

# 联合车速-队列感知的路边单元分组调度随机优化

代亮<sup>†</sup>, 张亚楠, 钱超, 孟芸, 黄鹤

(长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 路边单元(RSU)是车联网中为其无线覆盖范围内过往车辆提供信息服务的基础设施, 路边单元间的分组传输可通过移动车辆“存储-载带-转发”的方式进行, 其传输过程中分组的端到端时延由源RSU缓存中的排队时延与车辆载带过程的传播时延两部分组成。为使RSU间分组传输过程中平均端到端时延最小化, 本文提出一种联合车速-队列感知的路边单元分组调度随机优化方法, 该方法根据源RSU缓存队列长度和经过源RSU覆盖范围的车辆速度状态作分组调度决策。通过马尔科夫决策(MDP)框架对分组传输过程中的平均排队时延和平均传播时延进行分析, 建立一个非线性平均端到端时延最小化问题并求解。仿真结果表明, 所提出的RSU分组调度随机优化方法可以显著降低RSU间分组传输过程中的平均端到端时延, 并提高系统中分组传输的吞吐量。

**关键词:** 车联网; 路边单元; 分组调度; 随机优化; 车速感知

**引用格式:** 代亮, 张亚楠, 钱超, 等. 联合车速-队列感知的路边单元分组调度随机优化. 控制理论与应用, 2019, 36(10): 1707 – 1718

DOI: 10.7641/CTA.2019.80520

## Joint velocity and queue aware stochastic optimization of packet scheduling in roadside units

DAI Liang<sup>†</sup>, ZHANG Ya-nan, QIAN Chao, MENG Yun, HUANG He

(School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** The roadside unit (RSU), which provides information service for the passing vehicles entering its coverage, is infrastructure of Internet of vehicles. Packets transmission between RSUs can be implemented by mobile vehicles which serve as opportunistic store-carry-forward devices. The end-to-end delay of packet transmission consists of two parts: queuing delay at buffer of the source RSU and transmission delay caused by vehicles traveling from the source to the destination RSU. In order to minimize the average end-to-end delay in the transmission, a joint velocity and queue aware stochastic optimization method (VQSO) of packet scheduling in RSUs was proposed in this paper. The proposed method determines whether to send packets to the passing vehicles based on the queuing length of packets and the velocity of the vehicles. By analyzing the queuing delay and transmission delay in the Markov decision process (MDP) framework, a nonlinear optimization problem of average end-to-end delay is established. Simulation results show that the proposed scheduling method can significantly reduce average end-to-end delay in packet transmission between RSUs, and improve the throughput of packet transmission.

**Key words:** Internet of vehicles; roadside unit; packet scheduling; stochastic optimization; velocity-aware

**Citation:** DAI Liang, ZHANG Yanan, QIAN Chao, et al. Joint velocity and queue aware stochastic optimization of packet scheduling in roadside units. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(10): 1707 – 1718

## 1 引言

在现今复杂交通环境下, 车联网理论与应用的发展始终面对复杂的不确定性, 包括交通状态的时变性、业务需求的多样性、无线接入网络和终端设备的

异构性、网络环境的随机性等, 这些不确定性使得车联网系统设计和优化更加复杂化, 如多样的服务质量需求、不同时间尺度的资源需求和时变的系统状态等。为了解决这些问题, 使得车联网能够更好地兼容各种

收稿日期: 2018-07-14; 录用日期: 2019-04-02。

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: ldai@chd.edu.cn; Tel.: +86 29-82339246.

本文责任编辑: 赵千川。

国家自然科学基金项目(61701044), 长安大学研究生科研创新实践项目(2018078), 中国博士后特别项目(2015T80998), 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102328204)资助。

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61701044), the Scientific Innovation Practice Project of Postgraduates of Chang'an University (2018078), the China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (2015T80998) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (300102328204).

新型应用、保障用户服务质量、提高网络资源利用率,车联网需要以自适应和鲁棒的方法来解决以上问题,即在不同条件下从一组可访问的策略中做出优化决策以达到设计目标。

高速公路沿线部署多个路边单元(roadside unit, RSU)给行驶车辆提供信息服务是车联网的重要应用场景。为了降低车联网中通信基础设施开销,仅部分RSU与骨干网络相连,其他RSU与骨干网络处于隔离状态。与RSU部署间隔相比,其无线覆盖范围较小,导致RSU间不能互相连通。互不连通的RSU可通过过往车辆“存储-载带-转发”的方式<sup>[1]</sup>将所收集到的当地的路况、环境监测、动物活动等信息转发到与骨干网络相连的RSU,进而传送给数据中心<sup>[2-4]</sup>。在上述应用背景下,RSU节点的分组调度是其关键问题之一,其研究目标为设计有效的RSU分组调度策略,在源RSU无线覆盖范围内有车辆经过时,决定是否将收集的数据发送给过往车辆,并转发给相应的目的RSU。因此,RSU分组调度策略一方面决定了高速公路场景车联网中RSU间分组传输的时延、吞吐量等网络性能;另一方面,也直接决定了RSU向过往车辆传输分组时所需的开销大小,包括RSU发送数据的缓存开销,数据发送时延惩罚等。

在上述高速公路车联网应用背景下,分组从源RSU传输到目的RSU的端到端时延主要由两部分组成:在源RSU缓存中的排队时延和经车辆载带行驶至目的RSU过程中的传播时延。为使分组排队时延最小,可令源RSU不考虑车辆速度,向经过的每个车辆均发送1个分组,该分组传输方案称为贪婪中继方案(greedy bundle relaying scheme, GBRS)<sup>[5]</sup>。GBRS能使排队时延最小,但其传播时延较大,尤其是在车速差异较大的情况下。为降低传播时延,Khabbaz等人提出了一种RSU分组概率中继方案(probabilistic bundle relaying scheme, PBRS)<sup>[5-7]</sup>,定义一个称为发送概率的参数 $P_r$ ,该发送概率仅与车速有关,车速越大发送概率越大,反之发送概率越小,故该方案不能对分组队列长度的动态变化做出相应调整。与GBRS相比,PBRS能够选择向速度较快的车辆发送分组,但忽略了源RSU缓存中分组的快速累积,导致仿真结果中传播时延虽显著减小,但排队时延大幅增加,端到端时延无显著降低。在文献[7]中,Khabbaz等人设计了一个不依赖于完整的网络信息知识(例如车辆到达时间,准确的车辆速度等)的概率排队模型,其中分组端到端时延定义为缓存队首分组的服务时间和传播时延之和,仿真表明,当源RSU缓存负载较低时,PBRS的端到端时延小于GBRS。在文献[5-7]中车速分布服从一定区间的均匀分布,而从交通工程角度来讲,高速公路上的车辆速度更适合用截断正态分布来描述<sup>[8-9]</sup>。此外,在文献[10-12]中作者基于通信网络中的分组重

传机制,将虚拟空间引入分组延迟感知的分组传输方案,目的是在1个分组到达目的RSU前,源RSU可将虚拟空间中该分组备份重传给后续到达但速度更快的车辆,以便更早地交付给目的RSU。该方案中同一个分组可重传给多个车辆,造成分组传输冗余,进而会影响网路资源利用率。Ramaiany等人研究了类似背景下分组的顺序决策问题,假设源节点能感知车辆到达时间和车速,并根据车速和累计的分组数量做传输决策<sup>[13]</sup>。该作者利用动态规划方法解决了RSU间分组传输端到端时延最小化问题,该方法需要已知完整的网络信息知识(即精确地车辆到达时刻、车辆速度等),并以每辆车到达时刻作为决策点,不能及时感知RSU缓存中分组的动态变化。在文献[14]中,作者在相同背景下,通过建立马尔科夫链分析了传播时延对接收端RSU缓冲区中分组传输和重新排序的影响,统计间歇性连通车载网络场景下的延迟数据来评估网络性能。

