

## 高性能 RTI 自适应通信机制研究\*

梁洪波<sup>1,2</sup>, 柳林<sup>3</sup>, 姚益平<sup>1</sup>, 刘步权<sup>1</sup>, 慕晓冬<sup>2</sup>, 李猛<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073;

2. 第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025; 3. 海军装备研究院, 北京 100161)

**摘要:** 为了提高 HLA 仿真系统在高性能计算平台上的运行性能, 针对高性能计算平台的高性能层次式通信环境, 提出了一种共享内存/IB/以太网自适应 RTI 通信机制——SACM 机制, 该机制能够根据通信双方所在节点的网络拓扑信息, 自适应建立延迟最小的通信连接, 实现共享内存、IB 等高速互连及以太网互连的自适应选择。同时在该通信机制中, 针对节点内高速共享内存通信需求, 提出了一种面向多盟员互连的共享内存通信算法, 有效提高了节点内盟员通信效率。对象属性值更新延迟测试结果表明, 该通信机制可以有效提高 RTI 在高性能计算平台的通信性能。

**关键词:** 分布式交互仿真; 运行支撑环境(RTI); 高性能计算平台; 自适应通信机制; 共享内存通信  
**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)03-0148-06

## Research on self-adaptive communication mechanism for high performance RTI

LIANG Hongbo<sup>1,2</sup>, LIU Lin<sup>3</sup>, YAO Yiping<sup>1</sup>, Liu Buquan<sup>1</sup>, MU Xiaodong<sup>2</sup>, Li Meng<sup>1</sup>

(1. College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

3. Naval Academy of Armament, Beijing 100161, China)

**Abstract:** To promote the execution efficiency of HLA system which executes on high performance computing (HPC) platform, a self-adaptive communication mechanism, named SACM, is proposed for the hierarchy communication environment of HPC. By this mechanism, the connection with lowest latency can be established from the network information of computing nodes. The shared memory, high speed IB network and Ethernet network can be selected by federates adaptively. Aiming at the demand of shared memory communication between federates within one node, a high speed shared memory communication algorithm based on distributed infrastructure is proposed, and the communication performance can be improved by this algorithm. Experiment result of object attributes value updating latency has shown that the communication performance of RTI executing on HPC platform has been greatly improved.

**Key words:** distributed interactive simulation; runtime infrastructure; high performance computing platform; self-adaptive communication mechanism; shared memory communication

高层体系结构 HLA(High Level Architecture) 为分布式交互仿真提供了一个通用的技术框架和开放的标准<sup>[1]</sup>。运行支撑环境(Runtime Infrastructure, RTI) 是 HLA 接口规范的具体实现<sup>[2-3]</sup>。基于 HLA/RTI 的大规模仿真应用在运行过程中往往需要进行大量的通信, 如军事作战仿真中的雷达实体在每一步仿真过程中都需要接收其探测范围内的导弹、飞机等众多实体的位置信息, 而当战场中雷达、导弹、飞机及舰船等作战实体的规模增大时, 系统的通信量往往成级数增长; 另一方面, 为保持系统因果序正确, 仿真应

用在运行过程中往往需要进行频繁的协同操作, 这种协同操作每次都需要交换大量的信息, 大量的通信已成为影响整个系统运行效率的主要因素之一<sup>[4-5]</sup>。高性能计算机可为 HLA 仿真提供多种不同层次的高性能硬件通信环境<sup>[6-7]</sup>, 如一个节点内的共享内存、节点之间的 IB 高速互连、高性能节点与外部子系统的以太网互连等。然而, 目前的 HLA 运行支撑平台 RTI 大都只提供 TCP/IP 通信支持, 难以有效发挥高性能计算节点内共享内存通信及节点间 IB 通信的优势。因此, 研究面向高性能计算环境的 RTI 通信机制对于提高

\* 收稿日期: 2011-09-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170047)

作者简介: 梁洪波(1983—), 男, 河北邢台人, 博士研究生, E-mail: lianghongbo@nudt.edu.cn;

