

SEDS 在星载综合电子系统中的应用设计

杨丽君¹, 陈伯翰², 张睿¹, 何熊文¹, 张亚航¹

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 北京空间技术研制试验中心, 北京 100094)

摘要: 针对目前如何实现星载软件快速集成和测试的需求, 对空间数据系统咨询委员会 CCSDS 标准 SIOS 领域中 SEDS 的概念、应用背景以及国外最先展开应用的现状进行了分析; 对星载综合电子系统的分层体系结构以及各层的功能、业务、构件、协议等进行了研究说明; 基于该体系结构, 给出了 SEDS 在星载综合电子系统研制过程中的顶层应用设计、以卫星遥测功能为例给出了 SEDS 的设计实例以及 SEDS 后续的扩展应用方法; 在软件开发阶段、调试测试阶段、单元测试、组装测试以及确认测试阶段以 SEDS 为输入进行了设计验证, 验证结果表明通过部分代码自动生成以及各阶段数据复用, SEDS 的应用有助于实现星载接口的标准化并促进星载综合电子系统乃至整个航天器研制周期的缩短。

关键词: SEDS; 星载综合电子系统; CCSDS

Application of SEDS in Service and Protocol System

Yang Lijun¹, Chen Bohan², Zhang Rui¹, He Xiongwen¹, Zhang Yahang¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. Institute of Manned Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to realize the rapid integration and testing of spacecraft, the concept and the application background and foreign early application status of SEDS, which is in SIOS of consultative committee for space data systems (CCSDS) are analyzed. The layered architecture and the functions, service, components and protocols of the integrated electronic system are studied. Based on this architecture, the top-level application design, design example of telemetry acquisition and application extension of SEDS in the development of the service and protocol system are presented. This design was verified in software development, debugging, unit testing, integrated testing, confirmation testing and the results show that the application of SEDS will give a support to standardize the satellite onboard interface and shorten the cycle of the Service and Protocol System and even the entire spacecraft by auto-generated code and data reuse in different stages.

Keywords: SEDS; service and protocol system; CCSDS

0 引言

空间数据系统咨询委员会 (consultative committee for space data systems, CCSDS) 成立于 1982 年, 是空间数据系统领域最权威的组织, 目前有 11 个成员组织以及 30 个观察员组织, 主要负责制定空间数据系统的国际标准, 含星载接口、空间链路、空间互联网、任务操作和信息管理、交互支持、系统工程等 6 个领域。截止目前, 全球超过 800 个航天器上实现和应用了 CCSDS 系列标准。

CCSDS 航天器星载接口业务领域 (spacecraft onboard interface services, SOIS) 目前的工作重点是 SEDS (SOIS Electronic Data Sheet) 相关研究。针对目前实现星载软件快速集成和测试的需求, SEDS 可以实现对设备信息以及业务接口信息的描述, 并通过工具自动生成星载软件、测试用例以及相关文档, 从而减少星载软件集成、测试、维护

时间, 并保各个研制阶段数据的一致性。该标准的实现应用有利于缩短星载综合电子系统的研制周期、降低研制风险与成本。本文对 SEDS 标准及国外研究应用现状进行分析, 对星载综合电子系统进行研究说明, 基于该系统对 SEDS 的应用进行设计验证。

1 SEDS 概述

在 SOIS 体系结构中, EDS (electronic data sheet) 主要的用途是对设备信息以及业务接口信息进行描述, 简称 SEDS。它包含以下内容: SOIS 各协议层之间数据双向交换的接口; 组成上述接口的指令和参数; 实现两组接口间映射的构件服务; 组成构件的状态机、变量、行为; 作为以上参考的类型、变量、编码和术语。

