

文章编号 2097-1842(2024)05-1075-12

强光背景下主动偏振成像方法

史浩东^{1,2}, 许家伟^{1,2*}, 张健², 吴洪波³, 王超^{1,2}, 刘壮^{1,2}, 战俊彤^{1,2}, 李英超^{1,2}, 付强^{1,2}

(1. 长春理工大学 吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对传统光电探测方法在强光背景下目标探测对比度低的问题, 本文提出一种基于激光照明的主动偏振成像方法。首先构建激光入射双向反射分布模型、激光入射偏振双向反射分布模型以及激光照明的目标表面偏振度模型, 并分析 3 种典型目标材料偏振特性与束散角之间的耦合关系。然后在暗室可控条件下开展逆光观测实验, 验证目标偏振特性受激光束散角的影响。实验结果表明: 强光背景下主动偏振成像目标对比度与传统被动强度成像相比提升了 86.11%, 不同束散角下不同目标材料的可见光偏振特性间存在差异, 金属材质相对于非金属材质的线偏振度提升更高, 实验结果与理论分析具有较好的一致性。最后, 在室外开展太阳逆光观测实验, 验证了研究方法在室外高强度、远距离下依旧具有适用性。本研究为提升强光背景下的目标精准感知能力奠定了理论基础。

关键词:激光束散角; 强背景光; 可见光偏振特性; 偏振双向反射分布函数; 偏振度

中图分类号: O436.3

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0151

Active polarization imaging method under strong light background

SHI Hao-dong^{1,2}, XU Jia-wei^{1,2*}, ZHANG Jian², WU Hong-bo³, WANG Chao^{1,2}, LIU Zhuang^{1,2},

ZHAN Jun-tong^{1,2}, LI Ying-chao^{1,2}, FU Qiang^{1,2}

(1. Jilin Provincial Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun

University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of

Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xjw759785402@163.com

Abstract: In this study, we propose an active polarization imaging method based on laser illumination to tackle the issue of low target detection contrast in strong light backgrounds, which is a challenge in conventional photoelectric detection. Through constructing a laser incident bidirectional reflection distribution mod-

收稿日期: 2023-08-30; 修订日期: 2023-09-12

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No. YDZJ202301ZYTS417)

Supported by the Jilin Scientific and Technological Development Program (No. YDZJ202301ZYTS417)

el, a laser incident polarization bidirectional reflection distribution model and a target surface polarization model of laser illumination, the coupling relationship between the polarization characteristics of three typical target materials and the divergence angle of a laser beam is analyzed. Backlight observation experiments are conducted in a controlled darkroom to verify the impact of the scattering angle of the laser beam on the polarization characteristics of the target. The experimental results show an 86.11% increase in target contrast for active polarization imaging under strong light background compared to traditional passive intensity imaging. Additionally, the visible polarization characteristics of different target materials vary with different divergence angles, and the line polarization of metallic materials is higher than that of non-metallic materials. The experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. The outdoor solar backlight observation experiment verifies the applicability of the research method in high-intensity light and long-distance settings. This study can lay a theoretical foundation for improving accurate target perception under a strong light background.

Key words: laser beam divergence angle; strong background light; visible light polarization; polarization bidirectional reflection distribution function; degree of polarization

1 引言

目标探测技术能够对目标进行全域、全时、预警及精准感知,这对保障资产安全和国防安全具有十分重要的战略意义^[1-2]。光学探测具有分辨率高、识别度高、可视化等特点,被广泛应用于目标态势感知^[3]。然而,传统光学探测手段和器件在太阳等强光背景下,存在探测盲区,难以对逆光方向飞临抵近的目标进行精准探测。因此,强光背景下的目标探测一直是困扰各国的难题,亟需探寻新的探测方法予以解决。

针对强光背景下的目标探测,学者们提出了一些基于图像处理的目标检测方法,例如,基于光谱滤波^[4],以及特征提取的弱小目标检测方法^[5]。这些方法可以实现强光下提高目标信噪比和空间目标探测能力。

偏振探测由于具有特殊的探测维度和响应特性,可实现“强光弱化、弱光强化”,还可以显著抑制海面耀斑等复杂光照^[6]。因此,也有学者将偏振探测用于强光抑制,提出一种基于偏振调制的哈特曼波前探测方法,但其在目标偏振特性较弱的情况下有一定局限性^[7]。上述方法均可在不同程度上提升强光背景下的目标探测精度和信噪比,但大多难以在完全逆光状态下实现精准探测

识别,因此亟需探索强光、甚至是强逆光背景下的目标探测新方法。

针对上述问题,本文提出一种将偏振探测器与激光照明器相结合的强光背景目标主动偏振探测方法。通过构建基于激光入射双向反射分布模型,分析不同材料与激光照明角度以及束散角之间的关系。通过开展暗室逆光实验、室外太阳逆光实验,获取材料表面的偏振度数据及室外阳光下的目标状态,梳理激光相关参数与目标表面偏振特性的关系,从而验证理论可行性。

2 基础理论

2.1 基于激光入射双向反射分布模型建立

双向反射分布函数(BRDF)在光的辐射度学上的严格定义最早由 Nicodemus 在 20 世纪 70 年代提出,其为入射光入射到物体表面经过反射后的出射辐射亮度与入射光的辐射照度的比值^[8-10],其表达式为:

$$f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} (\text{sr}^{-1}) \quad (1)$$

式中: E_i 为入射光辐照度, L_r 为反射光辐亮度,角度 θ 和 φ 分别是天顶角和方位角, i 和 r 分别代表入射方向和反射方向, λ 为波长。

本文基于双向反射理论建立了由激光作为入射光时目标表面的双向反射分布模型。BRDF 描述了物体表面对入射光束的反射能力和在半球空间的散射分布情况^[11]。当目标处于背光状态时, 入射光主要来源于激光照明, 此时: 对于理想朗伯体, 双向反射分布函数为 $1/\pi$; 对于有一定探测立体角的物体, 即方向-锥角的情况^[12], 双向反射分布函数如式(2)所示:

$$f(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{p_r}{p_i \cos \theta_r \Omega_r}, \quad (2)$$

式中, (θ_i, ϕ_i) 表示光的入射方向; (θ_r, ϕ_r) 表示反射光的探测方向; $p_i = p_0 \cos \theta_i$ 为光入射到表面的辐射功率; p_r 为立体角 Ω_r 内探测器探测到的反射功率, 这里假设 f 和 $\cos \theta_r$ 在立体角 Ω_r 内不变^[13]。

