

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.07

量子关联成像及其雷达应用研究

孙帅^{1,2,3}, 何林贵^{1,2,3}, 陈鹏^{1,2,3}, 鲍可^{1,2,3}, 刘伟涛^{1,2,3*}

(1.国防科技大学理学院量子信息研究所, 湖南长沙 410073;

2.国防科技大学量子信息学科交叉中心, 湖南长沙 410073;

3.湖南省量子信息机理与技术重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 介绍了量子关联成像的物理原理, 阐述了量子关联成像灵敏度高、抗干扰能力强、信息获取效率高、能够实现单像素探测成像和无透镜成像的技术特点; 探讨了量子关联成像雷达的运动物体成像问题和大气影响应对问题, 指出可通过提高采样频率、升级跟踪手段、优化成像策略等方式提升量子关联成像雷达的应用性能; 展望了量子关联成像雷达在侦察、预警等领域的发展方向, 提出未来通过发展极弱光条件下的成像技术、优化设计照明方式、建立多基站协同体系、发展人工智能算法和多维信息智能融合算法等方式, 进一步提升量子关联成像雷达的发现概率、跟踪精度、判别准确度、有效作用距离。

关键词: 成像系统; 量子关联成像; 量子光学; 光学雷达

中图分类号: TB939; O431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)03-0075-16

Quantum correlation imaging and its application for LiDAR

SUN Shuai^{1,2,3}, HE Lingui^{1,2,3}, CHEN Peng^{1,2,3}, BAO Ke^{1,2,3}, LIU Weitao^{1,2,3*}

(1.Institute for Quantum Science and Technology, College of Science, National University of Defense Technolog, Changsha 410073, China; 2.Interdisciplinary Center of Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3.Hunan Key Laboratory of Mechanism and technology of Quantum Information, Changsha 410073, China)

Abstract: In this paper, basic physics of quantum correlation imaging is introduced, with discussion on its properties of high sensitivity, robustness, efficiency of information acquisition, as well as the capability of single-pixel and lensless imaging. Towards its applications in Lidar, issues related to imaging of moving objects and influences from the atmosphere are discussed. By improving the sampling rate, enhancing the means of tracking and optimizing the strategy of imaging reconstruction, the application performance of quantum correlation imaging can be upgraded. The development direction of quantum correlation imaging lidar in fields such as scouting and early warning are prospected. Further improvements of the discovery probability, tracking accuracy, discrimination accuracy and effective working distance in the future by studying imaging technology under extremely low photon flux, optimizing design of illumination patterns, establishing cooperation among multiple systems, and developing algorithms including artificial intelligence and information fusion are expected.

Key words: imaging system; quantum correlation imaging; quantum optics; LiDAR

收稿日期: 2022-12-20; 修回日期: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金 (62275270; 62105365)

引用格式: 孙帅, 何林贵, 陈鹏, 等. 量子关联成像及其雷达应用研究[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 75-90.

Citation: SUN S, HE L G, CHEN P, et al. Quantum correlation imaging and its application for LiDAR [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 75-90.



0 引言

量子关联成像是一种新型信息获取模式，基于光场的量子纠缠或高阶相干性获取物体的图像、距离等信息。基于其系统结构，通常认为量子关联成像具有高灵敏^[1-2]、抗干扰^[3-8]、信息获取效率高^[9-11]等特点，有望解决雷达前视成像及光学遥感、监测易受气象干扰的难题，并为光学雷达作用距离提升带来新的解决手段，因此近些年受到了广泛关注。

近年来，量子关联成像领域面向雷达应用^[9-11]涌现了很多创新性成果，在关键器件研制^[12-17]、成像灵敏度提升^[18-20]、运动目标跟踪成像^[21-24]、成像算法优化设计^[25-28]、信息获取策略优化^[8, 29-31]等方面取得了突破性进展。但目前仍然没有实际应用的量子关联成像雷达系统。量子关联成像在原理优势的发挥、实用系统的工程化等方面还有很大的发展空间。

本文将首先介绍量子关联成像的基本原理，

$$G^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = \langle I(\vec{r}_1, t_1) I(\vec{r}_2, t_2) \rangle = \langle \vec{E}^*(\vec{r}_1, t_1) \vec{E}^*(\vec{r}_2, t_2) \vec{E}(\vec{r}_1, t_1) \vec{E}(\vec{r}_2, t_2) \rangle \quad (1)$$

式中： $I(\vec{r}, t)$ 和 $\vec{E}(\vec{r}, t)$ 分别为 t 时刻 \vec{r} 处的光强和光场电矢量； $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均符号。光场二阶关联函数表示时空中两点的光场强度之间的关联，反映了时空中两点的光强变化或光强涨落的对应关系。定义归一化的二阶关联函数为

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = \frac{\langle I(\vec{r}_1, t_1) I(\vec{r}_2, t_2) \rangle}{\langle I(\vec{r}_1, t_1) \rangle \langle I(\vec{r}_2, t_2) \rangle} \quad (2)$$

归一化的二阶关联函数又称为二阶相干度。对于几种典型的光场，其二阶相干度表现出不同的性质。其中，纠缠双光子场的二阶相干度可写为

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = \begin{cases} 1 & \vec{r}_1 = \vec{r}_2 \text{ and } t_1 = t_2 \\ 0 & \vec{r}_1 \neq \vec{r}_2 \text{ or } t_1 \neq t_2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表明了纠缠双光子之间的强烈关联性。单光子场的二阶相干度则表现为

$$g^{(2)} = 0 \quad (4)$$

式(4)实际上是光子能量不可再分的自然结果。应用最为广泛的激光是一种相干光，其二阶相干度与其一阶性质相似，则

$$g^{(2)} = 1 \quad (5)$$

由原子自发辐射所得的热光二阶相干度则

然后通过与传统成像模式对照探讨分析量子关联成像的技术特点，阐述相关领域的应用研究，总结面向雷达应用需要解决的关键问题，并介绍本课题组在运动物体成像、大气扰动应对等方面的研究进展，最后对量子关联成像的雷达应用进行总结和展望，为相关领域的后续研究推进提供参考。

1 量子关联成像理论基础

量子关联成像的理论基础可以追溯到20世纪60年代Roy J提出的“光的相干性量子理论”^[32]。该理论成功描述了光量子的运动规律，揭示了光量子的特性，以及大量光子如何互相影响并产生多光子干涉现象等，奠定了量子光学的理论基础。因其对“光学相干的量子理论”的贡献，Roy J于2005年获得了诺贝尔物理学奖。

1.1 物理基础

根据Roy J的理论，光场中两点之间的二阶关联函数定义为

表现为

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = \begin{cases} 2 & \vec{r}_1 = \vec{r}_2 \text{ and } t_1 = t_2 \\ 1 & \vec{r}_1 \neq \vec{r}_2 \text{ or } t_1 \neq t_2 \end{cases} \quad (6)$$

热光场在对应位置也可以表现出关联特性，不过与纠缠双光子场相比多了一个本底。在考虑光场的相干体积的情况下，这几种典型光场的二阶相干度可以用图1来表示，其中， δr 为光场所在平面的坐标差， d 为光场的空间相干长度。

特别地，对于连续泵浦光经自发参量下转换产生的纠缠双光子态，当考察其中任何一个子系

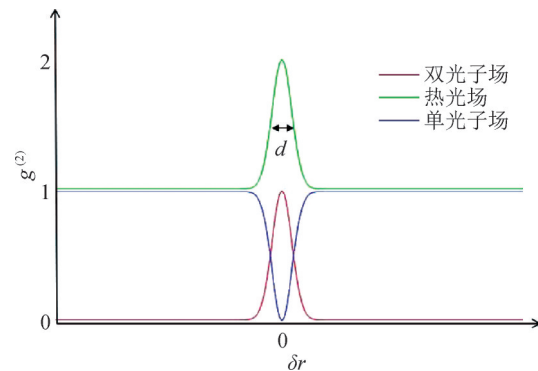


图1 几种典型光场的二阶相干度

Fig.1 Second-order correlation of several light fields

统时，其光子分布处在最大混合态，与热态分布类似。热光和纠缠双光子的二阶关联函数有相似的特点，接下来以热光为例展开讨论。

热光是由多个相互独立的源辐射的光场在空间混合的结果。对于单模热光，通常假设：①在同一时间空间点，由各子源辐射的光场的复振幅

$$G^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = \langle I(\vec{r}_1, t_1)I(\vec{r}_2, t_2) \rangle + \left| \langle \vec{E}(\vec{r}_1, t_1) \vec{E}^*(\vec{r}_2, t_2) \rangle \right|^2 \quad (7)$$

于是，热光场二阶相干度可以表示为

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = 1 + \frac{\left| \langle \vec{E}(\vec{r}_1, t_1) \vec{E}^*(\vec{r}_2, t_2) \rangle \right|^2}{\langle I(\vec{r}_1, t_1)I(\vec{r}_2, t_2) \rangle} \quad (8)$$

式(8)中等号右边的第二项对应于一阶相干度，即

$$g^{(1)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = \frac{\langle \vec{E}(\vec{r}_1, t_1) \vec{E}^*(\vec{r}_2, t_2) \rangle}{\sqrt{\langle I(\vec{r}_1, t_1)I(\vec{r}_2, t_2) \rangle}} \quad (9)$$

