

一种激光扫描水下成像系统的 衰减长度值研究*

袁易全

(东南大学无线电工程系, 南京 210018)

摘 要 简述了水下目标激光成像方法和优点。并描述了一种水下连续蓝绿激光点扫描、微光增强 CCD 面成像实验系统。分析了该系统的物理模型和计算公式。验证: 处于对比度极限模式工作时, $[1 + (\cos \theta)/3] CR_{\max}$ (衰减长度) 值恒定。在水质及目标确定条件下, 该值也许可成为判断系统优劣的依据。

关键词 激光, 水下成像, 微光增强 CCD, 目标识别。

1 引 言

人类赖以生存的地球有 70% 表面被海洋覆盖, 我国有 18000 km 海岸及 $470 \times 10^4 (\text{km})^2$ 邻海。海水中可利用电磁波、光波及声波等传送信息。长期来, “水光学”^[1, 4] 远不如 “水声学” 研究得深入。然而声较光频率低得多, “声呐” 近距离成像分辨率极低。光, 特别是蓝绿激光窗口的水下光成像, 具有潜在的高分辨率。近十年来, 国际水下蓝绿激光成像研究取得重大进展^[1~3], 并开始走向实用。著名教授 Jules Jaffe^[3, 12] 在美国能见度实验室提出了一种线性化近似计算水下光场, 取得了成效。Gordon^[11] 提出了一种用多重散射解析方程求解。还有文献[14]提出了基于 Monte-Carlo 模型方法进行水下光场求解。

国际上已有多种利用蓝绿激光 “窗口”(波长 0.47~0.58 μm) 研制的水下目标成像系统。最典型的 UWLIS^[5] (The underwater Laser Imaging System) 与本文工作接近。文献[5]的实验, 重点比测了水下多种光(包括: 普通光) 成像系统最大作用距离的衰减长度(attenuation Lengths) 值, 从而阐明水下蓝绿激光成像系统的突出优点。本文进一步研究了水下蓝绿激光 “能量极限模式” 的物理过程和计算公式。同时, 讨论了本文研制系统在浑浊海水中的 “对比度极限模式”, 并进行建模、计算及推导, 还实验了这种模式规律。表征系统工作在 “对比度极限模式” 时 $(1 + \cos \theta/3) CR_{\max}$ (衰减长度) 值恒定。这样, 对某一研制系统, 若已知水质及目标条件下, 该值或许可作评判成像系统是否先进、合理的重要依据之一。

* 国防科技预研基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 7 月 4 日; 收到修改稿日期: 1996 年 11 月 8 日

2 实验系统和物理模型

2.1 实验系统

水下目标连续兰绿激光点扫描、微光增强 CCD 面成像实验系统的组成如图 1 所示。电磁振镜扫描原理如图 2 所示。图中激光功率源为一单线谱与多线谱可调，激光输出功率可调。单线谱(514.5 nm 及 488 nm 二个波长)，单线谱功率输出均为 150 mW。多线谱共有 7 条线谱，总输出功率可达 500 mW。激光输出口的光束孔径为 $\Phi 0.82\text{ mm}$ ，光束发散角为 2.086 mrad。电磁振镜扫描速率： X 方向 1.25 kHz； Y 方向 30 Hz。微光增强 CCD 摄像接收系统的灵敏度为 $5 \times 10^{-4}\text{ lx}$ 。图像信号处理采用多帧对比度增强或多帧边缘增强平均处理。

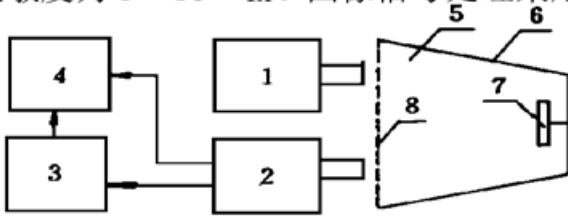


Fig. 1 Diagram of the UWLIS

- 1. laser scanning
- 2. camera
- 3. computer
- 4. monitor
- 5. water
- 6. tank
- 7. target
- 8. transmission glass

