

# 空间光调制器扫描接收的距离选通成像激光雷达

何志毅<sup>1,2\*</sup>, 黄裕<sup>1</sup>, 张雨益<sup>1</sup>, 何宁<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup> 桂林电子科技大学广西无线宽带通信与信号处理重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 激光距离选通的扫描式成像技术具有低成本、能避免多次散射等特点, 成像扫描与激光束扫描的同步配合是扫描成像技术的难点。设计了一个基于空间光调制器(SLM)的扫描式距离选通激光雷达系统, 保证目标反射光的可靠接收, 并在时间上和空间上屏蔽后向散射光。在具有不同衰减长度的光散射环境中对本系统进行了测量, 实现二维和三维成像。实验结果表明, 本系统能够有效地实现光束扫描与距离选通成像扫描的同步, 适用于光散射环境中光学成像的可视距离扩展。

**关键词** 大气光学; 扫描激光雷达; 距离选通成像; 空间光调制器; 多次光散射

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1201001

## Range-Gated Imaging LiDAR by Scanning Reception of Space Light Modulator

He Zhiyi<sup>1,2\*</sup>, Huang Yu<sup>1</sup>, Zhang Yuyi<sup>1</sup>, He Ning<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup> Guangxi Key Laboratory of Wireless Wideband Communication and Signal Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** Laser range-gated scan-type imaging technology has the advantages of lower cost and multiple scattering reduction. Synchronous operation between imaging scan and laser-beam scan is the technical difficulty in the scanning imaging technology. Herein, a scan-type range-gated LiDAR system based on spatial light modulator (SLM) is designed to temporally and spatially shield backscattered light while ensuring the reliable receipt of reflected light from the targets. Measurements are performed in light scattering environments with different attenuation lengths to realize the 2D and 3D imaging implementations. Experimental results show that the synchronization between light-beam scan and range-gated imaging scan can be effectively achieved in this system. Moreover, the proposed system is applicable to visible-range extension of optical imaging in a light scattering environment.

**Key words** atmospheric optics; scanning LiDAR; range-gated imaging; space light modulator; multiple light scattering

**OCIS codes** 010.3640; 350.6090; 010.1350

## 1 引 言

在弥漫烟雾的大气中或富含悬浮颗粒的水下<sup>[1]</sup>, 光散射是影响视觉观察距离的障碍, 在商用和军事等领域的大量活动中, 经常需要扩展比裸眼视距更远的范围。射频雷达利用无线电波探测可发现远超视距的目标, 不过易受电波衍射的干扰<sup>[2]</sup>, 也无

法在水下进行探测。声学成像可避免水介质的光学散射, 能达到较远的探测距离。先进的合成孔径声纳设备可达到厘米级的分辨率<sup>[3]</sup>, 但成像过程操作和算法处理复杂, 易受载体不稳定的影响, 成像速度受到声波传输速率的限制<sup>[4]</sup>, 能识别目标大致形状但不能分辨表面的随光反射率变化的纹理特征。基于距离选通<sup>[5]</sup>机制的激光雷达利用脉冲激光被一定

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-02-25; 录用日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(61961008)、广西研究生科研创新项目(YCSW2019140)

\* E-mail: hezhiyi@guet.edu.cn

距离目标反射回来的时延差探测反射回波,阻挡散射光<sup>[6]</sup>,因此其本质是一种时间上的选通,既能够滤除大部分散射光,又具有高分辨率、反低空飞行等特点,还可用于水下强烈光散射环境中的目标探测<sup>[7]</sup>。

