

1-3-2019

## Application Tests of MuDIS in Surface Ship Operation Training Simulation System

Xu Jing

*Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;*

Zhengxiang Xiong

*Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;*

Yongsheng Zhang

*Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;*

Xu Ming

*Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Application Tests of MuDIS in Surface Ship Operation Training Simulation System

## Abstract

**Abstract:** To meet the network communication demands of surface ship operation training simulation system, a multi-layer distributed service data interaction RTI was developed, which supported several system frameworks; and the main functions of HLA and DDS standards were realized. The distributed service with multiple key points was adopted; the data with several frequency response mechanisms and intelligent communication methods were provided; and the active analysis of data communication behavior was obtained. It had error-tolerance and adaptive load balancing capabilities. *The MuDIS tests on data control, real-time data communication, time advance request delay, error-tolerance performance and so on were carried out for the most critical capability of the network operation of the surface ship operation training simulation system.* The test results showed that MuDIS was applicable for multi-layer complicated system simulation.

## Keywords

MuDIS, multi-layer distributed service, operation training simulation system, application tests

## Recommended Citation

Xu Jing, Xiong Zhengxiang, Zhang Yongsheng, Xu Ming. Application Tests of MuDIS in Surface Ship Operation Training Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(12): 4668-4676.

# MuDIS 在水面舰艇作战训练模拟系统中的应用测试

徐敬, 熊正祥, 张永胜, 徐明

(海军大连舰艇学院, 辽宁 大连 116018)

**摘要:** 为满足水面舰艇作战训练模拟系统网络通信的要求, 研制多层次分布服务的数据交互支撑平台 MuDIS, 支持多种系统架构, 综合实现了 HLA、DDS 标准的主要功能, 采用多关键点的分布式服务, 提供数据多种频率响应机制以及智能通讯方法, 主动分析数据通信行为, 具备容错性与自适应负载平衡能力。对 MuDIS 的数据控制、数据通信实时性、时间推进请求延时、容错性能等对水面舰艇作战训练模拟系统网络运行最为关键的能力进行了测试, 测试结果表明 MuDIS 适用于支撑具有多层次结构的复杂系统仿真。

**关键词:** MuDIS; 多层次分布服务; 作战训练模拟系统; 应用测试

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 12-4668-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201812022

## Application Tests of MuDIS in Surface Ship Operation Training Simulation System

Xu Jing, Xiong Zhengxiang, Zhang Yongsheng, Xu Ming

(Dalian Naval Academy, Dalian 116018, China)

**Abstract:** To meet the network communication demands of surface ship operation training simulation system, a multi-layer distributed service data interaction RTI was developed, which supported several system frameworks; and the main functions of HLA and DDS standards were realized. The distributed service with multiple key points was adopted; the data with several frequency response mechanisms and intelligent communication methods were provided; and the active analysis of data communication behavior was obtained. It had error-tolerance and adaptive load balancing capabilities. *The MuDIS tests on data control, real-time data communication, time advance request delay, error-tolerance performance and so on were carried out for the most critical capability of the network operation of the surface ship operation training simulation system.* The test results showed that MuDIS was applicable for multi-layer complicated system simulation.

**Keywords:** MuDIS; multi-layer distributed service; operation training simulation system; application tests

## 引言

水面舰艇作战训练模拟系统规模大、战位数量多(100 个以上)、结构复杂、实时性要求高, 对网

络通信服务提出了很高的要求。RTI 是为实现 HLA 标准而由不同机构研发的支持软件, RTI 版本较多, 水面舰艇作战训练模拟系统的分布交互仿真通信先后试用过的 RTI<sup>[1-3]</sup>有国外的商用 pRTI、DMSO, 国内的开源 CERTI 等, 但无法满足该大型模拟训练系统的实时性要求。

文献[4]提出了一种共享内存的以太网自适应 RTI 通信机制来提高 RTI 实时性。文献[1]以 HLA



收稿日期: 2018-05-16 修回日期: 2018-06-26;  
作者简介: 徐敬(1969-), 男, 江苏无锡, 博士, 教授, 博导, 研究方向为作战仿真; 熊正祥(1973-), 男, 湖南望城, 博士, 高工, 研究方向为作战系统仿真; 张永胜(1972-), 男, 山东莱阳, 博士, 高工, 研究方向为作战系统仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 4668 •

