

文章编号: 0253-2239(2010)12-3464-07

# 基于多帧水下距离选通图像的三维重构方法

李海兰 王霞\* 金伟其 白廷柱 黄有为 丁琨

(北京理工大学光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 为了突破水下距离选通系统成像的景深局限,综合借鉴激光雷达成像理论与图像重构过程中的优点,结合实验室水下激光距离选通成像系统的实际情况,具体分析了通过水下选通序列图像获取距离信息的过程。针对不同水质产生的不同水下选通图像特点采用目标与背景相减、相邻图像按周期加微小时间偏移量取极值然后层层递进重构以及分割重构等算法进行处理,并用不同距离的选通序列场景“切片”对该算法进行了实验验证,最终重构成一幅包含 8.2~13.2 m,共计 5 m 距离范围的所有“切片”目标的图像。为进一步说明重构图像中所包含的距离信息,用三幅图像合成了一幅含有 10.7~13.2 m 距离信息的伪彩色图像。

**关键词** 成像系统;水下成像;距离选通;重构;三维显示

**中图分类号** TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103012.3464

## 3-Dimensional Reconstruction Based on Underwater Range Gated Images

Li Hailan Wang Xia Jin Weiqi Bai Tingzhu Huang Youwei Ding Kun

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** In order to conquer the depth of field limitation in underwater range-gated imaging, the advantages of laser radar imaging theory and images reconstruction are taken, considering the reality of our laboratory, range information acquisition process of underwater range gated serial images is analyzed in detail. In view of the characteristics of range gated images obtained in different quality water, subtracting background image from object image, choosing maximum layer progressive reconstruction among adjacent images according to period plus tiny time offset and reconstruction after segmentation are used to images. Serial scene “slices” in different range is attained to testify the proposed algorithm. An image comprising objects in all “slices” from 8.2 to 13.2 m is reconstructed. In order to explain the range information in the reconstructed image, a pseudo color image is reconstructed by three adjacent images containing range information from 10.7 to 13.2 m.

**Key words** imaging systems; underwater imaging; range gated; reconstruction; 3-dimensional reconstruction

## 1 引言

水下环境复杂,成像条件恶劣,但对海洋宝库探索的执着使得各种水下探测理论、技术及应用发展迅速,即使在国内也备受关注<sup>[1~5]</sup>。距离选通可以有效抑制后向散射噪声的切片式成像一直颇受欢迎,

但景深限制是它的瓶颈。

与传统二维(2D)成像技术相比,水下三维(3D)成像可以提供更丰富的图像信息,为改进算法以及人类的水下探索提供了强有力的理论和实验支持。海洋中的高分辨率 3D 成像技术一直都非常困难。

收稿日期: 2010-03-09; 收到修改稿日期: 2010-04-11

基金项目: 国家 863 计划(2006AA09Z207)资助课题。

作者简介: 李海兰(1979—),女,博士研究生,主要从事光电成像及图像处理等方面的研究。

E-mail: lihailan119@hotmail.com

导师简介: 白廷柱(1955—),男,博士,教授,主要从事光电成像、光电检测和图像处理等方面的研究。

E-mail: tzhbai@bit.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: angelniuniu@bit.edu.cn

本文电子版彩色效果详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

根据目前的调研,关于水下 3D 成像最早开始于 1999 年美国海军研究局支持的项目<sup>[6]</sup>,采用条纹管雷达成像系统在海水中进行高分辨率 3D 成像,36 inch (1 inch = 2.54 cm) 处的横向分辨率大于 0.5 inch,距离分辨力大于 1 inch。真正受到各国的关注集中于 2004 年至今。成果较显著的主要有美国<sup>[6~9]</sup>、新加坡<sup>[10~14]</sup>、丹麦<sup>[15]</sup>、法国<sup>[16]</sup>、加拿大<sup>[17]</sup>、德国<sup>[18]</sup>和意大利<sup>[19,20]</sup>等。中国关于水下 3D 成像方面,海洋大学于 2008 年提出了基于激光数字扫描网格的水下目标探测 3D 信息实时显示方法<sup>[21]</sup>,该方法可以有效抑制宽视场的后向散射噪声,同时获取不同探测点间的相对深度信息。

