

## 基于稀疏和冗余表象的鬼成像雷达研究进展

韩申生, 龚文林, 陈明亮, 李恩荣, 薄遵望, 李望, 张惠, 高昕, 邓陈进, 梅笑东, 王成龙

(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)

**摘要:** 基于稀疏和冗余表象的鬼成像雷达(Ghost Image via Sparsity Constraints, GISC Lidar)是一种结合光场空间涨落特性和现代信息论的全新雷达成像体制,其成像视场和分辨率无关,由此可在探测时采用大视场凝视成像模式捕捉运动目标以对其进行高分辨率成像探测。与闪光照相雷达需要将目标的反射光信号成像分布在焦平面阵列光电探测器件上相比,GISC 雷达只需要一个无空间分辨能力的单像素探测器接收目标场景的全部反射光信号,因此可以极大地提升系统的成像探测灵敏度。此外,GISC 雷达在成像探测过程中可以利用图像的各种先验约束,从而突破奈奎斯特采样定理对采样次数的要求,大幅度提高图像的信息获取效率。文中将结合上海光机所将鬼成像技术应用于雷达探测的研究历程,介绍 GISC 雷达研究进展,并指出 GISC 雷达工程化实际应用中仍待解决的若干问题。

**关键词:** 鬼成像; 雷达成像; 稀疏和冗余表象; 压缩感知; 信息论

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2547-09

## Research progress of GISC lidar

Han Shengshen, Gong Wenlin, Chen Minliang, Li Enrong, Bo Zunwang, Li Wang, Zhang Hui,  
Gao Xin, Deng Chenjin, Mei Xiaodong, Wang Chenglong

(Key Laboratory for Quantum Optics and Center for Cold Atom Physics of CAS, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** Ghost Image via Sparsity Constraints (GISC) lidar is a novel image lidar system which combines the light field coherence theory and modern information theory. The field of view (FOV) of GISC lidar is independent from its image resolution, and can obtain high resolution image of moving targets with a large FOV. While flash imaging lidar divides the intensity of target image into many small pixels of array charge-coupled device(CCD) camera on the imaging plane, GISC lidar uses a single pixel detector without spatial resolution to collect the entire reflective light intensity, which can greatly increase its detection sensitivity. Besides, based on various sparsity constraints of the target, GISC lidar can greatly improve imaging speed with much less samples compared to Nyquist Sampling requirement. Current development of GISC lidar based on the research experience of SIOM was introduced. Finally, the topics which need further investigation to improve the performance of GISC lidar in real application were also presented.

**Key words:** ghost image; imaging lidar; sparsity and redundant constraints; compressive sensing; information theory

收稿日期:2015-09-06; 修订日期:2015-09-13

基金项目:总装探索项目;国家 863 计划(20114920101,2013AA122901)

作者简介:韩申生(1978-),男,研究员,博士,主要从事强耦合等离子体物理、X 光强度关联衍射成像及量子成像等前沿科学领域内的研究。Email:sshan@mail.shcnc.ac.cn

## 0 引言

GISC 雷达起源于 20 世纪末开始的基于量子纠缠光源的量子成像(也被称之为鬼成像或强度关联成像)研究,早期的想法是试图将量子信息技术研究从量子通讯这一信息的一维传递推广到光学成像等高维的信息获取和传递领域<sup>[1-2]</sup>。在量子成像的研究过程中人们逐渐发现量子纠缠并不是实现鬼成像的必要条件<sup>[3-4]</sup>,由于实际应用中光学成像的绝大多数主被动照明光源都不是非经典的量子光源,因此这一突破为基于经典光场的时空涨落和关联的鬼成像研究开辟了广阔的应用前景。2005 年,北京师范大学的汪凯戈小组首次指出了在量子成像中实现基于经典热光源的无透镜鬼成像的可能性<sup>[5]</sup>,同年美国马里兰大学的史视华小组给出了赝热光无透镜鬼成像的首次实验验证<sup>[6]</sup>。上海光机所从 2004 年开始探索将鬼成像技术应用于遥感成像探测的可能性,文中第一部分首先厘清鬼成像技术应用于雷达探测的成像条件;第二部分介绍笔者在 GISC 雷达系统成像探测效率优化研究上取得的主要进展;最后在第三部分指出 GISC 雷达工程化实际应用中仍待解决的若干问题。

## 1 从鬼成像到 GISC 雷达

### 1.1 无透镜鬼成像

通过调制照明光场的空间分布对目标图像进行编码测量以突破传统光学成像系统的分辨率极限一直是光学成像技术的一个十分重要的研究方向<sup>[7-12]</sup>。鬼成像也可视为是一种通过光场空间涨落对图像目标进行编码,并通过计算重构目标图像的计算光学成像方法。

图 1 为量子成像中经典的近场热光场无透镜鬼成像原理图<sup>[13]</sup>。热光经分光棱镜(BS)后分为透射光束和反射光束;反射光束不包含物体,称为参考光路,由一个高空间分辨能力的阵列探测器(CCD)记录热光场在一个相干时间内的瞬态二维强度分布信息(实际应用中通常用赝热光场代替真实热光场);透射光束称为物光路,透过目标的光由物光路探测器接收。记光源到参考 CCD 的距离为  $z$ ,光源到目标的距离为  $z_1$ ,目标到物探测器的距离为  $z_2$ 。当  $z=z_1$  且  $z_2=0$  时,物探测器紧贴目标接收所有透射光强(称之为“桶”探测器, bucket detector),将物探测器记录光

