

时间敏感网络中多目标在线混合流量调度算法

王家兴, 杨思锦, 庄雷, 宋玉, 阳鑫宇

引用本文

王家兴, 杨思锦, 庄雷, 宋玉, 阳鑫宇. 时间敏感网络中多目标在线混合流量调度算法[J]. 计算机科学, 2023, 50(7): 286-292.

WANG Jiaying, YANG Sijin, ZHUANG Lei, SONG Yu, YANG Xinyu. [Multi-objective Online Hybrid Traffic Scheduling Algorithm in Time-sensitive Networks](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(7): 286-292.

相似文献推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于改进粒子群算法的云数据中心能耗优化任务调度策略](#)

Task Scheduling Strategy for Energy Consumption Optimization of Cloud Data Center Based on Improved Particle Swarm Algorithm

计算机科学, 2023, 50(7): 246-253. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220900176>

[基于多目标粒子群优化的属性网络局部社区检测算法](#)

Local Community Detection Algorithm for Attribute Networks Based on Multi-objective Particle Swarm Optimization

计算机科学, 2023, 50(6A): 220200015-6. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220200015>

[面向目标识别的特征融合模糊模型及其应用](#)

Fusion Multi-feature Fuzzy Model for Target Recognition and Its Application

计算机科学, 2023, 50(6A): 220100138-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220100138>

[LayerLSB:基于分层局部敏感B树的最近邻搜索](#)

LayerLSB:Nearest Neighbors Search Based on Layered Locality Sensitive B-tree

计算机科学, 2023, 50(4): 32-39. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.220600078>

[基于FWA-PSO-MSVM的船舶区域配电电力系统故障诊断](#)

Fault Diagnosis of Shipboard Zonal Distribution Power System Based on FWA-PSO-MSVM

计算机科学, 2022, 49(11A): 210800209-5. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800209>

时间敏感网络中多目标在线混合流量调度算法

王家兴¹ 杨思锦² 庄雷² 宋玉² 阳鑫宇¹

1 郑州大学网络空间安全学院 郑州 450002

2 郑州大学计算机与人工智能学院 郑州 450001

(wjx3534005@163.com)

摘要 基于以太网协议的时间敏感网络(TSN)通过不同类型流满足工业网络的实时传输、互联互通等多种需求。但时间触发(TT)流、音视频桥接(AVB)流和尽力而为(BE)流在网络中传输时,同种流争用队列、不同种流相互干扰的情况难以避免。针对 TSN 中多种流量调度影响端到端时延确定性的问题,提出了一种在线混合流量分析的粒子群(PSO)改进算法。该算法根据网络状况动态为混合流量计算路径,通过减少冗余搜索和约束粒子速度,避免粒子陷入局部最优,并加快搜索速度以满足在线计算的时间限制;对不同类型流量设置对应的适应度函数,降低混合流量间的相互干扰,减少了排队时延。仿真结果表明,所提算法在 TSN 网络中有效提高了混合流量传输成功率,并拥有稳定的性能和良好的计算效率。

关键词: 时间敏感网络;流量调度;粒子群;混合流量

中图分类号 TP393

Multi-objective Online Hybrid Traffic Scheduling Algorithm in Time-sensitive Networks

WANG Jiaying¹, YANG Sijin², ZHUANG Lei², SONG Yu² and YANG Xinyu¹

1 School of Cyber Science and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China

2 School of Computer and Artificial Intelligence, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

Abstract The time-sensitive network(TSN) based on the Ethernet protocol meets various requirements such as real-time transmission and interconnection of industrial networks through different types of streams. However, when time-triggered(TT) streams, audio/video bridging(AVB) streams, and best-effort(BE) streams are transmitting in the network, it is unavoidable that the same stream competes for queues and different streams interfere with each other. Aiming at the problem that multiple traffic scheduling in TSN affects the end-to-end delay determinism, this paper proposes an improved particle swarm optimization(PSO) for online mixed-traffic analysis. The algorithm dynamically calculates paths for mixed traffic based on network conditions, and accelerates searches to meet the time limits of online computation by reducing redundant searches and constraining particle velocities to avoid particles falling into local optimizations. What's more, the algorithm sets corresponding fitness functions for different types of traffic to reduce mutual interference between mixed traffic and queuing delay. Simulation results show that proposed algorithm can effectively improve the success rate of mixed traffic transmission in TSN network, and has stable performance and good computing efficiency.

Keywords Time-sensitive network, traffic scheduling, Particle swarm optimization, Mixed traffic

1 引言

随着信息技术和工业运营技术的融合发展、工业企业数字化与信息化的进一步深化升级,越来越多的行业领域要求网络通信保证实时性与确定性。例如,航空电子全双工交换以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX)要求 128 ms 以内的端到端时延^[1];工业自动化的实时运动控制系统,需要微秒级的有界抖动来保持稳定性^[2];随科技发展所出现的一些场景如增强现实、虚拟现实(AR/VR)和远程手术等

都需要时间敏感网络的数据流量调度和高数据速率^[3]来保证极高的服务质量。

基于以太网协议的时间敏感网络(Time Sensitive Network, TSN)^[4]是由 IEEE 802.1 工作组开发的一系列链路层增强机制与流量策略的标准和规范,主要包括时间同步、流量调度、可靠传输和网络管理标准。TSN 不仅保持了标准以太网开放性好、信息传输能力强、互操作性好的优点,而且拥有强大的互联互通、高质量实时传输的能力。尽管 TSN 在数据传输和优先级设置方面具有优势,但如何在线路由和调度多种

到稿日期:2022-05-18 返修日期:2022-11-15

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5700-202024176A-0-0-00)

This work was supported by the State Grid Corporation of China Science and Technology Project(5700-202024176A-0-0-00).

