

基于位置信息的路侧单元数据传输调度优化策略

时颖^{1,2},张丹洋²,王桐¹,陈义平²,付鑫^{3*}

(1.哈尔滨工程大学信息与通信工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001; 2.黑龙江科技大学电子与信息工程学院,黑龙江 哈尔滨 150022; 3.长安大学运输工程学院,陕西 西安 710064)

摘要:针对如何降低车路协同系统中路侧单元间载带中继数据传输总时延的问题,考虑路侧单元覆盖范围内 V2I(vehicle-to-infrastructure)下行数据传输速率自适应变化特性,提出一种基于车辆位置信息的数据传输调度策略。该策略综合考虑数据更新的随机性、位置差异的数据传输速率自适应性,依据数据缓存队列的状态转移构建马尔科夫链模型;同时,考虑路侧单元覆盖范围内存在多辆车的情况,提出基于车辆速度和车辆位置联合权重的车辆优先通信模型,以此为基础确定通信概率服务策略;建立以数据传输总时延最小为目标的非线性优化函数,通过线性化求解获得路侧单元数据传输调度最优策略。仿真结果表明,在车辆到达率、数据到达率变化的条件下,该策略均能有效减少传输总时延,且该策略能抵御数据到达率的变化,具有较好的数据传输稳定性。

关键词:车路协同系统;路侧单元;数据传输;位置信息;马尔科夫链;时延

中图分类号:U491.2; TP273

文献标志码:A

引用格式:时颖,张丹洋,王桐,等.基于位置信息的路侧单元数据传输调度优化策略[J].山东大学学报(工学版),2025,55(3):25-33.

SHI Ying, ZHANG Danyang, WANG Tong, et al. Data transmission scheduling optimization strategy of roadside unit based on location information[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(3):25-33.

Data transmission scheduling optimization strategy of roadside unit based on location information

SHI Ying^{1,2}, ZHANG Danyang², WANG Tong¹, CHEN Yiping², FU Xin^{3*}

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China; 2. School of Electric and Information Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, Heilongjiang, China; 3. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To address the problem of how to reduce the total delay of data transmission with relay between roadside units, considering the adaptive variation characteristics of the V2I downlink data transmission rate within the coverage of roadside units, a data transmission scheduling strategy based on vehicle location information was proposed. This strategy comprehensively considered the randomness of data update and the adaptability of data transmission rate of location difference, and constructed a Markov chain model based on the state transition of a data cache queue. At the same time, considering the existence of multiple vehicles in the roadside unit coverage area, a vehicle priority communication model based on the joint weight of vehicle speed and vehicle position was proposed to determine the communication service strategy. A nonlinear optimization function with the objective of minimizing the total delay of data transmission was established, and the optimal data transmission scheduling strategy of the roadside unit was obtained by linearization. The simulation results showed that the LTS strategy could effectively reduce the total transmission delay under the condition of vehicle arrival rate and data arrival rate change, and the strategy could resist the change of data arrival rate and had good stability of the data transmission.

收稿日期:2024-09-06

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1512002);国家自然科学基金资助项目(62372131);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102343516);黑龙江省属高校基本科研业务费资助项目(2022-KYYWF-0564,2023-KYYWF-0531)

第一作者简介:时颖(1980—),女,黑龙江鸡西人,教授,硕士生导师,硕士,主要研究方向为车联网与智能交通。E-mail:s_ying@hrbeu.edu.cn

* **通信作者简介:**付鑫(1982—),男,山东日照人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为交通运输系统。E-mail:fuxin@chd.edu.cn

Keywords: cooperative vehicle-infrastructure system; roadside units; data transmission; location information; Markov chain; time delay

0 引言

V2X(vehicle to everything, V2X)通信作为智能交通系统发展的关键要素,是智能交通协同指挥系统的运行基础保障,在提升道路安全、优化交通流量、满足用户信息娱乐需求等方面发挥着至关重要的作用^[1-2]。与传统的移动数据应用相比,V2X能使用多样的用户设备和无线电接入模式进行端到端(end to end, E2E)通信,包括车对道路基础设施(vehicle to infrastructure, V2I)通信、车对人(vehicle to person, V2P)通信和车对车(vehicle to vehicle, V2V)通信等。为确保高效、可靠的E2E通信,系统需要特定的传输要求,如有效数据载荷大小、消息类型和周期以及服务质量等。由于V2X通信承担着车联网中的环境感知、信息交互与协同控制的保障任务,对传输时延敏感,因此端到端时延是评价通信质量的关键指标之一^[3]。

车辆快速移动导致车联网拓扑结构变化频繁,且网络连接具有间歇性,这些因素势必影响E2E通信的低时延需求。为降低时延,学者们已从多方面展开了相关研究。(1)从资源分配管理方面构建V2V/V2I通信决策模型,实现降低时延、丢包率等目标优化策略^[4]。(2)通信模式方面。综合V2X通信的副链路模式、蜂窝模式以及组合通信模式,构建车辆网络元素的关联图,寻求最佳传输路径以获得时延最小化^[5]。(3)通信架构方面。建立多层通信架构增加数据传输的选择路径,继而降低时延^[6-7];引入软件定义网络(software defined network, SDN)的车联网服务架构,采取集中式数据调度分发模式,计算最优数据传输路由路径,最大限度上降低端到端时延^[8]。(4)车辆队列模式方面。将具有一定数量的车辆以分簇形式或车辆编队的形式分组,成员车辆可借助成员间、簇头或编队队长等车辆与其他组、道路基础设施等实体进行数据交互,有效降低通信时延^[9-10]。除此之外,基于车路协同技术的智能交通通信将基站(base station, BS)或路侧单元(road side unit, RSU)等路侧设备缓存数据用于信息交互,也可有效降低通信时延^[11]。

