

接收数值孔径和粗糙目标尺寸对稀疏限制的鬼成像影响研究

王成龙^{1,2}, 龚文林^{1*}, 邵学辉³, 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;

³宇航智能控制技术国家级重点实验室, 北京 100089

摘要 设计一种针对粗糙表面目标的基于稀疏限制的鬼成像(GISC)实验装置,研究并分析接收系统的数值孔径与粗糙目标尺寸对 GISC 成像性能的影响。结果表明,粗糙目标的 GISC 成像质量与接收系统的数值孔径和目标尺寸均呈正相关。本研究可以为 GISC 装置中接收系统的光路设计提供重要参考。

关键词 遥感; 图像重建; 粗糙表面; 统计光学

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0810002

Influence of Receiving Numerical Aperture and Rough Target Size on Ghost Imaging via Sparsity Constraint

Wang Chenglong^{1,2}, Gong Wenlin^{1*}, Shao Xuehui³, 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;

³National Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Intelligent Control, Beijing 100089, China

Abstract An experimental setup of ghost imaging via sparsity constraints (GISC) for a rough surface target is designed, and the influences of both the numerical aperture of receiving system and rough target size on imaging performance of GISC are investigated and analyzed by using this setup. The results demonstrate that the imaging quality of GISC for the rough surface target is positive in relation to both parameters. This research could be considered as an instructive role for the optical system design of a GISC system.

Key words remote sensing; image reconstruction; rough surfaces; statistical optics

OCIS codes 280.4788; 110.3010; 290.5880; 030.6600

1 引言

以雷达为代表的激光成像技术近年来在遥感探测与自动驾驶等领域中扮演着越来越重要的角色^[1-2]。与传统的被动光学成像技术相比,激光成像技术在全天时观测、抵抗阳光阴影干扰与远距离三维成像等方面具备巨大优势^[1]。然而,由于激光光源具有良好的相干性,当激光照射到粗糙表面时(实

际应用中的常见场景),经过目标调制后会产生熟知的散斑现象^[3-4]。由于散斑场的发散角较大而接收系统的接收口径有限,通常系统只能收集到这些散斑的少量部分,这将减少被探测到的回波能量,从而降低探测信噪比,直接影响成像性能。另一方面,由于接收系统收集这些散斑的过程可以看成是一个统计过程,散斑场自身的统计特性也会引起探测信号强度的随机涨落,进而形成一种探测噪声,该噪声与

收稿日期: 2019-03-01; 修回日期: 2019-04-01; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国防基础科研计划资助(D040301)、国家自然科学基金(61571427)、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

回波信号能量的强弱无关,但能够对那些基于多次测量与计算重构图像信息的激光成像机制产生不可忽视的影响^[3-8]。

鬼成像是近年来发展的一种新型计算成像体制^[5-10]。它采用激光照射旋转毛玻璃所产生的赝热光(空间分布随机变化的多帧散斑场)照射目标并进行多次随机测量,在遥感成像、生物医学成像、目标识别及显微成像领域都具有重要应用前景^[11-14]。根据其图像重建方式的不同,鬼成像主要分为两类:1)采用基于二阶关联的线性重建算法,即传统鬼成像^[5-7](TGI);2)采用凸优化迭代重建算法,即基于稀疏限制的鬼成像^[8-11](GISC)。与TGI不同的是,GISC在图像重建过程中充分考虑了目标的稀疏先验特性,可以在低于Nyquist的测量次数下重建目标图像,且具备更高的信息获取效率和超分辨成像能力^[9-10]。然而,作为一种典型的计算成像方法,粗糙目标的鬼成像性能显然也会受到上述问题的影响。为此,多个研究小组针对粗糙目标的TGI问题开展了较为深入的分析 and 探讨^[15-18]。Wang等^[15]通过理论与数值仿真分析了粗糙目标表面的统计特性对TGI的影响;Nan等^[16]则利用不同型号的砂纸作为粗糙目标,实验分析了粗糙目标的TGI的部分特性;Gong^[17]讨论了TGI在较小接收数值孔径条件下对粗糙目标进行大视场成像的特点;Hardy等^[18]分析了大气湍流下的粗糙目标TGI问题。然而,关于粗糙目标GISC的成像性能研究至今尚未见相关报道。此外,针对遥感成像应用,人们在光源的优化设计和快速调制、图像重建算法方面对GISC开展了较为深入的研究,然而对于目标特性接收和探测系统与成像质量的关系研究较少^[19-20]。为理清上述相关问题,本文设计一种粗糙表面目标GISC实验装置,研究并分析接收系统数值孔径与粗糙目标尺寸对GISC成像性能的影响,该工作可为遥感应用中GISC系统设计提供重要的技术支撑。

