

强度涨落在热光鬼成像中的作用*

刘雪峰¹⁾ 姚旭日¹⁾ 李明飞²⁾ 俞文凯¹⁾ 陈希浩¹⁾³⁾ 孙志斌¹⁾
吴令安^{2)†} 翟光杰¹⁾

1) (中国科学院空间科学与应用研究中心, 空间科学实验技术研究室, 北京 100190)

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)

3) (辽宁大学物理学院, 沈阳 110036)

(2013年4月15日收到; 2013年5月13日收到修改稿)

热光鬼成像的图像质量在实际应用中具有重要作用. 通过理论分析和数值模拟, 发现光场的强度涨落程度会影响热光鬼成像的对比度, 基于此, 提出可以通过调节热光场的平均强度和强度波动的方差来提高成像对比度, 并且研究了这一方法对成像信噪比的影响. 将这种方法与另一种提高成像对比度的方法——高阶鬼成像进行了对比, 所得结果将有助于提高对热光鬼成像的理解.

关键词: 鬼成像, 强度涨落, 对比度, 信噪比

PACS: 42.30.Va, 42.50.Ar, 42.30.Ms

DOI: 10.7498/aps.62.184205

1 引言

鬼成像是近年来引起广泛研究的一种成像技术. 在鬼成像中, 光源被分成两束, 一束光照在物体上, 并通过一个没有空间分辨能力的桶探测器接收透过物体的总光强, 另一束光直接被一个具有空间分辨能力的探测器探测, 将两个探测器的信号进行二阶关联运算即可得到物体的像. 这一成像方法的令人惊奇之处在于, 提供空间分辨的探测器所探测的是并没有经过物体的光. 第一个鬼成像实验是史砚华小组^[1]利用自发参量下转换产生的纠缠光子对实现的. 起初, 鬼成像被认为是纠缠光所特有的性质^[2], 但之后人们发现使用热光源同样可以实现鬼成像^[3-10]. 除了光路上稍有差别^[11], 纠缠光与热光的鬼成像方法是非常相似的.

由于热光源更易获得, 并且数据处理更加简单快速, 热光鬼成像更适合于在实际应用中使用. 然而, 热光鬼成像的一个关键缺点在于成像质量较差.

理论上, 热光鬼成像的对比度最大值为 $1/3$, 而纠缠光鬼成像的对比度理论上可以达到 1 . 各研究小组已经提出多种提高热光鬼成像对比度的方法^[12-14], 其中最受关注的一种方法是高阶鬼成像. 理论和实验都发现, 随着阶数的增加, 利用光场的高阶关联可以显著提高成像对比度^[15-20]. 信噪比是评价图像质量的另一个重要指标. 一些文献对纠缠光和热光鬼成像的信噪比进行了分析^[21-27], 发现在相同光子数的前提下, 热光鬼成像的信噪比同样会低于纠缠光的情况. 如何提高成像信噪比也是促进热光鬼成像实际应用的重要任务.

最近我们小组发现, 通过挑选强度涨落较大的采样可以提高热光鬼成像的成像质量, 并将其命名为“对应”像^[28]. 本文对热光鬼成像的对比度和信噪比进行了理论分析和数值模拟, 发现热光鬼成像的对比度与探测器信号的平均强度以及强度涨落密切相关, 因此, 通过适当调节探测结果可以控制成像的对比度. 利用数值模拟验证了这种方法可以有效提高成像对比度, 同时不会影响信噪比.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB922904)、国家自然科学基金 (批准号: 60978002, 61274024) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2011AA120102) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wula@aphy.iphy.ac.cn

2 热光鬼成像的对比度

2.1 理论计算

首先来回顾热光鬼成像的实验原理,如图1. 热光源由激光打到旋转的毛玻璃上产生. 激光被毛玻璃散射后会产生随机的散斑图样,这些散斑被分束器分为两束,一束自由传播并由 CCD 等具有空间分辨能力的探测器探测,这一路叫做参考臂,另一束照射在物体上,并在物体后面用一个桶探测器收集透过物体的总光强,这一路叫做物臂. 物体和参考臂探测器与光源的距离必须一致,以保证物面和参考探测器面上的散斑图样相同. 成像时,随着毛玻璃的转动,散斑图样发生变化,两个探测器同时进行 N 组采样. 探测器的曝光时间必须远小于光源的相干时间,而两次采样的间隔必须远大于光源的相干时间. 这样一次采样时间内的散斑图样可以认为是不变的,而两次测量得到的散斑是完全独立的.

