

距离选通激光水下成像系统的门控信号对 图像质量的影响

孙 健 张晓晖 葛卫龙 周亚民

(海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

摘要 研究了水体的前后向散射光和目标反射光的传输特性, 运用脉冲激光器和增益型 CCD(ICCD)搭建了距离选通激光水下成像实验系统, 建立了计算距离选通激光水下成像系统光信号的数学模型, 分析了图像对比度传递系数与门控信号的关系。编制计算机程序, 根据所搭建实验系统参数计算并绘制了距离选通激光水下成像系统门控信号与图像对比度传递系数的关系曲线, 提出了距离选通激光水下成像系统最佳门控策略。数值计算和实验结果表明: 在 ICCD 未饱和的情况下, 精确开门得到的图像质量最高, 不论是滞后开门或是提前开门都会使图像分辨率有所下降, 但滞后开门比提前开门较为有利, 并且选通门开启的持续时间则应取激光脉宽的 1~3 倍。

关键词 距离选通; 水下激光成像; 数学模型; 实验研究; 图像对比度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2185

Relation Between Imaging Quality and Gate-Control Signal of Underwater Range-Gated Imaging System

Sun Jian Zhang Xiaohui Ge Weilong Zhou Yamin

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

Abstract The transmission character of forward-scattering, backscattering and signal irradiance is studied. An underwater range-gated imaging system is built up with pulse-laser and ICCD. A mathematic method of underwater laser range-gated imaging system is given. The relation between imaging contrast and gate-controlled signal is analyzed. The theoretical calculations are programmed, and figures of image contrast and gate-controlled signal are plotted based on typical system programmed. A best strategy of gate-controlling is raised. Relatively, the experiment has been done. The results show that accurate open-time can acquire the best images, and the image is better when open the gate little-later than ahead with the ICCD not saturated. The duration of gating should one to three times of the pulse width.

Key words range-gated; underwater laser imaging; mathematic model; experiment study; image contrast

1 引 言

水下激光成像技术在水下目标探测上的应用正日益受到重视^[1], 但由于水介质对光具有散射效应强和吸收损耗大的特性, 近距离水体的后向散射光噪声往往比远距离目标的反射光信号大几个数量级, 所以水下激光成像系统难以在较远距离获得具有较高质量的目标图像, 为了在水下获得较远距离处的目标图像, 近几年研究出了不少用于分离目标反射光信号和水体后向散射光噪声的水下激光成像

技术^[2], 其中应用比较广泛的是距离选通技术^[3]。

距离选通水下激光成像系统以脉冲激光器和选通型像增强摄像机(ICCD)作为光源和探测器, 利用目标反射光与水体后向散射光到达探测器的时间差、通过门控信号控制 ICCD 选通门开启和持续时间而将目标的反射光信号与水体的后向散射光噪声区分开来, 因此, 距离选通水下激光成像系统的门控信号是决定其所获目标图像质量的关键因素^[4~6]。综合分析了水体的前后向散射光和目标反射光的传

收稿日期: 2008-08-18; **收到修改稿日期**: 2008-11-06

作者简介: 孙 健(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事探测与制导技术等方面的研究。E-mail: sunjianpeiabcd@163.com

导师简介: 张晓晖(1965—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事军用水下光电技术等方面的研究。

E-mail: zhangxiaohui@vip.sina.com

输特性,推导出 ICCD 探测单元所接收到的目标光信号和背景光噪声能量的计算公式,分析了图像对比度传递系数与门控信号之间的关系,提出了距离选通激光水下成像系统最佳门控策略。

2 理论分析

如图 1 所示为距离选通激光水下成像系统计算模型示意图,脉冲激光器和 ICCD 平行放置构成成像系统(其所在平面为 $X'O'Y'$),目标置于与激光光束垂直的平面(即 XOY 平面)上,且目标中心对准激光光源(设激光光源为点光源), $X'O'Y'$ 和 XOY 平面的距离为 L ,以激光光源为坐标原点,ICCD 坐标为 $(d,0,0)$ 。

