

一种基于平衡零差探测技术的平均光子数测量方法

刘金璐 杨杰 张涛 樊矾 黄伟 徐兵杰

An average photon number measurement scheme based on balanced homodyne detection

Liu Jin-Lu Yang Jie Zhang Tao Fan Fan Huang Wei Xu Bing-Jie

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 240303 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20211216

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211216>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于平衡零差探测技术的平均光子数测量方法*

刘金璐 杨杰 张涛 樊矾 黄伟 徐兵杰†

(西南通信研究所, 保密通信重点实验室, 成都 610041)

(2021年6月30日收到; 2021年8月11日收到修改稿)

针对连续变量量子密钥分发系统实用化进程中对系统核心参数的规范标定需求, 本文提出了一种基于平衡零差探测技术的平均光子数测量方法, 即利用平衡零差探测基本结构, 在本振臂添加一个电光相位调制器. 不同于通过计算相位漂移值进行被动相位补偿的方式, 本方法主动地对相位调制器加载 $[0, 2\pi]$ 的均匀随机相位以避免相位漂移对测量结果的影响. 仿真及实验验证了平衡零差探测器输出信号服从带有两个峰值的驼峰分布, 且探测输出信号方差与待测光脉冲平均光子数呈线性关系. 采用该方案实现的平均光子数测量精度为0.1个光子/脉冲, 测量范围达23 dB. 优化选择探测器性能和数据采集工具的采样精度和量程, 可实现满足测量要求的平均光子数和脉冲消光比测量, 为连续变量量子密钥分发系统的关键参数标准化提供了一种可行方案.

关键词: 光子数测量, 密钥分发, 标准化

PACS: 03.67.Hk, 03.65.Yz, 03.67.-a, 03.67.Dd

DOI: 10.7498/aps.70.20211216

1 引言

作为一种基于量子物理特性可为分离且合法的双方提供共享密钥的量子信息技术实用化手段, 量子密钥分发 (quantum key distribution, QKD) 被认为是可抵御量子计算机带来的安全威胁的热点研究方向. 根据编码过程的不同可将 QKD 分为两类: 离散变量量子密钥分发系统 (discrete-variable quantum key distribution, DV-QKD) 和连续变量量子密钥分发系统 (continuous-variable quantum key distribution, CV-QKD). 相较于基于 BB84 协议的 DV-QKD 系统, 基于高斯调制相干态协议 (Gaussian-modulated coherent-state, GMCS) 的 CV-QKD 系统主要有以下 4 点优势: 1) 相干态光源较单光子源更易制备; 2) 编码的量子态是准连

续的, 在希尔伯特空间具有无限维, 使其在相对较短的距离具有潜在的高安全码率特点^[1-4]; 3) 零差探测器较单光子探测器探测效率更高, 成本更低; 4) 采用具有天然滤波特性的相干探测方法, 表现出与现有光通信系统共纤同传的潜力^[5,6]. 目前国内外团队在 CV-QKD 与经典光信号共纤同传方面开展了相关研究, 并取得了一定的成果^[7-9]. 2019 年, 日本情报通信机构已实现 CV-QKD 与 100 个经典通信信道通过波分复用结构在 10 km 光纤中共纤同传^[5], 系统实用化研究进展迅速.

在 CV-QKD 系统实用化进程快速推进阶段, 系统关键参数的规范标定、扩展应用场景下的系统优化以及整体系统性能提升等方面的工作都亟待开展. 相干态协议 (含离散调制、高斯调制等) CV-QKD 系统是目前的主流研究方案, 特别是基于随路本振相干态协议的 CV-QKD 系统已经得到

* 国家自然科学基金 (批准号: U19A2076, 61771439, 61901425)、国家密码发展基金 (批准号: MMJJ20170120)、四川省科技计划 (批准号: 2019JDJQ0060, 2020YFG0289, 2020YJ0482) 和创新特区基金 (批准号: 18-163-00-TS-004-040-01) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xbjpku@163.com

了广泛且深入的研究 [1,2,7,8,10–13]. 系统中对发送端制备的本振光消光比要求极高, 通常高达 60–80 dB 才能不在接收端引入泄漏光噪声 [14–17], 然而对于本振光的消光比指标的标定方法却鲜有报道. 对光子数误差达 60–80 dB 的信号在同一标定方法下实现准确标定是很困难的, 标定光子数常用的单光子探测器在测量“消光部分”的光子数时, 较难避免由于来自“强光”部分的干扰造成的测量误差.

本文提出了一种适用于 CV-QKD 系统的平均光子数测量方法, 利用平衡零差探测技术, 结合相位随机化的本振光脉冲, 将对待测弱相干态脉冲信号的平均光子数的测量转换为对零差探测输出信号的数据方差统计. 仿真和实验表明, 该方法具备一定条件下的本振光脉冲消光比测试能力, 为 CV-QKD 系统的核心参数规范化测试提供了重要参考.

