

前向散射角度对偏振成像对比度影响的研究

战俊彤¹ 付强^{2*} 张肃² 段锦³ 张雅琳¹ 安岩² 刘显著¹ 姜会林²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²长春理工大学空地激光通信国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

³长春理工大学电信学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了分析前向散射角度对偏振成像的影响,从偏振图像对比度出发,分别研究不同偏振状态的线偏振光和不同前向散射角度对目标偏振图像对比度的影响。实验采用波长为532 nm水平线偏振光和-45°线偏振光照射目标,计算两者的偏振图像对比度。结果表明,前向散射角度的增加可有效提升偏振图像对比度,并且水平线偏振光的图像对比度低于-45°线偏振光的图像对比度。实验结论可为后续偏振成像探测工作提供技术支持。

关键词 成像系统; 前向散射; 对比度; 偏振成像; 偏振度

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0711007

Research on the Effects of Forward Scattering Angle to Polarization Imaging Contrast

Zhan Juntong¹ Fu Qiang² Zhang Su² Duan Jin³ Zhang Yalin¹

An Yan² Liu Xianzhu¹ Jiang Huilin²

¹Opto-Electronics Engineer Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

²Space Opto-Electronics Technology Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

³Electronics and Information Engineering Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract For analyze the impact of the forward scattering angle to polarization imaging, starting from the contrast ratio of the polarization image, the target is irradiated by horizontal polarization and -45° linear polarization respectively with 532 nm wavelength in different polarization states of the linearly polarized light, the polarization image contrast of them are calculated. The results show that the polarization image contrast is raised by the increasing of forward scattering angle and the horizontal linear polarization image contrast is lower than that of -45° linear polarization. The experimental results can provide technical support for the subsequent work on polarization imaging detection.

Key words imaging systems; forward scattering; contrast ratio; polarization imaging; degree of polarization

OCIS codes 110.5405; 290.2558; 290.5855

1 引言

当目标与背景辐射差异不明显时,偏振成像的效果要远高于强度成像。由于偏振光经过随机目标表面反射后,会使反射电场分量的相位、偏振态、偏振方位角发生改变^[1];不同目标表面材料具有不同的反射系数,人造目标与自然目标的偏振特性存在着很大差异,当强度成像无法探测识别到目标时,可以利用偏振态的变化对目标进行分类识别^[2]。由于偏振度(DOLP)代表的是不同方向上的能量比值,无需精确测量出入射到探测器的能量值,故而利用偏振成像探测的精度也会比强度成像的精度高很多^[3-4],获取到的斯托克斯参

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-02-25

作者简介: 战俊彤(1987—),女,博士,主要从事激光偏振传输特性方面的研究。Email: zhanjuntong@163.com

导师简介: 姜会林(1945—),男,教授,博士生导师,主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: HLLJiang@cust.edu.cn
通信联系人。E-mail: 673895960@qq.com

量不仅能获得目标的偏振信息,也能获取目标的强度信息。

各国科研人员对反射光偏振特性的产生机理及应用价值做了大量研究。例如纽约大学的 Eqan 分别对 C-130 型飞机、B-52 型飞机以及军事伪装车辆进行偏振特性研究。国内针对反射光偏振特性的研究大都集中在后向散射,对于前向散射研究较少^[5]。散射角度通常定义为入射光方向与散射光方向间的夹角。在透射情况下,当散射角为 0°~90°时,表示前向散射;在反射情况下,光的传输路径发生改变,当反射光与入射法线夹角小于 90°时为前向散射。

本文利用旋转偏振片法,获取目标板的前向散射光的斯托克斯矢量,计算了 532 nm 激光器发出的水平线偏振光和-45°线偏振光照射于目标板上的偏振图像对比度,通过理论分析和实验研究,分析前向散射角度对偏振图像对比度的影响,探索表面散射光的光强分布特征以及偏振特性规律。

