

2D/3D 距离选通成像的低对比度目标探测

王新伟^{1,2}, 曹忆南¹, 刘超¹, 孔庆善¹, 崔伟¹, 周燕¹, 李友福²

(1. 中国科学院半导体研究所 光电系统实验室, 北京 100083;

2. 香港城市大学 机械及生物医学工程学系, 香港 00852)

摘要: 低对比度目标探测在司法取证、反恐维稳、远距离监控、搜救等应用中具有重要意义, 然而传统二维成像方法则难以对其有效探测。由此, 提出了基于 2D/3D 距离选通成像探测低对比度目标的方法: 通过 2D 距离选通成像直接获取目标无背景或背景部分滤除的二维选通图像, 从而突显目标, 简化目标提取图像处理; 当复杂背景无法有效滤除时, 可进一步通过 3D 距离选通成像重建二维选通图像中丢失的三维空间信息, 通过距离图区分目标与背景, 实现目标有效探测。在该方法中, 3D 距离选通成像是基于上述二维选通图像采用超分辨率三维成像反演实现的, 因此无需耗时获取新数据, 从而提高了实时性, 并压缩了数据量。研究和实验表明: 该方法可有效解决低对比度目标探测问题, 在低照度及恶劣天气环境下均可有效工作。

关键词: 距离选通成像; 低对比度目标; 三维成像

中图分类号: TN249 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)09-2854-06

Low contrast target detection based on 2D/3D range-gated imaging

Wang Xinwei^{1,2}, Cao Yinan¹, Liu Chao¹, Kong Qingshan¹, Cui Wei¹, Zhou Yan¹, Li Youfu²

(1. Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. Department of Mechanical and Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 00852, China)

Abstract: Low contrast target detection is important in the applications of evidence gathering, protection from terrorists, remote surveillance, search and rescue, but it is difficult to detect by traditional imaging techniques. 2D/3D range-gated imaging(RGI) was proposed to detect low contrast targets. In our method, 2D range-gated imaging can output two-dimensional gate images of targets with background filtered or partly filtered to silhouette targets and simplify image processing of target extraction. If background is complex in gate images, 3D range-gated imaging can further reconstruct the spatial depth information collapsed in two-dimensional gate images, and then target can be easily distinguished from background by the depth map of target in a scene. Note that 3DRGI is realized by superresolution depth mapping only based on the data of 2DRGI and there is no need to take time to get new data like depth scanning. Therefore, real-time performance is improved, and data volume is also reduced. Our research and experiments demonstrate that 2D/3D range-gated imaging is effective for low contrast target detection, even under low light or bad weather conditions.

Key words: range-gated imaging; low contrast target; three-dimensional imaging

收稿日期: 2014-01-05; 修订日期: 2014-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61205019); 香江学者计划(XJ2012046)

作者简介: 王新伟(1982-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事主动成像、激光三维成像、智能视频监控等方面的研究。

Email: wangxinwei@semi.ac.cn

0 引言

低对比度目标探测在司法取证、反恐维安、远距离监控、军事侦察、搜救、科学调查等应用中具有重要意义。虽然 CCD 成像器件、热成像器件以及微光成像器件等的发明使人类视觉得到了很大延伸,解决了大多数“看”的问题,但是针对低对比度目标,特别是夜间以及雾、雨、雪等低照度、复杂环境下则难以有效探测识别。

造成目标与背景对比度低的原因很多,如恶劣天气及烟尘等引起信号衰减及产生散射噪声、目标与背景光谱反射特征或红外辐射特征接近或一致、环境干扰等。因而利用传统的光学成像与红外热成像很难发现,从而给目标识别带来很大困难。目前人们对低对比度目标探测识别解决途径的探讨主要是从两个层面:一是图像处理层面,即对已获取的低对比度图像进行图像处理实现目标提取;二是图像获取层面,即在图像获取中便采取措施,通过硬件系统或者成像方法的新设计直接获取高对比度图像,从根本上解决问题。当前研究表明三维成像可以有效的探测低对比度目标^[1-4],但是,传统的激光扫描三维成像由于大多采用机械扫描机制,因此存在实时性差的问题,虽然可通过牺牲空间分辨率来提高数据获取的实时性,却满足不了低对比度小暗目标探测的应用需求。文中从图像获取层面提出了一种基于 2D/3D 距离选通成像探测低对比度目标的方法,将二维距离选通成像和三维距离选通成像相结合,发挥各自的技术优势,解决低对比度目标探测问题。

