

基于不同调制方法产生赝热光源的性能比较

范晓磊¹ 张二峰² 徐耀坤² 熊水东¹

¹国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

²国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073

摘要 在关联成像中, 赝热光源的特性对成像质量至关重要。赝热光源的关联特性和关联成像的对比度、信噪比和分辨率密切相关。在其他条件相同的情况下, 二阶关联峰值越高, 所成关联像的对比度越高, 而赝热光源的随机性越好, 则成像的信噪比越高。赝热光源的产生有很多方案, 近来出现的基于空间光调制器的赝热光源由于其相位可预置性而具有很好的应用前景。本文介绍了利用空间光调制器调相、调幅等不同调制方法产生赝热光源的原理, 并通过模拟对比了施加不同的振幅、相位及其混合调制所引起的赝热光源的二阶关联峰值的差异性, 对比发现当振幅分布为瑞利分布、相位分布为 $0 \sim 2\pi$ 均匀分布时, 赝热光关联峰值理论可以达到 2, 此时赝热光源的特性较为理想。

关键词 成像系统; 赝热光; 空间光调制器; 关联成像; 调制; 散斑

中图分类号 O431.2 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.041101

Comparison of Pseudo-Thermal Light Source Based on Different Method of Modulation

Fan Xiaolei¹ Zhang Erfeng² Xu Yaokun² Xiong Shuidong¹

¹College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

²College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract The characteristics of correlation for pseudo-thermal light source have much effect on the quality of image in ghost imaging. The correlated characteristics of pseudo-thermal light have relations with contrast, signal to noise ratio and resolution. On the same condition of experiment, the higher the peak value of the two-order correlation, the higher the contrast of the image, and the better for the randomness of the pseudo-thermal light, the higher for the signal to noise ratio of the image. Recently, varieties of schemes for correlated imaging have emerged, and pseudo-thermal light correlated imaging based on space light modulator (SLM) has good prospect. The theory of pseudo-thermal light based on different modulation is presented, by which we have simulated the two-order correlation of pseudo-thermal light when different modulations have been sent to SLM, and a conclusion has come that when SLM is modulated by the mixture of phase and amplitude, the peak value of the two-order correlation is the highest, especially when the probability distribution for amplitude is Rayleigh distribution and the phase is evenly distributed between $0 \sim 2\pi$, and the peak value of the two-order correlation can come to 2, and the characteristic of pseudo-thermal light is ideal.

Key words image systems; pseudo-thermal light; space light modulator; correlated imaging; modulation; speckle
OCIS codes 110.3080; 070.6120; 270.5570; 280.4788

1 引言

自 20 世纪 90 年代, 巴西科学家利用纠缠光源通过符合计数的方法观察到鬼干涉条纹^[1]以来, 鬼成像(也被称作关联成像)技术得到广泛的应用和发展。鬼成像与传统成像的不同主要在于以下 3 点: 1) 基于的物理机制不同。传统成像是利用光场的一阶关联, 用探测器直接记录光的强度, 而关联成像方案是利用光场更

收稿日期: 2013-11-06; 收到修改稿日期: 2013-12-06; 网络出版日期: 2014-03-28

作者简介: 范晓磊(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事量子成像领域方面的研究。E-mail: 878079909@qq.com

导师简介: 熊水东(1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤传感技术和光学成像方面的研究。

E-mail: nudtxsd@163.com

高阶的关联(如强度涨落关联)获得信息;2)成像方案不同。传统成像方案中,物体透射或反射的光场直接携带了物体的空间信息,成像探测与物体不可分离,而关联成像方案中尽管也要求对物体透射或反射的光场进行探测,但是并不要求做空间分辨探测,而担任空间分辨测量任务的探测器与物体可以分离;3)数据处理技术不同。普通的光学成像利用空间分辨探测可以直接获取目标信息,不需要做图像恢复计算,而关联成像由于目标与空间分辨探测分离,采用双臂探测,因此在数据采集后需要对双臂探测结果进行符合计数,从而恢复目标信息。基于以上不同机制,关联成像与传统成像相比有许多优点:关联成像理论上可以超越衍射分辨极限,并在一定程度上克服大气湍流和散射的影响,还可以利用非相干光实现相干成像等传统成像不能有的效果等。

