

HLA-DDS 分布式通信卫星仿真系统

高小亮 马骏骁 李 劼

(中国空间技术研究院通信卫星事业部 北京 100094)

摘 要:通信卫星仿真系统用于模拟通信卫星工作状态,在验证整星方案、测控对接试验、飞行控制演练、卫星操作培训、故障排查等活动中都具有非常重要的作用。随着仿真技术的发展和运用,卫星各分系统研制了相应的专业仿真系统。但是如何有效地整合各专业仿真系统,形成一个整星级仿真系统,一直是一个亟待解决的难题。通过研究分布式仿真系统,设计了HLA-DDS混合的分布式通信卫星仿真系统架构,可以有效整合各专业仿真系统,形成一个整星级高精度仿真系统。

关键词:HLA;DDS;分布式;卫星仿真

中图分类号: TP391.9 TN927 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

HLA-DDS distributed simulation system of telecommunication satellite

Gao Xiaoliang Ma Junxiao Li Jie

(Institution of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China)

Abstract: The telecommunication satellite simulation system is used to simulate the working status of telecommunication satellite. It plays a very important role in the validation of the satellite program, TC&R compatibility test, flight control drills, satellite operation training, failure investigation and etc. With the development and application of simulation technology, each subsystem of satellite has developed a corresponding and professional simulation system. However, it is an urgent problem to be solved, how to effectively integrate the professional simulation systems, to produce a whole simulation system. By excavating the distributed simulation system, the architecture of the HLA-DDS hybrid distributed simulation system was designed, which can effectively integrate the professional simulation system and produce a whole and precise simulation system.

Keywords: HLA; DDS; distributed system; satellite simulation

1 引 言

通过仿真技术对通信卫星进行模拟,不仅可以在设计的早期阶段发现设计问题,验证设计方案的可行性,还能评估设计方案能否在满足约束条件下达到设计目标。随着通信卫星技术复杂度的提高,为提高效率,减少设计问题等,通信卫星相关的仿真系统越来越多。同时,越来越多的仿真技术、系统架构应用于通信卫星仿真系统^[1-6],例如:HLA、DDS、OpenGL、Vxworks、UML Matlab。

在尝试整合不同的专业仿真系统时发现,仿真系统的时序性和实时性是相互矛盾,所以如何解决这个矛盾是实现整合不同专业仿真系统的关键。由于高层体系结构(high level architecture, HLA)和数据分发服务(data distribution service, DDS)具有应用程序之间松耦合的优点,

同时 HLA 具备严格时序特性和 DDS 具备高效实时特性。因此,提出一种 HLA-DDS 混合的分布式通信卫星仿真系统,以整合不同专业仿真系统,实现整星级高精度仿真。

2 HLA 分布式仿真系统

高层体系结构 HLA^[7]是美国国防部推出的,发展历程如图 1 所示。HLA 与以前的仿真架构(DIS 等)相比^[8],具有良好的可扩展性,获得更高级别的仿真应用之间的互操作性,以及更好的模型和仿真组件的可重用性。

