

# 分布式 LVC 仿真系统关键技术研究

马能军, 王丽芳

(西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710129)

**摘 要:** 提出了准层次式的分布式 LVC 仿真系统的体系结构框架, 并进一步对构建该类仿真系统所需的关键技术进行深入研究, 包括: 时间管理、通信接口、数据管理等. 在此基础上, 开发了一个分布式指挥自动化仿真系统, 仿真系统实时的、正确的运行验证了研究成功的正确性和有效性.

**关键词:** 分布式; 仿真一体化; LVC 仿真; 体系结构

**中图分类号:** TP391.9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-7180(2014)07-0032-05

## The Key Technology Research on Distributed LVC Simulation System

MA Neng-jun, WANG Li-fang

(School of Computer College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** This paper propose put forward the quasi-hierarchical framework of system architecture of distributed LVC simulation system. The key technologies needed to construct the distributed LVC simulation system were studied, including: time management, communication interface, data management, etc. The correctness and effectiveness of study result be validated by the real-time and correct operation of this simulation system.

**Key words:** distributed; LVC simulation; simulation integration; system architecture

### 1 引言

分布式 LVC 仿真系统是指同时包含实况仿真(Live Simulation)、虚拟仿真(Virtual Simulation)和构造仿真(Constructive Simulation)三种类型仿真成员的分布式仿真系统<sup>[1]</sup>.

以上 3 类仿真成员各有特点, 如何将这 3 类仿真成员无缝、一致地整合到一个系统中是分布式 LVC 仿真系统开发要解决的主要问题<sup>[2]</sup>. 本文以 3 类仿真成员的特点为基础, 分析了分布式 LVC 仿真系统的需求, 按照系统的需求对系统的体系结构和实现该类系统所涉及到的关键技术进行了研究.

### 2 分布式 LVC 仿真系统体系结构框架

分布式 LVC 仿真系统体系结构的需求分为功能层需求和技术层需求<sup>[3]</sup>.

功能层需求如下:

- (1) 支持目前已存在的各种仿真资源;
- (2) 支持仿真系统的便捷集成, 能够包容目前的异构系统, 能满足不断扩展的要求;
- (3) 支持快速经济的开发、测试和部署仿真应用.

技术层需求如下:

- (1) 仿真成员间实时的、一致性的互操作支持;
- (2) 时间同步管理支持;
- (3) 具有透明无缝的接口来支持仿真的重组;
- (4) 具有自动高效的网络通讯服务<sup>[3]</sup>.

系统需求决定系统体系结构<sup>[4]</sup>, 针对上述的系统需求, 提出准层次式分布式 LVC 仿真系统体系结构框架. 如图 1 所示, 系统分为 3 层, 分别为分布式中间件层、分布式中间件通信对象层和应用层, 同时包含 1 个实用程序仓库.

其中, 分布式中间件层提供分布式中间件的基础服务, 如 HLA 1516-2010 标准中所定义的六类管

收稿日期: 2013-09-03; 修回日期: 2013-10-31

基金项目: 航空科学基金(2012ZC53040); 西北工业大学研究生创业种子基金(Z2013131)

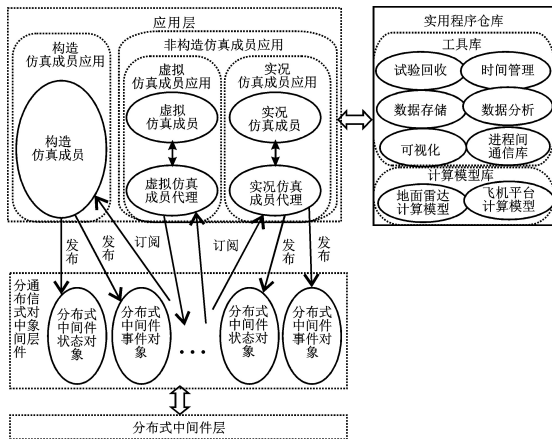


图 1 分布式 LVC 仿真系统体系结构框架

理服务和支撑服务<sup>[5]</sup>, TENA 6.0 中定义的网络命名服务和执行管理服务<sup>[6]</sup>. 独立出来的中间件层满足了上述功能层的需求(1)、(2)和(3), 同时对技术层的需求(1)和(4)提供支持.

