

基于同步遥测信号处理的实时仿真模型设计

胡金辉^{1,2}, 沈怡懿^{1,2}, 范蕾懿^{1,2}, 余维^{1,2}, 彭妮^{1,2}

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109; 2. 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109)

摘要: 卫星遥测信号解析是卫星综合测试系统的重要组成部分; 传统的遥测信号采集方案, 基于 Windows 非实时平台, 降低了系统解析的实时性和判读的有效性; 从故障预案的模型系统应用场景为出发点, 阐述了基于实时系统模型架构的遥测信号仿真模型设计思路、原理及功能实现; 该方法继承了模型的迭代特性, 通过在每一个周期中对比流数据的读取和同步帧头的识别, 实时地获取遥测信息, 为设计故障预案, 提供充分信息, 具有较强的工程实际意义。

关键词: 实时系统; 遥测信号; 仿真模型

Design of Real-time Simulation Model Based on Synchronous Telemetry Signal Processing

Hu Jinhui^{1,2}, Shen Yiwei^{1,2}, Fan Leiwei^{1,2}, Yu Wei^{1,2}, Peng Ni^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Control Technology, Shanghai 201109, China;

2. Key Laboratory of Space Intelligent Control Technology in Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: Satellite telemetry signal resolution is an important part of satellite integrated test system. The traditional telemetry signal acquisition scheme is based on the Windows non real-time platform, which reduces the real-time resolution and the effectiveness of the interpretation. The design idea, principle and function realization of the telemetry signal simulation model based on real time system model architecture are expounded from the point of view of the application scene of the model system of the fault plan. This method inherits the iterative characteristics of the model, and obtains the telemetry information in real time by comparing the reading of the special flow data and the recognition of the synchronous frame head in each cycle. It provides sufficient information for the design of the fault plan, and has a strong practical significance.

Keywords: real time system; telemetry signal; simulation model

0 引言

卫星综合测试系统广泛应用于卫星系统的各阶段研制, 包括系统级(整星)分系统级的各项试验, 实现对各系统接口功能、系统功能以及各个性能指标的测试与评估^[1]。该测试系统主要是根据不同试验内容的需要, 控制卫星系统各种激励信号, 同时接收卫星遥测信号, 验证卫星系统中相应的状态信息和参数信息。

在卫星入轨飞行后, 卫星综合测试系统则作为地面监控的重要组成部分, 承担对卫星遥测信号的采集和解算, 实现对卫星遥测数据的分析的功能^[2]。特别是对遥测数据的异常快速检测^[3-4], 预判可能出现的在轨状态, 争取尽可能多的时间对可能故障进行规避^[3], 以此提高卫星系统运行的可靠性, 保证卫星在轨任务的顺利完成。因此, 在卫星综合测试系统中, 对遥测信号采集和解算的实时性, 有了更加严格的要求。

在传统方法中, 遥测信号采集是通过非实时系统进行独立完成, 采集过程和解算过程受到系统内其余任务调度

的干扰, 严重影响遥测信号的实时性。此外, 对于有故障预案的模型系统来说, 解算得到的遥测信号还需要接入到模型系统中才能进行有效分析, 不仅带来了额外的延时, 还有设备成本的开销。

本文采用基于实时模型遥测信号的解析方案, 在仿真模型中直接嵌入解算模型模块, 实现从遥测信息解算到模型仿真迭代的融合, 提高卫星综合测试系统运行效率。

1 实时仿真模型研究

实时系统(Real-time system, RTS), 是在指定的时间或在指定时间可容许的误差时间范围内完成系统的某项指令作出响应的系统^[5]。常用的实时系统包括 Vx-Works、RTX、QNX 和 XPC 等, 均可以按照本方案等策略进行仿真验证。

