

基于超阈值时间技术的激光关联成像

梅笑冬^{1,2}, 龚文林^{1*}, 韩申生¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对现有基于全波形采样的激光关联成像回波采集数据量大且测距精度和测距分辨率受限于采样率的问题, 研究了一种基于超阈值时间(TOT)技术的激光关联成像方法。利用基于 TOT 技术的时间宽度或峰值反推方法获取回波信号的强度信息, 分析了 TOT 响应阈值选取、激光脉冲宽度、TOT 测量误差对激光关联成像重构结果的影响。结果表明: 基于 TOT 技术的回波信号获取方法可以实现激光关联成像; TOT 响应阈值选为回波信号峰值的 35%、激光脉宽不小于 30 个采样间隔、TOT 测量误差的均方根误差小于 1 个采样间隔, 能够保证较好的重构质量。此外, 基于峰值反推获取目标回波信号强度信息的方法比基于 TOT 的时间宽度表征方法更准确。

关键词 遥感; 关联成像; 图像重建; 成像系统

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0410003

Laser Ghost Imaging Based on Time-Over-Threshold Technology

Mei Xiaodong^{1,2}, Gong Wenlin^{1*}, Han Shensheng¹

¹Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The existing laser-correlated imaging echo based on full waveform sampling experiences the problem of requiring a large amount of collected data for echo, and the limitation of the sampling rate to ranging accuracy and resolution. We propose a new ghost imaging technology based on time-over-threshold (TOT) technology to address this problem. A time width or peak inverse method based on the TOT technology is proposed to obtain the intensity information of the echo signal. The influences of the threshold choice of TOT, laser pulse width, and the measurement error of the ghost imaging reconstruction performance are also studied. Numerical simulation and experimental results demonstrate that the proposed technology can achieve laser correlation imaging. When the threshold is set to 35% of the maximum echo signal, the laser width is wider than 30 sampling intervals, and the root-mean-square error of the measurement error is not greater than 1 sampling interval, the reconstruction quality can be guaranteed. In addition, the method of obtaining the intensity information of echo signal based on peak inverse is more accurate than the time width method based on TOT.

Key words remote sensing; ghost imaging; image reconstruction; imaging system

OCIS codes 280.4788; 110.3010; 280.3640

1 引言

激光雷达在各领域的应用越来越广泛^[1-4]。为获取目标的距离像和强度像, 激光雷达需要同时测量回波的到达时间及信号强度。目前, 主要存在三种采样模式可以达到这一目的。第一种为基于高速模拟数

字转换器(ADC)的全波形采样方式。此采样方式利用 ADC 对回波信号进行高速采样, 获取回波信号的全部波形, 继而获得回波信号的强度及到达时间, 其特点是强度信息获取准确, 但是数据量大、测距精度受限。第二种为基于超阈值时间(TOT)^[5-6]的时间计数方式, 这种采样方案采用具有皮秒级精度的时间数

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2019-12-03; 录用日期: 2019-12-12

基金项目: 国防基础科研计划项目(D040301)、中国科学院青年创新促进会优秀会员基金(2017-2013162)

* E-mail: gongwl@siom.ac.cn

字转换器件(TDC)记录超过某一阈值的回波信号强度对应的时间宽度,利用开始时间获取回波信号到达时间,利用时间宽度反推获得的回波信号强度^[5],具备测距精度高、数据量小等优势。第三种为基于TDC+ADC的采样方式,该采样方案将回波信号分为两路,一路由TDC标记其上升沿时间从而获取回波信号的到达时间,对于另一路,利用峰值保持电路使该路电压输出保持为回波信号最大值,随后由低速ADC采集电压值从而获取回波信号强度,该采样方式具备测距精度高、数据量较小等优势,但是无法分辨回波信号内低于最大值的其他回波信号。

