

国外电子与通信教材系列

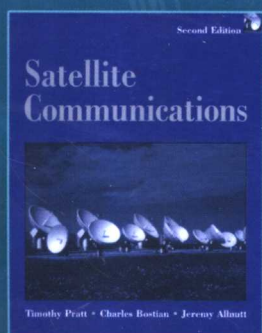


卫星通信

(第二版)

Satellite Communications

Second Edition



[美] Timothy Pratt
Charles Bostian 著
Jeremy Allnutt

甘良才 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

卫星通信

(第二版)

Satellite Communications

Second Edition

Timothy Pratt

[美] Charles Bostian 著

Jeremy Allnutt

甘良才 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书是关于卫星通信的一本最新著作。全书共分为12章,包括4个附录,内容涉及轨道力学与发射装置、卫星、卫星链路设计、卫星链路的调制与复用技术、多址、数字卫星链路的差错控制、传播效应及其对卫星-地球链路的影响、VSAT系统、低地球轨道非同步卫星系统、直接广播卫星电视与广播、卫星导航与全球定位系统等。

本书内容结构合理,反映了卫星通信的前沿技术,可作为大专院校电气工程专业学生的教材,也可作为相关研究人员及工程技术人员的参考书。

Timothy Pratt, Charles Bostian and Jeremy Allnutt: **Satellite Communications, Second Edition.**

ISBN 0-471-42912-0

Copyright © 2003, John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition published by Publishing House of Electronics Industry. Copyright © 2005.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2003-3679

图书在版编目(CIP)数据

卫星通信(第二版)/(美)普拉特(Pratt, T.)等著;甘良才等译.-北京:电子工业出版社,2005.7
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Satellite Communications, Second Edition

ISBN 7-121-01254-5

I. 卫... II. ①普... ②甘... III. 卫星通信-教材 IV. TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第072365号

责任编辑:马 岚

特约编辑:李玉龙

印 刷:北京天宇星印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:30.25 字数:774千字

印 次:2005年7月第1次印刷

定 价:45.00元

凡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。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长

译者序

自从 1957 年前苏联发射第一颗人造地球卫星以来,卫星通信已经发展到第四代,如此迅猛的发展速度正是由于卫星通信距离远,不易受时域、地域和空域的影响。目前卫星通信已成为当今先进的通信技术之一,在卫星电视广播、远程教学、互联网、军事、紧急救援系统以及移动通信等方面得到了广泛的应用,新一代宽带卫星通信系统不仅提供个人电信业务、多信道广播、互联网和互联网的远程传送以及作为地面多媒体通信系统的接入手段,而且成为实现全球无缝个人通信、互联网空中高速通道必不可少的手段。近年来卫星通信新技术的不断发展,如甚小口径天线地面站系统、中低轨道的移动卫星通信系统等都受到了人们的广泛关注,卫星通信已经成为未来全球信息高速公路的重要组成部分。

本书第二版由 Timothy Pratt, Charles W. Bostian 和 Jeremy E. Allnutt 教授合著,他们均是卫星通信、无线通信和无线电传播方面的著名专家和学者,具有较高的学术造诣和丰富的实践经验。本书是三位作者多年教学与科研成果的总结,除了保留第一版的主要章节外,还增加了不少反映近年来卫星通信系统发展的新技术,如 VSAT 系统、LEO 和 NGSO 系统、直接电视广播以及卫星导航等方面的内容。

