

面向车联网的智能数据传输新方法

张德千^{1,2}, 赵彭真^{1,2}, 高瑾馨^{1,2}, 张婷^{1,2}, 龚倡乐^{1,2}

(1. 天津理工大学计算机视觉与系统教育部重点实验室, 天津 300384;
2. 天津理工大学天津市智能计算及软件新技术重点实验室, 天津 300384)

摘要: 车联网 (IoV, Internet of vehicle) 技术是智能交通中的热点研究课题, 智能数据传输新方法的研究是 IoV 的重要技术之一。针对 IoV 的智能数据传输问题, 考虑了车辆密度、车辆速度、数据传输速率和数据传输时延等重要参数, 构建了 IoV 网络模型和时延函数, 提出了基于马尔可夫决策理论的数据传输最优路由方法。通过同类方法的对比分析, 验证了本路由策略具有数据传输速率更高和数据传输时延更短的性能, 对基于 IoV 的智能交通中的动态远程监控等多种应用具有重要的理论意义和实用价值。

关键词: IoV; 智能交通; 马尔可夫决策理论; 数据传输; 时延

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00104

New method of intelligent data transmission for IoV

ZHANG Degan^{1,2}, ZHAO Pengzhen^{1,2}, GAO Jinxin^{1,2}, ZHANG Ting^{1,2}, GONG Changle^{1,2}

1. Key Laboratory of Computer Vision and System (Ministry of Education), Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China
2. Tianjin Key Lab of Intelligent Computing & Novel Software Technology, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract: Internet of vehicle (IoV) is a hot research topic of the intelligent transportation, and the research of new method of the intelligent data transmission is one of the key technologies. In order to solve the problem of intelligent data transmission of IoV, a kind of new method which includes the important parameters such as vehicle density, vehicle speed, data transmission rate and data delay was proposed. By setting up network model of IoV and delaying function, the optimal routing method for intelligent data transmission which is based on Markovian decision theory was designed. Through comparison experiments with the relative methods show that the performance on improving the data transmission rate and shortening the delay of data transmission of IoV, it has important value for many applications of intelligent transportation with IoV, such as vehicle dynamic remote monitoring.

Key words: Internet of vehicle, intelligent transportation, Markov decision theory, data transmission, delay

1 引言

在 IoV 中, 车辆使用车辆到车辆 (V2V, vehicle-to-vehicle) 或车辆到基础设施 (V2I, vehicle-to-infrastructure) 的无线通信技术发送遥感数据到智能交通指挥监测中心, 不同于传统覆盖范围有限的固定传感器的传感系统, IoV 可以监控车辆能够到达的任何地方^[1-8]。IoV 中一个最重要的问题是保证感知数据从观测点到监测中心的及时交

付, 因为许多 IoV 应用需要频繁更新来自整个城区的感知信息, 如智能交通系统^[9-12]。IoV 示例如图 1 所示, IoV 的数据传输链路取决于车辆的移动性, 因此, 保证 IoV 中数据传递的时间和空间覆盖相当具有挑战性。在具有间歇性连接的网络中, 车辆有时必须在远离目的地时携带数据。事实上, 时延容忍网络 (DTN, delay tolerant network) 同样会出现到达目的地的间歇路由问题^[13-19]。由于相似性, DTN 的分组路由策略也可以用于 IoV。然而, IoV

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2019-02-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61571328)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61571328)

在如下 3 个方面与一般的 DTN 不同。1) IoV 中的车辆仅沿道路行驶，而 DTN 中的移动节点通常被假定为能够任意移动；2) IoV 通常采用具有多个目的地的任意播，而 DTN 中的工作假定为单播；3) 存在具有预定未来轨迹的车辆（如公交车），而在一般的 DTN 中，很难预测移动节点的移动。因此，DTN 的分组路由策略不能直接适用于 IoV 或无法充分利用 IoV 特性。



图1 IoV 示例

具有最小时延的分组路由策略是 IoV 中智能数据传输方法研究的主要技术^[20-23]。首先，由于车辆只能沿道路行驶，所以不同道路的车辆密度存在差异。显然，高密度的道路可以提供更多无线多跳转播机会，从而减少路上的交付时延。IoV 中影响时延性能的重要因素如图 2 所示，由于 B1 的移动不确定性，要传输的数据转发到 B1 时，可能无法将分组传递到目标 AP（即 AP1）。然而，由于在 B2 的方向（即 AP2、AP3 和 AP4）上存在许多替代 AP，因此要传输的数据转发到 B2 可能是减少时延更好的选择，具有已知轨道的车辆可以帮助进一步减少时延，如公交车等。

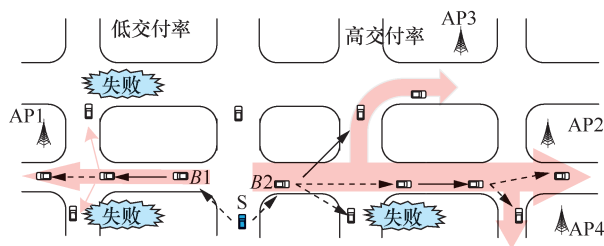


图2 IoV 中影响时延性能的重要因素

目前，IoV 中数据传输方法的分组路由策略大体有如下两种方案^[24-30]。在参考文献[24]中，采用随机有向路网图表示该路径图模拟道路地图结构和交通流量统计信息，如道路上的车辆密度和速度，并且路由算法的开发优于其他现有算法。基于

道路网络模型，参考文献[13]提出了一种利用车辆轨迹信息的分组路由方案。本文将研究 IoV 中智能数据传输新方法，涉及路由策略中通过考虑所给定的 3 个因素来最小化分组传输时延。扩展参考文献[24]中的有向路网图模型以说明预定的车辆轨迹，该模型能够将路由问题表述为简单的马尔可夫决策理论（MDT, Markov decision theory），该决策过程试图将分组的预期时延最小化，通过解决马尔可夫决策过程，设计了一个最优的数据传输分组路由算法。

本文的创新点如下：构建了一种新的有向路网图模型，该模型能够智能捕捉具有预定轨迹车辆（如公交车）的影响，并且能够动态制定路线；设计了一个时延最小的数据传输路由算法，该算法可智能地统计车辆数量、选播路由和选定最优车辆行驶路线。

2 系统模型

考虑由车辆和 Wi-Fi AP 构成的 IoV^[31-35]。沿道路移动的车辆感应城市区域，周期性地产生感知数据分组，并且通过携带或转发给其中一个 AP 从而将分组递送到另一个 AP。实际应用过程中接入点的情形较多，如接入点在交叉点、Sink 节点、基站或者其他特殊节点部署，为了便于研究，假设这些情形的接入点可以通过有线线路轻松连接城市监控中心，因此，感知数据分组只需要被传送到其中一个接入点，如在交叉点处的一个或多个邻近 AP。车辆类型有两种，包括具有预定轨迹的车辆（如公交车和警察巡逻车）和不可预测轨迹的车辆（如出租车和私家车）。为了简化说明，将具有预定轨迹的车辆称为“公交车”。如在真实城市中，假设 IoV 中的一部分车辆是公交车，车辆配备 IEEE 802.11 设备，可以使用数字路标和其 GPS 信息与其他车辆或 AP 进行通信。

