

激光雷达雨噪点产生机理与抑制方法研究

作者：赵赛哲 指导教师：李小路 单位：北京航空航天大学

激光雷达作为一种主动式三维高精度环境感知技术，在自动驾驶、地形测绘、无人系统等领域发挥着重要作用。然而，在雨天条件下，激光束与大气中雨滴粒子发生散射，产生大量非目标相关的噪声点，严重影响点云质量与目标识别可靠性，制约了激光雷达在复杂气象环境下的全天候应用。

为解决上述问题，本文开展激光雷达雨噪点产生机理与抑制方法研究，主要包括：

1. 针对雨噪生成过程复杂、现有模型缺乏微观物理依据的问题，建立基于 Mie 散射理论与蒙特卡罗光子追踪方法的雨噪声产生机理模型，为噪声特征分析提供物理基础。

2. 针对传统滤波方法特征单一、鲁棒性不足的问题，提出一种融合时空特征（距离、强度与邻域点数）的综合置信度决策方法，实现噪声与目标的准确分割。

3. 基于 FPGA 硬件平台设计并实现在线雨噪抑制系统，在可控模拟雨场中开展系统实验，验证所提出雨噪点抑制方法的可行性与准确性。

本研究旨在系统揭示雨噪点的产生机制，发展高效、实时的抑制技术，提升激光雷达在恶劣天气条件下的感知可靠性与系统稳健性，为自动驾驶、智能测绘等领域的全天候应用提供关键技术支持。

一、研究背景

激光雷达（Light Detection and Ranging, LiDAR）是一种基于主动激光探测的高精度三维成像技术，它通过发射激光束并接收其回波信号，结合时间延迟与角度信息，实时获取目标距离、形态与表面特性。该系统具备全天时工作、高空间分辨率、强抗干扰能力等优势，广泛应用于地形测绘、环境监测、自动驾驶、军事侦察及行星探测等多个重要领域。在智慧交通、无人系统与复杂环境感知等前沿应用中，激光雷达承担着关键的环境建模与态势理解任务，如图 1 所示。



(a) 机器人巡检



(b) 无人机救援



(c) 无人舰艇导航

图 1 激光雷达雨天应用需求

然而，在雨天条件下，大气中悬浮的液态粒子会对激光信号产生强烈的后向散射，形成大量非目标相关的噪声点，即“雨噪点”，如图 2 所示。这些噪点混杂在真实目标点云中，导致场景三维结构失真、目标识别困难、跟踪稳定性下降，严重影响激光雷达在雨天下的可靠性与可用性。尤其在自动驾驶、无人机导航等实时性要求高的应用中，雨噪点的存在直接威胁系统安全，成为制约激光雷达全天候应用的主要瓶颈之一。

当前，针对复杂天气下的感知增强，多数研究采用激光雷达与相机、毫米波雷达等多传感器融合方式，但该手段并未降低单一传感器（激光雷达）实时环境感知的不利因素。因此，开展面向激光雷达雨噪点产生机理与抑制方法的研究，具有重要的意义。

本研究旨在针对激光雷达在雨天条件下点云质量下降的问题，通过机理建模、特征鉴别，噪点抑制与在线处理相结合的研究路径，发展一套高效、实时的雨噪点抑制方法。该研究不仅有助于深化对激光与降水颗粒相互作用机理的认识，更能为提升激光雷达在恶劣天气下的环境感知可靠性与稳健性提供关键技术支持，对推动自动驾驶、智能测绘等领域在复杂环境下的实际应用具有重要价

值。

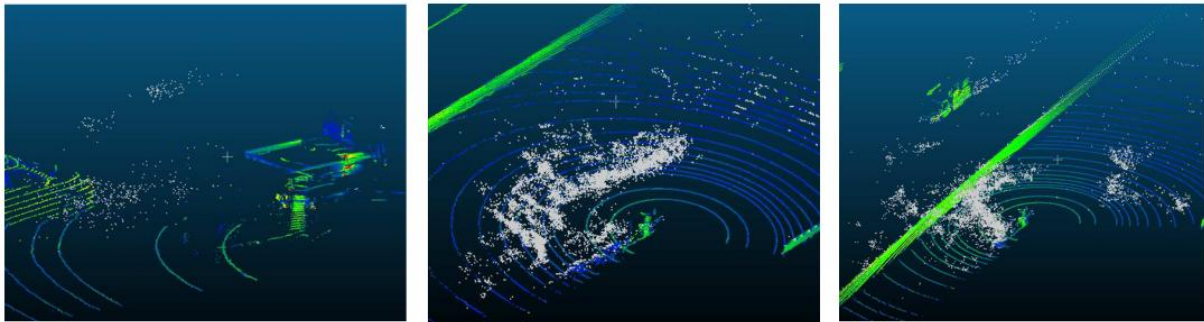


图 2 雨滴使激光雷达点云产生雨噪点（白色点）

二、设计过程

激光雷达雨噪点抑制的主要问题有：第一，雨噪点产生涉及激光-雨滴随机散射过程，现有模型缺乏微观物理依据，不利于噪声特征分析与抑制算法设计；第二，现有滤波方法多依赖单一特征或顺序应用多个标准，缺乏对雨噪时空特征的有效融合，导致泛化能力不足；第三，在线抑制系统对处理速度要求高，传统软件方法难以满足实时性需求，需要设计低延迟、高吞吐的硬件处理架构。针对上述问题，开展基于时空特征融合的雨噪点在线抑制方法研究，技术路线将从激光雷达雨噪点产生机理建模、雨噪点特征鉴别与抑制算法设计、在线处理系统设计与实验验证等方面展开，技术路线图如图 3 所示。

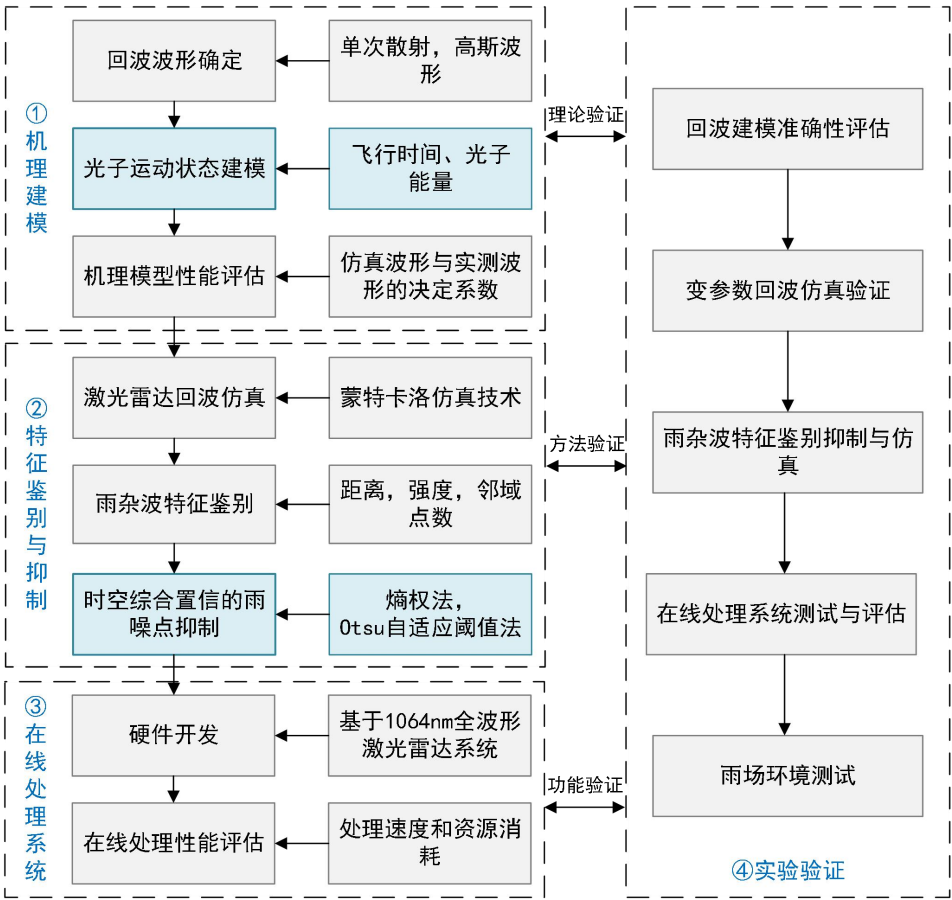


图 3 技术路线图

(1) 雨噪点产生机理模型建立

针对雨噪点生成涉及复杂随机散射过程、现有模型缺乏物理依据的问题，开展基于米氏散射理

论与蒙特卡洛模拟的物理机理建模。通过建立雨滴谱分布与散射相函数模型，并结合泊松随机过程模拟光子-雨滴交互，实现光子传输、散射及接收的全链路仿真，最终生成涵盖距离、强度与空间分布的噪声统计模型，为特征分析与算法设计提供高保真数据基础与理论工具。

（2）基于半解析蒙特卡罗的雨回波特征鉴别

针对雨天真实数据匮乏、杂波与目标特征难以有效区分的难题，研究基于半解析蒙特卡罗方法的雨回波及点云快速仿真方法。基于激光雷达方程与探测器灵敏度的信号可探测性判定技术，实现不同降雨强度、目标特性与系统参数下的回波与点云仿真。在此基础上，系统提取并分析回波信号（时域）与点云结构（空域）中的关键特征，揭示环境、目标及系统参数对雨杂波特性的影响规律，实现雨杂波与目标回波在时-空维度上的共性特征鉴别，为噪声抑制算法设计与系统优化提供判决依据。