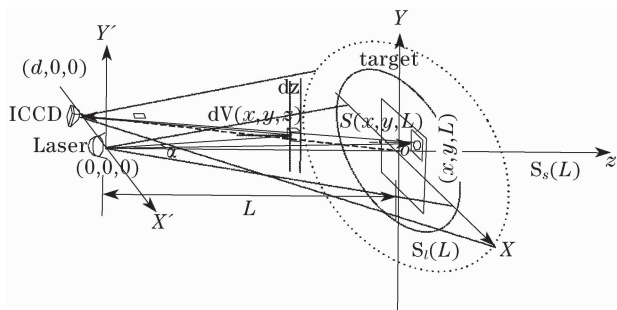


图 1 距离选通激光水下成像系统模型计算示意图

Fig. 1 Computing model of underwater range-gated system

脉冲激光光源的脉宽为 t_p ,脉冲能量为 Q_0 ,激光发射角为 α ,设激光脉冲发射的时刻 $t=0$,激光脉冲直射到 XOY 平面(即目标)的时刻为 t_1 ,被目标反射后直射到 $X'O'Y'$ 平面的时刻为 t_0 ;ICCD 的视场角为 θ ,像元数为 $M \times N$,选通门的开启时刻和持续时间(即门宽)分别为 t_2 与 t_s 。根据距离选通激光水下成像系统的工作原理,如果 $t_2 = t_0$, $t_s = t_p$,则可以让 ICCD 只接收目标的直射反射光信号而挡住了水中悬浮微粒所引起的后向散射光噪声,大大提高图像的质量^[14]。

不过,由于水体的散射作用,在激光脉冲往返传输于 $X'O'Y'$ 和 XOY 平面之间的过程中(包括激光脉冲射向目标和目标所反射的激光脉冲射入 ICCD 两个过程),始终都有水体的前、后向散射光相伴随,所以,在 ICCD 选通门开启的过程中,可能到达 ICCD 光敏面的光能量包括:目标反射的直射光及其前向散射光信号、未到达目标而直接被水体散射的后向散射光、被目标反射又被水体散射的前向散射光等,其中后两者混淆了目标的空间信息,可看作是背景光噪声,它们的存在导致了水下激光图像质量的下降。显然,图像质量下降的程度与 ICCD 的

门控信号密切相关,为了揭示图像对比度传递系数与门控信号之间的关系,将从计算 ICCD 探测单元所接收到的目标光信号和背景光噪声能量出发,推导图像对比度传递系数的数值计算公式。为了简化计算模型,这里仅考虑水体对光的单次散射,且不考虑水体对激光脉冲的展宽。

2.1 信号光能量的计算

前已述及,与目标信息有关的光信号有两种:一是直射到目标上光脉冲,二是未被目标反射的直射光的前向散射光,它们被目标反射后再直射到 ICCD 上构成了包含目标面元信息的光信号。

2.1.1 直射光的计算

如图 1 所示,设激光能量均匀照射在目标上,目标面积小于激光在 XOY 平面上的光斑,目标任意一点的坐标为 $A(x,y,L)$,漫反射系数为 $\rho(x,y,L)$,目标上与 ICCD 像元 $(x',y',0)$ 相应的面元表示为 $S(x,y,L)$ 。水体的衰减系数为 k ,散射系数为 $\beta(\xi)$, ξ 为散射角。根据比尔定律可得到目标平面上任意一点 $A(x,y,L)$ 所接收的激光光强为

$$I_1(x,y,L) = I_0 \cdot \exp(-kL/\cos \varphi) = \frac{P_0}{4\pi \sin^2(\alpha)} \cdot \exp(-kL/\cos \varphi), \quad (1)$$