通信作者:庄雷(zhuang@zhu.edu.cn)

类型流量以优化网络性能仍是 TSN 面临的一个重大问题。

为了解决 TSN 中的调度问题,文献[5]提出了一个支持时间触发(Time-triggered, TT)流量和尽力而为(Best-effort, BE)流量的融合网络的调度模型,引入了一种基于工厂网络层次的使用启发式的两阶段方法,但该方法只适用于特定环形拓扑场景。目前多数工作^[6-8]将调度问题表述为整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)和可满足性/优化理论(Satisfiability Modulo Theories/Optimization Modulo Theories, SMT/OMT)问题,并使用不同的工具和启发式算法来解决,但以上研究中调度工作的路由路径都采用生成树协议或最短路径优先(Shortest Path First, SPF)算法来确定,其路径单一且忽视了多流聚合时的争用问题^[9]。而文献[10-11]指出,当路由算法固定时,调度算法的性能并不能达到最高效,可能会导致流调度失败。其中文献[10]提出了一种基于爬山算法的元启发式贪婪随机自适应搜索过程(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP),用于确定音/视频桥接(Audio/video Bridging, AVB)流量的路由路径,提高了 AVB 流的可调度性。文献[11]提出了一个用于路径路由和时隙调度的联合数学模型,并将其形式化为 ILP 问题进行优化,提高了 TT 流的可调度性。文献[12]同样研究了如何提高 TT 流的可调度性,提出了启发式图划分算法,采用 GRASP 算法探索路由空间,迭代得到路由和分组方案。但是,上述解决方案都是离线计算出的结果,计算时间较长,无法适应未来工业控制通信和自动化的复杂性,同时缺少基于动态网络下应对多种流量的能力,难以抵抗在线运行时网络中固有且难以避免的不确定性。文献[13]指出,路由对网络性能的影响比调度更大,并提出了一种基于蚁群优化(Ant Colony Optimization, ACO)的方法,同时考虑 TT 和 AVB 流量来确定路由路径,但未考虑 BE 流的路由与调度,从而限制了整体解决方案的空间。BE 流是 TSN 网络中不可忽视的一部分,文献[14]提出的 PAS 算法与现有的 TSN 标准配合使用,实现了为 TT 流保证端到端延迟的目标,同时 BE 流充分利用保护频带中的可用带宽。但相比利用保护频带,直接为混合流量进行在线路由可以更加充分地利用 TSN 网络的特性,从根本上提高整体 TSN 网络的性能。

先前的研究^[13]已经证明同时路由 TT 流与 AVB 流是一个 NP-hard 问题。而本文考虑的是更复杂的路由问题,其中 TT 流、AVB 流和 BE 流将同时路由。随着流的数量和种类的增多,路由方案的空间和复杂度也随之增加。本文的目标是能够在线找到混合流量的路由路径,因此算法不仅要考虑混合流量之间的冲突,而且要快速有效地找到可行且良好的解决方案。

2 背景与动机

2.1 流量类型与流量整形器

在 TSN 网络中应用程序的流量可以分为 3 种类型^[15],即 TT 流、AVB 流和 BE 流,根据 IEEE 802.1Q 系列的定义,传输优先级依次降低。TT 流量类型周期长度和数据大小多为已知;AVB 流量提供有界的最坏情况端到端延时,但延时约束较为宽松;而 BE 流量是对时间服务质量指标要求不高

的常规以太网流量。AVB 流和 BE 流为非周期性随机数据传输,到达间隔与数据大小均为未知量。

本文采用时间感知整形器(Time-aware Shaper, TAS)结合基于信用值的整形器(Credit-based Shaper, CBS)的混合流量整形器进行数据的传输,其整形器结构如图 1 所示。TSN 队列的传输机制采用 TAS 来传送各类型流量,并根据路由路径和时间表计算门控制列表(Gate Control List, GCL);CBS 在 TAS 的基础上对 AVB 流量的传输进行整形,赋予每个 AVB 队列 1 个信用值,并根据队列中 AVB 帧的状态改变信用值,降低了 AVB 流量的突发,并通过调整信用值来缓解更低优先级队列的饥饿。另外,在 TSN 中,3 位 PCP(Priority Code Point)码定义了 8 个优先级,最高优先级队列(7)用于 TT 流量,以下两个优先级队列(6-5)分别用于 A 类和 B 类 AVB 流量,其余 5 个具有不同优先级值(4-0)的队列用于 BE 流量。

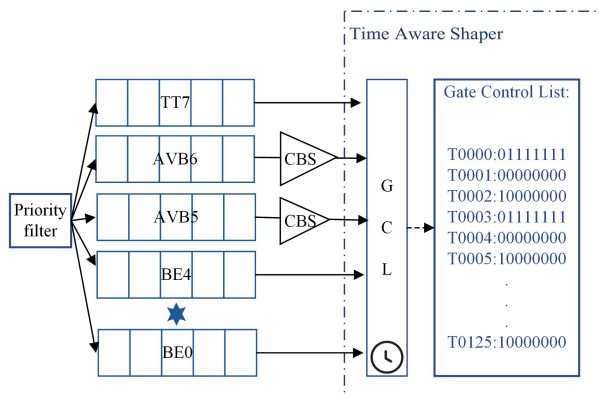


图 1 TAS 与 CBS 混合流量整形器视图

Fig. 1 View of TAS and CBS hybrid traffic shaper

2.2 动机

融合了软件定义网络(Software Defined Network, SDN)与时间敏感网络(TSN)特点的时间敏感软件定义网络(Time-sensitive Software Defined Network, TSSDN)^[10],通过隔离空间或时间中的不同类型流,提供确定性实时保障,网络总体结构如图 2 所示。

