

文章编号: 1001-3806(2011)02-0226-04

## 一种用于水下距离选通成像的变步长扫描方法

韩宏伟, 张晓晖\*, 葛卫龙  
(海军工程大学 兵器工程系 武汉 430033)

**摘要:** 为了扫描时既减少“切片”数目又保证图像质量, 采用一种用于距离选通水下激光成像的变步长的延迟递增方法, 首先通过辐射探测理论和景深原理确定接收镜头的焦距和对焦位置以及系统需要扫描的范围, 再依据水下激光脉冲时域展宽理论确定延迟递进的步长和相应的选通门宽, 最后进行了仿真计算和实验。结果表明, 在保证图像质量的同时, 基于该方法的距离选通成像系统可在7个脉冲成像内完成对15m到48.6m范围的扫描。实验结果证明了该方法的有效性, 从而为距离选通技术的实用化发展提供了有益的尝试。

**关键词:** 成像系统; 变步长扫描; 时域展宽; 距离选通

**中图分类号:** TN911.73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.023

### A variable step scan method for underwater range-gated imaging

HAN Hong-wei, ZHANG Xiao-hui, GE Wei-long

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to both reduce the number of scanning frames and ensure the image quality, a variable step scanning method was put forward for range-gated underwater laser imaging. Firstly, the focal length, focal position of the receiver lens and the system scanning scope were defined based on both radiation detection theory and the principle of depth of field. Then the step size of delay and the width of the gated pulse were calculated according to the time-domain broadening of underwater laser pulses. Finally, the simulation and experiments were conducted. The experimental results show that the range-gated imaging system based on the proposed scan method can scan over the scope from 15m to 48.6m with 7 pulses imaging, and the image quality is kept at the same time. This proves the validity of this method, and provides an attempt for the actual application of range-gated technique in underwater imaging.

**Key words:** imaging system; variable step scan; time-domain broadening; range-gated

### 引言

距离选通技术是水下光电成像中克服后向散射的一种有效手段<sup>[1]</sup>。它通过时间标记以时间的先后分开不同距离上的散射光和目标的反射光, 使由被观察目标反射回来的辐射脉冲刚好在摄像机选通工作的时间内到达摄像机并成像, 从而抑制了由水体及其中悬浮粒子引起的后向散射光对图像质量的影响<sup>[2-3]</sup>。随着激光技术和光电器件的发展, 国内外多家单位都对此展开了研究。目前, 国外已有实用的水下激光距离选通成像系统研制成功, 如加拿大瓦尔卡捷国防研究院先后研制的 LUCIE I 和 LUCIE II<sup>[4]</sup>, 美国 Sparta 公司研制的遥控式和潜水者式两款 See-Ray 水下激光距离选通成像系统等<sup>[5]</sup>。国内对该技术的研究还停留

在理论和实验研究阶段, 未见有关于实用化的产品的报道。

由于独特的成像原理, 距离选通技术实际上是一种定距成像方法, 即必须事先给定成像距离, 然后, 据此设定接收器选通门的开启时刻。实验室研究中多是把目标靶板悬挂在一定距离, 然后改变其它参量以研究不同参量变化时对图像质量的影响<sup>[6]</sup>。然而, 在未知的水下环境中事先获得目标距离却并不是一件容易的工作, 尤其是携带该成像系统的载体处于不断运动的情况下。因而只能通过搜索方式克服这个问题, 即逐渐增加从激光发射到接收机选通成像之间的延迟时间, 采集一系列针对不同距离的“切片”图像, 然后从这些图像中选取质量最好的一帧显示。为了避免载体运动的影响, 在激光频率不高时, 要尽量减少“切片”数目以缩短搜索时间。作者提出了一种基于水下激光时域脉冲展宽的变步长延迟递增方法, 该方法可在几个脉冲成像内完成整个扫描过程, 从而保证了系统工作的实时性。

