

# 水下激光距离选通成像系统的模型与 极限探测性能研究

韩宏伟 张晓晖 葛卫龙

(海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要** 为了改善现有水下激光距离选通成像建模方法在收发时序和器件特性方面的不足,提出了一种改进的系统模型。该模型以一维(1D)方波信号为研究对象,通过计算该信号的输出信噪比来评价成像系统的性能。模型考虑了水下激光脉冲的时域展宽和增强型电荷耦合装置(ICCD)的增益噪声特性以对现有模型的不足进行改进。通过模拟计算与实际水下激光距离选通成像系统所采集的图像相对比的方法验证了模型正确性,又通过对系统在不同水质下极限探测距离的仿真计算表明距离选通技术对人形暗目标的探测、识别和认清距离达到了 9, 7.5 和 7 个衰减长度,从而证明了距离选通技术能够有效探测劣质水况下的中小目标。

**关键词** 成像;距离选通模型;信噪比;一维方波信号;时域展宽

**中图分类号** TN249;TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0109001

## Study of the Mode and Maximum Detecting Performance of Underwater Laser Range-Gated Imaging System

Han Hongwei Zhang Xiaohui Ge Weilong

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

**Abstract** An advanced model of underwater laser range-gated imaging system is proposed in order to improve the shortcoming of present modeling methods in shoot-receive scheduling and instruments characteristic. One-dimensional (1D) rectangular signal is selected as the target, whose output signal to noise ratio (SNR) is used to evaluate the system performance. The time-domain broadening of pulse underwater and noise characteristic of intensified charge coupled device (ICCD) is integrated into the proposed model to improve the shortcoming of present models. The validity of the proposed model is validated through comparison of the simulation and the acquired images by the underwater laser range-gated imaging system. Finally the range-gated technology detects the target with middle and small size effectively with the system in different water qualities and maximum detecting distances, which shows that discovering, identifying and recognizing distances of the ranged-gated technology are at 9, 7.5 and 7 attenuation lengths respectively.

**Key words** imaging; range-gated model; signal to noise ratio; one-dimensional rectangular signal; time-domain broadening

**OCIS codes** 010.4450; 040.5160; 040.5250; 110.2970; 110.0113

## 1 引 言

目前,激光雷达的应用范围非常广泛<sup>[1]</sup>。在水下光电成像领域,距离选通型水下激光成像雷达能够有效抑制后向散射,提高图像对比度。它通过脉

冲激光器发射激光脉冲,以时间的先后分开不同距离上的后向散射光和目标反射光,使得目标反射光在增强型电荷耦合装置(ICCD)选通工作的时间内到达并成像,从而消除绝大部分后向散射光对图像

