

距离选通水下激光成像系统设计及实验

王磊^{1,2} 徐智勇¹ 张启衡¹ 王华闯¹ 万国良³ 万晶晶³

(¹ 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

³ 华北电网北京送变电公司, 北京 102401

摘要 针对浅水目标探测这一难题,设计了一种基于距离选通技术的水下成像系统。系统围绕 532 nm Nd:YAG 脉冲激光器和选通式增强型电荷耦合器件 (ICCD) 摄像机搭建而成,并且采用激光脉冲作为系统同步控制的触发信号。采用基于现场可编程门阵列 (FPGA) 技术设计的同步控制电路,进行了距离选通水下激光成像实验。实验结果表明,采用激光脉冲触发同步控制电路的方法,可有效抑制激光脉冲抖动对系统同步控制精度的影响,从而克服水体表面反射和后向散射对成像的影响,提高了成像质量。在有效衰减系数为 0.52 m^{-1} 的湖泊中,系统的成像深度可达到水下 7 m,对于浅水目标的探测、识别非常有效。

关键词 成像系统;距离选通;主动成像;同步控制

中图分类号 TN247; TN209

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.051101

Design and Experiment of Range-Gated Underwater Laser Imaging System

Wang Lei^{1,2} Xu Zhiyong¹ Zhang Qiheng¹ Wang Huachuang¹

Wan Guoliang³ Wan Jingjing³

¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ North China Grid Beijing Electric Power Transmission and Transformation Company, Beijing 102401, China

Abstract A range-gated underwater imaging system is designed for solving the problems in detection in shallow waters. The system is built around a pulsed 532 nm Nd:YAG laser and a self-made gated intensified charge-coupled device (ICCD) camera, and the laser pulse is used as the trigger for sync control of the system. The camera gating is timed to collect light reflected from the target to produce the target in the image. The range-gated underwater laser imaging experiment is done based on the sync control circuit designed by field programmable gate array (FPGA) technology. The experimental results indicate that the laser pulse jitter can be restrained by using laser pulse as trigger. As a result, water surface reflection and water backscattering are eliminated effectively and the imaging quality is enhanced. It is also proved that the imaging depth of the system is 7 m in the lake whose effective attenuation coefficient is 0.52 m^{-1} , and the target can be effectively detected and recognized in shallow waters.

Key words imaging systems; range-gated; active imaging; sync control

OCIS codes 110.6915; 010.1350; 030.4280

1 引言

由于水介质的吸收和散射,电磁波在水中的传播距离只有几米。然而 1963 年 Duntley^[1]发现海水中存

收稿日期: 2011-11-14; 收到修改稿日期: 2011-12-19; 网络出版日期: 2012-02-24

基金项目: 中国科学院科技创新基金(A08K001)资助课题。

作者简介: 王磊(1984—),男,博士研究生,主要从事激光水下成像探测方面的研究。

E-mail: wangleiy@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张启衡(1950—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电探测、目标跟踪和光电系统等方面的研究。

E-mail: qhzhang@ioe.ac.cn

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

在一个蓝绿“透明窗口”,为水下成像系统照明光源的选择提供了理论基础。蓝绿激光器以其良好的方向性、高亮度、技术成熟等特点成为照明光源的理想选择。水介质的吸收严重限制了光能量的传输距离,而散射作用降低了图像的信噪比和对比度^[2~5]。主动照明方式不仅增加了照明距离,而且有效克服了被动成像方式易受环境光源影响的缺点,尤其适用于水下目标成像探测^[6,7]。目前主要采用同步扫描^[8]或者距离选通技术^[9]减小散射光对系统成像质量的影响。相对于距离选通技术,同步扫描技术存在一些不足限制了其应用范围。同步扫描技术采用连续激光器,由于连续激光器的功率低,因此单位时间内目标反射的能量少,对探测器的灵敏度要求高,并且连续接收对环境背景光和后向散射光等噪声光的累积不可忽略,这不仅降低了系统信噪比,而且使得成像性能易受环境影响。距离选通技术可以克服传统被动成像和同步扫描成像的许多缺点,其原理为:利用脉冲激光器和选通摄像机,以时间的先后分开不同距离上的散射光和目标的反射光,使被观察目标反射回来的辐射脉冲刚好在摄像机选通工作的时间内到达摄像机并成像。

为了克服背景辐射噪声、水体表面反射和后向散射对成像的影响,本文研究了一种采用激光脉冲作为同步控制触发信号的距离选通水下激光成像系统(RULIS),并进行了实际的成像实验验证系统的性能。

