

学校编号: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 200331030

UDC _____

厦门大学

硕士学位论文

基于分布交互式仿真系统的应用层组播 通信技术研究 and 实现

**Research and Realization of Application Layer
Multicast Communication Technology
Based on Distributed Interactive Simulation System**

孟治强

指导教师姓名: 陈 伟 副教授

专业名称: 系统工程

论文提交日期: 2006 年 6 月

论文答辩时间: 2006 年 月

学位授予日期: 2006 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2006 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的科研成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于：

- 1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

随着计算机网络、通信和仿真技术的不断发展,分布交互仿真技术越来越多的被运用到军事领域的诸多方面,尤其以大规模分布式交互仿真系统的应用最为突出;为了解决仿真软件在大规模应用中的局限性,美国国防部提出了新一代仿真技术框架 HLA,来加强仿真系统以及组件之间的互操作性和重用性。

而作为底层支撑的网络通信的效率,则直接制约着仿真系统的效能,早期的组播技术侧重于从 IP 层提供组播通信支持,它的实施不但涉及到网络基础设施的调整,而且随着仿真接点数量的增加,网络流量急剧增加,极易造成广播风暴,严重制约着大规模仿真系统的应用;而在 HLA/RTI 中,采用点对点和组播通信方式,将信息从数据的发出者直接传递给数据的订购者,从而提高系统的底层性能。

基于 IP 组播的应用在实施上软硬件方面都存在很多困难,近年来,不少研究开始对 IP 组播的构架进行反思,并提出将复杂的组播功能放在端系统来实现的新思想,这就是应用层组播技术。应用层组播(ALM)将组成员组织成覆盖网络为数据传输提供服务,组播功能完全由终端系统在教育层实现,从而具有良好的伸缩性和高效的数据传输效率,并且易于大规模部署和实现。

本文介绍了 HLA 框架相关技术及 HLA/RTI 仿真系统的通信需求,分析了 IP 组播的局限性和应用层组播及其相关技术的特点,并运用应用层组播技术的新思想,设计并基本实现了一套基于应用层组播技术的 HLA/RTI 组播通信方案,为解决 HLA/RTI 仿真系统的通信问题提供了新思路。

关键字: 分布交互仿真; 应用层组播

Abstract

With the increasing development of computer technology, network technology and simulating technology, more and more distributed interactive simulation has been applied within the domain of military simulation. More development has been made in military simulation, more interoperability and reusability are requested. So, U.S. DoD has proposed a new technical framework named HLA (High Level Architecture) for simulation. The goal of HLA is to improve the interoperability and reusability of various simulation system and other components within military simulation domain. At present, the design and development of HLA/RTI simulation system has been the hot spots in simulation domain, especially in military domain.

As the backup of HLA/RTI simulation system, the capability of underlying network communication affects the performance of RTI. In early DIS simulation system, broadcasting was adopted to transport packets. With the increase of the nodes in the network, the traffic will increase so greatly in the network that broadcasting storm would be caused. As a result the network will get worse and worse, and halt in the end. Broadcasting is replaced by unicast and multicast in the HLA/RTI simulation system. The data packets were sent to data subscriber from data publisher directly so that the performance of RTI was improved.

Much time had been taken to study IP multicasting, it's difficult to apply it to applications because of some problem about software and hardware. Recently, some new thought was put forward by some researcher. The new technology is called Application Layer Multicasting which implement multicasting in end system instead of in network system.

This paper begins with the concept of HLA/RTI and the requirement of HLA/RTI simulation system. It also analyzes the shortage of IP multicasting and introduces the Application Level Multicasting. This paper also proposes a solution to HLA/RTI simulation system based on Application Level Multicasting and points a new way to settle the communication problem in HLA/RTI simulation system.

Keywords: Distributed Interactive Simulation; Application Layer Multicast.

