基于激光雷达的ADAS系统的电磁抗扰度测试方法试验

陈俊丽[1] 朱咏键[2] 张宇[2] 贾晋[2] 覃延明[1]

（1.招商局检测车辆技术研究院有限公司，重庆 401120；2.重庆理工大学汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室，重庆 400054）

【摘要】针对当前高级驾驶辅助系统（ADAS）的电磁抗干扰度（EMS）测试缺乏分布式视觉与激光雷达协同测试方案，且复杂电磁环境下多传感器协同存安全隐患的问题，提出一种基于车辆的ADAS EMS测试方法。通过设计仿真场景点云数字信号注入技术模拟激光雷达点云场景特征，基于PreScan与Simulink构建高精度测试工况，并采用直通滤波算法实现点云降噪。试验结果表明：直通滤波算法在保留目标特征的前提下，使点云数量减少22 851个，显著降低设备算力负荷。同时，搭建的传感器硬件在环平台在半点波暗室的自适应巡航控制（ACC）工况功能激活测试中，成功激活各传感器，毫米波雷达、摄像头和激光雷达的速度和相对距离识别精度均达到预期要求，验证了提出方案的有效性和可靠性。

主题词：高级驾驶辅助系统 电磁抗干扰度 激光雷达 自适应巡航控制 点云数字信号注入

中图分类号：U463.6 **文献标志码：**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20250600

Electromagnetic Immunity Test Method for ADAS System of Distributed Vision and LiDAR Vehicles

Chen Junli[1], Zhu Yongjian[2], Zhang Yu[2], Jia Jin[2], Qin Yanming[1]

（1. China Merchants Testing Vehicle Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401120; 2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Auto Parts, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054）

【Abstract】 Given the current lack of integrated testing solutions for distributed vision and LiDAR systems in Electromagnetic Susceptibility (EMS) testing of Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), and the safety risks associated with multi-sensor coordination in complex electromagnetic environments, this paper proposes a vehicle-based EMS testing method for ADAS systems. By using point cloud digital signal injection technology to simulate the characteristics of LiDAR point cloud scenes, the paper constructs high-precision test scenarios using PreScan and Simulink, and employs a pass-band filtering algorithm to reduce noise in the point cloud data. The test results show that the pass-through filtering algorithm reduces the number of point clouds by 22 851 while preserving target features, thereby significantly reducing the computational load on the equipment. At the same time, the sensor hardware-in-the-loop platform successfully activated all sensors during functional activation testing under Adaptive Cruise Control (ACC) conditions in a semi-anechoic chamber. The speed and relative distance recognition accuracy of the millimeter-wave radar, camera, and LiDAR all met the expected requirements, validating the effectiveness and reliability of the proposed solution.

Key words: Advanced Driver Assistance Systems (ADAS), Electromagnetic Susceptibility (EMS), LiDAR, Adaptive Cruise Control (ACC), Point cloud digital signal injection

【引用格式】 陈俊丽, 朱咏键, 张宇, 等. 基于激光雷达的ADAS系统的电磁抗扰度测试方法试验[J]. 汽车技术, 2026(6): 45-52.

CHEN J L, ZHU Y J, ZHANG Y, et al. Electromagnetic Immunity Test Method for ADAS System of Distributed Vision and LiDAR Vehicles[J]. Automobile Technology, 2026(6): 45-52.

1 前言

在高级驾驶辅助系统（Advanced Driving Assistance System，ADAS）发展过程中，车载环境中存在毫米波雷达、无线通信设备等多种电磁干扰，易导致激光雷达出现测距偏差、点云缺失等问题。为此，开展基于激光雷达的ADAS电磁抗扰度测试方法试验，可为ADAS的性能优化和安全保障提供技术参考。

目前，车辆ADAS的电磁兼容性测试多在暗室内搭建整车硬件在环测试平台完成[1]。吴志祥[2]以激光雷达的回波特性建模，实现了激光雷达对不同形状物体的雷达回波模拟，并开发相应的模拟器，但其主要的研究对象为激光雷达少量目标点云的波形模拟，未考虑场景点云的特征信息回波模拟。Zhang等[3]提出一种车载多摄像头与激光雷达的外部校准方法，将校准精度提高约20%。Park[4]利用时空点分割算法结合无监督聚类方法，分离了移动参考目标中的LiDAR信号，但该方法在车辆密集、存在大量非目标运动物体的复杂交通环境中的误检率较高。Lee等[5]完善了虚拟激光雷达传感器的数据仿真体系，但该模型仅聚焦强度特征建模，缺乏对点云几何形态、噪声干扰、复杂路况下的动态回波特性进行综合建模，在全场景激光雷达仿真的完备性方面仍存在短板。

现有车辆ADAS的电磁抗干扰度（Electromagnetic Susceptibility，EMS）测试方法难以评估ADAS整体电磁辐射抗扰性能，同时，缺乏激光雷达点云场景与摄像头、毫米波雷达感知场景的数据融合测试。因此，本文提出一种针对激光雷达的车辆ADAS EMS测试方法。首先，对测试平台进行设计搭建，完成测试场景的标定以及目标点云场景的激光雷达数字信号注入；其次，基于暗室内车辆电磁兼容测试标准以及车辆传感器的布局方案，使用PreScan和Visual Studio完成激光雷达的测试场景仿真；最后，采用镭神智能C16线激光雷达采集实际场景点云回波反射强度，与仿真场景目标反射强度进行对比分析，验证激光雷达点云仿真场景的有效性。

