

·激光技术·

水下高重频距离选通成像雷达盲区消除方法

钟 炜, 张晓晖, 管 风, 韩宏伟

(海军工程大学 兵器工程系, 武汉 430033)

摘 要: 水下距离选通成像雷达能够有效消除水体对光源的后向散射, 提高水下成像作用距离, 但由于系统信号处理固有延迟的影响, 成像盲区限制成为这种方法的主要缺点之一。提出了一种基于激光脉冲异步控制的方法, 在高重频和低重频两种系统上进行对比实验。研究表明, 采用异步控制方法在水下高重频距离选通成像系统上能够成功消除成像盲区限制, 但在低重频系统上会带来图像亮度抖动的缺点。这也是水下高重频距离选通成像系统优于低重频系统的原因之一。

关键词: 海洋光学; 距离选通; 主动成像; 成像雷达

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-04-0022-05

Blind Area Removal Method of Underwater High-repetition-rate Range-gated Imaging Radar

ZHONG Wei, ZHANG Xiao-hui, GUAN Feng, HAN Hong-wei

(Department of Ordnance Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Underwater range-gated imaging radar can not only eliminate back-scattering noise effectively, but also increase the underwater imaging operation distance. Imaging blind area limit is one of the main defects of the method for inherent delay of system signal processing. An asynchronous control method based on laser pulse is proposed to perform comparing experiments on high-repetition-rate and low-repetition-rate systems. Experimental results show that imaging blind area limit can be removed successfully from underwater high-repetition-rate range-gated imaging system by asynchronous control method, but this method would bring gray level jitter to low-repetition-rate system. It is one of the reason that the characteristics of underwater high-repetition-rate range-gated imaging system are better than that of low-repetition-rate system.

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

距离选通成像技术是一种先进的水下光电成像技术, 它采用时间标记的方法将目标反射的激光回波从传输介质的后向散射中区分出来, 使带有目标信息的激光脉冲回波恰好在 ICCD 选通门开启的时段内到达 ICCD 并成像^[1]。水下距离选通成像有低重频(LR)和高重频(HR)两种工作模式^[2]: 低重频系统在 ICCD 的一帧成像时间内只接收一个来自目标的激光脉冲回波信号, 即 ICCD 的选通门在一个成像周期内只打开一次; 而高重频系统在一帧成像时间内需要多次开关 ICCD 的选通门, 以便其上累

积多个由目标反射的激光脉冲回波信号, 从而达到既通过时间标记技术剔除水体的散射光噪声, 又采用多重曝光累积成像技术获得加强目标信号的目的。另外高重频系统还能够有效消除图像散斑噪声^[3], 提高系统探测效率。美国的 SPARTA See-Ray^[4]、瑞典的 Aqua Lynx^[5] 是典型的低重频系统, 加拿大的 LUCIE 系列^[6] 是典型的高重频系统。在国内, 北京理工大学^[7] 曾开展了低重频系统样机的研制工作, 课题组分别于 2008 年和 2014 年成功研制了低重频^[1] 和高重频^[8] 系统样机。

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 海军工程大学自然科学基金项目(435517D43)资助课题

作者简介: 钟炜(1985-), 男, 博士, 从事海洋光学研究; 张晓晖(1964-), 女, 博士, 教授, 从事海洋光学、水下成像、光电工程研究。

水下距离选通成像系统通常都采用同步控制方式,由激光脉冲触发信号控制ICCD开门时间,接收带有目标信息的当前激光脉冲回波。由于系统控制器、ICCD、线缆对于选通门控信号传播和处理的固有延迟以及系统结构上的约束,激光雷达在近距离处存在探测盲区,一般在10 m以内,但通常不会小于5 m。杨述斌^[9]采用激光器内部控制信号作为同步控制器触发信号的方法缩短了盲区,但无法完全消除。提出一种异步控制方式,由激光脉冲触发信号控制ICCD开门时间,接收带有目标信息的下一个激光脉冲回波。该方法在低重频和高重频系统上应用结果表明,采用异步控制方式能够有效消除水下高重频距离选通成像雷达盲区限制。

