

光的偏振对热光关联成像的影响*

张二峰 戴宏毅[†]

(国防科学技术大学理学院物理系,长沙 410073)

(2010年6月24日收到;2010年8月2日收到修改稿)

根据完全偏振光的不同偏振态和部分偏振光的不同偏振度对二阶关联函数的影响,利用统计光学理论研究了光的不同偏振性质对关联成像的可见度和信噪比的影响.研究表明,光的偏振对热光关联成像的影响体现在部分偏振光的不同偏振度上,关联成像的可见度是偏振度的二次函数,由二阶关联函数方法得到的信噪比随着偏振度增大而提高,而利用减去背景项的二阶关联函数以及二阶相干度方法得到的信噪比均与偏振度无关.

关键词: 关联成像, 偏振, 可见度, 信噪比**PACS:** 42.50.Ar, 42.30.Va, 77.22.Ej

1. 引言

20世纪80年代末,前苏联学者 Klyshko^[1]根据自发参量下转换光子对的纠缠行为,提出了关联成像方案.1995年,Pittman等^[2]首次在实验上借助于自发参量下转换光子对实现了双光子纠缠源的关联成像.由于纠缠光子对成像是利用量子纠缠坐标、动量关联的特点设计的,因此,人们很自然地认为关联成像是一种量子现象,只有量子纠缠才能实现关联成像.2001年,Abouraddy等^[3]研究了双光子成像中量子纠缠的作用,认为成像系统中纠缠光子所表现出的效应是其他双光子源所不能模拟的,纠缠是获得关联成像的先决条件.

经典关联的光能否实现关联成像实验,这样的问题还是引发了人们的思考.2002年,Bennink等^[4]首次利用经典关联的光进行了关联成像实验,否认了量子纠缠是关联成像的必要条件.2004年,Gatti等^[5]证明了经典关联光能够实现纠缠双光子的一些奇特效应;同年,Cheng等^[6]在理论上提出了用经典关联光进行无透镜傅里叶变换成像的方案,讨论了其在X射线衍射方面的应用.2005年,Valencia等^[7]在实验上得到了经典热光源的关联成像,并且提出了经典关联成像的高斯薄透镜成像方程;Cao等^[8]通过比较热光和量子纠缠光成像公式中的

差别,指出热光源类似于一个相位共轭镜可以实现无透镜成像;随后,Zhang等^[9]利用真热光源在实验上实现了关联成像.

近年来,热光关联成像引起了国内外学者的广泛关注^[4-12],然而热光关联成像存在背景项,导致其可见度较低,且热光关联成像不可避免的存在噪声.这些问题都对热光关联成像的实际应用带来了挑战.针对光是一种横波,存在偏振现象,Liu等^[13]研究了光的偏振对热光HBT效应的影响,但是热光的偏振对关联成像会产生什么样的影响呢?这一问题国内外文献还罕见报道.我们将根据完全偏振光的不同偏振态和部分偏振光的不同偏振度对二阶关联函数的影响,利用统计光学的理论,通过对关联成像探测面上的光强进行离散化处理来研究光的不同偏振性质对关联成像的可见度和信噪比的影响.这将对关联成像的理论研究和实际应用具有重大意义.

2. 关联成像的基本理论

热光关联成像原理^[14]如图1所示,其中 D_1 代表桶探测器,用于接收通过物体的总光强,而 D_2 是一扫描点探测器或电荷耦合器件(charge-coupled device,简记为CCD),用于对光强进行分辨率测量, d_A 和 d_B 分别表示热光源到待测物体和探测器 D_2

* 国家自然科学基金(批准号:11074307,10774192)和华东师范大学精密光谱国家重点实验室开放研究基金资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: hydai@nudt.edu.cn

的距离,关联器用于计算两个探测器所探测到光强的二阶关联函数.

