

卫星编队流调度的门控对齐策略研究

徐川^{1,2}, 张汝凤¹, 何熊文³, 崔钊婧³, 赵国锋^{1,2}

(1.重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065; 2.复杂环境通信重庆市重点实验室, 重庆 400065;
3.北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 针对时间敏感网络 (TSN) 门控调度对相邻节点同步精度要求高, 星间无线链路时延波动引起相邻节点门控开启出现偏差, 导致业务流在多个卫星节点的调度不一致问题, 提出了一种面向卫星编队流调度的门控对齐策略。首先, 分析卫星编队中影响门控调度的因素, 对业务流在端口的调度时间约束进行建模, 并构建门控 on/off 列表模型; 其次, 设计在线滚动灰色预测算法对节点间链路时延进行预测, 基于预测结果对相邻节点的门控列表偏差进行动态修正, 确保多节点门控调度的一致性; 最后, 基于 STK 和 EXata 搭建卫星编队软件仿真场景, 同时在现场可编程门阵列 (FPGA) 硬件平台上实现门控对齐策略。实验结果表明, 所提策略能保障卫星编队中时敏业务流经过 5 跳卫星节点传输后时延为 3 782~3 848 μs 、抖动稳定在 30 μs , 比现有方案提升了 20%。

关键词: 卫星编队; 时敏业务; 门控对齐; 确定性传输

中图分类号: TN927

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2024118

Research on gating alignment strategy for flow scheduling in satellite formation

XU Chuan^{1,2}, ZHANG Rufeng¹, HE Xiongwen³, CUI Zhaojing³, ZHAO Guofeng^{1,2}

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China
2. Chongqing Key Laboratory of Complex Environment Communication, Chongqing 400065, China
3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

Abstract: Aiming at the time-sensitive network (TSN) gating scheduling required high synchronization accuracy of adjacent nodes, the delay fluctuation of inter-satellite wireless links caused the deviation of gate opening of adjacent nodes, resulting in the problem of inconsistent flow scheduling, a gating alignment strategy for flow scheduling in satellite formation was proposed. Firstly, the factors that affect the gating scheduling in satellite formation were analyzed, and the scheduling time constraints of traffic flow at switch ports were modeled to establish a gating on/off list model. Secondly, an online rolling gray scale prediction algorithm was designed to predict the delay of inter-node links, and based on the prediction results, the gated list deviation of neighboring nodes could be corrected dynamically to ensure the consistency of multi-node gated scheduling. Finally, the satellite formation software simulation scenario was established based on STK and EXata, moreover, the gating alignment strategy also was implemented on field programmable gate array (FPGA) hardware platform. The experimental results demonstrate that the proposed strategy can ensure that after 5-hops satellite transmission, the time delay of the time-sensitive traffic flow keeps on 3 782~3 848 μs , and the jitter is stable at 30 μs , which is 20% lower than the existing schemes.

Keywords: satellite formation, time-sensitive service, gate alignment, deterministic transmission

收稿日期: 2024-01-10; 修回日期: 2024-05-14

通信作者: 徐川, xuchuan@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62171070); 重庆市自然科学基金资助项目 (No.CSTB2023NSCQ-LZX0129); 重庆市博士后科学基金资助项目 (No.CSTB2022NSCQ-BHX0043)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62171070), The Natural Science Foundation of Chongqing (No.CSTB2023NSCQ-LZX0129), Chongqing Post-Doctoral Science Fund Project (No.CSTB2022NSCQ-BHX0043)

0 引言

近年来,低轨卫星技术的快速发展使卫星编队在电子侦察、应急、数据链等可靠通信场景中被广泛应用^[1-4]。低轨卫星编队一般由若干颗卫星构成,以同轨道周期绕地球飞行,多星协作组网共同执行任务。由前端节点或星内传感器产生的任务数据,经过多个星间节点中继传输到达用户^[5],而时敏业务(如卫星测控、远程指挥、灾难应急等)对端到端数据传输的确定性要求非常严格^[6],时延要求为 ms 级,抖动稳定要求为 μs 级^[7-8]。因此,传统卫星编队采用尽力而为的服务,难以满足时敏数据确定性传输的需求^[9]。

为此,研究者将时间敏感网络(TSN, time-sensitive network)技术引入航空航天领域来解决时敏数据确定性传输的问题^[10-13],文献[11]分析了 TSN 技术在星内应用时对时延、带宽、可靠性、配置等方面的支持。近年来,针对低轨星座多个卫星协作数据传输中存在的有线无线网络融合调度问题,研究者开展了相关的研究^[14-15]。文献[14]提出了将 TSN 中 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制与时分多址(TDMA, time division multiple access)技术结合的思路,设计了基于无线时隙优先的融合流调度策略。文献[15]提出了一种面向多跳卫星节点的有线无线网络融合调度方案,通过相邻节点有线无线时隙的联合分配,保障端到端时敏业务的确定性传输。然而,IEEE 802.1Qbv 门控调度机制对相邻节点同步精度要求高,且星间相对运动带来的无线链路时延波动会引起相邻节点门控开启出现偏差,导致业务流在多个卫星节点调度不一致。

现有对 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制的研究主要针对有线网络,一般将链路时延视为变化较慢或者固定值。文献[16-17]提出了门控调度模型,但是该模型没有考虑相邻节点间门控时隙的偏移,而是假设门控时隙对齐。文献[18]提出了一种非重叠率的门控列表窗口机制,该机制可以提高业务曲线速率并消除 TSN 的流量拥塞。文献[19]考虑相邻节点门控时隙的相对位置关系,提出了一种基于窗口的灵活门控列表调度模型,该模型降低了业务流的时延抖动要求。但文献[18-19]都没有考虑无线场景下相邻节点间时隙偏移动态变化的情况。在卫星编队场景中,星间无线链路时延存在 ms 级的波动,远高于有线链路 μs 级的抖动,使得卫星节点间的门

控开启出现偏差,给时敏数据的确定性传输带来了极大挑战。为此,本文提出了一种面向卫星编队流调度的门控对齐策略,主要贡献总结如下。

1) 对节点有线无线融合流调度中的门控开关进行建模,设计了面向节点初始状态严格对齐的门控 on/off 列表模型。首先对融合网络中时敏业务端到端时延的影响因素进行刻画,然后对时敏业务流在端口发送时间进行严格约束,最后以最小端到端时延为优化目标,构建初始状态严格对齐的门控 on/off 列表模型。

2) 针对卫星相邻节点间的时延抖动,设计在线滚动灰色预测算法对节点间链路时延变化进行预测,基于预测结果对相邻 TSN 节点间的门控 on/off 列表进行动态修正并设置保护带,从而解决门控偏差带来的时敏业务流调度不一致的问题。