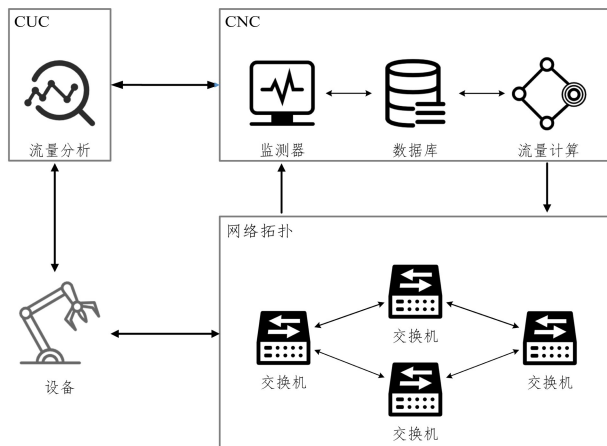


图 2 TSSDN 网络的总体结构图

Fig. 2 Overall structure of TSSDN network

TSSDN 旨在实现确定性的网络延迟,当网络中传输大量的数据时,设备响应缓慢和网络延迟是不可避免的。排队

延迟是 TSSDN 网络端到端时延的不确定性的主要来源^[16], 因此减少排队时延有利于整体网络端到端时延的确定性。

结合已有工作^[17-18]对 TSN 网络中排队时延的建模研究, 从排队时延成因分析, TSSDN 网络中会出现以下两种流量冲突情况致使排队时延产生和增加。

(1) 同种类型流争用队列

如图 3 所示, 假设输入流 $f_1 \in F^{TT}$ 是终端 A1 将向 A5 发送的 TT 流, 在当前网络已存在背景 TT 流 $f_2, f_3, f_4 \in F^{TT'}$ 。根据现有模型, f_2, f_3, f_4 在同一队列中, 则需要的时间上进行隔离。由于严重的时隙争用难以满足所有流的截止时间, f_1 的调度在满足实时流量的端到端时延约束时存在压力。这种情况的出现不仅减小了实时流量传输的解空间, 使得出现排队时延的可能性增大, 而且会干扰当前网络状态中的背景流, 严重的会造成背景流超出约束时延范围, 因此应减少此种情况的发生。存在同样问题的还有只有两个队列传输的 AVB 流, BE 流采用 5 个队列传输且无时延要求, 因此不用着重考虑该情况。

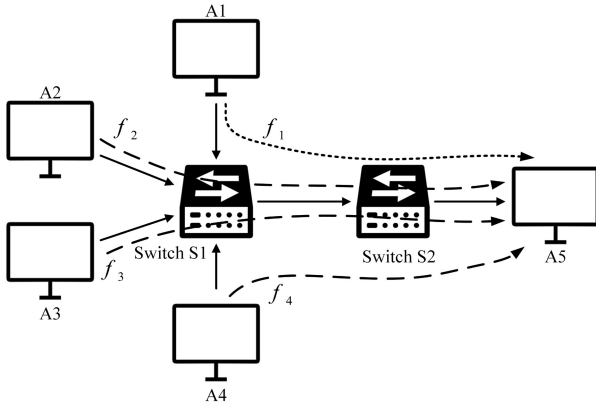


图 3 多流争用队列实例图

Fig. 3 Diagram of example of multi-flow contention queue

(2) 不同流量相互干扰

TSN 中的 AVB 流与 BE 流在混合流量整形中于同一时间戳内调度, 彼此之间容易造成干扰。这些流量如果出现图 3 所示的情况, 则会因为 CBS 整形器所固有的特性带来难以避免的排队时延, 影响 AVB 流的传输, 造成原本满足时延约束的 AVB 流超过时限。对于 BE 流而言, 可以通过选择 AVB 流经过较少的路径来降低饿死的可能性, 也可以选择带宽资源多的路径在快速将 BE 流送达目的节点的同时减小对 AVB 流的不利影响。因此, BE 流的在线路由选择是必要的。

综上所述, 本文提出了一种基于时间敏感网络的多目标在线流量分析算法, 通过减少同种流量的队列争用、不同流量的相互干扰, 在保证实时流量传输的前提下, 根据 TSSDN 网络情况对混合流量进行在线路由, 以提高网络混合流量的传输成功率。

3 问题建模

将 TSN 网络抽象为有向图 $G(V, E)$, 其中 V 为点集, 表示网络中的交换机 (Switch, SW) 和终端系统 (End System, ES)。边集 E 是所有链路的集合, 其中节点 $v_i \in V$ 到 $v_j \in V$