其中 I_0 和 P_0 分别为脉冲激光初始光强和光功率, φ 为激光对点 $A(x,y,L)$ 的入射角。 $A(x,y,L)$ 点处面元 $S(x,y,L)$ 对激光光源所张立体角为

$$\omega_1 = \frac{S(x,y,L) \cdot \cos \varphi}{L^2}, \quad (2)$$

$$S(x,y,L) = \frac{S_s(L)}{M \times N}, \quad (3)$$

$S_s(L)$ 为 ICCD 视场在 XOY 平面的截面积大小,则点 $A(x,y,L)$ 处接收到的直射光功率为

$$P_1(x,y,L) = I_1(x,y,L) \cdot \omega_1, \quad (4)$$

2.1.2 直射光前向散射光 E_n 的计算

前向散射光 E_n 为激光脉冲持续照明目标的时间内被水体散射到目标方向的光,它增加了目标平面上的照射光能量,对水下成像起积极作用。

由于激光光源是脉冲光,每个时刻被照明的水体都形成了一个长度为 ct_p/n 的光柱,为了分析激光直射到目标表面时该光柱的前向散射对目标的照明作用,把脉宽为 t_p 的光脉冲划分为 N 段,将被照明水体划分为与 XOY 平面相平行的 N 层,每层厚度为 dz (如图 2 所示),第一层(表示为 z_1)紧贴目标平面,设其面积为 $S_2(x,y,L)$,则该光层的光照度为^[7]

$$E(x, y, z) = I_0 \cdot \exp(-kz/\cos \varphi) \cdot \frac{S_z(x, y, L) \cdot \cos \varphi}{S'_z(L) \cdot z^2} \tag{5}$$

自激光发射至 ICCD 接收到 z 远处平面反射(散射)光的时间表示为

$$z = tc' / \left[1/\cos \varphi + 1/\cos \left(\arctan \frac{d}{L} \right) \right], \tag{6}$$

则 z_1 水层产生的前向散射光强为

$$dI(L)_{\Omega} = \beta(0) \cdot E(L) \cdot dV = \beta(0) \cdot E(L) \cdot S \cdot dz = \beta(0) \cdot I_0 \cdot \exp(-kL/\cos \varphi) \cdot \frac{S'_z(L) \cdot \cos^3 \varphi}{L^2} \cdot \frac{c'}{1/\cos \varphi + 1/\cos[\arctan(d/L)]} dt, \tag{7}$$

其中 $S'_z(L)$ 为整个被照明水层的面积, 近似等于 XOY 平面上激光光斑面积 $S_1(L)$ 。

θ 为反射角。 Ω_p 为 ICCD 接收光学系统对点 $A(x, y, L)$ 所张的立体角。

ICCD 成像的本质是光子(能量)的累积。所以在 ICCD 开门时间内, 光敏面接收到的信号光能量可表示为

$$Q_s(x', y', 0) = \int_{t_3}^t P_d(x', y', 0) dt, \tag{13}$$

其中

$$t_3 = \begin{cases} t_2 & t_2 \geq t_0 \\ t_0 + t_p & t_2 < t_0 \end{cases}, t = \begin{cases} t_2 + t_s & t_2 + t_s \leq t_0 + t_p \\ t_0 + t_p & t_2 + t_s > t_0 + t_p \end{cases} \tag{14}$$

图 2 单脉冲分层示意图

Fig. 2 Lamination of a laser pulse

由于光脉冲随时间逐渐照射到目标并被反射, 直至最后一个光层 z_N 被目标反射, 所有光层均会经历第 z_1 层的情况, 所以整个光脉冲照射目标的过程中产生的前向散射光可以近似看作光强为 $dI(L)_{\Omega}$, 发光立体角为 $4\pi \sin^2 \alpha$ 的光源(水层)持续照射 t_p 时间, 则水体对整个脉冲产生的前向散射光(照射到目标平面)的能量为

$$Q_{\Omega}(x, y, L) = \int_{t_1}^{t_1+t_p} 4\pi \sin^2 \alpha \cdot dI(L)_{\Omega}, \tag{8}$$

