

压缩态光场平衡零拍探测的位相锁定*

张岩 于旭东 邸克 李卫 张靖†

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

(2012年11月9日收到; 2012年12月21日收到修改稿)

平衡零拍探测是测量量子光场的重要方法之一. 通过对相位灵敏光学参量放大器注入的信号进行位相调制, 然后利用平衡零拍探测系统测量光学参量放大器输出的压缩光. 将相位灵敏光学参量分别运转在参量放大和参量缩小, 通过观察噪声谱中的调制信号就可确定测量的量子光场是正交振幅或位相分量. 通过解调位相调制信号可获得误差信号, 实现锁定平衡零拍探测系统本底光与待测光场相对位相为零 (对应于待测光场振幅噪声分量).

关键词: 平衡零拍探测, 位相锁定

PACS: 42.50.Ar, 42.50.Lc

DOI: 10.7498/aps.62.084204

1 引言

平衡零拍探测系统是一种非常重要的光学测量装置, 它可以用来测量光场的正交分量量子起伏, 因此在非经典光场的探测、量子通信与量子信息等方面有着广泛的应用^[1-7]. 该系统由一个 50/50 光学分束器、两个高量子效率光探测器和一个电子信号减法器构成. 用一束功率远大于待测光场的激光与待测光场在 50/50 分束器上进行相干耦合, 此束相对较强的光称为本底光. 两个探测器分别探测分束器的两出射光, 并将所得光电电流信号相减, 理想情况下输出信号正比于待测光的正交分量噪声. 其测量结果与本底光与待测光场的相对位相有着密切关系. 在压缩光的测量中, 当本底光与待测光场的位相差为零或 $\pi/2$ 时, 测量的结果分别为正交振幅或正交位相噪声^[8].

进行平衡零拍探测时, 通常可以使用人工扫描或搜索本底光与待测光场的相对位相来测噪声, 但在量子信息与量子通信的许多应用中需要固定测量某一正交分量量子噪声. 2003 年, 美国 Kimble 小组^[9] 进行量子离物态的实验时, 为了同时锁定两套平衡零拍探测系统中两待测光的相对位相, 在光

路上加上位相调制, 从而锁定本底光与待测光的相对位相分别为零和 $\pi/2$. 2006 年, 澳大利亚国立大学的 Lam 小组^[10] 通过对光学参量振荡器注入信号光加上位相调制, 将输出压缩光场与本底光锁在相对位相为零处, 测得大于 3 dB 的正交分量压缩噪声. 本文采用对周期性极化的 KTiOPO_4 (PPKTP) 晶体构成的相位灵敏光学参量放大器注入信号光进行位相调制, 利用平衡零拍探测系统测量光学参量放大器输出的压缩光. 将相位灵敏光学参量放大器分别运转在参量放大和参量缩小状态, 通过观察噪声谱中的调制信号就可确定测量的量子光场是正交振幅或位相分量. 通过解调位相调制信号可获得误差信号, 实现锁定平衡零拍探测系统本底光与待测光场相对位相为零, 测得 2 dB 的正交分量压缩.

2 理论分析

2.1 平衡零拍探测测量噪声谱随 θ 的变化

如图 1 所示, 待测光场 a_s 和本底光 a_L 经过一个 50/50 分束器干涉产生 c, d 两束光, 分别由探测器探测. 这里 a_s 和 a_s^+ 分别表示待测量光场的湮

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB921601)、国家自然科学基金重点项目 (批准号: 11234008)、国家自然科学基金创新研究群体 (批准号: 61121064) 和国家教育部博士点基金 (批准号: 20111401130001) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jzhang74@yahoo.com

灭和产生算符, a_L 和 a_L^\dagger 表示本底光的湮灭和产生算符, 它们满足对易关系 $[a, a^\dagger] = 1$, c, d 输出光场可表示为

$$\begin{aligned} c &= \frac{1}{\sqrt{2}}(a_s + e^{i\theta} a_L), \\ d &= \frac{1}{\sqrt{2}}(a_s - e^{i\theta} a_L). \end{aligned} \quad (1)$$

