

空间数据系统 (第二版)

SPACE DATA SYSTEM

张庆君 郭 坚 董光亮 等编著
谭维炽 审 定



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

空间数据系统

SPACE DATA SYSTEM

(第二版)

张庆君 郭坚 董光亮 等编著
谭维炽 审 定

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

空间数据系统/张庆君等编著. -2版. —北京:中国科学技术出版社,2016.7

ISBN 978-7-5046-7171-4

I. ①空… II. ①张… III. ①空间探测—数据处理系统 IV. ①V557

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第138442号

责任编辑 张楠 崔玲

责任校对 杨京华

责任印制 张建农

封面设计 世纪鸿文

出版 中国科学技术出版社

发行 中国科学技术出版社发行部

地址 北京市海淀区中关村南大街16号

邮编 100081

发行电话 010-62173865

传真 010-62179148

投稿电话 010-62176522

网址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开本 787mm×1092mm 1/16

字数 620千字

印张 33.5

版次 2016年7月第2版

印次 2016年7月第1次印刷

印刷 北京长宁印刷有限公司

书号 ISBN 978-7-5046-7171-4/V·71

定价 86.00元

前 言

随着载人航天、深空探测、卫星导航通信、卫星遥感的快速发展以及空间网络、天地一体化网络的建设推动了空间系统技术的发展和广泛应用,空间信息资源日益成为重要的战略资源。空间数据系统可以定义为对航天器获取的、产生的以及相关信息进行可靠、安全的处理、传输、存储、分发等各部分的集成。它既不仅是“空间数据的系统”,因为它包含地面数据穿越空间网络;也不全是“空间的数据系统”,因为它还包含地面处理的系统。更全面地说,它是航天器内部各分系统(含有效载荷)之间、航天器之间、航天器与地面系统之间信息流动涉及的数据和软硬件系统。

为推动我国空间数据系统技术的研究及应用,中国航天科技集团公司中国空间技术研究院谭维炽研究员与顾莹琦博士于2004年编著了《空间数据系统》一书,在国内率先系统地向读者讲解和推荐CCSDS标准,该书作为空间飞行器设计专业研究生的教材以及在职中、高级技术人员了解空间数据系统的专业书籍,广受教师、学生和专业人士的好评。

在过去的十几年里,空间数据系统技术发展迅猛,日新月异。空间数据系统咨询委员会(CCSDS)推出了许多新标准和标准的新版本。为适应技术发展和应用研究的需要,我们启动了该书第二版的编写工作。第二版并不是第一版简单的完善和补充,而是从结构到内容的全面更新。主要基于三个原因:一是十多年来CCSDS的标准体系发生了很大的变化,过去的一些重要协议,例如分包遥控、分包遥测、AOS等进行了重组,不仅协议名称、术语等发生很大变化,内容也变化较大;

二是 CCSDS 中很多新内容需要体现,例如邻近空间链路、空间互联网、文件传输、航天器星载标准接口(SOIS)等,过去只是一个概念甚至概念尚未提出,现在已是空间数据系统中的重要组成部分;三是近年来 CCSDS 标准更加强调系统性、层次性,考虑到与十多年前相比,协议分层的理念已被广泛理解和领会,空间数据系统的很多概念和方法也已被大家所理解和接受,因此本书的体系架构也更加考虑与 CCSDS 标准的分层相对应,便于读者更好地理解、掌握 CCSDS 标准。

