

# 基于高重复频率脉冲激光的水下全选通成像雷达

钟 炜 张晓晖 管 风 韩宏伟

海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033

**摘要** 在水下高重复频率距离选通成像系统的基础上,设计了一种全选通成像系统。在空间域中,可将整个探测区域划分为多个相互叠加的改进选通切片,一帧图像积分时间内的激光脉冲按照一定规律分布到各个改进选通切片中;在时间域中,在一帧图像积分时间内按照一定规律实现宽选通门对不同激光脉冲回波的等时差移动,使得一帧图像中包含所有距离的目标信息,实现了全选通实时成像。实验对比了连续光成像系统、传统距离选通成像系统和全选通成像系统的成像质量。实验结果表明,全选通成像系统同时具有连续光成像系统探测范围广和距离选通成像系统探测距离远的优点,探测距离大于  $4.5H$  ( $H$  为衰减长度),输出视频的帧率为 20 Hz。

**关键词** 海洋光学;距离选通成像;主动成像;成像雷达

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1101009

## Underwater Full Range-Gated Imaging Radar Based on High-Repetition-Rate Pulse Laser

Zhong Wei Zhang Xiaohui Guan Feng Han Hongwei

Department of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

**Abstract** A full range-gated imaging system is designed based on the underwater high-repetition-rate range-gated imaging system. In the spatial domain, the whole detecting range can be divided into multiple improved gating slices which are superposed mutually, and the laser pulses during the integral time of one image frame are distributed in these improved gating slices according to certain rules. In the time domain, the echo isotime movement of different laser pulses after the wide gate is achieved according to certain rules, the target information of all distances can be integrated into one frame, and the full range-gated images can be obtained in real-time. The imaging quality of the continuous-wave imaging system, the traditional range-gated imaging system and the full range-gated imaging system is compared. The experimental results show that the full range-gated imaging system has advantages of large detection range possessed by the continuous-wave imaging system and long detection distance possessed by the range-gated imaging system. The detecting distance exceeds  $4.5H$  ( $H$  is the decay length) and the frame rate of the output video is 20 Hz.

**Key words** oceanic optics; range-gated imaging; active imaging; imaging radar

**OCIS codes** 010.4450; 010.7295; 110.0113

## 1 引 言

激光成像技术为水下目标探测的重要手段<sup>[1-2]</sup>。连续光成像容易受水体后向散射噪声的影响,探测距离通常小于  $3H$  ( $H$  为衰减长度,定义为水体衰减系数  $w$  的倒数,即  $H = w^{-1}$ )。当水体散射系数较高、光源和探测器距离较近时,连续光成像受水体后向散射噪声的影响尤其明显。距离选通技术是一种基于脉冲激光的成像技术,可选择性地接收不同探测距离的激光回波,有效抑制了水体后向散射噪声,提高了目标探测距离,作用距离通常大于  $4H$ <sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2016-05-09; 收到修改稿日期: 2016-08-06

基金项目: 海装十二五预先研究项目(4010501050401)、海军工程大学自然科学基金(435517D43)

作者简介: 钟 炜(1985—),男,博士研究生,主要从事海洋光学等方面的研究。E-mail: hg\_zhongwei@163.com

导师简介: 张晓晖(1965—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事海洋光学、激光探测技术等方面的研究。

E-mail: zhangxiaohui505@sina.vip.com(通信联系人)

按照单帧图像积分时间内累积的激光脉冲回波个数,将水下距离选通成像系统分为低重复频率系统和高重复频率系统<sup>[4]</sup>。低重复频率系统在一帧图像积分时间内只接收一个激光脉冲回波,激光器重复频率较低。典型的低重复频率系统为 See-Ray 系统(美国 SPARTA 公司)<sup>[5]</sup>。黄有为等<sup>[8-11]</sup>也开展了低重复频率系统样机的研制。高重复频率系统的单帧图像由多个激光脉冲回波累积成像,激光器重复频率较高。典型的高重复频率系统为 LUCIE 系列产品(加拿大国防研究所)<sup>[6-7]</sup>。高重复频率的激光光源可有效减小系统的体积,提高系统的实用性<sup>[12-14]</sup>。