则热光场二阶相干度与一阶相干度的关系为

$$g^{(2)} = 1 + |g^{(1)}|^2 \quad (10)$$

还可以从光场强度涨落的角度来理解二阶关联函数。将某点处的光场强度改写为

$$I(\vec{r}, t) = \langle I(\vec{r}, t) \rangle + \Delta I(\vec{r}, t) \quad (11)$$

式中： $\Delta I(\vec{r}, t)$ 为该时空点处的光强涨落。由此，两点之间的关系可写为涨落关联形式

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = 1 + \frac{\langle \Delta I(\vec{r}_1, t_1) \cdot \Delta I(\vec{r}_2, t_2) \rangle}{\langle I(\vec{r}_1, t_1) \cdot I(\vec{r}_2, t_2) \rangle} \quad (12)$$

式(12)可以表现出时空点光强涨落之间的关系。理想情况下，热光的二阶相干度可以写为

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t_1, t_2) = 1 + \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2; t_1 - t_2) \quad (13)$$

式中： $\delta(\cdot)$ 为Dirac-Delta函数，当所考察的两时空点重叠时，其取值为2，当所考察两时空点不重叠时，其取值为1，证明热光场中两个不同点之间的涨落是相互独立的。需要说明的是，为了简化问题同时又不失一般性，本文在介绍光场的二阶相干和一阶相干性时仅考虑了理想光源的情况，实际条件下的光源相干长度和相干时间均有一定宽度，无法严格写为 $\delta(\cdot)$ 函数的形式，但随着所考察点之间的距离变化，这种涨落关联表现出单峰性质，如图1所示。

从上述二阶关联性质可以看出，纠缠双光子场和热光场的二阶相干度均具有单峰特性，利用这种单峰性质，配合适当的光路设计，可以建立

相互独立；②在光场同一空间点，同一子源辐射光场的复振幅在不同时刻相互独立；③在同一时间，空间中不同位置子源辐射光场的复振幅相互独立。根据以上假设，光场复振幅中相位在时间和空间中均匀随机分布，热光场的统计性质满足复高斯矩定理，二阶关联函数可以改写为

物面和像面点对点的成像关系，实现图像获取。这种图像获取方法就是量子关联成像。

以热光关联成像为例，典型的成像系统结构如图2所示。热光场经过分束器(Beam Splitter, BS)后分成两束，一束自由传播并由一个面阵探测器记录，另外一束照射在物体上。其中待成像物体所在的一路称为物臂，在接收口径内，将物体反射的回波收集到一个单像素探测器上进行强度探测而不进行空间分辨探测，这种探测方式称为桶探测；另一路记录光场不同时刻的空间分布，称为参考臂。其中，参考臂正对着照明光场，没有对物体进行探测，因此无法得到物体图像。而物臂仅做了单像素的能量探测，不具有空间分辨能力，也不能对物体成像。但是借助光场的二阶关联性质，通过两个探测结果的二阶关联可以获得物体图像。

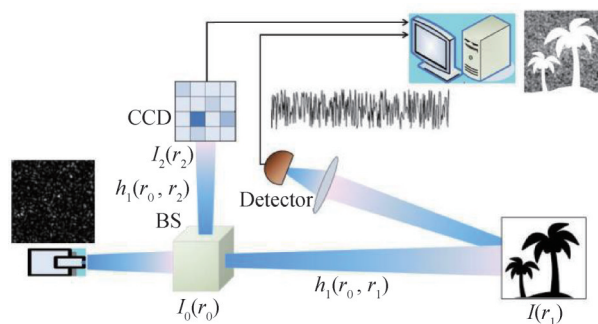


图2 关联成像原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of ghost imaging

图2中，设在分束器上的光强分布为 $I_0(\vec{r}_0)$ ，通过分束器后照射在物体上的光为 $I_1(\vec{r}_1)$ ，在参考臂探测器上的光强为 $I_2(\vec{r}_2)$ ，物体的反射率函数为 $O(\vec{r}_1)$ 。 $h_1(\vec{r}_0, \vec{r}_1)$ 为物臂菲涅尔衍射传播函数， $h_1(\vec{r}_0, \vec{r}_2)$ 为参考臂菲涅尔衍射传播函数。 $\langle \cdot \rangle$ 所代表的系综平均通过多次采样后在时域上求平均来完成。在第 n 次采样中，桶探测值可以表示为

$$B(n) = \int I_1(\vec{r}_1, n) O(\vec{r}_1) d\vec{r}_1 \quad (14)$$

将桶探测结果与参考臂上阵列探测器记录的结果进行关联运算, 即

$$\tilde{O}(\vec{r}_2) = \frac{\langle I_2(\vec{r}_2, n) B(n) \rangle}{\langle I_2(\vec{r}_2, n) \rangle \langle B(n) \rangle} \quad (15)$$

代入桶探测结果可得

$$\tilde{O}(\vec{r}_2) = \frac{\langle I_2(\vec{r}_2, n) I_1(\vec{r}_1, n) \rangle \cdot O(\vec{r}_1) d\vec{r}_1}{\langle I_2(\vec{r}_2, n) \rangle \int I_1(\vec{r}_1, n) O(\vec{r}_1) d\vec{r}_1} \quad (16)$$

通过运算可以得到

$$\tilde{O}(\vec{r}_2) = \frac{1}{\int O(\vec{r}_1) d\vec{r}_1} \int O(\vec{r}_1) \frac{I_1(\vec{r}_1, n) I_2(\vec{r}_2, n)}{I_1(\vec{r}_1, n) I_2(\vec{r}_2, n)} d\vec{r}_1 \quad (17)$$

$$\tilde{O}(\vec{r}_2) = \frac{1}{\int O(\vec{r}_1) d\vec{r}_1} \int O(\vec{r}_1) g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) d\vec{r}_1$$

由式(17)分析可知, 关联运算的结果可以表示为光场二阶相干度和物体反射率函数的卷积。对于理想热光场照明的条件, 有

$$g^{(2)}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \quad (18)$$

由热光场二阶相干度的性质, 可以得到

$$\tilde{O}(\vec{r}_2) = 1 + O(\vec{r}_2) \frac{1}{\int O(\vec{r}_1) d\vec{r}_1} \quad (19)$$

式(19)表明利用光场的涨落关联或者二阶相干性, 可以借助一个单像素探测器获得物体的空间分辨图像。

上述推导过程是按照理想单模热光模型进行的, 而实际情况下, 假设不一定能够实现。首先, 自然存在的热光场中光强的涨落时间或光场的相干时间很短, 而探测器响应时间往往远大于这一特征时间, 因此难以探测到光场的涨落。对此, 实验中通常采用赝热光, 即用其它光源来模拟热光的行为。其中最为典型的方法是将激光照射在转动的毛玻璃上获得赝热光^[33]。在这种情况下, 照明光场中会出现随时间涨落的散斑场, 其涨落的特征时间可以由毛玻璃转速来调节以适应探测器的响应能力; 其次, 上述分析中系综平均要求光源状态满足各态历经, 因此需要进行几乎无穷多次测量, 而实际情况下显然不可能。在实际操作中, 通常采用有限次测量的结果, 由此也会带来成像质量的下降。

1.2 成像原理

通过与传统光学成像对比来进一步理解量子关联成像的原理。在光学成像中, 通常可以用点扩散函数(Point Spread Function, PSF)来反映系统的成像能力。对于传统非相干照明的光学成像, 物体的像光强分布等于原始物体光强分布与点扩散函数的卷积, 即

$$\tilde{O}(\vec{r}_2) = O(\vec{r}_1) \star \text{PSF}(\vec{r}_2 - \vec{r}_1) \quad (20)$$

式中: $\text{PSF}(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$ 为物面到像面的点扩散函数; \star 为卷积符号。若透镜口径足够大或待成像目标足够远, 物面上的一个光点通过透镜到达像平面上依旧是一个光点, 这种情况下PSF可看作是一个 $\delta(\cdot)$ 函数, 实现点对点成像。而实际系统中透镜口径大小是有限的, 对于有限尺寸的圆形透镜, PSF为Somb函数, 这时不再是点对点关系, 而是一个点对应一个光斑。透镜孔径越小, PSF的半高宽越宽, 成像越模糊, 点扩散函数的宽度决定了像的分辨力。

对于关联成像来说, 根据式(1)~式(19)的推导, 与传统光学成像的卷积关系对照可知, 关联成像中光场的二阶相干度起到了点扩散函数的作用。 $g^{(2)}$ 的单峰性保证了物面和像面点对点的成像关系。同时, 与传统的光学透镜成像一样, 光场二阶相干度的形式也会影响成像的质量。采用激光照射毛玻璃获得赝热光源时, 热光二阶相干度变为有一定宽度的单峰函数, 其半高宽对应于照射在物体表面散斑的平均尺寸, 而散斑大小由激光照射在毛玻璃上的尺寸、激光波长及传播距离共同决定。同时, 照射在物体表面上的散斑的平均尺寸也决定了成像分辨力。另外, 由卷积关系可知, 二阶相干度的对比度也决定了成像的对比度。二阶相干度的峰值越大, 即峰值越接近2, 图像的对比度越高。可以通过控制光场调制器件的光学参数来调节峰值分布的参数。光源是决定成像质量的核心因素之一, 因此, 光源统计性质分析及性能提升是研究人员重点关注的问题。