本文综合各国的水下 3D 成像成果,尤其是对比新加坡<sup>[10~14]</sup>和丹麦<sup>[15]</sup>的激光雷达成像理论与图像重构过程中的优缺点,结合实验室水下激光距离选通成像系统的实际情况,对水下距离选通系统序列图像进行了重构及其 3D 显示研究,从而扩展了选通系统图像景深,增强了图像效果。

## 2 水下距离选通主动成像原理及系统

### 2.1 水下距离选通主动成像原理

距离选通主要是基于对激光束与接收器选通进行精确控制从而对空间中特定距离处的场景进行探测。主动成像系统的具体操作过程如图 1 所示,其中 ICCD 为像谱强型电荷耦合器件。首先从激光器发出脉宽为  $t_p$  的脉冲开始计时,所产生的脉冲前行到所要观察的场景,这期间接收器选通关闭。此时,由成像系统附近空气中或水中的粒子所产生的后向散射便不会影响接收过程(如图 1 中的过程 1 所示)。经过时间  $t$  后,激光脉冲到达所要观察的场景

区域,光遇到目标被反射(该过程与反射系数有关),或者没有遇到目标继续前行(如图 1 中的过程 2 所示)。经过时间  $2t$  以后,由所观察的场景反射的光到达接收器,选通开启(如图 1 中的过程 3 所示)。接收器积分(选通保持开启)的“光切片”的厚度和光强分布取决于选通时间  $t_g$  和激光脉宽  $t_p$ 。如果激光脉宽  $t_p$  等于接收器选通时间  $t_g$ ,那么  $t$  时刻到达目标被反射的所有的光便全部有效地积分在像面传感器上。另外,也可以通过对  $t_g$  和  $t_p$  进行不同的调整从而获取不同的结果。

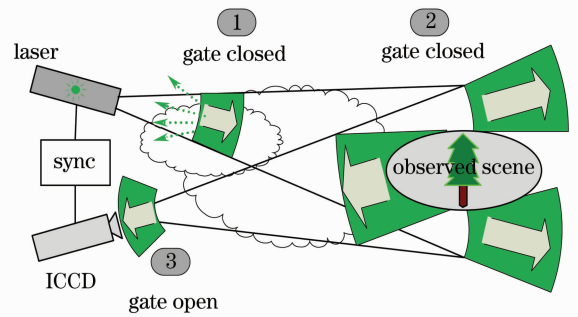


图 1 距离选通成像原理

Fig. 1 Principle of range gated imaging

### 2.2 水下距离选通成像系统

距离选通水下激光成像系统由大功率脉冲激光器、纳秒级选通型微光 ICCD、选通同步控制系统和 16 m 聚氯乙烯(PVC)水道组成<sup>[22,23]</sup>。系统组成框图如图 2 所示。该系统的主动照明光源为灯抽运紧致型 Q 调制 Nd:YAG 激光器。成像器件选用 18 mm 超二代近贴式微通道板像增强器运用光锥耦合技术与电荷耦合器件(CCD)耦合的微光 ICCD。实验水道为建在实验室楼道里的 16 m 长的 PVC 管,观察窗为镀有蓝绿光增透膜的光学玻璃。