2 原理

水下激光成像原理与激光雷达原理基本相同。系统使用脉冲激光器发射辐射脉冲,辐射脉冲透过水面照明水下目标,接收系统接收目标反射光后成像。激光脉冲在传输过程中受大气衰减、水体表面反射、水体的衰减等干扰而严重影响了系统的成像质量和探测深度。激光脉冲在大气和水体中的传输模型如图 1 所示,图中 ICCD 为增强型电荷耦合器件摄像机。接收系统从高度为 H 的平台接收到水表面的反射能量 $E_{r,s}$ 可以表示为

$$E_{r,s} = \int_0^{\tau} P(tr)(1-T)\eta A_d E \frac{\exp(-2KH)}{2\pi H^2} dt, \quad (1)$$

式中 $P(tr)$ 为激光脉冲的峰值功率, K 为大气衰减系数, T 为水体透射率, A_d 和 E 分别表示接收系统的接收口径和接收效率, τ 为激光脉冲宽度, η 是一个与接收视场角有关的参数,当激光发散角小于 5° 时, $\eta \approx 0.69$ 。

系统接收到水深 L 处目标的反射光能量 $E_{r,t}$ 可以进行估计为

$$E_{r,t} = \int_0^{\tau} P(tr)\rho T^2 \eta A_d E \frac{\exp[-2(KH + \Gamma L)]}{2\pi(H + L/n_w)^2} dt, \quad (2)$$

式中 Γ 为水体有效衰减系数, n_w 为水体的折射率, ρ 为目标的反射率。不妨设图像传感器的探测能量阈值为 E_T , 则系统能够探测到目标回光能量的条件为

$$E_{r,t} \geq E_T. \quad (3)$$

3 成像系统

距离选通水下激光成像系统的原理如图 2 所示。其工作原理为:光电探测器检测到激光脉冲后通过同步控制电路输出带有适当时间延迟的脉冲信号控制像增强器的选通时刻, CCD 相机接收到目标反射光后输出标准视频信号经过模数(AD)转换为数字信号,然后通过图像预处理系统存储到图像记录板。系统在工作过程中,可以通过计算机向同步控制电路发送指令以完成所有的控制及操作。因此,实现该系统的关键是光源和图像传感器的选择及同步控制电路的设计。

3.1 激光器

距离选通水下激光成像系统的激光器应满足以下条件:高能量,窄脉宽,工作波长与海水“透明窗口”相匹配。灯抽运 Nd:YAG 脉冲激光器经倍频后输出 532 nm 的绿光,转换效率高达 50%,经 Q 开关控制可产

