

基于路径时延模型的车联网数据分发方案

彭 鑫^{1,2}, 李仁发², 付 彬², 李 文¹, 刘志鹏¹

(1. 湖南理工学院信息与通信工程学院复杂工业物流系统智能控制与优化湖南省重点实验室, 湖南岳阳 414000;
2. 湖南大学嵌入式与网络计算湖南省重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘 要: 针对车联网的容迟特性造成通信资源受限的问题, 提出了满足副本抑制要求的数据分发方案. 方案利用马尔可夫链, 通过交通网络的车辆概率分布建立路段的期望传输时延, 并结合车辆的轨迹与目标位置的匹配度确定车辆的转发优先级. 车辆为转发的每个数据包插入转发参数字段并通过同步反馈机制确定最终的转发车辆, 确保由优先级最高的车辆完成转发. 考虑到链路的稳定性, 还推导了当前丢包率前提下, 车辆接收数据包与发送次数之比, 避免不必要的发送尝试产生大量副本. 实验结果显示, 提出的方案与基于轨迹预测的算法相比, 有效提高了网络吞吐量和时延性能.

关键词: 车联网; 数据副本; 容迟网络; 数据分发; 马尔可夫链

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)09-2195-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.021

Data Dissemination Based on Road Delay for VANETs

PENG Xin^{1,2}, LI Ren-fa¹, FU Bin², LI Wen¹, LIU Zhi-peng¹

(1. Key Laboratory on Complex Logistics Systems Intellectual Controlling and Optimization of Hunan Province School of Information and Communication Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang, Hunan 414000, China;

2. Key Laboratory for Embedded and Network Computing of Hunan Province, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: Considering that the delay tolerant character of VANETs (Vehicular Ad hoc NETWORKS), a packet dissemination strategy is introduced for duplicate controlling in VANETs of urban area. A packet transmission delay model of road is constructed based on Markov chain and vehicles distribution. The delay model is used to build the expected transmission delay of vehicles. And then the priority of vehicles is determined by the expected transmission delay and destination position. Current data carrier inserts decision segment of candidates into packets and select next hop vehicle by acknowledgement. Therefore, it is guaranteed that the vehicle with the highest priority can be selected as the next carrier. Furthermore, the paper deduces the ratio of quantities of received and transmitted packets. The ratio can be used to limit the unnecessary transmitting attempt, so as to inhibit duplicate packets. Simulation results demonstrate that the strategy achieves higher throughput and delay performance than the trajectory prediction based algorithms by limiting duplicate packets.

Key words: vehicular ad hoc networks; data duplicate; delay tolerant networks; packet dissemination; Markov chain

1 引言

车联网 (Vehicular Ad Hoc Networks; VANETs)^[1] 采用多跳接入方式, 无需部署大量基站, 具有较低的通信成本^[2]. 但车辆高速运动使网络拓扑动态改变, 出现容迟网络 (Delay Tolerant Networks; DTN) 特征, 数据包通

常以“携带-转发”的方式传输.

车联网的容迟特性使得车辆只能在通信窗口内转发数据, 由于链路不稳定, 容易产生大量数据副本, 占用通信资源. 所以低副本数据传输是车联网重要研究内容.

本文提出基于路段时延模型的车联网低副本数据

收稿日期: 2016-07-05; 修回日期: 2016-11-06; 责任编辑: 覃怀银

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61300039); 中国博士后基金面上项目 (No. 2013M542109); 湖南省自然科学基金 (No. 14JJ3130); 湖南省教育厅重点项目 (No. 12A057); 湖南省科技计划项目 (No. 2016TP1021); 湖南省高校创新平台开放基金项目 (No. 16K037)

分发方案. 方案根据道路时延和车辆行驶路径确定候选车辆优先级, 通过数据包附带的选择信息确定优先级最高的转发车辆, 并通过转发计数控制数据副本.

交通统计数据是车联网进行数据转发的基础. 文献[3~5]通过车辆位置信息和与目的地的远近作为下一跳车辆选择标准. 文献[6]提出的 VADD (Vehicle-Assisted Data Delivery) 协议根据交通统计数据和车辆分布情况进行路径决策, 由驶向目的地的车辆完成转发. 文献[7]对 VADD 进行改进, 根据车辆轨迹进行路口转发决策. 文献[8]提出的 TPD (Travel Prediction-based Data forwarding) 协议通过车辆交汇概率确定合适的转发路口.

部分工作通过插入控制消息进行数据分发. 文献[9]通过广播路径发现包建立转发路径. 文献[10]采用订阅与发布模型进行消息发送的分类提高转发率. 还有部分研究通过分析车辆轨迹特征进行数据分发. 文献[11, 12]分析出租车 GPS (Global Positioning Systems) 轨迹的时空相关性, 将车辆移动模型进行宏观和微观分层, 实现数据的转发. 文献[13]通过交通流量生成连通度延迟模型并利用贪心广播机制保证数据的可靠传输.