收稿日期:2010-05-06;收到修改稿日期:2010-08-22

基金项目:海装十一五预研基金资助课题。

作者简介:韩宏伟(1983—),男,博士研究生,主要从事水下激光成像与图像处理方面的研究。

E-mail: fire\_power\_ice@yahoo.com.cn

导师简介:张晓晖(1965—),女,博士生导师,主要从事激光探测技术方面的研究。E-mail: zhangxiaohui505@vip.sina.com

质量的影响。由于距离选通技术良好的应用前景,如何对它进行性能仿真以研究它的极限探测性能并选取最优的参数进行系统设计成为研究的热点。目前对水下激光距离选通成像系统的性能估算方法主要包括三类:1) 激光雷达方程。由于激光和微波同属电磁波,从微波雷达作用距离方程可导出激光雷达方程<sup>[2]</sup>。但它只是对成像距离的简单估算,不是成像模型,无法对图像质量做出预测;2) 光线追踪模型。该类模型以成像系统的几何结构为基础,通过推导单像素区域或单位面积的辐射通量进而进行整图的仿真或系统性能计算。这类模型中最著名的就是 Jaffe 的 UNLES 模型<sup>[3]</sup>。此外孙健等<sup>[4]</sup>以信号能量和散射光能量的比作为目标函数,研究了开门时刻和开门时间变化对系统性能的影响。黄有为等<sup>[5]</sup>也以图像表观衬度为对象研究系统性能,在他们的模型中考虑了后向散射散焦的影响。孔捷等<sup>[6]</sup>则推导了一套统一的水下光电成像探测系统的模型,受限于对光在水中传播特性及其解析形式的研究,这类模型对系统收发时序的设定都是理想化的,即没有考虑激光脉冲在水中的时域展宽;3) 蒙特-卡罗模型,也就是通过随机抽样的方法对系统进行建模,代表人物是 Strand<sup>[7]</sup>和 Tan 等<sup>[8]</sup>。蒙特-卡罗模型符合事物的随机本质,可以对系统的时序特性进行研究,但计算量太大。上述三类模型还有一个共同的缺点,就是没有考虑成像器件(这里专指 ICCD)对系统性能的影响,即使考虑了也简单地以增益常数和等效背景照度表示。实际上,ICCD 对图像质量的影响来自两个方面,分辨率和噪声,而 ICCD 的噪声水平又与亮度增益有关<sup>[9]</sup>,因此在水下激光距离选通成像系统建模中,必须更加细致地考虑 ICCD 的影响。本文把约翰逊准则引入水下光电成像探测,把目标特征转换为一维方波信号,计算该信号经过水体和 ICCD 后的变化情况,并以信噪比(SNR,  $R_{SN}$ )作为最终的评价标准,计算系统在不同水质下的极限探测能力。模型考虑了激光脉冲在水中的时域展宽以及 ICCD 的噪声特性。

## 2 选通时间内的光辐射通量

### 2.1 约翰逊准则与一维方波信号

约翰逊准则是指用等效目标条带图案可分辨率来评价成像系统对目标的识别能力<sup>[10]</sup>。目标的等效条带图案是一组黑白间隔相等的条带状图案。等效条带图案的可分辨率为目标临界尺寸中包含的可分辨条带数。一般认为,在 50% 的概率下,探测、识

别、认清目标所需的条带数分别为 1, 4, 8。同一尺度上不同数目的条带就代表了不同空间频率的一维方波信号,通过研究该信号就可以研究成像系统的性能。

建立如图 1 所示的水下激光距离选通成像系统的几何结构。设目标为一维方波漫反射目标,空间频率为  $u$ , 长度为  $l_w$ 。目标距成像系统的距离为  $R_0$ , 且亮条纹的反射率为  $\rho_1$ , 暗条纹的反射率为  $\rho_2$ 。激光器与接收系统之间的距离为  $L$ , 激光发射半角为  $\phi_1$ , 接收系统的视场半角为  $\phi_2$ 。

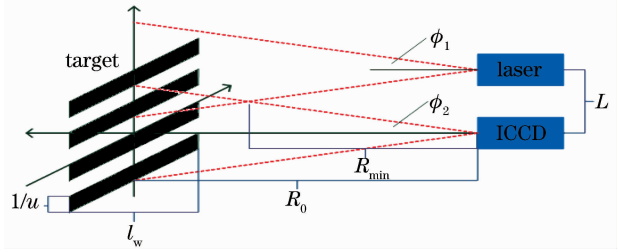


图 1 水下激光距离选通成像的几何结构

Fig. 1 Framework of underwater laser rang-gated imaging

### 2.2 目标反射辐射通量

在水下激光距离选通成像系统的建模中应该考虑激光脉冲在水中的时域展宽。设脉冲激光的初始发射波形为  $p_0(t)$ , 采用洛伦兹线型函数<sup>[11]</sup>

$$p_0(t) = \frac{I_0(\tau_s/2)^2}{(t - \tau_s)^2 + (\tau_s/2)^2}, \quad (1)$$

式中  $I_0$  为激光峰值光强,  $\tau_s$  为激光脉冲半峰全宽。理想 delta 时域激光脉冲在水中传输  $R$  距离后的波形为<sup>[12]</sup>

$$h(t, R) = E_R \frac{t}{t_M^2(R)} \exp\left(-\frac{t}{t_M}\right), \quad (t \geq 0) \quad (2)$$

式中  $E_R$  为单脉冲能量,  $t_M$  为从信号出现至达到最大值的时间, 表示为<sup>[12, 13]</sup>

$$t_M(R) = \frac{Rn}{c} \times \left\{ \frac{0.3}{\omega_0 a R \theta_0^2} \left[ \left( 1 + \frac{9}{4} \omega_0 a R \theta_0^2 \right)^{3/2} - 1 \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