的链路为 $e_{i,j}$, 且具有相应的带宽容量 $C_{e_{i,j}}$, 这里 v_i 与 v_j 不能全为 ES。

所有流量的集合被定义为 F^* , 包括输入流 F 以及背景流 F' 。例如, 有一组输入流 $F = (f_1, f_2, \dots, f_{|F|})$, 每个流都没有被路由或调度, 每个流要么属于输入 TT 流的集合 F^{TT} , 要么属于输入 AVB 流的集合 F^{AVB} , 要么属于 BE 流的集合 F^{BE} 。所有流的路由路径集合记为 R , 流 $f_k \in F^*$ 的路由路径 $R_k \in R$ 是源节点与目的节点之间的简单无环路径。当输入流成功调度则变更为背景流, 一组背景流 $F' = (f_1, f_2, \dots, f_{|F'|})$, 其中背景流 $f_m \in F'$ 都已经通过路径 $R_m \in R$ 路由和调度, 但仍在拓扑中传输。每个背景流仍然属于背景 TT 流的集合 $F^{TT'}$ 、背景 AVB 流的集合 $F^{AVB'}$ 或背景 BE 流的集合 $F^{BE'}$ 之一。

每个输入 TT 流 $f_k \in F^{TT}$ 由一个六元组表示:

$$f_k = (X_k, Y_k, S_k, P_k, F_k, D_k)$$

其中, X_k 是 f_k 的源节点的索引, Y_k 是 f_k 的目的节点的索引, S_k 是 f_k 的数据大小, P_k 是 f_k 的周期, 所有帧都是周期性发送的。 F_k 是 f_k 的开始传输时间, D_k 是 f_k 的存活时间。元组表示节点 v_{X_k} 在 $F_k, F_k + P_k, F_k + 2P_k$ 等时间向 v_{Y_k} 发送了 S_k 大小的数据, 且需要在 D_k 内完成传输。

每个输入 AVB 流 $f_k \in F^{AVB}$ 由一个六元组表示:

$$f_k = (X_k, Y_k, S_k, P_k, T_k, D_k)$$

上式各元组定义与 TT 流的定义相同, 除了: 1) 没有开始传输时间; 2) T_k 是 f_k 的类型, 可以是高优先级 Class-A 或低优先级 Class-B。元组表示节点 v_{X_k} 在每周期向 v_{Y_k} 发送了 S_k 大小的数据, 且需要在 D_k 内完成传输。

每个输入 BE 流 $f_k \in F^{BE}$ 由一个五元组表示:

$$f_k = (X_k, Y_k, S_k, P_k, D_k)$$

针对现有网络结构和调度混合流量的整形器, 流量调度和路由的约束条件和目标函数如下。

(1) 流量路径约束

设一个二元变量 x_k , 用于决定是否为流 $f_k \in F$ 分配有向路径 $R_k \in R$ 。约束(1)确保每个输入流只被分配给一条路径。本文假设所有流量都是不可分割的, 即不分为多条路径传输。

$$\sum_{R_k \in R} x_k = 1, \forall f_k \in F \quad (1)$$

(2) 链路容量约束

约束(2)保证每个流 $f_k \in F^*$ 所分配的路由路径上的每条链路 e 的带宽容量 C_e 可以满足所有已经调度的背景流和即将调度的输入流的传输需求。

$$\sum_{f_k \in F^*} \sum_{R_k \in R} x_k \left(\sum_{e \in R_k} \frac{S_k}{P_k} \right) \leq C_e \quad (2)$$

(3) 路径时延约束

定义 $d_{e,k}$ 为流 f_k 在链路 e 上的最坏状况时延。约束(3)用于确保 f_k 的路径 R_k 上的端到端时延始终低于流 f_k 的时延要求。

$$\sum_{e \in R_k} d_{e,k} \leq D_k \quad (3)$$

在满足约束(1)~约束(3)的前提下, 输入流计算出其路由路径后在网络中可以进行调度, 变更为背景流, 此时流只是开始进行调度, 并未完成传输。未来的输入流如果允许在网络拓扑调度, 可能会在一定程度上对正在调度的背景流造成

传输上的干扰。基于此,定义了 λ_k 判断流 f_k 是否完成传输,如下:

$$\lambda_k = \begin{cases} 1, & \text{若 } f_k \text{ 传输成功} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

本文算法的目标函数 O 为最小化目标 O_1, O_2 和 O_3 乘以它们各自的权重 W_1, W_2 和 W_3 的总和。

$$O = \min \sum_{l=1}^3 (W_l O_l) \quad (5)$$

O_1 是(最小化)不可调度和传输失败的所有 TT 流的数量,即:

$$O_1 = \sum_{f_k \in F^{TT} \cup F^{TT'}} (1 - \lambda_k) \quad (6)$$

O_2 是(最小化)不可调度和传输失败的所有 AVB 流的数量,即:

$$O_2 = \sum_{f_k \in F^{AVB} \cup F^{AVB'}} (1 - \lambda_k) \quad (7)$$

O_3 是(最小化)不可调度和传输失败的所有 BE 流的数量,即:

$$O_3 = \sum_{f_k \in F^{BE} \cup F^{BE'}} (1 - \lambda_k) \quad (8)$$

为了确保多个目标遵循优化的顺序,分别给每个目标赋予相应的权重值:

$$\begin{cases} W_1 > |F^{TT} \cup F^{TT'}| \cdot W_2 \\ W_2 > |F^{AVB} \cup F^{AVB'}| \cdot W_3 \\ W_3 = |F^{BE} \cup F^{BE'}| \end{cases} \quad (9)$$

4 算法设计

为了解决上述问题,本文提出了一种在线混合流量分析的粒子群(PSO for Online Mixed-traffic Analysis, PSO-OMA)改进算法。

4.1 算法改进思路

粒子群^[19](Particle Swarm Optimization, PSO)是一种经典的优化方法,属于进化算法的一种。PSO 算法是从随机解出发,通过迭代寻找最优解,根据当前搜索到的全局最优解与局部最优解快速调整速度与方向,以此寻找最优解决方案。