其中 t_1 为光脉冲到达目标平面时, 由前向散射光 E_{Ω} 照射在目标平面点 $A(x, y, L)$ 上的光能量为

$$Q'_{\Omega}(x, y, L) = \frac{Q_{\Omega}(x, y, L)}{S_i(L)/S(x, y, L)}, \tag{9}$$

则前向散射光 E_{Ω} 照射在目标平面点 $A(x, y, L)$ 上的光功率为

$$P_{\Omega}(x, y, L) = Q'_{\Omega}(x, y, L)/t_p. \tag{10}$$

2.1.2 ICCD 接收到的目标反射直射光功率的计算

由上节得激光照射在点 $A(x, y, L)$ 上的总功率为 $P_g(x, y, L) = P_1(x, y, L) + P_{\Omega}(x, y, L)$ 。 (11)

假设水下目标为朗伯体, 则由目标反射并可能被 ICCD 接收到的(信号)光功率为

$$P'_d(x', y', 0) = \frac{\rho(x, y, L) \cdot P_g(x, y, L) \cdot \cos \theta}{\pi} \times \exp(-kL/\cos \theta) \cdot \Omega_p, \tag{12}$$

2.2 背景光噪声的计算

未到达目标而直接被水体散射的后向散射光、被目标反射又被水体散射的前向散射光都有可能进入 ICCD 选通门开启的时间内进入 ICCD 而成为背景光噪声。

2.2.1 水体后向散射光的计算

依然使用将被照明水体分层的思路把光脉冲分段, 使后向散射光功率与被激光照明水体体积的关系转化为与激光照明时间的问题。后向散射光功率为

$$dP''(x', y', 0) = \frac{B \cdot \exp \left[-k \frac{(1 + 1/\cos \varphi) c' t}{(1 + 1/\cos \eta)} \right]}{c' t^2} dt, \tag{15}$$

$$B = [\pi^2 \cdot D^2 \cdot \tan^2 \alpha \cdot \beta(\pi) \cdot I_0 \cdot \cos^3 \varphi \cdot (1 + 1/\cos \eta)]/4, \tag{16}$$

其中 η 为散射点 (x, y, z) 对 ICCD 的入射角。

需要强调的是在不考虑多次散射的情况下, 后向散射光和信号光是同时消逝的, 即后向散射光噪声能量在信号光消逝的时候也不存在了。所以计算后向散射光能量时, 其积分时间的上限是受限制的, 所以, ICCD 光敏面接收到的后向散射光噪声能量表示为

$$Q_b(x', y', 0) = \int_{t_2}^t dP''(x', y', 0). \tag{17}$$

2.2.2 目标反射光的前向散射光噪声的计算

目标反射光的前向散射光 E_{f2} 因打乱了信息光束原始光能量分布而成为背景光噪声, E_{f2} 也是与信号光束同时存在和消逝的, 与 E_{f1} 的分析类似, 此时前端水层 z'_1 贴近的是像平面, 则整个水层 z'_1 产生的前向散射光强度为

$$dI(0)_{f2} = \beta(0) \cdot E_s(0) \cdot dV = \beta(0) \cdot P'_d \cdot \frac{c'}{(1 + 1/\cos \theta)} dt. \quad (18)$$

目标反射光所照亮区域的单位体积元产生的前向散射光功率为

$$dP_{f2}(x', y', 0) = dI(0)_{f2} \cdot \Omega_f, \quad (19)$$

其中 Ω_f 为 ICCD 对水层 z'_1 上单位元所张的立体角。

对于像面来说, 其噪声应该是整个物面反射光的前向散射光功率, 即为

$$dP'_{f2}(x', y', 0) = dP_{f2}(x', y', 0) \cdot \frac{S_f(L)}{S(x, y, L)}, \quad (20)$$

