

极弱光关联成像研究进展及展望 (特邀)

孙 帅^{1,2}, 杜隆坤^{1,2}, 李 东^{1,2}, 李月刚^{1,2}, 林惠祖^{1,2}, 刘伟涛^{1,2*}

- (1. 国防科技大学 文理学院, 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)

摘 要: 光学成像因其分辨率高, 信息量丰富, 具有其他探测和感知技术不可替代的地位, 是人们获取信息最重要的技术手段之一。光子是光学成像系统中的信息载体。光学图像的高质量重构, 依赖于对信号光子的高效耦合和对光信息的精准解耦。然而, 在遥感或生物成像等重要应用场景中, 由于作用距离远或辐照功率低, 到达探测面的物体信号光子数少, 信噪比低, 对光学系统设计、信号探测和图像恢复都带来了极大困难, 严重限制了光学成像性能。如何在极弱光条件下获得高质量图像, 是光电成像系统研究的基础性难题, 也是推动光学成像不断向更大视场、更远作用距离、更高信息通量发展亟待克服的关键技术。近年来, 在光场调控和量子探测技术支撑下, 并基于光场的高阶经典/量子关联发展起来的关联成像, 由于探测灵敏度高、抗干扰能力强, 为发展极弱光条件下的光学成像技术带来了新的机遇。文中将简要回顾关联成像的原理机制, 在此基础上系统介绍极弱光条件下关联成像方案和方法。并尝试从光子动力学层面解释这些方法的物理本质, 讨论这些方法的能力极限, 比较这些方法所适用的场景。

关键词: 成像系统; 关联成像; 弱光成像; 光子计数; 单光子成像

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210819

Progress and prospect of ghost imaging in extremely weak light (*Invited*)

Sun Shuai^{1,2}, Du Longkun^{1,2}, Li Dong^{1,2}, Li Yuegang^{1,2}, Lin Huizu^{1,2}, Liu Weitao^{1,2*}

- (1. College of Liberal Arts and Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Interdisciplinary Center of Quantum Information, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Possessing high resolution and rich information, optical imaging is one of the most important techniques for people to obtain information. Photons are information carriers in optical imaging systems. The high-quality reconstruction of optical image depends on the efficient coupling of signal photons and the accurate decoupling of optical information. However, in important application scenarios such as remote sensing or biological imaging, due to the long operating distance or low radiation power, the number of signal photons from the object to the detection plane is small, and the signal-to-noise ratio is low, thus bringing great difficulties to the design of optical system, the signal detection and the image reconstruction, and seriously limiting the performance of optical imaging. How to obtain high-quality images under extremely weak light conditions is not only a basic problem of photoelectric imaging system research, but also a key technology to promote the vigorous development of optical imaging with a larger field of view, longer working distance and higher information flux.

收稿日期: 2021-09-01; 修订日期: 2021-10-30

基金项目: 国家自然科学基金 (62105365, 11774431, 61701511)

作者简介: 孙帅, 男, 讲师, 博士, 主要从事量子光学方面的研究。

通讯作者: 刘伟涛, 男, 教授, 博士, 主要从事量子光学与量子信息方面的研究。

In recent years, with the support of light field modulation and quantum detection technology, and based on the high-order classical/quantum correlation of light field, ghost imaging has brought new opportunities for the development of optical imaging technology under extremely weak light conditions, due to its high detection sensitivity and strong ability against interference. This paper briefly reviewed the principle and mechanism of ghost imaging, and systematically introduced the schemes and methods of ghost imaging under very weak light conditions. The physical essence of these methods from the level of photon dynamics was introduced, the capability limits of these methods were discussed, and the applicable scenarios of these methods were compared.

Key words: imaging system; ghost imaging; weak light imaging; photon counting; single photon imaging

0 引言

光学成像是一个古老而常新的话题。从墨子发现小孔成像现象,到今天的荧光显微分辨细胞结构^[1],大孔径望远镜观察浩瀚宇宙^[2],光学成像一直是人类认知世界、改造世界进程中不可或缺的有力工具。同时,从探索生命起源,到仰望星辰大海,随着认知边界的拓展,人们对成像能力也不断提出新的要求。例如,在生物成像中,为了降低光毒性,常常需要在低辐照功率下对活细胞成像。在自动驾驶中,为了提升激光雷达作用距离,常常需要利用弱回波建成点云图。在遥感或空间目标光学探测领域,为了抵抗不良气象对光信号的吸收,提高观测的全时性,也常常需要在探测信噪比极低的条件下获得图像。这些至关重要的应用场景都有着共同的迫切需求,即在极弱光条件下实现高质量的光学成像。

现今,极弱光条件下的光学成像仍是一个系统性难题。实际应用中,光源(或物体自身)辐射功率总是有限的,随着作用距离的延伸、成像视场的扩大、信息通量的提升,待成像场景中单位面积辐射或反(透)射的信号光越来越弱,并且和环境中的噪声光子高度耦合,当从物体到达探测面的信号光子数至少光子乃至单光子量级时,如何在极弱回波下有效收集信号,在极低信噪比中精准甄别信噪光子,并在单光子乃至亚光子信号下实现图像重构,对光学系统设计、探测器性能、信号增强方法以及图像重构算法,都提出了新的更高要求^[3-5]。突破极弱光条件下的成像技术是推动光学成像向着更大视场、更远作用距离、更高信息通量和更强鲁棒性的关键。

光子光学成像系统中的信息载体。在理想的光电成像系统中,被探测的所有光子携带的信息总量

决定了可解耦的图像信息量上限^[6]。被探测的信号光子数越少,可解耦的信息量越少。实际系统中由于各类噪声的影响,可解耦的图像信息量会远远小于被探测的所有光子携带的信息量。在极弱光成像中,物体信号中光子通量低,单位时间内可探测的光子数少,携带的信息总量极为有限,这在“物质-信息”层面严重限制了可解耦的图像信息量,具体表现为图像的信噪比极低、信息缺失、甚至无法成像。要解决这一问题,需要从信息论出发,厘清光学成像中的信息演变过程,设计“图像-光信息”稠密编码方式,用更少的光子携带更多的信息,开发高量子效率的探测器,在极弱信号中收集更多的光子(值得一提的是,我国科研团队研发的纳米线单光子探测器,已经实现了量子效率国际领先^[7-10]),探索信息压缩解码方法,在单光子乃至亚光子信号中解耦出更多的信息,最终形成更适用于极弱光条件下的新的光学成像机制。因此,文中将尝试从光子动力学行为的角度讨论光学成像中的信息演变,以期对极弱光条件下的光学成像理论和应用研究提供一定启发。

1 极弱光高斯成像

光学成像可以概括为利用光学系统和光电探测装置对物体辐射或反(透)射光信息进行有序再现。以高斯成像为例,物体的每一点独立地向外辐射或反(透)射大量的光子,光子经过透镜后被位于像面的光电探测器记录,如图 1(a)所示。根据狄拉克单光子干涉的理论^[11],任意一个光子都仅和自己发生干涉。图 1(a)的成像系统中,物体 A 点的光子通过透镜后只有到达像面上 A'点的所有可能路径的光程相等,到像面其他任意一点均无法满足该条件。因此从 A 点出发的光子只在 A'点发生相长干涉,在像面上其他任意

一点均发生了相消干涉。并且发生相长干涉的面积和透镜的孔径有关,透镜孔径越大,发生相长干涉的面积越小。从 A 点出发的大量光子在干涉面积内非相干叠加,经系综平均形成以 A' 点为中心的规则艾里斑 (Airy spot),建立了高斯成像中“点到斑”的共轭关系。物体上光强越强的点,单位时间内到达共轭点的

光子数越多,形成的艾里斑也越亮。因此物体表面的光强分布在像面上得到了记录或再现。实际中的绝大部分成像系统比高斯成像系统复杂,常常用更为复杂的透镜组代替高斯透镜,但其中物面和像面共轭关系的建立和高斯成像系统类似。

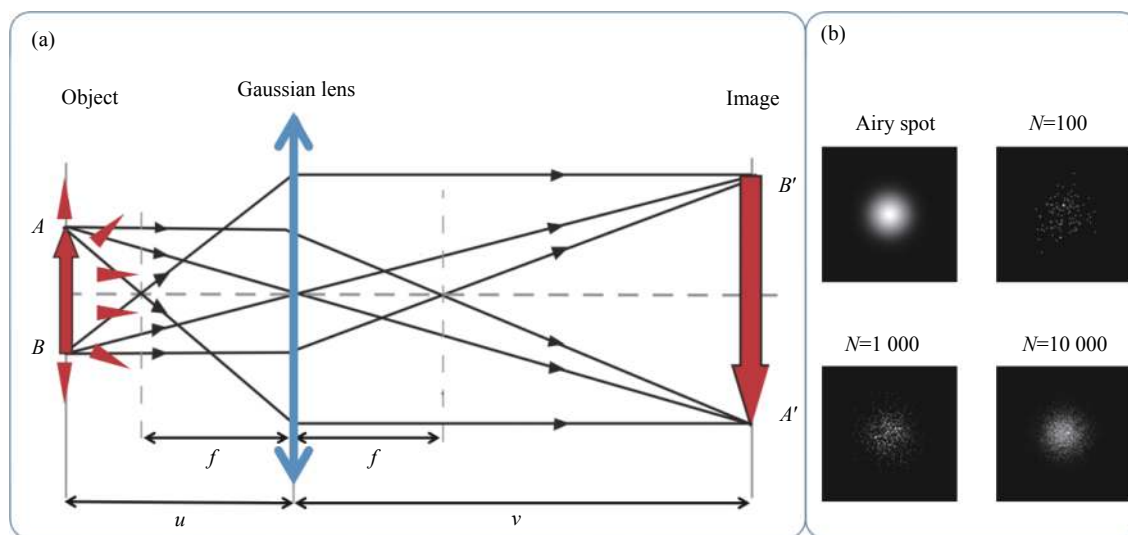


图 1 (a) 高斯成像系统示意图;(b) 不同光子数形成的艾里斑, N 表示光子数

Fig.1 (a) Diagrammatic sketch of Gaussian imaging system; (b) Airy spot formed with different number of photons, N is the photon number

在极弱光条件下,来自物体各点地光子通量低,单位时间内到达同一艾里斑内地光子数少,无法准确表征对应点的光强,如图 1(b) 所示。同时,对于物体表面强度不同的两个点,少光子条件下形成的艾里斑也无法准确表征两点的相对强弱。这共同导致了极弱光条件下物体表面的光强分布无法在像面上准确再现,成像质量退化。在实际场景中,环境中的噪声和探测器自身的噪声,会进一步降低图像信噪比。此时,需要通过优化光学系统设计,增加单位时间内到达探测面的信号光子数量,同时尽可能减少噪声光子数量;或使用更高灵敏度(更高的量子效率和更低的电路噪声)的探测器,使得尽可能多的光子转化为光电子;也可以通过探测器长时间测量,来累积信号光子数。总之,在直接成像中,由于物体的空间结构是通过记录光子数的空间分布再现的,记录的信号光子越多,图像信噪比越高。

