

遥测网络系统发展与展望

邱长泉, 袁延荣, 薛志超, 李 霄, 王 亨
(空间物理重点实验室 北京 100076)

摘要: 遥测系统对于评定航空航天飞行器飞行试验结果、故障定位、健康监测和趋势预测等具有非常重要的意义。近二十年来, 高码率遥测体制、双向通信及网络化遥测等需求不断增长, 美国靶场司令委员会 (RCC) 下属机构靶场仪器组 (IRIG) 将遥测网络系统 TmNS 纳入到 IRIG 106 标准中, 代表了下一代遥测系统的发展方向。在介绍 TmNS 发展历程的基础上, 对 TmNS 的概念定义、典型架构、分层模型和网络数据消息、系统配置管理、时间同步、服务质量 QoS、路由、源选择、安全等关键技术进行阐述和分析, 结合我国遥测技术发展现状, 总结其对中国遥测技术发展的启示, 并对 TmNS 后续发展进行展望。

关键词: 遥测; 网络; TmNS; 架构; 分层模型; 时间同步

中图分类号: V556 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)02-0001-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220519002

引用格式: 邱长泉, 袁延荣, 薛志超, 等. 遥测网络系统发展与展望[J]. 遥测遥控, 2023, 44(2): 1-10.

Development and prospect of the telemetry network system

QIU Changquan, YUAN Yanrong, XUE Zhichao, LI Xiao, WANG Heng
(Science and Technology on Space Physics Laboratory, Beijing 100076, China)

Abstract: The telemetry system is of great significance for evaluating the flight test results, fault positioning, health monitoring and trend prediction. In recent years, with the demand for high bit rate telemetry system, duplex communication and network telemetry constantly increasing, the TmNS was incorporated into the IRIG 106 standard by the Range Instrument Group IRIG, a subsidiary of the RCC, which represents the development direction of the next generation of telemetry systems. On the basis of introducing the development process of TmNS, the concept and definition of TmNS, typical architecture, hierarchical model and network-based data messages, system configuration management, time synchronization, Quality of Service(QoS), routing, source selection, security and other key technologies are elaborated and analyzed. Based on the development status of telemetry technology in China, the enlightenment of telemetry technology is summarized, and the development and prospect of TmNS is discussed.

Keywords: Telemetry; Network; TmNS; Architecture; Hierarchical model; Time synchronization

Citation: QIU Changquan, YUAN Yanrong, XUE Zhichao, et al. Development and prospect of the telemetry network system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(2): 1-10.

引 言

遥测系统是航空航天飞行器 (如运载火箭、导弹、卫星、飞机、飞艇等) 上不可或缺的组成部分, 它通过传感器获取飞行器上的力热环境参数、图像, 以及各分系统工作状态和工作参数等多种数据, 经编帧、加密、调制、放大、滤波后, 通过天线发射、传输到地面测控站, 接收信号经放大、滤波、解调、解密、解帧、解算等过程, 得到原始参数数据, 在地面进行监视、判读, 用

以评定飞行试验结果、故障定位、健康监测及趋势预测等, 具有非常重要的作用和意义^[1-3]。

从上个世纪六十年代开始, RCC 的下属机构 IRIG 开始制订并发布 IRIG 106 遥测标准, 目的是通过标准化工作简化设计开发工作, 促进 RCC 管辖的各靶场遥测发射、接收及遥测数据处理设备的相互兼容^[3]。近年, 随着遥测系统高码率、遥测与遥控结合、网络化等需求不断增长, 网络化遥测系统 (Telemetry Network System, TmNS) 标准被纳入 IRIG 106^[4], 这是当前遥测系统发展的主要

方向。

本文首先回顾了 TmNS 的发展历程, 接着介绍了 TmNS 的体系架构, 包括概念定义、典型架构、分层模型和关键技术等, 并结合我国航天遥测发展现状, 提出了 TmNS 对我国遥测发展的启示, 并对基于 TmNS 的下一代遥测系统的发展进行了展望。

1 TmNS 发展历程

从上世纪九十年代开始, 为满足日益增长的遥测新需求, IRIG 106 标准经历了两次较大改进, 分别是高码率遥测体制扩展和双向通信及网络化遥测扩展。

1.1 高码率遥测体制扩展

随着现代航空航天飞行器的发展, 信息化程度越来越高, 在采集的环境参数数量、采样率不断增加的同时, 高速、高分辨率的视频图像、雷达图像、红外图像采集需求, 以及不断增长的电子、电气、机电、探测等多种分系统工作状态、参数信息, 对遥测系统的传输速率提出了严峻的挑战。以运载火箭为例, 遥测参数从几百个到上千个, 重型运载火箭甚至达到几千个。为了应对遥测传输速率不足的问题, 通常采用数据存储器对遥测数据进行记录存储, 但也存在明显不足: 数据无法实时下传判读、评估且对于特定场景存储器回收存在较大风险。目前, IRIG 106 遥测标准中使用最为广泛的是脉冲编码调频 (Pulse Code Modulation-Frequency Modulation, PCM-FM) 体制, 传输速率 1 Mbps~20 Mbps, 其优点是技术简单成熟、捕获和重捕时间短, 且具有很强的抗火焰、抗衰老、抗射频相位非线性能力, 而缺点则是调制信号占用频带宽、频谱滚降较慢 (即使在最佳调制度为 0.7 时), 对邻近信道的抑制度低, 易造成干扰、串扰, 且在高码率通信时尤为突出^[5]。

为提高遥测传输码率, 并优化频谱利用效率、缓解频谱资源紧张, 美国于 20 世纪 90 年代中期, 启动了靶场先进遥测计划 (Advanced Range Telemetry, ARTM), 其所研究的高功率和频带利用率调制体制有 FQPSK、SOQPSK 和 ARTM CPM 等于 2004 年纳入到 IRIG 106 标准, 并将 PCM-FM 定义为 ARTM Tier 0, 将 FQPSK 和 SOQPSK 定义为 ARTM Tier I, 将 ARTM CPM 定义为 ARTM Tier

