

车载自组织网络中的数据传递

金蓓弘 张扶桑 张利锋

(中国科学院软件研究所 北京 100190)

摘 要 基于车载自组织网络 (Vehicular Ad Hoc Network, VANET) 的数据传递为 VANET 应用提供数据传输服务, 是车辆主动安全、城市生活服务、应急救援等应用不可或缺的组成部分。然而, 由于网络拓扑变化快、网络分区频繁、信道容量有限, VANET 数据传递面临诸多挑战。文章分析了 VANET 的特点, 指出了影响 VANET 数据传递的主要因素, 进而综述了已有的 VANET 数据传递技术, 包括 VANET 数据传递的基本实现方法和提高数据传递能力的优化策略。

关键词 数据传递; 车载自组织网络; 实现方法; 性能优化

中图分类号 TP 393 **文献标志码** A

On Data Delivery over Vehicular Ad Hoc Networks

JIN Beihong ZHANG Fusang ZHANG Lifeng

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

Abstract Data delivery provided data transmission services for various applications over Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs). In particular, it was an indispensable component in the vehicle active safety systems, urban life services, and emergency rescue applications. However, it faced such challenges as brought by the rapid changing of network topology, frequent network partitions, and the limited wireless channel capacity. The paper analyzed the characteristics of VANETs, pointed out the main influencing factors in the VANET data delivery, and then reviewed the existing technologies, including the basic implementation approaches and the optimization strategies for improving the capabilities of data delivery.

Keywords data delivery; VANET; implementation approaches; performance optimization

1 引 言

车载自组织网络 (Vehicular Ad Hoc Network, VANET) 是一种无线移动通信网络, 它包含两类

节点, 即移动车辆和路边单元 (Road Side Unit, RSU)。

VANET 中, 节点通过 WAVE (Wireless Access Vehicular Environment) 协议栈 (如图 1) 实现与邻近节点的数据交换, 相互提供包括车辆自

收稿日期: 2015-04-29 修回日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61472408)

作者简介: 金蓓弘 (通讯作者), 研究员, 研究方向为分布式计算、移动和普适计算, E-mail: jbh@otcaix.iscas.ac.cn; 张扶桑, 博士研究生, 研究方向为分布式计算、移动和普适计算; 张利锋, 博士, 研究方向为分布式计算、移动和普适计算。

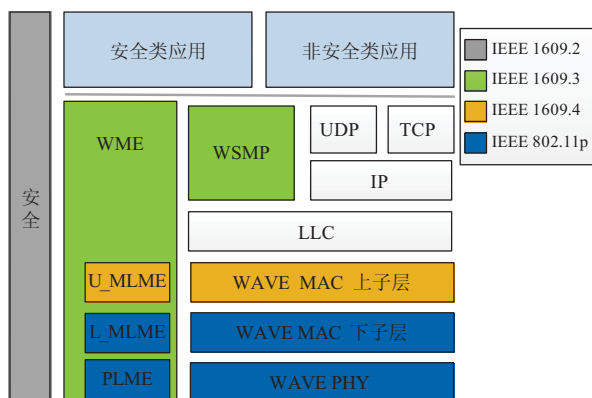


图 1 WAVE 协议

Fig. 1 WAVE protocol

身信息、车辆安全及道路交通参数在内的信息。

VANET 数据传递是指多个 VANET 节点通过协作将数据传递到一个或多个目的地，它是实现多种 VANET 应用不可或缺的组成部分。例如，VANET 的典型应用，即车辆主动安全，需要利用 VANET 数据传递将车辆传感器感知到的车速的突然改变信息传递给附近同车道上的邻居车辆，以及时避免交通事故。此外，多个相邻的车辆还可以将自身的行驶线路等信息通过 VANET 数据传递告知邻居车辆，以便给出最优的行驶决策（例如最优的路口通行顺序），同时，该决策还需要通过 VANET 数据传递通知给所有的司机。类似地，VANET 其他两个典型应用即应急救援和军事应用也离不开 VANET 数据传递。VANET 上的另一大类应用是为司机提供交通信息和各类生活服务信息。在此类应用中，车辆用户通过 VANET 数据传递，可以获得出行线路上的路况信息、交通临时管制信息和停车信息，实现智能出行。近来，VANET 也被看好成为一种群智感知 (Crowd Sensing) 的平台。例如，利用司机志愿者报告各个地方的交通拥堵状况，不过，这里仍需要 VANET 数据传递将车辆用户感知到的信息传递到指定的目的地。

本文综述了 VANET 数据传递的实现方法。下文按如下方式组织：首先在第 2 节给出

VANET 数据传递的关键挑战，然后在第 3 节介绍了数据传递的基本策略，接着在第 4 节列出了 VANET 数据传递的优化策略，最后是全文总结和对未来研究趋势的展望。

2 VANET 数据传递的挑战

VANET 与已有无线自组织网络如 MANET (Mobile Ad Hoc Network) 不同，其车辆节点的运动具有速度快且受限于道路拓扑结构的特点。车辆节点的高速移动会导致 VANET 拓扑变化快、网络分区频繁，从而严重影响节点间协作传递数据的性能。在 VANET 中部署相对静态的 RSU 节点可以改善 VANET 数据传递的性能，但 RSU 节点的部署（如位置分布和数量）仍然是一个研究课题。其次，VANET 车流的时空分布（例如车流量和密度）以及环境因素（例如路边建筑物和障碍物的遮挡、交通信号灯等）会直接影响 VANET 节点的通信建立及通信保持。例如，车流稀疏时 VANET 节点间可能无法建立通信连接，而车流密集时又会引发 VANET 节点间对无线信道的剧烈竞争。另外，多跳无线网络的网络容量有限，根据 Gupta 等^[1]的研究，由平面上随机部署的 n 个节点组成的多跳无线网络的容量仅为网络带宽的 $\sqrt{1/n}$ ，交通流的不均匀分布会加剧容量的限制问题。因此，如何适应 VANET 节点及拓扑的变化、在频繁发生网络分区的环境里提供低延迟、高可靠、低开销、高可伸缩的数据传递是 VANET 数据传递要面对的最大挑战。而 VANET 的节点组成（如有无 RSU 节点）、车辆节点的运动特征（如车辆前后呈跟驰行驶状态、车辆在道路交叉口相互干扰）、无线通信的 QoS (Quality of Service) 成为影响 VANET 数据传递的主要因素。

