

# 卫星与空间通信

余建国 张琦 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书主要介绍了卫星与空间通信的基本原理、关键技术及当前研究的热点问题,主要内容包括卫星与空间通信的发展现状及趋势,轨道与发射,系统结构,链路设计,多址方式,网络协议,光生太赫兹空间无线通信,分布式天线,超长距离传输,微弱信号接收与放大,高灵敏度的相干检测等关键技术。因教学和科研工作的实际需要,结合作者近 20 年来从事卫星与空间通信的教学及移动通信和光纤通信的产品研发经验,撰写了本书。

本书力求兼顾理论性、实用性、系统性和方向性,以此作为研究生或高年级本科生“卫星与空间通信”课程的教材,也可供从事卫星通信及其他相关领域的工程技术人员参考使用。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

### 图书在版编目(CIP)数据

卫星与空间通信/余建国,张琦编著. —北京:清华大学出版社,2022.2  
ISBN 978-7-302-59841-1

I. ①卫… II. ①余… ②张… III. ①卫星通信—研究 IV. ①TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 006729 号

责任编辑:鲁永芳

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:曹婉颖

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-83470000 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市君旺印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×240mm 印 张:12.75 字 数:254千字

版 次:2022年3月第1版 印 次:2022年3月第1次印刷

定 价:49.00元

---

产品编号:086109-01

# 前言

## P R E F A C E



卫星与空间通信自 20 世纪 40 年代提出以来,经过半个多世纪的发展逐渐成为空天地一体化网络,是实现万物互联的桥梁,也将成为互联网、物联网、车联网、舰联网、飞联网的重要组成部分。随着大数据、人工智能、自动驾驶等信息化、智能化新技术应用深度和广度日新月异的变化发展,卫星与空间通信已成为通信技术的重要发展方向。因教学和科研工作的实际需要,作者结合近些年的研究成果,撰写了本书。本书介绍了卫星与空间通信的基本原理,轨道与发射,系统与结构,链路设计,多址方式,网络协议,空间通信系统与网络用超长距离传输的放大器,光生太赫兹通信实现高频宽带、分布式天线、高灵敏度的相干探测等新技术。面向未来着重介绍了太赫兹波在卫星与空间通信中的应用,太赫兹丰富的频谱资源,超宽带的传输能力,高灵敏度的编解码技术,多入多出和多维复用技术可实现太比特每秒的传输。针对卫星与空间通信的高增益、高灵敏度通信需求介绍了基于虚拟多入多出系统(multiple input multiple output, MIMO)的分布式天线,基于小型化阵列或分形天线,极低码率调制,相干检测,可同时为一个或几个探测器提供理想直径的天线技术,可以接收更加微弱的信号,并与太阳系以外的航天器进行高速数据通信,降低航天器上通信系统的质量和能量消耗;介绍了相干光探测和高灵敏度的光接收机在卫星与空间通信中的应用,该技术比通常直接探测接收机的灵敏度提高了 3 个数量级,可达到量子噪声极限;针对卫星与空间通信距离遥远的问题,介绍了高功率线性功率放大器的工作原理,技术难点和自适应预失真算法。

本书系统和全面地介绍了卫星与空间通信系统的基本原理、关键技术以及当前研究的热点问题,力求兼顾理论性、实用性、系统性和方向性,以此作为研究生或高年级本科生“卫星与空间通信”课程的教材或参考。

感谢雷佳佳、董均国、常鑫、马洁、俞正、单飞龙等研究生同学及“卫星与空间通信”本科课程学习的历届同学为本书出版做出的努力!由于作者知识水平有限,书中难免有错漏之处,敬请读者不吝斧正。

余建国 张琦

2019 年 9 月



# 目录

## C O N T E N T S



<b>第 1 章 卫星与空间通信概论</b> .....	1
1.1 卫星与空间通信的概念 .....	1
1.2 卫星与空间通信的特点 .....	1
1.3 卫星通信发展简史 .....	2
1.3.1 国外卫星通信发展情况 .....	3
1.3.2 国内卫星通信发展情况 .....	4
1.4 通信卫星的分类 .....	7
1.4.1 按卫星轨道平面倾角分类 .....	7
1.4.2 按卫星轨道高度分类 .....	8
1.4.3 其他分类方式 .....	8
1.5 卫星通信组织的发展 .....	9
1.5.1 国际卫星通信组织 .....	9
1.5.2 国际海事卫星通信组织 .....	10
1.6 卫星通信发展趋势 .....	12
1.7 卫星通信在中国的特殊地位 .....	14
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 卫星的轨道与发射</b> .....	17
2.1 引言 .....	17
2.2 轨道及运动 .....	17
2.2.1 卫星轨道及同步卫星的优缺点 .....	17
2.2.2 卫星运动三定律 .....	19
2.2.3 卫星的圆轨道运动 .....	21
2.3 同步卫星与地面站间的几何关系 .....	22
2.4 卫星的发射 .....	23
2.4.1 人造卫星发射速度 .....	23
2.4.2 同步卫星发射轨道 .....	24
2.4.3 运载工具 .....	25

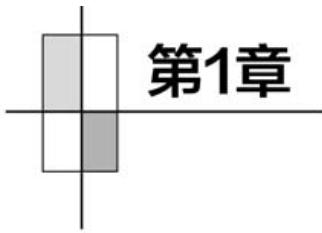
2.4.4 轨道对通信的影响 .....	26
参考文献 .....	27
<b>第3章 卫星与空间通信系统的组成 .....</b>	<b>28</b>
3.1 同步通信卫星的结构及子系统 .....	30
3.1.1 姿态和轨道控制系统 .....	30
3.1.2 全球波束天线 .....	32
3.2 通信卫星及地面站用天线 .....	34
3.2.1 常用参数 .....	34
3.2.2 卫星天线分类 .....	38
3.2.3 天线制作 .....	41
3.3 C频段和Ku频段 .....	43
3.3.1 低噪声下变频器 .....	43
3.3.2 C频段 .....	44
3.3.3 Ku频段 .....	45
3.3.4 高功率放大器类型 .....	45
参考文献 .....	46
<b>第4章 卫星与空间通信系统链路计算 .....</b>	<b>49</b>
4.1 通信链路的基本概念 .....	50
4.1.1 自由空间传播损耗 .....	50
4.1.2 等效全向辐射功率 .....	51
4.1.3 载噪比 .....	51
4.1.4 阈值载噪比 .....	53
4.1.5 地球站的品质因数 .....	53
4.1.6 卫星转发器的饱和通量密度 .....	53
4.2 传播损耗 .....	54
4.2.1 大气吸收损耗 .....	54
4.2.2 天线指向误差损耗 .....	56
4.2.3 极化误差损耗 .....	57
4.3 噪声干扰 .....	57
4.3.1 天线噪声 .....	58
4.3.2 噪声温度与噪声系数 .....	59
4.4 卫星通信链路计算 .....	61
4.4.1 上行链路载噪比 .....	61
4.4.2 下行链路载噪比 .....	62

4.4.3 卫星通信链路的总载噪比 .....	62
4.4.4 阈值备余量和降雨备余量 .....	63
参考文献 .....	64
<b>第 5 章 卫星与空间通信系统的多址方式 .....</b>	<b>66</b>
5.1 频分多址 .....	66
5.2 时分多址 .....	68
5.3 空分多址 .....	69
5.4 码分多址 .....	70
5.5 ALOHA 随机多址通信方式 .....	71
5.6 混合多址技术 .....	72
5.6.1 多频时分多址技术 .....	72
5.6.2 多频码分多址技术 .....	76
5.6.3 正交频分多址技术 .....	77
5.6.4 平行载波多址接入技术 .....	79
参考文献 .....	80
<b>第 6 章 卫星与空间通信协议及典型系统 .....</b>	<b>82</b>
6.1 卫星与空间通信网络的体系结构 .....	82
6.1.1 卫星通信系统的发展 .....	83
6.1.2 VSAT 卫星通信网络 .....	85
6.1.3 TES 网状电话网络 .....	87
6.1.4 个人地球站 .....	87
6.2 TCP/IP 协议存在的问题及解决办法 .....	87
6.2.1 网络拓扑 .....	88
6.2.2 协议体系 .....	89
6.2.3 在卫星信道中采用 TCP/IP 协议的意义 .....	92
6.2.4 在卫星信道中采用 TCP/IP 协议存在的问题 .....	92
6.2.5 提高卫星信道中 TCP 性能的几种解决方法 .....	94
6.3 卫星与空间通信网络的典型构型 .....	95
6.3.1 卫星通信网络的特征 .....	95
6.3.2 卫星通信网络的关键技术 .....	96
6.3.3 组播协议 .....	99
参考文献 .....	102
<b>第 7 章 空间通信系统与网络 .....</b>	<b>103</b>
7.1 空间通信 .....	103

