

面向动态多跳无线网的时延不确定性容忍时分调度

向子豪¹, 葛宁^{1,2}, 陆建华^{1,2}

(1.清华大学电子工程系, 北京 100084; 2.天基网络与通信全国重点实验室, 北京 100084)

摘要: 节点运动使传播时延在调度周期内连续漂移, 基于静态时延的时分 (time division, TD) 调度及时间提前 (timing advance, TA) 机制可能发生收发冲突, 难以保障确定性时延。为此, 本文提出一种时延不确定性容忍的调度机制。首先, 引入 TA 包络锁定机制, 通过锁定冗余时隙, 增强调度表对抗底层时延不确定性的稳健性。其次, 推导适用于动态场景的最恶劣分数干扰系数表达式以评估物理层干扰。最后, 构建时间展开冲突图, 将业务准入与资源分配建模为混合整数非线性规划, 设计延迟约束生成与状态空间剪裁策略加速求解。仿真表明, 在本文参数范围和 10 秒控制周期内, 该机制在半双工机动无线网中以有限的冗余时隙为代价, 使准入业务的准时交付率达 100%。相较于包含 20% 保护间隔 (guard period, GP) 的方案, 时隙利用率低 30% 左右, 但平均端到端时延缩短 28.9%, 可容忍 10^2 m/s 量级的节点运动。

关键词: 时分调度; 时间提前; 冲突图; 确定性网络; 时延不确定性

中图分类号: TN925; TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000

Delay Uncertainty-Tolerant Time Division Scheduling for Dynamic Multi-Hop Wireless Networks

Xiang Zihao¹, Ge Ning^{1,2}, Lu Jianhua^{1,2}

1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. State Key Laboratory of Space Network and Communications, Beijing 100084, China

Abstract: Node mobility causes propagation delays to drift within a scheduling cycle. Time division (TD) scheduling and timing advance (TA) based on static delays may lead to transmission-reception conflicts, making deterministic latency difficult to guarantee. To address this issue, a scheduling mechanism tolerant of delay uncertainty was proposed. First, a “TA envelope” locking mechanism was introduced, and redundant time slots were reserved to enhance the robustness of the scheduling table against delay uncertainty. Second, a worst-case fractional interference coefficient for dynamic scenarios was derived to evaluate physical-layer interference. Finally, a time-expanded conflict graph was constructed, and the joint traffic-admission and resource-allocation problem was formulated as a mixed-integer nonlinear programming problem. Delay-constraint generation and state-space pruning strategies were further designed to accelerate the solution. Simulations show that, under the evaluated parameters and a 10 s control period, the proposed mechanism achieves 100% on-time delivery for admitted flows in half-duplex mobile wireless networks with limited redundant-slot overhead. Compared with a scheme using a 20% guard period (GP), slot utilization is about 30% lower, while the average end-to-end delay is reduced by 28.9%; the tolerable node speed is on the order of 10^2 m/s.

Key words: TD scheduling, timing advance, conflict graph, deterministic networks, delay uncertainty

收稿日期: 2026-05-21; 修回日期: 2026-08-26

通信作者: 葛宁, gening@tsinghua.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62541106, No.62425110, No.62601480)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62541106, No.62425110, No.62601480)

0 引言

随着第六代移动通信技术的演进, 低空经济、空天地一体化网络等新兴场景对底层网络的承载能力提出了革命性要求^[1]。无线网络需要从传统的“尽力而为”向严格的“确定性网络”范式转变^[2]。为了满足此类核心业务对超低且有界端到端时延、零丢包率以及极低抖动的苛刻需求, 3GPP 组织与 IEEE 组织都在积极推动确定性网络标准向无线广域环境深度扩展^[3-4]。无线广域骨干网能够连接边缘设备和核心网, 是实现确定性服务的重要组成部分。

在低空移动平台构成的动态无线骨干网中, 由于遮挡少且对链路质量要求高, 通常在毫米波频段上使用可视 (line of sight, LoS) 链路^[5], 并通过定向天线实现信号增强和空间复用; 但干扰仍可能来自非可视 (non line of sight, NLoS) 链路。为了灵活支持不同传输方向的非对称业务并提高频谱利用率, 允许每个时隙根据业务任意选择传输方向的动态时分 (time division, TD) 调度成为主流体制^[6]。全双工 TD 网络允许在同一频段、同一时隙内完成双向收发, 但需要节点支持复杂的自干扰消除^[7]。而在半双工 TD 网络中, 一个时隙内节点只能处于收、发或空闲三种状态之一。考虑到可移动骨干网节点的体积和能量限制, 实际系统通常采用半双工模式^[8]。综上, 本文研究半双工 TD 网络, 其信号传输链路为毫米波频段的 LoS 链路, 并使用定向天线加强传输。

尽管半双工体制不存在链路自干扰, 将确定性 TD 调度引入动态骨干网仍然面临着底层物理特性的巨大挑战。首先, 定向天线会增加干扰管理的复杂度^[6]。在全向传输中, 发送节点的干扰与传输方向无关。但在定向传输中, 当非目标接收节点落入发送节点天线主瓣范围内, 就会带来严重的链路间干扰。而波束指向与链路调度强耦合, 造成链路调度成为高维非凸问题。其次是不可忽略的传播时延。传统的局域 TD 调度默认传播时延远小于时隙长度, 可被忽略; 但在广域骨干网中, 长距离传输与节点高动态特性的叠加, 底层的传播时延具有“跨时隙”与“连续漂移”的双重物理特征^[9]。不考虑时延或仅考虑静止不变的时延, 都无法在动态骨干网中实现稳健的 TD 调度。因此, 设计一种能够容忍时延不确定性的 TD 调度方案对于骨干网提

供确定性服务十分必要。

1 相关工作

1.1 现存工作

按照对传播时延的处理方式, 现有无线 TD 调度研究可分为时延规避型、静态时延感知和动态时延不确定性容忍。

第一类方法通过设置保护间隔 (guard period, GP) 规避传播时延对收发状态的影响。针对包含长传播时延的 TD 调度问题, 现有工程体系普遍按照最大单跳时延设置 GP^[10]。Lee 等^[10]分析了长传播时延下采用 TD 的帧结构和帧同步方面的挑战, 并指出灵活可变的 GP 和基于全球导航卫星系统的同步是未来方向。文献[11]通过星地传输实验说明, 传统长 GP 机制会显著降低资源利用率, 并提出基于终端调度的按需流水线发送机制, 以提高信道利用率和系统吞吐量。文献[12]研究了星地通信中长传播时延和同步困难对 TD 调度的影响, 通过在 GP 中插入其他可调度传输提高信道利用率; 并结合信号与干扰加噪声比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 和时延选择用户以降低链路间干扰。文献[13]研究灵活时分双工帧结构对 GP 的间接优化, 通过异步混合自动重传和非对称链路调度缩短 GP, 降低控制开销并改善时延性能。上述方法无需准确利用每条链路的传播偏移, 能够在一定程度上兼容传播时延变化, 但 GP 通常需要按照全网最大单跳时延设置, 不仅压缩有效数据传输时间, 其开销还会随多跳转发累积, 增加业务的端到端时延。

第二类方法利用已知传播时延进行时空错位调度, 以减少或取消 GP。物理层通常采用时间提前 (timing advance, TA) 机制, 使发送端提前发送, 从而将数据到达窗口对齐至指定的接收时隙。文献[14]研究了低轨卫星网络中的 TA 估计问题, 通过增强时延估计精度降低大传播时延对上行同步的影响。然而, 准确的 TA 估计只能确定当前时刻的传播偏移, 并不能直接保证媒介接入控制层预先生成的收发状态在后续时延变化下持续可行。Yang 等^[9]针对传播时延为整数时隙倍数的无线网络, 采用固定整数时延矩阵表示节点间传播偏移, 并利用有向超图描述多条链路间的碰撞关系。由于该模型诱导的周期超图具有无限顶点, 文献[9]进一步构造有

