

基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络研究

王洋, 姜云升, 任凯, 刘丹阳, 韩明

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 为满足运载火箭日益增长的测控需求, 网络化测控成为未来运载火箭测控的必然趋势。通过研究 IRIG 106-20 国际遥测标准中 TmNS 标准特性、协议栈以及系统架构, 提出了基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络的新概念, 给出了测控网络系统架构、各部分组成及功能, 并对其中涉及的 TmNS 数据消息传输协议、RF 网络接入层协议、TMOIP 协议、数据包遥测技术等关键技术进行研究, 提出了可行的实现方案, 为今后我国新一代运载火箭天地一体化测控通信奠定技术基础。

关键词: 运载火箭; 网络化测控; IRIG 106-20; TmNS; 天地一体化测控网络

中图分类号: TN925 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2023) 01-0027-10

Research on TmNS-Based Space-Earth Integrated TT&C Network for Launch Vehicles

WANG Yang, JIANG Yunsheng, REN Kai, LIU Danyang, HAN Ming

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to meet the increasing demand for TT&C (Telemetry, Tracking and Command) of launch vehicles, network-based TT&C has become an inevitable trend in the future. In view of the characteristics, protocol stack and system architecture of TmNS in IRIG 106-20 international telemetry standard, a new concept of TmNS-based space-earth integrated TT&C network for launch vehicles is proposed in this paper firstly. Then, the system architecture, components and relevant functions of the TT&C network are given. Moreover, the key technologies involved such as TmNS data message transmission protocol, RF network access layer protocol, TMOIP, packet telemetry technology etc. have been researched and the feasible implementation schemes have been proposed, which lays a technical foundation for the future space-earth integrated TT&C of new-generation launch vehicles in my country.

Key words: Launch vehicles; Network-based TT&C; IRIG 106-20; TmNS; Space-earth integrated TT&C network

0 引言

测控通信是运载火箭在飞行试验中获取数据的重要手段, 是发射任务成功的重要保证之一。运载火箭在测试和飞行期间, 内部的各种状态监

测参数通过测控通信系统传输至地面, 作为设计人员了解火箭测试和飞行状态的最重要依据^[1]。

从 1959 年开始, 美国靶场指挥官委员会 (Range Commanders Council, RCC) 下属遥测组 (Telemetry Group, TG) 提出并维护靶场仪器组 (Inter-Range

收稿日期: 2022-06-16; 修订日期: 2022-08-23

基金项目: 共用预研项目 (50903020501)

作者简介: 王洋 (1984-), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计。E-mail: yhzts@163.com

Instrumentation Group, IRIG) 106 协议^[2], 协议旨在保证 RCC 管辖内各试验靶场遥测应用的互通性。2004 年, 美国核心试验和评估投资计划 (Central Test and Evaluation Investment Program, CTEIP) 实施了集成网络增强遥测 (Integrated Network Enhanced Telemetry, iNET) 项目^[3], 以期达到增强已有遥测系统能力的目的。与此同时, 提出遥测网络标准 (Telemetry Network Standard, TmNS) 作为 iNET 项目的核心内容, 旨在规范各组成部分之间的互通性, 指导系统的开发。IRIG 106 每两年进行一次更新, 从 2001 版开始, IRIG 106 标准便加入了遥测网络的部分, 目前 IRIG 106 最新版本为 2020 版, 此版本中第二部分 (第 21~28 章) 是对遥测网络标准 TmNS 的介绍。

目前我国运载火箭主要采用点对点、单向传输的无线测控方式, 即箭上测量系统将信息经过 PCM-FM 调制后通过无线链路发送给地面站, 无线链路采用 S 频段。该遥测体制遵循我国现行的 GJB 遥测标准^[4], 该标准基本上是参考美国 IRIG106 遥测标准制定的。

近年来, 随着我国运载火箭规模的增大以及发射任务的密集化, 传统的点对点、单向传输的遥测技术已经不能满足飞行试验测控需求的变化与增长, 在网络互联技术迅猛发展的推动下, 多点对多点、双向通信的天地一体化网络传输技术成为了新的研究热点^[5-7], 带来了遥测体制的变革^[8-9]。本文以 TmNS 为基础, 提出了基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络的思路及实现方法。

1 TmNS 标准简介

1.1 TmNS 特性

TmNS 的核心设计原则是为建立基于网络的遥测系统提供框架, 通过提高频谱效率来实现飞行试验测控手段的变革, 是对现有遥测系统功能的增强和扩展。TmNS 在保留传统 PCM 串行遥测流 (Serial Streaming Telemetry, SST) 功能的基础上, 利用现有的以太网标准协议 (TCP/IP 协议栈) 以及新设计的特定协议, 提供路由、服务质量和拥塞控制等特性, 使新型遥测系统具备以下几大增强功能^[10-11]:

1) 双向通信功能: 可分别从传感器和存储器上实时查看被测对象 (Test Article, TA) 当前和历史测量数据; 当 PCM 信号失锁时可以近实时地

恢复丢失的测量数据; 地面站可为被测对象提供参数配置、指令控制等功能。

2) 动态频谱共享: 多发试验任务并行开展时, 具备提供遥测频谱资源共享的能力。

3) 服务质量: 可根据特定试验任务或特定测量数据 (如语音数据) 的优先级来动态共享频谱资源。

4) 全互联系统: 可为被测对象提供从一个天线到另一个天线的发射/接收数据的无缝切换能力, 包括在不同网络和其他靶场内的天线。TmNS 使用术语“接力”来描述该类型切换。

