

基于天基信息系统的的天基数据分发技术研究

雷超文^{1,2}, 田文波^{1,2}, 何健^{1,2}, 韦杰^{1,2}, 祝姪¹

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2. 上海航天智能计算技术重点实验室, 上海 201109)

摘要: 针对在天基多域信息系统中, 各类电子设备不断增加和推陈出新, 进而使得天基多域信息系统中数据量更大、数据类型更多、数据复杂性更高的特点, 对数据分发服务(DDS)技术进行研究, 提出了一种应用在天基多域信息系统网关上的基于国产操作系统的数据分发服务实现技术; 基于PowerPC P1022平台, 完成对国产化自主可控嵌入式操作系统风云翼辉(AIC-OS)嵌入式操作系统的移植适配, 同时联合VxWorks、Windows平台, 搭建起一套基于DDS技术的天基多域信息分发系统; 之后针对天地网络一体化通信的背景需求, 分别对该系统的连通性、可靠性、在线感知能力、通信时延等多方面能力进行实验测试; 实验结果表明, 可以有效实现天基多域信息系统的互联互通, 实现数据在不同用户间的发布和订阅。

关键词: 数据分发服务; 风云翼辉; 多网融合; 综合网关; 天基平台

Research on Data Distribution Technology Based on Space-based Information System

LEI Chaowen^{1,2}, TIAN Wenbo^{1,2}, HE Jian^{1,2}, WEI Jie^{1,2}, ZHU Ya¹

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Computing Technology (SAST), Shanghai 201109, China)

Abstract: In the space-based multi domain information system, various electronic devices are increasing and bringing forth the new through the old, which makes that the space-based multi domain information system is characterized by larger data volume, more data types and higher data complexity. The Data Distribution Service (DDS) technology is studied, and a data distribution service implementation technology based on the domestic operating system applied to the gateway of the space-based multi domain information system is proposed; Based on the PowerPC P1022 platform, the transplantation and adaptation in the domestic autonomous and controllable embedded operating system (FengYunYiHui AIC-OS) are completed. Meanwhile, a space-based multi domain information distribution system based on DDS technology is built through combing the AIC-OS, VxWorks and Windows platforms. After that, according to the background demand on the integrated communication of the heaven and earth network, the connectivity, reliability, online sensing ability, communication delay and other capabilities of the system are tested respectively. The experimental results show that the system can effectively realize the interconnection of the space-based multi domain information system, and realize the data publication and subscription among different users.

Keywords: data distribution service; AIC-OS; multi network integration; integrated gateway; space based platform

0 引言

长期以来, 各类国防系统均采用截然不同的通信网络, 如CAN总线, RS422总线等^[1]。而随着航天领域新概念新技术的不断运用和作战理念的不断更新, 未来基于网络信息体系的联合作战、跨域作战将成为我国国防体系建设的必然要求, 这也对我国海、陆、空、天各型设备的互联互通互操作提出了更高要求。

天基平台可以综合利用星间、星地数据链路传输信道, 将从太空到空中、海面、陆地的察打一体能力实现无缝一体化、全覆盖。星上传感器处理生成的情报数据可以经由天基平台直接进行跨域传输, 地面指令信息也可通过天基

平台进行直接回传, 进而实现全域联合作战的指挥控制、情报侦查与武器协同^[2]。

综上所述, 面对未来作战空间急剧膨胀、战场决策因素爆发式增长, 天基平台以其空间位置优势, 可以将卫星、地面指控中心与武器平台更好、更快捷地联合起来^[3]。在和平时期, 天基信息系统能够在全球范围内综合利用各类侦查卫星形成情报信息, 针对高威胁的战略目标进行全天候监控, 并利用信息分发系统将信息及时回传至地面, 为地面指控平台的决策提供依据^[4]。在战争时期, 天基多域信息分发系统可以实现海陆空天等多兵种数据的跨域传输。利用天基多域信息分发系统, 情报侦查信息可以快速回传至地面指控中心。而指控命令也可经由本系统快速传输至

收稿日期: 2022-07-06; 修回日期: 2022-08-02。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB0501004)。

作者简介: 雷超文(1995-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事星载嵌入式软件设计和分布式系统方向的研究。

引用格式: 雷超文, 田文波, 何健, 等. 基于天基信息系统的的天基数据分发技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(2): 223-229.