作为运行环境的基本技术框架,将 Agent 通信信息转化为 HLA 中的交互信息,由 RTI 负责底层事物,这种作法简单易行,但整体性能受限于 RTI。同时 HLA 中将信息分为对象和交互的表述并不适用于 Agent 的信息表述方式,文献[1]将包含 Agent 信息的 XML 文件转化为交互类中的字符串参数传递,这种方法利用了已有技术,但是发送方数据过滤能力有限,也不能直接传送效率更高的 XML 解析数据。文献[7]研究整个框架的核心是多 Agent 运行环境。文献[8]利用 DDS 产品设计了一组 DDS 本地通信接口实现数据动态共享和节点的动态扩展。文献[9]参照 HLA 的时间机制设计了平台级仿真中多帧速混合时间推进方法。

影响 RTI 实时性的主要原因在于它的组织架构、数据管理和实现方法上。以开源 RTI—CERTII.3 为例,首先在组织架构上,它采用单一中心 RTI 服务端为整个联邦提供服务,而且在线程管理上,它通过单个服务端进程以单线程同步堵塞方式侦听,所有仿真成员均通过一个中心 RTI 进行数据交互,这在大规模系统中是难以实现高实时性的并发操作的。而且在数据管理上,为了实现数据分发管理,RTI 把每个数据都绑定上名称、控制量等附加信息,这也增加了通信负荷和控制难度。虽然为了模型的拆分考虑,HLA 提出实现每个独立参数可在设定的数据空间里独立订购或发布,但这是个超出通常实际情况的过度要求,也大大增加了 RTI 实现上的复杂程度。事实上一个系统中的实体状态每次发生变化时,通常都引起一系列相关属性的变化,最小通信单元并非一个独立变量,通常都是一段不可拆分的数据整体,完全没有必要实现每个属性的单独控制。

针对以上问题,研制了多层次服务分布交互支撑系统—MuDIS(Multi-layer Distributed Infrastructure Service),首先 MuDIS 实现了异步、多线程的高并发实时操作,并根据不同操作系统的特性实现对应的高性能框架。如 Windows 下采用

完成端口异步框架,在 Linux 下采用同步 Reactor 框架;第二,根据系统规模采用 1 个或多个服务端共同提供服务,自适应调整负载,提高数据实时性;第三,在数据处理上将对象类或交互类的具备独立意义的数据整体作为通信单元,降低通信控制的复杂程度。第四,在通道组织上由平台自行决定,因为在实际项目执行中,用户往往难以对大量交互数据设置合适的通道模式,所以 MuDIS 自行根据具体数据的到达情况在可靠模式与性能模式之间切换。第五,在数据组织上,MuDIS 通过自主判断数据压缩率来实现通信与压缩的优化,在占用较少计算资源情况下,降低通信量。最后,对于一个局域网内的模拟训练系统来说,在实时性满足了系统需求情况下,只需要将少量对时间极敏感的数据列入时间管理,这样也能在一定程度上提高系统实时性。

MuDIS 采用多层次分布服务<sup>[10]</sup>,支持包括集中式、分布式和多层次分布式在内的多种系统架构,综合实现了 HLA、DDS 标准的主要功能,如主题或声明管理、数据分发管理、时间管理、对象管理、所有权管理等,采用无中心关键点的分布式服务,提供数据多种频率响应机制以及智能通信方法,主动分析数据通信行为,具备容错性与自适应负载平衡能力,性能稳定,能够满足水面舰艇作战训练模拟系统网络通信服务的要求。

## 1 MuDIS 简介

### 1.1 组成

MuDIS 由本地中间件(简称 LSC)和服务端(简称 RSC)构成,如图 1 所示,每个用户终端都由一个中间件支撑,整个系统通常采用一个服务端,也可以根据容错需求可以采用多服务端。多服务端之间相互协同能够实现数据空间的去中心化管理模式。单服务端提高系统效率,多服务端增强系统容错力。

