

智能天地一体化网络的卫星跟踪测控技术综述

韩帅, 郭航, 孟维晓, 姜雅琦

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院通信技术研究所 哈尔滨 150001)

摘要: 随着卫星互联网和我国航天测控技术的不断进步, 航天测控网络朝着智能化、一体化的方向发展, 在自主测控、资源分配等方面进展良好。因此, 建立智能天地一体化的航天测控网是我国航天未来发展的重要目标。针对智能航天测控网中的跟踪测轨、遥测和遥控三个方面, 分别介绍了相关原理与技术。同时, 结合 CCSDS 提出的空间数据链路标准协议详细介绍了 TM、TC、AOS、Proximity-1 以及 USLP 标准, 分析了不同标准所使用的技术与实际应用。本文从数据链路层和物理层的角度介绍了智能航天测控系统的工作原理及技术要求, 为我国智能天地一体化卫星测控通信网的研究提供参考并予以展望。

关键词: 跟踪测轨; 卫星遥测; 卫星遥控; CCSDS; 智能天地一体化

中图分类号: TN927+.2; V556 **文献标志码:** **文章编号:** 2095-1000(2024)01-0001-11

DOI: 10.12347/j.ycyk.20231031002

引用格式: 韩帅, 郭航, 孟维晓, 等. 智能天地一体化网络的卫星跟踪测控技术综述[J]. 遥测遥控, 2024, 45(1): 1-11.

Overview of Satellite TT&C Technology for Intelligent Space-ground Integrated Network

HAN Shuai, GUO Hang, MENG Weixiao, JIANG Yaqi

(Communication Research Center, College of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: With the continuous progress of satellite internet and China's aerospace TT&C technology, aerospace TT&C networks are developing towards intelligence and integration, making great progress in autonomous TT&C, resource allocation, and other aspects. Therefore, establishing an intelligent space-ground integrated network is an important goal for the future development of China's aerospace industry. In this paper, the relevant principles and technologies of tracking orbit, telemetry, and telecommand in intelligent space TT&C network are introduced. At the same time, combined with the space data link standard protocol proposed by CCSDS, TM, TC, AOS, Proximity-1, and USLP standards are introduced in detail, and the technology and practical application of different standards are analyzed. This paper introduces the working principle and technical requirements of space TT&C system from the view of the data link layer and physical layer, and provides reference and prospects for the research of the intelligent space-ground integrated satellite TT&C communication network in China.

Keywords: Tracking; Telemetry; Telecommand; CCSDS; Intelligent space-ground integrated network

Citation: HAN Shuai, GUO Hang, MENG Weixiao, et al. Overview of Satellite TT&C Technology for Intelligent Space-ground Integrated Network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(1): 1-11.

0 引言

近年来, 随着 6G 技术的突破和地球卫星轨道资源逐渐减少, 世界各国对近地轨道资源展开激烈竞争, 打响了低轨卫星争夺战。在 2021 年 6 月 6 日, 我国信息通信研究院发布的《6G 总体愿景与

潜在关键技术》指出, 6G 将实现空天地一体化的全球无缝覆盖, 星地一体融合组网技术将成为 6G 网络最重要的潜在技术之一^[1]。同时, 报告还提出: 要将移动通信技术与人工智能、大数据等新一代网络技术加速融合, 智能化、一体化将成为未来发展的趋势之一。建立智能天地一体化测控

网络势在必行。中国是航天大国, 目前发射的卫星数量位居世界前列, 而航天测控网络是航天任务指挥控制的核心, 是使航天器能够在轨道上平稳运行, 圆满完成任务的前提^[2]。因此, 建立新一代智能天地一体化测控网也是让航天测控更好发展的必然要求。

在卫星通信与导航中, 测控通信系统起到了关键的作用。航天测控通信是指对航天器的遥测遥控和其飞行轨迹的测量, 以及与地面站之间的信息传输。其传输的信息包括航天器进行正常工作必要的遥测遥控信息、对有效载荷的遥测遥控信息和有效载荷获得或转发的应用信息。测控通信是航天工程的重要组成部分, 用以保证航天器按计划完成任务。航天测控系统主要包括跟踪测轨(Tracking)、遥测(Telemetry, TM)、遥控(Telecommand, TC)和通信(Communication)四个功能, 其中将遥测、跟踪测轨和遥控称为测控(Telemetry, Tracking & Command, TT&C), 近年来简写为T。后来随着技术的发展, 人们把测控与通信结合, 统称为C&T, 即测控通信^[3]。

智能天地一体化测控网是面向大规模、多类型航天器的各类需求, 将天地一体化航天测控网与人工智能理论和技术相结合, 开展航天任务智能规划、站网资源智能调度、航天器与地面站设备智能化管理等技术研究, 实现自主测控、自主故障诊断、任务规划、资源分配等目标, 极大地提高测控任务的完成效率和资源利用率^[4]。

空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)提出了空间数据链路标准, 对航天测控制定了详细的建议。空间数据链路业务有六个工作组: 射频与调制工作组、空间链路编码及同步工作组、多光谱超光谱数据压缩工作组、空间链路协议工作组、空间数据链路层安全工作组和光通信工作组^[5], 是整个空间数据系统标准的基础部分, 世界各国的航天测控任务均采用了CCSDS提供的标准。

本文对智能天地一体化卫星测控通信技术进行综述, 同时介绍了CCSDS制定的标准, 分析了目前国内外卫星测控技术的发展现状, 对未来航天测控技术予以展望。

1 智能天地一体化测控网络

由于在轨航天器的数量增长迅速, 航天测控

网的规模和复杂度远超预期, 这导致地面设备面临数量不足和测控能力有限等问题。因此, 智能天地一体化测控网络应运而生。在近年来, 航天测控网的发展方向是一体化和智能化的。一体化是将天基、地基测控网相结合, 对测控网的资源通用化, 形成天地一体化测控网(第四代)。而智能化是在天地一体化测控网的基础上, 使用人工智能与卫星测控相结合, 实现测控网的自主化、自优化和自动化, 使测控网能够对用户、业务、资源等方面进行感知学习, 对测控网的资源进行优化调度, 满足航天器按需随遇接入要求, 实现测控网络的资源最优化利用。