（3）基于时空综合置信的雨杂波抑制算法

针对复杂消光环境下单一特征滤除方法性能不足的问题，提出一种联合时空特征点云综合置信度决策方法。通过建立基于噪声分布模型的单特征（距离、强度、邻域点数）置信度函数，量化各特征对噪声的判别能力；引入熵权法自适应确定各特征权重，构建多特征加权融合的综合置信度计算模型；并采用 Otsu 自适应阈值法实现噪声与目标的准确分割，提出一套物理驱动、特征融合的雨噪点抑制算法，达成高精度与高召回率的滤噪效果。

（4）雨噪点抑制的 FPGA 在线处理系统与实验验证

研制基于 FPGA 的在线抑制系统，将所提算法应用于实时处理并完成多环境闭环验证。通过设计硬件化流水线架构，实现波形参数解算、邻域搜索、置信度融合与阈值判决等关键步骤的实时处理；开展在可控雨场环境中的系统测试实验，以目标保留率、噪点抑制率，G-mean 指标综合评价系统性能，最终完成从理论、方法，功能到系统落地的全链路验证。

三、结果与验证

3.1 雨噪点产生机理建模

为验证所提出的雨噪点产生机理模型的有效性，并获取雨噪点在距离、强度和空间分布上的统计特性，本文基于半解析蒙特卡洛方法开展仿真实验。仿真目标包括：①分析不同降雨强度（10 mm/h、60 mm/h、120 mm/h、180 mm/h）对雨杂波波形及点云特征的影响；②研究不同目标距离（10 m、30 m、50 m、70 m、90 m）下目标回波与雨杂波的相对关系；③通过与经典激光雷达方程（LiDAR Equation, LE）模型的对比，评估所提机理模型的准确性和先进性。仿真得到的波形可用于提取距离、强度特征，并作为后续特征鉴别和抑制算法的物理基础。

（1）不同降雨强度下的回波仿真结果

仿真中考虑 4 种降雨强度：20, 60, 120, 180 mm/h，覆盖小雨至暴雨范围，以验证模型在不同雨强下的适应性，每个雨强下，根据 M-P 分布生成对应的雨滴粒径与空间浓度，模拟均匀降雨场。在仿真环境中设置 100 m 处标准目标，用于同时生成目标回波，以检验模型区分目标与噪声的能力，如图 4 所示。

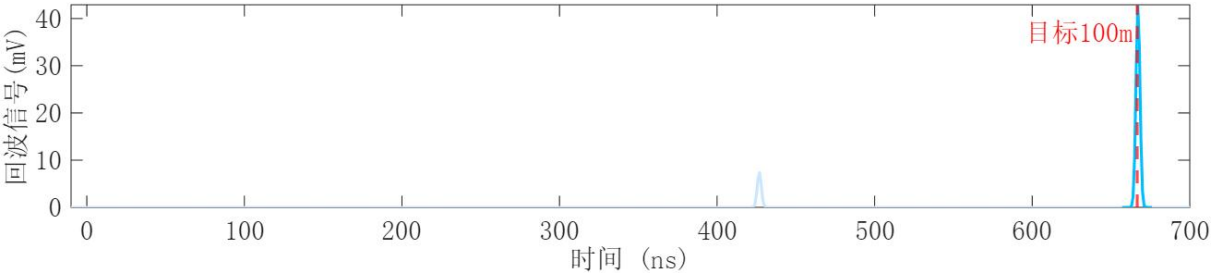
分析不同降雨量下的回波仿真结果，可以得到以下结论：

1) 雨杂波强度随降雨强度增加而显著增强：从波形图中可观察到，随着降雨量从 10 mm/h 增加到 180 mm/h，回波信号中雨杂波的峰值幅度明显上升。这是由于降雨强度增大导致单位体积内雨滴数量增多（符合 M-P 分布），激光束路径上参与散射的雨滴有效截面之和增大，雨杂波接收功率随之增强。

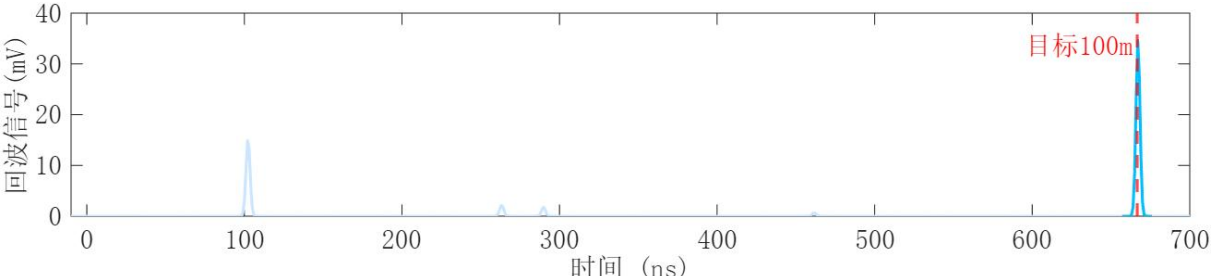
2) 雨杂波在时间（即距离）维上产生的概率增加：低降雨强度下，雨杂波主要集中在较窄的时间区间内；随着降雨强度升高，雨杂波出现的时域范围显著展宽，覆盖更多距离单元。这是因为高雨强下随机分布的雨滴在更大空间范围内产生可探测的后向散射，导致点云中噪声点的距离分布更加分散。

3) 目标回波与雨杂波的可区分性降低：在 20 mm/h 时，目标回波与背景雨杂波对比明显；当雨强增大后，雨杂波幅度逐渐接近甚至超过弱目标回波，目标信号可能被雨杂波淹没。这说明单纯依靠强度阈值难以在高雨强下可靠分割目标与噪声。

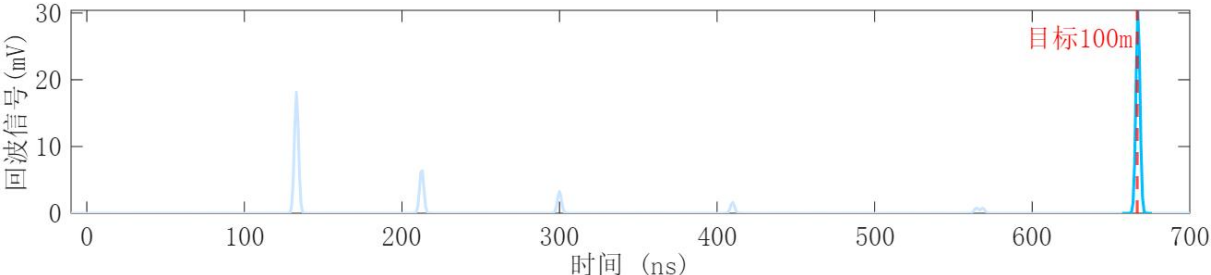
4) 雨杂波波形保持高斯形状：各降雨强度下的雨杂波回波仍保持与发射脉冲一致的高斯波形，仅峰值强度和到达时间随机变化。



