

## 焦距对计算关联成像质量影响的实验研究

彭宏韬<sup>1</sup>, 杨照华<sup>1</sup>, 李大鹏<sup>1</sup>, 吴令安<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 光物理重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 传统光学成像要求像面在成像透镜组的焦平面上, 以此获得最大的光通量, 因此焦距对成像质量影响较大。研究了焦距对计算关联成像成像质量的影响, 搭建计算关联成像系统, 利用桶探测器信号的强度涨落分析不同焦距下的关联成像结果, 分析了背景光强对强度涨落的影响。结果表明: 焦距和背景光强的变化对计算关联成像成像质量影响不大, 解决了热光关联成像中两光臂不等形成的散焦造成成像质量下降的问题, 并且该成像只用一个无空间分辨能力的探测器就能完成高分辨率成像, 降低了对探测器分辨能力的要求, 避免了光通量在维度上的分配, 提高了信噪比, 且无需成像透镜, 该成像方式非常适合用于极弱背景下的成像探测。

**关键词:** 计算关联成像; 焦距; 背景光强; 强度涨落

**中图分类号:** O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0824003

## Experimental study on effect of focal length on quality of computational ghost imaging

Peng Hongtao<sup>1</sup>, Yang Zhaohua<sup>1</sup>, Li Dapeng<sup>1</sup>, Wu Ling'an<sup>2</sup>

(1. School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Laboratory of Optical Physics, Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Conventional optical imaging require the image plane at the focal plane of the imaging lens group to get the maximum flux. So the focal length has great impact on imaging quality. In order to investigate the influence of focal length on quality of computational ghost imaging, the experiment of computational ghost imaging was constructed, and the probability density of the measurement of bucket detector was utilized to analyze the results of computational ghost imaging with different focal length and background light. The results show that the variation of focal length and background light have little effect on the quality of computational ghost imaging, which solve the problem that the defocus lead to the deterioration of quality caused by the inequality of two optical path in traditional ghost imaging. Computational ghost imaging can be realized without imaging lens and only using a bucket detector, thus avoiding the allocation of flux on the pixel dimension as well as improving the signal-to-noise ratio.

收稿日期: 2015-12-05; 修订日期: 2016-01-03

基金项目: 总装预研基金(37708901)

作者简介: 彭宏韬(1991-), 男, 硕士生, 主要从事计算关联成像方面的研究。Email: zy1317208@buaa.edu.cn

导师简介: 杨照华(1975-), 女, 副教授, 博士, 主要从事量子成像探测、气动光学、航天器导航制导方面的研究。

Email: yangzh@buaa.edu.cn

Therefore, computational ghost imaging is very suitable for imaging detection under the extremely weak background.

**Key words:** computational ghost imaging; focal length; background light intensity; intensity fluctuation

## 0 引言

关联成像,也称鬼成像,作为一种新型的成像方式颇受研究人员广泛关注。其强度关联测量原理最早可以追溯到 1956 年 Hanbury Brown 和 Twiss<sup>[1]</sup>使用强度关联干涉仪代替传统的迈克尔逊干涉仪测量恒星角直径,这种方法能够减少大气扰动对星体观测的影响。随后 Pittman 等<sup>[2]</sup>利用自发参量下转换产生纠缠光子对完成了关联成像实验,验证了非定域特性。实验中纠缠光子对被分开进入两个系统,即物臂和参考臂。物体放置于物臂中,透过物体的信息被无空间分辨能力的桶探测器记录,参考臂中有空间分辨能力的点探测器记录光场分布,将两探测器得到的信息进行符合测量,实现对物体的成像。