下面将结合数学表达的方式来探讨成像原理。离散化的物面的强度分布可以用一个 m 阶矩阵表示, 进一步, 该矩阵还可以表示为一个 $N \times 1$ 列向量 \mathbf{X} , 其中 $N = m^2$ 。同时, 物体表面的照明光场可写为一个行向量, 桶探测结果为表示光场的行向

量和表示物面强度分布的列向量的乘积, M 次测量后, 将所有测量的行向量按顺序排成一个矩阵, 这个矩阵可称为测量矩阵, 用 $M \times N$ 矩阵 $\Phi_{M \times N}$ 表示。测量矩阵 $\Phi_{M \times N}$ 作用在待测列向量 X 上, 得到的桶探测信号也对应一个列向量, 可以写为 $Y = \Phi_{M \times N} X$ 。

对于传统光学成像来说, 阵列探测器上每个像素测量的是物面上的一个点, 用测量矩阵表示该过程时, 对角元为 1, 非对角元均为 0, 整个测量矩阵正好构成一个单位矩阵。将测量矩阵作用在物面列向量上, 得到的就是探测结果, 即

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1' \\ \vdots \\ x_n' \end{bmatrix} \quad (21)$$

因此传统光学成像的探测结果与物体分布相同, 即获得物体的图像。这是一种“所见即所得”的成像模式。

对于关联成像来说, 测量结果同样可以表示为

$$S = \Phi_{M \times N} X \quad (22)$$

其中, S 对应的是关联成像中的桶探测值, 而测量矩阵则由照明散斑场确定。由于每次照明花样中都有多个散斑, 也就是物面上有多个像素被照亮从而被测到, 从数学表达上看测量矩阵的每一个行向量中非对角元并不为 0, 测量结果与像面上的像素之间不再存在一一对应关系, 因此需要采取适当的方法将图像计算出来, 实现“所见非所得”的成像模式。对于二阶关联运算, 即在等式 (22) 两边分别左乘测量矩阵的转置矩阵

$$\Phi_{N \times M}^T S = \Phi_{N \times M}^T \Phi_{M \times N} X \quad (23)$$

对于散斑场, 测量矩阵为随机矩阵, 测量次数足够多的情况下, 其转置矩阵与原测量矩阵的乘积无限逼近于一个全 1 矩阵与单位矩阵的和 (归一化后), 于是

$$\Phi_{N \times M}^T S = \left(\begin{bmatrix} 1 & & \\ & \ddots & \\ & & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

根据式 (24) 可以看出, 运算结果是一个单位矩阵与全 1 矩阵之和, 再乘以物体强度分布向量。其中单位矩阵和物体强度分布向量的乘积表示物体图像, 而全 1 矩阵与物体强度分布向量的乘积为常数矩阵, 可以认为是加在图像上的背景。

按照这种理解, 在传统成像中测量次数等于像素数, 而关联成像的测量次数可以不等于像素数。即使在测量次数小于图像像素数的情况下, 由于每次测量得到了多个像素的信息, 多次测量有可能覆盖所有像素, 在欠采样的情况下仍然有可能得到物体的图像。在欠采样情况下, $Y = \Phi_{M \times N} X$ 这一数学问题的求解正好与压缩感知理论^[34]所解决的问题相一致, 因此研究者们也基于待成像物体的稀疏性, 发展了基于压缩感知的量子关联成像方法^[35-38]。

另一方面, 虽然利用散斑场通过关联可以在欠采样的情况下得到图像, 但由于其存在一个本底, 导致图像质量有时不尽如人意。为避免这种情况, 科研人员提出了正交化的测量矩阵^[39-40], 如 Hadamard 矩阵^[40], 其特点是转置矩阵乘以原矩阵得到单位矩阵, 因此不再有散斑照明情况下的本底, 有可能得到更为准确的图像。但由于各次测量相互正交, 测量次数需要不小于像素数才能获得完整的图像。

1.3 技术特点

不同于传统成像, 量子关联成像是利用辐射场的涨落性质而发展出的新光学成像和信息并行获取技术。相较传统成像技术中通过记录辐射场的光强分布从而获取目标的图像信息的方法, 量子关联成像则是通过利用、控制 (或模拟) 辐射场的量子涨落来得到物体的图像, 辐射场的量子涨落特性在量子关联成像中扮演着重要角色。量子关联成像增加了量子涨落这个新的独立信息通道, 可以利用光场的涨落对物体信息进行编码, 在接收携带了编码物体信息的目标光场的涨落信号后, 再与未携带信息的照明光场进行关联计算, 即可获得物体的信息。与传统成像相比, 量子关联成像具有灵敏度高、抗干扰能力强、信息获取效率高等特点, 下面具体进行介绍:

1) 成像灵敏度高

传统成像采用的是一种物面与像面之间点对点的成像机制, 接收口径内的能量要分布到若干像素上分别进行探测, 由此得到各个像点。而量子关联成像将口径内的回波能量通过透镜收集到一个点探测器上, 能量更集中, 且单元探测器件相较阵列探测器在灵敏度、响应时间等方面往往

具有更好的性能,因此系统的灵敏度更高。对于雷达应用来说,采取量子关联成像机制可以探测到更远的物体,或者更暗的物体。

2) 抗干扰能力强

传统成像通过累积进入接收口径的所有信号来形成图像,无法区分夹杂在回波信号内的背景光、散射光等成像信道中的干扰因素。量子关联成像利用光场涨落进行物体信息的编码传输。从信号与噪声的关系角度分析,环境噪声和信道噪声与照明光不存在相关性,在进行信息重构时,关联运算可以一定程度上减弱外部噪声的干扰。进一步,量子关联成像还可以借助信道编码理论优化光场涨落模式来增强抗干扰能力,甚至具有对抗成像信道中雨雾等环境因素干扰的能力,因此有可能超越传统光学成像系统实现一定程度不良天气条件下的成像。

3) 信息获取效率高

传统成像采用点对点的成像机制,由于自然图像都是可压缩的(即自然图像包含大量的冗余信息),这种机制的信息获取效率很低。而量子关联成像利用光场时空涨落在成像过程中对物体信息进行编码,可以极大地压缩图像探测过程中的冗余信息,以最少的光子数获取目标场景图像信息,甚至在回波脉冲平均光子数小于1时仍然能够成像,具有远超传统成像系统的信息获取效率。同时,量子关联成像系统中,如果在照明光场上进行多个维度的编码,比如时间、空间、光谱等,就可以相应地从回波信号中获得对应维度上物体的信息,即可以实现多维信息的一体化并行获取,进一步提升系统的信息获取效率。

同时,量子关联成像利用光场的空时涨落还可实现波束内成像。现有的微波雷达在一个照明波束内只能获得一个点信息,不具备空间分辨能力,想要获得空间分辨能力则需要借助相对运动,通过合成孔径方法以斜视方式实现成像。而量子关联成像系统在照明范围内可以获得多点信息,具有空间分辨能力,为微波前视成像提供了新的思路。

另外,从系统构型上,量子关联成像还实现了单像素成像、无透镜成像,这为成像系统设计带来了新的便利。在量子关联成像系统中,采用

桶探测方式利用单像素探测器实现成像,这一图像信息获取方式实际上是将像素分割放在了照明光源上。而物与像之间的对应关系不再依赖于透镜进行变换,借助光场的二阶关联仅依靠光的自由传输也能实现物像之间的对应。基于这两个特点,对于一些阵列探测器或透镜不易获得的波段,如微波^[41-43]、太赫兹^[44-46]、X射线^[47-52]等,量子关联成像可以发挥很好的作用。

量子关联成像是一种间接成像模式,在成像质量方面往往不如直接测量,而且由于获得物体信息需要进行多次照明和采样从而完成系综平均,对于采样时间、数据处理往往有更高的要求。因此,在实际应用中,需要结合实际场景,扬长避短。

1.4 量子关联成像应用

基于纠缠的量子成像是量子关联成像领域最具吸引力的部分之一,对于弱信号检测、不宜光照太强的对象检测有明显优势。然而,由于纠缠光子对亮度较低,且在室外使用容易被大气环境扰动造成退相干,故更多的研究集中在(赝)热光关联成像的应用上。

由于量子关联成像的高灵敏度特性,科研人员最早将其应用于雷达^[53-57]和生物医学成像^[1, 51, 58-59]。在生物医学领域,基于量子关联成像有可能降低照明剂量要求,减少光漂白或光中毒风险,因此科研人员在量子关联显微成像方面开展了很多探索^[60-61]。而在雷达领域的应用的关注则更多,将在下一节对雷达应用展开详细讨论。

由于量子关联成像可以不需要透镜进行成像,并且可实现单像素成像,因此基于量子关联成像技术可以在X射线、微波、太赫兹等波段发展新的成像模式,甚至可以利用物质波成像^[62-64]。在微波波段,基于计算关联成像思想,可以实现新的雷达体制^[65]。与基于时延和多普勒分析成像的传统雷达不同,微波关联成像雷达通过测量回波的独立波形来恢复目标,可实现前视成像。利用多个随机信号发射机的信号在时空上的独立性,可以同时关联测量。理论上,每个发射机发射单脉冲,即可实现对非合作目标的快速成像。太赫兹波段采用量子关联成像方法,有效解决了缺乏高性能空间分辨探测器的问题,甚至可以实现

