



专题：确定性网络

基于 OMNeT++ 的大规模确定性网络仿真实践

高陈强, 朱向阳, 喻敬海

(中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 时间敏感网络 (TSN) 和确定性网络 (DetNet) 是确定性网络整体解决方案的重要组成部分, 目前产业界还缺少这两种技术在大规模联合组网方面的研究。在 OMNeT++ 仿真平台基于时隙调度实现了 TSN 和 DetNet 联合组网的确定性转发, 并打通了控制器和仿真系统的通道, 实现了转控协同的确定性仿真网络。重点介绍了对于仿真系统的改造, 以及基于此的大规模跨域场景下确定性业务的端到端时延和抖动性能研究。结果表明, 在大规模跨域场景下, 时隙调度的机制可以提供端到端的确定性业务保障。

关键词: OMNeT++; 大规模确定性网络; 转控协同; 时隙调度; 跨域

中图分类号: TN915.41

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023239

Large-scale OMNeT++-based deterministic networking simulation practice

GAO Chenqiang, ZHU Xiangyang, YU Jinghai

ZTE Corporation, Nanjing 210012, China

Abstract: TSN and DetNet are major components of the deterministic networking solution, detailed research has been conducted by industry and academia. However, the study seldom considers the joint of these two technologies under large-scale networks. To facilitate the analysis of the joint networks, TSN and DetNet specific extensions to the popular OMNeT++/INET framework for network simulations was presented, in particular, the time slot scheduling, the TSN node/host/interface and DetNet node/host/interface, the framework for collaboration between the controller and the simulation system. A proof of concept implementation and exemplary evaluation of the joint of these two technologies under large-scale networks was presented. The results show that in large-scale cross-domain scenarios, the time slot scheduling mechanism can provide end-to-end deterministic service guarantee.

Key words: OMNeT++, large-scale DetNet, forwarding and control collaboration, slot scheduling, cross-domain

0 引言

确定性网络是在以太网上为多种业务提供端

到端确定性服务质量保障的一种新技术^[1], 可以满足工业控制、远程医疗、在线游戏等对时延抖动有苛刻要求的应用需求。电气和电子工程师学



会 (IEEE) 802.1 于 2007 年创建了音视频桥接 (audio video bridging, AVB) 任务组, 其目标是用以太网取代家庭娱乐中的高清多媒体接口及专用线缆, 2012 年, AVB 更名为时间敏感网络 (time-sensitive networking, TSN) 任务组^[2], 进一步扩展了以太网在实时应用的场景及技术, 在传统以太网的基础上, 提供时间同步、时延保证等确保实时性的能力^[3]。TSN 基于局域以太网, 支持时间触发 (time-triggered traffic, TT) 流量, 该类流量的特点是具有周期性, 同时有低时延的需求, 针对 TT 流的调度问题已有大量研究^[4-7], 但在大规模以及跨域方面能力有限^[8], 2015 年互联网工程任务组 (IETF) 成立了确定性网络 (deterministic networking, DetNet) 工作组, 致力于 IP 网络提供确定性保障能力, 同时解决 TSN 在扩展性方面的短板, 以期望将确定性网络技术扩展至城域和广域网络^[9]。

OMNeT++ (objective modular net work test bed in C++) 是一款离散事件模拟器, 可以用于有线和无线通信网络的建模、协议建模、排队网络的建模等。基于 C++ 对象的模块化结构是 OMNeT++ 的重要特性之一^[10], OMNeT++ 模型由多个互相传递消息的模块组成, 模块有两种, 包括简单模块和复合模块^[11]。简单模块是活跃的, 并真正参与消息处理的模块, 通过使用 C++ 和 OMNeT++ 仿真类库编写得到, 简单模块分组可得到复合模块, 复合模块可以进一步分组, 嵌套的层次不受限制。确定性的特性通过简单模块实现并组合成复合模块以提供节点的确定性功能。

TSN、DetNet 工作组提出了多种时隙调度机制, 可以提供端到端的时延保障。基于物理设备验证时隙调度能力通常只能在少量节点设备上, 想要进行大规模组网的验证面临投资大、耗时长、不够灵活等问题。通过 OMNeT++ 仿真可以较容易地组建大规模异构跨域网络, 验证在大规模跨域场景下, 确定性时隙调度机制的能力。

Jiang 等^[12]在 OMNeT++ 仿真平台实现了 TSN 功能, Le 等^[13]基于 OMNeT++ 仿真了 TSN 的时间感知整形调度器, Fang 等^[14]仿真了基于令牌整形的模型, 但都只局限于少量节点和少量业务流, 缺少大规模网络的验证。强鹏等^[15]在 OMNeT++ 平台仿真了大规模确定性网络 (large-scale deterministic networking, LDN) 技术, 但未考虑转控协同以及异构的跨域网络。

本文基于 OMNeT++ 仿真平台实现了优先级队列、路由、编排、时隙调度、封装转换、多种类型节点等功能, 另外实现了集中式控制器与 OMNeT++ 仿真平台的协同功能, 控制器进行确定性业务流的输入和路径编排, OMNeT++ 仿真平台根据控制器下发的数据进行确定性转发, 在跨域的大规模网络中验证了不同调度机制下流量的时延特性。