由于纠缠光源制备困难,量子关联成像在目前的技术条件下难以投入实际应用,并且一度被认为是量子光学所特有的性质。直到 Bennink 等<sup>[3]</sup>利用小角度摆动的转镜模拟“热光源”完成了赝热光关联成像,证明经典热光源也可以实现关联成像,且赝热光源制备简单,更适合实际应用的需求。随后研究人员又实现了无透镜傅里叶变换关联成像<sup>[4]</sup>和无透镜太阳光关联成像<sup>[5]</sup>。与传统光学成像相比,关联成像还被证明成像分辨率高<sup>[6]</sup>,这使其在许多领域都有着潜在的应用前景。

传统的热光关联成像中物臂和参考臂两光臂必须相等,这一点极大的限制了关联成像的实际应用。Katz O 等使用空间光调制器完成了计算关联成像实验<sup>[7]</sup>。由于空间光调制器可以人为控制,其预先加载的数据是已知的,省去了参考臂的测量,解决了双臂必须相等的问题。这种成像方法已被用于单像素相机成像系统<sup>[8]</sup>,并且被证明仅使用单光子探测器就能完成极弱光下成像<sup>[9-10]</sup>。此外,研究人员还针对关联成像成像质量和成像速度等问题提出了一系列改进的实验方案和方法<sup>[11-12]</sup>。

在关联成像应用研究中,必须探究各种因素对

成像质量的影响,目前的研究大都针对热光关联成像,研究了探测器大小,两光臂长度<sup>[13]</sup>和毛玻璃转速<sup>[14]</sup>等对成像的影响。文中搭建计算关联成像系统,依据传统光学成像中成像质量易受焦距变化的影响,实验分析焦距对关联成像的影响,探究了影响成像质量的部分因素。

## 1 实验原理

关联成像原理图如图 1 所示,成像结果可以通过参考臂有空间分布能力的点探测器记录的散斑分布  $I_R(x_R)$ ,以及物臂无空间分布能力的桶探测器记录的总光强值  $S_B$  进行关联运算获得:

$$G^{(2)} = \langle S_B I_R(x_R) \rangle \quad (1)$$

式中: $\langle \dots \rangle$ 为平均算符; $x_R$ 为参考臂上所在空间位置坐标。

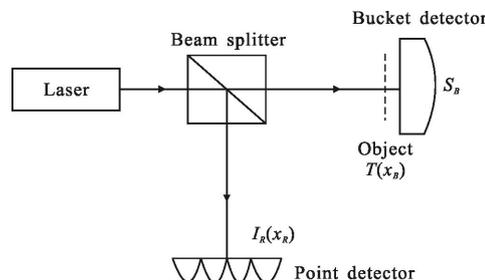


图 1 关联成像原理图

Fig.1 Schematic diagram of ghost imaging

关联成像中桶探测器信号又可定义为:

$$S_B = \int_{A_{beam}} I_B(x_B) T(x_B) d^2x_B \quad (2)$$

式中: $x_B$ 为物体的空间位置; $I_B(x_B)$ 为物体上的光强分布; $T(x_B)$ 为物体的透过率函数; $A_{beam}$ 为相干光束的面积大小。

参考探测器信号定义为:

$$S_R = \int_{A_{beam}} I_R(x_R) d^2x_R \quad (3)$$

在理想状态下  $I_B(x_B) = I_R(x_R)$ ,因此物体瞬时透过率函数可以表示为  $T = \langle S_B \rangle / \langle S_R \rangle$ 。

若利用差分桶探测器信号:

$$S_{\Delta} = \int_{A_{\text{bun}}} I_B(x_B) \delta T(x_B) d^2x_B = S_B - \frac{\langle S_B \rangle}{\langle S_R \rangle} S_R \quad (4)$$

其中  $\delta T(x_B) = T(x_B) - \bar{T}$ , 代替原始的  $S_B$ , 最终得到差分关联成像(DGI)结果如下<sup>[15]</sup>:

$$\text{DGI} = \langle \delta S_{\Delta} \delta I_R(x_R) \rangle = \langle S_B I_R(x_R) \rangle - \frac{\langle S_B \rangle}{\langle S_R \rangle} \langle S_R I_R(x_R) \rangle \quad (5)$$

