

# 基于光子计数的关联成像实验研究

薄遵望<sup>1</sup> 龚文林<sup>1\*</sup> 严毅<sup>2</sup> 韩申生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009

**摘要** 利用光纤分束器和  $N$  个单光子探测器, 提出了一种微弱光探测下的单脉冲光子计数方案。将该光子计数方案与关联成像原理结合, 搭建了一套光子计数探测模式下的关联成像实验平台。实验研究了微弱光探测条件下光子计数的动态范围对关联成像质量的影响, 分析并探讨了基于光子计数的关联成像需进一步深入研究的问题。

**关键词** 成像系统; 关联成像; 光子计数; 统计光学

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.1104001

## Experimental Research of Ghost Imaging Based on Photon Counting

Bo Zunwang<sup>1</sup> Gong Wenlin<sup>1</sup> Yan Yi<sup>2</sup> Han Shensheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China

**Abstract** By utilizing a fiber beam splitter and  $N$  single-photon sensors, a method for single pulse photon counting in the case of weak light signal detection is proposed. Combining the photon counting method and ghost imaging, a ghost imaging platform based on photon counting is established. The effect of dynamic range of the photon counting on the ghost imaging is investigated by experiments, and some problems to be further studied about this method are also discussed.

**Key words** imaging systems; ghost imaging; photon counting; statistic optics

**OCIS codes** 110.2990; 030.5260; 280.3640; 030.6600

## 1 引言

关联成像是一种利用热光场辐照目标, 由一个无空间分辨能力的单像元探测器获取目标返回信号的涨落信息, 通过涨落信息与探测热光场之间的二阶关联运算获取目标图像信息的非局域成像方法<sup>[1-7]</sup>。目前为止, 关联成像中的单像元探测器主要采用工作于线性模式下的光电转换器件, 比如光电倍增管(PMT)、线性模式下的雪崩光电二极管(APD)等<sup>[8-12]</sup>。该类器件输出信号的幅值与输入光强呈线性关系, 不但可以对输入光能进行高灵敏度探测(一般在百光子数量级), 而且能够准确测量输入光的强度涨落。此外, 由于关联成像系统将目标返回信号会聚于同一个单像元探测器且该探测器具备比面阵探测器高得多的探测灵敏度, 同时关联成像技术属于一种凝视成像体制, 因此该技术在遥感探测领域具有重要的应用前景<sup>[8-10, 13-15]</sup>。2012年, Zhao等<sup>[8-9]</sup>在国际上率先实现了室外探测距离 1 km 的高分辨关联成像, 演示了真实大气环境下关联成

**收稿日期:** 2016-04-07; **收到修改稿日期:** 2016-04-21

**基金项目:** 国家 863 计划(2013AA122901)、国家自然科学基金面上项目(61571427)、中国科学院青年创新促进会(2013162)、中航产学研创新资助项目(cxy2014ZKY28)

**作者简介:** 薄遵望(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事关联成像方面的研究。E-mail: zwbo@siom.ac.cn

**导师简介:** 韩申生(1960—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事量子成像和压缩感知关联成像技术等方面的研究。

E-mail: sshan@mail.shcnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: gongwl@siom.ac.cn

像技术具备一定的穿烟雾和改善大气湍流对成像质量影响的能力;2013年,Gong等<sup>[10]</sup>又获得了探测距离1 km的自然场景目标高分辨三维关联成像实验结果。2014年,McCaney<sup>[15]</sup>也报道了探测距离2.33 km的关联成像结果,强调了关联成像抵抗烟雾和热浪的能力。随着遥感成像作用距离需求的提升,在发射能量受限的情况下,当每次测量到达探测器上的目标返回信号弱到几个光子时,基于线性模式下的单像素探测器(比如在1064 nm波段对脉宽为10 ns的脉冲光探测时,目前线性模式探测器的灵敏度最高为24 nW)将难以实现对微弱光子信号(比如1064 nm,10 ns脉冲宽度内的一个光子对应的光功率为18.7 nW)的准确响应。盖革模式下的APD或者超导状态的纳米线探测器可对单光子量级的光信号作出响应并形成巨大的电流输出,可用于微弱光探测模式下的关联成像目标探测。然而,由于此类器件的信号输出形式一般为表征有无光子的晶体管逻辑(TTL)信号,高电平输出代表探测到光子(一般用数字信号1表示),低电平输出代表没有探测到光子(一般用数字信号0表示)。对于关联成像而言,仅有0/1两种状态的光子涨落动态范围太小,同时此类器件的量子效率一般不超过70%,存在较大的探测错误率,将严重影响到关联成像的图像信息获取。因此,开展微弱光探测模式下的光子计数关联成像技术,与线性探测模式下的关联成像技术相比,有望大幅度提升遥感探测作用距离;与0/1探测模式下的关联成像技术相比,有望提升关联成像的图像信息获取能力。

