

VANETs 路由协议的研究进展

于海宁, 张宏莉

(哈尔滨工业大学计算机网络与信息安全研究中心, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 车辆自组织网络是传统自组织网络派生出的一个分支, 其与应用场景高度相关. 传统路由协议不能有效的适用于车辆自组织网络, 因此, 针对车辆自组织网络提出了许多新的路由协议. 首先在总结车辆自组织网络的特性后, 分别介绍了单播路由、广播路由和地域性多播路由的概念, 然后着重分析和总结了近年来具有代表性的路由协议的核心路由机制及其优缺点, 并从路由协议的应用场景、分类、特性和前提条件四个方面对这些路由协议进行全面的比较. 最后, 指出了理想的路由协议应具有的特性以及未来可能的研究策略与突破方向.

关键词: 车载自组织网络; 路由协议; 单播路由; 广播路由; 地域性多播路由

中图分类号: TN919.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 12-2868-12

Research Progress of VANETs Routing Protocol

YU Hai-ning, ZHANG Hong-li

(Research Center of Computer Network and Information Security Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: Vehicle ad hoc networks (VANETs) which depend on special application scenarios are different from mobile ad hoc networks (MANETs). The existing routing protocols of MANETs cannot be applied to VANETs effectively. Many new routing protocols are presented for VANETs. Firstly, we describe the characteristic features of VANETs, then introduce the conceptions of unicast routing, broadcast routing and geocast routing. Moreover, we classify and characterize the existing representative routing protocols for VANETs, and also discuss their advantages and disadvantages. We give a qualitative comparison of these routing protocols with respect to application scenarios, classification methodology, characteristic features and assumptions involved. Finally, the important features that ideal routing protocols possess are summarized, and open research issues and possible directions of future research related to VANETs routing are proposed.

Key words: vehicle ad hoc networks; routing protocols; unicast routing; broadcast routing; geocast routing

1 引言

VANETs 在交通拥塞控制、交通安全、出行规划以及旅途娱乐等方面具有广阔的应用前景, 而 VANETs 路由协议为这些应用提供数据通信支持^[1], 是 VANETs 研究领域的热点和难点问题之一. VANETs 是 MANETs 所派生出的一个分支, 其具有以下特性: (1) 车辆的高速运动导致拓扑结构的高动态性; (2) 车辆的高速移动、建筑物对信号的阻挡导致拓扑结构的非连通性; (3) 网络规模较大, 具有开放性, 但通信带宽有限, 信道生命周期短, 质量不稳定; (4) 常被分割为相互独立子网络, 并且这些子网络不断的快速的融合或分裂, 拓扑结构具有非均衡性; (5) 通信具有严格延迟限制; (6) 车辆具有足够的能量和较强的存储计算能力; (7) 车辆通常依靠地理位置标识, 并且可以方便的获取自身位置信息; (8) 车辆运动

受道路拓扑、交通规则和驾驶者意图的限制, 其运动轨迹可被预测并建模. 特性(1)~(5)为设计高效的、可靠的、实时的 VANETs 路由协议带来严峻的挑战, 而特性(6)~(8)为路由协议设计带来了前所未有的机遇. 总之, VANETs 路由协议研究的挑战和机遇共存, 倍受学术界和工业界的关注.

本文主要是对近年来具有代表性的 VANETs 的网络层路由协议进行归纳分类, 分析与总结了各类路由协议的应用场景、核心路由机制及其优缺点, 并指出了可能研究策略和未来发展方向, 为 VANETs 路由协议进一步的研究提供广阔的视角.

2 VANETs 路由协议分类

VANETs 路由协议按照数据包的目的节点数的不同可分为单播路由 (Unicast Routing), 广播路由 (Broadcast

Routing),多播路由(Multicast Routing)三类,其中,针对多播路由由协议本文主要分析其中的一个子类,即地域性的多播路由(Geocast Routing),如图 1 所示.图 2 列举了

本文所涉及的协议,并指明了这些协议所属的类别,在下一节中,将对这些路由协议的分类标准和各自核心路由机制进行详细的论述和总结.

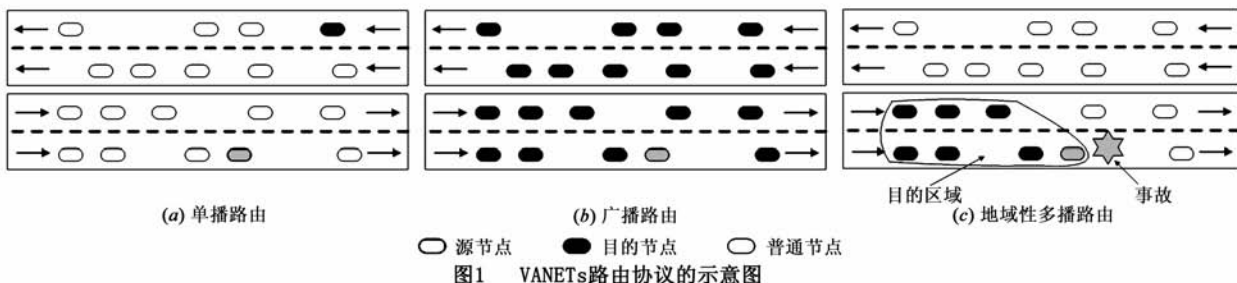


图1 VANETs路由协议的示意图

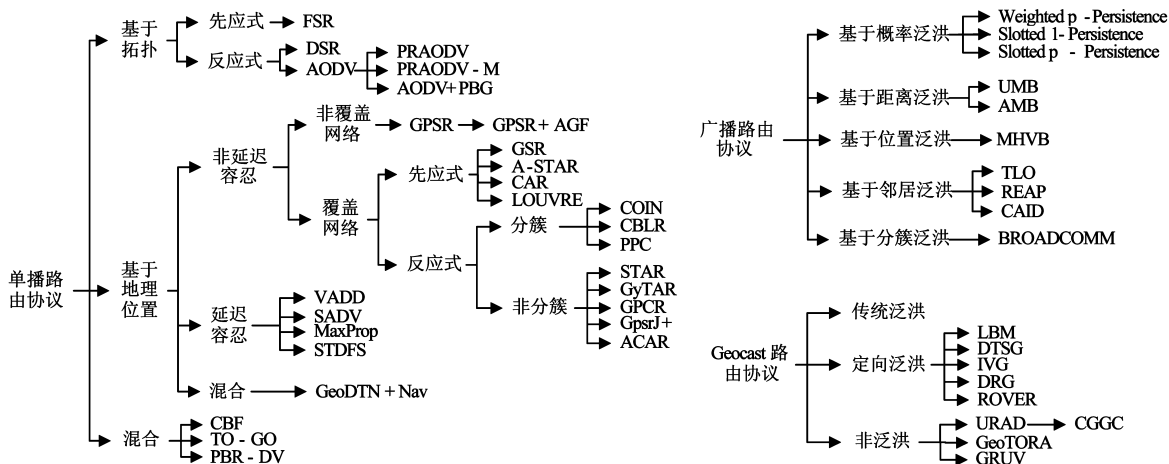


图2 VANETs路由协议分类

3 单播路由协议

单播路由协议用于一对一的数据传输,实现源节点到目的节点的数据包转发.单播路由协议可分为基于拓扑结构和基于地理位置两类.

