

## 基于双高斯拟合的目标激光偏振特性实验研究

杨雨迎<sup>1,2</sup>, 崔占忠<sup>2</sup>, 张万君<sup>1</sup>

(1. 装甲兵工程学院 兵器系, 北京 100072; 2. 北京理工大学 机电动态控制重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 对几种典型目标的后向散射光偏振度进行了测量和分析。基于探测光的 Stokes 矢量描述, 利用接收光路和发射光路的一体化设计, 设计了典型目标偏振特性的激光探测实验装置; 在不同偏振光入射角、不同粗糙度参数以及不同表面材质的条件下, 对几种典型目标后向散射光的偏振度进行了测量; 在实验的基础上对偏振度测量数据进行了双高斯拟合和分析, 得出了目标后向散射光偏振度与双高斯函数基本吻合以及基于后向散射光偏振度可以区分不同属性目标的结论。

**关键词:** 后向散射光; 偏振度; 收发一体化; 双高斯拟合

中图分类号: TN249 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)02-0449-06

## Experimental study on laser polarization characteristics of target based on double Gaussian fitting

Yang Yuying<sup>1,2</sup>, Cui Zhazhong<sup>2</sup>, Zhang Wanjun<sup>1</sup>

(1. Department of Arms Engineering of Academy, Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. State Key Lab of Mechatronics Engineering and Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The degree of polarization of backscattering laser, which is scattered from several typical targets, was measured and analyzed. Basing on the description of detection laser with Stokes vector, experimental setup of laser detection for polarization characteristics of typical targets was designed using the transceiver integration; the degree of polarization of backscattering laser of several typical targets was measured under the conditions of different angle of incidence laser, different roughness parameters and different materials of target surface; the measurement data of degree of polarization was analyzed after double Gaussian fitting on the basis of foregoing experiments, two conclusions that the degree of polarization of backscattering laser highly fits the double Gaussian function and targets with different attributes can be distinguished using the degree of polarization of backscattering laser were achieved at last.

**Key words:** backscattering laser; degree of polarization; transceiver integration; double Gaussian fitting

收稿日期: 2014-06-13; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61174219); 机电动态控制重点实验室基金(9140C360707070C11BQ01)

作者简介: 杨雨迎(1982-), 男, 博士, 主要从事目标探测、制导与毁伤效果评估方面的研究。Email: [xuanxuan20120328@163.com](mailto:xuanxuan20120328@163.com)

## 0 引言

偏振是激光强度、频率和相干属性之外的重要信息,有效拓展了激光探测的信息维度<sup>[1]</sup>。由于目标和背景表面材质、粗糙度以及探测光状态的不同,散射光包含与目标和背景表面性质相关的偏振特性。利用散射光的偏振信息探测目标,可提高激光探测器在复杂环境中的目标辨别能力。近几年,基于偏振探测技术的实验研究主要集中在军事目标识别<sup>[2-9]</sup>、医学检测<sup>[10-11]</sup>、偏振遥感<sup>[12-15]</sup>等领域,大多数研究工作的核心都是将散射光偏振信息作为模式识别的特征信息,在强度信息外辅以偏振信息排除干扰,提高目标探测与识别的性能。

在上述参考文献的研究基础上,针对典型的激光探测目标辨别问题,文中研究了不同目标样板对偏振激光的消偏振特性,对不同偏振光入射角度、不同粗糙度参数以及不同表面材质的条件下目标的后向散射光偏振度进行了测量和分析,得出的结论为利用偏振信息辨别目标奠定了基础。

## 1 激光偏振特性的探测实验设计

描述偏振探测光的 Stokes 矢量  $S=[S_0S_1S_2S_3]'$  中,  $S_0$  参量表示偏振光总的光强度  $I$ ;  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  参量分别表示偏振光水平线偏振分量(即  $x$  分量)和垂直线偏振分量(即  $y$  分量)的强度差值、 $+45^\circ$  方向线偏振分量和  $-45^\circ$  方向线偏振分量的强度差值、右旋圆线偏振分量和左旋圆偏振分量的强度差值。实际光束一般同时包含完全偏振光和完全非偏振光,其中完全偏振光  $I_{\text{pol}}$  的占比为该光束的偏振度 DOP (Degree of Polarization)<sup>[16]</sup>:

$$\text{DOP} = \frac{I_{\text{pol}}}{I} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (1)$$

同一束探测光以不同入射角照射同一目标,或者固定入射角照射不同目标时,后向散射光的 DOP 值不同。通过测量后计算不同探测条件下后向散射光的 DOP 值,可以作为区分目标属性的依据。基于此原理,文中设计了如图 1 所示的实验系统,并对典型的地面目标样板的后向散射光进行了偏振度测量和分析。

