

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2017.00014

## 面向沉浸式体验的空天地一体化车联网体系架构与关键技术

牛志升<sup>1</sup>, Sherman SHEN<sup>1,2</sup>, 张钦宇<sup>3</sup>, 唐余亮<sup>4</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 滑铁卢大学电子与计算机工程系, 加拿大 安大略 N2L 3G1;  
3. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055; 4. 厦门大学通信工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 面向智能化交通管理、车辆智能化控制以及路网智能信息服务的应用需求, 结合空间信息网络在覆盖范围、时空基准、态势感知等方面的突出优势, 提出一种基于空天地一体化网络的车联网概念, 并探讨空间资源动态约束下的空天地一体化网络重构、多维多尺度情境信息的实时感知与高效融合以及情境信息的实时可靠安全交互机理的基本思路与方法, 为车辆智能驾驶和用户沉浸式驾驶体验提供技术支撑, 为全自动无人驾驶车联网奠定理论和技术基础。

**关键词:** 空间信息网络; 车联网; 空天地一体化网络; 自动驾驶; 情境信息; 沉浸式驾驶体验

**中图分类号:** TP319

**文献标识码:** A

## Space-air-ground integrated vehicular network for immersive driving experience

NIU Zhi-sheng<sup>1</sup>, Sherman SHEN<sup>1,2</sup>, ZHANG Qin-yu<sup>3</sup>, TANG Yu-liang<sup>4</sup>

(1. Department of Electronic and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;  
2. Department of Electronics and Computer Engineering, University of Waterloo, ON N2L 3G1, Canada;  
3. Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China;  
4. College of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** In order to achieve the significant advantages of next generation intelligent transportation systems, realizing the smart control of vehicles, and satisfy the vehicular demands for on-road infotainment services, a novel space-air-ground integrated vehicular network architecture was proposed by making use of the space information in terms of service coverage, time synchronization, vehicle status sensing, etc. The project would investigate three fundamental scientific issues related to the novel network: 1) space-air-ground integrated network reconfiguration under dynamic space resources constraints; 2) real-time sensing and efficient integration of multi-dimensional context information; 3) real-time, reliable and secure interaction among context information. The outcomes of this project will provide the foundations both in theory and practice for highly expected smart driving, immersive driving experience, and autonomous self-driving vehicular networks.

**Key words:** space information network, vehicular network, space-air-ground integrated network, autonomous driving, context information, immersive driving experience

### 1 引言

随着经济的发展, 车辆已成为城市的重要组成部分。但是随之带来的交通事故、环境污染和交通拥堵等问题则成为了当今社会的顽疾。据不完全统计, 每年全世界有大约 120 万人由于交通事故死亡,

超过 2 000 万人受伤, 造成的直接经济损失超过 5 万亿美元<sup>[1]</sup>。引起交通事故的原因是多方面的, 但最主要的应属驾驶员的违章操作或错误判断<sup>[2]</sup>, 因此, 未来一个主要发展趋势是通过信息技术对车辆驾驶进行智能辅助, 甚至是全自动无人驾驶, 这样既可以大幅度地降低因驾驶员人为因素导致的交通

收稿日期: 2017-07-15; 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91638264)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (No.91638264)

事故,又能提高道路利用率、减少尾气排放。由此催生了汽车移动互联技术,即“车联网”。

车联网(vehicular network)是指车与车、车与路、车与人等交互,实现车辆与公众网络通信的动态移动通信系统。它是物联网在交通领域重要的应用,也是移动互联网、物联网向交通领域发展的必然结果,将实现智能交通管理控制、车辆智能化控制和智能动态信息服务的一体化,可以极大地改善人类生活的方方面面。实际上,未来智能车就相当于一个超级移动终端或是移动网络,它将装备几十甚至上百个传感器和摄像头,车内经过高速网络互联,并需要时时刻刻与外界(其他车辆、周边道路、路边基础设施、指挥中心、云服务中心等)交互信息,这对未来信息网络的功能和性能都提出了非常高的要求。我们完全可以将该系统理解为未来物联网、智慧城市或是“互联网+”应用的一个重要组成部分,同时也是未来 5G 及后 5G(post-5G)移动通信网络的最重要应用之一。

当前,随着城市化进程的推进和机动车数量的快速增长,我国也正在步入汽车社会,与汽车相关的社会问题和矛盾已经突显。交通拥堵成为影响大城市居民出行的首要问题,交通事故数量呈上升趋势;机动车尾气污染成为城市大气污染的主要来源等,中国发展智慧交通已经成为必然,并且十分紧迫。另一方面,随着移动互联网、人工智能、传感器技术的发展与成熟,汽车从为用户提供传统交通服务的功能时代向为用户提供综合交通信息和车载娱乐服务等智能化时代转型,汽车电子化、网络化和自动化等特征明显。据预测,到 2020 年,全球将会有 1.52 亿辆车与移动互联网连接;到 2025 年,所有的车将会通过各种形式进行互联;到 2035 年,路面上 75%的车将会是自动驾驶车,即自动驾驶或无人驾驶将成为未来智能交通的主流。同时,无人机也将融入我们的未来生活,传统的地面二维路网将向空中延伸,车联网将迎来爆发式增长期,这些都对将来车辆的智能化动态管控与服务提出了更高的要求。

在这种大背景下,中国全面启动了智慧交通与车联网的研究与建设,车联网的产学研发展也得到了国家层面的高度重视和大力支持。“十二五”规划已经将车联网列入物联网十大重点部署领域之一,并列为我国重大专项项目;“十三五”规划将车联网列为百个重大工程及项目之一。然而,与国

外车联网建设先进国家相比,中国车联网建设的理论研究与技术发展遍布挑战。

1) 中国是汽车保有量的大国,2016 年汽车保有量已经达到 1.79 亿辆,位居世界第二,而人均汽车保有量只有 0.13 辆,未来总体保有量的增长空间巨大。同时,中国城镇化发展使中国汽车产业在大城市普遍都出现了高速度增长、高强度使用、高密度聚集等明显特征。随着未来庞大的车载互联与接入应用普及,地面公共通信基础设施的用户任务需求将发生数量级的变化并呈集中式爆发态势。当城市地面平台资源总体受限,但用户数目、任务类型以及任务量级等发生突变时,受限资源与可变需求之间的矛盾将更加激化。