武器平台，引导武器系统精确打击敌方目标。

但由于各自采用的通信协议和硬件平台不尽相同，目前各军兵种武器平台、指控中心与天基平台无法做到互联互通^[5-6]。因此，如何打通各平台间的通信壁垒将成为实现天基跨域数据传输的重大难题。随着我国构建覆盖陆海空天的天地一体化异构组网架构，数据分发将跨多个作战域、多个网络形态、多种传输体制以及不同 QoS (quality of service, 服务质量) 用户需求^[7]。而 DDS (data distribution service, 数据分发服务) 技术以其数据为中心的发布/订阅模型特点，具备在跨域联合多样化、异构网络架构环境下实现动态路由规划与重规划，自适应节点快速运动与时变链路状态的能力^[8]。因而讨论 DDS 技术应用在天基多域信息分发系统网关上并基于国产操作系统进行移植具有重要的战略意义。

1 DDS 技术

DDS (data distribution service, 数据分发服务) 分布式数据分发服务中间件协议，作为新一代分布式网络标准协议，由美国海军主导，2005 年由国际标准化组织 OMG 制定发布。它具备跨平台、多态网络、互操作性强和低时延等功能。

DDS 中间件是以数据为中心的发布/订阅模型和数据分发服务规范，可通过即插即用组件的方式完成相互间的通讯，不需要程序员手工编写点到点的连接代码。

DDS 还允许系统操作者在系统运行时根据系统运行状态重新配置参数。此外，DDS 还提供了大量的开发工具，可以方便用户记录、分析、测试各种数据，包括这些数据在网络中的分发状况、各个数据的 QoS 策略的一致性。DDS 还可在现有通信网络上方便灵活地增加、减少通信节点^[9-10]。

DDS 的发布/订阅模型提供了一个以 QoS 控制的虚拟共享的全局数据空间^[11]，其结构如图 1 所示。在该全局数据空间当中，用户能够以数据发布者的身份发布数据，或用数据订阅者的身份订阅数据。DDS 允许节点在发布信息的同时实时地接收其所订阅的信息^[12]。

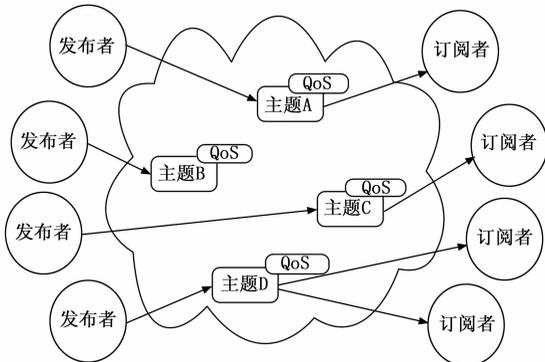


图 1 DDS 全局数据空间

DDS 规范的核心是 DCPS 层（以数据为中心的发布订阅层）^[13]。DCPS 层为节点发布和订阅信息提供了基础架构。DCPS 各实体包括域 (Domain)、域参与者 (Domain Participant)、数据写者 (Data Writer)、数据读者 (Data Reader)、订阅者 (Subscriber)、发布者 (Publisher)。图 2 显示了各个部分之间的关系。其中，数据按照发送端的数据写者 (Data Writer)、发布者 (Publisher) 以及订阅端的数据读者 (Subscriber)、数据读者 (Data Reader) 的顺序进行传输^[14]。

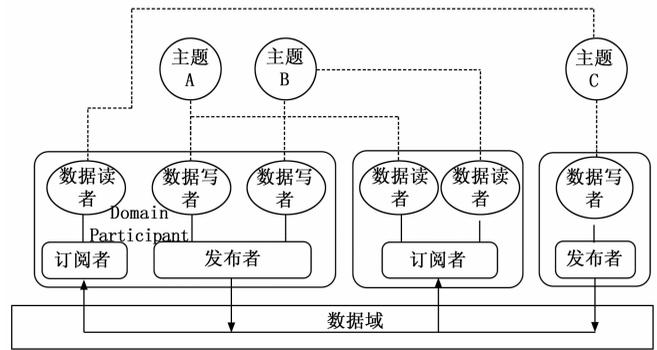


图 2 DCPS 模型结构

DDS 中的每一个成员都是一个实体，DDS 中，任意两个实体之间的通信都必须通过同一个域来进行交互。另外，在 DDS 中，所有的数据都带有一个主题，主题用以区分各种不同类型的数据，是实现发布者和订阅者之间数据传输的基本参数^[15]。主题也可称之为数据，全部的这些数据共同组成了 DDS 的全局数据空间。在全局数据空间中，分布式节点使用简单的读写操作即可实现对这些主题数据的访问。DDS 的全局数据空间是一个逻辑的概念，并不是存在于某一个特定的中心节点中。事实上，由于 DDS 常应用在分布式系统中，因此，其全局数据空间往往分散在各个分布式节点之中。

此外，DDS 规范还定义了 23 个 QoS，用户可以通过配置不同的 Qos，能够在不写一行代码的前提下实现对数据分发过程的控制，极大地减小了用户的工作量^[16]。如 ResourceLimits 策略描述了本地有多大存储空间可用于 DDS 配置。TimeBasedFilter 策略则描述了一种基于时间的数据过滤机制。

2 天基多域信息系统网关平台与操作系统

2.1 天基多域信息系统网关平台

对于以天地网络一体化为背景的新一代天基多域信息系统来说，它要求以数据为中心，可以实现有效的数据自动交换。这意味着任何类型的设备必须能够无缝、可靠地连接到通信网络，随后根据需要读取和写入数据，然后断开连接^[17]。