姚益平(通信作者), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: ypyao@nudt.edu.cn

HLA 仿真的运行性能和可扩展性等具有重要的理论和现实意义。

## 1 高性能计算机层次式通信环境及传统 RTI 通信机制的不足

高性能计算机(HPC)体系结构主要有对称多处理器共享存储并行机(SMP)、分布共享存储并行机(DSM)、大规模并行机(MPP)和SMP集群等<sup>[8]</sup>。目前,以SMP集群(图1)为代表的层次并行体系结构计算机发展迅速,已成为主流体系结构。这种结构的特点是结合了SMP和MPP的优点,同时具备节点内共享存储和节点间分布存储的层次结构,可实现节点内共享内存、节点间 Infiniband 等高速互连两级通信,此外,当与外部网络连接时,还存在高性能节点与外部 PC 节点间以太网通信。这种多层次通信环境的存在,客观上对基于高性能计算机的 HLA 仿真支撑平台的通信机制提出了更高的要求。

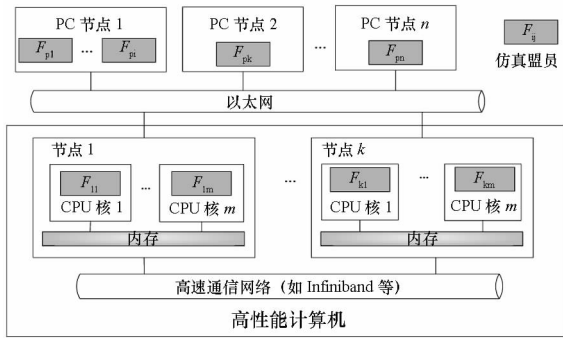


图1 基于高性能计算平台的分布式仿真应用通信环境

Fig.1 Communication environment of distributed simulation application on HPC

随着仿真应用的不断发展,基于PC机网络的HLA仿真已越来越不能满足其对计算和通信能力的需求,基于高性能计算平台的HLA仿真正成为分布式仿真发展的一个重要趋势。在这类仿真应用中,HLA联盟通常部署于图1所示的以高性能计算机为中心的网络环境中,高性能计算机通过其强大的计算能力与高速的通信能力为仿真应用的复杂模型解算、大规模实体交互等提供硬件支持<sup>[9-10]</sup>;而通过以太网与高性能计算机相连的PC机则为人机交互提供支持。高性能计算机的层次式通信结构可为盟员间通信提供多种可选择的通信方式,例如在图1中,位于同一个高性能计算节点内的不同盟员进程间( $F_{i1}$ 、 $\dots$ 、 $F_{im}$ ),可以通过共享内存、IB或以太网完成盟员间通信;位于不同高性能计算节点间的盟员(如 $F_{i1}$ 与

$F_{k1}$ )可以通过IB或以太网完成盟员间通信等。由于不同的通信方式性能差异很大,通常情况下,共享内存的通信性能优于IB网络,IB网络优于以太网,如基于某高性能计算平台上的通信延迟测试结果:当数据包为4KB时,基于共享内存的进程间平均通信延迟为 $3.6\mu\text{s}$ ;基于IB的平均通信延迟为 $15\mu\text{s}$ ;基于千兆以太网的平均通信延迟为 $140\mu\text{s}$ 。因此,为了获得更高的仿真执行效率,面向高性能计算环境的RTI通信机制需要能够针对不同的环境选择最佳的通信方式,如节点内共享内存通信、节点间IB通信等<sup>[11]</sup>。