2 偏振成像理论

偏振是矢量波的一种基本性质,指用一矢量来描述空间某一固定点所观测到的矢量波随时间变化的特征^[6]。各因素对偏振特性的影响可以用偏振度来表示。一般情况下,描述光波偏振态的方法有两种:琼斯矢量表示法和斯托克斯矢量表示法,前者通过琼斯矢量表示某电场矢量的 x 、 y 分量,它与电场的振幅及相位相关。在偏振光发生干涉效应时,通常采用琼斯矩阵计算法。后者斯托克斯矢量与光强成正比,利用 4 个斯托克斯参量来描述光波的偏振态和强度。与琼斯矢量不同的是,斯托克斯参量均是光强的时间平均值,具有强度量纲,可以直接被探测器探测。由于斯托克斯矢量运算的穆勒矩阵元素均为实数,且其中有不少元素为零,运算也较简单^[7]。通常把斯托克斯矢量 $(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 写做 $(I, Q, U, V)^T$,其中 Q 、 U 为线偏振光, V 为圆偏振光,实验中仅提取线偏振特征,故而 $V=0$,其中

$$\begin{cases} I = S_0 = \langle E_x^2 \rangle + \langle E_y^2 \rangle \\ Q = S_1 = \langle E_x^2 \rangle - \langle E_y^2 \rangle \\ U = S_2 = 2\langle E_x E_y \cos \varphi \rangle \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\langle E \rangle$ 表示时间平均的效果。

斯托克斯参量基本测量原理如图 1 所示。

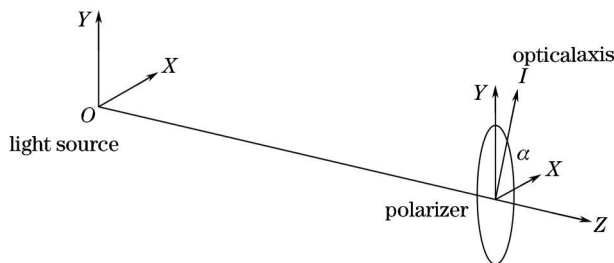


图 1 斯托克斯参量测量原理图

Fig.1 Configuration of the Stokes parameters measurement

在任意 xoy 平面内,与 x 轴夹角的方向上进行观测所得到的光强可以表述为^[8-11]

$$I(\alpha) = \langle E_x^2 \rangle \cos^2 \alpha + \langle E_y^2 \rangle \sin^2 \alpha + \langle E_x E_y \rangle \sin 2\alpha, \quad (2)$$

或

$$I(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\alpha + U \sin 2\alpha), \quad (3)$$

因此要获得某一瞬时目标真正的偏振信息,至少应从两个以上方向来检测偏振,才可以联立求出 I, Q, U 参量,并可以求出偏振光的偏振度 P , 对应的偏振度为

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \quad (4)$$

偏振角为

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1}(U/Q). \quad (5)$$

3 实验方法及过程

对目标板进行了前向散射实验,目标散射光偏振特性测量系统如图2所示,发射端与接收端均位于以目标为圆心的圆周上(圆周半径为2.2 m),在圆周上标记处 -20° 、 0° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 40° 、 45° 位置,发射端固定在 -20° 位置,接收端放置于 0° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 40° 、 45° 位置,从而使接收端与发射端形成 20° 、 30° 、 35° 、 40° 、 50° 、 60° 、 65° 七种不同的夹角。

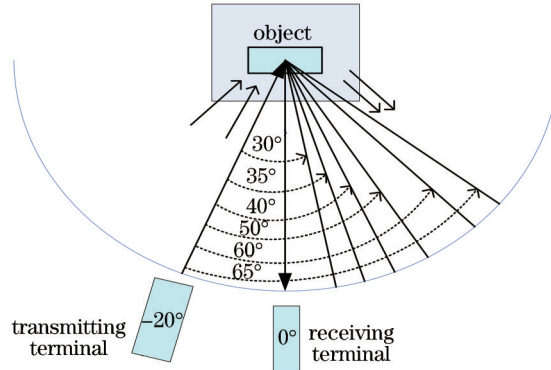


图2 目标散射光偏振特性测量系统示意图

Fig.2 Measuring system schematic diagram of the polarization characteristics of target scattering light

发射接收端装置如图2所示,由波长为532 nm输出功率为50 mW的固体激光器、2倍准直扩束器,透过光波段为400~700 nm的起偏器 P_1 ,10倍扩束器组成。接收端装置如图3所示,由透射光波段为400~700 nm的偏振片 P_2 ,接收相机组成。实验中使用维视图像MV-1300UM可见光相机接收400~700 nm波段的偏振图像。测量可见光波段偏振光对目标的前向散射实验时,使用532 nm固体激光器产生激光进入2倍准直扩束器,再进入起偏器 P_1 ,调节起偏器角度,使其出射为水平线偏振光或 -45° 线偏振光,经过10倍扩束器整形照射到涂漆的目标板上,照射到目标板上的前向散射光进入接收端的偏振片 P_2 ,最终进入终端进行数据处理。

