

面向低轨卫星切换的 TAS-CQF 协同调度确定性保障方法

李保罡^{1,2}, 郭于维^{1,2}, 陈晏雅茗^{1,2}, 李承达^{1,2}

(1. 华北电力大学电子与通信工程系, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 针对低轨卫星网络中链路时延动态变化与频繁切换造成的 TAS 门控发送与 CQF 周期转发失配, 以及时间敏感业务时延突增、乱序和丢包等问题, 提出一种切换感知的 TAS-CQF 协同调度确定性保障方法。该方法基于链路综合时延联合调整 CQF 周期偏移与 TAS 发送相位, 实现动态链路条件下的周期对齐; 进一步利用确定性网络演算获得新旧路径的时延边界, 量化最大路径差分时延, 并据此自适应配置 MBB 双路径保护区间与重排序缓存, 保障切换期间业务的连续、有序传输。仿真结果表明, 所提方法能够有效降低时间敏感业务的丢包率和最大端到端时延, 提高有效吞吐量, 并在卫星切换及时延扰动条件下保持较好的传输稳定性, 同时减少切换场景下的冗余保护开销。

关键词: 低轨卫星网络; TAS-CQF; 协同调度; 确定性保障; 网络演算

中图分类号: TP309

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000

Deterministic Guarantee Method for TAS-CQF Cooperative Scheduling in LEO Satellite Handover

LI Baogang^{1,2}, Guo Yuwei^{1,2}, CHEN Yanyaming^{1,2}, LI Chengda^{1,2}

1. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Abstract: To address the mismatch between TAS-gated transmission and CQF-periodic forwarding caused by dynamic changes in link delay and frequent handovers in low-Earth orbit satellite networks, as well as issues such as sudden increases in delay, out-of-order delivery, and packet loss for time-sensitive services, a handover-aware TAS-CQF cooperative scheduling deterministic guarantee method is proposed. This method jointly adjusts the CQF period offset and TAS transmission phase based on the comprehensive link delay to achieve period alignment under dynamic link conditions. Furthermore, deterministic network calculus is used to obtain the delay boundaries of the old and new paths, quantify the maximum path differential delay, and adaptively configure the MBB dual-path protection interval and reordering buffer accordingly to ensure continuous and orderly transmission of services during handover. Simulation results show that the proposed method can effectively reduce the packet loss rate and maximum end-to-end delay of time-sensitive services, improve effective throughput, maintain good transmission stability under satellite handover and delay disturbance conditions, and reduce redundant protection overhead in handover scenarios.

Key words: LEO satellite network, TAS-CQF, Coordinated scheduling, Certainty guarantee, Network Calculus

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修回日期: XXXX-XX-XX

通信作者: 郭于维, gyw20020302@163.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 62471181); 河北省自然科学基金青年项目(No. F2024502014)

Foundation Items: Project supported by "National Natural Science Foundation of China "(Grants No. 62471181), Hebei Provincial Natural Science Foundation Project for Young Scientists (No. F2024502014)

0 引言

低轨卫星网络具有覆盖范围广、部署灵活和受地面环境制约较小等特点,可为偏远地区、海上设施及灾害应急等场景提供补充通信链路,是空天地一体化网络的重要组成部分^[1]。随着低轨卫星系统逐步承载工业控制、应急指令等时间敏感业务,通信网络不仅需要提高资源利用率,还需保证关键业务的有界时延、低抖动和高可靠传输^{[2][3]}。现有研究通过动态资源配置改善低轨卫星网络中时延敏感业务的服务能力^[4],并利用多路径路由增强对时变拓扑的适应能力^[5]。然而,卫星高速运动导致传播时延持续波动和服务卫星频繁切换,传统方法难以抑制切换期间的时延突增、报文乱序和丢失。

时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)为解决上述确定性传输问题提供了可借鉴的技术基础。IEEE 802.1Qbv 标准^[6]定义的时间感知整形(Time-Aware Shaper, TAS)通过门控控制列表为不同业务配置发送窗口,实现时间敏感业务与普通业务的隔离。针对时钟偏差和流量扰动可能造成的门控窗口失配, Ma 等^[7]提出了鲁棒 TAS 调度方法。面向变电站通信场景,贾惠彬等^[8]建立了变电站时间敏感业务最大时延计算方法,验证了 TAS 在电力业务确定性承载中的应用价值。

由于 TAS 主要控制节点内部的业务发送,跨节点周期转发还需依赖 IEEE 802.1Qch 标准^[9]定义的循环排队转发(Cyclic Queuing and Forwarding, CQF)机制,该机制通过接收队列与发送队列周期性交替,使报文按照稳定节拍逐跳推进。Yan 等^[10]通过规划报文注入时间改善到达时刻与接收周期的匹配关系;Huang 等^[11]利用扩展循环队列和周期映射提高 CQF 的调度适应性;Wang 等^[12]则联合优化路径选择与周期配置,增强多跳业务的端到端确定性。进一步地, Nie 等^[13]提出 TAMCQF 机制,将 TAS 与多组 CQF 队列结合,提高了混合业务的可调度性和队列利用率。然而,上述方法主要面向传播时延相对稳定的地面网络,通常依据固定链路时延配置 TAS 门控参数和 CQF 周期映射。在低轨卫星高速运动过程中,星地及星间链路距离随时间变化,报文实际到达时刻会相对于预设 CQF 周期边界发生动态偏移。若继续采用固定 TAS 发送相位和静态 CQF 周期映射,经门控释放的报文可能提前或滞后于目标接收周期到达,进而产生跨周期等待

和额外排队时延。因此,地面网络中的固定 TAS-CQF 映射关系难以直接适用于低轨卫星动态链路。

围绕确定性调度机制向低轨卫星网络的扩展, Wang 等^[14]提出区域化循环转发机制,以缓解大规模卫星网络统一周期配置困难的问题;Liu 等^[15]设计优先级循环队列转发机制,以改善多级时间敏感业务的吞吐量和丢包率;Cao 等^[16]将周期调度与路由策略相结合,以控制巨型星座中的多跳传输时延;Xing 等^[17]通过联合配置星内有线时隙和星间无线时隙,缓解异构链路传输速率不一致问题。这些方法虽然增强了卫星网络的周期调度能力,但主要关注稳态条件下的队列、时隙或路径配置,尚未解决卫星切换时的路径迁移与周期重配置协同问题。

服务卫星切换会进一步改变报文的接入节点、转发路径和调度状态。童文婷等^[18]提出基于虚拟拓扑的低轨卫星路由切换方法,以减小拓扑变化对路径重构的影响。Jiang 等^[19]联合设计时空路由、冗余编码和多路径调度,提高卫星网络的确定性传输能力;Li 等^[20]基于网络演算表征业务积压和链路服务能力,提出低轨卫星确定性路由方法;Wang 等^[21]设计端到端协同时延容忍调度机制,以增强多节点之间的时延协调能力。现有方法主要关注链路连通性恢复、路径选择或稳态调度,难以直接处理卫星切换期间的 CQF 周期重新映射、业务迁移以及队列缓存竞争等问题。路径重构虽然能够恢复网络连通性,但不能消除切换过程中服务能力下降和调度状态变化引起的队列积压与时延突增。

IEEE 802.1CB 标准定义的帧复制与消除机制可通过多路径报文复制和重复副本消除,提高时间敏感业务的传输可靠性^[22]。然而,低轨卫星切换前后的新旧路径通常具有不同的传播时延、转发跳数和 CQF 周期长度,同一报文的副本可能跨周期到达目的节点,并产生乱序和重排序等待。王慧姊等^[23]基于网络演算建立了低轨卫星网络时延上界分析模型,Zhang 等^[24]利用鞅理论分析了多跳异构卫星网络的时延边界,为量化卫星路径时延差异提供了理论依据。但现有研究尚未将新旧路径周期差与双路径保护窗口、业务迁移过程和重排序缓存配置统一起来,仅依靠路径重构或报文复制难以同时保证切换期间业务的连续、可靠和按序交付。

