

时域脉冲平衡零拍探测器的高精度自动平衡*

刘建强¹⁾²⁾ 王旭阳^{1)2)†} 白增亮¹⁾²⁾ 李永民^{1)2)‡}

1) (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)

2) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2015年10月19日收到; 2016年3月16日收到修改稿)

时域脉冲平衡零拍探测器能够直接对光场量子态的正交分量进行测量, 是连续变量量子密钥分发系统的核心测量器件, 其测量精度与密钥分发系统的额外噪声及安全密钥速率密切相关. 本文理论分析了探测器双臂不平衡对测量精度的影响, 并实验设计、研制了双臂可精确自动平衡的时域脉冲平衡零拍探测器. 通过高精度控制探测器一臂的光纤圆环曲率半径, 实现了光纤内部光场强度的精密衰减, 进而获得了探测器的精确自动平衡. 实验测试结果表明时域平衡零拍探测器双臂具有 10^{-5} 以上的平衡精度, 能够长时间稳定运行, 有效避免了探测器的输出电压进入非线性区或饱和区. 该探测装置可应用于连续变量量子密钥分发系统, 有效降低由于量子态信号探测过程引入的额外噪声, 提高系统的长期稳定性.

关键词: 连续变量量子密钥分发, 时域平衡零拍探测器, 自动平衡控制

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Dv, 42.68.Ay, 87.19.lr

DOI: 10.7498/aps.65.100303

1 引言

量子密钥分发能够使合法通信双方 Alice 和 Bob 获得一组无条件安全的随机密钥^[1-4], 进而实现双向保密通信. 该通信方式的高安全性基于量子力学基本原理, 在国防、商业、网络等领域具有良好的应用前景. 相干态连续变量量子密钥分发协议具有光源制备简单、探测效率高、信道容量大等特点, 得到国内外科研人员的广泛关注. 2002年相干态连续变量量子密钥分发协议被提出^[5,6], 并于2003年首次在实验上得到验证^[7], 相关研究进展十分迅速, 通信系统的性能不断得到完善和提升^[8-15].

散粒噪声极限水平的平衡零拍探测器是量子光学及量子信息领域的重要测量装置. 传统的频域平衡零拍探测器主要用来探测特定频率处光场量子态的正交分量起伏噪声, 而时域平衡零拍探测器能够直接探测脉冲光场量子态的全面正交分量

信息, 测量频率范围可覆盖直流分量至探测器带宽^[16-20], 是连续变量量子保密通信的基本探测器件. 安全密钥生成速率是衡量密钥分发系统性能的核心参数, 在连续变量量子密钥分发系统中, 通常采用增加信号脉冲重复速率或者提高单脉冲信号的安全密钥信息量的方法来提升安全密钥生成速率. 对于探测装置, 前者需要扩展时域脉冲平衡零拍探测器的带宽, 而后者与探测器的测量精度密切相关, 主要包括探测器的共模抑制比及其长期稳定性.

通过直接串联光电二极管的方式, 并采用调节二极管偏压和平衡电路的方法, 可有效提高探测器的共模抑制比^[21-23]. 然而较高强度的本地振荡光场不仅要求时域平衡零拍探测器的电路部分尽量平衡, 而且要求50/50分束器具有极高的平衡度. 当本地振荡光脉冲的光子数为 10^8 光子时, 分束器两臂的平衡至少要达到万分之一以上. 对于全光纤器件的探测器, 采用弯曲光纤的方法对双臂的光强

* 国家自然科学基金 (批准号: 61378010, 11504219)、山西省自然科学基金 (批准号: 2014011007-1) 和山西省高等学校创新人才支持计划资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangxuyang@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yongmin@sxu.edu.cn

进行微调即可实现高精度的平衡, 该方法可以使探测器具有高的测量精度, 单次测量无校准时间可达数分钟. 然而随着测量时间的增加, 由于环境温度及振动等因素会导致分束器的分束比例缓慢漂移, 使得探测器的共模抑制比降低, 测量精度变差. 当应用于连续变量量子密钥分发系统时, 会增加系统的额外噪声, 降低通信的安全密钥速率. 当不平衡度较小时, 利用数据后处理的方法可以将分束器不平衡导致的测量误差进行一定程度的消除^[24], 但是随着不平衡度的增加, 特别是当分束器分束比例的偏差增加到一定程度时, 探测器的输出将会进入非线性区甚至饱和区, 这时, 探测器将不能输出与光场正交分量成线性关系的电压值.

