

# 热光关联成像技术研究

王高健勇

电子信息与电气工程学院 编码与通信安全实验室

## 摘要

关联成像作为量子光学的发展分支，在目标探测及成像技术上具有广阔的应用前景。关联成像将赝热光通过分束器分为信号光与参考光两臂，在信号臂上放置目标物体并用一个桶探测器接收，参考臂信息用 CCD 接收，单路的探测结果无法恢复出物体信息，只有对两路信号进行符合测量时才能观测到物体的图像信息，这一现象也被称为“鬼成像”。最近人们开始将关注点从关联成像的本质转移到关联成像的应用领域上。但现在针对关联成像的应用研究都局限在实验室环境之中。为了进一步拓展关联成像的应用范围、应用方式以及应用场合，本人仅现有技术，提出了利用日光、LED 阵列实现关联成像以及利用关联成像实现火场目标探测的技术方案。其中日光、LED 阵列关联成像技术能够摆脱激光器对关联成像的限制，利用关联成像技术实现火场目标探测将关联成像应用与实际应用之中。以上技术方案的实验结果与结果讨论均会在本文中呈现。

**关键词：**关联成像、日光、火场、LED 阵列、目标探测

## Abstract

Correlated imaging technique, a branch of quantum optics, has an extremely promising application prospects. Correlated imaging split pseudothermal into signal beam and idler beam. Object is placed in the signal beam. Signal beam is collected by a bucket detector eventually while idler beam is received by a CCD camera. Information of the object can only be reconstructed by coincidence measurement. Measurement of either of these beams cannot acquire image information of the object. This phenomenon is also named as ‘ghost imaging’. People tend to show more interest in the application of correlated imaging than in the principle of correlated imaging recently. In order to expand the application of correlated imaging, this paper proposes new techniques achieving correlated imaging using sunlight or LED screen based on existing

techniques. This paper also brings up a technical proposal to realize object detection in fire scene using correlated imaging. Detailed experiment results and discussion can also be found in this paper.

Keywords: Correlated imaging, sunlight, fire scene, LED screen, target detection

## 1. 引言

1994 年, Ribeiro 等人通过参量下转换的纠缠光子对并利用分线性晶体, 以符合计数法首次实验观测得到双光子干涉条纹<sup>[1]</sup>。随后 1995 年美国史研华小组也通过“纠缠双光子对”获得鬼干涉、鬼衍射<sup>[2]</sup>与鬼成像<sup>[3]</sup>的实验现象。分束器将相互纠缠的信号光、参考光分成为两路, 在信号臂放置一个双缝, 单独探测其中一路光路的强度分布将无法得出应有的干涉条纹, 但是对两路输出进行符合测量后才能观察到干涉条纹, 这一现象被称为鬼干涉。类似的, 在信号臂上放置一个探测物体, 用一个固定的单光子探测器对信号臂进行探测, 在参考臂上进行单光子的扫描探测, 只有对两路信号进行符合测量后才能够恢复出物体的图像信息, 而仅依靠单路探测结果将不能获取到物体信息, 这一现象被称为鬼成像, 也就是早期的关联成像<sup>[4-6]</sup>。

在早期, 关联成像实验都是基于纠缠光源。史研华小组利用二阶量子相干函数的概念对初期关联成像实验进行解释, 并将该现象的原因归结为使用了纠缠光作光源。直到美国的 Boyd 研究组报道出他们采用经典光源实现关联成像的实验结果<sup>[7]</sup>, 他们使用激光和能够随机旋转的反射镜制备出具有空间混沌特性的光场。与量子关联成像类似的是, 该光场被分束器分成两路, 信号光束经过物体与成像透镜后被桶探测器接收, 参考光束直接照射在电荷耦合探测器 (CCD) 上, 利用符合测量最终可以观测到与纠缠双光子鬼成像类似的现象。这一发现引发了一场关于双光子纠缠源是否是关联成像技术的必要条件的激烈争论<sup>[8-10]</sup>。之后, 美国的 Boyd 研究组<sup>[11]</sup>都从理论与实验上对比分析了量子关联成像与经典关联成像, 并指出关联成像可以由真正的非相干光作为光源来获得。之后有多篇文章报道了对采用赝热光进行鬼成像与鬼干涉实验的验证<sup>[12-14]</sup>。

在鬼成像以及鬼干涉现象提出后的十年里, 关联成像原理与实验机制迅速进行着完善, 人们对于鬼成像与鬼干涉现象的认知也越来越深刻。无论是基于量子纠缠光源还是经典热光源, 是基于透镜成像还是无透镜都能够实现关联成像。为了研究关联成像的本质原因, 史研华与 Shapiro 等人对于关联成像 (鬼成像) 的本质进行了深入地探讨<sup>[15-16]</sup>。

从 2006 年开始, 人们对关联成像的关注从理论机制的研究逐渐往实际应用

方面过渡。反射式物体的关联成像技术[17-19]研究使得关联成像更加适用于真实物体的拍照。从光源的实用化角度分析,关联成像所采用的光源从纠缠双光子对到赝热光已经是一种进步,不过这些都是主动式光源,为了进一步研究被动式关联成像技术或者应用自然光进行关联成像,吴令安等人开展了基于真热光(汞灯、荧光等)的关联成像实验研究<sup>[20]</sup>。考虑到真实热光源是一种具有高斯分布特性的光场, Shapiro 提出了基于高斯态光场的关联成像的统一理论<sup>[21]</sup>,并且在同一年首次提出了只使用一个单像素探测器实现的计算鬼成像方案<sup>[22]</sup>。2009 年, Y. Bromberg 等人用二维空间光调制器实现了单路计算鬼成像<sup>[23]</sup>, 计算鬼成像的提出对关联成像的实用化进程做出了巨大的贡献。

为了进一步拓展关联成像在现实生活中的应用, 本人申报了名为“利用日光等被动光源实现远距离目标关联成像、利用关联成像实现火场目标成像及自动检测”的课题, 该课题主要研究内容为以下三个方面:

### 1.1 研究基于日光的关联成像技术

研究基于日光的关联成像技术可以突破光源对关联成像的显示, 在实验室环境下, 实现关联成像一般需要用到相干性较强的激光器, 但激光器的不便携带性限制了关联成像的应用。现实生活中, 日光、月光等被动光源基本可以随时随地获得, 是一种理想方便的光源。该研究着重于如何利用日光取代激光, 直接对日光进行调制后进行关联成像。无论从广泛性还是易获得性上来看, 日光是远远优于激光的光源。研究基于日光的关联成像技术能够摆脱激光器限制, 使关联成像能够随时随地进行, 并拓展关联成像的应用范围与应用场合。

