



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材

卫星通信导论

Introduction to Satellite Communications

(第4版)

朱立东 吴廷勇 卓永宁 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材

卫星通信导论

(第4版)

朱立东 吴廷勇 卓永宁 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和普通高等教育“十五”国家级规划教材。

本书主要介绍卫星通信系统的基本原理和特有技术,并结合系统的组成介绍主要设备及当前所达到的水平,同时包括卫星通信的一些新技术和典型的实际系统。全书共 11 章,内容包括:卫星通信系统概述、卫星轨道和星座设计、链路预算、多址技术、星载和地球站设备、VSAT 卫星通信网、卫星移动通信、卫星宽带通信、卫星数字电视广播、卫星定位与导航、深空通信等。

本书注重基本概念和基本原理,并联系工程实践。内容全面,叙述清楚。例题与图表丰富,提供配套电子课件。习题是本书的重要组成部分,通过习题读者可掌握一些必要的设计和计算,题意具有启发性,便于教学与自学。

本书可作为高等学校电子信息类专业本科生与研究生教材或教学参考书,也可供相关专业领域的师生、科研和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

卫星通信导论/朱立东等编著. —4 版. —北京:电子工业出版社,2015. 3

国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材

ISBN 978-7-121-25621-9

I. ①卫… II. ①朱… III. ①卫星通信-高等学校-教材 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 043376 号

责任编辑:韩同平

印 刷:北京季峰印刷有限公司

装 订:北京季峰印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:16 字数:450 千字

版 次:2002 年 8 月第 1 版

2015 年 3 月第 4 版

印 次:2015 年 3 月第 1 次印刷

定 价:39.90 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

教材建设是高等学校组织教学和进行学科建设的重要内容。

为贯彻落实教育部“质量工程”的具体工作，把课程、教材建设与资源共享提上新的高度，电子工业出版社充分发挥在电子信息领域的教育出版优势和独树一帜的品牌影响力，适时推出了这套“国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材”。

与以往出版的同类教材相比，这套教材具有以下特点：

(1) 专业特色鲜明：以本科通信工程专业的专业核心课程为主线。

(2) 注重先进性、系统性、教学适用性：基本理论阐述精练，深入浅出，便于自学；注意吸收新理论、新技术成果；加强实践性与应用性，结合实例进行讲解。

(3) 配套教学支持：每本教材配有教学课件（电子教案），部分重要课程配套出版教学辅导书。

(4) 质量保证：本套教材特别吸纳或整合了以下优秀资源：

① 多数教材来源于优秀教材的修订和再版，包括教育部“十五”、“十一五”等历届国家级规划教材、国家级或省部级获奖教材、历届全国统编教材等。

② 多数作者为著名教材作者、国家级/省级教学名师、国家级/省级优秀教学团队负责人。

③ 其他优秀教学资源，如国家级/省级精品课程、国家级教学示范中心等组织编写的、体现相应课程或课程群特色的配套教材。

为做好本套教材的编写、出版工作，我们聘请了多位国内通信教育领域的著名教授作为教材顾问，并聘请了清华大学、东南大学、上海交通大学、北京交通大学、北京邮电大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校电子信息学院（系）的院长（系主任）成立教材编委会，从根本上保证了教材的高质量。在此对他们的辛勤工作表示衷心的感谢。

我们坚信：一流的教师队伍，一定有一流的教学理念和方法；一流的教学内容，需要配备一流的教材，从而体现一流的教学管理和教学质量。

《国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材》顾问委员

(按姓名音序排列)

迟惠生 (北京大学)	程时昕 (东南大学)
冯重熙 (清华大学)	李承恕 (北京交通大学)
吴伟陵 (北京邮电大学)	吴诗其 (电子科技大学)
谢希仁 (解放军理工大学)	袁保宗 (北京交通大学)

《国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材》编审委员

(按姓名音序排列)

主任委员 樊昌信 (西安电子科技大学)

副主任委员

顾婉仪 (北京邮电大学)	李建东 (西安电子科技大学)
彭启琮 (电子科技大学)	王金龙 (解放军理工大学)
王希勤 (清华大学)	王传臣 (电子工业出版社)
吴镇扬 (东南大学)	张思东 (北京交通大学)

委员

安建平 (北京理工大学)	鲍长春 (北京工业大学)
陈咏恩 (同济大学)	邓建国 (西安交通大学)
段哲民 (西北工业大学)	樊昌信 (西安电子科技大学)
范平志 (西南交通大学)	方勇 (上海大学)
酆广增 (南京邮电大学)	顾婉仪 (北京邮电大学)
顾学迈 (哈尔滨工业大学)	康健 (吉林大学)
李建东 (西安电子科技大学)	李晓峰 (电子科技大学)
刘璐 (山东大学)	彭启琮 (电子科技大学)
仇佩亮 (浙江大学)	唐朝京 (国防科技大学)
唐向宏 (杭州电子科技大学)	田宝玉 (北京邮电大学)
王金龙 (解放军理工大学)	王希勤 (清华大学)
王祖林 (北京航空航天大学)	王传臣 (电子工业出版社)
韦岗 (华南理工大学)	吴镇扬 (东南大学)
徐昌庆 (上海交通大学)	张德民 (重庆邮电大学)
张思东 (北京交通大学)	郑建生 (武汉大学)
朱光喜 (华中科技大学)	朱秀昌 (南京邮电大学)