5) 视距外遥测: 为包含多个被测对象和远距离射程的靶场试验提供被测对象到被测对象的中继通信能力。

1.2 TmNS 协议栈

为实现测控网络中成员之间的双向通信 (互联互通), TmNS 利用了现有的 TCP/IP 协议栈, 并在其基础上进行了一些适应性更改^[12]。

TCP/IP 协议栈是一个 4 层的协议结构, 它包含应用层、运输层、IP 层、网络接入层 (数据链路层和物理层), 其中每一层都服务于上一层, 同时被其下面的层所服务, 发送端数据从 TCP/IP 协议栈的应用层自上而下传递到物理层, 从发送端的物理层经过特定的传输媒介达到接收端的物理层, 再自下而上传递到接收端的应用层被接收。TCP/IP 协议栈中各层之间是严格独立的, 对其中一层的改动不会影响到其他层, 每层允许使用不同的协议技术。

图 1 给出了基于 TCP/IP 协议栈的 TmNS 协议栈设计, 其中, 中间协议族为被 TmNS 选中的已有 TCP/IP 协议, 右边协议族为 TmNS 设计的特定协议。同时, 为方便读者理解, 将现有传统的 PCM-FM 遥测体制 (左边协议族) 放入 TCP/IP 协议栈相应层中与 TmNS 协议栈进行对比, 可以看出, 传统的 PCM-FM 遥测体制仅规范了一些底层的物理特性和协议, 例如频率、信道编码、编帧、调制方式等, 这些均是物理层和数据链路层的技术, 不存在应用层、运输层和 IP 层。

1.3 TmNS 系统架构

如图 2 所示, TmNS 系统架构包含 4 个子系统 (不强制基于 TmNS 的系统都包含这 4 个子系统, 但是典型的系统部署应包含这 4 部分), 4 个子系统的功能描述如下^[13]:

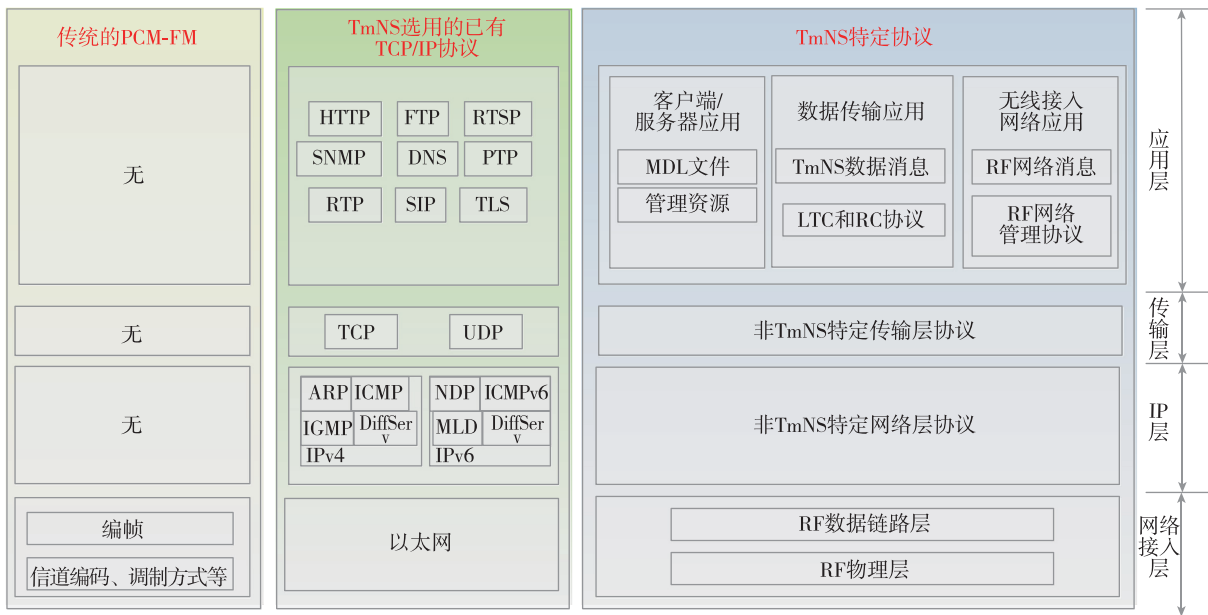


图 1 基于 TCP/IP 协议栈的 TmNS 协议栈

Fig. 1 TmNS protocol stack based on TCP/IP protocol stack

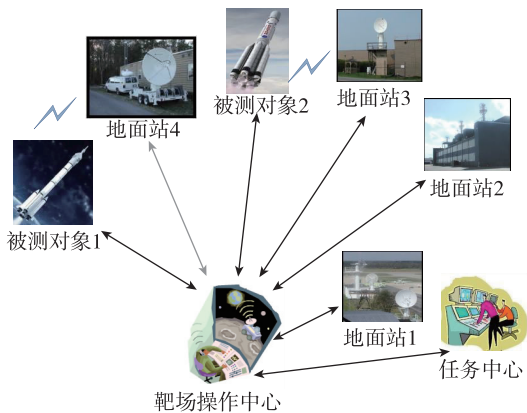


图 2 TmNS 系统架构图

Fig. 2 TmNS system architecture diagram

1) 被测对象子系统 (Test Article Subsystem, TAS): 空中的被测对象为数据采集单元、存储器、遥测传输设备等提供基于网络的接口, 用于对设备进行配置和控制以及设备健康和状态信息的回传。同时, 被测对象还具备与现有的传统 PCM 遥测系统进行交互的接口。

2) 地面站子系统 (Ground Antenna Subsystem, GAS): 地面站子系统用于连接被测对象与靶场操作中心两个子系统, 为被测对象提供双向无线链路, 可依赖于现有的跟踪机制, 例如跟踪被测对象发射的 SST 信号。

