

车载自组织网络中的数据分发机制*

汪兆洋^{1,2}, 金蓓弘¹, 张扶桑^{1,2}, 张利锋^{1,2}, 嵇伟¹

¹(中国科学院 软件研究所, 北京 100190)

²(中国科学院大学, 北京 100190)

通讯作者: 金蓓弘, E-mail: Beihong@iscas.ac.cn

摘要: 车载自组织网络(vehicular ad-hoc network, 简称 VANET)作为一种新型的移动自组织网络, 应用前景广阔. 鉴于长距离数据分发机制是支撑 VANET 应用的一个不可或缺的机制, 提出了一种 VANET 下路边单元(roadside unit, 简称 RSU)辅助的数据分发机制 Ara, 并在不同的交通场景下对其性能进行了评估. 实验结果表明, 即使在有 RSU 出现故障的情况下, Ara 也可以保证较高的数据到达率、较小的延迟和较低的消息开销. 同时, 通过建立分析模型对 Ara 的数据传递延迟进行了理论分析. 该分析模型建立在车辆的微观流模型之上, 可以推导出不同 RSU 部署场景下的数据传递延迟. 模拟实验结果验证了模型的正确性, 因此该分析模型可以对 Ara 数据传递的性能进行预测.

关键词: 车载自组织网络; 数据分发; 路边单元; 性能建模; 性能评估

中文引用格式: 汪兆洋, 金蓓弘, 张扶桑, 张利锋, 嵇伟. 车载自组织网络中的数据分发机制. 软件学报, 2013, 24(Suppl. (2)): 50-60. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13023.htm>

英文引用格式: Wang ZY, Jin BH, Zhang FS, Zhang LF, Zhuo W. Data dissemination over vehicular ad-hoc networks. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2013, 24(Suppl. (2)): 50-60 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/13023.htm>

Data Dissemination over Vehicular Ad-Hoc Networks

WANG Zhao-Yang^{1,2}, JIN Bei-Hong¹, ZHANG Fu-Sang^{1,2}, ZHANG Li-Feng^{1,2}, ZHUO Wei¹

¹(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Corresponding author: JIN Bei-Hong, E-mail: Beihong@iscas.ac.cn

Abstract: Vehicular ad-hoc networks (VANETs) are a new kind of mobile ad hoc network, and applications over VANETs are emerging with bright prospects. Considering that a long-distance data dissemination mechanism is indispensable for most VANET applications, this paper presents Ara, a RoadSide Unit (RSU)-aided unicast routing mechanism for VANETs, and evaluates its performance under different traffic scenarios. The experimental results show that Ara can keep high data delivery ratios, low delay and few message overheads even in the case of RSU failures. Moreover, the paper theoretically analyzes the data delivery delay of Ara by establishing an analytical model. Based on a vehicular microscopic flow mobility model, the analytical model can deduce the delay under the different RSU conditions. The model has been verified on its validation by simulation experiments and therefore it can be applied to predict the performance of data delivery through Ara.

Key words: vehicular ad-hoc network; data dissemination; roadside unit; performance modeling; performance evaluation

车载自组织网络(vehicular ad-hoc network, 简称 VANET)是一类移动自组织网络, 在 VANET 中, 装备有无线通信设备的车辆构成了该网络的主要节点, 它们之间以自组织方式建立连接以进行信息交换. 移动车辆可以自由地加入或离开这个网络. 同时, 还可以在路边部署无线通信单元, 也就是路边单元(roadside unit, 简称 RSU), 它们构成了 VANET 中相对静态的节点. 这些节点通常用作数据中继, 辅助进行数据分发及存储, 它们还可以作为

* 基金项目: 国家自然科学基金(60970027, 91124001)

收稿时间: 2012-06-15; 定稿时间: 2013-07-22

连接其他网络(如 Internet,WiFi)的网关来使用.在 VANET 中,车辆与车辆之间、车辆与 RSU 之间使用 IEEE 802.11p 进行通信.

VANET 的应用领域广泛,涉及到智能交通、城市生活服务、紧急救援服务等多个方面.VANET 应用中,长距离数据分发机制是一种不可或缺的机制.而城市场景下实现长距离数据分发机制所面临的挑战有以下两个方面:(1) VANET 节点可在道路上以不同的速度、不同的运动模式随机运动,该特性再加上交通信号灯的周期性干扰,会导致 VANET 节点密度频繁变化,所以 VANET 的网络拓扑变化快,通信链路呈现间断的连通性,不能形成稳定的数据路由路径;(2) VANET 下无线通信的质量还受到道路两侧建筑物和其他障碍物的影响.为此,我们借助于部署在道路路口的 RSU,提出了一种 RSU 辅助的数据分发机制 Ara.该机制利用 RSU 作为数据中继以适应车流的变化.同时,它还能有效地工作在 RSU 出现故障的情况下.这也意味着 Ara 可以工作在部分路口部署 RSU 的场景中.我们为 Ara 建立了一个分析模型,在给定地图和特定的城市应用下,分析模型可计算出在特定 RSU 部署和特定车流情况下的数据传递延迟.这些分析结果可用于指导 RSU 的部署,以便获得所期望的性能.