2 信号模型及图像重建

2.1 粗糙目标GISC图像重建

在GISC框架下^[9-11],如果将每次测量得到的尺寸为 $m \times n$ 的参考散斑场重排为 $1 \times N$ 的行向量($N = m \times n$),则 M ($M \leq N$)次测量得到的所有散斑场可以用 $M \times N$ 的测量矩阵 \mathbf{A} 表示。同时,经过对应的 M 次测量,探测器的接收系统记录的探测信号可以用 $M \times 1$ 的列向量 \mathbf{Y} 表示,而用 $M \times 1$ 的列向量 \mathbf{E} 表示探测过程中存在的各种噪声。此外,若用

$N \times 1$ 的列向量 \mathbf{X} 表示待测目标,则探测信号 \mathbf{Y} 与测量矩阵 \mathbf{A} 、待测目标 \mathbf{X} 与噪声 \mathbf{E} 之间的关系^[19]为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{E}. \quad (1)$$

由于矩阵 \mathbf{A} 的行数小于列数,(1)式所示的欠定方程组没有唯一解。但是根据压缩感知原理,通过对下列凸优化问题的求解,仍然能够获得目标图像的 \mathbf{X}_{GISC} ^[21]:

$$\mathbf{X}_{\text{GISC}} = \operatorname{argmin} \frac{1}{2} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{X}\|_2^2 + \tau \|\boldsymbol{\theta}\|_1, \quad (2)$$

式中: $\|\dots\|_1$ 和 $\|\dots\|_2$ 分别表示1范数和2范数; $\mathbf{X} = \boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{\theta}$ 表示对目标的稀疏表象变换; $\boldsymbol{\theta}$ 为稀疏变换后的向量; $\boldsymbol{\Psi}$ 为稀疏变换矩阵; τ 为与目标稀疏性有关的常数。同时,理论分析与实验验证均表明:(1)式中的噪声项越小(探测信噪比越高),(2)式中欧几里得项(2范数项)就越接近于零,而此时(2)式所示的优化问题越容易得到精确解(成像质量越高)^[21]。因此,GISC质量与探测信噪比紧密相关。

对于GISC而言,影响探测信噪比的主要因素除了背景光、探测器件自身的噪声外,还有因GISC调制和探测方式所带来的特征噪声。在遥感成像应用中,自然场景目标均具备表面粗糙的特点。对于激光照射旋转毛玻璃产生赝热光源的典型GISC系统而言,每一帧散斑场都是空间部分相干的,不同帧的散斑场之间则是空间不相干的。因此,与激光照射粗糙目标的情况类似,使用每一帧空间部分相干的散斑照射粗糙表面目标进行测量时都会随之产生散斑现象,并且每次测量产生的散斑空间分布都是随机的^[22]。若接收系统的数值孔径(NA)无限大,则根据能量守恒,粗糙表面产生的散斑不会给探测信号带来强度的涨落。然而,在实际应用中(尤其是遥感成像),接收系统的 NA 相对于散斑场的发散角而言较小,因此每次探测时接收系统只能收集到这些散斑的少量部分,进而导致探测信号强度的随机涨落。这种涨落形成了一种特殊的统计噪声,将会降低GISC系统的探测信噪比。

