

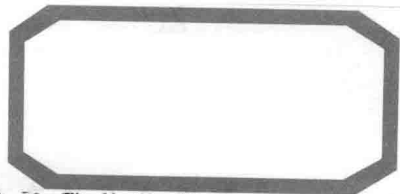
中国电子教育学会高教分会推荐  
普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

# 卫星通信与卫星网络

李晖 王萍 陈敏 编著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

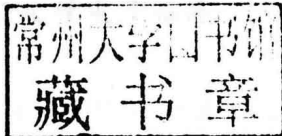


中国电子教育学会高教分会推荐

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

# 卫星通信与卫星网络

李晖 王萍 陈敏 编著



西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书对卫星通信和空间通信系统进行了较为全面的论述。全书分为三篇：卫星通信技术篇、卫星网络技术篇、深空探测与深空通信技术篇。除了一些传统的卫星通信理论与通信技术外，书中还增加了卫星网络与系统、空间信息网络协议、深空探测与通信等方面的内容，对未来空间科学的发展进行了介绍。

本书内容深入浅出，可作为相关专业的本科生和大专生教材或参考书，也可作为相关从业人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

卫星通信与卫星网络/李晖, 王萍, 陈敏编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-5606-4745-6

I. ①卫… II. ①李… ②王… ③陈… III. ①卫星通信—通信网 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 268299 号

策 划 刘玉芳

责任编辑 许青青

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西利达印务有限责任公司

版 次 2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 21

字 数 493千字

印 数 1~2000册

定 价 46.00元

ISBN 978-7-5606-4745-6/TN

**XDUP 5037001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 中国电子教育学会高教分会

## 教材建设指导委员会名单

- |       |           |                     |
|-------|-----------|---------------------|
| 主 任   | 李建东       | 西安电子科技大学副校长         |
| 副 主 任 | 裘松良       | 浙江理工大学校长            |
|       | 韩 焱       | 中北大学副校长             |
|       | 颜晓红       | 南京邮电大学副校长           |
|       | 胡 华       | 杭州电子科技大学副校长         |
|       | 欧阳缮       | 桂林电子科技大学副校长         |
|       | 柯亨玉       | 武汉大学电子信息学院院长        |
|       | 胡方明       | 西安电子科技大学出版社社长       |
| 委 员   | (按姓氏笔画排列) |                     |
|       | 于凤芹       | 江南大学物联网工程学院系主任      |
|       | 王 泉       | 西安电子科技大学计算机学院院长     |
|       | 朱智林       | 山东工商学院信息与电子工程学院院长   |
|       | 何苏勤       | 北京化工大学信息科学与技术学院副院长  |
|       | 宋 鹏       | 北方工业大学信息工程学院电子工程系主任 |
|       | 陈鹤鸣       | 南京邮电大学贝尔英才学院院长      |
|       | 尚 宇       | 西安工业大学电子信息工程学院副院长   |
|       | 金炜东       | 西南交通大学电气工程学院系主任     |
|       | 罗新民       | 西安交通大学电子信息与工程学院副院长  |
|       | 段哲民       | 西北工业大学电子信息学院副院长     |
|       | 郭 庆       | 桂林电子科技大学教务处处长       |
|       | 郭宝龙       | 西安电子科技大学教务处处长       |
|       | 徐江荣       | 杭州电子科技大学教务处处长       |
|       | 蒋 宁       | 电子科技大学教务处处长         |
|       | 蒋乐天       | 上海交通大学电子工程系         |
|       | 曾孝平       | 重庆大学通信工程学院院长        |
|       | 樊相宇       | 西安邮电大学教务处处长         |
| 秘 书 长 | 吕抗美       | 中国电子教育学会高教分会秘书长     |
|       | 毛红兵       | 西安电子科技大学出版社社长助理     |

## 前 言

自 1899 年古列尔莫·马可尼的无线电通信试验获得成功,以及 1945 年 Arthur C. Clarke 提出“地球外中继”思想,卫星通信至今已经经过了多次技术的更新换代。空间探测与卫星通信领域涉及的多项技术不但有力地支持了通信技术的发展,也极大地促进了陆地移动通信、电信业务、互联网业务等的长足发展,并在卫星电视广播、远程教学和医疗、全球军事通信、紧急救援系统、远洋运输等方面得到了具体的应用和拓展。近年来,我国空间通信及卫星技术不断发展,如我国的天链一号卫星和二号卫星、天通一号卫星、北斗二代卫星系统、实践十三号 Ka 频段大容量卫星和多个型号的高分卫星相继成功发射和运行,天宫二号与神舟十一号成功交会对接,嫦娥计划有条不紊地进行,未来的火星探测任务顺利实施,这些都一步一步夯实了我国空间科学技术大国和强国的地位。

未来的通信卫星不但可以成为空间中继器、路由器、转发器进行组网,还能成为空间站的组成部件,完成复杂的空间任务。未来的侦察卫星、遥感卫星和资源卫星将提供地球及其周围空间更加翔实的图像和数据信息。未来的大型卫星可能以模块化的方式在轨道上组合,而不是依赖大推力的火箭单次发射,卫星寿命将更长,并可更换和增加模块。未来的小卫星、微小卫星的发射成本将更加低廉,功能也更加丰富多样,成为类似于无人机的低成本多应用平台。未来的空间旅游将成为可能,普通人接受一些基本的训练就可以像开车一样在太空遨游。未来的深空探测将到达更远的地方,探寻人类与宇宙的起源,探索更多未知的宇宙空间。

