

面向流量相关性的 高级在轨系统复用及优化技术

The Technology of Multiplexing and
Optimization on Advanced Orbiting System Based on Traffic Correlation

■ 赵运弢 田野 冯永新 国一兵 著

防工业出版社
National Defense Industry Press

面向流量相关性的高级 在轨系统复用及优化技术

The Technology of Multiplexing and Optimization on
Advanced Orbiting System Based on Traffic Correlation

赵运弢 田野 冯永新 国一兵 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

随着航天技术的飞速发展,为满足航天任务的复杂性、多样性和长期性要求,将传统的空间数据交换向网络传输转变,传统的指令传输向语音、图像和视频等大容量传输过渡,CCSDS提出一系列建议书,为空间数据系统定制了通信体系、协议与业务规范标准。本书深入剖析了CCSDS高级在轨系统协议规范,从网络流量长、短相关性入手,对基于流量相关性的CCSDS空间数据系统复用及优化关键技术进行研究,建立了MPDU复用过程的无限缓存和有限缓存下的成帧模型,分析了多信源ON-OFF模型下的复用效率的长相关性,采用分级调度策略构建AOS虚拟信道调度总体优化控制方案,并建立基于HLA-RTI的AOS多信源仿真系统。

本书对于相关专业领域的研究人员、工程技术人员、高校教师 and 研究生等,具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

面向流量相关性的高级在轨系统复用及优化技术/赵运弢等著.

—北京:国防工业出版社,2018.4

ISBN 978-7-118-11599-4

I. ①面… II. ①赵… III. ①空间信息系统—研究 IV. ①P208.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第099256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 100048)

北京虎彩文化传播有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 5 1/4

2018年7月第1版第1次印刷

印数 1—600册

定价 79.00元



(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 88540777

发行邮购:(010) 88540776

发行传真:(010) 88540755

发行业务:(010) 88540717

前 言

空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 是为空间数据系统定制的通信体系、协议与业务规范标准。为了满足未来空间数据系统流量的复杂性和突发性的要求, 构建未来空天地一体化的空间数据系统, 开展基于流量相关性的 CCSDS 空间数据系统复用及优化技术研究具有重要的理论意义和应用前景。正是由于 CCSDS 的广阔前景和未来空天地一体网络的巨大应用价值, 并随着未来空天网络规模的急剧增长, 空天网络必然也面临着地面 IP 网络协议发展过程中遇到的流量相关性问题, 针对 CCSDS 流量长相关、自相似性所引发的一系列问题, 分析和研究 CCSDS 协议, 特别是其中高级在轨系统 AOS 的流量相关性的复用和优化关键技术, 必将成为研究的热点和亟待解决的方向性前沿问题。

为此, 针对 CCSDS 高级在轨系统 AOS 特性, 结合流量长/短相关下的成帧模型, 在国家自然科学基金“基于自相似业务流的高级在轨系统多路复用优化模型与算法研究”等项目 (61471247, 61501307)、中国博士后科学基金 (2016M590234) 课题、辽宁省特聘教授支持及滚动支持, 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助 (LR2015057)、辽宁“百千万人才工程”培养经费资助 (2014921044)、辽宁省一般项目 (No.L2015459, LG201611) 及沈阳理工大学博士后科研启动基金、重点实验室开放基金 (4771004kfs32) 的资助下, 进行了 AOS 多路复用及优化技术的研究。在此基础上, 完成部分研究成果汇总、撰写本书, 从而为相关领域的研究工作提供新思路、新方法, 为未来 CCSDS 协议的应用提供技术支持和理论支撑。全书共分 7 章。

第 1 章绪论。阐述了本书的背景和意义, 分析 CCSDS 空间数据

系统的国内外发展现状,对流量长、短相关下的 CCSDS 空间数据系统性能的影响进行了分析。

第 2 章 CCSDS 空间数据系统特性分析。在 CCSDS 建议书的基础上,重点对 CCSDS 空间数据系统主网模型、CCSDS 星载数据系统、地面数据系统进行分析,并结合 CCSDS 空间链路子网,系统地分析了虚拟信道链路控制子层和虚拟信道存取子层的工作过程,从而为后续的多路复用机制研究提供技术支持。同时,对 CCSDS 空间数据系统业务等级及路径业务、互联网业务、封装业务、复用业务、位流业务、虚拟信道访问业务、虚拟信道数据单元业务、插入业务 8 种业务进行深入研究与分析,为 CCSDS 空间数据系统复用和优化提供技术支持。