1 工作原理

2D/3D 距离选通成像探测低对比度目标主要是通过二维距离选通成像(two-dimensional range-gated imaging,2DRGI)和三维距离选通成像(three-dimensional range-gated imaging,3DRGI)实现的。

对于传统的非选通成像而言,所成图像为全景图,成像时成像视场内所有目标和背景的信息均被采集输出,如图 1(a)所示,从而易导致目标淹没在背景中,产生低对比度图像。距离选通成像是一种主动成像技术,采用脉冲激光器作为照明光源,采用选通成像器件作为探测器,通过控制激光脉冲和选通脉冲间的延时可实现空间切片成像,过滤背景,同时抑

制大气等后向散射噪声,实现目标探测。

在低对比度目标探测中,当目标与背景存在距离向上的空间差时,通过控制激光脉宽和选通门宽以及两者之间的延时可以实现对空间感兴趣区 ROI 的切片成像,如图 1(b)所示,通过 2DRGI 直接输出无背景的二维选通图像,突显目标,无需后续复杂的目标提取图像处理。选通图像对应的空间切片的位置 R 由激光脉冲和选通脉冲间的延时 τ 决定,其大小为:

$$R = \frac{\tau c}{2n} \quad (1)$$

式中: c 为光在真空中的传播速度; n 为大气折射率。空间切片距离向成像区间为 $\left[R - \frac{t_L c}{2n}, R + \frac{t_g c}{2n} \right]$,切片景深为 $\frac{(t_L + t_g)c}{2n}$,其中 t_L 为激光脉宽, t_g 为选通门宽。

显然,要获取无背景的选通图像除目标与背景存在空间差这一前提条件之外,还需要对激光脉宽、选通门宽和系统延时进行合理的设置。然而在实际应用中,难以预知目标的距离及其与背景的空间关系,从而无法准确设置。但是,对感兴趣目标可根据先验知识给出其尺寸信息,从而依据此信息设置空间切片的景深,以保证单帧空间切片图像中可包含该目标。这样在工作中 2DRGI 可由近及远对视场内场景采用大步长扫描的方式进行快速扫描。在该工作方式下,由于空间环境的不可预知性,因此对于含目标的选通图像存在两种类型:一种是无背景的选通图像,如图 1(b)所示,即目标与背景间存在较大的

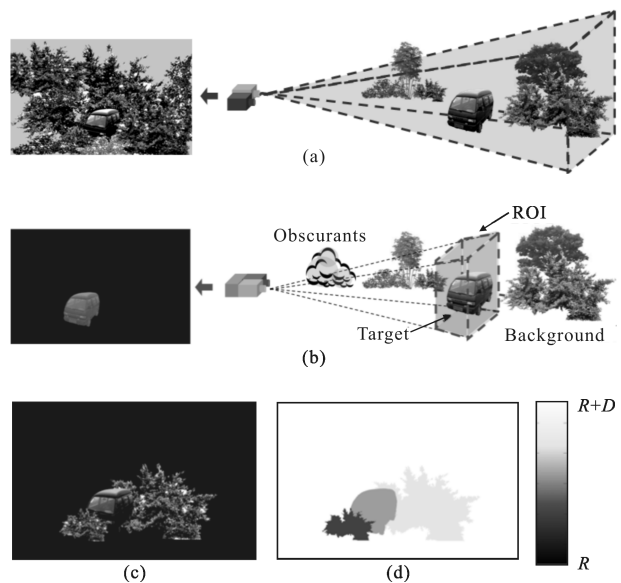


图 1 2D/3D 距离选通成像探测低对比度目标
Fig.1 2D/3D range gated imaging for low contrast target detection

距离差,选通成像时背景被完全滤除;另一种是背景部分滤除的选通图像,如图 1(c)所示,即目标与背景间的距离差较小,导致选通成像时背景无法完全滤除。需指出的是,2DRGI 对三维空间进行选通成像时依然存在空间切片中的空间信息丢失的问题,因此,可通过重建空间切片中丢失的三维空间信息获取背景部分滤除的选通图像对应的距离图像,如图 1(d)所示,进而通过距离图区分目标与背景,实现背景中的目标探测。