1 水下距离选通成像系统组成

图1为水下距离选通成像系统组成。

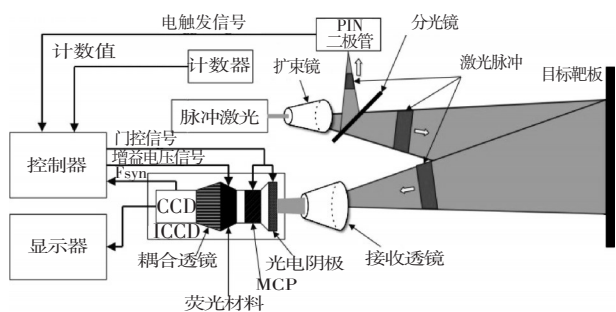


图1 水下距离选通成像系统组成

基本工作原理为,脉冲激光器发出532 nm激光脉冲经过扩束镜照明目标靶板,其中部分光能量由分光镜反射到PIN光电二极管上,转化为电触发信号(trigger signal)。控制器根据触发信号产生延迟和宽度可控的门控信号(shut signal)来控制ICCD光电阴极和微通道板之间的电压实现快门开闭,在目标反射激光脉冲到达ICCD时,快门打开接收信号,其余时间快门关闭抵制水体后向散射噪声。CCD每秒钟输出20帧图像,在每帧图像积分开始时发出帧频信号(F_{syn}),同步控制器此时开始对触发信号进行计数,完成计数器预先设定计数值(pulse number)后,同步控制器在这一帧时间内不再发出门控信号,直至下一帧频信号到来,开始第二次计数。每一帧时间内,携带目标图像信息的激光脉冲信号都会根据预先设定的计数值在CCD芯片上累积,在帧结束时以视频信号形式输出到显示器。控制器还

可以通过增益电压信号(gain voltage)来控制ICCD的微通道板的增益电压。

图2为低重频和高重频系统的工作信号。

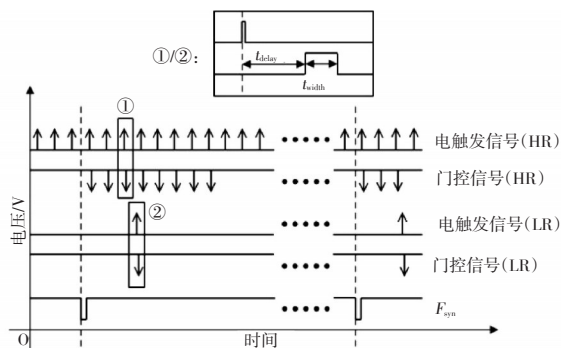


图2 低重频和高重频系统工作信号 (HR为高重频系统;LR为低重频系统)

在低重频系统(LR)中每一帧时间内只能接收一个激光脉冲回波;在高重频系统中每一帧时间内能接收多个激光脉冲信号,每一帧图像由多个激光脉冲累积而成,脉冲累积数可以通过同步控制器的计数值来控制。

2 异步控制原理

脉冲激光器发出周期为 T 的激光脉冲,并由PIN光电二极管探测转化为激光脉冲触发信号。由于线缆信号传输、控制器信号处理等因素的影响,激光脉冲触发信号和ICCD快门开门时刻之间存在固有延迟 t_0 。图3为同步和异步控制信号时序图。

