

## 距离选通水下成像中基于等水体后向散射光能量的目标搜索方法

葛卫龙<sup>1</sup>, 华良洪<sup>2</sup>, 张晓晖<sup>1</sup>

(1. 海军工程大学 兵器工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 海军装备部, 北京 100841)

**摘要:** 研究了距离选通水下成像系统中基于等水体后向散射光能量的目标搜索方法, 建立了 ICCD 接收水体后向散射光能量计算模型, 给出了单次成像时 ICCD 接收水体后向散射光能量的计算公式。通过控制系统成像时的开门时刻和选通门宽, 使得系统每次成像时接收到的水体后向散射光能量相等, 确定了基于等水体后向散射光目标搜索方法的搜索策略, 并给出了搜索策略的仿真计算结果。利用在某次成像中, 目标存在会导致系统接收信号光能量增大的特点, 给出了目标存在的判别准则, 仿真计算结果验证了所提出的判别准则的正确性。

**关键词:** 成像系统; 距离选通; 目标搜索; 等水体后向散射光能量

**中图分类号:** TN249    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2013)10-2677-05

## Target searching method based on equal energy of water backscattering light in range-gated underwater imaging system

Ge Weilong<sup>1</sup>, Hua Lianghong<sup>2</sup>, Zhang Xiaohui<sup>1</sup>

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Navy Equipment Department, Beijing 100841, China)

**Abstract:** The target searching method based on the equal energy of water backscattering light in range-gated underwater imaging system was studied. Computing model of water backscattering light energy received by ICCD was built, and the formula of water backscattering light power received by ICCD was deduced in a single imaging. The energy of water backscattering light received by ICCD at any imaging could be equal by controlling the moment and the time of ICCD opening gate. And then, the searching strategy based on the equal energy of water backscattering light could be established, the simulation result of the searching strategy was given. The judgment rule of target existence was given which the signal energy received by ICCD would be enhanced at a certain imaging if the target existed. The simulation result proves the right of the judgment function rule.

**Key words:** image system; range-gated; target searching; equal energy of water backscattering light

收稿日期: 2013-02-02; 修订日期: 2013-03-03

基金项目: 国家部委基金项目(4010714010301)

作者简介: 葛卫龙(1979-), 男, 讲师, 主要从事激光技术、图像处理技术方面的研究。Email: dragon7209@163.com

### 0 引言

随着人类探索领域向海洋不断延伸,水下激光成像系统在水下目标探测识别、海底地形地貌勘查及海洋工程中具有广泛而重要的应用价值。水下激光成像系统一般采用同步扫描技术<sup>[1-2]</sup>和距离选通技术<sup>[3-5]</sup>来克服水下激光后向散射等影响。距离选通水下成像系统通过目标的时间标记技术,利用水体后向散射光和目标反射光的传输时间差来消除水体后向散射的干扰,从而提高目标的探测距离。

距离选通激光成像本质上是一种定距成像方式,系统对水下目标进行成像时,要求预先知道目标距离等参数信息,然后设定接收器(ICCD)选通门的开启时刻,进而调整成像系统各参数以得到分辨率较高的目标图像。当目标距离未知时,需要对系统探测范围内的目标进行搜索,以确定目标的距离。美国的“魔灯”机载激光探雷探潜系统<sup>[6]</sup>采用 6 个 ICCD 在一个激光脉冲内对不同距离成像,使得探测范围内的目标总会被其中至少 1 个 ICCD 探测到;加拿大瓦尔卡捷国防研究院的 LUCIE 序列距离选通激光水下成像系统<sup>[7]</sup>中的 LUCIE I 采用固定激光器参数,固定选通宽度,同时把延迟时间和聚焦两个参数绑定在一起控制,在操作人员调整聚焦状态时延迟时间也跟着变化,从而实现探测范围内的目标搜索。另外一种可以确定目标距离的方法是借助其他目标定位手段,如利用声纳系统对目标进行定位。无论是通过其他目标定位手段获得目标距离还是用多个 ICCD 分别对不同水体范围成像,都会给成像系统带来体积大、成本高的弊端。文中研究的距离选通水下成像中基于等水体后向散射光能量的目标搜索方法,是一种可以在不借助其他目标定位手段情况下,利用距离选通水下成像自身系统对目标进行搜索定位的方法,在不增加系统额外的体积和成本的前提下,可快速、准确地判断目标存在和位置。