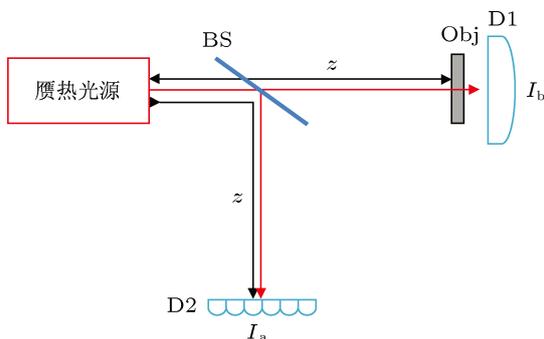


图1 热光鬼成像原理图 BS, 50/50分束器; Obj, 物体; D1, 桶探测器; D2, 有空间分辨能力的探测器; z , 物体和探测器D2到光源的距离

为了从 N 次采样的数据中重建物体的像, 数据处理的方法是将参考探测器每个点的光强值分别乘上当次采样时桶探测器的光强值, 再将 N 次采样的结果求平均. 也就是求参考探测器上每个点的光强与桶探测器光强的二阶关联函数

$$\begin{aligned} g^{(2)}(x_i) &= \frac{\langle I_b \cdot I_a(x_i) \rangle}{\langle I_b \rangle \langle I_a(x_i) \rangle} \\ &= 1 + \frac{\langle I_b \cdot I_a(x_i) \rangle - \langle I_b \rangle \langle I_a(x_i) \rangle}{\langle I_b \rangle \langle I_a(x_i) \rangle} \\ &= 1 + \frac{\text{cov}(I_b, I_a(x_i))}{\langle I_b \rangle \langle I_a(x_i) \rangle}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $I_a(x_i)$ 是参考探测器上点 x_i 处的光强, I_b 为桶探测器的光强, $I_b = \sum_{x_i} I_a(x_i)t(x_i)$, 其中 $t(x_i)$ 是

物体的透过函数, $\langle \dots \rangle$ 表示对 N 次采样求平均. I_b 和 $I_a(x_i)$ 的协方差定义为 $\text{cov}(I_b, I_a(x_i)) = \langle I_b \cdot I_a(x_i) \rangle - \langle I_b \rangle \langle I_a(x_i) \rangle$.

下面分析 $g^{(2)}$ 为何能够得出物体的像. 为了得到较好的成像分辨率, 光场的空间相干长度 S_c 必须小于待测物体的细节, 因此可以认为在一个空间相干长度之内物体的透过率是不变的. 由此 (1) 式可以写为

$$\begin{aligned} g^{(2)}(x_i) &= 1 + \frac{\text{cov}(N_c t(x_i) I_a(x_i), I_a(x_i))}{\langle I_b \rangle \langle I_a(x_i) \rangle} \\ &= 1 + t(x_i) \frac{N_c D(I_a(x_i))}{\langle I_b \rangle \langle I_a(x_i) \rangle}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $N_c = S_c/S_0$ 是相干面积包含的像素数, S_0 为一个像素的面积, $D(I_a(x_i))$ 是点 x_i 上的光强在 N 次测量中的方差. 对于一个均匀的光场, 有 $\langle I_a(x_i) \rangle = \langle I_a \rangle$ 和 $D(I_a(x_i)) = D(I_a)$. 桶探测器光强 I_b 的方差可以表示为

$$\begin{aligned} D(I_b) &= D\left(\sum_{x_i} I_a(x_i)t(x_i)\right) = N_c D(I_a) \sum_{x_i} t^2(x_i) \\ &= N_c N_m D(I_a), \end{aligned} \quad (3)$$