微米级分辨力成像^[66-67]。在X射线波段采用量子关联成像方法,可以实现非相干光源的傅里叶成像^[48]。而利用原子^[62]、中子^[63]、电子^[64]等物质波进行关联成像,则为量子力学中一些基本问题验证提供了新的可能方案。

同时,除了图像之外,量子关联成像还可以获取其他自由度的信息,比如时间自由度、光谱自由度等。还有一些科研人员在做量子关联全息成像研究^[68-72],甚至讨论利用量子关联成像来进行光刻^[73]。基于时空二元性,空域上的量子关联成像可以很自然地扩展到时域上,例如利用时域强度随机起伏得到时域物体图像^[74],该实验为后续时域量子关联成像的研究奠定了基础。进一步,结合计算关联成像方法,基于对时域信号的主动调制,还可以实现低带宽探测器探测快速信号,突破了低带宽探测器的原有时间分辨力限制^[75]。

1.5 量子关联成像的雷达应用原理

基于主动照明的关联成像方法,可以实现对目标的探测、成像,实现雷达功能,并有效拓展光学雷达感知维度。

如图3所示^[76],调制光场制备的照明散斑序列,通过成像系统投射到目标上(对应雷达的发射信号),同时在本地图同步记录散斑模式(对应于雷达中对于辐射调制模式的记录)。信号接收系统将目标回波信号收集到单像素的光电转换器件,得到一系列探测结果(称为桶探测,对应于雷达回波检测),将这些结果与本地记录的散斑模式进行二阶关联运算即可重构出物体图像(对应雷达

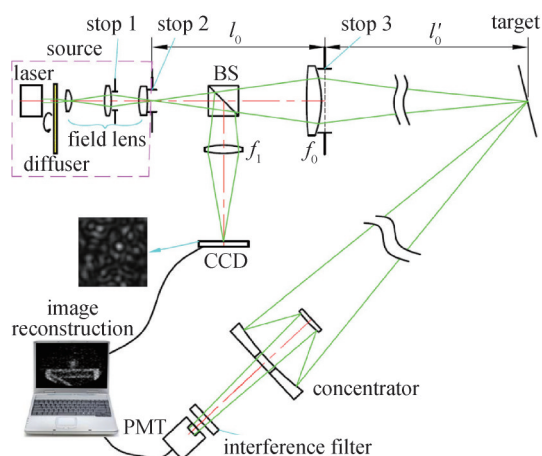


图3 关联成像的雷达应用原理^[76]

Fig.3 Principle of applications of correlation imaging for lidar^[76]

系统中的信号解调过程)。量子关联成像具备波束内分辨的能力,因此可以探测目标的有无,还可以得到物体的图像。同时,作为一种雷达系统,借助其他维度的信息编码与关联解译还可以实现对目标距离、位置、速度等信息的提取。基于关联成像技术提升雷达探测能力具有广阔的发展前景。

2 量子关联成像的雷达应用研究进展

从在实验室中实现,到在实际场景中实现量子关联成像应用,中间有很多问题需要解决。本节将结合量子关联成像的技术特点讨论量子成像走向雷达应用需要解决的问题,重点介绍运动物体成像、大气扰动应对等方面的研究进展。

2.1 雷达应用需要解决的问题

不同场景下,系统要面对不同的待测目标,由此会对系统提出不同的要求。这里主要针对光学关联成像的雷达应用进行一般性讨论。

首先,从系统构成来看,需要研制系统的各个模块,使各部分性能尽可能满足理论要求,并不断优化以提升系统整体性能。需要研制的模块主要包括:具有一定输出功率且具有较高刷新率的赝热光源、高效光场投射与回波收集模块、高性能信号检测模块、高效数据处理与信息重建算法模块等。如果针对运动目标开展系统研制,还需要增加目标跟瞄所需的运动及其控制部件。而在这一系统工程化过程中,在研制各个硬件部分之前,还需要根据系统能力需求确定各部分的参数需求。在实验室研究或者理论分析时往往会做一些假设,但是实际条件下这些假设是否能够真正实现需要进行细致分析,需要在现实技术水平约束下确定各个部分的参数要求。另一个重要问题是在资源有限的情况下尽可能优化系统设计以提升系统性能。这里的资源是指光源功率、允许的采样时间或需要的成像帧频、光学孔径、计算能力等。

其次,与各种光学系统类似,需要针对环境影响给出适当的应对方案。虽然量子关联成像具有抗干扰能力强的特点,但不是完全不受干扰(主要包括背景光^[54, 77]、大气吸收、湍流^[78-79]、散射^[33]等)影响。由于背景光与照明光不相关,

因此量子关联成像对这种影响（以及部分探测噪声）具有相较传统成像方式更好的抵抗能力，但前提是桶探测器本身能够对回波有效响应。对于大气扰动，已证实从物面向桶探测传输的路径上的扰动对成像质量影响不大，而对于由光源向物面传输的路径，由于照明光场分布有可能受到扰动而出现畸变，图像质量会不可避免地受到影响。

第三，量子关联成像需要利用多次采样的累积来获取目标图像，在实际应用中需要通过成像策略优化、光源设计和算法设计等提升系统成像帧频和图像信噪比等性能。例如，在很多雷达应用场景中需要对运动物体成像，并且希望把成像系统放在一个动平台上面便于机动，此时就会遇到系统与物体之间存在相对运动、平台抖动等问题，当系统成像帧频有限时，容易造成成像结果模糊。因此，需要瞄准雷达应用场景，在实际系统中优化参数指标，并发展新的技术，提升对运动目标的捕获、追踪和成像能力。

总的来说，如何更好地发挥量子关联成像的特点，在保证量子关联成像高灵敏、抗干扰的同时，又能提升成像帧频等指标，在实际应用场景中真正形成优势，是研究人员非常关心的问题。

2.2 运动物体成像问题

在电磁波雷达体制中，可以利用目标和雷达系统的相互运动进行合成孔径成像，基于该原理的雷达包括合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）和逆合成孔径雷达（Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR）等。相比之下，量子关联成像具备波束内分辨的能力，因此对于静止的目标也可以进行高分辨凝视成像。对于运动目标成像，量子关联成像所面临的问题以及解决这些问题可使用的技术和方法也和电磁波雷达不同。

在雷达应用场景中，待成像目标和成像系统存在相对运动。因此，如何提升量子关联成像对运动物体或动态场景成像的能力，是推进量子关联成像雷达实用化过程中的关键问题之一。

运动物体成像可以概括为对视场内物体进行实时地、清晰地辨认。这要求成像系统同时具备较高的时间分辨力和空间分辨力。在共聚焦光学成像系统中，在光学系统参数一定的条件下，时间分辨力由相机曝光时间决定，空间分辨力由相

机像素尺寸和相应光学系统参数决定。在相机曝光时间内，如果物体的图像在感光面上的运动距离大于像素尺寸，会导致图像空间分辨力下降。为了抑制运动模糊，最直接的方法是缩短相机曝光时间。物体运动速度越高，相机曝光时间需越短。但是在雷达应用场景中，物体距离成像系统较远，回波极弱，短积分时间会导致回波信号进一步降低，甚至降至光子数量级，图像信噪比将严重下降。因此，为了满足雷达应用场景需求，需要发展高灵敏的实时成像技术。

在量子关联成像系统中，桶探测器实现了回波能量密度最大化，同时也使得单次采样中目标空间信息混叠，要重构物体图像，需要多次采样，即所谓的“时间换空间”。多次采样的过程可以看作是量子关联成像的“积分”时间，决定了成像系统的时间分辨力。图像分辨力由照明散斑相干长度决定，在积分时间内，物体运动距离大于照明散斑的相干长度会导致运动模糊。

因此，为避免运动模糊，量子关联成像雷达系统的参数需满足^[21]

$$f \geq \frac{N_c \omega}{\theta} \quad (25)$$

式中： f 为系统的采样频率； θ 为角分辨力； N_c 为成像系统要求在物体可看作相对静止的时间段内完成的采样次数； ω 为物体相对系统的角速度。从这一关系可以看出，提升量子关联成像雷达对运动目标的成像能力，可以采取的方法主要有三个方面：①提高采样频率；②通过跟踪降低相对角速度；③优化成像策略，减少对相对静止状态下的采样数需求。

2.2.1 提升光源刷新率

量子关联成像系统的采样频率由光源刷新率和探测器带宽决定。现有的探测器带宽已经可以达到10 GHz^[80]甚至更高，完全满足成像所需。因此，研制高刷新频率的光源就成为了突破成像系统采样频率的关键。高刷新频率的光源和光场调制器件是光通信^[81]、光学成像^[82]、全息投影^[83]等系统的核心，受到了国内外学者的广泛关注。量子关联成像系统常用的光源包括：以空间光调制器^[8]、数字微镜器件^[3]或旋转毛玻璃^[8]为光场调制器件的赝热光源；以高速光开关为核心技术的发光二极管（Light Emitting Diode, LED）