3.1 基于拓扑结构的路由协议

基于拓扑结构的路由协议利用节点之间的链路状态信息转发数据包.这类路由协议可进一步分为先应式和反应式两类.在先应式路由协议中,每个节点无论当前是否需要通信,都需要建立和维护到达网络其他节点的路由表.如 FSR^[2](Fish-eye State Routing).先应式路由协议预构路由表,在传输数据时无需进行路由发现,数据包递交延迟小.但是,VANETs的路由表建立和维护的开销是无法容忍的.在反应式路由协议中,节点只有在需要通信的情况下,才会启动路由发现的过程.每个节点仅建立维护到达部分网络节点的路由信息的路由表.DSR (Dynamic Source Routing)^[3]和 AODV(Ad-hoc On-demand Distance Vector)^[4]是经典的反应式路由协议.研究表明由于 VANETs 节点的高速运动导致 DSR 和 AODV 无法及时收敛,产生大量的不可靠路由,且路由开销过大^[5-7].为提高 AODV 的性能,文献[8]提出了两

个基于预测的 AODV 协议 PRAODV 和 PRAODV-M.然而,二者的性能完全依赖于预测的准确性.文献[9]将 PGB(Preferred Group Broadcasting)机制应用在 AODV 协议的路由发现过程中,只有 PG 中的一个节点继续进行数据包泛洪.PGB 机制可以降低路由发现的开销,提高路由路径的稳定性,但是转发节点数量的减少导致路由建立延迟的增加.当 PG 为空时,会导致路由发现失效.总体而言,拓扑的高动态性导致基于拓扑结构的路由协议在 VANETs 中性能不佳.

3.2 基于地理位置的路由协议

在这类协议中,节点根据数据包目的节点位置和邻居节点位置决定数据包的转发策略.由于没有更多全局信息指导转发,这类协议的具体算法可能会终止于一个局部最优,而非全局最优.基于地理位置的路由协议可进一步分为三种类型:非延迟容忍型、延迟容忍型和二者混合型.

3.2.1 非延迟容忍的路由协议

非延迟容忍的协议不考虑 VANETs 的非连通性,假定在源目的节点之间存在足够多的车辆转发数据包,协议尽可能的选择延迟最小的路径作为最优路径.非延迟容忍的路由协议根据是否生成覆盖网络指导数据

包路由可进一步分为非覆盖网络型和覆盖网络型.在非覆盖网络型路由协议中,节点均处于平等地位,不考虑特殊节点对数据包转发的优先性和指导性.如 GPSR^[10](Greedy Perimeter Stateless Routing)采用基于地理位置的贪婪算法转发数据包,当贪婪转发陷入局部优点时,就采取边界转发,依据右手法则转发数据包,当数据包到达的节点比局部最优点更靠近目的节点时,恢复贪婪转发.文献[9]改进了 GPSR 的贪婪转发方式,删除过期的邻居信息,同时增加了对目的节点位置变化的预测机制,将数据包的递交率至少提高了三倍. GPSR 直观且易于实现,其他路由协议往往与其进行性能比较.上述非覆盖网络型路由协议在高速公路场景下性能尚佳,但在城市场景下,拓扑空旷的存在和建筑物对信号的遮挡,导致数据包转发经常落入局部最优的恢复阶段,导致路由性能下降.

覆盖网络型路由协议利用上层的覆盖网络指导数据包的转发.覆盖网络是由地理位置或具有特殊意义节点作为顶点,以源目的节点之间可能存在的转发路径作为边的覆盖在 VANETs 之上的图.这类协议在城市场景下拥有优良的性能.覆盖网络型路由协议可进一步分为先应式和反应式两种类型.

先应式协议的覆盖网络是静态的,在数据包发送前预设转发的最优路径,路径一般由锚点序列标识,数据包沿锚点序列转发.拓扑的高动态性或预测误差都可能导致路由失效,同时,这类协议可伸缩性较差.

GSR^[11](Geographic Source Routing)利用 Dijkstra 算法计算从源节点到目的节点的道路最短路径,将路径上的道路交叉口位置作为锚点写入数据包,数据包沿锚点序列进行贪婪转发.当转发失败时,中间节点重新计算数据包转发的锚点序列. GSR 性能远优于 DSR 和 AODV,常被用来与其他协议进行性能比较.但是, GSR 在计算最短路径时,没有考虑路段上的车辆密度,路段不连通会导致路由失效.

A-STAR^[12](Anchor-based Street and Traffic Aware Routing)以路段上公交线路数量作为权值,计算数据包转发的加权最短路径.当数据包转发陷入局部最优时,在重新计算加权最短路径的同时,局部最优点反向传播地理标识消息来标示该位置在一段时间内不参与加权最短路径的计算. A-STAR 增加了对路段连通性的评估机制,有效的排除了非连通的路段,但该机制不具有实时性和准确性.

CAR^[13](Connectivity-Aware Routing)由四个阶段构成:路由发现,数据包转发,路由维护,错误恢复.在路由发现阶段, CAR 使用 PGB^[9]机制广播 PD(Path Discovery)数据包,数据包记录其经过的道路交叉口处的节点的位置作为锚点序列.当含有不同锚点序列的 PD 数据

包到达目的节点后,目的节点选择最优的锚点序列应答源节点.在数据包转发阶段,源节点沿最优的锚点序列进行贪婪转发.当目的节点位置改变时,进入路由维护阶段, CAR 利用区域内的地理标示消息辅助目的节点的发现.当路由失败时, CAR 将进入错误恢复阶段. CAR 性能优于 GPSR + AGF. CAR 不存在局部最优问题,同时不需要电子地图和 LBS 系统的辅助,应用场景更具普遍性.但是, PD 数据包记录的锚点序列中存在一些多余的锚点.

LOUVRE^[14](Landmark Overlays for Urban Vehicular Routing Environments)通过点对点的协议实现了节点对分布式的各路段车辆密度的感知.利用各路段车辆密度信息构造一个覆盖网络连接状态路由表. LOUVRE 中存在两种路由机制:路间路由,通过连接状态路由表选择下一个转发数据包的路段;路内路由,通过贪婪算法转发数据包.当路由失败时, LOUVRE 提出两种恢复机制,一种是回溯到前一路段,选择次优路段转发数据包;另一种是缓存转发机制.实验表明 LOUVRE 的性能优于 GPSR 和 GPCR. LOUVRE 最大的缺陷是伸缩性差,当城市道路复杂时,覆盖网络连接状态路由表构造开销较大,准确性下降.

反应式协议的覆盖网络是动态的,覆盖网络在数据包转发过程中根据附近节点位置的或路段车辆密度等信息一步步的动态构造.反应式协议比先应式协议更加灵活,最优路径的选择更加准确.但是,覆盖网络的动态构造增加了网络开销和协议的复杂性.有些协议依赖额外服务为覆盖网络的构造提供决策依据,额外服务不但增加了协议应用成本,决策依据的不准确严重影响路由性能.下面对这类协议中具有代表性的进行分析.

STAR^[15](Spatial and Traffic Aware Routing)要求节点维护一个邻居表和一个交通流量表用于构造一个加权有向图. STAR 一段一段的动态获取最短路径,数据包沿图中计算出的含有固定数量锚点的最短路径进行贪婪转发,当数据包到达最后一个锚点时,重新计算最短路径继续转发.实验表明 STAR 性能优于 GPSR.但是, STAR 信标消息的大小是 GPSR 的六倍,浪费了大量的网络带宽.高速运动的节点可能延迟或丢失信标消息,使得车辆密度信息不准确,导致路由失效.另外,在 STAR 中,车辆密度只有稠密或稀疏两种状态,精确度较低.