激光关联成像雷达是一种全新的凝视式激光成像体制,其原理是利用涨落光场对目标进行编码,并采用具有时间分辨能力的单像素探测器记录目标回波信号,进而通过计算回波信号与涨落光场之间的二阶关联函数来获取目标的图像信息^[7-11]。为了实现三维成像,与激光雷达类似,需要获取回波信号的到达时间及强度。目前,激光关联成像雷达的回波信号获取主要采用基于ADC的全波形采样方案^[12-14],该方案存在以下缺点:1)对一个未知距离的目标进行采样时,ADC需要在回波信号到来前持续进行高速采样,而实际上回波信号仅分布在时间轴极小的区间内,即所测得的信号中存在大量的冗余数据,这给后面的数据处理和存储带来极大负担;2)该采样方案的测距精度和距离分辨率与ADC的采样率相关,受成本、尺寸及物理特性等限制,目前ADC的采样率很难超过10 GSa/s,测距精度和测距分辨率不超过1.5 cm。由于TOT技术具有测距精度高、数据量小等特点^[15-16],本文率先将TOT技术应用到激光关联成像领域,提出了一种基于TOT技术的激光关联成像方法。采样器件为TDC,其皮秒量级的采样精度可以大大提高回波信号到达时间的测量精度,同时该采样方式仅对超过其响应阈值的回波信号的上升沿、下降沿时间进行记录,因此不会出现冗余采样,可大幅度降低数据量。本文首先构建了基于TOT技术的激光关联成像回波信号提取模型,进而数值模拟分析了TOT响应阈值、激光脉冲宽度、TOT测量误差等因素对激光关联成像质量的影响,最后搭建了一套实验平台并验证了本方案的可行性。

2 基于TOT技术的关联成像原理

2.1 激光关联成像的图像重建

根据激光关联成像的物理原理,目标图像 O_{GI}

可以通过(1)式求出^[17], (1)式为

$$O_{GI}(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i [I_i(x, y) - \langle I(x, y) \rangle], \quad (1)$$

式中: K 为测量次数; y_i 为第*i*次探测到的目标回波信号强度; $I_i(x, y)$ 为第*i*次测得的涨落光场强度分布函数; $\langle I(x, y) \rangle$ 表示涨落光场强度的时间平均值。

2.2 TOT技术原理及回波信号强度的反演

对于窄脉冲激光关联成像而言,涨落光场与目标相互作用后,第*i*次测量的回波信号 I_i 与时间 T_i 之间的关系可表示为

$$I_i(t) = y_i \exp\left[-\frac{(T_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

式中: μ 为回波信号峰值位置对应的时刻; σ 为回波信号的半峰全宽。对于现有的激光关联成像雷达而言,(1)式中 y_i 的获取是利用高速ADC设备对回波信号进行全波形采样,如图1(a)所示。由于涨落光场在时间上的分布为高斯型,经目标反射被探测器探测后,时间上仍然为高斯型分布。每条虚线代表一次采样,ADC记录下每个采样位置对应的幅值,即完成了一次回波信号的采集,将全波形信号的峰值作为探测到的目标回波信号强度 y_i 。

所谓TOT技术是指通过测量波形在某一固定阈值之上的时间来推断该波形实际峰值的技术手段。将待测信号送入高速比较器与一恒定阈值信号进行比较,低于阈值时输出为低电平,高于阈值时输出为高电平,于是获得了一定宽度的方形脉冲信号,如图1(b)所示。利用TDC测量此脉冲信号的上升沿与下降沿对应的时刻,计算二者之差即得到了TOT值 T_i 。由于不同峰值的回波信号其 T_i 也不相同,所以 T_i 一定程度上表征了回波信号的峰值大小,因此可以通过测量 T_i 获取回波信号峰值 y_i 。本文提出了两种获取 y_i 的方式:

1) 基于TOT技术的时间宽度获得回波信号 y_i : 由于 T_i 与 y_i 存在一定正相关性,即 y_i 越大则对应的TOT值 T_i 也越宽,因此可以直接将TOT值 T_i 作为 y_i 值用于图像重构;

