



北京市高等教育精品教材立项项目

21 世纪 信息 通信 系列 教材

卫星通信系统与技术

WEIXING TONGXIN XITONG YU JISHU

陈振国 杨鸿文 郭文彬 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

陈振国 杨鸿文 郭文彬 编著

卫星通信系统与技术

北京邮电大学出版社
·北京·

内 容 提 要

本书是北京市高等教育精品教材建设、2002年初评议确定的项目,获得北京市教委的经费资助。书中主要包括:卫星通信概况、卫星运动轨道和卫星组成、地球站和VSAT、空间链路设计、信号处理和传输技术、多址联接、卫星蜂窝移动系统与网络管理、卫星系统中的多媒体通信等。

上世纪90年代以来,由于信息技术的迅速发展和社会需求的提高,卫星通信的应用已经发生了重大变化。广域个人移动通信的发展,全球无缝隙覆盖需求的增长,国际互联网(Internet)的出现,宽带多媒体通信和多播(Multicast)技术的开发,无线电频率资源的有效利用,通信服务质量要求的提高等,都导致卫星信号传输、处理和多址联接技术的很多变革和创新。

作为理工通信类高校的专业教科书,本书在讲解卫星通信基本原理的基础上,尽可能考虑上述特征,同时,也用一定篇幅介绍了非静止轨道卫星、个人移动卫星通信、信道纠错和图像信号压缩编码、宽带多媒体通信在卫星上的应用等,使其较好地反映了本门学科近十余年来发展情况。

本书内容丰富,面向工程实践和应用,有较多实例和插图帮助理解内容,主要用作通信、电子和信息类高校本科生的教材或研究生的教学参考书,也适用于有相应水平的、从事这方面工作的工程技术和管理人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

卫星通信系统与技术/陈振国,杨鸿文,郭文彬编著. —北京:北京邮电大学出版社,2003

ISBN 7-5635-0671-3

I.卫... II.①陈...②杨...③郭... III.卫星通信系统 IV.TN927

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第056000号

书 名: 卫星通信系统与技术

作 者: 陈振国 杨鸿文 郭文彬

责任编辑: 王琴秋 方瑜

出 版 者: 北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路10号) 邮编:100876

发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京通州皇家印刷厂

开 本: 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张: 27

字 数: 591千字

印 数: 1—5 000册

版 次: 2003年8月第1版 2003年8月第1次印刷

ISBN 7-5635-0671-3/TN·237

定价: 39.00元

•如有印装质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系•

前 言

卫星通信是现代通信的主要方式之一,它在军事上和航天科技上有特殊的地位,是实现现代信息社会的核心科技内容之一。通信、计算机和图像等信息技术的发展,很多都与它密切相关。

自从 1965 年开始投入运行以来,卫星通信已有 30 余年历史,它在全球通信、广播和导航定位等其他应用领域,都得到了飞速的发展。近十余年来,随着光缆通信、地面移动通信、计算机网络等其他传输介质的发展和生产成本的下降,长途通信中卫星通信面临着激烈的竞争,国际长途通信和电视广播,已经不再是卫星通信一统天下。在性能价格比上,它必须要面对其他各种传输介质的挑战。只有围绕卫星的基本特征并扬长避短,卫星通信才能在市场竞争中长期处于比较主动的地位。

本书的主要服务对象是通信、电子和信息类高年级本科生和相应专业研究生,可供他们用作教材或教学参考书,因此在每章中都附有大量插图,帮助理解课程内容;每章后都附有一定数量的思考题和计算题,便于学生复习和锻炼工程计算能力。本书大量素材来自国际上近年来的教学和科技参考书,也有不少内容取自国内外杂志上发表的论文。