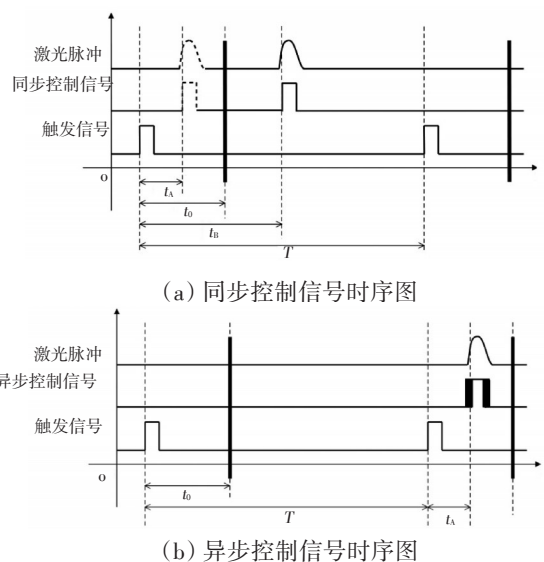


图3 同步和异步控制信号时序图

如图3a所示,当系统采用同步控制方式时,由当前发射激光脉冲所得到的触发信号,通过控制器产生门控信号来控制ICCD快门开门时间,从而接收带有目标信息的当前激光脉冲回波。假设激光脉冲触发信号上升沿时刻为 $t=0$,固有延迟 t_0 ,ICCD开门时刻 t_{delay} 满足下式

$$t_{\text{delay}} = t_0 + t_{\text{set}} \quad (1)$$

其中, t_{set} 为控制器设定的时间延迟。系统选通探测距离 l_s 满足下式

$$l_s = \frac{t_{\text{delay}}c}{2n} = \frac{t_0c}{2n} + \frac{t_{\text{set}}c}{2n} \quad (2)$$

$\downarrow \qquad \qquad \downarrow$
 $l_0 \qquad \qquad l_{\text{set}}$

式中, c 为光在真空中的传播速度; n 为水体折射率; l_0 为系统探测盲区。

图4为水下距离选通成像盲区。

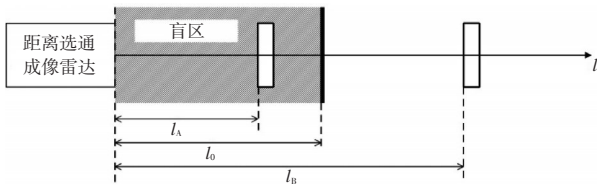


图4 水下距离选通成像盲区

结合图4可知,同步控制模式下,距离选通激光雷达无法接收 t_0 之前返回的激光脉冲回波,也就是说,在探测 $(0, l_0)$ 范围内,系统无法正常探测 $l=l_A$ 附近选通切片内的目标,即雷达系统存在探测盲区。当目标处于探测盲区范围外 $l=l_B$ 附近选通切片时,可通过控制器设定延迟为

$$t_{\text{set}} = \frac{2n(l_B - l_0)}{c} \quad (3)$$

则通过由当前发射的激光脉冲所得到的触发信号,按照控制器延迟 t_{set} 时间,产生选通门控制信号,即在 t_B 时刻选通相机开启快门成像,雷达系统即可对距离 $l_s=l_B$ 目标完成成像,从而实现对目标的探测。

如图3b所示,当采用异步控制方式时,由所述脉冲激光器当前发射激光脉冲所得到的触发信号,通过控制器进行合适的时间延迟,产生的选通门控制信号开启选通相机的快门,可接收由脉冲激光器发射的下一周期激光脉冲经目标反射后的目标激光回波信号,从而实现对雷达探测盲区内选通切片中目标的探测。为了探测盲区范围内 $l=l_A$ 附近选通