限调度图, 将无碰撞周期调度表示为调度图中的路径, 并利用图中环对应速率向量的凸包刻画调度速率域, 在此基础上研究速率域计算和加权链路速率最大化算法。该工作为利用传播时延改善无线调度提供了图论基础, 但其传播时延矩阵在调度过程中保持不变, 每条链路对应确定的时序偏移, 未考虑节点运动引起的连续时延漂移和跨时隙状态跳变。Hsu 等^[15]针对水声网络中的长传播时延, 将不同发送事件在各接收端产生的时空冲突显式表示为时空冲突图, 并通过混合整数规划和启发式算法生成 TD 调度。该研究的“时空不确定性”主要描述不同传播路径造成的接收时间差异, 其调度仍建立在链路传播时延已知的基础上。文献[16]利用二维时空网格刻画静态多跳链式水声网络中的数据传播过程, 设计了兼顾吞吐量、时延和公平性的周期 TD 调度, 但其节点固定, 传播时延在调度执行期间保持不变。因此, 这类方法能够利用确定的传播偏移提高时间复用能力, 但对运行期间的传播时延变化缺少直接容忍能力。

第三类方法考虑传播时延的随机偏差或节点运动引起的时变特性, 通过传播时延预测、统计建模和逐周期偏移修正增强 TD 调度对动态时延的适应能力, 相关研究主要集中在移动水声网络。Cho 等^[17]提出块时间有界时分多址机制, 由主节点根据移动节点的上一位置和当前速度预测下一周期的传播时延, 并以时间块为单位限制数据发送窗口, 从而降低移动引起的碰撞风险和信道接入时延。该方法能够感知节点运动, 但依赖传播时延预测和周期性调度重构, 尚未显式刻画预测误差对应的完整时延不确定区间。文献[18]针对长且随机的传播时延, 建立了包含距离相关传播时延偏差的离散时间 Markov 模型, 通过优化时隙长度降低随机时延偏差造成的跨时隙碰撞。该工作说明了传播时延偏差对 TD 调度性能的显著影响, 但未生成能够覆盖全部可能时延状态的多链路调度矩阵。文献[19]面向移动水声网络中的上下行非对称传播时延场景, 根据连续两个调度周期获得的位置和速度信息预测下一周期的传播时延, 并按照最大节点速度保守计算发送等待偏移, 使各节点的数据包在汇聚节点处依次到达。该机制能够逐周期跟踪节点运动造成的传播时延变化, 且不依赖全网时间同步, 但仍面向固定汇聚节点的集中式单跳场景, 需要在每个周期

重新估计传播时延并下发调度结果, 其多跳扩展尚未解决。

综上, 现有 GP 方法主要通过预留空闲时间规避传播时延影响, 但存在资源和多跳时延开销; 静态时延感知方法能够利用确定的传播偏移提高时间复用能力, 但依赖传播时延在调度执行期间保持不变; 动态传播时延感知方法则主要采用点预测、时隙扩展或逐周期重构调度, 且多面向单跳集中式汇聚场景, 尚未同时处理移动多跳网络中的跨时隙半双工冲突、链路间累积干扰和确定性业务端到端时延约束。对于由移动节点构成的多跳骨干网, 传播时延在一个控制周期内不再是单一常数, 而是随节点运动连续变化, 并可能在跨越时隙边界时引起离散发送状态跳变。此时, 基于单一传播时延生成的调度矩阵可能发生半双工冲突, 而频繁重构全网调度矩阵又会产生较大的控制与信令开销。因此, 有必要研究一种能够利用显式时延不确定区间, 使同一调度矩阵兼容控制周期内所有可能传播时延状态的, 并联合保障物理调度可行性和多跳业务确定性的 TD 调度机制。

1.2 本文工作

基于上述分析, 本文提出了一种面向动态骨干网的时延不确定性容忍 TD 调度机制。首先, 根据节点最大运动速度, 计算每条链路在控制周期内可能出现的传播时延区间。不再按照单一传播时延确定唯一的发送状态, 而是对时延区间内所有可能发送时隙集合取并集, 构造 TA 包络, 通过引入冗余时隙锁定, 使调度表兼容控制周期内的连续时延漂移和跨时隙状态跳变。其次, 针对时延不确定性引发的复杂重叠干扰, 推导由链路差分时延决定的分数干扰系数; 在此基础上, 针对每个调度事件建立面向全部激活干扰事件的累积 SINR 约束。最后, 为提供严格的时延硬保障, 本文构建了时间展开冲突图, 考虑数据包的本地排队与传播时延, 建立了混合整数非线性规划模型。仿真结果表明, 该机制能自适应判断业务准入, 以时隙资源利用率为代价, 在动态场景中保证准入业务的确定性端到端时延, 提高系统对节点机动性的容忍能力。

文献[9]是与本文最相关的传播时延感知调度研究, 二者均利用传播时延所产生的时域偏移组织链路并发传输, 但在冲突关系、时延假设及时域偏移处理上存在明显区别。首先, 在冲突关系构建方

面, 文献[9]依据确定的传播时延建立固定的时域偏移和调度冲突关系; 本文则将每条有向链路与接收时隙组合为时间展开调度事件, 并依据TA包络所覆盖的全部可能发送时隙, 联合构建跨时隙半双工冲突和分数重叠干扰关系。其次, 在传播时延假设方面, 文献[9]采用调度期间保持不变的确定性时延, 并认为时延为时隙的整数倍; 而本文考虑节点运动导致传播时延在调度表保持周期内连续漂移, 并以有界时延区间描述该不确定性。最后, 在时域偏移处理方面, 固定传播时延对应唯一的确定发送偏移; 本文提出TA包络机制, 将时延区间内可能对应的全部本地发送时隙取并集并统一锁定, 从而使预先生成的调度表在传播时延跨越时隙边界后仍能保持半双工可行性, 而无需频繁重构全网调度表。

2 系统模型

2.1 网络拓扑与时隙结构

考虑一个由定向无线链路构成的毫米波多跳骨干网络, 如图1所示, 表示为有向图 $\mathcal{G}=(\mathcal{V}, \mathcal{L})$, 其中 $\mathcal{V}$ 为网络节点集合, $\mathcal{L}$ 为节点间的单跳有向LoS链路, 即链路 (i, j) 表示节点 i 为发端, j 为收端, 链路 (j, i) 则相反。每个节点配备定向天线, 并工作于半双工模式, 即在任意时隙节点只能处于静默、发送或接收三种状态中的一种, 且只能与一个节点形成通信对。换句话说, 若节点 i 在某时隙的前半段与节点 j 通信, 即使该时隙后半段空闲, 其也无法与节点 k 建立新的通信。

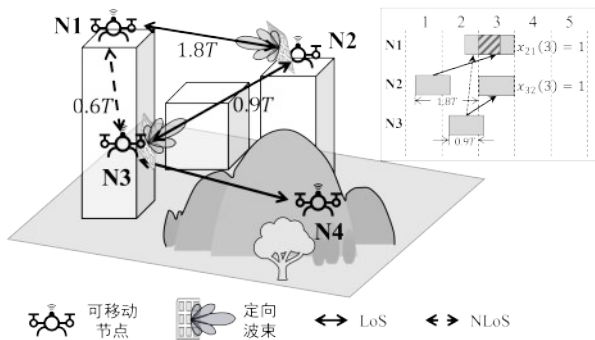


图1 可移动多跳骨干网拓扑及调度示意

由于骨干网承载平稳的聚合流量, 系统采用TD超帧调度机制^[9], 如图1所示。假设全网节点共享高精度的全局时钟同步 (如全球导航卫星系统授

时), 时间轴被划分为连续的超帧, 每个超帧包含 N_F 个离散的等长时隙, 每个时隙持续时间为 T 。对于超帧内的时隙索引 $n \in \mathcal{N} = \{0, 1, \dots, N_F - 1\}$, 其在时间轴上对应的时间窗为 $[nT, (n+1)T]$ 。与大部分现有TD论文假设一致^[8-9], 本文认为发送数据时长与时隙长度相等。

超帧周期记为 $T_F = N_F T$, 表示调度矩阵完成一次循环执行的时间; 控制周期记为 T_C , 表示控制平面保持同一调度矩阵不变的时间。

考虑节点移动, 由于时隙长度较短, 在一个超帧内节点位置近似分段常值, 认为每个时隙内节点位置保持不变, 但多个时隙的累积效应会造成节点位置改变。认为网络的拓扑结构和路由在一个超帧内保持不变, 路由的具体计算方法不在本文讨论范围内, 可采用时间确定性路由算法等^[20]。