本文第 1 节介绍相关工作.第 2 节描述我们提出的数据分发机制 Ara.第 3 节给出 Ara 的分析模型.第 4 节给出对 Ara 的实验评估.最后是全文的总结.

1 相关工作

本质上,VANET 使用广播进行数据传播.因此,VANET 下实现数据分发的基本方法是泛洪(flooding),也就是说,收到广播消息的节点如果是第 1 次收到该消息就再次进行广播.泛洪方法适合于数据需要传送到所有车辆的场景.为了减少冗余的广播,文献[1]提出,较远的接收节点应有更大的概率和更短的等待时间进行数据转发.发送节点如果在指定的时间段内没有收到自身发送的数据副本,则需要重新广播.文献[2]给出了基于一跳邻居信息责任条件(responsibility condition).接收者如果发现自身邻居和发送者的邻居满足责任条件,那么它将不再广播数据.文献[3]提出了基于确认的广播,即利用局部周期性的心跳消息构造节点的连通支配集,并在支配集内的节点设置较短的定时器用于再次广播数据,当定时器结束时,如果该节点没有收到邻居发送的确认消息,那么它认为这些邻居未收到数据,因而再次进行数据广播.

文献[4]介绍了 VANET 下将数据传递到一个指定目的地的单播路由策略,并根据系统目标、技术特征和系统假设将已有的单播路由策略进行了分类.其中,携带转发策略是一类基本的单播路由策略,即车辆在发现周围没有合适的传送数据的车辆时,将由车辆携带该数据前行.例如,MaxProp^[5]使用了携带转发以及数据包优先级技术来传递数据包.其中,数据包的优先级是由传递数据到目的地的开销来决定的,而后者又是通过记录两个节点相遇的概率来估计的.这样,数据传输基于优先级高者优先的策略,而当缓冲区满时,则删除优先级最低的数据.文献[5]已部署在以公交车为网络节点的称为 UMass DieselNet 的真实网络中.

还有一些研究针对于其他的数据分发形式.例如,转发扩散机制^[6]用于将数据传送到特定区域内的接收者.在文献[6]中,数据首先沿着去往目的地区域的轨迹进行转发,之后扩散到目的地区域内的所有车辆.文献[7]研究了针对车辆与任一随机分布在路边的网关之间的数据分发,其本质上是一个选播(anycast)的过程.

近期的一些研究关注了 RSU 的作用,主要原因在于车辆与车辆通信的可靠性较差.文献[8]研究了城市场景下 VANET 连通度的动态性,其实验结果表明,在 VANET 车辆密度低于特定阈值($60\text{veh}/\text{km}^2 \sim 70\text{veh}/\text{km}^2$)时,仅采用车辆与车辆通信机制的效果并不好.

文献[9]为了将数据“倾倒入”目的地区域,除了让车辆沿道路周期性地广播数据之外,还利用部署在路口的 IBer(也就是 RSU)负责在路口缓存数据并再次广播.文献[10]提出了一种静态节点辅助的数据分发协议,即在数据传递过程中,当传递数据的最优路径上没有车辆出现时,数据被存储于静态节点,即 RSU 上,当最优路径上的车辆出现时,静态节点再传送数据到车辆.这里,传递数据到一个目的地的最优路径被定义为具有最小数据传递延迟期望的路径,并且它是依据电子地图被实时更新的.此外,还有些工作给出了稀疏交通流场景下的分析模型.例如,文献[11]针对高速公路场景建立了一个分析模型,利用该模型可以计算出事件消息从事件发生地沿高速公路传递到一个 RSU 所需要的延迟.而文献[12]中提出的分析模型是针对高速公路及乡村场景的,该模型揭

示了 RSU 之间的最大距离与最差数据传递延迟之间的关系。

与已有工作相比,我们的工作重点在于:(1) Ara 作为 VANET 下 RSU 辅助的一种数据单播机制,不仅能完成从源节点到目的地的数据传递,而且能容忍 RSU 的失效.而已有工作没有考虑 RSU 出现故障而失效的情况;(2) 给出了 Ara 的性能分析,也就是说,可以根据城市环境中实际的道路、车流、RSU 部署、VANET 通信参数,估计出数据传递的延迟值.

2 RSU 辅助的数据分发机制

Ara 实现数据从源节点到固定目的地的传递,其实际传递过程是由一些 RSU 以及携带数据的车辆协作完成的.Ara 假设 RSU 部署在道路路口上,而且 RSU 和车辆都配备有 GPS 接收器和电子地图.

2.1 感知车辆及 RSU

车辆间、车辆和 RSU 间通过周期性的 hello 消息彼此相互感知.车辆发送的 hello 消息包含自身的 ID、位置及所在的道路等信息,RSU 的 hello 消息包含自身 ID 和位置信息.车辆在其 hello 消息中维护其一跳范围的邻居列表(包括通信范围内的 RSU 和车辆),RSU 也是如此.若车辆或 RSU 在连续的两个 hello 消息周期内没有收到某个节点的 hello 消息,则意味着该节点可能已经离开,此时它们会将该节点从邻居列表中删除.