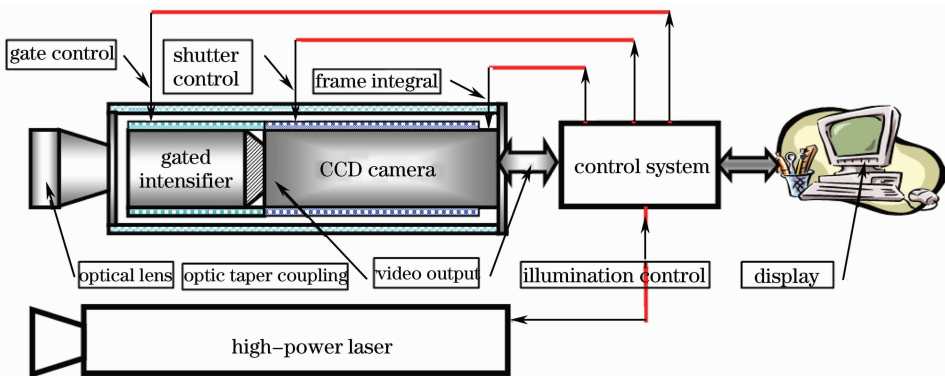


图 2 水下激光距离选通成像系统构成图

Fig. 2 Configuration of underwater range gated laser imaging system

### 3 水下选通图像距离信息的获取

假设激光脉冲为理想的方波,脉宽为  $t_p$ ,则激光脉冲  $L_p(t)$  的方波可以表示为

$$L_p(t) = \begin{cases} 1, & \forall t \in [0, t_p] \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

接收器的理想增益函数可以表示为

$$G(t) = \begin{cases} 1, & \forall t \in [t_o, t_o + t_g] \\ 0, & \text{others} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $t_o$  为选通开启时间,  $t_g$  为选通时间。选通开启时间定义为接收器参考距离  $r^0$  的函数:

$$t_o(r^0) = \frac{2}{v}r^0, \quad (3)$$

式中  $v$  为光在水中的传播速度,即  $2.25 \times 10^8$  m/s。开启时间对应于激光脉冲的前端经参考距离  $r^0$  反射后回到接收器的时刻。 $t_g$  为给定的选通时间,选通关闭时间定义为

$$t_c(r^0, t_g) = \frac{2}{v}r^0 + t_g. \quad (4)$$

也可以用距离代替时间,则  $t_g$  时间内光在水中所经过的距离为  $r_g$ ,那么选通关闭时间还可以定义为

$$t_c(r^0, r_g) = \frac{2r^0 + r_g}{v}. \quad (5)$$

当激光脉宽  $t_p$  等于选通时间  $t_g$ ,选通关闭时间对应于激光脉冲的末端经参考距离  $r^0$  反射后回到接收器的时刻。如果  $t_g < t_p$ ,也就是选通时间比激光脉宽短,部分激光脉冲将被损失掉。为了提高利用效率,选通时间和激光脉宽最好选择为  $t_g \geq t_p$ 。这样,如果  $t_g > t_p$ ,在大于  $r^0$  的距离  $r^*$  处反射的激光脉冲也能够完全回到接收器。时间  $t^*$  对应于距离  $r^*$  处返回的激光脉冲的末端到达接收器的时刻,由以下公式给出

$$t^*(r^*, r_p) = \frac{2r^* + r_p}{v}, \quad (6)$$

由  $t^*$  对应于选通关闭时间的限制条件可以导出

$$t^*(r^*, r_p) = t_c(r^0, r_g), \quad (7)$$

解方程可以得出

$$r^* = r^0 + \frac{r_g - r_p}{2}. \quad (8)$$

因此,激光脉冲贡献最大的距离范围为

$$[r^0, r^*] = \left[ r^0, r^0 + \frac{r_g - r_p}{2} \right]. \quad (9)$$

此外,即使接收器不能对  $r^*$  之后反射的全部激光脉冲进行积分,也仍然会有部分激光进入到接收器中。部分激光脉冲的贡献会随距离的增加而线性减小一直到在距离  $r^+$  处完全消失。对于激光脉冲

前端到达  $r^+$  并返回到接收器所需的时间  $t^+$  表述为

$$t^+(r^+) = \frac{2}{v}r^+, \quad (10)$$

当把  $t^+$  对应于选通关闭时间作为限定条件时,

$$t^+(r^+) = t_c(r^0, r_g), \quad (11)$$

解方程(11)得到

$$r^+ = r^0 + \frac{r_g}{2} = r^* + \frac{r_p}{2}, \quad (12)$$

因此,激光脉冲贡献线性减小直至消失的范围为

$$[r^*, r^+] = \left[ r^0 + \frac{r_g - r_p}{2}, r^0 + \frac{r_g}{2} \right]. \quad (13)$$

