

发布 / 订阅模型 DDS 应用研究及其性能评价^{*}

郝玲玲，傅妍芳

(西安工业大学 计算机科学与工程学院,西安 710021)

摘 要：针对中间件技术在分布式系统通信领域中的实时性较差、可靠性低等问题,本文提出了一种基于发布/订阅模型的,以数据分发服务中间件为技术支撑的空战模拟仿真系统。从系统体系结构、对象模型定义、服务质量策略三方面设计并实现了模拟仿真系统,以实时性、吞吐量、抖动及丢包数量为指标对系统的实时性和可靠性进行测试。测试结果表明,系统的传输延迟稳定在 117.4 μ s,平均抖动大小为 26.54 μ s,丢包数量为 0,随着数据包大小的变化,系统的传输延迟无明显影响,吞吐量、抖动趋于稳定值,这说明文中方法的实时性和可靠性较好,可为空战模拟仿真系统提供一定的技术支持。

关键词：数据分发服务;发布/订阅;服务质量;传输延迟

中图分类号： TP311.5 **文献标志码：** A **文章编号：** 1673-9965(2020)03-0290-09

Application and Performance Evaluation of DDS
Based on Publish/Subscribe Model

HAO Lingling ,FU Yanfang

(School of Computer Science and Engineering,Xi'an Technological University,Xi'an 710021,China)

Abstract: In the field of distributed system communication,the middleware technology has the disadvantages of poor real-time performance and low reliability. This paper presents a publish/subscribe model-based air combat simulation system supported by the data distribution service middleware technology. The entire simulation system was designed and implemented from three aspects:system architecture,object model definition,and service quality strategy. With the real-time performance,throughput,jitter,and packet loss as the indicators,the real-time performance and reliability of the system are tested. The test results show that the transmission delay of the system is stable at 117.4 μ s,the average jitter size is 26.54 μ s,and the number of packet losses is zero. The change in the size of the data packet has no significant effect on the system's transmission delay,with the throughput and jitter approaching definite values,suggesting that the proposed method has the advantages of good real-time performance and reliability,and can provide some technical support for the air combat simulation system.

^{*} 收稿日期:2019-07-19

第一作者简介:郝玲玲(1994—),女,西安工业大学硕士研究生。

通信作者简介:傅妍芳(1978—),女,西安工业大学教授,主要研究方向为新型网络与云计算,E-mail:fuyanfang3000@aliyun.com。

引文格式:郝玲玲,傅妍芳.发布/订阅模型 DDS 应用研究及其性能评价[J].西安工业大学学报,2020,40(3):290-298.

HAO Lingling,FU Yanfang. Application and Performance Evaluation of DDS Based on Publish/Subscribe Model[J]. Journal of Xi'an Technological University,2020,40(3):290-298.

Key words: data distribution service;publish/subscribe;quality of service;transmission delay

随着信息化建设的深入,各领域系统应用趋于复杂,如何让不同平台的系统进行通信已成为当务之急。目前大多数流行的信息传输中间件产品已能提供良好的开发平台和通信支持,但由于缺乏合适的系统控制接口和应用级服务质量(Quality of Service,QoS)的有效支持,并不能很好地解决通信的实时性和可靠性问题^[1]。在数据分发服务(Data Distribution Service,DDS)应用方面,国内外目前已将 DDS 产品广泛应用到了各个领域,在无人机领域中,文献[2]构建了一个基于 RTI-DDS 消息中间件的分布式无人机地面站系统,提出了一种基于 RTI-DDS 的消息中间件解决无人机地面站系统软件通信的方法。在船舶通信领域中,文献[3]研究了船舶通信中的 DDS 中间件应用可行性和性能效果,讨论并比较了 DDS 的实时性指标,引入不同结构对发送和接收相同数据的传输时间作比较,通过验证得出 DDS 比较适合应用在船舶分布式通信系统中。文献[4]通过分析分布式卫星系统仿真支撑平台的特点,完成了基于数据分发服务的仿真平台的需求分析、硬件结构、软件功能和数据接口设计,确定总体设计方案,并对关键部分进行实验验证,仿真结果表明仿真支撑平台可以屏蔽分布式环境的低层技术细节,使用户可以将注意力集中到仿真应用上来,从而提高仿真系统开发的质量和效率。文献[5]设计了基于 DDS 和 HLA 的实时性联合仿真系统,该系统通过使用 DDS 替换 HLA 中的数据分发功能,利用 HLA 进行仿真系统中的联邦管理,DDS 负责仿真节点间的数据分发功能,在半实物仿真中达到了实时仿真的目的,试验结果表明基于 DDS 和 HLA 仿真系统结构能显著提高基于 HLA 的半实物仿真系统的实时性,能有效满足分布式仿真的实时性需求。DDS 技术的应用也正在航空、航天等领域普及^[6-9],未来仍具有十分庞大的应用发展空间,因此开展 DDS 相关技术的研究和工程应用具有一定的实际意义。