新一代天基信息系统以数据为中心，这意味着同一个网络上的设备能够彼此通信，无需通过中心信息服务器。

而将 DDS 技术应用于天基多域信息系统综合网关上可以解决这一难题。

综合网关是天基多域信息系统的核心设备之一。通过天基多域信息系统的综合网关平台, 将不同的网络连通起来, 它通过信息转化和信息传输, 可以解决广域范围内指挥所、作战平台和天基平台之间不同格式的数据转化、融合处理与路由分发等难题。由此可见, 综合网关需要具备高性能集成、自主数据交换和信息融合高效的能力, 满足天地网络一体化背景下跨平台信息传输与分发的需求。

基于 DDS 技术的综合网关平台可以简化网络中链路接入和节点发现机制, 进而使得设备接入与握手通信协议具备简介、高效的特点和自主发现与交换能力^[18-19]。

此外, DDS 的发布/订阅机制还可以解决跨平台、跨操作系统间不同类型设备的相互通信和协作问题。

如图 3 所示, 在基于 DDS 技术的综合网关之中, 能够以主题方式, 让接入用户自动发布消息。主题可以统一制定, 也可以由用户进行设置。此外, 综合网关还能够以主题方式主动获取多种信息, 然后进行多元信息融合处理, 再将处理后消息以新主题发布。谁订阅谁使用, 装订成相应消息数据格式即可。

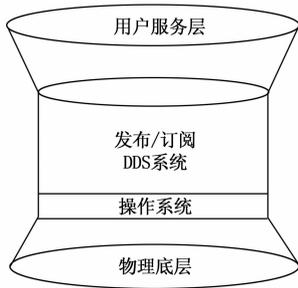


图 3 以主题为核心的发布/订阅自主数据交换系统

利用 DDS 系统的优势, 节点接入可主动更新。而以主题为发布/订阅方式以及不同链路自动接入的特点, 能够解决链路协议多样化、不兼容等问题。在实现方式上可能存在多个处理器平台或底层硬件平台的差异, 通过 DDS 与硬件无关的特性, 屏蔽底层差异性。进而满足不同用户的 QoS 需求。

主题可以统一制定, 也可以由用户关心的类型设置。一般设计的主题类型包括以下几种: 网络管理; 平台参数; 平台状况; 目标监视; 信息管理; 指挥控制。

2.2 风云翼辉操作系统

风云翼辉 (AIC-OS) 嵌入式操作系统是有航天八院自主研发的专用于卫星等航天器的国产操作系统。它具有高实时性的特点, 能够让应用软件实现高精度调度, 提高软件对卫星各项功能控制的可靠性。而作为一款专用于航天器的操作系统, 风云翼辉操作系统还带有丰富的航天专用组件, 可以为星上应用软件提供基础支撑。此外, 风云翼辉操作系统还兼容 POSIX 标准, 方便不同操作系统软件的

移植, 可以大大提高软件的复用率。

AIC-OS 嵌入式操作系统的系统架构如图 4 所示。

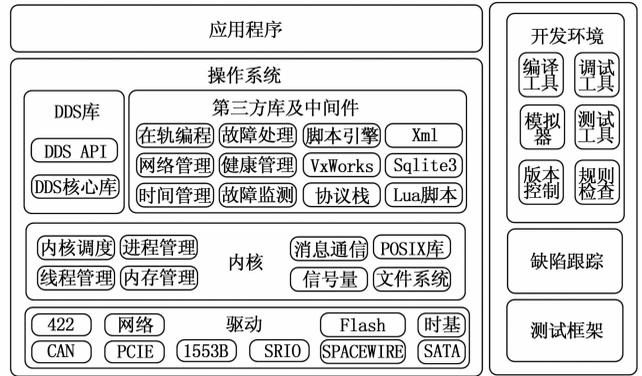


图 4 风云翼辉系统架构

AIC-OS 嵌入式操作系统由内核、驱动 (BSP)、中间件及第三方库、应用程序和相应的开发环境组成。其内核采用单内核模式设计。在驱动层完成对信息管理平台提供的外设的读、写访问, 中间件层提供对应应用开发有帮助的库, 如 VxWorks 和 Qt 等, 集成开发环境提供开发者具体功能应用的开发。

风云翼辉 (AIC-OS) 嵌入式操作系统为支持不同体系结构的处理器, 对 CPU 底层接口进行了抽象, 这样移植风云翼辉到 PowerPC P1022 处理器时, 只需要重新实现 P1022 底层接口即可。

3 平台适配

3.1 基于 AIC-OS 的 DDS 移植

基于 AIC-OS 操作系统的 DDS 移植就是在 PowerPC P1022 平台上基于 AIC-OS 嵌入式操作系统, 将 DDS 源码编译成动态库, 作为中间件提供给上层应用程序使用, 实现基于 AIC-OS 嵌入式操作系统的 DDS 核心库的移植适配, 同时针对 AIC-OS 嵌入式操作系统的应用设计通用 DDS API 接口。