本文设计研制了一种双臂可精确自动平衡的时域脉冲平衡零拍探测器, 通过反馈控制光纤圆环衰减器的方法, 探测器的平衡控制精度可达 10^{-5} 以上, 并能长时间处于精确平衡状态. 该自动平衡时域脉冲平衡零拍探测器可以方便地集成在连续变量量子密钥分发系统中, 使得通信系统的信号量子态能够实现长期稳定的高精度、低噪声测量.

2 理论分析

平衡零拍测量的原理如图 1 所示, a , b 分别表示信号光与本地振荡光的湮没算符, c , d 分别表示信号光与本地振荡光经过分束器干涉后两路输出光的湮没算符, T 表示分束器的透射率, 两束输出光的光子数分别表示为

$$\begin{aligned} c^\dagger c &= T a^\dagger a + (1-T) b^\dagger b \\ &+ i\sqrt{T(1-T)}(a^\dagger b - b^\dagger a), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} d^\dagger d &= T b^\dagger b + (1-T) a^\dagger a \\ &- i\sqrt{T(1-T)}(a^\dagger b - b^\dagger a). \end{aligned} \quad (2)$$

本地振荡光场 b 通常是强度较高的相干光, 可以做经典场近似: $b \approx |\beta| e^{i\theta}$, 表达式 (1) 和 (2) 经过化简后可得:

$$\begin{aligned} c^\dagger c &= T a^\dagger a + (1-T) b^\dagger b \\ &+ \sqrt{T(1-T)}|\beta| \cdot X_\phi, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d^\dagger d &= T b^\dagger b + (1-T) a^\dagger a \\ &- \sqrt{T(1-T)}|\beta| \cdot X_\phi, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 X_ϕ 是转象算符^[25], ϕ 是正交相位, 表达式为

$$X_\phi = X \cos \phi + Y \sin \phi, \quad (5)$$

$$\phi = \theta + \pi/2. \quad (6)$$

对于一个理想的 50/50 分束器, 即 $T = 1/2$ 时, 两光电二极管的光电流相减后输出为

$$n_{cd} = c^\dagger c - d^\dagger d = |\beta| X_\phi. \quad (7)$$

基于前置电荷放大器的时域脉冲平衡零拍探测器具有内置积分电路, 其输出电压脉冲的峰值与相减后的光电子数成正比.

$$V_{\text{peak}} = g n_{cd} = g |\beta| X_\phi. \quad (8)$$

(8) 式中, g 为探测器的增益. 对于不平衡的分束器, 分束比可表示为 $T = 1/2 \pm \varepsilon$ 时, ε 为平衡度, 由 (3), (4), (7) 和 (8) 式可推导出平衡零拍探测器输出的电压值为

$$V_{\text{peak}} = 2g |\beta| (\mp \varepsilon \cdot |\beta| + X_\phi). \quad (9)$$

从推导结果可以看出, 由于分束器的双臂不平衡, 会导致正交分量的测量结果产生偏差^[26]. 当本地振荡光场的光子数为 $|\beta|^2 = 10^8$, 分束器的平衡度为 $\varepsilon = 1/|\beta| = 10^{-4}$ 时, 不平衡产生的测量偏差值 V_m 与信号光为真空场时的正交分量起伏均方根值相当. 因此, 对于散粒噪声极限水平的平衡零拍探测器, 要求 $\varepsilon < 1/|\beta|$.

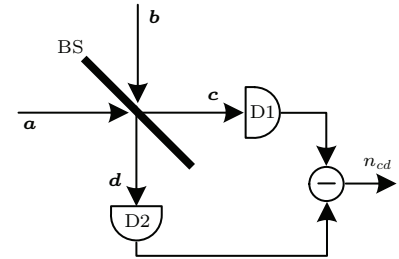


图 1 平衡零拍测量原理

Fig. 1. The principle of balanced homodyne detection.