GyTAR^[16](improved Greedy Traffic Aware Routing)摒弃了类似 A-STAR 的依靠静态的统计信息获取路段车辆密度的方法,根据各个路段实时的车辆密度一步步的动态获取数据包转发的下一个锚点,锚点之间采用改进的贪婪算法转发数据包,考虑了邻居节点的速度

向量,根据计算出的下一时刻邻居节点的位置进行贪婪转发.当数据包转发陷入局部最优时,采取缓存转发机制. GYTAR 需要额外的硬件设备和服务实时的提供路段车辆密度信息,这限制了协议的应用场景.

GPCR^[17] (Greedy Perimeter Coordinator Routing) 利用道路拓扑是平坦图的优势,直接转发数据包,而不需要电子地图的协助. GPCR 由两个阶段构成:受限的贪婪转发阶段和修复阶段.在受限的贪婪转发阶段,优先选取道路交叉口处的节点转发数据包,交叉口节点是数据包转发方向的决策者.当陷入局部最优时,进入修复阶段,交叉口节点利用右手法则决定数据包转发方向. GPCR 使用一个低负载先应式的探测机制来判断备选路段的车辆密度,选择连通性好的路段转发数据包. GPCR 存在三个缺陷:①交叉口节点的判断算法增加网络开销;②协议过度依赖于交叉口节点;③数据包路由经过的交叉口节点集合冗余.针对“缺陷①”, GpsrJ +^[18] (Gpsr Junction +) 利用电子地图确定节点目前是否处于道路交叉口处,进而在避免计算的同时提高了准确性.针对“缺陷②和③”, GpsrJ + 通过信标消息获取两跳邻居节点信息预测数据包转发方向,如果方向不变,则数据包不必由交叉口节点转发,进而减少了数据包转发的跳数,降低了对交叉口节点的依赖性. GpsrJ + 相比于 GPCR 提高了数据包递交率,相比于 GPSR 边界转发跳数降低了 200%.但是 GpsrJ + 将道路抽象为线,使得路段上节点至多有左右两个邻居节点,道路交叉口处节点至多有四个邻居节点,这个假设条件与现实道路场景差距较大.

ACAR^[19] (Adaptive Connectivity Aware Routing) 将路段分为多个相邻的元胞,每个元胞至多可以容纳一辆车, ACAR 计算每个路段的连通概率(路段上任意两个邻居节点之间空的元胞的总长度小于等于节点通信距离的概率).数据包沿着连通概率最高的路径进行贪婪转发.当路由失败时,采用缓存转发的机制进行恢复.

分簇的路由协议是覆盖网络型的路由协议的一个子类,协议将节点分簇,并推举出各簇的簇头节点,由簇头节点构成覆盖网络.这类协议能够优化网络带宽的应用、提高共享信道的利用率、提高应用的可扩展性.协议必考虑分簇算法的开销以及簇的稳定性,簇的频繁变化将产生很大的维护开销.下面介绍 VANETs 中具有代表性的分簇路由协议. COIN^[20] (Clustering for Open IVC Network) 以车辆的运动方向和驾驶者的意图为依据,将节点分簇,并推举出簇头节点.为了提高簇的稳定性, COIN 定义了两个簇头之间的允许的最短距离用以适应车间距的动态变化. COIN 虽然增加了一些小的附加开销,但是延长了簇的生命周期,并减少一些簇成员变动. CBLR^[21] (Cluster-Based Location Routing) 根

据位置将节点分为簇头节点、网关节点和成员节点三类.节点发送数据包时,首先查询自己的路由表中是否有目的节点的位置,如果有则将数据包发送到距离目的节点最近的簇头.否则,广播 LREQ 数据包,网关节点转发 LREQ 数据包,当簇头节点发现目的节点是其成员时,回复 LREP 数据包建立路由. CBLR 减少了路由发现数据包的转发次数,但是没有给出具体的簇生成算法. PPC^[22] (Position-based Prioritized Clustering) 通过 $E_i = T e^{-0.2d}$ 计算节点 i 的优先级,其中, T 为行驶时间, d 为节点速度与平均速度的偏移量.在两跳范围内具有最高优先级的节点成为簇头. PPC 定义簇的直径为 $2L$,簇头节点间最小距离为 D ,当簇成员与簇头距离大于 L 时,该簇成员脱离簇,加入另一个簇或形成新簇.当两簇头节点之间的距离小于 D 时,成员数少的簇解散.实验证明当 L 在 800 至 1000 米之间, D 在 200 至 300 米之间时,协议性能最优.

3.2.2 延迟容忍路由协议

在现实环境中, VANETs 常常为非均衡的延迟容忍网络.在此条件下,延迟容忍的路由协议一般采取机会转发,缓存转发,设定转发优先级等机制实现路由.这类协议在一定的延迟允许范围内尽可能将数据包可靠的传输到目的节点.下面介绍具有代表性的延迟容忍路由协议.

VADD^[23] (Vehicle-Assisted Data Delivery) 提出了三种数据包转发模式: Intersection 模式, Straightway 模式, Destination 模式.当数据包到达道路交叉口附近时,被设置为 Intersection 模式,选择传输延迟最小的路段转发数据包,次小的路段作为备选.当数据包离开道路交叉口时,进入 Straightway 模式,数据包沿路段转发.当数据包靠近目的节点时,进入 Destination 模式.数据包在选择下一跳节点时,有四种可选模式:位置优先的 L-VADD,方向优先的 D-VADD,多路方向优先的 MD-VADD 以及三者混和的 H-VADD,其中 H-VADD 的路由性能最优.

SADV^[24] (Static-Node Assisted Adaptive Routing) 在道路交叉口处设置静态节点指导数据包转发. SADV 包括三个模块: LDU (Link Delay Update), SNAR (Static Node Assisted Routing), MPDD (Multi-Path Data Dissemination). LDU 负责实时的更新静态节点间的传输延迟. SNAR 负责计算延迟最小路径.当道路上车辆稀少时, MPDD 通知静态节点同时向延迟最小和次小的两个路段转发数据包. SADV 采用路段模式和交叉口模式交替的方式转发数据包,当处于路段模式时,数据包向下一个静态节点进行贪婪转发.到达静态节点后变为交叉口模式,静态节点将数据包转发到延迟最小的路段.

MaxProp^[25] 通过计算缓存数据包到达目的节点的

优先级,在有限的通信时长和网络带宽条件下,按照优先级顺序转发数据包. MaxProp 由邻居发现阶段、数据包转发阶段和缓存管理阶段构成. 在邻居发现阶段,节点获取彼此信息. 在数据包转发阶段,有限数量的数据包在相遇节点间转发. 在缓存管理阶段,节点计算缓存数据包的优先级,决定将转发或丢弃的数据包. MaxProp 利用历史信息预测节点相遇的概率,而后计算转发成本确定数据包的优先级. MaxProp 在真实的 UMassDiesel-Net 场景下对 30 辆公交车 60 天的实验数据进行分析, MaxProp 在延迟容忍网络中具有良好的性能. 但是, MaxProp 不适用于车辆密度大的网络.

STDFS^[26] (Shared-Trajectory-based Data Forwarding Scheme) 通过共享轨迹信息构造车辆预期相遇图, 该图是一个以源节点作为起始节点, 以目的节点作为终止节点的有向图, 对于图中任意节点 e , 其子节点表示在 e 与其父节点相遇后, 预期相遇的节点. 如果 e 的子节点存在一条到达目的节点的路径, 那么向这个子节点发送的数据包以一定的概率到达目的节点. 所有可能成功递交数据包的子节点以与 e 相遇的时间排序组成了 e 的转发序列. STDFS 以最大化期望递交率和最小化期望递交延迟为目的, 从 e 的转发序列中选出一些节点构成最优转发序列, e 通过最优转发序列向相遇的车辆发送数据包. STDFS 在轨迹信息和预测信息较准确的情况下性能优于 VADD. 但是, 预测误差随路径距离的增大而增大, 必然导致路由性能下降.