强与参考光场做强度关联处理可得到目标的实空间鬼成像(Ghost Image, GI)<sup>[6]</sup>;当  $z=z_1+z_2$  且  $z_2 \neq 0$  时,物探测器仅接收透射光场一点的信息(称之为“点”探测器, point detector),将物探测器记录光强与参考光场做强度关联处理可得到目标的傅里叶空间鬼衍射像(Fourier-transform Ghost Diffraction, FRT)<sup>[3]</sup>。

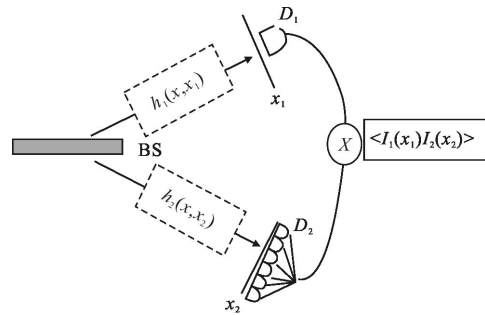


图 1 热光场无透镜鬼成像原理图

Fig.1 Schematic of lensless ghost image with thermal light

### 1.2 从 GI 到 GI 雷达

热光场无透镜鬼成像只有在满足严格的等距关系并采用相应的“桶”探测器或“点”探测器时,才能对透射式目标成实像或衍射像。在将鬼成像技术应用于远距离雷达成像探测时,由于目标的距离是未知的,所面临的第一个问题是在远距离且无法满足准确的成像距离匹配条件下的成像可行性。另外光学雷达采用有限口径的接收系统接收远方目标的部分反射信息,因此需要解决的第二个问题是反射式目标在非“桶”探测下的成像可行性。

当目标位于赝热光源远场时,赝热光源的横向尺寸相对于目标是有限的。基于热光场空间纵向关联长度概念<sup>[14]</sup>,设赝热光源直径为  $D$ ,则距其  $z$  处光场的纵向关联长度为:

$$\Delta l_z = 6.7\lambda \left( \frac{z}{D} \right)^2 \quad (1)$$

当物体位于赝热光源远场时,赝热光场具有纵向的关联性。当目标面光场在参考光场的纵向关联长度内时,目标面光场和参考光场空间关联,通过“桶”探测器接收全部透射光,成像结果为实像 GI;当物面光场和参考臂光场空间不关联而物臂探测器面光场和参考光场空间关联时,通过“点”探测器接收透射光场一点的信息,鬼成像的结果为傅里叶像 FRT<sup>[15]</sup>。热光场的纵向关联长度表明在成像距离不严格相等的情况下,只要经过光学雷达发射系统变

换的物面或物探测器面光场和参考面光场的等效距离差值在纵向关联长度之内,通过一个固定距离的参考光场也可实现远距离三维目标的鬼成像,这一点十分有利于鬼成像技术应用于雷达成像探测。

由于在光学波段,一般自然目标表面是光学粗糙的,其反射率  $T(x)$  统计特性满足:

$$\langle T^*(x')T(x) \rangle = \Gamma'(x)\delta(x-x') \quad (2)$$

式中:  $\Gamma'(x)$  为目标反射率强度系数。在对反射目标鬼成像时,可将反射式目标看作一个二次热光源,经目标反射后光场空间完全不相干。设反射式鬼成像系统光源的发射口径为  $D_s$ , 目标视场直径为  $D_o$ , 目标距雷达距离为  $L$ , 则辐照到目标上的光场的横向相干尺度为  $\Delta x_o = \lambda L / D_s$ <sup>[16]</sup>(即散斑场中散斑的平均尺度), 到达接收系统的反射光场的散斑尺度为  $\Delta x_r = \lambda L / D_o$ 。若采用大于或等于发射口径的接收系统,则接收系统上接收到的散斑数  $M \geq D_s / \Delta x_r = D_o / \Delta x_o$ 。由于鬼成像分辨率等于散斑平均尺度<sup>[17-18]</sup>, 为分辨目标,目标尺度内必然包括多个散斑,因此由  $M \geq D_s / \Delta x_r = D_o / \Delta x_o$  易知有多个散斑落到接收系统上。根据散斑场的统计特性可知,多个散斑强度和正比于反射散斑场总能量<sup>[16]</sup>。在仅接收部分散斑场的情况下,参考臂和探测臂光场空间涨落的关联性仍可保留。因此在粗糙目标的反射式鬼成像时,当目标面光场和参考光场空间相关且接收口径不小于系统发射口径时,笔者只需接收部分反射回波信息即可实现等效的“桶”探测,获得光学粗糙目标的鬼实像。