车路协同系统中RSU不仅能为驶入覆盖范围的车辆提供缓存信息服务,还能通过车载中继方式将缓存数据转发给其他RSU,以保证交通数据

传输的时效性^[12-13]。载带中继数据传输系统性能受车速状态、传输速率以及载带数据等多种因素影响,且其传输途径主要依赖于V2I通信,因此有必要对V2I通信数据传输策略展开研究。文献[14]为推导最优的数据调度策略,通过联合通信资源、缓存状态、计算资源、车辆的移动性以及数据的延迟,建立马尔科夫决策模型实现时延约束下的数据传输;文献[15]提出多智能体双深度Q网络方案,以稳定系统并最大化V2I链路的总容量,同时满足车辆到车辆链路的可靠性和时延约束;文献[16]研究了车辆行驶在接入点覆盖区域连续接入过程的进展情况,且评估了吞吐量对于不同条件的依赖性,如数据包错误率、车辆速度、平均数据包时延等。综上所述,数据传输调度策略研究多数从系统性能分析角度出发。除此之外,还有以RSU部署为出发点、确保网络容量同时降低网络时延展开的数据传输方案设计^[17]以及针对自供电RSU的能量消耗和服务率问题展开的数据分组调度优化策略^[18]。以上都是从RSU部署、数据缓存、能量消耗等方面研究数据传输的时延,但未考虑车辆到达路侧单元不同位置的自适应传输速率对数据传输时延的影响。

为此,针对路侧单元间数据载带中继的时延最小化问题,本研究提出基于车辆位置信息的路侧单元数据传输策略,简称为位置传输策略(location transmission strategy, LTS)。该策略考虑了路侧单元内新数据包到达的随机性以及V2I通信下行数据传输速率的自适应性,根据路侧单元覆盖范围内车辆位置和车辆速度建立联合权重评定车辆通信优先级,综合车辆位置信息状态和数据缓存队列长度状态进行数据传输决策。

1 系统模型

高速公路直行道路交通系统场景模型如图1所示。图1中RSU位于道路沿线,车辆在道路上行驶。配有高性能感知设备和强计算能力的RSU将收集或计算获取的周围环境信息、实时交通状态和控制决策等信息通过车辆以载带中继方式转发给其他RSU,设定两个RSU间距为 S ,通信半径为 R 。在RSU与车辆进行V2I下行数据传输过程中,为不失一般性,数据传输速率不固定,采用随车辆位置变化而自适应变化的传输速率方案^[19]。系统模型

由数据缓存区模型、车辆速度状态模型、车辆位置模型、车辆通信优先级模型、时延计算模型、概率传输策略模型构成。

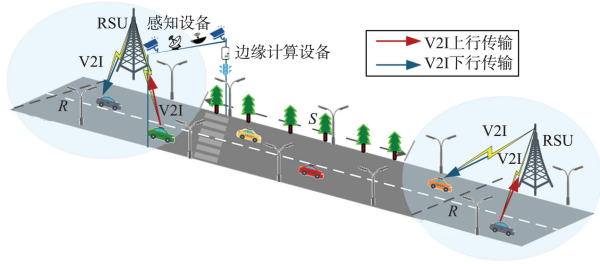


图1 车路通信场景示意图

Fig.1 Vehicle-road communication scenario

1.1 数据缓存区模型

路侧单元将通过监测、感知与计算等方式获取的信息数据,以交通数据包形式通过缓存技术存储在数据缓存队列中,按序排队等待传输。考虑离散时隙系统,在每时隙开始,获取的交通数据包随机到达缓存队列内,遵循伯努利过程。定义随机变量 $a[t]$ 为第 t 时隙开始到达的数据包数,满足独立同分布特性,其概率分布函数为

$$\Pr\{a[t]=k\}=l_k, \quad (1)$$

式中,概率 $l_k \in [0,1]$, $k \in \{0,1,\dots,K\}$,且 $\sum_{k=0}^K l_k = 1$ 。根据上式定义,缓存队列的数据包平均到达率为

$$\bar{\alpha} = \sum_{k=0}^K kl_k. \quad (2)$$

在第 t 时隙结束时,缓存队列长度 $x[t]$ 更新为 $x[t] = \max\{\min\{x[t-1]+a[t], Q\}-s[t], 0\}$, (3)

式中, Q 为数据缓存队列的最大长度, $s[t]$ 为路侧单元在第 t 时隙内传输数据包数。若假设新到达的交通数据包可以立即传输出去,则新到达的交通数据和已缓存在队列中的交通数据包可以不做区分。此时,定义等价队列状态为

$$r[t] = x[t] + a[t],$$

则 $r[t+1] = \max\{0, r[t] - s[t] + a[t+1]\}$ 。 (4)

1.2 车辆速度状态模型

在车辆交通流理论中,自由流交通状态下的速度满足正态分布,车辆到达路侧单元的时间服从参数为 n 的泊松分布,将接连进入路侧单元范围内的相邻车辆到达时间间隔定义为 $\bar{\omega}$,则 $\bar{\omega}$ 遵循负指数分布^[20],其概率密度函数可以描述为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} (t > 0), \quad (5)$$

式中, λ 为覆盖范围内的车辆到达率。其概率分布函数可表示为

$$F(t) = P(\bar{\omega} \leq t) = 1 - e^{-\lambda t} (t > 0), \quad (6)$$

若每个时隙长度为 Δt ,则根据式(6)可知,时隙内至少一辆车到达 RSU 的概率为 $\bar{F} = 1 - e^{-\lambda \Delta t}$ 。

在车辆交通理论中,自由流交通状态下的车速 v 服从均值为 \bar{V} 、标准差为 σ 的正态分布,其概率密度函数^[20]

$$f_v^*(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{v-\bar{V}}{\sigma}\right)^2}. \quad (7)$$

车辆在高速公路行驶过程中,由于统一执行限速政策,车速分布呈现截断概率分布,因此用截断概率密度函数表示车速的分布,即

$$f_v(v) = \frac{f_v^*(v)}{\int_{v_{\min}}^{v_{\max}} f_v^*(s) ds} = \frac{2f_v^*(v)}{\operatorname{erf}\left(\frac{v_{\max}-\bar{V}}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{v_{\min}-\bar{V}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}, \quad (8)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \sqrt{2/\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

