

XFDU 标准在遥测数据定义上的应用研究与设计

谭 杰 吕良庆 王彧泽

(中国科学院国家空间科学中心 复杂航天系统电子信息技术重点实验室 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 固定的星载数据格式设计会造成数据冗余, 占用遥测数据下行带宽, 导致不关注、不需要的数据被传输等问题. 参照 OAIS 模型中 XFDU 的设计思路, 提出了采用 CCSDS XFDU 标准进行数据格式的包装方法, 采用 PUS 标准的参数定义方法给出了星载数据定义的方法模型, 设计了相应的元数据 schema, 元数据编码表以及进一步的 XFDU 格式文件. 相应设计了 XFDU 转换器, 支持对描述数据格式的星载二进制数据串到 XML 文件的转换, 基于元数据 schema 生成元数据文本, 并进行了相应的测试验证. 通用的 XFDU 转换器可以提供给不同的系统, 供其识别和解析收到的数据格式, 从而支持异构系统之间异构信息的解读. 采用 XFDU 可以将卫星遥测场景下的数据定义模型与 OAIS 模型进行衔接, 有利于星地的标准化数据流转、处理和保存, 从而进行星载数据的灵活定义, 成为定义卫星的一个手段.

关键词 XML 格式化数据单元 (XFDU), 包应用标准 (PUS), 数据定义, 开放档案信息系统 (OAIS)

中图分类号 TP391, V7

Application Research and Design of XFDU on Definition of Telemetry Data

TAN Jie LYU Liangqing WANG Yuze

(Key Laboratory of Electronic and Information Technology for Space Systems, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Design of fixed data format on spacecraft can cause problems such as data redundancy, unnecessary data occupying downlink bandwidth, and transferring undesired or useless data. In order to solve these problems, a data format encapsulation method which adopting CCSDS XFDU standard referencing to XFDU design method in OAIS model, and a data definition model based on parameter definition method in PUS are proposed. Corresponding designs including metadata XML schema of data definition model, metadata code table and XFDU format file are given. Then a XFDU converter was designed and tested, to support transforming binary data strings which describe data format into XML file, to generate metadata text according to metadata XML schema. A universal XFDU converter can be used in different systems to recognize and explain data format, to support heterogeneous information un-

2023-02-12 收到原稿, 2023-05-19 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

derstanding among heterogeneous systems. Using XFDU can make the telemetry data definition model connecting to OAIS model, and will be in favor of data transferring, processing and preservation. This flexible data definition method will be a way of satellite definition.

Key words XML Formatted Data Unit (XFDU), Packet Utilization Standard (PUS), Data definition, Open Archive Information System (OAIS)

0 引言

卫星数据组织方式通常是使用固定的数据格式定义,对单一任务而言具有简单易理解的优势,但也存在着很多局限性。例如当星上数据下传时,固定格式中的很多数据信息不一定是当时需要的,即无用信息占用传输带宽,降低了数据传输效率,难以适应卫星在轨动态运行对信息传输的需求变化。并且当跨任务需要设计或修改格式时,配套的数据基础设施和处理软件也需要随之进行更改。

针对这一问题主要有两种解决方法。一是统一数据格式,在此基础上允许动态分配、调整数据内容和传输带宽分配。基于脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM) 体制的遥测数据主辅帧组织方式即采用了这一思路。二是实现数据及其格式的动态定义,允许根据需要组织数据格式和内容。空间数据系统咨询委员会 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS) 的空间包协议^[1]封装方式允许数据格式和内容按照应用过程的需要进行组织。CCSDS 的高级在轨系统 (Advanced Orbit System, AOS) 标准^[2]允许以不同的虚拟信道共用同一个物理信道,实现对传输信道带宽的充分利用。

空间包协议允许对包数据域进行填充,且在传输时仍然会有暂时不需要的数据被传输的情况。AOS 协议允许传输信道上传输空闲帧的设计,起到填充、占位和同步作用。如何传输有针对性的数据,消除“信息冗余”和“填充”数据,提高数据的传输效率和应用价值,是一个值得研究的问题。