理论上 GI 雷达采用遍历整个像空间的二阶强度关联算法重构图像,需通过无限次采样实现系综平均,这在实际中是不可能实现的。因此在鬼成像技术应用于雷达的可行性解决之后,所面临的主要问题即是如何提高 GI 雷达的探测效率,即在尽可能少的采样次数下提高 GI 雷达的成像可见度。为此笔者先后发展、尝试了多种关联重构算法:在传统二阶强度关联法基础上提出采用去噪算法,通过测量物光路与参考光路时间和空间上的强度波动互相关函数,并消除掉时间和空间上存在的高背景项,可显著提高图像的可见度<sup>[19]</sup>;2007年,湖南师范大学和笔者所在课题组首先将三阶强度关联函数引入到热光场鬼成像,构建了基于三阶强度关联算法的热光场鬼成像框架,相应的理论和数值模拟结果表明鬼成像的可见度也会有所提高<sup>[20-21]</sup>;2009年,笔者提出基

于平衡零差探测的鬼成像方案,通过参考光场和物光场的一阶关联获得更高质量的目标幅度像和相位像<sup>[22]</sup>,由于光学波段光场探测的复杂性,这种场关联鬼成像模式在微波波段的鬼成像中更容易得到应用。

在实际遥感探测中,大气湍流效应会对光学雷达性能造成严重影响,笔者利用扩展的惠更斯-菲涅尔原理从理论上对比分析了湍流对鬼成像和传统成像的影响<sup>[23]</sup>。理论和仿真表明大气湍流会导致两种成像方式的图像分辨率下降,其中使用 GI 雷达成像的分辨率主要受制于光源至物体间光路上的大气湍流影响,而传统光学成像系统分辨率则主要受制于物体到探测器间的大气湍流。

### 1.3 从 GI 雷达到 GISC 雷达

虽然可以发展各种方法改进鬼成像的图像质量,但是基于系综平均的传统鬼成像图像复原算法不能给出测量次数与目标图像质量的定量描述,而没有测量次数与成像质量的定量关系则无法在实际工程应用中进行雷达系统的优化和设计。2006年,E. Candes, J. Romberg, D. Donoho 等提出并证明了一种全新的获取信号或图像的压缩感知(Compressive Sampling, CS)理论,该理论表明如果原始图像是可压缩的或者可在某个变换域稀疏表示,那么可以使用一个与表达基低相干度的测量矩阵将变换得到的高维信号投影到一个低维空间上,并通过求解一个凸优化问题从这些少量的投影中以很高的概率恢复出原始图像<sup>[24-25]</sup>。CS 理论指出如果想以较高的概率准确恢复出目标图像,所需的采样数为:

$$m \geq C \cdot \mu^2(A, \Psi) \cdot S \cdot \log n \quad (3)$$

式中: $C$ 为常数; $S$ 为目标的稀疏度; $n$ 表示图像的总像素数; $\mu$ 表示探测矩阵  $A$  与表达基  $\Psi$  的相干度。由于压缩感知的信息获取模式与鬼成像类似,因此在发展鬼成像雷达的过程中可以借鉴压缩感知的丰富研究成果,此外利用压缩感知理论可以给出获取目标图像所需测量次数的准确估计,由此能够为实际的鬼成像雷达系统提供“底线”(worst case)设计依据。2009年,通过将压缩感知信号理论和鬼成像结合,根据图像的稀疏先验特性,提出了基于稀疏和冗余表象的 GISC 雷达<sup>[22]</sup>。GISC 雷达的图像重构过程可表示为:

$$|T_{\text{GISC}}| = |T|; \text{subject to:}$$

$$\min_{x,y} \frac{1}{2} \|B_s - \int dx dy I_s(x,y) |T(x,y)|^2\|_2^2 + \pi \|T(x,y)\|_1$$

$$\forall s=1 \dots K \quad (4)$$

式中： $B_s$  表示第  $s$  次测量时的物光路探测器接收信号； $I_s(x, y)$  为第  $s$  次测量时的参考臂光场分布； $T(x, y)$  为目标图像； $K$  为总采样数<sup>[26]</sup>。GISC 雷达利用图像的各种稀疏先验特性可大幅度减少采样数目，提高成像速度，同时获得超分辨图像<sup>[27-29]</sup>。

## 2 GISC 雷达研究进展

在厘清鬼成像应用于雷达成像探测的机理后，上海光机所于 2009 年完成了远场实空间鬼成像的原理验证实验；2012 年完成了真实大气环境下探测距离 900 m 处合作目标的 GISC 雷达成像<sup>[30]</sup>；2013 年，对探测距离 1.2 km 的大视场自然目标实现了三维 GISC 雷达成像<sup>[31]</sup>。图 2(a), (b) 分别为照相机(接收口径 25 mm)和望远镜(接收口径 420 mm)拍摄目标图像；图 2(c), (d) 为原始待测目标；图 2(e), (f) 为对应 GISC 雷达成像结果；图 2(g) 为相同条件下目标闪光成像结果(接收口径 420 mm)；图 2(h) 为(f)中红框对应的截面。图 3(a) 为传统望远镜(接收口径 140 mm)

