



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪高等学校通信类规划教材

# 卫星通信导论

(第2版)

Introduction to Satellite Communications  
2nd Edition

吴诗其 吴廷勇 卓永宁 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

## 内 容 简 介

本书介绍卫星通信的基本原理和技术,并结合系统的组成介绍主要设备及当前所达到的水平,同时包括了卫星通信的一些新技术和典型的实际系统。本书的主要特点为:①着重介绍卫星通信的基本原理和特有技术,对于调制、编码等通用技术未作介绍;②包含了卫星通信最新发展的重要内容,如卫星移动通信、卫星宽带通信技术、卫星数字电视广播和卫星定位与导航等;③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。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是普通高等教育“十五”国家级规划教材《卫星通信导论》的修订版。本书适合作为高等学校通信和信息系统等专业的相关课程的教材,也可作为从事通信相关工作的技术人员的参考书。

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/吴诗其,吴廷勇,卓永宁编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2006.8

(21世纪高等学校通信类规划教材)

ISBN 7-121-02845-X

I. 卫… II. ①吴… ②吴… ③卓… III. 卫星通信—高等学校—教材 IV. TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第073210号

责任编辑:王羽佳

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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:16.25 字数:416千字

印 次:2006年8月第1次印刷

印 数:4000册 定价:24.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,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;邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 出版说明

教材建设是高等学校教学和学科建设的主要内容之一。近几年来,我国各高等学校实施了一系列面向 21 世纪教学改革计划,在教学内容和课程体系改革上取得了丰硕的成果,因此需要适时推出适应教改成果的教材。同时,通信技术发展十分迅速,原有教材或者内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,需要修订或重新编写;或者需要开设新课程,编写新教材以填补空白。

电子工业出版社作为以信息技术领域出版为特色的中央级科技与教育出版社,始终关注着电子信息技术的发展方向,始终把出版适应我国高等学校发展要求的高质量精品教材放在重要位置上,出版了一系列特色鲜明的教材,希望能把它们放在学生的书包里、课桌上,为培养高素质人才打下良好的基础。

基于上述考虑,经过一年多的调研,并征求多方的意见,根据国内高等学校通信专业的发展现状,以及教育部《关于十五期间普通高等教育教材建设与改革意见》的指示精神,电子工业出版社规划出版了这套“21 世纪高等学校通信类规划教材”。

目前,我国多数高等学校都设有通信专业,但办学水平、特色及人才培养层次差异很大。这套教材定位于重点高校,即以研究型、研究教学型人才培养为主的高等学校通信类专业,包括其他相关专业的通信类课程教材。教材的作者全部来自于重点高校,多数是“信息与通信工程”一级学科设有全国重点学科的高校。

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:以重点院校本科通信类专业的专业课程教材为主线,兼顾其他相关专业的通信类课程。

(2) 突出系统性:本套规划教材覆盖了本科通信类专业的专业基础课、专业方向课及专业选修课,形成一个完整的教材系列,规模之大是以往教材中所不多见的。同时注意教材之间内容的合理划分与衔接,层次分明,重点突出,各高校可以根据需要组合选用,我们的目的是为通信类课程打造一套全方位解决方案。

(3) 体系、内容新颖:整个知识点建立在“高”、“新”平台上。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。

(4) 配套教学支持:多数教材配有教学课件(电子教案),部分重要课程配套出版教学辅导书或实验教材。

(5) 质量保证:多数教材为已出版教材的修订版,原教材在高校的影响大;重新规划的教材将在组织专家/教授对写作大纲和知识点进行充分讨论的基础上,选择优秀作者编写。

本套教材可作为高等学校通信专业及相关专业的本科生或研究生教材,也可供通信领域的有关专业人员学习参考。

为做好本套教材的出版工作,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。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切联系和合作,广泛听取一线教师对教材的反馈意见和建议,以便使我们的教材出版工作做得更好。

# 《21世纪高等学校通信类规划教材》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) |

# 《21世纪高等学校通信类规划教材》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:

- |              |                |
|--------------|----------------|
| 顾畹仪 (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)   | 文宏武 (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)      |
| 鄞广增 (南京邮电大学)   | 顾畹仪 (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) | 文宏武 (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 (重庆邮电学院)   |
| 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)   |

**编辑出版组:** 韩同平 王羽佳 姚晓竟

**联系电话:** (010)88254525 **E-mail:** hantp@phei.com.cn

## 前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是普通高等教育“十五”国家级规划教材《卫星通信导论》的第2版。

第2版在以下几方面做了改动:

1. 在章节、内容方面,删去了第1版的网络结构和典型系统简介两章,相应的部分内容融入了其他章节。同时增加了卫星数字电视广播系统和卫星定位与导航系统两章。

2. 全书更加注重系统设计和工程计算,教材增加了必要的定量分析和计算公式,列举了一些计算实例。同时,各章习题的数量相应增加,而且题意更富于启发性。

3. 第2版版对卫星移动通信和卫星宽带通信系统两章进行了重新编写。

本书是介绍卫星通信原理、技术和系统的基础性教材,同时包括了卫星移动通信、卫星宽带通信、卫星视频广播和卫星定位与导航等较新的内容,书中还列举了当前正在运行的一些典型系统。

本书共分9章,内容包括:卫星通信系统概述、链路传输工程、多址技术、星载和地球站设备、VSAT通信网、卫星移动通信系统、卫星宽带通信系统、卫星数字电视广播系统和卫星导航系统。第1、2、3、5章由吴诗其编写,第6、7章由吴廷勇编写,第4、8和9章由卓永宁编写。

本书可作为高等学校通信工程、计算机通信及信息工程等专业本科高年级学生的教材(参考学时数:40学时),也可作为跨专业学生和工程技术人员的参考书。

本书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。请登录华信教育资源网(<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:

[sqwu@uestc.edu.cn](mailto:sqwu@uestc.edu.cn)

[Wuty75@uestc.edu.cn](mailto:Wuty75@uestc.edu.cn)

[zyning@uestc.edu.cn](mailto:zyning@uestc.edu.cn)

作 者  
2006年6月

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可,复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为;歪曲、篡改、剽窃本作品的行为,均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人应承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序,保护权利人的合法权益,我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为,本社将奖励举报有功人员,并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话:(010)88254396;(010)88258888

传 真:(010)88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址:北京市万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编:100036

# 目 录

<b>第 1 章 卫星通信系统概述</b> .....	( 1 )
1.1 卫星轨道 .....	( 1 )
1.2 系统的组成 .....	( 3 )
1.2.1 空间段 .....	( 3 )
1.2.2 地面段 .....	( 3 )
1.3 频率分配 .....	( 4 )
1.4 卫星通信的特点 .....	( 5 )
1.5 卫星通信系统的应用类型 .....	( 6 )
1.5.1 卫星视频广播业务 .....	( 6 )
1.5.2 电话等交互式业务 .....	( 7 )
1.5.3 数据通信和因特网业务 .....	( 7 )
1.5.4 移动通信业务 .....	( 9 )
1.5.5 不同应用类型所需带宽 .....	( 9 )
1.6 卫星通信的发展 .....	( 10 )
习题 .....	( 11 )
本章参考文献 .....	( 11 )
<b>第 2 章 链路传输工程</b> .....	( 13 )
2.1 星-地链路传播特性 .....	( 13 )
2.1.1 自由空间传播损耗 .....	( 13 )
2.1.2 链路附加损耗 .....	( 15 )
2.2 卫星移动通信链路特性 .....	( 17 )
2.2.1 衰落特性 .....	( 17 )
2.2.2 多普勒频移 .....	( 19 )
2.3 天线的方向性和电极化问题 .....	( 19 )
2.3.1 天线增益和方向图 .....	( 19 )
2.3.2 极化隔离 .....	( 22 )
2.4 噪声与干扰 .....	( 23 )
2.4.1 系统热噪声 .....	( 23 )
2.4.2 宇宙噪声和大气噪声 .....	( 25 )
2.4.3 其他干扰 .....	( 26 )
2.5 卫星通信全链路质量 .....	( 27 )
2.5.1 链路预算分析 .....	( 27 )
2.5.2 接收系统的等效噪声温度 .....	( 28 )
2.5.3 全链路传输质量 .....	( 29 )