式中 $\operatorname{erf}(x)$ 是误差函数。

定义 v_{\min} 和 v_{\max} 分别为最小车速和最大车速,即车速 $v \in [v_{\min}, v_{\max}]$ 。为了建立概率策略,将连续车速量化成 W 个离散车速状态 v_w , $w \in \{1, 2, \dots, W\}$ 。令 \mathbf{V} 为车速状态向量, $\mathbf{V} = [v_1 v_2 \dots v_W]$,其中 $v_1 = v_{\max}$, $v_W = v_{\min}$,且满足车速 $v_w > v_{w+1}$ 。为表示当前时隙没有车辆进入覆盖范围内的情况,额外定义 $v_{w+1} = 0$ 表示没有车辆到达^[21]。由于车速状态是时变的,但在不同时隙下是独立且同分布的,令 δ_w 为车辆处于车速状态 v_w 的概率,依据式(8)推导可得

$$\delta_w = \begin{cases} \bar{F} \int_{v_{w+1}}^{v_w} f_v(v) dv_w, & (1 \leq w \leq W) \\ 1 - \bar{F}, & (w = W + 1) \end{cases}. \quad (9)$$

1.3 车辆位置模型

考虑高速路段中车路协同通信场景,车辆可与道路沿线部署的等间距和串行连接的路侧单元进行 V2I 通信。设车辆沿道路驾驶穿越路侧单元覆盖区,每时隙内车辆速度保持不变。将路侧单元覆盖范围划分为 Z 个空间区域,每个区域 $z \in \{1, 2, \dots, Z\}$,其对应长度为 d_z 。车辆在经过路侧单元覆盖范围过程中,车辆和路侧单元间的距离不断发生变化。文献^[22]指出满足 IEEE802.11b 标准的路侧单元具有自适应传输速率特性,即车辆根据当前时隙所在路侧单元的位置不同,车辆与路侧单元间的数据传输具有不同的有效载荷传输速率,用 c_z 表示,各区域对应传输速率参数如图2所示。

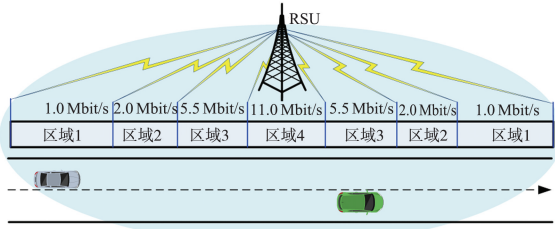


图 2 位置区域划分及自适应传输速率

Fig.2 Location area partitioning and adaptive transmission rate

由图 2 可以看出,根据车到路侧单元的距离划分为左右对称的区域,当车辆到达路侧单元的距离越近,传输速率越快,能传输更多交通数据包,因此靠近路侧单元的车辆会接收到更多交通数据。当时隙长度足够小时,车辆在某个时隙内到达路侧单元覆盖区域的车速是一定的,由于车辆处于位置区域 z 的概率^[23]为

$$p_r(z) = \frac{d_z}{2R}, \quad (10)$$

所以车辆以车速 v_w 出现在区域 z 的概率为

$$\beta_{w,z} = \delta_w p_r(z). \quad (11)$$

1.4 车辆通信优先级模型

每时隙内路侧单元最多选择 1 辆车进行中继转发^[13,21]。在某个时隙内,路侧单元覆盖区域内可能有多辆车可作为选择对象,为此建立车辆通信优先级模型,作为路侧单元决策依据。一方面,车辆速度越快,车辆在覆盖区域内的停留时间越短,若路侧单元优先为快速车辆提供服务,并向其传输更多的交通数据包,能有效降低数据传输时延;另一方面,路侧单元与车辆通信之间的距离越小,传输数据的速率增加,导致传输的数据量增加,也能有效降低数据传输时延。因此,通过车辆速度和车辆位置构建联合权重 $(\theta_v \cdot M_{v,i} + \theta_z \cdot M_{z,i})$,其中: θ_v 、 θ_z 分别为车辆 i 的车速权重系数和位置权重系数,且 $\theta_v + \theta_z = 1$; $M_{v,i}$ 、 $M_{z,i}$ 分别为车辆 i 的车速 v 和位置 z 的标准化值。路侧单元按照权重大小顺序依次决策是否选择该车辆进行中继转发,如图 3 所示。

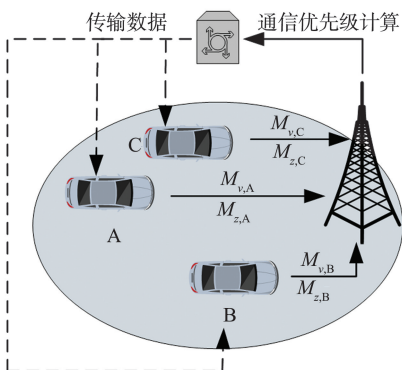


图 3 车辆通信优先级模型

Fig.3 Vehicle communication priority model

1.5 时延计算模型

路侧单元间的车辆载带中继数据传输所产生的总时延主要由排队时延、下行链路时延和传送时延构成。

(1) 排队时延

排队时延是待传输数据在路侧单元数据缓存区内的排队等待时间。根据 Little 定理,缓存队列平均排队时延

$$\Omega = \frac{1}{\bar{\alpha}} \sum_{k=0}^{\rho} k \pi_k, \quad (12)$$

式中 π_k 为 $\{r[t] = k\}$ 的稳态概率。

(2) 下行链路时延

下行链路时延是指从交通数据发送端(路侧单元)到接收端(移动车辆)的无线链路传输时延,它取决于传输数据量和传输速率。在车辆位置模型中,将路侧单元覆盖范围划分为不同区域 z ,各区域传输速率 c_z 不同。设定路侧单元传输数据 zD 给区域 z 内的移动车辆,则下行链路时延

