

水下物体的激光偏振成像研究

刘文清 曹念文 赵刚 王峰平

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 合肥 230031)

摘 要

采用波长 532 nm 的激光器作光源, 面阵 CCD 作探测器, 利用水中粒子和物体散射光解偏振度的差异, 本文研究了水下物体的激光偏振成像。结果表明, 采用偏振技术可使水下成像距离扩展至 1.5 倍左右。本文还讨论了不同衰减长度和偏振器的不同偏振角度与图像对比度的关系。

关键词 偏振技术, CCD 成像, 激光脉冲, 光散射

1 引 言

混浊介质中物体的成像目前仍然是科学与工程界较难解决的问题之一^[1]。数年的研究表明, 限制水下成像的距离主要有以下原因: 吸收和散射作用造成光在水中的衰减; 光的后向散射造成目标图像的不清晰; 目标与探测器之间的光散射使图像模糊并降低图像的对比度。这些因素导致了水下成像研究进展缓慢。在利用电磁波的主动探测系统中必须考虑到矢量特性, 也就是考虑电磁信号的部分偏振特性。在大气介质中, 某些微波遥感系统除了利用信号的强度和位相特征外, 还利用信号的偏振特性, 以便获得更多的信息。在光学波段, 特别是利用激光作光源的水下探测和成像系统中, 也可以利用信号的偏振特性从而得到较好的图像对比度^[2]。

悬浮粒子(水、雾、雨)后向散射光的解偏振度小于物体后向散射光的解偏振度^[3]。根据这个原理, 采用线偏振光或圆偏振光作照明光源, 并在探测器前放置线偏振器或圆偏振器, 以及利用水中粒子散射光和物体散射光解偏振度的差异, 来减小悬浮微粒后向光散射光影响, 有可能提高水下物体的图像对比度。采用波长 532 nm 的倍频 Nd:YAG 激光器的线偏振输出作光源, 面阵 CCD 作探测器, 同步采集水下物体的图像, 改变探测器接收偏振方向。本文研究了不同衰减长度水介质中, 水下物体的激光偏振成像。讨论了获得最佳水下成像对比度应选择的偏振方向, 偏振方法的有效性与成像物体的距离关系, 以及其它影响图像对比度的因素。

2 原理与方法

假定水为均匀介质, 其光学特性由吸收系数 μ_a 和散射系数 μ_s 决定。4 个参数 (S_0, S_1, S_2, S_3) 决定了 Stokes 矢量, 入射光和散射光偏振矢量之间的关系则由 Mueller 矩阵定义^[4]。

收稿日期: 1996-11-05

修改日期: 1996-12-04

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_4 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中 S' 表示散射光参数， S 表示入射光参数。在水下远距离探测和成像中，利用 Stokes-Mueller 关系式我们可以获得水粒子和水下物体对入射光解偏振度的信息。通过 64 个光强度值可以计算出 $[M]$ 的 16 个参数 m_{ij} ，那么解偏振效应能够表征为，

$$\sum_{i,j=1,2,3,4} [M_{ij}]^2. \tag{2}$$

对完全解偏振度光束，

$$\frac{1}{m_{11}^2} \left(\sum_{i,j} |m_{ij}|^2 \right) = 1. \tag{3}$$

对部分解偏振度光束，

$$1 < \frac{1}{m_{11}^2} \left(\sum_{i,j} |m_{ij}|^2 \right) \leq 4. \tag{4}$$

而当

$$\frac{1}{m_{11}^2} \left(\sum_{i,j} |m_{ij}|^2 \right) = 4 \quad \text{时}, \tag{5}$$