2 激光雷达硬件在环测试平台

2.1 设计原理与建模

激光雷达按照预设角度发射多条激光，获取基于障碍物的反射信号，经过时间范围、激光扫描角度和GPS位置等数据处理，转化为带有距离、空间位置信息的三维立体信号。通过组合该信号，建立三维点云场景，从而实现场景内目标识别。

根据测距方法的不同，激光雷达可分为2类：基于飞行时间（Time of Flight，ToF）法和基于相干探测方法的调频连续波（Frequency Modulated Continuous Wave，FMCW）激光雷达技术[6]。考虑到基于激光雷达模拟器实现场景测试的可行性较低，难以进行ADAS工况点云场景的回波模拟，故本文采用数字信号数据注入形式，同时对激光雷达注入数据后的识别效果进行有效性验证。

搭建激光雷达小型暗室传感器硬件在环测试平台，其3D建模如图1所示，摄像头、毫米波雷达和激光雷达置入其中。将自适应巡航控制（Adaptive Cruise Control，ACC）工况的场景模拟数据、毫米波雷达模拟数据、点云场景数据注入计算平台，根据主控处理单元导出的识别数据结果，判断注入点云的有效性。

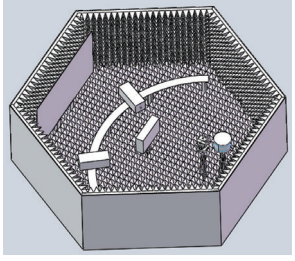


图1 测试平台3D建模设计

该系统主要包含场景模拟系统、导轨系统、主控系统和软件系统。其中，场景模拟系统负责ADAS各工况的场景数据的导入和导出，根据传感器类型区分为毫米波雷达数据、摄像头数据和激光雷达点云数据；导轨系统控制雷达模拟器的天线，模拟毫米波雷达数据；主控系统对各系统进行控制，包括对传感器数据的接收和点云数据处理；软件系统主要负责传感器的场景标定和系统界面控制。

2.2 车载激光雷达点云场景数字信号注入

本文搭建小型暗室硬件在环平台验证激光雷达模拟注入测试方法，总体方案如图2所示。利用计算机内嵌激光雷达识别算法完成点云原始场景数据的目标识别任务，逐帧处理导入的ACC场景数据，提取并识别点云场景中的目标特征与动力学信息，模拟车载雷达接收、感知和目标识别过程。

注入模拟点云场景前，需检验仿真点云数据（Point Cloud Data，PCD）文件格式，基于点云库（Point Cloud Library，PCL）核查点云场景畸变问题。对于批量点云场景的导入，基于文件安全拷贝协议（Secure Copy Protocol，SCP）/SSH文件传输协议（SSH File Transfer Protocol，SFTP）进行简单加密传输，发送端与主机端的目录统一按PCD文件的时间戳命名子目录，将PCD数据封装为ROS标准信息，发送频率模拟雷达固定频率

（20 Hz）。最终将主机的目标识别结果实时传输至上位机，如图3所示。

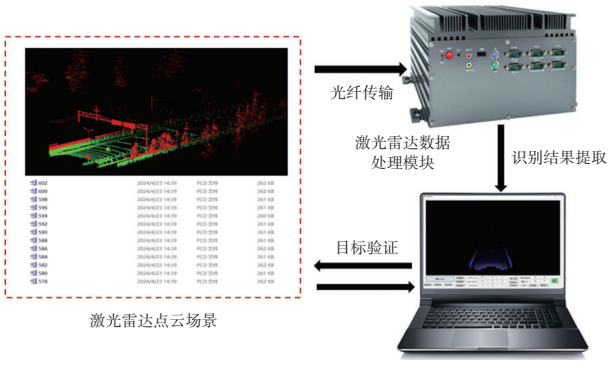


图2　信号注入方案

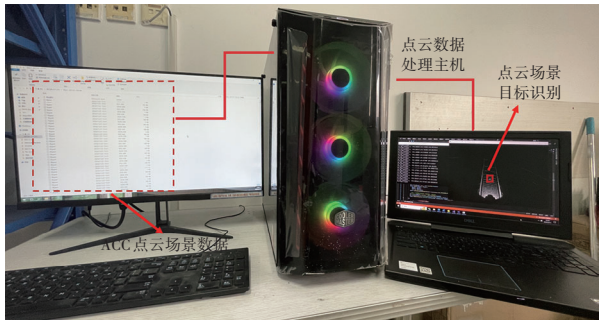


图3　点云场景注入

3　基于激光雷达的ADAS系统工况测试

3.1　测试工况场景搭建

车辆EMS测试常用于评估复杂电磁场干扰环境下ADAS的性能[7]，确保多传感器协同感知一致，验证系统符合法规及功能安全要求。本文使用基于车外辐射法进行ADAS的EMS测试，针对自适应巡航控制工况进行测试分析。选择PreScan 8.5自动驾驶软件进行场景仿真测试，集成MATLAB/Simulink实现ADAS系统和网联通信系统仿真。依据ISO 15622: 2018自适应巡航测试标准[8]，结合测试车辆车载传感器的实际布局，开展ADAS自适应巡航工况仿真场景与传感器感知特性分析，所建测试车辆传感器模型包含激光雷达仿真模型。仿真工况设置如图4所示，试验车辆以36 km/h匀速直线行驶，目标车辆以相同速度与试验车辆同车道行驶，两车相对距离为10 m。