1 确定性大规模仿真架构

1.1 确定性仿真概述

IEEE 802.1Qcc 提出了一种全集中式的体系结构, 包括集中式用户配置 (CUC)、中央网络控制器 (CNC) 和网桥^[16], 本文采用类似的全集中式结构, 确定性仿真软件系统如图 1 所示, 包括确定性网络 App、确定性网络控制器和确定性转发仿真系统 3 部分。确定性网络 App 是整个系统的前端界面, 向用户提供可视化界面, 方便用户对控制器进行参数配置、拓扑展示、业务流配置等; 确定性网络控制器是控制软件, 提供确定性网络业务管理插件, 负责业务部署、路径计算、资源预留和配置下发等工作, 控制器通过北向接口表述性状态转移配置 (representational state transfer configuration, RESTCONF) 与 App 交互, 通过南向接口网络应用消息协议 (web application messaging protocol, WAMP) 与仿真平台 OMNeT++ 进行交互。仿真平台 OMNeT++ 是确定性网络的转发面, 实现确定性转发机制的仿真。

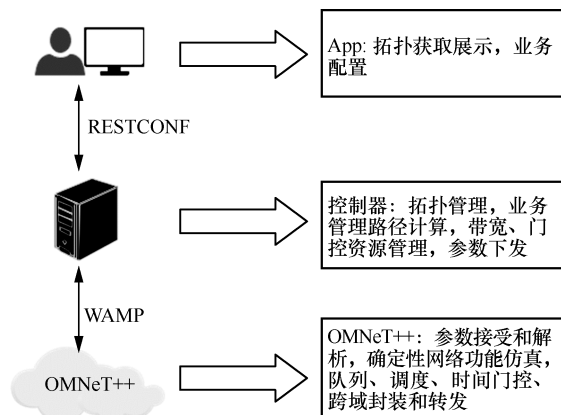


图1 确定性仿真软件系统

1.2 确定性 App 和控制面

确定性控制器是确定性网络的控制面软件，App 是其对应的前端界面。控制器实现拓扑获取、业务需求获取、路径计算、端到端业务管理、时隙和队列资源管理等。控制器收集到全网拓扑后，App 将确定性业务流量特征以及对网络的需求告知控制器，控制器规划一条符合其需求的路径，预留带宽并编排时隙资源，配置下发给转发面，实现业务部署。

1.3 确定性转发仿真系统

确定性转发仿真系统使用 OMNeT++ 内置的 INET 框架和 CoRE4INET 框架实现，通过在 INET 和 CoRE4INET 项目基础上组合现有组件和构建新组件，提供确定性转发功能。

确定性转发仿真系统模块如图 2 所示，其中通用模块没有列举，功能模块主要包括接口、时钟、队列、媒体访问控制（MAC）、时隙调度、转发表、流收发、流映射、流匹配等。

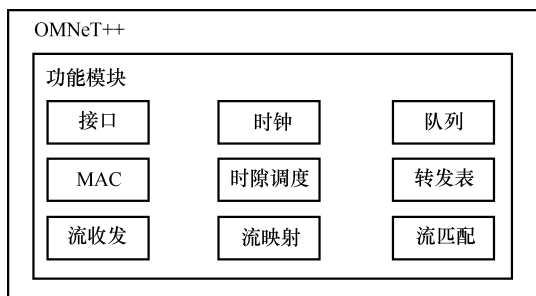


图2 确定性转发仿真系统模块

以下是各功能模块的主要功能。接口是 OMNeT++ 侧实现南向接口的组件，OMNeT++ 使用该模块提供的功能接收来自控制器的配置参数并动态写入仿真网络，使网络按新的参数配置运行，同时，控制器通过该接口获取仿真网络拓扑；时钟是 CoRE4INET 提供的定时器组件，为所有其他模块提供定时功能以及全网节点的时间同步；队列用于模拟设备出端口队列，缓存不同优先级的流量，支持以太网和 IP 的优先级识别能力，并提供相应的排队模型；MAC 是报文调度请求，用于从不同的优先级队列请求转发数据包；时隙调度是在出端口的队列上实现时隙控制，在时隙为打开状态时，发送数据包，反之停止发送，每端口时隙状态由定时器和控制器下发指令进行控制；转发表用于接收控制器下发的转发表，确定性流量要根据该转发表转发；流收发用于业务流的发送和接收，依据控制器的业务配置项发送确定性流和背景流；流映射在 TSN/IPv4/MPLS/SRv6 域边界提供流映射和封装转换功能。对接多个域时，需要维护多个映射表以应对不同的跨域拼接场景；流匹配用于匹配业务流，节点通过提取报文的流标识查找流匹配模块，判断业务流是否为确定性业务流。

1.4 确定性仿真转控协同

WAMP 通过发布订阅和远程过程调用实现双向通信。Crossbar.io 是 WAMP 的开源实现，具有功能丰富、可扩展、稳定和安全等特点。

WAMPInterface 是德国汉堡大学开发的一个 OMNeT++ 项目，用于在 OMNeT++ 侧提供 WAMP 的协议实现，并使用 Autobahn-cpp 作为外部通信接口，建立起确定性仿真网络与 Crossbar.io 的连接，打通控制器与仿真平台的消息通道。

确定性仿真网络接收控制器下发参数，解析并实时更新相关参数到仿真网络的各模块。确定性网络仿真转控协同架构如图 3 所示，控制器使用 jawampa 连接 Crossbar.io 时，需要按 OMNeT++