基于 AIC-OS 嵌入式操作系统的 DDS 移植方法有以下几种。

1) 使用 POSIX 接口: DDS 源码中通过 API 接口适配层可以使用标准的 POSIX 接口, AIC-OS 嵌入式操作系统完美支持 POSIX 接口, 所以基于 AIC-OS 移植 DDS 通用 API 接口适配层时, 直接采用 POSIX 接口。在编译 DDS 通用 API 接口适配层的各个模块时, 使用 POSIX 接口进行适配。

2) 模块实现接口选择: AIC-OS 嵌入式操作系统能够很好的支持 Linux 接口, 所以在编译 DDS 核心层的模块时, 采用 Linux 的实现方式, 将 DDS 源码核心层的各个模块分别按照 Linux 的实现方式进行编译。

3) Makefile 的编写: AIC-OS 嵌入式操作采用集成开发缓存, 其中工程管理文件 Makefile 能够自动生成, 在编

译 DDS 源码时需要手动修改 Makefile 文件，参照 AIC-OS 操作系统 Makefile 的编译参数，编写 DDS 的 Makefile，将编译的相关变量及参数按照 AIC-OS 操作系统的方式写入 DDS 的 Makefile 中。

3.2 基于 VxWorks 操作系统的移植适配

VxWorks 操作系统是实时操作系统，具有运行稳定、实时处理延迟低的特点，在武器领域，尤其是指控、火控领域有着广泛的应用。针对基于 x86 架构下的 VxWorks6.8 版本，通过对底层代码进行适配更改，并将 DDS 源码进行环境适应性修改及重新编译，完成了对 DDS 的移植^[20]。移植成功后，VxWorks 系统可以正常运行 DDS，并于其他节点通信。

3.3 基于 Windows 操作系统的移植适配

针对传统 x86 架构的 windows7/10 平台，进行多版本 DDS 产品的适配。在 Windows 系统下，通过设计的 idl 表，分别进行 C 语言、C# 语言、Java 语言的接口适配。

4 实验测试

4.1 DDS 验证平台搭建

搭建 DDS 测试验证系统，分别模拟卫星、指控车和地面指挥中心大厅。测试系统包括 1 台数据服务器，1 台 P1022 处理器板，4 台交换机，5 台计算机。分系统内部有交换机连接，分系统之间通过一个交换机实现连接，设备通过 2 级交换机实现互联，通过千兆以太网实现控制命令的发送和载荷遥测数据的下行，系统组成架构如图 5 所示。

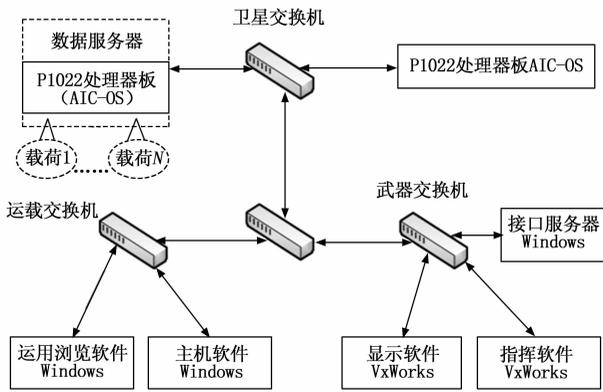


图 5 多系统测试组成框图

本系统包括 1 个卫星节点，2 个链路节点。天基节点基于 P1022 处理器和国产操作系统，链路节点基于地面 PC 机和 Windows 操作系统。各个节点之间通过有线网络互连。

系统组成如下：

- 1) 数据服务器是基于 P1022 处理器的单机，基于风云翼辉 (AIC-OS) 嵌入式操作系统，模拟卫星载荷数据源，实现载荷数据的发布。
- 2) 接口服务器是基于 Windows 平台的武器业务接口软件，实现载荷数据的订阅和解析后内部数据的发布。
- 3) 指挥软件运行 VxWorks，用于模拟指挥车、主机软

件运行 Windows，用于模拟地面指挥中心。实现遥控命令的发送，实现载荷数据的订阅。

4) 通用浏览软件运行 Windows，实现载荷数据的订阅和解析后的显示。

本测试系统中的每个节点均部署了 DDS 中间件。试验重点为在天基多域背景下对国产操作系统进行 DDS 适配测试。其中天基卫星采用风云翼辉嵌入式操作系统进行软件开发。

4.2 试验场景

本试验的试验场景为在天地网络一体化背景下的跨域信息流互通。

试验方案如下：

在多系统部署和联通后，卫星作为数据源头，首先启动所有服务，并等待其它系统的数据订阅请求，运载系统和武器系统随后启动软件，根据需要向卫星发送请求，根据收到的数据进行实时处理。