新型光电探测器在记录光子数量的同时,还可以获得光子到达探测器的时间,这给极弱光条件下的物

体空间结构信息获取带来了新的方法。当物体的光信号弱至单光子量级时,物体表面不同点在单位时间内辐射或反(透)射的平均光子数和该点的光强成正比。因此光强较强点的光子将较大概率地先到达探测器,而光强较弱点的光子到达探测器的时间较晚,并且物体上不同点出发的光子第一次到达探测器的时间和该点的光强正相关。利用这一原理,美国麻省理工学院研究小组在 2014 年开创了利用首达光子表征物体光强信息的方法和算法,并完成了成像实验^[12]。实验装置和结果如图 2 所示。他们使用脉冲光照明物体上一点,并记录经该点反射后第一个到达探测器光子的飞行时间,以此作为目标点的强度信息。通过逐点扫描获得了点云图,最后经正则化算法计算得到物体的二维和三维的清晰图像。用首达光子的飞行时间表征光强是一种新方法,在时间 (s) 和光强 (cd) 两个独立的基本物理量之间建立起概率模型。和用光子数表征光强的传统方法不同,该方法可以从一个信号光子中获得光强度信息,因此大大降低了成像所

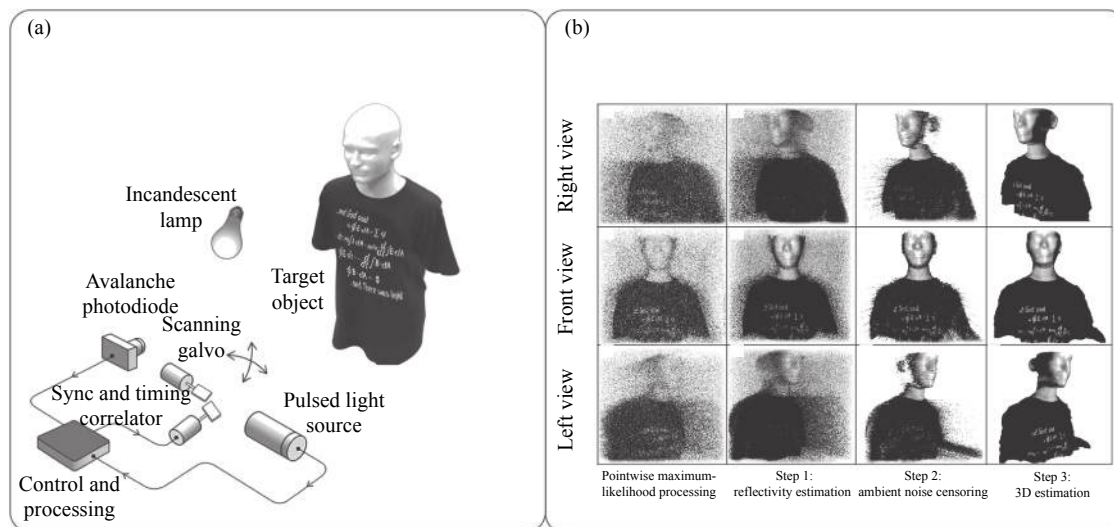


图 2 (a) 首达光子成像实验装置图; (b) 首达光子成像实验结果: 第一列为雪崩二极管记录的点云图, 第二列为通过首达光子飞行时间估计得到的反射率, 第三列为正则化计算得到的图像, 第四列为根据不同视图估计得到的三维图像^[12]

Fig.2 (a) Experimental setup of first-photon imaging; (b) Experimental results of first-photon imaging: The first column is the point cloud recorded by the avalanche photodiode, the second column is the reflectivity estimated from the time-of-flight of the first photon, the third column is the computational image via regularization method, the fourth column is the 3-dimentional image estimated from the different views^[12]

需的平均光子数。后来中科大的研究小组将该方法的算法大幅改进, 在高耦合效率的光学系统中利用高转换效率的探测器实现了对作用距离超 200 km 的成像^[13]。

用光子数或首达光子的飞行时间获取强度信息, 需要通过闪光照明或者点扫的方式对整个场景进行无差异的均匀编码。同时, 无论使用面阵探测器还是点扫, 都需要对整个场景进行满采样, 即面阵探测器的像素数或点扫的次数不少于待恢复的图像像素。近年来, 在光场调控和量子探测技术支撑下, 并基于光场的高阶经典和量子关联发展起来的关联成像, 具备图像编码可设计、信号采样可压缩等特点, 受到了国内外学者的广泛关注, 同时为极弱光条件下的图像信息获取提供了崭新的思路。

2 关联成像原理

关联成像 (Correlated imaging), 也被称作鬼成像 (Ghost imaging), 是一种基于光场高阶关联获取物体信息的成像技术。如图 3 所示, 在关联成像系统中, 光源被分为两路: 一路经过物体后的总光强被一个点探测器收集 (孔径内能量被透镜收集至一点, 这种探测方式也称桶探测), 被称为物臂; 另一路是参考臂,

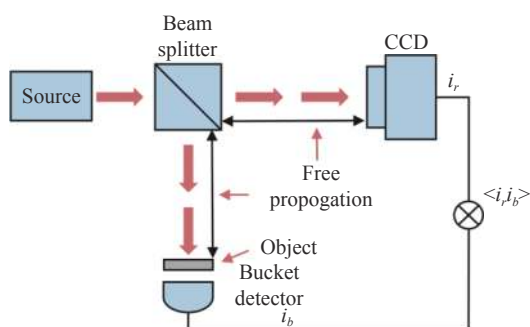


图 3 关联成像原理示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of the principle of correlated imaging

经自由传播后的光强分布被面阵探测器记录。物体的图像可以通过两臂信号的关联计算得到。

与直接记录物体信号光强度分布的传统成像相比, 关联成像有以下显著特点。首先, 桶探测的方式实现了对回波能量的汇聚收集, 大幅提升了信号的能量密度, 同时单元探测器件在技术上往往比面阵探测器件具备更优性能, 这使得关联成像可以在更弱回波条件下工作^[14-16]。其次, 关联成像通过照明或后端调制对物体图像信息进行编码, 可根据成像所需设计编码方式, 以实现成像所需能量、时间、数据量和采样次数的大幅减少^[17-23]。再次, 关联图像是通过照明编码信息和桶探测信号重构的, 可以有效抑制与照明光

源统计无关的噪声^[24-28], 因此可以大幅提升噪声条件下尤其是弱光条件下成像的鲁棒性。最后, 关联成像可以结合压缩感知、机器学习等算法相结合, 突破奈奎斯特采样定律, 实现亚采样下的图像重构。而在照明功率恒定的条件下, 大幅减少成像所需采样次数也意味着大幅减少了成像所需的照明能量。因此, 上述特点共同形成了关联成像更高的灵敏度和在极弱光条件下的潜在优势。此外, 关联成像还可以实现无透镜成像, 可拓展至在 X 光、中、远红外、太赫兹波等一些难以实现面阵探测或难以获取成像透镜的波段。另一方面, 由于使用了单元探测器, 关联成像需多次测量来获取二维、三维乃至更高维的场景信息。

在关联成像系统中, “点到斑”的共轭成像关系是通过光场的高阶关联建立的。图 4 为关联成像系统的展开图, 即将图 3 中的光路在分束器处展开。为了简洁起见同时不影响讨论, 这里省略了探测器, 并且以赝热光关联成像为例。根据菲涅尔衍射公式, 可以得到物体表面的光场为^[29]:

$$\vec{E}_s(x_s, y_s) = \int \vec{E}_0(x_0, y_0) h_s(x_0, y_0; x_s, y_s; u) dx_0 dy_0, s = \{r, t\}, z = \{v, u\} \quad (1)$$

当 $s = r(t)$ 时表示参考臂 (物臂), $\vec{E}_0(x_0, y_0)$ 表示光源表面光场, $z = v(u)$ 为参考臂相机 (物体) 到光源的距离, $h_s(x_0, y_0; x_s, y_s; u)$ 表示脉冲相应函数:

$$h_s(x_0, y_0; x_s, y_s; z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp\left\{\frac{ik}{2z} [(x_s - x_0)^2 + (y_s - y_0)^2]\right\} s = \{r, t\}, z = \{v, u\} \quad (2)$$

式中: λ 为波长; k 为对应的角波数; i 为虚数单位。根据复高斯矩定理^[30], 物体表面和参考臂相机表面光

场的二阶关联函数可以写为:

$$G(x_t, y_t; x_r, y_r) = \langle I(x_t, y_t) I(x_r, y_r) \rangle = \langle I(x_t, y_t) \rangle \langle I(x_r, y_r) \rangle + \left| \langle \vec{E}_t(x_t, y_t) \vec{E}_r^*(x_r, y_r) \rangle \right|^2 \quad (3)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示时域上的系综平均, 实际中通过大量采样求平均值来实现; * 表示光场的共轭。公式 (3) 中等号右边的第一项为常数项, 不影响对图像信息传递的讨论。将公式 (1) 和 (2) 代入第二项, 得到:

$$\begin{aligned} \left| \langle \vec{E}_t(x_t, y_t) \vec{E}_r^*(x_r, y_r) \rangle \right|^2 = & \left| \frac{e^{ik(u-v)}}{\lambda^2 u^2 v^2} \int \langle \vec{E}_0^*(x_0, y_0) \vec{E}_0(x'_0, y'_0) \rangle \cdot \right. \\ & \exp\left\{\frac{-ik}{2v} [(x_r - x_0)^2 + (y_r - y_0)^2]\right\} \cdot \\ & \left. \exp\left\{\frac{ik}{2u} [(x_t - x'_0)^2 + (y_t - y'_0)^2]\right\} dx_0 dy_0 dx'_0 dy'_0 \right|^2 \quad (4) \end{aligned}$$

对于完全非相干照明光源, 有:

$$\langle \vec{E}_0^*(x_0, y_0) \vec{E}_0(x'_0, y'_0) \rangle = \langle I(x_0, y_0) \rangle \delta(x_0 - x'_0, y_0 - y'_0) \quad (5)$$

式中: $\delta(\cdot)$ 为 Dirac-delta 函数; $I(x_0, y_0)$ 为光源的强度分布。当参考臂和物臂光程相等, 即 $v = u = d$ 时, 将公式 (5) 代入公式 (4), 可以得到:

$$\begin{aligned} \left| \langle \vec{E}_t(x_t, y_t) \vec{E}_r^*(x_r, y_r) \rangle \right|^2 = & \alpha \left| \int \langle I(x_0, y_0) \rangle \cdot \right. \\ & \left. \exp\left\{\frac{-i2\pi}{\lambda d} [(x_r - x_t)x_0 + (y_r - y_t)y_0]\right\} dx_0 dy_0 \right|^2 = \\ & \alpha \left| F \left[I \left(\frac{x_r - x_t}{\lambda d}, \frac{y_r - y_t}{\lambda d} \right) \right] \right|^2 \quad (6) \end{aligned}$$

式中: $\alpha = \frac{1}{\lambda^2 d^4}$; $F[\cdot]$ 表示傅里叶变换。因此, 忽略公式 (3) 的常数项时, 物体表面和参考臂相机表面光场