在本文网络结构的 CNC 数据库中,存储着任意两节点之间的所有简单无环路径,并且对相关链路时延总和从小到大进行排序,如流 $f_k \in F$ 的源节点 v_{x_k} 与目的节点 v_{y_k} 之间所有排序后的简单无环路径集合 Ω_k ,对应的序号空间为 Ω_k' 。每个粒子代表一个流量路由路径方案,根据所有路径集合 Ω_k 探索输入流的候选路由路径,利用 PSO 算法搜索速度快、效率高、算法计算复杂度低的优点,不断更迭粒子位置优化等式(5)中的目标并快速求解出最优解。

与传统 PSO 算法不同,改进的 PSO 算法按照路由路径选择概率对初始化函数进行修改,从而加快搜索最优解的速度。相应的初始化规则为:在 Ω_k' 中,按照前 50% 的路径有 70% 的概率选中为粒子初始位置。在初始化粒子位置之后,粒子根据输入流类型与相应适应度函数为其选择路由路径。此外,利用所有路由路径已知这一特点来删除粒子非最优位置,减少了冗余的搜索过程,不仅加快了对于最优解的搜索,而且避免了陷入局部最优解。

4.2 流量冲突度量方法与适应度函数

首先引入每个节点端口度 ω 的定义:每个节点的同一

端口经过同一类型流的最大数量,如图 3 中交换机 S1 与 S2 连接的端口(在此假设端口序号为 1)TT 流量 $\omega_{S1,1}^{TT}=3$,若 f_1 成功调度则为 4。每个节点中 ω 值都是在评估当前节点同一类型流量的冲突情况。

结合节点端口争用情况、时延、带宽进行综合考虑,适应度函数的定义如下:

$$Fitness = \sum_{v,e \in R} (\alpha \cdot \omega_v + \beta \cdot d_e + \chi \cdot BW_e) \quad (10)$$

其中, BW_e 为链路 e 的带宽使用率, α, β, χ 为比例系数,不同流量类型的值不同,以灵活应对不同流量的需求,本文中适应度值越小所选路径越符合要求。当流量类型为 TT 流时,为保证 TT 流能传输成功,对时延的要求较高,其次应减少队列争用的发生,因此适应度函数中 $\beta \geq \alpha \gg \chi, \omega$ 为节点端口 TT 流争用情况的度量;当流量类型为 AVB 流时,考虑 AVB 流时延要求宽松,但两个队列传输时,其中一个传输,另外一个必定会产生排队时延,因此适应度函数中 $\alpha = \beta > \chi, \omega$ 为节点端口 AVB 流争用情况的度量;当流量类型为 BE 流时,BE 流本身无时延要求,但应考虑对 AVB 流的影响,寻找带宽资源丰富且与 AVB 流不冲突的路径,因此适应度函数中 $\chi = \alpha_1 > \alpha_2 \gg \beta$,其中 α_1 为所选节点 v 的 i 端口 AVB 流量 $\omega_{v,i}^{AVB}$ 的比例, α_2 为所选节点 v 的 j 端口 BE 流量 $\omega_{v,j}^{BE}$ 的比例。对于 TT 流,在数据库中记录了最初算法所分配的原始路径,与得到的最优路径的适应度函数进行对比,若在一定差距范围之内将仍然按照原始分配路径进行路由,以避免产生重新路由开销(例如 GCL 重新分配)。

4.3 粒子速度与位置的更新

计算适应度后,对比适应度值判断是否更新粒子个体自身的经验,若更新则将当前粒子位置保存在局部最优位置的变量 p_{best} 中;对比群体中所有 p_{best} ,将得到的最优位置保存在全局最优位置 g_{best} 的变量中。粒子速度的更新式如下:

$$V_i^{k+1} = [W_{ps0} V_i^k + C_1 \cdot R_1 (p_{best(i)}^k - X_i^k) + C_2 \cdot R_2 (g_{best(i)}^k - X_i^k)] \quad (11)$$

粒子位置的更新式为:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (12)$$

$$\begin{cases} 0 \leq X_i^k + V_i^{k+1} \leq |\Omega_k'| \\ V_i^{k+1} \neq 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, X_i^k 和 V_i^k 为粒子 i 在第 k 次迭代时的位置和速度; W_{ps0} 为惯性权重; C_1 和 C_2 为常数学习因子; R_1 和 R_2 为介于(0, 1)之间的随机数; $p_{best(i)}^k$ 为粒子 i 在第 k 次迭代时的个体最佳位置; $g_{best(i)}^k$ 为粒子群在第 k 次迭代时的全局最佳位置。式(13)对位置更新进行约束,保证更新后的位置在序号空间范围内,若超出范围则根据超出方向取最大或最小值;并约束更新速度不为 0 来改善传统的 PSO 算法多样性丢失、容易陷入局部最优的缺点。

4.4 算法的主要流程

设置每个粒子位置为一个路径序号,每个序号代表流量预选路径集合中的一条路径。粒子速度是粒子基于当前位置在路径序号空间 Ω_k' 中移动的方向与大小。根据流量特征来选定粒子适应度函数,设置式(10)中相应的比例系数。