7.2	空间通信的关键技术 .....	105
7.3	空间通信的功率放大技术 .....	106
7.4	空间通信的相干检测技术 .....	106
7.5	空间通信的极化接收技术 .....	107
7.6	空间通信的卡塞格林天线技术 .....	108
7.7	空间通信的天线阵列技术 .....	108
7.8	空间通信的虚拟 MIMO 技术 .....	111
7.9	空间通信的协作广播技术 .....	114
7.10	空间通信的自组织网络算法 .....	115
7.11	空间通信的网络节点结构 .....	117
7.12	空间通信的软件协议 .....	119
7.13	空间通信的研究现状及发展趋势 .....	121
	参考文献 .....	127
<b>第 8 章 高功率线性宽带功率放大器 .....</b>		<b>129</b>
8.1	概述 .....	129
8.2	高功率宽带线性放大器的基本原理 .....	131
8.3	高功率空间通信线性化放大器的结构 .....	132
8.4	高功率空间通信放大器的建模方法 .....	133
8.5	空间通信线性化高功率放大器的自适应算法 .....	135
8.6	高功率放大器的自适应数字预失真方法 .....	136
8.7	高功率放大器的数字预失真温度补偿方法 .....	137
8.8	高功率放大器的自适应数字预失真引擎 .....	138
8.9	高功率放大器的自适应预失真系统 .....	139
8.10	空间通信线性化高功率放大器的系统实现 .....	140
8.11	空间通信线性化高功率放大器的应用前景 .....	143
	参考文献 .....	144
<b>第 9 章 光生太赫兹空间无线通信 .....</b>		<b>147</b>
9.1	概述 .....	147
9.2	光生太赫兹空间无线通信的基本原理 .....	148
9.3	光生太赫兹的转换效率 .....	150
9.4	基于光外差技术的太赫兹波 OFDM 生成 .....	151
9.5	基于自适应多倍频的太赫兹波 OFDM 生成方法 .....	153
9.6	基于 ASIC 和基于 FPGA 的太赫兹无线通信系统 .....	154
9.7	光生太赫兹无线通信的信道模型 .....	155

9.8	光生太赫兹空间无线通信波束对准技术 .....	157
9.9	低复杂度、低功耗的高速基带数字信号处理方法 .....	159
9.9.1	有效的硬件实现方法 .....	161
9.9.2	太赫兹基带数字信号处理算法的实现 .....	161
9.9.3	低复杂度、低功耗的高速基带数字信号处理算法 .....	162
9.9.4	太赫兹波系统中的线性和非线性 .....	162
9.9.5	OFDM 信号的损伤机理及补偿方案的硬件实现 .....	162
9.9.6	太赫兹集成电路设计和有效的硬件实现方法 .....	163
9.9.7	太赫兹高速通信实验系统并优化其传输性能 .....	163
9.10	太赫兹高速通信射频处理技术 .....	163
9.11	太赫兹频段晶体管模型的准确性 .....	167
9.12	光生太赫兹空间无线通信系统结构 .....	169
9.12.1	发送端和接收端数字信号处理算法的高效 FPGA/ASIC 实现 .....	171
9.12.2	基于光波-高谱效率矢量太赫兹波信号的产生技术 .....	171
9.12.3	基于外差数字相干探测的高频谱效率和高灵敏度太赫兹 信号接收 .....	172
9.13	光生太赫兹空间无线通信的应用前景 .....	172
	参考文献 .....	173
<b>第 10 章</b>	<b>卫星与空间通信系统未来发展趋势 .....</b>	<b>176</b>
10.1	宽带卫星通信的发展 .....	176
10.1.1	宽带卫星通信系统 .....	176
10.1.2	宽带卫星通信在中国的应用 .....	178
10.2	卫星激光通信系统 .....	184
10.2.1	国外卫星激光通信系统的发展 .....	184
10.2.2	国内卫星激光通信系统的发展 .....	186
10.2.3	卫星激光通信系统的组成 .....	187
10.3	卫星导航定位系统 .....	188
10.3.1	GPS 系统 .....	188
10.3.2	“北斗”卫星导航系统 .....	190
	参考文献 .....	191





## 第1章

# 卫星与空间通信概论

---

本章主要介绍卫星与空间通信的概念、特点、分类及发展历史,卫星与空间通信的优缺点,重要的国际组织,卫星与空间通信的发展趋势,以及卫星与空间通信在中国的发展情况。

## 1.1 卫星与空间通信的概念

卫星通信是指地球上包括地面、水面和低层大气中的无线电通信站之间利用人造地球卫星作中继站而进行的通信。

空间通信分为近空通信和深空通信。近空通信是指地球上的实体与地球卫星轨道上的航天器之间的通信。深空通信是指地球上的实体与处于月球及月球以外的宇宙空间中的航天器之间的通信。

卫星与空间通信是人类科技发展到一定阶段的必然产物,科技越发达,人类的活动范围越宽广。目前空间通信技术的前沿已达深空通信领域,人类即将进入万物互联的新时代。在科学技术高度发展的今天,各行各业都将打上时代的烙印。卫星与空间通信将是各国科学技术竞争的焦点。在天空飞行的卫星和宇宙飞船是国家和军事安全的首要保障,是国家的眼睛,也是首先可能被攻击的目标。导弹、飞机、船舶、汽车等运载工具的导航都离不开卫星;气象、农业、畜牧业、水利、海洋捕捞、航海运输等都和卫星与空间通信密切相关。

## 1.2 卫星与空间通信的特点

卫星与空间通信具有网络节点距离遥远、信号弱、接收灵敏度高、时延长、覆盖范围广、节点移动速度快、非固定通信的环境复杂等特点,它代表了一个国家通信网络技术的最高水平。

卫星的发展经历了从小型卫星到大型卫星再到小卫星网络的发展道路。小型卫星具有重量轻、体积小、成本低、研制周期短、轨道低、发射容易、生存能力强、风险小、技术含量也相对较高的特点。

同步轨道卫星具有覆盖范围大、通信距离远的特点,三颗卫星可覆盖全球,但在两极地区信号很弱,图 1-1 为三颗同步通信卫星覆盖地球表面的情况。同步轨道卫星还具有频带宽、容量大、机动性好、不受地理条件限制等优点,在通信可靠性方面也有较好的保证,表现为信号质量较好,通信较为稳定。此外,同步轨道卫星还具有费用与距离无关的特性,有多址能力,组网灵活,能够实现区域及全球个人移动通信。

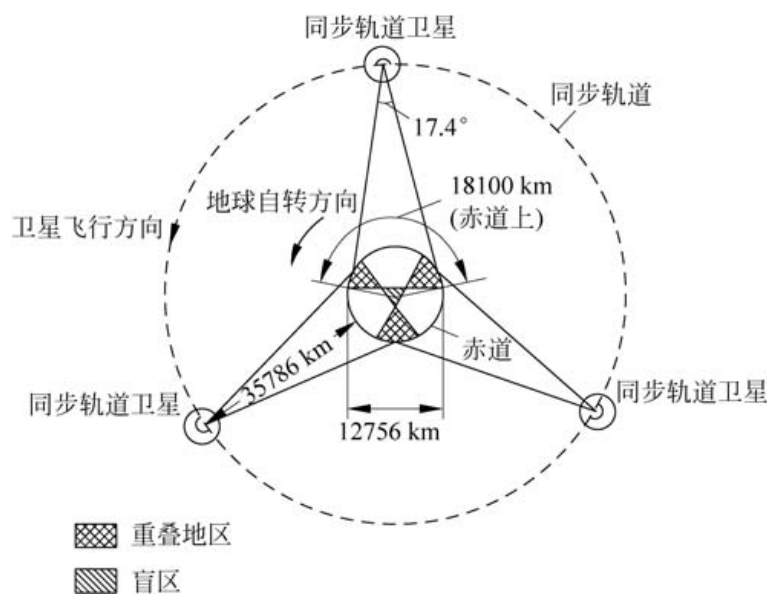


图 1-1 三颗同步通信卫星覆盖地球表面的情况

尽管卫星通信技术已较为成熟,但在技术上仍存在一些问题:如何实现更远距离的通信?如何实现更高速率的通信?如何实现更多卫星及航天器之间的联网通信及空天地一体化?人们需要研究先进的空间和电子技术来保障通信质量,降低服务成本,减小卫星信道传输时延带来的影响,增强用户体验,克服无线信道时变特性所带来的突发误码的影响,保证卫星高稳定、高可靠地工作等。