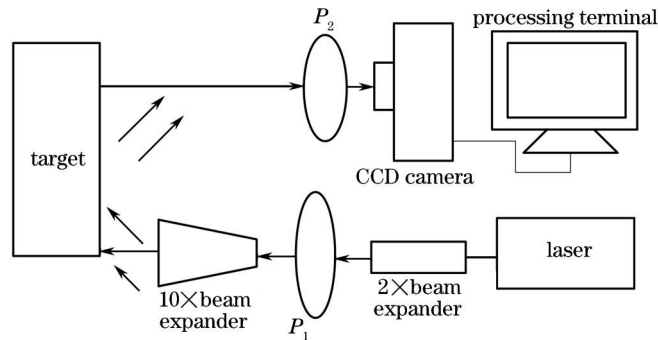


图3 发射接收装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of transmitter-receiver setup

上述装置的发射端接收端实物如图4所示。

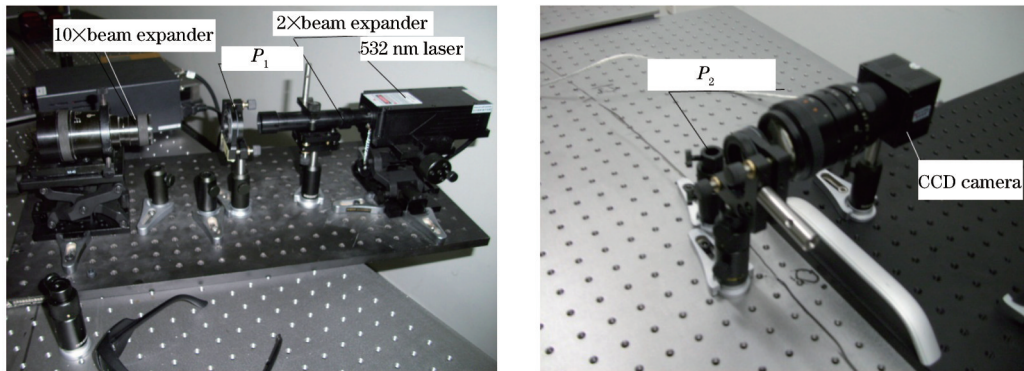


图4 发射端接收端装置实物图

Fig.4 Pictures of transmitter-receiver device

4 实验结果分析

以测试前向散度 40° 时为例进行说明。选用 532 nm 激光器照射到涂漆目标板上,目标板如图 5 所示。

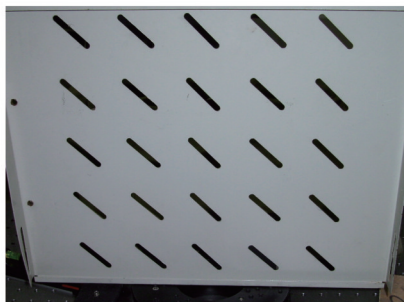


图 5 目标板实物图

Fig.5 Picture of target board

前向散射角为 20° 时,即入射端放置在 -20° 位置,出射端放置在 20° 位置,调整偏振片 P_1 为 0° 使初始入光为水平线偏振光,旋转偏振片 P_2 分别为 0° 、 90° 、 135° 时,采集到的 3 幅偏振图像,如图 6 所示。

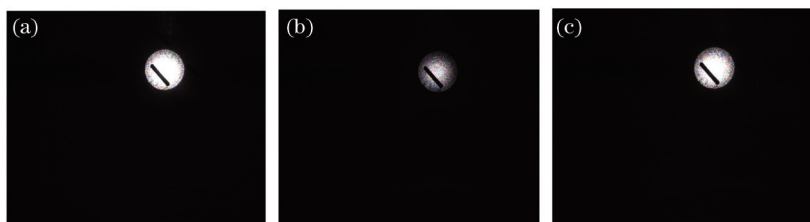


图 6 前向散射角为 40° 时初始入射光为水平线偏振光时偏振图像。(a) 0° ; (b) 90° ; (c) 135°

Fig.6 Polarized images of the incident light into horizontal polarization when the forward scattering angle is 40° . (a) 0° ; (b) 90° ; (c) 135°