1 解决思路

欧洲空间局 (European Space Agency, ESA) 的包应用标准 (Packet Utilization Standard, PUS)^[3]给出了如何定义数据类型、参数和数据格式的方法。在此基础上,可以实现地面定义一个新的数据格式,通过数据注入的方式通知星上,星上按照新格式组织后

续的数据下传。反之,如果星上某种智能能力定义了一个地面事先不知道的数据格式,就需要通过某种标准方式将这一格式通知地面,以便地面系统按照新格式解析后续收到的数据。这种标准方式应该能够支持数据格式的描述,同时能够在地面系统之间通用。

CCSDS 的基于可扩展标记语言 (eXtensible Markup Language, XML) 的格式化数据单元 (XML Formatted Data Unit, XFDU) 标准^[4]用于封装数据、元数据、软件到一个包 (一个文件或消息) 中,以便信息的传送和保存。其一方面是一种标准化的数据格式,可以在不同地面系统之间传递,另一方面在地面数据的处理和保存过程中,可以提供标准化的描述和检索作用。

在星地之间运用 XFDU 标准,可以将航天器和地面系统看作两个异构系统,且地面系统的终端是开放档案信息系统 (Open Archive Information System, OAIS),其应用场景如图 1 所示。图 1 描述了星上发送端到地面接收端的数据处理过程,忽略了数据传输过程中不同层次的通信协议栈的数据包装、传输和解析步骤以及通信细节。

为实现遥测数据灵活定义的效果,在星上端需要配置数据格式定义业务 (Data format definition),主要功能是采用 PUS 标准规定的数据结构定义方法,定义任意需要的数据结构。

当星上端定义了一个新的数据结构后,将其传递给地面端,作为 XFDU 转换器 (XFDU converter) 的输入,进行 XFDU 标准格式的转换。转换过程需要依据元数据编码表 (Metadata coding table),对二进制数据格式 (Binary format) 进行遍历搜索,最终生成 XFDU 格式文件 (XFDU format file)。星上端的工程遥测数据组织 (Telemetry organization) 也按照新的数据结构进行后续数据组织和下传。地面端按照 XML 遥测遥控数据交换 (XML Telemetric and Command Exchange, XTCE) 标准^[5],根据转换的 XFDU 数据格式,由 XTCE 转换器 (XTCE convert-

er) 解析后续的工程遥测数据, 保存到 OAIS 中.

通过上述端到端的数据格式定义到转换、解析的过程, 可以支持数据格式的灵活定义和按需解析识别, 从而有可能改善星地传输信息的冗余填充问题, 并适应星载信息的未知、突变等情况, 在需要的时候及时获得所关注的信息.

2 原理与方法

2.1 XFDU 背景、环境与结构

2.1.1 XFDU 背景

为了解决日益增长的数据长期保存的问题, 便于国际交流合作, CCSDS 从上世纪 80 年代末到 90 年代, 提出了一系列关于标准格式数据单元 (Standard Formatted Data Unit, SFDU) 的建议书, 包括了 SF-DU 的结构和构建规则、权威控制规程、使用参考环境等方面^[6-9]. 在 2002 年 CCSDS 推出了 OAIS 参考模型标准建议书^[10,11], 并于 2003 年成为 ISO 标准^[12].

2008 年随着 XML 语言的广泛应用, CCSDS 在 SF-DU 基础上发展出 XFDU 标准^[4], 给出了 XFDU schema 的数据定义规范.

XFDU 的应用主要体现在打包技术和数字文档的长期保存方面, 适用于 OAIS 模型 (见图 2^[10-12]).

图 2 中 XFDU 根据 OAIS 模型, 对在其系统中流转的数据对象进行建模和描述, 给出了相应的 XF-DU schema. 例如 2009 年 IBM 研究室报告了在 CASPAR 项目中使用 XFDU 技术实现基于 OAIS 的信息打包^[13]. 法国航天局 (CNES) 研究了采用 XF-DU 对 OAIS 的提交信息包 (Submission Information Package, SIP)、档案信息包 (Archival Information Package, AIP)、分发信息包 (Dissemination Information Package, DIP) 进行封装的方法^[14].