探测器的输出光电流经过减法器输出为

$$I = c^\dagger c - d^\dagger d = e^{i\theta} a_s^\dagger a_L + e^{-i\theta} a_L^\dagger a_s. \quad (2)$$

由于本底光为强的相干光, 则 α 为本底光 a_L 的平均值, 平衡零拍探测要求本底光强度远大于待测光场强度, 因此频谱仪测量得到减法器输出光电流起伏 i 为

$$\begin{aligned} i &\propto \delta^2 \langle I \rangle = |\alpha|^2 \delta^2 \langle e^{i\theta} a_s^\dagger + e^{-i\theta} a_s \rangle \\ &= |\alpha|^2 \delta^2 \langle X_s \cos \theta + Y_s \sin \theta \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, θ 为本底光与待测光场的相对位相, $X_s = a_s + a_s^\dagger$ 为待测光场正交振幅算符, $Y_s = -i(a_s - a_s^\dagger)$ 为待测光场正交位相算符. 当 $\theta = 0$ 时, 所测为待测光场正交振幅噪声分量; 当 $\theta = \pi/2$ 时, 所测为待测光场正交位相噪声分量.

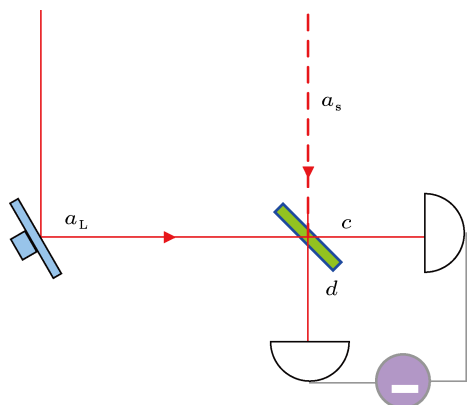


图1 平衡零拍探测装置

2.2 平衡零拍探测锁相的鉴频信号

信号光经过位相调制器后其光场振幅为

$$E_{\text{signal}} = E_1 e^{i(\omega t + \beta \sin \Omega t)}. \quad (4)$$

当调制幅度较小时可以通过 Bessel 函数一阶展开表达为

$$\begin{aligned} E_{\text{signal}} &\approx E_1 [J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} \\ &\quad - J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t}], \end{aligned} \quad (5)$$

可以看出, 调制后的激光变为含有三个频率成分的激光, 频率为 ω 的载波和频率为 $\omega \pm \Omega$ 的边带, 这里 Ω 为调制频率, β 为调制深度.

平衡零拍探测的本底光的振幅可以表示为

$$E_{\text{local}} = E_2 e^{i\omega t}, \quad (6)$$

当本底光与待测光场在 50/50 分束器上干涉耦合后, 其中一臂的光场振幅为

$$E_{\text{out}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (E_{\text{signal}} + E_{\text{local}} e^{i\theta}). \quad (7)$$

