

车联网宽带无线信道测量系统

Development and Testing of Wideband Wireless
Channel Measurement System for Internet of Vehicles

研制与测试

邢建兵,邱佳慧,林晓伯,徐亚楠,高 沛(中国联通网络运营事业部,北京 100033)

Xing Jianbing, Qiu Jiahui, Lin Xiaobo, Xu Ya'nan, Gao Pei (China Unicom Network Operations Division, Beijing 100033, China)

摘 要:

基于商用设备研制了车联网宽带无线信道测量系统平台,用于测量并提取车联网场景中多径信号参数与信道衰落特性。介绍了所搭建平台的系统架构,以车与路侧设备(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)场景信道测量为例,对V2I信道测量方案进行了详细阐述。针对采集到的数据,介绍了信道冲激响应的提取和多径抽头去噪的原理。阐述了典型信道大尺度、小尺度衰落参数提取算法。最后,以某市车联网实际测量场景为例,对上述测量过程进行了阐述与分析。

关键词:

车联网通信;信道测量;参数提取;衰落分析
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.12.008
文章编号:1007-3043(2025)12-0039-08
中图分类号:TN929.5
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

A wideband wireless channel measurement system platform for the Internet of Vehicles (IoV) is developed based on commercial equipment, which is used to measure and extract the parameters of multipath signals and channel fading characteristics for IoV scenarios. The system architecture of the platform is introduced, and taking the Vehicle to Infrastructure (V2I) scenario channel measurement as an example, the V2I channel measurement scheme is elaborated. According to the collected data, the extraction of channel impulse response (CIR) and the principle of multipath tap denoising are introduced. The large-scale and small-scale fading parameter extraction algorithms for wireless channels are described. Finally, taking the actual measurement scenario of Shanghai vehicle network as an example, it elaborates and analyzes the above measurement processes.

Keywords:

Internet of vehicles; Channel measurement; Parameter extraction; Fading analysis

引用格式:邢建兵,邱佳慧,林晓伯,等. 车联网宽带无线信道测量系统研制与测试[J]. 邮电设计技术, 2025(12): 39-46.

0 引言

随着国内经济的快速发展和人民生活水平的提高,我国机动车保有量不断攀升,截至2024年6月底,已达4.4亿辆^[1]。与此同时,道路交通事故也随之增加。根据国家统计局公布的数据,2022年全国共发生道路交通事故25.6万起,严重影响了社会秩序和经济发展。作为现代智能交通体系的核心,车用无线通信

(Vehicle-to-Everything, V2X)技术具有重要的意义。V2X通过车辆与车辆、车辆与基础设施之间的实时信息交互,不仅能够大幅提升道路行车安全、减少交通事故,还能有效优化交通流量、缓解城市拥堵问题,在构建智慧城市、推动交通现代化进程中扮演着举足轻重的角色。

如图1所示,V2X通信系统主要包括车与车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)、车与路侧设备(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、车与人(Vehicle-to-Pedestrian, V2P)以及车与网络(Vehicle-to-Network, V2N)4类通信模

收稿日期:2025-11-14

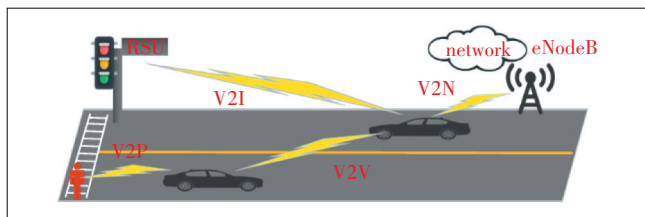


图1 V2X通信系统示意

式^[2]。美国国家公路交通安全管理局曾经对V2X设备的应用数量和交通事故发生概率之间的关联进行推演,当V2X通信系统的覆盖率达到100%时,通过在交叉路口和左转路口利用路侧设备广播预警信息,可使全球每年减少不少于40万起的交通意外,从而挽救780~1 080位交通参与者的生命,避免19万~27万的交通参与者受到伤害。

无线信道特征的刻画和建模在无线通信系统设计、标准化、网络部署等各个环节中均扮演着重要角色。与现有的蜂窝通信系统相比,V2X通信系统具有下述特点。

a) 全新工作频段。2018年11月,工信部为国内V2X划分了5 905~5 925 MHz共计20 MHz带宽的频谱。其中5 905~5 915 MHz频段用于发展V2V通信,5 915~5 925 MHz频段用于发展V2I通信。与蜂窝通信系统相比,V2X通信系统的工作频段更高,波长更短,因此通信的范围将缩小,信号传播时更容易受到干扰。

b) 更低的发射天线安装位置。在V2V通信系统中,发射机与接收机侧的天线一般放置在汽车鲨鱼鳍处,两者高度相差不大,因此信号易受到遮挡;在V2I通信系统中,路边单元安装位置低于传统基站,由于收发机之间环境中的散射点分布状况具有独特性,信道特性易受环境和交通特性影响,因此其信道特性需要进一步的研究。

c) 终端的高移动性。与蜂窝通信系统相比,V2X通信系统中的接收机大多处于移动状态,连续的移动使信道不再具有广义平稳(Wide Sense Stationary, WSS)特性。此外,在V2V通信系统中,还存在发射机与接收机的双移动特性。接收机的高移动特性使得V2X的网络拓扑结构发生剧烈变化,无线信道特性也随之变化。