2.2 跨时隙发送模型

在 n 时隙, 节点 i 和节点 j 的三维空间坐标分别记为 $\mathbf{p}_i(n)$ 和 $\mathbf{p}_j(n)$ 。链路 $(i, j) \in \mathcal{L}$ 的瞬时欧氏距离为 $d_{ij}(n) = \|\mathbf{p}_i(n) - \mathbf{p}_j(n)\|_2$, 对应的传播时延为 $\tau_{ij}(n) = d_{ij}(n)/c$, 其中 c 为光速。

在无线骨干网中, 传播时延往往等于时隙长度 T , 甚至可达其数倍。为了实现接收端的精准时隙对齐, 发送端必须采用TA机制。假设物理层TA能够使完整数据到达窗口与指定接收时隙对齐, 定义:

$$x_{ij}(n) = \begin{cases} 1, & \text{链路}(i, j) \text{ 在时隙 } n \text{ 内完成接收} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad \#(1)$$

若 $x_{ij}(n) = 1$ 则对应的发送窗口为:

$$W_{ij}(n) = [nT - \tau_{ij}(n), (n+1)T - \tau_{ij}(n)] \quad \#(2)$$

进一步, 对应的发送时隙集合为:

$$\mathcal{S}_{ij}(n) = \{k \in \mathbb{N} \mid [kT, (k+1)T] \cap W_{ij}(n) \neq \emptyset\} \quad \#(3)$$

其中 $\mathbb{N}$ 为自然数集。

通过上述分析可以发现, 由于传播时延的存在, 发送窗口占用的离散发送时隙数量取决于传播时延与时隙的关系。当 $\tau_{ij}(n)/T \notin \mathbb{N}$ 时, 发送窗口跨越两个连续时隙; 当 $\tau_{ij}(n)/T \in \mathbb{N}$ 时, 发送窗口恰好落在一个时隙中。如图1所示, 当 $x_{21}(3) = 1$ 时, 为使节点1在第3时隙完成接收, 节点2作为发端需要提前发送, 跨越时隙1和2; 对于链路

(3,2) 同理。由于节点不具备同时收发能力,需要对发送端节点施加非对称的半双工锁死约束,即 1 个接收时隙对应 1 至 2 个发送时隙。

2.3 物理传输与分数干扰模型

考虑毫米波定向传输环境,其路径损耗与节点间距离 d_{ij} 有关,可表示为:

$$\left[L(d_{ij}) \right]_{\text{dB}} = a + b \log_{10}(d_{ij}) \quad (4)$$

其中 a 和 b 是与信道、载波频率等传输条件有关的常数,在 LoS 链路和 NLoS 链路中取值不同^[21]。

为节点配备单波束定向天线,采用标准 3GPP 辐射模型^[22],天线增益是传输方向和天线主轴夹角 θ 的函数,在数学上可表示为:

$$G(\theta) = \begin{cases} G_0 \cdot 10^{\frac{3}{10} \left(\frac{|\theta|}{\theta_H/2} \right)^2}, & |\theta| \leq \theta_M/2 \\ G_C, & \theta_M/2 < |\theta| \leq \pi \end{cases} \quad (5)$$

其中 G_0 和 G_C 分别为最大主瓣增益和常数旁瓣增益, $\theta_M = \theta_H \sqrt{10/3 \cdot \log_{10}(G_0/G_C)}$ 是主瓣宽度, θ_H 是半功率波束宽度。同时,天线增益在三维空间中需满足能量守恒,即 $\int_0^{2\pi} \int_0^\pi G(\theta) \sin \theta d\theta d\varphi = 4\pi$ 。该方向图定义在三维单位球面上,并假设绕波束主轴旋转对称。对于有用链路,收发波束主轴分别与链路方向及其反方向对准;对于干扰链路,按照干扰信号方向与当前收发主轴之间的实际三维离轴角计算天线增益。进一步,将时隙 n 节点 i 的波束指向与节点 i, j 连线在空间中的夹角表示为 $\theta_{ij}(n)$ 。定向波束极大降低了全网的链路间干扰,但波束相交区域的并发传输仍不可忽视。

结合式(4)和(5)可知,链路 (i, j) 的信道增益为:

$$\left| h_{ij}(n) \right|^2 = G(\theta_{ij}(n)) G(\theta_{ji}(n)) L(d_{ij}(n)) \quad (6)$$

其中, $G(\theta_{ij}(n))$ 表示发端 i 在时隙 n 的发送天线增益, $G(\theta_{ji}(n))$ 表示收端 j 的接收天线增益。将收发两端的波束跟踪误差上界设为 $\varepsilon_\theta^{\max}$, 则合计增益损失最大为 $6 \left(\frac{\varepsilon_\theta^{\max}}{\theta_H/2} \right)^2$ dB。该误差影响链路增益和 SINR, 但不改变几何传播时延, 因此不直接扩展 TA 包络; 若误差导致链路 SINR 低于接收门限, 则提前触发链路和调度重构。

由于不同链路传播时延不同, 不同信号在同一

接收端可能发生部分时间重叠, 从而带来干扰, 本文称之为“分数干扰”。如图 1 调度中斜杠阴影方块所示, 链路(2,1)的数据包使节点 1 在第 3 时隙开启接收, 这是有用信号; 而由于信号在空间中自由传播, 链路(3,2)的数据包到达节点 1 时, 会与其接收窗口发生部分重合, 这是干扰。

设系统中有调度 $x_{ij}(n_j) = 1, x_{uv}(n_v) = 1$, 定义分数干扰系数 $\beta_{uv \rightarrow ij}(n_v, n_j) \in [0, 1]$ 表示节点 u 发出的数据包与节点 j 在时隙 n_j 的时间重叠比例。以图 1 调度为例, 此时 $\beta_{32 \rightarrow 21}(3, 3) = 0.7$ 。基于此, 链路 (i, j) 在时隙 n_j 的接收 SINR 为:

$$\gamma_{ij}(n_j) = \frac{P_i |h_{ij}|^2}{N_0 + \sum_{uv} x_{uv}(n_v) P_u |h_{uj}|^2 \beta_{uv \rightarrow ij}(n_v, n_j)} \quad (7)$$

其中 P_i, P_u 为节点的发送功率, $N_0 [\text{dBm}] = -174 + 10 \log_{10} B$ 为噪声功率^[22], B 为带宽。

2.4 业务模型

不同于追求最大业务流量总和的弹性流量网络, 本文聚焦于提供严格容量和时延保证的确定性网络。网络承载一组恒定比特率业务流集合 $\mathcal{F}$, 每个流 $f \in \mathcal{F}$ 建模为元组 $(\mathcal{P}, R^{\text{req}}, L^{\text{req}}, \omega, Y)$, 分别代表流的固定路由路径、端到端速率要求、端到端最坏时延要求、优先级权重和接入指示。

接入指示 $Y_f \in \{0, 1\}$ 为布尔变量, 当 $Y_f = 1$ 时, 系统通过严格的准入控制, 承诺该流在物理层的多跳调度中获得确定的速率分配, 且其端到端的总时延严格不超过 L_f^{req} ; 当 $Y_f = 0$ 时, 系统判断无法满足该流的确定性要求, 拒绝该流的接入。

系统的宏观调度目标旨在最大化高优先级确定性流的整体准入效用。

3 时延不确定性分析

在动态无线骨干网中, 网络节点的运动造成链路距离变化, 使传播时延在一个控制周期 T_C 内存在不确定性, 即发生时延漂移现象。本章针对该现象给出解决方案。

3.1 TA 包络及其资源利用率

根据式(3)可知, 当 τ_{ij} 恰好跨越时隙长度 T 的整数倍时, 发送端需占用的离散时隙集合将发生跳变。对于依赖静态时延假设的 TD 调度方案, 这种跳变会带来半双工冲突, 导致调度策略失效。