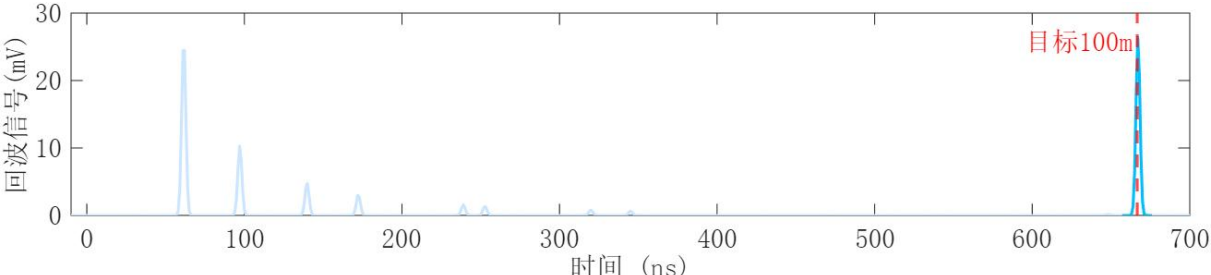
(a) 降雨量 20 mm/h 时回波仿真结果



(b) 降雨量 60 mm/h 时回波仿真结果



(c) 降雨量 120 mm/h 时回波仿真结果



(d) 降雨量 180 mm/h 时回波仿真结果

图 4 不同降雨量下回波仿真结果

(2) 不同目标距离下的回波仿真结果

在仿真实验中，将目标设置为不同距离（10 m、30 m、50 m、70 m、90 m），以观察目标距离对雨杂波及目标回波的影响，如图 5 所示。

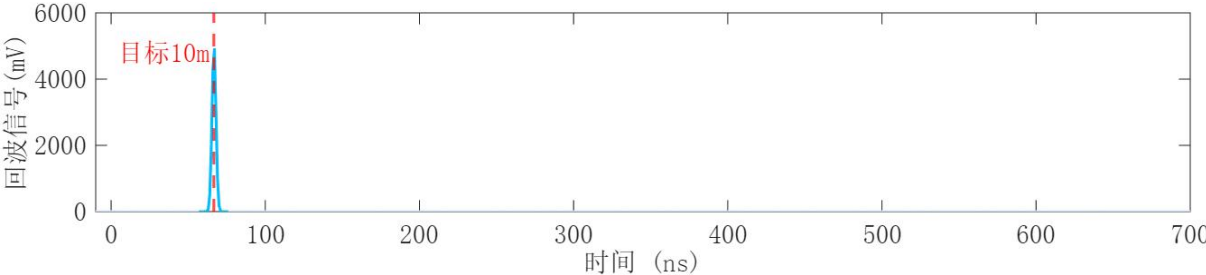
分析不同目标距离下的回波仿真结果，可以得到以下结论：

1) 目标回波时间随距离线性增加：仿真波形中目标回波峰值出现的时间与目标距离成正比，符合飞行时间测距原理，验证了模型在时间维度上的准确性。

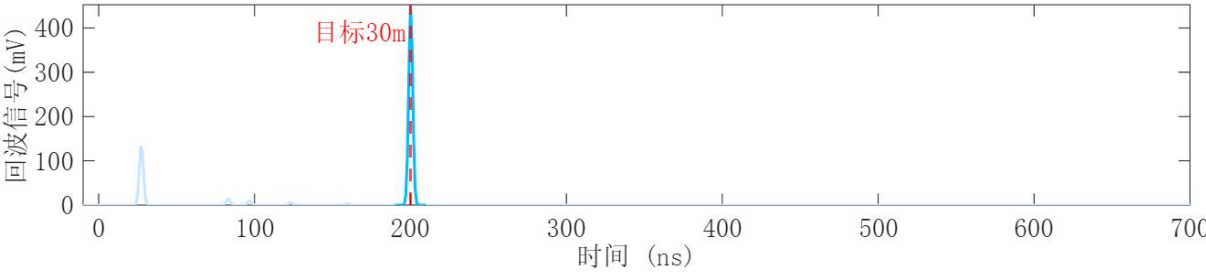
2) 目标回波强度随距离衰减：随着距离增大，回波峰值强度逐渐降低，符合激光雷达方程中接

收功率与距离平方成反比的规律。

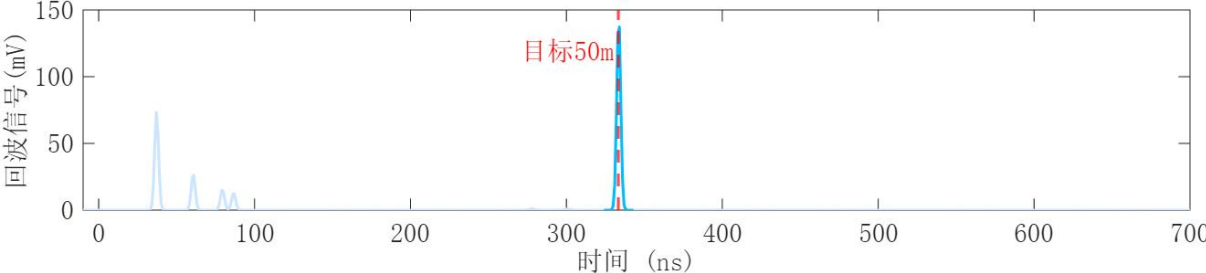
3) 目标与噪声的可区分性随距离增加而变差：近距离（10 m）目标强度远高于噪声，易于识别；70 m 以上目标强度衰减，90 m 以上时目标可能被雨杂波掩盖。



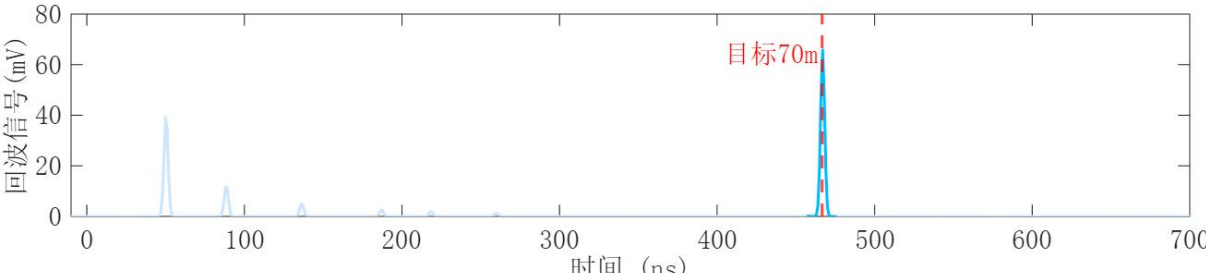
(a) 目标距离 10 m 时回波仿真结果



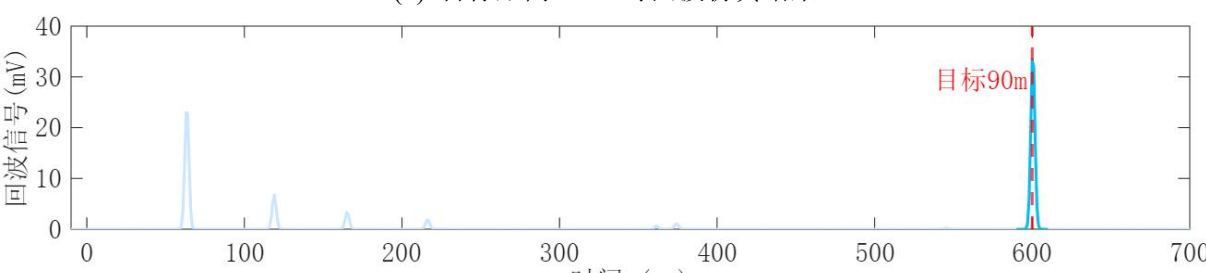
(b) 目标距离 30 m 时回波仿真结果



(c) 目标距离 50 m 时回波仿真结果



(d) 目标距离 70 m 时回波仿真结果



(e) 目标距离 90 m 时回波仿真结果

图 5 不同目标距离下回波仿真结果

(3) 机理模型性能评估

为体现所提机理模型的先进性，选取激光雷达方程（LiDAR Equation, LE）作为对比方法。LE方法基于宏观能量衰减模型，忽略多次散射与光子路径随机性，是传统雨杂波仿真的典型代表。

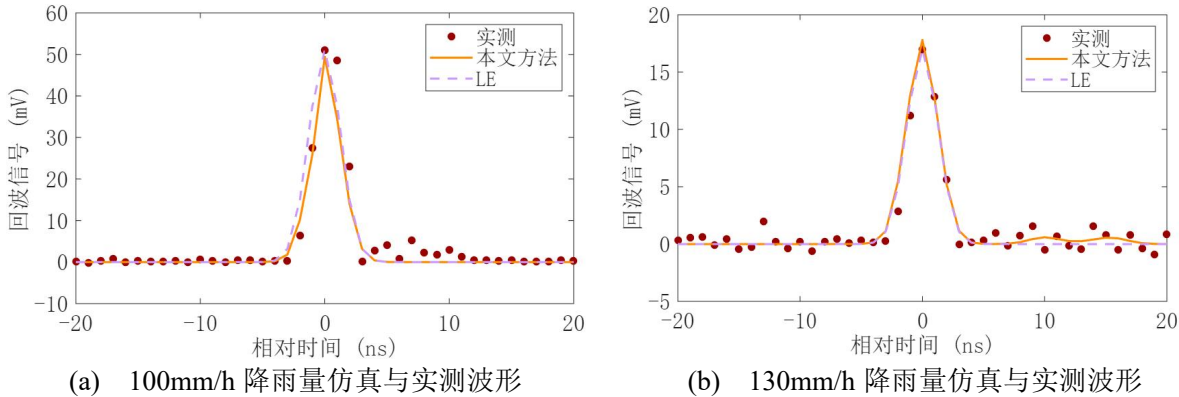


图 6 不同方法雨回波仿真结果与实测对比

表 1 不同降雨条件下仿真与实测决定系数 R^2 取值

降雨量(mm/h)	40	70	100	130	180
仿真方法					
LE	0.9014	0.9266	0.9198	0.9544	0.9276
本文方法	0.9021	0.9379	0.9295	0.9494	0.9230

本文所提方法与 LE 传统模型的仿真结果与实测数据对比如图 6 所示，对应的决定系数 R^2 如表 1 所示。本文方法与 LE 传统模型均满足 $R^2 > 0.9$ ，具有较高的拟合度，但本文模型通过模拟光子-雨滴的微观相互作用过程，揭示了雨噪点在距离、强度及空间分布上的统计规律，为后续特征鉴别与抑制算法提供了物理依据。

3.2 雨噪点特征鉴别及抑制

(1) 特征鉴别仿真实验

为准确刻画雨噪点在距离、强度和邻域点数三个维度的统计特性，本文基于激光雷达系统参数与雨滴散射特性的物理模型，通过蒙特卡洛仿真获得不同降雨强度下的噪声分布，并分别采用高斯函数、Burr 分布和指数函数进行拟合，建立了具有明确物理含义且拟合优度均高于 0.96 的置信度函数，如表 2 所示，为后续综合置信度判决提供了可靠的理论基础。

表 2 不同降雨强度下单特征置信度拟合优度

降雨强度	$S_R(\cdot)$	$S_I(\cdot)$	$S_N(\cdot)$
20 mm/h	0.9985	0.9726	0.9641
50 mm/h	0.9875	0.9678	0.9524
120 mm/h	0.9403	0.9768	0.9600
150 mm/h	0.9830	0.9771	0.9815
200 mm/h	0.9926	0.9832	0.9844
总体	0.9969	0.9882	0.9652