本书根据谭维炽研究员的提议,由张庆君策划和主持编写、审校,郭坚、董光亮、辛明瑞参与了全书框架设计和全部章节的修订、审校工作,何熊文参加了第 1、10、13 章的编写,阎冬参加了第 2 章的编写,王向晖参加了第 3 章的编写,张红军参加了第 4 章的编写,申景诗参加了第 5、7、9 章的编写,杨小瑞参加了第 6 章的编写,汪勃参加了第 8 章的编写,燕洪成参加了第 9 章的编写,鲁超参加了第 11 章的编写,张利萍参加了第 12 章的编写,朱剑冰、贺玮、田贺祥参加了第 13 章的编写。全书以 CCSDS 标准为主线索,按遥测遥控、高级在轨系统、邻近空间链路、同步与信道编码、数据压缩与文件传输、射频调制、空间互联网、航天器数据接口、空间数据安全、地面系统及交互支持等专题展开。第 2 章计算机网络技术,为部分初级读者补充一些计算机网络基础知识,以便于学习其他章节;第 13 章空间数据系统应用及展望,讲了一些应用 CCSDS 标准的航天器实例并对空间数据系统的未来发展方向进行了展望,供读者参考。为了更好突出中心内容,对第一版中若干可以在其他专业书籍中找到的基础性知识做了删减和压缩。与第一版相同,本书不是 CCSDS 标准的译本,而是对 CCSDS 标准的讲解,重点是对它的技术思想和概念的理解。

本书编写的过程中,谭维炽研究员全程参与,不仅对本书编写思路、组织结构提出了宝贵的意见,还对每一章的内容都进行了逐字逐句的审查、修改,为本书的出版付出了大量的心血;本书的编写和出版

还得到了教育部地球空间信息技术协同创新中心的资助以及中心领导和老师的悉心指导,李德仁院士、刘经南院士、张军院士、李建成院士、龚健雅院士和陆建华院士都给予了具体的指导,提出了很好的建议,中心的杨旭教授,蔡列飞处长也为出版而付出了辛勤的劳动,在此表示衷心的感谢!

本书可以作为大学或研究生的专业教材,也可作为从事航天器系统设计中、高级工程技术人员的参考用书。由于作者水平有限,书中难免有疏漏和错误之处,恳请读者批评指正。

作者

2016年5月

目 录

第1章 概论	1
1.1 空间数据系统概念	1
1.2 空间数据系统发展演变	2
1.3 空间数据系统咨询委员会(CCSDS)及其建议书 ^[3]	17
第2章 计算机网络技术	31
2.1 网络及其参考模型	31
2.2 典型网络介绍	37
2.3 计算机网络新技术 ^[4]	43
第3章 航天器遥测遥控	53
3.1 概述	53
3.2 遥测的发展及分类	54
3.3 遥控的发展及分类	58
3.4 PCM 遥测	68
3.5 PCM 遥控	70
3.6 分包遥测	73
3.7 分包遥控	88
3.8 共性技术	110
第4章 高级在轨系统	126
4.1 概述 ^[S107]	126
4.2 高级在轨系统业务 ^[S107]	129
4.3 高级在轨系统协议说明 ^[S107]	143
4.4 安全支持协议说明	161
4.5 我国 AOS 的实现情况	164
第5章 邻近空间链路	168
5.1 邻近空间链路的概念	168
5.2 邻近空间链路应用需求	169

5.3 邻近空间链路协议特性	173
第6章 遥测遥控同步与信道编码	195
6.1 概述	195
6.2 遥测同步与信道编码	200
6.3 遥控同步与信道编码 ^{[S24][S22]}	216
6.4 时间同步	221
第7章 数据压缩及文件传输	225
7.1 无损数据压缩	225
7.2 有损数据压缩	238
7.3 空间文件传输协议	253
第8章 射频与调制	269
8.1 空间无线电资源和频率利用	269
8.2 统一载波调制	277
8.3 射频链路 ^[S45]	284
8.4 无线电遥控、遥测与测距 ^[S45]	289
8.5 应答机转发频率比 ^[S45]	307
8.6 载波直接调制	311
第9章 空间互联网	328
9.1 概述	328
9.2 太阳系互联网	329
9.3 天基综合信息网	338
9.4 延迟容忍组网技术	344
9.5 空间互联网路由技术	352
第10章 航天器星载数据接口	370
10.1 星载数据接口概述	370
10.2 星载接口业务体系结构	372
10.3 命名与寻址机制	391
10.4 业务用户场景	393
10.5 业务应用方法 ^[3]	394
第11章 空间数据安全	403
11.1 数据安全性的基本概念 ^[1-3]	403
11.2 高级数据加密标准 AES ^[4]	414

