

## 解偏振度的测量及偏振成像探测识别

陶海鹏, 陈 强, 王志明

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:**在对解偏振进行定义的基础上,用 Mueller 矩阵参数元表述了解偏振度,并根据斯托克斯 - Mueller 矩阵关系式,设计了实验装置测量两种硬币的解偏振度。用线偏振激光作光源、CCD 相机做成像探测器的方法对包含有两硬币的目标进行主动成像实验,实验中,采集了六张不同偏振夹角的偏振图像和一张无检偏振器时的图像。实验证明,利用偏振技术并通过选取合适的偏振夹角对目标进行成像的方法,可以有效地提高成像探测的图像对比度,有利于目标的探测与识别。

**关键词:**激光技术;图像对比度检测(采用旁置四边形);主动成像;解偏振度;Mueller 矩阵

**中图分类号:**TN249      **文献标识码:**A

## Measurement of the depolarization and polarization imaging technique

TAO Hai-peng, CHEN Qiang, WANG Zhi-ming

(School of Mechanical Engineering of Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Using Mueller matrix element of parameters to represent the depolarization of one object, experimental device is designed to measure the depolarization degree of two types of coins according to the relation of the Stokes-Mueller matrix. Then active imaging experiment is carried out on the two coins, using linear polarized laser as light source and CCD camera as the imaging detector. In the experiments, an image without check polarizer and six polarization images with different polarization angles are collected. Experimental results show that the polarization image technique with appropriate polarization angle can effectively improve the image contrast, which is helpful to distinguish different targets.

**Key words:** laser technique; detection of image contrast; active imaging; the degree of depolarization; Mueller matrix

### 1 引言

目标的探测与识别是现代战争中进行有效打击的前提<sup>[1]</sup>,而成像探测与识别是当今遥感探测领域重要的组成部分,如何提高成像的质量成为重要研究课题,然而,要成像就必须得有光照,为了克服探测环境中自然光照欠缺的问题,人们开始采用主动式激光探测<sup>[2]</sup>。S. A. Sullivan 等人在 1963 年的研究中发现:“在海水中也有一个类似于大气透光窗口一样的海水透过窗口——它对 470 ~ 580 nm 之间波长范围内的光的缩减系数比较小,因此,这些范围内的光波在水中具有很好的透过能力”,所以,研究者开始越来越多关注这方面的研究,特别是这些波

长范围的蓝绿激光,利用它们的透过能力进行水下目标的探测<sup>[3]</sup>。然而,尽管蓝绿激光是海水窗口,具有较小的衰减,但是海水介质对光的强吸收和强散射作用却极大地限制了其发展,如何减少吸收和散射作用是当前激光水下探测的难点,近些年利用激光退偏振技术探测水下目标的研究开始进行<sup>[4]</sup>,本文正是基于该总体思想而展开的系列研究实验,因此选用的是 532 nm 的绿光做实验光源,并提出了

作者简介:陶海鹏(1985 -),男,硕士研究生,研究方向为主动式线偏振激光水下目标探测,车流量计设计等。E-mail: evonneer@hotmail.com

收稿日期:2010-09-27

旁置四边形偏振成像对比识别法,为以后的激光探测水下目标提供了一种有效手段。

### 2 解偏振定义

若入射光为线偏振光,用它照射一器件或物体后,散射光(出射的透射光或反射的散射光)会变成部分偏振光<sup>[5]</sup>,这种偏振变化过程叫做光的退偏振现象(也可称解偏振)。基于斯托克斯矢量的 Mueller 矩阵表示法是通常使用最广泛的描述解偏振的方法,它是基于斯托克斯矢量的(4×4)M 矩阵表述法,通过研究矩阵的 16 个参数元来定义与之相关的解偏振度,定义的斯托克斯矢量关系式为<sup>[6]</sup>:

$$S_{out} = \begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = M S_{in} = M \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于理想解偏振器件(即将入射的完全偏振光变成非偏振光的器件),它的 M 矩阵为<sup>[7]</sup>:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

对于非理想器件则 M 矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{pmatrix} \quad (3)$$

由它表示的解偏振度为<sup>[8]</sup>:

$$P_d = \sum_{i,j=1}^4 m_{ij}^2, 1 \leq P_d \leq 4 \quad (4)$$

式中,  $P_d = 1$  表示完全解偏振;  $P_d = 4$  表示完全保持入射偏振状态。

### 3 解偏度测量

为了获得 Mueller 矩阵的 16 个未知元,设计了以下实验测量装置,下面就通过实验来测量 16 个矩阵元  $m$ , 测量原理如图 1 所示<sup>[9]</sup>。