无线通信的 QoS 涉及到的内容很广泛。对 VANET 数据传递产生重要影响的因素有无线通信的连通性和通信信道的利用率。

VANET 的无线连通度与车流密度、无线传输范围紧密相关。Lochert 等^[2]研究了城市场景下 VANET 通信的连通性问题。根据其仿真实验,当车辆密度为每 250 米 4 辆车(4 vehicle/250 m)时,在 1 000 米路段内无线网络连通的概率为 68%,而 2 000 米内无线网络连通的概率仅为 42%;当车辆密度为每 250 米 2 辆车(2 vehicle/250 m)时,对应的概率仅为 21% 和 7%。实验数据表明,形成连续的多跳通信链路的概率随道路长度的增加而指数下降,同时,车流密度与 VANET 的无线连通度紧密相关。这说明,如果能根据车流密度自适应地改变无线传输范围,比如在车流密度低时,增大无线传输范围,则可增强网络连通性。基于连通度的数据传递策略能有效提高数据传递的性能,4.1 节将介绍这方面的已有工作。

在 WAVE 协议栈中,IEEE 1609.4 协议定义了信道分配与多信道协作机制,它将 VANET 工作频段划分为 7 个信道。其中一个信道通过 WAVE Short Message (WSM) 传输控制参数和车辆安全相关的数据,故称为控制信道(CCH);其他 6 个信道用于服务数据的传输,故称为服务信道(SCH)。按照 IEEE 1609.4 协议,多个 WAVE 设备是通过同步过程来协调对信道的使用,其同步区间由一个 CCH 区间(固定为 50 毫秒)和一个 SCH 区间(固定为 50 毫秒)组成。在 CCH 区间内,所有的 WAVE 设备必须工作在 CCH 信道,而在 SCH 区间内,WAVE 设备工作在通过 CCH 协商而确定的服务信道。这种交替访问模式可以保证及时监听到并处理 CCH 信道上的高优先级消息,但它也存在以下不足:(1)同步操作导致 CCH 和 SCH 利用率不高,最高仅为 50%;(2)固定的 SCH 和 CCH 区间时长导致其无法很好地适应通信负载的变化;(3)各个节点为了发送在 SCH 间隔内产生的 WSM,在切换到 CCH 信道后会集中竞争 CCH 信道,导致节点可能需要多

轮退让才能获得信道使用机会,降低了信道利用率。通过改进信道工作方式,能有效提高信道利用率,从而提高 VANET 数据传递的性能。4.4 节将介绍这方面的已有工作。

3 数据传递的基本策略

VANET 数据传递从通信范型上可分为四类:第一类为广播,即将数据发送到整个网络中的所有节点;第二类为多播,即将数据发送到一组节点;第三类为选播,即将数据发送到目的节点组中的任意一个节点;第四类为单播,即发送数据到一个目的节点。上述节点的位置可以是(通过位置服务)精确给出的,也可以是仅指定一个区域范围。从数据接收节点的数目上看,VANET 数据传递又可以分为多目标型和单目标型,广播和多播属于前者,而选播和单播属于后者。下面介绍各种通信范型中有代表性的工作。

3.1 广播与多播

广播是 VANET 通信的基本机制,因此 VANET 下实现数据传递的基本方法是泛洪(Flooding),也就是说,如果收到广播消息的节点是第一次收到该消息就再次进行广播,否则就丢弃该消息。泛洪策略能实现最大无线覆盖和数据的快速传播,但它存在广播风暴和吞吐率低等问题。

Wisitpongphan 等^[3]提出了 3 种用于 VANET 环境的广播抑制技术,分别称为带权重 p 概率持久化机制、分时段全概率持久化机制和分时段 p 概率持久化机制。在这些机制中,接收节点是根据它与发送节点的距离来计算转发概率,或者是根据当前所处的时段来设置转发等待时间,所以,节点的广播次数受到了限制。同时,若发送节点在给定的时间内收不到数据副本,则重新对消息进行广播。上述广播抑制技术能减少冗余的广播,提高广播机制的数据到达率,降低链路

负载。另外, 邻居消除规则也被用于减少冗余广播。例如, Khabbazian 等^[4]让接收者节点 R 在收到发送者节点 S 的数据后, 检查自己的邻居(记为 N_R)和发送者邻居(记为 N_S)是否满足“责任条件”(该责任条件是指接收者 R 到其邻居 N_R 的距离小于发送者邻居 N_S 与 N_R 的距离), 如满足该责任条件, 则节点 R 成为候选转发节点, 否则, R 丢弃该数据。

为了减轻广播风暴, Wu 等^[5]提出了 DAYcast 协议, 该协议只允许数据源车辆的有效邻居, 即沿数据传递方向还未接收到消息的车辆, 广播收到的数据包。DAYcast 协议根据源车辆一跳邻居的位置信息选择有效邻居, 同时允许每个有效邻居 i 等待一个固定的时长 T_i , $T_i = \left[\frac{D_{\max} - D_{ij}}{D_{\max} / N_j} \right] \times \tau$,

其中, N_j 是源车辆 j 的有效邻居数量; D_{\max} 是有效邻居中距离源节点最远的距离; D_{ij} 是车辆 i 和 j 的距离; τ 是单位时间。可以看出距离源节点较远的有效车辆在等待更少的时间后就进行消息的广播, 从而减少了广播消息的次数。