3.2.3 混合型路由协议

还有一类协议混合非容迟路由协议和容迟路由协议的转发机制, 如 GeoDTN + Nav, 其由贪婪转发模式, 边界转发模式和容迟转发模式构成. 协议根据网络连通状态动态转换数据包的转发模式, 如图 3 所示. GeoDTN + Nav 首先进入贪婪转发模式, 采用与 GPCR 相同的贪婪算法转发数据包. 当陷入局部最优点时, 进入边界转发模式. 在边界转发阶段, 节点为每个邻居维护一个转换积分, 一旦转换积分大于预设阈值, 则进入容迟转发模式, 缓存转发机制. GeoDTN + Nav 的多模式动态转换的数据包转发机制适用于非均衡的 VANETs, 这类协议是未来重要的研究方向之一.



图3 GeoDTN+Nav转发模式转换

3.3 基于拓扑和地理位置相混合的单播路由协议

在城市场景下, 基于地理位置的路由协议性能更优, 而网络的拓扑信息往往可以辅助路由. CBF^[28] (Contention-Based Forwarding) 通过广播方式实现数据包的转发. 其采用分布式计时器竞争机制使得距离目的节点

最近的接收节点最先继续广播数据包, 其他接收节点放弃广播. CBF 消除了信标消息所带来的网络开销, 同时数据包的递交率与 GPSR 相仿. CBF 仅适用于高速公路场景下, 而 TO-GO^[29] (Topology-assist Geo-Opportunistic Routing) 适用于城市场景, 其改进了 CBF 下一跳节点选择算法, 并增加了信标消息机制获取两跳的邻居信息. TO-GO 通过预测算法选择下一跳目标节点, 目标节点可能是道路交叉口处节点或最远的邻居节点. 确定了目标节点后, 可以确定一个数据包转发候选集合, TO-GO 采用分布式计时器竞争机制使得集合中越靠近目标节点的节点越先广播数据包. 李元振等^[30] 提出了类似的基于 CBF 的路由算法, 并且在文献^[31] 中得出了节点计时器参数和抑制策略成功执行的概率、节点密度、传播时延、发送时延的关系, 是这类协议的重要补充. PBR-DV^[32] (Position-Based Routing with Distance Vector Recovery) 采取基于地理位置的贪婪算法转发数据包, 当贪婪陷入局部最优点时, 采取类似 AODV 路由发现机制寻找到达目的节点的路径. 这种局部最优的解决方法产生大量请求广播数据包, 增加网络开销.

3.4 单播路由协议小结

本节对单播路由协议进行了逐级的分类, 概括了各个路由协议的特点及优缺点. 表 1 从应用场景、分类、特性和前提条件四个方面对单播路由协议进行总结和比较. 从表 1 可知不同类型路由协议应用场景和针对的问题各异, 即使同类的路由协议的核心路由机制也各不相同. 一般来说, 单播路由协议设计根本目标是提高数据包递交率和吞吐量, 降低数据包递交平均延迟和路由开销. 为实现此目标, 通过分析上述协议的特性, 总结了单播路由协议设计的若干经验性的准则.

(1) 一般来说, 基于地理位置的路由协议性能优于基于拓扑结构的路由协议. 网络拓扑结构信息可以辅助基于地理位置的路由协议转发数据包, 如出现局部最优问题时, 利用拓扑信息恢复转发.

(2) 多数协议采用沿路段的数据包贪婪转发方式, 这种方式简单且高效, 但是存在局部最优问题. 协议应该尽量避免或减少局部最优问题的发生, 当发生时存在恢复机制应对. 而多数延迟容忍的路由协议往往还采用缓存转发的机制, 当网络非连通时, 缓存数据包, 等待机会转发.

(3) 利用上层的覆盖网络指导数据包转发. 如道路交叉口的节点作为数据包转发的决策者构成覆盖网络, 路由协议往往涉及交叉口节点的判断算法和交叉口节点转发决策等方面的设计.

(4) 利用信标消息先应式的获取附近节点信息. 虽然信标消息会增加网络负载, 但使得数据包的转发更具目的性. 信标消息的大小和广播周期都是需要根据

实际应用场景和网络环境确定.当信标消息的周期较长时,协议无法适应节点的移动.当周期较短时,易产生数据包冲突.

(5)利用预测机制选择数据包转发的最优路径,有效预测算法能够大幅的提升路由性能.目前预测算法多数是对车辆位置或相遇时机的预测.

(6)多数协议需要一些辅助的设备和服务作为前提条件.如协议通过电子地图获取道路拓扑信息,通过 GPS 系统实现了节点位置的自感知,通过 LBS 服务获取目的节点的位置.协议可以以这些条件辅助路由^[33],但应能够容忍条件存在错误或误差,同时保证附加服务的网络开销较小.

表 1 VANETs 单播路由协议的分析和比较

	高速公路场景	城市场景	基于拓扑结构	基于地理位置	延迟容忍	覆盖网络	分类	先应式	反应式	贪婪转发	预测机制	路由锚点	缓存转发	车辆密度感知(统计)	道路感知	车辆密度感知(实时)	信标消息	路由发现和恢复	地理标志消息	路由缓存	定位系统(GPS)	位置服务(LBS)	全局交通线路	公共交通线路	车辆轨迹信息	辅助设备及服务	
FSR	√	√	√					√											√								
DSR	√	√	√						√																		
AODV	√	√	√						√										√								
AODV+PGB	√	√	√																								
GPSR	√	√		√						√							√	√				√	√				
GPSR+AGF	√	√		√							√																
GSR		√		√		√		√		√	√	√		√			√	√			√	√	√				
A-STAR		√		√		√		√		√	√	√		√	√		√	√		√	√	√	√	√			
CAR	√	√		√		√		√		√	√	√		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√			
LOUVRE		√		√		√		√		√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√		√	
STAR		√		√		√			√	√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
GyTAR		√		√		√			√	√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√		√	
GPCR	√	√		√		√		√		√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
GPsrJ+	√	√		√		√		√		√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
ACAR		√		√		√		√		√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√		√	
COIN	√			√		√	√	√		√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
CBLR	√	√		√		√	√	√		√	√	√		√	√		√	√	√	√	√	√	√	√			
PPC	√			√		√	√	√		√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
VADD		√		√	√					√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√		√	
SADV		√		√	√					√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			√
MaxProp		√		√	√					√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
STDFS		√		√	√					√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√		√	√
GeoDTN+Nav	√	√		√	√	√				√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√		√	√
CBF	√			√	√					√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
TO-GO		√		√	√					√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
PBR-DV	√	√		√	√					√	√	√		√	√		√	√			√	√	√	√			
	场景		分类					特性										前提条件									

4 广播路由协议

广播路由协议将源节点的数据包转发给网络中的其他节点.最简单的广播方式是泛洪,泛洪在节点数量较少的情况下性能很好.当节点数量较大时,大量的节点同时广播数据包,导致频繁信道竞争,造成数据包的碰撞,引起广播风暴.在广播协议中采用改进的泛洪机制可以有效的提高广播的成功率、降低开销和延迟、避

免数据包的碰撞.常用的泛洪改进机制如表 2 所示.

上述改进的泛洪机制常常应用在 VANETs 广播路由协议中,下面介绍具有代表性的广播路由协议.