本文研究的探测目标所处环境不涉及大气散射, 因此无需考虑大气后向散射对激光方向、强度等特性产生的影响。根据式(2)对激光照射情况进行分析。

假设激光发射功率为 p_i , 接收光学孔径面积为 A_r , 则总接收功率表达式如下:

$$p_r = \frac{p_i}{S} \sigma \frac{1}{4\pi R^2} A_r, \quad (3)$$

式中 σ 为后向散射截面; $S \approx \pi(R\theta_B/2)^2$ 为距离 R 处的波束覆盖面积, 其中 θ_B 为光束束散角 (其中反射光边缘光线与主光线间的偏角设为 θ_c , 表达式为 $\theta_c = 2 \arctan(r_2 - r_1/R)$, 且对于最边缘光有 $\theta_c = \theta_B$, r_1 与 r_2 分别为出光半径与光斑半径)。

联立式(2)和式(3)可以得到激光作为入射光时的双向反射分布函数:

$$f = \frac{p_i \sigma A_r}{4\pi^2 R^2 (R\theta_B/2)^2 \cos \theta_i \cos \theta_r \Omega_r p_0}. \quad (4)$$

根据式(4)可知, 基于激光入射的双向反射分布函数与发射功率、束散角这两个激光相关参数有关。依据式(4)可进一步讨论分布函数的偏振化、目标表面的偏振状态以及反射光偏振度等信息。将理论模型与实际探测建立联系, 辐射模型角度示意图如图1所示。

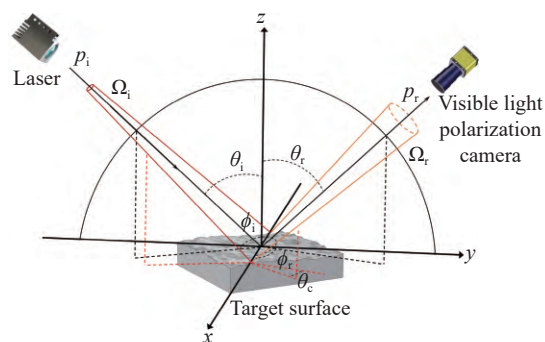


图1 辐射模型角度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radiation model angle

2.2 激光-偏振双向反射分布模型建立

为了分析激光与目标表面偏振特性之间的关系, 还需建立激光-偏振双向反射分布函数。根据微面元理论, 偏振双向反射分布函数(pBRDF)需要考虑镜面反射 f^m 和漫反射 f^d 。

$$f_{pBRDF} = f^m + f^d. \quad (5)$$

在模型(4)中添加可以表征光学表面偏振特性的穆勒矩阵, 因此镜面反射 f^m 可表示为:

$$f_{jk}^m = \frac{p_i \sigma A_r}{4\pi^2 R^2 (R\theta_B/2)^2 \cos \theta_i \cos \theta_r \Omega_r p_0} \times M_{jk}. \quad (6)$$

其中表面穆勒矩阵可表征为:

$$M_{jk} = \begin{pmatrix} \frac{r_s^2 + r_p^2}{2} & \frac{r_p^2 - r_s^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{r_p^2 - r_s^2}{2} & \frac{r_s^2 + r_p^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_p r_s \cos \varphi & r_p r_s \sin \varphi \\ 0 & 0 & -r_p r_s \sin \varphi & r_p r_s \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\varphi = \varphi_s - \varphi_p$, φ_s 、 φ_p 、 r_s 、 r_p 为 s 波与 p 波的相位变化和振幅反射系数。

漫反射 f^d 类似于朗伯体反射, 为非偏振态, 但会增加总反射的辐射强度。假设目标表面的漫反射光为完全非偏振光, 在该条件下的漫反射分量可以表示为:

$$f_{jk}^d = \rho_d G_d M_{jk}^d = \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho_d \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中, ρ_d 为引入漫反射参量后的光强和完全兰伯特(Lambertain)表面散射的光强比; G_d 表示物体

表面朗伯体漫散射强度的角度分布, $G_d = \cos \theta_r / \pi$ 。其中穆勒矩阵 $\mathbf{M}^d$ 描述的是漫散射的退偏过程^[14]。根据式(4)、式(5)、式(8)可得到激光-偏振双向反射分布函数模型。

$$f_{0,0} = \frac{p_t \sigma A_r}{4\pi^2 R^2 (R\theta_B/2)^2 \cos \theta_i \cos \theta_r \Omega_r p_0} \times \left(\mathbf{M}_{0,0} + \frac{\cos \theta_r}{\pi} \rho_d \mathbf{M}_{0,0}^d \right) \quad (9)$$

$$f_{j,k} = f_{j,k}^s (j, k \neq 0) \quad (10)$$

2.3 基于激光照明的目标表面偏振度模型

根据式(9)、式(10)推导激光照明的目标表

$$\mathbf{S}_r \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{Q} \\ \mathbf{U} \\ \mathbf{V} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(f_{00} + f_{dd})(r_s^2 + r_p^2)}{2} & \frac{f_{01}(r_p^2 - r_s^2)}{2} \\ \frac{f_{10}(r_p^2 - r_s^2)}{2} & \frac{f_{11}(r_s^2 + r_p^2)}{2} \\ f_{20} & f_{21} \\ f_{30} & f_{31} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{02} & f_{03} \\ f_{12} & f_{13} \\ r_p r_s \cos \varphi f_{22} & r_p r_s \sin \varphi f_{23} \\ -r_p r_s \sin \varphi f_{32} & r_p r_s \cos \varphi f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{\sigma_L - 1}{\sigma_L + 1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

根据式(13)与偏振度计算公式可得到基于激

面线偏振度(Dolp)。假设出射激光的斯托克斯矢量(Stokes)为^[15]:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{Q} & \mathbf{U} & \mathbf{V} \end{pmatrix}^T, \quad (11)$$

式中 $\mathbf{I}$ 与入射光强有关; $\mathbf{Q}$ 与 0° 和 90° 方向的线偏振信息有关; $\mathbf{U}$ 与 45° 和 135° 方向的线偏振信息有关; $\mathbf{V}$ 与左/右旋的圆偏振信息有关。

若出射激光为线偏振光, 且消光比为 σ_L , 则式(11)可简化为:

$$\vec{S} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{\sigma_L - 1}{\sigma_L + 1} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (12)$$