$$\tau_z = \frac{zD}{c_z}, \quad z \in \{1, 2, \dots, Z\}, \quad (13)$$

式中 D 为 1 个数据包所含的数据量。

(3) 传送时延

传送时延是指数据经当前路侧单元内移动车辆传送到另一路侧单元内所产生的时延。将连续的高速公路限速区间的车速离散化为 W 个车速状态,则经由车辆载带中继数据传输所产生的传送时延也具有 W 个离散值的特点。当车辆行驶到路侧单元覆盖范围内,路侧单元将车速 v_w 对应到其车速限制区域的平均值,则车速 v_w 对应产生的平均传送时延为

$$\varphi_w = \frac{S}{0.5(v_{w+1} + v_w)}, \quad 1 \leq w \leq W. \quad (14)$$

根据式(14),可发现传送时延与车速成反比,因此数据传送时延满足: $\varphi_1 < \varphi_2 < \dots < \varphi_w$ 。当车辆不在路侧单元的覆盖范围内,即 $w = W + 1$ 时,路侧单元无法实现数据的传输,或者路侧单元决策在当前时隙不进行数据传输,都将导致传送时延为 0。

1.6 基于位置信息的概率传输策略模型

在每时隙开始,路侧单元按照各车辆通信优先级次序,根据路侧单元数据缓存队列状态和车辆到达位置状态进行概率通信决策。

(1) 数据缓存队列状态 $r[t]$ 。每时隙开始时

到达的新数据包,与前一时隙结束时缓存队列长度完成的更新状态。

(2) 车辆到达位置状态 $z[t]$ 。路侧单元根据车

辆到达位置状态确定数据传输的速率。如果车辆与路侧单元间的距离较近,数据速率越大;反之,则越小。

路侧单元根据队列状态 $r[t]=k$ 和车辆位置状态 $z[t]=z$,对优选车辆作出传输决策 $u[t]=u$ 的概率 $f_{k,z}^u$ 定义为

$$\Pr\{u[t]=u | (r[t]=k, z[t]=z)\} = f_{k,z}^u, \quad (15)$$

式中:当 $u=1$ 时, $f_{k,z}^1$ 表示路侧单元向到达覆盖区域的车辆发送交通数据包;当 $u=0$ 时, $f_{k,z}^0$ 表示路侧单元不给车辆发送交通数据包,其中 $z \in \{1, 2, \dots, Z\}$, $k \in \{0, 1, \dots, Q\}$ 。

若当前队列状态 $k=0$,表示路侧单元没有交通数据待传输,发送数据的概率为 0,不发送数据的概率为 1,即 $f_{0,z}^1=0$ 和 $f_{0,z}^0=1$, $z \in \{0, 1, 2, \dots, Z\}$ 。若当前队列状态 $k>0$,表示路侧单元缓存队列内有缓存数据等待传输:若路侧单元覆盖范围内无车辆到达,传输交通数据的概率为 0,即 $f_{k,z}^1=0$,不传输交通数据的概率为 1,即 $f_{k,z}^0=1$;若路侧单元覆盖范围内有车辆到达时,传输交通数据的概率为 $f_{k,z}^1$,不传输交通数据的概率为 $1-f_{k,z}^1$ 。显然对 $\forall k, z$, 满足 $\sum_{u=0}^1 f_{k,z}^u = 1$ 。

2 马尔科夫建模

由于每个时隙内进入路侧单元覆盖范围内的车辆数、车辆位置以及路侧单元所获取的更新数据到达等状态都具有随机性,势必导致路侧单元的数据缓存队列状态以及调度策略均具有不确定性,因此本研究采用具有随机性数学模型描述的马尔科夫链进行建模。通过分析路侧单元在数据传输过程中数据队列长度状态的转移,并进一步对路侧单元与覆盖范围内车辆数据传输的总时延进行分析。

为构建概率传输策略,定义路侧单元每个时隙交通数据队列状态从 m 转移到 n 的一步转移概率

$$\rho_{m,n} = \Pr\{r[t]=n | r[t]=m\}。 \quad (16)$$

定义 $\lambda_{k,d}$ 为 $r[t]=k$ 时的 d 步前转移概率,即 $\lambda_{k,d} = \rho_{k,k+d}$; $\mu_{k,e}$ 为 $r[t]=k$ 时的后转移概率,即 $\mu_{k,e} = \rho_{k,k-e}$ 。每个时隙路侧单元最多到达 K 个新数据包,最多传输 Z 个数据包,且更新数据到达超出路侧单元数据队列长度的部分认定为溢出,因此将系统队列状态转移分为以下 3 种情况进行分析,以 $r[t]=k$ 为例的状态转移如图 4 所示。

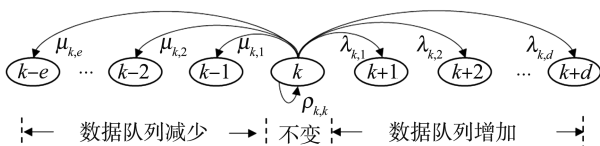


图 4 路侧单元交通数据队列状态转移

Fig.4 Traffic data queue state transition of RSU

(1) 情况 1

对任意时隙 t ,路侧单元根据数据队列长度 $r[t]=k$ 、车辆位置状态 $z[t]=z$,做出决策 $u[t]=u$ 后数据队列长度增加 d 单位的前向转移概率

$$\lambda_{k,d} = \begin{cases} \theta_d(1-u) \sum_{z=1}^Z \sum_{w=1}^W \beta_{w,z} f_{k,z}^0 + u \sum_{s=d+1}^K \sum_{w=1}^W \theta_s \beta_{w,s-d} f_{k,s-d}^1, & k \in [0, Q-K], d \in [1, K] \\ \theta_d(1-u) \sum_{z=1}^Z \sum_{w=1}^W \beta_{w,z} f_{k,z}^0 + u \sum_{s=d+1}^{Q-K} \sum_{w=1}^W \theta_s \beta_{w,s-d} f_{k,s-d}^1, & k \in [Q-K+1, Q-2], d \in [1, Q-k-1] \\ \theta_d(1-u) \sum_{z=1}^Z \sum_{w=1}^W \beta_{w,z} f_{k,z}^0, & (k \in [Q-K+1, Q-2], d=Q-k) \cup (k=Q-1, d=1) \\ 0, & (k \in [Q-K+1, Q-2], d=[Q-k+1, K]) \cup (k=Q-1, d \in [2, K]) \cup (k=Q, d \in [1, k]) \end{cases}, \quad (17)$$