目 录

绪 论	1
1. 计算机仿真技术的发展及研究动态	1
2. 分布交互式仿真技术在军事领域中的应用	4
3. 本课题的来源以及意义	5
4. 论文主要工作	6
第一章 HLA 框架以及相关技术	7
1.1 HLA 的定义以及组成	7
1.2 HLA 运行时支撑结构 RTI	9
1.3 HLA/RTI 关键技术	10
第二章 HLA/RTI 仿真的通信需求	13
第三章 IP 组播的局限性和应用层组播技术	17
3.1 IP 组播的历史与现状	17
3.2 IP 组播应用的局限性	18
3.3 应用层组播技术	20
第四章 基于应用层组播技术的 HLA/RTI 组播通信方案	25
4.1 总体设计方案	25
4.2 组播系统通信方式	27
4.3 应用层组播网络的组织和维护	28

4.4	应用层组播网络相关技术	36
4.5	通信协议	38
4.6	系统调用接口	41
第五章	总结与展望	43
	参考文献	44
	致 谢	46

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Catolog

Introduction.....	1
1. Development of computer simulation technology.....	1
2. Application of distributed interactive simulation technology in military area.....	4
3. Origin and significance of this article.....	5
4. Primary work of this article.....	6
Chapeter 1 Framework and interrelated technology of HLA	7
1.1 Concept and component of HLA.....	7
1.2 Support structure RTI as HLA running.....	9
1.3 Pivotal technology of HLA/RTI.....	10
Chapter 2 Communication requirement of HLA/RTI simulation... 	13
Chpater 3 Localization of IP multicast and application layer multicast.....	17
3.1 History and status quo of IP multicast.....	17
3.2 Application localization of IP multicast.....	18
3.3 Application layer multicast.....	20
Chapter 4 HLA/RTI multicast communication project based on application layer multicast technology.....	25
4.1 Total design project.....	25
4.2 Communication mode of multicast system.....	27
4.3 Organizing and maintenance of application layer multicast network...	28
4.4 Interrelated technology of application layer multicast network.....	36
4.5 Communication protocol.....	38
4.6 System transfer interface.....	41

Chapeter 5 Summary and prospect	43
Reference.....	44
Acknowledgement.....	46

厦门大学博硕士学位论文摘要库

绪 论

1. 计算机仿真技术的发展及研究动态

计算机仿真是以相似原理、系统技术、信息技术及应用领域的相关专业技术为基础，以计算机和各种物理效应设备为工具，利用系统模型对实际的或设计中的系统进行动态实验研究的一门多学科的综合技术。计算机仿真技术由于其有效性、可重复性、经济性、安全性和保密性的优点而受到各行各业的重视，随着系统仿真技术的发展和完善，计算机仿真技术已经参与到系统的运行当中，应用方式正也在从集中式仿真向分布交互式仿真发展，分布交互式仿真已成为系统生命周期中各阶段的重要技术手段和工具。目前，计算机仿真够使同构或异构的仿真应用之间在一个时间和空间相一致的环境中实现交互作用，以完成特定的仿真任务。分布交互仿真既满足了仿真灵活性的要求也为复杂系统的仿真提供了可能。

分布交互式仿真技术的发展大致经历了三个阶段。

美国国防部高级技术研究计划局 (ARPA) 和美国陆军在 80 年代初开始进行了仿真器网络 (SIMNET: SIMulation NETwork) 计划，可以说是最早的，较为成功的分布交互式仿真技术。利用 SIMNET 可以将分布在不同地点的仿真器 (仿真坦克、雷达等武器装备) 用计算机网络连接起来，进行攻防对抗演习，以检验武器系统的作战效能和训练指挥及作战人员。SIMNET 可用于人在回路中的作战仿真和作战演习，并能降低训练成本提高训练的安全性。在 SIMNET 成功的基础上，继续发展了异构性网络互连的分布交互仿真技术，并最终产生了 DIS (Distributed Interactive Simulation) 协议。DIS 具有以下特点：

- I **分布性：**DIS 允许在地理上分布的各仿真节点相互连接，并共享一个虚拟环境，同时 DIS 系统在功能和计算能力上也是分布的，各仿真节点都具有自治性；
- I **交互性：**DIS 系统为人在回路中仿真的互操作、各武器平台之间和环境的交互提供了协调一致的结构、标准和协议；
- I **实时性：**为了保证虚拟环境中的时间和空间与现实世界中的时间和空间的一致性，DIS 系统必须在实时的前提下运行；

I 集成性：DIS 支持对现有的系统进行集成并实现互操作；

作为分布交互式仿真技术的标志性成果，DIS 在实现技术上也有很大的突破，主要包括：不可靠的广播式发送标准 PDU 信息、实体状态信息的定期发送（Heart-beat）以及采用了 DR 算法。但是随着仿真的实体数量和类型不断增加，DIS 的缺点也逐渐突出了。首先是在体系结构方面存在缺陷，DIS 利用建立一致的标准通信接口来规范异构的仿真系统间的信息交换，对于不同的数据表示要求采取固定的 PDU，这使得 DIS 协议不够灵活和高效；其次，DIS 提供了实时、平台级的分布式仿真，但对于聚合级仿真等要求不同时间推进机制的仿真应用则不大适合。为此，在 90 年代初，ARPA 资助 MITRE 研究并设计了聚集仿真协议（ALSP），用于将现有的不同的对抗仿真集成起来，构成更为复杂的系统用于高层训练。ALSP 在仿真时间管理、数据管理和体系结构的无关性上比 SIMENT 和 DIS 都有所发展，但是 ALSP 只能进行离散事件、逻辑事件的仿真。