第 3 章基于短相关流量下的 AOS 多路复用技术。针对 CCSDS 空间数据系统,特别是其高级在轨系统 AOS 多路复用机制,结合标准 CCSDS 源包的 MPDU 复用业务,深入开展 AOS 包信道复用效率研究与分析,建立了 MPDU 复用过程的无限缓存和有限缓存下的成帧模型,推导给出了两种模型下的 MPDU 复用效率的计算公式,从而为 CCSDS 高级在轨系统的标准设计及优化提供数学基础及理论支撑。

第 4 章基于自相似流量的 AOS 多路复用技术研究。针对 CCSDS 空间数据系统主网部分相关业务流量存在的长相关自相似特性,基于 Pareto 重尾分布多信源 ON-OFF 叠加过程,并结合自相似流量生成模型及检测方法,建立了长相关自相似流量下的 AOS 等时帧生成模型,将 AOS 复用过程推广到长相关领域,分析了多信源 ON-OFF 模型下的复用效率的长相关性,并通过仿真进一步研究了长相关自相似流量下的 AOS 复用效率的自相似性以及流量自相似性的强弱变化趋势。

第 5 章基于自相似流量的 AOS 多路复用技术研究。进行基于流量相关性的 AOS 虚拟信道调度优化方法研究。在研究 AOS 虚拟信道复用机制的基础上,分析了 AOS 空间数据系统业务流量特性及传统调度方法在流量相关性条件下的局限性,针对 AOS 短相关业务流量,建立了跨层优化的加权轮询虚拟信道调度 (Weighted Polling of Cross-layer Optimization, WPCLO) 方法;针对 AOS 长相关自相似业

务流量，建立了延迟累积自适应轮询调度（Scheduling of Delay Accumulation Adaptive Polling, SDAAP）方法。并采用分级调度策略构建 AOS 虚拟信道调度总体优化控制方案。

第 6 章基于 HLA-RTI 的 AOS 多信源仿真系统设计。基于 HLA-RTI 仿真技术，根据五类信源，包括：8bit 小信源、16bit 小信源、文本信源、图像信源和声音信源，对总控成员模块、多信源封装成员模块、帧同步模块、虚拟信道复用与字节提取模块、最佳同步码型等进行了开发和研究，进行了基于 HLA-RTI 的 AOS 多信源发送/接收仿真系统的总体设计，对系统软、硬件环境进行了配置，并设计了仿真系统的通信接口。

第 7 章基于 HLA-RTI 的 AOS 多信源仿真系统实现。重点实现并仿真验证了基于 HLA-RTI 的 AOS 多信源仿真系统的核心模块，包括：发送端的多信源封装模块、虚拟信道调度模块、附加帧同步标记添加模块以及接收端的帧同步模块、虚拟信道分用和解析模块。

研究过程中，要感谢课题组所在辽宁省“通信与网络技术”省级工程中心和辽宁省“信息网络与信息对抗技术”省级重点实验室所提供的研究平台和条件；要感谢课题组所在的“通信与网络工程中心”研究团队的积极协作。

本书的撰写工作，除作者外，还要感谢潘成胜教授以及团队成员张文波、张德育、姜月秋、钱博、刘猛、黄迎春、周帆、田明浩、刘芳、隋涛、蒋强、马玉峰、刘立士等的大力支持，还要感谢“通信与网络工程中心”的研究生张耀寰、周雅芳、康紫允、徐春雨、张雨薇、张昊等的努力工作。