由于 RSU 可能会随时增加、撤离或者失效,因此每个 RSU 需要维护一个相邻路口上的“活”的 RSU 的列表.每个 RSU 会周期性地广播 exchange 消息给一跳通信范围内的邻居车辆,该 exchange 消息包含该 RSU 的位置、RSU 所在路口的邻接道路集合、发送消息的时间戳和消息的存活时间(time to live,简称 TTL).当邻居车辆或 RSU 接收到 exchange 消息后会继续周期性地广播该消息,直到该 exchange 消息过期.接收到 exchange 消息的 RSU 会同时更新自己感知到的 RSU 列表.这样,通过 exchange 消息,新加入的 RSU 会被其他 RSU 检测到.同时,RSU 若在设置的更新周期内没有收到某个 RSU 的 exchange 消息,则认为该 RSU 离开或者故障,该 RSU 将不会成为数据包转发的中继节点而从该表中删除.这些 RSU 恢复后将作为新的 RSU 重新加入.

2.2 RSU 辅助的数据传递

在数据从源节点传递到目的节点的过程中,数据或者位于 RSU 上或者位于车辆上.位于路口处的 RSU,在接收到要传递的数据后,会从当前的相邻路口 RSU 列表中为该数据选择下一跳中继 RSU(next relay RSU),并转发给处于去往该 RSU 的路段上的车辆.上述阶段称为 RSU 辅助转发阶段.而当数据由车辆携带时,车辆采用地理位置贪心的方式将数据包从一个路口转发到下一个路口.该阶段称为车辆携带转发阶段.

RSU 辅助转发阶段:要传递的数据包包含源节点 ID、目的地节点 ID、下一跳中继 RSU、已经过的 RSU 集合(记为 $SetR$)以及 $SetR$ 中最后一个 RSU 到其下一跳中继 RSU 的路段集合(记为 $SetL$).为传递数据,RSU 执行以下操作流程:

Step 1. 数据到达一个 RSU(记为 R_i)后, R_i 检查数据是否收到过,若收到过,则丢弃;否则,把 R_i 加入到数据的 $setR$ 中.若数据中 next relay RSU 属性非空,这说明上一个发送周期未找到合适的车辆进行数据发送,那么不再重复计算 next relay RSU 属性;否则,根据电子地图,获取到达目标位置的最优路径,并选择附近的位于最优路径上的 RSU(记为 R_j)作为 next relay RSU,并将 R_i 到 R_j 的路段信息存到 $SetL$ 中.若 R_j 已在 $SetR$ 中,说明数据不能通过 R_j 到达目标位置,则在电子地图中从附近的 RSU 选择有路径到达目的地的 RSU 作为 R_j .

Step 2. 本步骤是周期性地执行的.把 R_i 通过 hello 消息感知到的车辆记为 C_k 集合.遍历集合 C_k ,选择位于 $setL$ 中某一路段且距离 R_j 最近的车辆.如果这样的车辆存在,则 R_i 发送数据给该车辆并等待 ACK 消息.如果收到 ACK 消息, R_i 将删除该数据;否则, R_i 在下一周期中再尝试发送此数据.如果在最优路径上没有可用的车辆, R_i 将等待一个周期(与 hello 消息周期相同),然后重新寻找可用车辆.如果在之后的 n 个周期(可配置)中既没有收到 ACK 消息,也没有可用的车辆出现, R_i 将在周围 RSU 中随机选择一个 RSU 作为下一跳中继 RSU,并获取两者之间的路段存入 $SetL$ 中,然后重新执行第 2 步.

车辆携带转发阶段:该阶段中,数据包由车辆携带从一个 RSU 转发到 next relay RSU.若车辆一跳通信范围

内没有邻居车辆,则由车辆携带数据包行进;若车辆一跳通信范围内有邻居车辆,则根据 hello 消息,车辆选择邻居车辆中在 *SetL* 路段上且距离 next relay RSU 最近的车辆,将数据包转发给它.车辆收到邻居车辆发送的确认,则删除数据包,否则认为发送失败,重新选择传送车辆或者继续携带前行.当车辆到达 next relay RSU 附近时,则将数据转发给该 RSU,若没有收到来自 RSU 的 ACK 消息,车辆尝试再次发送. N 个周期(可配置)未发送成功,车辆可能已经错过了 next relay RSU 或 RSU 已失效,则车辆携带数据前进,设置 next relay RSU 为空并尝试着将数据传递给其前进方向遇到的第 1 个 RSU.

3 性能分析

下面建立一个分析模型来估计 Ara 的性能.基于以下假设:

- (1) 假设数据包传递方向为正方向.设路段上的平均车辆数为 λ ,记这 λ 辆车的初速度分别为 $v_1(0)$, $v_2(0), \dots, v_\lambda(0)$.
- (2) 在前后两辆车的移动过程中,将时间分割成若干个小的 Δt 时间段,在每个 Δt 时间内,车辆以匀加速运动的方式行进.
- (3) 数据传递过程中,由于数据包传输时间远小于于车辆携带的时间,故忽略数据包传输时间.
- (4) 初始状态下,车辆以均匀分布的方式存在,车辆的运动遵循车辆的一种微观流模型,即,智能驾驶员模型(intelligent driver model,简称 IDM)^[13],路口车辆按指数时间间隔进入路段.所使用的参数见表 1.

