

文章编号: 1007-6654(2009)02-0095-06

EPR 纠缠光束时域量子关联的实验验证

靳晓丽, 王宇, 苏晓龙[†], 彭堃堃

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 我们利用平衡零拍探测系统和数据采集系统直接测量了 EPR 纠缠光束信号光场与闲置光场正交分量之间的时域量子起伏, 验证了其量子关联。通过对 EPR 纠缠光束中的一束光场进行延迟, 验证了信号光与闲置光不同步时将导致量子关联减弱乃至消失。我们的实验结果为开展连续变量量子密钥分发、非高斯态的实验制备和纠缠纯化奠定了实验基础。

关键词: EPR 纠缠; 量子关联; 非简并光学参量放大器

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

量子纠缠是量子信息处理的重要物理基础。Einstein, Podolsky 和 Rosen 首先讨论了连续变量正交共轭分量之间的非经典关联, 通常称为 EPR 纠缠^[1]。1992 年, 利用双模压缩态光场的正交振幅和正交位相分量首次从实验上验证了连续变量的 EPR 量子纠缠^[2]。利用 EPR 纠缠, 人们可以完成许多在经典世界无法完成的工作, 例如: 量子离物传态 (Quantum teleportation)^[3,4]、量子密集编码 (Quantum dense coding)^[5,6]、量子密钥分发 (Quantum key distribution)^[7,8] 等。在光学领域, 相干态^[4]、压缩态^[9]及 EPR 纠缠态的一个子模^[10]等高斯光场作为输入态的量子离物传送已经实验实现。这些实验以光学分束、位相延迟、压缩、相空间平移以及平衡零拍探测等光学高斯操作为基本实验手段。迄今为止, 连续变量的量子协议也仅用高斯态和高斯操作实施。然而, 进一步发展连续变量量子信息处理的能力需要非高斯态或非高斯操作^[11,12]。因此, 非高斯态的量子离物传送将成为下一个实现通用连续变量量子信

息处理的重要挑战。

为了在光学系统中产生一个非高斯态, 从一束高斯光束中抽取出的一部分光进行光子计数是一种较为方便的技术。当测量到一个光子时, 这个被抽取出的高斯态将转化成一个非高斯态, 这种技术被称为“减光子法”。最近有一些产生非高斯态的报道, 采用此方法产生了一个量子叠加相干态 $|\psi\rangle \propto |\alpha\rangle - |-\alpha\rangle$ ^[13,14]。由于光子计数在时域被定义, 传统的利用光学载波边带传输信息的连续变量量子离物传态原理不能用于这些态的传输。因此为了实现连续变量非高斯态的传输, 就需要实现 EPR 纠缠光束时域的量子关联。这种 EPR 纠缠光束正交分量之间实时的量子关联, 可用于量子密钥分发、非高斯态的产生、量子纠缠纯化^[15,16]等量子信息研究中。目前, 日本的 A. Furusawa 研究组进行了这方面的实验研究, 他们采用傅立叶变换的方法, 将频域测量的结果变换到时域, 得到 EPR 纠缠光束时域量子关联^[17]。

我们利用平衡零拍探测器和通用示波器数据采集系统直接观测了 EPR 纠缠光束信号光与闲

收稿日期: 2009-01-30; 修回日期: 2009-02-05

基金项目: 国家自然科学基金 (60736040, 10804065, 60608012); 高等学校博士点新教师专项科研基金 (200801081022); 山西省青年科技研究基金 (2008021002)

作者简介: 靳晓丽 (1984-), 女, 山西运城人, 量子光学与光量子器件国家重点实验室、山西大学光电研究所在读硕士, 主要从事量子光学与量子信息的研究。E-mail: jxl8406@gmail.com

[†] 通讯作者: E-mail: suxl@sxu.edu.cn

置光正交分量之间的时域量子起伏,实验结果显示两束光场正交分量之间存在非局域量子关联。我们对 EPR 纠缠光束一束光场的量子起伏进行延迟,证实信号光与闲置光不同步时将导致量子关联减弱乃至最后消失。时域 EPR 纠缠光束量子关联的观测为下一步开展非高斯态的实验制备和连续变量量子纠缠纯化的实验研究奠定了基础。

