



基于典型无线场景库的 LTE-V2X 信道特性

Channel Characteristics of LTE-V2X Based on Typical Wireless Scenario Library

摘要: 分析了基于长期演进的车用无线通信技术 (LTE-V2X) 的关键技术、面临的挑战和和相关研究进展。详细介绍了北京交通大学和中国联合网络通信集团有限公司在上海开展的实地测试工作, 制定了测试方案, 并基于实际测量的数据对信道特性进行了深入分析。

关键词: 蜂窝车用无线通信技术; LTE-V2X; 无线信道; 测试

Abstract: The key technologies, challenges, and related research progress of long term evolution-vehicle to everything (LTE-V2X) are analyzed. The measurement campaigns carried out in Shanghai by Beijing Jiaotong University and China Unicom are introduced in detail, and the test scheme is given. Based on the actual measured data, the channel characteristics are analyzed.

Keywords: C-V2X; LTE-V2X; wireless channel; test

苏昭阳 /SU Zhaoyang¹

刘留 /LIU Liu¹

冯毅 /FENG Yi²

(1. 北京交通大学, 中国 北京 100044;
2. 中国联合网络通信集团有限公司, 中国 北京 100048)
(1. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. China Unicom, Beijing 100048, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202106010

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20211210.1946.004.html>

网络出版日期: 2021-12-13

收稿日期: 2021-11-10

如今汽车已经成为人们日常生活中不可缺少的出行工具。然而, 随着汽车保有量的增加, 一些潜在的问题也开始显现出来, 如交通安全、交通拥堵、环境污染等。在为人类带来便利的同时, 由汽车造成的负面影响已经不能忽视。于是车载无线通信技术 (V2X) 应运而生。V2X 包括车与车通信 (V2V)、车与物通信 (V2I)、车与人通信 (V2P)、车与网络通信 (V2N), 它可以显著提升驾驶的安全性与交通效率, 降低事故发生率^[1]。

V2X 面临着如何在无线传播环境快速时变与网络拓扑动态变化的情况下提供高可靠、低时延的通信服务等难题^[2]。目前, 世界上用于 V2X 的主流技术主要有两种: 一种是专用短程通信 (DSRC) 技术, 该技术采用电气与电子工程师协会 (IEEE) 802.11p 定

义的物理层协议; 另一种是基于蜂窝车用无线通信技术 (C-V2X), 该技术包括基于长期演进 (LTE) 移动通信技术形成的 LTE-V2X 技术和基于 5G 新空口 (NR) 演进形成的 NR-V2X 技术。其中, DSRC 可以提供多对多、低延时的通信, 但是可靠性较差^[2]; C-V2X 能提供更广的通信范围、更低的时延与更高的可扩展性^[3]。对于这两种技术, 中国选择使用 C-V2X 作为发展 V2X 的技术手段。

中国积极开展相关的研究与测试工作。C-V2X 产业化程度和产品接受程度都在逐步提升。一方面, 核心芯片、模组和终端产品的研发基本成熟; 另一方面, 交通运输行业和汽车厂商开始主动推广 C-V2X, 并开展了实地测试。2016 年, 工业和信息化部在重庆、武汉、长春进行了为期 3 年的 LTE-V2X 外场测试^[4]。2018 年, 中国率先为 LTE-V2X 直连通信分配

了 5 905 ~ 5 925 MHz 的专用带宽^[5], 并于当年 11 月在上海完成世界首例 C-V2X “三跨”展示, 实现了通信模组、终端厂商、整车厂商 3 个不同方向的互联互通^[6]。2019 年, 在三跨的基础上, “四跨”示范活动在上海举办, 四跨重点增加了跨安全平台的场景^[7]。2020 年, “新四跨”活动在上海举办, 进一步推动了 C-V2X 相关技术和标准的测试验证, 同时增加了新技术元素, 以不断完善 C-V2X。

除中国外, 欧美国家和日本对相关技术的研究占据领先地位。美国主要基于 DSRC 开展研究工作, 并支持 C-V2X 作为备选技术。高通与福特开展了美国的第一个 C-V2X 试验。其中, 高通设计了一款针对 C-V2X 的芯片 (Qualcomm 9150)。欧洲从支持 IEEE 802.11p 逐渐转为技术中立态度。5G 汽车联盟与宝马集团等公司共同完成了第一个跨车型的 C-V2X 现场演示。此

