

水平大气环境 34 km 单像素成像实验

李明飞^{1,2}, 阚宝玺¹, 霍娟^{1,2}, 阎璐¹, 刘院省^{1,2}

(1. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;
2. 中国航天科技集团有限公司 量子工程研究中心, 北京100094)

摘要: 搭建了远距离、高分辨率单像素成像实验装置, 完成了白昼时段水平 34 km 距离、分辨率 0.8 m 的自然目标的单像素成像。单像素成像测量基采用多尺度排序的 Hadamard 矩阵, 调制后经两个光电探测器进行差分来实现 Hadamard 调制测量, 利用压缩率 25% 的测量信号和快速 Walsh 变换算法, 实现了成像速度 2 帧/秒 @128 pixel×128 pixel。定义了一种人机交互的信噪比评价方法计算重建图像质量, 研究了单像素成像积分时间与图像质量关系, 评价结果与视觉效果相符合。提出的单像素成像方案在低成本的远距离红外成像方面有潜在应用价值。

关键词: 单像素成像; Hadamard 矩阵; 压缩采样

中图分类号: O438.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0925002

Single-pixel imaging experiment through 34 km horizontal atmosphere

Li Mingfei^{1,2}, Kan Baoxi¹, Huo Juan^{1,2}, Yan Lu¹, Liu Yuanxing^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;
2. Quantum Engineering Research Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China)

Abstract: Experimental setup of long distance and high resolution single-pixel imaging system was set up. Images of natural target were obtained through 34 km outdoors horizontal atmosphere in daylight, about 0.8 m resolution was achieved. The multiple resolution level of Hadamard matrix was used as measurement basis, and owing to 25% compressive sampling and differential measuring by two photon-multiplier tubes, video frame rate of 2 Hz@128×128 pixels was achieved with the proposed hardware and fast Walsh transform algorithm. An signal-to-noise ratio (SNR) was defined based on human-computer interaction interface to estimate the qualities of the recovered images. The relationship between image qualities and exposure times were researched. The proposed scheme has the potential application in long distance and high resolution infrared imaging with low cost setup.

Key words: single-pixel imaging; Hadamard matrix; compressive sampling

收稿日期: 2019-04-05; 修订日期: 2019-05-03

基金项目: 国防基础科研计划 (JCKY2016601C005); 国家自然科学基金 (61805006)

作者简介: 李明飞 (1986-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事关联成像相关方面的研究。Email: mf_li@sina.cn

0 引言

单像素相机概念, 由 Candes、Tao 等人于 2006 年正式提出^[1-2], Rice 大学进行了实验验证^[3]。其主要特点是利用了压缩感知理论。其原理是: 对稀疏或可压缩的信号进行少量非适应性的线性测量, 可以接近百分之百地恢复出原始信号, 一定意义上突破了 Shannon 采样定理的限制, 还具有超灵敏探测的优势等^[4]。目前用于单像素成像的压缩感知算法, 测量次数在某些条件下可达到 1% 压缩采样^[5], 极大降低了图像获取效率。尽管压缩感知算法在单像素成像中应用广泛, 因其采用稀疏约束、迭代优化等算法处理方式, 导致计算时间较长、稳定性差的问题, 也因此吸引了大批学者试图针对上述不足找到普适性、或者更有效的解决方案, 相应地也产生了大量研究成果^[2-9]。

近年来, 另一种高速、稳定的单像素成像方案引起人们的注意。基于 Walsh-Hadamard 变换方法^[10-13], 可稳定、快速成像, 算法存在快速变换算法且硬件易于实现; 采用二值 Hadamard 矩阵作为调制矩阵, 易于在高速空间光调制器件 DMD 上实现; 调制矩阵生成速度快且无需存储; Hadamard 作为测量矩阵, 其均值不变且具有正交特性, 利于光电探测器实现线性响应, 故探测误差小。不足在于, 基于 Walsh-Hadamard 变换方法要求测量次数与被测图像的像素数相等, 要得到 128 pixel×128 pixel 的图像, 需加载的测量基和测量次数为 16 384 次。随图像增大, 测量次数成比例增加, 相应地测量时间随之增长。