### 1.3 卫星通信发展简史

卫星就其用途来说可以分为通信卫星、空间探测卫星、气象卫星、广播电视卫星、导航卫星、军事卫星和资源卫星等大类,但是它们的通信原理基本相同。本书根据卫星通信教学的需要,主要介绍通信卫星的国内外发展情况。

### 1.3.1 国外卫星通信发展情况

1945年,克拉克(Author C. Clarke)提出3颗地球同步轨道卫星可覆盖全球的想法。

1954年,美国利用月球无源气球和铜针无源偶极子进行语音和电视传输的实验。

1957年10月,苏联发射世界上第一颗低轨人造卫星“斯普特尼克1号”(Sputnik-I)。

1958年12月,美国发射了世界上第一颗试验通信卫星,第一次通过卫星实现了语音通信,转播了艾森豪威尔总统的圣诞节祝词。

1960年,美国国防部发射了有源无线电中继卫星“信使”(Coverier),它可以接收和存储360000个字符,并可以转发给地球站。

1962年,美国电话电报公司(AT&T)发射了“电星”(Telsat),它可以进行电话、电视、传真和数据的传输。

1963年,美国国家航空航天局(NASA)发射了世界上第一颗同步卫星——“Syncom-I”试验卫星,是第一颗静止轨道卫星。

1964年,NASA发射了“Syncom-III”卫星,并成功转播了1964年东京奥运会的盛况。

1965年,美国发射了世界上第一颗商用同步卫星,将第一代国际电信卫星(Intelsat-I)“晨鸟”(Early Bird)送入地球同步轨道。它首先在大西洋地区开始进行商用国际通信业务,由美国通信卫星公司(COMSAT)负责管理。两周后,苏联成功发射了第一颗非同步通信卫星“闪电1号”(Molniya-I),对其北方、西伯利亚地区、中亚地区提供电视、广播、传真和其他一些电话业务。卫星通信由此进入了实用阶段。

1969年,美国军方发射了第一代战术通信卫星(Tacsat-I),可以转发10000条语音信道。

1970年2月11日,日本在内之浦成功发射其第一颗卫星“大隅号”(Tactical Satellite)。

1977年9月5日,美国发射了星际探测飞船“航海家1号”(Voyager-I)。

进入21世纪以来,全球范围卫星及应用已经实现了产业化发展,且呈现持续快速增长态势。据美国卫星产业协会(SIA)统计数据显示,2018年,全球航天产业规模为3600亿美元,全球年发射卫星总量达到314颗。卫星制造业总收入为195亿美元,其中,美国卫星制造产业收入115亿美元,占比约59%,其他国家总计80亿美元,占比约41%。

截至2019年1月9日,美国拥有卫星数量为901颗,数量遥遥领先;中国拥有卫星299颗,位列第二位;俄罗斯和日本卫星数量分别为153颗和87颗,位列第三位和第四位。

### 1.3.2 国内卫星通信发展情况

1970年4月24日,在酒泉卫星发射中心成功发射了我国第一颗人造地球卫星“东方红一号”(DFH-1)。

1975年11月26日,我国第一颗返回式遥感卫星在酒泉卫星发射中心发射成功。我国成为世界上第三个掌握卫星回收技术的国家。

1984年4月8日,我国发射了第一颗试验用同步通信卫星“东方红二号”(DFH-2),开始了我国自研卫星进行卫星通信的历史。

1986年2月1日,我国发射了第二颗“东方红二号”卫星,开始了我国自己的通信卫星进行卫星通信的历史。

1988年3月7日,我国发射了第一颗实用通信广播卫星“东方红二号甲”(DFH-2A),不久又相继成功发射了第二颗和第三颗卫星,它们分别定点于东经 $87.5^\circ$ 、 $110.5^\circ$ 、 $98^\circ$ 。这三颗卫星工作状况良好,在我国电视传输、卫星通信及对外广播中发挥了巨大的作用。

1990年2月4日,我国成功发射了“东方红二号甲-3”实用通信卫星。改变了边远地区收视难、通信难的状况,在我国电视传输、卫星通信及对外广播中发挥了巨大作用。

1990年4月7日,我国发射“亚洲一号”,这是我国第一颗商用通信卫星。

1997年5月12日,“长征三号甲”运载火箭发射了首颗“东方红三号”通信卫星,这是我国新一代中容量通信卫星。

1999年11月20日,我国成功发射第一艘宇宙飞船——“神舟一号”试验飞船,飞船返回舱于次日在内蒙古自治区中部地区成功着陆。

2000年,启动“北斗”卫星导航系统,又称“北斗一号”导航系统。

2001年1月10日,成功发射“神舟二号”试验飞船,其按照预定计划在太空完成空间科学和技术试验任务后,于1月16日在内蒙古自治区中部地区成功着陆。

2002年3月25日,成功发射“神舟三号”试验飞船,其环绕地球飞行了108圈后,于4月1日准确降落在内蒙古自治区中部地区。

2002年12月30日,成功发射“神舟四号”飞船。

2003年10月15日,发射第一艘载人飞船“神舟五号”,其载有航天员杨利伟。在轨运行14圈后成功着陆,我国成为继俄罗斯和美国后世界上第三个掌握载人航天技术的国家。

2005年10月12—17日,航天员费俊龙、聂海胜圆满完成“神舟六号”飞行任务,中国载人航天实现了2人5天、航天员直接参与空间科学实验活动的新跨越。

2007年,“嫦娥一号”卫星首次绕月探测成功,树立了我国航天的第三个里程碑。

2012年11月,“北斗二号”卫星导航系统建成。

2013年12月2日,“嫦娥三号”成功发射,萌萌的“玉兔号”月球车成功登陆月球并实现自动驾驶。

2015年3月30日,“北斗三号”试验系统首颗卫星升空。

2020年完成“北斗”卫星组网建设,提供全球定位服务。

下面具体介绍几个具有代表性的我国卫星发射的发展情况。

### 1. “东方红一号”

“东方红一号”(国际卫星标识符:1970-034A),是我国于1970年4月24日在酒泉卫星发射中心发射升空的第一颗人造地球卫星,同时也是“东方红”人造卫星系列的首颗卫星。“东方红一号”的成功发射标志着我国成为世界上继苏联、美国、法国和日本之后第五个能够独立发射人造卫星的国家。虽比1957年苏联发射第一颗人造卫星“斯普特尼克1号”晚了13年,但它的技术超过了前四个国家的第一颗卫星,卫星重量更是超过了前四个国家第一颗卫星的总和。图1-2为“东方红一号”卫星的实体拍摄图。

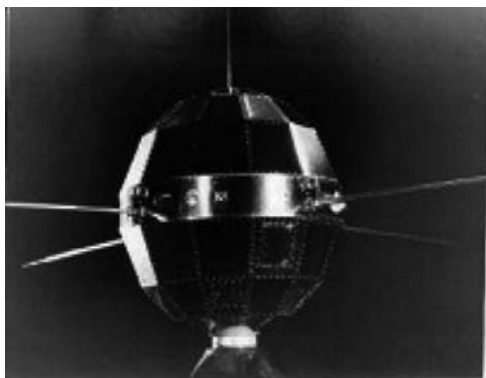


图1-2 “东方红一号”卫星

“东方红一号”卫星的主要任务是进行卫星技术试验、探测电离层和大气层密度。卫星为近似球形的72面体,质量为173 kg,直径约1 m,采用自旋姿态稳定方式,转速为120 r/min,外壳表面为按温度控制要求经过处理的铝合金材料,球状的主体上共有4条2 m多长的鞭状超短波天线,底部有连接运载火箭用的分离环。卫星飞行轨道为近地点439 km,远地点2384 km,轨道平面与地球赤道平面倾角为 $68.5^\circ$ 的近地椭圆轨道,绕地球运行一圈的周期为114 min。“东方红一号”卫星除了装有试验仪器外,还可以20.009 MHz的频率发射《东方红》乐曲。卫星运行期间,有无线电爱好者录下了“东方红一号”卫星广播的《东方红》乐曲,卫星上的仪器舱装有电源测轨用的雷达应答机、雷达信标机、遥测装置(包括电子音乐发生器和发射机)、科学试验仪器等。卫星进行了系列试验,探测电离层和大气密度。卫星采用银锌蓄电池作电源,电池寿命有限,卫星共运行了20天。