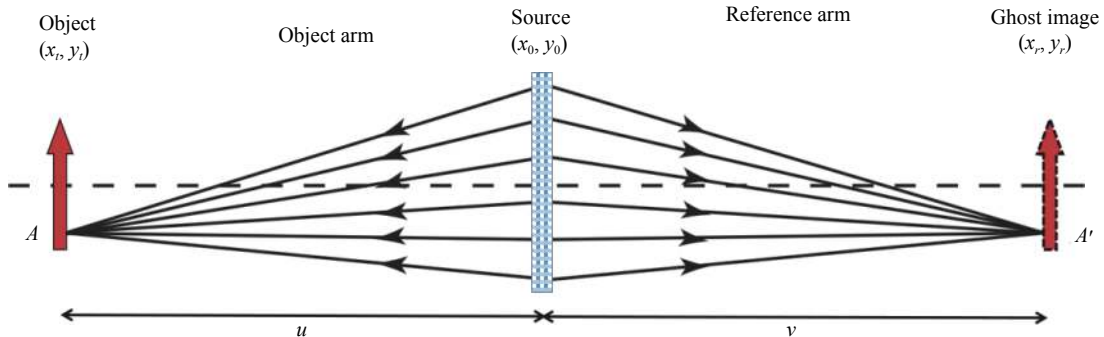


图 4 赝热光源关联成像系统展开图

Fig.4 Unfolded picture of the ghost imaging system with pseudothermal light

的二阶关联为光源强度分布的傅里叶变换的模平方。对于旋转毛玻璃调制高斯激光束产生的赝热光^[31-35],光源强度服从高斯分布,其傅里叶变换也服从高斯分布,且当 $x_r \cong x_s$ & $y_r \cong y_s$, 时出现最值。该高斯分布的半高宽取决于光源孔径,光源孔径越大,半高宽越小,反之半高宽越大。这表明,照在物体上 (x_o, y_o) 的光场,和参考臂相机表面以 (x_r, y_r) 为中心的微小区域(区域面积取决于光源孔径)光场的关联性最强,和其他区域的光场无关联。当桶探测器收集到来自 (x_o, y_o) 的光强并和参考臂记录的光场进行关联运算时,在 (x_r, y_r) 点的关联信号就会明显强于其他点。这就建立了关联成像系统中“点到斑”的成像关系。并且,由于光场关联的条件是 $x_r \cong x_s$ & $y_r \cong y_s$, 因此关联成像系统得到的是正立的图像。除了上述的强度关联理论,马里兰大学的史砚华教授也用双光子干涉理论解释了关联成像的物理机制^[36-38]。

在极弱光环境下,关联成像质量也会降低,但像质受影响的机理和传统成像具有显著差异。以赝热光关联成像为例,当照在物体上的光场或物体的回波弱至少光子乃至单光子时,由于光子数噪声、环境噪声以及探测器的影响,导致桶探测信号和参考臂共轭点的强度统计关联下降,而非共轭点的统计关联性则有可能上升,进而影响成像中“点到斑”的共轭关系。对于纠缠光关联成像^[39-41],在极弱光环境下,虽

然纠缠光子对自身的关联性并不会降低,但在背景噪声和非理想器件的影响下,实际探测到两臂信号的关联性也会下降,因此成像质量也会退化^[42-43]。

近年来,研究人员为提升极弱光环境下关联成像的性能进行了广泛深入的研究,并取得了诸多进展。包括大幅度降低成像所需辐射剂量^[44-45],在极低探测信噪比下实现图像重构^[46-49],在平均每像素的光子数远小于 1 的极弱光条件下获得物体图像^[50-53]等。

3 少光子纠缠光成像

第一个鬼成像的实验正是利用纠缠双光子源,在极弱光条件下实现的^[54]。1995 年,史砚华小组用氩离子激光泵浦 II 型 BBO 晶体,通过自发参量下转换过程产生正交偏振的纠缠光子对。所谓的自发参量下转换,是指泵浦光 (pump light) 和非线性晶体的极化场相互作用,直观上表现为湮灭一个能量较高的光子,同时产生两个能量较低的下转换光子。由于该过程遵循能量守恒和动量守恒,使得两个下转换光子的位置和动量分别相互纠缠。如图 5(a) 所示,信号光子 (signal photon) 和闲置光子 (idle photon) 被一偏振分束器分至物臂和参考臂。物臂上的信号光子照射透射型物体后被桶探测器收集。参考臂上的闲置光经过相应距离的自由传播,在探测平面被点探测器扫描测量。物体的空间分布信息可通过两个探测器的符合

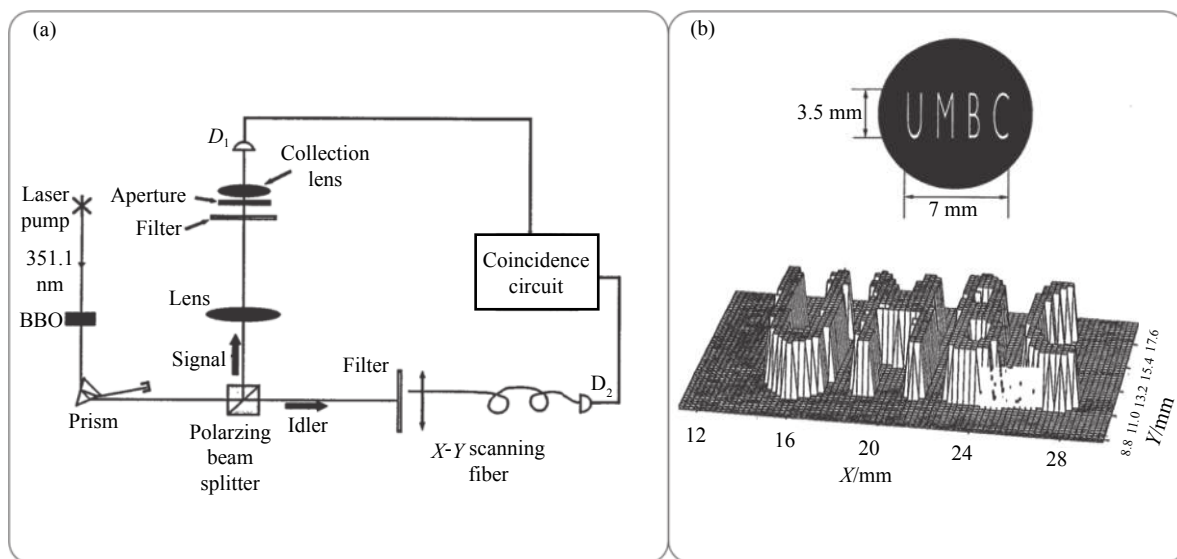


图 5 (a) 纠缠源鬼成像实验装置; (b) 纠缠源鬼成像结果^[54]

Fig.5 (a) Experimental setup of ghost imaging with entanglement source; (b) Results of ghost imaging with entanglement source^[54]

测量得到。这是因为,如果忽略实验中偶然计数的影响,可以认为分别触发参考臂探测器和物臂探测器实现符合计数的双光子互为纠缠姊妹对,这些光子对的位置和动量一一对应。因此,当物臂上只有携带物体空间信息的信号光触发桶探测器时,符合计数中触发参考臂探测器的也相应携带了物体的空间信息。这就使得物臂上的物体的空间信息在参考臂上得到了恢复,结果如图如图 5(b) 所示。自发参量下转换过程的效率极低,单位时间内产生的下转换光子数极少,因此该实验也是实现了极弱光条件下的鬼成像。

纠缠光鬼成像的关键在于纠缠光子对的符合测量。双光子的符合测量,是指在时域上对两个探测器的信号进行“且”运算,即只有当两个探测器同时探测到光子才会输出信号 1,否则输出的信号为 0,因此可以实现对测量纠缠光子对的同时精确测量。基于这一思想,格拉斯哥研究小组,利用单光子探测器的信号触发 ICCD(Intensified Charge Coupled Device),其中

ICCD 为参考臂相机,单光子探测器位于物臂,作为预示探测器 (Heralding detector),如图 6(a) 所示^[14]。当预示探测器响应信号光子,便同时触发 ICCD 记录闲置光子的位置,实验装置如图 6(a) 所示。由于预示探测器在响应信号光子后有电学延迟,因此参考臂使用了光学延迟线(装置图中的绿色部分)来使得 ICCD 被触发时,对应的闲置光子恰好到达探测面。纠缠光子对同时产生,同步性极佳,因此预示触发的方法可以为 ICCD 加载精准的光学时间门,使得与信号光子互为姊妹对的闲置光子到达探测面时 ICCD 恰好开始工作,在其他时间 ICCD 均不工作。该方法有效滤除了时域上不重叠的背景噪声。和内触发式的直接成像相比,预示鬼成像的方法大幅提升了少光子条件下的成像质量,如图 6(b) 所示。后来研究人员利用同样的方法,在少光子条件下还实现了高信噪比的物体边缘成像^[55-57]。

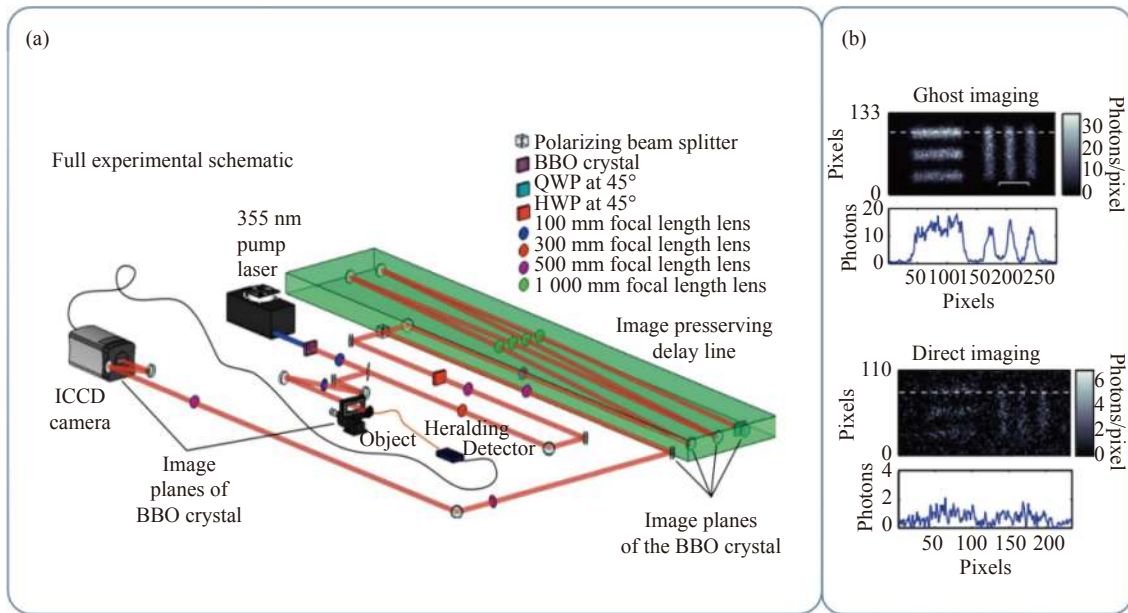


图 6 (a) 预示鬼成像实验装置; (b) 预示鬼成像和直接成像结果对比^[14]