然而,由于现有的RTI仿真平台主要面向分布式网络环境,盟员间通过以太网进行通信,受通信环境的制约,其通信机制主要基于TCP/IP实现,如pRTI<sup>[12]</sup>、KD-RTI<sup>[13]</sup>、Portico RTI<sup>[14]</sup>、ceRTI<sup>[15]</sup>、StarLink<sup>[16-18]</sup>等,虽然能满足基于分布网络构建HLA仿真系统的应用需求,但是,这种单一的通信机制不能有效发挥高性能计算机层次式通信硬件的效能,其主要原因有:(1)不能实现同一个计算节点内盟员间共享内存通信;(2)只能基于同一个网络实现盟员间互操作,不能发挥高性能计算节点间高速IB互连优势,例如使用该RTI基于图1的通信环境构建HLA仿真应用时,为了实现与外部盟员间通信,所有盟员必须基于以太网TCP/IP通信,不能基于IB网实现高性能计算节点间盟员高速通信。针对这些问题,文献[11]给出了我们的高性能RTI的基本框架,提出在高性能RTI中兼容共享内存、IB高速通信以及以太网通信等不同通信方式以提高通信性能,并从面向对象软件设计角度设计了基本实现框架。本文则对高性能RTI自适应通信机制进行深入研究,从自适应连接算法、共享内存通信算法等方面出发,研究如何尽可能减少通信延迟,以充分发挥高性能计算机的高速通信优势。

## 2 高效自适应 RTI 通信机制

针对单一的TCP/IP通信在高性能计算平台的不足,为了充分利用高性能计算机层次式通信环境的优势,论文提出了一种高效的共享内存/IB/以太网自适应RTI通信机制——SACM(Self-Adaptive Communication Mechanism),并针对SACM中的自适应连接与分布式仿真多盟员互连通信的特点,分别提出了基于位置和网络性能的自适应连接算法与基于分布式共享内存通信结构的高速内存通信算法。

### 2.1 SACM 设计

SACM 将共享内存通信与多网络 TCP/IP 通信相结合,使得通信双方盟员能够根据所在节点的网络信息,自适应选择最佳的通信方式:如果都位于同一个计算节点内部,则选择共享内存实现盟员间通信;如果分别位于不同的高性能计算节点,则选择 IB 高速互连网络实现盟员间通信;如果分别位于高性能计算节点与 PC 节点,或者分别位于不同的 PC 节点内,则选择以太网网络实现盟员间通信。SACM 主要包括通信初始化、连接建立、消息发送及断开连接 4 部分,如图 2 所示。

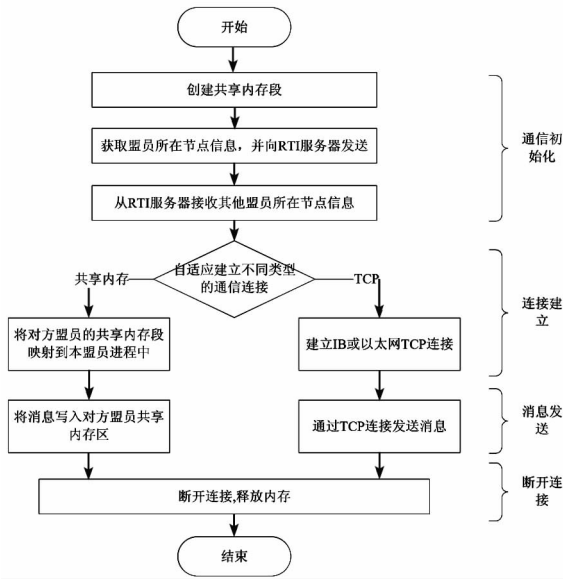


图 2 SACM 通信过程

Fig. 2 Communication process of SACM

(1)通信初始化。盟员进程在加入联盟执行时,首先创建用于共享内存通信的接收内存段。然后获取本盟员进程所在节点的网络信息(包括 IP 地址,网络带宽等),将信息提交到 RTI 服务器,并从服务器接收其他已加入盟员所在节点信息,使得每个盟员方都拥有全局的网络信息。

(2)通信连接建立。在获取了全局的网络信息后,盟员将根据通信双方进程所在节点的网络信息,自适应建立延迟最小的通信连接。如果需要建立共享内存通信连接,则通信双方互相映射对方的共享内存区到本进程中;否则建立 IB 或以太网 TCP 通信连接,建立连接后,在盟员方记录连接类型及连接指针。

