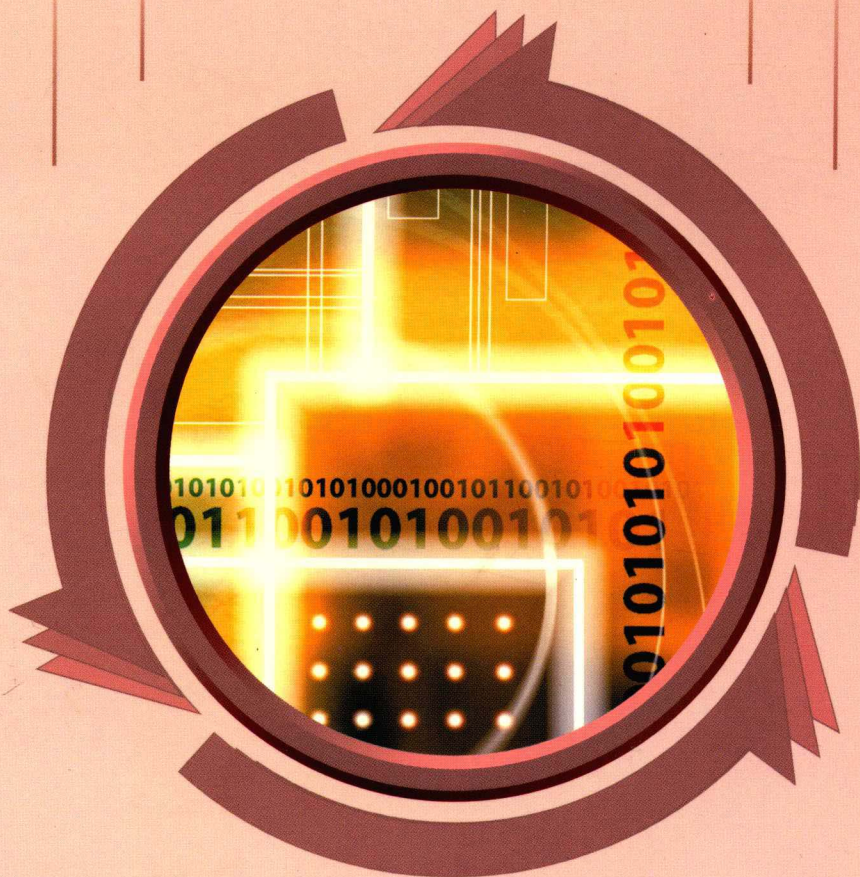


现代通信高技术丛书

卫星通信系统

王丽娜 主编
王兵 周贤伟 黄旗明 编著



Natio
版

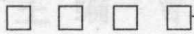
try Press
社

现代通信高技术丛书

内容简介

卫星通信系统

WeiXing TongXin XiTong



王丽娜 主编

王兵 周贤伟 黄旗明 编著



国防工业出版社
<http://www.ndip.cn>



内 容 简 介

本书对卫星通信系统的基本理论、基本技术,以及当前卫星通信领域研究的热点问题等做了比较系统、全面的阐述,基本反映了卫星通信发展的现状。

全书共分 10 章,内容包括卫星通信概述、卫星通信地球站、卫星通信线路、多址连接方式、星上处理技术和天线技术、卫星链路的调制技术、数字卫星链路的差错控制、VSAT 系统、卫星通信与互联网、卫星导航定位系统。

本书适合于高等院校通信专业的高年级学生和研究生,以及从事卫星通信专业的工程技术人员阅读,也可供从事相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

卫星通信系统 / 王丽娜主编; 王兵, 周贤伟, 黄旗明
编著. —北京: 国防工业出版社, 2006.5

(现代通信高技术丛书 / 周贤伟, 邓忠礼, 郑雪峰主
编)

ISBN 7-118-04344-3

I. 卫... II. ①王...②王...③周...④黄...

III. 卫星通信系统 IV. TN927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 007349 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19 $\frac{3}{4}$ 字数 448 千字

2006 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 37.00 元



(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

目 录

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 卫星通信概述 | 1 |
| 1.1 卫星通信的发展历程 | 1 |
| 1.2 卫星通信系统分类 | 3 |
| 1.3 卫星通信存在的主要问题 | 4 |
| 1.4 卫星通信系统的组成及工作过程 | 5 |
| 1.4.1 卫星通信系统的组成 | 5 |
| 1.4.2 卫星通信系统的工作过程 | 6 |
| 1.5 卫星运动轨道 | 7 |
| 1.5.1 卫星围绕地球运动的方程 | 7 |
| 1.5.2 卫星运动的基本规律 | 7 |
| 1.5.3 卫星轨道的分类 | 8 |
| 1.5.4 卫星轨道的摄动与分析 | 9 |
| 1.5.5 轨道形状和卫星速度的关系 | 11 |
| 1.6 通信卫星的组成 | 11 |
| 1.6.1 通信分系统 | 12 |
| 1.6.2 天线分系统 | 13 |
| 1.6.3 跟踪、遥测和指令(TT&C)分系统 | 15 |
| 1.6.4 控制分系统 | 15 |
| 1.6.5 电源分系统 | 15 |
| 1.7 卫星通信使用的频率 | 16 |
| 1.8 卫星通信技术的基本参数 | 17 |
| 1.8.1 有效全向辐射功率 | 17 |
| 1.8.2 噪声系数和等效噪声温度 | 18 |
| 1.8.3 载噪比 | 19 |
| 1.8.4 地球站的品质因数 | 20 |
| 1.8.5 卫星转发器饱和通量密度 | 21 |
| 1.8.6 门限载噪比 | 21 |
| 小结 | 22 |
| 参考文献 | 22 |
| 第 2 章 卫星通信地球站 | 23 |
| 2.1 地球站的分类及组成 | 23 |
| 2.2 地球站站址的选择与布局 | 24 |

