

车用自组网信息广播^{*}

李丽君¹⁺, 刘鸿飞^{2,3}, 杨祖元², 葛利嘉^{2,3}, 黄席樾²

¹(重庆理工大学 光电信息学院,重庆 400050)

²(重庆大学 自动化学院,重庆 400044)

³(重庆通信学院 军事信息工程系,重庆 400035)

Broadcasting Methods in Vehicular Ad Hoc Networks

LI Li-Jun¹⁺, LIU Hong-Fei^{2,3}, YANG Zu-Yuan², GE Li-Jia^{2,3}, HUANG Xi-Yue²

¹(School of Opt-Electronic Information, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China)

²(Automation Academy, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

³(Department of Information Engineering, Chongqing Communication College, Chongqing 400035, China)

+ Corresponding author: E-mail: cqtxxy123@126.com

Li LJ, Liu HF, Yang ZY, Ge LJ, Huang XY. Broadcasting methods in vehicular ad hoc networks. *Journal of Software*, 2010,21(7):1620-1634. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/3845.htm>

Abstract: As an application of mobile ad hoc networks (MANET) on Intelligent Transportation Information System, the most important goal of vehicular ad hoc networks (VANET) is to reduce the high number of accidents and fatal consequences dramatically. One of the most important factors that would contribute to the realization of this goal is the design of effective broadcast protocols. This paper introduces the characteristics and application fields of VANET briefly. Then, it discusses the characteristics, performance, and application areas with analysis and comparison of various categories of broadcast protocols in VANET. According to the characteristic of VANET and its application requirement, the paper proposes the ideas and breakthrough direction of information broadcast model design of inter-vehicle communication.

Key words: vehicular ad hoc network; single and multi-hop broadcast; scalability; robustness

摘要: 车用自组网作为移动自组网在智能交通系统中的应用,有望为人们提供更安全、效率更高的旅行方式.广播协议为危险警告、协同驾驶、路况通报等交通信息的发布提供了有效途径.简要介绍了车用自组网的特点和应用分类.采用分析和比较方法,讨论各种信息广播协议的特点、性能差异和应用范围,并针对车用自组网的特点及应用需求指出未来信息广播模型的设计思想和突破方向.

关键词: 车用自组网;单跳和多跳广播;可扩展性;鲁棒性

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60573001 (国家自然科学基金); the Natural Science Foundation of Chongqing of China under Grant Nos.CSTC2008BB2295, CSTC2008BB2324, CSTC2007BA2017 (重庆市自然科学基金); the Science Research Project of Chongqing Municipal Education of China under Grant No.KJ090611 (重庆市教委科研项目)

Received 2008-11-05; Accepted 2010-03-01

当前,交通运输安全和效率成为全球关注的“焦点”,交通事故因其极强的“杀伤力”被称为“世界头号杀手”^[1]。车用自组网(vehicular ad hoc networks,简称 VANET)作为未来智能交通系统(intelligent transportation system,简称 ITS)的核心部分,通过车辆节点(简称节点)之间或节点与路边站(road-side unit,简称 RSU)之间自组无线多跳通信,可为司机提供实时紧急交通信息和交通诱导信息,以扩展司机的视野与车辆部件功能,在降低交通事故、实施紧急救援、减轻交通拥堵、提高交通效率以及为驾乘人员提供多种服务信息方面(天气、交通流量、办公或娱乐等信息),具有其他无线或有线网络不可替代的优势。

近年来,VANET 已经引起世界各国政府、研究机构和学者的密切关注^[2-13]。2003年,美国联邦通信委员会专门为车辆间通信分配了 75MHz 带宽的专用频段^[5]。2004年,IEEE 基于 IEEE Standard 802.11 协议提出车辆间无线接入方案(wireless access in vehicular environments (WAVE) Draft1.0)^[6]。2005年,欧洲成立车辆间通信联盟(Car2Car communication consortium)^[7],日本也通过了车辆间通信标准 Internet ITS^[8]。主要研究项目有欧洲多国合作开展的 FleeNet^[9],CarTalk2000^[10],NOW^[11],日本的 Group Cooperative Driving^[12],美国的 TrafficView^[13]等。同时,学术机构也纷纷举办专刊和会议,为研究人员提供交流平台。例如,IEEE 每年主办的 Vehicular Technology Conf.(VTC),Intelligent Vehicles Symp.(IV),Intelligent Transportation Systems(ITS),Intelligent Transportation Systems Communication(ITSC)等,ACM 主办的 Vehicular Ad Hoc Networks(VANET)等。

在移动自组网(mobility ad hoc networks,简称 MANET)中,广播协议主要作为网络交换控制信息(beacon information)的一种有效方式,应用信息传输多采用点到点的单播及点到多点的组播协议。但是,由于 VANET 应用的特殊性,信息接收节点一般以组为单位,具有随机性和不确定性。在这种信息需求模式下,广播协议就成为 VANET 传输各种交通信息最有效的方式之一^[14]。

近年来,各国学者对 MANET 的信息广播模型与方法进行了广泛研究,但是,由于 VANET 特殊的网络环境 and 应用需求,基于 VANET 的信息广播模型研究更具有挑战性和创新性。一方面,在 VANET 中,地理信息、节点运动规律等都可以通过一定方法和途径获得,这些因素对设计实时性强、可靠性高、资源优化的广播协议提供了 MANET 不可比拟的优势;但另一方面,VANET 网络拓扑的大规模、高动态变化以及无线自组网固有的隐藏/暴露节点问题又为设计具有较强可扩展性和鲁棒性的广播协议带来巨大的困难和严峻的挑战^[15]。

本文首先简要介绍 VANET 基本特征及交通信息广播分发所面临的问题,然后详细分析、比较近年来具有代表性的 VANET 信息广播模型与方法的基本思想、特点以及存在的问题,最后结合 VANET 特征与应用需求,提出 VANET 信息广播模型设计目标和设计要素。

1 车用自组网基本特征

虽然车用自组网和移动自组网都具有自组性、多跳性、无中心等特征,都存在一般无线网络所固有的隐藏/暴露节点、信道捕获等问题,但是由于车用自组网的拓扑结构与道路布局、车辆节点分布/运动、环境等因素密切相关,因此车用自组网还具有以下特征:

(1) 网络拓扑的高动态性及节点运动规律的可预测性

由于节点高速移动(速率大致在 5m/s~42m/s 之间),导致网络拓扑结构高动态变化,链路寿命短。例如,在平均速率为 100Km/h 的道路上,当节点的信号有效半径为 250m 时,链路存在 15s 的概率仅为 57%^[16]。虽然节点快速移动,但由于受道路和前方车辆运动状态的约束,其位置、运动方向和速率均是可以预测的。

(2) 节点的信息获取和处理能力较强

对 MANET,能量和设备性能约束是设计有效通信协议需要考虑的关键因素。但是,车用自组网几乎不受能量和设备限制。车辆可以为通信设备提供持续电源,其配备的 GPS 能够为节点提供精确定位和精准时钟信息,利于获取自身位置信息和时钟同步,配置的计算机处理设备具有较强的信息缓存和处理能力。

(3) 网络的开放性及节点之间的关联性

在 MANET 中,节点数量有限并且保持相对稳定;但是对于 VANET 而言,大量节点频繁加入或离开网络(例如,由于车辆进入路边停车位停止工作,这样车辆将暂时从网络中消失,或者不断有新的车辆重新启动加入网

络),因此开放性也是 VANET 的基本特征.同时,相邻车辆之间的运动紧密相关,因此大部分文献都假设车辆进入道路时服从泊松分布,而车辆之间的相对距离服从指数分布.

(4) 网络拓扑的非均衡性

由于节点受道路以及交通状况约束,网络中同一路段的不同时段或同一时段的不同路段,节点密度差别极大,形成典型的稀疏和稠密模式,并且这两种模式相互转换迅速.同时,网络还会存在大量网络分割区域,在一定时间内可能形成“信息孤岛”^[17]效应.

(5) 无线信道质量不稳定性

无线链路是开放的有损介质,存在多径衰落、阴影效应,加之 VANET 选用开放频段,使得无线网络误码率较高^[16].节点高速移动及建筑物遮挡也对无线信道造成严重影响,很难保证信息传输的可靠性.