1.1 智能天地一体化测控网络架构

智能天地一体化测控网络体系架构如图1所示, 由天基测控骨干网、地基云测控资源、测控中心和测控网用户组成, 采用自组网测控的方式满足大规模星座集群的测控要求, 在提高测控容量的同时兼容地面测控资源。

1.2 智能天地一体化测控网络技术应用

近年来, 人工智能的应用研究领域广泛, 在航天测控系统中, 主要使用人工智能技术对航天

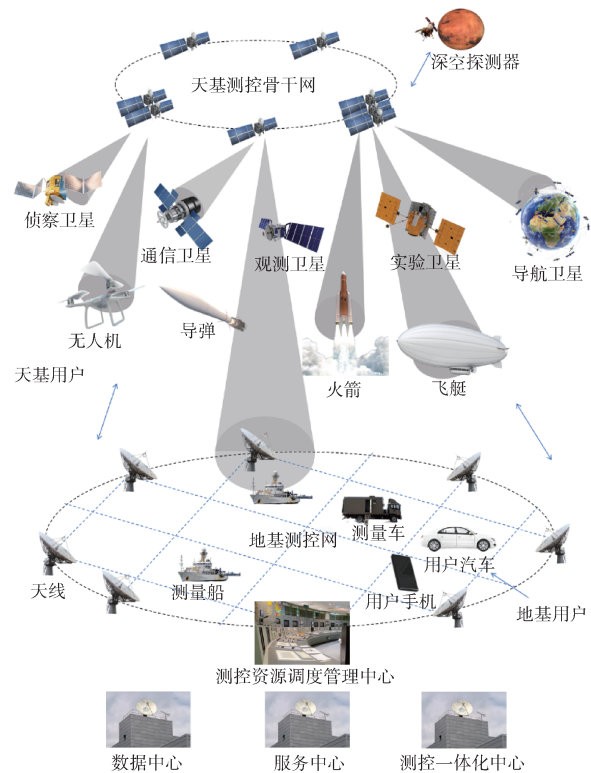


图 1 智能天地一体化测控网络体系架构

Fig. 1 Intelligent space-ground integrated TT&C network architecture

任务进行资源智能调度和航天器自主测控等应用。

1.2.1 资源智能调度

对于大规模和多类型的航天器,需要使用人工智能技术对测控网络进行资源的智能规划与调度。建立空间资源智能化管理系统,对在空间中高速运动的动态网络进行分析,实现星间链路、天基测控等多星任务系统的动态管理。同时,在地面资源集中管理的基础上,实现多任务规划与星地多种资源之间的智能优化。例如设备自动化操作、故障自主诊断、数据分析与评估等。在智能测控系统中,可以通过制定资源优化策略,提高资源利用率和评估系统性能。

1.2.2 自主测控

自主测控是在建立星地一体测控系统的基础上,使用人工智能技术,在可控条件下实现航天器自主测控和原始数据同步传输。同时,航天器可以自主判断并报告工作情况,对数据进行自动的接收、处理、分发等功能,从而实现全过程无人操作、全系统高度自主运行的目的。在避免手动遥控指令的同时,最大程度地减少人为干预,提高系统对执行任务的能力和容量。最终达到航天器自行完成测控任务,大幅减少人在回路的要求。

2 CCSDS标准

2.1 CCSDS简介

CCSDS成立于1982年,是一个开发和制定适用于空间通信和数据系统的通信协议和数据处理规范的国际性空间组织,旨在加强各国空间组织在航天任务中的交互操作和交互支持,促进空间信息的交换,减小风险和成本,缩短开发时间。CCSDS研究和制定的数据标准涉及空间飞行器发射运行控制全过程的数据系统,分为系统工程、任务操作与信息业务、横向支持业务、在轨飞行器接口业务、空间链路业务、空间互联网业务六个不同的技术领域^[6]。经过多年的发展,CCSDS已经建立了一系列适用于空间数据系统的技术协议,这些协议已被世界各国和组织广泛采用和认可,使其成为国际上权威的空间信息技术标准。CCSDS发布了一系列建议和技术报告,其内容包括分组遥测、遥控、射频、调制、时码格式、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,这些反映了当

前全球空间数据系统的最新技术进展和趋势。CCSDS的21世纪战略目标是:建立和不断扩大空间飞行任务信息系统的配套交换能力,在整个太阳系建立一个国际性可交互的空间数据通信与导航基础设施;支持近地的、深空的,以及飞向太阳系其他星体的飞行器,保证增强性、安全性和可靠性,减少任务成本和集成时间,提高空间信息的利用率^[7,8]。

我国的航天测控系统自20世纪90年代初起,开始研究和采用与CCSDS相关的标准,目前已成功实现了从最初的跟踪研究,逐步过渡到工程应用和前沿技术验证的阶段。20世纪90年代,我国开始在射频与调制的物理层以及链路层以上的高层协议上应用CCSDS标准。在1999年5月,我国发射了“实践”五号卫星,这标志着我国首次采用了CCSDS标准进行航天器的飞行试验^[9]。此后,我国众多航天器,如神舟系列飞船、风云系列卫星等均采用CCSDS标准。如今,CCSDS标准在我国得到了日益广泛的应用,我国研制的空间飞行器大部分都使用CCSDS标准进行下行数据的传输,而且新建的深空测控站也完全采用CCSDS标准。在我国航天科技的发展规划中,采用CCSDS标准进行航天测控通信已成为必然趋势^[9]。