1 EPR 纠缠光束

量子纠缠是量子系统独有的特性,反映了一个系统中子系统之间的相关性与不可分性。当两个或两个以上的子系统构成的量子体系的态矢量,在任何量子力学表象中,都无法表示为组成它的各子系统量子态矢的直积形式时,这些子系统之间即表现出相互纠缠的不可分特性,即使将它们空间分离,对一个子系统的观测也必然影响其它子系统的测量结果。这种相互依存的非局域关联称为量子纠缠或简称纠缠。在 EPR 原始文献中^[1],所讨论的可观测量子变量,是具有连续谱的正则坐标与动量,对应于光场的正交振幅(\hat{X})和正交位相分量(\hat{Y})。一束单模量子态光场可用一个湮灭算符 a 表示,其正交振幅和正交位相分量定义为:

$$\hat{X} = a + a^\dagger \quad \hat{Y} = (a - a^\dagger)/i \quad (1)$$

它们之间满足对易关系: $[\hat{X}, \hat{Y}] = 2i$ (取 $\hbar = 1$),不可能同时被确定。但是两个光学模的联合变量“振幅差”与“位相和”以及“振幅和”与“位相差”却可能是对易的: $[\hat{X}_1 - \hat{X}_2, \hat{Y}_1 + \hat{Y}_2] = 0$, $[\hat{X}_1 + \hat{X}_2, \hat{Y}_1 - \hat{Y}_2] = 0$ 。因此,“振幅差”与“位相和”以及“振幅和”与“位相差”可以被同时精确测量。理想情况下,它们的量子噪声趋于零,即

$$\begin{aligned} \langle \delta^2(\hat{X}_1 - \hat{X}_2) \rangle &\rightarrow 0, \\ \langle \delta^2(\hat{Y}_1 + \hat{Y}_2) \rangle &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (2)$$

或

$$\begin{aligned} \langle \delta^2(\hat{X}_1 + \hat{X}_2) \rangle &\rightarrow 0, \\ \langle \delta^2(\hat{Y}_1 - \hat{Y}_2) \rangle &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (3)$$

一般情况下,只可能达到部分量子关联,此时它们的噪声可以同时小于相应的散粒噪声极限 (Shot noise-limit, SNL),即

$$\begin{aligned} \langle \delta^2(\hat{X}_1 - \hat{X}_2) \rangle &< SNL \\ \langle \delta^2(\hat{Y}_1 + \hat{Y}_2) \rangle &< SNL \end{aligned} \quad (4)$$

或

$$\begin{aligned} \langle \delta^2(\hat{X}_1 + \hat{X}_2) \rangle &< SNL \\ \langle \delta^2(\hat{Y}_1 - \hat{Y}_2) \rangle &< SNL \end{aligned} \quad (5)$$

“振幅差”与“位相和”同时小于相应的散粒噪声极限的两束光场为正交振幅正关联 ($\hat{X}_a \curvearrowright \hat{X}_b$)、正交位相反关联 ($\hat{Y}_a \curvearrowleft \hat{Y}_b$) 的 EPR 纠缠光束。而“振幅和”与“位相差”同时小于相应的散粒噪声极限的两束光场为正交振幅反关联 ($\hat{X}_a \curvearrowleft \hat{X}_b$)、正交位相正关联 ($\hat{Y}_a \curvearrowright \hat{Y}_b$) 的 EPR 纠缠光束。无论两束 EPR 纠缠光束空间分离多远,总可以通过对一束光场正交分量的测量,推断另一束光场相应正交分量的值,即是说 EPR 纠缠光束的正交分量具有非局域量子关联。