2) 截至 2015 年底,中国大陆高速公路的通车总里程达 12.3 万公里,已经建成世界上规模最大的高速公路系统;提出的国家公路网 1.8 万公里展望线路主要分布在我国西部地区,其相应的通信基础设施比较薄弱;面向高速公路车载应用的全地域零死角覆盖与泛在连接性的实现难度大、经济成本高。此外,高速运动场景中引入的多普勒频移、频繁切换、穿透损耗等问题比城区环境面临更大挑战,严重影响车载接入与用户应用体验,这些都将成为制约我国车联网互联应用朝着宽带化、泛在化等方向发展的棘手难题。

3) 相比其他发达国家,中国“人多、车多、道路容量严重不足”等国情使中国道路交通呈现汽车、自行车、行人混杂的复杂特征,而实现智能驾驶或是全自动无人驾驶的最基本前提是对车辆本身、周边道路和环境、邻近车辆以及道路交通信息等(以下统称“情境信息”)的实时精确获取与交互,而且这些信息的维度(时间维、空间维、资源维)和尺度(毫秒至秒、厘米级至米级、局部与广域)都变得越来越多样化和复杂化,这些将使中国实现智能交通与智能驾驶的难度远远超过发达国家,必须探索中国特色的智能交通与车联网。

综上所述,实现中国特色的智能交通系统与车联网仅靠地面通信系统是远远不够的。地面通信系统,如以 DSRC(短距离专用无线通信)为基础的 IEEE 802.11p 网络或是目前处于标准化早期阶段的基于公共移动通信平台的 LTE-V 网络,虽然能够满足一定程度的车-车(V2V)和车-路(V2I)通信需求,但在车辆定位和授时精度、异质情境信息交

互的实时性、大尺度广域交通信息的获取以及超密集连接请求的实时应对等方面还难以满足高智能辅助驾驶或是完全自动无人驾驶的需求。而且大范围地部署 IEEE 802.11p 网络基础设施需要的资金投入大、周期长；LTE-V 网络虽然可以借助公共移动通信的基础设施快速部署，但其可用频谱资源严重受限，难以支撑大量车载用户的接入请求，也难以保证信息传输的延时和可靠性要求。

可喜的是，当前中国正在大力建设空间信息网络<sup>[3-5]</sup>，主要由在轨卫星构成的天基、平流层飞艇或无人机等空中飞行器构成的空基网络组成，在国际上处于领先地位。与地面信息网络相比，它具有覆盖范围更广、传输资源更丰富、传输可靠性和顽健性更高等优势，在对地观测、应急通信、航天测控、航空运输和国家战略利益拓展等方面都有着不可替代的作用，已逐渐成为国家战略利益的制高点。将其应用于车联网应用，它与由地面固定设施和车辆节点构成的地基网络融合在一起，构成了一个空天地一体化立体空间信息网络，通过三者之间的优势互补和有效的数据共享与融合，使不管是城市车辆或高速公路车辆都可以沉浸在由道路、车辆、交通及空天地网络信息综合在一起的数字化信息环境中自由自在地行驶，将更好地缓解地面通信平台的车载接入压力，提高未来车—路—网的协同能力，有效应对中国智能化交通难题。另一方面，随着未来路网进一步向空中延伸，三维空间路网将会形成，由空天地网络构成的一体化封闭式智能车载网络，将更好地实现三维路网的全覆盖，满足车载用户的泛在连接与异构网络资源的实时共享需求。

当前，国际上关于车载互联技术的研究方兴未艾，但整体上看仍处于百家争鸣的初级阶段。整合地面多种无线资源，综合利用各种不同制式的信息通信与网络手段，实现跨平台的车载互联是目前地面车载互联网络的发展趋势和研究热点。如能将中国在空间信息网络方面的优势发挥出来，进一步整合空天异构网络资源，将会为中国车联网技术的发展赢得先机，也将为我国利用“弯道效应”抢占未来车载互联技术的制高点提供难得的机遇。

本文首先针对空天地一体化车联网的技术发展与国内外研究现状进行全面综述，然后给出面向沉浸式体验的空天地一体化车联网需要解决的核心科学问题、解决思路以及面临的技术挑战。

## 2 国内外研究现状

**天基平台：**特斯拉公司提出了打造卫星车联网的畅，通过利用近地轨道卫星来提供面向车载用户的移动互联网接入与动态组网。目前，面向车联网应用的天基平台主要还是提供位置、导航信息，高精度时钟等单向管控服务，被广泛使用在车联网相关技术中。如文献[6]提出了基于时分复用的媒体接入协议，其不仅利用 GPS 提供车辆位置信息，同时利用 GPS 提供的高精度时钟来进行时隙同步。该协议能被用于防止车辆碰撞，紧急刹车预警等驾驶安全有关的应用中。天基平台能为车联网应用提供一个宏观、全局的信息网，但是由于造价、网络稳定性等原因，基于双向网络的交互应用还没有出现在车联网中，未能真正地在地面网络协同起来。

**高空平流层平台：**平流层通信平台具有覆盖面积广，驻留时间长，相比卫星通信平台具有机动性好，通信响应时间短，成本低廉等特点。在实践方面，谷歌公司从 2013 年开始建设“Loon”项目<sup>[7]</sup>，使用平流层气球飞行器，为缺乏网络覆盖的区域提供互联网接入。目前该项目处在试验阶段，还需发射足够的飞行器以实现稳定的区域覆盖。在理论方面，文献[8,9]通过论证和计算链路损耗，系统容量等关键参数，证明高空平流层平台有能力向地面提供高带宽，低时延的网络连接服务，满足宽带泛在的无线应用体验需求。

**低空无人机平台：**随着四轴飞行器等低空无人机成本的降低和流行，低空无人机通信作为地面车联网的重要补充部分，近年来成为研究的热点。低空无人机通信平台因距离地面较近，具有高响应速度、高带宽、高可靠视距(line-of-sight)传输以及灵活机动等特点。相对天基平台和高空平流层平台，无人机平台和车联网相关研究成为热点。文献[10]提出了一个基于空—路—基合作的车联网平台，通过多个无人机组成空中子网，协助地面车辆传输路面信息，并能运用于道路救援，事故第一现场通信等突发场景。文献[11]设计并实现了空地车载协同通信系统，利用无人机上的镜头和 GPS 信息为地面进行障碍物检测和导航。无人机平台和车联网通信存在以下挑战：首先，高度变化的网络拓扑和链路信道需要设计有效的协同机制，保障网络服务的持续性和稳定性<sup>[12]</sup>。其次，无人机受机体大小、载荷限制，其单次飞行时间以及通信、计算能力都有限，需要