投稿邮箱: 韩同平编辑 (010)88254525 E-mail: hantp@phei.com.cn

第4版前言

卫星通信是电子信息类专业的重要专业课程。本书第1版、第2版、第3版分别于2002年、2006年、2009年出版,并先后列选教育部普通高等教育“十五”国家级规划教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材。并列选第一批四川省“十二五”普通高等教育本科规划教材和电子科技大学“十二五”规划教材。

本书凝结了作者所在的电子科技大学通信与信息工程学院和通信抗干扰技术国家级重点实验室,“卫星通信”课程组多年的教学、科研体会和经验,出版10多年来,承蒙广大读者的支持与厚爱,先后被国内近百所大学的有关专业选作教材,这期间也得到了很多师生的大量反馈意见和建议,这使作者倍感荣幸和深受鼓舞,也有责任和义务根据电子信息类专业教育、教学,以及学科发展的需要,结合近年来从事该门课程的教学以及相关科研工作的经验,并参考国内外同类优秀教材,每隔5年左右对本书认真、及时地修订一次,以保持教材的先进性、教学适用性。

第4版在保持本书原有特色和基本章节结构的前提下,在内容上主要做了以下修订:第1章结合卫星通信的发展和应用,对卫星通信的发展历程和发展趋势进行了补充和完善;第2章章名由“卫星轨道”修改为“卫星轨道和星座设计”,并将第7章7.2节“非静止轨道卫星星座”和7.3节“卫星星际链路”移到第2章;第5章对5.2节的内容和结构做了调整;第7章的7.4.2节增加了Inmarsat系统;第8章增加了Spceway-3、IP-STAR和O3b系统。第10章介绍了北斗二代导航系统。

本书既考虑了卫星通信知识体系,又不重复介绍其他课程的内容,与先修、后续课程的内容划分、衔接良好。本书主要特点为:

(1) 从体系结构看,本书章节编排的思路是:卫星轨道→链路→多址→设备→系统→新技术,既介绍基本原理,又介绍新技术,形成一个完备的体系。

(2) 从内容看,着重介绍卫星通信的基本原理和特有技术,对于调制编码等通用技术,由于先修课程《通信原理》已讲授,本书未做介绍;同时本书包含卫星通信发展的最新内容,如卫星移动通信、卫星宽带通信、深空通信等。

(3) 本书文字叙述深入浅出,配有较多的图表和例题,便于教学。例如,第2章介绍卫星轨道按照高度分类时给出了图2-5,很直观。

(4) 为便于理解,大部分章节都有例题和习题,且例题和习题与系统设计和工程应用紧密结合,题意具有启发性,给教学提供了较大的灵活性。例如,3.6.4节链路预算结合实际系统给出了实例。

本书建议安排32~48学时,其中第1~8章为必学内容,第9~11章为选学内容。本书第1、3、4、6、11章由朱立东编写,第2、7、8章由吴廷勇编写,第5、9、10章由卓永宁编写。全书由吴诗其教授主审。本书的出版得到电子科技大学教务处、通信学院教务科的大力支持,作者在此一并表示衷心的感谢。

本书作者向使用本书作为教材的教师免费提供教学参考资料包,包括电子课件和课后习题解答。请登陆华信教育资源网(<http://www.huaxin.edu.cn> 或 <http://www.hxedu.com.cn>) 索取。

由于卫星通信涉及的面很广,而本书是以卫星通信基础性教材为宗旨编写的,因此难以包容更多的内容和进行更深层次的阐述。限于时间和水平,难免有错误和疏漏之处,希望读者不吝指正。与作者联系,请发邮件至:

zld@uestc.edu.cn, wuty75@uestc.edu.cn, zyning@uestc.edu.cn

目 录

第1章 卫星通信系统概述	1	2.5.1 多普勒频移	27
1.1 卫星轨道	1	2.5.2 日蚀	28
1.2 系统的组成	3	2.5.3 日凌中断	28
1.2.1 空间段	3	2.6 星座设计	28
1.2.2 地面段	3	2.6.1 星座设计时的基本考虑	28
1.3 频率分配	4	2.6.2 极/近极轨道星座	29
1.4 卫星通信的特点	5	2.6.3 倾斜圆轨道星座	33
1.5 卫星通信系统的业务类型	6	2.6.4 共地面轨迹星座	37
1.5.1 卫星视频广播业务	7	2.6.5 太阳同步轨道星座	39
1.5.2 电话等交互式业务	7	2.7 星际链路	40
1.5.3 数据通信和因特网业务	8	2.7.1 相同轨道高度卫星间的	
1.5.4 移动通信业务	9	星际链路	41
1.5.5 不同业务类型所需带宽	10	2.7.2 不同轨道高度卫星间的	
1.6 卫星通信的发展	10	星际链路	43
1.6.1 卫星通信的发展历程	10	习题	43
1.6.2 卫星通信的发展趋势	11	本章参考文献	44
习题	12	第3章 链路传输工程	45
本章参考文献	13	3.1 概述	45
第2章 卫星轨道和星座设计	14	3.2 星-地链路传播特性	46
2.1 卫星轨道特性	14	3.2.1 自由空间传播损耗	46
2.1.1 开普勒定律	14	3.2.2 链路附加损耗	48
2.1.2 地心坐标系与卫星轨道参数	16	3.3 卫星移动通信链路特性	50
2.1.3 卫星轨道分类	17	3.3.1 衰落信道模型	50
2.2 卫星的定位	21	3.3.2 多普勒频移	52
2.2.1 卫星在轨道面内的定位	21	3.4 天线的方向性和电极化问题	52
2.2.2 卫星对地球的定位——		3.4.1 天线增益和方向图	52
星下点轨迹	22	3.4.2 极化隔离	54
2.3 卫星覆盖特性计算	22	3.5 噪声与干扰	55
2.4 卫星轨道摄动	25	3.5.1 系统热噪声	55
2.4.1 地球扁平度的影响	25	3.5.2 宇宙噪声和大气噪声	57
2.4.2 太阳和月球的影响	26	3.5.3 其他干扰	58
2.5 轨道特性对通信系统性能的影响	27	3.6 卫星通信全链路质量	59
		3.6.1 链路预算分析	59