2) 基于TOT的峰值反推方法获得回波信号 y_i : T_i 与 y_i 满足(2)式的关系,可以通过 T_i 反推 y_i , 设回波信号峰值处为时间零时刻,即 μ 为零,那么当阈值设置为 l 时,峰值反推获得的 y_i 可以通过(3)式求得:

$$y_i = l \exp\left(\frac{T_i^2}{4\sigma^2}\right). \quad (3)$$

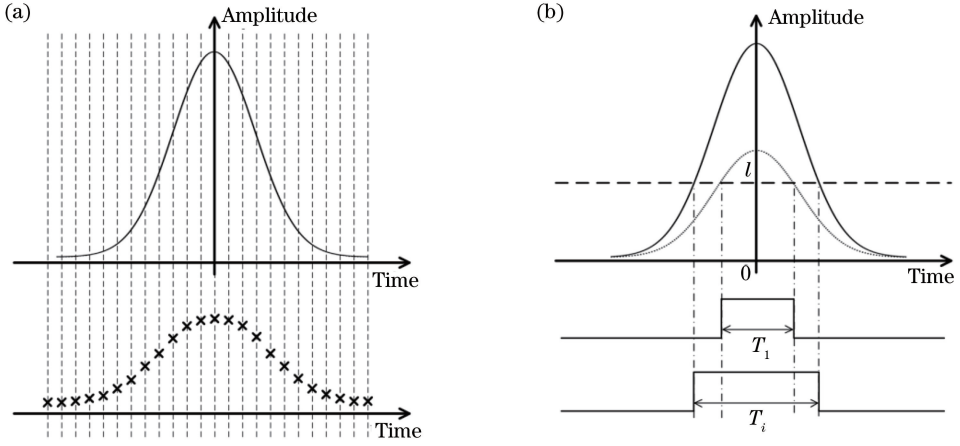


图 1 采样方案示意图。(a) ADC 全波形采样；(b) TOT 采样

Fig. 1 Schematic of sampling schemes. (a) ADC full waveform sampling; (b) TOT sampling

3 数值仿真与实验

3.1 仿真模型

激光关联成像的探测过程满足

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (4)$$

式中： $\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{pmatrix}$ 表示探测到的目标回波信号强度，为

$K \times 1$ 向量； $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_K \end{pmatrix}$ 表示产生的涨落光场分布，为

$K \times N$ 矩阵， \mathbf{A}_i 为第 i 次涨落光场的强度分布； \mathbf{X} 表示目标物体，为 $N \times 1$ 的向量。将 y_i 及 $I_i(t) = l$ 代入(2)式，即可得到第 i 次采样的 TOT 值 T_i 。

仿真中，测量矩阵 \mathbf{A} 采用 4096×4096 的 Hadamard 矩阵，即对应 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ 的分辨率和 4096 次采样。仿真所用的目标如图 2(a)所示，目标分辨率为 $64 \text{ pixel} \times 64 \text{ pixel}$ ，四个字母的灰度等级分别为 100%、80%、60%、40%。采用重构结果与仿真原图像的均方误差 (MSE) 来定量表征图像重构结果的好坏： $R_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (O'_{u,v} - O_{u,v})^2$ ，其中 m, n 分别为图像的宽和高， $O'_{u,v}, O_{u,v}$ 分别为重构图像和原始图像在 (u, v) 位置处的强度。

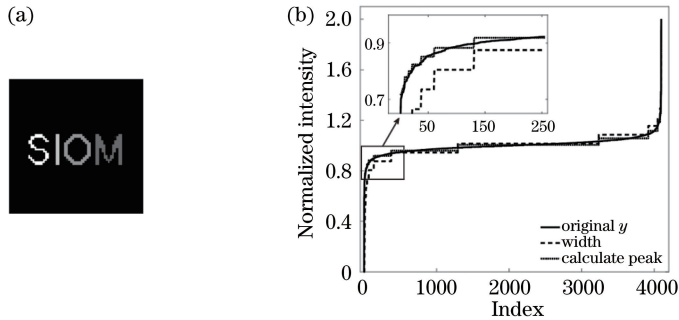


图 2 仿真目标与不同获取方法下回波信号对比图。(a) 仿真所用的原始目标；

(b) 原始回波信号，以及经 TOT 宽度、峰值反推后的信号的均值归一化曲线(值经过从小到大重新排列)

Fig. 2 Simulated target and comparison of echo signal using different acquire approaches. (a) Target applied in simulation;

(b) normalization curves of mean value of original signal, and signal inferred from TOT width and peak (values are rearranged from small to large)