差分关联中桶探测器信号中的积分由物体的透过率变成了物体透过率变化的差分信号。差分关联从信噪比的角度分析, 可以看作是减去了一个近似于噪声的变量, 因此差分关联成像可以看作一种去除噪声的方法, 使关联成像质量得到提高。文中的计算关联成像系统采用差分关联算法, 由于参考臂信息是已知的, 对于不同的物体, 就可得到不同的桶探测器测量值, 所以可以根据桶探测器信号来分析成像结果。

## 2 实验设计

关联成像采用的光源波长分布极广, 从 X 射线到太赫兹波段都可以实现关联成像。文中以工程应用为目标, 综合考虑大气吸收特性, 选择近红外波段激光作为光源。具体光路设计如图 2 所示, 选取 YAG 固体连续激光器作为实验光源, 激光器波长 1 064 nm, 功率 0~100 mW 可调。激光经对向放置的反射镜调节准直后入射到扩束透镜, 经透镜扩束后照射到空间光调制器。

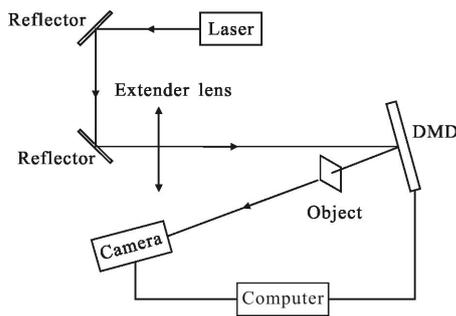


图 2 计算关联成像光路设计图

Fig.2 Optical design diagram of computational ghost imaging

空间光调制器选用数字微镜器件(DMD)。DMD 芯片由铝合金材质的微镜构成, 大小为 1 024×768 个像素, 每个微镜对应着一个像素, 微镜能够 ±12° 翻转, 并且翻转快速等间隔, 利用反射原理进行二进制光学调制。实验中使用的微镜大小为 256×256 个像

素, 将 Matlab 生成的已知二进制随机矩阵加载到 DMD 板载内存中设置 DMD 微镜的翻转状态, 随机矩阵中每个随机单元对应 16 个像素。激光入射到随机翻转的 DMD 微镜镜面被调制成随机光场, 光场照射到物体后的透射光被相机接收。将相机采集到的图像进行积分求和作为桶探测器的测量值, 加载到 DMD 中的二进制随机矩阵作为参考探测器的测量值, 二者进行关联运算得到物体的像。

桶探测器采用高速 COMS 相机, 配备了大视场镜头, 收集光能力强。实验中相机采集卡接收由 DMD 板卡输出的外部触发信号, 保证相机采集的信号与加载到 DMD 中的数据是同步的, 确保关联运算的正确性。

## 3 实验结果及分析

在传统的光学成像系统中, 要想获得清晰的像, 必须进行调焦, 散焦会大幅度降低成像质量。为了分析焦距对计算关联成像的影响, 在激光器电流和相机曝光时间不变的情况下, 通过调节相机镜头的焦距来模拟实际光学系统中不同的聚焦效果, 在计算关联成像系统下得到不同焦距下的成像结果如图 3