1 车联网通信系统相关研究

1.1 信道标准化研究

目前已有多个国际标准化组织在车联网的标准化方面开展了积极的工作,主要包括3GPP、IEEE、ITU和ISO等^[3]。

3GPP主导了LTE和NR等蜂窝网通信标准,目前正在推动以C-V2X(Cellular-vehicle-to-everything)为代表的基于现有蜂窝网的V2X技术。3GPP共发展了LTE-V2X和NR-V2X 2个版本的C-V2X技术。LTE-V2X是基于3GPP Release14和Release15标准引入了5.9 GHz频段的直通链路(PC5接口),主要用于终端设备间的V2V和V2P等直连通信。NR-V2X则基于3GPP Release16和Release17标准,增强并优化了PC5接口和公众移动蜂窝网通信接口(Uu接口),重点满足自动驾驶和车辆编队等高级车联网业务需求。

IEEE主导了802.11系列技术的标准化工作,其中802.11p技术支持5.9 GHz频段的V2V和V2I直连通信,并于2010年完成了标准化工作,802.11p的演进版本802.11bd也完成了标准化。

ITU组织中的无线电通信部门(ITU-R)主要负责对包括车联网在内的智能交通系统的场景、频率及应用等进行研究。ITU-R在2019年世界无线电通信大会上以建议书的方式明确鼓励各国主管部门将5.9 GHz频段作为统一使用频段。

目前ISO组织中的道路车辆技术委员会和智能运输系统技术委员会涉及了车联网相关的标准化工作。其发布的ISO17515-3标志着C-V2X被纳入ISO定义的智能交通框架,支持基于C-V2X的设备通信。

1.2 世界主要国家发展态势

车联网作为5G在垂直行业的重要应用,成为当今的研究热点,美国、日本和欧盟均在车联网发展上展开布局并形成竞争格局^[4]。

美国交通运输部于2024年8月发布《通过互联拯救生命:加速V2X部署计划》旨在通过分阶段部署V2X技术,降低交通事故伤亡率,提升道路安全和效率,最终在2036年实现全国75%交叉路口完成V2X部署。

2018年12月爱立信、日产、高通以及日本电报电话公司联合完成了日本的首次C-V2X试验,成功在5.8 GHz频段实现了V2V、V2I和V2P的通信,并验证了C-V2X直连通信的传输能力、覆盖范围,延迟和可靠性。

我国在C-V2X通信技术和产业发展中取得了令人瞩目的成果,先后批复7个国家级车联网先导区,并

已完成初期部署,预计每个先导区覆盖千余城市路口。2024年7月,工业和信息化部等五部委联合发布《关于公布智能网联汽车“车路云一体化”应用试点城市名单的通知》,确定首批20个试点城市(联合体),主要建设内容包括智能路侧基础设施,推动“聪明的车+智慧的路+强大的云”协同发展,加速智能网联汽车落地,标志着我国V2X技术从测试验证迈向规模化应用。

1.3 车联网无线信道研究现状

现今国内外对V2X信道的研究多集中于5.2~5.9 GHz频段,也有少量研究在430 MHz、900 MHz、2.4 GHz和毫米波频段。目前为获取V2X通信系统的无线信道特性,需要通过对其实环境的信道开展测量工作^[5]。现今国内外有关V2X通信系统的信道研究主要集中在V2V通信系统与V2I通信系统^[6]。

a) V2V。文献[7]在5.2 GHz频段对斜坡场景开展信道测量活动,分析得到路径损耗与对数距离之间存在线性关系,其路径损耗指数范围为1.50~2.82。文献[8]对停车场场景开展5 GHz频点测量,得到视距(Line of Sight, LOS)传播环境下路径损耗指数为1.5~2,非视距(Non Line of Sight, NLOS)传播环境下为2.7~3。文献[9]在5.2 GHz频段测量了城区、郊区、高速公路以及乡村4种场景的信道,发现高速公路的路径损耗指数最大,达到1.77,而城区和郊区的路径损耗指数仅分别为1.68和1.59。文献[10]在5.9 GHz频段测量得到城区、高速公路以及乡村的路径损耗指数分别为1.79、1.85、1.61,另外还对高速公路和乡村2种场景建立两径模型。文献[11]在5.9 GHz频段采用双斜率折线模型分别对高速公路、乡村以及郊区3种场景进行建模,得到3种场景的分段临界距离和路径损耗指数。文献[12]在5.6 GHz频段分别对LOS与阻塞视线(Obstructed LOS, OLOS)传播环境下的高速公路与城区场景进行了研究,得出了双斜率折线模型。在V2V通信系统中,常见的障碍物包括建筑物、树木、交通指示牌以及车辆。目前在典型场景中测量得到的阴影衰落标准差均小于9 dB,其中LOS环境下的标准差小于4 dB。文献[13]在街道交叉口场景中进行了5.9 GHz频段的V2V信道测量,提出了一种双斜率路径损耗模型,提取并分析了多径的时变空间特征,统计表征了到达的方位角和角度扩散,并研究了障碍物对交叉口场景下多径空间特征的影响。