Fig.6 (a) Experimental setup of heralded ghost imaging ; (b) Comparison between the results from heralded ghost imaging and that via direct imaging^[14]

极弱光条件下,光子数的散粒噪声是导致成像质量退化的重要因素,而散粒噪声是光子能量量子化带来的内秉属性,无法通过提升探测装置性能或改进成像算法有效抑制。如何实现亚散粒噪声的光学成像,一直是极弱光环境成像的理论和技術难题。纠缠双

光子因其量子关联性,使得信号光与闲置光具有相同的光子数分布和散粒噪声。基于这一现象,2010 年意大利的研究小组利用纠缠光子对的量子关联性实现了亚散粒噪声 (sub-shot-noise) 成像^[58]。实验装置如图 7(a) 所示,自发参量下转换产生的纠缠光子对分束

后,信号光和闲置光分别到达 CCD 的不同区域。其中信号光照明物体后,CCD 直接获得物体图像,如图 7(b) 中的第三列所示,图像质量主要受散粒噪声影响。闲置光经过自由传播被 CCD 另一区域记录。由于两区域的光子数散粒噪声近似相等(考虑探测器件的影响,因此近似相等),他们将物臂信号减去参考臂信号的噪声,有效提升了图像质量,甚至突破了散粒噪声对图像信噪比的限制,结果如图 7(b) 第一列所示。为了验证量子关联在抑制散粒噪声中的作用,他们还用激光代替纠缠源,用相同的装置和成像方法进行了对比实验,结果如图 7(b) 第二列所示,由于经典

光源不具备量子关联特性,物参两臂的光子数分布和散粒噪声并不相同,因此无法有效抑制散粒噪声。研究人员将该方法用于显微成像,在低辐射功率条件下获得了高信噪比的生物图像^[59-60]。

由于具备量子关联特性,纠缠光作为照明光源,可以超越经典光源实现更优越的成像效果。尤其在极弱光条件下,可以获得比传统成像更高信噪比的图像。现今,高亮度的纠缠源仍难以制备,因此纠缠光源大多用于生物成像中的照明。在光学遥感、激光雷达等应用场景中,则需要更高功率的赝热光实现更远作用距离的关联成像。

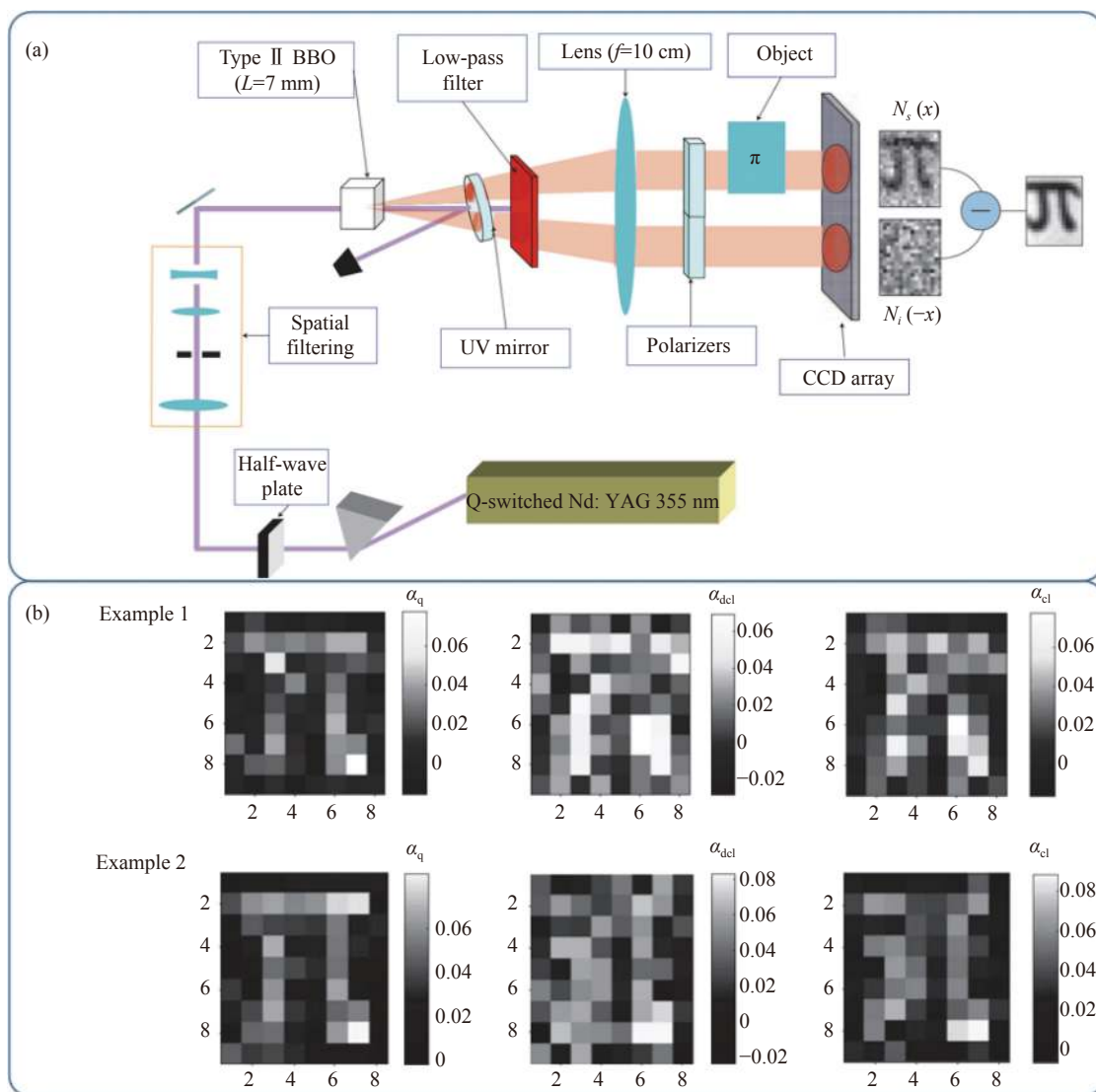


图 7 (a) 纠缠光子成像实验装置; (b) 纠缠光子成像和直接成像结果对比^[58]

Fig.7 (a) Experimental setup of quantum imaging with entanglement source; (b) Comparison between the results from quantum imaging with entanglement source and that via direct imaging^[58]

4 极低探测信噪比条件下的关联成像

2005 年, 马里兰大学研究小组验证了用赝热光作为光源也可以实现关联成像^[61]。所谓的赝热光, 是指光强统计分布和真热光相同, 但相干时间可控的光场, 可以通过相位调制器调制激光产生。调制所得的光场经过物体后, 相当于对物体的空间信息进行了编码。利用桶探测信号和照明光场的信息, 通过解码计算可以重构物体图像。大功率的赝热光场更容易制备, 因此赝热光关联成像受到了更广泛的关注和更深入的研究。极低探测信噪比下的关联成像, 是指在桶探测信号信噪比极低的条件下实现物体关联图像的重构。

在光学遥感、激光雷达等应用场景中, 当作用距离较远, 物体反射率较低或传输介质中散射吸收效应较强, 经过物体的光信号到达探测面时, 强度极弱, 且和各种环境噪声光高度耦合, 使得探测信噪比极低, 为光学成像带来了巨大困难。在关联成像中, 使用照

明光源的编码方式可设计, 使得信号光子和背景噪声光子更容易区分, 为极低探测信噪比下的信号增强和光学成像提供了新的思路。2016 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所韩申生小组率先提出并将脉冲压缩技术、相干探测技术与鬼成像结合的方案^[46]。他们将赝热光脉冲做啁啾幅度调制, 然后分为两路, 一路光作为相干探测的本地振荡, 另一路作为关联成像系统的照明光源。最后在接收端用物体的回波和本振光进行相干探测。实验的装置如图 8(a) 所示。由于回波中只有信号光和本振光相干, 而噪声光则不具备这一性质, 因此该方法可以在极低探测信噪比下解耦信噪光子并完成重构图像。同时结合脉冲压缩, 该方法模拟了对运动物体的测速和关联成像, 结果如图 8(b) 所示。其中 (c),(f) 是速度为 0.1 m/s 的运动物体 1 的重构图像; (d), (g) 是速度为 1 m/s 的运动物体 2 的重构图像, (e) 是为静止物体 3 的重构图像。(k) 是将 (h)、(i)、(j) 合成的三维图像, 其中不同的颜色代表不同的距离。

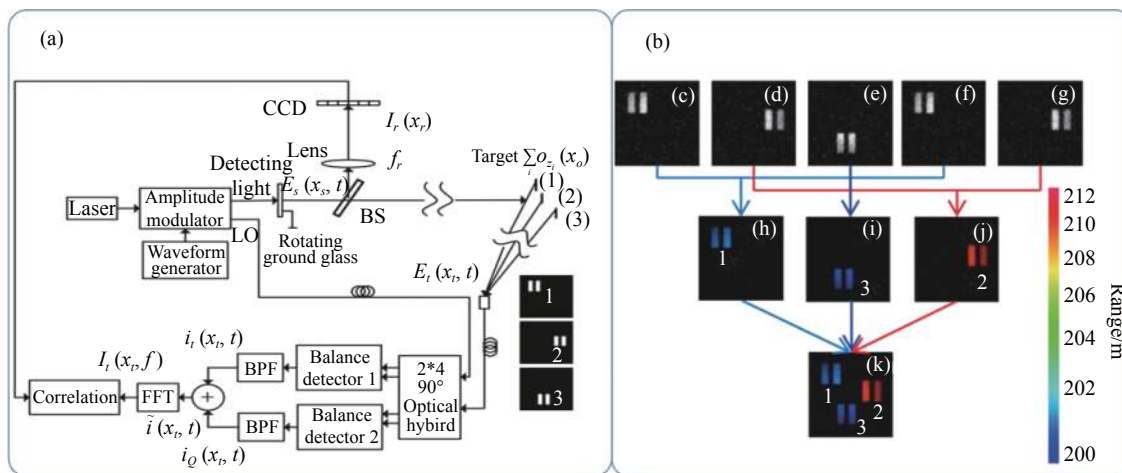


图 8 (a) 脉冲压缩和相干探测关联成像原理图; (b) 为脉冲压缩和相干探测关联成像模拟结果^[46]

Fig.8 (a) Principle of ghost imaging with coherent detection and pulse compression; (b) Simulation results of ghost imaging with coherent detection and pulse compression^[46]

为了对比分析和验证相干探测以及脉冲压缩对关联成像鲁棒性的提升, 2017 年, 韩申生课题组分析了背景光对三种典型的关联成像激光雷达系统的成像质量影响^[47], 三种系统包括窄脉冲激光关联成像、外差关联成像和相干探测关联成像。并通过模拟实验比较三种关联成像的信噪比, 如图 9 所示, 图 (a)~(c) 分别代表窄脉冲激光关联成像、外差关联成像

和相干探测关联成像的成像结果。每一列的图像在相同探测信噪比下获得。(1)~(6) 的探测信噪比依次为 -40 dB, -30 dB, -20 dB, -10 dB, 0 dB 和 10 dB。窄脉冲关联成像系统, 由于没有对探测信号进行信噪解耦, 因此最容易受到背景光的影响。外差关联成像通过对照明脉冲进行时域编码和解码, 可以获得照明脉冲的时间信息, 并滤除了照明脉冲时间以外的噪声,

