

# 平衡零拍探测器的改进

王金晶 贾晓军\* 彭堃堦

(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, 山西 太原 030006)

**摘要** 平衡零拍探测技术是连续变量量子信息科学研究中测量量子态量子噪声的最佳方法之一。在平衡零拍探测系统中,需要一对性能和结构尽量相同的光电探测器,以便很好地减去经典噪声,有效探测散粒噪声基准及光场噪声。根据基尔霍夫电流定律及光电二极管串联的办法,设计并制作出一种性能优良的低噪声平衡零拍探测器。该探测器从光电二极管串联节点处取出光电流相减信号,然后对信号进行放大,在对两探测器全同性要求降低的同时提高了平衡零拍探测的性能。实验结果表明,该探测器在 2 MHz 处共模抑制比达 39 dB,能很好地满足量子信息对低噪声、线性增益及高共模抑制比的要求。

**关键词** 量子光学;平衡零拍探测;光电探测;共模抑制比

**中图分类号** O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0127001

## Improvement of Balanced Homodyne Detector

Wang Jinjing Jia Xiaojun Peng Kunchi

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

**Abstract** Balanced homodyne detection technology is one of the best methods for detecting the quantum noise of a quantum state in continuous variable quantum information. In the balanced homodyne detection system, a pair of detectors with the same performance are needed to effectively detect the noise limit and the quantum fluctuations of quantum states for totally eliminating classical noises. Based on the Kirchhoff current law and the scheme of photodiodes in series, a type of balanced homodyne detector with excellent capability is designed and set up. The photo-current signal is obtained from the series connection nodes of photodiodes and then amplified, thus the requirement of identity for the two detectors is degraded and the quality of the balanced homodyne detection system is improved at the same time. The experimentally measured common-mode rejection ratio (CMRR) of the detector is 39 dB at 2 MHz. The improved detector with low noise, good linear gain and high CMRR can satisfy the requirements of quantum information experiments.

**Key words** quantum optics; balanced homodyne detection; photoelectric detection; common-mode rejection ratio

**OCIS codes** 270.5570; 270.5585; 270.6570

## 1 引言

随着现代科学技术的发展,光学测量和光学通讯的精度已经接近标准量子极限的水平<sup>[1]</sup>。即使采用有效方法去掉测量过程中所有经典误差源的影响,量子噪声<sup>[2]</sup> 仍然存在各种形式的辐射之中。

量子噪声的存在从根本上限制着光学测量<sup>[3]</sup>和光学通信精度的进一步提高,因此降低光场量子噪声成为科学工作者几十年来研究的热点课题<sup>[4~6]</sup>。而平衡零拍探测技术<sup>[7]</sup>正是探测量子噪声的最佳方法。其测量的关键是使用平衡零拍探测器,将加载在光

**收稿日期**: 2011-06-20; **收到修改稿日期**: 2011-08-09

**基金项目**: 国家重点基础研究发展计划(2010CB923103)和国家自然科学基金(60736040,11074157,60821004)资助课题。

**作者简介**: 王金晶(1986—),男,硕士研究生,主要从事量子光学和激光电子技术等方面的研究。

E-mail: wangjj@sxu.edu.cn

**导师简介**: 彭堃堦(1936—),男,教授,博士生导师,主要从事量子光学和固体激光技术等方面的研究。

E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: jiaxj@sxu.edu.cn

波上的交流噪声信号提取和放大。该探测器应具有噪声低和灵敏度高的特性,这样不仅能够有效探测散粒噪声,而且能使其本身的电子学噪声远低于散粒噪声(一般散粒噪声谱要高出电子学噪声谱10 dB以上),避免将散粒噪声淹没<sup>[8]</sup>;同时,为了使散粒噪声谱成为主要输出谱,探测器需要探测毫瓦量级的光场,因而应该有足够高的增益饱和和特性。

本文根据实验要求对实验室长期使用的平衡零拍探测器<sup>[9~11]</sup>进行了分析和技术上的改进,利用基尔霍夫电流定律产生光电流差并放大,而不是使用减法器对两个放大后的信号相减,因而避免了实验中需要制作一对性能相同光电探测器的要求,提升了平衡零拍探测系统的探测性能。