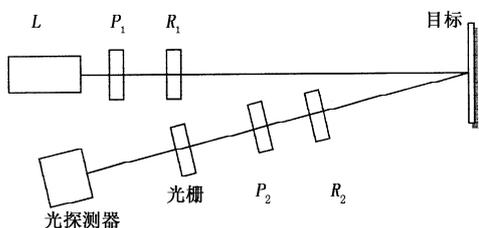


图 1 Mueller 矩阵测量实验原理示意图

L 为激光光源,  $P_1$  和  $P_2$  分别为偏振器 1 和 2, 并分别表示它们的 Mueller 矩阵;  $R_1$  和  $R_2$  则分别为

四分之一波片 1 和 2, 也分别表示它们各自的 Mueller 矩阵, 入射激光源的斯托克斯矢量用  $S$  表示, 两个偏振器之间的整个系统的 Mueller 矩阵为  $P_2 R_2 M R_1 P_1$  ( $M$  为所通过光介质 Mueller 矩阵), 则探测的光强度可表示为<sup>[10-11]</sup>:

$$I = C A P \quad (5)$$

其中,  $C$  为常数, 是光源绝对强度与  $S$  归一化后的强度之比值;  $A = P_2 R_2$ ;  $P = P_1 R_1 S_1$ , ( $S_1$  为激光光源归一化后斯托克斯矢量);  $P$  为所测量光介质入射光斯托克斯矢量;  $A$  为所测量光介质出射光检测分析 Mueller 矩阵。显而易见:

$$I = C \sum_{i,j=1}^4 a_i p_j m_{ij} \quad (6)$$

式中,  $a_i$  是  $A$  的第一行元素值;  $p_j$  为  $P$  的元素值;  $m_{ij}$  为  $M$  元素值, 因为我们仅测量斯托克斯矢量的强度值, 即第一个值  $I$ , 上式可以表示为:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ \bullet \\ \bullet \\ \bullet \end{bmatrix} \quad (7)$$

将以上各值相乘得:

$$I = a_1 (m_{11} p_1 + m_{12} p_2 + m_{13} p_3 + m_{14} p_4) + a_2 (m_{21} p_1 + m_{22} p_2 + m_{23} p_3 + m_{24} p_4) + a_3 (m_{31} p_1 + m_{32} p_2 + m_{33} p_3 + m_{34} p_4) + a_4 (m_{41} p_1 + m_{42} p_2 + m_{43} p_3 + m_{44} p_4) \quad (8)$$

在实验中, 设水平方向为  $X$  轴, 取  $P_1$  水平偏振,  $R_1$  与  $X$  轴角为  $\alpha$ ,  $R_2$  与  $X$  轴夹角为  $\beta$ ,  $P_2$  偏振化方向垂直于  $X$  轴, 归一化光源斯托克斯矢量为  $S_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T$ , 则根据“光的偏振及其应用”矩阵表可查得各元器件  $M$  矩阵, 将各元器件的  $M$  矩阵代入  $A = P_2 R_2, P = P_1 R_1 S_1$  两式可得:

$$\begin{cases} p_1 = 1, p_2 = \cos^2 2\alpha, p_3 = \cos 2\alpha \sin 2\alpha, p_4 = \sin 2\alpha \\ a_1 = 1, a_2 = \cos^2 2\beta, a_3 = \cos 2\beta \sin 2\beta, a_4 = -\sin 2\beta \end{cases} \quad (9)$$

转动四分之一波片  $R_1$  和  $R_2$ , 取不同的  $\alpha$  和  $\beta$  值测量独立的 16 组光强度值, 可得到 16 个独立方程, 通过这 16 个方程组成的方程组即可解得 16 个  $M$  矩阵元  $m_{ij}$ 。五角硬币实验数据如表 1 所示, 一元硬币实验数据如表 2 所示。

表1 五角硬币实验数据

$\alpha$	0°	0°	0°	45°	45°	45°	60°	60°
$\beta$	0°	45°	60°	0°	45°	135°	0°	45°
$I/mW$	0.0103	0.0472	0.0559	0.0298	0.1096	0.0082	0.0187	0.1023
$\alpha$	60°	60°	135°	135°	135°	22.5°	22.5°	0°
$\beta$	60°	135°	45°	60°	135°	0°	60°	22.5°
$I/mW$	0.1078	0.0203	0.0028	0.0057	0.1011	0.0242	0.1014	0.0077

