



汽车先进技术译丛

智能网联汽车系列

 Springer

智能网联汽车 信息物理系统

——自适应网络连接
和安全防护

VEHICULAR CYBER
PHYSICAL SYSTEMS

[美] 丹达·B. 拉瓦特(Danda B. Rawat) 著
钱德拉·巴吉拉查娅(Chandra Bajracharya)
中国信息通信研究院泰尔终端实验室 组译
罗瓊珞 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛
智能网联汽车系列

智能网联汽车信息物理系统

——自适应网络连接和安全防护

[美] 丹达·B. 拉瓦特 (Danda B. Rawat)

著

钱德拉·巴吉拉查娅 (Chandra Bajracharya)

中国信息通信研究院泰尔终端实验室 组译

罗瓊珞 译

机械工业出版社

本书主要是对智能网联汽车在频谱捷变网络环境下的自适应网络连接和安全防护进行分析和评估。本书内容包括关于车际网、信息物理系统和频谱捷变通信的概述；信息物理系统在汽车自组网络中如何实现自适应网络连接；信息物理系统在衰落信道的状况下如何实现自适应网络连接；信息物理系统构建的基于信任的安全体系，以发现恶意的驾驶人或者车辆，并且丢弃由这些驾驶人或者车辆发送的消息；信息物理系统如何利用公有云/互联网以及运行过程中形成的私有集群进行分布式运算。本书可供智能网联汽车产学研技术人员阅读使用，也可供其他汽车技术人员及汽车专业师生参考阅读。

Translation from the English language edition:

Vehicular Cyber Physical Systems: Adaptive Connectivity and Security

By Danda B. Rawat, Chandra Bajracharya

Copyright © Springer International Publishing Switzerland 2017

This Springer imprint is published by Springer Nature

The registered company is Springer International Publishing AG

All Rights Reserved

This title is published in China by China Machine Press with license from Springer. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体版由Springer授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2018-0656。

图书在版编目（CIP）数据

智能网联汽车信息物理系统：自适应网络连接和安全防护 / （美）丹达 B. 拉瓦特（Danda B. Rawat），（美）钱德拉·巴吉拉查娅（Chandra Bajracharya）著；罗璎珞译. —北京：机械工业出版社，2018.6

（汽车先进技术译丛·智能网联汽车系列）

书名原文：Vehicular Cyber Physical Systems

ISBN 978-7-111-59898-5

I . ①智… II . ①丹… ②钱… ③罗… III . ①汽车—智能通信网—研究
IV . ①U463.67

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 097170 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：孙 鹏 责任编辑：孙 鹏

责任校对：王 欣 张 薇 封面设计：鞠 杨

责任印制：张 博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 5 印张 · 2 插页 · 75 千字

0 001—2500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-59898-5

定价：60.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066 机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294 机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

作者简介

Danda B. Rawat 毕业于弗吉尼亚州诺福克市奥多明尼昂大学的电子与计算机工程专业，获博士学位。他是美国霍华德大学电气工程与计算机科学系的副教授。Rawat 博士的主要研究领域包括无线通信网络、网络安全、大数据、信息物理系统、物联网、无线虚拟化、软件定义网络、智能电网、无线传感器网络以及车辆无线自组网络。Rawat 博士于 2016 年获得 NSF Faculty Early Career Development (CAREER) 奖。他发表了 120 多篇科学/技术文章，出版了 8 本书。他曾担任十多种国际期刊的编辑/客座编辑。他还担任 IEEE INFOCOM 2016/2017 的网络主席，IEEE INFOCOM 2015 的学生津贴联合主席，IEEE CCNC 2016 无线网络和移动性分论坛主席，IEEE AINA 2015 年通信网络和协议分论坛主席等。他曾担任多个国际会议和研讨会的程序主席、总主席和会议主席，并曾担任 IEEE INFOCOM、IEEE GLOBECOM、IEEE CCNC、IEEE GreenCom、IEEE AINA、IEEE ICC、IEEE WCNC 和 IEEE VTC 等多个国际会议的技术计划委员会 (TPC) 成员。他还获得了格鲁吉亚南方大学 Allen E. Paulson 工程与技术学院杰出研究学院奖 (2015 年卓越学术活动奖)。他是 CWiNs 研究实验室的创始人和主任。Rawat 博士是 IEEE 的高级会员，也是 ACM 和 ASEE 的成员。他自 2013 年起担任 IEEE Savannah 部门执行委员会副主席。