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (61931001)

外,日本也将 C-V2X 作为备选技术。2018 年,日本多个通信和车辆公司联合进行了 C-V2X 直接通信测试^[8]。

随着 5G 的到来, C-V2X 面临着更多挑战。一方面,更加丰富的应用场景与业务种类要求通信技术能提供更低的时延与更高的可靠性;另一方面,与新技术如超大规模多输入多输出(MIMO)、毫米波通信、移动边缘计算等的结合也对 C-V2X 的发展提出了新要求。此外, V2X 通信的安全性也是一个亟待解决的问题,包括 V2X 通信中的功能安全、网络安全、隐私安全和数据安全^[2]。对此,人们需要构建 V2X 通信的安全防护体系。

面对这些挑战,进行 V2X 信道特性研究显得尤为重要。目前 V2X 信道特性的研究存在一些不足。相比于传统的蜂窝通信系统, V2X 信道具有工作频段高、发射端天线高度低、终端移动性高、受环境影响大的特点^[9]。通信双方的高速移动使信道状态变化剧烈,统计特性难以预测。虽然目前标准组织定义了 V2X 相关信道模型,但是这些模型有着场景覆盖不丰富、参数不合适等问题。因此,在更多场景下对 V2X 信道开展实地测量与建模是非常有必要的。

1 LTE-V2X 关键技术

1.1 LTE-V2X 无线通信特点

LTE-V2X 无线通信具有以下特点^[10]:

(1) 低延时高可靠通信

在 V2X 场景中,通信系统内个体处于高速移动状态,导致多普勒频移严重,无线传播环境复杂且快时变,网络拓扑具有高度动态性。LTE-V2X 依托现有 LTE 蜂窝通信系统,对物理层、资源分配、同步等关键技术进行改进,具备低延时高可靠的通信能力。

(2) 远距离数据传输可靠性高

相比于 IEEE 802.11p 采用的多跳中继进行远距离数据传输的方式, LTE-V2X 采用基站与云端服务器连接的方式传输远距离数据,可以有效避免中继节点的影响,提高远距离数据的可达性。

(3) 非视距场景传输可靠性高

由于利用了基站转发数据的方式进行通信,且基站天线架设高度一般较高,因此 LTE-V2X 可以很好地支持非视距场景,提高非视距场景下数据传输可靠性。

(4) 网络建设和维护成本低

由于是基于 LTE 蜂窝网络发展而来的,因此 LTE-V2X 可以在进行网络部署时在现有设备上升级扩展,方便快捷地实现 LTE-V2X 的网络建设,同时也可以利用现有商用网络进行安全证书的更新和设备的维护。

由此可见, LTE-V2X 能够最大程度利用已部署网络等资源,具有部署成本低、网络覆盖广的优势,并且在密集的环境下具有更远的通信距离、更大的容量、更佳的非视距通信性能和拥塞控制能力。

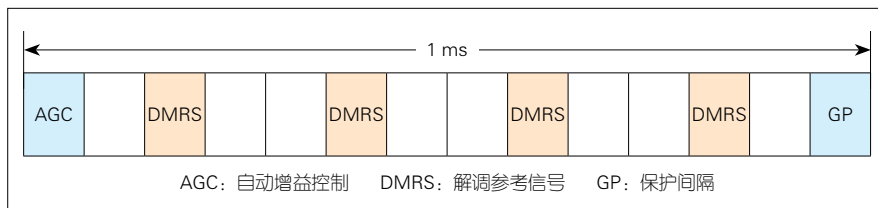
1.2 工作模式

LTE-V2X 针对车辆通信定义了直通模式和蜂窝模式两种通信模式^[10]。直通模式是指车辆之间的直接通信。这种模式引入设备到设备(D2D)PC5 接口,采用 V2X 专用频段,可以使邻近的终端在近距离范围内无需中心节点就可进行通信,从而实现车、路、人之间的短距离直连通信,有效达成