一些应用(如车辆安全应用)需要可靠的数据传递, 但由于节点运动及环境对无线信号的干扰, VANET 节点之间的通信是不可靠的。发送 ACK (Acknowledgement) 消息即确认消息是提高广播可靠性的基本手段。Korkmaz 等^[6]通过改造 MAC 层协议, 在 RTS/CTS 握手和发送确认消息基础上, 只允许距离发送者最远的节点转发该消息并发送确认消息, 从而解决隐藏节点的问题并提高可靠性, 但此方案在节点密度较高时可能需要进行多轮的碰撞解决过程, 从而会导致较长的数据延迟和较大的通信开销。

Voicu 等^[7]提出使用信噪比和 ACK 解耦实现快速可靠广播。在发送者广播消息后, 收到消息的车辆节点例如车辆 i 首先计算竞争窗口 $[0, CW_{\max}]$, 这里, $CW_{\max} = k \frac{D_{\max}}{D_i} CW_{\text{base}} \frac{(\text{SNR}_i - \text{SNR}_{\text{thresh}})}{\text{dB}}$ 。

其中, D_{\max} 是最大传输范围; D_i 是发送者到车辆 i 的距离; CW_{base} 是竞争窗口的基准值, 该值可以根据车流密度进行优化; SNR_i 是车辆 i 的信噪比值; $\text{SNR}_{\text{thresh}}$ 是可靠传输需要的最小信噪比值。然后, 车辆节点从竞争窗口中随机获得一个值作为节点转发消息的等待时间。获得最短转发等待时间的车辆将转发消息, 其他收到转发消息的车辆将不再转发消息。而且, 当发送者听到接收者广播的消息时, 它可以确认所发消息已经被成功接收, 从而不再需要 ACK 过程。如果发送者没有听到, 那么它将重发消息, 这时, 距离发送者较近的节点将发送 ACK 消息给发送者。上述过程要么消除了开销较大的 ACK 过程, 要么至少分离了消息传播和发 ACK 给发送者这两个步骤(称为 ACK 解耦), 从而改善了消息传播的速率。

Ros 等^[8]提出了利用局部周期性的心跳消息构造节点的连通支配集, 并对在支配集内的节点设置较短的定时器用于广播数据。当定时器结束, 如果该节点发现有邻居未收到数据, 那么它将再次广播数据。该方法能有效提高广播的可靠性, 但它不适合节点拓扑变化剧烈的场景, 同时构造连通支配集的开销较大。

基于传染病的数据传递协议是较泛洪机制更为高效的方式。Huang 等^[9]对中国上海市区车载网络(SUVnet)进行了研究, 分析了其拓扑和连通间断性, 并且基于延迟容忍网络(Delay Tolerant Network, DTN)提出了 Distance Aware Epidemic Routing (DAER) 协议, 用于提高消息传递的到达率。Nekovee 等^[10]则针对 VANET 环境下车流的特点对传染病算法进行了改进: 首先, 利用车流的特性, 对车流进行聚类; 然后, 通过各车辆簇的边界车辆实现消息的广播, 从而把消息的扩散限制在不同车流簇之间, 降低了网络的通信负载。

Slavik 等^[11]给出了一个统计广播协议 DADCQ。

在该协议中,一个收到消息的节点是否再次广播消息取决于节点与其最近邻的距离 D 值(以跳为单位)和阈值函数 $D_c(N)=D_{\max}-\beta e^{\alpha N}$, 其中, N 是邻居节点的数目,而参数 α, β, D_{\max} 依赖于车辆的分布模式和信道质量。当节点发现当前的 D 大于 D_c , 则再次广播消息。上述工作方式使得 DADCQ 协议能适应环境条件包括节点密度、节点空间分布模式和无线通信质量的变化,并获得高的消息到达率和低的带宽消耗。

多播与广播有类似之处,车辆节点都是将数据发送到多个目的地节点。

Zhou 等^[12]提出车辆相互协作地传递安全消息,可以避免车辆碰撞,提高道路安全。在该研究中,安全消息的扩散问题被转换成如何构造一棵生成树使得消息在其上扩散具有最小的能量消耗。在将能量消耗与消息传递的距离、跳数和可靠性等相关联后,作者提出一个混合整数规划模型用于寻找上述问题的最优解。

Jiang 等^[13]针对稀疏车辆网络提出了多播路由方法 TMC (Trajectory-based MultiCast)。它首先利用车辆轨迹构建轨迹相遇图,并通过搜索获得相遇图中所有能转发到达目的地节点的路径;然后,根据拟合车辆的行驶时间的分布,预测车辆间相遇的概率;最后,基于上述两者形成车辆传递消息到目的地节点的能力指标,进而根据该指标值给出数据转发决策。

地理路由是一类特殊的多播,利用它可以将消息传递到一个地理区域内的所有节点,在车联网中也就是车辆。以下工作都可以归属在地理路由这一类^[14-19]。

Wu 等^[14]提出了 MDDV (Mobility-centric Data Dissemination Algorithm for Vehicular Networks) 算法,该算法利用街道地图计算数据传递的路径,并利用称为消息持有者的车辆携带数据到目标区域。在目标区域内,消息被进一步地扩散并传播到所有节点,从而完成一对多的通信。

Chuang 等^[15]针对安全类消息(例如车辆碰撞消息)的传递提出了 DEEP 协议,以便这些消息能快速被指定的热点区域(例如高速路入口)中的车辆收到。该协议将道路划分为单元块,每个车辆在收到源车辆的消息后,设置如下的退避时间 $T_{\text{defer}}=$

$$T_{\text{slot}} \left\{ \left(\frac{D_y^{\max}}{O_y} \right) \left[\left(\frac{D_x^{\max}}{O_x} \right) - \left(\frac{D \cdot \cos \gamma}{O_x} \right) \right] + \left(\frac{D \cdot \sin \gamma}{O_y} \right) \right\}$$