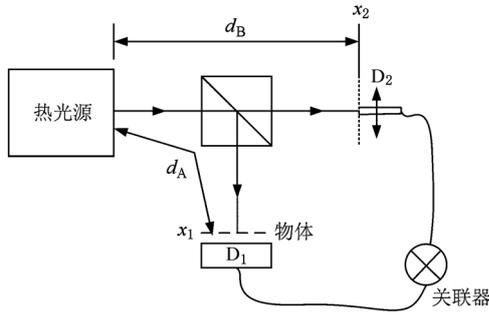


图1 热光关联成像原理图

利用相干激光照射旋转的毛玻璃产生热光,然后再经过一个 50:50 分束器把产生的热光分成两束:其中一束照射待成像物体,再用探测器 D_1 对透过待成像物体的光强进行桶测量;另外一束照射探测器 D_2 ,对其做分辨率测量.最后对两束光进行光强符合测量,当热光源距离待测物体和探测器 D_2 的距离相等时即可得到待成像物体的空间信息.

线偏振热光的二阶关联函数定义为^[15, 16]

$$\begin{aligned} \langle G^{(2)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rangle &= \langle I(\mathbf{x}_1)I(\mathbf{x}_2) \rangle \\ &= \langle E^*(\mathbf{x}_1)E(\mathbf{x}_1)E^*(\mathbf{x}_2)E(\mathbf{x}_2) \rangle. \end{aligned} \quad (1)$$

根据高斯矩定理^[17, 18],对于服从圆高斯统计分布的光场,其高阶关联函数可以用一阶关联函数来表示,因此热光的二阶关联函数为

$$\begin{aligned} \langle G^{(2)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rangle &= \langle E^*(\mathbf{x}_1)E(\mathbf{x}_1) \rangle \langle E^*(\mathbf{x}_2)E(\mathbf{x}_2) \rangle \\ &\quad + |\langle E^*(\mathbf{x}_1)E(\mathbf{x}_2) \rangle|^2 \\ &= \langle I(\mathbf{x}_1) \rangle \langle I(\mathbf{x}_2) \rangle \\ &\quad + |\langle E^*(\mathbf{x}_1)E(\mathbf{x}_2) \rangle|^2. \end{aligned} \quad (2)$$

此时,对透过物体的光进行桶测量,则得到

$$\begin{aligned} &\int d\mathbf{x}_1 t(\mathbf{x}_1) \langle G^{(2)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rangle \\ &= \int d\mathbf{x}_1 t(\mathbf{x}_1) [\langle E^*(\mathbf{x}_1)E(\mathbf{x}_1) \rangle \langle E^*(\mathbf{x}_2)E(\mathbf{x}_2) \rangle \\ &\quad + |\langle E^*(\mathbf{x}_1)E(\mathbf{x}_2) \rangle|^2] \\ &= \int d\mathbf{x}_1 t(\mathbf{x}_1) \langle I(\mathbf{x}_1) \rangle \langle I(\mathbf{x}_2) \rangle \\ &\quad + \int d\mathbf{x}_1 t(\mathbf{x}_1) |\langle E^*(\mathbf{x}_1)E(\mathbf{x}_2) \rangle|^2. \end{aligned} \quad (3)$$

利用(3)式右边第二项即可得到待测物体的空间信

息,但是右边的第一项对成像不起作用,所以关联成像存在背景项,其可见度小于1.

上面讨论的是线偏振热光.其他偏振形式的热光对关联成像会产生什么样的影响呢?为了研究光的偏振对关联成像的影响,我们首先分析其对二阶关联函数的影响.

3. 光的偏振对二阶关联函数的影响

3.1. 完全偏振光的不同偏振态对二阶关联函数的影响

完全偏振光分为线偏振光、椭圆偏振光和圆偏振光.完全偏振光可以分解为相互正交的线偏振 p 光和 s 光,其光场分别为 E_p 和 E_s , 相应的瞬时光强分别为 I_p 和 I_s . 令

$$E_p = aE_s e^{i\pi/2}, \quad (4)$$

其中 a 为实数,表示 p 光与 s 光的振幅比.特别的,当 $a = 0$ 时,热光为线偏振光,当 $a = 1$ 时,热光为圆偏振光.指数部分的正负号分别代表光场为左旋或右旋偏振光.