3.2 TOT 响应阈值选取对激光关联成像质量的影响

对于 TOT 技术而言，阈值 l 的大小会直接影响到回波信号强度信息的准确提取。图 3 给出了在不同阈值下 TOT 与信号峰值的关系。由图 3 可以

看出：当 TOT 阈值选取为信号 y 最大值的 10% 时，有效采样区间包括了峰值 10% 至 100% 的大部分。但是在这种低阈值下，TOT 与对应峰值存在严重的非线性关系，直接将 TOT 作为信号 y_i 会使图像产

生严重失真,需要利用(3)式进行峰值反推;同时,对于峰值较高的脉冲,量化精度将大幅降低。此外,随着阈值的升高,虽然非线性效应逐步减弱,但是信号可测量范围也在大幅减少,这对应于激光关联成像体制下对图像重构较为重要的小回波信号无法被采集到,同时也使有效采样数减少,最终导致关联成像质量退化^[18]。为平衡两者关系,确定阈值选取的最佳区间,本文进行了数值仿真,根据激光关联成像重构结果确认合适的阈值选取区间。

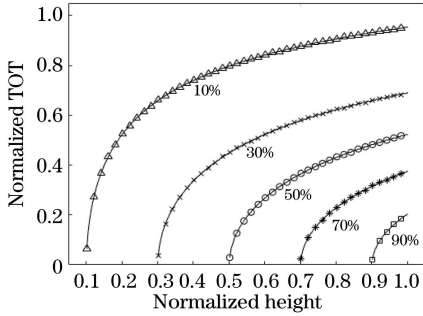


图 3 不同阈值下的 TOT 与对应峰值关系

Fig. 3 Relationship between TOT and peak value under different threshold

为了比较 2.2 节所述两种 y_i 信号获取方式的性能,在阈值 l 选为最大信号强度的 30% 时,对原始信号 y ,以及利用两种方法获得的回波信号的均值进行了归一化,并由小到大重新排列,所得曲线如图 2(b) 所示。由图 2(b) 可以看出:采用方法二进行峰值反推后的曲线与原始信号的拟合程度要优于方法一。

为了定量分析阈值选取对激光关联成像结果的影响,图 4 给出了采用方法一和方法二重构的仿真结果和对应的 MSE 曲线,此时阈值选取范围为 0.15 至 0.51。由图 4 可以看出:MSE 曲线出现了由高到低再到高的过程,即在阈值选择过低或过高时重构质量都有较大下降,这一趋势与峰值和阈值关系是吻合的。在低阈值区间,基于峰值反推方法的重构结果优于基于 TOT 的重构结果,这是由于反演过程消除了低阈值下的 TOT 与峰值之间的非线性关系,更准确地还原了 y 信号。随着阈值的提高,重构质量逐渐得到改善,但当阈值超过 0.4 时,有效采样数的下降导致重构质量再次降低,对应的 MSE 值也随之升高。根据不同阈值下的 MSE 曲线,文中阈值选取为回波信号最大值 35% 附近。

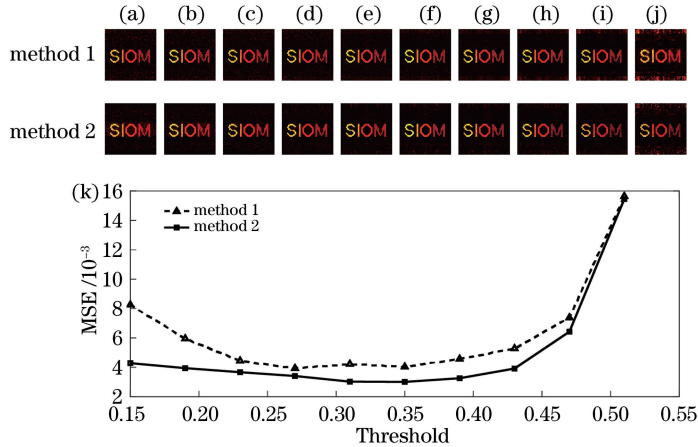


图 4 阈值为 0.15~0.51 时的仿真结果与 MSE 曲线。(a)~(j) 两种方法的重构结果;(k) 重构结果的 MSE 曲线

Fig. 4 Simulation results and corresponding MSE curves with threshold from 0.15 to 0.51.