激光雷达成像可分为扫描式和凝视型两种方式,前者通过单光束和单接收器逐点探测扫描,接收器按顺序获取光强数据并构建一幅图像;后者则采用高速接收器阵列在扩束激光照明下一次性采集反射回波图像,从而实现快速成像。接收器通常采用像增强型电荷耦合器件 (ICCD) 高速电子快门相机<sup>[8]</sup>,成本高昂,另外在它的真空管中,光电子是从光电阴极产生的,经过电子快门打到微通道板 (MCP),电子倍增后的噪声较大<sup>[9-10]</sup>。扫描成像方式的成像速度虽然较慢,但由于单光束照明和低成本的单像素光电倍增管 (PMT),且不存在多次散射光影响,因此成像距离能达到 7 倍以上衰减长度 (AL)<sup>[11]</sup>。虽然照明光束扫描相对比较容易,但成像探测扫描通常采用机械方法,要保证激光雷达探测一般所需要的窄视场<sup>[12]</sup>方向在时间和空间上同步对准,这就在设计上和保持稳定上难度较大<sup>[13]</sup>。本文主要研究单个 PMT 成像非机械式的光电扫描方法,动态选择空间光调制器 (SLM) 透明像素区域,限制 PMT 光在一个窄视角内被接收,以屏蔽多次散射光;在大视场范围同步跟踪并对准扫描激光束的照明方向,建立一个距离选通与同步扫描结合、透散射探测性能更好的激光雷达工作机制。

## 2 实验系统

实验系统结构如图 1 所示,光源与接收器 PMT 之间距离为 0.8 m,与探测目标距离为 11.1 m;发射

端光源为 Nd:YVO<sub>4</sub> 调 Q 脉冲激光器,倍频输出波长为 532 nm,光束直径为 8 mm,发散角为 5 mrad,脉冲宽度约为 10 ns,平均光功率为 1.1 W;接收端采用焦距为 18 mm、水平方向视角为 64°30′、垂直方向视角为 45°30′的单反光学镜头。激光束通过一个部分反射镜 (PR, 反射率约为 4%), PR 将激光器发出的一小部分脉冲光反射 (p0) 到 PMT,这部分光作为初始时刻的同步信号光 (简称为参考光);其余大部分透射光束经一个振镜,在现场可编程门阵列 (FPGA) 的控制下被扫描,目标反射光 p1 (简称为信号光) 在 p0 之后到达 PMT。在扫描角度为 20°时,振镜的最大扫描频率为 2 kHz,系统中控制振镜的 FPGA 与控制 SLM 的单片机 MCU 两个模块相互连接通信。FPGA 每控制振镜转到一个新的扫描角度都立刻向 MCU 发送方向角度信息,以控制液晶 SLM 调整透明区域,跟踪激光束下一个扫描方向,再由 MCU 提供一个电脉冲给激光器的外触发端口发出激光脉冲。PMT 将接收到的散射光和反射光回波转换为电信号,电信号被泰克数字示波器采集同时被上传到 PC 端;然后以参考光脉冲为初始时间基点,通过软件编程算法在其后寻找仅弱于参考光脉冲的信号尖峰 (可认为是目标反射光信号),通过它与参考光信号的时延间隔  $\Delta t$  得出目标距离  $c \times \Delta t / 2$  ( $c$  为光速,忽略 PMT 与激光器发射端之间的距离和参考光传播时间)。以目标反射回波次强波峰的信号强度或时间坐标为依据确定每个像素的灰度值或深度距离,实现距离选通。因此这种方式属于软件选通,它比高速快门进行选通的硬件方法有更好的灵活性,在未知目标距离的条件下可以通过编程算法在整个波形曲线中寻找、识别反射回波。

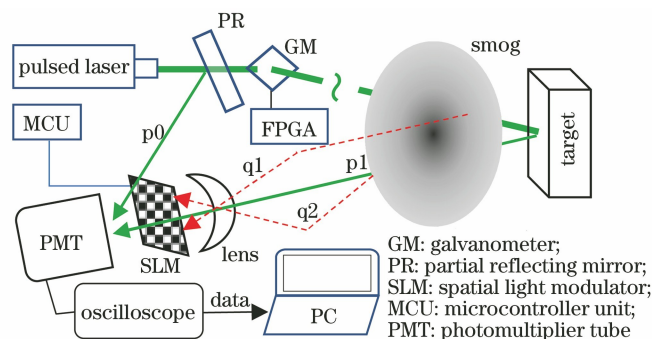


图 1 距离选通-同步扫描激光雷达实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental system for LiDAR with range-gated and synchronous scanning

