

文章编号: 1002-1582(2026)04-0481-10

一种基于多光谱偏振信息融合的 条纹像自适应重构方法

翟宇^{1,2}, 解森^{1,2}, 李文豪⁵, 李璇^{1,2}, 罗秀丽^{1,2}, 郭尚伟^{3,4*}, 王黎明^{1,2}

(1. 中北大学, 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室, 山西 太原 030051)

(2. 中北大学, 智能探测技术与装备山西省重点实验室, 山西 太原 030051)

(3. 北京航天自动控制研究所, 北京 100854)

(4. 宇航智能控制技术全国重点实验室, 北京 100854)

(5. 苏州职业技术大学, 电子信息工程学院, 江苏 苏州 215104)

摘 要: 针对传统条纹管激光雷达在复杂散射环境中对低反射率目标探测能力不足, 以及目标与背景反射率接近时成像对比度降低的问题, 构建了一种基于多光谱偏振的条纹管激光雷达成像系统, 并提出了一种多通道数据的自适应重构方法。该系统通过多光谱发射与偏振成像机制, 实现光谱信息与偏振信息的同步获取。在条纹像重构过程中, 利用同一波长下不同偏振分量的强度差异表征回波信号的散射特性与稳定性; 同时引入多通道深度中值抑制异常回波。通过上述方法, 实现多光谱、多通道深度信息的自适应加权融合。精确度实验结果表明, 在复杂场景下均方误差 (MSE) 较单波长方法降低了 53.5%, 标准差降低了 51.9%; 在对比度实验中, 与单波长强度图像和偏振度 (DOP) 图像相比, 所构建的 RGB 融合图像在对比度 (CST) 上显著提升, 由最高 0.2471 提高至 0.6242。方法为多光谱偏振条纹管激光雷达在复杂环境中的高精度成像提供了有效的解决方案。

关 键 词: 多光谱; 偏振; 条纹管激光雷达; 图像重构; 自适应融合

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

A streak image adaptive reconstruction method based on multispectral polarization information fusion

ZHAI Yu^{1,2}, XIE Sen^{1,2}, LI Wenhao⁵, LI Xuan^{1,2}, LUO Xiuli^{1,2}, GUO Shangwei^{3,4*}, WANG Liming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(2. Shanxi Key Laboratory of Intelligent Detection Technology & Equipment, North University of China, Taiyuan 030051, China.)

(3. Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China)

(4. National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, Beijing 100854, China)

(5. School of Electronics and Information Engineering, Suzhou Polytechnic University, Suzhou 215104, China)

Abstract: To address the limited detection capability of traditional streak tube imaging LiDAR for low-reflectivity targets in complex scattering environments, as well as the reduced image contrast when target and background reflectivities are similar, a multispectral polarization-based streak tube imaging LiDAR system is developed. An adaptive reconstruction

收稿日期: 2026-05-20; 收到修改稿日期: 2026-06-08

基金项目: 山西省基础研究计划 (202303021212207)

作者简介: 翟宇 (1992—), 男, 讲师, 博士, 从事目标探测识别研究。zhaiyu@nuc.edu.cn

郭尚伟 (1996—), 男, 工程师, 博士, 从事目标探测识别研究。

* 通讯作者: shwguo_12s@163.com

method for multi-channel data is also proposed. The system employs multi-wavelength emission and polarization imaging to acquire spectral and polarization information simultaneously. During streak image reconstruction, the intensity differences between polarization components at the same wavelength are used to characterize the scattering properties and stability of the echo signal. In addition, the multi-channel depth median is introduced as a reference to suppress abnormal echoes. Based on these strategies, adaptive weighted fusion of multi-wavelength and multi-channel depth information is achieved. Experimental results show that, in complex scenarios, the Mean Squared Error (MSE) is reduced by 53.5% and the standard deviation is reduced by 51.9% compared with the single-wavelength method. In terms of image contrast, the RGB fused image significantly outperforms single-wavelength intensity images and degree of polarization (DOP) images. The contrast separation metric (CST) increases from 0.2471 to 0.6242. The proposed method enables high-precision imaging for multispectral polarization streak tube imaging LiDAR in complex environments.

Keywords: multispectral; polarization; streak tube lidar; image reconstruction; adaptive fusion

0 引言

随着三维成像技术在复杂环境探测、远距离目标识别与三维重建等领域的快速发展,高分辨率、多维度信息获取能力已成为先进探测系统的重要发展方向。

在众多主动探测技术中,条纹管成像激光雷达(Streak Tube Imaging LiDAR, STIL)拥有独特的时间-空间转换机制。该系统通过将回波信号的时间信息映射为条纹图像中的空间位置信息^[1-4],实现高精度距离测量,并可同时获取强度与深度信息。得益于其较高的成像质量、空间分辨率、距离分辨率及高帧频特性,STIL在远距离目标探测等领域展现出重要的应用价值^[5-9]。

但在复杂背景、低对比度及强干扰条件下,传统单一信息维度的成像方式仅依赖强度与深度信息,难以实现稳定、可靠的目标识别与特征提取^[10]。尤其是在远距离探测与弱回波条件下,如何提升图像对比度、增强目标辨识能力,成为当前激光探测领域需要解决的关键问题。

为突破上述瓶颈,多光谱成像与偏振成像技术逐渐引入激光雷达系统中。多光谱成像通过获取不同波长下的反射信息,可揭示目标表面材料的光谱特性;偏振成像则通过分析回波光线的偏振状态变化,反映目标表面的几何形态、粗糙程度及散射特征。光谱信息与偏振信息具有互补性,将二者与条纹管成像机制相结合,从而明显提升成像对比度与目标判别能力^[11]。

然而,多光谱偏振信息的引入也带来了新的系统设计挑战。首先,在多光谱与多偏振通道条件下,多种信息的融合方式直接影响最终成像效果与深度测量精度,若缺乏合理的联合加权与约束机制,易导致信息冗余或融合失效。此外,在弱回波与噪声干扰条件下,不同波长与不同偏振分量的信号稳定性存在差异,如何实现图像稳定

的重构亦是系统设计中的关键问题。

针对上述问题,本文基于多光谱偏振条纹管成像激光雷达系统(Multi-Spectral Polarimetry Streak Tube Imaging LiDAR, MSP-STIL)开展研究,实现光谱信息、偏振信息与深度信息的协同获取,并提出一种面向多通道数据的自适应条纹像重构方法。本文主要工作如下:首先,构建多光谱偏振条纹管成像系统,实现目标强度、深度及偏振信息的同步获取;其次,利用同一波长下不同偏振分量的强度差异表征回波信号的散射特性与稳定性,并将其引入通道权重计算;进一步,引入多通道深度中值对异常深度回波进行抑制;最后,通过多种光谱信息、偏振信息进行自适应加权融合,实现深度信息的稳定重构,并通过精度实验和对比度实验验证所提方法的有效性。