智能的部署和运营机制来提高可靠性。另外,无人机之间的相互通信干扰也是值得研究的一个问题<sup>[13]</sup>。

**地面通信平台:**地面通信平台是当前车联网研究的主要战场,文献[14,15]系统性地总结了车联网的现有技术和发展现状,包括:1)基于车联网标准协议 802.11p 的专用短程通信技术(DSRC),主要用于道路信息共享,安全警戒等基于车与车通信,以及车与路边单元通信<sup>[16,17]</sup>;2)移动通信网络,主要用于车辆远程监控,情景信息的实时交互等,但是通信代价昂贵;3)基于无线局域网的 Drive-thru Internet 技术主要为路过车辆提供短暂的互联网接入和实时性要求不高的车载内容分发服务<sup>[18,19]</sup>;4)利用空闲数字电视广播频段的 WhiteFi 技术<sup>[20]</sup>,主要为人烟稀少区域提供广域高质的车载接入应用。整合当前地面多种无线接入技术,实现跨平台的车载互联是目前地面车载互联网络的发展趋势和研究热点。软件定义网络作为一种新型网络架构,相比于传统网络,其可以实现设备控制面和数据面分离,可以更灵活高效地实现网络资源的动态管理与适配,已经开始在车载网中应用<sup>[21,22]</sup>。此外,融合空天地网络平台的优势并协作互补,能提供一个立体的、全面的高效互联网络方案,使支持沉浸式体验的各种车载应用变成现实。文献[23]提出了一种空天地联合架构,分为地面层、高空层和卫星层,用以提高用户的服务质量,特别是高质量的多媒体服务。文献[24]分析了集成卫星平台和地面通信的可能性和挑战,也将为未来沉浸式的三维空间车载互联应用提供有效的理论支持。

**智能交通系统:**近 10 年来的实践证明,智能交通系统是解决目前经济发展所带来交通问题的理想方案。它利用高科技使传统的交通模式变得更加智能、安全、节能和高效。迄今为止,在美国、欧洲、亚洲都已有成功应用的范例,并且成立了车载通信联盟 Car2Car Communication Consortium 以及 Association of Electronic Technology for Automobile Traffic and Driving 等。美国交通部在《智能交通系统战略研究计划:2010-2014》当中,首次提出了“车联网”构想,最大程度地保障交通运输的安全性、灵活性和对环境的友好性。我国的智能交通系统还处在初步阶段,虽然在“十二五”和“十三五”规划中出台了一系列政策促进智能交通系统成为交通现代化建设的重要内容,“综合运输与智能交通”也列入了交通科技领域的重点专项之一,

但我国智能交通系统发展时间短,技术储备和研究都有待加强,更多的工作需要和城市与交通规划相结合,形成一个高效统一的管理平台,支撑智能交通应用的技术储备,完善技术体系和标准化体系。

### 3 需要解决的核心科学问题

1) 空间资源动态约束下的空天地一体化网络重构方法:空天地一体化车联网包括由卫星、临近空间平台、近地飞行器、无人机、地面车辆、移动通信基站等组成的多层网络。而这些网络独立运行、架构分散,各自需要为不同的任务服务,并非为车联网所专用,因此,其可用频谱、计算、存储和能量等资源高度受限,且随时间动态变化。此外,空地网络拓扑动态变化,资源的使用约束与链路性能存在较大的随机性,使地面与空间资源在时空维度上难以协同工作。为了支持车联网“沉浸式”体验中情境信息的实时感知与融合、交互与共享,以及自动驾驶、智能交通调度等控制信息的安全、及时传递,需要将受限的空地异质资源进行融合互补,实现空天地一体化车联网的有机协作。为此,需要建立一套多维异质空地资源的表述与虚拟化方法,并赋予网络可重构能力,在多时间尺度下分别实现网络的动态重构和调度:在分钟级时间尺度下,针对网络拓扑的变化实现网络的动态可重构;在秒级、亚秒级时间尺度下,优化多维度多尺度异构资源动态调度。同时还需要面对网络节点配置能力不同的客观条件,解决拓扑时效性与重构延时的矛盾。

2) 多维多尺度情境信息的实时感知与高效融合理论与方法:支撑沉浸式体验车联网的情境信息是多维(时间维、空间维、资源维)和多尺度(毫秒至秒、厘米级至米级、地面与空间)的,且要求能随时随地获取,因此,需要研究在网络拓扑和网络资源动态变化情况下的多维多尺度情境信息精确感知与高效融合理论与方法,为智能驾驶和交通调度的正确决策提供可靠的信息来源,为构建沉浸式体验的空天地一体化车联网提供必要的信息基础。

3) 情境信息的实时可靠安全交互机理:各种各样的异质情境信息需要在空天地一体化车联网中实时、可靠、安全地交互,但现有地面车联网网络覆盖范围有限、传播环境复杂,难以满足车载网络在自动辅助驾驶、动态智能交通管理以及应急、野外等恶劣环境中的应用要求。同时,空天网络中的节

点都是移动的，网络拓扑变化快速、时延要求高、节点处理能力受限，使物理身份信号的获取、识别和加密更为困难。

### 4 解决思路及面临的技术挑战

#### 4.1 空天地一体化沉浸式车联网体系架构

针对空天地一体化沉浸式车联网技术特点，首先需要确立空天地一体化车载互联网络模型与体系架构，并针对所涉及的车载信息感知与交互、空天地网络的动态管理以及资源的动态调度等关键技术给出解决方案。

如图 1 所示，空天地一体化车联网网络模型以地面通信网络与临近空间平台的协同为主，空中卫星网络为辅，融合了可以强化车载应用服务的其他空间信息网络节点，如 GPS 导航卫星、高精度对地观测卫星等。车联网网络模型中的车载用户研究对象包括智能车、自动（无人）驾驶车、电动车以及无人机等各种车载用户，将传统路网的二维平面延伸至三维空间。空天地一体化车联网网络将支撑未来面向交互式沉浸体验的多样化车载应用服务，如

行车安全广播服务、点对点实时交通信息服务、多媒体车载内容分发服务、移动互联网接入服务、自动停车服务、电动车智能充电服务、无人机功能化服务（无人机送货服务）等。

具体地，可采用美国国防部体系结构框架理论 DoDAF2.0 来开展空天地一体化沉浸式车联网体系架构设计，按照空天地一体化沉浸式车联网的全视图研究、能力视图研究、系统视图研究和技术标准视图研究的先后顺序开展研究。如图 2 所示，新型一体化沉浸式车载网体系架构不仅可以满足高时空分辨率情境信息感知与融合，通过设计面向沉浸式体验的多通道动态车载接入机制，可以实现一体化车载互联网络动态管理、车载用户低成本灵活接入。此外，还将支持全方位情境信息的实时共享与跨层安全以及异构网络的动态重构与资源调度优化。