针对上述问题, 文中提出了多尺度的 Hadamard 测量矩阵编码, 在 Walsh-Hadamard 变换基础上, 汲取了压缩感知思想的同时, 又保证了图像重建算法能够快速变换的特性^[14]。为验证算法实际成像效果, 搭建了一台适用于远距离高分辨成像的实验装置, 在 25% 压缩采样条件下研究了单像素成像, 并在远距离外场环境下进行了测试。

1 实验装置原理及组成

单像素成像实验装置, 如图 1 所示。单像素成像采用太阳光作为照明光源, 目标物体反射的光, 经过望远镜系统进行放大, 经过特殊设计的二次成像光

学系统, 分别成像到 CCD 相机和数字微镜器件 (Digital Micro-mirror Device, DMD) 上, DMD 通过控制加载特定矩阵 H_i 对 DMD 微镜进行调制, 将光束反射到 $\pm 24^\circ$ 两个反射方向; 经由 DMD 反射的光束分别被收集到光电倍增管 PMT1 和 PMT2 上并完成光电转换。电路模块 A/D 将 PMT1 和 PMT2 模拟电信号进行数字化, 并在计算机上完成差分运算 (即相减运算), 得到探测的强度信号 I_i , 其中 i 为探测次数 $i=1, 2, 3, \dots, M$, M 为测量总次数。

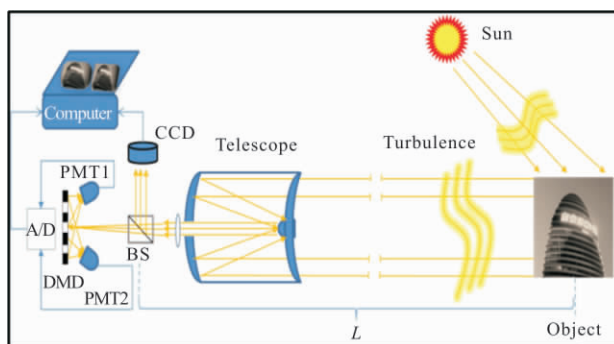


图 1 单像素成像实验装置原理图

Fig.1 Schematic of the experimental setup of single-pixel imaging

实验装置实物图如图 2 所示。望远镜为 $d=280\text{ mm}$ 口径, $f=2\ 800\text{ mm}$ 焦距的马克托夫-卡赛格林式折返望远镜, 后端设计了二次成像光学系统。光学系统整体焦距 $F=8\ 500\text{ mm}$, 角分辨率 $\theta=25\ \mu\text{rad}$; 空间光调制器 DMD 采用美国 TI 公司 $1\ 920\times 1\ 080$ 微镜, 0.95 in ($1\text{ in}=2.54\text{ cm}$), 调制速度最大 10 kHz ; 相机采用大恒水星系列 MER-030-120UC, 像素数 656×492 , 感光尺寸 $1/3\text{ in}$; 探测器采用滨松 H10723-20 型号 PMT 及控制电源; 数据采集卡 A/D 转换精度为 16 bit, 采样频率设置为 200 kHz 。



图 2 单像素成像实验装置

Fig.2 Single-pixel imaging experimental setup

实验系统中, CCD 相机与 DMD 共用同一成像系统, 因此二者分辨率相同。但受 CCD 感光面 1/3 in 限制, DMD 像面成像区域面积是 CCD 的 9 倍, 即 DMD 对应的单像素成像视场将是 CCD 视场的 9 倍。当然, 文中主要针对湍流和分辨率进行研究, 二者的感光面差异并不影响研究结论。

2 多尺度 Hadamard 编码及重建算法

传统关联算法, 将获得的强度信号 I_i 与调制矩阵 H_i 一一对应进行关联运算, 得到图像 T 的各个像素点的灰度, 即:

$$T = \sum_i H_i * I_i / M \quad (1)$$

式中: T 为物体灰度; H_i 为调制矩阵; I_i 为两个 PMT 差分后的强度信号; M 为总测量次数; i 对应每次测量序号。该方法需要每次运算都调用测量矩阵, 计算过程产生的数据量较大。

