

星地融合 TSN 的 确定性网关调度机制研究

Deterministic Gateway Scheduling Mechanism for Satellite-Terrestrial Integrated TSN

王晓博,郑志扬,杨 杉,张祺媛,王 题,叶海纳(中国联通智能城市研究院,北京 100048)

Wang Xiaobo, Zheng Zhiyang, Yang Shan, Zhang Qiyuan, Wang Ti, Ye Haina (China Unicom Smart City Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

为了解决低轨卫星(LEO)在广域网络中由较长传播时延和较大动态抖动造成传统的时间敏感网络(TSN)微秒级调度无法正常工作问题,提出一种端到端低轨星地融合 TSN 架构以及面向高时延抖动星地 TSN 网关(ST-GW)。该架构在控制面上实现 5G 非地面网络(NTN)与 TSN 协议栈的深度融合;在数据面上使用大缓存进行时延补偿,同时采用宏周期排队转发(MCQF)方式。OM-NeT++ 仿真结果表明,ST-GW 可以很好地应对星地链路上时延变化,在长传播时延情况下使端到端抖动小于 $1\ \mu\text{s}$,满足广域确定性通信要求。

Abstract:

To solve the problem that traditional Time-Sensitive Networking (TSN) with microsecond-level scheduling cannot work normally in Low Earth Orbit (LEO) wide-area networks due to long propagation delay and large dynamic jitter, it proposes an end-to-end LEO satellite-terrestrial integrated TSN architecture and a satellite-terrestrial TSN gateway (ST-GW) for high delay jitter. The architecture realizes the deep integration of 5G Non-Terrestrial Network (NTN) and TSN protocol stack on the control plane. On the data plane, large buffer is used for delay compensation, and the Macro-Cycle Queuing and Forwarding (MCQF) mechanism is adopted. OMNeT++ simulation results show that the proposed gateway can well cope with the delay variation on satellite-terrestrial links. Under long propagation delay, the end-to-end jitter is less than $1\ \mu\text{s}$, which can meet the requirements of wide-area deterministic communication.

Keywords:

LEO satellite; Satellite-terrestrial integrated network; Satellite-terrestrial TSN gateway; Jitter control

引用格式: 王晓博,郑志扬,杨杉,等. 星地融合 TSN 的确定性网关调度机制研究[J]. 邮电设计技术, 2026(7): 18-23.

1 概述

6G 星地融合网络(SAGIN)是实现全球泛在连接的重要基础设施,工业控制、无人机协同等关键任务型应用对网络的要求已经从大带宽提升到确定性传输^[1-4]。低轨(LEO)卫星的轨道高度较低,因此具有较低的时延以及较大的地理覆盖范围;而时间敏感网络(TSN)利用精确的时间同步和时间感知整形(TAS)技

关键词:

低轨卫星;星地融合网络;星地 TSN 网关;抖动控制

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.07.004

文章编号: 1007-3043(2026)07-0018-06

中图分类号: TN927

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



术可以在局部区域内提供确定性的传输能力。星地网络结合 TSN 是解决大规模区域内的确定性传输问题的有效方法,但星地融合确定性传输也存在如下问题^[5]。

a) 传播时延与调度周期失配。LEO 星地链路传播时延一般为 $10\sim 30\ \text{ms}$,而传统的局域网 TSN 微秒级调度周期对于如此大的传播时延已经不起作用,容易造成流量错位以及大量数据包丢失现象。

b) 高动态时延抖动。LEO 卫星相对于地面快速移动造成明显的多普勒频移,引起连续时延变化,从

收稿日期: 2026-05-19

而影响传统的静态 TSN 整形对端到端时延保证能力。

c) 缺乏异构协议栈映射方法。TSN 工作在 IEEE 802.3 的数据链路层,但是卫星通信一般使用 3GPP NTN 协议或者自定义的 TDMA 方式,需要低成本的跨协议栈映射以便支持高层的确定性路由,目前大部分研究工作都集中在高层的网络层泛化路由或者整个网络流量的最优分配问题上,在靠近地面站的物理链路上,对时延抖动控制方面的关注较少。