3) 基于 STK 和 EXata 搭建卫星编队软件仿真场景,并在现场可编程门阵列(FPGA, field programmable gate array)硬件平台上实现门控对齐策略,从软件仿真和硬件系统仿真 2 个方面验证了门控对齐策略的有效性。实验结果表明,本文所提策略能保障卫星编队中时敏业务流经过 5 跳卫星节点传输后时延为 $3\ 782\sim 3\ 848\ \mu\text{s}$ 、抖动稳定在 $30\ \mu\text{s}$,比现有方案提升了 20%,能满足卫星编队任务确定性传输需求。

1 问题描述与系统模型

1.1 场景与问题

卫星编队应用场景如图 1 所示。卫星编队在执行任务(如电子侦察、远程控制等)时,会产生高实时性要求的时敏业务。为保障时敏业务低时延、低抖动的确定性传输,将地面有线 TSN 技术中的 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制引入卫星编队网络。地面有线 TSN 技术的链路时延波动较为稳定,在采用 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制时可将链路时延视为固定值,进而将相邻节点的门控时隙对齐,保证时敏业务流调度一致。但由于有线无线链路的带宽、传输方式等存在差异以及星间相对运动会产生 ms 级的链路时延波动,相邻节点间的门控时隙难以对齐,影响时敏业务流的确定性传输。为此,本文需要解决以下问题。

1) 融合网络流调度门控列表建模。如何对多卫星融合调度中的门控列表进行刻画,门控列表的建立需要考虑业务流的需求、特性和当前网络状

况,且相邻节点的门控列表会影响其他节点的业务流调度情况,只有对门控列表精准刻画,才能准确地对业务流进行融合调度。

2) 链路时延抖动引起相邻节点门控偏差。卫星编队在执行任务时因星座运动会产生无线链路时延波动,引起相邻节点门控列表偏差。当时敏业务流跨卫星节点传输、链路时延抖动导致时敏业务流到达相邻节点时,如果未能在其传输门控隙内及时转发,需要等到下一个传输周期才允许调度,无法满足时敏业务端到端确定性传输需求。

1.2 系统模型

本文将网络拓扑建模为 $G = (V, E)$, 其中, V 是 TSN 节点的集合, E 是节点间链路的集合。星内有线 TSN 链路表示为 $e^w \in E^w$, 星间无线链路表示为 $e^{wl} \in E^{wl}$, 且 $\forall e \in E = \{E^w, E^{wl}\}$ 。为保障时敏数据的确定性传输, TSN 控制器需收集卫星编队中各 TSN 终端的业务需求, 所述业务需求具体包括源节点、目的节点、发送周期、数据大小和业务流端到端时延需求。那么, 时敏业务流 $f_i \in F$ 可以用五元组 $f_i < v_s, v_d, T_{s,i}, B_{s,i}, D_{s,i}^{dl} >$ 表示, 其中, v_s 表示源节点, v_d 表示目的节点, $T_{s,i}$ 表示时敏业务流发送周期, $B_{s,i}$ 表示时敏业务流数据大小, $D_{s,i}^{dl}$ 表示时敏业务流 f_i 的端到端时延需求。同时, 本文使用 $A[e_p][e_q] \in \{0, 1\}$ 表示链路的邻接矩阵, 若链路 e_p 与链路 e_q 相连, 即存在 TSN 节点 v 既是 e_p 的目的节点也是 e_q 的源节点, 则 $A[e_p][e_q] = 1$; 否则 $A[e_p][e_q] = 0$ 。

2 有线无线融合调度的门控 on/off 列表模型

本节首先对卫星有线无线融合场景中的业务流

端到端传输时延进行分析, 其次对业务流在 TSN 交换节点端口的调度时间约束进行建模, 构建面向有线无线融合调度的门控 on/off 列表模型。

2.1 融合网络的端到端确定性分析

在卫星编队融合网络中, 为保障时敏业务流的端到端确定性传输, 星内链路采用 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制, 星间链路采用 TDMA 技术。为构建合理的门控列表模型, 首先需要对比敏业务流在融合网络中的端到端传输时延进行分析。

融合网络的 TSN 流调度如图 2 所示。在卫星编队中进行有线无线融合的 TSN 流调度时, 时敏业务流 f_i 从卫星 A 的 TSN 终端 v_s 经过 TSN 交换机、TSN 与无线融合网关传输到卫星 B 的 TSN 终端 v_d 。

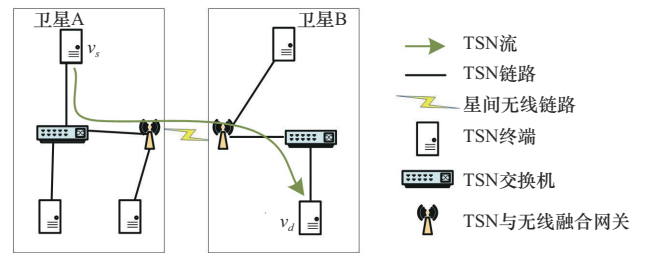


图 2 融合网络的 TSN 流调度

TSN 节点发送的时敏业务流 f_i 在星内有线 TSN 链路中会产生传播时延、传输时延和处理时延。依据文献[14]中式(6)描述, 星内有线 TSN 链路单跳时延为

$$D_{s,i}^w = D_{s,i,prop}^w + D_{s,i,trans}^w + D_{s,i,proc}^w \quad (1)$$

其中, $D_{s,i,prop}^w$ 表示单跳有线链路的传播时延, $D_{s,i,trans}^w$ 表示单跳有线链路的传输时延, $D_{s,i,proc}^w$ 表示星内有线 TSN 链路的处理时延。

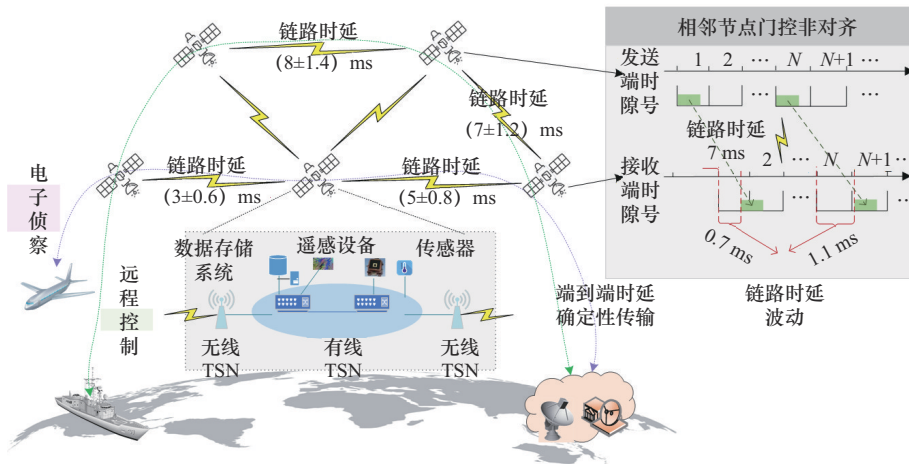


图 1 卫星编队应用场景

为保障星间链路时敏业务流的确定性传输，采用 TDMA 技术，数据按照时隙划分规则进行传输。依据文献[14]中式(5)和式(12)的描述，星间无线 TDMA 链路单跳时延为

$$D_{s,i}^{wl} = D_{s,i,prop}^{wl} + D_{s,i,trans}^{wl} + D_{s,i,wait}^{wl} + D_{s,i,proc} \quad (2)$$