3) 靶场操作子系统 (Range Operations Subsystem, ROS): 该子系统用于将地面站子系统中

的射频组件与靶场操作中心进行互联, 具备远程管理地面站子系统中跟踪天线、网络设备 (交换机和路由器) 等资源的能力。

4) 任务控制子系统 (Mission Control Subsystem, MCS): 任务控制子系统可与被测对象进行通信, 具备接入现有遥测处理系统的接口, 还具备处理 TmNS 数据消息的所需资源。

2 基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络设计

现有运载火箭 PCM 遥测系统中, 需要提前策划数据传输内容及帧格式, 即 PCM 数据流格式是提前编排好的, 根据每发任务需求进行差异化设计。该工作模式显著优点是传输可靠性和实时性好, 在现有运载火箭遥测参数规模及发射频度下, 可以满足任务需求。随着运载火箭遥测参数规模逐步扩大以及并行试验任务的日益增多, 这种单向、点对点、结构不灵活的工作模式不能满足未来运载火箭测控的需求, 频谱资源利用等问题也日益突出。TmNS 标准的提出, 使得在传统 PCM 遥测链路外增加了上下行的双向无线网络链路, 实现遥测系统的网络化和天地一体化, 基于双向 IP 网络实现了数据按需遥测的能力, 即可根据策划或者突发事件更改遥测传输内容, 同时可提供基于任务和数据优先级的服务质量; 具备动态资源共享能力, 可支持多发并行试验任务, 解决了

频谱资源紧张的问题。

目前,我国在网络化测控系统建设方面还刚刚起步,还有很多问题亟须解决。在测控系统网络化建设过程中,可参考借鉴 TmNS 标准,重点关注测控网络的顶层设计,增强运载火箭、靶场等各个节点间的通信能力,尽量采用已有成熟技术,满足未来运载火箭测控任务的需求。因此,提出了基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络设计思路。但是,必须指出,未来几年现有遥测标准在运载火箭、靶场等系统中依旧广泛使用,因此,基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络设计思路为保留现有 PCM 遥测链路,用于传输可靠性和实时性要求高的飞行必保数据,其他对可靠性和实时性要求没有那么高的测量数据,采用双向无线网络链路进行传输,网络数据和 PCM 数据之间可以互相转换互相备保,此类融合网络架构很好地解决了新增双向无线网络链路和 PCM 遥测链路的兼容问题,以实现功能上的互补和性能上的提升。

在现有运载火箭 PCM 遥测系统基础上,基于 TmNS 标准构建的新型运载火箭天地一体化测控网络系统框图如图 3 所示,该系统可以划分为火箭内部网络、地面站、靶场操作中心、任务控制中心等 4 部分,各部分组成和功能描述如下。

2.1 火箭内部网络

传统 PCM 数据流向如图 3 中红色实线框中所示,由箭上 PCM 数据采集单元将采集的测量数据传输给 PCM 编帧加密设备进行遥测编帧及数据加密,加密后的 PCM 数据通过 SST 发射机转换为射频信号后,传给天线系统发射出去,在未来较长一段时间内,将会保留传统 PCM 码流用于传输高可靠性和实时性要求的数据。

基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络在现有 PCM 数据流(SST)基础上增加了网络数据流,即 TmNS 数据流。首先,箭载 Network 数据采集单元将采集到的测量数据封装在 TmNS 数据消息(Data Message)中,根据用户需求,采用 LTC 传输协议(Latency/Throughput Critical Delivery Protocol)将 TmNS 数据消息传递给 MDL 文件(该文件用于配置和控制基于 TmNS 的设备以及获取其状态等信息)中定义的目的地址(如传递给箭载 TmNS 存储器进行备份或者地面遥测处理设备进行分析与显示)。箭载 TmNS 存

储器可利用 LTC 传输协议接收 TmNS 数据消息,将其存储在固态介质中,也可将利用 RC 传输协议(Reliability Critical Delivery Protocol)将被请求的数据发送给任务控制中心的 TmNS 存储器。火箭内部各网络设备通过交换机进行互联互通,TmNS 数据消息先经过网络加密机进行加密,再传递给 TmNS 发射机生成射频信号通过天线系统发射出去,天线系统接收到地面站发送的射频信号后传递给 TmNS 接收机,再经过网络解密机进行解密后得到 TmNS 数据消息发给相应设备。

同时,SST 与 TmNS 数据流之间可以相互转换,这一功能也是基于 TmNS 的新增功能,由箭载 PCM 网关和 Network 网关实现^[14]。PCM 网关可根据 MDL 文件从未加密 PCM 数据流中选择所需要的 PCM 数据,通过 TMoIP 协议转换为 IP 包,实现将 PCM 数据承载在 IP 网络中传输。Network 网关可根据 MDL 文件从 IP 包中选择所需要的测量数据(IP 包),通过数据包遥测技术转换为 PCM 数据流发送到 SST 发射机。

2.2 地面站

地面站的天线系统接收到箭上天线系统发射的无线信号,将 TmNS 无线信号送给 TmNS 接收机处理,将 SST 无线信号送给 SST 接收机处理,分别解调出加密后的 IP 包和加密后的 PCM 数据流送给任务控制中心进行处理。加密后的 PCM 数据可以通过地面站 PCM 网关转换为 IP 数据包,实现 PCM 在靶场网络中的传输,也可以直接送给任务控制中心的 PCM 解密机进行解密处理。任务控制中心的指控数据(IP 包格式),通过靶场网络发送给地面站 TmNS 发射机生成射频信号,再通过地面天线系统向空间发射出去。同时,地面站 TmNS 发射机/接收机可受靶场操作中心的链路管理器(Link Manager, LM)的控制,执行链路控制功能,通过靶场网络接收 LM 发送的控制信息,该信息规定了上行/下行传输开始和结束的精确时间,还可接收射频(Radio Frequency, RF)网络管理指令并做出响应。