### 1 单次成像时系统接收水体后向散射光能量的计算

图 1 是水体后向散射光能量计算模型示意图,其中  $\alpha$  为激光器发射光束的发散角(半角), $\gamma$  为 ICCD 接收视场角(半角), $\theta$  为发射中心轴与接收中心轴的

夹角,激光器与 ICCD 之间的距离为  $d_0$ , $D$  为 ICCD 接收光学系统的直径。要考察的水体截面和成像系统分别处于  $xoy$  和  $x'o'y'$  平面内,两个平面平行, $o$  为 ICCD 的视场在要考察的水体截面圆的中心, $o'$  为 ICCD 的像面的中心, $o'o$  垂直与两个平面,平面之间的距离为  $z$ 。

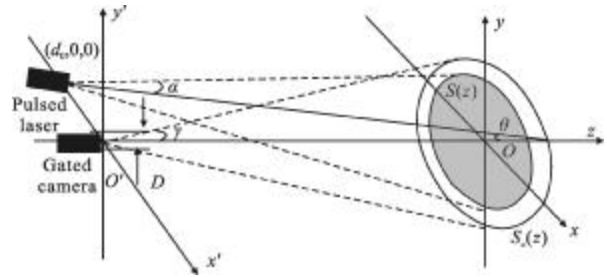


图 1 水体后向散射光计算模型示意图  
Fig.1 Computer model of water back-scattering light

在平面  $xoy$  内,激光的照射面积为  $S(z)$ ,ICCD 的视场面积为  $S_c(z)$ 。设照明激光入水时,脉冲激光器的初始发射激光脉冲功率为  $P_0$ ,考虑激光在水中传播时脉冲的展宽,设激光在出光时刻的脉冲宽度为  $\tau_p(0)$ ,在  $t$  时刻的脉冲宽度为  $\tau_p(t)$ ,水体的衰减系数为  $c$ ,水体的后向散射系数为  $\beta(\pi)$ ,激光在水中的传播速度为  $v_w$ ,距离选通系统成像时 ICCD 的开门时刻为  $t_g$ ,选通门宽为  $\tau_a$ ,称开门时刻和选通门宽为 ICCD 成像时的选通参数。黄有为等在参考文献[8]研究了系统成像时 ICCD 选通参数对应的散射水体范围和该范围内不同位置水体后向散射光到达 ICCD 的时序,有如下结论:在对应的散射水体范围内,距离  $z_w=v_w t$  处单位水体截面后向散射光信号能被 ICCD 接收的实际脉冲前点和后点时刻为:

$$\begin{cases} t_{front}' = \max(0, t_g - 2t) \\ t_{back}' = \min(\tau_a(2t), t_g + \tau_a - 2t) \end{cases} \quad (1)$$

李丽等在参考文献[9]中计算了 ICCD 接收到  $z_w$  距离处水体后向散射光的功率为:

$$P_b(z_w) = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \beta(\pi) P_0 \int_{z_w} f(z_w) e^{-c(z_w + z_w/\cos\theta)} \frac{1}{2} dz_w \quad (2)$$

式中: $f(z_w)$  为距离  $z_w$  处进入接收视场的被照面积与激光照射面积之比。

由公式(1)和公式(2)可知,ICCD 接收距离  $z_w$  处的水体后向散射光的功率为  $Q_b(z_w)$  为:

$$Q_b(z_w) = P_b(z_w) (t_{back}' - t_{front}') \quad (3)$$

那么在给定选通参数下 ICCD 接收到的累积水体后向散射光能量为:

$$Q_{in} = \int_{v_w(\frac{t_g + \tau_d}{2})}^{v_w(\frac{t_g - \tau_d(2l)}{2})} Q_b(z_w) dz_w \quad (4)$$