本书从轨道力学和卫星发射入手,逐步深入地介绍了卫星系统的组成、卫星链路设计和链路调制与多路复用技术,以及多址和差错控制技术、电波传播及对卫星-地球链路的影响;在介绍基本理论的基础上,也以相当大的篇幅介绍了目前卫星通信的实际应用系统,如 VSAT 系统、低轨道和非同步轨道地球卫星系统、直接广播卫星电视与广播以及卫星导航与全球定位系统。同时每章增加了许多工程实例、工程计算和设计的方法,从而使得全书既有卫星通信的基本理论,又融入了最新的工程实践。全书共分 12 章,第 1 章介绍了卫星通信的背景、历史及最新发展;第 2 章介绍了轨道力学方程及卫星发射、运动轨道定律、卫星的定位和轨道参数,并论述了卫星轨道对通信系统性能的影响;第 3 章介绍了卫星子系统,如姿态和轨道控制系统,遥测、跟踪、指挥和监控系统,电源系统,通信子系统,以及卫星天线,并介绍了卫星设备可靠性及太空资格认定方面的知识;第 4 章论述了卫星链路设计,包括系统噪声温度与 G/T、上/下行链路设计,并结合了两个具体的应用系统(小型地面站卫星系统、直接广播电视),详细说明了具体 C/N 的链路设计和系统设计方法;第 5 章论述了卫星链路的调制方法与多路复用技术;第 6 章论述了多址通信技术,以及星上处理与按需分配多址接入、码分多址等新技术;第 7 章论述了数字卫星通信链路中的差错控制技术,包括分组纠错编码、Turbo 码等;第 8 章论述了电波传播及对卫星地球链路的影响;第 9 章论述了 VSAT 系统的基本技术和系统设计方法;第 10 章介绍了低轨道和非同步轨道的地球卫星系统,以及影响系统性能的相关因素,如轨道因素、覆盖和频率因素、时延和吞吐量因素,以及系统因素等;第 11 章介绍了直接广播卫星电视与系统;第 12 章介绍了卫星导航与全球定位系统;本书带有四个附录,分别介绍了分贝概念、话音传输、误差函数和电波传播中的衰减模型等基础知识。

本书内容全面,概念清晰,习题与参考资料丰富,是一本全面深入论述卫星通信的经典著作。自本书问世以来,美国诸多著名大学均以该书作为高年级本科教材或研究生教学参考书。相信本书将成为我国从事卫星通信教学与研究的广大教师以及相关领域的工程技术人员的一本很好的参考书。

本书由甘良才教授担任主译,研究室的熊俊俏博士、吴琼莉博士、林静博士、谢玲硕士、项飞硕士承担了大部分工作,同时郭建兵、丁雅辉、张旭良、朱毅超和胡志强博士、祁晋、王彩霞和瞿小燕硕士也参与了部分工作,全稿由甘良才教授负责文字润色和统稿。在本书翻译过程中,武汉科技学院的吴麟章教授提出了许多宝贵且中肯的建议。在本书付梓之际,让译者对上述同志表示诚挚的谢意。由于译者才疏学浅,书中恐有谬误之处,敬请各位学者同仁不吝指教。

译者

2005 年于武昌珞珈山武汉大学

作者简介

Timothy Pratt 在英国伯明翰大学获得科学学士和博士学位,目前他是弗吉尼亚工学院电气和计算机工程系的教授,自 1981 年起在该校任教至今。长期以来 Pratt 博士一直在英国和美国从事通信学科的教学工作。其主要研究领域为卫星通信、地点定位和航空电子学。Pratt 博士现为 IEEE 高级会员和 IEE(London)会员。

Charles W. Bostian 在北卡罗来纳州立大学获得电机工程专业学位,是弗吉尼亚工学院电气和计算机工程系的教授,自 1969 年起在该校任教至今。其主要研究领域为无线通信和无线电传播,1980 年出版了 *Solid State Radio Engineering* 一书,他是 IEEE 会员之一。

Jeremy E. Allnutt 在英国索尔福德大学获得电气工程专业学士和博士学位,是 George Mason 大学电气和计算机工程系的教授,同时他还是 MS 电信项目的负责人。他的主要研究领域为无线电波传播对卫星链路的影响;1979 年至 1994 年期间,他一直在英国和加拿大的科研机构中从事该领域的研究,而后进入美国的 Intelsat 组织工作至今。Allnutt 博士于 2000 年进入 George Mason 大学,此前他还是英国约克大学和弗吉尼亚工学院教授,现为 IEEE 高级会员。