阵列；近年来崭露头角的片上集成赝热光源^[83]。在雷达应用场景中，成像目标距离较远，对光源的峰值功率有一定要求，因此空间光调制器件、数字微镜器件等损伤阈值功率低的调制器件，以及峰值功率有限的LED阵列，都不适宜作为量子关联成像雷达的光源。毛玻璃赝热光源的刷新率受机械转动速率限制，最高只能达到kHz量级，且能量利用率较低，难以满足雷达应用场景高峰值功率照明需求。2015年，美国HRL实验室提出的伪随机排布的垂直腔面发射激光器（Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL）二维阵列功率

高、调制速率可达GHz量级，可应用于激光雷达^[14]。2019年，日本神户大学在此基础上提出了基于VCSEL光源的快速计算关联成像^[15]。此外，日本东京大学在2020年制备了硅基赝热光源，在实验室内演示了量子关联成像，如图4所示^[84]。这类光源集成度高，可小型化，在无人驾驶领域有着广阔的应用前景。本文课题组瞄准量子关联成像雷达系统对高刷新频率、高能量利用率赝热光源的技术需求，自主研发了一种新型赝热光源，将光场刷新率提高到了20 kHz以上，相较现有方法提高了1个数量级，能量利用率也得到明显提升。

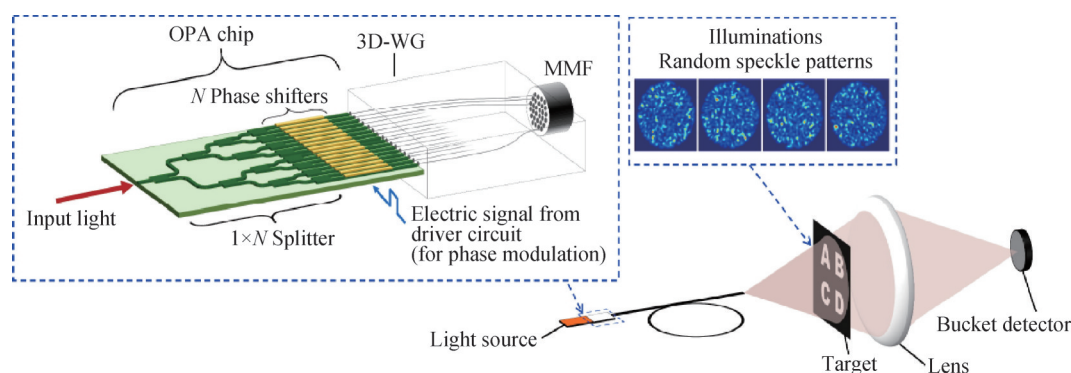


图4 硅基赝热光源及成像装置示意图^[84]

Fig.4 Schematic diagram of silicon based pseudothermal light source and imaging device^[84]

2.2.2 目标跟踪以降低相对运动速度

在量子关联成像系统中，通过光电跟踪技术，减小物体相对成像系统的速度，可以极大提升对运动物体追踪成像的能力。传统光电追踪技术通常使用平面波面或高斯波面均匀照明和象限探测的方式确定目标质心，进而根据回波飞行时间和光学系统的几何关系获取目标空间位置信息，但不能获得物体的图像。在量子关联成像系统中，通过前端的光场调制或后端调制，可以对运动物体的位置、速度等运动信息进行编码，由此可以实现基于少像素探测器的目标跟踪技术^[22]。根据获取的物体运动信息，在图像重构中对调制编码进行补偿，可以获得运动物体的图像。本课题组与上海光机所、上海交大等单位合作研制了一套室外量子成像系统，系统由新型赝热光源、高分辨光学系统、高耦合效率探测模块以及光学追踪模块组成。结合成像算法^[85]，在该系统上对数公里外飞行的中小型无人机开展了跟踪成像实验，成像帧频达到10 Hz。

本课题组提出结合光源编码，用象限探测代替桶探测，同时获得物体的位置信息，实现自跟瞄量子关联成像。在实验室内验证了这一方案，对运动速度100 mrad/s量级的目标实现了自跟瞄成像。

2.2.3 策略改进以减少成像所需的测量次数

在量子关联成像系统中，减少成像所需的采样次数可以同时降低对系统采样频率的要求，降低成像所需的数据量；当光源脉冲能量一定时，还可以降低成像所需的辐射能量。因此，如何降低成像所需采样次数，一直是量子关联成像领域备受关注的问题。在雷达应用场景中，运动物体和静止的复杂背景相比，通常具有空间稀疏性，并且物体运动状态以平动较多，在一段时间内物体形状通常保持不变。基于这一特点，本课题组提出了时域差分关联成像方法，该方法舍弃了静止的背景复杂信息，可以用极少的采样次数重构在场景中运动的物体图像。

时域差分关联成像方法的原理与“事件相机

(Event Camera) ”相似，基于在复杂场景下运动物体的空域稀疏性，将不同时刻下的相同散斑照明运动物体获得的桶探测值作差（相当于减去静止的背景信息），之后将桶探测值的差分结果与散斑关联，从而得到运动物体信息。这种方法相当于将物体的相对运动部分代替实际物体大小，使成像物体在场景中面积更小、更稀疏，从而减小成像所需测量次数。通过小采样获得运动物体在不同位置的模糊图像，利用不同时刻的模糊图像之间具有很强的相似性这一特点，计算这些模糊图像的互相关，可以得到两个采样时刻之间物体移动的距离，进而可以确定物体运动的轨迹。根据物体运动轨迹，在图像重构中加以平移补偿，利用所有的采样数据可以叠出清晰的图像。该方法可以利用全时段的采样实现渐进成像，图像在物体运动过程中越来越清晰，可同时获得运动轨迹，且所需的采样次数降低了1个数量级，基于互相关成像（Cross-correlation-based Ghost Imaging, CBGI）的结果如图5所示。

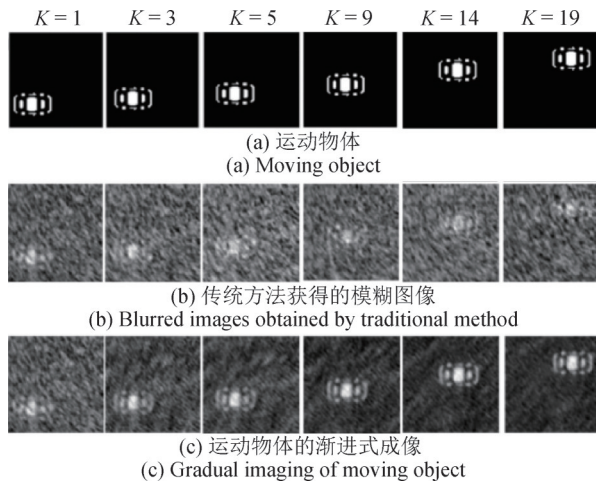


图5 基于互相关成像的结果^[23]
Fig.5 Reconstructed images with CBGI^[23]

与此同时，当照明光场保持不变，物体在视场中运动，桶探测信号的时域统计性质和物体运动速度有关。基于此原理，利用沿某一方向匀速平移的照明光场可以计算得到物体沿该方向的速度分量，原理如图6所示^[24]。同理，分别使用两组沿正交方向平移的照明光场，可根据桶探测信号计算得到物体在这两个正交方向上的速度分量，进而确定物体速度矢量。从此原理出发，本课题

组通过设计照明方式并计算桶探测信号，获得了物体速度矢量，进而获得物体轨迹，在此基础上对参考光场进行平移补偿，最终同时获得了物体的轨迹和图像。该方法突破了式(25)中的采样频率限制，最终实现了对相对角速度达45 mrad/s的运动物体的跟踪成像。此外，该方法还可以降低追踪成像所需的光子数量，在单脉冲回波平均2.4个光子/散斑的情况下可以得到物体的轨迹和清晰图像。

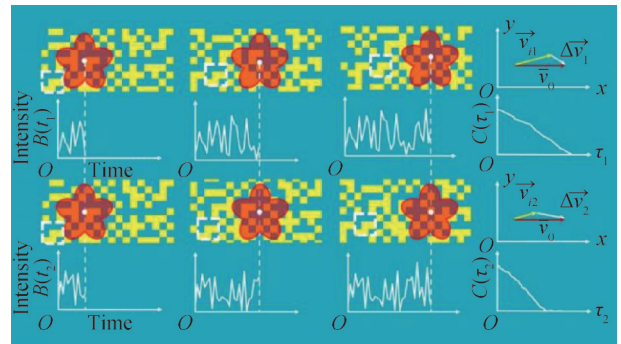


图6 平移散斑照明下的运动物体速度矢量
计算原理示意图^[24]

Fig.6 Schematic for calculation of velocity vector of moving object under shifting illumination^[24]

2.3 散射、湍流条件下的关联成像

在大气环境中，从物面上某一点反射的光场在经历了大气湍流或散射介质后，由于传播路径上的折射率不均匀或散射效应，到达像面的艾里斑发生畸变甚至形成随机散斑，最终导致图像信息退化甚至完全混叠。在雷达应用场景中，大气湍流和散射不可避免，如何准确评估并有效抑制大气对光学成像质量的影响，是物理学和光学领域的难题，备受研究人员关注。