探测距离和探测范围是评价水下激光成像系统的两个重要指标。受水体散射噪声的影响,连续光成像系统的探测距离有限,但探测范围较大,探测距离内所有目标都可以成像;传统水下距离选通成像系统可有效抑制水体后向散射噪声,增加成像距离,但仅针对某一距离的选通切片进行成像,探测范围有限;多帧图像三维重构方法可扩展距离选通成像系统的探测范围,但降低了系统输出视频的帧率<sup>[9]</sup>。高重复频率距离选通成像系统在一帧图像积分时间内包含多个激光脉冲,对单个选通切片中的目标进行有效成像不需要全部激光脉冲,过多激光脉冲将导致图像饱和,因此可以将剩余脉冲用于其他距离选通切片的成像,为全选通实时成像提供了可能。

本文在水下高重复频率距离选通成像系统的基础上,将一帧图像积分时间内的大量激光脉冲按照一定规律分配到不同距离的改进选通切片中,实现了探测区域的全选通实时成像。该方法同时具有连续光成像系统探测范围大和传统距离选通成像系统探测距离远的优点。

## 2 全选通成像雷达的工作原理

由于水体的后向散射作用和目标的反射特性,水下距离选通成像雷达发出的激光脉冲在传播过程中遇到水体和目标时都会向选通相机产生携带反射体信息的激光脉冲回波。如图 1 所示,假设  $t=0$  时激光脉冲触发信号上升沿; $t=t_1$  时激光脉冲在距离  $l_3$  处的反射回波到达成像雷达,选通相机在门控信号的控制下开门; $t=t_2$  时激光脉冲在距离  $l_4$  处的反射回波到达成像雷达,选通相机在门控信号的控制下关门。通过控制选通相机开关门时刻,可实现  $(l_3, l_4)$  区域的选通成像,通常称该区域为距离选通切片。

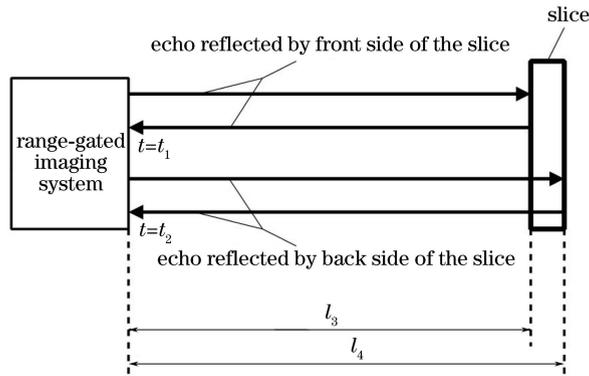


图 1 距离选通切片示意图

Fig. 1 Diagram of range-gated slice

由于消除了  $(0, l_3)$  区域内水体的后向散射噪声,被探测目标在上述选通切片中提高了图像的信噪比。除探测目标外,选通切片中其他水体依然产生后向散射噪声,因此选通切片通常较窄。设选通切片宽度为  $\Delta$ ,此时可以忽略选通切片中的后向散射噪声。从时间域来看,选通切片宽度及其位置可通过选通相机选通门宽度和延迟设置确定。假设激光脉冲宽度为  $\tau_1$ ,增强电荷耦合器件(ICCD)的开门时长为  $\tau_2$ ,不考虑水体对激光脉冲的时域展宽,选通切片的宽度满足

$$\Delta = c(\tau_1 + \tau_2)/(2h), \quad (1)$$

式中  $c$  为真空中光速, $h$  为水体的折射率。

图 2 将探测区域  $(l_1, l_2)$  分为  $n$  个相互连接且宽度为  $\Delta$  的选通切片。当目标在第  $n-1$  个选通切片中时,采用连续光成像系统探测目标,系统将受到第  $1 \sim n-2$  个选通切片中水体后向散射噪声的影响。当水

体散射系数很大时,连续光成像系统无法探测目标。采用传统距离选通成像系统探测目标,可消除第  $n-1$  个选通切片之前的后向散射噪声,提高图像的信噪比。如果将目标移动至第  $n-4$  个选通切片中,系统将目标和水体后向散射噪声都排除在外,因此传统距离选通成像系统具有定距成像的特点,探测范围有限。

