

距离选通超分辨率三维成像及其应用

王新伟, 刘晓泉, 游瑞蓉, 范松涛, 何 军, 周 燕

(中国科学院半导体研究所 光电系统实验室, 北京 100083)

摘要: 距离选通超分辨率三维成像是一种新型非扫描三维成像技术, 在水下成像、远距离侦察、自动导航等应用中具有重要意义。综述了距离选通超分辨率三维成像技术国内外研究进展, 对于梯形距离选通超分辨率三维成像和三角形距离选通超分辨率三维成像从距离能量包络能量态、三维成像步长、信噪比、环境噪声敏感性、距离分辨率以及测距精度等角度进行了对比分析, 介绍了距离选通超分辨率三维成像技术的最新研究进展, 包括编码超分辨率三维成像、实时距离选通超分辨率三维成像、多脉冲延时积分超分辨率三维成像, 并分析了在低对比度目标探测、识别、水下三维成像方面的应用情况, 以及笔者实验室在距离选通超分辨率三维成像技术方面开展的研究工作。距离选通超分辨率三维成像技术的发展趋势为获取更高的三维成像景深分辨率比, 实现快速高分辨率三维成像。

关键词: 距离选通三维成像; 超分辨率; 梯形距离能量相关; 三角形距离能量相关

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0824001

Three dimensional super-resolution range-gated imaging and its applications

Wang Xinwei, Liu Xiaoquan, You Ruirong, Fan Songtao, He Jun, Zhou Yan

(Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: Three dimensional super-resolution gated imaging(3D SRGI) is a novel scannerless 3D imaging technique, and has great potential in underwater imaging, remote surveillance and automatic navigation. The development of 3D SRGI was reviewed, and trapezoidal 3D SRGI and triangular 3D SRGI was compared from intensity states of range intensity profiles, 3D imaging step depth, signal-to-noise ratio, environmental noise sensitivity, range resolution, and range accuracy. For the improvement of 3D SRGI, advanced imaging methods were introduced including range-intensity coding imaging, real time 3D imaging and multi-pulse time delay integration imaging. Furthermore, the specific applications of 3D SRGI were summarized in low contrast target detection, target identification, and underwater 3D imaging. In addition, an overview on some recent 3D SRGI work was given in the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. The future development trends of three dimensional range-gated imaging are higher depth-to-range-resolution ratio and faster high-resolution 3D imaging.

Key words: three dimensional range-gated imaging; super-resolution; trapezoidal range-intensity correlation; triangular range-intensity correlation

收稿日期: 2015-12-10; 修订日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(61205019, 61475150); 中国科学院科研装备研制项目

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、水下成像、智能视频监控等领域的研究。

Email: wangxinwei@semi.ac.cn

0 引言

距离选通三维成像技术是一种新型的三维成像技术,利用距离选通成像技术获取目标空间切片图像,并基于此反演目标的三维空间信息,具有空间分辨率高、作用距离远以及有效抑制大气或水的后向散射的特点,可解决传统三维成像存在的作用距离近(如结构光成像、双目立体视觉成像)、空间分辨率低(如闪光激光成像雷达)的问题,在水下成像^[1]、远距离侦察^[2-3]等领域具有广泛的应用。

典型的距离选通三维成像技术是 2004 年丹麦科技大学 J. Busck 提出的距离选通步进延时扫描三维成像^[2],利用选通成像在距离向上小步长步进获取不同距离下的切片图像,然后通过大量的距离切片反演出目标的距离,但是,该方法本质上是一种扫描机制的成像方法,欲获得高的距离分辨率,需在较小延时步进补偿下获取目标大量的距离切片图像,然后处理大量数据,因此,实时性较差。

为了解决距离选通步进延时扫描三维成像存在的问题,2007 年底法德圣路易斯研究院提出了一种基于梯形距离能量包络的距离选通超分辨率三维成像技术^[4],该技术最少可通过两幅切片图像实现三维重建,不但解决实时性差的问题,同时解决了高距离分辨率依赖高性能器件的问题,达到了利用低性能器件获得与传统技术高性能器件相媲美的距离分辨率。近几年来,距离选通超分辨率三维成像得到迅速发展,并且在低对比度目标探测、航天探测、水下成像等领域进行了应用研究。目前从事超分辨率三维成像研究的单位主要有法德圣路易斯研究院、加拿大国家光学中心、浙江大学、中国科学院半导体研究所等。文中将全面介绍距离选通超分辨率三维成像技术的研究进展及其应用情况,以及笔者实验室在距离选通超分辨率三维成像技术方面开展的研究工作。