本文在对实时系统信息传输领域研究的基础上,提出了一种基于发布/订阅模型的空战模拟仿真系统,拟通过 DDS 通信中间件集成空战模拟仿真系统中的不同资源,实现各仿真节点间的通信,并通过设计 QoS 策略来优化数据流在网络传输的传输质量。

1 相关理论

DDS 是对象管理组织(Object Management Group,OMG)关于分布式实时系统中数据分发的一个以数据为中心、基于发布/订阅通信模型、提供丰富的服务质量配置的中间件技术规范^[10-11],其目标在于为分布式系统提供高效、可靠、实时的数据分发服务。DDS 规范建立了具有以数据为中心的发布订阅通信模式的分布式应用程序所使用的应用程序编程接口(API)^[12-15]。DDS 规范的层次如图 1 所示,分为以数据对象为中心的发布/订阅层(Data Centric Publish Subscribe,DCPS)和数据本地重构层(Data Local Reconstruction Layer,DLRL)。

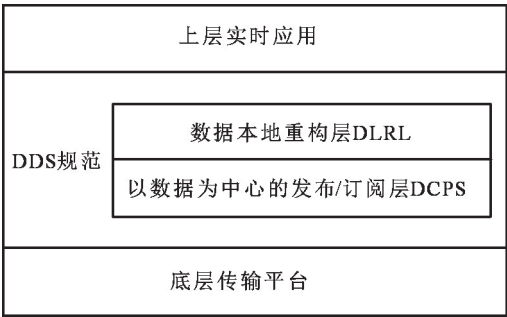


图 1 DDS 规范层次

Fig. 1 DDS specification hierarchy

图 1 中,DCPS 为 DDS 系统的核心,为用户提供数据发布和订阅功能,负责数据对象在发布者和订阅者间的通信。DLRL 建立在 DCPS 之上,为可选层,可将 DCPS 提供的服务抽象化,同时集成到应用层,一旦本地数据更新即可通知订阅者进行更新操作。DDS 规范列举并正式定义了一整套全面的 QoS 策略,能利用 QoS 进行系统控制。这使得 DDS 可以很好地配置和利用系统资源,协调可预言性与执行效率间的平衡,以及能支持复杂多变的数据流需求等。

以数据为中心的发布/订阅模型构建在全局数据空间(Global Data Space,GDS)的基础上,所有的数据对象都存在于此全局数据空间中,分布式节点通过简单地读写操作便可以访问这些数据对象。计划向这个数据空间提供信息的应用称为“发布者”,计划从数据空间中获取数据的应用称为“订阅者”。

者”。每当发布者将新数据发送到全局数据空间，中间件就会把信息传播给那些对此信息感兴趣的订阅者。

DCPS 层的数据流结构如图 2 所示。其主要由数据写入者 (Data Writer)、数据读取者 (DataReader)、发布者 (Publisher)、订阅者 (Subscriber)、域 (Domain)、域参与者 (Domain Participant)

与主题实体组成。
DDS 中间件的建立数据流通信的过程如图 3 所示。在 DDS 规范下,应用程序通过 DDS 中间件通信,需要为通信内容定义数据类型并创建相关的发布端和订阅端,此外还需要完成其他实体的创建和匹配,才能进行数据的发布与订阅。

