



## 面向毫米波车载雷达的高精度传播特性预测与算法测试技术

朱洛言, 刘寅生, 钟章队

### High-precision propagation characteristic prediction and algorithm testing technology for millimeter-wave automotive radar

ZHU Luoyan, LIU Yinsheng, and ZHONG Zhangdui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.cjors.2024206>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 基于改进射线跟踪法和BP神经网络算法的室外微蜂窝毫米波信道特性研究

Millimeter wave channel characteristics of outdoor microcellular based on improved ray tracing method and BP neural network algorithm

电波科学学报. 2021, 36(3): 430–442, 452

#### 车联网信道特性综述

Overview of the channel characteristics of V2X

电波科学学报. 2021, 36(3): 349–367

#### 面向6G的毫米波多频段多天线信道测量系统构建及实测试验

Construction and measurement verification of 6G mmWave multi-band multi-antenna channel measurement system

电波科学学报. 2023, 38(1): 44–53

#### 基于自适应粒子群优化的RBF毫米波信道建模研究

RBF neural network channel modeling of millimeter wave based on adaptive particle swarm optimization algorithm

电波科学学报. 2021, 36(3): 405–412

#### 非对称毫米波大规模MIMO系统信道特性研究

Research on channel characteristics of asymmetric millimeter-wave massive MIMO systems

电波科学学报. 2022, 37(4): 644–652

#### 基于压缩感知的STAR-RIS辅助毫米波系统信道估计

Channel estimation for STAR-RIS-assisted millimeter wave system based on compressed sensing

电波科学学报. 2024, 39(3): 510–517



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

朱洛言, 刘寅生, 钟章队. 面向毫米波车载雷达的高精度传播特性预测与算法测试技术 [J]. 电波科学学报, xxxx, x(x): x-xx. DOI: 10.12265/j.cjors.2024206

ZHU L Y, LIU Y S, ZHONG Z D. High-precision propagation characteristic prediction and algorithm testing technology for millimeter-wave automotive radar [J]. Chinese journal of radio science, xxxx, x(x): x-xx. (in Chinese). DOI: 10.12265/j.cjors.2024206

# 面向毫米波车载雷达的高精度传播特性预测与 算法测试技术

朱洛言<sup>1</sup> 刘寅生<sup>1</sup> 钟章队<sup>1,2\*</sup>

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100044)

**摘要** 本文旨在提供面向自动驾驶场景的毫米波感知信道测试技术, 通过“实测数据获取-仿真配置初始化-实测仿真校准-算法验证”的方式, 对基于真实场景的毫米波感知信道仿真及实测信号进行交叉验证及分析。首先, 利用了雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 值固定的两个角反射器, 对于所搭建的 77 GHz 毫米波雷达测量系统以及所采集的感知信号数据进行有效性验证。其次, 基于上述实验平台, 选取合适场景并设定系统参数, 开展车联网场景道路测量实验。然后, 通过对所获取的回波数据进行分析以及关键特征提取, 匹配场景中的典型结构体及相应的回波信号, 并提取目标物状态, 用于初始化射线跟踪 (ray tracing, RT) 仿真实验配置。接着, 基于雷达回波数据匹配场景中关键目标物状态, 将校准后的仿真与测量实验结果进行对比校准。最后, 设计低复杂度滤波算法, 对于仿真信道进行验证, 实现“测量-仿真-校准-验证”自动驾驶场景的毫米波感知信号实测及仿真方法闭环验证和分析。本文所提出的交叉验证方法成本低、效率高、可扩展性强, 基于验证过的仿真平台可以建立适用于目标场景的仿真系统, 生成准确、高效的感知信道回波数据, 为后续的感知信号算法设计与评估提供验证依据。

**关键词** 无线信道建模; 毫米波感知; 信道数据处理; 射线跟踪; 车联网

中图分类号 TN958.94

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(xxxx)00-0001-11

DOI 10.12265/j.cjors.2024206

## High-precision propagation characteristic prediction and algorithm testing technology for millimeter-wave automotive radar

ZHU Luoyan<sup>1</sup> LIU Yinsheng<sup>1</sup> ZHONG Zhangdui<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China)

**Abstract** This paper aims to provide millimeter-wave sensing channel testing technology for autonomous driving scenarios. It employs a real data acquisition, simulation configuration initialization, real measurement simulation calibration and algorithm validation approach to conduct cross-validation and analysis of millimeter-wave sensing channel simulation based on real scenarios and real-world signal measurements. Firstly, the paper validates the effectiveness of the 77 GHz millimeter-wave radar measurement system and the collected sensing signal data using a corner reflector with a fixed radar cross section (RCS). Based on this experimental platform, appropriate scenarios are selected and system parameters are set for road measurement experiments in a vehicular network scenario. By analyzing the acquired echo data and extracting key features, typical structures and corresponding echo signals in the scene are

收稿日期: 2024-09-30

资助项目: 北京市自然科学基金-丰台前沿项目 (L221009); 中央高校基本科研业务费 (2022JBXT001); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目 (L2023G005); 国家自然科学基金 (62171021)

通信作者: 钟章队 E-mail: zhdzhong@bjtu.edu.cn

matched, and the target object state is extracted to initialize the ray tracing (RT) simulation experiment configuration. Furthermore, the paper calibrates the simulation results by comparing them with the measurement experiment results based on the matching of key target object states in the scene with radar echo data. Lastly, the paper designs a low-complexity filtering algorithm and verifies it using simulated channels, realizing a closed-loop verification and analysis of the “measurement-simulation-calibration-verification” autonomous driving testing method. This achieves closed-loop verification and analysis of millimeter-wave sensing signal real measurement and simulation methods through “measurement-simulation-calibration-verification”. The cross-validation method proposed in this paper is cost-effective, efficient, and highly scalable. Based on the validated simulation platform, a simulation system suitable for the target scenario can be established, generating accurate and efficient sensing channel echo data. This provides a basis for the design and evaluation of subsequent sensing signal algorithms.