### 1.2 研究利用关联成像实现火场目标探测技术

关联成像具有抗噪性能优越的特点, 由于该技术基于统计光学原理, 能够有效抑制散射介质及噪声对图像信号的干扰。一般火场的主要由烟雾以及火焰组成, 在不能够燃烧的空气中大都充斥着以碳颗粒为主的浓烟。浓烟对光线具有较强的散射与阻挡能力。较其他成像技术而言, 利用关联成像能够取得理想的成像情况, 这样也利于火灾救援人员在火场外进行救灾安排布置。

### 1.3 研究基于 LED 阵列光源的关联成像技术

研究 LED 阵列关联成像技术也是突破现阶段光源对关联成像技术的限制。关联成像中最重要的一环之一就是对光源发出的光进行调制, 基于 LED 阵列光源的关联成像直接对 LED 阵列进行调制, 即将光源与光源调制模块合二为一。现阶段, 实验室一般使用数字微镜元件 (DMD) 对光场进行调制, 其工作原理为将照射到 DMD 上空间光的每个像素进行 0,1 调制。于是我们提出利用 LED 阵列模拟 DMD 工作原理的设想, LED 灯亮时表示 1, LED 灯灭时表示 0。故 LED 阵列可将光源与 DMD 合二为一, 光源与光源调制可同时在 LED 阵列上完成。

本文将着重介绍以上三项技术的进展。本文具体安排如下：在引言中简单介绍了关联成像技术的发展历程以及本项目课题的研究内容及其意义，将在第二部分中关联成像中所需要的基本知识，在第三部分中将陈述该项目中的实验进展并对实验结果进行分析讨论，最后在第四部分进行总结与展望。

## 2. 基本理论

在本节中，将简单介绍关联成像的基本设置与理论知识以及关联成像算法，若有读者感兴趣其中细节，可以自行查阅本文参考文献。

### 2.1 关联成像知识基础

Shapiro 等人<sup>[15-16]</sup>中已经详细地分析了关联成像的理论基础，在此只简单介绍利用量子纠缠源以及经典赝热光源实现关联成像的基础知识。

#### 2.1.1 量子鬼成像实验设置<sup>[16]</sup>

图 1 展示了利用量子纠缠源实现透射鬼成像的设置。纠缠源产生的信号经过分束器后进入信号臂  $\hat{E}_s(\rho, t)$  和参考臂  $\hat{E}_R(\rho, t)$ 。在信号路  $L$  米之外放置了一个透射函数为  $T(\rho)$  的物体，在物体之后放置一个桶探测器。在参考臂上  $L$  米之外，放置了一个成像阵列，用于探测光子及其位置。通过符合测量由桶探测器和成像阵列输出的光电流  $i_b(t)$  和  $i_p(t)$ ，物体的形状就被确定了。

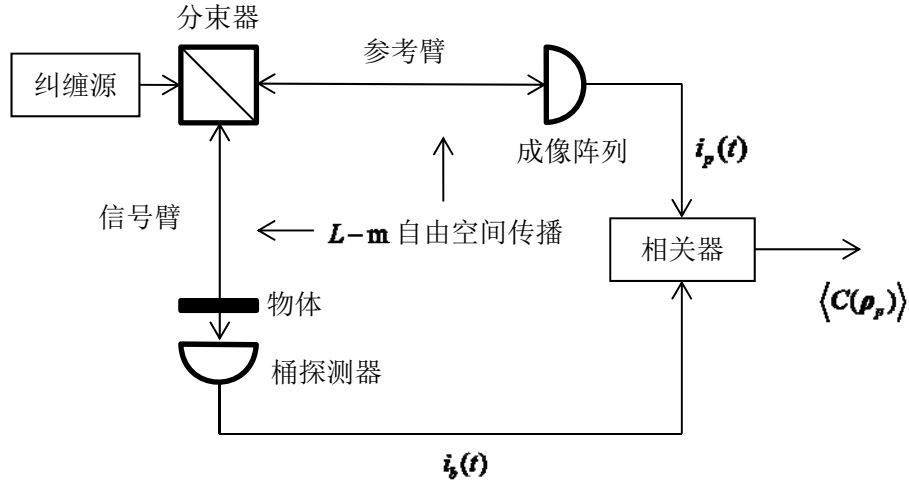


图 1：量子鬼成像实验配置原理图。

图 1 中相关器的输出可见式 1，表现为  $i_b(t)$  和  $i_p(t)$  的协方差，进一步分析发现  $\langle C(\rho_p) \rangle$  的可以通过式 2 表达。

$$\langle C(\rho_p) \rangle = \langle i_b(t) i_p(t) \rangle \quad (1)$$

$$\langle C(\rho_p) \rangle = q^2 \eta^2 A_p \left( \frac{2P}{\pi a_L^2} \right)^2 \left[ \int_{A_b} d\rho |T(\rho)|^2 + \frac{\Omega_B a_0^2}{16\pi P \rho_0^2} \int_{A_b} d\rho e^{-|\rho - \rho_p|^2 / \rho_L^2} |T(-\rho)|^2 \right] \quad (2)$$

从式(2)中可以看出，直流耦合的光电流的互相关 $\langle C(\rho_p) \rangle$ 由两个部分组成，包括式子右侧的第一项的背景项，以及包含图像反透射信息的第二项。考虑到 $\frac{\Omega_B a_0^2}{16\pi P \rho_0^2} \gg 1$ ，所以背景项可以忽略不计。

### 2.1.2 赝热光关联成像<sup>[16]</sup>

后来科学家发现利用由激光产生的赝热光也可以用于关联成像实验。实验配置如图 2<sup>[16]</sup>所示，激光经过 50-50 分束器之前需先经过一片旋转毛玻璃以产生赝热光。与图 1 中相似的是，经过分束器后的赝热光经过  $L$  米的自由空间传播。其中一路作参考臂由成像阵列接受，另外一路作信号臂在经过透射物体之后由桶探测器接收。通过符合测量两路的光电流，可以得出物体的图像信息。