式中  $n$  为水体的折射率,  $c$  为空气中的光速,  $a$  为水体的体衰减系数,  $\omega_0$  为单次散射的反照率,  $\theta_0$  为单次散射角的均方根, 定义为

$$\theta_0^2 = \int_0^\pi \theta^2 \beta(\theta) d\theta, \quad (4)$$

式中  $\beta(\theta)$  为水体散射的相函数, 采用 Fournie 的研究成果<sup>[14]</sup>

$$\beta(\phi) = \frac{1}{4\pi(1-\delta)^2\delta^v} \{v(1-\delta) - (1-\delta^v) + [\delta(1-\delta^v) - v(1-\delta)]\sin^{-2}(\phi/2)\} + \frac{1-\delta_\pi^v}{16\pi(1-\delta_\pi)\delta_\pi^v} (3\cos^2\phi - 1), \quad (5)$$

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

这样,以激光脉冲的发射为时间零点,激光脉冲经过距离  $R$  水体展宽后的波形为

$$p_R(t) = p_0 \left( t - \frac{nR}{c} \right) * h \left( t - \frac{nR}{c}, R \right), \quad (6)$$

式中  $*$  代表卷积。由于当  $R$  较大时, (6) 式会出现较大的误差,因此采用分段计算的方法,即把 0 到  $R$  这段水体看成是几个较短水体的级联。以 5 m 为准对水体分段,因此(6)式改写为

$$p_R(t) = p_0 \left( t - \frac{nR}{c} \right) * \underbrace{h \left( t - \frac{nR}{c}, 5 \right) * \dots * h \left( t - \frac{nR}{c}, 5 \right)}_{\text{floor}(R/5)} * h \left( t - \frac{nR}{c}, R - 5[\text{floor}(R/5) - 1] \right). \quad (7)$$

设激光强度在空间平面内均匀分布,则距成像系统为  $R_0$  的目标平面上的照度为

$$E_{R_0}(t) = \frac{p_{R_0}(t)}{\pi R_0^2 \phi_1^2}. \quad (8)$$

根据朗伯反射体的特性以及成像系统像平面的辐照度公式,可得目标在 ICCD 阴极上的辐照度为

$$E_i(t) = \pi \frac{\gamma \rho_i E_{R_0} \left( t - \frac{nR_0}{c} \right) * h \left( t - \frac{2nR_0}{c}, R_0 \right)}{\pi} \times \frac{1}{n^2} \frac{1}{4(f'/D)^2 + 1} = \frac{\gamma \rho_i Q}{\pi n^2 R_0^2 \phi_1^2} \frac{1}{4(f'/D)^2 + 1} \cdot p_R \left( t - \frac{nR_0}{c} \right) * \underbrace{h \left( t - \frac{2nR_0}{c}, 5 \right) * \dots * h \left( t - \frac{2nR_0}{c}, 5 \right)}_{\text{floor}(R_0/5)} * h \left( t, R - 5[\text{floor}(R/5) - 1] \right), \quad (9)$$

式中  $i = 1, 2$ , 分别表示亮条纹和暗条纹,  $D$  为接收系统口径,  $\gamma$  为镜头透射率,  $f'$  为接收镜头焦距。设 ICCD 的延迟为  $d$ , 选通宽度为  $\tau_r$ , 则在接收器选通积分时间内,系统接收到的目标辐射能量为

$$Q_i = \int_d^{d+\tau_r} E_i(t) dt, \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

## 2.3 后向散射辐射通量

对于后向散射的计算,在  $R$  平面  $dR$  路径上单位体积、单位立体角内后向散射强度为

$$dI_R(t) = b_b E_R(t) ds dR = \frac{b_b}{\pi R^2 \phi_1^2} p_R(t) ds dR, \quad (11)$$