HLA 分布式架构特点如下。

1)实现某一功能的仿真应用称为 HLA 的一个联邦成员(Federate),为特定的仿真目的而进行交互联邦成员的集合称为联邦(Federation)。

2)支撑环境(run-time infrastructure, RTI)是所有联邦

收稿日期:2016-10

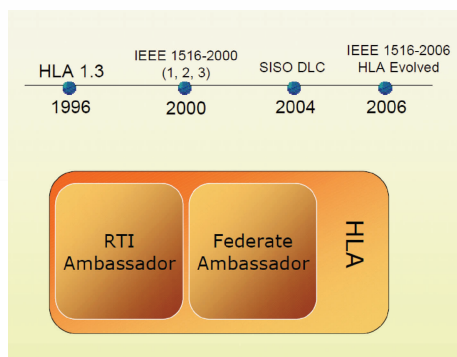


图1 HLA 发展历程

成员交互基础,由于RTI的支撑,HLA仿真系统实现了仿真功能实现、仿真运行管理和底层通信传输功能相互独立。

3)因为各部分功能独立、松散耦合,所以联邦成员可以进行相对独立的开发。

4) HLA 仿真系统以事件为中心,采用发布/订阅模式,事件是联邦成员之间的通信方式,事件是联邦成员之间交互数据信息的方式。

5)严格的时序控制。

HLA 包括对象模型模、HLA 的规则、接口规范。

(1)对象模型模板:用来定义、描述仿真对象、仿真对象属性、和用于仿真对象之间交互信息的格式和内容。(2) HLA 的规则:HLA 一共有 10 条规则^[9],规定了仿真和联邦成员的职责,保证一个联邦内联邦成员之间交互的正确性。其中第 1 至第 5 条规则,描述一个联邦必须遵循的规则;而第 6 条至第 10 条规则,描述了一个联邦成员必须遵循的规则。(3)RTI 的访问接口规范:描述操作期间的联邦成员与 RTI 之间交互方式,是联邦成员访问 RTI 的功能接口。HLA 中的对象模型分为 SOM 和 FOM,其中 SOM 是用来描述联邦中的单个仿真对象,FOM 是用来描述一个联邦中相互之间存在信息交换特性。RTI 接口是 HLA 仿真系统的运行支撑,提供了仿真系统底层的运行基础,所有的联邦成员通过 RTI 进行交互。HLA 仿真系统的基本结构如图 2 所示,RTI 接口提供整个仿真系统的支撑环境,为联邦成员之间的通信、互操作、仿真系统管理提供了有效支持^[10]。

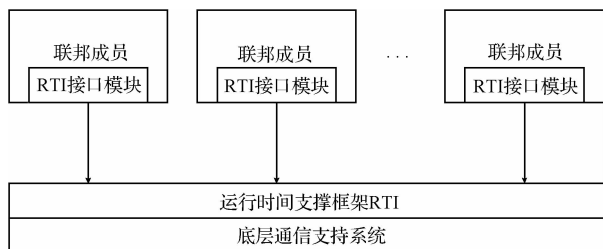


图2 HLA 联邦系统结构

3 DDS 分布式仿真系统

HLA 仿真系统的体系结构是以事件为中心,仿真应

用之间通过订阅发布通信,该结构大大降低了仿真应用之间的耦合程度,但是由于 HLA 仿真系统时序控制要求严格,其存在如下不足。

1)由于严格的时序控制,如果联邦间传输的数据量过大时,系统实时性会降低;

2)适用纯软件系统,对硬件仿真设备或者真实设备适应性差。

由于存在上述不足,对于大数据量应用的实时性以及硬件仿真仿真系统,需要一种新分布式仿真技术弥补这些缺点。DDS^[11]仿真系统采用分布式对称的体系结构,仿真系统中的全部节点是相当的,解决了 HLA 分布式仿真系统中的实时性不够的问题^[12]。在 DDS 仿真系统中以数据源为仿真引擎,将其与各仿真模块节点相链,各节点发布或者订阅数据。DDS 能够解决大量数据传输和实时性问题。DDS 最早应用于美国海军,目前广泛应用于工业、国防各个领域,是实时分布式系统中解决数据发布/订阅问题的标准方案,其发展历程如图 3 所示。

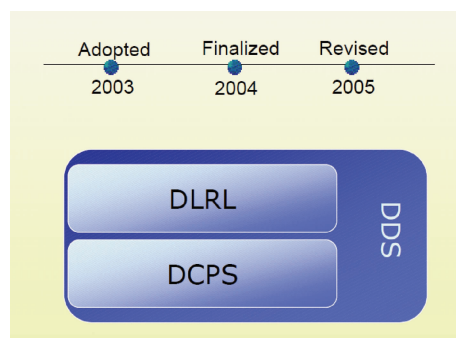


图3 DDS 发展历程

DDS 分布式架构具有如下特点。

- 1)以数据为中心,数据吞吐量大,数据传输实时性好;
- 2)采用全局数据空间技术,大大地提高通信效率;
- 3)引入服务质量策略(QoS),增加了通信灵活性;
- 4)具有丰富的线上协议,支持真实设备接入;
- 5)通讯实时性好,能够支持低时延仿真。

DDS 主要包括如下主要要素^[13]。

1)主题(Topic):是发布者与订阅者之间纽带,具有相同主题的发布者和订阅者,可以在没有中间媒介的情况下,直接进行点对点的通信。

2)域和域成员(Domain and Domain Participant):域是 DDS 划分逻辑网络的依据,域名是不同仿真应用相互通信的凭证,通过这种方法在一个物理网络上可以虚拟多个通信网络。