IoV 感知的城市区域或道路网络被抽象为有向路网图 $G=(I, R)$ ，其中， I 是交叉点的集合， R 是连接交叉点路段的集合。网络 G 是一个有向路网图，因此，路段 $e_{ij} \in R$ 表示从交叉点 i 到邻近交叉点 j 的道路。由 $L_{AP} \subset L$ 表示 AP 所在位置的交集， L 是连接 AP 位置交叉点路段的集合。在本方案中，设定有 N 辆车，定义 $V = \{0, 1, \dots, M\}$ 为一组车辆类型 ($M < N$)。如果车辆类型 $v \in V$ 为零，则其线路轨迹不可预知；否则，如果 $v \neq 0$ ，则意味着 v 型车辆是具有预定轨迹的车辆类型。因此， M 是 IoV 中的

轨道车辆数量。

路线图及其相应的有向路网图 G 如图 3 所示。在图 3(a)中，两个 AP 被放置在交叉点 i_7 和 i_9 处，并且轨道车辆 A 的路径是交叉点序列 i_1 、 i_2 、 i_5 、 i_8 和 i_9 。数据分组的路径是连续的道路段和交叉点的序列，因为数据分组通过沿道路行驶的车辆进行传输和转发，与通常的通信网络不同，IoV 中始终存在一组固定的路线，“数据路径”上的链接由车辆的移动性形成，因此，它们并不总是存在。图 3(b)是路线相应的有向路网，有向路网图 G 表示可以“潜在地”用于传输数据分组的网络，并且网络中数据链路的存在是高度不确定的，因此，由于车辆的移动性，数据分组的传输就像其通过随机路由一样。

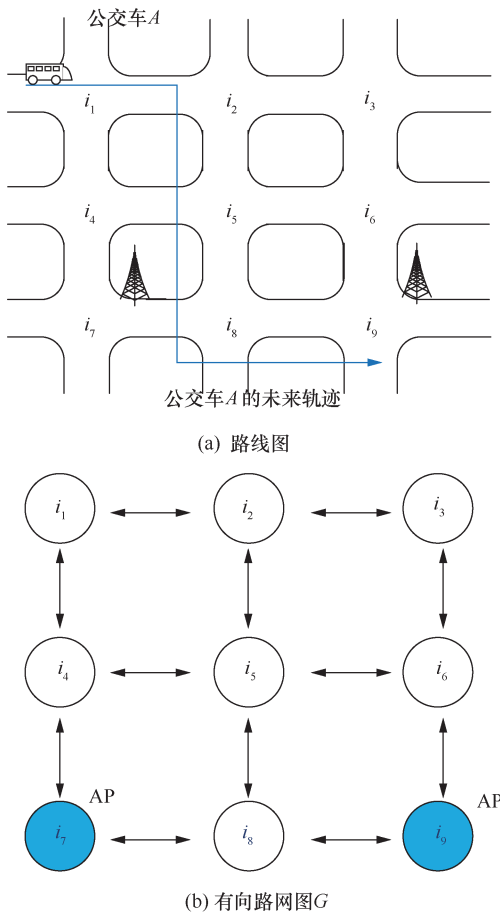


图 3 路线图及其相应的有向路网图 G

为了将预定路线的效果纳入有向路网图 G 中，公交车不仅可以将其分组携带到相邻交叉点，还可以将其分组沿着其未来轨迹的每个交叉点在一定时间内以 100% 的概率携带。因此，就像有一条边直接连接了两个相距多个街区的交叉点。为了定义

这些附加边，引入了新的表示法 e_{ij}^v ，表示 v 型车辆形成的由 i 到 j 的边。用 L 表示一组新增加的边，用 $G' = (I, R')$ 表示新的路网图，其中 $R' = R \cup L$ 。边 $e_{ij}^0 \in R'$ 与有向路网图 G 的 $e_{ij} \in R$ 相同，令 R'_s 为 R' 中对应于 R 中“单”路段的边集合，即 $R'_s = \{e_{ij}^v \in R' : \exists e_{ij} \in R\}$ 。

3 智能数据传输新方法的设计

在本文设计的智能数据传输新方法中包含设计路由策略，以尽可能减少任何一个 AP 的预期数据分组时延，特别是将分组路由问题制定为马尔可夫决策过程，并找出解决马尔可夫决策过程的最佳路由策略。

本文设计的智能数据传输新方法中的数据分组通过交通工具沿增强的有向路网图 G' 中的交叉点和边进行传输。假设路由策略是使用车辆流量统计预先计算的，车辆只有一个可用于转发数据分组的路由表，这将减少在线计算量，从而实现数据分组的快速转发。本文的路由策略规定了每个交叉点和边的转发决策，具体如下。

1) 针对交叉点，考虑到到达此处的车辆，并假设它有数据分组。显然，如果某车辆遇到前往相邻交叉点或者移动到相邻交叉点的另一车辆，该车辆可以将其分组转发到相邻交叉点。因此，分组交付到相邻交叉点是高度不确定的，并且取决于前往交叉点的车辆是否存在。采用参考文献[24]中的想法，即优先考虑每个交叉点的输出边。因此，如果车辆没有沿着具有第一优先级的边或者没有沿着具有第一优先级的边与其他车辆会合，那么其将尝试向具有第二优先级的边转发分组，以此类推。本文设计了一个智能优化方法，以尽量减少数据分组时延。

2) 针对边，将边上的分组转发分成两种情况，如 e_{ij}^v 。如果 j 是原始路网图 G 中 i 的邻居交集（即 $e_{ij}^0 \in R'$ ），则 e_{ij}^v 上的车辆将其分组转发到更靠近 j 的车辆。如果 j 不是原始路网图 G 中 i 的邻居交集（即 $e_{ij}^v \in R'/R'_s$ ），那么 e_{ij}^v 是 v 型轨道车辆的增广边，在这些边上，具有相应类型的轨道车辆能够将数据分组携带到 j 。

3.1 最佳路由策略的设计

根据参考文献[24]中的预期数据传输时延模型，将路由问题制定为马尔可夫决策过程，并设计

一个具有最小预期数据传输时延的路由策略。马尔可夫决策过程可以有效地智能捕获 IoV 中的路由，其中，从一个交叉点到另一个交叉点的分组传递是概率性的，并且概率取决于路口处的路由决策。