2DRGI 和 3DRGI 在探测低对比度目标时各有优缺点:2DRGI 输出的二维强度图像符合人类视觉习惯,但是丢失了空间信息;3DRGI 输出的三维图像或距离图含目标空间信息,利于增强人对环境的感知力,但是丢失了反应目标光谱反射特征等的强度信息。因此,将两者有效结合利于目标的探测识别。传统的距离选通步进延时扫描三维成像主要是通过距离向上的精细切片扫描获取大量的空间切片图像,然后通过图像空间叠加实现三维重构^[5]。这种三维成像方法的数据量大、实时性差^[6],无法满足应用需求。为了将 2DRGI 与 3DRGI 有机结合,文中采用距离选通超分辨率三维成像实现选通图像的空间信息的重建。图 2 给出了基于 2D/3D 距离选通成像探测低对比度目标的工作时序。在文中搭建的成像系统中,采用半导体脉冲激光器作为照明光源,采用具有选通功能的 ICCD 作为成像器件,为了实现远距离目标的有效探测,在工作时序中采用了频闪的工作方式,如图 2 所示。在 CCD 一帧的曝光时间里,

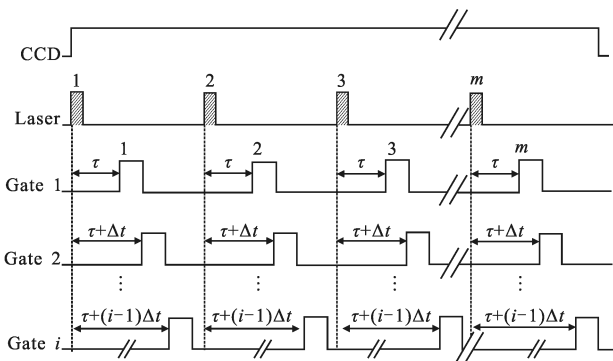


图 2 工作时序

Fig.2 Time sequence

激光器发射多个激光脉冲,相应地成像器件开启多次,形成多个脉冲对,通过控制每个脉冲对中激光脉

冲和选通脉冲间的延时实现选通成像。参考文献[7]的研究表明,通过频闪方式,距离选通成像可实现利用小功率激光器对远距离目标的探测。切片帧 i 对应的空间延时 τ_i 为:

$$\tau_i = \tau + (i-1)\Delta t \quad (2)$$

式中: τ 为初始延时; Δt 为延时步进步长。为了实现超分辨三维成像^[8],选通门宽是激光脉宽的两倍,这样在激光脉冲和选通脉冲的卷积作用下,空间切片图像具有梯形距离能量包络,且相邻切片间存在信号交叠,如图 3 所示,通过建立相邻切片图像间头信号区和体信号区或者是尾信号区和体信号区间像素灰度比与距离能量比之间的关系,便可获取目标的距离信息为:

$$r = R_i + \frac{I_{\text{head},i+1}}{I_{\text{body},i}} D \quad (3)$$

式中: R_i 是空间切片 i 的位置; $I_{\text{body},i}$ 和 $I_{\text{head},i+1}$ 分别是空间切片 i 的体信号区和空间切片 $i+1$ 的头信号区; D 为体信号区的景深。文中头信号区、体信号区和尾信号区与参考文献[8]中的梯形包络的上升区、平顶区和下降区相对应,3 个区域对应景深均为 D ,大小为 $\frac{f_t C}{2n}$ 。

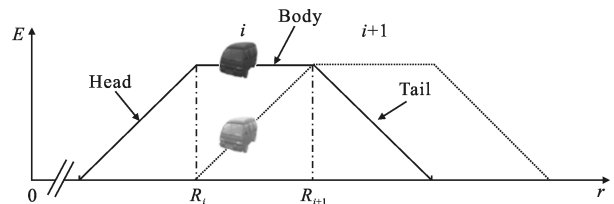


图 3 距离选通超分辨率三维成像

Fig.3 Superresolution depth mapping of 3D range-gated imaging

综上所述,采用 2D/3D 距离选通成像探测低对比度目标时,在图 2 的工作时序下,成像系统对视场内场景进行切片成像,通过 2DRGI 获取无背景或背景部分滤除的二维选通图像,进一步可利用这些空间交叠的选通图像通过 3DRGI 重建二维图像中丢失的三维空间信息,输出距离图像。由于 3DRGI 是基于 2DRGI 获得的图像数据实现的,因此无需重新获取新数据,即提高了实时性,压缩了数据量,又兼具了二维选通强度图像和距离图像的优点。