本书分为三篇,共二十章,第一篇(第 1~12 章)主要介绍卫星通信理论与技术,第二篇(第 13~17 章)主要介绍卫星组网技术,第三篇(第 18~20 章)主要关注未来的空间探测与行星际互联。第 1 章介绍了卫星通信的背景、历史、特点和通信频段;第 2 章介绍了轨道理论、卫星轨道、卫星发射和运载工具;第 3 章介绍了卫星的电源子系统,姿态和轨道控制子系统,遥测、跟踪、遥控和监测子系统,通信子系统,热量、温度控制子系统;第 4 章介绍了星-地链路的预算方法,包括无线电波的基本传输理论、通信系统噪声、卫星转发器等;第 5 章介绍了大气中的各种效应及其对卫星链路的影响,如雨和冰的影响、大气吸收、云和雾引起的衰减、对流层和电离层闪烁、法拉第旋转等,并给出了一些常用的减小大气效应影响的对策;第 6 章介绍了卫星链路中采用的差错控制编码理论;第 7 章介绍了卫星多址技术;第 8 章介绍了 GEO 轨道卫星系统,

如国际海事卫星系统、瑟拉亚卫星系统、亚洲蜂窝卫星系统、北美移动卫星系统以及 TerreStar 系统；第 9 章介绍了国外跟踪与数据中继卫星系统的发展，以及我国的跟踪与数据中继卫星系统；第 10 章介绍了 DBS 卫星系统；第 11 章介绍了 VSAT 卫星系统；第 12 章介绍了卫星通信新技术，包括新型星上通信载荷技术、新型物理层技术、先进天线技术和更高频段的卫星通信技术；第 13 章介绍了卫星星座设计方法，区域性和全球覆盖星座设计，单层、多层卫星星座设计；第 14 章介绍了典型 LEO、MEO 轨道卫星系统，如 Iridium 系统和 Odyssey 系统等；第 15 章介绍了卫星定位的原理、实用中的卫星导航系统（如 GPS 和北斗系统等）；第 16 章介绍了空间信息网络协议，如基于 CCSDS 的协议体系、基于 TCP/IP 的协议体系和基于容延迟/中断网络的协议体系等；第 17 章介绍了 STK 仿真软件；第 18 章介绍了深空探测与深空测控、通信网涉及的先进技术；第 19 章开展了星际网络体系结构、关键技术、传输模式与星际互联的讨论；第 20 章阐述了 DTN 的设计思想、特性、路由策略和信息传输方式等。

本书在对卫星通信基本概念和基础理论介绍的基础上，围绕卫星通信网络技术的发展，从卫星星座设计基础、典型 LEO 和 MEO 卫星系统、现有的卫星导航与定位系统等方面展开论述，结合卫星通信仿真软件 STK，讨论卫星星座构型和布局，并在论述空间信息网络协议的基础上，对深空探测与深空测控、通信网和星际互联等未来人类的太空探测构想和体系开展分析，讨论了星际互联网络和空间 DTN 网络等方面的关键技术内容。

本书得到了国家自然科学基金（60672089、60772075、61071128、61661018）的支持，也得到了海南省重点研发计划高新技术项目（ZDYF2016010）、海南省自然科学基金项目（20166210、20166215）、海南省教育厅高等学校科学研究重点项目（Hnky2016ZD-5）和海南大学科研启动基金项目（kyqd1536）的支持。

本书由海南大学李晖、王萍和陈敏共同编著。李晖编写第 1、3、10~13 章和附录，并完成全书的统稿工作；王萍编写第 2、4~9 章；陈敏编写第 14~20 章。研究生石尧、李鹏翔和杨亚飞对本书的内容进行了校正。