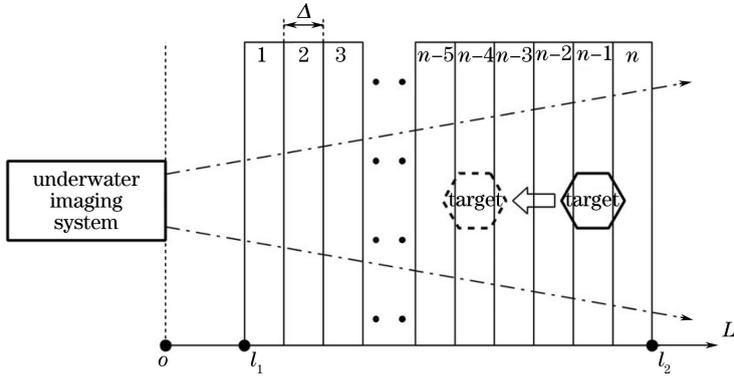


图 2 全选通成像雷达的工作原理

Fig. 2 Working principle of full range-gated imaging radar

考虑到高重复频率系统中一帧图像的积分时间内存在大量的激光脉冲,可以按照一定分布  $f_m$  ( $m=1, 2, \dots, n$ ) 将脉冲数分配到  $n$  个选通切片中,使得一帧图像中包含所有切片的信息,实现全选通实时成像。由于水体对照明光束的衰减作用和激光束的几何发散效果对光束的传输具有一定的影响,因此近距离选通切片中目标有效成像所需的激光脉冲数通常小于远距离的选通切片,即满足

$$f_{m-1} < f_m, \quad m=2, 3, \dots, n, \quad (2)$$

式中  $f_m, f_{m-1}$  分别为一帧图像积分时间内有效探测第  $m, m-1$  个选通片中的目标所需的激光脉冲数。从时间域来看,全选通雷达的工作原理:针对一帧图像积分时间内的大量激光脉冲,按照一定规律将窄选通门对不同激光脉冲回波进行等时差移动,移动时差与选通门宽度相等。

### 3 选通切片改进方法

实际工程应用中,距离选通成像系统的激光脉冲宽度  $\tau_1$  一般大于 10 ns, ICCD 的开门时长一般大于  $\tau_1$ <sup>[11]</sup>。由(1)式可知,选通切片宽度  $\Delta$  通常大于 2 m。当水体散射系数较小时,该宽度的选通切片中水体后向散射可以忽略;当水体散射系数较大时,该宽度的选通切片中水体后向散射将影响全选通成像效果。如果将探测区域划分为上述多个相互连接的宽度为  $\Delta$  的选通切片,激光脉冲宽度将影响全选通成像效果。因此采用图 3 所示方法改进选通切片的划分。

如图 3 所示,将成像区域划分为相互叠加、步进为  $\Delta$ 、宽度大于  $n\Delta$  的改进选通切片。为了获得与改进前相同的激光脉冲数分布,上述  $n$  个改进选通切片中激光脉冲数的分布  $g_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 满足

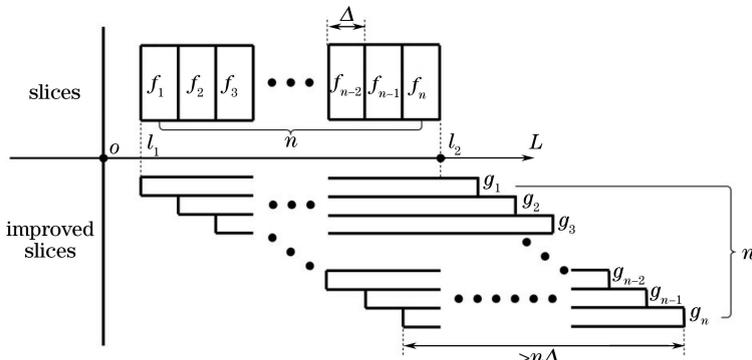


图 3 改进的选通切片示意图

Fig. 3 Diagram of improved gating slices

$$\sum_{i=1}^m g_i = f_m, \quad m = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

式中  $g_i$  为一帧图像积分时间内第  $i$  个改进选通切片分配的激光脉冲数。

采用这种改进方法的优势在于:1) 由于 ICCD 门控信号的步进控制精度通常大于激光脉冲宽度和门控信号宽度,改进的方法可用于更窄的选通切片划分,系统控制灵活性更高;2) 由(3)式可得

$$\sum_{i=1}^n g_i < \sum_{m=1}^n f_m, \quad (4)$$

改进选通切片的划分方法可通过更少的激光脉冲数获得相同的全选通成像效果,这种改进方法提高了激光脉冲利用率,在脉冲总数有限的情况下探测距离更远。

从时间域来看,改进选通切片的原理为:针对一帧图像积分时间内的大量激光脉冲,按照一定规律将宽选通门对不同激光脉冲回波进行等时差移动,宽选通门宽度大于窄选通门宽度之和。

