

基于数字微镜器件的光子计数对应鬼成像

曹 飞¹ 石剑虹¹ 杨 莹¹ 曾贵华^{1,2}

¹上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北斗导航与位置服务上海市重点实验室,
量子信息感知与处理研究中心, 上海 200240

²西北大学信息科学与技术学院, 陕西 西安 710100

摘要 提出了一种基于数字微镜器件的光子计数对应鬼成像方案。该方案采用数字微镜器件对光源进行调制, 通过时间相关单光子计数技术获取光子计数值, 并利用对应鬼成像算法计算目标物体的像。结合鬼成像理论和对应鬼成像理论阐明了光子计数对应鬼成像原理, 并通过实验对该方案进行了验证。研究表明, 该方案能够实现弱光成像。利用该方案可以获得与传统鬼成像效果相当的成像质量, 但降低了图像重建过程中的计算量和算法复杂度。此外, 该方案略去了阵列探测器对光强分布的测量, 利用一个不具有空间分辨率的单光子探测器结合对应鬼成像算法, 即可得目标物体的像, 同时也能获得目标的距离信息。

关键词 成像系统; 鬼成像; 对应鬼成像; 光子计数; 数字微镜器件

中图分类号 O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0111004

Correspondence Ghost Imaging via Photon Counting Based on Digital Micromirror Device

Cao Fei¹ Shi Jianhong¹ Yang Ying¹ Zeng Guihua^{1,2}

¹State Key Laboratory of Advanced Optical Communication System and Networks, Shanghai Key Laboratory on Navigation and Location-based Service, and Center of Quantum Information Sensing and Processing, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

²College of information Science and Technology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China

Abstract The correspondence ghost imaging scheme via photon counting based on micromirror device is proposed. In this scheme, a digital micromirror device is used to module the light source, the time-correlated single photon counting technology is introduced to acquire the photon counting value, and correspondence ghost imaging is used to calculate the image of target object. The principle of correspondence ghost imaging via photon counting is clarified with ghost imaging theory and correspondence ghost imaging theory, and the proposed scheme is verified by experiments. The research results show that the proposed scheme can realize weak light imaging. The images achieved by the proposed scheme are as good as those by traditional ghost imaging while the computational complexity in the process of image reconstruction is reduced. Besides, the measurement of intensity distribution by array detector is omitted in the proposed scheme and the image of target object is acquired with a single photon detector which has no spatial resolution, combined with correspondence ghost imaging algorithm. In the meantime, the proposed scheme can provide distance information of the object.

Key words imaging systems; ghost imaging; correspondence ghost imaging; photon counting; digital micromirror device

OCIS codes 110.1758; 030.5260; 110.3010

收稿日期: 2015-08-17; 收到修改稿日期: 2015-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(61471239)

作者简介: 曹 飞(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事关联成像方面的研究。E-mail: caofei_kevin@163.com

导师简介: 石剑虹(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事关联成像方面的研究。E-mail: purewater@sjtu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

鬼成像,即关联成像,是近十年来兴起的一种新的光学成像方式^[1-23]。1995年Pittman等^[1]通过自发参量下转换获得的纠缠光子对实现了基于纠缠光源的鬼成像,之后学者们通过研究证实了赝热光和热光也能够用于鬼成像^[2-7]。2009年Bromberg等^[8]根据Shapiro提出的方案实现了计算鬼成像^[9],该方案通过空间光调制器预置光源,从而略去了阵列探测器对光强分布的测量,利用一个不具有空间分辨率的单像素探测器结合鬼成像算法即可得到目标的像。此后也有一些改进的鬼成像方案被提出来,如差分鬼成像^[10]、压缩感知鬼成像^[11]、对应鬼成像(CGI)^[12-13]等。鬼成像是一种非局域的成像方式^[12],具有抗干扰能力强^[14]以及能穿透散射介质^[15]成像等优点,因而获得了广泛的关注,在遥感测量领域^[16]有很好的应用前景。

在对应鬼成像方案中,通过阈值判别^[13]或排序^[12]的方法,将光强涨落较大的采样对应的强度分布信息挑选出来用于成像,可以降低图像重建所使用的数据量和计算量,同时获得较好的成像质量。本文提出了一种基于数字微镜器件(DMD)的光子计数对应鬼成像方案,不同于文献[12、13]中的对应鬼成像方案,该方案中不需要使用电荷耦合器件(CCD)对光强分布进行测量,利用不具有空间分辨率的单光子雪崩光电二极管(SAPD)结合对应鬼成像算法即可实现对应鬼成像,此外,该方案中采用了时间相关单光子计数^[24](TCSPC)技术,因而利用该方案可以实现弱光鬼成像,同时能够获得目标物体的位置信息。通过实验对该方案进行了验证,并对系统的性能以及影响成像质量的一些因素进行了探讨。