3)发布者和数据写入者(Publisher and Data Writer):发布者负责组织数据写入者发布数据,数据写入者负责具体的数据分发。

4)订阅者和数据读取者(Subscriber and Data Reader):订阅者负责组织数据读取者订阅,数据读取者负责获得具

体数据,并将获取的数据发送给仿真应用。

5)监听器(Listener):是一种将异步事件实时传递给相关应用程序的机制。

6)条件触发器(Status Condition):是一种基于等待的

传递机制,实现了中间件与应用程序之间的同步通信,与监听器互为补充。

DDS数据如图4所示。

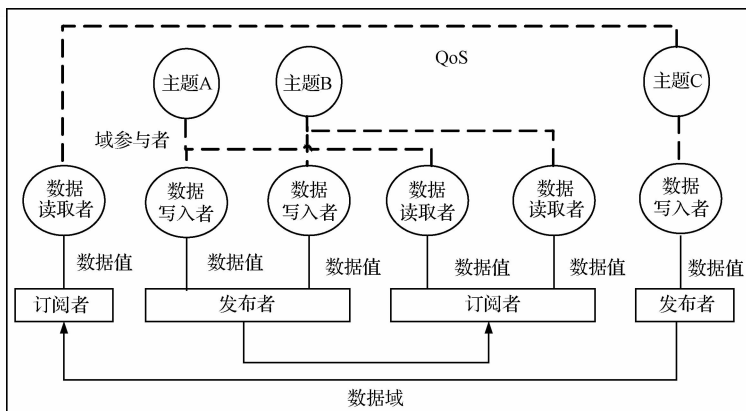


图4 DDS数据流结构

DDS以数据为中心,在全局数据空间中存储数据对象,具有相同主题的仿真应用通过全局数据相互通信。每一个节点都有发布应用程序与订阅方应用程序,通过DDS中间件进行交互信息,如图5所示。

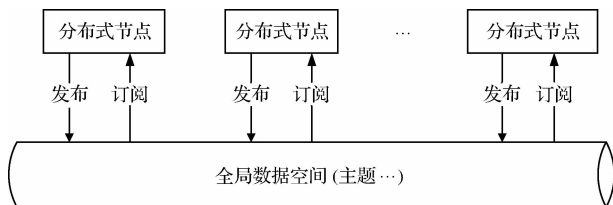


图5 DDS通信模型

4 HLA-DDS分布式通信卫星仿真系统

整星级分布式通信卫星仿真系统是一个复杂的系统,不仅需要整合不同的专业仿真系统,还需要满足从卫星的方案设计、单机测试、系统集成与验证、飞控演练,到在轨维护等各阶段的需求,以及同一阶段中不同应用情景下的需求。并且在不同的应用情景下,分布式通信卫星仿真系统需要配置不同的软硬件仿真模块,以满足应用需求。因此整星级分布式通信卫星仿真系统必须具备以下特征。

- 1)必须同时对软件仿真模块和硬件仿真模块提供良好的支持;
- 2)必须支持软件、硬件协同仿真的功能;
- 3)必须支持同一功能的不同仿真模块(软、硬件仿真模块)的动态替换;
- 4)必须对软硬件仿真部件进行统一的接口抽象与定义,并具备相应的标准规范。

基于整星级分布式通信卫星仿真系统的特性,采用HLA分布式架构或DDS分布式架构,都不能完全地满足

系统需求。为符合整星级分布式通信卫星仿真系统要求,需要一个同时具备HLA和DDS优点的系统架构,因此设计HLA-DDS分布式通信卫星仿真系统架构如图6所示。HLA-DDS分布式通信卫星仿真系统由HLA子系统、DDS子系统、HLA-DDS连接组件构成。HLA子系统和DDS子系统通过HLA-DDS连接组件进行数据通信和仿真协同。此架构结合HLA和DDS的优点,既能实现时序控制和系统可扩展性,还能满足对硬件真实系统的接入和大数据量实时性要求,能够兼容不同的专业仿真软件。