前 言

自本书第一版于 1986 年出版至今,卫星通信技术已有了长足的发展。尽管如此,卫星传输无线电信号的基本原理仍然没有发生变化,因此,本书中关于卫星轨道、视角、转发器、链路预算、信噪比(S/N)、模拟和数字链路的比特误码率(BER)、多址技术、差错控制技术以及地表无线电波传输损耗方面的讲述,仍与 1986 年的版本保持一致。所不同的是,随着卫星通信系统的应用日益广泛,已出现了许多新的终端设备。

在第二版中,由于篇幅有限,我们无意介绍现存的所有卫星通信系统,而是侧重于讲述卫星通信系统的基本原理,使读者能够深入了解卫星通信系统是如何将信息从一个地面站传送到另一个地面站的。本书的第一版是 Charles Bostian 和 Timothy Pratt 为卫星通信课程的教学编写的,曾赢得了各界的广泛好评。该书不仅适合作为本科高年级学生或研究生的教材,也可作为工程人员的参考书。在第二版的编写过程中,我们十分荣幸地得到了我们的朋友和同事 Jeremy Allnutt 的鼎力合作,25 年来,他一直和我们一起从事卫星系统的研究工作。Jeremy Allnutt 负责编写了轨道机制、电波传播、非同步卫星系统和 VSAT 网络等章节。

在第二版中,我们省略了第一版中的部分内容,加入了介绍 VSAT 系统、LEO 和 NGSO 系统、直接电视广播和卫星导航等知识的章节。1984 年编写本书时,利用低地球轨道卫星进行个人通信的通信技术还未出现,采用数字传输方式进行卫星直接广播的技术也还未发展起来。极小孔径终端(VSAT)系统是在 1986 年以后发展起来的一种系统,VSAT 的出现使得许多在第一版中讨论过的技术得到了应用。全球定位系统(GPS)目前已成为了无线电辅助定位的主要方式。GPS 由 24 颗卫星组成,可以对地球上的所有位置进行精确定位。在过去的 15 年中,技术上的最大突破可能就是由模拟传输向数字传输技术的转变。美国基本上已完成了这一转变,只剩下有线电视仍采用模拟传输方式传输视频信号。由于世界上有些地区仍在使用 FDM/FM/FDMA 系统,我们在第二版中保留了关于该部分内容的介绍。

本书将重点讲述数字传输技术;第 5 章对数字无线电传输的基础理论做了复述,这些理论是所有数字卫星系统的基础。值得一提的是,在模拟传输向数字卫星传输转变的同时,地面通信系统也得到了极大的发展。1986 年,光纤通信技术还刚刚起步,互联网也还处于萌芽状态,蜂窝电话更是少见。但是,现在许多地面通信系统的发展已超过了卫星系统,许多在 1986 年还是刚刚诞生的技术,现在都已经发展成熟了。

在美国国内,电话(语音)链路并不采用卫星系统,这主要是由于地面光纤链路的快速发展使得利用卫星开展电话业务变得很不经济,而且使得 GEO 卫星链路的时延缺点变得尤为突出。美国的民用卫星目前主要用于向各有线电视公司或家庭传送视频信号,以及为 VSAT 网络提供服务。直接向家庭进行卫星电视广播技术的发展对市场造成了深远的影响。美国目前已有大约 1500 万户(2001 年数据)家庭可以接收数字 DSB-TV 节目,欧洲的情况也大致相似。向有线电视公司和家庭进行电视转播的收入目前已占到卫星通信系统总收入的一半以上。

最后,作者希望能向多年来一直为本书提供宝贵建议的同事和学生们表示由衷的感谢。我们采纳了他们的宝贵建议,并在第二版中对不足之处进行了改进,而且还加入了许多工程实例,以针对各个主题说明计算和设计的方法。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 背景	1
1.2 卫星通信简史	2
1.3 2000 年卫星通信概述	5
1.4 卫星通信综述	10
1.5 小结	11
参考文献	11
第 2 章 轨道力学和发射装置	12
2.1 轨道理论	12
2.2 仰角的确定	24
2.3 轨道摄动	29
2.4 卫星轨道的确定	33
2.5 卫星发射和运载工具	33
2.6 轨道对通信系统性能的影响	39
2.7 小结	43
参考文献	43
习题	44
第 3 章 卫星	46
3.1 卫星子系统	46
3.2 姿态和轨道控制系统(AOCS)	48
3.3 遥测、跟踪、指挥和监测系统	55
3.4 电源系统	57
3.5 通信子系统	58
3.6 卫星天线	65
3.7 设备可靠性及太空资格认定	70
3.8 小结	75
参考文献	75
习题	76
第 4 章 卫星链路设计	78
4.1 概述	78
4.2 基本传输理论	82
4.3 系统噪声温度和 G/T	86
4.4 下行链路设计	92
4.5 小型地面站卫星系统	96