其中 $N_m = S_m/S_0 = \sum_{x_i} t^2(x_i)$. 对于没有灰度的物体, S_m 表示物体的透光面积. 对于有灰度的物体 S_m 仍然表征了物体的总透过率水平, 因此我们可以将其定义为广义的物体透过面积. (2) 式可以改写为

$$g^{(2)}(x_i) = 1 + t(x_i) \sqrt{\frac{S_c}{S_m} \frac{\sqrt{D(I_b)D(I_a)}}{\langle I_b \rangle \langle I_a \rangle}}. \quad (4)$$

不失一般性, 我们考虑一个没有灰度的物体, 即物体只包含透过函数为 0 和透过函数为 1 的部分. 当参考探测器上的点 x_i 对应物体上透光部分的点时, 二阶关联函数为

$$g_{\text{obj}}^{(2)} = 1 + \sqrt{\frac{S_c}{S_m} \frac{\sqrt{D(I_b)D(I_a)}}{\langle I_b \rangle \langle I_a \rangle}}. \quad (5)$$

当参考探测器上的点 x_i 对应物体上不透光部分的点时, 二阶关联函数为

$$g_{\text{back}}^{(2)} = 1, \quad (6)$$

由此得到热光鬼成像的对比度为

$$V = \frac{g_{\text{obj}}^{(2)} - g_{\text{back}}^{(2)}}{g_{\text{obj}}^{(2)} + g_{\text{back}}^{(2)}} \quad (7a)$$

$$= 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{S_c}{S_m} \frac{\sqrt{D(I_b)D(I_a)}}{2\langle I_b \rangle \langle I_a \rangle}} + 1}}. \quad (7b)$$

由 (7) 式可以看到, 鬼成像的对比度与物臂和参考臂探测器上光强的统计性质有关, 平均光强和光强涨落的方差都会影响成像对比度. 我们可以这样理解这一结论, 如果光场在时间和空间上都是均匀的, 那么每次测量的结果是相同的, 不会得到任何信息. 而散斑强度在时间和空间上存在涨落时, 每次测量时散斑强度分布不同, 通过物体的总光强就会发生变化, 因此每次测量都可以得到关于物体透过函数的部分信息. 可以说, 正是散斑强度的涨落使测量得到了物体的信息. 散斑强度的涨落越剧烈, 测量得到的物体信息量就越大. 我们可以用散斑平均强度和散斑强度变化的方差来衡量散斑强度涨落的程度, 散斑平均强度越小, 强度变化的方差越大, 强度涨落越剧烈, 成像对比度也越高.

2.2 数值模拟

下面通过数值模拟来验证热光鬼成像对比度和散斑光场强度涨落的关系. 数值模拟的方法是, 首先产生 N 个随机分布的散斑图样作为照射在物体上的散斑, 同时也是参考探测器 N 次测量的结果. 由于模拟中物体的透过函数已知, 根据散斑强度分布和物体透过函数可以计算出每次测量时透过物体的总光强, 即桶探测器 N 次测量的结果. 然后使用这 N 组参考探测器和桶探测器的测量结果对物体进行恢复.

模拟中物体为一个单缝, 物体面积是光场相干面积的 20 倍, $S_m/S_c = 20$, 采样次数为 10000 次. 光场平均强度 $\langle I_a \rangle = 1$, 因此桶探测器的平均强度 $\langle I_b \rangle = 20$. 对于高斯光场 $D(I_a) = 1$, 由 (3) 式可知 $D(I_b) = 20$. 数据处理中可以首先调节两个探测器的信号:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + k_1(I_{a0} - \langle I_{a0} \rangle) + c_1, \\ I_b &= I_{b0} + k_2(I_{b0} - \langle I_{b0} \rangle) + c_2, \end{aligned} \quad (8)$$

其中 I_{a0} 和 I_{b0} 是探测器的原始信号, $k_1, k_2 > -1$, $c_1 > -\langle I_{a0} \rangle$, $c_2 > -\langle I_{b0} \rangle$ 是调节参数. 因此有

$$\langle I_a \rangle = \langle I_{a0} \rangle + c_1, \quad \langle I_b \rangle = \langle I_{b0} \rangle + c_2, \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} D(I_a) &= (1 + k_1)^2 D(I_{a0}), \\ D(I_b) &= (1 + k_2)^2 D(I_{b0}). \end{aligned} \quad (9b)$$

选择不同的 c_1, c_2, k_1 和 k_2 , 可以调节探测器信号的平均强度和方差, 对调节后的信号使用 (1) 式计算

物体的像, 然后按照 (7a) 式计算成像对比度. $g_{obj}^{(2)}$ 和 $g_{back}^{(2)}$ 分别通过将物体透光和不透光部分的值求平均得到.