分布式中间件通信对象层为上层仿真应用提供交互支持. 仿真交互中有两种数据, 一种是持续存在的、标识实体状态的属性数据, 在分布式仿真中间件中一般用分布式状态对象来描述. 另一种是离散存在的、标识实体瞬时事件的数据, 在分布式仿真中间件中一般用分布式事件对象来描述. 基于特定中间件的仿真应用在使用中间件之前都需要对中间件进行繁琐的配置工作, 这些配置工作几乎完全相同. 根据以上情况, 分布式中间件通信对象层主要进行两项工作: 一、封装分布式中间件的使用配置, 促使所有仿真应用都能复用此使用配置; 二、对分布式中间件中的分布式状态对象和事件对象分别进行封装, 封装后的每一类通信对象对应用层表现出相同的访问接口, 从而实现应用层与通信层的解耦合. 分离出来的中间件通信对象层对上述功能层的需求(3)提供支持.

应用层维护应用的业务逻辑. 根据仿真成员类型的不同可以将应用分为两大类: 构造仿真成员应用和非构造仿真成员应用, 其中非构造仿真成员应用包括: 虚拟仿真成员应用和实况仿真成员应用. 两类仿真应用都使用分布式通信对象层提供的两类通信对象进行互操作, 不同的是对于构造仿真成员应用, 应用在程序中发消息给来自实用程序仓库的不同工具完成相应的功能, 而对于非构造仿真成员应用, 在应用层称其为仿真成员代理(以下简称代理), 它的工作只是代表实际仿真成员与网络上其他仿真成员进行交互. 分离的应用层进一步对上述功能层的需求(1)、(2)和(3)提供支持.

实用程序仓库提供一整套快速建立和管理仿真的服务, 如: 与数据相关的数据存储和数据分析服务, 用于仿真监控的可视化工具, 用于代理与实际仿真成员之间进行通信的进程间通信库. 独立的实用程序仓库在系统最高层对上述功能层的需求(3)和技术层的需求(2)提供最直接的支持.

### 3 分布式 LVC 仿真系统实现的关键技术

#### 3.1 通信接口

通信机制一般都充分利用了系统架构的特点, 分层的体系结构促使系统各层之间通信的数据格式的标准化. XML(eXtensible Markup Language)作为标准通用标记语言, 具有描述复杂数据的能力, 能够建立任何复杂层次的数据模型, 便于数据的搜索、定位. XML 的上述优势刚好符合分布式 LVC 仿真系统各层交互数据的多样性和复杂性的特点, 所以使用标准 XML 作为层与层以及应用层与实用程序仓库之间交互数据的格式.

同时层次式体系结构允许系统各层接口的标准化. 分布式中间件层接口由分布式中间件提供, 所以分布式 LVC 仿真系统通信接口主要包括: 分布式通信对象层接口以及系统实用程序仓库中的各类服务的接口.

(1) 分布式通信对象层接口. 分布式通信对象层对分布式中间件所提供的状态对象和事件对象进行封装. 为实现应用层与通信层的解耦合, 封装后每一类通信对象应该具有一致的接口, 如图 2 所示.