4.6 上行链路设计	102
4.7 具体 C/N 的链路设计:结合卫星链路中的 C/N 和 C/I 进行设计	105
4.8 系统设计实例	109
4.9 小结	125
参考文献	126
习题	126
第 5 章 卫星链路的调制和复用技术	131
5.1 频率调制	132
5.2 通过卫星的模拟调频传输	138
5.3 数字传输	144
5.4 数字调制与解调	158
5.5 模拟信号的数字传输	171
5.6 时分复用	178
5.7 小结	182
参考文献	183
习题	183
第 6 章 多址	191
6.1 概述	191
6.2 频分多址(FDMA)	193
6.3 时分多址(TDMA)	202
6.4 星上处理	214
6.5 按需分配多址接入(DAMA)	216
6.6 随机多址(RA)	221
6.7 各种分组无线系统及协议	221
6.8 码分多址(CDMA)	223
6.9 小结	231
参考文献	232
习题	232
第 7 章 数字卫星链路的差错控制	240
7.1 检错与纠错	240
7.2 信道容量	242
7.3 差错控制编码	243
7.4 分组纠错码的性能	247
7.5 卷积码	248
7.6 卫星链路上检错的实现	250
7.7 链接编码与交织	253
7.8 Turbo 码	255
7.9 小结	256
参考文献	257
习题	258

第 8 章 传播效应及其在卫星-地球链路上的影响	260
8.1 概述	262
8.2 量化衰减和去极化	263
8.3 与水汽凝结体无关的传播效应	269
8.4 雨和冰的影响	274
8.5 降雨衰减预测	278
8.6 XPD 的预测	287
8.7 传播减损对策	293
8.8 小结	297
参考文献	298
习题	299
第 9 章 VSAT 系统	302
9.1 概述	302
9.2 VSAT 系统综述	303
9.3 网络体系结构	305
9.4 接入控制协议	307
9.5 基本技术	311
9.6 VSAT 地面站工程	321
9.7 VSAT 星形网络链路裕量的计算	324
9.8 系统设计程序:例 9.1	326
9.9 一些新进展	336
9.10 小结	337
参考文献	338
习题	338
第 10 章 低轨道异步地球卫星系统	341
10.1 概述	341
10.2 轨道因素	343
10.3 覆盖和频率因素	355
10.4 时延和吞吐量因素	367
10.5 系统因素	370
10.6 可操作 NGSO 星群设计	371
10.7 小结	377
参考文献	378
习题	379
第 11 章 直接广播卫星电视与广播	383
11.1 C 频段和 Ku 频段家用卫星电视	384
11.2 数字 DBS 电视	385
11.3 DBS-TV 系统设计	390
11.4 DBS-TV 链路预算	391
11.5 数字 DBS-TV 中的差错控制	393

11.6 主控站和上行链路	394
11.7 DBS-TV 天线的安装	395
11.8 卫星无线电广播	396
11.9 小结	397
参考文献	398
第 12 章 卫星导航和全球定位系统	399
12.1 概述	399
12.2 无线电和卫星导航	401
12.3 GPS 定位原理	403
12.4 GPS 接收机和编码	406
12.5 卫星信号获取	408
12.6 GPS 导航消息	410
12.7 GPS 信号电平	411
12.8 定时精度	413
12.9 GPS 接收机操作	413
12.10 GPS 的 C/A 码精度	416
12.11 差分 GPS	418
12.12 小结	419
参考文献	420
习题	421
附录 A 通信工程中的分贝	422
附录 B FDM/FM/FDMA 模拟话音传输	425
附录 C 互补误差函数 $\text{erfc}(x)$ 与 Q 函数 $Q(z)$	435
附录 D 简易衰减模型	437
术语和缩写词汇编	442
索引	449