为了避免该情况, 本文提出“TA 包络”概念。以链路 (i, j) 为例, 在控制周期开始时, 控制平面根据预知的节点最大速度, 计算出该链路在周期内的传播时延区间 $[\tau_{ij}^{\min}, \tau_{ij}^{\max}]$ 。传播时延估计、TA 量化及残余时钟同步均等价于有界加性误差。设总误差上界为 $\varepsilon_{\text{clk}}^{\max}$, 则以此扩展等效时延区间为 $[\max\{0, \tau_{ij}^{\min} - \varepsilon_{\text{clk}}^{\max}\}, \tau_{ij}^{\max} + \varepsilon_{\text{clk}}^{\max}]$ 。为简化符号, 仍将扩展后的等效时延区间记为 $[\tau_{ij}^{\min}, \tau_{ij}^{\max}]$ 。

为兼容该区间内所有可能的时延跳变状态, 发送端 i 必须对其本地发送时隙进行联合保守锁死。当 $x_{ij}(n) = 1$, 发端在整个超帧周期内可能占用的发送时隙集合为:

$$\mathcal{T}_{ij}(n) = \bigcup_{\tau_{ij} \in [\tau_{ij}^{\min}, \tau_{ij}^{\max}]} \mathcal{S}_{ij}(n) \# (8)$$

称该集合为满足收端在时隙 n 接收的 TA 包络。

TA 包络 $\mathcal{T}_{ij}(n)$ 的元素数量与节点位置和运动速度有关, 在静态情况下, TA 包络至多包含 2 个发送时隙。若考虑最大运动速率为 $v_{\max}$, 控制周期内的最大传播时延漂移量为:

$$\Delta\tau = \tau^{\max} - \tau^{\min} = \frac{2v_{\max}T_C}{c} \# (9)$$

其中 c 为光速。长度为 $\Delta\tau$ 的连续区间最多可跨越 $\lceil \Delta\tau/T \rceil$ 个整数倍边界。因此 TA 包络中时隙个数不超过静态情况与跨界数之和:

$$|\mathcal{T}_{ij}(n)| \leq 2 + \left\lceil \frac{2v_{\max}T_C}{cT} \right\rceil \# (10)$$

该式是任意传播时延下的统一上界。对于地面或低空骨干网系统, 通常有 $|\mathcal{T}_{ij}(n)| \leq 3$ 。相对于一般 $\tau_{ij}(n)/T \notin \mathbb{N}$ 的情况, TA 包络锁定机制以至多 1 个冗余时隙为代价, 覆盖节点以 10^2 m/s 量级速度运动时的传播时延不确定性。

为衡量 TA 包络锁定机制对传输所造成的额外时隙占用, 本文定义节点一时隙资源利用率。该指标表示全网有效传输中, 用于有效数据发送和接收的时长占全部节点可用时长的比例。需要说明的是, 该指标以“节点一时隙”为资源计量单位, 发送端和接收端占用的资源分别统计后相加。设数据包的有效发送和接收持续时间均为 T_{eff} , 则全网节点一时隙资源利用率定义为:

$$\eta_{\text{net}} = \frac{\sum_{(i,j) \in \mathcal{L}} \sum_{n \in \mathcal{N}} s_{ij}(n) \cdot 2T_{\text{eff}}}{|\mathcal{V}|N_F T} \# (11)$$

其中, $s_{ij}(n) \in \{0, 1\}$ 表示当前调度是否成功传输且满足时延限制; 在无 GP 的情况下, $T_{\text{eff}} = T$ 。

考虑无空闲时隙的理想状态, 即所有时隙在协议上均处于收或发的状态。对于本文方案, 尽管无协议上的空闲时隙, 但 TA 包络的存在使成功传输 1 个包需要消耗 $|\mathcal{T}_{ij}(n)|$ 个发送时隙和 1 个接收时隙。因此, 若 $|\mathcal{T}_{ij}(n)| = 2$, 则 $\eta_{\text{net}} = 2/(2+1) = 2/3$ 。然而实际系统中往往存在空闲时隙, 导致本文方案 η_{net} 最大不超过 $2/3$ 。

3.2 最大分数干扰系数

首先推导调度 $x_{ij}(n_j) = 1$ 和 $x_{uv}(n_v) = 1$ 下, 链路 (u, v) 对链路 (i, j) 干扰的分数干扰系数的具体表达式。

由收端时隙及传播时延可知, 发端 u 发出的数据包到达收端 j 的起始时刻为:

$$t_{uj} = n_v T - \tau_{uv} + \tau_{uj} \# (12)$$

而发端 i 发出的数据包到达收端 j 的起始时刻为:

$$t_{ij} = n_j T \# (13)$$

因此重叠比例可计算为:

$$\beta_{uv \rightarrow ij}(n_v, n_j) = \max\left(0, 1 - \left\lceil \frac{t_{uj} - t_{ij}}{T} \right\rceil\right) = \max\left(0, 1 - \left\lceil n_v - n_j + \frac{\Delta\tau}{T} \right\rceil\right) \# (14)$$

其中 $\Delta\tau = \tau_{uj} - \tau_{uv}$ 。

由式(14)可知, 分数干扰系数仅与传播时延的差值有关。考虑到时延不确定性, 可根据传播时延区间得到最大分数干扰系数为:

$$\tilde{\beta}_{uv \rightarrow ij}(n_v, n_j) = \max_{\Delta\tau} [\beta_{uv \rightarrow ij}(n_v, n_j)] \# (15)$$

4 确定性 TD 调度问题建模

为联合优化底层物理资源分配与上层确定性业务准入, 本章引入时间展开冲突图, 将具有时延不确定性的动态调度问题转化为图论独立集与多跳时序因果约束下的数学规划问题。

4.1 时间展开冲突图

传统的冲突图仅在空间维度反映链路间的干扰

和半双工关系,无法刻画一整个调度周期内的时隙分配与跨时隙干扰。为此,本文将空间有向链路集合 $\mathcal{L}$ 与超帧时隙集合 $\mathcal{N}$ 进行展开,构造时间展开冲突图 $\mathcal{G}_C = (\mathcal{V}_C, \mathcal{E}_C)$ 。

图 $\mathcal{G}_C$ 的顶点集为 $\mathcal{V}_C$, 每个顶点 $v = (l, n)$ 表示激活有向链路 $l = (i, j)$, 且要求数据包在第 n 个时隙被接收。因此顶点的总规模 $|\mathcal{V}_C| = |\mathcal{L}| \times N_F$ 。顶点 (l, n) 的激活状态对应布尔调度变量 $x_{ij}(n)$ 。

图 $\mathcal{G}_C$ 的边集 $\mathcal{E}_C$ 代表冲突条件, 如果图中两顶点 $v_1 = (l_1, n_1)$ 与 $v_2 = (l_2, n_2)$ 之间存在无向边, 则代表这两个调度事件在物理空间或时序上无法同时满足。结合 2.2 节的跨时隙发送模型和 2.3 节的干扰模型, 边集由以下两类物理冲突生成。

1) 半双工约束: 设 $l_1 = (i, j)$, 若 v_1 的接收时隙 n_1 或其发端占用时隙集合 $\mathcal{T}_{ij}(n_1)$ 与 v_2 的对应集合在同一物理节点上发生重叠, 则产生该类边。即不允许同一节点在同一时隙向两个不同节点发送、接收来自两个不同节点的数据包、同时收发。该冲突条件在数学上统一涵盖了传播时延跨越时隙边界引起的所有状态跳变。

2) 强干扰约束: 若顶点 v_1/v_2 代表的调度事件中, 发端产生的信号导致 v_2/v_1 接收端的 SINR 低于接收门限 γ_{th} , 则产生该类边。在具体计算中, 采用式(15)给出的最大分数干扰系数。该类边用于提前排除仅由一个干扰事件即可导致接收失败的成对硬冲突。

若仅考虑上述成对冲突, 则任意可行的激活事件集合均为图 $\mathcal{G}_C$ 的独立集。相较于为每一条冲突边分别建立线性不等式, 利用图论中的团结构能更紧凑地表示互斥关系^[23]。团是无向图的完全子图, 即团内任意两个顶点之间均存在边; 极大团是不被其他更大团所包含的团。采用[24]中的算法得到 $\mathcal{G}_C$ 中的所有极大团, 构成集合 $\mathbf{C} = \{\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \dots, \mathcal{C}_K\}$ 。