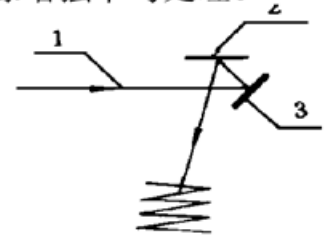


Fig. 2 Diagram of the optical layout

- 1. laser beam
- 2. horizontal scan-mirror
- 3. vertical scan-mirror

2.2 物理模型

2.2.1. 能量极限模式

1) 定义：所谓“能量极限模式”是指，光照目标、反射回探测器、所接收到的图像作用距离，仅仅取决于激光强度、海水吸收程度及微光增强 CCD 接收器的灵敏度。这种理想条件，多半设水中光的后向散射非常小，可忽略不计。现考察该模式的 CR 值(或称衰减长度值)。

2) 激光经目标至接收面的辐照度：假定这里研究的光场是线性的，即激光功率未使介质产生畸变，近似小信号传播条件为^[6]

$$E_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 L \eta \tau_w^2 \tau_0 G \tag{1}$$

式中 E_s 为辐照度； D/f 为光学相对孔径； f 为可调焦距(本工作： $f = 8.5 \sim 51\text{ mm}$)； L 为目标辐照度或称辐射率； D 为探测器镜头孔径($D = 50\text{ mm}$)； τ_w 为海水介质中激光源至目标的光衰减折扣； τ_0 为光学元件系统总衰减折扣； G 为处理增益($G = \sqrt{N}$ ， N 为处理帧数)； η 为因扫描引入能量分散的减小因子。

$$\eta = 1/(\Phi_{s_2}/D_{s_0})^2 \tag{2}$$

式中， Φ_{s_2} 为确定成像距离处视场面直径(或边框长度)； D_{s_0} 为确定成像距离处视场面上的像素光斑直径。

设被探测水下目标为一平面反射，则

$$L = \frac{P}{A_s \pi} \rho(\theta_i) \tag{3}$$

式中， P 为激光源输出功率(单位： W/m^2)； A_s 为确定成像距离处光斑面积($A_s = \pi D_{s_0}^2$)； $\rho(\theta_i)$ 为目标对平行光的反射系数，它是 θ_i 的函数， θ_i 为光与平面法线的夹角。另有

$$\tau_w = e^{-2CR} \tag{4}$$

式中 C 为均匀海水介质的光衰减系数 ($C = a + b$, a 为吸收部份; b 为散射部分); R 为目标成像作用距离。

3) 摄像机灵敏度折算得辐照度响应: 由摄像机的灵敏度换算成辐照度, 有

$$E_0 = \frac{E_y}{K_m V(\lambda)} \quad (5)$$

式中 E_y 为摄像机灵敏度; K_m 为绝对光谱效率值 ($K_m = 683 \text{ lm/W}$); $V(\lambda)$ 为波长 λ 的函数。

据文献[7], 对单色光, $V(\lambda)$ 随 λ 的不同而有差别。例如, 通常定义 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 时 $V(\lambda) = 1$, 则有^[9]

$$\begin{aligned} \lambda = 488 \text{ nm}; & \quad V(\lambda) = 0.19 \\ \lambda = 514 \text{ nm}; & \quad V(\lambda) = 0.58 \\ \lambda = 532 \text{ nm}; & \quad V(\lambda) = 0.88 \end{aligned}$$

若系统的电路噪声很低, 又不考虑水中光的后向散射影响, 满足 $E_s \geq E_0$, 摄像机就能探测到目标图像。其中 $E_s = E_0$, 水中探测目标的作用距离最大。经推导, 有

$$CR_{\max} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{K_m V(\lambda) P \rho \tau_0 G}{\pi E_y \Phi_{s_2}} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \right] \quad (6)$$