2 基本原理

在典型的热光鬼成像方案中,光源发出的光被分束器分为两路,分别称作信号臂和参考臂,被测物体放在信号臂中,在信号臂中利用桶探测器测量物体上的透射光光强,在参考臂中利用CCD同步测量参考光的强度分布信息,然后对两路信号进行二阶关联计算即可得目标物体的图像信息^[15]。假设测量次数为 M ,桶测量得到的光强值为 $B_i(1 \leq i \leq M)$,对应的由CCD测得的光强分布信息为 $I_i(x,y)(1 \leq i \leq M)$,根据传统鬼成像(TGI)算法,目标物体的图像信息可表示为^[8]

$$O(x,y) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (B_i - \langle B_i \rangle) [I_i(x,y) - \langle I_i(x,y) \rangle], \quad (1)$$

式中 $\langle \cdot \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \cdot$ 表示求均值运算, $O(x,y)$ 表示目标物体的图像信息。 B_i 满足

$$B_i \propto \iint T(x,y) I_i(x,y), \quad (2)$$

式中 $T(x,y)$ 是目标物体的透射函数。

光强涨落越剧烈,对应的参考臂光强分布信息对图像重建的贡献就越大^[13],对应鬼成像就是利用阈值判别^[13]或排序^[12]的方法挑选光强涨落较大的采样对应的光强分布信息用于成像。在对应鬼成像方案中,设定阈值 k 和 $-k$,并且令 k 满足 $0 \leq k < \max\{\delta B_i\}$,这里 $\delta B_i = B_i - \langle B_i \rangle$,根据 δB_i 与阈值 k 和 $-k$ 的大小关系对 $I_i(x,y)$ 进行筛选,可以分别得到一个 $I_i(x,y)$ 的集合,将两个集合中的 $I_i(x,y)$ 分别求均值后相减可得目标物体的图像,即^[13]

$$O(x,y) = \frac{1}{M^+} \sum_{i=1}^{M^+} I_i(x,y) \Big|_{\delta B_i > k} - \frac{1}{M^-} \sum_{i=1}^{M^-} I_i(x,y) \Big|_{\delta B_i < -k}, \quad (3)$$

式中 M^+ 和 M^- 分别是满足 $\delta B_i > k$ 和 $\delta B_i < -k$ 的光强测量值对应的 $I_i(x,y)$ 个数,理论上 $M^+ \approx M^-$ 。没有被选中的 $I_i(x,y)$ 是冗余数据,在重建图像的过程中被丢弃。由于重建图像时只使用了部分强度分布信息,且不需关联计算,所以该算法相对于TGI算法降低了计算量和算法复杂度。

在对应鬼成像方案中,可以采用单光子探测器对目标物体上的反射光或者透射光进行探测,从而提高系统的探测灵敏度,同时还可以利用DMD预置光源,从而略去CCD对参考臂光强分布的测量。基于DMD的光子计数对应鬼成像原理如图1所示。

DMD的每个微镜片有开和关两种状态,微镜片处于开状态时才会将光反射到目标光路中。在计算机上预先生成 M 个二值随机矩阵并将其转化为 M 帧二值随机图,将 M 帧二值随机图按照设定周期顺序加载到DMD上,二值随机图某点取值为1时对应的微镜处于开状态,取值为0时,对应的微镜处于关状态,这相当于对光源