平均自由程是常用的表征散射介质强度的参数之一，它表示光子在受到两次散射之间所走过的平均光程。根据散射介质几何厚度和平均散射自由程的比值，可以将散射介质大致分为弱散射介质、中等散射介质和强散射介质。在无散射介质影响的条件下，由于关联图像存在统计噪声，信噪比不如共聚焦成像。但是随着散射介质强度逐渐提升，物体回波中的弹道光的比例指数衰减，此时共聚焦成像的对比度急剧降低。在量子关联成像中，回波中只有弹道光和照明光场存在关联性，非弹道光和照明

光场统计无关,在图像重构算法中可以较好抑制,因此,随着散射强度增强,量子关联成像的质量退化相对较慢,如图7和图8所示^[77],其中, β 为照明光束在散射介质中的透过率。

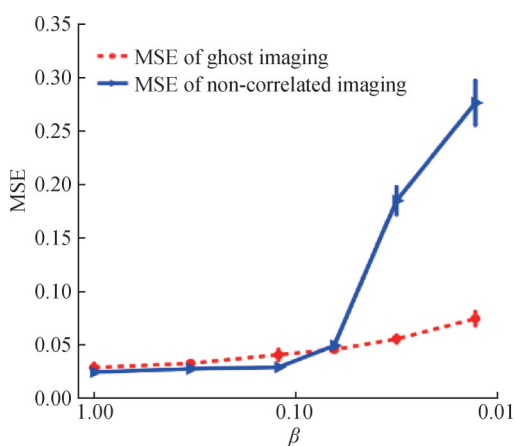


图7 散射条件下量子关联成像和传统成像的均方误差对比^[77]

Fig.7 Comparison of mean square error (MSE) between ghost imaging and traditional imaging in scattering conditions^[77]

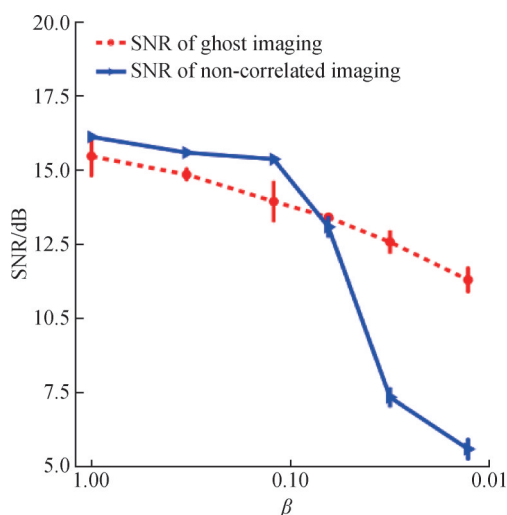


图8 散射条件下量子关联成像和传统成像的信噪比对比^[77]

Fig.8 Comparison of signal to noise ratio (SNR) between ghost imaging and traditional imaging in scattering conditions^[77]

在强散射介质中,回波中的弹道光能量极弱,难以探测,此时需要利用散射光成像。1988年,研究人员发现了光学散斑的记忆效应,即一束相干光通过散射后形成一个散斑场,当照射光有一个微小的角度变化时,散斑整体平移,而结构变化不明显。能够保持这一性质的角度偏移范围被称为记忆效应区间。利用记忆效应可以实现透散

射介质成像,成像视场由记忆区间决定。本课题组将该方法与关联成像相结合,通过强度二阶关联获得散射介质对应的点扩散函数,再利用解卷积,突破了记忆区间对成像视场的限制,并且实现了透散射介质的运动物体成像,实验结果如图9所示^[86]。

大气湍流是由于不均匀的温度、湿度、压强等导致的大气非均匀流动,是影响光学成像分辨力的重要因素之一。成像系统对湍流的响应是评价该系统成像能力的重要方面。在量子关联成像研究初期,研究人员就面向雷达应用场景对湍流中的量子关联成像展开了讨论。马里兰大学研究小组认为量子关联成像是双光子干涉的结果^[87]。双光子干涉,是指光子对作为整体,自身所有可能路径之间的干涉,干涉结果不受其中单光子局域相位的影响,而取决于全局相位。因此,当物臂和参考臂同时存在相同的湍流时,双光子两条可能的路径因湍流引入的全局相位相同,相互抵消,并不会影响干涉结果和成像质量。然而,实际场景中相同湍流的条件难以满足。另一方面,罗切斯特大学研究小组分析了物臂只存在湍流的情况,得出当湍流存在于物体和桶探测之间时,成像不受影响;而当湍流位于光源和物体之间时,成像质量退化,且湍流距离物体越远,成像质量退化越明显。麻省理工学院小组对比了激光雷达和量子关联成像雷达在湍流中的性能,通过理论分析得出,在相同强度的湍流下,量子关联成像分辨力受影响更小,这是因为发射和接收路径上的湍流对激光雷达均有影响,而量子关联成像系统则只受发射路径上的湍流影响。此外,在关联成像发展的过程中,研究人员验证了当纠缠光子对中单个光子的路径上存在色散或像差时,符合计数的时域或空间分辨力会降低^[88-89],而仅通过调控另一个光子,可以消除色散或像差对符合计数的影响。量子关联成像是受量子纠缠启发而发展起来的双光子成像,当物臂存在湍流、散射等介质时,可以设计照明光源,利用非局域调控技术,通过调制参考臂的光场来消除物臂的像差^[90-91]。

基于光场二阶关联的相位不敏感特性,科研人员在对大气散射、湍流影响方面取得了一些

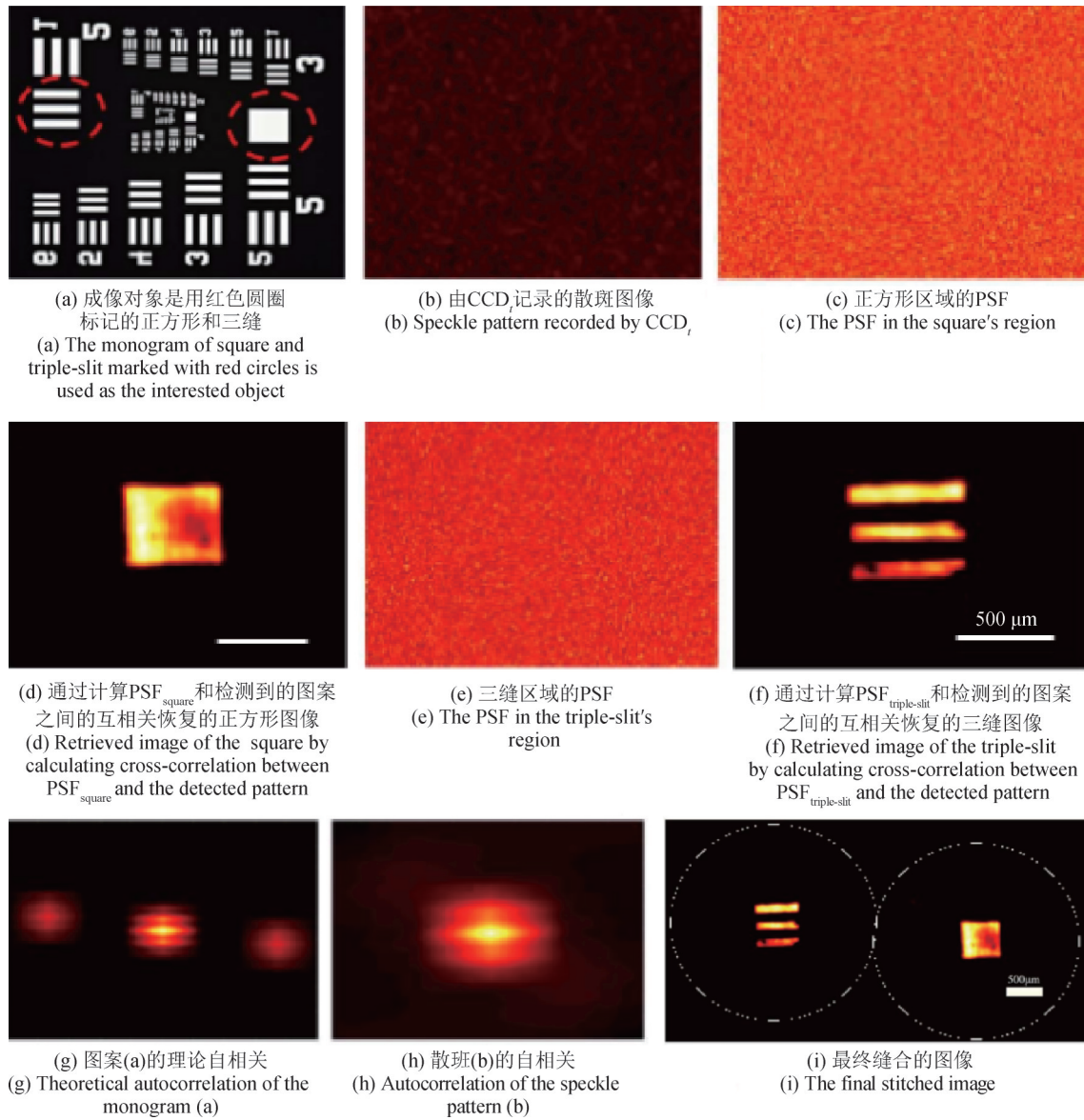


图9 基于强度关联的跨记忆与区间抗散射成像结果^[86]