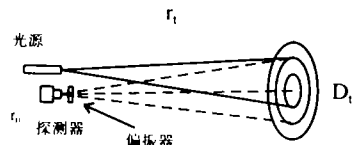


图 1 成像几何关系示意图

光束的偏振状态不发生任何改变。

采用输出功率 W_0 的调 Q 线偏振激光脉冲照明水中物体，物体到光源的距离为 r_t ，物体直径为 D_t ，漫反射率为 R ，假定由物体反射的光完全解偏。探测器的视场角为 2φ ，入射孔直径为 D_r ，探测器到光源的距离为 r_0 ，而 $r_0 \ll r_t$ ，如图 1 所示。由于 $r_0 \ll r_t$ ，探测器和光源认为是共线的。偏振光分析器放置在探测器前面，其偏振方向可以改变。利用这些条件，可采用小角度近似计算探测器接收的光散射功率。根据能量传递矢量方程的解，后向散射光的平行和垂直偏振分量为^[5]，

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{平行}}(t) &= \frac{1}{2} [F_1(t) + F_2(t)] \\ P_{\text{垂直}}(t) &= \frac{1}{2} [F_1(t) - F_2(t)] \end{aligned} \right\}. \tag{6}$$

而

$$F_i(t) = \frac{1}{8} W_0 D_r^2 \mu_s \nu m_{ii} \frac{1}{(\nu t)^2} \Phi_i \left(\frac{\nu t}{2}, \varphi \right), \quad i = 1, 2 \tag{7}$$

式中 ν 是光在水中传播的速度， $\Phi_i(r, \varphi)$ 是光源单位功率沿光束方向传播，半径为 $\rho = r\varphi$ 时的光通量。探测器的输出正比于光的积分时间

$$W_{\text{平行(垂直)}}^{\text{接收}} = \int_0^\infty P_{\text{平行(垂直)}}(t) dt, \tag{8}$$

那么，接收到的物体和水粒子的后向散射光强度之比定义为对比度，

$$C = \frac{W_{\text{物体}}}{W_{\text{背景}}}. \quad (9)$$

显然, 采用偏振光为照明源, 由于物体和水介质解偏度的差异, 探测器前无偏振分析器时,

$$C_1 = \frac{W_{\text{物体}}^{\text{平行}} + W_{\text{物体}}^{\text{垂直}}}{W_{\text{背景}}^{\text{平行}} + W_{\text{背景}}^{\text{垂直}}}. \quad (10)$$

当探测器前放置偏振分析器时,

$$C_1 = \frac{W_{\text{物体}}}{W_{\text{背景}}} \cos^2 \theta. \quad (11)$$

当 $\theta = 0$ 时, 偏振器的偏振方向与入射光偏振方向相同。实验装置如图 2 所示, 采用调 Q-YAG 激光器二倍频输出作照明光源, 波长 532 nm, 脉冲宽度 10 ns, 输出能量连续可调。模拟水箱长 2 m、高和宽均为 0.5 m。激光器发出的光经扩束镜扩束后, 照射到水槽的后部的物体表面上。水粒子和物体表面的后向散射光经过衰减片, 偏振分析器, 成像透镜进入 CCD 探测器。探测器光轴和入射光轴接近平行, 满足小角度成像条件。实验系统由一台 486 PC 微机控制, 计算机发出同步信号经过延迟电路光电隔离器控制激光器脉冲输出。CCD 探测器的信号输出经过图像采集卡采入计算机内存, 以便进一步分析处理。采用自行编制的控制、分析软件, 探测信号同时以图像、数据两种格式存储。