试验主要采集前视摄像头视觉场景信息、毫米波雷达的目标位置、速度信息和激光雷达的点云场景信息。运行场景模型导出数据如图5所示。

3.2　ACC工况点云仿真场景处理

激光雷达获取点云数据时易受硬件系统影响，采集的数据会掺杂少量噪点和离群点，需采用平滑处理或直接剔除[9]。通过体素滤波和直通滤波算法处理点云数据，可有效保留原始点云的特征结构，提高激光雷达对处理后点云的识别准确度[10]。

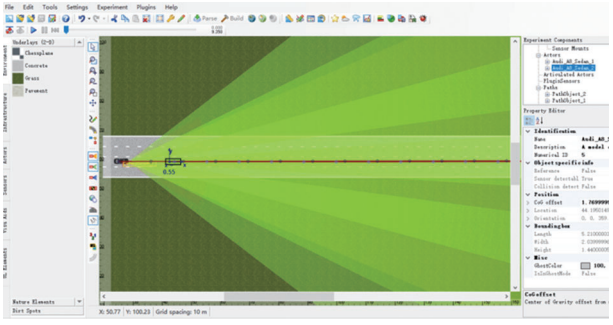
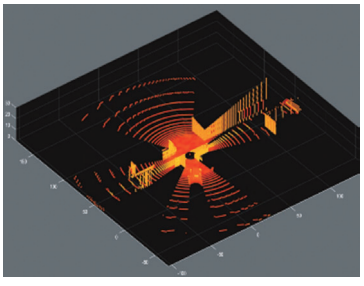
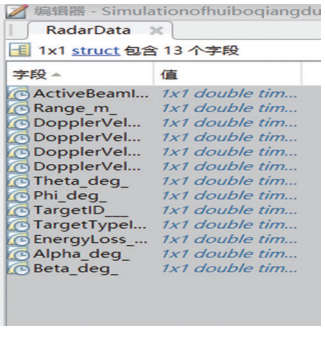


图4　自适应巡航（ACC）工况



（a）激光雷达点云



（b）点云坐标及强度信息

图5　场景数据

体素滤波将点云空间分割为规则体素网格，随后对各体素内的点执行降采样，从而降低点云数据量。假设体素网格的边长为L，点云的边界范围为$[x_{\min},x_{\max}]$，$[y_{\min},y_{\max}]$，$[z_{\min},z_{\max}]$，则体素网格的数量为：

$$\begin{cases} N_x = \dfrac{x_{\max} - x_{\min}}{L} \\ N_y = \dfrac{y_{\max} - y_{\min}}{L} \\ N_z = \dfrac{z_{\max} - z_{\min}}{L} \end{cases} \tag{1}$$

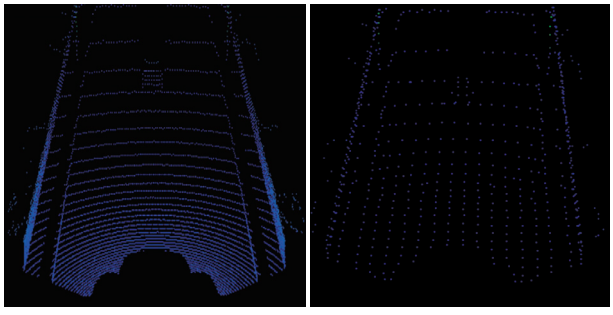
式中：$x_{\min}$、$y_{\min}$、$z_{\min}$、$x_{\max}$、$y_{\max}$、$z_{\max}$分别为x、y、z轴的最小值和最大值。

完成体素网格划分后，体素下采样通过将单个体素网格内的全部点云数据替换为唯一代表点。该点主要有2种选取方式：体素内所有点的重心或随机选取的单点，均可在保留点云整体空间特征的同时，有效减少点云数量。

假设体素内有k个点$\{P_1,P_2,\cdots,P_k\}$，则代表点为：

$$P_{\text{rep}}=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}P_i \tag{2}$$