为了便于理解和计算,将线性减小区间的激光贡献能量针对激光脉冲的整体贡献进行标准化,则该区间范围内的距离  $r$  处,部分激光脉冲贡献  $P(r)$  为

$$P(r) = \frac{2(r^0 - r) + r_g}{r_p}, \quad r \in [r^*, r^+] \quad (14)$$

同理,接收器对在  $r^0$  前面所反射的部分激光脉冲也会进行积分。对应于激光脉冲的末端,部分激光脉冲的贡献会随距离的减少而线性减小,直至完全消失在  $r^0$  前面的距离  $r^-$  处。对于激光脉冲末端到达  $r^-$  并返回到接收器所需的时间

$$t^-(r^-, r_p) = \frac{2r^- + r_p}{v}, \quad (15)$$

当把  $t^-$  对应于选通开启时间作为限定条件时,

$$t^-(r^-, r_p) = t_o(r^0), \quad (16)$$

解方程(16)得出  $r^-$  为

$$r^- = r^0 - \frac{r_p}{2}, \quad (17)$$

因此,激光脉冲贡献线性增加部分从零到最大值的范围是

$$[r^-, r^0] = \left[ r^0 - \frac{r_p}{2}, r^0 \right]. \quad (18)$$

同样相对于整体贡献进行标准化,该距离区间范围内的距离  $r$  处,部分激光脉冲贡献为

$$P(r) = \frac{2(r - r^0) + r_p}{r_p}, \quad r \in [r^-, r^0], \quad (19)$$

$P(r)$  的通用表达式为

$$P(r) = \int_0^{+\infty} G(\tau)L_p(\tau - t)d\tau, \quad (20)$$

对于距离  $r$  处的光返回接收器所需的时间为  $t = \frac{2}{v}r$ ,

则有

$$P(r) = \int_0^{+\infty} G(\tau)L_p\left(\tau - \frac{2}{v}r\right)d\tau. \quad (21)$$

根据以上分析得出图像中像素强度随距离的变化分布如图3所示。该分布图中的  $P(r)$  只是一个

相对值,即表示距接收器  $r$  处反射的激光脉冲对图像形成过程的相对贡献。由图可以看出,强度分布图的上升沿和下降沿相等且仅取决于激光脉宽,可梯形的平顶极值部分既取决于激光脉宽,又与选通距离有关。

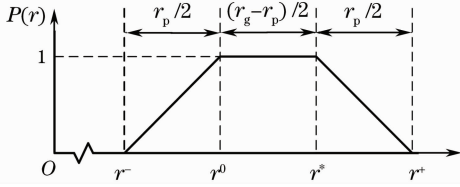


图 3 距离强度分布图

Fig. 3 Range-intensity profile

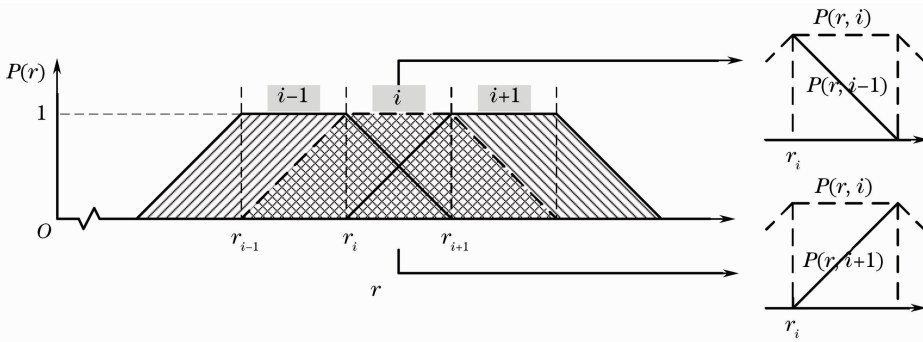


图 4 重叠选通图像距离强度分布图

Fig. 4 Overlapping range-intensity profile of successive gated images

由以上分析可以看出,不管是在  $[r^-, r^0]$  范围内还是在  $[r^*, r^+]$  范围内测得的两像素强度比值都可以推导出距离  $r$  的表达式,因此最少用连续的两幅选通序列图像便可以获得所成像空间的连续的距离信息。为了简化处理,激光脉宽与选通时间关系选择最好是  $t_g = t_p$ , 或者是  $t_g = 2t_p$ 。由图 4 可见,如想通过多幅连续选通图像序列获取长距离的重构,扫描步长最好选择为  $t_p/2$ 。