V2X 通信终端之间的低时延、高可靠传输,保证车辆安全驾驶。直通模式适合蜂窝网络覆盖有限的环境,但需要有良好的资源配置及拥塞控制算法。蜂窝模式使终端和基站通过 5G 空口(Uu)接口通信,工作在传统移动通信授权频段,由基站负责资源集中分配与数据转发,以具备集中控制、资源调度、统一协调的功能,可显著提高 LTE-V2X 的接入能力和组网效率。两种模式的协同工作、优势互补,可以使车辆在不同场景中实现低延时、高可靠通信^[11]。

1.3 物理信道设计

LTE-V2X 采用单载波频分多址接入技术,可以有效降低峰均功率比,在相同功放情况下有更大的发射功率。LTE-V2X 在频域上支持 10 ~ 20 MHz 的可变带宽,物理信道设计为子帧、资源块和子信道。在 LTE-V2X 中,如果继续使用传统蜂窝通信的帧结构,车辆的高速移动和高频段工作造成的多普勒频偏就会对信道估计产生严重影响,因此需要对帧结构进行增强设计。如图 1 所示,每个子帧长度为 1 ms,包含 14 个正交频分复用调制(OFDM)符号。其中,第一个符号用于自动增益控制(AGC),最后一个符号作为保护间隔(GP)。将原本子帧中的 2 列解调参考信号(DMRS)增加到 4 列,能够有效处理典型高速场景高频段的信道检测、估计与补偿^[12]。资源块是分配给用户的最小时频资源,在时域上占 1 ms,在频域上占 180 kHz,并包含了 12 个子载波,



▲图 1 基于长期演进的车用无线通信技术帧结构

是所有控制信令和数据信息的基本单元。子信道是具有相同子帧的资源块的组合，用于传输数据信息和控制信息两种信息。这两种信息被安置在同一子帧内，以达到降低时延的目的。

1.4 资源调度

LTE-V2X 支持 Mode 3 和 Mode 4 两种资源分配方式。合理进行资源调度可以有效避免资源碰撞，提高通信的可靠性。Mode 3 基于 Uu 接口，由基站对资源集中控制。用户需要在通信前向基站发送资源分配请求，基站根据用户的地理位置和资源利用情况将资源分配给用户。Mode 3 是一种基于终端地理信息的半持续调度方式。Mode 4 是基于 PC5 接口的“感知 + 预约的半持续调度”的方案，如图 2 所示。此方案充分利用 V2X 业务的周期性特点。终端会自行选择子信道接入，在资源池中感知资源占用情况。在选择合适的资源后，终端会在这些资源上周期性地发送一定次数，直到触发资源重选。Mode 4 的资源分配过程不需要基站参与，是一个完全自组网的方案，既可以承载周期性的 V2X 业务，又可以利用对资源状态的感知以避免冲突，提高资源利用率和传输可靠性^[10]。