2.3 靶场操作中心

位于靶场操作中心的 RF 网络管理器(RF Network Manger)负责管理 RF 网络资源,对 RF 网络中的相关设备进行优化控制和协调,包括协调靶场内和靶场间地面站接力的具体细节,协调 RF 链路和 RF 网络数据传输底层机制的更新,协调 RF 网络

转发配置的更新等。链路管理器负责策划 TmNS 发射机/接收机的 RF 传输，为地面站和被测对象之间的所有上下行链路的 RF 传输分配时隙，即提供时

分多址（Time Division Multiple Access, TDMA）的控制功能。这些网络管理信息均承载在 IP 包中，经靶场网络送给地面站的 TmNS 发射机/接收机。

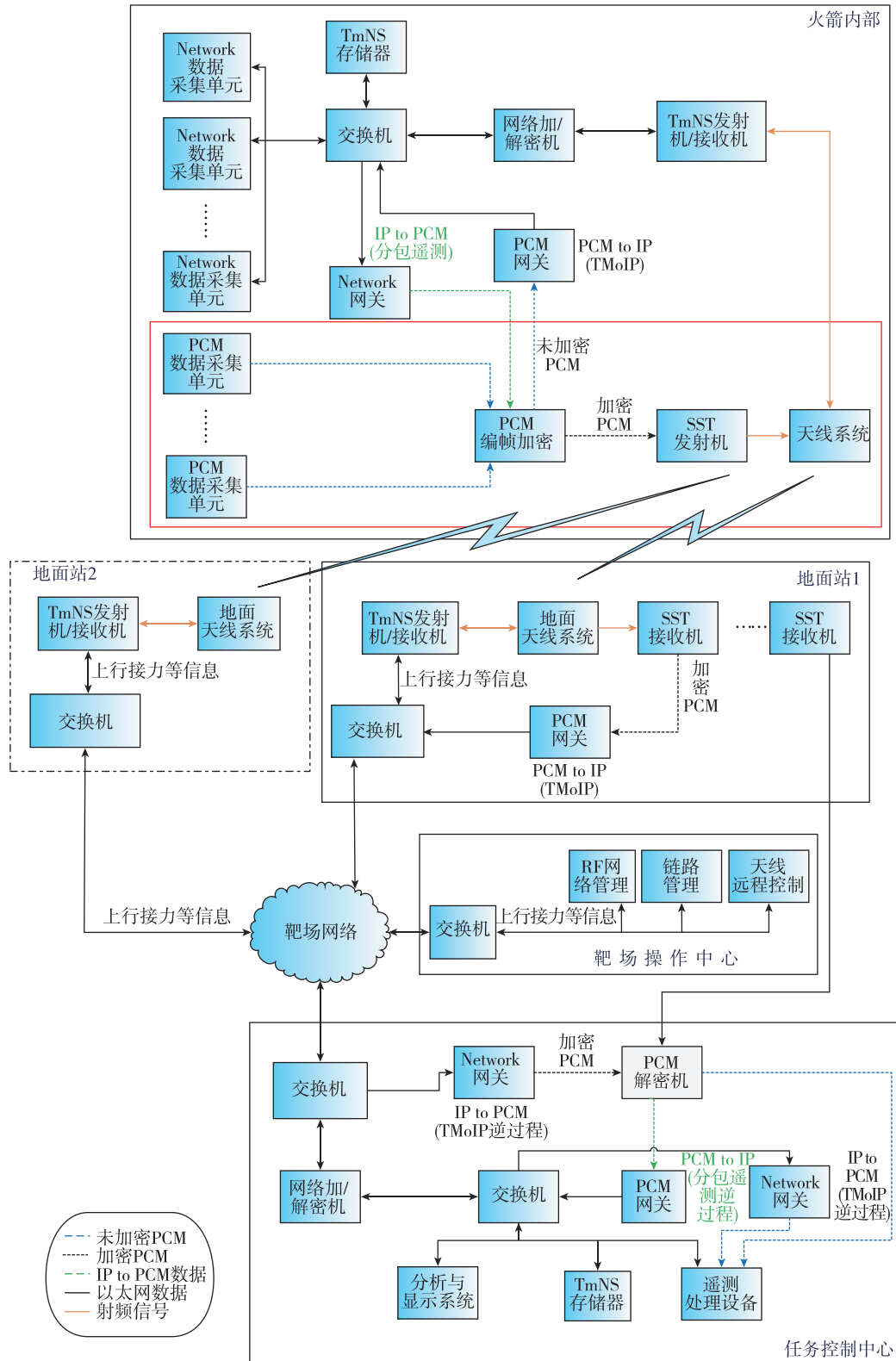


图 3 基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络系统框图

Fig. 3 Diagram of TmNS-based space-earth integrated TT&C network for launch vehicles

2.4 任务控制中心

具备传统 PCM 数据流的接收功能，通过任务控制中心的 PCM 解密机对地面站 SST 接收机输出的加密 PCM 数据流进行解密后送给中心的遥测处理设备，还可以通过任务控制中心的 Network 网关将从靶场网络送来的 IP 包中承载的加密后的 PCM 数据剥离出来（该过程为 TmIP 的逆过程），送入 PCM 解密机解密后给遥测处理设备进行处理。同时，任务控制中心 PCM 网关从 PCM 数据流中找到相应的 IP 包（该过程为数据包遥测的逆过程），通过交换机送给相应的遥测处理设备；任务控制中心 Network 网关接收到含有 PCM 数据的 IP 包，将其解析后（该过程为 TmIP 的逆过程）传送给相应的遥测处理设备。