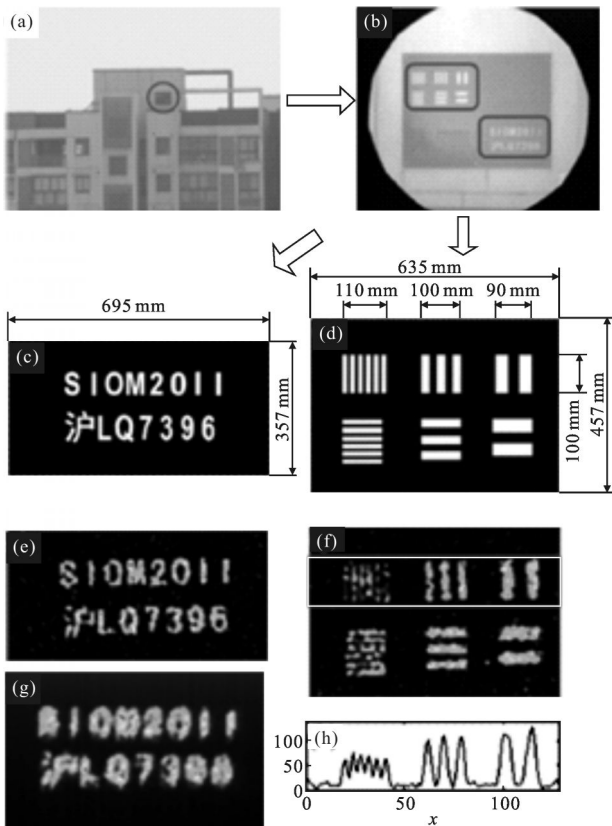


图 2 探测距离 900 m 远合作目标 GISC 雷达二维实验结果  
Fig.2 Experimental reconstruction results for high-reflection targets at 900 m range

拍摄图像；图 3(b) 为 GISC 雷达成像结果(颜色表示距离)；图 3(c) 为单脉冲探测下物探测器接收到回波时间序列；图 3(d1)~(d4) 为不同距离切片下的 GISC 雷达成像结果。

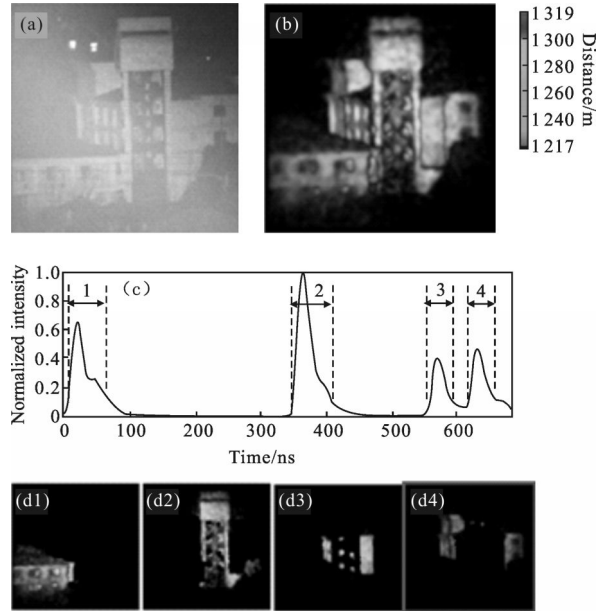


图 3 探测距离 1.2 km 远自然目标 GISC 雷达三维实验结果像  
Fig.3 Experimental demonstration results of a building at about 1.2 km range

在野外实际场景中实验验证了 GISC 雷达的成像探测能力后，在 GISC 雷达的理论体系建设方面，上海光机所将主要精力转向发展 GISC 成像雷达系统优化设计的定量理论依据和可以更充分利用目标场景先验知识的图像重构方法。主要包括：基于信息论评价和优化 GISC 雷达的成像能力；考虑图像的统计特性，基于多尺度散斑场优化 GISC 雷达的光场涨落形式；从图象复原算法的角度，基于压缩感知理论中的相干度优化 GISC 雷达散斑场；考虑光学表面三维成像的结构特点，基于结构化压缩感知优化三维 GISC 雷达图象复原算法；以及运动目标 GISC 雷达成像和稀疏多点 GISC 雷达。

### 2.1 基于信息论优化 GISC 雷达

英国学者 P.M. 伍德沃德曾从信息论的角度对传统雷达系统开展了系统的研究，基于信号的时间维特征分析阐述了雷达信号检测理论和分辨理论，并分析了几种典型雷达信号的模糊函数及其对雷达测距性能(精度、分辨力、模糊度)的影响，对传统测距雷达的信号波形设计有很大的指导作用<sup>[32]</sup>。但该

理论未考虑辐射场的空间涨落模式,因此无法应用于鬼成像雷达性能的研究。此外,基于信息论分析雷达的测距和成像性能的一个重要区别是:目标(信源)在距离维度上的统计分布是无关联的一阶马尔科夫过程,而在图像空间,其像素的统计分布是具备更高可压缩性的高阶马尔科夫过程,因此基于信息论优化鬼成像雷达的辐射脉冲波形和空间涨落分布可以获得更加显著的优化效果。GISC 雷达中测量关系为  $Y=AX$ , 其中  $A$  为散斑场矩阵,  $X$  为目标,  $Y$  为返回信号, 定义 GISC 雷达的互信息为:

$$I(Y, X|A) = - \int dY p(Y|A) \ln p(Y|A) - \int dx \int dY p(Y, X|A) \ln p(Y|A, X) \quad (5)$$

