

CAI Jiji, YU Yeluo, YANG Shujie, LI Wei, CHEN Yujun, ZHOU Da. Design and Implementation of Satellite Status Processing and Monitoring System Based on Multi-channel High-rate Frame Processing (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(4): 1114–1122. CSTR:32142.14.cjss.2024-0056. DOI:10.11728/cjss2025.04.2024-0056

基于多通道、高速率拼帧处理的卫星状态量 处理监视系统设计与实现*

蔡济济 虞业砾 羊书杰
李 伟 陈玉君 周 达

(中国科学院微小卫星创新研究院 上海 201304)

摘 要 星地稳定的信道建立使得地面控制中心能够接收来自卫星的遥测数据、跟踪和控制信号, 以及科学和观测数据. 传统在轨卫星下行数据通道包括卫星遥测信道数据以及数传信道数据, 其中遥测信道数据指的是 S 波段遥测信道下行数据, 而数传信道数据则指的是数传数据工程参数. 基于数传信道数据的高速率、双通道以及多应用模式等特点, 设计了一种卫星状态量处理监视系统. 该系统不仅能够处理多通道数据, 还具备对高速率数传数据工程参数进行拼帧处理、解析、显示、查询、存储以及异常报警等功能. 该软件已成功应用于在轨卫星的任务运控系统, 满足对卫星型号平台和载荷的实时监视需求.

关键词 卫星遥测, 数传工参, 多通道, 高速率, 拼帧处理, 状态量监视, 异常报警

中图分类号 TP277

Design and Implementation of Satellite Status Processing and Monitoring System Based on Multi-channel High-rate Frame Processing

CAI Jiji YU Yeluo YANG Shujie
LI Wei CHEN Yujun ZHOU Da

(Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304)

Abstract The stable establishment of space-ground communication channels enables the ground control center to receive telemetry data, tracking and control signals, as well as scientific and observational data from the satellite. Satellite telemetry data serves as an important basis for reflecting the working status of various subsystems and individual equipment on the satellite during its on-orbit operation and is also the basis for judging satellite faults, which are divided into real-time telemetry and delayed

* 上海市协同创新中心项目资助 (XTCX-KJ-2023-10)

2024-04-09 收到原稿, 2024-12-25 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

telemetry data. Real-time telemetry data are the telemetry data collected in real-time by the satellite, which can truly reflect the working status of the satellite; delayed telemetry data are compressed real-time telemetry data, where the time interval between adjacent sampling points during compression is long. The construction of the satellite status quantity processing monitoring platform aims to process and display the status data from the satellite downlink according to specific protocols through software systems, mainly including satellite data acquisition and processing, real-time monitoring and status analysis, anomaly detection and alarming, and satellite health management. Facing the traditional on-orbit satellite downlink data channels, which include satellite telemetry channel data and data transmission channel data, the telemetry channel data refers to the downlink data of the S-band telemetry channel, while the data transmission channel data refers to the engineering parameters of the data transmission. Considering the characteristics of the data transmission channel data, such as high rate, dual channels, and multiple application modes, a satellite status quantity processing monitoring system has been designed. This system is not only capable of processing multi-channel data but also performs framing processing, parsing, display, querying, storage, and exception alarming for high-speed data transmission engineering parameters. In addition, this software has been successfully applied to the mission operation control system of on-orbit satellites, meeting the real-time monitoring needs for satellite platform models and payloads.

Key words Satellite telemetry, Digital transmission data engineering parameters, Multi-channel, High rate, Frame processing, Status quantity monitoring, Anomaly alert

0 引言

航天器在轨遥测数据是监测航天器各单机、分系统等设备工作状态的重要数据基础,也是判断卫星故障的依据^[1];而卫星状态量处理监视系统是在轨卫星任务运控系统的重要组成部分^[2],其通过接收地面站网中心实时转发的原始遥测数据或离线事后的原始遥测数据文件,首先对原始遥测数据或文件进行格式化验证,验证通过后进行落盘存储,同步将遥测数据流推送给解析模块,解析模块依据遥测数据格式约定进行解析处理,并将解析结果推送给前端进行显示;监视系统具备对解析后的参数数据进行入库存储且对参数数据进行查询和分析的功能;解析模块同步将解析值推送给故障报警模块,故障报警模块实时监控卫星平台和载荷运行状态,当平台参数或载荷状态参数超阈值时,及时将故障参数推送给报警前端进行高亮显示并且同步进行语音播报告警等。