滤波处理后的点云效果如图6所示，在完整保留目标轮廓与核心点云特征的基础上，大幅削减冗余点云数据，显著优化点云体量的同时，降低设备的算力负荷。

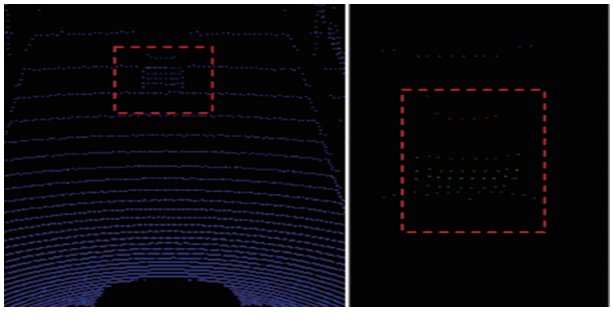


(a)滤波前　　(b)滤波后

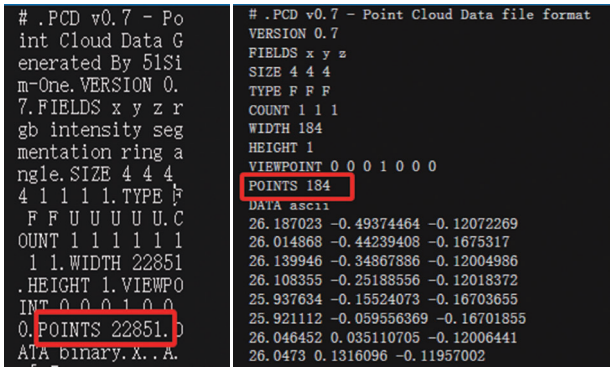
图6　体素滤波结果

直通滤波通过设定一个或多个坐标轴的取值范围，仅保留该范围内的点，其他点直接剔除处理[11]，滤波结果如图7所示。保留点需满足：

$$\begin{cases}x_{\min}\leqslant x\leqslant x_{\max}\\ y_{\min}\leqslant y\leqslant y_{\max}\\ z_{\min}\leqslant z\leqslant z_{\max}\end{cases} \tag{3}$$



(a)滤波前点云　　(b)滤波后点云



(c)滤波前点云数量　　(d)滤波后点云数量

图7　直通滤波结果

由图7可知，ACC工况场景原始点云的数量为22 851个，直通滤波成功剔除大量环境干扰，车辆尾部点云数量仅为184个。

为验证激光雷达点云场景的有效性，计算目标激光雷达回波的反射强度，同时与实际数据进行对比分析。使用激光雷达工作方程[12]描述发射信号与回波信号间关系：

$$P_{\text{r}}=\frac{4P_{\text{t}}}{\pi\theta_{\text{t}}^2R_{\text{t}}^2}\tau_{\text{t}}\eta_{\text{t}}\eta_{\text{r}}\rho\cos\theta_{\text{i}}\cos\theta_{\text{r}}A(D)\frac{D^2}{4R^2} \tag{4}$$

式中：P_{t}为雷达发射功率，P_{r}为探测目标回波的光功率，θ_{t}为激光发散角，R_{t}、R分别为目标与雷达、接收器间的距离，A为目标物体的有效照射面积，D为探测器孔径，θ_{i}为目标物体相对激光雷达发射端的入射角，ρ为目标物体反射率，η为激光雷达接收系统的效率，θ_{r}为激光雷达接收视场角。

影响激光雷达回波目标反射强度P_{r}的关键因素有：目标表面有效面积、目标物的反射率R、激光入射角θ、回波过程衰减和接收光学系统。由于本文主要探测激光雷达前方10 m处的物体，激光作用距离较短，激光发散角较小，车辆尾部的面积区域完全覆盖激光雷达光斑面积。故距离雷达D处的光斑面积和初始光强分别为：

$$A(D)=\pi(8.7\times10^{-3}D)(5.7\times10^{-3}D) \tag{5}$$

本文主要研究车辆尾部的点云反射，鉴于该部分材料为铝合金材质，其反射率较高，可将目标表面视为理想漫反射模型。当光在两种介质(铝合金和空气)的界面上发生反射时，其反射率遵循菲涅尔公式，可分为垂直偏振(S偏振)和平行偏振(P偏振)：

$$\begin{cases}R_{\text{S}}=\left(\dfrac{n_1\cos\theta_i-n_2\cos\theta_t}{n_1\cos\theta_i+n_2\cos\theta_t}\right)^2\\ R_{\text{P}}=\left(\dfrac{n_1\cos\theta_t-n_2\cos\theta_i}{n_1\cos\theta_t+n_2\cos\theta_i}\right)^2\\ n_1\sin\theta_i=n_2\sin\theta_t\end{cases} \tag{6}$$

式中：$n_1=1$、$n_2=1+3.46i$分别为空气和铝合金反射率。

总反射率R_{avg}为S偏振光和P偏振光反射率的平均值：

$$R_{\text{avg}}=\frac{R_{\text{S}}+R_{\text{P}}}{2} \tag{7}$$

目标物表面的法线方向$\boldsymbol{n}$与激光入射方向$\boldsymbol{d}$夹角决定激光反射方向，则入射角为：

$$\theta=\arccos(\boldsymbol{d}\cdot\boldsymbol{n}) \tag{8}$$

随着激光传播距离的增加，激光光强在空气中传播会发生衰减，常根据空气的衰减系数α进行计算。假设在均匀介质中，激光传播受大气吸收与散射的影响，其强度衰减遵循比尔-朗伯定律[13]：

$$I(R)=I_0\exp\left[-\int_0^R\mu(r,\lambda)\,\mathrm{d}r\right] \tag{9}$$

式中：I_0为发射光强，$\mu(r,\lambda)$为激光在距离r处的衰减系数。

激光雷达的光学接收系统对回波信号的探测能力受光电探测器的灵敏度、视场（Field of View，FoV）角和接收孔径等因素影响。通过查阅镭神智能C16线激光雷达的最小接收功率和最大接收功率，则归一化处理为：

$$I_{rescv} = round\left(\frac{P_r - P_{min}}{P_{max} - P_{min}} \times 255\right) \tag{10}$$