#### 4 水下选通图像 3D 重构

根据新加坡南洋理工大学对水下雷达成像的研究成果<sup>[10~13]</sup>,高散射介质的选通图像信号中后向散射峰的时间范围由激光脉冲参数确定,而目标反射峰的位置则取决于目标距离<sup>[14]</sup>。因此,可以用不同距离的选通序列图像显现不同深度信息的视觉场景。在浑浊度较低的情况下,目标反射峰通常比后向散射峰要高,也就是目标反射信号占优,融合图像场景中的每个部分可以由选通图像序列中具有最大信号强度(忽略后向散射峰以后)的相应片段构成。但是当成像介质的浑浊度较高时,后向散射峰占优,

图 4 为用于 3D 重构的三幅连续的相互重叠的选通序列图像距离强度分布图。设在第  $i$  幅图像中像素强度为  $P_{\max}$  处的  $P(r, i) = 1$ ,该反射元的实际空间位置在第  $i$  个光切片的  $[r_i^0, r_i^*]$  距离范围内。则在第  $i$  幅图像中该点处于梯形距离强度分布图的平顶极值区域。设该反射元在第  $i+1$  幅图像和第  $i-1$  幅图像中的相应点的光强分别为  $P(r, i+1)$  和  $P(r, i-1)$ 。则由图 4 及(19)式可知该像素代表的深度信息可以分别表示为

$$r = r_{i+1}^0 - \left[ 1 - \frac{P(r, i+1)}{P(r, i)} \right] \cdot \frac{r_p}{2}, \quad (22)$$

$$r = r_{i-1}^* + \left[ \frac{P(r, i-1)}{P(r, i)} - 1 \right] \cdot \frac{r_p}{2}. \quad (23)$$

用选最大值法融合的图像则大部分都是噪声,该方法失效。

结合前文的分析以及图 4 可以看出,选最大值法应适用于剔除后向散射噪声等各种噪声的理想情况。也就是图像的灰度值应该为主动照明产生的灰度值。为了将非主动照明产生的杂光剔除掉同时不影响距离重构图像的精确度,用照明场相减的方法来达到这个目的,即选通序列图像减去没有主动照明的背景图像。

图 5 为用于距离选通图像重构的原始序列图像,最后一幅为相同实验条件下将选通照明置于目标后面较远处所获得的背景图像,其余目标选通成像距离范围为 8.2~13.2 m。该序列图像的获取系统为图 2 所示的水下距离选通成像系统,其成像条件分别为:最大峰值功率为 4 W 的 532 nm 激光器,重复频率为 20 Hz,激光脉冲为 5 ns;选通控制的增益电压为 800 V,雪崩电压为 300 V,相对延迟变化范围为 55~100 ns,扫描步长为 5 ns,选通时间为 10 ns;图像接收部分所采用的镜头为 75 mm 定焦镜头;16 m 管道中充满水并融有平均粒径为 3  $\mu\text{m}$

的二氧化硅消光粉,水体的衰减系数为  $0.669 / \text{m}$ , 浑浊度为  $0.33 \text{ NTU}$ 。成像的目标为管道 4 孔和 5