本书共分 8 章:第 1 章介绍卫星通信的基本概况。第 2 章论述卫星的运行轨道、星座以及卫星星座结构,包括近年来投入应用的非静止轨道卫星和新型处理型卫星的发展情况。第 3 章讲解卫星地球站设备,也包括近年来广为发展的 VSAT 情况,地球站的基本性能 G/T 值、EIRP 等的计算也在本章讲解。第 4 章论述卫星空间链路的计算,主要讨论卫星系统的总体性能 C/N (或 C/N_0 , E_b/N_0) 计算,也涉及各种干扰和降雨等气候情况对高微波频段系统性能的影响。第 5 章介绍了信号传输和处理技术,除了涉及传输信号的基本特性和数字调制技术外,主要叙述图像信号的压缩编码技术和探讨信道编码纠错的最佳方案。第 6 章叙述卫星通信中的几种基本多址联接方案,也对近年来正在发展的多种服务要求进行了综合。第 7 章论述卫星蜂窝移动系统,偏重基本理论,具体实例在书后的参考文献中介绍。第 8 章讨论用于宽带多媒体通信的卫星系统,主要涉及 ATM 和 TCP/IP 在卫星通信中的发展和应用中要解决的问题。这些内容与今后卫星通信的发展方向关系比较密切,可供从事这方面工作的科技人员参考。

全书的基本内容选择由主编陈振国教授负责。本书第 7 章由杨鸿文副教授(在职博士)编

写,他还编写了第5章图像信号压缩编码的部分内容。第5章的其他内容由郭文彬讲师(在职博士)编写。第1、2、3、4、6、8章内容,由陈振国、庞翠珠教授合作完成。

在本书编写过程中,曾得到北京市高等教育精品教材建设市专款资金资助,也得到北京邮电大学教材委员会的大力支持,谨在此表示衷心感谢!

作者虽然力图使本书内容覆盖近年来卫星通信的各个主要方面,但由于水平所限,书中肯定还存在很多不足和错误,敬请广大师生和读者批评指正。

作者
2003年6月

目 录

第 1 章 卫星通信概况	1
1.1 卫星通信的发展简况和重大里程碑	1
1.1.1 Arthur C. Clarke 的早期设想	1
1.1.2 今天的卫星通信系统——GEO、LEO、MEO 和 HEO	2
1.1.3 卫星通信的主要应用领域	2
1.1.4 卫星通信发展中的重大里程碑	4
1.2 卫星通信的使用频带	7
1.2.1 无线电通信的频谱资源和频带命名	7
1.2.2 用于固定卫星业务(FSS)的主要频段	7
1.2.3 用于移动卫星业务(MSS)的主要频段	8
1.3 卫星通信系统的组成	9
1.3.1 卫星通信系统的空间段	9
1.3.2 卫星通信系统的地面段	12
1.4 编码、复接、调制和多址联接	14
1.4.1 脉冲编码调制(PCM)和自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)	14
1.4.2 时分复接系统(PDH)和同步数字系列(SDH)	16
1.4.3 数字调制、信号传输质量的衡量标准	20
1.4.4 多址联接	21
1.5 正交极化频率复用	24
1.5.1 电磁波极化和它的数学表示式	24
1.5.2 双极化运行时的关键性能指标——正交极化鉴别度	26
1.6 移动和个人卫星通信	28
1.6.1 移动卫星通信的应用	29
1.6.2 个人卫星通信	29
1.6.3 UMTS & IMT-2000	30
1.7 宽带多媒体卫星通信	31
复习思考题和计算题	32
第 2 章 卫星运动轨道和通信卫星组成	35
2.1 卫星运动轨道	36

