

基于选通深度曲线的脉冲激光水下传输时域展宽测量

韩宏伟 张晓晖 钟 炜

海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033

摘要 时域展宽是脉冲激光在水下传输时的重要特性,直接影响蓝绿激光对潜通信和 underwater 激光成像等水下光电应用的性能。推导了选通深度曲线的特征参数与脉冲激光回波波形参数和增强型电荷耦合器件(ICCD)选通波形参数的关系,从而提出了基于选通深度曲线的脉冲激光水下传输时域展宽测量方法。利用所搭建的高重频脉冲激光水下成像系统,在大型室内船池中进行实验测量。结果表明,所提方法能够有效完成脉冲激光在水下传输时的时域展宽测量,尤其适用于远距离传输的情况。

关键词 测量;水下光电探测;时域展宽;选通深度曲线;方差

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0612003

Measurements on Time-Domian Broadening of Underwater Laser Pulse Propagating Based on Depth of Gating Profile

Han Hongwei Zhang Xiaohui Zhong Wei

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

Abstract Time-domian broadening is one of the very important features of laser pulse propagating underwater, which affects the performances of blue-green laser submarine communication system and underwater laser imaging system directly. The relationship between characteristic parameter of depth of gating (DOG) profile and that of laser echo profile and intensified change coupled device (ICCD) gating profile is deduced, which is the theoretical foundation of the proposed method to measure the time-domian broadening of underwater laser pulse. With the help of the high RPF laser underwater imaging system constructed by our term, the laser pulse time-domian broadening in large-scale tank is experimentally measured. The results show that the method proposed works well and is suitable for the conditions at long range.

Key words measurement; underwater photoelectric detection; time-domian broadening; depth of gating profile; variance

OCIS codes 120.4825; 010.4455; 290.5820

1 引言

脉冲激光在水下传输时,受水分子和水中悬浮微粒的影响,其光学性质将发生变化:一方面,光束在空间上分布不均匀;另一方面,经多次散射仍进入探测器的光子与未经散射的光子到达探测器的路径不同,传输时间不同,前者比后者长,从而导致探测器所接收的脉冲回波波形宽度增加,即产生时域展宽^[1-2]。时域展宽会对水下光电应用产生严重影响。对于水下蓝绿激光通信而言,时域展宽将导致时隙间的串扰,造成误码率的提升^[3]。对于水下距离选通成像而言,时域展宽将影响时序信号的控制精度,降低输出图像的质量^[4]。

因此,脉冲激光水下传输时域展宽的研究是一个非常重要的课题。目前研究光脉冲水中传播特性主要有两种方法:基于 Monte Carlo 法的仿真模拟^[5-6]和现场进行的实验测量。其中,实验测量无疑是最直接和最可靠的方法。一般的实验方法是采用光电倍增管或雪崩二极管直接探测前向散射波形这种非成像方式。但该方法存在光轴难以对准、探测器响应速度不够快、探测器动态范围小的问题。当测量距离较远时,上述

收稿日期:2014-12-17;收到修改稿日期:2015-01-05

基金项目:海军工程大学自然科学基金(435517D43)

作者简介:韩宏伟(1983—),男,博士,讲师,主要从事水下激光成像与图像处理方面的研究。E-mail: powerfire@aliyun.com

问题更加突出,会造成较大的误差。章正宇等^[7]提出了光波门选通法,采用具有高速选通能力的增强型电荷耦合器件(ICCD)作为探测器,通过确定 CCD 像面上读出光子数超过某一阈值所对应的时刻来获得激光波形的时域宽度。该方法利用了 ICCD 高速、低噪声、大增益的优点,但仍为前向探测结构。黄有为等^[8]将上述方法改进为单基模式,从而避免了对准的问题,且采用图像对比度极小值作为判断脉冲激光前后沿到达探测器的依据。

本文在前述两人的工作基础上,提出了一种新的脉冲激光水下传输时域展宽测量方法。该方法通过测量选通深度(DOG)并计算其曲线特征参数来得到脉冲激光的时域展宽情况。介绍了 DOG 的相关背景,然后推导了 DOG 曲线特征参数与脉冲激光波形参数和选通波形参数的关系,进而确定脉冲激光时域展宽测量方案,并给出了实际的测量与计算结果并进行讨论。