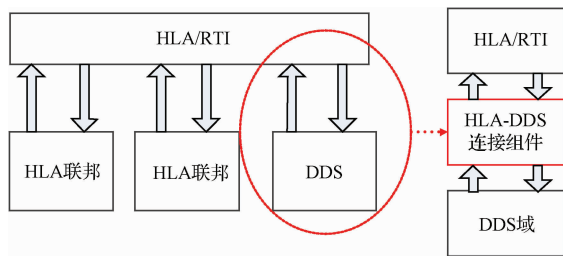


图6 HLA-DDS分布式架构

根据HLA-DDS分布式通信卫星仿真系统架构的特点,系统中各仿真模块布局设计如下。

- 1)对于时序有严格要求的仿真模块,作为HLA子分布系统中的一个联邦成员;
- 2)对于大数据量、实时性有严格要求的仿真模块,作为DDS子分布系统中的一个分布式节点;
- 3)对于软件模块,一般作为HLA子分布系统中的一个联邦成员;
- 4)对于硬件模块,一般作为DDS子分布系统中的一个分布式节点;
- 5)HLA子分布系统与DDS子分布系统通过HLA-DDS连接组件进行数据通信和仿真协同。

4.1 HLA 子系统设计以及流程

HLA 子分布系统的联邦成员主要包括:测控联邦成员、数管/综合电子联邦成员、供配电联邦成员、热控联邦成员、结构联邦成员、姿轨控联邦成员、有效载荷联邦成员、仿真控制联邦成员、数据库联邦成员、可视化联邦成员、故障注入联邦成员、背景环境联邦成员。其系统结构设计如图 7 所示。

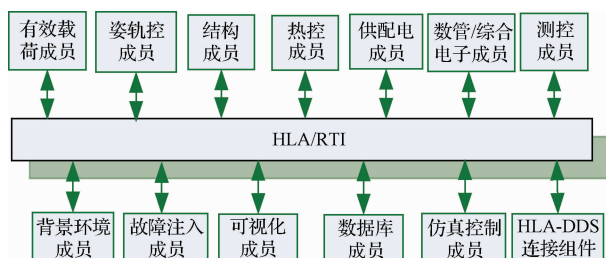


图 7 HLA 子分布系统设计

1)测控联邦成员:通过软件仿真模块,进行测控分系统的高精度仿真;

2)数管/综合电子联邦成员:通过软件仿真模块,进行数管/综合电子分系统的高精度仿真;

3)供配电联邦成员:通过软件仿真模块,进行供配电分系统的高精度仿真;

4)热控联邦成员:通过软件仿真模块,进行热控分系统的高精度仿真;

5)结构联邦成员:通过软件仿真模块,进行结构分系统的高精度仿真;

6)姿轨控联邦成员:通过软件仿真模块,进行控制分系统和推进分系统的高精度仿真,同时包括:包括轨道动力学、姿态动力学的仿真;

7)有效载荷联邦成员:通过软件仿真模块,进行有效载荷(转发器、天线等)的高精度仿真;

8)数据库联邦成员:通过软件仿真模块,进行对整个仿真系统的数据库管理;

9)可视化联邦成员:通过软件仿真模块,进行对 GUI 以及各种信息进行可视化显示(包括图、表、二维显示、三维显示等);

10)故障注入联邦成员:通过软件仿真模块,进行对故障注入的控制;

11)背景环境联邦成员:通过软件仿真模块,进行对空间环境进行仿真。

12)仿真控制联邦成员:进行对整个仿真系统的控制;

在系统设计中,包括联邦对象类的设计和交互类的设计。仿真对象模型(SOM),定义了联邦成员在联邦中用于交互的对象类、对象类属性和交互类,包含了两部分信息:(1)该联邦成员对联邦中其他成员的信息需求;(2)该联邦成员对联邦中其他成员的信息供给。在仿真对象模型中。联邦对象模型(FOM)定义了仿真联邦成员之间进