### 2. “东方红二号甲”

1988年3月7日,空间技术研究院研制的第一颗实用通信广播卫星“东方红二号甲”(图1-3)发射成功。

它属于我国的第二代通信卫星,其直径为2.1 m,总高为3.75 m,卫星发射质量为1044 kg。“东方红二号甲”的天线系统由一副双圆盘形全向天线、一副抛物面定向天线等组成。通信天线采用线极化方式,上行水平极化,下行垂直极化。测控全向天线采用圆极化方式。定向天线始终指向地面,保持其波束覆盖中国国土

95%以上的面积。主要用于国内通信广播和电视传输。

### 3. “东方红三号”

“东方红三号”卫星(图 1-4)是我国新一代通信卫星,主要用于电视传输、广播、通信及数据传输等业务。于 1997 年 5 月 12 日成功发射,后交付给中国通信广播卫星公司运营,更名为“中星六号”。



图 1-3 “东方红二号甲”卫星



图 1-4 “东方红三号”卫星

卫星上有 24 路 C 频段转发器,服务范围为我国的大陆、海南岛、台湾岛及近海岛屿。该卫星于 1997 年 5 月 12 日由“长征三号甲”火箭发射升空,5 月 20 日定点成功,定点位置是东经 125°的赤道上空,其东西及南北的位置误差均为 $\pm 0.1^\circ$ ,天线的俯仰及滚动误差均为 $\pm 0.15^\circ$ ,卫星设计工作寿命为 8 年。卫星长 2.2 m,宽 2.2 m,高 1.72 m,为双翼六面体,双翼展开后总长度 18.096 m,卫星重 1202 kg,24 个 C 波段转发器姿态控制,三轴稳定。

### 4. “北斗”卫星



图 1-5 第三代“北斗”卫星

“北斗”卫星导航系统(BDS)是我国独立自主建设的卫星导航系统,由两个独立的部分组成:一个是 2000 年开始运作的区域试验系统,另一个是正在建设中的全球导航系统。“北斗”系统建设发展经历了三步,图 1-5 为第三代“北斗”系统的卫星。

第一代“北斗”系统,官方名称为“北斗”卫星导航试验系统,也被称作“北斗一号”,由三颗卫星提供区域定位服务。从 2000 年开始,该系统主要在我国境内提供导航服

务。第二代“北斗”系统,官方名称为“北斗”卫星导航系统,也被称为“北斗二号”。“北斗二号”是一个包含 16 颗卫星的全球卫星导航系统,分别为 6 颗静止轨道卫星、6 颗倾斜地球同步轨道卫星、4 颗中地球轨道卫星。截至 2011 年 11 月,“北斗二号”的 10 颗卫星在中国投入服务。2012 年 11 月,“北斗二号”开始在亚太地区为用户提供区域定位服务。“北斗”卫星导航系统、美国全球定位系统(GPS)、俄罗斯全球导航卫星系统(GLONASS)和欧盟伽利略定位系统(Galileo)为联合国卫星导航委员会认定的四大核心全球卫星导航系统。

2015 年,中国开始建设第三代“北斗”系统(“北斗三号”),进行全球卫星组网。“北斗”卫星第三代导航系统空间段由 35 颗卫星组成,包括 5 颗静止轨道卫星、27 颗中地球轨道卫星、3 颗倾斜地球同步轨道卫星。第一颗“北斗三号”于 2015 年 3 月 30 日发射升空。截至 2018 年 8 月,已发射了 17 颗“北斗三号”在轨导航卫星,覆盖“一带一路”国家。2020 年完成建设提供全球定位服务。

## 1.4 通信卫星的分类

按照卫星轨道的倾角、高度、频段等的不同,可以把卫星轨道分为不同的类型。

### 1.4.1 按卫星轨道平面倾角分类

按照卫星轨道平面与赤道平面夹角的大小不同,通常把卫星轨道分为赤道轨道、倾斜轨道和极轨道,如图 1-6 所示。

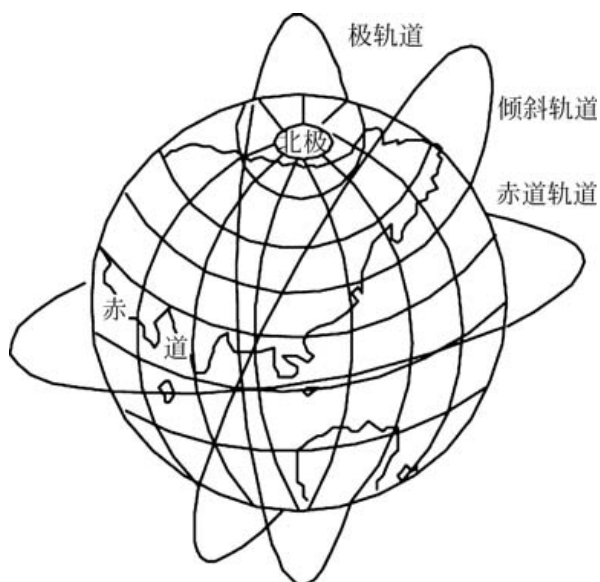


图 1-6 卫星轨道

(1) 赤道轨道: 轨道面与赤道面重合,静止卫星的轨道就位于此轨道平面内,称为静止轨道。

(2) 倾斜轨道: 轨道面与赤道面成一个夹角, 倾斜于赤道面。在倾斜轨道上运行的卫星是非静止卫星, 我国 20 世纪 70 年代发射的第一颗人造卫星“东方红一号”就是在倾斜轨道上运行的非静止卫星。

(3) 极轨道: 轨道面穿过地球的南、北两极, 即与赤道面垂直。在极轨道上运行的卫星是非静止卫星, 这种卫星不能对地球表面上任一点的相对位置保持不变。因此, 若想用一颗在极轨道运行的卫星为地球上某一特定的区域提供不间断的通信服务是不可能的, 通常需要大量的、运行在极轨道的非静止卫星才能覆盖全球, 为全球提供不间断的服务。

### 1.4.2 按卫星轨道高度分类

根据卫星运行轨道距离地球表面的高度, 通常将卫星轨道分为以下 4 类。

(1) 低轨道(LEO): 距离地球表面 700~1500 km。具有信号传播衰减小、时延短、可实现全球覆盖的优点。

(2) 中轨道(MEO): 距离地球表面 10000 km 左右。兼有低轨和高轨系统的折中性能, 信号传播衰减、时延和系统复杂度等均介于低轨和高轨系统之间。

(3) 高椭圆轨道(HEO): 距离地球表面最近点 1000~21000 km, 最远点 39500~50600 km。卫星位于最常用的赤道平面。

(4) 静止轨道(GEO): 距离地球表面 35786 km。

### 1.4.3 其他分类方式

另外还有其他的分类方式。如按照通信范围, 卫星可以分为国际通信卫星、区域性通信卫星、国内通信卫星。按照用途, 卫星可以分为综合业务通信卫星、军事通信卫星、海事通信卫星、电视直播卫星、气象卫星等类型。按照转发能力, 卫星可以分为无源(无星上处理能力)、有源(有星上处理能力)两种类型。按重量, 可以将卫星分为大型卫星(大于 1000 kg, 大于 1 亿美元), 小卫星(500~1000 kg, 0.5 亿~1 亿美元), 微小卫星(100~500 kg, 500 万~2000 万美元), 微卫星(10~100 kg, 200 万~300 万美元)和纳卫星(小于 10 kg, 小于 100 万美元)。按照频段可以将通信卫星分为 C 频段卫星、Ku 频段卫星、Ka 频段卫星、L 频段卫星和 X 频段卫星等。

在卫星通信中, 工作频率的选择是一个十分重要的问题, 它将直接影响到整个卫星通信系统的通信容量、质量、可靠性、卫星转发器和地球站的发射功率、天线口径的大小, 以及设备的复杂程度和成本的高低等。一般来说, 在选择卫星通信的工作频率时, 必须根据需要与可能结合的原则, 着重考虑下列因素:

- (1) 工作频段的电磁波应能穿透电离层;
- (2) 电磁波传播损耗应尽可能小;
- (3) 电磁波传播中天线系统引入的外部噪声要小;
- (4) 应具有较宽的可用频带, 与地面现有通信系统的兼容性要好, 且相互间的

