

## 天地信息网络协议融合技术综述\*

闫朝星, 付林罡, 谌 明, 朱至天  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 天地信息网络融合可以实现空间与地面网络资源的充分共享和高效利用, 国内外已提出多种天地一体化信息网络架构并从不同角度进行理论研究和关键技术攻关。面向 CCSDS 数据系统体制与空间通信协议规范 (SCPS), 在分析 CCSDS 协议体系结构及其应用发展基础上, 讨论卫星链路应用 TCP/IP 的问题与关键机制, 并综述星地一体化协议 IPoC (IP over CCSDS) 的技术研发与仿真研究进展。通过分析空间 CCSDS 协议体系与地面 IP 网络机制, 为天地信息网络融合系统设计与网络协议研究提供参考。

**关键词:** 星地一体化; CCSDS; IP over CCSDS; 空间通信协议规范

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)06-0030-09

### Overview of space-ground information network integration techniques

YAN Chaoxing, FU Lingang, CHEN Ming, ZHU Zhitian  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Space-ground information network integration could efficiently share and utilize the space and terrestrial network resources. There are several space-ground integration information network architectures from different fields to investigate the theory and technique therein. CCSDS has developed advance mature systems and space communication protocol standards. Based on analyzing the CCSDS protocol architectures and application developments at home and abroad, we survey the problems and key principles of TCP/IP application in satellite links. Then, we survey the simulation, research and design progress of satellite-ground integration protocol IPoC (IP over CCSDS). Through the literature analysis of CCSDS protocols and IPoC protocols, this treatise is dedicated to support both system and protocol designs of space-ground information network integration.

**Key words:** Space-ground integrated network; CCSDS; IP over CCSDS; SCPS

### 引 言

天地信息网络结合卫星系统的优势可实现空间网络与地面网络资源的充分共享和高效利用。以卫星等空间飞行器为节点组成的天基空间通信网相对于地面网络, 具有网络覆盖范围大、不受环境影响、资源利用率高等优点。经过多年发展, 我国已形成了地基测控网、天基测控通信网以及深空测控通信网完善的航天测控网体系, 未来发展将优化地基、天基和深空测控通信网, 进一步构建天地一体化测控通信网<sup>[1]</sup>。空间信息网络具有长时延、高误码、间断性的特点, 地面 TCP/IP 等网络协议直接应用在空间信息网将降低传输效率。

空间数据系统咨询委员会 (CCSDS) 在常规在轨系统 (COS) 的基础上发展制定了高级在轨系统 (AOS) 建议, 从 20 世纪 90 年代末开始相继制定了空间通信协议规范 (SCPS) 系列规范与下一代空间互联网 (NGSI), 形成 CCSDS 承载 IP、IPoC (IP over CCSDS) 建议书与太阳系互联网 (SSI) 体系结构报告, 并开展延迟容忍网络 (DTN) 标准研究<sup>[2]</sup>。在空间网络技术的发展过程中, 协议体系主要发展方向有: SCPS 协议、TCP/IP 协议、CCSDS 结合 TCP/IP 协议以及 DTN 协议体系。从网络层角度看, 可以认为目前只有 IP 和 DTN 两种协议体系<sup>[3]</sup>。在 CCSDS 协议技术研究领域, 尚未有技术综述文献。本

\*基金项目: 航天科技集团联合基金, 航天科技集团青年拔尖人才计划, 国家重点研发计划 (2018YFC1407201)

收稿日期: 2020-08-01 收修改稿日期: 2020-09-22

文针对天地网络融合中 CCSDS 协议的 IPoC 技术进行综述,通过分析国内外研究进展,探索天地信息网络建设方向。

## 1 国内外发展应用

美国 NASA 喷气实验室 (JPL) 将标准 SCPS 协议应用到一系列航天任务中,给出了 SCPS 网络及网关的实现部署方案:在端到端系统、在卫星/无线通信环境、在互联网和 SCPS 网络之间等三种方案<sup>[4]</sup>。基于 SCPS 传输协议商用软件 SkipWare 的网络平台<sup>[5]</sup>采用了 Comtech EF Data 公司 TurboIP 硬件平台,开发了 TCP/IP 性能增强网关,其性能增强典型值与传统 TCP 相比高达 250:1。美国宇航局促使航天器和地面最终用户之间实现全 IP 连接,国际空间站采用 CCSDS 建议标准实现了天地一体化的通信信息传输。在军用航天领域,如美国国家导弹防御计划的天基红外系统航天器也加速发展应用 CCSDS 标准。作为先进、成熟的数据系统体制,CCSDS 标准已成为航空航天领域的默认国际标准,在军民航天器一体化网络应用方面,CCSDS 协议簇应用势头迅猛增长。CCSDS 于 2014 年还发布了太阳系互联网体系结构报告,DTN 是实现太阳系互联网中各区域网之间互联的核心。NASA 已进行多项实验来测试 DTN,并在英国灾难监测卫星、国际空间站上进行测试<sup>[6]</sup>。