2 移动自组网广播研究

在 MANET 中,信息最简单的分发方式是泛洪广播(flooding broadcasting)^[18].任何节点在接收到新的广播信息后均将其向传输范围内的邻居节点转发,同时丢弃已经接收过的广播信息.虽然该方式可尽力保证广播信息发送到网络中的每个节点,但仍然存在如下问题:第一,由于无线传播是全方向的,大量地理位置同时被多个节点的信号覆盖,使得节点可能收到多个内容相同的广播信息,从而产生大量冗余,形成“广播风暴(broadcast storm)”^[19];第二,由于相邻节点间转发广播信息的时间选择高度相关,存在严重的信道争抢和碰撞;第三,大量隐藏/暴露节点的存在,很难保证广播信息的可靠分发.

因此,如何抑制过多冗余广播信息,协调节点间有序竞争,是设计有效广播模型的基本要求^[19].针对这些要求,诸多文献从不同角度提出了一系列广播协议. Williams B^[20]将其概括为基于邻居节点信息的优化泛洪广播、基于概率预测的优化泛洪广播以及基于区域的优化泛洪广播等.

基于邻居节点信息的优化泛洪广播^[21,22]可以提高信息传输的可靠性和实时性,但每个节点均需获得至少一跳邻居节点信息,因此协议的开销较大,并且收敛速度慢,不适宜于高动态变化网络.

基于概率预测的优化泛洪广播和基于区域的优化泛洪广播分别以基于概率的广播^[23]、基于距离的广播和基于位置的广播协议为代表^[24],节点对网络拓扑结构具有免疫性.但由于需要设置不同的门限参数(延迟发送时间或者节点转发概率),因此,如何适应动态变化网络拓扑也是这两类广播需要解决的关键问题.

虽然车用自组网和移动自组网都具有自组性、多跳性、分布式等特征,但是由于车用自组网的拓扑结构与道路布局、节点运动规律、天气状况等因素密切相关,节点及驾乘人员对信息的需求与 MANET 有本质的差别,MANET 的广播模型和方法并不能满足驾乘人员对交通信息的需求,因此迫切需要研究适应于车用自组网的广播模型和协议^[15].

3 车用自组网信息广播面临的挑战

有效的 VANET 信息广播协议应该满足驾乘人员对各种交通信息的服务质量(quality of service,简称 QoS)需求,提高旅途的安全性、舒适性和快捷高效性.这就要求广播信息具有较高的实时性、可靠性、可达性和资源利用效率.同时,为了能够在不同条件下为不同应用需求的广播信息提供差别化服务,广播协议还应具有较强的可扩展性和鲁棒性.但是,IEEE 802.11 的固有缺陷以及 VANET 独特的应用环境,为设计有效的 VANET 信息广播模型与方法提出了严峻的挑战.

3.1 IEEE 802.11 MAC 协议

IEEE 802.11 作为 VANET 的协议基础,在介质访问控制层(media access control,简称 MAC)采用两次握手(request to sending/clear to sending,简称 RTS/CTS)、确认机制和竞争窗口自适应调节机制实现点到点的可靠通信.但在信息广播过程中,如何利用 MAC 协议保证信息可靠分发是需要解决的关键问题^[25].

由于广播信息没有指定的接收节点,因此无法采用 RTS/CTS 来抑制隐藏/暴露节点对信道的竞争和干扰,

也不能采用确认机制.因此,广播节点无法获知信息分发的效果,也无法判断网络实际负载状况,不能根据网络负载状态和信道质量自适应地调整竞争窗口,以避免大量相邻节点集中和过度竞争无线信道.文献[26]仿真研究证明,在饱和吞吐量条件下,广播信息在 100m 处的可靠接收率只有 20%.其主要原因就在于,高负载状态下,大量节点都无法自动调整退避窗口,而是盲目竞争信道,从而导致相互干扰.

3.2 车用自组网对信息广播的挑战

VANET 作为特殊的移动自组网,节点高速移动导致网络拓扑频繁、大规模变化,网络拓扑呈现典型的非均匀分布.同时,无线链路是开放的有损介质,存在多径衰落、阴影效应,对无线信道质量造成了严重影响.因此,VANET 的这些典型特征很难保证交通信息传输的实时性、可靠性和可达性.

3.3 广播协议的可扩展性和鲁棒性

在研究 VANET 广播协议时,一般都假设节点通过配备的 GPS 获得有效位置信息.但在实际的车用自组网中,GPS 是一个逐渐普及的过程,因此应考虑协议的鲁棒性.另外,网络广播的信息不只是紧急危险警告等实时性强的应用,还包括交通诱导等其他信息的广播,这些信息对 QoS(实时性、可靠性、区域性等)需求差别较大.因此,基于 VANET 的基本特征和多种类、多层次应用需求,广播协议需要具有较强的可扩展性、鲁棒性和公平性.

综上所述,适应 VANET 基本特征、满足驾乘人员需求的交通信息广播协议需要具备以下条件:(1) 支持节点的高速移动;(2) 保证信息分发的实时性、可靠性和可达性;(3) 具有较高的资源利用率;(4) 适应无线网络恶劣信道环境;(5) 具有较强的可扩展性和鲁棒性;(6) 为多种应用信息提供资源公平共享机会.由于影响交通信息广播分发 QoS 需求的因素多而杂,因此在提出适应 VANET 特征和应用需求的广播模型与方法之前,必须以理论研究为基础,深入分析影响广播性能的各种因素,尤其是 VANET 网络拓扑高动态变化特征对广播性能的影响.

4 车用自组网广播研究

基于 VANET 的广播协议按信息传输跳数可分为单跳和多跳广播,如图 1 所示.单跳广播主要是为邻居节点提供各种紧急交通信息,以提醒邻居车辆应对可能的危险状况;多跳广播可以为驾乘人员提供各种交通诱导信息,实现危险预警、拥堵疏导、事故救援、交管部门宏观调控等应用.本节将分别对危险交通信息单跳广播和交通诱导信息多跳广播研究动态进行分析比较.

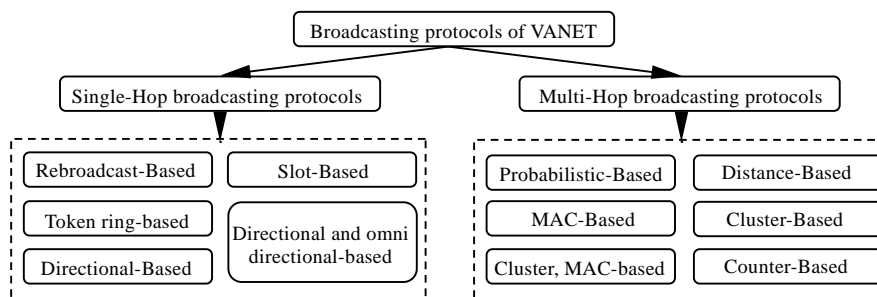


Fig.1 Broadcasting protocols of vehicular ad hoc networks: A taxonomy

图 1 车用自组网信息广播协议分类

4.1 车用自组网单跳广播

IEEE 802.11 单跳广播作为 MANET 的一种简单、有效的信息分发方式,邻居节点只需接收信息,可减少网络中的广播信息量,提高资源利用率,在交通运输安全中起着重要作用.通过单跳广播就可能为危险区域内的车辆提供危险警告、协同驾驶等优先级高、实时性强的交通信息,提醒司机紧急避险或采取合适的驾驶行为,以最大限度地避免追尾和连环碰撞事故的发生.

虽然单跳广播的主要目标是为邻居节点提供实时性好、可靠性高的信息,要求能够合理配置稀缺的无线资源.但是,由于节点的高速移动性,网络分布式以及 IEEE 802.11 的 MAC 层在信息广播分发方面存在的固有缺陷,很难保证司机获得实时、可靠的交通信息.因此,单跳广播模型需要解决交通信息分发的可靠性、实时性以及资源利用效率问题.文献[27-39]对单跳广播进行了全面研究,提出了多种邻居广播协议.根据单跳广播的发布机制,本文将单跳广播分为重复性广播、基于令牌环广播、基于时隙分配广播和定向广播.

4.1.1 重复性广播

为提高单跳广播的可靠性,保证邻居节点都能够正确接收到广播信息,文献[27-29]提出了重复广播协议.该协议主要针对进入某一危险区域内的车辆发布警告信息,通过连续不断的信息广播,提高各个邻居节点成功接收信息的概率.