针对上述问题,本文提出一种端到端低轨星地融合 TSN 架构以及面向高时延抖动星地 TSN 网关 (Satellite-Terrestrial Gateway, ST-GW),构建了端到端融合架构,设计了宏周期排队及动态补偿方案 (MCQF),最后利用 OMNeT++ 以及 STK 搭建高度仿真实验室进行了仿真验证。

2 星地融合 TSN 端到端架构详细设计

为了解决传统局域网微秒级 TSN 技术与低轨卫星 (LEO) 网络面临的长时延、高动态的问题,本文基于软件定义网络集中控制思想以及边缘计算的思想^[6],提出一种端到端星地融合 TSN 网络框架^[7],其主要目的是利用边界网关隐藏星地链路差异性,在大范围的空间内实现实时确定的数据传输。

2.1 总体网络拓扑架构

该系统融合卫星通信与地面工业以太网,分为地面 TSN 终端域、星地网关与传输域、集中控制域 3 个部分 (见图 1)。

a) 地面 TSN 终端域。它由分布于各个地点的本地 TSN 孤岛组成,在这些孤岛上部署有各种设备 (比如工业可编程逻辑控制器 PLC、机械臂执行器、高精度传感器等),它们之间使用标准 IEEE 802.1 系列协议进行通信,而卫星网络对于地面终端设备是不可见的,地面终端设备间仍然使用标准二层以太网协议进行通信。

b) 星地网关与传输域。它是本文所提架构中数据的主要承载者,包括低轨卫星骨干节点以及部署在地面端的星地 TSN 网关 ST-GW。ST-GW 又分为用户侧网关 (ST-GW-UE) 和信关站侧网关 (ST-GW-Ground)。所有从星地链路上来的流量都需要先经过 ST-GW 缓存、整形及协议封装。受到星载设备有限的尺寸、质量和功率 (SWaP)^[8] 的限制,LEO 卫星主要是透明中继或者简单路由节点,不做微秒级队列调度^[9]。

c) 集中控制域。主要由集中式网络配置器 (Cen-

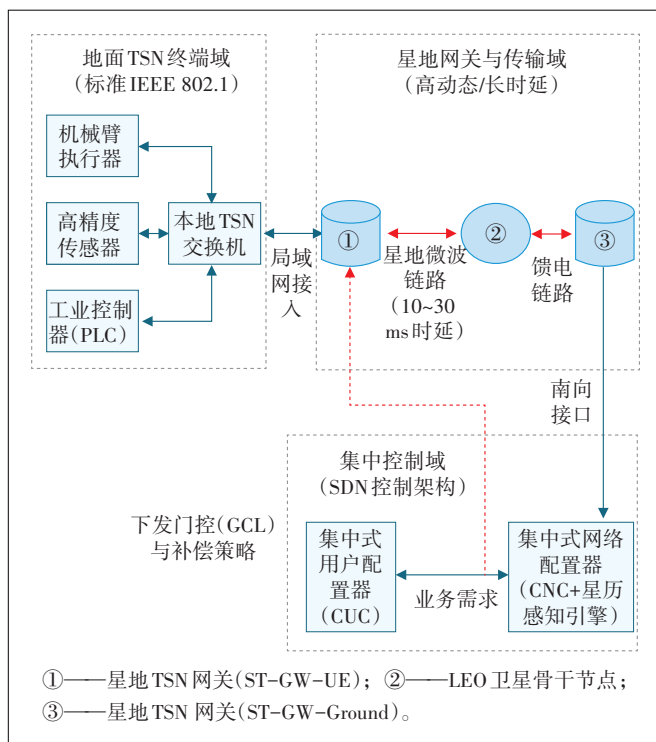


图1 星地融合 TSN 端到端总体拓扑架构

tralized Network Configuration, CNC) 和集中式用户配置器 (Centralized User Configuration, CUC) 组成,在满足 LEO 星座灵活性基础上,CNC 加入了“星历感知引擎”,可以利用卫星轨道根数 (TLE) 预测未来一段时间内的网络结构以及物理传播延迟变化趋势,从而得出最优的整体路径选择及网关整形方案。