| | | |
|------------|----------------|-----------|
| 2.2.1 | 地球站站址的选择 | 24 |
| 2.2.2 | 地球站的布局 | 27 |
| 2.3 | 地球站天线系统 | 27 |
| 2.3.1 | 对天线系统的基本性能要求 | 28 |
| 2.3.2 | 天线类型 | 29 |
| 2.3.3 | 馈源系统 | 32 |
| 2.3.4 | 跟踪伺服系统 | 33 |
| 2.4 | 地球站发射系统 | 39 |
| 2.4.1 | 对地球站发射系统的要求 | 40 |
| 2.4.2 | 高功率放大器(HPA) | 40 |
| 2.4.3 | 上变频器(UC) | 46 |
| 2.4.4 | 本机振荡器(泵源) | 48 |
| 2.5 | 地球站接收系统 | 49 |
| 2.5.1 | 对地球站接收系统的要求 | 50 |
| 2.5.2 | 低噪声放大器(LNA) | 50 |
| 2.5.3 | 下变频器(DC) | 53 |
| 2.6 | 其他系统和设备 | 55 |
| 2.6.1 | 终端系统 | 55 |
| 2.6.2 | 通信控制系统 | 55 |
| 2.6.3 | 电源系统 | 57 |
| 2.6.4 | 地球站回波抵消设备 | 60 |
| | 小结 | 62 |
| | 参考文献 | 62 |
| 第3章 | 卫星通信线路 | 63 |
| 3.1 | 星-地线路传输损耗 | 64 |
| 3.1.1 | 自由空间传播损耗 | 64 |
| 3.1.2 | 大气吸收损耗 | 65 |
| 3.1.3 | 馈线损耗 | 66 |
| 3.1.4 | 天线指向误差损耗 | 66 |
| 3.1.5 | 法拉第旋转 | 67 |
| 3.1.6 | 电离层闪烁 | 68 |
| 3.1.7 | 降雨衰减 | 68 |
| 3.1.8 | 多径衰落 | 69 |
| 3.2 | 卫星通信线路的噪声和干扰 | 70 |
| 3.2.1 | 天线噪声 | 71 |
| 3.2.2 | 交调噪声 | 73 |
| 3.2.3 | 其他干扰 | 74 |
| 3.3 | 卫星通信线路中的载噪比 | 77 |
| 3.3.1 | 上行线路载噪比与卫星品质因数 | 77 |

| | | |
|------------|--------------------------|------------|
| 3.3.2 | 下行线路载噪比与地球站品质因数 | 79 |
| 3.3.3 | 卫星转发器载波功率和交调噪声功率比 | 79 |
| 3.3.4 | 卫星通信线路的总载噪比 | 80 |
| 3.3.5 | 门限备余量和降雨备余量 | 82 |
| 3.4 | 卫星通信系统线路设计与计算 | 83 |
| 3.4.1 | 卫星通信系统线路设计步骤 | 83 |
| 3.4.2 | 卫星通信系统线路设计实例 | 83 |
| | 小结 | 93 |
| | 参考文献 | 93 |
| 第4章 | 多址连接方式 | 95 |
| 4.1 | 频分多址方式 | 95 |
| 4.1.1 | FDMA 终端设备的组成 | 97 |
| 4.1.2 | FDMA 方式的类型 | 98 |
| 4.1.3 | FDMA 方式的交调干扰与能量扩散 | 101 |
| 4.2 | 时分多址方式 | 107 |
| 4.2.1 | TDMA 终端设备的组成 | 108 |
| 4.2.2 | TDMA 方式的类型 | 110 |
| 4.2.3 | TDMA 的帧结构 | 111 |
| 4.2.4 | TDMA 帧长的选择 | 112 |
| 4.2.5 | 初始捕获与分帧同步 | 115 |
| 4.3 | 码分多址方式 | 118 |
| 4.3.1 | 直接序列扩频码分多址(CDMA/DS)方式 | 119 |
| 4.3.2 | 跳频码分多址(CDMA/FH)方式 | 119 |
| 4.4 | 空分多址方式 | 121 |
| 4.5 | 卫星交换 FDMA/TDMA 方式 | 122 |
| 4.5.1 | 卫星交换 FDMA | 123 |
| 4.5.2 | 卫星交换 TDMA | 124 |
| 4.6 | 随机(争用)多址方式 | 125 |
| 4.6.1 | 纯 ALOHA(P - ALOHA)方式 | 126 |
| 4.6.2 | 时隙 ALOHA(S - ALOHA) | 128 |
| 4.6.3 | 具有捕获效应的 ALOHA(C - ALOHA) | 129 |
| 4.6.4 | 选择拒绝 ALOHA(SREJ - ALOHA) | 129 |
| 4.7 | 可控(预约)多址方式 | 131 |
| 4.7.1 | 预约 ALOHA(R - ALOHA) | 131 |
| 4.7.2 | 自适应 TDMA(AA - TDMA) | 132 |
| | 小结 | 133 |
| | 参考文献 | 134 |
| 第5章 | 星上处理技术和天线技术 | 135 |
| 5.1 | 具有星上处理和星上交换能力的转发器 | 135 |