Xu^[27]针对广播可靠性不能通过每个接收节点返回 ACK 加以确认的问题,提出信息重复广播协议(每隔一定时间 T 的 1-坚持 CSMA 或者以平均时间 T 的 p -坚持概率发送^[4]),以提高节点接收广播信息的成功率.但是,该协议以极大的资源消耗为代价,抑制了其他交通信息在网络中的传输.同时,当危险区域内有多个节点同时发布警告信息时,会导致大量的竞争和碰撞,因此可靠性没有得到实质性改善.

Yang 等人^[28]针对交通信息时效特征,提出一种单跳车辆碰撞警告协议(vehicular collision warning communication,简称 VCWC).其基本思想是:在初始阶段,危险警告信息以较高频率不断重复广播;之后,广播频率乘性降低,以迅速减少广播信息量.该协议可以提高邻居节点接收广播信息的成功率,但与文献[27]相同,当危险区域内有多个节点同时需要广播警告信息时,会导致大量的竞争和碰撞,同时网络资源利用率较差.

文献[29]提出了一种可靠性高、能够为不同交通信息提供优先级服务的单跳广播协议.每个需要广播信息的节点通过对最近一段时间接收到的广播信息序列号进行分析,粗略估计出网络负载条件以及邻居节点数,从而动态调整不同优先级广播信息的竞争窗口、传输速率和传输功率.当统计出接收的广播信息丢失率大于某一个门限值 r 时,则判断网络处于拥塞状态,此时发送的广播信息可靠性将会降低,因此增大竞争窗口以延迟发送.当检测出网络负载较轻时,则减小竞争窗口,在保证传输可靠性的同时减小优先级广播信息等待时间.该协议的优点是提高了广播信息可靠性和资源利用率,同时能够保证紧急交通信息的实时性传输;但在不同网络节点密度下选择合适的门限值 r 以调节竞争窗口,是该类广播协议需要解决的关键问题.

4.1.2 基于时隙分配广播

针对 VANET 分布式导致节点间无序竞争问题,Borgonovo^[31]基于 R-ALOHA^[32]提出一种信道预约式的同步 MAC 协议(reliable reservation ALOHA,简称 RR-ALOHA),每个节点通过周期性广播帧信息(frame information,简称 FI)协调邻居节点竞争信道.当有节点加入时,先侦听 FI,然后选择一个空闲时隙发送一个分组来预约这个时隙.如果邻居节点正确接收到该分组,则在相应的 FI 中标示出来.当新加入的节点在一个完整的 FI 内收到所有邻居节点的确认分组时,即认为预约成功,新节点就将该时隙作为它的基本信道(base channel,简称 BC),直到节点离开网络.在这期间,其他节点不能访问该时隙.其中,BC 用于发送 FI、其他信令信息和应用信息.在每一帧中,节点只能在自己的 BC 中发送 FI 信息,并根据邻居节点的 FI 和自己的信道使用情况及时更新 FI 信息.如果 BC 信道提供的带宽不能满足业务需求,节点可通过预约附加信道方式占用其他空闲信道.如果是点对点通信,节点还可以预约点对点(point-to-point,简称 P2P)信道进行发送,以提高信道利用率.

赵华等人^[33]提出一种与 RR-ALOHA 类似的广播协议(concentrative competition R-ALOHA,简称 CCR-ALOHA).该协议采取竞争与预约相结合的分配方式,并将用于预约的控制时隙和业务时隙相分离,能够提供可靠的单跳广播信道和高效的多跳广播服务,平均分组时延较小,具有较好的可扩展性.

CSMA 和 RR-ALOHA 作为自组网采用的两种 MAC 协议^[1],CSMA 属于异步竞争式模式,RR-ALOHA 则是基于时隙的同步预约模式.针对车用自组网的特殊性,RR-ALOHA 更适合车用自组网的信息广播和单播.其优点是信道利用率较高,解决了隐藏/暴露节点对信道的干扰.但是 RR-ALOHA 存在的问题是,该协议要求每个需要传输信息的节点都必须占用帧中的一个时隙作为基本信道,因此一帧中所包含的时隙个数必须大于或等于节点的个数.对于高节点密度的路段,帧的长度会相应增加,从而对协议支持实时业务,尤其是广播的实时业务

造成困难.并且每个节点需要维护两跳邻居集合,不适应高动态变化网络的需求,协议的可扩展性也较差,需要对传统的 MAC 协议作较大的修改.

4.1.3 基于令牌环广播

除了基于 CSMA 和时隙类的 MAC 协议外,还有基于非竞争令牌环的 MAC 广播协议,如 WTRP(wireless token ring protocol)协议^[34]和 RNB(reliable neighbor broadcast)协议^[35].其基本方法是,在广播信道上,通过令牌构成逻辑环控制信道接入.文献[35]基于令牌环提出一种可靠邻居广播协议,一定范围内的邻居节点组成虚拟组,组内共享一个令牌,令牌拥有节点在向下一个节点递交的令牌中携带节点在上一个令牌之后接收到的广播信息序列,以便向广播节点确认已收到的广播信息,如图 2 所示.设节点 A,B,C 构成广播信息接收组,3 个节点组成逻辑令牌环,令牌传递顺序为 A-B-C-A,节点 1、节点 2 为信息广播节点.设某时刻节点 B 为令牌拥有者,则节点 B 将接收到的广播信息序列号(1.1,1.2,2.2)捎带在令牌中,节点 2 收到令牌控制信息后对比已发送的广播信息序列号(2.1,2.2),发现节点 A 没有收到广播信息(2.1),则节点 2 重新发送广播信息(2.1).

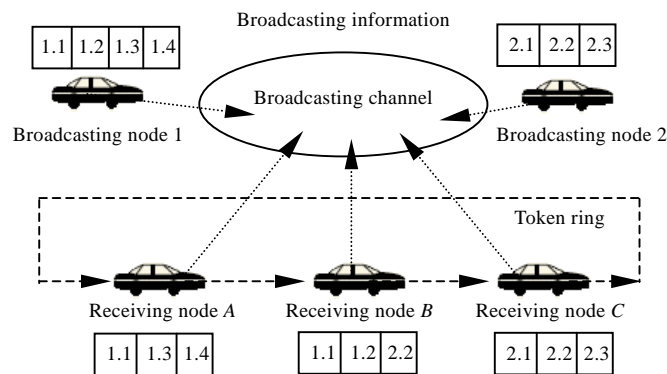


Fig.2 Broadcast protocol based on token ring

图 2 基于令牌环的广播协议

广播节点利用接收节点间有序确认,并利用重传策略确保所有邻居节点收到广播信息,提高了信息广播分发的可靠性.但是,RNB 没有解决广播节点之间的竞争问题.同时,由于某一接收节点需要的紧急信息可能由于没有令牌而迟迟不能向广播节点发送确认信息,降低了紧急警告信息的实时性.另外,其他接收节点可能多次重复接收到同一广播节点发送的广播信息,导致资源利用率降低.

文献[36]针对高速环境中紧急警告信息在危险区域内的可靠分发以及 RNB^[35]不能保证交通信息实时分发问题,提出了基于令牌环单跳广播协议(overlay token ring protocol,简称 OTRP).将广播节点纳入到令牌环中,利用正常和紧急两种模式(normal model,emergency model)分发广播信息.正常模式下,每个节点只有在拥有令牌时才能发送低优先级交通信息,其他时候都处于等待状态.当某一节点需要发送高优先级广播信息但却没有令牌时,则通过发送控制帧提前获取令牌,保证高优先级信息的实时发送.该协议不仅可以提高信息广播分发的可靠性和资源利用率,同时还能保证紧急警告信息广播的实时性.但是,在网络拓扑高动态变化的 VANET 中,大量节点不断加入或离开令牌组,导致令牌环协议鲁棒性较差,可扩展性不强.

4.1.4 基于定向天线的 MAC 层广播

Yadumurthy^[37]针对高速公路上危险区域的方向性(即道路上的危险警告等信息仅对其后面一定区域内的车辆带来潜在威胁,只需将这类信息定向广播就能为危险区域内的车辆提供警告服务),提出定向与全向相结合的广播协议(directional MAC protocol,简称 DMAC).该协议不但可以提高信息分发的可靠性,同时资源利用率较高.但是,该协议没有解决隐藏/暴露节点对广播节点的影响.

通过对上述单跳广播协议的分析,各类单跳广播协议特点及存在的问题见表 1.我们认为,如何在不同环境中兼顾广播协议的可靠性、实时性、资源利用率等性能是单跳广播在智能交通中应用的关键.

