

## 激光水下成像发射光学系统的研究

孙 健, 张晓晖, 葛卫龙  
(海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:**水下远距离激光主动成像系统对扩束发射光学系统的扩束能力及其对距离的适应性提出了较高的要求。为了在不同的成像距离处都获得适当大小的光斑, 论文对激光水下成像发射光学系统进行了研究, 设计了一种变倍的发射光学系统, 研究了激光光束通过该发射光学系统的变换规律, 推导了目标距离与变倍光学系统动镜组的位置调整量的数学关系, 提出了激光水下成像变倍发射光学系统的控制方案。

**关键词:**激光水下成像; 变倍光学系统; 高斯光束; 控制方案

**中图分类号:** TB133

**文献标识码:** A

## Study of the Expanding System in Laser Underwater Imaging System

SUN Jian, ZHANG Xiao-hui, GE Wei-long

(Dept. of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The active laser underwater imaging system of far distance puts strict demands on the expanding ability and adaptability to the distance of the expanding system. An expanding optical system is studied and designed for getting appropriate illuminating area at different imaging distance. The expanding system with the special rule that laser beams apply when transferring and transforming is analyzed. The mathematic relation between target position and modulating of the expanding optical system is discussed. A controlling project of the expanding optical system in laser underwater imaging system is raised at last.

**Key words:** laser underwater imaging system; expanding system of variable ratio; Gaussian beams; controlling project

### 1 引 言

距离选通激光水下成像技术是目前用于水下目标探测的最先进的技术, 它主动发射激光脉冲照射目标, 以 ICCD 作为光电探测器接收目标对激光的漫反射光而形成图像, 由于利用了激光脉冲所独具的时间特性来减小水体的散射光噪声, 它可以在相同条件下, 使其对水下目标的成像距离达到普通光成像方式的 3~6 倍<sup>[1-2]</sup>, 所以一些发达国家都进行了距离选通激光水下成像系统的研究。不过, 这些研究主要都是围绕着如何增大系统的成像距离和提高系统成像质量来展开的, 专门研究激光水下成像发射光学系统的文献较少, 而实际应用中, 如果不通过光学系统对激光器所发射的激光束进行变换, 是

不能使系统对处于不同距离处的目标都能获得比较理想的图像的: 激光对近距离目标的照明光斑小, 目标所反射的激光会因光功率密度过大而使 ICCD 探测单元饱和出现亮斑; 激光对远距离目标的照明光斑大, 因为水体的衰减效应, 此时到达目标表面的光强本来就比近距离目标小, 更大的光斑将使目标的照明光功率密度比近距离小得多, 这将使 ICCD 对远距离目标的成像因照明光能量不足而出现图像模糊以至无法分辨, 所以, 有必要对激光水下成像发射光学系统进行研究。

作者简介: 孙 健(1984 -), 男, 硕士, 主要从事水下探测的研究。E-mail: sunjianpeiabed@163.com  
收稿日期: 2008-09-22; 收稿日期: 2008-10-13

本文设计了一种变倍的发射光学系统,使激光照明光斑的大小具有可调性,可以让系统根据目标距离远近调节光斑大小,保证系统对一定距离范围内的目标都能获得比较理想的成像效果,提出了激光水下成像变倍发射光学系统的控制方案。

## 2 理论分析

距离选通激光水下成像系统的光源为倍频 Nd:YAG 脉冲激光器(波长为 532nm),其所发射激光经测试近似为基模高斯光束,光束束腰直径为 2.7mm,发散角为 5mrad。如图 1 所示为本文所设计的变倍发射光学系统结构示意图,该系统由 3 个镜组组成<sup>[3-4]</sup>,其中,A 为固定组,B 为变倍组,C 为补偿组。镜组 B 与镜组 C 共同构成动镜组,它们的相对位置固定。

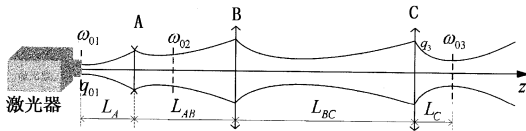


图 1 高斯光束通过变倍扩束系统

镜组 A、B、C 的等效焦距依次为  $f_A = -45\text{mm}$ ,  $f_B = 75\text{mm}$ ,  $f_C = 200\text{mm}$ , 设  $w_{01}$  为入射激光束的束腰直径,  $\omega_{02}$  与  $\omega_{03}$  分别为光束通过镜组 A、C 后的束腰半径,  $L_A$  为入射光束光腰位置到镜组 A 的距离,  $L_{AB}$  为镜组 A、B 间的距离,  $L_{BC} = 30\text{mm}$  为镜组 B、C 间的距离,  $L_C$  为高斯光束通过镜组 C 后束腰位置到镜组 C 的距离。设入射光束腰位置为原点。