其中， $D_{s,i,prop}^{wl}$ 表示单跳无线链路的传播时延， $D_{s,i,trans}^{wl}$ 表示单跳无线链路的传输时延， $D_{s,i,wait}^{wl}$ 表示星间无线链路的处理时延。

2.2 调度时间的严格约束

为保障时敏业务流的确定性传输，需要对时敏业务流 f_i 在链路 e 上的开始调度时间进行约束，具体定义为

$$\begin{aligned} t[f_i][e] &= t[f_i][e] \bmod T_{s,i}, \\ \forall e \in E^w, t[f_i][e] &\geq T_{s,i}, \forall s = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

若时敏业务流在链路 e 上的开始调度时间 $t[f_i][e]$ 大于该时敏业务流的发送周期 $T_{s,i}$ ，则将时敏业务流在链路 e 上的开始调度时间 $t[f_i][e]$ 对发送周期 $T_{s,i}$ 取模以符合周期性调度。

根据式(3)，星内 TSN 交换节点的开始调度时间定义为

$$\begin{aligned} t[f_i][e_v] &= t[f_i][e_u] + D_{s,i,prop}^w + D_{s,i,trans}^w + D_{s,i,proc}, \\ \forall e_u, e_v \in E^w, e_u &\neq e_v, \mathcal{A}[e_u][e_v] = 1, \forall s = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

其中， $t[f_i][e_v]$ 表示有线链路 e_v 的开始调度时间， $t[f_i][e_u]$ 表示前一条有线链路 e_u 的开始调度时间。

星间链路开始调度时间为

$$\begin{aligned} t[f_i][e'_v] &= t[f_i][e_u] + D_{s,i}^w + D_{s,i,wait}^{wl}, \\ \forall s = 1, 2, \dots, N, \forall e_u \in E^w, \\ e'_v \in E^{wl}, e_u &\neq e_v, \mathcal{A}[e_u][e'_v] = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

其中， $t[f_i][e_u]$ 表示有线链路 e_u 的开始调度时间， $t[f_i][e'_v]$ 表示融合网关无线链路 e'_v 的开始调度时间， $D_{s,i}^w$ 表示有线链路的单跳时延， $D_{s,i,wait}^{wl}$ 表示无线链路的处理时延。

经过有线 h 跳和无线 n 跳融合网络传输时敏业务流的端到端时延可表示为

$$\begin{aligned} D_{s,i} &= h(D_{s,i,prop}^w + D_{s,i,trans}^w) + \\ &n(D_{s,i,prop}^{wl} + D_{s,i,trans}^{wl} + D_{s,i,wait}^{wl}) + \\ &(h + n - 1)D_{s,i,proc}, \forall s = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 建立门控 on/off 列表

每个 TSN 节点根据门控 on/off 列表模型严格控制数据队列的门控开启与关闭时间，如图3所示。

门控 on/off 列表按照超周期 T 循环执行数据的调度操作，其中， T 为所有时敏业务流周期的最小公倍数。在超周期内划分多个时隙，时隙的大小为门控开启一次或关闭一次的时间，由同一时间流入该节点同等优先级的业务流数量决定。

假设 TSN 节点处理速度为 R_{proc} ，同一时间同等优先级的业务流的大小为 B ，则此类业务流的门控时隙大小为

$$t_{slot} = \frac{B}{R_{proc}} \quad (7)$$

根据严格约束业务流在端口输出的调度时间，

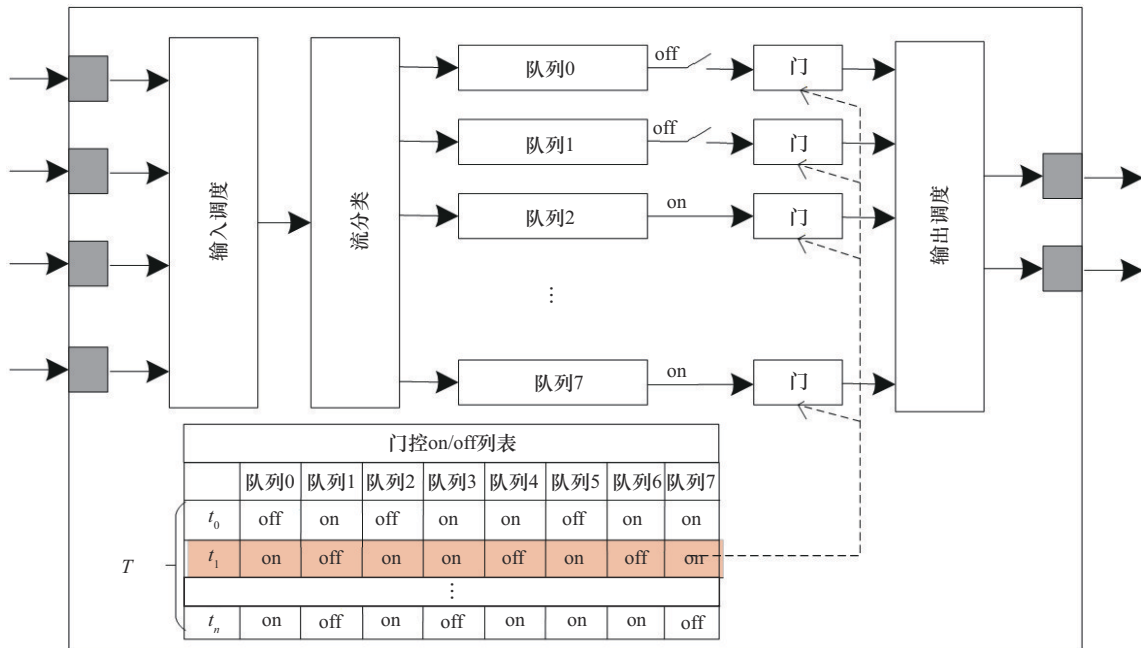


图3 门控 on/off 列表模型

可知时敏业务流 f_i 在有线路径 e 上第 h 个节点的门控开启时刻为

$$T_{s,i,h}^{w,o} = t[f_i][e_h] = t[f_i][e_s] + (h-1)(D_{s,i,prop}^w + D_{s,i,trans}^w + D_{s,i,proc}) \quad (8)$$