2 理论准备

类似于焦深(DOF)的定义,He 等^[9-10]提出了 DOG 的概念,以表征距离选通成像系统^[11]的快速选通能力,并采用其所研制的水下激光照明距离选通成像(ULRI)视频系统和沿系统光轴方向间隔 22.5 cm (光在水下 1 ns 传播的距离)排列的五个平面目标靶板首次测量了特定水体条件下的 DOG 曲线。随后,Jens^[12]提出了动态的 DOG 曲线测量方法。如图 1 所示,其基本思想是采用单一一个目标放置在确定距离 r 处,然后从时间 t_0 开始,以步长 ΔT 逐渐增加距离选通成像系统的延迟时间 t_i (即 $t_i = t_0 + i \cdot \Delta T, i = 0, 1, 2, \dots$),从而获得一系列目标切片图像。由此序列图像上某一像元的灰度值 I_i 沿时间轴变化所描绘的曲线即为 DOG 曲线的采样曲线。

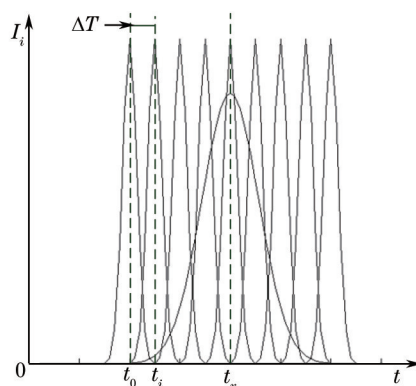


图 1 动态 DOG 曲线测量方法

Fig.1 Method of dynamic DOG profile measurement

对于第 i 次切片成像来说,图像某一像元灰度值 I_i 表征了在选通时间内,ICCD 所接收到的与该像元对应的目标面元所反射的激光回波信号的能量。为简化计算,忽视噪声、激光能量衰减、ICCD 增益等因素的影响^[13],将 I_i 表示为脉冲激光回波的波形 $P(t)$ 和 ICCD 的选通波形 $G(t)$ 的卷积:

$$I_i = \int_{-\infty}^{+\infty} P(t - t_r) \cdot G(t - t_i) \cdot dt, \quad (1)$$

式中 $t_r = 2nr/c$ 为目标回波到达探测器的时间, n 为水体折射率, c 为真空中光速。需要注意的是,这里所述卷积并不是数学意义上的卷积。

3 理论推导

从(1)式中可以看出,DOG 曲线第 i 次采样值的大小与脉冲激光回波波形特征和探测器选通波形特征密切相关,下面进行推导。

3.1 高斯波形

假设 $P(t)$ 和 $G(t)$ 皆为高斯函数波形,且假设随着传输距离的增加, $P(t)$ 的线型不会变化,即脉冲激光的时域展宽只表现为波形宽度的增加,因此

$$P(t) = \exp\left[-\frac{(t - t_r)^2}{2\sigma_r^2}\right], \quad (2)$$

$$G(t) = \exp\left[-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma_g^2}\right], \quad (3)$$

式中 σ_r 和 σ_i 分别为两个高斯函数的方差,可理解为脉冲激光宽度和选通宽度。

将(2)、(3)式代入(1)式并整理可得

$$I_i = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(t-t_r)^2}{2\sigma_r^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma_g^2}\right] \cdot dt = \exp\left[-\frac{\sigma_g^2 t_r^2 + \sigma_r^2 t_i^2 - (\sigma_g^2 t_r + \sigma_r^2 t_i)^2}{2\sigma_r^2 \sigma_g^2}\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(t - \frac{\sigma_g^2 t_r + \sigma_r^2 t_i}{\sigma_g^2 + \sigma_r^2})^2}{\frac{2\sigma_r^2 \sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_r^2}}\right] \cdot dt, \quad (4)$$

式中等式右边最后一项为高斯函数在整个实数轴上的无限积分,因此(4)式可进一步计算得

$$I_i = \sqrt{\frac{2\pi}{\sigma_g^2 + \sigma_r^2}} \sigma_g \sigma_r \exp\left\{-\frac{(t_r - t_i)^2}{\left[\sqrt{2(\sigma_g^2 + \sigma_r^2)}\right]^2}\right\}. \quad (5)$$