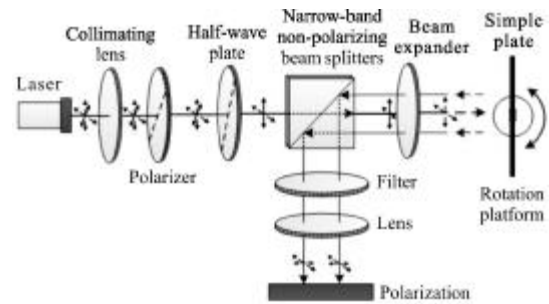


图 1 基于偏振特性的激光探测实验装置

Fig.1 Experimental setup of laser detection basing on polarization characteristic

## 2 实验

实验采用 1 064 nm 的激光器作为探测光源,经准直后通过偏振片的出射光为线偏振光,而后通过旋转  $\lambda/2$  波片调整线偏振光的偏振方向。为了获取目标样板的后向偏振散射光,文中利用窄带消偏振分光棱镜实现接收光路和发射光路的一体化。目标样板后向散射光沿入射光路返回,经扩束镜进入窄带消偏振分光棱镜,棱镜不区分水平和垂直偏振光,接收并反射后向散射光至检测光路;分光棱镜出射光经滤光片和透镜后照射到偏振计上,通过偏振计获取后向散射光的 DOP 值。

### 2.1 实验方法

选取几种典型材质的目标样板作为被测对象,其中相同材质的样板由同一块样板切割而成,区别在于表面作了不同的处理。采用 Olympus OLS 4000 型激光共焦显微镜进行测量,目标样板的表面特性测量参数如表 1 所示。

表 1 典型目标样板表面的粗糙度参数

Tab.1 Roughness parameters of typical target surfaces

No.	Material	RMS height / $\mu\text{m}$	Mean height / $\mu\text{m}$	Feature description
1	Aluminum	13.166	10.202	Hand sanding
2	Aluminum	6.594	5.054	Original
3	Copper	14.427	11.239	Hand sanding
4	Copper	8.748	6.663	Original
5	Iron	8.219	6.454	Rusty
6	Iron	10.215	7.609	Original
7	Iron	6.931	5.507	Dark green paint coating
8	Wood	12.884	9.743	Creamy white paint coating
9	Leaf	11.195	8.874	Holly leaf

被测样板表面垂直于工作面, 距离探测光出射点为 8 m。样板表面初始设置为与探测光路的光轴垂直, 即入射角为 0°。通过步进电机使旋转台在 [80°, 80°] 范围内以 1° 为单位水平旋转, 分别测量不同入射角条件下的后向散射光的偏振度, 偏振计采用 ThorlabsPAX5710。当入射角度、粗糙度参数、表面材质等条件一定时, 对偏振计输出值进行采样, 采样点设为 1 024 个, 然后取平均值作为该实验条件下的后向散射光 DOP。

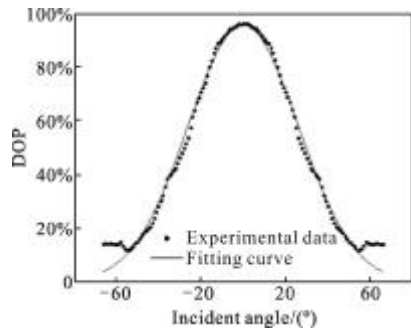
2.2 实验结果与分析

对同一块样板在全入射角条件下测量的实验数据进行双高斯拟合, 拟合 DOP 测量值的双高斯函数如公式(2)所示:

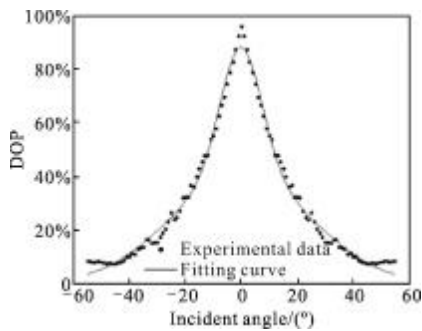
$$f_{DOP} = a_1 \exp\left(-\left(\frac{x-b_1}{c_1}\right)^2\right) + a_2 \exp\left(-\left(\frac{x-b_2}{c_2}\right)^2\right) \quad (2)$$

式中:  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  为双高斯拟合函数的系数。对于表 1 中的 5、6、7 号铁质样板, 其后向散射光偏振度测量数据及拟合曲线如图 2 所示。