关联成像最早由美国马里兰大学的 Shih 等^[2]利用纠缠双光子源于 1995 年得到。进入 21 世纪以来,人们发现普通的热光源与纠缠光有着类似的关联特性。2002 年,热光关联成像首先由 Bennink 等^[3]实现。热光关联成像与之前纠缠光源的量子成像一样比传统成像有很多优势,但是由于普通热光源亮度低,光强涨落容易被光子散粒噪声掩盖而无法应用,同时热光的相干时间极短,最高也只能达到 10^{-10} s,因此将热光源直接应用于关联成像难以用普通探测器探测。Valencia 等^[4]利用激光通过旋转毛玻璃得到的赝热光源进行关联成像成功避免了上述缺陷,但是这种赝热光源的光场分布不可预置。2008 年,Jeffrey^[5]提出利用空间光调制器调制激光预置热光场的方法,将鬼成像由原先的双臂结构转变为单臂结构。这样,关联成像无需再利用空间分辨探测器探测参考臂光强空间分布,从而加快了成像速度。2012 年,秦洁心等^[6]通过随机调制液晶光阀实现了可预置赝热光场。由于对激光场调制有多种方案,可以单独调制激光相位,振幅,偏振态等,也可以将多种调制混合起来同时工作。本文从理论的角度分析了不同调制方式对产生的赝热光特性的影响,为提高关联成像的质量提供了依据。

2 理论分析

2.1 赝热光理论

对于偏振热光源,用复数 $u_i(\mathbf{r}, t) = E_k \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega_k t)]$ 来描述单模热光,其中 \mathbf{k} 为光波矢量, ω_k 为光波频率, E_k 为光场的复振幅。则其合成光光波表达式可以写作:

$$u(\mathbf{r}, t) = \sum u_i(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

式中 $u_i(\mathbf{r}, t)$ 是第 i 个原子对光场的 X 方向分量的贡献。 $u_x(\mathbf{r}, t)$ 是一圆形高斯随机过程^[7]。可以将 $u_x(\mathbf{r}, t)$ 看作多个相幅矢量的和。将 $u_x(\mathbf{r}, t)$ 写作复数形式:

$$u_x(\mathbf{r}, t) = a^* \exp(i\theta) = r + ik, \quad (2)$$

式中 r 是实部, k 是虚部。则

$$a = \sqrt{r^2 + k^2}, \theta = \arctan \frac{k}{r}, \quad (3)$$

其反函数为

$$r = a \cos \theta, k = a \sin \theta. \quad (4)$$

其 Jacobi 行列式为

$$\|J\| = \begin{vmatrix} \frac{\partial r}{\partial a} & \frac{\partial r}{\partial \theta} \\ \frac{\partial k}{\partial a} & \frac{\partial k}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \theta & -a \sin \theta \\ \sin \theta & a \cos \theta \end{vmatrix} = a, \quad (5)$$

根据概率统计原理, a 和 θ 的联合概率密度函数为

$$P_{A\theta}(a, \theta) = P_{Ri}(r = a \cos \theta, k = a \sin \theta) \|J\| = \begin{cases} \frac{a}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right), & -\pi < \theta \leq \pi \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

从而得到相幅矢量的幅度和相位概率密度分布分别为

$$P_A(a) = \int_{-\pi}^{\pi} P_{A\theta}(a, \theta) d\theta = \begin{cases} \frac{a}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma^2}\right), & a > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{\theta}(\theta) = \int_0^{\infty} p_{A\theta}(a, \theta) da = \begin{cases} \frac{1}{2\pi}, & -\pi < \theta \leq \pi \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

由上述表达式可以看出偏振热光场的相位和幅度分别遵从 $(-\pi \sim \pi)$ 均匀分布和瑞利分布。赝热光场相位和幅度理论上概率分布为实际应用中光场的调制提供了理论依据。探测器探测到的是光功率,为了便于直接对比,还需求出光强的概率分布。

$I_x(P, t) = |u_x(P, t)|^2$ 根据概率统计原理:

$$P_I(I) = P_I(A = \sqrt{I}) \left| \frac{dA}{dI} \right| = \frac{\sqrt{I}}{\sigma^2} \exp[-I/2\sigma^2] \frac{1}{2\sqrt{I}} = \begin{cases} \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), & I \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