对于不同偏振态的完全偏振光,其二阶关联函数为

$$\begin{aligned} \langle G^{(2)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rangle &= \langle [I_p(\mathbf{x}_1) + I_s(\mathbf{x}_1)] \\ &\quad \times [I_p(\mathbf{x}_2) + I_s(\mathbf{x}_2)] \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

由(4)式可得

$$\langle G^{(2)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rangle = (1 + a^2) \langle I_s(\mathbf{x}_1)I_s(\mathbf{x}_2) \rangle. \quad (6)$$

根据上式可知,对于不同偏振态的完全偏振光,其二阶关联函数可以简化为线偏振光的二阶关联函数,因此完全偏振光的不同偏振态对二阶关联函数没有影响.

3.2. 部分偏振光的不同偏振度对二阶关联函数的影响

部分偏振光可以分解为两个正交方向上相互独立的线偏振光之和,且部分偏振光可以用偏振度来描述.光的偏振度定义为^[19]

$$P = \frac{\langle I_{\max} \rangle - \langle I_{\min} \rangle}{\langle I_{\max} \rangle + \langle I_{\min} \rangle}, \quad (7)$$

其中 $\langle I_{\max} \rangle$ 和 $\langle I_{\min} \rangle$ 分别为两个正交方向上线偏振光平均光强的极大值和极小值, $P = 1$ 代表线偏振光, $P = 0$ 代表自然光.

对于不同偏振度的光,其二阶关联函数为

$$\langle G^{(2)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rangle = \langle [I_p(\mathbf{x}_1) + I_s(\mathbf{x}_1)][I_p(\mathbf{x}_2) + I_s(\mathbf{x}_2)] \rangle, \quad (8)$$

其中 I_p 和 I_s 分别为两个正交方向上的线偏振瞬时光强. 此时, 由于在正交方向上的光强之间相互独立^[13], 即

$$\langle I_p(\mathbf{x})I_s(\mathbf{y}) \rangle = \langle I_p(\mathbf{x}) \rangle \langle I_s(\mathbf{y}) \rangle. \quad (9)$$

则(8)式可简化为

$$\begin{aligned} & \langle G^{(2)}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \rangle \\ &= \langle [I_p(\mathbf{x}_1) + I_s(\mathbf{x}_1)] \\ & \quad \times [I_p(\mathbf{x}_2) + I_s(\mathbf{x}_2)] \rangle \\ &= \langle I_p(\mathbf{x}_1)I_p(\mathbf{x}_2) \rangle \\ & \quad + \langle I_s(\mathbf{x}_1)I_s(\mathbf{x}_2) \rangle \\ & \quad + \langle I_p(\mathbf{x}_1) \rangle \langle I_s(\mathbf{x}_2) \rangle \\ & \quad + \langle I_s(\mathbf{x}_1) \rangle \langle I_p(\mathbf{x}_2) \rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

由此可以看出, (10)式右边的前两项分别为线偏振 p 光和 s 光的二阶关联函数, 而右边后两项则为线偏振 p 光和 s 光的强度平均值乘积. 故部分偏振光的不同偏振度对二阶关联函数的影响是不同的.

4. 光的偏振对关联成像可见度和信噪比的影响

根据上面讨论可知, 光的偏振对二阶关联函数的影响体现在不同的偏振度上, 从而由(3)式可以看出, 光的偏振对热光关联成像的影响也体现在不同的偏振度上. 关联成像的质量主要用可见度和信噪比来描述, 下面将主要研究光的偏振度对关联成像可见度和信噪比的影响.

4.1. 光的偏振度对热光关联成像可见度的影响

利用文献[20, 21]中的关联成像研究方法, 对两个探测器探测面上的光强进行离散化处理, 把探测器的探测面离散化, 分成一系列的像素点, 且离散化后每个像素点的面积为探测器上热光的相干面积^[22], 此时, 可以认为不同像素点上的瞬时光强相互独立, 即

$$\langle I(\mathbf{x}_i)I(\mathbf{x}_j) \rangle = \langle I(\mathbf{x}_i) \rangle \langle I(\mathbf{x}_j) \rangle \quad (i \neq j). \quad (11)$$

则此时待成像物体的透过面积包含的像素点数目为

$$T = S/S_c, \quad (12)$$

其中 S 为待成像物体的透过面积, S_c 为探测面上热光的相干面积.