在实时系统中, 当一个事件需要被响应时, 系统将迅速响应并执行。这和非实时系统有本质的区别。实时系统任务流程如图 1 所示。

实时系统以任务为基本运行元素。当启动模型任务时, 任务会首先进行模型配置和系统硬件配置。系统硬件配置包括板卡配置、时钟配置和中断配置。

在模型中将会调用 MdlStart 函数进行模型启动。在 MdlStart 函数中执行 MdlInitialize 函数, 进行模型各个模块

收稿日期: 2018-11-04; 修回日期: 2019-03-16。

作者简介: 胡金辉(1986-), 男, 浙江舟山人, 工程师, 主要从事系统设计方向的研究。

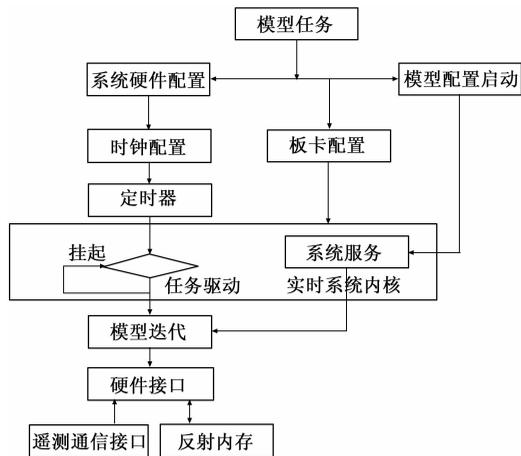


图 1 实时系统任务流程

的初始化配置。包括时钟配置、硬件接口配置。

系统时钟配置，是对模型仿真步长进行配置。例如步长配置项 Fixed-step size 为 0.001，表示仿真步长为 0.001 s。实时系统启动定时器中断，等待任务间信号量传递，驱动任务执行。当模型任务接收到相应的信号量时，首先会对模型进行迭代解算，计算当前节拍数据内容。

在硬件接口中，模型包含遥测通信接口和反射内存接口。遥测通信接口负责接收遥测数据，反射内存接口负责进行模型数据实时数据交换。

2 遥测信号特性

卫星在轨工作状态对于地面监控特别重要，在卫星遥测的数据中包含了卫星的运行状态、卫星上各个单机产品的运行状态、当前产品工作环境的压力、温度等，这些模拟量和数字量的信号都汇总在遥测数据中。

星上的遥测和地面测控站之间，采用无线通信。

GJB21.1B-2006 规定了我国遥测信号的标准，包括遥测频段、L 段和 S 段段载波频率、调制体制、遥测发射机、遥测接收机和遥测接收系统的极化。

其中，约定了 PCM 为主要的调制方式。PCM 遥测是基于 PCM 脉冲调制方式为基础的遥测方式。

但是在地面试验过程中，遥测信号不会以无线信号传输。

遥测数据一般以比特流信号方式传递^[6]。比特流数据的时序图如图 2 所示。

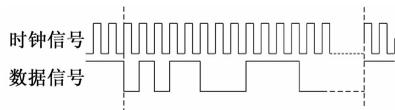


图 2 比特流数据示意图

时钟信号为方波，占空比为 50%±5%，时钟信号上升沿与数据信号跳变沿对齐，相互误差不大于时钟信号脉冲宽度的 5%，时钟信号下降沿对准码字的中间取数。

3 仿真模型设计

遥测信号的时序中，并不存在同步使能信号。需根据

遥测信号协议中的同步帧头，进行遥测信号接收和解析。仿真模型设计方案如图 3 所示。

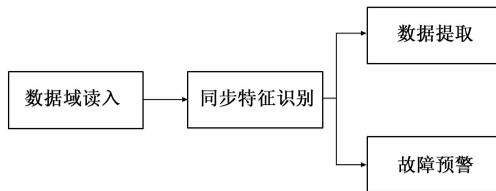


图 3 仿真模型方案

数据域读入模块是和硬件接口直接交互的模块，它将采集电信号遥测数据，接收遥测数据比特流信号，将信号以二进制源码的形式存入到仿真模型内存中，形成数据域。

遥测硬件接口将会把遥测数据存入硬件 FIFO 中。数据域读入模块将会从 FIFO 中读取数据，直到 FIFO 为空，将读取的数据组成比特流数据帧，并且输出。

同步特征识别模块将会识别遥测数据同步帧头^[7]。

在比特流数据读入后，首先确认数据长度大于同步帧头。然后将比特流移位，判断是否为同步帧头，如果是，将当前移位个数作为同步标志位输出。如果全部移位后还未有匹配合适的同步帧头，则输出故障标志位。