上述研究说明利用道路交通拓扑、车流轨迹、车辆位置等作为转发决策依据是可行的, 但当数据量较大时, 由于通信窗口限制, 难以实现大数据量传输^[14].

2 车联网低副本转发协议

2.1 路段时延模型

假设车辆可以通过导航系统可获取位置和基本信息, 并且采用“携带-转发”通信方式. 令 $G(V, E)$ 表示道路拓扑结构, V 为交叉路口集, E 为路段集. $e_{ij} = \{i, j \in V \mid \langle i, j \rangle \in E\}$ 为路口 i 和 j 之间的道路. 数据沿时延较小的路径转发. 端到端时延包括携带时延和转发时延两部分. 如图 1, h_f 为路段上的数据转发距离, h_c 为数据携带距离, 在路段长为 h 的情况下, 数据包传输时延为:

$$t_{ij} = \frac{h_f}{r} \cdot \tau + \frac{h - h_f}{v_{ij}} \quad (1)$$

其中, v_{ij} 为路段 e_{ij} 上车辆的平均速度, r 为通信半径, τ 为数据包的转发处理时延. 用 $E[\cdot]$ 表示期望算子, 路段 e_{ij} 的期望转发时延可表示为:

$$E[t_{ij}] = \frac{E[h_f]}{r} \cdot \tau + \frac{h - E[h_f]}{v_{ij}} \quad (2)$$

h_f 与路段 e_{ij} 上连通子网的分布密切相关. 对于 $E[t_{ij}]$, 有如下引理:

引理 1 对于长为 h 的路段 e_{ij} , 如果车辆通信半径为 r , 车速为 v_{ij} , 那么路段 e_{ij} 的数据转发时延均值 $E[t_{ij}]$

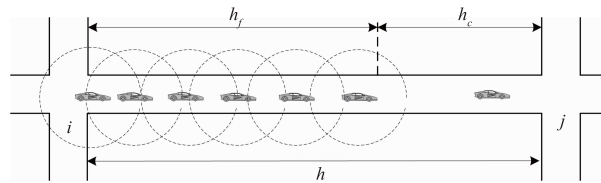


图1 数据转发与携带距离

可表示为 $E[t_{ij}] = \phi \cdot \left(P(x_i < r) \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{v_{ij}} \right) + \frac{h \cdot (P(x_i \geq r))^2}{v_{ij}} \right)$, 其中 $\phi = \frac{E[x_i]}{(P(x_i \geq r))^2}$.

证明 假设路段 e_{ij} 上的车辆平均密度为 ρ_{ij} , 车辆间距服从指数分布^[15], 即:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\rho_{ij}} \exp\left(-\frac{1}{\rho_{ij}}x\right), & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

车辆在路段上的到达率服从泊松分布, 即:

$$P_k = \frac{(\lambda \cdot t)^k}{k!} \exp(-\lambda \cdot t) \quad (4)$$

$C(k)$ 表示在单向车道上由 k 辆车构成的连通子网, $L(k)$ 表示 k 辆车构成的连通子网长度.

$$\begin{aligned} E[h_f] &= \sum_{k=1}^{\infty} (P(C(k)) \cdot E[L(k)]) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} (P(x_i < r \mid i \in C(k)) \cdot E[\sum_{i=1}^k x_i]) \end{aligned} \quad (5)$$

根据车辆间距的指数分布特性, 式(5)可写成:

$$E[h_f] = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\prod_{i=1}^k P(x_{i,j} < r) \cdot \sum_{i=1}^k E[x_i] \right) \quad (6)$$

并且, $P(x_i < r) = 1 - \exp\left(-\frac{r}{\rho_{ij}}\right)$, 那么:

$$\begin{aligned} E[x_i] &= \int_0^r x_i \cdot P(x_i \mid x_i < r) dx_i \\ &= \int_0^r x_i \cdot \frac{P(x_i, x_i < r)}{P(x_i < r)} dx_i \end{aligned} \quad (7)$$

积分区间为 $[0, r]$, 则 $P(x_i, x_i < r) = P(x_i)$, 那么:

$$\begin{aligned} E[x_i] &= \int_0^r x_i \cdot \frac{\frac{1}{\rho_{ij}} \cdot \exp\left(-\frac{1}{\rho_{ij}}x_i\right)}{1 - \exp\left(-\frac{r}{\rho_{ij}}\right)} dx_i \\ &= \frac{\rho_{ij} - (r + \rho_{ij}) \cdot \exp\left(-\frac{r}{\rho_{ij}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{r}{\rho_{ij}}\right)} \end{aligned} \quad (8)$$