由(6)式可知: 系统的 CR_{\max} 值与光功率因子 (P 、 ρ 、 τ_0 及 G 等) 诸项自然对数成正比; 而与灵敏度 (E_y)、扫描生成目标视场面直径 (Φ_{s_2}) 及调焦因子 (f^2) 等诸项自然对数成反比。

2.2.2. 对比度极限模式

1) 定义: 所谓“对比度极限模式”是指, 在浑浊海水中因背向散射光在目标回波图像上迭加一噪声, 限制了成像作用距离, 此极限值称对比度极限。

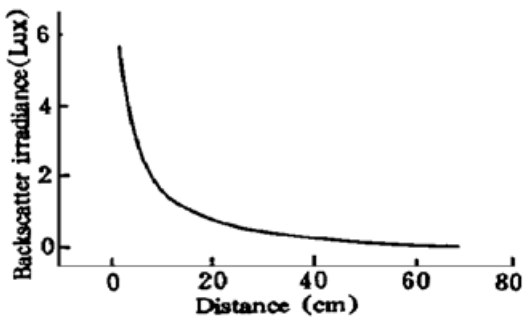


Fig. 3 The backscattering irradiance vs distance

2) 水中光的后向散射强度分布实验: 实验结果如图3所示。图中测量条件: $\lambda = 514.5 \text{ nm}$; 激光功率 $P = 310 \text{ mW}$; X 、 Y 方向扫描视场角均为 $\pm 3^\circ$ 。测定水质条件: $C = 0.33 \text{ m}^{-1}$ 。用 0.1 lx 级照度计实测记录水中光的后向散射强度分布。实验表明: 水中光的后向散射强度分布呈轴对称曲线。离光轴 $\pm 3.5 \text{ cm}$ 空间范围, 散射强度密集, 占了一半。分布呈非线性, 即微小的距离变化, 散射场强改变量大。从 $\pm 3.5 \text{ cm}$ 至 $\pm \infty$ 空间区域, 其散射强度与距离改变量呈线性化。距离变化大, 散射强度变化甚微。文献[8, 9]还表明: 海水越浑浊, 水中光的后向散射越大, 曲线分布角越趋扩展, 曲线响应越趋平坦。

3) 对比度极限模式公式推导: 对比度极限模式限制成像距离, 除了能量极限外, 还受二个因素制约: 第一、因水中光的后向散射强度超过目标反射强度, 使成像作用距离缩短。该因素若靠增大激光功率仍无法解决。因为后向散射强度与激光功率是同步增大的。该因素主要由光衰减系数 C 决定。 C 越大, R_{\max} 越小; 第二, 在混浊水中还要考虑图像自身对比度的衰减。这一因素是叠加的, 它使成像作用距离进一步缩短。

众所周知, 识别物体图像, 必须满足物体与周围环境的辐射率互相可以区分, 或有色差。若设物体辐射率为 L , 背景辐射率为 L_b , 则对比度定义为

$$T = \frac{L - L_b}{L_b} \tag{7}$$

在水中传送图像，它的对比度要降低。美国斯克里普斯海洋研究所能见度实验室用玻璃壳底船进行水下对比度观测。实验证明如下恒等式(此结论与文献[10]一致)

