

Vehicular Ad Hoc Networks*

Wei Xiong, Demin Liang

School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan
Email: xw@mail.hbut.edu.cn

Received: Dec. 21st, 2012; revised: Dec. 24th, 2012; accepted: Jan. 19th, 2013

Abstract: This paper describes the concept of *vehicular ad hoc networks* (VANET), and indicates the similarities and differences with *mobile ad hoc networks* (MANET) and *wireless sensor networks* (WSN). The system architecture for VANET is outlined, the communication protocol stacks are investigated, and the potential applications are explored. The VANET-related consortia, standards, and projects around the globe are presented. The enabling technologies, such as spectrum allocation, media access, information dissemination, and system modeling, for the realization of vehicular networks are also reviewed.

Keywords: Vehicular Ad Hoc Networks (VANET); Spectrum Allocation; Media Access; Information Dissemination; System Modeling

车辆自组织网络*

熊 炜, 梁德民

湖北工业大学, 电气与电子工程学院, 武汉
Email: xw@mail.hbut.edu.cn

收稿日期: 2012年12月21日; 修回日期: 2012年12月24日; 录用日期: 2013年1月19日

摘 要: 本文阐述了车辆自组织网络(VANET)的基本概念, 指出了 VANET 与移动自组织网络(MANET)、无线传感器网络(WSN)等系统之间的异同, 分析了 VANET 的体系结构及其协议栈层次, 并对车辆网络的典型应用进行了分类, 介绍了与 VANET 相关的研究机构、主要技术标准以及欧洲、美国和日本在该领域的最新研究计划和项目, 最后综述了频谱分配、信道接入、信息分发和系统建模等关键支撑技术。

关键词: 车辆自组织网络(VANET); 频谱分配; 信道接入; 信息分发; 系统建模

1. 引言

自组织网络(简称自组网)有许多英文名称, 例如 Ad-hoc Networks、Self-organizing Networks、Infrastructure-less Networks、Multi-hop Networks 以及 Packet Radio Networks, 其中最为常用的是 Ad hoc Networks。

“Ad hoc”一词来源于拉丁语, 本意为“向这个(to this)”的意思, 在英语中其基本含义是“为某一即将

发生的特定目标、事件或局势而专门设定的, 事先未准备的”。

移动自组织网络(MANET)是由一组带有无线收发装置的移动节点共同组成的自治系统, 它不依赖于预先架设的固定基础设施的支持而临时组建, 网络中的移动节点则利用自身的无线通信设备交换信息, 当信源和信宿节点不处于彼此的通信范围内时, 需要借助其他中间节点的中继, 从而实现多跳通信^[1]。

由于 MANET 分布式控制、网络自组织、节点可移动、多跳对等通信的技术特点, 使得它具有可快速临时组网、系统抗毁性强、无需预设固定基础设施等

*资助基金: 本文工作受湖北省教育厅科学技术研究计划(Q20111406, Q20111404)、湖北工业大学科研启动基金项目(BSQD12022)资助。

诱人的优点。然而, MANET 节点有限的处理和存储能力以及节点有限的能量供给等缺点, 又限制了它的应用场合。目前, 移动自组织网络的主要应用领域包括: 军事战术通信、灾后紧急救援、无线传感器网络(WSN)^[2,3]、无线局域网(WLAN)和无线个域网(WPAN)以及与蜂窝移动通信系统的结合^[4]等, 而且其应用范围仍在不断拓展。

近年来, 无线移动自组织网络一个非常重要的发展方向就是在智能交通(ITS)领域, 特别是在车辆网络通信中的广泛应用, 这便是本文将要深入研究和讨论的车辆自组织网络(VANET)。

2. 车辆自组织网络的基本概念

车辆自组织网络是一类迅速崛起并富有挑战的移动自组织传感网络, 是下一代智能交通远景规划中较为重要的组成部分, 主要包括车辆与车辆(V2V/IVC)、车辆与路旁设施(V2I/VRC)以及车辆与行人(V2P)之间的直接或多跳通信^[5], 使得在现有道路网中动态、快速构建一个自组织、分布式控制的车辆专用短距离通信(DSRC)网络成为现实。

车路通信系统属于有基础设施网络体系架构, 不支持车辆之间的直接通信。车辆与车辆之间的通信必须经由路旁固定接入点(AP)或基站(BS)以及有线骨干网络的转接才能够完成。在此类网络中, 固定基础设施担当控制中心的作用, 诸如无线频谱资源分配、呼叫建立、越区切换等控制功能都采用集中控制方式, 有着成熟的用户接入与分组路由方案, 因而不属于本文讨论的重点。

车辆间通信网络是移动自组织网络的一个崭新分支, 它是在车载终端之上, 将电子传感、导航定位、移动计算、数据网络、机器视觉、自动控制、人工智能以及系统综合等技术有效地集成, 并运用于整个地面道路交通运输管理体系之中, 实现人、车、路三者之间的信息共享、协同与交互, 从而建立一种在区域范围内、全方位发挥作用, 实时、准确、高效的综合交通运输管理与服务系统。在面向 ITS 用户提供实时道路交通环境状况信息的同时, 车车通信系统能够显著提高道路通行能力、降低驾驶员操作负荷, 从而达到在节省土地资源的前提下, 提供更为安全、经济、舒适、快捷的道路交通运输服务、节约能源消耗、减低交通拥塞并且改善交通环境, 其最终目标就是实现

以车载终端的高度智能化为核心, 以车辆之间的协调合作为基础, 并重视人的因素应用研究, 促进人、车、路三位一体协调发展的智能协同系统。它代表着未来道路交通的发展方向, 同时也是我国实现道路交通可持续发展的必由之路。

3. 车辆自组织网络的技术特点

车辆自组织网络具有无线移动自组网的一般特征, 如车车通信网络不依赖预先架设的固定基础设施而临时构建, 车路通信系统则需要较少的基础设施支持, 每个车辆节点既可以作为终端系统实现数据收发, 又可以作为中继路由实现多跳转发^[6]; 同样也存在无线网络所固有的问题, 如隐藏/暴露终端、信道拥塞等^[7]。然而与 MANET/WSN 相比, VANET 具有以下不同的特点^[8,9]:

1) 网络的大规模性

车辆自组织网络的大规模性主要体现于两点: ① VANET 节点数目非常巨大, 包括车辆节点(如私家车、公共交通、货运车辆)以及路旁节点(如交通标志、交通信号灯等); ② VANET 节点分布区域也非常广泛(如位于城市中心或高速公路上)。

2) 网络密度随时空变化快

网络密度有赖于 VANET 节点(尤其是车辆节点)的时空分布。偏远地区的交通属于稀疏网络, 发生交通拥塞时则为密集型网络。例如在长度为 1 km 的双向六车道路段内, 如果车辆安全间距为 70 m, 则有近 70 辆车行驶在该路段上; 当发生交通拥塞, 如果此时车辆间距仅为 5 m, 则同一路段内将有 1000 多辆车^[10]。

3) 车辆节点运动的特殊性

车辆节点只能沿着道路网做高速、受限的约束运动, 例如高速公路上车辆的行驶速度一般不低于 70 km/h, 但车辆间的相对运动速度却可高达 300 km/h; 另外, 车辆在行驶途中还必须遵守有关交通规则(如红灯停绿灯行, 限速或排队行驶等)。因此, 车辆节点的运动是可以短时预测的, 交通信息在 VANET 节点间的传播也具有很强的方向性。目前研究人员一致认为, 在高速公路场景中构建的 IVC 网络具有一维特征, 而在城市道路场景中构建的 IVC 网络则具有二维特征^[11]。

4) 网络拓扑变化频繁

由于车辆节点运动的高速性,加之网络极易受驾驶员行为(如变更车道或行驶方向)以及消息内容等因素的影响,节点之间通过无线链路形成的网络拓扑结构变化剧烈且频繁。例如在节点通信距离为 250 m、平均车速为 130 km/h 的双向运动场景中,节点间通信链路持续时间不超过 15 s 的概率仅为 57%^[12]。

5) 频繁的拓扑变化导致频繁的网络分裂

即使 VANET 得到了广泛的部署,在车流密度较高时,仍会频繁出现网络分裂现象,从而导致许多链路路径在正式使用之前就已经失效。为此,通过增加节点通信距离以及借助反向运动车辆实现信息转发可以有效减低网络分裂现象^[13]。

6) 节点无明显的硬件约束

VANET 节点一般都有外部电源提供能量,所以它不像传感器节点那样,没有明显的电源方面的约束,因此,在满足网络连通的前提下,可以适当增加单跳通信距离。例如 VANET 节点通信距离可达 1 km,无线通信带宽通常为几千 kbps。另外车载移动终端目前多采用以 32 位微处理器为核心的高性能嵌入式系统,计算能力和存储容量都得到了较大的提升,因而其生产成本也较高,节点的生命周期与车辆的生命周期大致相当^[14]。

7) 节点具有丰富的外部辅助信息

随着全球定位系统(GPS)与地理信息系统(GIS)的普及与广泛应用, VANET 节点不仅可以获取自身精确的位置、速度、加速度等瞬时运动信息,而且可以获得节点所处区域内的地理信息(如道路网分布等),如果再配合车载激光雷达(LIDAR)和 CCD 视觉传感装置, VANET 节点还能够实时感知其周围环境。因此, VANET 节点更多地采用基于地理区域的寻址机制^[15]。

8) 不同的交通应用具有不同的服务质量要求

VANET 致力于提高道路安全、运输效率、行车舒适以及环境保护等方面的应用,大多数交通方面的应用对网络服务质量(QoS)有着严格的要求,如分组时延、时延抖动、可用带宽及分组丢包率等,并且不同的交通应用对网络服务质量的要求也不尽相同。例如与行车安全相关的应用允许时延仅为 20~200 ms^[16],与行车效率相关的应用对时延要求并不高(一般为秒级),而多媒体信息服务方面的应用则需要占用大量的网络带宽。

小结 VANET 与 MANET/WSN 之间最大的差异就在于:快速变化但可以预测的网络拓扑、频繁的网络分裂、节点的硬件性能(节能已不再是 VANET 面临的首要挑战)、基于地理位置的寻址与路由机制以及对网络服务质量要求的不同,这些也都是 VANET 所独具的特征,它们对整个网络系统的设计与实施起着举足轻重的影响。鉴于此,针对 MANET/WSN 所做的研究成果并不能够直接应用于新兴的 VANET 系统。

4. 车辆自组织网络的体系架构

4.1. 车辆节点结构

VANET 车辆节点的硬件结构主要包括五大部分:车载传感单元、移动计算单元、(车外)无线或光通信单元、(车内)人机接口单元以及电源单元。针对不同 ITS 应用,车辆节点还可能包括行车日志安全数据库单元和备用电源单元等,其体系结构如图 1 所示。

最重要也是最能够体现 VANET 应用价值的是与行车安全相关的应用,因此,车载传感单元是最基本的组成部分,主要包括用于报告自驾车行驶状态以及路面环境状况的一系列车载传感器、定位邻居车辆与感测障碍物的微波/激光雷达以及视觉传感装置等。当传感器收集到自身及其周围环境数据后,便经由模拟/数字转换器将模拟信号转换成数字信号提供给车载计算单元进行处理。处理器除了具有运算功能外,还需要装备一定容量的行车日志安全型存储器,以存储专用数据,也可以用于存储诸如电子车牌或许可证书等机密信息。由于车辆节点之间彼此需要分发信息,因此,处理器还必须具有与其他车辆节点协同处理数据的能力。处理后的数据(也可能只是一个判决)将由无线或光通信模块单元负责直接或间接传输到其他车辆节点或交通控制中心。通常, VANET 应用都需要知道车辆节点的精确位置以及交通事件发生的精

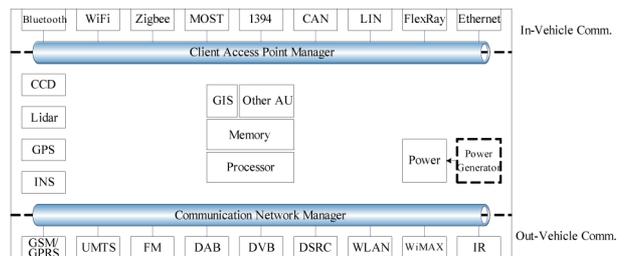


Figure 1. Vehicular node architecture
图 1. 车辆节点的体系结构

确时间，采用统一的时间基准和位置信息将有利于 VANET 路由与数据分发操作。目前，车辆节点一般都配有 GPS 接收器，能够比较方便地实现车辆定位与时间同步。车内通信接口单元主要用来实现汽车内部控制系统与各检测和制动机构间的数据通信、提供基于车载数字地图的交通态势信息的显示、车载多媒体娱乐以及与车内个人数字终端(如 PDA、智能手机)之间的信息交换等。电源单元则负责提供传感、处理、通信等模块所需的电源，它是 VANET 的生命线，其中备用电源用于确保在发生恶性交通事故时仍能够正常进行设备供电。

4.2. 路旁节点结构

路旁节点的硬件结构与车辆节点的基本相同，两者之间的主要差异就在于通信单元。路旁节点的通信单元一般包括两个模块：无线通信模块和有线通信模块。其中，无线通信模块连接由所有车辆临时构建的车用自组织网络，有线通信模块则与 Internet 等外部网络直接相连，从而实现两种协议栈之间的通信协议转换，同时发布管理机构的交通调度任务以及增值服务，并将实时的道路交通数据转发到外部网络。路旁节点可以是一个具有监控功能的高性能传感器节点，有足够的外部能量供给和更多的内存与计算资源，也可以是没有监控功能而仅带无线通信接口的特殊网关设备，如限速标志、可变情报板(VMS)等。

4.3. 车辆自组织网络结构

典型的车辆自组织网络体系结构如图 2 所示，一般由车辆节点(OBU)、路旁节点(RSU)、中继骨干网络以及远程管理和服务中心组成。大规模车辆节点按照一定的时空特征分布于道路网内部，并通过自组织方式构成网络。车辆节点通过各种车载传感装置，实现对道路交通环境状况信息(如车道标识以及路面状况、前/侧方运动目标与障碍物、自驾车行驶状态等)的智能感知与实时采集，这些信息可以在其车载终端上加以显示，以提醒驾驶人员注意行车安全。对于非常紧急且重要的交通安全信息，一方面可以通过车路通信系统传送到交通指挥控制中心，从而实现在大区域范围内进行实时的交通调度；另一方面，也可以通过车车通信系统直接在车辆网络内部发布，从而可以无时延地在小范围内进行区域交通调度。