2.1.2 使用环境

XFDU 标准定义了将数据和元数据整体打包的方法, 主要用于 OAIS 中的信息传输和归档存储. XFDU 是一种自描述数据文件, 通过 XFDU 清单文

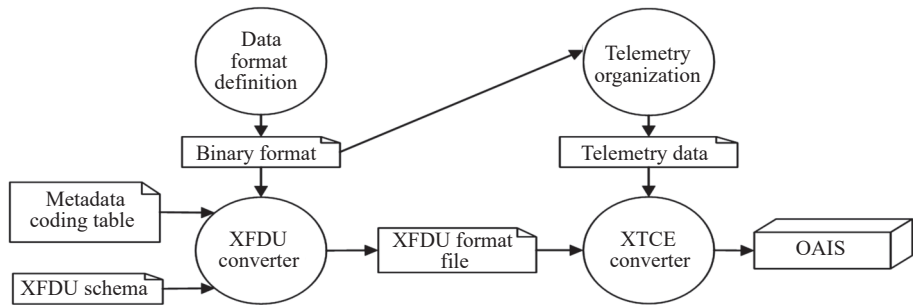


图 1 XFDU 标准用于遥测数据的应用场景分析

Fig. 1 Telemetry application scenario analysis of XFDU standard

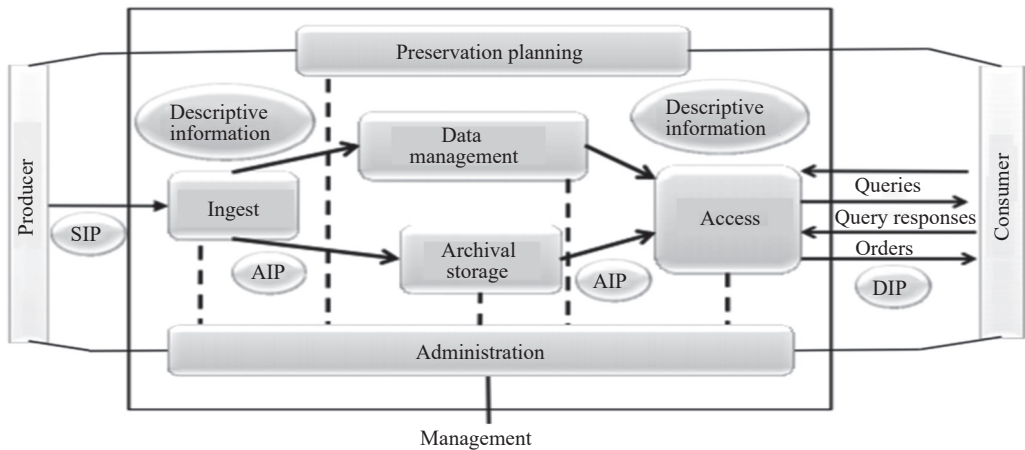


图 2 OAIS 功能实体

Fig. 2 OAIS functional entities

件 (Manifest Document) 的形式建立统一资源标识 (Uniform Resource Identifier, URI), 索引保存在不同位置的数据对象文件. 图 3^[4] 描述了在常规计算环境下一个抽象的 XFDU 包.

图 3 描述的 XFDU 文件使用环境包括清单文件、包交换文件和 XFDU 三个层次实体. 清单文件通过 URI 描述建立多个被包含文件之间的关系和位置索引, 从而可以访问内外部文件和注册表, 以及引用其他的包交换文件. 在同一个清单文件中也可以直接包含数据文件和元数据文件. 包交换文件可以是多个不同文件的绑定集合, 例如经常使用的.rar 和.zip 等压缩文件.

清单文件引用的外部文件可以来自许多不同的源, 例如其他的 XFDU 文件、文件系统, 注册文件或存储文件等. 在一个充分连接、可靠的、支持足够带宽的环境下, XFDU 相关的系统 (例如 OAIS) 可以通过不同的 URI 直接处理内外部索引的数据文件. 因

此 XFDU 的范围不仅包含包交换文件和清单文件, 还包括所有能够通过清单文件索引到的外部文件.

2.1.3 逻辑结构

图 4^[4] 描述了 XFDU 清单文件的组成. 图 4 中 XFDU 清单文件包含 5 个部分, 即包头部分、信息包映射部分、数据对象部分、元数据部分和行为部分.

(1) 包头用于描述整个 XFDU 包的环境信息、转换信息等.