2.2 CCSDS协议体系架构

由于空间网络环境区别于地面网络,具有前反向链路不对称、延时长、误码率高等特点,CCSDS以开放系统互连参考模型(Open System Interconnection/Reference Model, OSI/RM)的分层思想为基础,制定了空间通信协议体系。空间通信协议体系分为五层,自下而上包括:物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。在每一层又有若干个协议,且这些协议可以组合^[10]。空间通信协议体系的参考模型如图2所示。

CCSDS空间通信的各层与协议如下:

① 物理层

在物理层中,CCSDS规定了主空间链路物理层的推荐标准(射频和调制系统),以及邻近空间链路的物理层部分(Proximity-1协议的物理层)。

② 数据链路层

数据链路层为上层用户提供在空间链路传送其数据单元的业务。CCSDS数据链路层划分为两个子层:数据链路协议子层与同步和信道编解码子层。数据链路协议子层规定了在点对点空间链路

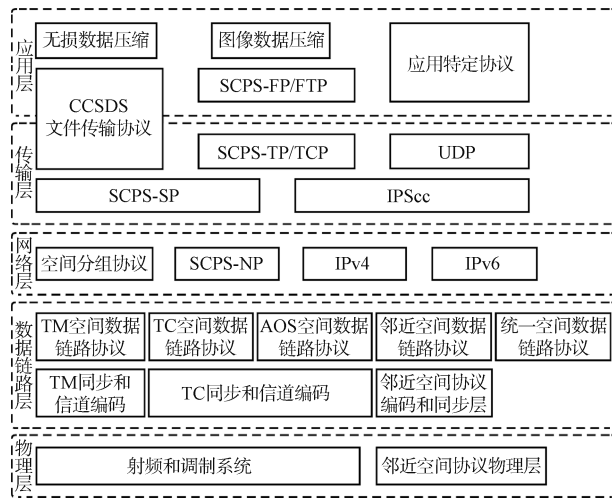


图 2 空间通信协议体系

Fig. 2 Space communication protocol system

上使用传输帧传输上层数据单元的方法。同步和信道编码子层则规定了通过空间链路传输传输帧的同步和信道编码方法。

CCSDS开发了五种数据链路协议子层协议：遥测空间数据链路协议^[11]、遥控空间数据链路协议^[12]、高级在轨系统（Advanced Orbiting System, AOS）空间数据链路协议^[13]、邻近空间（Proximity-1）数据链路协议^[14]和统一空间数据链路协议^[15]。同时，CCSDS开发了三种同步和信道编码子层协议：遥测同步和信道编码、遥控同步和信道编码以及邻近空间协议编码和同步子层。遥测同步和信道编码可与遥测空间数据链路协议或AOS空间数据链路协议同步使用^[16]。

③ 网络层

在网络层中，空间通信协议为上层用户提供在整个空间数据系统中的路由服务，包括航天器器载系统和地面网络。CCSDS在网络层上配置了两种标准业务，即空间包协议和封装业务。

④ 传输层

传输层空间通信协议为上一层用户提供端到端的数据传输业务。CCSDS为传输层开发了空间通信协议规范-传输协议。

⑤ 应用层

在应用层中，空间通信协议为用户提供端到端的通信服务，如文件传输，无损数据压缩等。

3 轨道跟踪与测量

对航天器轨道的跟踪与测量是遥测、遥控和

通信的前提。通过测速确定飞行器的速度矢量，测距和测角确定飞行器的位置矢量，进而确定飞行器的轨道相关参数。航天器的轨道测量，主要就是测量航天器与地面测控站之间的角度、距离和相对速度。由于航天器的位置随时间变化，因此需记录每一刻的参数才能确定其轨道，即需要跟踪测轨。

轨道跟踪与测量最早追溯于1936年，二战时期的德国使用了多普勒跟踪系统和光学设备对V-2火箭的轨道进行了跟踪测量。后来，随着20世纪50年代人造卫星的问世，轨道跟踪与测量设备也快速发展，并被广泛地应用于航天器的跟踪测控系统中^[17]。

3.1 航天器测速

在速度测量上，使用多普勒测速法进行测速和误差分析。“多普勒效应”是由于相对运动而使接收频率不同于发射频率的现象，通过测量频率的变化值，即“多普勒频率”，可以计算发射源和接收点间的相对运动速度。按照振荡源的位置将多普勒测速分为单向多普勒测速和双向多普勒测速。

在单向多普勒测速中，振荡源安装在航天器上。由航天器上的振荡源产生下行发射信号，经过空间传播与延迟后被地面接收器接收。地面站测量接收到的信号相对于标称下行发射信号的频率差，可以计算航天器的径向速度。因此单项测速设备简单，不需要上行信号，被广泛应用于卫星导航定位中。

而双向多普勒测速的振荡源配置在地面测控站，系统由地面发射机、地面接收机、发射天线、接收天线和航天器上的应答机组成，又称为询问式测速。由地面测控站向航天器发射频率高度稳定的信号，经过航天器的应答机转发或反射回地面观测点。将返回信号与基准信号比较可以得出信号往返双程的多普勒频移(2倍的变化)，从而得到航天器的相对径向速度。由于采用一个地基频率标准作为上行和下行信号的参考信号进行双向多普勒测速，且地面站采用的频率源稳定度可达到极高的水平，因此相比单向测速能得到更高精度的多普勒数据。