综上,现有研究在低轨卫星网络确定性调度与

切换保障方面仍存在三点不足: (1) 动态适配能力不足, 固定 TAS 门控与 CQF 周期映射难以适应链路综合时延变化, 易引发报文跨周期到达和额外等待; (2) 切换协同能力不足, 路径重构与业务迁移、队列调度及缓存管理相互分离, 难以抑制切换期间的时延突增; (3) 双路径保护配置的自适应性不足, 保护时间和重排序缓存多依赖经验设置, 难以根据新旧路径时延差异动态调整并保证切换时延有界。

针对上述三点不足, 本文的主要工作如下:

(1) 构建切换感知的 TAS-CQF 协同调度机制, 根据链路综合时延联合调整 CQF 周期映射与 TAS 发送相位, 实现门控发送与周期转发的动态匹配。

(2) 提出切换感知的双路径保障策略, 利用确定性网络演算获得新旧路径时延边界, 量化最大到达时差, 据此配置先建后拆 (Make-Before-Break, MBB) 保护区间与重排序缓存, 并给出切换状态下的端到端时延上界。

(3) 在不同网络负载和卫星切换条件下开展仿真验证, 结果表明, 所提方法能够降低 TS 业务丢包率和最大端到端时延, 并提高有效吞吐量。

1 TAS-CQF 分层协同调度机制

1.1 卫星切换场景与问题分析

在低轨卫星网络中, 卫星相对地面站高速运动, 星地链路的可见性、传播距离和信道状态随时间持续变化。当当前服务卫星逐渐远离地面站, 或链路仰角、剩余可见时间及链路质量低于设定门限时, 业务需要由当前服务卫星切换至新的可见卫星。对于普通业务, 短时切换主要表现为吞吐量下降或排队时延增加; 而对于时间敏感业务, 切换可能引起时延突增、报文乱序和丢失, 影响业务的连续可靠传输。

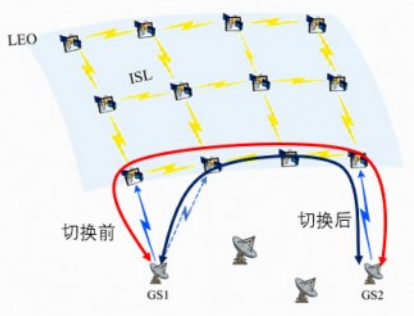


图1 低轨卫星切换场景及新旧传输路径

如图1所示, GS1和GS2通过LEO卫星网络建立端到端通信, 卫星之间通过星间链路 (Inter-Satellite Link, ISL) 进行多跳转发。随着卫星运动, 地面站的服务卫星发生变化, 切换前后的接入链路和星间转发路径随之改变。图中红色和黑色路径分别表示切换前后的业务传输路径, 在MBB保护阶段两条路径可短时并行, 以维持切换期间TS业务的连续传输。

由于新旧路径的传播距离、转发跳数及链路综合时延不同, 同一业务流在切换前后的到达时间和CQF周期位置可能发生变化。若仍沿用原有TAS发送相位和固定CQF周期映射, 报文可能偏离目标接收周期, 产生跨周期等待; 同时, 新旧路径的差分时延还可能造成副本乱序和重排序缓存积压。因此, 低轨卫星切换不仅涉及接入路径重构, 还需要协同调整TAS门控、CQF周期映射以及双路径保护和缓存资源。

基于此, 本文构建TAS-CQF分层协同调度机制, 并进一步针对卫星切换过程设计周期映射与相位补偿、MBB双路径保护及重排序机制, 实现动态链路条件下TS业务的确定性传输。

1.2 TAS-CQF 分层协同机制

该机制将卫星节点内部的微观时间感知调度与卫星节点之间的宏观周期转发相衔接: 节点内采用TAS实施业务分级、队列隔离与门控释放, 节点间采用CQF建立周期化接收与转发关系, 形成“星内精细门控、星间周期推进”的分层调度机制。

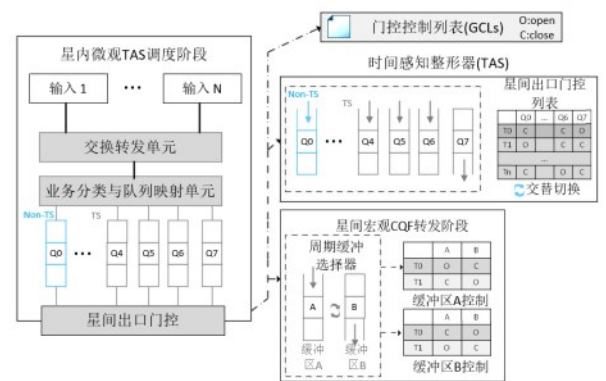


图2 TAS-CQF 分层协同调度机制

如图2所示, 该机制包括星内微观TAS调度阶段和星间宏观CQF转发阶段。前者由输入端口、交换结构、业务分类器、优先级队列及星间发送门

组成, 负责业务识别、队列映射和发送时机控制; 后者通过周期选择器与双缓存交替机制, 实现跨节点周期对齐和多跳有界转发。二者由星间发送门衔接, 使经 TAS 释放的报文按照 CQF 周期规则进入下一跳链路。

根据业务实时性和可靠性需求, 本文将业务划分为时间敏感业务 (TS) 和普通业务 (Non-TS)。所提机制以 TS 业务确定性保障为核心, 同时兼顾 Non-TS 业务的基础传输能力与链路利用效率。

1.3 星内微观 TAS 调度阶段

星内微观 TAS 阶段主要解决多源业务在卫星节点内部的资源竞争问题。业务经交换结构汇聚后, 由分类器依据业务类型、优先级标识和转发方向进行识别, 并映射至相应优先级队列。其中, Non-TS 业务进入低优先级队列 Q0, TS 业务进入 Q1—Q7, 可进一步按照业务的重要程度实施分级映射。

各队列的发送过程由门控控制列表 (Gate Control List, GCL) 统一约束。GCL 通过周期性配置队列门状态, 为 TS 业务划定确定性发送窗口, 并在关键窗口内关闭低优先级队列, 从时间维度抑制普通突发流量对关键业务的干扰。相较于先到先服务或静态优先级调度, TAS 能够显著压缩 TS 业务的排队不确定性, 为保护控制报文提供稳定的发送时机。

1.4 GCL 门控列表与星间发送门

星间发送门是连接 TAS 与 CQF 的关键接口。仅当相应队列在 GCL 中处于开启状态时, 报文才能通过星间发送门进入 CQF 转发阶段。GCL 可对多个业务队列、多个时间窗口及不同门控组合进行统一编排, 并按照设定周期循环执行。

面向低轨卫星网络中的时间敏感业务, 工业控制、应急指令等高实时性报文可配置最高优先级窗口, 周期测量与状态监测业务配置稳定周期窗口, 普通采集、日志及运维业务则利用剩余窗口传输。该配置方式能够体现不同业务的时效性差异, 为关键业务确定性保障与卫星链路资源利用之间的协调提供基础。

1.5 星间宏观 CQF 周期转发阶段

星间 CQF 阶段负责约束报文在多跳卫星链路中的跨节点转发过程。其核心采用双缓存交替机制: 在当前周期内, 一个缓存接收上一跳报文, 另一个缓存发送前一周期已接收报文; 下一周期两个

缓存交换角色, 从而形成“本周期接收、下一周期发送”的逐跳推进模式。

CQF 通过统一周期边界约束各节点的接收、缓存与发送行为, 将逐跳排队等待限制在可分析范围内, 避免多节点独立调度导致抖动累积。同时, 明确的周期位置也为后续卫星切换中的周期映射、路径差异量化和发送相位补偿提供基础。对于周期性业务, CQF 能够维持稳定的跨节点传输节奏。