第1章 概述

1.1 背景

20 世纪有两项发明极大地改变了人们的生活方式,那便是汽车和远程通信。在汽车普及之前,人们的出行只能依靠步行、骑自行车或骑马。虽然火车可以使人们快捷地往来于城市之间,但大多数人的生活仍然集中在所居住城镇或城镇周边的一个较小范围之内,活动范围不过 160 千米左右,即使是我们现在最普通的交通工具在当时也是不可想像的。在电报和电话普及之前,人们的交流要么是面对面的,要么是书信来往。若你想和某人直接交谈,就必须出门和他见面,然而由于交通的限制,该旅途一般是漫长而艰难的。

远程通信系统的出现使得人们可以在任何时间与任何人进行通信。早期的电报和电话系统采用铜缆在陆上或跨洋传送信号,而高频无线电(也称为短波无线电)则使得洲际通信成为可能。人造地球卫星用于通信系统已有 35 年的历史,且现在已成为世界电信结构中的重要组成部分。利用卫星,人们可以使用电话进行交谈,在世界各地收发电子邮件,或足不出户便可收看上百个频道的电视节目。

卫星通信的设想最早是由 Arthur C. Clarke 于 1945 年在英国的无线电杂志 *Wireless World* 上发表的一篇文章中提出的^[1]。当时,Clarke 服役于英国皇家空军部队,他对远距离通信十分感兴趣。后来他因为出版了 *2001: A Space Odyssey* 和其他一些科幻小说而一举成名^[2]。1945 年,高频无线电是进行洲际通信的惟一方式,但这种方式的可靠性很低,太阳黑子和电离层的扰动可以造成高频无线电链路中断数天。早在 19 世纪中期,电报电缆就已经实现了越洋铺设,但直到 1953 年跨大西洋传送语音信号的业务才成为可能。Clarke 认为,若能够在赤道上空设置一颗与地面相对静止、周期为 24 小时的无线电中继卫星,则可以实现远程无线电链路。当时,Clarke 写道:还没有轨道上的卫星,或者火箭还不能运载这样的卫星。然而,当前苏联成功发射了 Sputnik 号卫星后,他的设想变成了现实。1965 年,世界上第一颗对地静止卫星“晨鸟”号(Early Bird)开始提供跨大西洋的电话业务,实现了 20 年前 Clarke 的预言。

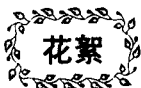
卫星通信系统最初是设计用于开展长途电话业务的。20 世纪 60 年代末,由于运载工具的发展,人类成功地将一颗重达 500 千克、能容纳 5000 个话路的卫星送入地球同步轨道,从而揭开了电信卫星快速发展时代的序幕。随后,静止卫星很快便被用于开展越洋和洲际电话业务,并且有史以来首次实现了跨大西洋和太平洋的新闻和体育赛事转播。

当卫星处于对地静止轨道(GEO)时,它与地球表面上某一定点是保持相对静止的,因此几乎所有大容量的通信卫星系统都优先选择静止轨道作为卫星的运行轨道。若地面站采用固定天线,则单颗卫星的覆盖面积可以达到地球总表面积的三分之一。换言之,利用一颗卫星便可以实现对整个大陆的电视广播,这一点对于广播而言是十分有价值的。目前,直接广播卫星电视(DBS-TV)和向有线电视网传送视频信号是静止卫星的最主要收入,1998 年该项收入达到了 170 亿美元。到 2001 年为止,轨道上的 GEO 通信卫星总数已经达到了 200 颗,业务范围覆盖

全球。尽管电视转播是对地静止卫星的主要业务,但是国际和地区电话、数据传输和互联网接入等业务也日益占据重要地位。在人口稠密地区,静止轨道上每隔 2° 或 3° (经度)便有一颗卫星,各系统工作频率几乎遍及整个可用频段。