切片中的目标,可以将控制器设定延迟设定为

$$t_{\text{set}} = T - t_0 + \frac{2nl_A}{c} = T - t_0 + t_A \quad (4)$$

采用异步控制方式时,激光器脉冲频率稳定度误差将导致不同激光脉冲之间的时域抖动,选通相机开门时刻 t_{delay} 为

$$t_{\text{delay}} = t_0 + t_{\text{set}} = T + \Delta t + t_A \quad (5)$$

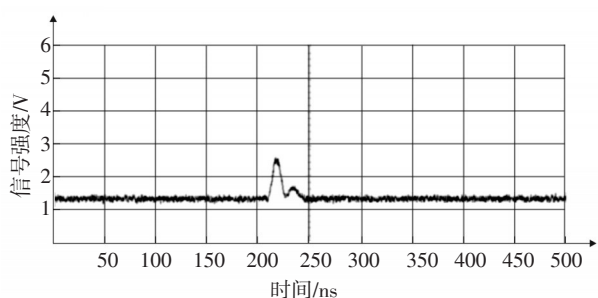
其中, Δt 为激光脉冲时域抖动误差。系统选通探测距离为

$$l_s = \frac{c(T + \Delta t + t_A)}{2n} = l_T + \Delta l + l_A = \Delta l + l_A \quad (6)$$

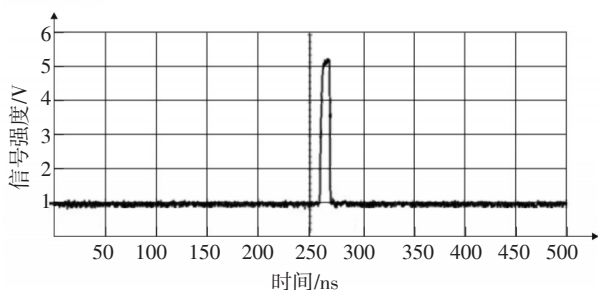
式中, Δl 是由激光脉冲抖动 Δt 造成的探测距离误差,由于当前激光脉冲的目标激光回波信号在下一个周期的激光脉冲发射之前,已经由选通相机接收完毕,即 $l_T=0$ 。因此,当激光脉冲时域抖动误差很小时,即便目标处于探测盲区范围内 $l=l_A$ 附近选通切片时,在水下距离选通体制下,采用异步控制方式仍可通过延迟时间为 $T+l_A$ 的选通门控制信号控制ICCD实现对探测盲区内目标的探测。

3 实验系统设计

低重频系统采用美国 Quantel Laser 公司 CFR200 型 Nd:YAG 调 Q 倍频 532 nm 脉冲激光器,重复频率为 20 Hz,最大脉冲能量为 200 mJ,脉冲半幅宽度为 12 ns。高重频系统采用 Huaray 公司 Spruce-532/20-A 型 Nd:YAG 调 Q 倍频脉冲 532 nm 激光器,重复频率为 4 kHz,频率稳定度为 $<0.6\% \text{rms}@4 \text{ kHz}$,单脉冲能量为 3 mJ@4 kHz,脉冲半幅宽度为 15 ns@4 kHz,平均功率约为 12 W。控制电路主要由 Xilinx 公司 Kintex-7 系列 XC7K160T 型 FPGA 和时钟延迟线芯片(MC100EP169)组成,完成计数和信号延迟功能^[10]。PIN 光电二极管为日本滨松公司 S5973-01 型高速光电二极管,输出带宽为 1 GHz。选通相机采用德国 Stanford 公司的 4Quik Edig 型 ICCD 相机,最小门宽 1.5 ns,时序抖动不超过 50 ps,像增强器直径为 18 mm,门控重复率可达 3 300/200 kHz,输出视频帧率为 20 Hz。实验水池长 5 m,宽 0.5 m,高 0.5 m,水深 0.4 m。水体衰减系数为 0.213 m^{-1} ,水体散射系数为 0.121 m^{-1} ,水体折射率为 1.33。采用 LeCroy 公司 Wave Runner 6200 型数字示波器测量系统处理和传输控制信号固有延迟,该示波器单通道带宽最高可达 2 GHz,最大采样率为 10 GS/s,测量结果如图5所示。



(a) 激光触发信号



(b) ICCD 门控信号

图5 系统固有延迟测量

图5a为PIN光电二极管输出的激光触发信号,图5b为ICCD的门控信号。测量结果表明,系统固有延迟约为43 ns,由式(2)计算可得成像盲区约为4.8 m。

4 实验结果与误差分析

图6为高重频系统采用同步和异步控制方式成像结果对比。如图6a所示,在水箱中由近及远,从右至左分别放置三个黑白靶板,分别记为目标①、②、③,与成像系统的距离分别为1.5 m、3.5 m、5.5 m,水下距离选通成像系统与水箱之间距离0.5 m。