原始的卫星状态量处理监视系统^[3]通常只接收解析处理遥测通道的数据帧,考虑到卫星实时入境的时间短暂,这期间通常只能下发实时采集的遥测参数以及境外采集的延时参数,而实际上卫星采集更密的工程参数数据无法在测控通道入境时下发,因而无法完整地对各分系统单机状态进行监视。为此,本文设

计了基于多通道、高速率拼帧处理的卫星状态量处理监视系统,能够同时接收处理遥测链路通道数据和高速率数传链路下传的采样频率更高的卫星工程参数数据,实现对卫星平台和载荷全天时的状态监测和故障诊断。

1 多通道数据下传

在轨卫星下传的卫星状态量数据通过两种通道下传,一种是通过 S 频段测控地面站进行遥测数据下传,另外一种是通过 X 频段数传地面站进行工程参数数传数据的高速下传。

第一种,通过 S 频段下发的遥测数据,该遥测数据帧通常使用 CCSDS (空间数据系统咨询委员会) 标准格式帧^[4],并通过数据流的方式实时转发给卫星状态量处理监视系统,该数据流的特点是数据量通常较小,且下行的速率低。

第二种,通过 X 频段下发的工程参数数传数据,该工程参数数据与数传载荷通道数据进行复用,由于载荷数据具有数据量大的特征,而卫星在一次过境过程中其可视的时间非常短,所以在设计时,该通道数据下行速率相对较高。因此,通过 S 频段通道下传的遥测数据速率与通过 X 频段通道下传的工程参数数

传数据的速率不尽相同, 数据速率从几比特每秒变化至上百兆每秒. 图 1 所示为 S 频段和 X 频段数据下传示意, 其中 X 频段数据下传包括双通道、右旋单通道、左旋单通道三种模式.

1.1 S 频段数据

卫星对遥测数据的处理包括组包、组帧、校验、加扰、调制、发送. 当卫星在地面接收站可视范围内时, 其先发送实时遥测包, 后发送延时遥测包. 延时包按照采样时间先后依次发送. 卫星加电后全程采集延时遥测数据, 并依次存入规定的遥测存储区, 存储区容量 ≥ 512 kByte. 根据遥测码速率和帧长, 每个软件周期 (1 s) 发送 2 帧遥测帧. 遥测数据帧使用 CCSDS 标准格式帧, 遥测参数在组帧和发送时高字节在前、低字节在后, 高位先发、低位后发. 遥测帧的数据

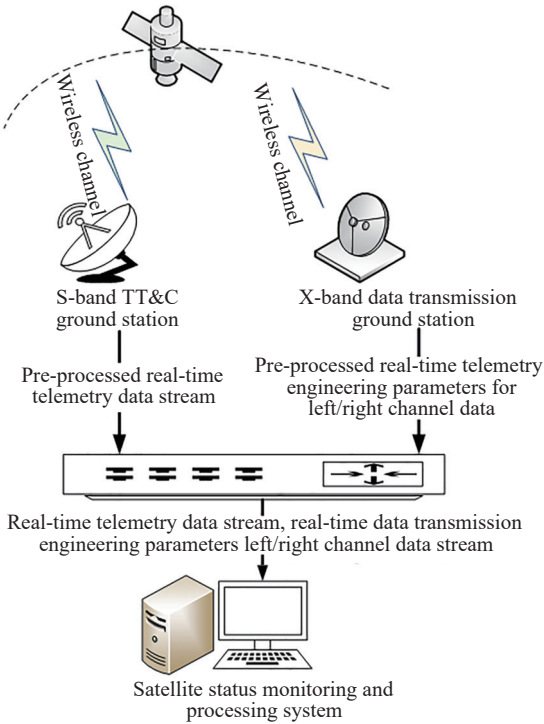


图 1 多通道下传数据

Fig. 1 Download data through multiple channels

结构见表 1, 其长度固定为 1024 Byte.

帧同步码: 4 Byte, 固定填 1 ACFFC1 DH.

帧主导头: 长度 6 Byte.

帧主导头结构见表 2.

虚拟信道识别符: 3 bit, 用于划分下行遥测帧的类型, 有效帧为 000 Byte, 空闲帧为 111 Byte.

帧副导头: 长度为 40 Byte, 具体结构定义见表 3.

帧副导头数据: 存放卫星快采样率重要固定遥测数据, 周期 0.5 s. 长度 39 Byte. 包含时间信息 (4 Byte 时间秒值+2 Byte 时间毫秒值) 及其他卫星重要遥测数据.

帧数据域: 放置需要下传的遥测源包数据.

帧差错控制域: 除帧同步码 4 Byte 和差错控制域 2 Byte 外的 1018 Byte 数据校验, 校验方式为 CRC 校验.