调整偏振片 P_1 为 135° 使初始入射光为 -45° 线偏振光,旋转偏振片 P_2 分别为 0° 、 90° 、 135° 时,共采集 3 幅偏振图像,如图 7 所示。



图 7 前向散射角为 40° 时初始入射光为 -45° 线偏振光的偏振。(a) 0° ; (b) 90° ; (c) 135°

Fig.7 Polarized images of the incident light into -45° polarization when the forward scattering angle is 40° . (a) 0° ; (b) 90° ; (c) 135°

将采集到的图像中 I 、 Q 、 U 三种矢量融合后获得的 DLDP 图像,如图 8 所示,图 8(a) 的对比度为 6.215% ,图 8(b) 的对比度为 11.973% ,均比融合前的图像有大幅提高而且 -45° 线偏振光的偏振图像对比度优于水平线偏振光。

对表 1 中 DLDP 对比度数据进行拟合,结果如图 9 所示。测试得到的各个前向散射角度的偏振图像对比度数据如表 1 所示。

从图 9 可以看出,前向散射角度对偏振度有一些影响,在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 范围内前向散射角度越大。水平线偏振光经过前向散射后的偏振图像对比度与 -45° 线偏振光经过前向散射的偏振图像对比度相比,要略低。在前向散射角度 $20^\circ \sim 40^\circ$ 范围内, -45° 线偏振光的偏振图像对比度比水平线偏振光的偏振图像对比度提升 2% 。在前向散射角度 $40^\circ \sim 60^\circ$ 范围内 -45° 线偏振光的偏振图像对比度比水平线偏振光的偏振图像对比度提升 6% 。预期当前向散射角度为 110° 时,水平线偏振光与 -45° 线偏振光的偏振图像对比度将达到最大,对于这点将在后续实验开展测量给予研究。

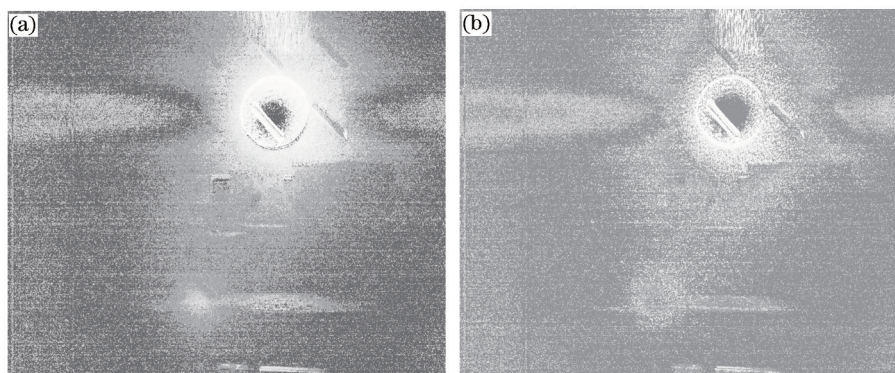


图 8 前向散射角为 40°时 DLOP 图像。(a) 初始入射光为水平线偏振光; (b) 初始入射光为 -45°线偏振光

Fig.8 DLOP images when forward scattering angle is 40°. (a) Incident light is horizontal polarization; (b) incident light is -45°polarization

表 1 前向散射角度与不同入射偏振态的 DLOP 对比度值关系

Table 1 Relation between the forward scattering angle and DLOP contrast ratio value in different incident polarizations

Angle θ / (°)	DLOP of horizontal polarized light	DLOP of -45° polarized light
20	5.071	9.023
30	6.104	10.371
35	6.119	11.763
40	6.215	11.973
45	8.634	13.735
50	8.593	14.241
60	11.85	17.424
65	17.143	17.712