式中:  $p(Y|A)$  表示返回信号  $Y$  对  $A$  的概率密度分布;  $p(Y, X|A)$  表示以  $A$  为条件返回信号  $Y$  和目标  $X$  的联合概率密度分布;  $p(Y|A, X)$  表示返回信号  $Y$  对目标  $X$  和  $A$  的概率密度分布;  $\ln$  为自然对数<sup>[33]</sup>。针对使用几种不同分布散斑场的 GISC 雷达系统, 计算了其返回信号和目标之间的互信息。图 4(a) 为负指数分布散斑场和不同参数下的伯努利散斑场的概率函数曲线, 图 4(b) 为相应 GISC 雷达系统的互信息。图 5 为相应散斑场的鬼成像均方差 MSE 性能曲线。数值模

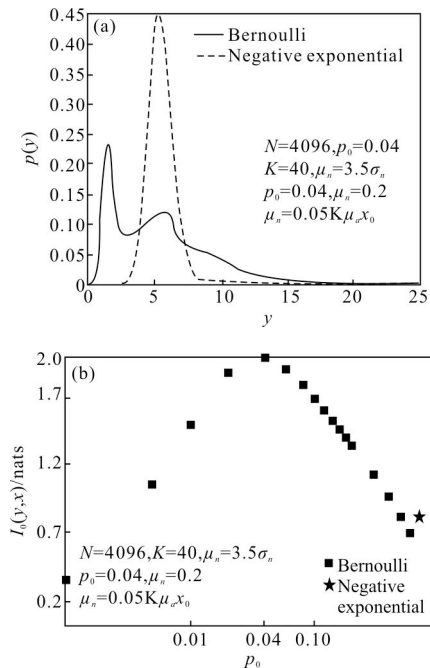


图 4 用负指数及伯努利散斑场得到的(a)曲线图和(b)互信息  
Fig.4 (a) Curves and (b) mutual information of negative exponential distribution and Bernoulli distribution

拟表明对于给定类型的目标, 存在特定的散斑场使得互信息达到最大, 这时由 GISC 雷达系统得到的目标重建质量最好。实际的目标场景是高阶马尔科夫过程, 互信息的计算与这里的简单例子不同, 但以此为基础, 可以看到以互信息为依据来设计优化 GISC 雷达系统是可能的。

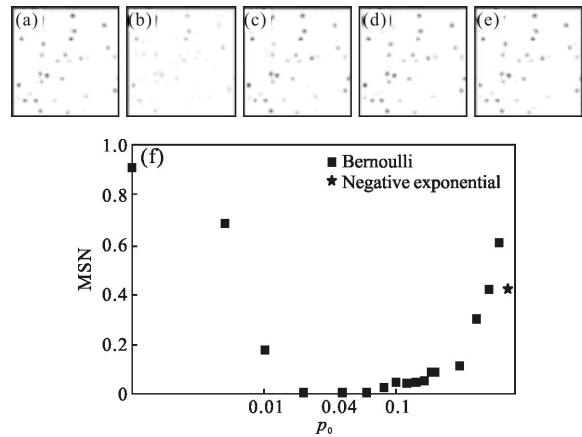


图 5 (a) 模拟所用的随机目标; (b) 用负指数分布散斑场得到的重建结果; (c)  $p_0=0.02$ ; (d) 0.04, (e) 0.06 的伯努利分布散斑场重建结果; (f) 两种分布散斑场重建结果的 MSE 值<sup>[31]</sup>  
Fig.5 Random target used in simulation; (a) reconstructed targets using speckle patterns generated (b) by negative exponential distribution and Bernoulli distribution with (c)  $p_0=0.02$ , (d) 0.04, (e) 0.06; (f) MSE values of two kinds of speckle patterns

### 2.2 GISC 雷达光源和重构算法优化

目前惯用的基于随机调制毛玻璃产生的负指数分布散斑场的相干尺度为常量, 而通常成像目标的特征具有不同尺度。GISC 雷达的图像分辨率由物面处的散斑场相干尺度决定, 采用单一相干尺度散斑场的 GISC 雷达, GISC 重构图像的噪声会随着散斑尺度的变小而增加。笔者提出采用多相干尺度散斑场作为 GISC 雷达的测量矩阵<sup>[34]</sup>, 初步的数值模拟和实验结果(见图 6)表明, 此时可同时获得高的成像分辨率和更加优良的抗噪性能。

根据压缩感知理论的公式(3)可知, 探测矩阵  $A$  与表达基  $\Psi$  的相干度越低, 所需要的采样数目就越少。因此, 在鬼成像中也可以通过降低探测矩阵与表达基的相干度的方式来提高图像的成像质量, 为 GISC 雷达提供一种优化的散斑场分布<sup>[35]</sup>。在实际应用中可以采用梯度下降法对探测矩阵与字典的相干度进行优化, 使得探测矩阵与字典的相干度尽可能

的低。图 7 为矩阵优化在不同采样数目之下的实验结果,利用优化之后的探测矩阵进行探测时比常规的高斯随机分布的矩阵的性能有了明显的提升。

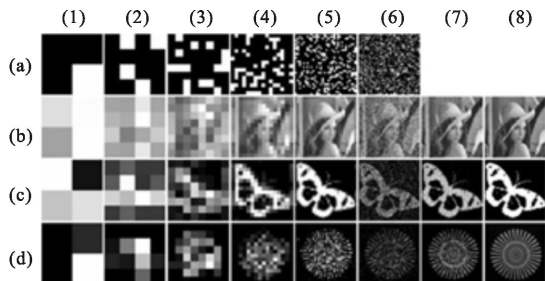


图 6 不同相关尺度散斑场 GISC 图像重构结果 (b8) 为原始 lena 图,(c8) 为稀疏蝴蝶模型,(d8) 为稀疏分辨率板;(a1~a6) 为单一尺度散斑场,(b1~b6),(c1~c6) 为 GISC 重构模拟结果,(d1~d6) 为 GISC 重构实验结果;(7) 列对应为多尺度散斑场 GISC 重构结果