II, 推荐使用的最大传输速率是 20 Mbps, 实际可达 100 Mbps。这些类型调制信号的频谱对比如图 1 所示, 新扩展的遥测调制体制频谱效率均优于 PCM-FM。ARTM 计划有力地推动了美国遥测体制、遥测频段乃至遥测系统工作模式的变革。

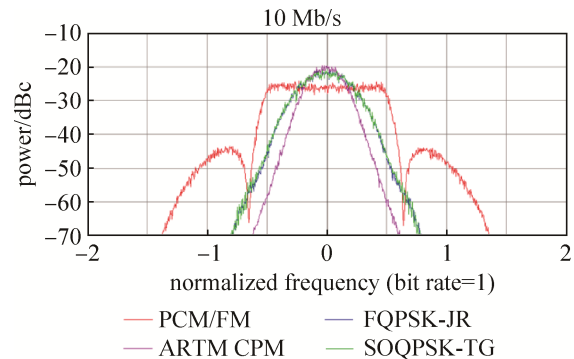


图 1 PCM-FM, ARTM CPM, FQPSK-JR, SOQPSK-TG 信号频谱 (10 Mbps)

Fig. 1 The signal spectrum of PCM-FM, ARTM CPM, FQPSK-JR, SOQPSK-TG(10 Mbps)

1.2 双向通信及网络化遥测扩展

伴随遥测传输码率的提高, 现代航空航天飞行器在信息化方面还呈现出两个主要需求: ① 飞行器对地或飞行器间双向通信需求: 飞行试验从“遥测监视”向“遥测与遥控结合”“遥测与遥控并重”“安全监控与任务监控并重”方向发展^[6]; 以导弹武器为例, 通过遥测监视导弹飞行状态, 还需要通过遥控实现飞行弹道变更, 在应用层面实现“任务监控”; 又如对于无人飞机, 通过遥测监视飞机动作效果和飞行状态, 还需要通过遥控实现机载设备的远程控制和动态配置; ② 飞行器对地或飞行器间组网的需求: 多发导弹同时组网发射、多架飞机协同试飞等需求和场景越来越多^[7], 基于传统点对点 PCM-FM 遥测, 只能通过频分复用来实现, 但是频谱资源的紧张对飞行器数量、传输码率造成严重限制。

为解决双向通信以及飞行器组网需求, 美国国防部试验中心和项目评估投资机构 (Central Test and Evaluation Investment Program, CTEIP) 于 2004 年 10 月启动了集成网络增强遥测 (integrated Network Enhanced Telemetry, iNET) 项目计划^[8], 主要目的是建立一种可行的、能对各类试验和评估范围内的遥测系统进行升级换代的基本网络架构、技术途径和技术标准。iNET 的组成架构

如图2所示,由飞行器内网络(vehicle Network, vNET)、TmNS和地面站网络(ground Network, gNET)组成^[9]。iNET是在现有点对点串行数据流遥测(Serial Streaming Telemetry, SST)基础上,增加射频网络(radio frequency Network, rfNET),构成TmNS,实现双向通信及网络化遥测扩展^[10]。TmNS是iNET项目计划的核心组成部分,其标准于2017年正式纳入IRIG 106-17中,并在第21章至第28章分别对遥测网络标准概述、网络基础协议族、元数据配置、消息格式、管理资源、TmNS数据消息传输协议、射频网络接入层、射频网络管理进行了详细描述,目前最新版本是IRIG 106-20。

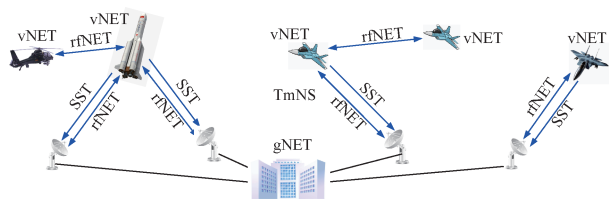


图2 iNET组成架构

Fig. 2 The architecture and component of iNET

2 TmNS体系架构

2.1 概念定义

2.1.1 TmNS概念

TmNS的目标是构建网络化遥测系统,促进开放式的体系结构和不同厂商间产品的兼容及互操作。它以标准因特网协议TCP/IP作为核心通信协议,在此基础上通过定义网络和网络组件接口进行扩展、增强,并与TCP/IP保持兼容。TmNS通过提高频谱效率的途径来增强遥测系统,并与现有的设备、方法和技术相融合,现有的PCM-FM遥测系统通过TmNS组件而具备TmNS特征^[11]。TmNS为遥测系统带来了新质能力^[12]:

① 双向通信:具备直接从试验对象传感器上获取实时测量值,或从试验对象存储器上获取历史测量值的能力;在串行数据流遥测SST丢失数据时能近似实时地对试验对象再次进行测量、传输;可以从地面站对试验对象上的设备进行状态监控、配置和控制,实现试验对象的实时指挥和控制;

② 频谱共享:根据对遥测资源的即时需求,具备在多个并发测试活动中共享频谱资源的能力;

③ 服务质量:具备根据特定活动优先级来保

证其测量结果优先传输的能力;

④ 互通互联:具备在不同试验对象天线间无缝转换发射和接收的能力,包括在不同网络(频率)和不同范围内的天线;

⑤ 超视距遥测:具备试验对象到试验对象遥测中继通信(即超视距遥测)和多目标测试能力。

2.1.2 TmNS定义

IRIG 106对TmNS的接口、数据传输协议、配置文件、指挥控制平台进行了标准化定义,以保证互操作性。TmNS由一系列组件组成,每个组件实现了特定的TmNS接口和功能。