1.6 TAS-CQF 协同调度流程

所提机制并非 TAS 与 CQF 的简单叠加, 而是面向低轨卫星网络构建的分层协同流程。源节点首先完成业务分类与优先级映射, TAS 依据 GCL 控制队列开闭, 使 TS 报文在预设窗口内优先释放; 报文随后进入 CQF 接收缓存, 并在下一周期转入发送缓存。中间节点持续执行“接收—缓存—发送”过程, 目的节点完成 CQF 接收后, 再通过本地调度交付上层应用。

其中, TAS 主要解决“何种业务优先发送”和“何时允许发送”, CQF 主要解决“报文在哪个周期接收”和“在哪个周期继续转发”。二者协同实现节点内业务隔离与节点间周期推进, 从而抑制多跳传输中的排队抖动。

为提升资源利用率, 本文在不破坏周期调度约束的前提下引入受限窗口复用: 当 TS 队列为空时, Non-TS 业务可利用空闲窗口; 当关键业务积压时, 调度器优先恢复 TS 发送资源。由此, 所提机制在保障关键业务确定性的同时, 兼顾普通业务传输能力, 并为后续面向卫星切换的动态周期映射与双路径保护机制奠定基础。

2 面向卫星切换的 TAS-CQF 调度策略

在所述低轨卫星切换场景下, 固定 TAS 门控参数与 CQF 周期映射难以适应新旧路径传播时延及跳数变化。为此, 本文依据链路综合时延联合调整 CQF 周期偏移和 TAS 发送相位, 利用确定性网络演算获得新旧路径时延边界, 并根据路径差分时延配置 MBB 保护时间和重排序缓存。后续分析涉及的主要符号及其物理含义如表 1 所示。

2.1 周期窗口与业务约束

节点 i 在每个周期内按比例 a_i 将周期划分为 TS 与 Non-TS 业务的保证发送窗口。

$$\begin{aligned} w_i^T &= a_i T_c, \quad 0 \leq w_i^N \leq (1 - a_i) T_c, \\ a_{\min} &\leq a_i \leq a_{\max} \end{aligned} \quad (1)$$

表 1 符号说明

符号	说明
x	业务类别, 取 TS 或 Non-TS
i	转发阶段或链路编号
P_{old}, P_{new}	切换前旧路径与切换后新路径
T_c	CQF 调度周期
$\alpha_x(t)$	业务 x 的到达曲线
σ_x, ρ_x	业务最大突发量与长期到达速率
$\hat{\tau}_i^x(t), \tau_i^x(t)$	名义综合时延与实际综合时延
ε_i	链路综合时延偏差上界
$k_i^x(t), \phi_i^x(t)$	CQF 周期偏移与 TAS 发送相位补偿
$\beta_i^x(t)$	第 i 阶段对业务 x 的服务曲线
$D_x^+(P)$	业务在路径 P 上的确定性时延上界
J	新旧路径的最大差分时延
T_{MBB}	双路径复制保护时间
B_R^{req}	目的端所需重排序缓存容量

式中, T_c 为完整 CQF 调度周期, w_i^T 和 w_i^N 分别为 TS 与 Non-TS 业务的有效发送窗口, $a_{\min}$ 和 $a_{\max}$ 为 TS 窗口比例上下限。周期内未分配的剩余时间用于设置保护间隔、吸收同步误差及协议处理开销。调度策略可依据队列状态调整 a_i ; TS 队列为空时, Non-TS 可临时复用空闲窗口, 但该机会服务不计入其最低保证服务。

为使后续确定性网络演算成立, 两类业务在进入 TAS-CQF 调度域前均经过入口监管。设业务 x 的最大突发量和长期受控到达速率分别为 σ_x 和 ρ_x , 则任意区间 $[s, t]$ 内满足

$$A_x(t) - A_x(s) \leq \alpha_x(t - s), \quad \alpha_x(u) = \sigma_x + \rho_x u \quad (2)$$

式 (2) 通过限制业务突发程度, 为路径服务能力和端到端时延边界分析提供统一的到达约束。

2.2 CQF 周期映射与 TAS 相位补偿

低轨卫星运动使链路传播距离持续变化, 同时轨道预测、链路测量、时间同步和星上处理过程均存在一定误差。若仅依据单一确定时延将报文名义到达时刻配置在 CQF 周期边界附近, 小幅时延扰动即可使报文落入相邻周期。因此, 需要在周期映射过程中显式考虑链路时延的不确定性。

设根据轨道预测和链路状态测量获得链路 i 在时刻 t 的名义综合时延为

$$\hat{\tau}_i^x(t) = \frac{\hat{d}_i(t)}{c} + \frac{L_x}{C_i} + \hat{p}_i \quad (3)$$

其中, $\hat{d}_i(t)$ 为链路预测距离, c 为光速, L_x 为业务 x 的最大报文长度, C_i 为链路保证传输速率, $\hat{p}_i$ 为节点名义处理时延。

考虑链路测量误差、星上处理时延波动等, 将实际综合时延表示为

$$\tau_i^x(t) = \hat{\tau}_i^x(t) + \delta_i(t), \quad |\delta_i(t)| \leq \varepsilon_i, \quad (4)$$

其中, $\delta_i(t)$ 表示实际综合时延相对于名义值的偏差, ε_i 为其上界, 由轨道预测、链路测量、时间同步及星上处理时延波动共同确定。

为避免报文名义到达位置过于靠近周期边界, 在目标 CQF 接收周期内部设置安全接收相位 g_i , 并要求

$$\varepsilon_i < g_i < T_c - \varepsilon_i, \quad 2\varepsilon_i < T_c. \quad (5)$$

在无其他周期内位置约束时, 可优先将 g_i 设置于目标接收周期中部, 以获得较大的双侧时延容忍裕量。

根据名义综合时延和安全接收相位, 业务 x 在链路 i 上所需的 CQF 周期偏移及目标接收周期确定为

$$\begin{cases} k_i^x(t) = \max \left\{ 0, \left\lceil \frac{\hat{\tau}_i^x(t) - g_i}{T_c} \right\rceil \right\}, \\ n_i^R = n_i^S + k_i^x(t), \end{cases} \quad (6)$$

其中, n_i^S 和 n_i^R 分别表示发送周期号和目标接收周期号。

在此基础上, TAS 发送相位补偿设置为

$$\phi_i^x(t) = k_i^x(t)T_c + g_i - \hat{\tau}_i^x(t) \quad (7)$$

报文从发送周期 n_i^S 的相位 $\phi_i^x(t)$ 处发出后, 其实际到达时刻为

$$t_i^{\text{arr}} = n_i^R T_c + g_i + \delta_i(t) \quad (8)$$

由式 (4) 和式 (5) 进一步有

$$0 < g_i - \varepsilon_i \leq g_i + \delta_i(t) \leq g_i + \varepsilon_i < T_c. \quad (9)$$

因此, 只要实际综合时延偏差不超过给定的不确定性上界, 报文仍落在目标周期 n_i^R 内, 从而避免小幅时延扰动造成的跨周期到达。

实际运行中, 当链路时延变化未引起周期偏移改变时, 仅更新 TAS 发送相位; 当时延变化跨越周期边界或超出安全裕量时, 再联合更新 CQF 周期偏移与 GCL 参数, 以减少频繁重构带来的控制