其中, O_x 和 O_y 是块的长和宽; D 和 γ 是车辆和源车辆的距离和角度; D_x^{\max} 和 D_y^{\max} 分别是 x 和 y 方向的传输范围。这样,拥有最小 T_{defer} 的车辆将转发消息。特别地,DEEP 协议针对不同的车辆密度给出了块大小的最优值设置方法。

Liu 等^[16]提出了 HBID 方法,用于信息悬停。信息悬停是指将信息传递到某个指定区域并悬停在该区域,使得该区域内所有车辆都能感知该信息。依据 HBID 方法,车辆根据邻居车辆的位置和速度调整广播消息的间隔,然后,选择下一中继车辆来保存消息;特别地,当没有邻居车辆或网络出现间歇性断连时,车辆可以向反方向车辆传递消息。该机制能将消息保留在指定区域,而且减轻了网络负载。

Zhang 等^[17]提出的 GeoMob 方法首先对车辆的 GPS 信息进行 k-means 聚类,进而按照车流量划分区域,接着,以区域为节点、流量为边上的权,构建有向带权图。然后,分两个层次实现地理路由:宏观层次路由和微观层次路由。前者是选择路由经过的区域,作者认为有较大车流量的区域其车辆的连通性强,所以在带权图中应用 Dijkstra 方法获得以区域序列表示的路由路径。微观层次路由是寻找从一个区域到另一个区域的路径。GeoMob 利用车辆个体的运动模式,使得消息被传递给有更高概率去往目的区域的车辆。但 GeoMob 没有动态调整区域的机制,这使得它无法适应车流的时变性。

张扶桑等^[18]依托实际的公交车轨迹,以路段

为粒度, 建立预测公交车行驶时间的 ARMA 模型, 从而获得公交车运行的时间特性; 同时, 用多项式拟合车辆相遇模式, 获得对公交车相遇概率的估计, 进而基于上述信息, 建立公交车数据传递的概率时空模型。最后, 基于该模型给出了数据传递的路由机制 Vela。该机制在可容忍的数据传递延迟基础上选择可靠性最高的路径进行传递, 从而实现将消息从源节点传递到目的路段。

Jiang 等^[19]把车载导航系统实时提供的轨迹看成车辆将要行驶的轨迹, 并根据车辆将要行驶的轨迹和它将要遇到的车辆计算车辆对消息目标区域的覆盖能力, 并基于此做出地理路由决策。

3.2 单播和选播

单播是 VANET 下广泛使用的一类通信范型。VANET 单播经常采用以下策略: (1) 贪心转发机制, 即将数据转发给在预定方向上距离最近的邻居; (2) 存储转发机制, 即车辆节点在发现周围没有合适的转发数据的节点时, 将携带该数据继续前行; (3) 利用环境信息, 如节点的位置信息、计划的出行线路、街道地图、交通流量信息等。

Lochert 等^[20]介绍了一种地理源路由 (Geographical Source Routing, GSR) 策略, 它利用城市街道地图和每个节点的位置信息, 根据 Dijkstra 最短路径算法计算转发数据到目的地的沿街路径, 并将该路径上的路口序列放置在数据包的头部。GSR 按贪心方式将数据包传递给离下一个路口最近的 1 跳邻居。GSR 利用城市地图来避免贪心工作方式带来的通信环路。作为对 GSR 的改进, Lochert 等^[21]提出了 GPCR (Greedy Perimeter Coordinator Routing), 消除了对街道地图的依赖, 它根据车辆的位置来确定哪些车辆是同一路段上同向行驶的、哪些车辆是在路口 (称为协调者)。在 GPCR 中, 车辆节点按贪心策略传递数据, 具体而言, 在与该车辆同向行驶的车

辆节点中, 如果没有协调者, 那么选择最远的车辆作为下一跳节点; 如果有协调者, 那么将数据传递到协调者, 由它继续按贪心方式选择下一跳节点。GPCR 提出了一个修复策略, 也就是协调者在检测到出现通信环路时, 将使用右手法则即选择沿着数据来的街道的逆时针方向的街道传递数据。

Zhao 等^[22]提出的 VADD 机制允许双向传递数据: 在路段之间的车辆节点采用存储和贪心转发策略; 在路口附近的节点使用预先标记在电子地图上的历史交通流信息为数据选择路由路径。由于每个路段的车辆密度是随时间变化的, 因此, 这种基于预载入历史统计数据来计算最短延时路径的方法不能够反映出真实的最优路径。宋超等^[23]则使用实时收集的路段间数据传递延迟作为数据到达路口时选择转发路径的依据, 但该协议需要在车辆间广播各个路段的延迟数据, 广播的开销较大。

Zhu 等^[24]利用马尔科夫链预测车辆相遇的间隔时间, 并根据邻居节点与目标车辆的相遇间隔时间决定数据传递的下一跳车辆节点。Zhu 等^[25]采用与 Zhu 等^[24]相同的相遇延迟估计方法, 并进一步挖掘了社会层面的移动性, 构造自我联系图, 这样车辆在缺少邻居车辆与目的车辆的相遇延迟估计时, 会选取在自我联系图中占据更重要位置的邻居车辆, 进行数据传递。

考虑到公交车运动拓扑和相遇机会的规律性, 有学者研究了以公交车为 VANET 节点进行数据传递的问题。Burgess 等^[26]使用了存储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, 而开销又是通过记录两个节点相遇的概率来估计的。其研究成果部署在以公交车为网络节点的称为 UMass DieselNet 的真实网络中。而陈丽等^[27]假设公交车路线及发车时间间隔等信息已知, 各线路公交车相互通信的概率可以基于历史