3 关键技术研究

3.1 TmNS 数据消息传输协议

在基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络系统中，测量数据在应用层以 TmNS 数据消息的格式进行传递。TmNS 数据消息结构如图 4 所示，由 TmNS 数据消息头域和载荷域构成，其中 TmNS 数据消息载荷域中包含多个信息包，每个信息包中均存放有测量信息。

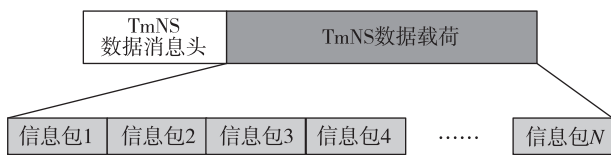


图 4 TmNS 数据消息格式

Fig. 4 TmNS data message structure

在应用层，需要根据数据传输需求选择合适的应用层数据传输协议，根据 TmNS 标准，建议应用层使用 LTC 数据传输协议和 RC 数据传输协议传输 TmNS 数据消息，两种协议的传输特性比较见表 1。

表 1 LTC 和 RC 数据传输协议对比

Tab. 1 Comparison of LTC and RC data transmission protocols

协议名称	底层传输协议	应用场景	举例
LTC 数据传输协议	无连接的 UDP 协议，支持多播	用来传输实时性要求较高、但是对可靠性要求却没那么高的数据	语音服务
RC 数据传输协议	面向连接的 TCP 协议	用来传输可靠性要求较高、但是对实时性要求却没那么高的数据	存储器读取

TCP 和 UDP 协议均为 TCP/IP 协议栈中的传输层协议，最大区别在于 TCP 协议是面向连接的，而 UDP 协议是无连接的。TCP 协议提供面向连接的可靠服务，在传送数据之前必须先建立连接，数据传送结束后要释放连接。同时，由于 TCP 协议要提供可靠的、面向连接的传输服务，不可避免地会增加一些开销，比如应答、计时器、流量控制以及连接管理等，同时增加了处理资源。UDP 协议在传送数据之前不需要先建立连接，不需要确认数据，提供一种不可靠交付，在某些情况下（实时性要求高）是一种最有效的传输方式。同时，UDP 协议支持多播服务。

LTC 和 RC 这两种协议的传输特性使得数据传输性能截然不同，需要系统设计师根据不同数据的数据传输需求来选择合适的传输协议，例如箭载 Network 数据采集单元产生的 TmNS 数据消息可利用 LTC 传输协议进行传输，虽然 UDP 协议不保证顺序传输，但是可以提供相比基于 TCP 协议更低的端到端时延，同时可以利用 UDP 协议多播功能实现到多个目的地址的数据传输。TmNS 数据消息头域中有基于某类消息的序号，该序号随着发送端发送该类消息数目的递增而递增。因此，如果使用 LTC 传输协议来传输某些对可靠性有要求的数据，接收端可以通过检测接收到的 TmNS 数据消息头域中的序号来检测和报告丢失的数据^[15]。

3.2 RF 网络接入层协议

数据链路层位于 IP 层之下，服务于 IP 层，用于将 IP 层交付下来的 IP 包组装成帧，在两个结点之间传输。在基于 TmNS 的 RF 网络中，需要将网络信息（IP 包）和控制消息等载荷数据组装成数据链路帧，再交给物理层（RF 通信链路）进行比特流的传输。由于基于 TmNS 的 RF 网络特性与以太网特性有所不同，以太网 TCP/IP 协议栈中网络接入层（数据链路层和物理层）协议不再适用，需改动网络接入层协议来支持 RF 链路传输^[16]。

RF 网络数据链路层具备将网络信息和控制消息等载荷数据复用在介质访问控制（Medium Access Control, MAC）帧中的能力，可基于链路的需求和优先级为上行和下行链路策划和分配信道容量，提供一种自适应的时分多址（TDMA）机制共享通信信道，满足有限带宽下并行试验需求，同时可使用 ARQ 协议来提高传输可靠性。