开销。

2.3 路径服务模型与时延边界

定义 G_i^x 为业务 x 在节点 i 的最大 TAS 门控等待。根据节点保证发送窗口，其最低保证服务速率为

$$R_i^x = C_i \frac{w_i^x}{T_c} \quad (10)$$

设 k_i^{x*} 为链路 i 在该区间内的最大周期偏移，即采用该区间内可能出现的最坏周期映射状态。第 i 个 TAS-CQF 转发阶段的保守固定时延为

$$\Theta_i^x = G_i^x + (k_i^{x*} + 1)T_c \quad (11)$$

其中， G_i^x 对应 TAS 最大门控等待， $k_i^{x*}T_c$ 为链路周期映射时延，额外的 T_c 表示 CQF 接收队列向发送队列切换产生的最大等待。

由此，节点及输出链路的速率一时延服务曲线为

$$\beta_i^x(t) = R_i^x [t - \Theta_i^x]^+ \quad (12)$$

对包含若干转发阶段的路径 P ，定义周期长度

$$\Omega_x(P) = \sum_{i \in P} (k_i^{x*} + 1) \quad (13)$$

路径最低保证服务速率和固定服务时延分别为

$$\begin{aligned} R_x(P) &= \min_{i \in P} R_i^x, \\ T_x(P) &= \sum_{i \in P} G_i^x + \Omega_x(P)T_c + T_d^x \end{aligned} \quad (14)$$

其中， T_d^x 为目的节点接收处理与业务交付的最大固定时间。

路径由多个转发阶段串联构成，端到端服务曲线由各阶段服务曲线做最小加卷积得到。对式 (12) 的速率一时延服务曲线，卷积结果取各阶段的最低服务速率并累加固定时延，因此得到式 (15) 中的路径服务参数。

根据网络演算的最小加卷积性质，端到端服务曲线及其参数为

$$\beta_x^P(t) = \bigotimes_{i \in P} \beta_i^x(t) = R_x(P) [t - T_x(P)]^+ \quad (15)$$

为使路径具有有限的确定性时延边界，业务到达速率必须小于路径保证服务速率，即

$$\rho_x < R_x(P), \quad x \in \{T, N\} \quad (16)$$

结合式 (2) 的漏桶到达曲线和式 (15) 的速率一时延服务曲线，得到业务 x 在路径 P 上的确定性时延上界

$$D_x^+(P) = T_x(P) + \frac{\sigma_x}{R_x(P)} \quad (17)$$

式 (17) 采用最大门控等待、最大周期偏移及业务突发上界，因此所得结果为最坏条件下的确定性时延界，具有一定保护裕量。后续通过依据当前路径差分时延动态配置 MBB 保护时间和重排序缓存，降低固定最坏配置造成的资源冗余。

为了计算新旧路径可能产生的最大到达时间差，还需给出路径时延下界。忽略排队等待和 TAS 门控等待，并采用切换区间内各链路的最小综合时延，可得

$$D_x^-(P) = \sum_{i \in P} \tau_i^{x, \min} + T_{d, \min}^x \quad (18)$$

其中， $\tau_i^{x, \min}$ 为链路 i 在切换分析区间内的最小综合时延， $T_{d, \min}^x$ 为目的端最小处理时间。因此，路径业务时延可由区间 $[D_x^-(P), D_x^+(P)]$ 表征。

2.4 基于差分时延的 MBB 自适应保护

TS 业务采用 MBB 双路径保护。为此需要根据两条路径的时延上下界分别确定新路径的提前启用时间和旧路径的延迟释放时间。

新路径可能相对旧路径滞后的最大时间，以及旧路径可能相对新路径滞后的最大时间分别为

$$\begin{cases} J_{\text{pre}} = \max \{ 0, D_T^+(P_{\text{new}}) - D_T^-(P_{\text{old}}) \}, \\ J_{\text{post}} = \max \{ 0, D_T^+(P_{\text{old}}) - D_T^-(P_{\text{new}}) \}. \end{cases} \quad (19)$$

新旧路径最大差分时延为

$$J = \max \{ J_{\text{pre}}, J_{\text{post}} \} \quad (20)$$

根据 CQF 周期边界，将切换前后的双路径保护时间分别配置为

$$\begin{cases} T_{\text{pre}} = \left\lceil \frac{J_{\text{pre}}}{T_c} \right\rceil T_c, \\ T_{\text{post}} = \left\lceil \frac{J_{\text{post}}}{T_c} \right\rceil T_c. \end{cases} \quad (21)$$

设 T_{ctrl} 为控制器完成新路径建立、转发表下发、CQF 周期参数配置、GCL 更新及队列激活所需时间的可测上界，其周期化准备时间可记为 $T_{\text{setup}} = \lceil T_{\text{ctrl}}/T_c \rceil T_c$ 。

若计划切换时刻为 t_s ，控制器最迟应在 $t_s - T_{\text{pre}} - T_{\text{setup}}$ 时启动新路径准备，并在 $t_s - T_{\text{pre}}$ 前完成全部配置。正式 MBB 保护区间为

$$\mathcal{I}_{\text{MBB}} = [t_s - T_{\text{pre}}, t_s + T_{\text{post}}] \quad (22)$$

其中， T_{setup} 仅表示正式 MBB 保护开始前的控制准

备时间, 不计入式 (22) 定义的双路径复制保护区间。保护区间内, 每个 TS 报文复制为同序号的两个副本, 分别沿 P_{old} 和 P_{new} 传输; 区间结束且新路径满足式 (16) 后, 停止旧路径复制并释放资源。Non-TS 不复制, 旧路径存量报文继续发送, 新到达报文待新路径稳定后迁移。

由式 (19) 一式 (22) 可知, MBB 保护时间随当前新旧路径差分时间动态调整。路径差异较小时缩短双路径复制时间, 路径差异增大时相应扩展保护区间, 从而避免采用固定最大保护窗口造成持续的冗余带宽占用。

2.5 重排序与节点缓存保护

双路径复制可以降低单路径中断造成的报文丢失, 但新旧路径的差分时间可能导致报文乱序。目的节点为每条 TS 业务流维护期望序号和重排序缓存。当到达报文序号等于期望序号时, 立即交付并继续检查缓存中的后续连续报文; 当序号大于期望序号时, 将其写入重排序缓存; 当序号小于期望序号时, 将其作为重复或过期副本丢弃。

在最大差分时间 J 内, TS 业务可能到达的数据量由其到达曲线确定。因此, 重排序缓存容量应满足

$$B_R^{eq} = \alpha_T(J) = \sigma_T + \rho_T \cdot J \leq B_R^{\max} \quad (23)$$

其中, B_R^{eq} 为所需重排序缓存, $B_R^{\max}$ 为目的节点能够提供的最大重排序缓存。式 (23) 表明, 重排序缓存需求随当前路径差分时间 J 动态变化, 可避免不同切换场景均按照最大时延差固定预留缓存。

除目的端重排序外, 切换期间的路径重构和门控更新还可能造成中间节点队列短时积压。对于节点 i , 若 TS 聚合流到达参数为 σ_i^T, ρ_i^T , 则预留缓存满足

$$D_T^{\text{HO}} \leq \begin{cases} \min \{D_T^+(P_{old}), D_T^+(P_{new})\} + J + T_e, & \text{新旧路径均有效} \\ \max \{D_T^+(P_{old}), D_T^+(P_{new})\} + J + T_e, & \text{一条路径短时失效} \end{cases} \quad (27)$$