3.2 航天器测距

在距离测量中，连续波测距信号可分为谐波信号(如侧音信号)和非谐波信号(如伪码信号)^[18]。

侧音测距是使用“侧音”(一个单频正弦波),把频率固定的侧音作为基带信号调制到载波上发射给目标,目标将信号转发给接收端,信号在接收端进行解调处理后,比较接收信号与发射信号的相位差就可以求得发射点、目标、接收点的总距离。提高侧音频率可获得高精度的测距,且这种方法所占带宽窄、捕获速度快。

伪码测距的基本原理与侧音测距一致,都是根据测距信号的传播时延与光速的关系计算距离。不同之处在于侧音测距是利用相位差计算距离,而伪码测距则是利用自相关函数测量时延。伪码测距利用伪码周期长的特点作为解模糊信号,利用随机码片作为高频侧音,仅用一个信号就可以完成测距。

码音混合测距是采用伪码和侧音的混合系统,结合了侧音和伪码各自的优点。使用高频侧音提高测量精度,伪码解距离模糊。

3.3 航天器测角

由于测控系统需要对飞行目标自动跟踪,因此对角度的测量尤为重要。在航天测控系统中,主要采用天线跟踪测角法和干涉仪测角法进行角度测量。

天线跟踪测角法是利用天线馈电系统,使天线电轴准确指向目标。天线的指向自动地跟随目标而转动,且天线角度与目标的实际角度始终保持一定误差范围之内。其跟踪体制分为圆锥扫描雷达测角和单脉冲雷达测角^[9]。

干涉仪测角是利用相干原理,用两个接收天线所接收到的目标所发射信号的相位差或时延差进行测角的方法。当被接收的是单频信号时,可以测相位,即相位差干涉仪。当被接收的是宽带信号时,采用时延差测量,称为时延差干涉仪。

4 遥测与遥控

航天遥测是指航天器将其飞行实验中各系统的状态参数经下行信道传输给测控站的技术。航天遥控是指航天测控网将生成的遥控信息经上行信道传输给航天器并被获取的技术。

4.1 航天遥测

4.1.1 航天遥测工作原理

在航天测控通信中,遥测指对飞行器上的待测参数进行检测,并将测量结果传输至地面站。地面站接收遥测信号,恢复遥测数据,进行记录、

显示和处理。完成上述过程的设备组合称为航天遥测系统,包括航天器上的发送端和地面的接收端两个部分,一种典型的航天遥测系统结构如图3所示。遥测是飞行器起飞后及时向测控站报告飞行器内部工作状态,以及给地面提供依据来决定是否对飞行器上系统进行干预的手段。因此航天遥测系统具有系统复杂、测量参数作用距离广、对系统可靠性和快速反应能力要求高等特点^[3]。

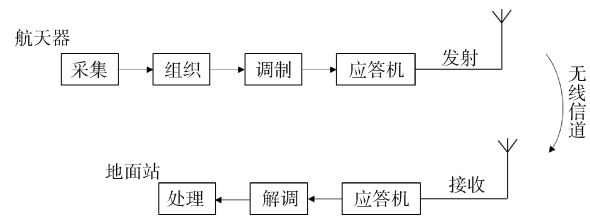


图3 遥测系统结构框图

Fig. 3 Telemetry system structure block diagram

航天遥测系统的信息传输过程模型如图4所示。

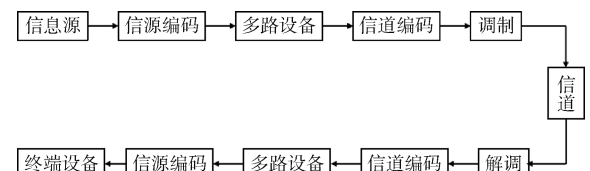


图4 遥测系统信息传输

Fig. 4 Telemetry system information transmission

航天遥测信息的被测参数种类繁多,频率响应相差巨大,因此在航天测控通信系统中采用多路传输技术有效地合并这些信号来进行传输。使用一条信道传输多路信号时,遥测系统中应用最广泛的多路复用调制方法有频分制(FDM)、时分制(TDM)和码分制(CDM)三种方式。频分制是将各路信号调制到不同频率的副载波上,且副载波的频率间隔要足够大以防止混叠。频分制采用二次调制,载波和副载波调制为AM、FM、PM中的一种,不同的组合可以组成不同的遥测系统。频分制的设备简单,但精度低,抗干扰性差。时分制是将各路信号安排在不同时间段,按一定的时间顺序依次传输。其基带信号是脉冲信号,按调制方法可分为脉冲幅度调制(PAM)、脉冲宽度调制(PWM)、脉冲位置调制(PPM)和脉冲编码调制(PCM)。时分制的设备相对复杂,但精度高,抗干扰性强。码分制是利用不同的码型或波形区分多

路遥测信息, 主要用于多目标遥测, 且只需要一台接收机就可以接收。码分制的成本低, 占用带宽小, 抗干扰性强。

采用信道编码后能获得编码增益, 并具有一定的保密作用和抗干扰、抗截获作用。在飞行器遥测中, CCSDS 推荐为信道编码标准的有卷积码、R-S 码、卷积码和 R-S 码构成的级联码、Turbo 码和 LDPC 码等。码的选择由信道带宽和所需获得的编码增益决定。

调制是将遥测基带信号转换成可通过物理信道传输的信号的过程。20 世纪 50 年代初, 航天器遥测刚起步时, 采用的是调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)等模拟调制方式。随着基带信号数字化后, 均改为使用幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)等数字调制方式。因 PSK 调制所需的射频带宽最窄, 在相同传输质量条件下要求的信噪比最低, 故最终都趋于采用 PSK 及其变化的调制方式。随着空间数据传输码率的不断提高, 空间频率资源日益紧张, 对具有压缩频谱宽度、降低带外功率、减少码间干扰、保持信号包络恒定等特征的调制体制需求愈加强烈, 由此, CCSDS 推荐使用 QPSK、OQPSK、MSK 和 GMSK 等恒包络调制体系^[20]。