1.2 X 频段数据

数传下传通道包括双通道、右旋单通道、左旋单通道三种下传通道. 其中双通道下传为常规模式, 传输帧采用奇偶帧分开传输, 右旋通道传输虚拟信道帧计数为奇数的传输帧, 左旋通道传输虚拟信道帧计数为偶数的传输帧; 单通道下传为另一通道出现故障后的减半模式, 传输帧采用奇偶连续帧的方式. 调制方式包括: 8 PSK 及 QPSK, 主用模式为 8 PSK, 速率为双通道 $2 \times 810 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$; 应急模式为 QPSK, 速率为双通道 $2 \times 540 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$. 信息流帧格式按照 AOS 空间数据链路协议 (CCSDS 732.0-B-2, July 2006) 标准执行. 传输帧结构见表 4.

传输帧主导头: 包括主信道标识符、虚拟信道帧计数、虚拟信道标识符 (VCID) 以及信令域. 虚拟信

表 1 遥测帧结构 (单位: Byte)

Table 1 Telemetry frame structure (Unit: Byte)

帧同步码	帧主导头	帧副导头	帧数据域	帧差错控制域
4	6	40	972	2
4	6	1012	1012	2

表 2 帧主导头结构 (单位: bit)

Table 2 Telemetry frame master header structure (Unit: bit)

主信道识别		虚拟信道识别符	操作控制域标识	主信道帧计数	虚拟信道帧计数	帧数据域状态				
版本号	航天器识别符					帧副导头标识	同步标识	包顺序标识	段长识别符	首包主导头位置指针
2	10	3	1	8	8	1	1	1	2	11

道标识符设置见表 5.

帧数据域: 采用 B_PDU 位流规约数据单元格式, 886 Byte, 均用于数据域. 将虚拟信道为载荷科学数据和延时工程遥测参数的数据分别组存储源包后存放至帧数据域中; 当虚拟信道为实时工程参数时, 不组存储源包, 直接以工程参数源包格式的形式存入帧数据域中, 当虚拟信道为填充数据时, 帧数据域中直接全部填充 AA 码.

LDPC 校验: 按照 (7136, 8160) LDPC 码的编码规则进行编码运算, 校验位为 128 Byte.

载荷科学数据及延时卫星工程参数的存储源包为定长包, 包长为 252 Byte, 格式见表 6.

同步码: 固定填 0xE225.

表 3 帧副导头结构

Table 3 Telemetry frame sub-master header structure

帧副导头识别		帧副导头数据
帧副导头版本号	帧副导头长度	
2 bit	6 bit	39 Byte

表 4 数据传输帧格式 (单位: Byte)

Table 4 Data transmission frame format (Unit: Byte)

帧同步码	帧主导头	帧数据域	LDPC校验符号填充
4	6	886	128

表 5 虚拟信道标识符设置

Table 5 Virtual channel identifier settings

信道内容	虚拟信道标识符
实时工程参数数据	011001
延时工程参数数据	100101
延时载荷科学数据	110010
填充数据	111111

E-PDU 数据域: 数据域长度 244 Byte. 存放回放科学数据包和回放工程参数源包.

数传一体机: 通过异步 422 串口接收来自星务计算机的工程遥测包, 包长度可变. 星务计算机发送给数传一体机的工程遥测源包格式见表 7.

包头: 2 Byte, 固定填 0xEB90.

遥测源包: 变长, 每个遥测源包域中只封装一包遥测源包的数据.

同时支持符合欧洲 DVB-S2 标准 ETSI EN 302 307-1 V1.4.1 (2014-11) 的可变编码调制 (VCM) 技术作为试验, 将协议中的基带帧 (BBFRAME) 内容改为 CCSDS AOS 帧 (896 Byte, 去掉 128 Byte LDPC 校验域) 以兼容主用和应急模式帧格式, 具体如下.

$2 \times 810 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 2/3 BCH-LDPC 编码@8PSK.

$2 \times 1.08 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 2/3 BCH-LDPC 编码@16APSK.

$2 \times 1.08 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$, 4/5 BCH-LDPC 编码@16APSK.

2 高速率数传工参拼帧处理

该型号卫星数传通道下行的数传工程参数数据包括常规模式和 VCM 模式两种数据协议模式, 卫星状态量处理监视系统需要同时支持解析两种数传数据格式. 数传工程参数双通道下发, 具有左右旋双通道数据, 数据速率包括 $2 \times 810 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, $2 \times 540 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$, $2 \times 1.08 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 三种, 具备对多协议、高速率数传数据的拼帧正常解析能力. 表 8 给出了 VCM 模式下的信息数据帧格式.