假设一帧图像积分时间内可分配的激光脉冲总数为  $N$ ,则改进选通切片中分布的激光脉冲总数不超过  $N$ ,即

$$\sum_{i=1}^n g_i < N. \quad (5)$$

对于高重复频率脉冲激光全选通成像雷达而言,改进选通切片在一帧图像积分时间内的激光脉冲数分布应当满足(2)、(3)、(5)式。

#### 4 系统组成与实验方法

搭建了水下高重复频率脉冲激光全选通成像雷达系统,系统结构如图 4(a)所示,包括高重复频率激光器、ICCD、PIN 光电二极管、控制器、水箱。实验装置图如图 4(b)所示。

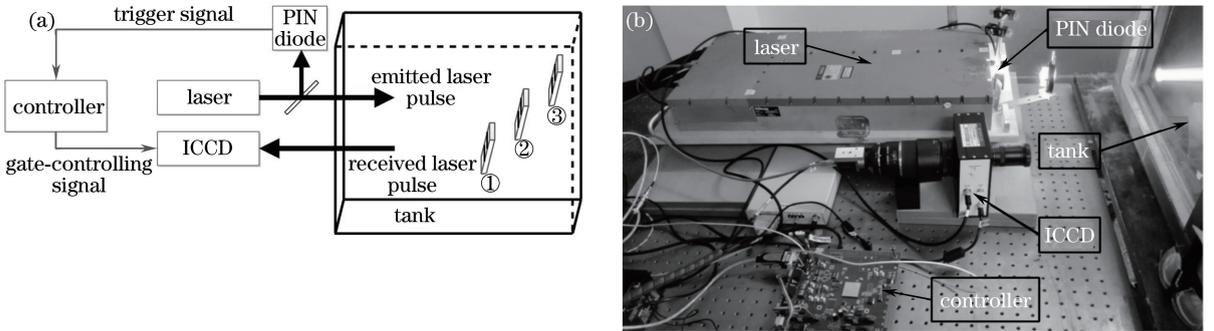


图 4 (a) 系统结构示意图; (b) 实验装置图

Fig. 4 (a) Diagram of system structure; (b) experimental setup

激光器采用调 Q 倍频 Nd:YAG 脉冲绿激光器(Spruce-532/20-A 型,Huaray 公司),激光波长为 532 nm,单脉冲能量为 3 mJ,脉冲宽度为 15 ns,平均功率为 17 W,重复频率为 4~10 kHz,发散角为  $7.4 \times 10^{-5}$  rad。ICCD 由镜头、微通道板(MCP)和 CCD 三部分组成。镜头的  $F$  数为 1:16,焦距在 8~50 mm 范围内连续可调。MCP(Quantum Leap N 型,Stanford Computer Optics 公司)的连续开门最高频率为 200 kHz,开门抖动小于 20 ps。CCD(Mako G-125B 型,Allied Vision Technologies 公司)的曝光时间在  $1.2 \times 10^{-5} \sim 84$  s 范围内连续可调,连续工作最高输出帧率为 30 Hz。使用耦合透镜组连接 CCD 和 MCP。PIN 光电二极管为高速光电二极管(S5973-01 型,日本滨松公司),输出带宽为 1 GHz。控制器采用现场可编程门阵列内部计数器和时钟延时芯片组成的门控信号时域参数控制模块,输出信号的控制精度为 2 ns,信号沿抖动约为 1 ns。水箱长为 5 m,宽为 0.5 m,高为 0.5 m,水深为 0.4 m。实验水体散射系数  $s = 0.121 \text{ m}^{-1}$ ,衰减系数  $\tau = 0.213 \text{ m}^{-1}$ ,水体衰减系数  $\tau$ 、吸收系数  $a$ 、散射系数  $s$  之间满足  $\tau = a + s$ 。为获得更高的水体散射系数,在水中加入适量氢氧化镁粉末将水体散射系数增加至  $0.653 \text{ m}^{-1}$ ,此时水体衰减系数为  $0.931 \text{ m}^{-1}$ 。为了防止水箱壁对照明光的反射对实验结果造成影响,水箱内侧布满黑绒布,其在可见光范围内吸收率大于 99%。