2 实验及分析

为了开展实验研究,文中搭建了距离选通成像

系统 RGLIS,并研制了高精度时序同步控制技术^[9-10]。该系统采用波长 808 nm 半导体脉冲激光器作为照明光源,采用像素数大于 1 000×1 000 的选通 ICCD 作为成像器件,通过高精度时序控制器控制激光脉宽、选通门宽、系统延时和工作频率等系统参数。

在图 4 实验中,观察目标为约 230 m 处的海上桥梁。图 4(a)是热像仪获取的目标夜间红外图像,由于背景山的干扰难以分辨桥身的边界。图 4(b)和(c)是 2DRGI 输出的无背景的二维选通图像,对应的系统延时分别为 1 440 ns 和 1 640 ns,激光脉宽为 200 ns,选通门宽为 400 ns。对比图 4(a),在图 4(b)和(c)中可清楚分辨桥的轮廓边界,并可看清桥身。但是对于桥自身而言,由于桥各结构件的材料反射率相近,因此,各结构件相对于桥身为低对比目标,在图 4(b)和(c)中无法区分识别各结构件。图 4(d)是基于图 4(b)和(c)采用超分辨率 3DRGI 反演的距离图。在图 4(d)的距离图中,各结构件清晰可辨。

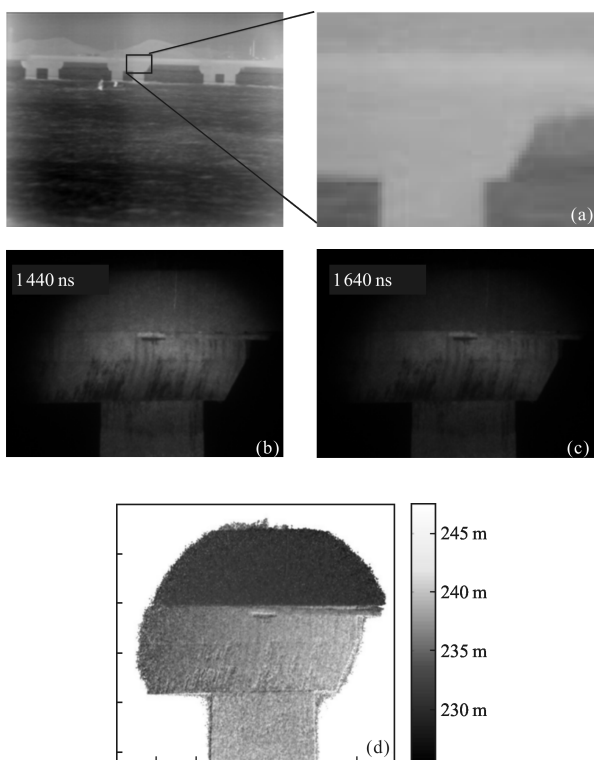


图 4 低对比目标探测实验结果

Fig.4 Experimental results of low contrast target detection

无背景的图 4(b)和(c)是目标与背景存在很大的空间距离差的情况下 2DRGI 输出的选通图像。当目标与背景存在较小空间差时,若在合理的系统参数

设置下 2DRGI 仍然可获得目标的无背景选通图像,如图 5(a)和(b)所示实验。图 5(a)是非选通激光成像获得的夜间玉米地中的汽车图像,汽车距 RGLIS 的距离约 400 m。由于玉米背景的干扰,在图 5(a)中仅能模糊的看到汽车的车头,对于车身无法与背景区分识别,从而无法获得汽车整体轮廓信息。图 5(b)是 2DRGI 输出的选通图像,在该图中,背景被有效的滤除,可清楚获得汽车的整体轮廓,识别车的类型。上述实验均是环境背景造成图像对比度低的情况,对于恶劣天气及烟尘等引起的图像对比度低的情况,2DRGI 依然可获得目标高对比度图像,如图 5(c)和(d)所示实验。图 5(c)为夜间雾天非选通激光成像所成图像,在大气中雾的后向散射噪声影响下,图像存在低对比度问题,无法有效探测识别目标。对比图 5(c),图 5(d)为 2DRGI 输出的高对比度选通图像,从中可以发现雾后约 720 m 远的楼房,并清楚识别出窗口和门等信息。