在上述研究工作中,源RSU向每个经过车辆最多发送1个分组。在高速公路车联网场景中,如果源RSU网络层的最大传输单元为1500字节,在数据率为1 Mbps的情况下,发送1个分组给到达车辆需要11.44 ms。假设源RSU无线覆盖范围为100 m,车辆以120 km/h的速度经过源RSU时,驻留时间约为3 s。源RSU向每个经过车辆发送1个分组的方式使得传输资源利用率低,且排队时延受分组到达率的影响较大。据此,Khabbaz等人提出了一种以端到端时延最小化为目标的批量分组概率传输策略(probabilistic bundle relaying scheme with bulk bundle release, PBRS-BBR),该策略允许给每辆车发送多个分组,通过提高服务率减少分组在缓存中的排队时延,并仿真验证了PBRS-BBR相对于批量分组贪婪传输策略(greedy bundle relaying scheme with bulk bundle release, GBRS-BBR)的优势<sup>[5-6, 15-16]</sup>。PBRS-BBR中给车辆发送分组的决策仅与速度有关,不能对分组队列长度的动态变化做出相应调整。在文献[17]中,Fawaz等人在间歇性连通的路边通信网络中,建模并分析了上游RSU与中游RSU同时依靠车流向下游RSU传输分组的场景,通过建立马尔科夫决策框架量化中游RSU分组存储的饱和程度,提出了一个能够缓解存储饱和度且延迟最小的分组批量发送方案。

在类似背景下,Wang等人的研究侧重于RSU向过往车辆发送数据的下行传输问题,在双向车流中选择中继车辆将信息从RSU转发给有下载需求的目的车辆,减少车辆处于两个相邻RSU之间盲区(RSU无线覆盖范围之外的路段)时的传输中断时间<sup>[18]</sup>。Atallah等人将车载单元缓存中的队列建模为M/G/1排队系统,提出了两种复杂度最小的V2I接入方案,并从车辆的角度捕获V2I系统的性能<sup>[19]</sup>。Abdrabou等人研究了一种低密度车载自组织网络中的多跳分组传输延迟

问题, 利用有效带宽及容量来估计覆盖路段所需的最少RSU数量, 并研究了车辆密度、传输范围和车辆之间速度差异对端到端分组传输时延的影响<sup>[20]</sup>.

本文在高速公路车联网背景下研究通过车辆载带中继的RSU通信问题, 为使RSU间分组传输过程中平均端到端时延最小化, 提出一种联合车速-队列感知的路边单元分组调度随机优化方法(a joint velocity and queue aware stochastic optimization method, VQ-SO), 根据源RSU缓存队列长度和过往车辆的车速状态作分组调度决策. 该方法将服从高速公路限定车速区间(如[80, 120] km/h)的截断正态分布连续车速离散为多个车速状态, 根据车速状态确定给相应车辆发送的分组数量. 为找到最优的调度策略, 本文通过马尔科夫决策(Markov decision process, MDP)框架对分组传输过程中的平均排队时延和平均传播时延进行分析, 建立一个非线性平均端到端时延最小化问题并求解. 结果表明, 本文所提出的RSU分组调度随机优化方法能够显著降低RSU间分组传输的平均端到端时延, 并提高系统中分组传输的吞吐量.

## 2 系统模型

本文所研究的车联网背景下RSU间分组传输场景如图1所示, 在高速公路的某个路段部署两个固定的RSU节点, 分别为源节点RSU<sub>1</sub>与目的节点RSU<sub>2</sub>. 两个RSU间隔距离用D<sub>c</sub>表示, 与该距离相比, RSU无线覆盖范围可忽略<sup>[6-7]</sup>. RSU间分组传输由过往车辆“存储-载带-转发”的方式完成, 其端到端时延由RSU<sub>1</sub>缓存中的排队时延与车辆载带RSU<sub>1</sub>所发送分组至RSU<sub>2</sub>过程中的传播时延两部分组成. 若RSU<sub>1</sub>给每个到达车辆均发送分组, 可使得平均排队时延最小, 但会导致较大的平均传播时延, 尤其是车速差异较大的情况下; 若RSU<sub>1</sub>为了等待速度较快的车辆而长时间不发送分组, 则平均排队时延增加. 因此, 平均排队时延和平均传播时延之间有一个最佳折衷, 且该折衷能使平均端到端时延最小化. 由于速度快的车辆在两RSU间行驶过程中可能超过较慢的车辆, 当到达RSU<sub>1</sub>的车辆速度较小时, RSU<sub>1</sub>可继续等待直到有速度较快的车辆经过时再发送分组, 其传播时延之差足以弥补分组的等待时延<sup>[13]</sup>.

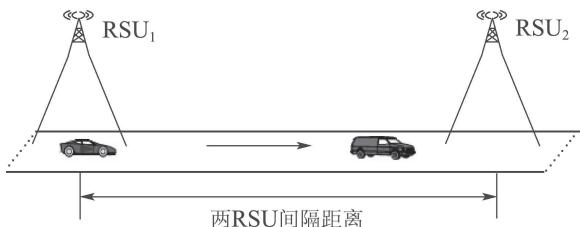


图1 路边单元间分组传输调度示意图

Fig. 1 The schematic of packet transmission scheduling between roadside units

### 2.1 RSU-车辆分组随机调度模型

RSU-车辆分组随机调度模型如图2所示, 到达RSU<sub>1</sub>的分组在其缓存中排队等待发送. 将系统时间划分为等长时隙, 在某个时隙内, 若没有车辆到达RSU<sub>1</sub>, 则分组在缓存中排队等候; 若该时隙内有车辆到达, 则RSU<sub>1</sub>根据分组调度策略确定是否向经过车辆发送分组, 以及发送的分组数量.

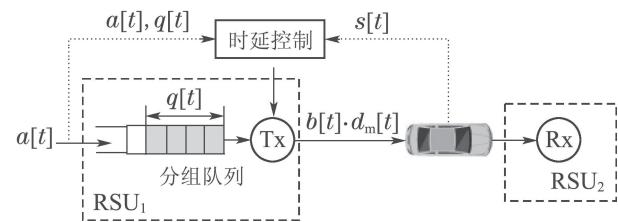


图2 RSU-车辆分组随机调度模型

Fig. 2 Stochastic packet scheduling model of RSU-vehicles

从图2中可以看出, RSU-车辆分组随机调度模型由车辆速度状态s[t]、RSU<sub>1</sub>中分组到达状态a[t]、分组排队长度q[t]、发送分组个数d<sub>m</sub>[t], 以及调度决策变量b[t]构成. 后文在车速状态模型、RSU缓存模型和第2.2小节分组调度策略中对上述变量进行介绍.

#### 1) 车速状态模型.

高速公路自由流交通状态下, 车辆到达RSU<sub>1</sub>服从参数为λ的泊松过程. 用T表示两车相继到达RSU<sub>1</sub>的时间间隔, 则T服从负指数分布, 其概率密度函数为f(t) = λe<sup>-λt</sup>(t > 0), 概率分布函数为F(t) = P(T ≤ t) = 1 - e<sup>-λt</sup>(t > 0). 令系统时隙长度为固定值, 用Δt表示, 则在该时隙内(至少)有1辆车到达RSU<sub>1</sub>的概率(即两辆车相继到达的时间间隔小于等于Δt的概率)为

$$P_a = P(T \leq \Delta t) = 1 - e^{-\lambda \Delta t}, \quad \Delta t > 0, \quad (1)$$

则一个时隙内没有车到达RSU<sub>1</sub>的概率为1 - P<sub>a</sub>. 当时隙足够小时可确保每个时隙最多有一辆车到达.

令v[t](v[t] ≥ 0)表示在第t个时隙到达RSU<sub>1</sub>的车辆速度, 其中v[t] = 0表示该时隙没有车辆到达RSU<sub>1</sub>. 假设在RSU间行驶过程中车辆速度保持不变, 且对于各个时隙独立同分布. 本文将连续的车辆速度量化为M+1个离散的车速状态: 令V = [v<sub>1</sub> v<sub>2</sub> … v<sub>M+1</sub>]为阈值向量, 其中v<sub>1</sub> = V<sub>max</sub>, v<sub>M+1</sub> = V<sub>min</sub>分别是车速的上限和下限, 且满足v<sub>m</sub> > v<sub>m+1</sub>(m = 1, 2, …, M), 即下标越小代表车速越快. 在第t个时隙到达RSU<sub>1</sub>的车辆速度状态用s[t]表示, 其中: s[t] = m(1 ≤ m ≤ M)表示v[t] ∈ [v<sub>m+1</sub>, v<sub>m</sub>); s[t] = M+1表示时隙t内没有车辆到达, 即v[t] = 0. 车速离散为3个状态的模型如图3(a)所示, 其中m = 1与m = 2分别表示车速较快与较慢的状态, m = 3表示无车辆到

达RSU<sub>1</sub>. 类似地,  $M+1$ 个离散车速状态模型如图3(b)所示.

