务卫星通信系统；
- 移动业务卫星通信系统；

- 广播业务卫星分发系统;
- 科学试验卫星系统。

(6) 按多址方式分类

- 频分多址卫星通信系统;
- 时分多址卫星通信系统;
- 空分多址卫星通信系统;
- 码分多址卫星通信系统;
- 混合多址卫星通信系统。

(7) 按基带信号体制分类

- 数字制卫星通信系统;
- 模拟制卫星通信系统。

(8) 按使用频段分类

- 特高频 (UHF) 卫星通信系统;
- 超高频 (SHF) 卫星通信系统;
- 极高频 (EHF) 卫星通信系统;
- 激光卫星通信系统。

也有按 UHF、L、C、X、Ku、Ka 频段区分卫星通信系统。

(9) 按卫星转发器处理能力分类

- 透明转发器卫星通信系统;
- 处理、交换、抗干扰转发器卫星通信系统。

(10) 按卫星重量大小分类

大小卫星没有确切的定义,通常按卫星重量区分。

- 重量大于 1000kg 的卫星称为大卫星,它组成的通信系统为大卫星通信系统;
- 重量小于 500kg 的卫星称为小卫星,它组成的通信系统为小卫星通信系统。

1.1.3 卫星通信工作频段

卫星通信中工作频段的选择是一个十分重要的问题,它将影响系统的传输容量、地球站及卫星转发器的发射功率、天线尺寸和设备的复杂程度。影响无线电波传输的自然因素很多,例如地球表面的特性,大气层内对流层电学特性的不均匀性,大气中的雾、云、雨、雪等。目前,考虑到各种传输因素的影响以及业内有关规范,卫星工作频段选择在下列频段。

- UHF 频段, 400/200MHz;
- L 频段, 1.6/1.5GHz;
- C 频段, 6.0/4.0GHz;
- X 频段, 8.0/7.0GHz;
- Ku 频段, 14.0/12.0GHz (或 14.0/11.0GHz);
- Ka 频段, 30.0/20.0GHz。

卫星通信在现有技术的基础上,大多选择在 1~10GHz 范围内为最佳,而最理想的频率在 C 频段 (6/4GHz) 附近。该频带带宽较宽,便于利用成熟的微波中继通信技术,