水介质的光学特性由其散射和吸收系数确定^[6], 在水中加入不同浓度的悬浮粒子以改变水介质的衰减长度。由衰减长度的计算公式

$$L = \frac{1}{C} = \frac{r}{\ln \frac{B_r}{B_0}}. \quad (12)$$

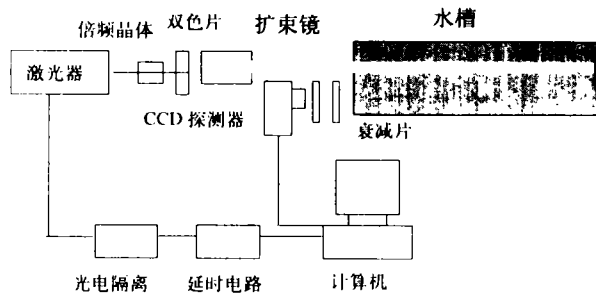


图 2 实验装置简图

式中 B_0 表示 0 位置时沿光束方向激光亮度, B_r 为 r 位置时沿光束方向激光亮度, r 为水体路径。实验时, 根据实时测量的光强度值计算出衰减长度。

3 结果与讨论

图 3 给出衰减长度为 0.55 m, 物体放置在水箱 2 m 处, 改变探测器前偏振分析器的不同偏振角度所纪录的图像。我们定义, 偏振器的通光方向与入射激光束的偏振方向相同时, 激光束的偏振方向与偏振器的夹角为零。与理论分析一致, 当偏振器的通光方向与入射激光束的偏振方向相同时, 无法去除水介质中粒子散射光的干扰, 图像淹没在噪声中。当夹角逐渐变大时, 水粒子

散射光的干扰变小, 图像逐渐变得清晰, 当夹角为 90° 时, 入射激光的偏振方向与偏振器的通光方向垂直, 图像对比度最大。水粒子后向散射光的解偏振度小于物体散射光的解偏振度, 利用这种解偏振度的差异, 选择合适的偏振器通光方向, 可以获得最佳的图像对比度。图 3h 为物体在空气中的图像, 由于光在空气和水介质中的光程不同, 实测物体图像变小。

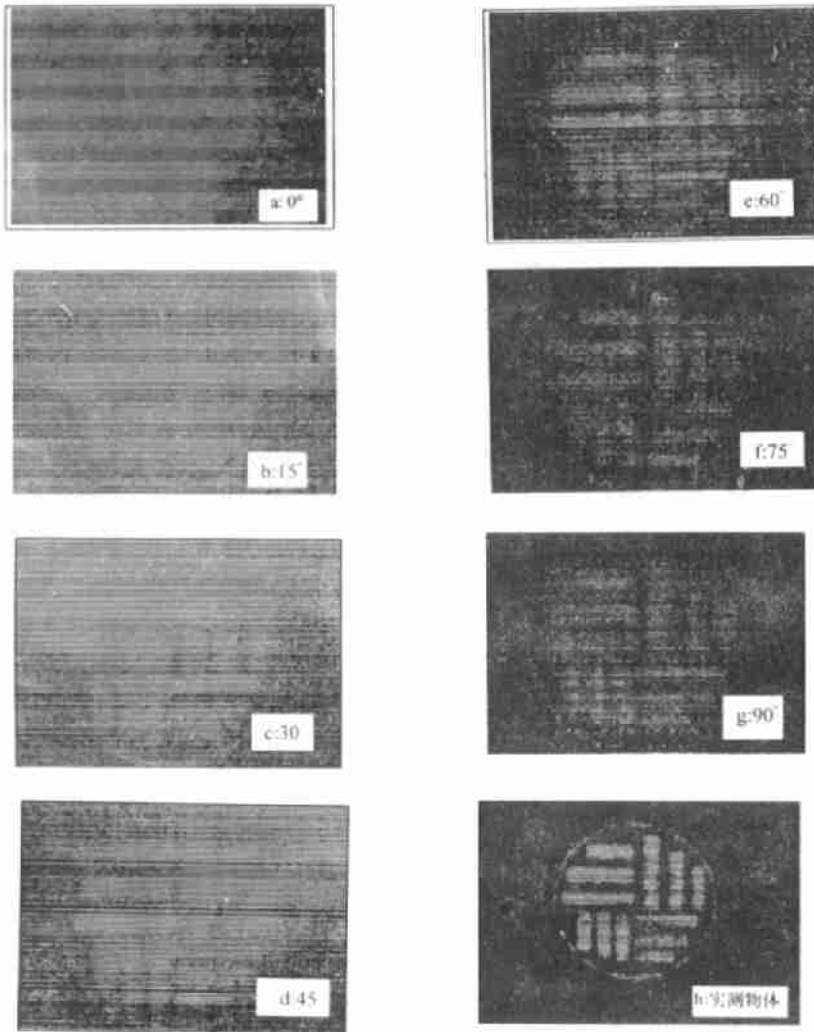


图 3 水中物体激光偏振成像实验。偏振器的偏振方向与入射激光的偏振方向分别成 0° 角 (a); 成 15° 角 (b); 成 30° 角 (c); 成 45° 角 (d); 成 60° 角 (e); 成 75° 角 (f); 成 90° 角 (g); 系统实际测量的物体图像 (h)。