因此式(6)可以表示为:

$$E[h_f] = \frac{\rho_{ij} - (r + \rho_{ij}) \cdot \exp\left(-\frac{r}{\rho_{ij}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{r}{\rho_{ij}}\right)}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \sum_{k=1}^{\infty} \left(k \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{r}{\rho_{ij}}\right) \right)^k \right) \\ & = \frac{P(x_i < r)}{P^2(x_i \geq r)} \cdot E[x_i] \end{aligned} \quad (9)$$

由式(2)可知, $E[t_{ij}]$ 可表示为:

$$\begin{aligned} E[t_{ij}] & = \frac{P(x_i < r) \cdot E[x_i]}{r \cdot P^2(x_i \geq r)} \\ & \quad + \frac{h \cdot P^2(x_i \geq r) - P(x_i < r)}{v_{ij} \cdot P^2(x_i \geq r)} \cdot E[x_i] \end{aligned} \quad (10)$$

令 $\phi = \frac{E[x_i]}{(P(x_i \geq r))^2}$, 则有:

$$E[t_{ij}] = \phi \cdot \left(P(x_i < r) \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{v_{ij}} \right) + \frac{h \cdot (P(x_i \geq r))^2}{v_{ij}} \right) \quad (11)$$

证毕

利用 $E[t_{ij}]$ 可得到每条路径的端到端时延. 如果数据到达转发路口, 没有遇到合适的下一跳车辆, 则被继续携带. 因此, 须考虑数据包在路口的转发成功率. 用 D_{ij} 表示经路段 e_{ij} 完成转发的数据包端到端时延:

$$D_{ij} = t_{ij} + \sum_{k \in \text{Neigh}(j)} (p_{jk} \cdot D_{jk}) \quad (12)$$

其中 $\text{Neigh}(j)$ 为与路口节点 j 相邻的节点. p_{jk} 表示在路口 j 处经路段 e_{jk} 转发的概率. 令 μ_{ij} 表示车辆在路口 i 的滞留时间, 交通灯时长为 l_i , 道路宽度为 w_i , 在高架路口车辆直接驶过, μ_{ij} 可由式(13)表示.

$$\mu_{ij} = \frac{w_{ij} + 2r}{v_{ij}} \quad (13)$$

交通灯路口车辆存在排队时长, μ_{ij} 由红绿灯间隔和驶过路口所耗时间组成. 后者取决于路口队列长度和路口宽度. 根据马尔科夫链, 任意时刻 t , 路口的排队长度可表示为:

$$Q(t) = Q(t - \tau) + \alpha \cdot A(\tau) \quad (14)$$

其中 $A(\tau)$ 为时长 τ 内到达路口的车辆. 为了计算排队长度, 将红绿灯间隔时间分为长度为 τ 的时隙. 经过 n 个时隙, 路口的排队长度从 i 到 j 的转移概率 $q_{ij}(n)$ 为:

$$q_{ij}(n) = \begin{cases} P_r(A(n) = j - i), & j \geq i \\ 0, & j < i \end{cases} \quad (15)$$

车辆到达率服从泊松分布, 那么在任意时长 $n \cdot \tau$ 内, 车辆到达概率为:

$$a_i = \frac{(\lambda \cdot n \cdot \tau)^i}{i!} \cdot \exp(-\lambda \cdot n \cdot \tau) \quad (16)$$

其中 λ 为单位时间到达率. 信号灯等待时间内, $k\tau$ 时刻车辆排队长度的概率矩阵 $\mathbf{P}^{(0)} = [P_0^{(0)}, P_1^{(0)}, P_2^{(0)}, \dots, P_n^{(0)}]$, 其中 $P_j^{(0)}$ 表示排队长度为 j 的概率. 在 $(k+h)\tau$ 时刻, 车辆排队长度的概率为:

$$\mathbf{P}^{(1)} = \mathbf{P}^{(0)} \cdot q_{ij}(h) \quad (17)$$

那么在第 l 步的概率为:

$$\mathbf{P}^{(l)} = \mathbf{P}^{(l-1)} \cdot q_{ij}(h) \quad (18)$$

根据 $k\tau$ 时刻的排队长度, 可推出 $(k+1)\tau$ 时刻的排队长度均值为:

$$E[Q((k+1) \cdot \tau)] = \sum_{i=0}^n (i \cdot \mathbf{P}^{(l)}) \quad (19)$$

在红绿灯控制下, 车辆在路口停留时间 μ_{ij} 为:

$$\mu_{ij} = l_i + \frac{w_{ij} + z \cdot E[Q(\omega \cdot \tau)]}{v_{ij}} \quad (20)$$