b) V2I。文献[14]分别在城区、郊区和高速公路3

种场景下针对V2I信道进行测量。但作者只分析了小尺度衰落,没有估计路径损耗与阴影衰落。文献[15]提出了一种新型的针对V2I通信系统中盲角散射环境下的小尺度衰落信道模型,该模型可以更好地描述V2I信道特性的变化。在V2I通信系统中,由于发射机安装位置较低,因此树木对其信道特性影响极大。文献[16]依据IEEE 802.11p通信标准,对V2I通信系统中城区场景进行了大量的实地测试。依据测试结果定性分析了当发射机天线安装在不同高度的基础设施时,树木对其通信质量的影响,以此建议在安装发射机天线时,应当考虑到附近遮挡物的影响。文献[17]提出了一个基于经验的近地路径损耗模型,该模型预测得到的路径损耗与测量值较为吻合。文献[18]针对城区场景中因树叶遮挡而产生的NLOS传播环境,提出了基于几何的信道传播模型。文献[19]提出了一种基于几何的确定性路径损耗模型,该模型考虑到了V2I通信系统中由树叶引起的接收能量衰减。此模型可以通过设置不同的发射机天线高度和接收机与发射机之间的距离来准确地预测此时接收机接收到的信号强度。但这个模型的计算量太大,无法在车载自组织网络(Vehicular Ad-hoc Network, VANET)中进行大规模仿真。文献[20]在郊区场景的道路上对V2I通信系统中无线信道进行测量,该场景中主要的遮挡物为树木。在分析信道特性时,将场景分为高于树冠的视线传播环境、低于树冠的视线传播环境和NLOS传播环境3个部分,并针对3个部分分别分析其大尺度衰落与小尺度衰落特征。

2 基于商用仪表的车联网测量方案

2.1 信道测量系统

本文所搭建的车联网宽带信道测量系统如图2所示,主要包括以下几个部分。

a) 激励信号源。采用罗德施瓦茨公司的SMW200A设备作为信号源,支持最大2发射天线配

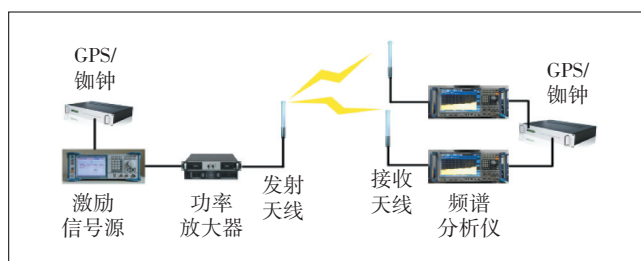


图2 信道测量系统设备框图

置,最大射频带宽为 150 MHz,最高工作频率为 6 GHz。信号源采用的是正交频分复用(Orthogonal frequency-division multiplexing, OFDM)信号,其在频域上为平坦信号,其表达式为:

$$C_k = \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp(j2\pi ik/N), (0 \leq k \leq N-1) \quad (1)$$

式中:

N ——子载波数目

d_i ——BPSK 调制后第 i 个子载波的符号

对其模值进行归一化处理,使各个子载波上探测到的信道质量相同。本文信道测量采用的 OFDM 符号共 2 560 个子载波,为防止 OFDM 符号的带外能量泄露,对其中高频段的 512 个子载波进行补零,其频域图如图 3 所示。

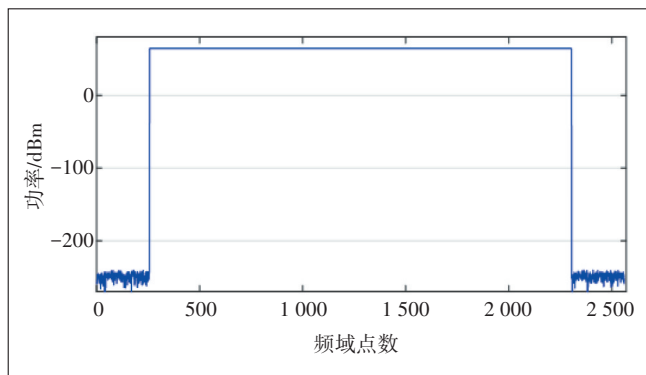


图3 OFDM 信号频域图

b) 接收端。使用罗德施瓦茨公司的 FSW 频谱仪来接收和采集数据,其测量范围为 10~44 GHz,最大带宽可达 510 MHz,可以通过实时显示来观察信号的动态变化。在测量中频谱仪的参数设置对测试结果的准确程度有很大的影响,因此需要对频谱仪的衰减器、分辨带宽、视频带宽以及扫描时间等几个重要的参数进行合理的设置,并根据不同频率设置相应的频点接收数据。

c) 收发天线。采用成都欧力通科技公司的全向玻璃天线,工作频率范围为 800~6 000 MHz,垂直极化方式。该天线的优势在于其水平面辐射方向图近似为圆形,天线增益 0 dBi。