根据式(7),可得门控关闭时刻为

$$T_{s,i,h}^{w,c} = t[f_i][e_s] + (h-1)(D_{s,i,prop}^w + D_{s,i,trans}^w + D_{s,i,proc}) + t_{slot} \quad (9)$$

时敏业务流 f_i 跨卫星节点经过无线链路传输后

到达下一节点门控开启时刻为

$$T_{s,i}^{wl,o} = t[f_i][e'_v] + D_{s,i,trans}^{wl} = t[f_i][e_u] + D_{s,i}^w + D_{s,i,wait}^{wl} + D_{s,i,trans}^{wl} \quad (10)$$

同理,门控关闭时刻为

$$T_{s,i}^{wl,c} = t[f_i][e_u] + D_{s,i}^w + D_{s,i,wait}^{wl} + D_{s,i,trans}^{wl} + t_{slot} \quad (11)$$

结合式(3)~式(6),本文以时敏业务流端到端传

输时延最小化(Minimize)为优化目标构造目标函数与约束条件,如式(12)所示。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } D_{s,i} \\ & \text{s.t. C1: } t[f_i][e] = t[f_i][e] \bmod T_{s,i}, \\ & \quad \forall e \in E = \{E^w, E^{wl}\}, t[f_i][e] \geq T_{s,i} \\ & \text{C2: } t[f_i][e_v] = t[f_i][e_u] + D_{s,i}^w, \\ & \quad \forall e_u, e_v \in E^w, e_u \neq e_v, \mathcal{A}[e_u][e_v] = 1 \\ & \text{C3: } t[f_i][e'_v] = t[f_i][e_u] + D_{s,i}^w + D_{s,i,wait}^{wl}, \\ & \quad \forall e_u \in E^w, e'_v \in E^{wl}, e_u \neq e'_v, \mathcal{A}[e_u][e'_v] = 1 \\ & \text{C4: } D_{s,i} \leq D_{s,i}^{dl}, \forall s = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (12)$$

其中,约束C1表示时敏业务流的开始调度时间,对其发送周期 $T_{s,i}$ 取模以符合周期性调度;约束C2表示时敏业务流在星内有线侧TSN链路的发送时间约束;约束C3表示时敏业务流在星间有线无线融合网关TSN节点的发送时间约束;约束C4表示时敏业务流的端到端传输时延应满足其时延需求。

式(12)以最小化时敏业务流的端到端传输时延为优化目标,求解最优的初始门控on/off列表,对时敏业务流调度输出时间进行约束,该优化问题为无等待数据包调度问题^[20]。根据文献[20]可知,TSN的无等待数据包调度问题等同于无等待车间调度问题,是典型的NP-hard问题。因此,本文使用Minizinc对约束条件进行建模,再使用Gecode求解器对融合网络初始门控on/off列表进行求解,得到近似最优解。

3 卫星编队的门控对齐策略

本节首先对节点间链路时延进行预测,然后根据预测结果对相邻节点的门控进行对齐。由于需要进行在线预测,本文选择灰色预测模型进行改进,因为其仅需少量的历史数据和较低的计算开销,更适用于在

FPGA平台上部署,从而实现滚动的在线时延预测。

3.1 在线滚动灰色预测模型

由于链路时延的波动性,需要对链路时延的变化规律进行预测,本文使用在线滚动灰色预测模型预测短期内链路时延的方式预测门控列表偏差,假设原始非负时间序列为

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(k) | k = 1, 2, \dots, n\} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \quad (13)$$

通过累加运算(AGO, accumulated generating operation)生成的新序列为

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(k) | k = 1, 2, \dots, n\} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\} \quad (14)$$

其中, $x^{(1)}(k)$ 为

$$x^{(1)}(k) = \sum_{j=1}^k x^{(0)}(j), k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

建立灰色微分方程,表示为

$$x^{(0)}(k) + pz^{(1)}(k) = q, k = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

将 $k = 1, 2, \dots, n$ 代入式(16)可得

$$\begin{cases} x^{(0)}(2) + pz^{(1)}(2) = q \\ x^{(0)}(3) + pz^{(1)}(3) = q \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) + pz^{(1)}(n) = q \end{cases} \quad (17)$$

使用最小二乘法估计式(17)中数据发展趋势 p 和数据的变化 q 为

$$[p, q]^T = (Z^T Z)^{-1} Z^T X \quad (18)$$

其中, X 为

$$X = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, Z = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) \\ -z^{(1)}(3) \\ \vdots \\ -z^{(1)}(n) \end{bmatrix} \quad (19)$$

建立一阶灰色预测模型白化微分方程,表示为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + px^{(1)} = q \quad (20)$$

取初始值 $x^{(1)}(t)|_{t=1} = x^{(0)}(1)$,可得

$$x^{(1)}(t) = [x^{(0)}(1) - \frac{q}{p}]e^{-a(t-1)} + \frac{q}{p} \quad (21)$$

灰色微分方程时间序列响应函数为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - \frac{q}{p}]e^{-ak} + \frac{q}{p} \quad (22)$$

通过累减还原计算,可得

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = (1 - e^p)[x^{(0)}(1) - \frac{q}{p}]e^{-ak}, k = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (23)$$

当 $k \geq n$ 时,可对原始序列进行预测。

3.1.1 背景值优化

根据式(16)可知, 自变量 p 和 q 直接影响灰色预测模型的预测精度, 而 p 和 q 的值取决于背景值 $z^{(1)}(k)$, 因此优化背景值对 p 和 q 的取值有着显著的影响。

传统灰色预测模型采用邻均值生成背景值, 即 $z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1)$, 则背景值的计算等效为图4中梯形的面积, 这样的计算方式会产生 ΔS 的误差, 使得模型预测精度不高。