平衡零拍探测一臂的光场由探测器探测输出光电流为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= E_{\text{out}} E_{\text{out}}^* \\ &= \frac{1}{2} (E_{\text{signal}} + E_{\text{local}} e^{i\theta}) (E_{\text{signal}}^* + E_{\text{local}}^* e^{-i\theta}) \\ &= \frac{1}{2} (|E_{\text{signal}}|^2 + E_{\text{signal}} E_{\text{local}}^* e^{-i\theta} \\ &\quad + E_{\text{signal}}^* E_{\text{local}} e^{i\theta} + |E_{\text{local}}|^2), \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $|E_{\text{signal}}|^2 = |E_1|^2 [J_0^2(\beta) + 2J_1^2(\beta) - J_1^2(\beta) e^{2i\Omega t} - J_1^2(\beta) e^{-2i\Omega t}]$, $|E_{\text{local}}|^2 = |E_2|^2$, $E_{\text{signal}} E_{\text{local}}^* e^{-i\theta} = E_1 E_2 [J_0(\beta) e^{-i\theta} + J_1(\beta) e^{i(\Omega t - \theta)} - J_1(\beta) e^{-i(\Omega t + \theta)}]$, $E_{\text{signal}}^* E_{\text{local}} e^{i\theta} = E_1 E_2 [J_0(\beta) e^{i\theta} + J_1(\beta) e^{-i(\Omega t - \theta)} - J_1(\beta) e^{i(\Omega t + \theta)}]$. 探测输出光电流简化为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}} &= \frac{1}{2} \{ |E_1|^2 [J_0^2(\beta) + 2J_1^2(\beta)] + |E_2|^2 \\ &\quad + 2E_1 E_2 J_0(\beta) \cos \theta \\ &\quad + 4E_1 E_2 J_1(\beta) \sin(\Omega t) \sin \theta + f(2\Omega) \}, \end{aligned} \quad (9)$$

可以看到探测输出光电流包含直流项、 Ω 项和 2Ω 项, 其中 2Ω 项属于高阶项可以忽略. 可以看出, 平衡零拍探测一臂探测器输出的交流信号主要是位相调制 Ω 频率的信号, 并且信号强度大小依赖于本底光与待测光场的相对位相 θ .

当 $\theta = 0$ 时, 调制信号强度最小, 其值为零; 当 $\theta = \pi/2$ 时, 调制信号强度最大.

将从信号源分出的一部分调制信号 $\cos(\Omega t + \varphi)$ 和平衡零拍探测一臂探测器输出的交流信号同时送入混频器, 其中 φ 为射频信号源与探测器输出交流信号的相对位相. 混频信号经过低通滤波器将频率大于或等于 Ω 的信号滤掉后得到

$$\begin{aligned} S &= E_1 E_2 J_1 [\cos(\theta + \varphi) - \cos(\theta - \varphi)] \\ &= -E_1 E_2 J_1 \sin \theta \sin \varphi, \end{aligned} \quad (10)$$

该输出为锁定本底光与待测光场相对位相的鉴频信号, 可将本底光与待测光场相对位相锁定在 $\theta = 0$. 当调节相位 φ 为 $\pi/2$, 此时鉴频曲线强度最大.

2.3 参量放大和参量缩小时噪声谱与鉴频信号随 θ 变化的对应关系

当相位灵敏光学参量放大器运转在参量放大状态时, 待测光场的正交位相分量噪声被压缩, 而正交振幅分量噪声被放大. 锁定本底光与待测光场相对位相, 此时所测量的是待测光场正交振幅分量, 该分量为反压缩, 量子起伏高于散粒噪声基准 (SNL), 如图 2 所示.