由于同一极大团内任意两个调度事件均相互排斥, 每个极大团中至多激活一个顶点, 因此有:

$$\sum_{(i,j,n) \in \mathcal{C}_k} x_{ij}(n) \leq 1, \forall \mathcal{C}_k \in \mathbf{C} \quad (16)$$

4.2 累积 SINR 约束

式(16)能保障半双工约束和成对强干扰, 但不能处理多条链路的累积干扰, 还需在极大团约束之外增加面向全部并发事件的累积 SINR 约束。

针对任意调度事件 $v_1, v_2 \in \mathcal{V}_C$, 事件 v_2 对 v_1 的最恶劣有效干扰功率在干扰系数取最大时达到, 即式(15)。结合式(7)可知, 调度事件 v_1 的累积 SINR 约束可表示为:

$$\begin{aligned} & \sum_{v_2 \in \mathcal{V}_C \setminus v_1} x_{i_2 j_2}(n_2) P_{i_2} |h_{i_2 j_1}|^2 \tilde{\beta}_{i_2 j_2 \rightarrow i_1 j_1}(n_2, n_1) \\ & \leq \frac{P_{i_1} |h_{i_1 j_1}|^2}{\gamma_{th}} - N_0 + M [1 - x_{i_1 j_1}(n_1)] \quad (17) \end{aligned}$$

其中, M 为松弛常数。当 $x_{i_1 j_1}(n_1) = 1$ 时, 该约束直接限制所有同时激活事件产生的干扰功率之和; 当 $x_{i_1 j_1}(n_1) = 0$ 时, 大 M 项解除该约束。考虑到调度变量和分数干扰系数取值均不超过 1, 取 $M =$

$\max_{v_1 \in \mathcal{V}_C} \left\{ \sum_{v_2 \in \mathcal{V}_C \setminus v_1} P_{i_2} |h_{i_2 j_1}|^2 + N_0 \right\}$, 该取值是累积干扰功率的安全上界。

综上, 时间展开冲突图及极大团约束用于刻画 TA 包络下的半双工冲突和成对强干扰冲突, 累积 SINR 约束则进一步处理多个调度事件同时工作时的联合干扰。

4.3 全局优化问题建模

在确定性网络中, 除物理链路的调度可行性之外, 还需满足对业务流的确定性服务。业务流路由 $\mathcal{P}_f$ 固定, 定义连续变量 $r_{ij}^f(n) \geq 0$ 表示流 f 在链路 (i, j) 的第 n 个接收时隙上实际分配到的速率, 并引入辅助布尔变量 $z_{ij}^f(n) \in \{0, 1\}$ 指示该时隙是否被流 f 占用, 且满足:

$$z_{ij}^f(n) = \begin{cases} 0, & r_{ij}^f(n) = 0 \\ 1, & r_{ij}^f(n) > 0 \end{cases} \quad (18)$$

首先, 链路容量受限于其对应的信道质量。在时隙 n 内, 链路 (i, j) 的可用速率由其 SINR 决定, 因此所有业务流在该链路上的总传输速率需满足:

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} r_{ij}^f(n) \leq x_{ij}(n) \cdot R_{ij}(n), \forall (i, j) \in \mathcal{L}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (19)$$

其中 $R_{ij}(n) = \log_2(1 + \gamma_{ij}(n))$ 为物理速率上限。在具体实现中, 由于 $R_{ij}(n)$ 无法实时获取, 可用上一调度周期中链路的最大容量代替。

其次, 对于系统准入的业务, 需满足业务本身的速率和时延要求。对于速率, 其在每一跳的所有时隙速率之和应满足:

$$\sum_{n=1}^{N_F} r_{ij}^f(n) \geq R_f^{\text{req}}, \forall f \in F, \forall (i, j) \in \mathcal{P}_f \quad (20)$$

对于时延, 在流 f 的传输中, 端到端时延由传播时延、排队时延和接收时延构成。考虑路由路径 $\mathcal{P}_f = (v_0, v_1, \dots, v_{H_f})$, H_f 为路径跳数, 并满足 $x_{v_{h-1}v_h}(n_h) = 1$ 。则流在中间节点 v_h 的排队时延, 以时隙数为单位, 可表示为 $\min \{ \mathcal{T}_{v_h v_{h+1}}(n_{h+1}) \} - n_h$ 。上述三种时延总和需满足:

$$\underbrace{\sum_{h=1}^{H_f} \left\lceil \frac{\tau_{v_{h-1}v_h}^{\max}}{T} \right\rceil}_{\text{传播时延}} + \underbrace{\sum_{h=1}^{H_f-1} \min \{ \mathcal{T}_{v_h v_{h+1}}(n_{h+1}) \} - n_h}_{\text{排队时延}} + \underbrace{1}_{\text{接收时延}} \leq L_f^{\text{req}}, \forall f \in F \quad (21)$$

其中, $\tau_{v_{h-1}v_h}^{\max}$ 和 T 的单位均为秒, L_f^{req} 是以时隙数为单位的端到端时延预算。

最后, 为保障数据包在各中继节点满足先收后发的物理因果关系, 相邻两跳还需满足:

$$\min \{ \mathcal{T}_{v_h v_{h+1}}(n_{h+1}) \} > n_h, h = 1, \dots, H_f - 1 \quad (22)$$

综合上述物理层与业务层模型, 面向高动态骨干网的确性联合准入与调度规划问题旨在最不利的时延漂移条件下最大化全网高优先级确定性流的整体效用, 优化目标为:

$$\max_{x_{ij}(n), r_{ij}^f(n), Y_f} \sum_{f \in F} \omega_f Y_f \quad (23)$$

同时需满足优化变量自身取值约束及约束 (16)-(22)。

4.4 状态空间与加速策略

由于该优化问题的约束中存在指示、比较等非线性特征, 是一个混合整数非线性规划问题; 且基于冲突图的最大权独立集问题是非确定性多项式时间 (nondeterministic polynomial time, NP) 难问题。为了评估其在真实骨干网控制面中的可求解性, 本节分析状态空间维度与约束规模, 并给出加速策略。

设网络包含业务流集合 $\mathcal{F}$, 定义全网平均跳数为 $\bar{H} = \sum_f H_f / |\mathcal{F}|$ 。模型的连续变量包括速率分配变量 $r_{ij}^f(n)$, 由于路由不变, 该变量仅在路径 $\mathcal{P}_f$ 上存在, 规模为 $\mathcal{O}(|\mathcal{F}| \bar{H} N_F)$ 。模型的整数变量包括调度变量 $x_{ij}(n)$, 规模为 $|\mathcal{L}| N_F$; 准入变量 Y_f , 规模为 $|\mathcal{F}|$; 时隙占用指示变量, 规模为 $|\mathcal{F}| \bar{H} N_F$ 。综

上, 系统的状态空间维度为 $\mathcal{O}(|\mathcal{F}| \bar{H} N_F)$ 量级。

在约束规模方面, 式(16)所示的极大团无冲突约束的规模与极大团数量成正比, 在最坏的情况下, 图中极大团数量随节点数呈指数增长^[24], 因此该约束规模为 $\mathcal{O}(2^{|\mathcal{L}| N_F})$ 量级, 是限制求解时间的瓶颈。式(19)所示的链路容量和式(20)所示的速率约束规模与变量维度线性相关, 为 $\mathcal{O}(|\mathcal{F}| \bar{H} N_F)$ 量级。式(21)所示的排队时延约束和式(22)所示的物理因果约束需要考虑同一个节点上的接收时隙和发送时隙, 因此规模为 $\mathcal{O}(|\mathcal{F}| \bar{H} N_F^2)$ 量级。

在广域骨干网中, $|\mathcal{L}|$ 和 $|\mathcal{F}|$ 通常取值为 10^2 量级, 导致约束规模达到 2^{10000} 量级, 这对于应用来说是不现实。针对求解器可能出现的内存溢出和求解时间过长问题, 针对物理结构, 设计加速策略。