| | | |
|------------|--------------------|------------|
| 5.1.1 | 载波处理转发器 | 136 |
| 5.1.2 | 比特流处理转发器 | 138 |
| 5.1.3 | 全基带处理转发器 | 143 |
| 5.2 | 多波束卫星天线技术 | 145 |
| 5.2.1 | 多波束反射面天线 | 146 |
| 5.2.2 | 多波束透镜天线 | 147 |
| 5.2.3 | 多波束阵列天线 | 148 |
| 5.2.4 | 智能相控阵天线 | 151 |
| 5.3 | 星上抗干扰处理技术 | 152 |
| 5.3.1 | 天线自适应调零技术 | 152 |
| 5.3.2 | 智能自动增益控制 | 153 |
| | 小结 | 154 |
| | 参考文献 | 154 |
| 第6章 | 卫星链路的调制技术 | 155 |
| 6.1 | 模拟信号的调制 | 155 |
| 6.1.1 | FM 信号的产生 | 155 |
| 6.1.2 | FM 信号的解调 | 156 |
| 6.1.3 | FM 信号的传输特性 | 157 |
| 6.2 | 数字调制和解调 | 158 |
| 6.2.1 | 相移键控调制 | 159 |
| 6.2.2 | 频移键控调制 | 165 |
| 6.3 | 多载波调制 | 171 |
| 6.4 | 正交幅度调制 | 172 |
| 6.4.1 | QAM 的一般原理 | 172 |
| 6.4.2 | 叠加式 QAM | 175 |
| 6.5 | 编码调制 | 177 |
| 6.5.1 | 网格编码调制 | 177 |
| 6.5.2 | 分组编码调制 | 182 |
| 6.5.3 | 多路网格编码调制和多路分组编码调制 | 183 |
| | 小结 | 183 |
| | 参考文献 | 184 |
| 第7章 | 数字卫星链路的差错控制 | 185 |
| 7.1 | 差错控制方式 | 185 |
| 7.1.1 | 自动请求重发 | 185 |
| 7.1.2 | 前向纠错 | 187 |
| 7.2 | 差错控制编码的几个基本概念 | 188 |
| 7.2.1 | 信息码元和监督码元 | 188 |
| 7.2.2 | 许用码组与禁用码组 | 188 |
| 7.2.3 | 码重与码距 | 189 |

| | | |
|--------------|---------------------|------------|
| 7.3 | 线性分组码 | 190 |
| 7.4 | 循环码 | 196 |
| 7.4.1 | 循环码的特点 | 196 |
| 7.4.2 | 循环码的生成 | 197 |
| 7.4.3 | 汉明(Hamming)码 | 199 |
| 7.4.4 | BCH 码 | 200 |
| 7.4.5 | 格雷(Golay)码 | 200 |
| 7.4.6 | 里德-所罗门(RS)码 | 200 |
| 7.5 | 卷积码 | 201 |
| 7.6 | 级联码和交织技术 | 203 |
| 7.6.1 | 级联码 | 203 |
| 7.6.2 | 交织码 | 204 |
| 7.7 | Turbo 码 | 205 |
| 7.7.1 | Turbo 码编码 | 206 |
| 7.7.2 | Turbo 码译码 | 207 |
| 7.7.3 | 影响 Turbo 码性能的参数 | 208 |
| 7.7.4 | Turbo 码的性能 | 209 |
| | 小结 | 209 |
| | 参考文献 | 210 |
| 第 8 章 | VSAT 系统 | 211 |
| 8.1 | 组网方式及网络组成 | 211 |
| 8.1.1 | 组网方式 | 211 |
| 8.1.2 | VSAT 网组成 | 213 |
| 8.2 | VSAT 系统的工作原理及关键技术 | 215 |
| 8.2.1 | VSAT 的工作过程 | 215 |
| 8.2.2 | VSAT 网多址协议应用概况与用户选择 | 217 |
| 8.2.3 | VSAT 系统信号传输技术 | 219 |
| 8.3 | VSAT 网的主要传输体制 | 220 |
| 8.3.1 | 传输体制的选择依据 | 220 |
| 8.3.2 | VSAT 数据网的传输体制 | 221 |
| 8.3.3 | VSAT 电话网的传输体制 | 222 |
| 8.4 | VSAT 电话网 | 222 |
| 8.5 | VSAT 系统设计 | 224 |
| 8.5.1 | 用户需求分析 | 224 |
| 8.5.2 | VSAT 的总体设计 | 225 |
| 8.5.3 | VSAT 卫星通信系统的工程建设 | 227 |
| | 小结 | 229 |
| | 参考文献 | 229 |
| 第 9 章 | 卫星通信与互联网 | 230 |

| | |
|-------------------------------|------------|
| 9.1 基于卫星的互联网 | 231 |
| 9.2 TCP 协议及其控制机制 | 233 |
| 9.2.1 几种 TCP 协议版本 | 233 |
| 9.2.2 TCP 控制机制 | 237 |
| 9.3 影响 TCP 性能的卫星链路特性 | 239 |
| 9.3.1 长传播延时 | 239 |
| 9.3.2 高误码率 | 240 |
| 9.3.3 信道非对称性 | 240 |
| 9.4 改善卫星通信系统中 TCP 性能的措施 | 240 |
| 9.4.1 链路层解决方案 | 241 |
| 9.4.2 端到端的解决方案 | 241 |
| 9.4.3 划分 TCP 连接的解决方案 | 245 |
| 9.5 宽带卫星 IP 技术 | 248 |
| 9.5.1 宽带卫星 IP 通信的特点 | 248 |
| 9.5.2 现有的宽带卫星 IP 通信系统 | 249 |
| 9.5.3 宽带卫星 IP 通信关键技术 | 253 |
| 小结 | 256 |
| 参考文献 | 257 |
| 第 10 章 卫星导航定位系统 | 259 |
| 10.1 卫星导航定位系统介绍 | 259 |
| 10.1.1 子午仪卫星导航系统 | 259 |
| 10.1.2 GPS 卫星全球定位系统 | 260 |
| 10.1.3 GLONASS 全球导航卫星系统 | 262 |
| 10.1.4 Galileo 卫星导航定位系统 | 263 |
| 10.1.5 北斗卫星导航定位系统 | 264 |
| 10.2 GPS 卫星导航定位信号 | 265 |
| 10.2.1 伪噪声码及其生成 | 268 |
| 10.2.2 GPS 卫星的伪噪声码 | 273 |
| 10.3 GPS 信号接收机 | 278 |
| 10.3.1 GPS 信号接收机的类型 | 278 |
| 10.3.2 GPS 信号接收机的基本结构 | 279 |
| 10.3.3 GPS 信号接收机的工作原理 | 282 |
| 10.4 GPS 定位原理 | 287 |
| 10.4.1 GPS 伪距测量定位 | 288 |
| 10.4.2 GPS 载波相位测量定位 | 298 |
| 小结 | 301 |
| 参考文献 | 301 |