作者简介: 韩宏伟(1983-), 男, 博士研究生, 主要研究领域为水下激光成像与图像处理。

\* 通讯联系人。E-mail: zhangxiaohui505@vip.sina.com

收稿日期: 2010-04-20; 收到修改稿日期: 2010-07-05

## 1 系统的扫描范围

系统的扫描范围指“切片”帧所要覆盖的距离,这包括最近距离和最远距离。最近距离由系统的固有延迟决定,即在外触发式的距离选通成像系统中,由于电子器件和线缆的影响,激光脉冲发射后接收器不能马上响应,而要经过一个固有延迟,在这个固有延迟内光波所走过距离的一半就是最近距离。最远距离考虑两方面的因素,一是图像信噪比,要保证增强型电荷耦合器件(intensified charge coupled device, ICCD)输出图像的信噪比大于一定的阈值;二是镜头的焦距,由于镜头是机械变化,因此,在整个扫描过程中镜头的参量应该保持不变,即焦距和对焦保持在某一位置,希望此时镜头的景深能涵盖整个扫描范围以尽量提高图像的清晰度。基于以上考虑,本文中通过计算由图像信噪比决定的极限探测距离  $R_{\max}'$  和景深理论中的远景平面  $R_{\max}''$ , 并令两者相等来确定镜头参量和系统扫描范围。

### 1.1 基于图像信噪比的极限探测距离

设激光单脉冲的能量为  $Q$ , 脉宽为  $\tau_s$ , 激光发散半角为  $\theta$ , 激光强度均匀分布, 则在距系统  $R$  处的平面上的照度为:

$$E_R = \frac{Q}{\tau_s \pi \theta^2 R^2} \exp(-aR) \quad (1)$$

式中,  $a$  为水体衰减系数。设目标为朗伯反射体, 反射率为  $\rho$ , 则接收器阴极面上的光照度为<sup>[7]</sup>:

$$E = \frac{1}{4} \pi \gamma \rho \frac{E_R \left(\frac{nD}{f'}\right)^2 \exp(-aR)}{\pi \left(\frac{nD}{f'}\right)^2} = \frac{\gamma \rho Q}{4 \tau_s \pi \theta^2 R^2} \left(\frac{nD}{f'}\right)^2 \exp(-2aR) \quad (2)$$

式中,  $\gamma$  为接收镜头透过率,  $D$  是入射光瞳直径,  $f'$  为镜头焦距,  $n$  是水体折射率。

设阴极的量子效率为  $\eta$ , 直径为  $l$ , ICCD 的增益为  $G$ , 则在选通宽度为  $\tau_r$  的选通时间内, CCD 上单像素积累的目标电荷数为:

$$S_{\text{target}} = GE\eta\tau_r \frac{\lambda}{hc} \frac{\pi l^2}{4MN} = \frac{\lambda \eta \gamma \rho \tau_r G Q}{16hc\tau_s \pi \theta^2 R^2} \left(\frac{nD}{f'}\right)^2 \exp(-2aR) \quad (3)$$

式中,  $h$  为普朗克常数,  $c$  为光速,  $\lambda$  为激光波长,  $M$  和  $N$  为图像大小。

而 CCD 上单像素的噪声为<sup>[8]</sup>:

$$N_{\text{ICCD}}^2 = N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{CCD}}^2$$

式中,  $N_{\text{shot}}^2$  是由于量子的波动性而产生的散弹噪声, 可以表述为:

$$N_{\text{shot}}^2 = G^2 F (E\eta + E_{\text{bg}}) \tau_r \frac{\lambda}{hc} \frac{\pi l^2}{4MN} \quad (5)$$

式中,  $F$  为 ICCD 的噪声因子,  $E_{\text{bg}}$  为等效背景照度。  $N_{\text{CCD}}^2$  包括 CCD 的暗电流噪声和读出噪声。

ICCD 最终输出图像的信噪比为:

$$\frac{S}{N} = \frac{S_{\text{target}}}{\sqrt{N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{CCD}}^2}} \quad (6)$$