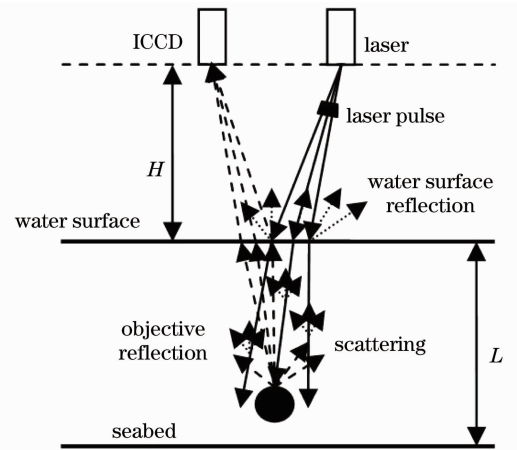


图 1 激光主动成像原理图

Fig. 1 Schematic diagram of active laser imaging

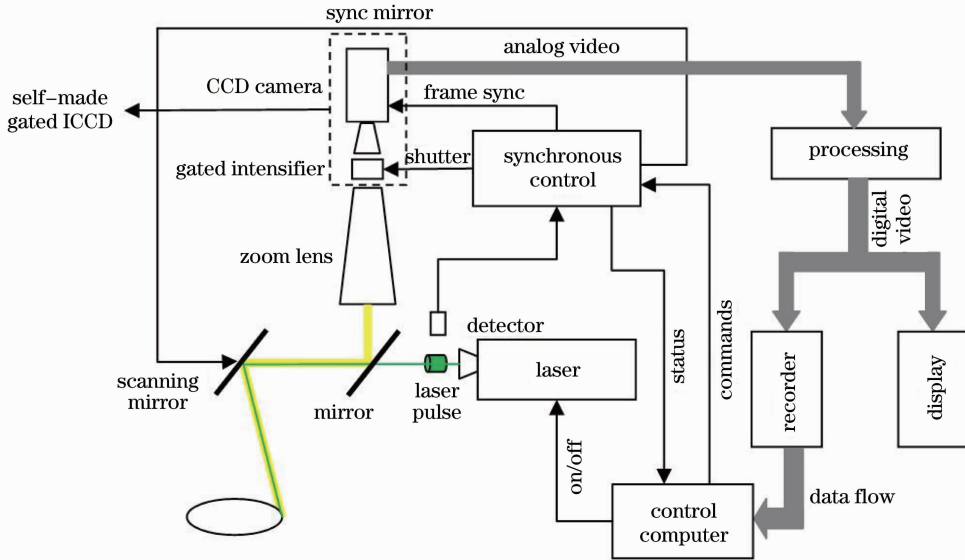


图2 水下激光成像系统原理图。绿线表示激光脉冲的传输路径,黄线表示反射光的路径

Fig. 2 Schematic diagram of optics and electronics of RULIS. The outgoing laser beam path is in green, while the return light is in yellow

生能量达到几百毫焦、宽度仅为几纳秒的激光脉冲。本系统采用单脉冲能量 15 mJ, 脉冲宽度 8 ns, 重复频率 1~50 Hz 可调的 Nd:YAG 多模脉冲激光器。激光脉冲经过扩束装置改变其在水体表面的光照度, 使其满足激光使用安全标准的要求^[10]。

3.2 图像传感器

水下环境要求成像系统具有微弱光成像能力和消除后向散射干扰的选通特性, 这就要求图像传感器必须具备高速的电子快门、高灵敏度、低噪声和足够的增益动态范围, 因此系统需要采用选通式微光成像摄像机。

本系统中自组选通式 ICCD 摄像机由最小选通门宽为 40 ns 的 Gen II+ 像增强器、耦合透镜和 CCD 摄像机组成, 其探测能量阈值为 2.25×10^{-12} J, 结构如图 2 左上角所示。CCD 摄像机输出标准 PAL 制视频信号, 经过 AD 转换后以分辨率为 640 pixel × 480 pixel、灰度级为 1024 (10 bit) 的数字信号形式存储于大规模闪存阵列中。自组 ICCD 前接有一个焦距 50~300 mm 可调的变焦镜头, 最大视场为 21 mrad × 16 mrad。变焦镜头和自组 ICCD 之间安装一个中心波长 534 nm、半峰全宽 60 nm、透射率大于 85% 的窄带滤波片, 用以滤除杂散光。

3.3 扫描方式

采用合适的扫描方式不仅可以增加成像系统的探测范围, 而且可以提高系统的探测效率。目前主要有两种扫描方式: 直线扫描和类圆扫描。直线扫描结构需要两块反射镜, 主反射镜实现宽度方向的扫描, 另一个为校准反射镜, 用来补偿系统前进速度所造成的扫描轨迹的偏斜, 以获得直线扫描点阵。与直线扫描结构相比, 类圆扫描结构只需要一块反射镜, 使系统结构更稳定, 而且合理设计扫描点, 可以减少漏扫现象。

根据菲涅耳定律, 激光入射角小于 30° 时平静海面对蓝绿激光的反射率约为 2%。为了保证系统的探测效率, 扫描角通常小于 20° 。本系统采用扫描角为 15° 的类圆扫描结构, 当系统工作高度为 500 m 时扫描半径可以达到 134 m。

3.4 同步控制

同步控制电路系统产生纳秒级的选通脉冲并对系统各单元的精确同步控制, 是整个系统正常工作并获得高质量图像的关键。目前主要有两种同步控制方式: 调 Q 脉冲同步方式和激光脉冲同步方式。

调 Q 脉冲同步方式的工作原理如图 3 所示。Ex_trigger input 信号控制脉冲激光器的频率。采用脉冲激光器发出的 Q-switch sync output 信号作为同步控制触发信号, 该信号与脉冲发射时刻的时间间隔为建立时间 t_{BT} , $t_{BT} \in [-200 \text{ ns}, 200 \text{ ns}]$ 是一个不确定值。同步控制电路根据触发信号输出延迟 t_{delay} 和宽度 t_{width} 可调的脉冲信号 Sync_int, 其中 $t_{delay} = (H + Ln_w)/v$, v 为光在大气中的传输速度。理论上 Sync_int 信号的