在连续变量量子密钥分发过程中, 相对于信号光脉冲重复速率, 双臂平衡度的变化属于缓变, 在短时间内可认为平衡度引起的误差值为常数. 当平衡度较小时 ($\varepsilon \approx 1/|\beta|$), 可以用软件处理的方法将该偏差值消除^[24]. 然而, 随着通信时间的延长, 由于环境温度变化等因素引起的 50/50 保偏光纤耦合器的分束比改变和光纤衰减器的衰减值的改变导致该偏差值不断增加, 当平衡度降低到百分之一左右时, 产生的偏差值近似等于平均光子数为 10000 的信号光产生的信号, 此时探测器输出电压值将呈现非线性甚至饱和特性, 导致测量产生较大的误差, 严重影响甚至中断通信.

3 实验装置

图2所示是我们设计的高精度自动平衡时域平衡零拍探测器示意图. 信号光和本地振荡光分别耦合输入50/50保偏光纤分束器的输入端, 经耦合后的两束光场分别由输出尾纤入射至探测器的两个相级联的光电二极管, 实现两束光电流的直接相减, 电动可变光纤衰减器接入传输效率较高的一臂. 时域脉冲平衡零拍探测器的前置电路为低噪声电荷放大器, 可直接对相减后的光电流进行积分, 探测器输出的电脉冲峰值正比于所测信号光场的正交分量值. 90/10保偏光纤分束器用于从本地振荡光中提取小部分光信号, 并将其输入至时钟信号恢复模块, 可产生与本地振荡光同步, 且可精确延时的时钟信号(延时精度1 ns). 时钟信号与探测器输出的脉冲信号需精确对准, 如图3所示, 将两路信号分别接入数据采集卡的外部时钟输入端口和模拟信号输入端口, 可对脉冲峰值进行精确采集. 再经过特定的算法处理后可计算出反馈信号, 并施加于电动可变光纤衰减器, 从而实现时域脉冲平衡零拍探测器的自动平衡控制.

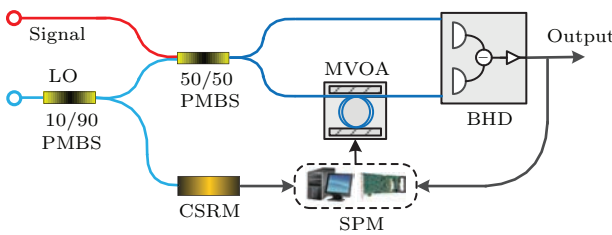


图2 (网刊彩色) 高精度自动平衡时域平衡零拍探测器示意图 Signal, 信号光; LO, 本地振荡光; PMBS, 保偏光纤分束器; MVOA, 电动可变光纤衰减器; CSRM, 时钟信号恢复模块; SPM, 信号处理模块; BHD, 平衡零拍探测器

Fig. 2. (color online) The schematic of high precision auto-balance time-domain homodyne detector. Signal, signal beam; LO, local oscillator beam; PMBS, polarization maintaining beam splitter; MVOA, motor variable optical attenuator based on fiber bending; CSRM, clock signal recovery module; SPM, signal processing module; BHD, balanced homodyne detector.

电动可变光纤衰减器主要由直线步进电机、电机驱动器、机械平台和光纤圆环组四个部分组成, 如图4所示. 光纤圆环组由50/50保偏光纤分束器的尾纤绕制而成, 可避免引入外接跳线而引起的插入损耗. 光纤固定夹具将光纤圆环固定于滑块和机械平台右侧的固定块, 当可动滑块滑动时, 将改变光纤圆环的曲率半径从而实现光场强度的精密衰

减. 直线步进电机(尺寸20 cm × 20 cm × 28 cm)安装在机械平台的左侧, 通过转动螺杆带动滑块沿滑杆做精密直线运动. 为了确保光纤衰减器具有良好的稳定性, 滑块与滑杆需紧密结合, 光纤圆环通过光纤固定夹具9牢固地固定在可动滑块与第二固定滑块之间. 电机驱动器用来驱动直线步进电机工作.

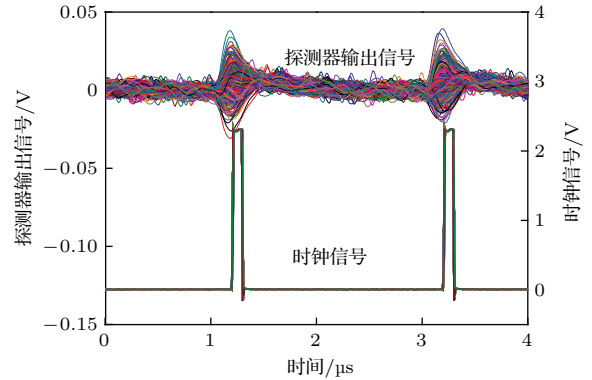


图3 (网刊彩色) 探测器输出的脉冲信号与恢复的时钟信号
Fig. 3. (color online) Pulsed signal output from the detector and the corresponding recovered clock signal.