另一方面,类比Goodman的散斑统计理论,假设粗糙目标上的起伏数目足够多(对于遥感成像此类场景通常均满足),则赝热光照射粗糙面后的散斑可以近似看成全散射散斑^[3-4]。在这种理想情况下,探测面光场的统计分布可以近似看成负指数分布,并且探测信号的信噪比(NSR)为 $\sqrt{N_s}$ (N_s 为所收集到探测面上的独立散斑个数)^[3-4]。对于尺寸为 L 的粗糙目标,达到接收望远镜处的散斑大小可以近似表示成 $\Delta X = \lambda z / L$ (λ 为波长, z 为传播距

离)^[3-4],接收系统的 NA ($NA \approx D/2z$, D 为接收口径) 收到的散斑数目可近似表示为 $N_s = (D/\Delta X)^2 = (2NA \cdot L/\lambda)^2$ 。尽管以上讨论是在全散射理想情况下得到的近似结果,但是对于赝热光照明的粗糙目标 GISC 而言,接收系统 NA 和目标尺寸 L 也可能影响探测信噪比,进而会影响 GISC 的成像性能。因此,将着重开展上述两个变量对粗糙目标 GISC 影响的实验研究。

2.2 图像重建质量评价

为方便后续的讨论,采用重建图像与原始图像的结构相似度(SSIM)来表征图像重建质量。重建图像 \mathbf{X}_1 与原始图像 \mathbf{X}_2 的结构相似度可定义为^[23]

$$SSIM(\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2) = \frac{4\mu_{X_1}\mu_{X_2}\sigma_{X_1X_2}}{(\mu_{X_1}^2 + \mu_{X_2}^2)(\sigma_{X_1}^2 + \sigma_{X_2}^2)}, \quad (3)$$

式中: μ_{X_i} 表示 \mathbf{X}_i 的均值; σ_{X_i} 表示 \mathbf{X}_i 的标准差; $\sigma_{X_1X_2}$ 表示 \mathbf{X}_1 与 \mathbf{X}_2 的协方差。结构相似度在 0 到 1 之间变化,且 SSIM 越接近 1,则说明两幅图像的相似度越高。

3 实验装置与实验结果

3.1 实验方案设计与实验装置

对于实验方案设计,没有采用直接限制接收系统孔径光阑的常规方案控制 NA ,而是利用成像方式对孔径光阑一定范围处的光场强度进行记录,并通过不同光场强度的求和区域大小模拟不同 NA 的接收系统。所设计的粗糙表面目标 GISC 实验装置原理图如图 1 所示。激光器发出的光照射于受伺服电机控制的旋转毛玻璃(RGG)上,经过一个紧贴毛玻璃放置的光阑(stop1)后,在场镜(lens1)处产生赝热光,这里设置 lens1 的目的

是为了提高整个成像系统的能量利用率。紧贴 lens1 处放置一个视场光阑(stop2)以限制成像视场。此后,分束器(BS)将上述赝热光场分成两路。其中透射光路为 GISC 参考光路,利用参考镜(lens2)和参考相机(CCD1)记录赝热光场以获取测量矩阵 \mathbf{A} ,反射光路为 GISC 发射光路,通过发射镜(lens3)将赝热光场成像至透射型的粗糙目标上。经过该粗糙目标后,将距离目标 z 处的探测面作为虚拟的接收系统孔径光阑,并利用后置的接收透镜(lens4)和探测相机(CCD2)组成探测光路对该位置处的光场进行探测和记录,通过控制光场强度的求和区域大小以模拟不同大小的接收口径(D),以获取不同 NA 下的探测信号 \mathbf{Y} 。

注意到,使用的反射型粗糙目标实验方案^[14]与之前方案不同,这里借鉴了文献[3]提出的透射型粗糙目标方案,采用一块毛玻璃与透射型物体的级联产生等效的粗糙表面目标,这种方案更易于实现灰度型粗糙目标。此外,对不同尺寸大小的粗糙目标成像时,不是对直接调整视场光阑 stop2 的大小进行视场调整,而是在固定视场光阑的情况下,通过调节 lens3 的位置来改变发射光路的成像放大率。这样的设计保证对不同尺寸的目标成像时信息量一致(测量矩阵的规模能够保持不变),避免了信息量变化给 GISC 重建自身带来的影响。