3.6.2 接收系统的等效噪声温度	60	5.4 其他类型的地球站	105
3.6.3 全链路传输质量	61	5.4.1 TT&C 地球站与 SCC	105
3.6.4 链路预算实例	61	5.4.2 TV 上行站和广播中心	107
3.7 信道对传输信号的损害	62	5.4.3 TV 单收站	108
3.8 上行、下行链路的 RF 干扰	64	5.5 MSS 移动终端和信关站	110
习题	66	5.5.1 移动终端	110
本章参考文献	68	5.5.2 信关站	111
第4章 多址技术	69	习题	112
4.1 引言	69	本章参考文献	113
4.2 频分多址技术	69	第6章 VSAT 通信网	114
4.2.1 MCPC 和 SCPC	69	6.1 VSAT 概述	114
4.2.2 FDMA 的非线性效应和交调干扰	70	6.1.1 VSAT 的概念和特点	114
4.2.3 FDMA 的地球站设备	72	6.1.2 VSAT 卫星通信网	114
4.3 时分多址技术	73	6.1.3 VSAT 系统分类	114
4.3.1 TDMA 地球站帧格式	73	6.1.4 VSAT 的主要业务类型及应用	115
4.3.2 子帧的捕获和同步	75	6.2 VSAT 网络结构和地面设备	115
4.3.3 信号比特速率和转发器带宽	76	6.2.1 VSAT 网络结构	115
4.4 FDMA 与 TDMA 的比较	76	6.2.2 VSAT 系统的主站和小站设备	117
4.4.1 TDMA 和 FDMA 上行链路所需 功率的比较	77	6.3 VSAT 数据网	120
4.4.2 功率受限和带宽受限	78	6.3.1 网络体系结构	120
4.5 码分多址技术	79	6.3.2 卫星链路传输特性对协议和 系统性能的影响	121
4.6 三种多址技术的 RF 利用方式	81	6.3.3 VSAT 星形数据网多址协议	123
4.7 ALOHA 协议	82	6.3.4 VSAT 数据网的响应时间	125
习题	85	6.4 VSAT 电话网	125
本章参考文献	86	6.4.1 VSAT 电话网的特点	125
第5章 星载和地球站设备	87	6.4.2 VSAT 电话网的多址方式	126
5.1 高功率放大器和低噪声放大器	87	6.4.3 VSAT 电话网的 DAMA 方式	127
5.1.1 HPA	87	6.5 VSAT 系统链路设计实例	128
5.1.2 LNA	88	习题	129
5.2 星载设备	89	本章参考文献	131
5.2.1 星载转发器	89	第7章 卫星移动通信系统	132
5.2.2 星载天线	95	7.1 引言	132
5.2.3 星载电源	98	7.2 卫星移动通信系统网络结构	133
5.3 通信地球站设备	98	7.2.1 空间段	133
5.3.1 射频部分	99	7.2.2 地面段	136
5.3.2 中频和基带处理部分	101	7.2.3 用户段	137
5.3.3 地面接口与陆地链路	102	7.3 卫星移动通信频率规划	137