Chandra Bajracharya 博士是美国乔治亚州南部大学电气工程系的一名教师，2014 年她在美国奥多明尼昂大学获得电气与计算机工程博士学位。她在尼泊尔 Tribhuvan 大学获得电子工程学士学位，在挪威科技大学获得电力工程硕士学位。她还获得了美国东肯塔基大学的计算机科学 (应用计算) 硕士学位。她的研究兴趣包括医学信息物理系统、交通信息物理系统、数值电磁学、电磁场的生物效应、UWB 天线、天线设计、智能电网和电力电子、替代能源、信号/图像处理 and STEM 教育。她发表了 30 多篇关于相关课题的科技论文。她是 IEEE 的成员，曾担任 TPC 成员和多个会议和期刊的审阅者。

序 言

先进的无线通信技术和轻巧的智能便携设备，使随时随地的通信变为可能。同时，嵌入式系统、传感器和无线网络等技术和设备搭建起了连接物理设备（汽车、道路）和信息世界（网络、运算能力）的桥梁，形成了所谓的信息物理系统。智能网联汽车的信息物理系统需要通过无线通信收到实时反馈，以通知驾驶人或者直接控制车辆的安全功能及信息娱乐应用。本书主要是对智能网联汽车的信息物理系统在频谱捷变网络环境下的自适应网络连接和安全防护机制进行分析和评估。

本书包括以下 5 章：

第 1 章：关于车联网、信息物理系统和频谱捷变通信的概述；

第 2 章：介绍信息物理系统在汽车自组网络中如何实现自适应网络连接；

第 3 章：介绍信息物理系统在衰落信道的状况下如何实现自适应网络连接；

第 4 章：介绍信息物理系统构建的基于信任的安全体系，以发现恶意的驾驶人或者车辆，并且丢弃由这些驾驶人或者车辆发送的消息；

第 5 章：介绍信息物理系统如何利用公有云 / 互联网以及运行过程中形成的私有集群进行分布式运算。

目 录

序言

第 1 章 车际网及信息物理系统概述

1.1. 概述	1
1.2 背景	2
1.3 车际网	2
1.3.1 车车通信	3
1.3.2 车路通信	4
1.4 IEEE802.11p 协议与车际通信	4
1.5 智能网联汽车信息物理系统	5
1.6 智能网联汽车信息物理系统功能	6
1.6.1 安全功能	7
1.6.2 辅助驾驶	7
1.6.3 自动驾驶	7
1.6.4 紧急通信	7
1.6.5 信息娱乐内容共享	7
1.7 智能网联汽车信息物理系统所面临的挑战	7
1.7.1 无线网络连通性	8
1.7.2 异构无线接入	8
1.7.3 信息安全与隐私保护	8
1.7.4 高移动性和动态网络拓扑	8
1.7.5 对时延的敏感性和对服务质量的影响	8

1.7.6 本地运算与云端运算 ... 9

1.8 信息物理系统的频谱捷变 ... 9

1.9 总结 11

参考文献 11

第 2 章 车际网及信息物理系统概述

2.1 概述	13
2.2 自适应发送范围 / 功率	14
2.3 竞争窗口调节	16
2.4 性能评估	18
2.5 总结	22
参考文献	22

第 3 章 在衰落信道的状况下汽车自组网频谱捷变实现自适应网络连接

3.1 概述	24
3.2 系统模型	25
3.3 在衰落信道状况下汽车自组网的网络连通性	26
3.3.1 在衰落信道状况下发送范围和功率	28
3.3.2 相向行驶时的 V2V 连接	30
3.3.3 同向行驶时的 V2V 连接	32
3.4 性能评估	33

3.5 总结	38	第 5 章 计算、通信和其 他车载信息物理 系统亟待解决的 问题	61
参考文献	39	5.1 概述	61
第 4 章 信息物理系统构建 的汽车自组网的信 息安全	41	5.2 介绍	61
4.1 概述	41	5.3 汽车信息物理系统自适应 通信	62
4.2 汽车自组网的可信性	42	5.4 汽车信息物理系统的计算 方案	65
4.3 分析	44	5.4.1 公有云计算	66
4.3.1 检测恶意车辆 / 驾驶人的 概率性方法	44	5.4.2 私有云计算	66
4.3.2 检测恶意车辆 / 驾驶人的 确定性方法	49	5.5 性能评估	68
4.3.3 概率性方法和确定性方 法相结合	55	5.6 总结	73
4.4 总结	59	参考文献	74
参考文献	59		

第 1 章 车际网及信息物理系统概述

1.1. 概述

智能交通信息物理系统的车际互联是美国、日本、欧洲等国工业界和学术界普遍关注的新兴技术。JSK（日本汽车交通与驾驶电子技术协会）在 20 世纪 80 年代初启动了汽车联网和通信的课题研究。在美国，正式的研发始于 20 世纪 90 年代，当时美国国会通过了基于 1991 年陆上综合交通运输效率化法案（ISTEA）的智能车辆高速公路系统（IVHS）提案，以提高道路安全和效率。