式中  $b_b$  为后向散射系数。由于只有阴极面与目标面才是一对理想成像平面,故散射截面上每一点的后向散射均会在阴极面上形成一个光斑,光斑半径为  $r_R$ 。文献[5]认为该光斑内的照度是均匀分布的,这样阴极面上任意一点的由  $R$  处的水体所产生的后向散射照度是散射面上一定区域内单点所形成的后向散射照度的积分,即

$$dE_R(t) = \int_{\delta(R)} \frac{1}{\pi r_R^2} b_b \Omega_R \gamma \times \left[ E_R \left( t - \frac{nR}{c} \right) * h \left( t - \frac{2nR}{c}, R \right) \right] ds dR, \quad (12)$$

式中  $\Omega_R = \frac{\pi D^2}{4R^2}$  为散射点对接收系统所张的立体角。

根据几何光学的知识,可知  $\delta(R) = \left( \frac{R}{nf'} \right) \pi r_R^2$ , 所以由  $R$  处的水体所产生的后向散射照度为

$$dE_R(t) = \frac{b_b \gamma}{4} \left( \frac{D}{nR \phi_1 f'} \right)^2 \times \left[ E_R \left( t - \frac{nR}{c} \right) * h \left( t - \frac{2nR}{c}, R \right) \right] dR. \quad (13)$$

假设不考虑目标后面水体的后向散射光,则对于 ICCD 来说,在选通时间内所接收到的后向散射光的辐射通量为从  $R_{\min}$  到  $R_0$  这段水体的共同贡献,其中  $R_{\min}$  为由成像系统几何结构所决定的照明光场和接收视场的最近交点距成像系统的距离,所以

$$Q_b = \frac{b_b \gamma}{4} \left( \frac{D}{nR \phi_1 f'} \right)^2 \int_{R_{\min}}^{R_0} dR \times \int_d^{d+\tau_r} \left[ E_R \left( t - \frac{nR}{c} \right) * h \left( t - \frac{2nR}{c}, R \right) \right] dt. \quad (14)$$

## 3 输出图像的信噪比

### 3.1 系统的空间衰减

水体的散射效应不仅使激光脉冲发射时域展宽,而且还会产生空间模糊,即 ICCD 所接收到的方波信号  $Q_1 - Q_2$  将会衰减,且信号频率越高衰减越严重。而 CCD 最终输出的信号还要再经过成像器件的衰减。可以用对比度传递函数(CTF)描述系统

对方波信号的传递特性,但一般研究中常用调制传递函数(MTF),两者之间的关系为<sup>[15]</sup>

$$f_{\text{CTF}}(u) = \frac{4}{\pi} \left| f_{\text{MTF}}(u) - \frac{f_{\text{MTF}}(3u)}{3} + \frac{f_{\text{MTF}}(5u)}{5} - \dots \right|, \quad (15)$$

式中  $u$  为空间频率,本文取一阶近似。

对于水体来说,Wells 给出了一种水体传递函数的表达形式<sup>[16]</sup>,由于在(10)式计算  $Q_i$  时已包含了吸收的作用,因此这里改写为

$$f_{\text{MTF\_water}}(\psi, R_0) = \exp \left[ b \int_0^{R_0} S \left( \frac{\psi r}{R_0} \right) dr \right],$$

$$S(\psi) = 2\pi \int_0^{\theta_{\max}} J_0(2\pi\theta\psi) \beta(\theta) \theta d\theta, \quad (16)$$

式中  $b = \omega_0 a$  为水体散射系数;  $\psi = uR_0$  为空间角频率;  $\theta_{\max}$  为满足小角度近似的最大散射角,在实际应用中,为接收系统的半场视角<sup>[17]</sup>;  $J_0$  为零阶一类 Bessel 函数。

对于成像器件来说,一般其 MTF 是由各部分 MTF 相乘得到的,包括镜头、像增强器 CCD,但由于在不考虑散焦的情况下,像增强器是限制成像器件分辨率的“瓶颈”<sup>[18]</sup>,因此这里用像增强器的 MTF 来代表整个 ICCD 的 MTF

$$f_{\text{MTF\_ICCD}}(\nu) = \exp(-2\pi\sigma\nu), \quad (17)$$

式中  $\nu$  为像增强器靶面的空间频率,  $\sigma$  由像增强器 50%  $f_{\text{MTF}}$  定义。另外,空间角频率  $\psi$  与像增强器靶面上的空间频率的关系为

$$\nu f' = \psi, \quad (18)$$

这样,如果把整个成像过程的 MTF 看成是水体和 ICCD 两个线性系统的级联,可以表述为

$$f_{\text{MTF}}(\psi | R_0, f') = f_{\text{MTF\_water}}(\psi, R_0) \times f_{\text{MTF\_ICCD}}(\psi / f'). \quad (19)$$