本系统采用多进程技术实现对左右通道^[5]、多协议数据独立并行处理, 全系统除主程序进程外, 还同时开辟了 tcp 连接进程、数据接收进程、数据提取进程以及数据拼帧 4 大类进程^[6]. 图 2 所示为基于多进程技术划分的进程处理.

表 6 存储源包格式

Table 6 Storage source package format

同步码	包主导头							E-PDU数据域
	版本号	包标识			包序控制		包数据长度	
		类型	副导头标志	应用过程标识符	分组标志	包序列计数		
16 bit	3 bit	1 bit	1 bit	11 bit	2 bit	14 bit	16 bit	1952 bit
2 Byte			2 Byte		2 Byte		2 Byte	244 Byte

3 四大类进程开启的 8 个进程

- (1) tcp_recv_processing: 启用 2 个 tcp 客户端连接进程, 与 tcp 服务端建立连接.
- (2) tcp_recv_in_queue: 启用 2 个 tcp 数据接收进程, 接收左右旋通道的数据, 并将接收到的数据存入进程队列中.
- (3) parse_func: 启用 2 个数据提取进程, 分别从 2 个通道中提取出实时工参数据及延时工参数据.
- (4) dt_parse: 启用 2 个实时拼帧进程, 对于提取出的实时工参及延时工参以帧计数连续为前提, 将连续的帧拼好后作下一步解析处理.

基于上述 8 个处理进程, 高速数传工程参数数据处理流程如图 3 所示.

- (1) 双进程 tcp_recv_processing, 与服务端建立 tcp 长连接, 根据设置的 connect_status 状态判断连接状态, 如果断开连接, 则启用重连机制进行重连.

表 7 工程遥测包格式 (单位: Byte)
Table 7 Engineering telemetry package format (Unit: Byte)

包头	数据长度	命令域	遥测源包域	校验和	包尾
2	2	2	长度可变	2	2

表 8 VCM 模式下的信息数据帧格式 (单位: Byte)
Table 8 Information data frame format in VCM (Unit: Byte)

帧同步码	帧主导头	帧数据域
4	6	886

- (2) 双进程 tcp_recv_in_queue, 负责接收服务端 2 个通道发送的数据, 将接收到的数据分别放入到 q1 和 q2 两个进程队列中.
- (3) 双进程 parse_func, 负责从 q1 和 q2 两个队列中分别提取数据, 然后进一步作数据提取, 分别提取出左旋实时工参、延时工参数据, 再将提取出的工参数据分别放入 ch_left_5725, ch_left_5719, ch_right_5725, ch_right_5719 进程中.
- (4) 双进程 dt_parse, 负责将 ch_left_5725, ch_right_5725 与 ch_left_5719, ch_right_5719 进行实时拼帧处理, 将拼好的帧分别放入 qu25 和 qu19 进程队列中.
- (5) 将 qu25 和 qu19 的数据分别从队列中提取出来, 根据协议数据源包 4032 Byte, 拼成一个完整的数据源包.
- (6) 根据数据源包及协议, 找到每个以 EB90 开头和 09 D7 结束的传输帧进行传输帧校验及解析.

基于多进程的高速率数传工参拼帧处理技术, 对

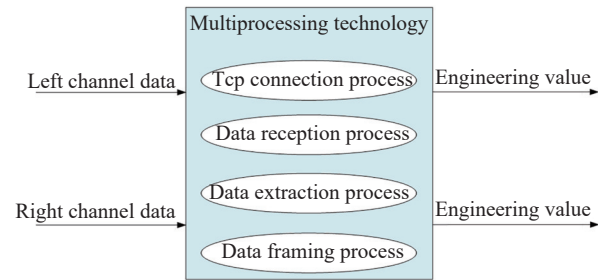


图 2 多进程技术划分进程处理
Fig. 2 Multi-process technology divided process processing

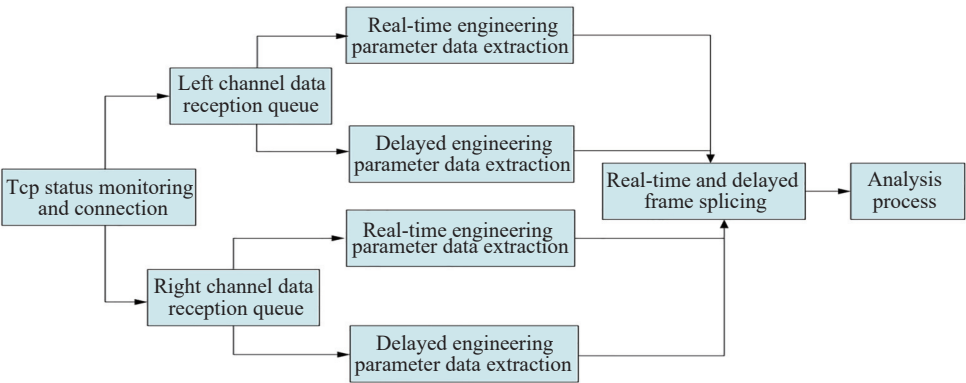


图 3 高速数传工程参数数据处理流程
Fig. 3 Flow chart of high-speed digital transmission engineering parameter data processing