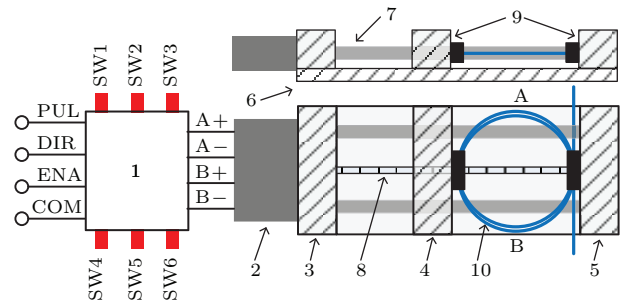


图4 (网刊彩色) 可变光纤衰减器原理图 1-电机驱动器; 2-直线步进电机; 3/5-固定块; 4-滑块; 6-底座; 7-滑杆; 8-螺杆; 9-光纤固定夹具; 10-光纤圆环组

Fig. 4. (color online) The schematic of variable optical attenuator. 1-motor driver; 2-linear stepper motor; 3/5-fixed block; 4-slide block; 6-base; 7-slide bar; 8-screw; 9-optical fiber fixing fixture; 10-fiber coils.

实验中所选的驱动器需具有低振动、小噪声、高速度的特点, 可实现正反转控制. 驱动器的四个接线端分别是单步脉冲输入端PUL(脉冲上升沿有效), 步进方向输入端DIR(高低电平代表不同的步进方向), 驱动器使能端ENA和逻辑电平的公共接线端COM. 四个接线端与多功能数据采集卡的I/O相连接, 通过计算机控制I/O口的电平实现步进电机的双向移动. 实验中螺杆的螺纹间距为2 mm, 步进电机的步距角为1.8°, 采用1/128细分后最小移动间距可达78 nm. 由于弯曲光纤所用推

力较小, 此时滑块的推力仍然可以推动光纤圆环做直线运动. 在室温 25 °C 的环境下, 直线步进电机的工作温度低于 35°.

为了估算可变光纤衰减器的衰减度及衰减精度, 对不同曲率半径的保偏光纤圆环引入的衰减进行了测试, 测试结果如图 5 所示. 在测量过程中, 为了增加光纤的衰减灵敏度, 每一半径的光纤圆环圈数为 5. 从拟合的曲线可以看出, 当圆环半径大于 2 cm 时, 几乎没有损耗; 当圆环半径小于 1.75 cm 时, 损耗开始明显; 当圆环半径小于 1.25 cm 时, 光纤的损耗开始快速增加, 呈指数形式增长, 当圆环半径减小至 1 cm 时衰减可达 0.4 dB, 约 10% 左右. 综合考虑后, 将圆环的半径选择在 2 cm 左右, 当光纤受挤压后, 位于光纤夹具部分的光纤曲率半径(椭圆长轴)增大, 损耗变化很小, 而 A 点和 B 点(椭圆短轴)的曲率半径减小, 损耗不断增加. 光纤衰减器的灵敏度可以简单进行如下估算: 当光纤圆环的半径 R 在 1.25—1.375 cm 的区间变化时, 曲线可近似看成直线, 光纤衰减的变化幅度 $\Delta T = 1.14\%$, 衰减器的灵敏度为

$$\begin{aligned} \Delta T / \Delta L &= 1.14\% / (1.375 - 1.25) \text{ cm} \\ &\approx 10^{-6} / 100 \text{ nm}. \end{aligned} \quad (10)$$

(10) 式结果表明当光纤衰减器处于 1.25—1.375 cm 区间时, 具有很高的灵敏度, 同时衰减变化幅度可达 2% 左右. 当光纤曲率半径增大时该灵敏度还会不断增加, 但是衰减幅度会有所降低; 相反, 当曲率半径减小时灵敏度将减小, 但是衰减幅度会增加. 在具体使用过程中, 还可以通过改变光纤圆环缠绕的圈数对衰减度和灵敏度进行总体调整, 同时需注意设置好滑块的移动范围, 避免光纤被过度弯曲, 造成折断.