## 2 平衡零拍原理简介

平衡零拍探测是用于光信号振幅与相位测量的一种成熟技术<sup>[12]</sup>。如图1所示,以  $a_s$  和  $a_s^\dagger$  分别表示待测信号光场的湮没和产生算符,  $a_L$  和  $a_L^\dagger$  代表本地振荡光场的湮没和产生算符。待测信号光场与本

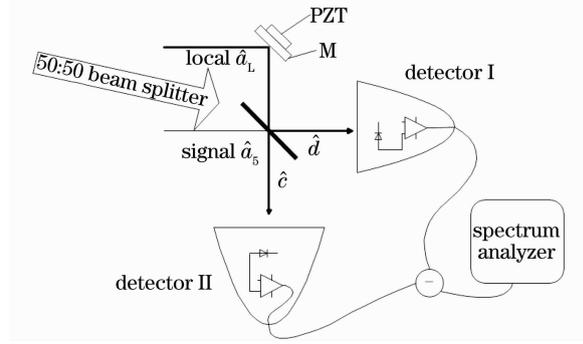


图1 平衡零拍探测系统示意图

Fig. 1 Diagram of balanced homodyne detection system  
地振荡光场分别从两个通道入射到50:50分束器上干涉,输出两相干叠加光场  $c, \hat{d}$  表示为

$$c(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) [\hat{a}_s(t) + \exp(i\theta)\hat{a}_L(t)], \quad (1)$$

$$\hat{d}(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) [\hat{a}_s(t) - \exp(i\theta)\hat{a}_L(t)], \quad (2)$$

式中  $\theta$  代表本地振荡光场与待测信号光场的相对相位,通过反射镜 M 后的压电陶瓷(PZT)来改变本地振荡光光程从而变化  $\theta$  相位。光电探测器 1,2 接收到的光强分别为

$$\hat{I}_c(t) = c^\dagger(t)c(t) = \frac{1}{2} [\hat{a}_s^\dagger(t)\hat{a}_s(t) + \exp(i\theta)\hat{a}_s^\dagger(t)\hat{a}_L(t) + \exp(-i\theta)\hat{a}_L^\dagger(t)\hat{a}_s(t) + \hat{a}_L^\dagger(t)\hat{a}_L(t)], \quad (3)$$

$$\hat{I}_d(t) = \hat{d}^\dagger(t)\hat{d}(t) = \frac{1}{2} [\hat{a}_s^\dagger(t)\hat{a}_s(t) - \exp(i\theta)\hat{a}_s^\dagger(t)\hat{a}_L(t) - \exp(-i\theta)\hat{a}_L^\dagger(t)\hat{a}_s(t) + \hat{a}_L^\dagger(t)\hat{a}_L(t)]. \quad (4)$$

假设两探测器的效率均为100%,则其产生的光电流正比于入射光强,因而两光电流经减法器相减,输出的电流可以表示为

$$\hat{I}_-(t) = \hat{I}_c(t) - \hat{I}_d(t) = \exp(i\theta)\hat{a}_s^\dagger(t)\hat{a}_L(t) + \exp(-i\theta)\hat{a}_L^\dagger(t)\hat{a}_s(t). \quad (5)$$

使用频谱分析仪测量减法器的输出电流,测量到的是该信号的噪声方差  $i_- = \Delta^2 \hat{I}_- = \langle \hat{I}_-^2 \rangle - \langle \hat{I}_- \rangle^2$ 。由于本地振荡光场是相干态光场,由计算得出

$$i_- = \frac{1}{2} |\alpha|^2 \Delta^2 [\exp(i\theta)\hat{a}_s^\dagger - \exp(-i\theta)\hat{a}_s] + \langle \hat{a}_s^\dagger \hat{a}_s \rangle, \quad (6)$$

式中  $\alpha = \langle \alpha | \hat{a}_L | \alpha \rangle$  是本地振荡光场的本征值。待测信号光场的强度远小于本地振荡光的强度,所以  $\langle \hat{a}_s^\dagger \hat{a}_s \rangle$  可以忽略不计。令  $\hat{x}(\theta) = \frac{1}{2} [\exp(i\theta)\hat{a}_s^\dagger - \exp(-i\theta)\hat{a}_s]$ , 平衡零拍测量得到的两路光电流相减后的信号可以表达为  $i_- \propto \Delta^2 \langle \hat{x}(\theta) \rangle$ <sup>[13]</sup>。