1 距离选通超分辨率三维成像技术

“距离选通超分辨率三维成像”的概念是从成像效果层面提出的,相比于步进延时扫描成像实现了距离超分辨率成像。技术层面上,该技术又被称为“距离能量相关三维选通成像”^[4-5],其工作原理是通过回波展宽效应构造满足特定几何形状的距离能量包络^[6],通过两幅空间交叠的切片图像间的距离能量相关性

建立像素灰度比与距离能量比的映射关系,利用三维反演算法获取目标距离信息,进而实现三维重建,如图 1 所示。目前主要发展了两种距离能量相关三维重建算法,分别是梯形相关算法^[4]和三角形相关算法^[5]。

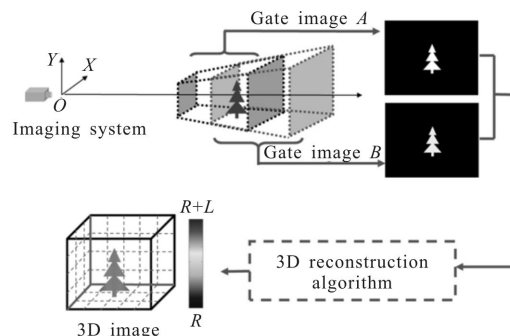


图 1 距离选通超分辨率三维成像工作原理

Fig.1 Principle of 3D superresolution range-gated imaging

1.1 梯形距离能量相关算法

梯形距离能量相关算法是 2007 年底法德圣路易斯研究院 M.Laurenzis 提出的^[4]。在梯形距离能量相关算法中,激光脉冲和选通脉冲均为矩形脉冲,且满足选通门宽为激光脉宽的 2 倍,因此,在回波展宽效应作用下,目标距离向能量包络为梯形,可通过建立相邻切片间的能量灰度比关系获得目标的距离信息 r 。

$$r = \frac{\tau_A C}{2} + \frac{I_{\text{head},B}}{I_{\text{body},A}} \frac{t_L C}{2} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{body},A}$ 和 $I_{\text{head},B}$ 分别是二维切片图像 A 的体信号区灰度值和二维切片图像 B 的头信号区灰度值; t_L 为激光脉宽; τ_A 是选通切片图像 A 对应的激光脉冲和选通脉冲间的选通延时; c 为光传播速度。如图 2 所示,该方法也可利用图像 A 的尾信号与图像 B 的体信号反演目标距离,具体可参见参考文献[4]。

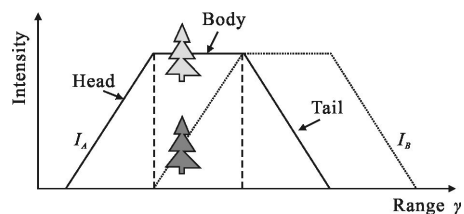


图 2 梯形距离能量相关算法

Fig.2 Trapezoidal range-intensity correlation algorithm

1.2 三角形距离能量相关算法

为进一步降低环境噪声影响和提高超分辨率三维成像的距离分辨率,2011 年中国科学院半导体研

究所提出了三角形距离能量相关算法^[5,7],在该方法中,激光脉冲和选通脉冲也均为矩形脉冲,不同于梯形距离能量相关算法,选通门宽与激光脉宽大小相等,因此,在回波展宽效应作用下,目标距离向能量包络为三角形,通过建立相邻切片间的能量灰度比关系可获得目标的距离信息 r 。

$$r = \frac{\tau_A C}{2} + \frac{I_{\text{head},B}}{I_{\text{head},B} + I_{\text{tail},A}} \frac{t_L C}{2} \quad (2)$$