此时, 反射光的斯托克斯矢量可表示为:

$$Dolp = \frac{\frac{p_t \sigma A_r}{4\pi^2 R^2 (R\theta_B/2)^2 \cos \theta_i \cos \theta_r \Omega_r p_0} \left(\frac{(r_p^2 - r_s^2)}{2} + \frac{(r_s^2 + r_p^2)(\sigma_L - 1)}{2(\sigma_L + 1)} \right)}{\frac{p_t \sigma A_r}{4\pi^2 R^2 (R\theta_B/2)^2 \cos \theta_i \cos \theta_r \Omega_r p_0} \left(\frac{(r_s^2 + r_p^2)}{2} + \frac{(r_p^2 - r_s^2)(\sigma_L - 1)}{2(\sigma_L + 1)} \right) + \frac{(r_s^2 + r_p^2) \rho_d \cos \theta_r}{2\pi}} \quad (14)$$

由式(14)可知, 当激光作为入射光源时, 目标表面偏振度受入射角、观测角、激光输出功率、激光束散角和介质折射率等多个参数影响。

2.4 激光主动照明理论分析

由 2.3 节可知目标表面偏振度受激光功率等因素影响, 而在实际探测过程中随着距离与背景光光强的升高, 探测目标所需的激光能量也逐渐增强, 故本节针对强光背景下的激光照明功率与目标探测距离及背景光强进行进一步探讨。

根据激光雷达方程、接收系统参数、观测距离及反射截面积等, 可计算每秒钟光学系统接收口径处(未经过接收光学系统和光子探测器)的激光回波光子数如下^[3]:

$$n_s = \left(E_T \frac{\lambda}{hc} \right) \eta_t G_t \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 A_r \eta_r f_v \quad (15)$$

式中 n_s 为接收系统收到的单次脉冲回波光子数, E_T 为激光单脉冲能量, λ 为激光波长, h 为普朗克常量 ($6.626\,069\,3 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$), c 为光速

光入射目标表面的反射光线偏振度表达式为:

(299 792 458 m/s), η_t 为激光发射系统效率, η_r 为激光接收系统效率, G_t 为激光发射系统增益 $G_t = 8/\theta_B^2 \times \exp[-2(\theta_i/\theta_B)^2]$, θ_i 为激光指向误差。通常情况下, 激光束指向误差(约为 $1''$)相较于激光束散角小很多, 此时激光发射系统增益可近似表示为 $G_t \approx 8/\theta_B^2$, f_v 为激光发射频率, 则光学系统接收口径处的激光回波光子密度 N_s (单位为 $e/(\text{m}^2\cdot\text{s})$):

$$N_s = \frac{n_s}{A_r} = \left(E_T \frac{\lambda}{hc} \right) \eta_t \frac{8}{\theta_B^2} \sigma \left(\frac{1}{4\pi R^2} \right)^2 f_v \quad (16)$$

根据 N_s , 曝光时间 t , 以及量子效率 Q , 可计算出一次曝光时间内的激光回波光子数:

$$S_{\text{signal}} = N_s \eta_r A_r t Q \quad (17)$$

由于偏振探测器对入射光具有偏振主动甄别作用(即接收与偏振阵列相同震动方向入射光, 减弱或消除其他方向入射光)根据式(14)则激光回波偏振光子数为:

$$S_{\text{psignal}} = Dolp \times N_s \eta_r A_r t Q \quad (18)$$

则信号引起的随机散粒噪声 $N_1 = \sqrt{\text{Dolp} N_s \eta_r A_r t Q}$ 。
 $n \times n$ 像素数接收的太阳光背景光子数为:

$$N_2 = \sqrt{\eta_r A_r t S_0 \times 10^{-0.4 \times m_v} \Delta \lambda \theta_v^2 \times Q}, \quad (19)$$

式中 S_0 是零星等亮度的星体所发射光子最终到达接收系统处的平均光子数, 取 9×10^7 [e/(m²·nm·s)], m_v 为一平方角秒背景光所对应星等, $\Delta \lambda$ 为背景光波段, θ_v 为一个像素对应的天空张角, 为 $(h_1/f_L) \times 206\,265''$, h_1 为像元尺寸(取 $3.45 \mu\text{m}$), f_L 为接收系统焦距, 目标所占像素数 n 取 10×10 。

每个像素暗流引起的随机散粒噪声 $N_3 = \sqrt{D_t}$, 每个像素读出时引起的系统随机噪声 $N_4 = N_r$, 每个像素单位时间内暗流积累电荷 D_t (取 0.08 [e/(pixel·s)]) 和读出噪声 N_r (取 5 e/pixel)。假定探测器信噪比高于 20, 则可根据式(14)与信噪比计算公式 S/N , 以及光子数密度 N_s 推导出激光器输出功率 $P = E_T f_v$, 取激光束散角 θ_B 为 1° (半角), 激光发射系统效率 η_t 取 0.6, 探测器曝光时间 t 为 1 ms, 量子效率取 0.6, 接收系统有效接收面积 A_r 为 0.7225 cm^2 , 接收系统效率 η_r 为 0.7, 太阳背景星等取 $26.92^{[6]}$ 。假定目标为铝制材料, 最终计算得到在 $10 \sim 100 \text{ m}$ 内, 激光束散角为 1° 、照明角度为 90° (垂直照射)、观测角度为 90° 、探测器灵敏度为 0.01 lx 时, 目标所需激光功率为 $0.00072 \text{ W} \sim 37.77 \text{ W}$ 。未来随着探测器不断发展, 探测灵敏度可达到 10^{-5} lx , 而激光主动偏振成像方法随着探测灵敏度的提高, 所需激光主动照明功率相应降低。根据上述理论推导及计算, 可知在远距离下清楚观测目标所需的激光功率, 表明研究方法在理论上是可行的。

2.5 仿真分析

由双向反射系数的定义和 2.2 节激光-偏振双向反射分布模型推导可知: 根据激光器的发射波长、束散角及目标表面折射率、入射角、反射角等参数可仿真计算得出激光相关参数偏振传输的 Stokes 分量, 如式(13)所示。

根据线偏振度计算公式(14), 可以计算出金色聚酰亚胺薄膜、铝板以及太阳能电池板在不同束散角下的线偏振度分布特性。图 2 (彩图见期刊电子版) 为不同目标在入射角为 20° 时的线偏振度分布示意图。从图 2 可以看出, 3 种目标的线偏振度随着束散角的增大而减小。这是因为束散