以上这三种仿真技术都是在特定的条件下产生的，尽管在某些方面都有各自的长处，但是由于当时技术条件和认识上的不足，它们都存在着许多缺陷，无法满足目前及今后对分布交互式仿真的要求。目前所迫切需要解决的问题有以下几个方面：

- 现有的仿真技术不支持多种类型仿真应用之间的互操作。如何能将各种类型的仿真系统，如基于 DIS 协议的平台级实时连续系统仿真器、基于 ALSP 的聚合级作战仿真系统、基于离散事件的仿真、以及实际的 C⁴I 系统，集成到一个综合环境中，并实现它们之间的相互操作，这是目前最重要的也是最紧迫的问题；
- 现有的仿真系统没有很好的考虑仿真构件的可重用问题，使得重复开发增多，导致各种资源的浪费；
- DIS 协议的通信方式浪费了大量的网络带宽资源，发送通信数据的方式必须由广播式改进为组播方式；

根据分布交互式仿真的发展可以看出，现代的仿真具有了广泛性、复杂性、分布式等特点，这也就对下一代的仿真技术提出了新的要求：

- 不同类型间仿真系统的集成，以实现跨地理区域跨应用领域的分布交互仿真；
- 仿真应用间具有互操作性，支持仿真应用之间的协同工作，以灵活地构成不同目的的仿真；

- 仿真软件可重用，各仿真领域开发的仿真构件能够重用以减少开发代价，缩短开发周期。

为了解决存在的问题并满足今后的需求，美国国防部建模与仿真办公室（DMSO）于 1995 年提出了一个全新的仿真技术框架 HLA（High Level Architecture）。

HLA 是一个通用的仿真技术框架，规定了开展仿真活动的整个过程中应遵循的规则，如包括仿真对象的建模、模型表示、应用程序开发、程序运行环境等应遵循的一般方法。HLA 在更高层次考虑了未来仿真的发展需求，只要遵循 HLA 框架开发的仿真应用程序就能够很好的互操作，模型和仿真构件能够最大程度的重用。HLA 自其正式公布起由于思想及技术的先进性，引起了仿真界的高度重视，发达国家纷纷启动 HLA 的研究计划。

在美国，DoD 规定今后军事领域内的仿真活动必须在 HLA 的框架下开展，已有的仿真系统要转换成 HLA 兼容方式，并明确了向 HLA 转换的最后期限。DMSO 于 1996 年正式提出了 HLA 的定义，它包括：接口规范、规则和对象模型模板三个组成部分，并已作为 IEEE 标准草案提交给 IEEE，以最终使其成为正式的仿真技术标准。目前在 HLA 方面的开发工作主要集中在三个方面：1) 对 HLA 的体系结构进行进一步的研究，并不断的改进以提高各方面的性能，2) 作为 HLA 核心的仿真运行支撑系统 RTI (RunTime Infrastructure) 的开发也是 HLA 研究的重点，3) 基于 HLA 的分布交互式仿真应用系统的研究与开发。

国内的不少单位也十分重视建模与仿真技术的研究，并不断开展对国际先进技术发展的跟踪研究，在体系结构、计算机生成兵力、地形数据库等方面取得了初步的成果，并获得了以单武器研究为主、部分体系对抗仿真的研究成果。但对 HLA 的研究还处于起步阶段，国内的一些研究单位也正在从不同的角度积极跟踪研究 HLA 技术。

由于 HLA 从更高层次上理解仿真的要求和特点，它在结构和功能上是合理和完善的，能适应各类型仿真的发展，并支持它们之间的互操作和可重用。因此 HLA 在军事领域和商业领域都有很好的应用前景。HLA 作为一个技术性框架，并不涉及具体的实现细节，作为 HLA 核心的 RTI 可以有不同的实现，同时 DoD 也鼓励 RTI 的商业化，这在客观上为我们跟踪国外新技术创造了有利条件，我们应把握这个机会尽快开展 HLA 的研究，以缩短与发达国家的差距。