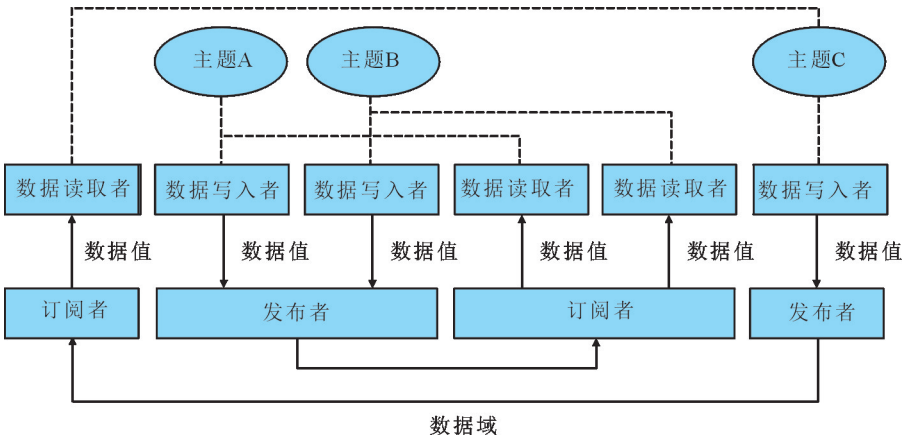


图 2 DCPS 层的数据流结构

Fig. 2 Data stream structure of the DCPS layer

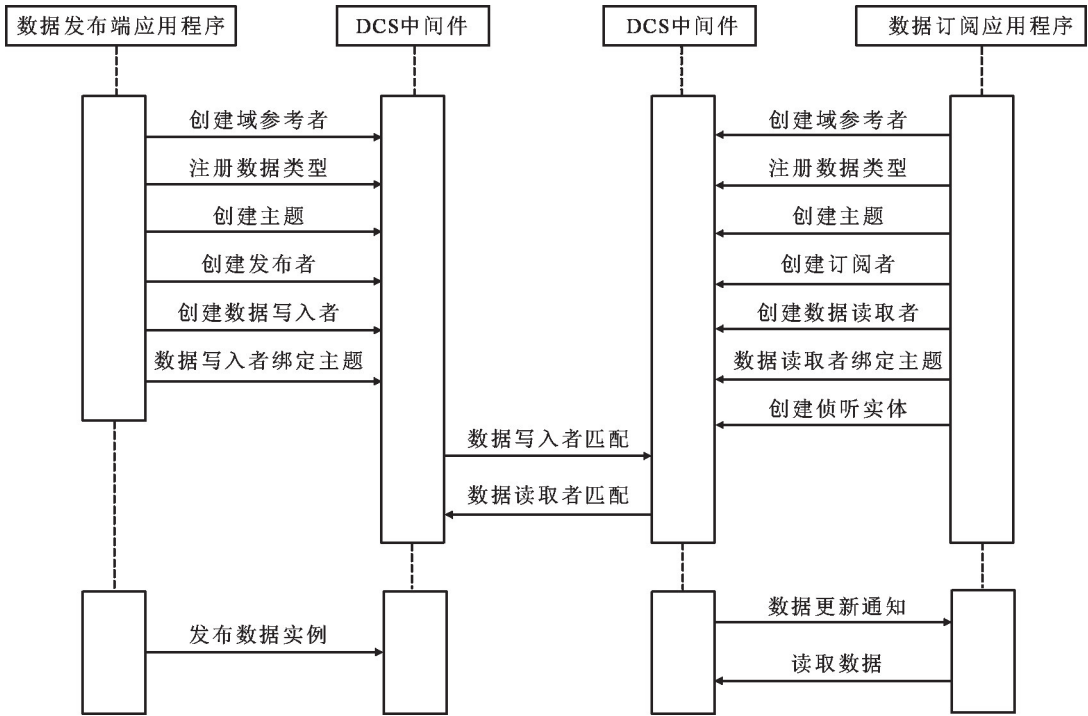


图 3 DDS 通信过程

Fig. 3 DDS communication process

2 系统设计

2.1 系统体系结构

空战模拟仿真系统作为一个分布式仿真系统,集成了仿真控制管理、模拟器、计算机生成兵力、智能空战、战场环境态势显示和综合评估六个子节点,能够针对特定的仿真任务,快速构建仿真应用,包括了从仿真开发、部署、运行到评估的各个阶段。结合 DDS 技术和空战模拟仿真系统的特点,本文的层次化体系结构如图 4 所示。

图 4 中,总体结构分为数据交换层、数据模型层、仿真服务层和应用层 4 个层次。它是一种以数据为中心的、层次化和模块化的仿真体系结构,其

目标是通过 DDS 将不同仿真资源进行集成,完成空战模拟仿真系统节点间的互联互通互操作。应用层包括空战模拟仿真系统的六个仿真节点,各节点通过调用服务层的不同服务来实现不同功能;服务层通过对 DDS 进行封装,为应用层提供调用接口,为整个体系结构提供数据交互、运行管理等服务;数据模型层通过以数据为中心的模型,支持多种体系结构互联,它包含应用程序编程接口来管理空战训练中使用的数据模型;数据交换层采用基于 DDS 的实现方式,用来传递各种数据,支持不同体系结构之间的数据通信,同时对各种公共服务的实现提供基础^[16-17]。这种层次化的结构提高了仿真支撑平台的开放性、扩展性和可维护性。