由于作者水平有限，书中难免有欠妥之处，敬请读者不吝赐教。

作 者

2017 年 8 月

# 目 录

## 卫星通信技术篇

<b>第1章 概述</b> .....	2	3.2 姿态和轨道控制子系统 .....	24
1.1 背景 .....	2	3.2.1 自旋稳定 .....	25
1.2 卫星通信简史 .....	4	3.2.2 三轴稳定 .....	27
1.3 卫星的特点 .....	7	3.2.3 轨道控制 .....	29
1.4 卫星通信频段 .....	7	3.3 遥测、跟踪、遥控和监测子系统 .....	30
1.5 本章小结 .....	8	3.4 通信子系统 .....	31
参考文献 .....	9	3.4.1 转发器 .....	33
<b>第2章 轨道力学和发射装置</b> .....	10	3.4.2 天线 .....	35
2.1 轨道理论 .....	10	3.5 热量、温度控制子系统 .....	39
2.1.1 开普勒定律 .....	10	3.6 本章小结 .....	39
2.1.2 卫星运行轨道方程 .....	12	参考文献 .....	40
2.1.3 轨道参数 .....	13	<b>第4章 卫星链路预算</b> .....	41
2.1.4 卫星位置的确定 .....	14	4.1 基本传输理论 .....	41
2.1.5 常用卫星轨道 .....	15	4.1.1 功率通量密度 .....	41
2.2 卫星轨道摄动 .....	16	4.1.2 天线增益 .....	42
2.2.1 地球非中心引力的影响 .....	16	4.1.3 有效全向辐射功率 .....	42
2.2.2 其他摄动力的影响 .....	17	4.1.4 自由空间路径损耗 .....	43
2.3 卫星运行轨道的确定 .....	17	4.1.5 链路功率预算方程 .....	43
2.4 卫星发射和运载工具 .....	18	4.2 系统噪声 .....	43
2.4.1 卫星的发射速度 .....	18	4.2.1 噪声系数 .....	44
2.4.2 运载工具 .....	18	4.2.2 噪声温度 .....	44
2.4.3 发射轨道 .....	20	4.2.3 系统噪声温度的计算 .....	45
2.4.4 GEO卫星的发射 .....	20	4.2.4 接收系统品质因数 .....	46
2.5 本章小结 .....	21	4.3 卫星转发器的特性 .....	46
参考文献 .....	22	4.3.1 单载波饱和通量密度 .....	47
<b>第3章 卫星</b> .....	23	4.3.2 输入/输出回退 .....	47
3.1 电源子系统 .....	23	4.4 卫星链路性能 .....	48

4.4.1 上行链路载噪比	48
4.4.2 下行链路载噪比	49
4.4.3 交调噪声	49
4.4.4 链路总载噪比	49
4.4.5 链路余量	50
4.5 本章小结	50
参考文献	51

## 第5章 大气效应及其对卫星链路的影响

5.1 概述	52
5.2 雨和冰的影响	53
5.2.1 量化衰减	53
5.2.2 ITU-R 雨衰模型	54
5.2.3 雨去极化	56
5.2.4 ITU-R 去极化模型	58
5.2.5 降雨噪声	59
5.3 其他各种大气效应的影响	59
5.3.1 大气吸收	59
5.3.2 云和雾引起的衰减	60
5.3.3 对流层和电离层闪烁	60
5.3.4 法拉第旋转	61
5.4 降低大气效应影响的对策	61
5.4.1 功率控制	61
5.4.2 分集技术	62
5.4.3 自适应	63
5.5 本章小结	63
参考文献	63

## 第6章 卫星链路差错控制

6.1 差错控制编码理论	65
6.1.1 差错控制方式	65
6.1.2 信道容量	66
6.2 线性分组码	67
6.3 循环码	68

6.3.1 BCH 码	69
6.3.2 RS 码	69
6.4 卷积码	70
6.5 级联码与交织	71
6.6 Turbo 码	72
6.7 低密度奇偶校验码	74
6.8 本章小结	75
参考文献	76

## 第7章 多址技术

7.1 概述	77
7.2 频分多址	78
7.3 时分多址	80
7.3.1 帧结构	81
7.3.2 TDMA 网络同步	82
7.3.3 数字语音插空	83
7.4 码分多址	85
7.4.1 扩频与解扩	86
7.4.2 码序列同步	87
7.5 空分多址	88
7.5.1 卫星交换-频分多址	88
7.5.2 卫星交换-时分多址	89
7.6 本章小结	90
参考文献	91

## 第8章 GEO 轨道卫星系统

8.1 国际海事卫星(INMARSAT)系统	92
8.1.1 系统简介	92
8.1.2 空间段	93
8.1.3 地面段	94
8.1.4 用户终端	95
8.2 瑟拉亚卫星(Thuraya)系统	97
8.2.1 系统简介	97
8.2.2 空间段	97



8.2.3 地面段 .....	98	9.5 本章小结 .....	120
8.2.4 用户终端 .....	98	参考文献 .....	120
8.3 亚洲蜂窝卫星(ACeS)系统 .....	98	<b>第10章 DBS 卫星系统</b> .....	122
8.3.1 系统简介 .....	98	10.1 频率选择和极化 .....	122
8.3.2 空间段 .....	99	10.2 功率等级和转发器数量 .....	123
8.3.3 地面段 .....	99	10.3 卫星轨道间距 .....	123
8.3.4 用户终端 .....	100	10.4 转发器容量 .....	123
8.4 北美移动卫星(MSAT)系统 .....	100	10.5 数字卫星电视的比特率 .....	123
8.4.1 系统简介 .....	100	10.6 MPEG 压缩标准 .....	124
8.4.2 空间段 .....	101	10.7 DBS 中的差错控制 .....	127
8.4.3 地面段 .....	101	10.8 DBS 系统的组成 .....	128
8.4.4 用户终端 .....	101	10.9 家庭接收机室外单元 .....	129
8.5 TerreStar 系统 .....	101	10.10 家庭接收机室内单元 .....	130
8.5.1 系统简介 .....	101	10.11 本章小结 .....	131
8.5.2 空间段 .....	101	参考文献 .....	131
8.5.3 地面段 .....	102	<b>第11章 VSAT 卫星系统</b> .....	132
8.5.4 用户终端 .....	102	11.1 VSAT 系统设计思想 .....	133
8.6 本章小结 .....	102	11.2 网络体系结构 .....	134
参考文献 .....	102	11.2.1 单向方式 .....	134
<b>第9章 跟踪与数据中继卫星系统</b> ..	103	11.2.2 分离式双向方式 .....	134
9.1 系统概述 .....	103	11.2.3 双向方式 .....	135
9.1.1 系统组成及工作原理 .....	104	11.3 接入控制协议 .....	136
9.1.2 系统特点 .....	105	11.4 基本技术 .....	138
9.1.3 系统的通信业务和链路特性 .....	106	11.4.1 多址技术 .....	138
9.2 国外跟踪与数据中继卫星系统的 .....	108	11.4.2 信号格式 .....	142
发展 .....	108	11.4.3 调制、编码和干扰 .....	142
9.2.1 美国 TDRS 系统 .....	108	11.5 系统组成 .....	144
9.2.2 俄罗斯 SDRN 系统 .....	113	11.6 本章小结 .....	145
9.2.3 欧洲 EDRS 系统 .....	115	参考文献 .....	146
9.2.4 日本 DRTS 系统 .....	116	<b>第12章 卫星通信新技术</b> .....	147
9.3 美欧日 TDRSS 的联网互操作 .....	118	12.1 新型星上通信载荷技术 .....	147
9.4 我国的跟踪与数据中继卫星系统 .....	119	12.2 新型物理层技术 .....	153
		12.2.1 编码调制技术 .....	153

