

一种新型水下激光成像系统

刘雪明 张明德 孙小菡

(东南大学电子工程系 南京 210096)

提要 提出了一种新型水下激光成像系统的模型, 计算了该系统的成像距离和成像质量与光束发散角、接收视场角、快门开启时间等主要参数的关系, 降低背景光的影响与提高光脉冲质量能有效地提高成像距离和成像质量。在一般海水介质中, 这种水下激光成像系统的成像距离理论值可达 25 倍衰减长度, 约是同步扫描和距离选通水下激光成像系统的 4~5 倍。

关键词 水下激光成像, 成像质量, 成像距离, 调制传递函数

1 引言

电磁波在水中传输时, 由于受到水介质的吸收和散射, 传播距离受到严重限制。然而, 蓝绿光在水中传输时, 具有“透明窗口”效应, 因此水下成像系统的最佳光源是蓝绿激光。由于水介质对光波的强烈散射, 影响水下激光成像距离的主要因素是后向散射光^[1~3], 为了尽量减少后向散射光对水下成像的影响, 目前主要采用同步扫描和距离选通技术。虽然它们在一定程度上都减少了后向散射光的影响, 提高了成像能力, 但它们也都存在一些固有的不足。前者使用连续激光扫描和连续接收, 由于激光功率低(一般小于 5 W), 因此目标反射光的能量少, 接收器的灵敏度要求高, 并且连续接收使得后向散射光及环境背景光等噪声光的累积仍然较大。后者使用全视场接收, 使得非目标区域的后向散射光、背景光等也进入了接收器, 不但接收了更多的外界光, 而且全视场接收, 使得计算机在处理图像时, 不仅只处理从目标反射回每个脉冲光斑的信号所产生的像素点, 而且能处理整个视场范围内的所有像素点, 带来了许多额外噪声, 降低了信噪比, 从而也降低了成像能力。为了更有效地提高成像能力, 本文提出一种新型水下激光成像技术, 采用超短脉冲激光器作为光源, 结合同步扫描技术和距离选通技术两者的优点, 既利用准直器压缩光束的发散, 提高激光束的能量密度, 又利用距离选通技术和窄视场接收减小后向散射光的累积, 从而成像距离远, 分辨率高, 且有同时进行测距与三维成像等的潜在优势。

2 工作原理和理论分析

2.1 工作原理

这种新型水下激光成像系统的构成方框图如图 1 所示。从超短脉冲激光器发出的脉冲光

经准直, 由同步子系统控制二维扫描机构, 使脉冲光对目标表面逐点扫描照射(如图 2 所示)。同时, 同步子系统也控制光接收器对照射的光点同步跟踪, 然后距离选通子系统控制快门的开关, 使目标反射光在到达接收器的瞬间打开快门, 并使反射光进入成像系统, 再经电荷耦合器件(CCD)转换, 输出电信号, 经采样/量化后送入计算机, 这样就得到了重建图像的像素点。因此, 实现该系统的主要技术是光源、距离选通和同步控制技术、准直器及光接收器等。超短脉冲蓝绿激光器比较成熟, 主动锁模加调 Q 获得的蓝绿激光功率高, 且性能稳定; 克尔盒快门的开门时间达皮秒量级; 距离选通和同步扫描技术已经达到实用阶段^[1, 2]; 使用三个透镜组合的准直器不仅能有效地准直激光, 也能有效地消除像差^[4]; CCD 的灵敏度达 10^{-7} lx, 分辨率达 0.08 mrad, 并具有皮秒量级开关能力^[1, 5]。由此可见, 该系统的同步扫描范围能达 70 度^[2]。