本文利用光纤分束器和 $N$ 个单光子探测器(工作在盖革模式下的APD)构建了一种单脉冲光子计数方案。利用光纤分束器将返回光信号均分为 $N$ 路,每路用一个单光子探测器独立探测,探测后将各路输出信号(0/1)对应相加便可以实现目标回波信号的光子计数功能。将该光子计数方案应用于关联成像技术,搭建了一套光子计数探测模式下的关联成像实验平台并开展了相关的实验研究,并对该方案下的关联成像内在物理机理进行了讨论。

## 2 基本原理

### 2.1 实验装置

图1为基于光子计数的关联成像实验装置示意图,实验装置整体分为发射系统和接收系统两部分。发射系统利用窄脉冲激光照射旋转的毛玻璃形成赝热光场,并经过分束器(BS)分成物光路和参考光路。其中参考光路中的参考透镜 $f_2$ 将光阑 $S$ 面处的赝热光场成像到参考相机CCD上,由该相机记录赝热光场的空间分布信息。物光路中的发射透镜 $f_1$ 将光阑 $S$ 面处的赝热光场成像到目标上,经目标反射后的光子由一个接收望远镜会聚于光子计数模块(PCM)上,由该PCM对回波信号进行光子计数探测。需要强调的是,该PCM由一个光纤 $N$ 路分束器和 $N$ 个单光子探测器组成。实验过程中,赝热光源、参考光路中的CCD和接收系统中的PCM等均由自主开发的同步控制器及现场可编程门阵列核心板(FPGA)进行控制,通过计算机发布指令给FPGA核心板,从而达到控制整个实验装置的目的。由于每次探测时CCD记录的光场分布和投射到目标上的光场分布是关联的,因此通过CCD记录的光场空间分布与PCM记录的光子计数分布进行关联运算,可以获取目标的空间分布信息。

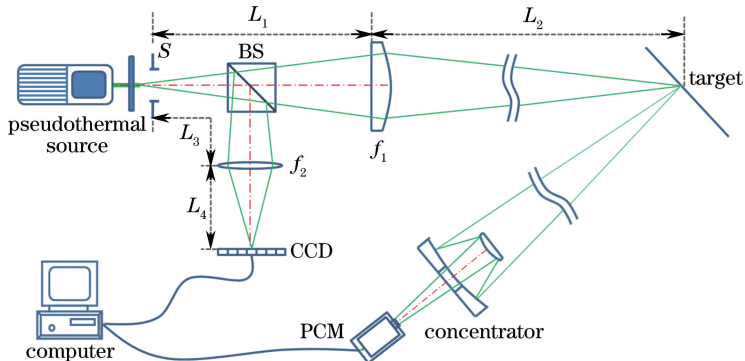


图1 基于光子计数的关联成像实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup for the ghost imaging based on photon counting

## 2.2 光子计数模块结构

与传统关联成像装置相比,该实验装置的核心部件在于接收系统中能实现单脉冲光子计数功能的PCM。图 2(a)为基于光纤分束器和  $N$  个单光子探测器(工作在盖革模式的 APD)的光子计数方案示意图,接收望远镜收集到的微弱光信号经中心波长 532 nm 的滤光片(带宽 1 nm)滤光后,通过光纤耦合器耦合进入  $N$  路光纤分束器的输入光纤。 $N$  路光纤分束器将返回光信号等比例(误差小于 10%)分成  $N$  路,分束后的每一路由单光子探测器同步探测,APD 输出的 TTL 电平信号由多通道计数器并行计数。实验过程中,计数器在门控信号的控制下准确开关,不但可以对每路 APD 的输出信号准确计数,而且可以利用门控的选通作用大大降低 APD 暗计数所引入的误差。一次探测过程中如果某一路有光子进入 APD,则该路会输出一个高电平信号并记为 1;如果没有光子进入则该路输出一个低电平信号并记为 0。一次探测过程完成后,所有探测器的输出值相加便会得到  $0 \sim N$  之间的数值,该数值代表了此次探测过程中有几路有光子进入,从而实现了光子计数的功能。图 2(b)为光纤分束器实物照片。