本书对于相关专业领域的研究人员、工程技术人员、高校教师和研究生等，具有较高的参考价值。

限于作者水平，本书难免有疏漏和不足之处，恳请作者批评指正。

作 者

2018 年 1 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 现状及趋势	3
1.2.1 CCSDS 空间数据系统发展及现状	3
1.2.2 流量相关性对 CCSDS 空间数据系统性能的影响	11
参考文献	14
第2章 CCSDS 空间数据系统特性分析	16
2.1 引言	16
2.2 CCSDS 空间数据系统主网模型	16
2.3 CCSDS 星载数据系统	21
2.4 CCSDS 地面数据系统	24
2.5 CCSDS 空间链路子网 SLS	26
2.5.1 SLS 业务子层	26
2.5.2 SLS 业务等级	28
2.5.3 SLS 业务种类	29
2.6 CCSDS 网间 CPN 业务	38
2.6.1 CCSDS 路径业务	38
2.6.2 CCSDS 网间业务	40
2.7 本章小结	41
参考文献	41
第3章 基于短相关流量下的 AOS 多路复用技术	43
3.1 引言	43
3.2 AOS 高级在轨系统多路复用机制	43
3.2.1 两级多路复用	43

3.2.2	AOS 包信道多路复用	45
3.2.3	包信道多路复用性能影响分析	46
3.2.4	包达到模型	50
3.3	模型 1 无限缓存包信道复用	50
3.3.1	无限缓存包复用过程	50
3.3.2	无限缓存复用效率递推关系	51
3.3.3	仿真研究及分析	53
3.4	模型 1 有限缓存包信道复用	54
3.4.1	有限缓存包复用过程	54
3.4.2	有限缓存复用效率递推关系	55
3.4.3	仿真研究及分析	57
3.5	模型 2 包信道复用	59
3.6	本章小结	63
	参考文献	64
第 4 章	基于自相似流量的 AOS 多路复用技术研究	66
4.1	引言	66
4.2	流量自相似数学描述	66
4.2.1	连续自相似过程	66
4.2.2	离散自相似过程	68
4.2.3	流量自相似特征表现	68
4.3	AOS 数据流量长相关自相似特性	71
4.3.1	AOS 数据流量复杂性	71
4.3.2	AOS 数据流量突发性	73
4.3.3	AOS 数据流量自相似性	73
4.4	长相关 AOS 多路复用等时帧生成模型	74
4.4.1	现有自相似业务模型	74
4.4.2	自相似数据流检测方法	79
4.4.3	长相关成帧模型	82
4.4.4	长相关 AOS 复用效率	88
4.4.5	仿真分析	89
4.5	本章小结	97

参考文献	97
第5章 基于流量相关性的 AOS 虚拟信道调度优化方法研究	99
5.1 引言	99
5.2 AOS 虚拟信道调度机理	100
5.3 空间数据系统虚拟信道划分	102
5.4 虚拟信道调度算法分析与研究	103
5.4.1 虚拟信道调度算法	103
5.4.2 自相似流量下的虚拟信道调度算法性能分析	104
5.5 基于流量相关性的 AOS 虚拟信道分级调度	108
5.5.1 流量短相关跨层优化的加权轮询虚拟信道调度算法	111
5.5.2 流量自相似下的延时累积自适应轮询调度算法	118
5.5.3 AOS 虚拟信道调度总体优化控制仿真分析	123
5.6 本章小结	131
参考文献	131
第6章 基于 HLA-RTI 的 AOS 多信源仿真系统设计	133
6.1 引言	133
6.2 总体设计	133
6.3 系统硬件环境配置	135
6.4 系统软件环境配置	137
6.4.1 运行支撑环境 (RTI)	137
6.4.2 高层体系结构 (HLA)	138
6.4.3 联邦功能设计	139
6.5 本章小结	141
参考文献	141
第7章 基于 HLA-RTI 的 AOS 多信源仿真系统实现	143
7.1 引言	143
7.2 多信源封装模块实现	143
7.2.1 包信道复用子模块	143
7.2.2 BPDU 封装子模块	149
7.3 虚拟信道调度模块	152

7.3.1	虚拟信道调度模块设计	152
7.3.2	虚拟信道调度模块仿真	154
7.4	附加帧同步标记 (ASM) 添加模块	154
7.4.1	附加帧同步标记选取	154
7.4.2	ASM 添加模块设计	156
7.4.3	ASM 添加模块仿真	158
7.5	帧同步模块	159
7.5.1	帧同步原理及性能分析	159
7.5.2	帧同步模块设计	163
7.5.3	帧同步模块仿真	165
7.6	虚拟信道分用和解析模块	167
7.6.1	虚拟信道分用和解析原理	167
7.6.2	虚拟信道分用与空间包业务模块设计	169
7.6.3	虚拟信道分用与空间包业务模块仿真	170
7.6.4	虚拟信道分用与位流业务模块设计	171
7.6.5	虚拟信道分用与位流业务模块仿真	173
7.7	本章小结	173
	参考文献	174