本文设计的马尔可夫决策过程中状态集合表示交叉点 L 的集合，并且从 R' 中的边 e_{ij}^v 概率性地出现从一个状态到其他状态的转换。然后，马尔可夫决策过程中每个状态的控制决定对应于每个交叉点处的路由决策，从状态 i 到状态 j 的状态转移概率取决于车辆交通流量统计和交叉路口 i 的路径决策，由 u_i 表示交集 i 处的路由决策。为了说明前面讨论的优先级， u_i 被定义为行向量 $u_i = [u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{k_i}]$ ，其中， $u_i^1, u_i^2, \dots, u_i^{k_i} \in R'$ 是交集 i 的所有输出边， k_i 是 i 输出边的总数。 u_i 中的元素顺序表示优先级，即 u_i^k 表示对于最小分组时延来自交集 i 的第 k 个最优的下一跳。设 $u(i)$ 为交集 i 处所有可能的决策 u_i 的集合；那么， $u(i)$ 的大小由 $|u(i)| = k_i$ 给出。路由决策 u_i 影响从交集 i 到其他交集的数据转发概率。假设 $p_{ij}^v(u_i)$ 是路由决策 u_i 下 v 型车辆的数据分组从交叉点 i 转发到 j 的概率。由 d_{ij}^v 表示在边 $e_{ij}^v \in L$ 上的预期数据传输时延，这是沿着边 e_{ij}^v 承载和转发分组所花费的时间。可以使用平均车辆速度、密度以及从交叉点 i 到 j 的路段总长度来估计时延 d_{ij}^v ，后文将讨论估计 d_{ij}^v 的细节。

在路由策略 $u = [u_i, \forall i \in L]$ 中，令 $D_i(u)$ 为从交叉点 i 到任何 AP 的预期数据传输时延。因此，对于放置 AP 的交叉点 i (即 $i \in L_{AP}$)，针对任何路由策略 u ，有 $D_i(u) = 0$ 。另一方面，在没有 AP 的交叉点处， $D_i(u)$ 依赖于 d_{ij}^v 。路由问题的 MDT 模型如图 4 所示，图 4 举例说明了路由决策 u_i 和相关参数。

假设存在 4 个可能的转发候选，这些转发候选由 u_i 优先。图 4 中的 MDT 模型具有 4 个对应于转发候选的传出边，并且规定转发概率 $p_{ij}^v(u_i)$ 和边时延 d_{ij}^v 。显然， $D_i(u)$ 可以计算为

$$D_i(u) = p_{j_1}^0 \times (d_{j_1}^0 + D_{j_1}(u)) + p_{j_2}^0 \times (d_{j_2}^0 + D_{j_2}(u)) + p_{j_1}^v \times (d_{j_1}^v + D_{j_1}(u)) + p_{j_3}^v \times (d_{j_3}^v + D_{j_3}(u)) \quad (1)$$

在通常情况下， $D_i(u)$ 可以表示为

$$D_i(u) = \sum_{v \in V'} \sum_{j \in L} p_{ij}^v(u_i) \cdot (d_{ij}^v + D_j(u)), i \in L \quad (2)$$

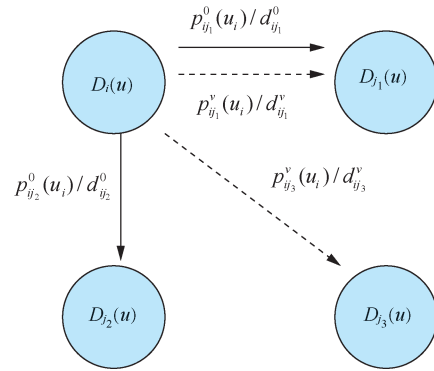


图 4 路由问题的 MDT 模型

因此，智能数据传输中的路由问题可以被表述为

$$\min_u D_i(u), \forall i \quad (3)$$

式(3)的最优解决方案包含了路由策略，该路由策略使得从任何交叉点 i 到任何 AP 的预期数据传输时延最小化。路由问题可以使用值迭代方法^[9]来解决，具体如算法 1 所示。

算法 1 智能数据传输中最优路由策略的描述

- 1) 智能数据传输中计算最优路由策略 (D^0)
- 2) 输入初始值, $\varepsilon = 0.05, p = 0.8$
- 3) 输出最优路由策略 $u^* = [u_i^*, \forall i \in L]$
- 4) 局部变量 $k = 0$
- 5) 重复
- 6) $D_i^{k+1} = \min_{u_i \in u(i)} \sum_{v \in V'} \sum_{j \in L} p_{ij}^v(u_i) (d_{ij}^v + D_j^k), \forall i \in L$ (4)
- 7) $k = k + 1$
- 8) 直到 $\max_{i \in L} |D_i^k - D_i^{k-1}| < \varepsilon$
- 9) $u_i^* = \arg \min_{u_i \in u(i)} \sum_{v \in V'} \sum_{j \in L} p_{ij}^v(u_i) \cdot (d_{ij}^v - D_j^k), \forall i \in L$ (5)
- 10) 返回 u^*

对于给定的初始时延矢量 D^0 ，如式(4)中更新来自交叉点 i 的预期数据传输时延。如果两个连续时延矢量 D^k 和 D^{k-1} 足够接近，则迭代终止，即

$$\max_{i \in L} |D_i^k - D_i^{k-1}| < \varepsilon \quad (6)$$

其中， ε 是预定的阈值，设其值为 5%。对于每个 i ，由式(4)中的迭代生成的序列 $\{D_i^k\}$ 在迭代次数足够多时，收敛于其最优值 $D_i^* = D_i(u^*)$ ^[8]。然后，如式(5)所示，使用估计的最优时延向量 $D^k = [D_i^k, \forall i \in L]$ 计算最优路由策略 $u^* = [u_i^*, \forall i \in L]$ 。

3.2 数据转发概率的计算

本节讨论如何计算数据转发概率 $p_{ij}^v(u_i)$ 。首先，如果一个 AP 被放置在交叉点 i ， $p_{ij}^v(u_i) = 0$ 。令 $o(i)$ 是从交叉点 i 出发的边集，在没有 AP 的交叉路口，车辆沿 $o(i)$ 中的一个边将分组进行转发或携带到相邻路口。因此， $p_{ij}^v(u_i)$ 是概率 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 的函数，其中， Q_{ij}^v 为车辆在 i 上移动到边 e_{ij}^v 的概率； C_{ij}^v 为接触车辆前往 e_{ij}^v 的概率。根据 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 找到 $p_{ij}^v(u_i)$ 的表达式，然后描述如何使用车辆流量统计来估计 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 。 $p_{ij}^v(u_i)$ 计算过程的完整描述如下。

1) 考虑在路由决策 u_i 下，交叉点 i 中的数据分组是通过边 e_{ij}^v 被转发到 j 的事件。很明显，如果一辆车在 i 处有数据分组与另一辆车驶向 e_{ij}^v 或者它驶向 e_{ij}^v ，则可能发生此转发事件。转发事件发生的附加条件是在 i 处的车辆不会遇到移动到比 u_i 中的 e_{ij}^v 具有更高优先级边的车辆，并且它不会移动到这些边上。