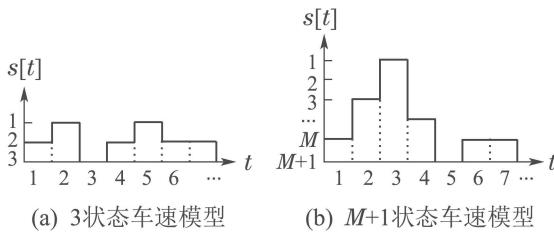


图3 车速状态模型

Fig. 3 Velocity states models

车速处于状态 $m$ 的概率用 $\eta_m$ 表示, 其概率质量函数表达式如下:

$$\begin{aligned} \eta_m &= P\{s[t] = m\} = \\ &\begin{cases} P_a \int_{v_{m+1}}^{v_m} f(v) dv, & 1 \leq m \leq M, \\ 1 - P, & m = M + 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $f(v)$ 表示车速 $v$ 的分布. 根据文献[8]中的自由流交通模型, 假设车速分布与车辆到达过程无关, 且车速 $v$ 服从均值为 $\bar{V}$ 、标准差为 $\sigma$ 的正态分布, 则其概率密度函数为 $f(v)^* = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\frac{v-\bar{V}}{\sigma\sqrt{2}})^2}$ . 令 $v \in [V_{\min}, V_{\max}]$ , 则车速分布的截断概率密度函数如下式所示:

$$f(v) = \frac{2f(v)}{\operatorname{erf}\left(\frac{V_{\max}-\bar{V}}{\sigma\sqrt{2}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{V_{\min}-\bar{V}}{\sigma\sqrt{2}}\right)}. \quad (3)$$

## 2) RSU缓存模型.

令RSU<sub>1</sub>的缓存容量为 $Q$ ( $Q \in \mathbb{Z}^+$ )个分组, 其中 $Q = \infty$ 和 $Q < \infty$ 分别表示缓存容量无限和有限的情况. 到达RSU<sub>1</sub>的分组在其缓存中形成队列, 第 $t$ 个时隙结束时, 队列长度用 $q[t]$ 表示, 其更新表达式为

$$q[t] = \max\{\min\{q[t-1] + a[t], Q\} - b[t] \cdot d_m[t], 0\}, \quad (4)$$

其中:  $a[t]$ 表示在时隙 $t$ 到达RSU<sub>1</sub>的分组个数;  $d_m[t]$ 表示RSU<sub>1</sub>在时隙 $t$ 发送给速度状态为 $m$ 的车辆的分组个数. 如果缓存已满, 即 $q[t-1] = Q$ , 则第 $t$ 个时隙新到达RSU<sub>1</sub>的分组会被丢弃.

假设分组到达RSU<sub>1</sub>服从参数为 $\alpha$ 的伯努利过程, 故 $a[t] \in \{0, 1\}$ , 且概率质量函数可表示为

$$P\{a[t] = 1\} = \alpha, P\{a[t] = 0\} = 1 - \alpha. \quad (5)$$

车速状态模型将连续的车速离散为 $M+1$ 个状态, 因此与之相关的给不同车辆所发送的分组个数 $d_m[t]$ 也离散为相应状态<sup>[21]</sup>: 对 $\forall m \in [1, M]$ , 有 $d_1 < d_2 < \dots < d_M$ , 即速度越快, 车辆在RSU<sub>1</sub>无线覆盖范围内驻留时间越短, 可载带分组数量越少; 对于 $m =$

$M+1$ , 有 $d_{M+1} = 0$ , 此状态下没有车辆到达RSU<sub>1</sub>, 故无法传输分组. 为了便于下文第3.1小节马尔科夫链模型的建立与分析, 假设对 $\forall m \in [1, M]$ , 有 $d_{m+1} - d_m > 1$ . 根据第1节引言所述, 车辆经过RSU<sub>1</sub>时, 在其无线覆盖范围内的驻留时间远大于传输1个分组的时间, 故在不同车速状态下,  $d_{m+1} - d_m > 1$ 的假设具有合理性.

## 2.2 分组调度策略

假设RSU<sub>1</sub>能感知经过其覆盖范围内车辆的速度状态<sup>[22-23]</sup>, 则RSU<sub>1</sub>根据其缓存中分组的队列长度和经过车辆的速度状态, 按以下调度策略确定是否向经过其覆盖范围的车辆发送分组, 且发送分组的数量由车速状态确定.

定义一个决策变量 $b[t]$ ( $b[t] \in \{0, 1\}$ ), 表示RSU<sub>1</sub>在时隙 $t$ 是否发送分组给车辆: 如果发送分组, 则 $b[t] = 1$ , 否则 $b[t] = 0$ . 其次, 定义两组概率:  $\{g_{i,m}\}$ ,  $\{f_{i,m}\} \in \{0, 1\}$ , 其含义为: 在 $q[t-1] = i$ ,  $s[t] = m$ 的条件下, 如果在该时隙有1个新的分组到达, 即 $a[t] = 1$ , 则RSU<sub>1</sub>向车辆发送分组的概率是 $g_{i,m}$ , 不发送分组的概率是 $1 - g_{i,m}$ ; 如果在该时隙没有新的分组到达, 即 $a[t] = 0$ , 则RSU<sub>1</sub>向车辆发送分组的概率是 $f_{i,m}$ , 不发送分组的概率是 $1 - f_{i,m}$ . 因此, 在 $q[t-1] = i$ ,  $s[t] = m$ 的条件下, 对于任意 $i \in [0, Q]$ ,  $m \in [1, M+1]$ , 调度变量 $b[t]$ 的条件概率表示如下:

$$\begin{cases} P\{b[t] = 1 | a[t] = 1, q[t-1] = i, \\ s[t] = m\} = g_{i,m}, \\ P\{b[t] = 0 | a[t] = 1, q[t-1] = i, \\ s[t] = m\} = 1 - g_{i,m}, \\ P\{b[t] = 1 | a[t] = 0, q[t-1] = i, \\ s[t] = m\} = f_{i,m}, \\ P\{b[t] = 0 | a[t] = 0, q[t-1] = i, \\ s[t] = m\} = 1 - f_{i,m}, \end{cases} \quad (6)$$

其中 $f_{0,m} = 0$ , 因为当 $i = 0$ 时, 缓存中没有分组可以发送. 当车速状态 $s[t] = M+1$ 时, 表示没有车到达RSU<sub>1</sub>, RSU<sub>1</sub>不能给任何车辆发送分组, 所以有 $g_{i,M+1} = f_{i,M+1} = 0$ .

## 3 优化方法

MDP是用于不确定条件下的决策优化模型, 描述代理与环境或系统交互的随机决策过程<sup>[24]</sup>. 本文使用基于MDP的随机优化方法对车联网中路边单元分组优化调度问题进行研究, 该问题面临外部业务到达时刻的随机性、覆盖范围内车辆到达的随机性, 以及车速的随机性. 本节通过建立MDP框架<sup>[25]</sup>对分组传输过程中的排队时延和传播时延进行分析, 并以分组端到端时延最小化为目标, 建立一个非线性优化问题.

MDP框架制定如下: 上文所描述的分组传输系统可由一个5元组 $(Q, W, B, P, \cdot, \bar{D})$ 组成, 其中:  $Q = \{0, 1, \dots, Q\}$ 表示系统状态集合, 每个状态代表RSU<sub>1</sub>缓存中的队列长度,  $W = \{(a, m) | a \in \{0, 1\}, m \in \{1, 2, \dots, M+1\}\}$ 表示所有可能的分组到达状态与车速状态的组合, 表明系统的不确定性,  $B = \{b\}$ 表示行动集合. 在每个时隙, RSU<sub>1</sub>根据缓存中的队列长度、车速状态以及分组到达状态做出行动决策. 定义 $P_{b,w}(i, j) = P\{q[t] = j | q[t-1] = i, b[t] = b, w[t] = (a, m)\}$ , 表示在时隙 $t-1$ 队列状态 $q[t-1] = i$ 、时隙 $t$ 系统不确定性 $w[t] = (a, m)$ 且行动 $b[t] = b$ 的条件下, 队列状态在时隙 $t$ 由 $i$ 转移到 $j$ 的概率. 令 $\bar{D}$ 表示分组从RSU<sub>1</sub>传输到RSU<sub>2</sub>的平均端到端时延, 即MDP框架中的报酬函数. 令 $\bar{D}_q$ 表示平均排队时延,  $\bar{D}_t$ 表示平均传播时延, 可得到 $\bar{D} = \bar{D}_q + \bar{D}_t$ . 本节通过建立马尔科夫链模型描述各系统状态的一步转移概率, 并对分组传输过程中的平均排队时延 $\bar{D}_q$ 和平均传播进行时延 $\bar{D}_t$ 进行分析, 最后提出一个平均端到端时延最小化问题并求解.