为了便于分析, 假定每个像素点上的平均光强是相等的, 且光源的光强足够大, 以至于探测过程中的散粒噪声可以忽略^[23]. 这样, 关联成像的噪声只来自于经典的光强涨落.

线偏振热光瞬时光强的概率分布函数为^[24, 25]

$$p_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) & (I \geq 0), \\ 0 & (I < 0), \end{cases} \quad (13)$$

其中 $\langle I \rangle \equiv \mu$. 一个部分偏振光的瞬时光强总是可以分成两个互不相关的偏振分量的强度之和

$$I = I_p + I_s, \quad (14)$$

其中瞬时光强 I_p 和 I_s 的期望值分别为

$$\langle I_p \rangle = \frac{\langle I \rangle}{2}(1 + P),$$

$$\langle I_s \rangle = \frac{\langle I \rangle}{2}(1 - P). \quad (15)$$

则部分偏振光的瞬时光强的概率分布为

$$p_I(I) = \begin{cases} \frac{1}{P\langle I \rangle} \left\{ \exp\left[-\frac{2I}{(1+P)\langle I \rangle}\right] - \exp\left[-\frac{2I}{(1-P)\langle I \rangle}\right] \right\} & (P > 0, I \geq 0), \\ \left(\frac{2}{\langle I \rangle}\right)^2 I \exp\left(-\frac{2I}{\langle I \rangle}\right) & (P = 0, I \geq 0), \\ 0 & (I < 0). \end{cases} \quad (16)$$

此时对关联成像二阶关联函数进行离散化表示

$$\langle G(\mathbf{x}) \rangle = \left\langle \int_S I(\mathbf{y}) d\mathbf{y} I(\mathbf{x}) \right\rangle = \langle I_0 I(\mathbf{x}) \rangle, \quad (17)$$

其中 $I_0 = \sum_{\mathbf{y}_{in}}^T I(\mathbf{y}_{in})$ 表示桶测量器收集到的光强, \mathbf{y}_{in} 表示物体透过面积内部的像素点.

利用(16)式得

$$\langle I(\mathbf{x}) \rangle = \mu,$$

$$\langle I_0 \rangle = \left\langle \sum_{\mathbf{y}_{in}}^T I(\mathbf{y}_{in}) \right\rangle = T\mu, \quad (18a)$$

$$\langle G(\mathbf{x}) \rangle = \left\langle \left[\sum_{\mathbf{y}_{in}}^T I(\mathbf{y}_{in}) \right] I(\mathbf{x}) \right\rangle$$

$$= \begin{cases} \left(T + \frac{1+P^2}{2}\right)\mu^2 & (\mathbf{x} = \mathbf{x}_{in}), \\ T\mu^2 & (\mathbf{x} = \mathbf{x}_{out}). \end{cases} \quad (18b)$$

其中 \mathbf{x}_{in} 和 \mathbf{x}_{out} 分别代表探测面上对应的像素点在物体透过面积的内部和外部.

此时,热光关联成像的可见度为

$$V = \frac{\langle G(\mathbf{x}) \rangle_{\max} - \langle G(\mathbf{x}) \rangle_{\min}}{\langle G(\mathbf{x}) \rangle_{\max} + \langle G(\mathbf{x}) \rangle_{\min}} = \frac{1+P^2}{4T+1+P^2}. \quad (19)$$

图 2 表示当 $T = 100$ 时,利用(19)式得到的关联成像可见度 V 与偏振度 P 的关系,且由(19)式可得,当 T 较大时,

$$V \approx \frac{1+P^2}{4T}. \quad (20)$$

由此可以看出,二阶关联成像的可见度将随着热光偏振度的增大而提高.