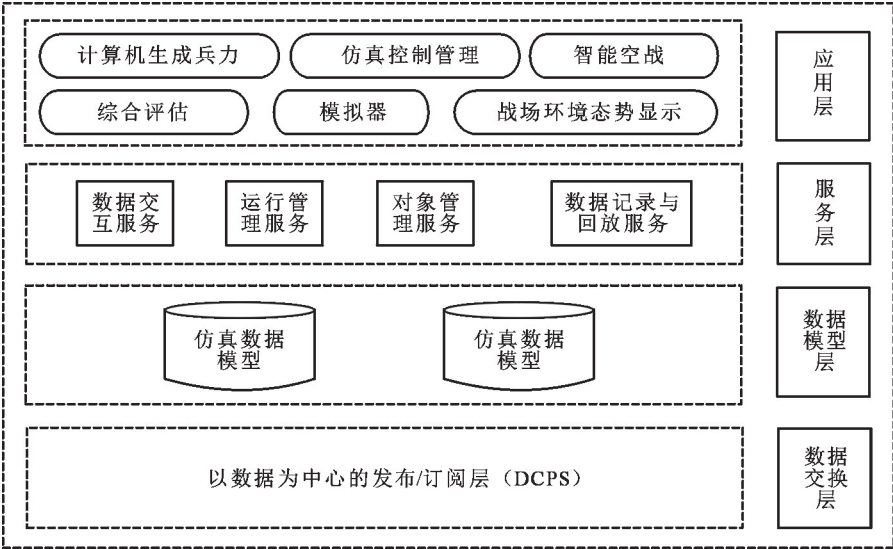


图 4 基于 DDS 的层次化体系结构
Fig.4 Hierarchical architecture based on DDS

2.2 对象模型定义方法

对象模型中包含模型间交互的信息和行为,有效的对象模型可以使得空战模拟仿真系统资源应用之间实现语义互操作性,本文的对象模型定义的方法主要由 DataType、DataTypeField、DomainPara、Topic、CDDSCommuModuleBase 5 个类完成。

DataType 类为数据类信息,数据类作为发布/订阅的对象,记录该数据的值、数据类型(对象类,交互类)以及该数据的相关信息。

DataTypeField 类为 DataType 类的属性类,记录节点的基本数据类型、成员名称、成员类型描

述及成员描述信息。在空战模拟仿真系统中将数据结构按照 Type 类型分为对象类和交互类,对象类为系统运行过程中需要实时更新的状态类数据,交互类为系统运行过程中事件触发类数据。本系统共设计 15 种数据结构,其中对象类的数据结构为 8 种,交互类的数据结构为 7 种。所有数据结构见表 1。

Topic 类为主题类,作为节点发布/订阅的主题,记录仿真系统中各节点发布/订阅主题的名称、数据类型、主题所属域 ID、主题描述以及主题的发布—订阅情况。空战模拟仿真系统中共设计 11 个主题,所有主题信息见表 2。

表 1 数据结构

Tab.1 Data structures

序 号	名 称	描 述	类 型
1	ENTITY_GESTURE_ST	实体姿态数据结构	对象类
2	ENTITY_ID_ST	实体 ID 数据结构	对象类
3	ENTITY_SPEED_ST	实体速度数据结构	对象类
4	ENTITY_COORDINATE_ST	实体位置数据结构	对象类
5	ENTITY_STATUS_ST	通用实体状态数据结构	对象类
6	PLANE_STATUS_ST	飞机实体状态数据结构	对象类
7	MISSILE_STATUS_ST	导弹弹道数据结构	对象类
8	RADAR_STATUS_ST	雷达状态数据结构	对象类
9	RADAR_WARNING_INFO	雷达告警信息数据结构	交互类
10	ENTITY_REGIS_ST	实体注册数据结构	交互类
11	ENTITY_DEREGIS_ST	实体注销数据结构	交互类
12	RADAR_FIND_TAR_ST	雷达发现目标数据结构	交互类
13	RADAR_LOSE_TAR_ST	雷达丢失目标数据结构	交互类
14	SHOOT_INFO_ST	武器发射信息数据结构	交互类
15	BOMB_MSG_ST	爆炸信息数据结构	交互类

表 2 主题信息

Tab.2 Topic information

序 号	主题所属域 ID	主题名称	数据类型	主题描述
1	8	TopicEntityStatus	ENTITY_STATUS_ST	实体状态数据主题
2	8	TopicRegis	ENTITY_REGIS_ST	实体注册主题
3	8	TopicDeRegis	ENTITY_DEREGIS_ST	实体注销主题
4	8	TopicPlaneStatus	PLANE_STATUS_ST	飞机实体状态数据主题
5	8	TopicRadarStatus	RADAR_STATUS_ST	雷达状态数据主题
6	8	TopicRadarWarningInfo	RADAR_WARNING_INFO	雷达告警信息主题
7	8	TopicFindTarMsg	RADAR_FIND_TAR_ST	雷达发现目标事件主题
8	8	TopicLoseTarMsg	RADAR_LOSE_TAR_ST	雷达丢失目标事件主题
9	8	TopicMissileShot	SHOOT_INFO_ST	武器发射事件主题
10	8	TopicMissileStatus	MISSILE_STATUS_ST	导弹弹道数据主题
11	8	TopicBombMsg	BOMB_MSG_ST	爆炸事件主题