基于在线混合流量分析的粒子群改进算法的流程如图 4 所示。

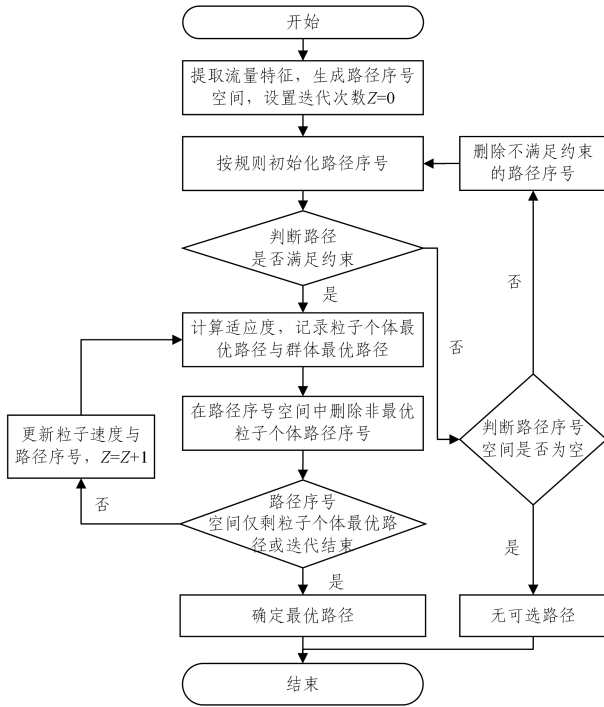


图 4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

算法 1 基于在线混合流量分析的粒子群改进算法

输入: G, f_k, F', C, d

输出: R_k

- 步骤 1 设置迭代次数 $Z=0$, 提取 f_k 类型, 根据 f_k 的 X_k 与 Y_k 提取路径集合 Ω_k 并生成序号空间 Ω_k'
- 步骤 2 按照初始化规则选择路径
- 步骤 3 判断粒子所选路径是否满足约束(1)~约束(3), 若不满足则删去相应路径序号, 重新对不符合约束的粒子进行初始化, 直到路径序号空间 Ω_k' 为空; 若满足则进行步骤 5
- 步骤 4 若 Ω_k' 为空则输出无可选路径, 转步骤 10
- 步骤 5 按照 f_k 类型选定相应的适应度函数, 根据当前网络状况计算每个粒子位置对应路径集合 Ω_k 中的适应度
- 步骤 6 对比更新后的适应度, 记录粒子个体最优位置与群体最优位置对应的路径序号, 将搜索过的 Ω_k' 中的非个体最优粒子路径序号删除
- 步骤 7 判断 Ω_k' 所存留的路径序号是否只剩个体最优粒子位置或已经完成迭代, 若不是则进行步骤 8; 否则进行步骤 9
- 步骤 8 根据式(11)、式(12)更新粒子速度与路径, 迭代次数 $Z=Z+1$, 返回步骤 5
- 步骤 9 确定全局最优粒子位置, 找出相应路径
- 步骤 10 结束计算

5 实验分析

5.1 仿真设置

本文基于 NeSTiNg 框架^[20]扩展了 SDN4CoRE 框架^[21], 在 OMNeT++ v5.5.1 中搭建整体网络, 并结合 python 环境实现了本文算法。其中 SDN4CoRE 支持配置结合了 SDN 和 TSN 的交换机。为了体现本文方法在各种应用场景下的

普适性, 仿真实验选用 Topology Zoo 数据集^[22]中的 3 个真实网络拓扑: Compuserve, Janet backbone 和 DFN。相关网络信息总结如表 1 所列, 包括网络中的实时流量的带宽要求以及时延要求。3 个网络规模递增, 以验证算法在不同网络中的性能, 实验设置每台交换机连接 1 台终端设备。

表 1 网络相关信息表

Table 1 Network-related information

网络名称	Compuserve	Janet Backbone	DFN
交换机数目	14	29	58
网络链路数目	17	45	87
链路带宽/Mbps	45	100	100
带宽要求/Mbps	3~15	5~30	5~30
时延要求/ms	1~3	1~5	1~7

根据现有研究^[10, 13, 17], 每个 TT 流的数据大小范围为 1500~4500 Bytes, 每个 AVB 流的数据大小为 400 Bytes, 每个 BE 流的数据大小范围为 400~4500 Bytes。每个流的周期设置为 100 ms, 200 ms 或 250 ms, 服从均匀分布^[17]。输入 TT 流数、AVB 流数和 BE 流数的比例固定为 1:1:2。每次运行的超时设置为 10~100 ms, 没有特别说明, 默认超时时间为 10 ms^[13]。

考虑到在第 2 节中定义的目标, 将本文算法与其他 3 种方法进行比较。

(1) 最短路径优先(SPF)。SPF 方法为每个流找到最短的路由路径, 它不会重新路由背景流。

(2) 传统粒子群算法(PSO)。未删除解空间中的非最优粒子位置, 适应度函数统一, 同样不会重新路由背景流。

(3) 基于在线流感知的蚁群路由优化算法(Online Stream-aware ACO-based Routing Algorithm, OSACO)^[13]。该算法同时考虑了 TT 流与 AVB 流的在线路由, 能够为背景流根据网络状况重新规划路由路径。

5.2 实验结果分析

图 5 给出了 3 种网络中 2000 条流在不同算法下进行调度所得到的流量传输成功率。实验结果表明, 本文算法有效提高了网络混合流量的传输成功率。与 SPF 和 OSACO、传统 PSO 算法相比, 本文算法对不同流量采用不同策略求解路由, 能够更加灵活地满足混合流量的网络服务质量需求, 有效减少了同种类型的流量队列争用, 一方面增加了 TT 流整体解空间, 提高了传输成功率, 另一方面降低了 AVB 流与 BE 流之间的影响, 更好地利用了带宽丰富的链路传输 BE 流。但规模越大的网络(如 DFN)路由空间往往更大, 复杂度也更高, 缩短计算时间一定程度上会降低算法效率, 因此整体提升幅度较小。