对于 Hadamard 调制, 定义整个调制矩阵为 H , 则调制矩阵 H_i 是从总的测量矩阵 H 中抽取行或列, 排列成二维图案形成的测量基矩阵, 因为 Hadamard 矩阵是正交阵, 需要进行全采样测量才能保证矩阵的正交完备性。文中发现对 Hadamard 矩阵进行重新排序后, 即使采用部分测量也可以保证其正交性。二维测量基矩阵在变换域的空间频率, 相当于其在相应表象下的稀疏性, 因此按测量基疏稀度进行排序具有合理性。定义第 i 个测量基矩阵的稀疏度 $S(i)$ 为:

$$S(i) = \|\Psi H_i\|_1 \quad (2)$$

式中: Ψ 为 Haar 小波基; $\|\cdot\|_1$ 表示 l_1 范数。按照 $S(i)$ 将其值按从小到大排序, 则 Hadamard 矩阵每个测量基相当于按低空间频率到高空间频率排序。以 16×16 大小的 Hadamard 测量基矩阵为例, 排序前和排序后顺序如图 3 所示。

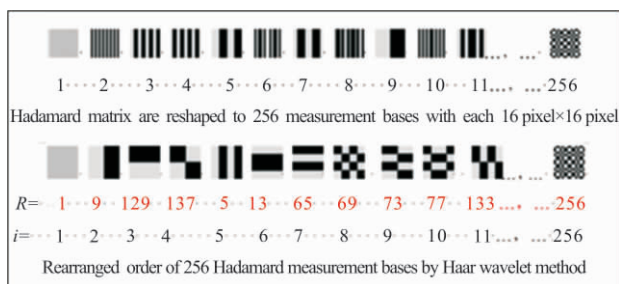


图 3 测量基按 Haar 小波变换系数和排序

Fig.3 Measurement basis are reordered by the sum of the Haar wavelet transform coefficients

图 3 中第一排测量基图案是 Hadamard 矩阵按行抽取的顺序, 第二排测量基图案是按公式(2)计算后排列顺序, R 代表重新排序后的测量基序号与原始序号的对应关系。从图 3 可见, 排序后的 H 测量基从低分辨尺度“大块”逐渐向高分辨率“小块”变化, 并且在特定阶次表现出正交的特性, 从而使压缩测量成为可能。

采用公式(3)排序后的测量矩阵, 可利用 Hadamard 变换进行单像素成像。在文中第 1 节提到探测的强度信号 I_i , 由于是按公式(3)排序后的测量值, 在按排序序号对应 Walsh 排序后, 可快速重建^[12-13], 在采样后, 只需将未采样的值设置为 0 即可, 重建算法为:

$$T_{1 \times M} = \text{Walsh}(I, M) \quad (3)$$

式中: $I = [I_1, I_2, I_3, \dots, I_M]$, Walsh 表示 Walsh 序的快速 Hadamard 变换, 变换后进行归一化和重新将 $T_{1 \times M}$ 形成二维图像 T 。

3 外场实验结果与分析

为测试单像素成像在室外成像可行性, 以及近地面水平大气远距离条件下, 单像素成像是否受大气湍流影响, 利用搭建的单像素成像实验装置进行了外场测试和成像实验。成像目标选为望京 SOHO 大厦 T3 楼, 高 200 m, 楼宇字体大小为 4 m×4 m, 楼层高度约 4.3 m, 在 100 m 处利用相机拍摄的图像如图 4 所示。



图 4 待成像目标

Fig.4 Target to be imaged

楼宇字“望京 SOHO”是可表征图像分辨率的特征图像。实验中将样机对准该目标, 进行多帧单像素成像数据的采集, 从图 2 中可观察到, 目标已经超出人眼视距。

通过实验装置中 CCD 相机通道对目标成像, 实

验效果如图 5 所示。受 CCD 相机感光面限制, 图 5 中图像由 4 次拍摄的图像数据拼接而成, 对应图 4 中的楼宇字“望京 SOHO”部分。其中图 5(a)、(c) 对应同一区域不同时刻成像结果, 图 5(b)、(d) 对应同一区域不同时刻成像结果, 四幅图的曝光时间均相同。通过对比图 5(a) 与 (c) 或 (b) 与 (d) 能够明显观察到大气湍流对成像质量的影响, 图像产生了畸变和分辨率下降, 在连续成像过程中图像位置随时间产生随机移动。