其中 z 为车辆平均长度. 数据包能在预定路口 I_i 向路段 e_{ij} 转发的前提是在该路口遇到至少 1 台驶往 e_{ij} 的车辆. 令 $\zeta(T_{ij})$ 表示在 μ_{ij} 时长内, 从路口 I_i 驶向路段 e_{ij} 的车辆数. 由于到达率服从泊松分布, 数据包在路口 I_i 能够成功转发至路段 e_{ij} 的概率 PT_{ij} 为:

$$\begin{aligned} \text{PT}_{ij} & = P(\zeta(\mu_{ij}) \geq 1) = 1 - \frac{(\lambda_{ij} \cdot \mu_{ij})^0}{0!} \\ & \quad \cdot \exp(-\lambda_{ij} \cdot \mu_{ij}) = 1 - \exp(-\lambda_{ij} \cdot \mu_{ij}) \end{aligned} \quad (21)$$

如果路口 I_i 有 n 个出度, 即 $\{e_{ia} \mid a = 1, \dots, n\}$, 并且其转发时延满足 $\{D_{ia} \leq D_{ib} \mid b \geq a \& a, b = 1, \dots, n\}$. 根据本文转发规则, 数据包从路段 e_{ix} 转发的概率 $P_{ix} = \text{PT}_{ix}$

$\cdot \prod_{i=1}^{x-1} (1 - \text{PT}_i)$. 由于数据包在路口会尽量沿具有更小 $E[t_{ij}]$ 的道路转发, 如果车辆通过路口 I_i 后进入 e_{ix1} 路段, 所有期望转发时延比 e_{ix1} 要大的路段其转发概率将为 0, 路口 I_i 的车辆也可能不转发而是自己继续携带数据包. 假设车辆驶向 e_{ix1} , 数据包经 e_{ix2} 转发的概率为 $P(e_{ix2} \mid e_{ix1})$, 可建立如下条件概率:

$$P(e_{ix2} \mid e_{ix1}) = \begin{cases} P_{ix2}, & D_{ix2} < D_{ix1} \\ \prod_{D_{ix} < D_{ix1}} (1 - P_{ix\alpha}), & D_{ix2} = D_{ix1} \\ 0, & D_{ix2} > D_{ix1} \end{cases} \quad (22)$$

用 G_{ix} 表示车辆从路口 I_i 进入 e_{ix} 路段的概率. 那么数据包在路口 I_i 经路段 e_{ij} 转发的概率为:

$$P_{ij} = \sum_{x \in \text{Neigh}(I_i)} (G_{ix} \cdot P(e_{ij} \mid e_{ix})) \quad (23)$$

2.2 低副本转发策略

车辆在路口转发数据包时可能有多个候选车辆接收, 只有让优先级高的车辆转发, 才能改善副本传输造成的网络拥塞. 候选车辆的优先级综合考虑候选车辆的行驶轨迹和转发时延. 令 D_u 表示当前车辆 u 的期望转发时延, D_u 可表示为车辆 u 在其行驶过程中将数据包转发出去的平均时延, 即:

$$D_u = \sum_{n=1}^N \left(\prod_{j=1}^n (1 - \text{PT}_{j,j+1}) \cdot (E[t_{ij}] + \sum_{k \in \text{Neigh}(j)} p_{jk} \cdot D_{jk}) \right) \quad (24)$$

其中, N 表示车辆 u 行驶轨迹经过的路口数. 考虑到转

发过程数据的丢包问题,数据包的转发次数与待传输的数据包总数之比可建立定理 1:

定理 1 令 β_u 表示车辆 u 数据包的发送次数, l_{uv} 为当前车辆 u 与下一跳转发车辆 v 之间链路的丢包率,那么转发车辆 v 的数据包转发次数与要传输的数据包总数之比为:

$$Y_u = \frac{\sum_{i \in \{D_i > D_v\}} \left(\prod_{i \in \{D_i < D_v\}} l_{ui} \cdot \beta_u \cdot (1 - l_{ui}) \right)}{\left(1 - \prod_{j \in \{D_j < D_v\}} l_{vj} \right) \cdot \sum_{i \in \{D_i > D_v\}} \beta_u \cdot (1 - l_{ui})} \quad (25)$$

证明 车辆 u 发送数据包个数为 β_u 时, u 的候选车辆收到的总数据包个数为 $\sum_{i \in \{D_i > D_v\}} \beta_u \cdot (1 - l_{ui})$. 为降低传输副本,只需转发车辆 v 转发数据,优先级比 v 更高的车辆均没有收到数据包,才能由 v 转发,则转发概率为 $\prod_{i \in \{D_i < D_v\}} l_{vi}$. 那么车辆 v 收到的数据包个数 m_v 为:

$$m_v = \sum_{i \in \{D_i > D_v\}} \left(\prod_{i \in \{D_i < D_v\}} l_{vi} \cdot \beta_u \cdot (1 - l_{ui}) \right) \quad (26)$$

如果已知车辆 v 发送的数据包个数为 β_v ,考虑丢包的可能, v 转发出的数据包 β_v 与收到的数据包 m_v 须满足:

$$m_v = \beta_v \cdot \left(1 - \prod_{j \in \{D_j < D_v\}} l_{vj} \right) \quad (27)$$