在 SEDS 的使用上, 除了对设备进行描述外, 还可用 SEDS 描述业务的接口、业务间的连接关系、业务的配置参数、系统的配置参数, 将体系架构中原本概念性的通信管理转化为通过 SEDS 描述各层业务配置以及连接关系的实体。描述设备的参数以及软件业务的配置参数和业务之间的接口关系。此外, SEDS 还有许多其它的用途。例如地面操作人员可以将设备的 SEDS 采用工具进行转换, 可自动生成任务的数据库, 便于生成对设备的控制指令以及

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-05-25。

作者简介: 杨丽君(1987-), 女, 工程师, 主要从事星载数管/综合电子系统协议设计、软件开发、CCSDS 标准研究等方向的研究。

陈伯翰(1985-), 男, 工程师, 主要从事空间站研制抓总工作方向的研究。

解析设备下行的遥测。在空间站等应用,若航天员将一台新的设备接入空间站的系统网络,当设备将自身的 SEDS 存储于设备内部,通过即插即用的机制,空间站内可以自动识别该设备并将该设备的数据以及 SEDS 信息发布,航天员通过笔记本可以订阅该设备的数据以及 SEDS,通过 SEDS 的解析工具对设备的数据进行解析,即可在界面进行数据查看。

通过 SEDS 产生星载软件代码、测试用例、接口控制文档、遥控指令、遥测解析文件等,可以减少文档的不确定性和不一致性,避免在需求变更时修改大量的文件。目前地面测试使用的电子数据表单采用 CCSDS 的 XTCE 标准进行描述,当前主要偏重于遥控和遥测格式,后续通过扩展对于星载业务接口的描述采用 SEDS 标准后,SEDS 和 XTCE 可以通过工具进行转换,综合 SEDS 和 XTCE 各自的优势实现对整个航天器接口软件及文档的电子表单化。

2 国外研究现状

目前,在国际领域最先展开 SEDS 应用的是 NASA 和 ESA。NASA 的戈达德飞行中心在其 cFE 核心飞行软件架构中实现了 SEDS 应用;ESA 目前也正在采用 JAVA 开发工具用于支持 SEDS 的生成和解析。

2.1 NASA 现状

NASA 核心软件系统 cFE 已用于多个型号,基于软件总线进行各软件组件之间的消息通信,并开发了配套的组件配置工具,其源码公开,不仅用于航天器,也用于无人机等系统。NASA 已计划将该软件架构参考 SOIS 体系架构定义的接口,进行进一步完善,使之能适应 SOIS 体系架构。在 NASA 的 cFE 核心飞行软件架构中,采用了 SEDS 的技术自动生成软件配置信息,方便软件的按需配置和组装。SEDS 可以定义设备的接口也可以定义所有软件构件的接口。通过工具扫描代码头文件辅助生成 SEDS,对 SEDS 进行修改后可再生成新的代码,同时可通过 SEDS 生成测试用的遥控指令并解析遥测数据。NASA 已经开发出一款工具,该工具将软件构件 SEDS 和任务配置文件作为输入然后生成 C 语言的头文件。头文件包含消息定义和工程单元转换。目前,该工具集成在 cFS(核心飞行系统)创建系统中,被多个 NASA 中心使用。

2.2 ESA 现状

来自欧洲 SCISYS 公司已经研究 EDS 多年,并正在开发工具支持 SEDS 的生成和解析。该工具采用 JAVA 开发,可以根据 SEDS 自动生成星载软件代码。SEDS 的生成及使用过程为:在开发初期,通过设备的参数生成 SEDS 文件,通过工具 SEDS 文件可生成参数、验证相关的文档,此时生成的 SEDS 文件通过工具可以生成星载部分构件,比如设备驱动,还可以生成用于仿真的输入。之后在项目开发过程中,当新增设备或设备参数改变时可直接更新 SEDS;系统的模型或者数据也可生成 SEDS,当系统数据或者设备数据

变化时它们之间互相影响都可以通过 EDS 对数据进行修改,修改后的 SEDS 文件通过工具对文档自动生成,进行更新。在综合测试时,EDS 直接可作为其输入而省去了文档,因为 SEDS 中直接包含了其所有的文档数据。