① TmNS接口包括管理接口、时间接口、数据传输接口、射频网络接口,其中管理接口用于配置、状态获取、控制和报告,时间接口用于通过网络分发和获取时间同步,数据传输接口用于根据不同的传输要求将获取的数据从试验对象传输到地面站处理,而射频网络接口则定义了双向遥测通信和频谱共享的底层控制和监视机制。

② TmNS数据传输协议包括实时传输协议和可靠传输协议,实时传输协议用于传输延迟比可靠性更重要的场合即高实时性场合,支持该协议的有用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)、因特网组管理协议(Internet Group Management Protocol, IGMP)和IP多播;可靠传输协议用于可靠性比传输延迟更重要的场合,支持该协议的有TCP和实时流协议(Real Time Streaming Protocol, RTSP)。

③ TmNS配置文件用于描述系统配置,采用元数据描述语言(Metadata Description Language, MDL),以可扩展标记语言(eXtensible Markup Language, XML)为基础^[13]。使用MDL语法和语义,可以创建MDL实例文档来描述遥测系统组件的配置以及它们的逻辑、物理关系。MDL可以描述大、小、简单、复杂等不同系统,从数据获取单元(Data Acquisition Unit, DAU)上采集卡的低电平传感器到测量值的关联关系,再到多个测试任务网络的网络拓扑结构等。

④ TmNS指挥控制平台定义了测试/任务指挥控制平台(红色网络)和靶场基础设施指挥控制平台(黑色网络),如图3所示。测试/任务指挥控制平台负责特定功能如语音网关、座舱仪表等的指挥控制,包括测量、遥测处理、消息/数据格式确定、数据记录、试验对象组件的配置和监视,

主要由试验对象、任务控制和地面支持子系统中的红色部分组成, 信息以明文方式传递; 而靶场基础设施指挥控制平台负责同一靶场内或多个靶场间指定测试或系列测试所需资源配置的指挥控

制, 包括频谱共享、QoS、双向遥测通信建立和管理、试验对象与地面天线站间通信转换, 主要由试验对象、地面天线站和靶场操作子系统中黑色部分组成, 信息以密文方式传递。

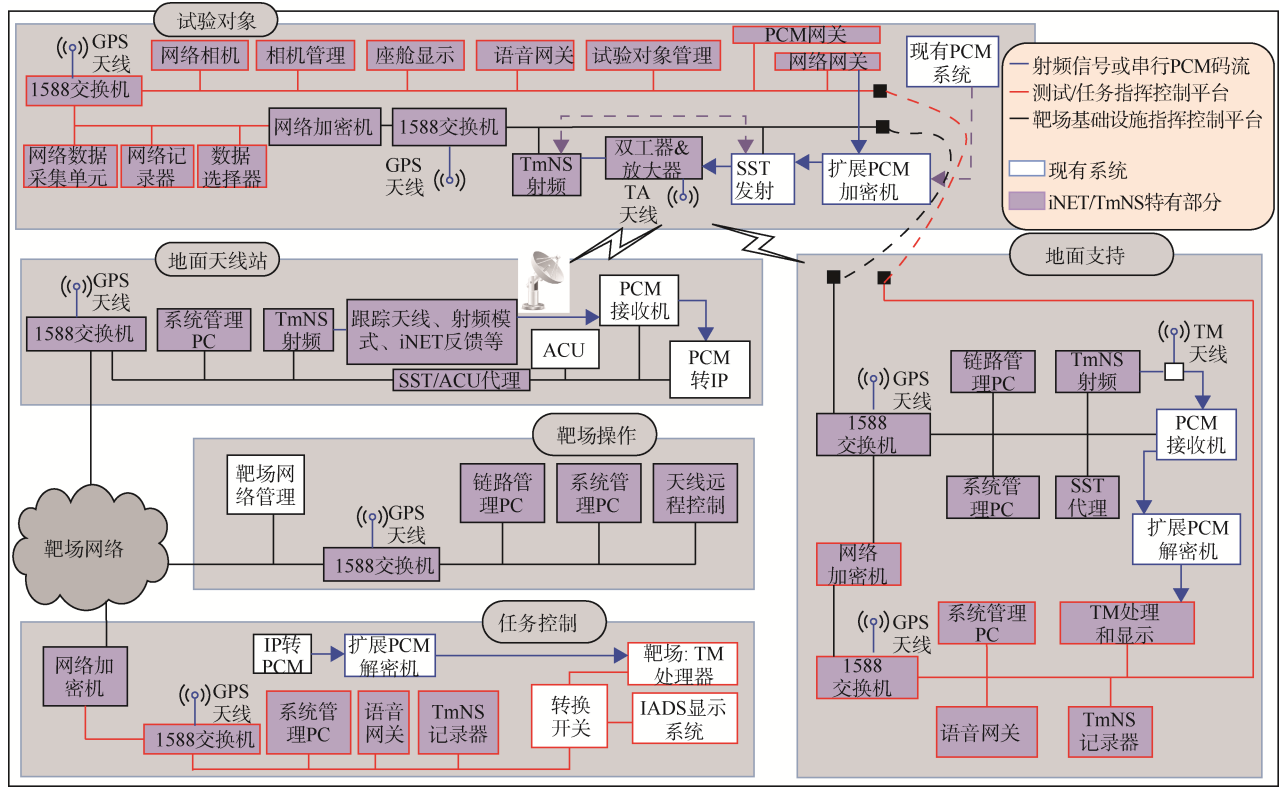


图 3 TmNS 指挥控制平台

Fig. 3 Command and control planes of generalized TmNS system diagram

2.2 典型架构

TmNS 典型架构如图 3 所示, 图中体现了现有遥测系统 (图中蓝色部分) 与网络化遥测系统的融合。TmNS 主要由五个子系统组成, 分别是试验对象子系统、地面天线站子系统、靶场操作子系统、任务控制子系统和地面支持子系统^[14]。