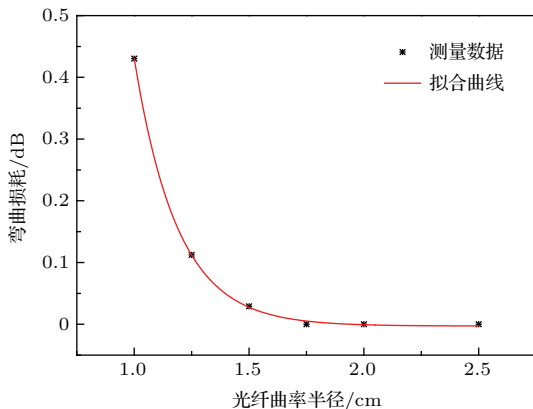


图 5 光纤弯曲损耗随曲率半径的变化曲线

Fig. 5. Attenuation of fiber coils versus their radius.

4 反馈控制原理

从 (9) 式可知, 当输入的信号光为真空态光场时, 测量结果的均值反映的是反馈误差信号, 由于受散粒噪声的影响, 需多次测量方可求出信号的平均值.

$$V_m = \langle V_{\text{peak}} \rangle = \mp 2g\epsilon |\beta|^2 = \mp 2\epsilon gn_1, \quad (11)$$

(11) 式中, n_1 为本地振荡光场脉冲的光子数, 在很短的测量取样时间内可认为是恒定值. 由实验确定探测器的增益 g 和光子数 n_1 , 经测量得出均值 V_m 后可计算出探测器当前的平衡度大小.

图 6 是反馈算法的流程图, 计算机对数据采集卡采集的信号求取平均值, 进一步得出当前的平衡度. 反馈控制过程中, 设定当前平均值的阈值电压为 1 mV, 当平衡度的值小于阈值时, 步进电机不动作; 当平衡度的值大于阈值时, 根据平衡度的大小及其正负值, 决定步进电机的移动步长和方向. 在反馈信号的输出过程中, 计算机将步长信号转换为步进电机可识别的数字 I/O 信号, 由多功能数据采集卡输出至步进电机驱动器, 驱动步进电机实现时域脉冲平衡零拍探测器两臂的精确快速平衡.

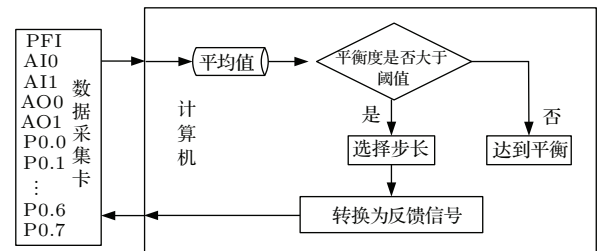


图 6 反馈算法流程图

Fig. 6. The flow chart of Feedback procedure.

为了获得高的稳定性和较低的额外噪声, 连续变量量子密钥分发系统在信息传输过程中需进行周期性校准, 该校准过程包括信号光场与本地振荡光场偏振态的校准, 振幅调制器偏置电压的校准等. 为了使探测器双臂自动平衡和通信系统运行过程有机融合在一起, 可将其放入系统校准时段. 当通信系统在运行过程中执行周期性的校准时, 探测器将能够保持长期正常运转.

5 实验结果

图 7 所示为探测器在反馈锁定过程从不平衡状态向平衡状态的实时演化过程, 所需锁定时间

约为1 s, 平衡后探测器输出电压的平均值约为1 mV. 测量过程中, 信号光场为真空场, 本地振荡光场的强度为 10^8 光子/脉冲, 脉冲光重复速率为500 kHz, 探测器的增益为 $3.2 \mu\text{V}/\text{光子}$, 单次测量 V_m 所用数据量为50 k, 采集该数据量所用时间为100 ms.

平衡度 ε 计算公式可由(11)得出

$$\varepsilon = V_m / (2 \cdot g \cdot n_1), \quad (12)$$

代入上述实验参数, 经计算可得 $\varepsilon \approx 1.56 \times 10^{-6}$. 实验结果表明研制的自动平衡探测器的长期平衡精度能够达到 10^{-5} 以上, 满足平衡度的要求 $\varepsilon < 1/|\beta|$.