**Keywords** wireless channel modeling; mmWave sensing; channel data processing; ray tracing; Internet of Vehicles

## 0 引言

随着车联网的不断发展与科技的快速变革,道路车辆数量的增加使得交通负担日益加重,这推动着自动驾驶等级不断增加,功能不断完善<sup>[1-2]</sup>。自动驾驶技术被视为推动智慧交通系统(intelligent transportation system, ITS)智能化的关键推力,其在未来将面对复杂多样的升级动态场景,上述变化要求车辆系统具备强大的环境自主感知能力,并不断加强汽车行驶安全规范<sup>[3]</sup>。车联网与传统汽车产业的不断融合发展推动了新业态的诞生——智能网联汽车(intelligent connected vehicle, ICV)<sup>[4-6]</sup>。ICV通过其车身所搭载的装置,如融合传感器等,具备着复杂的环境感知、协同控制执行以及智能决策等功能,以此实现了车辆本身与外部节点的多维信息共享以及多方协同控制<sup>[7-8]</sup>。ICV所配备的传感器平台融合了摄像头、激光雷达、超声波雷达及毫米波雷达等多传感器融合的协作体系<sup>[8-11]</sup>,在这些外部传感器中,77 GHz毫米波雷达可以实现更高的距离和速度分辨率,并且凭借其结构简单、全天候检测、发射功率低的特点,在技术的迭代更新中发挥着重要的作用,是ITS发展进步的关键推动因素<sup>[12-13]</sup>。

毫米波频段是未来移动通信、雷达传感器的关键频段,而高精度的传播及信道模型对通信、雷达系统的设计有重要的作用<sup>[14]</sup>。然而,由于道路环境的多样性以及场景目标物运动状态的复杂性,毫米波雷达传感器对于场景的感知和理解面临着严峻的挑战<sup>[15]</sup>。随着自动驾驶等级的上升和功能的丰富完善,结合安全等级要求和日常交通需求,面向复杂多样场景的实际测量活动难以开展。目前依托封闭场地所开展的毫米波感知信号采集方式具有局限性,发展缓慢且无法满足自动驾驶技术的要求,已成为制约ITS发展的关键因素之一。基于真实场景的感

知信号采集仿真系统可以突破实际场景开展实验的局限性,获取准确有效的多场景雷达回波数据<sup>[16-17]</sup>。射线跟踪(ray tracing, RT)被视为确定性电波仿真及信道建模方法,利用该方法可以在所建模的三维物理场景中以射线形式展示无线电波的传播情况。基于RT可以填补感知信号采集可行性和实际需求之间的差距,并为感知信号处理算法提供可靠的验证基础<sup>[18]</sup>。

目前的车载毫米波感知信号系统主流市场主要依赖调频连续波(frequency modulation continuous waveform, FMCW)信号及相关调制技术,用于实现高分辨率的目标物信息估计。但在FMCW雷达系统的相关应用场景中,尤其在低发射功率条件下,由于无线电波信号的自由空间衰减,微弱的目标物回波会被淹没在高水平的背景噪声中,因此传感器的感知探测性能会受到极大的限制。为了提高毫米波车载雷达的传播特性预测精度,可以借助信号降噪算法提升系统性能。一些传统的降噪方法,包括动目标指示、脉冲多普勒处理<sup>[19]</sup>、杂波图、动目标检测<sup>[20]</sup>、偏移相位中心天线(displaced phase center antenna, DPCA)<sup>[21]</sup>等,侧重于通过滤波以及频谱分析等基于目标物多普勒特征来减轻或消除噪声分量的影响;文献[22]提到利用手动背景减除法降低背景噪声的影响。但此类算法均要求提前获取待抑制噪声所处的频带,从而对噪声分量进行滤波处理,而上述先验信息一般基于感知场景的统计性信息,难以提前获取,因此限制了在实际雷达系统中的应用。针对目标信号低信噪比带来的问题,一些研究工作设计了基于信号特性的自适应滤波:1959年,最小均方算法(least mean squares, LMS)算法被首次提出用以自适应消除接收信号中来自噪声成分的干扰;该算法较为简单、复杂度低、易于实现,有一定的旁瓣抑制

效应;但由于 LMS 滤波器系数为逐点更新,因此收敛速度相对较慢。同时,理想 LMS 算法中需要预先得期望无噪声信号作为输入,但实际操作中只能通过带噪声信号进行延迟处理,造成了算法性能及执行效率的下降。最小二乘法 (least of squares, LS) 及其推广形式的递归最小二乘法 (recursive least of squares, RLS) 不需要对滤波器输入信号的统计特性进行假设,可以在相对平稳环境下以较快的收敛速度得到维纳解<sup>[23-24]</sup>,可以达到统计意义上的最优性能。但相较于 LMS 算法服从线性法则,RLS 算法服从平方法则,在二维感知信号处理过程中将导致计算复杂度较高。文献 [25-26] 采用离散小波变换对二维信号进行处理用于降低噪声,然而,此方法仍然存在阈值选取的问题,难以在动态变换的环境中保证有效性。

本文基于实际场景测量结果以及 RT 仿真数据,实现了“实测数据获取-仿真配置初始化-实测仿真校准-算法验证”的闭环校验以及分析。通过自适应降噪算法,进一步提升了电波传播预测精度,并验证了毫米波车载雷达 RT 仿真的有效性。更确切地说,本文从以下方面对毫米波车载雷达的高精度传播特性预测与算法测试做出了贡献。

1) 提出了毫米波车载雷达系统的采集数据有效

性验证方法:基于 Friis 传输公式,利用具有恒定 RCS 的角反射器对所搭建的 77 GHz 毫米波雷达测量系统以及所采集的数据进行有效性验证。将上

述验证过的硬件测试平台部署到测试车上,并选取合适路段开展道路侧方停车测量实验,获取准确的雷达回波数据。

2) 通过对所获取的雷达电波传播数据进行分析以及特征提取,匹配场景中关键目标物并提取目标物状态,用于确定高精度 RT 仿真实验配置;进一步结合车辆所搭载的行车记录仪和 GPS 获取的车辆位置以及测量视频辅助验证所提取的目标物信息,对仿真平台进行参数校准。根据所获取的数据,在距离、速度和角度域中对电波传播进行分析预测。

3) 利用低复杂度二维信号降噪处理算法对雷达电波传播预测平台进行验证测试。该算法基于二维回波信号的距离和速度相关性,利用两个分离的子低秩滤波器代替原一维低秩滤波器,提取信号在特征变换域的低秩结构。基于上述算法实现了如图 1 所示的“测量-仿真-校准-验证”的毫米波感知信号实测及仿真方法闭环验证和分析,所验证的平台可以扩充至多种测试场景,为自动驾驶技术提供可靠的风险评估方案。

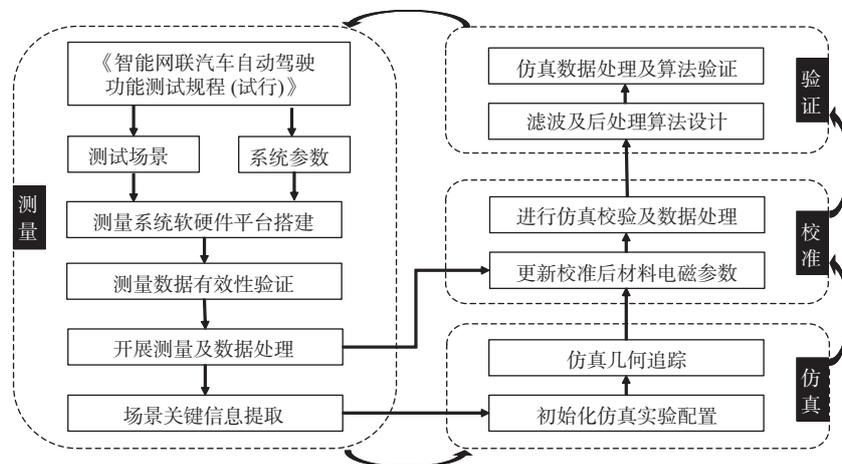


图 1 毫米波雷达测量实验流程框架

Fig. 1 Block diagram of the mmWave radar measurement

## 1 雷达信道测量系统设计

本节首先介绍了自行搭建的毫米波雷达系统的软硬件平台部署情况,并简述了数据的获取格式,然后对所搭建系统所采集数据的有效性进行验证,最后基于测量实验数据,阐述了车载雷达信号处理基础理论及流程。