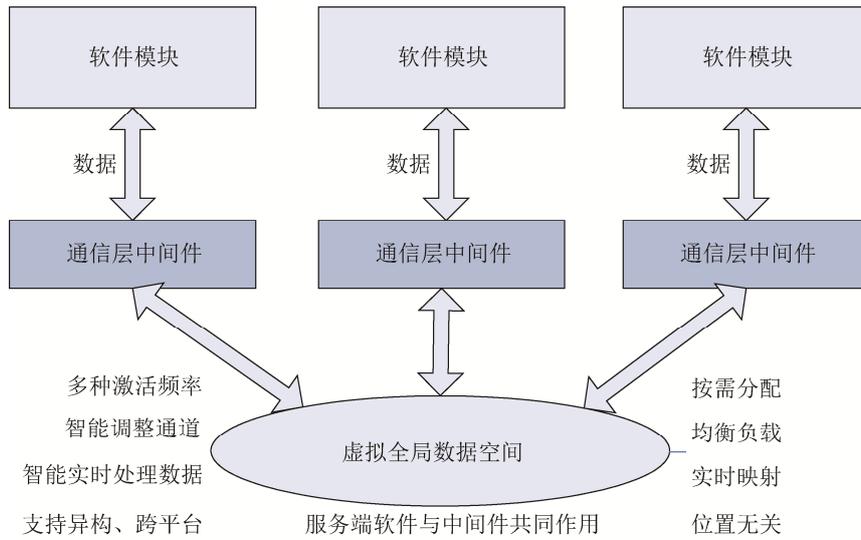


图1 MuDIS的组成图  
Fig. 1 Constitution of MuDIS

中间件和服务端共同生成全局唯一的虚拟数据空间，如图2所示，全局数据空间并非一个存在于服务端的数据实体，而是由服务端和中间件共同维护的数据集合。它分为事件流与实体集。事件流是实时生成的数据事件，由业务层生成并实时派发到相关的业务模块中去；实体集是由业务层生成并更新，由数据空间保持和维护并且及时主动向相关的业务模块通报最新信息。

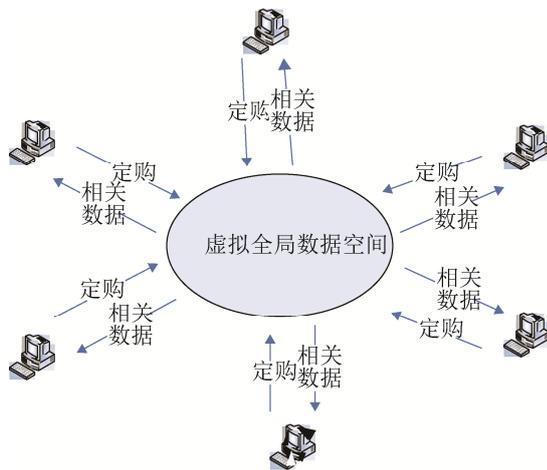


图2 虚拟全局数据空间关系图  
Fig. 2 Relationship of virtual global data space

连接数据空间的所有节点可以向该空间提出数据需求，同时各节点生成的数据也发往该空间，并由数据空间根据各节点需求分发到具体节点。对

每个上层应用而言，不需要关心数据来源和去向，仅需要通过中间件订购和发送相关数据即可，所订购数据出现在数据空间时，由MuDIS第一时间激活上层应用将数据推送到终端。

### 1.2 功能特点

- (1) 采用统一接口实现多线程、多进程、网络多节点之间的数据通信；
- (2) 后台智能处理，为用户做到数据发出后四不管：即：“不管谁接收”、“不管接收者位置”、“不管联接是否中断”、“不管网络是否阻塞”；
- (3) 智能分析数据通信行为，实时调整通信组织方法，降低网络流量，提高通信可靠性与实时性；
- (4) 提供秒级与毫秒级的时统服务；
- (5) 采用多关键点的分布式服务，任何一个服务端故障都不影响系统整体功能；
- (6) 服务器可以部署于局域网络内任意位置，不需要通知客户端；
- (7) 不需要桥接成员即可实现相同体系下多系统互联；
- (8) 能够主动通知用户网络拓扑变化情况；
- (9) 能够实现多个局域网的分区域通信管理；
- (10) 基于“自然语义”的订购管理方法更有利于交互协议的理解；

(11) 采用单向订购模式实现各节点数据发出过滤更利于快速迭代式开发;

(12) 采用多线程异步操作模式, 不影响业务流程, 系统占用率低;

(13) 能够自行恢复软件引起的通信中断;

(14) 具备自适应负载平衡机制;

(15) 完全兼容以结构体报文为单位的通信协议;

(16) 同时具备对象管理与长效数据管理功能;

(17) 采用保守时间算法有序推进仿真时钟;

(18) 具备与异构系统互联的能力, 支持 windows、linux、android 操作系统, 同时还能够直接发送与接收 UDP 广播、组播、单播数据;

(19) 具备数据实时压缩与解压缩功能;

(20) 能够保存所有通信数据、编辑数据并复演。

### 1.3 主要技术指标

(1) 支持的网络拓扑结构: 支持集中式、分布式、层次式和多层次式拓扑;

(2) 单个服务端每秒通信能力: 收发总量不小于 50 M 数据(1 000 M 局域网, 2.6 G 双核 CPU, 2 G 内存, WinXP 系统);

(3) 客户端发送队列最大负荷: 不小于 50M/s(2.4G CPU, 4G 内存, WinXP 系统);