其中, T_e 为序号判断、重复消除、缓存访问和按序交付的最大附加处理时间。第一种状态采用较早到达的有效副本, 第二种状态以较大的单路径时延上界保证保守性。

2.7 控制开销与计算复杂度

所提机制需要在卫星切换前完成链路综合时延更新、CQF 周期偏移计算、TAS 发送相位调整以及 MBB 参数配置。为避免大规模星座条件下频繁进

$$B_i^T \geq \sigma_i^T + \rho_i^T \Theta_i^T \quad (24)$$

其成立条件为 $\rho_i^T < R_i^T$ 。其中, 突发参数应根据上游输出到达曲线逐跳更新, 不能在所有节点直接使用源端初始值。

节点总缓存为 B_i 时, Non-TS 业务允许占用的最大空间为 $B_i - B_i^T$ 。当 TS 到达而剩余缓存不足时, 设到达量、剩余空间和 Non-TS 占用量分别为 U_i 、 F_i 和 Q_i^N , 则

$$\begin{cases} B_i^{\text{push}} = \min \{Q_i^N, [U_i - F_i]^+\}, \\ U_i^{\text{in}} = \min \{U_i, F_i + B_i^{\text{push}}\}. \end{cases} \quad (25)$$

当缓存充足时, 两类业务均正常入队; 当缓存紧张时, 节点通过限制 Non-TS 业务占用并释放其部分缓存, 优先保证 TS 报文入队。

2.6 切换状态下的端到端时延分析

本节在上述基础上进一步推导切换状态下 TS 与 Non-TS 业务的端到端时延。TS 为确定性保障对象, Non-TS 仅在经整形且配置保证窗口时给出迁移时延包络。

对于 Non-TS 业务, 切换前已经进入旧路径的报文继续按照旧路径完成传输; 切换阶段新到达报文则在新路径稳定后迁移。设该过程的最大迁移等待为 T_m 。因此, Non-TS 业务的切换状态端到端时延上界为

$$D_N^{\text{HO}} \leq \max \{D_N^+(P_{old}), T_m + D_N^+(P_{new})\} \quad (26)$$

式中, 第一项对应继续沿旧路径完成传输的报文, 第二项对应等待新路径稳定后迁移的报文。

对于 TS 业务, 在 MBB 保护阶段接收端优先采用较早到达的有效副本, 并利用序号进行重复消除和重排序。考虑切换过程中可能存在一条路径短时失效, 为给出统一的确定性上界, 两种情况下的 TS 切换时延上界统一表示为

行全网重配置, 本文采用受影响路径局部更新方式。

在新旧路径已经由上层路由或切换模块确定的条件下, 对单条链路计算综合时延、周期偏移和发送相位均只涉及常数次数运算。若旧路径和新路径分别包含 H_{old} 和 H_{new} 个转发阶段, 则一次切换中的调度参数更新及路径边界计算复杂度为 $O(H_{old} + H_{new})$ 。该复杂度不包括独立路由算法自身的路径

搜索过程。

控制面开销主要包括链路状态上报和调度参数下发。设参与状态上报的节点数及单节点消息长度分别为 N_s 和 b_s ，仅调整 TAS 相位的节点数为 N_ϕ ，需要联合更新 CQF 周期映射和 GCL 参数的节点数为 N_G ，相应消息长度分别为 b_ϕ 和 b_G ，平均参数更新间隔为 T_u ，则

$$V_{ctrl} = N_s b_s + N_\phi b_\phi + N_G b_G, \quad R_{ctrl} = \frac{V_{ctrl}}{T_u}. \quad (28)$$

其中， V_{ctrl} 表示一次参数更新产生的控制数据量， R_{ctrl} 表示相应平均控制带宽需求。较复杂的轨道预测、路径时延边界及调度参数计算由网络控制器完成，星上节点主要执行 GCL 配置、CQF 队列映射和转发表切换。由此避免在数据平面进行逐报文全局计算，降低星上节点的实时计算负担。

3 仿真与结果分析

3.1 仿真模型与参数设置

为验证所提切换感知 TAS-CQF 协同调度方法在不同网络负载及服务卫星切换条件下的传输性能，本文基于 MATLAB R2025b 构建报文级离散事件仿真环境，并与尽力而为转发、标准 CQF^[9] 和 CPF^[14] 进行对比。性能评价主要包括丢包率、最大端到端时延、有效吞吐量，并进一步从切换瞬态、时延扰动鲁棒性及 MBB 资源开销等方面验证所提机制。端到端时延自报文产生时刻起计算，直至目的端完成重复消除、重排序和最终按序交付，包括传播、串行化、节点处理、TAS 门控等待、CQF 周期等待及接收端处理等时延。

仿真采用 Walker 星座构型，共部署 24 颗低轨卫星，均匀分布于 4 个轨道面，每轨 6 颗卫星，轨道高度为 1000km，星间链路带宽为 1Gbit/s。卫星轨道模型主要用于生成服务卫星切换场景及切换时刻附近的新旧路径、链路斜距和传播时延变化；在此基础上截取切换附近的局部时间区间开展报文级调度仿真，重点刻画 TAS 门控、CQF 周期映射、MBB 双路径保护及重排序过程。CQF 调度周期设为 1ms，节点总缓存容量设为 500KB，主要参数如下表 2 所示。

切换专项实验从星座拓扑中选取一次具有代表性的服务卫星切换，其中旧路径包含 3 个 TAS-CQF 转发阶段，新路径包含 2 个转发阶段。切换期间链

表 2 仿真参数

参数	取值
卫星数量	24
轨道面数量	4
每轨道卫星数	6
轨道高度	1000km
星间链路带宽	1Gbps
CQF 调度周期	1ms
队列缓存容量	500KB
归一化负载范围	0-1
TS 业务比例	20%
Non-TS 业务比例	80%

路斜距随卫星运动变化，并据此更新传播时延，再结合报文长度、链路速率和节点处理参数获得链路综合时延。

业务由 TS 和 Non-TS 两类报文组成，长期业务量占比分别为 20% 和 80%，报文长度均为 1000B。TS 报文采用泊松到达模型，Non-TS 报文采用 Pareto On/Off 突发模型，并在 On 阶段按泊松过程产生。两类业务进入调度域前均满足到达约束。负载扫描实验通过调整长期到达速率改变归一化网络负载，切换及鲁棒性实验选取中高负载场景，以增强路径切换和队列竞争的可观测性。

每次报文级仿真持续 2s，计划切换时刻设在仿真中部，即 $t_s=1s$ ，以保证切换前后均具有稳定运行和恢复观测区间。业务在前 1.8s 内产生，剩余时间用于完成在途报文转发及重排序处理，避免仿真结束造成未完成报文的误统计。每个负载点、扰动等级及资源场景均独立运行 50 次，并采用固定且可复现的随机种子序列。丢包率和有效吞吐量取 50 次实验均值，最大端到端时延统计各次实验最大值，并保存原始数据及 95% 置信区间。

为保证比较公平，四种机制采用相同的卫星拓扑、链路带宽、业务输入、节点缓存、随机种子和切换时刻。尽力而为转发采用先进先出 (First In, First Out, FIFO)，标准 CQF 采用严格 Rx/Tx 双队列周期转发，CPF 按照文献[14]的循环优先机制实现；上述对比机制采用先断后连 (Break-Before-Make, BBM) 方式完成服务路径切换。本文方法采用动态 TAS 窗口、CQF 周期偏移与发送相位联合调整、TS 缓存保护、差分时延驱动的 MBB 保护以

及目的端重复消除和重排序。不同方法仅改变其调度和切换策略。

3.2 丢包率分析

图3和图4分别给出了不同归一化网络负载下四种机制的TS报文丢包率和总流量丢包率。

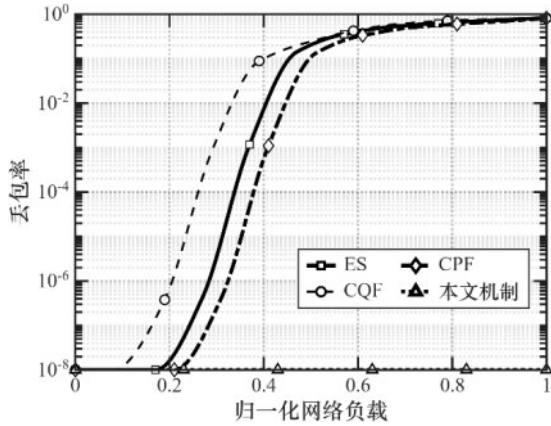


图3 四种机制下TS报文丢包率随归一化网络负载的变化

由图3可见，在轻载条件下，各机制的TS业务丢包率均处于较低水平，此时链路服务能力能够满足业务转发需求，队列积压和跨周期等待现象并不明显。随着网络负载增加，标准CQF首先出现明显丢包，尽力而为转发和CPF的丢包率也随负载进一步增大而快速上升。这表明在高负载和路径切换共同作用下，固定周期映射或缺乏业务隔离的调度方式难以持续保障TS报文的可靠交付。