(3)消息发送。当通信双方需要发送消息时,需要根据记录的连接类型选择不同的发送方式:如果为共享内存通信,将消息写入对方盟员的共享内存区;否则,获取 TCP 连接指针,通过 TCP 连接发送消息。

(4)通信连接断开。在盟员退出联盟执行时,该盟员与所有其他盟员间 TCP 通信连接将断开,然后该盟员释放其创建的共享内存段,通信结束。

SACM 中,通信初始化以及连接建立过程与基于 TCP/IP 的通信机制相比,需要一定的额外开销,例如与 RTI 服务器的网络信息同步,共享内存段的创建与映射、以及根据不同网络类型建立不同的 TCP 连接等。为了减少这些额外开销对仿真系统性能的影响,在实现中,通信初始化以及连接建立过程在盟员加入联盟执行服务调用中完成,在整个仿真过程中,每一个盟员只执行一次该服务调用。同时,由于仿真系统运行性能主要取决于仿真推进速度,为了减少仿真推进过程中自适应选择引起的消息发送开销,不同通信方式的自适应选择通过简单的标志位(该标志位在连接建立过程中记录)判断即可,与基于 TCP/IP 的通信机制相比,在仿真推进过程中几乎不会产生额外的开销。

### 2.2 基于位置和网络性能的自适应连接算法

SACM 的关键是盟员间如何自适应建立最佳的通信连接,针对该问题,提出了基于位置和网络性能的自适应连接算法,该算法基于如下原理:在盟员的 IP 地址列表(位置信息)中,位于同一个节点内的盟员必然有一个 IP 地址相同,此时为该盟员间通信指定共享内存通信方式;否则指定通信方式为 TCP 通信。由于节点间 IB 高速网络的带宽(可达 40Gb/s)明显大于外部以太网网络(千兆网带宽 1Gb/s)。因此可以根据网络带宽信息区分高速与低速网络,从而优先选择高带宽网络建立 TCP 连接,这样既保证了高性能节点间盟员通信可以基于高速互连网络实现,又满足了高性能计算机内部与外部盟员间通信需求。同时,由于两个盟员间可以共享同一 TCP 连接,这里规定由句柄值小的盟员发起连接。为了实现该算法,在盟员方定义了节点列表 NodeList(NL),用于按网络性能由好到差顺序存储盟员的节点信息(包括 IP 地址与对应的网络带宽),算法描述如下:

```

for(本地盟员  $F_m$  地址列表  $NL_m$  中每一个地址  $a_i$ )
{
  for(目标盟员  $F_n$  地址列表  $NL_n$  中每一个地址  $a_j$ )
  {
    if( $a_i == a_j$ )
       $F_m$  和  $F_n$  位于同一个节点上,选择共享内存通信方式,获取  $F_n$  共享内存指针,算法结束;
    else
       $F_m$  和  $F_n$  位于不同节点上,选择 TCP 通信方式;
  }
}

```

```

if( $a_i$  与  $a_j$  在同一网段内)
    if( $F_m$  盟员句柄  $H_m$  小于  $F_n$  盟员句柄  $H_n$ )
        由  $F_m$  创建指向  $a_j$  的 TCP 连接;
    算法结束;
endif
endif
endelse
}
    
```

盟员在加入联盟执行时,请求加入盟员和已加入盟员将根据盟员间通信需求,基于以上算法自适应建立盟员间通信连接,如图3所示。(1)盟员A与盟员B位于同一个高性能计算节点内,盟员间采用共享内存通信;(2)盟员A与盟员C位于不同的高性能计算节点,且同时通过IB与以太网互连,由于IB带宽高于以太网,因此基于IB网络建立TCP连接;(3)盟员A与盟员D分别位于高性能计算节点与PC节点,基于以太网建立TCP连接。