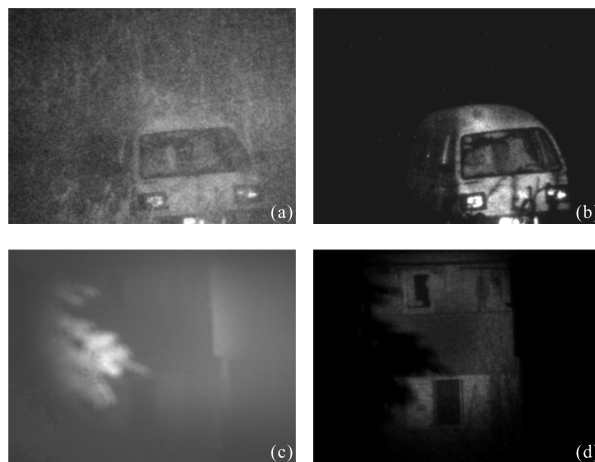


图 5 2DRGI 实现目标无背景探测

Fig.5 Target detection under 2DRGI for gate images with background filtered

在图 5(b)的实验中,当目标与背景间的空间差较小时需要严格设置激光脉宽、选通门宽和系统延时才可获得无背景的选通图像。但是,如前文工作原理部分所述,在实际应用中难以预知目标的距离及其与背景的空间关系,从而难以准确设置系统参数,因此,利用 2DRGI 探测目标时会出现背景部分滤除的选通图像,如图 6(a)所示。在图 6 的实验中,目标为约 300 m 处的人,图 6(a)为 2DRGI 输出的选通图像,人与后面的背景帐篷均被选通成像,由于两者的

反射率相近,导致图像对比度低,因此在图 6(a)中难以发现并识别出人。结合该帧的相邻帧利用超分辨率 3DRGI 可重建图 6(a)中丢失的空间距离信息,获得其距离图像图 6(b),从中可以清楚发现帐篷前的人。

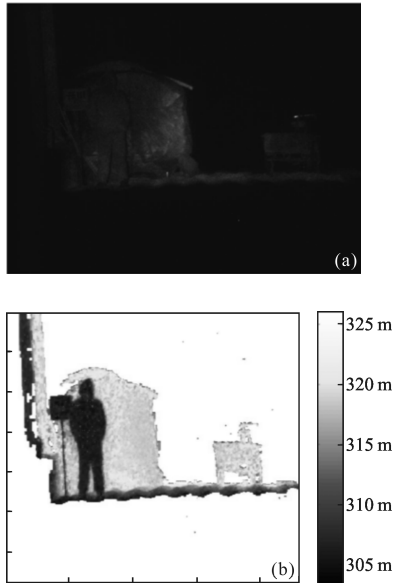


图 6 3DRGI 实现部分背景滤除下目标探测

Fig.6 Target detection under 3DRGI for gate images with background partly filtered

在文中的方法中,2DRGI 输出的选通图像切片的景深由激光脉宽和选通门宽的大小决定,但是需指出的是在目标探测中选通图像的景深并不是越小越好。对于大目标而言,小景深切片只会对目标局部成像,从而不利于从宏观整体角度对目标进行识别。此外,小景深切片成像将导致小延时步进步长,对于大景深大视场成像不仅耗时而且会产生大量数据。因此,在应用中设置空间切片景深时,考虑超分辨率 3DRGI 反演目标所需的信号区景深的大小,选通图像对应的空间切片的景深至少是目标最大尺寸的三倍。图 7 是对海上大目标探测实验结果。探测目标是青岛崂山区东南部黄海海域的赤岛,距离观测点的距离约为 2.3 km。图 7(a)是白天赤岛的照片,图 7(b)是夜间赤岛的选通图像,图 7(c)是图 7(b)的距离图。在图 7(b)中,距离选通成像抑制了海上水汽的后向散射噪声影响,并滤除了背景,从中可以识别出岛上的房屋,并可看清房屋的窗户等细节信息,但是难以区分是一座房屋还是多座房屋。结合图 7(c)则可以分辨出图 7(b)中的房屋是前后两座。由图 7 的实验

结果可以发现,将二维选通图像与距离图像结合探测目标,即可发挥距离选通成像抑制大气后向散射噪声和降低或消除背景干扰影响的优点,获得相对高质量的选通强度图像,又可利用三维成像增强目标相对于背景或目标自身信息的感知,提高目标探测识别概率。

