

# CCSDS 高级在轨系统及 在我国航天器中的应用

孙辉先 陈小敏 白云飞 吕良庆 汪大星

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080)

**摘要** CCSDS(空间数据系统咨询委员会)1989年发布了“高级在轨系统,网络与数据链路:结构说明”建议书,高级在轨系统(AOS)为空间数据系统信息交换与处理提供了极大的方便,同时向下兼容常规空间数据业务。中国科学院空间科学与应用研究中心自1993年开始进行AOS的应用研究,先后在载人飞船有效载荷数管系统、实践五号卫星、863遥科学通用平台以及计划于2003年发射的探测一号、探测二号卫星上采用了CCSDS AOS数据标准。

本文将简要介绍CCSDS、AOS标准以及在实践五号卫星、神舟飞船、遥科学通用平台和探测一号、探测二号卫星上应用AOS的情况与经验。

**关键词** CCSDS, AOS, 虚拟信道, 高速多路复接器, 1553B总线。

## 1 CCSDS 简介

CCSDS(空间数据系统咨询委员会)是由各国空间机构相互协作共同开发和制定空间数据标准以促进空间信息交换的国际性组织。CCSDS的目标是致力于建立一个世界范围的开放的CCSDS兼容的虚拟空间数据系统,以利于相互协作,支持和科学信息的交换。

CCSDS建立于1982年,由美国NASA和欧空局ESA等世界上主要空间机构组成,为共同关心的空间数据系统的开发与操作提供了一个论坛。目前CCSDS有10个正式的成员,23个观察员,100多个工业组织。我国空间技术研究院(CAST)以观察员身份加入了CCSDS。

CCSDS的主要任务是对空间数据系统的问题进行讨论和研究,制定空间数据系统标准,这些标准均以建议书的形式出现。CCSDS的文件有6种,分别以不同的颜色表示其种类:

蓝皮书——正式建议书

红皮书——建议书草稿(尚未被批准采用的建议书)

粉皮书——对现有建议书的更新草稿

绿皮书——CCSDS的报告

白皮书——有二种,一种是建议书草稿,将发展为红皮书;另一种为报告的草稿将发展为绿皮书

黄皮书——行政管理类报告(CCSDS程序、备忘录等)

目前CCSDS已批准并正式使用的正式建议书(蓝皮书)有30份,内容涉及遥测系统、遥控系统、辅助数据、射频与调制系统,跟踪与导航系统,信息访问与交换系统,高级在轨系统,交互支持的概念、服务与结构等。

## 2 高级在轨系统(AOS)简介<sup>[1]</sup>

CCSDS 成立的初期制订了一系列针对“常规”任务(Conventional missions)的建议书,包括射频与调制,分包遥测、遥测信道编码,遥控等,为多种无人空间飞行器数据系统的标准化建立了广泛的基础。

1986 年由于开发国际空间站,针对常规任务制定的标准难以满足空间站的需求,CCSDS 决定进一步提高和扩展其常规建议书,开发高级在轨系统(AOS),以便能够提供更为方便灵活的数据处理服务。AOS 包括载人空间站、无人空间平台、自由飞行的空间飞行器和空间运输工具。许多这类系统需要在空-空、空-地、地-空链路同时传送多种数字化信息,包括图像和语音。1989 年 CCSDS 发布了“高级在轨系统,网络与数据链路:结构说明”建议书,1992 年和 2001 年分别作了两次修改和补充。

同常规任务有很大的不同,AOS 提供了更为广泛的数据服务。由于技术的进步,可以在概念上把空间部分看成是网络中的一个节点,传统“遥测”、“遥控”的概念变得模糊,而代之以天-地之间多种数字信息的双向交换。AOS 建议书支持图像、语音、高速、低速的各种数据任一方向的传输。为了能使不同类型的数据共享同一数据链路,AOS 支持异步、同步、等时传输模式和位流、分包等多种传输业务。AOS 为空间数据系统信息交换与处理提供了极大的方便,同时向下兼容常规空间数据业务。