2. 分布交互式仿真技术在军事领域中的应用

分布交互仿真通过网络将分散在各地的仿真器 (Simulators)、计算机生成的兵力 (Computer Generated Forces, CGF) 以及其他设备联合为一个整体, 形成一个可以在时间和空间上相互耦合的虚拟战场环境。它具有可控性、无破坏性、安全、可多次重复和经济性的特点, 主要应用在训练、作战仿真、武器系统研制、试验和评估以及采办等方面。现代战争的基本特点是多兵种联合作战, 因此联合作战训练是部队训练的主要内容。分布交互仿真能提供虚拟战场环境, 使部队能够进行生动逼真的联合作战军事演习, 还可以进行军事理论研究和战法研究。从而使过去主要依靠野战演习完成的工作, 可以在室内利用计算机、仿真器组成的虚拟环境进行。随着技术的进一步发展, 可将演习部队和虚拟环境联合起来进行演习。同传统的实兵演习相比, 采用分布式仿真系统进行军事演习训练的优点是无需动用大量人员、装备和弹药、可节省大笔开支, 而且还可反复进行多次演练, 演习的全过程都可以记录下来, 便于及时发现和解决问题。还可以避免因实战演习造成的人员意外伤亡、武器装备损耗和环境污染等。

在武器系统研制方面, 计算机分布交互仿真技术有助于缩短研制周期、减少研制经费。例如, 在武器系统采办方面, 可应用于武器系统采办的各个阶段, 并成为采办策略的有机组成部分。在方案论证阶段, 可建立分布交互仿真系统, 来检验武器系统的设计方案和战术技术指标。采用虚拟样机设计, 保证系统设计的首次制造的正确性, 降低研制费用, 缩短研制周期。虚拟试验可以模拟可能出现的各种情况和环境因素, 可以缩短试验时间和降低试验费用。虚拟制造用于精确的模拟所计划的生产过程, 保证可生产性, 降低制造成本, 减少生产时间。

早期的分布交互式仿真技术正是在军事需求的推动下才获得巨大发展的, 并且都有成功的实例。在 1990 年完成的 SIMNET 系统通过广域网将分布在美国和欧洲的 120 个 M1A1 坦克和 BRADLEY 步兵战车仿真器连在一起, 构成了一个分布交互式仿真环境。SIMNET 第一次实现了作战单位之间的直接对抗, 并能在其所提供的虚拟作战环境中使营以下的部队进行联合兵种协同作战训练和相应的战术研究。SIMNET 的成功为分布式作战仿真系统的发展奠定了坚实的基础。1992 年美国 DMSO 提出了 DIS 的基本结构, 并经过了多年的研究与实践, 从 1995

年开始 DIS 的标准逐步被定为了 IEEE1278 系列标准, 并利用 DIS 系统成功的进行了多项作战演习。为了支持聚合级仿真模型的分布式仿真, 1991 年 MITRE 公司受美国国防部 ARPA 的委托开发出了聚合级仿真的基础支撑软件原型, 并利用它进行了第一次试验, 成功的实现了两个聚合级仿真模型的互连和交互, 这两个仿真器分别是陆军军团作战仿真 CBS 和空军空战仿真 AWSIM。基于这项试验在 1992 年这是诞生了聚合级仿真协议 ALSP, 后来此系统发展为包括 12 个仿真系统的联合训练仿真联邦。

随着 HLA 的提出, 分布交互式仿真技术进入了一个新的时代, 同时作战仿真也进入了一个新的阶段, 那就是基于 HLA 的联邦式作战仿真。在很短的时间内美军的作战仿真活动都转向了 HLA 并取得了很大的成功。DMSO 利用现有仿真构造了五个符合 HLA 规范的联邦原型, 它们是: 人员训练、战术训练、工程设计、测试评估以及系统分析。1997 年 10 月美军成功举行了大规模军事演习 STOW-97。该系统首次应用了 HLA 体系结构, 实现了高分辨率合成战场环境下 (包括高分辨率的实体模型、高分辨率地形、高保真度的环境效果和战场现象) 的军事训练演习, 演习涵盖了两栖作战、扫雷作战、空中打击、地面作战、特种作战等各军兵种的作战任务。模拟的战场范围为 500×750 平方公里, 由分散在美、英两国的 5 个仿真站点组成, 包括了 3700 多个仿真平台, 8000 多个仿真实体对象。这次演习的成功完全确立了 HLA 在作战仿真中的主导地位, 更加促进了军事领域里分布交互式仿真的研究与应用。