第 1 章 卫星通信概述

卫星通信,指的是设置在地球上(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转发或反射无线电波,在 2 个或多个地球站之间进行的通信。

卫星通信是在地面微波中继通信和空间电子技术的基础上发展起来的,它是宇宙无线通信的主要形式之一,也是微波通信发展的一种特殊形式。与其他通信方式相比,卫星通信具有覆盖面广、通信容量大、距离远、不受地理条件限制、性能稳定可靠等优点,卫星本身还具有独特的广播特性,组网灵活,易于实现多址连接,可以作为陆地移动通信的扩展、延伸、补充和备用,因此,对航空用户、航海用户、缺乏地面通信基础设施的偏远地区用户,以及对网络实时性要求较高的专门用户都具有很大的吸引力。此外,卫星还能够提供直接到家庭(DTH, Direct To Home)的 Internet 服务(如 Hughes 网络系统的 DirectPC),是解决 Last-mile 问题的最佳方案之一,也是向全球用户提供宽带综合 Internet 业务的最佳选择。由于卫星通信具有上述优点,因此它自诞生之日起便得到了迅猛发展,成为当今通信领域中最为重要的一种通信方式。

1.1 卫星通信的发展历程

卫星通信发展的历史最早要追溯到 1945 年 10 月,当时的英国空军雷达军官阿瑟·克拉克(Arthur C. Clarke)在《无线电世界》杂志上发表了“地球外的中继站”(Extra-Terrestrial Relays)一文^[1]。在这篇文章中,克拉克提出在圆形赤道轨道上空、高度为 35 786km 处设置 1 颗卫星,每小时绕地球旋转 1 次,旋转方向与地球自转方向相同,该卫星与地球以相同的角速度绕太阳旋转,因此,对于地球上的观察者来说,这颗卫星是相对静止的。克拉克在文中还提到,用太阳能作动力,在赤道上空的静止(或称同步)轨道上配置 3 颗静止卫星,即可实现全球通信,如图 1-1 所示。

1957 年 10 月,苏联成功发射了世界上第 1 颗低轨人造地球卫星 Sputnik。

1958 年,美国发射了第 1 颗卫星,第 1 次通过卫星实现了话音通信。

1958 年,美国宇航局(NASA)发射了“斯柯尔”卫星(SCORE),通过它传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“信使”(COVRIER)有源无线电中继卫星,它可以接收和存储 360 000 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),它可进行电话、电视、传真和数据的传输。

1964 年 8 月,美国发射了第 1 颗静止轨道的通信卫星“辛康姆 3 号”(SYNCOM 3),并利用它成功地进行了电话、电视和传真的传输试验。同年,国际电信卫星组织(INTELSAT, International Telecommunication Satellite Organization)成立。至此,卫星通信完成了早期

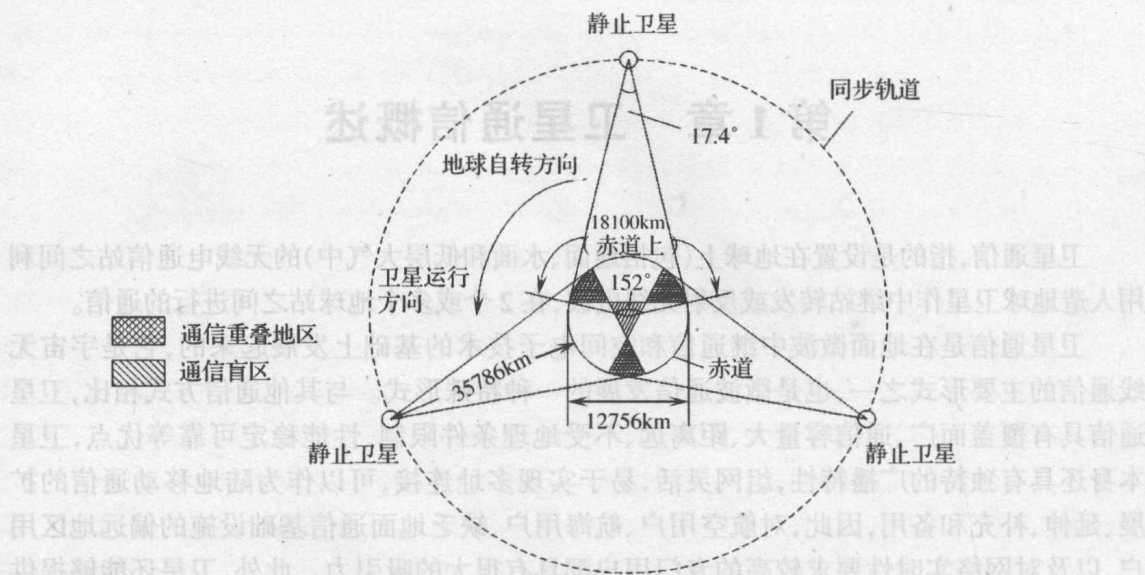


图 1-1 3 颗静止卫星实现全球通信

的试验阶段而转向实用阶段。

1965 年 4 月,INTELSAT 把原名为“晨鸟”(EARLY BIRD)的第 1 代“国际电信卫星”(INTELSAT - I,简记为 S - I)射入地球同步轨道。该卫星是一颗商用通信卫星,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,苏联成功地发射了第 1 颗非同步通信卫星“闪电”(MOLNIYA)1 号,对其北方、西伯利亚、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。