一方面, 本文采用延迟约束生成, 在初始冲突图中, 仅考虑半双工约束, 不考虑干扰约束。在求解器运行过程中, 每当找到一个整数可行解时, 检查该解是否违背强干扰约束。若是, 则将该特定的极大团约束动态添加到搜索树中。由于定向天线的空间隔离作用, 绝大多数物理碰撞组合在追求最大接入的目标下并不会被触发。除此之外, 半双工冲突本质上只与节点和时隙数量有关, 因此其规模为 $\mathcal{O}(|\mathcal{V}| N_F)$ 量级。可见, 该机制在保障调度无碰撞的同时, 可大大降低内存开销与求解时间。另一方面, 利用确定性时延约束对状态空间进行剪裁。若某中间节点的时隙组合导致数据包等待时延结合传播时延已超过 L^{req} , 则在预处理阶段消除对应的变量。

综上, 上述策略将一次性生成指数规模约束转化为线性规模初始化和按需约束生成, 使该 NP 难问题在大规模骨干网场景下具备工程求解可行性。

5 性能评估

5.1 仿真场景与参数设置

本文搭建结合节点运动、物理干扰和确定性业务调度的系统级仿真环境, 并采用 Gurobi 求解优化问题^[25]。仿真采用 $100 \text{ km} \times 30 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的三维网状骨干网, 最大 LoS 距离为 30 km , 节点平均连接度为 4, 路由采用最短路径。控制周期内保持拓扑和路由不变, 否则提前触发重构; 无 LoS 链路仍计入 NLoS 干扰。默认参数如表 1 所示, 指向误

差造成的最大增益损失为 0.82 dB, 但不直接扩展 TA 包络; 最大等效时延区间宽度约 3.87 μs , 小于时隙长度, 因此单条链路的 TA 包络最多比静态情形增加 1 个时隙。固定网络拓扑, 取 100 次随机业务流实验的平均值作为数值结果。

表 1 默认的网络仿真参数

参数	取值
节点数量	$ V = 20$
工作频段	28 GHz 中心频率, 100 MHz 带宽
数据时隙长度	$T = 50 \mu\text{s}$
调度周期时长	$T_F = 5 \text{ ms}$ (即 $N_F = 100$)
控制周期时长	$T_C = 10 \text{ s}$
发送及噪声功率	$P_t = 10 \text{ dBm}$; $N_0 = -94 \text{ dBm}$
路径损耗 (LoS)	$\left[L(d_{ij}) \right]_{\text{dB}} = 61.4 + 20 \log_{10}(d_{ij})^{[21]}$
路径损耗 (NLoS)	$\left[L(d_{ij}) \right]_{\text{dB}} = 72.0 + 29.2 \log_{10}(d_{ij})^{[21]}$
定向天线	$G_0 = 1000, G_C = 0.2, \theta_H = 5.4^\circ, \theta_M = 18.9^\circ$
节点最大速率	$v_{\max} = 30 \text{ m/s}$ (x、y、z 三个方向各自独立)
业务流数量	$ \mathcal{F} = 40$
误差上界	$\epsilon_\theta^{\max} = 1^\circ$; $\epsilon_{\text{clk}}^{\max} = 0.2 \mu\text{s}$

在业务流生成方面, 系统在全网随机选取收发节点对。端到端时延约束设定为物理传播时延加额外时延裕量, 前者不属于调度能够压缩的时延, 后者在 0.1~0.5 ms 内随机取值。速率要求设定为传播路径最大链路容量的 50% 至 80%, 优先级权重与速率要求成正比, 且保证 $\sum_{f \in \mathcal{F}} \omega_f = 1$ 。

5.2 对比方法描述

本文设置一个非因果理想上界和 3 种基准。非因果理想上界预知控制周期内各时隙的真实传播时延, 仅针对实际时延状态构建冲突和干扰关系, 用于衡量 TA 包络的性能代价。基准 1 按照最大单跳 LoS 时延设置 GP 为 100 μs , 在保持调度周期不变的条件下减少时隙数量, 并逐时隙调度最紧急业务, 代表缺少全局视野的低复杂度调度。基准 2 采用文献[9]的固定时延矩阵、碰撞集合和周期超图模型, 结合本文的多跳业务约束与全局优化器生成固定调度矩阵, 再使用连续变化的实际传播时延评价其长期性能。基准 3 采用 100 μs 固定 GP 和 400 μs 数据持续时间, 使 GP 占时隙的 20%^[26]; 5

ms 调度周期包含 10 个时隙, 业务速率降为原来的 1/8 以保持单次传输数据量不变。该基准采用与本文相同的全局优化框架, 用于比较固定 GP 与 TA 包络的资源及时延代价。

为凸显时间展开冲突图的优势, 在本文方案其他条件不变的情况下, 设置两种消融实验。(1) 同时隙空间冲突图: 仅连接接收时隙相同的冲突事件, 不考虑 TA 包络造成的跨时隙占用, 因而可能遗漏不同接收时隙之间实际发生的冲突。(2) 保守空间投影冲突图: 将任意传播时延组合下可能冲突的两条链路在所有时隙上互斥, 能够避免碰撞, 但会限制可行并发传输。

5.3 仿真结果分析

首先将节点静止, 检验本文所提方法的基础性能。图 2 展示业务流准入效用, 即式(23), 随业务流数量的变化。需要注意的是, 基准 1 采用逐时隙调度, 无法预先判断某个流是否要接入, 因此准入效用实际上指最终满足端到端时延要求的流的权重和。可以看到, 准入效用随业务流数量增加而整体下降。在低负载时只有本文方案和基准 2 能实现 100% 的业务流准入。在仿真参数范围内, 本文方案的准入效用与理想上界的差距约为 4%, 与基准 2 性能接近。这表明, 在静态场景中, TA 包络锁定和统一鲁棒约束只带来了较小的准入性能损失。相反, 基准 1 和基准 3 的准入效用会随业务流数量的增加出现持续下降。这是因为基准 1 和 3 引入保护间隔, 一方面导致有效时隙减少, 另一方面增大了端到端时延, 使得高负载下链路无法满足所有业务的速率或时延要求。

动态场景中, 控制面根据首个调度周期生成调

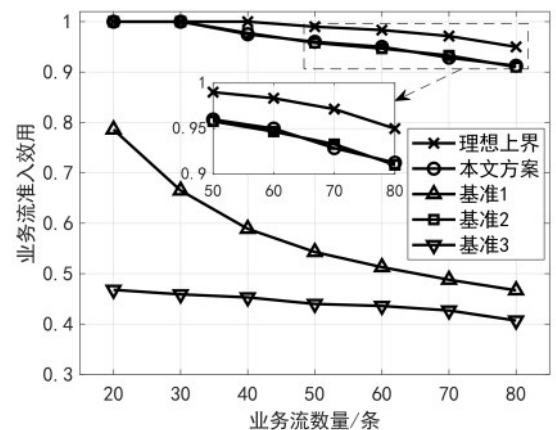


图2 确定性流准入效用随业务流数量的变化

度矩阵,并在10秒内重复执行该矩阵,其余1999个周期的业务流保持不变。

为量化TA包络锁定机制带来的资源开销,图3展示了全网节点一时隙资源利用率随业务流数量的变化。根据3.1节,本文方案最高资源利用率在50%~66.7%之间。GP法的利用率与GP占比有关,基准1最高为33.3%,基准3最高为80%。在趋势上,利用率随负载增加而上升,并趋于稳定;但无法达到理论最大值,这是信道容量限制了准入流数量。负载过高时,本文方案的资源利用率略微下降,相较于理想上界仅低3%。根据3.1节的分析,这是因为有更多流的TA包络包括了3个时隙,造成部分资源浪费。基准2在高负载区域出现利用率下降现象,反映出忽略传播时延不确定性会导致调度冲突,从而降低资源利用效率。基准3的时隙利用率较本方案高30%左右,这是因为其单时隙有效时间比例为80%,而本文所提TA包络需要冗余时隙。但由于基准3在调度周期内仅10个长时隙,较粗的调度粒度面对源宿节点高度分散的业务流时仅服务少量的业务,且增加了多跳等待时间。