式中: $I_{\text{tail},A}$ 和 $I_{\text{head},B}$ 分别是二维切片图像 A 和二维切片图像 B 的尾信号区灰度值和体信号区灰度值。不同于梯形距离能量相关算法,三角形算法无体信号区,但是,可由图像 A 的尾信号和图像 B 的头信号叠加求和构建等效的体信号区,如图 3 所示。

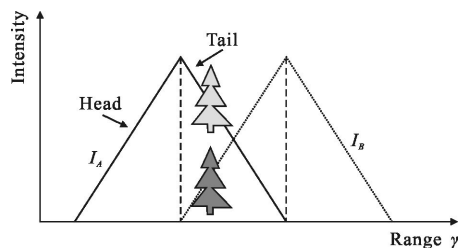


图 3 三角形距离能量相关算法

Fig.3 Triangular range-intensity correlation algorithm

1.3 梯形和三角形算法下距离选通超分辨率三维成像对比

表 1 给出了梯形和三角形距离能量相关算法下的超分辨率三维成像技术对比。

表 1 梯形和三角形超分辨率三维成像对比

Tab.1 Comparison of trapezoidal and triangular superresolution 3D imaging

3D imaging	Trapezoidal algorithm	Triangular algorithm
RIP of gate images	Trapezoidal RIP	Triangular RIP
RIP intensity state	Three states (head, body, tail)	Two states(head, tail)
Range-intensity correlation	Head-body, tail-body	Head-tail
3D imaging step depth	$t_L C/2$	$t_L C/2$
SNR	Low	High
Environmental noise sensitivity	Low	High
Range resolution	Low	High
Range accuracy	Low	High

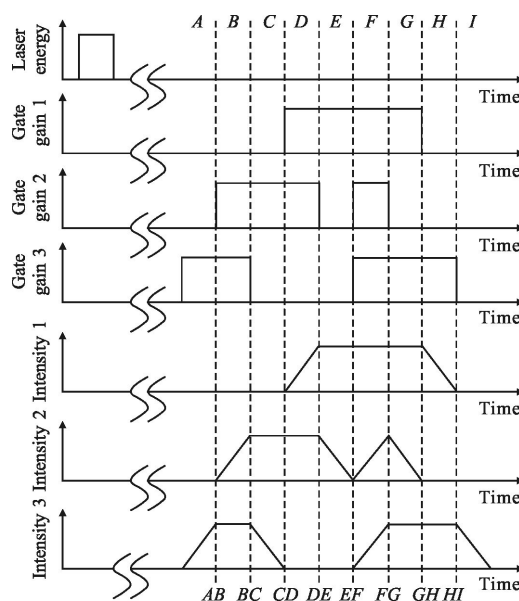
对于距离能量包络(Range-Intensity Profile,RIP),梯形 RIP 的能量态包括三个态+1、2 和-1,分别对应头信号、体信号和尾信号,而三角形 RIP 的能量态则为两个态+1 和-1,分别对应头信号和尾信号。在上述能量态分析中,均未包含 0 态,即信号低于噪声阈值的能量态。由于在距离选通超分辨率三维成像中,欲根据公式(1)或(2)进行三维反演,需首先判别二维切片图像中每个像素隶属的能量态,能量态越少越利于判别,因此,具有三角形 RIP 的二维切片图像相比于具有梯形 RIP 的二维切片图像更易于判别像素能量态,从而压缩了三维反演的数据计算量。此外,研究表明:相比于梯形能量相关算法,三角形距离能量相关算法利于降低环境噪声的影响,可将距离分辨率提高了约 3 倍^[5]。