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着航天技术的飞速发展,特别是微小卫星平台、载人航天、深空探月工程的深入开展以及长周期自主空间实验室规划实施,航天器平台和有效载荷的复杂度在不断提高,航天任务的物理环境更复杂,功能要求更高,数据速率范围更宽,空间任务呈现多样性、长期性,以往简单的数据交换向网络传输转变,传统的指令传输向语音、图像和视频等大容量传输过度,因此,对航天数据业务也提出了更高的要求,构建满足空间数据传输,同时能够与地面数据系统无缝互联的空间数据系统,以实现空间数据的采集、传输、处理和利用具有更加迫切的现实意义。

空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data System, CCSDS)作为空间数据系统技术权威的国际组织,20多年来,已经制定了近百个标准(建议书)。这些标准不只是单纯地统一世界各地的技术规范,更重要的是推出了一整套完全崭新的技术思想和系统体制。其宗旨是建立一个全球范围的、开放的、与CCSDS标准兼容的空间数据系统,用于国际交互支持、合作和空间信息交换服务,从而为构建空天地一体的、全覆盖的数据高速传输系统奠定基础。同时,CCSDS空间数据系统新体制得到了各主要空间国家和空间组织的广泛承认,采用CCSDS标准的空间任务迅速增多,包括各种不同类型的航天器,如国际空间站、深空探测器、各种近地轨道卫星和实验小卫星等。CCSDS拥有11个正式成员、28个观察员、142个工业会员和13个联络组织。其中,欧洲空间局(European Space Agency, ESA)明确规定以后的航天器必须采用CCSDS标准;美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)为在深空网

(Deep Space Network, DSN) 的高级多任务操作系统及未来星际互联网中已采用或即将采用 CCSDS 标准。

建立符合 CCSDS 体制的空间数据系统具有诸多优点。首先, CCSDS 推出的是动态优化的空间数据系统体制,它能够利用给定的星上资源,使用动态的数据组织和管理满足用户不同的需求,获取和利用最多的飞行任务信息,以做出准确的判读和处理;它是一个开放的网络系统,有利于系统集成和系统试验,支持系统容错,使数据系统与飞行任务能够并行设计以及能适应多目标的测控数据服务。同时,对采用 CCSDS 体制的数据流,可以很方便地建立长期保存和再利用的国际空间数据档案库,信息利用率将大大扩展;采用 CCSDS 标准的系统可以与国际互联网、专用网互联,实现全球交互支持,使航天器测控和数据传输无缝化;采用 CCSDS 标准符合未来空间数据系统国际通用化、系列化、模块组合化的发展趋势,可以降低开发成本,缩短研制周期,减少运行风险。对国内各地面站来说,各类航天器采用统一的 CCSDS 标准,可以在地球站与地球站之间通用,这样,地面站对航天器的服务就不仅局限于区域任务型号,还可以承担全球数据中转和传输业务。目前,各国在星上和地面软、硬件设备的开发和研制中逐步向与 CCSDS 建议兼容的方向发展,CCSDS 数据系统已经成为展现空间数据技术领域最新发展动态的集中舞台,开放网络的 CCSDS 标准是最适合的空间数据系统体制。

但是,在 CCSDS 建议书不断更新完善的同时,空间数据系统仍有许多问题需要进一步的深入研究。特别是随着航天器数量和通信业务种类的日益增多,空间数据系统上承载的业务量飞速发展,信息容量不断攀升,空间数据系统流量表现出更高的复杂性、突发性及自相似特性。而 CCSDS 空间数据系统,特别是高级在轨系统(Advanced Orbiting System, AOS)采用两级多路复用机制,将不同业务、不同信源的数据进行包信道复用和虚拟信道复用,由此引起的流量聚合、分解及整形使得数据流量特性变得更加复杂,流量的相关性不仅表现为短相关性,还表现为长相关性。而流量特性直接影响空间数据系统性能,同时也是空间数据系统规划设计的基础和前提,其对延时、复用效率等性能的影响更为直接。只有通过对流量相关性的全面而深入