智能网联汽车信息物理系统的主要目标是将计算、通信和控制相结合，以减少道路拥塞、交通事故和燃料消耗，最终提升道路驾驶的安全性、效率和用户体验。有许多关于车辆信息物理系统之间网联和通信的研究^[1]，例如研究货车编队行驶的美国加利福尼亚州的 PATH 项目^[2]和欧洲的 Chauffeur^[3]。另外，美国运输部（DOT）与多家汽车制造公司如福特、本田、丰田等展开“避碰规范合作”（CAMP），推动车际网的落地^[4]。汽车之间的网络连接和通信是智能网联汽车信息物理系统的重要组成部分，通过及时地扩散和传播准确的路况信息供车辆采取相应措施，提升道路的安全性和效率。通常情况下，智能网联汽车信息物理系统之间的通信通过车车通信（V2V）、车路通信（V2R）以及路路通信（R2R）来实现。常规信息物理系统解决方案使用车载单元（OBU）形式进行感知决策控制，不与其他车辆交换信息；近期推出的车际网通信，可以通过基于车车和车路联网，进行车辆之间的通信，实现车辆之间的高效协同。

1.2 背景

交通事故每年持续增长。美国国家安全委员会（NSC）发布的报告显示，2015年前6个月交通事故的数量比2014年同期增加了14%。交通事故对经济的影响，达到平均每年2306亿美元^[5]。根据美国交通部的统计，超过半数的交通拥堵是由于高速公路上的事故导致的，并非发生在高峰时间的城市路段。并且，交通部也提到，由于交通事故造成拥堵的高速路造成了数十亿美元的生产力损失，一年也会浪费数亿加仑的燃料。

“如果驾驶人在碰撞前半秒的时候接收到警告信息，60%的撞车事故都是可以避免的^[6, 7]。”汽车信息物理系统对交通事故和车辆状态的预警非常重要，可以支撑车辆智能决策，变换路线或者采取制动等操作，从而避免交通事故的发生。的确目前已经有通过高速路上的电子显示大屏，或者通过交通广播去告知驾驶人路况或者事故的方式，但是这些方式通常都比较慢，或者需要驾驶人分神去获取信息。智能网联汽车信息物理系统就可以将路况及流量信息通过自动化的方式通知驾驶人（在无人驾驶阶段是通知到车辆），驾驶人或者车辆可以根据这些获取的信息做出进一步的操作。无线通信就是传送这种信息的一种途径。

智能网联汽车信息物理系统应具备运算和处理交通流量信息的能力，并且通过车车、车路、车辆与行人的通信把信息传送给其他的车辆、路侧设施和行人，从而避免交通拥堵和交通事故的发生。因为车辆本身的快速移动，使得车车通信和车路通信具有一个特点——通信网络拓扑变化速度很快。在这种情况下，为了达到通信的要求，信息物理系统需要及时改变参数，来适应动态网络通信和承载业务的需求。这种对连接的适配通常要考虑以下因素：与汽车的密集程度相关的网络连通性，与各类消息成功发送概率相关的竞争窗口设置，以及基于各方面信息判定汽车安全可信的机制等。

1.3 车际网

车际网的目标是提升道路安全和效率。这一目标主要是通过车辆自组网络

(VANET) 进行车车通信和车路通信交换传递信息, 以及通过车辆中继, 实现路侧设备之间的通信来实现的。通信场景如图 1.1 所示。

1.3.1 车车通信

车车通信是基于汽车之间单跳或者多跳网络传递道路流量信息的, 并不借助路侧设备。所以这种通信方式不需要相应路侧通信基础设施的部署。因此, 当出现自然灾害或者紧急情况, 通信基础设施被破坏时, 这种通信方式仍然能够使用。在车车通信中, 汽车接收的是其他汽车发送的信息, 如何不使用发送方汽车的标识, 又要验证消息的真实性和合法性, 是一个很具有挑战性的课题。如果使用发送方汽车的标识, 与汽车相关的, 或者与汽车的所有者、驾驶人相关的隐私信息保护将是个问题。智能网联汽车物理信息系统如何在保护隐私的前提下进行安全的车车通信是目前大家普遍关心的问题。