综上所述,本研究所提出的多光谱偏振条纹管成像激光雷达系统在实现多维信息协同获取的同时,有效提升了复杂场景下的成像对比度与深度分辨率,为高精度远距离探测与目标识别提供了一种新的技术路径。

1 多光谱偏振条纹管激光雷达成像方法

为实现多光谱与偏振信息的协同获取,并提升条纹像重构精度,本研究在多光谱偏振条纹管成像激光雷达系统框架下开展研究。该系统通过多发射与偏振调制,实现多维信息同步获取,并结合改进的条纹像重构方法,提升回波信息利用效率^[12]。系统整体结构如图1所示。

1.1 激光发射系统与偏振态调制机制

1.1.1 多波长激光发射

系统采用多波长脉冲激光发射器作为系统的主动探测光源,同时发射三个特定波长(λ_1 、 λ_2 、 λ_3)的混合激光束。多波长设计能够获取目标在不同光谱下的反射特性,为后续多维信息获取提供基础。

本文选用355nm、532nm和1064nm三个波长,

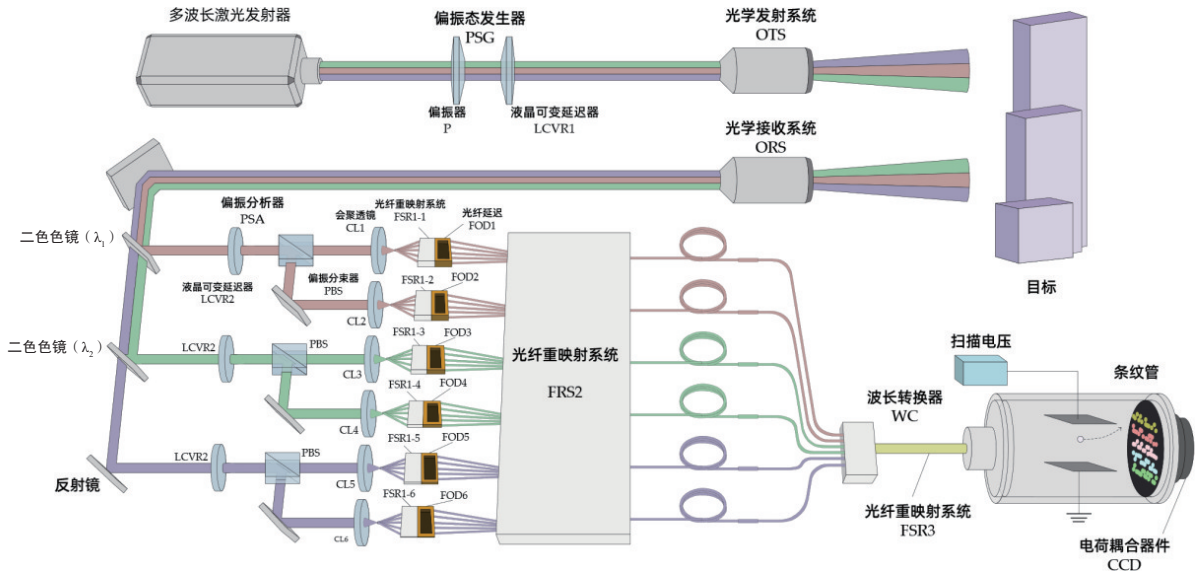


图1 MSP-STIL系统示意图

分别覆盖紫外、可见光和近红外波段，不同波段在目标反射特性及大气散射特性方面存在显著差异，能够提供互补信息。其中，短波长对散射变化更为敏感，而长波长具有更强的穿透能力与抗干扰能力，有助于提升复杂环境下的探测稳定性。该三种波长可由Nd:YAG（Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet）激光器通过倍频方式获得，具有良好的工程实现基础与系统兼容性。

发射激光的时间域能量分布近似服从高斯模型，其表示为

$$P_t(t) = \frac{E_t}{\tau\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2\tau^2}\right) \quad (1)$$

式中， E 为发射激光能量； τ 为脉冲宽度。

三种波长激光束随后进入偏振调制单元，实现入射光偏振态的精确控制。

1.1.2 偏振态生成机制

为获得具有特定偏振特性的入射光，系统在发射端设置偏振态生成器（Polarization State Generator, PSG）。该模块由液晶可变延迟器（Liquid Crystal Variable Retarder, LCVR）与偏振片（Polarizer, P）组成。其中，LCVR的快轴与空间坐标系Y轴呈45°夹角，可对不同波长激光产生特定相位延迟 δ_n ，偏振片的透射轴则与Y轴平行。基于液晶可变延迟器和偏振片的穆勒矩阵，可得出PSG系统的穆勒矩阵可写为^[13]

$$\mathbf{M}_{\text{PSG}}(\delta_\lambda) = \mathbf{M}_{\text{LCVR}}(45^\circ, \delta_\lambda) \mathbf{M}_P(0^\circ) \quad (2)$$

并遵循以下公式

$$\mathbf{M}_{\text{PSG}}(\delta_\lambda) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ \cos \delta_\lambda & \cos \delta_\lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \delta_\lambda & \sin \delta_\lambda & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在该调制作用下，入射的非偏振激光（以归一化斯托克斯矢量表示）被转换为具有特定偏振态的激光，其偏振态表示为

$$\mathbf{S}_{t-\lambda n} = \mathbf{M}_{\text{PSG}}(\delta_{\lambda n}) \mathbf{S}_{\lambda n} = [1 \quad \cos \delta_\lambda \quad 0 \quad \sin \delta_\lambda]^T \quad (4)$$

调制后的激光束进入光学发射系统（Optical Emission System, OES）进行整形与扩束处理，以确保激光在空间上均匀、稳定地照射至目标区域。

1.2 激光与目标的相互作用模型

当三种波长的偏振激光照射目标表面时，激光与目标表面发生相互作用，其回波信号的强度与偏振态均受到目标反射特性影响。回波信号强度满足雷达距离方程

$$\begin{cases} I_{\text{irr}}(t) = \frac{4\tau_a P_t(t)}{\pi(\theta_t R)^2} \\ I_{\text{rec}}(t) = I_{\text{irr}}\left(t - \frac{2R}{c}\right) \frac{\tau_a \rho(dA)}{R^2 \theta_r} \\ P_{\text{det}} = I_{\text{rec}}(t) \frac{\tau_o \pi D_R^2}{4} + N_{\text{noise}} \end{cases} \quad (5)$$

式中， θ_t 为发射激光束角发散度， θ_r 为目标表面角散射度； R 为探测器与目标的距离； τ_o 为光学系统透射效率， τ_a 为大气透射系数； ρ 为目标表面反射率； D_R 为接收光学透镜半径； dA 为反射激光接收面积； N_{noise} 为噪声信号（含激光散斑、热噪声和背景噪声）^[14,15]。