卫星状态量处理监视系统进行了数传链路实时数传工参参数处理的显示时延试验, 并进行性能测试, 表 9 给出了高速数传工程参数性能测试记录, 具体测试流程如下。

- (1) 接收地面接收站发送的 SDGSAT-1 卫星原始数传数据。
- (2) 通过业务通信与管理调度软件接收数据帧后, 记录时间为 T_0 。
- (3) 卫星状态量处理监视系统实时接收业务通信与管理调度软件转发的实时数传数据。
- (4) 依据数传数据处理要求, 完成数传的处理, 将处理结果发送给状态量数据实时显示模块进行显示, 记录任务监视显示的完成时间 T_1 。
- (5) 重复进行 3 次测试, 分别计算显示延时 $T_2=T_1-T_0$ 。

三次测试结果分别为: 第一次 3.03 s, 第二次 3.045 s, 第三次 4.09 s。三次性能测试结果均满足工程总体提出的 ≤ 4 s 的性能要求。

4 基于 XML 技术协议约定

标准 XML 语言具有粒状更新、数据显示多样性、压缩性以及升级性等特点^[7]。基于标准 XML 技术上述特点, 并且针对系统需要处理多传输帧协议、多参数处理方法等要求, 设计实现了一套健壮性良好和具有层次化结构的标准规范, 该规范作为数据信息的标准, 用于统一定义航天器中各传输帧、传输源包的格式约定, 以及分系统、源包、参数、处理方法等^[8]。这种描述方式将形成一套兼具高复用、高可读、高可用性的 XML 文件, 以提高系统的开发效率, 有效缩短研制周期, 同时减少研制过程中的重复编码问题。

此框架的设计思路如下。

(1) 每个接口 XML 文件具备独有的所属型号信息, 便于多个型号共享服务器, 也便于接口文件传递。

(2) 使用 TmFuncs 元素描述通用的遥测处理公式和方法库, 该元素包含的所有处理方法 (使用 TmFunc 元素描述) 在遥测参数处理时直接引用, 同时明确参数和系数等信息。类似于编程语言中的函数定义与函数调用, 函数定义时明确函数调用需要的参数个数、类型等接口信息, 具体调用时由用户按照函数接口提供具体的参数值。

(3) 分系统集成节点, 可以作为各个分系统信息汇集的结合点。该节点树下包括了遥测包的具体定义, 而遥测包内包括了每个遥测参数的定义及其处理方法。

(4) 针对非标的参数类型 (21 bit 补码数、24 bit 浮点数等) 设计专门的 InputType 类型转换接口, 将非标源码转换为标准格式的原始数据。

通过 TmFrames 元素定义整星或星座遥测整帧格式, TmPktHeader 定义遥测包包头的结构, Sub-Systems 定义子系统的集合, TmPkts 定义遥测包集合元素, TmParas 用于标识所有遥测参数的集合, TmFuncs 主要描述通用函数的信息。以 TmFrames 属性为例, 其定义描述如下。

- byteLen: 字节长度。
- bitRate: 码速率, 单位为 $\text{bit}\cdot\text{s}^{-1}$ 。
- TmFrame 元素中, 通过 FrameItem 子元素来标识帧结构元, 其属性如下。
 - name: 项目名称。
 - bitLen: 数据位长度。
 - startBitLocation: 起始位置。
 - value: 值属性, 可选。
 - role: 项目角色定义。

表 9 高速数传工程参数性能测试记录

Table 9 Performance test records of high-speed digital transmission engineering parameter

tcp	2021-08-24 10:40:33.233	第一帧数据帧接收时刻: 20210824 10:40:33.215
tcp	2021-08-24 10:40:33.215	接收到填充格式头帧
tcp	2021-08-24 10:40:33.197	接收到传输请求, 准备接收实时数传数据流, 文件名: KX10_S2_000005_20210824_MY111_RR.dat, 卫星代号: KX10
tcp	2021/08/24 10:40:33.172	第一帧数据帧接收时刻: 20210824 10:40:33.161