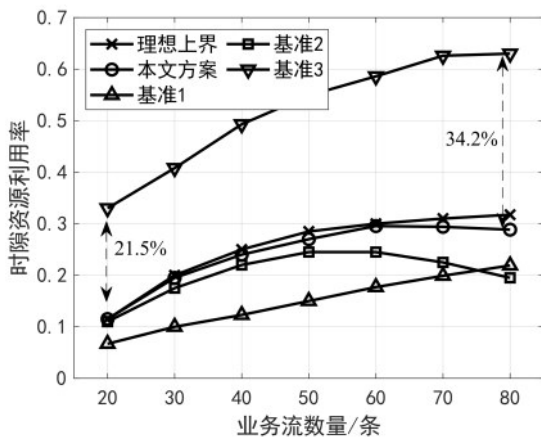


图3 全网节点一时隙资源利用率随业务流数量的变化

表2给出了默认动态场景下准入流的准时交付率,以及准时交付流的平均端到端时延和平均跳数。本文方案与理想上界表现一致,表明TA包络能够覆盖控制周期内的时延变化,且附加时延较小。基准1采用逐时隙贪婪调度,中继排队使仅55.3%的准入流满足时限;基准2的固定时延关系随节点运动失效,准时交付率降至43.6%,其较低平均时延源于仅统计准时交付样本。基准3按最大单跳时延设置固定GP:在实际传播时延未超出GP

保护范围时,可规避传播时延引起的收发碰撞;默认参数下6.5%的准时交付率损失主要来自长时隙降低调度粒度,使部分准入业务的多跳排队与等待时延超过端到端时延约束。其平均跳数仅为1.5,也说明该方案在既定时延预算下主要承载短路径业务。取消时延约束后,其平均端到端时延增至2553.21 μs 。相比之下,本文方案的平均端到端时延缩短28.9%。

表2 默认参数下准入流的性能表现

方法	准入流 准时交付率	平均 端到端时 延/ μs	平均 跳数
理想上界	100%	516.48	2.9
本文方案	100%	523.74	2.8
基准1	55.3%	375.19	2.0
基准2	43.6%	465.30	2.8
基准3	93.5%	736.85	1.5
基准3 (时延不限)	100% (交付成功率)	2553.21	2.8

进一步验证动态场景下的性能,使节点的单方向最大运动速率在1~100 m/s范围内变化。业务准入效用和准时交付率的变化分别如图4和图5所示。对于基准1,图4和图5的曲线相同。

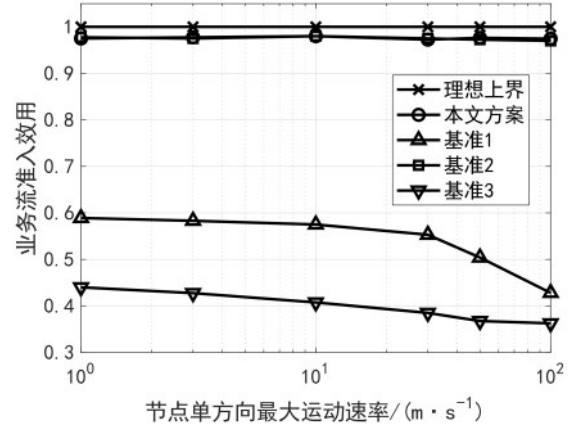


图4 确定性流准入效用随节点运动速度的变化

在业务流准入效用方面,本文和基准2均不使用GP,直接利用TA机制。机动性不影响基准2的准入判断,因此二者准入效用相近,如图4所示。这表示二者在周期开始时获得了相同或接近的加权准入目标值,但动态执行阶段可靠性不同。基准1

在高速下重复执行首周期的贪婪调度，碰撞逐渐加剧；基准 3 虽采用固定 GP，但最恶劣干扰约束随传播时延不确定区间扩大而收紧，因而准入效用下降。图 5 中，基准 2 因固定时延关系失效而持续下降；基准 3 在高速下减少准入并偏向短路径业务，准时交付率有所回升，但当实际传播时延超出固定 GP 的保护范围时，仍可能发生收发冲突。本文方案通过 TA 包络覆盖跨时隙状态变化，在保持高准入率的同时实现了与理想上界一致的 100% 准时交付率。相较包含 20% GP 的方案，本文方案时隙利用率低约 30%，但可容忍 10^2 量级的节点运动。

为量化 TA 包络的锁定代价，构造仅取消不确定区间额外时隙锁定的“无冗余锁定”消融，其余设置与本文方案相同。记非因果理想上界、匹配消融和本文方案的准入效用分别为 U_1, U_2 和 U_3 ，采用 $(U_2 - U_3)/(U_1 - U_3) \times 100\%$ 计算保守锁定损失占比。表 3 给出了不同控制周期和节点速度下的结果，其中，TA 包络平均分布依次表示包含 1、2 和 3 个时隙的链路比例。可以看到，随着 T_C 和 $v_{\max}$ 增大，传播时延不确定区间扩张，部分链路的发端占用区间跨越额外的时隙边界，TA 包络逐渐由 2 时隙向 3 时隙迁移。与包络扩张相对应，本文方案

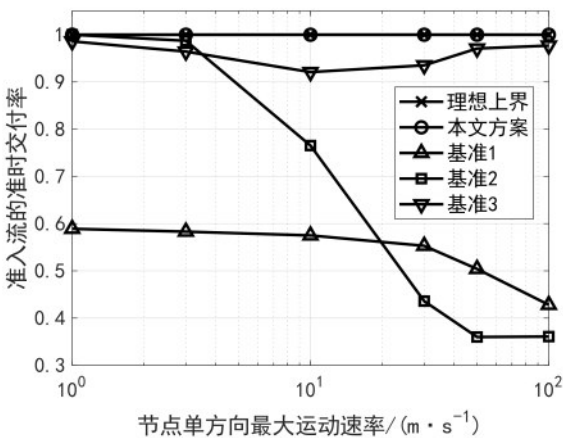


图5 准入流中的准时交付率随节点运动速度的变化

的准入效用总体上由 0.9954 下降至 0.9124，TA 额外锁定损失占总准入效用损失的比例总体上由 19.57% 增加至 78.54%。需要指出的是，TA 包络均值相同或接近时，准入效用及损失占比不一定相同。这是因为准入效用不仅取决于平均包络大小，还取决于额外锁定发生在哪些链路和时隙，以及其他约束的共同作用。此外，准入业务的准时交付率仍保持 100%，表明 TA 包络能够有效覆盖控制周期内的传播时延变化。

表3 不同控制周期及运动速度下的性能及 TA 包络

$(v_{\max}, T_C)$ (m/s, s)	本文方案 准入效用	保守锁定损失占比	TA 包络平均时隙数	TA 包络平均分布
(0, 1)	1.0000	—	2.000	0:1:0
(30, 1)	0.9954	19.57%	2.025	0:0.975:0.025
(60, 1)	0.9922	24.36%	2.050	0:0.95:0.05
(100, 1)	0.9913	31.03%	2.050	0:0.95:0.05
(0, 5)	1.0000	—	2.000	0:1:0
(30, 5)	0.9834	45.18%	2.050	0:0.95:0.05
(60, 5)	0.9766	59.83%	2.100	0:0.9:0.1
(100, 5)	0.9758	60.33%	2.150	0:0.85:0.15
(0, 10)	1.0000	—	2.000	0:1:0
(30, 10)	0.9746	57.09%	2.100	0:0.9:0.1
(60, 10)	0.9707	60.75%	2.275	0:0.725:0.275
(100, 10)	0.9687	61.34%	2.379	0:0.621:0.379
(0, 20)	1.0000	—	2.000	0:1:0
(30, 20)	0.9715	58.95%	2.275	0:0.725:0.275
(60, 20)	0.9549	67.63%	2.480	0:0.52:0.48
(100, 20)	0.9124	78.54%	2.766	0:0.234:0.766

在计算复杂度方面,对于本文方案、基准2和基准3,完整的计算时间包括冲突图生成、约束生成及利用 Gurobi 进行求解的时间;对于基准1,考虑每个时隙的调度生成时间之和。100 次实验的平均计算时间如图6所示,误差棒表示统计标准差。可以看到,由于基准1采用基于贪婪的调度策略,每个时隙对时延最紧急的业务流进行调度,因此调度计算时间最少。本文方案与基准2所需的计算时间接近,但额外计算时延区间、TA 包络和累积 SINR 约束,导致计算时间略高。如4.4节所述,利用加速策略,计算时间未出现指数爆炸,而是随网络规模近似线性增长。尽管本文方案的耗时高于基准,但在业务准入效用、准时交付率及端到端时延上均有更好的表现。考虑到控制周期远长于计算时间,该计算开销是可以接受的。