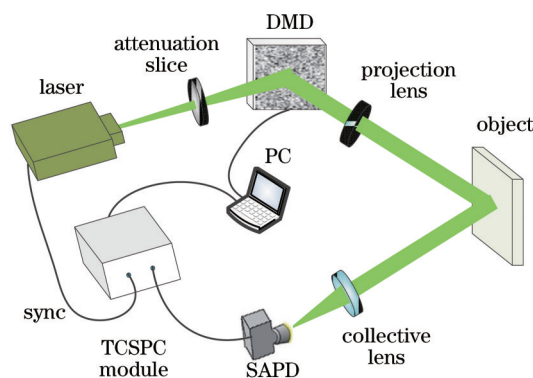


图1 基于DMD的光子计数对应鬼成像原理图

Fig.1 Schematic of ghost imaging via photon counting based on DMD

进行了 M 次空间强度分布调制,每次调制后的光强分布可由对应的二值随机矩阵 $I_i(x,y)(1 \leq i \leq M)$ 表示,不需要再用 CCD 测量。在每个 DMD 周期内,对激光器的同步输出和 SAPD 的输出进行时间相关单光子计数^[24],可得每个 DMD 周期内光子飞行时间的统计分布直方图,光子飞行时间统计分布直方图如图 2 所示。将统计直方图中波峰对应的时间区间上的光子数相加,得到的结果可视为相应 DMD 周期内的信号光子计数值 $n_i(1 \leq i \leq M)$ 。采用这种方式能根据噪声光子与信号光子飞行时间的不同,将大部分噪声光子滤除,还能根据信号光子的飞行时间获得目标的距离信息^[25]。

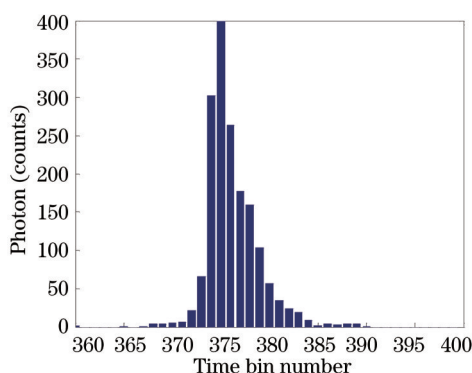


图2 光子飞行时间统计直方图

Fig.2 Histogram of photon flight time

信号光子计数值 n_i 能够反映相应 DMD 周期内回波脉冲的光强大小,因此依据对应成像算法,可计算目标物体的图像信息,

$$O(x,y) = \frac{1}{M^*} \sum_{i=1}^{M^*} I_i(x,y) \Big|_{\delta n_i > k} - \frac{1}{M^-} \sum_{i=1}^{M^-} I_i(x,y) \Big|_{\delta n_i < -k}, \quad (4)$$

式中 $\delta n_i = n_i - \langle n_i \rangle$, $I_i(x,y)$ 表示计算机上生成的二值随机矩阵。

3 实验过程与结果

实验中所使用的激光源的脉冲重复频率为 5 MHz,其波长在可见光波段内。单光子探测器是盖革模式下的 SAPD,其死时间为 77 ns,对波长为 550 nm 的光探测效率为 0.49。单光子计数器是 Picoquant 公司的 HydraHarp 400 型 TCSPC 模块,时间精度可达 1 ps。DMD 的微镜阵列规模为 1024×768 ,每个微镜尺寸是 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$,由于在生成二值随机图时采用的变换单位是 8×8 ,所以微镜阵列被划分成了 128×96 块,每块上的 8×8 个微镜片状态相同,忽略微镜之间的间隙,则每块的尺寸近似为 $109.44 \mu\text{m} \times 109.44 \mu\text{m}$ 。发射透镜距与 DMD 以及目标物体的距离分别约为 6 cm 和 30 cm,发射透镜和会聚透镜的焦距均为 5 cm。该系统的横向分辨率取决于目标物体表面的最小散斑尺寸^[15],利用透镜成像公式计算可得目标物体表面的最小散斑尺寸约为 $109.44 \times (30/6) \mu\text{m}^2 = 547 \mu\text{m}^2$,因而成像系统的最小横向分辨率约为 $547 \mu\text{m}$ 。

实验过程中,光源发出的光透过衰减片照射到DMD上,DMD的出射光经发射透镜照射到目标物体上,使用汇聚透镜将目标物体上的反射光汇聚到SAPD的探测面,由SAPD对回波脉冲进行探测,SAPD的输出信号和激光器的同步信号输入到TCSPC模块,利用Matlab软件对TCSPC模块的输出文件进行处理可得到每个DMD周期内的信号光子数,利用对应鬼成像算法可重建图像。