12.2.2 网络编码 .....	155	12.3.2 相控阵天线 .....	164
12.2.3 多载波技术 .....	156	12.3.3 智能天线 .....	166
12.2.4 多天线技术 .....	158	12.3.4 可重构天线 .....	167
12.2.5 链路自适应技术 .....	161	12.4 更高频段的卫星通信技术 .....	168
12.3 先进天线技术 .....	163	12.5 本章小结 .....	169
12.3.1 小型化、宽频带天线 .....	164	参考文献 .....	169

## 卫星网络技术篇

<b>第 13 章 卫星星座设计</b> .....	172	13.8.2 多层卫星星座设计 .....	195
13.1 辐射影响 .....	172	13.9 本章小结 .....	196
13.2 卫星轨道 .....	174	参考文献 .....	198
13.2.1 近赤道轨道 .....	174	<b>第 14 章 典型 LEO、MEO 轨道卫星系统</b>	199
13.2.2 对地静止轨道 .....	175	.....	199
13.2.3 倾斜圆轨道 .....	176	14.1 低轨道卫星系统 .....	203
13.2.4 椭圆轨道 .....	177	14.1.1 Iridium 系统 .....	204
13.2.5 太阳同步轨道 .....	178	14.1.2 Celestri 系统 .....	205
13.3 卫星覆盖和通信仰角 .....	180	14.1.3 Globalstar 系统 .....	206
13.4 星下点轨迹 .....	181	14.1.4 Skybridge 系统 .....	208
13.5 扫描角和波束 .....	182	14.1.5 Teledesic 系统 .....	209
13.6 区域性覆盖星座设计 .....	185	14.1.6 Orbcomm 系统 .....	209
13.6.1 $\delta$ 星座 .....	185	14.2 中轨道卫星系统 .....	211
13.6.2 $\sigma$ 星座 .....	186	14.2.1 Odyssey 系统 .....	211
13.6.3 $\Omega$ 星座 .....	186	14.2.2 ICO 系统 .....	212
13.6.4 地带性覆盖星座 .....	187	14.2.3 Spaceway 系统 .....	214
13.7 全球覆盖星座设计 .....	187	14.3 本章小结 .....	215
13.7.1 星间链路 .....	188	参考文献 .....	215
13.7.2 路由与切换 .....	189	<b>第 15 章 卫星导航与定位系统</b> .....	216
13.7.3 赤道轨道星座设计 .....	190	15.1 卫星导航系统概述 .....	216
13.7.4 极轨道和近极轨道星座设计 .....	191	15.2 卫星导航技术原理 .....	217
13.7.5 倾斜圆轨道星座设计 .....	192	15.2.1 时间参考系 .....	217
13.8 多层卫星星座设计 .....	193	15.2.2 空间参考系 .....	218
13.8.1 单层卫星星座存在的问题 .....	193	15.2.3 卫星定位原理 .....	222
		15.3 低轨卫星导航系统 .....	224