### 3.1 马尔科夫链模型

从时隙 $t$ 到时隙 $t+1$ , RSU<sub>1</sub>缓存中分组队列长度由 $i$ 转变为 $j$ 的一步转移概率用 $q_{i,j}$ 表示, 且

$$q_{i,j} = P\{q[t+1] = j | q[t] = i\} = \sum_w \sum_b P_{b,w}(i, j).$$

令 $\mathbf{P} = \{q_{i,j}\}$ 表示系统一步转移概率矩阵. 根据MDP框架, 系统状态转移与时隙 $t$ 无关, 可省略 $t$ . 系统状态的一步转移概率可分为以下3种情况讨论.

**Case 1** 当 $i = 0$ 时, 表示RSU<sub>1</sub>中没有分组排队, 该状态一步转移的马尔科夫链如图4(a)所示.

若有1个新分组到达RSU<sub>1</sub>(即 $a = 1$ ), 且行动为不发送分组(即 $b = 0$ )时, 对任意车速状态 $m$ (即 $\forall m$ ), 缓存中分组队列长度增加1, 其一步转移概率如下式所示:

$$q_{0,1} = \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - g_{0,m});$$

其他情况下, 缓存中排队长度保持不变, 其一步转移概率为

$$q_{0,0} = 1 - \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - g_{0,m}).$$

故 $i = 0$ 状态下一步转移概率可用如下分段函数表示:

$$q_{0,j} = \begin{cases} 1 - \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - g_{0,m}), & j = 0, \\ \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - g_{0,m}), & j = 1, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (7)$$

**Case 2** 当 $i \in (1, Q-1)$ 时, 表示RSU<sub>1</sub>中有分组排队. 当 $b = 0$ 时, 对 $\forall m$ , 若 $a = 1$ , 队长增加1, 相应的一步转移概率为

$$q_{i,i+1} = \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - g_{i,m});$$

若 $a = 0$ , 则队长保持不变, 其一步转移概率为

$$q_{i,i} = (1 - \alpha) \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - g_{i,m}).$$

当 $b = 1$ 时, 队长变化情况及其转移概率可分为以下4种情况讨论:

1) 当 $0 < i < d_1$ 时, 其一步转移的马尔科夫链如图4(b)所示. 根据式(4), 当 $b = 1$ 时, 对 $\forall m$ ,  $a = 1$ 和 $a = 0$ 分别有

$$\max\{i+1-d_m, 0\} = \max\{i-d_m, 0\} = 0,$$

故缓存中队长变为0, 其一步转移概率表示为

$$q_{i,0} = \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}].$$

故 $0 < i < d_1$ 状态下一步转移概率如下式所示:

$$q_{i,j} = \begin{cases} \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}], & j = 0, \\ (1 - \alpha) \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - f_{i,m}), & j = i, \\ \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1 - g_{i,m}), & j = i+1, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (8)$$

2) 当 $i = d_n$ ( $1 \leq n \leq M$ )时, 该状态一步转移的马尔科夫链如图4(c)所示.

当 $b = 1$ 时, 对于 $1 \leq m \leq n$ , 若 $a = 1$ , 根据式(4)可得 $\max\{i+1-d_m, 0\} = i+1-d_m$ , 则队长变为 $i-d_m+1$ , 相应的一步转移概率表示为 $q_{i,i-d_m+1} = \alpha \eta_m g_{i,m}$ ;

当 $b = 1$ 时, 对于 $1 \leq m < n$ , 若 $a = 0$ , 根据式(4)可得 $\max\{i-d_m, 0\} = i-d_m$ , 则队长变为 $i-d_m$ , 相应的一步转移概率表示为 $q_{i,i-d_m} = (1-\alpha) \eta_m f_{i,m}$ ;

当 $b = 1$ 时, 对于 $m \geq n+1$ 且 $a = 1$ , 或 $m \geq n$ 且 $a = 0$ , 根据式(4)分别可得 $\max\{i+1-d_m, 0\} = 0$ 和 $\max\{i-d_m, 0\} = 0$ , 故队长变为0, 相应的一步转移概率表达式为

$$q_{i,0} = \alpha \sum_{m=n+1}^{M+1} \eta_m g_{i,m} + (1 - \alpha) \cdot \sum_{m=n}^{M+1} \eta_m f_{i,m}.$$

综上所述,  $i = d_n$ ( $1 \leq n \leq M$ )状态下一步转移概率如下式所示:

$$q_{i,j} = \begin{cases} \alpha \sum_{m=n+1}^{M+1} \eta_m g_{i,m} + (1-\alpha) \sum_{m=n}^{M+1} \eta_m f_{i,m}, & j=0; \\ (1-\alpha) \eta_m f_{i,m}, & j=i-d_m, 1 \leq m < n; \\ \alpha \eta_m g_{i,m}, & j=i-d_m+1, 1 \leq m \leq n; \\ (1-\alpha) \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-f_{i,m}), & j=i; \\ \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-g_{i,m}), & j=i+1; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (9)$$

3) 当  $d_n < i < d_{n+1}$  ( $1 \leq n \leq M-1$ ) 时, 该状态一步转移的马尔科夫链如图4(d)所示.

当  $b=1$  时, 对于  $1 \leq m \leq n$ , 若  $a=0$ , 根据式(4)有  $\max\{i-d_m, 0\} = i-d_m$ , 则队长变为  $i-d_m$ , 其一步转移概率表示为  $q_{i,i-d_m} = (1-\alpha) \eta_m f_{i,m}$ ;

当  $b=1$  时, 对于  $1 \leq m \leq n$ , 若  $a=1$ , 根据式(4)有  $\max\{i+1-d_m, 0\} = i+1-d_m$ , 则队长变为  $i-d_m+1$ , 相应的一歩转移概率表示为  $q_{i,i-d_m+1} = \alpha \eta_m g_{i,m}$ ;

当  $b=1$  时, 对于  $m \geq n+1$  和  $\forall a$ , 根据式(4)可得  $\max\{i+1-d_m, 0\} = 0$  和  $\max\{i-d_m, 0\} = 0$ , 故队长变为 0, 相应的一歩转移概率表示为  $q_{i,0} = \sum_{m=n+1}^{M+1} \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1-\alpha) f_{i,m}]$ .

综上所述,  $d_n < i < d_{n+1}$  ( $1 \leq n \leq M-1$ ) 时, 一步转移概率如下式所示:

$$q_{i,j} = \begin{cases} \alpha \sum_{m=n+1}^{M+1} \eta_m g_{i,m} + (1-\alpha) \sum_{m=n+1}^{M+1} \eta_m f_{i,m}, & j=0; \\ (1-\alpha) \eta_m f_{i,m}, & j=i-d_m, 1 \leq m \leq n; \\ \alpha \eta_m g_{i,m}, & j=i-d_m+1, 1 \leq m \leq n; \\ (1-\alpha) \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-f_{i,m}), & j=i; \\ \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-g_{i,m}), & j=i+1; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (10)$$

4) 当  $d_M < i < Q$  时, 其一步转移的马尔科夫链如图4(e)所示.

当  $b=1$  时, 对  $\forall m$ , 若  $a=1$ , 有  $\max\{i+1-d_m, 0\} = i+1-d_m$ , 故队长变为  $i+1-d_m$ , 相应的一歩转移概率为  $\alpha \eta_m g_{i,m}$ ;

当  $b=1$  时, 对  $\forall m$ , 若  $a=0$ , 有  $\max\{i-d_m, 0\} = i-d_m$ , 故队长变为  $i-d_m$ , 相应的一歩转移概率为  $(1-\alpha) \eta_m f_{i,m}$ .