① 试验对象子系统: 具备网络传输、网络记录、网络加密、数据选择、配置管理、遥测传输等功能, 并提供与现有 PCM 遥测系统的接口。

② 地面天线站子系统: 支持各种试验对象与靶场的连接、联网, 提供试验对象网络与靶场网络之间的数据路由, 并依赖于现有的试验对象跟踪机制, 如利用 SST 跟踪试验对象。

③ 靶场操作子系统: 支持天线站射频组件与靶场操作中心 (Range Operations Center, ROC) 的接口, 具备远程管理地面天线站设施 (如跟踪

天线) 和靶场基础网络的能力, 提供靶场设施互联服务。

④ 任务控制子系统: 支持 TmNS 消息记录、IP 转 PCM 及解密等功能, 并提供与现有遥测数据处理器的接口。

⑤ 地面支持子系统: 支持 PCM 接收解密、遥测数据处理显示、TmNS 消息记录等功能, 并在飞行试验前对试验对象进行检测和维护。

2.3 分层模型

TmNS 采用标准因特网协议 TCP/IP 作为网络节点的核心通信协议, 其与开放式系统互联 (Open System Interconnect, OSI) 参考模型、TCP/IP 分层模型的关系如图 4 所示。该分层模型的特点是层次独立性, 即每个分层服务它上面的层, 并由它下面的层提供服务, 改变其中一层对其它层没有影响, 因此允许在每个层中使用不同的技术。

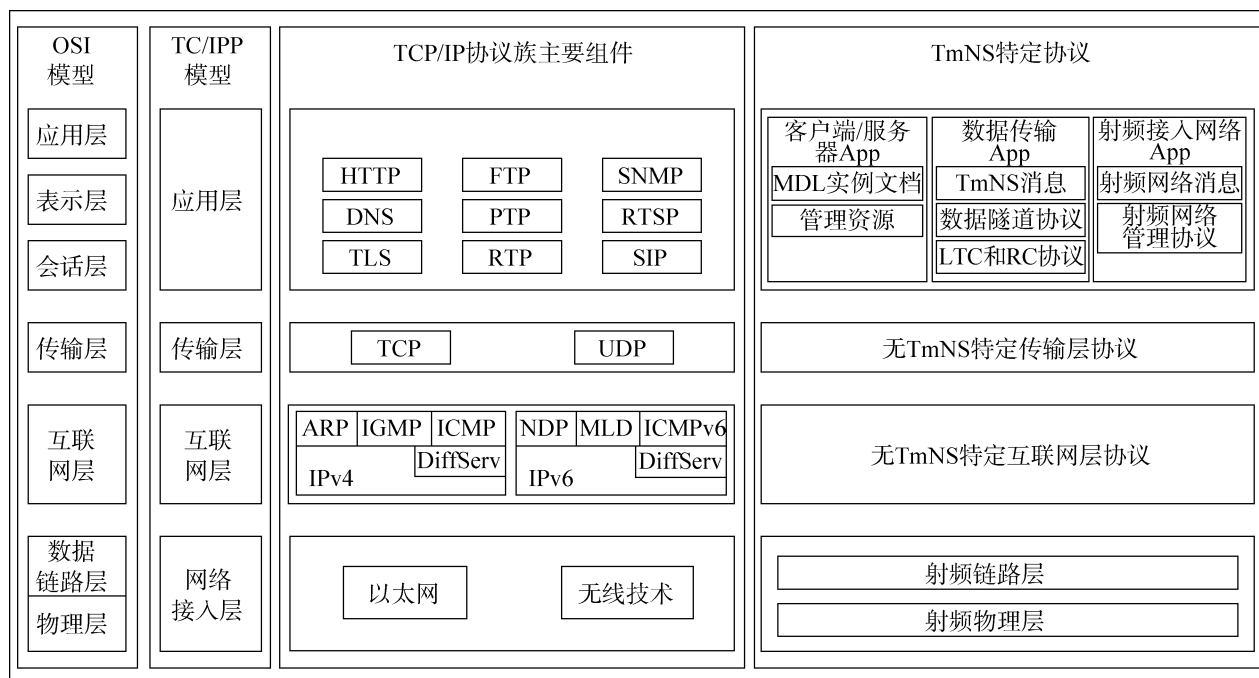


图4 TCP/IP模型核心TmNS技术和TmNS特定协议

Fig. 4 Core TmNS technologies and TmNS-specific protocols in the TCP/IP model context

① 网络访问层：由物理子层和数据链路子层构成，物理子层支持百兆、千兆、十吉比特以太网标准，相对TCP/IP增加了前文所述SOQPSK调制技术，后续版本的IRIG 106标准修订中还可能增加无线局域网（符合IEEE 802.11系列标准）技术；数据链路子层支持IEEE 802.3-2012中规定的以太网数据链路协议，包括帧结构、媒体访问控制、逻辑链路控制（Logical Link Control, LLC）、链路层切换/桥接/流量控制、地址解析（含IPv4、IPv6）等，相对TCP/IP增加了射频链路层协议，该协议提供了动态管理传输带宽的控制机制。

② 因特网层：与TCP/IP完全一致，支持IPv4、IPv6、IP数据报、网络路由等，其中IPv4包括因特网控制消息协议（Internet Control Messages Protocol, ICMP）和IGMP，IPv6还包括ICMPv6、IPv6组播侦听发现协议等。

③ 传输层：与TCP/IP完全一致，支持TCP、UDP、传输层安全性（Transport Layer Security, TLS）和安全套接字层（Secure Socket Layer, SSL）等。