4.4. 车辆自组织网络协议栈

随着车辆自组织网络的深入研究和广泛应用，研究人员提出了多个不同的 VANET 协议体系框架。图 3(a)所示为目前已被采纳的车 - X 通信协议栈四层模型^[17]，其参考设计采用双栈结构，以并行支持基于 TCP/IP 的寻址与路由以及基于地理位置的寻址与路由机制。该协议栈的应用目标是使 VANET 节点按照信道(而非能量)高效利用的方式协同工作。各协议层及平台的功能如下：

1) ITS 接入层涵盖多种通信介质以及物理/数据链路层协议，主要用于与车内/外设备间的通信接口。

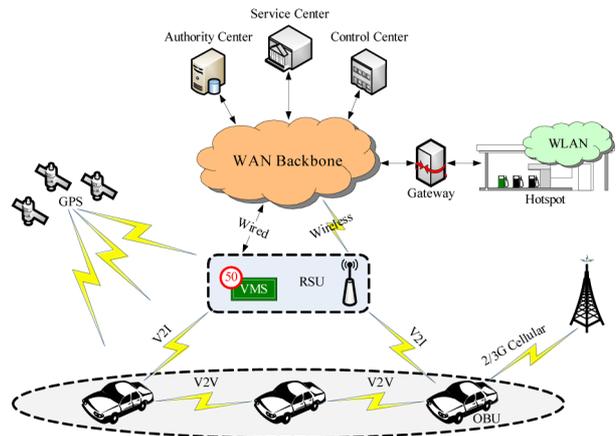
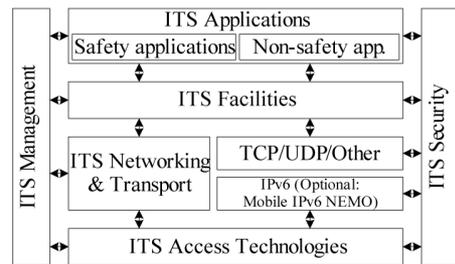
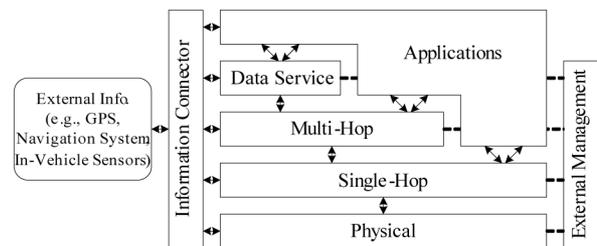


Figure 2. Vehicular ad hoc network architecture
图 2. 车辆自组织网络的体系结构



(a) Layered architecture



(b) Cross-layered architecture

Figure 3. Protocol architecture for vehicular ad hoc networks
图 3. 车辆自组织网络的协议体系框架

目前控域网(CAN)总线协议已成为汽车计算机控制系统的标准总线, 适合线控操作的 FlexRay 也成为新一代汽车内部网络通信协议, 面向媒体的系统传输 (MOST)总线专门用于满足车载高端娱乐的要求, 蓝牙、WiFi、ZigBee 等短距离通信技术则支持与 PDA、智能手机、笔记本电脑及相关外设间的无线信息交换。车辆外部通信以无线接入技术为主, 可大致分为: ①专用频段上的中短程通信技术, 例如 5.8/5.9 GHz 专用短距离通信/车载环境无线接入(DSRC/WAVE)、红外(IR); ②工业、科学及医疗(ISM)频段上的中短程通信技术, 例如 2.4/5.0 GHz 无线局域网(WLAN); ③无线城域网(WMAN)技术, 例如 WiMAX; ④蜂窝移动通信技术, 例如 GSM/GPRS、UMTS; ⑤地面广播技术, 例如调频(FM)、数字音/视频广播(DAB/DVB)等。

2) ITS 网络和传输层包括一系列数据分发协议, 从而在 VANET 内部以及 VANET 与 Internet 之间实现数据的透明传输。ITS 网络层协议主要负责信源和信宿节点间高效路由的发现与选择, ITS 传输层协议则提供可靠的端到端连接, 并根据其上的 ITS 构件层和应用层需求实现流量控制和网络拥塞控制。协议栈中 TCP/UDP 和 IPv6 两层作为 Internet 协议组的一部分, 可以保证 VANET 系统能够与广泛普及的互联网应用相兼容。

3) ITS 构件层是支持各项任务应用的特殊功能集, 通过该层提供的数据结构可存储、汇集、维护不同类型的异构源数据, 允许在不同的应用中选择不同的寻址方案, 提供面向 ITS 的特定消息处理机制, 并支持建立和维护通信会话。其中服务管理构件是最为重要的组成部分之一, 完成服务发现、服务下载与管理等功能。

4) ITS 应用层提供基于车车/车路通信等道路交通服务的高层应用接口, 它直接面向用户, 以满足用户的不同需求。目前主要考虑的是与行车安全、行车效率以及在途信息娱乐等方面的应用。

5) ITS 管理平台的诸多机制一部分将融入到上述各层协议之中, 用以优化和管理协议流程; 另一部分则独立在协议外层, 并通过各种显示与配置接口对 VANET 节点进行控制和管理, 例如车辆网络管理、节点移动性管理以及交通服务管理等, 并实现信息的跨层交互。

6) ITS 安全平台则提供安全和隐私服务, 主要包括通信协议栈不同层内安全消息格式的定义、身份认证和安全证书的管理、终端海量数据云存储的安全问题以及敏感数据的防窃取和防篡改等方面的应用。

基于分层的方法试图保持类似 TCP/IP 协议层次及其功能和接口, 并针对 VANET 的具体应用需求作了适当改进, 以适应车辆自组网中单跳及多跳通信要求。然而协议栈中各层之间是相互独立的, 通过服务访问点(SAP)仅能够实现与相邻协议层实体间的交互, 因此不利于多层数据融合处理。图 3(b)所示的协议栈改进了原始模型(参见文献[18]), 它继承了传统分层架构的思想, 以简化协议的设计和实现, 同时也增强了不同协议层之间的协作与信息共享。应用层在该协议栈中的位置比较特殊, 它根据 VANET 具体应用的需要, 从其下多个 SAP 中选择是否直接使用某个低层提供的服务, 所以在图中采用倒阶梯型来描述这个功能层。车载 GPS、GIS 及传感器等外部设备则通过一个公共的外部信息接口, 从而实现与各协议层之间的数据共享与交互。外部管理平台则作为系统的配置接口允许用户设置或修改有关协议层参数。

小结 早期的 VANET 主要是为车辆编队行驶以及协同驾驶系统设计的, 没有对体系结构作过多的考虑, 其数据传输框架多基于 TCP/IP 分层模型, 并对物理层和数据链路层作了必要的修改, 以适用于车载环境。协议栈中下层通过层间接口向上层提供服务, 但不能实现跨层操作。随着研究的深入, 特别是当 VANET 需要提供多种承载业务, 并满足一定的服务质量保障时, 就应当考虑如何选择最为合适的体系结构, 需要对原有的协议栈进行重新设计。目前, 多采用具有跨层交互功能的协议体系架构, 高层应用程序可直接调用其下任意多层的信息, 从而能够满足不同的交通应用需求。由于各功能层之间耦合度较高, 因而协议设计与维护也较为困难。其中车车/车路专用通信协议栈为强制实现, 以支持基于地理定位的交通安全方面的应用。

5. 车辆自组织网络的典型应用

车辆网络的自组织性和大规模节点提供的容错能力使其不会因为某些节点的异常而导致整个系统的崩溃, 非常适合在特殊时刻、特殊环境中快速构建

通信基础设施, 因此具有广阔的应用前景。通过运用新兴的车 - X 通信技术, 能够实现道路交通安全、交通运输管理、在途增值服务等方面的应用^[19], 如表 1 所示。有关 VANET 应用的不同分类方法, 读者还可以参见文献[20]。

5.1. 道路交通安全方面的应用

面向交通安全方面的应用是最为重要, 也是最能体现 VANET 应用价值的一类应用, 它是在车辆高速行驶的过程中, 通过与其它临近车辆和/或路旁基础设施之间的无线通信, 周期性交换彼此的运动状态(如

Table 1. Typical applications of vehicular ad hoc networks
表 1. 车辆自组织网络的典型应用

典型应用	应用描述	主要通信方式	寻址方式	应用分类
车辆协同防撞告警 (CCW) ^[26]	车辆主动监听其邻居车辆发送的运动状态信息, 并对潜在的交通事故发出警告, 以避免(连环)追尾等恶性交通事故的发生。	V2V	地理寻址	面向交通安全
交叉路口协同防撞 (ICA) ^[27]	交叉路口附近的车辆向邻近车辆或路侧单元周期性广播其位置及运动状态信息, 并根据各自的运动方向和速度判断彼此之间是否存在碰撞的可能。	V2V/V2I	地理寻址	
协同车道预留 (CLR) ^[28]	紧急救援或公共交通车辆要求沿途所有车辆为其让道, 同时也要求沿途所有交通信号灯保障其快速赶到事发地点或优先行驶。	V2V/V2I	地理寻址	
事故后告警 (PCW)	事故车辆提醒正在驶向该事故地点的所有车辆注意其前方潜在的交通危险, 接收到事故告警信标的路旁单元则将该信息转发到交通控制中心, 以便及时处理事故现场。	V2V/V2I	地理寻址	
逆向行驶告警 (WDW)	针对单行道中逆向行驶车辆发出警告, 并提示驾驶人员正确的行驶方向。	V2V/V2I	地理寻址	
道路环境通告 (RCW)	路旁传感器实时检测道路路面是否覆有积水或积雪, 并将容易打滑路段的信息发送给过往车辆, 此类信息借助车辆的运动还会发布到更远的范围, 从而提醒驾驶人员及早做好预防。	V2V/V2I	地理寻址	
车道变更辅助 (LCA)	超车道上行驶的车辆通过报告其运动方位, 借以提醒邻近车道上行驶的车辆注意, 避免侧挂等交通事故的发生。	V2V	地理寻址	
车辆协同编队行驶 (Platooning) ^[29]	高速公路上行驶的车辆能够感知同向行驶的其他车辆, 通过彼此之间实时的信息交换, 能够为驾驶人员提供及时反馈, 并在适当时候采取纠正措施, 从而使车流更加畅通和安全, 同时也减少有害气体的排放。	V2V	地理寻址	
分岔路口切入辅助 (BMA)	分岔路口处的车辆在进入主干道之前, 通过路侧单元侦测并将此信息发送至主干道上的车流, 借以避免因驾驶人员的视线死角而造成的车辆擦撞等交通事故。	V2V/V2I	地理寻址	
车辆限速提示 (SLW)	路侧单元根据当地的交通法规或天气情况(如雨雪天气或能见度等)向过往车辆发送速度限制信标, 同时也可以采集超速行驶车辆的电子车牌, 以便作为后期执法的凭据。	V2I	地理寻址	
道路施工通告 (WZW)	路侧单元根据某段道路的施工情况向过往车辆发布施工区域通告信息, 以提醒驾驶人员注意行车安全。	V2I	地理寻址	
智能交通流控制 (ITFC) ^[30]	通过测算道路上实际车流量来自动优化或分配交叉路口红绿灯时间, 同时受控区域内的多个交通信号灯还可以相互关联、协同调度, 从而有效提高道路车辆通行率。	V2V/V2I	地理寻址	面向交通管理
实时道路交通信息 (RTTI) ^[31]	通过对道路交通实时信息的收集、处理和发布, 使道路使用者可以在信息预知的模式下对自己出行时间、出行方式、出行路线进行优化调整, 从而避免交通拥塞, 提高整个道路系统的运输效率, 同时还能够为交通管理、规划部门提供实时交通信息支持, 使其决策更科学、更合理。	V2V/V2I	地理寻址	
电子不停车收费 (ETC)	车辆在通过收费站时, 利用车载设备实现车辆识别等操作, 并自动从预先绑定的 IC 卡或银行帐户中扣除相应费用, 可以显著提高道路通行能力, 降低收费管理成本, 提高车辆运营效益。	V2I	IP 寻址	
P2P 文件共享 ^[32, 33]	不同于传统的客户端/服务器(C/S)模式, 点对点(P2P)网络的一个重要目标就是让所有的网络节点都能够提供资源, 包括带宽、存储空间和计算能力等。因此, 当有新节点加入并对系统请求增多时, 整个系统的容量也会随之增大, 同时分布式特性也增加了网络系统的健壮性。	V2V/V2I	IP 寻址	在途增值业务
停车场管理 (FPM) ^[34-36]	通过路旁无线通信终端提供的实时停车信息, 从而引导驾驶人员更方便、快捷地找到停车位。	V2I	IP 寻址	
实时视频传输 (RTVT) ^[37]	在车辆网络环境中, 以全新的组网方式实现多媒体及视频信号的实时传输, 以帮助不同车辆内的网络用户之间进行实时通信和共享信息的需要。	V2V/V2I	IP 寻址	
多人在线游戏 (MOG) ^[38]	多名游戏玩家在乘车旅行途中, 通过编队行驶的车辆临时组成的无线通信网络进行车间接互动娱乐, 同时还可以在游戏过程中与其他玩家进行语音或视频交流。	V2V	IP 寻址	
高速互联网接入 (Hotspot) ^[39]	为公众在加油站、停车场、旅馆等热点区域提供高速 Internet 接入服务, 实现在线收发 E-mail、阅读新闻、即时聊天等。	V2I	IP 寻址	

当前车辆具有的瞬时位置、速度、加速度和转向灯的控制状态)以及道路的环境状况(如路面是否有积水或积雪)等实时信息,从而对其前后左右四个方向上的潜在危险进行主动检测,并在车辆与危险目标可能发生碰撞的情况下,进行声光报警(以提示驾驶人员注意危险目标所在方位及其危险程度)或激活相应的防撞应急措施(如启动自动刹车系统或提前触发安全气囊),其应用目标是努力提高道路交通运输网络的安全运行能力,避免侧挂或连环追尾等恶性交通事故的发生,并显著减少人员伤亡以及财产损失。