值得注意的是, 在对图像中由于粒子散射光造成的背景和物体信号光逐点积分时, 发现尽管随着夹角的增大, 图像将变得清晰, 但是无论是粒子散射的光强度还是物体散射的光强度, 都将随着夹角的增大而下降, 结果如图 4 所示。从图中可见, 水粒子的散射光强随偏振角的增大而减小, 因为水粒子散射光的解偏度比目标散射光的解偏度小。当偏振角为零度时, 水粒子散射光大部分能量通过偏振器进入 CCD 探测器。当偏振角增大时, 椭圆偏振光的长轴与偏振器偏振方向夹角增大, 通过偏振器的能量便变小。当偏振角为 90° 时, 椭圆偏振光的短轴与偏振方向相同, 通过偏振器的能量最小。从图 4 可见, 当偏振角为 90° 时, 粒子的散射光强最小; 物体的亮

度随偏振角度的增大也渐渐减小,但减小的幅度较之水粒子散射光要小。根据理论分析,本实验采用的水粒子的解偏振度在 $3 < m < 4$ 之间,而物体解偏振度在 $2 < m < 3$ 之间。因此,水中物体成像的清晰度,不但与偏振分析器的角度有关,而且与物体表面的光散射特性有关。在采用偏振技术的成像系统中,物体表面对入射光的解偏振度越大,图像越清晰。当物体表面的 Mueller 参量 $m=1$ 时,图像越清晰达最大值。

当偏振角为 0° 时,通过偏振器的水粒子散射光强和目标散射光强接近相等。随着偏振角度的增大,通过偏振器的目标散射光和粒子散射光光强相差越大。当偏振角度为 90° 时,通过偏振器的目标散射光和粒子散射光光强相差最大,也就是图像对比度最大。从图 3 可以看出这时图像最清晰,这一分析和实验结果相符合。

在同样的实验条件下,改变水介质的光衰减长度,通过分析所纪录的水下物体图像,发现随着衰减长度的增加,激光束的偏振方向与偏振器的夹角为零时,图像最清晰。这是因为衰减长度较长时,水介质中粒子的光散射强度较之物体的光散射强度要弱得多,即使在这种情况下,最佳的图像的对比度也是在夹角为 90° 。探测器前无偏振器时的图像与探测器前偏振器夹角 0° 时的图像相比,似乎表明水粒子散射光解偏振椭圆的长轴与激光光源的偏振方向也存在一定的角度。尽管在这种条件下无偏振器也可观察出水中物体,但是有偏振器时的图像对比度却大为改善。