2.1.1 椭圆和圆形轨道	36
2.1.2 卫星运动速度和轨道周期	37
2.1.3 静止轨道上卫星的定位	39
2.1.4 轨道平面取向和轨道参量	42
2.1.5 轨道的扰动*	44
2.1.6 地面跟踪*	45
2.2 卫星和地球的几何关系	47
2.2.1 卫星和地球站终端之间的几何关系	47
2.2.2 从地球站看向卫星的方位角、仰角和极化角	48
2.2.3 最小仰角给定时一定高度卫星的覆盖面积	51
2.2.4 长时延的影响和消除	53
2.2.5 星蚀现象与日凌中断	55
2.3 卫星星座和系统概念	57
2.3.1 Walker 倾斜星座	58
2.3.2 极星座	60
2.3.3 非同步极星座	62
2.3.4 GEO、LEO、MEO 和 HEO 系统概念	62
2.4 通信卫星设计和有效载荷	65
2.4.1 通信卫星设计考虑	65
2.4.2 通信卫星有效载荷(payload)	68
2.5 卫星公用平台和寿命	79
2.5.1 卫星公用平台(Platform or Bus)	79
2.5.2 卫星的寿命和可靠性	87
复习思考题和计算题	89
第3章 卫星地球站和 VSAT	91
3.1 引言	91
3.1.1 设计考虑	92
3.1.2 国际规定和技术限制	93
3.1.3 地球站技术近期发展趋向	94
3.1.4 地球站设备一般组成	95
3.2 地球站射频基本性能	97
3.2.1 有效全向辐射功率(EIRP)的定义和计算	97
3.2.2 接收系统噪声分析和品质因素 G/T 值计算	97
3.3 天线、馈源和跟踪系统	104
3.3.1 天线基本性能	104
3.3.2 天线系统	107
3.3.3 馈源系统	111
3.3.4 跟踪系统	113
3.4 射频(RF)分系统	117
3.4.1 发送设备	117

3.4.2 接收设备	125
3.5 通信公用和网络接口分系统	127
3.5.1 上变频器(UC)和下变频器(DC)的设计	127
3.5.2 频率合成器	132
3.5.3 中频放大、滤波和均衡	135
3.5.4 调制和解调	137
3.5.5 基带信号处理	137
3.5.6 网络接口分系统	137
3.6 固定和广播卫星业务地球站	138
3.6.1 大、中型固定业务(FSS)地球站	138
3.6.2 广播卫星业务(BSS)地球站和卫星电视接收	148
3.7 很小孔径终端(VSAT)网络	156
3.7.1 VSAT 网络结构和组网方案	159
3.7.2 典型 VSAT 系统组成	162
3.7.3 VSAT 系统工作原理	164
3.7.4 20 世纪 90 年代后期 VSAT 网络的发展	173
3.7.5 VSAT 星形网链路计算实例	174
3.8 地球站监控,辅助设备和可靠性分析	175
3.8.1 地球站监控(M&C)	175
3.8.2 辅助设备	177
3.8.3 设备可靠性分析	177
复习思考题和计算题	179
第 4 章 卫星链路设计	183
4.1 传输方程	183
4.1.1 引言	183
4.1.2 传输方程	184
4.1.3 其他传输损耗	186
4.2 基本卫星链路分析	188
4.2.1 上行载噪比计算(透明型转发器)	188
4.2.2 下行载噪比和总的载噪比计算	190
4.2.3 卫星上高功率的输入和输出回退量(或称补偿量)	191
4.2.4 卫星链路计算实例	192
4.2.5 再生型转发器计算公式	196
4.3 卫星链路干扰分析	197
4.3.1 载波噪声干扰功率比	197
4.3.2 进入或来自邻近卫星系统的干扰	198
4.3.3 地面微波等其他干扰	202
4.3.4 交调干扰产生的噪声	204
4.4 降雨衰减分析	208
4.4.1 降雨衰减预测和计算	208

4.4.2 降雨衰减对系统噪声温度的影响	215
4.4.3 降雨引起的去极化效应	216
4.4.4 缓解降雨衰减的方法	216
4.5 信号阻挡和多径衰落**	217
4.5.1 地面移动卫星信道的窄带模型	217
4.5.2 高频时的卫星信道	221
4.5.3 地面移动卫星信道的宽带模型	222
4.6 卫星系统的可用度和设计实例	226
4.6.1 卫星系统的可用度(或有效性)	226
4.6.2 一般卫星链路设计思路	227
4.6.3 VSAT 链路设计实例	231
复习思考题和计算题	234
第 5 章 信号传输与处理技术	237
5.1 信源技术	237
5.1.1 信源及其编码	237
5.1.2 多媒体信号	248
5.1.3 数据信号及压缩技术	248
5.2 数字信号调制	251
5.2.1 相位调制(MPSK)	251
5.2.2 频率调制	256
5.2.3 各种调制的性能及功率谱	259
5.3 信道编码	260
5.3.1 基本知识	261
5.3.2 线性分组码	262
5.3.3 循环码	264
5.3.4 卷积码	269
5.3.5 级联码	276
5.3.6 编码调制	278
5.4 差错控制	282
5.4.1 纯 ARQ(Pure ARQ)	282
5.4.2 混合 ARQ 方式	284
复习思考题和计算题	285
第 6 章 多址联接	289
6.1 频分双工(FDD)和时分双工(TDD)	289
6.1.1 频分双工	290
6.1.2 时分双工	290
6.2 频分多址联接	291
6.2.1 MCPC 和 SCPC	292
6.2.2 小型固定业务地球站(SCPC)	294

