

文章编号: 1001-3806(2013)06-0756-04

水体后向散射光能量变化规律的仿真与实验

葛卫龙¹, 华良洪², 张晓晖¹

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

摘要: 为了研究距离选通水下成像系统在采用等步长搜索策略进行目标搜索过程中增强型电荷耦合器件 (ICCD) 接收水体后向散射光能量的变化规律, 建立了 ICCD 接收水体后向散射光能量计算模型, 推导了单次成像时 ICCD 接收水体后向散射光能量的计算公式, 对选通成像系统在搜索目标过程中, ICCD 接收到水体后向散射光能量的变化规律进行了仿真计算和实验验证, 利用 ICCD 显示图像的平均灰度和 ICCD 接收到水体后向散射光能量的对应关系, 实验中得到了水体后向散射光能量变化规律的数据。结果表明, ICCD 接收到的水体后向散射光能量随着距离增大近似呈指数下降。

关键词: 成像系统; 距离选通; 水体后向散射光; 变化规律

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.06.011

Simulation and experiment of change rule of water backscattering light energy

GE Wei-long¹, HUA Liang-hong², ZHANG Xiao-hui¹

(1. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Navy Equipment Department, Beijing 100841, China)

Abstract: In order to study the change rule of water backscattering light energy received by a intensified charge-coupled detector (ICCD) in the process of searching for underwater targets by the equal step length, a model of water backscattering light energy received by the ICCD was built, and the formula of water backscattering light power received by the ICCD was deduced in a single imaging. Simulation computation and experiment validation were carried through. According to dependence of mean grayscale of the image on the water backscattering light energy, the data of the change rule of water backscattering light energy was obtained. The result shows that water backscattering light energy descends along with the distance of water accretion in exponent rule approximately.

Key words: image system; range-gated; water backscattering light; change rule

引言

随着人类探索领域向海洋不断延伸, 具有高分辨率的水下光电成像系统^[1,2]在水下目标探测识别、海底地形地貌勘查及海洋工程中得到了广泛的应用。距离选通激光水下成像系统^[3,4]的基本原理是通过时间标记技术, 利用水体后向散射光和目标反射光传播时间的差来消除水体后向散射干扰, 所以距离选通成像本质上是一种定距成像方式, 对距离已知的目标能取得较好的成像效果。当目标距离未

知时, 首先需要对探测范围内的水体进行分段搜索来判断目标的存在。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^[5], 在系统探测水体范围内, 由于目标的数量有限, 在搜索目标的过程中成像系统接收到的大部分是水体后向散射光能量, 研究并掌握水体后向散射光能量的变化规律, 然后根据水体后向散射光能量的变化规律的异常判断目标的存在是一种搜索目标可行的方法。SUN 等人给出了距离选通激光水下成像系统接收水体后向散射光能量的计算方法^[6-7], LI 等人给出了距离选通激光水下成像系统接收水体后向散射光能量随距离(时间)的变化规律^[8], 但都未涉及距离选通激光水下成像系统在对探测范围

基金项目: 国家部委基金资助项目(4010714010301)

作者简介: 葛卫龙(1979-), 男, 讲师, 博士, 主要从事水下激光成像及图像处理技术等方面的研究。

E-mail: dragon7209@163.com

收稿日期: 2013-03-24; 收到修改稿日期: 2013-05-19

内的水体进行分段成像时接收到水体后向散射光能量的变化规律,也未见实验中验证水体后向散射光能量的变化规律。作者研究了距离选通水下成像系统在采用等步长搜索策略进行目标搜索过程中增强型电荷耦合器件(intensified charge-coupled detector, ICCD)接收水体后向散射光能量的变化规律,并根据 ICCD 显示图像的平均灰度和 ICCD 接收到水体后向散射光能量的对应关系,利用实验中得到的水体后向散射光序列图像平均灰度,验证了 ICCD 接收到水体后向散射光能量的变化规律。