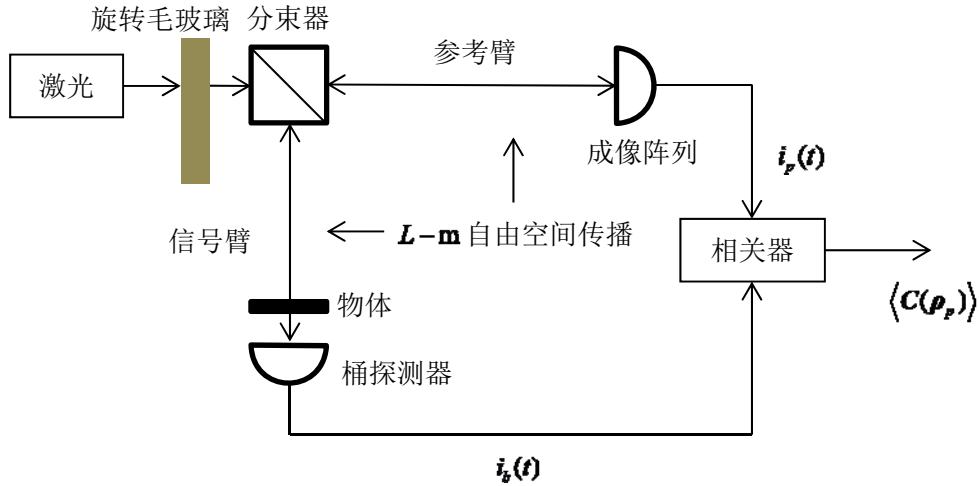


图 2: 关联成像实验配置原理图。

其测量结果与式(2)类似:

$$\langle C(\rho_p) \rangle = q^2 \eta^2 A_p \left( \frac{2P}{\pi a_L^2} \right)^2 \left[ \int_{A_b} d\rho |T(\rho)|^2 + \int_{A_b} d\rho e^{-|\rho - \rho_p|^2 / \rho_L^2} |T(\rho)|^2 \right] \quad (3)$$

式(3)中也包含一项背景项，与式(2)不同的是，式(3)中后一项包含正立的图像传输函数。无论使用纠缠源还是经典光源的关联成像均拥有大小为  $\rho_L$  的分辨率。利用赝热光作光源的关联成像可以通过交流耦合的相关器以便抑制式(3)右侧第一项的背景项。

### 2.1.3 计算关联成像<sup>[16]</sup>

上述的关联成像技术通过两路信号的符合测量以获取图像信息。在此基础上 Shapiro 提出了计算关联成像技术的概念<sup>[16]</sup>。激光先通过空间光调制器 (SLM, DMD 等) 进行调制再照射到物体。理论上，经过调制的光场可以通过衍射理论

计算出参考臂的信息从而可以省去图 2 中的参考臂光路。这样可以大大地减少光路系统的复杂性。计算关联成像的光路设置可见图 3。经过经过空间光调制器后，光场经过  $L$  米的自由空间并照射在物体上，最后由桶探测器收集数据。

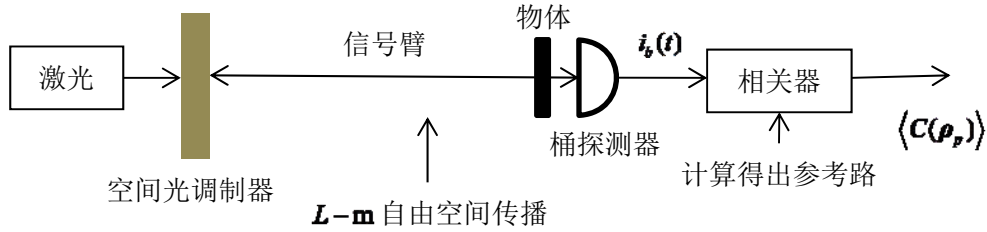


图 3: 计算鬼成像实验配置原理图。

基于 SLM 的计算关联成像与传统热光关联成像相比有如下好处：

- (1) 结构简单，可以省去分束器，一个桶探测器即可完成目标探测；
- (2) 单路探测在实际应用领域具有较大优势，在计算强度分布矩阵时候可加入不同模型以抵御外界噪声对关联成像的影响；
- (3) 计算关联成像与混沌激光相结合可以创造出具有良好的空间、时间关联性的光源，可用于三维关联成像实验技术。

因此基于 SLM 的单路计算关联成像在实际应用中前景比较广阔。

## 2.2 计算鬼成像基本算法

为了进一步理解计算关联成像（计算鬼成像）的实现原理，在此贴出计算鬼成像的实现算法<sup>[15]</sup>。

```

1. 生成用于 DMD 的随机谱
输入：DMD 尺寸：N*M，随机谱个数 n
初始化：Ref=zeros[N,M,n], ref=zeros[1,n], Sum_Ref=zeros[N,M].

for i=1:n
    Ref[,i]=rand[M,N]
    Sum_Ref+=Ref[,i]
    ref[1,i]=sum{Ref[,i]}
end for

输出：随机谱信息 Ref, Sum_Ref, ref

2. 恢复探测目标图像信息
输入：桶探测数据：obj[1,n],
初始化：恢复出的图像信息：DGI=zeros[N,M]

obj=obj-min(obj)
for i=1:n

```

<pre> DGI+=(Ref[,i]-Sum_Ref/n)*(obj(i)-mean(obj)*ref(i)/mean(ref)) end </pre> <p>输出：探测目标图像信息：DGI</p> <p>注：</p> <p>rand[M,N]：生成 M*N 大小的二维随机 0,1 矩阵；</p> <p>mean(X)：X 矩阵或数组的平均值；</p> <p>sum(X)：X 矩阵或数组求和；</p> <p>min(X)：X 矩阵或数组中最小值。</p>
--

### 3. 实验结果及讨论

#### 3.1 利用日光实现关联成像实验

该实验的目标是拓展关联成像的应用场合，突破激光器对关联成像的限制并近似模拟现实照相技术。

##### 3.1.1 初步实验结果

日光关联成像平台的原理图如图 4(a)所示，日光从 L1 口进入系统，在 L2 出放置一枚反射镜将光线投入到 DMD 上，经由凸透镜 L3 透射到探测物体上。在本实验中，探测物体为上海交通大学蓝底金色校徽。最后，桶探测器接收由凸透镜 L4 收集到的图像反射信息。图 4(b)所示的是日光关联成像平台实物图，该平台尺寸为 60cm\*30cm，按照原理图将反射镜、DMD、透镜以及替代桶探测器的 CCD 相机沿光路搭好后进行初步实验。