从 i 到 j 转发数据分组的条件如图 5 所示，3 个事件定义如下：在 i 的车辆不符合车辆移动到比 e_{ij}^v 具有更高优先级的车辆的事件；在本车辆遇到另一车辆驶向 e_{ij}^v 并且没有移动到比 e_{ij}^v 具有更高优先级的边的事件；车辆驶向 e_{ij}^v 的事件。

那么， $p_{ij}^v(u_i)$ 的描述如下

$$p_{ij}^v(u_i) = \Pr[A \cap (B \cup C)] = \Pr(A) \times \Pr(B \cup C) \quad (7)$$

其中， $\Pr(E)$ 表示发生事件 E 的概率。使用 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v ，式(7)可以改写为

$$\begin{aligned} p_{ij}^v(u_i) &= \Pr(A) \times [\Pr(B) + \Pr(C) - \Pr(B \cap C)] \\ &= \Pr(A) \times [\Pr(B) + \Pr(C) - \Pr(B/C)\Pr(C)] \\ &= \left[\prod_{e_{ik}^w \in H(u_i, e_{ij}^v)} 1 - C_{ik}^w \right] \times \\ &\quad \left[C_{ij}^v \left(1 - \sum_{e_{ik}^w \in H(u_i, e_{ij}^v)} Q_{ik}^w \right) + Q_{ij}^v - C_{ij}^v Q_{ij}^v \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中， $H(u_i, e_{ij}^v)$ 是在路由决策 u_i 中比 e_{ij}^v 具有更高优先级的边的集合。式(8)中的第一个乘积项对应于 $\Pr(A)$ ，即在路由决策 u_i 中， i 处车辆不符合比边 e_{ij}^v 移动到具有更高优先级边的车辆的概率。第二个乘积项等于 $\Pr(B \cup C)$ ，即车辆在 i 处携带或转发其数据分组到边 e_{ij}^v 上的概率。

2) 针对 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 的估计如下： Q_{ij}^v 是交叉点 i 的车辆移动到边 e_{ij}^v 上的概率， C_{ij}^v 是接触车辆移动到 e_{ij}^v 上的概率。显然， Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 由车辆密度和移动趋势等参数决定。以下参数用来表示 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v ： q_{ij}^0 为到达 i 的所有车辆中移动到相邻路口 j 的 0 型车辆的比例； p_{ij}^0 为在 i 移动到 j 时遇到 0 型车辆的概率； q_i^v 为到达 i 的所有车辆中的 v 型车辆的比例； p_i^v 为在 i 处遇到 v 型车辆的可能性。这些参数可以从车辆流量统计中提取^[24]。

为了计算 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v ，考虑 v 型车辆的两种情况。首先，对于不可预测的车辆（即 $v = 0$ ）， Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 分别被估计为 q_{ij}^0 和 p_{ij}^0 。然而，在 $v > 0$ 时，估计 Q_{ij}^v 和

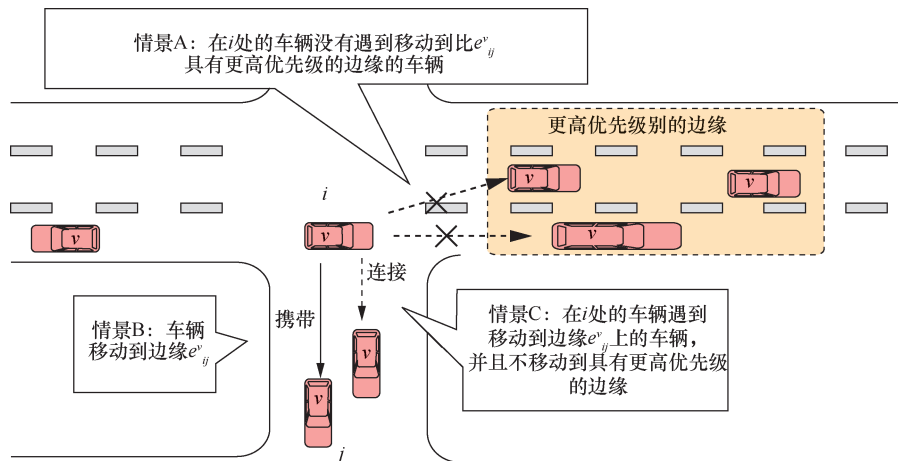


图 5 从 i 到 j 转发数据分组的条件

C_{ij}^v 更复杂,因为在交叉点 i 处,由 v 型车辆创建的输出边变为全部可用或全部不可用。在路由决策 \mathbf{u}_i 下的交叉点 1 处的数据转发如图 6 所示,图 6 显示了这种情况的一个例子。如果 v 型轨道车辆到达 i ,则所有相应的输出边都可用,在这种情况下,只使用具有最高优先级的边(在决策 \mathbf{u}_i 下)。如果从 i 到 l 的边在 v 型轨道车辆的所有边中具有最高优先级,则轨道车辆将数据分组携带到 l ;因此,对于其他边(即到 j 、 k 、 m 的边)的 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 变为零。这表明,对于 $v > 0$, Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 依赖于路由决策 \mathbf{u}_i 。因此,如果 e_{ij}^v 是 v 型车辆的所有增广边中的最佳边,则 $v > 0$ 时的 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 分别等于 q_i^v 和 p_i^v 。否则, Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 是零。以下总结了所有类型车辆的 Q_{ij}^v 和 C_{ij}^v 的计算式为

$$Q_{ij}^v(\mathbf{u}_i) = \begin{cases} q_i^v, & v = 0 \\ q_i^v, & v > 0 \text{ 且 } e_{ij}^v > \mathbf{u}_i e_{ik}^w, \forall e_{ik}^w \in o(i) \text{ s.t. } w = v \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$C_{ij}^v(\mathbf{u}_i) = \begin{cases} p_{ij}^v, & v = 0 \\ p_i^v, & v > 0 \text{ 且 } e_{ij}^v > \mathbf{u}_i e_{ik}^w, \forall e_{ik}^w \in o(i) \text{ s.t. } w = v \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

3) 通过一个数值计算例子给出转发概率 $p_{ij}^v(\mathbf{u}_i)$ 的计算过程。图 6 显示了增强的有向路网图。在图 6 中,到达交叉点 1 的分组可以被转发到交叉点 2、3 或 5。在路由决策 \mathbf{u}_1 下,通过 v 型车辆转发到交叉点 5 的分组是交叉点 1 处的最高优先级,并且将分组转发到交叉点 3 和 2 分别是第二优先事项和第三优先事项。将概率转发到交叉点 2、3 和 5,可以根据式(8)计算。

$$p_{15}^v(\mathbf{u}_1) = C_{15}^v + (1 - C_{15}^v) \times Q_{15}^v = 0.1 + (1 - 0.1) \times 0.3 = 0.37 \quad (11)$$

$$p_{12}^0(\mathbf{u}_1) = (1 - C_{15}^v) \times (1 - C_{13}^0) \times [C_{12}^0(1 - Q_{15}^v - Q_{13}^0) + (1 - C_{12}^0)Q_{12}^0] = (1 - 0.1) \times (1 - 0.6) \times [0.4 \times (1 - 0.3 - 0.5) + (1 - 0.4) \times 0.2] = 0.072 \quad (12)$$