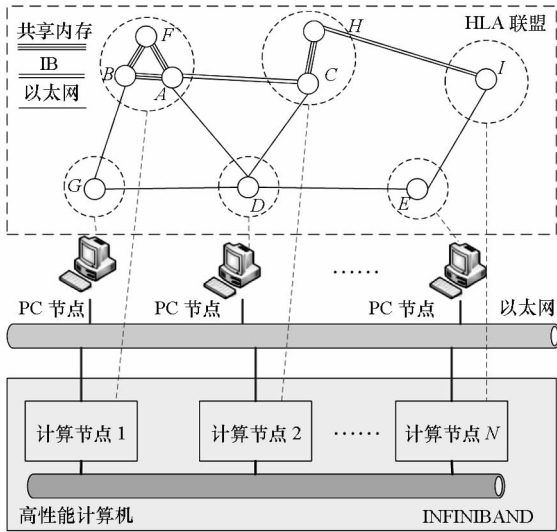


图3 基于SACM的HLA联盟及盟员间通信连接  
Fig.3 HLA Federation based on SACM and connections between federates

### 2.3 基于分布式共享内存结构的高速通信算法

在基于高性能计算环境的HLA仿真中,往往有多个盟员并行运行在同一个高性能计算节点内,盟员之间存在大量而频繁的数据交互。在这样的通信环境中,如何管理共享内存并保证进程间内存访问的一致性共享内存通信正确性的关键,也是影响通信性能的最主要因素<sup>[19]</sup>。针对该问题,本文提出了一种基于分布式共享内存结构的通信算法:每一个盟员维护一个属于本地盟员的共享内存段,用来接收其他盟员的消息。发送盟员通过向接收盟员的共享内存段写数据实现消息发送,目标盟员通过从本盟员的共享内存段读

数据实现消息接收(如图4所示)。由于每一个接收盟员都拥有独立的内存区域,因此具有不同目的地址的发送进程不会竞争同一个共享内存段,有效减少了盟员间共享内存访问冲突。同时,由于只需要保证局部共享内存的一致性,不需要全局进程同步,使得进程间的同步开销减小,保证了通信效率。

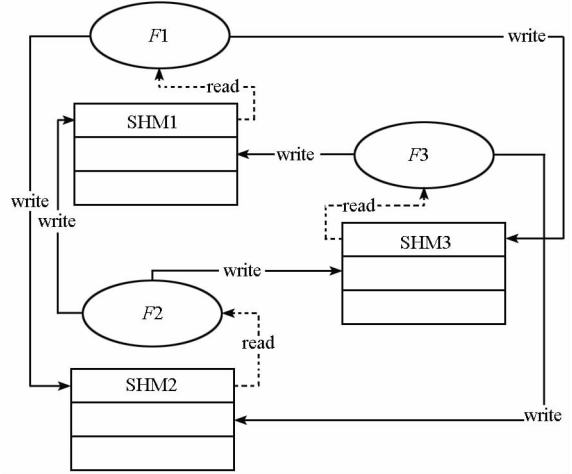


图4 分布式共享内存通信结构  
Fig.4 Distributed shared memory communication infrastructure

内存中,消息分为两部分存储:消息长度与消息内容。消息长度占用4个字节内存空间,消息内容占用大小为消息长度字节的内存空间,进程间同步基于信号量机制实现,该算法由写算法和读算法组成,写算法描述如下:

**for** (每一个长度为  $l$  的消息  $m$ )

- ```

{
    ① 等待写信号量 write;
    ② 比较可用空闲内存大小  $a$  与  $l$ , if( $a < l + 4$ ) then 等待固定时间间隔  $\Delta t$ , 转②; else 转③;
    ③ 比较写指针  $w$  与内存结束位置  $e$ , if( $w + 4 \leq e$ ) then 将长度值  $l$  写入内存,  $w = w + 4$ , 转⑤; else 转④;
    ④ 将长度值分两部分存储,首先,取长度为  $e - w$  的第一部分存储在  $w$  与  $e$  之间的内存区域,并移动  $w$  到内存起始位置  $b$ ;然后将剩余部分写入内存,移动  $w$  到长度值存储区的末尾;
    ⑤ if( $w + l < e$ ) then 将消息内容写入内存区,移动写指针  $w$ ,  $w = w + l$ , 转⑦; else 转⑥;
    ⑥ 将消息内容分两部分存储,第一部分存储在  $w$  与  $e$  之间的内存区,移动  $w$  到内存起始位置  $b$ ;再将第二部分写入  $b$  指向的内存区,移动  $w$  到消息内容末尾;
    ⑦ 等待互斥信号量 compute;
    ⑧ 计算可用空闲内存大小  $a$ ,  $a = a - l - 4$ ;
    ⑨ 释放 compute 信号量;
    ⑩ 释放 full 信号量;
}
    
```