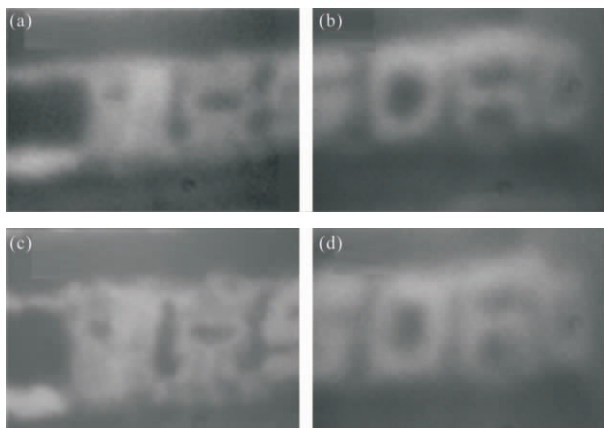


图 5 CCD 相机通道成像数据
Fig.5 Images captured by CCD camera

针对同一目标, 利用单像素成像通道获得成像结果如图 6 所示。图 6 中图像大小 128 pixel×128 pixel, 对应全采样次数 $M=16\ 384$ 。调制器 DMD 微镜像面面积是 CCD 相机的 9 倍, 因此视野较大。

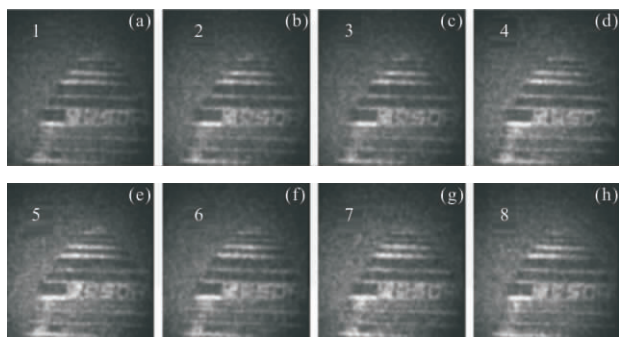


图 6 单像素成像连续 8 帧图像结果
Fig.6 Single-pixel imaging, 8 frames

图 6 中 8 帧连续采集数据后重建结果, 测量次数为 $M=4\ 000$, DMD 调制速度设置为 8 kHz, 对应成像速度为 2 Hz, 每张图像算法重建时间 0.003 s, 远小于测量时间。从每帧单像素成像结果来看, 楼宇字中

的字母“S”和“O”人眼可以分辨, 其他细节则较为模糊。就上述数据而言, 无法区分图像像质下降是由于实验装置系统噪声影响还是受大气湍流影响造成。按字母“S”, 字体高度 4.0 m, 线宽约 0.8 m, 结合 GPS 地图定位, 目标距离 34 km, 可推算原理样机达到的角分辨率 $\geq 23.5\ \mu\text{rad}$ 。

图 6 中, 挑选一帧图像对应的原始数据在图 7 中给出, 横轴为采集次数 M , 纵轴为两路 PMT 的电压差值 I_i , 相比于全采样 16 384 次测量数据, 重建图像压缩采样 25%。

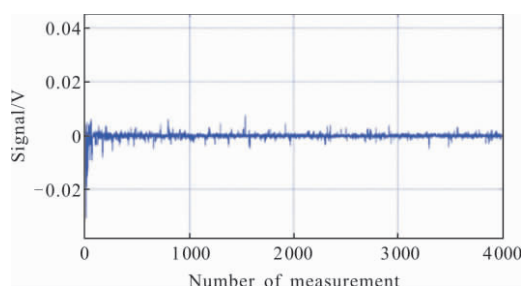


图 7 单帧图像对应的采样数据
Fig.7 Single frame image sampling data

为提高单像素成像信噪比, 对 8 帧采样数据进行了累加求平均, 并用于重建图像。累加后的采样数据结果如图 8 所示, 在局部上数据的测量值发生了改变, Σ 代表数据累加次数。