图 2(a), (b) 分别为对比度 V 与参考探测器信号 I_a 和桶探测器信号 I_b 的统计性质的关系曲线. 图中数据点为数值模拟结果, 虚线为根据 (7b) 式得到的理论曲线, 二者符合得很好. 在传统的鬼成像计算中, $\langle I_a \rangle = 1, D(I_a) = 1, \langle I_b \rangle = 20, D(I_b) = 20$, 因此成像对比度非常低. 然而从图中可以看到, 随着 $\langle I_a \rangle, \langle I_b \rangle$ 的减小, 或者 $D(I_a), D(I_b)$ 的增加, 对比度逐渐提高, 甚至可以超过热光鬼成像对比度的极限 $1/3$. 理论上说, 只要平均强度足够小或者强度变化方差足够大, 对比度甚至可以达到 1. 这是因为调制过后探测器强度信号的统计性质发生了变化, 实际上热光鬼成像 $1/3$ 的对比度极限是由热光的高斯统计性质决定的, 如果强度信号的统计性质发生了改变, 对比度限制也会发生改变. 根据模拟结果, 通过调节两个探测器的光强信号, 二阶关联计算得到的成像对比度可以得到有效提高.

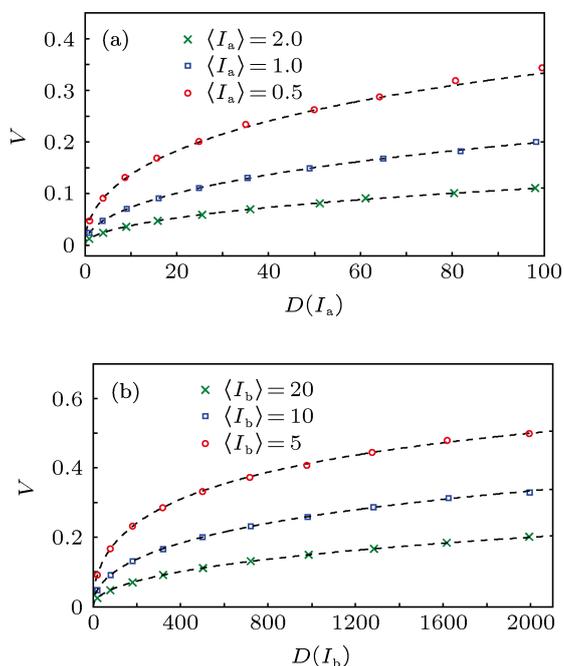


图 2 (a) 对比度随参考探测器信号方差变化的曲线, 三条曲线对应不同平均强度, $\langle I_a \rangle = 0.5, 1, 2$; (b) 对比度随桶探测器信号方差变化的曲线, 三条曲线对应不同平均强度, $\langle I_b \rangle = 5, 10, 20$; 图中数据点为数值模拟结果, 虚线为根据 (7b) 式得到的理论曲线

这种提高成像对比度的方法不仅可以通 过数据处理完成, 也可以很容易地在实际光路中实现, 如使用空间光调制器对光源强度进行调制 [29,30], 即可得到强度涨落更剧烈 的光场, 进而实现成像对

比度的提高. 由 (7b) 式, 增加光场相干长度也可以提高对比度, 但这同时会降低成像分辨率, 而我们提出的这种方法是对光场中每个点的强度分别调节, 不会改变光场相干长度, 因此也不会对分辨率产生影响.

3 热光鬼成像的信噪比

3.1 理论计算

除对比度之外, 信噪比也是衡量成像质量的一个重要指标. 从 (4—6) 式可以看到, 理论上鬼成像中物体不透光部分的二阶关联函数严格等于 1, 而透光部分必然大于 1, 因此从二阶关联函数的差异即可得到物体的像. 然而对于实际中的有限次测量来说, 统计平均的结果在理论值周围有涨落, 因此, 物体不透光部分, 也就是背景部分的二阶关联函数值会分布在 1 周围一定范围内, 当背景涨落产生的噪声幅度超过物体透光部分的二阶关联函数值, 即我们要得到的信号时, 图像信号便淹没在背景涨落中而无法分辨.