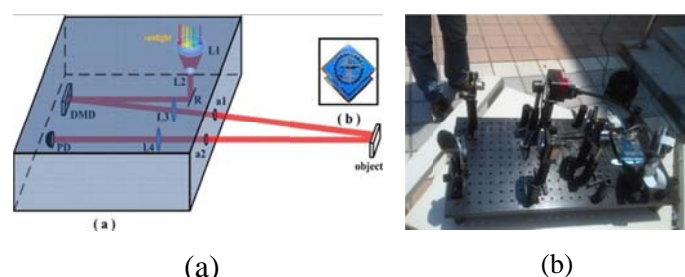


图 4：  
(a) 日光关联成像平台原理图；  
(b) 日光关联成像平台实物图。

图 5 显示的是利用日光实现关联成像目标探测实验的初步结果。共采集 30000 帧数据用于探测目标的图像信息恢复。从图中分析发现，实际成像效果并不佳，从图中大致可以看出上海交通大学校徽的轮廓，但校徽的细节比较缺乏。若并不是事先就知道拍摄物体是校徽，并不能看出探测目标是校徽，所以由此可以认为初步实验并不成功。

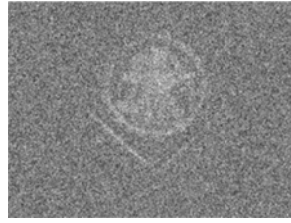


图 5 日光关联成像初步实验结果。

事实上，造成实验失败的原因来源于太阳与地球之间位置的不断变化，每过 4 分钟，地球围绕太阳旋转 1 度。图 6 中绘制的是日光关联成像中阳光变化对成像质量产生影响的简单示意图，若图中蓝色线表示图像采集开始时的光路，当图像采集结束时阳光光路已经偏移到了图 6 中红线位置，如果在此过程中保持反射镜、DMD、物体以及 CCD 位置不变，那么最终光线会汇聚到原始汇聚点的上方。若 DMD、物体、CCD 之间间距约为 30cm，当太阳偏转过 1 度时（四分钟时间），CCD 接收到的像的位置将变化约 1.5cm。在该系统中，图像采集速率由 DMD 速率决定，DMD 变换速率约为 100 帧/秒，若需要采集 30000 帧桶探测数据，那么大约需要 5 分钟，这时太阳已经转过 1 度的角度。CCD 的探测区域纵向尺寸大约为 1cm，所以经过 2~3 分钟的采集时间之后，CCD 已经不能接收到探测数据。这必定对图像的恢复产生巨大影响。

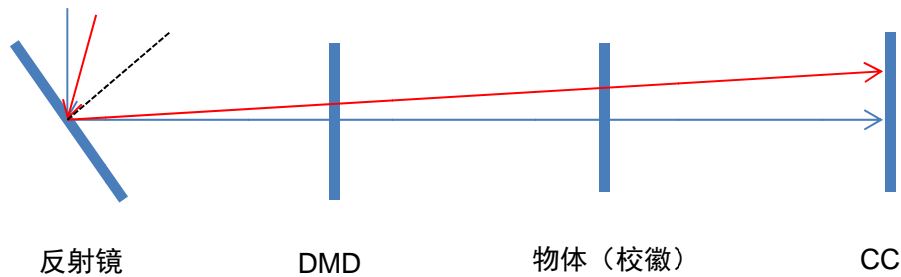


图 6 日光变化位置对系统产生影响示意图。

### 3.1.2 太阳跟踪阳光采集系统

为了保证日光能够稳定地提供给日光关联成像系统，需设计一个阳光采集装置。如图 7(a)所示的阳光采集装置能够满足日光关联成像系统对稳定日光的需求。该系统由两个凸透镜组成，两个凸透镜的焦点重合如图 7(a)所示，垂直入射到上凸透镜表面的阳光会汇聚到焦点上，并从下凸透镜垂直向下平行出射。为了保证上凸透镜始终与阳光相垂直，需设计一个太阳跟踪装置，如图 7(b)所示。该装置主要由四个光电探测器组成，两两相对放置，并保证两对互相垂直。每个光电探测器都与上凸透镜形成固定夹角。根据 4 个光电探测器探测出电流值的大小决定上凸透镜需要向什么方向转动。当某一个光电探测器的电流值大于与它相对的光电探测器的电流时，上凸透镜需要往电流输出较大的光电探测器方向转动，直到两个相对的光电探测器电流值相平衡。在阳光下，四个光电探测器会控制上凸透



镜的朝向直至上凸透镜表面与阳光垂直。

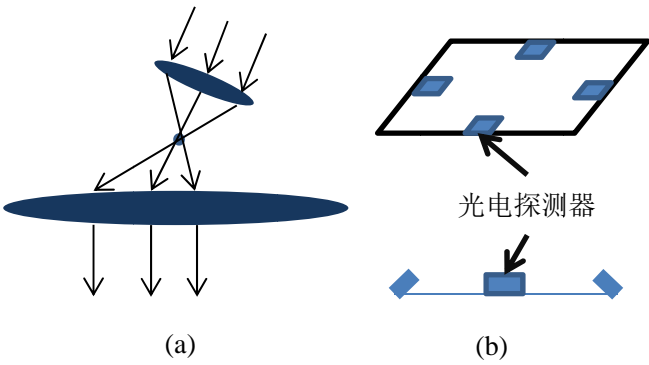


图 7 (a)日光采集系统示意图；(b)太阳跟踪系统示意图。

但是该日光采集系统并不能维持长时间的稳定日光输出（几个小时），当太阳高度角很低时上凸透镜仍需保持与入射阳光垂直，此时会遭遇到上凸透镜所收集的阳光不能被下凸透镜接收到的情况，所以该套日光采集系统并不是完美无瑕的，相反，它也存在一定的适用范围和适用时间，若超出此范围，依旧不能满足实验或者工业的需求标准。