2.2 控制面与数据面解耦设计

在星地高动态情况下,分布式路由协议易因星间链路 (ISL) 不断变化引发路由振荡问题,所以该方案采用控制平面与转发平面分离的设计方案。

a) 控制面信令交互,终端设备向 CNC 发送确定性业务请求 (包括最大容忍时延、带宽以及突发量等信息)。CNC 利用整个系统的星历信息得到从源站到目的站的时空确定性路径^[10]之后,就可以通过卫星链路将预先计算好的宏周期门控控制列表 (GCL) 和动态时延补偿参数传送给沿途各个 ST-GW。而在实际工程应用过程中,建议使用带内管理方式 (In-band Management),即在网络中创建一个较高优先级专门用于控制的承载 (例如 5QI=5 的信令流),通过 Netconf/YANG 等标准网络配置协议将 GCL 参数下发到 ST-GW,以减少对低层移动通信协议栈过多干预和非标改动。

b) 数据面透明转发,在底层数据到达ST-GW后,网关数据面根据控制面对应GCL对数据包进行分类、存储及调度操作。数据面不需要关心整个网络结构的变化情况,只需要知道如何在指定时间把到来的高优先级以太网帧发送到卫星链路上即可大大减少边缘网关计算量。

2.3 TSN与5G NTN 协议栈深度映射机制

星地融合的关键工程难点在于跨协议栈的透明互通。传统的TSN工作在IEEE 802.3标准的二层(数据链路层),而低轨卫星网络目前正全面向3GPP 5G非地面网络(NTN)标准演进。为了实现确定性保障的无缝延伸,ST-GW必须在数据面完成多层协议栈的深度映射。本文在ST-GW中设计了分层映射机制,主要包括流量承载映射与时钟同步映射。TSN与5G NTN的协议栈深度映射关系如图2所示。

2.3.1 数据面优先级与承载映射

当标准以太网数据帧进入ST-GW后,在网关中读取802.1Q标签里的优先级代码点(Priority Code Point, PCP,取值为0~7)。

a) 时间敏感的流量映射,对于PCP取值为6或者7的确定性控制面流量,由ST-GW去除其以太网外部封装之后映射到5G NTN的专用数据无线承载(DRB)上。而在无线链路控制RLC层面设置成无确认模式(UM)。因为星地链路上下行单程延迟有十几毫秒,使用基于自动重传请求(ARQ)的方法容易使数据包超过其允许的最大延迟。另外,在介质访问控制(MAC)中关闭混合自动重传请求(HARQ)来减少低层传输抖动。但由于微波星地物理信道容易受到外界干扰而产生较高的误码率,如果完全关闭底层重传会带来较大的业务最终丢包率问题,在网关的较高一层(例如PDCP层)使用基于多个连接的数据包复制(PDCP Duplication)冗余方式或在适配层采用简单的前向纠错(FEC)都是达到极低时延及高可靠性的较优解。

b) 尽力而为流量(Best-Effort)映射,对于PCP值较小的一般背景流量(例如视频监控、大容量文件上传等),ST-GW将这些流量映射到被设置为确认模式

(Acknowledged Mode, AM)的DRB上,这在一定程度上保证了传输的可靠性,但牺牲了传输的时间准确性。

2.3.2 时钟同步域的跨界融合

TSN所有调度都是以全网精准的时间同步为基础。但卫星NTN网络采用基于全球导航卫星系统(GNSS)的绝对时间(如北斗、GPS时间),而局域网TSN大多运行IEEE 802.1AS(gPTP)协议分发相对时间。