11.3	公开密钥 RSA 算法	420
11.4	数字签名	422
11.5	CCSDS 数据安全协议	422
11.6	CCSDS 密码算法	435
第 12 章	地面系统及交互支持	437
12.1	地面系统概述	437
12.2	交互支持 ^[S134]	446
12.3	SLE 数据传输 ^[S138]	450
12.4	SLE 业务管理 ^[S138、S135、S136]	457
12.5	SLE 的结构模型 ^[S139]	464
12.6	交互支持的应用	469
12.7	数据交换格式的标准化	475
第 13 章	空间数据系统应用及展望	488
13.1	空间数据系统在海洋二号卫星的应用	488
13.2	空间数据系统在 Landsat - 7 的应用	493
13.3	空间数据系统发展展望	504
附录 1		508
附录 2		517

第 1 章 概 论

1.1 空间数据系统概念

随着航天科技的不断进步,航天器平台和有效载荷的复杂度都在不断提高。从对地观测卫星到数据中继卫星,从无人航天器到载人飞船和载人空间站,以及无人或载人火星探测器等深空飞行器,航天任务的物理环境更复杂,功能要求更高,信息获取的能力更强,信息传输和交换的需求日益迫切,因此对航天任务的数据获取、处理、传输、交换、存储和安全等也提出了更高的要求,空间数据系统概念应运而生。

空间数据系统可以定义为对航天器获取、产生以及涉及航天器的有关信息进行可靠、安全的处理、传输、分发的各功能部分的集成。既不仅是“空间数据的系统”,强调专为航天器提供数据服务,因为它还包含地面数据穿越空间网络;也不全是“空间的数据系统”,强调系统处于太空,因为它还包含地面处理的系统,二者的结合才是空间数据系统的完整内涵。空间数据系统不是传统的遥测系统、遥控系统和测轨定位系统的简单相加,而是要统一航天器有关的信息处理、传输的方法和要求,进而支持航天器之间、航天器与地面之间的互联互通。从体制上,它符合多信源、多用户的开放系统模型,完全不同于传统体制的点对点封闭系统,但又不是简单地把地面因特网搬到天上,而是针对空间特殊应用环境和空间任务特殊要求而开发的一整套崭新的标准体制;在技术上,它是现代计算机技术、网络技术、通信技术和电子技术等最新发展的综合产物,又是航天技术发展进一步需求的结果。空间数据系统的内涵涉及一系列新观点和新概念,为了深刻理解它,我们首先要从宏观上转变一些传统的观念。

我国的航天技术已经从试验阶段走入应用阶段,随着航天任务的需求增长,我国航天器的复杂性和品种日益加大,对数据系统的要求也越来越高。我国将研制各种大型复杂航天器,其上的计算机和微处理器、微控制器将多达数百,需要高可靠高速率的网络把它们分级、分布互连起来,航天器的数据管理和自主能

力将前所未有,遥测参数有几千个,遥控命令达上千条,综合数据速率从每秒千比特到每秒吉比特,还随时要应对突发事件和故障状态,在轨寿命将超过 10 年甚至 15 年,自主管理、自主诊断和自动重组等技术的应用将极大提高航天器的可用度,同时需要大量的数据支持。例如我国天宫一号目标飞行器和空间实验室的关键工程遥测参数有 700 多个,总线遥测参数超过 6000 个,遥控指令超过 1700 条,下行关键工程遥测速率为 16kbps,下行载荷数据速率达 144Mbps。高分辨率遥感卫星的下行载荷速率超过 1Gbps。对于载人航天器,包括空间实验室、空间站和往返运输航天器等,宇航员的生命保障和人机系统将纳入数据系统,还需要提供宽带视频和电子邮件等网上业务,以及支持交会对接、人机交互的复杂任务和功能。与此同时,微小型航天器的发展方兴未艾,其数据系统的综合一体化和微机电、微电子技术结合成为实现微小型化的必由之路,对星座和星群的管控将引出特殊测控技术,其数据处理、交换和传输都是我们必须认真研究的。深空探测是 21 世纪航天的特色,我国也已启动深空探测并会逐渐加快步伐,因此适应深空飞行的数据系统,将要具备超远距离通信、超强自主管理和支持遥操作的能力,还可能需要长达数十年的飞行寿命。由深空飞行和天地信息网发展而牵动的我国天基网建设,提出了空间移动平台联网的要求,一系列崭新课题摆在我们面前。建成完全的天基测控和数据网将根本改变我国空间数据系统的技术面貌。总之,航天技术发展的空间很宽广,空间数据系统的发展天地也很大,这就是我们在这个领域大有作为的需求所在。