侧提供的远程过程调用下发信息，下发信息格式需要与 OMNeT++ 接口侧要求一致，控制器侧和 OMNeT++ 侧需要提前协商好参数格式。

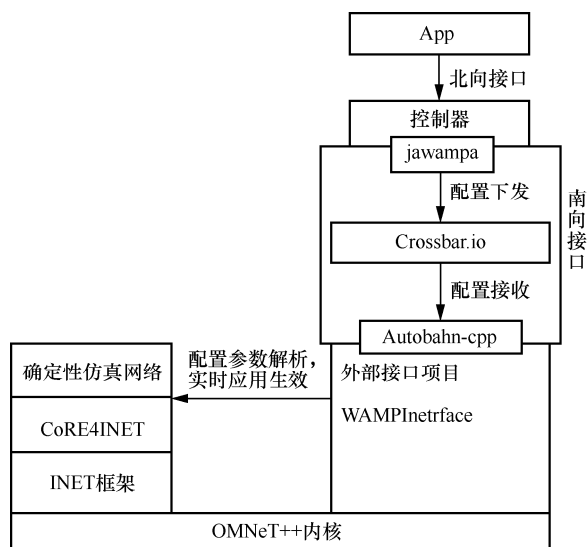


图3 确定性网络仿真转控协同架构

大规模确定性仿真实例中模块配置参数项多达数万个，采用静态配置文件方式人工添加或修改会非常烦琐。本系统打通了转发仿真系统与控制器的通道，使控制器能实时获取仿真系统组网拓扑，在 App 界面进行拓扑获取、业务配置，并在控制器实现拓扑解析、业务部署、路径计算和时隙编排等功能，将配置参数实时下发至仿真系统。另外，因为参数较多，为避免时序问题，需要将关联模块的参数打包下发。

2 确定性转发仿真系统功能实现

2.1 仿真系统转发过程

确定性转发功能由内部各模块组合起来，形成一个完整流处理过程，仿真原型系统功能交互示意图如图4所示。业务流特性由控制器下发给仿真平台，流量发生器依据配置参数构造符合要求的数据包（包括优先级、发流间隔、包大小、发流目的模块），经流量校验模块校验后由流量转发模块将数据包转发进入相应的出端口，如果是边界节点，还需要进行跨域的封装和映射。出端口队列模块对接收到的数据包进行整形和缓存，再由调度模块根据时隙调度列表进行调度，时隙的状态需要使用定时器模块进行设定。最后通过 MAC 层发送出去。

仿真网络运行后，外部接口模块实时监听并接收由控制器下发的配置参数，通过调用参数映射模块进行转换并写入对应网络子模块，使配置参数实时生效。仿真网络根据控制器下发的业务参数生成确定性流量，并根据下发的确定性转发表和时隙调度列表进行业务流的确定性转发。

2.2 确定性仿真系统节点模型

仿真系统通过多种节点组网，形成跨域大规模网络拓扑，支持二层、三层确定性业务仿真，通过终端节点产生对应的业务流，转发节点进行

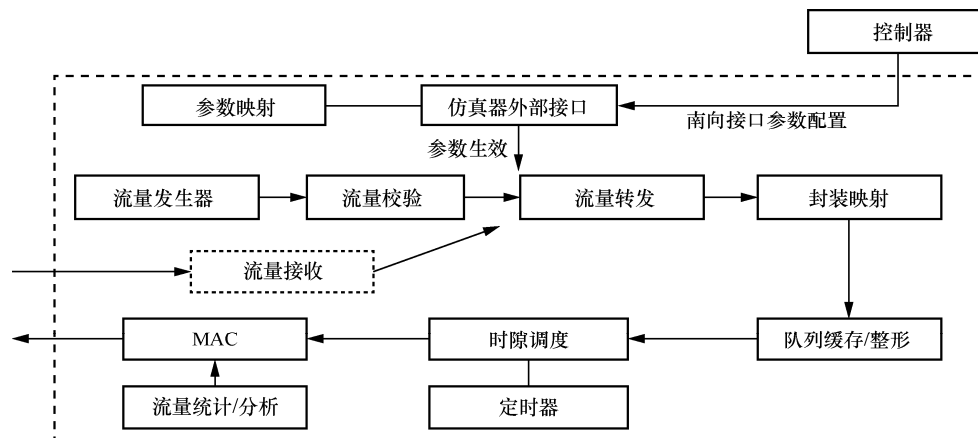


图4 仿真原型系统功能交互示意图

转发, 边界节点进行域间拼接。

针对二层确定性业务, 实现 TSN 转发节点和 TSN 终端节点, TSN 节点模型如图 5 所示。其中改造模块包括 `srpTable`、`avbCTC` 和 `phy`, 新增模块包括 `psfpTableConfig` 和 `app`, 其他模块是自带的。具体地, `srpTable` 是二层确定性业务流的转发表, 原有转发表通过流预留协议 (stream reservation protocol, SRP) 生成, 改造后支持控制器下发。`avbCTC` 用于 TSN 流匹配和分类, 并转发到相应的确定性队列, 增加支持 TSN 流的分类。`phy` 详见第 2.3 节。`psfpTableConfig` 是 802.1Qci 每流

过滤和策略机制的配置表项。收/发流 `app` 只在 TSN 终端节点增加, 其中发流 `app` 按照控制器的配置生成二层确定性业务流。

针对三层确定性业务, 实现 DetNet 转发节点和 DetNet 终端节点, DetNet 节点模型如图 6 所示。其中改造模块是 `eth`, 新增模块包括 `detnetRoutingTable`、`detnetCTC` 和 `app`, 其他模块是自带的。具体地, `eth` 详见第 3.3 节。`detnetRoutingTable` 是三层确定性业务流的路由表。`detnetCTC` 用于 DetNet 流匹配和分类, 将确定性业务流转发到相应的确定性队列。收发流 `app`