仿真与实测距离置信度曲线如图 7 所示，形态高度一致，均呈单峰分布，峰值位于 6 m 附近，说明在该距离处，激光束与雨滴相互作用产生的后向散射回波最容易被探测器接收，即雨噪点在此距离出现的概率最大。近距离（小于峰值）时，激光束发散角小，光束截面小，与雨滴相遇概率低，雨噪点较少；远距离（大于峰值）时，虽然光束扩大、雨滴数量增多，但激光衰减增强，回波功率迅速下降，低于探测器阈值；峰值位置正是两者平衡点，后向散射能量最强。最终在约 12 m 后衰减至零，标志着超出有效探测范围后雨噪点无法被可靠接收，目标与雨噪点区分明显，因此距离可作为区分噪声与目标的关键指标。然而，在峰值附近雨噪与目标置信度高度重叠，仅凭距离无法准确区分，近距离低反射率目标与远场高反射率目标可能落入相同距离区间。

强度置信度曲线如图 8 所示，峰值位于 5 mW 附近，代表雨滴后向散射回波能量最可能出现的强度水平，反映了雨滴粒径分布与 Mie 散射截面共同作用下的统计集中区域；曲线在 50 mW 后衰减至零，构成可探测雨噪声的能量上限，高于该阈值的回波极大概率来自实体目标，因此强度可作为区分噪声与目标的关键指标。然而，单特征鉴别能力存在明显局限，在低能量区域雨噪与弱目标回波严重重叠，仅凭强度无法准确区分。

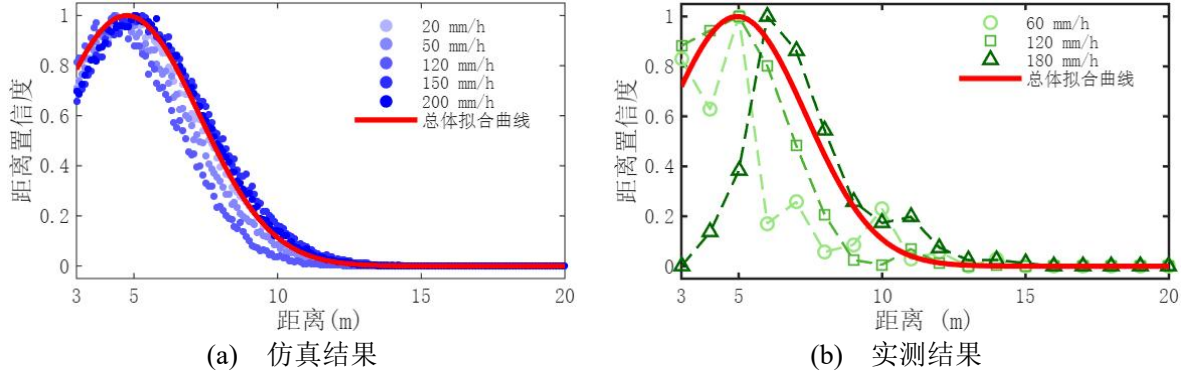


图 7 雨杂波距离置信度分布

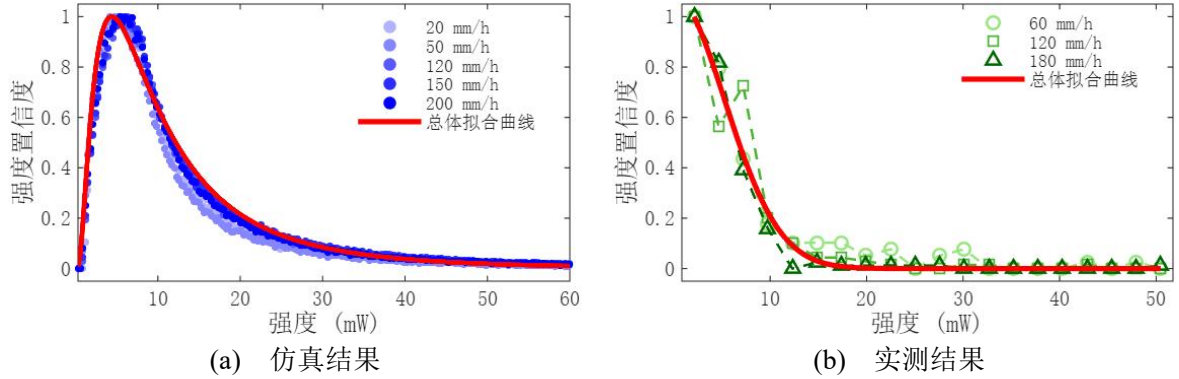


图 8 雨杂波强度置信度分布

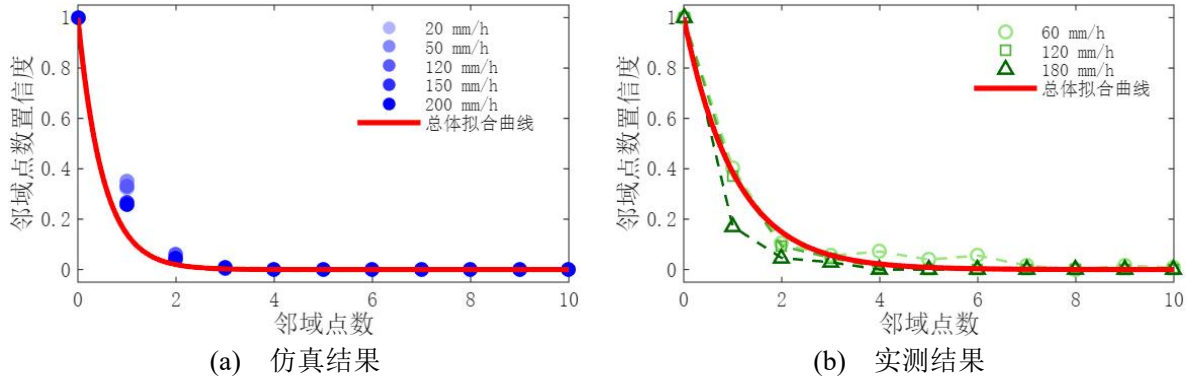


图 9 雨杂波邻域点数量置信度分布

邻域点数量置信度曲线如图 9 所示，呈现单调递减形态，随邻域点数增加置信度迅速下降，反映了雨噪点在空间分布上的稀疏性和随机性：真实目标往往形成空间聚集的团状点云，而雨噪点由于雨滴随机分布且单次散射占主导，在局部邻域内出现多个点的概率极低。仿真与实测曲线显示，邻域点数 0 时置信度为 1，代表孤立点最可能是噪声；邻域点数 ≥ 1 时置信度骤降至 0.4 以下，邻域点数 ≥ 4 时置信度已趋近于零，表明雨噪点几乎不会出现 4 个以上的密集聚集。

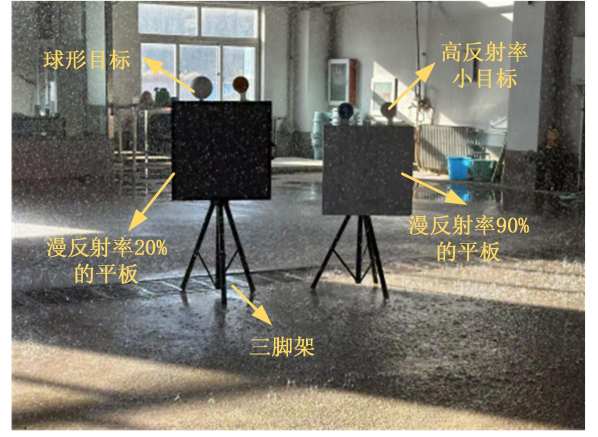
邻域特征具有独特的判别优势，零邻域点（孤立点）几乎可以确认为雨噪，可直接滤除；高邻域点数 (≥ 4) 几乎可确认为目标，可直接保留。但在邻域点数 1-3 的中等重叠区，雨噪与稀疏目标（如树冠边缘、远距离小目标）难以仅凭邻域区分。

(2) 雨噪点抑制实验

本实验基于已有实测数据集进行，旨在定量与定性评估所提雨噪点抑制方法的性能。该数据集针对一系列标准目标（漫反射率分别为 20% 和 90% 的平板、高反射率小目标以及球形目标）采集点云数据。数据集通过对比无雨条件下的实测数据，为每个点精确标注其类别（噪声点或目标点），从而构建用于算法评估的带标注基准数据集。