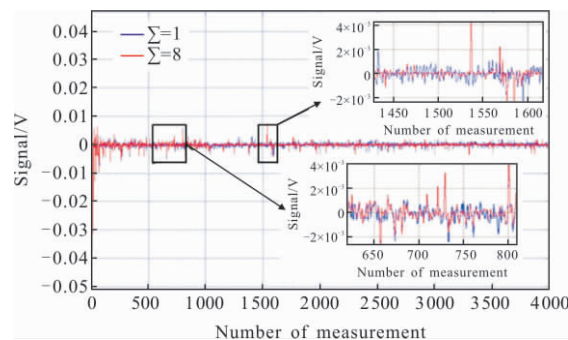


图 8 单次测量信号与 8 次累加平均测量对比
Fig.8 Signals of single measurement vs 8 times averaged measurement

从图 8 中的两处局部放大可见, 多帧累加数据平均值与单次采样数据出现了偏差, 直观上累加后的信号对比度更高。利用 8 次累加求平均后重建图像如图 9 所示。

经 8 次测量数据的累加平均后, 相当于单像素成像曝光时间延长 8 倍, 图像信噪比在视觉上有了直观改善。

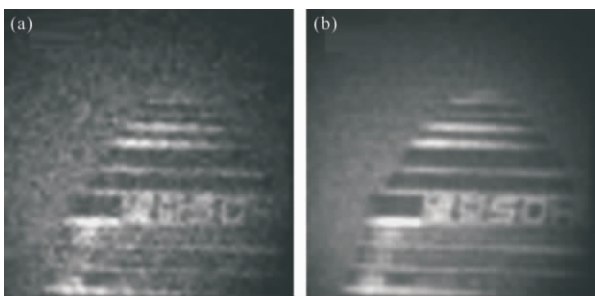


图 9 成像结果对比:(a)单次测量重建的成像;(b)8 帧图像求平均

Fig.9 Imaging results comparison: (a) single time measurement recovered image; (b) 8 frames averaged image

为了能够将图像质量的提高进行量化,参考图像峰值信噪比评价方法峰值信噪比(PSNR)公式^[15],定义了人工选取图像相对光滑部分灰度平均值 S_a 作为信号,图像灰度均方根 σ 视为噪声,利用下列公式进行计算:

$$PSNR=10\log(S_a/\sigma) \quad (4)$$

式中: $S_a=\sum T(i,j)/PQ$, $T(i,j)$ 为第 i 行, j 列像素值, P , Q 为选取区域行和列数; $\sigma=(\sum (T(i,j)-S_a)^2/PQ)^{1/2}$,其中 P , Q 为选取区域行和列数。

根据公式(4)可对图 10(a)和(b)进行信噪比的评价。选取两幅图的同一区域,计算区域内信号均值 S_a 和方差 σ ,利用公式(4)计算出各图的信噪比。

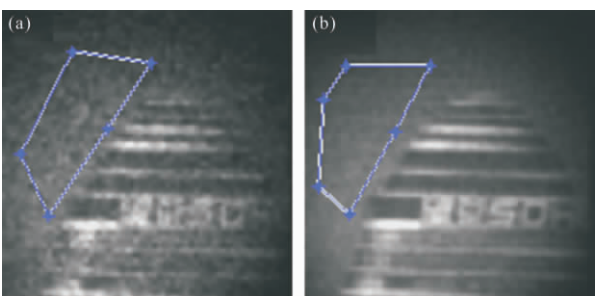


图 10 选择的区域用于评估信噪比,分别对应单帧图像(a)和 8 帧平均后的图像(b)

Fig.10 Selected zone used for estimating SNR of single frame image (a) and 8 frames averaged image (b)

利用上述评价方法,在图像中选择平滑背景区域,计算图像的峰值信噪比,1 次采集图像的 $PSNR=17.26$ dB,8 次累加后的图像 $PSNR=19.18$ dB,提升近 2 dB。