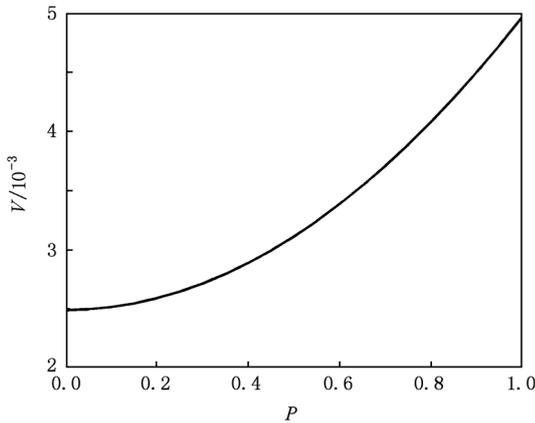


图 2 当 $T = 100$ 时,利用(19)式得到的可见度 V 随偏振度 P 的变化

4.2. 光的偏振度对热光关联成像信噪比的影响

在上节,我们研究了光的偏振度对热光关联成像可见度的影响.然而,关联成像可见度只代表由关联成像得到的物体的有效信息在总信息中占得比重,可见度越大,像的质量不一定就越好,相对于可见度来说,关联成像的信噪比是影响其质量的重要因素^[21, 26].

在前面分析热光二阶关联函数时,是对所得到的瞬时光强乘积求期望值,然而在现实中,不可能得到其期望值,只能通过进行多次测量,然后再对测量值取算术平均值来近似其期望值,这样,最后的测量值就会存在一定的误差,所得像的空间信息

就会有一定的噪声.由于利用不同的数据处理方法得到的像的噪声也不相同,下面我们就三种常见的关联成像数据处理方法来计算其信噪比,分别是计算关联成像的二阶关联函数^[20, 21]、减去背景项的二阶关联函数^[7, 14]和关联成像的二阶相干度^[9]

$$G(\mathbf{x}) = M[I_0 I(\mathbf{x})], \quad (21a)$$

$$G'(\mathbf{x}) = M[I_0 I(\mathbf{x})] - M[I_0]M[I(\mathbf{x})], \quad (21b)$$

$$g(\mathbf{x}) = \frac{M[I_0 I(\mathbf{x})]}{M[I_0]M[I(\mathbf{x})]}, \quad (21c)$$

其中 $M[X] \equiv \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N X^{(s)}$ 表示对 X 进行 N 次测量以后取平均值.

因为测量次数 N 有限, $M[I_0 I(\mathbf{x})]$, $M[I_0]$ 和 $M[I(\mathbf{x})]$ 都可以看作随机变量,所以(21)式可以看作随机变量 $M[I_0 I(\mathbf{x})]$, $M[I_0]$ 和 $M[I(\mathbf{x})]$ 的函数.

为了便于分析,把 $M[I_0 I(\mathbf{x})]$, $M[I_0]$ 和 $M[I(\mathbf{x})]$ 分别记为 X, Y 和 Z , 则不同的关联成像数据处理方法可以记为 X, Y 和 Z 的函数,用 $F(\mathbf{x}) = f(X, Y, Z)$ 来表示,并且定义 $\bar{F}(\mathbf{x})$ 为函数 $F(\mathbf{x})$ 在 X, Y 和 Z 取期望值时得到的函数值.则对于 $G(\mathbf{x}), G'(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{x}), F(\mathbf{x})$ 分别为 $X, X - YZ$ 和 X/YZ .

关联成像的信噪比定义为^[23]

$$\sigma(F) = \frac{\bar{F}(\mathbf{x}_{in}) - \bar{F}(\mathbf{x}_{out})}{\sqrt{\frac{1}{2}[\Delta^2 F(\mathbf{x}_{in}) + \Delta^2 F(\mathbf{x}_{out})]}} \quad (22)$$

其中 $\Delta^2 F(\mathbf{x}) = \langle (F(\mathbf{x}) - \bar{F}(\mathbf{x}))^2 \rangle$ 表示函数 $F(\mathbf{x})$ 测量值与期望值之间的偏差.