### 3.2 ICCD 的噪声特性

噪声是另一个影响对方波信号观察的因素。激光雷达的探测器中含有大量噪声<sup>[19,20]</sup>。这里采用等效电子计数法计算 CCD 最终输出图像的信噪比。设光电阴极的量子效率为  $q$ ,则输入信号可以表示为

$$S_0 = N_{\text{frame}} (Q_1 - Q_2) \frac{ql}{2\nu} \cdot \frac{\lambda}{hc}, \quad (20)$$

式中  $l = \frac{nl_w f'}{R_0}$  为阴极面上条纹的长度,  $\lambda$  为激光波长,  $h$  为普朗克常量,  $N_{\text{frame}}$  为生成一帧图像所需要的脉冲数。受光子噪声影响,输入的噪声标准差为

$$N_i = \sqrt{[qN_{\text{frame}}(Q_1 + Q_2 + 2Q_b) + E_{\text{EBI}}\tau_2]} \frac{l}{2\nu} \cdot \frac{\lambda}{hc}, \quad (21)$$

式中  $E_{\text{EBI}}$  为光电阴极的等效背景噪声。

水下激光距离选通成像系统最终输出的有用信号就可以表示为

$$S = S_0 \langle g_{\text{pc-CCD}} \rangle \cdot \frac{4}{\pi} f_{\text{MTF}}(\psi | R, f'), \quad (22)$$

式中  $\langle g_{\text{pc-CCD}} \rangle$  为 ICCD 中除阴极外其他部分的总的平均增益,可以表示为

$$\langle g_{\text{pc-CCD}} \rangle = T_1 \eta \langle g_{\text{MCP}} \rangle \langle g_{\text{phos}} \rangle T_2 T_{\text{FO}} Q_{\text{CCD}}, \quad (23)$$

式中  $T_1, T_2$  分别为 ICCD 中两段真空部分的离子反馈阻膜的透射率;  $\eta$  为微通道板(MCP)的开口比;  $T_{\text{FO}}$  为光纤光锥的传输率;  $Q_{\text{CCD}}$  为 CCD 的量子效率;  $\langle g_{\text{MCP}} \rangle$  和  $\langle g_{\text{phos}} \rangle$  分别为 MCP 和荧光屏的平均增益。在 ICCD 中, MCP 的二次电子发射的量子特性和荧光屏电光转换的量子特性会引入额外噪声,它们的噪声特性可以通过噪声因子  $F_{\text{MCP}}$  和  $F_{\text{phos}}$  来度量。设

$$\langle g_{\text{MCP}} \rangle = \langle g_1 \rangle \langle g_2 \rangle^{m-1}, \quad (24)$$

式中  $\langle g_1 \rangle$  为 MCP 中的初级电子碰撞增益;  $\langle g_2 \rangle = \left( \frac{U}{mV_c} \right)^k$  为 MCP 中的次级电子碰撞增益<sup>[21]</sup>,  $k$  为与材料有关的参量;  $V_c$  表示材料的基能态激发所需要的最小电压,与材料有关;  $U$  为 MCP 的工作电压;  $m$  为电子碰撞次数。文献<sup>[22]</sup>给出了在二次电子发射概率符合泊松分布条件下的  $F_{\text{MCP}}$  表达式

$$F_{\text{MCP}} = \frac{1}{T_1 \eta} \left\{ 1 + \frac{1}{\langle g_1 \rangle} + \frac{1}{\langle g_1 \rangle \langle g_2 \rangle} \left[ 1 + \sum_{m=1}^{m-2} \left( \frac{1}{\langle g_2 \rangle} \right)^m \right] \right\}. \quad (25)$$