统计信息来获得,并用它研究了使用马尔可夫决策过程来从相遇节点中选择转发节点及数据到达路口后选择转发路段来最小化数据转发延迟的问题。

不过,根据 Li 等^[28]对公交车之间相遇频率的分析发现,在 5 个工作日内,约 44% 的公交车之间仅相遇一次。这使得基于公交车个体模式的路由机制的实际有效性值得质疑。

BLER 依据公交线路之间的重叠长度来选择路由消息的公交线路^[29]。当消息到达目的公交线路后,将触发一个之字形过程(在该过程中仅将消息在同一线路的公交车之间传递)将消息传递到目的车辆。R2R 对 BLER 进行了改进,依据公交线路的相遇频率进行路由选择,从而实现了比 BLER 更好的性能^[28]。上述两种策略都是挖掘了公交线路层面的模式并将它用于路由。

Zhang 等^[30]利用社交网络中的社团发现技术,发现了公交系统中以公交车线路为粒度的社团结构,从而识别出车辆线路间的亲疏关系。在此基础上,以连接不同社团的公交线路作为中介车辆线路建立社团内部和社团之间的路由,从而实现基于公交车的路由。

还有一些研究关注车辆与路边的网关之间的数据传递,如 Shafiee 等^[31]提出了一种连通度感知的最小延迟地理路由协议(Connectivity-aware Minimum-delay Geographic Routing, CMGR)。在 CMGR 中,数据发送方需要发起路由发现过程,即广播路由发现消息,收到路由发现消息的车辆节点将自己的位置、速度信息填入该消息并再次广播,当该消息到达部署在路边的网关时,由该网关选择最佳中继车辆并发送回复消息给请求者。最终,请求者使用回复消息中的路由路径来传递数据。因此,CMGR 本质上是一个选播的过程。但 CMGR 中,车辆运动导致该方法需要不断重复路由发现过程,车辆密集时会产生严重的广播风暴,故伸缩性差。

4 数据传递的优化策略

针对 VANET 数据传递,本文列出了四大类优化策略:基于连通度的优化策略;基于 RSU 辅助的优化策略;基于网内数据聚合的优化策略;基于改进信道工作方式的优化策略。

4.1 基于连通度的优化策略

考虑到 VANET 连通度是影响 VANET 数据传递性能的关键因素,Naumov 等^[32]针对城市和高速路环境下的车辆间通信,提出了一种连通性感知的路由协议(Connectivity-Aware Routing, CAR)。在 CAR 中,节点记录并缓存从一个节点到另一个节点的路径,并将这些路径在节点间扩散。收集到的路径信息通过贪心路由的方式会传递回源节点。源节点基于收集的路径信息,将数据以每次距离下一跳路口最近的贪心方式,从源节点传递到目的节点。

Tonguz 等^[33]提出的分布式车辆广播协议则根据不同的网络连通度条件,动态选择不同的工作模式:在连通度良好的场景下采用 Wisitpongphan 等^[3]的方法;在车辆稀疏的场景下,车辆节点接收到消息后立即广播给相反方向的车辆,相反方向的车辆如果找不到周围一跳可到达的车辆则传回原方向的车辆;否则车辆节点将工作在全不连通的状态,此时它将携带数据直到找到邻居节点。该方法利用了反方向车辆来中继消息,但它未能解决 Wisitpongphan 等^[3]方法中存在的问题。

Zhang 等^[34]利用实时收集的交通流量数据,建立了反映路口车辆排队长度变化的马尔可夫模型,并基于此模型估算路段间无线网络连通度的实时变化,以便数据沿最小延迟路径进行转发。该机制还考虑到城市环境对无线信号的干扰,用覆盖消除规则改进了贪心广播算法,通过多候选转发策略增强了路段间数据传输的可靠性。

在 VANET 连通度建模方面,已有的工作可

以分为两类: 一类假定车流分布, 另一类不假定车流分布。

目前研究主要集中在第一类, 该类模型通常假定车辆间距或车头时距所服从的分布, 然后使用特定的车辆运动模型(比如随机模型), 根据条件概率推导连通度分析模型, 这类模型主要适用于高速路场景。Khabazian 等^[35, 36]研究了具有多入口、多出口且允许超车的多车道高速公路连通度的统计属性。文章假定车辆在入口处泊松分布到达, 然后, 将高速路划分为长度为 R (R 为无线传输距离) 的路段单元, 并使用概率的方法推导 R 内车辆的数目分布、位置分布以及相邻单元车辆的连通条件概率和整条道路的连通概率。

第二类研究通常使用元胞自动机模型作为车辆运动模型, 限定车速和位置的变化, 然后, 根据车辆的几何位置分布来推导连通性分析模型。Nzouonta 等^[37]基于元胞自动机模型, 使用离散空间的马尔可夫链来估计车辆速度变化, 即首先建立 t_0 时刻车辆速度变化的状态转移概率矩阵, 进而推算 t_0+k 时刻的速度分布, 并据此估算网络是否会发生分区。此方法计算过程复杂, 计算开销大, 严重影响了它的伸缩性。

4.2 基于 RSU 辅助的优化策略

在 VANET 中, 节点沿道路高速运动, 网络拓扑变化频繁, 节点的连通性无法保证。因此, 可以考虑部署路边基础设施, 即沿路部署一系列的 RSU。它们除了改善 VANET 的连通度, 提高网络通信的覆盖率, 还能缓存到达路口却找不到最优转发路径的数据, 降低数据的丢包率和数据传递的延迟。目前, 已有不少研究关注通过部署 RSU 提高网络连通概率, 进而提高数据传递性能。Reis 等^[38]研究了在高速路场景下车流稀疏时通过部署 RSU(不连接骨干网)来中继数据、减少传输延迟的效果。在 RSU 部署间隔为 750~1 000 米、车流量为 200~700 辆/小时的情况下, 其模拟实验表明数据传输延迟减小