(4) 可管理的通信节点数量(低于最大通信负荷时): 不小于 1 000 个;

(5) 系统管理能力: 支持系统成员主动发现网络拓扑;

(6) 时钟、时统精度: <1 ms;

(7) 时间管理(5 节点为例): 保守机制推进时延 <0.5 ms;

(8) 对象所有权管理能力: 支持所有权管理能力;

(9) 按频率响应数据能力: 支持按整数倍调节数据响应频率;

(10) 单个数据包最大容量: <500 M;

(11) 负载自适应检测与调整周期: 6 s;

(12) 网络中断自动恢复时间周期: 1~16 s;

(13) 通信实时性: 局域网内双节点之间通信延时 <0.2 ms。

## 2 主要关键技术

### 2.1 网络体系结构选择

分布式仿真的网络体系一般分为以下 3 种:

**集中式:** 这种结构的特点是组织简单, 具有一个中心节点, 所有终端都通过该节点进行管理, 但是一旦系统过大, 该节点容易成为瓶颈, 限制系统扩展。目前一般小型局域网都采用这种结构。

**网状分布:** 这种结构复杂, 不存在集中控制节点, 各节点的负载能力平均分配。这种结构的组织复杂, 在某些情况下适用。但是网络内节点增加时, 组织复杂度以指数级上升, 不适用于网状节点过多的情况。

**树状层次分布:** 树状结构采用多级服务体制, 信息逐层上报, 这种结构层次性好, 可以容纳较多节点, 不过也需要设定一个顶层集中控制点。

MuDIS 没有固定的组织形式, 它可以实现以上任意一种结构模式, 能够在树状顶点间实现网状联接。具体结构由仿真系统设计者在实践中根据系统规模自行决定。

### 2.2 线程模式

线程的模式选择决定了一种软件的反应能力和适用性。单线程流程简单, 但是容易造成性能瓶颈, 无法满足要求; 多线程组织复杂, 调试困难, 但是性能较高。MuDIS 采用了多线程合作模式, 其中线程分为 5 类:

(1) 主线程: 实现数据分发管理和时间管理等;

(2) 观察线程: 主动观察环境中的敏感信息;

(3) 工作线程: 循环处理敏感信息队列;

(4) 数据库线程: 定期保存或提取历史数据;

(5) 通讯线程: 每个通道都保持一对发送线程和接收线程, 处理通讯队列中的信息。

## 2.3 时间同步机制

MuDIS 在时间同步处理上采用了步长推进机制, 系统内的仿真终端具有动态改变时间同步机制的能力, 可以根据需要在时间同步和自由推进间进行切换。自由推进时, 信息不受时戳限制, 自由发布; 时间同步时, 当所有时间同步成员都申请推进后, 整个仿真时钟才推进到申请的最早时钟, 并且给每个申请的成员一个时钟反馈, 告之当前仿真时钟。

## 2.4 动态融合订购信息

MuDIS 仅要求用户上报订购信息, 不要求上报公布信息, 公布信息由 MuDIS 根据所有订购信息动态融合后通知各用户。这样严格实现了数据按需发布。无效数据被 MuDIS 主动隔离。

## 2.5 数据分发管理实现

数据分发管理的目的是为了充分发挥网络效能, 避免无用信息占用网络资源。目前数据分发管理有 3 种策略:

简单策略: 实现接收方过滤, 但是没有对网络资源进行任何优化;

静态路径空间策略: 根据路径空间, 实现静态的发送方数据过滤;

静态路径空间网格策略<sup>[11]</sup>: 这种策略是在路径空间基础上进行进一步网格划分。它理论上能够更好实现网络优化, 但是在实践中, 当仿真系统规模增大时, 这种做法很容易造成负面影响, 极大增加人员工作量, 网格细分方法不适当时, 非但不能提高网络效能, 反而会造成网络堵塞。

MuDIS 对第二种策略进行了改进, 采用了动态路径空间策略实现“发送方数据过滤”。按离散信息的概念对数据进行路径空间划分, 这一过程是由 MuDIS 根据信息需求自动划分的, 不需要事先人为确定。在系统运行时, MuDIS 根据环境中各节点信息需求的变化来动态调整路径空间及网络路由。

## 2.6 数据通信通道选择

MuDIS 数据通信通道有以下 3 种:

(1) 程序线程间内存操作通道: MuDIS 的所有用户数据都要通过 LSC 提供的接口发出, 当 LSC 发现数据接收方就在本地时, 数据直接按内存复制操作赋值。

