

水下目标圆偏振成像及最远成像距离的计算

曹念文 刘文清 张玉钧 王锋平 宋炳超 许克军

(中国科学院安徽光机所 合肥 230031)

提要 报道了用圆偏振技术进行水下目标成像结果并分析了用圆偏振技术提高图像清晰度的原因: 推导了水下目标最远成像距离的计算公式, 在衰减常数 α 为 0.5 的水体中, 目标放在 1.5 m 处, 测量出用圆偏振成像系统成像所得图像对比度 C 为 4.1, 通过 r_0 和 C 可计算出圆偏振成像系统的最远成像距离 r 为 1.92 m, 与实测距离相差 0.08 m, 相对误差为 4%。

关键词 衰减常数, 圆偏振成像系统, 最远成像距离

1 引 言

水下目标成像实验研究已进行了多年, 如何提高水下目标成像的清晰度与成像距离是人们最关注的问题, 研究表明水下目标成像的清晰度与成像距离的远近与水体的衰减常数^[1]、散射粒子的大小^[2]、目标反射光、水粒子散射光的偏振态^[3]和光强等很多因素有关; 通常用时间选通法、偏振技术来除去水粒子散射光的干扰进行水下目标成像。但由于实验条件的限制, 很难进行远距离目标成像, 本文介绍了水下目标最远成像距离的计算方法, 通过简单的实验室模拟实验, 可以估算出圆偏振成像系统的最远成像距离。这一工作具有一定的实际意义和重要的应用价值。

2 水下目标成像对比度、成像距离、水体衰减常数之间关系的推导

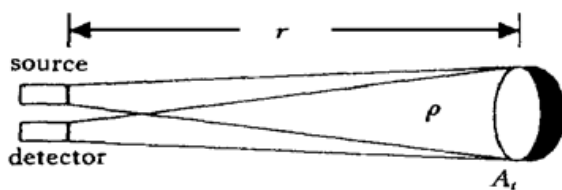


图 1 水下成像示意图

Fig. 1 Schematic for underwater imaging

假设目标为理想的 Lamber 体, 目标离探测器距离为 r , 如图 1 所示。则目标反射光在探测器处的强度为

$$I = \left[\frac{k\rho A_t}{\pi} \right] \left[I_0 \exp \left[\frac{-2\alpha r}{r^4} \right] \right] \quad (1)$$

ρ 为目标的反射率, A_t 为目标的表面积, I_0 为光源发光强度, α 为衰减系数, k 为成像系统加偏振器后所成图像清晰度提高的倍数。背景亮度是由于粒子散射引起的, 并由激光光源所照亮的区域和探测器所能接受的光区域决定。对于小角度散射成像系

统来说, 可以认为背景亮度为一常数, 与成像距离无关: $I_b(r) = I_b(r_0) = I_{min}$ 。目标图像对比度

$$c = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{min}} \tag{2}$$

其中 I_{min} 为目标背景强度, I_{max} 为目标图像的强度。光强为 I_0 的光照射到浸在水中距离光源 r_0 处的目标上, 反射光回到探测器, 光强为 I_{max} , 则有下列关系式

$$I_{max} = \frac{k\rho A_t}{\pi} I_0 \frac{e^{-2\alpha r_0}}{r_0^4} \tag{3}$$

移动水下目标使成像距离增大, 则探测器接收的能量减小, 当距离增至 r 处时探测的能量减小到最小值 I_{min} , 等于背景噪声即背景光能量, 这时图像完全淹没在噪声中, 则

$$I_{min} = \frac{k\rho A_t}{\pi} I_0 \frac{e^{-2\alpha r}}{r^4} \tag{4}$$

把(3)和(4)代入(2)得

$$c = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{min}} = \frac{\frac{k\rho A_t}{\pi} I_0 \frac{e^{-2\alpha r_0}}{r_0^4} - \frac{k\rho A_t}{\pi} I_0 \frac{e^{-2\alpha r}}{r^4}}{\frac{k\rho A_t}{\pi} I_0 \frac{e^{-2\alpha r}}{r^4}} = \frac{\frac{e^{-2\alpha r_0}}{r_0^4} - \frac{e^{-2\alpha r}}{r^4}}{\frac{e^{-2\alpha r}}{r^4}} = \frac{e^{-2\alpha r_0}}{\frac{r_0^4}{r^4}} - 1$$