Fig.6 Simulation results by GISC lidar with multi-correlation-scale speckle pattern. (b8) the continuous target Lena, (c8) the sparse targetbutterfly, (d8) the sparse target resolution plane, (b1)–(b6) the simulation results of Lena reconstructed by the corresponding measurement matrices, (c1)–(c6) the simulation results of the butterfly reconstructed by the corresponding measurement matrices, (d1)–(d6) the experimental results of the resolution plane reconstructed by the corresponding measurement matrices, (b7), (c7), (d7) the reconstruction results using multi-correlation-scale measurementmatrices

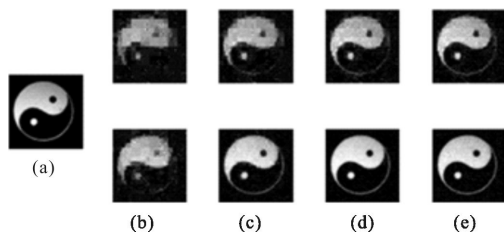


图 7 矩阵优化在不同采样数目之下的实验结果(a) 原参考目标,(b~e) 分别为采样数目为 1000,2000,3000,4000 次下的图像恢复结果;上一行为使用原高斯分布的矩阵进行采样所恢复的结果,下一行为使用优化之后的矩阵采样所恢复出的结果

Fig.7 Experimental results with different numbers of samplings. reference image(a); reconstructed results with  $K=1\ 000$ (b);  $K=2\ 000$ (c);  $K=3\ 000$ (d);  $K=4\ 000$ (e). Shown in the top line are the results obtained with Gaussian random matrix and in the bottom line the optimized matrix

在三维 GISC 雷达中,考虑三维目标和重构图在空间上的结构关系,笔者通过对 GISC 重构增加正交约束,相比于不考虑三维目标特点的直接时间切片 GISC 重构,可有效减少采样数<sup>[36]</sup>。图 8 所示为结构化三维 GISC 雷达对城市场景的仿真重构结果,相比于不考虑结构化的时间切片三维 GISC 重构方法,图像重构质量得到有效提高。

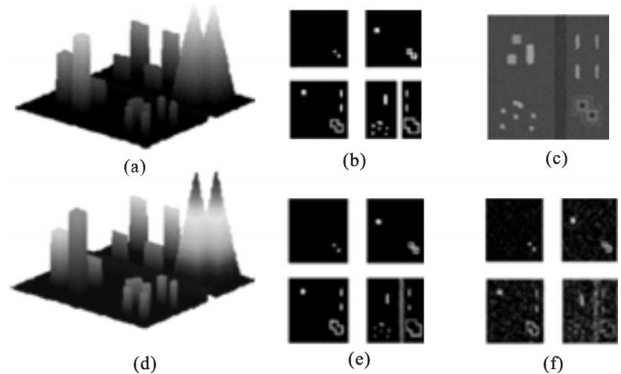


图 8 结构化 3D GISC 对城市场景的仿真重构结果

(a) 目标的三维模型(b) 目标的切片模型, (c)结构 3D GISC 结构重构结果(颜色表示高度), (d) 结构 3D GISC 重构结果,(e) 结构 3D GISC 重构结果切片,(f) 不考虑结构特性的 3D GISC 重构结果切片

Fig.8 Reconstructed results of a simulated city scene in 3D GISC (a) and (b) are the original 3D scene and some of its characteristic slices, (c) and (d) are the results of structured reconstruction, (c) is the simulated aerial photography results of 3D GISC lidar, (d) is the reconstructed 3D scene, (e) and (f) are the slice results of structured reconstruction and standard reconstruction

### 2.3 GISC 雷达对运动目标成像

GISC 雷达采用大视场凝视成像模式捕捉运动目标,雷达和目标间的相对运动会导致 GISC 雷达成像分辨率下降(即运动模糊)<sup>[37-40]</sup>。对于目标在垂直于雷达视线方向运动的情况,笔者提出基于参考散斑光场平移补偿的方法,可有效去除运动模糊<sup>[38]</sup>;又进一步提出了基于速度搜索的未知匀速运动目标去模糊图像重构方法<sup>[39]</sup>;对于目标在沿雷达视线方向运动的情况,笔者提出参考散斑光场缩放补偿方法,基于速度搜索对未知匀速运动目标成像<sup>[40]</sup>。这些方法提高了运动平台 GISC 雷达或者 GISC 雷达对运动

目标的成像能力,目前还在对更复杂运动形式研究相应的补偿方法。

## 2.4 GISC 雷达结构优化

在 GISC 雷达的远距离遥感探测和成像中,随着作用距离增大,为保证探测灵敏度需要接收系统口径相应增大。在实际工程应用中,超大发射和接收口径系统存在工艺复杂、造价昂贵、系统笨重等问题。根据鬼成像雷达的图像分辨机理和接收特点,笔者提出采用若干个小口径发射或接收系统合理排布在一定区域类,其有效口径等效于一个大口径发射或接收系统,从而实现稀疏多点发射和探测的 GISC 雷达<sup>[41-43]</sup>。