式中 $(s-d) \leq Z$ 。

式(17)中根据数据队列转移前状态 k 联合转移后状态 d 是否达到队列饱和上限为界限,通过决策变量 u 的取值分段获得转移概率。当队列长度 $k \in [0, Q-K]$ 且 $d \in [1, K]$ 时,队列长度处在非饱和和临界状态,依据决策变量 u 进行状态转移。当 $k \in [Q-K+1, Q-2]$ 时,路侧单元数据队列将要达到饱和和上限,会有 3 种情况:若 $d \in [1, Q-k-1]$,数据队列仍未达到饱和,不影响路侧单元决策;若 $d=Q-k$,数据队列刚好达到饱和,则 $u=0$;其余情况转移概率为 0。

(2) 情况 2

对任意时隙 t ,路侧单元根据交通数据队列长度 $r[t]=k$ 、车辆位置状态 $z[t]=z$ 做出决策 $u[t]=u$ 后数据队列长度减少 e 单位的后向转移概率为

$$\mu_{k,e} = \begin{cases} u \sum_{n=0}^{\min\{K, k-e\}} \sum_{w=1}^W \theta_n \beta_{w,n+e} f_{k,n+e}^1, & k \in [1, Z-1], e \in [1, k] \\ u \sum_{n=0}^{\min\{K, Z-e\}} \sum_{w=1}^W \theta_n \beta_{w,n+e} f_{k,n+e}^1, & k \in [Z, Q], e \in [1, Z] \\ 0, & (k \in [1, Z-1], e \in [k+1, Z]) \cup (k=0, e \in [1, Z]) \end{cases}。 \quad (18)$$

式(18)中,当 $k \in [1, Z-1]$ 时,表示当前时隙路侧单元最多能够发送 K 个数据包,存在 2 种情况:

若 $e \in [1, k]$, 则转移后队列长度为 $\min\{K, k-e\}$; 若 $e \in [k+1, Z]$, 因超出当前时隙缓存区的数据队列长度, 则转移概率为 0。当 $k \in [Z, Q]$ 时, 表示路侧单元最多发送 z 数据包, 若 $e \in [1, Z]$, 则转移后队列长度更新为 $\min\{K, Z-e\}$ 。若 $k=0$, 表示当前时隙路侧单元数据队列为空, 则不发送数据。

(3) 情况 3

在前一个时隙路侧单元传输数据结束时, 缓存数据队列长度没有变化。根据马尔科夫性质, 将其队列状态一步转移概率表示为

$$\rho_{k,k} = \begin{cases} 1 - \sum_{d=1}^K \lambda_{k,d}, & k=0 \\ 1 - \sum_{d=1}^K \lambda_{k,d} - \sum_{e=1}^Z \mu_{k,e}, & 1 \leq k \leq Q-1 \\ 1 - \sum_{e=1}^Z \mu_{k,e}, & k=Q \end{cases} \quad (19)$$

由上述马尔科夫模型可以得到 $(Q+1) \times (Q+1)$ 数据队列状态的一步转移概率矩阵 \mathbf{A} 。令矢量 $\boldsymbol{\pi}$ 表示 $[\pi_0 \pi_1 \pi_2 \cdots \pi_Q]^T$, 其中上标 T 表示矩阵的转置。根据马尔科夫性质, 可知 $\mathbf{A}\boldsymbol{\pi} = \boldsymbol{\pi}$ 、 $\mathbf{1}^T \boldsymbol{\pi} = \mathbf{1}$ 。进一步结合式(17)~(19), 可发现稳态概率 $\boldsymbol{\pi}$ 由调度参数传输概率 $f_{k,z}^u$ 决定。

3 问题构造与求解

3.1 问题构造

根据时延计算模型和马尔科夫链状态转移, 依据车辆联合权重次序, 利用基于数据缓存队列状态和车辆位置信息的概率策略模型优化车辆中继转发数据传输策略, 以达到降低数据传输总时延的目的。将感知、计算等获取的交通数据包通过载带中继转发所产生的总时延主要由排队时延、下行链路时延、传送时延组成。数据传输平均总时延可综合为

$$T = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^Q k\pi_k + \frac{\sum_{w=1}^W \sum_{z=1}^Z \delta_w \frac{d_z}{2R} (\frac{D}{c_z} + \varphi_w) \cdot z \cdot \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{k,z}^1}{\sum_{w=1}^W \sum_{z=1}^Z \delta_w \frac{d_z}{2R} \cdot z \cdot \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{k,z}^1} \quad (20)$$

3.2 问题求解

求解目标是数据传输平均总时延的最小化, 因此优化目标问题可以描述为

$$\min T = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^Q k\pi_k +$$

$$\frac{\sum_{w=1}^W \sum_{z=1}^Z \delta_w \frac{d_z}{2R} (\frac{D}{c_z} + \varphi_w) \cdot z \cdot \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{k,z}^1}{\sum_{w=1}^W \sum_{z=1}^Z \delta_w \frac{d_z}{2R} \cdot z \cdot \sum_{k=0}^Q \pi_k f_{k,z}^1}, \quad (21)$$

式中, 系统的稳态概率约束条件分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\pi}\mathbf{A} = \boldsymbol{\pi} \\ \sum_{k=0}^Q \pi_k = 1 \end{cases},$$