式中：I_{rescv}为归一化的回波强度，$round()$为取整函数，P_{min}、P_{max}为最小和最大目标回波的光功率。

因此，不考虑激光雷达的发射系统的效率和接收探测器的孔径，车辆尾部的激光雷达反射强度为：

$$\begin{cases} I = \dfrac{P_r}{P_t} \\ P_r = \dfrac{P_t \eta \rho A(D) e^{-2\alpha R}}{4\pi R^2} \end{cases} \tag{11}$$

本文忽略激光雷达的发射系统效率影响，基于仿真搭建ACC工况，建立测试车辆激光雷达与目标车辆尾部特征点的发射脉冲等效数学模型，如图8所示。以目标车辆尾端面左下角端点为原点o建立直角坐标系，目标车辆行驶的反方向为x轴，车辆纵切面右端为y轴，垂直地面方向为z轴。在等效模型中，1为测试车辆激光雷达位置的纵切面，2为目标车辆尾端面，a = 10 m为测试车辆与目标车辆间距离，b = 1.5 m、c = 1.6 m分别为测试车辆的高度和宽度。

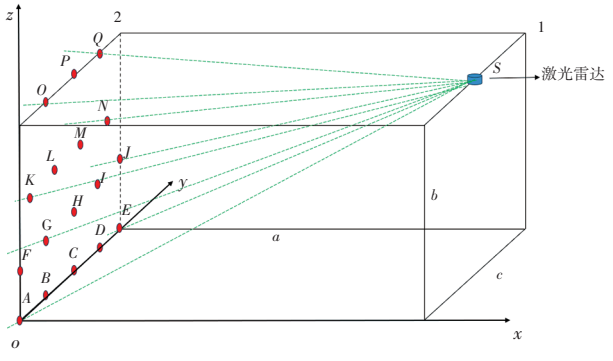


图8　激光雷达发射脉冲等效模型

选取目标车辆尾端面均匀分布的17个点为反射点，计算各点的反射角度和反射率，确定激光脉冲到各点反射的回波强度I_1，车辆A激光雷达和车辆B端面的17个反射点位置如表1所示。

通过各点坐标计算激光雷达的发射脉冲的入射角，当发射脉冲由点S射向点A，则光线方向向量为$\boldsymbol{f}_{SA}$ = (−10,−0.8,−1.5)。由于光线与x = 0面相交，且法向量为沿x轴的单位向量$\boldsymbol{n}_x$ = (1,0,0)，根据余弦公式得到入射角为θ_i = 9.6°，结合θ_t = 60.9°，则平均反射率R_{avg} = 78.78%。

表1　目标车辆反射点与雷达位置坐标

ID	坐标	ID	坐标
A	(0 m,0 m,0 m)	*J*	(0 m,1.6 m,0.5 m)
B	(1 m,0.4 m,0 m)	*K*	(0 m,0.2 m,1.0 m)
C	(0 m,0.8 m,0 m)	*L*	(0 m,0.6 m,1.0 m)
D	(0 m,1.2 m,0 m)	*M*	(0 m,1.0 m,1.0 m)
E	(0 m,1.6 m,0 m)	*N*	(0 m,1.4 m,1.0 m)
F	(0 m,0 m,0.5 m)	*O*	(0 m,0.4 m,1.5 m)
G	(0 m,0.4 m,0.5 m)	*P*	(0 m,0.8 m,1.5 m)
H	(0 m,0.8 m,0.5 m)	*Q*	(0 m,1.2 m,1.5 m)
I	(0 m,1.2 m,0.5 m)	*S*	(10 m,0.8 m,1.5 m)

为简化计算过程，车辆尾部玻璃的点K、L、M、N的折射率设置为1.5。基于MATLAB计算各点的入射角和反射率，并计算反射强度P_r = 2.28 × 10^{-5}。假设车辆尾部为均匀模型，激光雷达实际与仿真点云强度进行归一化处理，模拟得到回波模拟结果如图9所示。