(2) 信息包映射包含内容单元 (Content Unit) 以及指向数据对象部分的内外指针, 为数据对象和元数据对象提供相应的访问路径. 其结构表示为一系列内容单元嵌套层次视图.

(3) 数据对象部分是数字对象及其转换对象的字节流, 转换对象可以是算法或者参数. 数据对象元素为访问数据文件提供了 URI 访问路径.

(4) 元数据对象部分通过 xml id 的形式与相关数据对象建立关联. 元数据对象记录了 XFDU 包中全

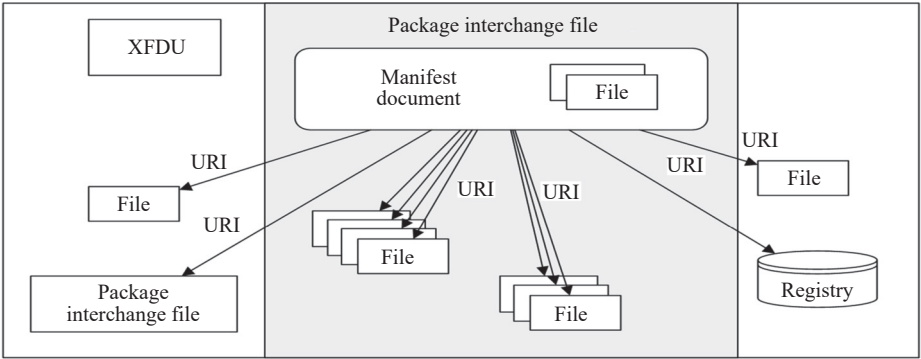


图 3 XFDU 环境概念

Fig. 3 Environment conceptual view of an XFDU

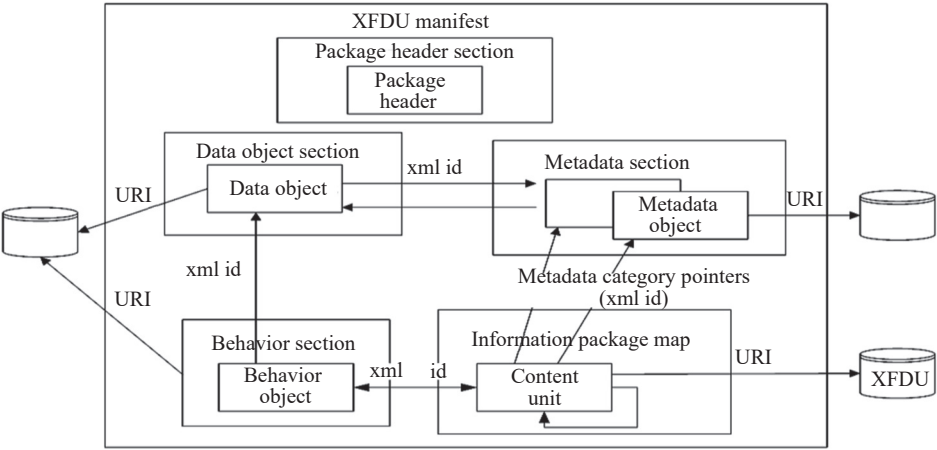


图 4 XFDU 清单逻辑

Fig. 4 XFDU manifest logical view

部实体的静态元数据, 根据被描述对象的系统模型 (例如 OAIS) 构建元数据模型.

(5) 行为对象部分包含了处理相关数据对象的行为对象索引. 行为对象可以是可执行动作的序列集合或软件程序.

XML schema 是对 XML 文档结构的定义和描述, 主要用于约束并验证 XML 文件的有效性^[15]. 同理, XFDU schema 为 XFDU 文件建立了基本的构成框架, 包含以上 5 个部分的元素及其属性.

2.2 PUS 的数据定义

与 XFDU 描述 OAIS 模型中的数据信息同理, 如果要描述星载定义的数据格式, 需要先建立数据定义方法的模型, 再采用 XFDU 进行描述.

PUS 中的参数定义方法通过包域类型码 (Packet field Type Code, PTC) 和包域格式码 (Packet field Format Code, PFC) 的组合来定义所需数据类型、数据参数和数据格式. 其中 PTC 规定了布尔型、枚举型、整型、实型等 12 种数据类型的编码. PFC 在 PTC 之下规定了各数据类型的具体格式编码规则, 在很大程度上能够满足参数定义的需要, 为支持数据的灵活定义奠定了基础.