注 时刻为LT。

5 整星状态量处理监视

5.1 系统组成

卫星下行运行管理模块: 负责内部功能模块间链路监视, 接收遥测数据及数传数据 (工程参数) 并转发至数据接收处理模块。

数据接收处理模块: 对接收的实时数据和事后回放数据进行缓存并按照标准 XML 协议进行预处理, 对处理后的数据进行清洗与融合, 最终发送给前端显示和数据库管理平台存储。

实时监视与报警模块: 对卫星在轨运行状态进行数据监视、状态分析、异常数据监测报警等。

数据查询模块: 对历史数据进行检索图表化显示, 并对结果进行数理统计与分析。

数据库存储检索模块: 提供数据支撑, 为各业务应用系统提供数据存储服务^[9]。

具体卫星状态量处理监视系统组成如图 4 所示。

5.2 卫星下行运行管理

卫星下行运行管理模块负责与软件内部功能模块共同进行链路监视, 同时负责接收前端通信软件透明转发的遥测数据及数传数据 (工程参数), 并以网络流的形式输入数据接收处理模块。包括链路维持、数据统计以及数据转发三个子模块。

链路维持子模块: 实时发送和接收心跳监视数据包; 当心跳异常时尝试重新建立链接, 当心跳正常时继续接收原始数据, 并对接收到的数据进行缓存。

数据统计子模块: 从接收到的数据流中同步正确的遥测帧, 将收到的帧信息数量进行统计处理。

数据转发子模块: 将网络采集的遥测数据及数传数据 (工程参数) 透明转发给数据接收处理功能。

5.3 数据接收处理

数据接收处理模块用于对接收的卫星状态量数据和事后回放数据进行缓存并按协议处理, 其采用新一代标准化遥测处理协议, 对遥测协议和遥测量进行通用化预处理, 对处理后的数据进行数据清洗与融合, 最终发送给前端显示和数据库管理平台存储。包括数据解析处理和数据分发子模块。

数据解析处理子模块: 通过加载标准化数字量遥测 XML 文件, 获取数据协议配置、遥测波道信息以及遥测量的处理公式等配置信息; 从接收到的数据流中同步正确的遥测帧, 将帧传递给帧解析进行处理; 从帧数据中匹配到正确的遥测包, 将遥测包传递给包解析进行处理; 从包数据中获得包中的遥测量的源码值, 将源码传递给数据类型进行处理; 将源码转换为对应数据类型的值, 传递给解析函数进行处理; 解析函数处理通过相应的公式将值计算成工程值, 传递给数据分发进行处理。

数据分发子模块: 对状态量处理结果数据进行封装; 将封装后的数据发送给实时监控与报警模块以及数据库存储检索模块。

5.4 实时监视与报警

实时监视与报警模块用于对卫星在轨运行状态

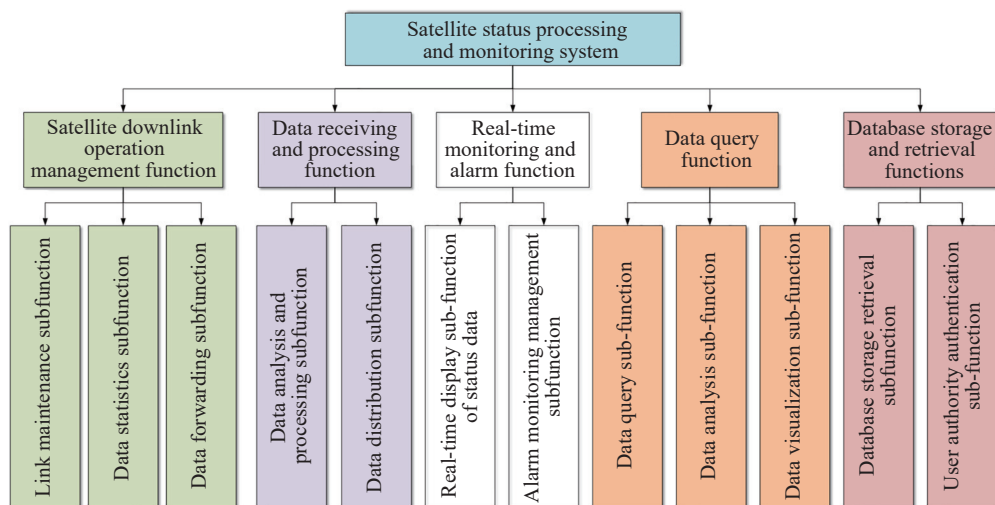


图 4 卫星状态量处理监视系统组成

Fig. 4 Composition of satellite status processing and monitoring system

的数据进行监视和状态分析, 具备包括状态量数据的实时显示、数据回放显示、异常数据检测报警等功能, 支持数值显示和曲线图显示等可视化图表展示. 包括状态量数据实时显示和报警监测管理子模块.