相比之下，本文机制在整个负载范围内均保持较低的TS业务丢包率。其主要原因在于，本文机制根据链路综合时延动态调整TAS发送相位和CQF周期偏移，使报文能够进入预定的下游接收周期，减少因时序失配造成的跨周期等待和队列积压。同时，在切换阶段采用MBB双路径传输、重复消除和重排序处理，并结合TS业务缓存预留与Non-TS报文释放策略，降低了链路切换和缓存竞争引起的TS报文丢失。

由图4可以看出，总体业务丢包率随网络负载增加而逐步上升。低负载条件下，本文机制的总体丢包率略高于部分对比方法，主要是由于其优先为TS业务预留门控窗口和缓存资源，使Non-TS业务可用服务资源受到一定限制；随着负载进一步增加，本文机制通过门控窗口、周期队列和缓存资源的协同配置，有效缓解了突发流量引起的队列拥塞。因此，在中高负载条件下，本文机制的总体丢

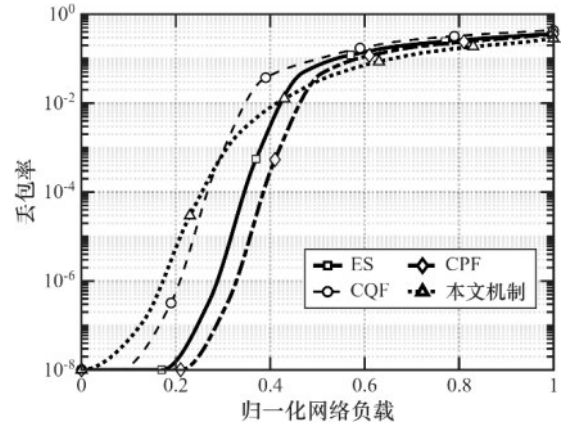


图4 四种机制下总流量丢包率随归一化网络负载的变化

包率逐渐低于其他对比机制，说明其在优先保障TS业务的同时，能够兼顾重载场景下的整体报文交付性能。

3.3 最大端到端时延分析

图5和图6分别给出了四种机制下TS报文和总流量的最大端到端时延。端到端时延从分组产生时刻起计算，直至接收端完成重复消除、重排序并最终按序交付。最大时延仅对成功交付的分组统计，未交付分组计入丢包率而不作为时延样本，因此需要结合上一节的丢包率结果共同评价。

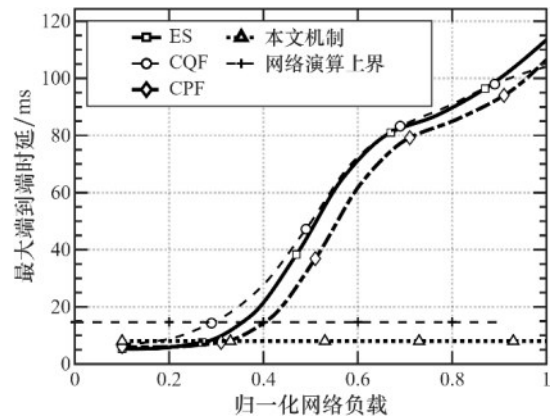


图5 四种机制下TS报文最大端到端时延随归一化网络负载的变化

由图5可见，在轻载条件下，各机制的TS业务最大端到端时延差异相对较小，此时排队等待在端到端时延中的占比较低，时延主要由传播、串行化、节点处理和周期转发等固定分量构成。随着负载增加，尽力而为转发、标准CQF和CPF的最大端到端时延均出现明显增长，表明队列积压、门控等待和跨周期转发逐渐成为主要时延来源。

本文机制的TS业务最大端到端时延随负载增

加变化较小,表现出较好的稳定性。一方面,链路综合时延驱动的周期映射和相位补偿能够提高TAS发送窗口与CQF接收周期之间的匹配程度,避免报文因错过目标周期而产生额外等待;另一方面,TS业务通过独立门控窗口、优先缓存和切换保护机制获得较稳定的服务资源,从而抑制了Non-TS突发流量及卫星切换对其时延的影响。

图中同时给出了基于确定性网络演算推导的TS业务端到端时延上界。本文机制的仿真结果始终位于理论上界以内,说明所建立的到达曲线、路径服务曲线及切换状态时延模型能够对TS业务时延提供有效约束。

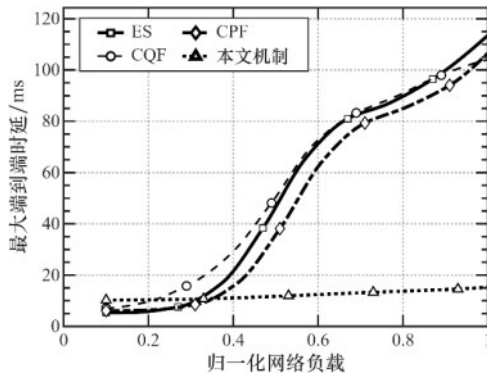


图6 四种机制下总流量最大端到端时延随归一化网络负载的变化

由图6可见,三种对比机制的总体最大端到端时延在中高负载下均快速增加,反映出普通业务在队列拥塞时可能经历较长的排队和周期等待。本文机制的总体最大端到端时延增长相对平缓,说明其不仅能够约束TS业务时延,还能通过协调TAS窗口、CQF队列和缓存资源,缓解Non-TS业务的持续积压,改善重载条件下的整体时延性能。

3.4 吞吐量分析

图7和图8分别给出了四种机制下TS报文有效吞吐量和系统总有效吞吐量。有效吞吐量仅统计接收端最终成功交付的原始分组;MBB产生的重复副本计入链路负载,但不重复计入有效吞吐量。

由图7可见,在轻载阶段,各机制的TS业务有效吞吐量均随业务输入增加而上升,此时网络尚未出现明显拥塞,绝大多数TS报文能够被有效交付。随着负载进一步提高,尽力而为转发、标准CQF和CPF的TS业务吞吐量达到峰值后逐渐下降,说明大量TS报文因队列溢出、周期失配或切换过程中的传输中断而未能成功到达目的端。

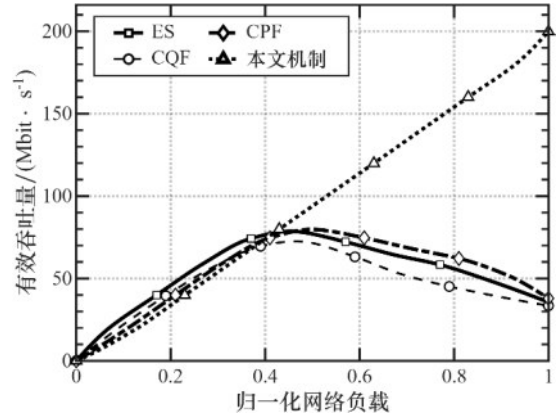


图7 四种机制下TS报文有效吞吐量随归一化网络负载的变化

本文机制的TS业务有效吞吐量则随网络负载持续增长,未出现明显下降趋势。这是因为本文机制通过TAS窗口隔离为TS业务提供稳定的发送机会,并利用CQF周期对齐降低跨周期转发概率。在卫星切换过程中,MBB双路径保护能够维持TS报文的连续传输,重排序与重复消除机制则保证了报文的有效、有序交付。因此,即使在重载条件下,本文机制仍能将增加的TS业务输入有效转化为目的端吞吐量。