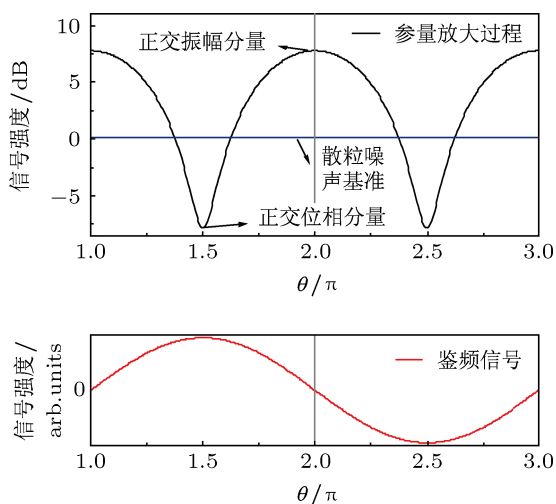


图2 参量放大时噪声谱与鉴频信号随 θ 变化时的对应关系

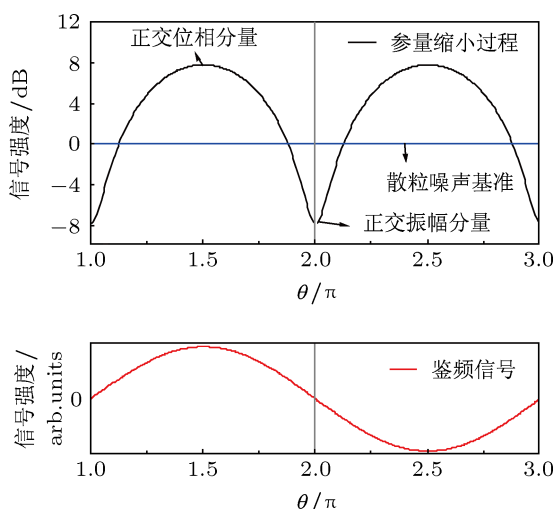


图3 参量缩小时噪声谱与鉴频信号随 θ 变化时的对应关系

当相位灵敏光学参量放大器运转在参量缩小状态时, 待测光场的正交振幅噪声被压缩, 而正交位相分量噪声被放大. 锁定本底光与待测光场相对位相, 此时所测量的是待测光场正交振幅分量, 该分量低于散粒噪声基准 (SNL), 如图 3 所示.

3 实验装置和结果

实验装置如图 4 所示, 主要装置包括: 激光器, 模清洁器, 光学参量放大器 (optical parametric amplifier, OPA) 腔, OPA 腔长及位相锁定系统, 平衡零拍探测系统和其他位相锁定系统.

单频全固化内腔倍频激光器同时输出 532 nm 的绿光和 1064 nm 的红外光, 经过分色镜后将两束光分开. 红外光通过单模偏偏光纤, 光纤对红外光具有空间模式清洁作用, 获得具有很好高斯分布的激光光束. 光纤的输出光经过格兰棱镜后分为两束, 一束作为平衡零拍探测的本底光, 另一束则经过位相调制器后注入 OPA 腔作为信号光. 绿光注入 OPA 腔, 作为 OPA 腔的抽运光, OPA 腔采用两镜驻波腔结构, 非线性晶体采用准相位匹配晶体 PPKTP 晶体, (OPA 腔的详细参数见文献 [11—14]). OPA 腔输出光包含红外压缩光 (待测光场) 与透射的绿光, 经过一个分色镜将两束光分离, 绿光由探测器探测. 红外压缩光输出的 2%—5% 由红外探测器 3 探测, 探测器输出直流信号用于监视红外光模式, 探测器输出交流信号分为两路, 分别通过两个锁相放大器锁定 OPA 腔及红外光与绿光相对位相. 大部分输出红外压缩光通过平衡零拍探测器进行探测. 实现平衡零拍探测本底光与待测光场位相锁定首先需要对 OPA 腔信号光进行位相调制. 射频信号源输出频率为 2.3 MHz 的正弦波, 它分为两路, 一路加到位相调制器上, 另一路输入混频器中, 与平衡零拍探测器其中一只探测器的信号混频, 解调出平衡零拍探测系统本底光与待测光场相对位相的信息. 混频器的输出信号经过一个低通滤波器后进入 PID 控制电路. 通过压电陶瓷扫描 θ 来观测鉴频信号 (扫描电压如图 5 所示), 并调节 φ 使鉴频信号达到最大 (如图 5 所示). 鉴频信号反馈控制本底光反射镜上的压电陶瓷来锁定本底光与待测光场相对位相.