如图 4(a)所示,将 3 个条纹靶板置于水池中,①、②、③号靶板与成像系统的距离  $L$  分别为 1, 3, 5 m。①、②号靶板条纹空间频率为  $0.02 \text{ mm}^{-1}$ , ③号靶板条纹空间频率为  $0.01 \text{ mm}^{-1}$ 。实验步骤:1) 根据控制器的控制精度,将距离成像系统分别为 1 m、5 m 的区间  $[(1 \text{ m}, 5 \text{ m})]$  的区域]平均分为 8 个宽度为 0.5 m 的选通切片,对应的改进选通切片步进为 0.5 m,宽度大于 4 m;2) 根据(2)、(3)、(5)式的要求,确定这 8 个选通切片中脉冲数的分布  $f_m$  以及改进选通切片中脉冲数的分布  $g_m$ ;3) 根据参数设置,由控制器控制一帧图像积分时间内每个门控信号的延迟和宽度,实现对(1 m, 5 m)区域的全选通实时成像。

## 5 实验结果与分析

将连续光成像系统、传统距离选通成像系统和全选通成像系统的实验结果作对比。利用上述高重复频率激光器、CCD 和成像镜头对目标①、②、③进行连续光成像,成像结果如图 5 所示。激光器的重复频率为 4 kHz, CCD 单帧曝光时间为  $10^5 \mu\text{s}$ 。由于光源位于 CCD 左侧,图像中左侧存在明显的水体后向散射噪声。该系统可有效探测目标①,对目标②的探测效果不如目标①,无法探测目标③。

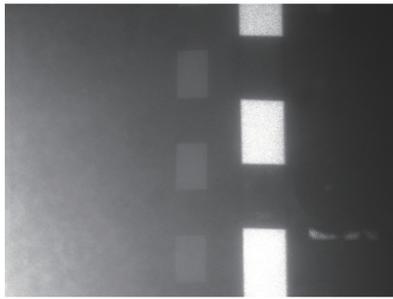


图 5 连续光成像系统的输出图像

Fig. 5 Output image of continuous-wave imaging system

利用高重复频率激光器和 ICCD 组成传统距离选通成像系统,分别在 3 帧图像中对 3 个不同距离目标所在的选通切片成像,成像结果如图 6(a)~(c)所示。激光器重复频率为 4 kHz, CCD 单帧曝光时间为  $5 \times 10^4 \mu\text{s}$ , MCP 增益电压为 800 V,图像中选通切片宽度均为 2.5 m,累积激光脉冲数  $q$  分别为 10, 50, 200。采用该方法可分别实现对 3 个目标的有效探测,但至少需要 3 帧图像才能获得探测范围内的所有信息。如图 6(d)所示,增加选通切片宽度至 7 m,成像系统可扩大距离选通成像的探测范围,且水体后向散射噪声较图 5 更小,这是因为距离选通技术有效抑制了目标①之前的水体后向散射噪声。由于选通切片的宽度增加,水体后向散射噪声增大,影响成像效果,因此无法探测距离较远的目标③。

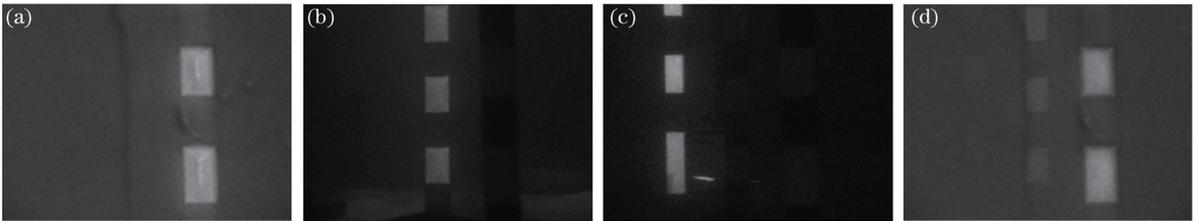


图 6 传统距离选通成像系统对(a)目标①,(b)目标②和(c)目标③的输出图像;

(d) 选通切片宽度为 7 m 时成像系统对目标①的输出图像

Fig. 6 Output images of (a) target ①, (b) target ② and (c) target ③ by traditional range-gated imaging system;

(d) output image of target ① by imaging system when the width of gating slice increases to 7 m