d) 时钟同步单元。选用高精度高稳定度的 GPS 驯服时钟源 GX-OT1064,该设备同步于 GPS 信号,可为设备提供 1E-11 (GPS 锁定, 24 h) 和 5E-10 (GPS 失锁, 24 h 内) 精度的 10 MHz 时钟信号。

e) 数据采集存储单元。采用固态硬盘对现场采

集的海量原始数据进行快速存储,以便于后续的离线数据分析。

2.2 V2I 信道测量方案

V2I 场景下车联网信道测量方案主要包括如下几个部分。

a) 设定时间同步。将发射端和接收端的设备连接 GPS 驯服铷原子钟设备, GPS 驯服铷原子钟设备通过搜索卫星,驯服本地铷原子钟,使收发两端设备的时间和频率同步。

b) 发射信号。将生成 OFDM 信号作为信道探测信号导入 SMW200A 矢量信号发射器,在 SMW200A 矢量信号发射器中设置本次信道测量的频点为 5 920 MHz,发送带宽为 12.5 MHz,发射功率为 6 dBm。将功率放大器发射功率设为 27 dBm。同时在接收端设置 FSW67 信号与频谱分析仪的接收频点为 5 920 MHz 以及接收采样频率为 12.5 MHz。探测信号在 SMW200A 矢量信号发射器中经过数模转化变为模拟信号,并上变频至 LTE-V2X 通信系统测量频点通过发射端天线发射。

c) 接收信号。接收端天线将接收到含有信道信息的探测信号传输给 FSW67 信号与频谱分析仪, FSW67 信号与频谱分析仪将探测信号进行下变频处理并以 I/Q 模式保存数据,此时的接收数据中包含有 LTE-V2X 通信系统中测量场景的所有信道信息。

在 V2I 场景中,需将路侧发射设备安装在路口的支架上,使发射端天线的高度满足路侧设备的部署标准。针对多天线信道测量,将多台 FSW67 信号与频谱分析仪设置为联动模式,以减少因人为操作而导致接收端两天线采集的信道数据存在的时间差。在信道测量前通过对测量场景的距离测量,设置 FSW67 信号与频谱分析仪的信号采集时间长度。在进行信道测量时, SMW200A 矢量信号发射器需要一直发送探测信号, FSW67 信号与频谱分析仪在进入场景时才开始采集探测信号。

3 数据处理

信道测量完毕后需对测量数据进行处理并提取信道的参数,流程如图 4 所示。

3.1 信道冲激响应

频谱仪采集的原始数据为中频信号数据,需要通过下变频和低通滤波将其变为基带信号。利用基带信号与发射的 OFDM 信号滑动相关计算得到信道冲激

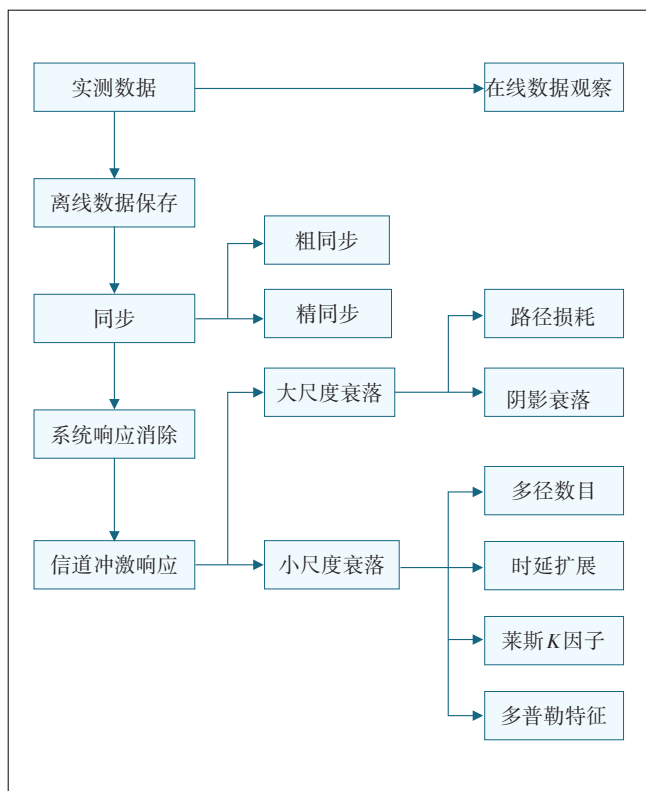


图4 实测数据分析和信道参数提取

响应(Channel Impulse Response, CIR)。为了解决 CIR 的能量泄漏问题,需对原始的 CIR 进行粗同步、精同步以及加窗处理。首先,进行粗同步寻找 OFDM 帧开头;然后进行精同步,修正相位偏差;最终通过最小二乘(Least-Square, LS)信道估计的方法,就可以得到信道频域响应;之后对频域加汉宁窗,最后通过傅里叶反变换得到时域 CIR。