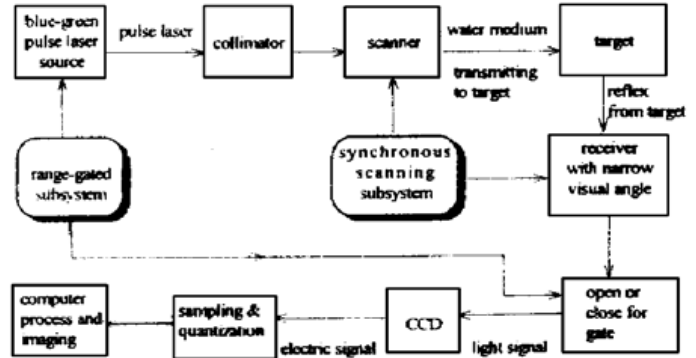


图 1 新型水下激光成像系统构成的原理框图

Fig. 1 Schematic diagram for the new kind of underwater laser imaging system

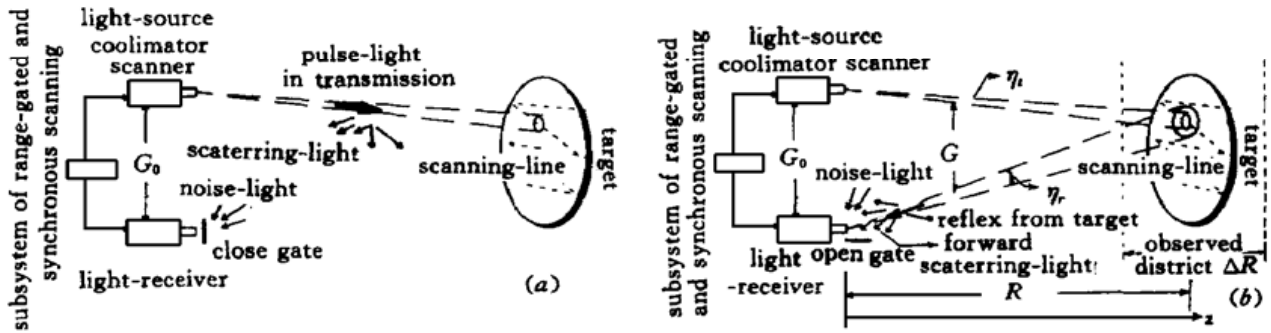


图 2 新型水下激光成像系统的光路图

(a) 由光源至靶的脉冲光的传输; (b) 从靶反射的脉冲光的传输

Fig. 2 Light diagram for the new underwater laser imaging system

(a) transmitting of pulse light from light-source to target; (b) transmitting of pulse light reflected from target

2.2 信号光和噪声光的累积照度

光在水介质中传输时, 散射光不仅损耗光的能量, 而且影响系统的成像距离和成像质量, 其中后向散射光影响系统的成像距离和降低图像的对比度, 前向散射光影响目标的细节分辨率^[1~ 3, 6, 7]。如果系统使用了窄带滤光器和窄视场接收, 太阳背景光、水中微生物诱导荧光等外界光对系统成像的影响不大, 但在远距离成像中, 由于信号光的能量也较低, 于是不得不考虑背景光的影响。为了讨论方便, 假设经窄带滤光后的背景光的照度 $E_b = 4.4 \times 10^{-7}$ W/m² (该值相当于无月夜天光在地面上所生的照度)。光源发出的一个脉冲光传输到目标的过程中, 根据辐射传输理论, 传输到目标的照度表达式为^[6, 8~ 10]

$$E_0 = I \left[\frac{1}{R^2} e^{-cR} + Ak \frac{1}{4\pi R} e^{-kR} \right] \quad (1)$$

式中 I 为激光源的辐射强度, 它由脉冲光的峰值功率 P 和脉冲光的发散角 η 决定, c 为体积衰减系数, k 为照度衰减系数, R 为光源到目标的距离, A 为常数, 它与水介质中的粒子直径、浓度和脉冲光的发散角等有关。在一般海水介质中, 利用准直器压缩脉冲光的发散角到毫弧度量

级, A 值近似可取 4×10^{-2} 。

光从目标反射回接收器的传输过程中, 采用双流辐射传递理论^[9], 目标反射光的照度为

$$E_s(R) = \{E_0' + QE_0''[1 - E_0'^{(k-c)R}]\}e^{-kR} \quad (2)$$

式中 E_0' 为目标反射光的漫射分量, E_0'' 为目标反射光的定向分量, Q 为与 k , c 及散射系数 b 有关的常数, 假设目标是均匀漫反射物体, 那么 $E_0'' = 0$, $E_0' = \rho E_0$, ρ 为目标的反射率, E_0 由(1)给出。

一个光脉冲从目标反射到接收器端, 除了信号光, 也混有噪声光(包括后向散射光和背景光), 因此在快门的开门期间就有了噪声光的累积, 即

$$E_n(R) = E_{bs}(R) + E_b \quad (3)$$

式中 $E_{bs}(R)$ 为后向散射光的照度, E_b 为背景光的照度。

利用光束扩展函数和点扩展函数, 后向散射光的累积为^[11]

$$E_{bs} = \int_{R-\Delta R/2}^{R+\Delta R/2} 2\pi \text{BSC}(z) M \text{PSFP}(G, 2z) dz \quad (4)$$