2 技术研究进展

2.1 编码超分辨率三维成像

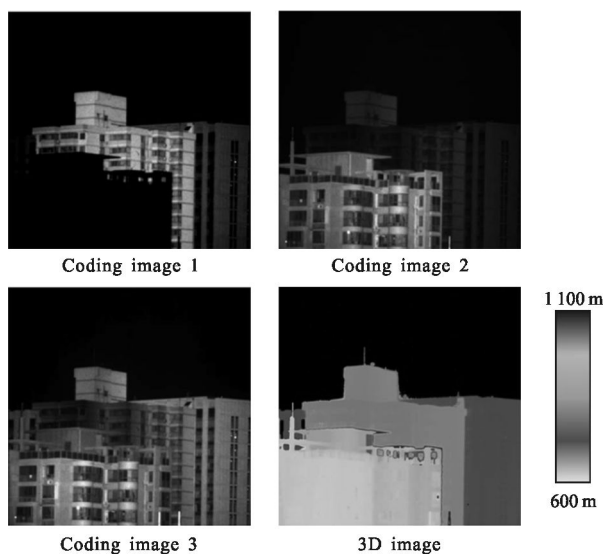
为获取更高景深分辨率比,实现大景深下的高距离分辨率,2009 年浙江大学提出了基于梯形距离能量相关算法实现编码超分辨率三维成像的想法^[8]。2011 年浙江大学和法德圣路易斯研究院分别实现了梯形相关编码超分辨率三维成像,并进行了实验研究。

图 4 是浙江大学于 2011 年 4 月报道了基于梯形距离能量相关算法实现的三幅切片图像 7 码道编



(a) 7 码道梯形相关编码

(a) 7-bin trapezoidal correlation coding



(b) 编码切片图像及三维图像

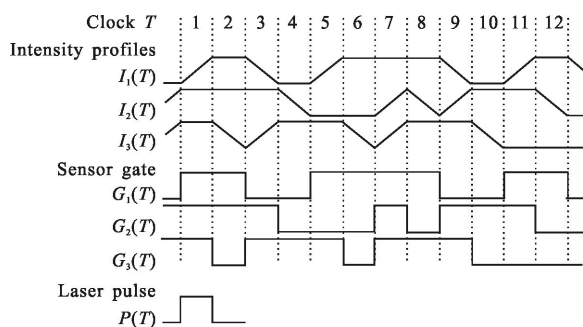
(b) Coding images and 3D image

图 4 浙江大学梯形相关编码超分辨率三维成像

Fig.4 3D superresolution imaging by trapezoidal correlation coding in Zhejiang University

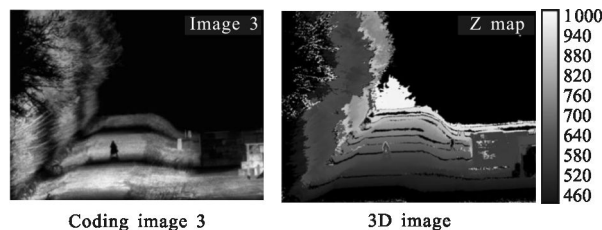
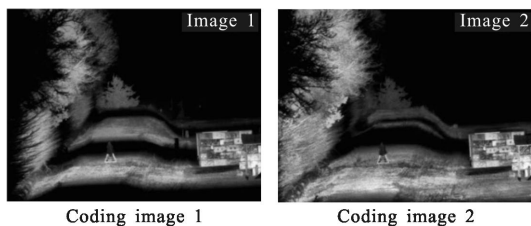
码超分辨率三维成像的实验结果^[9],实现了距离 600~1100 m 范围内距离图的获取,其中,暗目标的距离分辨率约为 3.21 m,亮目标的距离分辨率约为 1.42 m。

法德圣路易斯研究院于同年 7 月份报道了在梯形距离能量相关算法下进行的三幅切片图像 12 码道编码超分辨率三维成像实验^[10],对 460~1000 m 距离



(a) 12 码道梯形相关编码

(a) 12-bin trapezoidal correlation coding



(b) 编码切片图像及三维图像

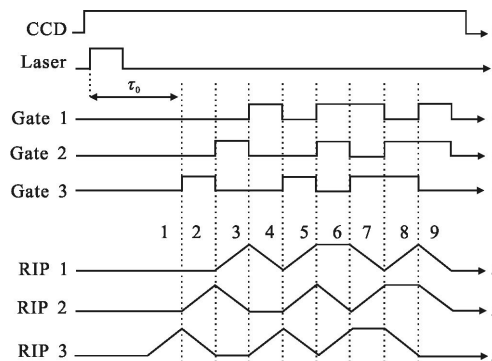
(b) Coding images and 3D image

图 5 法德圣路易斯研究院梯形相关编码超分辨率三维成像

Fig.5 3D superresolution imaging by trapezoidal correlation coding in the French-German Research Institute of Saint-Louis