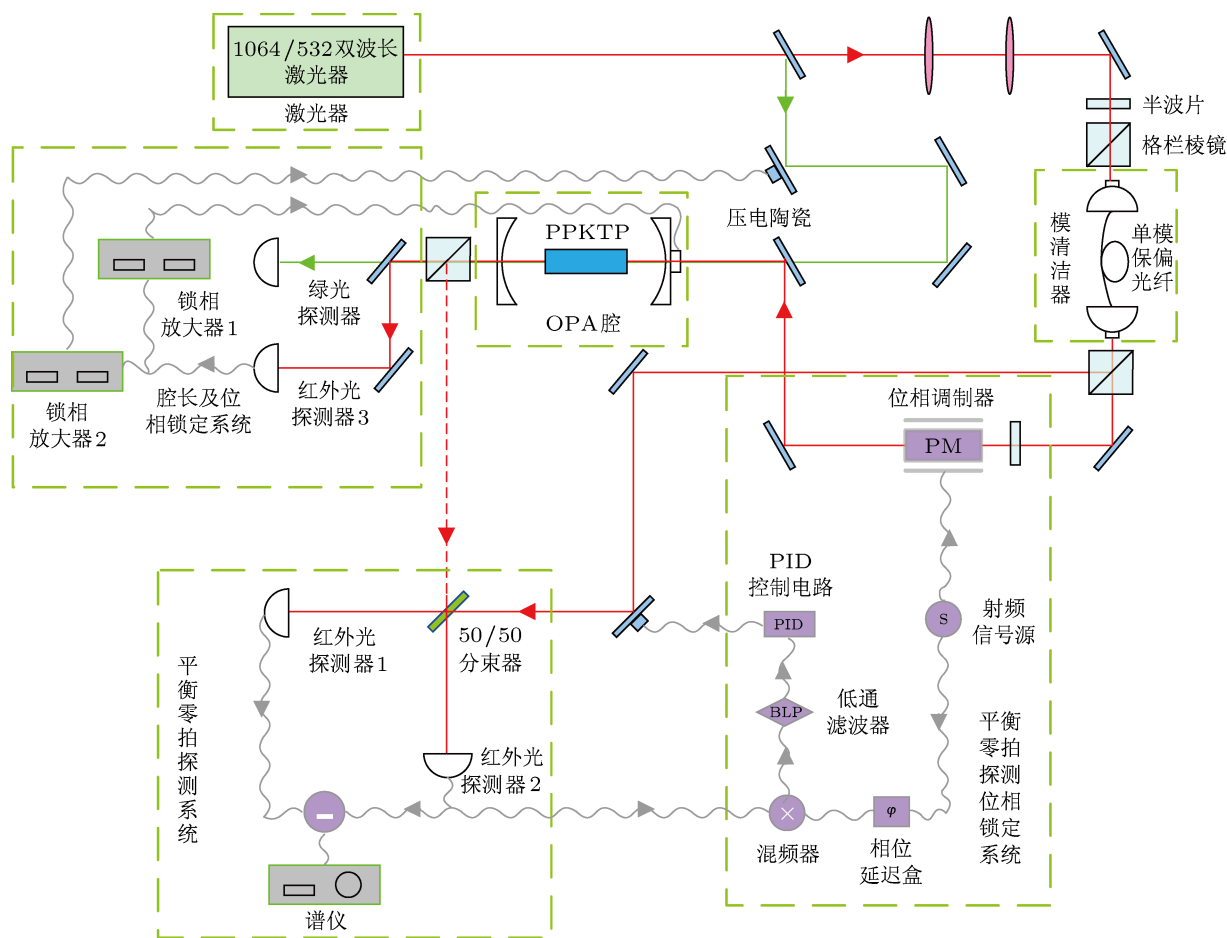


图4 实验装置图

首先考虑相位灵敏光学参量放大器运转在参量放大状态, 此时输出压缩光的正交位相分量被压缩低于散粒噪声基准, 正交振幅分量被放大高于散粒噪声基准. 利用锁相放大器锁定红外光与绿光相对位相, 使光学参量放大器运转于参量放大状态, 调节腔前注入红外光功率使参量腔输出功率约为 $4 \mu\text{W}$, 调节本底光功率约 $160 \mu\text{W}$. 首先挡住待测压缩态光场, 因此平衡零拍探测器的输入待测光场为真空光场, 此时平衡零拍探测器测得噪声谱为散粒噪声基准, 如图 6 中线 b 所示. 然后打开待测压缩态光场, 锁定本底光与待测光场相对位相, 此时测得高于散粒噪声基准 4 dB 的反压缩噪声, 如图 6 中线 a 所示. 此时, 观测不到 2.3 MHz 的调制信号, 本底光与待测光场相对位相为零状态, 所测量得到的噪声谱是待测光场正交振幅噪声分量. 当解开 PID 锁定, 搜索本底光与待测光场相对位相到