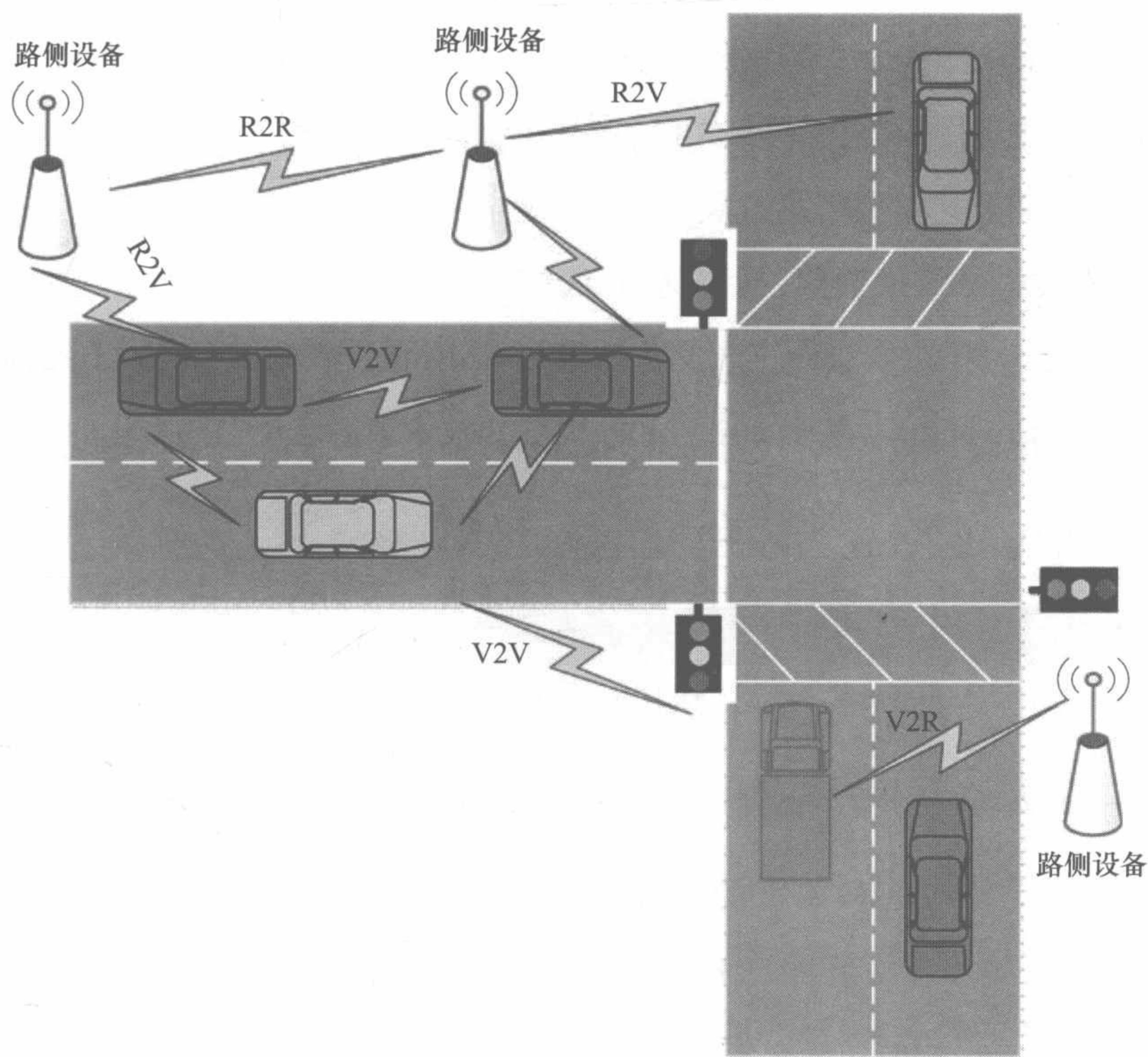


图 1.1 车车 (V2V)、车路 (V2R) 和路车 (R2V) 通信的网络情景

1.3.2 车路通信

车路通信包括汽车与路侧的基站、接入点等基础设施，通过车路 / 路车等通信协议传送信息，以及路侧设置之间的通信。在这种通信里，路侧基础设施对车际网络中通信的连通性和安全性起到非常重要的作用。路侧设施可以验证汽车的标识，并为车际网中的智能网联汽车提供安全保障。进一步来说，在郊区等车辆密集程度较低的地方，路侧设备可以帮助连通相距很远的车辆。但可能会有延迟，不太适用于紧急通信。

1.4 IEEE802.11p 协议与车际通信

美国联邦通信委员会从 802.11p 的频段中为车际网分配了专用频段，如图 1.2 所示。底层基于专用短距离通信（DSRC）协议的车际网络无线接入（WAVE）的应用协议是专门针对高速行驶的汽车和汽车与路侧设施之间通信设计的，使用 5.9GHz（5.855~5.925GHz）频段，一共分为 7 个信道，每个信道均为 10MHz。在这 7 个信道中，位于中间位置的第 178 信道是控制信道，第 172 信道和第 184 信道用于与人身安全和公共安全相关的紧急通信。剩余的 4 个信道被用于一般业务。起初车际网计划使用 802.11a 协议，后来基于 802.11p 的 WAVE 协议显现出很多优势，车际网最终还是选择了 802.11p。当发送功率为 32dBm 的情况下，802.11p 的最大传送范围可以达到 1000m。基于 802.11p 的 WAVE 技术很适合动态的变化的网络。