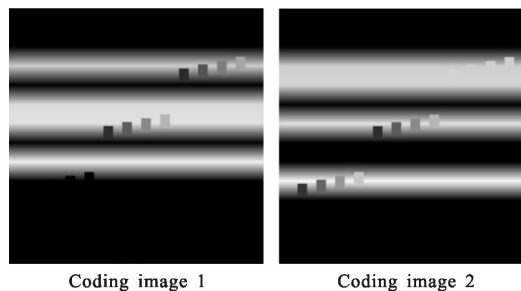
范围内的实验场景进行了三维成像,其中,暗目标的 RMS 距离误差约为 1.1 m,亮目标的 RMS 距离误差约为 0.5 m。相比于浙江大学,有效码道数由 7 码道扩展为 12 码道,相应的距离分辨率也得到了提高。

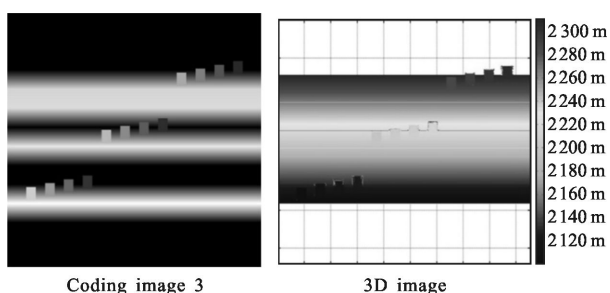
2014 年,中国科学院半导体研究所提出了基于三角形距离能量相关算法的编码超分辨率三维成像,如图 6 所示,实现了三幅切片图像 7 码道编码超分辨率三维成像^[11],仿真实验表明,相同景深下 7 码道三角形相关编码可实现优于 12 码道梯形相关编码的距离分辨率。



(a) 7 码道三角形相关编码

(a) 7-bin triangular correlation coding





(b) 编码切片图像及三维图像
(b) Coding images and 3D image

图 6 中国科学院半导体研究所三角形相关编码超分辨率三维成像
Fig.6 3D superresolution imaging by triangular correlation coding in the Insititute of Semiconductors, CAS

2.2 实时距离选通超分辨率三维成像

距离选通超分辨率三维成像具有可通过两幅切片图像实现三维重建的特点, 相比于步进延时扫描三维成像可降低三维重建所需的图像数据量, 并降低三维重建的计算量, 因此, 该技术具有实现实时三维成像的技术潜力。

2014 年, 中国科学院半导体研究所基于距离选通超分辨率三维成像提出了帧间相关法, 用于实现实时距离选通三维成像^[12], 并对 200 m 处两人互传篮球的过程进行了帧频 10 Hz、像素数 696×520 的三维成像^[13], 如图 7 所示。

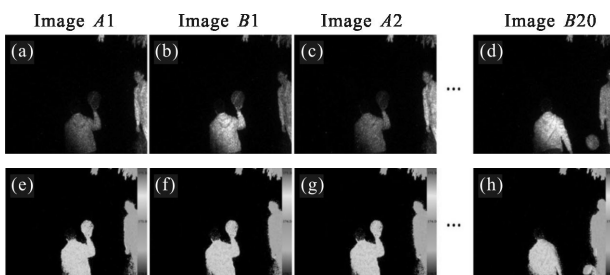


图 7 中国科学院半导体研究所实时距离选通三维成像
Fig.7 Real-time 3D range-gated imaging by the Insititute of Semiconductors, CAS

同年, 法德圣路易斯研究院报道了利用梯形超分辨率三维成像实现了搭载水下运动平台的距离选通三维成像^[14], 获取了水下地形地貌, 但该报道中未给出三维成像的帧频。图 8 中给出了该实验结果中海星的三维图像。

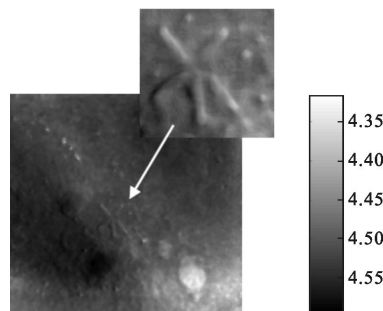


图 8 法德圣路易斯研究院水下动平台下实现距离选通超分辨率三维成像

Fig.8 3D superresolution imaging from a moving submarine platform by the French-German Research Institute of Saint-Louis