系统参数取值的约束条件分别为

$$\begin{cases} \sum_{u=0}^1 f_{k,z}^u = 1, & \forall k, z \\ f_{k,z}^u \in [0, 1], & \forall k, z, u \end{cases}.$$

由于式(21)中稳态概率 π_k 是关于参数 $f_{k,z}^u$ 的非线性函数, 该优化目标属于非线性优化问题的求解, 解析求解困难。为简化该问题求解, 定义变量^[24]

$$y_{k,z}^u = \pi_k f_{k,z}^u \quad (22)$$

根据马尔科夫性质 $\sum_{z=1}^Z \sum_{u=0}^1 \pi_k f_{k,z}^u = \pi_k$ 和 $\sum_{u=0}^1 f_{k,z}^u = 1, \forall k, z$, 以及式(22)的定义, 可以获得 $\sum_{z=1}^Z \sum_{u=0}^1 y_{k,z}^u = \pi_k$ 。将式(22)代入式(21)中可得

$$\min T = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^Q k\pi_k +$$

$$\frac{\sum_{w=1}^W \sum_{z=1}^Z \delta_w \frac{d_z}{2R} (\frac{D}{c_z} + \varphi_w) \cdot z \cdot \sum_{k=0}^Q y_{k,z}^1}{\sum_{w=1}^W \sum_{z=1}^Z \delta_w \frac{d_z}{2R} \cdot z \cdot \sum_{k=0}^Q y_{k,z}^1}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{k=0}^Q \sum_{z=1}^Z \sum_{u=0}^1 y_{k,z}^u = 1 \\ 0 \leq y_{k,z}^u \leq \sum_{w=1}^W \frac{\delta_w d_z}{2R} \sum_{z=1}^Z \sum_{s=0}^1 y_{k,z}^s \end{cases} \quad (23)$$

采用 Lingo 数学求解软件对上述构造的时延问题进行分析并求解, 获得最优解 $\{y_{k,z}^{u*}\}$, 再由 $\sum_{z=1}^Z \sum_{u=0}^1 y_{k,z}^{u*} = \pi_k^*$ 得到最优稳态概率 $\{\pi_k^*\}$ 。实现时延最小化的路侧单元数据传输, 将数据传输策略优化并求解, 可得最优概率参数

$$f_{k,z}^{u*} = \frac{y_{k,z}^{u*}}{\pi_k^*} (\pi_k^* \neq 0) \quad (24)$$

4 仿真试验与结果分析

本章将通过 MATLAB 和 Lingo 软件进行仿真

试验,分析3种策略在不同交通数据到达率、不同车辆到达率以及不同权重下的数据传输总时延,验证LTS策略的优越性。

4.1 仿真参数设置

设定路侧单元时隙为1s,将路侧单元的覆盖区域划分为左右对称的4个传输区域,每个传输区域的传输速率如表1所示^[25]。

表1 各区域长度与传输速率

Table 1 Length and transmission rate of each region

覆盖区域	区域长度/m	传输速率/(Mbit·s ⁻¹)
区域1	200	1.0
区域2	100	2.0
区域3	50	5.5
区域4	100	11.0

假定在一个时隙内车辆的空间位置是准静态的,车辆的位置在一个时隙内没有显著变化。试验仿真过程中其他参数设置如表2所示。

表2 仿真参数设置

Table 2 Simulation parameter setting

Q	$[V_{min}, V_{max}] / (m \cdot s^{-1})$	D/bit	S/m	R/m
100	$[22.22, 33.33]$	1×10^6	8 000	400
σ	λ	W	K	Z
5.56	0.8	4	4	4

根据式(2)可知,数据包平均到达率 $\bar{\alpha}$ 由数据包到达概率 l_k 计算获得, $k \in \{0, 1, \dots, K\}$,为此设置9种数据包到达概率 l_k 组合,对应计算数据包平均到达率如表3所示,作为后续仿真工作中的数据包平均到达率参数。

表3 数据包平均到达率的参数设置

Table 3 Parameter setting of average data packet arrival rate

序号	l_0	l_1	l_2	l_3	l_4	$\bar{\alpha}$
1	0.895	0.05	0.025	0.02	0.01	0.2
2	0.830	0.09	0.040	0.03	0.01	0.3
3	0.790	0.10	0.050	0.04	0.02	0.4
4	0.740	0.11	0.070	0.05	0.03	0.5
5	0.700	0.13	0.080	0.05	0.04	0.6
6	0.650	0.14	0.090	0.07	0.05	0.7
7	0.590	0.17	0.110	0.07	0.06	0.8
8	0.570	0.17	0.120	0.08	0.06	0.9
9	0.530	0.17	0.130	0.10	0.07	1.0

4.2 仿真结果分析

将本研究提出的LTS策略与平均传输策略(average transmission strategy, ATS)、随机传输策略(random transmission strategy, RTS)在车辆到达率、数据到达率和通信优先级权重等参数变化情况的平均总时延进行对比与分析。在车辆到达率为0.8、权重均取0.5时,不同数据到达率的3种传输策略总时延如图5所示。