角与光束质量相关, 根据公式 $\theta_B = M^2(\lambda/\pi\omega_0)$ (式中 M^2 用于表征光束质量、 λ 为激光发射波长、 ω_0 为束腰半径), 光束束散角增大, 光束参数乘积变大, 光束质量降低, 从而导致反射光偏振特性减少。为了验证仿真推导的正确性, 需要进行相关实验做进一步探讨。

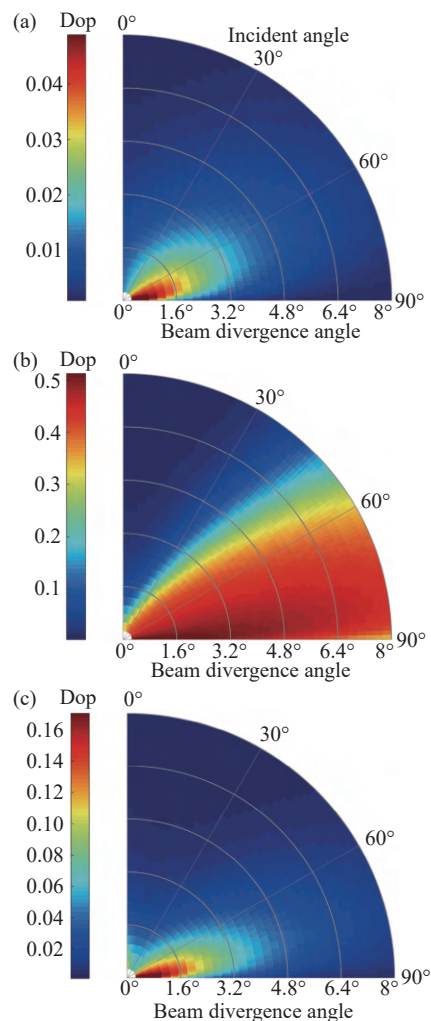


图2 不同目标在入射角为 20° 时的线偏振度分布。(a) 金色聚酰亚胺薄膜; (b) 铝板; (c) 太阳能电池板

Fig. 2 The distribution of Dolp of different targets at the incident angle of 20° . (a) Gold polyimide film; (b) aluminum plate; (c) solar panels

3 实验设计与分析讨论

3.1 暗室积分球逆光成像实验

3.1.1 实验装置搭建

将偏振探测技术应用于目标的强光背景识别中, 在理论分析的基础上开展逆光目标偏振成像实验, 分析不同材料的偏振信息差异, 验证激光照

明与偏振相结合的主被动复合式探测方法的可行性,为强光背景下的目标探测提供支撑。

图像采集设备选择可见光偏振相机,主动照明设备选用变焦白光激光器,并对试验设备进行定标,以保证试验结果的准确性,标定结果如表 1 所示。为提高测试数据的精确性,实验全程在暗室进行,同时为有效降低其他杂散光的影响,将实验平台、升降台、积分球装置附近铺上具有高吸收率的黑布。实验过程全程保持室内清洁,防止室内粉尘对测试数据造成影响。将目标材料(金色聚酰亚胺薄膜、铝板、太阳能电池板)放置在积分球光源前模拟逆光状态。为了探究不同激光入射角和束散角对目标偏振特性的影响,实验通过变焦白光激光补光灯实现相机在不同束散角下的拍摄,调节视场、焦距和光圈使目标处于视场中心且图像清晰。获取目标在观测角为 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 的 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 入射角下 4° 、 5° 、 6° 、 7° 、 8° 不同束散角的线偏振度图片。最终对图像数据进行处理,对逆光目标的偏振信息进行解算,分析束散角对材料偏振特性的影响,验证激光照明与偏振技术相结合实现逆光目标探测的可行性。实验原理图如图 3 所示。

表 1 定标实验结果

Tab. 1 Results of calibration experiments

定标参数	参数数值
积分球输出功率/mW	20.920
激光输出功率/W	2.080
偏振片消光比	0.517
黑布吸收率	0.996

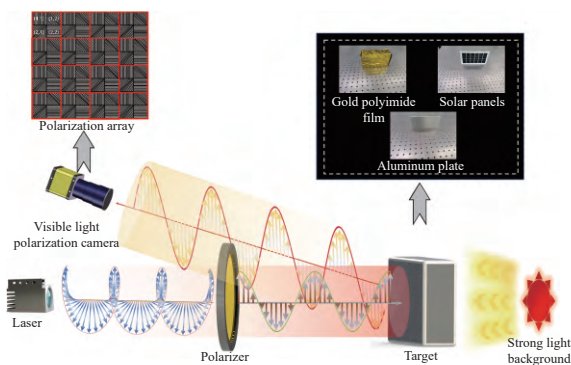


图 3 实验原理图

Fig. 3 Experimental schematic diagram

在定标实验中,采用 PD300-UV 型号的光功率计对积分球、激光器、偏振片消光比以及黑布

吸收率进行定标,固定距离尺寸,以光功率计为基准,确定照明光与背景光的光功率。采用的激光器型号为 VLW-LD-500,获取线偏振片透射光和黑布反射光光功率,最终计算得出相关数值。可见光偏振相机以及主动照明白光激光器的主要参数如表 2 所示。

表 2 成像、照明系统的主要技术参数

Tab. 2 Main technical parameters of imaging and lighting systems

系统	指标	参数
可见光偏振相机	响应波段/ μm	$0.3 \sim 0.7$
	镜头焦距/mm	15
	光圈数	2.8
	靶面分辨率	$2\,464 \times 2\,056$
	像元尺寸/ μm	3.45
	灵敏度/lx	0.01
白光激光器	输出波段/ μm	$0.3 \sim 0.7$
	电功率/W	≥ 10
	束散角/ $^{\circ}$	$3 \sim 11$
	输出流明值/lm	≥ 230
	输出光功率/W	2

3.1.2 不同探测模式下的材料状态分析

按照上述实验方案进行相关实验。图 4 为暗室积分球实验现场图,图 5 是观测角为 90° 时强光背景下不同材料的可见光偏振图像。对金色聚酰亚胺、铝板、太阳能电池板进行灰度对比度提取,即目标表面平均灰度值与背景平均灰度值进行对比度计算,实验结果如表 3 所示。