图 5 给出了网络层信息在 RF 网络接入层中进

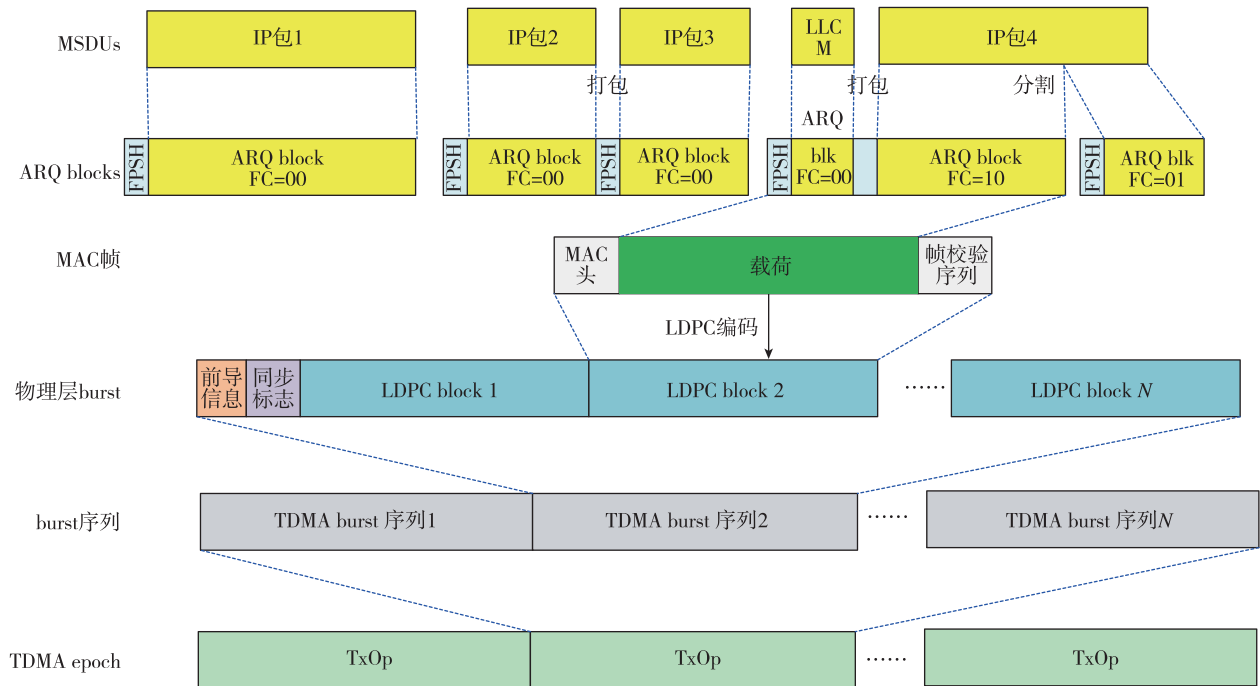


图 5 基于 TmNS 的 RF 网络中网络接入层示意图

Fig. 5 Overview of network access layer in TmNS-based RF network

行传输的处理过程。

网络层信息 (TCP/IP、UDP/IP 和相关的 IP 协议族包) 和链路层控制消息 (Link Layer Control Messages, LLCs) 统一被称为 MAC 服务数据单元 (MAC Service Data Units, MSDUs), 被复用在 MAC 帧中。多个长度较短的 MSDUs 被打包成为 ARQ blocks (块), 然后被封装在一个 MAC 帧中; 长度较长的 MSDU 被分割为多个 ARQ blocks, 然后被封装在多个 MAC 帧中。ARQ block 的分段/打包头域 (Fragmentation/Packing SubHeader, FPSH) 指示该 ARQ block 是否为 MSDU 分段或打包处理后产生的, 其中的 FC 域是一个分段标示, 可以表示没有分段 (00)、第一个分段 (10)、中间的分段 (11)、最后的分段 (01), 同时 FPSH 还指示被封装数据的协议类型, 被封装数据相对于其他 ARQ blocks 的优先级等。

MAC 帧由 MAC 头、载荷部分以及帧校验序列构成。MAC 帧载荷包含一到多个可变长度的 ARQ blocks, 每个 ARQ block 的最大长度受限于 MAC 帧载荷部分的长度, 而 MAC 帧载荷部分的长度又受限于物理层信道编码的码字长度 (MAC 帧的最大长度与信道编码码长相对应)。MAC 头中含有发送和接收无线设备的 RF MAC 地址以及一些用于链路层

处理的附加信息。

MAC 帧在物理层中先进行比特交织, 然后进行 LDPC 编码, 最后进行 SOQPSK 调制。IRIG 106-20 标准中推荐使用 CCSDS 标准中应用于深空通信的累积重复参差累积码 (Accumulate Repeat Jagged Accumulate Code, AR4JA 码) 构造的 LDPC 码, 码率为 1/2, 2/3 和 4/5 可选, LDPC 码信息比特长为 128 字节和 512 字节可选。

多个 LDPC blocks 组成一个 burst 在 RF 链路上传输, 每个 burst 由前导信息、同步标志和码块帧 (包含 1 到 N 个固定长度的 LDPC blocks, N 最大可配置为 16) 组成, 同步标志用来辅助比特和字节级的同步和解调。无线收发设备利用在 TDMA 时隙 (epoch) 中策划的传输机会 (Transmission Opportunities, TxOps) 来传输这些 burst 序列。TDMA epoch 也叫作 TDMA 帧, 其典型结构如图 6 中所示。epoch 大小固定, 由多个大小可变的 TxOps 组成。TxOps 代表一段时间, 在该段时间内源无线设备可以接入到信道中将数据传输给目的无线设备, 因此, 源和目的无线设备之间的通信均需分配 TxOps, 例如地面站发往箭上的上行数据传输、火箭发往地面站的下行数据传输以及火箭与火箭之间的数据传输。

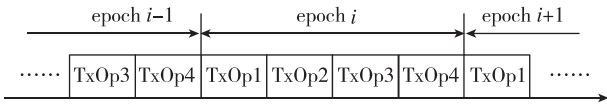


图 6 典型的 TDMA 帧结构
Fig. 6 Typical TDMA frame

为简化 TDMA 的策略，TDMA 帧 (epoch) 的持续时间通常有以下几种选择：1000 (最大时间)，500，250，125，100 (默认时间)，50，40，25，10 ms (最小时间)。RF 网络设计师可通过选择合适的 TDMA 帧 (epoch) 的持续时间来在开销、包时延和网络性能之间进行性能折中。同时，RF 网络中每个无线或管理设备都必须使用通用的时间同步协议来达到时间同步，避免 RF 之间的干扰。

在 RF 网络中，TDMA 控制器 (LM) 在每次试验时基于上下行链路的需求和优先级来分配 epoch 中的 TxOps。最基础的分配策略为 TxOps

的静态分配，这种方式不考虑每次试验的容量需求。TmNS 的典型分配策略为基于优先级和瞬时/平均网络负载量来分配 TxOps，以优化整个 RF 网络的使用，可最小化网络传输时延，最大化吞吐量，减小队列溢出所造成的损失^[17-18]。

3.3 TMOIP 协议

SST 与 TmNS 数据流之间可以相互转换，这一功能也是基于 TmNS 的新增功能，箭载 PCM 网关、地面站 PCM 网关、任务控制中心 Network 网关均具备该功能。箭载 PCM 网关/地面站 PCM 网关将 PCM 数据封装在 IP 包中，实现 PCM 数据在 IP 网络中的传输，实现该功能的协议被称为 TMOIP (Transmission over Internet Protocol)^[19]，任务控制中心 Network 网关执行逆操作。