### 1.1 测量系统部署

所搭建的测量系统由一组 FMCW 毫米波硬件电

路平台和毫米波测量控制软件组成。硬件电路平台采用德州仪器公司 (Texas Instruments, TI) 开发的汽车雷达传感器评估模块 AWR1843 和实时数据采集适配器 DCA1000EVM 搭建而成。将上述车载毫米波雷达测量系统安装在配有行车记录仪和 GPS 的测试 SUV 车辆前方保险杠的位置,用于记录数据采集过程中车辆周围的情况和车辆的实时位置变化,并作为后续数据处理的真实值对照。通过 DCA1000EVM 数据采集板收集到原始 ADC 中频信号数据,并将其

以二进制文件的格式保存。由于中频信号中包含了回波相位信息,数据由实部和虚部两部分组成,因此通过两条低电压差分信号 (low voltage differential signaling, LVDS) 通道实现复数数据采集。图 2 展示了整车道路测量系统的走线部署情况,图中红色方框所示的毫米波雷达硬件模块通过数据线与测试车驾驶室控制系统相连,实现对雷达传感器的数据传输以及供电控制功能。

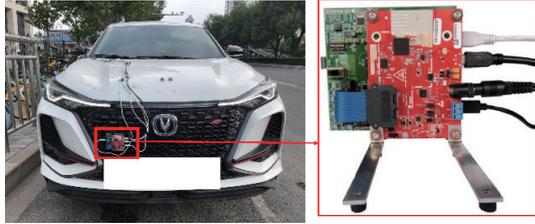


图 2 雷达测量平台及测试车

Fig. 2 Test vehicle with radar system

正式实际测量活动之前,需要根据测量活动的关键性能要求对雷达系统参数进行设定。本文关注的系统关键性能指标包括:最大不模糊距离、最大不模糊速度、距离分辨率以及速度分辨率。

### 1.2 测量数据有效性验证

在开展正式的道路测量活动之前,需要对测量方案、实测平台以及所采集的雷达回波数据进行有效性验证,本小节基于三面角反射器作为验证工具。三面角反射器是一个由三个金属面组成的正三棱锥,由经过特殊处理的金属作为制作材料。雷达系统发射的电磁波以任意入射角度照射角反射器后,均可以以原入射角度的反方向被反射,此过程所造成的电磁波功率损耗极小,因此角反射器具有较强的回波反射特性,在船舶救险以及军事领域的应用场景发挥作用。此外,三面角反射器的 RCS 均为固定值:由于 RCS 值用于表征雷达回波入射方向上的目标物电磁波反射能力,因此三面角反射器具有稳定的反射回波能力。基于此,选择 RCS 恒定的三面角反射器,利用所搭建的雷达硬件测试平台,在相对开阔的区域开展实验。实验过程中,在入射角固定的条件下,获取不同距离下来自两个角反射器的雷达回波信号,并通过信号处理计算出角反射器在不同测试条件下的接收信号相对回波功率。此处,所采用的目标物回波功率模型基于雷达测距经典 Friis 公式,表达式如下:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

式中,  $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$ 、 $\lambda$ 、 $\sigma$  和  $R$  分别表示雷达系统的发射功率、雷达系统发射端天线增益、雷达系统接收

端天线增益、波长、典型结构体的 RCS 以及目标物距雷达系统的距离。对公式 (1) 进行变形,得到目标物 RCS 的表达式如下:

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_r}{P_t G_t G_r \lambda^2} \quad (2)$$

由于式 (2) 中参数项  $P_t$ 、 $G_t$ 、 $G_r$  和  $\lambda$  与目标物信息无关,仅由测量系统性能决定且在测量过程中保持恒定不变。因此,结合式 (2) 定义系统参数  $f_{\text{system}}$  如下表达:

$$f_{\text{system}} = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3} \quad (3)$$

最终,可以得到下列表达式:

$$\sigma = \frac{R^4 P_r}{f_{\text{system}}} \quad (4)$$

式 (4) 表示,在保持设备参数固定的多次测量过程中,由于系统参数  $f_{\text{system}}$  为常数值,目标物 RCS 值的计算过程仅取决于目标物和雷达系统之间的距离  $R$  和接收功率  $P_r$ 。而这两个变量均可以由雷达回波信号处理得到,因此只要求出系统参数  $f_{\text{system}}$ , 就可以得到目标物 RCS 的计算值。

雷达系统中,主要的关键性能参数如表 1 所示,最大不模糊距离和最大不模糊速度分别表示雷达系统在距离和速度维度的目标物探测能力,距离分辨率以及速度分辨率分别表示雷达系统在距离和速度维度分辨目标物的能力。根据所设置的系统参数,可以计算出所采用雷达系统的上述参数表征其测量能力。其中,最大不模糊距离主要受采样率和啁啾信号斜率影响,距离分辨率取决于信号带宽,最大不模糊速度通过提取啁啾信号之间的相位差进行计算,主要取决于波长和啁啾信号持续时间,而速度分辨率则取决于波长和帧持续时间。本节测量所采用雷达系统参数如表 2 所示。基于上述测量系统,利用两个 RCS 值固定的三角面反射器开展测量实验:在角反射器的径向方向,首先在 1 m 至 5 m 的距离范围内,对 10 dBsm RCS 的角反射器每隔 1 m 进行测量;接着在 5 m 至 9 m 的距离范围内,对 20 dBsm RCS 的角反射器每隔 1 m 进行测量,并得到接收信号。通过多次测量并对  $f_{\text{system}}$  的统计取平均值,最终将其设定为约为 -28.80 dB。

表 1 雷达系统的关键性能参数

Tab. 1 Key performance parameters of radar system

性能指标	参数值	性能指标	参数值
最大不模糊距离	5 m	距离分辨率	6 cm
最大不模糊速度	40 km/h	速度分辨率	0.635 9 km/h

表 2 道路测试实验的系统参数

Tab. 2 System parameters of radar system in road measurement

参数项	参数值	参数项	参数值
起始频率	77 GHz	系统带宽	2.51 GHz
距离维	256	速度维	128
FFT点数			
每帧内	128	每个啁啾内	186
啁啾数			
采样率	6.3 MHz	信号斜坡	36.08 $\mu$ s
啁啾信号斜率	85.17 MHz/ $\mu$ s	持续时间	
		信号空闲时间	7 $\mu$ s