如果 v 作为唯一候选车辆,那么 v 实际收到的数据包数为 $\sum_{i \in \{D_i > D_v\}} \beta_u \cdot (1 - l_{ui})$. 因此, v 的转发次数与需要转发的数据包之比为:

$$Y_v = \frac{\sum_{i \in \{D_i > D_v\}} \left(\prod_{i \in \{D_i < D_v\}} l_{ui} \cdot \beta_u \cdot (1 - l_{ui}) \right)}{\left(1 - \prod_{j \in \{D_j < D_v\}} l_{vj} \right) \cdot \sum_{i \in \{D_i > D_v\}} \beta_u \cdot (1 - l_{ui})}$$

证毕

根据定理 1, 车辆 v 在转发过程中建立计数器 Θ_v , v 收到 m_v 个包, 那么 $\Theta_v = \Theta_v + m_v \cdot Y_v$. 一旦 v 的转发次数达到 Θ_v 则停止发送, 避免在链路质量较差时产生不必要的副本.

本文限制数据包长度, 如果数据包较大, 受链路质量影响, 转发成功率较低; 如果数据包较小, 则增大了控制开销. 令 l 表示转发成功率, t 为链路生存期, B 为链路带宽, 用 mp 表示在交叉路口遇到下一跳车辆的概率. 那么包长度上限 d_{\max} 为:

$$d_{\max} = mp \cdot B \cdot t \cdot l \quad (28)$$

如果待传输的数据量为 F , 那么数据包个数 k 最小值为:

$$k_{\min} = \left\lceil \frac{F}{d_{\max}} \right\rceil \quad (29)$$

数据发送后, 发送方通过 ACK 判断是否成功, 如果成功就清除缓存. 候选车辆依据其转发开销 D 遴选下一跳车辆. 发送方在数据包后插入决策信息, 候选车辆

决定自己是否转发收到的数据. 假设 $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 为待转发的数据包, x_k 为序号. 参与转发的车辆维持本地变量 $\alpha(u)$, 其值为 $x_i, i = 1, 2, \dots, k$, 候选车辆 u 根据 $\alpha(u)$ 决定是否转发之前收到的第 $\alpha(u)$ 个数据包. 发送方在数据包后插入 $\alpha(u)$. 候选车辆收到数据包后进行缓存. 如果 u 收到数据包, 并且 $\alpha(u) = i$, 那么 u 将转发之前缓存的数据包 x_i .

候选车辆每接收 k 个数据包向发送方反馈 ACK. 如果未收到 ACK, 发方将重传. 由于数据包大小受限, 为避免过多的 ACK, 本文采用同步 ACK 确认方式^[16].

C_i 为收到数据包 x_i 的候选车辆集合. $C_i(E_{\min})$ 表示集合 C_i 中期望转发时间最低的车辆. 下一跳车辆遴选过程, 在接收端如算法 1 所示, 发送端如算法 2 所示.

算法 1 接收端副本控制协议

输入: 数据包 x_c
 输出: 转发或缓存 x_i

- 1: Initialize $T_c = 0$;
- 2: Send ACK(u) to transmitter;
- 3: If $\alpha(u) = i$ and $T_c < \Theta_v$
- 4: Forward x_i ;
- 5: ELSE Cache x_i ,
- 6: $T_c = T_c + 1$;

算法 2 发送端副本控制协议

输入: 发送数据包 x_i
 输出: 设置 $\alpha(u)$ 的值

- 1: After received ACK(u), set $\alpha(u)$ of x_{i+k} ;
- 2: If $u \notin C_i$, Then keep $\alpha(u)$ unchanged;
- 3: If $u = C_i(E_{\min})$, Then $\alpha(C_i(E_{\min})) = 1$;
- 4: If $u \in \{v | v \in C_i \& v \neq C_i(E_{\min})\}$,
- 5: Then $\alpha(u) = \text{null}$;

发送端如果没有收到 ACK, 后续数据包中附带的 $\alpha(u)$ 保持不变, 直到发送方收到接收方的 ACK. 如果 $u = C_i(E_{\min})$, 通过设置 $\alpha(u) = 1$ 通知 u 转发 x_i . 如果 $u \neq C_i(E_{\min})$, 为了避免 $C_i(E_{\min})$ 和 u 重复转发 x_i 产生数据副本, i 的值不能赋给 $\alpha(u)$, 所以设置 $\alpha(u) = \text{null}$.

引理 2 令数据包集合 $H(u) = \{x_i | \alpha(u) = i, j < i\}$, $\Gamma(u)$ 为 u 转发的数据包集合, 集合 $E(u) = H(u) - \Gamma(u)$. 对于任意候选车辆 u , 在任意时刻, 集合 $E(u)$ 最多包含一个数据包, 并且如果集合 $E(u) \neq \emptyset$, 那么 $E(u) = \{x_i | i = \alpha(u)\}$.