3.1.3 实验结果及分析

利用上述的日光关联成像系统以及日光采集及太阳跟踪系统重复日光关联成像实验，得出如图 8 所示的实验结果。

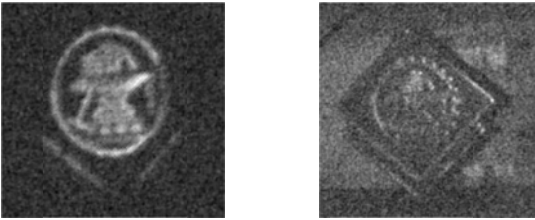


图 8：利用日光跟踪采集系统进行日光关联成像实验结果。

从图 8 中可以看出，经过太阳采集系统后，已经能够恢复出的校徽的图像信息。图 8 分为左右两幅图，这两幅图是在不同时间不同场合采集得到。左图中可以看到校徽的细节均已经扑捉得到，能够比较清晰地看出锤子铁链等细节，右图虽然细节展示不如左图但从图像来看，更接近于真实照相技术。由此可见利用日光实现关联成像目标探测是可行且具有前景的。

3.2 利用关联成像实现火场目标探测实验

该实验意义在于将关联成像技术拓展到火场目标检测的应用之中，也是将关联成像技术应用于现实的大胆尝试。

3.2.1 初步实验结果

本次实验的实验设置如图 9 中所示，LED 的入射光线与 DMD 平面法线方向大约成 24°角（DMD 自身需求），出射的水平光经过一焦距为 60.0mm 的凸透镜后照射到物体表面。该实验中，探测物体为边长为 20mm 的白色纸质五角星，从

目标反射回的光线通过 CCD 相机镜头（凸透镜）汇聚到 CCD 上作桶测量。凸透镜与 CCD 相机在纵向上并排放置，物体被放置在距离凸透镜以及 CCD 相机 26.0cm 之外。

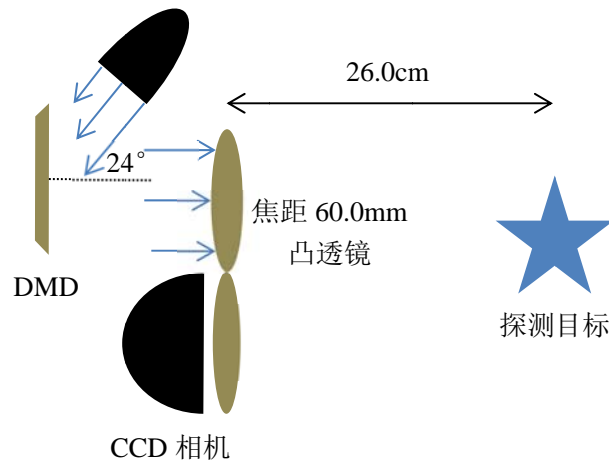


图 9：火场目标探测实验配置图。

其中酒精灯所产生的火焰被放置在探测目标之前。利用 MATLAB 软件生成能够用于 DMD 的随机谱后，将 CCD 与 DMD 调至内同步状态，进行 20000 次桶测量，图 10 展示了使用关联成像算法后恢复出图像信息。

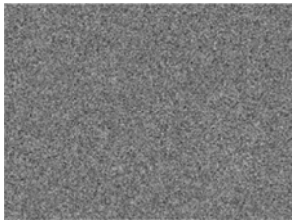


图 10：利用关联成像实现火场目标探测初步实验结果。

从图 10 中可以看出，被探测的目标的图像信息并没有恢复出来，连最基本的五角星轮廓都不存在，可以认为实验是失败的。之后多次重复此类实验，结果依旧不理想，无论多小的火焰，均会对探测目标的图像恢复造成破坏，但一旦将火焰移去，五角星的图像信息便能完美地恢复出来。

3.2.2 酒精灯火焰分析

为了分析并研究光路中存在火焰就不能将图像信息恢复的原因，需要从火焰本身入手。因为酒精灯火焰是该实验中唯一引入的变化，所以探测目标图像信息无法恢复是由于酒精灯火焰的存在而造成的。故必须先研究火焰本身才能知道为什么火焰会对关联成像造成巨大破坏。有趣的是如果使用其他火焰，包括打火机火焰等都会对图像恢复产生巨大破坏，实验结果如同图 10 中所示。可见火焰对图像的破坏是普适性的。

对此，进行了酒精灯火焰的光谱测试，实验结果展示在图 11 中。

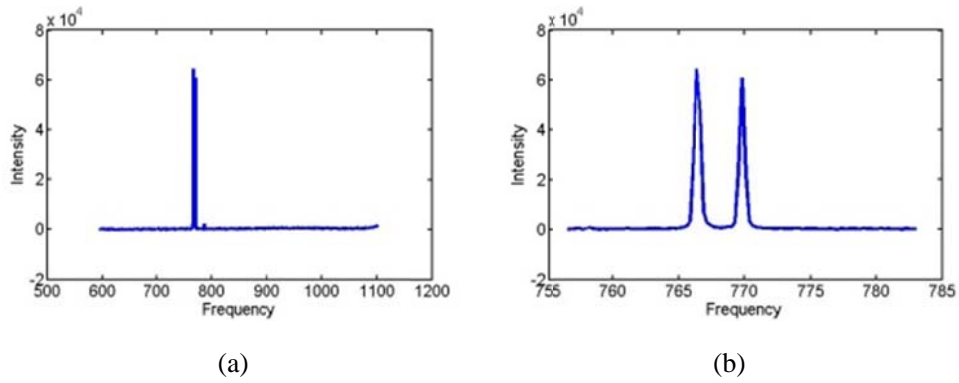


图 11: (a) 酒精灯火焰频谱图; (b) 酒精灯火焰频谱细节图。

从图 11 中可以看出，酒精灯火焰的光谱存在两个峰值，分别在红光以及黄光频率上，那么可以假设火焰对关联成像图像恢复的破坏是由于这两个冲击光强导致的。考虑到实验所使用的 LED 发出的热光为绿色光，所以可以通过滤波的方式将酒精灯火焰的两个冲击光强滤除。从滤波角度来看，只要将信号频段以内的信号保留，将信号频段以外的信号滤除即可达到图像通信的需求。利用一片窄带滤波器即可实现保护关联成像图像恢复的要求。