Table 1 The parameters used

表 1 所使用的参数

参数含义	符号
无线通信半径	R
路段初始车辆数	λ
路段的平均长度	\bar{D}
车辆 $i, i+1$ 之间的初始距离(车辆 $i, i+1$ 之间没有其他车辆)	$x_i(0)$
车辆 i 的初始速度	$v_i(0)$
车辆 i 在 t 时刻的加速度	$a_i(t)$
车辆的最大速度	v_{\max}
车辆间的安全距离	Δx_{safe}
司机的反应时间	Δt_{safe}

使用智能驾驶员模型,可以得到车辆 i 在 t 时刻运动的加速度为

$$a_i(t) = \frac{dv_i(t)}{dt} = \alpha \cdot \left[1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_{\max}} \right)^4 - \left(\frac{\Delta x_{\text{des}}(t)}{\Delta x_i(t)} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中, t 时刻期望的动力距离为

$$\Delta x_{\text{des}}(t) = \Delta x_{\text{safe}} + \left[v_i(t) \Delta t_{\text{safe}} - \frac{v_i(t) \Delta v_i(t)}{2\sqrt{\alpha\beta}} \right] \quad (2)$$

公式(2)中, α 是车辆加速度的最大值,而 β 是车辆减速度的最大值.

车辆 i 在 t 时刻的速度为

$$v_i(t) = v_i(t - \Delta t) + a_i(t - \Delta t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

现在计算 Ara 中数据从一个 RSU(记为 RSU_S)到达目的 RSU(记为 RSU_D)所需要的时间(可能途经失效的 RSU) T_{total} .如图 1 所示, A 点表示 RSU_S , B 点表示 RSU_D , D 点表示车辆行驶路径上遇到的失效 RSU, E 点表示车辆经过失效 RSU 后携带数据包遇到的第 1 个正常的 RSU. T_{Normal} 为数据包沿路径 $ADGHB$ 传递的数据延迟,即没有 RSU 失效情况下的数据延迟; T_{BrRSU} 为 D 到 E 的数据延迟,即数据包遇到失效 RSU 后由车辆携带传递到第 1 个正常 RSU 所消耗的时间; T_2 为数据包沿着 EFB 路径传递的时间, T_1 为数据包沿路径 $DGHB$ 传递的时

间, $T_{increase}$ 为数据包从再次遇到的正常 RSU 传递到目的地增加的延迟, 即 $T_{increase} = T_2 - T_1$. 这样, T_{total} 的计算如式(4)所示:

$$T_{total} = \begin{cases} T_{Normal} & \text{(无失效RSU)} \\ T_{Normal} + T_{BrRSU} + T_{increase} & \text{(含失效RSU)} \end{cases} \quad (4)$$

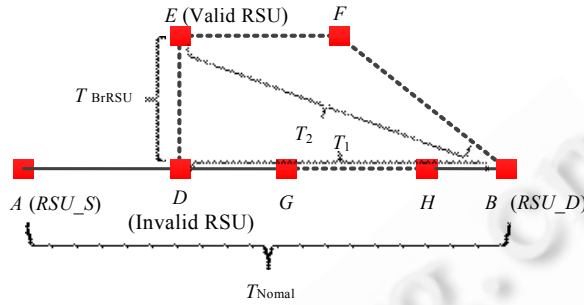


Fig.1 Pathways to delivering a data packet from A to B
图 1 数据包从 A 传递到 B 的路径

3.1 无失效RSU情况下的数据延迟

数据从发起节点到目的节点不经过失效 RSU 的延迟 T_{Normal} , 可以认为是数据在 RSU 间传输的延迟 T_{road} 与数据包在 RSU 上等待的时间 T_{wait} 之和, 表示为式(5):

$$T_{Normal} = T_{road} \times N_{road} + T_{wait} \times N_{wait} \quad (5)$$

其中, N_{road} 是数据包平均经过的路段数目, N_{wait} 是数据包平均经过的 RSU 数目; T_{road} 为数据包在一个路段上传递的延迟, T_{wait} 为数据包缓存在 RSU 上等待去往 next relay RSU 车辆的时间.

T_{road} 为一个路段(该路段一端部署 RSU_A , 另一端部署 RSU_B)上的数据传递延迟, 计算步骤如下:

Step 1. 初始化 $\bar{D}, \lambda, R, \Delta x_{safe}, \Delta t_{safe}, v_{max}, x_i(0), \Delta t, flag$, 并初始化数据包于 RSU_A 上, 变量 $flag$ 赋值为 -1 ($flag$ 记录当前数据包所在车辆编号), 初始化每辆车的初始速度, 并记为 $v_k(0), k=1, 2, \dots$, 迭代次数 w 设为 1.

Step 2. 通过公式(1)~公式(3)计算每辆车的加速度和速度, 进而用公式(6)计算所有车辆与 RSU_A 的距离:

$$S_i(t) = S_i(t - \Delta t) + v_i(t - \Delta t) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a(t - \Delta t) \cdot \Delta t^2 \quad (6)$$

Step 3. 如果 $flag$ 为 -1, 根据 Step 2 计算出的距离选择下一跳车辆, 并将 $flag$ 置为该车的编号; 若 $flag$ 为 i (不是 -1), 则计算 t 时刻, 携带数据包的车辆节点 k_i 与其他节点 k_j 之间的距离:

$$\Delta x_{k_j}(t) = S_{k_j}(t) - S_{k_i}(t) \quad (7)$$

进而选择下一跳车辆, 并将 $flag$ 置为该车的编号, 该 $flag$ 需满足:

$$flag = \{k | S_k - S_{flag} < R \wedge S_k - S_{flag} > S_q - S_{flag}, q \text{ 为除 } k \text{ 以外的所有车辆}\}.$$

Step 4. 若 Step 3 中选择的 $flag$ 车辆在节点 RSU_B 通信范围内, 即 $S_i(t) + R \geq \bar{D}$, 则计算终止, 输出所用时间 $T_{road} = w \cdot \Delta t$; 若 $flag$ 车辆的通信范围内存在可用的下一跳车辆, 则返回 Step 3; 否则, 置 $w=w+1$, 返回 Step 2.