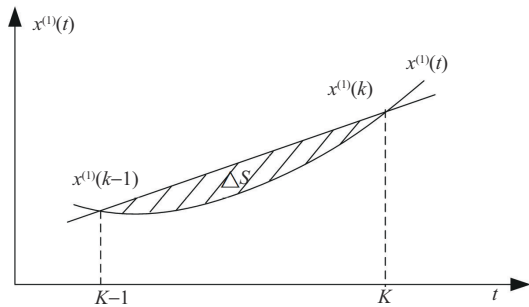


图4 邻均值和背景值误差

针对上述问题, 本文采用多个矩阵求和的方式减小阴影部分面积的误差。如图5所示, 将 $[K-1, K]$ 划分为 λ 个等长的区间。

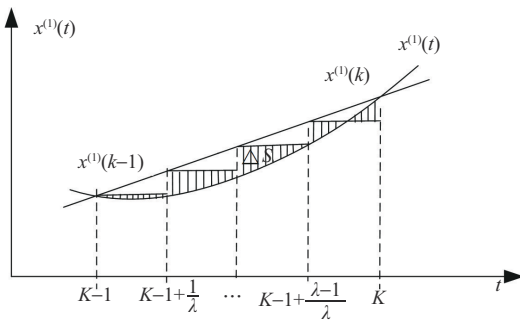


图5 矩阵求和背景值误差

优化后的背景值等效为

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{\lambda} \left[x^{(1)}(k-1) + \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{\lambda} j \right] \quad (24)$$

为了使灰色预测模型的平均绝对百分比误差 (MAPE, mean absolute percentage error) 最小, 本文采用计算速度更快、精度更高的数值迭代算法求解 λ 的最优值。

灰色预测模型的 MAPE 为

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)|}{x^{(0)}(k)} \times 100\% \quad (25)$$

定义 $e=f(\lambda)$, 则 $f(\lambda)$ 为

$$f(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)|}{x^{(0)}(k)} \times 100\% \quad (26)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k) = (1 - e^{p(\lambda)}) \left[x^{(0)}(1) - \frac{q(\lambda)}{p(\lambda)} \right] e^{-a(k-1)} \quad (27)$$

假设步骤 i 的决策变量是 λ_i , 根据数值迭代算法基本公式可得

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i - \frac{f'(\lambda_i)}{f''(\lambda_i)} =$$

$$\lambda_i - \frac{\lambda_i - \lambda_{i-1}}{f'(\lambda_i) - f'(\lambda_{i-1})} f'(\lambda_i) \approx$$

$$\lambda_i - \frac{(\lambda_i - \lambda_{i-1})(f(\lambda_i + \Delta\lambda) - f(\lambda_i))}{f(\lambda_i + \Delta\lambda) - f(\lambda_i) - f(\lambda_{i-1} + \Delta\lambda) + f(\lambda_{i-1})} \quad (28)$$

当 $|\lambda_{i+1} - \lambda_i| < \varepsilon$ 时, 停止迭代, 最优值为 λ_i 。

数值迭代算法求 λ 最优值的步骤如图6所示, 具体介绍如下。

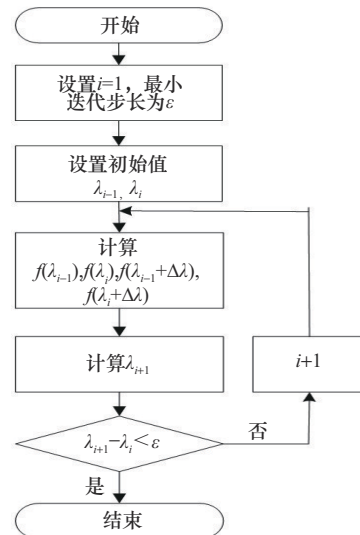


图6 数值迭代算法求 λ 最优值的步骤

步骤1 设置 $i = 1$, 最小迭代步长为 ε 。

步骤2 设置初始值 λ_{i-1}, λ_i 。

步骤3 计算 $f(\lambda_{i-1}), f(\lambda_i), f(\lambda_{i-1} + \Delta\lambda), f(\lambda_i + \Delta\lambda)$ 。

步骤4 计算 λ_{i+1} 。

步骤5 判断 $\lambda_{i+1} - \lambda_i < \varepsilon$ 是否成立, 若是, 停止迭代, 结束; 否则 $i + 1$, 返回步骤3。

数值迭代算法第 i 步输出的变量 λ_{i+1} 与迭代收敛点 λ_i 满足 $\lambda_{i+1} - \lambda_i < \varepsilon$, 则此算法的时间复杂度为 $O(i)$ 。

3.1.2 初始值优化

如式(26)所示, 初始值 $x^{(0)}(1)$ 的选取也会影响预

测结果的准确性,若初始值的选取没有采取新信息数据,则会影响后续的预测结果。因此,本文使用在线滚动灰色预测调度(ORGPA, online rolling grey predictive allocate),将下一次时延测量所得到的时延通过预测得到的 $x^{(0)}(k+1)$ 添加至序列末尾,并将旧信息数据 $x^{(0)}(1)$ 从序列中移除,接着使用所得到的新序列 $x^{(0)} = \{x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(k+1)\}$ 对 $x^{(0)}(k+2)$ 进行预测,如算法1所示。此算法在选取完 K 个初始值后会一直进行更新操作,但每次更新只需循环一次,因此时间复杂度为 $O(1)$ 。

算法1 在线滚动灰色预测调度

输入 时间序列 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(k)\}$

输出 预测值 $x^{(0)}(k+1)$

- 1) for $i=1$ to K
- 2) $x^{(1)}(k) = x^{(1)}(k) + x^{(1)}(i)$
- 3) end for
- 4) while
- 5) $z^{(1)}(k) = \text{Calcu_neigmean}(x^{(1)})$
- 6) $X = \text{Data_matrix}(x^{(0)})$
- 7) $Z = \text{Data_matrix}(-z^{(1)})$
- 8) $[p, q]^T = (Z^T Z)^{-1} Z^T X$
- 9) $\text{Firstorder_eq}(x^{(1)}, p, q)$
- 10) $\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k)$
- 11) if $\text{Detect}(x^{(1)}(k+1))$
- 12) $\text{update } x^{(0)} = \{x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(k+1)\}$
- 13) end if
- 14) end while

根据预测的相邻链路时延计算原有门控开启时间与数据到达时间的偏差,可得门控差为

$$\text{offset}_{\text{gcl}} = D_l(n) - D_l(n-1) \quad (29)$$

其中, $D_l(n)$ 表示包长为 l 的时敏业务流当前时刻的链路时延值, $D_l(n-1)$ 表示前一时刻的链路时延值。

3.2 门控 on/off 列表偏差修正

根据预测得到的门控偏差对融合网络中各TSN节点门控开启时间进行修正,门控修正示意如图7所示。

修正后,门控开启时刻为

$$t[f_i][e]_n = t[f_i][e]_{n-1} + \text{offset}_{\text{gcl}} \quad (30)$$

其中, $t[f_i][e]_{n-1}$ 表示前一时刻时敏业务流 f_i 在TSN节点的开始调度时间, $t[f_i][e]_n$ 表示当前时刻

时敏业务流 f_i 在TSN节点的开始调度时间, $\text{offset}_{\text{gcl}}$ 表示门控列表偏差。则新的传输窗口为

$$[T_{s,i,h}^o, T_{s,i,h}^c]_n = [t[f_i][e]_{n-1} + \text{offset}_{\text{gcl}}, t[f_i][e]_{n-1} + \text{offset}_{\text{gcl}} + t_{\text{slot}}] \quad (31)$$