3.2 去噪处理

为了避免采用固定阈值门限在信噪比较低或噪声波动较大的情况下影响判决的准确性的问题,本文采用一种动态噪声门限计算方法确定信道冲激响应数据的噪声门限,主要步骤如下。

a) 设定噪声门限。根据 CIR 计算功率时延谱,通过粗略估计噪底和信号分量门限,去除占样值总数一定百分比的功率最强与功率最弱的样值,得到纯净的噪声样本。

b) 去除虚检多径。在确定噪声门限之后,采用硬判决方法仍存在“虚检”和“漏检”的概率,对此采用 3 个参数识别多径分量,对于高于噪声门限的多径根据其连续性,将若干连续多径划为一个分量区域;对每个分量区域内的多径,搜索其峰值多径,并记录其峰

值多径的时延和功率;设定最大功率差 ΔP ,表示最小可接受的峰值和相邻波谷之间的功率差值,由此判定峰值是否为噪声产生的“毛刺”。在一个分量区域中任何峰值只要满足最大功率差值标准就会被判定为一个多径分量,具体判断法则如下。

a) 若分量区域仅存在一个峰值,则将该峰值判定为有效多径分量。

b) 若存在多个峰值,则:当 ΔP 小于 ΔP_{\min} (如 $\Delta P_{\min} = 2 \text{ dB}$),则判定峰值为噪声分量;若 ΔP 大于 ΔP_{\min} ,则判为多径分量;当所有 ΔP 均小于 ΔP_{\min} ,则随机选取其中一个峰值作为多径分量。

通过对测量得到的 CIR 进行去噪和多径搜索的操作,就可以利用提取到的多径分量来分析 V2X 多个场景的大尺度衰落特性和小尺度衰落特性。图 5 为实测的功率时延谱(Power Delay Profile, PDP)以及去噪结果。

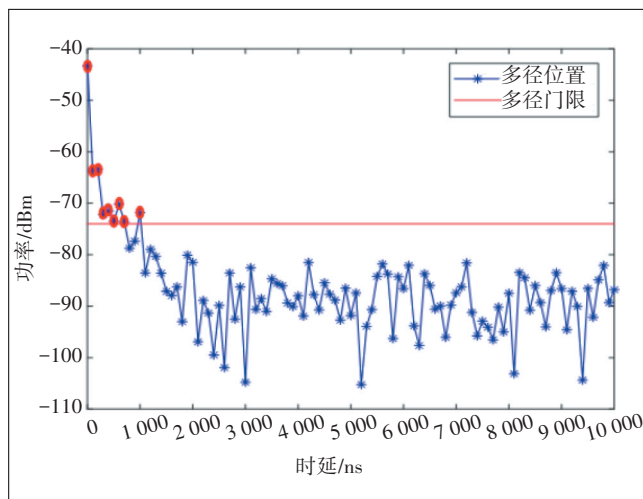


图5 实测 PDP 与去噪示意

4 信道参数提取

4.1 大尺度信道参数

大尺度衰落特性参数包括路径损耗和阴影衰落。由于测量得到的数据同时包含大尺度和小尺度,因此需要消除小尺度衰落带来的影响, i 时刻的接收功率为所有多径功率之和的均值:

$$P_{\text{Rx}}(i) = \frac{1}{W_{\text{LS}}} \sum_{k=i}^{k+W_{\text{LS}}-1} \int |h(k, \tau)|^2 d\tau \quad (2)$$

其中, W_{LS} 表示用于计算接收功率的平均窗长度,一般常取 20λ 。根据发射功率和接收功率可计算得到传播路径损耗。本文采用对数阴影模型来分析信道

的路径损耗和阴影衰落特性:

$$PL = A_0 + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_{sf} \quad (3)$$

其中,PL为路径损耗(dB); d 为接收端和发射端之间的实际距离; d_0 表示天线远场的参考距离,本文取10 m; A_0 表示 d_0 处的路径损耗; n 表示路径损耗指数,其决定了路径损耗随距离变化的快慢;通过实测数据与对数距离模型的最小均方根方误差(Root Mean Square Error, RMSE)拟合,可以得到 A_0 和 n ; X_{sf} 为阴影衰落,由实测路损值与拟合值的差值计算得到,阴影衰落是满足均值为0,标准差为 X_{sf} 的正态分布。

4.2 小尺度信道参数

常用的小尺度衰落特性参数包括功率时延谱、均方根时延扩展、莱斯 K 因子和多普勒功率谱。

无线信道的时间色散特性通常采用功率时延谱(Power Delay Profile, PDP)表征。PDP可以通过对离散化的CIR $h(k, \tau)$ 进行统计得到,即:

$$PDP(t_i, \tau) = \frac{1}{W_{av}} \sum_{k=i}^{i+W_{av}-1} |h(k, \tau)|^2 \quad (4)$$

其中, W_{av} 表示用于计算PDP的平均窗长度, W_{av} 的取值需使信道满足广义平稳(Wide Sense Stationary, WSS)的条件,本文取值 20λ ,约为1 m。