利用(18)式可以得到不同数据处理方法下信号值 $\bar{F}(\mathbf{x}_{in}) - \bar{F}(\mathbf{x}_{out})$, 所以只要能够得到关联成像的噪声,就可以求得其信噪比.又因为 $F(\mathbf{x})$ 是随机变量 X, Y 和 Z 的函数,这时可以利用文献[27]中的误差传播公式求 $\Delta^2 F(\mathbf{x})$, 可得到

$$\Delta^2 G(\mathbf{x}) = \Delta^2 X, \quad (23a)$$

$$\begin{aligned} \Delta^2 G'(\mathbf{x}) &= \Delta^2 X + \langle Z \rangle^2 \Delta^2 Y \\ &+ \langle Y \rangle^2 \Delta^2 Z - 2\langle Z \rangle \text{cov}(X, Y) \\ &- 2\langle Y \rangle \text{cov}(X, Z) \\ &+ 2\langle Y \rangle \langle Z \rangle \text{cov}(Y, Z), \end{aligned} \quad (23b)$$

$$\begin{aligned} \Delta^2 g(\mathbf{x}) &= \frac{1}{\langle Y \rangle^2 \langle Z \rangle^2} \left[\Delta^2 X + \frac{\langle X \rangle^2 \Delta^2 Y}{\langle Y \rangle^2} \right. \\ &+ \frac{\langle X \rangle^2 \Delta^2 Z}{\langle Z \rangle^2} - \frac{2\langle X \rangle \text{cov}(X, Y)}{\langle Y \rangle} \end{aligned}$$

$$-\frac{2\langle X \rangle \text{cov}(X, Z)}{\langle Z \rangle} + \frac{2\langle X \rangle^2 \text{cov}(Y, Z)}{\langle Y \rangle \langle Z \rangle} \Big], \quad (23c)$$

其中随机变量 X, Y 和 Z 的协方差 (cov 函数) 矩阵可

以由 (16) 式求得, 如表 1 和表 2 所示, 其中表 1 为当探测面上对应的像素点在物体透过面积内时得到的协方差矩阵 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{in}$, 表 2 为在物体透过面积外时得到的协方差矩阵 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{out}$.

表 1 随机变量 X, Y 和 Z 的协方差矩阵 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{in}$

\mathbf{x}_{in}	X	Y	Z
X	$\frac{\mu^4}{N} \left(\frac{1+P^2}{2} T^2 + \frac{P^4+20P^2+11}{4} T + P^4 + 8P^2 + 2 \right)$	$\frac{\mu^3}{N} \left[(1+P^2)T + \frac{1+3P^2}{2} \right]$	$\frac{\mu^3}{N} \left(\frac{1+P^2}{2} T + 1 + 2P^2 \right)$
Y	$\frac{\mu^3}{N} \left[(1+P^2)T + \frac{1+3P^2}{2} \right]$	$\frac{1+P^2}{2N} T \mu^2$	$\frac{1+P^2}{2N} \mu^2$
Z	$\frac{\mu^3}{N} \left(\frac{1+P^2}{2} T + 1 + 2P^2 \right)$	$\frac{1+P^2}{2N} \mu^2$	$\frac{1+P^2}{2N} \mu^2$

表 2 随机变量 X, Y 和 Z 的协方差矩阵 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_{out}$

\mathbf{x}_{out}	X	Y	Z
X	$\frac{\mu^4}{N} \left(\frac{1+P^2}{2} T^2 + \frac{P^4+4P^2+3T}{4} \right)$	$\frac{1+P^2}{2N} T \mu^3$	$\frac{1+P^2}{2N} T \mu^3$
Y	$\frac{1+P^2}{2N} T \mu^3$	$\frac{1+P^2}{2N} T \mu^2$	0
Z	$\frac{1+P^2}{2N} T \mu^3$	0	$\frac{1+P^2}{2N} \mu^2$