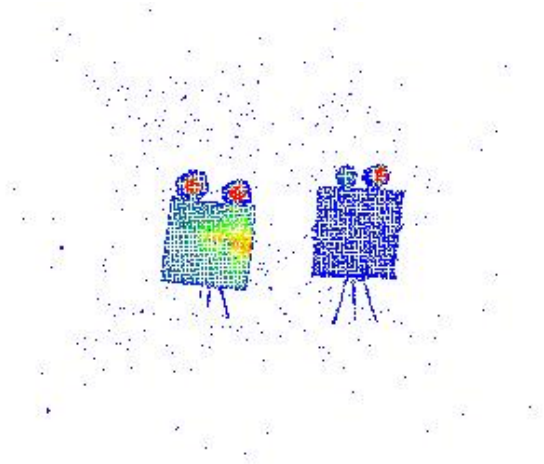


(a) 实验场景设置

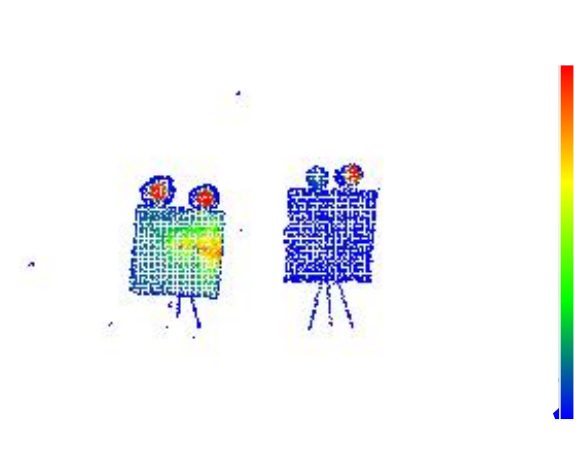


(b) 实验目标设置

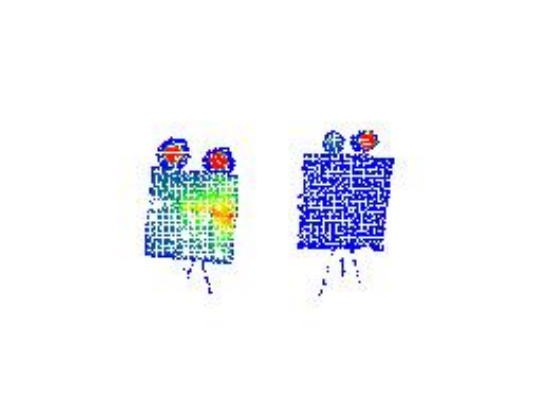
图 10 数据集场景及目标设置



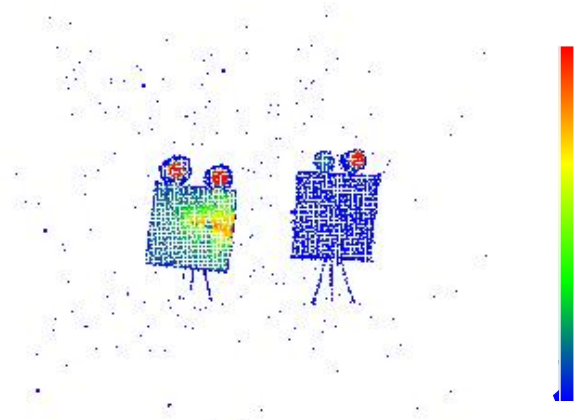
(a) 原始点云



(b) 去噪后点云 ($S_{thres}=0.23$)



(c) 去噪后点云 ($S_{thres}=0.03$)



(d) 去噪后点云 ($S_{thres}=0.5$)

图 11 不同阈值下雨噪点抑制结果

雨噪点抑制结果如图 11 所示，在最佳阈值 0.23 下，本文方法的综合去噪性能达到最优，点云

中的目标（如平板、球体、高反射率小目标）轮廓清晰、边缘完整，周围背景中的雨噪点基本消失，点云质量接近无雨条件下的理想状态。这一结果表明，在 Otsu 自适应阈值的选择下，综合置信度决策方法精准地实现了噪声与目标的分割，既保证了噪声的强力抑制，又最大程度地保留了对后续感知至关重要的有效信息，验证了该方法在雨噪抑制与目标保真之间的优异平衡能力。

对比三组不同阈值下的去噪效果：阈值小时，噪声抑制率高，但目标保留率较低，大量目标点被误删，平板和球形目标边缘轮廓模糊，三脚架出现缺失；阈值大时，目标保留率高，但噪声抑制率显著下降，点云中残留大量雨噪点，尤其在目标周围形成密集的雨噪点团；阈值 0.23 时，既继承了高阈值对目标的高度保护，又保留了低阈值对噪声的强力抑制，充分验证了 Otsu 自适应阈值选择的有效性。

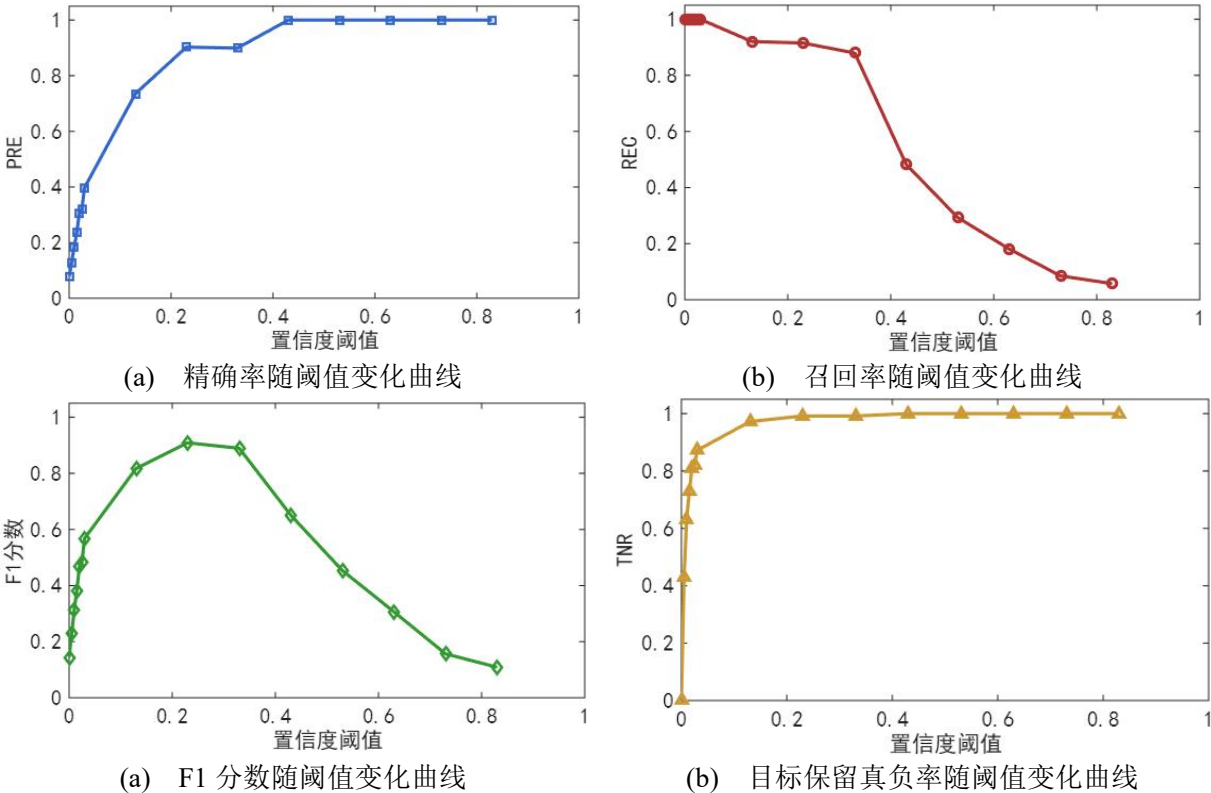


图 12 性能指标随置信度阈值变化曲线

(3) 消融实验

消融实验结果如图 13 所示，性能指标如表 3 所示，结果表明，单一特征中，距离特征具有最高目标保留率，但其噪点抑制率较低，表明其对噪点的识别能力较弱，存在较多漏检；强度特征与邻域点数特征在噪点抑制率上有所提升，目标保留率仍保持在 0.98 以上的高水平，综合性能优于距离特征。三特征融合的综合置信度方法在保持高目标保留率的同时，将噪点抑制率提升至 90%以上，F1 分数与 G-Mean 综合指标显著优于任一单一特征，验证了距离、强度与邻域点数的互补性以及多特征融合策略在雨噪点抑制中的有效性。

表 3 消融实验性能指标对比

特征	PRE	REC	TNR	F1 分数	G-Mean
单距离	1.0000	0.8000	1.0000	0.8889	0.8944
单强度	0.8537	0.8630	0.9876	0.8583	0.9232
单邻域点数	0.8983	0.8712	0.9917	0.8846	0.9295
综合置信	0.9027	0.9151	0.9917	0.9088	0.9526