该分布的标准偏差和平均值相等,都为 $2\sigma^2$,即 $\sigma_I = \bar{I} = 2\sigma^2$

所以(9)式也可以写作

$$P_I(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right), I \geq 0 \quad (10)$$

由上可知,光强遵从的是负指数分布。利用(10)式得到的密度函数曲线如图1所示。

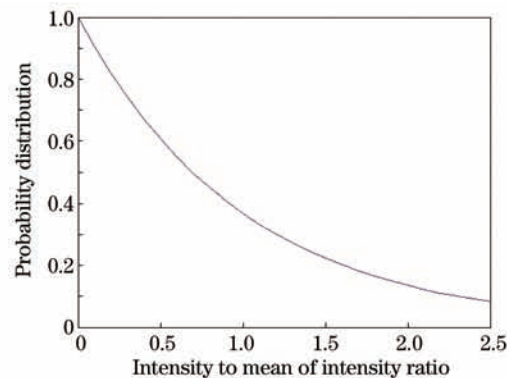


图1 偏振热光瞬时强度的概率密度

Fig.1 Probability density of instant intensity of polarized thermal light

2.2 关联成像理论

最初的双臂关联成像的方案如图2所示:激光经过起偏器后成为线偏振光,然后通过旋转的毛玻璃后进行分束,再在自由空间中传播一段距离分别由桶探测器(PMT)和空间分辨率探测器(CCD)探测光强。其中PMT探测到的是经过物体反射或者透射后的在PMT所探测范围内的总光强,没有空间分辨率,该臂称为取样臂(或物臂);CCD探测到的是参考臂上的光强空间分布,具有空间分辨率。将两臂探测到的光强值做关联计算即可恢复取样臂中物体的信息。关联计算公式为

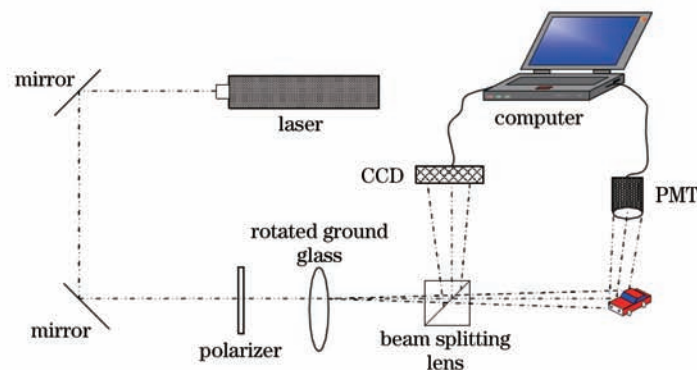


图2 传统赝热光关联成像系统框图

Fig.2 Traditional scheme of correlated imaging based on pseudo-thermal light

$$R(x,y) = \frac{\langle I_1(x,y)I_2 \rangle}{\langle I_1(x,y) \rangle \langle I_2(x,y) \rangle}, \quad (11)$$

式中 $I_1(x,y)$ 为参考臂探测到的第 (x,y) 个像素的光强, I_2 为取样臂探测总光强, $\langle \rangle$ 为系综求平均。该方法利用了热光的统计特性,各像素处的光强在时间序列上与自身的关联值最高。

自从 Shapiro 等^[5]提出利用空间光调制器(SLM)调制激光产生热光的方法后,参考臂就变得不再需要。该成像方案称作计算鬼成像,系统如图3所示。在该方案中,计算机输出控制电压,使得空间光调制器各液晶分子的偏转发生变化,从而改变透射后的光场的相位和振幅。

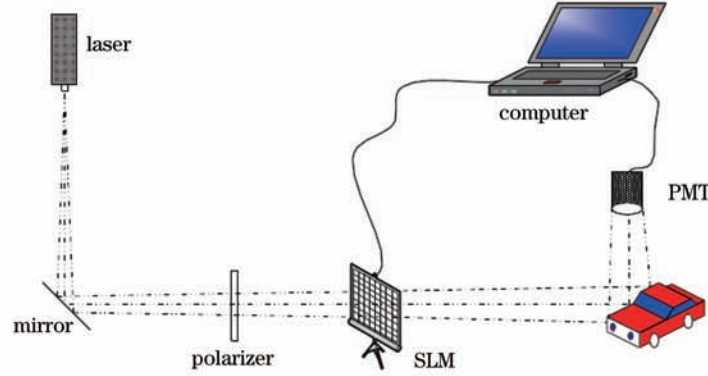


图3 计算鬼成像系统框图

Fig.3 Scheme of computational ghost imaging

如果控制 SLM 中各像素液晶分子的电压值是随机的,则激光经过调制后的光场具有类似热光的特性。离开 SLM 后的光场为

$$E_r(x,y) = \sum_n A(x_n, y_n) \text{rect}\left(\frac{x-x_n}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y-y_n}{a}\right) \exp(i\varphi_n), \quad (12)$$