涉及高级在轨系统的正式建议书(蓝皮书)目前有以下 6 个,即:

- 1)CCSDS701.0—B—1:高级在轨系统网络与数据链路:结构说明
- 2)CCSDS713.0—B—1:空间通信协议规范—网络协议
- 3)CCSDS713.5—B—1:空间通信协议规范—安全协议
- 4)CCSDS714.0—B—1:空间通信协议规范—传输协议
- 5)CCSDS717.0—B—1:空间通信协议规范—文件协议
- 6)CCSDS727.0—B—1:CCSDS 文件传递协议

上述的第一个文件是高级在轨系统的一个主要建议书,和“常规”任务的建议书相比扩大了业务类型,使之适应于高级在轨系统。它的主要思想是用虚拟信道和分包的概念,使来自不同信源、不同速率、不同应用过程的数据,经过标准化的打包和标识,最后形成等长的适于传输的虚拟信道数据单元(VCDU),从而在同一物理信道上传送这些数据。该建议书在 1989 首次发布,在 1992 年和 2001 年分别进行了三次修改和补充。相对于早期版本而言,新的版本使 CCSDS 传输帧可以传送 CCSDS 网络协议(NP)包和互联网协议(IP)包。第二至第五个文件是空间通信协议规范(SCPS)建议书,定义了一系列与地面互联网功能相对应且可以交互运行的协议。这些协议包括 FTP、TCP、IP。SCPS 克服了在空间使用互联网协议所带来的问题。第六个文件是一个文件传送协议,它定义了由空间飞行器传出或传入的文件协议,除了与单纯文件传输有关的功能以外,协议还包括文件在存储介质上的管理与控制。

## 3 AOS 在神舟飞船有效载荷数管系统中的应用

我国神舟飞船应用任务涉及面广,种类繁多。包括空间生命、空间材料、空间环境、空间天文、地球环境,对地观察等多方面的科学研究与应用,每艘飞船应用项目各不相同。其多种有

有效载荷,要求的数据服务千差万别,每艘飞船都有几十台载荷设备。各载荷都有不同的数据速率、格式和各自不同的工作模式。有些载荷如空间天文方面的数台观测仪器,往往有相互协同观测需要。在特种条件下会触发而产生数倍于正常状态的大量突发信息(如对宇宙 $\gamma$ 爆的观测)。有效载荷服务系统本身也要配合科学试验产生大量的服务信息和系统工作状态信息,如飞船位置、姿态、时间,系统工作状态,环境条件等。这些信息对分析试验结果,纠正观测误差,地面数据反演十分必要,并且也需要随科学实验数据传送到地面。面对这一复杂的数据需求,传统的遥测遥控已不能满足需要。而采用 CCSDS 高级在轨系统标准,是解决这一问题的极好方案。神舟飞船有效载荷数据管理系统在设计初始就采用了 CCSDS 标准。有效载荷数管系统框图如:

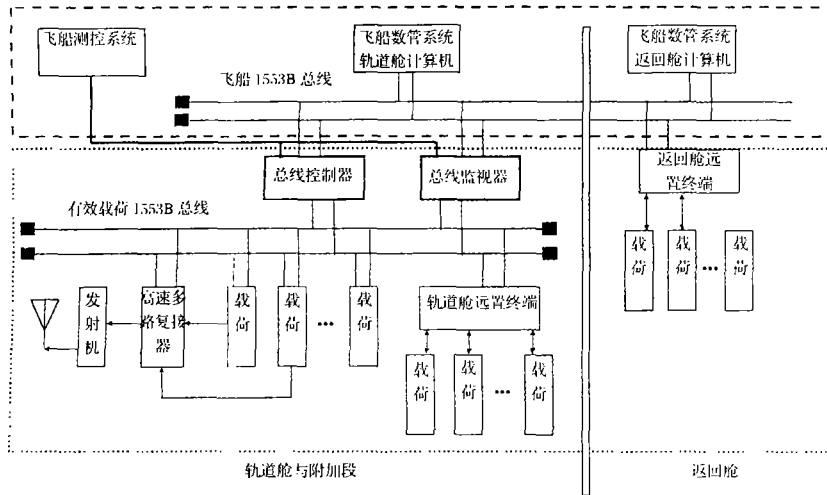


图1 神舟飞船有效载荷数管系统方框图

由图中可以看出这是一个基于1553B总线的分布式系统,有效载荷通过1553B总线与数管系统相连,实现数据交换和资源共享。有效载荷产生的科学数据,如果其数据量比较小,例如其输出平均速率在100kbps之下,都可以通过1553B总线传输,或由各个载荷自行形成科学数据源包,或由总线控制器形成科学数据源包。不同载荷或同一载荷产生的不同类的数据,可以用各自的应用过程标识符加以区别。有一些载荷如对地观测类仪器产生的数据量比较大,难以在1553B总线上传输,则采用专用高速数据接口直接送入高速多路复接器。

高速多路复接器是实现CCSDS高级在轨系统的关键设备。神舟飞船中使用的高速多路复接器,有一个1553B接口和2个直接的高速数据入口。所有经1553B总线传送到高速复接器的数据都以科学数据源包的形式,占用一个虚拟信道,而由高速接口直接进入复接器的数据各自单独占用虚拟信道。高速复接器将各虚拟信道的数据形成虚拟信道数据单元(VCDU),然后将各信道的数据复接在一起,经S波段发射机和下行。

使用CCSDS数据标准成功地解决了神舟飞船载荷种类多,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的利用,从神舟一号到神舟三号的飞行试验证明了这套系统运行良好,成功地将各种载荷数据和大量飞行状态工程参数传到地面。例如在神舟3号飞船的试验中,中分辨率成像光谱仪的数据量大、数据结构复杂,利用这套系统除了将中分辨率成像光谱仪的大量图像传回地面以外,其它地球环境、空间环境以及与有效载荷数据反演和故障诊断有关的大量飞船参数、数据管理参数、状态参

数、运行记录等也从同一数传信道传送到地面,得到非常良好的效果。

## 4 AOS 在实践五号卫星中的应用<sup>[2]</sup>

由于 CCSDS 标准在中国是第一次使用,缺乏经验,为了减少神舟飞船有效载荷数管系统的风险,在 1999 年 5 月发射的实践五号卫星上,首先对这一系统使用的主要技术进行了先期在轨飞行验证性试验。由于实践五号对这项试验所能提供的重量、功耗等非常有限,中科院空间中心精心设计了一个缩微的有效载荷数据管理系统,如图 2 所示。试验技术包括 1553B 总线接口技术、固态大容量存储器、高速多路复接器、1553B 总线控制器系统软件,CCSDS 数传标准。在本系统中高速多路复接器按照 CCSDS 高级在轨系统的标准将 1553B 总线的低速数据和来自大容量存储器的高速数据复接为一路以 1.024Mbps 的数据下行。这次试验获得了圆满成功,达到了预期的目的,证明了神舟飞船有效载荷数管系统所采用的几项新技术,特别是采用 CCSDS 标准的数据系统可以在空间正常工作。这也是我国采用 CCSDS 标准第一次成功的在轨试验,为神舟飞船工程中采用 CCSDS AOS 标准增强了信心,积累了宝贵的经验。