目前我军在基于 HLA 的联邦式作战仿真这一领域还处在起步阶段, 虽然有很多研究所和院校开始进行这方面的研究, 但至今尚未建立起一套供人们共同遵守的作战仿真通用技术框架, 这与已经在该领域走上规范化、标准化和自动化之路的先进国家相比还有相当大的差距。

3. 本课题的来源以及意义

课题来源于总部综合性研究项目“应急作战一体化指挥信息系统平台”。

我军现有的一些新军事装备的价格昂贵, 数量较少, 很难保证实装训练, 而未来战争主要是高科技条件下的战争, 指战员们要适应这种作战, 新装备作战训练又必不可少。因此, 利用高度发展的计算机技术和仿真技术, 研制训练仿真系

统代替实际装备实行训练是非常必要的，这对于促进军事训练手段的现代化、作战研究的科学性都有这十分重要的意义。

目前我军在作战仿真领域还没有一个可用来共同遵守的标准的规范的通用仿真技术框架，这种情况严重制约了我军作战仿真技术的发展和系统的应用，因此迫切需要建立我军自己的作战仿真建模规范和技术标准，此项目正是在这种背景下提出来的，目的是针对当前作战仿真面临的主要技术挑战，着眼于分布式作战仿真系统的高层体系结构 HLA，研究新一代作战仿真的结构和运行模式，探索支持新的作战仿真概念的通用技术框架，以解决我军的作战仿真在目前及今后所面临的新问题。

4. 论文主要工作

本论文从“一体化指挥信息系统平台”的需求出发，着眼整体，局部突破，介绍了 HLA 框架技术，分析 HLA/RTI 分布交互式仿真系统的通信需求和 IP 组播的局限性，对 HLA/RTI 分布交互式仿真系统中的组播通信技术进行研究，并建设了一套简单的应用层组播解决方案。

本文的主要工作如下：

- 全面系统的分析了 HLA 框架，包括 HLA 的基本思想、重要概念、体系结构、对象模型以及其关键部分 RTI 的结构及功能；
- 分析了 HLA/RTI 的底层通信机制以及分布交互式仿真的通信需求；
- 分析了 IP 组播的局限性以及应用层组播的发展现状；
- 设计并实现了一套简单的应用层组播解决方案；
- 对所做工作进行总结，并展望下一步工作。

第一章 HLA框架以及相关技术

1.1 HLA的定义以及组成

HLA (High Level Architecture) 作为新一代仿真技术框架, 其目的是为了解决军事领域内的仿真应用中的可重用性和互操作性。HLA 框架由三部分组成: HLA 对象模型模版、HLA 规则、HLA 接口规范。一个仿真程序是否与 HLA 框架兼容, 就是看它是否根据 OMT 来建立对象模型, 在操作时是否遵守 HLA 规则, 以及是否采用 HLA 接口规范中的规定的 API 来进行仿真操作。要了解 HLA 的定义和组成我们必须先明确几个概念:

- 联邦成员(federate): 指各个仿真应用系统, 可以是任意类型的仿真应用程序或联邦成员管理器、数据收集器、消息观察器等。它由一组对象组成, 并根据产生的事件(属性更新, 交互等)来处理对象的行为。

- 联邦 (federation): 为实现某种特定的仿真目的而组织到一起并能彼此进行交互作用的一组仿真系统、支撑软件和其它相关的部件共同组成的一个更大的模型或仿真便叫做联邦, 还可以包括人机接口, 真实硬件和通用的实现数据收集、分析、显示等功能的软件。

- 运行时支撑结构 (RTI: Run Time Infrastructure): 是 HLA 的核心, 用于实现接口规范中定义的服务。在一个联邦执行的过程中, 所有联邦成员都必须按照 HLA 接口规范要求的方式和 RTI 进行数据交换, 进行成员间的互操作。

图 1-1 为联邦基本组成示意图。

1.1.1 HLA 对象模型模版

HLA 用对象模型模版 (OMT, Object Model Template) 来规范对象模型的描述, 是 HLA 实现互操作和重用的重要机制之一。HLA OMT 是一种标准的结构框架 (或模版), 它是描述 HLA 对象模型的关键部件, 之所以采用标准化的结构框架, 是因为它可以做到以下几点:

- 提供一个通用的、易于理解的机制, 用来说明联邦成员之间的数据交换和运行期间的协作。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库