由(5)式可以看出,当 t_r 固定, t_i 变化时, $I_i(i=0,1,2,\dots)$ 实际上是对一高斯波形的采样,即 DOG 曲线符合高斯函数线型。更主要的是,该高斯函数的方差 σ 满足:

$$\sigma^2 = \sigma_g^2 + \sigma_r^2, \quad (6)$$

即 DOG 曲线的方差与脉冲激光回波波形方差和探测器选通波形方差呈勾股关系。

因此,在已知 σ_g 的情况下,可以通过测量并计算 DOG 曲线的 σ 来得到时域展宽后的脉冲激光波形的 σ_r ,具体做法是:采用距离选通水下激光成像系统对一目标进行切片成像,该目标与成像系统沿光轴的距离 r 固定且等于待研究水体长度的一半;基于动态测量法获得 DOG 曲线的离散采样值,然后对于获得的数据进行高斯函数拟合,得到方差的估计值;最后根据(6)式得到脉冲激光回波的方差,将该方差与脉冲回波发射时的方差进行比较分析可以得到脉冲激光在水下传输 $2r$ 后的时域展宽度量。

3.2 一般情况

上述讨论基于理想假设,实际上,由于多种原因(如 ICCD 的增益与电压的平方成正比,而不是与电压呈正比), $P(t)$ 和 $G(t)$ 的形状不会是完美的高斯线型,甚至都无法用高斯函数描述^[14]。但即使这样, σ 与 σ_g 和 σ_r 之间仍然满足(6)式所描述的关系。具体的证明过程如下。

根据 DOG 曲线的离散采样数据 $I_i(i=0,1,2,\dots)$ 可得一维变量 t_i 的均值 $\langle t_i \rangle$ 为

$$\langle t_i \rangle = \sum_i \frac{I_i}{I} \cdot t_i, \quad (7)$$

式中 $I = \sum_i I_i$ 。设 $G(t)$ 为轴对称,若延迟时间步长 ΔT 足够小,则可将(7)式的求和近似表示为积分的形式^[15],即

$$\langle t_i \rangle = \frac{\int \left[\int t_i P(t-t_r) G(t_i-t) dt \right] dt_i}{\int \left[\int P(t-t_r) G(t_i-t) dt \right] dt_i}. \quad (8)$$

通过交换积分次序,并引入中间变量 $\tau = t_i - t$,则(8)式可进一步推导得

$$\langle t_i \rangle = \frac{\int \left[\int t_i P(t-t_r) G(t_i-t) dt_i \right] dt}{\int \left[\int P(t-t_r) G(t_i-t) dt_i \right] dt} = \frac{\int P(t-t_r) \left[\int (t+\tau) G(\tau) d\tau \right] dt}{\int P(t-t_r) \left[\int G(\tau) d\tau \right] dt} = \int \frac{tP(t-t_r)}{\int P(t-t_r) dt} dt + \int \frac{\tau G(\tau)}{\int G(\tau) d\tau} d\tau = \langle t \rangle_r + \langle \tau \rangle_g, \quad (9)$$

式中下标 r 和 g 分别为脉冲激光回波波形和选通波形的均值。

同理,

$$\langle t_i^2 \rangle = \langle t^2 \rangle_r + \langle \tau^2 \rangle_g + 2\langle t \rangle_r \langle \tau \rangle_g. \quad (10)$$

由(9)、(10)式可以得到 DOG 曲线的方差为

$$\sigma^2 = \langle t_i^2 \rangle - \langle t_i \rangle^2 = \langle t^2 \rangle_r + \langle \tau^2 \rangle_g - (\langle t \rangle_r^2 + \langle \tau \rangle_g^2) = \sigma_r^2 + \sigma_g^2, \quad (11)$$