相比那些仅基于一系列车载传感装置(如超声波、雷达、激光、机器视觉、红外等)的安全辅助系统而言,基于车车/车路通信技术的交通安全类应用主要是通过 GPS 获取自身的位置、速度和加速度等运动信息,无须进行复杂的信号处理或图像处理;借助中间车辆的信息转发,后者在应对非视距范围内的交通事故预警方面还具有不可比拟的优势。然而,为了解决传统 GPS 的定位精度问题以及在困难地区由于高大建筑物、桥梁、隧道、树木等的遮挡或多径效应,导致 GPS 信号质量下降,定位精度的降低无法满足协同安全驾驶服务的应用需求^[21]。因此,采用差分 GPS(DGPS)提高定位精度^[22],并结合陀螺仪等惯性导航系统(INS)实现航位推算也是目前广泛研究的发展方向。

面向行车安全方面的应用具有最高的优先级,它对紧急告警消息的快速、可靠分发有着非常严格的要求,目前多以广播方式加以保证^[23],同时也需要解决广播风暴问题^[24]。此外,这类应用还要求具有较高的市场普及率才能够得以最终实现,例如基于车车通信技术的协同防撞告警(CCW)服务要求所有车辆都必须装备 VANET 无线通信设施(即接近 100%的市场普及率^[25]),如图 4 所示。

5.2. 交通运输管理方面的应用

面向行车效率方面的应用主要是基于浮动车的移动采集功能,从而实现对道路交通流信息的动态、实时监测。一方面可以通过车路通信系统传送到交通指挥控制中心,并由交通控制中心进行集中处理,以获得整个城市道路网的交通流分布,从而实现在大区域范围内的实时交通调度;另一方面也可以通过车车通信系统直接在车辆网络内部发布,并由各个车辆

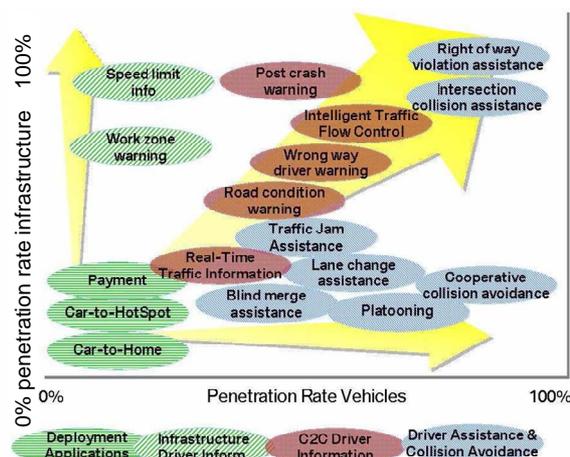


Figure 4. Necessary vehicle and infrastructure penetration rates for different kinds of applications
图 4. 车辆自组织网络的典型应用及其所需的市场普及率

节点分布式处理,以获得局部道路的实时交通信息,从而能够无时延地在小范围内进行区域交通调度。

通过在车辆节点、路旁设施以及交通控制中心三者之间共享实时的道路交通信息,从而提高交通信息资源的利用效率,改善道路交通运输网络的拥堵状况,并有效缩短行车时间。

面向行车效率的应用虽然对实时性没有特别要求,但是过高的时延以及丢包率也同样会使消息质量大打折扣^[15]。由于信源/信宿节点通常为某一地理区域内的任意车辆,因此,上述两类典型应用多采用地理寻址方式^[11]。

5.3. 在途增值服务方面的应用

在途增值服务方面的应用则主要是通过车路通信系统以及车载智能终端,为驾乘人员提供形式多样、内容丰富的移动通信、移动办公以及影音娱乐等增值业务,从而提升智能交通系统的应用价值。此类应用具有最低的优先级,并且会在短时间内占用大量的网络带宽资源;同时,为了保持与传统互联网业务的兼容性,通常采用 IP 寻址方式。

小结 随着无线网络技术的进步与普及,行车安全问题越来越受到重视,IEEE 针对 VANET 也定义了约 40 种相关应用,除了学术界的前瞻技术探讨外,美国、欧洲和日本等交通发达国家的产业界也在积极发展各种类型的应用研究,显示出国际上对 VANET 相关应用与研究发展的高度重视。然而,目前大部分应用尚处于理论研究及实验评估阶段,加之

大规模部署该系统还涉及到投资和法律等方面的问题,因此,如何将理论成果转化为实际应用便成为现阶段的主要任务之一。

6. 车辆自组织网络相关研究机构与项目

6.1. 相关研究机构及主要技术标准

VANET 研究人员多来自图论、统计物理学、计算机网络及交通工程等不同领域,其研究成果主要发表于 IEEE/ACM 等相关学术期刊和会议。特别值得一提的是,ACM 自 2004 年起每年都会专门举办一届 VANET 国际研讨会,借以展示和讨论车辆组网互联技术的最新研究进展。除美国车辆安全通信协会(VSCC)、欧洲车车通信协会(C2C-CC)以及日本 Internet ITS 协会等产业研究机构外,美国加州大学伯克利分校^[21,22]和洛杉矶分校^[20,32,33]、卡耐基·梅隆大学^[24,35]、老道明大学^[36,40,41]、乔治·华盛顿大学^[8]、乔治·梅森大学^[27]、罗格斯大学^[28]、马里兰大学^[31]、德国曼海姆大学^[11,13,18]、卡尔斯鲁厄大学^[7,18,19]、汉诺威大学^[12]以及瑞士联邦理工学院^[6,42]等著名学府也开始了车辆自组网方面的研究工作,纷纷成立了 VANET 研究小组并启动或参与了相关研究计划。

国际标准化组织(ISO)智能运输系统技术委员会(TC204)第 16 工作组(WG16),即广域通信、协议及接

口工作组,提出了一系列被称为中长程通信系统空中接口(CALM)的草案标准,并规定了有线和无线通信系统的通用框架、网络协议和接口定义,采用的接入技术主要包括:蜂窝通信、卫星通信、红外通信、5 GHz 微波和 60 GHz 毫米波通信以及移动无线宽带等,能够实现车辆与车辆、车辆与路旁设施、车辆与行人以及车辆与 Internet 间的直接或多跳通信(如单播、多播和广播),并承载所有类型的应用(如 ITS 安全类、非安全类应用以及传统互联网应用等),其网络层设计为支持 IP(如 IPv6)以及非 IP(如 FAST)类型的通信^[17],其概念验证示范模型如图 5 所示。

美国材料试验协会(ASTM)、电气和电子工程师协会(IEEE)以及汽车工程师协会(SAE)共同采纳的 DSRC/WAVE 标准。其中,ASTM 车路通信小组委员会(E17.51)负责开发 5.9 GHz DSRC 标准,并于 2003 年发布其物理层与媒介访问控制(MAC)层规范(E2213-03^[43]),它也是 IEEE WLAN 工作组项目 802.11p 的基础。相应的高层协议规范则由 IEEE DSRC 工作组负责,主要包括四个标准^[44]:①WAVE 资源管理(P1609.1);②WAVE 应用和管理信息安全服务(P1609.2);③WAVE 网络服务(P1609.3);④WAVE 多信道操作(P1609.4)。SAE 则主要负责开发消息集(J2735)、数据字典及应用框架等标准。

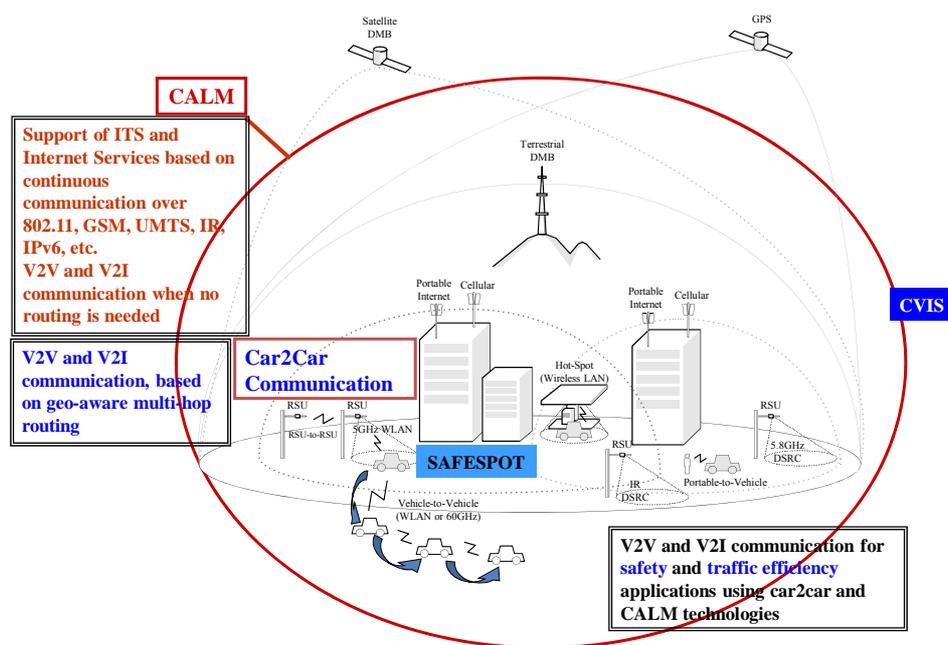


Figure 5. Proof of concept demonstration for CALM technology
图 5. 中长程通信系统空中接口(CALM)概念验证示范模型

6.2. 相关研究计划或研究项目

欧盟委员会特别资助的针对 eSafety 通信 (COMeSafety, 2006.1~2009.12)项目^[45]旨在使车车/车路通信技术标准化, 并在此基础上延伸出多个研究计划, 其网络关系示意图如图 6 所示。CARLINK 项目^[46](2006.7~2008.6)试图通过整合多种无线组网技术(例如 WLAN、WiMAX、蜂窝移动通信网以及广域传输网等), 建立一种具有混合体系架构的智能无线交通服务平台, 从而实现在道路网内部实时发布区域天气预报、城市交通拥堵状况以及交通运输调度管理等。面向道路安全的智能协同系统(COOPERS, 2006.2~2010.1)^[47]侧重于道路基础设施与机动车辆之间的实时交通信息通信。SAFESPOT 综合研究项目^[48](2006.1~2009.12)侧重于动态车辆网络的 V2V 通信, 同时融入车辆与道路基础设施之间的 V2I 通信, 形成所谓的安全间距辅助概念, 即通过检测道路前方潜在的危險, 从而扩展了驾驶人员在时间和空间上对其所处环境的认知。作为泛欧国家主要的研究与发展计划之一, 车路协同系统(CVIS, 2006.2~2010.1)^[49]则更多地侧重 V2V 和 V2I 通信核心技术的设计、研发与测试。安全车辆通信(SEVECOM, 2006.1~2008.12)项目^[50]主要关注未来车辆网络通信安全需求的界定与实现, 例如车辆间通信及其与道路基础设施间通信的安全性和隐密性。借助人车之间的协同通信与传感技术提升道路交通安全的 WATCH-OVER (2006.1~2008.12)^[51]主要研究车载平台与可穿戴用户模块之间的协同合作, 所采用的技术主要是基于短距离无线通信技术(如 ZigBee、射频识别 RFID、超宽带 UWB)以及视觉传感技术(如红外、2/3D 视觉传感器、微波雷达、激光雷达等)。欧洲其它的研究项目, 例如 CarTALK-2000 (2001.8~2004.7)^[52,53]、远程通信及信息处理系统(GST, 2004.3~2007.3)以及欧洲最大的道路安全倡议 PReVENT 的子项目——WILLWARN (2004.2~ 2008.1)等, 虽然已经结束, 但是他们的研究成果却是值得上述这些后续研究项目借鉴的。另外, 值得一提的欧洲部分国家项目还包括: 由德国教育与研究部部分资助的项目 FleetNet (2000.9~2003.12)^[54]及其后续项目 NoW (2004.5~2008.5)^[55]旨在充分利用无线移动自组织网络通信技术开发车辆间协同通信平台, 从而提高驾乘人员的行车安全与舒适度; 英国运输部已经启

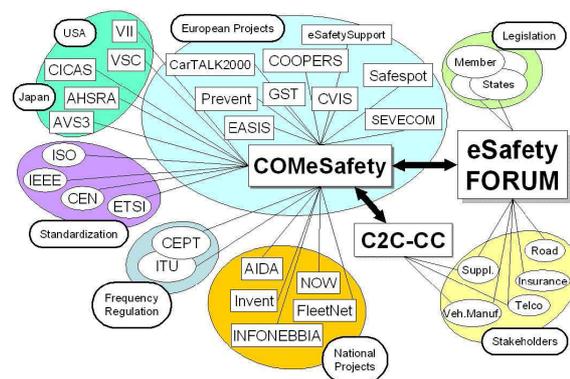


Figure 6. Relationship between COMeSafety and other research institutions/projects

图 6. 中远程通信系统空中接口(CALM)概念验证示范模型

动的车路全作系统(CVHS), 其目标是通过车辆、基础设施与通信的协调获得更为安全、可靠的运输; 以及瑞典的智能车辆安全系统(IVSS)等。

美国方面主要是由交通部(USDOT)和 ITS America 等联合倡导、实施的车辆与道路基础设施一体化(VII, 2004.1~2008.12)^[56,57]应用, 通过在各州范围内采用统一的实施模式, 并运用浮动探测车实时获取交通数据信息, 提供动态路径规划与诱导支持, 从而显著提高道路交通安全及行车效率。该计划是一个多系统集成、多学科交叉的综合性实验项目, 主要包括: 由 USDOT 赞助的智能车辆先导(IVI, 1998~2004)计划^[58]、车辆安全通信(VSC)计划(第一阶段: 2002.5~2004.12; 第二阶段: 2006~2009)^[59]、增强型数字地图(EDMap, 2001.4~2004.3)计划等。美国通信委员会(FCC)还专门为 ITS 通信分配了 5.9 GHz DSRC 频段, 其最终目标就是通过一系列车载传感装置以及 V2V/V2I 通信为主要的信息获取手段, 并为驾乘人员提供安全辅助控制及全自动控制支持。与此相关的研究项目还包括: 交叉路口协同避撞系统(CICAS, 2004.1~2008.12)^[60]以及综合车载安全系统(IVBSS, 2004.7~2009.10)^[61]等。

根据日本对智能道路交通的规划, 日本政府、企业以及研究机构正在积极推动日本 ITS 进入一个新的发展阶段, 即遵循 ITS 的系统集成理念, 融合现有系统, 例如车辆信息与通信系统(VICS, 1995.7~至今)、电子收费系统(ETC, 2001.3~至今)、先进辅助巡航道路系统(ACAHS, 1996.9~至今)以及先进安全车辆系统(ASV, 1991 年开始, 第一、二、三阶段分别于 1995、2000、2005 年结束; 目前正在进行的是第四阶段),