光学参量下转换是产生 EPR 纠缠光束的有效途径,目前采用两类系统:一种是利用由 II 类非线性晶体组成的非简并光学参量放大器 (non-degenerate optical parametric amplifier 简称为 NOPA) 产生 EPR 纠缠光束^[5]。另一种途径是利用两个 I 类光学参量放大器,产生两束正交压缩光,经 50% 分束器耦合产生 EPR 纠缠光束^[4]。实验中,我们利用由 II 类 KTP 晶体组成的、工作在参量反放大状态的 NOPA,产生正交振幅反关联、正交位相正关联的 EPR 纠缠光束,其信号光 a 与闲置光 b 的正交振幅和正交位相分量的噪声起伏以及关联噪声的起伏方差分别为:

$$\begin{aligned} \langle \delta^2 \hat{X}_a \rangle &= \langle \delta^2 \hat{X}_b \rangle = \langle \delta^2 \hat{Y}_a \rangle \\ &= \langle \delta^2 \hat{Y}_b \rangle = (e^{2r} + e^{-2r})/2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \langle \delta^2(\hat{X}_a + \hat{X}_b) \rangle \\ &= \langle \delta^2(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b) \rangle = 2e^{-2r} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, r 为关联参量,依赖于 NOPA 中参量相互作用的强度和时间的。 $r = 0$, 相应于关联度为零,即没有纠缠,而 $r \rightarrow \infty$, 则趋近于理想纠缠。

2 EPR 纠缠光束产生和探测系统

正交振幅反关联、正交位相正关联的明亮 EPR 纠缠光束的产生及探测系统如图 1 所示。瓦级连续双波长输出单频稳频 Nd:YAP/KTP 激光器输出的 540 nm 的激光用作非简并光学参量放大器(NOPA)的泵浦光,1 080 nm 的激光分为两部分,一部分用于 NOPA 的注入信号光,另一部分用于进行平衡零拍探测的本地振荡光(Local oscillation beam, LO)。我们选用 α -切割的 KTP 晶体作为非线性介质,实现 II 类非临界相位匹配,以消除光束离散效应。NOPA 腔采用半整块 (Semimonolithic) 结构,即将非线性晶体 KTP 的一个端面镀双色膜使之对 1 080 nm 光波高反,对

540 nm 光波增透,将其作为 NOPA 腔的输入耦合镜,这样可以减小内腔损耗并增加腔的稳定性;另一端面镀对 1 080 nm 和 540 nm 的双增透膜。腔的输出耦合镜为一曲率半径为 50 mm 的凹面镜,镀有 540 nm 全反膜,而对 1 080 nm 透射率为 5.02%。粘合于输出镜上的压电陶瓷用于扫描和锁定 NOPA。当 NOPA 运转于参量反放大状态时,即泵浦光与注入信号光之间的位相差为 π 时,产生正交振幅反关联、正交位相正关联的明亮 EPR 纠缠光束。

用一个偏振分束棱镜(PBS)将偏振相互正交的两束 EPR 纠缠光束的信号光 a 和闲置光 b 分开,分别用两套平衡零拍探测系统(HD1 和 HD2)

测量信号光和闲置光的正交振幅或正交位相分量。平衡零拍探测系统中的压电陶瓷用于扫描和锁定本地振荡光与探测光之间的相对位相。当 LO 光与探测光的相对位相差为 0 或 $\pi/2$ 时,平衡零拍探测系统分别测量被探测光场的正交振幅或正交位相分量。平衡零拍探测系统输出的光电流经过功率放大器和中心频率为 2 MHz、带宽为 600 kHz 的带通滤波器(BPF)后,进入带宽为 600 MHz 的存储示波器(Storage Oscilloscope, 54830B, Agilent, 作为数据采集系统)记录数据。实验中在 2 MHz 处获得的关联度最高,因此我们选用中心频率为 2 MHz、带宽为 600 kHz 的带通滤波器(BPF)测量 2 MHz 附近的量子起伏。