3.2 实验结果与分析

在实验中,对两种代表性的粗糙目标进行了 GISC 研究。一种是使用金属板制作的简单二值目标,此目标为矩形方孔,如图 2(A)所示,另一种是使用胶片制作的复杂灰度目标,此目标为“house”图片,如图 3(A)所示。每种目标都设置了两种尺寸($L=11.04$ mm 和 $L=22.08$ mm),对应的发射光路分别实现 $4\times$ 与 $8\times$ 放大率成像。其他实验参数设置如下:激光波长 $\lambda=532$ nm,激光光斑 $D_s=1.156$ mm,自由传播距离 $z_0=150$ mm, lens1 的焦距 $f_0=150$ mm,经过粗糙目标后自由传播距离 $z=1.718$ m;参考光路的成像放大率为 $1\times$, CCD1 等效像元大小为 $13.8 \mu\text{m} \times 13.8 \mu\text{m}$, CCD1 所记录的散斑尺寸为 $m=n=250$;探测光路的成像放大率为 $1/3\times$, CCD2 记录探测面上光场强度信息范围为 $21.2 \mu\text{m} \times 21.2 \mu\text{m}$,对应 NA 最大为 1.23×10^{-2} (减少求和区域面积可以实现更小的 NA)。此外, GISC 的测量次数 $M=8000$,图像重建采用 GPSR 算法和 DCT 稀疏表象变换。

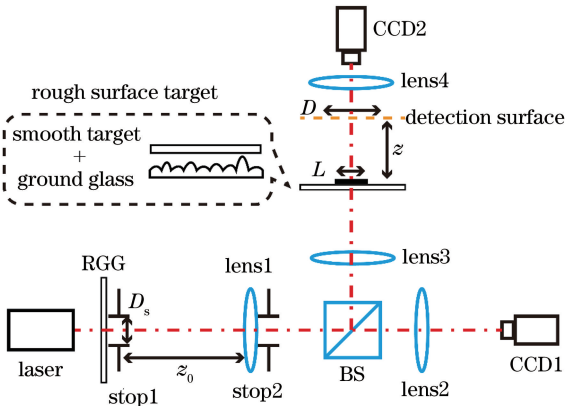


图 1 粗糙表面目标的 GISC 实验装置原理图
Fig. 1 Schematic of experimental GISC setup for rough surface target

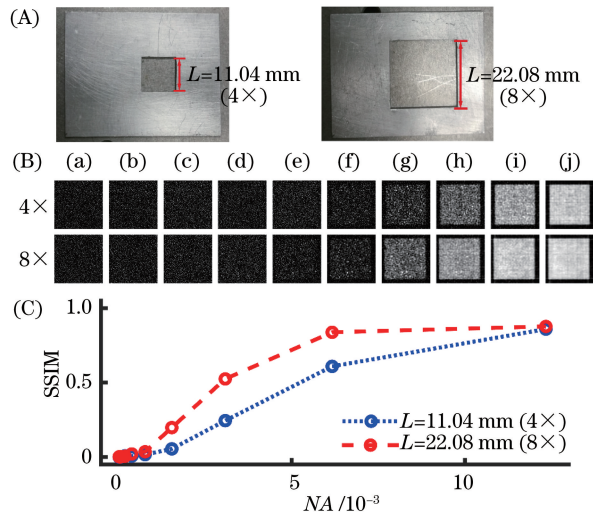


图 2 二值粗糙目标的 GISC 实验结果。(A)金属板制成的二值目标;(B)不同 NA 和 L 的 GISC 成像结果,其中(a)~(j)分别对应 $NA = 2.41 \times 10^{-5}$, 4.82×10^{-5} , 9.64×10^{-5} , 1.93×10^{-4} , 3.86×10^{-4} , 7.71×10^{-4} , 1.54×10^{-3} , 3.08×10^{-3} , 6.17×10^{-3} , 1.23×10^{-2} ; (C)不同 NA 和 L 下的 SSIM