15.3.1	系统结构	224	16.3	CCSDS 与 TCP/IP 结合的 协议体系	247
15.3.2	工作原理	225	16.4	基于容延迟/中断网络的协议体系	247
15.3.3	系统误差	226	16.4.1	BP 协议	249
15.4	双静止卫星导航系统	226	16.4.2	汇聚层协议	249
15.4.1	系统结构	227	16.5	本章小结	250
15.4.2	工作原理	228	参考文献	250	
15.4.3	系统误差	229	<b>第 17 章 STK 仿真软件</b>	251	
15.5	GPS 导航系统	230	17.1	STK 的主要功能	251
15.5.1	系统结构	230	17.2	STK 具体模块介绍	252
15.5.2	工作原理	231	17.2.1	STK 基础模块	253
15.5.3	系统误差	232	17.2.2	分析模块	254
15.6	第二代卫星导航系统	233	17.2.3	综合数据模块	259
15.6.1	GLONASS 系统	233	17.2.4	STK 的扩展、集成和接口模块	260
15.6.2	GALILEO 系统	234	17.3	STK 仿真基础	261
15.6.3	北斗二代导航系统	234	17.3.1	基础分析	262
15.7	本章小结	235	17.3.2	STK 三维模型	263
参考文献	235		17.4	STK 仿真和应用	264
<b>第 16 章 空间信息网络协议</b>	236		17.4.1	STK 仿真	264
16.1	基于 CCSDS 的协议体系	236	17.4.2	STK 应用	265
16.1.1	CCSDS 协议分层结构	237	17.5	本章小结	268
16.1.2	SCPS 协议簇	240	参考文献	268	
16.1.3	CFDP 协议	242			
16.2	基于 TCP/IP 的协议体系	245			

## 深空探测与深空通信技术篇

<b>第 18 章 深空探测与深空测控、通信网</b>	270	18.4.3	数据压缩	273	
18.1	深空测控通信系统	270	18.4.4	天线组阵技术	274
18.2	深空通信网	271	18.4.5	深空光通信技术	276
18.3	深空测控通信要求	271	18.4.6	行星际网络技术	277
18.4	深空通信技术	272	18.4.7	自主与认知技术	279
18.4.1	调制技术	272	18.4.8	行星无线电科学探测技术	280
18.4.2	编码技术	272	18.4.9	太赫兹通信技术	280

18.5 本章小结 .....	281	20.1.2 DTN 的数据转发方式 .....	301
参考文献 .....	281	20.1.3 DTN 的路由选择 .....	301
<b>第 19 章 星际网络与星际互联</b> .....	<b>282</b>	20.1.4 DTN 的服务质量等级 .....	301
19.1 背景 .....	282	20.1.5 DTN 的流量控制和拥塞控制 .....	301
19.2 星际网络体系结构 .....	284	20.1.6 DTN 的时间同步问题 .....	302
19.3 星际网络关键技术 .....	284	20.1.7 DTN 的安全体系 .....	302
19.3.1 集束协议 .....	285	20.1.8 DTN 的信息分段和重组 .....	302
19.3.2 IP 地址划分 .....	286	20.1.9 DTN 的状态信息管理问题 .....	302
19.3.3 断续通信 .....	286	20.1.10 DTN 的应用层要求 .....	303
19.3.4 文件传输协议 .....	286	20.2 DTN 的特性 .....	303
19.4 星际信息传输模式 .....	287	20.3 DTN 的路由策略 .....	305
19.4.1 星际信息传输方式 .....	287	20.4 DTN 的信息传输方式 .....	308
19.4.2 容失传输 .....	291	20.5 本章小结 .....	308
19.5 星际互连网络 .....	292	参考文献 .....	309
19.5.1 网络业务模型 .....	293	<b>附录 A 频段的定义</b> .....	<b>310</b>
19.5.2 网络安全结构 .....	294	<b>附录 B 互补误差函数 <math>\operatorname{erfc}(x)</math> 与 <math>Q(z)</math> 函数</b> .....	<b>311</b>
19.5.3 频谱结构 .....	297	<b>附录 C 对数单位</b> .....	<b>313</b>
19.6 本章小结 .....	299	<b>附录 D 术语和缩略语汇编</b> .....	<b>316</b>
参考文献 .....	299		
<b>第 20 章 DTN 网络</b> .....	<b>300</b>		
20.1 DTN 的设计思想 .....	300		
20.1.1 DTN 的命名规则 .....	300		

# 卫星通信技术篇

中国科学院

## 卫星通信技术篇

随着科学技术的飞速发展，卫星通信技术已成为现代信息通信领域的重要组成部分。它不仅改变了传统的通信方式，还为全球范围内的信息传输提供了全新的解决方案。本文将从卫星通信的基本原理、发展历程、应用现状及未来展望等方面进行深入探讨。

卫星通信是指利用人造地球卫星作为中继站，在地球上的地面站之间进行信息传输的一种通信方式。其基本原理是利用卫星在高空轨道上接收并转发地面站发送的信号，从而实现远距离、大容量的通信。与传统的地面通信相比，卫星通信具有覆盖范围广、传输距离远、不受地形限制等优点。

卫星通信技术的发展经历了从第一代到第四代的过程。第一代卫星通信主要用于军事和科研领域，第二代则开始应用于民用领域。随着技术的不断进步，第三代和第四代卫星通信系统在容量、带宽和抗干扰能力等方面取得了显著突破，为现代社会的各行各业提供了更加稳定、高效的通信服务。

目前，卫星通信在多个领域得到了广泛应用。在军事领域，卫星通信是实现战略指挥和情报传递的关键手段；在民用领域，它广泛应用于移动通信、广播电视、气象观测、海洋渔业等方面。特别是在偏远地区和自然灾害发生时，卫星通信更是发挥着不可替代的作用。