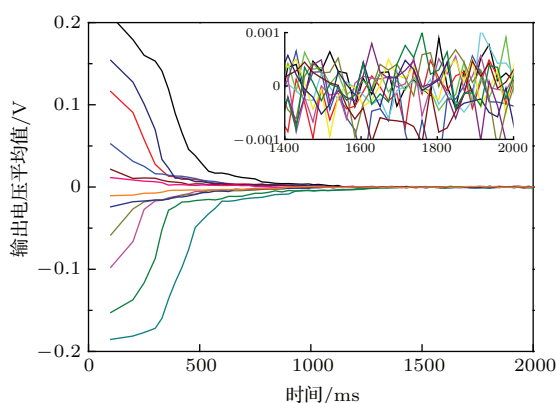


图7 (网刊彩色) 探测器从不平衡状态向平衡状态的演变过程

Fig. 7. (color online) Evolution process of the detector from unbalanced states to balanced states.

6 结 论

相干态连续变量量子保密通信具有光源制备简单、探测效率高、信道容量高等优点, 相关理论研究和实验技术进展十分迅速. 时域平衡零拍探测器是连续变量量子保密通信的重要探测器件, 其共模抑制比及相应的长期稳定性是制约测量精度的关键环节. 本文基于高精度步进电机控制光纤衰减器精密衰减的原理, 设计了一种可实现时域脉冲平衡零拍探测器两臂高精度自动平衡的控制装置, 并对相关控制原理和反馈控制过程进行了详细的分析. 实验结果表明该装置可以快速地实现时域脉冲平衡零拍探测器两臂的高精度自动平衡, 平衡精度可达 10^{-5} 以上. 该控制装置可以很好地集成在相干态连续变量量子密钥分发系统中, 用于提高系统的测量精度, 从而降低系统的额外噪声, 以及有效避免系统长期运转后出现的探测器非

线性或饱和的现象, 确保通信系统能够长期稳定运行.

参考文献

- [1] Lo H K, Curty M, Tamaki K 2014 *Nat. Photonics* **8** 595
- [2] Gisin N, Ribordy G, Tittle W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [3] Scarani V, Pasquinucci H B, Cerf N J, Dusek M, Lutkenhaus N, Peev Momtchil 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1301
- [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] Grosshans F, Grangier P 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 057902
- [6] Grosshans F, Grangier P 2002 *Proceeding of the 6th International Conference on Quantum Communication, Measurement and Computing* MIT, Cambridge, MA, July 22–26, 2002 p351
- [7] Grosshans F, Assche G V, Wenger J, Brouri R, Cerf N J, Grangier P 2003 *Nature* **421** 238
- [8] Lodewyck J, Debuisschert T, Brouri R T, Grangier P 2005 *Phys. Rev. A* **72** 050303
- [9] Lodewyck J, Bloch M, Patron R G, Fossier S, Karpov E, Diamanti E, Debuisschert T, Cerf R G, Brouri R T, McLaughlin S W, Grangier P 2007 *Phys. Rev. A* **76** 042305
- [10] Qi B, Huang L L, Qian L, Lo H K 2007 *Phys. Rev. A* **76** 052323
- [11] Fossier S, Diamanti E, Debuisschert, Villing A, Brouri R T, Grangier P 2009 *New J. Phys.* **11** 045023
- [12] Xuan Q D, Zhang Z S, Voss P L 2009 *Opt. Express* **17** 24244
- [13] Wang X Y, Bai Z L, Wang S F, Li Y M, Peng K C 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 010305
- [14] Jouguet P, Jacques S K, Leverrier A, Grangier P, Diamanti E 2013 *Nat. Photonics* **7** 379
- [15] Wang S F, Wang X Y, Bai Z L, Li Y M 2014 *Acta Sin. Quan. Opt.* **2** 167 (in Chinese) [王少锋, 王旭阳, 白增亮, 李永民 2014 量子光学学报 **2** 167]
- [16] Smithey D T, Beck M, Raymer M G 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1244
- [17] Breitenbach G, Schiller S, Mlynek J 1997 *Nature* **387** 471
- [18] Zavatta A, Viciani S, Bellini M 2006 *Laser Phys. Lett.* **3** 3
- [19] Lvovsky A I, Raymer M G 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 299
- [20] Hansen H, Aichele T, Hettich C, Lodahl P, Lvovsky A I, Mlynek J, Schiller S 2001 *Opt. Lett.* **26** 1714
- [21] Chi Y M, Qi B, Zhu W, Qian L, Lo H K, Youn S H, Lvovsky A I, Tian L 2011 *New J. Phys.* **13** 013003
- [22] Wang X Y, Bai Z L, Du P Y, Li Y M, Peng K C 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 124202
- [23] Jin X L, Su J, Zheng Y H, Chen C Y, Wang W Z, Peng K C 2015 *Opt. Express* **23** 023859