综上所述,在多次平均后,图像信噪比上升,分辨率有所提高,受大气湍流影响不再明显。本次实验意义在于,证明了远距离水平大气环境单像素成像

可行性,且角分辨率在 $23.5 \mu rad$ 时未观测到因大气湍流而分辨率降低现象。当然,凭借上述数据还不足以给出在长曝光条件下单像素成像不受大气湍流影响的结论,后续需针对更高分辨率的图像进行验证并且与经典成像进行相同小视场下的对比。

4 结 论

文中采用能够快速变换的 Hadamard 矩阵作为测量基,对其重新排序后进行了压缩采样单像素成像算法实现与实验验证。搭建了远距离、高分辨率单像素成像实验装置,完成了白天水平距离 34 km,分辨率 0.8 m 的自然目标 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$ 成像的外场实验,成像速度达 2 帧/s,算法速度可达 0.003 s,成像速度主要受空间光调制器件的调制速度限制。定义了人机交互的信噪比公式作为图像质量评价方法,研究了单像素成像积分时间与图像质量关系,评价结果与视觉效果相符合。研究表明单像素成像在长积分时间条件下,即多次探测平均可降低噪声,可提升成像信噪比,说明单像素成像质量与照明光强度密切相关。单像素成像未观测到明显湍流效应,而经典成像受影响较大。但是针对高分辨单像素成像是否可消除大气湍流影响,仍需进一步进行高分辨率成像实验加以确定。最后需要指出,本技术在低成本近红外成像方面具有潜在应用价值^[16],若采用脉冲激光作为光源,采用单光子探测技术记录脉冲光子飞行时间,本技术还有望用于高灵敏度的三维关联成像激光雷达^[17-18],提升其成像速度和探测灵敏度。

参 考 文 献:

[1] Candès E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006, 52 (2): 489.

[2] Donoho D. Compressed sensing[J]. *IEEE Trans Inf Theory*, 2006, 52(4): 1289.

[3] Duarte M, Davenport M, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Process Mag*, 2008, 25(2): 83.

[4] Yu Wenkai, Yao Xuri, Liu Xuefeng, et al. Compressed sensing for ultra-weak light counting imaging [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(10): 2283-2292. (in Chinese)

- [5] Olivas S, Rachlin Y, Gu L, et al. Characterization of a compressive imaging system using laboratory and natural light scenes[J]. *Appl Opt*, 2013, 52: 4515–4526.
- [6] Ma Jingting, Liu Zunlong, Wang Minhang, et al. Modulated multi-wavelength correlated imaging system with DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0924001. (in Chinese)
- [7] Ori K, Yaron B, Yaron S. Compressive ghost imaging [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(13): 131110.
- [8] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors [J]. *Science*, 2013, 340: 844–847.
- [9] Li Mingfei, Mo Xiaofan, Zhang An'ning. The key technics in quantum imaging and its researching status[J]. *Navigation and Control*, 2015, 5(15): 1. (in Chinese)
- [10] Beauchamp K G. Applications of walsh and related functions, with an introduction to sequency theory [M]. New York: Academic Press, 1984.
- [11] An Xiaofeng, Li Yanqiu, Ma Haiyu, et al. Research on thresholding method of Hadamard coded modulation correlation imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1041002. (in Chinese)
- [12] Bhagavan B K, Polge R J. Sequencing the Hadamard transform [J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1973, 21(5): 472–473.
- [13] Li Mingfei, Mo Xiaofan, Zhao Lianjie, et al. Single-pixel remote imaging based on Walsh-Hadamard transform [J]. *Acta Phys Sin*, 2016, 65(6): 064201. (in Chinese)
- [14] Sun Mingjie, Meng Litong, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3464.
- [15] Rafael C González, Richard E W. Digital image processing [J]. *Prentice Hall*, 2008, 354: ISBN0–13–168728–X.
- [16] Huo Juan, Li Mingfei, Yang Ran, et al. High sensitive near infrared imaging system based on single element detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S104001. (in Chinese)
- [17] Howland G A, Lum D J, Ware M R, et al. Photon counting compressive depth mapping [J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 23822.
- [18] Gong Wenlin, Wang Chenglong, Mei Xiaodong, et al. Recent research progress and thoughts on GISC lidar with respect to practical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0702001. (in Chinese)