2.5.4 链路预算实例 .....	(30)
2.6 信道对传输信号的损害 .....	(31)
2.7 上行、下行链路的 RF 干扰 .....	(33)
习题 .....	(35)
本章参考文献 .....	(37)
<b>第3章 多址技术</b> .....	<b>(38)</b>
3.1 引言 .....	(38)
3.2 频分多址技术 .....	(38)
3.3 时分多址技术 .....	(40)
3.3.1 TDMA 技术 .....	(40)
3.3.2 子帧的捕获和同步 .....	(42)
3.3.3 信号比特速率和转发器带宽 .....	(43)
3.4 FDMA 与 TDMA 的比较 .....	(44)
3.4.1 TDMA 和 FDMA 上行链路所需功率的比较 .....	(44)
3.4.2 功率受限、带宽受限与转发器 TWTA 操作 .....	(45)
3.5 码分多址技术 .....	(46)
3.6 三种多址技术的 RF 利用方式 .....	(48)
3.7 ALOHA 方式 .....	(49)
习题 .....	(51)
本章参考文献 .....	(53)
<b>第4章 星载和地球站设备</b> .....	<b>(54)</b>
4.1 高功率放大器和低噪声放大器 .....	(54)
4.1.1 HPA .....	(54)
4.1.2 LNA .....	(55)
4.2 星载转发器 .....	(56)
4.2.1 弯管式转发器 .....	(56)
4.2.2 转发器的 EIRP 和 $G/T$ .....	(57)
4.2.3 星载天线 .....	(58)
4.2.4 数字处理转发器 .....	(60)
4.2.5 星载电源 .....	(66)
4.3 通信地球站设备 .....	(66)
4.3.1 射频部分 .....	(67)
4.3.2 中频和基带处理部分 .....	(69)
4.3.3 地面接口与陆地链路 .....	(70)
4.4 其他类型的地球站 .....	(73)
4.4.1 TT&C 地球站与 SCC .....	(73)
4.4.2 TV 上行站和广播中心 .....	(75)
4.4.3 TV 单收站 .....	(76)
4.5 MSS 移动终端和信关站 .....	(79)



4.5.1 移动终端 .....	(79)
4.5.2 信关站 .....	(80)
习题 .....	(81)
本章参考文献 .....	(82)
<b>第5章 VSAT 通信网 .....</b>	<b>(83)</b>
5.1 VSAT 网络结构和地面设备 .....	(83)
5.1.1 VSAT 网络结构 .....	(83)
5.1.2 VSAT 系统的主站和小站设备 .....	(85)
5.2 VSAT 数据网 .....	(89)
5.2.1 网络体系结构 .....	(89)
5.2.2 卫星链路传输特性对协议和系统性能的影响 .....	(90)
5.2.3 VSAT 星形数据网多址协议 .....	(91)
5.2.4 VSAT 数据网的响应时间 .....	(93)
5.3 VSAT 电话网 .....	(94)
5.3.1 VSAT 电话网的特点 .....	(94)
5.3.2 VSAT 电话网的多址方式 .....	(95)
5.3.3 VSAT 电话网的 DAMA 方式 .....	(96)
习题 .....	(97)
本章参考文献 .....	(99)
<b>第6章 卫星移动通信系统 .....</b>	<b>(100)</b>
6.1 引言 .....	(100)
6.2 非静止轨道卫星系统概况 .....	(101)
6.2.1 卫星运动规律与轨道参数 .....	(101)
6.2.2 非静止轨道卫星系统的轨道和高度选择 .....	(109)
6.3 非静止轨道卫星星座 .....	(111)
6.3.1 星座设计时的基本考虑 .....	(111)
6.3.2 极/近极轨道星座 .....	(112)
6.3.3 倾斜圆轨道星座 .....	(116)
6.3.4 共地面轨迹星座 .....	(121)
6.3.5 太阳同步轨道星座 .....	(124)
6.4 卫星星际链路 .....	(126)
6.4.1 相同轨道高度卫星间的星际链路 .....	(126)
6.4.2 不同轨道高度卫星间的星际链路 .....	(131)
6.5 卫星移动通信系统网络结构 .....	(132)
6.5.1 概述 .....	(132)
6.5.2 空间段 .....	(133)
6.5.3 地面段 .....	(135)
6.5.4 用户段 .....	(136)
6.6 卫星移动通信频率规划 .....	(136)

6.7 典型卫星移动通信系统简介 .....	(139)
6.7.1 非静止轨道卫星移动通信系统 .....	(139)
6.7.2 静止轨道卫星移动通信系统 .....	(146)
习题 .....	(149)
本章参考文献 .....	(150)
<b>第7章 卫星宽带通信系统</b> .....	<b>(153)</b>
7.1 引言 .....	(153)
7.2 卫星宽带通信系统结构 .....	(154)
7.3 卫星 TCP 技术 .....	(156)
7.3.1 TCP 协议概况 .....	(156)
7.3.2 卫星网络中 TCP 存在的问题 .....	(159)
7.3.3 改善卫星 TCP 性能的方法 .....	(161)
7.4 卫星 IP 技术 .....	(171)
7.4.1 卫星 IP QoS .....	(172)
7.4.2 隧道技术 .....	(172)
7.4.3 异构网络互连 .....	(173)
7.4.4 卫星星座路由技术 .....	(174)
7.4.5 卫星网络组播技术 .....	(175)
7.4.6 现有卫星 IP 技术简介 .....	(176)
7.5 国外卫星宽带通信系统概况 .....	(180)
7.6 DIRECWAY —— 一个卫星宽带通信系统实例 .....	(183)
7.6.1 DIRECWAY 的技术指标 .....	(184)
7.6.2 DIRECWAY 的 IP 点到点通信 .....	(184)
7.6.3 DIRECWAY 的 IP 组播通信 .....	(185)
7.6.4 DIRECWAY 的优先级控制和安全机制 .....	(185)
7.6.5 DIRECWAY 的应用系统举例 .....	(186)
习题 .....	(188)
本章参考文献 .....	(188)
<b>第8章 卫星数字电视广播系统</b> .....	<b>(191)</b>
8.1 引言 .....	(191)
8.2 卫星数字电视广播系统的组成 .....	(192)
8.3 卫星广播电视系统中的纠错编码 .....	(193)
8.3.1 RS 编码技术 .....	(194)
8.3.2 数据交织技术 .....	(195)
8.3.3 卷积编码技术 .....	(195)
8.4 卫星数字电视传输标准 .....	(195)
8.4.1 概述 .....	(195)
8.4.2 DVB-S 传输标准 .....	(196)
8.4.3 我国的卫星数字电视传输标准 .....	(197)