(2) 主机内进程间共享内存通道: 当接收方与发出方在同一主机内时, 双方自主建立共享区, 通过共享内存操作实现通信。

(3) 网络异地间通信通道: 当本地不存在数据订购方时, 数据通过网络发出到虚拟数据空间, 异地接收方通过网络接收。

## 2.7 网络通讯模式选择

MuDIS 中所有信息都可以通过 3 种模式发送: 可靠模式、性能模式和智能模式, 模式选择由发送方采用的 API 参数动态确定。

可靠模式采用点对点通讯, 在同一局域网的任意两个终端间的信息都要经由环境节点进行两次传递。广域网内环境间的信息则要通过多个环境中节点传递。这种传递过程对于仿真终端是透明的。

性能模式采用组播方法。这种方法只能用于同一局域网的同一环境内, 即处于同一环境内的各终端之间可以采用性能模式发送数据, 而跨广域网的不同局域网内的终端间只能采用可靠模式。如果性能模式无法实现时, MuDIS 会自行改变为可靠模式。

智能模式仅应用于局域网。在智能模式中 MuDIS 采用可靠模式发送, 接收方根据接收的数据类型判断数据是否稳定, 稳定后即通知发送方切换为性能模式; 如果接收数据出现不稳定状态后, 立即通知发出方切换到可靠模式。

在网络通讯的实现上, MuDIS 为了提高效率, 针对不同操作系统采用不同模式, 在 Windows 系统中采用 Proactor 完成端口模式, 在 Linux 与 Android 系统中采用 Reactor 反应模式。

### 3 应用测试与分析

#### 3.1 测试对象

水面舰艇作战训练模拟系统由 104 台计算机构成,模拟了某型舰艇的所有作战部门的武器和探测系统以及 5 个指挥舱。以通信量最大的对空雷达模拟器为例:每个目标数据结构长度为 96 字节,每周更新最多 1 000 批目标,最高刷新周期为 50 赫兹,所以对该单部雷达而言,仅接收的目标数据量为 4.5 M/s。该系统内有 10 部对空和对海雷达模拟器。在系统规定的最复杂训练想定情况下,单个服务端的压缩后数据流量峰值为 27 M/s 左右。

水面舰艇作战训练模拟系统采用的 MuDIS 体系结构根据整体规模和需求设计成图 3 中的形式,它的中心层由 2 个核心 RSC 组成,直接下级包括指控系统 RSC、武器系统 RSC、战斗航海 RSC 和导调控制 RSC 等 6 个 RSC 服务端,其中武器系统和指控系统由于规模较大,为了增强容错能力,服务组中采用了 2 个 RSC。指控分系统拥有 2 层 RSC,上层是 2 个 RSC 构成的服务组,下层是 6 个 RSC 服务器,分别负责编队指控和 5 艘

舰艇的指控。武器分系统的体系结构与指控系统一样,不过下层部署有 10 个 RSC 服务器,分别负责各个子系统的训练战位。训练模拟系统采用这种结构的好处在于:结构清晰,逻辑关系明确,即能满足编队和单舰整体训练要求,也能实现各个分系统单独训练。

系统中最多只采用 2 个 RSC 服务器组成服务组,其原因在于:整个网络环境和计算机的硬件条件较好,采用了千兆以太网,根据整个通信量估算 2 个 RSC 服务器能够满足通信和容错的需求。如果系统规模增大,那么相应的 RSC 服务组应该增加节点,但是不宜超过 3~4 个,以免增加组内协同的复杂度。