基于提取某个距离下的某角反射器回波信号作为定标校准数据,其余情况下的三面角反射器 RCS 估计值则基于公式 (4) 进行估计,由于此时的三面角反射器 RCS 真实值已知,因此将估计值与真实值进行比较,就可以对测量设备即采集数据的有效

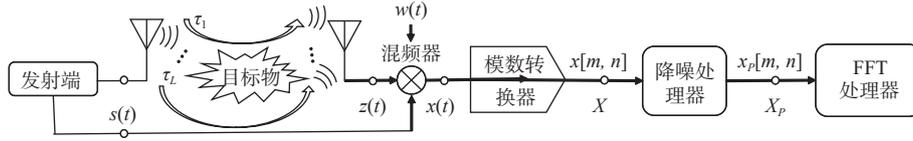


图 3 系统数据处理流程图

Fig. 3 Illustration of data constitution

令发射端的  $K_1$  个天线单元发送相同的发射信号  $s(t)$ , 假设存在  $L$  个目标物, 第  $k$  个虚拟阵元的接收信号表示为  $z_k(t)$ 。经下变频混频器处理后, 中频信号可表示为

$$x_k(t) = s^*(t)z_k(t) = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{j2\pi(f\tau_{k,l} + f_c\tau_{k,l})} + w(t) \quad (5)$$

式中:  $*$  表示共轭运算;  $w(t) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_w^2)$  表示零均值循环平稳复高斯白噪声幅值, 同时满足  $E\{|w(t)|^2\} = \sigma_w^2$ ;  $\tau_{k,l}$  表示第  $k$  个 VA 中关于第  $l$  个目标物所反射的回波信号的往返时延,

$$\tau_{k,l} = 2R_l/c - d(k-1)\sin(\phi_l) \quad (6)$$

$R_l$  和  $\phi_l$  分别表示第  $l$  个目标的距离和方位角。

图 3 中, 中频信号  $x_k(t)$  进入 ADC 中进行离散采样, 可以将其记为  $M \times K$  的矩阵  $\mathbf{X}$ 。将  $x(t)$  和  $w(t)$  在第  $k$  个虚拟阵元的第  $m$  个采样点的离散形式分别记为  $x[m, k]$  和  $w[m, k]$ , 有

$$x[m, k] \triangleq x_k(mT_s) = \sum_{l=1}^L \alpha_l e^{j2\pi(\frac{\theta_l}{\lambda}m + \frac{\phi_l}{\lambda}n)} + w[m, k] \quad (7)$$

式中,  $T_s$  表示采样间隔; 高斯噪声  $w[m, k]$  表示噪声矩阵  $\mathbf{W}$  中的第  $(m, k)$  个矩阵元素;  $\theta_l$  和  $\phi_l$  分别为公式简化后的结果。

性进行验证。至此, 在开展正式实际测量活动之前, 整个测量系统的有效性便得到了验证。利用以上验证过的雷达测试系统便可以获得高质量的雷达回波数据, 此过程保证了后续信号处理的算法性能。

## 2 信道数据建模及数据处理

### 2.1 系统模型

本文考虑了单站收发多输入多输出 (multiple-input multiple-output, MIMO) 天线阵列场景, 信号发射和信号接收端天线阵列均为均匀线性阵 (uniform linear arrays, ULA), 分别包含  $K_1$  个和  $K_2$  个独立阵元, 接收端阵元间距  $d$  为工作波长  $\lambda$  的一半, 发射端阵元间距为  $dK_2$ , 通过时分复用 (time division multiplexing, TDM) 实现包含  $K = K_1K_2$  个元素的虚拟阵列 (virtual array, VA), 该技术在实际中便于实现且复杂度低, 应用范围较广。此外, 本工作采用啁啾信号用于雷达传感, 系统信号处理的简化框图如图 3 所示。

### 2.2 雷达信道信号处理

本文基于《智能网联汽车自动驾驶功能测试规程 (试行)》文件, 选取北京市海淀区某路段开展路测实验, 在侧方停车场景中进行感知信号数据采集, 测试环境如图 4 所示。该图为所选取帧时刻下行车记录仪所记录的视频画面, 此时场景中主要探测物体分别为移动 SUV 和静止 SUV 两个目标物。

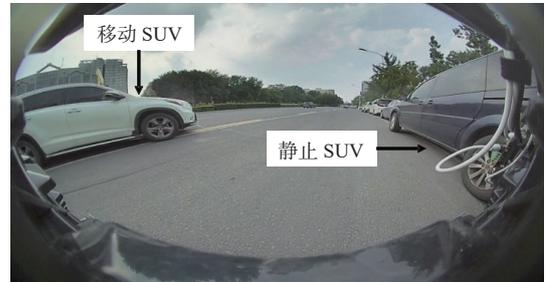


图 4 测量实验环境及行车路线

Fig. 4 Test surroundings and vehicular route

利用验证过的数据采集系统获取侧方停车过程中的雷达回波信号, 对中频信号进行一维 (one-dimensional, 1D) 快速傅里叶变换 (fast fourier transform, FFT), 并同时使用 Hanning 窗进行加窗处理, 用于抑制频谱泄漏。中频信号通过 FFT 从时域变换到频

域。基于 FMCW 信号的频率和时间对应关系,将目标物的频域信息换算至距离域,由此获得一个 chirp 信号持续时间内的二维分布图,并进一步合成一帧信号的功率时延谱,进行距离维度的数据处理和分析。对于出现在相同距离的目标物,仅凭一维距离分布图和功率时延谱无法区分这些目标物,在这种情况下,进一步根据目标物之间的速度差异来进行区分<sup>[27]</sup>。由于目标物的径向运动速度会导致回波复数信号在不同啁啾信号之间的相位差,可以通过二维 (two-dimensional, 2D)FFT 计算出目标物的瞬时速度,即对整个帧信号执行 2D FFT,便可获得信号的相位信息,从而完成从频率域到速度域的转变,并形成距离-速度谱,获取目标物的距离-速度二维信息。与 1D FFT 类似,二维情况中也使用 2D Hanning 窗抑制频谱泄漏。

此外,本文利用多天线 MIMO 雷达系统进行雷达回波数据采集,并通过 TDM 技术实现 VA,基于 VA 数据处理获取雷达视场角 (field of view, FoV) 内的角度域信息以及距离-角度谱。在雷达回波数据结果处理的多种呈现方式中,距离-角度谱是最直观最常见的一种展示目标物的方式,该谱图对应着目标

物在真实世界中的二维物理坐标。在距离-角度谱的数据处理过程中,一般对每一个啁啾信号中时间采样点中的 VA 中的阵元数据利用导向矢量进行角度扩展,在此结果基础上,执行距离维 FFT,便得到距离-角度谱。通常,在执行 FFT 操作之前,采用 Hanning 窗加窗处理来抑制频谱泄漏。