定义量子态的正交振幅算符  $\hat{X}_s = \frac{1}{2} (\hat{a}_s + \hat{a}_s^\dagger)$  和正交相位算符  $\hat{Y}_s = \frac{1}{2i} (\hat{a}_s - \hat{a}_s^\dagger)$ , 可以求得

$$i_- \propto \Delta^2 \langle \hat{x}(\theta) \rangle = \Delta^2 (\hat{X}_s \sin \theta - \hat{Y}_s \cos \theta). \quad (7)$$

由(7)式可知,当  $\theta = 0$  时,平衡零拍探测测量到的是待测量光场量子态的正交相位分量上的噪声方差  $\Delta^2 \langle \hat{Y}_s \rangle$ ; 当  $\theta = \pi/2$  时,测量到的是该量子态的正交振幅分量上的噪声方差  $\Delta^2 \langle \hat{X}_s \rangle$ 。所以平衡零拍探测器测量的物理量是压缩信号场正交振幅或相位分量的噪声功率。

## 3 平衡零拍探测器的设计

### 3.1 设计目的及原理

在以往的平衡零拍探测过程中,需要一对性能相同的光电探测器,从而很好地减去经典噪声,有效探测散粒噪声基准及压缩态光场,因此在制作电路时要选用性能一致的电子元器件。但这样做不仅过程繁琐,而且在物理上是不可能实现完全对称的。于

是考虑将两个光电管串联,并从串节点处取出光电流相减信号,然后对其进行放大<sup>[14]</sup>。这样做可以避免两光电流信号在各自放大的过程中引入额外噪声,给平衡零拍探测系统带来不必要的失衡影响,进而影响非经典光场的测量结果。同时为了锁定平衡零拍探测系统本地振荡光与待测量信号光之间的相对相位,将光电流的直流(DC)与交流(AC)部分分开,然后根据需要分别利用适当的电路对其进行放大。

根据基尔霍夫电流定律,汇于节点的各支路电流的代数和为零。可以将用于探测的两光电二极管串联,在串联点处引出电流差信号进行放大,如图2所示。规定流向节点的电流为正,则对节点A可列节点电流方程  $I_1 - I_2 + I_3 = 0$  即  $I_3 = I_2 - I_1$ ,可知输出电流  $I_3$  是两光电流  $I_1$  和  $I_2$  的差且  $I_3$  方向不定。

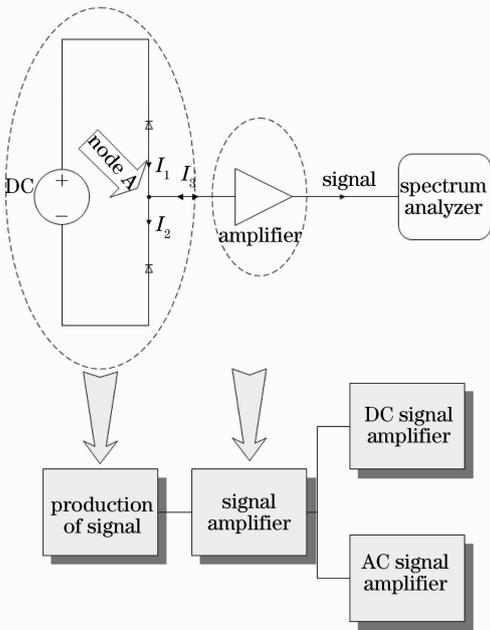


图2 平衡零拍探测器的设计结构及框图

Fig. 2 Design structure and block diagram of balanced homodyne detector

### 3.2 结构设计

设计并制作的平衡零拍探测器主要由两部分构成,如图2所示。它们分别是光电流差产生部分和信号放大部分。

#### 3.2.1 光电流差产生部分的器件选取及电路设计

光电二极管需有很好的线性、动态特性及长期稳定性,是平衡零拍探测器的最优选择标准。常见的光电二极管有PIN二极管和雪崩二极管。雪崩二极管的增益大、响应速度快,但由于其利用光生载流子在耗尽区内的雪崩倍增效应而产生光电流的倍增作用,不可避免地会产生较大噪声。相比之下,

PIN二极管虽然响应稍慢,但其噪声小、响应频率高、使用方便,适合用于较低分析频率(1~20 MHz)处量子光学实验的光电探测应用。

为了减小噪声,应选择内阻大、结电容小、暗电流小和灵敏度高的PIN二极管。除此之外,针对量子光学实验的要求,还要考虑以下几个方面的问题:

1) 量子效率。探测器的量子效率是指单个光子入射到测量装置产生一个光生载流子并形成探测器电流的几率。由于任何损耗对压缩态和纠缠态的破坏都是不可忽略的,因此量子效率越高,测量所带来的破坏越小。

2) 探测器的饱和特性。实验上要测量压缩态需要强的本地振荡光,因此要求探测器具有很好的饱和特性。

综上所述,选用型号为ETX-500的PIN型光电二极管作为光电检测器件。ETX-500使用材料为InGaAs,对波长为1080 nm的红外光,其量子效率约为94%;暗电流典型值为12 nA,远小于流过二极管的毫安级光电流,可忽略;结电容典型值35 pF,内阻典型值250 MΩ,有良好的频率响应特性。

电路设计如图3所示,光电二极管ETX500-1和ETX500-2串联点取出的光电流差信号,通过取样电阻R10和R15,其中交流部分经过隔直电容C7后流入交流放大电路,而直流部分经过电感L2及R10后,流入直流放大电路。输出光电流信号的-3 dB带宽  $f_c$  可表示为

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_s R}, \quad (8)$$

式中  $C_s$  为PIN管极间分布电容以及电阻、导线、电感和隔直电容之和。合理选择R1, R7和R15对于系统设计是非常重要的,电阻阻值如果较小,虽然带宽很大但是对于微弱信号其输出电压过小,会降低输出信号的信噪比。如果想改善信噪比,必须加大电阻阻值,但是此时频带宽度又会变差。所以综合考虑带宽和信噪比,选择如图3所示的阻值。

#### 3.2.2 信号放大电路

信号放大电路包括直流放大部分与交流放大部分,如图3所示。直流放大使用运算放大器OP27AJ构成常见的比例放大电路。为了保证交流信号尽可能流入交流放大电路,添加了电感L2来过滤交流信号,R12, R13, C20构成一个输入滤波电路,也可以滤去交流信号。通过电容C7的交流部分是量子光学实验探测的主要部分,即噪声光电流。其信号十分微弱,为使探测的光电流噪声谱高于平