然而，卫星通信的发展也面临着诸多挑战。首先是频谱资源紧张，随着卫星数量的不断增加，如何合理分配和协调频谱资源已成为亟待解决的问题。其次是发射成本高昂，大功率卫星的研制和发射费用巨大，这对发展中国家来说是一个沉重的负担。此外，卫星通信还面临着空间碎片威胁、信号延迟等问题。

尽管如此，随着国家对航天事业的重视和支持，卫星通信技术必将迎来更加广阔的发展前景。通过技术创新和产业升级，我国有望在卫星通信领域实现从跟跑到领跑的转变，为全球用户提供更加优质的通信服务。

未来，随着低轨卫星星座的部署和量子卫星等新技术的应用，卫星通信将实现全球无缝覆盖和超高速率传输。同时，卫星互联网的建设也将成为推动全球数字经济发展的关键基础设施。我们期待在不久的将来，卫星通信能够真正走进千家万户，为人类社会的进步做出更大的贡献。

总之，卫星通信技术作为现代信息通信的重要组成部分，其发展历程充满了艰辛与探索。未来，我们将继续加大研发投入，攻克关键技术难题，推动卫星通信产业高质量发展，为实现中华民族伟大复兴的中国梦提供坚实的科技支撑。

卫星通信技术的不断进步，不仅改变了我们的生活方式，也深刻影响着全球的政治、经济格局。在“一带一路”倡议和人类命运共同体的背景下，卫星通信作为连接世界的桥梁，将发挥着越来越重要的作用。我们坚信，通过国际间的合作与交流，卫星通信技术必将造福全人类，共创美好未来。

随着5G、6G等地面移动通信技术的快速发展，卫星通信与地面网络的深度融合将成为未来通信发展的主流趋势。通过天地一体化网络的建设，我们将实现全球范围内的无缝连接，为各行各业提供更加便捷、高效的通信服务。

总之，卫星通信技术的发展是一个长期的过程，需要政府、企业和社会各界的共同努力。我们将继续秉承开放、合作、共赢的理念，推动卫星通信技术的创新与发展，为全球用户提供更加优质、安全的通信服务，为构建人类命运共同体贡献智慧和力量。

最后，我们祝愿我国卫星通信事业蓬勃发展，取得更加辉煌的成就。同时，也希望全球各国能够携手共进，共同推动卫星通信技术的进步，为人类社会的繁荣与进步做出更大的贡献。

# 第 1 章 概 述

## 1.1 背 景

远距离通信的目的是使人们可以在任何时间、任何地点与任何人进行通信。1899年,古列尔莫·马可尼的跨越英吉利海峡 51 km 无线电通信试验获得成功。1901年,古列尔莫·马可尼在美国成功试验了加拿大的纽芬兰与英国的昆沃尔之间、横跨大西洋 3000 km 的越洋无线电通信。这使得洲际通信成为了可能。人造地球卫星作为中继转发站并用于通信系统已经有 50 余年的历史,它已经成为世界无线电通信体系中的重要组成部分。利用通信卫星,人们可以打电话、上网、收看卫星电视广播;利用气象卫星、资源卫星,人们可以进行天气预报、资源普查;利用导航和定位卫星系统,人们可以确定地理坐标和规划路径;利用侦察卫星,人们可以进行军事侦察和情报搜集;卫星脱离地球引力进入太阳系、进入太空,可以进行月球和深空探测;等等。目前,卫星通信和空间信息传输已经深入人们的日常生活中,与我们的生活、工作、娱乐等息息相关。

卫星通信的设想最早由 Arthur C. Clarke 于 1945 年 10 月在英国的无线电杂志《Wireless World》上发表的一篇文章中提出。由于高频无线电通信的可靠性很低(太阳黑子和电离层扰动可能造成高频无线电链路中断数天),因而信息传输速率也十分有限。虽然 19 世纪中期电报电缆已经实现了越洋铺设,但直到 1953 年跨大西洋传送语音信号才成为可能。Clarke 认为在地球赤道上空一定高度的轨道上设置三颗卫星(如在  $30^{\circ}\text{E}$ 、 $150^{\circ}\text{E}$  和  $90^{\circ}\text{W}$  的轨道位置)可以覆盖全球。1957 年 10 月,苏联成功发射了全球第一颗人造地球卫星 Sputnik 号,紧接着 1958 年 1 月,美国发射了 Explorer I 号椭圆轨道卫星,1965 年世界上第一颗对地静止卫星“晨鸟(Early bird)”号开始提供跨大西洋的电话业务。

各国发射的第一颗人造地球卫星情况见表 1-1。除上述国家外,加拿大、意大利、澳大利亚、德国、荷兰、西班牙、印度和印度尼西亚等国家也在准备自行发射或已经委托别国发射了人造卫星。

早期运载火箭的推力受限,只能将卫星发射到近地轨道,但是真正意义上的实用的人造地球卫星位于地球静止轨道上。20 世纪 60 年代末期,运载火箭技术得到了快速发展,人类有能力将一颗重 500 千克、容量为 5000 个话路的人造地球卫星送入对地静止轨道,这才开始了通信卫星快速发展的进程。随后,地球静止轨道卫星很快被用于开展越洋和洲际电话业务,并且首次实现了跨大西洋与太平洋的新闻和电视赛事转播。