### 3 实测仿真信道校准

为了对仿真结果进一步验证,本文对仿真数据进行校准处理,仿真配置如表 3 所示。基于图 5 中蓝色竖线上出现的快照位置对应帧的测量数据得到仿真结果与测量结果的距离时延谱、距离多普勒谱和距离角度谱。

表 3 仿真配置参数

Tab. 3 Simulation Configuration Parameters

仿真参数项	仿真配置	
发射/接收端天线	垂直极化,水平和垂直旁瓣分别为 $80^\circ$ 和 $20^\circ$ ;最大天线增益为 11 dBi	
传播机制	反射	二阶反射
	散射	方向性散射模型 <sup>[28]</sup>

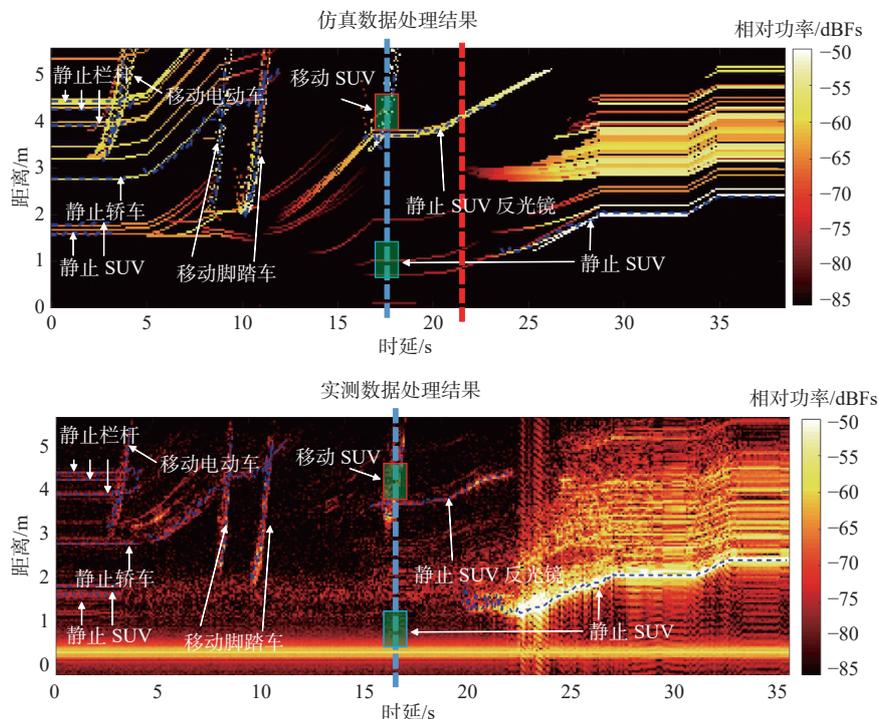


图 5 侧方停车过程距离功率谱

Fig. 5 Range-power spectrum during parallel parking

图 6 比较了雷达信道随距离变化的回波功率,仿真实验准确刻画了所选帧中出现的两个关键目标的主要特征,与测量结果高度吻合。测量结果中有四个主要峰值,其中第一个蓝色方块出现在 1.432

m 处,回波功率为  $-70.12$  dB,对应路边静止 SUV;后三个红色方块分别出现在 3.342 m、3.907 m 和 4.992 m 处,回波功率分别为  $-54.05$  dB、 $-69.02$  dB 和  $-74.27$  dB,均对应于移动 SUV。

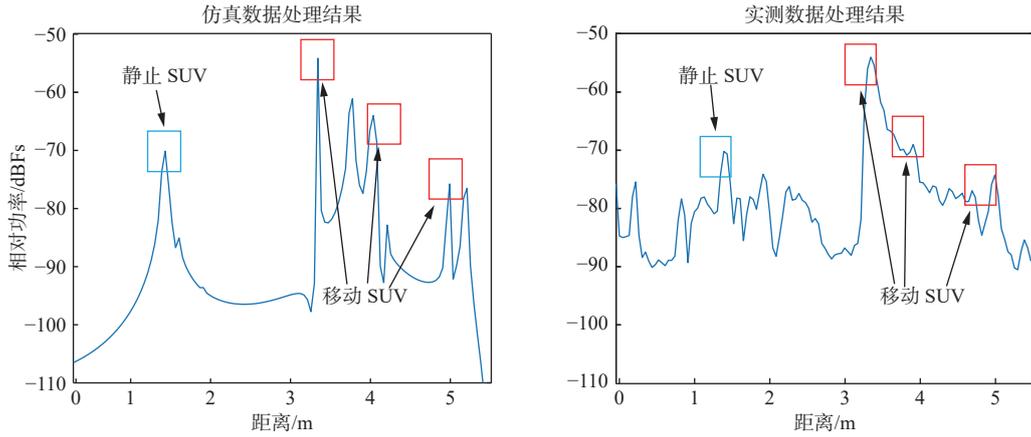


图 6 所选帧距离谱

Fig. 6 Range profile of the selected frame

图 7 比较了随距离和速度变化的测量和仿真回波功率,该图中有两部分关键散射点。其中蓝色方块出现在 1.432 m 处,速度为 0 m/s,表示路边静止 SUV;红色方块出现在约 3.342 m 和 3.993 m 处,速度分别为 2.473 m/s 和 3.356 m/s,表示相对雷达系统具有不同径向速度的移动 SUV。对比图 6 和图 7 可以

看出,距离时延谱中目标的相对功率低于距离多普勒谱中的目标功率,原因如下:距离时延谱表示了目标的 1D 信息,1D 信息中的功率包含特定距离所有速度的回波;而距离多普勒谱表示目标的 2D 信息,而 2D 信息中的功率包含特定距离特定速度下的回波功率。