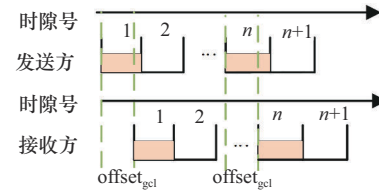


图7 门控修正示意

4 软件仿真实验与系统实验

为验证卫星编队流调度的门控对齐策略的可行性和有效性,本节将联合STK和EXata仿真平台搭建卫星融合网络软件仿真场景,有线端口采用IEEE 802.1Qbv门控调度机制,融合网关无线接口定制开发了TDMA技术,支持时敏业务流的有线无线融合调度。最后,在FPGA硬件平台上实现该策略并进行系统仿真实验。

4.1 软件仿真实验与分析

1) 仿真参数设置

典型的卫星时敏业务流包括快速位置报告信息、电子侦察、遥感勘测等,一般具有周期发送特性且数据大小比较固定,其端到端时延抖动需求为几十至几百ms,抖动需求为几十至几百 μs 。本文仿真场景参考文献[1]和文献[13]的设置,数据传输格式满足卫星通信协议规范格式,具体仿真参数设置如表1所示。

表1 仿真参数设置

参数	值
卫星编队中卫星的数目/颗	4
星间距离/km	60~90
每颗卫星的内部节点数目/个	4
有线链路传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	1 000
无线链路传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	10
时隙长度/ μs	500
时敏业务发送周期取值/ms	20
时敏业务数据帧大小/B	500
非时敏业务数据帧大小/B	500
背景流数据帧大小/B	1 024

根据表1中的仿真参数,在EXata中搭建卫星编队融合网络仿真场景,如图8所示,每颗卫星由2个融合网关与2个TSN交换机组成。星间采用

TDMA 技术进行组网，星间无线传输速率设置为 10 Mbit/s；星内通过 TSN 技术进行组网，星内有 线传输速率设置为 1 000 Mbit/s。在该仿真场景中，数据帧大小为 500 B 的时敏业务流由终端节点 h_1 周期性产生，经星间链路与星内有线无线融合网关、TSN 交换机传输至目的节点 h_4 ；非时敏业务流由节点 h_2 以相同路径传输至目的节点 h_5 。

2) 仿真结果分析

本节分别对比基于窗口的灵活门控列表调度 (STNet) [19]、融合网络门控未对齐调度 (GTS-CSA) [15] 和本文所提在线滚动灰色预测调度 (ORGPA) 的时延抖动性能，其中 STNet 方案本身没有考虑星间无线传输，因此验证 STNet 方案时空间采用通用的 CSMA/CA 机制，测试结果如图 9 所示。当采用 STNet 时，时延变化范围为 3 851~4 179 μs ，抖动变化范围为 34~127 μs ，由于该机制没有融合星间无线传输设计调度机制，时敏数据在跨卫星节点传输时引入不确定时延，因此时延抖动较大且不稳定。当采用 GTS-CSA 时，时延变化范围为 3 811~4 759 μs ，抖动变化范围为 30~389 μs ，存在时延抖动陡然上升的情况，这是因为链路时延波动导致数据错过了传输门控开启时隙。当采用 ORGPA 时，可有效修正门控偏差，时延变化范围为 3 762~3 828 μs ，抖动稳定在 30 μs 。因此，本文所提 ORGPA 方案能满足卫星任务端到端时延抖动要求。

4.2 系统仿真与测试

为满足实际应用要求，本节将模拟真实网络场景，实现并验证本文所提策略的性能。卫星内部通常由传感器、交换节点、有线链路等组成[13]，星间通过无线电波或激光链路传输数据，由于受实验设

备和环境限制，本文采用有线 TSN 交换机和融合网关模拟星内交换节点，Wi-Fi 模拟星间无线链路。

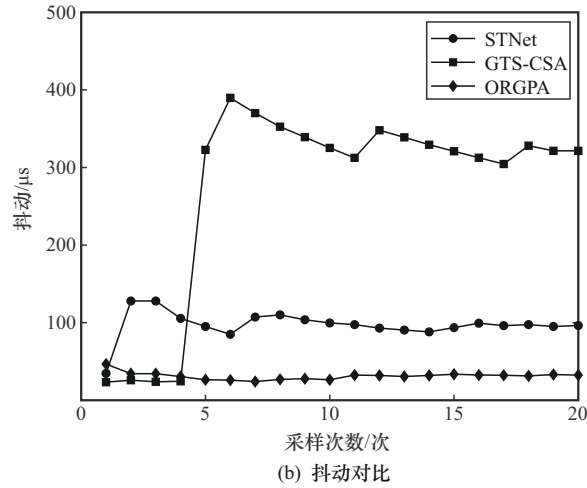
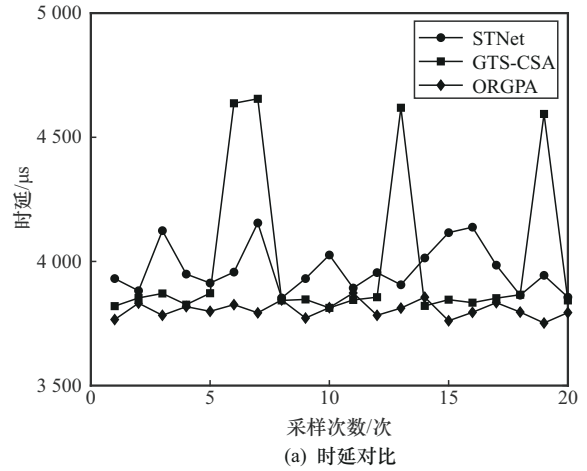