即

$$c + 1 = \frac{e^{-2\alpha r_0} r^4}{e^{-2\alpha r} r_0^4} \tag{5}$$

对(5)两边同时取对数得

$$\ln(c + 1) - 2\alpha r + 4\ln r = -2\alpha r_0 + 4\ln r_0 \tag{6}$$

这就是图像对比度、成像距离和水体衰减常数之间的关系, 其中 c 为成像距离为 r_0 时的图像对比度, r 为最远的成像距离。

3 实 验

3.1 圆偏振成像实验

实验装置如图 2 所示。整个装置主要分为光源、水槽(目标放入水中)、探测器部分、控制系统、测量部分, 其中水槽长 2 m, 宽 0.5 m, 高 0.5 m, 探测器部分由 CCD 和成像镜头组成, 测量部分由输出波长为 533 nm 的小型固体钷酸钷激光器和光电二极管组成。利用示波器可测量水体衰减常数。激光器输出的 1.06 μm 波长激光经倍频、扩束后照射水下目标, 目标的反射光和水粒子散射光进入 CCD 成像系统成像, 为了改善成像效果, 在入射光

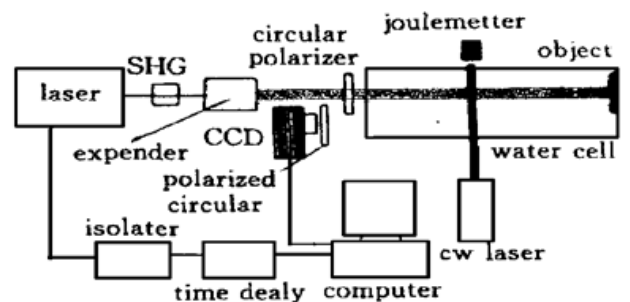


图 2 圆偏振成像实验装置

Fig. 2 The setup for circular polarization imaging

路上放置一右旋圆偏振器, 使入射激光变成右旋圆偏振光, 在 CCD 探测器前加右旋圆偏振器除去水粒子散射光的干扰。成像探测器与入射光源靠得很近, 尽量使入射光和目标反射光平行以确保水粒子散射为小角度散射。目标反射光通过右旋圆偏振器再通过 CCD 前的成像镜头成像在 CCD 表面上。整个实验由计算机控制, 计算机发出同步信号触发激光器, 经过 10 ns 的延时后触发 CCD 进行数据采集, 采集的数据输入计算机。不加偏振器, 从目标处的反射光和水粒

子散射光都进入 CCD 成像系统, 散射光噪声很大, 图像不清晰, 如图 3 (a)。图 3 (b) 为圆偏振成像系统所成图像。

3.2 原因分析

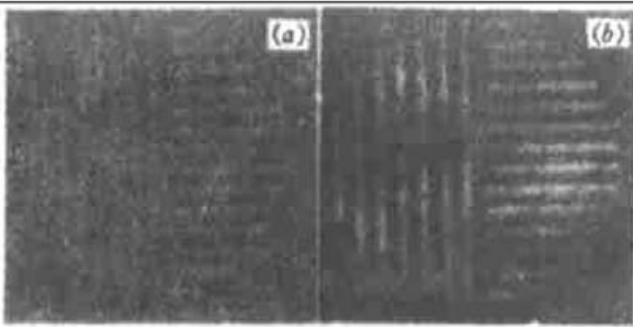


图 3

(a) 用激光作光源, 成像系统不加偏振器; (b) 用激光作光源, 激光为右旋圆偏振光, 在 CCD 前加右旋圆偏振器

Fig. 3

(a) Use laser as source, without polarizer in the experiment;
(b) The source light is right circular polarized laser, putting right circular polarizer in front of CCD detector

比较图 3 (a) 与 (b), 可见 (b) 比 (a) 清晰得多。(a) 的背景噪声大, 图像信号几乎淹没在噪声中, (b) 的噪声小, 这是由于圆偏振器除去了水粒子的散射光, 图像清晰。因为入射激光经过右旋圆偏振后, 变成右旋圆偏振光。入射的右旋圆偏振光子与水粒子碰撞一次, 右旋偏振变成左旋偏振, 再碰撞一次偏振状态又变成右旋, 即入射右旋光子与水粒子碰撞奇数次, 偏振状态发生改变, 碰撞偶数次偏振状态不发生改变; 入射右旋光子与水粒子碰撞后绝大部分偏振状态改变, 右旋变成左旋。而入射右旋光子与水下目标发生碰撞, 由于目标表面特性的影响, 只有部分入射光子偏振状态发生改变, 即目标的反射光有左旋圆偏振光和右旋圆偏振光, 如图 4。目标反射光的左旋圆偏振光和左旋