综上所述,  $d_M < i < Q$  时, 一步转移概率如下式所示:

$$q_{i,j} = \begin{cases} (1-\alpha) \eta_m f_{i,m}, & j=i-d_m, \forall m, \\ \alpha \eta_m g_{i,m}, & j=i-d_m+1, \forall m, \\ (1-\alpha) \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-f_{i,m}), & j=i, \\ \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-g_{i,m}), & j=i+1, \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (11)$$

**Case 3** 当  $i=Q$  时, 该状态一步转移的马尔科夫链如图4(f)所示, 一步转移概率  $q_{i,i-d_m}$  和  $q_{i,i+1-d_m}$  的表达式与 Case 2 中情况 4) 相同. 当  $i=Q$  时, 表示 RSU<sub>1</sub> 缓存中分组已满, 对于  $\forall a, m$ , 且  $b=0$  时, 根据式(4)有  $\max\{\min\{Q+a, Q\} - 0, 0\} = Q$ , 则队长仍为  $Q$ , 一步转移概率为  $\alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-g_{i,m}) + (1-\alpha) \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-f_{i,m})$ . 综上所述,  $i=Q$  时一步转移概率如下式所示:

$$q_{i,j} = \begin{cases} (1-\alpha) \eta_m f_{i,m}, & j=i-d_m, \forall m; \\ \alpha \eta_m g_{i,m}, & j=i-d_m+1, \forall m; \\ \alpha \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-g_{i,m}) + (1-\alpha) \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m (1-f_{i,m}), & j=i; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (12)$$

令向量  $\Pi = \{\pi_i\}$ , 其中  $\pi_i$  ( $0 \leq i \leq Q$ ) 表示系统达到稳态时队列状态为  $i$  的概率. 因为本系统所建立的马尔科夫链是齐次、不可约且非周期的, 所以其稳态概率可以通过  $\Pi P = \Pi$  获得. 令  $g$  表示参数为  $\{g_{i,m}\}$  的向量,  $f$  表示参数为  $\{f_{i,m}\}$  的向量. 由于一步转移概率  $\{q_{i,j}\}$  是参数  $\{g_{i,m}\}$  和  $\{f_{i,m}\}$  的函数, 稳态概率  $\pi_i$  可以表示成  $g$  和  $f$  的函数  $\pi_i(g, f)$ .

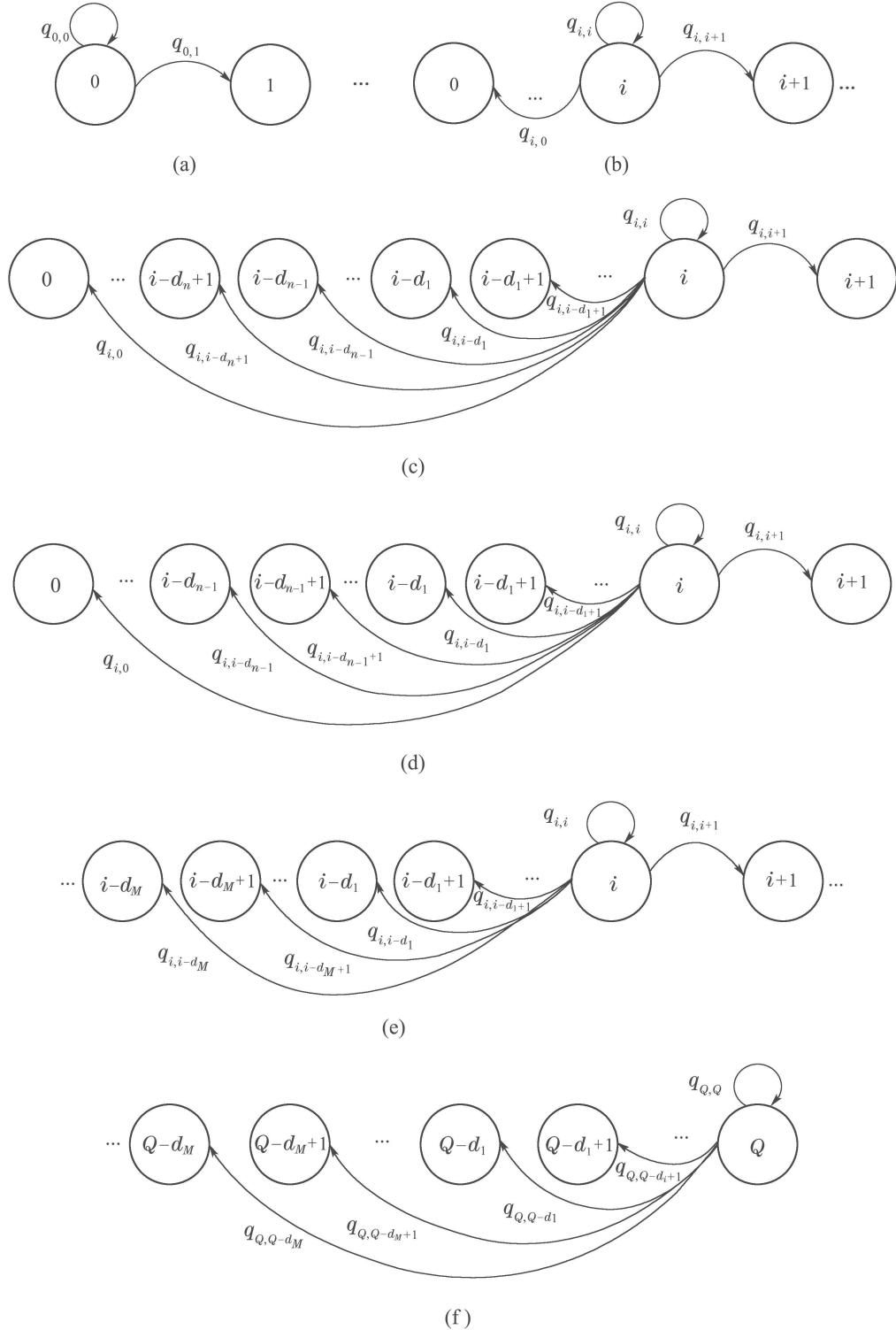


图 4 马尔科夫链模型

Fig. 4 Markov chain model

### 3.2 排队时延分析

根据Little定理, 在RSU<sub>1</sub>缓存中排队的平均分组个数表示为 $L_s = \sum_{i=0}^Q i\pi_i(g, f)$ , 则每个分组的平均排队时延表达式如下:

$$\bar{D}_q = \frac{L_s}{\alpha} = \alpha^{-1} \sum_{i=0}^Q i\pi_i(g, f). \quad (13)$$

### 3.3 传播时延分析

假设车辆载带分组行驶于RSU<sub>1</sub>与RSU<sub>2</sub>之间时, 速度保持不变。在第2.1小节车速状态模型中将连续车

速离散为 $M+1$ 个状态, 则传播时延也相应的离散为 $M+1$ 个状态. 令 $T_m$ 表示车速状态为 $m$ 时分组的平均传播时延, 并分两种情况讨论:

**Case 1** 当车速状态为 $m(1 \leq m \leq M)$ 时, 速度取区间中值, 该状态下平均传播时延表达式如下:

$$T_m = \frac{D_c}{\frac{1}{2}(v_{m+1} + v_m)}, \quad 1 \leq m \leq M. \quad (14)$$

显然平均传播时延与车速成反比, 车速状态越快, 平均传播时延越小, 即 $T_1 < T_2 < \dots < T_M$ .

**Case 2** 当车速状态为 $m = M+1$ 时, 表示没有车辆到达RSU<sub>1</sub>, 故不能传输分组, 该状态下平均传播时延为0, 即

$$T_{M+1} = 0. \quad (15)$$

令 $c[t] = x$ 表示分组调度系统在时隙 $t$ 产生的平均传播时延, 根据式(14)–(15)可知 $x$ 的取值范围是 $x \in \{0, T_m\}$ . 在 $q[t-1] = i, s[t] = m, a[t] = k$ 的条件下, 当 $b[t] = 1$ 时, 即RSU<sub>1</sub>向当前车辆发送分组, 则传播时延 $x \in T_m$ ; 当 $b[t] = 0$ 时, 即RSU<sub>1</sub>不向当前车辆发送分组, 则传播时延 $x = 0$ , 所以 $w_{i,m}(x)$ 的表达式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{i,m}(x) = \\ \sum_{k=0}^1 P\{c[t] = T_m | q[t-1] = i, a[t] = k, \\ s[t] = m\} = \\ \sum_{k=0}^1 P\{b[t] = 1 | q[t-1] = i, a[t] = k, \\ s[t] = m\} = \\ \alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}, \quad x \in T_m, \forall i, m; \\ w_{i,m}(0) = 1 - w_{i,m}(x), \forall i, m, \end{array} \right. \quad (16)$$

其中:  $f_{0,m} = 0; g_{i,M+1} = f_{i,M+1} = 0$ .