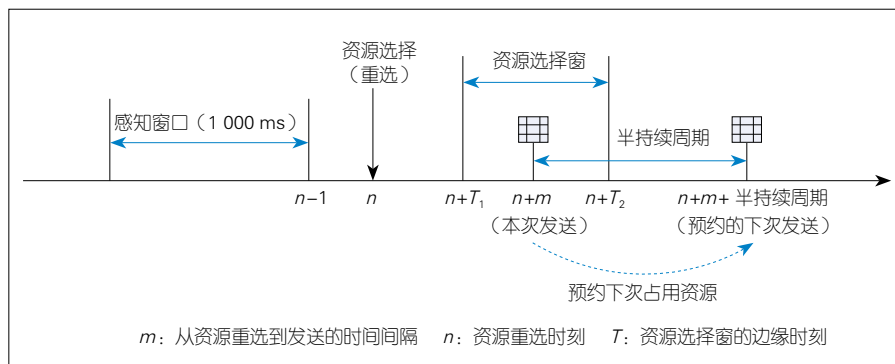
2 典型场景库分类

根据调研，V2X 通信主要涉及 11 个场景：城区直道、城区弯道、城区路口、城区环岛、高速直道、高速弯道、隧道、路堑、地上停车场、地下停车场、三岔路口。

各场景参数如表 1 所示。表中同时给出了各场景的示意图。

3 信道测量与特性分析

无线信道是无线通信系统设计的基础，会在很大程度上影响通信的性能。准确认识 V2X 信道特点是研究



▲图 2 “感知 + 预约的半持续调度”资源分配机制

▼表 1 典型场景库分类

场景	示意图	场景基本情况
城区直道		多径: 较多; 多普勒: 较强; RSU 部署位置: 路中或路侧
城区弯道		多径: 较多; 多普勒: 较弱; RSU 部署位置: 路中或路侧
城区路口		多径: 较多; 多普勒: 较弱; RSU 部署位置: 路中或路侧
城区环岛		多径: 较多; 多普勒: 较弱; RSU 部署位置: 路中或路侧
高速直道		多径: 较弱; 多普勒: 较强; RSU 部署位置: 路中或路侧
高速弯道		多径: 较弱; 多普勒: 较强; RSU 部署位置: 路中或路侧
隧道		多径: 较多; 多普勒: 较强; RSU 部署位置: 路中或路侧
路堑		多径: 较多; 多普勒: 较强; RSU 部署位置: 路中或路侧
停车场		地面停车场 多径: 较弱; 多普勒: 较弱; RSU 部署位置: 路侧 地下停车场 多径: 较多; 多普勒: 较弱; RSU 部署位置: 路中或路侧
三岔路口		多径: 较多; 多普勒: 较弱; RSU 部署位置: 路中或路侧

OBU: 车载单元 RSU: 路侧单元

V2X 通信的首要问题。信道测量是无线信道传播特征统计和参数提取的前提，有助于充分了解所关注场景的信

道特性。为了测量 LTE-V2X 信道并分析其特性，本文研究组在上海临港智能网联汽车综合测试示范区开展了实

地测量工作。

3.1 测试方案

外场测试地点为上海临港智能网联汽车综合测试示范区。选择了上述 11 个典型场景进行测试。测试系统如图 3 所示，基本参数配置如表 2 所示。

在外场测试中，要保证所使用的频段无其他频率干扰，收发信机之间要保持同步。发射端采用多载波信号序列作为探测信号，接收端使用频谱仪联调。测试过程中，还需要用全球定位系统（GPS）轨迹记录仪记录车辆的行驶状态，便于后续的数据分析与处理。图 4 给出了 V2I 高速直道场景与 V2I 城区直道场景下的测试实景图。

3.2 测试结果展示与分析

下面选择 V2I 高速直道场景与 V2I 城区直道场景进行路径损耗的对比，如图 5 所示。

本文研究组采取最小二乘法对实测路损进行拟合，并与自由空间路径损耗模型、WINNER 模型对比，得到了较好的拟合效果。经计算得知，V2I 与 V2V 的路损值分别为 2.27 与 2.67。城区直道路损值较大，这主要是因为城区直道环境反散射体较多，信号经过反射的次数也较多。

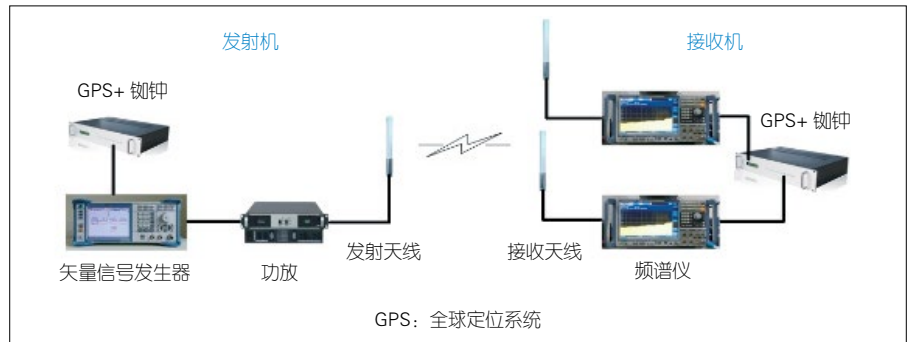
在对 V2I 高速直道场景有效径数进行分析后得到，平均有效径数为 1.81，如图 6 所示；而 V2I 城区直道场景的平均有效径数为 2.87，明显多于高速直道场景。这主要是因为城区场景下较多的反散射体使得发射信号在到达接收信号前发生了更多次的反射，从而产生了更多的多径。