7.4 典型卫星移动通信系统简介	140	9.5.3 DBS 中的音频压缩编码	
7.4.1 非静止轨道卫星移动通信系统	140	MPEG—1	195
7.4.2 静止轨道卫星移动通信系统	146	9.6 条件接收和视频点播	196
习题	152	9.6.1 条件接收	196
本章参考文献	152	9.6.2 视频点播	197
第8章 卫星宽带通信系统	154	9.7 数据广播	198
8.1 引言	154	9.7.1 基本原理和 IP over DVB	198
8.2 卫星宽带通信系统结构	155	9.7.2 数据轮播与对象轮播	198
8.3 卫星 TCP 技术	157	习题	199
8.3.1 TCP 协议概况	157	本章参考文献	200
8.3.2 卫星网络中 TCP 存在的问题	160	第10章 卫星定位与导航系统	201
8.3.3 改善卫星 TCP 性能的方法	162	10.1 卫星导航系统概述	201
8.4 卫星 IP 技术	172	10.2 卫星导航技术基础	202
8.4.1 卫星 IP QoS	172	10.2.1 坐标系与时间体系	202
8.4.2 隧道技术	173	10.2.2 卫星定位的一般原理	207
8.4.3 异构网络互连	174	10.3 低轨卫星定位系统	209
8.4.4 卫星星座路由技术	175	10.3.1 子午仪系统的结构	210
8.4.5 卫星网络组播技术	176	10.3.2 积分多普勒定位技术	210
8.4.6 现有卫星 IP 技术简介	176	10.3.3 主要误差因素	213
8.5 国外卫星宽带通信系统概况	180	10.4 双静止卫星导航系统	213
习题	184	10.4.1 系统结构	214
本章参考文献	184	10.4.2 工作原理	215
第9章 卫星数字电视广播系统	187	10.4.3 主要误差因素	216
9.1 引言	187	10.5 GPS 导航系统	217
9.2 卫星数字电视广播系统的组成	188	10.5.1 系统结构	217
9.3 卫星广播电视系统中的纠错		10.5.2 工作原理	219
编码	189	10.5.3 测距信号结构	220
9.3.1 RS 编码技术	190	10.5.4 基本定位方法和数学模型	220
9.3.2 数据交织技术	190	10.5.5 定位性能与主要误差因素	224
9.3.3 卷积编码技术	190	10.6 新一代卫星导航系统	225
9.3.4 LDPC 编码技术	191	10.6.1 GALILEO 卫星导航系统	225
9.4 卫星数字电视传输标准	191	10.6.2 GPS 现代化计划	227
9.4.1 概述	191	10.6.3 北斗二代导航系统	227
9.4.2 DVB—S 传输标准	192	习题	228
9.4.3 我国的卫星数字电视传输标准	193	本章参考文献	229
9.5 信源编码与 MPEG—2 标准	193	第11章 深空通信	230
9.5.1 信源编码码流的复用方式	193	11.1 概述	230
9.5.2 MPEG—2 标准简介	193	11.1.1 深空通信的概念和任务	230

11.1.2 深空通信的特点及面临的问题	231	11.5 深空通信的接收技术	236
11.1.3 深空通信的频段	231	11.5.1 深空通信的天线组阵技术	236
11.2 深空通信系统组成及原理	232	11.5.2 深空通信的大天线技术	236
11.3 深空通信的跟踪、测量和 控制技术	233	11.6 深空通信的发展	237
11.4 深空通信的调制编码技术	234	习题	238
11.4.1 深空通信的调制解调技术	234	本章参考文献	238
11.4.2 深空通信的信道编译码技术	235	附录 A 缩略词	239



第 1 章 卫星通信系统概述

卫星通信是指利用卫星作为中继站转发或反射无线电波,以此来实现两个或多个地球站(或手持终端)之间或地球站与航天器之间通信的一种通信方式。换言之,卫星通信是在地球上,包括地面、水面和大气层中的无线电通信站之间,利用人造卫星作为中继站进行的通信。

本章简要介绍卫星轨道、系统的组成、频率分配、卫星通信的特点、卫星通信系统的应用及发展。

1.1 卫星轨道

在卫星通信系统中,卫星是通信的重要中继站。用于通信系统的卫星可以有不同的运行轨道,而不同轨道卫星的系统在网络结构、通信方式、服务范围和系统投资等方面均有较大的差异。因此,有必要首先简单介绍有关通信卫星的轨道问题(关于轨道的详细讨论参见第 2 章)。

卫星通常围绕地球做无动力飞行,它们可视为宇宙中通过重力相互作用的两个物体。卫星围绕地球运行规律服从开普勒(Kepler)定律,轨道具有如下的特性。

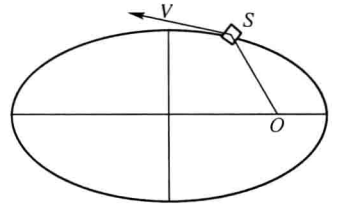


图 1-1 卫星运行轨道示意图

(1) 卫星具有椭圆形轨道,而地球的地心 O 是椭圆的一个焦点,如图 1-1 所示。

(2) 卫星在轨道上以速度 V 运动的过程中,单位时间内地心 O 与卫星 S 的连线所扫过的面积(以轨道弧线为界)相等。显然,卫星靠近地球时运动速度较快,而离开地球较远时运动速度较慢。

(3) 图 1-1 中 OS 为地心到卫星的距离,称为轨道半径,可用地球半径 R_e 与卫星到星下点(卫星-地心连线与地面的交点)的距离 h 之和来表示。对于椭圆轨道, $h = (h_{\max} + h_{\min})/2$,称为平均高度。显然,轨道半径等于椭圆轨道的半长轴 $[R_e + (h_{\max} + h_{\min})/2]$ 。

(4) 卫星运行周期 T 的平方与轨道半径 $(R_e + h)$ 的立方成正比:

$$T = 1.65866 \times 10^{-4} (R_e + h)^{3/2} \quad (1-1)$$

而卫星在圆形轨道上的运行速度 V 与轨道半径的平方根成反比:

$$V = 631.348 / (R_e + h)^{1/2} \quad (1-2)$$

式中,卫星运行周期为 T ,单位 min;卫星在(圆形)轨运行速度为 V ,单位 km/s;卫星平均高度 h ,单位 km;地球半径 $R_e = 6378$ km。