之所以采用对地静止轨道(GEO, Geostationary Earth Orbit)卫星,是因为如果卫星与地球表面某一定点保持相对静止,则其卫星系统的天线不需要随时转动,卫星与地面链路的衰减较为固定。因此早期几乎所有大容量的通信卫星系统都优先选择对地同步/静止轨道作为卫星的运行轨道。单颗对地静止轨道卫星理论上可以覆盖地球表面积的三分之一,

因此,从理论上来说,一颗这种卫星就可以覆盖整个大洲,从而实现整个大洲的电视广播。这一点对于一个通信系统的部署来说十分有价值,而直接广播卫星电视和向有线电视网传送视频信号是静止轨道卫星的主要收入来源,其他业务还包括国际和地区电话、数据传输和互联网接入等。

表 1-1 各国发射的首颗人造地球卫星情况

国家	名称	发射时间	基本情况
苏联	Sputnik	1957年 10月4日	球形,直径58 cm,重83.6 kg,沿着椭圆轨道飞行,每96 min环绕地球一圈
美国	Explorer I	1958年 1月31日	重8.22 kg,锥顶圆柱形,高203.2 cm,直径15.2 cm,沿近地点360.4 km、远地点2531 km的椭圆轨道绕地球运行,轨道倾角 $33^{\circ}34''$ ,运行周期114.8 min
法国	试验卫星 A-1号	1965年 11月26日	重42 kg,运行周期108.61 min,沿近地点526.24 km、远地点1808.85 km的椭圆轨道运行,轨道倾角 $34^{\circ}24''$
日本	大隅	1970年 2月11日	重约9.4 kg,轨道倾角 $31^{\circ}07''$ ,近地点339 km,远地点5138 km,运行周期144.2 min
中国	东方红一号	1970年 4月24日	直径约1 m,重173 kg,沿近地点439 km、远地点2384 km的椭圆轨道绕地球运行,轨道倾角 $68^{\circ}5''$ ,运行周期114 min
英国	普罗斯帕罗	1971年 10月28日	重66 kg,近地点537 km,远地点1593 km

近年来,卫星同时向两个方向发展:一方面卫星的重量、体积、使用寿命和费用日益增加,但受制于运载火箭推力和尺寸的限制,单颗大卫星的发展有瓶颈;另一方面,微小卫星及其编队成为近年来卫星事业发展的主要方向。微小卫星的技术含量高,研制周期短(一年左右),研制经费低(数千万人民币量级),且可以进一步组网,以分布式的星座形成“虚拟大卫星”。与以往的大卫星相比,微小卫星具有很多优势:重量轻,体积小,再加上可批量生产,因而生产成本低;可以用小型火箭发射,或作为大型火箭的辅助载荷发射,发射成本低;能从战斗机甚至气球上发射,或利用地(水)面火炮发射,可以满足快速反应的需求。在语音、数据和视频传输方面,卫星通信也与光纤通信展开竞争:单根光纤通信的传输速率就可达4.5 Gb/s,这几乎是一个GEO卫星可以传输的最大速率。然而,光纤通常是以束为单位进行传输的,整束光纤的传输速率远远不止几个Gb/s。尽管如此,卫星系统在灵活性上可以对光纤系统形成竞争力。例如,利用卫星系统与某偏远地区、未开通有线网络的地区或灾区进行通信,只需要在地面安装一个地面终端即可,而光纤通信系统需要在当地铺设光缆。

中、低轨道(MEO/LEO, Middle Earth Orbit/ Low Earth Orbit)通信卫星是GEO卫星的有力补充,通常用于提供特定地区的通信业务,或者构成全球覆盖的通信网络。而单颗MEO/LEO覆盖范围有限,往往需要多颗卫星按照一定的卫星星座设计原则进行“定制”,才能够发挥其轨道高度低、地面终端仅需要较小发射功率就能与卫星建立“星-地”链路的优势。

## 1.2 卫星通信简史

苏联第一颗人造地球卫星的成功发射揭开了人类向太空进军的序幕,大大激发了世界各国研制和发射卫星的热情。Sputnik 号卫星只配备了一个反馈发射机,它不具备通信能力,但证明了利用大功率火箭将卫星送入一定高度轨道的可能性。该卫星携带一台无线电发报机,不停地向地球发出“滴—滴—滴”的信号。一些人围着收音机,侧耳倾听着初次来自太空的声音。另一些人则仰望天空,试图用肉眼在夜空中搜索人造地球卫星明亮的轨迹。但是,当时很少有人了解到,人造卫星是载人宇宙飞船的前导,科学家正在加紧准备载人空间飞行。1957年11月3日,苏联又发射了第二颗人造地球卫星,它的重量增加了5倍多,达到508公斤。这颗卫星呈锥形,为了在卫星上节省出位置,增设一个密封生物舱,不得不把许多测量仪器移到最末一节火箭上去。在圆柱形的舱内安然静卧着一只名叫“莱卡依”的小狗。小狗身上连接着测量脉搏、呼吸、血压的医学仪器,通过无线电随时把这些数据报告给地面。为了使舱内空气保持新鲜清洁,还安装了空气再生装置和处理粪便的排泄装置。舱内保持一定的温度和湿度,使小狗感到舒适。另外,还有一套自供食装置,一天三次定时点亮信号灯,通知莱卡依用餐。遗憾的是,由于当时技术水平的限制,这颗卫星无法收回,试验狗在卫星生物舱内生活了一个星期,完成全部试验任务后,只好让它安乐死,它成为宇航飞行中的第一个牺牲者。