在同步标志位读入后，首先判断标志位是否正常，如果标志位异常，则判定是故障，直接输出故障预警；如果标志位正常，则继续判断剩余比特流长度，如果小于预设遥测帧长，继续进行数据域读入，如果大于遥测帧长，直接根据遥测帧长进行数据截取，完成数据输出。

我们选用 Matlab 作为仿真工具。Matlab 是一种面向科学计算和工程仿真的高级语言，它更加贴近数学思维的编程习惯，犹如公式编辑一般进行逻辑的语法的输入，编程上手简单，提高了编程过程中的效率。

Matlab 是一种解释性语言，它可以直观地进行执行逻辑的调试，避免了传统开发工具中对于编译、链接等过程中的繁琐，此外，它对语法的要求低，可以快速地排除语法错误。

Matlab 含有比较全面的工具库，无论是进行逻辑运算或者复杂运算，都能够调用丰富的工具库来实现，此外，用户还可以根据实际的应用，自定义工具库。

在本方案中，将会在实时系统中运行模型，需要通过 matlab 的 RTW 工具箱进行实现。

它实现将 matlab 代码转换为机器代码。而 Matlab 在设计探索方面具有多态性、基于矩阵的函数和交互式编程环境等优点。然而，在将算法从 matlab 转换为机器代码的过程中，软件设计者面临着一些重要的约束。

Matlab 是一种动态类型，C 是一种静态类型的语言。编写 matlab 程序时，不需要为变量定义数据类型和大小。虽然这种灵活性使开发算法作为概念证明变得容易，但当需要转换到 C 时，程序员必须为所有变量分配适当的数据类型和大小。这是实现的难点之一。

我们采用 M 脚本语言进行模块的设计。

打开 Simulink 的模型库, 查找 User-Defined Functions, 找到 S-Function。

S 函数在使用过程中, 需要注意 direct feedthrough 的应用, 它表示模块的输入和输出是否和有关联选项, 当 direct feedthrough 是 1 时, 输入数据将会关联到输出数据, 并有标识提示。当 direct feedthrough 是 0 时, 输入数据将不会关联到输出数据, 并无标识提示。

我们选用 S 函数的模板 sfuntmpl. m 进行模块的封装。

我们定义 yaoce_slover 为主体函数。在 yaoce_slover 启动时, 先进行 setup, 进行初始化, 设置输入参数数量 block. NumDialogPrms, 设置预设默认值 block. SetPreCompPortInfoToDefaults; 读入模块的 GUI 配置值 block. DialogPrm (X). Data, 作为模块的配置输入,

```
block. NumInputPorts = 6;
block. NumOutputPorts = 5;
```

模块的输入参数为 6 项, 输出参数为 5 项。对于每一项的输入和输出进行配置:

```
block. InputPort(x). Dimensions; 设置输入的维度;
block. InputPort(x). DatatypeID; 设置输入数据类型;
block. OutputPort(x). Dimensions; 设置输出的维度;
block. OutputPort(x). DatatypeID; 设置输出数据类型;
设置采样率 block. SampleTimes.
```

最后注册输出函数 Output 和启动函数 Start, 完成 setup; block. RegBlockMethod; 在 Output 函数中, 根据图 4、图 5、图 6 流程进行模块实现。