#### 4.2 空天地一体化车联网的软件定义实现及其重构机制

沉浸式车联网应用的需求具有多样化的特点。根据具体需求的不同，各应用对于通信链路的覆盖

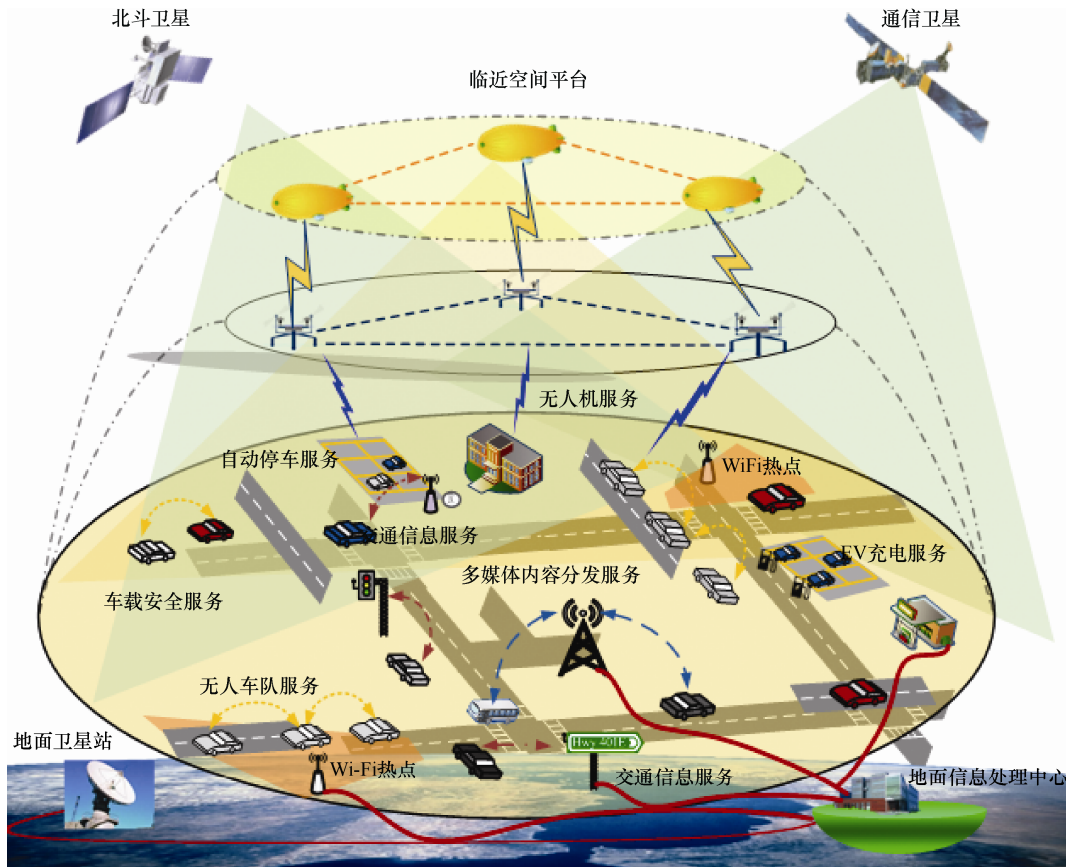


图 1 面向沉浸式体验的空天地一体化车联网架构

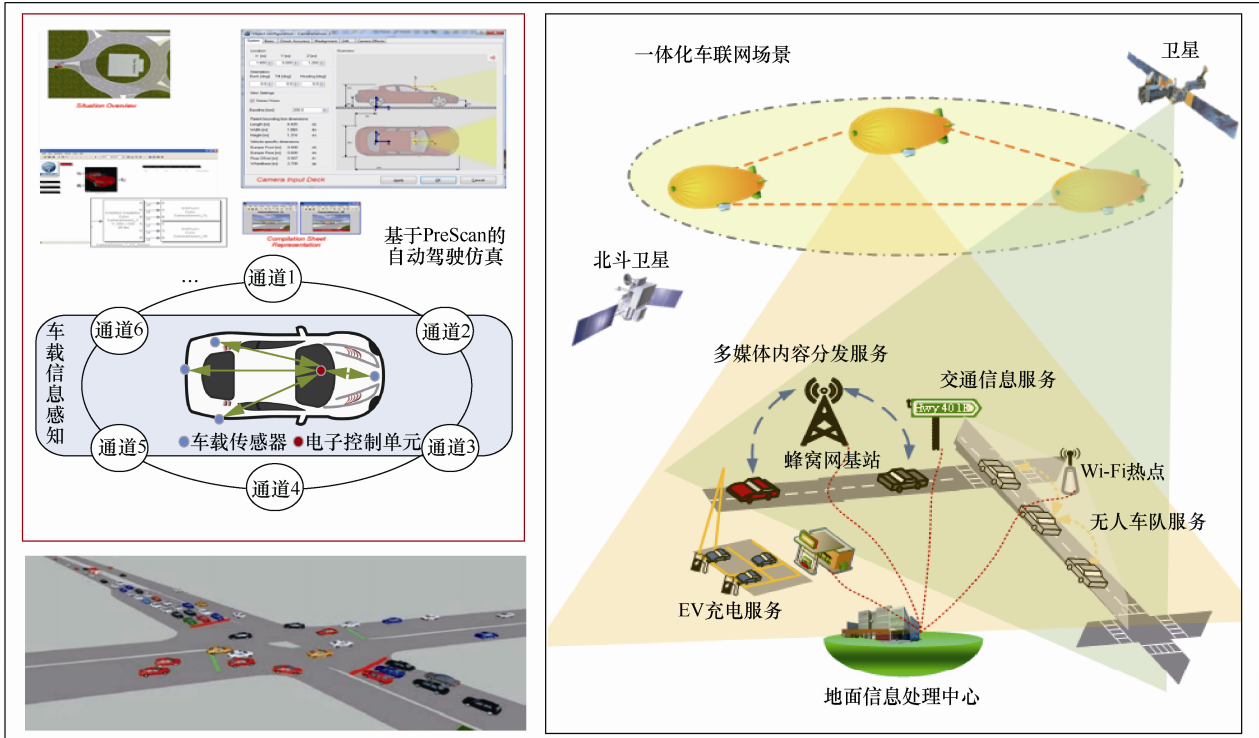


图 2 空天地一体化沉浸式车联网功能组成

范围、带宽、时延、抖动以及计算资源的吞吐量、时延等需求差别很大，难以通过单一的设计同时满足，为系统的设计提出了很大的挑战。资源虚拟化通过引入虚拟资源这一中间实体，将应用的抽象需求与具体的物理承载解耦，简化了系统设计，也提高了使用的灵活性。