T_{wait} 是数据包缓存在 RSU 上的时间, 用公式(8)计算:

$$T_{wait} = \frac{\bar{L}}{n \cdot \bar{V}} \quad (8)$$

其中, \bar{L} 为路段的平均长度, \bar{V} 为车辆的平均行驶速度, n 为路段上的平均车辆数目.

根据公式(5)~公式(8), 可以得到从源节点到目的节点不经过失效 RSU 的延迟 T_{Normal} .

3.2 含失效RSU情况下数据传递增加的延迟

在含失效 RSU 情况下, 数据延迟增加了两部分内容: (I) 遇到失效 RSU 后车辆携带数据包行进直到再次遇

$$T_S = \frac{n_3}{(n_1 + n_2 + 1)(n_3 + 1) - 1} \times \frac{L_{BrRSU} \times T_{road}}{L} \times (P_l + P_r) \quad (15)$$

当实际区域很大,即 $n_1, n_2, n_3 \rightarrow \infty$ 时,计算 $T_{increase}$ 如下:

$$T_{increase} = \lim_{n_1, n_2, n_3 \rightarrow \infty} (T_{LS} + T_{RS} + T_S + T_L + T_R) = \frac{L_{BrRSU} \times T_{road}}{2L} \times (P_l + P_r) \quad (16)$$

通过以上计算,可以得到从 RSU_S 到达 RSU_D 的数据延迟 T_{total} . 我们通过实验验证了上述分析模型具有与 Ara 一致的行为. 表 2 给出了分析模型所需参数的赋值,而实验所需参数的赋值见表 5. 表 3、表 4 分别给出了 Ara 的实验和模型估算所获得的数据传输总延迟(此时,数据到达率约为 80%),概括而言,无失效 RSU 情况下,数据传输延迟平均相对误差为 6.5%,有失效 RSU 情况下,数据传输延迟平均相对误差为 9.1%. 这表明,实验结果与理论结果基本吻合.

Table 2 The setting of model parameters

表 2 模型参数的设置

参数	值
$v_i(0)$	20km/h~72km/h
v_{max}	72km/h
Δx_{safe}	2m
Δt_{safe}	0.1s
N_{wait}	4
N_{road}	4

Table 3 Delay in the case of normal RSUs

表 3 无失效 RSU 时模型估算延迟与模拟实验延迟

车辆总数	延迟	
	模拟实验	估算
25	355.6	376.7
50	284.9	286.2
75	158.8	154.6
100	106.9	116.3
150	51.5	56.0
200	19.3	20.5
250	13.3	14.2
300	9.4	8.8
350	7.6	6.6

Table 4 Delay in the case of failed RSUs

表 4 含失效 RSU 时模型估算延迟与模拟实验延迟

车辆总数	延迟	
	模拟实验	估算
25	580.1	453.2
50	310.2	349.1
75	214.6	197.8
100	137.5	153.8
150	80.0	84.5
200	66.7	65.8
250	53.4	63.8
300	57.2	57.7
350	54.4	55.1

4 实验评估

本节通过以下指标评估 Ara 的性能:

- 数据到达率:数据在给定时间内,从源节点最终可传递到目的节点的比率.
- 数据延迟:数据从源节点传递到目的节点所需平均时间.

- 消息开销:数据从源节点向目的节点传递过程中所需要的消息总量.

在 VANET 的数据分发过程中,直接的携带转发机制(记为 DC&F)代表了一类数据分发的方式.在 DC&F 中,车辆在感知到除了发送给它的车辆或 RSU 外,还有其他车辆或者 RSU 在其通信范围内时,广播该数据包;否则,由车辆携带该数据包前行.RSU 存储收到的数据包,并在感知到周围有车辆的时候,周期性地广播收到的数据包.换句话说,车辆和 RSU 类似传染病算法中的源节点,将数据传递给附近尽可能多的节点.因而我们采用 DC&F 作为 Ara 的对比系统,观察和评估两者的性能.

对于 Ara,由于其可以工作在 RSU 失效的情况下,所以,Ara 在这种情况下的性能如何也是值得关注的.我们通过实验比较了 Ara 在无失效 RSU 环境和存在失效 RSU 环境下的性能.

4.1 实验环境

实验建立在北京市真实地图上中关村地区的一块 $4000 \times 4000 \text{m}^2$ 的区域上,我们通过 Google 地图获得该区域内的道路拓扑结构以及路段长度等数据.模拟实验中,道路均设置为双向车道,并在区域内的 25 个主要路口上设置了 RSU.图 3 显示了实验所使用的道路拓扑,图上黑色圆点代表 RSU.