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 α 为激光器发射光束的发散角(半角), γ 为 ICCD 接收视场角(半角), θ 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 $x-O-z-y$ 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, $O'O$ 垂直于两个平面,平面之间的距离为 z 。

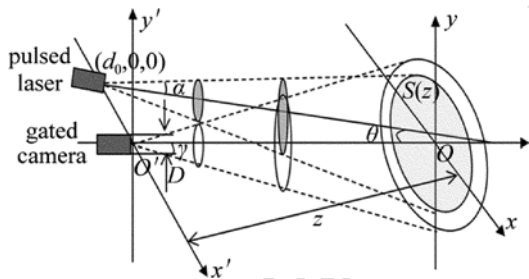


Fig. 1 Computing model of water backscattering light

设脉冲激光器的初始发射能量为 Q_0 , 脉冲宽度为 τ_p , 则激光脉冲功率为:

$$P_0 = \frac{Q_0}{\tau_p} \quad (1)$$

在距离 z 处激光的照射面积为 $S(z)$, 水体的衰减系数为 c , 水体所受的激光照度为:

$$E(z) = \frac{P_0 \exp(-cz)}{S(z)} \quad (2)$$

散射面积上的面积元 dS 与照明厚度 dz 的乘积即为散射体积 dV , 由体积元 dV 产生的后向散射光强度为:

$$dI(z) = \beta(\pi) E(z) dV \quad (3)$$

式中, $\beta(\pi)$ 为水体后向散射系数。接收光学系统对

体积元 dV 所张立体角为:

$$\Omega = \frac{\pi \left(\frac{D}{2}\right)^2}{z^2} \quad (4)$$

达到 ICCD 由体积元 dV 产生的后向散射光功率为:

$$dP_b = \Omega \exp(-cz) dI = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \beta(\pi) P_0 \times \exp[-c(z + z/\cos\theta)] \frac{1}{S(z)z^2} dSdz \quad (5)$$

距离 z 处激光照射的水体总体积产生的后向散射到达 ICCD 的总功率为:

$$P_b(z) = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \beta(\pi) P_0 \iint \exp\left[-c\left(z + \frac{z}{\cos\theta}\right)\right] \times \frac{1}{S(z)z^2} dSdz \quad (6)$$

重叠系数 $f(z)$ 是进入接收视场的被照面积与激光照射面积之比。在距离 z 处, 激光照射面积为 $S(z)$, 则处于接收视场内的散射面积为 $f(z)S(z)$, 即有:

$$\int dS = f(z) S(z) \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式可得:

$$P_b(z) = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \beta(\pi) P_0 \int f(z) \times \exp[-c(z + z/\cos\theta)] \frac{1}{z^2} dz \quad (8)$$

距离 z 处的后向散射光到达 ICCD 的时刻可根据下式计算:

$$z + \frac{z}{\cos\theta} = v_w t \quad (9)$$

式中, v_w 为激光在水体中传播的速度, 将 z 写成关于 t 的函数, 并代入(8)式中可得:

$$P_b(t) = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \beta \frac{Q_0}{v_w t_p} \frac{1 + \cos\theta}{\cos^2\theta} \times \int f(z) \exp(-cv_w t) \frac{1}{t^2} dt \quad (10)$$

设 ICCD 在第 i 次成像时, 开门时间为 $t_g(i)$, 选通门宽为 τ_d , 则该次成像 ICCD 接收到的水体后向散射光能量为:

$$Q(i) = \int_{t_g(i)}^{t_g(i) + \tau_d} P_b(t) dt, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