具体来讲，在通信资源方面，通过等效带宽的方式抽象沉浸式车联网应用的流层次软实时带宽需求，同时将异质信道的服务能力抽象为等效带宽；在计算资源方面，将各应用对网络侧信号处理等计算需求等效为计算吞吐量及延时需求，并将实体物理计算设备抽象为虚拟机。

沉浸式车联网具有多层次的动态特性，一方面，车辆通信节点处在连续不断的移动中，形成动态的时空分布；另一方面，具体的车联网应用也有可能进行迭代式的更新，形成动态的通信以及计算资源需求。软件定义的可重构空天地一体化网络可以实现大时空尺度的系统重配置，动态适配不断变化的需求，以软件定义的方式实现网络侧的信号处理等计算需求。当应用需求发生变化时，或资源约束发生变化时（由于空间节点的计算与通信资源通常需要与多种其他既有任务共享，且这些任务的需求通常也是时变的），仅需要通过更新软件的方式

就可以重构网络的功能；卫星、无人机等网络侧通信节点，则可以通过软件定义的方式更改巡航路线或悬停地点，使其服务的地理范围更加适配车辆的聚集热点。图 3 给出了一个采用空天地一体化网络实时重构出交通事故上报与共享功能的例子，当事故已被处理完毕或者其对交通已不产生影响时，对应的通信和计算资源可以释放，供其他应用使用。

与地面移动通信网的虚拟化与软件定义实现不同，空天地一体化网络的软件定义重构首先需要选择在异质的通信节点中搭载异质的可重构计算资源，如在空中节点中搭载低能耗嵌入式的可重构处理器负责进行简单的可重构任务，在地面节点中则部署高性能的可重构集群，以充分满足沉浸式车联网对网络计算能力的需求。其次，还要综合考虑不同通信层次的异质性，结合本地、局部、大尺度的控制信息设计分布式或集中式，或混合多层次的软件定义控制中心架构，对应的重构策略也需要根据分布式和集中式的特点进行优化。

基于网络拓扑和资源的变化，将空天地不同网络的特点进行互补，用户可依据通信及计算需求动态选择网络接入，以在满足服务质量的前提下降低开销。例如，地基网络资源充足且传输成本较低，然而当车辆高速移动时需频繁切换；空基网络可更

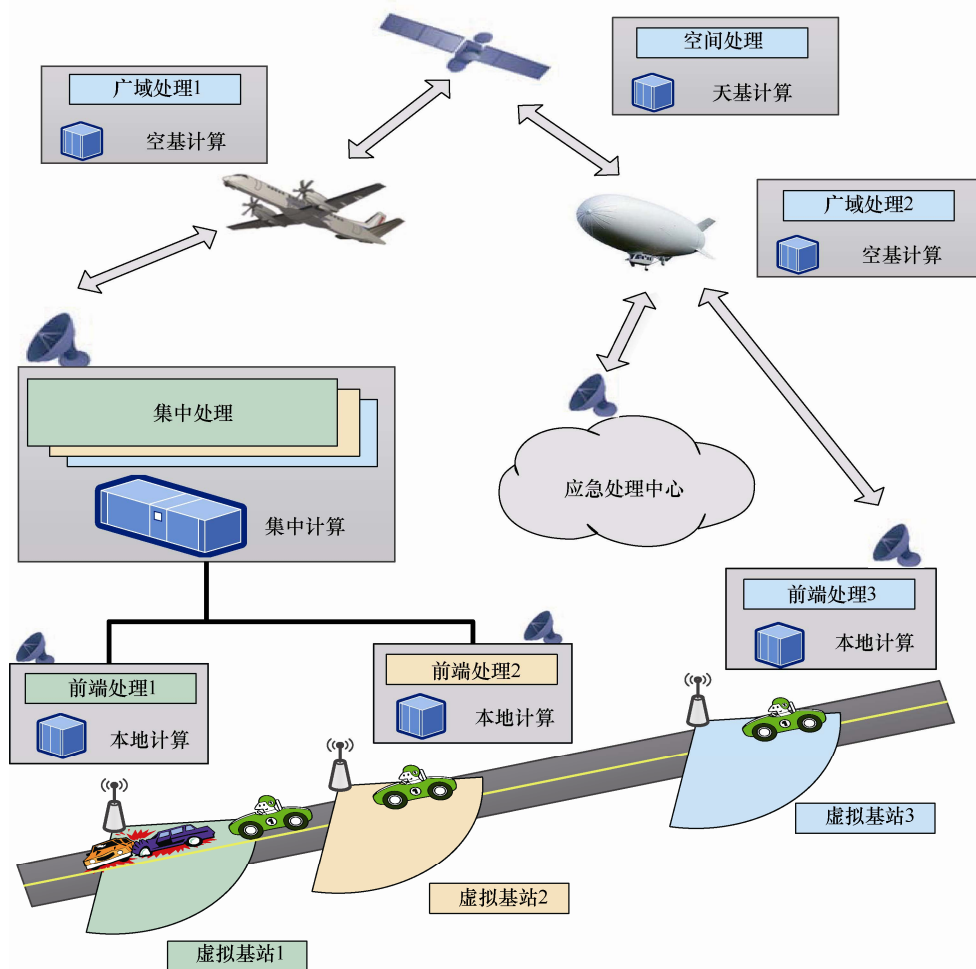


图3 软件定义空天一体化车联网应用示例

好地支持用户移动性，但其资源受限且成本相对较高。因此，车载娱乐视频信息可通过地基网络的RSU下载以降低通信成本，而延时要求较高的路况信息则应通过天基网络获取以实现高可靠通信。

基于网络虚拟化所提供的计算及通信资源表述，从用户角度出发研究多维网络的动态选择机制。首先，在已知网络拓扑和资源信息的条件下，利用优化理论分别设计单任务及多任务情况下的最优网络选择机制，以在满足延时要求的前提下最小化用户成本，并拓展至多任务联合优化场景；进而，考虑网络拓扑和资源动态变化，基于马尔可夫决策过程理论设计用户动态接入策略，以适配相应的网络资源，从而减小用户切换开销和时延。