考虑到散射光的展宽、周边白色墙壁漫反射、时间测量精度和噪声的影响,应有足够长的光脉冲往返距离,才能观察到反射信号光和初始同步参考光

两个脉冲的峰值,例如 7.5 m 的目标距离 (反射回波的时延是 50 ns) 为信号光与参考光两个回波测量波峰可分辨的最短距离。由于散射环境采用实验水

池,需要较大的场地和用水量,因此在一个体积为  $13.0\text{ m} \times 5.8\text{ m} \times 3.6\text{ m}$  的室内由舞台烟雾机喷洒烟雾产生散射环境,探测系统到目标的光散射损耗长度为衰减长度的  $5.5 \sim 7.5$  倍,实验在黑暗环境中进行。

所使用的 PMT 的阴极灵敏度为  $500\text{ A/lm}$ , 阴极倍增  $10^6$ , 脉冲上升沿  $1.4\text{ ns}$ , 光电阴极受光面尺寸为  $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。进入镜头不同方向的光线可被 PMT 接收到,包括目标反射光  $p_1$  和各个方向的多次散射光  $q_1, q_2$ , 由于无论远近目标反射光只可能发生在激光束的直线传播路径上,因此系统使用外部可编程模块控制的电寻址液晶 SLM, 使沿该三维空间直线路径投影到 SLM 二维平面上的对应像素变成透明,而其他像素为不透明,以遮挡不同方向的多次散射光(如图 1 虚线  $q_1, q_2$ ), 这样可在空间上屏蔽大部分散射光。SLM 由一个单色液晶屏去掉背光源改装而成(液晶屏尺寸为  $320\text{ pixel} \times 240\text{ pixel}$ ), 相当于一个空间光强度(或振幅)调制器,其被一个单片机控制。

### 3 扫描设计

#### 3.1 光束扫描

在 FPGA 控制下,一个振镜沿水平、竖直方向进行二维扫描,每经过一个间隔采集一次示波器的测量波形数据,并以相应的行列序数为文件名保存数据文件。扫描完成后,这些数据文件将被数据处理程序读取处理,结果显示为二维图像或三维图形,以实现成像。由于将示波器中散射光和目标反射光变化波形的动态数据保存到 PC 需要手动操作,因此扫描探测选用较低的点阵数目,一方面可显示出目标的大致形状轮廓,另一方面这是研究非机械式扫描距离选通成像的方法。

振镜通过两个反射镜的反射方向角度来调整光束的出射方向,方向角度包括俯仰角  $\alpha$  和水平偏转角  $\beta$ , 方向与  $\alpha, \beta$  的关系如图 2 所示。出射方向的直线方程可表述为

$$X = Z \times \tan \beta / \cos \alpha, \quad (1)$$

$$Y = Z \times \tan \alpha. \quad (2)$$

#### 3.2 成像扫描

脉冲激光发出后原则上可以直接通过 PMT 接收来自三维空间的散射光和目标反射回波的动态光强变化,但由于没有方向选择性,大量的多次散射光<sup>[11]</sup>会同时被接收到,这样信噪比就不高。如果能够以窄视角接收且 PMT 正好对准激光束打到目标

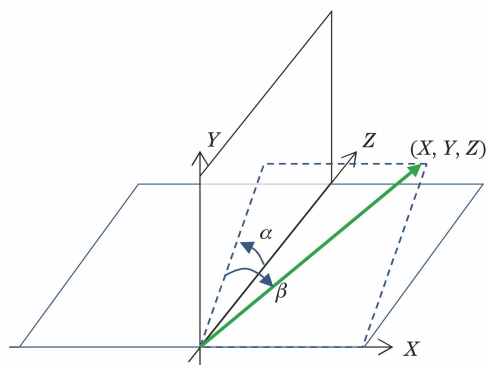


图 2 振镜的光束扫描方向与控制角度的关系

Fig. 2 Relationship between beam scanning direction of galvanometer and control angles