根据所提方法,将整个成像区域划分为相互连接的 8 个选通切片和相互叠加的 8 个改进选通切片。在满足(2)、(3)、(5)式的前提下,进一步假设 8 个选通切片中分配的激光脉冲数  $f_m$  满足

$$f_m = a (L_m + b)^k, \quad (6)$$

式中  $L_m$  为第  $m$  个选通切片的起始位置,  $a$  和  $b$  为模型参数,  $k=3$ 。由传统距离选通成像结果可知,目标①位于第 1 个选通切片中,对其有效成像需要 10 个激光脉冲,即  $f_1=10$ ;目标③位于第 8 个选通切片中,对其

有效成像需要 200 个激光脉冲,即  $f_8=200$ 。利用(6)式,可得到参数  $a=0.7874, b=1.3332$ ,计算其他选通切片所需要的激光脉冲数  $f_m$ ,进而得到改进选通切片所需的激光脉冲数  $g_m$ 。计算得到  $f_1 \sim f_8$  分别为 10, 19, 33, 52, 78, 110, 151, 200,  $g_1 \sim g_8$  分别为 10, 9, 14, 19, 26, 32, 41, 49。

按照上述参数分配一帧图像积分时间内的激光脉冲,从而实现全选通实时成像,成像结果如图 7 所示。激光器重复频率为 4 kHz, CCD 单帧曝光时间为  $5 \times 10^4 \mu\text{s}$ , MCP 增益电压为 800 V, 输出视频帧率为 20 Hz。门控信号波形图如图 8 所示,测量仪器为数字示波器(MDO3000 型, Tektronic 公司),通道 1 为激光脉冲触发信号,通道 2 为 MCP 门控信号。从示波器荧光屏的积分效果可以看出, MCP 门控信号可分为步进为 8 ns、宽度为 50 ns、相互叠加的 8 组波形,并且信号强度依次增强,与上述计算得到的 8 个改进选通切片脉冲数分布情况相符。

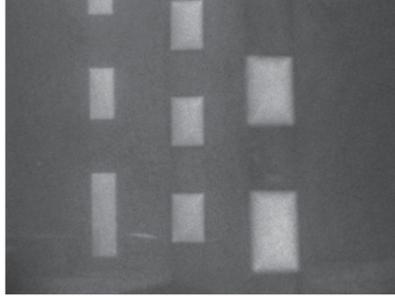


图 7 全选通成像系统输出图像

Fig. 7 Output image of full range-gated imaging system

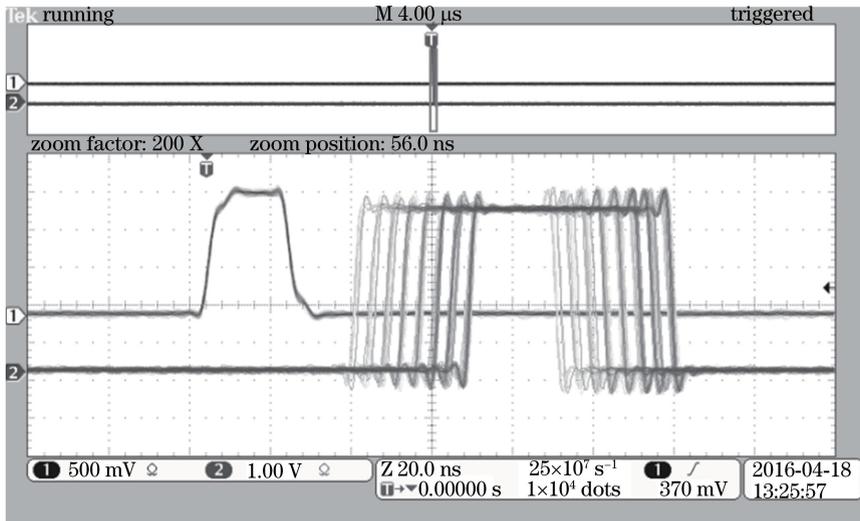


图 8 全选通成像系统门控信号波形

Fig. 8 Gate-controlling signal waveform of full range-gated imaging system

对比图 5~7 可以得到以下结论。

1) 全选通成像雷达可实现对不同距离目标的实时有效探测,探测距离超过  $4.5H$ 。

2) 采用全选通成像方式时,由于第 1~7 个改进选通切片中的后向散射噪声影响图像质量,在图 7 中距离较远的目标③附近仍然可以观察到水体后向散射噪声。传统距离选通成像系统仅对目标③附近的选通切片成像,因此图 6(c)中目标③附近的信噪比优于图 7。换言之,全选通成像方式对目标的探测距离不超过传统距离选通成像系统。