6.2.3 设计考虑	298
6.2.4 转发器利用、预分配和按需分配	299
6.2.5 带宽和功率受限,主要特性总结	301
6.3 时分多址联接(TDMA)	302
6.3.1 帧结构	306
6.3.2 独特码检测和网络同步	308
6.3.3 帧效率和转发器利用	312
6.3.4 预分配和按需分配 TDMA	314
6.3.5 主要特性总结	317
6.4 多波束卫星中的 FDMA/TDMA	317
6.4.1 多波束卫星的引出(又称空分多址 SDMA)	317
6.4.2 卫星交换 SS/TDMA	320
6.4.3 星上信号处理用于 FDMA/TDM 运行	322
6.5 码分多址联接(CDMA)	324
6.5.1 直接序列扩频传输(DS-CDMA)	325
6.5.2 频率跳跃扩频传输(FH-CDMA)	329
6.5.3 伪随机噪声(PN)序列	331
6.5.4 扩频系统容量和 RAKE 接收机	334
6.6 卫星分组数据通信(RA/TDMA)	338
6.6.1 分组数据通信基本概念	339
6.6.2 分组数据传输协议	339
6.6.3 Internet 业务(Direc-PC)和卫星通信的结合	343
6.7 关于多址联接的讨论及多址联接的发展趋向	346
6.7.1 关于多址联接的讨论	346
6.7.2 今后的发展趋向	347
复习思考题和计算题	348
第7章 卫星蜂窝移动系统	351
7.1 卫星蜂窝的概念	351
7.2 频率复用	353
7.2.1 星内的频率复用	353
7.2.2 星间频率复用	356
7.2.3 CDMA 的频率复用	358
7.3 同信道干扰	358
7.3.1 FDMA/TDMA 系统中的同信道干扰	359
7.3.2 CDMA 系统中的同信道干扰	362
7.4 系统结构	365
7.4.1 空间段	365
7.4.2 地面段	366
7.5 网络控制	367
7.5.1 网络控制概述	367

7.5.2 移动性管理	369
7.5.3 呼叫控制	371
7.5.4 无线资源管理	373
7.6 切换	376
7.6.1 不同的切换情形	376
7.6.2 切换的操作	379
7.6.3 切换引起的资源分配问题	381
7.6.4 CDMA 系统中的软切换	382
7.7 业务容量	383
7.7.1 单小区的爱尔兰容量	383
7.7.2 系统的容量及频谱效率	384
复习思考题和计算题	385
第 8 章 卫星系统中的多媒体通信	386
8.1 宽带通信网络类型	386
8.1.1 传统的电路交换网络和分组交换因特网(Internet)	386
8.1.2 采用新卫星轨道的新型多媒体卫星系统	386
8.2 多媒体服务和业务特性	388
8.2.1 图像业务和 MPEG 编码	388
8.2.2 自相似业务	389
8.3 基于 ATM 的卫星通信系统	390
8.3.1 ATM 原理	390
8.3.2 基于 ATM 卫星网络的意义	397
8.4 通过卫星系统的因特网服务	398
8.4.1 TCP/IP 原理	398
8.4.2 因特网协议(IP)	399
8.4.3 传输控制协议(TCP)	400
8.4.4 卫星环境中的 TCP/IP	406
8.4.5 卫星环境中 ATM 上的 IP	409
8.5 基于 ATM 的卫星网络	409
8.5.1 系统结构	409
8.5.2 服务	410
8.5.3 协议结构	412
8.5.4 ATM 资源管理	413
8.5.5 对 ATM 卫星系统的多址联接	415
8.5.6 无线电资源管理	419
8.5.7 误差控制	420
复习思考题	421