3.1 成像实验

设置帧数 $M = 90000$, 在使用 CGI 算法重建图像时, 采用不同的阈值 k , 得到实验结果如图 3 所示。

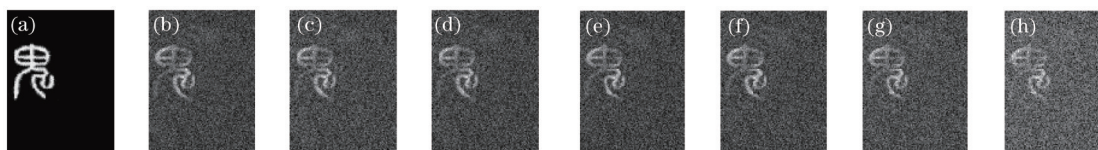


图 3 光子计数对应鬼成像实验结果。(a) 原图; (b) TGI 算法得到的图像; (c) $k=0$; (d) $k=0.01\langle n_i \rangle$; (e) $k=0.03\langle n_i \rangle$; (f) $k=0.05\langle n_i \rangle$; (g) $k=0.07\langle n_i \rangle$; (h) $k=0.1\langle n_i \rangle$

Fig.3 Experiment result of photon counting correspondence ghost imaging. (a) Original image; (b) image achieved by TGI algorithm; (c) $k=0$; (d) $k=0.01\langle n_i \rangle$; (e) $k=0.03\langle n_i \rangle$; (f) $k=0.05\langle n_i \rangle$; (g) $k=0.07\langle n_i \rangle$; (h) $k=0.1\langle n_i \rangle$

由此可见,利用光子计数对应鬼成像方案能够得到目标物体的图像信息。图 3(c)~(h) 是 $M = 90000$ 的情况下依次增大 k 得到的结果,在不同 k 值下,选出的 $I_i(x,y)$ 个数与总的 $I_i(x,y)$ 个数的比值 $(M^+ + M^-)/M$ 依次为 100%、85%、56%、34%、18%、6%,即随着 k 的增大,通过阈值判别选出的 $I_i(x,y)$ 个数逐渐减少,因而图像重建所使用的数据量逐渐减少,图像重建过程中的计算量也随之减小。为了客观评价图像质量,引入峰值信噪比(PSNR)来衡量图像质量,峰值信噪比的定义为

$$P_{\text{SNR}} = 10 \times \lg \frac{P^2}{\frac{1}{UV} \sum_x \sum_y [A(x,y) - B(x,y)]^2}, \quad (5)$$

式中 P 是最大的像素值, $A(x,y)$ 和 $B(x,y)$ 分别表示原图像和重建图像,图像的大小为 $U \times V$ 。计算可知,图 3(c)~(h) 的 PSNR 分别为 11.37 dB、11.79 dB、11.95 dB、11.58 dB、10.80 dB、9.24 dB。当阈值大于 $0.07\langle n_i \rangle$ 时图像质量变差,这是因为此时选出的 $I_i(x,y)$ 较少,得到的图像信息信息量过少。图 3(b) 是利用 TGI 算法重建的图像,其 PSNR 为 11.97dB,与 $k = 0.05\langle n_i \rangle$ 时利用 CGI 算法得到的图像的 PSNR 近似相同,但是 CGI 算法使用的 $I_i(x,y)$ 个数只有 TGI 算法的 34% 且不需要关联计算,只需对选出的 $I_i(x,y)$ 进行简单的加减和求均值运算就能得到目标的图像信息,因而大大降低了图像重建的计算量。由此可见,利用光子计数对应成像方案可以在降低计算量和算法复杂度的同时获得与 TGI 近似的成像质量。

SAPD 探测灵敏度较高,能够分辨单个光子。在实验条件下,单个回波脉冲上得到的平均光子计数值为 0.0178,此时回波脉冲光强极弱,肉眼无法分辨,但是利用该方案依旧可以很好地恢复目标物体的图像信息,可见光子计数对应鬼成像方案能够实现弱光成像。

3.2 成像质量影响因素探讨

SAPD 对多个回波脉冲进行光子计数是一个统计过程,因此实验得到的光子计数值 n_i 包含了统计噪声,当统计噪声较大时会导致光子计数值附加一个很大的波动,从而影响成像质量。记单个 DMD 周期内的激光脉冲个数为 L , 增大 L 相当于增加统计样本数量,因此增大 L 可以降低光子数统计噪声,从而提高成像质量。通过实验可以验证上述结论,设置二值随机图的帧数 $M = 90000$, 在其他条件相同的情况下改变单个 DMD 周期内的脉冲个数 L , 为了在相同的条件下比较实验结果,在利用对应成像算法重建图像时,设定合适的阈值使 M^+ 和 M^- 始终满足 $M^+ = M^- = M/5$ 。重建图像的峰值信噪比随脉冲个数 L 的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,随着单个 DMD 周期内的脉冲个数的增加,重建图像的 PSNR 逐渐升高,并最终趋于收敛。由于单个 DMD 周期内的脉冲个数等于 DMD 的周期乘以激光器的脉冲重复频率,因而可以适当增大 DMD 的周期或提高脉冲重复频率来降低光子数统计噪声,提高图像质量。