在卫星通信系统中,最常用的是圆形轨道,分为低轨(LEO, Low Earth Orbit)、中轨(MEO, Medium Earth Orbit)和静止轨道(GEO, Geostationary Earth Orbit)三类。LEO 系统的卫星轨道高度范围为 500 ~ 1500 km, MEO 的轨道高度为 10000 ~ 20000 km, GEO 的轨道高度为 35786 km(通常也被粗略地称为 36000 km)。运行周期为一个恒星日(23 小时 56 分 4 秒)的卫星称为同步卫星,轨道高度为 35786 km。轨道面与赤道平面相重合且轨道高度为 35786 km 的卫星称为静止轨道卫星,它与地面观察者之间保持相对静止。在 2000 ~ 8000 km 的空间有一个由范·艾伦(Van Al-

len)带形成的恶劣的电辐射环境,这一高度范围的空间不宜于卫星的运行。

卫星在轨道上运行时除受地球(假定为理想球形)引力影响外,还将受到诸多非理想因素的影响而产生摄动。这些因素主要有:地球形状不规则、大气阻力、太阳和月球引力等。对于LEO的近地卫星,前两种因素的影响是主要的。地球形状不规则产生的引力的变化将使轨道面发生旋转和轨道长轴在轨道面内转动(当轨道平面对赤道平面倾角为 63.4° 时,长轴在轨道面内不再转动);大气阻力将使轨道远地点不断降低,长轴缩短,运行周期减小,同时偏心率也不断变小,轨道高度越来越低,形状越来越圆,这一过程称为轨道衰减。对于GEO卫星,影响摄动的主要因素来自太阳和月球的引力,而不存在大气阻力的影响。

处于一定高度的卫星将对地面形成一定范围的覆盖区,而卫星可为覆盖区内用户之间的通信信号进行中继转发。覆盖区的范围是以某一允许的最低仰角来定义的,即覆盖区内用户对卫星的仰角都大于(或等于)某最低允许仰角。20世纪的卫星通信系统,大多采用GEO卫星。一颗GEO卫星能以零仰角覆盖全球表面的42%,三颗经度差约 120° 的卫星,能够覆盖除南、北极地区以外的全球范围。地面用户利用地球站与卫星连接的链路进行通信,从用户到卫星的距离至少有36000 km,微波链路设计应保证提供足够的接收信号功率,而用户间的单跳通信的信号传播延时可达 $1/4$ s。

由于摄动等非理想因素的影响,卫星运行的轨道是不稳定的,必须加以控制,称为轨道控制。轨道控制是对卫星的质心施加外力,以改变质心运动的轨迹。轨道控制可用于完成四种任务:变轨控制、轨道保持、返回控制和轨道交会。变轨控制是使卫星从一个自由飞行轨道转移到另一个自由飞行轨道的控制,比如,在GEO卫星发射过程中,要经过两次变轨才能使卫星进入静止轨道。图1-2所示为GEO卫星发射过程的轨道形状转换示意图。地面发射的卫星(发射点为 T)首先在 b 点进入150~300 km高度的圆形停泊轨道,之后末级火箭点火用于推动卫星从停泊轨道进入转移轨道GTO(Geostationary Transfer Orbit)。GTO为椭圆轨道,近地点为停泊轨道高度,远地点(图中的 a 点)为同步轨道高度(约36000 km),周期约为16 h。远地点发动机将卫星从转移轨道的远地点助推进入GEO的圆形轨道,使近地点也升高到36000 km左右。通常,这一过程除完成轨道形状的转换外,将同时实现轨道倾角的转换(将倾斜的轨道平面转换为与赤道平面的零倾角要求,即由同步轨道转换为静止轨道)。

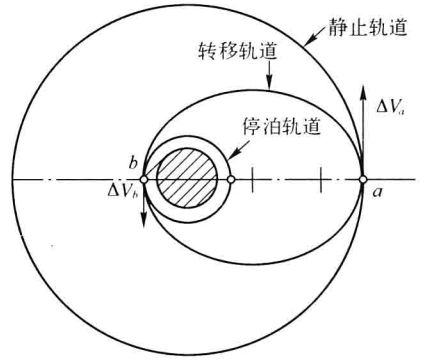


图1-2 GEO卫星的轨道转换

轨道保持用以克服各种摄动的影响,保持卫星轨道的某些参数不变。比如,为保持GEO卫星定点位置的精度(对于商业应用的静止卫星,其轨道倾斜不能大于 0.1° ,以控制卫星在轨道法线方向上的漂移范围,因为天线指向尖锐的大中型地球站的跟踪能力是有限的),需定期进行轨道修正。又比如,太阳同步轨道为保持其倾角和周期的变化在允许的范围内所实施的控制;而低轨道卫星为克服大气阻力,延长轨道寿命所进行的控制也是一种轨道保持。

使返回式卫星脱离其原有轨道而再入大气层,需要进行轨道控制。而使一颗卫星与另一颗卫星在同一时间以相同的速度到达空间同一位置,即实现两颗卫星(航天器)的交会(对接)时,也需要进行轨道控制。