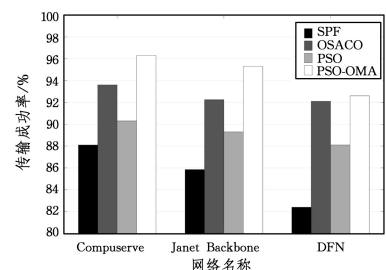
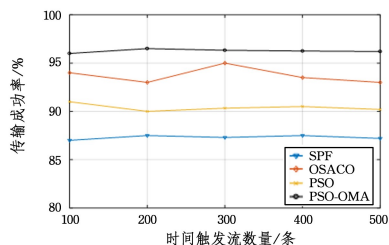


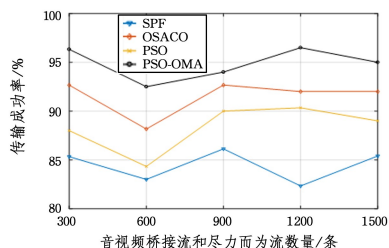
图 5 不同网络中各算法的传输成功率

Fig. 5 Transmission success rate of every algorithm in different networks

以 Janet Backbone 网络为例,图 6(a)、图 6(b)分别为 TT 流的传输成功率以及 AVB 和 BE 流的传输成功率。本文混合流量整形器中引入了保护带机制,TT 流与 AVB 和 BE 流采用时分多址技术减少了互相之间的干扰。其中 TT 流为已知流量,具有周期性,本实验设置每 100 个 TT 流为一个周期。如图 6(a)所示,本文算法在 TT 流的传输成功率较 SPF 和 OSACO 更高且更稳定,其原因是在调度输入流时选择了 TT 流量较小的路径,之后的调度周期中倾向沿用此路径,减小了流量冲突和流量更改路径所需要花费的成本。虽然 OSACO 算法考虑了流干扰和重路由成本,但未在输入流开始计算路由路径时就预防流量冲突的发生,会对调度中的背景流进行重路由,因此传输成功率并不稳定。AVB 流与 BE 流的传输比例为 1:2,即每 300 条流中有 100 条 AVB 流和 200 条 BE 流,流的产生服从泊松分布。如图 6(b)所示,本文算法的 AVB 和 BE 流的传输成功率也比其他算法更高,这是因为本文算法同时考虑了 AVB 与 BE 流的路由,且在 BE 流寻路时,为其选择了可用带宽高、影响 AVB 流较小的路径,这不仅有利于 AVB 流的传输,而且减少了 BE 流饿死的可能性。



(a) TT streams



(b) AVB and BE streams

图 6 Janet Backbone 网络中各算法不同流的传输成功率

Fig. 6 Transmission success rate of different streams of every algorithm in Janet Backbone network

图 7 给出了不同算法在各网络中的丢包率。仿真结果表明,传统 PSO 算法和改进算法在适应度函数中引入了度 ω 的计算,都在一定程度上避免了同类型流对队列的争用,但改进后的算法适应度函数更加灵活,因此获得了更低的丢包率。SPF 方法是一种不考虑可调度性和链路利用率的贪婪方法,因此丢包率最高。而 OSACO 算法未关注同种流量对队列的争用,忽视了 BE 流与 AVB 流的相互影响,且其关注重点更多放在了减少时延上,因此丢包率也不理想。但本文算法为减小队列冲突引发的不确定性,所选流量路径相比最短路径的端到端时延可能更高。虽然使得总体流量平均端到端时延增加,但仍符合实时流量的时延要求,能够保证混合流量传输成功。

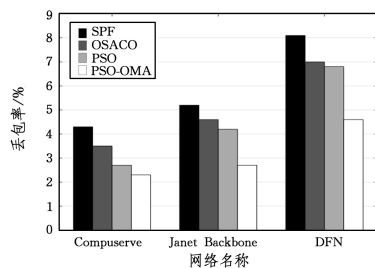


图 7 不同网络中各算法的丢包情况

Fig. 7 Packet loss of every algorithm in different networks

图 8 给出了 3 种网络中各算法每条流量路由路径的计算时间。实验结果表明,本文算法通过删除粒子非最优位置加快搜索速度,能够比传统 PSO 算法更快地找出最优路径。SPF 算法成熟且计算时考虑因素少,因此时间最快,但流的传输成功率并不尽如人意。而 OSACO 算法有确定的计算时长,对比之下,本文算法在网络中既提高了流的传输成功率,又有效地缩短了计算时长。对比图 5 和图 8 可以看出,随着网络规模的增加,为选出最优路径,需要更长的计算时间,即更多的粒子数和迭代次数,否则流量传输成功率难以显著提升。

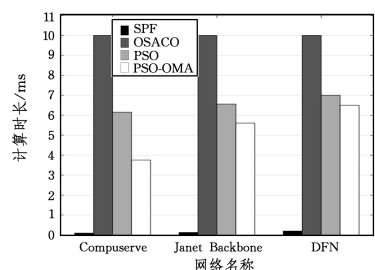


图 8 不同网络中各算法的每流路由计算时长

Fig. 8 Route calculation time per flow for every algorithm in different networks

结束语 现有 TSN 中的研究工作大都基于某种特定类型流量来进行路由路径的决策,本文提出了一种启发式的在线流量分析算法,结合网络中的实时情况,为混合流量计算路由路径;通过改进粒子群算法来加快搜索最优解的速度,以满足在线路由的时间限制;分析混合流量冲突情况,提出度量节点端口流量冲突情况的度量方法,修改粒子群算法中的适应度函数来灵活应对混合流量需求,提高了整体网络的传输成功率。仿真结果表明,对比最新算法 OSACO,本文算法有更高的传输成功率和更好的计算效率。但在大规模时间敏感网络中严格的全网时钟同步存在实际的部署难题。因此,在接下来的工作中,考虑引入帧抢占机制来优化混合应用类型的传输调度,进一步探索更多参数的影响,并放松时间同步的限制。