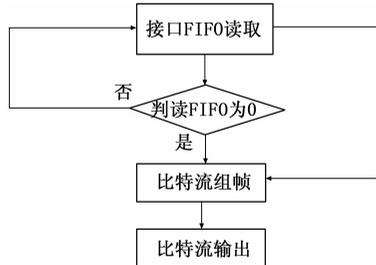


图 4 数据域读入流程

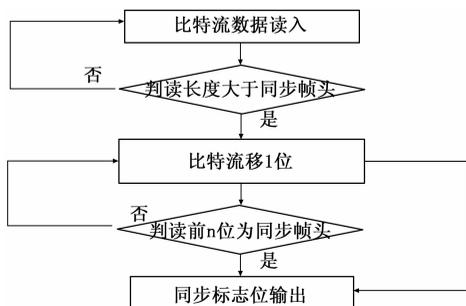


图 5 同步特征识别流程

模块的输入包括有比特流源码数据、遥测帧解算长度、遥测帧同步帧头、遥测帧同步帧头长度。输出包括遥测帧状态、遥测帧数据以及遥测帧长度。

模块封装在 S 函数中, 如图 7 所示。封装后的模块,

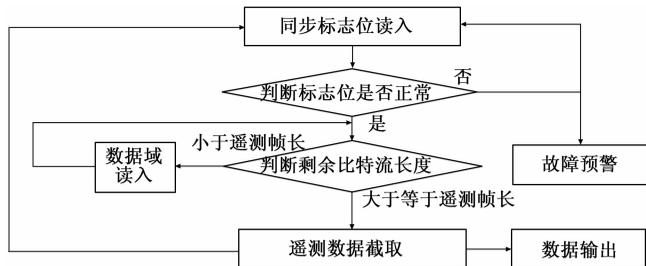


图 6 遥测数据提取流程

可以作为用户自定义库的组成部分, 为后续模型所直接调用和使用。

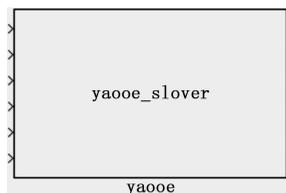


图 7 模块界面

4 测试验证

在传统的方案中, 卫星综合测试系统采用了 PXI 总线作为测试总线^[8], 分别部署有遥测采集计算机和故障预警模型计算机。遥测采集计算机中安装有 PXI I/O 板卡, 用来采集星上计算机的遥测信号。故障预警模型计算机安装有数字量通信板卡和模拟量采集板卡, 用来和地面模拟分系统进行数据交换。故障预警模型计算机和遥测采集计算机通过以太网进行数据通信, 故障预警计算机监控遥测信号, 完成对遥测信号最终分析判断。如图 8 所示。

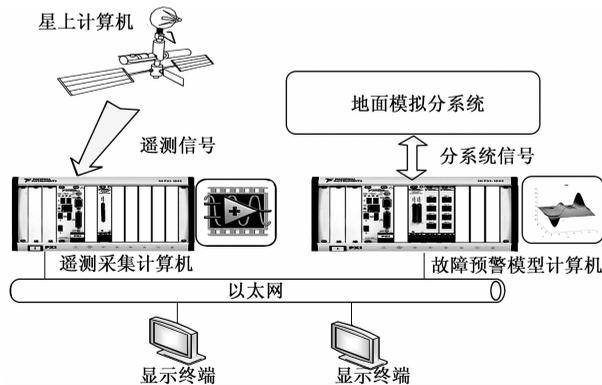


图 8 卫星综合测试系统传统解决方案

遥测采集计算机安装有 windows 系统, 采用 labview 作为开发环境, 进行遥测信号的采集、解算以及以太网传输^[9-10]。

传统方案中, 遥测采集机和故障预警模型计算机独立存在。遥测采集机的性能, 取决于 Windows 系统的运行状态。作为非实时系统, Windows 系统除了本项目中的遥测解算功能软件外, 还额外承担了网络转发的任务开销。此外, 由于遥测采集机和故障预警模型计算机无法做到实

时同步，对于故障预警的反馈无法实时更新。

本文采用了一体式设计，将遥测采集板卡和解算功能嵌入到故障预警模型计算机中，并运行实时系统和模型，以此来实现对遥测数据的实时应用如图 9 所示。

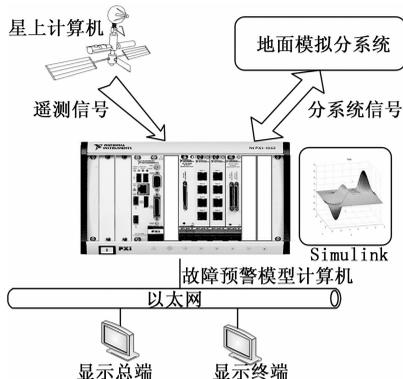


图 9 卫星综合测试系统基于实时系统模型解决方案

故障预警模型计算机采用 PXI 架构，选用 NI 公司 PXI-1042 机箱作为故障预警模型计算机机箱，它是一个标准的 8 槽 4U 机箱。零槽控制器选用 NI 8840 控制器，足够满足系统功能要求。采用定制的遥测信号接收板卡，进行遥测信号的比特流采集，采用 NI 8431 串口卡，进行串口通信，并与其它分系统进行数据交换。同时故障预警模型计算机将会通过网络传输给显示终端。