我们将鬼成像的信号定义为物体透光和不透光部分的二阶关联函数之差, 而噪声可以由背景部分二阶关联值的方差的平方根来定义.

$$\text{signal} = g_{\text{obj}}^{(2)} - g_{\text{back}}^{(2)} = \sqrt{\frac{S_c}{S_m}} \frac{\sqrt{D(I_b)D(I_a)}}{\langle I_b \rangle \langle I_a \rangle}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{noise} &= \sqrt{D(g_{\text{back}}^{(2)})} = \frac{1}{\langle I_b \rangle \langle I_a \rangle} \sqrt{D(\langle I_b \cdot I_a \rangle - \langle I_b \rangle \langle I_a \rangle)} \\ &= \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sqrt{D(I_b)D(I_a)}}{\langle I_b \rangle \langle I_a \rangle}, \end{aligned} \quad (11)$$

因此热光鬼成像的信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{\text{signal}}{\text{noise}} = \frac{g_{\text{obj}}^{(2)} - g_{\text{back}}^{(2)}}{\sqrt{D(g_{\text{back}}^{(2)})}} \quad (12a)$$

$$= \sqrt{\frac{NS_c}{S_m}}. \quad (12b)$$

我们发现, 信噪比与 I_a 和 I_b 的统计性质是无关的. 由 (10) 和 (11) 式看出, 成像的信号和噪声都与探测器上光强信号的统计性质有关, 但其依赖关系是相同的. 上面提到, 成像中的噪声是背景部分的涨落引起的, 因此会随着光强涨落的剧烈而增加, 而光强的涨落同样是产生图像信号的原因, 因此光场的强度涨落程度不会影响成像的信噪比. 由 (12) 式看

出, 热光鬼成像的信噪比只和采样次数以及物体面积与相干面积之比有关.

3.2 数值模拟

数值模拟的方法与 2.2 节中相同. 参数选择为 $S_m/S_c = 20$, 采样次数 $N = 10000$. 图 3(a), (b) 分别为成像信噪比与 I_a 和 I_b 统计性质的关系曲线. 可以看到当两探测器的光强均值和方差变化时, 成像信噪比基本不变, 这与 (12) 式以及前面的讨论是一致的.

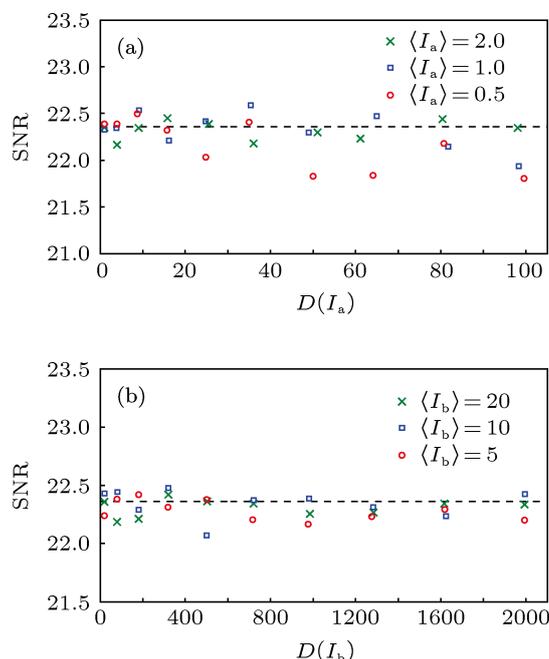


图 3 (a) 信噪比随参考探测器信号方差变化的曲线, 三条线对应不同平均强度, $\langle I_a \rangle = 0.5, 1, 2$; (b) 信噪比随桶探测器信号方差变化的曲线, 三条线对应不同平均强度, $\langle I_b \rangle = 5, 10, 20$; 图中数据点为数值模拟结果, 虚线为根据 (12b) 式得到的理论曲线