式中, $\Delta R = \Delta t \cdot V$, Δt 为快门的开门时间, V 为光波在水介质的速度; $M = \pi r_r^2 P / 4$, r_r 为接收视场角; G 为水中传输光束与接收光束间的距离; z 为以接收器为原点的坐标轴上的点(如图 2 所示); $\text{PSFP}(G, z)$ 为点扩展函数的零阶汉克尔变换; $\text{BSC}(z)$ 为体积散射系数, 由于在 $\theta > 90^\circ$ 时, 体积散射函数 $\text{VSF}(\theta)$ 变化不大, 近似为常数^[12], 于是 $\text{BSC}(z) \approx b_b / (2\pi)$, b_b 为后向散射系数。

在一般海水介质中, $\text{PSFP}(G, z)$ 可表示为^[11]

$$\text{PSFP}(G, z) = \int_0^\infty dx \left[x \exp\left[-cz - bz \frac{1 - \exp(-0.06\pi x z)}{-0.06\pi x z}\right] J_0(2\pi x G) \right] \quad (5)$$

式中 b 为水介质的散射系数; x 为以照射到目标上脉冲光的圆心为原点、与垂直于 z 轴的平面上的点到原点的距离; $J_0(2\pi x G)$ 为零阶第一类贝塞尔函数。

2.3 调制传递函数

在讨论水下激光成像系统的成像质量好坏时, 一般使用调制传递函数(MTF)^[7, 11]。在计算这种水下激光成像系统的 MTF 时, 我们把从光源发出的脉冲光经目标反射传输到接收器端的过程分两个过程, 即从光源到目标之间水介质散射产生后向散射光和环境的背景光; 从目标到接收器之间水介质散射产生的前向散射光, 这两个过程互不相干^[3]。即^[7]

$$\text{MTF} = \text{MTF}_1 \times \text{MTF}_2 \quad (6)$$

$$\text{MTF}_1 = \frac{E_s(R)}{E_s(R) + 2E_n(R)} \quad (7)$$

$$\text{MTF}_2(\phi, R) = 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} R^2 \text{PSF}(\theta, R) J_0(2\pi\phi R) \theta d\theta \quad (8)$$

式中, MTF_1 为背景光的调制传递函数, MTF_2 为前向散射光的调制传递函数, ϕ 为空间角频率, θ 为光子流方向的角度, θ_{\max} 为最大积分角, $\text{PSF}(\theta, R)$ 为极坐标上的点扩展函数。

3 模拟结果及结论

从式(1) ~ (8)可知, 成像距离和成像质量与脉冲光的发散角、接收的视场角、快门开启时间等因素有直接关系。在数值计算过程中, 我们采用海水的典型值^[11, 13], 即 $c = 0.145 \text{ m}^{-1}$, $b = 0.122 \text{ m}^{-1}$, $b_b = 2 \times 10^{-3} b$ ^[14], $k = 0.063$, 并设 $P = 500 \text{ kW}$, 光脉冲宽度为 1 ps , $\rho = 0$ 。

5, $\lambda = 488 \text{ nm}$, $\phi = 400 \text{ r/rad}$, 接收器与激光器的距离 G_0 为 1 m。图 3 是 E_n, E_s 与 $\eta_t, \eta_r, \Delta t, R$ 的关系图。图 3(a) 中 E_s 曲线族从右到左依次对应于 $\eta_t = 1, 4, 16, 64, 128 \text{ (mrad)}$ 。图中 A, B 曲线分别对应于背景光相当于接近天顶的满月和 无月夜天光在地面所生的照度, 即 $E_b = 3 \times 10^{-4}, 4.4 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ 。图 3(b) 和(c) 中 E_n 曲线族从下到上依次对应于 $\eta_r = 2, 5, 10, 20, 50, 150 \text{ (mrad)}$ 和 $\Delta t = 1, 10, 100, 1000, 10000 \text{ (ps)}$ 。图 3 中纵坐标都为 E_n, E_s , 横坐标 R 的单位都是衰减长度, 即 c^{-1} 。图 4(a) 是 MTF 与 R 关系图。图 4(b) 是 MTF 与 η_r 关系图(为了数值模拟的方便, 假设脉冲光在水中传输中, 它的光斑是圆形, 并且呈高斯分布, 于是 $\text{PSF}(\theta, R)$ 也为高斯分布)。