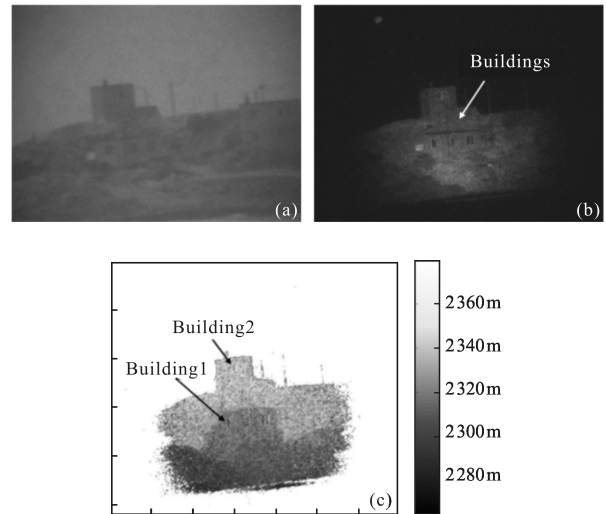


图 7 海上远距离低对比度目标探测实验结果

Fig.7 Experimental results of detection of low contrast targets at sea

3 结论

文中提出了一种基于 2D/3D 距离选通成像探测低对比度目标的方法,将二维距离选通成像和距离选通超分辨率三维成像有机结合起来,在频闪工作模式下,利用具有梯形距离能量包络特征的空间切片大步长快速扫描视场内场景,输出无背景或背景部分滤除的高质量二维选通图像,当发现目标时,可进一步利用与目标帧相邻的选通图像通过超分辨率三维成像反演获得其距离图,通过距离图像结合二维选通强度图像区分识别目标与背景。文中利用上述方法对夜间低对比度背景、复杂背景、雾天等情况下的目标以及海上远距离大目标进行了实验研究。研究表明文中提出的方法可有效解决低对比度目标探测问题,为低对比度目标探测提供了新的方法,可服务于海监海防、司法取证、反恐维安、搜救等领域。此外,在实际应用中,可结合参考文献[11]所提方法对二维选通图像进行目标提取处理,从而仅对提取的感兴趣目标进行超分辨率三维重建,进一步降低

环境噪声等的影响,提高低对比度目标探测能力。

参考文献:

- [1] Busck J. Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(11): 116001-1-7.
- [2] Nevis A J, Hilton R J, Taylor J S, et al. Advantages of three-dimensional electro-optic imaging sensors [C]//SPIE, 2003, 5089: 225-237.
- [3] Steinvall O, Larsson H, Gustafsson F, et al. Performance of 3-D laser radar through vegetation and camouflage [C]//SPIE, 2005, 5792: 129-142
- [4] Chen C, Stettner R. Drogue tracking using 3D flash lidar for autonomous aerial refueling[C]//SPIE, 2011, 8037: 80370Q.
- [5] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar[J]. *Applied Optics*, 2004, 43 (24): 4705-4710.
- [6] Wang Xinwei, Zhou Yan, Liu Yuliang. Impact and application of echo broadening effect on three-dimensional range-gated imaging[C]//SPIE, 2012, 8558: 855823-1-7.
- [7] Wang Xinwei, Zhou Yan, Fan Songtao, et al. Range-gated laser stroboscopic imaging for night remote surveillance[J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27 (9): 094203-1-4.
- [8] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. *Optics Letters*, 2007, 32 (21): 3146-3148.
- [9] Yang Jinbao, Cao Yinan, Fan Songtao, et al. Hundred ps level timing control system in 3D range-gated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1792-1797. (in Chinese)
杨金宝, 曹忆南, 范松涛, 等. 百皮秒级三维选通成像时序控制系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1792-1797.
- [10] Cui Wei, Fan Songtao, Wang Xinwei, et al. High delay precision based on dynamic phase-shift for range-gated laser imaging technology[C]//SPIE, 2013, 8905: 89051I.
- [11] Cao Yinan, Wang Xinwei, Zhou Yan, et al. Spatial positioning fuzzy C-means algorithm in segmentation of range-gated image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2682-2696. (in Chinese)
曹忆南, 王新伟, 周燕. 距离选通激光成像空间定位模糊C均值聚类分割法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(10): 2682-2696.