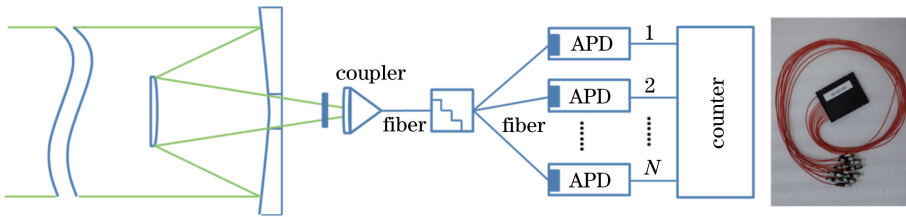


图 2 (a)光子计数方案示意图;(b)光纤分束器实物照片

Fig. 2 (a) Diagram of the photon counting method; (b) photograph of the fiber beam splitter

## 3 实验结果

利用图 1 所示的实验装置,进行了基于光子计数的关联成像实验。实验装置的具体参数如下:入射激光波长  $\lambda = 532$  nm,激光脉宽为 10 ns,发射透镜  $f_1$  的焦距为 5 m,接收望远镜焦距为 477 mm,发射透镜与探测目标之间的距离  $L_2 = 2$  km,参考光路中的成像放大率为  $1 \times$ ,光纤耦合器的型号为 Thorlabs 公司生产的 PAF-SMA-5-A,输入光纤为内芯直径为  $105 \mu\text{m}$  并且数值孔径为 0.22 的多模光纤。由接收系统的拉氏不变量换算可知,接收望远镜的通光口径为 60 mm,接收视场发散角为  $1.32'$ 。实验中调节发射系统的发射角至  $1.03'$ ,保证接收系统可以接收到发射视场中的所有信息。成像目标如图 3(a)所示,为 4 个正方形组成的物体,每个正方形的边长为 5 cm,相邻正方形在水平方向和竖直方向上的中心间隔都为 10 cm。对于类似稀疏度的成像目标,通过模拟研究发现,  $2 \sim 3$  bit 的探测动态范围足以实现关联成像对该目标的清晰成像,所以实验时光子计数模块结构中的 APD 数目  $N = 6$ ,所采用 APD 的型号为 SPCM-AQRH-16,量子效率在 532 nm 为 50%,图像重构采用差分关联算法<sup>[13]</sup>。图 3(b1)~(b6)为 15000 次采样时物光路不同光子计数动态范围内对应的统计分布直方图,可以看出,随着光子计数动态范围的增加,目标返回信息在各个光子计数值上的分布趋于高斯统计分布,不再集中于某个数值上而导致信息的大量丢失,如图 3(b1)中的 0 值。探测时信息量的提升将可以有效改善关联成像的重构质量,如图 3(c1)~(c6)和图 3(d1)~(d6)所示,随着光子计数动态范围的增加,关联成像的对比度逐渐提升,其中图 3(c1)~(c6)的采样次数为 6000,图 3(d1)~(d6)的采样次数为 15000。另外,对比图 3(c1)~(c6)和图 3(d1)~(d6)还可以发现,当采样数足够多并且目标的有效反射截面较小时,随着光子计数的动态范围达到一定数量,其重构信噪比将趋于稳定。

为了定量说明关联图像的重构质量,采用了文献[16]的信噪比(SNR)定义进行评估,

$$R_{\text{SN}} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \frac{I(i, j)_{\text{max}} - I(i, j)}{I(i, j)_{\text{max}} + I(i, j)}, \quad (1)$$

式中  $N_x$  和  $N_y$  分别表示二维重构图像在横向和纵向上的像元数,  $I(i, j)$  为像元  $(i, j)$  的灰度值,  $I(i, j)_{\text{max}}$  为所有灰度值的最大值。SNR 的数值反应了重构图像的对比度,其数值越大则代表图像的对比度越高。按照(1)式分别计算图 3(c1)~(c6)和图 3(d1)~(d6)的信噪比,计数动态范围分别为  $0 \sim 1, 0 \sim 2, 0 \sim 3, 0 \sim 4, 0 \sim 5, 0 \sim 6$ ,结果如图 4 中的蓝色曲线和红色曲线所示,红色曲线对应的采样次数为 15000 次,蓝色曲线对