$$T_r = T_0 \exp [- (C + K \cos \theta) R] \tag{8}$$

式中， T_r 为表现对比度； T_0 为固有对比度； θ 为摄像机与激光束两光轴夹角； K 为海水辐照度衰减系数。按文献[11]有

$$C = (2.7 \sim 3.3) K \tag{9}$$

为方便起见取 $K = C/3$ 。 C 为水的光衰减系数。有

$$(T_r)_{\min} = T_0 \exp [- (C + K \cos \theta) R_{\max}] \tag{10}$$

及

$$(T_r)_{\min} = T_0 \exp [- (1 + \frac{\cos \theta}{3}) C R_{\max}] \tag{11}$$

式中 $(T_r)_{\min}$ 为摄像机分辨识别的下限。

由于某一成像系统的性能是确定的，被识别目标的固有对比度也是确定的，故有

$$(1 + \frac{\cos \theta}{3}) C R_{\max} = \text{常数} \tag{12}$$

称此常数为“衰减长度”值(无量纲)。该常数是对比度极限模式工作时成像系统(软硬件)的一个本征值。它的物理意义为，当海水混浊度确定(即水的光衰减系数 C 确定)、被探测水下目标确定及收、发部件操作方式确定(即光轴夹角 θ 确定)，则成像系统的最大作用距离 R_{\max} 也就确定。 C 与 θ 没有对应关系； R_{\max} 与 C 成反比，且与 θ 有密切关系。 $(1 + \frac{\cos \theta}{3}) C R_{\max}$ (即衰减长度这个恒定值越高，表明研制系统越先进、合理。也许此值可作为重要判据之一。)

3. 实验数据与测试结果

3.1 实验数据

表 1 示出三种不同衰减系数的水的实验数据。实验条件：激光功率 $P = 14.3 \text{ mW}$ ；波长

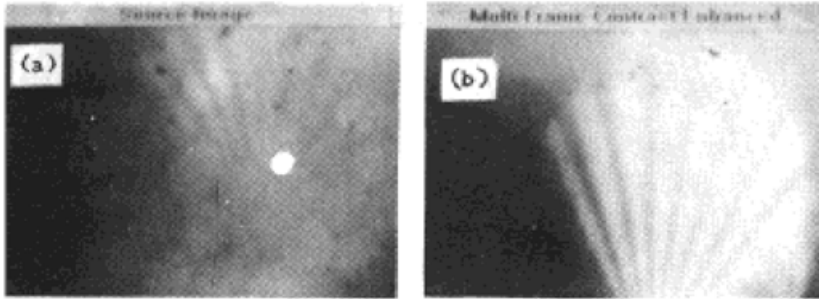
Table 1. The measuring result of the contrast limitation model for AL

number	time	tank (m ³)	attenuation coefficient (m ⁻¹)	imaging distance R _{max} (m)	cos θ	AL
						(1 + cos θ/3) C R _{max} attenuation lengths
1	96.4.26 day	8×5×4	1.26 tap water add suspended substance	3.5	0.8 (θ = 37°)	5.59
2	96.5.8 night	1.2×0.5×3	7.0 quite turbid seawater of Zhoushan	0.65	0.88 (θ = 28.4°)	5.88
3	96.5.7 night	1.2×0.5×8	20.8 very turbid seawater of Zhoushan	0.26	0.29 (θ = 73.2°)	5.93

$\lambda = 514.5 \text{ nm}$; 摄像机灵敏度 $E_V = 5 \times 10^{-4} \text{ lx}$; 图像处理增益 $G = 11.3$; 激光束发散角为 2.086 mrad ; 激光扫描开角为 $\pm 2.86^\circ$ (与调焦接收视场角相等)。实验时仅摄像机与激光光轴间夹角 θ 不相同。

3.2 测试分析

图 4 为在 $8 \times 5 \times 4 \text{ m}^3$ 的大水池中加入少量粒径约 $6 \mu\text{m}$ 的无机悬浮物, 并搅混。采用本



文研制的水下成像系统成像。起初没有目标图像, 当悬浮物经 39 min 沉淀, 水的透光率有所提高后, 系统屏幕上显示出目标图像, 如图 4(a), $R_{\max} = 3.5$ 。立即在光路上截取水介质, 测得光衰减系数 $C = 1.26 \text{ m}^{-1}$ 。图 4(b) 为经 128 frame 对比度增强处理后的清晰目标图像。测试所获得“衰减长度”值为 5.59。