因此,就广域服务和全球通信而言,卫星通信是经济的。

- 卫星具有收集信息和广播特性,它们建立的网络本来就带有星形拓扑结构,因此卫星适合用于多个固定用户之间、多个移动用户之间或固定用户和移动用户之间进行通信。
- 卫星网络可以在很短时间建立,而且网络结构灵活机动,设备随时可以搬迁。

后来实际建立的静止轨道 3 颗卫星全球波束覆盖情况,如图 1-2 所示。地球站天线最小仰角 $E_{\min}$ 不同时,覆盖区大小是不同的,图上的两组覆盖区分别对应 $E_{\min} = 5^\circ$ 和 0° 。

1.1.2 今天的卫星通信系统——GEO、LEO、MEO 和 HEO

今天的卫星通信系统已经不只是大量的静止轨道卫星,还有一些采用其他高度的卫星星座:

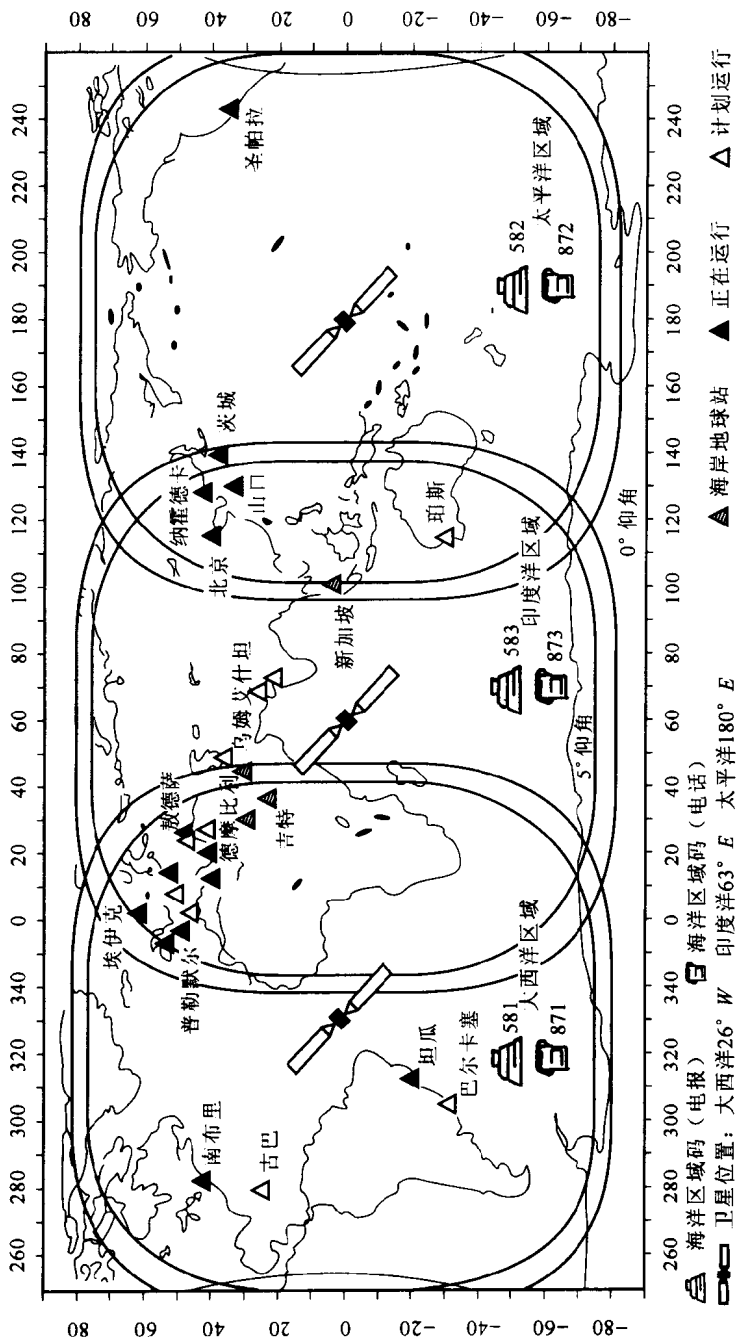
- 静止轨道(GEO)卫星放在地球上空接近 36 000 km 的赤道延伸平面上,以使卫星轨道的旋转与地球同步,在天空上看起来是固定的。由于它的高度高,只要 3 颗卫星就几乎能提供全球覆盖。但是,长的距离会引起很大的信号衰减和传播时延(从一个地球站到另一个地球站的往返时延达 0.5 s 左右)。
- 为了避免静止轨道卫星引起的很大信号衰减和时延,高度在 700 ~ 1 500 km 左右的低轨道(LEO)卫星,已经投入使用。这时,为了覆盖整个地球表面,需要大量的卫星(几十颗以上),系统比较复杂。另外,LEO 卫星比 GEO 卫星重量轻、结构简单,它的轨道周期大约为 2 h,因此是非静止轨道卫星。由于这个原因,一颗卫星在要求实时连接时,可能需要转换到那颗卫星的另一个天线波束上或另一颗卫星上。当然也可以按信息转接的方式,传输非实时消息。
- 为了避免静止轨道卫星的很大信号衰减和时延,又不使系统太复杂,高度在 10 000 km 左右的中轨道(MEO)卫星,也已投入使用。这时用少量卫星(约 10 颗左右),就几乎能实现全球覆盖。