由于目标反射光的前向散射光与信号光是同时存在和消逝的, 所以 ICCD 光敏面接收到的反射直射光前向散射光噪声能量表示为

$$Q_f(x', y', 0) = \int_{t_3}^t dP'_{f2}(x', y', 0). \quad (21)$$

2.3 图像对比度传递系数的计算

距离选通激光水下成像系统中 ICCD 光敏面上每个像元上所获得的总的光能量为

$$Q_t(x', y', 0) = Q_s(x', y', 0) + Q_f(x', y', 0) + Q_b(x', y', 0). \quad (22)$$

根据 Purkinje 效应可知, 对视觉来说, 在观察物体时起决定作用的是物体和背景的亮度差异, 所以目标识别与探测到理论一般都是基于目标与背景的亮度对比展开的。水下图像的质量与目标物的形态、物面反射特性、水体传输特性和 ICCD 的探测灵敏度等因素密切相关, 为了突出主要矛盾, 在这里将距离选通激光水下成像系统所得到的每帧图像看成是在探测系统和环境及目标参数不变的情况下获取的, 则水下图像对比度传递系数 C_t 为^[8]

$$C_t(x', y', 0) = \left| \frac{Q_s(x', y', 0)}{Q_s(x', y', 0) + (Q_f(x', y', 0) + Q_b(x', y', 0))} \right|. \quad (23)$$

一般认为 C_t 越大, 水介质对原始图像的影响越小, 则成像的质量越好。需要注意的是在计算 C_t 时, 要先排除 ICCD 器件的动态响应范围之外的点

以及零(信号)能量点, 否则计算结果将会出现数据溢出和错误。

3 数值计算结果及分析

根据第 2 节中所推导的相关公式, 编制了计算距离选通激光水下成像系统图像对比度传递系数的程序。图 3 是以某成像系统参数计算并绘制的图像对比度传递系数 C_t 与 ICCD 门控信号之间的关系曲线, 表 1 所示为计算所用参数值。

表 1 计算参数值

Table 1 Values of computing parameter

Q_0 /m	2α /(°)	2γ /(°)	k /m ⁻¹	ρ	$M \times N$	L /m	t_p /ns	d /m
230	10	10	0.3	0.5	782 × 528	40	7	0.01

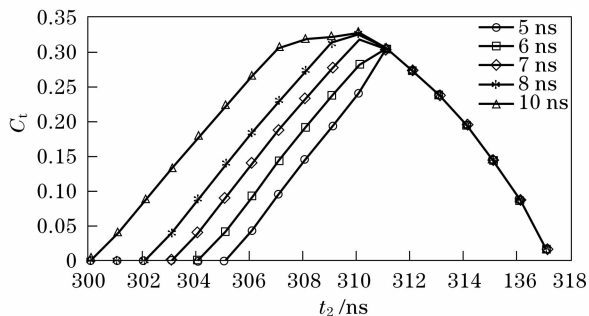


图 3 ICCD 门控信号与图像对比度传递系数关系曲线

Fig. 3 Transfer coefficient of imaging contrast versus gate-controlled signal of ICCD

由(7)式计算得: 当目标在 40 m 处时, 其反射光刚好到达 ICCD 的时刻 $t_0 = 266.7$ ns。图 3 反映了两种明显的趋势。

(1) 当 ICCD 门宽大小不变时, 若 ICCD 在信号光未到达或者已经通过接收系统的时候开门, 对比度传递系数显然为零(信号光能量未被接收到)。如果 ICCD 恰好在 266.7 ns 的时刻开门(信号光能量恰好全部被 ICCD 接收), 对比度传递系数数值最大, 即此时的图像质量最好, 这是因为在精确开门时, 接收器接收到了最多的信息光子, 它们主要是目标反射光中的直射光部分(弹道光)。同时, 不论是滞后开门还是提前开门都会使图像分辨率均有所下降, 但其对比度传递系数数值下降趋势是不同的, 稍微延后于 t_0 时刻开门所获得的图像质量要比提前开门要好。当滞后开门时, 目标反射直射光比重减小, 整个背景噪声能量下降, 因此虽然稍微滞后开门会使信号光能量减少, 导致成像质量下降, 但不会有太大的影响。