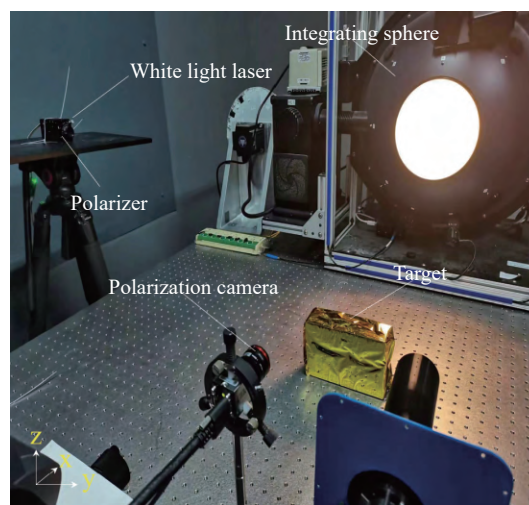


图 4 暗室积分球逆光实验装置图

Fig. 4 Darkroom integrating sphere backlighting experiment setup

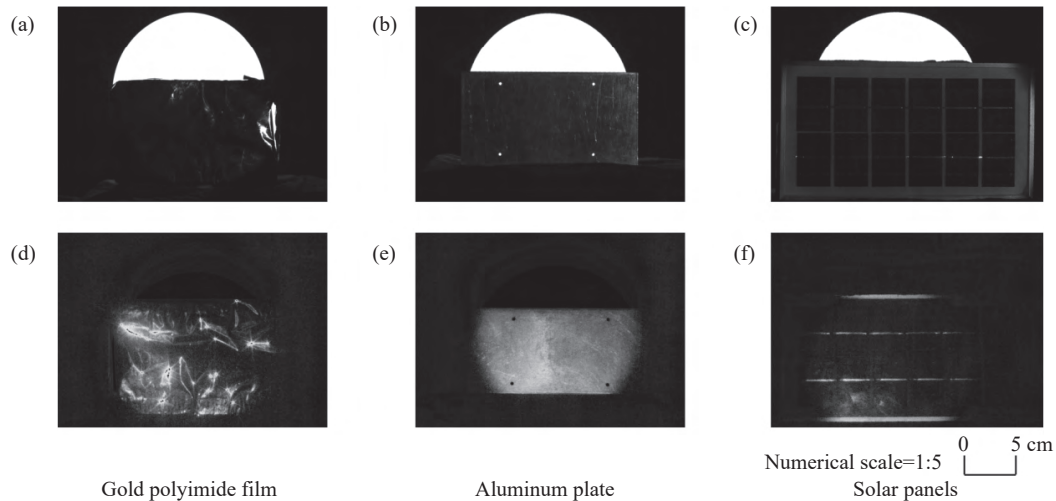


图 5 逆光状态下金色聚酰亚胺薄膜、铝板、太阳能电池板(从左到右)非偏与偏振图像对比图。(a)、(b)、(c)非偏图像 (d)、(e)、(f)偏振图像

Fig. 5 Comparison of unpolarized and polarized images of gold polyimide film, aluminum plate, and solar panel (from left to right) under backlight state. (a), (b) and (c) are unpolarized images and (d), (e) and (f) are polarized images

表 3 强光背景下不同目标的实验结果

Tab. 3 Experimental results of different targets under strong background light

目标	图像对比度	
	非偏图像	线偏振度图像
金色聚酰亚胺薄膜	0.36	0.65
铝板	0.45	0.80
太阳能电池板	0.24	0.48

由图 5 可知, 采用偏振探测模式对强背景光进行抑制可有效凸显目标。传统可见光相机因为要兼顾强背景光, 必须适当减少曝光时间, 故在相同激光照明条件下 3 种材料的图像对比度依然较低, 而偏振模式下背景光大部分被抑制, 且在激光照射下 3 种材料目标表面与轮廓清晰可见, 对比度均有较高提升。这表明利用激光与偏振结合的主被动复合方式可有效解决强光背景下的动态范围成像、目标探测盲区等难题。3 种材料中金色聚酰亚胺薄膜与铝板由于会产生较强的镜面反射因此对比度较高。另外, 由于金色聚酰亚胺薄膜表面有些许起伏, 故相较铝板而言整体对比度略低。而太阳能电池板受光吸收系数较大的影响, 对比度较以上两个材料相对较低。

3.1.3 激光入射角、束散角对不同材料可见光偏振度的影响

将获取的各目标可见光偏振图像进行整理, 针对探测角为 30° (探测装置与照明装置位于同侧) 的强光背景下可见光偏振度图片, 提取 3 种目标材质不同观测角、不同束散角下的偏振度数值

如图 6 所示。

从图 6 可以看出 3 种材料中铝板表现最好。这表明铝板表面的散射占比相较其他两个目标大, 而金色聚酰亚胺薄膜与太阳能电池板由于表面光滑, 镜面反射占比更大。需要注意的是在实际探测中照明光源很难实现对探测系统的大范围、大角度辅助成像, 故在以下分析过程中主要对一定照明范围或角度内的逆光目标进行成像分析。

从图 6 可以看出随着束散角的减小, 3 种目标表面的线偏振度均有不同程度的提升, 而金色聚酰亚胺薄膜受激光束散角的影响较小, 受激光照明角度影响较大, 在照明角为 $70^\circ \sim 90^\circ$ 内线偏振度响应较强。这是因为其镜面反射占比较大, 镜面反射是产生偏振信息的主要因素。而太阳能电池板的表现与其相反, 在束散角 $\leq 6^\circ$ 时线偏振度上升较为明显。这表明其受激光能量影响较大, 同一束散角下, 线偏振度随照明角度改变, 变化较小, 这是因为晶体内部多次散射占比较大。铝板线偏振度分布相对均匀, 且受激光束散角与照明角度影响较小。

图 7 为探测角是 90° 时 3 种材料线偏振度分析结果, 其中金色聚酰亚胺薄膜与太阳能电池板在束散角为 5° 后线偏振度提升较小, 两种材料在 90° 观测角下束散角由 5° 缩小至 4° 之后偏振度均未提升, 故在实际探测中可结合已有数据针对逆光下不同目标选取适当入射角度和束散角, 以提高探测质量。