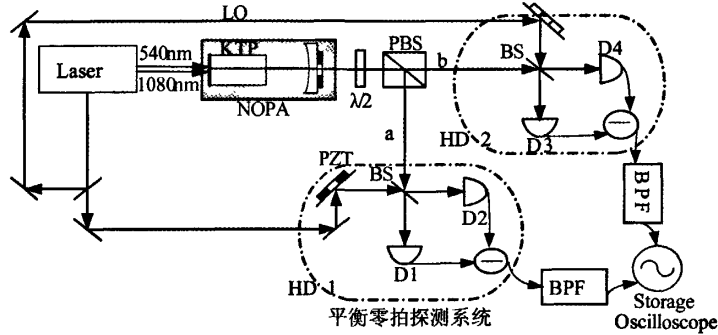


图 1 EPR 纠缠光束产生和探测系统

Fig. 1 The generation and detection system of EPR entangled beams

3 EPR 纠缠光束量子关联测量结果

让平衡零拍探测系统 HD1 和 HD2 同时测量光束 a 和 b 的正交振幅或正交位相分量,并将输出的光电流相加或相减,得到正交振幅和 $\langle \delta^2(\hat{X}_a + \hat{X}_b) \rangle$ 或正交位相差 $\langle \delta^2(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b) \rangle$ 的关联噪声,并用频谱分析仪进行记录,即可得到 EPR 纠缠光束的关联噪声谱。图 2 为我们测得的 EPR 纠缠光束在 2MHz 附近的关联噪声,(a)为正交振幅和关联噪声,(b)为正交位相差关联噪声。图中轨迹 1 为归一化散粒噪声极限(SNL),轨迹 2 为关联噪声,测量频率为 2 MHz,频谱分析仪分析带宽(RBW)为 10 kHz,视频带宽(VBW)为 30 Hz。我们实验测得的 EPR 纠缠光束的量子关联度为 $\langle \delta^2(\hat{X}_a + \hat{X}_b) \rangle = -3.08 \pm 0.02$ dB, $\langle \delta^2(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b) \rangle = -3.01 \pm 0.03$ dB。实验结果满足 L. M. Duan 等人提出的 EPR 纠缠的量子不可分判据^[18]:即 $\langle \delta^2(\hat{X}_a + \hat{X}_b) \rangle + \langle \delta^2(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b) \rangle = 0.98 < 2$ 。

根据我们的 NOPA 腔参数计算可得其带宽约为 20 MHz,则腔存储时间约为 5×10^{-8} s。只有当测量时间大于腔存储时间时才可以观测到量子关联^[19],因此我们选取测量时间为 $\Delta T = 0.5 \mu s$ (5×10^{-7} s),对应的采样速率为 2 M/s。图 3 为实验测得的信号光和闲置光正交分量瞬时的量子起伏,(a)为正交振幅分量的量子起伏,(b)为正交位相分量的量子起伏,其中实线(i)为信号光的量子起伏,点线(ii)为闲置光场的量子起伏,均包含 50 个数据点。由图 3(a)和(b)可见正交振幅之间存在反关联 ($\hat{X}_a \propto -\hat{X}_b$),而正交位相之间存在正关联 ($\hat{Y}_a \propto \hat{Y}_b$)。这就验证了 EPR 纠缠光束正交分量之间的量子关联。测量到的信号光和闲置光正交振幅和正交位相分量数据之间的关联如图 4 所示,(a)为正交振幅数据,(b)为正交位相数据,各有 50 000 个数据点。理想情况下,正交分量之间的关联应该为一条 $\pm 45^\circ$ 方向的直线。由于我们测量到正交振幅和正交位相分量的关联度分别为 -3.08 dB 和 -3.01

dB, 因此看到正交振幅和正交位相之间的关联分别为 -45° 方向 ($\hat{X}_a \propto -\hat{X}_b$) 和 $+45^\circ$ 方向 ($\hat{Y}_a \propto$

\hat{Y}_b) 的椭圆。

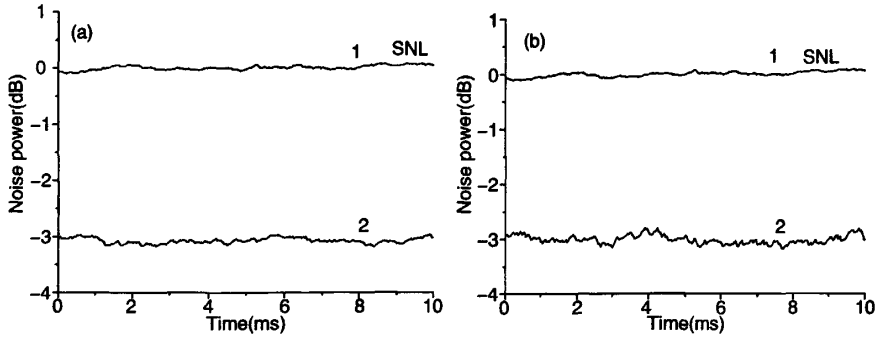


图 2 EPR 纠缠光束的关联噪声谱, (a): 正交振幅和, (b): 正交位相差。

Fig. 2 The measured EPR correlation variances. (a): amplitude sum variance, (b): phase difference variance.