3 SEDS 应用设计

3.1 星载综合电子体系结构

星载综合电子体系结构是基于 SOIS 开发的一种分层的体系结构,每一层包含了多种业务及协议。在该体系结构中,一方面将 SOIS 标准的业务和协议映射为可重用的软件构件,另一方面将软件构件统一划分为中间件层,与操作系统层、应用层一起共同组成整个综合电子系统软件。该结构中核心部分为中间件层,该层软件构件包含了 CCSDS、ECSS 的多种标准协议,并通过标准化的接口对应用层提供服务,如图 1 所示。

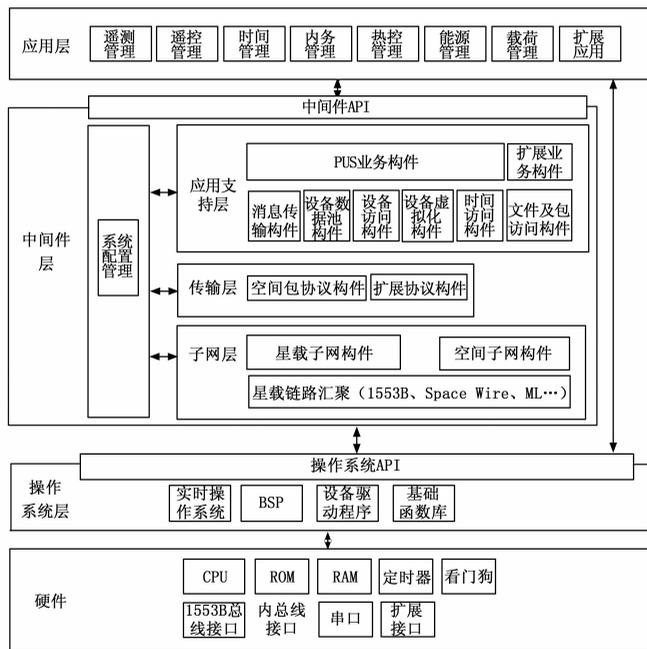


图 1 综合电子体系结构

3.1.1 应用层

应用层包含遥控、遥测、时间管理、内务管理、热控管理、能源管理、载荷管理以及其他一些扩展应用等顶层功能,可使用底层提供的业务,通过对这些业务进行实例化来生成不同的应用进程。

3.1.2 应用支持层

应用支持层包括 SOIS 定义的命令与数据获取业务(包含设备访问业务、数据池业务、设备虚拟化业务),应用程序访问星上设备;文件及包存储业务用于航天器内以及航天器间的计算机文件系统中传输文件;时间访问业务用于获取航天器时间;消息传输业务用于星上两个应用程序之间的消息传递;PUS 定义的标准业务基本覆盖目前航天器综合电子系统的通用功能。

3.1.3 传输层

传输/网络层一般只在有多个子网且子网间的应用程序需要相互通信时才使用，它提供应用程序间端对端的数据传输业务。此处使用空间包协议进行选路，并对空间包协议进行了扩展，在其副带头增加了源/目的地址信息，可扩展支持 UDP/IP 等协议。

3.1.4 子网层

子网层包含空间链路和星载链路，提供一系列业务供上层的应用程序支持层和传输层业务调用，空间链路主要由上行 TC 协议和 COP-1 协议、下行 AOS 协议提供。星载链路包括包业务、存储器访问业务、同步业务。除了上述标准业务外，还提供一个统一通用的总线接口业务，于每一种链路，可通过相应的汇聚协议以及数据链路层协议，使之能支持子网的标准业务，从而对上层屏蔽底层链路的差异。目前支持的链路包括 1553B 总线、SpaceWire 总线、串口、ML 接口、DS 接口等。