行共享的所有信息,并且是用于联邦成员之间的数据交换的公共协议。联邦成员工作流程如图 8 所示。

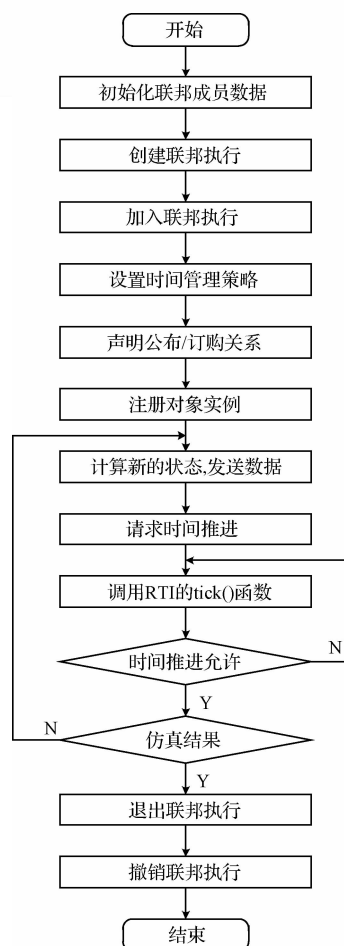


图 8 联邦成员仿真工作流程设计

4.2 DDS 子系统设计及流程

DDS 子分布系统的分布式节点主要包括:测控半物理仿真节点、数管/综合电子半物理仿真节点、供配电半物理仿真节点、热控半物理仿真节点、姿轨控半物理仿真节点、有效载荷半物理仿真节点、半物理仿真控制节点,其系统结构设计如图 9 所示。

1)测控半物理仿真节点:主要由测控器件组成,仿真星上测控分系统功能;

2)数管/综合电子半物理仿真节点:主要由数管/综合电子器件组成,仿真星上数管/综合电子分系统功能;

3)供配电半物理仿真节点:主要由供配电器件组成,仿真星上供配电分系统功能;

4)热控半物理仿真节点:主要由热控器件组成,仿真星上热控分系统功能;

5)姿轨控半物理仿真节点:主要由控制和推进器件组成,仿真星上控制和推进分系统功能;

6)有效载荷半物理仿真节点:主要由有效载荷器件组成,仿真星上有效载荷的功能;

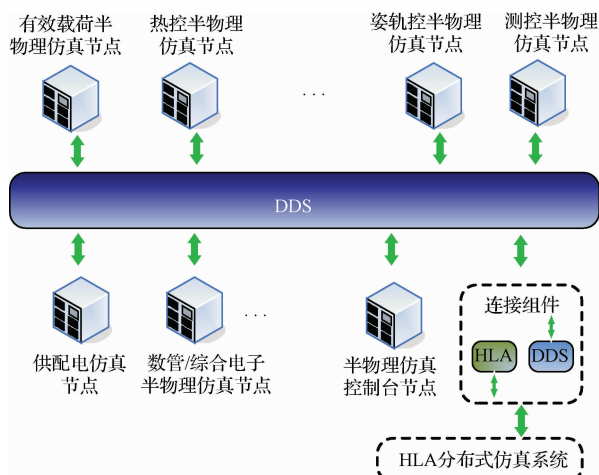


图9 HLA子分布系统设计

7) 半物理仿真控制台节点: 用于控制 DDS 部分仿真控制。

在 DDS 分布式仿真系统中, 每个仿真节点既是发布者, 也是订阅者, 仿真节点之间通过 DDS 中间件交互数据。仿真节点之间的交互数据流程^[14]如图 10 和 11 所示。