上的光斑,就可以屏蔽掉其他方向的散射光而只接收到这个方向的目标反射光和该方向上的少量散射光。因此图 1 中将 PMT 光电阴极受光面放在一个单反相机镜头之后,在两者之间还需要进行空间上的选通来接收目标反射光,同时屏蔽其他方向的散射光进入到 PMT 光电阴极板上。而扫描过程中,激光束打到目标上的光斑的位置是变化的,故采用二维选通位置和范围可编程的透射型液晶 SLM 动态地控制接收范围,以保持 SLM 选通位置与激光束的照明扫描区域相对应。

在三维空间上,被激光束照亮的目标点进入相机镜头后会聚于像平面上并清晰成像,SLM 就放置于像平面上,这时它对应的被激光照亮物点的成像位置应该是透明的。在像平面上对正确的坐标进行透明调制是保证接收到目标反射光的关键,利用投影算法<sup>[14]</sup>将物方三维空间上任一坐标点  $(X, Y, Z)$  映射到二维像平面上的位置。

如图 3 所示,  $O$  点为相机几何光心,在三维图形学<sup>[15]</sup>中,目标物体最远处所在竖直平面称为远截面,为了将三维空间的物体显示在一个二维平面上,建立了一个三维空间到二维平面上的坐标映射关系;设置一个近截面,三维物空间的  $K$  点与光心  $O$  的连线与近截面的交点  $P$ ,即正确映射到二维屏幕上的对应点。令近截面与光心的距离  $Z_n$  与像距(像平面与光心的距离)相等,则近截面和像平面关于光心对称,可以由三维图形的三维-二维变换矩阵求出三维物点在近截面上的二维映射坐标;再根据该对称关系得出成像点在像平面上的坐标,也就是 SLM 应该选择透明的像素坐标;还需根据像素点距将像素坐标转换为像素行列序数。假设激光照射在目标平面上的一个三维坐标点  $K(X, Y, Z)$ , 则  $K$  点和  $O$  点的连线和近截面的交点为  $P(x, y, z)$ ,  $G$

$(x', y')$  为成像点。  $Z_f$  为光心  $O$  点到远截面的距离。

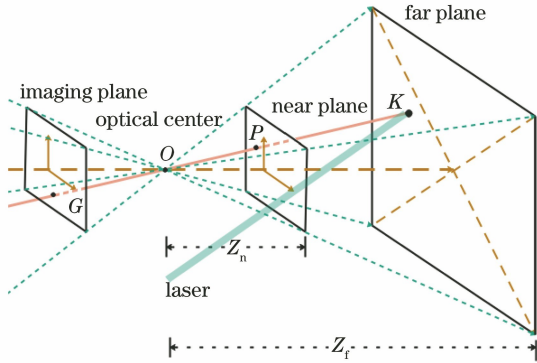


图 3 相机成像的三维-二维空间投影变换示意图  
Fig. 3 Schematic of 3D - 2D spatial projection transformation for camera imaging

根据投影矩阵变换原理,  $K$  点和  $P$  点之间的齐次坐标关系<sup>[16]</sup>为

$$[X, Y, Z, 1] \begin{bmatrix} \frac{2 \times Z_n}{w_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2 \times Z_n}{h_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z_f}{Z_f - Z_n} & 1 \\ 0 & 0 & \frac{Z_f \times Z_n}{Z_n - Z_f} & 0 \end{bmatrix} [x, y, z, w] = \quad (3)$$