$\pi/2$ 处, 此时测得低于散粒噪声基准 2 dB 的压缩噪声, 如图 6 中线 c 所示. 此时观测到 2.3 MHz 的调制信号幅度最大, 所测为待测光场正交位相噪声分量.

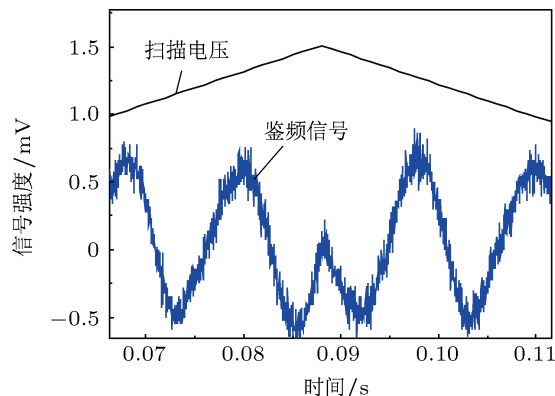


图5 扫描 θ 时的鉴频曲线

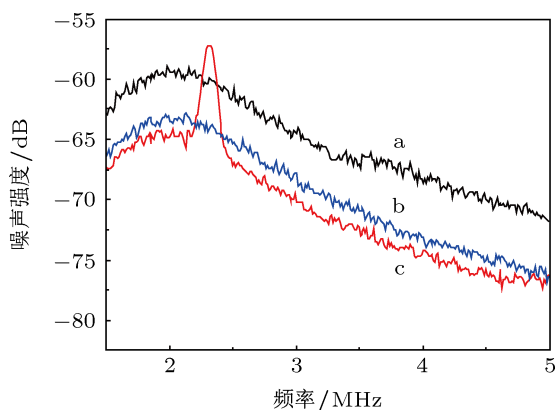


图6 参量放大过程测得噪声 a 反压缩噪声; b 散粒噪声基准; c 压缩噪声

当相位灵敏光学参量放大器运转在参量缩小状态, 此时输出压缩光的正交振幅分量被压缩低于散粒噪声基准, 正交位相分量被放大高于散粒噪声基准. 首先将光学参量放大器锁定在参量反放大状态. 调节腔前注入红外光功率使参量腔输出功率约为 $2 \mu\text{W}$, 当锁定本底光与待测光场相对位相, 此时测得 2 dB 压缩噪声, 如图 7 中线 g 所示. 此时 2.3 MHz 的调制信号最小 (与前面理论分析一致), 所测为待测光场正交振幅噪声分量, 本底光与待测光场相对位相为零. 解开 PID 锁定, 搜索本底光与待测光场相对位相到 $\pi/2$ 处, 此时测得 4 dB 反压缩噪声, 如图 7 线 e 所示. 此时 2.3 MHz 的调

制信号最大 (与前面理论分析一致), 所测为待测光场正交位相噪声分量.