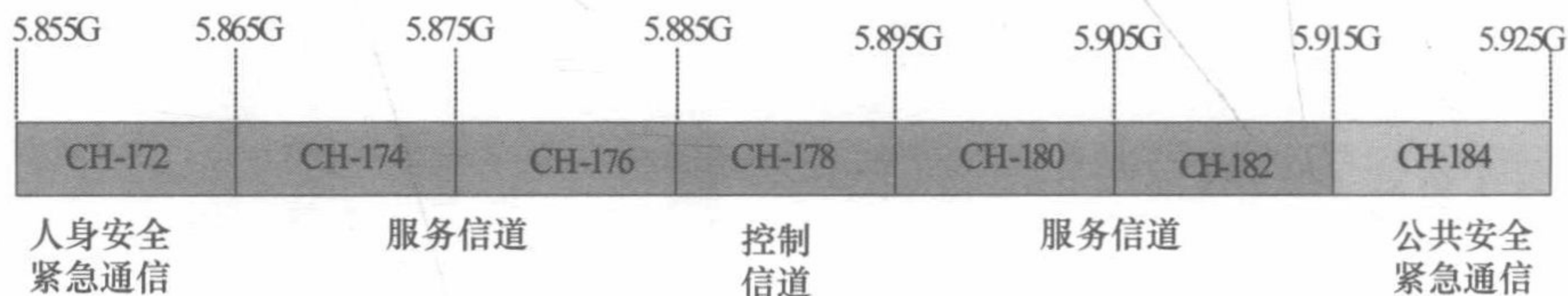


图 1.2 IEEE 802.11p WAVE（专用短距离通信）的 7 个专用信道

表 1.1 总结了各地区和国家的车际网使用的不同频段，表 1.2 对比了基于 802.11p 的 WAVE 技术和基于 802.11 的 Wi-Fi OFDM 无线通信技术。

表 1.1 不同国家 / 地区 WAVE / DSRC 的应用频谱分配

国家或地区	频段 /MHz
ITU-R (ISM band) 欧洲	5725~5875 5795~5815, 5855/5875~5905/5925
北美	902~928, 5850~5925
日本	715~725, 5770~5850

表 1.2 IEEE 802.11p WAVE 和 IEEE 802.11 Wi-Fi 正交频分复用 (OFDM) 的参数比较

参数	IEEE 802.11p WAVE	IEEE 802.11 Wi-Fi
频谱	5.9GHz	5/2.4GHz
带宽	10MHz	20MHz
数据传输速率 / (Mbit/s)	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54
调制类型	同 Wi-Fi	BPSK/QPSK/16-/64-QAM
信道编码	同 Wi-Fi	Conv. coding rate: 1
总数据副载波	同 Wi-Fi	48
导频副载波总数	同 Wi-Fi	4
总虚拟副载波	同 Wi-Fi	12
FFT/IFFT 大小	同 Wi-Fi	64
FFT/IFFT 间隔	6.4 μ s	3.2 μ s
副载波间隔	0.15625MHz	0.3125MHz
CP 间隔	1.6 μ s	0.8 μ s
OFDM 符号间隔	8 μ s	4 μ s

1.5 智能网联汽车信息物理系统

信息物理系统是物理实体与信息系统通过网络连接和通信建立起的集成化系统。智能网联汽车的信息物理系统是信息物理系统的一个子集，它以汽车和路侧的网络为实体，运算和通信为信息化过程。图 1.3 就是一个典型的智能网联汽车信息物理系统。它由物理实体单元（例如汽车、DSRC / 移动通信设备、平板电脑等）、信息系统（例如数据中心、交通控制中心等）和通信连接（例如车际网）等构成。