结构与机构、电源和供配电、姿态和轨道控制、测控通信与数据管理、热控是航天器平台的五大支柱,其中测控通信与数据管理是空间数据系统的核心,也是航天器的信息中枢。国内外有大量的实例说明,数据系统的可靠性往往就决定了航天器的安危,而当航天器发生重大故障时又恰恰是依靠数据系统来挽救的。

数据系统是在轨航天器与地面信息交换的途径,地面能够根据航天器返回的数据分析星上的工作情况;同时,可以对星上注入新的命令和数据控制航天器的运行,因此数据系统是人工干预排除航天器在轨故障的最有效手段。

1.2 空间数据系统发展演变

随着电子集成技术、计算机技术和网络技术的飞速发展,电子集成由亚微米、深亚微米迈向纳米级,互联网+、工业 4.0 等新概念也逐渐进入航天领域;另一方面航天技术也在突飞猛进,航天器同时向大型多功能综合化和单任务微小

型化两个方向发展,星座飞行和深空飞行成为两个崭新的领域。这些新技术的融合给空间数据系统技术带来了巨大的变化,空间数据系统也随着技术的变革,在拓扑结构、处理方法、实现手段等方面逐渐演变。

1.2.1 拓扑结构的演变

在拓扑结构方面,空间数据系统的演变呈现出从分散到集成、从点对点到网络、从单一功能网络到多网多功能融合的趋势。

1.2.1.1 从分散到集成

早期的航天器上,遥测、遥控、跟踪定位、数传都是独立的通道,其中遥测分系统、遥控分系统和跟踪定位分系统等统称 TTC (Telemetry, Tracking, and Command) 系统。数传为单独的分系统,用于传输数据率较高的有效载荷数据。

后来把遥测、遥控、跟踪定位三个分系统的射频载波统一起来,合并为一个公用的信道。其上行载波上调制了遥控副载波和测距侧音,在下行载波上调制了遥测副载波和返回的测距侧音,同时还利用残余载波进行测角和测速。这样,遥测、遥控和跟踪定位的视频部分就相对独立于射频部分。

随着航天器的日益复杂,许多自主的任务提出来了,例如程控、延时命令、有效载荷运行管理、能源管理、热控管理、系统级安全管理、系统级重组、星上时统以及各分系统之间数据交换与共享等,几乎是每一个卫星都需要的。起初,这些任务可以采用扩大遥测遥控分系统功能的办法来实现,例如把遥控与程控结合起来,遥测与时统结合起来等。但后来,自主管理的任务越来越重,也越来越复杂,于是产生了一个综合完成遥测遥控和自主管理任务的分系统,我国多称之为数据管理分系统(简称数管分系统),可以说,星上数管分系统是空间数据系统在航天器上的重要组成部分。“数据管理”源于英文 OBDH (On Board Data Handling),其中 Handling 主要指数据处理,在小卫星上通常也称为“星务分系统”(On Board Housekeeping),美国人常用 C&DH (Command and Data Handling);随着数据“管理”的任务日益增加,因此又出现了 OBDM (On Board Data Management)。后来随着系统功能的进一步集成,在数管分系统的基础上,把全星(或部分)电子设备的功能融合,实现软硬件资源的充分共享,支持更复杂的星上自主管理功能,即所谓综合电子系统。在我国,数管分系统的主要功能起初仍是以遥测数据采集和格式化以及遥控命令的处理和分配为主,与计算机化的遥测遥控分系统差别不大。这并不是因为没有自主管理的需求,而是因为数管技术刚刚起步,其能力和可靠性(尤其是软件可靠性)还不能满足(至少是当时尚未被