Domain 类为 DDS 域属性类,定义了各节点的通信域名称、ID、通信域描述、发布主题列表、域参与者、域数据写入者列表及域数据读取者列表。

DDSCommuModuleBase 类中定义了 DDS 域列表,表明节点所处的通信域,定义了节点相关的

数据类型列表。本文设计了 DDSCommuModule 接口类,实现对 DDSCommuModuleBase 类中原始 API 的封装,各节点通过继承 DDSCommuModule 后的类,调用相应 API 来实现各仿真成员互联互通操作。封装之后的 API 见表 3。

表 3 Durability 策略可取值

Tab.3 Durability strategy values

序 号	接 口	接口描述
1	InitDDS()	初始化接口
2	SendCmdData(string topicName,string sendCmdData)	发送指令类数据接口
3	sendData(string dataType,unsigned char * lpBuffer)	发送仿真数据接口
4	OnCallBackObjData(string &topicName,string &dataType,unsigned char * lpBuffer)	对象类回调接口
5	OnCallBackInterData(string &topicName,string &dataType,unsigned char * lpBuffer)	交互类回调接口

2.3 QoS 策略设计

DDS 的实时性是建立在其丰富的 QoS 策略之上的,OMG 在 DDS 规范中定义了 22 种 QoS 策略,本文通过配置不同主题、不同发布者、不同订阅者的 QoS 策略来极大地优化空战模拟仿真系统的通信性能。结合 DDS 自身的 QoS 策略设计了适用于该空战模拟仿真系统的 QoS 策略,分别为持久性策略(Durability),历史策略(History),可靠性策略(Reliability)。

持久性策略描述了数据在其被发布的时刻之外是否继续存在。Durability 策略参数值见表 4。

表 4 Durability 策略可取值
Tab. 4 Durability strategy values

序号	参 数	说 明
1	VOLATILE_DURABILITY	瞬时保存
2	TRANSIENT_LOCAL_DURABILITY_QOS	本地临时保存
3	TRANSIENT _ DURABILITY_QOS	临时保存
4	PERSISTENT _ DURABILITY_QOS	永久保存

在该空战模拟仿真系统运行时,将发布或订阅爆炸事件主题的节点的 Durability 策略设置为 VOLATILE_DURABILITY,当战场环境态势显示节点因某种原因掉线重连时,原本已经发布爆炸事件主题的实体仍然存在于态势显示界面,这就会影响实际仿真运行;将 Durability 策略设置为 TRANSIENT_DURABILITY_QOS,当计算机生成兵力节点因某种原因掉线但不继续参与战场战斗时,系统会自动将已经发布的爆炸事件主题保存到内存,对于掉线后不继续上线的节点是不需要存储与之相关的事件信息的;将 Durability 策略设置为 PERSISTENT_DURABILITY_QOS,其实与 TRANSIENT_DURABILITY_QOS 的意义大致相同,但 PERSISTENT_DURABILITY_QOS 会将以往演练的所有永久策略的主题都存贮到系统硬盘中,需要使用者将历史中所有主题事件进行再次管理;所以本文将所有交互类的主题策略设置为 TRANSIENT_LOCAL_DURABILITY_QOS,保证了仿真的正常运行。

历史策略描述了 DDS 会尝试发送最近的多少个数据给后加入的订阅者。History 策略参数值见表 5。

表 5 History 策略取值
Tab. 5 History strategy values

序 号	参 数	说 明
1	KEEP _ LAST _ HISTORY_QOS	保留最近 n 个数据
2	KEEP _ ALL _ HISTORY_QOS	保留所有数据

将 History 策略设为 KEEP_LAST_HISTO-
RY_QOS,并指定 depth 值为 n 时,则表示 DDS 会尝试发送最近的 n 个数据给后加入的订阅者;KEEP_ALL_HISTORY_QOS 为 DDS 会将所有发布过的数据发送给新加入的订阅者。

History 策略是和 Durability 策略相互配合使用的,对于该空战模拟仿真系统而言具体保留最近多少个数据样本是难以确定的,所以本系统将 History 策略设置为 KEEP_ALL_HISTORY_QOS,即保留所有配置该策略的主题到 DDS。