4.1.2 典型遥测体制

航天遥测系统的主要遥测体制有分帧遥测体制(PCM)和分包遥测体制(CCSDS)。PCM 遥测是一种常见的遥测数据传输和编码方式, 它将模拟信号转化为数字信号, 之后进行采样、量化、编码和同步等步骤实现数据的传输。由于 PCM 采样率和编排格式的限制性, 其已不能满足如今对数据源的传输要求。

1987 年, CCSDS 开始提出分包遥测概念并至今仍在不断更新。分包遥测是一种将遥测数据划分为多个数据包或帧以进行传输的方法。在许多遥测系统中, 数据量可能非常大, 而且需要在不同的通信通道上传输, 因此将遥测数据划分成小的数据包可以提高数据传输的效率和可靠性, 如表 1 和表 2 所示^[21]。同时, CCSDS 还规定了遥测数据在空间链路中传输的体系结构^[22]。如图 5 所示, 在 CCSDS 的分层模型中, 其将 OSI 模型中的数据链路层划分为数据链路协议子层以及同步和信道编码子层。数据链路协议负责传送帧发送功能, 同步和信道编码子层负责空间链路上发送传送帧时附加的功能, 如分隔/同步传送帧、纠错编码/解码、比特转换生成/去除等。

表 1 遥测传送帧格式(不带 SDLS 的遥测传送帧)

Table 1 Telemetry transfer frame format (without SDLS)

传输帧主导头	传输帧副主导头(可选)	传输帧数据域	传送帧尾(可选)	
			操作控制域(可选)	帧差错控制域(可选)
6 Bytes	最长 64 Bytes	可变长度	4 Bytes	2 Bytes

表 2 遥测传送帧格式(带 SDLS 的遥测传送帧)

Table 2 Telemetry transfer frame format (with SDLS)

传输帧主导头	传输帧副主导头(可选)	安全头	传输帧数据域	安全尾(可选)	传送帧尾(可选)	
					操作控制域(可选)	帧差错控制域(可选)
6 Bytes	最长 64 Bytes		可变长度		4 Bytes	2 Bytes

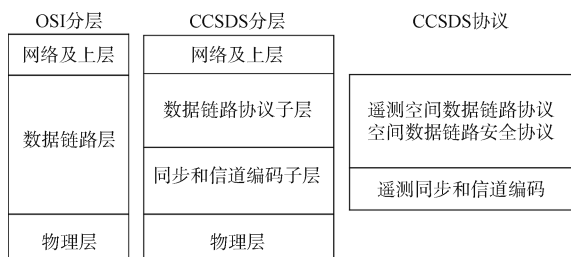


图 5 遥测数据链路协议分层模型

Fig. 5 Telemetry data link protocol hierarchical model

4.2 航天遥控

航天遥控是一种用于控制和操作航天器的技术和过程。它通常是通过地面控制中心或地面站来执行的, 以实现对于航天器的远程监控和指导, 确保其能够执行任务、维护轨道安全以及采集所需数据, 航天遥控系统的组成如图 6 所示^[3]。

航天遥控与航天遥测的原理类似, 它们都是在航天器与地面之间传输数据, 统一在载波体制的测控通信系统中, 如图 7 所示。相比于航天遥

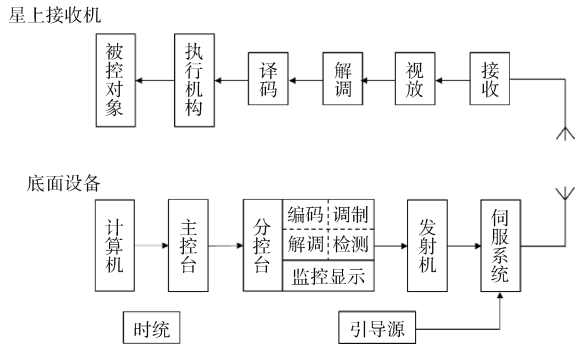


图6 遥控系统结构框图

Fig. 6 Telecommand system structure block diagram

测，遥控传输信号的可靠性更高，且是断续传输的，而遥测需要连续不断地进行传输。此外，遥控是以完整的数据单位进行传输，且传输帧更短，帧同步只能一次完成。因此，遥控常需要采取多重保护措施，使用更加复杂的设备进行数据传输。信道编码过程中，因遥控帧长过短且不连续传送，通常采用分组码而非遥测中常用的卷积码。在信号调制方面，遥控系统对信号的可靠性和抗干扰性要求更高，因此常选用PCM、FSK、FM、PSK、PM等进行二次调制。为了保障航天器的飞行安

全，遥控系统更加需要数据保护技术来提高安全性。使用数据加密和加密认证来实现加密，同时，使用前向纠错机制和信息反馈校验机制来对指令进行差错控制。

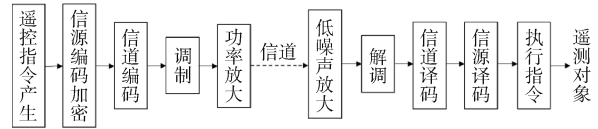


图7 航天遥控系统信息传输

Fig. 7 Telecommand system information transmission

与航天遥测系统类似，遥控系统的主要遥测体制也是分帧遥控体制（PCM）和分包遥控体制（CCSDS）。在PCM遥控体制中，使用包括了遥控指令帧和数据注入帧的PCM遥控帧。遥控帧是遥控设备每次发送的包括地址同步字、方式字、若干指令字的完整信息帧。同时，PCM遥控采用对数据注入帧进行编码的数据加密方式来实现对数据的安全保护功能。分包遥控是把遥控信息数据打包后，经上行信道送到航天器，实现对航天器上的设备和进程进行控制，传输帧结构如表3所示^[23]。