近年来,GEO 卫星的质量、体积、使用寿命和费用与日俱增。在众多大型卫星中,值得一提的是由美国国家侦察局发射的重达 13 600 千克的 KH 和 Lacrosse 侦察卫星^[3]。到 2000 年为止,研制和发射一颗使用寿命为 15 年、质量为 6000 千克的商用通信卫星的费用大约为 12 500 万美元,要实现盈利,这些卫星每年的收入必须超过 2000 万美元。不仅如此,卫星通信还必须与光纤通信系统在语音、数据和视频传输方面展开激烈的竞争。光纤的传输速率可以达到 4.5 Gbps,这差不多是 GEO 卫星可以达到的最大传输速率。然而,光纤通常是以束为单位进行传输的,换言之,光纤的传输速率远不止 4.5 Gbps,比卫星系统的传输速率要高得多。尽管如此,GEO 卫星仍然可以在传输点的灵活性上与光纤系统竞争。例如,利用卫星系统与某地进行通信,只需要在当地安装一个地面终端即可;但光纤系统则需要在当地铺设光缆,形成通信网才可以完成通信。不过,对系统容量有较高要求或者用户密度超过经济底线时,光纤通信是比卫星通信更为有效的通信方式。

低高度地球轨道卫星和中高度地球轨道卫星是 GEO 卫星的有利补充,通常用于提供专门业务。低地球轨道(LEO)卫星可以提供大陆或全球的电话和数据业务,到 2000 年为止,轨道上已经存在三种(或者说即将存在三种)卫星系统,LEO 卫星总数可达 138 颗。此外,LEO 卫星也用于地面摄像和侦察。全球定位系统(GPS)由 24 颗中高度轨道(MEO)卫星组成,虽然 GPS 还不能严格地称为卫星通信系统,但它的诞生仍然给导航系统带来了一次革命。GPS 接收机现在已实现产品化,在可见的将来,所有的汽车和蜂窝电话上都会配置一台 GPS 接收机,这样司机便不会再担心迷路了,因为手机在发出紧急呼叫的同时,也将所在的具体位置信息发送给了服务站。



光纤和卫星所具有的极大容量以及电信业务由模拟信号向数字信号的平稳过渡,不仅使得长途电话的费用有所降低,而且也极大地增加了可用电话线路的数目。在 1960 年卫星通信还未成形以前,美国只有 550 条越洋电话线路。当时与欧洲通话的长途话费是每分钟 1 美元,电话必须由接线员连接,延迟数小时是常见的事。而到了 2000 年,几乎所有的国际长途都是由用户自己拨号的,与欧洲通话的费用每分钟不到 0.1 美元。为了更好地说明国际长途话费下降的幅度,我们应该了解的是,在这几十年的时间里,人们的收入已经有了十分显著的提高。20 世纪 50 年代,一名“蓝领”工人的工资为每小时 1.50 美元,因此一名蓝领工人为了支付打往欧洲的长途话费,他必须连续工作 40 分钟,这还没有计算他应该缴纳的税款。在 2000 年,美国普通工人每小时可以赚 11 美元,因此支付长途话费的工作时间不到一分钟。美国现已拥有成百上千条越洋电话线路和传送全球新闻报道的视频链路。

1.2 卫星通信简史

1957 年,前苏联发射了一颗名为 Sputnik I 的小型卫星,这标志了卫星通信的开始。这是人类发射的第一颗地球卫星,它点燃了美国和前苏联太空竞赛的导火索。Sputnik I 号只配备了一个反馈发射机,并且不具备通信能力,但却证明了利用大功率火箭是有可能将卫星送入轨

道的。1958年1月31日,美国在卡拉维拉尔角利用 Juno I 号火箭成功发射了人类历史上的首颗卫星——“探索者1号”卫星。来自太空的第一个声音是当时的美国总统艾森豪威尔的声音,1958年12月升空的 Score 卫星发回了他的一段圣诞致词录音。Score 卫星实际上是前端带有小型负载的 Atlas ICBM(洲际弹道导弹)的核心部分。Score 上配有的录音机可以存储时长为4分钟的信息,在运行了35天之后,卫星因携带的电池耗尽而耗损。