而对照明脉冲时间内的噪声则无法滤除,因此其成像结果优于窄脉冲关联成像。在相干探测关联成像中,由于只有信号光可以和本振光相干,而任何时间点内的噪声光子则无法相干,因此该系统对探测信号的信噪解耦能力最强,相同探测信噪比下成像质量最好。

同时,该文章还指出在实际应用中,还需要考虑探测装置的能量耦合效率对成像信噪比的影响。2020年,该小组在实验上验证了脉冲压缩关联成像在极低探测信噪比下的性能,当探测信噪比低至 -36.7 dB时仍能获得物体的图像^[48]。

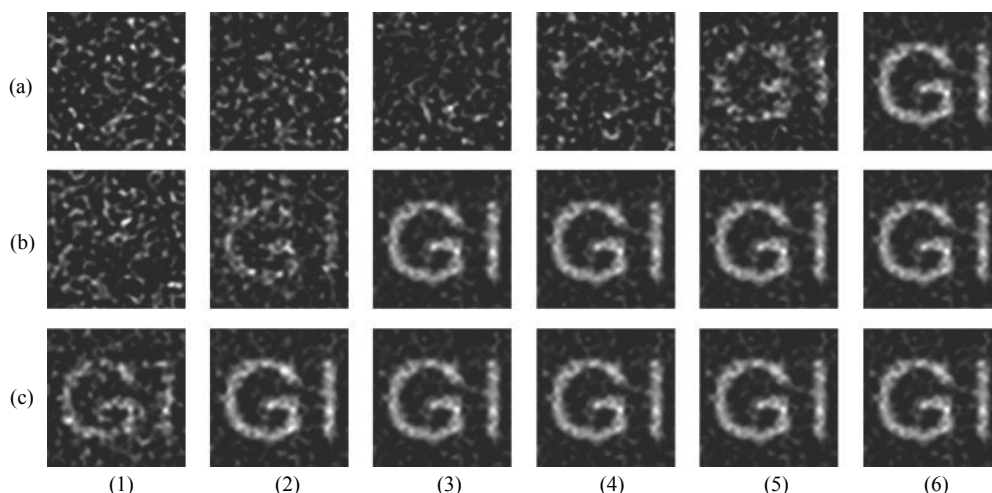


图 9 三种关联成像雷达在不同探测信噪比下的模拟成像结果^[47]

Fig.9 Simulation results of the three ghost imaging LiDAR under different detection signal-to-noise ratio^[47]

2021年,笔者课题组将脉冲压缩的思想用于多脉冲时域相关,即在相同调制时刻内发射一组脉冲串,同时记录脉冲串的时间信息,然后将对应的多脉冲桶探测信号和记录的脉冲串进行时域关联,将关联所得

结果和参考臂光场用于图像的计算重构。将该方法用于室外关联成像实验,如图 10(a)所示,在日光背景噪声远强于目标信号的条件实现了距离 1.3 km 目标的关联成像^[49]。实验结果如图 10(b)所示,BSNR

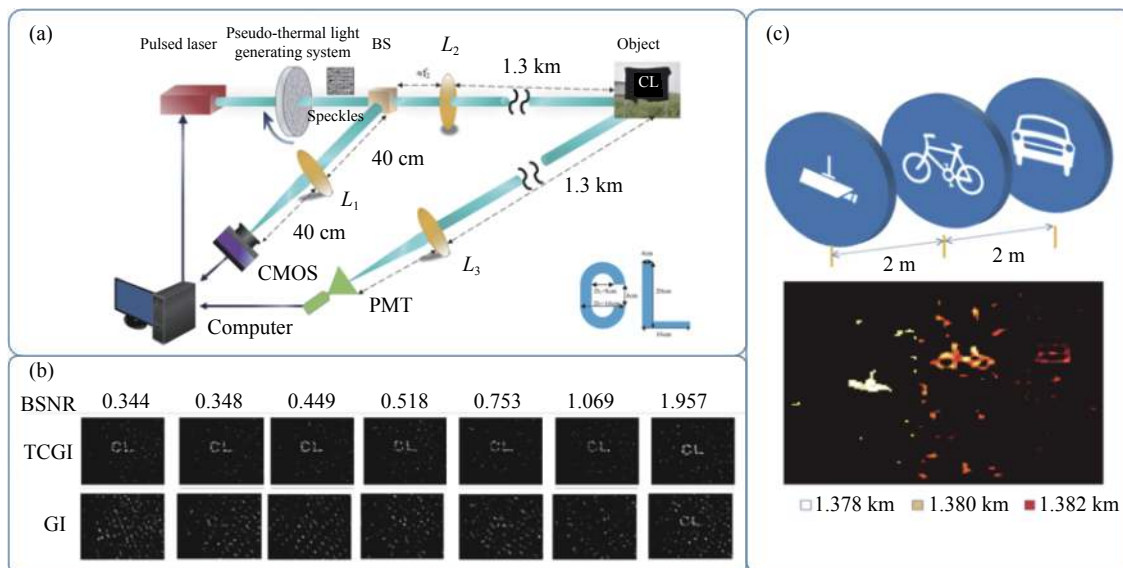


图 10 (a) 1.3 km 关联成像示意图; (b) 时域关联方法和传统方法的实验结果比较; (c) 时域关联方法对不同距离上的物体成像结果^[49]

Fig.10 (a) Diagrammatic sketch of ghost imaging at 1.3 km; (b) Comparison between the experimental results of the temporal correlation method and that from traditional method; (c) Imaging results of objects at different distance from the temporal correlation method^[49]

为桶探测的信噪比, BSNR 小于 1 表示背景噪声远强于目标信号, 此时传统关联成像 (GI) 无法获得物体图像, 而时域关联的方法 (TCGI) 仍可以对物体成像。此外, 多脉冲的时域关联还可以获得物体的距离或深度信息, 因此可以对三维物体或同时对不同距离上的物体成像, 结果如图 10(c) 所示。在实验验证的同时, 还对时域关联方法对成像信噪比的提升机理进行了理论推导, 得出三条主要结论。首先, 关联成像中决定成像质量的是桶探测中信号的涨落而非平均强度, 这和传统成像有着显著区别, 在传统成像中, 图像质量往往是由探测信号的平均强度决定的。其次, 探测信号中噪声和信号是强度的线性叠加, 因此日光背景噪声属于加性噪声。和照明脉冲统计无关的加性噪声可以通过统计关联有效抑制。最后, 统计关联的方法和给脉冲加时间门的方法是等效的, 不同之处在于在统计关联中, 脉冲的时间信息是通过统计平均得到的, 而给脉冲加时间门则需要通过其他手段提前获得脉冲的时间信息。

极低探测信噪比下的关联成像, 影响成像质量的主要是环境中的噪声光子, 此时提升关联成像的性能, 关键在于实现桶探测信号的信噪精准解耦, 从而提升桶探测信号信噪比。由于关联成像中使用了主动照明编码的光源, 其统计性质和噪声光独立无关, 因此通过线性滤波或统计关联的方法可以有效区分信号光子和噪声光子, 最终实现桶探测信号信噪比的提升。此外, 使用鲁棒性更强的算法也可以提升低探

测信噪比条件下的关联成像质量, 例如 CLEAN 算法^[62]、SGI 算法^[63]、机器学习算法^[64-68] 等。使用更先进的算法和提升桶探测信号信噪比并行不悖, 相辅相成。

5 单光子赈热光关联成像

在关联成像中, 当回波信号弱至单光子量级时, 除了环境噪声和探测器噪声, 光子数噪声也会严重影响信号信噪比, 最终导致图像质量的下降。所谓的光子数噪声, 是指对于少光子或单光子量级的光信号, 短时间内到达探测器表面的光子数和信号的平均光子数之间存在误差, 这种误差是由信号光子能量量子化的内秉属性决定的。

因此单光子量级的关联成像, 除了需要使用前文所述的方法来抑制环境噪声, 还需要研究如何用少光子或单光子准确估计平均光子数, 并表征桶探测信号的强度。2015 年, 上海交通大学研究小组用盖格模式的单光子探测器进行计算关联成像^[50]。由于盖格模式的单光子探测器只能进行脉冲计数, 无法分辨单脉冲内的光子数涨落, 因此在实验中研究人员在一个照明模式下发出多个脉冲, 用探测器记录的脉冲个数估计桶探测信号强度, 实现了单光子关联成像, 光子脉冲在时间上的服从泊松分布, 如图 11(a) 所示。此外, 文中提出了一种新的 MGI 的算法, 通过将桶探测进行从大到小的排序, 并将涨落较大的桶探测信号和对应的照明模式用于图像重

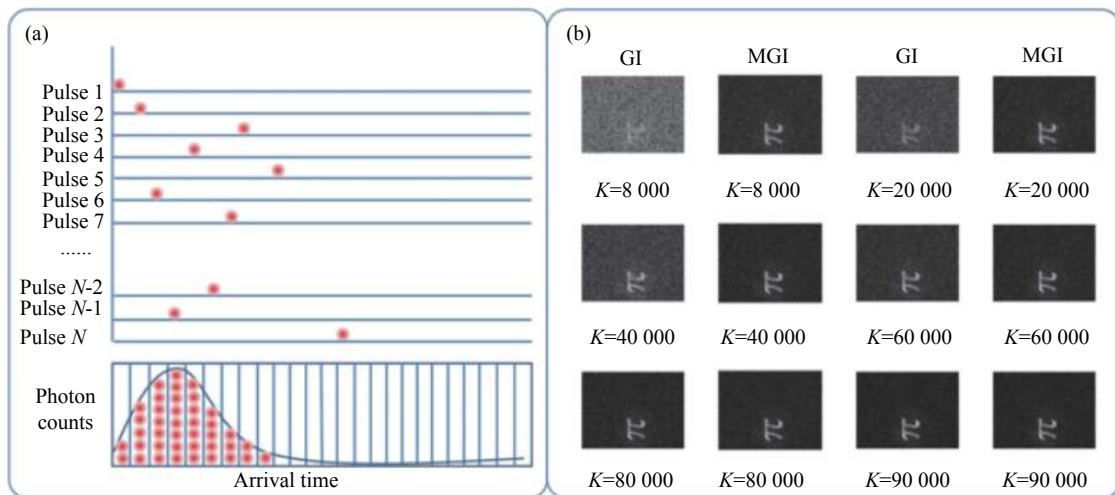


图 11 (a) 单光子关联成像中桶探测光子脉冲的统计分布; (b) 单光子关联成像结果^[50]

Fig.11 (a) Statistical distribution of photon pulses detected by bucket detector in single photon ghost imaging; (b) Results of ghost imaging single photon^[50]

构,可以获得比传统关联算法信噪比更高的图像,在几千帧照明模式下就能得到清晰的成像结果。如图 11(b)所示,其中 GI 表示传统算法。

2016 年,该小组利用同样的方法,加上物体的偏振信息实现了单光子计数的偏振关联成像^[51]。实验中,用线偏光作为照明光源,并将物体回波通过一偏振分束器,分束器两端分别用一个桶探测器收集横向