实际工程证明能满足)航天器自主管理的要求。这种现状使不少人对数管分系统的存在意义产生过疑问。但是随着数管分系统在轨运行的出色表现,人们对它的期望也就日益提高,逐渐把越来越多的星上自主管理任务赋予了它。数管技术本身也在不断发展。为了使航天器具有强大的自主管理能力,必须把全星数据统一管理起来,在星载数据网络、全星数据库和分布式操作系统的支持下,实现全星数据共享、分系统间自由对话和交互支持、系统级重组管理以及有效载荷与平台的统一数据流传输。

我国第一代星上数管分系统的典型构成如图 1-1 所示。

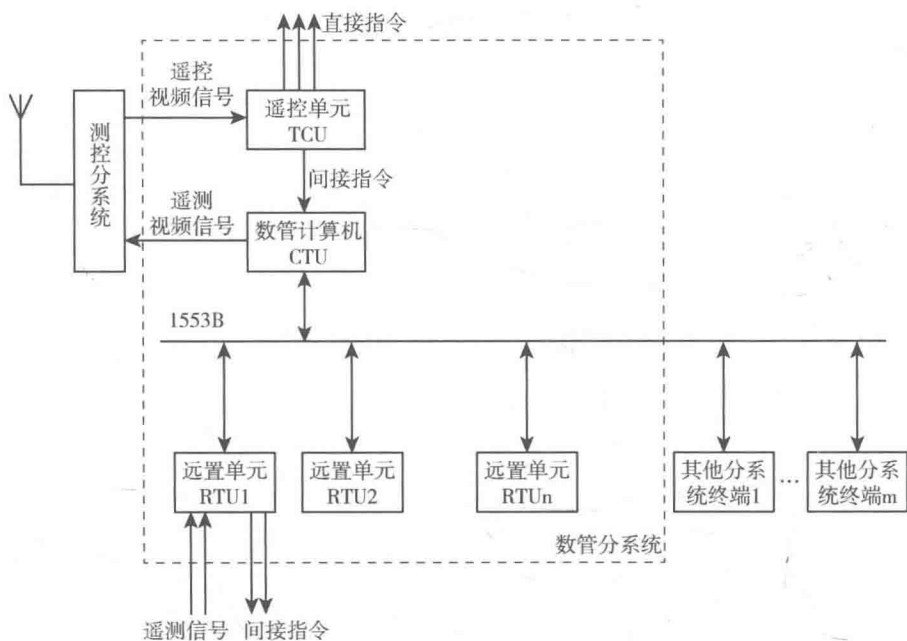


图 1-1 第一代星上数管分系统典型示例(OBDH/C&DH)

由图可知,数管分系统采用 1553B 总线(小卫星采用 CAN 总线)将各有数据交换要求的远置单元和分系统智能终端连接在一起。数管计算机(CTU)作为总线控制单元,其他各分系统与数管远置单元(RTU)一起,通过总线接口挂在总线上,数管计算机与远置单元及分系统之间的数据和命令交换都是通过总线。由于遥控具有实时性、安全性等多方面特殊要求,所以保留了一部分遥控的独立处理。一方面,保持了不需通过星上计算机的直接指令系统,即通过遥控单元直接译码形成命令输出给相应星上分系统或用户;另一方面,遥控单元可将注入数

据通过星上计算机和总线送给用户,这种方式尤其用来实现延时指令控制或数据注入等功能。

在这个阶段,测控分系统、数管分系统、数传分系统为功能相对独立的分系统,测控分系统用于传输平台的遥控、遥测数据及测轨定位等,数管分系统用于在星上传输数据及处理,数传分系统用于传输高速的有效载荷数据,例如遥感或深空探测卫星的图像数据、中继卫星的中转数据、载人航天器的话音和视频数据等。对应测控以及数传的地面应用系统都有专用的地面站,不同的应用系统之间无法通用。