干扰要小；

(5) 通信设备的质量要轻,功率要小；

(6) 要尽可能利用现有的通信技术和设备；

(7) 应较为合理地使用无线电频谱,与其他通信、雷达等电子系统或电子设备之间的干扰要小。

鉴于以上各方面,卫星通信的工作频率范围在 300 MHz 至 300 GHz,见表 1-1。微波频段可以根据波长长短分为分米波段(又称为特高频(UHF),频率为 0.3~3 GHz,波长为 10~100 cm)、厘米波段(又称为超高频(SHF),频率为 3~30 GHz,波长为 1~10 cm)和毫米波段(又称为极高频(EHF),频率为 30~300 GHz,波长为 1 mm 至 1 cm)。卫星通信所用的频段大多是 C 波段或 Ku 波段。

表 1-1 微波频段和所对应的频率范围

单位: GHz

微波频段	频率范围	微波频段	频率范围	微波频段	频率范围
L	1~2	K	18~26	E	60~90
S	2~4	Ka	26~40	W	75~110
C	4~8	Q	33~50	D	110~170
X	8~12	U	40~60	G	140~220
Ku	12~18	V	60~80	Y	220~325

1~2 GHz 为 L 频段,主要应用于移动业务; 2~4 GHz 为 S 频段,主要应用于移动业务; 4~8 GHz 为 C 频段,主要应用于固定业务; 8~12 GHz 为 X 频段; 12~18 GHz 为 Ku 频段,主要应用于固定业务; 18~26 GHz 为 K 频段; 26~40 GHz 为 Ka 频段,主要应用于宽带传输业务; 33~50 GHz 为 Q 频段; 50~75 GHz 为 V 频段。

世界无线电大会(World Administration Radio Congress, WARC)对同步卫星、移动卫星、广播卫星及卫星间通信等业务均作了相应规定。考虑的原则有电离层不成为障碍,大气吸收尽量小,大气、宇宙干扰尽可能避免(特别是通信业务之间的干扰),具有较宽的可用频带等。

## 1.5 卫星通信组织的发展

卫星通信始于 1964 年,当年在美国成立了国际通信卫星组织(INTELSAT)。1965 年,美国发射了第一颗商用通信卫星“晨鸟”(Early Bird)。之后,卫星通信技术及其应用蓬勃发展,取得了巨大的成功。就卫星通信组织来说,可以分为国际通信卫星组织和国际海事卫星组织(INMARSAT)。

### 1.5.1 国际卫星通信组织

INTELSAT 成立于 1964 年,有成员国 142 个,是世界性的商业卫星通信组

织,为世界各国提供长期(租赁卫星或转发器)或短期(频道或节目等)卫星通信服务。从成立至今,不断有卫星发射成功并运行,也不断有卫星发射失败或卫星寿命到期而失效。例如,从1965年4月至1984年3月,INTELSAT发射了五代、6种不同性能的卫星共计35颗,除6颗卫星因运载火箭和远地点发动机故障而发射失败,其余29颗卫星均被送入预定的静止轨道位置,承担了大部分国际通信业务和全球性电视广播;1969年到1973年,INTELSAT采用C频段建立了60多个标准地球站,30 m天线,基本技术体制频分多路复用/调频/频分多址(FDM/FM/FDMA);1972年到1984年,INTELSAT在160多个国家和地区建立了500多个地球站发射大容量卫星增加Ku频段和L频段,采用数字通信手段;1984年8月前后,INTELSAT利用部署在大西洋、太平洋、印度洋上空的15颗国际通信卫星,为遍布世界各地的170多个国家或地区提供电话、电传、电报、电视和数据传输等电信业务,出租卫星通信转发器信道,为部分国家建立国内卫星通信链路,还为世界各国船只提供部分海上移动通信服务。为满足国际通信的需求,INTELSAT还发射了3颗等效通信容量为1.5万话路的国际通信卫星“V-A号”改进型卫星。1998年成立“新天空”公司,拥有6颗卫星,重点在于多媒体卫星业务等。截至目前,通信卫星已发展到第八代,一代比一代体积大、质量重、技术先进、通信能力强、寿命长。

### 1.5.2 国际海事卫星通信组织

INMARSAT原为一个政府间的合作组织<sup>[1]</sup>,最早提供的业务仅限于为航行在世界各地的船舶提供全球通信服务。后来,INMARSAT将通信服务范围扩大到陆地移动的车辆和空中航行的飞机。在1994年12月的第十次特别大会上,更名为“国际移动卫星组织”,但英文编写仍为“INMARSAT”,成为唯一能提供全球海上、空中、陆地、救援、定位等全方位卫星移动通信服务的组织。INMARSAT组织于1979年7月16日成立后,先后租用了美国的“Marisat”卫星、欧洲空间局(ESA)的“Marecs”卫星和INTELSAT的“IS-V”卫星来进行以全球海事移动卫星业务为主的运营工作。到1982年,INMARSAT又发射3颗海事通信卫星,建立了世界上第一个海事卫星通信系统,其中大部分通信容量供美国海军使用,小部分通信容量向国际商船开放,形成了第一代海事卫星通信系统。第二代卫星是INMARSAT发射了自己的专用卫星。第三代卫星功能更强,除了具有1个全球波束外还具有5个点波束,地面终端实现了小型化。

INMARSAT现拥有美国、英国、日本、挪威等81个成员国,我国在1979年加入该组织。经过近20年的发展,截至1999年,全球使用INMARSAT卫星的国家超过160个,用户已有16万多,中国用户有6000多。1999年改制为股份制公司并成功上市,至今运转良好,是全球移动卫星通信业务的主要提供者,在世界移动卫星通信领域占有极其重要的地位。INMARSAT系统是全球唯一同时承担卫星移

动通信和遇险安全通信的卫星通信系统。INMARSAT 系统成立时间早、占有市场份额大、运营良好、终端类型多、业务种类全面。INMARSAT 系统最初由各国政府投资组建,影响广泛。INMARSAT 系统通信体制成熟,卫星先进,地面站遍布全球。各国军方都将 INMARSAT 卫星通信系统作为军用通信系统的重要组成部分。INMARSAT 海事卫星通信系统提供海事、航空、陆地移动卫星通信和信息服务,包括电话、传真、低速数据、高速数据及网络应用互联网协议(IP)数据等多种业务类型,其应用遍布海上作业、矿物开采、救灾抢险、野外旅游、军事应用等各个领域。1999 年中国驻南斯拉夫联盟大使馆被炸时,驻南联盟使馆的记者正是通过海事卫星电话把这个消息传到新华社。科索沃战争也采用了 INMARSAT 设备为主要通信设备。伊拉克战争期间,中央电视台赴前线记者发送回国的语音和图像等战地报道也是通过海事卫星通信系统。印度洋海啸后,我国派出的地震救援队带去的通信设备也是海事卫星电话。2008 年,我国南方的抗雪救灾,地面通信出现大面积故障,很多现场指挥就是用海事卫星电话。INMARSAT 通信体制和技术参数通信体制系统采用了 FDMA/TDM/TDMA/SDMA/SCPC 等通信体制。系统采用了二进制相移键控(BPSK)、偏移四相相移键控(O-QPSK)、正交相移键控( $\Pi/4$ QPSK)、16 QAM 等调制方式。编码方式系统采用了卷积码、Turbo 码等编码方式。表 1-2 为 INMARSAT 移动终端标准分类,表 1-3 为 INMARSAT 通信卫星分布概况。

表 1-2 INMARSAT 移动终端标准分类

卫星类型	主要业务	备注
A	电话、传真、电传、数据	分陆地、海上两种规格,陆地采用便携折叠式
B	电话、传真、电传、数据	INMARSAT-A 的继续,采用数字技术
M	电话、传真、电中速数据	具有陆地、海上和车载技术与规格
C	600b/s 双向存储转发或电文	具有 GPS 接收系统,可提供定位业务
D	存储转发式电文或数据信息	航空站用于安全通信和飞机中的通信
I	实时数据信息	航空站用于驾驶舱和飞机的飞行安全控制
H		航空站提供信道驾驶舱语音和旅客电话

表 1-3 INMARSAT 通信卫星分布概况

区域	大西洋(西)	大西洋(东)	印度洋	太平洋
工作星	INMARSAT-2F4 55°W	INMARSAT-2F2 15.5°E	INMARSAT-2F1 64.5°E	INMARSAT-2F3 78°E
备用星	INMARSAT CMS-2F4 55°W	INMARSAT MCS-A 60°E	INMARSAT MCS-D 180°E	INMARSAT-F3 182°E