实验采用 NCTUns6.0^[14]作为网络模拟平台,其中,MAC 协议采用 IEEE 802.11p 通信协议.为了仿真城市中的路边建筑,在道路两边设置了阻挡无线信号的障碍墙.实验中,车辆的移动采用反映城市市场景车辆运动特征的智能驾驶员模型,所有车辆的初始位置均随机产生,车辆在路口以一定概率转向(直行概率为 0.6,左右转向概率各为 0.2),在实验刚开始的前 50s 内,部分车辆每隔 0.5s 产生 1 条数据,产生数据的车辆数目不超过车辆总数的 25%.表 5 给出了实验中的其他参数及取值.

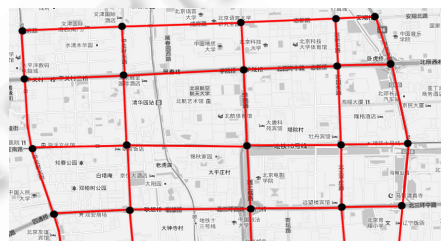


Fig.3 Street topology used in the experiments
图 3 实验采用的街道拓扑

Table 5 Experiment parameters

表 5 实验参数

参数	值
无线通信半径	300m
平均道路长度	1km
车辆速度	20km/h~72km/h
车辆密度(总数)	25 辆~350 辆
Hello 消息间隔	0.5s
Exchange 消息间隔	10s

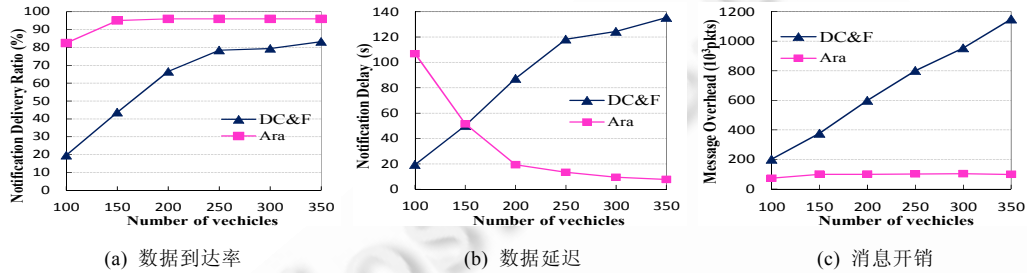
4.2 DC&F和Ara的实验结果和分析

我们进行了两组实验.第 1 组实验观察了不同车流密度下 Ara 和 DC&F 两种机制的性能和开销.车辆密度变化是通过改变车辆总数实现的.实验中,车辆数从 100 辆增加到 350 辆,每次增加 50 辆车.每次实验持续 400s,图 4(a)~图 4(c)给出了实验结果.

从图 4(a)可以看到,车辆节点数目在从 100~350 的变化过程中,两种机制的数据到达率都有较大幅度的提高.在车辆数为 100 时,DC&F 的数据到达率较低(19.8%),而 Ara 则有相对较高的数据到达率(82.4%).图 4(b)记录了在不同车流密度下两种机制的数据延迟.由于 Ara 中,车辆需要寻找附近合适的车辆进行数据转发,所以车辆密度越大,则出现合适车辆的概率越大,进而延迟也越小.而在 DC&F 中,可能会有多条路径到达目的地,包括很多绕路的路径,所以,平均而言,其延迟并不小.图 4(c)记录了两种机制各自消耗的消息总数量.可以看到,DC&F 的消息开销量远大于 Ara.

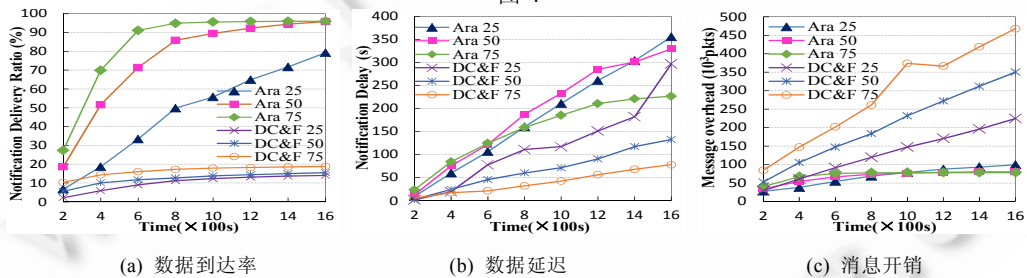
考虑到在 VANET 推广应用的初始阶段,车辆节点可能较少,为此,第 2 组实验观察了在低密度车流下 Ara 和 DC&F 的表现.实验中,车辆数目分别设置为 25,50 和 75.实验持续 1 600s,并每隔 200s 记录相关的性能数据.