当  $\frac{S}{N}$  等于一定的阈值时, 便可以计算出系统的最远极限成像距离  $R_{\max}'$ 。

### 1.2 景深的影响

按理想光学系统的特性, 物空间一个平面在像空间只有一个平面与之相共轭, 其它空间点在景像平面上只能为一个弥散斑。但由于人眼的分辨率限制, 当弥散斑小于一定限度时, 仍可认为是一个点, 即清晰像。能成清晰像的物空间的深度范围就是景深<sup>[9]</sup>。

设  $p_1, p$  和  $p_2$  分别是前景平面、对准平面和远景平面距入射光瞳的距离, 它们在像空间的共轭平面距出射光瞳的距离分别为  $p_1', p'$  和  $p_2'$ 。  $D$  是入瞳直径, 且出射瞳直径等于入瞳直径。  $\varepsilon$  是对准平面上允许的弥散斑的直径, 景象平面上对应的弥散斑直径为  $\varepsilon'$ 。 根据理想光学的原理, 前景平面和远景平面的距离分别为:

$$p_1 = \frac{Dp}{D + \varepsilon} = \frac{Dp}{D + \varepsilon'/\beta}$$

$$p_2 = \frac{Dp}{D - \varepsilon} = \frac{Dp}{D - \varepsilon'/\beta} \quad (7)$$

$\beta$  是垂轴放大率。根据高斯公式, 有:

$$p' = \frac{pf'}{p + nf'} \quad (8)$$

从而

$$\beta = \frac{np'}{p} = \frac{nf'}{p + nf'} \quad (9)$$

把上式代入(7)式得:

$$p_1 = \frac{Dnf'p}{Dnf' + \varepsilon'(p + nf')}$$

$$p_2 = \frac{Dnf'p}{Dnf' - \varepsilon'(p + nf')} \quad (10)$$

可以看出, 景深与焦距和光瞳密切相关。设定  $p_1 = R_{\min}$ , 此时的  $p_2$  就定义为  $R_{\max}''$ 。 假设光瞳  $D$  保持不变, 则  $R_{\max}''$  随  $f'$  的变化而变化。 同时  $R_{\max}'$  也是与  $f'$  有关的。 变化  $f'$ , 当  $R_{\max}' = R_{\max}''$  时所对应的  $f'$  便是需要的焦距, 此时定义  $R_{\max} = R_{\max}' = R_{\max}''$ , 则系统的扫描范围为  $[R_{\min}, R_{\max}]$ 。

## 2 基于脉冲展宽的延迟步进方法

载具运动时需要尽量减少一个扫描周期内的

“切片”数目即成像次数以避免运动对成像的影响,提高图像的实时性和连续感。但是,如果采用均匀“切片”即等步长增加延迟的方法,则很难既全面搜索又保证图像质量。因为如果选通门的宽度小于延迟增加的步长,则“切片”之间留有空隙,无法覆盖整个扫描区间;如果采用“紧密”的方式即选通宽度与延迟增加的步长相等,则当采用小步长时,“切片”数目较多,而当采用大步长时,特别当目标处于近处时,后向散射的积累将影响图像的质量,相当于没起到选通的作用。因此,好的搜索方法应该是延迟变步长的搜索,即在近处采用小步长,而在远处,由于衰减严重可以采用大步长,同时门宽保证各“切片”之间不留空隙。

实际上,激光脉冲在水下传播时,由于散射的作用,其能量不仅要衰减,时域也将展宽。因此,如果能够计算这种展宽情况便可以把它作为延迟变化的依据。参考文献[10]中通过初始激光脉冲波形  $p(t)$  与水体冲激响应函数  $h(t, R)$  的卷积计算激光脉冲经过一段水体后的展宽情况,取得了良好的效果。其中系统的冲激响应函数的表示形式为:

$$h(t, R) = Q_R \frac{t}{t_{\max}(R)} \exp\left[-\frac{t}{t_{\max}(R)}\right], (t \geq 0) \quad (11)$$