三特征融合的综合置信度方法在保持高目标保留率的同时，将噪点抑制率提升至 90%以上，F1

分数与 G-Mean 综合指标显著优于任一单一特征，验证了距离、强度与邻域点数的互补性以及多特征融合策略在雨噪点抑制中的有效性。

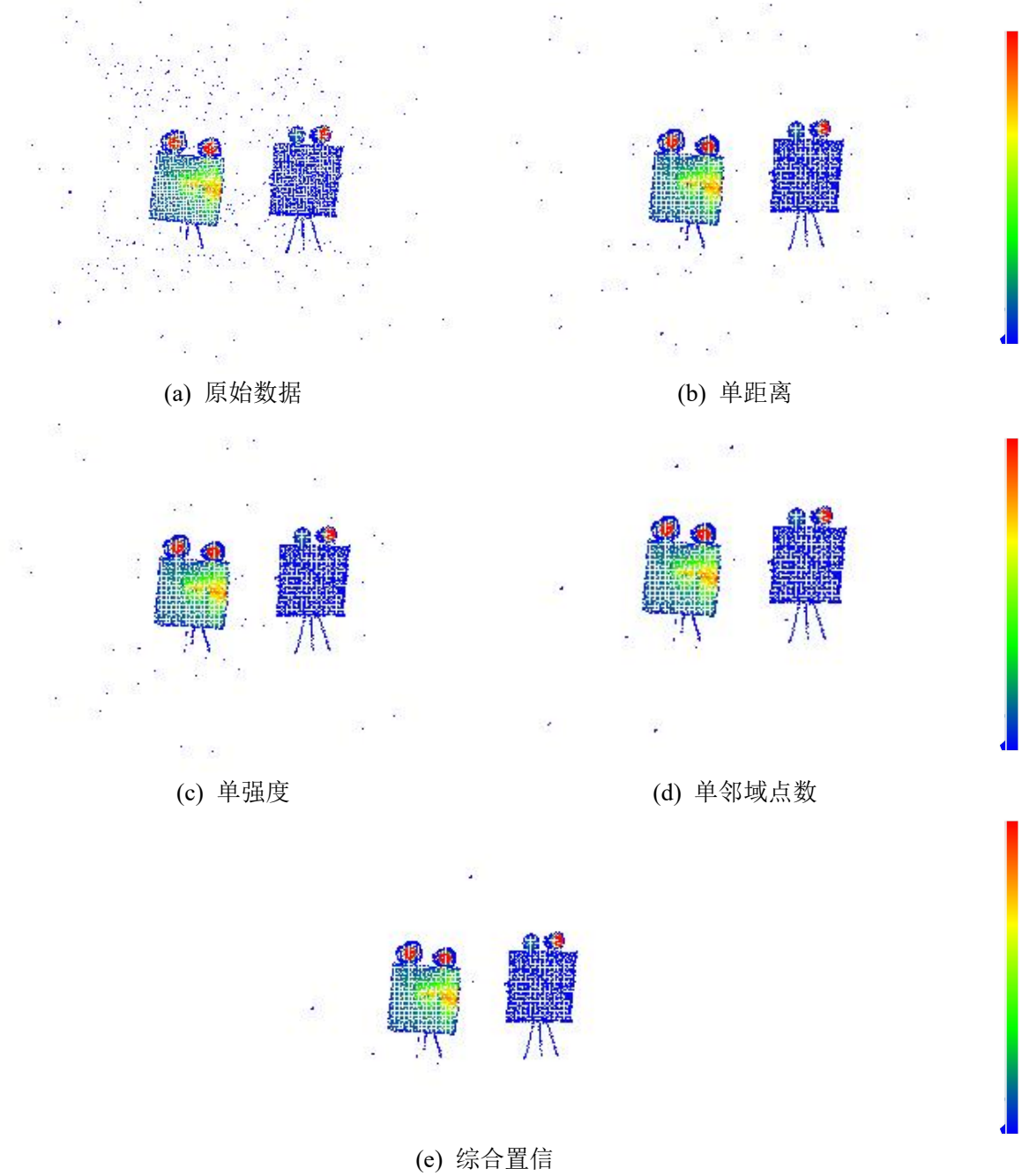


图 13 消融实验结果

(4) 对比实验

从图 14 可以看出，本文方法在噪点抑制及保持目标完整性方面显著优于其他方法，原始点云中雨噪点密集，目标轮廓被大量雨噪点掩盖；SOR 存在明显的噪声残留，ROR 虽抑制了大部分噪声，但存在明显的目标边缘丢失；DROR 对目标保留较好，但远处目标仍有噪声附着；LIOR 和 DIOR 强度滤波后，低强度目标（如 20%漫反射平板）出现明显的点云稀疏甚至缺失；而本文方法在清除背景雨噪点的同时，基本完整保留了所有目标（平板、球体、高反射率小目标）的轮廓与细节，去噪后点云质量大幅提升。

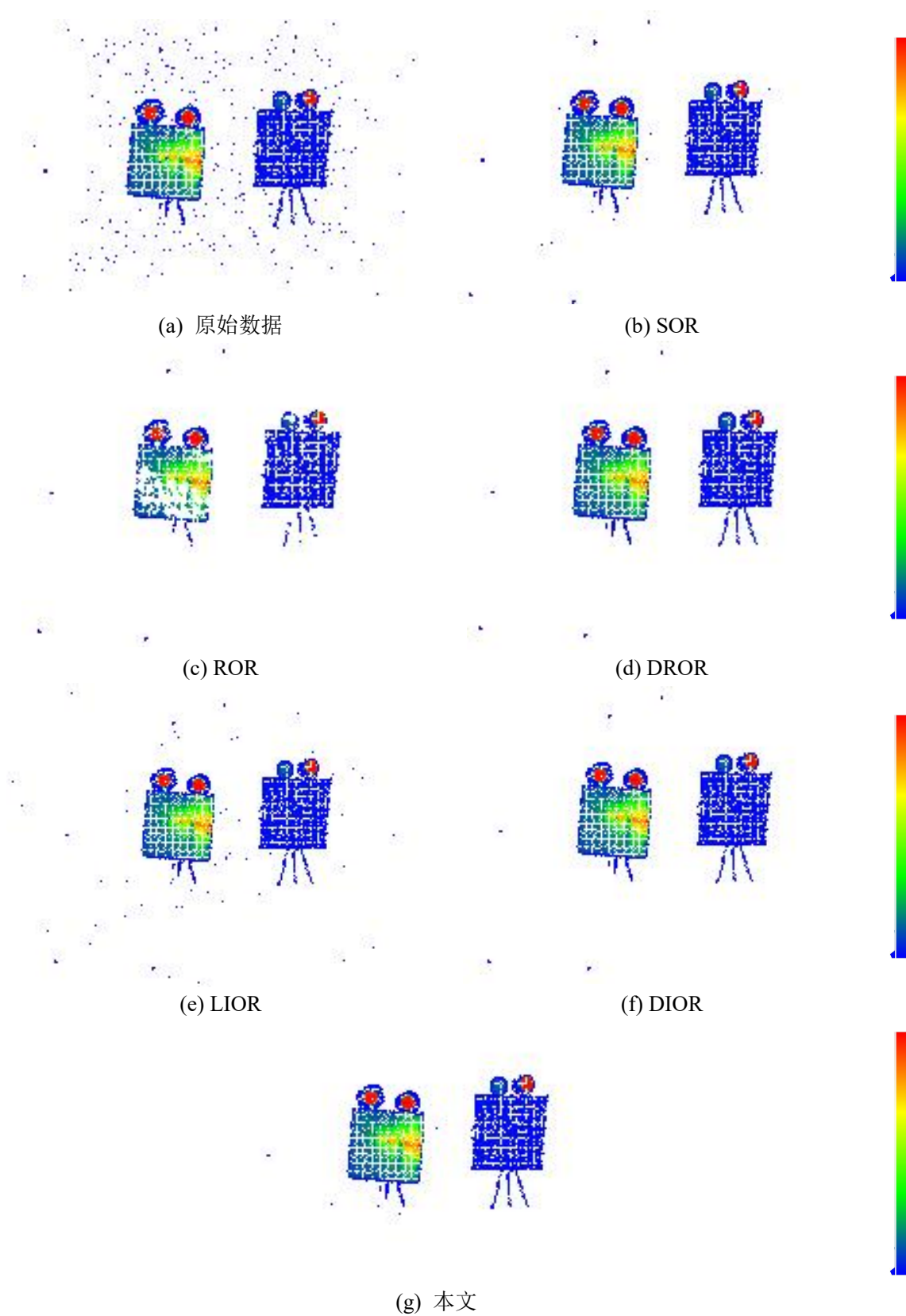


图 14 不同方法噪点抑制性能对比图

不同方法性能指标对比如表 5 所示，本文方法在噪点抑制率（召回率）上达到 91.51%，显著高于其它传统方法，是所有对比方法中唯一召回率超过 90% 的方法，体现了其卓越的噪点抑制能力；在目标保留率（真负率）方面，本文方法达到 99.17%，位居前列，表明其对真实目标的保护能力极

强，G-Mean 达到 95.26%，为所有方法中最高，单帧点云处理时间 3.55 ms，即 0.71 us/点，为所有方法中最快，具有优越性能。

表 4 不同方法性能指标对比

方法	PRE	REC	TNR	F1 分数	G-Mean	单帧处理 时间(s)
SOR	0.9904	0.8438	0.9993	0.9112	0.9183	0.00454
ROR	0.2230	0.8822	0.7416	0.3560	0.8088	0.17049
DROR	0.9554	0.8795	0.9965	0.9158	0.9362	0.17881
LIOR	0.6071	0.6986	0.9620	0.6497	0.8198	0.14039
DIOR	0.6492	0.8822	0.9599	0.7480	0.9202	0.19418
本文方法	0.9027	0.9151	0.9917	0.9088	0.9526	0.00355

本文方法在噪点抑制率、目标保留率及综合性能上均表现优异，实现了去噪效果与目标保真度的最佳平衡，具备良好的实时处理能力。这一优异表现源于其物理驱动的置信度建模、熵权法的自适应特征融合以及 Otsu 的无监督阈值分割，使算法在不同降雨强度与目标场景下均能精准区分噪声与目标。

综上，本文提出的基于综合置信度决策的雨噪点抑制方法，在定量指标与定性效果上均显著优于现有经典方法，尤其在处理效率、目标保留与噪点抑制的综合平衡上表现出明显优势，具备面向实际应用的在线处理潜力。

3.3 雨噪点抑制的 FPGA 在线处理系统与实验验证

3.3.1 基于 FPGA 的雨噪点在线抑制实现

为验证所设计在线处理系统的性能，从处理速度和资源占用两个维度进行评估。

(1) 处理速度

本文所用 FPGA 板卡主时钟频率为 250 MHz，时钟周期为 4 ns。通过 HLS 综合报告分析，若各模块直接串联，总延迟约 339 个时钟周期（1.356 μs）。但通过本文所设计的流水线与时分复用架构，波形采集、参数解算与置信度判决流水线重叠执行，核心置信度判决模块的启动间隔仅为 23 个时钟周期（92 ns），理论吞吐率可达 10.87 MHz。实际系统配合激光器重复频率（最大 1 MHz）工作时，能够实时处理所有回波数据，无数据丢失，实现了微秒级在线处理。相比于传统软件后处理方式（毫秒级），处理速度提升了两个数量级以上，为复杂天气下激光雷达的实时雨噪抑制提供了充足的带宽裕量。