ST-GW在体系结构上起到边界时钟(Boundary Clock, BC)作用。ST-GW利用自身集成的卫星授时接收器获得NTN域高精度的时间基准,在本地完成时间戳格式转换和频率校正之后,充当主时钟(Grandmaster)给与其相连的地面TSN孤岛发送gPTP消息(Sync和Follow_Up),从而使星地两端物理孤岛在时间基准上保持一致。

3 星地 TSN 网关设计与实现

低轨星地融合TSN端到端方案的有效性在很大程度上取决于边缘网关对外部异构网络特性的隐藏程度。传统的局域网TSN的整形是基于链路传播时延很小(几乎为0)的前提条件,而低轨卫星的高速运行使得星地链路的物理传播时延变化快且变化范围大。本章针对数据面,介绍星地TSN网关的设计及其实现,提出一种星历感知动态时延补偿方法并结合重构宏周期排队转发(MCQF)方法,把无法避免的物理链路变化转换为网关内可控制缓存停留时间,进而消除底层信道对端到端延迟的影响。

基于上述核心设计思想,本文构建了面向星地融合的异构TSN端到端等效传输模型。如图3所示,对于不存在网关干预的原生路径用红色虚线表示,物理时延的剧烈变化会导致严重的周期错位。而在本文设计的ST-GW干预下的路径用蓝色实线表示,网关主动吸收了这部分抖动,成功将高动态的星地异构网络等效为一条具备恒定目标时延(D_{target})的确定性逻辑链路,从而实现了完美的时隙对齐。

3.1 星地链路高动态时延建模

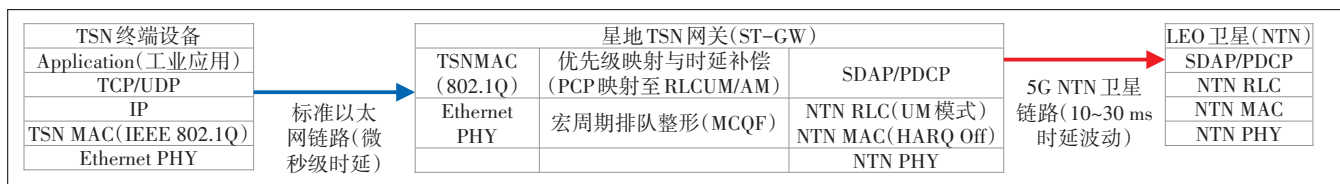


图2 TSN与5G NTN协议栈深度映射

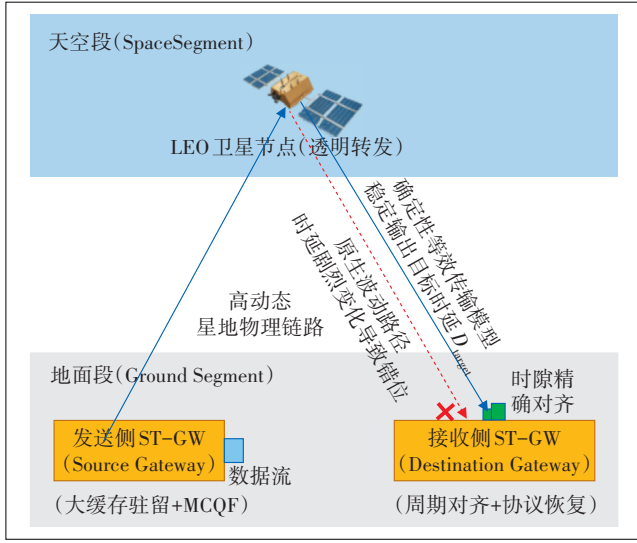


图3 面向星地融合的异构TSN端到端等效传输模型

为便于在网关处准确补偿延迟,在星地物理链路上需建立一个时变几何模型来描述LEO卫星到地面站(或者用户设备)之间的视距距离是一个随时间变化而变化的连续函数。

如果把地球看成一个标准球体,它的半径是 R_E ,LEO卫星的轨道高度是 H 。以地面网关所处的位置为原点,设在某一时刻该卫星相对于地面网关的仰角(Elevation Angle)是 $\theta(t)$,则根据空间三角形的关系(即地球球心、地面网关以及卫星这3点组成的三角形),利用余弦定理可以得到地面网关到该卫星的距离为:

$$d(t) = \sqrt{(R_E + H)^2 - (R_E \cos \theta(t))^2} - R_E \sin \theta(t) \quad (1)$$

由式(1)可知,当卫星在天顶($\theta(t)=90^\circ$)处时,星地距离最近,即 $d_{\min} = H$;而当卫星处在最小通信仰角(如地形遮挡以及天线自身限制等因素造成)时,星地距离最大为 $d_{\max}$ 。因此星地链路自由空间传播时延 $D_{\text{prop}}(t)$ 可通过式(1)得到的 $d(t)$ 和光速 c 计算得出:

$$D_{\text{prop}}(t) = \frac{d(t)}{c} \quad (2)$$

对于典型的LEO场景(如轨道高度为600 km),单向物理链路时延变化范围一般在2~6 ms。另外由于卫星快速移动($v \approx 7.5$ km/s)会引起较大的多普勒效应,从而造成时延变化率(即时延抖动)较大,该影响不能忽略不计,而这种连续时延抖动会使传统的基于固定时间窗口TSN门控调度方法失效。

3.2 基于星历的动态时延补偿机制

为了消除由于动态波动引起的影响,在ST-GW的发送端以及接收端增加了一个“动态时延补偿器”。它的工作原理是基于LEO卫星运行周期较短的特点(可以用两行轨道数据TLE进行预测),在网络关口处人为地加入一个可以变化的时延 $T_{\text{comp}}(t)$,使数据所经过的“物理传播时延+网关补偿时延”的总和在一个大的范围内保持不变。规定系统期望得到的一个固定的映射时延 D_{target} 要大于或者等于系统可能遇到的最大物理传播时延,即:

$$D_{\text{target}} \geq \frac{d_{\max}}{c} + D_{\text{margin}} \quad (3)$$

其中, D_{margin} 是安全裕量,用来抵消底层微小处理时延和物理层重传造成的少量误差,在时间戳为 t_0 时刻,当数据帧要进入LEO物理信道之前,网关计算该数据帧真正需要的补偿缓存时间为:

$$T_{\text{comp}}(t_0) = D_{\text{target}} - D_{\text{prop}}(t_0) \quad (4)$$

采用这种方法,每时隙内进入星地链路一定确定性的流量,在对端网关处可获得的有效空间驻留时间是固定的,因此从逻辑上把高动态LEO链路等效成一个固定时延链路。

3.3 宏周期排队转发机制设计

在使用动态时延补偿消除抖动后,所面临的问题是在时延保持在 D_{target} 的情况下,它本身的大小(以数码秒计)远大于局域网TSN的微秒级调度周期(Cycle Time, T_c)。如果直接应用传统的循环排队转发(CQF, IEEE 802.1Qch)方法会带来很大的周期错配(Cycle Mismatch)。传统的CQF有2个队列(Ping-Pong Queues),一个队列负责入队,另一个负责出队,在相邻节点之间的链路传播时延要小于一个周期 T_c 才能保证正确工作。为解决上述问题,在ST-GW基础上提出了一种新的方法即宏周期排队转发(Macro-Cycle Queuing and Forwarding, MCQF)。