运载分系统，数据处理与转发软件，向卫星发布订阅请求，实时接收弹道信息并显示；指挥软件模拟导弹车、武器车，根据业务需要，向卫星发布订阅请求；卫星根据订阅请求，向网络上发布不同的载荷信息。

根据场景应用的需求，设计了通信的 idl 表，并设置了 8 个资源主题，分别如下显示：

```
const string TOPIC_RESLLIST =
    "Resource List"; /* 资源列表 */
const string TOPIC_PLATTM =
    "Platform TM"; /* 平台遥测 */
const string TOPIC_RADERCON =
    "Radar Reconna"; /* 雷达侦查 */
const string TOPIC_COMMERCON =
    "Communication Reconna"; /* 通信侦查 */
const string TOPIC_AIS =
    "AIS"; /* AIS 数据 */
const string TOPIC_ADSB =
    "ADS-B"; /* ADS-B 数据 */
const string TOPIC_VDES =
    "VDES"; /* VDES 数据 */
const string TOPIC_IMAGE =
    "Image"; /* 图像数据 */
const string TOPIC_INRSATE =
    "Inter-satellite"; /* 星间数据 */
```

通过设计的 idl 表和编写的程序，卫星分系统在启动后，实时向外发布资源列表和资源情况，同时在界面上显示连接信息，如图 6 所示。

显示软件根据收到的载荷信息，解析后在界面显示。在测试大厅，运载分系统和战术分系统都在网络上收到了卫星发布的资源列表，同时在资源列表中订阅了自身需要的资源。

运载分系统启动了 2 个客户端，都订阅了 Platform TM

Satellite DDS Software					
data: 2021-08-17			version: v1.0.0		
Resource List					
name(topic)	id	available flag	used count	Used list	Write count
Platform TM	1	Yes	0	NONE	19
Rader Reconna	2	Yes	0	NONE	19
Communication Reconna	3	Yes	0	NONE	19
AIS	4	Yes	0	NONE	19
ADS-B	5	Yes	0	NONE	19
VDES	6	Yes	0	NONE	19
Image	7	Yes	0	NONE	19
Inter-satellite	8	Yes	0	NONE	19
Resource publisher infomation					
VDES Resource Publisher -->					
Image Resource Publisher -->					
Inter-satellite Resource Publisher -->					
Resource List Publisher -->					
Platform TM Resource Publisher -->					
Rader Reconna Resource Publisher -->					
Communication Reconna Resource Publisher -->					
AIS Resource Publisher -->					
ADS-B Resource Publisher -->					
software running information					
[INFO]	Topic 1:Platform TM<init_datawriter_variables>				
[INFO]	Topic 2:Rader Reconna<init_datawriter_variables>				
[INFO]	Topic 3:Communication Reconna<init_datawriter_variables>				
[INFO]	Topic 4:AIS<init_datawriter_variables>				
[INFO]	Topic 5:ADS-B<init_datawriter_variables>				
[INFO]	Topic 6:VDES<init_datawriter_variables>				
[INFO]	Topic 7:Image<init_datawriter_variables>				
[INFO]	Topic 8:Inter-satellite<init_datawriter_variables>				

图 6 卫星资源发布图

的资源, 在卫星资源发布图中可以看到 Platform TM 资源的连接用户为 2, 断开 1 个客户端后, Platform TM 资源的连接用户为 1。

4.3 DDS 技术指标测试

在上述试验场景下, 对系统进行联通性试验、通信时延试验、传输安全性和误码率试验、在线状态感知试验以及可靠性试验等多方面, 全方位的实验测试。

4.3.1 联通性试验

根据天基多域信息系统需要跨域、跨平台传输信息的要求, 对本系统进行了点对点联通性试验、点对多联通性试验以及跨平台联通性试验。

1) 点对点联通性试验: 在实际使用过程中, 最多的应用场景就是两个终端之间的点对点通信, 传统的方案是 TCP 传输或 UDP 应答式传输, 采用 DDS 中间件后, 需要进行点对点压力测试, 验证其通信的可靠性。

2) 点对多的联通性试验: 在实际的应用场景中, 存在一个终端产生的数据源通过组播传输, 多个终端同时接收并使用该数据的场景, 传统的方式是采用 UDP 组播方式, 采用 DDS 中间件后, 需要进行点对多的压力测试, 验证在点对多模式下的通信可靠性。

3) 跨平台联通性试验: 在实际的天基多域信息系统中, 系统中的多个设备采用了不同的操作系统, 有 Vx-Works、Windows、AIC-OS 嵌入式操作系统等, 这些设备需要进行实时的通信, 因此需要在各个设备上移植 DDS 中