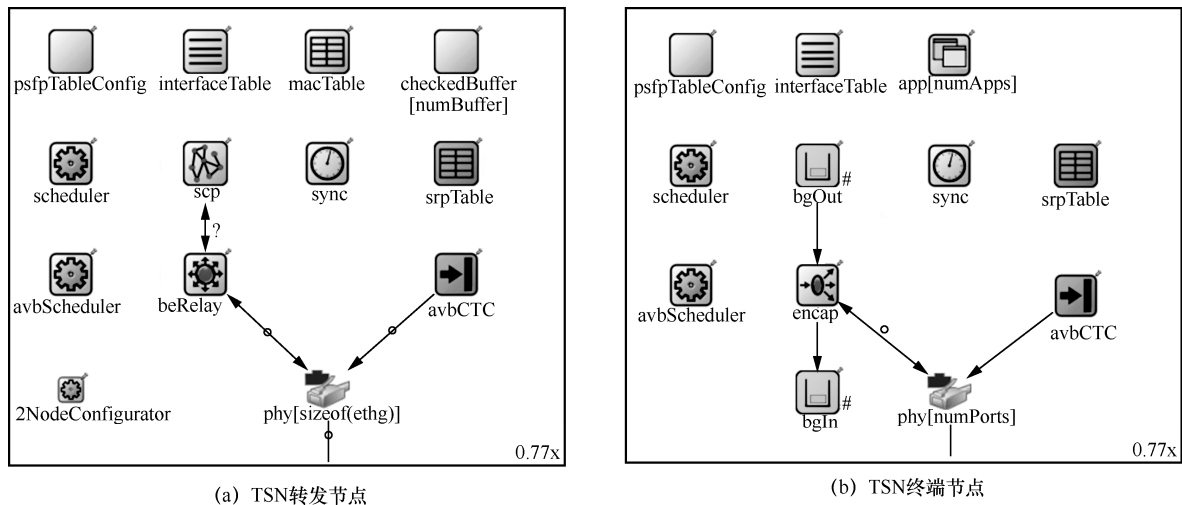


图 5 TSN 节点模型

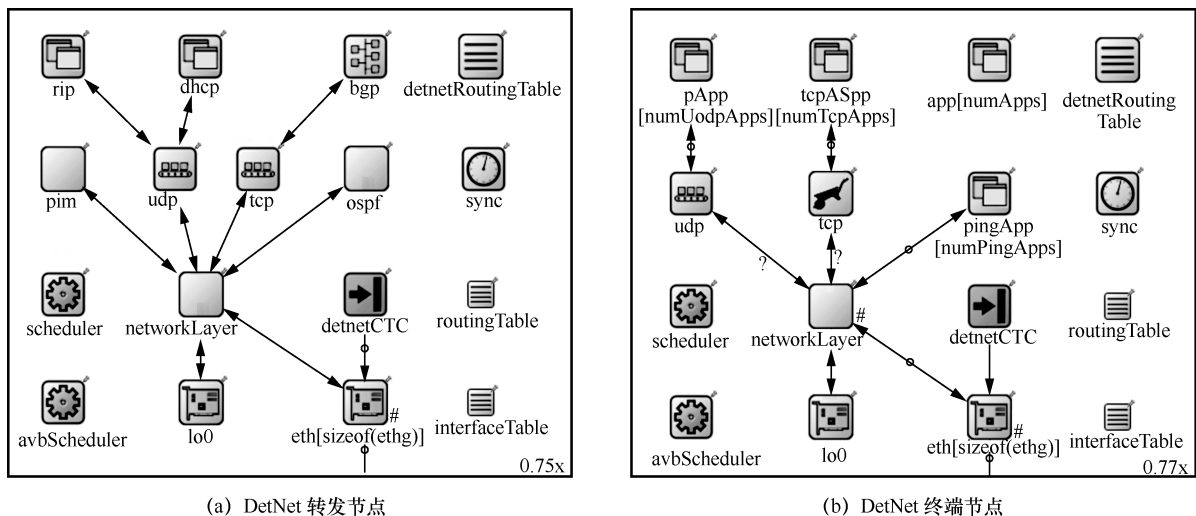


图 6 DetNet 节点模型



只在 DetNet 终端节点增加, 其中发流 app 按照控制器的配置生成三层确定性业务流。

针对多域组网需要实现边界节点, DetNet 边界节点如图 7 所示。其中新增模块包括 srpTable、detnetRoutingTable、avbCTC、detnetCTC 和 flowIDMapping, 前 3 个模块功能和图 5 的一致, flowIDMapping 是流映射模块, detnetMpls 是改造的模块, 支持 TSN 和 IPv4 数据包到 detnet MPLS 的转换与封装, flowIDMapping 和 detnetMpls 配合实现边界节点跨域报文封装结构的转换和流量映射, 流量映射主要包括业务流 ID、序列号和业务路径的映射。仿真系统支持 TSN/IPv4 承载 MPLS、IPv4/MPLS 承载 TSN、TSN/MPLS 承载 IPv4、SRv6 承载 TSN 等多种跨域场景。图 7 只列举了 TSN/IPv4 承载 MPLS 的情况, SRv6 的边界节点和图 7 类似, SRv6 报文的封装和映射在 network Layer 模块内。