平衡零拍探测器的电子学噪声谱 10 dB 以上,需对信号做放大处理,使用 Analog Devices 生产的高速低

噪声运算放大器 AD829 构成的比例放大电路对噪声电流信号进行放大输出。

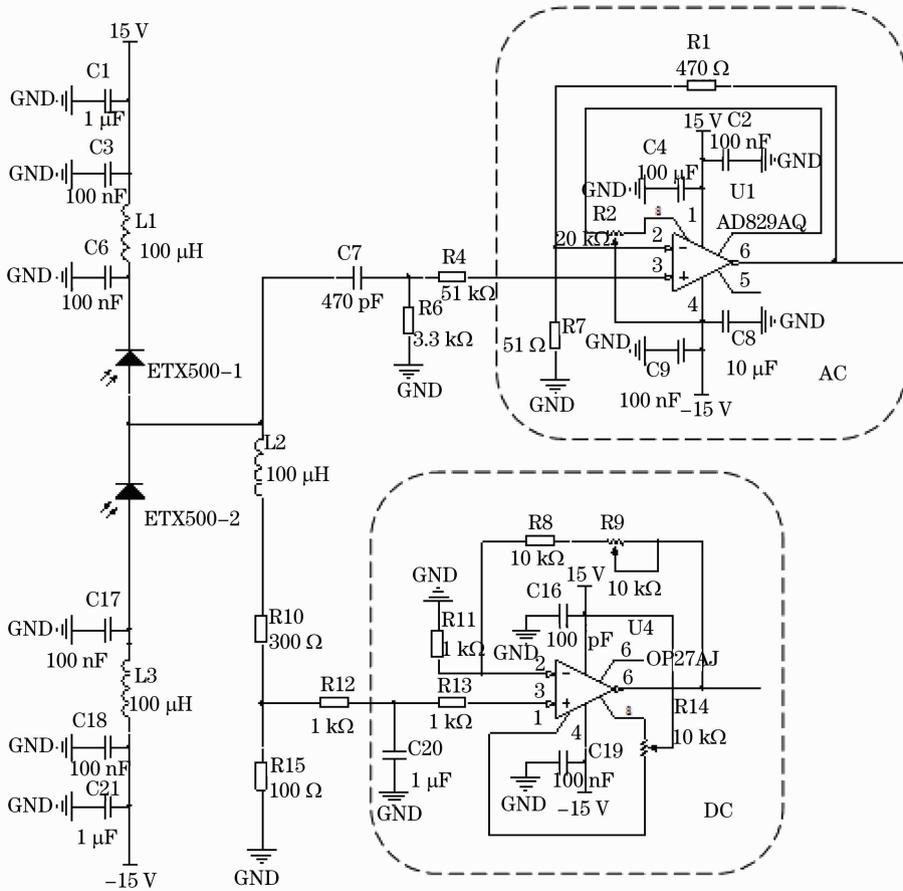


图 3 电路原理图

Fig. 3 Diagram of circuit principle

#### 4 平衡零拍探测器性能测试

根据量子光学及量子信息实验的要求,利用上节设计的光电流差产生电路和信号放大电路,研制出了性能优良的平衡零拍探测器。使用全固态连续单频 1080 nm 激光器(宇光科技有限公司,DPSS F-VIB)作为测试光源,并且搭建了如图 4 所示的测试光路。从激光器输出的激光首先经过由半波片(HWP1)和偏振分束器(PBS1)组成的功率调节系统,用于调节探测器测试时注入激光功率的大小;HWP2、振幅调制器及 PBS2 共同构成对入射激光的振幅调制,用于测量探测器的共模抑制比;HWP3 和 PBS3 构成 50:50 分束器,用于调节注入两光电二极管的激光功率分束比。由于光电二极管的光敏面较小,在两个探测器前均放置一短焦聚焦透镜,用于使注入光聚焦到光电二极管的光敏面上。探测器交流输出端接频谱分析仪,用于测量光电流的交流信号输出,直流输出端接数字万用表。搭建好光路

后,旋转 HWP3,使用光功率计测量注入两光电管的光功率,直到两功率相等,此时分束比为 50:50。

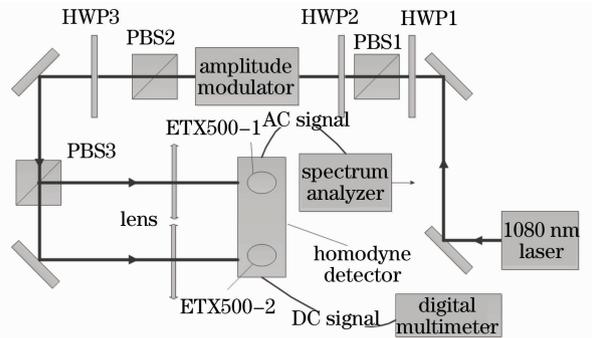


图 4 探测器测试光路示意图

Fig. 4 Schematic for testing optical path of detector

首先对平衡零拍探测器的直流输出特性进行测试。注入激光功率从 100  $\mu$ W 增加至 10 mW(通过旋转 HWP1 进行调节),分别测量光电管 1 的电流

信号电压(此时遮挡光电管 2),同理测量光电管 2 的电流信号电压,最后测量电流差信号电压(此时不对任何光电管进行遮挡)。测试结果如表 1 所示。得出其响应曲线图 5,由响应曲线可知,随着入射功率的增加,探测器的直流响应是线性的。同时测得,当注入光功率达到 18.73 mW 时,由于运放的动态范围所限,直流输出为 14.1 V 且不再增加,即平衡零拍探测器的饱和光功率为 18.73 mW。

表 1 直流输出特性数据

Table 1 Data of DC output characteristics

Light power /mW	ETX500-1 /mV	ETX500-2 /mV	Difference /mV
0.1	-74.7	79.1	4.4
0.2	-157	164	8.2
0.5	-406.8	419.4	12.6
1	-828.6	834.2	4.2
2	-1672.5	1681.0	6.9
5	-4288.0	4293.6	7.2
10	-8584.0	8591.2	7.6