在水中加悬浮粒子,改变水的衰减长度,在相同的测量条件下,给出了衰减长度对图像对比度的影响,如图 5 所示。图 5a 表明衰减长度为 0.8 m,偏振器的偏振方向与入射激光的偏振方向成 90° 夹角时的图像,图 5b 为不加偏振器时的情况。图 5c 表明衰减长度为 0.67 m,偏振器夹角为 90° 时的图像,图 5d 为不加偏振器时情况。图 5e 表明衰减长度为 0.56 m,偏振器夹角为 90° 时的图像,图 5f 为不加偏振器时情况。图 5g 表明衰减长度为 0.46 m,偏振器夹角为 90° 时的图像,图 5h 为不加偏振器时情况。从图中可见,当衰减长度较大时,也就是说水介质中散射粒子较少,无论是否在探测器前放置偏振器,均可获得较清晰的图像。随着衰减长度的减小,散射光强增大,由于探测器前无偏振器,无法去除粒子散射光的干扰,图像越来越模糊。在探测器前放置偏振器,除去粒子散射光的干扰,与不加偏振器时的图像相比可以提高图像对比度,如图 5c、5e、5g 所示。随着水混浊度的增加,图像逐渐变得模糊。当衰减长度为 0.46 m 时,图像仍然可分辨(见图 5g),但是噪声也大大增加。由于信号的损失而引起的噪声是无法避免的,在这种情况下,即使提高激光输出能量也不能改善图像清晰度。从图中可见,由于散射的存在,不但降低了图像的对比度,而且也导致了图像分辨率的下降。由公式(13),根据实测数据计算,在衰减长度为 0.67 m,成像距离为 2 m 时,探测器前有偏振器与无偏振器相比,成像距离可增加至 3.2 m。当衰减长度降低至 0.56 m 时,同样条件下,成像距离可增加至 2.9 m。除采用偏振技术提高水下物体成像对比度外,近年来,利用激光技术,还发展了激光同步扫描成像系统^[7]和时间选通成像系统^[8]。无论是在采用高度准直的激光束、从空间上排除体散射影响的激光同步扫描成像系统中,还是在利用短脉冲激光束、从时间上排除体散射影响的时间选通成像系统中,如果将偏振技术加到这些系统中都可进一步提高水下物体成像的图像对比度和成像距离。

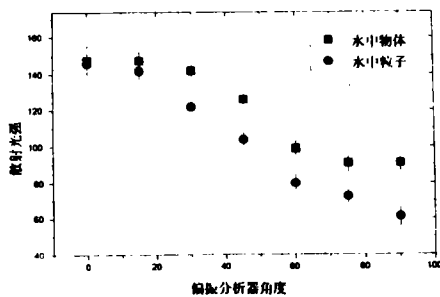


图 4 偏振分析器不同偏振方向,水介质中粒子和物体的光散射强度分布

$$dL = -cLdr \text{ 即 } L_{\text{有偏振器}} - L_{\text{无偏振器}} = -c \times L_{\text{有偏振器}} \times \Delta r \quad (L \text{ 为图像亮度平均值}) \quad (13)$$