实验结果如图 5(a)~图 5(c)所示.从图 5(a)所示的数据可以看出,连通度的降低对数据到达率的影响非常显著.在 Ara 中,大量数据要靠 RSU 及车辆携带很长时间后才能送达目的地,在 50 辆和 75 辆车的情况下,需要在 600s 以后,才能够达到 80% 以上的数据到达率.而在 3 种低密度情况下,DC&F 最高的到达率只有 19%.这表明,在这种情况下,DC&F 几乎不可用.结合图 4(a)所示的数据,我们认为选择合适的车辆转发数据(Ara)相比于发送数据到多辆车(DC&F)更为有效.这个结论在低车流密度导致低网络连通度的情况下更为明显.图 5(b)记录了数据传递所需要的数据延迟.Ara 中,可以看到,随着时间的流逝,伴随着数据到达率的提高(如图 5(a)所示),数据的延迟也在增大.特别地,在 75 辆车的情况下,车辆延迟在 1 200s 后趋于平稳,这说明车辆密度越高,数据延迟越早进入稳定状态.DC&F 虽然到达目的地的数据所需的延迟比较小,但由于数据到达率太低,所以,实际效果并不好.图 5(c)记录了随时间变化的消息开销.从图 5(c)的数据我们看到,Ara 在低密度车流下,消息开销随时间的流逝会趋于稳定.而 DC&F 随着车辆密度的增加,开销增长明显,并且远大于 Ara,这说明 DC&F 发送了很多冗余的消息,所以不够高效.



(a) 数据到达率 (b) 数据延迟 (c) 消息开销

Fig.4
图 4



(a) 数据到达率 (b) 数据延迟 (c) 消息开销

Fig.5
图 5

4.3 含失效RSU的Ara实验结果和分析

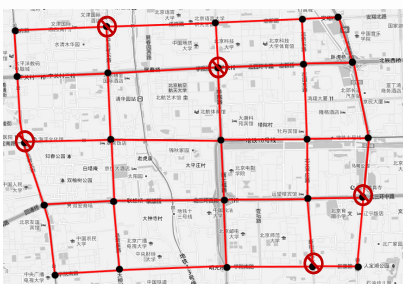


Fig.6 Distribution of failed RSUs
图 6 RSU 失效节点分布图

实验场景如图 6 所示,其中,随机部署了 5 个失效的 RSU 节点.下面两组实验将观察在有或无失效 RSU 情况下 Ara 的性能和开销.

在第 3 组实验中,不同车流密度仍通过改变车辆总数来实现,车辆数从 100 辆增到 350 辆,每次增加 50 辆车.实验持续 400s,图 7(a)~图 7(c)给出了含失效 RSU 和不含失效 RSU 的 Ara 的实验结果.

从图 7(a)可以看到,随着车辆节点数目的增加,含失效 RSU 和无失效 RSU 情况下 Ara 机制的数据到达率都有所提高.含失效 RSU 情况下数据包到达率略低于无失效 RSU 的数据包到达率,但是相差不大(不超过 6%).而在高密度车流下数据包的到达率几乎相同.图 7(b)记录了两种情况下的数据延迟.可以看到,有失效 RSU 情况下的数据

延迟大于无失效 RSU 的情况,这是由于,在有失效 RSU 的情况下,数据并非在最优路径上传递,所以,由于车辆携带的时间较长,延时较大.两种情况下数据包的延迟都随车流密度的增大而减小.但是,在 100 辆车时,车流密度

比较稀疏,车辆携带数据包行进的几率较大,二者的数据延迟相差不大;随着车流密度的增加,两种情况下的数据延迟差别明显,这是由车辆密度增加导致网络的连通度提高造成的.图 7(c)记录了两种情况下的消息开销,含失效 RSU 情况下的消息开销小于无失效 RSU 的情况.这是因为,在有失效 RSU 的情况下,由于 RSU 数量的减少,导致 RSU 之间的 exchange 消息和 RSU 与车辆之间的交互消息都有所减少.

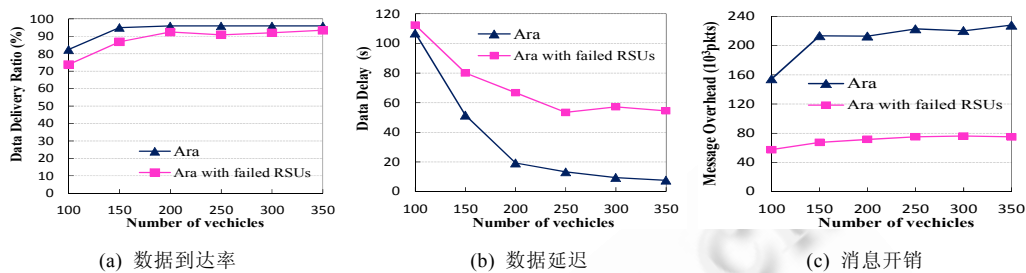


Fig.7
图 7

第 4 组实验观察在低密度车流下,Ara 在含失效 RSU 和无失效 RSU 情况下的性能表现.实验结果如图 8(a)~图 8(c)所示.从图 8(a)的数据可以看出,两种情况在相同车流密度下的数据到达率几乎相同.25 辆车的情况下,在 800s 时二者的到达率差别最大;50 辆车和 75 辆车的情况下,在 600s 时二者的到达率差别较大,但是差别都在 10% 的范围内,并且数据到达率的差异随时间逐渐减小,1 600s 时数据到达率都在 85% 以上.结合图 7(a)可以看出,在存在失效 RSU 的情况下,Ara 的数据到达率是可以得到保障的.图 8(b)记录了数据传递所需要的数据延迟.从图中可以看出,随着时间的流逝,伴随着数据到达率的提高(如图 8(a)所示),数据的延迟也在增大,而且与第 3 组实验一样,有失效 RSU 情况下的数据延迟大于无失效 RSU 的情况.从图 8(c)的数据可以看出,在低密度车流下,两种情况的消息开销随时间的流逝会趋于稳定,而且有失效 RSU 情况下的消息开销相对较低.