2.3 多脉冲延时积分超分辨率三维成像

对于距离选通超分辨率三维成像及其编码三维成像, 无论是梯形距离能量相关算法还是三角形距离能量相关算法均需要矩形激光脉冲和矩形选通脉冲。激光脉冲和选通脉冲的矩形特征影响着超分辨率三维成像质量, 特别是距离分辨率。对于选通脉冲, 目前商业用选通 ICCD 的选通门宽可达到 ps 级, 可输出 ns 级至 μs 级矩形选通脉冲。但是, 对于固体脉冲激光器, 如用于水下成像 532 nm 及全天候成像 1.5 μm 的固体激光器的激光脉冲大多为高斯型或类高斯型, 难以输出矩形激光脉冲, 且激光脉宽难以调节, 从而限制了三维成像景深调节, 而对于 808 nm 和 850 nm 半导体激光器, ns 级矩形脉冲较易获得, 但是 ns 级矩形脉冲则难以获得。针对上述问题, 2015 年中国科学院半导体研究所提出了一种多脉冲延时积分整形技术^[15](见图 9), 利用窄脉冲激光器可等效实现矩形激光脉冲以及固体激光器脉宽不可调

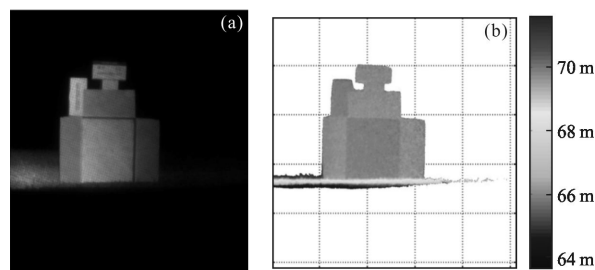


图 9 多脉冲延时积分超分辨率三维成像

Fig.9 3D superresolution imaging based on multi-pulse time delay integration

的问题,构建所需的规则形状的梯形或三角形距离能量包络,实验上利用 2 ns 固体脉冲激光器实现了等效脉宽 60 ns 的 9 m 景深三角形超分辨率三维成像。该技术也适用于编码超分辨率三维成像,从而提高了超分辨率三维成像的实用性。

3 超分辨率三维成像应用研究进展

3.1 低对比度目标侦察

当目标与背景光谱反射特征或红外辐射特征接近或一致时,利用传统的光学成像与红外热成像很难发现目标,然而三维成像可利用目标与背景的空间差异有效探测上述低对比目标。图 10 是法德圣路易斯研究对 1 km 林地背景下的车辆和目标靶的探测结果^[10],其中图 10(a)是二维选通切片图像,图 10(b)是利用超分辨率三维成像获取的距离图,从距离图中可有效发现两个目标靶和车辆,并可获取背景的距离信息,有利于增强态势感知。

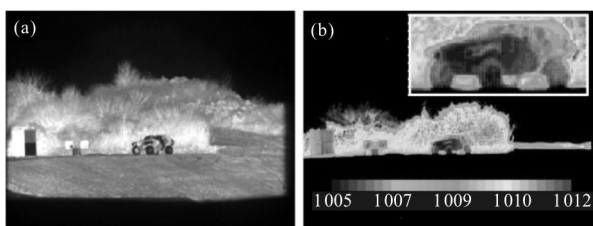


图 10 林地目标探测

Fig.10 Target detection in woods

图 11 是中国科学院半导体研究所对海上大目标探测实验结果^[17]。探测目标是距离观测点 2.3 km 的海岛,如图 11(a)所示。图 11(b)是海岛的选通图像,图 11(c)是利用超分辨率三维成像获取的海岛的距离图。从图 11(b)中可发现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,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。图 11(c)则可以分辨出图 11(b)中的房屋是前后两座,从而实现目标有效探测。