处理数据后得到的  $M$  矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -0.1299 & -0.1944 & 0.0627 \\ 0.3017 & 0.3829 & -0.4109 & 0.2235 \\ 0.4337 & 0.3185 & 0.1863 & 0.5422 \\ 0.0140 & -0.0326 & 0.1067 & 0.9012 \end{bmatrix}$$

计算的解偏度  $p_d = 2.9590$ 。

表2 一元硬币实验数据

$\alpha$	0°	0°	0°	45°	45°	45°	60°	60°
$\beta$	0°	45°	60°	0°	45°	135°	0°	45°
$I/mW$	0.0058	0.0259	0.0303	0.0149	0.0581	0.0048	0.0085	0.0536
$\alpha$	60°	60°	135°	135°	135°	22.5°	22.5°	0°
$\beta$	60°	135°	45°	60°	135°	0°	60°	22.5°
$I/mW$	0.0528	0.0102	0.0011	0.0023	0.0586	0.0137	0.0535	0.0049

处理数据后得到的  $M$  矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & -0.1484 & -0.1276 & 0.0261 \\ 0.3780 & 0.2830 & -0.4017 & 0.1610 \\ 0.2942 & 0.4165 & 0.2743 & 0.3684 \\ -0.0342 & 0.0278 & 0.1092 & 0.9023 \end{bmatrix}$$

计算的解偏度  $p_d = 2.7451$ , 由于所测量物体表面并非均匀平整表面, 所以激光照射位置不同, 测量的值也会略有差异, 而另一方面物体表面材料却是相同的, 这表明整体差异将不会太大, 由点及面即可推算整体解偏度值, 因此测量值能代表整体表面材料的解偏度, 为了进一步减小硬币之间的相对误差, 实验中均测量硬币平整区, 即无花纹区, 这样也将减少对整体实验效果的影响。从上面计算可知两硬币解偏度相差不大, 解偏振作用可能相当, 下面我们就进行旁置四边形偏振成像对比识别实验。

#### 4 用偏振技术提高成像对比度实验

为了避免引入干扰, 实验在无光暗室进行, 选用像素灵敏度高的 CCD SONY 数码相机作成像探测器, 激光源通过水平方向的偏振片产生水平线偏振光, 再通过由两个透镜组成的扩束准直器, 将放大的激光照射到目标样品表面上, 同时在激光反射方向的检测端放置一检偏振器, 反射方向与照射方向夹角约 30°, 在检偏器前端加了中心波长为 530 nm 滤波片, 以滤除非绿色波段光的干扰。实验样品中除

了五角和一元硬币外, 还为本实验特别选取了一片印有四边形图案的白色硬纸板, 并将硬币置于白纸板图案上方, 以便形成白纸板与硬币、四边形图案与硬币、白纸板与四边形图案的三方对比。实验装置图如图 2 所示。在实验中, 根据不同目标对线偏振光解偏振作用的差异, 用 CCD 相机对目标进行成像, 起偏振器取水平方向, 在成像时检偏振器与起偏振器的夹角取几个典型值以进行不同角度成像对比, 同时还在无检偏器时对目标成像, 成像效果如图 3 所示。