在单模配置条件下（目标区域无双折射材料），目标表面可用4×4对角穆勒矩阵描述

$$\mathbf{M}_\lambda = \text{diag}[m_{00}^\lambda \quad m_{11}^\lambda \quad m_{11}^\lambda \quad m_{33}^\lambda] \quad (6)$$

式中， m_{00}^λ 反映目标表面反射率； m_{11}^λ 和 m_{33}^λ 表征目标表面偏振特性。根据式（5），入射激光经目标反射后，偏振态变为

$$S_{rec-\lambda n}^{i,j} = M_{\lambda n}^{i,j} S_{irr-\lambda n}^{i,j} \ln \left(t - \frac{2R^{i,j}}{c} \right) \frac{\tau_a \rho(dA)}{R^2 \theta_R} \quad (7)$$

式中, $S_{irr-\lambda n}^{i,j}$ 为照射到目标局部区域的激光偏振态, R^{ij} 为目标局部区域与系统的距离。

1.3 回波信号接收与成像流程

接收过程的核心是对目标反射的多种波长的偏振态回波信号进行分离、延迟和传输处理, 确保信号有序进入条纹管完成成像。

1.3.1 偏振与光谱分离

经目标反射后的多波长偏振回波信号由光学接收系统 (Optical Receiver System, ORS) 接收, 然后进入由 LCVR 和偏振分束器 (Polarizing Beam Splitter, PBS) 组成的偏振态分析器 (Polarization State Analyzer, PSA) 系统。其中, LCVR 的快轴与 Y 轴呈 135° 夹角, 且能产生相位延迟 δ_n , PBS 可将入射激光分离为寻常光 (o 光) 和非寻常光 (e 光), 对应的 PSA 系统穆勒矩阵分别可写为

$$\begin{cases} M_{PSA-o}(\delta_\lambda) = M_P(0^\circ) M_{LCVR}(135^\circ, \delta_\lambda) \\ M_{PSA-e}(\delta_\lambda) = M_P(90^\circ) M_{LCVR}(135^\circ, \delta_\lambda) \end{cases} \quad (8)$$

并遵循以下公式

$$\begin{cases} M_{PSA-o}(\delta_\lambda) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos \delta_\lambda & 0 & \sin \delta_\lambda \\ 1 & \cos \delta_\lambda & 0 & \sin \delta_\lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ M_{PSA-e}(\delta_\lambda) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -\cos \delta_\lambda & 0 & -\sin \delta_\lambda \\ -1 & \cos \delta_\lambda & 0 & \sin \delta_\lambda \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

o 光的 Stokes 矢量 $S_{\lambda n-o}^{i,j}(t)$ 和 e 光的 Stokes 矢量 $S_{\lambda n-e}^{i,j}(t)$ 可以写成以下等式

$$\begin{cases} S_{\lambda n-o}^{i,j}(t) = M_{PSA-o}(\delta_{\lambda n}) S_{rec-\lambda n}^{i,j}(t) \\ S_{\lambda n-e}^{i,j}(t) = M_{PSA-e}(\delta_{\lambda n}) S_{rec-\lambda n}^{i,j}(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} G(x, y) = \frac{1}{4\pi\tau_1\tau_2} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{2\tau_1^2} + \frac{y^2}{2\tau_2^2} \right) \right) \\ E(x, y) = \exp \left(-\frac{x^2}{4\tau_1^2} - \frac{\left(y - \frac{2R^{i,j}}{c} \right)^2}{4\tau_2^2 + 2\tau^2 v_s^2} \right) \\ A_{\lambda n-o}^{i,j} = C(m_{00}^{\lambda n, i, j} + m_{11}^{\lambda n, i, j} \cos^2 \delta_{\lambda n} + m_{33}^{\lambda n, i, j} \sin^2 \delta_{\lambda n}) \\ B_{\lambda n-o}^{i,j} = C(m_{00}^{\lambda n, i, j} - m_{11}^{\lambda n, i, j} \cos^2 \delta_{\lambda n} - m_{33}^{\lambda n, i, j} \sin^2 \delta_{\lambda n}) \\ I_{\lambda n-o}^{i,j}(x, y) = \tau_s \int P_{\lambda n-o}^{i,j}(t) G(x, y - tv_s) dt = A_{\lambda n-o}^{i,j} E(x, y) \\ I_{\lambda n-e}^{i,j}(x, y) = \tau_s \int P_{\lambda n-e}^{i,j}(t) G(x, y - tv_s) dt = B_{\lambda n-e}^{i,j} E(x, y) \end{cases} \quad (13)$$

式中, τ_1 , τ_2 分别为激光光斑在 x , y 方向的尺寸, C 为与系统参数相关的常数, 光斑峰值位置为

$S(t)[0]$ 表示斯托克斯矢量的第一个元素, 即光强, 根据式 (5), 入射到条纹管的光电阴极上的 o 光和 e 光的功率分别为 $P_{\lambda n-o}^{i,j}(t)$ 和 $P_{\lambda n-e}^{i,j}(t)$, 其可以由以下公式确定

$$\begin{cases} P_{\lambda n-o}^{i,j}(t) = \frac{\tau_{\lambda n} \pi D_R^2}{4} S_{\lambda n-o}^{i,j}(t)[0] + N_1 \\ P_{\lambda n-e}^{i,j}(t) = \frac{\tau_{\lambda n} \pi D_R^2}{4} S_{\lambda n-e}^{i,j}(t)[0] + N_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\tau_{\lambda n}$ 是波长 λ_n 处的回波信号在光学系统中的透射率。

经过偏振分离后, 不同波长与偏振态的信号形成 6 组。各通道信号经会聚透镜 (convergent lens, CL) 聚焦后, 分别耦合进入光纤重映射系统 (Optical Fiber Remapping System, FRS) 的光纤阵列中。每组回波信号通过对应的光纤延迟器 (Fiber Optic Delay, FOD) 进行时间延迟处理, 以确保不同组信号按时序进入波长转换器 (Wavelength Converter, WC), 将不同波长信号统一转换为特定波长 λ 的激光脉冲后, 信号按照时间顺序被依次输入条纹管。

1.3.2 条纹像生成

条纹管通过“光-电-光”转换处理输入信号, 激光脉冲在条纹管荧光屏上产生的光斑强度可表示为

$$I(x, y) = \tau_s \int P_i(t) G(x, y - tv_s) dt \quad (12)$$

式中, (x, y) 为空间坐标; τ_s 为条纹管光子转换效率; P_i 为入射激光脉冲功率; $G(x, y)$ 为激光光斑几何形状 (近似二维高斯分布); v_s 为条纹管扫描速度。