式中,  $Q_R$  是激光脉冲传播到  $R$  处的能量,  $t_{\max}(R)$  是峰值出现的时间。根据小角度近似:

$$t_{\max}(R) = \frac{Rn}{c} \times$$

$$\left\{ \frac{0.3}{w_0 a R_0 \phi_0^2} [(1 + 9/(4w_0 a R \phi_0^2))^{3/2} - 1] - 1 \right\} \quad (12)$$

$$\phi_0 = \left( \int_0^\pi \phi^2 \beta(\phi) d\phi \right)^{1/2} \quad (13)$$

式中,  $w_0$  表示单次散射反照率,  $\beta(\phi)$  是水体散射相函数,在这里采用 FOURNIE 的研究成果<sup>[11]</sup>:

$$\beta(\phi) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2 \delta^\nu} \times \left\{ \nu(1-\delta) - (1-\delta^\nu) + [\delta(1-\delta^\nu) - \nu(1-\delta)] \times \sin^{-2}\left(\frac{\phi}{2}\right) \right\} + \frac{1-\delta_\pi^\nu}{16\pi(1-\delta_\pi)^2 \delta_\pi^\nu} [(3\cos^2\phi - 1)] \quad (14)$$

式中,  $\nu = \frac{3-\mu}{2}$ ,  $\delta = \frac{4}{3(n-1)^2} \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$ ,  $\mu$  是散射粒子幂律分布的斜率,  $\delta_\pi$  是  $\phi = \pi$  的计算值。

这样,具有发射波形为  $p(t)$  的激光脉冲经过一段水体并返回到 ICCD 展宽后的波形为:

$$k(t, R) = p(t) * h(t, R) * h(t, R) \quad (15)$$

式中,  $*$  表示卷积。注意,由于水下激光脉冲展宽理论只验证了十几米距离的理论与实测结果,为了避免计

算长距离水体时直接应用(15)式产生较大的误差,应把该段水体看成是几个较短水体的线性级联。本文中以 10m 为准对水体分段,得到最终的时域展宽计算公式为:

$$k(t, R) = p(t) * \underbrace{h(t, 10) * \dots * h(t, 10) * h(t, \text{mod}(R, 10))}_{\text{floor}(R/10)} * \underbrace{h(t, 10) * \dots * h(t, 10) * h(t, \text{mod}(R, 10))}_{\text{floor}(R/10)} \quad (16)$$

掌握了水下激光脉冲的时域展宽情况后,便可以据此设置搜索策略,具体方法描述如下。设  $R_1 = R_{\min}$ , 由  $R_1$  计算激光脉冲到  $R_1$  达并返回 ICCD 时的时域展宽情况,并设置 ICCD 的开门宽度  $\tau_{r,1}$  等于展宽波形从开始到下降到峰值一定百分比时的宽度,此时相应的延迟  $\tau_{d,1} = 0$ ; 在下一个激光脉冲成像时,设置  $\tau_{d,2} = \tau_{d,1} + \tau_{r,1}$ , 然后计算相对应的成像距离  $R_2 = R_1 + n\tau_{d,2}/(2c)$ , 接着计算与  $R_2$  相对应的激光脉冲时域展宽,并设置  $\tau_{r,2}$  等于展宽波形从开始到下降到峰值一定百分比时的宽度……以此类推直到满足条件  $R_i > R_{\max}$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) 时为止。

### 3 仿真与实验

为了验证这种成像方式的效果,在水池中进行了成像实验。实验中采用脉冲激光器和 ICCD 组成距离选通成像系统,置于水下 1.5m, 目标为黑白条纹目标板,悬挂于距成像系统一定距离处,目标平面垂直于成像系统的光轴。