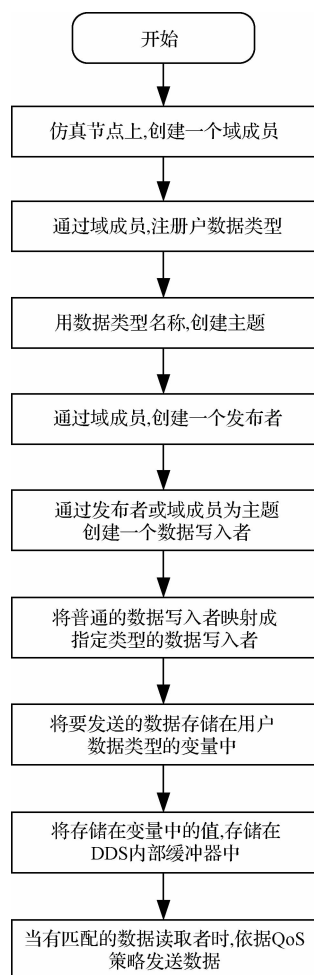


图10 发布方发送数据的步骤

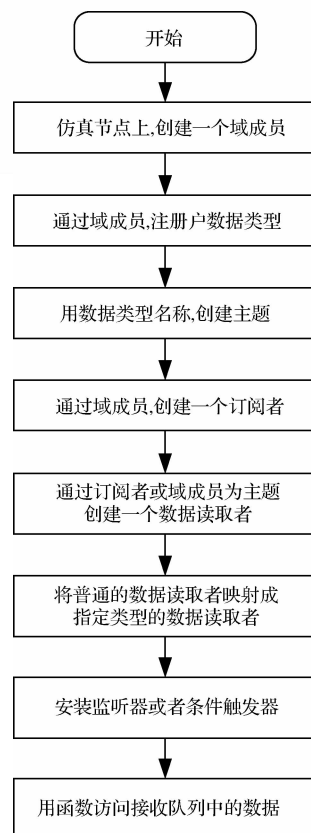


图11 订阅方接收数据的步骤

4.3 HLA-DDS 连接组件

HLA 子分布系统与 DDS 子分布系统通过 HLA-DDS 连接组件^[15]进行数据通信和仿真协同。HLA-DDS 连接组件的基本结构如图 12 所示, 连接组件主要包括 3 个模块: HLA 代理成员、DDS 代理节点、协议转换器。

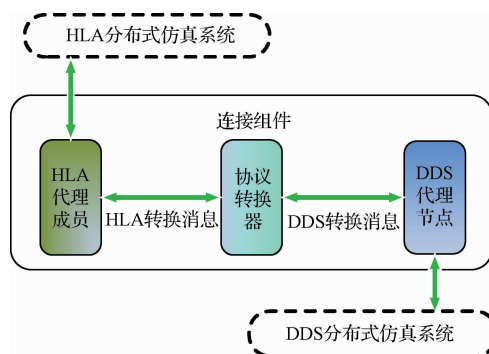


图12 HLA-DDS 连接组件结构

HLA-DDS 连接组件中的 3 个模块的功能如下所述。

1) HLA 代理成员: 它是 HLA 子系统中的一个联邦成员, 通过 RTI 接口与 HLA 系统通信, 通过 HLA 过渡消息与协议转换器通信。HLA 代理成员充当 HLA 系统的代理, 不仅具有普通联邦成员的功能, 还增添了与协议转换器进行数据交互的新功能。HLA 代理成员主要增加了

HLA 数据解析器和 HLA 数据封装器。

(1)HLA 数据解析器:将接收到的 HLA 系统发送的对象、交互事件、服务等,解析为 HLA 过渡消息,然后发送给协议转换器。

(2)HLA 数据封装器:将接收到的协议转发器发送的 HLA 过渡消息,封装为 HLA 系统中的对象、交互事件、服务等,然后发送到 HLA 系统中。

HLA 过渡消息是对 HLA 系统中对象、交互事件或者服务等描述,可采用结构体、XML 等多种形式。

2)协议转换器:它是 HLA-DDS 连接组件的核心模块,用于完成 HLA 过渡消息与 DDS 过渡消息之间的相互转换,这两种消息之间的相互转换通过转换关系表来实现。转换关系表主要描述 HLA 过渡消息与 DDS 过渡消息之间的转换关系。通过转换关系表,实现 HLA 过渡消息与 DDS 过渡消息之间的相互转换,从而实现 HLA 仿真系统与 DDS 仿真系统之间的交互。HLA 中的对象模型 HLA-OMT 转换到 DDS 中的 DLRL。根据 HLA-OMT 和 DLRL 的转换关系,将 HLA 系统中的 HLA-FOM 和 HLA-SOM 转换为在 DDS-DLRL 中的仿真实体。将 RTI 接口规范转换到 DDS 中用 UML 和 IDL 指定的 DCPS 和 API。将 RTI 接口规范中的 RTIAmbassador 的应用程序编程接口转换到 DDS 中的参与者、订阅者、发布者、数据写入者、数据读取者具有的应用程序编程接口。同时将 RTI 接口规范中的 FederateAmbassador 的应用程序编程接口转换到 DDS 中监听者(Listener)具有的应用程序编程接口。

3)DDS 代理节点:它是 DDS 子系统中的一个仿真节点,通过 DDS 中间件与 DDS 系统通信,通过 DDS 过渡消息与协议转换器通信。DDS 代理成员充当 DDS 系统的代理,不仅具有普通 DDS 节点的功能,还增添了与协议转换器进行数据交互的新功能。DDS 代理节点主要增加了 DDS 数据解析器和 DDS 数据封装器。