8.5 信源编码与 MPEG—2 标准 .....	(197)
8.5.1 信源编码码流的复用方式 .....	(197)
8.5.2 MPEG—2 标准简介 .....	(198)
8.5.3 DBS 中的音频压缩编码 MPEG—1 .....	(200)
8.6 条件接收和视频点播 .....	(200)
8.6.1 条件接收 .....	(200)
8.6.2 视频点播 .....	(202)
8.7 数据广播 .....	(203)
8.7.1 基本原理和 IP over DVB .....	(203)
8.7.2 数据轮播与对象轮播 .....	(203)
8.8 卫星远程教育传输系统 .....	(204)
8.8.1 基于 VBI 多媒体数据广播的远程教育系统 .....	(205)
8.8.2 基于双向传输的交互式远程教育系统 .....	(206)
习题 .....	(207)
本章参考文献 .....	(208)
<b>第 9 章 卫星定位与导航系统</b> .....	<b>(209)</b>
9.1 卫星导航系统概述 .....	(209)
9.2 卫星导航技术基础 .....	(210)
9.2.1 坐标系与时间体系 .....	(210)
9.2.2 卫星定位的一般原理 .....	(216)
9.3 低轨卫星定位系统 .....	(218)
9.3.1 子午仪系统的结构 .....	(218)
9.3.2 积分多普勒定位技术 .....	(219)
9.3.3 主要误差因素 .....	(222)
9.4 双静止卫星导航系统 .....	(222)
9.4.1 系统结构 .....	(223)
9.4.2 工作原理 .....	(224)
9.4.3 主要误差因素 .....	(225)
9.5 GPS 导航系统 .....	(226)
9.5.1 系统结构 .....	(226)
9.5.2 工作原理 .....	(228)
9.5.3 测距信号结构 .....	(229)
9.5.4 基本定位方法和数学模型 .....	(230)
9.5.5 定位性能与主要误差因素 .....	(234)
9.6 新一代卫星导航系统 .....	(235)
9.6.1 GALILEO 卫星导航系统 .....	(235)
9.6.2 GPS 现代化计划 .....	(237)
习题 .....	(237)
本章参考文献 .....	(238)
<b>附录 A 缩略词</b> .....	<b>(239)</b>

# 第 1 章 卫星通信系统概述

## 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 6.2 节)。

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。

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 系统的卫星高度范围为 500~1500 km, MEO 的轨道高度约为 10000~20000 km, GEO 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 的空间有一个由范伦(Van Allen)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

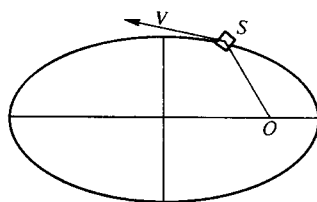


图 1-1 卫星运行轨道示意图

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  $63.4^\circ$  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  $120^\circ$  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到  $1/4$  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。

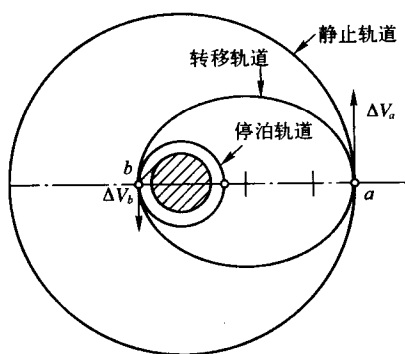


图 1-2 GEO 卫星的轨道转换

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  $150 \sim 300$  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)。