### 3.2.3 实验结果与分析

利用光学窄带滤波片后重复上述实验可以得出图 12 中的实验结果。初步观察图 12 可以认为前面的假设是正确的。为了进一步探究火焰与图像恢复之间的关系，总共进行了 9 次火场目标探测实验。实验选择驱动 LED 电流为 1500mA, 800mA, 200mA 以及火焰与 CCD 距离为 22.0cm, 13.0cm, 4cm 时分别进行实验，共有 9 中组合可能。LED 灯的亮度与其驱动电流呈正比关系，LED 驱动电流越大，LED 灯亮度越大。由简单透镜成像知识可知，当火焰与 CCD 距离越近时，火焰在 CCD 上所成像的尺寸越大，占据面积越多；相反，当火焰与 CCD 距离越远时，火焰在 CCD 上所成像尺寸越小，占据面积越小。

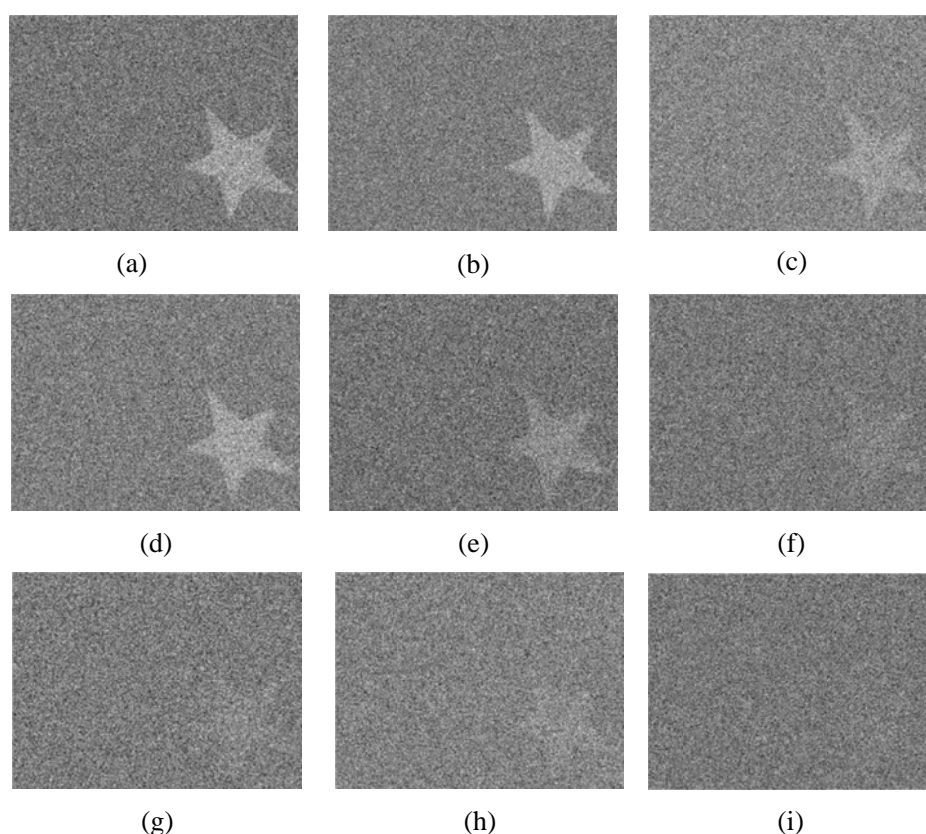


图 12: 添加滤波片后实验结果;

- (a)LED 驱动电流 1500mA, 火焰与 CCD 距离 22.0cm 所恢复出图像信息;
- (b)LED 驱动电流 1500mA, 火焰与 CCD 距离 13.0cm 所恢复出图像信息;
- (c)LED 驱动电流 1500mA, 火焰与 CCD 距离 4.0cm 所恢复出图像信息;
- (d)LED 驱动电流 800mA, 火焰与 CCD 距离 22.0cm 所恢复出图像信息;
- (e)LED 驱动电流 800mA, 火焰与 CCD 距离 13.0cm 所恢复出图像信息;
- (f)LED 驱动电流 800mA, 火焰与 CCD 距离 4.0cm 所恢复出图像信息;
- (g)LED 驱动电流 200mA, 火焰与 CCD 距离 22.0cm 所恢复出图像信息;
- (h)LED 驱动电流 200mA, 火焰与 CCD 距离 13.0cm 所恢复出图像信息;
- (i)LED 驱动电流 200mA, 火焰与 CCD 距离 4.0cm 所恢复出图像信息。

从实验结果中,可以大致分析出:当火焰与 CCD 间距离一定时,LED 照度越大,恢复出的像越清晰。也就是说,当在火焰在 CCD 上成像大小固定时,照射在物体上的光强越强、被 CCD 接收到的物体像的亮度越大时,恢复出的图像越清晰。图中可以很明显看出当火焰与 CCD 距离分别为 4.0cm, 13.0cm 以及 22.0cm 时,恢复出的图像清晰度随 LED 亮度的降低而降低。

当 LED 照度一定时,亮度火焰对关联成像的破坏程度随着火焰与 CCD 间距离的减小而增大。也就是说火焰越靠近 CCD,火焰越能破坏关联成像的成像质量。事实上,当火焰越靠近 CCD 时,火焰在 CCD 上所成出的像越大,因此而产生的噪声越大,对图像信息的恢复破坏越大。从图中可以看出,当 LED 的驱动电流分别为 1500mA, 800mA 和 200mA 时,恢复出的图像清晰度随火焰与 CCD 间距离的增大而增大。