根据 (18), (23) 式以及表 1 和表 2 中数据可以得出 3 种数据处理方式的图像的信噪比

$$\sigma(G) = \frac{\sqrt{N}(1+P^2)}{\sqrt{2(1+P^2)T^2 + (P^4+12P^2+7)T + 2(P^4+8P^2+2)}}, \quad (24a)$$

$$\sigma(G') = \frac{\sqrt{N}(1+P^2)}{\sqrt{(1+P^2)^2 T + 2(P^4+5P^2+1)}}, \quad (24b)$$

$$\sigma(g) = \frac{2\sqrt{N}(1+P^2)}{\sqrt{4(1+P^2)^2 T + P^6 - P^4 + 27P^2 + 5 + \frac{3P^6 - 3P^4 - 7P^2 - 1}{T}}}. \quad (24c)$$

当 $N = 1000$ 和 $T = 100$ 时, 根据 (24) 式得到的三种数据处理方式的信噪比 σ 与偏振度 P 的关系如图 3 所示, 其中, 图 3 左边的纵坐标轴为 $\sigma(G)$ 的坐标轴, 而右边的纵坐标轴为 $\sigma(G')$ 与 $\sigma(g)$ 的坐标轴. 并且当 T 较大时, 由 (24) 式可得到

$$\sigma(G) \approx \frac{\sqrt{N(1+P^2)}}{2T}, \quad (25a)$$

$$\sigma(G') \approx \sqrt{\frac{N}{T}}, \quad (25b)$$

$$\sigma(g) \approx \sqrt{\frac{N}{T}}. \quad (25c)$$

综上所述可以看出, 由三种关联成像数据处理方法得出到的信噪比有一个共同特点, 即都与测量次数的平方根 $N^{1/2}$ 成正比, 这是由于关联成像的噪声随着测量次数 N 的增大而减小, 并且关联成像的噪声和 $N^{1/2}$ 成反比. 此外, (25a) 式与偏振度 P 有关, 且随着 P 的增大而提高, 而 (25b) 和 (25c) 式与 P 无关. 另外 (25a) 式与 T 成反比, 而 (25b) 和 (25c) 式与 $T^{1/2}$ 成反比, 因此, 当物体透过

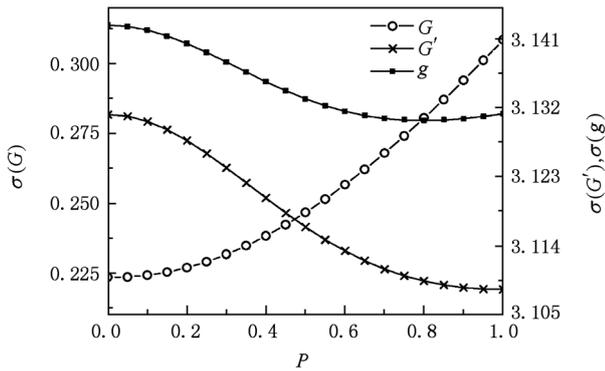


图3 当 $N = 1000$ 和 $T = 100$ 时,根据(24)式得到的三种数据处理方式的信噪比 σ 随偏振度 P 的变化

面积包含的像素点数目较多时,由减去背景项的二阶关联函数和二阶相干度方法得到的信噪比是相同的,且远远大于利用二阶关联函数方法得到的信噪比。

5. 结 论

根据完全偏振光的不同偏振态和部分偏振光的不同偏振度对二阶关联函数的影响,利用统计光学的理论,通过对关联成像探测面上的光强进行离散化处理,研究了光的不同偏振性质对关联成像的影响. 通过研究得出,光的偏振对热光关联成像的影响体现在部分偏振光的不同偏振度上;关联成像的可见度是偏振度的二次函数;当物体透过面积包含的像素点数目较多时,由二阶关联函数方法得到的信噪比随着偏振度的增大而提高,而利用减去背景项的二阶关联函数和二阶相干度方法得到的信噪比均与偏振度无关,且远远大于由二阶关联函数方法得到的信噪比. 本文针对光存在偏振现象,研究了光的偏振对热光关联成像的影响,对关联成像的理论研究和实际应用具有重大的意义。