从图 7 中可以看出，V2I 高速直道场景的多普勒功率谱存在快变特性。发生此快变的位置均为收发端距离最近的位置，且存在一定程度的多普勒扩展。

经过对测试数据的分析，我们初

步得出以下结论：对于大尺度衰落，V2V 场景下的路径损耗指数大于 V2I 场景下的；对于小尺度衰落，V2V 场

景的有效多径数大于 V2I 场景下的，且对向行驶场景大于同向行驶场景；无论是 V2V 还是 V2I，不同的测试场



▲图 3 信道测量系统参数配置

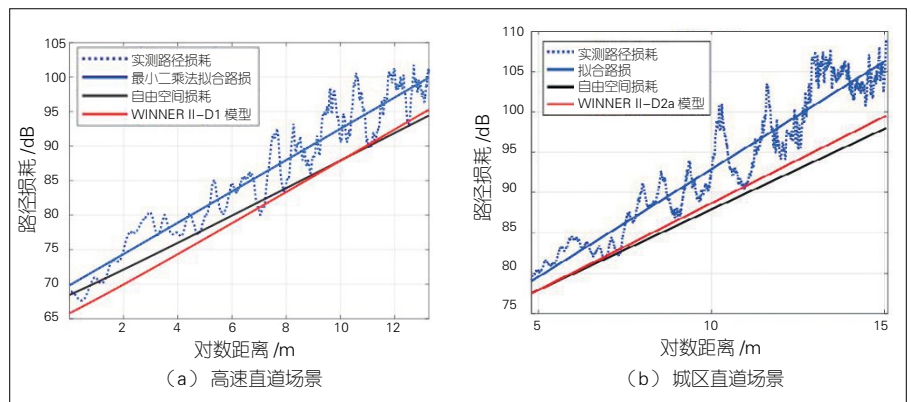
▼表 2 基本参数配置

参数	配置
测量频点	5.91 GHz (V2V), 5.92 GHz (V2I)
测试带宽	10 MHz
发射功率	27 dBm
天线配置	全向偶极子天线，单发双收模式，接收端天线间距为 10 cm
天线高度	V2V 及 V2I 中，车载天线高度为 1.5 m； V2I 中，RSU 天线高度为 6 m
激励信号	多载波信号序列
时钟同步方式	GPS+ 铷钟

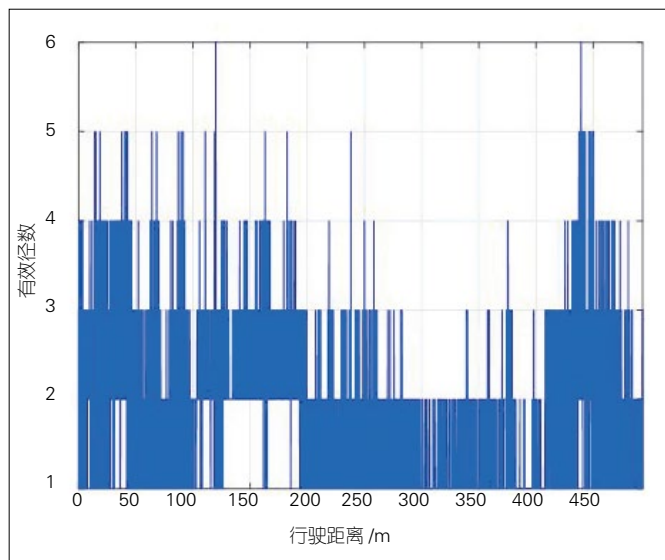
GPS: 全球定位系统 RSU: 路侧单元 V2I: 车与物通信 V2V: 车与车通信