## 2 等水体后向散射光能量目标搜索策略

韩宏伟等在参考文献[10]中研究了距离选通水下成像系统的极限探测距离与水体衰减系数之间的关系,根据该文中的研究结论可确定不同水质条件下距离选通水下成像系统的探测范围,如何在该范围内快速地搜索目标并准确判断目标存在成为要解决的关键问题。所谓搜索策略是指在对目标搜索过程中,每次成像时 ICCD 的开门时刻  $t_g(i)$  和选通门宽  $\tau_d(i)$  的设置方法。

距离选通成像系统利用距离切片的方法对水下目标进行搜索时,大部分切片内 ICCD 接收到的都是水体后向散射光能量。根据这个实际情况,可通过设置成像时 ICCD 的选通参数,使得每次成像 ICCD 接收的水体后向散射光能量相等,当某次成像 ICCD 接收到目标信号时,该次成像 ICCD 接收内到的信号能量将会比其他次接收到的信号能量大,从而判断该次成像所对应的距离切片内存在目标。采用该搜索策略的计算过程如下:

(1) 设置 ICCD 首次开门时刻  $t_g(1)$  和选通门宽  $\tau_d(1)$ ;

(2) 计算第一次成像时 ICCD 接收到的水体后向散射光能量

$$Q_1 = \int_{v_w(\frac{t_g(1) + \tau_d(1)}{2})}^{v_w(\frac{t_g(1) - \tau_d(2l)}{2})} Q_b(z_w) dz_w \quad (5)$$

(3) 第二次成像时 ICCD 开门时刻  $t_g(2) = t_g(1) + \tau_d(1)$ , 计算第二次 ICCD 选通门宽  $\tau_d(2)$ , 使其满足:

$$Q_2 = \int_{v_w(\frac{t_g(2) + \tau_d(2)}{2})}^{v_w(\frac{t_g(2) - \tau_d(2l)}{2})} Q_b(z_w) dz_w = Q_1 \quad (6)$$

(4) 重复(3)的计算过程,根据:

$$Q_i = \int_{v_w(\frac{t_g(i) + \tau_d(i)}{2})}^{v_w(\frac{t_g(i) - \tau_d(2l)}{2})} Q_b(z_w) dz_w = Q_1 \quad (7)$$

计算出每次成像时 ICCD 的开门时刻  $t_g(i)$  和选通门宽  $\tau_d(i)$ ,  $(t_g(i) + \tau_d(i)) > \frac{2z_{max}}{v_w}$ , 考虑到搜索的实际情况,单次成像时 ICCD 的选通门宽  $\tau_d(i)$  不超过 50 ns (该段时间内对应搜索距离约为 5.6 m)。

对该搜索策略进行仿真计算,成像系统的参数和水体的参数如下:  $c = 0.0159 \text{ m}^{-1}$ ,  $\beta(\pi) = 0.00062 \text{ m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ,  $\alpha = 0.015 \text{ rad}$ ,  $\gamma = 0.03 \text{ rad}$ ,  $\theta = 0.0125 \text{ rad}$ ,  $d_0 = 0.5 \text{ m}$ ,  $D = 0.05 \text{ m}$ ,  $Q_0 = 200 \text{ mJ}$ ,  $\tau_p = 7 \text{ ns}$ ,  $v_w = 3e8/1.33 \text{ m/s}$ , 设 ICCD 成像时初始开门时刻  $t_g(1) = 100 \text{ ns}$ , 选通门宽  $\tau_d(1) = 3 \text{ ns}$ , 此时对应的水体距离为 11 m, 对最远距离为 7 倍水体衰减长度进行搜索,按照此初始条件进行计算,得到搜索过程中每次成像的 ICCD 开门时刻  $t_g(i)$  及选通门宽  $\tau_d(i)$ , 如图 2 所示。