P-Persistence 泛洪以预设的概率转发数据包,而 Weighted p-Persistence^[34]泛洪在其基础上,利用节点的位置信息计算转发概率,保证距发送节点远的节点以高概率转发数据包,同时通过数据包缓存转发机制避免丢包,提高了广播成功率. Slotted 1-Persistence^[34]泛洪

通过设置节点的转发等待时间(而非转发概率)实现数据包广播,距发送节点越远的节点等待时间越短,进而转发概率越高.在 Slotted 1-Persistence 中时隙数与车辆密度之间的函数关系确定是难点.而 Slotted p-Persistence^[34]泛洪是 Weighted p-Persistence 和 Slotted 1-Persistence 的结合.

UMB^[35](Urban Multi-Hop Broadcast)根据车辆通信范围和密度迭代的将道路分段,而后交替的采用定向广播和交叉口广播模式转发数据包.定向广播模式利用链路层的 RTB/CTB 握手机制选择路段中最远的邻居节点转发数据包.交叉口广播模式通过在交叉口处安装转发器,向不同路段上的邻居节点进行定向广播.AMB^[36](Ad hoc Multi-hop Broadcast)在 UMB 的基础上,以道路交叉口处的节点代替转发器进行交叉口广播,提高了 UMB 的普适性.

MHVB^[37](Multi-Hop Vehicular Broadcast)利用退火算法获取退火区域,退火区域内的节点不继续广播数据包.数据包接收节点利用交通拥塞检测算法确定转发数据包的等待时间,如果节点处于交通拥塞状态,则延长等待时间.文献[38]对 MHVB 进行了两点改进:通过角度和方向的计算缩小了退火区域;由接收节点与发送节点间的距离动态决定转发数据包的等待时间.MHVB 利用退火算法和拥塞检测算法有效的提高了广播效率.

TLO^[39](To Last One)协议和 REAR^[40](Receipt Estimation Alarm Routing)协议通过信标消息获取邻居节点信息,当节点收到广播数据包后,节点判断与其邻居节点相比自身是否是最优的转发节点,如果是则继续广播数据包.具体而言,TLO 以节点和数据包发送节点之间的距离最为择优标准,而 REAR 则以节点邻居节点的数量作为择优标准.

CAID^[41](Context-Adaptive Information Diffusion)计算邻居节点与其持有的数据包之间的相关性,然后向邻

居节点转发相关性大的数据包.具体地,节点利用数据包相关性(如,数据包产生时间等),车辆相关性(如,车速,车辆密度等),信息相关性三组值计算数据包的效益,节点根据效益为数据包分配通信资源并发送数据包到相关邻居.

BROADCOMM^[42]是一个应用于紧急消息广播的协议,其根据 MAC 层协议的传输距离将高速公路分成多个虚拟的元胞,靠近元胞中心位置的节点被选举为元胞的 Reflector 节点,Reflector 节点作为一个虚拟基站,控制数据包的广播.Reflector 节点管理元胞内部节点数据包的接收和发送,负责与相邻的 Reflector 节点通信,并决定数据包广播的优先级.

表 2 泛洪改进机制

	描述	缺点
基于概率的泛洪	以预设的概率广播数据包	易丢失数据包
基于计数的泛洪	记录数据包的冗余数,当冗余数小于阈值时,广播数据包	不适用于大规模的网络环境
基于距离的泛洪	当与发送节点间距离大于阈值时,广播数据包.	最优阈值不易获取
基于位置的泛洪	指定区域内的节点的广播数据包	指定区域不易获取
基于邻居的泛洪	根据邻居表决定向哪些邻居发送数据包	信标消息消耗带宽和存储资源
基于分簇的泛洪	只有簇头节点参与广播数据包	簇的生成和维护增加了复杂性

本节总结了广播路由协议常用的泛洪机制,并对基于各机制的广播路由协议进行了分析和对比,如表 4 所示.车辆可以方便的获取自身的位置信息,因此基于位置和距离的泛洪机制被广泛的应用在广播协议中,其他广播协议在引入了节点位置信息后也得到了可观的路由性能.而是否引入其他机制辅助路由可以根据应用需求而定.

表 3 广播路由协议总结

	应用场景	泛洪机制	网络类型	信标消息	提前条件
Weighted p-Persistence	高速公路	基于概率	非延迟容忍	NO	GPS
Slotted 1-Persistence					
Slotted p-Persistence					
UMB	城市	基于距离	非延迟容忍	NO	电子地图,转发器,GPS
AMB	城市	基于距离	非延迟容忍	NO	电子地图,GPS
MHVB	城市	基于位置	非延迟容忍	NO	GPS
TLO	城市	基于邻居	非延迟容忍	YES	GPS
REAP	高速公路	基于邻居	非延迟容忍	YES	GPS
CAID	城市	基于邻居	延迟容忍	YES	GPS
BROADCOMM	高速公路	基于分簇	非延迟容忍	NO	GPS

一般来说,通过测量平均开销 overhead、可达率

reachability、平均延迟 delay 和平均碰撞率 collision 四个

参数可以评估一个广播路由协议的性能,假设网络节点数为 N ,广播最大传输距离为 L ,共进行 R 轮广播.其中第 R_i 轮广播中,源节点在 $t_s^{R_i}$ 时刻生成数据包,在 $t_e^{R_i}$ 时刻网络中最后一个节点收到数据包,共有 M_i 个节点转发了数据包, K_i 个节点收到了数据包,发生了 C_i 次数据包碰撞,则这个参数分别表示如下:

$$\text{overhead} = \sum_{i=1}^R (M_i/N) / R \quad (1)$$

$$\text{reachability} = \sum_{i=1}^R (K_i/N) / R * L \quad (2)$$

$$\text{delay} = \sum_{i=1}^R (t_e^{R_i} - t_s^{R_i}) / R \quad (3)$$

$$\text{collison} = \sum_{i=1}^R (C_i/M_i) / R \quad (4)$$

通过上述协议的分析可知如何选择下一跳广播节点是广播路由协议核心问题,节点的选择算法不但要保证较高的可达率,同时还要保证较低的平均开销、平均延迟和平均碰撞率,广播路由协议的设计一般也是从这四个方面入手.在交通安全应用中,广播协议的可靠性至关重要,而在舒适出行的应用中低优先级的、数据包延迟和丢失容忍的广播路由协议成为了新的需求.

5 Geocast 路由协议

Geocast 也被称为地域性的多播,是一种基于地理位置的,向指定的目的域内所有节点传送数据包的多播路由协议^[43].Geocast 的目的区域定义为 ZOR(Zone of Relevance),位于 ZOR 中的节点是数据包的目的节点,数据包的转发区域定义为 ZOF(Zone of Forwarding),位于 ZOF 中的节点转发数据包.Geocast 以地理位置规划成员,其多播组是位于 ZOR 内的所有节点,一旦有节点进入或离开 ZOR 就意味着此节点加入或退出多播组.Geocast 路由协议根据数据包到达 ZOR 方式的不同可分为三类:基于传统泛洪的 geocast,基于定向泛洪的 geocast 和非泛洪的 geocast.

5.1 基于传统泛洪的 geocast 路由协议

在基于传统泛洪的 geocast 路由协议中,数据包记录目的区域,首次接收该数据包的节点判断自身是否在此目的区域内,如果是则将数据包递交给上层应用,同时继续广播该数据包.否则仅继续广播数据包.很少有协议直接基于此实现,传统泛洪常常用来评估 geocast 路由协议的性能.