证明 如果候选车辆没有收到发送方 s 发送的数据包, 那么 u 接收到的数据包集合与其转发的数据包集合完全一致, 所以集合 $E(u) = \emptyset$. 由发送方算法第 4

行,集合 $E(u)$ 一次最多增加一个数据包. 如果 u 已缓存 x_i , 且 s 准备发送的后续数据包 x_j 中 $\alpha(u) = i$, 那么 $H(u)$ 和 $\Gamma(u)$ 之间正好差一个 x_i , 这时 $E(u) = \{x_i\}$. 如果候选车辆 u 接收到后续数据包 x_j , 不管是否成功向 s 发送了 $ACK(u)$, u 都会转发 x_i . 此时 $H(u) = \Gamma(u)$, $E(u) = \emptyset$. 如果, $E(u)$ 和 $\alpha(u)$ 保持不变, 那么只要 $x_i \in E(u)$, 有 $\alpha(u) = i$. 当 $\alpha(u)$ 的值发生改变时 $H(u)$ 才能包含新的数据包, 即 $E(u)$ 每次只能新增一个数据包. 证毕.

由引理 2, s 改变包赋值 $\alpha(u)$, 一次只能让 $E(u)$ 新增一个数据包, 因此候选车辆只需缓存最近收到的数据包即可. 无论 s 要发送多少数据包, 对每个候选车辆而言, 如果最后一个包赋值非空, 就需要一个会话结束确认即可.

3 仿真分析

本文用 NS2 对提出的协议进行仿真^[17], 并与 TBD (Trajectory Based Delivery)^[7] 和 TPD^[8] 协议进行对比. 交通仿真器 SUMO^[18] 生成 $4\text{km} \times 3\text{km}$ 的 24 个路口交通区域, 参数如表 1.

表 1 仿真参数

参数	值
车辆通信半径	300 (m)
车辆速度	$N(60, 5)$ (km/h), $N(\cdot)$ 表示正态分布
链路带宽	2 (Mbps)
MAC 协议	802.11DCF/同步 ACK
丢包率	0.01
车辆数目	350

车辆在每个路口随机选择下一条路段.

首先选取 30 台车辆向 RSU 发起会话, 同时改变车辆数目, 比较三种协议的平均转发时延和转发成功率, 结果分别如图 2 和图 3. 随着车辆数目的增加, 三种协议的数据转发时延均显著降低. 当车辆数目为 50, 本文方案与 TBD 和 TPD 相比时延分别降低了 5.9% 和 3.8%; 当车辆数目为 400 时, 时延分别降低了 18.7% 和 4.8%. 随着车辆数目的增加, 数据转发成功率逐渐提高. 本文提出的协议相比 TBD 和 TPD 转发成功率分别提高了 5.2% 和 4.1%.

图 4 和图 5 比较了不同车辆速度均值条件下的转发性能. 图 4 显示, 随着车速的增加, 平均转发时延逐渐降低. 这是因为本文方案转发过程与路口到达率相关. 路口到达率增加, 车辆具有更大的路口转发机会. 此外, 由于“携带”时延比“转发”时延要大, 车辆速度提高也降低了包转发时延. 图 5 比较了不同速度条件下的包转发成功率. 可见, 本文方案与 TBD 和 TPD 相比具有较低

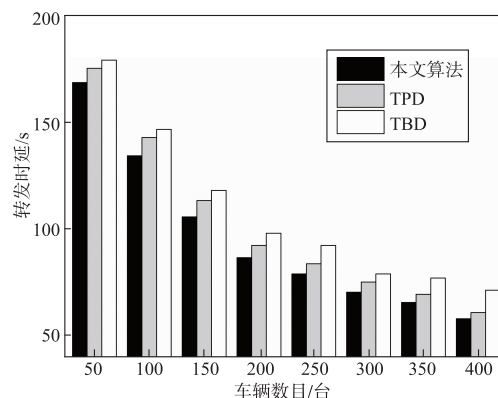


图2 不同车辆数目条件下转发时延比较图

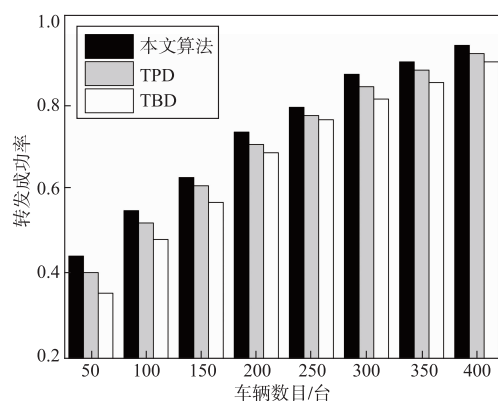


图3 不同车辆数目条件下转发成功率比较图

的时延和较高的包转发率.