表 2 给出了 TMOIP 对应于 TCP/IP 协议栈中每层的具体实现。

表 2 TMOIP 在 TCP/IP 协议栈的具体实现

Tab. 2 Implementation of TMOIP in TCP/IP protocol layers

TCP/IP 协议层名称	TCP/IP 协议层功能	TMOIP
应用层	为用户的应用进程提供服务，包括一些信息交换功能	提供数据流到包的汇聚
传输层	负责网络主机中两个进程之间的端到端通信	UDP
IP 层	以 IP 包为单位进行数据传送，同时可选择合适的路由	IP、IGMP
数据链路层	在网络结点间的链路上传送以帧为单位的数据，可检测和纠正错误	802.3
网络接入层	物理层	10BASE-T、10BASE-F、100BASE-TX、100BASE-FX、1000BASE-X、1000BASE-T

TMOIP 应用层提供数据转换功能，即载荷汇聚功能，可以保证 SST 流被承载在网络包中，实现过程如下：

1) 首先，实现 SST 流格式转换，将串行流格式转换为包格式，得到的包被称作原始包载荷。

2) 其次，将 TMOIP 的控制字追加到原始包载荷前面，构成 TMOIP 载荷。图 7 给出了 TMOIP 的控制字以及得到的 TMOIP 载荷格式。TMOIP 可通过控制字实现丢包或失序的检测，同时也标识了 PCM 子帧或者副帧同步状态、时间戳等信息。

传输层、IP 层和网络接入层均为成熟 TCP/IP 协议，图 8 给出了 TMOIP 在 TCP/IP 协议中各层的展开实现。

3.4 数据包遥测

数据包遥测技术可将来自一个或者多个数据

流的数据异步插入到 PCM 子帧中，数据类型可支持以太网帧、TmNS 数据消息、IP 包等。这是一种将网络数据包融入传统 PCM 码流的方法，以兼容网络化的遥测数据包。箭载 Network 网关利用该项技术，根据 MDL 文件从 IP 包中选择所需要

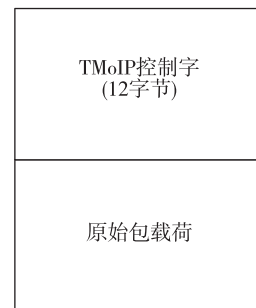


图 7 TMOIP 载荷格式

Fig. 7 TMOIP payload structure

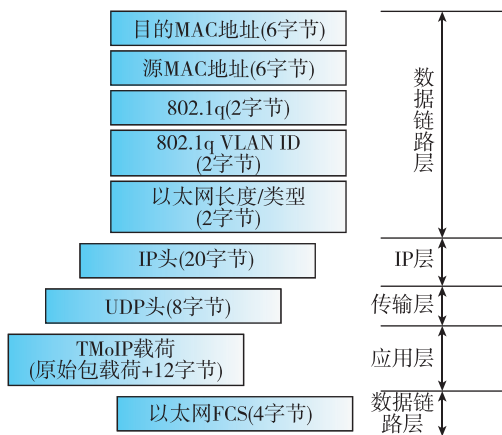


图 8 TMOIP 协议各层展开图

Fig. 8 TMOIP layout in layers

的测量数据，将其转换为 PCM 数据流。数据包遥测的具体实现过程如图 9 所示，异步插入的数据被称作源包（Source Packet, SP）。

首先，一个 SP 被封装在一个或多个封装包（Encapsulation Packet, EPs）的载荷域中，通常，一个 EP 只包含一个 SP。当 SP 大小超过 64k 字节的时候，SP 将被分割为多个 SP 段，此时一个 EP 包含一个 SP 段。EP 头域中“内容”域可指示 EP 载荷所包含的 SP 的类型，如 IP 包 SP、TmNS 数据消息 SP、MAC 帧 SP 等，“分段”域可指示 EP 载荷所包含的 SP 是独立的 SP 或者 SP 段。不同类型的 SP 可同时被多路复用到一个单独的 EP 逻辑流中（图 9 中 EP 流中红色竖线表示 EP 的首字节）。