2 等步长搜索时系统接收水体后向散射光能量变化规律的仿真计算

HAN 等人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^[9-10],根据这些研究结论,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,把探测范围进行等间隔无间隙分段是一个最直接和最容易实现的搜索方法,作者称这种搜索方法为等步长目标搜索方法。在等步长目标搜索方法中, $\tau_d(i) = \tau_d$ 为一固定值,设激光在整个搜索范围内往返时间为 t_a ,则完成搜索范围所需的搜索次数为:

$$N = \left[\frac{t_a}{\tau_d} \right] + 1 \quad (12)$$

式中, $[\]$ 为取整操作。初始开门时刻 $t_g(1)$ 确定后,第 i 个切片的开门时刻 $t_g(i)$ 可以表示为:

$$t_g(i) = t_g(1) + (i-1)\tau_d, (i=1,2,\dots,N) \quad (13)$$

则 $[t_g(i), \tau_d]$ 就确定了等步长目标搜索方法的搜索策略。

按照表 1 中所给出的参量对等步长搜索时系统

Table 1 Setting of other parameters of the model

name	value	name	value	name	value	name	value
c	0.0159m^{-1}	$\beta(\pi)$	$0.00062\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$	α	0.015rad	γ	0.03rad
θ	0.0125rad	d_0	0.5m	D	0.05m	Q_0	200mJ
τ_p	7ns	v_w	$\frac{3 \times 10^8}{1.33}\text{m/s}$	$t_g(0)$	0ns	τ_d	10ns

接收水体后向散射光能量变化规律进行仿真计算,并对计算结果作归一化处理,得到水体后向散射光能量变化规律如图 2 所示(横坐标为成像的帧数,纵坐标为每次成像所接收到的水体后向散射光能量的比例值)。

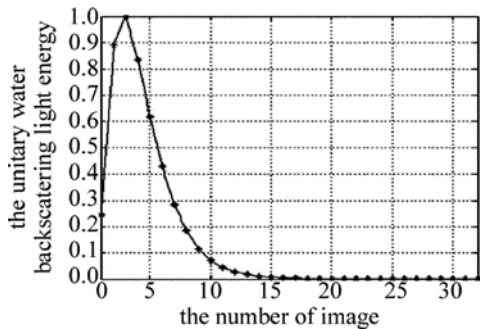


Fig. 2 The change rule of backscattering light energy

通过图 2 的分析,可以得出如下结论:

(1) 在近距离处,由于激光光斑逐渐完全进入接收视场,系统接收的水体后向散射光能量可能会随着距离的增加而增大,设:

$$f(z_{i,\max}) \exp(-cz_{i,\max}) = \max[f(z) \exp(-cz)] \quad (14)$$

即包含 $z_{i,\max}$ 距离的水体所对应的水体后向散射光能量最大。

(2) 当距离大于 $z_{i,\max}$ 时,随着距离增加,系统接收的水体后向散射光能量逐渐减小,且近似呈指数规律下降。

3 水体后向散射光变化规律的实验验证

由于 ICCD 是用图像形式体现接收到的能量,若不考虑 ICCD 的暗电流噪声和读出噪声,在第 i 次成像,ICCD 所成图像的平均灰度为 $I_m(i)$,则有:

$$I_m(i) \propto kQ(i), (i=1,2,\dots,N) \quad (15)$$

式中, k 为比例系数, $Q(i)$ 为常数。

即在对系统探测范围内水体等间隔成像时,所得图像平均灰度的变化规律就是水体后向散射光能量的变化规律。

为对不同距离的水体后向散射光变化规律进行验证,按照表 1 中参量搭建水下距离选通成像系统,在该实验系统中,激光器是一台光抽运 Nd:YAG 倍频激光器,发射 532nm 的蓝绿脉冲激光,单脉冲能量 200mJ,脉宽 7ns,工作频率 10Hz,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 要求的晶体管-晶体管逻辑电路(transistor-transistor logic, 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是 750V ~ 1450V。

为避免系统重叠系数对水体后向散射光变化规律的干扰,把初始开门时间设为 $t_g(0) = 130\text{ns}$,选通门宽 $\tau_d = 10\text{ns}$,得到了不同距离的水体后向散射光图像,其中前 6 帧如图 3a ~ 图 3g 所示,用图像的平均灰度反映每次成像时 ICCD 接收到的水体后向散射光能量,图像序列的平均灰度随着距离的变化规律如图 4 所示。从实验结果可以看出,随着水体与 ICCD 距离不断增大,其所对应的图像的平均灰度不断下降,从而验证了当激光光斑完全进入视场后,ICCD 接收到的水体后向散射光能量随着距离增大近似呈指数规律下降的规律。