除轨道控制之外,还必须对卫星的姿态进行控制。姿态控制是对卫星绕其质心施加外力

矩,以保持或按要求改变卫星在空间定向的技术。保持卫星在空间所需的定向是为了:①使卫星天线对准地面或空间的目标;②卫星进行轨道控制时,发动机应对准所要求的推力方向;③卫星再入大气层时,要求制动防热面对准迎面气流等。

姿态稳定是保持已有姿态的控制。卫星姿态稳定有自旋稳定和三轴稳定两类,前者依靠转动量矩保持自旋轴在惯性空间的指向,后者利用主动或环境力矩,保持星体三条正交轴线在某一参考空间的方向。目前,采用三轴稳定的居多。

在卫星通信系统中,也可采用低轨(LEO)或中轨(MEO)等非静止轨道(NGEO, Non-GEO)卫星。由于NGEO卫星与地球上的观察点有相对运动,为了保证对全球或特定地区的连续覆盖,以支持服务区内用户的实时通信,需要用较多数目的卫星组成特定的星座。比如,低轨卫星移动通信系统铱(Iridium)的星座由66颗高度785 km、倾角 86.4° 的卫星组成。全球星(Globalstar)的星座由48颗高度1414 km、倾角 52° 的卫星组成。低轨卫星的主要优点是,信号传播距离短,链路损耗和传播延时小,对用户终端的天线增益和发射功率要求不高。

1.2 系统的组成

1.2.1 空间段

卫星通信系统由空间段和地面段两部分组成。空间段以卫星为主体,并包括地面卫星控制中心(SCC, Satellite Control Center)和跟踪、遥测及指令站(TT&C, Tracking, Telemetry and Command station)。在TT&C站与卫星之间,有一条控制和监视的链路,通常对卫星进行下述几方面的监控。

- 在卫星发射阶段,一旦最后一级火箭释放,TT&C就必须对卫星进行跟踪和定位,并对天线和太阳能帆板的展开实施控制。
- 在系统运行过程中,对卫星的位置和轨道进行监测和校正,以便将轨道的漂移和卫星摆动控制在允许的范围内。在卫星生命的最后阶段,轨道校正的星载燃料已基本耗尽,卫星应撤离服务岗位。GEO卫星通常的退役方法是利用剩下的少量燃料(比如2 kg),以增加速度使其轨道升高几千米,退伍的卫星将永远停泊在该轨道上。当然,卫星上的转发器应予关闭,以免干扰正常工作的GEO卫星。对于LEO卫星,如果不进行轨道校正,将由于大气阻力使轨道衰减,卫星最终会再进入大气层而被烧毁。
- 星载转发器是卫星的有效载荷,也是卫星通信系统空间段的主要组成部分。SCC可对星载转发器的输出及整个空间通信分系统进行测试、监控,并对出现的故障进行检修。
- 对由于“双重照射”形成的地区性通信干扰问题进行监测。由于地球站或卫星在某频率上错误地(可能是无意的,也可能是海盗行为,或是未经认可的卫星容量的使用)激活其发射机,对正常工作的卫星系统的覆盖区形成“双重照射”而引起严重干扰。TT&C必须迅速进行检测,探明干扰源所在,使正常业务受到的损害降到最小。

卫星星载的通信分系统主要是转发器,现代的星载转发器不仅仅能提供足够的增益(并包含从上行频率到下行频率的频率变换),而且具有(再生)处理和交换功能。

1.2.2 地面段

地面段包括了支持用户访问卫星转发器,并实现用户间通信的所有地面设施。用户可以

是电话用户、电视观众和网络信息供应商等。卫星地球站是地面段的主体,它提供与卫星的连接链路,其硬件设备与相关协议均适合卫星信道的传输。除地球站外,地面段还应包括用户终端,以及用户终端与地球站连接的“陆地链路”。当然,地球站应配备与“陆地链路”相匹配的接口(或网关)。但是,由于用户终端、“陆地链路”(通常为地面微波中继链路或光纤链路)及其接口都是地面通信网的通用设备,所以地面段常常被狭义地理解为地球站。地球站可以是设置在地面的卫星通信站,也可以是设置在飞机或海洋船舶上的卫星通信站。图 1-3 所示为地球站通过“陆地链路”与地面网节点相连接的情况。