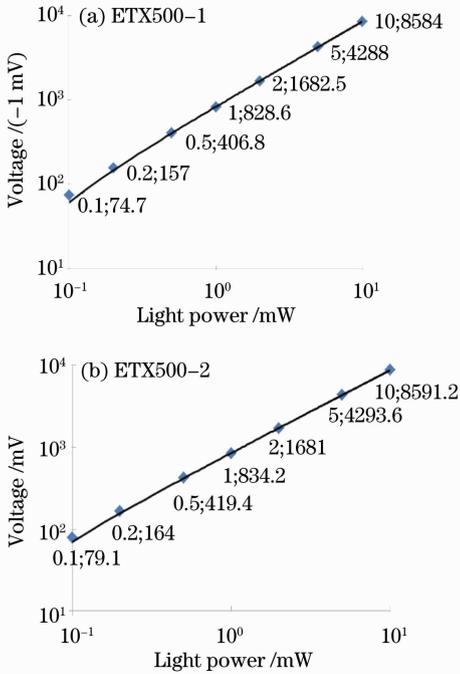


图 5 两光电管直流响应曲线图

Fig. 5 DC responses of two photodiodes

其次,使用平衡零拍探测器测量全固态连续单频 1080 nm 激光的噪声特性。测量顺序与直流特性测试过程相似,首先使用遮光片遮挡光电二极管 2,然后给光电二极管 1 注入激光,用频谱分析仪(Agilent, E4411B)测量并记录平衡零拍探测器的交流输出,即平衡零拍探测器的光电流噪声谱,然后同理测量并记录光电管 2 的光电流噪声谱及两光电管

电流差噪声谱(此时不遮挡任一光电管)。然后更改注入激光的功率,重复测量以上 3 种光电流噪声谱。测量时谱仪参数设置为:分辨率带宽 30 kHz,视频带宽 100 Hz,扫描时间 1.354 s。图 6 为注入激光功率 10 mW 时的 3 种光电流噪声谱。由于图中电流差噪声谱的能量是单管电流噪声谱的 2 倍,因而两光电管电流差噪声谱线高出 ETX500-1 和 ETX500-2 谱线约 3 dB。

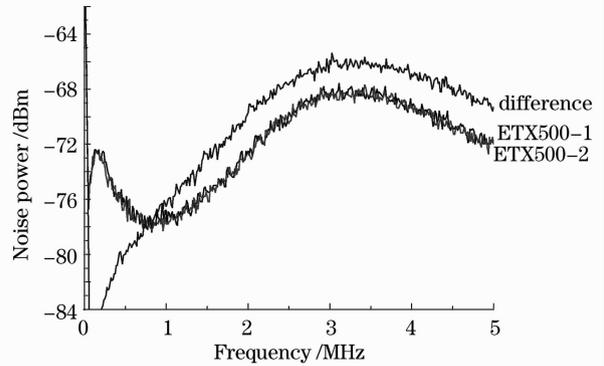


图 6 注入激光功率为 10mW 时的激光噪声谱  
Fig. 6 Noise spectrum of laser at injection laser power of 10 mW

当分别测量并记录完不同激光功率注入下的 3 种光电流噪声谱后,利用数据处理软件可以得出单管不同注入激光功率下的光电流噪声谱,如图 7 所示。由图 7 可知,光电流噪声谱具有很好的线性增益特性。当注入激光功率大于 2 mW 时,激光噪声在分析频率 2 MHz 之后均高于电子学噪声 10 dB 以上。

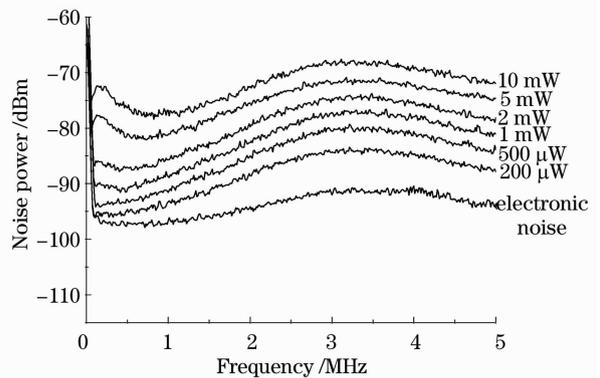


图 7 光电管 1 在不同注入光功率下的光电流噪声谱  
Fig. 7 Noise spectra of light current from ETX500-1 at different laser powers

为了测量平衡零拍探测器的共模抑制比,在注入激光光路中插入振幅调制器(New Focus, 4104)对激光的振幅进行调制。由于一般在 2 MHz 处测量量子纠缠态和压缩态,于是在 2 MHz 的调制频率