对于 o 光和 e 光对应的光斑, 其强度模型结合偏振特性和测距方程可进一步表示为

$x=0$ 、 $y=2R^{ij}v_s/c$, 可通过峰值位置^[16]推导目标距离。

2 条纹像重构

在 MSP-STIL 系统中, 经偏振分析后, 每一波长的回波信号被分解为 o 光与 e 光。因此, 对于波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, 每个波长下记录两种偏振分量 $p \in \{o, e\}$ 。

条纹图像本质为回波信号在时空域的映射结果。条纹像重构在于对每个光斑的强度信息、深度信息以及偏振信息进行精确提取。

用峰值检测算法^[17]在每个光斑区域内通过搜索确定最大灰度值位置, 将该峰值幅值作为该像素点的回波强度信息; 根据峰值在条纹图像中的偏移位置, 结合条纹管扫描速度与时间-空间映射关系, 将其转换为回波飞行时间, 并进一步计算目标距离。从而实现了强度信息与深度信息的同步提取。得到 (i, j) 光斑在波长 λ_n 处的强度值 $I_{\lambda_n-p}^{ij}(x, y)$ ($n=1, 2, 3$) 和深度值 $R_{\lambda_n-p}^{ij}(x, y)$ ($n=1, 2, 3$) 后。然后对 $DOP_{\lambda_n}^{ij}(x, y)$ ($n=1, 2, 3$) 进行计算, 以获得光斑在波长处的 DOP 值。在同一波长下, o 光与 e 光的强度差异反映目标表面的偏振散射特性。偏振度 $DOP_{\lambda_n}^{ij}(x, y)$ 定义为

$$DOP_{\lambda_n}^{ij}(x, y) = \frac{\left| I_{\lambda_n-o}^{ij}(x, y) - I_{\lambda_n-e}^{ij}(x, y) \right|}{\left| I_{\lambda_n-o}^{ij}(x, y) + I_{\lambda_n-e}^{ij}(x, y) \right|} \quad (14)$$

通常情况下, DOP 较高时, 回波偏振保持能力较强, 多次散射相对较弱, 回波信号相对稳定; DOP 较低时, 可能存在较强的多次散射或背景干扰现象, 从而降低深度估计的可靠性。因此, DOP 可作为描述回波散射稳定性的权重。

为消除不同通道之间量纲和能量尺度差异, 对六通道强度进行归一化处理

$$I_{(\lambda_n-p, \text{norm})}^{ij}(x, y) = \frac{I_{\lambda_n-p}^{ij}(x, y)}{\sum_{n=1}^3 \sum_p I_{\lambda_n-p}^{ij}(x, y)} \quad (15)$$

强度表示该通道在所有通道中的相对能量占比, 从而反映其对当前像素测量的权重。强度越高, 说明信号质量越好, 对应权重应越大; 强度较低的通道则会被自动抑制, 所以将 $I_{(n-p, \text{norm})}^{ij}$ 设置为强度信息的自适应权重。

理论上, 同一空间位置的真实深度在不同波长和偏振通道中应保持一致。然而, 在多通道深度融合过程中, 不同波长与偏振通道的深度结果可能受到噪声、多次散射或弱回波的影响, 从而

产生异常值。为提高重构过程的稳定性, 采用六通道深度的中值作为参考值。

与均值等统计量相比, 中值具有较强的抗异常干扰能力, 不易受到极端偏差值的影响, 能够有效避免少数异常通道对参考值的显著拉偏, 基于中值构建参考基准, 可有效衡量各通道深度估计与整体估计结果之间的偏离程度, 为后续权重计算与分配提供可靠依据。为此, 首先计算六通道深度的中值 D_{mid}^{ij}

$$D_{\text{mid}}^{ij} = \text{median}(D_{\lambda_1-o}^{ij}, D_{\lambda_1-e}^{ij}, D_{\lambda_2-o}^{ij}, D_{\lambda_2-e}^{ij}, D_{\lambda_3-o}^{ij}, D_{\lambda_3-e}^{ij}) \quad (16)$$

在获得多通道深度中值后, 为进一步反映各通道深度估计结果与整体深度值的偏离程度, 构建如下参数

$$C_{\lambda_n-p}^{ij} = \exp(-|D_{\lambda_n-p}^{ij} - D_{\text{mid}}^{ij}|) \quad (17)$$

偏离程度可视为该像素深度的稳定性估计。当某通道深度接近中值时, 其测量结果与多数通道相近, 可信度较高; 当偏离较大时, 则更可能受到异常因素影响。

$C_{\lambda_n-p}^{ij}$ 作为参考值参与权重计算, 使偏离较大的通道权重被有效抑制, 从而提升融合结果的稳定性。

最终权重由强度、偏振度与深度共同决定, 实现多通道信息的自适应加权。

综合强度、偏振度及深度一致性, 定义每个通道的权重如下

$$Q_{\lambda_n-p}^{ij} = I_{(\lambda_n-p, \text{norm})}^{ij} \cdot DOP_{\lambda_n}^{ij} \cdot C_{\lambda_n-p}^{ij} \quad (18)$$

对三个波长处的深度值 $D_{\lambda_n-p}^{ij}(i, j)$ 进行加权重构以获得 (i, j) 处的深度值 D^{ij}

$$D^{ij} = \frac{\sum_{n=1}^3 \sum_{p \in \{o, e\}} Q_{\lambda_n-p}^{ij} D_{\lambda_n-p}^{ij}}{\sum_{n=1}^3 \sum_{p \in \{o, e\}} Q_{\lambda_n-p}^{ij}} \quad (19)$$

综上, 本文提出的条纹像重构方法包括: 多通道强度与深度信息提取、偏振散射的稳定性、深度约束以及多通道自适应加权融合四个步骤。该方法能够充分利用多光谱与偏振信息的互补性, 实现对回波强度与到达时间信息的高精度恢复, 从而完成强度图像、偏振图像及深度图像的重建。

3 实验与分析

为保证 MSP-STIL 仿真的物理一致性, 如表 1 所示, 系统建模过程中综合考虑了激光发射特性、目标反射特性、光学接收系统参数以及探测器与条纹管性能等关键因素。

表 1 系统参数设置

主要参数	数值
脉冲能量 E_p/J	1
脉冲宽度 τ/ns	5
波长 λ/nm	355/532/1064
目标角散射度 θ_r/rad	π
激光发散角 θ_f/rad	0.024
视场角 $\alpha/^\circ$	3
焦距 F/m	0.04
接收孔半径 D_R/m	2×10^{-3}
光学透射率 τ_a	0.75/0.68/0.62
大气透过率 τ_a	0.9
条纹管转换效率 τ_s	1.1×10^4
扫描速度 $v/\mu\text{m} \cdot \text{ns}^{-1}$	100
回波信号数量	$6 \times 64 \times 64$
CCD 分辨率	4096×4096
帧率 f/Hz	60
背景噪声 $N_B/\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	100
暗电流 N_d/A	1×10^{-9}