Fig. 2 Experimental results of GISC for binary rough surface target. (A) Binary targets made of metal plate; (B) experimental results of GISC in different NA and L, where (a)-(j) correspond to $NA = 2.41 \times 10^{-5}$, 4.82×10^{-5} , 9.64×10^{-5} , 1.93×10^{-4} , 3.86×10^{-4} , 7.71×10^{-4} , 1.54×10^{-3} , 3.08×10^{-3} , 6.17×10^{-3} , 1.23×10^{-2} , respectively; (C) SSIM in different NA and L

基于上述实验参数,所述粗糙目标在 $L = 11.04 \text{ mm}$ 和 $L = 22.08 \text{ mm}$ 、不同 NA 下的 GISC 实验结果如图 2(B)、图 3(B)所示。其中,图 2(B)、图 3(B)的 (a)~(j) 列分别对应 $NA = 2.41 \times 10^{-5}$, 4.82×10^{-5} , 9.64×10^{-5} , 1.93×10^{-4} , 3.86×10^{-4} , 7.71×10^{-4} , 1.54×10^{-3} , 3.08×10^{-3} , 6.17×10^{-3} , 1.23×10^{-2} 的 GISC 重建情况;图 2(C)和图 3(C)给出了图 2(B)和图 3(B)对应的 NA-SSIM 关系曲线。

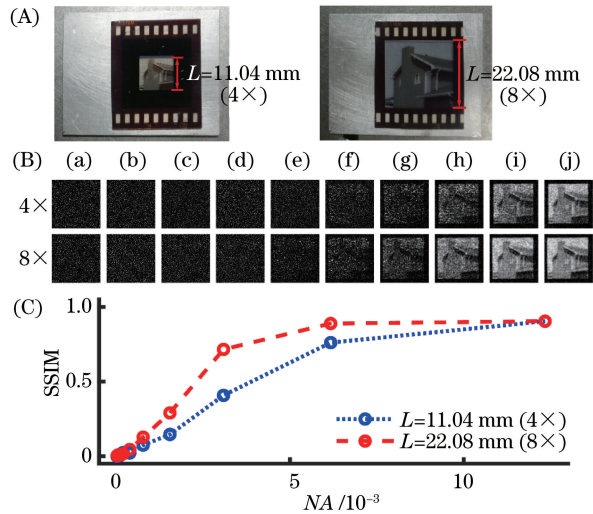


图 3 灰度粗糙目标的 GISC 实验结果。(A)胶片制成的灰度目标;(B)不同 NA 和 L 的 GISC 成像结果,其中(a)~(j)分别对应 $NA = 2.41 \times 10^{-5}$, 4.82×10^{-5} , 9.64×10^{-5} , 1.93×10^{-4} , 3.86×10^{-4} , 7.71×10^{-4} , 1.54×10^{-3} , 3.08×10^{-3} , 6.17×10^{-3} , 1.23×10^{-2} ; (C)不同 NA 和 L 下的 SSIM

Fig. 3 Experimental results of GISC for gray-scale rough surface target. (A) Gray-scale targets made of film; (B) experimental results of GISC in different NA and L, where (a)-(j) correspond to $NA = 2.41 \times 10^{-5}$, 4.82×10^{-5} , 9.64×10^{-5} , 1.93×10^{-4} , 3.86×10^{-4} , 7.71×10^{-4} , 1.54×10^{-3} , 3.08×10^{-3} , 6.17×10^{-3} , 1.23×10^{-2} , respectively; (C) SSIM in different NA and L