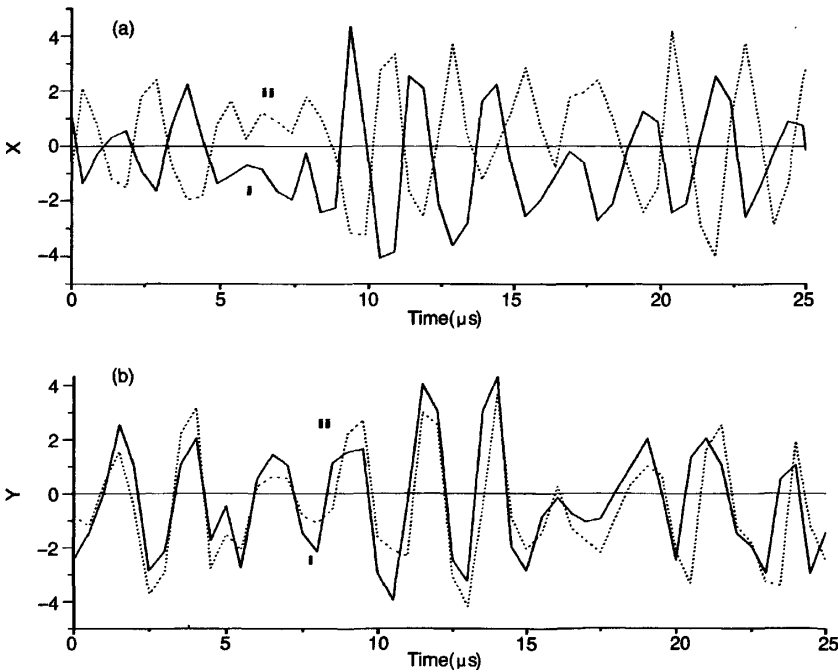


图 3 信号光与闲置光瞬时的量子关联, (a): 正交振幅分量, (b): 正交位相分量。

Fig. 3 The instantaneous quantum correlation of signal and idler beam, (a): amplitude quadrature, (b): phase quadrature.

为了测量最大的 EPR 纠缠光束的时域量子起伏, 必须首先保证信号光和闲置光平衡零拍探测系统的同步, 即同步测量从 NOPA 同时输出的、具有零延迟时间的信号光和闲置光的量子起伏。我们尝试对实验测得的闲置光的量子起伏进行延迟, 发现当延迟时间增长时, 关联度逐渐降低, 而延迟达到约 $2 \mu\text{s}$ 时, 量子关联消失。延迟 $2 \mu\text{s}$ 后正交分量之间的量子关联如图 5 所示,

(a) 为正交振幅分量, (b) 为正交位相分量, 其中实线 (i) 为信号光的量子起伏, 点线 (ii) 为闲置光场的量子起伏。可见, 由于信号光与闲置光不同步, 导致量子关联消失。因此, 在应用中我们应该尽可能同步执行两关联光束的正交分量测量。

4 结论

我们在实验上实时观测了 EPR 纠缠光束正

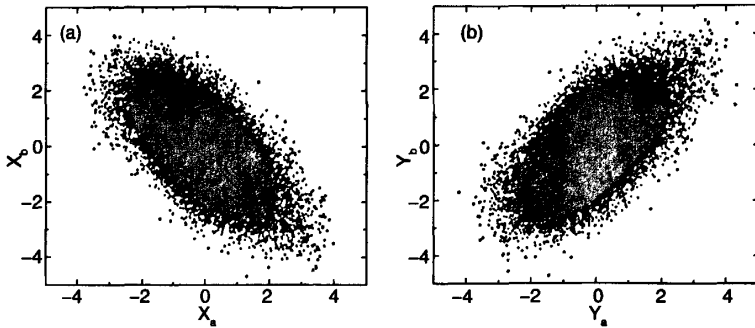


图4 EPR 纠缠光束正交分量之间的关联, (a): 正交振幅数据, (b): 正交位相数据

Fig. 4 The correlation between quadratures of EPR beams,
(a): data of amplitude quadrature, (b): data of phase quadrature.