偏振光和纵向偏振光,以此获得回波的偏振度,然后将其用于图像重构,可以在获得物体光强分布的同时,获得物体的偏振信息。在实验中,研究人员用白纸“中”字贴在铝板上作为物体,由于白纸和铝板有偏振特性差异,该方法因额外获取了偏振维度信息而提高了成像的信噪比,结果如图 12(b),第一行为传统方法的结果,第二行为利用了偏振信息的关联成像结果。

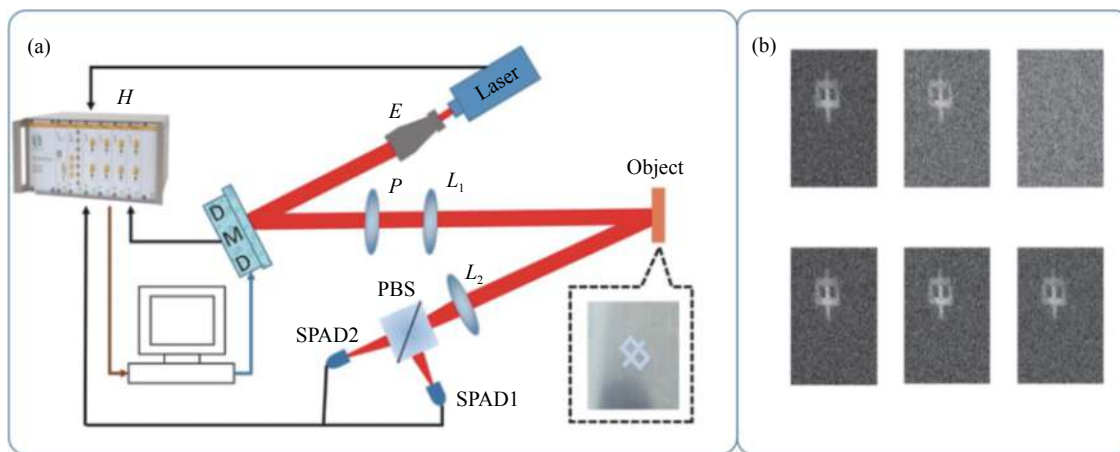


图 12 (a) 单光子关联成像实验装置; (b) 单光子偏振关联成像结果^[51]

Fig.12 (a) Diagrammatic sketch of single photon ghost imaging; (b)Results of single photon polarization ghost imaging^[51]

上述方法在一个照明模式内使用脉冲串并记录回波脉冲个数,等同于在时域上实现光子计数来估计桶探测信号强度。平均每个照明模式内的脉冲数越多,脉冲计数越接近回波的平均光子数,桶探测信号中的光子数噪声越小。因此,为了抑制光子数噪声,该方法仍需要探测多个脉冲或光子来表征桶探测信号。成像所需的累积探测时间较长,所需的照明光总能量较高。

如何利用一个光子来表征或估计桶探测信号强度,是进一步提升成像速度和降低成像所需能量需要解决的问题。2018 年,该小组基于首达光子成像的思想,提出并验证了快速首达单光子关联成像^[52]。实验中,同样在一个照明模式内发射多个脉冲,和脉冲计数的方法不同的是,当物体回波首个光子脉冲被桶探测器探测到时,记录下该光子脉冲的时间信息,并完成该模式照明下的测量。利用首个光子脉冲的时间信息估计桶探测信号的强度。首个光子到达的时间越早,对应的桶探测信号越强,反之,桶探测信号越弱,如图 13(a)所示。并且提出在每个脉冲串中控制脉冲数量的方法,在照明脉冲串内如果没

有回波光子被探测,将该照明模式的桶探测值作为 0,不再增加脉冲数量,以此来提升成像速度,实现快速首达光子关联成像。该方法仅需单个光子脉冲来估计桶探测信号强度,和脉冲计数的方法相比,大大减少单次采样内所需的光子脉冲数,同时,结合关联成像采样可压缩的优势,容易将成像所需的平均光子数/像素降至 1 以下。实验中,利用快速首达单光子关联成像,实现了用小于 1 000 个光子对 96×128 个像素的二维物体成像,平均每个像素所需要的探测光子个数小于 0.1。实验结果如图 13(b)所示,其中第一行是首达光子关联成像 (FPGI) 结果,第二行是快速首达光子关联成像 (FFPGI) 结果。

在快速首达光子关联成像中,光子的飞行时间信息被用来估计桶探测信号的强度,丢掉了物体的深度信息,因此无法对三维物体成像。为了克服这一问题,2020 年,该研究小组从理论上分析得到,利用首达光子被探测到的时间、概率,和光场光强分布的一致性,可以估计物体的深度信息。利用这一现象,在平均每个像素探测到 0.01 个光子的条件下,实现了对距离 100 km 处的合作目标的首达光子三维关联成像^[53],

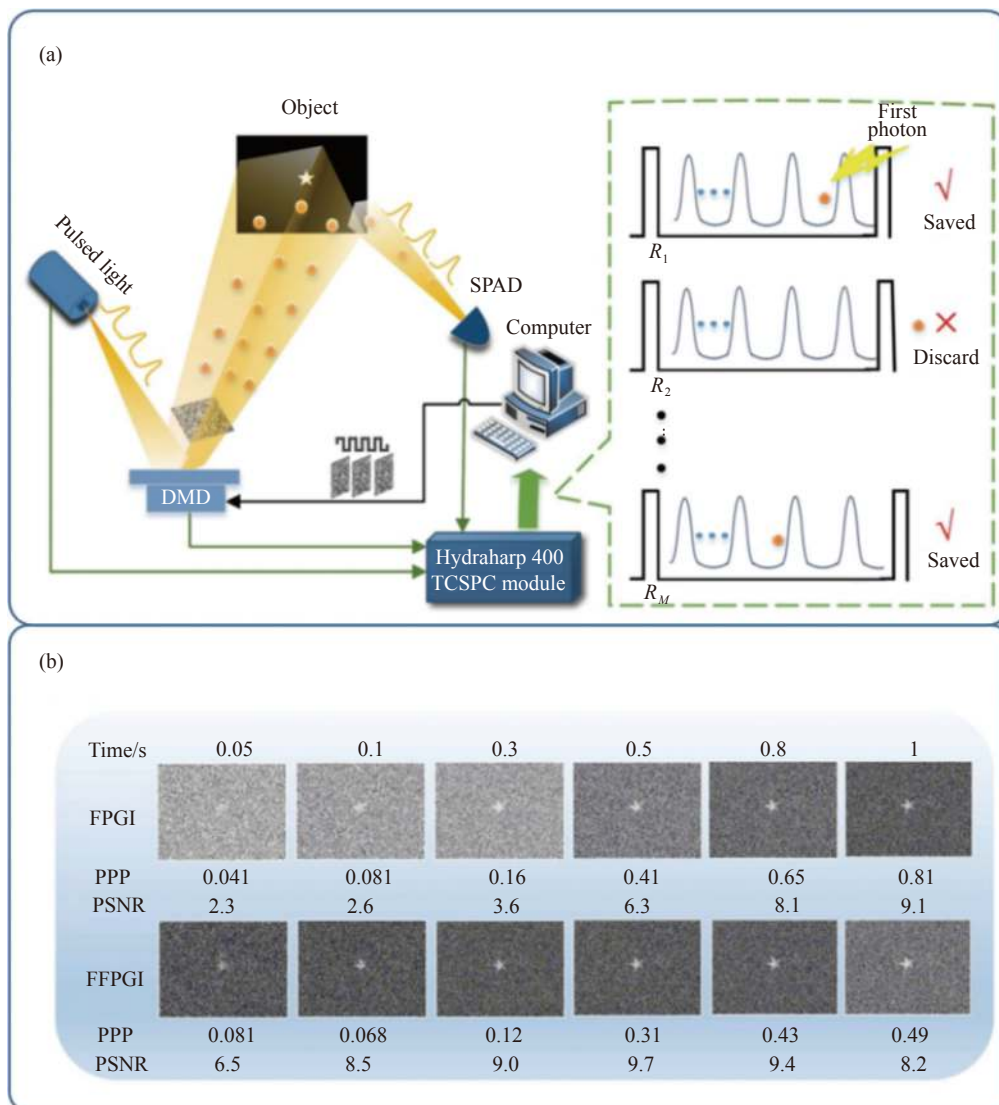


图 13 (a) 首达光子关联成像示意图; (b) 首达光子关联成像结果^[52]

Fig.13 (a) Diagrammatic sketch of first-photon imaging; (b) Experimental results of fast first-photon ghost imaging^[52]

结果如图 14 所示。

在关联成像中, 物体的图像是利用桶探测信号的强度涨落和参考臂光场计算得到的。在进行大量采样后, 当某次采样的桶探测值大于整个桶探测序列的平均值, 说明该桶探测信号对应的照明模式中, 物体区域的光强较强, 而非物体区域的光强较弱, 此谓之“涨”。当某次桶探测值小于于整个序列的平均值, 说明该次的照明模式中, 物体区域的光强弱, 而非物体区域的光强强, 此谓之“落”。因此, 将“涨”的桶探测信号对应的照明模式叠加后, 就可以得到物体的正像, 即物体区域的信号强于背景区域。将“落”的桶探测信号对应的照明模式叠加后, 物体区域的信号会弱

于背景区域, 即得到物体的负像, 这就是正负关联成像的原理^[69-72]。利用这一思想, 烟台大学、山东大学等研究小组联合在单光子关联成像中的发现了有趣的现象, 装置如图 15(a) 所示。他们利用后端调制的方式, 将极弱光照明下的物体编码后, 再用单光子探测器收集信号光子。实验中, 桶探测器记录的平均光子数 (单光子探测器响应的光子数/照明光源发出的脉冲数) 远远小于 1。所有桶探测信号的概率统计如图 15(b) 所示, 分别将光子数为 1, 2, 3, 4 的桶探测信号对应的照明模式叠加, 得到了物体的正像, 这是因为这些桶探测信号大于平均值, 是“涨”的信号。当将光子数为 0 的桶探测对应的照明模式叠加后, 由于这