随着空间数据系统的新体制高级在轨系统(AOS)的应用,有效载荷与平台数据流可以实现统一传输,即在同一个高速信道里传输。星上数管分系统也承担了更多的功能,例如数据的复接、存储与回放等,此时的星上数管分系统可称为第二代,其典型构成由图1-2所示。相比第一代星上数管分系统,第二代增加了高速复接器以及大容量存储器设备,其中高速复接器用于将平台的数据与载荷的数据进行复接后通过数传分系统传送;大容量存储器用于存储平台及载荷的数据,并在入境后通过高速复接器回放。出于可靠性考虑,仍保留了常规的测控信道用于关键指令和关键遥测数据的传输。

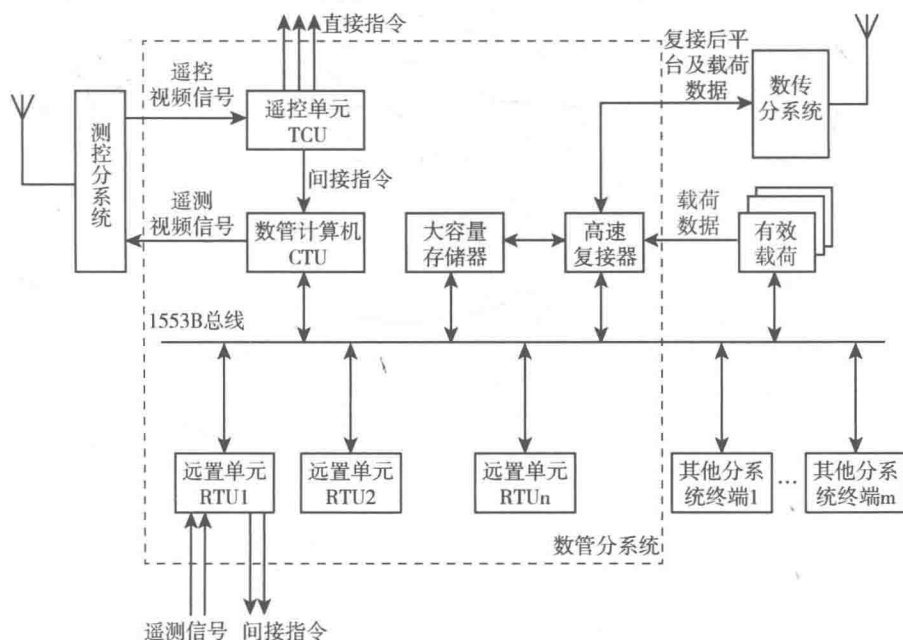


图1-2 第二代星上数管分系统典型示例(OBDH/C&DH)

后来再发展的综合电子系统,在原数管分系统功能的基础上,进一步将热控管理、火工品管理、解锁与转动机构控制等功能进行了集成,并增加了自主任务规划、自主导航、星间路由、信息处理等许多新的管理功能,通过统一的信息网络服务、硬件模块化设计、软件构件化设计等技术实现软硬件资源的共享和重用,该阶段可以称之为第三代星上数管分系统。其典型的组成示例如图1-3所示。此阶段的数管分系统(或综合电子分系统)通过轻小型化设计、模块化设计,支持通过模块组装形成设备(例如卫星管理单元和多个数据接口单元)进而组成系统,大幅精简了系统的硬件设备,并可根据任务需要进行模块的选择和增减,支持通过多个通用处理器模块组成分布式计算环境,为航天器提供通用的计算服务。