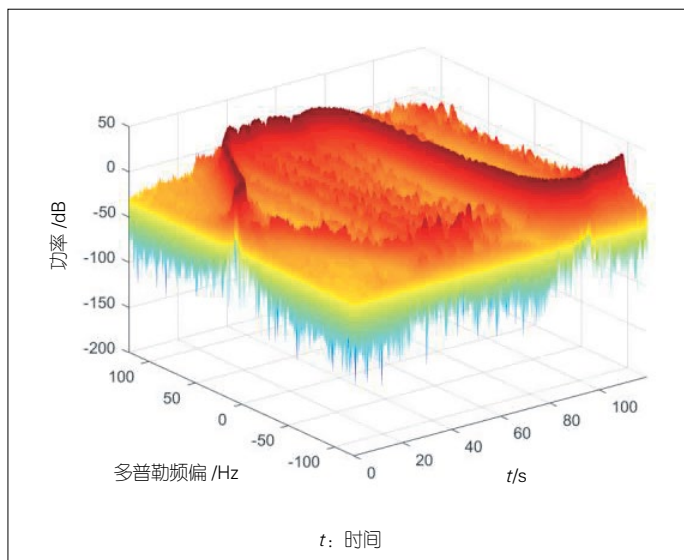
▲图 4 车与物通信高速直道测试场景



▲图 5 车与物通信路径损耗统计分析



▲图6 多径数量统计



▲图7 多普勒功率谱

景得到的结果均有较大差异,需要对每个测试场景进行深入分析。

4 结束语

本文从C-V2X的全球发展态势出发,介绍了LTE-V2X的关键技术、面临的挑战,详细描述了本文研究组在上海临港智能网联汽车综合测试示范区开展的实地测试工作,给出了相应的测试方案,并分析了测试结果。C-V2X作为中国车联网产业发展的关键技术,必将推动中国汽车产业、智能交通等领域的改革创新。由于目前C-V2X无线通信场景的实地测试较少,我们希望本文起到抛砖引玉的作用,以所做的测试为行业同仁开展相关工作提供参考,为车联网产业在中国的大规模部署提供帮助。

致谢

本研究得到了北京交通大学樊月圆和中国联合网络通信集团有限公司邱佳慧、林晓伯工程师的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] 陈山枝,胡金玲. 蜂窝车联网(C-V2X) [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021
- [2] 陈山枝,时岩,胡金玲. 蜂窝车联网(C-V2X)综述[J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 179-185. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2020.02.009
- [3] 郭荣斌,朱永东,朱凯男,等. 车路协同C-V2X关键技术演进 [C]// 第十五届中国智能交通年会论文集. 深圳, 2020: 584-596. DOI: 10.26914/c.cnki-hy.2020.028421
- [4] 魏奎,王庆扬. C-V2X蜂窝车联网标准分析与发展现状[J]. 移动通信, 2018, 42(10): 9-12. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2018.10.002
- [5] CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. A vision of C-V2X: technologies, field testing, and challenges with Chinese development [J]. IEEE Internet of Things journal, 2020, 7(5): 3872-3881. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2974823
- [6] 郭蓬,袁俊肖,戎辉,等. LTE-V2X标准分析及发展现状的研究[J]. 中国汽车, 2019, 29(1): 59-62
- [7] 葛雨明. 我国LTE-V2X标准化及测试验证进展[J]. 移动通信, 2019, 43(11): 36-39. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2019.11.006
- [8] 崔硕,姜洪亮,戎辉,等. 关于C-V2X的标准组成及研究现状分析[J]. 汽车电器, 2018, (9): 47-48+52. DOI: 10.13273/j.cnki.qcdq.2018.09.016
- [9] 董明明,刘留,樊月圆,等. 车联网信道特性综述 [EB/OL]. (2020-12-15)[2021-04-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1185.TN.20201215.1702.001.html>
- [10] 陈山枝,胡金玲,时岩,等. LTE-V2X车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学, 2018, 34: 1-11
- [11] CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. LTE-V: a TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network [J]. IEEE Internet of Things journal, 2016, 3(6): 997-1005. DOI: 10.1109/JIOT.2016.2611605
- [12] CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. Vehicle-to-everything (v2x) services supported by LTE-based systems and 5G [J]. IEEE communications standards magazine, 2017, 1(2): 70-76. DOI: 10.1109/MCOMSTD.2017.1700015

作者简介



苏昭阳, 北京交通大学电子信息工程学院在读博士研究生; 研究方向为车联网通信、信道测量与建模。



刘留, 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师; 研究方向为电波传播与无线信道建模、时变信道信号处理、5G关键技术、高铁宽带接入物理层关键技术等; 主持国家自然科学基金、北京市自然科学基金等多项科研课题; 2016年入选北京市科技新星; 发表论文130余篇, 申请专利30余项(授权20余项)。



冯毅, 中国联合网络通信集团有限公司智网创新中心总监、教授级高级工程师, 享受国家级特殊津贴; 长期从事通信行业网络技术研究、建设规划、产品创新研发工作; 带领团队先后完成8项国际标准和9项中国标准; 发表论文10余篇, 获得省部级以上奖励10余项。