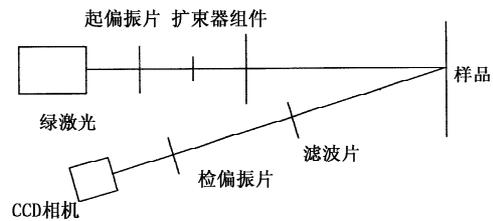


图2 实验装置图

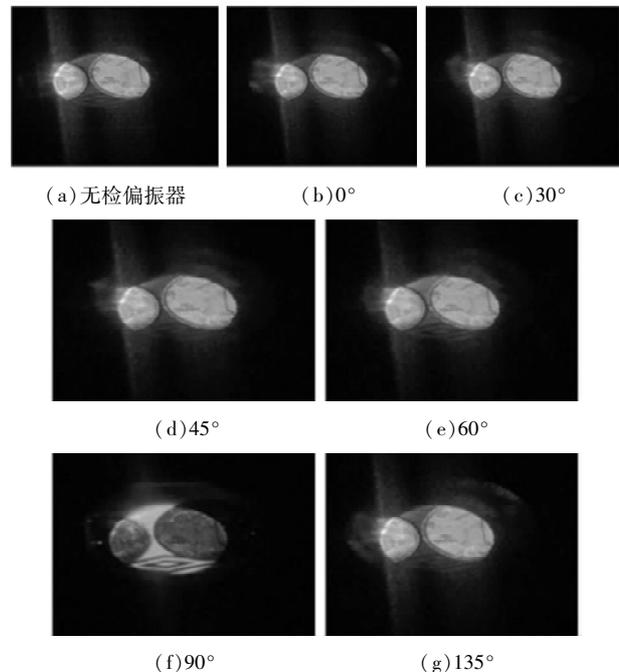


图3 实验图像

显而易见, 在这组实验图像中, 90° 的图像不同于其他六张, 与其他角度图像相比, 90° 图像白色纸板处显得更亮, 硬币处较其他图像要暗淡些, 图标更加清晰可见, 在 0° ~ 90° 图像间, 随着夹角角度的增加, 白纸处越来越亮, 图案形状越来越清晰, 在 90° 达到最好效果, 夹角增大到 135° 时, 对比又开始减弱。与无检偏振片相比, 硬币与白纸、图案与白纸之间对比更明显, 这说明在 90° 时成像对比度要好于无检偏振片时的情况。从这些实验中, 我们还可以看到当用线偏振光照射目标时, 在白纸板、硬币、纸

板上图案间发生着不同的解偏振作用,白纸板处解偏振作用大,硬币解偏振作用最小,且两硬币之间变化类似,这表明它们对线偏振光的解偏振作用相当,与上面所测量的解偏度较一致,四边形解偏振作用则适中,当取不同偏振夹角时成像变化也不一样,利用这种偏振技术对目标成像,完全有可能提高整体成像对比度,以识别不同的目标。

## 5 结 论

本文根据斯托克斯矢量与 Mueller 矩阵的关系式,通过测量 16 组不同偏振状态下的光强度值,可以计算得到 Mueller 矩阵的 16 个参数元,然后根据这些参数元计算得到表示解偏振作用的解偏振度。更重要的是,本文采用的四边形图案对照检测法对于偏振光检测有明显的效果,通过选取合适的偏振夹角的线偏振激光进行偏振成像不但可以表征更多的目标信息,而且能较好的提高各目标之间成像的对比度。

## 参考文献:

- [1] Hu Fangrong, Xiong Xianming, Dong Tingjin. Target detection and identification based on linear polarization laser active imaging [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37 (2): 108 - 110. (in Chinese)  
胡放荣,熊显名,董挺进. 基于线偏振激光主动成像的目标探测与识别 [J]. *激光与红外*, 2007, 37 (2): 108 - 110.
- [2] Li Quan, Liu Zejin, Shu Bohong, et al. Application of polarization diversity in active imaging [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17 (3): 351 - 354. (in Chinese)  
黎全,刘泽金,舒柏宏,等. 利用表面散射光偏振差异的目标识别技术 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17 (3): 351 - 354.
- [3] Li Xiaochuan. The research significance of the scattering properties and depolarization of blue-green laser under seawater [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)  
李小川. 蓝绿激光在海水中的散射特性及其退偏的研究意义 [D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [4] Liu Wenqing, Cao Nianwen, Zhao Gang, et al. Laser polarization image of underwater objects [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1997, 14 (6): 520 - 526. (in Chinese)  
刘文清,曹念文,赵刚,等. 水下物体的激光偏振成像研究 [J]. *量子电子学报*, 1997, 14 (6): 520 - 526.
- [5] Luis Fernando Rojas-Ochoa, David Lacoste, Ralf Lenke, et al. Depolarization of backscattered linearly polarized light [J]. *Optical Society of America September*, 2004, 21 (9): 1799 - 1804.
- [6] M Preda, E I Scarlat, Li liana Preda. Depolarization analysis of a laser beam scattered by a dusty plasma [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, 5581: 509 - 516.
- [7] Hannah Noble, Waisze Tiffany Lam, Greg Smith, et al. Polarization scattering from a spectralon calibration sample [J]. *Proc. of SPIE* 2007, 6682: 191 - 199.
- [8] G D Lewis, D L Jordan. Backscattering mueller matrices from bead - blasted aluminium surfaces [J]. *SPIE*, 1997, 3121: 438 - 448.
- [9] Cao Nianwen, Liu Wenqing, Zhang Yujun. Measuring the depolarization for scattering light at several kinds of media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49 (4): 647 - 653. (in Chinese)  
曹念文,刘文清,张玉钧. 几种散射介质散射光解偏度的测量 [J]. *物理学报*, 2000, 49 (4): 647 - 653.
- [10] Dennis H, Goldstein. Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter [J]. *Applied Optics*, 1992, 31 (31): 6676 - 6683.
- [11] Jack Cariou, Bernard Le Jeune, Jean Lotrian. Polarization effects of seawater and underwater targets [J]. *Applied Optics*, 1990, 29 (11): 1689 - 1695.