3.3.1 宏周期与周期映射的定义

将时间轴划分为连续的底层调度周期 T_c ,并定义 N 个连续的 T_c 组成一个“宏周期”(Macro-Cycle, T_{MC}):

$$T_{\text{MC}} = N \times T_c \quad (5)$$

参数 N 的取值取决于目标补偿时延 D_{target} ,为了保证数据包在对端能被正确地映射到预期的接收周期中,宏周期的长度必须能够完整覆盖最长传输时延:

$$N = \left\lceil \frac{D_{\text{target}}}{T_c} \right\rceil + 1 \quad (6)$$

在此构架下,假设源ST-GW在第 i 个周期发送了

数据包,经历恒定的大时延 D_{target} 后,到达对端网关的时间必定稳定落在第 j 个接收周期内:

$$j = i + \left\lfloor \frac{D_{\text{target}}}{T_c} \right\rfloor \quad (7)$$

3.3.2 多队列状态机调度逻辑

为满足长时延下大量并行的数据流,ST-GW 出口端口不再仅限于 2 个乒乓队列,而是一个循环队列数组(Queue Array),队列数量为 $M(M \geq 3)$ 。网关调度器采用严格的“封闭—接收—发送”的顺序进行操作(见图 4)。

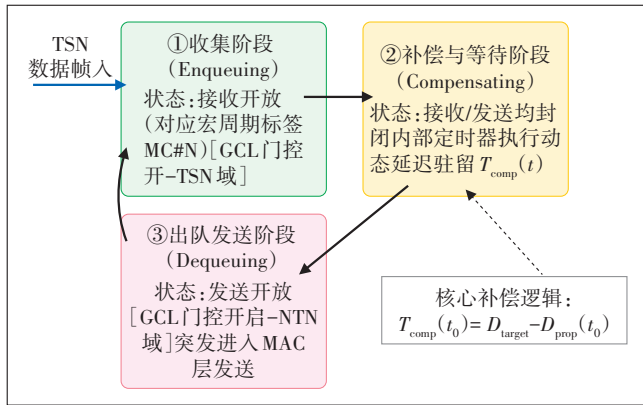


图4 单队列状态机的“封闭—接收—发送”轮转逻辑

如图 5 所示,当星地底层存在高动态物理时延 $D_{\text{prop}}(t)$ 波动时,如果不做处理,会造成接收端严重错位与报文越界(红色虚线)。在利用 MCQF 机制的情况下,在发送端引入动态延迟补偿(用驻留期 $T_{\text{comp}}(t)$ 表示)。针对不同时刻面临不同物理时延的数据帧(用 MC#1 与 MC#2 表示),网关通过自适应调节缓存驻留时间,确保满足 $D_{\text{target}} = T_{\text{comp}}(t) + D_{\text{prop}}(t)$ 的恒等关系。这种方案可以很好地减少物理层时延抖动对队列调度的影响,使星地异构网络数据面时隙对齐,并最终使得端到端等效时延稳定在期望值 D_{target} 附近。

3.4 跨时钟域的时间戳重构

在 ST-GW 的设计中,同步是基础。星地融合网络即作为一种常见的异步时钟岛。卫星端 NTN 基于全球导航卫星系统(GNSS)的绝对时间进行工作,而在地面的工业 TSN 网络则是基于 IEEE 802.1AS(gPTP)相对时间同步。为了使这 2 个时钟域同步,在 ST-GW 中使用一个“边界时钟”(Boundary Clock)。在 ST-GW 中有 2 个独立的时钟计数器,同时用硬件中断捕捉到卫星脉冲秒(PPS)信号,从而得到绝对时间 T_{NTN} 和本地相对时间 T_{TSN} 间的线性对应关系:

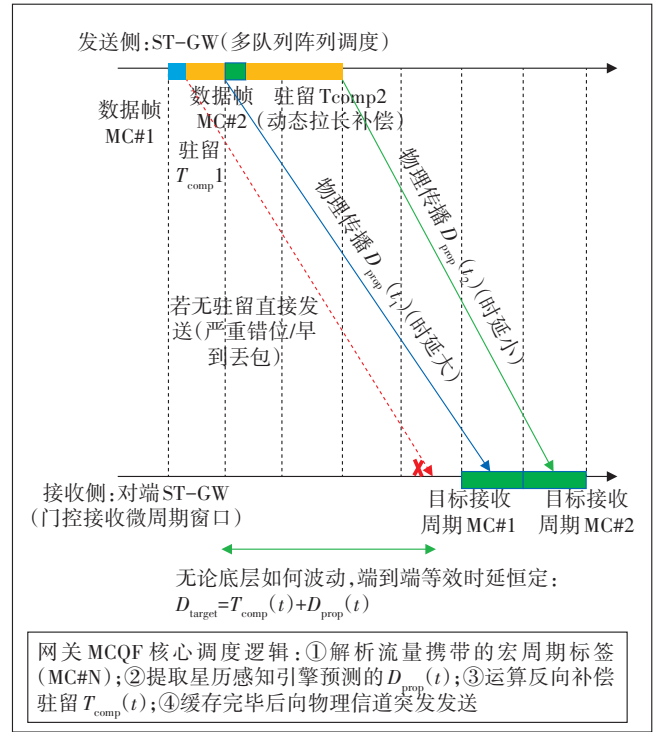


图5 基于宏周期(MCQF)的动态补偿与多队列时序对齐视图

$$T_{\text{TSN}}(t) = \alpha \times T_{\text{NTN}}(t) + \beta \quad (8)$$

其中, α 是晶振频率漂移补偿因子(Skew), β 是 2 个域之间静态的时间相位差(Offset)。在网关入口处对接收到的所有数据帧的时间戳进行统一重映射后, ST-GW 保证 CNC 规划出来的整个系统的全局门控时序可以在不同钟域下的硬件上正确地触发,从而保证 MCQF 正常工作。

4 仿真实验与性能分析

4.1 仿真环境构建与参数设定

本章采用了联合仿真实验的方法对所提出的 ST-GW 以及 MCQF 进行综合评价。使用 Systems Tool Kit (STK)生成高精度 LEO 轨道星历和链路几何信息,并导入到 OMNeT++网络仿真环境中(包括 INET 和 NeST-iNg),搭建高精度星地融合异构网络环境。核心仿真参数配置如表 1 所示。

4.2 端到端时延与抖动性能分析

端到端时延及抖动是评价时间敏感网络确定性的主要标准,在传统的直接映射结构中,确定性数据流的端到端时延有显著的抛物线变化趋势,在卫星仰角最小的时候,其单向时延最大,在天顶过境时,时延最小,而这个几毫秒的时延抖动远超过局域网 TSN

表1 仿真参数

参数类别	参数名称	设定数值
LEO 星座参数	卫星轨道高度/km	600
	卫星运行速度/(km/s)	约 7.56
	最小通信仰角/ $^{\circ}$	10
	载波频率(Ka 频段)/GHz	28
TSN 网络参数	基础链路带宽/(Gbit/s)	1
	TSN 调度周期(T_c)/ μ s	100
	确定性流量包长/B	256
	尽力而为流量包长/B	1 500
ST-GW 网关参数	目标补偿时延(D_{target})/ms	15
	宏周期倍数(N)	151
	网关时钟同步精度/ μ s	<1

100 μ s 调度周期限制,造成接收端门控队列严重的周期错位以及大量的报文丢失,2种方案在 LEO 卫星过境时的端到端时延比较如图6所示。由图6可知,所提出的ST-GW方案具有良好的确定性。利用基于星历感知的动态时延补偿技术,在网关的数据发送、接收边缘动态添加反向缓存补偿时延后进行仿真得到的结果表明,不管底层物理链路变化多么剧烈,确定性数据流的端到端时延都被牢牢锁定在了预先设置的 D_{target} (15 ms)上。再加上MCQF宏周期整形算法,ST-GW把微小的端到端时延抖动有效地限制在一个TSN周期之内(<100 μ s),从而达到了跨越不同时钟域和长时间延迟的要求。