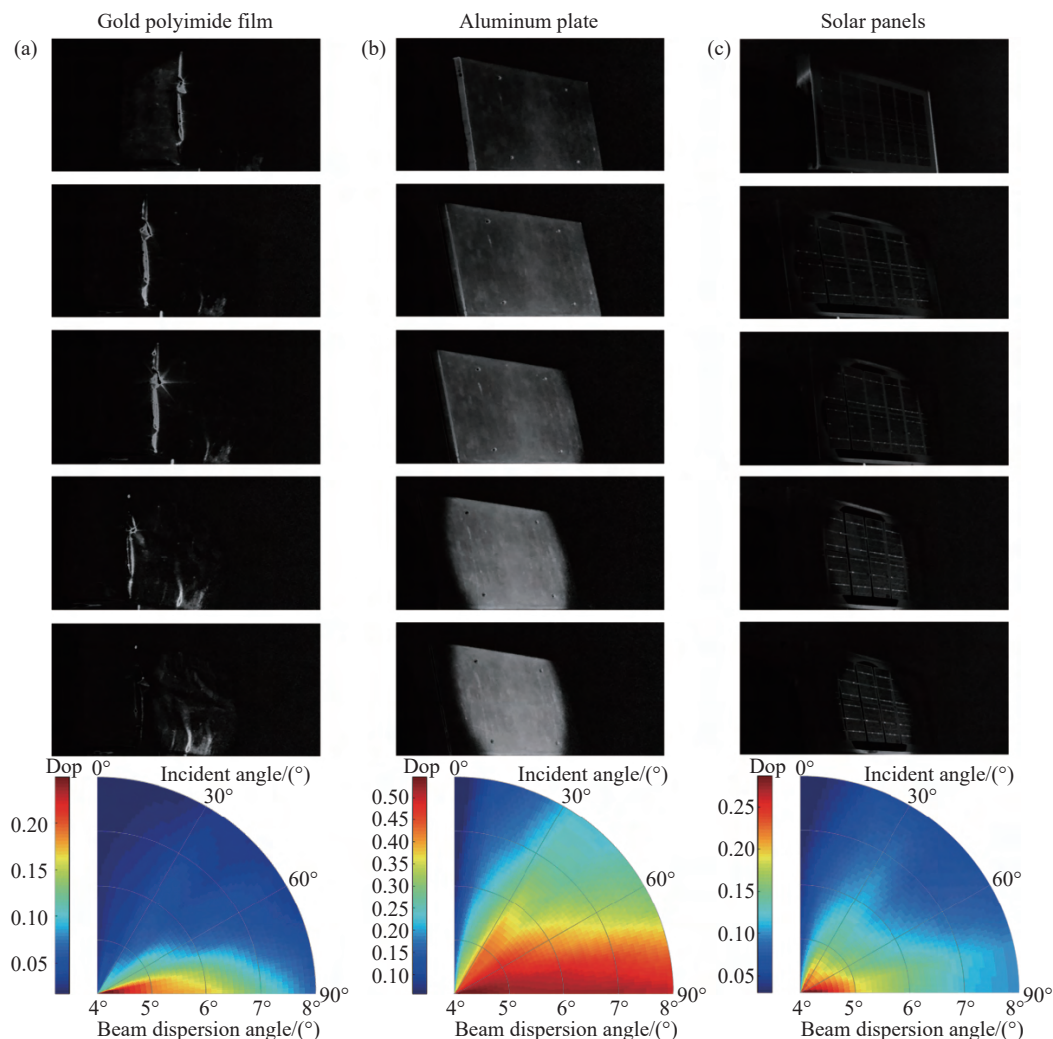
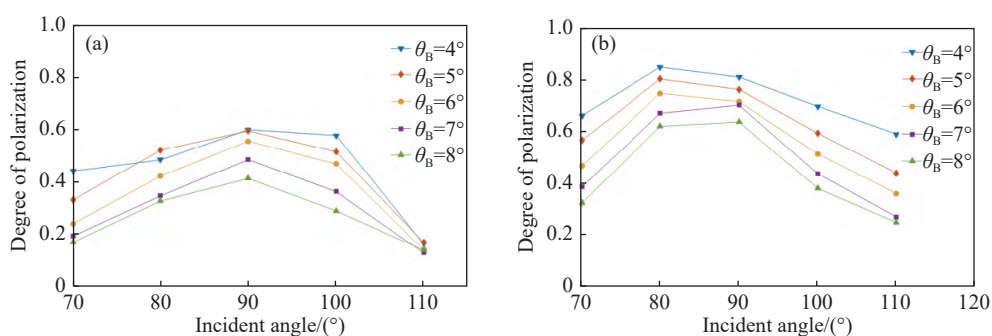


图 6 不同目标在不同束散角下观测角为 30° 时的偏振度分布特征。(a) 金色聚酰亚胺薄膜; (b) 铝板; (c) 太阳能电池板

Fig. 6 Polarization distribution characteristics of different targets at 30° observation angle with different beam dispersion angles for (a) gold polyimide film, (b) aluminum plate and (c) solar panels

图 8 为材料在同一探测角度和入射角度、不同束散角下线偏振度随光斑半径变化示意图。从图 8 可以看出随着光斑半径的增加, 材料表面线偏振度减小, 但增大束散角后其衰减趋势明显加强, 这是因为当束散角降低时, 入射线偏光的准直度有所提升。忽略环境等因素的影响, 假设准直

光线的传播方向均一致, 则反射光线也具有较好的方向一致性。而当束散角增加时, 边缘光线与入射平面间存在一定偏角, 束散角越大偏角越大, 使得反射光散射增加、探测器接收质量减弱, 导致目标表面线偏振度减弱。



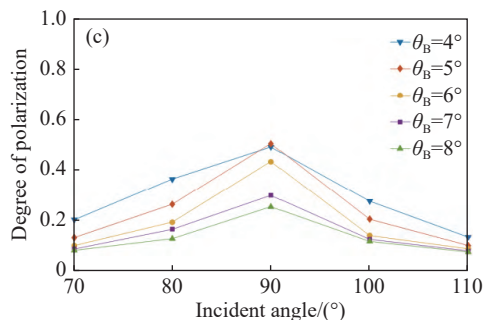


图7 不同目标在90°观测角时在不同束散角下的线偏振度变化曲线。(a)金色聚酰亚胺薄膜;(b)铝板;(c)太阳能电池板

Fig. 7 Variation curves of linear polarization at different divergence angles for different targets at 90° observation angle.