了约 15%~30%。Sok-Ian 等^[39]在高速路中部署 RSU, 用于缓存并周期性广播安全警告消息, 实验结果表明这可以提高消息可达性, 减少广播消息开销。Yousefi 等^[40]认为在车流稀疏的高速路上车辆间距服从指数分布, 建议部署固定的 RSU 来提高长距离数据传递的性能。Zhao 等^[41]通过在交叉路口设置的 RSU, 提出了 VANET 下数据倾倒和缓存模式, 即, 数据从源节点发出并沿主要道路上的车流进行扩散, 到达路口后由 RSU 将数据包传递给来自其他道路的车辆。在 SADV 机制中, 为了能够度量相邻静态节点间路段数据传递的延时, 静态节点通过途经车辆节点相互传递心跳消息, 该消息记录了相邻静态节点间的数据传递延迟, 静态节点基于路段间延迟对数据包进行转发, 为了避免环路, 静态节点保存一段时间内发送过的消息, 从而丢弃一段时间内重复达到的消息^[42]。

4.3 基于网内数据聚合的优化策略

数据聚合是指通过将节点收集的数据按照一定的规则抽取或合并, 提取其有效特征, 去除冗余数据。使用聚合后数据代替原始数据, 可减少网络中传输的数据量, 增强 VANET 的数据传递能力。

VANET 中的数据聚合方法需要解决三个方面的问题, 即聚合的对象、时机和方法。目前的很多研究集中在基于地理位置分区的数据聚合方法。在这种方法中, 预先将路段划分为若干个子区域, 然后对相同区域内的数据进行聚合^[43], 但这些方法存在子区域粒度难以合理设定的问题, 粒度设置得大会损失聚合后结果的精度, 而粒度过小则会导致聚合后数据量较大。

在聚合时机的选择上, 数据到达节点后不立即转发, 而是等待一小段时间, 可以增加可聚合的数据在同一节点相遇的概率。Yu 等^[44]提出了一种追赶机制, 它使用马尔可夫决策过程建立节点转发延迟模型, 节点根据自己的局部视图并通

过向发送者节点学习数据转发获益来分布式地决策当前的延迟时长。但是应该看到,这种机制是对数据聚合成功率与数据传递延迟两方面的一种折衷,上层应用程序对延迟的容忍程度会影响数据聚合的成功率。

Zhao 等^[45]将 VANET 看成 DTN,利用 DTN 中车辆相遇时间的规律性和相遇模式的异构性,提出了基于树的数据聚类算法 EDA。按照 EDA,首先,构建相遇图,其中车辆是节点,边是相遇关系,边上的权重代表期望的车辆相遇间隔;其次,数据将在相遇图中沿着最短路径传递给数据收集节点;最后,基于最短路径树构建数据聚合树,并使用动态规划算法给每棵树上的节点分配聚合开始前的等待时间。这样,数据即可按照聚合树进行数据聚合传递。

数据聚合方法需要考虑收集到的数据在经过聚合操作后表意的准确性、完整性,即聚合后数据的质量。聚合质量是由应用程序的需求决定的,不同的应用有不同的质量要求。层次聚合^[46]、基于模糊推理的聚合^[47]都是考虑聚合质量的聚合方法的例子。

4.4 基于改进信道工作方式的优化策略

信道访问控制是影响 MAC 层数据传输效率的重要因素,通过改进 MAC 信道访问机制,能提高 VANET 数据传递的 QoS。

Zang 等^[48]提议将 CCH 信道的使用时间划分为信标消息使用时间和安全类消息使用时间,这样可以避免信标消息和安全类消息对信道的竞争。同时通过 WSA 消息为使用 SCH 信道的应用协商预留信道号,从而避免了应用对 SCH 信道的竞争,提高了 SCH 信道的利用率。Wang 等^[49]提出了一种动态调整 CCH 和 SCH 时长比率的方法,其工作模式为:先由 RSU 或特定节点(例如,1 跳邻居内编号最小的节点)根据网络条件对 CCH 所需的时间进行概率分析;然后,通过广播发送该时长信息,而车辆节点从收到的所有广

播消息中选取最长的 CCH 时长。

针对现有网络协议不能随应用的需求(如负载类型的改变和负载量的改变)调整其工作方式,Zhang 等^[50]对负责多信道协调操作的 IEEE 1609.4 协议进行改进,设计能适应信道需求变化的自适应机制,自动满足不同应用的需求变化。具体而言,将多信道间隔分配问题建模成一个马尔科夫决策过程,采用融合了模糊逻辑的增强学习算法,通过学习历史通信负载下的动作获益获得当前通信负载下最优的信道间隔,从而在保证安全类应用对信道需求的同时,最大化地满足非安全类应用对高吞吐量的需求。

大量的多媒体信息在一个 CCH 上传输使得 CCH 变得非常拥堵,为解决此问题,Cho 等^[51]提出了“分而传递”技术,即用多个 SCH 传递多媒体内容。为了最大化使用带宽,根据可用的 SCH 信道的数量将整个多媒体安全应用信息划分成多个数据包,然后,在每个 SCH 信道上传递消息。按这种方法,可以最小化每个信道用于传递多媒体消息的带宽。此外,同属一个信道的车辆可以将分割后的小数据包通过多跳传递给其他车辆。多跳传递使得“分而传递”机制可以使用较少的 CCH 间隔而将多媒体信息快速传递到目的车辆。

Chung 等^[52]为有 RSU 支持的 VANET 环境设计了一种新的 MAC 协议,它让 RSU 充当协调者的角色,为与该 RSU 距离远的车辆节点和运行实时类应用的车辆节点设置高的信道访问优先级,并根据应用所需的吞吐量来计算 SCH 区间中超级帧和无竞争时段的时长,从而使得车辆节点能按照优先级依次无竞争地访问信道。无竞争的信道访问机制能大幅度提高信道利用率,进而提高数据传输的吞吐率,并能保证高优先级消息的 QoS,但该机制必须在 RSU 支持下工作。