粒子散射光被 CCD 探测器前的右旋圆偏振器滤去, 通过探测器的只有目标的右旋圆偏振反射光, 水粒子的散射光被完全除去, 因而所成图像很清晰, 如图 3 (b) 所示。

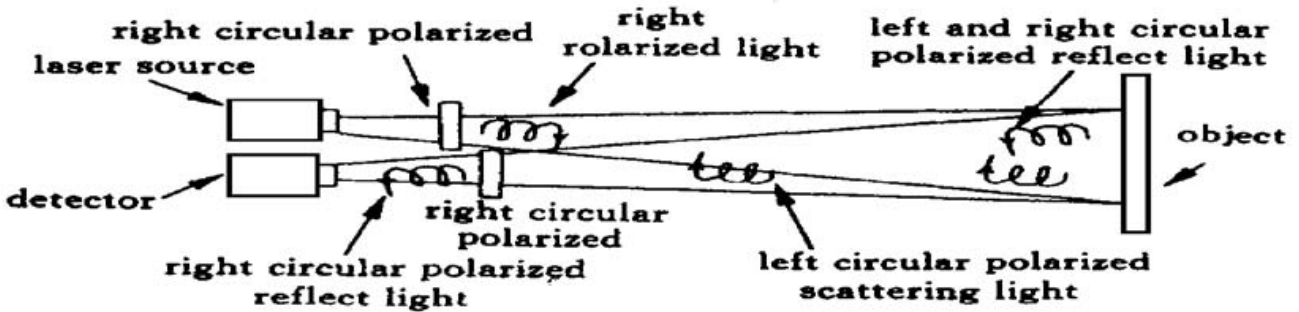


图 4 用圆偏振法减少水粒子散射光

Fig. 4 Scattering light is reduced by using circular polarization technigue

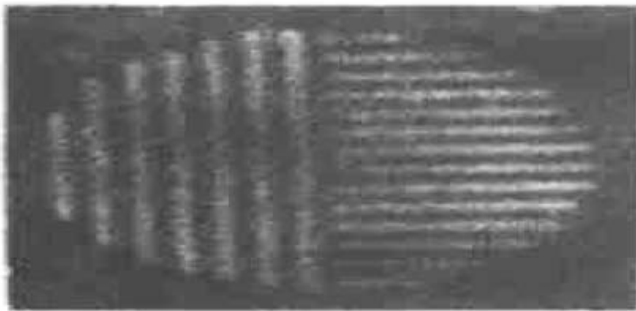


图 5 圆偏振成像系统对 1.5 m 处目标所成的图像

Fig. 5 The image for underwater object at 1.5 m, obtained by circular polarization technique

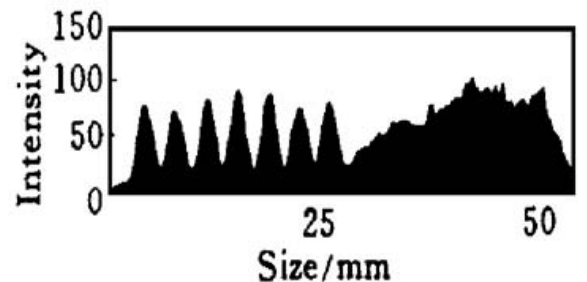


图 6 图 5 的光亮度分布图

Fig. 6 The intensity pattern for Fig. 5

3.3 圆偏振成像系统最远成像距离估算的实验

532 nm 激光经扩束镜扩束后照射水下目标, 目标反射光和水体散射光进入 CCD 圆偏振成像系统, 当成像距离 r_0 为 1.5 m 时, 所成图像如图 5 所示, 其强度分布如图 6 所示, 从图 6 可算出图像对比度 C 为 4.1。测量水体的衰减常数 α 为 0.5。把 $C = 4.1, r_0 = 1.5 \text{ m}, \alpha = 0.5$ 代入方程(6) 得

$$4\ln r + 2 \times 0.5 \times r = 2 \times 0.5 \times 1.5 + 4\ln 1.5 + \ln(4.1 + 1) \tag{7}$$

方程(7) 的解为 1.92 m, 即圆偏振成像系统最远成像距离 r 为 1.92 m。

4 实验结果与理论计算的比较(实测值与计算值的误差)

移动水中目标, 增大目标成像距离, 图像越来越模糊, 当成像距离为 2 m 时, 实测图像如图 7 所示, 图 8 是图像的强度分布图, 从图 8 可以看出此时图像完全淹没在噪声中, 这说明实测的最远成像距离为 2.0 m, 这一结果和上述理论计算相差 0.08 m。相对误差为 4%。