(2) 硬件资源占用

系统在 Xilinx Zynq XC7Z100 FPGA 上的资源占用情况如表 6 所示。所有资源的利用率均在 20% 以下，为后续功能扩展留有余量。

表 5 不同模块资源开销

	LUT 查找表	寄存器	DSP	BRAM
板卡资源总量	277400	554800	2020	1510
在线处理模块总和	19537	24867	29	232
资源开销占比	7%	4%	1%	15%

在线测距需要占据大量硬件资源，本文所用 FPGA 硬件资源包括 LUT 查找表、寄存器、数字信号处理器 DSP 与 BRAM。为保证本文所提方法的可行性，对硬件资源开销进行分析，通过 Vivado HLS 软件对上述方法进行综合。

由资源报告可知，整个在线处理模块共消耗 LUT 查找表 19537 个（占比 7%）、寄存器 24867 个（占比 4%）、DSP 单元 29 个（占比 1%）、块 RAM 232 个（占比 15%）。所有资源的利用率均在 20% 以下，为后续功能扩展留有余量。

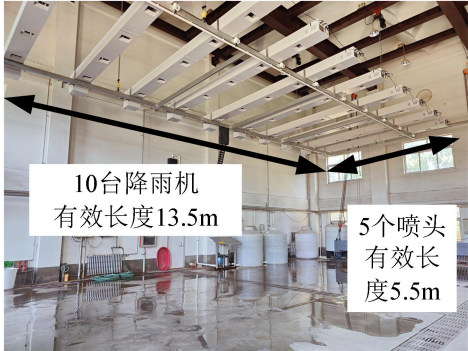
综上，本章设计的 FPGA 在线处理系统在速度和资源方面均达到了预期指标，为复杂天气下激光雷达的实时雨噪抑制提供了可靠的硬件平台。

3.3.2 雨场环境实测

在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室人工模拟降雨大厅开展可调控雨场实验，如图 16 所示，降雨大厅内装备有室内人工模拟降雨系统，即 10 台可控式摆喷头下喷人工降雨机及其配套的水电供应设备。降雨机间隔为 1.5 m，该方向上有效长度为 13.5 m。每台降雨机具备 5 个喷头，喷头间距 1.1 m，总长 5.5 m。降雨大厅可模拟 10-180 mm/h 雨强，如图 16 所示，雨滴尺寸分布、动能和均匀性均与自然降雨接近。



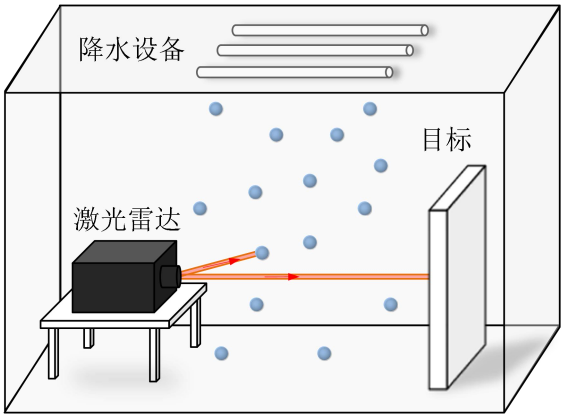
(a) 人工模拟降雨大厅外部



(b) 人工模拟降雨大厅内部

图 16 降雨模拟实验场地

实验设置目标类型、降雨强度两个变量，验证所提方法的可行性。目标包括两个交通标志牌、一辆自行车、一个拉杆箱和一个打伞的人。在 18 种降雨强度（10-180 mm/h）下，对每个目标各采集三次点云数据，以获取具有统计意义的数据集。在人工降雨大厅中，固定激光雷达与各目标位置，雨场采集数据时，保证系统与降雨区域保有约 5 m 的距离，如图 17 所示。



(a) 实验场景设置示意图



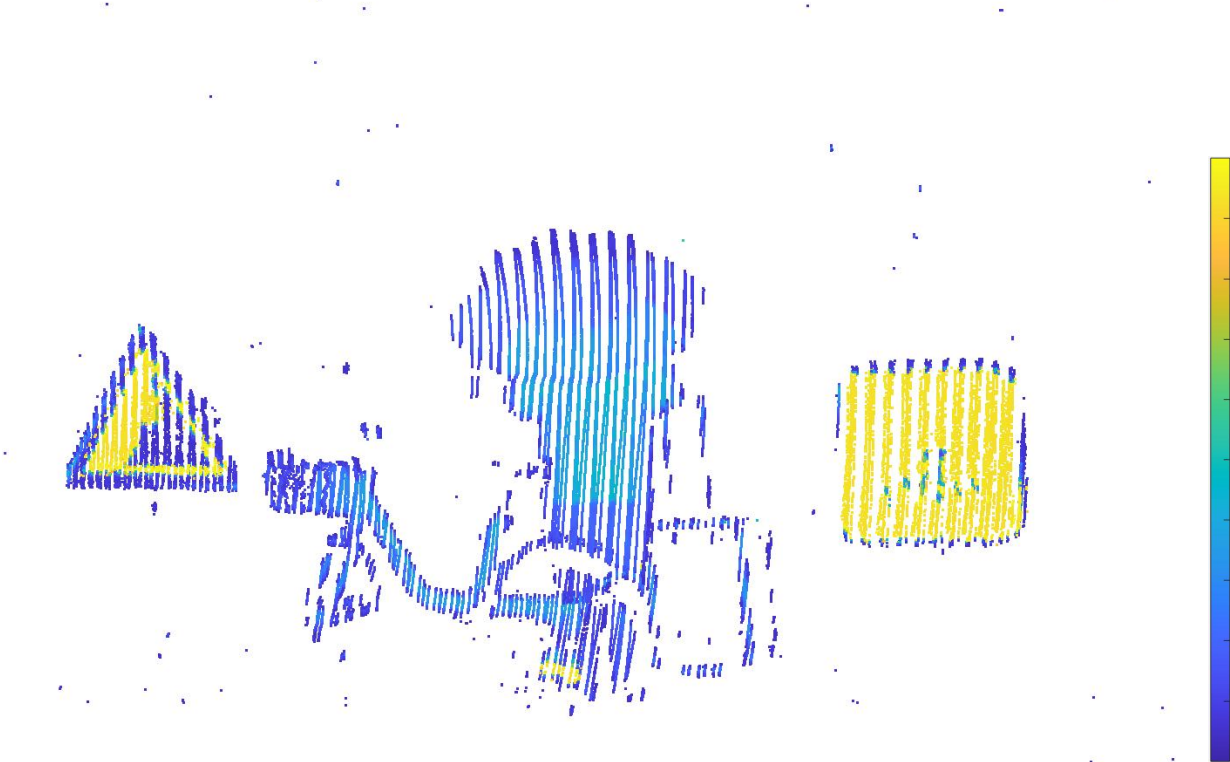
(b) 实验场景设置

图 17 雨场数据采集实验设置

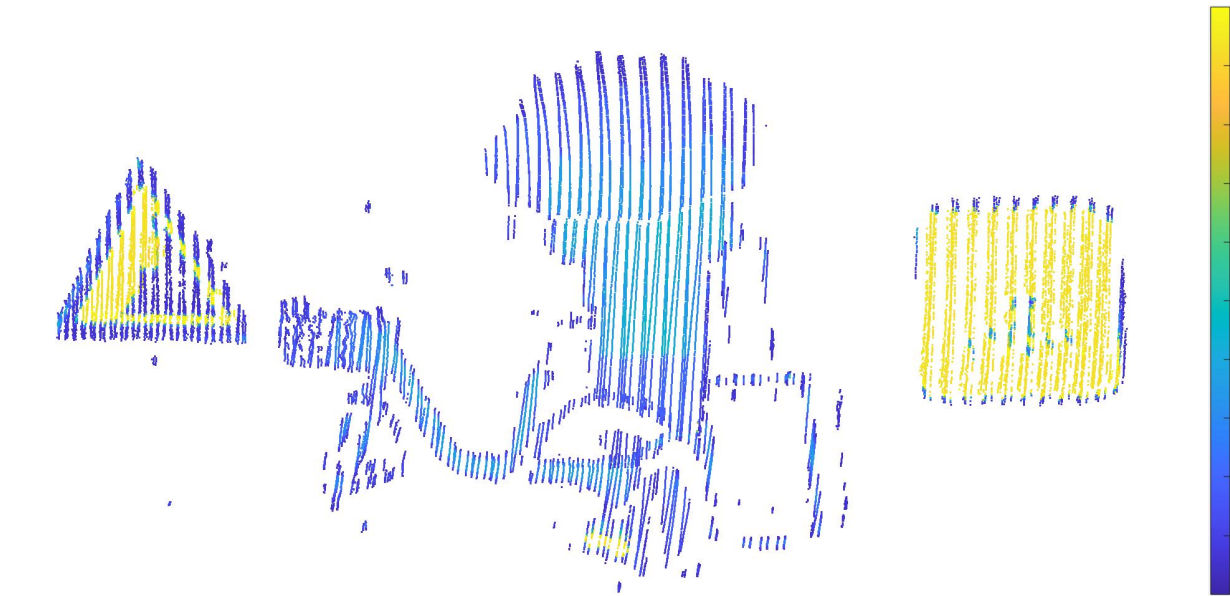
同时，以无雨条件下采集的同场景点云作为纯净目标点云真值，并通过人工精确标注从雨噪点云数据中辨识出真实的噪声点，共同构成基准真值数据集，用于计算各项性能指标。