此后,人们曾经尝试利用大型气球(Echo I 和 Echo II)作为通信信号的无源反射体,并发射了几颗试验用卫星。终于在1962年7月和1963年5月成功发射了第一批真正实用的通信卫星——“电星1号”(Telstar I)和“电星2号”(Telstar II)。电星卫星是贝尔实验室研制的,采用的是C频段转发器,该收发机是根据陆上的微波链路设备改装而成的。其上行链路频率为6389 MHz,下行链路频率为4169 MHz,带宽为50 MHz。卫星配有可供收发机连续工作的太阳能电池。当时横跨大西洋进行了实况电视链路和多路电话环路的测试,有力地说明了卫星通信的可行性。

当年两颗电星的运行轨道就是我们现在所说的中高度轨道,其环绕周期分别为158分钟和225分钟。电星卫星在大西洋两岸均可见的时间约为20分钟,因而可利用这20分钟的时间建立跨大西洋链路。因为卫星的运行轨道跨越了几个高能量辐射区,所以发射初期曾经导致工作站的电子元件发生故障。但是,电星卫星的发射证明了通信卫星的价值,人们也因此开始研制能够将有源卫星运载到静止轨道的发送设备和能够提供有效通信的卫星。

1961年7月24日,美国总统肯尼迪制定了美国在卫星通信领域的政策,首次明确地提出了单一世界系统的说法。1961年12月20日,美国国会建议国际电信联盟(ITU)对太空通信进行审查,并指出有必要成立一个专门的国际合作组织对太空通信的各方面事宜进行管理。1962年8月,美国国会通过了通信卫星法案,从此迈出了最为重要的一步,因而也为各国向国际卫星组织进行商业投资创造了条件。1964年1月19日,首批对 Intelsat(国际电信卫星组织)进行投资的12个国家的代表签署了一项创立协议,代表美国签署协议的公司是 Comsat 公司,它负责全权代表美国在 Intelsat 中的利益。值得注意的是,此时贝尔系统在美国国内的长途电话通信领域已经占据了完全的垄断地位,因而美国国会通过通信卫星法案时,贝尔系统被禁止直接参与卫星通信领域,只允许对 Comsat 公司进行投资。

在 Intelsat 成立初期,Intelsat 的管理基本上由 Comsat 公司负责,该公司在国际项目上取得了巨大的成功。首批发射的五颗 Intelsat 系列卫星的选定和管理均是由 Comsat 领导的小组负责的。但与此同时,Comsat 中很多的工程和管理机构也调到了 Intelsat,以至于1979年永久管理协议生效时,Intelsat 中的很多机构都来自于 Comsat。

1963年中期,LEO 上的卫星已占卫星发射总数的99%。就当时所能制造的小型运载火箭而言,将卫星送入更高一点的 MEO 比送入 GEO 更为容易。最终,人们将讨论的重点集中到了运载火箭的可靠性上,而不是卫星的负载能力上。在所谓的“太空时代”的前6年里,卫星和火箭的研制是并重的。火箭研制的风险很大,每四次发射只有一次可以完全成功。最初设计的商用通信卫星系统是由12颗位于 MEO 上的卫星联合组成的,因而按照当时的发射失败率,为了保证成功发射12颗卫星,必须预计发射48次。若运行轨道上的卫星不足12颗,系统就无法提供24小时的连续覆盖。任何通信卫星都必须保证每周7天、每天24小时的全天候工作,而 GEO 系统只需要采用1颗卫星便可以对占世界面积1/3的地区进行覆盖,所以覆盖1/3的全球面积只需预计发射4次即可,覆盖全球预计也只需发射12次。尽管当时 GEO 系统的技