从而证明了对于任意脉冲激光波形和选通波形而言,(6)式所描述的关系均成立。

根据上述讨论,对于更一般的情况,脉冲激光水下传输时域展宽测量的后端数据处理算法可根据 DOG 曲线的离散采样数据 $I_i(i=0,1,2,\dots)$ 计算 $\langle t_i \rangle = \sum_i I_i \cdot t_i / I$ 和 $\langle t_i^2 \rangle = \sum_i I_i \cdot t_i^2 / I$ 进行修改,从而得到 DOG 曲线的方差估计,并进而根据(11)式得到脉冲激光的时域展宽情况。

4 实验结果

4.1 实验系统组成

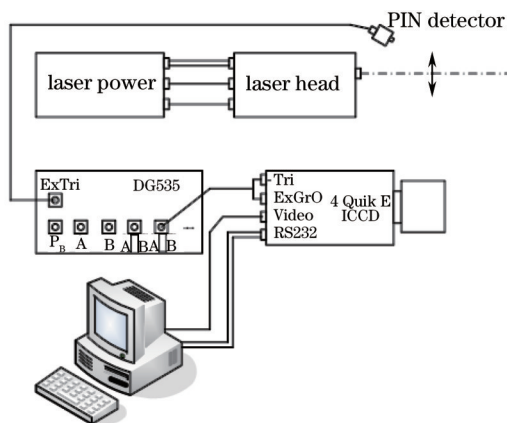


图2 实验装置框图

Fig.2 Framework of experimental equipment

采用本文所提出的方法,对脉冲激光在特定水体中传输时的时域展宽进行了现场实验测量。实验在一室内水池中进行,水池的尺寸为 $6\text{ m} \times 150\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。经测定,该水池水体的衰减系数为 0.15 m^{-1} 。实验中所采用的距离选通成像系统为项目团队所搭建高重频脉冲激光水下成像系统,其组成框图如图2所示。其中,激光器的脉冲重复频率为 10 kHz ,单脉冲能量为 1.7 mJ ,平均功率为 17 W ,脉冲激光时域波形的半峰全宽(FWHM)为 $T_{0.5} = 25\text{ ns}$ 。探测器采用标准模拟视频输出的 ICCD,帧频为 25 Hz ,因此在输出一帧图像的时间内,CCD的光敏面上可累积400个目标回波信号,从而有效减小随机噪声的影响。为了减小因 CCD 像元尺寸导致的固有光程差,ICCD所配的镜头为长焦镜头。整套实验系统采用外触发方式,即出射激光被分光镜后分出一小束照射到正-本征-负(PIN)二极管上,而PIN管所输出的信号作为时间基准信号进入 DG535,再由 DG535 产生门控信号控制 ICCD 的选通。

4.2 陆上定标

从线性系统的观点来看,距离选通水下成像过程可理解为脉冲激光在水体和成像系统这样两个线性系统级联所组成的线性系统中的传输过程。因此,由 ICCD 所测得的脉冲激光在水下传输的时域展宽情况实际上包括了水体和 ICCD 两者的共同作用,即水体对脉冲激光的展宽和脉冲激光转换为光电子后 ICCD 内部放大过程对其的展宽。

为了消除 ICCD 自身的影响,在进行水下实验之前首先应在陆上对系统进行定标。具体做法是:将目标放置在距离选通成像系统前方与水下实验相同的距离处,且激光器、ICCD 及时序参数的设置也与水下实验相同。按本文所述方法可测得一组 DOG 曲线,并计算其方差 σ 。由于脉冲激光传输的距离很短(水下距离选通成像的距离一般不超过几十米),大气散射对脉冲激光的影响可以忽略,因此可认为脉冲激光回波到达 ICCD 时的时域波形与发射时的波形相同,即(11)式中的 σ_r 等于出射激光时域波形的方差 σ_0 ,再将其与 σ_g 一起代入(11)式可得 σ' 。最终,差值 $\Delta\sigma = \sigma - \sigma'$ 就是在进行实际测量时,为消除 ICCD 自身影响所要补偿的偏移量。

4.3 水下实验

实验中所采用的目标为一表面涂有黑白条纹的圆柱形物体,距成像系统的距离为 20 m 。系统的选通宽度为 20 ns ,并以 1 ns 的延迟步长连续采集 100 帧图像。图3所示为该 100 幅序列图像中的第 1、10、20、30、40、50 幅。