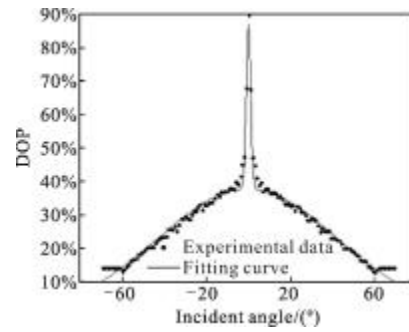
从图 2 中可以看出, 铁质样板后向散射光的偏振度值随其表面性质的不同而不同。5 号样板表面的



(a) 5 号样板(生锈)  
(a) No.5 sample plate(rusty)



(b) 6 号铁板(表面未处理)  
(b) No.6 sample plate(original)



(c) 7 号样板(墨绿色漆涂层)

(c) No.7 sample plate(coated with dark green paint)

图 2 铁质样板后向散射光偏振度测量数据及拟合曲线  
Fig.2 Experimental data of DOP and fitting curves of backscattering laser of iron plates

铁锈层起到了类似喷漆的效果, 粗糙度较小, 偏振度随入射角变化较为平缓, 当入射角大于 55° 时偏振度逐渐趋于一个固定偏振度值; 对于 7 号涂层样板, 当探测光垂直入射时后向散射光偏振度较大, 随着入射角的增大偏振度值迅速减小。

对偏振度数据进行双高斯拟合, 拟合曲线的参数取值如表 2 所示。将拟合曲线和实际数据进行对比可以发现: 考虑实验误差, 在 [-60°, 60°] 入射角范围内, 5 号生锈铁板和 7 号涂层样板后向散射光偏振度与双高斯拟合曲线吻合程度高; 6 号未处理铁板在 [-50°, 50°] 入射角范围内与双高斯拟合曲线基本吻合, 只在垂直入射时存在一定偏差。

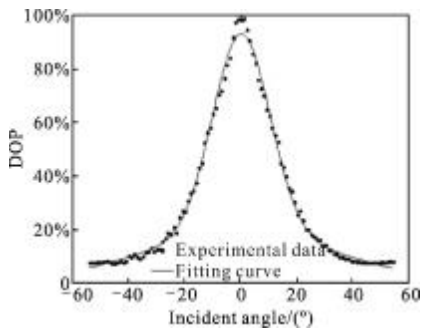
表 2 双高斯拟合参数(95%置信区间)

Tab.2 Double Gaussian fitting parameters (95% confidence interval)

No.	Double Gaussian fitting parameters					
	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$
5	95.510	0.005	36.960	0.000	0.000	0.000
6	47.300	-0.000	10.400	40.560	0.002	35.010
7	49.430	-0.008	1.537	37.710	-0.338	60.390

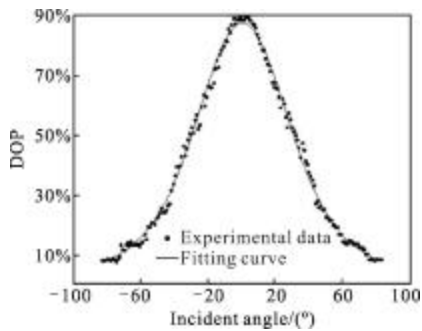
为了对比不同金属材质的样板后向散射光偏振度, 对表 1 中 1、2、3、4 号金属样板的后向散射光偏振度测量数据进行拟合, 其后向散射光偏振度测量数据及拟合结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,铝、铜质样板的后向散射光偏振度双高斯拟合曲线与实验测量数据吻合程度较高:2 号铝板在入射角 $[-80^{\circ},80^{\circ}]$ 范围内均表现出较高的吻合程度,1 号铝板和 3、4 号铜板在入射角 $[-60^{\circ},60^{\circ}]$ 范围内也与拟合曲线基本吻合;砂纸打磨后的样板拟合程度要好于未打磨样板;不同材质的样板经过砂纸打磨后偏振度随入射角的变化趋势不同,铝板的变化差异较为明显。双高斯拟合曲线的参数取值如表 3 所示。



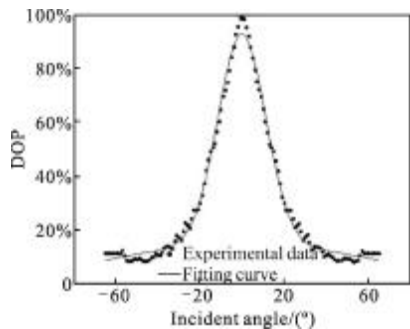
(a) 1 号铝板(砂纸打磨)

(a) No.1 sample plate (burnished with sand paper)