(2) 在不考虑水体的多次散射情况下, 当 ICCD 设置不同的门宽大小时, 若 ICCD 提前开门, ICCD

门宽的值大于激光脉宽的值时,图像将获得更好的质量;若 ICCD 精确开门或者滞后开门,门宽的大小对图像对比度传递系数基本没有影响。所以,总的来说,ICCD 设置的门宽的值大于激光脉冲宽度值将获得更好的图像。

4 实验验证

为了进一步揭示距离选通水下激光成像系统图像对比度传递系数与 ICCD 门控信号之间的关系,进行了水下激光成像实验,实验系统的参数为与第 3 节中数值计算参数基本一致。图 4 和图 5 所示为实验结果。

如图 4 所示,为 35 m 处在 10 ns 选通门宽下对不同开门时刻获得的目标图像,其中提前、滞后开门

是为了模拟控制系统产生时序误差的情形。可以看出,当成像系统精确开门时,获得图像[图 4(b)]的分辨率最高;滞后 40% 门宽开门使得图像[图 4(c)]分辨率有所降低,但差别不是太大;而提前 40% 门宽开门则图像[图 4(a)]分辨率急剧降低。即精确开门得到的图像质量最高,不论是滞后开门或是提前开门都会使图像分辨率有所下降,但滞后开门比提前开门较为有利,得到的图像质量相对较好,与计算机计算结果一致。因此,在距离选通激光水下成像系统的使用中,由于系统本身存在的延时和水体对脉冲光的展宽,时序控制不可能做到精确,所以可以把开门时间稍微滞后于理论估算值,以获得较好的成像质量。

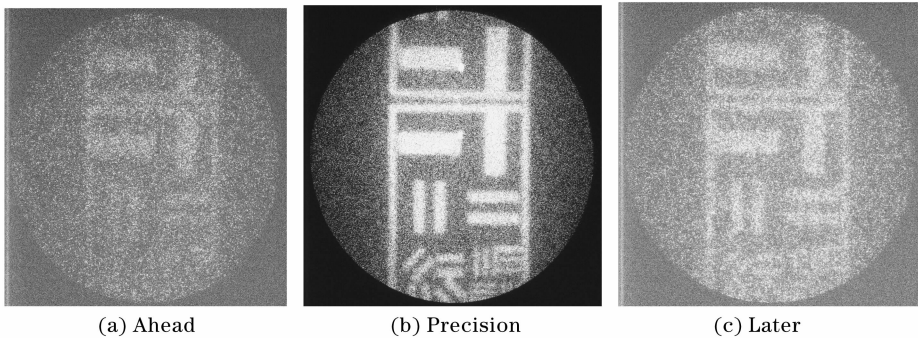


图 4 不同开门时刻的成像结果图

Fig. 4 Results of different open-gate time

如图 5 所示,为 30 m 处条纹目标在相同开门时刻但不同选通门宽下的图像。可以看出,其中图 5(c) 的图像质量最好,图 5(b),图 5(d)次之,图 5(a)最低。