Explorer I号卫星利用Juno I号火箭于1958年1月在美国卡纳维拉尔角空军基地发射升空。来自太空的第一个声音信号是美国总统艾森豪威尔的录音,即1958年12月升空的Score卫星发回了他的圣诞致辞。Score上的录音机可以存储时长为4分钟的信息,在运行35天后,卫星携带的电量耗尽。

此后,人们首先尝试利用高空气球作为反射体进行中继传输的验证,然后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性的通信卫星:电星(Telstar)1号和2号。这一系列卫星由贝尔实验室研制,采用C波段转发器,该卫星收发信机是根据陆地微波链路设备改装而成的,上行链路载波频率为6389 MHz,下行链路载波频率为4169 MHz,通信带宽为50 MHz。卫星上还配备了太阳能电池,可供收发信机连续工作。当时该系统进行了跨大西洋实况电视转播和多路电话测试,证明了利用卫星进行通信的可行性。

Telstar 1号和2号位于中高度轨道,其环绕周期分别为158分钟和225分钟,由于该卫星所处的轨道不是对地静止轨道,大西洋两岸的用户可见卫星的时间均是20分钟,因而可以利用这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,所以早期的应用在卫星上的电子元器件经常发生故障。但是,该系列卫星的发射证明了通信卫星的巨大价值和潜力,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射装备和能够提供有效通信的卫星。

1961年12月20日,美国国会建议国际电信联盟(ITU, International Telecommunication Union)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空间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,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,首批对国际



电信卫星组织(Intelsat)进行投资的12个国家的代表签署了一项创立协议。

1963年中期,LEO卫星占到卫星发射总数的99%。就当时所能制造的小型运载火箭而言,将卫星送入MEO或LEO轨道比送入GEO轨道更容易,因此早期卫星发射讨论的重点是运载火箭的可靠性和运载能力,而不是通信卫星。早期的火箭发射风险巨大,每4次发射只有1次可以完全成功。最初设计的商业通信卫星系统由12颗位于MEO轨道上的卫星联合构成,因此如果按照上述发射失败的概率,为了保证成功发射12颗卫星,预计需要发射48次,还不包括备份卫星的发射。若运行轨道上的卫星不足12颗,系统就无法提供24h的连续覆盖。而通信卫星系统必须保证每周7天、每天24h的全天候工作,否则花费巨大代价建立的卫星系统的效能将大打折扣。

相对而言,GEO系统采用1颗卫星便可以覆盖地球将近1/3的表面,按照上面的成功概率,全球覆盖需要发射12次。早期Intelsat选择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)于1965年4月16日发射升空,这颗卫星质量为36kg,具有两个带宽为25MHz的6/4GHz的转发器。随着卫星技术的不断完善和对卫星通信潜在价值的不断挖掘,越来越多的国家和地区认识到卫星通信不仅在洲际通信方面存在巨大的价值,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,卫星通信与组网事业的发展十分迅速。

第一个地区卫星系统是苏联采用的高椭圆轨道(HEO, Highly Elliptical Orbit)卫星——Molniya卫星系统,该系统的首颗卫星于1965年4月发射。因为苏联国土辽阔,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。第一个采用GEO卫星建立国家电信系统的是加拿大,它于1974年5月发射了Anik 1A卫星,两个月后美国发射了第一颗民用卫星WESTAR 1。印度尼西亚由3000多个岛屿组成,国土绵延1600多千米,采用GEO卫星系统比陆地电信系统有巨大优势,一颗GEO卫星便可以在整个地区内提供实时通信。GEO卫星通信的便捷为Intelsat带来了巨大的利益,Intelsat组织也得以壮大,形成了国际Intelsat联盟。Intelsat的巨大成功还激励了许多国家投资建立自己的卫星系统。

Intelsat成立于1964年,目前包括了140余个会员国,以及超过40个投资实体。2001年7月,Intelsat成为私营公司,自2002年5月开始,该公司通过典型网络、租用光纤以及遍布全球的服务点向用户提供端到端的服务。从1965年“晨鸟”号卫星开始,该机构每一次发射的系列卫星在容量和设计寿命上都有显著提升。这些卫星都是GEO轨道卫星,提供的业务包括互联网接入、DBS-TV、远程医疗、远程教育以及互动电视和多媒体等。

从20世纪70年代到80年代早期,用于国际上各个地区的民用电话和电视转播业务的卫星系统发展迅速,但是到了1985年,由于大容量、低延时、高质量的光纤和光缆的大规模铺设,几乎所有的电话业务都转换到陆地通信线路中。同时,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。美国在1985年以后扩展的频段多用于电视转播和极小孔径天线终端(VSAT, Very Small Aperture Terminal)系统。

到了1995年,Ku频段也面临耗尽的可能,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,人们开始研制Ka频段卫星系统。例如,欧洲卫星公司从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。未来将有数个Ka频段卫星系统投入使用。