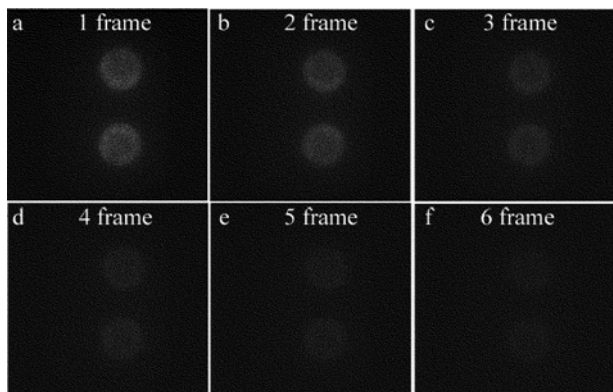


Fig. 3 Experiment result of water backscattering energy changing with distance

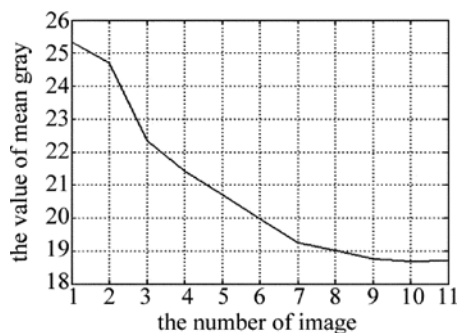


Fig. 4 The change rule of image mean gray value

4 结 论

研究了距离选通水下成像系统在采用等步长搜索策略进行目标搜索过程中,ICCD 接收水体后向散射光能量的变化规律。建立了 ICCD 接收水体后向散射光能量计算模型,推导了单次成像时 ICCD 接收水体后向散射光能量的计算公式,给出了选通成像系统在搜索目标过程中,ICCD 接收到水体后向散射光能量的变化规律仿真计算结果。根据 ICCD 显示图像的平均灰度和 ICCD 接收到水体后向散射光能量的对应关系,利用实验中得到水体后向散射光序列图像平均灰度验证了 ICCD 接收到水体后向散

射光能量的变化规律。根据 ICCD 接收的水体后向散射光能量变化的异常,可判断该次成像所对应的水体范围内是否存在目标,而选通参量又能确定目标的距离,目标距离确定后,距离选通成像系统就能调整各种控制参量,获得效果较好的目标图像。

参 考 文 献

- [1] JAFFE J S, MOORE K D, McLEAN J, *et al.* Underwater optical imaging: status and prospects [J]. *Oceanography*, 2001, 14(3): 64C76.
- [2] GE W L, HAN H W, ZHANG X H. A new kind of underwater photoelectric imaging system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7382: 73824T.
- [3] MEDONALD T E, YATES G J, GVERNA F H, *et al.* Range gated imaging experiments using gated intensifiers [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3642: 142-148.
- [4] BAI L F, ZHANG Y, CHEN Q, *et al.* Some questions in the realization of range gated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 57-61 (in Chinese).
- [5] HAN H W, ZHANG X H, GE W L. 3-D noise analysis of underwater laser image sequence [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(4): 518-521 (in Chinese).
- [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] HUANG Y W, JIN W Q, WANG X, *et al.* Theoretical optical backscattering model for staring underwater laser imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1192-1198 (in Chinese).
- [8] LI L, GAO ZH Y, WANG X, *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).
- [9] HAN H W, ZHANG X H, GE W L. The study of maximum detecting performance of underwater laser rang-gated imaging system based on a model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(1): 0109001 (in Chinese).
- [10] HAN H W, ZHANG X H, GE W L. A variable step scan method for underwater range-gated imaging [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 226-229 (in Chinese).