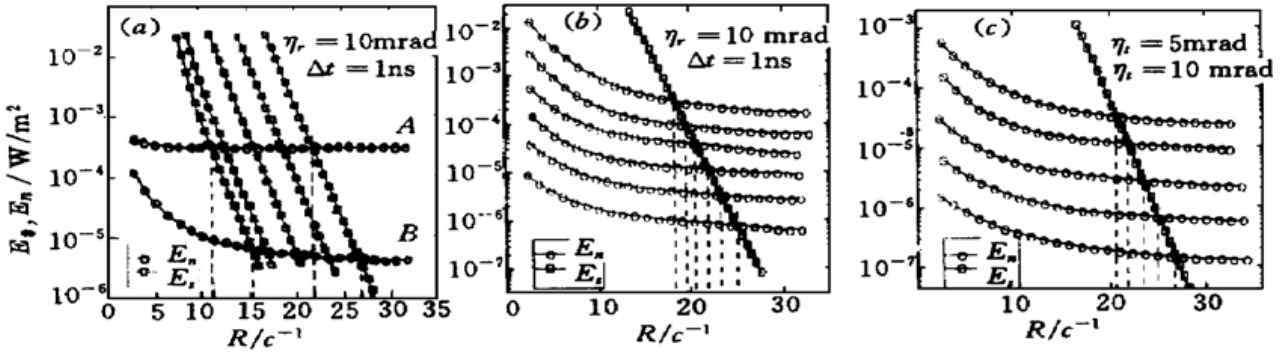


图 3 E_n, E_s 与 $\eta_r, \eta_t, \Delta t, R$ 的关系图

Fig. 3 Curves of E_n and E_s vs $\eta_r, \eta_t, \Delta t$ and R

在计算成像距离时, 如果信号光的照度大于噪声光的照度, 就假设能成像。因此, 从图 3 可知, 该水下激光成像系统在一般海水介质中的成像距离的理论值可达 25 倍衰减长度, 该值是同步扫描和距离选通水下激光成像系统的 4~ 5 倍。由图 3(a) 可知, 准直入射光束、压缩脉冲光发散角能提高信号光的能量密度、增强脉冲光的穿透能力, 于是有效提高成像距离, 并且发散角越小效果越明显。背景光对成像距离也有较大影响, 如果成像系统不使用窄带滤光器, 那么背景光将成为影响系统成像能力的主要因素。图 3(b) 表明, 接收系统采用窄视场接收, 减小了后向散射光累积, 从而提高了成像距离, 视场角越小成像距离越远。从图 3(c) 可以发现, 快门开启的时间越短噪声光的累积越小, 成像距离越远。从图 4(a) 不难发现, 随着目标距离的增大成像质量近似指数下降, 这是由于目标越远光斑越大, 光能量密度越小, 并且光能量的损耗呈指数减小, 而前向散射光的累积相对增大, 于是 MTF 下降较快。图 4(b) 表明, 压缩脉冲光的发散角能明显地提高成像质量, 这是因为随着发散角的减小, 光斑越小, 功率密度越大, 从目标反射回来的能量越多。因而影响成像质量的主要因素是光斑的质量和发散角。

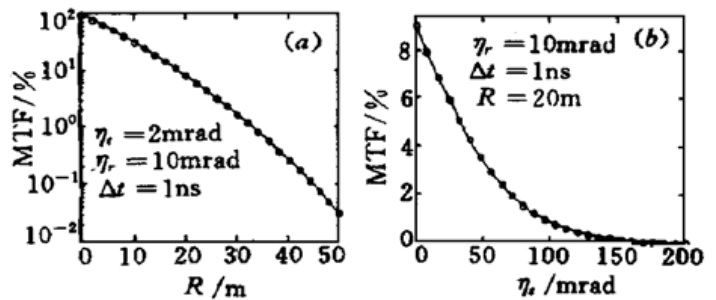


图 4 MTF 与 R, η_r 关系图

Fig. 4 Curves of MTF vs R and η_r

本文提出的新型水下激光成像系统不但成像距离能提高到同步扫描和距离选通水下激光成像系统的 4~ 5 倍(可达 25 倍衰减长度), 而且成像质量也有效得到改善。通过数值模拟, 我们发现: 光脉冲的准直、接收器的窄视场接收、快门的高速开启等技术能有效提高这种水下激光成像系统的成像距离和成像质量。当光功率增加到一定值后, 利用窄带滤光器和偏振器尽