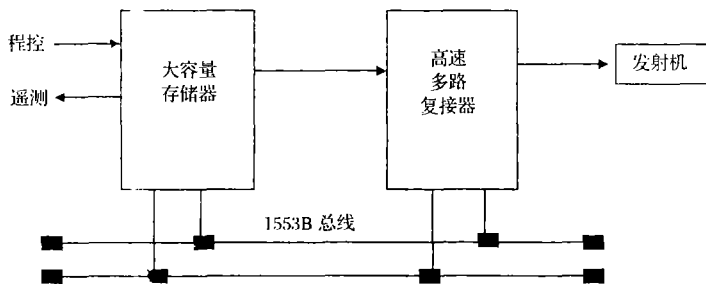


图 2 实践五号卫星上有效载荷数管系统技术实验示意图

## 5 AOS 在 863 遥科学通用平台研究中的应用

遥科学通用平台是以空间实验室和空间站进行科学实验为应用背景的预研项目。其研究目标是针对遥科学实验的特点,向不同类型的用户提供测控和数据管理的服务,建立空地连路和地面网络合为一体的实时交互数据网,使实验人员在自己的实验室可以实时地获得空间飞行器上进行的科学实验的图像及数据,即通过通信手段在科学家实验室中建立空间实验的虚拟遥现场,同时也使实验人员可以在实验中实时操作与控制空间实验,也就是实现遥操作。经过二年的努力,实现了一个具有上述功能地面演示系统。系统框图如图 3 所示。

系统包括天基和地基部分,天基部分包括遥科学实验的图像和数据采集、图像压缩、高速复接、数据传输以及指令和数据注入的接收、分发功能。地基部分包括数据接收解包,及通过地面网络的图像数据的传输,各用户指令的综合及通过无线信道的上行。

系统中空间实验选用具有典型遥科学特点的,空间通用流体实验装置。图像压缩采用 MPEG 方式,被压缩图像和采集的其他工程参数在高速复接器按照 CCSDS 高级在轨系统的标准被复接成为串行数据流,经 S 波段发射机传向地面。由于压缩后的图像数据会产生误码扩散,虚拟信道数据单元采用 RS(255, 233)纠错编码,编码器以 FPGA 硬件实现,地面接收、位同步、帧同步、去扰码、纠错、虚拟信道分路等过程全部用硬件实现,因而完全实现实时处理。

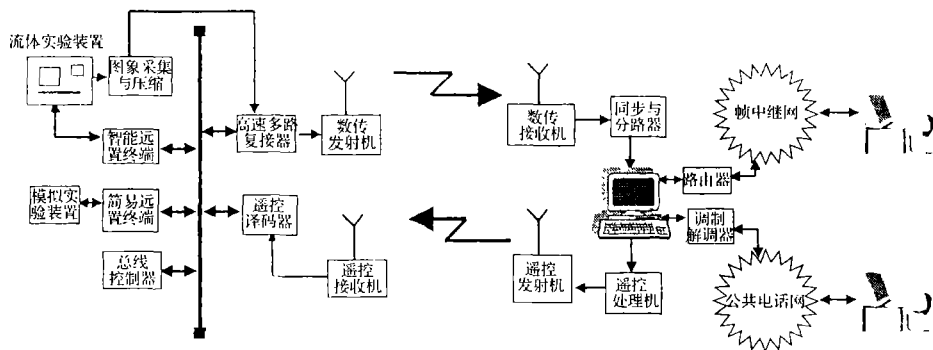


图3 遥科学演示系统框图

因为图像为连续媒体对时间敏感,通讯过程中的迟滞与抖动都会对连续媒体的质量和连续性造成不利影响。因而在CCSDS复接过程中,图像信道优先传输,在地面网络中采用UDP协议传输。工程参数和科学数量相对图像来说数据量比较小,没有苛刻的时间维度要求,在地面传输中采用有确认和重传机制的TCP协议。

演示系统非常成功,“天基”的流体图像经空地链路按CCSDS标准传到地面。通过公用电话网(PSTN)和帧中继(FRN)网络传到远方实验室。整个图像经压缩、编码、传输、解码至图像恢复的总延迟约十几秒,所有实验工程参数和科学数据也实时传到实验人员的终端上。实验人员可以根据实验情况在自己的终端上对实验进行控制和操作。