令 $\tau$ 表示RSU<sub>1</sub>在每个时隙内向车辆所发送分组数量的均值, 即RSU–车辆分组随机调度系统的吞吐量, 其表达式如下:

$$\begin{aligned} \tau = & \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m w_{i,m}(T_m) d_m = \\ & \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}] d_m. \end{aligned} \quad (17)$$

类似地,

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m w_{i,m}(T_m) T_m d_m = \\ \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}] T_m d_m \end{aligned}$$

表示RSU<sub>1</sub>在每个时隙向车辆发送分组所产生的总传

播时延. 由此, 系统中每个分组的平均传播时延如下式所示:

$$\bar{D}_t = \frac{\sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}] T_m d_m}{\sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}] d_m}. \quad (18)$$

### 3.4 优化问题

根据式(13)和式(18), 分组平均排队时延 $\bar{D}_q$ 和平均传播时延 $\bar{D}_t$ 都是稳态概率 $\{\pi_i(g, f)\}$ 的函数, 因此以平均端到端时延 $\bar{D}$ 最小化为目标函数的约束优化问题可表示如下:

$$\begin{aligned} \min_{g, f} \bar{D} = \bar{D}_q + \bar{D}_t = & \alpha^{-1} \sum_{i=0}^Q i \pi_i(g, f) + \\ & \frac{\sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}] T_m d_m}{\sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \pi_i(g, f) \eta_m [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}] d_m}, \\ \text{s.t. } & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^Q \pi_i(g, f) = 1, \\ \Pi P = \Pi, \end{array} \right. \quad (19a) \quad (19b) \\ & g_{i,m}, f_{i,m} \in \{0, 1\}, \forall i, m, \quad (19c) \end{aligned}$$

其中参数 $\{g_{i,m}\}$ 和 $\{f_{i,m}\}$ 是可控变量. 稳态概率 $\{\pi_i(g, f)\}$ 是一个关于参数 $\{g_{i,m}\}$ 和 $\{f_{i,m}\}$ 的非线性函数, 所以问题(19)是一个非线性优化问题.

为了便于分析, 定义两组函数:

$$l_i = i \pi_i, h_{i,m} = \pi_i [\alpha g_{i,m} + (1 - \alpha) f_{i,m}].$$

在最优解不变的条件下, 优化问题(19)可等效转化为以下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{g, f} \bar{D} \cdot \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m d_m h_{i,m} = & \alpha^{-1} \sum_{i=0}^Q l_i \cdot \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m d_m h_{i,m} + \\ & \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m T_m d_m h_{i,m}, \\ \text{s.t. } & \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^Q \pi_i(g, f) = 1, \\ \Pi P = \Pi, \end{array} \right. \quad (20a) \quad (20b) \\ & g_{i,m}, f_{i,m} \in \{0, 1\}, \forall i, m. \quad (20c) \end{aligned}$$

根据凸函数定义可知, 函数 $l_i$ 与函数 $h_{i,m}$ 均为凸函数. 因此, 目标函数

$$\alpha^{-1} \sum_{i=0}^Q l_i \cdot \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m d_m h_{i,m} + \sum_{i=0}^Q \sum_{m=1}^{M+1} \eta_m T_m d_m h_{i,m}$$

为凸函数. 等式约束条件(19a)为线性函数, 等式约束

条件(19b)为凸函数,因此该优化问题为凸非线性混合整数规划模型。本文采用LINGO软件中的建模语言对该优化问题(19)进行描述,该软件将本问题识别为混合整数非线性规划(MINLP)模型,并自动匹配B-and-B(分支定界)求解器进行求解。

#### 4 仿真分析

本文在源RSU缓存为有限大小,且排队系统稳定的条件下,将所提出的联合车速-队列感知的路边单元分组调度随机优化方法(VQSO),与贪婪中继方案(GBRS)以及概率中继方案(PBRS)在平均排队时延、平均传播时延、平均端到端时延以及吞吐量4个方面进行仿真对比与分析。仿真的固定参数设置如表1所示,其中速度区间取[22.22.33.33]m/s,即[80,120]km/h;时隙长度 $\Delta t$ 取1s,根据第1节引言所述,仿真时隙的取值远大于发送一个分组所需的时间。

表1 仿真参数表  
Table 1 Simulation parameter table

参数名称	符号	参数值	单位
RSU缓存容量	$Q$	100	个
RSU间隔距离	$D_c$	10000	m
速度区间	$[V_{\min}, V_{\max}]$	[22.22.33.33]	m/s
速度期望	$\bar{V}$	25	m/s
速度标准差	$\sigma$	5.56	—
车辆到达率	$\lambda$	0.55	vehicles/s
时隙长度	$\Delta t$	1	s

GBRS不考虑车辆速度,RSU<sub>1</sub>向每一个经过的车辆均传输分组,即传输参数 $g_{i,m} = f_{i,m} = 1$ 。PBRS中,RSU<sub>1</sub>向第*i*辆车传输分组的概率为 $P_{\text{br},i}$ ,即传输参数 $g_{i,m} = f_{i,m} = P_{\text{br},i}$ 。根据文献[16]中式(2)所示,RSU<sub>1</sub>给第*i*辆车发送分组的概率表达式为

$$P_{\text{br},i} = \exp\left[-\mu_v\left(\frac{d_{\text{SD}}}{v_i} - \frac{d_{\text{SD}}}{V_{\max}}\right)\right],$$

其中:  $\mu_v$ 表示车辆到达率;  $d_{\text{SD}}$ 表示源-目的RSU间隔距离;  $V_{\max}$ 表示限定车速的最大值;  $v_i$ 表示第*i*辆车的速度。由此可知,在车辆到达率 $\mu_v$ 为定值的条件下,  $P_{\text{br},i}$ 仅由车速决定,车速越大,  $P_{\text{br},i}$ 越大;反之,  $P_{\text{br},i}$ 越小。因此PBRS方法仅能降低分组平均传播时延,无法对平均排队时延进行控制。本文所提出的VQSO方法以端到端时延(排队时延与传播时延之和)最小化为优化目标,可根据分组排队数量和车速状态两个因素决定是否给该车发送分组。

针对以上3种分组传输方案,本文分为两种场景进行仿真:

**Case 1** RSU<sub>1</sub>向每个到达车辆最多发送一个分组,即对 $\forall m \in [1, M]$ ,有 $d_m = 1$ 。该情况下,当 $\alpha < \lambda$ 时,分组排队系统才能处于稳定状态,故分组到达率 $\alpha$ 的变化范围取[0.1, 0.5]。3种传输方案的仿真结果分别记为GBRS, PBRS和VQSO。分组传输过程中3种传输方案的平均排队时延、平均传播时延以及平均端到端时延随 $\alpha$ 的变化如图5所示。