可靠性策略描述了数据写入者和数据读取者怎样对待他们所处理的数据。Reliability 策略参数值见表 6。

表 6 Reliability 策略取值
Tab. 6 Reliability strategy values

序 号	参 数	说 明
1	RELIABLE_RELIABILITY_QOS	尽力而为
2	BEST _ EFFORT _ RELIABILITY_QOS	可 靠

RELIABLE_RELIABILITY_QOS 将保证所有的数据被可靠地传输到数据读取者;BEST_EF-
FORT_RELIABILITY_QOS 则没有数据的检测与重发机制,将不保证数据传输的可靠性。

在该空战模拟仿真系统运行时,将发布或订阅实体注册主题的节点的 Reliability 策略设置为参数 1,战场环境态势显示节点可能只会显示个别节点或实体,因为参数 1 不保证数据传输的可靠性,所以没有收到的实体注册事件的实体在态势显示界面不会正常显示;但是对于对象类的主题,因为数据持续在更新,所以丢失个别数据包对整个系统运行是没有影响的。所以本系统将交互类主题的 Reliability 策略设置为参数 2,这样就避免了各节点丢失重要的仿真控制命令以及交互类主题,整个仿真系统也能进行正常运行。

2.4 案例应用

在完成系统总统架构设计、对象模型定义方法

和 QoS 策略设计之后,实现各分布式仿真节点间的通信,其中仿真控制管理节点运行界面如图 5 所示,实时显示了当前搭载在 DDS 数据中间件上的各分布式节点,通过仿真控制管理节点可实现对整个仿真场景的启动、暂停、停止等操作。

图 6 为战场环境态势显示节点的实时运行界面图,图中战场场景是红方飞机锁定蓝方飞机后,发射多枚导弹攻击蓝方飞机,蓝方飞机进行相应的规避,绿色的线为多枚红方攻击弹的攻击轨迹,与此同时蓝方防空系统也锁定了红方目标。

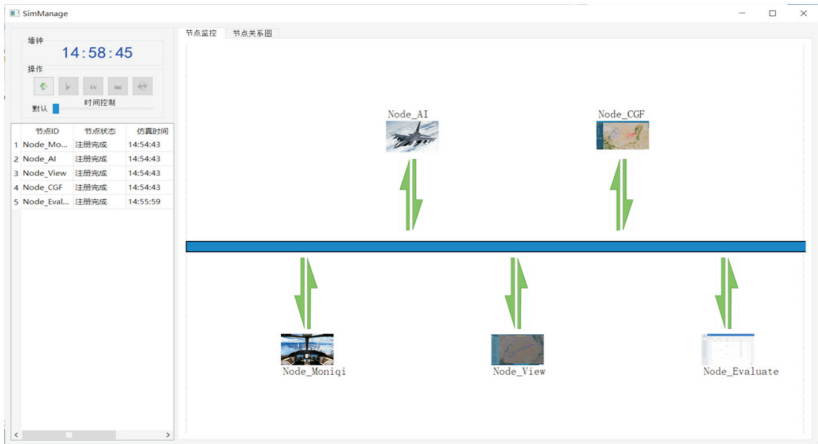


图 5 仿真控制管理节点运行界面图

Fig. 5 Operation interface of simulation control management nodes



图 6 战场环境态势显示节点界面运行图

Fig. 6 Operation interface of battlefield environment situation display nodes

3 测试与分析

本文选用美国 RTI(Real-Time Innovations)公司的 DDS 来搭建空战模拟仿真系统,在完成本系统节点间通信的基础之上,对该系统的实时性进行相关测试。所有仿真节点组成一个千兆局域网,各节点操作系统均为 win10-64 位,处理器为 Intel(R)Core(TM)i7-7700CPU@4. 20 Hz,内存为 16 GB,使用 RTIDDS5. 3 版本,测试程序为 perftest_ cpp. exe。本文共设计 4 组实验来研究系统在实时性、可靠性和吞吐量上的表现,主要从数据包长度、传输延迟、抖动、吞吐量及 lost(网络丢包)的大小

来衡量。

其中传输延迟为发送接收处理时间、响应时间、传输时间三个时间的总和,用来衡量网络传输时间长短,单位为 μs ;抖动为信号的某特定时刻相对于其理想时间位置上的短期偏离,用于衡量网络时延的稳定性,单位为 μs ;吞吐量为单位时间内成功地传送数据的数量,单位为 mbps;网络丢包为数据传输过程中的丢包数,用于衡量网络的可靠性,单位为 %。

实验一 测试系统在数据包大小不同时的传输延迟,共进行 5 次数据测试,测试结果如图 7 所示,5 次数据传输的平均传输延迟为 $117. 4 \mu\text{s}$,数