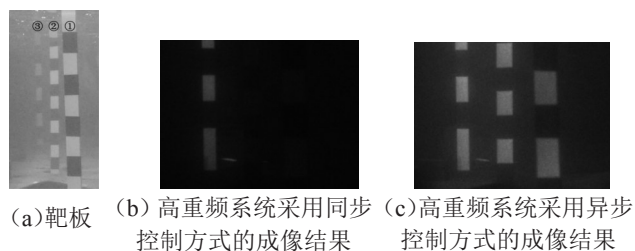


图6 高重频系统采用同步和异步控制方式成像结果对比

水下高重频距离选通成像系统采用同步控制方式和异步控制方式探测结果分别如图6b和图6c

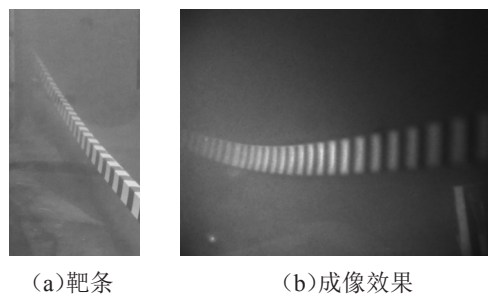
所示。当采用同步控制方式时,由于目标①和②都位于系统成像盲区中,因此系统只能探测位于盲区外的目标③,而图像中目标①和②位置的阴影是因为目标挡住了照明光造成的。当采用异步控制方式时,系统已不存在盲区,三个目标都能够被探测。相应的,水下低重频距离选通成像系统也能获得类似实验结果。实验中系统工作参数设定参考式(2)和式(6)的计算结果和系统固有延迟的测量结果,具体如表1所示。

表1 图6实验结果的系统工作参数

工作方式	激光脉冲能量	脉冲数/帧	t_0	t_{set}	t_{delay}	t_{width}
HR 同步	3 mJ	200	43 ns	0 ns	43 ns	60 ns
HR 异步				250 μ s~43 ns	250 μ s	60 ns
LR 同步	200 mJ	1	43 ns	0 ns	43 ns	60 ns
LR 异步				50 ms~43 ns	50 ms	60 ns

为了尽可能地探测水池中所有目标,ICCD的开门时长 t_{width} 应该足够长,使得探测范围超过整个水池长度。由于水箱内侧都布满黑绒布,其可见光吸收率大于99%,因此增加ICCD开门时长并不会使得成像结果受水箱壁反射光的影响。

为了进一步说明采用异步控制方式能够完全消除系统的盲区,在水箱中放置了长度为6 m的条形黑白靶板,由水下高重频距离选通系统采用异步控制方式对其成像。实验场景照片如图7a所示。该靶板从前至后、从右至左横跨整个水箱,成像结果如图7b所示。