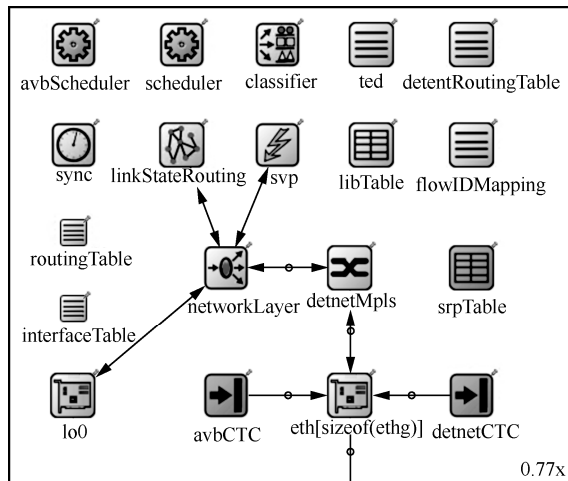
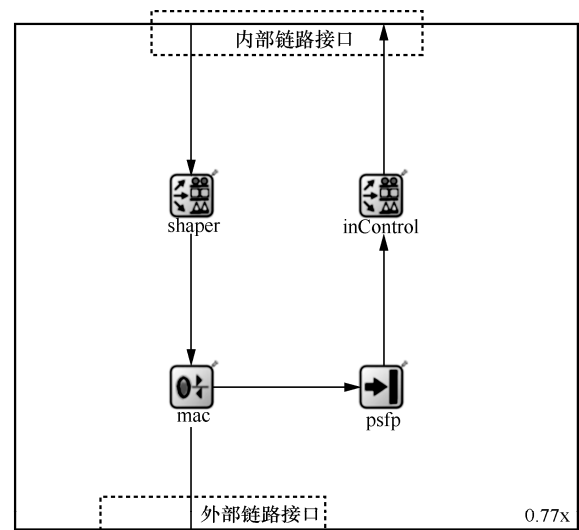


图 7 DetNet 边界节点

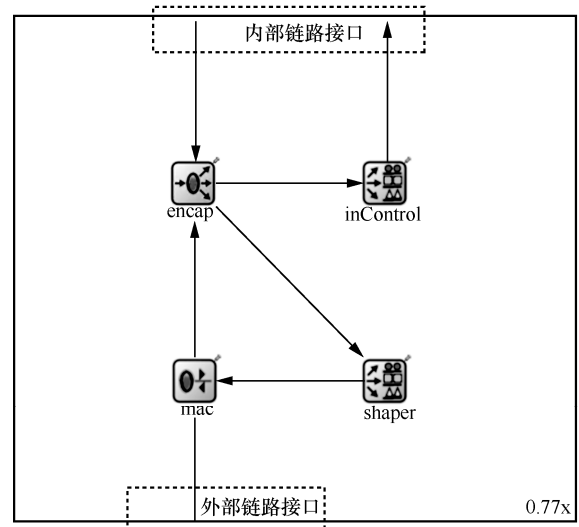
2.3 确定性仿真系统接口模型

确定性仿真的队列处理以及时隙调度都是在接口模型里面实现。改造的两种接口如图 8 所示: TSN 接口和 DetNet 接口, 分别对应第 2.2 节中 TSN 节点的 phy 模块和 DetNet 节点的 eth 模块, 用于处理节点内外部报文的收发工作。其由多个模块组成, 包括出向队列整形调度 shaper、入向流分类 inControl、链路层 mac、每流过滤策略 psfp、出向流封装 encap 以

及上下行接口, psfp 是新增模块, 其余都是改造模块。其中 shaper 新增时隙调度功能, 负责队列整形以及出口确定性队列时隙调度, 依据控制器下发的时隙调度表, 转发对应队列中的数据包。incontrol 负责入向确定性业务流和非确定性流的分类, 分别上送节点的不同处理模块处理, 改造后支持多种边界节点角色。psfp 负责流过滤处理, 需要配合第 2.2 节中 TSN 节点的 psfpTableConfig 使用, mac 负责链路层的收发处理。encap 是三层节点独有的封装处理模块, 用于流量的封装转换, 改造后支持确定性业务流的封装。



(a) TSN 接口



(b) DetNet 接口

图 8 改造的两种接口

3 仿真实验及结果分析

3.1 仿真实验环境

仿真 OMNeT++ 版本为 5.1.1, INET 版本为 3.5.0。通过 OMNeT++ 仿真系统生成大规模拓扑, 其中节点共 1 002 个, 共 7 个域, 有 IPv4 域、TSN 域、MPLS 域、SR-MPLS 域、SRv6 域, 控制器读取并展示在 App 界面上, 仿真大规模拓扑如图 9 所示, 跨域连接组网拓扑如图 10 所示, 展示了各域之间的逻辑连接关系。

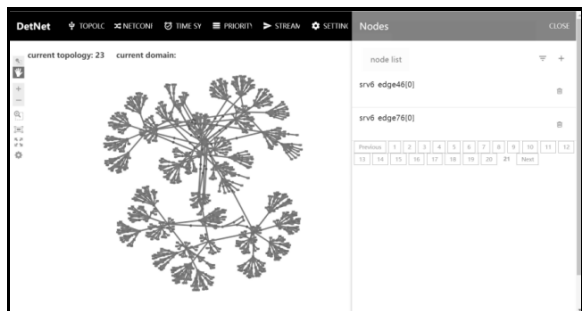


图 9 仿真大规模拓扑

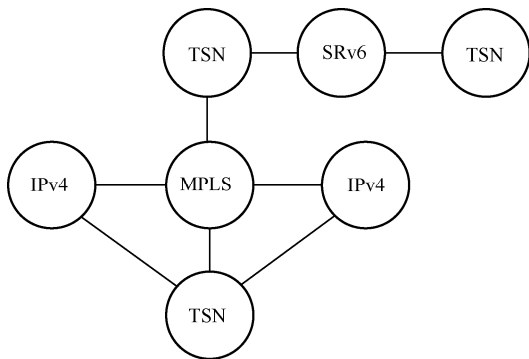


图 10 跨域连接组网拓扑

基于上述仿真拓扑, 共配置 1 000 条业务流, 其中确定性业务流共 200 条、背景流 800 条, 确定性业务流占比为 20%。确定性业务流通过控制器规划路径并批量配置下发, 分布到各跨域路径, 800 条背景流由 OMNeT++ 随机规划路径。