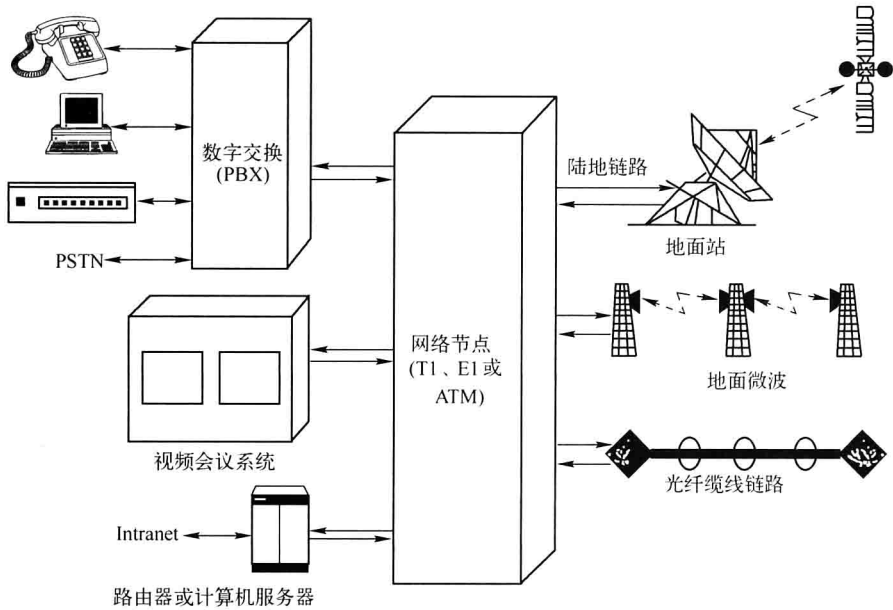


图 1-3 卫星地球站与地面网的一个节点连接的情况

1.3 频率分配

在卫星转发器与地面地球站之间,信息是利用电磁波来承载的。通常使用较高的频率天线才能有效地进行电磁波的辐射,同时有利于承载更高的信息速率。卫星通信系统常用的频率范围为 150 MHz ~ 300 GHz。然而,在不同的频段,大气(在晴天或雨天)对电波传播的影响是不同的,系统设计时需要特别考虑。

3 GHz 以下的频率区域定义了甚高频 VHF (Very High Frequency) 和超高频 UHF (Ultra High Frequency) 两个频段。VHF 的范围为 30 ~ 300 MHz,而 100 MHz 以下的频段不能用于空间通信。UHF 的范围为 300 ~ 3000 MHz。在卫星通信领域,通常认为 UHF 的范围为 300 ~ 1000 MHz。实际上这一频率范围的大部分已经为地面无线通信所占。对于卫星系统而言,由于 UHF 频段只能传输较低的数据速率,因此通常只用于低轨小卫星 (Little LEO) 数据通信系统和静止卫星的遥测与指令系统,以及某些军用卫星通信系统。

在更高的超高频段 (SHF, Super High Frequency) 又进一步被划分为更常用的 L、S、C、X、Ku 和 Ka 等频段。各频段的频率大致范围如下: L, 1 ~ 2 GHz; S, 2 ~ 4 GHz; C, 4 ~ 7 GHz; X, 7 ~ 12 GHz; Ku, 12 ~ 18 GHz; Ka, 20 ~ 40 GHz。在卫星通信系统中,在某一频段内的上行链路

频率往往比下行频率高很多。这是因为 RF(Radio Frequency)功率放大器的效率随着频率的升高而下降,而地球站较卫星能容忍这种功放的低效率。同时,通常地球站发射功率比卫星发射功率大几十倍。几个常用的频段的上/下链路频率的习惯性表示为:L 频段 1.6/1.5 GHz,C 频段 6/4 GHz,X 频段 7/8 GHz,Ku 频段 14/12 GHz,Ka 频段 30/20 GHz。

由于卫星通信系统覆盖范围广,频率的分配和协调工作十分重要。为此,国际电信联盟 (ITU, International Telecommunication Union)在有关规定中将全球划分为三个频率区域:Ⅰ区包括欧洲、非洲和俄罗斯亚洲部分、西亚地区及蒙古等,Ⅱ区包括南美洲、北美洲和格陵兰等,Ⅲ区为其他亚洲部分(包括中国)和澳洲。图 1-4 所示为频率划分的区域图。频率区域的划分有利于区域性业务的频率再用和全球业务频率的统一规划。

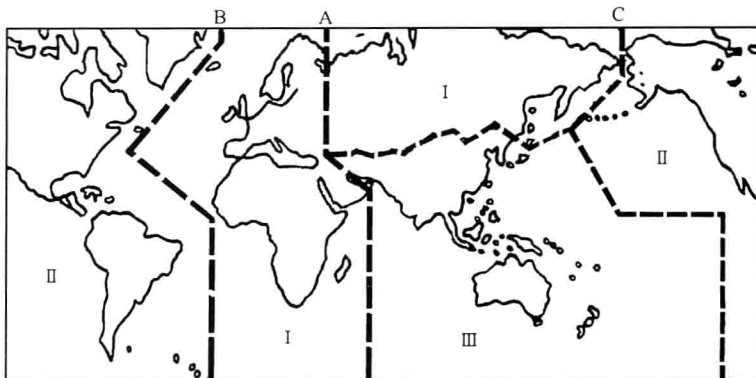


图 1-4 ITU 的频率划分区域图

按不同的业务类型对不同频段有一个大致的划分。低于 2.5 GHz 的 S 和 L 频段大部分用于移动通信业务和静止卫星测控链路的指令传输,以及特殊的卫星通信业务。多数商用卫星固定业务使用 C 频段(6/4 GHz),该频段目前已十分拥挤,且存在与地面微波中继网的同频干扰问题。Ku 频段(14/12 GHz)正在被大量利用,同时 Ka 频段(30/20 GHz)的应用已逐渐增多。