表3 遥控传送帧格式

Table 3 Telecommand transfer frame format

主导头 (5 Bytes)					最大 1 019 Bytes				
版本号	通过标志	控制命令标志	空闲位	航天器标识	虚拟信道标识	帧长	帧序列 字号	传送帧 数据域	帧差错 控制域(可选)
2 bits	1 bits	1 bits	2 bits	10 bits	6 bits	10 bits	8 bits	8n bits	16 bits

同样，CCSDS还规定了遥控数据在空间链路中传输的体系结构，如图8所示。

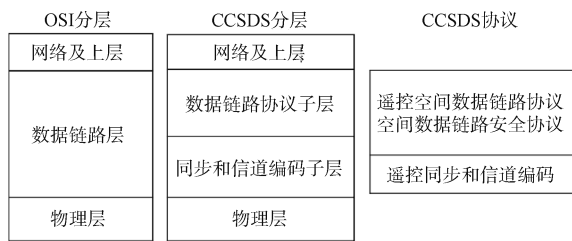


图8 遥控数据链路协议分层模型

Fig. 8 Telecommand data link protocol hierarchical model

4.3 统一载波测控系统

在航天事业的发展初期，由于航天器距地较近且对测控的要求较低，因此测控系统采用了分离测控系统，即跟踪测轨、遥测、遥控三个系统

相互分离。但是，相互分离的系统会导致设备庞大且信号干扰严重，于是这种分离系统已经被统一载波测控系统替代。

统一载波测控系统是将测轨、遥测、遥控信号采用时分或频分方式调制在一个载波上，实现对飞行器跟踪、测量、控制等功能综合于一体的系统。有的测控系统还担负着飞行器与地面间的信息传输任务，所以又可称为统一载波测控通信系统。

统一载波测控系统包括频分统一测控系统和时分统一测控系统两种。在频分统一测控系统中，多个副载波调制在一个载波上，每个副载波实现一个功能，通过频分复用的方式实现测控的多功能综合。与分离系统相比，统一载波系统用一个设备实现了测控的多个功能，减少了设备的数目。

而且系统采用了锁相接收技术, 提高了接收信号的信噪比。同时, 由于工作的频段统一, 系统的电磁兼容性大大提高。而时分统一测控系统采用时分制, 其系统组成大部分与频分统一测控系统相同, 但时分统一测控系统在信号处理终端采用了伪噪声码扩频, 具有抗干扰能力强、传输效率高和容量大等特点。

最早出现的统一载波测控系统是采用频分多路原理实现的, 由于通常工作于 S 或 C 频段, 所以被称为统一 S 频段(USB)系统和统一 C 频段(UCB)系统。我国分别于 20 世纪 80 年代和 90 年代建成了 C 频段测控网与 S 频段测控网, 并在西安建立了 S 频段测控网多任务管理中心, 我国的 UCB 系统用于地球同步卫星的测控, USB 系统用于低轨航天器和深空航天器的测控。例如, 我国首次探月工程中的“嫦娥 1 号”卫星测定轨就是由 USB 系统实现的^[24]。近年来, 我国大力推动扩频统一测控系统的研制并制定相应标准。

5 空间数据链路协议

除了遥测空间数据链路协议与遥控空间数据链路协议外, CCSDS 还提出了高级在轨系统协议、临近空间链路协议, 以及统一空间链路协议。国内外的航天器可以选用不同的协议来进行测控通信, 尤其是 AOS 协议, 已经在我国的神舟系列飞船上得到全面应用。

5.1 高级在轨系统(AOS)协议

为了应对大型航天器(如国际空间站)的多数据源、大数据量、多种传输业务的要求, 20 世纪 80 年代, CCSDS 扩展了分包遥测和分包遥控的标准, 形成了称为 AOS 的第三种标准。

AOS 标准引入了虚拟信道(Virtual Channel, VC)的概念, 将一个物理信道划分成多个虚拟的逻辑信道, 每个虚拟信道分别标识并传输一种数据流, 这使得一个物理信道可被多个高层数据流以时分复用的方式共享, 实现了在一个物理信道上传输多种不同类型数据的功能^[25]。AOS 增加了传输各种类型的在线数据(如音频和视频数据)的功能, 主要面向需要在整个空间链路传输多种类型、不同速率的数据, 特别是一些高速率数据(如动态视频数据)。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、周期)、不同的用户数据格式协议(位流、数据包)以及不同

等级的差错控制^[26]。

AOS 与分包遥测和分包遥控的差别不大, AOS 和分包遥测、分包遥控所用的包结构一致, 但在业务类型和帧结构方面则存在一些差异。此外, 分包遥测常用于空间到地面的下行遥测链路, 分包遥控常用于地面到空间的上行遥控链路, 而 AOS 既可用于下行遥测链路, 也可用于上行遥控链路, 成为了目前国内外航天器普遍应用的标准。

AOS 空间数据链路协议是一种数据链路层协议, 与遥测数据链路协议分层模型一致。AOS 空间数据链路协议可以使用被称为“传输帧”的定长协议数据单元传输各种数据, 如表 4 所示。而且数据链路协议子层支持可选的空间数据链路安全协议, 因此 AOS 空间链路协议可以通过使用 SDLS 协议实现安全保护, 同时在 AOS 传送帧的前后加入安全头和安全尾^[27]。

表 4 AOS 传送帧格式

Table 4 AOS frame format

传输帧 主导头	传输帧插 入域(可选)	传输帧 数据域	传送帧(可选)	
			操作控制 域(可选)	帧差错控制 域(可选)
6 或 8 Bytes	可变长度	可变长度	4 Bytes	2 Bytes