3.1 精准度验证实验

为验证本文所提出方法重构图像的精确性，本实验设计四层阶梯目标成像仿真实验。实验选取具有不同光谱反射特性和偏振散射特性的材料

作为目标表面，通过将其反射率参数及 Mueller 矩阵参数引入雷达成像模型，在三个波长下分别获得单波长下 o 光和 e 光的深度图像，并进一步利用所提出的重构方法得到优化后的深度图像。

最后，对各阶梯区域的深度值进行统计平均，并计算其均方误差，标准差，对所提方法的准确性与稳定性进行定量评估。

实验中，采用 MSP-STIL 系统对距离 1000m 的梯形目标进行照射成像。梯形目标由 4 层阶梯构成，如图 2 所示，每层尺寸均为 $4\text{m} \times 1\text{m}$ 的矩形平面，相邻阶梯间距离为 1m。为体现不同材料反射特性对成像结果的影响，自上而下分别选取为布料、混凝土、纸和铝作为覆盖材料。

四种材料在 355nm、532nm 和 1064nm 波长下的表面反射率及 Mueller 矩阵参数 m_{11} ， m_{33} 如表 2 所示。

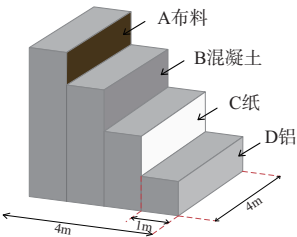


图 2 阶梯模型

表 2 不同材料在多波长下的反射率及偏振参数 (m_{11} 、 m_{33})

波长	A 布料			B 混凝土			C 纸			D 铝		
	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3	λ_1	λ_2	λ_3
反射率	0.460	0.540	0.560	0.510	0.588	0.560	0.870	0.820	0.790	0.360	0.362	0.425
m_{11}	0.375	0.400	0.280	0.185	0.190	0.228	0.162	0.160	0.600	0.800	0.867	0.980
m_{33}	0.372	0.370	0.300	0.190	0.193	0.240	0.170	0.175	0.630	0.780	0.851	0.980

理论上，同一目标在不同波长条件下的真实深度应保持一致，因此三幅单波长深度图像应具有相同的空间层次结构。然而，由于不同材料在不同波长下的参数存在差异，各阶梯区域在成像过程中会表现出不同的强度响应和偏振响应，条纹峰值提取精度会有所差异，所以不同波长下重构得到的深度图像也会存在误差。所以对加权重构后的深度图像进行实验，对图像精准度进行验证。

将四层阶梯目标参数输入多光谱偏振条纹管激光雷达成像仿真模型，分别在三个波长条件下进行成像，得到六幅对应的单波长深度图像，如图 3 所示。

在获得单波长深度图像后，采用本文提出的重构方法对其进行处理，得到的最终的融合深度图像如图 4 所示。

该方法根据不同波长通道下深度估计结果的可靠性自适应分配融合权重，从而充分利用多波

长信息之间的互补特性。相较于单一波长成像，所提出的融合策略能够有效抑制由材料反射差异、偏振响应差异及噪声扰动引起的局部误差，提升深度估计结果的准确性与稳定性。

为了定量分析不同方法的深度重构效果，将对融合前后 4 个阶梯的深度数值进行计算并对比，最终结果取四个区域的平均值 $\bar{D}_k$ 。

随后，将每层阶梯的平均深度值 $\bar{D}_k$ 与对应的真实距离 R_k 进行对比，选取均方误差 (Mean Square Error, MSE) 和标准差 (Standard Deviation, STD) 作为评价指标。

MSE 用于衡量整体测量精度

$$\text{MSE} = \frac{1}{P} \sum_{i,j} (D(i,j) - D_{\text{true}}(i,j))^2 \quad (20)$$

STD 用于表征误差的离散程度

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i,j} ((D(i,j) - D_{\text{true}}(i,j)) - \mu)^2} \quad (21)$$

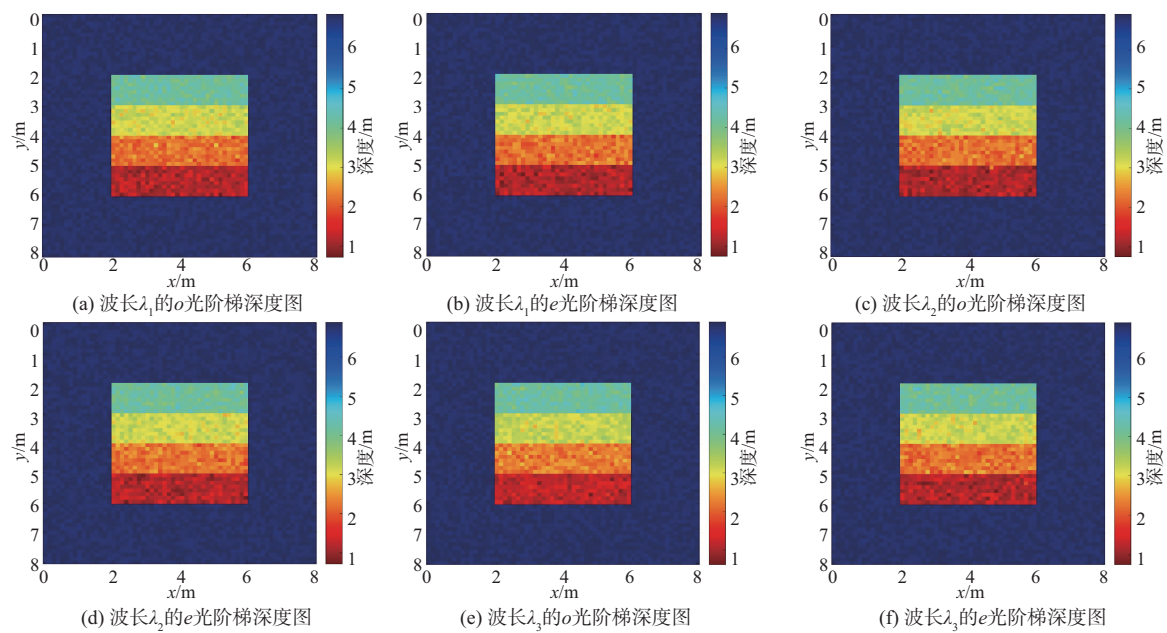


图3 单波长的阶梯深度图

式中，平均误差 μ 定义为

$$\mu=\frac{1}{P}\sum_{i,j}\left(D(i,j)-D_{\text{true}}(i,j)\right) \tag{22}$$

式中 D 为重构的深度值， D_{true} 为真实深度值； P 为图像的有效像素数； i,j 分别表示图像在行方向和列方向的像素索引通过对不同单波长深度图像与融合深度图像在四层阶梯目标上的重构结果进行对比分析，可以定量评估所提出方法的性能。