的分析,才能很好地对系统性能进行评价,进而采取有针对性的措施,减少相关性带来的负面影响,最终使空间数据系统得到优化。因此,在流量相关性分析与研究基础上,开展 CCSDS 体制的复用和优化技术研究是建立空间数据系统首要解决的关键问题。

由此可见,由空天地信息网、载人航天和深空飞行发展而牵动的我国航天测控及通信系统建设,对空间数据系统提出了新的技术需求,建立满足 CCSDS 建议书规范的空间数据系统是未来的必然趋势,而基于流量相关性的 CCSDS 高级在轨系统性能分析、建模及优化是航天测控、导航和通信等数据系统规划设计的基础和前提,同时也为空间数据系统服务质量的保证提供了理论支撑和技术支持。

本书正是基于此背景,分析了当前 CCSDS 体制及协议规范,特别是 AOS 高级在轨系统所采用的关键技术,结合网络流量相关性理论,解决在复杂数据流量特性下的多路复用及优化关键问题,并对其数据成帧、虚拟信道调度和优化方法进行了深入研究,以期能为构建未来我国天地一体化网络和空间数据系统积累必要的技术基础;为空间数据传输优化、端到端信息交互和各类空间任务的顺利完成提供强有力的保证。

1.2 现状及趋势

1.2.1 CCSDS 空间数据系统发展及现状

空间数据系统咨询委员会 CCSDS 是由欧洲空间局(European Space Agency, ESA)、美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、俄罗斯空间局(Russia Space Agency, RSA)及日本、法国等国家的空间局共同成立的一个国际性空间组织,成立于 1982 年,主要目的在开发空间数据系统标准化通信体系结构、通信协议和业务,使未来的空间任务能以标准化的方式进行数据交换和处理,从而加速空间数据系统的开发,国际间的相互支持、合作与交流。CCSDS 已经被 ISO 承认是具有空间信息技术标准的国际权威。

CCSDS 对空间数据系统做了科学的规范。定义的空间数据系统符

合开发系统互联参考模型 (Open System Interconnection-Reference Model, OSI-RM), 它向用户提供数据管理业务、数据路由选择业务和数据传输信道业务三类业务的全面服务。数据处理系统面向航天器的全部应用过程, 不论是平台系统还是有效载荷系统, 它的信息形式都是数据包报文。从工程遥测遥控的低速率数据, 到图像语音等多媒体高速率数据, 跨度从低于 1bit/s 到高于 100Mbit/s, 不同速率和不同服务要求的多用户多信源数据包按照虚拟信道动态组合, 形成统一数据流在信道上传送。在整个空间网络中, 航天器作为星载数据系统的一个节点, 可以多层次对外开放, 互联形成空间综合业务数字网, 再与地面互联网融为一体, 构成立体化的全球信息网。

CCSDS 建立之后, 推出了一系列建议和技术报告, 内容涉及到分包遥测 (Packet Telemetry)、分包遥控 (Packet Tele-command)、遥控指令、射频、调制、时间码格式、遥测信道编码、轨道运行、标准格式化数据单元、无线电外测和轨道数据等, 反映了当时世界空间数据系统的最新技术发展动态。其中, 分包遥测和分包遥控是 CCSDS 最早制定的建议书, 它们使用虚拟信道方法实现多个用户动态地分享同一物理信道, 其数据传送速率中等, 实现的业务相对简单, 主要用于具有中等通信需求的近地和深空任务, 又称为常规在轨系统 (Common Orbiting System, COS)。

针对常规在轨系统 COS 的不足和未来数据系统的发展, CCSDS 对常规在轨系统建议进行了延伸, 提供了灵活性更强、更多样化的数据处理业务, 这就是高级在轨系统 AOS 建议。高级在轨系统与常规在轨系统相比最大的区别是, 前者能提供的业务类型要广泛许多。它既可用于下行链路, 又可用于上行链路, 也可应用于载人空间站、空间实验室、无人空间飞行平台、自由飞行的航天器以及新型空间运输系统。这些航天器都需要比常规任务更复杂的数据处理业务和更高的数据传输速率。另一方面, 伴随着航天技术的发展, 星上数据处理能力得到了极大地提高, 可以将星上视为与地面对等的一个数据处理中心, 因此, 传统的遥控和遥测概念在高级在轨系统 AOS 的数据双向传输中就变得相对模糊, 取而代之的是星地之间的前向和反向链路的概念。因此, AOS 可以使用对称的业务和协议, 在空间链路之间双向