我国目前广泛执行遥测 IRIG 标准以固定帧格式面向单个数据静态管理,而 CCSDS 标准 AOS 标准数据格式面向用户数据动态管理,如 CCSDS 包和虚拟信道数据单元 (VCDU),针对不同需求的用户,可同时通过虚拟信道管理方法对信道资源进行动态分配<sup>[7]</sup>。我国航天测控通信经过最初的独立载波系统遥测遥控,已发展为单载波的统一 S 频段测控通信系统,多数航天测控任务中采用点到点链路的天地信息传输,使用简化的高级数据链路控制 HDLC 协议。测控数据多采用 PCM 格式波形传输,高速有效载荷部分采用了 CCSDS 建议波形传输<sup>[8]</sup>,两者采用不同的物理信道传输。近些年来,空间技术研究院开展了“空间站信息与数据系统概念研究”、中国科学院开展了“天际综合信息网关键技术预先研究”<sup>[9]</sup>。我国航天局在 2008 年成为 CCSDS 组织第 11 个正式成员。

目前,我国地面网络内部与空间网络内部运行的网络协议在体系结构上仍然相互独立。在地面测控网和天地无线信道等方面部分采用了 CCSDS 建议书,“实践”五号卫星、“神舟二号”飞船、“嫦娥一号”月球探测卫星、“风云三号”气象卫星、数据中继卫星采用了 CCSDS 建议标准。在北斗全球系统通信网中,卫星内各载荷之间按 TCP/IP 有线接入技术实现互连;星间与星地按 CCSDS 无线接入技术实现互连;在卫星内部通过 CCSDS 协议实现空间无线网与卫星有线局域网之间互连<sup>[10]</sup>;地面主控站、注入站与监测站具备满足 CCSDS 协议规范的无线接入能力。

中国电子科技集团公司设计了机载 IPoC 与地面网关,反向链路带宽 31.2Mb/s<sup>[13]</sup>。文献[14]开展了基于同步骨干卫星的天地互联模式静态 IP 网络试验,TCP 传输速率约 120Mbps,UDP 传输总速率约 130Mbps。北京遥测技术研究所设计 CCSDS 数据地面接收系统软件<sup>[11]</sup>解决了数据缓冲区和虚拟信道及用户管理问题,设计了符合 CCSDS 标准下行传送帧数据的卫星模拟器<sup>[12]</sup>,并研制了星地高速协议转换网关设备,数据处理速率设计达 900 Mb/s,时延  $T_d < 0.1\text{ms}$ ,支撑星间链路在轨试验进行即时通信、网络视频监控、FTP 传输与 WiFi 接入等应用。

在星载数据系统接口方面,航天科技集团北京空间飞行器总体设计部跟踪和研究了 CCSDS 航天器接口业务 (SOIS)。中国科学院在载人飞船有效载荷数据管理系统设计中采用了 AOS 标准和 1553B 总线技术<sup>[15]</sup>。国内多所高校进行了仿真研究:文献[16]通过 AOS 协议信道复用方法的 OPENT 仿真建模分析动态自适应信道算法;文献[17]通过对遥测和遥控协议进行建模仿真寻找对协议干扰的方法;文献[18]使用 OPNET 和 STK 仿真平台比较分析不同系统误码率、航天器轨道高度及不同信道传输速率等条件下的 TCP 和 SCPS-TP 协议的性能;文献[19]研究基于 CCSDS 的空间网络认证模型;文献[20]开发万兆网通信协议转换器;文献[21]研究基于 CCSDS 协议框架星间链路的全球卫星导航系统协议体系和接入模型。

## 2 空间通信 CCSDS 系统

### 2.1 CCSDS 协议架构

CCSDS 制定的 AOS 协议应用于高级空间运输系统、自由飞行器、载人空间站及无人空间平台等航天器间双向链路或反向链路。AOS 正式建议书包含的 SCPS 空间通信协议规范主要有网络协议 NP (Network Protocol)、SP 安全协议 (Security Protocol)、TP 传输协议 (Transport Protocol)、文件协议 FP (File Protocol) 和文件传输协议 CFDP (CCDS File Delivery Protocol) 等<sup>[22]</sup>。如图 1 所示, 对应于 TCP/IP 体系 OSI 模型, SCPS 协议栈主要包含物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层的协议:

- ① 物理层, 包括两部分: 无线射频和调制系统、紧邻空间 (Prox-1) 跨层协议。
- ② 数据链路层, 包括四种链路协议: Prox-1 协议、遥测 TM 协议、遥控 TC 和 AOS 协议。
- ③ 网络层, 包括空间分组协议 (SPP) 和网络协议 SCPS-NP。
- ④ 传输层, 传输协议 SCPS-TP 提供端到端传输服务; 安全协议 SCPS-SP 提供身份认证、数据完整检查和接入控制等安全服务。
- ⑤ 应用层, 提供端到端的 SCPS-FP、CFDP、无损数据压缩、图像数据压缩或者其它应用服务。

IPoC 建议书 (CCSDS 702.1-B-1)<sup>[23]</sup>为航空器和地面系统中通过 CCSDS 承载 IP 数据建立了实践规范。数据链路层可以分为: 对应 TM 空间数据链路协议的数据链路协议子层; 对应 TM 同步与信道编码协议的同步与信道编码子层。大多数基于 CCSDS 建议的空间数据系统采用以 RS+卷积码的级联信道编码方式, 或采用 LDPC 码<sup>[24]</sup>。CCSDS 空间数据链路协议 (SDLP) 可以传输 IPv4 数据包、空间包和 SCPS-NP 数据包等形式的数据包, 也可对 IPv6 等其他类型数据包进行封装后传输<sup>[9]</sup>。