图 1-3 所示为这几种卫星轨道的大致情况。

1.1.3 卫星通信的主要应用领域

由于上述优点,在很多应用中卫星通信都是很有吸引力的。它的主要应用可按引入日期排列如下:

- 多年来在点对点的拓扑结构中,卫星一直被用来互接长途电话和电视业务。面对日益激烈的海底光缆的竞争,干线业务中卫星可以提供备份电路或传送峰值业务。
- 对无线电和电视广播,卫星发挥了它固有的广播特性,以向广阔的地区提供直播到家(DTH)的语音和电视广播节目。一种较好的数字压缩和传输方案 DVB/MPEG-2,目前得到了广泛的应用。
- 随着重要性的增加,卫星正被用于海上、地面和空中的移动通信,个人终端可以是膝上或笔记本终端,或手持移动电话。在这里,卫星可以提供广域或全球覆盖的移动通信业务。对边远地区的用户和旅游者,它是最吸引人的。底层的标准 GSM 或未来的 UMTS(全球移动通信系统)标准,都将采用卫星作为 UMTS 的一个必备部分。



- 目前,卫星正被用在基于 TCP/IP 协议的 Internet 业务。对终端用户,它们下载着丰富的节目;而 Internet 业务供应商,则利用卫星将下载的节日直接送到 Internet 主干网上。
- 卫星也被用在固定通信网络中。近年来,很多跨国公司采用很小孔径终端(VSAT)构成的卫星网络,用来联接它们的众多业务点。不久的将来,用于多媒体通信(包括 Internet 业务)的宽带广域网络(WAN)也将被引用,有可能采用基于异步传输模式(ATM)。在那里,卫星最适合用于分配或多点同播(multicast)多媒体内容和宽带通信,将它们送到移动或边远用户。根据这种观点,卫星必将是未来全球信息基础设施(GII)不可缺少的组成部分。