孔分别置有斜放的木板以及置于 6 孔的铁块和标准分辨率靶,其中铁块置于标准分辨率靶的前面。

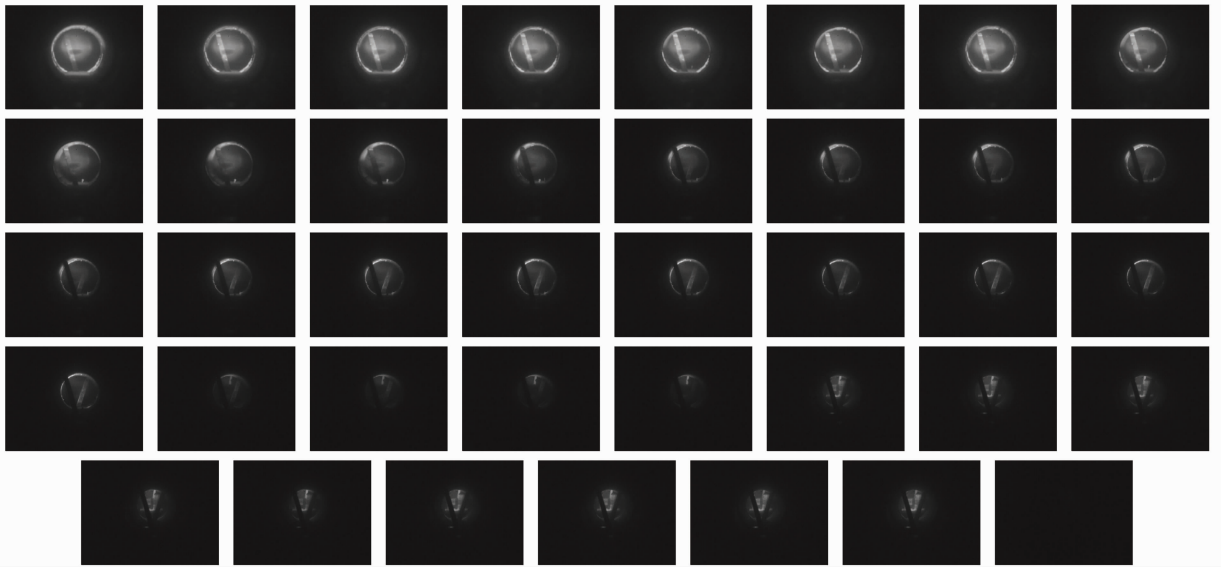


图 5 原始序列图像及其背景图像

Fig. 5 Original serial images and its background images

由成像条件,  $t_g = 2t_p = 10 \text{ ns}$ , 则光切片的厚度为  $1.6875 \text{ m}$ 。由图 4 可知, 观察参考点附近的  $0.5625 \text{ m}$  范围内被照亮的目标才能获得整个激光脉冲积分, 由于扫描步长为  $5 \text{ ns}$ , 所以从  $8.2 \sim 13.2 \text{ m}$  的每一个点都会被完全照亮。这也就意味着在这种情况下每个像素在距离  $[r^-, r^0]$  范围内要被照亮一次, 同时在距离  $[r^*, r^+]$  范围内也会被照亮一次。所以图 5 均为“重叠”的连续光切片图。

由于光功率与观察场景中目标距离的平方成反比, 因此该选通图像序列中前面的图像亮度明显高于后面的图像, 并且水体中的粒子散射强度更厉害, 图像中的噪声也比较强。后面的图像虽然受水体粒子散射累积影响比较大, 但是相邻图像间的噪声效果差别不是很明显。因此对目标与背景相减以后的

图像序列采用相邻图像按周期加微小时间偏移量取极值, 然后层层递进的方法进行重构。在图像重构的中间阶段, 观察图像的特点, 对因照明较强散射较严重的重构结果图像要进行分割, 如图 6(a) 所示。水道中心的水体散射部分的强度较大, 如果直接与其后的重构结果图像[图 6(b)]进行重构, 后面的图像细节将完全被淹没。分割边界的选取可以参照重构结果图像自身[图 6(a)], 也可以参考其相邻的重构结果图像[图 6(b)]。最后将分割的结果图像与其他不需要分割的过程图像进行取极值重构获得最终的距离选通重构结果图像。图 6(c) 为水道内  $8.2 \sim 13.2 \text{ m}$ , 总计  $5 \text{ m}$  的场景的选通重构结果图像。



图 6 距离选通图像重构结果

Fig. 6 Reconstructed result of range gated image

整个图像重构过程为:1)目标与背景相减;2)相邻图像按周期加微小时间偏移量取极值后层层递进重构;3)对因照明较强散射严重图像进行分割(在浑浊度较低的散射介质中成像,此步骤可以省略);4)对结果图像取极值重构;5)获得最终的重构结果图像。由图 6(c)的结果图像可以看出,该图像包含了前面 8.2~13.2 m 图像序列中的所有目标信息,可以清晰地看到放置在水道的 4 孔和 5 孔处的木板,放置在水道 6 孔处的铁块及标准分辨率靶标,甚至可以看到部分管道壁的细节。融合图像整体很有深度感,同时去除了大量的散粒噪声和脉冲噪声,图像对比度相较于原始图像也有了很大程度的提升。