(a)~(j) Reconstruction results of two methods; (k) MSE curves of reconstruction results

3.3 激光脉冲宽度对激光关联成像质量的影响

在实际应用中,还应考虑到 TOT 测量分辨率与激光器脉冲宽度的匹配。虽然较窄的激光脉冲宽度能够保证较高的距离分辨率,但是对于激光关联成像而言,为了保证信号 y_i 的准确性,TOT 的测量分辨率需要满足一定要求。图 5 给出了激光脉冲宽度与激光关联成像质量之间关系的数值仿真结果。需要指出的是:仿真中激光脉冲宽度的单位为采样间隔,阈值选取为回波信号最大值的 35%。由图 5 可以看出:当激光脉冲宽度较小时,关联成像质量退化

较为严重,这是因为随着激光脉冲宽度变窄,TOT 的变化量会相应减少,而 TDC 的分辨率是一定的,这导致 TOT 的有效量化位出现退化(对应于探测信号的量化精度下降),最终导致关联成像重构质量下降。因此,为了保证目标灰度图像的准确性,根据 MSE 曲线,要求激光脉冲宽度不小于 30 个采样间隔。

3.4 测量误差对激光关联成像质量的影响

利用 TDC 对 TOT 进行测量时,芯片电压、温度等会导致 TOT 技术所记录的目标到达时间存在一定的随机测量误差。为了分析这一测量误差对激

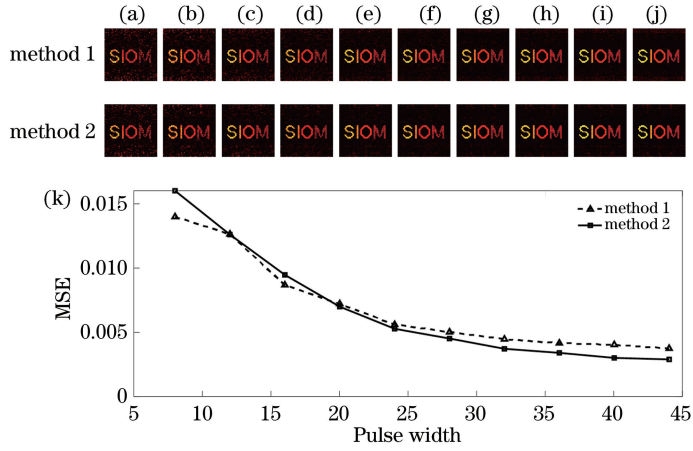


图 5 脉冲宽度为 7~44 个采样间隔时的仿真结果与结果的 MSE 曲线。

(a)~(j) 两种方法的重构结果;(k) 重构结果的 MSE 曲线

Fig. 5 Simulation results and corresponding MSE curves with pulse width from 7 to 44 sampling intervals.

(a)~(j) Reconstruction results of two methods; (k) MSE curves of reconstruction results

光关联成像的影响,进行了相应的数值仿真。根据文献[5],TDC 的测量误差可以用均方根误差(RMSE)衡量,RMSE 值越大说明测量误差越大。对一个固定宽度的信号进行多次测量,该 TDC 测量误差的 RMSE 的计算式为

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K (q_i - \bar{q})^2}{K - 1}}, \quad (5)$$

式中: q_i 为第 i 次采样值; \bar{q} 为多次采样的均值; K 为总采样数。为避免阈值选取和激光脉冲宽度的影响,仿真中阈值选取为回波信号最大值的 35%,激光器脉冲宽度为 30 个采样间隔。

TOT 的测量误差对激光关联成像质量影响的仿真结果如图 6 所示。同样地,图中 RMSE 的单位为采样间隔。由图 6 可以看出:随着 RMSE 值的升高,重构质量逐渐变差,当 RMSE 值超过 1 个采样间隔时,重构质量开始明显退化。值得注意的是,当 TOT 的测量误差较大时,基于峰值反推方式的重构质量比直接采用 TOT 进行重构的要差。经分析认为,当 TDC 测量的 TOT 数值存在误差时,峰值反推的方式会因为其非线性关系,进一步放大这一误差进而影响重构质量。根据仿真结果,为了不影响激光关联成像的重构质量,TDC 测量误差的 RMSE 值应不大于 1 个采样间隔。