提供声音、图像、高速遥测、低速处理等数据传输。为了使不同类型的数据共享同一链路，AOS 提供了不同的传输机制（同步、异步）、不同的用户数据格式协议（比特流、字节块、数据包等）以及不同等级的差错控制。从而提高信道利用率，降低成本，保证高质量的数据传输。

高级在轨系统 AOS 能够兼容常规在轨系统 COS，整个数据系统可能工作在一种 AOS 与 COS 共存的混合状态，例如，空间工作的 AOS 平台可能与独立的自由飞行器对接，该自由飞行器使用的是常规 CCSDS 标准；或者在一个系统中，不含声音和图像的上行数据使用的常规的分包遥控标准；而下行链路使用 AOS 标准。由于业务范围的扩展，AOS 将空间任务端到端的数据处理网络定义为 CCSDS 主网（CCSDS Primary Network, CPN），CPN 又包括空间轨道上的星载网络、地面网络和空间链路子网（Space Link Subnetwork, SLS）。CPN 采用了 ISO 的开发系统互联模型，提供八种不同的业务类型，包括路径业务（Path Service）、互联网业务（Internet Service）、封装业务（Encapsulation Service）、复用业务（Multiplexing Service）、位流业务（Bit Streaming Service）、虚拟信道访问业务 VCA、虚拟信道数据单元业务 VCDU、插入业务（Insert Service）8 种不同的业务，可以处理语音、图像、电视、科学实验数据等各种非同步的、来自不同信源的复杂数据。其中路径服务和互联网服务以异步方式穿越整个 CPN。也就是说，这两种业务需要 SLS 和星载/地面网的支持，在星载/地面网中，将不再保持数据包的顺序性。另外 6 种业务仅由 SLS 支持，可以工作在同步或异步模式，SLS 保持数据包的顺序性。

CCSDS 对每一技术问题的讨论结果以建议书的形式给出，根据对这些结果的认可程度，建议书分成若干等级，用不同颜色加以区分，白皮书（White Book, WB）为原始草稿；红皮书（Red Book, RB）为评审稿；蓝皮书（Blue Book, BB）为批准稿；绿皮书（Green Book, GB）为技术指导；黄皮书（Yellow Book, YB）为管理文件；粉皮书（Pink Book, PB）为修改意见。CCSDS 的建议书通过两种途径转化为标准：第一，被国际标准化组织批准转化为 ISO 标准。ISO 承认 CCSDS 为领导有关空间信息技术标准的国际权威部门，同意 CCSDS 对 ISO 第 20 技术委员会（TC20/SC13）制定的技术标准负主要责任；第二，

CCSDS 建议书被各空间组织采纳为其内部标准或与其兼容。其中 CCSDS 蓝皮书中的大部分已经或正在转为 ISO 国际标准。图 1.1 为航天器上的主要 CCSDS 建议书分层结构。