Table 1 Analysis and comparison of single-hop broadcast protocols

表 1 单跳广播协议的分析和比较

Protocol	Main scheme	Latency	Reliability	Storage overhead	Resource utilization	Algorithm complexity
VCWC ^[28]	Rebroadcast-Based	Low	Moderate	No need	Rather low	Simple
RR-ALOHA ^[31]	Slot-Based	Moderate	Moderate	2-hop neighbor	High	Complexity
RNB ^[35]	Token ring-based	High	Moderate	1-hop neighbor	High	Complexity
DMAC ^[37]	Directional-Based	Low	Rather low	No need	Rather low	Simple

4.2 车用自组网多跳广播

车用自组网单跳广播虽然能够将紧急交通信息在一定区域内进行分发,但还不能满足驾乘人员对各种交通信息的需求^[38,39].VANET 多跳广播通过广播信息中继可为更大范围内的节点提供交通信息,但多跳广播不仅需要处理单跳广播面临的可靠性、实时性问题,更需要解决资源优化和协议的可扩展性和鲁棒性问题.

许多学者基于 MANET 多跳广播的基本思想,提出了多种广播协议^[40-67].按照是否需要获取邻居节点信息可分为有状态(state)广播和无状态(stateless)广播,按照中继节点选择方式可分为基于概率的广播、基于距离的广播、基于 MAC 层的广播和基于计数的广播等.

4.2.1 基于概率的多跳广播

当节点收到广播信息时,立即或等待一定时隙后以概率 p 转发广播信息,以概率 $1-p$ 丢弃广播信息.简单泛洪中,节点总是以概率 1 转发或丢弃广播信息,因此,基于概率的广播属于简单泛洪的改进.主要分为加权 p -坚持协议、时隙 1-坚持协议和时隙 p -坚持协议,如图 3 所示,EV 为紧急交通信息广播节点.

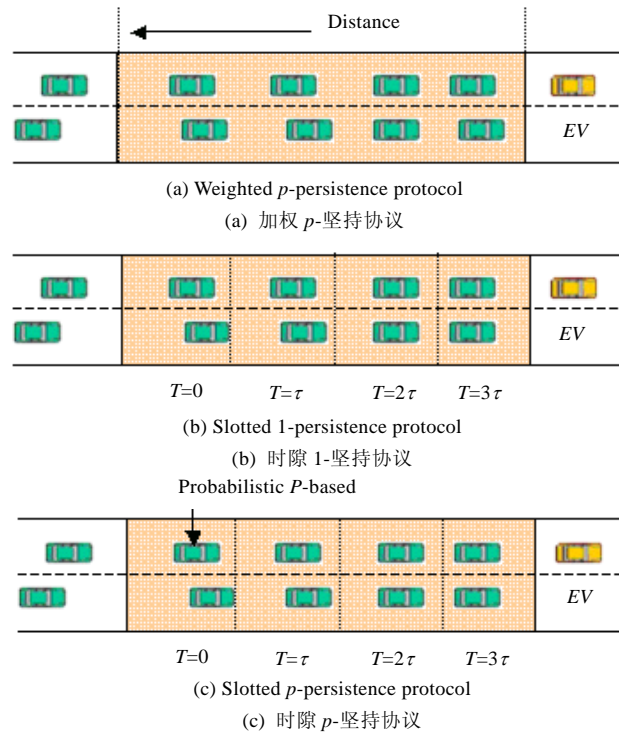


Fig.3 Analysis and comparison of probabilistic broadcast protocol

图 3 基于概率的广播协议的分析和比较

加权 p -坚持概率广播协议以文献[40]提出的分布式车辆广播(distributed vehicular broadcast,简称 DV-CAST)为代表,如图 3(a)所示.每个节点通过周期性“Hello”报文获得两跳邻居信息,以估计局部路段上的节点密

度,从而动态调节转发广播信息概率.文献[40,41]的理论分析和仿真结果均表明,基于节点密度的动态概率协议能够在稀疏和稠密模式下提供较好的信息可达率,但没有解决隐藏/暴露节点对信息可靠性的影响.并且,节点需要维护两跳邻居节点信息,在高动态变化网络中开销较大.

Kim^[42]以距离为权重因子,为节点设置不同的等待时隙.距离与等待时隙数成反比,距离越远,节点等待的时隙数就越少.当节点等待时隙结束时,就以 1-坚持协议转发广播信息,如图 3(b)所示.该协议能够保证距离较远节点获得更大的转发权,但在高节点密度状态下,与广播节点距离相当的节点可能有多个.这些节点同时转发广播信息将引起严重的碰撞和竞争,导致广播可靠性降低.针对该问题,Nekovee^[44]提出一种动态时隙 p -坚持的广播协议.当节点接收到广播信息后,根据与广播节点间的距离计算等待时间,距离越远,等待时间越短.当等待时间结束后,节点以概率 p 转发广播信息.该协议与文献[42]都需要维护邻居节点信息.

文献[43]为解决高节点密度状态下距离相同节点间的竞争问题,提出基于概率的时隙 p -坚持广播协议,以减小相邻节点间的竞争,如图 3(c)所示.但在这种情况下,非最远节点可能提前转发广播信息,不能保证最远节点一定能够获得转发权,增加了广播中继跳数.

Wisitpongphan^[45]对上述 3 种基于概率的广播协议性能的分析、比较表明,时隙 p -坚持协议在可靠性和资源利用率方面均好于时隙 1-坚持协议和加权 p -坚持协议.但在高节点密度情况下,时隙 p -坚持协议由于可能选择非最远节点作为信息中继节点,增加了信息传输时延.3 种协议都未能解决隐藏/暴露节点对广播信息可靠分发的影响问题.

4.2.2 基于距离的多跳广播

基于距离的多跳广播通过选择距离广播节点更远的节点转发广播信息,减少广播传输过程中的跳数,降低广播信息的传输时延,减少冗余广播信息,提高资源利用率.接收节点首先通过信号强度或者 GPS 计算自己与广播节点间的距离,然后利用公式(1)计算等待转发时间 $d(t)$.当等待时间结束时,如果还没有收到相同的广播信息,节点就立即转发该信息.

$$d(t) = WT[(R^k - D_{sd}^k) / R^k] \quad (1)$$

其中, WT 表示节点的最大等待时间, R 表示节点信号的有效范围, D_{sd} 表示信息发送节点与接收节点间的距离, k 为调节因子.

Durresi 等人^[46]针对高速环境提出基于距离的延迟广播协议,接收节点根据与广播节点间的距离插入延迟时间片,距离与延迟时间成反比,以确定接收节点转发广播信息的时间,减少了冗余广播信息量.但是,该协议没有解决高节点密度路段中大量与距离节点间的竞争问题^[42],不能保证信息传输的可靠性.同时,网络分割造成的“信息孤岛”也不能保证区域内的所有节点能及时接收到该信息.

虞强源^[47]为增强高速公路上交通信息广播的可靠性,首先利用广播节点与接收节点间的关系动态地调节接收节点转发广播信息的等待时间,以适应不同的网络节点密度.并充分利用相邻车辆之间同向与反向关系,通过反向车辆存储-转发(carry-forward)策略解决网络分割导致的信息不可达问题.该协议的最大优点是能够适应不同的网络环境,提高信息广播的可靠性,较好地抑制冗余广播信息量.

Osafune^[48]也提出一种基于距离的多跳广播协议(multi-hop vehicular broadcast,简称 MHVB).广播源节点为交通信息设置有效传输范围 B ,当节点接收到广播信息时,判断与信息源间的距离是否大于 B :如果大于 B ,则认为信息失效,就丢弃该广播信息.为适应不同网络状态下的信息广播,每个节点需要维护邻居列表,通过检测接收到的广播信息量、其前后的节点数及移动速率,动态调整每个节点的推迟转发时间.Mariyasagayam 等人在后续研究中^[49]利用定向广播的优点限制广播信息的传播方向,进一步减小广播冗余信息对资源的消耗.