(a) Gold polyimide film. (b) Aluminum plate; (c) Solar panels

图9分别为金色聚酰亚胺薄膜、铝板及太阳能电池板的线偏振度分布特性测量值与计算值对比结果图。由图9可知,对于3种目标,基于激光照明的线偏振双向反射分布模型的线偏振度的仿真计算值与测量值有较好的一致性。这表明激光-偏振双向反射分布模型适用于入射光为典型高斯光束的可见光偏振特性分析。

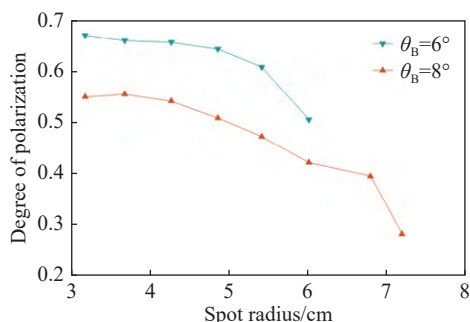


图8 铝板在同一观测角和入射角、不同束散角下线偏振度随光斑半径变化曲线

Fig. 8 The curve of spot radius versus linear polarization for aluminum plate at the same observation angle, the same incident angle and the different beam scattering angle

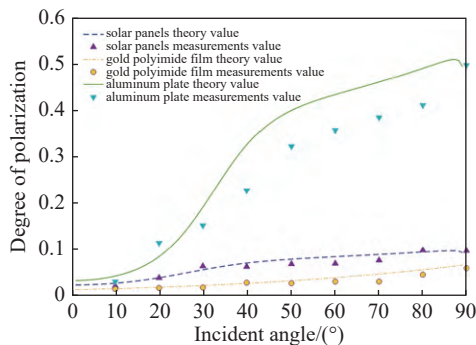


图9 实验仿真对比图

Fig. 9 The comparison of experimental and simulation results

3.2 室外太阳逆光实验

为验证本研究方法在远距离、强背景光下的可行性,开展了室外太阳逆光实验。实验采用的偏振成像装置由衰减片、可旋转偏振片以及低照度相机(P5241)组成。对照组成像装置为可见光工业相机(acA2040-180kc),两种实验都采用白光激光器进行辅助照明。观测地点位于长春理工大学南校区(E125.31412°, N43.83069°),实验时间为2023年7月30日,天气晴朗,室外温度为28℃,当日空气质量指数为42,室外测试距离为30~40 m,实验时间为15:00,观测目标为无人机(DJI Mini 3 Pro),实验现场如图10所示,成像系统参数如表4所示。

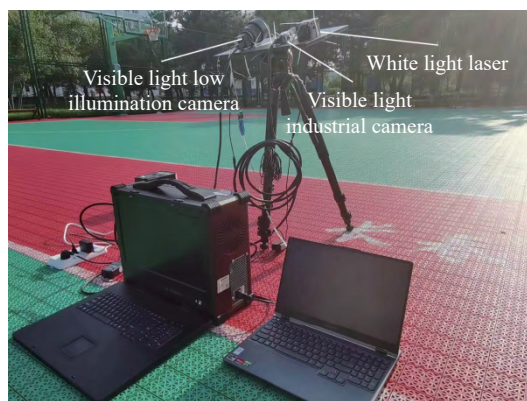


图10 室外太阳逆光实验现场图

Fig. 10 Outdoor sun backlight experimental site

采用与上文相同的激光主动照明方式,获取室外太阳背景下的目标对比图像。其中:图11(a)为室外太阳光下实测得到的可见光普通工业相机图像,在此场景下相机视场内太阳辐射较强,探测器接近饱和,太阳耀光背景区域内一片白亮,目标靠近太阳逐渐被吞没;图11(b)为相同条件下可见光低照度相机偏振图像,可见视场中太阳耀光

完全消除,且目标位于太阳中心时仍可清晰观测目标轮廓与细节。目标相对对比度如表 5 所示。

考虑太阳光辐射过强,因此采用衰减片适配偏振低照度相机,并利用可旋转偏振片抑制背景光,再结合激光照明提高目标在图像中的相对对比度。可见,使用偏振低照度相机后,目标对比度由普通工业相机的 0.03 增大到 0.24,且激光出光功率为 2 W,符合 2.4 节的计算结果。综上所述,在远距离、高强度背景光场景下的目标探测时,宜采用主动照明结合高灵敏度偏振探测器对目标进行提取。

表 4 成像系统主要技术参数
Tab. 4 Main technical parameters of imaging system

相机类型	指标	参数
可见光工业相机	响应波段/ μm	0.3 ~ 0.7
	镜头焦距/mm	25
	光圈数	16
	靶面分辨率	2 046 × 2 046
	像元尺寸/ μm	5.5
	灵敏度/lx	0.01
低照度相机	响应波段/ μm	0.3 ~ 0.7
	镜头焦距/mm	25
	光圈数	16
	靶面分辨率	1 920 × 1 080
	像元尺寸/ μm	12
	灵敏度/lx	10^{-4}

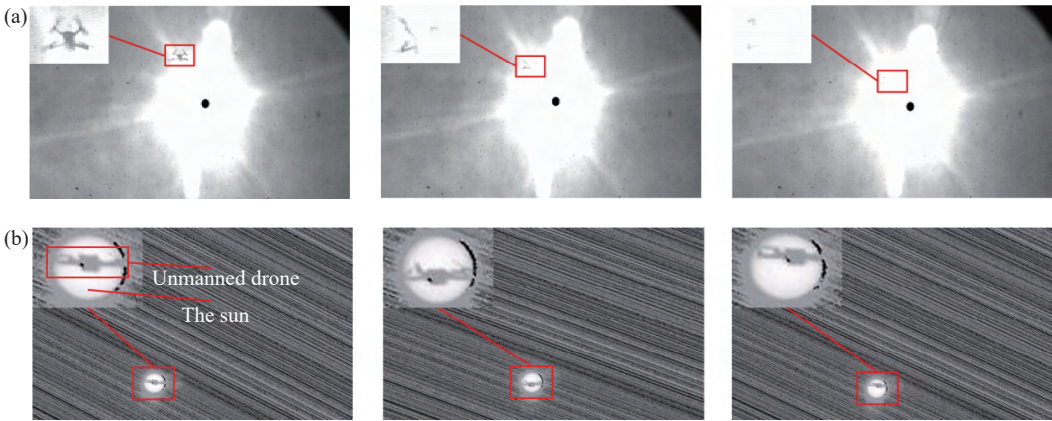


图 11 室外太阳背景下不同探测器得到的图像。(a)可见光工业相机;(b)偏振低照度相机

Fig. 11 Images captured by (a) visible light industrial cameras and (b) polarized low illumination cameras under outdoor sun background

表 5 室外强光背景下不同探测模式的实验结果
Tab. 5 Experimental results of different detection modes under strong outdoor light background