据包大小的变化对传输延迟不会产生明显的影响。

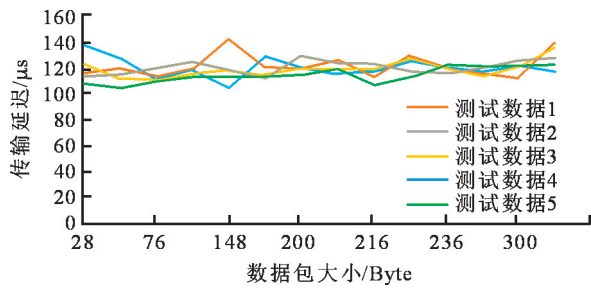


图 7 传输延迟测试图

Fig. 7 Transmission delay test chart

实验二 测试系统在数据包大小不同时的抖动,共进行 5 次数据测试,5 次测试结果如图 8 所示,5 次数据传输的平均抖动大小为 26.54 μs ,数据包大小的变化对抖动不会产生明显的影响。

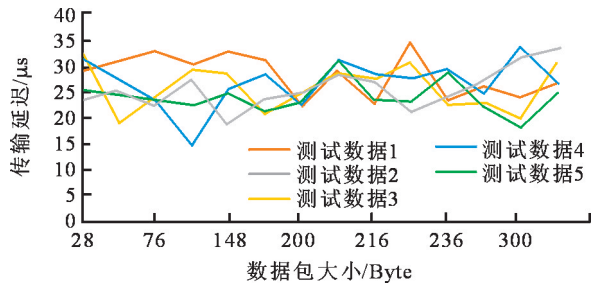


图 8 抖动测试图

Fig. 8 Jitter test chart

实验三 测试系统在数据包大小不同时的丢包数量,共进行 2 组丢包数量(lost 1,lost 2)测试,测试结果见表 7。

表 7 数据丢包率测试

Tab. 7 Data loss rate test

序 号	数据包 长度/Byte	发布数 量/个	lost 1/个	lost 2/个
1	28	3 000 000	0	0
2	32	3 000 000	0	0
3	76	3 000 000	0	0
4	104	3 000 000	0	0
5	148	3 000 000	0	0
6	184	3 000 000	0	0
7	200	3 000 000	0	0
8	204	3 000 000	0	0
9	216	3 000 000	0	0
10	224	3 000 000	0	0
11	236	3 000 000	0	0
12	268	3 000 000	0	0
13	300	3 000 000	0	0
14	588	3 000 000	0	0

从表 7 中可看出每次实验发布数据包数量为

300 万,随着数据包长度增加,丢包数一直为零,可看出该仿真系统满足可靠性传输。

实验四 测试系统在数据包大小不同时的吞吐量,共进行 5 次测试,5 次测试结果如图 9 所示。从图 9 可看出,随着数据包大小在 148 byte 以后,基本上吞吐量开始趋于稳定。吞吐量(860 mbps 左右)接近网络的实际带宽(1 000 mbps),因此该系统能够实现对网络环境的充分利用。

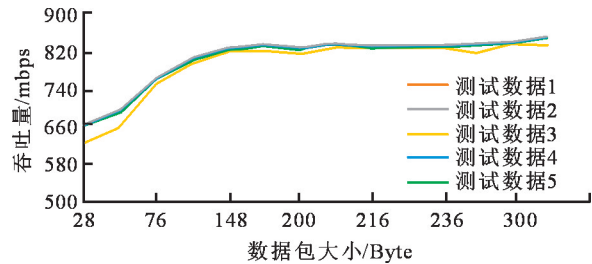


图 9 网络吞吐量测试图

Fig. 9 Throughput test chart

4 结 论

1) 本文利用 DDS 通信中间件技术设计并实现了空战模拟仿真系统的数据交互功能,提出了一种基于数据分发服务的层次化体系架构,设计了各个仿真节点间的支撑环境接口、对象模型定义方法及 QoS 策略,实现将仿真控制管理、模拟器、计算机生成兵力、智能空战、战场环境态势显示和综合评估 6 个仿真资源的整合。

2) 在实现各节点互联互通互操作的基础上,测试了 DDS 通信中间件技术在空战模拟仿真系统下的传输延迟、抖动、丢包数量和吞吐量,系统的传输延迟稳定为 117.4 μs ,平均抖动大小为 26.54 μs ,丢包数量为 0,且当数据包长度大于 148 Byte 时,吞吐量趋于稳定。表明文中方法在实时性、可靠性和吞吐量上表现良好,为空战模拟仿真系统的可靠性和实时性提供了一定的技术保障。

参 考 文 献:

[1] 刘诚. HLA 和 DDS 集成的关键机制研究[D]. 南京:东南大学,2017.
LIU Cheng. Research on Key Mechanisms of HLA and DDS Integration[D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)

[2] 钱峭,陈丹. 基于 DDS 的飞机协同设计数据分发系统[J]. 信息与电脑(理论版),2017(1):96.
QIAN Shao, CHEN Dan. DDS-based Aircraft Collaborative Design Data Distribution System [J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2017(1):96.