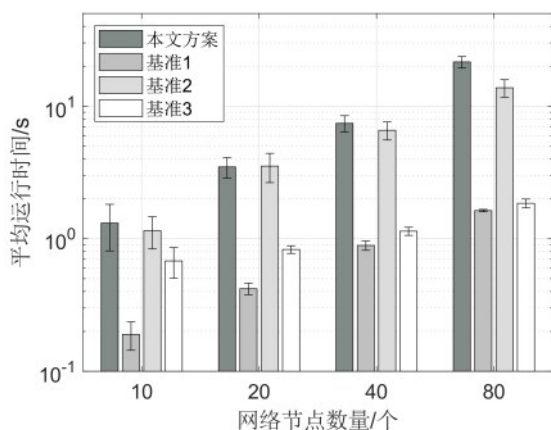


图6 平均计算时间随网络规模的变化

图7展示了与时间展开冲突图相关的消融实验结果的均值及95%置信区间。可以看到,同时隙空间冲突图与时间展开冲突图的计划准入效用基本处于同一水平,但其准时交付率仅为20%~30%。这是因为前者是后者的约束松弛,使计划准入效用偏高。但仅依靠相同接收时隙构造冲突关系会遗漏传播时延造成的跨时隙半双工冲突,较高的计划准入性能并不能转化为实际可靠交付。保守空间投影冲突图通过禁止所有潜在冲突时隙组合,使准时交付率始终保持100%,但限制了时空复用;当业务流数量增加至60条时,计划准入效用下降至0.754。时间展开冲突图能够准确刻画TA包络引起的跨时隙冲突,在避免乐观图模型调度失效的同时,减少保守投影造成的不必要互斥,从而在调度

可靠性和时空资源复用之间取得更好的平衡。

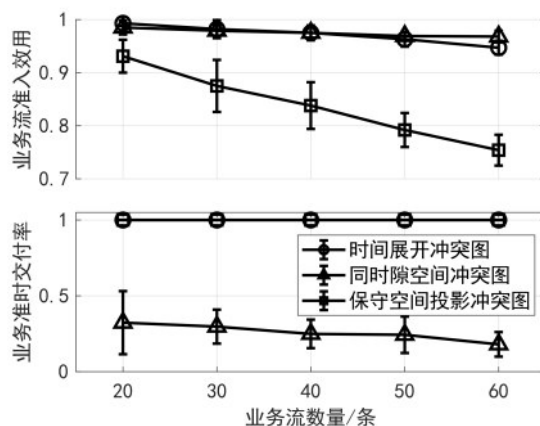


图7 时间展开冲突图消融实验结果 (均值及95%置信区间)

6 结论

本文面向机动多跳无线网的传播时延不确定性问题,提出TA包络锁定机制,并构建时间展开冲突图,实现对跨时隙半双工冲突、分数干扰和端到端时延约束的联合建模与优化。仿真表明,在本文参数范围和10秒控制周期内,所提方案以有限的冗余时隙为代价,使准入流的准时交付率达到100%,同时保持较小的静态性能损失,并提高对节点机动性的容忍能力。该方案可为低空移动网络等动态多跳场景的确定性传输提供参考。

参考文献:

- [1] Adil M, Qiu T, Zhou X, et al. Integrated 5G and time sensitive network-ing for emerging applications: a survey of advancements, challenges, and future directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 4016-4050.
- [2] 黄韬, 刘江, 汪硕, 等. 未来网络技术与发展趋势综述[J]. 通信学报, 2021, 42(01): 130-150.
Huang T, Liu J, Wang S, et al. Survey of the future network technology and trend[J]. Journal on Communications, 2021, 42(01): 130-150.
- [3] 3GPP. Study on deterministic communication services assurance (Release 18)[R]. 3GPP TR 28.865, 2024.
- [4] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks - amendment 25: enhancements for scheduled traffic[S]. IEEE Std 802.1Qbv-2015, 2016.
- [5] Zhao P, Xiang Z, Ge N. Robust relay placement for millimeter wave backhaul via link-quality-based cooperative coevolution[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2026, 15: 1742-1746.
- [6] Kim H, Kim J, Hong D. Dynamic TDD systems for 5G and beyond: a survey of cross-link interference mitigation[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2315-2348.

- [7] Du C, Zhang H, Zhang X, et al. A full-duplex based integrated sensing and communication survey: principles, key techniques, and receiver design[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 1285-1317.
- [8] Chowdhury A, Chopra R, Murthy C R. Can dynamic TDD enabled half-duplex cell-free massive MIMO outperform full-duplex cellular massive MIMO?[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(7): 4867-4883.
- [9] Yang S, Ma J, Liu Y. Wireless network scheduling with discrete propagation delays: theorems and algorithms[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2024, 70(3): 1852-1875.
- [10] Lee H, Roberts I P, Heo J, et al. Can TDD be employed in LEO satcom systems? Challenges and potential approaches[J]. IEEE Communications Magazine, 2026.
- [11] Fonseca L S, Monteiro V F, Sousa D A, et al. Throughput-oriented resource allocation for TDD NTN with per-UE constraints[C]//2025 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). IEEE, 2025: 1-7.
- [12] Traspadini A, Giordani M, Zorzi M. Enhanced time division duplexing slot allocation and scheduling in non-terrestrial networks[C]//2024 58th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2024: 835-841.
- [13] Pedersen K I, Berardinelli G, Frederiksen F, et al. A flexible 5G wide area solution for TDD with asymmetric link operation[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(2): 122-128.
- [14] Zhu J, Sun Y, Peng M. Timing advance estimation in low earth orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 4366-4382.
- [15] Hsu C C, Kuo M S, Chou C F, et al. The elimination of spatial-temporal uncertainty in underwater sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 21(4): 1229-1242.
- [16] Luque-Nieto M Á, Moreno-Roldán J M, Otero P, et al. Optimal scheduling and fair service policy for STDMA in underwater networks with acoustic communications[J]. Sensors, 2018, 18(2): 612.
- [17] Cho A, Yun C, Park J, et al. Design of a block time bounded TDMA (BTB-TDMA) MAC protocol for UANets[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(17-18): 2215-2226.
- [18] Mandal P. Performance comparison of TDMA variants for underwater acoustic sensor networks[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 92: 20-30.
- [19] Cho A R, Yun C, Lim Y K, et al. Asymmetric propagation delay-aware TDMA MAC protocol for mobile underwater acoustic sensor networks [J]. Applied Sciences, 2018, 8(6): 962.
- [20] 王鹏, 张修社, 索龙, 等. 基于随机时变图的时间确定性网络路由算法[J]. 通信学报, 2021, 42(09): 21-30.
- Wang P, Zhang X, Suo L, et al. Time deterministic network routing algorithm based on stochastic temporal graph[J]. Journal on Communications, 2021, 42(09): 21-30.
- [21] Akdeniz M R, Liu Y, Samimi M K, et al. Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1164-1179.
- [22] Xiang Z, Ge N, Feng W, et al. Joint beamforming and z-chain structuralization for satellite-assisted multi-hop networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2026, 74: 2420-2433.
- [23] Wang T, Wang X. DeepRP: Bottleneck theory guided relay placement for 6G mesh backhaul augmentation[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(3): 1744-1758.
- [24] Cheng J, Ke Y, Fu A W C, et al. Finding maximal cliques in massive networks[J]. ACM Transactions on Database Systems, 2011, 36(4): 1-34.
- [25] Gurobi Optimization, LLC. Gurobi optimizer reference manual (Version 13.0) [EB/OL]. Beaverton: Gurobi Optimization, LLC, 2026 [2026-04-20]. <https://www.gurobi.com>.
- [26] 3GPP. NR; Requirements for support of radio resource management: TS 38.133[S]. France: ETSI, 2026.



向子豪 (1999—), 男, 清华大学博士生, 主要研究方向为自组织网络架构和无线复杂网络。

葛宁 (1971—), 男, 博士, 清华大学研究员、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信和空天地海一体化网络等。



陆建华 (1963—), 男, 博士, 清华大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信和空天地海一体化网络等。