延时 $\Delta T = t_{\text{delay}} - t_{\text{BT}}$, 根据距离信息可以计算 t_{delay} , 但由于 t_{BT} 是一个不确定值, 所以不能准确地估计 ΔT , 误差为 ± 200 ns。

激光脉冲同步方式的工作原理如图 4 所示。硅光电二极管检测到激光脉冲后输出延时为 t_{pd} 的同步控制触发信号 SP sync output。同步控制电路根据触发信号输出延迟 t_{delay} 和宽度 t_{width} 可调的脉冲信号 Sync_int, 其中 $t_{\text{delay}} = (H + Ln_w) / v$, v 为光在大气中的传输速度。理论上 Sync_int 信号的延时 $\Delta T = t_{\text{pd}} + t_{\text{delay}}$, 根据距离信息可以计算 t_{delay} , 而且 t_{pd} ($t_{\text{pd}} \leq 1$ ns) 是一个固定值, 故可以准确地估计 ΔT 。

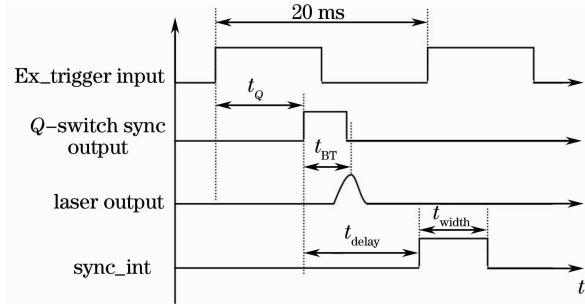


图 3 激光器触发模式

Fig. 3 External trigger mode of laser

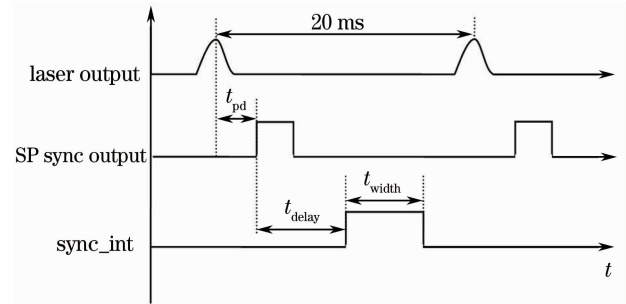


图 4 硅光电二极管触发模式

Fig. 4 External trigger mode of silicon photodiode

由于同步控制电路系统中各个器件的延迟, 同步控制触发信号产生至少 60 ns 后选通式 ICCD 才能接收到选通信号, 因而在空气中无法获得 9 m 之内目标的信息, 即系统的成像“盲区”为 9 m。调 Q 脉冲同步方式的不稳定性虽然可以抵消一部分器件的延时, 减小了系统的成像“盲区”, 但使得成像系统不能对特定距离上的目标进行稳定的成像, 降低了系统的可靠性。所以这种同步方式会严重影响本系统的成像性能。系统采用激光脉冲同步方式, 其工作原理为: 激光器发射激光脉冲, 光电二极管检测到激光脉冲后输出的同步控制触发信号经电平转化输入到现场可编程门阵列 (FPGA) 内, FPGA 根据触发信号输出含有一定延迟信息的选通脉冲, 然后选通脉冲信号经电平转换后送到可编程延时器件 DS1023-100 中进行步长 1 ns 的延迟调节, 最终输出给同步控制单元。同步控制电路系统的延迟精度为 1 ns, 脉宽精度为 10 ns。工作过程中, 主控机通过串口与同步控制电路系统通信, 完成对选通脉冲信号的延迟时间和脉冲宽度的配置。

4 实 验

水下激光成像系统主要参数如表 1 所示。在距离水面高度 11 m 处进行成像实验。漫反射目标为黑白条纹、反射率为 0.4, 面积 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。

表 1 系统主要参数

Table 1 Main parameters of the system

Parameter	Value
Pulse energy / mJ	15
Divergence / mrad	10
Resolution / (lp/mm)	50
Pulse width / ns	8
Aperture / mm	80
Field-of-view angle / mrad	10
System efficiency / %	60
Focal length / mm	50~300
Energy threshold / (10^{-12} J)	2.25

自然光成像实验如图 5 所示。CCD 摄像机接收到水体表面反射光、后向散射光和背景辐射光等噪声光, 降低了图像的对比度。由于摄像机灵敏度的限制, 曝光时间小于 $1 \mu\text{s}$ 时系统无法成像, 增加曝光时间, 图像的亮度明显增强, 但是图像的对比度并没有改善。系统在自然光条件下成像的极限深度约为 3 m。