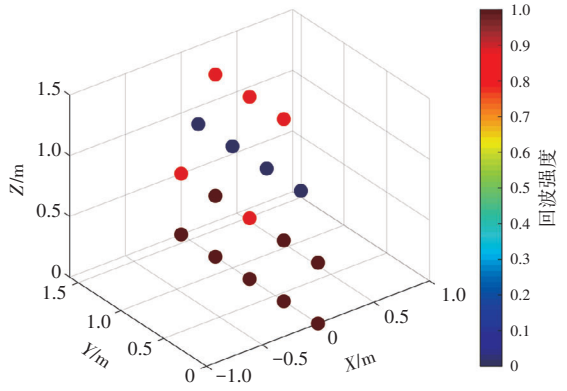
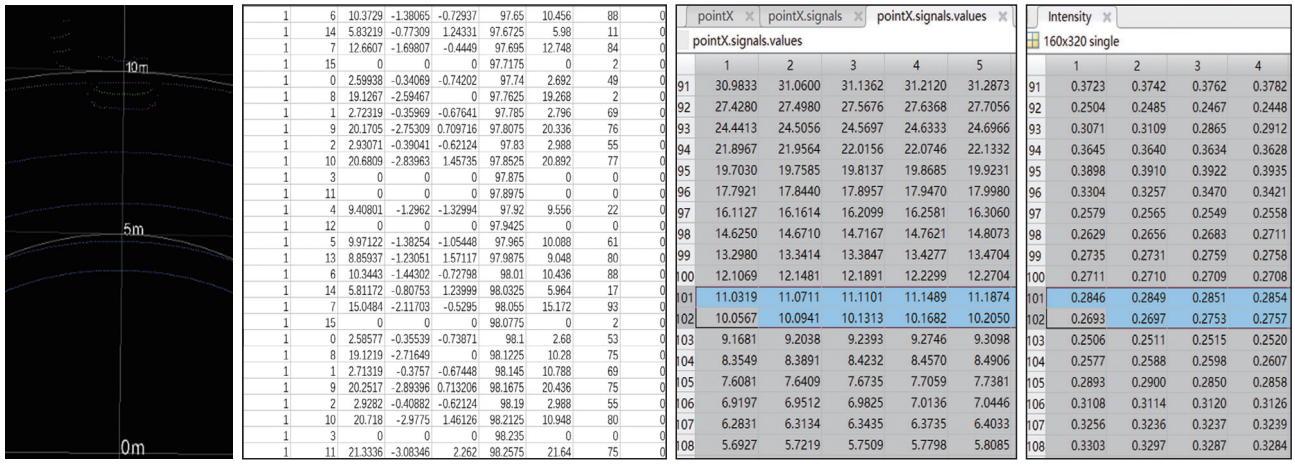


图9　理论激光雷达回波强度模拟

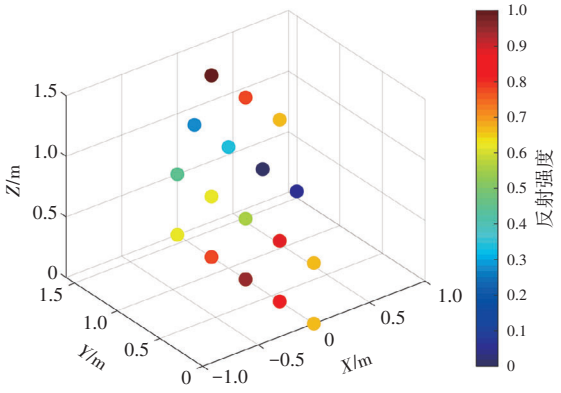
为验证点云模拟回波的有效性，本文采用镭神智能C16线激光雷达对实际10 m处的某款SUV车型的尾部点云特征进行实际采集。通过点云上位机控制软件标定雷达点云的角度范围，以此获取车辆部分区域点云。对点云噪点及周围无用点进行点云处理，通过直通滤波保留车辆尾部特征点云，解析点云数据得到目标车辆的点云反射强度。因此，实际采集与仿真点云的目标反射强度数据如图10所示，归一化处理后目标点云的反射强度如图11所示。

将实际采集处理的回波反射强度分别与模拟的回波反射强度、理论计算的回波反射强度对比，结果如图12所示。理论计算的反射强度高于实际值和仿真值，主要源于Prescan仿真中，车辆的反射率为0.5，低于理论计算值，但整体拟合度超过0.81，表明仿真激光雷达点云场景测试工况具有一定的有效性。

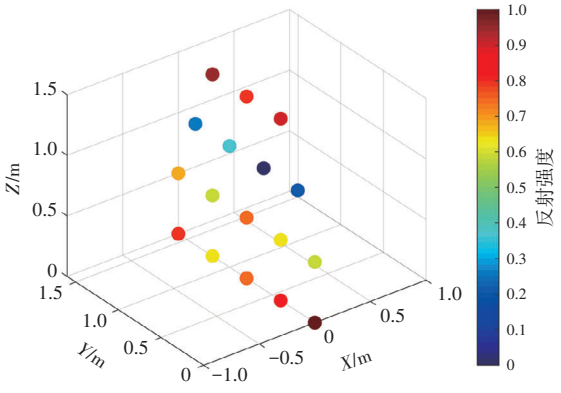


（a）实际点云　　（b）仿真点云

图10　目标点云反射强度提取



（a）实际点云



（b）仿真点云

图11　目标点云反射强度对比

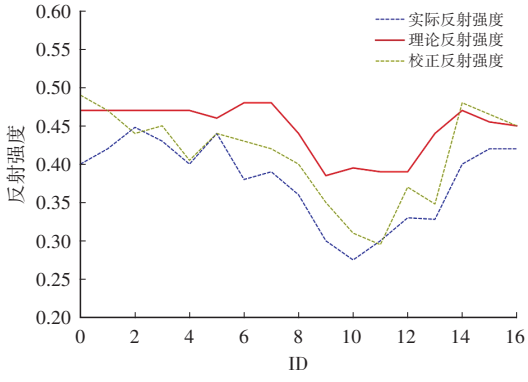


图12　不同点云反射强度对比

4　测试验证

本文搭建的小型暗室传感器硬件在环平台如图13所示，车载毫米波雷达使用德尔福毫米波雷达，摄像头模组选取常规摄像头，内置车辆识别算法，激光雷达选择镭神智能C16线激光雷达。