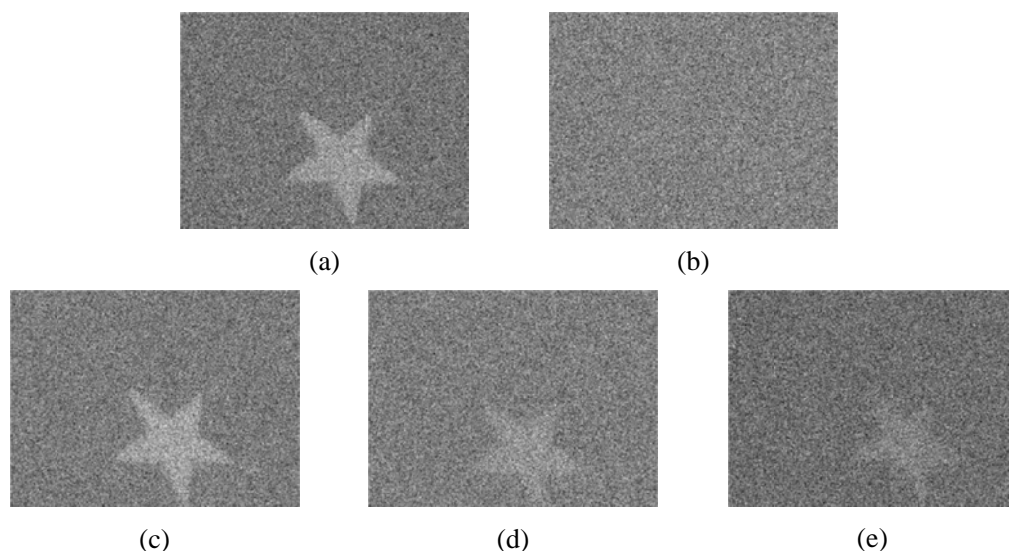


图 13：火场烟雾场关联成像目标探测实验结果

- (a) 无火场无烟雾场情况下恢复出图像信息；
- (b) 火场无烟雾场未滤波所恢复出图像信息；
- (c) 火场无烟雾场滤波后所恢复出图像信息；
- (d) 无火场烟雾场未滤波所恢复出图像信息；
- (e) 火场与烟雾场滤波后所恢复出图像信息。

为了进一步完成火场目标探测实验，需要加入烟雾成分并重复上述实验。在火场之中，除了火焰之外，不能够完全燃烧的碳颗粒能够极大地阻碍视线并影响火灾之中的救援活动。本实验使用涂满碳颗粒的塑料透明板进行烟雾场的模拟。图 13 中显示的是加入烟雾场后的实验结果。从图 13(b)中可以看出，在桶探测之前未经过滤波依旧不能恢复出图像信息。经过滤波之后，可以从实验中恢复出被火焰阻挡的探测目标的图像信息，但是其清晰度与原始图像（未加火场以及烟雾场）相比要差一些，若不考虑火焰的影响，若探测目标被烟雾场阻挡，依旧可以恢复出图像信息，但是其图像质量要比图 13(c)中显示结果要差，可见浓厚不透光的烟雾场对图像恢复所造成的破坏要更严重一些。当火场与烟雾场同时存在时，探测目标的图像信息仍然可以恢复出来，但是其图像清晰度要低于前两种情况，一些图像细节已经缺失。

由此分析，可以认为使用关联成像进行火场目标探测是可行的。关联成像的良好抗干扰性在此处得到体现。若使用 CCD 对着在火焰以及烟雾之后的探测目标直接拍摄，会得到一张几乎全黑的照片，即若使用常规一次成像方法根本不能恢复出图像信息。这就是为什么在火灾发生时并不能直接使用人眼看到火焰以及烟雾所遮挡的物体的原因。

### 3.3 利用 LED 矩阵实现关联成像技术

在本实验中，提出了一种利用 LED 阵列作为光源的关联成像技术。这项技

术将平常生活中常见的 LED 显示屏用于实验，能极大利于关联成像在实际生活中的应用。

### 3.3.1 实验结果与分析

由于将 LED 阵列本身集成具有较大的困难(若使用  $50 \times 50$  像素的 LED 阵列，则需要焊接 2500 个 LED 灯)，实验中使用了  $8 \times 8$  的 LED 阵列用于实验。探测目标为由反射镜构成的单缝。实验原理图可见图 14。

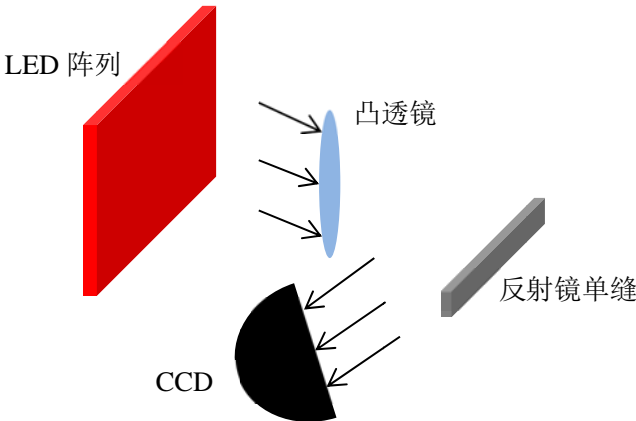


图 14: 利用 LED 阵列实现关联成像技术配置示意图。

LED 阵列作为光源与调制器所发出的光场通过一片凸透镜透射到探测目标（单缝）上。由反射镜单缝反射回的光线由 CCD 接收作桶测量。本次实验像素点为  $8 \times 8 = 64$  个像素点，共设计数量为 100 个的随机谱，这些随机谱输入到 LED 阵列中，每次出现随机谱，CCD 均会作一次桶测量，CCD 共进行 100 次桶测量。最终利用关联成像算法得出图 15 中的实验结果。

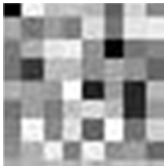


图 15: 利用 LED 阵列实验关联成像技术实验结果图。

粗略看来，图 15 的下方能够大致看出单缝的轮廓（图像下方的白点较多）。但该实验结果并不理想，并不能得出清晰的单缝图像。由于时间紧迫，未能得出较理想的实验结果。但下一步实验将会从以下方面完善 LED 阵列实现关联成像技术：

- (1) 将 LED 阵列进行拓展，从  $8 \times 8 = 64$  个像素点拓展到  $32 \times 32 = 1024$  个像素点；
- (2) 完善 LED 与 CCD 的控制电路。

## 4. 总结与展望

本文展示并讨论了三种新型关联成像技术，分别为日光关联成像技术、火场目标探测的关联成像技术以及 LED 阵列关联成像技术。这三项技术是在现有关联成像技术基础上，实现关联成像技术现实应用的初步探究。

首先，本文展示了使用日光关联成像技术对目标物体的探测，实验中采用的是上海交通大学校徽作探测物体。为了弥补日光随时间移动的缺点，本文设计了一套用于日光关联成像技术的日光跟踪采集装置，该装置利用平行入射凸透镜的光束将会汇聚在焦点这一特性实现垂直向下平行出射太阳光。日光关联成像直接利用阳光作为光源进行目标探测，这本身与现实生活中的照相技术相一致，从理论上讲，日光关联成像技术有望突破旧式照相技术并成为新一代相机并对照相技术产生变革性影响。