式(11)表示来自交叉点 1~5 的两个可能的分组转发事件,即当交叉点 1 处的车辆接触 v 型车辆时移动至交叉点 5 或者当交叉点 1 处的车辆是 U 型车辆时移动至交叉点 5。式(12)可以被类似地解释,与式(11)的区别在于式(12)考虑将数据传输到具有更高优先级的交叉点的机会。

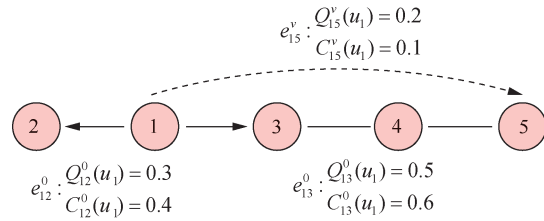


图 6 在路由决策 \mathbf{u}_1 下的交叉点 1 处的数据转发

3.3 时延的计算

d_{ij}^v 是在边 $e_{ij}^v \in L$ 上的预期数据传输时延。可以使用平均车辆密度和 e_{ij}^v 上的速度以及 e_{ij}^v 的长度来估计时延 d_{ij}^v , 这可以很容易地从车辆流量统计中获得。如果 e_{ij}^v 对应于 R 中的一组多重路段(即 $e_{ij}^v \in R'/R'_s$), 则在 e_{ij}^v 上相应的轨道车辆将数据分组一直“传送”到交叉点 j 。另一方面, 如果 e_{ij}^v 对应于 R 中的单个路段(即 $e_{ij}^v \in R'_s$), 则在 e_{ij}^v 上允许 IoV 分组转发。因此, 根据边中的跳数来估计边上的时延。

1) 针对 $e_{ij}^v \in R'_s$ 上的 d_{ij}^v 计算方法如下: 数据分组将被转发到其他车辆前方。显然, 这种 IoV 转发可以显著减少时延。时延 d_{ij}^v 取决于 e_{ij}^v 上的车辆密度 ρ_{ij} , 如果密度很高, 那么 IoV 转发的可能性很大。如果 Wi-Fi 传输范围 R 很长, 那么 IoV 转发的可能性也很大。然而, 如果 e_{ij}^v 上的车辆在变速器范围内没有遇到另一车辆, 则必须将其数据分组一直运送到十字路口 j 。这些因素可以通过几种方式进行整合。采用参考文献[24]中的时延模型, 如式(13)所示。

$$d_{ij}^v = (1 - e^{-R \cdot \rho_{ij}}) \cdot \frac{l_{ij} \cdot C}{R} + e^{-R \cdot \rho_{ij}} \cdot \frac{l_{ij}}{s_{ij}}, v = 0 \quad (13)$$

其中, l_{ij} 、 s_{ij} 和 C 分别是路段 e_{ij}^v 的长度、 e_{ij}^v 上的平均车速和无线传输时延。式(13)中的第一项是 IoV 转发带来的预期数据传输时延, 第二项是预期携带时延。式(13)表明, 时延随着变速器范围 R 、车辆密度 ρ_{ij} 或车速 s_{ij} 的增加而减小。

2) 针对 R'/R'_s 的 e_{ij}^v 上的 d_{ij}^v 计算方法如下：在这种情况下，数据分组一直由轨道车辆承载。设 $B(e_{ij}^v)$ 为沿 v 型公交线路的交叉点 i 和 j 之间的路段集合。 e_{ij}^v 上的数据分组时延仅取决于 v 型轨道车辆的平均速度 s_{ij}^v 和 $B(e_{ij}^v)$ 中的路段长度。因此，边 e_{ij}^v 上的预期数据传输时延可以通过式(14)来估计。

$$d_{ij}^v = \sum_{e_{mn} \in B(e_{ij}^v)} \frac{l_{mn}}{s_{mn}^v}, \quad v > 0 \quad (14)$$

3.4 算法的复杂度分析

在算法 1 中， D_i^k 与其最优值之间的差距随着迭代次数的增加呈指数级下降，因此，迭代终止于 $\text{clb}(1/\varepsilon)$ ，其中 c 是一个有界常数，其数值一般设定为 0.5。因此，如果每次迭代可以在多项式时间内完成，那么算法 1 是一个多项式时间算法。下面讨论迭代的计算复杂度。

用 V 和 S 表示交叉点的数量和行动空间的大小（即路由决策的数量），最小化问题式(4)可以在 $O(SV^2)$ 时间内解决。 S 取决于入射到节点的输出边数量。在增强的有向路网图中，每种类型的车辆给出每个交叉点的 $O(V)$ 输出边，因此，每个交叉点都有 $O(V)$ 个可能的路由决策。但是，对于每个 v 型轨道车辆，只有具有最高优先级的边增加了 v 个事项，因为这些边一次不可用或全部不可用。即对于边 e_{ij}^v ， $O((V-1))$ 路由决策导致完全相同的时延 D_i^{k+1} 。因此，每个车辆类型本质上只给出交叉点处的 $O(V)$ 路由决策。除去冗余路由决策，动作空间的大小 S 变为 $O(V^M)$ 而不是 $O(V)$ ，其中， M 是轨道车辆类型的数量。最后，每次迭代的计算复杂度为 $O(SV^{M+2})$ ，因此，每次迭代终止于 V 的多项式时间。由于路由策略通过流量计算，所以这种复杂性在实践中是可以接受的。

3.5 智能数据转发方式

由算法 1 推导的最优路由策略是每个交集处的一组路由决策，并且每个路由决策给出对应交集的所有输出边的优先级。因此，交叉点附近的车辆数据应该被转发到移动至最高优先级边的车辆。然而，在实践中，很难充分利用每一次向该车辆发送数据的机会，主要是由于以下两个原因：1) 无法确定到达交叉点的车辆将在不知道车辆未来轨迹的情况下移动到哪个边界；2) 即使车辆没有移动到高

优先级边，也可以接触移动到该边上的另一车辆。因此，交叉点车辆的当前移动方向与下一个交付数据的交叉点不紧密相关。

为了设计智能数据转发 (OVDF) 方式，使用车辆的地理位置，它类似于参考文献[24]中的 L-VADD。在 OVDF 路由协议中，假设出租车和公交车知道每个最优路由策略 u^* 和沿边的时延 $[d_{ij}^v, \forall e_{ij}^v \in R']$ 的预期数据传输时延 $[D_i(u^*), \forall i \in L]$ ，并且基于交叉点的最佳时延、边时延以及在路线图中的位置来周期性地计算路线度量。每辆车定期探测附近的车辆并比较其路线指标。如果车辆具有至少一个有较低路线度量的相邻车辆，则该车辆将其数据转发至具有最低路线度量的相邻车辆。基于接近的这种贪婪的数据转发方法不需要来自整个网络的全局信息，所以贪婪的数据转发可以成为车载网络的实用解决方案。