在距离选通主动照明工作模式下, 选通门宽为 100 ns 时成像结果如图 6 所示。与图 5 比较, 距离选通

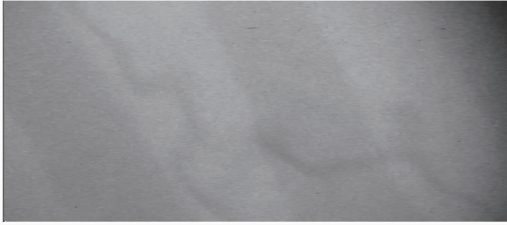


图5 被动成像实验,水深 2 m,选通门宽 $15 \mu\text{s}$
Fig. 5 Passive imaging experiment. The water depth is 2 m, and the gate width is $15 \mu\text{s}$



图6 主动成像实验,水深 3 m,选通门宽 100 ns
Fig. 6 Active imaging experiment. The water depth is 3 m, and the gate width is 100 ns

技术有效屏蔽了水体表面反射光的影响,图像的清晰度和信噪比得到明显的改善。系统的成像极限深度约为 7 m。成像系统在不同深度采集的图像如图 7 所示。因为目标反射能量随传输距离的增加呈指数衰减,所以图像质量下降明显。通过实验发现系统可以接收到水下 10 m 处目标的反射光能量,但是当深度大于 7 m 时图像被噪声淹没,纹理信息丢失,无法识别目标。



图7 距离选通主动照明实验。(a)目标深度 5 m; (b)目标深度 6 m; (c)目标深度 7 m

Fig. 7 Range-gated active imaging experiment. The target is (a) 5 m, (b) 6 m and (c) 7 m underwater

5 结 论

通过实验可以得出以下结论:1)水体表面的反射光对系统成像性能的影响是不可忽略的,同步扫描技术是通过使接收视场和照明视场成一定夹角的方法屏蔽水体后向散射光,但是无法屏蔽水体表面反射的影响,而距离选通技术可以很好地解决这个问题。2)水体后向散射光降低了图像的信噪比,系统接收到后向散射光能量的多少取决于选通门宽度,在系统设计过程中选通门宽等于激光脉冲宽度时为最佳。3)选通快门的准确开启不仅决定了系统的效率,而且影响系统接收的后向散射能量。采用激光脉冲作为同步控制电路的触发信号,不仅提高了同步控制精度,而且抑制了激光脉冲建立时间对同步控制精度的影响。4)水面波浪和湍流引起图像的扭曲和失真,严重影响了系统的成像和识别能力。如何修复波浪和湍流的影响是下一步研究的重点。

本文设计的水下激光成像系统可搭载在各种水上或空中移动平台上使用。在湖泊中($\Gamma=0.52 \text{ m}^{-1}$),系统对实验目标的极限成像深度约为 7 m,是被动成像极限深度的 2.3 倍。要进一步提高系统的成像清晰度和深度,实验系统在光源、图像传感器和同步控制等方面都有很大的提升空间。

参 考 文 献

- 1 Seibert Q, Duntley. Light in the sea[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1963, **53**(2): 214~233
- 2 G. R. Fournier. Range-gated underwater laser imaging system[J]. *Opt. Engng.*, 1993, **32**(9): 2185~2190
- 3 L. R. Marshall. Blue-green lasers plumb the mysteries of the deep[J]. *Laser Focus World*, 1993, **27**(4): 185~197
- 4 J. S. Jaffe. Computer modeling and the design of optical underwater imaging system[J]. *IEEE J. Oceanic Engng.*, 1990, **15**(2): 101~111
- 5 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,眭晓林. 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
- 6 T. E. McDonald. Range-gated imaging experiments using gated intensifiers[C]. *SPIE*, 1999, **3642**: 142~148
- 7 D. David, B. Steve. Long-range laser illuminated imaging: analysis and experimental demonstrations[J]. *Opt. Engng.*,

2001, **40**(6): 1001~1009

- 8 L. J. Mullen, V. M. Contarino. Modulated laser line scanner for enhanced underwater imaging[C]. *SPIE*, 1999, **3761**: 2~9
- 9 T. E. Medonald, G. J. Yates. Range gated imaging experiments using gated intensifiers[C]. *SPIE*, 1999, **3642**: 142~148
- 10 H. M. Zorn, J. H. Churnside, C. W. Oliver. Laser safety thresholds for cetateans and pinnipeds[J]. *Marine Mammal. Sci.*, 2000, **16**(1): 186~200