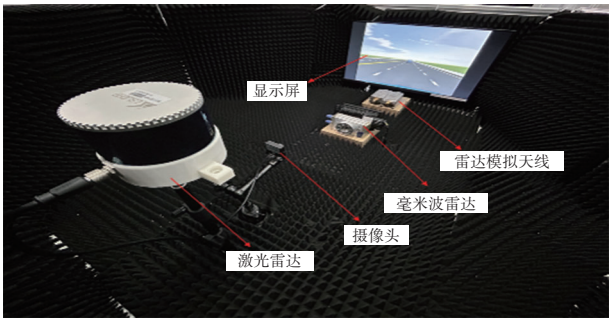


图13　小型暗室硬件在环平台测试

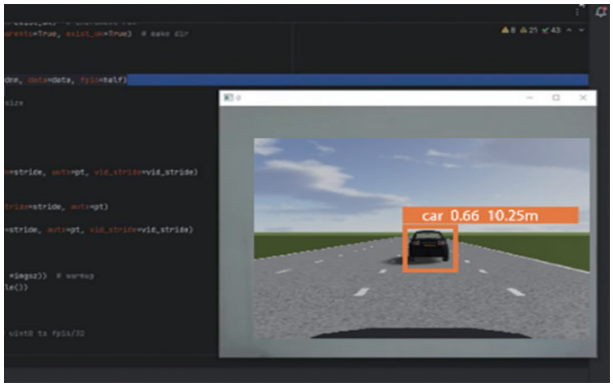
完成毫米波雷达和摄像头的场景标定后，对车辆的ACC工况进行激活测试验证。考虑到实际车辆的激光雷达模拟注入受限，难以获取主机厂CAN通信协议，故基于搭建的小型暗室进行激光雷达的模拟注入验证。

将毫米波雷达数据信息和雷达截面反射率输入至雷达模拟器，仿真场景库的摄像头场景信息通过高清晰度多媒体接口（High Definition Multimedia Interface，HDMI）传输至显示屏，激光雷达的场景点云信息通过光纤传输至主控机，主控机内置激光雷达目标识别算法。工况测试中，可从各传感器端口观察传感器完成目标识别任务情况，如图14所示。

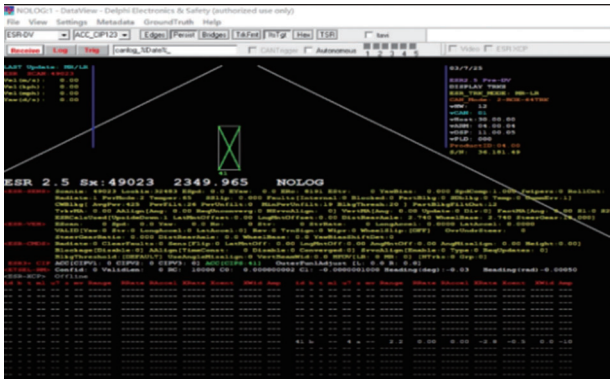
基于ACC场景验证，设定目标车辆的速度为12.5 m/s，目标与车辆的相对距离为10 m。提取测试过程中某一分钟的测试结果，每隔10 s采集数据，分析各传感器采集的目标动力学数据，摄像头、毫米波雷达、激

光雷达的目标速度信息和位移信息如图15所示。同时，对各传感器的识别目标与实际值、仿真值进行均方误差（Mean Squared Error，MSE）分析[13]：

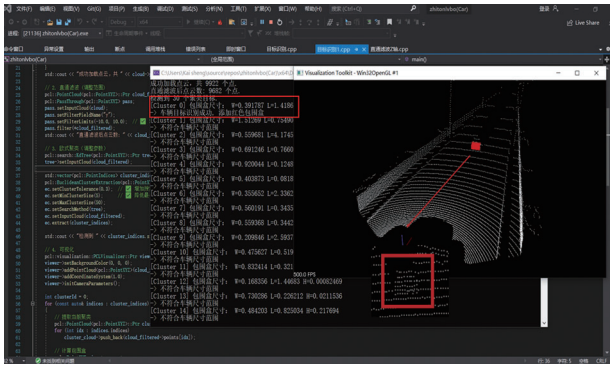
$$e_{\mathrm{MSE}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i)^2 \tag{12}$$