4 性能评估

4.1 实验参数设置

为了验证数据传输最优路由算法，在天津市使用 800 辆出租车和 300 辆公交车的 GPS 轨迹，在 30 天内，每辆车的位置信息在天津市 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ 的范围内每 45 s 记录一次。关注市区感知情景，选择范围为 $4.5 \text{ km} \times 4.0 \text{ km}$ 的天津市区，由 50 个交叉口和 106 个路段组成。一条路段的平均车道数为 3。选定的区域被建模为有向路网图。选择 GPS 误差相对较低的车辆进行评估，车辆平均速度为 8 m/s。在无线网络模拟器 GloMoSim^[10]上使用 IEEE 802.11a 介质访问控制 (MAC) 层协议实现 IoV。在实验中，基于参考文献[6]的标准生成传感数据。

假定车辆在满足至少一个以下条件时生成感知数据：1) 车辆移动 120 m 而不产生数据；2) 车辆在 40 s 内没有数据产生的情况下移动；3) 车辆到达 90 个交叉点中的一个。因此，车辆基于其移动距离、时间和地理位置生成感知数据。在实验中，车辆在 2 h 内产生的平均感应数据为 600 项。假设单个感应数据的大小为 100 B，与参考文献[18]中的感应数据大小相同，车辆发送包含多个（最多 50 个）感知数据的 1 024 B 数据分组。所有车辆和 AP 周期性地发送信标分组，以便在每秒检测彼此。如果互相检测到，则会尝试根据其路由算法发送数据分

组。参数设置如表 1 所示。

参数	数值
车辆的有效数量	15(10), 20(15), ..., 150(100)
仿真时间	2 h
无线设备	IEEE 802.11a
数据分组大小	1 024 位
AP 与车辆间的通信范围	120 m

4.2 测试结果

通过与参考文献[24]和参考文献[26]中为车载网络设计的两种现有路由算法 VADD^[24]和 TBD^[26]进行比较,评估路由算法(即 OVDF)的性能。VADD 和 TBD 都通过给定道路网络的交通统计数据估计到达目的地的预期数据传输时延做出分组路由决策。在 TBD 中,每辆车还利用其未来的轨迹计算路线度量。它们专为单播路由而设计,但可以按照参考文献[26]中介绍的方法轻松扩展到任意播,即在交叉点处,通过每个邻居交叉点对 AP 的预期数据传输时延估计为假定单播。对于任意播路由,在每个交叉点处,路由路径上的预期数据传输时延被假定为所有 AP 的估计时延的最小值。虽然这种方法试图最小化预期数据传输时延的最小值,但它并没有充分利用多个目的地的影响,因为实际最优解通过最小化对所有 AP 的最小时延的期望来获得。具体如下所示,此扩展可能会导致性能明显下降。

1) 数据传输性能: 首先用数据传输时延的累积分布函数(CDF, cumulative distribution function)评估上述 3 种算法(VADD、TBD 和 OVDF)的数据传输时延性能。数据传输时延的 CDF 曲线如图 7 所示,图 7 显示了当有 220 辆有效车辆(包括 150 辆出租车和 70 辆 5 种类型的公交车)时与各种数量的接入点 1、3 和 5 的交付时延的 CDF。显然,对于所有数量的 AP,OVDF 在测试算法中具有最佳数据传输时延性能。如图 7 所示(当一个 AP 位于市区时),在 10 min 内,OVDF 分别比 VADD 和 TBD 多提供了 30%的数据和 20%的数据。随着 AP 数量的增加,测试算法中数据传输性能的差距减小。这是因为,当 AP 数量较多时,在其中一个 AP 的短距离范围内会创建更多数据,因此,这些数据很容易在短时间内(在向 AP 进行少量转发后)传送给 AP 以用于任意一个算法。因此,路由算法对接近 AP 的数据影响相对较小。另一方面,边区域中的数据传输时延性能可以根据路由算

法而显著变化。下面研究测试算法的空间传感覆盖率,并展示边区域的时延性能。

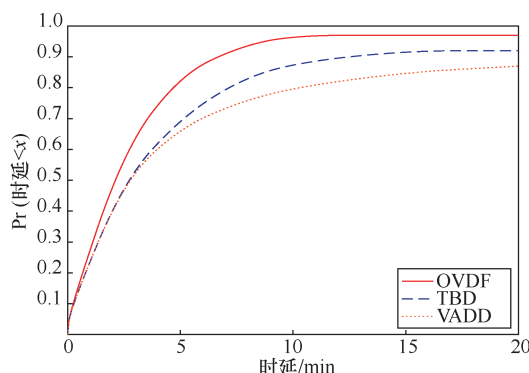


图 7 数据传输时延的 CDF 曲线

2) 感知范围中的数据传输速率: IoV 路由中重要的性能指标之一是在一定期限内的交付率。在模拟中,传感数据的截止时间固定为创建开始后 20 min。为了显示空间覆盖性能,将 5.0 km×5.0 km 的天津市划分为 400 个 0.25 km×0.25 km 的方格,并测量每个方格、每个算法的投放比率。有效车辆数量为 500 辆(包括 100 辆公交车),有 3 个 AP 且都位于市区。在生成的所有传感数据中,超过 90%的数据来自 100 个方格。与 VADD 和 TBD 相比,OVDF 在大多数地区显示出更高的数据传输速率: 220 个正方形(100 个有效方块)在 OVDF 下的传输率比在 VADD 下的传输率至少高 50%。

显然,就所有测试路由算法中的数据传输速率而言,OVDF 显示出最佳的传感覆盖率。正如前文所讨论的,创建数据足够接近以便在少量跳数内转发到 AP 的中心区域,所有测试算法的数据传输速率都很高,算法之间没有明显差异。但是,在创建数据时延很难的边区域,与 VADD 和 TBD 相比,OVDF 大大提高了数据传输速率。

3) 平均数据时延: 平均交付时延示例如图 8 所示,图 8 显示了路由算法的时延性能。在传送感知数据的过程中,OVDF 平均传输时延比 VADD、TBD 和 VDF(VDF 为次优数据转发方法^[18])低,与其他 3 种算法相比,OVDF 的平均时延分别缩短约 25%、23%和 20%。OVDF 大幅降低了边区域的平均交付时延。简言之,路由算法实现了比现有算法更快的传感数据传输。

4) 距离接入点的性能: 为了更详细地验证边区域的时延性能,研究了数据传输速率和平均时延以及离最近 AP 的距离的位置生成数据。交付率(20 min

内)和数据与距离的平均时延估计如下:考虑在城市地区 X 处产生的感知数据,并且令 Y 为距离 X 最近 AP 的位置。如果 X 和 Y 之间的距离在 $x_1 \sim x_2$ km,那么数据的交付有助于离最近 AP 的距离 $x_1 \sim x_2$ km 的地区的投放率和平均时延。