由于低频段频率资源日益紧张,使用 Ku 和 Ka 频段的系统不断增加,不久 Ku 和 Ka 频段也将趋于饱和,需要开发更高的频段资源。目前开始开发 Q 频段和 V 频段,其中 Q 频段范围为 36.0 ~ 46.0 GHz,V 频段范围为 46.0 ~ 56.0 GHz。为了支持更高的传输速率,太赫兹频段也在加紧开发中。太赫兹频率范围为 0.1 ~ 10 THz,资源丰富,容量大,可提供 10 Gbps 以上的高速传输速率,较光通信容易实现对接。但是太赫兹频段大气吸收损耗大,适合局域网或星间高速传输。此外,星间通信采用激光,可以进一步提高星间传输速率。

1.4 卫星通信的特点

由于卫星能提供较宽范围的覆盖,因此,卫星通信系统能为用户的无线连接提供很大的自由度,并能支持用户的移动性,使系统具有以下一系列优点。

(1) 卫星通信系统能以较低的成本提供较宽范围的无缝覆盖,服务范围宽且不受地理条件的限制。卫星能覆盖的范围由卫星的高度和允许的最小仰角确定,在卫星覆盖范围以内,通信成本与通信距离无关。一颗 GEO 卫星能有效地覆盖地球表面的 1/3(零仰角时能覆盖地球表面的 42%)左右,因此,三颗 GEO 卫星即可组成全球系统(南、北两极地区除外)。一颗低轨

卫星的覆盖范围虽然十分有限,但是一个完整的星座可以实现全球覆盖。卫星通信是唯一能对偏远地区、海岛、大山、沙漠、丛林等地形地貌复杂区域,以及空中和海上,提供可靠移动通信的手段,从而真正实现任何时间、任何地点的信息交流。

(2) 可利用频带宽。卫星通信系统可利用的频带很宽,从 VHF 频段(150 MHz)到目前已实用化的 Ka 频段(20/30 GHz),并在向更高的 Q(36 ~ 46 GHz)和 V(46 ~ 56 GHz)频段拓展。对于 C 频段(4/6 GHz)和 Ku 频段(12/14 GHz),可利用的频带宽度达 1 GHz。因此,卫星通信系统的容量是较大的。如果采用多波束星载天线等频率再利用技术,可进一步扩大系统的容量。此外,空间光链路正逐步成为星际通信的主流,同时,相应技术的改进和发展,将使星-地之间的激光通信成为可能。

(3) 卫星通信系统与地面通信基础设施相对独立,网络路由简捷。由于卫星提供了空间转发器,用户之间的通信不依赖于地面通信网,这对于那些地面通信基础设施不足的地区和国家(如发展中国家)具有重要意义。同时,对于建立或使用地面网需要付出高昂代价的稀业务密度地区,卫星通信系统能发挥重大作用。此外,对于跨国或全国性的公司、行业和政府部门,利用卫星通信系统构成专用数据网,就旁路了网络结构复杂的地面公用网,路由简捷、延时小,对专用网内部数据的传输和处理十分有利。

(4) 网络建设速度快、成本低。卫星通信系统与地面光纤或微波中继系统相比,不需要大量地面工程的基础设施,建设速度快。同时,系统的运行和维护费用低。在系统容量范围内,增加一个地球站的成本较低,特别是对小容量或个人终端而言所需投资更低。

(5) 卫星通信具有灵活性和普遍性。卫星通信可以不受自然条件和自然灾害的影响,如地震、雪灾、洪水等,实现全球范围的普遍服务。在快速、灵活地组成响应世界重大事件的全球视频网络业务方面,具有无可争辩的优势。

(6) 统一的业务提供商有助于系统的均匀服务,并有利于新业务的引入。通常,一个卫星通信系统由统一的业务提供商提供服务,有利于对系统内各地区提供一致(均匀)的服务,有助于建立跨国公司或行业的远程专用网,同时对个人用户(Direct PC)也较为有利。卫星通信系统对新业务的引入和对原有业务的拓展也较地面网有利。例如,为 Direct PC 用户可提供 Internet 业务、直接到户(DTH, Direct-to-home)业务,以及接入功能的数字用户线(DSL, Digital Subscriber line)等;同时,还可用 VSAT 小站(特别是工作于 Ku 和 Ka 频段的小站)支持多种类型的业务。

必须指出,卫星通信系统只是地面公用网的补充、扩展和备份。由国家、地区骨干网覆盖的高业务密度地区,利用卫星系统进行通信是不经济的,它只能作为因灾害等事故造成地面网故障时的备份。而对于广大低业务密度地区来说,使用卫星系统比建设地面网经济。同时,对于某些类型的业务和应用场合,卫星系统具有一定的优势,如视频广播(含直播系统和视频分配系统)、因特网接入、国际(越洋)通信等。

1.5 卫星通信系统的业务类型

卫星通信业务有固定卫星业务(FSS, Fixed Satellite Service)和移动卫星业务(MSS, Mobile Satellite Service)两类,与 FSS 有关的还有卫星广播业务(BSS, Broadcasting Satellite Service)。FSS 能在几兆赫甚至几十兆赫带宽内支持不同的应用,而利用甚小天线口径终端(VSAT, Very Small Aperture Terminal)工作于低业务密度地区的窄带业务,也属于 FSS。

卫星通信系统通常用于支持视频广播业务、电话等交互式业务、数据通信和因特网业务及