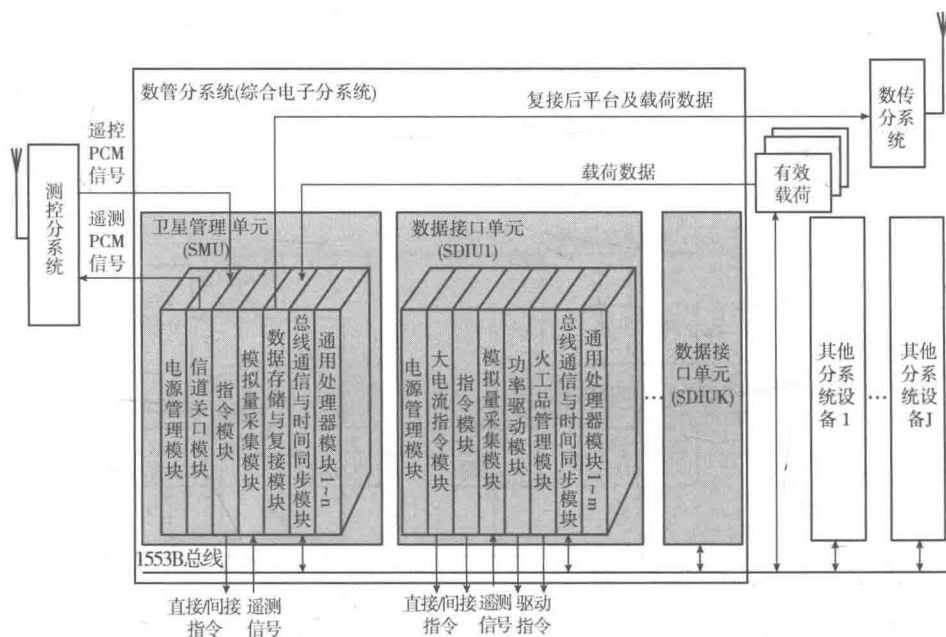


图 1-3 第三代星上数管分系统典型示例(OBDH/C&DH)

1.2.1.2 从点对点到网络

早期的航天器一般直接与地面进行通信,其通信方式为点对点通信,这种模式下,在一个地球站对一个中低轨道航天器的可视时间大约不超过全轨道的百分之十五。随着中继卫星技术的应用,可为数据在空中的传输提供接力,数据的传输方式由航天器 $\leftrightarrow$ 地面变为航天器 $\leftrightarrow$ 中继卫星 $\leftrightarrow$ 地面,可大幅

提高航天器的可视时间。随着更多中继星的加入以及航天器之间星间链路的建立,未来将形成一个由多类型航天器组成的天基网,与地面网络并存,构成了一个立体交叉的数据网络,如图1-4所示。

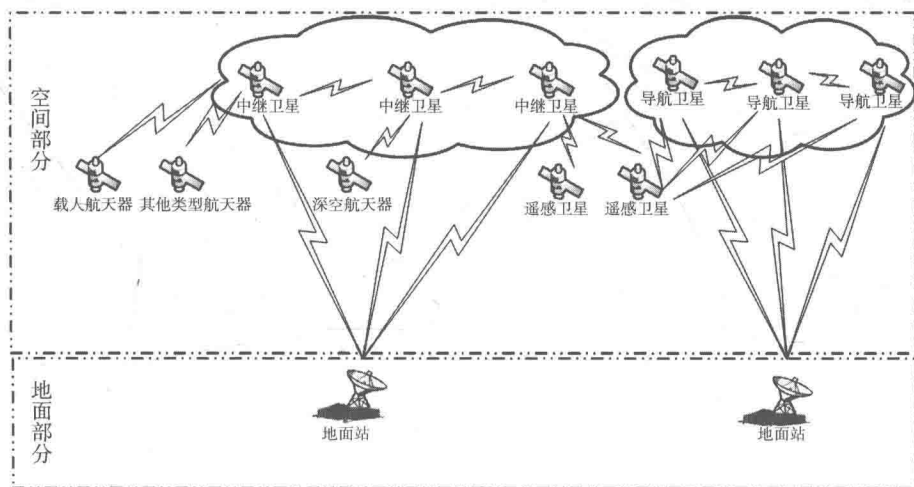


图1-4 天基信息网络示意图

星—星通信网与传统的星—地链路相比,大大扩展了通信覆盖范围。另外通过导航定位、定时功能使航天器的测轨定位由原来完全依赖地面变成以天基实时自主定位为主,以地基为辅,不但定位的精度和实时性大大提高,而且降低了对数据信道的要求。尤其是对深空飞行和星座星群的测轨定位,天基网的作用意义深远。在天地网络支持下将来有可能在全球范围内做到无缝的通信,使航天器的可靠性和效益发生大的飞跃。