间件后进行联通性验证。

实验结果如表 1 所示。

表 1 联通性试验结果

试验平台组成	实验目的	验证结果
PC(Windows)+ PC(Windows)	点对点联通	联通
PC(Windows)+ 2 台 P1022 (AIC-OS)	点对点联通、跨平台联通	联通
PC(Windows)+ 设备 (VxWorks)	点对点联通、跨平台联通	联通
多台 PC (Windows)+ 多台 P1022 (AIC-OS)+ 设备 (VxWorks)	点对多联通、跨平台联通	联通

在联通性试验时, 通过开发的测试软件, 进行了带宽测试。

1) 点对点通信带宽测试: 如图 7 所示, 设置输入数据帧长度为 1 024 字节, 总传输帧数为 100 000, 当 DDS 发布者只发 1 个主题的帧数据, DDS 订阅者只接收 1 个主题帧数据时, 在不丢包的前提下 DDS 的平均带宽可达 105 Mbps 以上;

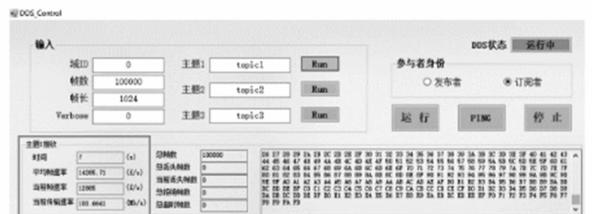


图 7 DDS 单主题接收

2) 点对多通信带宽测试: 如图 8 所示, 设置输入数据帧长度为 1 024 字节, 总传输帧数为 100 000, 当 DDS 发布者同时发送 3 个主题的帧数据, DDS 订阅者同时接收 3 个主题时, 在不丢包的前提下 DDS 的平均带宽可达 35 Mbps 以上。



图 8 DDS 多主题接收

4.3.2 通信时延试验

DDS 技术相对于传统的 TCP、UDP 方式, 多了一层中间层, 高速通信时, 数据通过中间层时, 相对于传统方式,

产生的时延是否增大，需要进行测试，验证其时延量级，是否可以用在高速数据传输。

通过专用的网络测试工具，分别进行 32、64、256、1 024、8 192、32 768、63 000 字节长度的延时测试，测试结果如图 9 所示。从图 9 中可以分析得到结果，采用 DDS 传输时，字节的传输延时都在 ms 级别以下，与不采用 DDS 直接传输的情况没有区别，可以得到结论，采用 DDS 并不会增加网络传输的延时。

```

Transport Configuration :
Kind: UDPv4
Nic: 192.168.0.150
Use Multicast:False
Initial peers:192.168.0.170

Waiting to discover 1 subscribers ...
Waiting for subscribers announcement ...
Sending 50 initialization pings ...
Sending data ...

One-way Latency Summary:
Length <Bytes>, Ave <us>, Std <us>, Min <us>, Max <us>, 50% <us>, 90% <us>, 9f
32, 427, 76.1, 113, 654, 417, 524, 57;
64, 426, 72.9, 148, 690, 417, 520, 56;
256, 417, 74.2, 123, 684, 407, 518, 56;
1024, 440, 80.3, 136, 1512, 432, 544, 58;
8192, 519, 67.7, 260, 876, 524, 592, 69;
32678, 768, 109.2, 499, 1407, 751, 959, 101;
63000, 1009, 90.1, 747, 1493, 998, 1115, 126;

Finishing test...
Test ended.

C:\Users\SH804\Desktop\rti_perftest-3.1.0_RTI_ConnectDDS_Pro_6.0.1_x64\Wn64\rt:

```

图 9 通信时延试验

通过开发的应用软件，综合采用 DDS.waitset、DDS.StatusCondition、DDS.StatusMask 等类来辅助计算时延，发布者在发送数据时记录发送时间并进入等待接收状态，订阅者接到数据后进行回传，发布者接收到订阅者的回传数据后记录接收时间，通过多组帧数据传输计算平均时延，最后得到图 10，时延约为 0.2 ms。

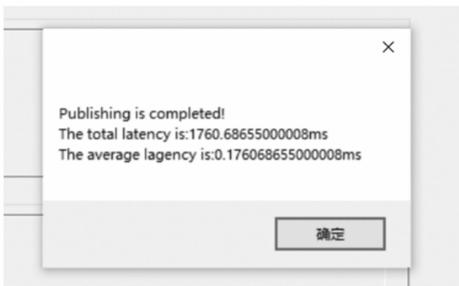


图 10 DDS 时延测试

4.3.3 传输安全性和误码率试验

误码率是数据传输的重要指标，DDS 中间件在部署完成后，需要进行不同码率下传输误码率的测试，验证其可靠性。

在进行多系统联合测试时，通过星载平台进行了多个主题 (Topic) 的发布，武器平台和运载平台都对 Topic 进行了订阅，通过业务接收软件进行了实测，配置为可靠通信模式下，测试过程未发现误码或丢包现象。配置为不可靠通信模式下，测试过程发生丢包现象，丢包率约为万分之一。