目标	图像对比度	
	非偏振图像	偏振图像
无人机	0.03	0.24

4 结 论

强光背景下目标无光照反射,使传统可见光探测系统无法对其进行观测,针对这一问题,本文提出了激光、偏振主被动复合的理论与探测方法。建立了基于激光入射的偏振双向反射分布模型以及偏振度模型,并计算了长远距离下激光照明所需功率。利用所提探测方法对强光背景下不

同目标的偏振信息进行测量,并基于实测数据验证分析了模型计算有效性。

逆光实验结果表明:在强光背景、激光主动照明下,3 种材料的线偏振度图像的对比特较传统强度图像分别提升了 80.56%、77.78%、100%,验证了探测方法的有效性;不同目标在不同束散角下的偏振特性不同,表面粗糙度较高的材料(如铝)受激光束散角影响较小,而表面光滑的材料(金色聚酰亚胺薄膜、太阳能电池板)受镜面反射影响,对入射角和束散角要求较高;在完全逆光状态下金色聚酰亚胺薄膜、太阳能电池板在束散角 5°后偏振度提升较小,而铝则不受影响,在实际探测中可根据上述结论,更快速有效地识别目标。室外太阳逆光实验结果表明:采用激光照明结合高灵敏偏振探测装置下偏振图像较传统强度图像灰度对比度提升 800%。此方法可在更高辐射强

度、高亮度背景下清楚识别目标,而随着高灵敏度探测器的发展,结合更高灵敏度的探测装置将能在清晰识别目标的前提下,有效降低主动激光照明功率。

本文提出的激光、偏振主被动复合探测方法

可以解决大部分强背景光探测问题,有效提升光学系统在强光下的探测能力。下一步工作中,拟开展典型背景偏振特性分析,通过与已有目标偏振特性进行比对,进一步提升探测效率,为强背景光偏振成像探测提供科学依据。

参考文献:

- [1] 徐森,史浩东,王超,等.空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J].中国激光,2021,48(12):1206002.
XU M, SHI H D, WANG CH, *et al.*. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(12): 1206002. (in Chinese).
- [2] 付强,史浩东,王超,等.天基空间碎片光电探测新技术研究[J].空间碎片研究,2020,20(4):49-55.
FU Q, SHI H D, WANG CH, *et al.*. Research on new technology of photoelectric detection for space-based space debris[J]. *Space Debris Research*, 2020, 20(4): 49-55. (in Chinese).
- [3] 张海峰,张忠萍,秦思,等.激光主动照亮地影中空间目标实验研究[J].中国激光,2014,41(S1):s108003.
ZHANG H F, ZHANG ZH P, QIN S, *et al.*. Experimental study on laser active illumination to space targets within the shadow of earth[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(S1): s108003. (in Chinese).
- [4] LI H SH. Research on space target detection ability calculation method and spectral filtering technology in sky-screen's photoelectric system[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2016, 58(5): 1035-1041.
- [5] 鲁梅,陈忠碧.基于梯度特征的弱小目标检测[J].激光与红外,2022,52(1):129-135.
LU M, CHEN ZH B. Dim target detection based on gradient feature[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(1): 129-135. (in Chinese).
- [6] 李岩松,赵慧洁,李娜,等.基于中红外偏振的海面太阳耀光背景下的目标探测[J].中国激光,2022,49(19):1910004.
LI Y S, ZHAO H J, LI N, *et al.*. Detection of marine targets covered in sun glint based on mid-infrared polarization[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1910004. (in Chinese).
- [7] 郭庭,张彬,顾乃庭,等.偏振哈特曼波前探测技术研究[J].光电工程,2021,48(7):210076.
GUO T, ZHANG B, GU N T, *et al.*. Research on polarization hartmann wavefront detection technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(7): 210076. (in Chinese).
- [8] 于洁,巩蕾,王海斌,等.伪装涂层红外偏振模型优化及辐射特性研究[J].中国激光,2023,50(13):1304007.
YU J, GONG L, WANG H B, *et al.*. Optimization of infrared polarization model and study of radiation characteristics of camouflaged coatings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(13): 1304007. (in Chinese).
- [9] 柳祎,史浩东,姜会林,等.粗糙目标表面红外偏振特性研究[J].中国光学,2020,13(3):459-471.
LIU Y, SHI H D, JIANG H L, *et al.*. Infrared polarization properties of targets with rough surface[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 459-471. (in Chinese).
- [10] 高明,宋冲,巩蕾.基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究[J].中国激光,2013,40(12):1213002.
GAO M, SONG CH, GONG L. Analysis of polarization characteristics about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(12): 1213002. (in Chinese).
- [11] 凌军,张拴勤,吴坚业,等.伪装涂层激光反射特性检测与实验研究[J].中国激光,2012,39(3):0308005.
LING J, ZHANG SH Q, WU J Y, *et al.*. Measurement and experimental study of laser reflectance characteristics of camouflage coat[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0308005. (in Chinese).
- [12] 陆君,李季波.常见自然地物对1.06 μm激光反射特性研究[J].光电技术应用,2015,30(5):71-73.
LU J, LI J B. Research on 1.06 μm laser reflectance characteristic for common natural features[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2015, 30(5): 71-73. (in Chinese).
- [13] 赵若曼,陈少捷,张川.空间目标激光雷达散射波实验室模拟技术[J].激光杂志,2021,42(3):91-95.
ZHAO R M, CHEN SH J, ZHANG CH. Laboratory simulation technology of Lidar scattering wave of space target[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(3): 91-95. (in Chinese).

- [14] 汪杰君, 王鹏, 王方原, 等. 材料表面偏振双向反射分布函数模型修正[J]. 光子学报, 2019, 48(1): 0126001.
WANG J J, WANG P, WANG F Y, *et al.*. Modified model of polarized bidirectional reflectance distribution function on material surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(1): 0126001. (in Chinese).
- [15] 张卫国. 海面太阳耀光背景下的偏振探测技术[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 231-236.
ZHANG W G. Application of polarization detection technology under the background of sun flare on sea surface[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 231-236. (in Chinese).
- [16] 王新涛, 郑建华, 李明涛. 小行星天基光学监测信噪比分析[J]. 光学 精密工程, 2021, 29(12): 2763-2773.
WANG X T, ZHENG J H, LI M T. Analysis of signal-to-noise ratio for space-based optical surveillance of asteroids[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(12): 2763-2773. (in Chinese).

作者简介:



史浩东(1989—), 男, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 吉林省青年托举工程人才, 2017 年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事先进光学系统设计及偏振探测技术方面的研究。E-mail: shihaodong08@163.com