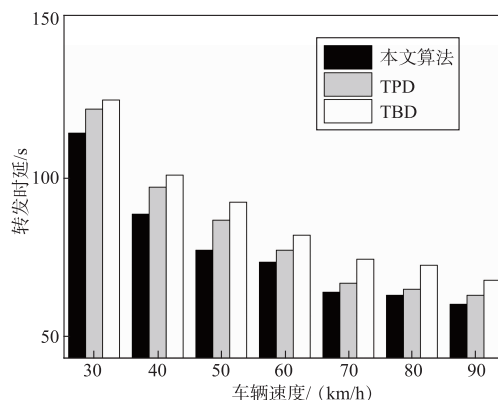


图4 不同车辆速度均值时的转发时延比较图

我们改变会话的车辆台数, 比较了协议的时延和转发成功率. 如图 6, 当会话车辆增加, 转发时延相应增加. 这是由于参与会话的车辆增多, 网络负载提高, 链路竞争激烈, 导致重传次数增加, 产生更多的数据副本. 三种方案中, 本文方案的副本控制策略具有在某链路失效情况下的可靠性保障机制, 而且使用同步 ACK 机制, 所以时延较低. 图 7 显示, 随着负载增大, 转发成功率逐渐下降. 这是由于, 网络流量增大, 靠近 RSU 的位置容易出现较为严重的链路争用现象. 这时本文的副本控

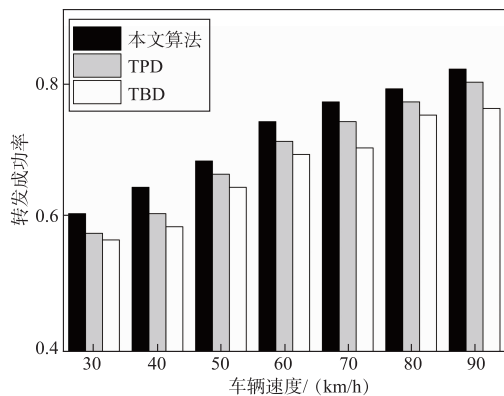


图5 不同车辆速度均值时的转发成功率比较图

制策略能体现出更好的传输可靠性, TBD 并未采用副本抑制机制, 而 TPD 直接采用单播方式, 缺乏链路失效情况下的应对策略. 因而, 本文提出的方案在不同负载条件下体现出更好的时延性能和更低的丢包率.

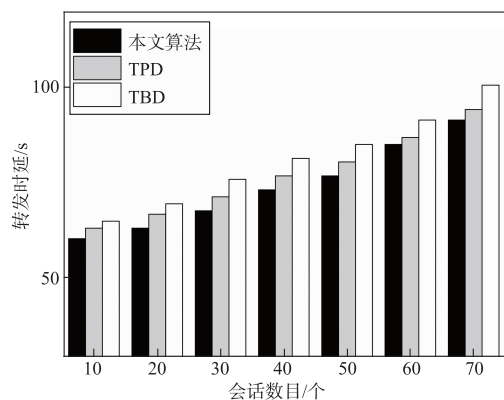


图6 不同网络负载条件下的转发时延比较图

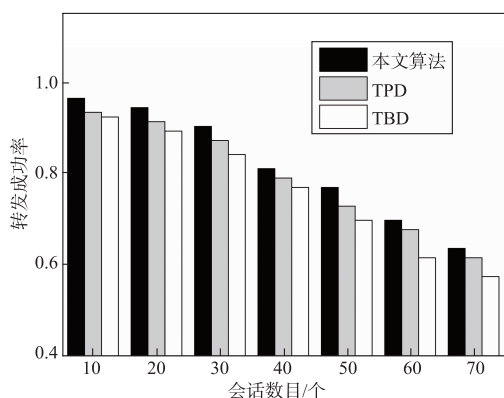


图7 不同网络负载条件下的转发成功率比较图

4 结论

本文提出了城市交通环境下, 具有副本控制能力的车联网数据分发协议. 文章首先通过交通网络的车辆分布特征建立各路段的时延模型. 协议基于时延模型并结合车辆的行驶路径确定车辆的转发优先级. 转

发的每个数据包附带一跳车辆的选择信息并通过应答确定最终的转发车辆, 确保了由优先级最高的车辆完成转发. 考虑到链路的稳定性, 文章推导了车辆接收的数据包数据与发送次数之比, 从而构造发送计数器, 避免因不必要的传输产生数据副本. 仿真结果显示, 提出的协议在交通环境下能够取得较好的传输性能, 下一步的工作将研究在更复杂移动模型条件下的数据传输问题.