地面互联网的发展为航天数据业务提供了新思想和借鉴,目前地面互联网的技术和设计思想已经渗透到航天器数据网的建立中了,而且,国际上的航天专家们正在规划将天基网和地面互联网统一组织成一个全方位立体结构的行星际大网络,他们甚至大胆设想,今后要在 Internet 域名的最后再加上有关所在星球的后缀,如 . earth 或 . mar,以区分网站所在的星球。可见,整个星地一体化网络的建立将是未来空间数据网的发展方向。

在新的数据传输体系中,空间数据网与地面公众互联网可以连结为全球一体化的立体网络,空间数据系统由封闭的点对点模式转变为开放的网络模式,每一个航天器只是空间网络中的一个结点,每一个地球站只是地面网络中的一个结点。而且不同类型航天器的地面应用站和测控站,例如气象卫星地球站、遥感

卫星地球站、通信卫星地球站与测控地球站可以合并和通用化。这样,在实验室中,甚至在个人手持终端上对航天器做遥操作将不再是梦想,其示意图如图 1-5 所示。其中包括在实验室中对星载计算机进行文件操作和在轨软件维护(OBSM)。在地面互联网基础上发展起来的云计算、大数据等先进技术也都会进入空间数据系统应用。

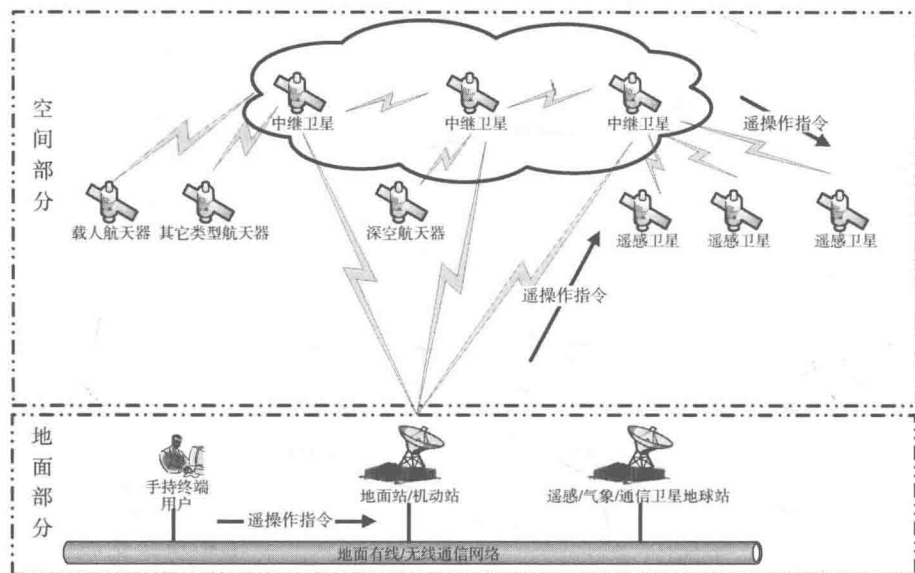


图 1-5 遥操作示意图

1.2.1.3 从单一功能网络到多网多功能融合

随着技术的发展和用户需求的牵引,传统单一的功能网络例如导航网、通信网、遥感网、地面网络等呈现逐渐融合的趋势。例如遥感卫星需要既通过通信卫星进行数据的转发和下行,也需要导航卫星提供导航定位服务。

未来的天地一体化网络将包含由遥感卫星、导航卫星、通信卫星、载人航天器、深空探测航天器等组成的天基网以及地面站、用户终端等组成的地面网络,随着天地一体化的统一协议建立和应用,各种不同类型的卫星与地面网络之间将实现互联互通,地面测控的范围将逐渐走向无缝测控,不同种类卫星之间的协同操作也将变为可能,从而为用户提供更为便利和优质的服务。其示意图如图 1-6 所示。