与此同时, 在 PTC 和 PFC 组合方法基础上, PUS 的工程参数标准业务进一步规定了定义参数、简单数据格式和复杂数据格式的方法, 可以组织任意需要的数据格式. 定义参数主要是为了分配必要的空间, 以保存参数的值, 其定义方式取决于参数的类型. 简单数据格式指的是参数在数据结构中仅出现一次的情况, 而复杂数据格式则允许某些参数在数据结构中重复出现多次, 即复杂数据格式可以包含简单数据格式和参数.

3 XFDU 元数据设计

XFDU 标准基于 OAIS 模型建立其清单文件. 为便于灵活定义航天器遥测数据及其格式, 适应卫星在轨运行动态变化导致的信息传输需求变化, XFDU 标准可以起到对数据格式进行规范定义的外层封装作用, 允许在异构系统 (这里主要关注星地) 之间规范传递的数据格式定义内容. 在这种非 OAIS 的应用中, 有必要根据图 1 的应用场景进行特定的 XFDU schema 的设计, 同时借鉴已有的 XFDU 标准, 与地面的数据处理过程和系统进行衔接.

按照 PUS 的 PTC+PFC 方法和工程参数定义方法, 参数、简单数据格式和复杂数据格式可以按照表 1~3 的形式进行定义.

表 1 中每个参数通过参数 id 进行区别, 主要包含 PTC 和 PFC, 也可以进一步包含与参数有关的属性, 例如参数采集周期. 多个不重复的参数组合构成一个简单数据格式, 因此简单数据格式可由一系列参数 id 排列来描述 (见表 2).

表 2 中参数个数 m 规定了一个简单数据格式中包含的参数个数. 表中参数 id 的排列顺序构成其结构的描述. 复杂数据格式的表现形式与简单数据格式类似 (见表 3).

表 3 中包含的均为简单数据格式. 复杂数据格式允许包含简单数据格式和单个参数, 单个参数可通过定义为简单数据格式而包含在复杂数据格式中. 在遥测数据的组织中, 工程参数报告的组织形式主要是复杂数据格式, 因此表 3 中一项复杂数据格式对应了一个工程参数报告 id.

针对表 1~3, 相应的 XML schema 可以设计为:

表 1 参数定义
Table 1 Parameter definition

参数id	参数类型代码PTC	参数格式代码PFC	参数采集周期	
------	-----------	-----------	--------	-------

表 2 简单数据格式
Table 2 Simple data format

简单数据格式id	参数个数 m	参数1 id	参数2 id		参数 m id
----------	----------	--------	--------	-------	-----------

表 3 复杂数据格式
Table 3 Complex data format

工程参数报告id	简单数据格式个数 n	简单数据格式1 id	简单数据格式2 id	...	简单数据格式 n id
----------	--------------	------------	------------	-----	---------------

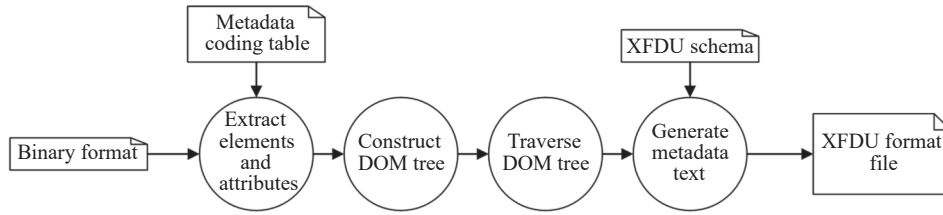


图5 XFDU转换器处理流程

Fig. 5 XFDU converter process progress

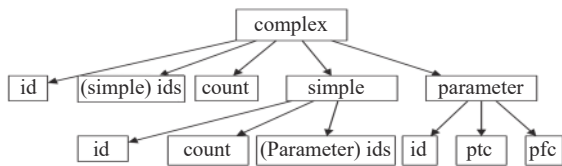


图6 元数据文本的DOM树

Fig. 6 Metadata text DOM tree

参数通过 parameter 元素描述, 包含了每个参数的 PTC 和 PFC 的编码赋值, 例如 parameter id="..." ptc="..." pfc="..." 的形式. 简单数据格式通过 simple 元素描述, 例如 simple id="..." count="..." ids="..." 的形式. 复杂数据格式通过 complex 元素描述, 可以包含参数 parameter 元素和简单数据格式 simple 元素.