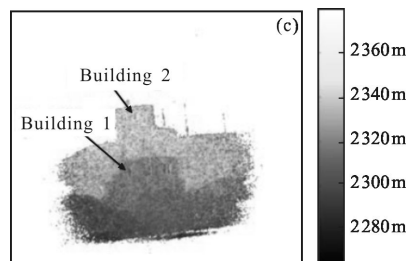
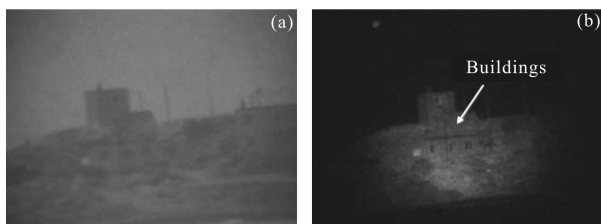
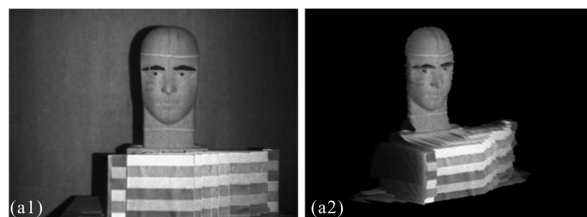


图 11 海上目标探测

Fig.11 Target detection at sea

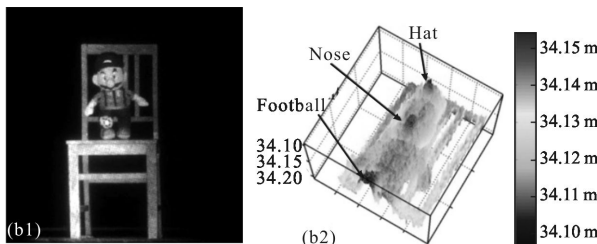
3.2 目标识别

利用距离选通超分辨率三维成像可实现 mm 级三维成像,如图 12 所示,从而可用于姿态无关目标识别,提高目标识别率。图 12(a)是法德圣路易斯研究院的试验结果^[14],其中图(a1)为灰度图,图(a2)为纹理贴片后三维图像;图 12(b)是中国科学院半导体研究所试验结果^[11],其中图(b1)为灰度图,图(b2)为三维图像。



(a) 法德圣路易斯研究院成像结果

(a) Results from the French-German research institute of Saint-Louis



(b) 中国科学院半导体研究所成像结果

(b) Results from the Insitute of Semiconductors, CAS

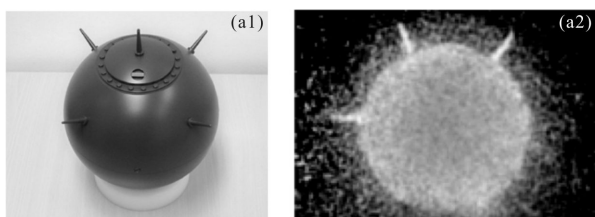
图 12 用于目标识别的高分辨率三维成像

Fig.12 High-resolution 3D imaging for target identification

3.3 水下三维成像

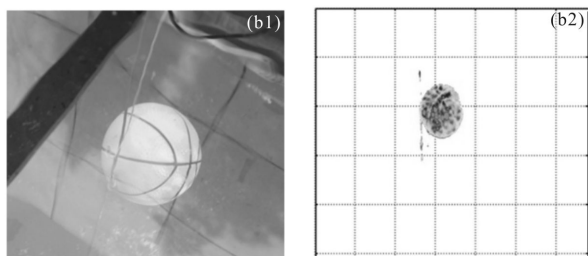
距离选通成像可有效抑制海水的后向散射,是目前最有效的水下光学成像技术手段之一。距离选通超分辨率三维成像继承了距离选通成像有效抑制后向散射的传统特点,因此,相比于水下激光扫描三维成像可实现更远的作用距离,并具有更高的实时性。2014 年,法德圣路易斯研究院利用梯形距离选通超分

辨率三维成像实现了在波罗的海实现了水雷的探测^[18], 如图 13(a)所示, 其中, 图(a1)为水雷照片, 图(a2)为水雷水下三维图像, 同年, 中国科学院半导体研究所利用三角形距离选通超分辨率三维成像对水下约 10 m 处的小球进行了水下三维成像, 如图 13(b)所示。