3.1.5 操作系统及硬件

硬件层是软件运行的基础，包含星载计算机各种硬件，主要有 CPU、RAM、ROM、EEPROM 看门狗、定时器、遥测接口、遥控接口、串口、总线接口、其它接口等。

操作系统层将操作系统的各接口进行封装，提供统一应用程序编程接口。任何操作系统只要支持该结构中统一的访问接口，即可在星载综合电子系统中进行应用，因此，可支持操作系统的更新。其组成包括实时操作系统、设备驱动程序、板级支持包 (BSP)、基础函数库等。

3.2 SEDS 顶层应用设计

SEDS 的应用可以贯穿综合电子系统开发的各个生命周期，如图 2 所示。在软件设计和开发阶段，设备 SEDS 通过设计人员编写生成；业务接口 SEDS 分为两类，一类是已经具有的软件构件或者模型，可通过工具直接生成 SEDS，另一个类是新的软件构件可通过编写生成，生成后可作为构件模型的输入。在软件测试阶段，以上生成的这些 SEDS 可以通过工具读取作为仿真测试的输入，保证正确性的同时减少了测试各种配置工作；在后期整器测试阶段以及航天器飞行地面控制阶段，这些电子表单还可以通过地面系统工具生成数据库等，该数据库也可用于开发方测试、三方测试以及在轨测试等。总之，电子表单一旦形成，它的应用贯穿于项目开发和运行的各个阶段。

3.3 SEDS 应用实例

图 3 是以星载软件中遥测采集功能为例，由左向右，依次对应星载综合电子系统的硬件、子网层、传输层、应用支持层、应用层。左边 D1、D2、D3 是不同的设备，其中 D1、D2 分别通过 RS422、CSB 总线与 RTU1（远置单元）连接，RTU1 通过 1553B 与星载综合电子系统中中央管理单元 (SUM) 连接；D2 则直接通过 1553B 与 SUM 相连接。采集这些设备的遥测数据，首先通过 1553B 和串口汇

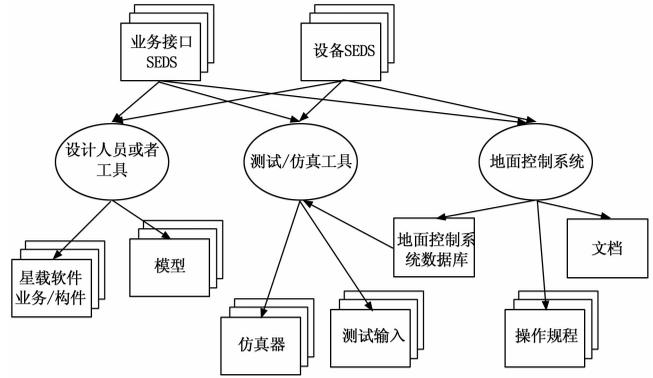


图 2 SEDS 应用顶层设计

聚协议完成遥测采集和组织，形成空间包，通过空间包协议将包发送至应用支持层，消息传输业务的消息发送原语将遥测发送至应用层的遥测处理模块，遥测数据经过处理后，通过空间链路下传至地面。

在此过程中，SEDS 开始于设备，SEDS 描述设备信息时，由于不同的设备支持不同的数据，所以设备描述的 SEDS 包括设备的访问接口、设备的功能接口、设备的访问协议、设备虚拟控制步骤、子网层的使用信息等，例如 SEDS1、SEDS2、SEDS3。随着综合电子系统结构分层，越靠上层，设备 SEDS 聚合度越高，数量也越少，例如 SEDS5 它汇聚了 SEDS1 和 SEDS2 的相关信息后，又加入了 1553B 汇聚的访问接口。而 SEDS 描述业务接口，主要描述业务之间的双向数据交换的接口，包含业务/构件的参数（可以是输入或者输出）、命令、业务的原语、三者的映射关系以及表示业务之间关系的状态机。