④ 应用层：包括网络节点核心协议、TmNSApp核心协议和服务质量协议，网络节点核心协议包括主机/地址配置（含静态配置和动态配置）、域名服务（Domain Name Service, DNS）、时间同步（Precision Time Protocol, PTP）、信息保证

和加密；TmNSApp核心协议包括简单网络管理协议（Simple Network Management Protocol, SNMP）、超文本传输协议（Hyper Text Transfer Protocol, HTTP）、实时流媒体协议RTSP、文件传输协议（File Transfer Protocol, FTP）、IP语音、安全通信（Secure FTP、Secure HTTP）、统一资源标识符（Uniform Resource Identifier, URI）/统一资源名称（Uniform Resource Name）；服务质量（Quality of Service, QoS）包括差异化服务、差异化服务标记（DiffServ Code Point, DSCP）分配等。相对TCP/IP，TmNS在应用层新增了客户端/服务器应用、数据传输应用和射频接入网络应用，以实现特定的TmNS功能。

2.4 关键技术

2.4.1 网络数据消息

TmNS在应用层采用基于网络的数据消息进行通信，测试数据以TmNS数据消息传输。TmNS数据消息包括消息头和消息有效负载，消息有效负载又分为若干数据包；数据包包括包头和包有效负载，包有效负载中包含实际测量数据，如图5所示。TmNS数据消息中的测量定义通过系统配置文件进行映射，配置文件采用元数据描述语言MDL描述特定测试设备正在传输或使用的给定TmNS数据消息的配置信息。

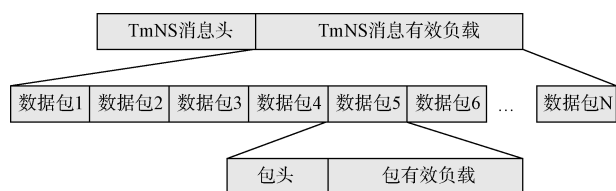


图 5 TmNS 消息格式

Fig. 5 TmNS data message

TmNS 数据消息传输的过程^[15]如图 6 所示: 在因特网层封装为 IP 数据包, IP 数据包和链路层控制消息 (Link Layer Control Message, LLCMs) 统称为 MAC 服务数据单元 (MAC Service Data Units, MSDUs), 多个较小的 MSDUs 通过自动重传请求 (Automatic Repeat-reQuest, ARQ) 块封装为一个 MAC 帧, 较大的 MSDUs 则通过多个 ARQ 块封装为多个 MAC 帧。MAC 帧包括帧头、具有密码

块链接消息认证码模式的计数器协议 (Counter with Cipher Block Chaining Message Authentication Code mode Protocol, CCMP) 帧头、有效加密负载和消息完整性编码 (Message Integrity Code, MIC)、帧校验序列 (Frame Check Sequence, FCS), MAC 帧数据按位进行伪随机处理并通过低密度奇偶校验码 (Low Density Parity Check, LDPC) 前向纠错编码, 之后在物理层进行 SOQPSK 调制。多个 LDPC 码块以突发序列方式传输, 并在突发序列前面增加前导码和附加同步标记 (Attached Synchronization Marker, ASM), 以便于在接收端实现解调和位、字同步。在分时多址 (Time Division Multiple Address, TDMA) 传输时机调度 (Transmission Opportunities, TxOps) 时隙内, 突发序列完成射频传输^[16]。

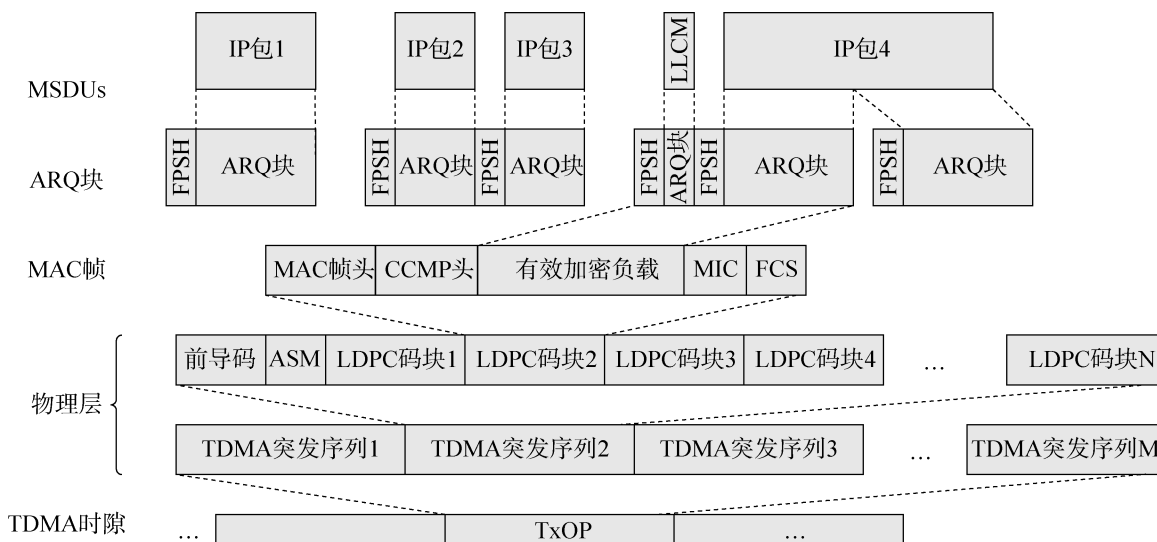


图 6 TmNS 数据消息传输过程

Fig. 6 Transfer process of TmNS data message

2.4.2 系统配置管理

TmNS 系统配置管理采用国际标准化组织制定的电信管理网络模型 (Fault, Configuration, Accounting, Performance and Security, FCAPS) 来管理 TmNS 组件, 提供网络上故障、配置、计费、性能和安全性等配置信息视图。TmNS 系统在管理和配置上由两种类型设备组成: 被管设备和 TmNS 管理器。图 7 是 TmNS 系统管理框图, 核心技术是通过系统传递管理信息的 SNMP 协议。被管设备运行“代理”应用程序, 使用 TmNS 定义的 SNMP 管理信息库 (Management Information Bases, MIBs)