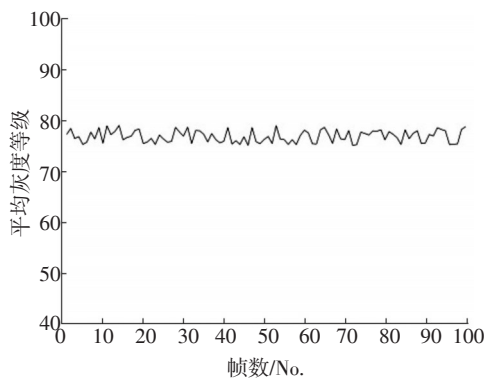
(a) 靶条 (b) 成像效果

图7 高重频系统采用异步控制方式消除盲区后的成像效果

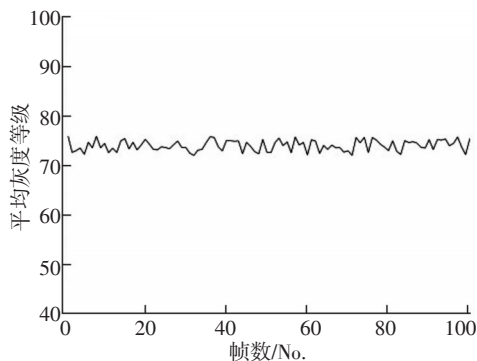
实验结果进一步说明,异步控制方式能够完全消除水下高重频距离选通成像系统盲区。

当水下距离选通成像系统采用异步控制方式时,由于激光脉冲频率的不稳定,选通相机的开门

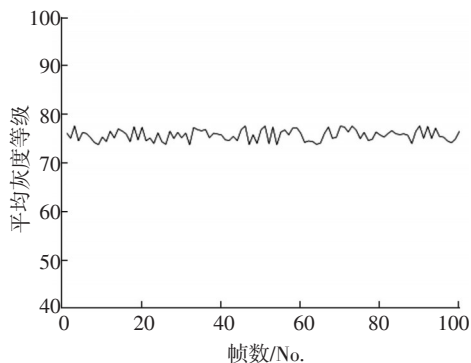
时刻将会产生相应抖动,ICCD的开门时段将不一定是激光脉冲回波最强的时段,这样,激光脉冲抖动将最终影响输出视频的稳定性。实验中由于低重频系统激光脉冲周期远大于高重频系统,因此在相同频率稳定度的情况下,低重频系统激光脉冲抖动要大于高重频系统。文中连续采集了100帧高重频系统和低重频系统的输出图像,靶板设置、系统工作参数与图5、表1一致,选取图像中目标③白条纹区域计算平均灰度,从而分析两种不同系统输出视频的稳定性,实验结果如图8。



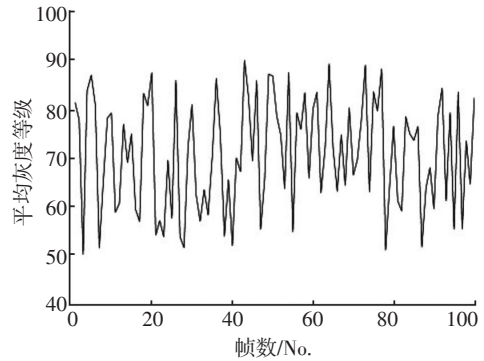
(a)高重频同步控制



(b)高重频异步控制



(c)低重频同步控制



(d)低重频异步控制

图8 高重频和低重频系统输出图像
平均灰度抖动

实验中,调节激光器能量和发散角,使得这4种情况所采集的视频基本处于同一灰度等级,以便进一步的误差分析。

图8a和图8b分别为高重频系统采用同步和异步控制方式的结果,图8c和图8d分别为低重频系统采用同步和异步控制方式的结果。图8a~图8d平均灰度的标准差分别为 $S_a=1.20$ 、 $S_b=1.11$ 、 $S_c=1.17$ 和 $S_d=11.40$ 。从误差分析结果可得到如下结论,(1)两个系统采用同步控制方式时,输出视频灰度会抖动较小,主要原因是水下距离选通成像噪声和CCD光电转换过程不稳定的影响;(2)低重频系统采用异步控制方式时,由于激光脉冲抖动造成ICCD开门时段不一定对应目标③激光脉冲回波最强的时段,输出视频灰度出现很大范围的抖动;(3)高重频系统采用异步控制方式时,输出视频灰度抖动与同步控制方式差别不大。这是由于高重频系统在一帧图像积分时间内累积了200个激光脉冲回波,根据统计学大数定律,当累积脉冲数很大时,由于ICCD开门时间抖动所造成的输出图像灰度误差将忽略不计,此时的输出图像的灰度抖动也主要是由成像噪声和CCD光电转换过程不稳定造成的,平均灰度抖动水平与同步控制方式相差不大。