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  $0.1^\circ$ ,以控制卫星在轨道法线方向上的飘移的范围,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)的星座是由66颗高度为765 km的卫星组成的。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、遥测和指令站(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摄动控制在允许的范围内。在卫星寿命的最后阶段,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。

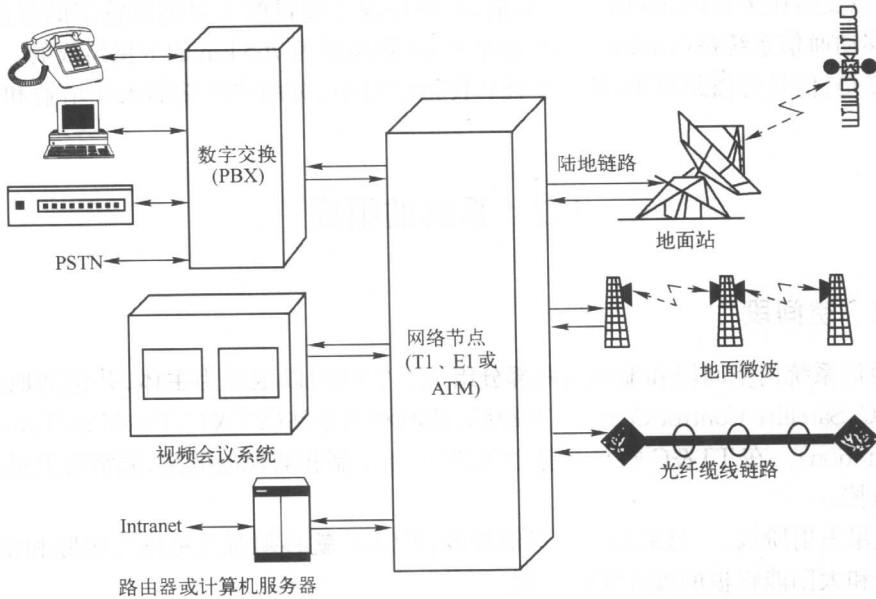


图 1-3 卫星地球站与地面网的一个节点连接的情况

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。

### 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)对电波的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,UHF 的范围通常认为是 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。

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。

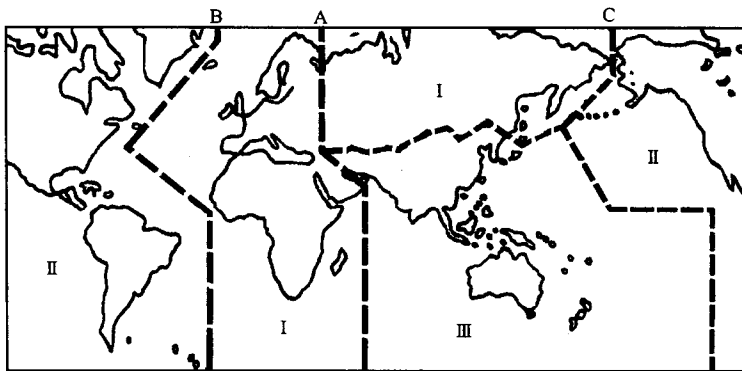


图 1-4 ITU 的频率划分区域图

## 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,使系统具有以下优点。

- 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。一颗 GEO 卫星能有效地覆盖地球表面约 1/3 的地区(零仰角时能覆盖地球表面的 42%),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。
- 卫星通信系统可利用的频带很宽,从 VHF 频段(150 MHz)至目前已实用化的 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。

- 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(比如发展中国家)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,旁路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。
- 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,不需要大量的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。
- 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,这样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,对个人用户(Direct PC)也较为有利。同时,卫星通信系统对新业务的引入和拓展原有业务也较地面网有利。例如,为 Direct PC 用户可提供 Internet 业务,直接到户(DTH, Direct-To-Home)业务,以及提供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 卫星通信系统的应用类型

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移动通信业务。

### 1.5.1 卫星视频广播业务

目前,世界上运行的 GEO 卫星转发器中,有三分之二是用于电视和视频广播的。早期的卫星电视广播是以调频方式传送模拟电视信号的,由地区电视台、有线电视网的卫星电视接收站或集体接收站进行接收,再送入家庭电视接收机。采用 C 频段(由于卫星与地面微波中继系统公用该频段,对卫星发射信号在地面的功率密度有严格限制)或中、小功率 Ku 频段卫星时,接收机天线较大。若采用大功率 Ku 频段直播卫星,也可由家庭卫星电视接收机直接接收。这种模拟传输方式占有的频带宽(每个转发器仅能传送 1~2 路电视节目),保证图像质量所需的信噪比也较高。