由 (2) 式可知, I_b 与 I_a 的关联值正比于光场的相干面积, 而桶探测器的平均强度与物体面积成反比, 因此 (10) 式中成像的信号与 S_c/S_m 成正比. 另一方面, 多个相干面积的光强叠加之后总光强的涨落会变小. 因此, 当物体面积相对光场相干面积变小时, 桶探测器收集到的光中相干面积数变少, 涨落幅度就会变大, 由 (11) 式, 成像的噪声与 $\sqrt{S_c/S_m}$ 成正比. 因此成像信噪比是与 $\sqrt{S_c/S_m}$ 成正比的. 图 4(a) 为数值模拟的结果, 可以看到成像对比度和信噪比都会随着物体面积与相干面积之比的减小而增加, 但信噪比的增加速度较小, 这是因为物体面积与相干面积之比减小时噪声同时增加造成的,

数值模拟的结果与理论分析是符合的.

二阶关联函数是一个统计平均的概念, 当采样数增加时, 图像的背景值更加接近于理论值 1, 也就是背景涨落带来的噪声减小. 而成像信号是通过二阶关联的平均值定义的, 与其偏离平均值的波动无关, 采样数不会对信号大小产生影响, 因此采样数的增加会对信噪比有提高作用. 图 4(b) 为数值模拟的结果, 可以看到数值模拟与理论曲线十分符合, 成像对比度与采样数无关, 而信噪比则会随着采样数的增加得到提高.

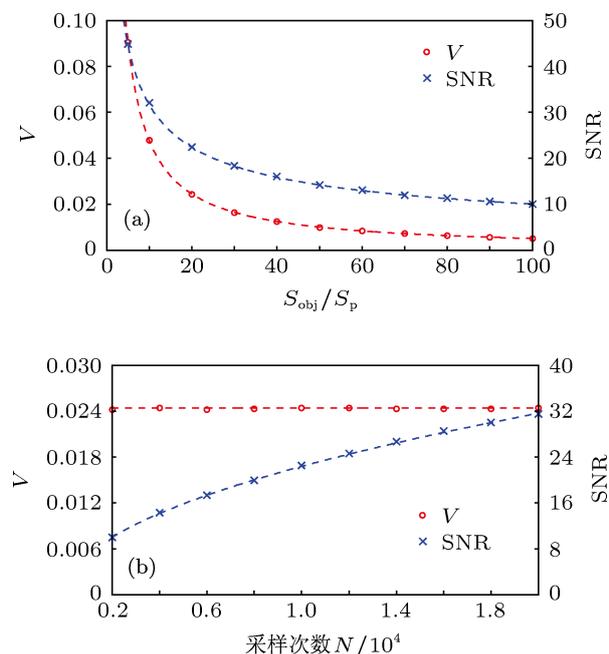


图 4 (a) 对比度和信噪比随物体面积与相干面积之比 S_m/S_c 变化的曲线, 虚线为理论曲线, 下面的线为根据 (7b) 式得到的对比度理论曲线, 上面的线为根据 (12b) 式得到的信噪比理论曲线, 圆圈和叉形分别为对比度和信噪比的数值模拟结果, 采样次数 $N = 10000$; (b) 对比度和信噪比随采样次数变化的曲线, 虚线为理论曲线, 下面的线为根据 (7b) 式得到的对比度理论曲线, 上面的线为根据 (12b) 式得到的信噪比理论曲线, 圆圈和叉形分别为对比度和信噪比的数值模拟结果, $S_m/S_c = 20$

4 热光高阶鬼成像

近年来, 高阶鬼成像被广泛用于提高热光鬼成像对比度, 理论和实验工作都证明了高阶鬼成像在提高成像对比度方面具有明显的效果 [17,18]. 在实验上, 高阶鬼成像需要通过分光等方式产生 n 路相同的散斑分布, 通过多个桶探测器和参考探测器的光强高阶关联函数得到物体的像. n 阶鬼成像的计算方法为

$$g^{(n)} = \frac{\langle I_b^p \cdot I_a^q \rangle}{\langle I_b \rangle^p \langle I_a \rangle^q} \quad (p+q=n), \quad (13)$$

其中 p, q 分别为物臂和参考臂的数目, 并且 $p+q=n$. 下面通过数值模拟来讨论两种极端情况下的成像对比度和信噪比, 一种是只有一个物臂, 其他 $n-1$ 路为参考臂; 另一种是只有一路参考臂, 其他 $n-1$ 路为物臂.