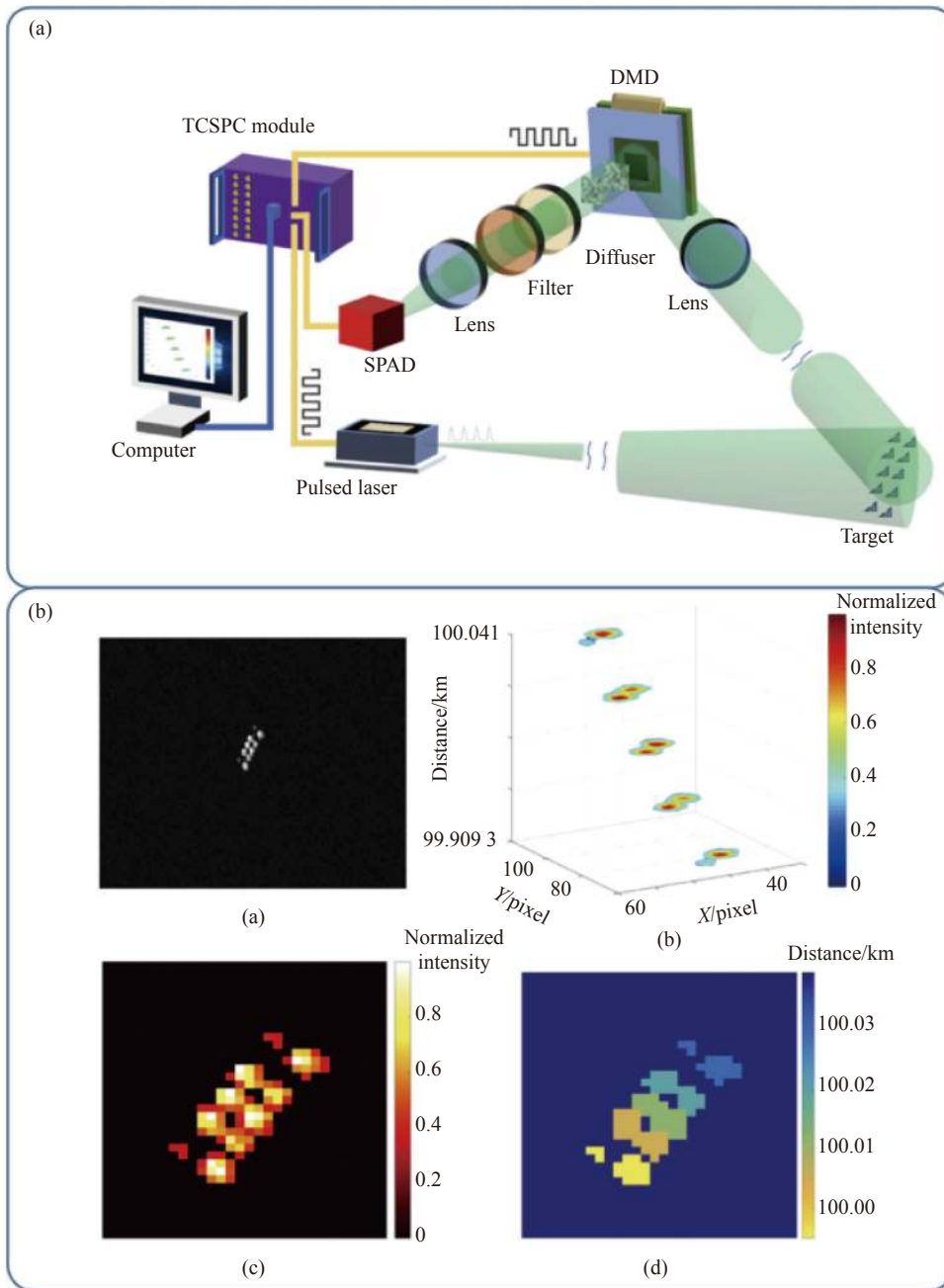


图 14 距离 100 km 三维物体的首达光子关联成像装置及实验结果^[53]

Fig.14 Experimental setup and results of fast first-photon ghost imaging for 3-dimentional object at 100 km distance^[53]

些桶探测是“落”的信号，便得到了物体的负像，作者称之为 0 光子成像，结果见图 15(b)^[73]。这充分体现了关联成像和传统成像的不同。传统成像时通过直接记录物体的光信号强度来实现成像的，无法再探测器 0 响应的条件下获得物体图像。而在关联成像中，有用的信号是“涨落”值而不是绝对值，因此即使在探测器 0 响应的测量条件下也可以为图像的重构提供信息。

利用光子脉冲计数估计桶探测信号强度和首达

光子方法相比，需要探测的平均光子数不同，但同样都会引入一定估计误差。在光子脉冲计数的方法中，平均计数脉冲越多，误差越小。在首达光子方法中，则是发出的脉冲数越多，估计误差越小。在 0 光子成像中，增加测量次数也可以减少图像的统计噪声。单光子热光关联成像中的光子数噪声可以通过探测更多的光子或发射更多的能量来减少，但无法完全抑制，这是因为光子数噪声是光子的内禀属性，无论是

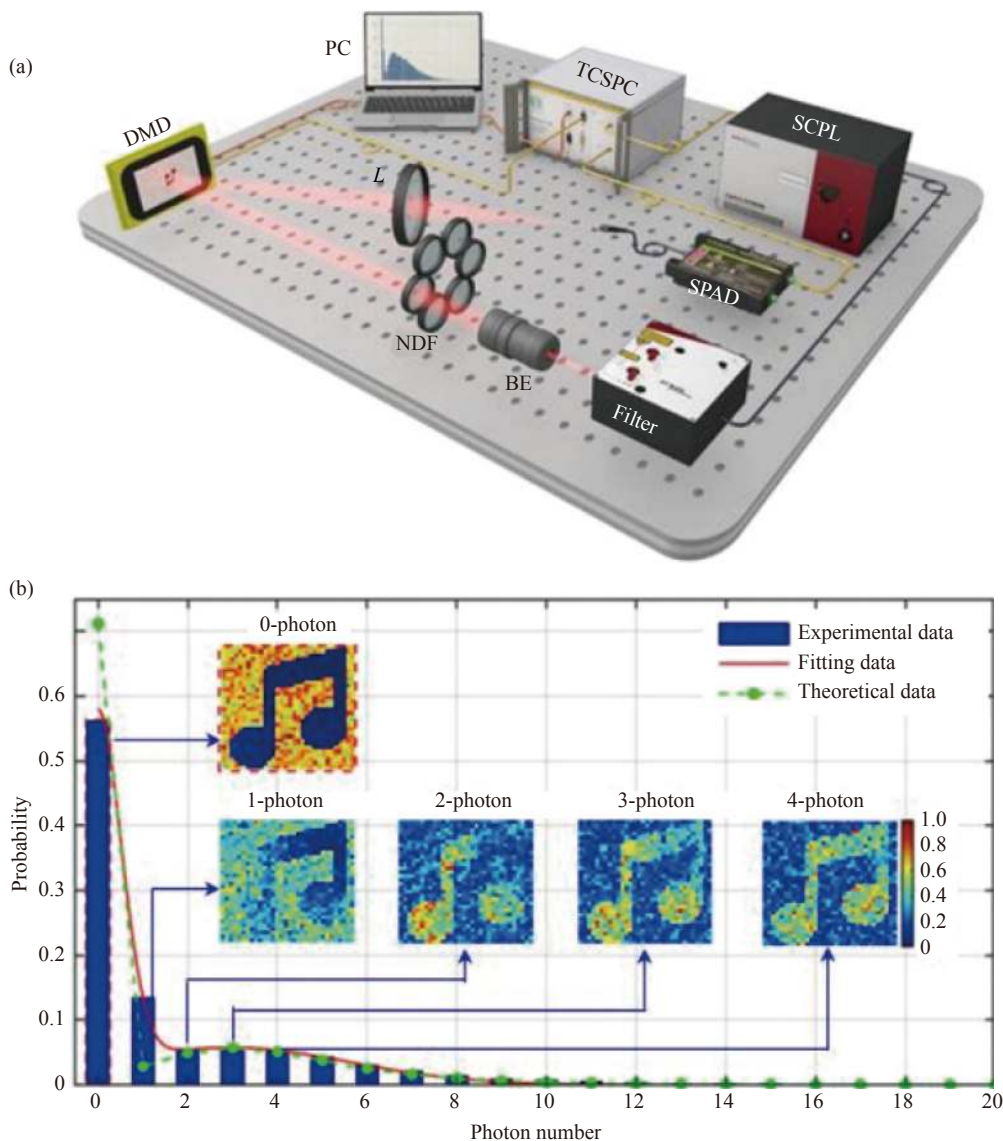


图 15 (a) 0 光子成像实验装置图; (b) 0 光子成像光子数统计和实验结果^[73]

Fig.15 (a) Experimental setup of zero-photon imaging; (b) Photon statistical and the experimental results of zero-photon imaging^[73]

在传统成像或是赝热光关联成像中,都无法通过提升探测装置性能或改进算法来完全消除。

6 极弱光关联成像发展趋势

随着关联成像朝着更大视场,更远作用距离,更高信息通量和更强鲁棒性的方向不断拓展,评估并提升极弱光条件下的成像性能,这一关键问题显得越来越重要,越来越紧迫。极弱光关联成像研究的发展趋势,作者认为可以从以下三方面考虑:

(1) 极弱光关联成像性能的提升。提升极弱光条件下的性能是拓展关联成像应用场景的重要问题之一,是提升光学成像作用距离,节约成像所需辐射能

量的重要途径。在极弱光条件下,关联成像和传统成像同样面临着物体回波信号弱、信噪比低、信号光子和噪声光子高度耦合等诸多问题。解决这一问题,一方面可以借鉴传统成像的技术和经验,包括优化光学系统设计,提高回波能量耦合效率;采用滤波系统,解耦信噪光子;提升探测器性能,收集更多光子,降低光子数噪声等,进而实现桶探测信号的信噪比的提升,最终用更高质量的桶探测信号重构更高信噪比的图像。另一方面,由于关联成像的照明编码可设计,且算法的性能对成像质量有着重要影响,因此可以通过设计特殊照明方式来有效区分回波中的信号光子和噪声光子,同时结合压缩采样,发展鲁棒性更强的算

法,则有望实现超越传统成像的优越性能。

(2) 关联成像灵敏度极限的评估。灵敏度是成像性能的重要指标,“获得一副光学图像至少需要多少个光子”一直是光学成像领域内备受关注的焦点问题^[6]。成像灵敏度的科学评估是推动关联成像走向应用的基础问题之一。在关联成像中,桶探测的方式实现了对回波能量密度的大幅提升。同时作为单元探测器,桶探测器拥有比面阵探测器更优的性能,可以探测到更弱的回波。这使得关联成像具有高探测灵敏度的天然优势。同时,作为一种间接成像方式,关联成像还有待发展适用于自身机制的成像灵敏度定义,成像灵敏度的能力极限还有待进一步明确。解决这一问题需要在厘清关联成像中光信息演化机制的基础上,建立关联图像信息量和所需信号光子数的关系,并明确平均单个光子的信息携带能力,最终定量评估关联成像的灵敏度。

(3) 极弱光条件下的动态成像。光子是光学成像系统中的信息载体。虽然待恢复的信息量和所需光子数的关系尚未定量,但待恢复的信息量越大,所需探测的光子数越多,这已成为光学成像中的基本规律。在静态场景成像中,当回波中的光子通量极低,单位时间内获得的光子数不足以对场景成像时,可以通过长时间探测累积足够多的光子来恢复场景信息。然而,对于场景中存在运动物体,或在传输路径上有动态散射、湍流等无序介质时,待恢复的场景信息量将随时间不断增加。此时,当成像系统单位时间内探测到的光子数少至不足以恢复场景单位时间内增加的信息量时,成像将变得更加困难。此时探测器短时间获得的光信号信噪比低,无法成像;而长时间的累积探测会使得待恢复的信息量更大,最终造成信息混叠,更加难以解耦。解决极弱光条件下的动态成像问题,需要从信息论的角度出发,发展更稠密的光学编码方式和压缩比更高的光信息解码算法,提升单个光子可解码的信息量,降低成像所需的光子数,进而在信号光的平均光子数不变的条件下可以用更短的时间对场景成像。