式中 a 为 SLM 单个像素的边长。 (x_n, y_n) 为第 n 个像素的中心坐标, $A(x_n, y_n)$ 为 (x_n, y_n) 处的振幅, φ_n 为施加的相位。假设满足夫琅禾费远场假设^[7]:

$$Z_2 > \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (13)$$

其中假设空间光调制器个数为 $N \times N$, 则 $D = a \times N$ 。该光场经过自由空间传播到达目标后光场表达式为

$$E_r'(x', y') = \sum_n A(x_n, y_n) \frac{a^2}{\lambda_0 L} \sin c\left(\frac{ax'}{\lambda_0 L}\right) \sin c\left(\frac{ay'}{\lambda_0 L}\right) \exp\left[\frac{-ik_0(xx_n + yy_n)}{L}\right] \exp\left[\frac{-ik_0(|x'|^2 + |y'|^2)}{2L}\right] \exp(i\varphi_n), \quad (14)$$

式中 (x', y') 为远场坐标。 $I_r'(x', y') = |E_r'(x', y')|^2$ 为远场的光强分布。远场经目标物体后光的光强分布为

$$B_r = \iint I_r'(x', y') T(x', y') dx' dy'. \quad (15)$$

物体的信息可以由关联计算恢复得到:

$$G(x', y') = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N (B_r - \langle B \rangle) I_r'(x', y') = \langle B I_r'(x', y') \rangle - \langle B \rangle \langle I_r'(x', y') \rangle. \quad (16)$$

3 仿真结果

根据热光特性,空间光调制器调制方式可以分为纯相位调制、纯振幅调制和混合调制。模拟时假设空间光调制器阵元为 128×128 , 每个像素尺寸为 $20 \mu\text{m}$, 激光波长为 $1.064 \mu\text{m}$, 激光器距离 SLM 0.1 m , 经 SLM 调制后光场再在自由空间经过 20 m 距离传播。 $\frac{2D^2}{\lambda} = \frac{2 \times (128 \times 20 \mu\text{m})^2}{1.064 \mu\text{m}} = 12.32 \text{ m} < Z_2 = 20 \text{ m}$ 可知满足夫琅禾费近似^[7]。以下针对每种调制方式分别进行仿真,通过比较得出各调制方式的优劣。

3.1 相位调制

单独进行相位调制时,令各像素调制振幅均为 1。然后使 SLM 每个像素点对光场产生不同的延时从而使通过各像素点后的光场的相位变化产生差异。对 SLM 处的光源施加的相位延迟满足不同的概率分布

时,所模拟的远场处的赝热光场特性也不同。在SLM 20m外所产生的赝热光场如图4(a)所示,其光强概率统计分布如图4(b)所示,仿真时分别对光源调制相位服从均匀分布、泊松分布等作了考察,所用帧数为5000 frame。当调制相位服从均匀分布、泊松分布时,利用(14)式计算关联得到的结果如图5所示,关联峰值分别为1.9866、1.9732。每次计算后得到关联峰值都会略有差异,这是由于统计帧数不是无穷,而理论上时间上的统计帧数应该是无穷多个。多次计算发现相位均匀分布时的二阶关联峰值大致落在1.98~2之间,相位为泊松分布时的二阶关联峰值大致落在1.96~1.99之间。二者区别不大,调制相位服从均匀分布时的关联峰值略微高些,因此调制相位服从均匀分布时的成像对比度应略好一些。此外,由图5对比发现调制相位服从泊松分布时的噪声比较大,由此会给关联成像带来差的信噪比。