这样,可以写出最后的输出信噪比的表达式为

$$R_{\text{SN}} = \frac{S_i \langle g_{\text{pc-CCD}} \rangle \cdot \frac{4}{\pi} f_{\text{MTF}}(\psi | R, f')}{\sqrt{N_i^2 \cdot \langle g_{\text{pc-CCD}} \rangle^2 \cdot F_{\text{MCP}} + N_i^2 \cdot \langle g_{\text{pc-CCD}} \rangle \cdot \langle g_{\text{phos}} \rangle T_2 T_{\text{FO}} Q_{\text{CCD}} \cdot F_{\text{E,phos}} + \frac{l}{2\nu\Delta S} (N_{\text{dark}}^2 + N_{\text{read}}^2)}}, \quad (26)$$

式中  $\Delta s$  为 CCD 上单个像素的尺寸,  $N_{\text{dark}}$  为 CCD 单像素的暗电流噪声,  $N_{\text{read}}$  为 CCD 单像素的读出噪声。  $F_{\text{E,phos}}$  为荧光屏的额外噪声因子, 其与  $F_{\text{phos}}$  的关系为  $F_{\text{E,phos}} = F_{\text{E}} - 1$ 。

在后面的计算中定义

$$\begin{aligned} P_{a1} &= T_1 \eta, \\ P_{a2} &= \langle g_{\text{phos}} \rangle T_2 T_{\text{FO}} Q_{\text{CCD}}. \end{aligned} \quad (27)$$

## 4 实验与仿真

为了验证模型的有效性, 把模拟计算的结果与在距离选通水下激光成像系统上获得的图像进行比较。在该系统中, 激光器是一台光抽运 Nd:YAG 倍频激光器, 发射 532 nm 的蓝绿脉冲激光, 单脉冲能量 200 mJ, 脉宽 7 ns, 工作频率 10 Hz, 因此一个脉冲产生一幅图像。脉冲激光扩束后照射目标。PIN 管捕获发射玻璃窗反射的激光, 产生电脉冲信号, 经延迟电路后产生符合 ICCD 要求的 TTL 信号, 作为延迟基准。目标反射光被接收镜头接收, 汇聚于 ICCD 阴极面上。ICCD 根据设定的选通延迟和门宽进行工作, 输出图像, 其工作电压可调范围为 750~1450 V。目标如图 2 所示, 是一块被不同尺寸黑白条纹覆盖的测试板。在板的正中心为 8 cm × 8 cm 的黑色区域, 水平方向上从内到外依次排列着 1 cm 白, 2 cm 黑白, 2.5 cm 黑白, 3 cm 黑白, 5 cm 黑白, 10 cm 黑白相间条纹。垂直方向亦然, 形成回形图案。实验在一个长 150 m, 宽高各 4 m, 水质  $0.159 \text{ m}^{-1}$  的室内水池中进行。

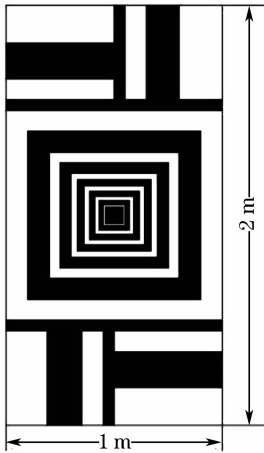


图 2 目标板  
Fig. 2 Target

目标板悬挂于距成像系统 42 m 的地方, 板面垂直于光轴。ICCD 的工作电压为 1450 V, 延迟等于目标反射的激光脉冲到达成像系统的时间, 选通宽

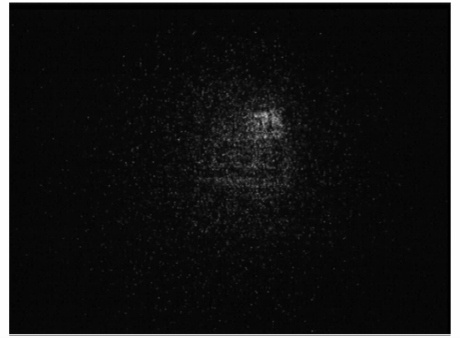


图 3 实验图像

Fig. 3 Image of experiment

度为 50 ns, 所采集的图像如图 3 所示。根据实验条件设定模型参数进行计算, 表 1 为一些参数的设置值, 表 2 为对目标板上不同宽度的条纹在表 1 的参数设置下所计算出来的信噪比。