## 3 GISC 雷达工程化应用的若干关键技术

目前 GISC 雷达研究正处于向工程应用转化的初始阶段,没有现成的关键技术可以用来进行“系统集成”。急需发展的关键技术主要有以下几点。

### 3.1 高重频大能量可预置赝热光源技术

考虑一个具体应用场景:对 10 km 处场景提供分辨率优于 0.1 m、尺寸 512×512、帧频为 25 帧/s 的视频图像监控。为满足这一需求,根据雷达距离方程计算可知基于非相干探测的 GISC 雷达需要赝热光源单脉冲能量不小于 10 mJ。设重构一帧图片需要 2000 次独立采样,则光源脉冲重频为 50 kHz。(由于视频帧间数据具备冗余,发展基于视频压缩感知理论的测量散斑场优化方法和图像重构技术有望进一步减少采样数)。为了满足高速成像需求,需要发展可预置赝热光源技术以提高采样速度。除了常规的单脉冲能量和脉冲重频外,GISC 雷达系统的赝热光源必须能够根据目标特性对光场的时空涨落形式进行优化;另外类似于激光的光束质量因子,为保证辐射的能量集中于设定的成像视场之内,对 GISC 雷达系统赝热光源的拉氏不变量也有相应的约束。

### 3.2 GISC 雷达的相干探测技术

目前的鬼成像雷达系统探测臂光电探测采用非相干方式,使用一个单像素的桶探测器对回波信号进行直接接收。使用非相干探测方法直接探测存在的主要问题是接收信噪比 SNR (反比于接收电路带宽)和纵向分辨率(正比于接收电路带宽)是一对矛盾,这会限制雷达对远距离微弱信号的高距离分辨探测<sup>[44]</sup>。测距雷达通常采用基于脉宽压缩的相干探

测将这两个参数解耦,实现低功率宽脉冲下的高分辨测距。因此研究和建立基于相干探测体制的鬼成像雷达有利于对远距离三维目标的鬼成像。常见的脉冲压缩技术利用线性调频信号调制激光载波的频率或幅度,由于调频会导致横向散斑场的模糊,因此简单的直接调频不适用于鬼成像,故在鬼成像中更容易采用啁啾调幅体制的脉冲压缩技术。啁啾调幅鬼成像雷达采用啁啾信号对发射激光幅度进行时间维调制,毛玻璃对发射激光进行空间调制,得到时空二维调制光。接收机采用相干外差方式接收散射回波,在时间维采用脉冲压缩技术获得高分辨的距离切片,然后由切片所携带的场信息获得对应的强度信息,与参考臂做关联运算,可以获得目标的三维图像。由于反射光的空间散斑效应,接收系统需要采用阵列相干探测方式实现桶探测。

### 3.3 单光子探测灵敏度及自适应的 GISC 雷达图象复原算法

弱光条件下一次测量可接收到单个光子的雪崩回波信号,但这只能判断目标的有无。如何在概率性低比特信息中恢复图像,是弱光下 GISC 雷达研究亟需解决的问题。此外,目前的 GISC 图像重构算法对基本参数的选择依赖性非常大,通常需要调节一系列参数才能获得一个最佳的重构结果,不利于实时图像获取,因此需要发展研究自适应的 GISC 重构算法。总之,降低图像重构的复杂度并提高时效性,也是 GISC 雷达工程实用化需要突破的一系列关键问题之一。

## 4 结论

GISC 雷达是一种全新的光学遥感成像技术,兼具传统激光雷达的远距离探测能力和闪光成像雷达的图像分辨率。通过和压缩感知等现代信息理论结合,利用目标场景的各种先验知识,可实现高效的图像获取效率。GISC 雷达光源的设计及工程实现、图像复原算法远较传统激光雷达复杂,总体结构设计及接收系统与传统激光雷达相当。目前上海光机所使用分立器件构建系统完成了野外实际场景的演示性试验,但理论体系远未完善,在光源设计、光电探测、图像算法及成像体制等方面向工程应用的转化才刚刚开始,仍需大量的光物理、光学工程、信息科学及应用数学等学科领域的交叉合作研究。文中简单介绍了上海光机所 GISC 雷达的研究历程,希望