4.3.4 在线感知试验

在天际多域信息系统中，需要有一个显示终端来显示各个设备彼此之间的连接状态，是否处于正确或断开情况，传统的方式是采用 TCP 连接或 UDP 心跳方式感知。而采

用 DDS 技术之后，需要对系统中各个设备的连接状态进行感知验证。

在进行多系统联合测试时，通过 DDS 产品的测试工具，能够查看到网络上所有连接到 Topic 的设备。查看结果如图 11 所示。

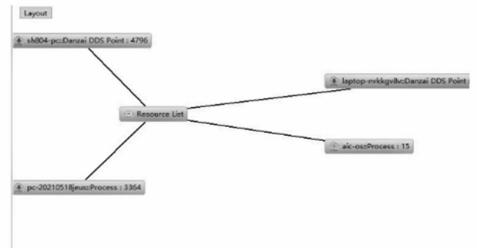


图 11 在线感知状态 1

如图 12 所示，当订阅者接入到某 Topic 时候，可以通过可视化的监测界面可以看到连接的设备增加。

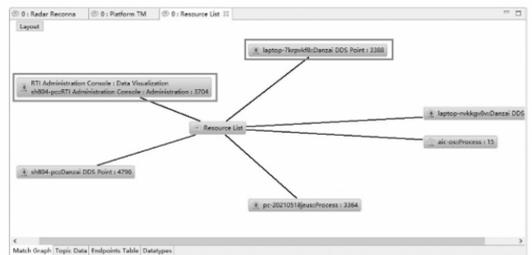


图 12 在线状态感知 2

4.3.5 可靠性试验

1) 可靠通信与不可靠通信实验：分别在可靠通信与不可靠通信模式下进行通信试验：通过编写 QoS 配置文件，分别进行了这两项测试，结果显示在可靠通信 (RELIABLE_RELIABILITY_QOS) 模式下，出现丢包会进行重传，在不可靠通信 (BEST_EFFORT_RELIABILITY_QOS) 模式下，出现丢包不会重传。测试结果如图 13 和图 14 所示。

```

Transport Configuration :
Kind: UDPv4
Nic: 192.168.0.150
Use Multicast:False
Initial peers:192.168.0.170

Waiting to discover 1 subscribers ...
Waiting for subscribers announcement ...
Sending 50 initialization pings ...
Sending data ...

One-way Latency Summary:
Length <Bytes>, Ave <us>, Std <us>, Min <us>, Max <us>, 50% <us>, 90% <us>,
32, 428, 55.9, 170, 642, 428, 514,
64, 491, 77.8, 150, 669, 513, 569,
256, 491, 61.0, 167, 670, 512, 539,
1024, 482, 63.4, 190, 657, 497, 545,
8192, 529, 55.2, 286, 902, 532, 589,
32678, 882, 89.7, 504, 1299, 916, 954,
63000, 1156, 80.6, 791, 1520, 1183, 1212,
Finishing test...
Test ended.

```

图 13 可靠通信试验

4.4 测试结果分析

综上所述，在联通性试验中，验证了基于 DDS 技术的天基多域信息系统的跨平台联通能力，实现了风云翼辉 (AIC-OS)、VxWorks 和 Windows 等不同操作系统平台之

```

Transport Configuration :
  Kind: UDPv4
  Nic: 192.168.0.150
  Use Multicast:False
  Initial peers:192.168.0.170

Waiting to discover 1 subscribers ...
Waiting for subscribers announcement ...
Sending 1 initialization pings ...
Sending data ...

Intervals One-way Latency for 100 Bytes:
Length <Bytes>, Latency <us>, Ave <us>, Std <us>, Min <us>, Max <us>
100, 333, 390, 57.0, 333, 447
100, 322, 367, 56.5, 322, 447
100, 276, 345, 62.9, 276, 447
100, 277, 331, 62.4, 276, 447
100, 287, 324, 59.3, 276, 447
100, 285, 318, 56.5, 276, 447
100, 279, 313, 54.4, 276, 447
100, 280, 310, 52.4, 276, 447
100, 292, 308, 50.0, 276, 447
100, 281, 305, 48.3, 276, 447
100, 278, 303, 46.8, 276, 447
100, 276, 301, 45.6, 276, 447
100, 276, 299, 44.4, 276, 447
100, 180, 291, 52.2, 180, 447
100, 254, 289, 51.3, 180, 447
100, 275, 288, 49.9, 180, 447
100, 245, 286, 49.5, 180, 447
100, 271, 285, 48.3, 180, 447
100, 271, 284, 47.2, 180, 447
100, 283, 284, 46.0, 180, 447
100, 271, 284, 45.0, 180, 447
100, 282, 284, 44.1, 180, 447
100, 279, 283, 43.1, 180, 447
100, 282, 303, 42.3, 180, 447
100, 308, 284, 41.7, 180, 447
100, 268, 284, 41.1, 180, 447
100, 278, 283, 40.3, 180, 447