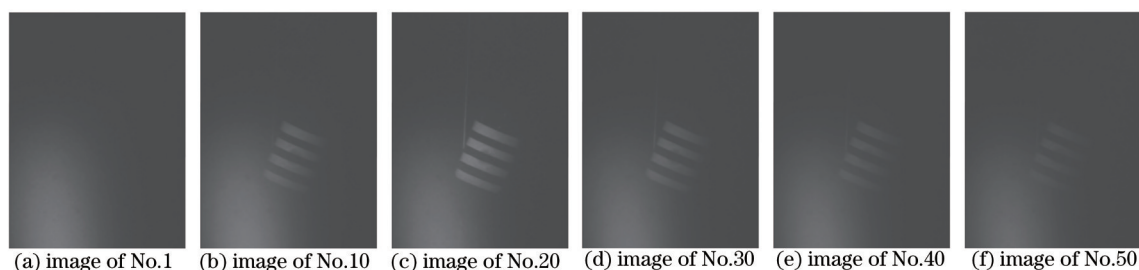


图3 部分序列图像

Fig.3 Part of the sequence images

取图像中心白条纹上的一块区域作为计算对象,则 DOG 采样曲线如图 4 所示。根据 3.2 节所述方法,经计算可得, $\sigma^2 = 822.7608$ 。设 ICCD 的选通波形为阶梯函数,则 $\sigma_z^2 = (t_{gate})^2 / 12 = 33.3333$, 因此 $\sigma_r^2 = 789.4274$ (减去补偿量 $\Delta\sigma$ 后)。根据文献[14],激光脉冲波形取为

$$P(t) = \left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (12)$$

式中 $\tau = T_{0.5} / 3.5$ 。根据(12)式可以得到该波形函数条件下, $T_{0.5}$ 与 σ_r^2 的关系为

$$\sigma_r^2 = 9\left(\frac{T_{0.5}}{3.5}\right)^2 - 6\left(\frac{3.5}{T_{0.5}}\right), \quad (13)$$

因此,可以得到在本文所述水体条件下,脉冲激光在水中传输 40 m 后的 FWHM 为 32.7928 ns,即以 FWHM 来度量,脉冲激光波形展宽了 7.8 ns。图 5 给出了出射脉冲激光与经 40 m 长水体时域展宽后的脉冲激光的波形对比(忽视幅度的变化)。

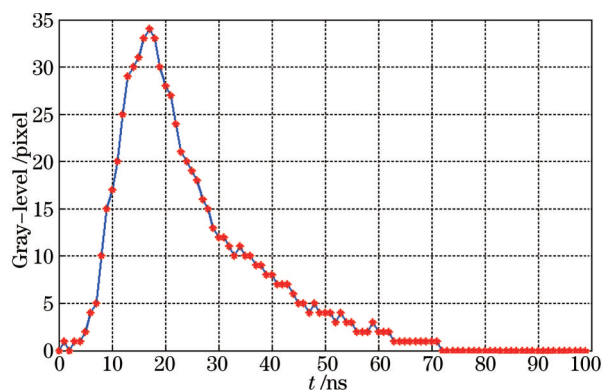


图4 DOG 采样曲线

Fig.4 Sampling profile of DOG

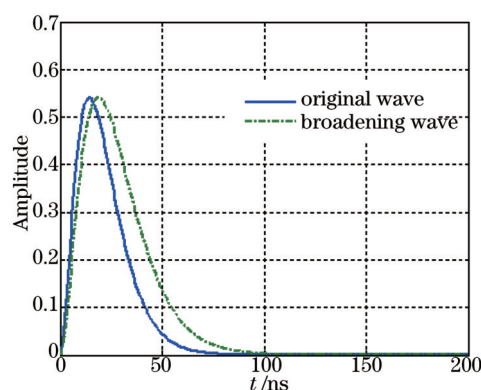


图5 脉冲激光时域展宽前后波形对比

Fig.5 Comparison of wave shape before and after time-domain broadening

4.4 误差分析

在获得实验结果后有必要对结果的可靠性和误差来源进行分析。由于计算的依据是 DOG 曲线的离散采样点,因此采样的频率越高,即延迟步进的长度 ΔT 越短,则计算结果的精度越高。此外,一个非常重要的影响是,对于每增加一次延迟所获得的一幅切片图像而言,形成图像的光通量不仅仅来自目标反射的回波脉冲,而且还包括一段范围内水体的后向散射光[如图 3(a)所示],即实际获得的 DOG 曲线会由于后向散射的影响而产生一定的形变,这必然会对计算结果产生影响。为了消除这种干扰,应合理选择延迟步进开始的时间点。