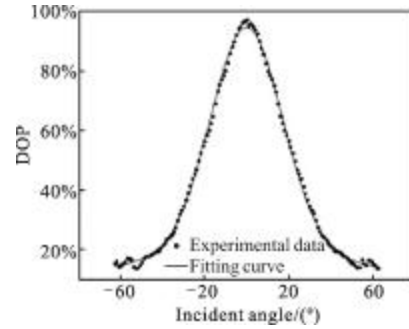
(b) 2 号铝板(未打磨)

(b) No.2 sample plate (original)



(c) 3 号铜板(砂纸打磨)

(c) No.3 sample plate (burnished with sand paper)



(d) 4 号铜板(未打磨)

(d) No.4 sample plate (original)

图 3 铝、铜质样板后向散射光偏振度测量数据及拟合曲线  
Fig.3 Experimental data of DOP and fitting curves of backscattering laser of aluminum and copper plates

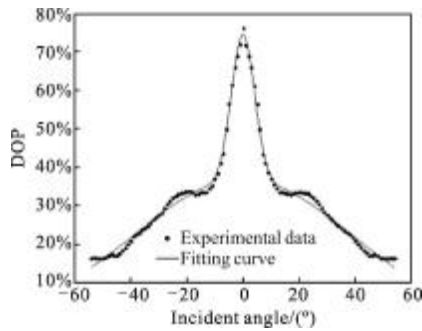
表 3 双高斯拟合参数(95%置信区间)

Tab.3 Double Gaussian fitting parameters (95% confidence interval)

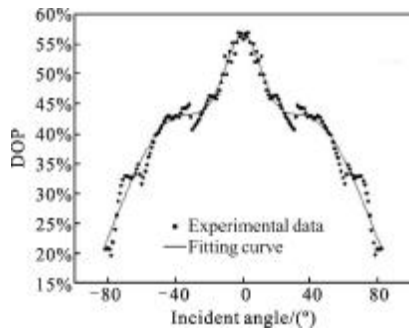
No.	Double Gaussian fitting parameters					
	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$
1	60.82	0.498	34.02	26.47	0.968	72.81
2	74.71	0.017	14.43	18.21	-0.386	50.66
3	76.34	0.009	24.4	18.14	-1.236	128.3
4	78.17	-0.004	16.08	14.74	-0.002	89.78

对表 1 中的两个非金属样板的后向散射光偏振度测量数据进行拟合,偏振度测量数据和拟合曲线如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,对于非金属物体表面的后向散射偏振度,双高斯拟合曲线与实验数据大致吻合:对于带乳白色漆涂层的木板,由于涂层的存在使得样板后向散射光偏振度变化趋势和墨绿色漆涂层铁板类似,垂直入射时偏振度较大,随入射角增大迅速减小;对于冬青树叶,由于其表面结构的复杂性,后向散射光偏振度随入射角的增大呈分段阶梯状下降趋势,在入射角 $[-80^{\circ},80^{\circ}]$ 范围内,整体变化趋势仍可以近似看作双高斯曲线。两种非金属样板后向散射光偏振度峰值均远小于金属样板后向散射光偏振度峰值。拟合曲线的参数取值如表 4 所示。



(a) 8号木板(乳白色漆涂层)  
(a) No.8 sample plate (coated with milk whitepaint)



(b) 9号冬青树叶  
(b) No.9 leaf of holly

图 4 非金属样板后向散射光偏振度实验数据及拟合曲线  
Fig.4 Experimental data of DOP and fitting curves of backscattering laser from non-metal plates

表 4 双高斯拟合参数(95%置信区间)

Tab.4 Double Gaussian fitting parameters (95% confidence interval)

No.	Double Gaussian fitting parameters					
	$a_1$	$b_1$	$c_1$	$a_2$	$b_2$	$c_2$
8	37.5	-0.010	5.779	36.92	-0.005	54.72
9	16.68	0.0172	15.38	40	-41.7	50

### 2.3 双高斯函数拟合度分析

对于不同目标样板的后向散射光偏振度实验数据  $(f_i, x_i)$ ,  $f_i$  为偏振度测量值,  $x_i$  为入射角。分别利用高斯函数、双高斯函数和多项式拟合方法对部分样板的实验数据  $(f_i, x_i)$  进行了拟合,不同拟合函数的拟合度参数——均方根 RMSE 如表 5 所示。