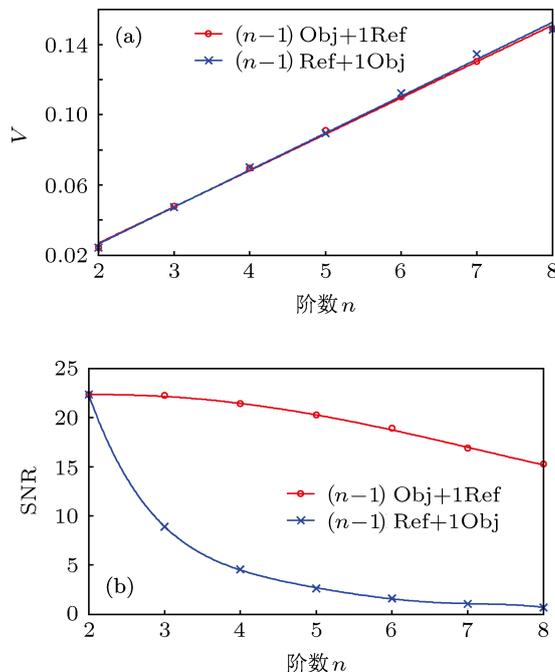


图 5 高阶鬼成像图像质量与阶数的关系 (a) 对比度与阶数的关系; (b) 信噪比与阶数的关系; 参数选择为 $S_m/S_c = 20$, 采样次数 $N = 10000$, 圆圈为 $n-1$ 个物臂和 1 个参考臂的情况, 叉形为 $n-1$ 个参考臂和 1 个物臂的情况, 曲线为多项式拟合的结果

图 5 为数值模拟得到的高阶鬼成像对比度和信噪比与阶数的关系. 参数选择为 $S_m/S_c = 20$, $N = 10000$. 从图 5(a) 中可以看到高阶鬼成像的对比度随着阶数的提高基本呈线性增长, 并且两种情况的对比度可以认为完全一致. 而根据图 5(b), 高阶鬼成像的信噪比很明显是随着阶数的增加而下降的, 尤其是 $n-1$ 个参考臂和 1 个物臂的情况, 在阶数较高时信噪比很快下降到 1 以下, 也就是图像信号完全淹没在背景涨落的噪声里. 考虑到高阶鬼成像的对比度是有明显提高的, 这说明高阶鬼成像同时也更大幅度地提高了成像中的噪声水平. 这一结论与其他分析高阶鬼成像信噪比的文章是类似的, 但也有所不同. 如在文献 [21] 中, 理论分析表明在物体面积较大时, 信噪比随着参考臂的数量增加而显著下降, 与物臂的数目没有关系. 数值模拟结果表明, 即使是 $n-1$ 个物臂和 1 个参考臂的情况, 信噪比仍然会随着物臂的增加而略有下降, 只

是下降的速度与参考臂数目增加时相比较慢. 另外, 文献 [20, 23] 对不进行归一化的高阶鬼成像进行了分析, 提出有一个大于 1 的最佳的物臂数量, 可以使成像信噪比达到最大. 而本文对归一化的高阶鬼成像模拟结果显示, 成像信噪比随着物臂和参考臂数量的增加都是单调下降的.

5 结论

本文系统分析了影响热光鬼成像对比度和信噪比的因素, 数值模拟和理论计算取得相符的结果.

我们发现参考探测器和桶探测器上光场的强度涨落程度会影响成像对比度, 光场平均强度越小, 强度波动的方差越大, 成像对比度越高, 因此可以通过数据处理或者产生强度涨落更剧烈的光场进行鬼成像来提高成像对比度. 而热光鬼成像的信噪比只和采样次数以及物体面积和光场相干面积之比有关. 通过数值模拟, 我们发现虽然高阶鬼成像可以提高对比度, 但同时也会降低信噪比. 从这一角度来看, 通过增加光场强度涨落来提高成像对比度的方法具有更大的优势.