## 6 AOS在探测1号、探测2号卫星中的应用

探测1号、探测2号卫星,也称双星计划,是1997年4月由中科院空间中心刘振兴院士提出的一项地球空间探测卫星计划。该计划通过两颗小卫星对地球空间赤道区与极轨区环境中的磁场、宽能谱粒子场、星体电位、等离子体波动等进行相互配合的星座式组合探测,从而分析、发现由于太阳活动引起的、近地空间中的各种扰动活动,如磁暴与亚暴等的发生机制和发展变换规律。这两颗卫星还可以与欧空局Cluster任务中的4颗卫星相互配合进行6点探测,揭示空间磁场时空结构的三维变化。该计划提出后得到了国际空间界特别是欧空局的积极响应和我国有关部门的大力支持,目前该项目已成为中国和欧空局的合作项目。欧空局将为这两颗卫星提供部分有效载荷试验设备,其中包括三分量磁通门磁强计、电位主动控制仪、热离子分析仪、电子和电流仪、中性原子成像仪等。卫星计划于2003年发射。

为节省研制时间和经费,所有由欧空局提供的试验载荷将保持与Cluster计划中完全同样的技术状态,包括电接口、数据注入编码、数据采集的顺序和采集时钟频率及各种服务信号。但卫星平台却与Cluster卫星大不相同,而且由我国提供的有效载荷探测仪器在电接口上与Cluster的仪器更是截然不同,这就给星上有效载荷的数据管理带来很大的困难。为解决这一问题中国科学院空间中心专门设计了双星有效载荷数据管理系统。该系统是基于1553B总线的分布式系统,系统由总线控制器、大容量存储器、高速多路复接器、远置终端、载荷配电器和S波段数传发射机组成。总线控制器中为Cluster载荷设计了专门的接口,其它仪器将通过1553B总线或远置终端与数管系统相接。系统框图如图4所示。

有效载荷数管系统将完全按照Cluster卫星的速率、周期和顺序采集欧空局仪器的科学数据和工程参数,但这些数据将由数管系统重新组织和打包,存入大容量存储器。当卫星经过地

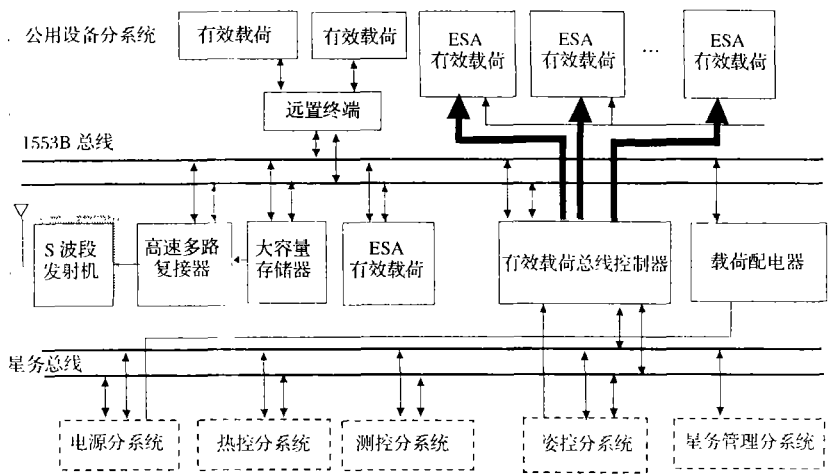


图 4 TC-1、TC-2 卫星有效载荷公用系统原理框图

面站作用区时,存储的科学数据、实时探测数据和工程参数将通过 1553B 总线进入高速多路复接器,在这里数据将按照 CCSDS 高级在轨系统(AOS)的标准被复接为编码虚拟信道数据单元(CVCDU)经 S 波段数传发射机下行。

高速多路复接器输出的下行数据格式按照“CCSDS701.0-B-3”高级在轨系统、网络和数据链路结构说明的标准执行。按 CCSDS 位流业务处理,采用空间链路子网第二级业务传递,即:

- a. 无 SLAP(空间链路 ARQ 程序)
- b. 无插入
- c. 无导头差错控制
- d. 无 VCDU 差错控制
- e. 有 REED—SOLOMAN 编码

按照这样选择,经 1553B 总线传输的低速数据、和由大容量存储器直接进入复接器的高速数据分属不同的虚拟信道,另有一个虚拟信道为空信道,专作填充用,选定后的帧格式如图 5 所示。

	VCDU 导头						VCDU 数据单元区		
同步码	版本号	VCDU 标识符		VCDU 计数器	符号域		B-PDU 导头	B-PDU 位流数据	RS 校验符号
		航天器标识符	虚拟信道标识符		回放标志	备用			
32	2	8	6	24	1	7	16	436 字节	64 字节

图 5 TC1、TC2 卫星有效载荷下行数据格式

由于这两颗卫星都将运行于大椭圆轨道,为了获得尽可能多的数据,按照卫星距离地面站的远近采用了 1.024Mbps、128kbps 和 16kbps 三种不同的数传速率。整个系统灵活而有效,当某一载荷退出运行时,其它载荷分享其存储和传输的资源。

## 7 结束语

CCSDS 面向复杂空间任务所开发和制定的高级在轨系统的数据标准,具有很强的适应性和灵活性。它不但适应于空间站、空间实验室、天地往返运输工具等这类复杂的空间任务,也同样适用于小卫星等无人自由飞行的航天器。特别是高级在轨系统向下兼容常规空间数据标准,适应于多种空间数据业务。该标准将空间飞行器,空一地连路,空一空连路联结到一起,并与地面网络协议相结合的思路,对于未来形成天地一体化的网络有巨大的推动作用。在这样的网络中每个航天器被看成是整个网络中的一个节点,在这个网络中可以实现点到点,或端到端的数据传输。加强对高级在轨系统的研究与应用,对推动我国空间综合电子技术的发展有重要的意义。

### 参考文献

- 1 Advanced Orbiting Systems, Networks and Data Links: Architectural Specification. Recommendation for Space Data Systems Standards, CCSDS 701.0-B-3, Blue Book. Issue 3. Washington, D. C. : CCSDS, June, 2001.
- 2 陈晓敏,孙辉先.有效载荷数据管理系统新技术试验.中国空间科学技术, Vol 22, 第一期, 2002 年.

**作者简介:**孙辉先,研究员,空间综合电子技术研究室主任,副总师,长期从事空间综合电子信息系统研究。

陈晓敏,研究员,空间综合电子技术研究室副主任,副主任设计师,长期从事空间综合电子信息系统研究。

白云飞,高级工程师,主管设计师,从事高速复接等电子技术的研究。

---

## 台湾“中华-2”号卫星有效载荷已经准备就绪

台湾“国家科学委员会”(NSC)宣布,“中华-2”号卫星有效载荷已经成功通过测试,台湾空间研究计划又登上了一个新的台阶。

“中华-2”号卫星将于 2003 年 10 月发射,是由台湾、美国和日本共同研制的,用于进行科学研究和遥感任务。它的用途之一是研究大气层高层的“红色精灵闪电”(“red sprite lightning”)现象,这种现象位于距离地面 30~90km 高空,是和大型雷暴系统(large thunderstorm systems)有关的一种放电现象。“中华-2”号卫星是世界上第一颗用于研究此罕见现象的卫星。

“中华-2”号卫星的另一个重要使命是为台湾提供遥感图像。遥感图像的用途包括用于农业和林业研究的台湾地形的观测,自然灾害评估,损失估计,土地使用分析,海岸和海域观测以及其他一些环境监测计划等。

“中华-2”号卫星包括载荷和燃料在内的总重量为 764kg,轨道高度 891km,每天飞经台湾 2 次。

(王丽霞、赵秋艳)