1968 年,美国军方发射了“林肯”试验卫星(IES - 6)。

1969 年,美国军方发射了第 1 代战术通信卫星(TACSAT - I),可以转发 10 000 条话音信道。

1970 年 4 月 24 日,中国在酒泉卫星发射中心成功地发射了第 1 颗人造地球卫星“东方红一号”(DFH - 1)。

1972 年,加拿大通信卫星公司发射了第 1 颗国内通信卫星“阿尼克”(ANIK),率先开展了国内卫星通信业务,并取得了一定的经济效益。

1975 年,第 1 次通过卫星从美国到印度成功实现了直接广播试验,开始了广播卫星业务(BSS)阶段。

1976 年,第 1 代移动通信卫星发射(3 颗静止卫星 MARISAT),开始了移动卫星业务(MSS)阶段。

1979 年,国际海事卫星组织(INMARSAT, International Maritime Satellite)宣告正式成立,它是一个提供全球范围内移动卫星通信的政府间合作机构。

1982 年,国际海事卫星通信进入运行阶段(INMARSAT - A,移动卫星电话系统)。

1984 年,第 1 个直接到家庭(DTH)系统在日本进入运行。

1984 年 4 月 8 日,中国首次成功发射了由中国空间技术研究院研制的“东方红二号”(DFH - 2)卫星,该卫星是一颗静止轨道卫星,是中国国内用于远距离电视传输的主要卫

星。“东方红二号”卫星的成功发射翻开了中国利用本国的通信卫星进行卫星通信的历史,使中国成为世界上第5个独立研制和发射静止轨道卫星的国家。

1986年2月1日,中国成功发射了第2颗“东方红二号”卫星。

1988年至1990年,中国相继成功发射了3颗“东方红二号甲”(DFH-2A)卫星,“东方红二号甲”卫星是“东方红二号”卫星的改型星,主要为国内的通信、广播、交通、水利、教育等部门提供了各种服务。

1990年,INMARSAT启用了第1个商用航空地球站航空系统,从此开始利用INMARSAT卫星服务于全球。

1995年,商用低轨卫星系统(ORBCOM)第1次传送低速数据试验成功。

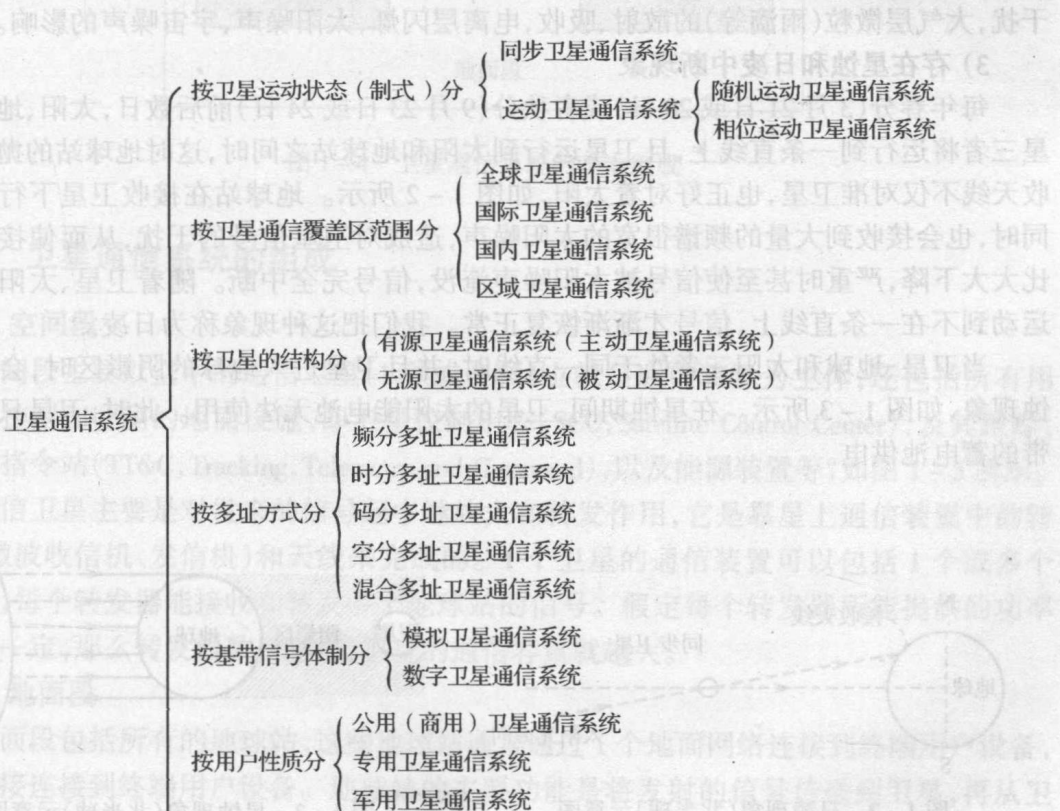
1997年5月12日,中国成功发射了第3代通信卫星“东方红三号”(DFH-3)卫星,主要用于电视传输、电话、电报、传真、广播和数据传输等业务。