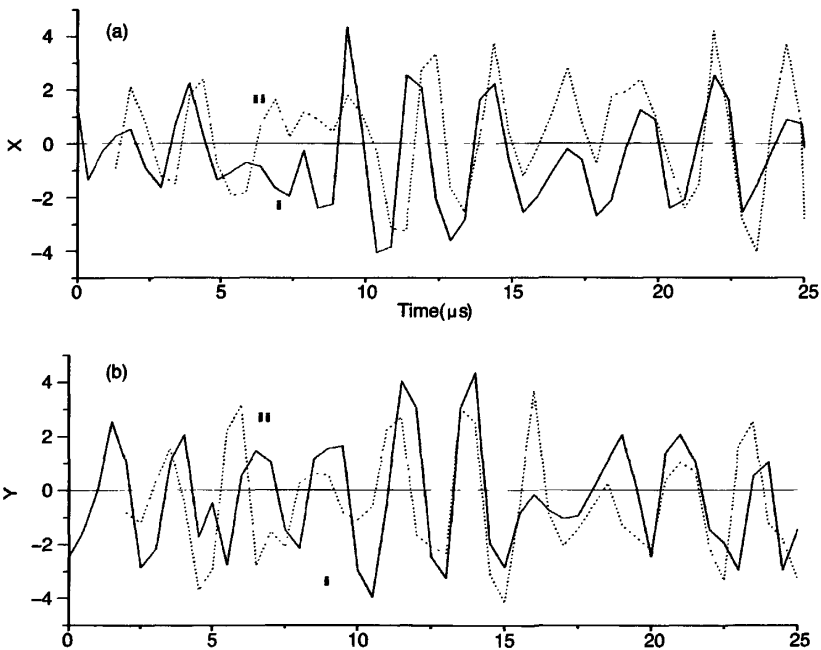


图5 延迟闲置光后的量子关联, (a): 正交振幅分量, (b): 正交位相分量

Fig. 5 The quantum correlation after the idler beam delayed,
(a): amplitude quadrature, (b): phase quadrature

交分量之间的时域量子关联。当两光束的测量延迟时间超过 $2 \mu\text{s}$ 时量子关联消失。连续变量时域量子关联的测量可用于高速率量子密钥分

发、非高斯态实验制备、量子纠缠纯化等研究领域,为下一步发展量子信息网络提供了一种新的技术手段。

参考文献:

- [1] EINSTEIN A, PODOLSKY B, ROSEN N. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? [J]. *Phys Rev*, 1935, **47**: 777-780.
- [2] OU Z Y, PEREIRA S F, KIMBLE H J, *et al.* Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox for continuous variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68**: 3663-3666.
- [3] BRAUNSTEIN S L, KIMBLE H J. Teleportation of Continuous Quantum Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**: 869.