在多径传播条件下,由于各条多径的传播时延不同,接收端的信号在时延域上产生色散。时延扩展刻画了信号在时延域上的色散程度,该参数对于载波调制具有重要的影响。常用均方根(Root Mean Square, RMS)时延扩展 σ_τ 表示:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k^2}{\sum_k P(\tau_k)} - \left(\frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \right)^2} \quad (5)$$

其中, $P(\tau_k)$ 表示时延 τ_k 上PDP抽头的功率。

莱斯因子是一个衡量直射径与散射径强度关系的重要参数,常用直射径功率与其他多径分量功率和之比来表示。对于窄带系统,可采用经典的二阶矩和四阶矩法估计 K 因子,表达式为:

$$K = \frac{-2\mu_2^2 + \mu_4 - \mu_2 \sqrt{\mu_2^2 - \mu_4}}{\mu_2^2 - \mu_4} \quad (6)$$

其中, $\mu_2 = E(r^2)$ 和 $\mu_4 = E(r^4)$ 分别表示信号幅度的二阶矩和四阶矩; r 为CIR的幅值。

由于收发端的移动性导致多普勒效应,这使得信道对信号在频率上造成色散。频率色散在频域上表

现为时间选择性衰落,快速变化的信道导致接收信号失真。无线信道的频率色散特性通常利用多普勒功率谱(Doppler Power Spectral Density, DPSD)表征。多普勒功率谱可由CIR自相关函数的离散傅里叶变换计算得到,即:

$$DPSD(m, \nu) = F \left\{ \sum_{k=m}^{m+W_{FFT}-1} h(k) \cdot h^*(k+m), W_{FFT} \right\} \quad (7)$$

其中, ν 表示多普勒频偏; $F\{\cdot\}$ 表示DFT运算; $(\cdot)^*$ 表示共轭运算; W_{FFT} 为DFT窗的长度。

5 V2I信道测量结果

V2I高速道路场景的具体测试地点位于某智能网联汽车综合测试示范区,测试路段全长约500 m。在高速直道场景中,V2I发射端天线架设到了路侧,高度与旁边的红绿灯一致,此时天线高度约为5 m。在该场景下,车辆以静止状态加速到9 m/s,再匀速行驶。测量时,车辆均由远处驶向发端,再远离发端。接收端天线都架设到了车辆顶部的中间位置,距离地面的高度约为2 m。信号在传输过程中,没有明显的遮挡区域,属于LOS场景。

图6为高速直道V2I和V2V场景大尺度衰落特性统计分析及建模的结果,图6(a)为测量路径损耗结果,其中横轴为对数距离,纵轴为路径损耗,图6(b)为阴影衰落实测值和拟合值,其中 $n=2.18$ 。图6还对比了WINNER II D2a模型的路损结果,从图6可知WINNER II模型与V2I场景拟合效果存在一定差异,且WINNER II D2a模型的路损指数为2.15。这是由于传统蜂窝网络中基站架设的高度为10~35 m,发端周围没有明显的散射体,而V2I天线高度为4~6 m,一般架设到红绿灯或者路灯旁,V2I信道的路损指数会大于同场景的蜂窝网络模型的路损指数。因此,传统的蜂窝网络模型并不适用于描述V2X信道的大尺度衰落特性。

基于式(4)可以得到高速直道场景下V2I的PDP,如图7所示。在车辆行驶过程中,随着接收端靠近发射端,最强径的传播时延逐渐减小,而其功率则明显增大,此外在LOS径周边存在部分多径分量,其呈现出出生灭现象,反映了V2I信道的时变非平稳特性。

图8为统计得到的高速直道V2I场景下的多径数量。由图8可知,多径数量随收发端间距的改变而变,收发端距离越近,其多径数量也越少。此外,V2I场景下的平均多径数较少,为2~3个多径抽头。