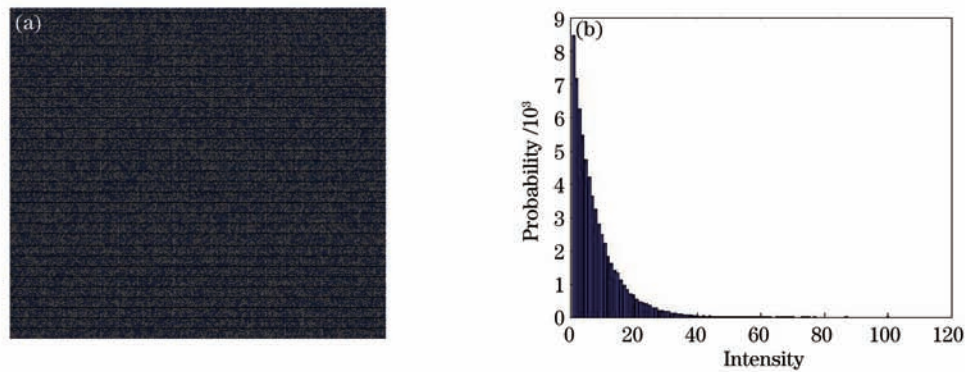


图4 (a)赝热光场; (b)光强概率分布统计

Fig.4 (a) Pseudo-thermal light; (b) statistics of probability of light intensity

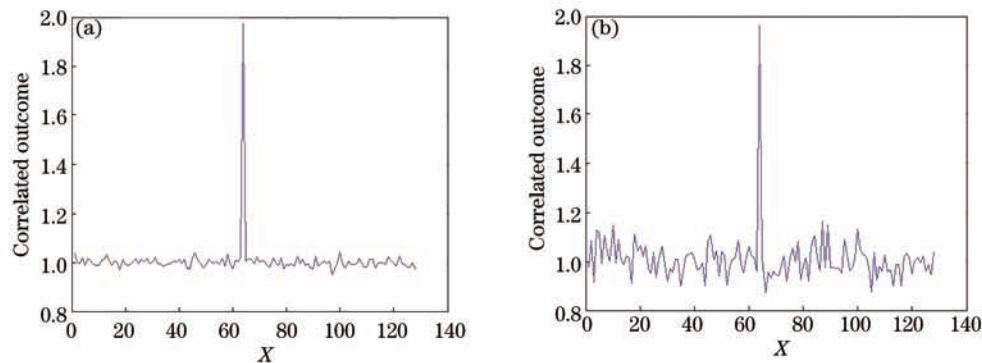


图5 调制相位为不同概率分布时的关联结果。(a)均匀分布; (b)泊松分布

Fig.5 Correlated outcome based on different phase modulation. (a) Evenly distribution; (b) Poisson distribution

3.2 振幅调制

单独进行振幅调制时,令调制相位为0。当调制时源光场振幅的概率分布分别满足均匀分布(0~1)、瑞利分布(峰值概率在0.3)、准高斯分布(振幅平均值0.5,方差为0.5)和泊松分布(0~1)时,多次模拟二阶关联峰值平均分别为1.8226[大致在(1.81~1.84)范围内]、1.7974[大致在(1.79~1.80)范围内]、1.9984[大致在(1.9~2.1)范围内]、1.08(小于1.1),仿真结果如图6所示。

从仿真结果来看,均匀振幅调制时比瑞利分布调制产生的远场赝热光的关联峰值高,但均匀分布的关联峰值方差高于瑞利分布,必须利用足够高的帧数才能得到准确的关联峰值。在关联成像时,为保证成像质量利用的帧数也比服从瑞利分布时的高,这样会降低成像速度。相比之下,利用瑞利分布振幅调制产生的赝热光场在成像所用帧数较低时也比较理想。当振幅为高斯分布和泊松分布时,关联性变差,旁瓣较高,信噪比变差,不利于成像,且泊松分布对应的关联峰值只有1.08,对比度过低,无法有效用于关联成像。

3.3 振幅和相位混合调制

从前面的仿真结果来看,当调制时改变的相位服从均匀分布和泊松分布时的关联结果都比较理想,而振幅服从瑞利分布和均匀分布时的关联结果各有优劣。将其分别混合调制仿真的结果如图7所示。不同调