## 1.6 卫星通信发展趋势

自从 1964 年在美国成立了 INTELSAT<sup>[2]</sup>,并于次年发射了第一颗商用通信卫星(“晨鸟”)以来,卫星通信技术及其应用蓬勃发展,取得了巨大的成功。如 1997 年世界卫星通信市场总收入 512 亿美元,1998 年 12 月,全球在轨转发器 4241 个,尚在建造的转发器 1918 个,2005 年世界卫星通信市场收入达 4000 亿美元。

2004—2012 年的 8 年间,卫星通信消费市场比重增加最多,年均增长 5.9%;2012 年卫星宽带通信增长最快,为 25%。虽然市场主要在美国,但代表着行业发展的新趋势,其中卫星直播增长最快,广播和电视年均增长分别为 10.3% 和 6.5%。

全球卫星运营发展很快,但区域差别仍较大,卫星转发器服务也不平衡。例如,2012 年美国平均 30 万人一个转发器,在欧洲是平均万人一个,而在亚洲,是平均 600 万人一个。近几年,排名较后的国家也发展较快,排名有所提前,但前四位的排名变化不大,其营业收入仍占全球的 64%,可用转发器占全球的 60%,商业 C 频段和 Ku 频段转发器容量占全球的 61%。

在目前的通信卫星中,已采用许多先进技术,如氦粒子发动机、高能太阳电池和蓄电池、大天线和多点波束(Thuryu、Ases、Torss、Galileo 等卫星天线)、卫星星上处理器(窄带信道化器、数字波束成形网络和 Butler 矩阵放大器),以及射频功率动态按需分配等技术。这些技术的发展,对通信卫星和卫星通信的发展产生了深刻的影响。目前同步通信卫星正在向大型化和微型化两个方向发展,同时卫星通信向卫星移动通信方向演进,与互联网技术相结合并且向大容量、多波束、智能化的方向发展。低轨卫星群与蜂窝技术相结合,能够实现全球个人通信,甚小口径卫星终端站(Very Small Aperture Terminal, VSAT)被广泛应用,电视直播和数字声广播步入家庭和个人用户等。微小卫星具有较高的功能密度,发射方式灵活,研制成本低,应用灵活性强等特点。

### 1. 大型同步通信卫星

现在大型同步通信卫星的主要研究方向是增加容量,增大辐射功率,多波束。目前 INTELSAT 已发展到第九代卫星,INMARSAT 已发展到第三代卫星。均采用大功率放大器提高发射功率,具体包括固态功率放大器(SSPA),具有 10 W、16 W、20 W、30 W 等功率;行波管功率放大器(TWTA),具有 35 W、50 W、72 W、85 W、135 W 等功率。在覆盖范围方面具有全球、半球、区域、点波束、智能化等方向,能够提高星上处理能力,延长寿命,改进电池性能等。由于采用了离子推进技术,所以大型同步通信卫星能够向更高频段发展,微波交换 SS/TDMA 宽带处理及交换,具有调制、解调、再生、复接/分接、波束可调、赋形可变的作用,采用实时软件控制,具有 VSAT 主站的功能。

采用同步卫星实现移动通信。海事卫星可实现全球覆盖,多波束大型同步卫星可实现区域覆盖,可用于手机通信。例如亚太移动卫星(APMT)已在1999年发射,有16000条话路,兼容全球移动通信系统(GSM)和亚洲蜂窝内卫星系统(ACeS),2000年投入运用。

用小卫星实现移动通信,例如“铱星”系统是世界上第一个全球覆盖的手机卫星通信系统,已有72颗卫星入轨,设计寿命为8年,每年需要发射6颗替补卫星。全球星系统共有48颗卫星,于1999年6月建成中圆轨道系统(ICO),共12颗中高轨道卫星。该系统于1999年初首发,在2000年投入使用。在Ellipso系统中,共有17颗卫星,其中10颗在两个椭圆轨道上,7颗在赤道轨道上。该系统于2001年为赤道地区提供移动业务,2002年起提供全球通信服务。

## 2. 小型卫星通信地面站

甚小口径卫星终端站是卫星通信地面段技术的一项重大成就。VSAT是高技术的综合产物,采用通信专用超大规模集成电路、微波技术、固态功放、低噪声接收、调制解调、纠错编码、多址方式、分组交换、语音压缩编码、数字信号处理等技术,具有低旁瓣、小口径天线、网络管理软件化等特点。目前VSAT正由北美走向全球,发展极为迅速。目前多址方式主要有TDMA/SCPC/FDMA/CDMA/TDM/TDMA等主流体制。兼容VSAT符合发展中国家的需求。

## 3. 直播电视(DVB)

1993年12月,休斯公司(Hughes)成立美国直播电视集团,用户数超过350万。1998年初美国主要的公司有DirecTV(用户数360万)、Echostar(用户数100万)和Primestar(用户数200万),它们共拥有8颗卫星。这些系统都能向家庭直播几十至150多个频道电视,接收天线口径为0.45~0.8m。DirecTV从1994年开播以来年利润超过10亿美元,其中接收机售价已低至199美元,其销量远大于录像机、CD唱机、大屏幕电视、激光视盘(VCD)等。

## 4. 数字声广播(DAB)

世界无线电管理委员会在1992年(WARC92)为DAB(卫星和地面通信)划分了频段(1452~1492 MHz,2310~2360 MHz,2535~2635 MHz)。DAB要求能为车载、便携和固定接收机提供高质量双声道或多声道立体声节目,具有CD质量高、能抗多径和阴影等特点,能用通用接收机接收,为国际电信联盟(ITU)无线电通信部门(ITU-R789)建议推荐的数字声广播系统。掩码模式通用子带一体化编码与复用(MUSICAM)音频编码,采用子带压缩编码和采用正交频分复用编码作为编码方式。

## 5. 微小卫星

质量在1000 kg以下的人造卫星统称为“微小卫星”,具有研制经费少,研制周期短的特点,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,微小卫星具有卫星质量轻、体积小、生产成本低的特点,可以用小型火箭发射,也可以用大型火箭的辅助载荷发射。性价比较高,对于普通卫星来说,成本需要5亿~10亿元人民币,可以用5~10年,对于小卫星来说,成本1亿~5亿元人民币,可以使用3~5年,而对于微小卫星来说,成本只需要几千万元人民币,却可以使用2~3年。它可以提供专用系统,能够在星座之间相互组网,可以提供大卫星无法完成的特殊功能,使用高新技术,具有功能密度高的特点。

## 1.7 卫星通信在中国的特殊地位

中国地域辽阔,东西和南北跨度均超过5000 km,地形复杂,山区占31%,高原占26%,丘陵占10%,平原仅占31%。人口众多,拥有14亿人口,其中5亿人口在农村。自然灾害比较频发,全国有74%的省会城市以及62%的地级以上城市位于地震烈度7级以上危险地区。70%以上的大城市、半数以上的人口、75%以上的工农业产值,分布在洪水、地震等灾害频发地区。自然灾害已成为制约我国经济和社会发展的的重要因素之一。卫星通信在救灾应急事件的第一时间,有不可替代的重要作用。

### 1. 波束覆盖我国的区域卫星

波束覆盖我国的区域卫星,包括下列卫星:“亚洲一号”,寿命为12年;“亚洲二号”,寿命为15年;“亚太一号”,寿命为10年;“亚太-IIR”,寿命为15年;“东方红三号”(“中星六号”)寿命为15年;“中卫一号”,寿命为15年;“鑫诺一号”,寿命为15年;“中星八号”,寿命大于15年;“泛美PAS-A”等。

### 2. 我国广播电视卫星应用情况

目前我国在6颗卫星上拥有20多个转发器,能够传送中央电视台(现为中央广播电视总台)和地方台30多套电视节目,中央人民广播电台32路对外、对内广播节目(40多种语言)及地方广播电台20多套广播节目。其中中央电视台一、二、七套节目为模拟信号,用“亚太1A”卫星;中央电视台二、三、五、六、七、八套节目为数字压缩信号,用“亚星2号”卫星,使用C和Ku频段转发器;中央电视台四套节目用“亚星1号”,使用一个C频段转发器;“银河3R”“热鸟3号”使用国家电视标准委员会(NTSC)、逐行倒相(PAL)向亚太大部分地区覆盖。中央电视台三、四、九套节目使用“泛美”2、3、4、5号卫星,用数字压缩动态图像(MPEG)向全球传送。中央人民广播电台第一、第二套节目随同中央电视台第一套电视节目向全国传送。山东、四川、浙江、云南、贵州五省(区)电视台使用“亚太1A”卫星,采用模拟信号。广东、广西、湖南、湖北、江西、河南、福建、青海、辽宁、内蒙古、陕西等十八省(区)电视台使用“亚太2号”卫星数字压缩信号。