从而实现集 ITS 于一体的智能道路交通基础设施,即 Smartway。

小结 以上简要介绍了欧洲、美国和日本在 VANET 领域的研究、应用及其发展趋势,不难看出:尽管各国对其称谓不一,内容也不尽相同,但都是以道路和车辆为基础、以信息处理与通信技术为核心、以出行安全和行车效率为目的,并将道路交通基础设施的智能化及其与车载终端一体化系统的协调合作作为研发方向和突破重点。国内对此方面的研究尚处于跟踪和调研阶段^[62-64],据笔者所知,国家高技术研究发展计划(863 计划)现代交通技术领域围绕提高我国道路交通安全保障水平的重大需求,启动了为期 3 年的智能车路协同关键技术研究(2011.1~2013.12)主题项目,旨在建立智能车路协同技术体系框架,攻克智能车载系统、智能路侧系统、车车/车路协同信息交互与控制、车路协同系统集成和仿真测试等关键技术,研制支持典型应用的系统装备,从而形成我国道路交通主动安全保障的核心技术体系。

7. 车辆自组织网络的关键技术

车辆自组织网络作为现代交通与信息领域新兴的研究热点,涉及多个学科交叉与融合,有着非常多的关键技术亟待研究与解决,本节仅列出部分关键技术。

7.1. 无线接入技术

未来的 ITS 旨在充分利用先进的短距离无线通信技术,加快道路交通安全系统的研发与集成应用,在为道路交通提供全面的安全解决方案的同时,除自主式智能车载信息终端装置外,还必须考虑车路协调合作方式,即通过车-X 通信技术实时获取当前道路环境状况信息,从而更有效地评估潜在危险,其研究与发展将直接受益于以 DSRC、WLAN、WiMAX、红外、蓝牙以及 2/3G 等为代表的无线移动接入技术的发展与更新。从网络层次上讲,无线接入技术一般对应于开放系统互连/参考模型(OSI/RM)的物理层和数据链路层(2/3G 和蓝牙技术除外,它们将包含整个通信协议栈)。本小节仅对 DSRC 作简要的介绍(重点关注其物理层参数),并与其它短距离通信技术的主要性能指标进行分析和比较。

7.1.1. 专用短距离通信(DSRC)

DSRC(业界也称之为 IEEE 802.11p 或 WAVE)是专门为车载环境设计开发的中/短程射频通信技术,能够为车辆与车辆、车辆与路旁基础设施之间提供高速、实时、准确、可靠的单/双向语音、图像及数据通信服务,支持车辆公共安全、交通运输管理、在途信息发布、商用货运管理以及不停车收费服务等应用^[65],从而能够显著提高道路交通的安全运行效率。它包括一系列协议和标准,其工作原理非常类似于 RFID 技术。

目前,国际上已基本形成以欧洲 CEN/TC278、美国 ASTM/IEEE 和日本 ARIB/TC204 为核心的 DSRC/WAVE 标准化体系,它们之间彼此互不兼容并且各自有着不同的应用地区范围,但是从微波频谱的角度来看,面向 ITS 应用的 DSRC 技术基本上都选择了 5.8~5.9 GHz 射频频段,主要是因为该频段的微波信号具有良好的频谱特征及传播特性,例如能够提供高速率的数据传输(6~27 Mbps),通信距离可达 1000 m,并且受天气影响小等,因此特别适用于车载环境。此外,为了避免其它非安全相关类应用对高优先级的行车安全相关类应用带来不必要的时延与干扰,该频段虽为免费使用频段,但在使用之前必须事先申请许可证^[66],这一点也完全不同于 900 MHz、2.4 GHz 和 5.0 GHz ISM 频段的使用。早期也曾采用过 915 MHz 频段,它们之间的主要差异如表 2 所示。

Table 2. 915 MHz vs. 5.9 GHz system performance comparison
表 2. 915 MHz 与 5.9 GHz 系统性能比较

射频频段	915 MHz	5.9 GHz
频谱带宽	12 MHz	75 MHz
数据速率	500 kbps	6~27 Mbps
通信距离	<30 m	<1 km(标称 300 m ^[67])
信号功率		
上行链路	<4 mW	<2 W
下行链路	<10 W	<2 W
信道数目	1(使用无需申请执照)	7(使用前需申请执照)
主要应用	不停车收费	车辆安全通信、互联网接入
系统需求	专门定制芯片及软件	基于 IEEE 802.11a ^[68]
通信类型	车路通信	车路/车车通信
通信模式	请求响应方式	请求响应/点对点方式
干扰来源	900 MHz 移动通信 扩频电台、雷达等	某些雷达或卫星 通信的上行链路

美国联邦通信委员会(FCC)于2003年7月专门为DSRC分配了75 MHz的频谱带宽,位于5.850~5.925 GHz之间。为了满足不同类型的应用需求,该频段被划分为八个不同的信道^[67]:一个10 MHz带宽的控制信道(5.885~5.895 GHz, CH178)、六个10 MHz带宽的服务信道(其中,CH172属于车车通信服务信道,车路通信服务信道包括CH174/176/180/182,交叉路口协同通信服务信道则为CH184)以及一个5 MHz带宽的预留信道(参见图7所示)。控制信道主要用于行车安全相关的广播信标及服务通告的发布,其它非安全相关的交通信息则在服务信道中处理并加以传输。在DSRC系统中,车车通信带宽选择为10 MHz(而不采用WLAN系统中的20 MHz带宽),其主要原因是为了减低由于多径传播所引起的正交频分复用(OFDM)符号间的干扰现象^[66]。

不同于美国的DSRC规范,欧洲电信标准协会(ETSI)提出将5.855~5.925 GHz之间共70 MHz的频段分配给欧洲DSRC系统,其中,10 MHz带宽的控制信道中心频率位于5.900 GHz(CH180)。此外,针对道路安全以及交通管理等方面的应用指定5.875~5.905 GHz(3 × 10 MHz,主要用于车路间通信),针对高优先级行车安全相关的应用则指定5.905~5.925 GHz(2 × 10 MHz,主要用于车辆间通信),并规定5.855~5.875 GHz共20 MHz的可用带宽主要针对非安全相关的交通应用^[17]。

日本则倾向于在5.8 GHz频段(5.770~5.850 GHz)分配80 MHz带宽用于其DSRC通信。虽然我国ISO/TC204技术委员会向交通部无线电管理委员会也提出将5.8 GHz频段分配给智能交通运输系统的短程通

信,但就目前的具体应用而言,主要实现的是ETC收费服务。

小结 表3为DSRC同其它几种常用的短距离无线接入技术在传输速率、频谱特征以及通信模式等方面的比较,可以看出每一种无线电系统都有它们各自的技术性能和应用领域。数据通信网络(如WLAN)能够提供无障碍的Internet接入,因而具有高速率和高可靠性,但不支持对实时性要求高的应用;电信网络(如GSM/CDMA)主要面向的是话音业务,因此能够提供低时延的实时支持,但可靠性较差;专用通信系统(如DSRC)是应用相关的网络,只有贴近应用,才能够做出高效的目标系统;然而无线电广播很难提供高可靠、低时延的实时通信服务,其可靠性通常由中继转发加以保证。

7.2. 信道共享技术

在车辆自组织网络中,MAC协议决定着无线信道的共享方式,并在VANET节点之间分配有限的无线频谱资源,从而构建网络系统的底层通信基础结构。从网络层次上讲,MAC协议处于VANET物理层之上,其设计好坏直接影响到网络吞吐量、端对端时延等网络性能指标的优劣,对VANET数据分发性能也起着至关重要的作用,是保证车辆网络用户高效通信的关键技术之一。

MAC协议除了需要解决无线自组网中共有的隐藏和暴露终端以及如何使用分布式控制机制实现无线信道资源的公平接入,从而保证网络中各种业务的服务质量等普遍性问题外^[69,70],VANET特定的应用环境和业务需求使得研究人员在设计与开发车辆专用的MAC协议时,还必须着重考虑以下几方面的因素^[71]:

- 1) 可扩展性,以适应车辆网络高度动态、频繁变化的拓扑结构;
- 2) 实时性,在规定的时延要求(如100 ms^[60])内快速分发交通安全事件信息;
- 3) 可靠性,减少发送数据冲突的同时,还要提高分组在多径衰落时变信道中的正确接收^[72-74];
- 4) 突发性,以支持广播消息优先机制,应对可能出现的交通突发事件^[75]。

此外,车辆节点一般都有车载电源和GPS等设备,因此在设计和开发车辆专用MAC协议时,节约

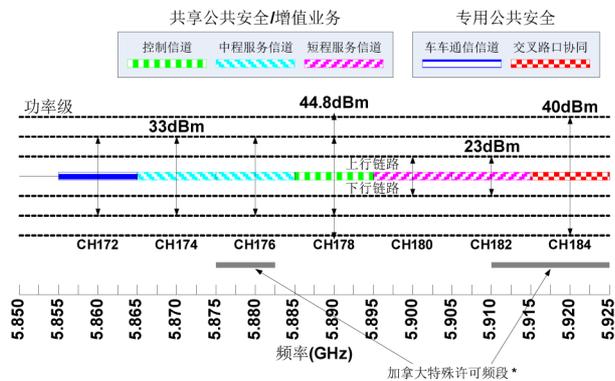


Figure 7. 5.9 GHz DSRC spectrum planning and power level
图 7. 5.9 GHz DSRC 频谱规划及其功率级分配

Table 3. Performance comparison between DSRC and other short range wireless communication technologies
表 3. DSRC 及其它短距离无线通信技术的性能比较

	DSRC-ETC	DSRC-IVC	WLAN	IR	WiMAX	GSM/GPRS	UMTS
技术标准		IEEE 802.11p	IEEE 802.11a/b/g	ISO 21214	IEEE 802.16	GSM	3GPP
天线类型	车顶天线	车顶天线	车顶天线	定向天线	智能天线(MIMO)	车顶天线	车顶天线
频谱范围 (MHz)	5795~5815 (早期: 902~928)	欧洲: 5855~5925 美国: 5850~5925 日本: 5770~5850	11a: 5 GHz(UNII) 11b/g: 2.4 GHz(ISM)	800~1000 nm	2~66 GHz, 可由 用户自行选择	欧洲: 900/1800 美国: 850/1900	欧洲: 900/2100 美国: 850/1700/1900
信道带宽	4 × 5 MHz 或 2 × 10 MHz	控制信道: 1 × 10 MHz 服务信道: 6 × 10 MHz	20 MHz	4 个独立信道		124 × 200 kHz 8 个时隙/载频	5 MHz
等效全向辐射功率	≤33 dBm	路旁节点: ≤44.8 dBm 车载节点: ≤33 dBm	17 dBm/MHz ≤z30dBm		取决于使用的 频率范围	(MS) ≤ 2W(850/900) ≤1W(1800/1900)	功率控制
数据速率 (kbps)	下行: 500 上行: 250	3000~27,000 典型速率: 6000	802.11a/g: ≤54,000 802.11b: ≤11,000	1000~2000	≤70,000 典型速率: 10,000	(GPRS)下行: 60~80 上行: 20~40	车载环境: 384
通信距离 (m)	3~15	≤1000	取决接入点的 覆盖范围	1~100 典型距离: 7	取决接入点 覆盖范围 最大: 50 km	取决基站 覆盖范围 最大: 35 km	取决基站覆盖范围 最大: 2 km
连接建立时间 (ms)	5~12	采用自组织方式		10	存在连接时延 支持越区切换	入网时间: 10 s 支持越区切换	入网时间: 2.12 s 支持越区切换
系统响应时间 (ms)	10	取决具体实现	取决具体实现	10	取决具体实现	500~700	200~300
信道访问机制	TDMA	EDCA(~802.11e)	CSMA	TDMA	OFDMA	TDMA	CDMA
优先级或 QoS 支持	无优先级 QoS 支持	4 个服务等级 无实时支持	有优先级支持 无 QoS/RT 支持	CALM~IR 支持 8 个不同的优先级	QoS 取决于其 到 AP 的距离	无 QoS 支持	QoS 取决于其 到 BS 的距离
通信模式	定向双工非对称 广播, 无 P2P	全向双工对称 广播/单播/多播	全向双工对称 广播, 无 P2P	定向双工对称 广播/单播/多播	全向双工非对称 有限广播, 无 P2P	全向双工非对称 无广播, 无 P2P	全向双工非对称 有限广播, 无 P2P
系统需求	路旁设备	GPS(但非强制)	接入点设备	视距定向天线	接入点设备	基站设备	基站设备
主要干扰来源	DSRC-IVC	DSRC-ETC WLAN 5GHz	DSRC-IVC	可见光, 雨, 雪	取决于使用的 频率范围	预留频段	预留频段

能量和时间同步等问题已不再是其首要考虑的关键因素^[76]。

纵观当前车用 MAC 协议研究的趋势, 我们注意到, 近年来该技术的发展实际上是沿着两条主线进行的^[77]: 一条是以无线局域网为基础, 在多址技术上主要采用载波侦听/冲突避免(CSMA/CA)机制, 从而有效地避免载波之间的冲突; 另一条则是以分组无线电为基础, 在多址技术上主要采用无竞争的分布式时隙预约(例如 RR-ALOHA^[78]), 从而有效地解决了隐藏/暴露终端问题。

7.2.1. 基于自由竞争的车用 MAC 协议

基于竞争的随机访问 MAC 协议采用按需分配信

道的方法, 基本思想是当节点需要发送数据时, 通过竞争方式占用无线信道。如果发送的数据包产生了冲突, 则按照某种策略重新发送, 直到数据被成功接收或放弃发送。典型的基于自由竞争的车用 MAC 协议包括: IEEE 802.11 MAC^[79]、DOLPHIN^[80]、自动依赖性监督 - 广播协议(ADS-B)等。考虑到 IEEE 802.11 标准已被广泛应用于 VANET 模拟实验研究及系统原型设计, 为此在简要介绍其 MAC 协议后, 说明业界针对车载环境所做的改进。

IEEE 802.11 MAC

IEEE 802.11 MAC 标准定义了两类媒介访问控制机制: 点协调功能(PCF)和分布式协调功能(DCF), 其中, DCF 是 PCF 的基础, 提供分布式竞争接入服务,