Fig.9 Imaging beyond memory effect range based on intensity correlation^[86]

研究进展，但现有方案的抗散射、抗湍流能力依然有限，其中很重要的原因是无序介质中双光子干涉的演化机理还需进一步探究，对双光子干涉相位不敏感特性还需进一步发掘和利用。

3 总结与展望

光学成像分辨力高，提供的信息量丰富。光学成像雷达既可以和电磁波雷达衔接配合，也可以独立工作，在侦察预警领域发挥着不可替代的作用。雷达工作流程可以概括为发现、跟踪、识别和判定。性能优越的雷达系统应同时具备作用距离远、发现概率高、跟踪误差小、识别能力强

和判定能力准等特点。量子关联成像雷达可提供高分辨的光学图像，具备高概率识别能力。为了进一步形成量子关联成像雷达与电磁波雷达的有效配合或独立工作能力，还需不断拓展其作用距离，提升其发现概率、跟踪精度和判别准确度。

发展极弱光条件下的成像技术，提升成像灵敏度，是拓展量子关联成像雷达作用距离的关键。量子关联成像雷达系统的作用距离由光源辐射功率、目标散射截面、探测效率和成像方案共同决定。为了提升雷达系统自身的隐蔽性，降低被目标发现的概率，通常不考虑大幅增加辐射功率。此外，光电探测的灵敏度也已经达到量子极限。

为了进一步拓展量子关联成像系统作用距离,提升对小散射截面目标的预警能力,需要发展更灵敏的成像方案,用更少的光子获得更多目标图像信息。在量子关联成像系统中,经调制的光场照明物体的过程可以看作对目标图像信息的编码过程,通过桶探测信号和照明光场重构图像的过程可以看作目标图像信息的解码过程。想要实现更灵敏的成像方案,需要研究和设计更节约光子的照明光场,扩大每个光子的平均图像携带信息量,同时发展更节约光子的图像解码算法,提升每个光子的平均解译信息量,最终使每个光子平均传递的信息量最大化,实现成像灵敏度的提升。

雷达应用场景中的绝大多数目标都是运动的,对运动目标的精确跟踪是雷达系统必备的能力之一。通过设计照明方式和单(少)像素探测,可使量子关联成像雷达具备同时跟踪和成像的能力。随着作用距离的不断拓展,回波强度急剧下降,甚至弱至单光子量级,如何利用单光子量级的回波信号实现运动物体精确追踪,仍然有很多需要研究的问题,包括研发大靶面、高灵敏的象限探测器,发展基于少光子的目标追踪算法等。此外,为了实现量子关联成像雷达对目标编队的有效侦察,还需要研究多目标同时追踪的方法和算法,在不明显增加系统复杂度的基础上,实现对多目标的实时测速、定位和成像。

在雷达应用场景中,量子关联成像还应具备快速搜索和高概率发现的能力。为了提升目标发现概率,降低漏警率,雷达系统扫描区域应尽可能覆盖待搜索区域,此时雷达的搜索速度取决于光源的照明视场,照明视场越大,单位时间内雷达系统可覆盖的面积越广,漏警率越低。然而,在光源辐射功率一定的前提下,单位面积上的辐射能量密度和视场成反比,视场越大,能量密度越低,此时目标回波越弱,信噪比越低。过低的回波信噪比也会导致漏警。受物理原理限制,在单基站系统中,上述矛盾不可调和,因此急需发展多基站协同,扩能增效的分布式量子关联成像雷达系统。此外,根据常见目标的速度、飞行高度等运动参数,研究高效的搜索算法,用尽可能少的搜索点覆盖尽可能广的区域,对进一步提升量子关联成像雷达的发现目标概率也具有重要意义。

对目标进行精准识别和确定,为指挥系统决策提供可靠依据是雷达系统的基本职能。因此,提升目标识别准确度对提升量子关联成像雷达系统能力至关重要。在远距离探测中,受间接成像中的统计噪声影响,量子关联成像质量受限,因此需要通过目标图像以外的多维信息复用,大幅提升目标识别准确度。近年来,机器学习、人工智能和信息融合等领域迅速发展,为光学成像带来了新的机遇。通过设计照明光场和探测方式,量子关联成像系统可以同时获得目标的偏振度分布和反射率分布等不同维度的信息^[92],也可以根据场景所需,获取目标的梯度、边缘等信息。结合量子关联成像信息维度可扩展、信息获取方式灵活的特点,发展人工智能算法和多维信息智能融合算法,实现基于多维信息复用的目标精准识别方法,是量子关联成像雷达系统走向实用的过程中需要重点研究的内容。

参考文献

- [1] MORRIS P A, ASPDEN R S, BELL J E C, et al. Imaging with a small number of photons[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1).
- [2] ASPDEN R S, TASCA D S, BOYD R W, et al. EPR-based ghost imaging using a single-photon-sensitive camera[J]. *New Journal of Physics*, 2013, 15(7).
- [3] WANG L, ZHAO S M. Fast reconstructed and high-quality ghost imaging with fast Walsh-Hadamard transform[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 240-244.
- [4] XI M J, CHEN H, YUAN Y, et al. Bi-frequency 3D ghost imaging with Haar wavelet transform[J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32349-32359.
- [5] CHEN Y, LIU S, YAO X R, et al. Discrete cosine single-pixel microscopic compressive imaging via fast binary modulation[J]. *Optics Communications*, 2020, 454: 124512.
- [6] GU J H, SUN S, XU Y K, et al. Feedback ghost imaging by gradually distinguishing and concentrating onto the edge area[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(4).
- [7] LIU B, WANG F, CHEN C, et al. Self-evolving ghost imaging[J]. *Optica*, 2021, 8(10).
- [8] SUN S, LIU W T, LIN H Z, et al. Multi-scale adaptive computational ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1).
- [9] GONG W, ZHAO C, YU H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1).
- [10] ZHANG C, GONG W, HAN S. Ghost imaging for moving

- targets and its application in remote sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(12): 1214003 – 1214010.
- [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).
- [12] XU Z H, CHEN W, PENUELAS J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination[J]. Optics Express, 2018, 26(3): 2427–2434.
- [13] SALVADOR-BALAGUER E, LATORRE-CARMONA P, CHABERT C, et al. Low-cost single-pixel 3D imaging by using an LED array[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15623 – 15631.
- [14] SAYYAH K, EFIMOV O, PATTERSON P, et al. Two-dimensional pseudo-random optical phased array based on tandem optical injection locking of vertical cavity surface emitting lasers[J]. Optics Express, 2015, 23(15): 19405 – 19416.
- [15] NITTA K, YANO Y, KITADA C, et al. Fast computational ghost imaging with laser array modulation[J]. Applied Sciences, 2019, 9(22).
- [16] YUSUKE K, KENTO K, TANG R, et al. Ghost imaging using a large-scale silicon photonic phased array chip[J]. Optics Express, 2019, 27(3) 3817 – 3823.
- [17] FUKUI T, KOHNO Y, TANG R, et al. Single-pixel imaging through multimode fiber using silicon optical phased array chip[C]//Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, 2020.
- [18] LIU X, SHI J, WU X, et al. Fast first-photon ghost imaging[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1).
- [19] LIU X, SHI J, SUN L, et al. Photon-limited single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8132 – 8144.
- [20] ZHAO W G, CHEN H, YUAN Y, et al. Ultrahigh-speed color imaging with single-pixel detectors at low light level [J]. Physical Review Applied, 2019, 12(3).
- [21] HU L, JIN X, ZENG G. Lensless ghost imaging for moving objects[J]. Optical Engineering, 2011, 50(12).
- [22] ZHA L, SHI D, HUANG J, et al. Single-pixel tracking of fast-moving object using geometric moment detection [J]. Optics Express, 2021, 29(19): 30327 – 30336.
- [23] SUN S, GU J H, LIN H Z, et al. Gradual ghost imaging of moving objects by tracking based on cross correlation [J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5594 – 5597.
- [24] SUN S, HU H K, XU Y K, et al. Simultaneously tracking and imaging a moving object under photon crisis [J]. Physical Review Applied, 2022, 17(2).
- [25] SUN B, WELSH S S, EDGAR M P, et al. Normalized ghost imaging[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16892–16901.
- [26] YAO X R, YU W K, LIU X F, et al. Iterative denoising of ghost imaging [J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24268 – 24275.
- [27] FERRI F, MAGATTI D, LUGIATO L A, et al. Differential ghost imaging [J]. Physical Review Letters, 2010, 104(25).
- [28] SUN S, GU J H, XU Y K, et al. Ghost imaging normalized by second-order coherence [J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 5593 – 5596.
- [29] PHILLIPS D B, SUN M J, TAYLOR J M, et al. Adaptive foveated single-pixel imaging with dynamic supersampling [J]. Science Advances, 2017, 3(4).
- [30] ABMANN M, BAYER M. Compressive adaptive computational ghost imaging[J]. Scientific Reports, 2013, 3.
- [31] GU J, SUN S, XU Y, et al. Feedback ghost imaging by gradually distinguishing and concentrating onto the edge area[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(4).
- [32] GLAUBER R J. Coherent and incoherent states of the radiation field[J]. Physical Review, 1963, 131(6): 2766 – 2788.
- [33] GONG W, HAN S. Correlated imaging in scattering media [J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 394 – 396.
- [34] CANDÈS E J. Compressive sampling [C]//Proceedings of the International Congress of Mathematicians. 2006, 3: 1433 – 1452.
- [35] DUARTE M F, DAVENPORT M A, TAKHAR D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 83 – 91.
- [36] KATZ O, BROMBERG Y, SILBERBERG Y. Compressive ghost imaging[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(13).
- [37] ZEROM P, CHAN K W C, HOWELL J C, et al. Entangled-photon compressive ghost imaging[J]. Physical Review A, 2011, 84(6).
- [38] 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.
- [39] KHAMOUSHI S M M, NOSRATI Y, TAVASSOLI S H. Sinusoidal ghost imaging [J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3452 – 3455.
- [40] ZHANG Z, WANG X, ZHENG G, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging[J]. Optics Express, 2017, 25(16): 19619 – 19639.
- [41] 查国峰. 运动目标微波关联成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
ZHA G F. Microwave coincidence imaging technique research for moving target[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)
- [42] 周小利. 基于稀疏性的微波关联成像理论与方法[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2017.
ZHOU X L. Theory and methods of sparsity-based micro-