⑪ 释放 write 信号量;

读算法描述如下:

while(1)

- ① 等待信号量 full;
- ② 比较读指针 r 与内存结束位置 e, if(r+4 <= e) then 读出消息长度值 l, r=r+4, 转④; else 转③;
- ③ 将长度值 l 分两部分读出, 首先读出 r 与 e 之间的数据, 移动 r 到内存起始位置 b; 再读出 4-(e-r) 长度数据。两部分数据合并即得到长度值 l, 移动读指针 r 到长度值存储区的末尾;
- ④ if(r+l <= e) then 读出消息内容, 移动读指针 r, r=r+l, 转⑥; else 转⑤;
- ⑤ 将消息内容分两部分读出, 首先读出 r 与 e 之间的数据, 移动 r 到内存起始位置 b; 再读出 l-(e-r) 长度数据, 两部分数据合并即得到消息内容。移动读指针 r, 使 r 指向内存中该消息的结束位置;
- ⑥ 等待互斥信号量 compute;
- ⑦ 计算可用空闲内存大小 a, a=a+l+4;
- ⑧ 释放 compute 信号量;

### 3 性能测试

#### 3.1 实验环境

本通信机制在课题组设计的高性能 RTI 软件 shmRTI 中得到实现。在 HLA/RTI 中, 对象属性值更新是 HLA 仿真系统中最常用的服务<sup>[20]</sup>, 当不使用时间管理时, 其性能直接反映 RTI 的通信性能。实验环境由 3 个高性能计算节点和 3 台 PC 机组成。高性能计算节点环境为双路四核 QuadCore Xeon 处理器, 2.53GHz, 32GB RAM, PC 机配置为 Intel 双核 E7500 处理器, 2.93GHz, 2GB RAM, 高性能节点之间在集群内部通过 IB 互连, 同时每一个高性能节点与 PC 机采用千兆以太网互连, 测试结果与目前国际上普遍使用的基于 TCP/IP 通信机制的 RTI 软件 pRTI 进行了对比, pRTI 作为一款通用的 RTI 软件, 具有较高的性能和较好的稳定性<sup>[4]</sup>, 在国内外各类 HLA 仿真系统中得到了广泛应用。

#### 3.2 性能测试与分析

对象属性值更新延迟测试过程为: (1) 首先构造测试联盟 F, 联盟 F 由盟员 A、B、C、...、I 这 9 个盟员组成, 盟员在高性能计算机及 PC 机上的分布如图 3 所示。(2) 在联盟 F 中分别测试同一高性能节点内、高性能节点间、高性能节点与 PC

节点间的盟员对象属性值更新延迟。(3) 盟员  $F_i$  与  $F_j$  间对象属性值更新延迟测试方法如下:  $F_i$  与  $F_j$  采用 Ping-Pong 方式发送属性更新, 即  $F_i$  首先发出属性更新,  $F_j$  在接收到属性更新后, 返回一个新的属性更新,  $F_i$  在收到后同样再发出一个新的属性更新, 如此循环 10 万次, 记录完成时间, 再重复 10 次, 计算平均完成时间  $t$  (去除最长时间与最短时间), 根据  $t$  计算出平均端对端延迟  $l(l = [t / (100000 \times 2)] \times 1000000$ , 单位:  $\mu s$ )。改变更新对象属性值的数据大小, 重复以上实验, 记录不同数据大小下的对象属性值更新延迟。