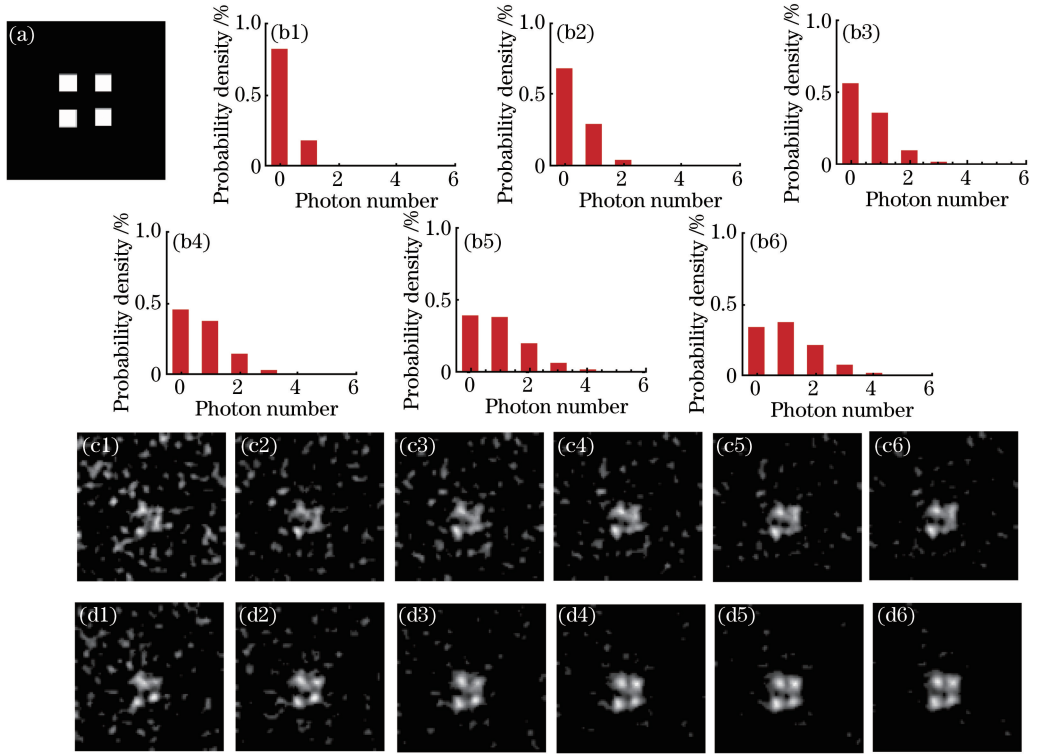


图 3 不同光子计数动态范围下的关联成像结果。(a)原始物体示意图;(b1)~(b6)采样次数为 15000 时的统计分布直方图;(c1)~(c6)采样次数为 6000 时的关联成像结果;(d1)~(d6)采样次数为 15000 时的关联成像结果

Fig. 3 Ghost imaging results correspond to different dynamic ranges of photon counting. (a) Diagram of the object; (b1)-(b6) statistical distribution histogram when sampling number is 15000; (c1)-(c6) ghost imaging results when sampling number is 6000; (d1)-(d6) ghost imaging results when sampling number is 15000

应的采样次数为 6000 次。当采样次数只有 6000 次时,蓝色曲线对应的图 3(c1)~(c6)结果的信噪比随光子计数动态范围的增加迅速上升,而采样次数为 15000 次时,红色曲线对应的图 3(d1)~(d6)结果的信噪比变化则相对平缓,尤其是当计数动态范围增加到 0~5 和 0~6 时,红色曲线的斜率趋于水平。该结论与图 3(c1)~(c6)和图 3(d1)~(d6)所示的定性结果相吻合。

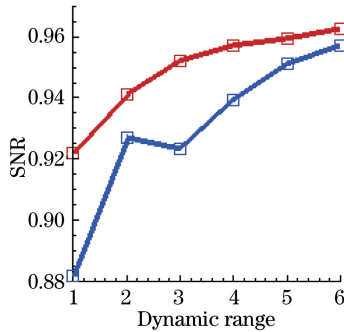


图 4 光子计数动态范围对关联成像质量的影响

Fig. 4 Influence of the dynamic range of photon counting on the ghost imaging quality