5 结论

消除盲区限制对于提升水下距离选通成像雷达适用范围具有重要工程意义。提出了一种基于激光脉冲异步控制方法,由激光脉冲触发信号控制ICCD开门时间,接收带有目标信息的下一个激光脉冲回波。搭建了低重频和高重频距离选通成像系

(下转第65页)

参考文献

- [1] 谭显裕. 微光夜视和红外成像技术的发展及军用前景[J]. 航空兵器, 2001(3): 29-34.
- [2] 何丽. 走进新世纪的红外热成像技术[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(12): 48-51.
- [3] 毛峡, 胡海勇, 黄康, 等. 飞机红外辐射及大气透过率计算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(10): 228-1272.
- [4] 陈衡. 红外物理学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985: 100-102.
- [5] 李奇, 林衍庆. 新型红外探测技术的研究[J]. 自动驾驶

仪与红外技术, 2003(3): 2-8.

- [6] 高昕, 李建安. 应用于弹丸跟踪测量的红外器件工作波段选择[J]. 测试技术学报, 2002, 16(3): 192-195.
- [7] 李颖杰, 吕相银. 空间目标的红外辐射理论计算[J]. 红外, 2010, 31(2): 39-43.
- [8] 徐南荣, 瞿荣贞. 飞行器的红外特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 8-14.
- [9] 余常斌, 杨坤涛, 姜宏滨. 红外成像系统作用距离等效折算方法[J]. 光学与光电技术, 2003, 1(3): 53-55.
- [10] 郑贤利, 王俊霖. 镍合金对 γ 射线吸收系数的测量与分析[J]. 核电子学与探测技术, 2013, 33(1): 62-64.

(上接第26页)

统, 并分别采用同步和异步两种控制方式进行对比研究, 从输出视频稳定性讨论了异步控制方式给系统带来的误差。结果表明, 采用异步控制方式在高重频系统中能够成功消除盲区限制, 在低重频系统中会产生输出视频灰度抖动, 从而影响成像效果。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Fournier G R, D.Bonnier, Forand L, et al. Lucie Rovmounted laser imaging system[C]//Proc. SPIE, 1992, 1750: 443-452.

- [4] Swartz B A. Laser range gated underwater imaging advances[C]// Proc. IEEE, 1994, 2: 722-727.
- [5] Andersson A. Range Gated Viewing with Underwater Camera[D]. Sweden: Linköping University, 2005.
- [6] Weidemann A, Fournier G R, Forand L, et al. In harbor underwater threat detection identification using active imaging[C]//Proc. SPIE, 2005, 5780: 59-70.
- [7] 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.
- [8] 戴路, 张晓晖. 脉冲计数可调式高重频水下距离选通成像系统[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(4): 78-82.
- [9] 杨述斌, 彭复员. 激光水下距离选通成像门控实验研究[J]. 激光杂志, 2010, 31(3): 10-11.
- [10] 钟炜, 张晓晖. 水下高重频距离选通成像雷达同步控制器设计[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(3): 55-59.

(上接第49页)

- [2] 于颖, 聂生东. 医学图像配准技术及其研究进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2009, 26(6), 1485-1489.
- [3] Pluim J P W, Maintz J B A, Viergever M A. Mutual-information-based registration of medical images: a survey[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2003, 22(8): 986-1004.
- [4] Maes F, Collignon A, Vandermeulen D. Multimodality image registration by maximization of mutual information[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1997, 16(2): 187-198.
- [5] 张峻豪, 孙焱, 詹维伟. 基于加权互信息的多模图像配

准算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(16), 207-211.

- [6] Viola P, Wells W M. Alignment by maximization of mutual information[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 24: 137-154.
- [7] Studholme C, Hill D L G, Hawkes D J. An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(1): 71-86.
- [8] Pluim J P W, Maintz J B A, Viergever M A. Image registration by maximization of combined mutual information and gradient information. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2000, 19(8): 809-814.