Zhang 等^[53]从时空两个维度改进已有的 MAC 协议,用于改善 RSU 的吞吐量。考虑到无

线信号随距离增加不断衰减的特点, 利用节点分布的空间多样性使用协作通信来提高链路的传输数据率。同时, 修改信道访问控制机制, 捕获协作传输过程产生的并发传输机会, 提高无线信号的空间重用能力, 从而改善 RSU 服务车辆节点的能力。

Bi 等^[54]提出在邻居车辆节点中维护信道访问令牌, 通过获得令牌的节点获得信道访问权限。这种方法不依赖 RSU, 但维护令牌的代价不容忽视。

为了提高信道的利用率, Han 等^[55]提出一种异步信道协作协议。按照该协议, 节点不需要每隔 50 毫秒就进行一次 CCH 和 SCH 的切换, 所有不使用 SCH 信道传输数据的节点将一直监听 CCH 信道。当节点需要传输数据时, 首先在 CCH 上广播 RTS 消息, 其中包含节点可用的 SCH 信道列表, 目标节点收到数据包后根据自己 SCH 信道的可用性回复 CTS 消息, 达成协议后, 需要传输数据的节点切换到 SCH 信道开始传输数据。特别地, 在此协议中, CCH 被划分成多个时间槽, 每个节点可以使用其中的一个或多个时间槽, 这种工作方式可以减少 CCH 上的数据包冲突率, 提高信道协商的成功率。

5 总结与展望

本文对 VANET 下数据传递的关键技术进行了调研。首先指出了 VANET 数据传递的关键挑战。在此基础上, 对 VANET 下数据传递的通信范型进行了分类, 归纳总结了已有的实现方法, 分析了这些工作的优点和不足。本文还专门介绍了多种提高数据传递能力的优化策略。

到目前为止, VANET 下数据传递策略仍有不少研究问题有待解决。例如, 如何与其他通信网络无缝融合协同传递数据, 如何利用空白频谱提高数据传递的吞吐量, 如何通过统计分析通信

网络条件自适应地进行数据传递, 如何深入挖掘车辆真实轨迹和车辆众包能力进行数据传递决策等。但驱动 VANET 数据传递发展的最大动力仍来自实际应用需求, 例如, 应急场景中如何服务于多种车辆之间的协作, 民用场景中如何支持车辆的自动巡航, 军事场景中如何服务于军用车辆的编队行驶等。这些应用需求将引导着未来 VANET 数据传递的研究工作。

参考文献

- [1] Gupta P, Kumar PR. The capacity of wireless networks [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404.
- [2] Lochert C, Scheuermann B, Caliskan M, et al. The feasibility of information dissemination in vehicular ad-hoc networks [C] // *Proceedings of Wireless on Demand Network Systems and Services*, 2007: 92-99.
- [3] Wisitpongphan N, Tonguz OK, Parikh JS, et al. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(6): 84-94.
- [4] Khabbazian M, Bhargava VK. Localized broadcasting with guaranteed delivery and bounded transmission redundancy [J]. *IEEE Transactions on Computers*, 2008, 57(8): 1072-1086.
- [5] Wu X, Zheng J, Tong H, et al. DAYcast: A dynamic transmission delay based broadcast protocol for vehicular ad hoc networks [C] // *IEEE International Conference on Communications*, 2014: 563-567.
- [6] Korkmaz G, Ekici E, Özgüner F, et al. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems [C] // *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, 2004: 76-85.
- [7] Voicu RC, Abbasi HI, Fang HW, et al. Fast and reliable broadcasting in VANETs using SNR with ACK decoupling [C] // *IEEE International Conference on Communications*, 2014: 574-579.
- [8] Ros FJ, Ruiz PM, Stojmenovic I. Acknowledgment-based broadcast protocol for reliable and efficient data dissemination in vehicular ad-hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(1): 33-46.