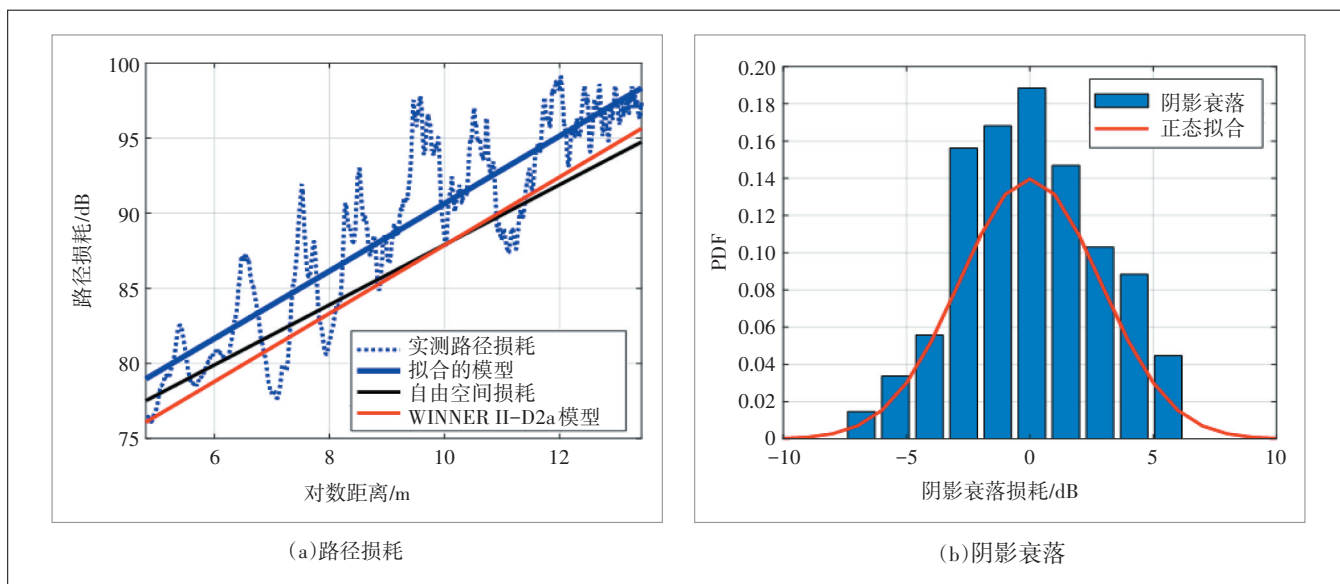


图6 高速直道场景下V2I大尺度衰落特性

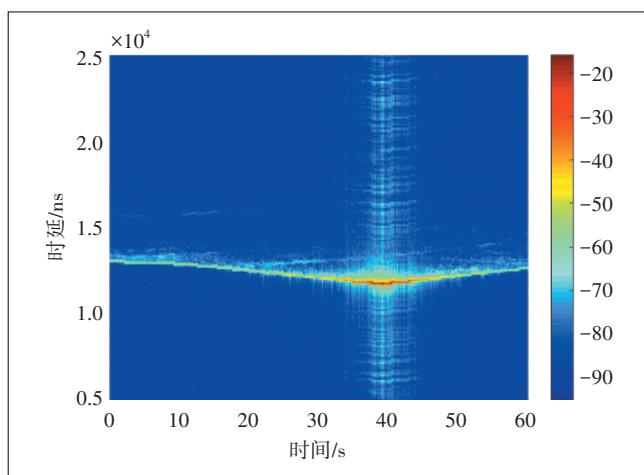


图7 高速直道场景V2I的PDP

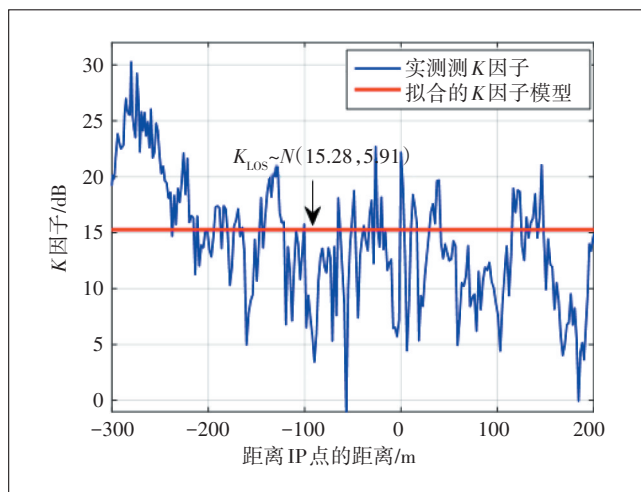


图9 高速直道场景V2I的K因子结果

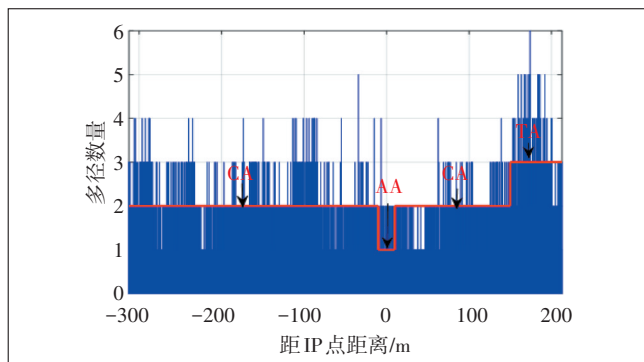


图8 高速直道场景V2I的多径分布

图9展示了莱斯 K 因子随距离的变化情况。从图9可以发现 K 因子整体趋势比较稳定,仅在较小区域

内浮动。对 K 因子采用高斯分布拟合,可知V2I信道的整体均值较高,为15.28 dB,标准差为5.9 dB。这是由于多径数目较少,NLOS径的能量较低,导致其 K 因子最小。

基于实测数据和式(7)可以得到如图10所示的高速直道场景的瞬时多普勒功率谱。从图10中可以看到,V2I场景多普勒功率谱存在快变特性,即从最大正频偏向最小负频快速变化,呈现出“Z”字形。测量得到的最大多普勒频移与理论计算结果($f_{v2i,max}=197.3$ Hz)基本一致,验证了所测数据的合理性。从图10还可以发现,多径分量也具有多普勒频偏,因而V2I场景下的多普勒功率谱还出现一定程度的多普勒扩展。