故障预警模型计算机将采用 VxWorks 实时操作系统，VxWorks 本身和其应用程序都具有极好的可移植性。VxWorks 库组件几乎都用 C 语言编写，可容易移植到不同 CPU 上实现。VxWorks 的发行版本直接对多种支持，主要包括 PowerPC、Pentium、MIPS、SH、Xscale、ARM、68K 和 ColdFire 等。VxWorks 适用于紧急任务应用，具有极高的可靠性。VxWorks 经过多年的开发和应用，各内核组件都经过实践检验，已经相当稳定和成熟，包括军事、航天等在内的各种重要行业都有其应用。

在模型中，加入仿真模型模块，如图 10 所示。

输入的第一项是比特流源码，在本模型中是定制遥测采集卡所采集的数据；

输入的第二项是需要解析的遥测帧的规定数据长度，在本模型中，由模型的其它配置或外部输入控制；

输入的第三项和第四项，是采集输出的第四项和第五项，用来对每一次的比特流进行剩余字符的循环解析。

输入的第五项，是需要解析遥测帧同步帧头，在本模型中，由模型的其它配置或外部输入控制。

输入的第六项，是需要解析遥测帧同步帧头的的数据长度，在本模型中，由模型的其它配置或外部输入控制。

输出的第一项是解析完后的数据状态，如果是 1 表示在当前比特流中完成解析，如果是 0 表示在当前比特流中没有完成解析。

输出的第二项是解析完后的数据帧。

输出的第三项是解析完后的数据帧长度。

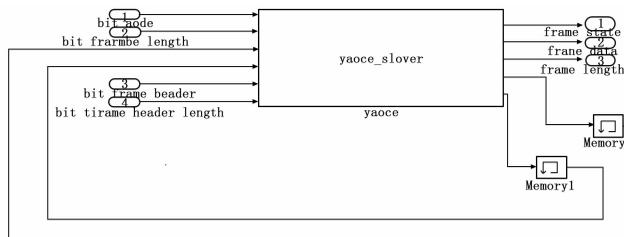


图 10 仿真模型模型及设置

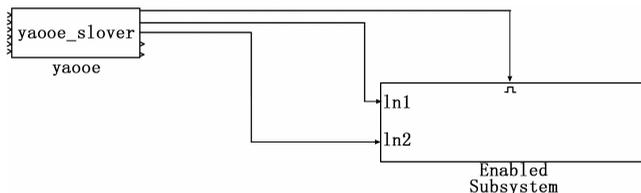


图 11 模块应用

如图 11 所示，在模块的应用中，输出的第一项解析完后的数据状态，需要作为触发模块的使能输入，当状态为高时，Enable Subsystem 将会处理解析完后的数据帧。当状态为低时，Enable Subsystem 不会处理解析完后的数据帧。

在配置项中，需要对模块最大输入长度和最大输出长度进行约束。

在仿真迭代的过程中，每一拍的遥测帧数据将会作为模块的输出，直接应用在模型中。

在测试中，以 2048 bps 的遥测信号作为标准遥测输入，256 字节长度为输出遥测帧长度，遥测帧同步头 3 字节，仿真步长 0.001 s，进行遥测性能对比。对比内容包括解算延时均值、解算延时误差、故障预警同步延时。

解算延时均值考察的是遥测信号输入和遥测帧输出的平均解算速度；它将直接影响遥测帧的反馈输出的速度，影响测试性能。

解算延时误差考察的是解算速度的平均误差；它直接体现的是突发状态下，系统解算能力的稳定性，也会直接影响系统在应急状态的反应能力。

故障预警同步延时考察的是遥测帧和故障预警模型的数据同步时间；它体现的是信号本身的传输时间，也是故