式中:  $w_s$  和  $h_s$  为相机视场在近截面上的宽和高;  $w$  为齐次坐标项。(3)式计算结果为以光心为原点的相对坐标,  $x \in [-1, 1], y \in [-1, 1], z \in [0, 1]$ 。在像平面上该坐标与像素点距为  $\Delta p$  的液晶 SLM 像素行列序号  $i, j$  的转换关系为

$$i = \frac{(1 - y') \times h_s / 2}{\Delta p}, \quad (4)$$

$$j = \frac{(x' + 1) \times w_s / 2}{\Delta p}. \quad (5)$$

在控制模块上编程, 确定 SLM 透明选通位置的像素行列序号  $i, j$ , 这样在扫描过程中才能使探测方向能够正确对准光束扫描到的物点位置。但是, 目标的距离是未知的, 那么物点的坐标也就不确定, 因此也就无法确定 SLM 上所对应的哪一个像素应该被控制成透明使成像信号光透过。不过被照亮的物点位置肯定在激光束的直线传播路径上, 为了保证光束扫描到的物点反射光能够透过 SLM, 可以考虑由(1)、(2)式描述的这条直线或预计目标距

离范围所对应的线段, 将其经过三维空间所有的点映射到像平面处的 SLM 二维像素坐标后作透明选通处理。虽然 SLM 透明范围扩展为一条线段, 进入其中的后向散射光会比单点透明接收的方式多一些, 不过其中主要为来自激光束传输路径上的体散射光, 与无 SLM 的全开放接收方式相比, 仍然可屏蔽其他方向大量的多次散射光。

## 4 实验结果和分析

### 4.1 反射回波检测

在无外部光照、6.5 倍衰减长度的散射环境中, 利用高速响应和高灵敏度的 PMT 对 11.1 m 外的白色墙壁进行检测, 激光脉冲自发出后(同步信号脉冲参考光波峰)穿入室内烟雾空间的散射光、反射光回波的动态过程波形如图 4 所示, 其中虚线是无 SLM 屏蔽 PMT 直接检测的波形, 实线是在 PMT 前方插入了 SLM 并进行区域选通的波形, PMT 输出负压, 负压越大则光强越大。图 4 中第一个负压峰值表示同步参考光信号, 实线中的次波峰表示 PMT 探测到的反射回波信号, 虚线中反射回波由于被散射噪声掩盖而不明显, 两个波峰之间的杂散波为后向散射光噪声。可以看到, 有 SLM 屏蔽时, 在参考光脉冲与反射回波之间的散射光有所减少, 证明 SLM 对来自各个方向的多次散射光屏蔽起到了一定作用, 不过为了确保能够可靠接收到反射回波, SLM 沿着激光束的投影直线扩展比较宽, 所以仍然有一部分散射光混杂进来被 PMT 接收到, 但目标反射回波的尖峰能够明显从周边散射光中分辨出来; 而没有 SLM 屏蔽时, 测到的这一波峰前后混杂了较大一部分后向散射光和前向散射光(在反射波

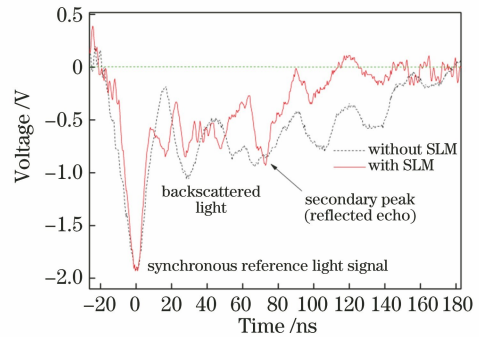


图 4 在 6.5 倍衰减长度的散射环境中, 同步参考信号、散射光及目标反射光回波的动态过程

Fig. 4 Dynamic processes of synchronous reference signal, scattered light and echo wave of reflected light under 6.5 times attenuation length in light-scattering environment