分系统的 RSC 服务组向下引出各个子系统的 RSC,子系统 RSC 管理若干训练战位。

#### 3.2 数据控制能力测试与分析

整个训练模拟系统规模较大,信息种类极多,MuDIS 必须根据信息的需求情况确定其传输范围,以降低整体的网络通信负荷,表 1 列举了某些数据的作用域和传输范围。

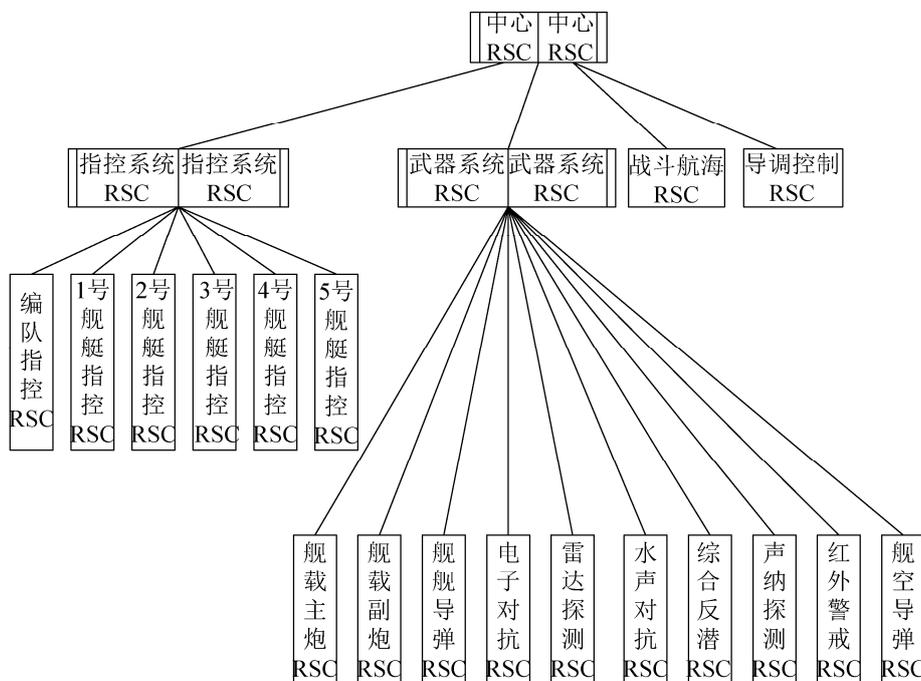


图 3 训练模拟系统的 MuDIS 服务架构设计图

Fig. 3 MuDIS service framework design for training simulation system

<http://www.china-simulation.com>

• 4673 •

表 1 某些数据的作用域和传输范围示例  
Tab. 1 Example of scope and range of some data

信息类型	功能	作用域	传输范围
提示信息	提示各种操作有关信息	1	战位训练软件 LSC 内
武器协同战位的指令	单个武器装备子系统内的多个协同战位间的操作指令	2	子系统 RSC 以下
传感器信息	从雷达、声纳等传感器发出的探测目标信息	3	分系统 RSC 以下
舰艇航行姿态	描述舰艇姿态角, 用于协调三维海战场多通道视景拼接显示	2	战斗航海 RSC 以下
作战方案	从指控系统发出的用于指挥武器的作战方案	4	全局

由表 1 中列举的信息及作用范围得知, MuDIS 对数据的控制能力较强, 可以根据需求将数据的传输范围控制在从战位训练软件到系统全局的不同层次内。

### 3.3 通信实时性测试与分析

MuDIS 中数据通信实时性分为两个方面: 一是 LSC 下属的自主模块(用户仿真程序内的独立线程)间数据通信的实时性, 二是 RSC 管理的不同邦员间通信的实时性。为了测试 MuDIS 中的数据传输实时性, 在该训练系统的战位软件上加载如下测试模块:

A、B 模块互相定购测试消息, A 模块发出实时性消息被 B 接收, B 收到后返回实时性消息, A 收到后计算消息往返时间, 然后重复若干次计算平均消耗时间。

测试中, 当测试模块被加载到分布于树形网的不同区域的战位训练软件上时, 测试模块之间属于网间通信, 消息会经过不同数量 LSC 和 RSC 的中转, 所以位置的不同会造成耗时不同。测试消息长度为 64 字节。表 2 是 1 000 次测试后得到的结果。

当 A、B 模块处于同一局域网内采用性能优先模式进行网内通信, 则测试结果为表 3 中所示, 其中 2048 字节消息的延迟明显增加是由于该消息长

度超过了 MuDIS 的最大传输信息单位长度而被 MuDIS 拆分为 4 次传输。

表 2 可靠模式通信实时性测试结果

Tab. 2 Reliable mode communication real-time test results

A、B 之间消息经过的 LSC 和 RSC 数量 /64byte	平均到达 时间/ms
1 个 LSC(同一节点的自主模块间通信)	0.041 3
2 个 LSC, 1 个 RSC(网内通信)	0.420 3
2 个 LSC, 5 个 RSC(网间通信)	3.910 8

表 3 性能模式通信实时性测试结果(网内通信)

Tab. 3 Test results of performance mode real-time communication (inside the net communication)

A、B 之间传输消息字节长/byte	平均到达时间/ms
512	0.145 3
1 024	0.184 6
2 048	0.401 1

千兆局域网中, 通信量小于 MuDIS 最大负载情况下进行用户层的数据正确率和网络传输延时测试。测试方法为: 同时在 N 台计算机上运行 N/2 组测试程序, 每组测试程序分为发送方和反馈方, 发送方每次发出带有序号和正确性检验信息的数据包, 反馈方收到数据不进行处理直接反馈回去, 发送方收到反馈回的数据并确认序号正确后再发下一组数据, 这样重复多次可以得出丢包率为 0 情况下的通信延时。进行了 1 000 次通信延时测试, 结果如表 4 所示。