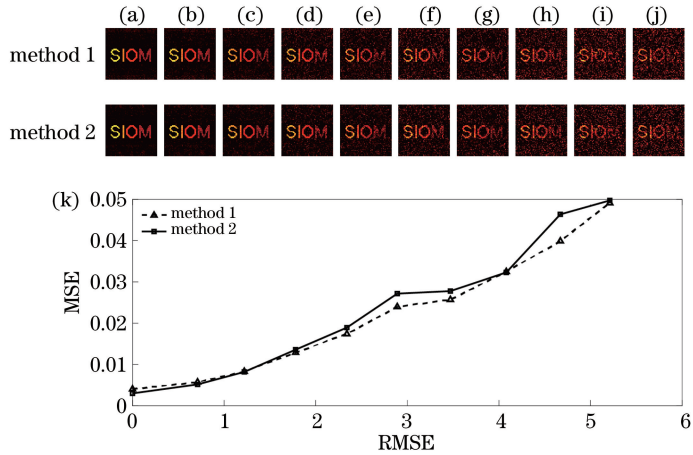


图 6 测量误差为 0~5.2 个采样间隔下的仿真结果与对应 MSE 曲线。

(a)~(j) 两种方法的重构结果;(k) 重构结果的 MSE 曲线

Fig. 6 Simulation results and corresponding MSE curves with RMSE from 0 to 5.2 sampling intervals.

(a)~(j) Reconstruction results of two methods; (k) MSE curves of reconstruction results

3.5 实验验证

为了验证基于 TOT 技术的激光关联成像方法的可行性,搭建了如图 7 所示的实验平台,对近距离灰度目标进行了成像实验验证。采用典型的 CGI (computational ghost imaging) 成像实验架构^[19],脉冲宽度 4 ns、重复频率 1 kHz、中心波长 532 nm 的脉冲激光经焦距 $f_0=50$ mm 的扩束镜(lens1)扩束后辐照于数字微镜设备(DMD)上,通过 DMD 调制形成涨落光场,为了保证与仿真结果一致,涨落光场仍然选用 4096×4096 的 Hadamard 编码方式。经 DMD 调制后,反射光场经焦距 $f_1=150$ mm 的发射透镜(project lens)成像至待测目标上,其中 DMD 面与成像透镜的距离 $z_0=157$ mm,目标面至发射透镜距离 $z_1=3.2$ m。实验目标为打印在 A4 纸上不同灰度等级的“SIOM”四个字,各字母的灰度等级分别为 100%、80%、60%、40%。经目标反射后,由口径为 25.4 mm 的接收透镜(receive lens)收集目标反射的回波光。为了对比本文所提的基于 TOT 采样方案和基于 ADC 采样方案的重构结果,经接收透镜收集的光子由分光比为 1:1 的分束器(BS)分为两路,并被相同型号的光电倍增管(PMT)探测。根据 3.2 节的结论,设置 TOT 阈值为回波信号最大值的 35%,选取的 TDC 采样间隔为 64 ps, TDC 量化模块的测量误差 RMSE 为 64.8 ps,约等于 1 个采样间隔。图 8 给出了基于 TOT 采样方案和基于 ADC 采样方案的关联成像实验结果。从图 8(c)和 8(d)可以看出:基于 TOT

技术的激光关联成像方法成功重构了目标的灰度图像;与图 8(a)所示的基于采样率 2 GSa/s 的 ADC 的采样方案重构结果相比,成像质量有一定的退化,并且基于 TOT 峰值反推方法的重构结果仅仅是略微优于基于 TOT 的重构结果,这与图 6 所示的数值仿真结果相符合。对比满足 Nyquist 采样率(即 500 MSa/s)的 ADC 采样方案的重构结果, TOT 方案的重构质量有明显提升。需要说明的是,相比于上面的仿真结果,基于 ADC 和 TOT 采样方案的图像重建实验结果有较大的退化,主要原因是上述实验装置的接收镜头口径有限,部分高频能量无法被接收,导致 $y \neq AX$,这对于基于 Hadamard 编码方式的关联成像影响较大。