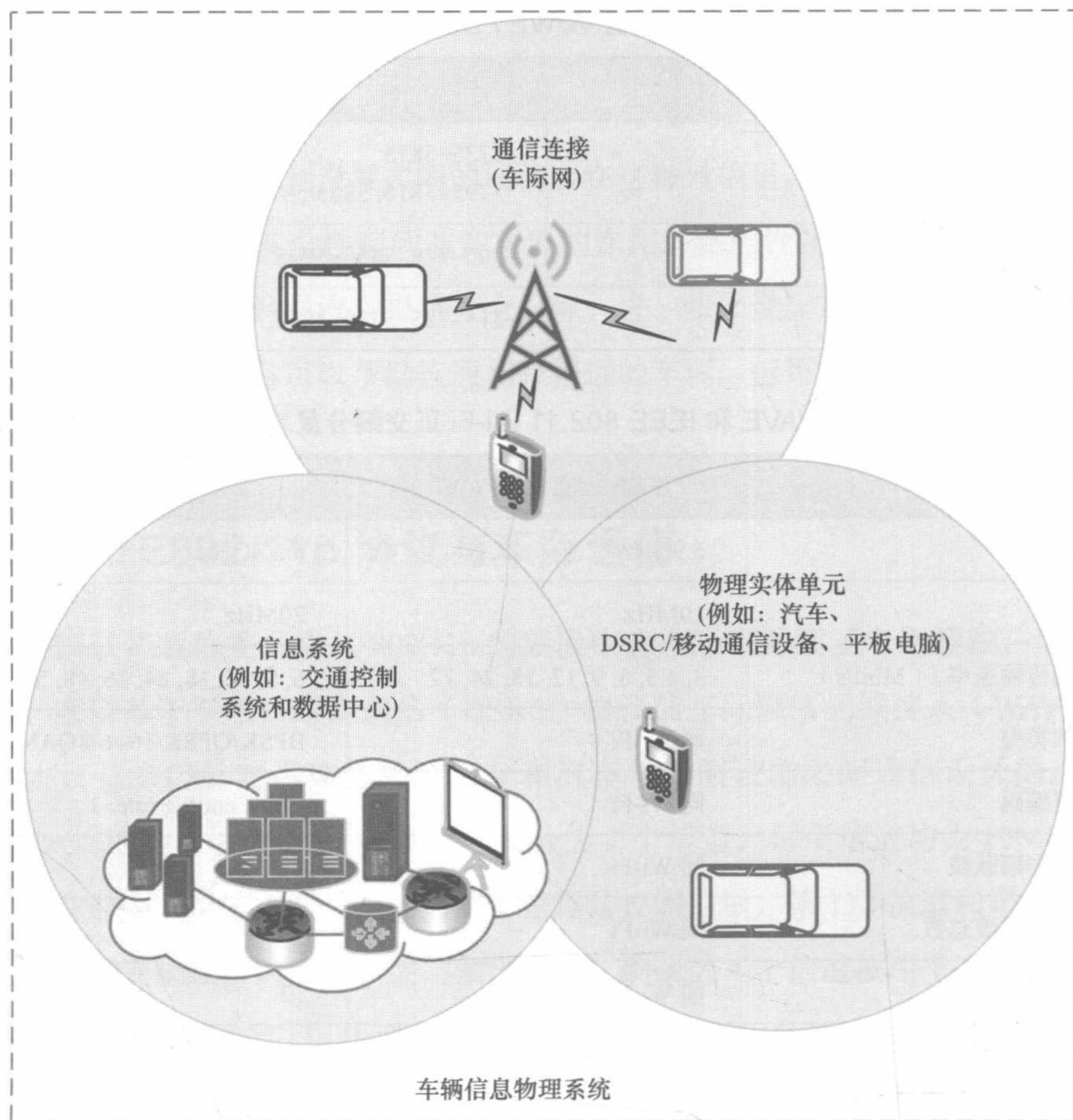


图 1.3 车辆信息物理系统及部件示意图

智能网联汽车信息物理系统可以利用车端几乎无限的能量和存储能力这一优势，利用路侧设施的属性，结合车联网网络自身的特点，来构建与汽车移动性、流量信息、汽车行驶轨迹相关的多种服务^[1, 10, 18]。

1.6 智能网联汽车信息物理系统功能

智能网联汽车信息物理系统所具备的功能有：道路安全、绿色交通、辅助驾驶、信息娱乐等^[1, 19, 20]。以下简单介绍一下这些应用。

1.6.1 安全功能

智能网联汽车使用信息物理系统交换多种信息，包括汽车状态、道路状况、天气状况、拥堵路段以及交通事故等。这些信息能够帮助用户全方位地了解驾驶环境，从而最终提升道路安全性。此外，汽车还能够跟使用移动通信设备的行人进行通信，避免碰撞行人。

1.6.2 辅助驾驶

智能网联汽车信息物理系统可以根据与其他汽车交换的信息和相邻汽车的状态，为避免撞车、变道和超车等操作提供帮助。

1.6.3 自动驾驶

智能网联汽车信息物理系统也被认为是支撑无人驾驶 / 自动驾驶功能的关键，例如谷歌的无人驾驶汽车。

1.6.4 紧急通信

智能网联汽车可以通过车车之间多跳通信，在汽车自组网内传递紧急状态通知，例如灾难来临时的紧急撤离通知。当出现重大的天灾人祸时，通信基础设施可能被破坏，或者由于大量呼叫导致超负荷，这时通过车车通信建立的汽车自组网就提供了另一种通信解决方案。