表 1 模型的部分参数设定

Table 1 Setting of part parameters of the model

Name	Value	Name	Value	Name	Value
$\omega_0$	0.5	$\phi_1/\text{rad}$	0.015	$L/\text{m}$	0.5
$n$	1.33	$\phi_2/\text{rad}$	0.04	$D/\text{m}$	0.03
$\rho_1$	0.9	$d/\text{ns}$	372	$f'/\text{m}$	0.18
$\rho_2$	0.1	$\tau_r/\text{ns}$	50	$q$	0.5
$E_{\text{EBI}}/\mu\text{Lx}$	0.25	$P_{a1}$	0.5	$\gamma$	0.74

表 2 不同条纹的信噪比

Table 2 SNR of different stripes

Stripe width / m	$R_{\text{SN}}$	Stripe width / m	$R_{\text{SN}}$
0.10 × 1.0	9.1928	0.025 × 0.28	0.3432
0.05 × 0.6	1.7855	0.020 × 0.18	0.1869
0.03 × 0.4	0.5652	0.010 × 0.10	0.0427

从仿真结果可以看到, 如果设定信噪比的阈值为 2.5<sup>[23]</sup>, 那么对于 0.1 m × 1 m 的条纹是可以观察得到的, 0.05 m × 0.6 m 的条纹的信噪比开始弱于临界状态, 应该无法观察, 再精细一些的条纹就会被噪声覆盖而完全无法观察了。这一结论与实验图像的感受是相符的, 因而说明了模型的正确性。

下面计算水下激光距离选通成像系统在不同水质下的极限探测能力。设计针对的目标为 1.8 m × 0.8 m 大小的平板。根据约翰逊准则, 要以一定的概率探测、识别、认清目标所需要的目标临界尺寸方向上的条纹数分别为 1, 4, 8, 即在 0.8 m 宽的范围内的条纹数分别设为 1, 4, 8, 条纹的长度为 1.8 m。计算了在 3 种水体条件下, 即  $c = 0.2, b = 0.15$ ;  $c = 0.25, b = 0.2$ ;  $c = 0.3, b = 0.18$ , 不同观察要求下系统的极限探测距离。计算中所用的参数与表 1 相同, 只是为了更接近水下目标的真实情况, 把亮暗条

纹的反射率降为0.3和0,另外,为了使光斑覆盖整个目标,把激光发散半角扩大为0.03 rad。计算结果如表3所示。

表3 不同观察要求下的极限探测距离

Table 3 Maximum detecting range underwater different requirements

	Discovering range /m	Identifying range /m	Recognizing range /m
First water	47	39	35
Second water	37	30	28
Third water	30	27	25

从以上的仿真中可以得出结论,基于距离选通成像方式,采用大功率脉冲激光器和高增益 ICCD,对于人形大小的暗目标,水下光电成像系统可以在9个衰减长度以上发现目标,7.5~8个衰减长度识别目标,7~7.5个衰减长度认清目标。

## 5 结 论

针对水下激光距离选通成像系统建模仿真中存在的一些问题,建立了一套包含水下激光脉冲时域展宽和 ICCD 特性的系统模型。该模型以信噪比为目标函数,较为全面地考虑了系统的各个参数,包括激光器的能量、激光脉冲和选通脉冲的时序关系和 ICCD 的工作电压等在仿真中的作用,通过改变它们的值,可以研究系统在不同参数配置下的性能,从而为系统的优化设计提供参考。计算了系统在不同水质、不同观察要求下的极限工作距离,证明了距离选通成像方式在水下光电成像中的优势。

## 参 考 文 献

- Liu Jinbo, Li Sining, Wang Qi. System design and experiment of multiple streak tube imaging lidar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8):1991~1994  
刘金波,李思宁,王 琪. 多狭缝条纹管激光雷达系统设计及实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8):1991~1994
- Dai Yongjiang. The Principle of Lidar [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002  
戴永江. 激光雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- Jules S. Jaffe. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems [J]. *Journal of Oceanic Engineering*, 1990, **15**(2):101~111
- Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong *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  
孙 健,张晓晖,葛卫龙等. 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[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8):2185~2190
- Huang Youwei, Jin Weiqi, Wang Xia *et al.*. Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7):1191~1197