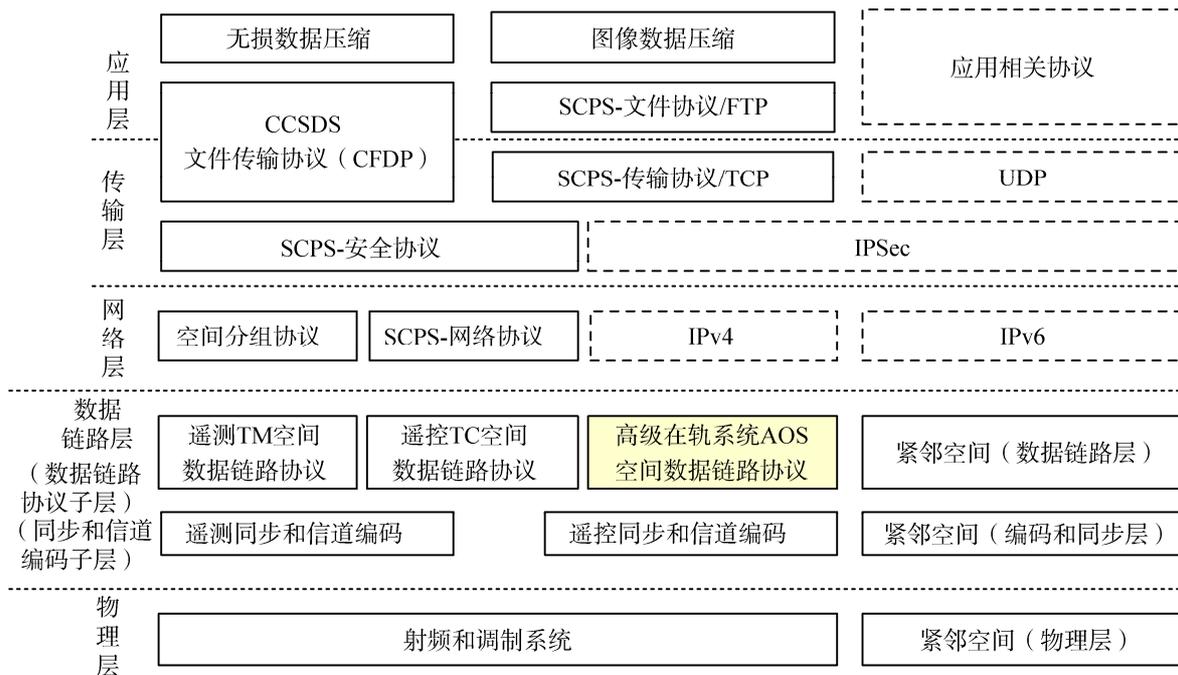


图 1 SCPS 和 TCP/IP 对应 OSI 模型中协议栈关系  
Fig. 1 Protocols of SCPS and TCP/IP in OSI architecture

### 2.2 AOS 空间数据系统

AOS 空间数据系统从功能上可以向下兼容 CCSDS TM 空间数据链路建议, 并可需求支持传输更多的业务种类<sup>[25]</sup>。CCSDS 主网 (CPN) 是 AOS 系统核心部分, 包含星载网络、空间链路子网 (SLS) 和地面网络, 通过星地信道和星间信道支持网络层的路径业务数据单元和网间业务数据单元进行双向传输。AOS 系统协议包括端到端业务和空间链路子网业务两类不同业务类型, 对应提供了八种不同的服务:

端到端业务包含路径和网间业务两种服务；CCSDS 对仅需要通过空间链路的点到点数传提供了如图 2 所示的六种点到点业务<sup>[4]</sup>：封装服务、复用服务、位流服务、虚拟信道访问（VCA）服务、虚拟信道数据单元（VCDU）服务、插入服务。

其中，封装服务封装统一格式 CCSDS 包并复用到虚拟信道；复用服务把同一个虚拟信道上的数据包合路到多路复用协议数据单元（M\_PDU）；位流服务把比特流数据放置在位流业务协议数据单元（B\_PDU）；VCA 将虚拟信道访问业务数据单元（VC\_SDU）放于虚拟信道访问协议数据单元（VC\_PDU）；VCDU 服务和 VCA 服务产生的数据单元通过多路复用在物理信道进行传输；插入服务在虚拟信道的插入区内等间隔地插入固定长度的高实时性业务数据。VCDU 业务和插入业务不在同一个物理信道上同时使用。

此外，与 AOS 协议单向传输、无确认机制、无数据完整性保证机制的特点不同，紧邻空间链路协议 Prox-1 具有通信时延短、信号强度适中、单次会话简短且相互独立的特点，如图 1 所示，主要作用于 CCSDS 标准中的物理层和数据链路层，支持空间任务中航天器之间的双向通信链路。文献[26]依据 CCSDS 的 Prox-1 协议，设计了适用于邻近空间链路协议的回退 N 帧 ARQ 方案，由两台一体化工控机用于模拟两个航天器，板卡采用 Xilinx-V5 系列 FPGA 芯片和 TI 的 TMS320C6455 系列 DSP 芯片，结合软硬件平台搭建了测试环境，对 ARQ 性能进行了测试。