状态量数据实时显示子模块: 数据接收线程收到数据后, 依据帧头对包完整性进行校验; 将完整性包数据放入数据缓存队列; 数据发送线程通过 Web-Socket 协议将数据推送至前端显示. 状态量显示分为定制区和固定区, 定制区预设 9 个布局模板, 模板中导入不同通道数据以及选择表格或者曲线图显示, 将不同数据包中的相关量在同一个界面上进行监视和对比操作, 如图 5 所示.

报警监测管理子模块: 从数据库存储检索功能中获取未结束和未确认的当前异常数据清单; 接收到数据包后, 对其中的遥测量进行逐个判断, 如果有报警规则设置, 进行规则校验; 根据校验结果以及异常清单中是否存在该遥测量进行处理; 如果校验不通过且清单中不存在, 则添加至异常清单; 如果校验不通过且清单中已存在, 则报错计数增加; 如果校验通过且清单中存在, 则更新清单中的异常结束时间, 并根据异常次数判断是否需要剔除该异常信息; 整包数据判断完成后, 根据异常更新标志判断是否需要更新数据库并发送至前端显示.

通过界面化或批处理方式对报警规则和判断依据的配置, 对单个报警参数信息的新增、修改和删除. 既可独立配置单遥测参数报警规则, 又可添加多遥测参数关联判据.

5.5 数据查询

数据查询模块用于对历史数据按照约束条件进行检索, 并使用可视化的展示控件对查询到的数据进行图表化显示. 同时, 可以对所查询的遥测数据结果进行数理统计与分析, 并进行数据文件导出以及查询结果图片保存等. 包括数据查询、数据分析以及数据可视化子模块.

数据查询子模块: 在界面左侧工具栏勾选需要查询的参数, 右侧显示区选择查询条件, 并显示需要查询的参数信息列表. 在查询结果波形图下方区域, 显示对参数的具体数值分析和滤波剔除设置, 点击左右两个箭头可进行参数间的切换.

数据分析子模块: 数据清洗对不合规则的数据进行预处理操作; 数据分析支持基于算法模型的数据分

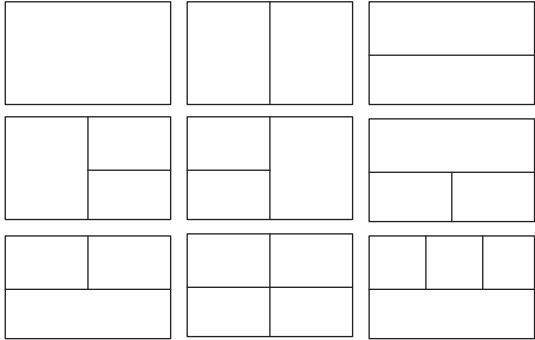


图 5 实时监视布局方式

Fig. 5 Diagram of real-time monitoring layout

析功能, 包括对数据关联性进行分析, 得到对应遥测量的基础数据统计结果, 如最大值、最小值、平均值、方差等.

数据可视化子模块: 数据可视化接口转换对可视化数据进行统一的数据接口格式转换; 可视化展示封装实现对数据的可视化展示.

5.6 数据库存储检索

数据库存储检索模块为系统提供数据支撑, 并为各业务应用系统提供数据存储服务. 包括数据库存储检索和用户权限认证子模块.

数据库存储检索子模块: 接收模块收到实时/延时遥测原始数据、数传工程参数数据等后将其放入消息队列; 数据库理模块作为消费者从中取出数据, 然后根据元数据存入对应的数据引擎中.

用户权限认证子模块: 提供数据归档以及对归档操作日志记录的服务.

6 结论

基于多通道、高速率拼帧处理的卫星状态量处理监视系统, 采用 XML 技术实现对卫星遥测数据格式约定的描述, 完成系统的通用化的设计, 形成了自有的标准和规范. 通过引入多进程技术, 满足了工程总体提出的性能要求, 所有设计模块功能均在工程中得以实现, 大大缩短了开发周期, 提升了开发效率.

(1) 通过 XML 技术, 统一化定义各通道传输帧、传输源包以及参数处理方法等标准化协议, 支持拓展到多航天器的应用.