- 黄有为,金伟其,王 霞等. 凝视型水下激光成像后向散射光理论模型研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7):1191~1197
- Kong Jie, Zhang Baomin. Analysis of performance modeling on underwater imaging detection system [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2007, **31**(3):332~336  
孔 捷,张保民. 水下光电成像探测系统的性能建模分析[J]. *南京理工大学学报*, 2007, **31**(3):332~336
- Michael P. Strand. Imaging model for underwater range-gated imaging system[C]. *SPIE*, 1991, **1537**:151~160
- C. S. Tan, G. Seet, A. Sluzek. Model of gated imaging in turbid media [J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(11):116002
- Liu Bingqi, Zhou Bin, Gao Zhiyun *et al.*. Analysis of the gain's effect on output signal-to-noise ration of image intensifier [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1):120~124  
刘秉琦,周 斌,高雅允等. 像增强器增益对输出信噪比影响的分析[J]. *光学技术*, 2005, **31**(1):120~124
- Bai Yanzhu, Jin Weiqi. Principles and Techniques of Optical Imaging [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 63~64  
白延柱,金伟其. 光电成像原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 63~64
- Zhang Zhengyu, Zhou Shouhuan, Sui Xiaolin. Study on time-domain broadening of submarine laser pulse [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(7):850~854  
章正宇,周寿桓,睦晓林. 激光脉冲水中传输时域展宽特性的分析计算[J]. *光学学报*, 2003, **23**(7):850~854
- Zhou Yamin, Liu Qizhong, Zhang Xiaohui *et al.*. An efficient method for simulating time-domain broadening of laser pulse propagating underwater [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1):143~147  
周亚民,刘启忠,张晓晖等. 一种激光脉冲水下传输时域展宽模拟计算方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1):143~147
- Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin *et al.*. Study and simulation of air influences on laser pulse transmission delay time [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8):2046~2050  
韩 成,白宝兴,杨华民等. 大气信道对激光脉冲延迟时间影响的仿真研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8):2046~2050
- Curtis D. Mobley, Lydia K. Sundman, Emmanuel Boss. Phase function effects on oceanic light fields [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6):1035~1049
- Lei Wu, Yue Shen, Gaoping Li *et al.*. Modeling and simulation of range-gated underwater laser imaging systems [C]. *SPIE*, 2009, **7382**:73825B
- Hohn W. McLean, Kenneth J. Voss. Point spread function in ocean water: comparison between theory and experiment [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(15):2027~2030
- Huang Youwei, Jin Weiqi, Ding Kun *et al.*. Underwater forward scattering imaging model based on beam spatial brodening [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4):669~701  
黄有为,金伟其,丁 琨等. 基于光束空间展宽的水下前向散射成像模型[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4):669~701
- Li Quan, Wang Yangui, Wang Xiaowei *et al.*. Simulative and experimental study on the MTF and SNR of range gated laser imaging system [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(4):31~33  
黎 全,王雁桂,王小伟等. 激光选通成像系统 MTF 与 SNR 的仿真与实验研究[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(4):31~33
- Zhang Yong, Zhao Yuan, Liu Liping *et al.*. Range resolution improvement of scannerless laser radar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5):1270~1274  
张 勇,赵 远,刘丽萍等. 一种提高非扫描激光雷达距离分辨率的方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5):1270~1274
- David Dussault, Paul Hoess. Noise performance comparison of ICCD with CCD and MECCD cameras [C]. *SPIE*, 2004, **5563**:195~203
- Shen Feng, Zhang Xuejun, Rao Changhui *et al.*. Optical

- performance of image-intensified CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5):601~606
- 沈 锋,张学军,饶长辉 等. 像增强型 CCD 探测器的光学特性 [J]. 光学学报, 2002, **22**(5):601~606
- 22 S. E. Moran, B. L. Ulich, W. P. Elkins *et al.*. Intensified CCD (ICCD) dynamic range and noise performance [C]. *SPIE*, 1997, **3173**:430~457
- 23 Yang Bingxin. Study on the SNR of TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, **26**(2):22~24
- 杨秉新. TDICCD 相机的信噪比的研究 [J]. 航天返回与遥感, 2005, **26**(2):22~24