3) 由于第 1~7 个改进选通切片中激光脉冲数小于第 8 个改进选通切片,因此全选通成像雷达系统对目标③的探测效果优于连续光成像系统(图 5)和选通切片宽度增加的传统距离选通成像系统[图 6(d)]。

在目标位置已知的情况下,上述实验利用高重复频率脉冲激光距离选通系统实现了(1 m, 5 m)区域内的全选通成像。实验中已知的目标位置信息有助于划分选通切片的长度和步进,实现激光脉冲在时间上的

分配。(6)式确定的各个选通切片中的激光脉冲数分布  $f_m$  不一定为实现目标有效成像的最佳分布。高重复频率脉冲激光全选通成像系统的选通切片宽度、步进长度以及激光脉冲分配本质上取决于水体和目标特性。下一步研究将从水体的光学特性和系统特征出发,设计更具科学依据的模型;在目标位置未知情况下,设计系统参数,构建系统在整个探测区域分配激光脉冲的策略。

## 6 结 论

基于高重复频率脉冲激光的全选通成像系统将一帧图像积分时间内的激光脉冲按照一定规律分配到不同距离的改进选通切片中,使得单帧图像中包含不同距离目标的信息。基于高重复频率脉冲激光的全选通成像系统和传统高重复频率距离选通成像系统具有同样的硬件基础,可以通过控制器控制模式转换实现两个系统之间的灵活切换以及更为复杂的选通成像,高重复频率激光光源更易于小型化。基于高重复频率脉冲激光的全选通成像雷达有望广泛应用于水下光电成像领域。

## 参 考 文 献

- Hou W L. Ocean sensing and monitoring: optics and other methods[M]. Washington: SPIE Press, 2013: 87-116.
- Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Zhong Wei. Measurements on time-domain broadening of underwater laser pulse propagating based on depth of gating profile[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0612003.  
韩宏伟, 张晓晖, 钟 炜. 基于选通深度曲线的脉冲激光水下传输时域展宽测量[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0612003.
- Jaffe J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging system [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1990, 12(2): 101-111.
- Cao Fengmei, Jin Weiqi, Huang Youwei, *et al.* Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (I)——Underwater laser range-gated imaging technology[J]. Infrared Technology, 2011, 33(2): 63-69.  
曹峰梅, 金伟其, 黄有为, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(上)——水下激光距离选通技术[J]. 红外技术, 2011, 33(2): 63-69.
- Swartz B A. Oceans engineering for today's technology and tomorrow's preservation 1994 II : laser range gated underwater imaging advances[M]. New Jersey: IEEE Press, 1994: 722-727.
- Fournier G R, Bonnier D, Forand L, *et al.* Range-gated underwater laser imaging system[J]. Optical Engineering, 1993, 32(9): 2185-2190.
- Weidemann A, Fournier G R, Forand L, *et al.* Photonics for port and harbor security 2005: in harbor underwater threat detection/identification using active imaging[M]. Washington: SPIE Press, 2005: 59-70.
- Huang Youwei, Wang Xia, Jin Weiqi, *et al.* Temporal model of underwater laser range-gated imaging and pulse stretching[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3177-3183.  
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.
- Li Hailan, Wang Xia, Jin Weiqi, *et al.* 3-dimensional reconstruction based on underwater range gated images[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(12): 3464-3470.  
李海兰, 王 霞, 金伟其, 等. 基于多帧水下距离选通图像的三维重构方法[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3464-3470.
- Han Hongwei, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Study of the mode and maximum detecting performance of underwater laser range-gated imaging system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0109001.  
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.
- Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong, *et al.* Relation between imaging quality and gated-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.
- Wang Fei, Zhao Yuan, Zhang Yong, *et al.* Multi pulse gain-modulated three-dimensional imaging system[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(8): 1961-1966.  
王 飞, 赵 远, 张 勇, 等. 多脉冲增益调制三维实时成像系统[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 1961-1966.
- Zhong Wei, Zhang Xiaohui, Han Hongwei. Irradiance spatial distribution model of laser source for underwater range-gated imaging radar[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0401005.  
钟 炜, 张晓晖, 韩宏伟. 水下距离选通成像雷达激光照明模型[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0401005.
- Han J F, Luo T, Sun L Y, *et al.* Research of application of high-repetition-rate green laser in underwater imaging system [C]. SPIE, 2013, 8905: 89051Y.