当出射光腰在焦平面上时,扩束望远系统可达到最大扩束比,因此把入射光腰设在镜组 A 的焦平面上。随着镜组 B、C 的移动,发射光学系统可以看成是离焦的望远系统,根据高斯光束的传输特性<sup>[5]</sup>,有:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2(z)} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \omega(z) \left[ 1 + \left( \frac{\pi \omega^2(z)}{\lambda R(z)} \right) \right]^{-1/2} \quad (2)$$

$$q_{01} = i \frac{\pi \omega_{01}^2}{\lambda} \quad (3)$$

$$L_A = f_A \quad (4)$$

其中,  $q(z)$  为  $z$  远处的高斯光束的复曲率半径( $q$  参数);  $R(z)$  为  $z$  远处等相位面的曲率半径;  $\omega(z)$  为与束腰相距为  $z$  处的光斑大小;  $q_{01}$  为初始  $q$  参数值,高斯光束通过发射光学系统的变换矩阵为<sup>[6]</sup>:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_C} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_{BC} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_B} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_{AB} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_A} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$A = 1 + \frac{L_{AB}(L_{BC} - f_B) - L_{BC}(f_A + f_B)}{f_A f_B} \quad (6)$$

$$B = 1 + L_{AB} + L_{BC} + \frac{L_{AB}(L_{BC} - f_B) - L_{BC}(f_A + f_B)}{f_A f_B} -$$

$$\frac{L_{AB} L_{BC}}{f_B} \quad (7)$$

$$C =$$

$$\frac{L_{AB}(f_B + f_C) + L_{BC}(f_A + f_B) - f_A f_B - f_B f_C - f_A f_C - L_{AB} L_{BC}}{f_A f_B f_C} \quad (8)$$

$$D = \frac{L_{BC}(f_A + f_B) - f_A f_B - f_A f_C - f_B L_{BC}}{f_B f_C} \quad (9)$$

那么,光束通过光学系统后的  $q$  参数为:

$$q_3 = \frac{A q_{01} + B}{C q_{01} + D} \quad (10)$$

把式(6)~式(9)代入式(10),结合式(1)得出通过镜组 C 后的等相位曲率半径  $R(z)_3$  和光斑半径  $\omega(z)_3$  表达式:

$$R(z)_3 = \frac{A^2 q_{01}^2 - B^2}{AC q_{01}^2 - BD} \quad (11)$$

$$\omega(z)_3^2 = \frac{i \lambda (A^2 q_{01}^2 - B^2)}{\pi (BC - AD) q_{01}} \quad (12)$$

则激光束通过发射光学系统后的光束束腰半径为:

$$\omega_{03} = \omega(z)_3 \left[ 1 + \left( \frac{\pi \omega^2(z)_3}{\lambda R(z)_3} \right) \right]^{-1/2} \quad (13)$$

于是可得系统扩束比为:

$$M = \left| \frac{\omega_{03}}{\omega_{01}} \right| = \frac{\omega(z)_3 \left[ 1 + \left( \frac{\pi \omega^2(z)_3}{\lambda R(z)_3} \right) \right]^{-1/2}}{\omega_{01}} = \frac{\lambda}{\pi \theta_{03}} = \frac{\theta_{01}}{\pi \theta_{03}} \quad (14)$$

其中,  $\theta_{01}$  与  $\theta_{03}$  分别为初始发散角和经过扩束光学系统后的发散角。

下面分析动镜组调整量与目标距离的关系。

对于水下远距离( $>30\text{m}$ )成像,由于目标距离远远大于(10倍以上)光源半径,所以可以把激光照明光源看作为点光源处理。在未考虑水体多次散射的情况下,若实验要求距离  $L$  远处的照明光斑半径为  $r$ ,则由三角形定理近似得到激光在水中所要求的初始发散角为:

$$\theta_{03} = \arctan\left(\frac{r}{z}\right) \quad (15)$$

若距离选通激光水下成像使用的波长为  $\lambda$  的激光束初始束腰直径为  $\omega_{01}$ , 则激光初始发散角为:

$$\theta_{01} = \frac{\lambda}{\pi\omega_{01}} \quad (16)$$

通过系统光学系统后的发散角与初始发散角的放大率应为:

$$M' = \theta_{03}/\theta_{01} = M \quad (17)$$

因此,若目标为长为 2m、宽 1m 的长方形物体,则要求在任何距离处距离选通激光水下成像系统的照明光均能照亮整个靶板,即照明圆斑直径至少为 2m。假设激光初始束腰直径  $\omega_{01} = 2.7\text{mm}$ 、波长  $\lambda = 532\text{nm}$ ,则由式(14)~式(17)得特定距离  $L$  与该距离处要获得满意光斑要求的调整值的数学关系:

$$\frac{\arctan\left(\frac{1}{z}\right)}{\frac{\lambda}{\pi\omega_{01}}} = \frac{\omega_{01}}{\omega(z)_3 \left[1 + \left(\frac{\pi\omega^2(z)_3}{\lambda R(z)_3}\right)^{-1/2}\right]} \quad (18)$$

目标距离与该位置调整值关系曲线如图 2 所示。

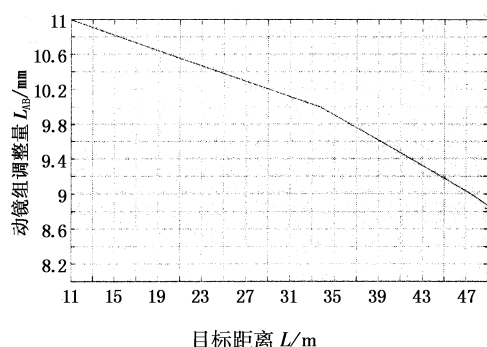


图2 目标距离与该位置调整值关系曲线

### 3 发射光学系统控制方案及应用

激光水下实验系统中,激光发射光学系统的调整值(A、B两透镜组间的距离) $L_{AB}$ ,本文称之为调整预置值。在不考虑光斑质量的情况下,由第2节的理论推导,可知目标距离与达到系统要求的动镜组调整量 $L_{AB}$ 存在的数学关系,并且考虑到尽量缩小光学系统体积把调整量限定在8~11mm内,此时距离与调整量为——对应关系,则发射光学系统控制方案实现如下:

设定需要探测到距离,对应的动镜组调整量被导入执行机构,对发射光学系统中 $L_{AB}$ 进行电动调节,得到满意的照明光斑。又由于水体对光的散射

作用,初步的调整并不能很好地满足实验要求,所以把应接收器得到的图像光斑与事先得到的数据库进行比较,如果偏差超过阈值则输出修正值到执行机构,对激光发射光学系统进行二次调整,最终得到较满意的光斑。图3为本文设计的激光水下成像电动发射光学系统控制示意图。

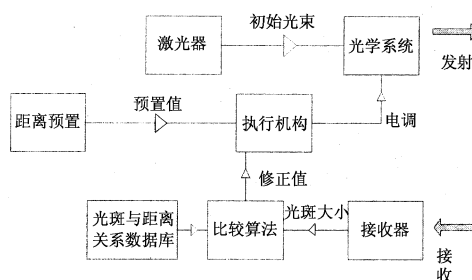


图3 发射光学系统控制示意图

应用结果显示,本文设计的光学系统能够满足实验的需求。在15~45m内均能与目标靶板和接收器视场实时匹配,实现大视场下的全视场均匀扩束和小视场下的目标细节照明,达到较好照明效果。

### 4 结论

为了在不同的成像距离处都获得适当大小的光斑,本文对激光水下成像发射光学系统进行了研究,并设计了变倍发射光学系统。在研究了激光光束通过该发射光学系统的变换规律的基础上,推导了目标距离与变倍光学系统动镜组位置调整量的数学关系,提出了激光水下成像电动发射光学系统的控制方案,达到较好的效果,为距离选通激光水下发射光学系统的使用提供指导。

### 参考文献:

- [1] 刘广荣,等. 水下探测光电成像技术及其进展[J]. 光学技术,2004,11 30(6):732-735.
- [2] Thomas E McDonald, et al. Range-gated imaging experiments using gated intensifiers [J]. Proc. SPIE, 1999, 3642, 142-148.
- [3] 赵勇,李鹏生,浦昭邦. 基于ABCD定律的LD-SMF高斯光束模式匹配方法的研究[J]. 光电子·激光, 2000,11(3):274-276.
- [4] 赵延仲,宋丰华,孙华燕. 高斯光束的激光变倍扩束光学系统设计[J]. 装备指挥技术学院学报,2007,18(5):85-89.
- [5] 李小彤. 几何光学和光学设计[M]. 杭州:浙江大学出版社,1996:221-227.
- [6] 郁道银,谈恒英. 工程光学[M]. 北京:机械工业出版社,1999:1-36.