峰之后), 较难分辨出这一反射回波信号。100 ns 以后的几个波峰可能是四周墙面的反射光, 对测量结果无影响, 但也明显被 SLM 屏蔽掉了。

无外部光照时, 在 5.5, 6.5, 7.5 倍衰减长度的散射环境中, 利用 PMT 对 11.1 m 外的白色墙壁进行检测, 测到的脉冲发出参考光-散射光-反射光信号的波形如图 5 所示。可以看到, 6.5 倍衰减长度时, 反射回波还比较明显(裸眼可视距离约为 3.5 倍散射衰减长度), 可以从参考光以外的次最强波峰处分辨出来, 这也是程序处理波形数据时自动判断目标距离的依据; 在 7.5 倍衰减长度时, 反射回波的次波峰强度低于散射光, 难以再将目标反射光分辨出来; 考虑到四周白色墙壁反射引起的噪声干扰, 估计在宽阔的野外环境进行探测能达到 7 倍衰减长度或稍远。这与文献[11]所报道的水下扫描式距离选通成像系统的性能相当, 且本系统主要提供了一个成像扫描的可行方案, 能够在激光雷达设计方案及实施当中得到有效应用。

#### 4.2 三维成像

首先对深度距离不同的目标和背景进行三维探测, 如图6所示。探测目标与光源的距离为10.2 m, 墙

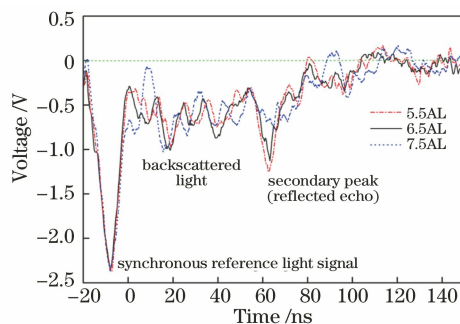


图 5 不同散射环境中, 同步参考信号、散射光及目标反射光回波的动态过程

Fig. 5 Dynamic processes of synchronous reference signal, scattered light and echo wave of reflected light in different scattering environments

壁与光源的距离为 11.1 m。根据目标的长宽比, 采用  $14 \times 17$  的扫描点阵, 通过 PC 程序, 读取示波器采集到发射光-散射光-反射光的时序信号波形数据并进行实时处理, 在读取出来的波形数据中, 识别出光反射回波的次波峰和激光输出参考光脉冲的时间间隔  $\Delta t$ , 得出距离  $c \times \Delta t / 2$ 。由 Windows 系统的三维图形库函数 Direct3D<sup>[17]</sup> 自动在 3D 设备环境中绘制出目标物体的三维形貌。

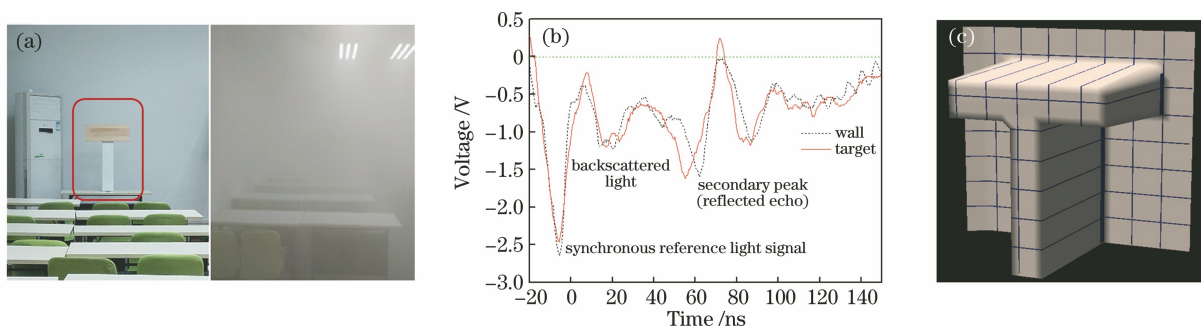


图 6 三维成像结果。(a)待测目标和实验环境;(b)6.5 倍衰减长度下, 同步参考信号、散射光及不同距离反射光的波形;(c)目标三维形貌

Fig. 6 Experimental results of 3D imaging. (a) Target to be tested and experimental environment; (b) waveforms of synchronous reference signal, scattered light, and reflected light with different distances under 6.5 times attenuation length; (c) 3D graph of target