参考文献

- [1] Dua A, Kumar N, Bawa S. A systematic review on routing protocols for vehicular ad hoc networks [J]. *Vehicular Communications*, 2014, 1(1): 33–52.
- [2] Yan T, Zhang W, Wang G. DOVE: Data dissemination to a desired number of receivers in VANET [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2014, 63(4): 1903–1916.
- [3] LeBrun J, Chuah C N, Ghosal D, et al. Knowledge based opportunistic forwarding in vehicular wireless ad hoc networks [A]. *Proceedings of the 61st IEEE Vehicular Technology Conference [C]*. Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 2289–2293.
- [4] Burgess J, Gallager B, Jensen D, et al. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks [A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]*. Barcelona, SPAIN: IEEE, 2006, 1–11.
- [5] Wu H, Fujimoto R, Guensler R, et al. MDDV: a mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks [A]. *Proceedings of ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET) [C]*. Philadelphia, USA: ACM, 2004. 47–56.
- [6] Zhao J, Cao G. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(3): 1910–1922.
- [7] Jeong J, Guo S, Gu Y, et al. Trajectory-based data forwarding for light-traffic Vehicular Ad Hoc Networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2011, 22(5): 743–757.
- [8] Jeong J P, Kim J, Hwang T, et al. TPD: travel prediction-based data forwarding for light-traffic vehicular networks [J]. *Computer Networks*, 2015, 93: 166–182.
- [9] Shafiee K, Leung V. Connectivity-aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in VANETs [J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(2): 131–141.
- [10] 吴磊, 刘明, 王晓敏, 等. 移动分布感知的车载自组网络数据分发 [J]. *软件学报*, 2011, 22(7): 1580–1596.
Wu L, Liu M, Wang XM, Chen GH, Gong HG. Mobile distribution-aware data dissemination for vehicular ad hoc

networks[J]. Journal of Software, 2011, 22(7): 1580 – 1596. (in Chinese)

- [11] Zhu H, Dong M, Chang S, et al. ZOOM: Scaling the mobility for fast opportunistic forwarding in vehicular networks [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Turin, Italy: IEEE, 2013. 2832 – 2840.
- [12] Zhang L, Yu B, Pan J. GeoMob: A mobility-aware geocast scheme in metropolitans via taxicabs and buses [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Toronto, Canada: IEEE, 2014. 1279 – 1787.
- [13] 张利锋, 金蓓弘, 嵇伟. 车载自组织网络中一种连通度感知的可靠数据分发机制[J]. 计算机学报, 2013, 36(4): 701 – 715.
Zhang L F, Jin B H, Zhuo W. On connectivity-aware and reliable data dissemination in VANETs[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(4): 701 – 715. (in Chinese)
- [14] 田锐, 孙利民, 刘燕, 马建. COBRA: 车载网络中基于协作的大数据传输增强机制[J]. 计算机研究与发展, 2008, 46(12): 2076 – 2084.
Tian R, Sun L M, Liu Y, Ma J. COBRA: a collaboration based reinforcement mechanism for mass transmission in VANETs[J]. Journal of Computer Research and Development, 2009, 46(12): 2076 – 2084. (in Chinese)
- [15] Wisitpongphan N, Fan B, Mudalige P, et al. On the routing problem in disconnected vehicular ad-hoc networks [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM) [C]. Alaska, USA: IEEE, 2007. 2291 – 2295.
- [16] Foh C H, Cai J, Qureshi J. Collision codes: Decoding superimposed BPSK modulated wireless transmissions [A]. Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference [C]. Las Vegas, USA: IEEE, 2010: 1 – 5.
- [17] Zhang J, Ma X, Wu T. Performance modeling and analysis of emergency message propagation in vehicular ad hoc networks [J]. Wireless Communications & Mobile Computing, 2014, 14(3): 366 – 379.
- [18] Arellano W, Mahgoub I. Traffic modeler extensions: a case for rapid VANET simulation using, OMNET + +, SUMO, and VEINS [A]. Proceedings of International Conference on High Capacity Optical Networks and Enabling Technologies [C]. Magosa, Cyprus: IEEE, 2013. 109 – 115.

作者简介



彭 鑫 男, 1981 年生于湖南岳阳. 现为湖南大学信息科学与工程学院博士后. 主要研究方向为无线传感器网络和车联网.

E-mail: peng-xin@foxmail.com



李仁发 男, 1957 年生于湖南桂阳. 现为湖南大学信息科学与工程学院教授、博士生导师. 主要研究方向为嵌入式系统和 CPS.

E-mail: lirenfa@hnu.edu.cn



付 彬 女, 1978 年生于江西南昌. 现为湖南大学信息科学与工程学院讲师、博士. 主要研究方向为无线网络与移动计算.

E-mail: fubin@hnu.edu.cn



李 文 男, 1968 年生于湖南岳阳, 现为湖南理工学院教授、硕士生导师. 主要研究方向为工业传感器网络和现场总线.

E-mail: liwen07@sohu.com



刘志鹏 男, 1991 年生于湖南娄底, 现为湖南理工学院硕士生. 主要研究方向为工业无线网络.

E-mail: hnistlzp@163.com