能为有兴趣的同行提供有益的参考。

#### 参考文献:

- [1] Elias P. Optics and communication theory [J]. *JOSA*, 1953, 43(4): 229–232.
- [2] Francia G. Resolving power and information[J]. *JOSA*, 1955, 45(7): 497–499.
- [3] Cheng J, Han S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9): 093903.
- [4] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: Comparing entanglement and classical correlation[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(9): 093602.
- [5] Cao D Z, Xiong J, Wang K. Geometrical optics in correlated imaging systems [J]. *Physical Review A*, 2005, 71 (1): 013801.
- [6] D'angelo M, Shih Y. Quantum imaging [J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(12): 567–596.
- [7] Naulleau P, Leith E. Imaging through optical fibers by spatial coherence encoding methods [J]. *JOSA A*, 1996, 13 (10): 2096–2101.
- [8] Dowski Jr E R, Johnson G E. Wavefront coding: a modern method of achieving high-performance and/or low-cost imaging systems [C]//SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation, 1999: 137–145.
- [9] Shemer A, Mendlovic D, Zalevsky Z, et al. Superresolving optical system with time multiplexing and computer decoding [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(35): 7245–7251.
- [10] Schwarz C J, Kuznetsova Y, Brueck S. Imaging interferometric microscopy [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(16): 1424–1426.
- [11] Zalevsky Z, García J, García-Martínez P, et al. Spatial information transmission using orthogonal mutual coherence coding[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(21): 2837–2839.
- [12] Schermelleh L, Carlton P M, Haase S, et al. Subdiffraction multicolor imaging of the nuclear periphery with 3D structured illumination microscopy [J]. *Science*, 2008, 320 (5881): 1332–1336.
- [13] Han Shengsheng. Intensity correlation imaging technology for remote sensing[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 44–51. (in Chinese)  
韩申生. 强度关联遥感成像技术 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 44–51.
- [14] Liu H, Han S. Spatial longitudinal coherence length of a thermal source and its influence on lensless ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(8): 824–826.
- [15] Gong W, Han S. The influence of axial correlation depth of light field on lensless ghost imaging [J]. *JOSA B*, 2010, 27 (4): 675–678.
- [16] Goodman J W. Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications[M]. New York: Wiley, 2007.
- [17] Ferri F, Magatti D, Gatti A, et al. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 183602.
- [18] Gatti A, Bache M, Magatti D, et al. Coherent imaging with pseudo-thermal incoherent light [J]. *Journal of Modern Optics*, 2006, 53(5–6): 739–760.
- [19] Gong W, Han S. A method to improve the visibility of ghost images obtained by thermal light[J]. *Physics Letters A*, 2010, 374(8): 1005–1008.
- [20] Bai Y, Han S. Ghost imaging with thermal light by third-order correlation[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(4): 043828.
- [21] Ou L H, Kuang L M. Ghost imaging with third-order correlated thermal light [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2007, 40(10): 1833.
- [22] Zhang P, Gong W, Shen X, et al. Homodyne detection in ghost imaging with thermal light [J]. *Physical Review A*, 2009, 80(3): 033827.
- [23] Zhang P, Gong W, Shen X, et al. Correlated imaging through atmospheric turbulence[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033817.
- [24] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 2006, 52(4): 1289–1306.
- [25] Candè E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling [J]. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 2008, 25 (2): 21–30.
- [26] Gong W, Han S. Super-resolution far-field ghost imaging via compressive sampling [EB/OL]. <http://arxiv.org/abs/0911.4750v3>, 2009.
- [27] Du J, Gong W, Han S. The influence of sparsity property of images on ghost imaging with thermal light [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1067–1069.
- [28] Gong W, Han S. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1519–1522.
- [29] Chen J, Gong W, Han S. Sub-Rayleigh ghost imaging via sparsity constraints based on a digital micro-mirror device[J]. *Physics Letters A*, 2013, 377(31): 1844–1847.



- [30] Zhao C, Gong W, Chen M, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [31] Gong W, Zhao C, Jiao J, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar[EB/OL]. <http://arxiv.org/abs/1301.5767>, 2013.
- [32] Woodward P M, Probability and Information Theory, with Applications to Radar[M]. New York: McGraw-Hill, 1953.
- [33] Li Enrong, Chen Mingliang, Gong Wenlin, et al. Mutual information of ghost imaging systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013(12): 101-106. (in Chinese)  
李恩荣, 陈明亮, 龚文林, 等. 鬼成像系统的互信息[J]. 光学学报, 2013(12): 101-106.
- [34] Chen M, Li E, Han S. Application of multi-correlation-scale measurement matrices in ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(13): 2924-2928.
- [35] Xu X, Li E, Shen X, et al. Optimization of speckle patterns in ghost imaging via sparse constraints by mutual coherence minimization[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(7): 071101.
- [36] Yu H, Li E, Gong W, et al. Structured image reconstruction for three-dimensional ghost imaging lidar[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 14541-14551.
- [37] Li H, Xiong J, Zeng G. Lensless ghost imaging for moving objects [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 127005-1-127005-6.
- [38] Zhang Cong, Gong Wenlin, Han Shensheng. Ghost imaging for moving targets and its application in remote sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 204-210. (in Chinese)  
张聪, 龚文林, 韩申生. 运动目标强度关联成像及其在遥感探测中的应用[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 204-210.
- [39] Li E, Bo Z, Chen M, et al. Ghost imaging of a moving target with an unknown constant speed [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251120.
- [40] Li X, Deng C, Chen M, et al. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153-157.
- [41] Gong W, Han S. Multiple-input ghost imaging via sparsity constraints[J]. *JOSA A*, 2012, 29(8): 1571-1579.
- [42] Bo Z, Gong W, Li E, et al. Multiple-input ghost imaging via sparsity constraints with thermal light[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(10): 102501.
- [43] Chen Mingliang, Li Enrong, Wang Hui, et al. Ghost image based on sparse array pseudothermal light system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 17-24. (in Chinese)  
陈明亮, 李恩荣, 王慧, 等. 基于稀疏阵赝热光系统的强度关联成像研究[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 17-24.
- [44] Merrill I S. Introduction to Radar Systems [M]. New York: Mc Grow-Hill, 2001.