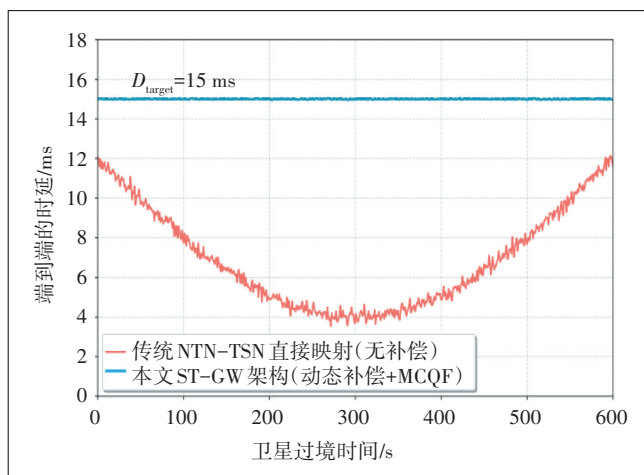


图6 LEO 卫星过境期间端到端时延性能对比

5 结束语

本文针对低轨卫星网络长时延、高动态给传统的基于TSN确定性传输造成的巨大困难,提出一种星地

融合TSN端到端架构以及边缘网关(ST-GW)。利用网关处星历信息进行实时动态时延补偿,并采用一种新的宏周期排队转发(MCQF)方法,把链路时延变化转变为网关内部缓存驻留,仿真结果表明该方案可以很好地缓解星地链路时延变化问题,使端到端网络抖动保持在微秒级别(单个TSN周期以内),并且支持跨协议栈、跨时钟域确定性传输。后续将围绕基于机器学习的多星多轨联合路径优化展开研究,并分析更高频段如太赫兹下大范围高速移动对精确时钟同步补偿算法影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈山枝,孙韶辉,康绍莉,等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2024,54(5):1177-1214.
- [3] Zeydan E, Arslan S S, Turk Y, et al. The role of mobile communications for industrial automation: architecture, applications and challenges[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025 (6):6808-6841.
- [4] Giuliano R. From 5G-advanced to 6G in 2030: new services, 3GPP advances, and enabling technologies [J]. IEEE Access, 2024 (12): 63238-63270.
- [5] Peng G Y, Wang S, Li G Z, et al. Space-terrestrial integrated time-sensitive networks: architecture, challenges, and open issues [J]. IEEE Network, 2025,39(3):140-147.
- [6] 3GPP TS 23.501: System architecture for the 5G system (5GS); stage [S/OL]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [7] 彭国宇,汪硕,李桂珍,等. 空天地一体化确定性网络研究[J]. 电信科学,2023,39(11):13-26.
- [8] 刘扬,李泽亚,龚龙庆,等. 时间敏感网络研究现状及发展趋势[J]. 微电子学与计算机,2022,39(6):1-11.
- [9] Fiori T, Lavacca F G, Valente F, et al. Proposal and investigation of a lite time sensitive networking solution for the support of real time services in space launcher networks [J]. IEEE Access, 2024 (12): 10664-10680.
- [10] 张雨曼,朱厦,梁国鑫,等. 面向天地一体化的确定性网络技术研究[J]. 电信科学,2024,40(1):24-34.

作者简介:

王晓博,正高级工程师,博士在读,主要从事星地融合网络、TSN确定性网络、人工智能方向的研究工作;郑志扬,高级工程师,硕士,主要从事通信网络方向的研究工作;杨杉,正高级工程师,博士,主要从事卫星网络、通信导航方向的研究工作;张祺媛,工程师,学士,主要从事卫星网络、5G定位方向的研究工作;王题,教授级高级工程师,学士,主要从事通信导航、人工智能方向的研究工作;叶海纳,正高级工程师,博士,主要从事卫星网络、通信导航、人工智能方向的研究工作。