### 3 空间网络传输机制

#### 3.1 卫星链路的 IP 应用问题

空间网络应用 IP 技术时，低轨 LEO 星座动态特性是最大的挑战，星际链路（ISL）在系统拓扑中不断变化更增加了 IP 路由选路的困难<sup>[4]</sup>。应尽量简化星上路由表，隔离两种网络间路由更新信息的传播；移动 IP 切换与 QoS 的保证机制可采用改进多协议标签交换（MPLS）协议，提高空间网络吞吐量和路由性能，同时减小本地状态开销和队列时延<sup>[4]</sup>。

卫星网络传输时延受多种因素影响，在卫星链路上应用 TCP 协议时引发的长时延问题主要由轨道类型决定。一般的低轨 LEO 星座中星间单跳时延大约为 20ms~25ms，GEO 卫星则达 250ms~280ms。大规模星座、轨道变化、星际链路路由策略等都会影响卫星网络传输时延，影响 TCP 协议的定时机制，导致网络超时和数据重传，降低带宽利用率；长时延的 TCP 连接在与短延时的 TCP 连接竞争时候的公平性问题。卫星通信信道中出现高误码率时，在不能获知数据报丢失是信道误码还是网络拥塞原因时，默认为网络拥塞引起的。地面双向通信往返时延（RTT）一般在毫秒级别，且信道误码率 BER<10<sup>-9</sup>。但是，空间通信环境中的误码率 BER 可达 10<sup>-5</sup>，RTT 常超过 1s，网络丢包率将达到 12%<sup>[5]</sup>。

在传统 TCP 传输协议里，解决丢包问题的方法主要是减小发送窗口，这将不断恶化 TCP 传输性能，对此主要通过链路层优化、TCP 优化以及性能增强代理等方法解决<sup>[27]</sup>。在实际应用中，性能增强代理实现主要有 TCP 欺骗和 TCP 分段两种方式。TCP 欺骗方案在发送端做加速处理；TCP 分段在收发两端用协议变换的方式将 TCP 协议在无线链路上转换为专用协议，SCPS-TP 网关是一个典型 TCP 分段应用。文献[28]分析了天地一体化网络进行传输层融合的关键技术，可基于不同误码率、往返时延、链路间断性、数据丢失原因、缓存和处理能力等技术进行融合。

#### 3.2 CCSDS 协议机制分析

TCP/IP 协议的关键机制有流量控制机制、差错控制机制和拥塞控制机制。CCSDS 协议的关键机制

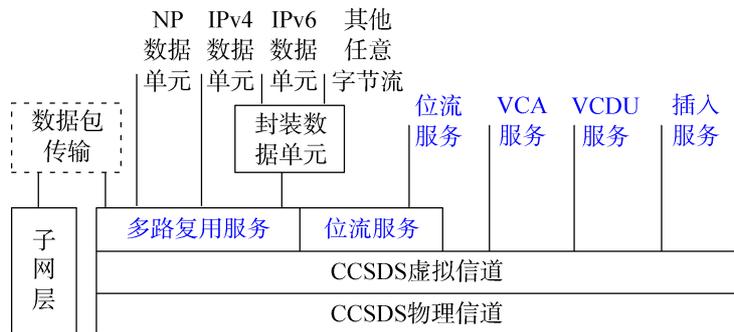


图 2 AOS 协议业务类型  
Fig. 2 Service of AOS protocols

与 TCP/IP 协议的三种关键机制相比, 稍有不同<sup>[28]</sup>:

① CCSDS 流量控制机制, 通过对数据包追加窗口扩展选项来扩大通知窗口, 提升数据传输效率。基于 RTT 变化来动态调整拥塞窗口大小, 实时调整发送速率, 达到流量控制目的。

② CCSDS 差错控制机制, 由确认包、定时器和数据重传三种方式组成。定时器通过时间戳选项来进行计算, 数据重传采用选择性否定确认技术(SNACK)。出现大量有高误码率导致的丢包时, SNACK 技术可在一次确认中重传多个数据包, 大大提高了数据的恢复效率。

③ CCSDS 拥塞控制, 采用 Vegas 算法, 通过检测 RTT 来动态调整拥塞窗口, 避免拥塞发生。

SCPS-TP 按可靠性可分为: 完全可靠协议、最大可靠协议和最小可靠协议。SCPS-TP 协议针对 TCP 的修改如表 1 所示, 通过数据损坏响应、SNACK 选项和包头压缩功能等技术对高误码率特性进行改进; 针对 RTT 往返时延长问题, 通过大窗口和定时器的修改进行改进; 地面网络数据丢失的原因被默认为拥塞导致的, 而在空间网络中, 数据丢失有可能是高误码导致的, 也有可能是因为链路恶化造成的。SCPS-TP 使用类似于 ICMP 的空间 SCMP 协议为突发错误问题提供支持。这些改进大大提升了空间网络环境的数据传输效率。