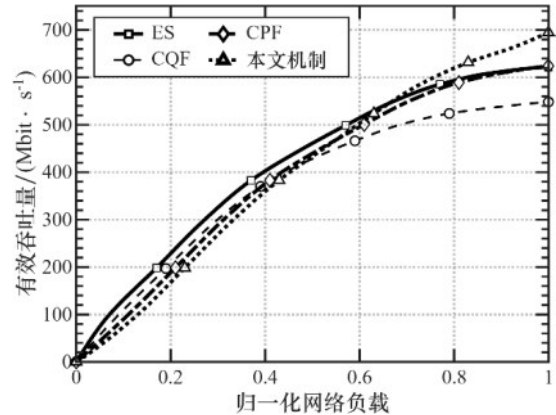


图8 四种机制下系统总有效吞吐量随归一化网络负载的变化

由图8可见,在轻载条件下,各机制的总体有效吞吐量差异较小,说明此时网络资源较为充足,调度策略对整体性能的影响尚不明显。随着网络负载升高,标准CQF、尽力而为转发和CPF的总体有效吞吐量逐渐趋于饱和,部分机制在重载阶段还出现增长放缓或下降现象,其主要原因是队列拥塞和丢包率上升削弱了有效数据交付能力。

相比之下,本文机制在中高负载条件下仍保持较高的总体有效吞吐量。该结果表明,本文机制并

非单纯通过压缩 Non-TS 业务资源来保障 TS 业务,而是通过动态门控配置、周期转发协调和缓存资源保护,提高了链路及队列资源的整体利用率,在优先保障时间敏感业务的同时,也改善了系统的总体传输效率。

3.5 卫星切换瞬态丢包分析

为直接考察服务卫星切换对 TS 业务可靠性的影响,图9给出了切换前后 TS 业务的瞬态丢包率。横坐标采用相对切换时间 $t - t_s$, 其中 $t - t_s = 0$ 表示计划切换时刻。采用固定短时间窗统计窗口内产生但最终未按序交付的 TS 报文比例,空样本不计入统计。

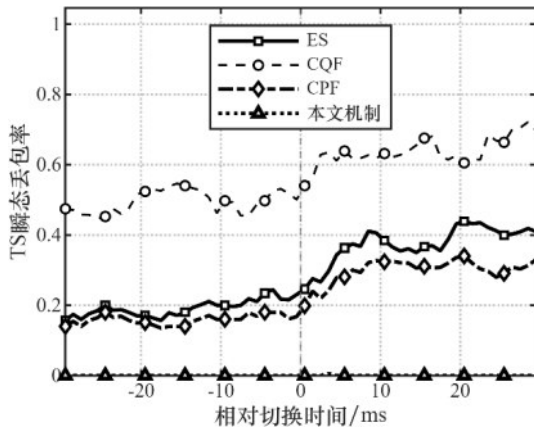


图9 卫星切换前后TS业务瞬态丢包率

由图9可见,尽力而为转发、标准CQF和CPF在切换附近均出现较明显的丢包波动,并在切换后经历一定恢复过程。其主要原因是BBM切换造成短时传输中断,同时新旧路径传播与转发时延不同,使切换前后报文可能出现序号缺口、乱序及按序交付阻塞,因此丢包峰值并不一定严格出现在切换时刻。

相比之下,本文机制在MBB保护区间内对TS报文实施新旧路径复制,接收端采用首个有效副本并进行重复消除和重排序,从而减轻单路径中断及路径差异造成的报文丢失。多次独立实验结果表明,本文机制在切换期间保持较低的瞬态丢包率,说明所提MBB保护能够提高TS业务的连续交付能力。

MBB执行过程中,控制准备与正式双路径复制相互分离。控制器在保护区间开始前完成新路径建立及调度参数配置,正式复制仅在第二章确定的MBB保护区间内进行,避免将控制准备时间重复

计入数据面保护时长。

3.6 时延不确定性鲁棒性分析

为验证所提机制对动态链路时延扰动的适应能力,在名义综合链路时延 $\hat{\tau}$ 上叠加独立有界扰动 δ , 满足 $|\delta| \leq \varepsilon$, 并在相应区间内均匀采样。通过逐步增大 ε/T_c 构造不同扰动强度,每个扰动等级均进行多次独立实验。图10给出了不同时延扰动下TS业务最大端到端时延的变化。

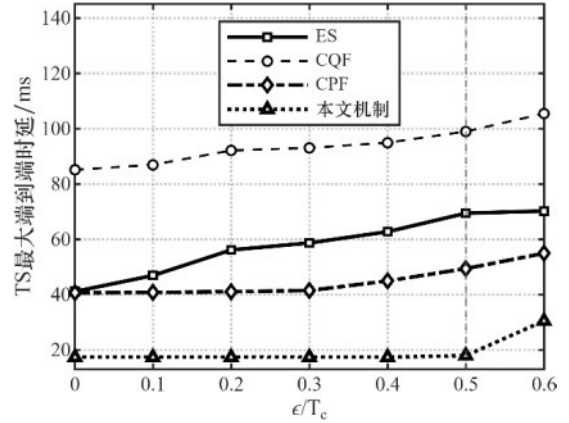


图10 时延不确定性对TS最大端到端时延的影响

本文将安全接收相位设置为目标CQF周期中部。周期安全对齐条件可进一步表示为 $0 \leq \varepsilon/T_c < 0.5$, 因此,本实验中低于0.5的扰动等级属于理论安全范围,达到或超过0.5的情况用于考察超出安全裕量后的性能变化。当周期偏移未发生变化时仅调整TAS发送相位;当跨越周期边界或安全条件不满足时,再联合更新CQF周期映射与GCL参数。

由图10可见,在理论安全范围内,本文机制的TS最大端到端时延整体保持稳定;随着扰动幅度进一步增大并接近或超过安全条件,跨周期等待概率增加,最大端到端时延随之上升。结果表明,安全相位与分级参数更新能够提高TAS-CQF调度对有界时延扰动的适应能力。

3.7 MBB资源效率与控制开销分析

为评价固定最坏保护配置可能造成的资源冗余,设置S1—S5五种不同路径差异程度的切换场景。其中,S3为默认切换场景,S1和S2表示新旧路径差异相对较小的情况,S4和S5表示路径差异逐渐增大的情况,用于构造由小到大的差分时延条件。上述场景仅用于分析路径差异变化对MBB资源配置的影响,并不表示实际卫星轨道距离整体按

比例变化。

固定配置在所有场景中均采用最大路径差异对应的 MBB 保护参数, 本文方法则根据各场景计算得到的 J_{pre} 、 J_{post} 和 J 动态配置保护时间与重排序缓存。两种方法在同一场景下采用完全相同的业务轨迹和时延扰动。

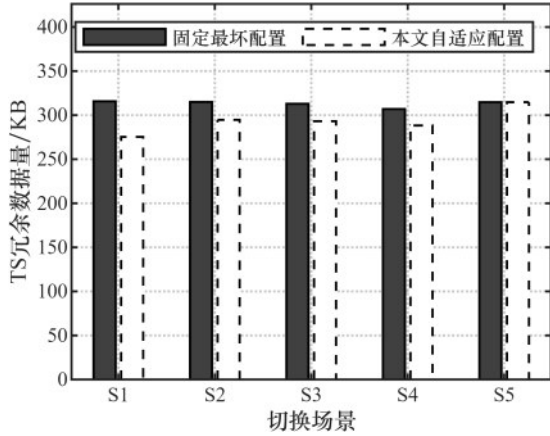


图 11 固定最坏配置与自适应配置的 MBB 冗余数据量

由图 11 可见, 在多数非最坏切换场景中, 自适应配置能够不同程度地减少 TS 冗余副本数据量; 随着新旧路径差异增大, 两种配置的资源开销逐渐接近, 在最坏场景下两者基本一致。该结果表明, 基于差分时延的 MBB 参数配置能够减少固定最大保护窗口造成的不必要带宽占用, 但在最坏路径条件下仍需保留完整保护资源。