(a) 法德圣路易斯研究院水雷探测结果

(a) Mine detection by the French-German research institute of Saint-Louis



(b) 中国科学院半导体研究所水下成像结果

(b) Underwater imaging by the Institute of Semiconductors, CAS

图 13 水下三维成像

Fig.13 Underwater 3D imaging

4 结 论

目前, 距离选通超分辨率三维成像主要提出了梯形距离能量相关算法和三角形距离能量相关算法, 并基于该两种算法分别发展了梯形相关编码超分辨率三维成像和三角形相关编码超分辨率三维成像技术。整体技术发展趋势为: 获取更高的三维成像景深分辨率比, 即高分辨率、大景深三维成像; 实现快速高分辨率三维成像。在应用方面, 距离选通超分辨率三维成像已针对低对比度目标侦察、目标识别以及水下三维成像等领域开展了应用研究, 可以预见, 随着距离选通超分辨率三维成像在实时性方面的进一步提高必将拓展至空间探测、避障导航等领域。

在距离选通超分辨率三维成像方面, 中国科学院半导体研究所已开展了大量的研究工作^[5-7,11-12, 15,17,19], 包括提出三角形距离能量相关算法以及实现实时距离选通三维成像, 并开展了目标侦察及水下三维成

像等应用研究, 未来将进一步开展距离选通超分辨率三维成像的深度应用研究。

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.
- [2] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(24): 4705-4710.
- [3] Pierre Andersson. Long-range three-dimensional imaging using range-gated laser radar images [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(3): 034301.
- [4] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(21): 3146-3148.
- [5] Wang Xinwei, Li Youfu, Zhou Yan. Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7399-7046.
- [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.
- [7] Wang Xinwei, Zhou Yan, Fan Songtao, et al. Four-dimensional flash trajectory imaging using time-delay-modulated range-gated viewing [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 364-366.
- [8] Zhang Xiuda, Yan Huimin, Yao Jinliang, et al. Exponential increased partitions method for three-dimensional active imaging [C]//SPIE, 2009, 7506: 75062Q.
- [9] Xiuda Zhang, Huimin Yan. Three-dimensional active imaging with maximum depth range [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(12): 1682-1686.
- [10] Martin Laurenzis, Emmanuel Bacher. Image coding for three-dimensional range-gated imaging [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 3824-3828.
- [11] Wang Xinwei, Cao Yinan, Cui Wei, et al. Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing [C]//SPIE, 2014, 9260: 9260L.
- [12] Wang Xinwei, Cao Yinan, Cui Wei, et al. Real-time remote three-dimensional super-resolution range-gated imaging based on inter-frame correlation [C]//SPIE, 2014, 9273: 927327.
- [13] Lu Dezhen, Wang Xinwei, Fan Songtao, et al. Ns-scaled

- time coding method for real-time 3d super-resolution range-gated imaging [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13 (8): 081102
- [14] Christnacher F, Laurenzis M, Monnin D, et al. 3D laser gated viewing from a moving submarine platform [C]//SPIE, 2014, 9250: 92500F.
- [15] Wang Xinwei, Li Youfu, Zhou Yan. Multi-pulse time delay integration method for flexible 3D super-resolution range-gated imaging [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7820–7831.
- [16] Martin Laurenzis, Frank Christnacher, Nicolas Metzger, et al. 3D range-gated imaging at infrared wavelengths with super-resolution depth mapping [C]//SPIE, 2009, 7298: 729833.
- [17] Wang Xinwei, Cao Yinan, Liu Chao, et al. Low contrast target detection based on 2D/3D range-gated imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (9): 2854–2859. (in Chinese)
- 王新伟, 曹忆南, 刘超, 等. 2D/3D 距离选通成像的低对比度目标探测[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 2854–2859.
- [18] Martin Laurenzis, Frank Christnacher, Thomas Scholz, et al. Underwater laser imaging experiments in the Baltic sea [C]//SPIE, 2014, 9250: 92500D.
- [19] Cao Yinan, Wang Xinwei, Zhou Yan. Spatial positioning fuzzy C-means algorithm in segmentation of range-gated image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10): 2682–2686. (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): 2682–2686.