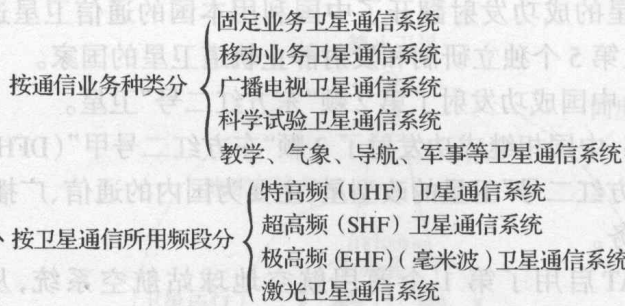
1998年,通过LEO星座引入手机通信业务,从而使得非静止轨道卫星进入运行阶段。

2000年至2005年,引入了宽带个人通信;轨道卫星残骸将成为问题;Ka频段系统得到迅速发展;多个低轨道和中轨道星座系统将投入运行。

1.2 卫星通信系统分类

卫星通信系统有很多分类方法,可以按照卫星的运动状态(制式)、卫星的通信覆盖区范围、卫星的结构(或转发无线电信号的能力)、多址方式、基带信号的体制、用户性质、通信业务种类以及卫星通信所用频段的不同来划分^[2,3]。典型的分类方法如下所示。





上述各种分类方法从不同的角度反映出卫星通信系统的特点、性质和用途,若将它们综合起来,便可较全面地描绘出某一具体的卫星通信系统的特征。

1.3 卫星通信存在的主要问题

卫星通信与其他通信方式相比,具有许多不可比拟的优势,但是凡事均具有两面性,卫星通信在某些方面也存在着一一些不足。

1) 通信时延较长

对于地球同步卫星而言,其离地面的距离为 35 786km,发端信号经过卫星转发到收端地球站,传输时延可达 270ms。如果要再转接到另一颗卫星通话的话,时延更长。中、低轨道卫星的传输时延较小些,但也有 100ms 左右。

2) 作为一个开放的通信系统,其通信链路易受外部条件影响

由于卫星通信的电波要通过大气层,所以其通信链路易受外部条件如通信信号间的干扰,大气层微粒(雨滴等)的散射、吸收,电离层闪烁,太阳噪声,宇宙噪声的影响。

3) 存在星蚀和日凌中断现象

每年春分(3月21日或20日)或者秋分(9月23日或24日)前后数日,太阳、地球和卫星三者将运行到一条直线上,且卫星运行到太阳和地球站之间时,这时地球站的抛物面接收天线不仅对准卫星,也正好对着太阳,如图 1-2 所示。地球站在接收卫星下行信号的同时,也会接收到大量的频谱很宽的太阳噪声,造成对卫星信号的干扰,从而使接收信杂比大大下降,严重时甚至使信号被太阳噪声淹没,信号完全中断。随着卫星、太阳和地球运动到不在一条直线上,信号才渐渐恢复正常。我们把这种现象称为日凌。

当卫星、地球和太阳三者处于同一直线时,并且卫星进入地球的阴影区时,会出现星蚀现象,如图 1-3 所示。在星蚀期间,卫星的太阳能电池无法使用。此时,卫星只能靠自带的蓄电池供电。

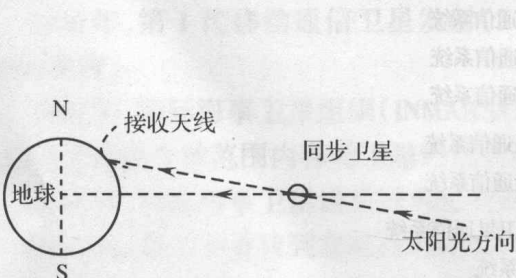


图 1-2 日凌现象(北半球)示意图

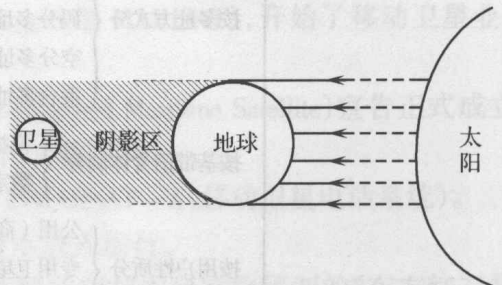


图 1-3 星蚀现象(北半球)示意图

1.4 卫星通信系统的组成及工作过程

目前的卫星通信系统因其传输的业务不同,它们的组成也不完全相同。一般的卫星通信系统主要由空间段和地面段两大部分组成,如图1-4所示^[4]。本节将对卫星通信系统的组成及其工作过程进行简单的介绍。

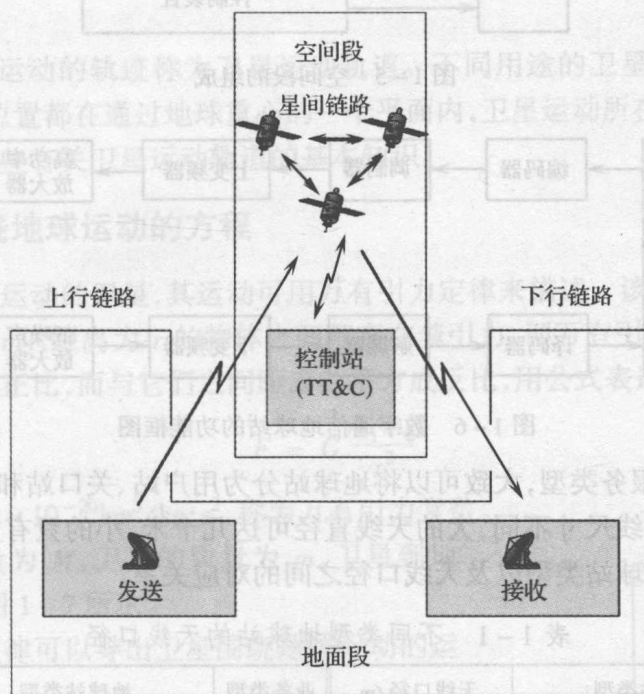


图1-4 卫星通信系统的基本组成

1.4.1 卫星通信系统的组成

1) 空间段

空间段主要以空中的通信卫星(1颗或多颗)也就是通信装置为主体,还包括所有用于卫星控制和监测的地面设施,即卫星控制中心(SCC, Satellite Control Center),及其跟踪、遥测和指令站(TT&C, Tracking, Telemetry and Command),以及能源装置等,如图1-5所示。