首先验证基于图像信噪比的极限成像距离,表 1 中给出了仿真计算时参量的设定。

Table 1 The setting of parameters in computation

name	value/unit	name	value/unit	name	value/unit
$a$	0.159/m	$w_0$	0.6	$\eta$	0.5
$\gamma$	0.8	$\rho$	1	$l$	18mm
$Q$	200mJ	$\tau_s$	7ns	$G$	$10^5$
$\theta$	15mrad	$D$	3cm	$M, N$	720 × 576
$n$	1.33	$\varepsilon'$	0.05mm	$\lambda$	532nm
$c$	0.3m/ns	$R_{\min}$	15m	$E_{bg}$	0.25 $\mu\text{Lx}$
$F$	1.6	$N_{\text{ICCD}}^2$	50e <sup>-</sup>	$\mu$	3.4

设 ICCD 选通的开门时刻与激光脉冲波前返回的时刻相同,且  $\tau_r = \tau_s = 7\text{ns}$ , 设图像信噪比的阈值为 1。当  $f' = 180\text{mm}$  时,算得的极限成像距离为 42m。图 1 是一幅水下距成像系统 40m 处的目标的图像,实际计算的图像信噪比为 2.8182, 图像的白色椭圆为计算信噪比时所选择的区域。可以看到,理论计算结果与实际测量基本相符。

接着计算距离选通成像系统的扫描范围。令接收

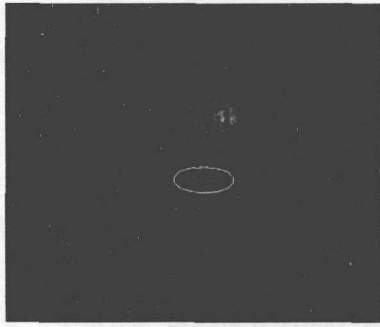


Fig. 1 Image of target at 40m

镜头的焦距从 50mm 连续变化到 60mm,图 2 中给出了

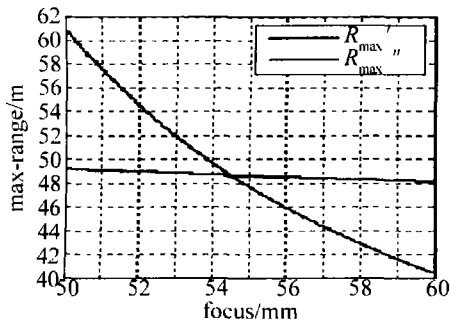


Fig. 2 Variance of  $R_{max}'$  and  $R_{max}''$  with  $f'$

由图像信噪比原则计算出的最大距离  $R_{max}'$  和由景深公式计算出的  $R_{max}''$  随镜头焦距变化的情况。可以看出,按图像信噪比原则计算时,系统的极限成像距离随焦距的变化比较舒缓,而景深对焦距的变化很敏感。当  $f' = 54.55\text{mm}$  时,  $R_{max}' = R_{max}'' = 48.6\text{m}$ ,  $p = 22.9\text{m}$ , 因此,应采用最小焦距小于 55mm 的可变镜头,此时对焦平面为 22.9m 处,镜头的  $F$  数为 1.8,整个成像系统的扫描区间为 [15m, 48.6m]。

最后,根据第 2 节中所述方法,设激光脉冲发射波形为矩形,并设脉宽的计算为展宽波形从开始到下降到峰值 10% 时的宽度,由上面所设定的水体参量和得到的扫描区间,可以得到成像位置如下:

$$R_i = 15, 17.5940, 20.7519, 24.6992, 28.9850, 34.1729, 40.0376, 47.0301, 56.1231 \quad (17)$$

由于倒数第 2 次成像时的成像位置已经非常接近最远距离  $R_{max}$ , 因此,把最后两次成像合并为一次。由此可以得到,系统完成一个周期的扫描需要成像 7 次,即 7 个脉冲显示一副图像,每次成像时系统的参量设定分别为:

$$\begin{cases} \tau_{d,i} = 0, 23, 35, 38, 45, 52, 62 \\ \tau_{r,i} = 23, 35, 38, 45, 52, 62, 76 \end{cases} \quad (18)$$