PCF 则提供有基础设施支持的轮询式无竞争接入服务。

802.11 DCF 是基于 CSMA/CA 多址接入技术的协议, 其载波侦听机制由物理载波侦听和虚拟载波侦听共同完成, 其中物理载波侦听有赖于所使用的物理层硬件, 通过节点接收到的信号电平来确定信道的占用情况, 该方法不能够有效地解决隐藏终端问题^[72]; 虚拟载波侦听则是对接收到的 MAC 帧信息进行解析的基础上, 判断无线信道将被占用的时间, 从而确定自身发送需要延迟多长的时间。因此, 网络中每个节点都必须维护一个网络分配矢量(NAV), 它是一个定时器, 其数值大小预示着当前正在进行的通信所需持续的时间。当其中任何一个载波侦听功能指示信道忙时(例如 NAV 不等于零), 则认为信道忙; 否则, 认为信道空闲。

802.11 MAC 采用不同的帧间间距(IFS), 从而实现对不同分组或业务提供接入信道的优先级控制。这些帧间间距按照从短到长的顺序分别为: 短帧间间距(SIFS)、PCF 帧间间距(PIFS)、DCF 帧间间距(DIFS)、扩展帧间间距(EIFS), 可以看出 SIFS 具有最高的优先级。

根据 CSMA/CA 协议, 每个车辆节点在尝试发送数据之前, 首先侦听信道是否空闲。如果侦听到信道已经空闲了 DIFS 的时间, 则立即发出包含信源节点 ID 以及未来整个通信持续时间的请求发送(RTS)分组。所有接收到 RTS 分组的邻居车辆则根据解析出的通信持续时间分别设置各自的 NAV 值。如果信宿节点准备就绪, 在接收到 RTS 分组并等待 SIFS 的时间后, 则立即发出包含后续通信所需时间的清除发送(CTS)分组。所有接收到 CTS 分组的邻居节点会根据解析出的通信持续时间再次设置各自的 NAV 值。当信源节点接收到 CTS 分组并等待 SIFS 的时间之后, 开始传输数据分组。信宿节点则在正确接收来自信源节点的 DATA 分组并等待 SIFS 的时间之后, 再向信源节点发送一个确认应答(ACK)信号。所有接收到 ACK 分组的节点将各自的 NAV 值清零。因此, 在单一共享信道中, 通过 RTS/CTS/DATA/ACK 四次握手过程, 从而实现了分布式业务数据的接入过程。

如果信道忙, 则执行二进制指数退避(BEB)算法, 然后重新检测信道, 这样能够避免在各站点之间竞争信道时可能造成的冲突。节点进入退避状态将启动一

个退避计时器, 当计时到达退避时间后结束退避状态。在退避状态下, 只有当检测到信道空闲时才进行计时。如果信道忙, 退避计时器则停止计时, 直到检测到信道空闲时间大于 DIFS 后才继续计时。当多个节点推迟且进入随机退避状态时, 则利用随机函数选择具有最小退避时间的节点作为竞争优胜者。

IEEE 802.11p

IEEE 802.11 MAC 的自组织工作模式在构建独立基本服务集(IBSS)时, 效率低下(其主要表现为耗时)、算法复杂且系统开销大, 不适合车辆之间的专用通信。车车通信要求具有的瞬时数据交换能力, 无法通过首先扫描基本服务集(BSS)信标信道, 然后再执行一系列握手过程来得以实现。为此, IEEE 802.11p 基于 802.11a, 并对 MAC 层作了以下主要改进^[66]:

1) WAVE 模式。所有支持 802.11p 的无线设备默认都守候在同一信道(例如控制信道)内, 并配置基本服务集标识(BSSID)域为全 1, 以支持车辆间的安全通信。该模式允许 VANET 节点以广播方式收发数据帧, 不需要事先隶属于某个 BSS。这样, 当 VANET 节点位于彼此的通信范围内时, 便可以立即通信, 从而减少了系统的额外开销。

2) WAVE BSS。如果 VANET 节点需要获取某项服务(如数字地图增量更新服务)时, 它首先发送一个服务请求分组, WAVE 站点则根据接收到的请求分组采用信标帧发布 WAVE BSS, 不同的是, WAVE 站点不必周期性的重复广播。由于其中已经包含了所需的全部信息, 因此接收端一方面可以了解 WAVE BSS 中提供的服务以决定是否需要获取该项服务, 另一方面也可以根据其提供的信息来配置 VANET 节点(例如服务所在信道等)以完成服务的连接过程。相关服务的安全认证则由位于 802.11 MAC 之上的高层机制来保证, 这进一步减少了系统的通信开销。

3) BSSID 扩展用法。考虑到行车安全是 VANET 首要解决的关键应用, 为此, 当节点配置为特定 BSSID, 即隶属于某个 WAVE BSS 时, 其仍然支持全为 1 的通配型 BSSID; 换言之, WAVE 模式与 WAVE BSS 可以共存, 因此, 在进行数字地图增量更新的同时, VANET 节点仍可对外发送广播信标。这一点完全不同于传统的 802.11 MAC 机制, 即当节点处于某个特定的 BSS 时, 它便会自动过滤掉来自其它 BSS 成员节点的分组包。

4) 分布式系统服务。在 IEEE 802.11 标准中定义的分布式系统为通过 AP 在相同扩展服务集(ESS)内不同 BSS 之间的相互连通,即移动站点必须位于同一个网段内。这显然不能满足车载计算机在城市或城间范围内高速运动时仍需要保持与网络通信的要求。为此, WAVE 模式下的车载通信终端,不管是否已经隶属于某个 WAVE BSS,都能够发送/接收含有通配型 BSSID 的数据帧,这时帧控制字段中的 ToDS 和 FromDS 比特位必须设置为 00;若为某个已知的 BSSID,则可以用来访问分布式系统服务。

7.2.2. 基于时分多址的车用 MAC 协议

时分多址(TDMA)是实现信道分配简单成熟的机制,例如蓝牙网络便采用了基于 TDMA 的 MAC 协议。它是在一个宽带的无线载波上,将时间分成周期性的帧,每一帧再分割为若干时隙(无论帧或时隙都是互不重叠的),每一个时隙就是一个信道,从而分配给一个用户使用。系统根据一定的时隙分配原则,使各个车载通信终端在每帧内只能按照指定的时隙发送或接收数据。在满足定时和同步的条件下,各个节点之间的通信互不干扰。典型的基于 TDMA 机制的车用 MAC 协议包括: ADHOC-MAC^[81,82],它非常适合车辆网络对通信实时性的需求,但网络扩展性较差,并且节点间需要严格的时间同步。

ADHOC-MAC

ADHOC-MAC 是欧洲 CarTALK-2000(随后又被德国 FleetNet 等)研究项目采用的 MAC 协议,其基本实现为可靠的时隙预约 ALOHA(RR-ALOHA)协议^[78],并根据车辆网络的特点对时隙预约 ALOHA(R-ALOHA)协议作了较大改进,通过全分布式的媒体接入控制,即动态时分多址接入机制,实现在同步自组网中建立无竞争的、可靠的单跳广播信道,通过帧信息(FI)的交互与更新,使所有邻节点都能够准确地掌握时隙分配情况,从而较好地解决了隐藏终端和暴露终端问题,通过快速预约附加带宽的方式占用其它空闲信道,还能够提供高带宽利用率的点对点通信以及具有最少转发节点的多跳广播服务。RR-ALOHA 可以在不同的物理层标准下使用(即独立于物理层^[76]),尤其适合于采用时隙帧结构的物理层,如通用移动通信系统陆地无线接入时分双工(UTRA-TDD)。UTRA-TDD 最初是为集中式网络体系架构而设计开发的,

CarTALK-2000 项目解决了许多关键技术性问题(如分布式同步技术、功率控制机制、无线资源管理等)^[83],从而将其成功地移植到 VANET 中。

RR-ALOHA 协议的基本思想是^[78]:假设一帧由 N 个时隙组成,并且单跳内的所有节点共同组成一个全连通的簇。当有节点需要加入时,先侦听一帧的时间,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了该分组,则在它的 FI 中标示出来。可以看出 FI 是发送节点感知的前一帧的时隙状态信息。当新加入的节点从一帧时间内收到的所有 FI 中知道邻节点都已正确接收到分组时,即认为预约成功,从而将每帧中的该时隙作为其基本信道(BCH),直到节点离开网络,在此期间,其它节点不能够访问该时隙。其中 BCH 主要用于传送 FI、其它信令信息以及承载有效载荷。在每一帧中,节点都必须在自己的 BCH 中发送 FI,并根据邻节点的 FI 和自己的信道使用情况及时更新 FI。当 BCH 提供的基本带宽不能够满足业务需求时,节点可以通过预约附加信道的方式占用其它空闲信道,以满足业务的 QoS 要求。如果是点对点通信,节点还可以预约 PTP 信息进行传送,以实现相邻一跳簇内的时隙复用,从而提高了信道的利用率。

在 RR-ALOHA 协议中,FI 的发送与更新是其关键技术之一。FI 是一个由 N 个时隙状态信息组成的向量,它由节点对前 N 个时隙侦听获得。当分组被正确接收或发送时,相应的时隙标记为忙(BUSY),否则标记为空闲(IDLE),其中,在忙时隙的 FI 中还包含发送节点的 ID 等信息。在从时隙($k-N$)到时隙($k-1$)中,至少接收到一个 FI 将时隙($k-N$)标记为忙,则第 k 个时隙被标记为已预约(RESERVED),否则标记为可用(AVAILABLE)。显然,一个可用时隙是可以被访问的。当节点 j 试图接入某个可用时隙时,在其接收到的所有 FI 中,节点 j 用于传送的时隙均被标记为忙,则认为传送成功,否则传送失败。

图 8 中的 7 个节点分别隶属于三个单跳(OH)簇 A、B、C,位于同一个 OH 簇内的所有节点可以直接通信,不同簇内的节点如果不属于所有簇的公共子集则不能够直接通信,只有位于公共子集的节点才能够与簇内的所有节点通信,并且所有的 OH 簇形成一个两跳(TH)簇。以节点 1 为例,它通过侦听信道可以知

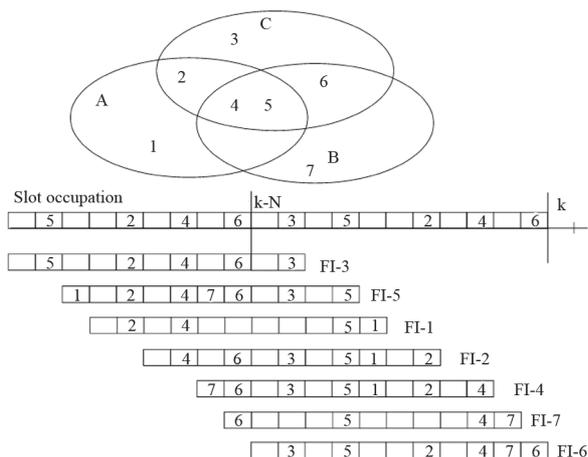


Figure 8. FI broadcast schematic
图 8. FI 广播示意图

道与其最近邻节点(即节点 2、4、5)的时隙占用情况,通过正确接收并解析来自邻节点的 FI 信标(即 FI-2、FI-4、FI-5),还可以掌握其两跳范围内其它节点(例如节点 3、6、7)的时隙占用情况,从而有效克服了隐藏终端问题,并显著减少了冲突的发生。采用动态 TDMA 机制为每个终端预留时隙,也为 VANET 提供了较好的 QoS 保证。但是,在该协议中一帧所包含的时隙数也限制了无线传输范围内的节点数(这是因为时隙数必须大于节点数),所以当网络中节点增多时,帧的长度也要随之增加。此外,FI 的周期性传送也将增加网络的额外开销。

在此,我们将 IEEE 802.11 同 ADHOC MAC 协议进行了简单的比较,如表 4 所示。需要说明的是,此处的比较并不是为了要确定这两类 MAC 协议谁优谁劣;相反,两者在目前已经启动的 VANET 研究计划或研究项目中都具有一定的应用背景。例如 IEEE 802.11 适合于高速运动场景且不需要时间同步,而 ADHOC MAC 则能够保证更高的可靠性、QoS 和实时性。因此作者认为,这两个标准的融合将为 VANET 提供更好、更完整的解决方案。

7.2.3. 基于空分多址的车用 MAC 协议

空分多址(SDMA)接入方式是通过空间的分割来区别不同的用户。在无线通信中,能够实现空间分割的基本技术就是采用自适应阵列天线,在不同用户方向上形成不同的波束。SDMA 采用定向天线来服务于不同的用户,相同或不同的频率都可以用来服务于被天线波束覆盖的不同区域。扇形天线可以看作是

Table 4. IEEE 802.11 vs. ADHOC MAC
表 4. IEEE 802.11 与 ADHOC MAC

	IEEE 802.11 MAC	ADHOC MAC
接入机制	CSMA/CA	TDMA
协议类型	异步 MAC	同步 MAC
时间同步	没有必要	必须
适用网络规模	中等	受时隙数限制
节点运动性	中/高速	中等
QoS 与实时性	差*	中等
可靠多播/广播	无	有
技术成熟度	成熟,仍在发展中	较成熟

*IEEE 802.11e 为无线设备定义了支持带宽敏感应用的 QoS 机制。

SDMA 的一个基本方式,在极限情况下,自适应阵列天线具有极小的波束和无限快的跟踪速率,理论上可以实现最佳的 SDMA。目前,针对不同的 MANET 应用,研究人员从不同方面提出了多个基于定向天线的 MAC 协议^[84-89],其中, Ko 等人^[84]基于 IEEE 802.11 的定向 MAC(D-MAC)协议最有可能应用于车载环境^[76,90]。

D-MAC

该协议要求每个终端必须知道自己及其近邻节点的地理位置,再根据周围节点是否正在进行通信等情况选择采用定向或全向方式发送 RTS 分组,接收到 RTS 或 CTS 分组的定向天线将自动锁定,并根据接收信息延迟发送。图 9 所示的网络中包含三个节点 A、B、C,其中,节点 B 和 C 不在彼此的无线通信范围内,它们的公共邻居是节点 A。在 A 处所有定向天线未被锁定时,若 A 要向 B 发送信息,则 A 先发出一个全方向 RTS 分组。节点 C 中接收到 RTS 分组的定向天线将被锁定,直到 A 和 B 之间的通信结束。这样,在节点 A 和 B 的整个通信过程中,C 不会向 A 发送 RTS 分组,从而避免了冲突。