通过实验考察帧数 M 和发射光强对光子计数对应鬼成像的影响,实验结果如图 5 所示。

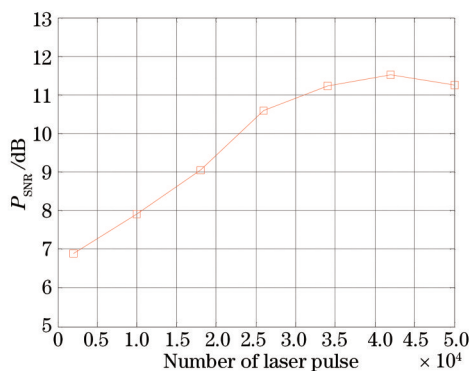


图4 单个DMD周期内的激光脉冲个数对图像质量的影响

Fig.4 Influence of the number of laser pulse within a single DMD period on image quality

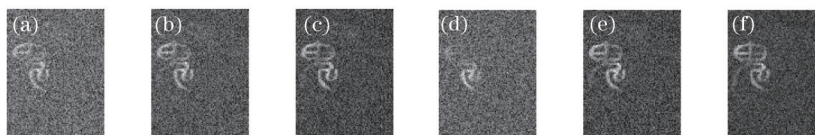


图5 不同帧数和不同发射光强下的实验结果。(a) $M=30000$; (b) $M=50000$; (c) $M=70000$; (d) $R=0.92\%$; (e) $R=1.78\%$; (f) $R=6.00\%$

Fig.5 Experiment result with different number of frames and emission intensities. (a) $M=30000$; (b) $M=50000$;

(c) $M=70000$; (d) $R=0.92\%$; (e) $R=1.78\%$; (f) $R=6.00\%$

图5(a)~(c)是在其他条件相同的情况下依次增大帧数 M 得到的结果,在不同的帧数下,令 $k = 0.04 \langle n_i \rangle$, 得到的 M^+/M 与 M^-/M 的值都近似相同且基本不变,约为44%,但是图像的PSNR依次升高,分别为8.00 dB、9.75 dB、11.08 dB,可见图像的质量随着帧数 M 的增加而提高。

图5(d)~(f)是 $M = 70000$ 情况下依次减小衰减片衰减系数得到的结果,实验中单个DMD周期内的激光脉冲个数 $L = 50000$ 。将单个DMD周期内的单脉冲计数率定义为 n_i/L ,并将平均单脉冲计数率记作 $R = \langle n_i/L \rangle$,随着衰减系数的减小发射光强增大,平均单脉冲计数率 R 也随之增大。为了在相同的条件下比较实验结果,在不同的发射光强下,都令 M^+ 和 M^- 满足 $M^+ = M^- = M/5$ 。图5(d)~(f)的峰值信噪比分别8.63 dB、10.99 dB、11.68 dB,图像质量依次变好,这是因为在脉冲个数 L 一定的情况下,单脉冲计数率越高,统计噪声对光子计数值的干扰就越小,而且随着发射光强的增大,信号光子计数率增大的程度远大于背景噪声光子计数率增大的程度,背景噪声光子对信号光子计数值的干扰也变小。但是应当指出,盖革模式SAPD存在死时间,当SAPD响应光电子产生一个电脉冲后,要等待一个死时间周期才能再次响应光电子,由于死时间通常大于回波脉冲宽度,所以单个回波脉冲在SAPD中最多激发一个电脉冲。而当发射光强过大时,任意回波脉冲在SAPD内激发的电脉冲数都将为1,这会导致不同DMD周期内的信号光子计数值 n_i 都等于单个DMD周期内的激光脉冲个数 L ,此时利用光子计数对应鬼成像方案将无法得到目标物体的图像信息。