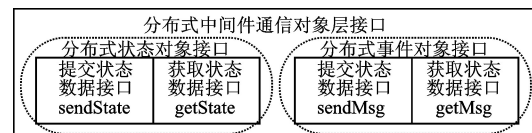


图 2 分布式中间件通信对象层接口

(2) 实用程序仓库主要包括 4 类接口: 显示工具、数据存储、进程间通信库以及计算模型库的接口. 每类仓库程序分别具有抽象一致的接口, 仓库中实用程序只需对接口负责, 应用只需关注业务逻辑实现, 一方的变化不会波及到另一方, 从而将仿真应用与仓库中的实用程序解耦合. 其中, 显示工具和数据存储以组件的形式存在于系统中, 应该让它们拥有一个相同的通知接口——Notify, 当系统需要显示数据时将数据 Notify 给显示工具完成可视化, 需要存储数据时将数据 Notify 给数据存储完成存储. 所有计算模型应该具有 2 个相同的接口, ModelInit 和 Step 接口, 其中 ModelInit 用于计算模型初始化,

Step 用于计算模型的步进, 进程间通信库应该具有 3 个相同的接口, CommuConf、Send 以及 Receive 接口, 其中 CommuConf 用于通信配置、Send 用于发送数据、Receive 用于接收数据。

### 3.2 时间管理

由于实况仿真必须使用壁钟时间, 即仿真应用所在的操作系统的时间, 进行仿真, 所以分布式 LVC 仿真系统不能采用逻辑时间推进, 而只能是实时时间推进<sup>[7]</sup>。采用实时时间推进方案, 则所有仿真应用必须具有一致的操作系统时间, 为此可以将仿真系统中某一特定节点所在的操作系统时间规定为标准时间, 分布式 LVC 仿真系统启动后, 所有分布式仿真节点需要首先将本节点的操作系统时间与标准时间进行同步。按照仿真成员处于仿真状态和回放状态可以将分布式 LVC 仿真系统也分为两种状态: 仿真状态和回放状态, 不同的系统状态应该选取不同的时间作为仿真系统的系统时间。

对于仿真状态, 系统内所有仿真成员可以采用所在节点的操作系统时间作为仿真的系统时间。对于回放状态, 有以下定义:  $t_{rs}$  表示回放过程中操作系统时间与之前进行该仿真时操作系统时间的偏移值,  $t_p$  表示在回放过程中任一时刻的操作系统时间,  $t_{pd}$  表示回放过程中在操作系统时间为  $t_p$  时所使用的数据记录的时间, 即数据记录的时戳的值,  $t_{pd}$  与  $t_p$  的关系如式(1)所示。又因回放即为使用仿真时采集的数据记录再次激励仿真成员运行, 所以回放中在操作系统时间为  $t_p$  时所选取的数据记录的时间  $t_{pd}$  也就是回放时仿真系统的系统时间。

$$t_{pd} = t_p - t_{rs} \quad (1)$$

### 3.3 数据存储

为进行仿真过程的事后回顾、仿真结果的事后分析, 需要对分布式 LVC 仿真系统在仿真过程中所产生的仿真数据进行记录存储。

数据库具有共享性高、冗余度低、易扩充、独立性高等特点, 将数据库作为仿真数据存储的容器能够帮助系统对仿真数据进行有效的存储和管理<sup>[8]</sup>。但频繁的数据库操作不仅会占用大量的系统资源, 而且会影响系统实时性, 因此分布式 LVC 仿真系统对于仿真数据采取如图 3 所示的“两级存储+缓冲”存储机制。仿真应用不直接将产生的数据记录提交到数据库, 而是首先将数据存入每个仿真应用的专用仿真数据内存缓冲区中, 当内存缓冲区满或者仿真结束时再将内存缓冲区中的数据写入仿真应用所各自对应的本地数据记录文件中。待仿真结束后,