虽然基于距离的广播协议^[46-49]比较简单,不需要对标准协议进行修改,可自适应不同网络节点的密度,优化资源配置,但无论是采用定向广播还是区域广播,都没有改善相邻节点间的无序竞争,也没有解决隐藏/暴露节点对信道的干扰问题,可靠性较差.针对该问题,文献[50]提出了基于距离的定向重复广播协议.当一个节点接收到广播信息之后,基于距离设置一个等待时间 $d(t)$,并开始侦听其他节点传输的信息.当等待时间结束时,该节点立即向广播节点发送 ACK,其他接收到 ACK 的邻居节点保持沉默,等待该节点广播信息.这种机制可减小隐藏/

暴露节点对广播信道的干扰,当广播节点在 WT 内没有收到邻居节点的 ACK 信息或者相同的广播信息时,则认为广播传输失败或者周围没有邻居节点(网络处于分割或者稀疏模式状态).因此,广播节点每隔 $10WT$ 就重复广播该信息,直到收到其他节点的 ACK 信息.该协议通过重复广播以提高可靠性,通过 ACK 减少竞争碰撞和隐藏节点的干扰,但这种重复广播以过多的资源消耗为代价,可扩展性需要进一步提高.

4.2.3 基于 MAC 的多跳广播

针对 IEEE 802.11 的 MAC 不支持可靠广播问题,许多学者^[51-57]结合基于距离的多跳广播,通过将接收节点与广播节点之间的距离与 MAC 竞争窗口和退避时隙相结合,提出了多种基于 MAC 的广播协议.

最具代表性的是 Korkmaz^[51,52]提出的城市多跳广播协议(urban multi-hop broadcast,简称 UMB).该协议突出的特点就是提出了一种类似 RTS/CTS 的信息广播迭代握手机制(request to broadcast/clear to broadcast,简称 RTB/CTB),将广播接收节点的不确定性转换为广播节点与最远节点之间的点对点通信,并利用 ACK 确认机制提高信息传输的可靠性.介于源节点与目标接收节点之间的其他节点将同时获得可靠的广播信息.RTB/CTB 握手机制和广播协议如图 4 所示,可分为 6 个步骤:(1) 在发送广播信息之前,为选择更远的节点作为点到点通信的目标节点,广播节点首先发送 RTB 信息,该信息包括了广播节点的位置;(2) 收到 RTB 信息的节点计算到达广播节点的距离,通过距离的远近设置长度不一的信道占用信息(black-burst),距离越远,black-burst 的长度越长;(3) 接收节点发送 black-burst 结束后,继续检测信道,如果信道处于空闲状态,则说明该节点距离广播节点最远,再等待 CTB Time 之后向广播节点发送 CTB 以请求广播节点广播信息;(4) 如果广播节点探测到有 CTB 发生碰撞,则广播节点开始下一轮最远节点的查找;(5) 当广播节点确定了最远节点作为接收节点时,两者之间建立点对点的信息传输模式,并开始向该节点发送广播信息;(6) 目标节点接收到正确的广播信息后向广播节点返回 ACK 确认帧,同时,目标节点自动成为广播中继节点.

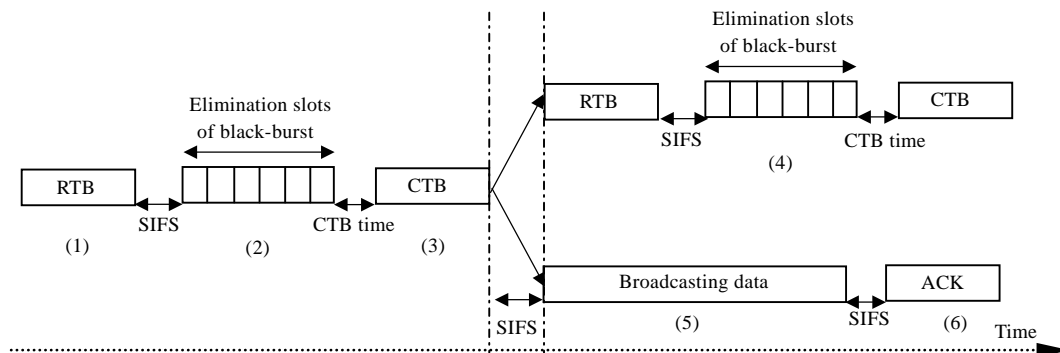


Fig.4 RTB/CTB broadcast protocol

图 4 RTB/CTB 信息广播机制

UMB 的优点是信息广播的可靠性高,网络中冗余信息量小.但该协议也存在如下问题:(1) 由于 UMB 需要通过 RTB/CTB 选择中继节点,在密度较大路段上其迭代过程不易收敛,导致时延和开销较大,特别是在高密度路段,这种机制可能导致网络吞吐量严重下降;(2) RTB/CTB 也不能适应车辆网络高动态的特征,迅速变化的拓扑结构将导致选择的目标节点次优化;(3) 需要对 MAC 层的相关协议作较大修改,因此协议的可扩展性不强.

针对 UMB 存在的问题,文献[53,54]对 UMB 的 RTB/CTB 迭代过程进行了简化,将广播节点覆盖的区域等距离分段为 N 段,第 r 段中的节点竞争窗口设置如公式(2)所示:

$$W_r = \{(r-1)cw, (r-1)cw + 1, \dots, rcw - 1\}, r = 2 \dots N \quad (2)$$

其中,文献[53]设置不同路段上的竞争窗口不相互重叠,以保证更远节点一定比其他节点优先获得与广播节点握手的机会.而文献[54]中每段道路上节点选择的竞争窗口由于有相互重叠部分,因此很难保证距离最远节点一定能够获得与广播节点进行点到点握手的机会,从而导致更多的碰撞和次优化.文献[55]对这两种广播协议

性能的对比分析表明,文献[53]的信道利用率和可靠性均高于文献[54].Mostafa^[56]同样利用 UMB 的 RTB/CTB 广播握手机制选择最远的节点作为点到点的信息接收和中继者,距离不同的节点其帧间间隔(inter-frame space, 简称 IFS)不同,距离越远的节点其 IFS 越小,接入信道,向广播节点发送 CTB 的机会就越大.但上述 3 个协议都没有解决高密度路段中相邻节点间竞争的问题.

为避免 RTB/CTB 握手机制在查找最远节点时的复杂迭代过程,Marc^[57]提出基于转发节点竞争的广播协议.广播节点不需要查找最远节点,而是直接发布广播信息.收到广播信息的节点之间相互竞争,获胜节点转发广播信息.其基本思想是:将广播节点的信息覆盖按距离的远近分为不同的区域,利用 IEEE 802.11e 协议信道接入优先级机制(access category, 简称 AC)^[58]将各个区域内的节点依次映射为不同的 AC,距离越远,映射优先级越高,其竞争窗口越小.但由于 IEEE 802.11e 协议只设置了 4 个优先级 AC,在高节点密度环境中,同一区域内的节点由于采用相同的竞争窗口,会导致大量碰撞,降低了广播信息的可靠性.

4.2.4 基于分层的多跳广播

近年来,基于网络拓扑分层的多跳广播成为 VANET 新的研究方向.首先,通过网络拓扑分层协议将 VANET 划分为各个相对独立的子网(也称簇),利用簇头(cluster head, 简称 CH)和网关节点(gateway node, 简称 GN)构造虚拟主干网(virtual backbone network, 简称 VBN),将高动态变化的物理拓扑结构映射为稳定的逻辑拓扑结构.然后,广播信息就可在 VBN 中传输,从而将点对多点的广播转化成为点对点的单播,剔除了广播中继节点的选择过程,同时消除了隐藏/暴露节点对广播可靠性的影响.但如何针对网络拓扑高动态变化的 VANET 提出一种开销小、稳定性强的分层协议,是这类广播协议需要解决的关键问题.

Peng^[59]针对 VANET 中节点组运动状态的关联性,首先提出基于权重的网络拓扑分层协议(weighted utility function, 简称 WUF),然后提出基于分层的广播协议(distributed cluster-based scheme, 简称 DCBS)^[60].通过创建网络拓扑的分层结构,网络中相关 CH 和 GN 负责转发收到的广播信息,其他节点仅作为广播信息的接收者.该协议的优点是:(1) 每个 CH 都能够完全覆盖自己的簇成员,因此广播信息可达率高;(2) 只有 CH 和 GN 可以转发广播信息,因此网络中广播节点间竞争减小,信息的可靠性高,实时性强;(3) 通过逻辑拓扑结构与物理拓扑结构的映射关系,屏蔽了高动态变化网络拓扑结构对广播传输的影响,具有较强的可扩展性和鲁棒性.

但该协议存在的主要问题在于:首先,网络拓扑分层过程中每个节点需要通过周期性“hello”获得两跳邻居节点信息,开销较大;其次,分层协议不易收敛,簇的维护和更新困难.