表 4 通信延时测试结果

Tab. 4 Test results of communication delay

序号	组数	数据包大小/字节	MuDIS 处理后大小/字节	通信次数	平均延时/ms
1	1	256	256	1 000	0.135 8
2	2	1 024	1 024	1 000	0.147 6
3	2	1 000 000	3 932	1 000	0.195 2

说明: 不同数据的压缩率不同。测试数据的压缩率较大, 是因为重复性字节较多。如果采用随机数构成数据包, 那么其压缩程度较小。

### 3.4 时间推进请求延时的测试与分析

MuDIS 向用户提供 3 种传输模式, 可靠、性能与智能模式。可靠模式下通过 TCP 通道实现, 性能模式通过 UDP 组播实现, 智能模式通过自主判断用户数据的通信行为来决策是否在两种模式间切换。

MuDIS 在时间管理上采用的是保守推进机制。所有数据分为两类, 一是时间约束数据, 二是自由交互数据。时间敏感的数据包附带时间戳, 由服务端按时间戳排序, 当所有时间约束成员提出推进申请后, 由服务端计算出最小推进时间并且根据仿真时间的推进来决定向哪些成员推送符合条件的时间戳数据。自由交互数据不列入时间消息队列。

为了单独测试 MuDIS 的时间推进请求延时, 设计了一个符合人在回路训练仿真特点的时间同步推进实验, 实验采用集中结构, 通过一个 RSC 为所有邦员提供服务, 各个邦员的工作流程见图 4。

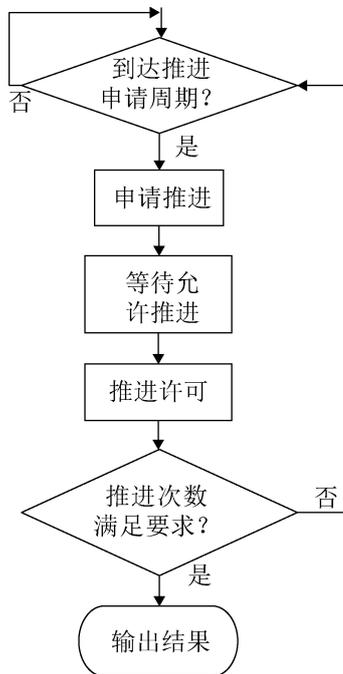


图 4 测试用例流程图  
Fig. 4 Test case flow chart

为了避免其他通信的干扰, 各个邦员只发出时

间推进申请, 不发出其他时戳消息, RSC 采用主动邀请机制: 当 RSC 收到某一邦员推进申请时, 主动向其他未提出申请的邦员发出推进邀请, 受邀邦员会在收到邀请时根据自身进度及时申请推进, 如果已经发出申请, 则忽略邀请。进行了 1 000 次推进测试, 结果如表 5 所示。

表 5 时间推进测试结果  
Tab. 5 Test results of time advance

推进机制	测试成员数量	平均一次推进时间/ms
主动邀请 机制	3	0.332 5
	5	0.474 7
	7	0.61
	3	0.363 0
	5	0.481 1
	7	0.591 7
	3	0.337 1
	5	0.439 2
	7	0.661 2

### 3.5 容错性能的测试与分析

设置的故障情况: 某服务组由 2 个 RSC 服务端组成, IP 地址分别为 22.69.186.5(PC1) 和 22.69.186.253(PC2), 测试过程中首先启动某仿真应用程序 APP1, 将其服务端设置为 PC1, 然后等待一段时间后再启动 PC1 和 PC2, 最后退出 PC1 的进程。APP1 将 MuDIS 的处理过程信息实时显示在界面上, MuDIS 能够自行不断重复联接 PC1, 当 PC1、PC2 和 APP1 稳定工作时 PC1 突然退出后的处理信息, MuDIS 能够自行切换到同组的 PC2, 从而保持仿真正常进行。

为了全面测试 MuDIS 的容错性能, 实验设置了多种故障情况, 具体的测试结果见表 6。

由表 6 列出的测试结果得知, 任何时候只要服务组内的节点不同时出现故障, MuDIS 就能够继续维持正常工作, 即使是通信中断后, MuDIS 也能通过重联机制去定时检测通信是否恢复正常, 所以 MuDIS 具备很强的故障容错能力。