把目标靶板悬挂于距成像系统 25m 处的地方对其成像。如果采用步长等于 10ns 的等步长成像方式,共需 30 次成像才能扫描完整个扫描范围,第 10 次成像的成像位置为 25.1504m;而如果采用步长等于 50ns 的等步长成像方式,共需 6 次成像,第 2 次成像位置为 20.6391m,第 3 次成像位置为 26.2782m。采用作者所

提方法,25m 位于第 4 个成像区间的前端。按不同搜索方法所采集的图像如图 3 所示。其中图 3a、图 3b

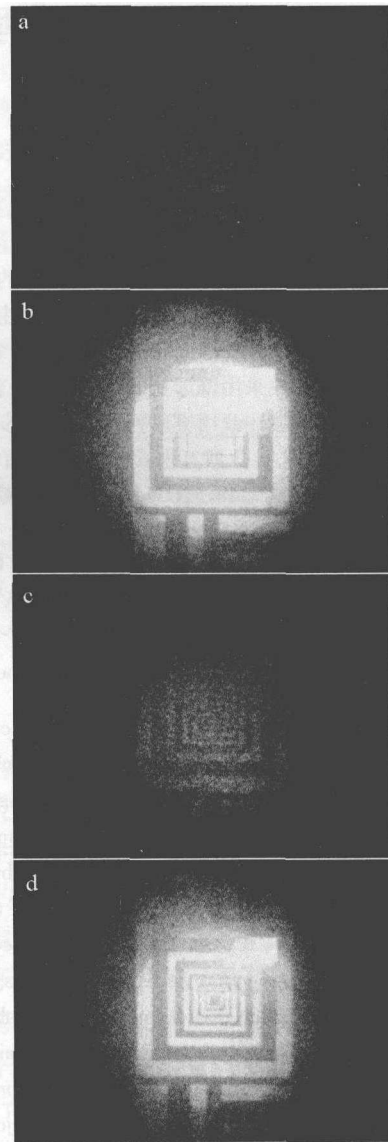


Fig. 3 Results of different scan manner

a—the third frame at variable manner b—the fourth frame at variable manner c—the second frame at 50ns manner d—the tenth frame at 10ns manner

分别是按照本文中的方法采集的一个扫描周期中的第 3 帧和第 4 帧,在第 3 帧图像中,只有脉冲尾部的一小部分反射能量被接收系统所接收,而对第 4 帧图像来说,则接收了反射脉冲绝大部分能量。图 3c、图 3d 是采用延迟等步长成像的方式所采集的图像。如果都采用大步长,则如图 3c 所示,在其扫描周期的第 2 帧就会出现后向散射加重的问题;而如果都采用小步长,则如图 3d 所示,其扫描周期的第 10 帧显然没有完全利用目标的回波能量。

### 4 结论

水下激光距离选通成像系统的参量较多,要想获得 (下转第 259 页)

行去耦合补偿,需要开发相应的适合合成孔径激光雷达的成像算法作为保证;另一方面,合成孔径激光成像雷达采用激光作为信号的载体,激光由于波长非常短,微小的抖动都会对成像产生严重的影响,所以,需要开发高精度的运动补偿算法来保证实际的合成孔径激光雷达成像。

(4)成熟的合成孔径激光雷达系统设计。合成孔径激光雷达以激光作为信号载体,其发射、接收等各系统模块较微波都有很大的变化,如何将这些分系统有机地结合在一起,是合成孔径激光雷达走向工程必须克服的关键技术。

## 5 小 结

合成孔径激光雷达作为未来主动对地观测的一个重要组成部分,可以大大提高现代化作战的效能,既可装备战斗机和轰炸机,也可以装备监视飞机和无人机;还可用于灾害和环境监测、海洋观测、资源勘察、农作物调查估产、森林调查等民用方面;在军事、科学研究、工业生产中都有广泛的应用前景<sup>[10]</sup>,但是受限于激光技术,合成孔径激光雷达还有很长的路要走。

### 参 考 文 献

[1] MARCUS S, COLELLA B D. Solid-state laser synthetic aperture radar

[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(6): 960-964.