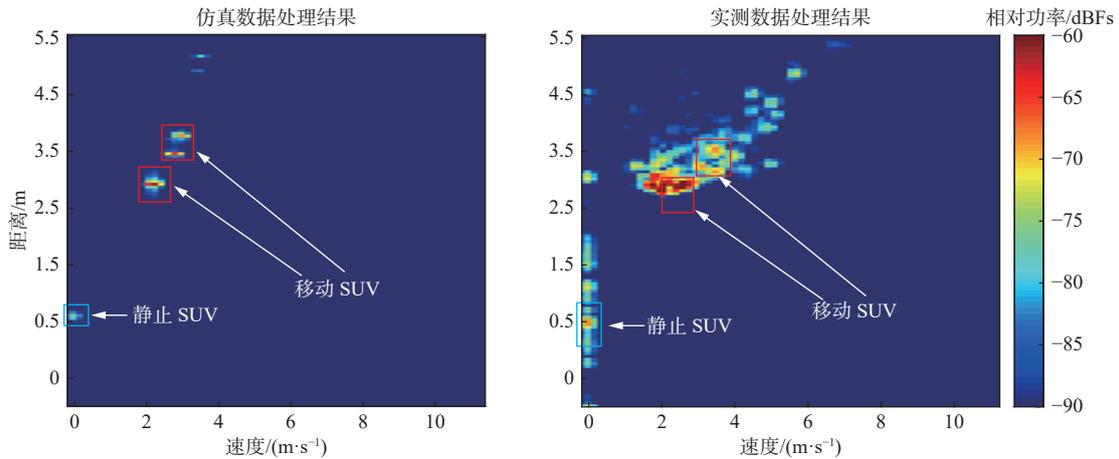


图 7 所选帧距离-多普勒谱

Fig. 7 Range-Doppler spectrum of the selected frame

类似地,图 8 比较了随径向距离和角度变化的测量和仿真回波功率变化。蓝色方块出现在 0~54.99° 范围内,表示路边静止的 SUV;红色方块出现在 120°~150° 范围内,表示运动中的 SUV。该图与

距离时延谱中的目标物功率值之间也存在差距,原因与距离时延谱和距离多普勒频谱出现差距类似,即该图所表示的 2D 信息中的功率包含特定距离特定角度下的回波功率。

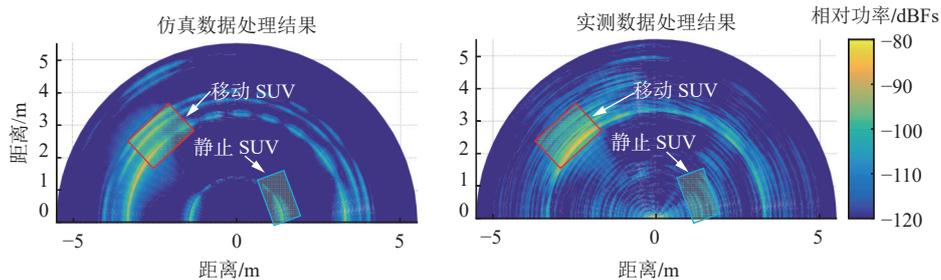


图 8 所选帧距离-角度谱

Fig. 8 Range-angle spectrum of the selected frame

需要说明的是,在实际测量中,由于车辆物体反射雷达回波的金属表面面积较大,表现在一维及二维处理结果中会呈现为多个反射点,如在本次测量及仿真结果中,移动 SUV 在距离域,多普勒域及角度域均呈现出扩散的点目标簇。表 4 详细总结了实测及所仿真场景中关键物体的回波信息。从数值结果可以看出仿真结果与测量结果相近,证明该仿真配置较为符合真实场情况,因此可以更加广泛地服务于车载雷达探测及感知的不同应用场景。

表 4 实测及仿真实验场景中典型结构体信息

Tab. 4 Typical structure information between measurement and simulation

参数项		路侧SUV	移动SUV	
距离谱	相对功率/dB	实测	-70.7	-54.1/-69.0/-74.3
		仿真	-70.1	-53.8/-64.0/-75.8
	距离/m	实测	1.432	3.342/3.907/4.992
		仿真	1.432	3.342/4.037/4.992
距离-速度谱	相对功率/dB	实测	-74.1	-64.9/-74.2
		仿真	-76.0	-61.3/-73.3
	距离/m	实测	0	2.473/3.356
		仿真	0	2.296/3.179
距离-角度谱	相对功率/dB	实测	-107.1	-82.6 (最大值)
		仿真	-98.0	-86.6 (最大值)
	距离/m	实测	0~54.99	120.00~150.00
		仿真	0~60	120.00~180.00

## 4 算法验证

### 4.1 低复杂度滤波算法

基于上述仿真和实测数据,本节利用低复杂度

滤波算法,对雷达回波信号进行降噪处理,从数据后处理和层面进一步验证所仿真数据的有效性以及其实际应用可行性。

本节阐述所提出的低复杂度低秩滤波器,可用于距离-角度域的二维信号降噪。根据文献 [29],使用克罗内克积 $\otimes$ ,可以得到下述表达形式:

$$R_x \approx R_1 \otimes R_2 \quad (8)$$

式中, $R_1$ 和 $R_2$ 表示二维信号矩阵两个维度的相关矩阵,分别代表低复杂度滤波算法中两个分离的一维低秩滤波器。接着,对 $R_1$ 和 $R_2$ 进行低秩近似,利用文献 [30]中的公式 (1.10.44),即 $\prod_{i=1}^N [A(i) \otimes B(i)] = \otimes \left[ \prod_{i=1}^N A(i) \right] \left[ \prod_{i=1}^N B(i) \right]$ ,可以得到:

$$U_x \approx U_1 \otimes U_2, \quad (9)$$

$$\Lambda_{x_p} \approx \Lambda_{1p} \otimes \Lambda_{2p} \quad (10)$$

其中, $R_x = U_x \Lambda_x U_x^H$ , $R_1 = U_1 \Lambda_1 U_1^H$ , $R_2 = U_2 \Lambda_2 U_2^H$ 。

利用文献 [30]中的方程 (1.10.25),即 $(C^T \otimes A) \text{vec}(B) = \text{vec}(ABC)$ ,可推导出改善设计后的低复杂度滤波器,即

$$\begin{aligned} \text{vec}(X_p) &= (U_1 \otimes U_2) \Delta (U_1 \otimes U_2)^H \text{vec}(X) \\ &= \text{vec} \{ U_2 [\Delta \otimes (U_1^H X U_1^*)] U_1^T \} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,截断矩阵 $\Delta$ 由下式给出:

$$\Delta = \begin{pmatrix} \Delta_p & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