通信卫星主要是对发来的信号起中继放大和转发作用,它是靠星上通信装置中的转发器(微波收信机、发信机)和天线来完成的。1个卫星的通信装置可以包括1个或多个转发器,每个转发器能接收和转发多个地球站的信号。假定每个转发器所能提供的功率和带宽一定,那么转发器数目越多,卫星的通信容量就越大。

2) 地面段

地面段包括所有的地球站,这些地球站通常通过1个地面网络连接到终端用户设备,或者直接连接到终端用户设备。地球站的主要功能是将发射的信号传送到卫星,再从卫星接收信号。图1-6给出了一个传送数字信号的卫星地球站的功能框图^[5]。

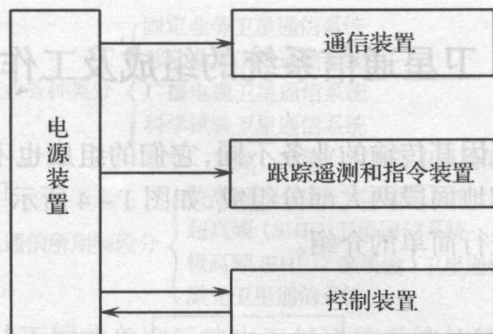


图 1-5 空间段的组成

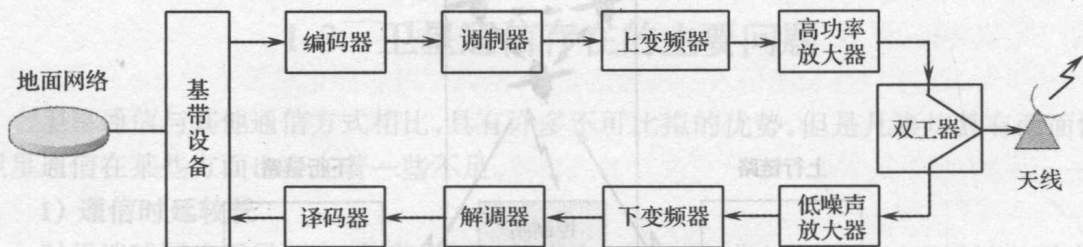


图 1-6 数字通信地球站的功能框图

根据地球站的服务类型,大致可以将地球站分为用户站、关口站和服务站 3 类。不同类型的地球站,其天线尺寸不同,大的天线直径可达几十米,小的只有几十厘米。表 1-1 给出了业务类型、地球站类型以及天线口径之间的对应关系。

表 1-1 不同类型地球站的天线口径

| 业务类型 | 地球站类型 | 天线口径/m | 业务类型 | 地球站类型 | 天线口径/m |
|-------|--------------|---------|------|-----------|---------|
| 点对点 | 关口站、Hub(枢纽站) | 2~10 | 采集 | VSAT | 0.1~1.0 |
| | VSAT | 1~2 | | Hub | 2~10 |
| 广播/组播 | 馈送站 | 1~5 | 移动 | 手机、便携式、移动 | 0.1~0.8 |
| | VSAT | 0.5~1.0 | | 关口站 | 2~10 |

在如图 1-4 所示的卫星通信系统中,上行链路指的是从发送地球站到卫星之间的链路;下行链路指的是从卫星到接收地球站之间的链路。如果空中有多个通信卫星,则从 1 个卫星到另 1 个卫星之间还存在着星间链路,利用电磁波或光波将多颗卫星直接连接起来。

1.4.2 卫星通信系统的工作过程

在 1 个卫星通信系统中,各地球站中各个已调载波的发射或接收通路,经过卫星转发器转发,可以组成很多条单跳或双跳的双工或单工卫星通信线路,整个通信系统的通信任务就是分别利用这些线路来实现的^[6]。单跳单工的卫星通信系统进行通信时,地面用户发出的基带信号经过地面通信网络传送到地球站。在地球站,通信设备对基带信号进行处理,使其成为已调射频(RF)载波后发送到卫星。卫星作为空中的一个大中继站,接收

此系统中所有地球站用上行频率发来的已调射频载波,然后再进行放大和变频,用下行频率发送到接收地球站,信号功率增益一般为 100dB ~ 130dB。接收地球站对接收到的已调射频载波进行处理,解调出基带信号,再通过地面网络传送给用户。为了增大发送输出信号和接收输入信号之间的隔离度,避免二者相互干扰,上行频率和下行频率一般使用不同的频谱,且尽量保持足够大的间隔。

1.5 卫星运动轨道

卫星围绕地球运动的轨迹称为卫星运动轨道。不同用途的卫星都有一个共同的特点,即它们的轨道位置都在通过地球重心的一个平面内,卫星运动所在的轨道面称为轨道平面。本节介绍一些有关卫星运动轨道的基本知识。

1.5.1 卫星围绕地球运动的方程

以地球为中心运动的卫星,其运动可用万有引力定律来描述。该定律指出:任何两个质量分别为 m_1 和 m_2 、距离为 r 的物体之间都存在着引力,即万有引力 F ,其大小与两个物体的质量乘积成正比,而与它们之间距离的平方成反比,用公式表述如下:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1-1)$$