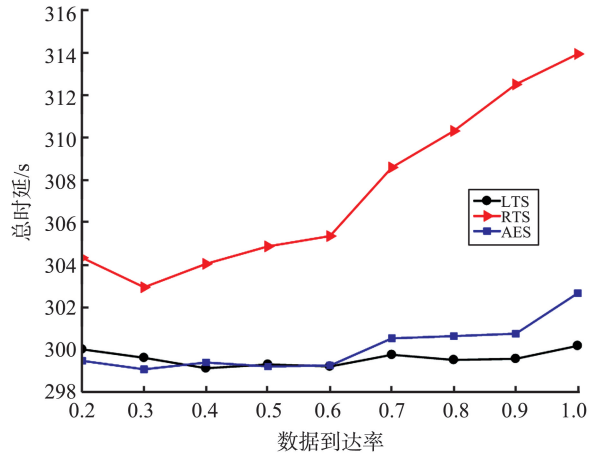


图5 不同数据到达率的总时延

Fig.5 Total delay under different data arrival rates

由图5可知,随着数据到达率的增大,路侧单元缓存区的数据越多,从而导致3种传输策略的时延呈现波动递增趋势。当路侧单元采取RTS向覆盖范围内的车辆传输交通数据时,RTS随机选择车辆进行中继数据传输,数据包也随机传输,因此随机传输策略产生的总时延最大;采取ATS向覆盖范围内的车辆传输交通数据时,ATS考虑数据以不同的车辆位置速率传输同等的的数据量,产生的总时延也会较大;LTS同时考虑系统数据缓存状态、车辆到达位置以及通信车辆的优选,使得在数据平均到达率大于0.6时数据传输总时延最小,例如当数据平均到达率为 $[0.9, 1.0]$ 时,总时延相对降低约14s,降低了4.59%。不同车辆到达率的3种传输策略总时延如图6所示。

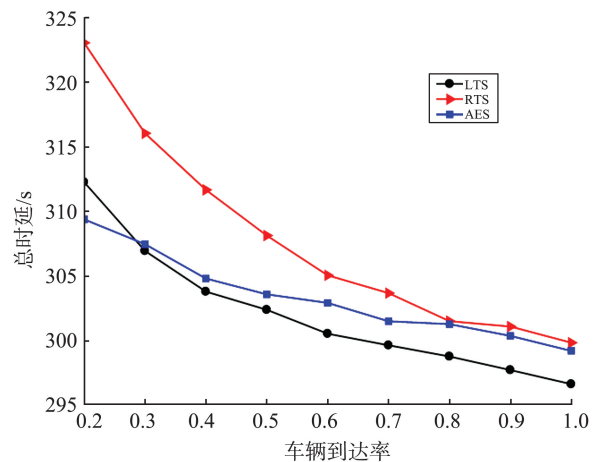


图6 不同车辆到达率的总时延

Fig.6 Total delay under different vehicle arrival rates

由图6可知,在数据到达率为0.3和权重均取0.5的情况下,随着车辆到达率的增大,到达路侧单元覆盖范围的车辆越多,路侧单元将数据传输给车辆的也越多,因此传输时延随着车辆到达率呈现递

减趋势。当路侧单元采取 RTS 向覆盖范围内的车辆传输交通数据时,RTS 不考虑车辆的到达率,随机选择车辆传输数据,因此产生的时延最大;采取 ATS 向其覆盖范围内的车辆传输交通数据时,ATS 只考虑不同位置速率传输同量的数据,因此产生的时延较大;LTS 考虑数据缓存区长度以及车辆到达位置,在车辆到达率增大的同时扩大车辆的位置,优先选择权重大的车辆传输数据,因此 LTS 策略下数据传输产生的时延最小。不同数据到达率、不同车辆到达率及权重的 LTS 策略总时延性能分析对比如表 4 和表 5 所示。

表 4 不同数据到达率及权重的平均总时延
Table 4 Average total delay of different data arrival rates and weight

数据到达率	平均总时延/s		
	权重 0.3、0.7	权重 0.5、0.5	权重 0.8、0.2
0.2	302.95	300.02	295.83
0.3	301.94	299.62	294.59
0.4	301.18	299.13	296.25
0.5	300.25	299.31	295.45
0.6	300.60	299.21	297.31
0.7	302.57	299.76	297.09
0.8	300.88	299.52	296.30
0.9	301.49	299.57	296.40
1.0	302.24	300.19	297.77

表 5 不同车辆到达率及权重的平均总时延
Table 5 Average total delay of different vehicle arrival rates and weight

车辆到达率	平均总时延/s		
	权重 0.3、0.7	权重 0.6、0.4	权重 0.8、0.2
0.2	313.03	312.28	311.93
0.3	308.20	306.95	306.34
0.4	305.41	303.80	302.91
0.5	304.50	302.39	301.26
0.6	303.19	300.54	299.55
0.7	302.74	299.64	298.30
0.8	302.12	298.77	297.00
0.9	301.78	297.72	295.95
1.0	300.92	296.63	294.52

由表 4 可知,当车辆到达率为 0.8,权重为 0.3、0.7 时,数据传输的总时延高于其他两种权重的总时延。这是因为系统优先选择距离路侧单元近的车辆通信,但由于近距离车辆的速度权重占比较小,车辆携带的交通数据以较慢的速度传输给其他路侧单元,因此数据传输产生的时延增加;随着车速权重递增时,表示车辆的速度在权重中的占比较大,速度大的车辆优先和路侧单元通信,车辆携带

的交通数据会以更快的速度传输给其他路侧单元,从而实现最小时延的数据传输。

由表 5 可知,当车辆到达率增大时,3 种权重的时延曲线对比图呈现递减趋势。每个时隙内到达的车辆越多,路侧单元在该时隙内通过车辆中继转发的数据越多,因此路侧单元数据传输的总时延趋势逐渐降低。当车速权重占比较大,位置权重占比较小时,路侧单元间数据传输总时延呈现递减趋势。这是因为车速越快,将数据传输给另一路侧单元所需时间越短,所以车辆中继转发传输的总时延越小。在车辆到达率为 0.8,权重均为 0.5 时,不同数据到达率的 LTS 策略缓存队列稳态概率如图 7 所示。