Bononi^[61]提出一种基于网络拓扑分层的动态广播协议(dynamic backbone assisted MAC, 简称 DBA-MAC).其基本方法是,首先将网络中的节点划分为骨干节点(backbone member, 简称 BM)和普通节点(normal vehicle, 简称 NV),BM 具有较高优先级,能够优先获得广播信息转发权,其他收到广播信息的 NV 通过发送 ACK 以保证信息可靠接收.然后,动态调节 IEEE 802.11 的 MAC 竞争窗口退避机制,以自适应网络负载状态.该协议的优点是:将广播目标不确定性转换为可靠的点对点通信,并通过赋予 BM 优先转发权保证信息分发的实时性;缺点是网络拓扑分层开销仍然较大,文献[60,61]都没有考虑网络资源公平性,也没有解决网络分割导致的信息不可达问题.

针对 DBA-MAC 的网络分层协议开销过大和不易收敛问题,有学者提出简化网络拓扑分层协议.文献[62-64]结合电子地图和 GPS 将道路分割成等间距的路段或者蜂窝(cell),节点根据 GPS 确定当前所处的路段,处于路段中心的节点自动成为该路段的广播中继节点(cell reflector, 简称 CR).当节点离开路段中心时,其他靠近路段中心的节点自动成为新的 CR,相邻路段的 CR 之间构成广播信息传输骨干链路.广播节点结合自己所处的路段标识添加到广播信息中,以确认该广播信息的有效区域,接收节点根据广播信息及自身位置决定是转发还是丢弃广播信息,以便将广播信息限制在一定范围内,提高资源利用率.该类分层广播的优点是,通过这种道路划分,免去了分层协议 CH 选举的复杂性和开销问题,CR 之间成为点到点通信模式,减少了节点间的干扰,提高了信息传输的可靠性和实时性.但是,该协议需要网络中每个节点携带相同的电子地图并保持全局同步.同时,路段长度的选取、高密度路段 CR 的选择及节点位置信息的精确性是这类分层广播协议需要解决的主要问题.

4.2.5 基于计数的多跳广播

基于计数的多跳广播是 MANET 研究较多的广播模型^[65].其基本方法是,接收节点为每个新接收到的广播

信息分别设置一个计数器和随机评估时延(random assessment delay,简称 RAD).在 RAD 内,每收到一个重复的广播信息时,相应计数器加 1,当计数器超过门限 C 时丢弃该分组.当 RAD 结束,且计数器没有超过门限 C 时,节点立即转发该广播信息.这种广播方式可以减少网络中的广播冗余,提高资源利用率.并且,该广播机制不需要 GPS,不要求维护邻居信息,具有较强的可扩展性.但没有解决隐藏/暴露节点干扰问题.同时,由于节点在转发广播信息前需要等待一定的时间,因此增加了信息传输时延,不适用于实时性高的车辆警告信息广播.另外,如何设置门限 C 和 RAD 以适应网络拓扑高动态变化的 VANET,还是一个开放性问题.因此,对这类广播协议,研究者极少采用.

针对某种交通信息的广播分发 QoS 需求,每一类多跳广播协议都有比较突出的优点,但一般以牺牲其他方面的性能为代价.各类代表性多跳广播协议的特点以及存在的问题见表 2.

Table 2 Analysis and comparison of multi-hop broadcast protocols

表 2 多跳广播协议的分析 and 比较

Protocol	Main scheme	Latency	Reliability	Neighbor information	Dissemination areas	Redundant rebroadcasts	Algorithm complexity
DV-CAST ^[40]	Probabilistic-Based	Rather low	Rather low	State	Local areas	Rather high	Rather complexity
MHVB ^[48]	Distance-Based	Rather low	Rather high	State	Local areas	Rather high	Rather complexity
UMB ^[51]	MAC-Based	Rather high	High	Stateless	No limited	High	Complexity
DCBS ^[61]	Cluster-Based	Low	High	State	No limited	Low	Complexity
DBA-MAC ^[62]	Cluster, MAC-based	Low	High	State	No limited	Low	Complexity
RAD ^[67]	Counter-Based	High	Rather low	Stateless	No limited	Rather low	Simple

5 结论与展望

通过对近年来国内外学者提出的各类 VANET 广播协议的分析,我们认为,如何针对高动态变化 VANET 中不同交通信息的应用需求,提出具有较强的可扩展性和鲁棒性,同时兼顾可靠性、实时性、资源利用率的单跳和多跳广播协议,是 VANET 迫切需要解决的问题,需要从以下几个方面对广播模型与方法进行研究:

(1) 理论分析研究

通过对上述文献提出的广播协议分析发现,大部分文献采用“设计广播协议→仿真验证”的方法.提出的 VANET 信息广播协议缺乏理论基础,缺乏对 VANET 动态变化网络基本特征的建模分析,更没有深入分析影响广播协议性能(可靠性、实时性、可达性、资源利用率)的各种关键因素以及相互关系.因此,相应协议很难适应 VANET 高动态变化网络的基本特征和应用需求.

但是,VANET 网络拓扑的特殊性以及在不同环境中的复杂性决定了这是一项艰巨的工作.近年来,只有少数研究者通过简化 VANET 模型,从理论的角度对广播模型进行初步分析.Wu^[66]分析了单一路段上影响多跳广播信息平均传输时延 $E[T_{cf}]$ 和传输距离 $X(t)$ 的因素,结果表明,这两项指标与道路上节点及节点速率分布密切相关.文献[67]分析了道路交叉口节点接收广播信息的概率与节点分布关系.但上述文献都假设节点进入路段时服从泊松分布,节点之间相互独立,不符合 VANET 网络拓扑基本特征^[68].因此,在研究广播协议时,首先需要基于 VANET 网络拓扑特征,从实际的道路拓扑和节点/节点组运动规律出发,分析不同环境中广播模型需要解决的关键问题,为提出更加有效的广播提供理论基础.

(2) 全面的性能分析

由于受条件所限,几乎所有文献都利用仿真软件对提出的广播协议进行性能分析.大部分文献为简化仿真过程,一般都采用单一路段或者简单城市道路.这种仿真环境与实际道路布局和车流模型差别较大^[69],因此,协议在实际环境中的性能有待进一步分析.

(3) 广播协议的鲁棒性研究

很多文献都认为信息传输可靠且所有节点的传输范围一致,且假设每个节点均配备 GPS.但在 VANET 中,广播协议的实现还需解决诸多不确定因素,包括 GPS 失效、信息传输范围不稳定、信号误码、建筑物对信号

的遮挡、高速移动节点的多普勒效应等.Korkmaz^[70]探讨了 GPS 装备率以及失效对信息广播的影响.研究表明,GPS 位置失效对基于距离的多跳广播影响较大.因此,为提高信息广播的性能,必须考虑协议的鲁棒性问题.

(4) 广播协议的普适性研究

由于不同条件下驾乘人员对道路交通信息需求的差异性,交通信息对单跳和多跳广播传输的实时性、可靠性、区域性、优先级差异较大.如突发的紧急交通信息(车辆碰撞引起的交通阻塞)需要较高的优先级,而该信息不一定在全网范围内传输,仅仅需要在事故路段附近广播就能够起到碰撞避免、交通诱导、紧急救援等作用,具有较强的区域性.但是,现有文献一般针对特定环境中某类交通信息分发问题设计广播模型,这些广播模型不能满足多种交通信息传输的 QoS 需求,普适性较差.因此,如何基于 VANET 提出普适性较强的广播协议需要广泛而深入的研究.

(5) 广播协议的公平性研究

当前,大多数文献在提出广播模型时均没有考虑其他信息与广播信息在网络中的共存,如单播、组播信息流.文献[68]分析了广播信息对其他信息流的冲击,结果表明,由于缺乏 TCP 传输控制协议,缺乏流量控制的广播信息可能导致网络拥塞,不利于其他业务在网络中的部署.因此,需要研究不同广播流及广播流与单播/组播流公平占用网络资源问题.

(6) 广播协议的安全性研究

与分组交换网类似,信息安全也是 VANET 需要解决的关键问题.由于参与广播中继的节点存在不确定性,广播信息源和中继节点都可能成为虚假信息或错误信息的源头,不良信息可导致司机采取错误操作而发生严重的交通事故.因此,如何在 VANET 中建立可信机制也是广播模型需要解决的问题.