最终,简化公式,可以得到图 9 所表示的低复杂度滤波器,即

$$X_p = U_2 [\Delta \otimes (U_1^H X U_1^*)] U_1^T \quad (13)$$

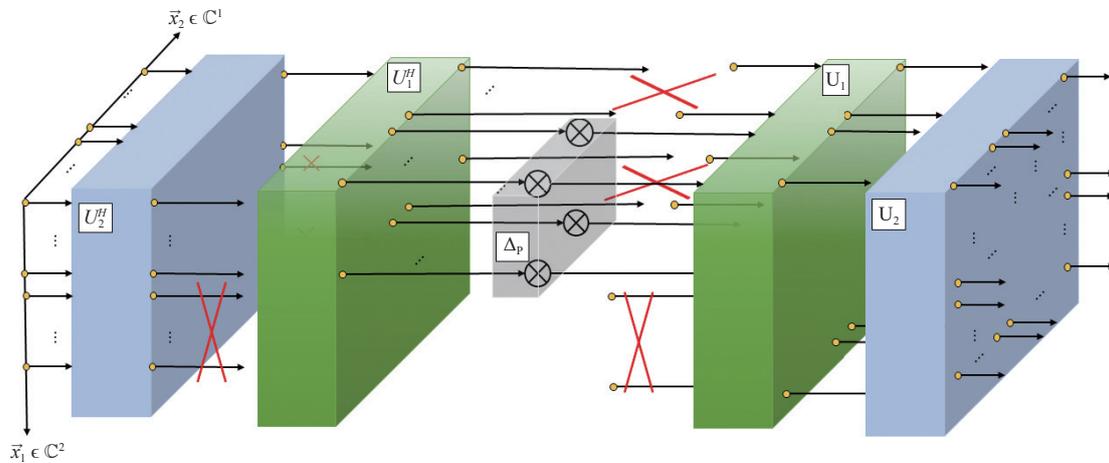


图 9 低复杂度降噪滤波器

Fig. 9 The low-complexity filter strategy

### 4.2 仿真数据算法验证

本节中,基于图 5 中红色竖线出现的快照位置

所对应的帧测量数据得到的仿真结果,利用低复杂度降噪算法在距离-角度域对 RT 电波仿真进行测

试。

考虑 FMCW-MIMO 毫米波雷达,将中心频率设为 77 GHz,考虑带宽为 2.51 GHz,每个啁啾信号的采样个数为 256,采样率为 6.3 MHz。所进行的仿真配置如表 5 所示,考虑一个 TDM-MIMO 毫米波雷达系统,其中发射天线端阵元数  $K_1 = 2$ ,接收天线端阵元数  $K_2 = 4$ 。通过 100 组蒙特卡罗独立实验分别展示算法在低复杂度滤波器的降噪结果。设置场景中存在着两个目标物,目标物的距离-速度分别为 (38 m,  $2^\circ$ ) 和 (21 m,  $-45^\circ$ )。

通过图 10 可以看出,低复杂度滤波器中,在秩数  $P = 7$  和  $P = 10$  的条件下,噪声分量得到很好的抑制。由于利用两个分离的 1D 特征值变换滤波器代替传统的高复杂度二维滤波器,在保证降噪性能

基础上有效降低了算法的计算复杂度。在此基础上,进一步采用 DCT 变换矩阵代替特征值变换矩阵,避免了算法性能对样本协方差矩阵估计结果的依赖。从图 10 还可以看到,用 DCT 替换特征值变换后的目标物周围的噪声水平相对较弱,降噪效果甚至优于替换前的结果。

表 5 低复杂度降噪算法验证系统参数

Tab. 5 System parameters for verification of low-complexity denoising algorithm

参数项	参数值	参数项	参数值
中心频率	77 GHz	每个啁啾采样点数	256
啁啾信号斜率	85.17 MHz/ $\mu$ s	每帧的啁啾信号数	128
带宽	2.51 GHz	采样率	6.3 MHz

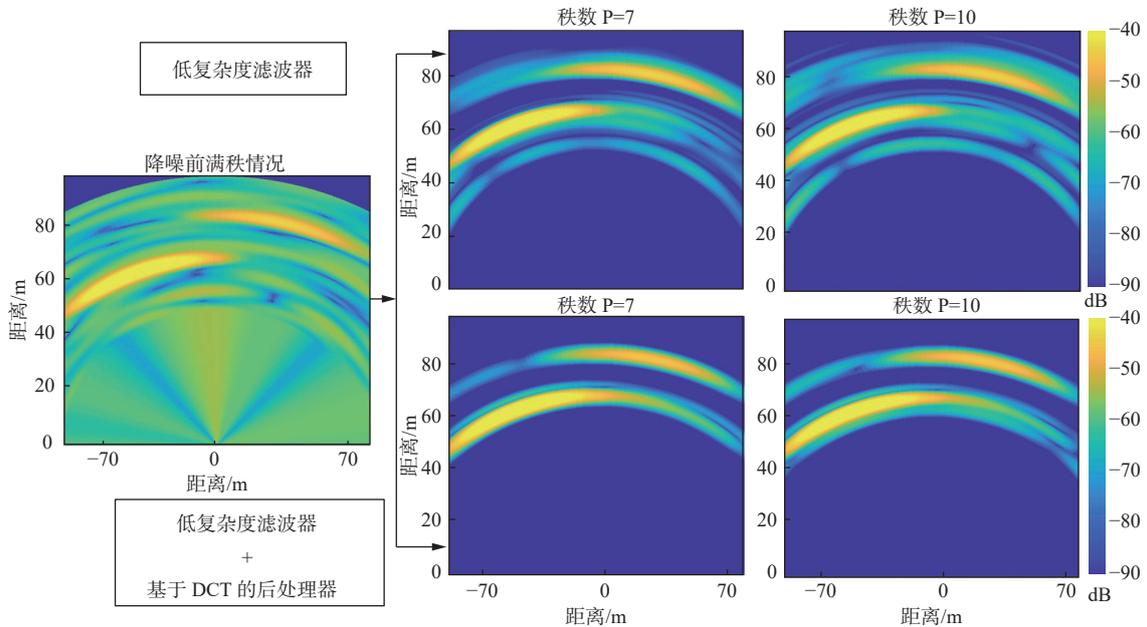


图 10 不同秩数情况下,两种方法仿真结果性能比较

Fig. 10 Performance comparisons of low-complexity scheme under different rank selections for the two stages

通过将上述降噪算法应用于仿真数据,得到了降噪后的距离-角度谱信号,表明了该算法的降噪性能;同时,利用有效的信号处理算法对于仿真数据进行处理,从应用角度可以进一步验证了用于毫米波车载雷达信号处理算法测试技术的有效性。

## 5 结论

本文面向自动驾驶技术测试需求,介绍了自行搭建的 77 GHz 调频连续波毫米波雷达实验平台,同时提出了一种基于场景的可扩展毫米波雷达仿真测试方法。首先,通过具有恒定 RCS 的三面角反射器对自行搭建的毫米波雷达测量系统进行有效性验证,并选取合适场景开展道路侧方停车测量实验。

然后,基于雷达回波数据匹配场景中关键目标物状态,根据仿真及测量结果进行对比较验。最后,设计低复杂度滤波算法,对于仿真信道进行验证,实现“测量-仿真-校准-验证”的自动驾驶测试方法闭环验证和分析。本文基于道路测试实验和 RT 仿真平台,建立场景可扩展的仿真系统,实现准确、高效的雷达回波数据生成,填补了自动驾驶场景测量可行性和测试需求之间的差距,为智慧交通系统毫米波雷达自动驾驶技术研究、构架设计、系统性能的评估和优化等提供必要的理论和研究条件,具备关键的科学价值和重要的工业应用意义。

本文工作目前基于 ULA 阵列,对于毫米波雷达信号进行研究,主要考虑天线维度为一维。基于上

述研究,未来本文计划将所提出的方案扩展应用至其他天线阵列类型,例如均匀面阵(uniform planar array,UPA)以及均匀圆阵(uniform circular array,UCA)。