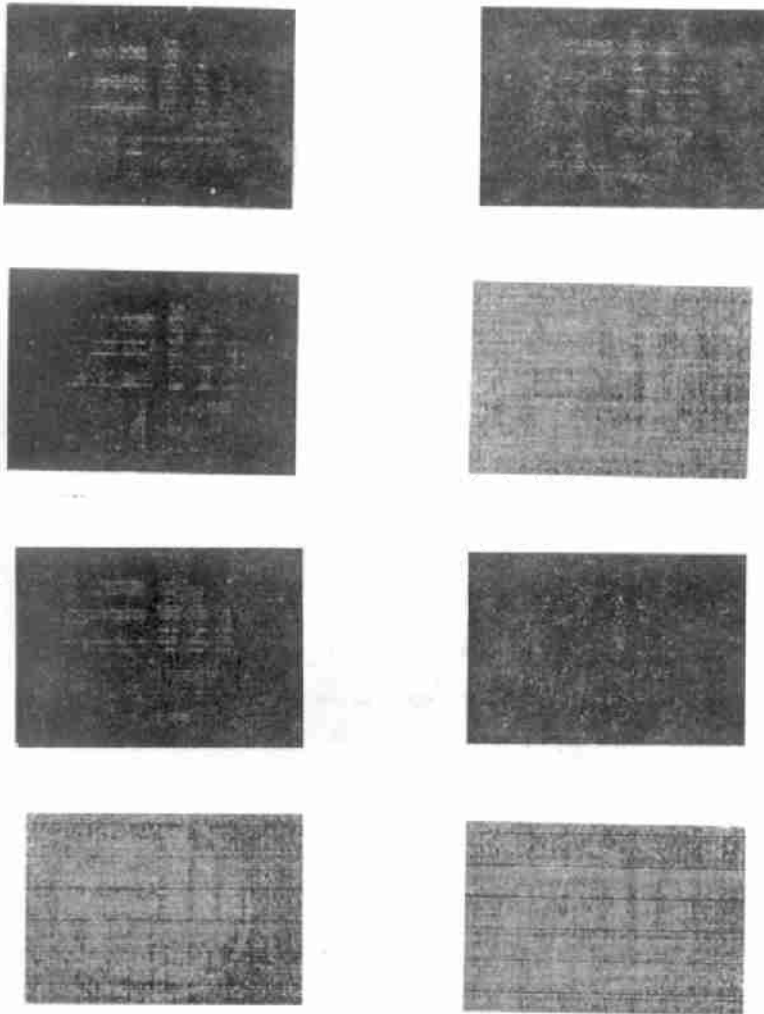


图 5 不同的衰减长度时的水下物体成像结果，衰减长度 0.8 m，有偏振器 (a)，无偏振器 (b)；衰减长度 0.67 m，有偏振器 (c)，无偏振器 (d)；衰减长度 0.56 m，有偏振器 (e)，无偏振器 (f)；衰减长度 0.46 m，有偏振器 (g)，无偏振器 (h)

4 结 论

在激光成像系统中，采用短脉冲激光器作光源，CCD 面阵探测器，本文研究了水下物体散射光成像的偏振效应。由于水下光学窗口宽度的限制，水下物体光散射成像无法像大气成像那样可用多波长的光获得高对比度的图像，因而必须寻找散射信号的其它参量来提高图像对比度。利用水粒子和物体散射光解偏振度的差异，采用偏振技术，在一定条件下可以获得最佳图像对比度。

利用 Stokes 参量分析水介质和水中物体散射光的解偏振度，可以选择最佳图像对比度的测量参数。根据理论分析的结果，随着水中物体距离的增加，散射光的解偏振度降低了利用偏振技

术鉴别水中物体的有效性。与我们的实验结果一致,由于散射的存在,随着水中物体距离的增加,不但降低了图像的对比度,而且也导致了图像分辨率的下降。在这种情况下,即使提高激光输出能量也不能改善图像清晰度。另外,水中物体的清晰度,与偏振分析器的角度和物体表面的光散射特性有关。

有关水中不同物体表面的光学特性和水介质中不同尺度粒子对成像质量的影响的实验正在进一步研究中。

作者感谢国防科工委目标与环境特性实体办的支持。

参 考 文 献

- 1 McLean E A, Burriss H R, Jr Strad M P. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water. *Appl. Opt.*, 1995, 34(21): 4343~4351
- 2 Hallock H B, Halajian J. Polarization imaging and mapping. *Appl. Opt.*, 1983, 22(7): 325
- 3 Eugene V Miasnikov, Timothy V Koudranin. *SPIE*. 1992. 1750: 433
- 4 Mueller H. The foundations of optics. *J. Opt. Soc. Am.*, 1984, 38: 1391
- 5 Vasilkov A P, Kondranin T V, Miasnikov E V. Polarization characteristics of the backscattering signal for pulsed sensing of the ocean by a narrow light beam. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 1988, 24(8): 913
- 6 王之江等. 光学技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1987. 697
- 7 Kulp T J, Garvis D, Kennedy R *et al.* Development and testing of a synchronous-scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging. *Appl. Opt.*, 1993, 32(19): 3520
- 8 Witherspon N H, Holloway J H. *SPIE*. 1990. 1302: 414

Laser Polarization Image of Underwater Objects

Liu Wenqing Cao Nianwen Zhao gang Wang Fenping

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics the Chinese Academy of Science Hefei 230031)

Abstract

Laser polarization image of underwater objects is studied in this paper by using the laser pulse at the wavelength 532 nm and CCD detector, according to the different degree of polarization between the water medium and immersed objects. The experimental results show that the imaging range in scattering water can be expanded to a factor of one and a half. The influence of the various attenuation length and the angle of the polarizer on the contrast of the objects are also discussed in this paper.

Key words: polarization technique, CCD imaging, laser pulses, light scattering

刘文清 见本刊 1997 年第 14 卷第 3 期。