表 1 SCPS-TP 协议针对 TCP 的修改  
Table 1 Modification of SCPS-TP compared with TCP

影响因素	SCPS-TP 对 TCP 改进
比特误码率	数据损坏响应 SNACK 端到端包头压缩
往返时延	窗口大小可调, 定时器修改
连接状态	SCMP 支持链路中断
存储容量	预先计算包头设置记录临界值, 包头压缩
数据丢失	根据不同的丢失原因采取不同的应对策略

AOS 虚拟信道调度是实现链路层 QoS 保证的核心, 是解决多个虚拟信道共享物理信道的有效手段<sup>[29]</sup>, 主要有先来先服务、时间片轮询、静态优先级、剩余量优先等算法。典型的 QoS 模型包括综合服务模型 IntServ、区分服务模型 DiffServ 和 MPLS 等。文献[30]将 IP 网络层与 CCSDS 数据链路层相结合设计了跨层 QoS 保证机制, 包括业务分类、AOS 虚拟信道分配和虚拟信道动态调度, 提取 IP 包 ToS 值并映射到 AOS 帧的虚拟信道标识 (VCID) 域中, 完成基于 IP 区分服务的虚拟信道的分配。

## 4 星地网络协议技术

### 4.1 IPoC 网络协议

IPoC 空间链路协议目的是实现空间网络和地面网络通信协议一体化融合。针对网络层融合问题, SCPS 给出了翻译和封装两种机制: 翻译机制在网络层 SCPS-NP 与 IP 协议之间进行协议互译; 封装方式将 SCPS-NP 包封装在 IP 包中直接传输。地面网络向空间网络发送数据时, 地面网络系统将 IP 数据包封装成 AOS 帧, 再经过空间链路传输到星上网络系统, 空间网络从接收到的 AOS 帧中解析出地面的 IP 数据包。空间网络向地面网络发送数据时, 星上网络系统将 IP 数据包封装成 AOS 帧, 再经过空间链路传输到地面网络系统, 地面网络从接收的 AOS 帧中解析出星上的 IP 数据包。

在 CCSDS 空间链路协议 (SDLP) 上实现 IP 数据报传递的方法有<sup>[4]</sup>:

- ① 无需任何中介子层, 直接将 IP 数据报置入 CCSDS 空间数据链路帧内实现 IP 数据报传递;
- ② 将 IP 数据报放在 CCSDS 空间包内, 再分割或合并放入 CCSDS 空间数据链帧内进行传递;
- ③ 用户自定义串行流封装。

其中, 方式①和②以包的形式传输 IP 数据报, 方式①具有可提供 CCSDS 数据链路再同步的优点。

IP 协议有 IPv4 和 IPv6 两个版本, 分别用到不同的 CCSDS 服务, 如表 2 所示为 SDLP 上承载 IPv4 数据包所用到的服务。用到了虚拟信道包 (VCP)、多路访问点数据包 (MAPP)、封装服务 (ENCAP),

对此服务使用方提供位于 SDLP 包传输帧头部分的全局虚拟信道标识 (GVCID)，由相串接的传输帧版本号 (TFVN)、航天器标识 (SCID) 及 VCID 组成：“GVCID=TFVN+SCID+VCID”。服务提供方通过空间链路传输数据，服务使用方在 SAP (服务访问点) 取得传输服务。通过 AOS 协议传输 IP 数据报的处理流程如图 3 所示<sup>[22]</sup>，M\_PDU 载荷域通常由 CCSDS 空间包碎片和完整的 CCSDS 空间包组成。

表 2 SDLP 上承载 IPv4 数据包所用到的传输服务  
Table 2 IPv4 delivery service over SDLP of CCSDS

传输服务	SAP 地址	适用的 SDLP
VCP	GVCID+包版本号 (PVN)	AOS、TM、TC、Prox-1
MAPP	GVCID+PVN+MAP_ID	TC
ENAP	GVCID	AOS、TM、TC
Over VCP	GVCID	AOS、TM、TC、Prox-1