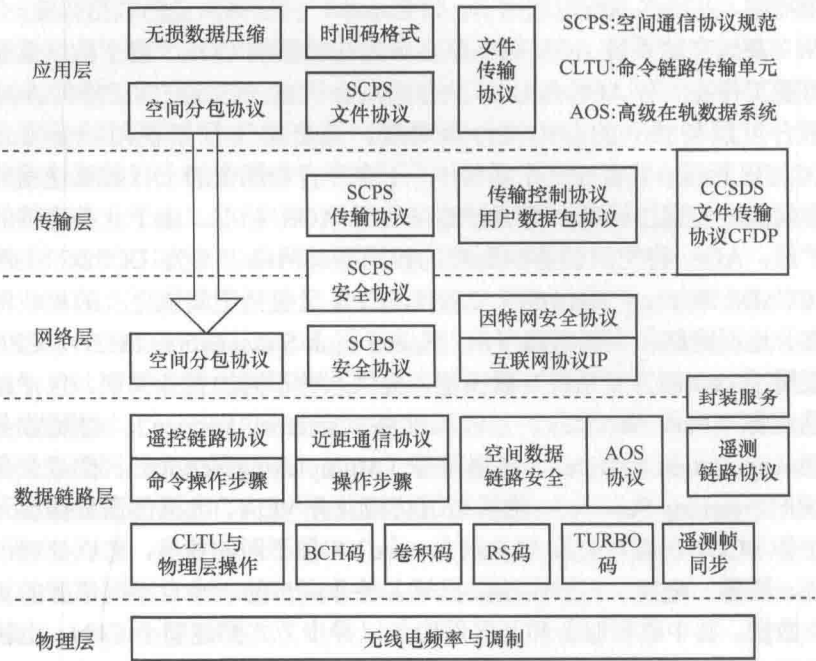


图 1.1 CCSDS 建议书分层结构

CCSDS 目前有 11 个正式成员，28 个观察员，140 多个合作伙伴，国际上主要航天机构均参加了该组织，为该组织各项技术活动的开展提供支持。虽然 CCSDS 建议在航天领域为推荐使用，但由于其反映了各航天机构交互支持的需求，技术体系相对完备，因此被各航天机构广泛采用，已成为国际航天领域中的事实标准。ESA 明确规定航天器必须采用 CCSDS 标准，NASA 的 DSN 深空网支持的新任务也必须符合 CCSDS 标准。目前，采用 CCSDS 建议的空间任务超过 500 项，包括卫星、空间站、深空探测器等。例如：2011 年 3 月，美国 NASA 的 Messaenger 探测器成功转入环绕水星的椭圆轨道，并采用 CCSDS 文件传输协议（CCSDS File Delivery Protocol, CFDP）向地球发送数

据；美国海洋大气局开发的极地环境监测系列卫星（Polar-orbiting Operational Environmental Satellite, POES），采用 AOS 数据系统代替原始的时分多路遥测系统，形成了覆盖全球的近地轨道星座；NASA 的 LandSat-7 卫星的载荷实时数据和大容量存储器的回放数据按照 CCSDS 分包遥测和信道编码协议完成组帧、编码和同步串行；美国国家导弹防御计划中的天基红外系统使用的航天器等也都采用了 CCSDS 标准。其他，如欧洲空局 ESA 的地面测控网、日本国家空间开发组织 NASDA 的技术试验卫星 ETS-8、美国空军卫星控制网和中继卫星等系统也应用了 CCSDS 建议。

我国 20 世纪 90 年代初开始跟踪、研究 CCSDS 建议，经过近 20 年的努力，已实现了从单纯的跟踪研究到工程应用、前沿技术验证的转变。起初为减少技术风险，在 1999 年发射的“实践”五号卫星上成功地进行了 AOS 标准的在轨技术飞行试验，取得了应用 AOS 标准的宝贵经验。2008 年 4 月在西昌发射成功的我国第一颗数据中继卫星“天链一号 01 星”在数据链路层使用了 CCSDS 协议，“天链一号 01 星”的成功发射将提高“神七”的测控和通信覆盖能力。此外，载人飞船和双星探测卫星等有效载荷数管系统上采用了 AOS 数据标准和基于 1553B 总线的分布式系统；863 测控科学通用平台也采用了 AOS 数据标准。采用 CCSDS 数据标准成功解决了载荷种类多、产生数据量各不相同和有突发数据传输的要求。系统可以根据需要对数据动态调配使信道得到非常有效和高度灵活的利用。另外，“神舟”飞船、探测一号、探测二号、实践系列卫星等卫星的成功在轨运行充分体现了采用 CCSDS 标准的优越性。更值得关注的是，2008 年 6 月 23 日，中国国家航天局 CNSA 已成为 CCSDS 组织第十一个正式成员，这也意味着中国航天管理机构已承认 CCSDS 空间数据协议体系为空间数据协议标准，中国航天研究机构将普遍采用 CCSDS 协议实现天-地间的数据传输与处理。

综上所述，CCSDS 能够满足未来航天探测任务的需求，从国内外 CCSDS 建议书的应用和发展来看，CCSDS 空间数据系统具有如下优点。

1. 重用性和可移植性

CCSDS 空间数据系统采用统一数据系统标准的系统测试和实现，可以很容易地在其他型号中得到应用，通过这种重用的方式，可以大