### 参考文献

- [1] GIACALONE J-P, BOURGEOIS L, ANCORA A. Challenges in aggregation of heterogeneous sensors for autonomous driving systems [C]// IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), 2019.
- [2] SUN S, ZHANG Y D. 4D automotive radar sensing for autonomous vehicles: a sparsity-oriented approach[J]. *IEEE journal of selected topics in signal processing*, 2021, 15(4): 879-891.
- [3] YAN D, GUAN K, HE D, et al. Blockage effects of road bridge on mmWave channels for intelligent autonomous vehicles[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2024, 25(3): 2908-2919.
- [4] TAN Z, DAI N, SU Y, et al. Human-machine interaction in intelligent and connected vehicles: a review of status quo, issues, and opportunities[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2022, 23(9): 13954-13975.
- [5] CHEN Y, ZHANG H, WANG F Y. Society-centered and DAO-powered sustainability in transportation 5.0: an intelligent vehicles perspective[J]. *IEEE transactions on intelligent vehicles*, 2023, 8(4): 2635-2638.
- [6] FANG Y. Connected vehicles make transportation faster, safer, smarter, and greener![J]. *IEEE transactions on vehicular technology*, 2015, 64(12): 5409-5410.
- [7] YANG S C, ZUO Z, MA B, et al. Essential technics of cybersecurity for intelligent connected vehicles: comprehensive review and perspective[J]. *IEEE Internet of Things journal*, 2023, 10(24): 21787-21810.
- [8] GUAN K, HE D, AI B, et al. 5 GHz obstructed vehicle-to-vehicle channel characterization for internet of intelligent vehicles[J]. *IEEE Internet of Things journal*, 2019, 6(1): 100-110.
- [9] OSENI A, MOUSTAFA N, CREECH G, et al. An explainable deep learning framework for resilient intrusion detection in IOT-enabled transportation networks[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2023, 24(1): 1000-1014.
- [10] CHEN W, BAO Y. Key technologies of Internet-of-Intelligent-Things towards 6G[J]. *ZTE communications*, 2021, 27(2): 6-12.
- [11] SUVARNA A R, KOPPELAAR A, JANSEN F, et al. Fusion of data from multiple automotive radars for high-resolution DOA estimation [C]// IEEE Radar Conference (Radarconf22), 2022.
- [12] HUANG Y, ZHANG H, GUO K, et al. Density-based vehicle detection approach for automotive millimeter-wave radar [C]// 2020 IEEE 3rd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), 2020: 534-537.
- [13] HE D, GUAN K, AI B, et al. Channel measurement and ray-tracing simulation for 77 GHz automotive radar[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2023, 24(7): 7746-7756.
- [14] 李韞鑫, 刘凡, 杜振, 等. 面向 5G NR 车联网的感知辅助通信低开销传输技术[J]. *移动通信*, 2023, 47(09): 40-45.
- LI Y X, LIU F, DU Z, et al. Low-cost transmission techniques for sensing-assisted communications in 5G NR Internet of Vehicles[J]. *Mobile communications*, 2023, 47(09): 40-45.
- [15] YU X, HUANG Y, ZHANG L, et al. Radar moving target detection via improved sparse Fourier transform [C]//2019 IEEE 2nd International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), 2019: 543-546.
- [16] CHEN X, XUE W, SHI H, et al. Orbital angular momentum multiplexing in highly reverberant environments[J]. *IEEE microwave and wireless components letters*, 2020, 30(1): 112-115.
- [17] 吴丽娜, 何丹萍, 艾渤, 等. 基于多层感知器神经网络的路径损耗预测研究[J]. *电波科学学报*, 2021, 36(3): 396-404.
- WU L, HE D, AI B, et al. Path loss prediction based on multi-layer perceptron Artificial Neural Network[J]. *Chinese journal of radio science*, 2021, 36(3): 396-404. (in Chinese)
- [18] HE D, AI B, GUAN K, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform For 5G and beyond wireless communications: a tutorial[J]. *IEEE communications surveys & tutorials*, 2019, 21(1): 10-27.
- [19] BARRETT JR C. R. MTI and pulsed doppler radar[M]//Principles of Modern Radar. Boston, MA: Springer US, 1987: 422-464.
- [20] NATHANSON F E, REILLY J P, COHEN M N. Radar design principles-signal processing and the environment [R]. NASA STI/Recon Technical Report A, 1991.
- [21] LIGHTSTONE L, FAUBERT D, REMPEL G. Multiple phase centre DPCA for airborne radar [C]// Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference, 1991: 36-40.
- [22] JIAO M, LU G, JING X, et al. A novel radar sensor for the non-contact detection of speech signals[J]. *Sensors*, 2010, 10(5): 4622-4633.
- [23] LUO J, WEN H. Research on radar echo signal noise processing and adaptive RLS noise reduction algorithm [C]// 2019 12th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), 2019: 71-74.

- [24] MUGDHA A C, RAWNAQUE F S, AHMED M U. A study of recursive least squares (RLS) adaptive filter algorithm in noise removal from ECG signals [C]// 2015 International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 2015.
- [25] FANG H T, HUANG D S. Noise reduction in lidar signal based on discrete wavelet transform[J]. Optics communications, 2004, 233(1): 67-76.
- [26] KHALAF N H, ABDULLAH H N, TAWFEEQ Q S, et al. Enhancement of radar signal detection using double-density dual-tree DWT [C]// 2022 2nd International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI), 2022.
- [27] ZHU L, HE D, AI B, et al. Measurement and ray-tracing simulation for millimeter-wave automotive radar[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), 2021: 582-587.
- [28] DEGLI-ESPOSTI V, FUSCHINI F, VITUCCI E M, et al. Measurement and modelling of scattering from buildings[J]. IEEE transactions on antennas & propagation, 2007, 55: 143-153.
- [29] ZHU L, LIU Y, HE D, et al. A low-complexity noise reduction algorithm for enhanced target detection in FMCW radar[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023,

72(12): 15227-15236.

- [30] ZHANG X. Matrix analysis and applications [M]. Cambridge University Press, 2017.

### 作者简介



朱洛言 (1997—), 女, 辽宁营口人, 北京交通大学博士研究生, 主要研究方向为雷达信道信号处理技术等。E-mail: [19111050@bjtu.edu.cn](mailto:19111050@bjtu.edu.cn)



刘寅生 (1984—), 男, 河北唐山人, 博士, 北京交通大学副教授, 主要研究方向为无线通信等。E-mail: [ys.liu@bjtu.edu.cn](mailto:ys.liu@bjtu.edu.cn)



钟章队 (1962—), 男, 湖南衡阳人, 北京交通大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带移动通信系统与专用移动通信。E-mail: [zhzhang@bjtu.edu.cn](mailto:zhzhang@bjtu.edu.cn)