### 3. 广播电视村村通

为解决广大人民群众听广播难、看电视难的问题,1998年党中央、国务院决定

启动卫星广播电视村村通工程,第一轮工程至 2005 年结束。根据第一轮实施效果,2006 年党中央、国务院决定继续实施广播电视村村通工程,按照“巩固成果、扩大范围、提高质量、改善服务”的要求,构建农村广播电视公共服务体系。到 2010 年年底已全面实现了 20 户以上已通电的自然村全部通广播、电视。现已发送中央电视台 8 套节目和中央人民广播电台、中央国际广播电台 8 套广播。建立起传送 44 套电视节目和 44 套广播节目的卫星传送平台。使用“鑫诺”卫星 Ku 转发器,每个转发器 54 MHz,1 个转发器传送 12 套节目。第四个转发器的 1/3 频率资源用于 IP 广播和互联网接入等业务。

#### 4. 中国重要的卫星公司

目前我国主要有下面几个重要的卫星公司:中国通信广播卫星公司、中国东方通信卫星有限责任公司和鑫诺卫星通信有限公司。中国通信广播卫星公司成立于 1985 年,隶属原国家信息产业部,拥有“中星”五、六、八号卫星。中国东方通信卫星有限责任公司成立于 1995 年,是以原国家邮电部为主同时吸收国内主要用户共同投资组建的,拥有“中卫一号”卫星。鑫诺卫星通信有限公司是由原中国航天工业总公司、原国防科学技术工业委员会、中国人民银行和上海市创办的国有股份制公司,拥有“鑫诺一号”卫星。

#### 5. 中国重要的几颗卫星

##### (1) “中星八号”

“中星八号”卫星是新一代大容量同步轨道通信卫星,由美国劳拉空间系统公司设计生产,由“长征三号乙”火箭发射升空,轨道位置为东经 115.5°。该卫星使用 FS-1300 平台,总功率为 10000 W,星上共有 52 个转发器,其中 C 频段 36 个,占用 800 MHz 带宽; Ku 频段 16 个,占用 750 MHz 带宽。设计寿命大于 15 年,星上采用 3C-Ku 互联技术(两对 72 MHz 转发器)。在 C 频段大于 40 dBW,在 Ku 频段最高位 54 dBW。

##### (2) “中卫一号”

“中卫一号”通信卫星由中国东方通信卫星有限责任公司拥有,使用美国洛克希德·马丁公司的 A2100A 平台,总功率为 8394 W,星上共有 38 个转发器,其中 C 频段 18 个,占用 864 MHz 带宽; Ku 频段 20 个,占用 864 MHz 带宽。设计寿命为 15 年。在等效全向辐射功率(EIRP)方面,C 频段大于 39 dBW; Ku 频段最高为 54 dBW。

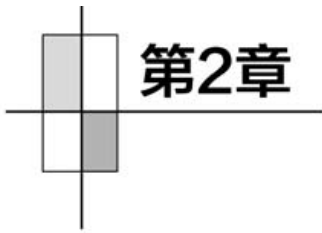
##### (3) “鑫诺一号”

“鑫诺一号”通信卫星由法国宇航公司制造,20 世纪 90 年代进口中国的一颗大容量通信卫星,服务于鑫诺卫星通信有限公司。该卫星使用法国宇航公司 SAPACEBUS 3000 平台,总功率为 5130 W。星上共有 38 个转发器,其中有 24 个 C 频段转发器(其中 23 个带宽为 36 MHz,1 个带宽为 54 MHz)和 14 个 Ku 频段转发器,带宽为 54 MHz。设计寿命大于 15 年。在 EIRP 方面,C 频段大于 36 dBW,

Ku 频段最高为 52 dBW。

## 参考文献

- [1] KOROLKOVA N, LEUCHS G, LOUDON R, et al. Polarization squeezing and continuous-variable polarization entanglement[J]. *Physical Review A*, 2019, 65(5): 052306.
- [2] LUGLIO M, ROMANO S P, ROSETI C, et al. Service delivery models for converged satellite-terrestrial SG network deployment: a satellite-assisted CDN use-case[J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 142-150.
- [3] TOH B Y, CAHILL R, FUSCO V F. Understanding and measuring circular polarization [J]. *Education, IEEE Transactions on*, 2018, 46(3): 313-318.
- [4] LIANGLIANG W, XIANG C, HONGZHOU T. Research and implementation of rateless spinal codes based massive MIMO system [J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2018, 2018: 1-9.
- [5] ARAPOGLOU P D, GINESI A, CIONI S, et al. DVB-S2X enabled precoding for high throughput satellite systems [J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2016, 34(3): 439-455.
- [6] MACEDO D F, GUEDES D, VIEIRA L F M, et al. Programmable networks—from software-defined radio to software-defined networking [J]. *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, 2015, 17(2): 1102-1125
- [7] MEHRAN F, NIKITPOULOS K, XIAO P, et al. Rateless wireless systems: gains, approaches, and challenges[C]//2015 IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing (ChinaSIP). *IEEE*, 2015: 751-755.
- [8] DU J, JIANG C, GUO Q, et al. Cooperative earth observation through complex space information networks[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(2): 136-144.
- [9] GISIN N, RIHORDY G, TITTLE W, et al. Quantum cryptography[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2002, 74: 145-195.
- [10] RICHARDSON T J, URBANKE R L. The capacity of low density parity-check codes under message-passing decoding[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2001, 47(2): 599-618.
- [11] BENNETT C H, BRASSARD C Z, EKERT A K. Quantum cryptography[J]. *Scientific American*, 1992, 10: 26-33
- [12] OKUTO Y, CROWELL C R. Energy-conservation considerations in the characterization of impact ionization in semiconductors[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(8): 3076.
- [13] MCINTYRE R J. The distribution of gains in uniformly multiplying avalanche photodiodes: theory[J]. *IEEE Trans. on Electron Dev.*, 1972, 19: 703-713.
- [14] MCINTYRE R J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes[J]. *IEEE Trans. on Electron. Dev.*, 1966, 13: 164-168.



## 第2章

# 卫星的轨道与发射

---

## 2.1 引言

围绕地球旋转的卫星(航天器)遵循着与行星绕太阳运动相同的定律,在很早以前,通过对自然现象的观察,人类已经掌握了很多有关行星运动的知识。根据这些观察,约翰内斯·开普勒(1571—1630年)推导了描述行星运动规律的三大定律。1665年,伊萨克·牛顿爵士(1642—1727年)根据他发现的机械定律推导出了开普勒定律,并且发展为引力场理论。

## 2.2 轨道及运动

### 2.2.1 卫星轨道及同步卫星的优缺点

卫星的轨道类型由其完成任务的需要而定,反之,卫星轨道的特性也决定了其任务特性。同步轨道上的卫星与陆地移动通信的基站类似,非同步轨道的卫星相当于使陆地移动通信的终端固定而基站运动。卫星设计的轨道不同,运动状态就不同,所需的卫星发射和动力系统也不同,由此决定了组网形式和业务类型。

#### 1. 按形状分类

按卫星轨道形状可以分为圆形轨道和椭圆轨道。圆形轨道上的卫星围绕地球等速运动,是通信卫星最常用的轨道;椭圆轨道在近地点附近的运行速度快,在远地点区域运行速度慢,可以利用在远地点速度慢这一特点,来满足特定区域的通信,特别是通过调整轨道参数,使其满足高纬度区域的通信。

#### 2. 按轨道高度分类

按卫星轨道高度可分为低轨(LEO)、中轨(MEO)和高轨(HEO)。

低轨道系统的卫星轨道高度在 700~2000 km, 卫星对地球的覆盖范围小, 一般用于特种卫星, 或由多颗卫星组成星座, 卫星之间由星间链路连接, 可以实现全球的无缝覆盖通信。低轨星座系统具有信号传播衰减小、时延短、可实现全球覆盖的特点, 但实现的技术复杂度高。此外, 随着轨道的降低, 大气阻力就成了影响卫星轨道参数的重要因素。一般来讲, 卫星轨道高度低于 700 km 时, 大气阻力对轨道参数的影响就比较严重, 修正轨道参数会影响到卫星的寿命。轨道高度高于 1000 km 时, 大气阻力的影响就可以忽略。