从表 5 中可以看出,对于 1、2 号板,双高斯函数拟合的 RMSE 值远小于多项式拟合;对于 7 号板,探测光垂直或者接近垂直入射时,后向散射光中存在

较大的镜像反射分量,双高斯函数相比高斯函数和多项式能更好地反映镜像分量的存在。

表 5 不同拟合函数的拟合度参数——RMSE

Tab.5 RMSE - Goodness of fit using different fitting functions

No.	Double Gaussian	Gaussian	Quadratic polynomial	Quartic polynomial
1	2.097	3.657	12.2	4.989
2	2.05	6.111	18.52	11.1
7	1.43	1.652	1.488	1.43

综上,对于不同表面性质的样板,双高斯函数相比高斯函数和多项式具有较高的拟合度,能更好地反映后向散射光偏振度曲线。

### 3 结论

对铝、铜、铁三种金属以及木板、树叶两种非金属等九块样板的后向散射光偏振特性进行的实验及数据拟合结果说明:

(1) 在有效数据角度  $[-60^\circ, 60^\circ]$  范围内,典型样板的后向散射光偏振度测量数据随入射角变化趋势符合双高斯函数。

(2) 金属和非金属样板的后向散射光偏振度峰值区别明显,变化趋势及其拟合曲线也存在明显差异,此特性可以作为区分金属属于非金属材质目标的依据;涂层和无涂层样板的后向散射光偏振度变化趋势和双高斯拟合曲线不同,基于此特性也可用于区分样板表面有无涂层。

### 参考文献:

- [1] Bass M, Mahajan V N. Handbook of Optics[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc, 2010.
- [2] Frank C, Wim D J, Kalmer S. Infrared polarization measurements of surface and buried anti-personnel landmines[C]//SPIE, 2001, 4394: 164-175.
- [3] Egan W G, Duggin M J. Synthesis of optical polarization signatures of military aircraft[C]//SPIE, 2002, 4481: 188-194.
- [4] Egan W G, Duggin M J. Optical enhancement of aircraft detection using polarization[C]//SPIE, 2000, 4133: 172-178.
- [5] Hosam E O. Laser backscattered from partially convex targets of large sizes in random media for E-wave polarization [J].

- Optical Society of America, 2006, 23(8): 1908-1913.
- [6] Dubreuil M, Delrot P, Leonard I, et al. Exploring underwater target detection by imaging polarimetry and correlation techniques [J]. Optical Society of America, 2013, 52 (5): 997-1005.
- [7] Frank C, Wim D J, Klamer S. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines [J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2002, 41(5): 1021-1032.
- [8] Jiang Shu, Lai Jiancheng, Wang Chunyong, et al. Experimental study of depolarization characteristic of typical rough surfaces[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2011, 35(3): 294-297. (in Chinese)  
江舒, 来建成, 王春勇, 等. 典型粗糙表面的退偏振特性实验研究[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2011, 35(3): 294-297.
- [9] Cui Dong, Li Tie, Yan Wei. A study on laser backscattering polarization characteristics of painted metal samples[J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(2): 41-45. (in Chinese)  
崔冬, 李铁, 闫炜. 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): 41-45.
- [10] Tatiana N, Arnaud E, Francois G, et al. Sources of possible artifacts in the contrast evaluation for the backscattering polar metric images of different targets in turbid medium[J]. Optical Society of America, 2009, 17(26): 23851-23860.
- [11] Chennault D B, Larry P J. Polarization imaging through scattering media [C]//SPIE, 2000, 4133: 124-133.
- [12] Meng L F, Kerekes J P. Adaptive target detection with a polarization sensitive optical system [J]. Optical Society of America, 2000, 50(13): 1925-1932.
- [13] Miller M A, Blumer R V, Howe J D. Active and passive SWIR imaging polarimetry[C]//SPIE, 2001, 4481: 87-99.
- [14] Williams J W, Howard S T, Mark A P. Image processing and classification of the UK remote minefield detection system infrared polarimetric camera [C]//SPIE, 2001, 4394: 57-67.
- [15] Zhang Chaoyang, Cheng Haifeng, Chen Zhaohui, et al. Application of polarization remote sensing in camouflage detection and method of polarization stealth [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(4): 553-556. (in Chinese)  
张朝阳, 程海峰. 偏振遥感在伪装目标识别上的应用及对抗措施[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(4): 553-556.
- [16] Dennis Goldstein. Polarized Light [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2005.
- [17] Bai Rugui, Lv Hongjun. Bi-Gaussian fitting theory measuring fibers band in time domain [J]. Laser Journal, 1987, 8(4): 256-259. (in Chinese)  
白儒贵, 吕洪军. 时域法测最光纤带宽的双高斯拟合理论[J]. 激光杂志, 1987, 8(4): 256-259.