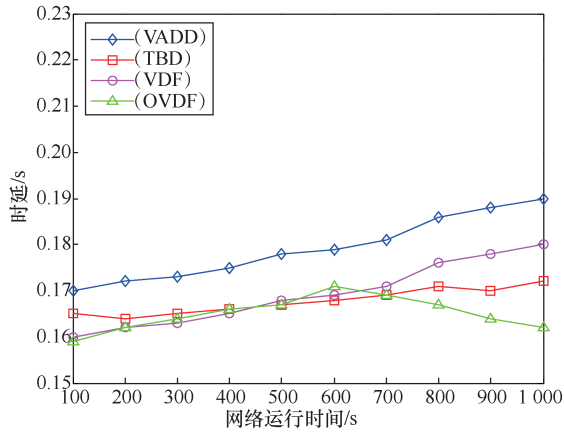


图 8 平均交付时延示例

交付率与离最近 AP 的距离关系如图 9 所示,图 9 显示了对于 AP 的无线通信范围内的区域,传输率为 100%。虽然 VADD 的交付率随着区域和 AP 之间距离的增加而明显下降,但 TBD 和 OVDF 在远离 AP 的区域内表现出相对较好的交付率,这是因为使用了预定的车辆轨迹。特别是 OVDF 在 1.5~1.8 km 和 1.8~2.1 km 的距离内分别具有 90% 和 70% 的交付率。OVDF 在这些距离范围内的交付性能比 VADD 高 70% 和 80%,比 TBD 高 60% 和 90%。OVDF 平均比 VADD 和 TBD 高 30% 和 38%,这是因为 OVDF 充分利用了车辆的预定轨迹,考虑了任意播路由的影响,并且 OVDF 即使在远离 AP 的区域产生数据,也能在短时间内与其中一个 AP 产生强大的数据传输时延。

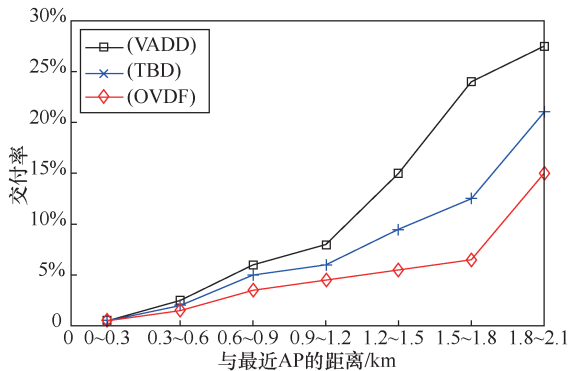


图 9 交付率与离最近 AP 的距离关系

5) 针对车辆数量的性能:通过改变车辆的有效数量(即车辆密度)来检查路由算法。把城市分为密集区域和稀疏区域。密集区域包括在 220 个有效方块中具有相对较高车辆密度的 100 个方块,稀疏区域包括在有效方块中具有较低车辆密度的 40 个方块。在密集区域,数据分组通过多跳传输很容易传送到其中一个接入点;但在稀疏区域,数据分组的传输高度依赖于如何利用车辆轨迹和接触机会。

图 10 显示了不同车辆密度下平均时延的对比。测试结果表明,OVDF 在所有算法中具有最佳传输速率和平均时延性能,不管密集区域和稀疏区域中的车辆密度如何,所有测试的算法随着车辆密度的增加而趋于更好地执行。尤其是随着车辆密度的增加,稀疏区域内 OVDF 的性能增加远高于 VADD 和 TBD。这意味着 OVDF 比 VADD 和 TBD 更好地利用了车辆轨迹和接触机会。

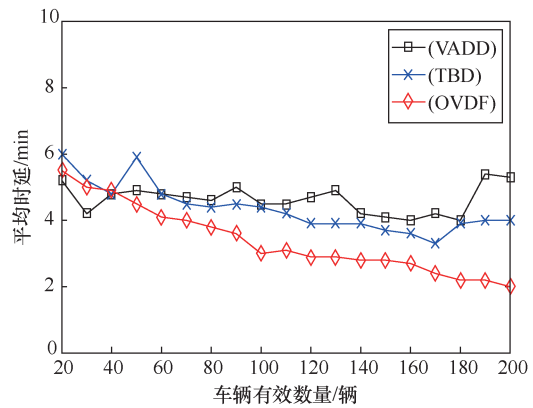


图 10 不同车辆密度下平均时延的对比

6) 针对传感数据生成速率的性能:通过提高传感数据生成速率研究路由算法的性能,平均时延与传感数据生成速率的关系如图 11 所示。所有测试算法的性能随着感知数据生成速率的增加而恶化,因为当车辆具有大量数据时,可能难以将车辆中的所有数据转发到另一车辆或单接触持续时间的 AP。具体而言,当将传感数据生成速率提高 15 倍时,OVDF 的性能下降远低于 VADD 和 TBD。因此,OVDF 对于不完整的数据转发是顽健的。

7) 针对路由表数据发送量与算法收敛速度(即轮数)关系的性能:算法优化的决策变量是数据分组转发的下一跳交叉点,预先计算并存储在路由表中。对于路线有限的公交车和自由路线的其他车辆,算法的收敛速度与存储的路由表数据量是值得比较的方面。路由表数据发送量与算法收敛速度

(即轮数)关系比较如图 12 所示,由图 12 可以看出,在传送数据的过程中,OVDF 能在最短的时间轮数内发送完相同路由表中的数据,也就是说,随着路由表数据量或发送量的动态变化,OVDF 发送这些数据量比 VADD、TBD 和 VDF 所花费的代价都小,根据轮数的大小可知,OVDF 算法的收敛速度最快。简言之,OVDF 路由算法的性能比其他 3 种算法的性能更优。

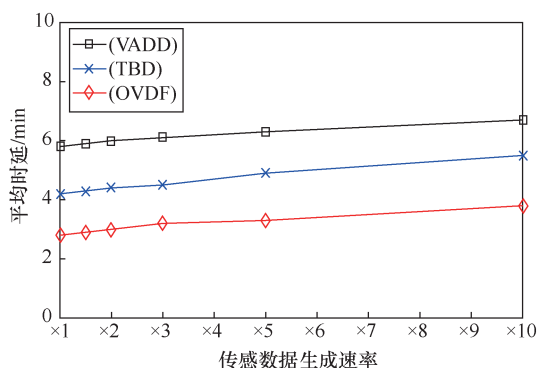


图 11 平均时延与传感数据生成速率的关系

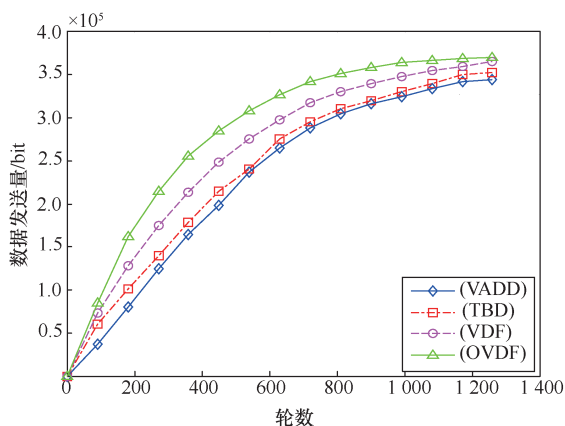


图 12 路由表数据发送量与算法收敛速度(即轮数)关系比较

5 结束语

针对 IoV 的智能数据传输问题,考虑了车辆密度、车辆速度、数据传输速率和数据传输时延等重要参数,基于网络模型和时延函数,提出了基于 MDT 的数据传输最优路由方法。使用天津市部分出租车和公交车的实际数据,在 GloMoSim 模拟器上进行大量模拟,验证了本路由策略具有更好的数据传输速率和显著缩短数据传输时延的性能。研究表明,智能数据传输分组路由方法可以极大地提高 IoV 的时延性能,该研究对基于 IoV 的智能交通应用具有重要的理论意义和实用价值。