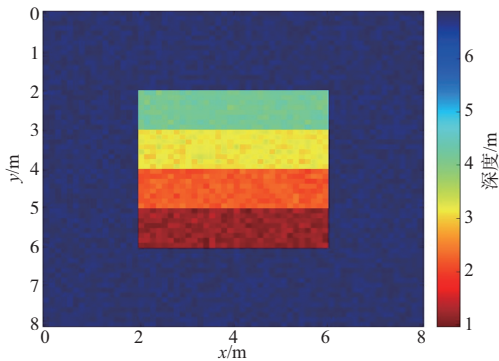


图4 融合后的阶梯深度图

如表3所示，不同波长下的深度测量结果存在一定偏差，单波长测量在不同材料上均出现不同程度的偏离。

表3 不同波长下的深度测量结果与融合结果对比

	真实距离	$\lambda_1(\text{o/e})$	$\lambda_2(\text{o/e})$	$\lambda_3(\text{o/e})$	融合深度图
A 布料	4	4.157/4.174	4.172/4.171	4.158/4.139	4.165
B 混凝土	3	3.153/3.133	3.155/3.149	3.144/3.174	3.155
C 纸	2	2.259/2.258	2.240/2.258	2.216/2.275	2.249
D 铝	1	1.175/1.214	1.206/1.186	1.240/1.189	1.181

结果表明，在B（混凝土）和D（铝）目标中，单波长测量的偏差相对较大，其中 λ_3 在B目标上的测量值为3.174m，相较真实值3m偏差达到0.174m； λ_3 在D目标上的测量值为1.240m，相较真实值1m偏差达到0.24m。相比之下，重构图像的结果分别为3.155m和1.181m，误差减小，说明重构方法能够有效抑制极端偏差。

在A（布料）目标中，各单波长测量值均略高于真实距离4m，最大偏差出现在 λ_2 时的4.172m和 λ_1 时的4.174m。重构图像的结果为4.165m，相比单波长，偏差得到一定程度的削弱。

在C（纸）目标中，单波长测量结果分布较为集中，但仍存在一定偏高现象，最大约2.2775m。重构后结果为2.249m，进一步降低了测量误差。

如表4所示，各单波长的MSE分别为0.1071、0.1215、0.1128、0.1084、0.1248和0.1076，而融合方法的MSE为0.0529，相较单波长结果降低约53.5%。对应的STD分别为0.2694、0.2889、0.2747、0.2682、0.2981和0.2643，融合方法的STD降至0.1333，降低约51.9%。

表4 不同波长组合方法的MSE与STD

方法	MSE	STD
波长 $\lambda_1(\text{o/e})$	0.1071 / 0.1215	0.2694 / 0.2889
波长 $\lambda_2(\text{o/e})$	0.1128 / 0.1084	0.2747 / 0.2682
波长 $\lambda_3(\text{o/e})$	0.1248 / 0.1076	0.2981 / 0.2643
融合	0.0529	0.1333

结果表明，该方法能够有效抑制极端偏差，具有更高的准确性和稳定性，能够在不同材料响应差异的情况下，有效融合多波长深度信息，

抑制局部异常误差，从而提高深度估计的可靠性。

3.2 对比度实验

为验证本研究所提出方法在复杂场景下的图像对比度增强能力，设计多光谱偏振成像仿真实验。实验基于 MSP-STIL 成像系统，在复杂背景与遮挡条件下获取多个波长回波信息，并分别重构得到单波长中 o 光和 e 光的强度图像、DOP 图像以及重构的深度图像。

在此基础上，从 10 幅图像中选取三幅图像，分别映射至 RGB 三个通道，随后，将构建的 RGB 融合图像与强度图像、偏振图像及深度图像进行对比度定量分析，采用对比度评价指标对比度（Contrast Separation Metric, CST）对各类图像进行统一评价，并将 RGB 图像转换至 HSV（Hue, Saturation, Value）图像进行计算，对比度计算方法如下

$$CST = \sum_{c=1}^{c_n} \left| \frac{\frac{1}{K_c} \sum \text{Target}_c(k) - \frac{1}{M_c} \sum \text{Background}_c(m)}{\frac{1}{M_c} \sum \text{Background}_c(m)} \right| \quad (23)$$

其中， c_n 为图像的通道数， $c_n=1$ 为单通道图像的通道数， $c_n=3$ 为 HSV 图像的通道数； $\text{target}_c(k)$ 为图像的通道 c 上目标的像素值； K_c 为图像的通道 c 上目标的像素总数； $\text{background}_c(m)$ 为图像的通道 c 上背景的像素值； M_c 为图像 c 通道上背景的像素总数。

如图 5 所示，图 5 (a) – (c) 分别为目标区域在三个波长下的反射率图像，图 5 (d) – (f) 分别为目标区域在三个波长下 Mueller 矩阵的 m_{11} 的图像，图 5 (g) – (i) 为 m_{33} 的图像，图 5 (j) 为目标区域的原始距离图像，其中目标车辆被树木遮挡。