图 9 门控对齐策略仿真测试卫星编队融合网络仿真场景

1) 总体架构设计

卫星编队流调度门控对齐总体架构如图 10 所示。为解决星间无线链路时延波动较大导致相邻

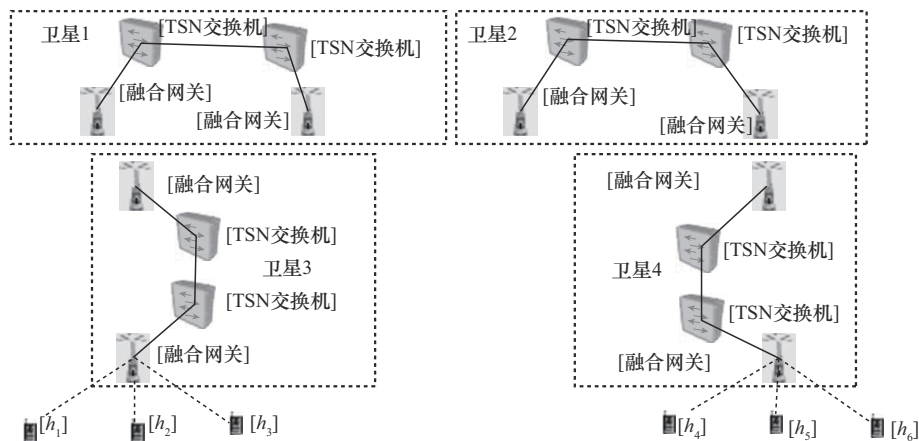


图 8 卫星编队融合网络仿真场景

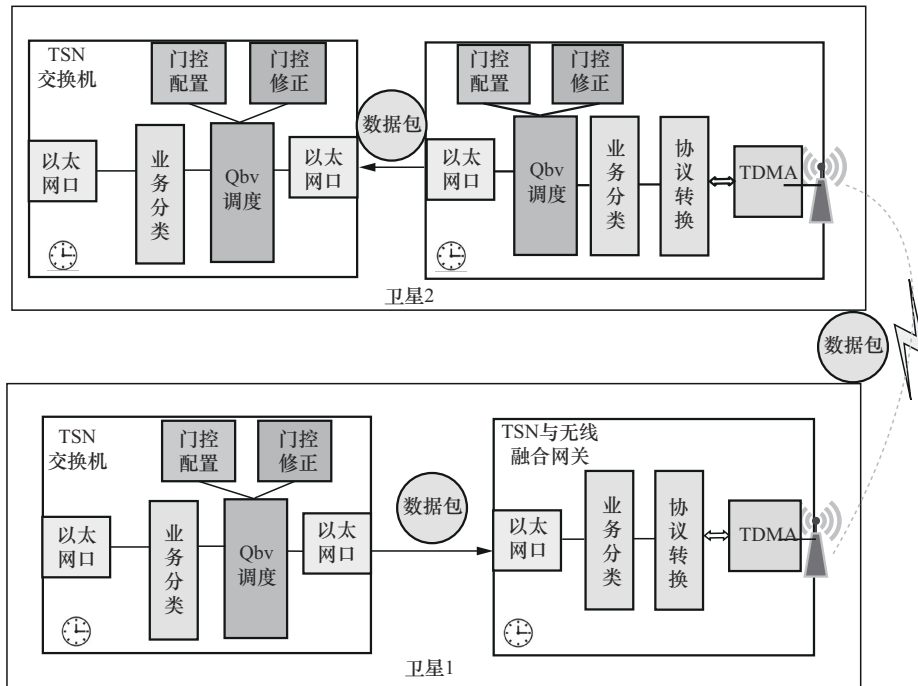


图 10 卫星编队流调度门控对齐总体架构

TSN节点门控难以对齐的问题，需要预测门控偏差并修正门控偏差，系统主要包括门控配置、Qbv调度和门控修正。

2) 实验设计与部署

为验证本文所提策略对融合网络流调度降低链路时延及抖动所带来的收益，本文搭建了如图 11 所示的卫星编队融合网络验证平台。

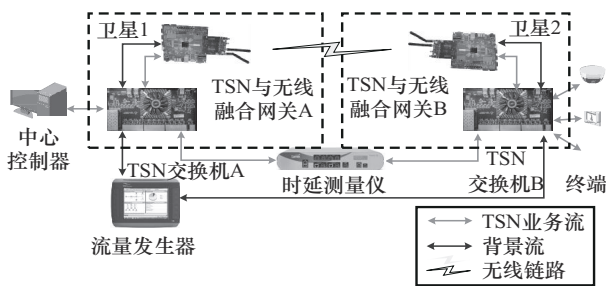


图 11 卫星编队融合网络验证平台

在该平台中，由 ZYNQ+AD9361 开发板设计的 TSN 与无线融合网关和由 ZYNQ 开发板设计的 TSN 交换机组合模拟卫星，中心控制器和终端通过模拟卫星实现端到端数据交互。其中，无线收发速率为 10 Mbit/s，有线收发速率为 1 000 Mbit/s。为模拟星间相对运动对门控列表对齐带来的影响，考虑卫星编队星间距离约为几十千米至几百千米，故本文实验在融合网关无线发送接口通过将数据

进行暂存的方式人为引入 1~2 ms 的时延变化，并设计如表 2 所示的融合网络参数配置，其中 f_1 为时敏业务流，传输周期为 20 ms。将融合流调度中门控对齐策略部署在 FPGA 平台上进行系统仿真测试。

表 2 融合网络参数配置

编号	业务流类型	数据帧大小/B	业务流周期/ms
f_1	时敏业务流	500	20
f_2	非时敏业务流	500	20
b_1	背景流	1 024	100

3) 测试验证及结果分析

为了验证本文策略在有线无线融合网络中的有效性，在本文发送端口严格约束的基础上分别使用无门控未对齐调度与在线滚动灰色预测调度 (ORGPA) 进行对比测试，并将中心控制软件的显示结果进行记录。其时延对比如图 12(a)所示，抖动对比如图 12(b)所示。

通过实验数据可以发现，在无门控未对齐调度中会存在大于 1 ms 的时延值，时延变化范围为 536~1 140 μ s，抖动变化范围为 8~175 μ s，在卫星编队网络融合中此情况已经无法满足时敏业务流的确定性传输需求。而在部署 ORGPA 策略后时延和抖动不会发生突变，都相对稳定，并且平均时延约

为 $544 \mu\text{s}$ ，平均抖动约为 $8.1 \mu\text{s}$ 。这是由于本文策略对节点间链路时延进行在线预测并根据预测结果动态修正相邻节点间的门控列表偏差，避免了星间相对运动带来链路时延波动导致相邻 TSN 节点的门控无法对齐问题，从而使得各 TSN 节点能够及时对时敏业务流进行转发操作。