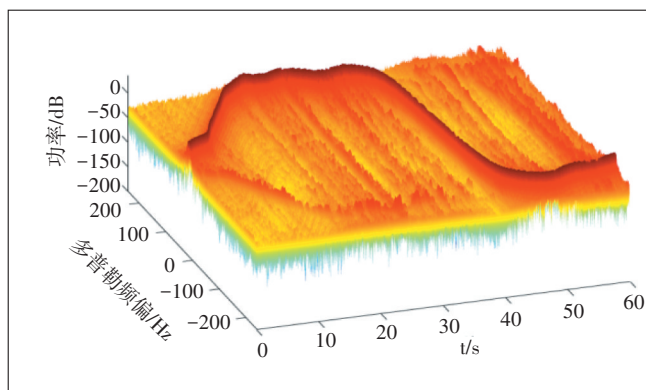


图10 高速直道场景V2I的多普勒功率谱

6 结束语

本文介绍了一种基于商用设备的车辆网宽带无线信道测量系统,详细阐述了测量系统的组成架构以及各个模块的功能,并对测量采集数据的后期处理进行了详细介绍,包括去噪、参数提取等。其中,重点介绍了大尺度参数(路径损耗、阴影衰落)和小尺度参数(功率时延谱、多普勒功率谱、时延扩展、莱斯因子、多径数目)的提取算法。基于实际场景展示了V2I场景中信道大/小尺度衰落情况。

参考文献:

- [1] 全国机动车达4.4亿辆 驾驶人达5.32亿人[EB/OL]. [2025-07-08]. https://www.gov.cn/zhengce/jiedu/tujie/202407/content_6962004.htm.
- [2] 陈山枝. C-V2X 车联网赋能智能驾驶和智能交通[J]. 智能网联汽车, 2023(1): 36-39.
- [3] 林琳,李璐,葛雨明. 车联网通信标准化与产业发展分析[J]. 电信科学, 2020, 36(4): 15-26.
- [4] 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.
- [5] CHENG X, HUANG Z W, CHEN S Z. Vehicular communication channel measurement, modelling, and application for beyond 5G and 6G[J]. IET Communications, 2020, 14(19): 3303-3311.
- [6] WANG C X, CHENG X, LAURENSEN D I. Vehicle-to-vehicle channel modeling and measurements: recent advances and future challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(11): 96-103.
- [7] WANG W Q, GUAN K, HE D P, et al. Channel characterization for vehicle-to-vehicle communication in urban sloped terrain[C]//2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES). Beijing: IEEE, 2018: 1-2.
- [8] SUN R Y, MATOLAK D W, LIU P Y. 5-GHz V2V channel character-

- istics for parking garages[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 3538-3547.
- [9] KAREDAL J, CZINK N, PAIER A, et al. Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(1): 323-328.
- [10] KUNISCH J, PAMP J. Wideband car-to-car radio channel measurements and model at 5.9 GHz[C]//2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference. Calgary: IEEE, 2008: 1-5.
- [11] CHENG L, HENTY B E, BAI F, et al. Highway and rural propagation channel modeling for vehicle-to-vehicle communications at 5.9 GHz[C]//2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. San Diego: IEEE, 2008: 1-4.
- [12] ABBAS T, SJÖBERG K, KAREDAL J, et al. A measurement based shadow fading model for vehicle-to-vehicle network simulations[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2015, 2015(1): 190607.
- [13] YANG M, AI B, HE R S, et al. Dynamic V2V channel measurement and modeling at street intersection scenarios[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(5): 4417-4432.
- [14] ACOSTA-MARUM G, INGRAM M A. Six time- and frequency-selective empirical channel models for vehicular wireless LANs[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, 2(4): 4-11.
- [15] CHELLI A, HAMDY R, ALOUINI M S. A vehicle-to-infrastructure channel model for blind corner scattering environments[C]//2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Las Vegas: IEEE, 2013: 1-6.
- [16] GOZALVEZ J, SEPULCRE M, BAUZA R. IEEE 802.11p vehicle to infrastructure communications in urban environments[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(5): 176-183.
- [17] MENG Y S, LEE Y H, NG B C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5): 1461-1468.
- [18] AYGUN B, BOBAN M, VILELA J P, et al. Geometry-based propagation modeling and simulation of vehicle-to-infrastructure links[C]//2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Nanjing: IEEE, 2016: 1-5.
- [19] LI W, HU X Y, JIANG T. Path loss models for IEEE 802.15.4 vehicle-to-infrastructure communications in rural areas[J]. IEEE Internet of things journal, 2018, 5(5): 3865-3875.
- [20] LI W, HU X Y, GAO J, et al. Measurements and analysis of propagation channels in vehicle-to-infrastructure scenarios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3550-3561.

作者简介:

邢建兵,高级工程师,博士,主要从事车联网、智能终端、网络与应用相关技术研究;邱佳慧,正高级工程师,博士,主要从事车联网、5G通信、高精度定位等技术研究;林晓伯,高级工程师,硕士,主要从事车联网、5G通信、IP网络等技术研究;徐亚楠,工程师,硕士,主要从事5G无线技术、MEC等技术创新业务孵化等工作;高沛,工程师,学士,主要从事5G网络创新产品管理、解决方案等工作。