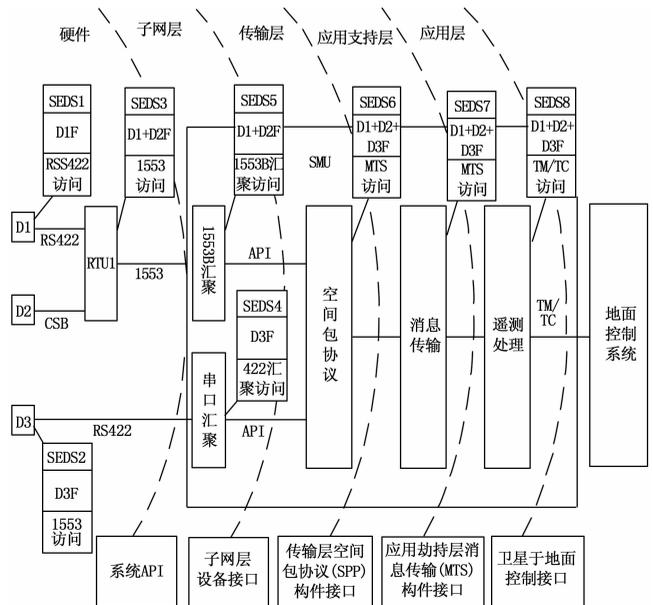


图 3 SEDS 描述设备、业务接口

3.4 SEDS 应用扩展

目前地面综合测试系统、发射基地数据系统以及飞控中

心数据系统使用的电子数据表单采用 CCSDS 的 XTCE 标准进行描述, 主要偏重于遥控和遥测格式, 其应用主要于地面进行数据上注和解析。星载业务接口/设备的描述采用 SEDS 标准, 后续可以通过工具进行 SEDS 和 XTCE 转换, 如图 4 所示。星载业务接口/设备 SEDS 和任务配置文件为输入, 生成 XTCE 标准的数据库, 提供不同的任务系统使用该转换有利于星上数据与地面数据的衔接, 即 SEDS 不仅可以用于星上软件开发的各个生命周期, 可以用于地面系统。

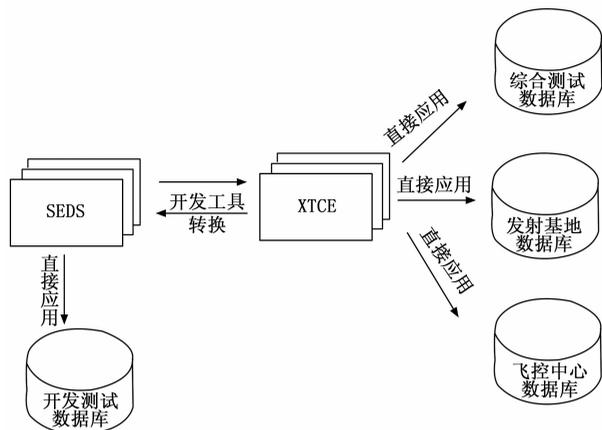


图 4 SEDS 与 XTCE 的转换

4 设计验证

基于星载综合电子系统 SMU 的 43 个软件构件, 其功能涵盖 CCSDS 空间链路协议、SOIS 的 9 种标准业务及协议、空间互联网领域协议、1553B 协议、ECSS 的 PUS 协议中 12 种业务、汇聚协议、驱动, 开发了 43 份业务接口的 SEDS, 针对与 SMU 有接口的设备开发了 15 份设备 SEDS, 在软件开发阶段、调试测试阶段、单元测试、组装测试以及确认测试等阶段, 均以 SEDS 作为测试的输入。经统计, 在现阶段星载综合电子系统的开发测试阶段, 时间节省约 35%, 集成代码自动生成部分占 62%, 与此同时, 未出现由于文件问题引起的接口状态不一致等问题。通过 SEDS 开发、测试在快速集成、可重用性、可靠性方面有着突出作用, 主要体现在:

1) 快速集成测试。由于 SEDS 描述了业务的配置参数、接口、以及业务间的连接关系, 根据需求选取相关的软件构件之后, 通过 SEDS 描述这些构件之间调用关系, 通过工具便可生成互相调用的代码, 可实现星载综合电子系统内部的快速集成。在开发测试阶段和整星测试阶段, 通过设备的 SEDS, 实现即插即用, 大量的减少了测试期间的配置工作, 缩短测试周期。

2) 可重用性。目前开发的软件构件均以入库, 与之接口相对的 SEDS 也已入库, 对于同一构件应用于不同领域, 由于其参数、接口、调用关系固定, 所以业务接口的 SEDS 可重用。对于同一设备, 当其通信协议固定的同时, 设备

的 SEDS 在航天器整个研制周期可以重用, 以上重用度越高, 开发效率也越高。

3) 可靠性。通过 SEDS 产生星载软件代码、测试用例、接口控制文档、遥控指令、遥测解析文件等, 可以减少文档的不确定性和不一致性; SEDS 采用工具进行转换后, 自动生成任务的数据库, 保证了软件开发、集成、测试的各个阶段数据的一致性, 提高了各个阶段数据的可靠性。

5 总结

通过 SEDS 对设备信息以及业务接口信息进行描述, 自动生成星载软件, 可实现星载综合电子系统快速集成与测试。通过 SEDS 可以自动生成星载软件代码、测试用例、接口控制文档、遥控指令、遥测解析软件等, 可减少文档的不确定性和不一致性, 避免在需求变更时修改大量的文件。与此同时通过扩展 SEDS 与地面 XTCE 的自动转换还可实现软件开发者、综合测试、飞控中心、设备生产者之间灵活可靠的数据交互。SEDS 实现快速集成与测试的同时, 它的可重用性和可靠性有助于提高开发效率, 从而实现整个航天器研制周期的缩短。

参考文献:

- [1] CCSDS 876. 1-R-1 Spacecraft Onboard Interface Service—Specification for Dictionary of Terms for Electronic Data Sheets for Onboard Components CCSDS [S]. 2016.
- [2] CCSDS 876. 0-R-1 Spacecraft Onboard Interface Services—XML Specification for Electronic Data Sheets for Onboard Devices CCSDS [S]. 2016.
- [3] CCSDS. 232. 0-B-3 TC Space Data Link Protocol [S]. Washington: CCSDS, 2015.
- [4] CCSDS. 732. 0-B-3 AOS Space Data Link Protocol [S]. Washington: CCSDS, 2015.
- [5] CCSDS TBD. 0-G-0 Electronic Data Sheets and Common Dictionary of Terms for Onboard Devices and Components [S].
- [6] CCSDS. 871. 2-M-1 Spacecraft Onboard Interface Services—Device Virtualization Service [S]. Washington: CCSDS, 2014.
- [7] CCSDS. 850. 0-G-2 Spacecraft Onboard Interface Service [S]. Washington: CCSDS, 2013.
- [8] CCSDS. 875. 0-M-1 Spacecraft onboard interface services—message transfer service [S]. Washington: CCSDS, 2012.
- [9] CCSDS. 871. 1-M-1 Spacecraft Onboard Interface Services—Device Data Pooling Service [S]. Washington: CCSDS, 2012.
- [10] CCSDS. 872. 0-M-1 Spacecraft Onboard Interface Services—Time Access Service [S]. Washington: CCSDS, 2012.
- [11] 阴艳龙, 即插即用卫星中电子数据表单的设计研究 [J]. 现代电子技术, 2013 (6): 38-41.
- [12] 赵亚雄, 基于 XML 的卫星即插即用接口模块设计 [J]. 装备学院学报, 2012, 23 (2): 68-71.
- [13] 何熊文, 星载标准接口业务 (SOIS) 在航天器中的应用方法 [A]. 全国空间数据系统学术交流会 [C]. 2015.