由于星上端只能采用二进制编码的方式组织数据, 为此需要配置能够对应 XML 元素和属性的元数据编码表. 表中主要包含标签名称、标签类别 (元素和属性) 以及对应的二进制编码. 二进制编码用来描述星上的二进制数据格式, 通过与表中标签的对应关系来转换、组织 XFDU 元数据文本. 元数据编码表描述了星上自定义数据结构与地面 XFDU 文件的映射关系, 解决了二进制信息和 XML 语言之间元素、属性、标签等的映射问题, 是 XFDU 转换器识别和解析数据格式的依据之一.

4 XFDU 转换器设计与验证

XFDU 转换器需要依据元数据编码表对收到的二进制数据结构进行遍历搜索, 转换成 XFDU 格式文件, 其转换过程如图 5 所示.

输入的二进制数据转换成的文档对象模型 (Document Object Model, DOM) 树形结构如图 6 所示, 树中的节点及其相关属性构成层级关系. 图 6 中 DOM 树的根节点是复杂数据格式 complex 元素. 复

```

<complex id="c1" count="2" ids="s1 s2">
  <parameters>
    <parameter id="p1" ptc="2" pfc="2"/>
    <parameter id="p2" ptc="2" pfc="1"/>
    <parameter id="p3" ptc="2" pfc="2"/>
  </parameters>
  <samples>
    <simple id="s1" count="1" ids="p1"/>
    <simple id="s2" count="2" ids="p2 p3"/>
  </samples>
</complex>
  
```

图7 生成的元数据文本示例

Fig. 7 Example of generated metadata text

杂数据格式包含一个 id 属性、ids 属性、count 属性、simple 元素和 parameter 元素. 其中 id 属性是 complex 的标识, 用于区分不同的复杂数据格式. ids 属性表示一个 complex 中可能包含的多个 simple 的 id, simple 个数由 count 指定. 复杂数据格式的子节点是简单数据格式 simple 元素和参数 parameter 元素. simple 元素有一个 id 属性、可能包含的多个 parameter 的 ids 属性, count 属性是该 simple 元素中包含的 parameter 个数. parameter 元素包含一个 id 属性和相应的格式说明类型 (ptc, pfc) 属性.

转换器遍历搜索的方法采用广泛使用的 DOM 算法^[16]. 当发现有匹配的二进制编码时, 提取其编码值, 填入元数据 schema 中. 当二进制数据结构全部被遍历搜索完毕, 生成元数据文本, 再填入 XFDU schema 中即生成 XFDU 格式文件.

为验证 XFDU 转换器的设计, 能够遍历搜索并识别出有效的元素、属性等标签编码, 再转换为元数据文本, 测试结果生成数据如图 7 所示.

图 7 中复杂数据格式 complex 元素包含两个简单数据格式 simple 元素, 两个 simple 又分别包含三个 parameter. XFDU 转换器识别二进制数据结构串, 对照元数据编码表将其转化为对应的属性值, 嵌入 simple 中, 再将 simple 嵌入 complex 中, 形成元数据

文本. 在转换时为便于人工阅读, 根据 complex, simple, parameter 元素, 在读出的属性数值上加前缀 c, s, p. 在之后的 XTCE 转换器处理遥测数据过程中, 可进一步与实际参数名称和 id 进行关联.

以上内容只展示了描述元数据文本的生成过程. 当元数据文本生成后, 将其嵌入 XFDU schema 中, 生成含有包头、信息包映射、数据对象和行为对象的完整 XFDU 格式文件, 供后续处理过程逐步添加和完善内容, 最终形成 OAIS 中动态 XFDU 标签文件.