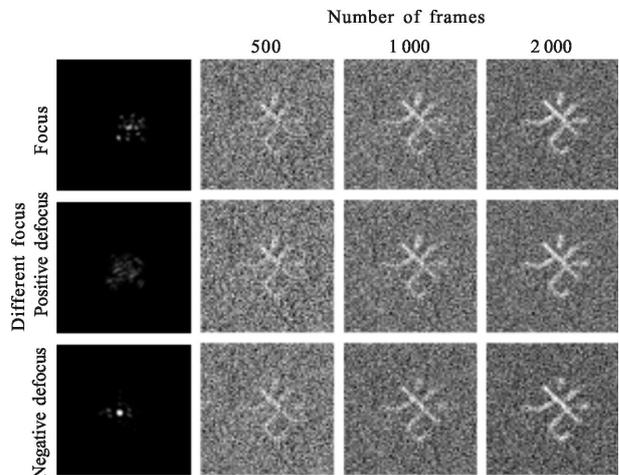


图 3 不同焦距下的计算关联成像结果

Fig.3 Computational ghost imaging results with different focal length

所示。定义收集透镜焦距大于实际聚焦焦距时称为正散焦, 反之称为负散焦。第一列是使用相机对二值物体“光”字掩膜的直接聚焦拍摄的结果。聚焦时, 透射过物体被相机探测到的光场是不断变化的, 可以大致看出物体的轮廓。当出现散焦时, 传统的光学成像已无法得到物体的像, 但通过差分关联仍然可以

得到物体的像，其成像质量明显好于直接在焦平面上的像。图中第 2~4 列每一列对应的采样帧数为 500, 1 000, 2 000。

为了定量分析实验结果,引入信噪比(SNR)的定义<sup>[16]</sup>:

$$SNR = \frac{\sum_{m,n=1}^{M,N} [T_0(m,n) - \bar{T}_0]^2}{\sum_{m,n=1}^{M,N} [T(m,n) - T_0(m,n)]^2} \quad (6)$$

式中:  $M \times N$  为待成像图像的大小;  $T_0(m,n)$  和  $T(m,n)$  分别表示物体的透过率矩阵和成像结果;  $\bar{T}_0 = \frac{1}{MN}$

$\sum_{m,n=1}^{M,N} T_0(m,n)$  表示物体的平均灰度。不同焦距下的信噪比分析结果如表 1 所示, 每一行表示不同的焦距, 每一列对应的采样数为 500, 1 000, 2 000。可以看出随着采样数的增加, 不同焦距下的成像信噪比都不断提高, 计算关联成像质量明显好于传统成像。不同于传统热光关联成像中两光臂不相等造成的散焦会造成成像质量降低<sup>[6]</sup>, 计算关联成像中收集透镜的散焦对成像质量无明显影响, 从实验上验证了计算关联成像解决了热光关联成像中两光臂必须相等的问题。

表 1 不同焦距下的信噪比

Tab.1 SNR of different focal lengths

Different focal lengths	SNR		
Focus	0.574 0	0.665 8	0.748 4
Positive defocus	0.593 1	0.653 1	0.777 3
Negative defocus	0.588 2	0.726 6	0.843 7

下面通过桶探测器信号强度分布来分析实验结果。图 4 表示在不同焦距下, 桶探测器接收到的总光强概率密度分布和使用差分关联算法后的差分总光强概率密度分布。可以看出不同焦距下桶探测器信号绝对分布是不同的, 但均存在强度涨落, 强度涨落决定了最终的成像结果。

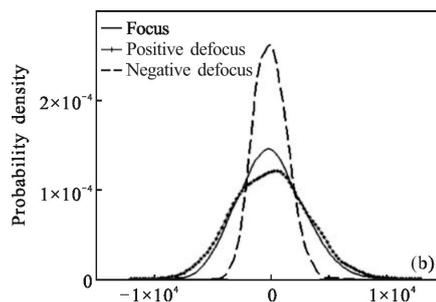
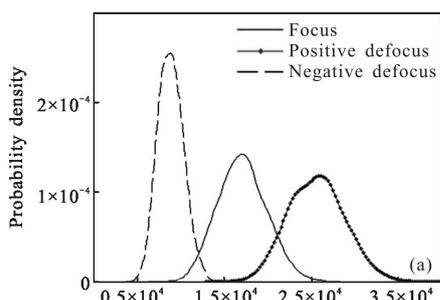


图 4 不同焦距下桶探测器信号的概率密度分布

Fig.4 Probability density distribution of bucket detector with different focal lengths