每个仿真节点统一将本节点所产生的仿真数据记录文件提交至服务器的数据库中。

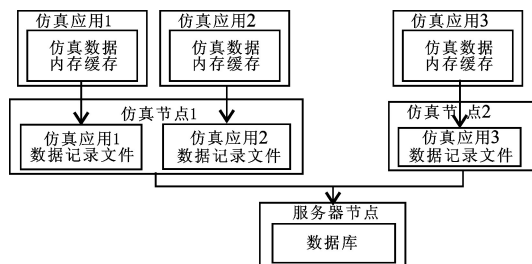


图3 仿真数据存储机制

## 4 应用实例

根据以上关键技术研究的结果, 基于 TENA 中间件设计和开发了用于试验与训练的分布式指挥自动化(C<sup>4</sup>I)仿真系统。

系统仿真成员组成如图 4 所示, 共有 5 类仿真成员, 其中实况仿真成员(L)有: 情报融合中心和指挥引导中心, 虚拟仿真成员(V)有: 飞机, 构造仿真成员(C)有: 地面雷达和数据链。采用上述的系统体系结构框架和关键实现技术进行了本系统的设计和实现。

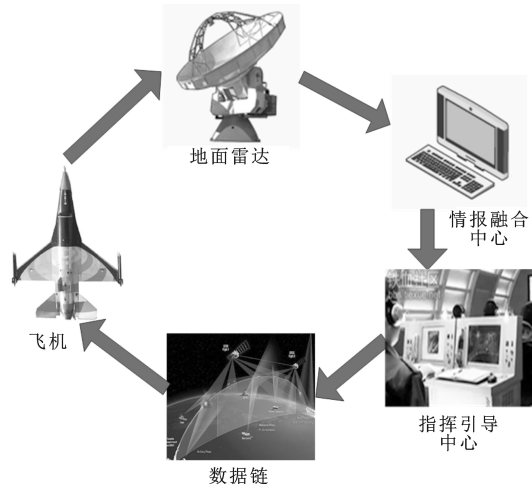


图4 分布式指挥自动化仿真系统的仿真成员组成

本 C<sup>4</sup>I 仿真系统中各仿真成员的数据交互如图 5 所示, 其中非构造仿真成员和其代理之间使用本地 Socket 库进行进程间通信, 各仿真成员和以及仿真成员代理由不同的团队异地、独立进行开发, 各自开发结束后进行系统集成。具体交互如下所述:

①仿真时飞机一直存在自身的状态信息, 每隔 1 s 会将这些状态信息传送给飞机代理, 飞机代理接收到飞机的状态数据后通过 TENA 飞机状态对象将该状态数据发布到中间件。

②雷达订阅 TENA 飞机(目标)状态对象, 并对订阅到的数据解算, 解算后将目标的相关数据通过

TENA 雷达情报事件对象发布到中间件,雷达每 10 s 转一圈,每转一圈发布一次情报数据。

③情报融合中心代理订阅 TENA 雷达情报事件对象,订阅到该对象后将该对象中的情报传送给情报融合中心,情报融合中心对情报进行情报融合

后将目标(飞机)的信息打包为指定的某一格式的情报报文并将该报文传送给情报融合中心代理,情报融合中心代理接收到该情报报文后通过 TENA 融合情报事件对象将该报文发布到中间件,实时发布,无发布周期。