- wave coincidence imaging [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [43] 陈颖. 微波关联成像方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- CHEN Y. Research of microwave correlated imaging methods [D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [44] SHREKENHAMER D, WATTS C M, PADILLA W J. Terahertz single pixel imaging with an optically controlled dynamic spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12507 – 12518.
- [45] CHAN W L, CHARAN K, TAKHAR D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(12).
- [46] ZHAO J P, YIWEN E, WILLIAMS K, et al. Spatial sampling of terahertz fields with sub-wavelength accuracy via probe-beam encoding [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8(1): 680 – 687.
- [47] CHENG J, HAN S. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction [J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(9).
- [48] YU H, LU R, HAN S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X rays [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11).
- [49] PELLICCIA D, RACK A, SCHEEL M, et al. Experimental X-ray ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11).
- [50] SCHORI A, SHWARTZ S. X-ray ghost imaging with a laboratory source [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14822 – 14828.
- [51] ZHANG A X, HE Y H, WU L A, et al. Tabletop X-ray ghost imaging with ultra-low radiation [J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374 – 377.
- [52] 杨善初, 喻虹, 陆荣华. 非单色 X 光傅里叶变换鬼成像模拟 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 147 – 153.
- YANG S C, YU H, LU R H, et al. Simulation of fourier-transform ghost imaging using polychromatic X-ray sources [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 147 – 153. (in Chinese)
- [53] DENG C, GONG W, HAN S. Pulse-compression ghost imaging lidar via coherent detection [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 25983 – 25994.
- [54] DENG C, PAN L, WANG C, et al. Performance analysis of ghost imaging lidar in background light environment [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 431 – 435.
- [55] HAN S, YU H, SHEN X, et al. A review of ghost imaging via sparsity constraints [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(8).
- [56] MA S, LIU Z, WANG C, et al. Ghost imaging LiDAR via sparsity constraints using push-broom scanning [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13219 – 13228.
- [57] MA S, HU C, WANG C, et al. Multi-scale ghost imaging LiDAR via sparsity constraints using push-broom scanning [J]. *Optics Communications*, 2019, 448: 89 – 92.
- [58] RADWELL N, MITCHELL K J, GIBSON G M, et al. Single-pixel infrared and visible microscope [J]. *Optica*, 2014, 1(5): 285 – 289.
- [59] PAN Z, ZHANG L. Optical cryptography-based temporal ghost imaging with chaotic laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(16): 1289 – 1292.
- [60] GENOVESE M. Real applications of quantum imaging [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(7).
- [61] SAMANTARAY N, RUO-BERCHERA I, MEDA A, et al. Realization of the first sub-shot-noise wide field microscope [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7).
- [62] KHAKIMOV R I, HENSON B M, SHIN D K, et al. Ghost imaging with atoms [J]. *Nature*, 2016, 540(7631): 100 – 103.
- [63] KINGSTON A M, MYERS G R, PELLICCIA D, et al. Neutron ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2020, 101(5).
- [64] LI S, CROPP F, KABRA K, et al. Electron ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(11).
- [65] LI D, LI X, QIN Y, et al. Radar coincidence imaging: an instantaneous imaging technique with stochastic signals [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 52(4): 2261 – 2277.
- [66] CHEN S C, FENG Z, LI J, et al. Ghost spintronic THz-emitter-array microscope [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9(1).
- [67] STANTCHEV R I, YU X, BLU T, et al. Real-time terahertz imaging with a single-pixel detector [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1).
- [68] CLEMENTE P, DURAN V, TAJAHUERCE E, et al. Single-pixel digital ghost holography [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(4).
- [69] XIAO Y, ZHOU L, CHEN W. Secured single-pixel ghost holography [J]. *Optics & Lasers In Engineering*, 2020, 128.
- [70] VINU R V, CHEN Z, SINGH R K, et al. Ghost diffraction holographic microscopy [J]. *Optica*, 2020, 7(12): 1697 – 1704.
- [71] BOYD R W, DOWLING J P. Quantum lithography: status of the field [J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 891 – 901.
- [72] HEMMER P R, MUTHUKRISHNAN A, SCULLY M O, et al. Quantum lithography with classical light [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(16).
- [73] D'ANGELO M, CHEKHOVA M V, SHIH Y. Two-photon diffraction and quantum lithography [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(1).
- [74] RYCKOWSKI P, BARBIER M, FRIBERG A T, et al.

- Ghost imaging in the time domain[J]. Nature Photonics, 2016, 10(3): 167 – 170.
- [75] XU Y K, SUN S H, LIU W T, et al. Detecting fast signals beyond bandwidth of detectors based on computational temporal ghost imaging[J]. Optics Express, 2018, 26(1): 99 – 107.
- [76] ZHAO C Q, GONG W L, CHEN M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(14).
- [77] LI D, YANG D, SUN S, et al. Enhancing robustness of ghost imaging against environment noise via cross-correlation in time domain[J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31068 – 31077.
- [78] XU Y K, LIU W T, ZHANG E F, et al. Is ghost imaging intrinsically more powerful against scattering?[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 32993 – 33000.
- [79] TAN W, HUANG X W, NAN S Q, et al. Effect of the collection range of a bucket detector on ghost imaging through turbulent atmosphere[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2019, 36(7): 1261 – 1266
- [80] STARK A J, HSUEH Y T, DETWILER T F, et al. System performance prediction with the Gaussian noise model in 100 G PDM-QPSK coherent optical networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(21): 3352 – 3360.
- [81] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19(1): 57 – 96.
- [82] YUAN X, BRADY D J, KATSAGGELOS A K. Snapshot compressive imaging: Theory, algorithms, and applications[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2021, 38(2): 65 – 88.
- [83] BUCKLEY E. Holographic laser projection[J]. Journal of Display Technology, 2011, 7(3): 135 – 140.
- [84] KAMEYAMA Y, IKEDA K, KOYAMA O, et al. Single-pixel imaging using a multi-core fiber[C]//2019 24th Optoelectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). IEEE, 2019: 1 – 3.
- [85] CHANG C, WU G, YANG D, et al. Clustering - based CLEAN algorithm in ghost imaging with sparse spatial frequencies[J]. Optics Express, 2021, 29(23): 38841–38848.
- [86] LI L, LI Q, SUN S, et al. Imaging through scattering layers exceeding memory effect range with spatial - correlation - achieved point-spread-function[J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1670 – 1673.
- [87] SHIH Y. The physics of ghost imaging [M]//Classical, Semi - classical and Quantum Noise. Springer, Boston, MA, 2012: 169 – 222.
- [88] FRANSON J D. Nonlocal cancellation of dispersion [J]. Physical Review A, 1992, 45(5).
- [89] SHAPIRO J H. Dispersion cancellation with phase-sensitive Gaussian - state light [J]. Physical Review A, 2010, 81(2).
- [90] BLACK A N, GIESE E, BRAVERMAN B, et al. Quantum nonlocal aberration cancellation[J]. Physical Review Letters, 2019, 123(14).
- [91] SUN S, NIE Z W, LI Y G, et al. Ghost synthetic aperture with computational wavefront shaping [J]. arXiv Preprint arXiv:2208.08644, 2022.
- [92] XIAO X, SUN S, LIN H Z, et al. Ghost imaging utilizing experimentally acquired degree of linear polarization with no prior information[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28457 – 28465.

(本文编辑: 刘圣晨)



第一作者: 孙帅 (1991—), 男, 讲师, 博士, 主要从事量子光学和量子关联成像等方面的研究。



通讯作者: 刘伟涛 (1981—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为量子光学与量子成像。教育部新世纪人才, 湖南省杰出青年, 湖南省湖湘青年英才, 湖南省物理学会理事, 中国光学工程学会计算成像专业委员会委员。主持国家自然科学基金等项目多项, 发表SCI检索论文50余篇, 出版专著1部, 获湖南省自然科学一等奖1项。