来提供其内部状态, 并接受外部控制和配置管理, 而文件传输协议、超文本传输协议和因特网控制消息协议则为文件传输、发现和配置提供支持。通过使用系统管理功能, 可以通过互操作的方式配置、重新配置、控制和监视 TmNS 组件。

使用系统配置管理的典型方法是构建系统管理器, 为遥测网络系统的协调管理提供一个模型^[17], 该用户应用程序针对 TmNS 组件可进行监视、控制、配置、协调和可视化操作。通过系统管理器, 用户可获取系统和设备级状态, 包括试验对象的设备状态和本地网络、全局网络的性能

信息, 以及系统健康状态指示和任一故障状态的详细信息。

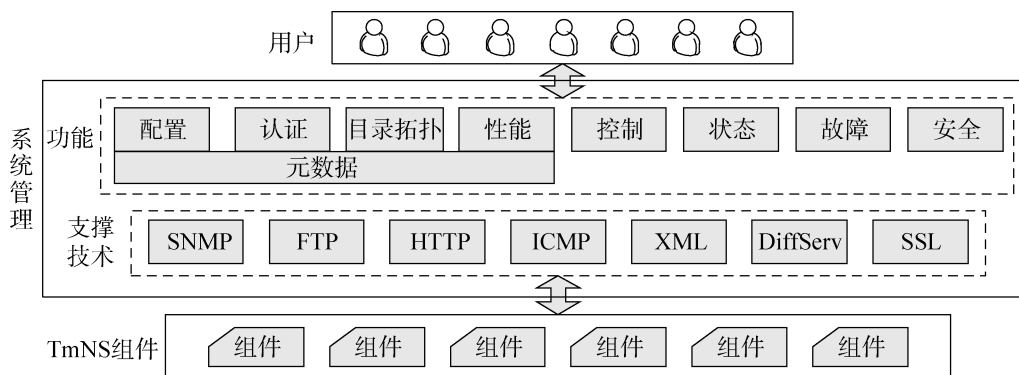


图7 系统管理框架图

Fig. 7 System management architecture

2.4.3 时间同步

TmNS采用IEEE 1588-2008协议(也称PTP协议)实现时钟同步, 该协议针对网络化测量和控制系统高精度时间同步需求设计, 采用自组织式的主从时钟同步算法^[18]。按节点工作状态, 分为基准时钟、主时钟和从时钟, 基准时钟是外部参考时钟, 可选择GPS时钟或原子钟; 主时钟是通过最佳主时钟算法选择出的精度最高的时钟, 其余为从时钟; 每隔一段时间, 主时钟向基准时钟同步, 从时钟向主时钟同步, 进而实现整个网络的时间同步。按节点通信路径数量, 分为普通时钟和边界时钟, 普通时钟是只包含一条通信路径的时钟, 而边界时钟有两条或两条以上通信路径的时钟, 如图8所示。

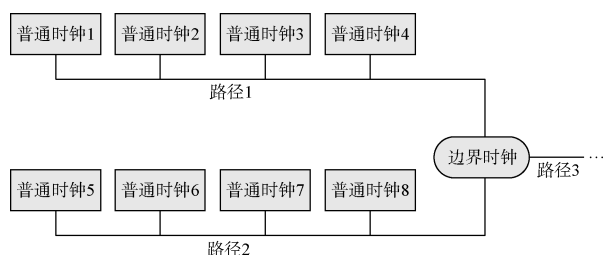


图8 IEEE 1588同步系统拓扑结构

Fig. 8 Topology of IEEE 1588 synchronization

IRIG 106规定所有符合TmNS标准的网络交换机(属边界时钟)都同步到一个外部参考时钟(推荐GPS时间), 并作为TmNS本地网络的主时钟(如图3所示), 在无外部参考时钟时, 使用跟踪GPS时间的最佳估计值。在工程上, 时间同步既可完全基于软件, 也可采用软件结合专属硬件

的方式实现。由于越靠近物理层所引入的延迟和抖动越小, 因此采用专属硬件的同步精度更高, 可以达到亚微秒级^[19]。

2.4.4 服务质量

TmNS采用标准的IP网络服务质量QoS机制, 用以协调数据、指挥和控制等网络信息流的竞争传输, 保证特定业务的服务质量如带宽、时延、抖动和丢包率等^[20]。QoS常用于某个测试或多个测试中的特定数据, 出于性能原因(如语音数据)或是飞行安全的考虑, 这些数据对传输有着严格的要求。

TmNS网络节点通过支持RFC 2474、RFC 2475、RFC 2597等标准中规定的差异化服务(DiffServ)来实现业务级端到端QoS。首先, 采用流量标记与控制技术, 根据服务质量要求对不同业务的数据进行分类, TmNS定义了差异化服务标记DSCP, 网络节点通过基于元数据描述语言MDL文件配置的DSCP来标识IP报文^[21], 对报文按类进行优先级标记和流量监管; 进而, 采用拥塞管理与拥塞避免技术对拥塞的报文进行缓存和调度, 实现拥塞管理与拥塞避免, 保证TmNS网络的服务质量。

IRIG 106-20标准中给出了TmNS系统中与不同业务类型相关联的默认DSCP标记, 如在IEEE 802.1Q PCP-IEEE P802.1p标准中定义的“3-关键应用”, 相关联的默认DSCP标记为“第3类”。