高性能节点内盟员通信延迟如图 5 所示, 高性能节点间盟员通信延迟如图 6 所示, 高性能节点与外部节点盟员通信延迟如图 7 所示。

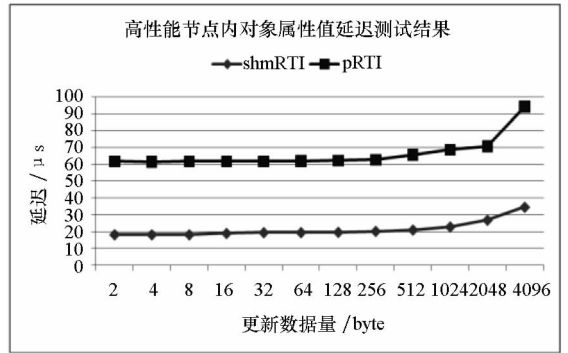


图 5 高性能节点内对象属性值更新延迟测试  
Fig. 5 Object attributes value updating latency of federates on the same HPC node

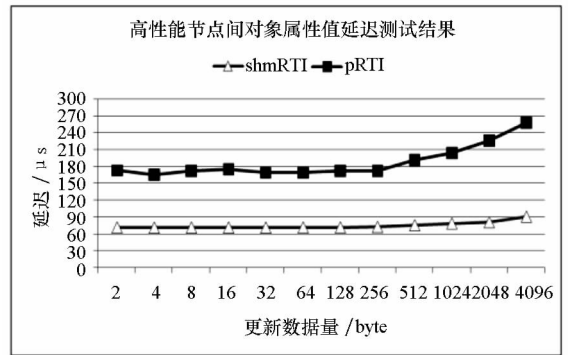


图 6 高性能节点间对象属性值更新延迟测试  
Fig. 6 Object attributes value updating latency of federates on different HPC nodes

对象属性值更新延迟测试结果表明, 在同一个高性能计算节点内, shmRTI 能够自适应选择共享内存实现盟员间通信, TCP 虽然针对节点内通信做了优化, 但 pRTI 的延迟仍为 shmRTI 的 3 倍 (图 5); 在不同高性能计算节点间 (图 6), shmRTI 能够在高速 IB 网络与千兆网之间自动选择 IB 建立 TCP 连接, 而 pRTI 中, 所有盟员都必须位于同一个网段内, 因此, 为了兼顾与节点外的盟员通

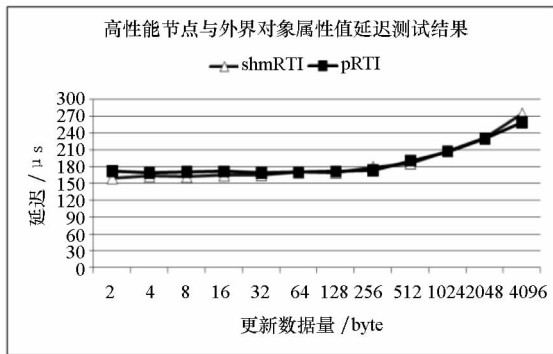


图7 高性能节点与外界对象属性值更新延迟测试

Fig.7 Object attributes value updating latency of federates between HPC node and outside node

信,高性能盟员间通信也必须通过千兆网实现,此时,shmRTI 的延迟约为 pRTI 的 1/3 ~ 2/5;而对于高性能盟员与外界盟员间通信(图7),shmRTI 与 pRTI 都采用基于千兆网的 TCP 通信,其对对象属性值更新延迟相当。测试结果充分说明了自适应通信机制更加适合于高性能计算平台。

## 4 结论

论文针对基于 HPC 环境的大规模分布式交互仿真应用特点,分析了目前 RTI 通信机制在 HPC 环境中应用的不足之处,提出了一种共享内存/IB/以太网自适应 RTI 通信机制。该通信机制的创新在于通信进程能够根据所在节点的网络信息,自适应在共享内存、高速网络、以太网网络中做出选择,建立延迟最小的通信连接;同时通过高效的共享内存算法设计,有效提高了节点内盟员间的通信性能。性能测试表明,在高性能计算平台上,基于自适应通信机制的 RTI 通信性能明显优于基于 TCP/IP 通信机制的 RTI。

## 参考文献 (References)

[1] IEEE Standard for Modeling and Simulation. High Level Architecture [HLA] -Federate Interface Specification [S]. IEEE Std 1516.1-2000, 2001.