（a）摄像头



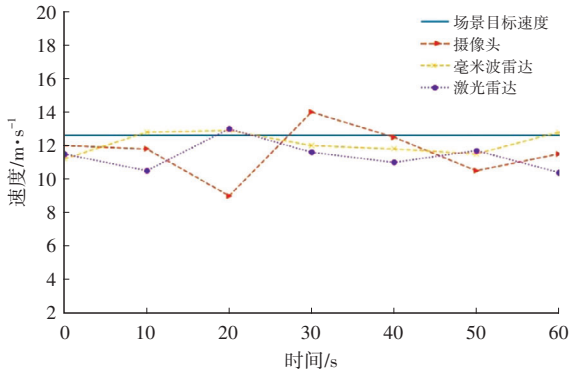
（b）毫米波雷达



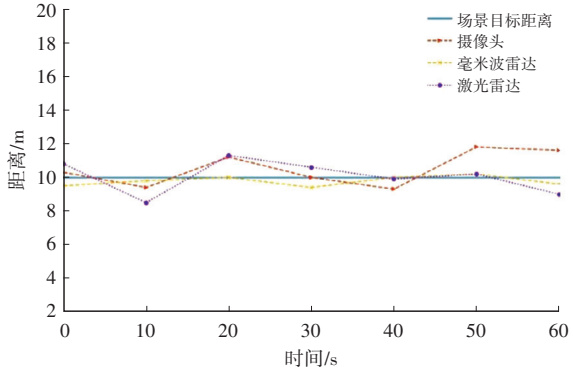
（c）激光雷达

图14　目标识别对比

由图15可知，各传感器对目标的速度以及位移信息基本识别准确。在误差允许范围内，毫米波雷达对于目标的速度和相对距离的均方误差分别为0.501 6 m/s、0.151 9 m，识别最为准确；摄像头的最大均方误差分别为2.852 8 m/s、1.123 4 m，识别精度处于中等水平。毫米波雷达所识别的目标动力学信息与激光雷达所识别到的基本一致，间接说明激光雷达的场景点云信息模拟注入方法的可行性。



（a）目标速度



（b）目标距离

图15　ACC工况各传感器对目标速度和距离的识别曲线

5　结束语

本文建立了激光雷达回波强度模型，通过对比理论值、实测值与场景仿真值，验证了点云仿真的有效性。基于Prescan、Simulink及PCL库完成了ACC工况的场景仿真与点云处理，搭建的小型暗室硬件在环平台，实现了多源传感器同步模拟。ACC工况下多传感器目标动力学信息一致，证明了该仿真点云数据可用于激光雷达在环注入测试，为搭载激光雷达与分布式摄像头的车辆ADAS系统电磁辐射抗扰测试提供了有效方法与经验基础。

未来，可采用双向反射率分布函数替代理想漫反射模型，考虑激光雷达实际接收路径的强度损耗，以减小理论回波强度的计算误差。同时，开展整车暗室内的点云场景数字信号注入试验，从而更全面地验证该方法的工程实用性。

参　考　文　献

[1] 郑刚，张朝阳，俎兆飞，等. 高级驾驶辅助系统硬件在环测试平台研究[J]. 现代电子技术，2021，44(20)：65-68.
ZHENG G，ZHANG C Y，ZU Z F，et al. Research on Hardware-in-the-Loop Test Platform for Advanced Driver Assistance Systems[J]. Modern Electronic Technique，2021，44(20)：65-68.

[2] 吴志祥. 激光雷达回波特性建模与模拟器研制[D]. 南京：

南京理工大学, 2020.
WU Z X. Echo Characteristics Modeling of LiDAR and Its Simulator Development[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.

[3] ZHANG X Y, XIONG Y J, QU Q X, et al. Automated Extrinsic Calibration of Multi-Cameras and LiDAR[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-12.

[4] PARK J, CHO J, LEE S, et al. An Automotive LiDAR Performance Test Method in Dynamic Driving Conditions[J]. Sensors, 2023, 23(8).

[5] LEE D, IM J, WON J. Virtual Lidar Sensor Intensity Data Modeling for Autonomous Driving Simulators[J]. IEEE Access, 2023, 11: 120694-120706.

[6] 刘帅涛. 面向复杂场景下点云与图像融合的目标检测研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
LIU S T. Research on Object Detection with Fusion of Point Cloud and Image in Complex Scenes[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2023.

[7] 中国人民解放军总装备部. 电磁干扰和电磁兼容性术语: GJB 72A-2002[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2002.
General Armaments Department of the People's Liberation Army. Electromagnetic Interference and Electromagnetic Compatibility Terminology: GJB 72A-2002[S]. Beijing: General Armaments Department of the People's Liberation Army, 2002.

[8] International Organization for Standardization. Intelligent Transport Systems-Adaptive Cruise Control Systems-Performance Requirements and Test Procedures: ISO 15622: 2018[S]. Geneva: ISO, 2018.

[9] 胡任杰. 基于点云的齿轮参数提取以及表面缺陷识别[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
HU R J. Research on Gear Parameter Extraction and Surface Defect Recognition Based on Point Cloud[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.

[10] 于乃功, 谢秋生, 李洪政. 基于点云处理的仿人机器人楼梯障碍物识别与剔除方法[J]. 工程科学学报, 2025, 47(2): 339-350.
YU N G, XIE Q S, LI H Z. Obstacle Recognition and Elimination Method for Humanoid Robots Based on Point Cloud Processing[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2): 339-350.

[11] 高参. 基于3D视觉的特钢样棒定位和机器人抓取技术研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.
GAO C. Research on Special Steel Sample Bar Positioning and Robotic Grasping Technology Based on 3D Vision[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2023.

[12] 张正贤. 激光雷达强度数据计算模型及应用的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
ZHANG Z X. Research on Calculation Model and Application of LiDAR Intensity Data[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[13] 王海先, 叶艾. 大气衰减系数对激光测距能力影响的研究[J]. 舰船科学技术, 2007(6): 116-119.
WANG H X, YE A. Research on the Influence of Atmospheric Attenuation Coefficient on Laser Ranging Capability[J]. Ship Science and Technology, 2007(6): 116-119.

（责任编辑　瑞　秋）

修改稿收到日期为2025年11月6日。