本文还实现了利用关联成像对火场目标探测技术，实验中采用了白色纸质五角星作探测目标。由于酒精灯呈现双冲击光强的频谱特征，所以实验中采用了窄带滤波器将冲击光强滤除。另外，利用关联成像技术可以有效抑制由于烟雾对目标的遮挡。基于统计光学原理的关联成像技术，能够有效抑制噪声对图像信号的干扰，可以抵御散射介质对图像信息的干扰，关联成像的抗噪性在该实验中得到了良好的体现。从现实意义上来说，利用关联成像实现火场目标探测技术是一种将关联成像与现实应用相结合的技术，可能在未来，关联成像将成为支撑人类发展的关键技术，在极限条件目标探测等方面发挥无可替代的作用。

本文还初步探究了 LED 关联成像技术，该技术也是对现有关联成像技术的拓展，作为电力线预置编码成像的初步，LED 关联成像技术拥有广阔的前景。理论上讲，不仅 LED 阵列可作为光源，路灯、烟花都可作为光源用于成像。另外关联成像具有极强的抗干扰性，能够抵御大雾等极端天气的影响。所以关联成像技术完全有望成为抵抗雾霾天气中能见度大幅度降低的关键技术并在未来社会中充当重要作用。

所以研究关联成像并探索拓展关联成像技术应用方法以及应用范围本身就是一件极具意义的事情，关联成像技术可以使用几乎任何光源—荧光灯泡、激光甚至太阳，能避免云、雾和烟等使常规成像技术无能为力的气象条件的干扰，从而获得更为清晰的图像。量子物理学家罗恩·迈耶斯说过：“我认为，或者说我希望，若干年后，会出现这样的情景：一名军人使用一台量子鬼成像机，透过战场上的硝烟，辨清敌友。”这也是各个国家争先研究关联成像技术的原因（美国陆军研究实验所、中国科学院等）。

## 参考文献

- [1] Ribeiro P H S, Padua S, Machado da Silva J C, et al. "Controlling the Degree of Visibility of



- Young's Fringes with Photon Coincidence Measurements" [J]. *Phys Rev A*, **49**:4176-4179 (1994).
- [2] D. V. Strekalov, A. V. Sergienko, D. N. Klyshko, and Y. H. Shih, "Observation of two-photon ghost interference and diffraction," [J]. *Phys. Rev. Lett.* **74**, 3600–3603 (1995).
- [3] T. B. Pittman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov, and A. V. Sergienko, "Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement," [J]. *Phys. Rev. A* **52**, R3429–R3432 (1995).
- [4] T. B. Pittman, D. V. Strekalov, D. N. Klyshko, M. H. Rubin, A. V. Sergienko, and Y. H. Shih, "Two-photon geometric optics," [J]. *Phys. Rev. A* **53**, 2804 (1996).
- [5] G. A. Barbosa, "Quantum images in double-slit experiments with spontaneous down-conversion light," [J]. *Phys. Rev. A* **54**, 4473(1996).
- [6] P. H. Souto Ribeiro and G. A. Barbosa, "Direct and ghost interference in double-slit experiments with coincidence measurement," [J]. *Phys. Rev. A* **54**, 3489(1996).
- [7] R. S. Bennink, S. J. Bentley, and R. W. Boyd, "Two-photon coincidence imaging with a classical source," [J]. *Phys. Rev. Lett.* **89**, 113601 (2002).
- [8] A. F. Abouraddy, B. E. A. Saleh, A. V. Sergienko, and M. C. Teich, "Role of Entanglement in Two-photon Imaging," [J]. *Phys. Rev. Lett.* **87**, 123602(2001).
- [9] M. D' Angelo, Y. H. Kim, S. P. Kulik, and Y. H. Shih, "Identifying Entanglement Using Quantum Ghost Interference and Imaging," [J]. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 233601(2004).
- [10] G. Scarcelli, V. Berardi, and Y. Shih, "Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations?" [J]. *Phys. Rev. Lett.* **96**, 063602(2006).
- [11] R. S. Bennink, S. J. Bentley, and R. W. Boyd, "Quantum and Classical Coincidence Imaging," [J]. *Phys. Rev. Lett.* **92**, 033601(2004).
- [12] A. Valencia, G. Scarcelli, M. D' Angelo, and Y. Shih, "Two-Photon Imaging with Thermal Light," [J]. *Phys. Rev. Lett.* **94**, 063601(2004).
- [13] F. Ferri, D. Magatti, A. Gatti, M. Bache, E. Brambilla, and L. A. Lugiato, "High-resolution ghost imaging and ghost diffraction with thermal light," [J]. *Phys. Rev. Lett.* **94**, 183602(2005).
- [14] L. Basono, and P. Ottonello, "Experiment in lensless ghost imaging with thermal light," [J]. *Appl. Phys. Lett.* **89**, 091109(2006).
- [15] Y. H. Shih, "The physics of ghost imaging," [C]. *International Conference on Quantum Information*, (2008).
- [16] J. H. Shapiro, and R. W. Boyd, "The physics of ghost imaging," [J]. *Quantum Inf. Process*, (2012).
- [17] R. Meyers, K. S. Deacon, and Y. H. Shih, "Ghost-imaging experiment by measuring reflected photons," [J]. *Phys. Rev. A* **77**, 041801R(2008).
- [18] N. S. Bisht, E. K. Sharma, and H. C. Kandpal, "Experimental observation of lensless ghost imaging by measuring reflected photons," [J]. *Opt. Laser Eng.* **48**, 671-675(2010).



- [19] L. Basano, and P. Ottonello, “Diffuse-reflection ghost imaging from a double-strip illuminated by pseudo-thermal light,”[J]. *Opt. Commun.* **283**, 2657-2661(2010).
- [20] Y. H. Zhai, X. H. Chen, D. Zhang, and L. A. Wu, “Two-photon interference with true thermal light,”[J]. *Phys. Rev. A* **72**, 043805(2005).
- [21] B. I. Erkmen, and J. H. Shapiro, “Unified theory of ghost imaging with Gaussian-state light,”[J]. *Phys. Rev. A* **77**, 043809(2008).
- [22] J. H. Shapiro, “Computational ghost imaging,”[J]. *Phys. Rev. A* **78**, 061802(R) (2008).
- [23] Y. Bromberg, O. Katz, and Y. Silberberg, “Ghost imaging with a single detector,”[J]. *Phys. Rev. A*. **79**, 053840(2009).