5.2 基于定向泛洪的 geocast 路由协议

在定向泛洪中,不是传统泛洪机制那样向四面八方广播数据包,而是通过特定的转发区域 ZOF 转发数据包.定向泛洪有目的性和针对性的转发数据包,减少

了网络中的冗余数据量,降低网络拥塞的几率.同时,定向泛洪保持了传统泛洪的高容错能力的特性,保证了网络通信的可靠性.基于定向泛洪的 geocast 路由协议描述如下.

在 LBM(LBM, Location-Based Multicast)中,发送节点预设数据包的 ZOF,ZOF 内的节点收到该数据包后,向其邻居节点继续广播该数据包.ZOF 可以根据相关的参数进行静态或动态的设定.常用的获取 ZOF 的方法包括:静态区域获取机制、自适应区域获取机制^[44]、基于距离的区域获取机制^[45]、基于 Voronoi 图的区域获取机制^[46]以及基于网格(GeoGRID)的区域获取机制^[47]等.

DTSG^[48] (Dynamic Time-Stable Geocast)由 Pre-stable 阶段和 Stable 阶段构成,其中 Pre-stable 阶段完成数据包在 ZOR 中的扩散,Stable 阶段保证数据包在预设时长内持久的存在于 ZOR 中.DTSG 的预设时长可以动态变化的,不需要任何额外的开销.DTSG 通过设置数据包广播周期时长降低数据的冗余度,减少网络负载,同时利用反向运动节点协助数据包转发使协议适用于延迟容忍网络.文献^[49]提出的路由协议与 DTSG 相类似,数据包广播周期时长的设置略有不同.

IVG^[50]和 DRG^[51] (Distributed Robust Geocast)是两个相似的协议,IVG 应用在高速公路场景下的事故预警中,ZOR 由节点位置和速度向量动态决定,而 DRG 可以应用在城市场景下.为了减少网络冗余数据包,降低网络开销,增强协议的伸缩性,IVG 和 DRG 采取类似于 CBF 的基于距离的竞争机制广播数据包,即靠近 ZOR 的节点优先转发数据包.IVG 和 DRG 引入了周期性重播机制克服 VANETs 非连通性,提高数据包的递交成功率.

ROVER^[52] (RObust VEhicular Routing)采用类似 AODV 的路由发现机制,建立从源节点到 ZOR 中的节点的多播树.ROVER 的 ZOF 是包括源节点和 ZOR 的矩形区域.源节点广播 ZRREQ 数据包,位于 ZOF 的节点转发 ZRREQ,当 ZOR 内的节点接收到 ZRREQ 后,向上一跳发送节点回复 ZRREP 数据包,上一跳发送节点在路由表中记录 ZRREP 的信息.当源节点收到 ZRREP 数据包后通过已建立的多播树向 ZOR 内的节点发送数据包.ROVER 先利用定向泛洪进行路由发现,而后进行数据传输,这种方式支持数据包传输的质量服务.

5.3 非泛洪机制路由协议

在基于 URAD(Unicast Routing with Area Delivery)的 geocast 路由协议中,源节点利用单播路由协议将数据包发送的 ZOR 内的某目的节点,该目的节点在 ZOR 内进行数据包泛洪,进而实现了数据包的多播路由.在文献^[53]提出的 CGGC(Cached Greedy Geocast)中,节点引入缓存机制,缓存贪婪转发失败的数据包,当发现距离

ZOR 更近的邻居节点时,继续转发数据包,当数据包到达 ZOR 内的某目的节点后,该节点在 ZOR 内进行数据包泛洪.类似的,其他单播路由协议可以修改为 URAD 协议.

GeoTORA^[54] 协议采用 TORA (Temporally-Ordered Routing Algorithm) 协议建立一条源节点到 ZOR 的路由,数据包沿该路由发送到 ZOR 内的某目的节点,由该节点在 ZOR 内进行数据包泛洪.虽然 GeoTORA 协议在传输数据时减少了数据冗余,但采用泛洪方式建立路由导致数据冗余度增加,传输延迟增大.节点的移动可能导致预先建立的路由失效.

GRUV^[55] (Geocast Routing in Urban VANETs) 利用道路拓扑结构建立一个网格,通过源路由算法在源节点和 ZOR 之间建立多条冗余的路由.GRUV 提出了三种基于网格 ZOR 类型:BOX、E-BOX 和 FLOOD,根据网络环境可以动态转换 ZOR 类型.GRUV 将节点分为道路交叉口节点和路段节点,并给出了相应的下一跳节点选择算法.

5.4 Geocast 路由协议小结

本节对 VANETs 的 geocast 路由协议进行分类并分析了各类中具有代表性的路由协议.一般来说,基于定向泛洪和基于 URAD 的 geocast 路由协议应用较为广泛.定向泛洪仍然存在数据冗余度较高,网络负载大的问题,尤其在节点密度稀疏的网络中,消息难以成功转发到目标区域.Geocast 路由协议的性能评价参数与广播路由协议的相类似.Geocast 路由协议中 ZOR 和 ZOF 的获取算法直接决定协议的性能.在城市场景下的车辆按照道路拓扑分布,车辆间通信受到建筑物的遮挡,ZOF 的确定需要考虑更多的因素.针对同一应用,车辆的高速运动导致 ZOR 也处于动态变化状态,如何适应 ZOR 时空上的动态变化也是协议需要解决的问题.在某些交通应用中,消息仅针对 ZOR 中的部分节点,如,消息只发送给 ZOR 中的车辆,而不发送给行人.这时需要 geocast 路由协议具有扩展性,可以为 ZOR 中的节点建立多播组.

6 总结与展望

本文首先分析 VANETs 的特性.而后,对 VANETs 的单播路由协议、广播路由协议和 geocast 路由协议分别进行了分类,对各类型中具有代表性的协议的核心机制进行分析和比较.从分析结果可知,理想的 VANETs 路由协议应具有以下特点:采用分布式路由算法;具有自适应能力;无环路;控制开销少;数据冗余度低;扩展性强;递交率高;递交延迟小.通过对当前的各类路由协议进行分析与总结,可以预测未来 VANETs 路由协议可能的研究策略与突破方向.

(1) 路由协议可靠性和及时性研究.路由协议要保证数据包成功递交,尤其是在交通安全应用领域中,数据包可靠的及时的到达目的节点显得尤为关键.泛洪无法提供数据包的可靠传输和端到端的质量服务,广播路由协议和 geocast 路由协议更加需要新的机制和技术来保证数据传输的可靠性和及时性.

(2) 路由协议伸缩性研究.路由协议要适应交通流量和网络规模不断变化的情况,在高密度、大规模的网络情境下仍然拥有优良的性能,这要求路由协议具有自感知能力和自适应能力,根据现实环境进行自我调整.

(3) 路由协议鲁棒性的研究.目前,许多路由协议的前提条件过于理想化,在现实环境中这些前提条件可能存在误差甚至失效.同时,网络中还存在着一些不确定因素^[56],如数据包的碰撞、信号误码等.这些误差和不确定因素不应协议性能造成严重影响.协议的鲁棒性是必须予以关注的问题.

(4) 路由协议普适性的研究.现有的路由协议一般针对特定网络环境中的具体的交通应用而提出,这些协议普适性较差.VANETs 的非均衡性和应用的多样性要求路由协议具有较强的普适性,如何增强路由协议的普适性需要进一步深入的研究.

(5) 路由协议共存性的研究.在 VANETs 中,不同类型的路由协议共享网络带宽,单播路由协议、广播路由协议和多播路由协议的数据流如何共存,如何分享网络资源,进一步地,这三类路由协议各自的不同类型的路由协议的数据流如何共存都是需要研究和解决的问题.