我国于 1999 年发射的“实践”五号卫星第一次采用了 CCSDS 高级在轨系统(AOS)标准, 成功进行了飞行试验。在其之后, 我国发射的神舟二号至神舟六号飞船全面采用了 AOS 标准进行有效载荷数据管理。采用了虚拟信道和分包的概念, 在同一个物理信道上同时成功传输了数十种数据, 包括观测类、实验类、工程类等。后续发射的嫦娥一号、风云三号、高分系列等卫星也均采用 AOS 标准, 满足了航天器的数据格式复杂和突发性强、载荷种类多等诸多要求。

5.2 邻近空间链路(Proximity-1)协议

为了在一些航天任务中实现对多种不同的航天器的统一控制, CCSDS 提出了一种地面站只与空间任务中的一个或少数几个主航天器之间建立常规空间链路, 而在主航天器与其他航天器之间建立附加空间链路, 即邻近空间链路的测控通信方案。工作时, 地面站使用 AOS 协议与主航天器进行数据传输, 主航天器与其他航天器间使用邻近空间链路协议进行通信。

邻近空间链路协议是CCSDS基于常规在轨数据系统(分包遥测、分包遥控)和AOS开发的协议。该协议更适用于邻近链路信号强度适中、通信延迟较短,以及需要独立对话等应用场景。它适用于空间近距离、双边、固定或移动的无线通信链路,通常用于固定探测器、在轨星座、星球着陆器、轨道中继卫星等之间的通信^[28]。该协议提供了单工、半双工、全双工等多种工作模式和多频段通信,采用了先握手互设参数后进行通信的方式。邻近空间链路协议是一个双向数据链路层协议,由物理层和数据链路层组成,满足空间任务中有效数据传输的需求,支持多种空间数据在各种近距离空间环境中的有效可靠传输^[29]。

该协议首次应用于2001年的火星奥德赛号轨道器和2003年的火星探测漫游者号。我国于2020年发射的天问一号火星探测器和祝融一号火星车也采用了邻近空间链路协议进行火星探测任务中的通信。

5.3 统一空间链路协议(USLP)

由于数据链路协议子层的四项标准协议:TM空间数据链路协议、TC空间数据链路协议、AOS空间数据链路协议和Proximity-1空间数据链路协议之间存在部分的差异,以及数据交互等存在问题,因此CCSDS制定统一空间数据链路协议,实现用一个统一的标准进行数据传输,如图9所示。

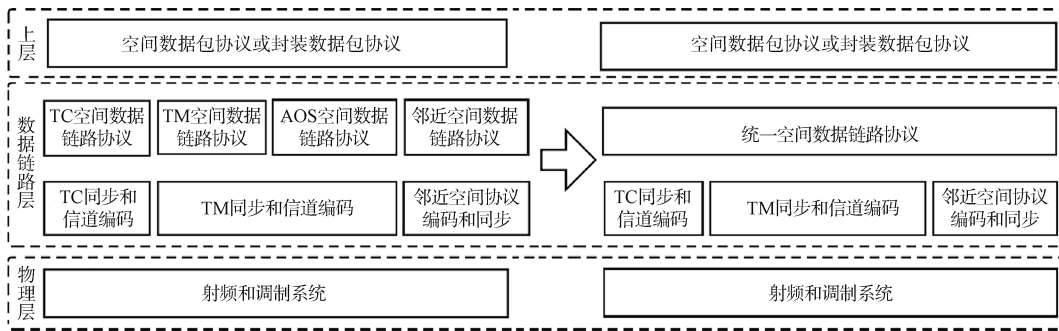


图9 统一空间数据链路协议

Fig. 9 Unified space data link protocol

统一空间数据链路协议沿用了已有的数据链路协议子层标准,通过改进,能够满足星地、星间的双向空间链路高效数据传输^[16]。统一空间数据链路传输帧的数据结构与其他空间数据链路协议类似,如表5所示。

表5 USLP传输帧格式^[30]

Table 5 USLP transfer frame format

传输帧 主导头	传输帧 插入域	传输帧数据域		操作 控制域	帧差错 控制域
		传输帧数据 域导头	传输帧数 据域		
4 ~ 14 Bytes	可变长度	1 ~ 3 Bytes	可变长度	4 Bytes	2 Bytes

统一空间数据链路协议是CCSDS提出的一个比较新的标准协议,其具有灵活的传输帧结构和广泛的应用场景。未来,随着对其研究的不断深入,可以实现智能天地一体化和卫星测控网。

6 结束语

自1957年苏联发射了第一颗人造卫星以来,

世界各国争相探索宇宙,人类对卫星的测控技术也随之不断地发展。从最初的分帧遥测、遥控到如今CCSDS提出的TM、TC、AOS、Proximity-1和USLP数据链路协议,航天器的飞行距离越来越远,信号传输也越来越准确。目前,我国的航天测控技术发展迅速,已达到世界一流水平。而且,随着人们对空间技术的不断探索,航天测控网正朝着智能化和一体化的方向进步。建立“智能天地一体化”信息网已经上升至国家战略,智能卫星测控网技术也日益成熟^[31]。在未来,智能天地一体化信息网会被应用于更丰富的场景和更广阔的空间,为人们提供便利,但是测控网络的节点众多、空间分布立体、网络复杂,对控制中心的网络资源管理调度是一项巨大的挑战。在此背景下,本文综述了目前卫星测控通信的技术和发展进程,介绍了跟踪测轨、遥测和遥控基本原理,并概述了CCSDS协议架构和不同的空间数据链路协议,对未来智能天地一体化卫星测控网作进一步的研究与探索。