实际网络中，业务需求在时域和空域均动态变化，然而网络资源通常受限，特别是空间网络资源，难以满足所有用户的通信或计算请求。因此，需从网络管理角度出发，引入用户接入机制并合理分配

资源，以提升网络性能及用户满意度。“沉浸式”车联网通信和自动驾驶对通信及计算提出了多样化需求，且天空地一体化网络本身具有网络异构、资源异质且动态变化的特性，为网络资源管理提出了新的挑战和要求。为此，在给定的网络拓扑和资源配置、用户接入选择条件下，可基于网络虚拟化所提供的计算及通信资源表述对资源的异质性进行简化，建立优化问题设计高效的多维异质网络资源管理机制，综合调度功率、频率、时隙等通信资源和存储、计算等资源，通过不同网络间的协作提升网络及用户性能（如容量、能效等）。此外，针对不同业务的特性及内容，可依据当前网络情况设计差异化的服务机制，进一步提升网络资源利用率。例如，对于流行度较高的视频，可利用天基网络进行大范围内的广播推送，以有效减少对地基网络资源的占用。利用随机几何理论，可从网络层角度设计基于内容的高效信息传输机制，通过动态的

内容缓存与推送，实现低信令开销与低能耗的服务质量保证。

### 4.3 基于车网协同的高时空分辨率情境信息感知与融合

对于智能驾驶而言，周边环境障碍物（包括建筑物、人等）和其他行驶车辆的距离和相对位置是最重要的小尺度情境信息之一。现有的车辆位置信息一般通过卫星定位系统获得（如 GPS、北斗等）。但由于卫星定位误差一般在 10 m 左右，无法满足智能驾驶避障的高精度定位需求；而且，在某些特定场合，如树林、地下停车场等，卫星信号无法穿透障碍物的遮挡，因此，需要考虑其他定位技术作为补充。

常见方法是车辆与地面位置固定的基站通过不同方法（如到达时间、到达角度、信号强度）进行测量和定位。但由于车辆的运动速度快、活动范围大，基站的覆盖有限，因此很有可能车辆落入基站盲区。解决该问题的一个途径是通过车辆之间的协作测量来完成位置估计。如图 4 所示，车辆 4 没有得到基站的覆盖，但是通过与车辆 1~车辆 3 的协作测量，仍然能够成功获得自身位置信息。根据测距误差的分布特性，协作定位算法可以分为参数类和非参数类，一般来讲非参数方法会导致较高的处理复杂度，因此，本文建议采用参数化的协作定位算法进行位置估计。考虑到车辆运动速度快（典型速率 60 km/h），超声波信号多普勒效应严重，仅依赖于信号强度的测量方法精度不足。一个可行的解决方案是采用宽带信号的到达时间和角度估计方法实现距离（角度）测量，并以贝叶斯协作定位算法为主要手段实现车辆的快速位置估计。

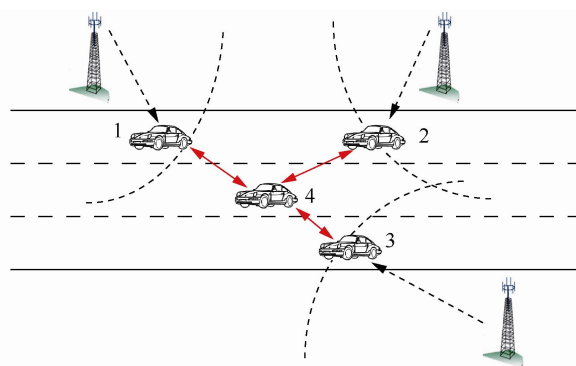


图 4 车辆协作定位方法

另外，考虑驾驶环境的不可预测性，车辆在很大程度上可能既得不到足够的基站，也没有合适的

协作车辆进行定位辅助（二维定位一般需要至少 3 个外部测量节点）。此时，车辆需要通过自身配备的速度计、陀螺仪等惯性导航模块实现位置的不间断估计。但是，惯导模块常用的航位推断法存在有严重的误差累积特性，无法单独使用，需要外部信息的辅助。常见的方法是利用地图信息进行位置纠正，地图信息可以来自事先离线输入，或由空间信息平台提供。这种方法的优点在于融合处理较为简单，但缺点在于实时性不好，精度也不足。一个可行的解决思路是采用部分外部测距信息，如 GPS 卫星信号、基站和协作车辆的测距信息等，与惯导信息进行融合跟踪，以扩展卡尔曼滤波为基本处理框架。该方案可通过外部测距信息的辅助有效消除惯导产生的累积误差，以保证定位的实时性。

另外，如图 5 所示，除了其他车辆外，环境中的障碍物位置也是智能驾驶最重要的局部情境信息之一。常见的非协作探测方式包括雷达、激光、超声波等方式，利用信号回波的到达时间实现距离估计。在此基础上，结合其他车辆位置信息，可采用即时定位与地图构建方法（SLAM）实现局部位置情境信息的融合。基本的 SLAM 包括地图表示、特征提取、误差描述方式等多个步骤。考虑到构建地图的实时性要求，可采用基于概率模型的 SLAM 方法。另外由于车辆运行范围较大（典型局部范围在 100 m 左右），而单车感知范围受限，因此需要采用多车协同的 SLAM 方式，即通过局部网络中的多部车辆共同维护局部地图及其协方差矩阵，并利用观测结果进行全局更新。

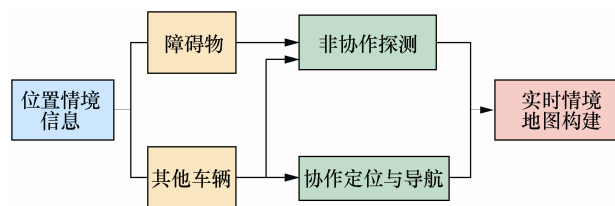


图 5 位置情境信息的组成与表示

在局部情境信息感知方法中，由于网络动态性强、范围大、环境复杂，因此，车辆的高精度同步几乎是不可能实现的。常见的假设是基站之间能够完成一定程度的同步，而车辆与基站、以及车辆之间都是完全异步的。因此，以到达时间估计为例，往往需要采用到达时间差（TDOA）或双向测距等方法实现车辆位置估计。以 TDOA 为例，其定位误差的克拉美劳下界要比 TOA 方法高 3 dB 以上。由