需要说明的是, 实际应用系统可采用高速采样模块<sup>[18]</sup>替代实验中所用的示波器进行自动读取处理, 这样扫描速度和扫描点阵规模都有很大的提高。

#### 4.3 二维目标探测成像

声学成像在水下的探测受到散射的影响远比光学成像要小, 但需要在距离和密度相差较大的目标之间才能获得比较清晰的成像。光学成像除了外形和距离探测以外, 另一个优势就是还能够

探测到物体表面光反射率的变化, 也就是目标表面的明暗变化图案。将一个梯形黑色板块平铺在白色墙壁上, 如图 7(a) 所示, 在散射环境中它们的反射回波如图 7(b) 所示, 可以看到, 黑色目标仍然有较强的反射回波, 但其强度比白色墙壁背景弱。把  $9 \times 11$  扫描点阵得到的目标反射回波峰值绘制成一幅二维图像, 如图 7(c) 所示, 由于点阵行列数目较少, 呈马赛克图案, 但基本上可以看出梯形区域的基本形状。

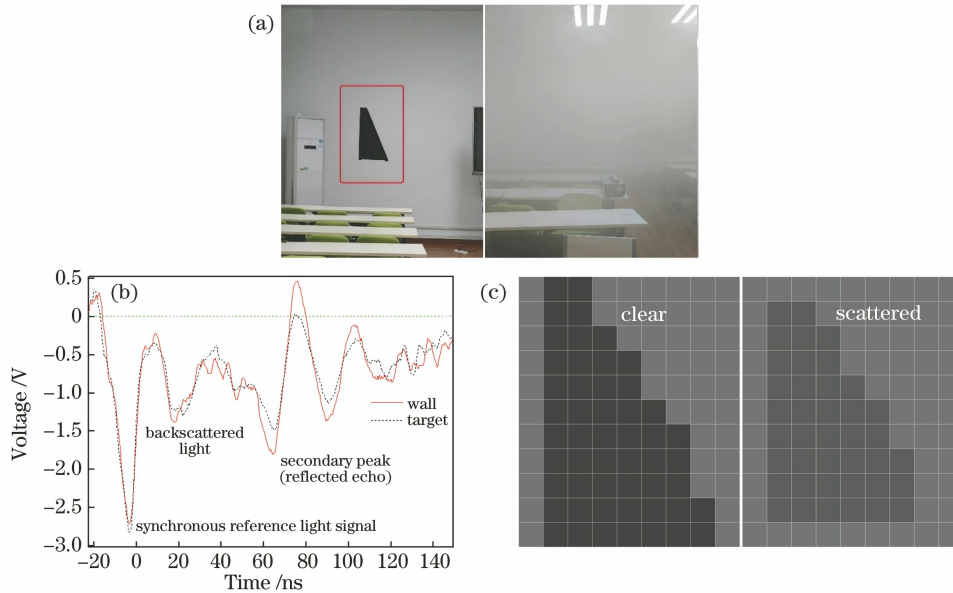


图7 二维成像实验结果。(a)待测目标和实验环境;(b) 5.5倍衰减长度下,参考光、散射光及不同强度反射光的波形;(c)清晰环境和散射环境中的二维成像结果

Fig. 7 Experimental results of 2D imaging. (a) Target to be tested and experimental environment; (b) waveforms of reference light, scattered light, and reflected light with different intensities under 5.5 times attenuation length; (c) 2D imaging results in clear and scattered environments