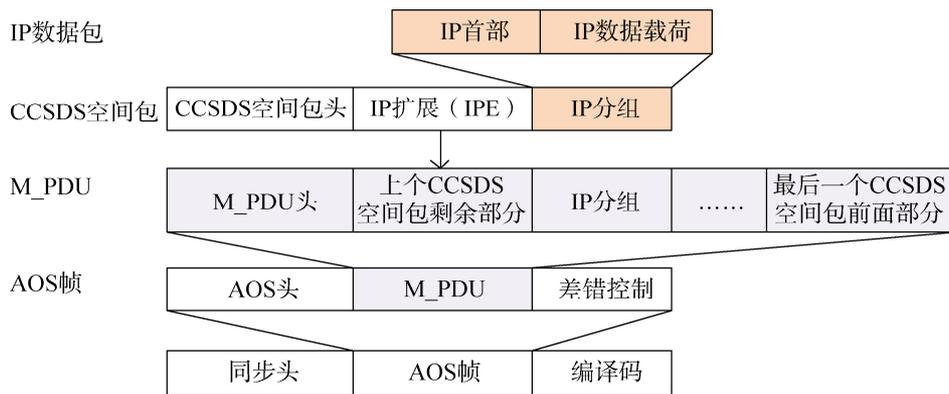


图 3 IP 数据报通过 AOS 协议处理流程

Fig. 3 Processing of IP data packet for AOS protocols

星地 IPoC 协议在天地一体化信息网的端到端通信中实现网络层上基本一致的通信协议。航天科技集团<sup>[31, 32]</sup>针对近地轨道航天器网关与地面网络通信设计了三层网络交换；针对航天器网关与航天器内部网络通信设计了二层网络交换；针对天地一体化互联网络的 QoS 需求，设计了航天器网关缓存和调度策略，采用了静态优先级和轮询调度策略相结合的虚拟信道调度模式。该航天器网关的往返传输延时影响 TCP 性能，只适用于近地轨道航天器。空间技术研究院<sup>[33]</sup>指出，地面网关软件化过程的关键技术包含数据链路层协议解析和网络层 IP 数据包透明传输，星上视频数据通过网关实现 IP 包向 CCSDS 协议的转换；地面软网关接收解调数据实现天地间网络通信，在通用操作系统上可对网络层 IP 数据包经过通用网卡透明发送，地面视频播放器接收地面软网关数据，最终实现天地视频通信，其最高速率为 300Mbps、时延  $T_d < 100ms$ 。

#### 4.2 星地协议转换技术

随着高速星地通信技术的发展，天地一体化跨系统互连速率需求已达到 Gbps 级甚至几十 Gbps 级，PCIe、RapidIO、Rocket I/O 等高速串行传输技术逐渐取代了传统并行传输技术，成为高速数据传输系统的主流应用。Xilinx 开发 AURORA 点到点传输通信协议，可将 AURORA 协议数据包加载到运行在该协议之上的多种高层协议数据包上传输。

文献[20]采用高速收发器件 TLK2711 支持线速率达 1.6Gbps，信号带宽超过 2.16Gbps。西安电子科技大学<sup>[34]</sup>实现 IPoC-AOS 高速网关链路层协议转换，最高优先级业务数据转发时延指标为  $T_d < 3ms$ 。其网关设备<sup>[1, 25, 35, 36]</sup>采用 Virtex 7 系列 XC7VX690T 芯片、两个 4GB 的 DDR3 缓存，有四个物理传输通道 GTH 通过 10G 光纤模块 (SFP+) 封装，采用 AURORA 协议配合 GTH 共同完成 AOS 同步接口 PHY 功

能,并结合光纤模块实现广域网同步光纤接口。主要功能模块有:

① 高速查找表模块,实现 IP 分组与 VCID 映射,接收来自 IP 封装与解封装模块的 IP 分组,提取分组中的源端口号、目的端口号、目的 IP 地址、源 IP 地址以及协议号;

② MAC 地址提取模块,提取从万兆以太网端接收的以太网帧的 MAC/IP 地址,获得上行链路 IP 数据报到 AOS 同步帧的源 MAC 地址与 IP 地址之间的对应关系,从而在星地下行链路 AOS 同步帧到 IP 数据报获得目的 IP 地址对应 MAC 地址;

③ M\_PDU 生成模块,完成将 AOS 数据包转换为 M\_PDU 的适配工作。

下行链路以太网成帧模块接收到下行调度模块的 AOS 帧取出其数据载荷,添加相应 MAC 头后由以太网光纤接口模块发出。采用专业网络测试仪 Test Center,参照 IETF RFC2544 主动测试方法向网关测试装置发起 ARP、ICMP 测试数据包,测双向连通性、吞吐量、时延指标。

文献[8]在 PowerPC MPC8548 嵌入式硬件平台上实现 IPoC 网关,IP 协议与 CCSDS AOS 空间数据链路协议的相互转换采用了 Linux 内核的网络协议栈,使用 Test Center 进行 RFC2544 吞吐率测试,单向传输 1500 字节 IP 报文、46 字节 IP 报文的吞吐率分别为 600Mbps、200Mbps。中国电子科技集团<sup>[37]</sup>采用 IP 数据简单数据链路协议(SDL)封装方法设计机载网关对 IP 数据进行封装和定界,地面网关采用基于 CRC 的捕获方法来确定 SDL 的帧边界,该设计采用 FPGA+PowerPC 的架构,FPGA 主要负责接口处理、协议封装和解析,PowerPC 主要负责 IP 数据转发和协议控制,然后在所设计的系统上进行 ping 包时延测试,测得 IP 数据发送时延为 0~0.4ms。此外,文献[20]的万兆网协议转换器在 Virtex-7 系列 FPGA 芯片 XC7V585T 上完成自定义协议和标准以太网协议之间的转换,其接口采用万兆光纤模块,引入的最大时延  $T_d < 0.1\text{ms}$ 。并采用 Wireshark 软件对抓取数据内容并对比原数据,采用网络测试仪对协议转换器设备进行自环测试。

### 4.3 软件与仿真研究

文献[38]利用 CCSDS 的 AOS 协议业务类型广泛的优点,实现机载与地面数传设备点对点的多种数据传输,优化虚拟信道调度策略,保证关键数据实时性要求,还研究了空间数据在地面传输的标准空间链路扩展(SLE)协议,可将空间机构、地面运营商以及空间数据用户的地面设施互联,避免为每次新型号任务定制特定的网关设备。在 SLE 服务提供方与使用方的测控系统数据传输包括前向和反向遥测数据两个流向。文献[39]针对 SLE 系统在执行高可靠性任务时进行了改进和补充,将 SLE 服务端分为测站级 SLE 服务端和区域级 SLE 服务端两个等级,对高速大量数据通过合理拆分可保证可靠数据传输的同时降低服务实例的传输压力,在物理层面和逻辑层面都进行了必要的备份以保证系统可靠执行。