(1)HLA 数据解析器:将接收到的 DDS 系统发送的订阅发布关系、数据、主题或者 QoS 策略等,解析为 DDS 过渡消息,然后发送给协议转换器。

(2)DDS 数据封装器:将接收到的协议转发器发送的 DDS 过渡消息,封装为 DDS 系统中的订阅发布关系、数据、主题或者 QoS 策略等,然后发送到 DDS 系统中。

DDS 过渡消息是对 DDS 系统中订阅发布关系、数据、主题或者 QoS 策略等的描述,可采用结构体、XML 等多种形式。

HLA-DDS 连接组件的工作流程如下所述。

HLA→DDS:从 HLA 子系统角度看,HLA 代理成员就是 DDS 子系统。当 HLA 子系统有对象、事件、服务等需要发送到 DDS 中的仿真节点时,HLA 子系统通过 RTI 接口将对象、事件、服务等发送给 HLA 代理成员。HLA 代理成员将这些信息解析为 HLA 过渡消息发送给协议转换器。协议转换器收到 HLA 过渡消息后,转换为 DDS

过渡消息并发送给 DDS 代理节点。DDS 代理节点收到 DDS 过渡消息后,封装为 DDS 系统中的订阅发布关系、数据、主题或者 QoS 策略等,然后通过 DDS 中间件发送到 DDS 系统中。

DDS→HLA:从 DDS 子系统角度看,DDS 代理节点就是 HLA 子系统。当 DDS 子系统有订阅发布关系、topic 或者 QoS 策略等需要发送给 HLA 子系统下的联邦成员时,将这些信息通过 DDS 中间件发送给 DDS 代理节点。DDS 代理节点将这些信息解析为 DDS 过渡消息发送给协议转换器。协议转换器收到 DDS 过渡消息后,转换为 HLA 过渡消息并发送给 HLA 代理成员。HLA 代理成员收到 HLA 过渡消息后,封装为 HLA 系统中的对象、交互事件、服务等,然后通过 RTI 接口发送到 HLA 系统中。

5 结 论

本文概述、分析了通信卫星仿真系统的现状,提取了整星级分布式通信卫星仿真系统的特征,研究了 HLA 和 DDS 分布式仿真系统的特点,设计了 HLA-DDS 混合的分布式通信卫星仿真系统的总体架构、HLA 子系统的架构、DDS 子系统的架构、HLA-DDS 连接组件以及相关流程。HLA-DDS 混合的分布式通信卫星仿真系统,具有应用程序之间松耦合、时序性和实时性兼顾性的优点。能够解决整合不同类型专业仿真系统的难题。当前 HLA-DDS 混合的设计已应用于预研项目中,用来实现通信卫星整星级地高精度仿真。在下一步工作中,将逐步实现 HLA-DDS 分布式通信卫星仿真系统;研制 HLA-DDS 连接组件,将已有仿真系统(或仿真模块)封装或改造为 HLA 联邦成员或 DDS 仿真节点。

复杂的系统,通常由功能、性能不同的分系统或者部件组成。因为不同分系统或部件的功能和性能不同,所以对仿真的时序性和实时性要求有时会截然不同。HLA-DDS 分布式仿真系统,可应用于这类复杂系统的仿真。

参 考 文 献

- [1] 张利强,郑昌文,胡晓惠,等.一种基于 HLA 的卫星仿真系统的设计与实现[J].系统仿真学报,2009,21(20):6487-6491.
- [2] 朱晏庆.卫星控制系统嵌入式软件虚拟化测试平台技术研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [3] 乔建波,陈宜金.基于 OpenGL 和 IGS 精密星历的 GPS 卫星轨道可视化[J].北京测绘,2015,125(6):8-12.
- [4] 贺庚贤,李俊霖,宁飞.星务仿真系统高精度时标设计[J].电子测量与仪器学报,2014,28(8):827-835.
- [5] 张东.遥测数据处理系统 UML 建模与实现[J].电子测量技术,2017,41(1):52-56.
- [6] 王井胤,林宝军.基于 nRF24E01 的卫星三轴半物理仿真系统研究[J].中国测试,2012,38(6):1-4.