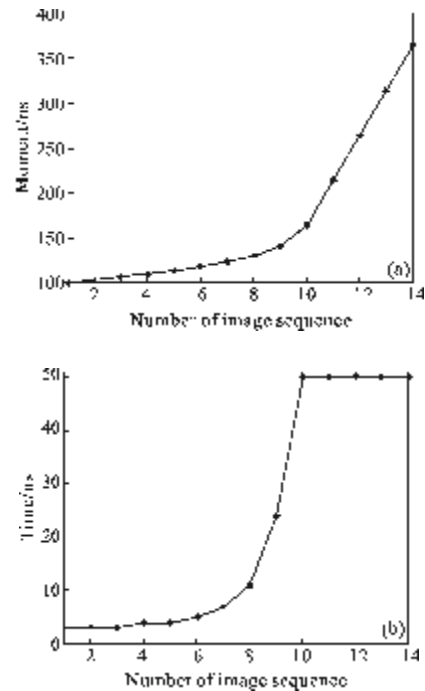


图 2 ICCD 的开门时刻和选通门宽  
Fig.2 Moment and time of ICCD opening gate

按此搜索策略完成 11~44 m 搜索距离的搜索需要次数为 14 次,由于距离选通水下成像系统接收到的信号能量是以图像的形式显示的,可用 ICCD 所成图像平均灰度值  $I_{mean}(i)$  来反映  $Q_i$ , 所得图像序列平均灰度值  $I_{mean}(i)$  之间的关系如图 3 所示。可以看出,前 9 次成像所得图像的  $I_{mean}$  基本相等,从第 10 次开始,由于水体后向散射光能量过小,在一定的选通门宽内无法达到与前面相当的后向散射光能量,

此时选通门宽设为最大选通门宽 50 ns。

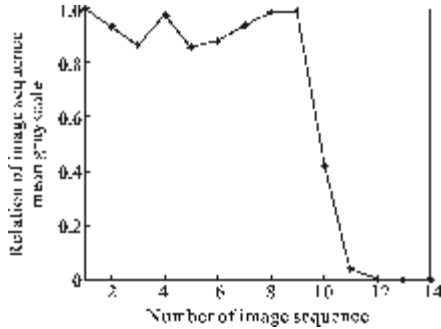


图 3 图像序列平均灰度之间的关系

Fig.3 Relation of image sequence mean grayscale

### 3 目标存在的判别函数及仿真计算

通过上述分析及仿真结果可以看出,由于 ICCD 接收到的远距离处水体后向散射光能量较小,即使选通门宽很长,也很难达到与近距离处的水体后向散射相等的情况,实际上整个搜索过程分为两个部分,一是等水体后向光能量搜索,此时步长是变化的,二是当  $\tau_0(i)=50$  ns 的最大搜索步长时,搜索过程变成了等步长目标搜索方法,因此可用如下判别依据判断目标是否存在:

$$I_{\text{mean}}(i) > I_{\text{mean}}(1) \quad (8)$$

或当  $T_d(j)=50$  ns

$$I_{\text{mean}}(i) > I_{\text{mean}}(i-1) \quad i=j, j+1, \dots, N \quad (9)$$

式中:  $N$  为搜索次数。若满足上述条件,可判断在第  $i$  个切片内存在目标。

当与成像系统距离  $l=20$  m 处存在一目标时,对目标特性参数作如下设定:目标的反射率  $\rho=0.1$ ,目标的面积为该距离处激光光斑面积的 0.5 倍,成像系统的参数和水体的参数与文中第 2 部分给出的参数一致。孙健、黄有为等在参考文献[11-12]中建立了计算距离选通水下成像系统光信号的数学模型,指出距离选通激光水下成像系统在一次成像的过程中可能接收到的光能量包括目标反射直射光能量、未到达目标而直接被水体散射的后向散射光能量以及目标反射直射光的前向散射光能量,并且给出了 ICCD 接收到目标反射直射光能量、及目标反射直射光的前向散射光能量的计算方法。采用等水体后向散射光能量目标搜索的方法进行搜索,依据参考文献[11-12]中的计算方法对距离选通成像系统搜索过程中每次成像时 ICCD 接收到的信号能量进行仿