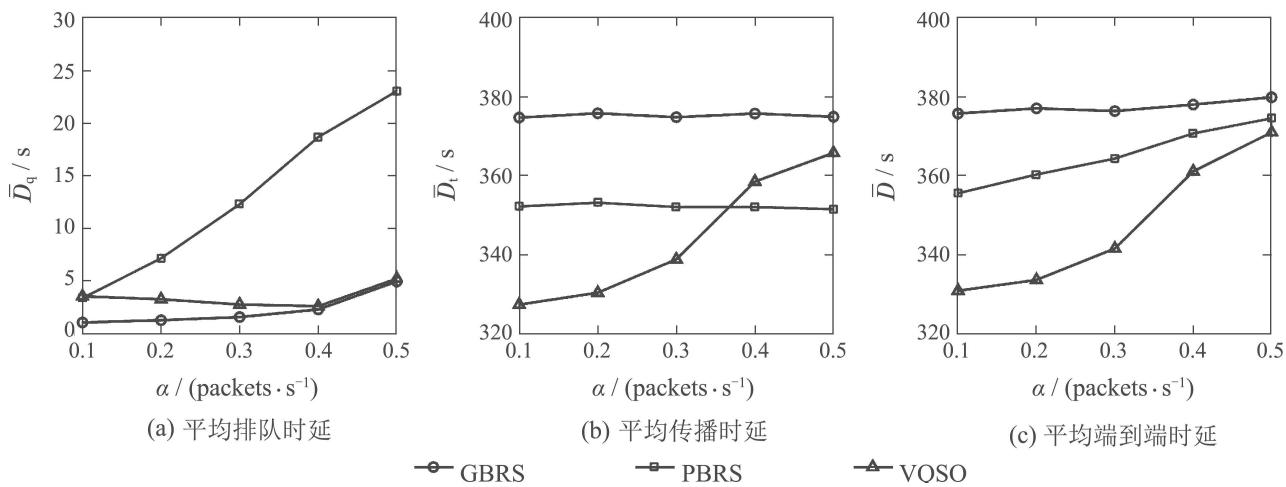


图5 GBRS, PBRS, VQSO的时延随 $\alpha$ 变化曲线

Fig. 5 Delay of GBRS, PBRS and VQSO with  $\alpha$

如图5(a)所示,当 $\alpha$ 较小时,分组到达率较低,此时GBRS产生的排队时延近似为0,说明分组到达RSU<sub>1</sub>缓存后几乎立刻就被发送给经过的车辆;随着 $\alpha$ 增大,RSU<sub>1</sub>缓存中排队分组的累积速度加快,产生的排队

时延随之上升。对于PBRS,RSU<sub>1</sub>向速度越大的车辆发送分组的概率越大,速度越小的车辆发送概率越小甚至被忽略,这使得RSU<sub>1</sub>缓存中排队分组的数量随着 $\alpha$ 增大而快速上升,故其排队时延明显大于GBRS。

本文提出的VQSO方法同时考虑缓存中分组排队长度和车速两个因素,当 $\alpha$ 较小时,分组累积速度缓慢,VQSO会放弃当前速度较慢的车辆并等待速度较快的车辆以降低传播时延;随着 $\alpha$ 增大,VQSO产生的排队时延逐渐逼近GBRS,这是因为随着分组累积速度加快,VQSO会扩大车速选择范围给速度较慢的车也发送分组,目的是防止排队时延的过快增长。

3种分组调度方法产生的平均传播时延如图5(b)所示。因为GBRS向每一个到达RSU<sub>1</sub>的车辆均发送1个分组,故其平均传播时延是RSU<sub>1</sub>和RSU<sub>2</sub>的间隔距离与车速期望值的比值,其大小不随 $\alpha$ 变化。根据文献[16],PBRS的分组发送概率 $P_{br,i} \in [0, 1]$ 是由车辆到达率和车速确定,当车辆到达率为确定值时,RSU<sub>1</sub>给不同速度车辆发送分组的概率 $P_{br,i} \in [0, 1]$ 为固定值,其平均传播时延是不同车速传输分组所产生的传播时延的期望值,不随 $\alpha$ 的变化而变化。当 $\alpha$ 较小时,VQSO选择较快的车辆传输分组,其平均传播时延较小;随着 $\alpha$ 逐渐增大,RSU<sub>1</sub>中排队的分组累计逐渐加快,为降低排队时延,VQSO需要同时选择部分车速较慢的车辆来传输分组,故其传播时延增大。

平均端到端时延是排队时延与传播时延之和,仿真结果如图5(c)所示,3种方法的分组端到端时延均随着 $\alpha$ 的增大而增大。以GBRS方法为基准,结合图5(a)和图5(b)可看出,PBRS仅考虑车速,降低传播时延的同时使得排队时延大幅增加;VQSO同时考虑分组排队长度与车速两个因素,当 $\alpha$ 较小时,可用较小排队时延的增长使得传播时延保持在较低水平;当 $\alpha$ 较大时,能通过扩大车速选择范围防止排队时延的剧烈增长,其端到端时延小于其他两种方法。

**Case 2** RSU<sub>1</sub>向每个到达车辆可发送 $d_m$ 个分组,且对 $\forall m \in [1, M]$ ,有

$$d_1 < d_2 < \dots < d_M.$$

该情况下3种传输方案的仿真结果分别记为GBRS-dm, PBRS-dm, VQSO-dm。为简化分析,取 $M=2$ ,即连续车速离散划分为2个状态,且令 $d_1=3$ , $d_2=7$ ;当车速状态为 $M+1=3$ 时,表示没有车辆到达源节点,故 $d_3=0$ 。此时系统服务率为 $\lambda d_m$ ,当 $\alpha$ 取 $[0.1, 1]$ 时,满足 $\alpha < \lambda d_m$ ,故分组排队系统可保持系统稳定性。该情况下平均排队时延、平均传播时延、平均端到端时延以及吞吐量随 $\alpha$ 的变化如图6所示。

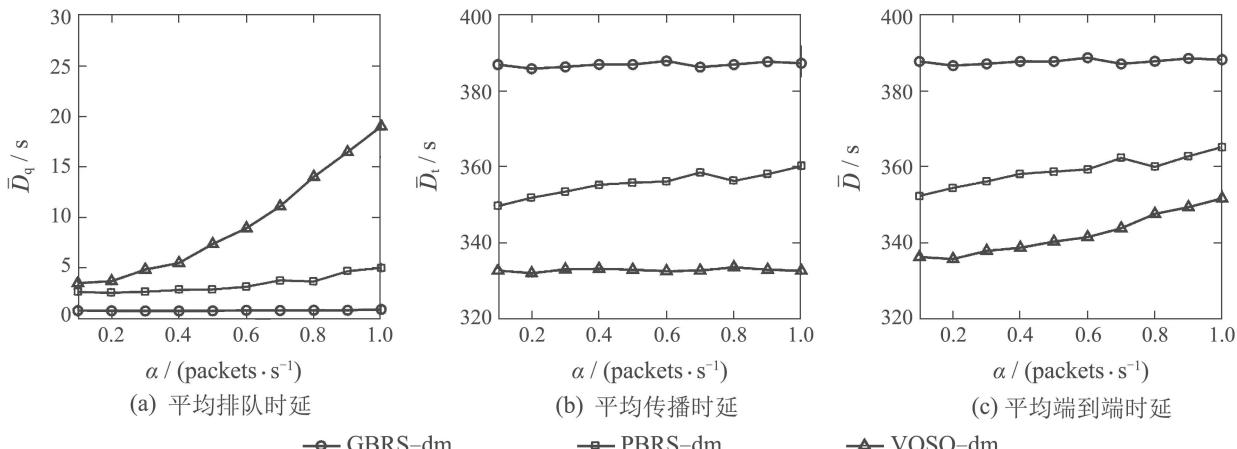


图6 GBRS-dm, PBRS-dm, VQSO-dm的时延随 $\alpha$ 变化曲线

Fig. 6 Delay of GBRS-dm, PBRS-dm and VQSO-dm with  $\alpha$

3种分组调度方法产生的平均排队时延如图6(a)所示。由于Case 2中RSU<sub>1</sub>向每个经过车辆可发送多个分组,与图5(a)相比,GBRS-dm排队时延略有降低,PBRS-dm的排队时延降低显著。与之相反,VQSO-dm的排队时延较VQSO有较大增长。这是因为系统服务率变大,VQSO-dm允许用较长时间来等待更快速度的车辆到达RSU<sub>1</sub>,从而将分组传播时延始终保持在较低水平,如图6(b)所示。而GBRS-dm和PBRS-dm均不能随着 $\alpha$ 的变化调整分组发送策略,故其传播时延保持在较稳定的水平。3种方法的端到端时延仿真结果如图6(c)所示,与GBRS-dm, PBRS-dm相比,

本文所提出的VQSO-dm方法能显著降低分组传输过程中的端到端时延。

在Case 1与Case 2两种情况下,3种分组传输方案的吞吐量仿真结果如图7所示。

比较图5(a)与图7(a)、图6(a)与图7(b)可知:系统吞吐量越大,分组平均排队时延越小;系统吞吐量越小,分组平均排队时延越大。比较图7(a)与7(b)可知,当 $\alpha$ 相同时,Case 2情况下3种分组传输方案的吞吐量分别较Case 1有较大增长,证明给每个到达车辆发送多个分组的方式能较大程度上提高系统吞吐量,并降低分组平均排队时延。