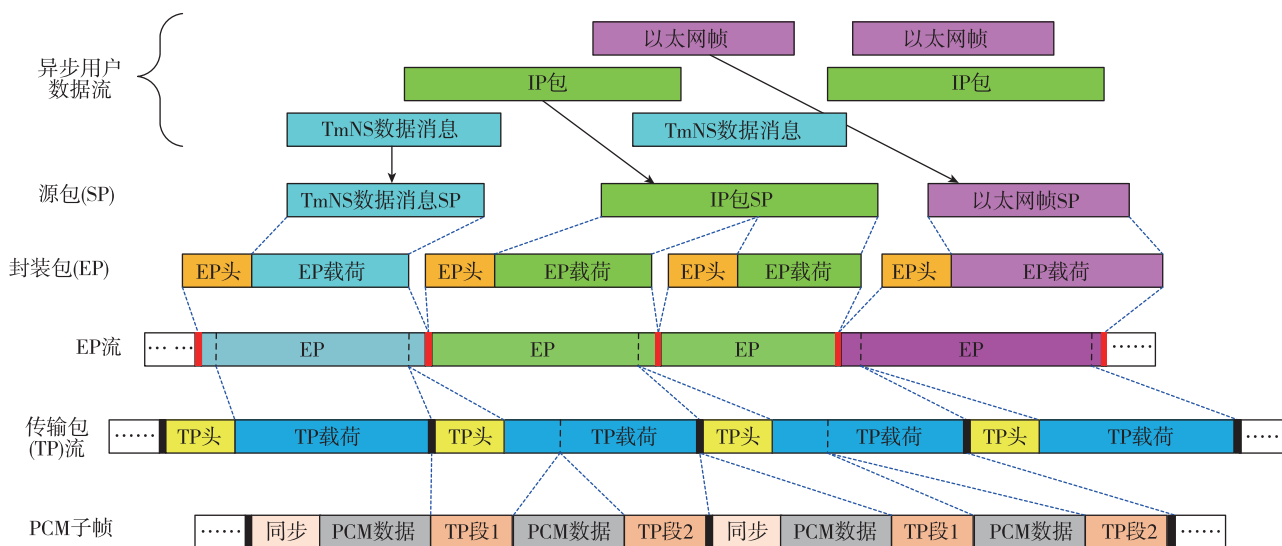


图 9 数据包遥测示意图

Fig. 9 Packet telemetry overview

接着，EP 流将被分割到多个等长的传输包（Transport Packet, TPs）的载荷域中，形成 TP 流。如果 TP 载荷中包含了一个 EP 的首字节，那么 TP 头域将包含到该 EP 首字节的偏移量；如果 TP 载荷中包含了多个 EPs，那么 TP 头域将包含到第一个 EP 首字节的偏移量。

最后，每个 TP 被插入到一个单独的 PCM 子帧中。一个 TP 可被分割为多个 TP 段，和 PCM 数据一起排布在一个 PCM 子帧中，但是每个 PCM 子帧只能包含一个 TP，图 9 中为一个 PCM 子帧包含了两个 TP 段（1 个 TP）。

4 结论

随着运载火箭发射任务的密集化以及网络技术

的不断发展，网络化遥测在空间通信方面的优势显而易见，特别是 IRIG 106-20 中 TmNS 建议的提出，明确了天地一体化测控网络的思想。本文关注未来运载火箭测控通信网络发展，对 TmNS 特性、协议栈、体系架构进行深入研究，在现有 PCM-FM 遥测架构基础上提出了基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络的思想，对其具体系统架构、关键技术以及实现方式等进行了研究和阐述。目前，网络化技术在空间通信方面也在深入发展，对运载火箭天地一体化测控网络的研究将有助于天地网络的结合，促进航天领域测控通信的不断发展。

参考文献

[1] 王国辉,张金刚,耿胜男,等. 运载火箭新一代测量系

- 统发展设想与关键技术分析 [J]. 宇航总体技术, 2020, 4(1): 1-7.
- [2] Range Commanders Council. Telemetry standards [S]. IRIG Standard 106-20, New Mexico, 2020.
- [3] Young T. Integrated Network Enhanced Telemetry (iNET): impact to the telemetry community [C]. 2018 European Test and Telemetry Conference, Nuremberg, Germany, 2018.
- [4] GJB 21.2B-2020, 遥测标准第 2 部分: 多路信号格式 [S]. 北京: 中央军委装备发展部, 2020.
- [5] 万端华, 蓝鲲. 网络技术在箭载测量数据综合技术中的应用研究 [J]. 遥测遥控, 2012, 33(6): 48-52.
- [6] 罗清华, 彭宇, 周鹏太, 等. 航空飞行试验新一代网络化遥测技术浅析 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 261-270.
- [7] 夏国江, 韩明, 王星来, 等. 飞行器高码率网络化无盲区测控需求与技术 [J]. 遥测遥控, 2018, 39(2): 1-8.
- [8] 鲁宇. 中国运载火箭技术发展 [J]. 宇航总体技术, 2017, 1(3): 1-8.
- [9] 彭越, 牟宇, 宋敬群. 中国下一代运载火箭电气系统技术发展研究 [J]. 宇航总体技术, 2020, 4(2): 13-24.
- [10] Grace T B, Abbott B A. Telemetry network standards overview [C]. 2018 European Test and Telemetry Conference, Nuremberg, Germany, 2018: 175-178.
- [11] 袁炳南, 霍朝晖, 白效贤. 新一代遥测网络系统—TmNS [J]. 测控技术, 2010, 29(11): 18-21.
- [12] 陈雨迪, 刘燕都, 焦义文. 从 IRIG 106 看遥测网络标准 TmNS 发展 [J]. 遥测遥控, 2019, 40(6): 14-21.
- [13] Abbott B A, Araujo M S, Moodie M L, et al. iNET system design concepts [C]. 2011 International Telemetry Conference, Las Vegas, USA, 2011.
- [14] Reinwald C. Telemetry data on demand: the key to understanding the telemetry network revolution [C]. 2018 International Telemetry Conference, Glendale, USA, 2018.
- [15] RCC 129-22, Telemetry network standard handbook [S]. New Mexico: Range Commanders Council, 2022.
- [16] Kaba J, Connolly B. Overview of the telemetry network system (TMNS) RF data link layer [C]. 2018 International Telemetry Conference, San Diego, California, 2012.
- [17] 王星来, 蓝鲲, 夏国江, 等. 新型遥测网系统 RF 链路管理技术 [J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(6): 429-435.
- [18] Fecko M, Chang K, Cichocki A, et al. Dynamic capacity allocation algorithms for iNET Link Manager [C]. 2014 International Telemetry Conference, San Diego, USA, 2014.
- [19] RCC Standard 218-20. Telemetry over Internet Protocol (TmIP) standard [S]. New Mexico: Range Commanders Council, 2020.

引用格式: 王洋, 姜云升, 任凯, 等. 基于 TmNS 的运载火箭天地一体化测控网络研究 [J]. 宇航总体技术, 2023, 7(1): 27-36.

Citation: Wang Y, Jiang Y S, Ren K, et al. Research on TmNS-based space-earth integrated TT&C network for launch vehicles [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(1): 27-36.