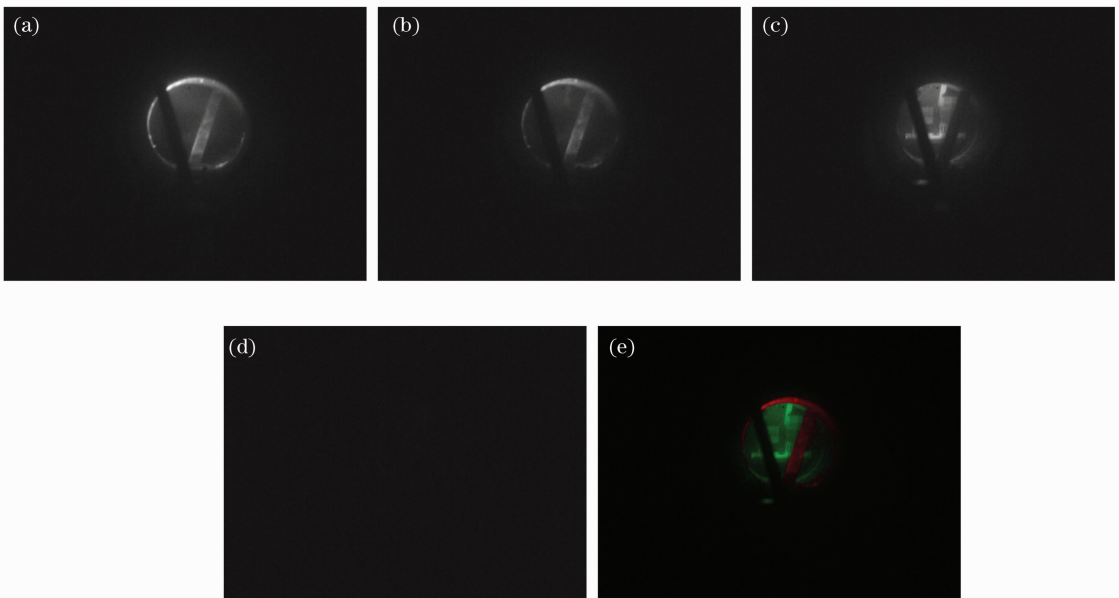


图 7 伪彩色图

Fig. 7 Pseudo color image

## 5 结 论

结合实验室水下激光距离选通成像系统的实际情况,建立了水下激光选通图像距离信息获取模型,以特定的操作方式对观察场景产生一系列的图像序列“切片”,并由图像序列复原出了场景的第三维即深度信息。针对不同水质产生的水下激光距离选通图像采用特定的算法进行重构处理,并进行了实验验证。结果表明,重构图像可以较好地展现大景深范围的全部信息。虽然视觉效果较好,但本文所提的算法仅适用于定焦图像,且照明场要小于视场。普适算法可以进一步从图像分割和图像拼接角度考虑。本文所用到的延迟时间仅为选通控制程序输入的相对延迟时间,选通电源输入触发信号的响应时间和系统同步控制器件间的延迟时间均未考虑在

为了进一步说明选通序列重构图像中的深度信息,在图 5 实验中选取相对延迟时间分别为 80, 85 和 90 ns 的三幅选通图像[图 7(a)~(c)所示]及其背景图像[图 7(d)],其余成像条件均与图 5 相同,则根据图 4 及 (22), (23) 式可得水道中 10.7~13.2 m 的伪彩色深度图像,如图 7(e)所示。图中红色表示 10.7 m 附近的目標,绿色表示 13.2 m 附近的目標,颜色的深浅与目標远近相对应。由于该图像中的目標深度不是很明显,尤其标准分辨率靶标为一平面目標,因此绿色的层次感不是很强,但红色的木板因为是倾斜放置,可以明显看出红色的深浅变化,也就是距离的变化。