1.6.5 信息娱乐内容共享

车际网可以提供汽车之间的音乐、视频以及文件等多种形式的分享内容，汽车自组网使用者也可以通过建立对等连接进行分享。不仅如此，汽车自组网用户还可以通过车路 / 路车通信获得路侧设施提供的信息。汽车自组网用户也可以把互联网上的服务分享给道路上的其他人。

1.7 智能网联汽车信息物理系统所面临的挑战

智能网联汽车物理信息系统所面临的挑战^[8,21]主要包括以下内容。

1.7.1 无线网络连通性

车际网的网络拓扑是根据汽车速度和驾驶人的行为不断变化的。汽车开上道路，也就加入了网络；驶出道路时，也就离开了网络。在这样的动态的变化的网络拓扑中，保证网络的连通性对智能网联汽车信息物理系统来说是一个挑战。到了汽车密集度较低的农村地区，连通性也是个问题。因此，汽车需要有自适应的发送范围 / 发送功率调节技术，以实现更高的连通性。

1.7.2 异构无线接入

802.11p WAVE 协议使用了 5.9GHz 专用频段，包括 7 个信道，专门用作车际通信。当汽车密集度较高的时候这 7 个信道不够用。而且，有的汽车为了具备更好的性能需要使用其他接入方式或者使用其他信道。这种情况下，信息物理系统需要根据无线设备和接入技术来实现异构无线接入。

1.7.3 信息安全与隐私保护

信息安全与隐私保护是车际网面临的主要问题。如果直接使用汽车自身的标示，可以保证接入网络的网元的安全性和可靠性。但是，使用像汽车标识码 (VIN) 这样的信息，汽车的所有者 / 驾驶人 / 租用者的隐私就有可能被泄露甚至被侵害。或者说，车际网需要对车辆进行认证，以保证所接收的信息的完整性，这方面的需求就可能对车辆用户的隐私构成威胁。因此，对于智能网联汽车的信息物理系统来说，必须要平衡信息安全防护和隐私保护两个方面。

1.7.4 高移动性和动态网络拓扑

汽车自组网络是移动自组网的一个子集，网络拓扑是动态的，会根据道路的变化而变化。已有的无线接入技术并不是为这种高动态性网络设计的，因此高移动性必然会带来一些新的挑战：每辆车需要调整其通信的相关参数，迅速适应环境的变化，及时传送和接收信息。

1.7.5 对时延的敏感性和对服务质量的影响

对于智能网联汽车的信息物理系统来说，时延是最重要的性能指标之一，因

为很多时效性很强的信息需要在很短的时间内完成传送。802.11p 协议定义了 7 个信道，其中 6 个信道用于通信，1 个信道用于管理这 6 个通信信道。在车联网应用场景下，这个协议的主要缺陷是无法支撑大量用户，当一些地区车辆密集度很高的时候，那些时延敏感信息的传输达不到服务质量的要求，从而使信息物理系统的整体性能下降。

1.7.6 本地运算与云端运算

智能网联汽车可以依靠本地的资源进行计算，也可以把数据上传到云端平台，由云端的系统完成运算。这两种方法各有利弊：本地计算的时延虽然较小，但是有较高的不确定性，也可能会出现错误；上传云端计算的时延可能稍高，但是运算结果准确率高。总之，应当根据智能网联汽车信息物理系统所要承载的具体应用，来均衡使用这两种计算模式。

1.8 信息物理系统的频谱捷变

在城市中汽车密集度较大的地方，车联网的通信信道很容易拥塞。近期研究表明，给特定的服务提供商静态地分配信道，仅供其在很长时间内覆盖面很广的区域内独家使用，往往信道不能被充分利用，常常处于空闲状态。

为了提高这些未被充分利用的频段的使用率，出现了频谱捷变认知无线电技术，这种技术可以使没有得到某个频段授权的备选用户适时使用空闲信道。例如车联网用户，他们只授权使用 5.9GHz 的频段，但是他们可以在条件满足的情况下，使用蜂窝通信的频段。因为使用了频谱捷变认知无线电，这种“借用”并不会对正常使用该频段的用户造成干扰。需要明确的是，正常用户是指授权使用相应频段的用户，例如蜂窝通信用户使用蜂窝网络；备选用户是指没有得到某个频段的使用授权，但是当没有正常用户使用这个频段时，可以借用这个频段进行通信的用户。例如，车联网用户使用蜂窝通信频段^[22-26]。