-
- [1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** R3429
- [2] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, Teich M C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 123602
- [3] Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, Shih Y H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 063601
- [4] Meyers R, Deacon K S, Shih Y H 2008 *Phys. Rev. A* **77** 041801(R)
- [5] Zhang D, Zhai Y H, Wu L A, Chen X H 2005 *Opt. Lett.* **30** 2354
- [6] Chen X H, Liu Q, Luo K H, Wu L A 2009 *Opt. Lett.* **34** 695
- [7] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 113601
- [8] Cheng J, Han S S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 093903
- [9] Gatti A, Brambilla E, Bache M, Lugiato L A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 093602
- [10] Cai Y J, Zhu S Y 2005 *Phys. Rev. E* **71** 056607
- [11] Cao D Z, Xiong J, Wang K G 2005 *Phys. Rev. A* **71** 013801
- [12] Basano L, Ottonello P 2007 *Appl. Opt.* **46** 6291
- [13] Gong W L, Han S S 2010 *Phys. Lett. A* **374** 1005
- [14] Hong P L, Liu J B, Zhang G Q 2011 *Arxiv*. 1108.3612v1
- [15] Cao D Z, Xiong J, Zhang S H, Lin L F, Gao L, Wang K G 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 201102
- [16] Liu J B, Shih Y H 2009 *Phys. Rev. A* **79** 023819
- [17] Liu Q, Chen X H, Luo K H, Wu W, Wu L A 2009 *Phys. Rev. A* **79** 053844
- [18] Agafonov I N, Chekhova M V, Iskhakov T S, Wu L A 2009 *J. Mod. Opt.* **56** 422
- [19] Chen X H, Agafonov I N, Luo K H, Liu Q, Xian R, Chekhova M V, Wu L A 2010 *Opt. Lett.* **35** 1166
- [20] Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W 2009 *Opt. Lett.* **34** 3343
- [21] Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W 2010 *Opt. Express* **18** 5562
- [22] Agafonov I N, Chekhova M V, Penin A N 2009 *Arxiv*. 0911.3718v2
- [23] Iskhakov T, Allevi A, Kalashnikov D A, Sala V G, Takeuchi M, Bondani M, Chekhova M 2011 *Eur. Phys. J. Special Topics* **199** 127
- [24] Erkmen B I, Shapiro J H 2009 *Phys. Rev. A* **79** 023833
- [25] O'Sullivan M N, Chan K W C, Boyd R W 2010 *Phys. Rev. A* **82** 053803
- [26] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, Gatti A 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 253603
- [27] Brida G, Chekhova M V, Fornaro G A, Genovese M, Lopaeva E D, Berchera I R 2011 *Phys. Rev. A* **83** 063807
- [28] Luo K H, Huang B Q, Zheng W M, Wu L A 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 074216
- [29] Shapiro J H 2008 *Phys. Rev. A* **78** 061802(R)
- [30] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y 2009 *Phys. Rev. A* **79** 053840

The role of intensity fluctuations in thermal ghost imaging*

Liu Xue-Feng¹⁾ Yao Xu-Ri¹⁾ Li Ming-Fei²⁾ Yu Wen-Kai¹⁾ Chen Xi-Hao¹⁾³⁾
Sun Zhi-Bin¹⁾ Wu Ling-An^{2)†} Zhai Guang-Jie¹⁾

1) (*Laboratory of Space Science Experiment Technology, Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

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

3) (*College of Physics, Liaoning University, Shenyang 110036, China*)

(Received 15 April 2013; revised manuscript received 13 May 2013)

Abstract

The quality of the image in ghost imaging with thermal light is of great importance in practical applications. Through theoretical analysis and simulation, we find that the intensity fluctuations of the field can greatly influence the visibility of thermal ghost imaging. According to this, we suggest a new scheme to improve the visibility by appropriately scaling the intensity and variance of the incident thermal field. The influence of this method on the signal-to-noise ratio is also studied. In addition, comparison is made with the high-order correlation ghost imaging, another means adopted in recent years to increase the visibility. Our analysis should help promote our understanding of thermal ghost imaging.

Keywords: ghost imaging, intensity fluctuation, visibility, signal-to-noise ratio

PACS: 42.30.Va, 42.50.Ar, 42.30.Ms

DOI: 10.7498/aps.62.184205

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB922904), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60978002, 61274024), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA120102).

† Corresponding author. E-mail: wula@aphy.iphy.ac.cn