由图 18 可得，在较小降雨强度下，原始点云中雨噪点数量相对较少且分布较为稀疏，但依然在目标周围形成弥散状噪声，部分低强度目标的边缘轮廓受到干扰。经本文方法去噪后，雨噪点基本被滤除，目标点云轮廓清晰、边缘完整，且误删极少，表现出高目标保留率与良好噪点抑制能力，

验证了方法在中弱降雨环境下的有效性。

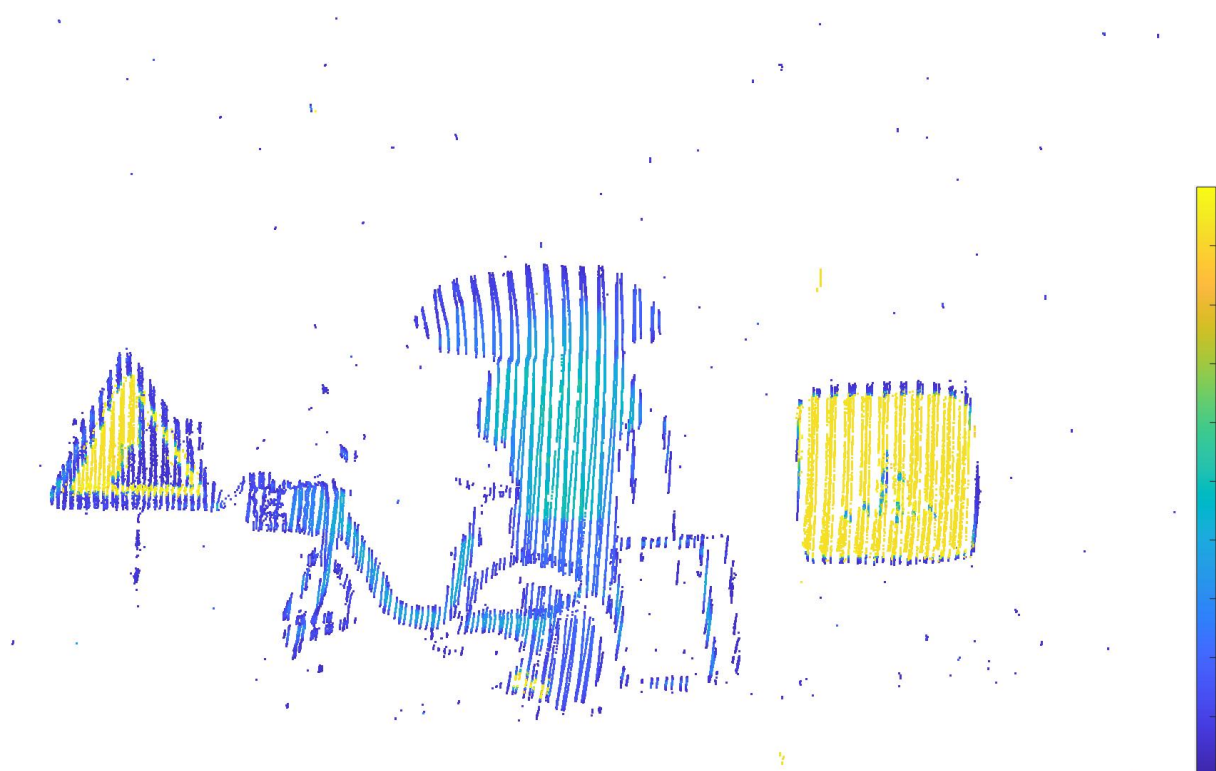


(a) 降雨强度 80 mm/h 去噪前

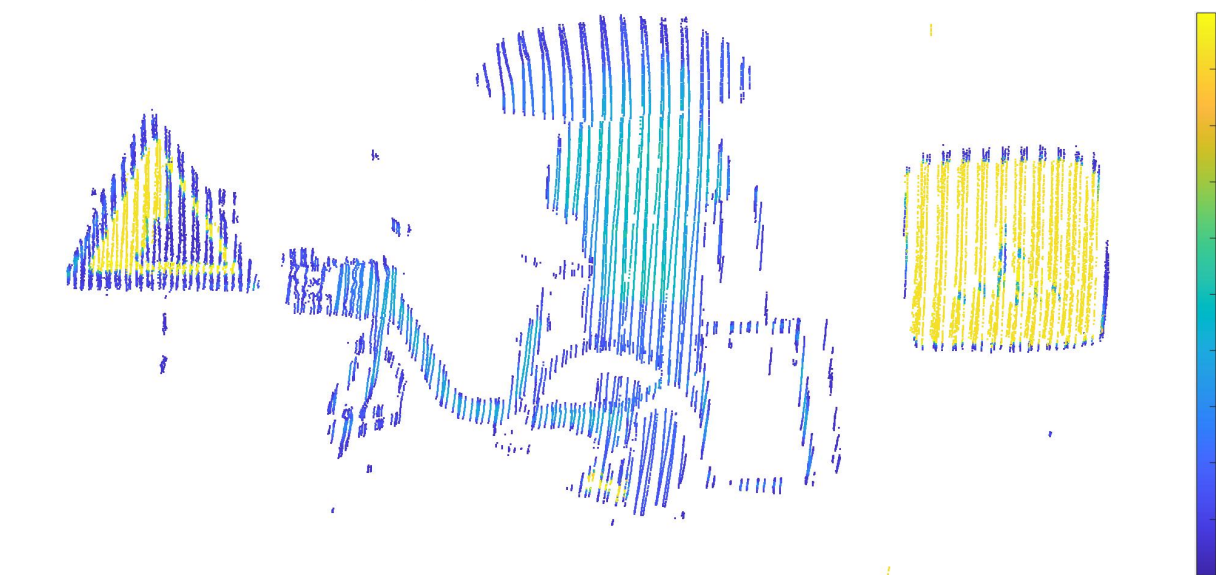


(b) 降雨强度 80 mm/h 去噪后

图 18 降雨强度 80 mm/h 去噪前后对比图



(a) 降雨强度 180 mm/h 去噪前



(b) 降雨强度 180 mm/h 去噪后

图 19 降雨强度 180 mm/h 去噪前后对比图

由图 19 可得，在大雨强条件下，原始点云中的雨噪点数量明显增加，分布密集且范围广泛，目标点云几乎被噪声淹没。与小雨情况相比，大雨时的噪声密度和覆盖范围显著提升，对算法的抑制能力提出了更高要求。经本文方法去噪后，虽然目标周围仍有极少量高密度噪声残留，但大部分雨噪点被有效滤除，目标的主要结构轮廓得以清晰恢复，去噪效果较好，验证了所提方法在强降雨环境下的有效性。

四、结论

激光雷达在雨天环境下因雨滴散射产生大量噪声点，严重影响点云质量与目标识别可靠性，制约了其在自动驾驶、智能测绘等领域的全天候应用。针对雨噪点产生机理不明、传统滤波方法特征单一鲁棒性不足、缺乏系统化雨场实验验证等问题，本文开展激光雷达雨噪点产生机理与抑制方法研究。本文建立雨噪声产生机理模型，揭示雨噪点在距离、强度和空间分布上的统计规律；提出融合距离、强度与邻域点数的时空特征综合置信度决策方法，实现噪声与目标的准确分割；搭建基于 FPGA 硬件平台的雨噪在线抑制系统，并开展雨场实验验证。本文主要工作及结论如下：

（1）本文建立基于 Mie 散射理论与蒙特卡罗光子追踪方法的雨噪声产生机理模型，分析不同降雨强度和不同目标距离对回波波形的影响。提出决定系数 R^2 指标，评价仿真波形与实测波形的拟合程度。开展机理模型仿真实验，实验结果表明，所提模型在不同降雨强度下 R^2 均高于 0.9，与实测数据拟合良好，验证了雨噪点产生机理模型的有效性。

（2）本章研究激光雷达雨噪点特征鉴别与抑制方法，提出了基于时空特征综合置信判决的雨噪点抑制方法，主要环节包括激光雷达波形表征，雨噪点特征鉴别和基于综合置信度的雨噪点抑制。开展消融实验与对比实验，采用 G-Mean 指标评估雨噪点抑制结果。实验结果表明，三特征融合的综合置信度方法在 G-Mean 指标上达到 95.26%，显著优于单一特征和传统方法，验证了多特征融合的有效性，所提方法在噪点抑制率和目标保留率上均优于 90%。

（3）本文搭建基于 FPGA 硬件平台的雨噪在线抑制系统。置信度判决模块为核心创新单元，实现了距离置信度、强度置信度与邻域点数三个特征维度的并行硬件计算。系统测试结果表明，250 MHz 时钟频率下理论吞吐率达 10.87 MHz，实际系统配合激光器重复频率（最大 1 MHz）工作时，实现微秒级雨噪声处理速度。开展雨强参数可控的模拟雨场实验，实验搭载自研 1064 nm 双轴振镜激光雷达系统，设置不同目标类型和降雨量，在人工模拟降雨大厅采集可控降雨强度的点云数据。实验结果表明，针对不同降雨强度下的实测点云数据，所提方法实现噪点抑制率和目标保留率优于 90%，验证了所提出雨噪点抑制方法的可行性。