在计算成像距离时, 如果信号光的照度大于噪声光的照度, 就假设能成像。因此, 从图 3 可知, 该水下激光成像系统在一般海水介质中的成像距离的理论值可达 25 倍衰减长度, 该值是同步扫描和距离选通水下激光成像系统的 4~ 5 倍。由图 3(a) 可知, 准直入射光束、压缩脉冲光发散角能提高信号光的能量密度、增强脉冲光的穿透能力, 于是有效提高成像距离, 并且发散角越小效果越明显。背景光对成像距离也有较大影响, 如果成像系统不使用窄带滤光器, 那么背景光将成为影响系统成像能力的主要因素。图 3(b) 表明, 接收系统采用窄视场接收, 减小了后向散射光累积, 从而提高了成像距离, 视场角越小成像距离越远。从图 3(c) 可以发现, 快门开启的时间越短噪声光的累积越小, 成像距离越远。从图 4(a) 不难发现, 随着目标距离的增大成像质量近似指数下降, 这是由于目标越远光斑越大, 光能量密度越小, 并且光能量的损耗呈指数减小, 而前向散射光的累积相对增大, 于是 MTF 下降较快。图 4(b) 表明, 压缩脉冲光的发散角能明显地提高成像质量, 这是因为随着发散角的减小, 光斑越小, 功率密度越大, 从目标反射回来的能量越多。因而影响成像质量的主要因素是光斑的质量和发散角。

可能减小背景光影响,也能提高该系统的成像能力。

参 考 文 献

- 1 G. R. Fournier. Range-gated underwater laser imaging system. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(9): 2185~ 2190
- 2 L. R. Marshall. Blue-green lasers plumb the mysteries of the deep. *Laser Focus World*, 1993, (4): 185~ 197
- 3 J. S. Jaffe. Computer modeling and the design of optical underwater imaging system. *IEEE J. Oceanic Engineering*, 1990, **15**(2): 101~ 111
- 4 Liu Xueming, He Jinlin, Sun Xiaohan *et al.*. Instrument for collimating and expanding Gaussian beams for underwater laser imaging systems. *Opt. Eng.*, 1998, **37**(9): 2467~ 2471
- 5 Jiang Benhe *et al.*. Small angle measuring system by collimating laser and CCD. *Photonics Nanjing '98*, 1998. 13 (in Chinese)
- 6 Xiaolenzhengci, Anjijiancilan, Huguwuxiong. Ocean Electronics. Ocean Press, 1980. 155~ 172 (in Chinese)
- 7 Liu Xueming, Zhang Mingde, Sun Xiaohan. Analysis of the MTF for an underwater laser imaging system. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 1999, **A26**(4): 332~ 336 (in Chinese)
- 8 N. G. Jilrov. Oceanic Optics. Beijing: Science Press, 1981. 99~ 121 (in Chinese)
- 9 Xivlin. Oceanic and Atmosphere Optics. Qingdao: Qingdao Ocean Press, 1991. 169~ 205 (in Chinese)
- 10 H. J. Okoomian. Underwater transmission characteristics for laser radiation. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(9): 1441 ~ 1446
- 11 L. E. Mertens. Use of point spread and beam spread functions for analysis of imaging systems in water. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(8): 1105~ 1117
- 12 R. A. Maffione, D. R. Dana. Instruments and methods for measuring the backward scattering coefficient of ocean waters. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 6057~ 6067
- 13 J. T. O. Kirk. Estimation of the absorption and the scattering coefficients of natural waters by use of underwater irradiance measurements. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(15): 3276~ 3278
- 14 O. Ulloa, S. Sathyendranath, T. Platt. Effect of the particle-size distribution on the backscattering ratio in seawater. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(30): 7070~ 7076

A New Kind of Underwater Laser Imaging System

Liu Xueming Zhang Mingde Sun Xiaohan

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract The model for a new kind of underwater laser imaging system is proposed. The quantity relationships of imaging distance and quality of the system with the main system parameters such as the scattering angle of light beam, the visual angle and open time of gate of receiver are calculated. The results show that the imaging quality and distance can be increased by decreasing the influence of background lights and increasing the quality of pulse light. The theoretical value of imaging distance for the new kind of underwater laser imaging system in the ordinary seawater can reached 25 times of the attenuation lengths, which is as 4~ 5 times long as that for the synchronous scanning and range-gated systems.

Key words underwater laser imaging, imaging quality, imaging distance, modulation transfer function