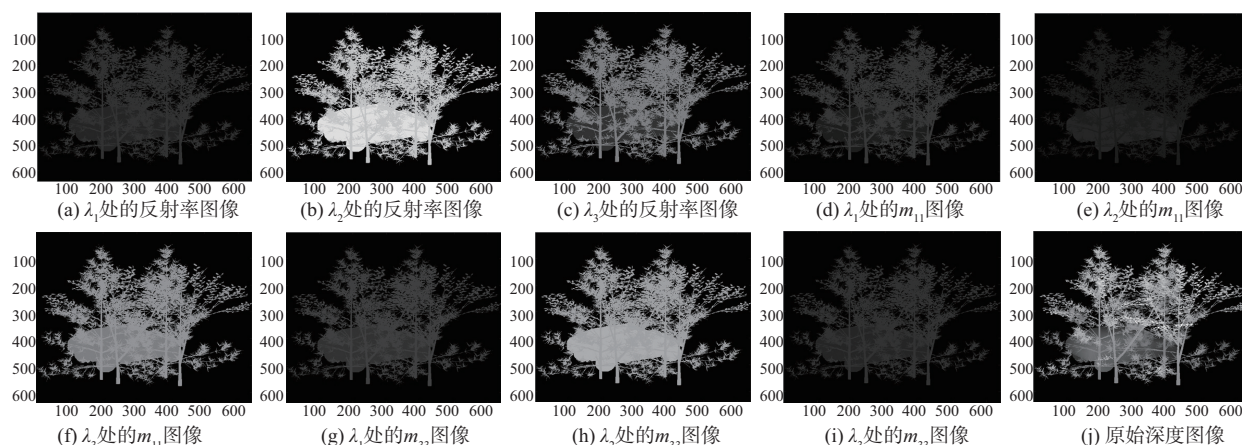


图 5 反射率图像, m_{11} 图像和 m_{33} 图像

由图 6 可见，各单波长图像中目标车辆与遮挡

亮度偏暗，致使图像整体对比度较低、目标特征不明显，从而增加识别的难度。

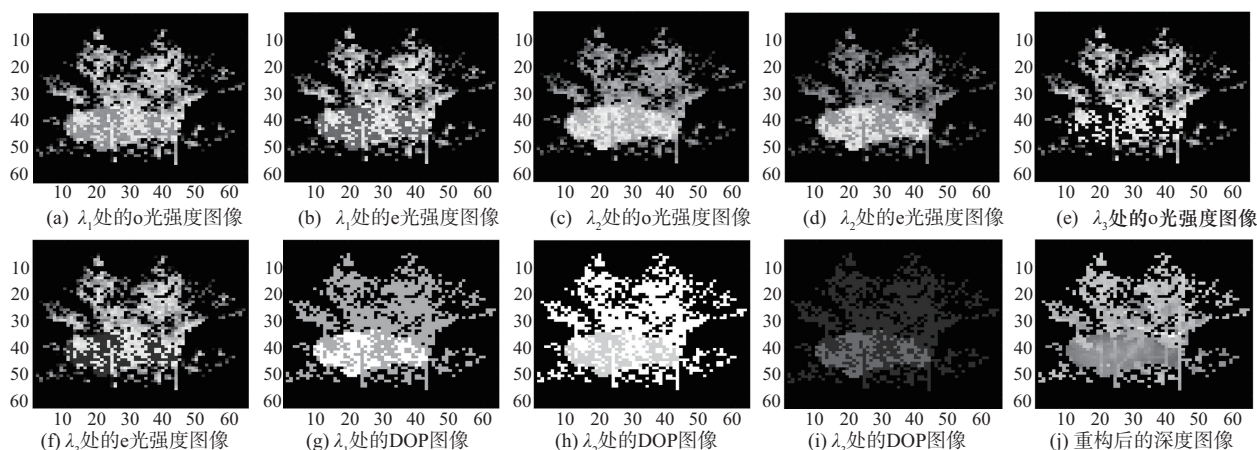


图 6 单波长的强度图像、偏振度(DOP)图像及融合后的深度图像。

通过各单波长下的强度、偏振度 (degree of polarization, DOP) 图像和重构的深度图像，然后

选取相对的单波长图像进行 RGB 图像融合。其中，图 7 (a) 和图 7 (d) 都选择 λ_1 时的 DOP 图像，深

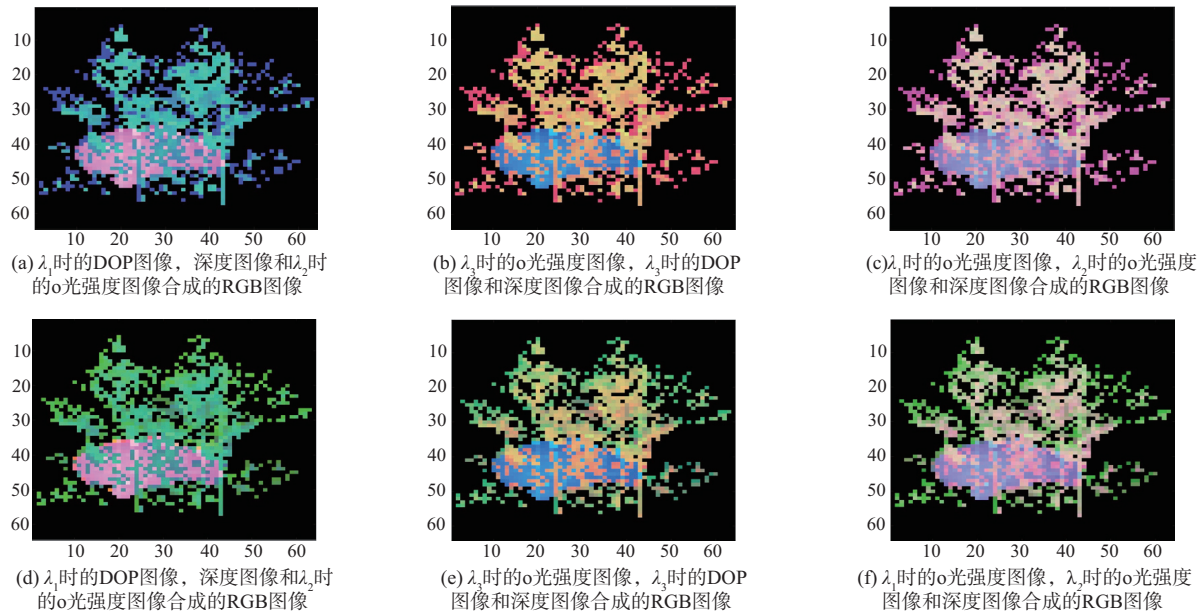


图 7 由强度图像、偏振度(DOP)图像和深度图像融合得到的 RGB 图像(优化前后对比)

度图像和 λ_2 时的 o 光强度图像合成, 图 7 (b) 和图 7 (e) 都选择 λ_3 时的 o 光强度图像, λ_3 时的 DOP 图像和深度图像, 图 7 (c) 和图 7 (f) 选择 λ_1 时的 o 光强度图像, λ_2 时的 o 光强度图像和深度图像, 将三幅图像融合为 RGB 图像。

如图 7 (a) ~ (c), 为方法改进前的 RGB 融合图像, 图 7 (d) ~ (f), 为改进重构方法后的 RGB 融合图像, 融合后的 RGB 图像在视觉表现上具有更丰富的信息表达能力, 不同通道之间的差异使目标与背景在颜色分布上产生明显区分, 从而提升了整体对比度。然后通过公式 (23) 验证各类型的图像对比度, 计算的 CST 如表 5、6 所示。

表 5 不同图像类型的 CST 指标对比

图像类型	CST
DOP 图像(λ_1)	0.2471
DOP 图像(λ_2)	0.0318
DOP 图像(λ_3)	0.1961
强度图像(λ_1)(o 光/e 光)	0.0673/0.1219
强度图像(λ_2)(o 光/e 光)	0.0479/0.0827
强度图像(λ_3)(o 光/e 光)	0.2343/0.1879
融合深度图	0.0679

表 6 重构方法改进前后的 RGB 图像对比度

图像类型	CST
改进前的 RGB 融合图像	(a) 0.2902
	(b) 0.2683
	(c) 0.3758
改进后的 RGB 融合图像	(a) 0.4164
	(b) 0.3785
	(c) 0.6242