[2] GREEN T J, MARCUS S, COLELLA B D. Synthetic aperture radar imaging with a solid-state laser[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(30): 6941-6949.

[3] BASHKANSKY M, KUCKE R L, FUNK E. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(22): 1983-1985.

[4] BECK S M, BUCK J R, BUELL W F, *et al.* Synthetic-aperture imaging laser radar: laboratory demonstration and signal processing[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(35): 7621-7629.

[5] ALLEACE G. Northrop Grumman successfully demonstrates synthetic aperture laser radar for tactical imagery [EB/OL]. (2006-9-10) [2010-07-02]. [http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news\\_releases.html?d=103583](http://www.irconnect.com/noc/press/pages/news_releases.html?d=103583).

[6] BUCK J R, KRAUSE B W, MALM A, *et al.* Synthetic aperture imaging at optical wavelengths[C]//The Conference on Lasers and Electro-Optics/The International Quantum Electronics Conference. Baltimore; Optical Society of America, 2009: 1-2.

[7] YOSHKADO S, ARUGA T. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5631-5639.

[8] XING M D, GUO L, TANG Y, *et al.* Design on the experiment optical system of synthetic aperture imaging lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 290-294 (in Chinese).

[9] ZHOU Y, XU N, LUAN Z, *et al.* 2-D imaging experiment of a 2-D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2030-2032 (in Chinese).

[10] WANG S W, HOU T J, ZHOU D F, *et al.* Synthetic aperture lidar [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(1): 4-7 (in Chinese).

(上接第229页)

最好的图像质量,必须对这些参量进行仔细调整,这需要一个稳定的工作环境。当载具运动而无法满足这一条件时,只能考虑实时性和图像质量的平衡,追求一个次优的结果。考虑能量探测极限和景深的协调从而把镜头参量固定下来,再依据水下激光脉冲展宽原理实现变步长的序列成像,完成对前方空间的成像搜索,该方法为距离选通技术的实用化发展提供了一种尝试。

### 参 考 文 献

[1] FU B, YANG K Ch, RAO J H, *et al.* Analysis of MCP gain selection for underwater range-gated imaging applications based on ICCD [J]. *Journal of Modern Optics*, 2010, 57(5): 408-417.

[2] STRAND M P. Imaging model for underwater range-gated imaging systems [J]. *Proceedings of SPIE*, 1991, 1537: 151-160.

[3] XU X W, GUO J, YU Q Y, *et al.* Key technique of laser range gated imaging [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 603-605 (in Chinese).

[4] FOURIER G R, BONNIER D, FORAND J L. Underwater laser imaging system with large field-of-view [J]. *Proceedings of SPIE*, 1994, 2258: 413-421.

[5] SWARTA B A. Laser range gate underwater imaging advances [J]. *Proceedings of IEEE Oceans '94*, 1994, 2: 722-727.

[6] SUN J, ZHANG X H, GE W L, *et al.* Relation between imaging quality and gate-control signal of underwater range-gated imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2185-2190 (in Chinese).

[7] FOURNIER G R, BONNIER D, FORAND J L, *et al.* Range-gated underwater laser imaging system [J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(9): 2185-2190.

[8] DUSSAULT D, HOESS P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5563: 195-204.

[9] YU D Y, TAN H Y. *Engineering optics* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999: 58-63 (in Chinese).

[10] ZHOU Y M, LIU Q Zh, ZHANG X H, *et al.* An efficient method for simulating time-domain broadening of laser pulse propagating underwater [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(1): 143-147 (in Chinese).

[11] MOBLEY C D, SUNDMAN L K, BOSS E. Phase function effects on oceanic light field [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(6): 1035-1050.