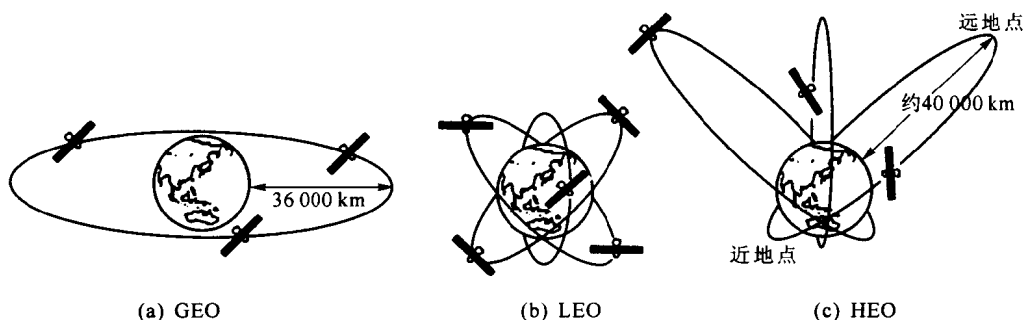


图 1-3 静止轨道卫星、低轨道卫星、中轨道卫星和高椭圆轨道(HEO)卫星的运动轨道

上述卫星通信的后四项应用领域如图 1-4 所示。当然,这样简单的图形不可能包含卫星通信应用的所有领域,但是它突出强调了近年来卫星通信在多种应用中的最重要特征。

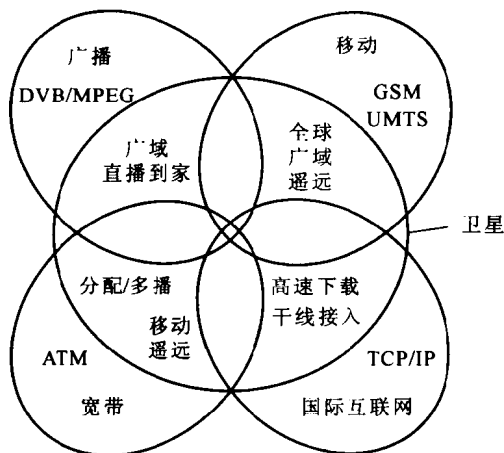


图 1-4 近年来卫星通信的主要应用领域

1.1.4 卫星通信发展中的重大里程碑

1232 年 中国发明火箭。

- 1945年 Clarke A. C.在《Wireless world》上发表论文《用于全球通信的静止卫星》[卫星通信开创阶段]。
- 1957年 前苏联发射第一颗人造地球卫星(Sputnic,一颗 LEO 卫星)。
- 1958年 U.S.发射第一颗卫星,第一次通过卫星实现语音通信。
- 1960年 发射第一颗无源通信卫星(Echo)。
- 1962年 发射第一颗有源通信卫星。
- 1964年 发射第一颗通信卫星(SYNCOM 3)进入静止轨道,INTELSAT 组织成立。
- 1965年 第一颗商业通信卫星(INTELSAT-1)进入静止轨道[固定卫星业务 GSS 开始阶段]。
- 1970年 中国发射第一颗卫星——“东方红 1 号”(一颗 LEO 卫星)。
- 1972年 第一个国内卫星通信系统 INTER-SPUTNIK 系统,在加拿大进入运行。
- 1975年 第一次通过卫星成功实现直接广播试验(从美国到印度,一年时间)[广播卫星业务 BSS 开始阶段]。
- 1976年 第一代移动通信卫星发射(3 颗静止卫星 MARISAT)[移动卫星业务 MSS 开始阶段]。
- 1979年 国际移动卫星组织(INMARSAT)成立。
- 1982年 国际海事卫星通信进入运行(INMARSAT-A,移动卫星电话系统)。
- 1984年 第一个 DTH 系统在日本进入运行。
- 1984~1990年 中国发射四颗第二代通信卫星“东方红 2 号和东方红 2 号 A”。
- 1987年 INMARSAT 成功进行地面移动卫星通信试验。
- 1988年 INMARSAT 成功进行用于地面移动卫星数据通信试验(INMARSAT-C)。
- 1989~1990年 INMARSAT 将全球移动卫星通信业务扩展到地面和空间移动通信领域。
- 1990~1992年 几个国际组织或公司声明,计划在 2000 年之前,将利用非静止轨道卫星(LEO)提供手机电话通信业务,用于移动通信[非静止轨道卫星开始阶段]。
- 世界很多地区,VSAT 系统应用在继续大幅度增长;全球无线电会议(WRC)给移动卫星通信分配新频谱;DTH 系统在亚洲和欧洲继续增长。
- 1995年 本年度 VSAT 系统数量在世界上具有最大增长;WRC 对非静止轨道卫星系统分配新频谱;商业用 LEO 卫星系统(ORBCOM)第一次传送低速数据试验成功。
- 1997年 中国发射第三代通信卫星“东方红 3 号”;装备语音业务手持终端的第一批 LEO (Iridium 系统)卫星发射;INMARSAT 用桌上电话机大小移动终端,建立了语音通信业务;INMARSAT 用袖珍型终端,建立了寻呼业务;提出几个宽带固定卫星业务个人通信系统(如 Teledesic)。
- 1998年 通过 LEO 星座引入手机通信业务[非静止轨道卫星进入运行阶段]。
- 1990~2000年 引入卫星直接广播语音业务。
- 2000~2005年 引入宽带个人通信;轨道卫星残骸将成为问题;Ka 频段系统将得到迅速