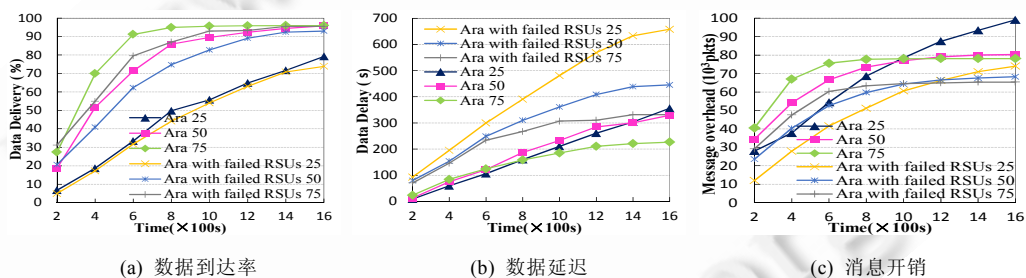


Fig.8
图 8

5 结束语

VANET 已成为很有前景的数据分发基础平台.本文设计、实现了 RSU 辅助的数据分发机制 Ara,并给出了 Ara 的分析模型,利用该模型可以预测给定场景下的数据分发性能.本文还进行了模拟实验.实验结果表明,与携带转发机制(DC&F)相比,Ara 具有更高的数据到达率及更小的消息开销.即使在含有失效 RSU 的情况下,Ara 依然能够保持很好的性能和较低的消息开销.

References:

- [1] Wisitpongphan N, Tonguz OK, Parikh JS, Mudalige P, Bai F, Sadekar V. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *Wireless Communications*, 2007,14(6):84-94. [doi: 10.1109/MWC.2007.4407231]

- [2] Khabbazian M, Bhargava VK. Localized broadcasting with guaranteed delivery and bounded transmission redundancy. *IEEE Trans. on Computers*, 2008,57(8):1072–1086. [doi: 10.1109/Tc.2008.31]
- [3] Ros F, Ruiz P, Stojmenovic I. Acknowledgment-Based broadcast protocol for reliable and efficient data dissemination in vehicular ad-hoc networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2012,11(1):33–46. [doi: 10.1109/Tmc.2010.253]
- [4] Bernsen J, Manivannan D. Unicast routing protocols for vehicular ad hoc networks: A critical comparison and classification. *Pervasive and Mobile Computing*, 2009,5(1):1–18. [doi: 10.1016/j.pmcj.2008.09.001]
- [5] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, Levine BN. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. In: *Proc. of the 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications, INFOCOM*. 2006. [doi: 10.1109/INFOCOM.2006.228]
- [6] Wu H, Fujimoto RM, Guensler R, Hunter M. MDDV: A mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*. New York: ACM Press, 2004. 47–56. [doi: 10.1145/1023875.1023884]
- [7] Shafiee K, Leung VCM. Connectivity-Aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in VANETs. *Ad Hoc Networks*, 2011,9(2):131–141. [doi: 10.1016/j.adhoc.2010.06.003]
- [8] Viriyasitavat W, Bai F, Tonguz OK. Dynamics of network connectivity in urban vehicular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011,29(3):515–533. [doi: 10.1109/Jsac.2011.110303]
- [9] Zhao J, Zhang Y, Cao GH. Data pouring and buffering on the road: A new data dissemination paradigm for vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(6):3266–3277. [doi: 10.1109/Tvt.2007.906412]
- [10] Ding Y, Xiao L. SADV: Static-Node-Assisted adaptive data dissemination in vehicular networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2010,59(5):2445–2455. [doi: 10.1109/Tvt.2010.2045234]
- [11] Sou S, Tonguz OK. Enhancing VANET connectivity through roadside units on highways. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2011,60(8):3586–3602. [doi: 10.1109/Tvt.2011.2165739]
- [12] 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*, 2011,29(1):129–139. [doi: 10.1109/Jsac.2011.110113]
- [13] Stephan O, Michele CW. *Vehicular Networks from Theory to Practice*. CRC Press, 2009.
- [14] Wang SY, Chou CL, Lin CC. The design and implementation of the NCTUns network simulation engine. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007,15(1):57–81. [doi: 10.1016/j.simpat.2006.09.013]



汪兆洋(1989—),男,江苏宿迁人,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为分布式计算,普适计算.

E-mail:
wangzhaoyang12@otcaix.iscas.ac.cn



张利锋(1977—),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为分布式计算,普适计算.

E-mail: Zhanglifeng10@otcaix.iscas.ac.cn



金蓓弘(1967—),女,博士,研究员,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究领域为分布式计算,普适计算.

E-mail: Beihong@iscas.ac.cn



谌伟(1986—),男,工程师,主要研究领域为分布式计算,普适计算.

E-mail: 182101630@qq.com



张扶桑(1987—),男,工程师,CCF 会员,主要研究领域为分布式计算,普适计算.

E-mail: zhangfusang10@otcaix.iscas.ac.cn