如表 5 和表 6 所示, 在单一波长条件下, 各类图像的对比度整体较低, 其中对比度最高的为

DOP 图像 (λ_1), 其 CST 值为 0.2471。相比之下, 单波长强度图像与部分偏振图像的对比度更低, 说明在复杂背景条件下, 单一信息维度难以有效区分目标与背景。

在此基础上, 用改进前的重构方法产生的 RGB 图像, 其对比度均明显高于单波长图像。三种组合对应的 CST 分别为 0.2902、0.2683 和 0.3758, 较单波长最优结果分别提升约 8.6%、17.4% 和 52.1%, 表明多维信息融合能够有效增强图像对比度。进一步采用本文的条纹像重构方法后, RGB 融合图像的对比度得到明显提升。三种组合的 CST 分别达到 0.4164、0.3785 和 0.6242, 相较改进前分别提升约 55.2%、30.4% 和 66.1%。

上述结果表明, 本文方法通过在条纹像重构阶段对回波强度与深度信息进行协同优化, 使得融合过程中输入特征的质量明显提升, 从而增强了 RGB 图像中各通道之间的差异表达能力, 最终实现更高的图像对比度。

4 结 论

针对复杂散射环境下条纹管激光雷达在低反射率目标探测能力不足及成像对比度降低的问题, 本文构建了一种多光谱偏振条纹管激光雷达成像系统, 并提出了一种面向多通道数据的自适应条纹像重构方法。在该系统框架下, 实现了光谱信息、偏振信息与深度信息的协同获取, 并通过改进的重构策略提升多维信息融合效果。

在方法方面, 利用同一波长下不同偏振分量的强度差异表征回波信号的散射特性与稳定性; 同时引入深度中值对异常回波进行抑制; 在此基

基础上, 构建多波长、多偏振通道的自适应加权融合机制, 实现深度信息的稳健重构。

实验结果表明: 在深度重构方面, 所提方法相较单波长方法使均方误差降低约 53.5%, 标准差降低约 51.9%, 表明其具有更高的测距准确性与稳定性; 在图像对比度方面, 融合后的 RGB 图像在对比度指标 CST 上明显提升, 由单一信息图像的最高 0.2471 提升至 0.6242, 有效增强了目标与背景之间的区分能力。

尽管本文方法在多光谱偏振条纹管激光雷达仿真中取得较好重构效果, 但仍存在局限性。本文主要基于系统建模与仿真, 工程实现中多通道光纤延迟精度控制、多波长激光同步与能量一致性、多通道信号串扰及噪声抑制等问题仍可能影响最终成像性能, 需进一步实验验证与系统优化。

未来将构建实验平台, 对所提方法在复杂环境和真实场景中的适用性进行验证, 同时, 针对远距离弱回波场景, 将开展光子计数级弱信号探测及低信噪比下的重构方法研究, 提高极限条件下成像能力。此外, 将结合图像识别技术, 开展目标检测、识别与场景理解的研究, 充分发挥光谱、偏振和深度信息的互补优势, 为复杂环境下目标识别与智能探测提供技术支撑。

综上所述, 本文方法通过对回波强度与深度信息的协同优化, 提高了信息融合质量, 显著增强了目标与背景之间的区分能力, 在复杂环境下具有良好的应用潜力。

参考文献:

- [1] Gao Jian, Zhang Hetong, Sun Jianfeng, et al. A three-dimensional high-resolution imaging method for multi-slit streak tube based on compressed sensing[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Academic International Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 101—105.
- [2] Clermont L, Uhring W, Georges M. Stray light characterization with ultrafast time-of-flight imaging[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 10081.
- [3] Chen Jiaxin, Li Hong, Zhan Weiwei, et al. Simulation and analysis of coherent wind lidar based on range resolution[J]. Sensors, 2025, 25(8): 2344.
- [4] Morsy Ayman, Kuijk Maarten. Correlation-assisted pixel array for direct time of flight[J]. Sensors, 2024, 24(16): 5380.
- [5] Farooq A, Alquaity A B S, Raza M, et al. Laser sensors for energy systems and process industries: Perspectives and directions[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2022, 91: 100997.
- [6] Wolf A, Dostovalov A, Bronnikov K, et al. Advances in femtosecond laser direct writing of fiber Bragg gratings in multicore fibers: technology, sensor and laser applications[J]. Opto-Electronic Advances, 2022, 5(4): 210055.
- [7] Bai Z, Zhao Z, Tian M, et al. A comprehensive review on the development and applications of narrow-linewidth lasers[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(12): 2244—2255.
- [8] Zhu G, Xu Z, Jin Y, et al. Mechanism and application of laser cleaning: A review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 157: 107130.
- [9] Zhai Yu, Zhang Ziyi, Xie Sen, et al. Simulation algorithm for depth images of imaging LiDAR[C]//Proceedings of the 2025 5th International Conference on Imaging LiDAR. Piscataway, NJ: IEEE, 2025: 214—218.
- [10] Dong Chaowei, Fan Rongwei, Fan Zhigang, et al. Research of the richardson-lucy algorithm based deblurring method for enhancing spatial resolution in streak-tube imaging lidar[C]//Proceedings of the 2024 IEEE Academic International Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 212—215.
- [11] Zhang Zhiwei, Yang Zhiyong, Li Gengpeng, et al. Analysis of influence factors of target polarization characteristics[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 21784.
- [12] Guo Shangwei, Li Wenhao, Lai Zhengchao, et al. Design and modeling of multi-spectral polarimetry streak tube imaging LiDAR[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 118: 103872.
- [13] 周建, 周易, 倪歆玥, 等. 偏振集成红外光电探测器研究进展与应用[J]. 光电工程, 2023, 50(5): 230010.
- [14] Zhou Jian, Zhou Yi, Ni Xinyue, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector[J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(5): 230010.
- [15] Zhang Yijian, Wu Tong, Zhang Xianzhong, et al. Rayleigh lidar signal denoising method combined with WT, EEMD and LOWESS to improve retrieval accuracy[J]. Remote Sensing, 2022, 14(14): 3270.
- [16] 程志远, 李治国, 折文集, 等. 激光相干场成像散斑噪声复合去噪方法[J]. 物理学报, 2019, 68(5): 054206.
- [17] Cheng Zhiyuan, Li Zhiguo, She Wenji, et al. Compound denoising method of laser speckle noise in laser inherent field imaging[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(5): 054206.
- [18] Yue Zelin, Ruan Ping, Fang Mengyan, et al. Restoration of streak tube imaging LiDAR 3D images in photon starved regime using multi-sparsity constraints and adaptive regularization[J]. Remote Sensing, 2025, 17(17): 3089.
- [19] Zhang Miaomiao, Li Zhengnan, Zhang Fuquan, et al. Adaptive bidirectional gray-scale center of gravity extraction algorithm of laser stripes[J]. Sensors, 2022, 22(24): 9567.