真计算,得到各距离切片所对应图像  $I_{\text{mean}}(i)$  之间的关系,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,对于文中给定目标可以很容易通过  $I_{\text{mean}}(10) > I_{\text{mean}}(11)$  判断在第 10 个切片内存在目标。

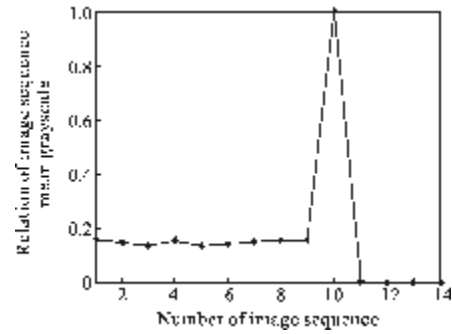


图 4 图像序列平均灰度之间的关系

Fig.4 Relation of image sequence mean grayscale

### 4 结论

文中针对距离选通水下成像系统对距离未知目标探测成像探测难的问题,研究了基于等水体后向散射光能量的目标搜索方法,建立了水体后向散射光能量计算模型,给出了距离选通水下成像系统单次成像时系统接收到水体后向散射光能量的计算方法,通过控制系统成像时的开门时刻和选通门宽,使得系统成像时每次接收到的水体后向散射光能量相等,确定了基于等水体后向散射光目标搜索方法的搜索策略,并给出了搜索策略的仿真计算结果,利用在某次成像中,目标存在会导致系统接收水体后向散射光能量变化的现象,给出了目标存在的判别准则,仿真计算结果验证了文中所提出的判别准则的正确性。所提出的基于等水体后向散射光能量的目标搜索方法,可以在不借助其他目标定位手段情况下,利用距离选通水下成像系统本身在探测范围内确定目标的位置,为距离选通水下成像系统正确设置控制参数、获得较高质量目标图像提供依据。

### 参考文献:

- [1] Mullen L, Contarino V M, Laux A, et al. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging [C]//SPIE, 1999, 3761: 1-8.
- [2] He D M, Gerald G L S. Laser gated-ranging for underwater robot vision in turbid waters[C]//SPIE, 2002, 4546: 11-22.
- [3] Jaffe Jules S, John McLean, Strand Michael P, et al.

- Underwater optical imaging: status and prospects [J]. *Oceanography*, 2001, 14(3): 64C76.
- [4] Ge Weilong, Zhang Xiaohui, Han Hongwei, et al. Design and implementation of image processing for range-gated based on Dm642[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1641-1645. (in Chinese)  
葛卫龙, 张晓晖, 韩宏伟, 等. 基于 DM642 的激光水下图像处理系统设计及实现[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(6): 1641-1645.
- [5] Bai Lianfa, Zhang Yi, Chen Qian et al. Some questions in the realization of range gated imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 57-61. (in Chinese)  
柏连发, 张毅, 陈钱, 等. 距离选通成像实现过程中若干问题的探讨[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 57-61.
- [6] Bobby L U, Philip L, Steven E M, et al. Recent results in imaging lidar[C]//SPIE, 1997, 3059: 95-108.
- [7] Alan W, Fournier G R, Forand J L, et al. In harbor underwater threat detection/identification using active imaging [C]//SPIE, 2005, 5870: 59-70.
- [8] Huang Youwei, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Temporal model of underwater laser ranged-gated imaging and pulse stretching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3177-3183. (in Chinese)  
黄有为, 王霞, 金伟其, 等. 水下激光距离选通成像与脉冲展宽的时序模型[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3177-3183..
- [9] 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): 489-491. (in Chinese)  
李丽, 高雅允, 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): 489-491.
- [10] Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser rang-gated imaging system [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2011, 38(1): 0109001-1-0109001-7. (in Chinese)  
韩宏伟, 张晓晖, 葛卫龙. 水下激光距离选通成像系统的模型与极限探测性能研究 [J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0109001-1-0109001-7.
- [11] 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. (in Chinese)  
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.
- [12] Huang Youwei, Jin Weiqi, Ding Kun, et al. Underwater forward scattering imaging model based on beam spatial broadening [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4): 669-701. (in Chinese)  
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.