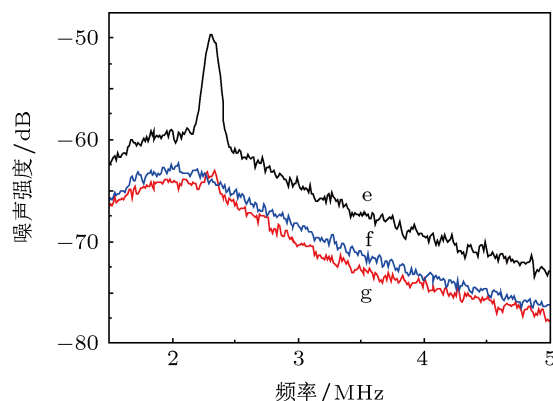


图7 参量反放大过程所测噪声 e 反压缩噪声; f 散粒噪声基准; g 压缩噪声

4 结论

本文研究了对光学参量放大器注入的信号进行位相调制, 利用平衡零拍探测系统测量光学参量放大器输出的压缩光, 通过观察噪声谱中的调制信号就可确定测量的量子光场是正交振幅或位相分量. 通过解调位相调制信号可获得误差信号, 实现锁定平衡零拍探测系统本底光与待测光场相对位相. 该技术将用于量子纠缠测量及量子通信实验中.

- [1] Braunstein S L, Loock P V 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 513
- [2] Braunstein S L, Pati A K 2003 *Quantum Information with Continuous Variables* (Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic)
- [3] Cerf N, Leuchs G, Polzik E S 2007 *Quantum Information with Continuous Variables of Atoms and Light* (London: Imperial College Press)
- [4] Weedbrook C, Pirandola S, Patron R G, Cerf N J, Ralph T C, Shapiro J H, Lloyd S 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 621
- [5] Slusher R E, Hollberg L W, Yurke B, Mertz J C, Valley J F 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 2409
- [6] Furusawa A, Sorensen J L, Braunstein S L, Fuchs C A, Kimble H J, Polzik E S 1998 *Science* **282** 706
- [7] Gu M, Chrzanowski H M, Assad S M, Symul T, Modi K, Ralph T C, Vedral V, Lam P K 2012 *Nature Phys.* **8** 671
- [8] Kasi K, Gao J R, Fabre C 1997 *Europhys. Lett.* **40** 25
- [9] Zhang T C, Goh K W, Chou C W, Lodahl P, Kimble H J 2003 *Phys. Rev. A* **67** 033802
- [10] Hétet G, Glöckl O, Pilypas K A, Harb C C, Buchler B C, Bachor H A, Lam P K 2007 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **40** 221
- [11] Ma H L, Wei D, Ye C G, Zhang J, Peng K C 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3637 (in Chinese) [马红亮, 卫栋, 叶晨光, 张靖, 彭堃堃 2005 物理学报 **54** 3637]
- [12] Di K, Yu X D, Zhang J 2011 *Acta Sin. Quantum Opt.* **4** 241 (in Chinese) [邸克, 于旭东, 张靖 2011 量子光学学报 **4** 241]
- [13] Zhang J, Ye C G, Gao F, Xiao M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 233602
- [14] Di K, Xie C D, Zhang J 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 153602

Locking the phase of balanced homodyne detection system for squeezed light*

Zhang Yan Yu Xu-Dong Di Ke Li Wei Zhang Jing[†]

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

(Received 9 November 2012; revised manuscript received 21 December 2012)

Abstract

The balanced homodyne detection technique is an important method to detect the quantum light field. The signal light injected into the phase sensitive optical parameter amplifier (OPA) is phase modulated. The output squeezed light of OPA is detected by the balanced homodyne detection system. When the phase sensitive OPA is operated at parametric amplification and deamplification respectively, we can judge which quadrature component of the quantum light field is measured by observing the modulation signal. We can demodulate the phase modulation signal to achieve the error signal, which is used to lock the relative phase of zero between the local and the quantum light fields (corresponding to the quadrature-amplitude of the unknown light field).

Keywords: balanced homodyne detection, lock the phase

PACS: 42.50.Ar, 42.50.Lc

DOI: 10.7498/aps.62.084204

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB921601), the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11234008) the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61121064), and the Doctoral Program Foundation of Ministry of Education, China (Grant No. 20111401130001).

[†] Corresponding author. E-mail: jzhang74@yahoo.com