3.2 时隙调度使能测试对比

基于第 3.1 节的实验环境, 使能所有确定性功能, 即确定性业务流经过的所有节点都开启时隙调度功能。时隙调度端到端时延如图 11 所

示。200 条确定性业务流的端到端时延统计结果如图 11 (a) 所示, 其中每条直线代表一个业务流, 同一条业务流的每个数据包的端到端时延相同, 没有抖动。

在同样实验环境下, 使能部分确定性功能, 即确定性业务流经过的部分节点不开启时隙调度功能。200 条确定性业务流的端到端时延统计结果如图 11 (b) 所示, 其中每条折线代表一条业务流, 同一条业务流的每个数据包的端到端时延不一定相同, 有抖动。与全部启用确定性转发机制对比, 会发现部分受影响的确定性业务流的时延、抖动增大。

综合看, 严格的时隙调度机制可以保证严格的抖动控制, 而跨节点的部署方式会带来一定的抖动, 要看业务的抖动容忍范围。

3.3 源抖动和时隙调度抖动容忍范围测试对比

第 3.2 节中业务流的发送时刻是固定的, 并按照一定的周期进行周期性发包, 时隙调度的大小和数据包的大小一致, 正好可以容纳对应的数据包从时间窗内传输出去, 业务流端到端时延无抖动。

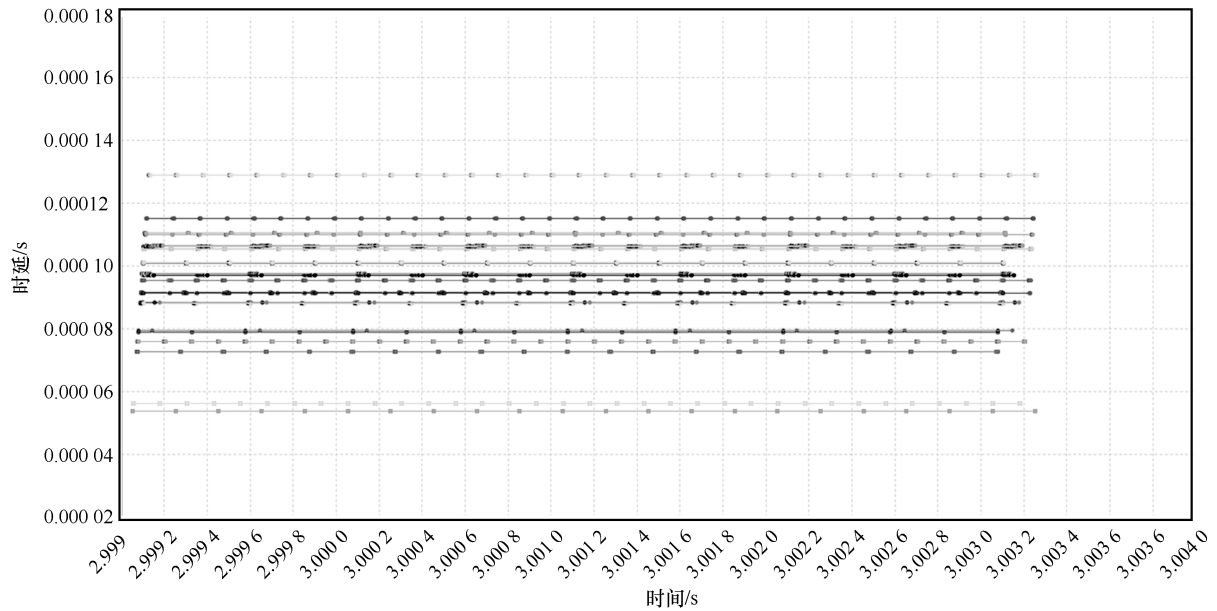
但是当业务流的源发流有抖动时, 时隙调度需要做相应的抖动兼容机制。源抖动和时隙容忍抖动测试场景见表 1, 一种场景是时隙调度抖动容忍范围可以覆盖源抖动, 另一种是不能覆盖。

表 1 源抖动和时隙容忍抖动测试场景 (单位: μs)

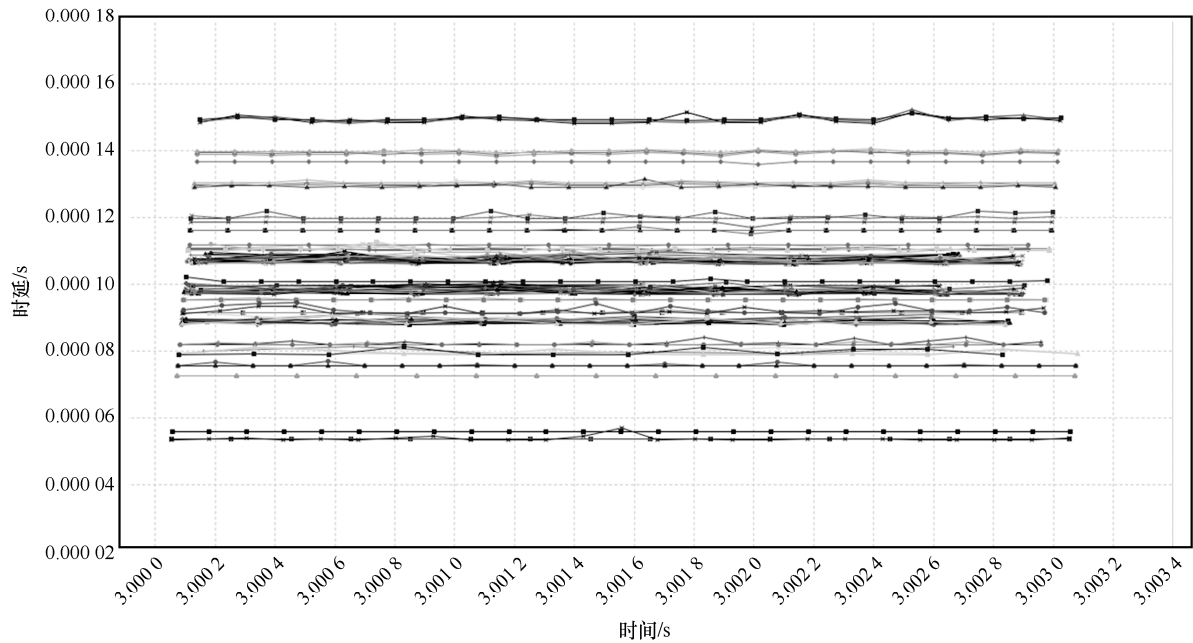
测试情况	业务周期	源抖动	时隙调度抖动容忍
场景 1	125	5	5
场景 2	125	10	5