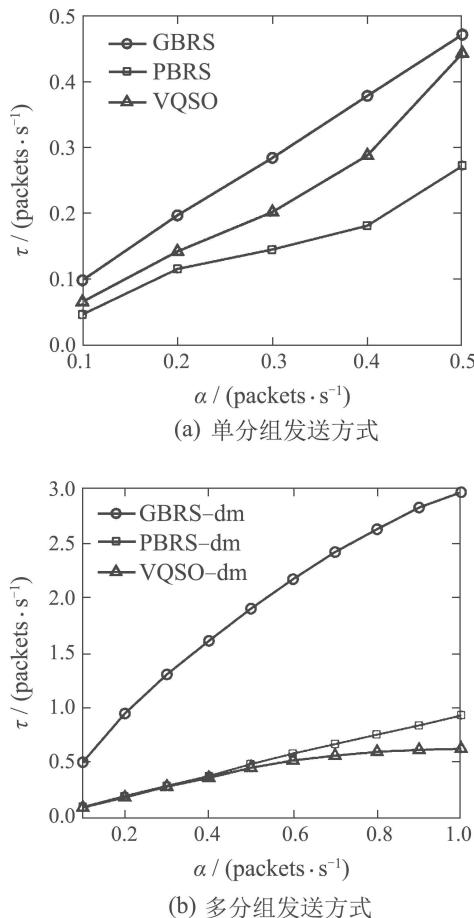


图 7 吞吐量随  $\alpha$  变化曲线  
Fig. 7 Throughput with  $\alpha$

## 5 结论

本文在高速公路车联网背景下研究通过车辆载带中继的RSU通信问题。分组在RSU间传输过程中，其平均端到端时延包括在RSU<sub>1</sub>缓冲区的平均排队时延和经车辆载带行驶至RSU<sub>2</sub>过程的平均传播时延两部分。本文提出了一种联合车速-队列感知的路边单元分组调度随机优化方法，该方法根据RSU<sub>1</sub>缓存中的分组队列长度和到达RSU<sub>1</sub>的车辆速度状态来确定是否给车辆发送分组。为找到最优的分组调度策略，本文通过建立马尔科夫链决策框架，提出一个非线性端到端时延最小化问题。仿真结果表明，本文所提出的分组调度随机优方法可以显著降低分组在RSU间传输过程中的平均端到端时延，并提高系统中分组传输的吞吐量。

## 参考文献：

- [1] HE J, CAI L, PAN J, et al. Delay analysis and routing for two-dimensional VANETs using carry-and-forward mechanism. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2017, 16(7): 1 – 1.
- [2] HUANG L, JIANG H, ZHANG Z, et al. Optimal traffic scheduling between roadside units in vehicular delay-tolerant networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, 64(3): 1079 – 1094.
- [3] HUANG L, JIANG H, ZHANG Z, et al. Efficient data traffic forwarding for infrastructure-to-infrastructure communications in VANETs. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(3): 839 – 853.
- [4] SI P, HE Y, YAO H, et al. DaVe: offloading delay-tolerant data traffic to connected vehicle networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(6): 3941 – 3953.
- [5] KHABBAZ M J, FAWAZ W F, ASSI C M. Probabilistic bundle relaying schemes in two-hop vehicular delay tolerant networks. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(3): 281 – 283.
- [6] KHABBAZ M J, FAWAZ W F, ASSI C M. Modeling and delay analysis of intermittently connected roadside communication networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(6): 2698 – 2706.
- [7] KHABBAZ M J, FAWAZ W F, ASSI C M. A probabilistic bundle relay strategy in two-hop vehicular delay tolerant networks. *Proceeding of IEEE International Conference on Communications*. Kyoto, Japan, USA: IEEE, 2011: 1 – 6.
- [8] KHABBAZ M J, FAWAZ W F, ASSI C M. A simple free-flow traffic model for vehicular intermittently connected networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 1312 – 1326.
- [9] ROESS R P, PRASSAS E S, MCSHANE W R. *Traffic Engineering*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2010.
- [10] KHABBAZ M J, ALAZEMI H M K, ASSI C M. Stochastic data delivery delay analysis in intermittently connected vehicular networks. *Proceeding of IEEE Global Communications Conference*. Anaheim, CA, USA: IEEE, 2012: 183 – 188.
- [11] KHABBAZ M J, ALAZEMI H M K, ASSI C M. Delay-aware data delivery in vehicular intermittently connected networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2013, 61(3): 1134 – 1143.
- [12] KHABBAZ M J, ALAZEMI H M K, ASSI C M. Modeling and delay analysis of a retransmission-based bundle delivery scheme for intermittent roadside communication networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(2): 700 – 708.
- [13] RAMAIYAN V, ALTMAN E, KUMAR A. Delay optimal scheduling in a two-hop vehicular relay network. *Mobile Networks & Applications*, 2010, 15(1): 97 – 111.
- [14] BADIA L, SCALABRIN M. Stochastic analysis of delay statistics for intermittently connected vehicular networks. *Proceeding of European Wireless Conference*. Barcelona, Spain, Germany: VDE, 2014: 1 – 6.
- [15] KHABBAZ M J, FAWAZ W F, ASSI C M. A probabilistic and traffic – aware bundle release scheme for vehicular intermittently connected networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 60(11): 3396 – 3406.
- [16] KHABBAZ M J, FAWAZ W F, ASSI C M. Modeling and analysis of bulk bundle release schemes in two-hop vehicular DTNs. *Proceeding of IEEE Global Telecommunications Conference*. Kathmandu, Nepal, USA: IEEE, 2011: 1 – 6.
- [17] FAWAZ W F, ATALLAH R F, KHABBAZ M J. A first step towards the resolution of the starvation problem in multi-point-to-point ICR-CNs. *IEEE Communications Letters*, 2013, 17(11): 2104 – 2107.
- [18] WANG Y, LIU Y, ZHANG J, et al. Cooperative store-carry-forward scheme for intermittently connected vehicular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 777 – 784

- [19] ATALLAH R F, KHABBAZ M J, ASSI C M. Modeling and performance analysis of medium access control schemes for drive-thru internet access provisioning systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(6): 3238 – 3248.
- [20] ABDRABOU A, ZHUANG W. Probabilistic delay control and road side unit placement for vehicular ad hoc networks with disrupted connectivity. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 29(1): 129 – 139.
- [21] LI Yijin, TANG Hao, LÜ Kai, et al. Modeling and learning – based optimization of the energy dispatch for a combined cooling, heat and power microgrid system with uncertain sources and loads. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(1): 56 – 64  
(李怡瑾, 唐昊, 吕凯, 等. 源荷不确定冷热电联供微网能量调度的建模与学习优化. 控制理论与应用, 2018, 35(1): 56 – 64)
- [22] PATRA M, THAKUR R, MURTHY C S R. Improving delay and energy efficiency of vehicular networks using mobile femto access points. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(2): 1496 – 1505.
- [23] ATALLAH R F, KHABBAZ M J, ASSI C M. Multi – hop V2I communications: a feasibility study, modelling and performance analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2801 – 2810.
- [24] PUTERMAN M. *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1994.
- [25] ZHANG Lanlan, GUO Xianping. Average optimality and constrained average optimality for controlled queuing systems. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(2): 139 – 144.  
(张兰兰, 郭先平. 受控排队系统的平均最优与约束平均最优. 控制理论与应用, 2009, 26(2): 139 – 144.)

### 作者简介:

代亮 博士,副教授,目前研究方向为车联网理论与应用,  
E-mail: ldai@chd.edu.cn;

张亚楠 硕士研究生,目前研究方向为车联网理论与应用, E-mail:  
2016132053@chd.edu.cn;

钱超 博士,讲师,目前研究方向为智能交通系统, E-mail:  
qianchao@chd.edu.cn;

孟芸 博士,讲师,目前研究方向为智能交通系统, E-mail:  
mengyun@chd.edu.cn;

黄鹤 博士,副教授,目前研究方向为智能交通系统, E-mail:  
huanghe@chd.edu.cn.