- [7] 张秀程, 潘忠石. 基于 HLA 的卫星协同仿真系统研究与实现[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(11): 136-140.
- [8] 刘培杰, 王华, 刘党辉. 基于 HLA 的运载火箭控制系统仿真设计研究[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(5): 41-44.
- [9] 涂晨阳, 张猛, 高文彬. HLA 作战仿真中联邦管理成员设计[J]. 科技信息, 2010, 17(35): 721, 736.
- [10] 张婷, 王琪. HLA/RTI 仿真平台的数据分发管理[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(4): 223-227.
- [11] 张大海, 赖兰剑, 陈鼎才. DDS 在分布式系统仿真中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(3): 250-252.
- [12] 汪剑. 数据分发服务及其应用[C]. 四川省通信学会 Ip 应用与增值电信技术会议论文集, 2011: 57-60.
- [13] 李腾, 孙志刚, 贾峰. 实时发布/订阅数据分发服务

- 的模型分析[J]. 无线电工程, 2016, 46(2): 6-9.
- [14] 任棕洗, 任雄伟. DDS 在分布式仿真中的应用探讨[J]. 舰船电子工程, 2015, 22(11): 106-108.
- [15] 朱瑞峰. 基于桥接器的 HLA 与 DDS 互连技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

作者简介

高小亮, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星仿真技术、卫星测控技术等。

马骏骁, 工学博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星仿真技术、卫星测控技术、整星测试技术等。

李劼, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星仿真技术、中继通信技术等。

E-mail: boygxl@163.com

(上接第 70 页)

的硅元素俘获峰, 图 15 经对比可找到钙元素的对应能窗, 以上测试结果与表 3 数据相符合。因此仪器可有效采集底层元素 γ 能谱。

5 结论

本文设计了一种基于可控中子源的元素分析测井仪。通过采集性能测试、能谱与时间谱测试以及实验井测试, 证明了仪器具有良好的性能, 能满足实际测井要求, 为地层元素分析提供支持。

参考文献

- [1] 张锋, 刘军涛, 冀秀文, 等. 地层元素测井技术最新进展及其应用[J]. 同位素, 2011, 24(b12): 21-28.
- [2] 孙建孟, 姜东, 尹璐. 地层元素测井确定矿物含量的新方法[J]. 天然气工业, 2014, 34(2): 42-47.
- [3] 彭智, 李国玉. 元素测井资料解释及应用[J]. 石油仪器, 2014, 28(1): 84-86, 101.
- [4] 郑华, 孙亮, 梁庆宝, 等. PNST-E 脉冲中子地层元素测井技术研究[J]. 测井技术, 2015, 28(4): 395-404.
- [5] 张祯. 地层元素测井研究进展[J]. 地下水, 2015(1): 112-114.
- [6] 张瑞, 潘保芝, 杨雪, 等. 脉冲中子源密度测井进展[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(6): 2596-2602.
- [7] 姚文彬, 李辉, 尚捷, 等. 随钻自然伽马测井仪研制[J]. 电子测量技术, 2013, 36(6): 42-45.
- [8] 张锋, 田立立, 刘军涛, 等. 地层元素测井中探测器响应数值模拟研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(11):

- 2067-2074.
- [9] 江华, 周媛媛. 光电倍增管的结构与性能研究[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(1): 193-196.
- [10] 朱军, 高清维, 韩璐. 基于 DSP 和 FPGA 的数据通信实现方案[J]. 电子测量技术, 2009, 32(1): 102-104.
- [11] 曹攀辉, 周凯波, 程晶晶, 等. 脉冲中子测井仪器前端信号处理电路[J]. 测井技术, 2016, 40(1): 76-80.
- [12] 刘少真, 顾煌栋, 曹学蕾. 极-零相消电路的理论分析与实验验证[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(12): 1446-1449.
- [13] 王飞. 基于 FPGA 的全数字化峰值时刻检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 914-919.
- [14] 徐静, 王南萍. FPGA 便携式多道 γ 谱仪的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(9): 1106-1109.
- [15] 阎淑梅, 凌球, 等. FPGA 技术在脉冲中子源数据采集系统的设计与实现[J]. 核电子学与探测技术, 2007, 27(2): 389-391.
- [16] 于志翔. 基于 FPGA 的 UART 设计与实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 77-81.
- [17] 张儒, 李敏. 基于 FPGA 的曼码编解码模块实现[J]. 仪器仪表用户, 2016(3): 53-55.

作者简介

李晋宇, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事地层中子测井仪器的研究与开发工作。

E-mail: hustlijinyu@126.com