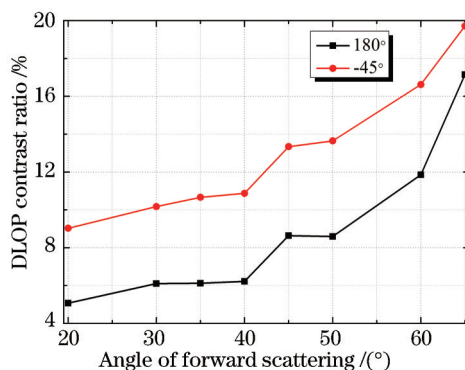


图 9 前向散射角度与偏振度图像对比度关系

Fig.9 Relation between the forward scattering angle and DLOP image contrast ratio

5 结 论

采用旋转偏振片法,产生水平线偏振光与-45°线偏振光照射目标板,获取目标的偏振图像,利用偏振图像的斯托克斯矢量进行图像融合,计算出目标板的偏振图像对比度,分析了多个前向散射角度对偏振图像对比度的影响,通过实验获得以下结论:1) 前向散射角度增大会使偏振图像对比度呈上升趋势;2) 水平线偏振光的偏振图像对比度要低于-45°线偏振光的偏振图像对比度。仅针对水平和-45°线偏振光进行实验,在后续工作中会增加后向散射角度的偏振图像,并对 90°线偏振光以及圆偏振光增加实验测试。

参 考 文 献

- 1 Yang Jinhua, Di Xu, Yue Chunmin, *et al.*. Polarization analysis on reflected light and three-dimensional measurement of object shape[J]. Acta Optica Sinic, 2008, 28(11): 2115-2119.

- 杨进华, 邸旭, 岳春敏, 等. 反射光偏振特性分析与物体形状的测量[J]. 光学学报, 2008, 28(11): 2115-2119.
- 2 Liu Biliu, Shi Jiaming, Zhao Dapeng, *et al.*. Mechanism of infrared polarization detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 777-781.
- 刘必臻, 时家明, 赵大鹏, 等. 红外偏振探测的机理[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(5): 777-781.
- 3 Zhang Xia, Zhan Yunsheng, Sun Tianlin, *et al.*. Quantitative research on the thermal radiation polarization properties of snow[J]. Acta Optica Sinic, 2012, 32(11): 1128001.
- 张霞, 赵云升, 孙天琳, 等. 雪的热辐射偏振特性定量研究[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128001.
- 4 Li Shujun, Jiang Huilin, Zhu Jingping, *et al.*. Development status and key technologies of polarization imaging detection[J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 803-809.
- 李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
- 5 Yang Zhiwen, Gao Shenggang, Wang Peigang, *et al.*. Polarization of reflected light by earth objects[J]. Acta Optical Sinica, 2005, 25(2): 241-245.
- 杨之文, 高胜钢, 王培纲, 等. 几种地物反射光的偏振特性[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 241-245.
- 6 Zhao Yunsheng, Wu Taixia, Hu Xinli, *et al.*. Study on quantitative relation between multi-angle polarized reflectance and bidirectional reflectance[J]. Journal of Infrared Millimeter Waves, 2005, 24(6): 441-444.
- 赵云升, 吴太夏, 胡新礼, 等. 多角度偏振反射与二向性反射定量关系初探[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(6): 441-444.
- 7 Cui Dong, Li Tie, Yan Wei, *et al.*. A study on laser backscattering polarization characteristics of painted metal samples[J]. Journal of Detection&Control, 2009, 31(2): 43-45.
- 崔东, 李铁, 闫炜, 等. 涂漆金属等几种目标的后向散射激光偏振特性[J]. 探测与控制学报, 2009, 31(2): 43-45.
- 8 Xu Canjun, Su Lan, Yang Genyuan, *et al.*. Images processing and evaluation of middle wave infrared polarization imaging system[J]. Infrared Technology, 2009, 31(6): 362-366.
- 徐参军, 苏兰, 杨根远, 等. 中波红外偏振成像图像处理及评价[J]. 红外技术, 2009, 31(6): 362-366.
- 9 Caetano D P, Ribeiro P H, Pardal J T C, *et al.*. Quantum image control through polarization entanglement in parametric down-conversion[J]. Phys Rev A, 2003, 68(2): 1-5.
- 10 J S Harchanko, D B Chenault. Water-surface object detection and classification using imaging polarimetry[C]. SPIE, 2005, 5888: 588815.
- 11 F Cremer, W de Jong, K Schutte. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines[J]. SPIE, 2002, 41(5):1021-1032.

栏目编辑: 苏 岑