于天基网络能够提供全网统一时钟，因此，可以实现局部车联网中的高精度同步，从而大大提升局部位置信息的感知精度。

#### 4.4 基于空地协同的情境信息实时共享与跨层安全机制

综合考虑情境信息的 QoS 要求、链路状态和节点负载、节点移动性等因素，研究高效快速的信道接入与路由维护的理论和方法，以及与之相适应的跨层安全机制，保证信息的安全可靠传输和实时共享。

首先，如图 6 所示，为了提高无线信道的快速接入和分配，根据空地通信节点各自特点，可以将空地一体化网络进行适当的分簇。网络分簇后，无线信道分配主要包括 2 个层次，第一层是无人机等空中节点与地面车辆簇头之间的信道分配，第二层是地面车辆簇内的信道分配。空地一体化分簇网络的组网模型可以分为同频组网、异频组网和混合组网模型。利用随机几何理论研究具有无人机的空地一体化车联网节点的连通性；在节点高动态移动性下，分析信道分配算法的性能和网络拓扑的稳定性，研究无人机条件下的车联网信道分配策略；由于车辆的高速移动性，当簇头驶出当前无人机通信范围时，存在通信切换问题。与传统的蜂窝网络切换方式不同，由于需要簇头集中上报测量信息以及转发切换信息，可能引起较大的信息传递时延，利用群组切换及其资源分配策略，减少信令开销和时

延。由于业务时延不仅与传统意义上的带宽分配相关，而且与 MAC 帧结构，时隙位置及帧长密切相关。为此，根据簇内节点数量、传输数据量，动态调整帧结构，减少节点接入网络的竞争时延或分配信道时延。

空天一体化车联网对近、中、远 3 类情景信息交互的实时性要求不同，需要研究差异化的按需路由选择机制。可利用蚁群优化算法，自适应分流不同的传输数据到不同的网络，有效降低链路失效所带来的影响。进一步，可通过强化学习与蚁群算法的结合，鼓励蚂蚁选择到达目标的按需路径，让蚂蚁更多地在这些路径上留下信息素，使蚁群算法更快地探索到最优的按需路径，提高数据传输的实时性。另一方面，由于多无线接口多信道技术的应用越来越普及，对于可靠性要求高、带宽需求大的数据，根据时空特点，利用分布式的强化学习路由由算法，选择合适的多路径路由传输，保障数据传输的可靠和低时延。

由于空间网络资源有限，且链路不稳定，如空中无人机节点在能量耗尽前必须返回地面，使空地网络拓扑发生较大的变化，需要研究快速空地动态拓扑重构下密钥分发算法。采用预分配机制，在无人机节点能量达到预警值时，重构密钥分发路径，并预分配非对称密钥，当无人机广播撤销指令时，重构路径上的节点及时用预分配密钥和当前密钥

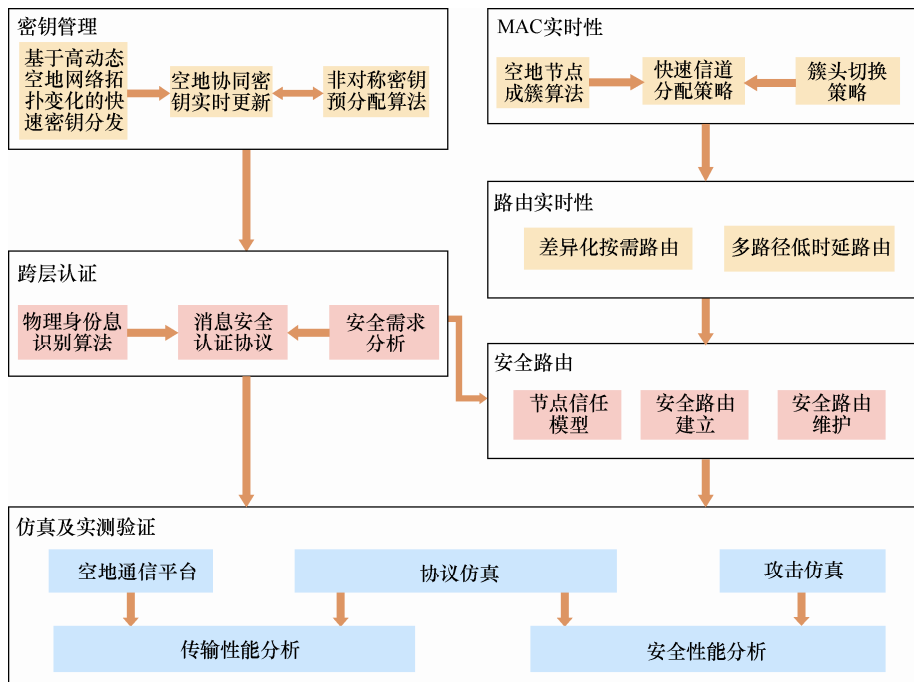


图 6 基于空地协同的情境信息实时共享与跨层安全技术路线

组合生成新的密钥,同时撤销失效无人机节点以及过期密钥。

空地协同密钥实时更新模块能够使车辆通过无人机更新密钥。由于该方案通过无人机来更新车辆密钥,所以车辆的密度对该分配方案的执行是一个非常关键的因素,需分析密钥分配方案如何适用于具有不同车辆密度的网络场景,以及车辆如何动态的更新它们的密钥。在密钥更新的过程中,无人机将会为车辆用户产生一些临时的匿名密钥,保证车辆与车辆之间的安全通信。该密钥的数量由无人机的密度决定,因此密钥分配方案还需研究如何适用于具有不同密度的无人机的网络场景。

网络中用户接收到的信息是否由合法用户发送以及信息是否完整也非常重要,因此,需要有一个对信息的合法性和有效性进行认证的机制。为此,IEEE1609.2采用椭圆曲线数字签名算法(ECDSA, elliptic curve digital signature algorithm)对信息进行数字签名处理。然而现有使用车载网络的基于群组的数字签名算法和基于公钥基础设施的密钥分配方案(PKI, public key infrastructure)无法在短时间内处理大量的信息。因此,天空地一体化车载网络需要一种结合空地通信网络节点高动态、低时延特点的基于物理身份信息的跨层认证机制。为此,首先需要研究空地网络节点的物理身份信息特征提取和识别方法,为空地通信轻量级认证提供物理前提;然后分析通信链路信息完整性和可靠性安全需求,并提出基于物理身份信息的跨层认证方案;最后在空地通信网络仿真平台上构建密钥分发、认证以及各种安全威胁的场景,通过数值仿真和实测设备验证方案的安全性能和传输性能。