由于车辆的运动受道路结构以及交通规则的限制,因此,在 VANET 中采用定向天线技术必定有利于减少传输干扰和冲突的发生,同时也可增加信道复用的可能性^[89,91]。该技术在理论上可以显著改善现有 MAC 协议的性能,然而定向天线系统的复杂性以及难以管理等特点也给现场实现带来了困难。

小结 如何解决多个用户高效、合理地共享有限

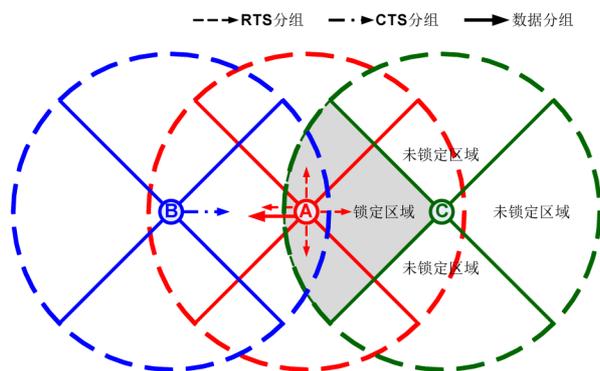


Figure 9. Principle of D-MAC protocol
图 9. D-MAC 工作原理

的无线信道资源，即 MAC 协议的设计一直都是无线移动自组织网络(当然也包括 VANET)的关键技术之一，它的好坏直接影响到网络吞吐量、端对端时延等性能指标的优劣。由于车辆网络独有的特性，使得车用 MAC 协议的设计面临许多极具挑战性的技术问题。不同的网络环境也有着不同的应用需求和限制条件，因此不存在一个适用于所有车辆网络的 MAC 协议。无论是采用基于自由竞争的信道分配机制，还是采用基于 TDMA/SDMA 的固定信道分配机制，或者其它类型的 MAC 协议(如针对车辆编队行驶的无线令牌环协议^[92])，都必须根据具体应用选择不同的协议类型来设计相应的 MAC 协议。

7.3. 数据分发技术

车用自组织网络是由一组具有路由功能的车辆节点组成的分布式无线多跳通信网络，它可以不依赖任何预设的网络基础设施，网络中的每个节点既是终端，也是中继器。当信源节点与信宿节点之间不能够直接通信时，则需要借助其它中间节点的辅助，采用存储转发机制有利于克服车辆网络的间歇连通性问题^[93]。因此数据分发协议也是 VANET 中不可缺少的一个重要部分，它负责将数据分组从信源节点通过车辆网络转发到目标节点，其设计的好坏直接影响到通信业务服务质量的各项性能指标，影响到通信系统资源使用的有效性和可靠性。

车辆网络中的数据分发主要包括两个方面的功能：寻找源节点与目标节点间的优化路径，并将数据分组沿着优化路径正确转发。VANET 的首要目标是提供高质量和公平高效地利用网络带宽，这些网络路由协议的主要任务是寻找从源节点到目标节点

间通信延迟最小的路径，同时提高整个网络的信道利用率，避免产生通信拥塞并均衡网络流量等，这类似于传统的 MANET 和 WLAN 等无线网络。然而，在 VANET 中，节点的能量消耗问题已不再是这类网络考虑的重点，同时车辆节点数目往往很大且一般都安装有 GPS 等定位终端，因此数据分发协议要能够在局部拓扑以及全局定位信息的基础上选择最佳路径，并能够适应网络的快速拓扑变化，它对应于 OSI 七层模型中的网络层。

针对不同的车辆网络应用，研究人员提出了不同的数据分发协议。但到目前为止，仍缺乏一个完整和清晰的协议分类。本小节从具体应用的角度出发，根据不同应用对车辆网络各种特性的敏感度不同，将其粗略分为单播型、广播型和地理多播型数据分发协议^[94-96]。有关 VANET 路由的不同分类方法，读者还可以参见文献^[9,63]。

7.3.1. 基于单播机制的数据分发协议

目前，MANET 路由协议的研究已经成为无线自组织网络的热点之一，对其路由方法的讨论也越来越深入，并且已经提出了多种针对 MANET 的路由方案，主要包括先应式路由(如目标节点序列号距离矢量 DSDV^[97]、最优链路状态路由 OLSR^[98])、反应式路由(自组网按需距离矢量路由 AODV^[99]、动态源路由 DSR^[100])、地理路由(贪婪边界无状态路由 GPSR^[101])以及混合地理路由(如终端路由 TR)等，然而它们却不能直接应用于节点高速运动且非均匀分布的车辆网络内。在车辆自组织网络中，基于地理位置的路由协议是首选的数据分发机制，同时引入随机转发机制可以增强协议的鲁棒性^[102]。然而，在更为真实的车辆运动场景中，例如类似于曼哈顿式的城市运动以及随着车载存储器的广泛应用，需要对这类使用存储转发机制的协议设计得当，否则有可能出现某些过时的信息覆盖掉较新的信息。Burgess 等人^[103]采用优先级策略来确定分组数据包的传递顺序：①邻居节点的数据包具有最高的优先级；②其次为包含路由信息的数据包；③确认交付的数据包；④转发次数较少的数据包；⑤转发次数较多，但仍能够正确转发的数据包。Zhao 和 Cao^[104]提出的车辆辅助数据传输(VADD)协议也是基于存储转发的思想，并且运用车辆运动的可预测性以指示消息沿着预定的道路网图进行传播，在减少消

息转发时延的同时还显著提高了分组转发的成功率。Naumov 和 Gross^[105]基于混合地理路由协议(即 PGB+AGF)提出的连接感知路由(CAR),在路由发现阶段通过泛洪机制找出源节点与目标节点间的一系列界点,并采用地理贪婪路由算法在指定路径中转发分组包。

7.3.2. 基于广播机制的数据分发协议

广播机制是车辆网络中使用最为频繁的一种数据分发技术,例如面向道路行车安全方面的应用主要使用广播方式报告实时交通、紧急事故、路面环境以及天气状况等信息。同时广播机制也通常运用于单播协议的路由发现阶段,以期寻找信源和信宿之间的优化路径。当节点密度较高时,它又将导致大量带宽资源的消耗以及较长的端对端延迟。

依据各节点在车辆网络中扮演的角色以及关于下一跳转发节点的选择方法的不同, VANET 广播协议可以分为^[14,64]:基于泛洪的广播、基于分簇的广播、基于列表的广播以及基于距离的广播,如图 10 所示,其中大多数算法都是假定车辆节点能够通过 GPS 获知自身的位置信息。

泛洪技术是最简单的广播业务类型,它不需要已知任何网络拓扑信息,其工作原理如下:源节点向其所有的邻居节点广播分组,中间节点判断自己是否是目标节点。如果不是,并且又是第一次接收到该分组,则继续广播;否则直接丢弃。在车辆节点高速运动的场景中,安全信息只能够通过定向泛洪策略实现;但当节点密度增加时,带宽的消耗也会急剧增加。因此不加限制地周期性广播必将导致分组在全网范围内重复发送。VANET 中对泛洪方案的改进之一是:在分组的智能广播中引入隐式确认机制(如 I-BIA^[29]),即当前方车辆接收到来自后方的同一分组时,则由其后的车辆节点负责继续向后广播,从而有效抑制了重复广播的节点数目。采用泛洪方式传递信息,具有很大的盲目性,通信负荷重且端对端时延长,但它也是将分组扩散到整个网络的最健壮和最基本的方法。

随着网络规模的扩大以及节点移动性的增强,节点在非层次化路由协议维护阶段的信息交换也越来越频繁,继而导致网络时延的增大和网络拥塞。分簇是克服以上缺点的常用方法(如基于集群的位置路由并在每个子集中选择一个簇头,用以构成高一层次的

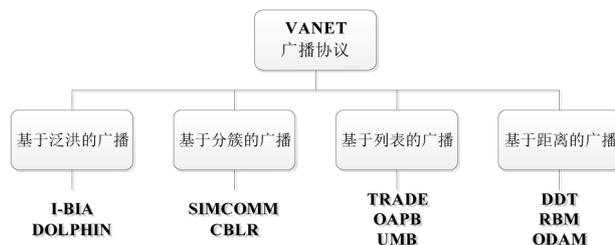


Figure 10. VANET broadcast protocols
图 10. VANET 广播协议

虚拟骨干网,从而实现网络的层次化;同一簇内的节点之间可以直接通信,不同簇内的节点之间的通信则 CBLR^[106],它通过将网络中的节点划分为多个子集,需要经由簇头和网关节点实现。该方案在网络拓扑变化较小时才具有较好的性能,否则会因为频繁地重组簇内成员并重选簇头等过程而使网络性能恶化。

网络中的所有节点都将维护一个邻居节点列表,并且通过请求/响应方式周期性地更新。下一次转发节点由前一次转发节点确定。当节点低速运动时,该方案在网络通信量及端对端延迟方面显示了优越的性能,但当网络拓扑变化频繁时,其性能将急剧恶化,因此不适合应用于高速运动的车辆网络。特别是当节点移动性增加时,节点间控制消息的交换周期缩短,这意味着消耗网络带宽资源的同时,也将增加端对端时延。最具代表性的是 Korkmaz 等人^[107,108]提出的城市多跳广播(UMB)协议。

每次只允许一个节点参与分组转发具有相对于其他几种广播方案更好地性能,其网络通信量少、端对端延迟小。在这类方案中,转发节点由基于距离的转发节点选择(DBRS)算法选举产生。被选取的转发节点通常位于前一次转发节点传输范围的边界,因而具有最短的等待时间,其代表性的基于距离的广播方案有 DDT、RBM 和 ODAM。然而,在稀疏网络中,如果转发节点并非边界节点的话,那么转发节点将花费更长的等待时间。此时,转发节点必须等待直到时间超期,这样端对端延迟反而会变长。

7.3.3. 基于地理多播机制的数据分发协议

基于位置的多播路由也称为地理多播路由^[109],它提供从源节点到某特定地理区域(ZOR)内的所有目标节点的广播。前述的许多 VANET 应用直接受益于地理多播服务,例如当前方车辆发生交通异常后,事故车辆仅对正在驶向该事故地点的所有车辆广播紧急

告警消息,以提醒其注意前方潜在的危险,并提前做好防范工作;或者当前方道路发生交通拥塞后,受阻车辆将对正在驶向该拥塞路段的所有车辆广播交通路况信息,以提醒驾驶员及早变更行车路线,从而有效地避免交通拥塞的进一步恶化。

Wu 等人^[110]提出的以车辆运动为中心的数据分发算法(MDDV),旨在利用车辆节点的运动特性来进行数据分发,并且综合了存储转发、基于车道轨迹的转发以及基于地理位置的转发三者的优势。在 MDDV 算法中,转发节点选择距离目标最近的节点作为其下一跳邻居,这种机制被称为 MFR (Most Forward within Radius),从而使到达目标节点的跳数最少。

Sormani 等人^[111]基于信息传播函数产生的虚拟势场概念,提出了在指定路径中传递信息的新方法,即节点首先估计其在势场中的位置,并选择势场中具有极小值的节点作为其下一跳转发节点,从而缩小了数据分组传送的范围。

Maihöfer 等人^[112]提出了持续性地理多播的概念,即对某段时间内位于特定区域中的所有节点持续广播服务,因而特别适用于基于位置的服务(LBS)。文中详细讨论了设计空间、语义以及三种解决方案:1) 服务器用来存储地理多播信息;2) 目标区域内指定的节点可以临时担当服务器的作用;3) 每个节点存储所有接收到的地理多播分组,同时也存储所有邻居节点及其位置表信息。

小结 目前大部分文献都是采用协议设计与仿真验证相结合的研究方法,提出的车用信息分发协议缺乏对 VANET 动态拓扑特性的建模分析,也缺乏深入分析影响协议性能(如可靠性、实时性、可达性、资源利用率等)的各种因素及其相互关系。此外大部分文献为了简化理论分析或实验仿真过程,一般都假定节点通信距离相等、链路路径对称且信息传输可靠,然而无线信道受外界环境干扰严重(如具有较高的误码率、传输功率波动大、时延抖动非均衡等),加之 GPS 信号失效以及高速移动节点间的多普勒效应等,使得车辆自组织通信在实际应用中仍面临着严峻的技术挑战。因此,如何针对车辆网络中不同交通信息的应用需求,提出具有较强可扩展性和鲁棒性,同时兼顾可靠性、实时性、资源利用率的单跳或多跳路由协议,是 VANET 迫切需要解决的问题。

7.4. 其它关键技术

7.4.1. 车辆运动建模

车辆运动模型主要描述车辆节点高速、受限的约束运动特征,预测其在场景中的时空位置分布并用来评估节点运动对自组网通信协议性能的影响。

虽然在真实环境中对所开发的协议或算法进行测试与评估是至关重要的一步,但是在协议的设计和开发阶段以及对分析模型的验证与完善阶段,研究人员会首先考虑通过模拟仿真代替大规模现场实验^[113]。因此尽可能真实地反映车辆节点的运动行为便是 VANET 模拟中最为重要的一个方面。

根据运动模型对交通要素和行为细节描述程度的不同,可大致分为微观和宏观运动模型^[114]。其中,微观运动模型以单个车辆为研究对象,车辆在道路上的跟车、超车以及车道变换等微观行为能够得到较真实的反映,其特征参数主要包括车头时距和车头间距;宏观运动模型则基于流体动力学理论描述交通流作为整体所表现出的宏观运动特征,它仅考虑了诸如道路、交叉路口、交通信号灯等运动约束因素,并规定了交通流量、车辆密度和平均运动速度三者之间的量化关系。因此,微观交通模型是 VANET 研究中较理想的选择。

根据车辆运动生成方法的不同,微观交通模型又可以分为数学解析模型、交通仿真模型、统计调研模型和运动轨迹模型^[115]。其中,数学解析模型是交通仿真中最为重要的一类模型,它通过建立一系列数学表达式,以期反映真实的物理作用。Fiore^[116]将此类模型进一步细分为随机模型、交通流模型、车辆跟驶模型、排队模型和行为模型。数学模型的解析表达式通常比较复杂,缺乏对驾驶员行为的真实性描述,为了验证其准确性还需要同真实的车辆运动做比较。交通仿真模型借助微观交通仿真软件研究宏观和微观交通行为,然而遗憾的是,在商业化的交通仿真软件中不能够直接进行网络通信模拟,并且两者的运动数据格式也彼此互不兼容。统计调研模型则通过大规模问卷或在线调查获取人的行为及其特征,但由于工作量巨大,可操作性差。运动轨迹模型虽然可以随时重现真实的车辆运动行为,但却不具外推性,例如针对公交系统的运动轨迹就不适用于私家车的运动模拟,此外通过大规模现场实验获得一定数量的车辆轨迹数