制组合对应的关联峰值如表1所示。

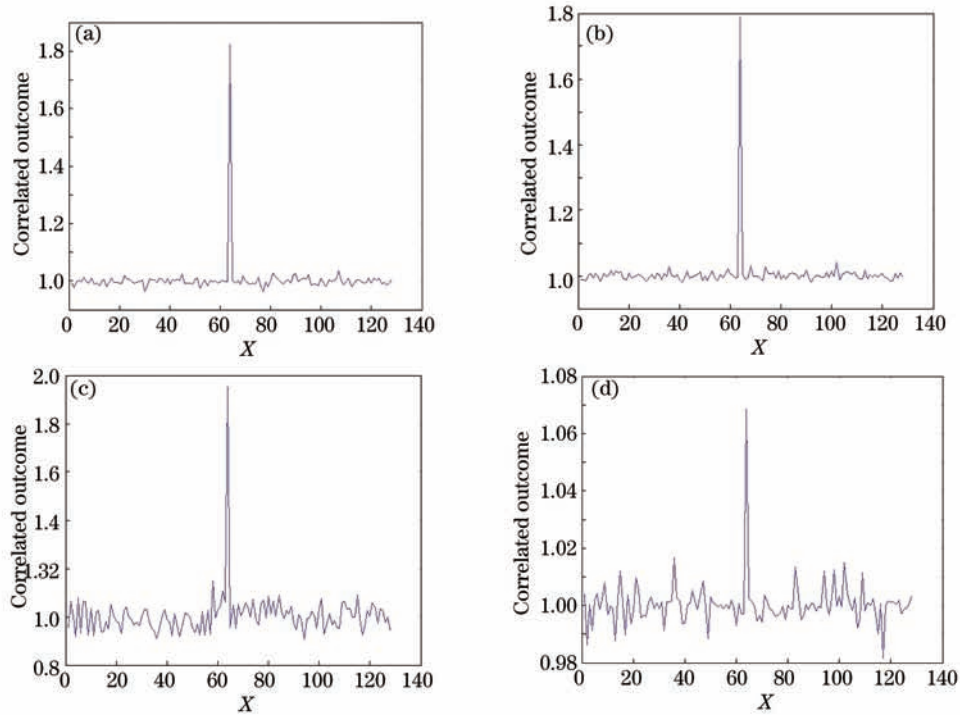


图6 调制振幅为不同概率分布时的关联结果。(a) 均匀分布;(b) 瑞利分布;(c) 高斯分布;(d) 泊松分布

Fig.6 Correlated outcome based on different amplitude modulations. (a) Evenly distribution; (b) Rayleigh distribution; (c) Gaussian distribution; (d) Poisson distribution