针对地面检测软件系统自动化测试需求,中科院<sup>[40]</sup>基于 FPGA 与 Labview 的嵌入式硬件卫星数据帧解析与显示系统,实现 CCSDS 数据格式的实时解析与测试。针对天地一体化骨干网络 CCSDS 协议,文献[41]从数据包转发、系统复杂度和可移植性等几方面对比分析不同卫星网络路由算法性能,发现基于地理位置的分布式抗毁路由算法充分考虑了不同网络拓扑变化对路由的影响,具有较好的可移植性。在其它研究中,如文献[42]和文献[43]采用了符合 CCSDS 标准的帧格式进行无人机测控数据传输;文献[44]基于 ZODIAC 公司的 Cortex CRT-Q 平台用于空间网络协议物理层,在小于 10Mbps 带宽下,设计天地一体化网关仿真节点设计与实现方案。文献[45]针对全域联合作战要素融合应用总结了空天地一体化网络协议体系、网络路由与网络安全防护等三项关键技术。

## 5 结束语

近年来,随着全球各国对空间信息网络和天地一体化技术的不断深入研究,国内建成北斗三号全球导航系统的同时也相继启动了多个空间信息网络重大研究计划,各类全球覆盖的互联网卫星星座蓬勃兴起。在此背景下,本文综述天地信息网络融合技术,在分析 CCSDS 标准发展应用的基础上,概述了 CCSDS 协议架构和 AOS 系统协议,然后比较 CCSDS 与 TCP/IP 协议关键机制与天地网络特性,最后综述了

天地信息网络 IPoC 协议与设备研制与测试情况,对天地一体化网络协议融合技术领域作进一步研究与探索。

### 参考文献

- [1] 荣华为. 基于 IP over CCSDS 的高速网关设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- [2] 黄薇, 张乐. 空间数据系统咨询委员会的专业领域及其发展综述[J]. 国际太空, 2016, 4: 72-79.  
HUANG Wei, ZHANG Le. Professional field and development review of CCSDS[J]. Space International, 2016, 4: 72-79.
- [3] 陈运军. 空间网络技术发展分析与建议[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(2): 153-160.  
CHEN Yunjun. Development of space internet technologies and suggestions[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2016, 35(2): 153-160.
- [4] 张林杰. TCP/SCPS 网关设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [5] 蒋立正. IP over CCSDS 空间组网通信关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2009.
- [6] 朱至天, 谌明, 闫朝星等. 延迟中断容忍网络路由技术综述[J]. 遥测遥控, 2018, 39(6): 59-72.  
ZHU Zhitian, CHEN Ming, YAN Chaoxing, et al. A survey on routing techniques in delay/disruption tolerant network[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(6): 59-72.
- [7] 宋永淳. CCSDS 在遥测系统中的应用[J]. 遥测遥控, 2012, 33(3): 6-10.  
SONG Yongchun. Application of CCSDS in telemetry systems[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2012, 33(3): 6-10.
- [8] 李少宾, 张亚生, 宋春晓. IP over CCSDS 协议转换技术研究[J]. 载人航天, 2012, 18(6): 13-19.  
LI Shaobin, ZHANG Yasheng, SONG Chunxiao. Research on protocol conversion of IP over CCSDS[J]. Manned Spaceflight, 2012, 18(6): 13-19.
- [9] 周拴柱. IP over CCSDS 协议的研究与实现[D]. 保定: 河北大学, 2015.
- [10] 钟涛, 易先清, 侯振伟等. 基于 CCSDS 的北斗全球卫星导航系统信息传输接入模型研究[C]. 第五届中国卫星导航学术年会, 2014: 1-6.
- [11] 张源. CCSDS 数据地面接收系统软件设计[J]. 遥测遥控, 2008, 29(3): 1-5.
- [12] 瞿晓明, 贾林巧. 一种基于轮转机制的 CCSDS 数据链路层的实现[C]. CCSDS 建议在我国航天领域的研究与应用第一届专题研讨会, 2011: 71-74.
- [13] 曾勇, 代红, 陈琪等. IP over CCSDS 网关在无人机测控与信息传输系统中的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2016, 42(10): 11-15.  
ZENG Yong, DAI Hong, CHEN Qi, et al. The design and implementation of IP over CCSDS gateway in UAV TT&C and information transmission system[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(10): 11-15.
- [14] 刘华峰, 徐潇审, 孙宝升等. 基于同步骨干卫星的天地一体化 IP 网络互联模式设计及真星试验[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(5): 532-538.  
LIU Huafeng, XU Xiaoshen, SUN Baosheng, et al. Design and verification of the space-ground integrated ip network interconnection model based on GEO[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(5): 532-538.
- [15] 吕良庆. 航天器智能软件体系架构设计与应用研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2018.
- [16] 马西飞. CCSDS AOS 空间协议信道复用机制的 OPNET 仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [17] 周君. 基于 CCSDS 的空间数据链路协议研究与仿真[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [18] 丁锐. SCPS-TP 协议在空间通信中的研究与仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [19] 牛犇, 李晖, 朱晓妍. 一种基于 CCSDS 的空间网络认证模型[J]. 载人航天, 2011, 6: 35-39
- [20] 金冶纯. 基于 FPGA 的万兆网通信协议转换器设计[D]. 保定: 河北大学, 2016.
- [21] 易先清, 刘思慧, 张耀鸿等. 基于星间链路的全球卫星导航系统协议体系研究[C]. 第五届中国卫星导航学术年会, 2014: 1-5.
- [22] 赵和平, 何熊文, 刘崇华等. 空间数据系统[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
- [23] CCSDS. 702. 1-B-1-2012, IP over CCSDS space links[M]. Washington, DC. 2012.