- mation and Computer (Theoretical Edition), 2017 (1):96. (in Chinese)
- [3] 侯玉,潘昕,冯源. 基于 DDS 的船舶分布式通信实时性研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(9):13.
HOU Yu, PAN Wei, FENG Yuan. Research on the Real-time of Distributed Communication of Ships based on DDS[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(9):13. (in Chinese)
- [4] 李想. 分布式卫星系统仿真支撑平台研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
LI Xiang. Research on Distributed Satellite System Simulation Support Platform [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. (in Chinese)
- [5] 张志鹤,史璐莎,张斌,等. 一种基于 DDS 与 HLA 的实时性联合仿真系统[J]. 电子设计工程, 2017, 25(10):26.
ZHANG Zhihe, SHI Lusha, ZHANG Bin, et al. A Real-time Joint Simulation System Based on DDS and HLA [J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(10):26. (in Chinese)
- [6] 周莹. 受限带宽环境下实时数据分发服务传输优化技术研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2016.
ZHOU Ying. Research on Real-time Data Distribution Service Transmission Optimization Technology in Confined Bandwidth Environment[D]. Beijing: China Ship Research Institute, 2016. (in Chinese)
- [7] 裴楷,沈栋,李娜,等. 基于 DCPS 模型的数据分发服务 DDS 的研究[J]. 电子科技, 2006(11):68.
QIU Kai, SHEN Dong, LI Na, et al. Research on Data Distribution Service DDS Based on DCPS Model[J]. Electronic Science & Technology, 2006(11):68. (in Chinese)
- [8] 孙文俊,冯燕,张宏宇. 基于 DDS 的实时信息交换平台研究[J]. 指挥信息系统与技术, 2011, 2(1):49.
SUN Wenjun, FENG Yan, ZHANG Hongyu. Research on Real-Time Information Exchange Platform Based on DDS[J]. Command Information Systems and Technology, 2011, 2(1):49. (in Chinese)
- [9] 李馥丹. 联合试验平台中间件的数据分发管理模块开发[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
LI Fudan. Development of Data Distribution Management Module for Joint Test Platform Middleware [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [10] 冷枫麒. 基于发布/订阅的分布式数据分发技术的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
LENG Fengqi. Research on and Implementation of Distributed Data Distribution Technology Based on Publish/Subscribe[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [11] 戴树唯. 基于 DDS 的 SOA 服务集成框架的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
DAI Shuwei. Research on SOA Service Integration Framework Based on DDS [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [12] 巴海涛,许锐锋. 基于 DDS 规范的战场态势信息分发框架[J]. 指挥信息系统与技, 2012, 3(1):45.
BA Haitao, XU Ruifeng. Battlefield Situation Information Distribution Framework Based on DDS Specification [J]. Command Information Systems & Technology, 2012, 3(1):45. (in Chinese)
- [13] 侯玉,潘昕,冯源. 基于 DDS 的船舶分布式通信实时性研究[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(9):13.
HOU Yu, PAN Wei, FENG Yuan. Research on Real-time Distributed Communication of Ships based on DDS[J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35(9):13. (in Chinese)
- [14] 李培林,彭美平. 基于 DDS 的分布式网络仿真系统[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(2):214.
LI Peilin, PENG Meiping. Distributed Network Simulation System Based on DDS[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 11(2):214. (in Chinese)
- [15] 卞华星. 基于 DDS 的飞机协同设计数据服务中间件的设计与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
BIAN Huaxing. Design and Implementation of Aircraft Cooperative Design Data Service Middleware Based on DDS[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015. (in Chinese)
- [16] 谷晓鹏,张凡石,王叶. 发布/订阅中间件中基于过滤器的信息选择机制[J]. 网络安全技术与应用, 2018(12):44.
GU Xiaopeng, ZHANG Fanshi, WANG Ye. Filter-based Information Selection Mechanism in Publish/Subscribe Middleware[J]. Network Security Technology and Application, 2018(12):44. (in Chinese)
- [17] 王洁宁,王果. 基于 DDS 规范的航行通告分发服务[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(11):212.
WANG Jiening, WANG Guo. Navigation Notification Distribution Service Based on DDS Specification [J]. Computer Technology and Development, 2012, 22(11):212. (in Chinese)

(编辑、校对 肖 晨)