(7) 网络拓扑分层与广播协议

针对网络拓扑分布式、大规模、高动态变化的 VANET,要实现广播协议的可扩展性和鲁棒性,较好的协议是基于网络拓扑分层思想,即充分利用节点/节点组运动规律的可预测性,将网络分割成相对独立、自治的子网.将广播信息的扩散限制在一定区域和一定节点之间进行,再根据道路分布特点辅助物理层定向信息转发协议,以有效解决广播可靠性、实时性、资源有效性问题.虽然基于分层的广播协议需要获得邻居节点信息、进行簇重构等,造成开销比无状态广播协议要大,但为了克服网络拓扑大规模、高动态变化造成的影响,基于分层的广播模型具有明显的优势.设计这类广播模型的关键就是如何提出一种开销较小、更适合 VANET 特征、满足用户需求的网络拓扑分层理论和模型.针对该问题,本课题组作了初步的探索^[71],通过分析城市中车辆节点运动规律,提出了基于权重的稳定分簇协议(stability weight-based clustering algorithm,简称 SWCA).在分层结构的稳定性、负载均衡度以及网络开销等方面均有良好的表现.

References:

- [1] Chang CY, Xiang Y, Shi ML. Development and status of vehicular ad hoc networks. *Journal on Communications*, 2007,28(11): 116–126 (in Chinese with English abstract).
- [2] Lochert C, Scheuermann B, Wewetzer C, Luebke A, Mauve M. Data aggregation and roadside unit placement for a VANET traffic information system. In: *Proc. of the 5th ACM Int'l Workshop on Vehicular Inter-Networking*. New York: ACM Press, 2008. 56–65.
- [3] Vehicular ad-hoc network. 2007. http://en.wikipedia.org/wiki/Vehicular_ad-hoc_network
- [4] Sheng WH, Yang QY, Guo Y. Cooperative driving based on inter-vehicle communications: Experimental platform and algorithm. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Intelligent Robots and Systems*. New York: IEEE Computer Society Press, 2006. 5073–5078.
- [5] Standard specification for telecommunications and information exchange between roadside and vehicle systems—5GHz band dedicated short range communications (DSRC) medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications ASTM E2213-03. 2003. <http://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/E2213-02.htm>
- [6] Stibor L, Zang YP, Reumerman HJ. Evaluation of communication distance of broadcast messages in a vehicular ad-hoc network using IEEE 802.11p. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf.* New York: IEEE Press, 2007. 254–257.
- [7] Car-to-Car communications. 2009. <http://www.whynot.net/ideas/784>
- [8] DSRC in Japan. 2002. http://www.itsforum.gr.jp/Public/E4Meetings/P01/2Z11JPN_StatusRPTv2.pdf

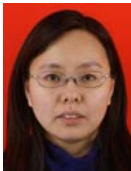
- [9] FleetNet. 2006. <http://www.fleet-net.com/>
- [10] CarTalk200. 2007. http://www.esafetysupport.org/en/esafety_activities/related_projects/finished_projects/cartalk2000.htm
- [11] GSM network-on-wheels. 2008. <http://www.adc.com/us/en/Library/Literature/106587AE.pdf>
- [12] Shin K, Sadayuki T, Kiyohito T, Takeshi M, Haruki F. Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, 2002,3(3):155–160. [doi: 10.1109/TITS.2002.802929]
- [13] Tamer N, Sasan D, Liao CY, Liviu I. TrafficView: Traffic data dissemination using car to car communication. In: *Proc. of the ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review*. New York: ACM Press, 2004. 6–19.
- [14] Nadeem T, Shankar P, Iftode L. A comparative study of data dissemination models for VANETs. In: *Proc. of the 3rd IEEE Annual Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems*. New York: IEEE Computer Society Press, 2006. 1–10.
- [15] Saleh Y, Mahmoud SM, Mahmood F. Vehicular ad hoc networks (VANETs): Challenges and perspectives. In: *Proc. of the 6th IEEE Int'l Conf. on ITS Telecommunications Processing*. New York: IEEE Computer Society Press, 2006. 761–766.
- [16] Chen LJ, Jiang H, WU J, Guo CC, Xu WP, Yan PL. Research on transmission control on vehicle ad hoc network. *Journal of Software*, 2007,18(12):1477–1490 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1477.htm> [doi: 10.1360/jos181477]
- [17] Ukkusuri S, Du LL. Geometric connectivity of vehicular ad hoc networks: Analytical characterization. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking*. New York: ACM Press, 2007. 79–80.
- [18] Karthikeyan N, Palanisamy DV, Duraiswamy DK. Performance comparison of broadcasting methods in mobile ad hoc network. *Int'l Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2009,2(2):47–58.
- [19] Buruhanudeen S, Othman M, Mazliza O, Ali BM. Mobility models, broadcasting methods and factors contributing towards the efficiency of the MANET routing protocols: Overview. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Telecommunications and Malaysia*. New York: IEEE Computer Society Press, 2007. 226–30.
- [20] Williams B, Camp T. Comparing of broadcasting techniques for mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the 3rd ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. New York: ACM Press, 2002. 194–205.
- [21] Wu J, Dai F. Broadcasting in ad hoc networks based on self-pruning. *Int'l Journal of Foundations of Computer Science*, 2003,14(2): 2240–2250.
- [22] Peng W, Lu XC. On the reduction of broadcast redundancy in mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*. New York: ACM Press, 2000. 129–130.
- [23] Kim JS, Zhang Q, Dharma PA. Probabilistic broadcasting based on coverage area and neighbor confirmation in mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Communications Society*. New York: IEEE Press, 2004. 96–101.
- [24] Kim D, Toh CK, Cano JC, Manzoni P. A bounding algorithm for the broadcast storm problem in mobile ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking*. New York: IEEE Press, 2003. 1131–1136.
- [25] Sun MT, Huang LF, Arora A, Lai TH. Reliable MAC layer multicast in IEEE 802.11 wireless networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications and Mobile Computing*, 2003,3(4):527–536.
- [26] Borgonovo F, Capone A, Cesana M, Fratta L. ADHOC MAC: A new, flexible and reliable MAC architecture for ad-hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking*. New York: IEEE Press, 2003. 965–970.
- [27] Xu Q, Sengupta R, Mak T, Ko J. Vehicle-to-Vehicle safety messaging in DSRC. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York: ACM Press, 2004. 19–28.
- [28] Yang X, Liu J, Zhao F. A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*. New York: IEEE Computer Society Press, 2004. 114–123.
- [29] Balon N, Guo JH. Increasing broadcast reliability in vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*. New York: ACM Press, 2006. 104–105.
- [30] Hamid M, Fethi F, Massimiliano L. A survey and qualitative analysis of MAC protocols for vehicular ad hoc networks. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2006,3(10):30–35.
- [31] Borgonovo F, Capone A, Cesana M, Fratta L. RR-ALOHA: A reliable R-ALOHA broadcast channel for ad hoc inter-vehicle communication networks. 2002. <http://www.elet.polimi.it/upload/antlab/RESEARCH/Ad-hoc/papers/medhocnet2002.pdf>
- [32] Dyson DA, Haas ZJ. The dynamic packet reservation multiple access scheme for ATM. In: *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf*. New York: IEEE Press, 1999. 87–99.
- [33] Zhao H, Yu HY. A new MAC protocol for vehicular ad hoc networks. *Microcomputer Information*, 2005,21(9):113–115 (in Chinese with English abstract).
- [34] Duke L, Roberto A, Anuj P, Raja S, Stavros T, Pravin V. A wireless token ring protocol for intelligent transportation systems. In: *Proc. of the IEEE Intelligent Transportation System Conf*. New York: IEEE Press, 2001. 1152–1157.