(6) 路由协议兼容性的研究.路由协议的兼容性体现在横向兼容和纵向兼容两方面,横向兼容是不同的 VANETs 路由协议之间的兼容,纵向兼容是 VANETs 路由协议与互联网网络协议的兼容^[57,58].这两方面的兼容性问题都需要更加广泛和深入的研究.

(7) 驾驶员意图及其社会关系网络与路由协议结合的研究.车辆运动轨迹除了受道路拓扑和交通规则的限制外,主要受驾驶员的意图控制.同时,驾驶员的社会关系网络往往可以用来预测节点的运动特点.如何将驾驶员意图及其社会关系网络与路由协议相结合,指导数据包的路由是未来研究的关键问题之一.

(8) 路由协议安全性的研究.VANETs 的安全需求包括:用户和数据的授权、隐私保护、安全通信等.目前,多数路由协议没有考虑协议的安全问题,因此,如何在这些路由协议中引入安全保障机制是需要解决的问题.

(9) 通用的 VANETs 路由协议实验仿真平台的研究.目前,VANETs 路由协议的实验仿真平台各异,没有

个统一的,结合道路拓扑和交通流模型的实验平台可以对不同的路由协议的性能做出客观的综合评估.许多路由协议的仿真路网和车辆运动模型过于简单,实验场景和现实场景之间的巨大差异可能导致路由协议的失效.路由协议的实验仿真平台还有待进一步研究和开发.

总的来说,目前国内外针对各类场景问题提出大量的 VANETs 路由协议,但是,在 VANETs 路由协议研究领域,仍有许多问题有待解决,许多新的研究课题有待发现.

参考文献

- [1] Willke T L, Tientrakool P, Maxemchuk N F. A Survey of inter-vehicle communication protocols and their applications [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2009, 11(2): 3 – 20.
- [2] Pei G, Gerla M, Chen, T W. Fisheye state routing: A routing scheme for ad hoc wireless networks[A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications* [C]. Los Angeles: IEEE Press, 2000. 1: 70 – 74.
- [3] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks [J]. *Mobile Computing*, 1996, 353: 153 – 181.
- [4] Perkins C E, Royer E M. Ad-hoc on demand distance vector routing[A]. *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* [C]. Menlo Park: IEEE Press, 1999. 90 – 100.
- [5] Liu G, Lee B S, Seet B C, et al. A routing strategy for metropolis vehicular communications[A]. *Proceedings of International Conference on Information Networking* [C]. Busan: Springer, 2004. 134 – 143.
- [6] Santos R A, Edwards A, Edwards R, et al. Performance evaluation of routing protocols in vehicular ad hoc networks[J]. *The International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 2005, 1(1/2): 80 – 91.
- [7] Wang S Y, Lin C C, Hwang Y W, et al. A practical routing protocol for vehicle-formed mobile ad hoc networks on the roads[A]. *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems* [C]. Hsinchu: IEEE Press, 2005. 161 – 165.
- [8] Nambodiri V, Agarwal M, Gao L. A study on the feasibility of mobile gateways for vehicular ad-hoc networks[A]. *Proceedings of the 1st International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks* [C]. Philadelphia: ACM Press, 2004. 66 – 75.
- [9] Naumov V, Baumann R, Gross T. An evaluation of inter-vehicle ad hoc networks based on realistic vehicular traces[A]. *Proceedings of the 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing* [C]. New York: ACM Press, 2006. 108 – 119.
- [10] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks[A]. *Proceedings of the ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking* [C]. Boston: IEEE Press, 2000. 243 – 254.
- [11] Lochert C, Hartenstein H, Tian J, et al. A routing strategy for vehicular ad hoc networks in city environments[A]. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium* [C]. Columbus: IEEE Press, 2003. 156 – 161.
- [12] Seet B C, Liu G, Lee B S, et al. A-STAR: A mobile ad hoc routing strategy for metropolis vehicular communications[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, 3042: 989 – 999.
- [13] Naumov V, Gross T. Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad-hoc networks[A]. *Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications* [C]. Anchorage, Alaska: IEEE Press, 2007. 1919 – 1927.
- [14] Lee K, Le M, Haerri J, et al. Louvre: Landmark overlays for Urban vehicular routing environments [A]. *Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference* [C]. Calgary: IEEE Press, 2008. 1 – 5.
- [15] Giudici F, Pagani E. Spatial and traffic-aware routing (STAR) for vehicular systems[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3726: 77 – 86.
- [16] Jerbi M, Meraihi R, Senouci S M, et al. GyTAR: Improved greedy traffic aware routing protocol for vehicular ad hoc networks in city environments[A]. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks* [C]. Los Angeles: ACM Press, 2006. 88 – 89.
- [17] Lochert C, Mauve M, Füyler H, et al. Geographic routing in city scenarios[J]. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2005, 9(1): 69 – 72.
- [18] Lee K C, Haerri J, Lee U, et al. Enhanced perimeter routing for geographic forwarding protocols in urban vehicular scenarios[A]. *Proceedings of IEEE Globecom Workshops* [C]. Washington: IEEE Press, 2007. 1 – 10.
- [19] Yang Q, Lim A, Li S, et al. ACAR: Adaptive connectivity aware routing protocol for vehicular ad hoc networks[A]. *Proceedings of 17th International Conference on Computer Communications and Networks* [C]. Virgin Islands: IEEE Press, 2008. 1 – 9.
- [20] Blum J, Eskandarian A, Hoffman L. Mobility Management in IVC networks[A]. *Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium* [C]. Columbus: IEEE Press, 2003. 150 – 155.
- [21] Santos R A, Edwards R M, Edwards A. Cluster-based location routing algorithm for inter-vehicle communication[A]. *Proceedings of Vehicular Technology Conference* [C]. Los Angeles: IEEE Press, 2004. 2: 914 – 918.
- [22] Wang Z, Liu L, Zhou M C. A position-based clustering technique for ad hoc inter vehicle communication[J]. *IEEE Trans-*