为了进一步说明强度涨落对计算关联成像的影响, 改变桶探测器接收到的信号强度。在其他条件不变的情况下, 分别在暗室、明亮环境和暗室中外加光源三种不同的背景光强下进行计算关联成像实验, 实验结果如图 5 所示, 表 2 为对应的信噪比分析结果。

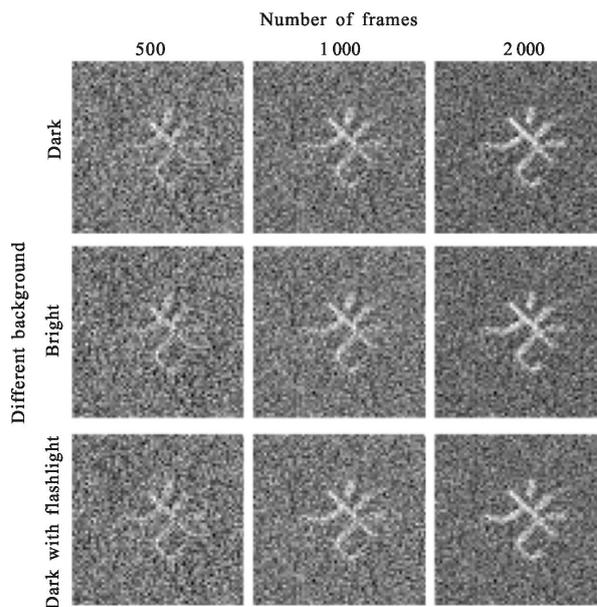


图 5 不同背景光强下的计算关联成像结果

Fig.5 Computational ghost imaging results with different backgrounds

表 2 不同背景光强下的信噪比

Tab.2 SNR of different backgrounds of light intensity

Different backgrounds	SNR		
Dark	0.574 0	0.665 8	0.748 4
Bright	0.609 5	0.629 5	0.765 6
Dark with flashlight	0.597 4	0.615 4	0.721 7

从上述成像结果和信噪比结果可知,随着采样帧数的增加,计算关联成像质量得到提高,背景光强的改变对成像结果无明显影响,计算关联成像对背景光强的变化表现出了一定的抗干扰作用。如图 6 所示,仍然通过绘制不同背景光强下的桶探测器信号分布曲线来分析实验结果。

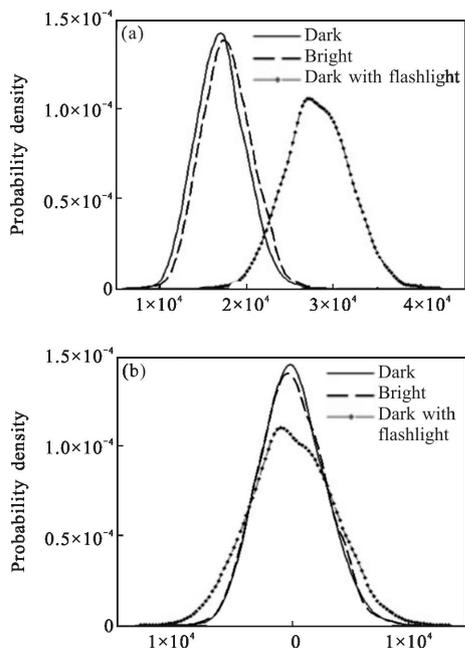


图 6 不同背景光强下桶探测器信号的概率密度分布

Fig.6 Probability density of measurement of bucket detector with different backgrounds of light intensity

实验结果表明:不同的背景光强改变了桶探测器信号的大小,但其仍然存在涨落,所以最终的成像结果无明显变化。计算关联成像使用桶探测器更加容易探测到弱光,只要探测器信号存在涨落,就能完成成像,因此计算关联成像非常适合极弱背景下的成像。