下,首先利用频谱分析仪记录由一个光电二极管输出的激光噪声谱,然后记录两光电管同时受相等光功率照射时输出的激光噪声谱,此时注入光功率为4 mW。利用实验数据可计算得平衡零拍探测器的共模抑制比为39 dB,噪声谱线如图8所示。较本实验室原有探测器25 dB的共模抑制比,提高了14 dB。

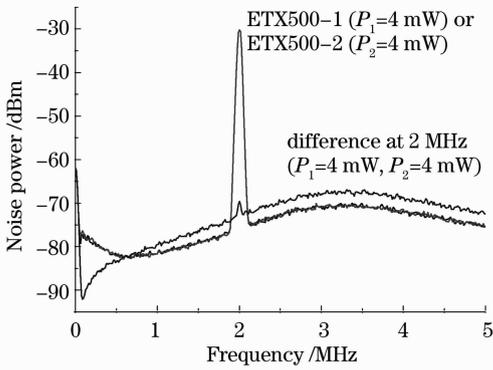


图8 2 MHz 共模抑制比测量结果

Fig. 8 Measurement results of common-mode rejection ratio at 2 MHz

## 5 结 论

改进了平衡零拍探测器设计,并对探测器进行了性能测试,结果显示其共模抑制比在2 MHz处为39 dB,饱和光强18.73 mW,且交、直流线性增益特性好,与目前使用的光电探测器相比有诸多优点。在下一步的工作中,会选择更为优良的芯片及电路,从而提高探测器的信噪比及其他参数,制作出性能更好的平衡零拍探测器,为量子光学实验的研究提供更好的测量手段。

## 参 考 文 献

1 Peng Kunchi. Generation and application of squeezed state light sub-shot-noise-limit optical measurement and quantum information [J]. *Physics*, 2001, **30**(5): 300~305

彭堃堃. 光场压缩态的产生及其在亚散粒噪声光学测量和量子信息中的应用[J]. *物理*, 2001, **30**(5): 300~305

2 N. G. Walker, J. E. Carroll. Multiport homodyne detection near the quantum noise limit[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1986, **18**(5): 355~363

3 Wang Hai, Xie Changde, Gao Jiangrui *et al.*. The measurement of weak absorption spectroscopy using intensity difference squeezed light[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8): 1143~1147

王海, 谢常德, 郜江瑞等. 应用强度差压缩光进行微弱吸收光谱学测量[J]. *光学学报*, 1996, **16**(8): 1143~1147

4 Lingan Wu, H. J. Kimble, J. Hall *et al.*. Generation of squeezed states by parametric down conversion[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(20): 2520~2523

5 A. Heidmann, R. J. Horowicz, S. Reynaud *et al.*. Observation of quantum noise reduction on twin beams[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(22): 2555~2557

6 Gao Jiangrui, Xie Changde, Peng Kunchi. Squeezing of pump light reflected from triply OPO[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11): 1447~1451

郜江瑞, 谢常德, 彭堃堃. 三模共振光学参量振荡腔抽运场的压缩[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11): 1447~1451

7 Bernard Yurke. Wideband photon counting and homodyne detection[J]. *Phys. Rev. A*, 1985, **32**(1): 311~323

8 Gray B. Malcolm, Shaddock A. Daniel, Harb C. Charles *et al.*. Photodetector designs for low-noise, broadband, and high-power applications[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(11): 3755~3762

9 Jia Xiaojun, Su Xiaolong, Pan Qing *et al.*. Experimental demonstration of unconditional entanglement swapping for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(25): 250503

10 Su Xiaolong, Jing Jietai, Pan Qing *et al.*. Dense-coding quantum key distribution based on continuous-variable entanglement[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **74**(6): 062305

11 Su Xiaolong, Tan Aihong, Jia Xiaojun *et al.*. Experimental preparation of quadripartite cluster and Greenberger-Horne-Zeilinger entangled states for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(7): 070502

12 Ondřej Haderka, Václav Michálek, Vladimír Urbásek *et al.*. Fast time-domain balanced homodyne detection of light [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(15): 2884~2889

13 M. O. Scully, M. S. Zubairy. *Quantum Optics* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 128

14 H. Hansen, T. Aichele, C. Hettich *et al.*. Ultrasensitive pulsed, balanced homodyne detector: application to time-domain quantum measurements [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1714~1716

栏目编辑:何卓铭