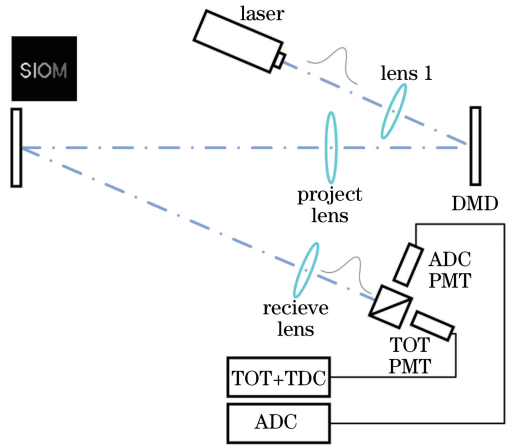


图 7 基于 TOT 的关联成像验证实验设置
Fig. 7 Experimental setup for TOT-based ghost image

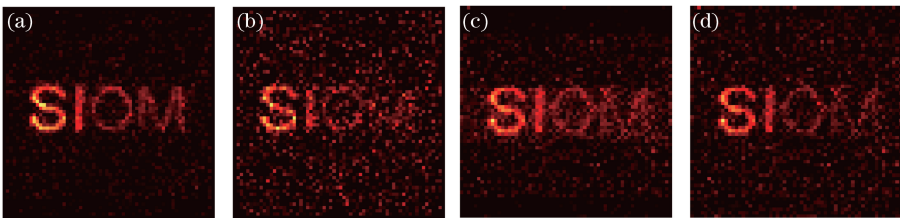


图 8 关联成像实验结果。(a)基于采样率为 2 GSa/s 的 ADC 的重构结果;(b)基于采样率为 500 MSa/s 的 ADC 的重构结果;(c)使用 TOT 采样不进行峰值反推的重构结果;(d)使用 TOT 采样并进行峰值反推的重构结果

Fig. 8 Experimental reconstruction results of ghost imaging. (a) Experimental result applying ADC with 2 GSa/s sampling rate; (b) experimental results applying ADC with 500 MSa/s sampling rate; (c) experimental results applying TOT without peak inverse; (d) experimental results applying TOT with peak inverse

4 讨 论

值得注意的是,3.3 节的仿真结果表明:当涨落光场的编码方式为 Hadamard 时,激光脉冲宽度须不小于 30 个采样间隔,才能保证关联成像的重构结果较好;若 TOT 技术的采样间隔为 64 ps,则

要求激光器脉冲宽度不小于 1.8 ns(即对应 0.27 m 的测距分辨率),这对激光关联成像距离分辨率的提升比较有限,这主要是由本文选择的 Hadamard 编码具有抗噪性低导致的。为了说明这一因素,图 9 给出了 ADC 全波形采样方案下,采用 Hadamard 编码作为测量矩阵,回波信号量化精度

对关联成像质量影响的仿真结果。由图 9 可以看出:当信号量化精度较低时,与图 5 所示的结果类似,基于 ADC 采样方案的关联成像图像重构结果退化严重,当信号量化精度达到 5 bit(即 32 个测量间隔)时,重构结果基本达到要求,与上述基于

TOT 技术的仿真结果一致。因此,实际应用中可以选择抗噪性较强的编码方式,比如随机相位板形成的负指数分布涨落光场。在该编码方式下,即使信号量化精度为 1 bit,关联成像仍然可以获得较好的图像质量^[20-21]。

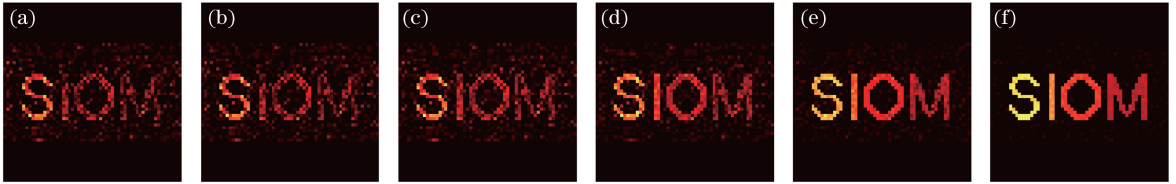


图 9 ADC 全波形采样方案下,不同信号量化精度下的重构结果图。

(a) 1 bit; (b) 2 bits; (c) 3 bits; (d) 4 bits; (e) 5 bits; (f) 6 bit

Fig. 9 Reconstruction results of ADC fill waveform sampling scheme with different measurement accuracy.