对于微弱光探测模式下的关联成像而言,由图 3 中的实验结果可知,即使每次经目标反射后进入探测器的光子数仅有几个,但只要较为精确地探测到该条件下的光场涨落信息,通过关联成像技术也是可以获取目标的高质量图像,从而验证了在发射能量不变的条件下,基于光子计数的关联成像技术可以大幅度提升关联成像的探测距离。然而,若仅采用一个单光子探测器对目标返回信号进行探测,一方面探测器自身的量子效率会影响信号 0/1 判断的准确性,另一方面仅有 0/1 两种状态的光子涨落动态范围太小,整体上导致系统探测信息失真较大,从而关联成像的图像信噪比较低。此外,虽然实验验证了微弱光探测条件下光子计数关联



成像的可行性,但是还有诸多原理性的问题需要进一步研究。其中一个首要问题是,单脉冲光子计数方案探测到的光子数涨落能够表征辐照光场强度涨落的前提是假设环境和系统等因素对光场的衰减是恒定的,并且  $N$  路光纤分束器对微弱光的均分作用也是高概率事件,然而在实际应用中非理想因素对探测精度的影响还有待进一步深入研究。另外,探测器量子效率与光子计数关联成像的关系、光源的统计分布特性对光子计数的影响、关联成像图像重构算法(比如波动相关关联成像、差分关联成像、对应成像、归一化关联成像)、目标的反射截面大小等对光子计数关联成像质量的影响、光子计数的动态范围达到多少时足够精确表征目标的图像信息等,都需在以后的研究中进行详细分析和讨论。

## 4 结 论

介绍了一种利用光纤分束器将光信号均分为  $N$  路,通过  $N$  个单光子探测器同时探测的光子计数方案,并利用该方案实现了光子计数模式下的关联成像。实验结果不但验证了微弱光探测模式下光子计数关联成像的可行性,而且证明了个位数的光子计数涨落仍可以获取目标的高质量图像。基于光子计数的关联成像技术为更远距离的遥感探测提供了一种可行的途径,具有重要的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Kaige, Cao Dezhong, Xiong Jun. Progress in correlated optics[J]. *Physics*, 2008, 37(4): 223-232.  
汪凯戈, 曹德忠, 熊俊. 关联光学新进展[J]. *物理*, 2008, 37(4): 223-232.
- 2 Zhang D, Chen X, Zhai Y, *et al.* Correlated two-photon imaging with true thermal light[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(18): 2354-2356.
- 3 Shapiro J H, Boyd R W. The physics of ghost imaging[J]. *Quantum Information Processing*, 2012, 11(4): 949-993.
- 4 Gong W, Zhang P, Shen X, *et al.* Ghost "pinhole" imaging in Fraunhofer region[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(7): 071110.
- 5 Tang Wenzhe, Cao Zhengwen, Shi Jianhong, *et al.* Back-side correlation imaging with digital micro mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0511004.  
唐文哲, 曹正文, 石剑虹, 等. 基于数字微镜器件的“后视”关联成像[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0511004.
- 6 Li Dong, Cang Ji, Xia Xinxing, *et al.* Investigation on back-modulation long distance three-dimensional imaging based on compressed sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0111002.  
李东, 仓吉, 夏新星, 等. 基于压缩感知的后调制远距离三维成像研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0111002.
- 7 Xiang Qing, Yang Kecheng, Yu Long, *et al.* Reflective underwater ghost imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711002.  
项青, 杨克成, 于龙, 等. 反射式水下量子成像[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711002.
- 8 Zhao C, Gong W, Chen M, *et al.* Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- 9 Chen M, Li E, Gong W, *et al.* Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere[J]. *Optics and Photonics Journal*, 2013, 3(2): 83-85.
- 10 Gong W, Zhao C, Jiao J, *et al.* Three-dimensional ghost imaging lidar[J]. *arXiv*: 1301.5767, 2013.
- 11 Zhang X, Xie L, Zhang Y, *et al.* Optimization of long-period grating-based refractive index sensor by bent-fiber interference[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): 9152-9156.
- 12 Du Keming, Jiang Yuanda, Chen Ying, *et al.* Photon-counting imaging system based on compressive sensing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 363-368.  
杜克铭, 蒋远大, 陈颖, 等. 基于传感的光子计数成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 363-368.
- 13 Erkmén B I. Computational ghost imaging for remote sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(5): 782-789.
- 14 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.
- 15 McCaney K. Arl's "ghost imaging" cuts through battlefield turbulence[EB/OL]. [2016-04-01]. <https://defensesystems.com/articles/2014/01/06/arl-quantum-ghost-imaging.aspx>.
- 16 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.