参考文献:

- [1] CHEN J Q, MAO G Q, ZHANG D G. Capacity of cooperative vehicular networks with infrastructure support: multi-user case[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2): 1546-1560.
- [2] SONG X D, WANG X. Extended AODV routing method based on distributed minimum transmission (DMT) for WSN[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2015, 69(1): 371-381.
- [3] ZHANG D G, LI G, ZHENG K. An energy-balanced routing method based on forward-aware factor for wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 766-773.
- [4] ZHANG D G, WANG X, SONG X D. A novel approach to mapped correlation of ID for RFID anti-collision[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2014, 7(4): 741-748.
- [5] ZHENG K, ZHANG T. A novel multicast routing method with minimum transmission for WSN of cloud computing service[J]. Soft Computing, 2015, 19(7): 1817-1827.
- [6] ZHANG X D. Design and implementation of embedded uninterruptible power supply system (EUPSS) for Web-based mobile application[J]. Enterprise Information Systems, 2012, 6(4): 473-489.
- [7] ZHANG D G. A new approach and system for attentive mobile learning based on seamless migration[J]. Applied Intelligence, 2012, 36(1): 75-89.
- [8] ZHENG K. Novel quick start (QS) method for optimization of TCP[J]. Wireless Networks, 2016, 22(1): 211-222.
- [9] KANG X J. A novel image de-noising method based on spherical coordinates system[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012, 2012(110): 1-10.
- [10] WANG X. New clustering routing method based on PECE for WSN[J]. Journal on Wireless Communications and Networking, 2015, 2015(162): 1-13.
- [11] SONG X G, WANG X. New agent-based proactive migration method and system for big data environment (BDE)[J]. Engineering Computations, 2015, 32(8): 2443-2466.
- [12] ZHU Y N. A new constructing approach for a weighted topology of wireless sensor networks based on local-world theory for the Internet of things (IoT)[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 1044-1055.
- [13] LIANG Y P. A kind of novel method of service-aware computing for uncertain mobile applications[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 57(3): 344-356.
- [14] ZHAO C P. A new medium access control protocol based on perceived data reliability and spatial correlation in wireless sensor network[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(3): 694-702.
- [15] MA Z. New AODV routing method for mobile wireless mesh network (MWMN)[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2016, 22(3): 431-438.
- [16] MA Z. Shadow detection of moving objects based on multisource information in Internet of things[J]. Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence, 2017, 29(3): 649-661.
- [17] MA Z. A novel compressive sensing method based on SVD sparse random measurement matrix in wireless sensor network[J]. Engineering Computations, 2016, 33(8): 2448-2462.
- [18] LIU S, ZHANG T. Novel unequal clustering routing protocol considering energy balancing based on network partition & distance for mo-

- bile education[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 88(15): 1-9.
- [19] ZHOU S. A low duty cycle efficient MAC protocol based on self-adaption and predictive strategy[J]. Mobile Networks & Applications, 2018, 23(4): 828-839.
- [20] NIU H L. Novel PEECR-based clustering routing approach[J]. Soft Computing, 2017, 21(24): 7313-7323.
- [21] NIU H L. Novel positioning service computing method for WSN[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 92(4): 1747-1769.
- [22] ZHOU S, CHEN J. New mixed adaptive detection algorithm for moving target with big data[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(7): 4705-4719.
- [23] WANG X, SONG X D. New medical image fusion approach with coding based on SCD in wireless sensor network[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(6): 2384-2392.
- [24] ZHOU S. New DV-distance method based on path for wireless sensor network[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2017, 23(2): 219-225.
- [25] CHATTERJEE P. A trust enhanced secure clustering framework for wireless Ad Hoc networks[J]. Wireless Networks, 2014, 20(1): 1669-1684.
- [26] WANG X, SONG X D. A kind of novel VPF-based energy-balanced routing strategy for wireless mesh network[J]. International Journal of Communication Systems, 2017, 30(6): 1-15.
- [27] ZHANG T, ZHANG J. A kind of effective data aggregating method based on compressive sensing for wireless sensor network[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2018, 2018(159): 1-15.
- [28] ZHANG D G, GE H, ZHANG T. New multi-hop clustering algorithm for vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018(7): 1-16.
- [29] ZHANG D G, ZHANG T. Novel optimized link state routing protocol based on quantum genetic strategy for mobile learning[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2018, 2018(122): 37-49.
- [30] GAO J X, LIU X H, ZHANG T. Novel approach of distributed & adaptive trust metrics for MANET[J]. Wireless Networks, 2019, 25(5): 1-16.
- [31] ZHANG T, LIU X H. Novel self-adaptive routing service algorithm for application of VANET[J]. Applied Intelligence, 2019, 49(5): 1866-1879.
- [32] ZHANG D G, CHEN C. New method of energy efficient subcarrier allocation based on evolutionary game theory[J]. Mobile Networks and Applications, 2019, 24(5): 1-15.
- [33] LIU S, LIU X H. Novel dynamic source routing protocol (DSR) based on genetic algorithm-bacterial foraging optimization (GA-BFO)[J]. International Journal of Communication Systems, 2018, 31(18): 1-20.
- [34] TANG Y M, CUI Y Y. Novel reliable routing method for engineering of Internet of vehicles based on graph theory[J]. Engineering Computations, 2019, 36(1): 226-247.

- [35] LIU S. Dynamic analysis for the average shortest path length of mobile Ad Hoc networks under random failure scenarios[J]. IEEE Access, 2019(7): 21343-21358.

[作者简介]



张德干（1970-），男，湖北黄冈人，博士，天津理工大学教授，主要研究方向为车联网、物联网、移动计算、智能控制等。



赵彭真（1996-），男，河南郑州人，天津理工大学硕士生，主要研究方向为车联网、物联网、网络通信等。



高瑾馨（1995-），女，辽宁兴城人，天津理工大学硕士生，主要研究方向为车联网、物联网、网络通信等。



张婷（1973-），女，河北唐山人，天津理工大学博士生，主要研究方向为车联网、网络通信等。



龚倡乐（1996-），男，重庆人，天津理工大学硕士生，主要研究方向为车联网、网络通信等。