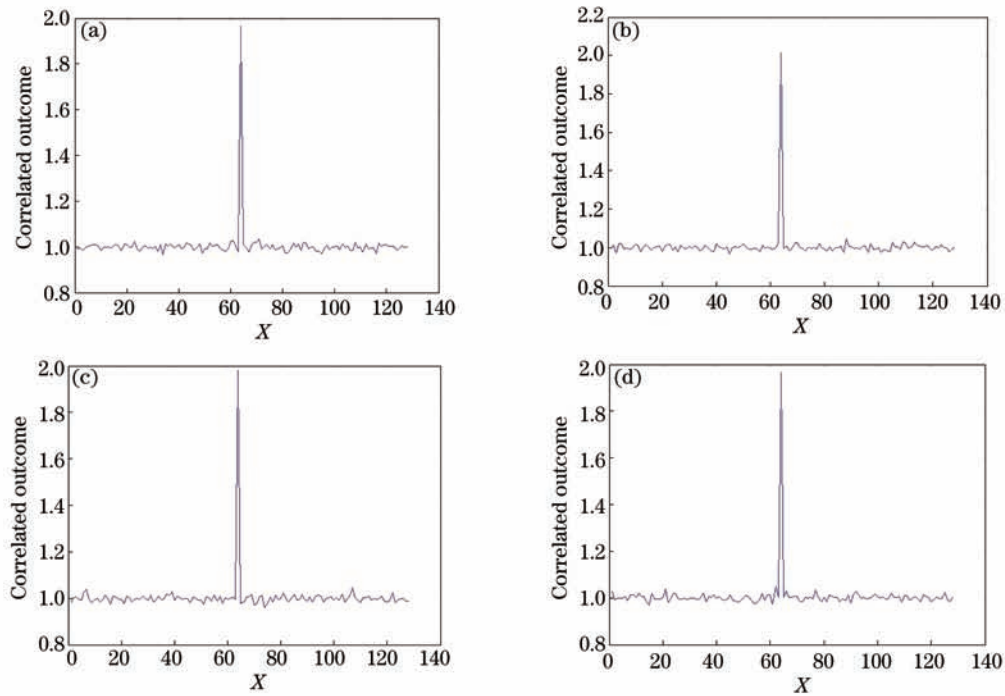


图7 不同混合调制组合的关联结果。(a)相位均匀分布,振幅均匀分布;(b)相位均匀分布,振幅瑞利分布;(c)相位泊松分布,振幅瑞利分布;(d)相位泊松分布,振幅均匀分布

Fig.7 Correlated outcome based on different amplitudes and phase modulations. (a) Phase follow evenly distribution, amplitude follow evenly distribution; (b) phase follow evenly distribution, amplitude follow Rayleigh distribution; (c) phase follow Poisson distribution, amplitude follow Rayleigh distribution; (d) phase follow Poisson distribution, amplitude follow evenly distribution

表1 不同组合调制的二阶关联峰值

Table 1 Peak value for two-order correlation based on different modulations

Two-order correlation		Phase modulation	
		Evenly distribution	Poisson distribution
Amplitude modulation	Rayleigh distribution	2.0117	1.9791
	Evenly distribution	1.9666	1.9664

从仿真结果来看,当施加调制的相位遵循均匀分布、振幅遵循瑞利分布时模拟得到的赝热光性能最好,其二阶关联峰值甚至可以超越2,根据文献[7]可知,这时赝热光场的时间和空间统计特性与普通热光有所区别,其二阶关联性能比普通热光关联特性更优。对于仿真中的其他3个组合,模拟得到的赝热光场性能比较接近,在实际应用可以选择更方便的组合。对于液晶空间光调制器,目前市场上已经有可以实现振幅、相位混合调制的产品,将上述仿真结果应用到实际中,可以在一定程度上提高关联成像效果。

4 结 论

分析了赝热光的基本原理及其数学上的概率分布,并推导了赝热光双臂和单臂关联成像的二阶关联公式。本文针对目前普遍采用的可预置单臂鬼成像方案,从调制方式的角度分析了影响赝热光源性能的因素。通过模拟对比振幅、相位单独及混合调制液晶空间光调制器产生的赝热光的二阶关联特性,发现振幅服从瑞利分布、相位服从均匀分布时赝热光的关联特性最好,此时关联峰值有望达到甚至超过2,且信噪比和对比度均达到比较好的状态,从而可以提高关联成像效果。该研究对于提高赝热光的性能有一定指导作用。

参 考 文 献

- 1 Klyshko D N. Photon and Nonlinear Optics [M]. New York: Gordon and Breach Science, 1988. 312-332.
- 2 Strekalov D V, Sergienko A V, Klyshko D N, *et al.*. Observation of two-photon "ghost" interference and diffraction [J]. Phys Rev Lett, 1995, 74(18): 3600-3603.
- 3 Bennink R S, Benley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. Phys Rev Lett, 2002, 89(11): 113601.
- 4 Valencia A, Scarcelli G, D'Angelo M, *et al.*. Two-photon imaging with thermal light [J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(6): 063601.
- 5 Jeffrey H Shapiro. Computational ghost imaging [J]. Phys Rev A, 2008, 78(6): 061802.
- 6 Qin Jiexin, Liu Shichao, Huang Genghua, *et al.*. Research on the pseudo-thermal light made by liquid crystal spatial light modulation [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102008.
秦洁心, 刘世超, 黄庚华, 等. 基于液晶光阀调制的赝热光源制备技术研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102008.
- 7 Qi Kangnan, Qin Kecheng, Cheng Lu. In troduction to Statistical Optics [M]. Tianjin: Nankai University Press, 1987. 69-82, 205-211, 410-424.
戚康男, 秦克诚, 程 路. 统计光学导论 [M]. 南开大学出版社, 1987. 69-82, 205-211, 410-424.
- 8 Xuefeng Liu, Mingfei Li, Xuri Yao. High-visibility ghost imaging from artificially generated non-Gaussian intensity fluctuations [J]. AIP Advances, 2013, 3(5): 052121.