智能网联汽车的频谱捷变通信过程包括 4 个阶段，如图 1.4 所示。

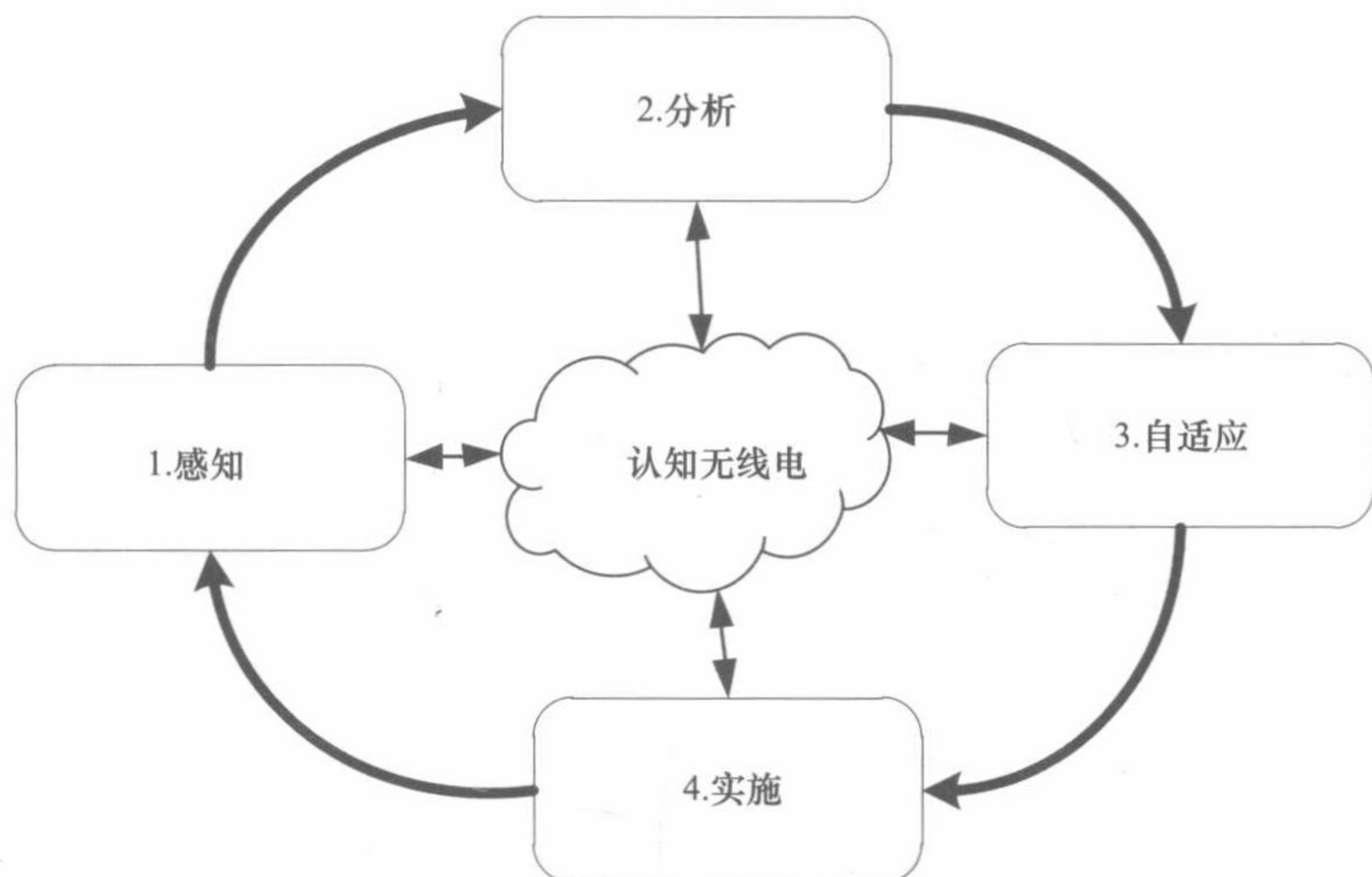


图 1.4 频谱捷变车载信息物理系统通信的认知周期^[23]

感知阶段

感知是频谱捷变技术中动态频谱访问 (DSA) 的第一个阶段。在这个阶段, 没有被授权的备选用户可以感知或者扫描去发现那些没有被正常用户使用的空闲信道。感知信息可以是某个用户自己扫描频谱发现的, 也可以是多个用户利用已经一定的已经获得的扫描信息进一步协同完成的。

分析阶段

在这个阶段, 用户分析感知到的信息找出空闲信道。同样, 分析可以由某个用户单独完成, 也可以综合多个用户的感知信息, 在汇聚中心完成分析。独立分析的用户自己找到适用的信道; 汇聚模式下由中心控制者最终明确适用的信道。

自适应阶段

在自适应阶段, 用户根据确定的适用信道, 调节自身发射和接收的参数来进行通信。这些参数包括: 数据传输速率、发送功率、调制类型、带宽等。

实施/通信阶段

实施阶段, 也就是通信阶段, 就是用户和通信目标按照自适应阶段协商的参数进行通信阶段。

这四个阶段周期性循环, 既可以避免对正常用户产生干扰, 又可以使备选用户