式中: $G = 6.668462 \times 10^{-20} \text{km}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$,称为万有引力常数。

设地球的质量为 M ,卫星的质量为 m ,卫星到地心的距离为 r ,如图 1-7 所示。

由万有引力定律可以导出卫星围绕地球运动的运动方程为

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -G(M+m) \frac{\mathbf{r}}{r^3} = -\mu \frac{\mathbf{r}}{r^3} \quad (1-2)$$

式中: \mathbf{r} 为从地球指向卫星的位置矢量(又称矢径); $M = 5.977414 \times 10^{24} \text{kg}$ 为地球质量; $\mu = G(M+m) \approx GM = 3.986013 \times 10^5 \text{km}^3/\text{s}^2$,称为开普勒常数。

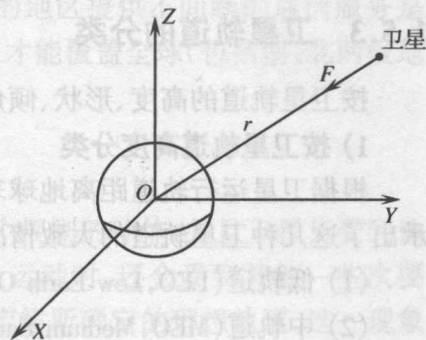


图 1-7 卫星相对于地球的坐标

1.5.2 卫星运动的基本规律

根据万有引力定律,可以导出卫星运动的三定律,即开普勒三定律^[7]。开普勒三定律揭示出了卫星受重力吸引而在轨道平面上运动的规律。

(1) 开普勒第一定律(轨道定律):卫星运动的轨道一般是 1 个椭圆,1 个椭圆有 2 个焦点,双体系的质量中心称为质心,它始终处在其中 1 个焦点上。质心与地球中心是重合的,即地球的中心始终位于该椭圆的 1 个焦点上。

这一定律表明,在以地球质心为中心的引力场中,卫星绕地球运行的轨道面,是一个通过地球中心的椭圆平面,这称为开普勒椭圆,其形状和大小不变。在椭圆轨道平面上,卫星离地心最远的一点称为远地点,而离地心最近的一点称为近地点,它们在惯性空间的位置也是固定不变的。卫星绕地心运动的轨道方程为

$$r = \frac{a_s(1 - e_s^2)}{1 + e_s \cos V_s} \quad (1-3)$$

式中： r 为卫星的地心距离； a_s 为轨道椭圆的半长轴； e_s 为轨道椭圆的偏心率； V_s 为卫星的近点角，它描述了任意时刻卫星在轨道上相对于近地点的位置。

(2) 开普勒第二定律(面积定律)：在单位时间内，卫星的地心矢径 r ，即地球质心与卫星质心间的距离矢量，扫过的面积相等。此定律的数学表示式导出为

$$|r \times dr/dt| = \sqrt{\mu p} \quad (1-4)$$

(3) 开普勒第三定律(轨道周期定律)：卫星围绕地球运动 1 圈的周期为 T ，其平方与轨道椭圆半长轴 a 的立方之比为—常数，而该常数等于地球引力常数 GM 的倒数。

这一定律的数学表达式为

$$\frac{T_s^2}{a_s^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad (1-5)$$

式中： T_s 为卫星运动的周期，即卫星绕地球运动一周所需的时间。

假设卫星的平均角速度为 $n = \frac{2\pi}{T_s}$ (rad/s)，则得

$$n = \sqrt{\frac{GM}{a_s^3}}$$

由上式可以看出，当卫星运动轨道椭圆的半长轴确定后，就能够确定出卫星运行的平均角速度。

1.5.3 卫星轨道的分类

按卫星轨道的高度、形状、倾角、运转周期等的不同，可把卫星轨道分为不同的类型。

1) 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，通常可以将卫星轨道分为以下 4 类，图 1-8 示出了这几种卫星轨道的大致情况。

(1) 低轨道(LEO, Low Earth Orbit)：距离地球表面为 700km ~ 1 500km。

(2) 中轨道(MEO, Medium Earth Orbit)：距离地球表面 10 000km 左右。

(3) 高椭圆轨道(HEO, Highly Elliptic Orbit)：距离地球表面的最近点为 1 000km ~ 21 000km，最远点为 39 500km ~ 50 600km。

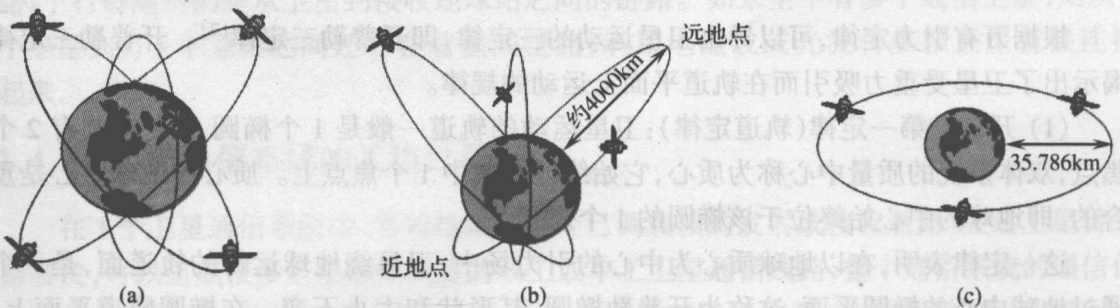


图 1-8 低轨道卫星、中轨道卫星、高椭圆轨道卫星和静止轨道卫星的运动轨道

(a) LEO & MEO; (b) HEO; (c) GEO.