- [9] Huang H, Luo P, Li M, et al. Performance evaluation of SUVnet with real-time traffic data [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(6): 3381-3396.
- [10] Nekovee M. Epidemic algorithms for reliable and efficient information dissemination in vehicular ad hoc networks [J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2009, 3(2): 104-110.
- [11] Slavik M, Mahgoub I. Spatial distribution and channel quality adaptive protocol for multihop wireless broadcast routing in VANET [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2013, 12(4): 722-734.
- [12] Zhou F, Benslimane A. Reliable safety message dissemination with minimum energy in VANETs [C] // *IEEE Global Communications Conference*, 2013: 587-592.
- [13] Jiang R, Zhu Y, Wang X, et al. TMC: Exploiting trajectories for multicast in sparse vehicular networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2015, 26(1): 262-271.
- [14] Wu H, Fujimoto RM, Guensler R, et al. MDDV: A mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks [C] // *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, 2004: 47-56.
- [15] Chuang MC, Chen MC. DEEP: Density-aware emergency message extension protocol for VANETs [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(10): 4983-4993.
- [16] Liu Y, Chen C, Guan X. A hovering-based warning information dissemination approach in highway entrances [C] // *IEEE International Conference on Communications*, 2014: 2719-2724.
- [17] Zhang L, Yu B, Pan J. GeoMob: A mobility-aware geocast scheme in metropolitans via taxicabs and buses [C] // *IEEE INFOCOM*, 2014: 1279-1287.
- [18] 张扶桑, 金蓓弘, 汪兆洋, 等. 基于轨迹挖掘的公交车自组织网络路由机制 [J]. *计算机学报*, 2015, 38(3): 648-662.
- [19] Jiang R, Zhu Y, He T, et al. Exploiting trajectory-based coverage for geocast in vehicular networks [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2014, 25(12): 3177-3189.
- [20] Lochert C, Hartenstein H, Tian J, et al. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments [C] // *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2003: 156-161.
- [21] Lochert C, Mauve M, Fübler H, et al. Geographic routing in city scenarios [J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2005, 9(1): 69-72.
- [22] Zhao J, Cao G. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks [C] // *Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications*, 2006: 1-12.
- [23] 宋超, 刘明, 龚海刚, 等. 基于分布式实时信息的车载网络路由协议 [J]. *软件学报*, 2011, 22(3): 466-480.
- [24] Zhu H, Chang S, Li M, et al. Exploiting temporal dependency for opportunistic forwarding in urban vehicular networks [C] // *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2011: 2192-2200.
- [25] Zhu H, Dong M, Chang S, et al. ZOOM: scaling the mobility for fast opportunistic forwarding in vehicular networks [C] // *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2013: 2832-2840.
- [26] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, et al. MaxProp: routing for vehicle-based disruption-tolerant networks [C] // *Proceedings of the 25th International Conference on Computer Communications*, 2006: 1-11.
- [27] 陈丽, 李治军, 姜守旭, 等. 车载 Ad Hoc 网络中基于移动网关的数据传输 [J]. *计算机学报*, 2012, 35(3): 454-463.
- [28] Li L, Liu Y, Li Z, et al. R2R: data forwarding in large-scale bus-based delay tolerant sensor networks [C] // *Proceedings of IET WSN*, 2010: 27-31.
- [29] Sede M, Li X, Li D, et al. Routing in largescale buses ad hoc networks [C] // *Proceedings of IEEE WCNC*, 2008: 2711-2716.
- [30] Zhang F, Liu H, Leung Y, et al. Community-based backbone of bus system for efficient routing in vehicular ad hoc networks [C] // *Proceedings of International Conference on Distributed Computing Systems ICDCS*, 2015.
- [31] Shafiee K, Leung V. Connectivity-aware minimum-delay geographic routing with vehicle tracking in VANETs [J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(2): 131-141.
- [32] Naumov V, Gross TR. Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad-hoc networks [C] // *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, 2007: 1919-1927.
- [33] Tonguz O, Wisitpongphan N, Bai F, et al. Broadcasting in VANET [C] // *Proceedings of Mobile Networking for*

- Vehicular Environments, 2007: 7-12.
- [34] Zhang L, Jin B. Dubhe: a reliable and low latency data dissemination mechanism for VANETs [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013: 581821.
- [35] Khabazian M, Ali MKM. A performance modeling of connectivity in vehicular ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2440-2450.
- [36] Khabazian M, Ali MM. A continuous communication path availability analysis in vehicular ad hoc networks [C] // *IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, 2009: 1-5.
- [37] Nzouonta J, Nakayama MK, Borcea C. On deriving and incorporating multihop path duration estimates in VANET protocols [J]. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2011, 21(2): 1-23.
- [38] Reis AB, Sargento S, Tonguz OK. On the performance of sparse vehicular networks with road side units [C] // *Proceedings of Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011: 1-5.
- [39] Sok-Ian S, Tonguz O. Enhancing VANET connectivity through roadside units on highways [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(8): 3586-3602.
- [40] Yousefi S, Altman E, El-Azouzi R, et al. Improving connectivity in vehicular ad hoc networks: an analytical study [J]. *Computer Communications*, 2008, 31(9): 1653-1659.
- [41] Zhao J, Zhang Y, Cao G. Data pouring and buffering on the road: A new data dissemination paradigm for vehicular ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2007, 56(6): 3266-3277.
- [42] Ding Y, Xiao L. SADV: Static-node-assisted adaptive data dissemination in vehicular networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(5): 2445-2455.
- [43] Wischoff L, Ebner A, Rohlong H, et al. SOTIS-a self-organizing traffic information system [C] // *Proceedings of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference*, 2003, 4: 2442-2446.
- [44] Yu B, Xu C, Guo M. Adaptive forwarding delay control for VANET data aggregation [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 23(1): 11-18.
- [45] Zhao Q, Zhu Y. An efficient data aggregation algorithm in delay tolerant vehicular networks [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Communications*, 2014: 118-123.
- [46] Lochert C, Scheuermann B, Mauve M. A probabilistic method for cooperative hierarchical aggregation of data in VANETs [J]. *Ad Hoc Networks*, 2010, 8(5): 518-530.
- [47] Stefan D, Bako B, Schoch E, et al. A fuzzy logic based approach for structure-free aggregation in vehicular ad-hoc networks [C] // *Proceedings of the 6th ACM International Workshop on Vehicular InterNetworking*, 2009: 79-88.
- [48] Zang YP, Stibor L, Walke B, et al. A novel MAC protocol for throughput sensitive applications in vehicular environments [C] // *Proceedings of IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, 2007: 2580-2584.
- [49] Wang Q, Leng S, Fu H, et al. An IEEE 802.11p-based multichannel MAC scheme with channel coordination for vehicular ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(2): 449-458.
- [50] Zhang L, Jin B, Li K, et al. An adaptive channel coordination mechanism for vehicular ad hoc networks [C] // *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Local Computer Networks*, 2013: 21-24.
- [51] Cho J, Uluagacy A, Copeland J, et al. Efficient safety message forwarding using multi-channels in low density VANETs [C] // *Proceedings of IEEE Global Communications Conference*, 2014: 70-75.
- [52] Chung JM, Kim M, Park YS, et al. Time coordinated V2I communications and handover for WAVE networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(3): 545-558.
- [53] Zhang L, Jin B, Cui Y. A concurrent transmission enabled cooperative MAC protocol for vehicular ad hoc networks [C] // *Proceedings of IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service*, 2014: 258-267.
- [54] Bi Y, Liu K, Cai L, et al. A multi-channel token ring protocol for QoS provisioning in inter-vehicle communications [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(11): 5621-5631.
- [55] Han C, Dianati M, Tafazolli R, et al. A novel distributed asynchronous multi-channel MAC scheme for large-scale vehicular ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(7): 3125-3138.