2.4.5 路由

TmNS采用因特网工程任务组(Internet Engineering Task Force, IETF)制定的标准IP网络路由,

在网络中选择最佳传输路径, 这为 TmNS 带来了新的能力如中继能力, 进而试验对象可以实现超视距通信 (具体见图 2)。

TmNS 网络节点 (包括网络设备) 支持 RFC 1812 标准第 7.4 节定义的静态路由功能, 该功能一般通过主机操作系统进行配置, 如 Linux 路由命令; 提供网络层服务的网络设备可通过静态路由配置为单播或多播模式; 提供 IPv4 路由功能的网络设备支持符合 RFC 2328 标准的内部路由协议开放最短路径优先协议 (Open Shortest Path First, OSPF) (第二版); 提供 IPv6 路由功能的网络设备支持符合 RFC 5340 标准的内部路由协议 OSPF (IPv6)。

2.4.6 源选择

源选择功能通过 TmNS 源选择器 (TmNS Source Selector, TSS) 来实现。当一个符合 TmNS 标准的射频发射源端信号, 传播到达两个或多个符合 TmNS 标准的射频接收终端时, 使用路由和源选择功能, TmNS 节点可选择任一网络数据包。网络隧道可降低在 TmNS 与现有网络间传输数据、指挥和控制信息的复杂性, 比如隧道可支持路由、QoS、多播、切换等功能。隧道管理采用虚拟网络接口来实现, 它可以被应用程序直接访问, TmNS 收发器都具备称为 TSS 接口的虚拟网络接口, TSS 接口之间的 TSS 隧道使用基于 TCP 的安全套接字层来实现。

TSS 消息在 TSS 接口之间进行交换, IRIG 106 标准定义了两种类型的 TSS 消息, 分别是 TSS 初始化消息和 TSS 数据消息。首先, TSS 客户端在 TSS 服务器上的 TSS 监听端口上启动一个 TCP 连接, 即建立要用作隧道的连接; 接着, 在建立初始 TCP 套接字连接后, TSS 服务器应发送 TSS 初始化消息; 然后, 即可通过 TSS 数据消息, 实现 TmNS 网络与其它网络之间的网络数据封装和专用路由。

2.4.7 安全

TmNS 采用多种安全机制如加密、完整性、身份验证、访问控制等以满足特定程序的需求, 包括确保从各试验对象到地面数据传输的安全机制, 以及确保信息不是机密但是从业务角度来看比较敏感的其它类型通信的安全机制。比如, IRIG-106 标准中, 试验对象与任务控制子系统之间的通信建议采用美国国家安全局批准的第 1 类安全机制进

行保护, 以减轻预期威胁, 而一般射频通信则通过美国联邦信息处理标准 FIPS-140-2 安全机制予以保护; 针对语音和数据传输安全方案, 则建议采用美国国家安全局开发的支持 IGMP 的安全通信互操作性协议 SCIP (Secure Communications Interoperability Protocol) [22]。

TmNS 中保护数据安全的其它机制还有 TLS、SSL 和 SNMPv3, 其中 TLS 用于应用程序如即时消息、VoIP 传输数据的安全机制, SSL 用于通过 HTTP 和 FTP 传输数据的安全机制, SNMPv3 同时支持身份验证和隐私保护, 用于安全的 SNMP 通信。

3 TmNS 对我国遥测发展的启示

① 遥测网络化需求日益迫切、功能亟待拓展, 亟需定期更新发布遥测标准

近二十年我国航空航天事业持续快速发展, “双向通信及网络化遥测”需求越来越迫切, 遥测亟需向“遥测与遥控并重”、“安全监控与任务监控并重”、“空天地一体化遥测网络系统”方向发展。目前我国的遥测标准是 GJB 21, 于 2006 年参照 IRIG 106 标准制定, 已无法适应当前及未来遥测技术发展的需要, 各工程项目采用不同的技术途径来实现遥控、网络化等需求, 没有统一的指导意见和规范, 通信体制、试验设备不相容, 造成反复开发、资源浪费。因此, 亟需跟踪研究国际遥测领域发展前沿技术, 定期修订、更新我国遥测标准, 指导工业部门、靶场支持系统对遥测技术、产品更新换代。

② 飞行器遥测系统综合化、网络化亟待拓展, 亟需开发统一 vNET 框架

飞行器上采用传统方法设计的遥测、外测、安控、数据链、任务监控等分系统, 已无法满足飞行器对体积、重量的限制, 亟需向基带一体化、射频综合化、天馈一体化方向发展, 即遥测系统已发展为综合诸多功能的综合电子系统, 如利用遥控通道即可实现外测、安控、任务监控等功能。同时, 飞行器内各设备间的通信总线和通信架构也应向 iNET 进行转变, 现有飞行器常用总线 (如 RS-422、CAN、MIL-STD-1553B) 不具备基于 TmNS 的空、天、地设备联网能力、高速信息交换能力和无缝访问、互操作能力, 亟需开发统一的 vNET 框架。AFDX、TTE 等总线技术由于兼容以

太网技术且兼具实时性,具备统一化、标准化基础,因此vNET的开发可基于AFDX、TTE等成熟总线技术。

③ 靶场地面站网络功能性能亟待拓展,亟需开展gNET更新换代

靶场系统发展与飞行器的发展息息相关,传统靶场为适应飞行器内相对独立的遥测、外测、安控、数据链、任务监控等分系统,地面站也具备相应独立的功能,同时靶场系统还具备雷达跟踪、光学跟踪等能力。因此,在开发飞行器统一vNET框架的同时,亟需开展gNET的更新换代,以确保空地、天地匹配性和一致性。与vNET相似,飞行器在实现遥测、外测、安控、数据链等综合电子系统,具备网络接口统一化的同时,靶场地面站也将实现网络接口统一化和设备复杂度优化。