[2] Li Z X. A Three-phases byzantine fault tolerance mechanism for HLA-based simulation. in distributed simulation and real time applications (DS-RT) [C]// 2010 IEEE/ACM 14th International Symposium, 2010.

[3] Fujimoto. Parallel and distributed simulation systems [M]. Wiley Interscience, 2000.

[4] 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:国防科学技术大学, 2003.

YAO Yiping. Research on technologies of high performance distributed simulation runtime infrastructure [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)

[5] 张颖星. 面向复杂系统应用的并行离散事件仿真性能优化技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.

ZHANG Yingxing. Research on performance optimization of

parallel discrete event simulation for complex system application [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[6] Fujimoto. Design of high performance RTI software. in distributed simulation and real-time applications (DS-RT 2000) [C]// Proceedings of 4th IEEE International Workshop, 2000.

[7] Steinman J S, Blank G E, Brutocao J S. Design of the HPC-RTI for the high level architecture [C]// 99F-SIW - 067, 1999.

[8] 单莹, 吴建平, 王正华. 基于 SMP 集群的多层次并行编程模型与并行优化技术[J]. 计算机应用研究, 2006. 23 (10): 254 - 256.

SHAN Ying, WU Jianping, WANG Zhenghua. Hierarchical parallel programming model and parallelization and optimization techniques based on SMP cluster[J]. Application Research of Computers, 2006. 23 (10): 254 - 256. (in Chinese)

[9] 陈春鹏. 基于 HPC 环境的 RTI 及作战仿真应用[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2794 - 2797.

CHEN Chunpeng. HPC-based RTI and martial simulation application[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(10): 2794 - 2797. (in Chinese)

[10] 姚益平, 张颖星. 基于并行处理的分析仿真解决方案[J]. 系统仿真学报, 2008. 20(24): 1375 - 1381.

YAO Yiping, ZHANG Yingxing. Solution for analytic simulation based on parallel processing [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(24): 1375 - 1381.

[11] Liang H B, Yao Y P, Mu X D. Development of a HLA/RTI for high performance simulation [J]. Advanced Materials Research, 2011, (291-294): 3044 - 3049.

[12] pRTI. Available from; <http://www.pitch.se/>.

[13] 唐见兵, 李革, 杨海刚. KD-RTI 软件的测试研究[J]. 计算机工程, 2007, 33(3): 62 - 64.

TANG Jianbing, LI Ge, YANG Haigang. Research on the test of KD-RTI software [J]. Computer Engineering, 2007, 33 (3): 62 - 64. (in Chinese)

[14] Portico website. Available from; [www.porticoproject.org](http://www.porticoproject.org).

[15] Noulard E, Rousselot J Y. CERTI, An open source RTI, why and how[R]. 2009.

[16] Liu B Q. An efficient algorithm in the HLA time management [C]// Simulation Conference, 2006. WSC 06. Proceedings of the Winter, 2006.

[17] Liu B Q. Development of a runtime infrastructure for large-scale distributed simulations [C]// Simulation Conference, 2006. WSC 06. Proceedings of the Winter, 2006.

[18] 姚益平, 卢锡城. HLA/RTI 时间管理的一种优化算法[J]. 电子学报, 2004, 32(2): 294 - 297.

YAO Yiping, LU Xicheng. An optimized algorithm of HLA/RTI time management[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32 (2): 294 - 297.

[19] Adelantado M. HP-CERTI: Towards a high performance, high availability open source RTI for composable simulations[C] // 04F-SIW-014, Orlando, United States, 2004.

[20] 张卫, 张童. 基于 HLA 分布式仿真的 Web 服务化[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 120 - 124.

ZHANG Wei, ZHANG Tong. Web service enabling of HLA-based distributed simulation [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(5): 120 - 124.