参考文献

- [1] FINZI A, MIFDAOUI A, FRANCES F, et al. Network Calculus-based Timing Analysis of AFDX networks with Strict Priority and TSN/BLS Shapers [C] // 2018 IEEE 13th International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES). IEEE, 2018:1-10.

- [2] NEUMANN P. Communication in industrial automation—What is going on? [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(11): 1332-1347.
- [3] LI Y, ZHANG P, ZHOU Y, et al. A Data Forwarding Mechanism based on Deep Reinforcement Learning for Deterministic Networks[C]// *IEEE INFOCOM 2020—IEEE Conference on Computer Communications Workshops(INFOCOM WKSHPS)*. IEEE, 2020: 285-290.
- [4] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency(ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(1): 88-145.
- [5] HELLMANNS D, GLAVACKIJ A, FALK J, et al. Scaling TSN Scheduling for Factory Automation Networks[C]// *2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems(WFCS)*. IEEE, 2020: 1-8.
- [6] CRACIUNAS S S, OLIVER R S, MARTIN C, et al. Scheduling Real-Time Communication in IEEE 802.1Qbv Time Sensitive Networks[C]// *International Conference on Real-time Networks & Systems*. ACM, 2016: 183-192.
- [7] FRANK D, NAYAK N G. No-wait Packet Scheduling for IEEE Time-sensitive Networks (TSN) [C]// *the 24th International Conference*. ACM, 2016: 203-212.
- [8] OLIVER R S, CRACIUNAS S S, STEINER W. IEEE 802.1Qbv Gate Control List Synthesis using Array Theory Encoding[C]// *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium(RTAS)*. IEEE, 2018: 13-24.
- [9] YANG S J, ZHUANG L, SONG Y, et al. Intelligent scheduling mechanism of time-sensitive network modal in polymorphic network[J]. *Chinese Journal of Journal on Communications*, 2022, 41(2): 85-93.
- [10] LAURSEN S M, POP P, STEINER W. Routing optimization of AVB streams in TSN networks[C]// *SIGBED Rev. ACM*, 2016: 43-48.
- [11] SCHWEISSGUTH E, DANIELIS P, TIMMERMANN D, et al. ILP-based joint routing and scheduling for time-triggered networks[C]// *The 25th International Conference*. ACM, 2017: 8-17.
- [12] ATALLAH A A, HAMAD G B, MOHAMED O A. Routing and scheduling of time-triggered traffic in time-sensitive networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(7): 4525-4534.
- [13] CHUANG C C, YU T H, LIN C W, et al. Online Stream-Aware Routing for TSN-Based Industrial Control Systems[C]// *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation(ETFA)*. IEEE, 2020: 254-261.
- [14] ZHANG C, WANG Y, YAO R, et al. Packet-size aware scheduling algorithms in guard band for time sensitive networking[J]. *CCF Transactions on Networking*, 2020(3): 1-17.
- [15] ZHANG T, FENG J Q, MA Y Y, et al. Survey on Traffic Scheduling in Time-Sensitive Networking [J]. *Chinese Journal of Journal of Computer Research and Development*, 2022, 59(4): 1-18.
- [16] WANG Y, CHEN J, NING W, et al. A time-sensitive network scheduling algorithm based on improved ant colony optimization [J]. *AEJ—Alexandria Engineering Journal*, 2020, 60(1): 107-114.
- [17] JURDI R, GUO J, KIM K J, et al. Queueing Delay Analysis of Mixed Traffic in Time Sensitive Networks[C]// *2021 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC)*. IEEE, 2021: 327-332.
- [18] MAXIM D, SONG Y. Delay analysis of AVB traffic in time-sensitive networks(TSN) [C]// *Proceedings of the 25th International Conference on Real-Time Networks and Systems(RTNS'17)*. ACM, 2017: 18-27.
- [19] KENNEDY J. Particle swarm optimization [J]. *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, (Perth, Australia), 2011, 4(8): 1942-1948.
- [20] FALK J, HELLMANNS D, CARABELLI B W, et al. NeSTiNg: Simulating IEEE Time-sensitive Networking (TSN) in OMNeT++[C]// *2019 International Conference on Networked Systems(NetSys)*. IEEE, 2019: 1-8.
- [21] HÄCKEL T, EYER P, KORF F, et al. SDN4CoRE: A Simulation Model for Software-Defined Networking for Communication over Real-Time Ethernet[C]// *Proceedings of the 6th International OMNeT++ Community Summit*. 2019: 24-31.
- [22] KNIGHT S, NGUYEN H X, FALKNER N, et al. The Internet Topology Zoo[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(9): 1765-1775.



WANG Jiaxing, born in 1998, postgraduate, is a member of China Computer Federation. His main research interests include time-sensitive networking and next generation internet.



ZHUANG Lei, born in 1963, Ph.D supervisor, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include future network architecture, time sensitive networking, and network virtualization.