5 结 论

提出了一种新的脉冲激光水下传输时域展宽测量方法,与已有方法对比,所述方法是直接对脉冲激光波形特征参数的测量和计算,而已有方法中阈值设定与波形特征参数间的关系并不明确。因此,根据所述方法,在已知波形函数具体类型的条件下,可以给出展宽后脉冲激光的逐点分布。此外,所提方法特别适用于测量距离较远的情况。实验验证了所提方法的有效性。下一步的工作是对该方法精度的评估。

- 1 Wu Min, Liu Zhi, Bai Xuhui. Research on time-domain broadening of underwater laser pulse propagating[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 37(4): 133-137.
吴 民, 刘 智, 白旭卉. 水下脉冲激光传输时域展宽特性研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2014, 37(4): 133-137.
- 2 Li Jinwei, Bi Weihong, Ren Yanhui. A method for simulating time-domain broadening of laser pulse in the underwater laser communication[J]. Optical Technique, 2012, 38(5): 569-572.
李仅伟, 毕卫红, 任炎辉. 水下激光通信中脉冲时域展宽的模拟计算方法[J]. 光学技术, 2012, 38(5): 569-572.
- 3 Yin Hang, Liu Zhi, Liu Jianhua, *et al.*. Simulation and analysis on time-domain broadening of underwater laser pulse transmission [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology : Natural Science Edition, 2014, 37(4): 56-59.
尹 航, 刘 智, 刘建华, 等. 水下激光脉冲传输时域展宽仿真分析[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2014, 37(4): 56-59.
- 4 Sun Jian, Zhang Xiaohui, Ge Weilong. Relation between imaging quality and gate-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. 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.
- 5 Wei Anhai, Zhao Wei, Han Biao, *et al.*. Simulative study of optical pulse propagation in water based on Fournier-Forand and Henyey-Greenstein volume scattering functions[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0601003.
魏安海, 赵 卫, 韩 彪, 等. 基于 Fournier-Forand 和 Henyey-Greenstein 体积散射函数的水中光脉冲传输仿真分析[J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0601003.
- 6 Jin Sai, Tan Wenjiang, Liu Xin, *et al.*. Temporal and spatial characteristics of ultrashort pulse propagation in turbid media[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 41(7): 0702004.
靳 赛, 谭文疆, 刘 鑫, 等. 超短脉冲在散射介质中传播的时间和空间特性研究[J]. 光学学报, 2014, 41(7): 0702004.
- 7 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, 睦晓林. 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.
- 8 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.
- 9 Duo-Min He, Gerald G L Seet. Underwater lidar imaging scaled by 22.5 cm/ns with serial targets[J]. Opt Eng, 2004, 43(3): 754-766.
- 10 He Duo-Min. Underwater laser-illuminated range-gated imaging scaled by 22.5 cm/ns with serial targets[J]. Journal of Ocean University of China, 2004, 3(2): 208-219.
- 11 Guo Huichao, Sun Huayan, Fan Youchen. Development status of range-gated laser active imaging technology under atmospheric condition[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100004.
郭惠超, 孙华燕, 范有臣. 大气条件下距离选通激光主动成像技术发展现状[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100004.
- 12 Jens Busck. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar[J]. Opt Eng, 2005, 44(11): 116001.
- 13 Guo Huichao, Sun Huayan, Du Lin. Range information calculation method for 3D imaging based on serial images by time-slice technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(12): 3258-3262.
郭惠超, 孙华燕, 都 琳. 利用时间切片序列图像的三维成像距离信息计算方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3258-3262.
- 14 Pierre Andersson. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images[J]. Opt Eng, 2006, 45(3): 034301.
- 15 Jens Busck, Henning Heiselberg. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar[J]. Appl Opt, 2004, 43(24): 4705-4710.

栏目编辑: 何卓铭