- [4] FURUSAWA A, SØRENSEN J L, BRAUNSTEIN S L, *et al.* Unconditional Quantum Teleportation [J]. *Science*, 1998, **282**: 706-709.
- [5] LI XIAOYING, PAN QING, JING JIETAI, *et al.* Quantum Dense Coding Exploiting a Bright Einstein-Podolsky-Rosen Beam [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**: 047904.
- [6] MIZUNO JUN, WAKUI KENTARO FURUSAWA AKIRA, *et al.* Experimental Demonstration of Entanglement-assisted Coding Using a Two-mode Squeezed Vacuum State [J]. *Phys Rev A*, 2005, **71**: 012304.
- [7] SILBERHORN CH, KOROLKOVA N, LEUCHS G. Quantum key Distribution with Bright Entangled Beams [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**: 167902.
- [8] BENCHEIKH K, SYMUL T H, JANKOVIC A, *et al.* Quantum key Distribution with Continuous Variables [J]. *J Mod Opt*, 2001, **48**: 1903-1920.
- [9] TAKEI N, YONEZAWA H, AOKI T, *et al.* High-Fidelity Teleportation beyond the No-Cloning Limit and Entanglement Swapping for Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **94**: 220502.
- [10] JIA XIAOJUN, SU XIAOLONG, PAN QING, *et al.* Experimental Demonstration of Unconditional Entanglement Swapping for Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**: 250503.
- [11] LLOYD S, BRAUNSTEIN S L. Quantum Computation over Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**: 1784-1787.
- [12] MENICUCCI NICOLAS C, VAN LOOCK PETER, GU MILE, *et al.* Universal Quantum Computation with Continuous-Variable Cluster States [J]. *Phys Rre Lett*, 2006, **97**: 110501.
- [13] OURJOUNTSEV A, TUALLE-BROURI R, LAURAT J, *et al.* Generating Optical Schr dinger Kittens for Quantum Information Processing [J]. *Science*, 2006, **312**: 83-86.
- [14] NEERGAARD-NIELSEN J S, NIELSEN B M, HETTICH C, *et al.* Generation of a Superposition of Odd Photon Number States for Quantum Information Networks [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**: 083604.
- [15] HAGE BORIS, SAMBLOWSKI AIKO, DIGUGLIELMO JAMES, *et al.* Preparation of Distilled and Purified Continuous-variable Entangled States [J]. *Nature Physics*, 2008, **4**: 915-918.
- [16] DONG RUIFANG, LASSEN MIKAEL, HEERSINK JOEL, *et al.* Experimental Entanglement Distillation of Macroscopic Quantum States [J]. *Nature Physics*, 2008, **4**: 919-923.
- [17] TAKEI N, LEE N, MORIYAMA D, *et al.* Time-gated Einstein-Podolsky-Rosen correlation [J]. *Phys Rev A*, 2006, **74**: 060101(R).
- [18] DUAN L-M, GIEDKE G, CIRAC J I, *et al.* Inseparability Criterion for Continuous Variable Systems [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**: 2722-2725.
- [19] REYNAUD S, FABRE C, GIACOBINO E. Quantum Fluctuations in a Two-mode Parametric Oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 1987, **4**: 1520-1524.

Experimental Testing of Time-domain Quantum Correlation of EPR Entangled Beams

JIN Xiao-li, WANG Yu, SU Xiao-long, PENG Kun-chi

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We measured the quantum fluctuations of the quadratures of signal and idler beams of EPR entangled beams in time domain directly by using the homodyne detection system and data acquisition system, and demonstrated intuitively the quantum correlations between two optical beams. By delaying one of the EPR entangled beams, we verify that if the measurements on the signal and the idler beams are not synchronal, the correlations between them will decrease and finally vanish. The presented experimental method can be utilized in developing quantum key distribution with continuous variables, experimental preparation of non-Gaussian state and entanglement purification.

Key words: EPR entanglement; quantum correlation; non-degenerate optical parametric amplifier

作者: 靳晓丽, 王宇, 苏晓龙, 彭堃堃, JIN Xiao-li, WANG Yu, SU Xiao-long, PENG Kun-chi
作者单位: 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西, 太原, 030006
刊名: 量子光学学报 **ISTIC** **PKU**
英文刊名: ACTA SINICA QUANTUM OPTICA
年, 卷(期): 2009, 15(2)

参考文献(19条)