重排序缓存同样根据最大路径差分时延动态配置。当理论缓存需求低于可用容量时, 可满足式 (23) 的确定性缓存条件; 若资源受限场景下实际配置低于理论需求, 则该场景仅用于评价有限缓存条件下的运行性能, 不能作为最坏情况下的确定性保证。实际部署时应通过增加重排序缓存、收紧入口突发约束或降低路径差分时延满足理论容量要求。

控制开销方面, 仿真结果表明, 大多数参数调整仅涉及 TAS 发送相位更新, 完整 CQF 周期映射与 GCL 重配置仅在周期映射发生变化时触发, 说明分级参数更新能够降低完整调度重构频率。对于分别包含 H_{old} 和 H_{new} 个转发阶段的新旧路径, 调度参数及路径时延边界计算复杂度为 $O(H_{old} + H_{new})$, 复杂的轨道预测、路径边界及调度参数计算由控制器完成, 星上节点主要执行局部

GCL、CQF 队列映射和转发表更新, 从而降低星上实时计算压力。

4 结束语

本文针对低轨卫星动态链路和服务卫星切换造成的 TAS 门控与 CQF 周期转发失配问题, 提出一种切换感知的 TAS-CQF 协同调度确定性保障方法。该方法依据链路综合时延联合调整 CQF 周期偏移与 TAS 发送相位, 并通过安全接收相位增强周期映射对有界时延扰动的适应能力; 利用确定性网络演算获得新旧路径时延边界和最大路径差分时延, 据此自适应配置 MBB 保护区间与重排序缓存, 实现切换期间 TS 业务的连续、有序传输。

仿真结果表明, 所提方法能够在不同网络负载下有效降低 TS 业务丢包率和最大端到端时延, 并提高有效吞吐量; 在服务卫星切换过程中能够抑制 TS 业务瞬态丢包, 同时在理论安全范围内保持较好的时延鲁棒性。与固定最坏保护配置相比, 差分时延驱动的 MBB 能够根据不同切换场景按需调整双路径保护资源, 分级参数更新也减少了完整 CQF 周期映射和 GCL 重配置频率。

本文目前主要采用报文级调度和有界时延扰动模型, 尚未充分考虑无线信道衰落、链路重传以及大规模星座并行切换带来的控制面开销。后续将结合更精细的星地链路模型和半实物实验平台, 进一步研究复杂链路环境及多切换场景下的确定性调度与资源协同问题。

参考文献:

- [1] Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, et al. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [2] Al-Hraishawi H, Chougrani H, Kisseleff S, et al. A survey on nongeostationary satellite systems: The communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(1): 101-132.
- [3] Finn N, Thubert P, Varga B, et al. Deterministic networking architecture [S]. RFC 8655. IETF, 2019.
- [4] Dong F H, Zhang Y S, Liu G Y, et al. Delay-sensitive service provisioning in software-defined low-earth-orbit satellite networks[J]. Electronics, 2023, 12(16): 3474.
- [5] Huang Y X, Yang D, Feng B H, et al. A GNN-enabled multipath routing algorithm for spatial-temporal varying LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(4): 5454-5468.
- [6] IEEE. Enhancements for Scheduled Traffic[S]. IEEE Std 802.1Qbv-2015, 2016.
- [7] Ma Y Y, Zhang T, Feng X Q, et al. Improving robustness of time-aware

- shaper in time-sensitive networking[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(13): 25211-25223.
- [8] 贾惠彬, 胡子函, 吴堃, 等. 基于时间敏感网络的变电站通信网络最大时延计算方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 192-199.
- Jia H B, Hu Z H, Wu K, et al. Maximum delay calculation method for substation communication networks based on time-sensitive networking[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 192-199 (in Chinese).
- [9] IEEE. Cyclic Queuing and Forwarding[S]. IEEE Std 802.1Qch-2017, 2017.
- [10] Yan J L, Quan W, Jiang X Y, et al. Injection time planning: Making CQF practical in time-sensitive networking [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2020: 616-625.
- [11] Huang Y D, Wang S, Zhang X Y, et al. Flexible cyclic queuing and forwarding for time-sensitive software-defined networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023, 20(1): 533-546.
- [12] Wang X L, Yao H P, Mai T L, et al. Joint routing and scheduling with cyclic queuing and forwarding for time-sensitive networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(3): 3793-3804.
- [13] Nie H R, Li S S, Liu Y. TAMCQF: Hybrid traffic scheduling mechanism integrating TAS and Multi-CQF in TSN[C]//Proceedings of the 2023 IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 329-334.
- [14] Wang F, Wu D, He W J, et al. CPF: Bridging time-sensitive networks into large-scale LEO satellite networks[C]//Proceedings of the 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1304-1309.
- [15] Liu W, Xiao N, Liu B, et al. Optimizing time-sensitive traffic scheduling in low-earth-orbit satellite networks[J]. Sensors, 2025, 25(14): 4327.
- [16] Cao B, Fan X, Hong Y, et al. Research on time-sensitive service transmission routing and scheduling strategies based on optical interconnect low Earth orbit mega-constellations[J]. Applied Sciences, 2025, 15(7): 3843.
- [17] Xing Y, Zhao G, Han Z. Integrated scheduling algorithm based on matching game theory in LEO satellite networks[J]. Sensors, 2026, 26(4): 1356.
- [18] 童文婷, 黄圣春, 王玲. 基于虚拟拓扑的低轨卫星路由切换算法仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(9): 31-34.
- Tong W T, Huang S C, Wang L. Simulation of LEO satellite routing handover algorithm based on virtual topology[J]. Computer Simulation, 2021, 38(9): 31-34 (in Chinese).
- [19] Jiang X F, Huang Y H, Li J J, et al. Spatio-temporal routing, redundant coding and multipath scheduling for deterministic satellite network transmission[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(5): 2860-2875.
- [20] Li S Y, Wang F, Mai R M, et al. Network calculus-based deterministic routing for LEO satellite networks [C]//Proceedings of ICC 2025 - IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2025: 4707-4713.
- [21] Wang F, Yao H P, He W J, et al. Time-sensitive scheduling mechanism based on end-to-end collaborative latency tolerance for low-earth-orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(6): 5149-5162.
- [22] IEEE. Frame Replication and Elimination for Reliability[S]. IEEE Std 802.1CB-2017, 2017.
- [23] 王慧姊, 孙雷, 王健全, 等. 基于网络演算的 LEO 卫星网络时延上界分析研究[J]. 通信学报, 2025, 46(4): 80-90.
- Wang H Z, Sun L, Wang J Q, et al. Delay upper-bound analysis of LEO satellite networks based on network calculus[J]. Journal of Communications, 2025, 46(4): 80-90 (in Chinese).
- [24] Zhang Q Q, Zhu Y, Zhou D, et al. Martingale theory-based delay bound analysis for multi-hop heterogeneous satellite networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(7): 5198-5213.



李保罡(1980—), 男, 博士, 华北电力大学教授, 主要研究方向为电力信息通信技术、智能电网技术、人工智能技术应用。



郭于维(2002—), 男, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为确定性网络。



陈晏雅茗(2003—), 女, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为确定性网络。



李承达(2001—), 男, 华北电力大学硕士生, 主要研究方向为确定性网络。