Fig. 4 The underwater target laser-imaging in simulating seawater

(a) only one frame imaging, (b) 128-frame average imaging

结 论

- 1) 用连续蓝绿激光对水下目标点扫描、微光增强 CCD 面接收成像方案是可行的。目标图像有较高的分辨率;
- 2) 实际海水条件下和实验室模拟海水条件下目标成像的本征“衰减长度”值一致;
- 3) 根据海水光衰减系数 C 不相同, 可能出现两种工作模式, 即能量极限与对比度极限。 $C = 0.05 \text{ m}^{-1}$ 可能是工作模式的分界线;
- 4) 在对比度极限模式时, 实验证明 $(1 + \cos \theta/3) CR_{\max}$ 值确是恒定的;
- 5) 在对比度极限模式时, 对 C 、 θ 确定条件下增加激光功率亦无法增大成像作用距离 R_{\max} 。只有改进成像系统性能, 如提高灵敏度 E_V 、降低 f^2 、降低视场角 Φ_s 及提高图像处理能力 G ;
- 6) 在对比度极限模式时, θ 与 C 没有对应关系。而 C 越大, θ 越小, 则目标成像作用距离越近。反之亦然。

本文工作得到电子工业部 55 所陈钟谋教授、东南大学吴东南教授及王向阳、王敏明等研究生大力协助, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] Frank M. Caimi, Laser/Light Imaging For Underwater Use. *Sea Technology*, 1993, 5(12): 22~ 27
- [2] N. G. 杰尔洛夫, 海洋光学. 北京, 科学出版社, 1981: 75~ 80
- [3] Jules S. Jaffe, Computer Modeling and design of optimal underwater imaging system. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1990, 15(2): 101~ 111
- [4] M. Ravisanker, A. T. Reghunath, K. Salhianandan *et al.*, Effect of dissolved NaCl, MgCl_2 , and Na_2SO_4 in seawater on the optical attenuation in the region from 430 to 630 nm. *Appl. Opt.*, 1988, 27(18): 3887~ 3894
- [5] Thomas J. Kulp, Darrel Garvis, Randall Kennedy *et al.*, Development and testing of a synchronous-

- scanning underwater imaging system capable of rapid two-dimensional frame imaging. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(19): 3530~ 3530
- [6] 机械工程手册(光学), 北京, 机械工业出版社, 1979: 9~ 13
- [7] 张凤林, 孙学珠, 工程光学. 天津, 天津大学出版社, 1979: 92~ 95
- [8] G. D. Hickman *et al.*, Laser Transmission Studies of East Coast Waters. *AD-759781*, 1973: 1~ 9
- [9] 李荣福, 崔桂华, 李桂娟, 蓝绿脉冲激光用于海深及水下目标探测. 声学与电子工程, 1990, (1): 34~ 40
- [10] 李景镇, 光学手册. 西安, 陕西科学技术出版社, 1986: 35~ 39
- [11] 王之江, 光学技术手册(上、下), 北京, 机械工业出版社, 1987: 101~ 105
- [12] Jules S. Jaffe, Monte Carlo modeling of underwater imaging formation: Validity of the liner and small-angle approximations. *Appl. Opt.*, 1955, **34**(24): 5413~ 5421
- [13] H. R. Gordon, Equivalence of the point-and beam-spread functions of scattering media—a formal demonstration. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(2): 1120~ 1120
- [14] C. J. Funk, S. B. Bryant, P. J. Hekman, Jr., *Handbook of Underwater Imaging System Design*. Ocean Technology Department, Naval Undersea Center, San Diego, Calif., 1972: 107~ 112

Study of AL Value of Underwater Imaging System by Laser-Scanning

Yuan Yiquan

(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210018)

(Received 4 July 1996; revised 8 November 1996)

Abstract The virtues and the ways of laser imaging for underwater target are described. A kind of underwater experimental system with micro-intensified CCD imaging and continuous blue-green laser-spot scanning is discussed. The physical model and computer formula of the system are analysed. The experiments show that when it works under the contrast limitation model, its $[1 + (\cos \theta)/3] CR_{\max}$ (ie. attenuation length-AL) value kept constant. When water quality and target are certain, the value may become a basis for criteria of system superiority.

Key words laser, underwater imaging, micro-intensified CCD, target identification.