实验分析了焦距对计算关联成像的影响,并分析不同背景光强下的成像结果,根据桶探测器信号的分布特点,得出以下结论,只要桶探测器信号存在强度涨落,焦距对计算关联成像结果无明显影响。

#### 4 结论

文中搭建基于近红外光源的计算关联成像实验系统,得到不同焦距和背景光强下的计算关联成像结果和成像信噪比,并从桶探测器信号的强度分布进行实验分析。研究结果表明,焦距和背景光强的改

变影响了桶探测器的测量值,但只要其强度涨落存在,即使在收集透镜出现散焦或背景光强发生变化时,计算关联成像仍然可以得到较好的成像效果,成像信噪比无明显变化,体现了关联成像可以实现无透镜成像的优势,并且与传统成像相比,使用桶探测器探测总光强更加容易实现。此外,传统热光关联成像中两光臂必须相等,否则成像质量会下降,计算关联成像很好的解决了这个问题,更加容易投入实际应用。因此,这一新型的成像探测方法对于极弱背景下的红外成像探测有着很重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] Brown R H, Twiss R Q. A test of a new type of stellar interferometer on Sirius[J]. *Nature*, 1956, 178(4541): 1046–1048.
- [2] 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(5): R3429–3432.
- [3] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601.
- [4] Zhang M, Wei Q, Shen X, et al. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light [J]. *Physical Review A*, 2007, 75(2): 021803.
- [5] Liu X F, Chen X H, Yao X R, et al. Lensless ghost imaging with sunlight[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2314–2317.
- [6] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3145–3153. (in Chinese)
- 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3145–3153.
- [7] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.
- [8] Chen Tao, Li Zhengwei, Wang Jianli. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(11): 2523–2530. (in Chinese)
- 陈涛, 李正伟, 王建立. 应用压缩感知理论的单像素相机成像系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2523–2530.
- [9] Du Keming, Jiang Yuanda, Chen Ying, et al. Photoncounting imaging system based on compressive sensing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 363–368. (in Chinese)
- 杜克铭, 蒋远大, 陈颖, 等. 基于压缩传感的光子计数成像系统[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 363–368.

- [10] Yu Wenkai, Yao Xuri, Liu Xuefeng, et al. Compressed sensing for ultra-weak light counting imaging [J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(10): 2283–2292. (in Chinese)  
俞文凯, 姚旭日, 刘雪峰, 等. 压缩传感用于极弱光计数成像[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2283–2292.
- [11] Zhu Ming, Gao Wen, Guo Liqiang. Application of compressed sensing theory in image processing [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(5): 441–447. (in Chinese)  
朱明, 高文, 郭立强. 压缩感知理论在图像处理领域的应用[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 441–447.
- [12] Guo Shuxu, Zhang Chi, Cao Junsheng, et al. Object reconstruction by compressive sensing based normalized ghost imaging [J]. *Opt Precision Eng*, 2015, 23(1): 288–294. (in Chinese)  
郭树旭, 张弛, 曹军胜, 等. 基于压缩感知归一化关联成像实现目标重构[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1): 288–294.
- [13] Luo Chunling, Lin Jie, Cheng Jing. Experimental investigation on the effects of the detector size and defocusing length on lensless ghost diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 29–34. (in Chinese)  
罗春伶, 林洁, 程静. 实验研究探测器大小与散焦长度对无透镜鬼衍射的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 29–34.
- [14] Wang Sen, Li Hongguo, Zhang Dejian, et al. The influence of rotational speed of ground-glass on the quality of ghost imaging with thermal light [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2015, 21(1): 9–13. (in Chinese)  
王森, 李洪国, 张德建, 等. 毛玻璃转速对热光鬼成像质量的影响[J]. *量子光学学报*, 2015, 21(1): 9–13.
- [15] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [16] Russ J C. *The Image Processing Handbook* [M]. Florida State: CRC Press, 2011.