据代价也太大。

7.4.2. 无线信道建模

无线传播模型描述无线信号通过空间传播时遭受的各种衰落和干扰现象, 预测接收信号的功率及其传输内容的完整性, 并对无线系统进行设计、仿真与规划。

无线信号通过空间传播时会遭受各种衰落现象, 主要涉及两个重要方面, 即大尺度路径损耗和小尺度衰落^[73]。其中, 大尺度衰落由于传播距离的路径损耗或传播环境(如高大建筑物)的遮挡所致, 它用于预测平均场强并估计无线覆盖范围, 通常与射频频率无关; 小尺度衰落则由于无线电波在空间传播时存在反射、绕射和衍射等机制, 从而造成信号经由多条路径到达接收端叠加形成, 与无线频率有关。加之车辆之间的相对运动会引起随机频率调制, 这是由多径分量存在的多普勒效应引起的, 因此信号经由不同方向传播时, 其多径分量也将造成接收机信号的多普勒扩展。

目前, 在移动无线信道建模方面, VANET 研究人员仍主要使用 NS-2 中已经实现的大尺度路径损耗模型, 例如地面反射双线模型^[74,117-119]和对数正态阴影模型^[120-122]。近几年来, 研究人员也开始采用相对复杂的统计模型来较精确地描述无线传播的多径衰落现象。其中, 瑞利分布是最常见的用于描述平坦衰落信号接收包络或独立多径分量接收包络统计时变特性的一种分布类型。众所周知, 两个正交高斯噪声信号之和的包络服从瑞利分布。当存在一个主要的稳定信号分量, 例如视距传播路径时, 则小尺度衰落的包络服从莱斯分布。当确定信号的功率与多径分量方差之比趋于 0 时, 莱斯分布则退化为瑞利分布。另一个广泛应用的场强概率分布是 Nakagami- m 分布^[123,124], 当 $m = 1$ 时退化为瑞利分布。

7.4.3. 协同仿真平台

车辆通信网络协同仿真平台主要由两大部分组成: 微观交通仿真软件和网络通信模拟软件^[125], 前者用以产生实际的车辆运动数据, 后者则用以产生实际的无线通信行为。

微观交通仿真是 20 世纪 60 年代伴随计算机技术的进步而发展起来的交通分析技术和方法, 它可以动态、逼真地仿真交通流和交通事故等各种交通现象,

再现交通流的时空变化, 深入分析车辆、驾驶员和行人、道路的特征, 从而有效地进行交通规划、交通组织与管理、交通能源节约与物资运输流量合理化等方面的研究。由于国外在交通仿真研究方面开展的较早, 目前已经形成相对完整的体系, 其中公认较成熟的微观交通仿真软件主要包括: 美国佛罗里达大学 McTrans 中心开发的 TSIS-CORSIM、英国 Quadstone 公司的 PARAMICS 和德国 PTV AG 公司的 VISSIM。

然而, 这些微观交通仿真软件与主流的网络模拟软件(如 OPNET、NS-2、GloMoSim)并无接口, 加之两者所支持的运动数据格式也彼此互不兼容, 因此国外许多学术研究机构分别提出了各自的集成/协同仿真模型, 例如街区随机路点(STRAW)^[126]运动模型已经集成于 JiST/SWANS^[127]离散事件模拟器中, 交通与网络仿真(TraNS)^[128]平台实现了城市交通模拟(SUMO)^[129]与 NS-2 的集成, 网络仿真中的车辆(VeiNS)^[130]则通过 TCP/IP 网络接口实现了 SUMO 与 OMNeT++的集成, 针对车车通信的多模拟器互联环境(MSIECV)^[131]实现了 NS-2、VISSIM 与 MATLAB/Simulink 等模拟软件之间的无缝连接, 集成网络和运动模拟实验平台 GrooveNet(原名为 GrooveSim)^[132,133]则允许在真实或模拟车辆之间实时通信。

8. 结束语

车辆自组织网络是一类迅速崛起并富有挑战的移动自组织传感网络。除了前面讨论的无线接入、信道共享、数据分发和系统建模等技术外, 还有许多关键技术也引起了 VANET 研究人员的广泛兴趣, 例如车辆网络中数据传输控制^[62]、通信安全与认证^[134,135]、信息编码与调度^[136,137]等。限于篇幅的考虑, 本文仅将这些可能的研究热点和研究方向罗列出来, 只想到抛砖引玉的作用, 不做深入的讨论。对这些问题感兴趣的读者也可以参考所引用的相关文献, 期望能够借此推动国内学者对这一新兴领域更广泛的关注与重视。

参考文献 (References)

- [1] I. Chlamtac, M. Conti and J.-N. Liu. Mobile ad hoc networking: Imperatives and challenges. *Ad Hoc Networks*, 2003, 1(1): 13-64.
- [2] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, et al. *Wireless*

- sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 2002, 38(4): 393-422.
- [3] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. *软件学报*, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [4] X. J. Li, B.-C. Seet and P. H. J. Chong. Multihop cellular networks: Technology and economics. *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 2008, 52(9): 1825-1837.
- [5] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, et al. Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2011, 13(4): 584-616.
- [6] J. Luo, J.-P. Hubaux. A survey of research in inter-vehicle communications. *Embedded Security in Cars: Securing Current and Future Automotive IT Applications*. Heidelberg: Springer Berlin, 2006: 111-122.
- [7] M. Torrent-Moreno, M. Killat and H. Hartenstein. The challenges of robust inter-vehicle communications. *Proceedings of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)*, Dallas, 2005, 1: 319-323.
- [8] J. J. Blum, A. Eskandarian and L. J. Hoffman. Challenges of intervehicle ad hoc networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5(4): 347-351.
- [9] S. Yousefi, M. S. Mousavi and M. Fathy. Vehicular ad hoc networks (VANETs): Challenges and perspectives. *Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications*, 2006: 761-766.
- [10] Y. Toor, P. Muhlethaler, A. Laouti, et al. Vehicle ad hoc networks: Applications and related technical issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2008, 10(3): 74-88.
- [11] H. Füßler, M. Mauve, H. Hartenstein, et al. Position-based routing for car-to-car communication. *Inter-vehicle-communications based on ad hoc networking principles—The FleetNet project*. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2005: 117-143.
- [12] M. Rudack, M. Meincke and M. Lott. On the dynamics of ad hoc networks for inter vehicle communication (IVC). *Proceedings of the 2002 International Conference on Wireless Networks (ICWN'02)*, Las Vegas, 2002.
- [13] H. Füßler, M. Mauve, H. Hartenstein, et al. A comparison of routing strategies for vehicular ad hoc networks. *Technical Report TR-02-003*, 2002.
- [14] T.-H. Kim, W.-K. Hong and H.-C. Kim. An effective multi-hop broadcast in vehicular ad-hoc network. *Architecture of Computing Systems—ARCS 2007*. Heidelberg: Springer Berlin, 2007: 112-125.
- [15] M. L. Sichitiu, M. Kihl. Inter-vehicle communication systems: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2008, 10(2): 88-105.
- [16] Q. Xu, R. Sengupta and D. Jiang. Design and analysis of highway safety communication protocol in 5.9 GHz dedicated short range communication spectrum. *Proceedings of the 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference (VTC)*, 2003, 4: 2451-2455.
- [17] M. Bechler, H. Berninger, T. Biehle, et al. COMeSafety architecture task force: European ITS communication architecture—Overall framework, proof of concept implementation FP6-027377. 2010.
- [18] H. Füßler, M. Torrent-Moreno, M. Transier, et al. Thoughts on a protocol architecture for vehicular ad-hoc networks. *Proceedings of the 2nd International Workshop in Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, 2005: 41-45.
- [19] H. Hartenstein, K. P. Laberteaux. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, 2008, 46(6): 164-171.
- [20] U. Lee, R. Cheung and M. Gerla. *Emerging vehicular applications. Vehicular Networks: From Theory to Practice*. Chapman & Hall, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009: 1-30.
- [21] S. E. Shladover, S.-K. Tan. Analysis of vehicle positioning accuracy requirements for communication-based cooperative collision warning. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2006, 10(3): 131-140.
- [22] H.-S. Tan, J. Huang. DGPS-based vehicle-to-vehicle cooperative collision warning: Engineering feasibility viewpoints. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(4): 415-428.
- [23] S. Panichpapiboon, W. Pattara-Atikom. A review of information dissemination protocols for vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 99: 1-15.
- [24] N. Wisitpongphan, O. K. Tonguz, J. S. Parikh, et al. Broadcast storm mitigation techniques in vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, 2007, 14(6): 84-94.
- [25] J. A. Misener, R. Sengupta and H. Krishnan. Cooperative collision warning: Enabling short range avoidance with wireless technology. *Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Transport Systems*, San Francisco, 2005.
- [26] T. EIBatt, S. K. Goel, G. Holland, et al. Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, Los Angeles, 2006: 1-9.
- [27] M. Hartong, R. Goel, C. Farkas, et al. PTC-VANET interactions to prevent highway rail intersection crossing accidents. *Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2007-Spring)*, Dublin, 2007: 2550-2554.
- [28] N. Ravi, S. Smaldone, L. Iftode, et al. Lane reservation for highways (Position Paper). *Proceedings of the 10th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC-2007)*, Seattle, 2007: 795-800.
- [29] S. Biswas, R. Tatchikou and F. Dion. Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety. *IEEE Communications Magazine*, 2006, 44(1): 74-82.
- [30] V. Gradinescu, C. Gorgorin. Adaptive traffic lights using car-to-car communication. *Proceedings of the 65th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2007-Spring)*, Dublin, 2007: 21-25.
- [31] T. Nadeem, S. Dashtinezhad, C. Liao, et al. Traffic view: Traffic data dissemination using car-to-car communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8(3): 6-19.
- [32] A. Nandan, S. Das, G. Pau, et al. Co-operative downloading in vehicular ad-hoc wireless networks. *Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless on-demand Network Systems and Services (WONS-2005)*, 2005: 32-41.
- [33] K. C. Lee, S.-H. Lee, R. Cheung, et al. First experience with CarTorrent in a real vehicular ad hoc network testbed. *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Networking for Vehicular Environments (MOVE-2007)*, Anchorage, 2007, 109-114.
- [34] M. Caliskan, D. Graupner and M. Mauve. Decentralized discovery of free parking places. *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, Los Angeles, 2006: 30-39.
- [35] R. Panayappan, J. M. Trivedi, A. Studer, et al. VANET-based approach for parking space availability. *Proceedings of the fourth ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks*, Montreal, 2007.
- [36] G. Yan, M. C. Weigle and S. Olariu. A novel parking service using wireless networks. *Proceedings of the IEEE/INFORMS International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics (SOLI-2009)*, Chicago, 2009: 406-411.
- [37] M. A. Bonuccelli, G. Giunta, F. Lonetti, et al. Real-time video transmission in vehicular networks. *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Networking for Vehicular Environments (MOVE)*, 2007: 115-120.
- [38] C. E. Palazzi, M. Roccetti, S. Ferretti, et al. Online games on wheels: Fast game event delivery in vehicular ad-hoc networks. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicle-to-Vehicle Communications 2007 (V2VCOM-2007)*, Istanbul, 2007.
- [39] B. Bochow, M. Bechler. Internet integration. *Inter-vehicle-communications based on ad hoc networking principles—The Fleet*