- [24] Wang X Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Taiyuan: Shanxi University) (in Chinese) [王旭阳 2013 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [25] Ma R L 2006 *Quantum Cryptography Communication* (Beijing: Science Press) p125 (in Chinese) [马瑞霖 2006

量子密码通信 (北京: 科学出版社) 第 125 页]

- [26] Chen J J, Hang Z P, Zhao Y B, Gui Y Z, Guo G C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 0005 (in Chinese) [陈进建, 韩正甫, 赵义博, 桂有珍, 郭光灿 2007 物理学报 **56** 0005]

Highprecision auto-balance of the time-domain pulsed homodyne detector*

Liu Jian-Qiang¹⁾²⁾ Wang Xu-Yang^{1)2)†} Bai Zeng-Liang¹⁾²⁾ Li Yong-Min^{1)2)‡}

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

2) (Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 19 October 2015; revised manuscript received 16 March 2016)

Abstract

Quantum key distributions, which could make legitimate communication parties Alice and Bob achieve the same random key with unconditional security, will have broad applications in defense, commerce, and communication. The protocol of the continuous variable quantum key distribution (CVQKD) has many advantages, such as easy preparation of the light source, high detector efficiency, and good compatibility with the classic fiber-optic communication systems. In recent years, great progress in the research of CVQKD has been made both theoretically and experimentally. In the protocol, the quadratures of the optical field with Gaussian or Non-Gaussian modulation are employed as the carriers of the key.

The quadratures of the pulsed optical quantum states in CVQKD can be detected with a time-domain pulsed homodyne detector. The performance of the detector has great influences on the excess noises and the safe key rate of the quantum communication system. The measurement accuracy, which depends crucially on the common mode rejection ratio and the long-term stability, is the key performance of the detector. In order to improve the accuracy of measurement and avoid saturating the detector, we propose and demonstrate a technique to balance the two output beams of a 50/50 fiber coupler of the homodyne detector automatically. The auto-balance technique, which improves the long-term stability and high common mode rejection ratio, is described in the following.

Firstly, the relation between the balance degree and the measurement accuracy is theoretically analyzed in detail. The result shows that a balance degree larger than 10^{-4} should be reached to ensure a high precision measurement when the intensity of the local oscillator pulse is 10^8 photons per pulse. Secondly, a fiber-based variable attenuator based on computer-controlled linear stepper motor is designed. The linear stepper motor that is used to drive the fiber coils has a small dimension of $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 28\text{ cm}$ and a minimum step size of 78 nm, and is controlled through the I/O port of a multifunction data acquisition card connected to a computer. The attenuations of the fiber coils of different radii are detected. The precision of attenuation is estimated to be on the order of 10^{-6} per 100 nm.

The principle of the feedback control is described. A method of changing step-size which depends on the balance

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61378010, 11504219), the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2014011007-1), and the Program for the Outstanding Innovative Teams of Higher Learning Institutions of Shanxi, China.

† Corresponding author. E-mail: wangxuyang@sxu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yongmin@sxu.edu.cn

degree is proposed to fulfill a fast auto-balance process. Using the auto-feedback-control system, a balance degree of about 1.56×10^{-6} can be achieved. The procedure of auto-balance takes about 1 s, and the evolution curves that represent the transformation process from various unbalanced states to the balanced state are presented.

The auto-balance apparatus can ensure that the time-domain pulsed homodyne detector run stably in a long-term with a high common mode rejection ratio. The nonlinear and saturation effects due to the drift of the balance point are eliminated. The presented auto-balance time-domain pulsed homodyne detector can be well integrated into the continuous variable quantum key distribution system, and is expected to play an important role in improving the measurement accuracy and reducing the excess noises of the system. We believe that it could also be found to have potential applications in other areas.

Keywords: continuous variable quantum key distribution, time-domain homodyne detector, auto-balance control

PACS: 03.67.Hk, 42.50.Dv, 42.68.Ay, 87.19.lr

DOI: [10.7498/aps.65.100303](https://doi.org/10.7498/aps.65.100303)