表6 容错性能测试结果  
Tab. 6 Test results of error-tolerance

设置的故障现象	MuDIS 的处理方法
单节点的 RSC 服务端结束进程	1、当故障 RSC 的下级没有设置角色转换机制时, 自行重联, 当重新启动 RSC 服务端后, 自行恢复; 2、当故障 RSC 的下级设置了角色轮换机制后, 自行连接到故障 RSC 的上级, 即中心 RSC 后, 恢复正常
RSC 服务组中一个节点结束进程	训练系统不受影响正常运行
断开连接单节点 RSC 服务端的网线	受影响的战位数据停止更新, 没有其他异常现象, 重新接上网线后数据恢复正常更新
断开 RSC 服务组中的一个节点的网线	受影响的战位自行连接到另一个 RSC 服务端, 继续正常运行

## 4 结论

MuDIS 采用无中心关键点的分布式服务, 提供数据多种频率响应机制以及智能通讯方法, 主动分析数据通信行为, 具备容错性与自适应负载平衡能力, 性能稳定。测试结果表明, MuDIS 适用于支撑具有多层次结构的复杂系统仿真, 数据控制能力强、通信实时性较高、时间推进效率较高、容错能力强, 可满足水面舰艇作战训练模拟系统网络通信运行的要求。

## 参考文献:

- [1] 姚益平. 高性能分布式交互仿真运行支撑平台关键技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2003.  
Yao Yiping. Research on the Key Technologies of High Performance Run Time Infrastructure of Distributed Interactive Simulation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [2] 陈显锋, 裘丽华, 王占林. 分布式综合仿真平台软件结构设计[J]. 计算机仿真, 2003, 20(1): 94-97.  
Chen Xianfeng, Qiu Lihua, Wang Zhanlin. The Software Structure Design for a Distributed Integrated Simulation Platform[J]. Computer Simulation, 2003, 20(1): 94-97.
- [3] 韩超, 郝建国, 黄健, 等. HLA 多联邦互联工具 KD-FBT 的研究与实现[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3118-3122.  
Han Chao, Hao Jianguo, Huang Jian, et al. Research and Implementation of the software KD-FBT for Interconnecting HLA Multiple Federations [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3118-3122.
- [4] 梁洪波, 柳林, 姚益平, 等. 高性能 RTI 自适应通信机制研究[J]. 国防科技大学学报, 2012, 34(3): 148-153.  
Liang Hongbo, Liu Lin, Yao Yiping, et al. Research on self-adaptive communication mechanism for high performance RTI [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(3): 148-153.
- [5] 王卫青, 华祖耀. 基于 Agent 体系结构的 HLA 联邦成员设计与实现[J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 142-145.  
Wang Weiqing, Hua Zuyao. Design and Realization of Federate in HLA based on Agent Architecture[J]. Computer Simulation, 2006, 23(7): 142-145.
- [6] 杨乐平, 陈钦, 朱彦伟. HLA 框架下的 Agent 与 XML 应用研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1045-1048.  
Yang Leping, Chen Qin, Zhu Yanwei. Study on application of Agent and XML in the HLA[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(5): 1045-1048.
- [7] 高志年, 邢汉承. 智能仿真支撑环境 H-MAS[J]. 东南大学学报. 2002, 32(2): 197-201.  
Gao Zhinian, Xing Hancheng. H-MAS: Intelligent Simulation Supporting Environment[J]. Journal of Southeast University, 2002, 32(2): 197-201.
- [8] 周平, 苏银科, 沈超. 基于 DDS 的分布式数字仿真系统设计与实现 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26(8): 1678-1691.  
Zhou Ping, Su Yinke, Shen Chao. Design and Implementation of Distributed Simulation System Based on DDS[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8): 1678-1691.
- [9] 袁刚, 许文腾. 武器平台仿真级中多帧速混合时间推进方法[J]. 系统仿真技术, 2015, 27(2): 172-175.  
Yuan Gang, Xu Wenteng. The methods of Multi-flames Mixed Time Advance of Weapon Platform Level Simulation[J]. Journal of System Simulation Technology, 2015, 27(2): 172-175.
- [10] 李铁, 康凤举, 邹文荫. 基于消息的分布式仿真支撑环境的研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8): 1614-1617.  
Li Tie, Kang Fengju, Zou Wenmeng. Research on Message Based Distribute Simulation Runtime Environment[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(8): 1614-1617.
- [11] 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.  
Zhang Ting, Wang Qi. Data Distribution Management of Flight Simulation Based on HLA/RTI[J]. Journal of Computer System Application, 2015, 24(4): 223-227.