7 结束语

在极弱光条件下获得高质量图像,是光电成像系统研究的基础性难题,也是推动光学成像不断向更大

视场、更远作用距离、更高信息通量蓬勃发展亟待克服的关键技术。提升极弱光条件的成像能力是一个系统性的问题,涉及成像机制研究、光学系统设计、探测器研发、光电信号增强、成像算法开发等诸多方面。既需要基础理论研究的支撑,也需要应用技术的推进。作为一种不同于传统成像的新机制,关联成像在极弱光条件下表现出了显著特性。提升关联成像在极弱光条件下的能力,既可以借鉴传统成像的技术和经验,又需要基于关联成像的机制特点,发展适用于自身的方案方法。关联成像信息编码方式可设计,信息获取方式灵活,为精确解耦信噪光子,并提升单个光子可解耦的信息量,最终从“物质-信息”层面实现大幅提升极弱光条件下的成像能力提供了新的思路和新的机遇。

参考文献:

- [1] Lichtman J W, Conchello J A. Fluorescence microscopy [J]. *Nature Methods*, 2005, 2(12): 910-919.
- [2] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. The james webb space telescope [J]. *Space Science Reviews*, 2006, 123(4): 485-606.
- [3] Kobayashi M, Kikuchi D, Okamura H. Imaging of ultraweak spontaneous photon emission from human body displaying diurnal rhythm [J]. *PLoS One*, 2009, 4(7): e6256.
- [4] Cao W, Che R, Ye D. An illumination-independent edge detection and fuzzy enhancement algorithm based on wavelet transform for non-uniform weak illumination images [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2008, 29(3): 192-199.
- [5] Yeom S, Javidi B, Watson E. Photon counting passive 3 D image sensing for automatic target recognition [J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9310-9330.
- [6] Johnson S D, Moreau P A, Gregory T, et al. How many photons does it take to form an image? [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(26): 260504.
- [7] You L, Yang X, He Y, et al. Jitter analysis of a superconducting nanowire single photon detector [J]. *Aip Advances*, 2013, 3(7): 072135.
- [8] You L. Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(9): 2673-2692.
- [9] Zhou Hui, Zhang Chengjun, Lü Chaolin, et al. Recent progress of imaging applications based on superconducting nanowire single-photon detectors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011005. (in Chinese)

- [10] Kong Lingdong, Zhao Qingyuan, Tu Xuecou, et al. Progress and applications of superconducting nanowire delay-line single-photon imagers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011002. (in Chinese)
- [11] Sciamanda R J. Dirac and photon interference [J]. *American Journal of Physics*, 1969, 37(11): 1128-1130.
- [12] Kirmani A, Venkatraman D, Shin D, et al. First-photon imaging [J]. *Science*, 2014, 343(6166): 58-61.
- [13] Li Zhengping, Ye Juntian, Xin Huang, et al. Single-photon imaging over 200 km [J]. *Optica*, 2021, 8(3): 344-349.
- [14] Morris P A, Aspden R S, Bell J E C, et al. Imaging with a small number of photons [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 5913.
- [15] 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): 073032.
- [16] Zhu Y, Shi J H, Wu X Y, et al. Photon-limited non-imaging object detection and classification based on single-pixel imaging system [J]. *Appl Phys B*, 2020, 126: 21.
- [17] Ma S, Hu C Y, Wang C L, et al. Multi-scale ghost imaging LiDAR via sparsity constraints using push-broom scanning [J]. *Opt Communication*, 2019, 448: 89-92.
- [18] Chen M L, Li E R, Han S S. Application of multi-correlation-scale measurement matrices in ghost imaging via sparsity constraints [J]. *App Opt*, 2014, 53: 13.
- [19] Aßmann M, Bayer M. Compressive adaptive computational ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 1545.
- [20] Yu W K, Li M F, Yao X R, et al. Adaptive compressive ghost imaging based on wavelet trees and sparse representation [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7133-7144.
- [21] Gu J H, Sun S, Xu Y K, et al. Feedback ghost imaging by gradually distinguishing and concentrating onto the edge area [J]. *Chin Opt Lett*, 2021, 19(2): 0411.
- [22] Sun S, Liu W T, Lin H Z, et al. Multi-scale adaptive computational ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 37013.
- [23] Sun S, Lin H Z, Xu Y K, et al. Tracking and imaging of moving objects with temporal intensity difference correlation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27851-27861.
- [24] Xu Y K, Liu W T, Zhang E F, et al. Is ghost imaging intrinsically more powerful against scattering? [J]. *Opti Express*, 2015, 23(26): 32993-33000.
- [25] Wu Yongbo, Yang Zhihui, Tang Zhilie. Experimental study on anti-disturbance ability of underwater ghost imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(6): 0611002. (in Chinese)
- [26] Liu Weitao, Sun Shuai, Hu Hongkang, et al. Progress and prospect for ghost imaging of moving objects [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011001. (in Chinese)
- [27] Gong Wenlin, Sun Jianfeng, Deng Chenjin, et al. Research progress on single-pixel imaging lidar via coherent detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011003. (in Chinese)
- [28] Fu Xiquan, Huang Xianwei, Tan Wei, et al. Correlation imaging research under disturbance of channel airflow [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011017. (in Chinese)
- [29] Goodman, Joseph W. *Statistical Optics*[M]. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [30] 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.
- [31] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [32] 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.
- [33] Liu X F, Chen X H, Yao X R, et al. Lensless ghost imaging with sunlight [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(8): 2314-2317.
- [34] Gong W, Zhao C, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [35] Gong W, Han S. Correlated imaging in scattering media [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [36] Shih Y. *Classical, Semi-classical and Quantum Noise*[M]. Berlin: Springer, 2012: 169-222.
- [37] Shih Y. The physics of ghost imaging: nonlocal interference or local intensity fluctuation correlation? [J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 995-1001.
- [38] Shih Y. The physics of turbulence-free ghost imaging [J]. *Technologies*, 2016, 4(4): 39.
- [39] Klyshko D N. *Photon and Nonlinear Optics* [M]. New York: Gordon and Breach Science Press, 1988.
- [40] Bornman N, Agnew M, Zhu F, et al. Ghost imaging using entanglement-swapped photons [J]. *Quantum Information*, 2019, 5(1): 1-6.
- [41] Zerom P, Chan K W C, Howell J C, et al. Entangled-photon compressive ghost imaging [J]. *Physical Review A*, 2011, 84(6): 061804.
- [42] Li J, Gao W, Qian J, et al. Robust entangled-photon ghost imaging with compressive sensing [J]. *Sensors*, 2019, 19(1): 192.
- [43] Dixon P B, Howland G A, Chan K W C, et al. Quantum ghost imaging through turbulence [J]. *Physical Review A*, 2011, 83(5): 051803.
- [44] Schori A, Shwartz S. X-ray ghost imaging with a laboratory source [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14822-14828.

- [45] 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.
- [46] Deng Chenjin, Gong Wenlin, Han Shensheng. Pulse-compression ghost imaging lidar via coherent detection. [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 25983-25994.
- [47] Deng Chenjin, Pan Long, Wang Chenglong, et al. Performance analysis of ghost imaging lidar in background light environment [J]. *Photonics Research*, 2017(5): 431-435.
- [48] Pan Long, Deng Chenjin, Bo Zunwang, et al. Experimental investigation of chirped amplitude modulation heterodyne ghost imaging. [J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20808-20816.
- [49] Li Dong, Yang Ding, Sun Shuai, et al. Enhancing robustness of ghost imaging against environment noise via cross-correlation in time domain. [J]. *Optics Express*, 2021, 29(20): 31068-31077.
- [50] Yang Ying, Shi Jianhong, Cao Fei, et al. Computational imaging based on time-correlated single-photon-counting technique at low light level [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 009277.
- [51] Liu Y, Shi J, Zeng G. Single-photon-counting polarization ghost imaging [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(36): 10347.
- [52] Liu X, Shi J, Wu X, et al. Fast first-photon ghost imaging [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 5012.
- [53] Liu X, Shi J, Sun L, et al. Photon-limited single-pixel imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8132.
- [54] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52: R3429.
- [55] Aspden R S, Morris P A, He R, et al. Heralded phase-contrast imaging using an orbital angular momentum phase-filter [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055204.
- [56] Tasca D S, Aspden R S, Morris P A, et al. The influence of non-imaging detector design on heralded ghost-imaging and ghost-diffraction examined using a triggered ICCD camera [J]. *Optics Express*, 2013, 21(25): 30460-30473.
- [57] Liu Shikai, Zhou Zhiyuan, Shi Baosen. Progress on optical image edge detection [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011014. (in Chinese)
- [58] Brida G, Genovese M, Berchera I R. Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 227.
- [59] Genovese M. Real applications of quantum imaging [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(7): 073002.
- [60] 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): e17005.
- [61] Valencia Alejandra, Scarcelli Giuliano, D'Angelo Milena, et al. Two-photon imaging with thermal light. [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(6): 063601.
- [62] Yang Dongyue, Wu Guohua, Li Junhui, et al. Image recovery of ghost imaging with sparse spatial frequencies [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(19): 403288.
- [63] Sun Shuai, Liu Weitao, Gu Junhao, et al. Ghost imaging normalized by second-order coherence. [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 5993-5996.
- [64] Wang Fei, Wang Hao, Wang Haichao, et al. Learning from simulation: An end-to-end deep-learning approach for computational ghost imaging. [J]. *Optics Express*, 2019, 27(18): 25560-25572.
- [65] Hu Hongkang, Sun Shuai, Lin Huizu, et al. Denoising ghost imaging under a small sampling rate via deep learning for tracking and imaging moving objects. [J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37284-37293.
- [66] He Y C, Wang G, Dong G X, et al. Ghost imaging based on deep learning [J]. *Sci Rep*, 2018, 8: 6469.
- [67] Wang F, Wang H, Wang H C, et al. Learning from simulation: An end-to-end deep-learning approach for computational ghost imaging [J]. *Opt Express*, 2019, 27: 25560-25572.
- [68] Rizvi S, Cao J, Zhang K Y, et al. DeepGhost: real-time computational ghost imaging via deep learning [J]. *Sci Rep*, 2020, 10: 1140.
- [69] Yang Y, Shi J, Cao F, et al. Computational imaging based on time-correlated single-photon-counting technique at low light level [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 9277-9283.
- [70] Liu H C, Yang H, Xiong J, et al. Positive and negative ghost imaging [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(3): 034019.
- [71] Li G L, Zhao Y, Yang Z H, et al. Positive-negative corresponding normalized ghost imaging based on an adaptive threshold [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(11): 115202.
- [72] Yang H, Wu S, Wang H B, et al. Probability theory in conditional-averaging ghost imaging with thermal light [J]. *Physical Review A*, 2018, 98(5): 053853.
- [73] Cao D Z, Zhang S H, Zhao Y, et al. Zero-photon imaging under extremely low-light illumination [J]. *arXiv preprint*, 2021, 2108: 01037.