- [24] WANG B, CHEN P, FANG Y, et al. The design of vertical RS-CRC and LDPC code for ship-based satellite communications on-the-move[J]. IEEE Access, 2019, 7: 44977–44986.
- [25] 白海斌. 空天信息专用网络高速网关设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [26] 王杰. 邻近空间链路协议自动重传系统设计与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [27] 张亚生, 彭华, 谷聚娟等. IP over CCSDS 网关 TCP 增强关键技术研究[J]. 载人航天, 2012, 18(4): 85–89.  
ZHANG Yasheng, PENG Hua, GU Jujuan, et al. Research on TCP performance improvement of IP over CCSDS space links gateway[J]. Manned Spaceflight, 2012, 18(4): 85–89.
- [28] 李雪梅. 天地一体化异构网络融合技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [29] 王晓波, 孙甲琦. IP over CCSDS 空间组网应用浅析[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30: 37–40.  
WANG Xiaobo, SUN Jiaqi. Analysis of application of IP over CCSDS in space networking[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30: 37–40.
- [30] 陈晓, 晋东立. IP over CCSDS 空间通信跨层 QoS 保证机制设计[C]. 第 26 届中国飞行器测控学术会议, 2012: 569–74.
- [31] 龙吟, 朱珂, 丁凯等. 天地一体化互连网络中航天器网关的设计及实现[J]. 航天器工程, 2016, 25(1): 77–83.  
LONG Yin, ZHU Ke, DING Kai, et al. Design and implementation of spacecraft gateway in integrated space-ground network[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(1): 77–83.
- [32] 龙吟, 朱珂, 丁凯等. 一种用于近地轨道航天器的天地网络一体化方案[J]. 空间电子技术, 2016, 4: 67–72.  
LONG Yin, ZHU Ke, DING Kai, et al. Design of space-ground integrated network for LEO spacecraft[J]. Space Electronic Technology, 2016, 4: 67–72.
- [33] 刁伟鹤, 张亚非, 潘顺良等. 天地一体化网络地面网关技术及其应用[J]. 宇航计测技术, 2018, 38(5): 54–60.  
DIAO Weihe, ZHANG Yafei, PAN Shunliang, et al. Research and application on ground software gateway technology[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2018, 38(5): 54–60.
- [34] 孙志颖. 天地一体化网络协议的研究与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [35] 吴友飞. IP over CCSDS AOS 适配器链路层适配单元的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [36] 杜长刚. IP over CCSDS 适配器高速接口电路设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [37] 周婷婷. 无人机通信系统 IP 数据传输设计与实现[J]. 中国新通信, 2018, 33–37.  
ZHOU Tingting. The design and implementation of IP data transmission in UAV communication system[J]. China New Telecommunications, 2018, 33–37.
- [38] 黄习福, 宋永淳. CCSDS AOS 协议在机载数据传输系统中的应用[C]. 航天测控技术研讨会, 2007: 144–150.
- [39] 冯炜, 张爱美, 贾林巧等. 高可靠 CCSDS SLE 系统方案的研究[J]. 遥测遥控, 2014, 35(1): 6–11.  
FENG Wei, ZHANG Aimei, JIA Linqiao, et al. Research on high reliability CCSDS SLE system scheme[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(1): 6–11.
- [40] 刘秀秀. 基于 CCSDS 标准的卫星数据地面实时测试系统的设计[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2017.
- [41] 刘立祥. 天地一体化信息网络的体系结构与协议分析[J]. 重庆邮电大学学报, 2018, 30(1): 9–21.  
LIU Lixiang. Analysis of architecture and protocol of space-ground integrated information network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018, 30(1): 9–21.
- [42] 段彩萍. 无人机遥控遥测地面站系统及航迹规划的研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2018.
- [43] 罗军军. 无人机遥测遥控地面站系统研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2014.
- [44] 倪小钦. 天地一体化网关可重构仿真节点设计与实现[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [45] 李潇, 陆婷婷, 李喆, 等. 国外空天地一体化网络及其在联合作战中的应用[J]. 飞航导弹, 2020, 5: 59–63.

#### [作者简介]

闫朝星 1985 年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为航天信息网络技术。

付林罡 1982 年生, 硕士, 研究员, 主要研究方向为航天测控通信技术。

湛明 1977 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为航天测控通信技术。

朱至天 1994 年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天通信网络技术。