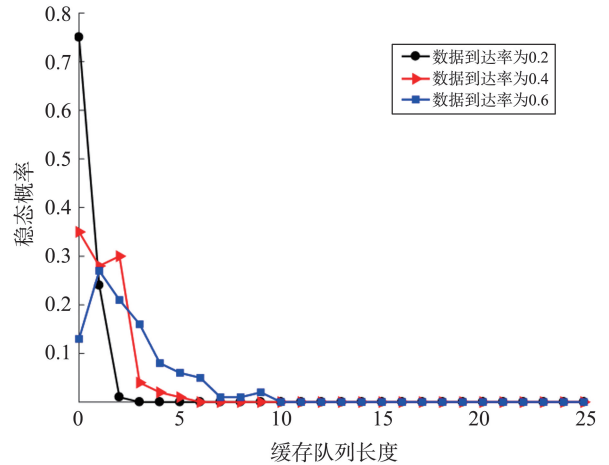


图 7 不同数据到达率的 LTS 策略稳态概率
Fig.7 Queue steady-state probability under different data arrival rates for LTS

由图 7 可知,随着数据到达率增大,LTS 策略下路侧单元缓存区长度逐渐增大。数据到达率为 0.2 时,缓存队列长度为 0~4;数据到达率为 0.4 时,缓存队列长度为 0~6;数据到达率为 0.6 时,缓存队列长度稳定为 0~10。综上,随着数据到达率的增大,LTS 策略中数据缓存队列长度稳定增长,数据传输稳定性良好。

5 结论

本研究基于位置信息的路侧单元数据传输时延最小化策略,利用马尔科夫决策过程将提出的优化问题建模,并求解验证了数据传输的最小时延和数据队列的稳态性。重点考虑路侧单元传输交通数据的总时延问题,结合数据队列状态和车辆到达位置区域状态构建了马尔科夫链模型,并对多车的车速和位置进行权重优先通信的时延计算。经过理论仿真验证分析,与 RTS、ATS 策略相比,本研究提出的 LTS 策略

能够根据实时的数据队列状态和车辆位置状态动态调整传输策略,最小化传输总时延。在数据到达率增加时,系统数据队列的稳定性良好。这表明 LTS 能够有效降低路侧单元间交通数据的传输总时延,且系统数据传输稳定性良好。

参考文献:

- [1] ABOUD K, OMAR H A, ZHUANG W H. Interworking of DSRC and cellular network technologies for V2X communications: a survey [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65 (12): 9457-9470.
- [2] NAIR A, TANWAR S. Resource allocation in V2X communication: state-of-the-art and research challenges [J]. *Physical Communication*, 2024, 64(6):102351.
- [3] GUO C T, LIANG L, LI G Y. Resource allocation for low-latency vehicular communications: an effective capacity perspective[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(4): 905-917.
- [4] ZHANG Q X, MENG H, FENG Z Y, et al. Resource scheduling of time-sensitive services for B5G/6G connected automated vehicles[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(16): 14820-14833.
- [5] FARDAD M, MUNTEAN G M, TAL I. Latency-aware V2X operation mode coordination in vehicular network slicing [C]// 2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference (VTC2023-Spring). Florence, Italy: IEEE, 2023:1-6.
- [6] HU B T, DU J B, CHU X L, et al. Enabling low-latency applications in vehicular networks based on mixed fog/cloud computing systems [C]// 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, USA: ACM, 2022: 722-727.
- [7] MOKHTARI S, NOURI N, ABOUEI J, et al. Relaying data with joint optimization of energy and delay in cluster-based UAV-assisted VANETs [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(23): 24541-24559.
- [8] NKENYEREYE L, NKENYEREYE L, PHAM Q V, et al. Efficient RSU selection scheme for fog-based vehicular software-defined network [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(11): 12126-12141.
- [9] KHAYAT G, MAVROMOUSTAKIS C X, MASTORAKIS G, et al. VANET clustering based on weighted trusted cluster head selection [C]//International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC). Limassol, Cyprus:IEEE, 2020: 623-628.
- [10] HOU J, CHEN G, HUANG J, et al. Large-scale vehicle platooning: advances and challenges in scheduling and planning techniques[J]. *Engineering*, 2023, 28: 26-48.
- [11] ZHANG W H, FENG M J, KRUNZ M, et al. Latency prediction for delay-sensitive V2X applications in mobile cloud/edge computing systems [C]// IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Taipei, China: IEEE, 2020: 1-6.
- [12] YAO L, WANG J, WANG X, et al. V2X routing in a VANET based on the hidden Markov model[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 19(3): 889-899.
- [13] SHI Y, FENG C, WANG T, et al. The optimal packets scheduling for buffer-aid energy harvesting RSUs in cooperative vehicle infrastructure system [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022: 4147373.
- [14] LUO Q Y, LI C L, LUAN T H, et al. Collaborative data scheduling for vehicular edge computing via deep reinforcement learning [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(10): 9637-9650.
- [15] MAFUTA A D, MAHARAJ B T J, ALFA A S. Decentralized resource allocation-based multiagent deep learning in vehicular network [J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, 17(1): 87-98.
- [16] XU W C, ZHOU H B, SHI W S, et al. Throughput analysis of in-vehicle internet access via on-road WiFi access points [C]//2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Toronto, Canada: IEEE, 2017: 1-5.
- [17] AHMED Z, NAZ S, AHMED J. Minimizing transmission delays in vehicular ad hoc networks by optimized placement of road-side unit [J]. *Wireless Networks*, 2020, 26(4): 2905-2914.
- [18] 代亮, 张金龙, 秦雯. 面向交通能源融合的路侧单元传输控制优化策略[J]. *控制与决策*, 2023, 38(12): 3354-3362.
DAI Liang, ZHANG Jinlong, QIN Wen. Optimization strategy of roadside units transmission control for transportation-energy integration [J]. *Control and Decision*, 2023, 38(12): 3354-3362.
- [19] KIM K, LEE J, LEE W. A MAC protocol using road traffic estimation for infrastructure-to-vehicle communications on highways[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(3): 1500-1509.
- [20] KHABBAZ M J, FAWAZ W F, ASSI C M. A simple free-flow traffic model for vehicular intermittently connected networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 1312-1326.
- [21] 代亮, 张亚楠, 钱超, 等. 基于车辆载带中继的路边单元突发业务分组调度最优策略[J]. *自动化学报*, 2021, 47(5): 1098-1110.