(a) 1 bit; (b) 2 bits; (c) 3 bits; (d) 4 bits; (e) 5 bits; (f) 6 bit

5 结 论

本文首次将 TOT 技术应用到激光关联成像领域,提出并验证了基于 TOT 技术的激光关联成像的可行性。与现有的基于 ADC 的全波形采样方案相比,本方案具备更小的数据量以及更高的测距分辨率。研究表明:当探测光场采用 Hadamard 编码方式时,TOT 的响应阈值选取为最大回波信号的 35%,激光脉冲宽度不小于 30 个采样间隔,测量误差 RMSE 小于 1 个采样间隔,能够保证较高的关联成像图像重构质量。此外,优化设计抗噪性更强的编码方式和提升 TOT 的精度是进一步提升该技术测距分辨率和测距精度的关键。该技术有望在激光关联成像领域以及其他激光雷达领域得到广泛应用。

参 考 文 献

[1] Mcmanamon P, Buell W, Choi M, et al. Laser radar: progress and opportunities in active electro-optical sensing [J]. Washington, DC: National Academy of Sciences, 2014.

[2] Itzler M A, Entwistle M, Wilton S, et al. Geiger-mode LiDAR: from airborne platforms to driverless cars[C] // Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology 2017, June 26-29, 2017, San Francisco, California. Washington, D. C.: OSA, 2017: ATu3A.3.

[3] McManamon P F. Review of ladar: a historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology[J]. Optical Engineering, 2012, 51(6): 060901.

[4] Shapiro J H, Capron B A, Harney R C. Imaging and

target detection with a heterodyne-reception optical radar [J]. Applied Optics, 1981, 20(19): 3292-3313.

[5] Becker R, Grillo A, Jacobsen R, et al. Signal processing in the front-end electronics of BaBar vertex detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1996, 377(2/3): 459-464.

[6] Liu R, Zeng M, Tian Y, et al. Application of the dynamic time over threshold method for semi-Gaussian signals [J]. Journal of Instrumentation, 2018, 13(2): P02020.

[7] Wang C L, Mei X D, Pan L, et al. Airborne near infrared three-dimensional ghost imaging LiDAR via sparsity constraint [J]. Remote Sensing, 2018, 10(5): 732.

[8] Erkmen B I. Computational ghost imaging for remote sensing[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2012, 29(5): 782-789.

[9] Gong W L, Zhao C Q, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 26133.

[10] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(14): 141123.

[11] Hardy N D, Shapiro J H. Computational ghost imaging versus imaging laser radar for three-dimensional imaging [J]. Physical Review A, 2013, 87(2): 023820.

[12] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution[J]. Nature Communications, 2016, 7: 12010.

[13] Mei X D, Gong W L, Yan Y, et al. Experimental

- research on prebuilt three-dimensional imaging lidar [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43 (7): 0710003.
- 梅笑冬, 龚文林, 严毅, 等. 可预置强度关联激光三维成像雷达实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0710003.
- [14] Li D, Cang J, Xia X X, et al. Investigation on back-modulation long distance three-dimensional imaging based on compressed sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0111002.
- 李东, 仓吉, 夏新星, 等. 基于压缩感知的后调制远距离三维成像研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111002.
- [15] Shimazoe K, Orita T, Nakamura Y, et al. Time over threshold based multi-channel LuAG-APD PET detector[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 731: 109-113.
- [16] Jung J, Choi Y, bom Kim K, et al. An improved time over threshold method using bipolar signals[J]. Physics in Medicine & Biology, 2018, 63 (13): 135002.
- [17] Gong W L. High-resolution pseudo-inverse ghost imaging[J]. Photonics Research, 2015, 3(5): 234-237.
- [18] Luo K H, Huang B Q, Zheng W M, et al. Nonlocal imaging by conditional averaging of random reference measurements[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29 (7): 074216.
- [19] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 061802.
- [20] Li M F, Zhang Y R, Luo K H, et al. Time-correspondence differential ghost imaging [J]. Physical Review A, 2013, 87(3): 033813.
- [21] Li J H, Yang D Y, Luo B, et al. Image quality recovery in binary ghost imaging by adding random noise[J]. Optics Letters, 2017, 42(8): 1640-1643.