- [35] Maxemchuk NF, Tientrakool P, Willke TL. Reliable neighborcast. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(6):3278–3288. [doi: 10.1109/TVT.2007.905011]
- [36] Zhang JQ, Liu KH, Shen XM. A novel overlay token ring protocol for inter-vehicle communication. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. New York: IEEE Press, 2008. 4904–4909.
- [37] Yadumurthy RM, Chimalakonda A, Sadashivaiah M, Makanaboyina R. Reliable MAC broadcast protocol in directional and omnidirectional transmissions for vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the 2nd ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York: ACM Press, 2005. 10–19.
- [38] Sascha S, Holger F, Matthi T, Wolfhag E. Vehicular ad-hoc networks single-hop broadcast is not enough. In: *Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Intelligent Transportation*. New York: IEEE Computer Society Press, 2006. 49–54.
- [39] Sadashivaiah M, Makanaboyina R, George B, Raghavendra R. Performance evaluation of directional MAC protocol for inter-vehicle communication. In: *Proc. of the 61st IEEE Vehicular Technology Conf.* New York: IEEE Press, 2005. 2585–2589.
- [40] Alshaer H, Horlait E. An optimized adaptive broadcast scheme for inter-vehicle communication. In: *Proc. of the 61st IEEE Vehicular Technology Conf.* New York: IEEE Press, 2005. 2840–2844.
- [41] Fracchia R, Meo M. Analysis and design of warning delivery service in inter-vehicular networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 2008,7(7):832–845. [doi: 10.1109/TMC.2007.70756]
- [42] Kim TH, Hong WK, Kim HC. An effective multi-hop broadcast in vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the 20th Int'l Conf. on Architecture of Computing Systems*. Zurich: Springer-Verlag, 2007. 112–125.
- [43] Tonguz O, Wisitpongphan N, Bai F, Mudalige P, Sadekar V. Broadcasting in VANET. In: *Proc. of the Mobile Networking for Vehicular Environments*. New York: IEEE Computer Society Press, 2007. 7–12.
- [44] Nekovee M, Bogason BB. Reliable and efficient information dissemination in intermittently connected vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the 65th IEEE Vehicular Technology Conf.* New York: IEEE Press, 2007. 2486–2490.
- [45] Wisitpongphan N, Tonguz OK, Parikh JS, Mudalige P, Bai F, Sadekar V. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, 2007,14(6):84–94. [doi: 10.1109/MWC.2007.4407231]
- [46] Durrezi M, Durrezi A, Barolli L. Emergency broadcast protocol for inter-vehicle communications. In: *Proc. of the 11th Int'l Conf. on Parallel and Distributed Systems*. New York: IEEE Computer Society Press, 2005. 402–406.
- [47] Yu QY, Heijenk G. Abiding geocast for warning message dissemination in vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications Workshops*. New York: IEEE Press, 2008. 400–404.
- [48] Osafune T, Lin L, Lenardi M. Multi-Hop vehicular broadcast (MHVB). In: *Proc. of the 6th Int'l Conf. on ITS Telecommunications Processing*. New York: IEEE Press, 2006. 757–760.
- [49] Mariyasagayam MN, Osafune T, Lenardi M. Enhanced multi-hop vehicular broadcast (MHVB) for active safety applications. In: *Proc. of the 7th IEEE Int'l Conf. on ITS Telecommunications*. New York: IEEE Computer Society Press, 2007. 1–6.
- [50] Li D, Huang HY, Li X, Li ML, Tang FL. A distance-based directional broadcast protocol for urban vehicular ad hoc network. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*. New York: IEEE Computer Society Press, 2007. 1520–1523.
- [51] Korkmaz G, Ekici E, Ozguner F, Ozguner U. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York: ACM Press, 2004. 76–85.
- [52] Korkmaz G, Ekici E, Ozguner F. Black-Burst-Based multihop broadcast protocols for vehicular networks. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2007,56(6):3159–3167. [doi: 10.1109/TVT.2007.900493]
- [53] Chiasserini CF, Gaeta R, Garetto M, Griboaldo M, Sereno M. Efficient broadcasting of safety messages in multi-hop vehicular networks. In: *Proc. of the 20th Int'l Parallel and Distributed Processing Symp.* New York: IEEE Press, 2006. 8–14.
- [54] Fasolo E, Zanella A, Zorzi M. Effective broadcast scheme for alert message propagation in vehicular ad hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Communications*. New York: IEEE Press, 2006. 3960–3965.
- [55] Chiasserini CF, Fasolo E, Furiato R, Gaeta R. Smart broadcast of warning messages in vehicular ad hoc networks. 2005. <http://www.di.unito.it/~marcog/Downloads/Newcom05.pdf>
- [56] Mostafa MIT, Yassin MYH. VANET-DSRC protocol for reliable broadcasting for life safety messages. In: *Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Signal Processing and Information Technology*. New York: IEEE Computer Society Press, 2007. 104–109.
- [57] Marc TM, Jiang D, Hartenstein H. Broadcast reception rates and effects of priority access in 802.11-based vehicular ad-hoc networks. In: *Proc. of the 1st ACM Int'l Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*. New York: ACM Press, 2004. 10–18.
- [58] Choi S, Prado JD, Shankar SS, Mangold S. IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation. In: *Proc. of the IEEE Int'l Conf. of Communications*. New York: IEEE Press, 2003. 1151–1156.
- [59] Peng F, Haran J, Dillenburg J, Nelson PC. Traffic model for clustering algorithms in vehicular ad-hoc networks. In: *Proc. of the IEEE Consumer Communications and Networking Conf.* New York: IEEE Computer Society Press, 2006. 168–172.

- [60] Peng F. Improving broadcasting performance by clustering with stability for inter-vehicle communication. In: Proc. of the 65th IEEE Vehicular Technology Conf. New York: IEEE Press, 2007. 2491–2495.
- [61] Bononi L, Felice MD. A cross layered MAC and clustering scheme for efficient broadcast in VANETs. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. New York: IEEE Computer Society Press, 2007. 1–8.
- [62] Wischhof L, Ebner A, Rohling H. Information dissemination in self-organizing inter-vehicle networks. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2005,6(1):90–101. [doi: 10.1109/TITS.2004.842407]
- [63] Su H, Zhang X, Chen HH. Cluster-Based DSRC architecture for QoS provisioning over vehicle ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Global Telecommunications Conf. New York: IEEE Press, 2006. 1–5.
- [64] Zang YP, Stibor L, Reumerman HJ, Chen H. Wireless local danger warning using inter-vehicle communications in highway scenarios. In: Proc. of the 14th European Wireless Conf. New York: IEEE Press, 2008. 1–7.
- [65] Fukuhara TT, Warabino T, Ohseki T, Saito K, Sugiyama K, Nishida T, Eguchi K. Broadcast methods for inter-vehicle communications system. In: Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conf. New York: IEEE Press, 2005. 2252–2257.
- [66] Wu H, Fujimoto R, Riley G. Analytical models for information propagation in vehicle to vehicle networks. In: Proc. of the 60th IEEE Vehicular Technology Conf. Los Angeles: IEEE Press, 2000. 4548–4552.
- [67] Xeros A, Andreou M, Pitsillides A, Lestas M. Information propagation probability on intersections in VANETs. In: Proc. of the 3rd Int'l Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications. New York: IEEE Press, 2004. 57–64.
- [68] Wischhof L, Rohling H. Congestion control in vehicular ad hoc networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Vehicular Electronics and Safety. New York: IEEE Computer Society, 2005. 58–63.
- [69] Hoogendoorn SP, Bovy PHL. State-of-the-Art of vehicular traffic flow modeling. The Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2001,21(4):283–303. [doi: 10.1243/0959651011541120]
- [70] Korkmaz G, Ekici E, Ozguner F. Effects of location uncertainty on position-based broadcast protocols in inter-vehicle communication systems. http://www.ece.osu.edu/~ekici/papers/locerr_medhoc.pdf
- [71] Liu HF, Huang XY, Li LJ, Zhang ZB. The study on hierarchy and optimization in vehicular ad hoc networks. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008,28(7):119–124 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [1] 常促宇,向勇,史美林.车载自组网的现状与发展.通信学报,2007,28(11):116–126.
- [16] 陈立家,江昊,吴静,郭成城,徐武平,晏蒲柳.车用自组织网络传输控制研究.软件学报,2007,18(6):1477–1490. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1477.htm> [doi: 10.1360/jos181477]
- [33] 赵华,于宏毅.一种新型的基于自组网车载通信系统 MAC 协议.微计算机信息,2005,21(9):113–115.
- [71] 刘鸿飞,黄席樾,李丽君,张仔兵.车用自组织网络分层优化研究.系统工程理论与实践,2008,28(7):119–124.



李丽君(1973—),女,重庆人,讲师,主要研究领域为移动自组网,车用自组网.



葛利嘉(1957—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线网络,信息处理.



刘鸿飞(1974—),男,博士,副教授,CCF 学生会员,主要研究领域为移动自组网,计算机网络,智能交通信息系统.



黄席樾(1948—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为智能交通,智能故障诊断.



杨祖元(1975—),男,博士,讲师,主要研究领域为智能交通信息系统,人工智能.