图 7 圆偏振最远成像距离(2 m) 的实测图像

Fig. 7 The image for underwater object at 2.0 m, obtained by circular polarization technique

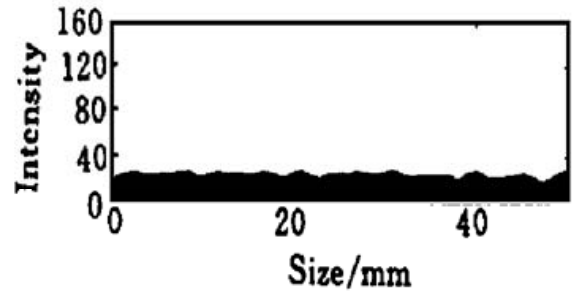


图 8 图 7 的强度分布图

Fig. 8 The intensity pattern for Fig. 7

5 讨 论

用圆偏振技术进行水下物体成像不能完全除去水粒子散射光, 因为入射的右旋圆偏振光和水粒子碰撞后并非完全变成左旋圆偏振光, 还存在一小部分右旋圆偏振光, 右旋圆偏振光的光子数与水粒子浓度和粒子的尺寸大小有关, 这部分右旋圆偏振光能通过 CCD 前的右旋圆偏振器进入成像系统。

用圆偏振技术所成图像亮度较无圆偏振成像系统成像亮度弱, 因为目标的反射光子一部分是左旋圆偏振光子, 被 CCD 前的右旋圆偏振器除去, 整个成像光能量降低。

最远成像距离的计算是建立在一定的实验基础之上的, 并非纯粹的理论计算, 必须先测出圆偏振成像系统在成像距离 r_0 处所成图像对比度 C , 以及水体的衰减常数 α , 然后根据方程(6) 解出圆偏振成像系统最远成像距离 r 。

从图 6 可以看出, 方程(6) 的解是直线 $y = kx + b$ 与曲线 $y = 4\ln x$ 的交点, 与直线的斜率 k 和在 y 轴上的截距有关, 其中斜率 k 为负数, 当水体较清时, 水体的衰减常数 α 很小导致斜率 k 为很小的负数, 这时直线与横轴接近平行; 而当水体较清时成像距离 r_0 一般都很大, 从而导致直线截距 b 很大, 这两点就使得直线 $y = kx + b$ 与曲线 $y = 4\ln x$ 的交点的横坐标很大, 即水体较清时, 最远成像距离很远, 如大洋海水衰减常数 α 是 10^{-2} 数量级, 最远成像距离达 100 m

左右。总之最远成像距离与水体的衰减常数 α 关系很大,当水体的衰减常数 α 很大时最远成像距离很小且随水体的衰减常数 α 的增加变化缓慢,当水体的衰减常数 α 很小时,最远成像距离很大且随水体的衰减常数 α 的减小急剧变大。

参 考 文 献

- 1 E. A. McLean, H. R. Burris, Jr., M. P. Strand. Short-pulse range-gated optical imaging in turbid water. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(21): 4343~ 4350
- 2 D. Friedman. Infrared characteristics of ocean water (1.5~ 15 μm). *Appl. Opt.*, 1969, **8**(10): 2073~ 2078
- 3 Liu Wenqing, Cao Nianwen, Wu Xingwu *et al.*. Polarization discrimination of underwater object illuminated by 532 nm pulsed laser. *Technical Proceedings, International Topic Meeting on Photoelectronics, ITMPE'97*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1977. 136~ 139
- 4 Cao Nianwen, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. An experimental comparison of the laser circular polarization imaging to the laser linear polarization imaging for underwater objects. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1998, **27**(6): 568~ 572 (in Chinese)
- 5 Eugene V. Miasnikov, Timothy V. Kondranin. Effectiveness of the polarization discrimination technique for underwater viewing systems. *SPIE*, 1992, **1750**: 433~ 442
- 6 G. D. Gilbert. The effects of particle size on contrast improvement by polarization discrimination for underwater targets. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(2): 421~ 428

The Circular Polarization Image and the Calculation for the Farest Imaging Range for Underwater Objects

Cao Nianwen Liu Wenqing Zhang Yujun

Wang Fengping Song Bingchao Xu Kejun

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract The contrast of the polarization image was measured to be 4.1 and the imaging range was 1.5 m. According to the formula expressing the relation between the contrast for polarization image and the attenuation of water, the farest imaging range with polarization was calculated as 1.92 m.

Key words attenuation, circular polarization image, the farest imaging range