根据成像结果和 NA -SSIM 曲线可以看出,对于同一尺寸的粗糙目标,GISC 的成像质量随着 NA 的增加而提高,并且提高的速度呈现先慢后快再慢的总体趋势,这一趋势跟探测信噪比与图像重建质量关系是吻合的。当探测信噪比较低时(低于 GISC 图像重建算法进行精确重建的信噪比下限),此时探测信噪比的提高对图像重建质量改善不大;当探测信噪比越过一定的界限后,图像重建质量将随着信噪比的提高迅速提升;而当探测信噪比提高至一定的水平后,继续提升探测信噪比对图像重建质量的改善不大^[24]。特别地,实验结果表明,粗糙表面目标的 GISC 质量与粗糙目标自身的尺寸也相关。当接收系统 NA 相同时,目标尺寸更大的 GISC 重建结果要比目标尺寸较小的 GISC 好,这将意味着对于实际应用中的 GISC 系统而言,其光学系统设计不仅需要考虑接收系统的 NA ,而且还需分析目标大小对成像质量的影响。此外,不管是对于简单的二值粗糙目标还是复杂的灰度粗糙目标,成像结果与曲线的变化趋势都具备良好的一致性,表明本文所得到的结论具备普适性。

4 结 论

设计一种粗糙表面目标 GISC 实验装置并研究其接收系统数值孔径和粗糙目标尺寸大小对 GISC 成像质量的影响。实验结果表明,接收系统数值孔径和目标尺寸越大,GISC 质量越好。该研究对实际应用中的 GISC 光学系统设计具有重要指导意义。

参 考 文 献

- [1] Council N R. Laser radar: progress and opportunities in active electro-optical sensing[M]. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 2014: 6-106.
- [2] Geiger A, Lenz P, Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite [C] // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 16-21, 2012, Providence, Rhode Island. New York: IEEE, 2012: 3354-3361.
- [3] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Englewood Colorado: Roberts and Company Publishers, 2006: 7-163.
- [4] Goodman J W. Statistical properties of laser speckle patterns[M] // Dainty J C. Laser speckle and related phenomena. Berlin, Heidelberg: Springer, 1975: 9-75.
- [5] Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost

- imaging[J]. Quantum Information Processing, 2012, 11(4): 949-993.
- [6] Gong W L, Han S S. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light [J]. Physics Letters A, 2010, 374(8): 1005-1008.
- [7] Pan L, Deng C J, Gong W L, *et al.* Influence of chirped-amplitude correlated imaging under incoherent detection [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1011001.
潘龙, 邓陈进, 龚文林, 等. 非相干探测模式下啁啾调幅关联成像影响因素研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1011001.
- [8] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, *et al.* Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0814001.
闫昱琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究 [J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0814001.
- [9] Du J, Gong W L, Han S S. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light [J]. Optics Letters, 2012, 37(6): 1067-1069.
- [10] Gong W L, Han S S. High-resolution far-field ghost imaging via sparsity constraint [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9280.
- [11] 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.
- [12] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media [J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 394-396.
- [13] Chen W, Chen X D. Object authentication in computational ghost imaging with the realizations less than 5% of Nyquist limit [J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 546-548.
- [14] Zhang P L, Gong W L, Shen X, *et al.* Improving resolution by the second-order correlation of light fields [J]. Optics Letters, 2009, 34(8): 1222-1224.
- [15] Wang C F, Zhang D W, Bai Y F, *et al.* Ghost imaging for a reflected object with a rough surface [J]. Physical Review A, 2010, 82(6): 063814.
- [16] Nan S Q, Bai Y F, Shi X H, *et al.* Experimental investigation of ghost imaging of reflective objects with different surface roughness [J]. Photonics Research, 2017, 5(4): 372-376.
- [17] Gong W L. Correlated imaging for a reflective target with a smooth or rough surface [J]. Journal of Optics, 2016, 18(8): 085702.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Gong W L, Wang C L, Mei X D, *et al.* Recent research progress and thoughts on GISC Lidar with respect to practical applications [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0302001.
- 龚文林, 王成龙, 梅笑冬, 等. 面向实际应用的 GISC Lidar 近期研究进展与思考[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0302001.
- [21] Candès E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [22] Martienssen W, Spiller E. Coherence and fluctuations in light beams[J]. American Journal of Physics, 1964, 32(12): 919-926.
- [23] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [24] Wang J, Kwon S, Li P, *et al.* Recovery of sparse signals via generalized orthogonal matching pursuit: a new analysis [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(4): 1076-1089.