5 结语

为实现星地之间遥测数据的灵活定义和解析过程, 进一步减少甚至消除遥测数据的冗余信息和填充, 开展了相应研究, 涉及 PUS 标准、OAIS 标准和 DOM 技术等. 重点针对采用 XFDU 标准, 设计了元数据文本, 进一步设计实现了 XFDU 转换器软件工具, 并进行初步的测试验证.

XFDU 标准是为支持 OAIS 信息描述而制定的规范, 是在 OAIS 模型基础上建立的 XML schema. 同理, 在遥测数据设计的场景下, 也需要先对数据定义方法建模, 建立相应的元数据模型及其 XML schema, 再开展相应的解析工具设计. 通用的 XFDU 转换器可以提供给不同的系统, 供其识别和解析收到的数据格式, 从而支持异构系统之间的异构信息解读和理解. 采用 XFDU 可以将遥测场景下的数据定义模型与 OAIS 模型衔接, 将卫星看为 OAIS 外部能够访问到的一个异构数据节点, 扩大了 OAIS 范围, 有利于从星到地的标准化数据流转、处理和保存. 同时通过这种灵活定义数据格式的方法, 可为地面定义卫星以及星上智能能力的构建提供支持.

参考文献

- [1] CCSDS. CCSDS 133.0-B-1 Space Packet Protocol[S]. Washington: CCSDS, 2003
- [2] CCSDS. CCSDS 732.0-B-3 AOS Space Data Link Protocol[S]. Washington: CCSDS, 2015
- [3] ECSS. ECSS-E-ST-70-41C Telemetry and Telecommand Packet Utilization[S]. Noordwijk: ECSS, 2016
- [4] CCSDS. CCSDS 661.0-B-1 XML Formatted Data Unit (XFDU) Structure and Construction Rules[S]. Washington: CCSDS, 2008
- [5] CCSDS. CCSDS 660.2-G-2 XML Telemetric and Command Exchange (XTCE)[S]. Washington: CCSDS, 2021
- [6] CCSDS. CCSDS 620.0-B-2 Standard Formatted Data Units—Structure and Construction Rules[S]. Washington: CCSDS, 1992
- [7] CCSDS. CCSDS 630.0-B-1 Standard Formatted Data Units—Control Authority Procedures[S]. Washington: CCSDS, 1993
- [8] CCSDS. CCSDS 632.0-B-1 Standard Formatted Data Units—Control Authority Data Structures[S]. Washington: CCSDS, 1994
- [9] CCSDS. CCSDS 622.0-B-1 Standard Formatted Data Units—Referencing Environment[S]. Washington: CCSDS, 1997
- [10] CCSDS. CCSDS 650.0-B-1 Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS)[S]. Washington: CCSDS, 2002
- [11] CCSDS. CCSDS 650.0-M-2 Reference Model for an Open Archival Information System (OAIS)[S]. Washington: CCSDS, 2012
- [12] ISO. ISO 14721: 2003 Space Data and Information Transfer Systems—Open Archival Information System—Reference Model[S]. Switzerland: ISO, 2003
- [13] DUNCKLEY M, RONEN S, HENIS E A, et al. Using XFDU for CASPAR information packaging[J]. *OCLC Systems & Services*, 2010, **26**(2): 80-93
- [14] LUCAS A. XFDU packaging contribution to an implementation of the OAIS reference model[C]//Proceedings of the International Conference on Ensuring the Long-Term Preservation and Value Adding to Scientific and Technical Data. Edinburgh: Royal Society, 2007
- [15] HE Jie, QU Guoxing. Fast ontology construction method based on XML Schema partition[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2022, **60**(5): 1113-1122 (何杰, 屈国兴. 基于 XML Schema 分块的快速本体构建方法[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2022, **60**(5): 1113-1122)
- [16] GUO Bangcai. Based on DOM/AST Design Technology C Language Parser[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011

作者简介



谭杰女, 1993年3月出生于湖北省恩施土家族苗族自治州巴东县. 中国科学院国家空间科学中心硕士研究生. 主要研究方向为空间数据处理与传输等.
E-mail: 2665880471@qq.com



吕良庆(通信作者)男, 1969年4月出生于北京. 中国科学院国家空间科学中心正高级工程师, 博士生导师. 主要研究方向为空间数据系统、航天系统工程、计算机应用技术、软件工程等.
E-mail: lvliangqing@nssc.ac.cn