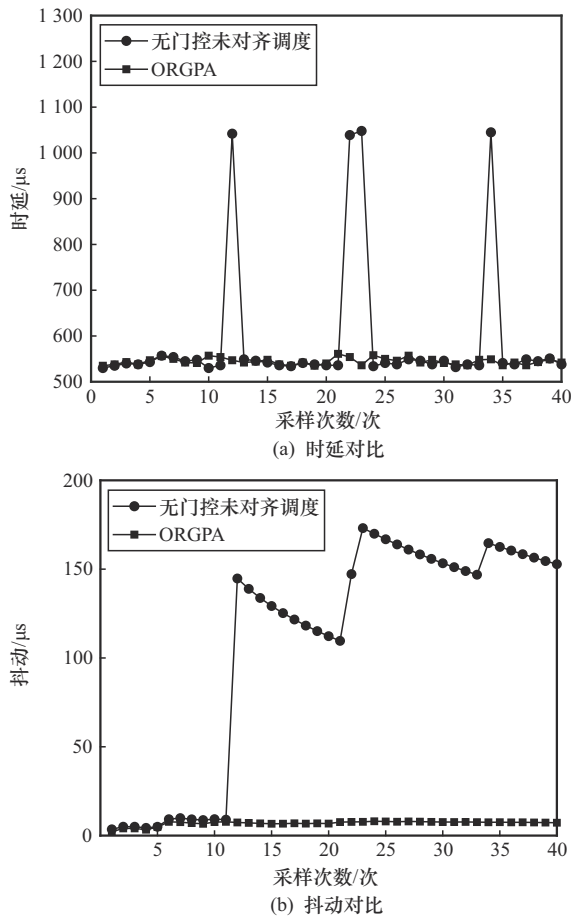


图 12 门控偏差预测与修正策略测试结果

综上所述，本文策略能够有效降低动态链路场景下时敏业务流的端到端时延和抖动值。

5 结束语

在卫星编队融合网络场景中引入 IEEE 802.1Qbv 门控调度机制保障时敏业务流确定性传输时，星间无线链路时延波动使得相邻节点门控开启出现偏差，导致业务流在多个卫星节点调度不一致，本文提出了一种面向卫星编队流调度的门控对齐策略。首先对卫星编队中影响门控调度的因素进行分析，对业务流在端口的调度时间进行严格约束与建模，并构建门控 on/off 列表模型；然后设计在线滚动灰

色预测算法对节点间链路时延进行预测，基于预测结果对相邻节点的门控列表偏差进行动态修正，以保障时敏业务流完全落在传输时隙内，实现端到端的确定性传输；最后基于 STK 和 EXata 搭建卫星编队软件仿真场景，并在 FPGA 硬件平台上对本文所提策略进行系统仿真与验证。实验结果表明，本文所提策略能满足卫星编队中时敏业务流确定性传输需求。

参考文献:

- [1] DENG R Q, DI B Y, SONG L Y. Ultra-dense LEO satellite based formation flying[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(5): 3091-3105.
- [2] BOROWITZ M. The military use of small satellites in orbit[R]. 2022.
- [3] LIU H, TIAN Y, LEWIS F L. Robust trajectory tracking in satellite time-varying formation flying[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 51(12): 5752-5760.
- [4] 左珮良, 侯少龙, 郭超, 等. 基于强化学习的多层卫星网络边缘安全决策方法[J]. *通信学报*, 2022, 43(6): 189-199.
ZUO P L, HOU S L, GUO C, et al. Security decision method for the edge of multi-layer satellite network based on reinforcement learning[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(6): 189-199.
- [5] ZHOU D, SHENG M, LI J D, et al. Aerospace integrated networks innovation for empowering 6G: a survey and future challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(2): 975-1019.
- [6] CUI Z J, DONG Z H, ZHANG H J, et al. A hybrid service scheduling strategy of satellite data based on TSN[C]//*International Conference in Communications, Signal Processing, and Systems*. Berlin: Springer, 2021: 362-367.
- [7] WEI T, FENG W, CHEN Y F, et al. Hybrid satellite-terrestrial communication networks for the maritime Internet of things: key technologies, opportunities, and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11): 8910-8934.
- [8] ZHOU J G, ZHOU C J, KANG Y Q, et al. Integrated satellite-ground post-disaster emergency communication networking technology[J]. *Natural Hazards Research*, 2021, 1(1): 4-10.
- [9] LIU J J, SHI Y P, FADLULLAH Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 2714-2741.
- [10] SANCHEZ-GARRIDO J, APARICIO B, RAMÍREZ J G, et al. Implementation of a time-sensitive networking (TSN) Ethernet bus for microlaunchers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(5): 2743-2758.
- [11] BOSK M, REZABEK F, HOLZINGER K, et al. Methodology and infrastructure for TSN-based reproducible network experiments[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 109203-109239.
- [12] BUSH S F. Toward efficient time-sensitive network scheduling[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(3): 1830-1842.
- [13] CHAINE P J, BOYER M, PAGETTI C, et al. TSN support for quality of service in space[C]//*Proceedings of 2020 the 10th European Con-*

- gress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-11.
- [14] 徐川, 刘俊斌, 邢媛, 等. 有线无线融合的卫星时间敏感网络流调度研究[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 1014-1023.
- XU C, LIU J B, XING Y, et al. Research on flow scheduling of wired and wireless converged satellite time sensitive network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 1014-1023.
- [15] XING Y, ZHAO G F, XU C, et al. The converged scheduling for time sensitive mission in satellite formation flying[C]//Proceedings of the 2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2022: 4691-4696.
- [16] HELLMANN D, FALK J, GLAVACKIJ A, et al. On the performance of stream-based, class-based time-aware shaping and frame preemption in TSN[C]//Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 298-303.
- [17] REUSCH N, ZHAO L X, CRACIUNAS S S, et al. Window-based schedule synthesis for industrial IEEE 802.1Qbv TSN networks[C]//Proceedings of the 2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-4.
- [18] HASAN M M, FENG H, KHAN S, et al. Improve service curve using non-overlapped gate in time sensitive network switch[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 21st International Conference on Communication Technology (ICCT). Piscataway: IEEE Press, 2021: 913-918.
- [19] ZHAO L X, POP P, GONG Z J, et al. Improving latency analysis for flexible window-based GCL scheduling in TSN networks by integration of consecutive nodes offsets[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5574-5584.
- [20] DÜRR F, NAYAK N G. No-wait packet scheduling for IEEE time-sensitive networks (TSN) [C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. New York: ACM Press, 2016: 203-212.

[作者简介]



徐川 (1980-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为时间敏感网络、天地一体化网络、工业互联网等。

张汝凤 (1999-), 女, 四川雅安人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为时间敏感网络。

何熊文 (1982-), 男, 北京人, 北京空间飞行器总体设计部研究员, 主要研究方向为空间数据系统、航天器综合电子系统、星载嵌入式软件等。

崔钊婧 (1992-), 女, 北京人, 北京空间飞行器总体设计部工程师, 主要研究方向为软件定义网络、时间触发以太网等。

赵国锋 (1972-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为天地一体化网络、工业物联网、网络测量。