- Net project. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2005: 175-211.
- [40] G. Yan, D. B. Rawat and S. El-Tawab. Reliable routing protocols in VANETs. *Advances in Vehicular Ad-Hoc Networks: Developments and Challenges*: IGI Global, 2010: 200-213.
- [41] G. Yan, S. Olariu. A probabilistic analysis of link duration in vehicular ad hoc networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2011, 12(4): 1227-1236.
- [42] M. Raya, J.-P. Hubaux. Securing vehicular ad hoc networks. *Journal of Computer Security*, 2007, 15(1): 39-68.
- [43] ASTM. E2213-2003. Standard specification for telecommunications and information exchange between roadside and vehicle systems—5 GHz band dedicated short range communications (DSRC) medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, 2003.
- [44] H. Moustafa, S. M. Senouci and M. Jerbi. Introduction to vehicular networks. *Vehicular Networks: Techniques, Standards, and Applications*. Northwest: Auerbach Publishers, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009: 1-20.
- [45] T. Kosch, R. Mietzner and K.-O. Proskawetz. COMeSafety: A EU specific support activity (Project Presentation). 2006
- [46] T. Sukuvaara, P. Nurmi, D. Stepanova, et al. Wireless traffic service communication platform for cars. *Modelling, Computation and Optimization in Information Systems and Management Sciences*, 2008: 548-557.
- [47] R. Pfliegl. COOPERS: Co-operative systems for intelligent road safety (Project Presentation). 2010
- [48] M. Provera. SAFESPOT integrated project: Co-operative systems for road safety—Smart vehicles on smart roads. *The Secure Vehicle Communication Workshop*, Lausanne, 2006.
- [49] CVIS. Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems (CVIS). <http://www.cvisproject.org>
- [50] T. Leinmüller, L. Buttyan, J.-P. Hubaux, et al. SEVECOM—Secure vehicle communication. *IST Mobile and Wireless Communication Summit*, Mykonos, 2006.
- [51] K. Meinken, L. Andreone, A. Guarise, et al. WATCH-OVER: The concept of a cooperative system for vehicle to vulnerable road users communication. *Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Lyon, 2007.
- [52] D. Reichardt, M. Miglietta, L. Moretti, et al. CarTALK 2000: Safe and comfortable driving based upon inter-vehicle-communication. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium (IV-2002)*, Versailles, 2002, 2: 545-550.
- [53] P. Morsink, R. Hallouzi, I. Dagli, et al. CarTALK 2000: Development of a cooperative ADAS based on vehicle-to-vehicle communication. *Proceedings of the 10th World Congress and Exhibition on Intelligent Transport Systems and Services*, Madrid, 2003.
- [54] W. Franz, H. Hartenstein and M. Mauve. Inter-vehicle-communications based on ad hoc networking principles—The Fleet Net project. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2005.
- [55] A. Festag, G. Noecker, M. Strassberger, et al. NoW—Network on wheels: Project objectives, technology and achievements. *Proceedings of the 5th International Workshop on Intelligent Transportation (WIT)*, Hamburg, 2008: 211-216.
- [56] X.-M. Dong, K. Li, J. Misener, et al. Expediting vehicle infrastructure integration (EVII). *California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2006-20*, Berkeley, 2006.
- [57] J. Opiola. Vehicle infrastructure integration (VII) in the US—enhancing safety, enabling mobility. *The Institution of Engineering and Technology Seminar on RFID and Electronic Vehicle Identification in Road Transport*, Newcastle, 2006: 79-90.
- [58] K. Hartman, J. Strasser. Saving lives through advanced vehicle safety technology: Intelligent vehicle initiative final report. *Final Report FHWA-JPO-05-057*, Cambridge, 2005.
- [59] VSCC. Vehicle safety communications project. *Final Report DOT HS 810 591*, 2006.
- [60] M. Schagrin, M. Oliver. Cooperative intersection collision avoidance initiative. *Proceedings of ITS America Annual Meeting*, 2005.
- [61] J. J. Ferenc. The integrated vehicle-based safety systems initiative. *13th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services*, London, 2006.
- [62] 陈立家, 江昊, 吴静等. 车用自组织网络传输控制研究[J]. *软件学报*, 2007, 18(6): 1477-1490.
- [63] 常促宇, 向勇, 史美林. 车载自组网的现状与发展[J]. *通信学报*, 2007, 28(11): 116-126.
- [64] 李丽君, 刘鸿飞, 杨祖元等. 车用自组网信息广播[J]. *软件学报*, 2010, 21(7): 1620-1634.
- [65] DSRC. *Dedicated Short Range Communications (DSRC)*, 2009. <http://www.leearmstrong.com/DSRC/DSRCHomeset.htm>
- [66] D. Jiang, L. Delgrossi. IEEE 802.11p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. *Marina Bay, SINGAPORE*, 2008: 2036-2040.
- [67] R. Roebuck. DSRC white paper. Carrolton, 2005.
- [68] D. Jiang, V. Taliwal, A. Meier, et al. Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication. *IEEE Wireless Communications*, 2006, 13(5): 36-43.
- [69] A. C. V. Gummalla, J. O. Limb. Wireless medium access control protocols. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2000, 3(2): 2-15.
- [70] J. Zhu, S. Roy. MAC for dedicated short range communications in intelligent transport system. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(12): 60-67.
- [71] S. Leng, H. Fu, Q. Wang, et al. Medium access control in vehicular ad hoc networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2011, 11(7): 796-812.
- [72] S. Sibecas, C. A. Corral, S. Emami, et al. On the suitability of 802.11a/RA for high-mobility DSRC. *Proceedings of IEEE 55th Vehicular Technology Conference (VTC-2002-Spring)*, Birmingham, 2002, 1: 229-234.
- [73] J. Yin, T. El Batt, G. Yeung, et al. Performance evaluation of safety applications over DSRC vehicular ad hoc networks. *Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks*, Philadelphia, 2004: 1-9.
- [74] B. Gallagher, H. Akatsuka and H. Suzuki. Wireless communications for vehicle safety: Radio link performance and wireless connectivity methods. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2006, 1(4): 4-24.
- [75] L. Bononi, M. Di Felice. A cross layered MAC and clustering scheme for efficient broadcast in VANETs. *Proceedings of the IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS-2007)*, Pisa, 2007: 1009-1016.
- [76] H. Menouar, F. Filali and M. Lenardi. A survey and qualitative analysis of MAC protocols for vehicular ad hoc networks. *IEEE Wireless Communications*, 2006: 30-35.
- [77] M. J. Booyesen, S. Zeadally and G. J. van Rooyen. Survey of media access control protocols for vehicular ad hoc networks. *IET Communications*, 2011, 5(11): 1619-1631.
- [78] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana, et al. RR-ALOHA, a reliable R-ALOHA broadcast channel for ad-hoc inter-vehicle communication networks. *Proceedings of the Mediterranean Ad hoc networking Conference (Med-Hoc-Net 2002)*, Baia Chia, 2002.
- [79] B. O'Hara, A. Petrick. *The IEEE 802.11 handbook: A designer's companion*. New York: Standards Information Network IEEE Press, 2005.
- [80] K. Tokuda, M. Akiyama and H. Fujii. DOLPHIN for inter-vehicle communications system. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV-2000)*, Dearborn, 2000: 504-509.
- [81] F. Borgonovo, A. Capone, M. Cesana, et al. ADHOC MAC: New MAC architecture for ad hoc networks providing efficient and reliable point-to-point and broadcast services. *Wireless Networks*, 2004, 10(4): 359-366.
- [82] J. Liu, F. Y. Ren, L. M. Miao, et al. A-ADHOC: An Adaptive real-time distributed MAC protocol for vehicular Ad Hoc networks. *Mobile Networks & Applications*, 2011, 16(5): 576-585.
- [83] L. Coletti, N. Riato, A. Capone, et al. Architectural and technical

- aspects for ad hoc networks based on UTRA TDD for inter-vehicle communication. Proceedings of the 12th IST Mobile & Wireless Communications Summit, Aveiro, 2003: 468-472.
- [84] Y.-B. Ko, V. Shankarkumar and N. H. Vaidya. Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks. Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM-2000), Tel Aviv, 2000, 1: 13-21.
- [85] A. Nasipuri, S. Ye, J. You, et al. A MAC protocol for mobile ad hoc networks using directional antennas. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC-2000), Chicago, 2000, 3: 1214-1219.
- [86] R. Ramanathan. On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas. Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Long Beach, 2001: 95-105.
- [87] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan, et al. Using directional antennas for medium access control in ad hoc networks. Proceedings of the 8th annual international conference on Mobile computing and networking, Atlanta, 2002, 59-70.
- [88] M. Takai, J. Martin, R. Bagrodia, et al. Directional virtual carrier sensing for directional antennas in mobile ad hoc networks. Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Lausanne, 2002: 183-193.
- [89] T. Korakis, G. Jakllari and L. Tassiulas. A MAC protocol for full exploitation of directional antennas in ad-hoc wireless networks. Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Annapolis, 2003: 98-107.
- [90] M. Sadashivaiah, R. Makanaboyina, B. George, et al. Performance evaluation of directional MAC protocol for inter-vehicle communication. IEEE VTC-Spring, 2005.
- [91] R. M. Yadumurthy, A. Chimalakonda, M. Sadashivaiah, et al. Reliable MAC broadcast protocol in directional and omnidirectional transmissions for vehicular ad hoc networks. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Cologne, 2005: 10-19.
- [92] D. Lee, R. Attias, A. Puri, et al. A wireless token ring protocol for intelligent transportation systems. Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC'01), Oakland, 2001: 1152-1157.
- [93] Z. D. Chen, H. T. Kung and D. Vlah. Ad hoc relay wireless networks over moving vehicles on highways. Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, Long Beach, 2001: 247-250.
- [94] F. Li, Y. Wang. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, 2(2): 12-22.
- [95] W. Chen, R. K. Guha, T. J. Kwon, et al. A survey and challenges in routing and data dissemination in vehicular ad hoc networks. Wireless Communications & Mobile Computing, 2011, 11(7): 787-795.
- [96] A. Casteigts, A. Nayak and I. Stojmenovic. Communication protocols for vehicular ad hoc networks. Wireless Communications & Mobile Computing, 2011, 11(5): 567-582.
- [97] C. E. Perkins, P. Bhagwat. Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1994, 24(4): 234-244.
- [98] P. Jacquet, P. Mühlthaler, C. T. lausen, et al. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. Proceedings of the IEEE International Multi Topic Conference (INMIC'01), Lahore, 2001: 62-68.
- [99] V. D. Park, M. S. Corson. A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks. Proceedings of the 16th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM '97), Kobe, 1997, 3: 1405-1413.
- [100] D. B. Johnson, D. A. Maltz. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. Mobile Computing: Kluwer Academic Publishers, 1996: 153-181.
- [101] B. Karp, H. T. Kung. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks. The 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000), Boston, 2000: 243-254.
- [102] K. C. Lee, U. Lee and M. Gerla. Geo-opportunistic routing for vehicular networks. IEEE Communications Magazine, 2010, 48(5): 164-170.
- [103] J. Burgess, B. Gallagher, D. Jensen, et al. MaxProp: Routing for vehicle-based disruption-tolerant networks. Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM-2006), Barcelona, 2006: 1-11.
- [104] J. Zhao, G.-H. Cao. VADD: Vehicle-assisted data delivery in vehicular ad hoc networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1910-1922.
- [105] V. Naumov, T. R. Gross. Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad-hoc networks. Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM-2007), 2007: 1919-1927.
- [106] R. A. Santos, R. M. Edwards and A. Edwards. Cluster-based location routing algorithm for vehicle to vehicle communication. Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Conference, 2004: 39-42.
- [107] G. Korkmaz, E. Ekici, F. Özgüner, et al. Urban multi-hop broadcast protocol for inter-vehicle communication systems. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Philadelphia, 2004: 76-85.
- [108] G. Korkmaz, E. Ekici and F. Özgüner. Black-burst-based multi-hop broadcast protocols for vehicular networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(5): 3159-3167.
- [109] C. Maihöfer. A survey of geocast routing protocols. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2004, 6(2): 32-42.
- [110] H. Wu, R. Fujimoto, R. Guensler, et al. MDDV: A mobility-centric data dissemination algorithm for vehicular networks. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Philadelphia, 2004: 47-56.
- [111] D. Sormani, G. Turconi, P. Costa, et al. Towards lightweight information dissemination in inter-vehicular networks. Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks, Los Angeles, 2006: 20-29.
- [112] C. Maihöfer, T. Leinmüller and E. Schoch. Time-stable geocast for ad hoc networks. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Cologne, 2005, 20-29.
- [113] R. Stanica, E. Chaput and A.-L. Beylot. Simulation of Vehicular Ad-Hoc Networks: Challenges, Review of Tools and Recommendations. Computer Networks, 2011, 55(14): 3179-3188.
- [114] D. Helbing. Traffic and related self-driven many-particle systems. Reviews of Modern Physics, 2001, 73(4): 1067-1141.
- [115] J. Haerri, F. Filali and C. Bonnet. Mobility models for vehicular ad hoc networks: A survey and taxonomy. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2009, 11(4): 19-41.
- [116] M. Fiore. Mobility models in inter-vehicle communications literature. Technical Report, Department of Electronics, Polytechnic Institute of Torino, 2006.
- [117] Y. Zang, L. Stibor, G. Orfanos, et al. An error model for inter-vehicle communications in highway scenarios at 5.9 GHz. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks, Montreal, 2005: 49-56.
- [118] 熊炜, 李清泉. 高速公路场景中车用自组织网络的节点度[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9): 2033-2038.
- [119] 熊炜, 李清泉. 高速公路场景中车用自组织网络 1——连通的必要条件[J]. 软件学报, 2010, 21(11): 2906-2919.
- [120] C. Bettstetter, C. Hartmann. Connectivity of wireless multihop networks in a shadow fading environment. Wireless Networks, 2005, 11(5): 571-579.
- [121] Z. L. L. hang, B. H. Soong, Y. Zhang, et al. An analysis of k-connectivity in shadowing and Nakagami fading wireless multi-hop networks. Marina Bay, 2008: 395-399.
- [122] X. Ta, G. Mao, B. D. O. Anderson. On the giant component of

- wireless multi-hop networks in the presence of shadowing. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009.
- [123] V. Taliwal, D. Jiang, H. Mangold, et al. Empirical determination of channel characteristics for DSRC vehicle-to-vehicle communication. Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Philadelphia, 2004.
- [124] M. Torrent-Moreno, F. Schmidt-Eisenlohr, H. Füßler, et al. Effects of a realistic channel model on packet forwarding in vehicular ad hoc networks. Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Las Vegas, 2006, 1: 385-391.
- [125] F. J. Martinez, C. K. Toh, J.-C. Cano, et al. A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs). Wireless Communications & Mobile Computing, 2011, 11(7): 813-828.
- [126] D. R. Choffnes, F. E. Bustamante. An integrated mobility and traffic model for vehicular wireless networks. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Cologne, 2005: 69-78.
- [127] R. Barr, Z. J. Haas and R. Renesse. Scalable wireless ad hoc network simulation. In Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks, CRC Press, 2005: 297-311.
- [128] M. Piorkowski, M. Raya, A. Lugo, et al. TraNS: Realistic joint traffic and network simulator for VANETs. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2008, 12(1): 31-33.
- [129] SUMO. SUMO—Simulation of Urban MObility—An open source traffic simulation package, 2009. <http://sumo.sourceforge.net/>
- [130] C. Sommer, Z. Yao, R. German, et al. Simulating the influence of IVC on road traffic using bidirectionally coupled simulators. Proceedings of IEEE INFOCOM Workshop on MOBILE Networking for Vehicular Environments (MOVE), Phoenix, 2008: 1-6.
- [131] C. Lochert, A. Barthels, A. Cervantes, et al. Multiple simulator interlinking environment for IVC. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Cologne, 2005: 87-88.
- [132] R. Mangharam, D. S. Weller, D. D. Stancil, et al. GrooveSim: A topography-accurate simulator for geographic routing in vehicular networks. Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET'05), Cologne, 2005: 59-68.
- [133] R. Mangharam, D. Weller, R. Rajkumar, et al. GrooveNet: A hybrid simulator for vehicle-to-vehicle networks. Mobile and Ubiquitous Systems: 2006 Third Annual International Conference on Networking & Services, 2006: 1-8.
- [134] M. Riley, K. Akkaya and K. Fong. A survey of authentication schemes for vehicular ad hoc networks. Security and Communication Networks, 2011, 4(10): 1137-1152.
- [135] M. A. Moharrum, A. A. Al-Daraiseh. Toward secure vehicular ad-hoc networks: A survey. IETE Technical Review, 2012, 29(1): 80-89.
- [136] C. L. Robinson, L. Caminiti, D. Caveney, et al. Efficient coordination and transmission of data for cooperative vehicular safety applications. Proceedings of the 3rd International Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks, Los Angeles, 2006: 10-19.
- [137] C. L. Robinson, D. Caveney, L. Caminiti, et al. Efficient message composition and coding for cooperative vehicular safety applications. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3244-3255.