参考文献

- [1] IMT-2030 推进组. IMT-2030(6G)推进组正式发布《6G 总体愿景与潜在关键技术》白皮书[J]. 互联网天地, 2021(6): 8-9.
- [2] 张威, 吴涛, 马宏, 等. 智能一体化航天测运控网络发展探析[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 82-89.
ZHANG Wei, WU Tao, MA Hong, et al. Discussion on the development of integrated and intelligent space TTC & OC network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 82-89.
- [3] 贺涛, 李滚. 航天测控通信原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2022.
- [4] 刘昭, 杨艳平. 商业航天智能测运控初探[J]. 科技风, 2020(10): 95-96, 104.
- [5] 郭经. CCSDS 空间链路业务标准化工作综述[J]. 航天标准化, 2013(3): 33-36, 39.
- [6] 刘佳. “CCSDS 建议”在我国航天领域的研究与应用”第三届专题研讨会成功召开[J]. 国际太空, 2013(8): 65.
- [7] 胡民达. 基于 PCIE 总线的 CCSDS 标准卫星数据采集软件开发[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- [8] 朱万里. DSFDP:深空文件传输协议研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [9] 白云飞, 陈晓敏, 安军社, 等. CCSDS 高级在轨系统协议及其应用介绍[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(S1): 16-21.
BAI Yunfei, CHEN Xiaomin, AN Junshe, et al. Introduce to CCSDS AOS protocols and its application[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(S1): 16-21.
- [10] 叶晓国. 空间通信协议 SCPS/CCSDS 研究综述[J]. 电信快报, 2009(2): 13-15.
YE Xiaoguo. Research review of space communication protocol SCPS/CCSDS[J]. Telecommunications Information, 2009(2): 13-15.
- [11] CCSDS. TM space data link protocol: CCSDS 132.0-B-3[S]. 2021.
- [12] CCSDS. TC space data link protocol: CCSDS 232.0-B-4[S]. 2021.
- [13] CCSDS. AOS space data link protocol: CCSDS 732.0-B-4[S]. 2021.
- [14] CCSDS. Proximity-1 space link protocol-data link layer, CCSDS 211.0-B-6[S]. 2020.
- [15] CCSDS. Unified space data link protocol: CCSDS 732.1-B-2[S]. 2021.
- [16] 周军, 吴侃侃, 李林伟, 等. CCSDS 统一空间数据链路协议应用分析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(3): 40-46.
ZHOU Jun, WU Kankan, LI Linwei, et al. Analysis on application of CCSDS unified space data link protocol[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(3): 40-46.
- [17] 韩秀国, 唐立. 多普勒跟踪测轨技术在深空探测中的应用研究[C]//国防科学技术工业委员会科技与质量司, 中国宇航学会深空探测技术专业委员会. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第二届学术会议论文集, 2005: 8.
- [18] 陈维超. 卫星测距的关键技术研究及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [19] 蒋金冰. 一种新型低轨卫星跟踪测角控制系统设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2015.
- [20] 张高远, 文红, 宋梁. 深空通信中的数字调制与纠错编码[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [21] 梁磊, 易予生, 陈春亮. CCSDS 分包遥测在航天器通信中的设计及应用[J]. 电子科技, 2018, 31(4): 77-80.
LIANG Lei, YI Yusheng, CHEN Chunliang. Design and implementation of CCSDS packet telemetry in spacecraft communication[J]. Electronic Science and Technology, 2018, 31(4): 77-80.
- [22] 张琛, 李爱红, 张尔扬. CCSDS 遥测遥控空间数据系统通信协议及其应用[J]. 航天返回与遥感, 2004, 25(2): 23-28.
ZHANG Chen, LI Aihong, ZHANG Eryang. CCSDS telemetry/telecommand space data systems protocols and their applications[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2004, 25(2): 23-28.
- [23] 张亚航, 赵思阳, 何熊文. 基于传统遥控体制的分包遥控方案设计[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(S1): 81-85.
ZHANG Yahang, ZHAO Siyang, HE Xiongwen. A multilayer telecommand design based on the traditional telecommand system[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(S1): 81-85.
- [24] 于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述[J]. 深空探测学报, 2016, 3(4): 307-314.
YU Dengyun, WU Xueying, WU Weiren. Review of technology development for Chinese Lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016,

- 3(4): 307-314.
- [25] 杨晓剑. IP协议与CCSDS协议的转换[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [26] 王琦, 汪勃, 吴斌. CCSDS建议在某新型航天器测控中的应用[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(S1): 22-25.
WANG Qi, WANG Bo, WU Bin. Application of CCSDS recommendations in TT&C of a new model spacecraft[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(S1): 22-25.
- [27] 朱明. 基于集成学习的CCSDS空间链路层协议识别技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.
- [28] 任放, 赵和平. CCSDS邻近空间链路协议的初步探究[J]. 北华航天工业学院学报, 2007(5): 3-6.
REN Fang, ZHAO Heping. Tips on Proximity-1 space link protocol of CCSDS[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2007(5): 3-6.
- [29] 马红军, 李严, 张建华. 邻近空间链路协议的研究现状与前景展望[C]//中国通信学会卫星通信委员会. 第七届卫星通信新技术、新业务学术年会论文集, 2011: 242-247.
- [30] CCSDS. Overview of the unified space data link protocol, CCSDS 700.1-G-1[S]. 2020.
- [31] 李海龙, 孟亚洁. 织就"天地一体"信息网络——我国卫星通信产业发展趋势研判[J]. 中国电信业, 2022(2): 37-41.
LI Hailong, MENG Yajie. Weaving "heaven and earth in one" information network-Research and judgment on the development trend of China's satellite communication industry[J]. China Telecommunications Trade, 2022(2): 37-41.

[作者简介]

- 韩 帅 1981年生, 教授, 博士生导师。
郭 航 2001年生, 硕士研究生。
孟维晓 1968年生, 教授, 博士生导师。
姜雅琦 2000年生, 硕士研究生。

(本文编辑: 傅 杰)