在上述密钥分配和跨层认证研究基础上,为防范来自合法节点的安全攻击,进一步保障空地一体化车联网信息传输的安全性和实时性,应研究基于多路径路由的安全传输机制。将机器学习中的决策树方法引入到节点信任度的评估和节点的分类中,通过节点的历史行为对节点进行动态的分类,解决网络中内部节点的攻击或不合作带来的安全问题,且实时性较高。从而在路由选择时,尽量选择可靠的节点进行数据的转发,并根据业务QoS、链路质量、路由稳定性等约束条件,建立和维护安全路由,提高数据传输的安全性。

## 5 结束语

作为物联网的一个重要组成部分,本文面向智能化交通管理、车辆智能化控制以及路网智能信息服务的应用需求,提出了一种基于空天地一体化网络的车联网概念及其体系架构,并重点描述了面向沉浸式体验空天地一体化车联网需要解决的核心科学问题、解决思路以及面临的技术挑战,给出了空间资源动态约束下的空天地一体化网络重构机理、多维多尺度情境信息的实时感知与高效融合方法,以及情境信息的实时可靠安全交互机理的基本思路与方法,为车辆智能驾驶和用户沉浸式驾驶体验提供了技术支撑,为全自动无人驾驶车联网奠定了理论和技术基础。

致谢: 本文的撰写得到了清华大学的周盛副教授和沈渊副教授、加拿大滑铁卢大学的周海波博士和张珊博士、哈尔滨工业大学深圳研究生院的张霆廷副教授和吴绍华副教授,以及厦门大学的杨帆副教授的大力支持,同时得到了于全院士、陆建华院士和朱洪波教授的学术指导,在此一并表示衷心的感谢。

## 参考文献:

- [1] MUKHTAR A, XIA L, TANG T B. Vehicle detection techniques for collision avoidance systems: a review[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(5): 2318-2338.
- [2] FLEMING B. Advances in automotive electronics[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 9(2): 4-13.
- [3] 张乃通, 赵康德, 刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(3): 223-230.  
ZHANG N T, ZHAO K L, LIN G L. Thought on constructing the integrated spaceterrestrial information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(3): 223-230.
- [4] 沈荣骏. 我国天地一体化航天互联网构想[J]. 中国工程科学, 2006, 8(10): 19-30.  
SHEN R J. Some thoughts of Chinese integrated space-ground network system[J]. Engineering Science, 2006, 8(10): 19-30.
- [5] 黄惠明, 常呈武. 天地一体化天基骨干网络体系架构研究[J]. 中国电子科学研究院学报[J]. 2015, 10(5): 460-491.  
HUANG H M, CHANG C W. Architecture research on span-based backbone network of space-ground integrated networks[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(5): 460-491.
- [6] NAUSHAD A, BALAEI A T, DEMPSTER A G. Relative positioning enhancement in VANETs: a tight integration approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 47-55.
- [7] ERIC M. Meet Google's project Loon: balloon-powered net access[J]. CNET Retrieved, 2013, 15.

- [8] LIN Y, LIN W, SHEN L. Satellite and high altitude platform-based inter-vehicle communications in vast and desolate areas[J]. Journal of Southeast University, 2012, 28(2): 135-139.
- [9] WIDIWAN A K, TAFAZOLLI R. High altitude platform station (HAPS): A review of new infrastructure development for future wireless communications[J]. Wireless Personal Communications, 2007, 2(3): 387-404.
- [10] ZHOU Y, CHENG N, LU N, et al. Multi-UAV-aided networks: aerial-ground cooperative vehicular networking architecture[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(4):36-44.
- [11] GARZÓN M, et al. An aerial-ground robotic system for navigation and obstacle mapping in large outdoor areas[J]. Sensors, 2012, 13(1): 1247-1267.
- [12] GODDEMEIER N, KAI D, CHRISTIAN W. Role-based connectivity management with realistic air-to-ground channels for cooperative UAVs[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(5): 951-963.
- [13] ZENG Y, ZHANG R, LIM J T. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Migration, 2016, 54(5): 36-42.
- [14] LU N, CHENG N, ZHANG N, et al. Connected vehicles: solutions and challenges[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(4): 289-299.
- [15] ZHENG K, ZHENG Q, CHATZIMISIOS P, et al. Heterogeneous vehicular networking: a survey on architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials 2015, 17(4): 2377-2396.
- [16] WU X, SUBRAMANIAN S, GUHA R, et al. Vehicular communications using DSRC: challenges, enhancements, and evolution[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 399-408.
- [17] JAVIER G, MIGUEL S, RAMON B. IEEE 802.11p vehicle to infrastructure communications in urban environments[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(5): 176-183.
- [18] VLADIMIR B. A measurement study of vehicular internet access using in situ Wi-Fi networks[C]//The 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, 2006.
- [19] OTT J, KUTSCHER D. Drive-thru Internet: IEEE 802.11 b for "automobile" users[C]//INFOCOM 2004, 2004, 1:362-373.
- [20] ZHOU H, CHENG N, LU N, et al. WhiteFi infostation: engineering vehicular media streaming with geolocation database[J]. IEEE Journal of Selected Areas of Communications. 2016, 34(8): 2260-2274.
- [21] SALAHUDDIN M A, FUQAHA A A, GUIZANI M. Software-defined networking for RSU clouds in support of the internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal Wireless Communications, 2015, 2(2): 133-144.
- [22] LIU K, NG J K Y, LEE C S, et al. Cooperative data scheduling in

hybrid vehicular ad hoc networks: Vanet as a software defined network[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(3): 1759-1773.

[23] PACE P, ALOI G, RANGO F D, et al. An integrated satellite-HAP-terrestrial system architecture: resources allocation and traffic management issues[C]// VTC 2004-Spring, 2004, 5:2872-2875.

[24] EVANS B, WERNER M, LUTZ E, et al. Integration of satellite and terrestrial systems in future multimedia communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(5):72-80.

#### 作者简介:



牛志升 (1964-), 男, 清华大学教授, 主要研究方向为通信网流量控制理论、绿色通信、车联网等。



**Sherman SHEN** (1958-), 男, 加拿大滑铁卢大学教授, 清华大学客座讲席教授, 主要研究方向为移动通信网络、无线传感器网络、网络与信息安全、车联网等。



张钦宇 (1972-), 男, 哈尔滨工业大学深圳研究生院教授, 主要研究方向为空间信息网络、通信与信息系统等。



唐余亮 (1964-), 男, 厦门大学教授, 主要研究方向为无线与移动通信、车联网、网络安全等。