## 5 结 论

扫描式激光距离选通成像系统具有更好的抗散射性能,虽然成像时间比凝视型激光雷达长,在一定的应用领域上还是具有很高的性价比。利用成像镜头的投影光学计算和设计的动态控制 SLM 局部光线透过的距离选通成像扫描方法,能够有效地在光接收窄视角内同步跟踪窄束照明激光打到目标上的空间位置,从而准确接收到目标反射的信号光,同时在空间和时间上屏蔽散射光,增加成像信噪比。在烟雾制造的散射环境中进行实验,除了可应用于大气环境中,所设计的扫描方法也适用于水下的散射环境。另外在实际应用系统中,PMT 动态输出信号可被高速采集模块获取并保存,能够实现自动快速二维/三维成像。以上实验已经证明该系统的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Nie Y, He Z Y. Underwater imaging and real-time optical image processing under illumination by light sources with different wavelengths[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0710002.  
聂瑛,何志毅.不同波长光源照明的水下成像及光学图像实时处理[J].光学学报,2014,34(7): 0710002.
- [2] Zhang K X, Li S H. Research on current situation and development trend of radar anti-jamming technology[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(11): 1-4, 17.  
张凯旋,李淑华.雷达抗干扰技术现状及发展趋势研究[J].舰船电子工程,2018,38(11): 1-4, 17.
- [3] Yu H, Wang P G, Duan K H, et al. Application progress of synthetic aperture sonar in submarine pipeline inspection[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2015, 35(3): 20-23.  
于灏,王培刚,段康弘,等.合成孔径声纳技术在海底管道探测中的应用进展[J].海洋测绘,2015,35(3): 20-23.
- [4] Li H S, Wei B, Du W D. Technical progress in research of multibeam synthetic aperture sonar[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1760-1769.  
李海森,魏波,杜伟东.多波束合成孔径声纳技术研究进展[J].测绘学报,2017,46(10): 1760-1769.
- [5] Wang B N, Gao Y Y. Three dimensional image reconstruction based on range-gated laser imaging system[J]. Laser Journal, 2019, 40(6): 50-54.  
王柏娜,高煜好.基于距离选通激光成像系统的三维图像重构[J].激光杂志,2019,40(6): 50-54.
- [6] Zhao Y, Zhai B C, Wang J L, et al. Design and implementation of the laser range-gating imaging synchronization control system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(5): 526-529.

- 赵岩, 翟百臣, 王建立, 等. 激光距离选通成像同步控制系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 526-529.
- [7] Xu X W, Guo J, Yu Q Y, et al. An improved laser range gated imaging system[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(1): 3-5.
- 徐效文, 郭劲, 于前洋, 等. 一种改进的激光距离选通成像系统[J]. 激光与红外, 2004, 34(1): 3-5.
- [8] Lü W L, Zhang X, Liu K. Design and experimental study on a range-gated underwater laser imaging system [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(8): 198-202.
- 吕文磊, 张旭, 刘可. 一种距离选通水下激光成像系统设计及实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 198-202.
- [9] Wang F, Wang Y B, Yang M, et al. A denoising scheme for randomly clustered noise removal in ICCD sensing image[J]. Sensors, 2017, 17(2): 233.
- [10] Ying C S, Zhao P, Yue D, et al. Low light level image enhancement based on multi-layer slicing photon localization algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 2018, 27(3): 521-526.
- [11] Dagleish F R, Caimi F M, Britton W B, et al. Improved LLS imaging performance in scattering-dominant waters [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 3717: 73170E.
- [12] Liu B, Yu Y, Jiang S. Review of advances in LiDAR detection and 3D imaging [J]. Opto-Electronic Engineering, 2019, 46(7): 21-33.
- 刘博, 于洋, 姜朔. 激光雷达探测及三维成像研究进展[J]. 光电工程, 2019, 46(7): 21-33.
- [13] He Z Y, Luo M X, Song X Y, et al. Laser line scan underwater imaging by complementary metal-oxide-semiconductor camera [J]. Optical Engineering, 2017, 56(12): 123101.
- [14] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003, 25-64.
- [15] Eberly D H. 3D game engine design[M]. 2nd ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2007, 62-125.
- [16] Shapiro L S, Zisserman A, Brady M. 3D motion recovery via affine epipolar geometry [J]. International Journal of Computer Vision, 1995, 16(2): 147-182.
- [17] He Z Y, Qin X L, He N. Refraction analysis of optical wireless channel through air-ocean interface by graphic operations[J]. Optik, 2013, 124(15): 2050-2056.
- [18] Liu S. Design and implement of high speed data acquisition card based on FPGA [D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 1-3.
- 刘烁. 基于 FPGA 的高速数据采集卡设计与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 1-3.