高轨卫星通信系统一般选用高度为 35786 km 的同步卫星轨道(GSO), 卫星位于赤道平面, 是最常用的轨道。高轨卫星的单颗卫星覆盖范围大。传播信道稳定, 理论上三颗高轨卫星便可覆盖除两极之外的所有地区。但高轨卫星系统的信道传播信号衰减大、时延长, 并且只有一个轨道平面, 容纳的卫星数量有限。目前运营的 Intelsat、Inmarsat、Thuraya 等很多系统都是高轨卫星系统。大椭圆轨道可以为高纬度地区提供高仰角的通信, 对地理上处于高纬度的地区也是一种选择。

中轨卫星的卫星轨道高度为 8000~20000 km, 具有低轨和高轨系统的折中性能, 中轨卫星组成的星座也能实现全球覆盖, 信号传播衰减、时延和系统复杂度等介于低轨和高轨系统之间。ICO 就是一个由 12 颗卫星组成的中轨卫星系统。

### 3. 按轨道倾角分类

按卫星轨道倾角来分可分为赤道轨道、极轨道和倾斜轨道。赤道轨道的倾角为  $0^\circ$ , 当轨道高度为 35786 km 时, 卫星运动速度与地球自转速度相同, 从地球上看上去, 卫星处于“静止”状态, 这也是通常所讲的静止轨道。当卫星轨道的倾角不是  $0^\circ$  或  $90^\circ$  时, 称为倾斜轨道。顺行轨道, 轨道倾角在  $0^\circ\sim 90^\circ$ ; 逆行轨道, 轨道倾角在  $90^\circ\sim 180^\circ$ 。不过一般而言, 通信卫星都是采用顺行轨道。卫星轨道倾角的选择是由用户所在地球位置和面积及用途决定。高纬度地区适合用极轨卫星, 中纬度地区适合用斜轨道卫星, 低纬度地区适合用同步轨道卫星。发射卫星的目的是用于国内还是国外, 区域还是全球, 民用还是军用等, 用途不同决定了卫星的运动轨道、发射高度、卫星质量、卫星寿命、动力系统、控制系统、供电系统等各不相同。

### 4. 同步轨道

卫星轨道周期与地球自转周期相同就称为同步轨道, 轨道的偏心率  $e=0$  时为圆轨道, 因此卫星在轨道上以恒定的角速度运动。

星下点轨迹就简化为一个点, 卫星永久保持在该位置, 从地球上看上去, 卫星好像固定在天空, 这时的轨道叫作对地静止轨道。

对地静止轨道具有非常多的优良性能, 是卫星通信最常用的轨道类型之一。主要优点如下。

(1) 从地球站看上去, 卫星是静止不动的, 因此地球站只需要一副天线和相对简单的跟踪系统, 对于小型固定地球站甚至不需要自动跟踪系统, 因此降低了地球站的制造成本。

(2) 单颗卫星的覆盖范围大。除去  $76^{\circ}\text{N}$  以北和  $76^{\circ}\text{S}$  以南的两极地区,理论上采用彼此间隔  $120^{\circ}$  的三颗静止卫星就可以覆盖整个地球表面。因此,目前多数的商用系统采用地球静止轨道卫星。

(3) 卫星到地球站的距离基本固定,因此信号传播时延和多普勒频移的变化小,便于系统设计并简化技术复杂度。

(4) 由于具有广域覆盖特性,非常便于卫星电视广播。

静止卫星的轨道面与赤道平面重合,同时静止卫星的高度和速度都是固定的,因此一般只用星下点在赤道上的经度来描述卫星位置即可。由于静止轨道只有一条,是稀缺资源,要想使用必须按照 ITU-R 的有关规则和程序进行申请和协调。

## 2.2.2 卫星运动三定律

开普勒定律是开普勒发现的关于行星运动的定律。他于 1609 年在他出版的《新天文学》上发表了关于行星运动的两条定律,又于 1618 年发现了第三条定律。开普勒很幸运地得到著名丹麦天文学家第谷·布拉赫 20 多年观察与收集的非常精确的天文资料。大约于 1605 年,根据第谷的行星位置资料,沿用哥白尼的匀速圆周运动理论,通过 4 年的计算,开普勒发现第谷观测到的数据与计算有  $8'$  的误差,开普勒坚信第谷的数据是正确的,从而他对“完美”的“神运动”(匀速圆周运动)发起质疑,经过大量计算,开普勒得出了第一定律和第二定律,又经过 10 年的大量计算,得出了第三定律。

### 1. 开普勒第一定律

开普勒第一定律指出:行星在一个围绕太阳的平面上运动,轨迹是其中一个焦点的椭圆。开普勒第一定律表明,小物体(卫星)绕大物体(地球)运行的轨迹是一个椭圆,地球的质心是卫星运动椭圆轨道的一个焦点,如图 2-1 所示。

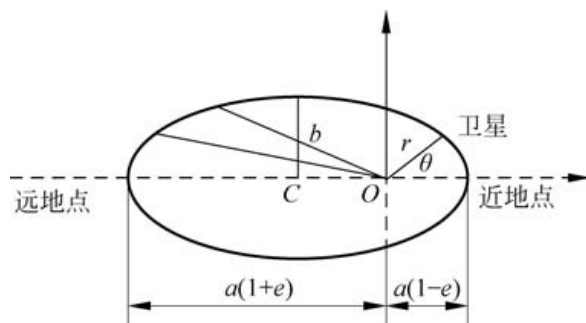


图 2-1 卫星轨道示意图

图 2-1 中, $r$  为向量长度, $r = \frac{P}{1 + e \cos \theta}$ ;  $\theta$  为中心角; $P$  为二次曲线参数。

由于地球和卫星的质量悬殊,图 2-1 中地球的质心(或地心) $O$  为椭圆轨道的一个焦点, $C$  为椭圆轨道的中心, $r$  为卫星到地心的距离, $a$  为椭圆轨道半长轴, $b$

为短半轴,  $e$  为偏心率。偏心率是一个非常重要的参数, 它决定了轨道的形状, 并且, 由

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \quad (2-1)$$

$e=0$ , 圆轨道,  $P=r$ ;

$e<1$ , 椭圆轨道,  $P=a(1-e^2)$ ,  $a=\frac{P}{1-e^2}$ ,  $b=a(1-e^2)^{\frac{1}{2}}$ ;

$e=1$ , 抛物线轨道,  $P=r(1+\cos\theta)$ , 太阳系人造卫星;

$e\neq 1$ , 双曲线轨道,  $P=a(1-e^2)$ , 银河系人造卫星。

由此可见, 只有  $e<1$  时才是一个围绕地球的闭环运动, 才能成为有用的通信卫星。如果  $e\geq 1$  会导致卫星从地球引力中脱离, 比如, 到月球和火星的探测器, 其运行轨道的偏心率  $e\geq 1$ 。

## 2. 开普勒第二定律

开普勒第二定律指出: 从太阳到行星的矢量在相同时间内扫过相同的面积, 该定律也称为面积定律。

开普勒第二定律表明, 卫星在椭圆轨道上的运动是非匀速的, 靠近近地点的速度快, 如图 2-2 所示。这就表明, 卫星在离地球较远时的速度慢, 可以利用这一特性, 提高地球上某一区域对卫星的能见度。

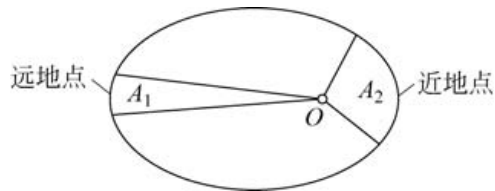


图 2-2 卫星单位时间内扫过的面积  $A_1$  和  $A_2$  相同

根据运动方程和机械能守恒原理, 可以推导出卫星在椭圆轨道上与地心距离为  $r$  处的瞬时运行速度为

$$v = \sqrt{\mu \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \quad (\text{km/s}) \quad (2-2)$$

根据式(2-2)可以算出卫星在近地点、远地点的瞬时速度。

在近地点,  $r_p = a(1-e)$ , 有

$$v_p = \sqrt{\frac{\mu}{a} \left( \frac{1+e}{1-e} \right)} \quad (\text{km/s}) \quad (2-3)$$

在远地点,  $r_a = a(1+e)$ , 有

$$v_a = \sqrt{\frac{\mu}{a} \left( \frac{1-e}{1+e} \right)} \quad (\text{km/s}) \quad (2-4)$$

圆轨道是  $e=0$  的特殊情况, 这时  $r=a$ , 理论上卫星具有恒定的速度, 从