发展;多个 LEO 和 MEO 星座系统将投入运行。

图 1-5 简要地列出了卫星通信技术近 40 年的发展情况。卫星通信目前正在从固定业务走向个人移动通信和宽带多媒体业务,如图 1-6 所示。

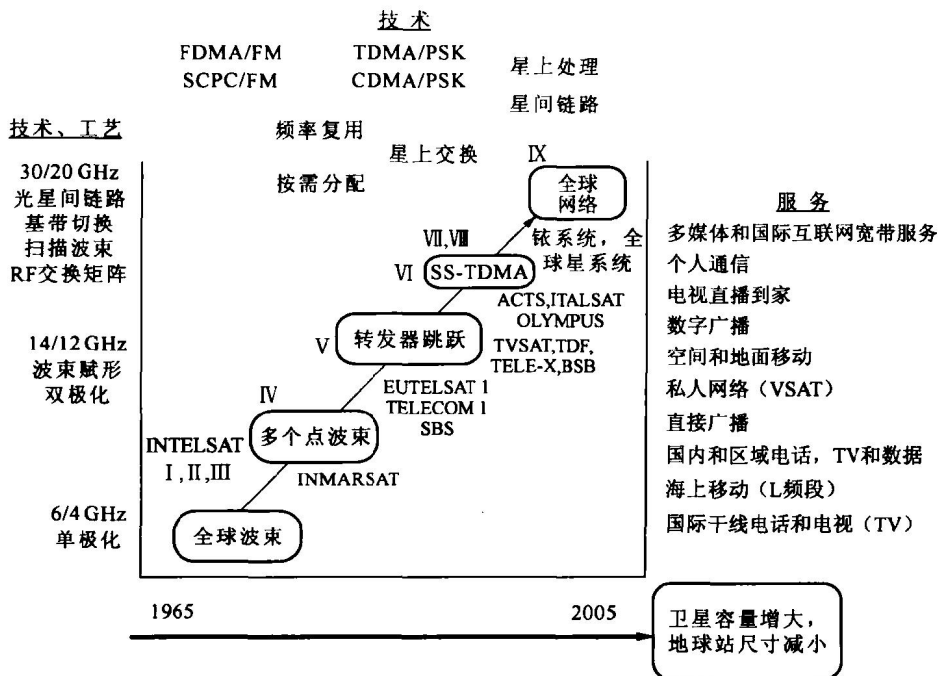


图 1-5 卫星通信技术的发展概况

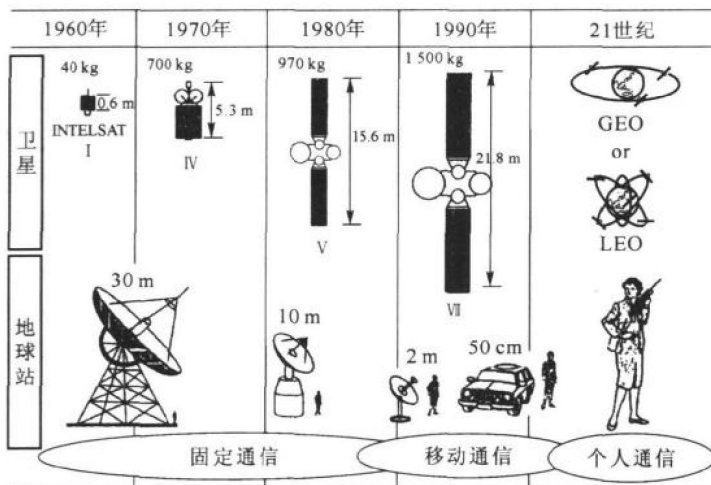


图 1-6 卫星通信从固定业务向个人移动通信、宽带多媒体通信发展