[1] Klyshko D N 1988 *Sov. Phys. JETP* **67** 1131

[2] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** R3429

[3] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, Teich M C 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 123602

[4] Bennink R S, Benley S J, Boyd R W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 113601

[5] Gatti A, Brambilla E, Bache M, Lugiato L A 2004 *Phys. Rev. A* **70** 013802

[6] Cheng J, Han S S 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 093903

[7] Valencia A, Scarcelli G, D' Angelo M, Shih Y H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 063601

[8] Cao D Z, Xiong J, Wang K G 2005 *Phys. Rev. A* **71** 013801

[9] Zhang D, Zhai Y H, Wu L A, Chen X H 2005 *Opt. Lett.* **30** 2354

[10] Cheng J, Han S S, Yan Y J 2006 *Chin. Phys.* **15** 2002

[11] Xiong J, Li H G, Sun X J, Lin L F, Wang K G 2006 *Chin. Phys.* **15** 2942

[12] Li H G, Zhang Y T, Cao D Z, Xiong J, Wang K G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4510

[13] Liu H C, Guan D S, Li L, Zhang S H, Xiong J 2010 *Opt. Comm.* **283** 405

[14] Scarcelli G, Berardi V, Shih Y H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 061106

[15] Glauber R J 1963 *Phys. Rev.* **130** 2529

[16] Glauber R J 1963 *Phys. Rev.* **131** 2766

[17] Mandel L, Wolf E 1995 *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge: Cambridge University Press) p36—39

[18] Teng S Y, Cheng C F, Liu M, Liu L R, Xu Z Z 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 316 (in Chinese) [滕树云、程传福、刘曼、刘立人、徐至展 2003 物理学报 **52** 316]

[19] Liu P S 1987 *Fundamentals of Statistical Optics of Speckles* (Beijing: Science Press) p73—75 (in Chinese) [刘培森 1987 散斑统计光学基础(北京:科学出版社)第73—第75页]

[20] Basano L, Ottonello P 2007 *Opt. Express* **15** 12386

[21] Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W 2009 *Opt. Lett.* **34** 3343

[22] Ferri F, Magatti D, Sala V G, Gatti A 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 261109

[23] Chan K W C, O'Sullivan M N, Boyd R W 2010 *Opt. Express* **18** 5562

[24] Goodman J W 2000 *Statistical Optics* (New York: Wiley) p121—124

[25] Song H S, Cheng C F, Teng S Y, Liu M, Liu G Y, Zhang N Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7654 (in Chinese) [宋洪胜、程传福、滕树云、刘曼、刘桂媛、张宁玉 2009 物理学报 **58** 7654]

[26] Agafonov I N, Chekhova M V, Iskhakov T S, Wu L A 2009 *J. Mod. Opt.* **56** 422

[27] Barlow R J 1989 *Statistics: A Guide to the Use of Statistical Methods in the Physical Sciences* (Chichester: Wiley) p56—57

Effect of light polarization on thermal light correlated imaging^{*}

Zhang Er-Feng Dai Hong-Yi[†]

(Department of Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 24 June 2010; revised manuscript received 2 August 2010)

Abstract

Based on the effect of the polarization state of polarized light and the degree of polarization on the second-order correlation function, the influence of light polarization on visibility and signal-to-noise ratio (SNR) is investigated by use of the statistical optics theory. It is shown that only the polarization degree has effect on thermal light correlated imaging. The visibility of correlated imaging is a quadratic function of the polarization degree. An increase in the polarization degree leads to an increase in the SNR of conventional correlated imaging, but the SNR obtained by subtracting the background and using the second-order coherent degree is independent of polarization degree.

Keywords: correlated imaging, polarization, visibility, signal-to-noise ratio

PACS: 42. 50. Ar, 42. 30. Va, 77. 22. Ej

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11074307, 10774192) and the Opening Research Foundation of State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: hundai@nudt.edu.cn