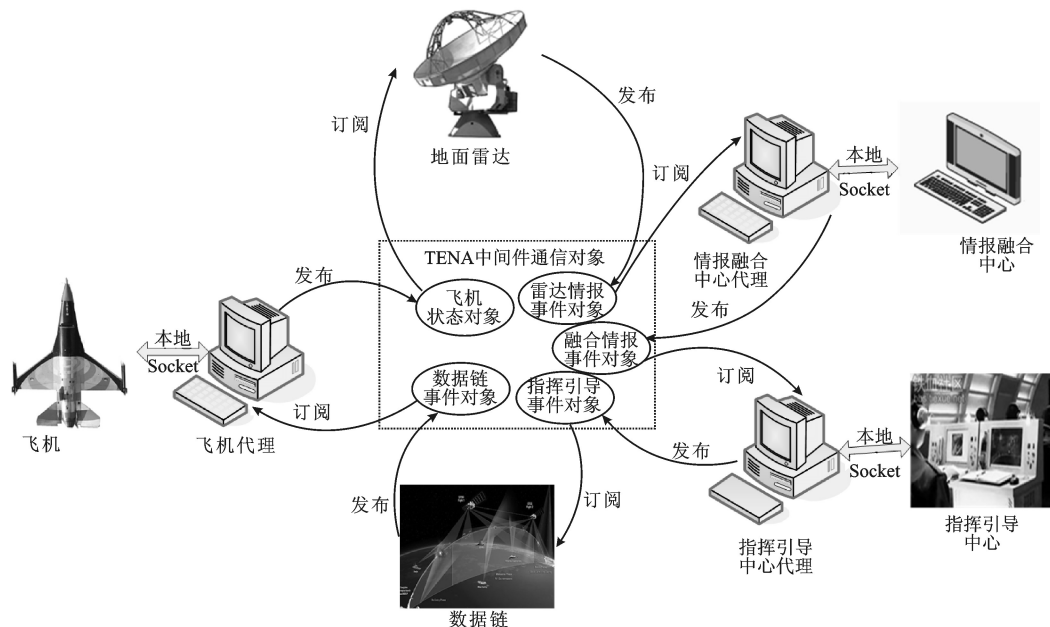


图5 C<sup>4</sup>I 仿真系统交互图

④指挥引导中心代理订阅 TENA 融合情报事件对象,订阅到后将该对象中的情报传送给指挥引导中心,指挥引导中心接收到情报后对情报数据进行解算,解算后产生发给己方飞机的指挥引导数据,然后将这些数据打包为指定格式的指挥引导报文并将该报文传送给指挥引导中心代理,指挥引导中心代理接收到该报文后通过 TENA 指挥引导事件对象将该报文发布到中间件,实时发布,无发布周期。

⑤数据链订阅 TENA 指挥引导事件对象,并根据指挥引导中心的位置、接收该指挥引导报文的飞机的位置以及二者之间的地理环境解算出本引导报文的误码率和传输延迟,然后按照解算出的误码率及传输延迟对指挥引导报文添加一定的误码并延迟一定的时间后通过 TENA 数据链事件对象将处理后的指挥引导报文发布到中间件,实时发布,无发布周期。

⑥飞机代理订阅 TENA 数据链事件对象,订阅

到后将该事件对象中的指挥引导数据传送给飞机,飞机接收到该指挥引导数据后根据接收到的引导数据调整飞机的状态,接下来转入①,依次循环直至仿真结束。

本 C<sup>4</sup>I 仿真系统要求从指挥引导中心发出的指挥引导报文传输至飞机端延迟不能超过 3 s,否则报文无效,所以报文传输实时性是否满足仿真要求直接决定系统是否可用。以下对系统中报文从指挥引导中心端到飞机端的传输延迟进行测试,环境为 Windows XP 平台,4 核处理器计算机,100 Mb/s 的以太网环境。指挥引导中心发布大小从 64~4 096 Byte 不等的指挥引导报文,数据链转发从指挥引导中心订阅到的指挥引导报文,飞机通过订阅数据链事件对象获得指挥引导报文,每种报文连续发送 1 000 次,记录报文从指挥引导中心到达飞机的通信时间延迟,测试的结果如表 1 所示。

表 1 C<sup>4</sup>I 仿真系统指挥引导中心端到飞机端报文延迟

| 字节数/Byte      | 64     | 128    | 256    | 512    | 1 024  | 2 048  | 4 096  |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 最小延迟/ $\mu$ m | 1 971  | 1 854  | 2 071  | 2 095  | 2 255  | 2 360  | 2 133  |
| 平均延迟/ $\mu$ m | 3 193  | 3 222  | 3 292  | 3 453  | 3 542  | 3 708  | 3 992  |
| 最大延迟/ $\mu$ m | 30 690 | 30 135 | 35 384 | 32 266 | 32 142 | 36 117 | 32 127 |