- actions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 2008, 38(2): 201 – 208.
- [23] Zhao J, Cao G. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks[A]. Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications [C]. Barcelona: IEEE Press, 2006. 1 – 12.
- [24] Ding Y, Wang C, Xiao L. A static-node assisted adaptive routing protocol in vehicular networks[A]. Proceedings of the 4th ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks [C]. Montréal: ACM Press, 2007. 59 – 68.
- [25] Burgess J, Gallagher B, Jensen D, et al. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks[A]. Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications [C]. Barcelona: IEEE Press, 2006. 1 – 11.
- [26] Xu F L, Guo S, Jeong J. Utilizing shared vehicle trajectories for data forwarding in vehicular networks[A]. Proceedings of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications [C]. Shanghai: IEEE Press, 2011. 441 – 445.
- [27] Cheng P C, Weng J T, Tung L C. GeoDTN + NAV: A hybrid geographic and DTN routing with navigation assistance in urban vehicular networks[A]. Proceedings of the 1st International Symposium on Vehicular Computing Systems [C]. Dublin, Ireland: IEEE Press, 2008. 1 – 11.
- [28] Füßler H, Hannes H, Jorg W, et al. Contention-based forwarding for street scenarios[A]. Proceedings of the 1st International Workshop in Intelligent Transportation [C]. Hamburg: IEEE Press, 2004. 155 – 160.
- [29] Lee K C, Lee U, Gerla M. TO-GO: TOpology-assist geo-opportunistic routing in urban vehicular grids[A]. Proceedings of the 6th International Conference Wireless on On-Demand Network Systems and Services [C]. Snowbird, Utah: IEEE Press, 2009. 11 – 18.
- [30] 李元振, 廖建新, 李彤红, 等. 一种基于竞争转发的城市场景车载 Ad Hoc 网络路由算法[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2639 – 2645.
Li Y Z, Liao J X, Li T H, et al. A Contention-based forwarding routing protocol for vehicular ad hoc networks in city scenario[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(12): 2639 – 2645. (in Chinese)
- [31] 李元振, 廖建新, 李彤红, 等. 城市场景车载 Ad Hoc 网络竞争转发关键参数分析[J]. 电子学报, 2011, 38(5): 1154 – 1158.
Li Y Z, Liao J X, Li T H, et al. Analysis of key parameter of contention-based forwarding strategy for vehicular ad hoc networks in city scenarios. [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 38(5): 1154 – 1158. (in Chinese)
- [32] Schnauffer S, Füßler H, Transier M, et al. Unicast Ad-hoc Routing in Vehicular City Scenarios[R]. Mannheim: Department for Mathematics and Computer Science, University of Mannheim, 2007.
- [33] Li X M, Wang J X, Jin X, et al. A framework to analyze the impact of maps on VANET simulation[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(3): 401 – 406.
- [34] Wisitpongphan N, Tonguz O K, Parikh J S, et al. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks[J]. Wireless Communications, 2007, 14(6): 1536 – 1284.
- [35] Korkmaz G, Ekici E, Ozgüner F, et al. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicular communication systems [A]. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Network [C]. Philadelphia: ACM Press, 2004. 76 – 85.
- [36] Korkmaz G, Ekici E, Ozguner F. An efficient fully ad-hoc multi-hop broadcast protocol for inter-vehicular communication systems [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications [C]. Istanbul: IEEE Press, 2006. 423 – 428.
- [37] Osafune T, Lin L, Lenardi M. Multi-hop vehicular broadcast (MHVB) [A]. Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications [C]. Chengdu: IEEE Press, 2006. 757 – 760.
- [38] Mariyasagayam M N, Osafune T, Lenardi M. Enhanced multi-hop vehicular broadcast (MHVB) for active safety applications [A]. Proceedings of the 7th International Conference on ITS Telecommunications [C]. Sophia Antipolis: IEEE Press, 2007. 1 – 6.
- [39] Suriyapaibonwattana K, Pomavalai C. An effective safety alert broadcast algorithm for VANET [A]. Proceedings of International Symposium on Communications and Information Technologies [C]. San Diego: IEEE Press, 2008. 247 – 250.
- [40] Jiang H, Guo H, Chen L. Reliable and efficient alarm message routing in VANET [A]. Proceedings of the 28th International Conference on Distributed Computing Systems Workshops [C]. Beijing: IEEE Press, 2008. 186 – 191.
- [41] Adler C, Eichler S, Kosch T, et al. Self-organized and context-adaptive information diffusion in vehicular ad hoc networks [A]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems [C]. Valencia: IEEE Press, 2006. 307 – 311.
- [42] Durresi M, Durresi A, Barolli L. Emergency broadcast protocol for inter-vehicle communications [A]. Proceedings of the 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems [C]. Fukuoka: IEEE Press, 2005. 2: 402 – 406.
- [43] Maihofer C. A survey of geocast routing protocols [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2004, 6(2): 32 – 42.
- [44] Ko Y B, Vaidya N H. Flooding-based geocasting protocols for mobile ad hoc networks [J]. Mobile Networks and Applications, 2002, 7(6): 471 – 480.
- [45] Ko Y B, Vaidya N H. Geocasting in mobile ad hoc networks:

- location-based multicast algorithms [A]. Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications [C]. New Orleans: IEEE Press, 1999. 1 – 10.
- [46] Stojmenovic I, Ruhlil A P, Lobiyal D K. Voronoi diagram and convex hull based geocasting and routing in wireless networks: Research articles [J]. Journal Wireless Communications & Mobile Computing, 2006, 6(2): 247 – 258.
- [47] Liao W H, Tseng Y C, Lo K L, et al. Geogrid: A geocasting protocol for mobile ad hoc networks based on grid [J]. Journal of Internet Technology, 2000, 1(2): 23 – 32.
- [48] Rahbar H, Naik K, Nayak A. DTSG: Dynamic time-stable geocast routing in vehicular ad hoc networks [A]. Proceedings of the 9th IFIP Annual Mediterranean [C]. Juan Les Pins: IEEE Press, 2010. 1 – 7.
- [49] Yu Q Y, Heijnen G. Abiding geocast for warning message dissemination in vehicular ad hoc networks [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops [C]. Beijing: IEEE Press, 2008. 400 – 404.
- [50] Joshi H P, Sichitiu M, Kihl M. Distributed robust geocast multicast routing for inter-vehicle communication [A]. Proceedings of the 1st Weird Workshop on WiMAX Wireless and Mobility [C]. Coimbra: IEEE Press, 2007. 9 – 21.
- [51] Bachir A, Benslimane A. A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast [A]. Proceedings of IEEE Semianual Vehicular Technology Conference [C]. JeJu: IEEE Press, 2003. 2456 – 2460.
- [52] Kihl M, Sichitiu M L, Joshi H P. Design and evaluation of two geocast protocols for vehicular ad-hoc networks [J]. Journal of Internet Engineering, 2008, 2(1): 127 – 135.
- [53] Maihofer C, Eberhardt R, Schoch E. CGGC: Cached greedy geocast [A]. Proceedings of the 2nd International Conference Wired/Wireless Internet Communications [C]. Frankfurt: Springer, 2004. 13 – 24.
- [54] Ko Y B, Vaidya N H. GeoTORA: A protocol for geocasting in mobile ad hoc networks [A]. Proceedings of International Conference on Network Protocols [C]. Osaka: IEEE Press, 2000. 240 – 250.
- [55] Zhang G Q, Chen W, Xu Z, et al. Geocast routing in urban vehicular ad hoc networks [J]. Studies in Computational Intelligence, 2009, 208: 23 – 31.
- [56] Wu Z, Yang Y, Guo X, et al. Analysis of collision probability in IEEE 802.11 based VANETs [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 19(1E): 187 – 190.
- [57] 李昕, 李 ■. 基于 MANET 接入 Internet 的动态网关布局与选取规划模型 [J]. 电子学报, 2009, 37(4): 726 – 732.
Li X, Li Z. A new programming model for placement and selection of dynamic gateways based on MANET accessing internet [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 726 – 732. (in Chinese)
- [58] 李昕, 李 ■. 基于网关信息素更新的 MANET 接入 Internet 开销控制方法 [J]. 电子学报, 2010, 38(4): 870 – 874.
Li X, Li Z. Overhead reducing method for MANET accessing internet based on gateway pheromone update [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 870 – 874. (in Chinese)

作者简介



于海宁 男, 1983 年生于黑龙江省萝北县。现为哈尔滨工业大学计算机网络与信息安全研究中心博士生。主要研究方向为车载无线网络, 物联网体系结构等。

E-mail: yuhaining83@gmail.com



张宏莉 女, 1973 生, 吉林榆树人。博士, 教授, 博士生导师, 国家计算机信息内容安全重点实验室副主任, 计算机网络与信息安全技术研究中心副主任, 信息产业部十一五科技规划组专家。主要研究方向: 网络与信息安全、网络测量与建模、网络计算、并行处理等。

E-mail: zhanghongli@hit.edu.cn