```

图 14 不可靠通信试验

间的联通。同时, 经过通信带宽测试, 验证了 DDS 中间件在点对点通信和点对多通信中均拥有较高的带宽, 可以有效满足大数据量的传输需求。通信时延试验中, 结果表明采用 DDS 传输时, 其平均传输时延在毫秒级别以下, 与不采用 DDS 传输没有区别。因此可知采用 DDS 技术并不会增加网络传输的时延。在传输安全性和误码率试验中, 验证得知了在可靠通信的模式下, 系统不会发生误码或丢包现象, 而在配置为不可靠通信的模式下, 系统会发生丢包现象, 但丢包率较低, 约为万分之一。在线感知试验中, 验证得知, 本系统能够自动感知系统中新增的设备。而在可靠性试验中, 可知在可靠通信的模式下, 系统在出现丢包时会进行重传, 而在不可靠通信的模式下, 出现丢包不会进行重传。

因此, 基于 DDS 技术的天基多域信息系统能够很好的完成对不同平台通信链路的互联互通, 打通各平台间的通信壁垒, 实现数据的跨域传输。能够很好的应用在我国天地一体化异构组网架构的建设中, 实现天地一体化通信。

5 结束语

天基多领域信息互联互通始终是一个难点, 需要进行大量的协调和对接工作, 采用 DDS 技术, 通过对天基多域信息系统网关进行标准的 idl 表制定以及维护, 可以实现多领域之间信息高效互联互通, 大幅度减少沟通协调对接时间, 且该技术拥有高可靠性和高性能。本文通过对搭载 AIC-OS 操作系统的 PowerPC P1022 硬件平台移植 DDS 系统, 验证发现其能够很好地支持星上跨域、跨平台以数据处理为中心的新一代天基多域信息分发系统的应用, 可以作为新一代天基多域信息分发系统中数据管理的核心应用, 为未来解决平台差异性情况下的消息自动交换问题提供了一个新思路。在下一阶

段的研究中, 我们将对本系统在无线环境下的各项功能进行测试和完善, 以满足未来实际需求。

参考文献:

- [1] 陈冬. 天基信息网络数据链应用技术 [J]. 火力与控制, 2018, 43 (3): 5-9.
- [2] 张晓波. 天基预警控制系统总体框架研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13 (2): 196-120.
- [3] 肖奇飞, 司徒佳希, 宋文宾. 卫星通信在数据链系统中的应用研究及启示 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42 (4): 164-167.
- [4] 陈永华, 孔德强, 陈洁. 天基信息支援在防空作战中的应用模式 [J]. 指挥与控制学报, 2021, 7 (3): 331-334.
- [5] 和欣. 关于卫星数据链体系发展的思考 [J]. 指挥信息系统与技术, 2017, 8 (6): 26-32.
- [6] 李学远, 回征, 朱历洪, 等. 卫星数据链战场应用的规划问题研究 [J]. 空间电子技术, 2015, 12 (5): 55-58.
- [7] 朱子杰, 汪敏, 李荣宽, 等. 基于 DDS 战术服务框架的实现机制 [J]. 指挥信息系统与技术, 2020, 11 (4): 52-56.
- [8] 安剑, 谭超, 张晓. 基于 DDS 的数据交互架构研究 [C] //北京: 2018 软件定义卫星高峰论坛会议摘要集, 2018: 78-85.
- [9] 王天一, 高博. 分布式实时系统数据分发服务 DDS 技术研究 [J]. 电子科技, 2020, 33 (8): 40-44.
- [10] KANG W. RDDS: a real-time data distribution service for cyber-physical systems [J]. IEEE Transaction on Industrial Informatic, 2012, 8 (2): 393-405.
- [11] 谢之皓. DDS 通信中间件的传输构架和数据一致性技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [12] 冯云姣, 吴斌, 曾辉. 基于 DDS 的异构系统数据交换技术研究 [J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46 (12): 83-86.
- [13] 郑书朋, 杜勇, 韩俊伟. 基于 DCPS 的分布式实时通信体系结构分析及延迟测试 [J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37 (5): 559-564.
- [14] 宋健. 基于数据分发服务的多学科流程分布式调度研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [15] 司马智. 基于服务集成框架的数据服务研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [16] INGLES R J, ROMERO G A, VICENTE C C, et al. A model-driven approach to enable adaptive QoS in DDS-based middleware [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2017, 1 (3): 176-187.
- [17] 任开银, 胡昊伟. 分布式数据交换平台设计与实现 [J]. 计算机与数字工程, 2013, 41 (11): 1850-1852, 1875.
- [18] 马骁. 一种战术数据链协议网关的设计与实现 [J]. 价值工程, 2019, 38 (17): 235-237.
- [19] 白艳祥, 赵旭, 沈文渊. 嵌入式船舶网络综合网关的设计 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38 (17): 96-100.
- [20] SONG B, HU X, XIAO J, et al. Integration of data distribution service into partitioned real-time embedded systems [C] //2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2020.