在第 3.1 节的拓扑上, 选取一条业务流数据做分析, 两种场景业务流端到端时延如图 12 所示。

场景 1 业务流的最大端到端时延为 60 470 ns, 最小时延为 55 670 ns, 抖动最大值为 4.8 μs , 小于源的 5 μs 抖动。场景 2 业务流的最大端到端时延为



(a) 开启全部时隙调度确定性流的端到端时延



(b) 开启部分时隙调度确定性流的端到端时延

图 11 时隙调度端到端时延

190 470 ns, 最小时延为 55 670 ns, 抖动最大值为 134.8 μ s, 分析来看, $134.8 \mu\text{s} = 125 \mu\text{s} + 9.8 \mu\text{s}$, 其中 125 μs 即业务流的周期, 9.8 μs 是源抖动引起的端到端时延抖动, 从图 12 可以看出, 由于初始的源抖动可能小于时隙调度容忍的抖动范围, 端到端时延在 55 670 ns 附近, 但后面突然有个大的

阶跃跳变, 这是由于源抖动超过了时隙调度容忍的 5 μs , 当前数据包无法从时隙调度转发出去, 需要等待下一个周期 (125 μs) 后, 才能在下个安排的时隙内转发出去, 后续的所有数据包都有一个周期的时延。源抖动和时隙容忍抖动测试结果见表 2。