由表 1 可知本 C<sup>4</sup>I 仿真系统的平均时延随着发

布-订阅的事件对象的增大而增大,最小时延处于

1 800~2 400  $\mu\text{s}$  之间,由于 Windows 操作系统时间片轮转机制的存在,最大时延较大,但总保持在 30 000~40 000  $\mu\text{s}$  之间,可满足本 C<sup>4</sup>I 系统的实时性要求。

## 5 结束语

本文提出了适合分布式 LVC 仿真系统的体系结构框架,同时对实现这样的仿真系统所需要的关键技术进行了详细阐述。最后,根据研究结果成功开发了一个用于试验与训练的分布式指挥自动化仿真系统,该系统的快速开发,开发完成后系统的正确、有效运行验证了所研究的关键技术的正确性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 周玉芳,余云智,翟永翠. LVC 仿真技术综述[J]. 指挥控制与仿真, 2010,32(4):1-7.
- [2] Gustavsson per M, Bjorkman Ulf, Wemmergard Joakim. LVC aspects and integration of live simulation[C]//Fall Simulation Interoperability Workshop 2009, 2009 Fall

SIW, Orlando, 2009:503-517.

- [3] 车梦虎,庄锦程,蔡强. 基于 TENA 的虚实结合的靶场公共体系结构设计[J]. 计算机测量与控制, 2012,20(7):1895-1920.
- [4] 毕博,朱元昌,邸彦强. 基于 TENA 的分布交互仿真程序设计[J]. 微电子学与计算机, 2012,29(9): 35-38.
- [5] 肖瑜,刘宏义. 基于 HLA 视景仿真系统的 BOM 组件开发[J]. 微电子学与计算机, 2009,26(11): 153-156.
- [6] Architecture Management Team (TENA AMT). TENA-6.0. Test and training enabling architecture (TENA)[S]. Alexandria, 2012.
- [7] 梁培生,周玉芳,翟永翠. LVC 时间管理的实时性研究[J]. 指挥控制与仿真, 2010,32(6): 60-64.
- [8] Wikipedia. Database[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Database>.

### 作者简介:

马能军 男,(1987-),硕士研究生. 研究方向为计算机应用技术.

王丽芳 女,(1964-),博士,教授. 研究方向为计算机应用技术.

(上接第 31 页)

- [10] Fazeli M, Patooghy A. Feedback redundancy: a power efficient SEU-tolerant latch design for deep sub-micron technologies[C]//37th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks, Edinburgh, 2007.
- [11] 李鹏,孙永节,陈建军,等. 基于 Muller\_C 单元和 DICE 单元的抗辐射 D 触发器设计[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(3):35-40.
- [12] Seifert, Zhu Xiaowei, Massengill L W. Impact of scaling on soft - error rates in commercial microprocessors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(6):3100-3106.
- [13] Messenger G C. Collection of change on junction nodes from ion tracks[J]. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1982, 29(6):2024-2031.
- [14] Seifert N, Zhu Xiaowei, Moyer D, et al. Frequency dependence of soft error rates for sub-micron CMOS

technologies[C]//International Electron Devices Meeting, Washington, 2001.

- [15] 陈善强,师立勤. 诱发单粒子多位翻转的电荷分享研究[J]. 核电子学与探测技术, 2011,31(2):171-174.
- [16] 刘凡宇. 90 纳米 CMOS 工艺下单粒子效应引起的电荷共享研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.
- [17] Shah M Jahinuzzaman, Riadul Islam. TSPC-DICE: a single phase clock high performance SEU hardend flip-flop[C]//53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems, Montreal, 2010.

### 作者简介:

梁华国 男,(1959-),教授,博士生导师,CCF 高级会员. 研究方向为内建自测试、数字系统设计自动化、ATPG 算法、分布式控制等.

王旭明 男,(1989-),硕士. 研究方向为基于设计的抗辐射加固技术、电路老化预测、检测等.