术还不成熟,但 Intelsat 仍然选择了对地静止轨道作为卫星的运行轨道。

第一颗 Intelsat 卫星 INTELSAT I(即“晨鸟”号)是于 1965 年 4 月 16 日发射升空的。该卫星的质量仅有 36 千克,包含两个带宽为 25 MHz 的 6/4 GHz 转发器。1965 年 6 月 28 日,欧洲和美国之间的商业运作正式开始,GEO 卫星通信也终于变成了现实,此时距 Clarke 在 *Wireless World* 上发表的那篇重要文章已经过了 20 年。随着时间的流逝,越来越多的国家认识到了卫星通信不仅在国际通信方面存在着巨大的价值,而且对于国土面积较大的国家而言,卫星通信可以提供高质量的国内通信,因而 Intelsat 取得了巨大的成功,且发展速度十分迅速。

加拿大是第一个采用 GEO 卫星建立国家电信系统的国家,它于 1974 年 5 月发射了 Anik 1A 卫星,较之美国的第一颗民用卫星 WESTAR 1 号要早两个月。然而,第一个地区卫星系统是前苏联采用的高椭圆轨道(HEO)卫星——Molniya 系统,该系统的首颗卫星于 1965 年 4 月(与 INTELSAT I 同月)发射升空。前苏联国土面积广阔,跨越 11 个时区,这种面积广阔的国家十分适合采用地区卫星系统。另一个从 GEO 地区卫星系统受益的国家是印度尼西亚。印度尼西亚由 3000 多个岛屿组成,绵延 1600 多千米。对这类国家而言,采用陆地电信系统是不可行的,然而仅采用一颗 GEO 卫星便可以在整个地区内提供实时通信。GEO 卫星为通信带来的便捷具有极大的经济利益。在不到 10 年的时间里,Intelsat 便实现了自食其力。由于 Intelsat 不是一个营利性的组织,因而它将数目巨大的收入返还给了各个协约国。在 25 年的时间里,Intelsat 的签约国已经超过了 100 个。2000 年年初,其成员国和签约国数目达到了 143 个,形成了国际 Intelsat 联盟。

Intelsat 巨大的商业成功导致许多国家开始投资建立自己的卫星系统。美国即是如此,到 1983 年年底,美国民用卫星系统在电话业务上的收入就已经超过了 Intelsat 系统。20 世纪 90 年代初期,许多原来的 Intelsat 签约国都实现了独立,不仅在相互之间而且与 Intelsat 在空间通信领域展开了激烈的竞争。在这种情况下,必须寻找一种有效的机制,使得 Intelsat 变成一个营利性的组织,从而保护那些依赖 Intelsat 低费用进行通信的国家的利益。Intelsat 私有化的第一步便是成立了一个名为“新天空”的商业公司,并将一定数目的 Intelsat 卫星转到了新天空的名下。

20 世纪 70 年代和 80 年代,用于国际地区和民用电话业务以及电视转播的卫星系统发展迅速。由于高容量、低时延的光纤的广泛铺设,到 1985 年时,几乎所有的电话业务都转换到了陆地通信线路中。但是,在这段时期内,人们对卫星系统的要求也在不断提高,C 频段很快就被占满了,人们不得不向 Ku 频段延伸。在美国,1985 年以后扩展的频段多用于进行电视转播和 VSAT(极小孔径终端)网络业务。到了 1995 年,Ku 频段也面临用完的可能,为了满足日益扩展的数字业务的需要,特别是高速互联网数据的宽带传输业务的需要,人们开始不断研制 Ka 频段卫星系统。在 Luxemburg 基础上建立的 SES 于 2001 年开始采用 Astra 1H 卫星在西欧和中欧地区开展双向多媒体和互联网接入业务^[6]。预计在 2003 年,将会有数个 Ka 频段卫星系统投入使用^[7,8]。

人们很早就已认识到利用卫星系统提供移动通信的能力,国际海事卫星组织(Inmarsat)几十年来一直为船只和飞机提供通信服务,不过这些业务所收取的费用也不低。LEO 卫星一直被认为是建立全球卫星电话系统的一种方式。在 20 世纪 90 年代,人们对此提出了许多方案,到 2000 年,最终有三个 LEO 系统(铱星、全球星和 Orbcomm)投入使用。建立用于移动通信的 LEO 和 MEO 卫星系统的实际费用比预算的费用要昂贵得多,而且与 GEO 卫星系统相比,LEO