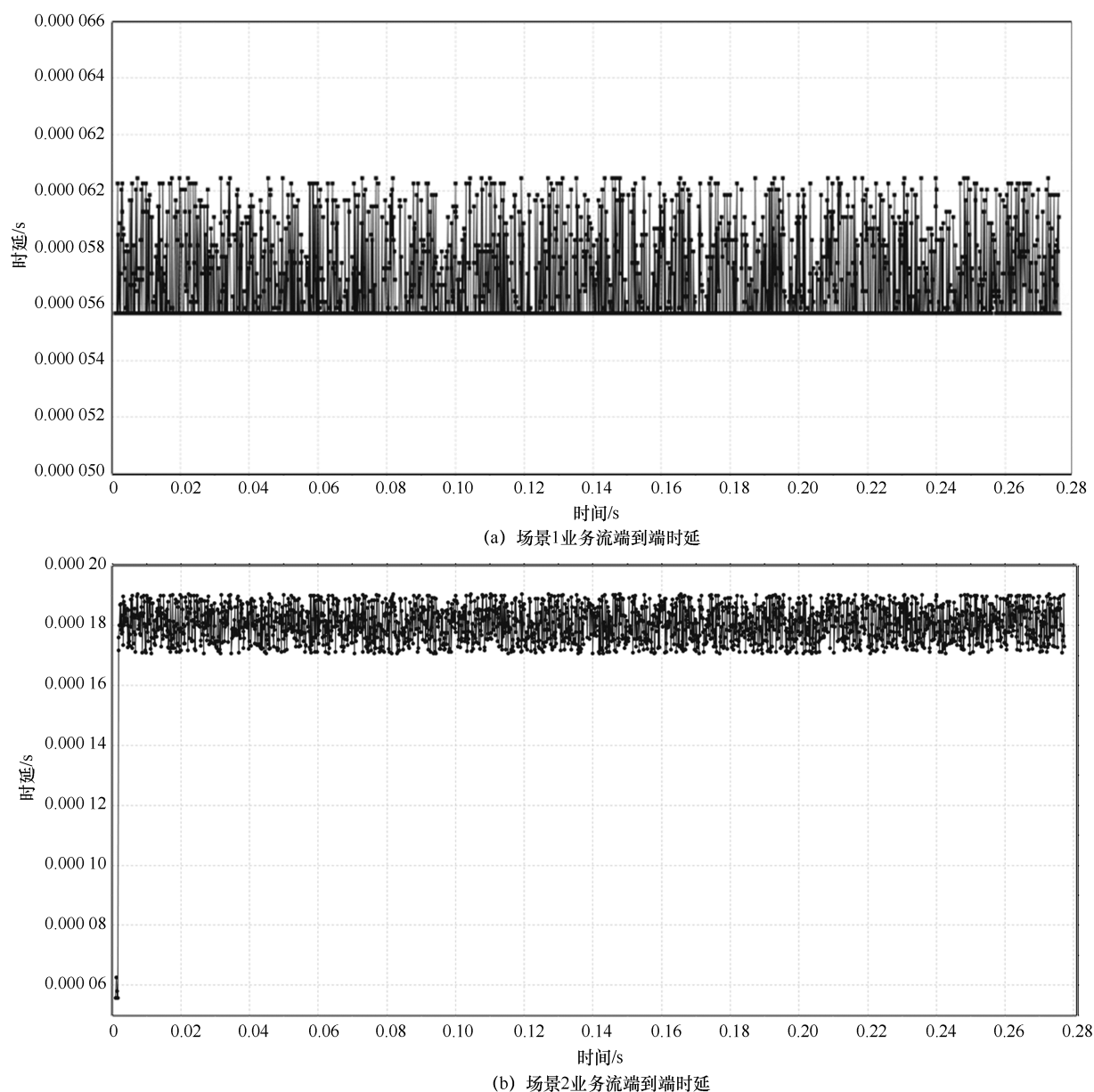


图 12 两种场景业务流端到端时延

表 2 源抖动和时隙容忍抖动测试结果 (单位: μs)

测试情况	端到端最小时延	端到端最大时延	端到端抖动
场景 1	55.67	60.47	4.8
场景 2	55.67	190.47	134.8

从表 2 结果来看,业务流的特征对整体端到端时延、抖动有较大的影响,基于时隙的调度机制需要对业务流提出一定的约束,或者在边缘节点做出符合调度机制要求的整形动作。

4 结束语

本文基于 OMNeT++ 仿真平台进行确定性网络仿真,实现优先级队列、路由编排、时隙调度、封装转换等功能,并实现控制器和仿真平台的协同工作机理,仿真验证了大规模跨域确定性网络场景。结果表明,在大规模跨域场景下可以保证确定性业务的端到端时延和抖动性能。在相关的



测试对比中,也可以看出业务流特征和时隙调度机制存在一定的耦合特性,需要做一定的去耦合动作。下一步可以研究 OMNeT++ 仿真平台和外部实体交换机或路由器的对接,实现仿真平台和实际转发设备的联合组网。

参考文献:

- [1] 网络通信与安全紫金山实验室. 确定性网络技术体系白皮书[R]. 2021.
Purple Mountain Laboratories. Deterministic network technologies System white paper[R]. 2021.
- [2] 刘鹏, 杜宗鹏, 李永竞, 等. 端到端确定性网络架构和关键技术[J]. 电信科学, 2021, 37(9): 64-73.
LIU P, DU Z P, LI Y J, et al. End-to-end deterministic networking architecture and key technologies[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(9): 64-73.
- [3] 莫益军, 杨子涵, 刘辉宇, 等. 面向大规模确定性网络的全局循环排队与转发机制[J]. 电信科学, 2021, 37(10): 55-65.
MO Y J, YANG Z H, LIU H Y, et al. Global cyclic queuing and forwarding mechanism for large-scale deterministic networks[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(10): 55-65.
- [4] CRACIUNAS S S, OLIVER R S, CHMELÍK M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1Qbv time sensitive networks[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. New York: ACM Press, 2016: 183-192.
- [5] PAHLEVAN M, OBERMAISSER R. Genetic algorithm for scheduling time-triggered traffic in time-sensitive networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 337-344.
- [6] MAHFOUZI R, AMINIFAR A, SAMII S, et al. Stability-aware integrated routing and scheduling for control applications in Ethernet networks[C]//Proceedings of 2018 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). Piscataway: IEEE Press, 2018: 682-687.
- [7] NAYAK N G, DÜRR F, ROTHERMEL K. Time-sensitive software-defined network (TSSDN) for real-time applications[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. New York: ACM Press, 2016: 193-202.
- [8] 工业互联网产业联盟. 工业互联网网络连接白皮书[R]. 2018.
Alliance of Industrial Internet. Industrial Internet network connection white paper[R]. 2018.
- [9] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [10] 蔡敏捷, 李波. OMNET++与 H.264 视频编解码器的联合仿真研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(1): 136-139.
CAI M J, LI B. Research on hybrid simulation of OMNET++ and H.264 codec[J]. Computer Science, 2011, 38(1): 136-139.
- [11] VARGA A. OMNET++ discrete event simulation system version 5.1 simulation manual[EB]. 2003.
- [12] JIANG J H, LI Y T, HONG S H, et al. A time-sensitive networking (TSN) simulation model based on OMNET[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 643-648.
- [13] LE C J, QIAO D H. Evaluation of real-time Ethernet with time synchronization and time-aware shaper using OMNeT[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET). Piscataway: IEEE Press, 2019: 70-73.
- [14] FANG B W, LI Q, GONG Z J, et al. Simulative assessments of credit-based shaping and asynchronous traffic shaping in time-sensitive networking[C]//Proceedings of 2020 12th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). Piscataway: IEEE Press, 2021: 111-118.
- [15] 强鹏, 刘冰洋, 于德雷, 等. 大规模确定性网络转发技术[J]. 电信科学, 2019, 35(9): 12-19.
QIANG L, LIU B Y, YU D L, et al. Large-scale deterministic network forwarding technology[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(9): 12-19.
- [16] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks stream reservation protocol (SRP) enhancements and performance improvements: 802.1Qcc[S]. 2018.

[作者简介]



高陈强 (1990—), 男, 中兴通讯股份有限公司工程师, 主要研究方向为确定性业务承载技术、软件定义网络和网络演算等。

朱向阳 (1987—), 男, 中兴通讯股份有限公司工程师, 主要研究方向为确定性业务承载技术和软件定义网络等。

喻敬海 (1970—), 男, 现就职于中兴通讯股份有限公司, 主要研究方向为位索引显示复制技术、确定性业务承载技术、以太网、IP 路由、云计算数据中心网络 and 软件定义网络等。