1. EINSTEIN A; PODOLSKY B; ROSEN N Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? 1935
2. OU Z Y; PEREIRA S F; KIMBLE H J Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox for continuous variables 1992
3. BRAUNSTEIN S L; KIMBLE H J Teleportation of Continuous Quantum Variables[外文期刊] 1998(4)
4. FURUSAWA A; S(Φ)RENSEN J L; BRAUNSTEIN S L Unconditional Quantum Teleportation[外文期刊] 1998
5. LI XIAOYING; PAN QING; JING JIETAI Quantum Dense Coding Exploiting a Bright Einstein-Podolsky-Rosen Beam 2002
6. MIZUNO JUN; WAKUI KENTARO; FURUSAWA AKIRA Experimental Demonstration of Entanglement-assisted Coding Using a Two-mode Squeezed Vacuum State 2005
7. SILBERHORN CH; KOROLKOVA N; LEUCHS G Quantum key Distribution with Bright Entangled Beams 2002
8. BENCHEIKH K; SYMUL T H; JANKOVIC A Quantum key Distribution with Continuous Variables[外文期刊] 2001(13)
9. TAKEI N; YONEZAWA H; AOKI T High-Fidelity Teleportation beyond the No-Cloning Limit and Entanglement Swapping for Continuous Variables[外文期刊] 2005(22)
10. JIA XIAOJUN; SU XIAOLONG; PAN QING Experimental Demonstration of Unconditional Entanglement Swapping for Continuous Variables[外文期刊] 2004(25)
11. LLOYD S; BRAUNSTEIN S L Quantum Computation over Continuous Variables[外文期刊] 1999(8)
12. MENICUCCI NICOLAS C; VAN LOOCK PETER; GU MILE Universal Quantum Computation with Continuous Variable Cluster States 2006
13. OURJOUNTSEV A; TUALLE-BROURI R; LAURAT J Generating Optical Schrödinger Kittens for Quantum Information Processing[外文期刊] 2006(5770)
14. NEERGAARD-NIELSEN J S; NIELSEN B M; HETTICH C Generation of a Superposition of Odd Photon Number States for Quantum Information Networks[外文期刊] 2006(8)
15. HAGE BORIS; SAMBLOWSKI AIKO; DIGUGLIELMO JAMES Preparation of Distilled and Purified Continuous-variable Entangled States 2008
16. DONG RUIFANG; LASSEN MIKAEL; HEERSINK JOEL Experimental Entanglement Distillation of Macroscopic Quantum States 2008
17. TAKEI N; LEE N; MORIYAMA D Time-gated Einstein-Podolsky-Rosen correlation 2006
18. DUAN L-M; GIEDKE G; CIRAC J I Inseparability Criterion for Continuous Variable Systems[外文期刊] 2000(12)

本文读者也读过(10条)

1. [于文健, 王继锁, 范洪义](#) [用Weyl-Wigner对应求证相干态的一个重要性质](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#)2009, 15(4)
2. [张靖, 谢常德](#) [明亮EPR光束的量子纠缠交换](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#)2002, 8(1)
3. [翟淑琴, 邹宏新, 张俊香, 郜江瑞](#) [利用孪生光束实现强度量子关联的传递](#) [期刊论文]-[激光与光电子学进展](#) 2008, 45(2)
4. [申玉梅, 邓晓玮, 贾晓军, SHEN Yu-mei, DENG Xiao-wei, JIA Xiao-jun](#) [连续变量量子纠缠增强实验的改进](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#)2011, 17(2)
5. [王晓鑫, 刘玉, 王长强, Wang Xiaoxin, Liu Yu, Wang Changqiang](#) [安全传送明文的量子直传实验方案设计](#) [期刊论文]-[光学学报](#)2005, 25(3)
6. [荆杰泰, 张俊香](#) [结合双模压缩真空态对EPR“佯谬”与量子力学几率波的统一性解释](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#) 2002, 8(2)
7. [蔡阳健, 朱诗尧, CAI Yangjian, ZHU Shiyao](#) [相干高斯光束的符合成像和干涉](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#) 2005, 11(4)
8. [宋克柱, 杨小军, 张凌云](#) [量子密钥分发实验数据采集系统](#) [会议论文]-2008
9. [孙跃, 翟淑琴, 张海龙, 张俊香, 郜江瑞, SUN Yue, ZHAI Shu-qin, ZHANG Hai-long, ZHANG Jun-xiang, GAO Jiang-ru](#) [连续变量量子纠缠态的非对称量子克隆](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#)2009, 15(2)
10. [徐兴磊, 李洪奇, 范洪义, XU Xing-lei, LI Hong-qi, FAN Hong-yi](#) [引入Wigner函数, Weyl对应和Wigner算符相干态表象的新途径](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#)2010, 16(2)

引用本文格式: [靳晓丽, 王宇, 苏晓龙, 彭堃堃, JIN Xiao-li, WANG Yu, SU Xiao-long, PENG Kun-chi](#) [EPR纠缠光束时域量子关联的实验验证](#) [期刊论文]-[量子光学学报](#) 2009(2)