通过成像实验发现,与激光发射脉宽最为匹配

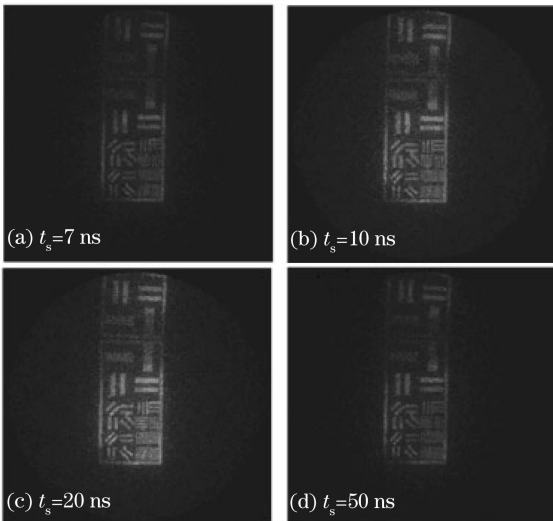


图 5 不同门宽取值的成像结果图

Fig. 5 Results of different gate width

的 7 ns 选通门宽[图 5(a)]并不能达到最佳成像效果,增加门宽,如增加至 20 ns 左右,图 5(b)成像质量将有所改善。实际是多次散射的存在导致了脉冲的展宽,当门宽的值继续增大,超过激光水中传输后的脉宽时[图 5(d)],由于接收到了较多的后向散射光和未携带目标信息的前向散射光部分,引入较多噪声,因此图像质量反而下降了。

经过大量实验表明,在衰减系数约为 0.2 m^{-1} 的水体中,进行 30~40 m 处的目标成像时,可选取门宽为激光发射脉宽的 1~3 倍,对成像质量影响不大。

5 结 论

基于体积散射函数建立了距离选通激光水下成像系统的数学模型,研究了 ICCD 时间门控精度和时间区间与成像质量的关系,并用 35 m 处水下成像实验对本文的理论推导进行了验证。

上述理论计算和实验结果表明:

- 1) 只有在门控信号合适的情况下,距离选通激

光水下成像系统才可以减少水体散射光噪声的影响而获得具有较高质量的图像。

2) 为了获得较好的图像质量,ICCD 选通门的开启时刻应正好为目标反射直射光脉冲前延到达 ICCD 光敏面的时刻,而选通门开启的持续时间则应大于激光脉冲宽度。

3) 不论 ICCD 选通门开启时刻滞后或是提前都会使图像质量下降,但滞后开门比提前开门所得到的图像质量较好,在不能精确控制 ICCD 选通门开启时刻的情况下,延后开门比提前开门好,开启持续时间大于激光脉冲宽度比等于或小于激光脉冲宽度好。

参 考 文 献

- 1 Zhu Yun. Developing Tendency of Abroad underwater imaging system [J]. *Ship Electronic Engineering*, 1999, **3**: 60~64
朱 耘. 国外水下成像系统的发展[J]. *舰船电子工程*, 1999, **3**: 60~64
- 2 Jules. S. Jaffe, John McLean, Michael P. Strand *et al.*. Underwater optical imaging: status and prospects [J]. *Oceanography*, 2001, **14**(3): 64~76
- 3 G. R. Fournier. Range-gated underwater laser imaging system [J]. *Opt. Eng.*, 1993, **32**(9): 2185~2190
- 4 Michael P. Strand. Imaging model for under-water range-gated imaging systems [C]. *SPIE*, 1991, **1537**: 151~160
- 5 Richard Vollmerhausen, Eddie Jacobs, Nicole Devitt *et al.*. Modeling the target acquisition performance of laser-range-gated imagers [C]. *SPIE*, 2003, **5076**: 101~111
- 6 Ove Steinvall, Tomas Chevalier, Pierre Andersson, et al. Performance modeling and simulation of range-gated imaging systems [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 654218(1~16)
- 7 Li Li, Gao Zhiyun, Wang Xia *et al.*. Optical backscatter calculations for an underwater range-gated imaging system [J]. *Transactions of Beijing Institute of technology*, 2003, **23**(4): 487~491
李 丽, 高稚允, 王 霞等. 水下距离选通成像系统后向散射光的计算[J]. *北京理工大学学报*, 2003, **23**(4): 487~491
- 8 Sun Chuandong, Chen Liangyi, Gao Liming *et al.*. Water optical properties and their effect on underwater imaging [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **21**(4): 39~46
孙传东, 陈良益, 高立民等. 水下光学特性及其水下成像的影响 [J]. *应用光学*, 2000, **21**(4): 39~46