(2) 引入多进程技术, 完成对数传双通道高速率数据的拼帧处理, 通过采用多队列独立缓存机制, 解

决高速率拼帧数据丢失问题。

(3) 采用模块化设计思想^[10], 设计了集接收、处理、分发、查询、报警等于一体的系统, 支持对系统模块的裁剪和新增。

系统在实际在轨常态化使用过程中, 也显示了一些性能和功能方面的不足, 未来可以考虑在以下方面开展进一步的研究与提升。

(1) 提高运行效率。目前对于单星的处理时延控制在 4 s 内, 后续随着遥测信道带宽的增长, 下传数据帧的长度和数量会更大, 进一步考虑到当前低轨巨型星座在轨的不断累增, 当前平台状态已无法满足在上述趋势下进行实时或快速处理数传工程参数的需求。针对该问题, 目前考虑采取的措施主要有两个方面: 使用更高效的编程语言 (例如 C, C++) 开发比较耗时的数据接收处理部分逻辑; 使用集群运行比较耗时的数据接收处理部分程序, 在遥测数据接收校验完成后, 把数据分配到多个计算节点的处理程序上进行运算。

(2) 优化存储方式。随着对遥测参数处理结果分析判读要求的增加, 面向后续低轨巨型星座, 需要存储全生命周期参数的处理结果, 存储数据量大且数据存在异构等特点, 当前基于 Influxdb 的时序数据库存储方式已无法满足后续发展要求。可以从以下方面考虑, 解决参数处理存储的问题: 尝试使用非关系型数据库, 通过试验验证, 使用非关系型数据库存储参数处理结果, 10 万条数据批处理录入时间不超过 2 s; 对遥测参数处理结果存储的数据库表进行分表处理, 分表存储降低了每个表存储的数据条目, 在确定查询表名的情况下可以提高查询速度, 同时也可提高存储速度。

参考文献

- [1] GUO Xiaohong, XU Xiaohui, ZHAO Shuqiang, et al. Satellite telemetry parameter trend forecast algorithm based on new information and applications[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, **31**(8): 1939-1943 (郭小红, 徐小辉, 赵树强, 等. 基于新息灰预测的卫星遥测参数状态预测及应用[J]. *宇航学报*, 2010, **31**(8): 1939-1943)
- [2] TAN Weichi, GU Yingqi. Space Data System[M]. Beijing: Popular Science Press, 2004: 92-163 (谭维炽, 顾莹琦. 空间数据系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004: 92-163)
- [3] ZHANG Yuan. Design of CCSDS ground data acquisition system software[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2008, **29**(3): 1-5 (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)
- [4] CCSDS. CCSDS 130.2-G-1 Space data link protocols — summary of concept and rationale[S]. Washington: CCSDS, 2007
- [5] SU Hongqi, LIU Guanshu. A high-efficiency inter-progress communication mechanism based on shared memory[J]. *The Journal of New Industrialization*, 2014, **4**(2): 67-73 (苏红旗, 刘官树. 一种基于内存共享的高效进程间通信机制[J]. *新型工业化*, 2014, **4**(2): 67-73)
- [6] YUAN Hong, LIU Hao, LIAO Wenhe. Application of windows inter-process communication in system integration[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, **31**(4): 436-441 (袁鸿, 刘浩, 廖文和. 进程间通信技术在系统集成中的应用[J]. *重庆大学学报*, 2008, **31**(4): 436-441)
- [7] PENG Tao, SUN Lianying. XML Technology and Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 92-163 (彭涛, 孙连英. XML 技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 92-163)
- [8] GAN Guohua. A Research on Software Component Composition Technology Based on XML and Software Architecture[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005 (甘国华. 基于 XML 和软件体系结构的构件组装技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005)
- [9] ZHANG Weizhou, JIANG Menghu, YANG Pinghui, et al. System design for monitoring & disposalling the satellite telemetry automatically[J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, **17**(5): 51-57 (张维洲, 蒋孟虎, 杨平会, 等. 卫星遥测信息自动监视处理系统设计[J]. *航天器工程*, 2008, **17**(5): 51-57)
- [10] ZHANG Dong, WU Xiaolin. System of telemetry data processing based on plug-in technology[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, **28**(12): 138-141 (张东, 吴晓琳. 基于插件技术实现遥测数据事后处理系统软件[J]. *舰船电子工程*, 2008, **28**(12): 138-141)

作者简介



蔡济 男, 1988 年 12 月出生于江西省南昌市, 现为中国科学院微小卫星创新研究院仿真与运控中心系统工程室主任, 副高级工程师, 主要研究方向为卫星地面遥测遥控处理研究、健康管理、大数据、任务规划与轨道预报等。

E-mail: caijj@microsat.com