4 结 论

将时间相关单光子计数技术用于对应鬼成像,实现了光子计数对应鬼成像。在成像系统中使用DMD对光源进行调制,略去了CCD对光强分布的测量,利用一个不具有空间分辨率的SAPD结合对应鬼成像算法得到了目标物体的图像信息。使用光子计数对应鬼成像方案时,通过选择合适的阈值降低了图像重建的计算量,同时获得了与TGI效果近似的成像质量。由于采用了时间相关单光子计数技术,该方案可以实现弱光成像,且能够获得目标的位置信息。实验结果表明,增大二值随机图的帧数、提高发射光强或者增大单个DMD周期内的脉冲个数,可以使图像质量变好。该方案光路简单、算法复杂度低、具备弱光成像能力且能够获取目标的距离信息,因而有广阔的应用前景。

参 考 文 献

1 T B Pittman, Y H Shih, D V Strekalov, *et al.*. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. Phys Rev A, 1995, 52

- (5): R3429–R3432.
- 2 R S Bennink, S J Bentley, R W Boyd. “Two-photon” coincidence imaging with a classical source[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(11): 113601.
- 3 A Gatti, E Brambilla, M Bache, *et al.*. Ghost imaging with thermal light: Comparing entanglement and classical correlation[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(9): 093602.
- 4 J Cheng, S Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(9): 093903.
- 5 F Ferri, D Magatti, A Gatti, *et al.*. High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(18): 183602.
- 6 D Zhang, Y Zhai, L Wu, *et al.*. Correlated two-photon imaging with true thermal light[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(18): 2354–2356
- 7 Shen xia, Zhang Minghui, Liu Honglin, *et al.*. Research on the pulsed thermal light[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(11): 2893–2898.
沈 夏, 张明辉, 刘红林, 等. 脉冲式赝热光源的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2893–2898.
- 8 Y Bromberg, O Katz, Y Silberberg. Ghost imaging with a single detector[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(5): 053840.
- 9 J H Shapiro. Computational ghost imaging[J]. *Phys Rev A*, 2008, 78(6): 061802.
- 10 F Ferri, D Magatti, L A Lugiato, *et al.*. Differential ghost imaging[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(25): 253603.
- 11 O Katz, Y Bromberg, Y Silberberg. Compressive ghost imaging[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(13): 131110.
- 12 Kaihong Luo, Boqiang Huang, Weimou Zheng, *et al.*. Nonlocal imaging by conditional averaging of random reference measurements[J]. *Chin Phys Lett*, 2012, 29(7): 074216.
- 13 M Li, Y Zhang, K Luo, *et al.*. Time-correspondence differential ghost imaging[J]. *Phys Rev A*, 2013, 87(3): 033813.
- 14 J Cheng. Ghost imaging through turbulent atmosphere[J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 7916–7921.
- 15 Jin Haoqiang, Shi Jianhong, Zeng Guihua, *et al.*. Looking around corners and imaging through turbid media with projector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0511006.
金浩强, 石剑虹, 曾贵华, 等. 基于投影仪的“街角成像”和穿透散射介质成像[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0511006.
- 16 B I Erkmen. Computational ghost imaging for remote sensing[J]. *J Opt Soc Am A*, 2012, 29(5): 782–789.
- 17 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.
- 18 B Sun, M P Edgar, R Bowman, *et al.*. 3D Computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844–847.
- 19 Yinzuo Zhang, Jianhong Shi, Hu Li, *et al.*. Imaging through aberrating media by computational ghost imaging with incoherent[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(1): 011102.
- 20 Chen Chao, Zhao Shengmei. Study on high order difference sifted ghost imaging scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0611002.
陈 超, 赵生妹. 高阶差值筛选鬼成像方案研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0611002.
- 21 S Zhao, P Zhuang. Correspondence normalized ghost imaging on compressive sensing[J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(5): 054203.
- 22 M Zafari, R Kheradmand, S Ahmadi-Kandjani. Optical encryption with selective computational ghost imaging[J]. *J Opt*, 2014, 16(10): 105405.
- 23 Wu Nan, Gong Wenlin, Han Shensheng. Experimental research on pseudo-thermal light ghost imaging with random phase plate based on variable motion trail[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0711005.
吴 楠, 龚文林, 韩申生. 基于运动轨迹可调式随机相位板的赝热光鬼成像实验研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0711005.
- 24 W Becker. *Advanced Time-Related Single Photon Counting Techniques*[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 11–24.
- 25 J S Massa, A M Wallace, G S Buller, *et al.*. Laser depth measurement based on time-correlated single-photon counting[J]. *Opt Lett*, 1997, 22(8): 543–545.

栏目编辑: 苏 岑