内,此为结果误码率差源之一。另外,激光脉冲并不是方波,距离强度频图的边缘可以用误码差函数进行修正,如此表达式将非常复杂,这是影响最终结果的另一个误差源。

## 参 考 文 献

- 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
- Xia Min, Yang Kecheng, Zheng Yi *et al.*. Influence of wavy sea surface on airborne lidar underwater beam quality with monte Carlo Method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 178~182  
夏珉, 杨克成, 郑毅等. 用蒙特卡罗法研究波动水表面对机载海洋激光雷达水下光束质量的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 178~182
- Yang Yuezhong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development

- of real-time hyperspectral radiation sea-observation system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107
- 杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华 等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 102~107
- 4 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
- 5 Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wakes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 14~18
- 王向伟, 周田华, 陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 14~18
- 6 John W. McLean. High resolution 3-D underwater imaging[C]. *SPIE*, 1999, **3761**: 10~19
- 7 William P. Elkins, Bobby L. Ulich, Jeffrey G. Lawrence *et al.*. A 3D lidar sensor for volumetric imaging in highly backscattering media[C]. *SPIE*, 2005, **5791**: 17~28
- 8 Robert Schuelein, Bahram Javidi. Underwater multi-view three-dimensional imaging[J]. *J. Display Technol.*, 2008, **4**(4): 351~353
- 9 Oscar Pizarro, Ryan Michael Eustice, Hanumant Singh. Large area 3-D reconstructions from underwater optical surveys[J]. *IEEE J. Oceanic Engng.*, 2009, **34**(2): 150~169
- 10 Duo-Min He, Gerald G. L. Seet. Novel underwater 3D-target design for measurement of depth of gating (DOG) in underwater lidar Imaging (UWLI)[C]. *SPIE*, 2002, **4768**: 124~135
- 11 Duo-Min He, Gerald G. L. Seet. Underwater lidar imaging scaled by 22.5 cm/ns with serial targets[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(3): 754~766
- 12 Duo-Min He, Gerald G. L. Seet. Optical image sensing through turbid water[C]. *SPIE*, 2005, **5852**: 74~79
- 13 Andrzej Sluzek, Tan Ching Seong. Image formation in highly turbid media by adaptive fusion of gated images[C]. J. Blanc-Talon *et al.* *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2005, **3708**: 194~201
- 14 Ching Seong Tan, Andrzej Sluzek, Gerald Seet. Model of gated imaging in turbid media [J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(11): 116002
- 15 Jens Busck. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar[J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(11): 116001
- 16 V. Brandou, A. G. Allais, M. Perrier *et al.*. 3D Reconstruction of natural underwater scenes using the stereovision system IRIS [C]. Computer Society. OCEANS 2007-Europe. Inst. of Elec. and Elec. Engng. IEEE. Piscataway, NJ, USA: 2007, 0. 1215-051
- 17 François Mirallès, Julien Beaudry, Michel Blain *et al.*. 3D imaging system for inspection of large underwater hydroelectric structures[C]. *SPIE*, 2008, **7239**: 723907
- 18 Marc Hildebrandt, Jochen Kerdels, Jan Albiez *et al.*. A practical underwater 3D-laserscanner [C]. OCEANS 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008, 978-1-4244-2620-1
- 19 Luciano Bartolini, Luigi De Dominicis, Mario Ferri de Collibus *et al.*. Underwater three-dimensional imaging with an amplitude-modulated laser radar at a 405 nm wavelength[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(33): 7130~7135
- 20 L. De Dominicis, M. Ferri de Collibus, G. Fornetti *et al.*. Polarimetry as a valid means to reduce optical noise in underwater 3D imaging by means of amplitude-modulated laser optical radar systems[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(14): 2117~2119
- 21 Bing Zheng, Jialin Hou, Guoyu Wang. An approach of 3D information real-time display for detection of underwater target based on laser digital scanning grid [C]. OCEANS 2008. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008, 978-1-4244-2619-5
- 22 Hailan Li, Xia Wang, Tingzhu Bai *et al.*. Nonuniformly illuminated image enhancement based on range-gated underwater imaging system [C]. *SPIE*, 2008, **7156**: 71563E
- 23 Weiqi Jin, Fengmei Cao, Xia Wang *et al.*. Range-gated underwater laser imaging system based on intensified gate imaging technology [C]. *SPIE*, 2008, **6621**: 66210L