4 TmNS后续发展展望

TmNS代表着下一代遥测系统甚至是下一代航空航天信息综合系统(含遥测、外测、安控、数据链、任务监控、语音、数传等)的发展方向,世界各主要航空航天国家都将朝着这个方向大力发展。但是,受限于各国遥测技术、靶场建设发展的不同水平以及TmNS跟踪、支持和开发、投入力度不同,将呈现从现有遥测能力向TmNS逐渐过渡的发展趋势,在此过程中SST将被rfNET逐步取代,进而使TmNS成为统一的、标准的网络化系统。与此同时,随着天基卫星的部署与应用,天基靶场建设的发展,也使得飞行器与天基卫星间的TmNS成为可能,由此将逐步发展为“空、天、地”一体化遥测综合网络系统。网络化发展也将促进vNET和gNET的发展与变革,比如vNET将具备分布式计算、无线互联、故障定位隔离、功能在线重构、任务在线变更等能力,而gNET将在全域全球一体、航空航天一体、军民两用一体的同时,极大降低地面系统开发、维护成本。工程上,TmNS也将面临高动态环境适应性、多目标试验、更高码率传输、全向通信等实际问题。

5 结束语

TmNS已纳入到IRIG 106标准中,用于规范网络化遥测系统的设计和研发,具备双向通信、频

谱共享、服务质量、互通互联、超视距遥测等新质能力,代表着下一代遥测系统的发展方向。为了不断满足我国航空航天飞行器如运载火箭、导弹、飞机等日益增长的信息化变革需求,保持与国际先进遥测技术同步发展,必须对其进行跟踪研究,并结合我国遥测技术发展现状和发展需求,尽快提出我国遥测标准的制定、修订方案,希望本文能够对未来我国遥测技术发展、遥测标准制定及更新起到积极推动作用。

参考文献

- [1] 李邦复. 遥测系统[M]. 北京: 宇航出版社, 1987.
- [2] 李秉常. 航天遥测系统[M]. 北京: 宇航出版社, 2001.
- [3] 李凉海. 从IRIG 106遥测标准看遥测新发展[J]. 遥测遥控, 2017, 38(1): 1-7.
LI Lianghai. New Development of Telemetry Technology Viewed from IRIG Standard 106[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2017, 38(1): 1-7.
- [4] RCC Telemetry Group. Telemetry Standards[S]. IRIG Standard 106-20, 2020.
- [5] 郭凯. 航天遥测技术现状及发展思考[J]. 遥测遥控, 2015, 36(5): 7-15.
GUO Kai. Research on the status quo and development trends of aerospace telemetry [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2015, 36(5): 7-15.
- [6] 张俊民, 袁炳南, 白效贤. iNET的技术框架和应用前景[J]. 测控技术, 2010, 29(11): 15-17.
ZHANG Junmin, YUAN Bingnan, BAI Xiaoxian. The technical framework and application prospect of iNET[J]. Measurement & Control Technology, 2010, 29(11): 15-17.
- [7] 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.
LUO Qinghua, PENG Yu, ZHOU Pengtai, et al. Analysis of next generation networking telemetry technology in aeronautical flight test[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 261-270.
- [8] ZEGEYE W, DEAN R, DUGDA M, et al. Modeling networked telemetry[J]. Computers, 2021, 45(10): 1-14.
- [9] HODACK D. Information assurance (IA) considerations for a telemetry network system(TmNS)[C]//International Telemetry Conference Proceedings, 2010.
- [10] 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.
YUAN Bingnan, HUO Zhaohui, BAI Xiaoxian. The new generation telemetry network system-TmNS[J].

- Measurement & Control Technology, 2010, 29(11): 18-21.
- [11] ABBOTT B A, ARAUJO M S, MOODIE M L, et al. iNET System Design Concepts[C]//International Telemetry Conference Proceedings, 2011.
- [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.
CHEN Yudi, LIU Yandu, JIAO Yiwen. Viewing the development of telemetry network standard from IRIG 106[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(6): 14-21.
- [13] YIN X, SULEWSKI J. Implementation for an iNET-enabled end-node utilizing an mdl-based telemetry system architecture[C]//International Telemetry Conference Proceedings, 2011.
- [14] GRACEL T B, ABBOTT B A. Telemetry network standards overview[C]//The European Test and Telemetry Conference, 2018.
- [15] KABA J, CONNOLLY B. overview of the telemetry network system(TmNS) RF data link layer[C]//International Telemetry Conference Proceedings, 2012.
- [16] 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.
WANG Xinglai, LAN Kun, XIA Guojiang, et al. RF Link management technology of a telemetry network system[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2016, 35(6): 429-435.
- [17] NOONAN P J, NEWTON T A, WILLDEN G C, et al. iNET System Manager[C]//International Telemetry Conference Proceedings, 2014.
- [18] IEEE Standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control Systems[S]. IEEE Std 1588-2008 (Revision2 of IEEE Std 1588-2002), 2008.
- [19] EDISON J C. Measurement, Control, and Communication Using IEEE 1588[M]. London: Springer, 2006.
- [20] CONNELL R, WEBSTER L. Telemetry Network System(TmNS) Link Management Modeling and Simulation [C]//International Telemetry Conference Proceedings, 2011.
- [21] CONNELL R, WEBSTER L. Telemetry network system (TmNS) rf link management quality of service[C]//International Telemetry Conference Proceedings, 2012.
- [22] DUKES R, DEAN R. Proposed iNET network security architecture[C]//Telemetry Conference(ITC), 2009.

[作者简介]

邱长泉 1984年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器测控与通信技术。

袁延荣 1987年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器测控与通信技术。

薛志超 1982年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器测控与通信技术。

李 霄 1980年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器测控与通信技术。

王 亨 1991年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器测控与通信技术。

(本文编辑: 潘三英)