2 平衡零差探测模型及仿真分析

2.1 平衡零差探测器模型

常用的平衡零差探测 (balanced homodyne detector, BHD) 通常由 1 个 2×2 光分束器 (beam splitter, BS) 和 1 个带有 2 个 PIN 光电二极管的高增益低噪声差分放大电路构成 [18]. 将 2×2 BS 的 2 个输入臂依据输入信号强度的不同分别命名为本振臂和信号臂, 而两个输出臂信号分别进行强度和延时平衡后输入进两个响应度一致的 PIN 管, 对 PIN 管输出信号进行差分放大后, 由模拟数字转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 对输出电信号进行采集. 当测试真空态的随机涨落时, 将信号臂断开, 调整输入进本振臂的本振光强度即可获得基于真空态随机涨落的量子随机信号 [18–21], 采集获得的信号统计方差称为散粒噪声方差. 要利用这个模型进行平均光子数的测量, 传统方法是将待测信号接入信号臂, 并在本振臂插入一个电光调制器. 电光调制器的作用是对待测信号和本振光信号干涉中无法避免的相位漂移进行补偿 [21]. 然而这种依据零差探测结果计算相位漂移值并对电光调制器加载实时补偿电压的方式在高重复频率的系统中实现起来是非常困难的.

理想零差探测器输出的信号 X_{out} 可以表示为 [22]

$$X_{\text{out}} = AX_{\text{LO}} \cdot (\hat{x}_{\text{signal}} \cos \theta + \hat{p}_{\text{signal}} \sin \theta), \quad (1)$$

其中 A 为放大系数, X_{LO} 为本振光的 x 正则分量, \hat{x}_{signal} 和 \hat{p}_{signal} 分别为信号光的 x 正则分量和 p 正则

分量, θ 为本振光和信号光之间的相位差. 考虑到散粒噪声波动及分布特性, \hat{x}_{signal} 和 \hat{p}_{signal} 在测量时均呈现高斯分布, 其均值分别代表在 x 分量和 p 分量上的振幅, 两个振幅的平方和即为该相干态的信号强度或平均光子数.

2.2 仿真分析

由于弱相干态脉冲信号在相空间上可以看成是由真空态 (x 和 p 分量均值为 0, 方差为 v) 进行平移后得到的, 因此仿真时, \hat{x}_{signal} 和 \hat{p}_{signal} 由两组独立同分布的高斯随机数 G1 和 G2 来表征, 均值分别为 m_1 和 m_2 , 方差同为 v , 而 $\sigma^2 = m_1^2 + m_2^2$ 是该相干态脉冲信号的强度, 与平均光子数正相关. 在待测相干态信号的平均光子数一定的条件下, 给本振光加载 $[0, 2\pi]$ 的随机相位可使信号光与本振光的相位差 θ 也服从 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布. 由 (1) 式可知, 采用主动控制信号光和本振光相位差的方法测量到的结果是同时包含了信号光的 x 分量和 p 分量的数据信息. 在仿真中, 令 A 和 X_{LO} 均为 1, 样本点个数为 10^7 , 结果如图 1 所示, 探测结果分布呈现驼峰型. 仿真获得的探测输出信号方差 v_{out} 与相干态脉冲信号强度 σ^2 的关系, 结果如图 2 所示. 可以看出, 随着 σ^2 的增大, v_{out} 线性增大. 由于 σ^2 正比于平均光子数, 换算关系可表示为

$$N = \frac{PT\lambda}{hc}, \quad (2)$$

其中 N 为平均光子数; T 为光脉冲重复频率; λ 为中心波长; $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常数; $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为光速; P 为平均光功率, 其正比于 σ^2 . 由此可知, 探测输出信号方差 v_{out} 与相干态脉冲信号的平均光子数 N 呈线性关系.

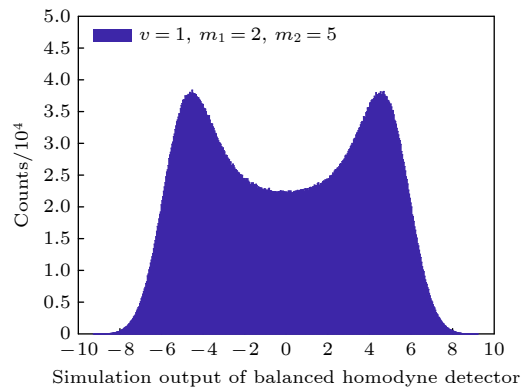


图 1 零差探测器输出信号分布仿真结果

Fig. 1. Simulation distribution of BHD output.

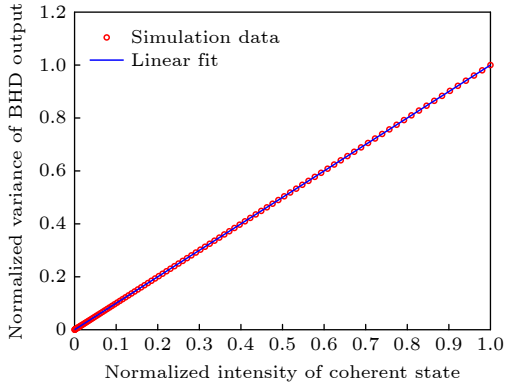


图 2 探测器输出信号方差随待测相干态信号的强度变化的仿真结果

Fig. 2. Variance of BHD output changes with the intensity of coherent state.

3 实验方案及测量结果

依据设计方案搭建的实验光路如图 3 所示. 一束脉冲光经 BS1 分束后, 分为强度不同的上下两支路, 分别用来传输信号光和本振光. 信号光通过一个光衰减器 (VATT) 后再由 BS2 分成两束, 一束由光功率计 (power meter) 进行功率监测以计算平均光子数, 另一束经强固定衰减器 (CATT) 后进入 2×2 BS 的信号臂, 作为待测平均光子数的相干态信号. 本振光通过一个相位调制器 (PM) 并被加载 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布随机相位后输入进 2×2 BS 的本振臂, 作为本振光信号, 实现零差探测, 并由 ADC 最终完成数据提取.

实验中的 VATT 可控制弱光脉冲的强度, CATT 固定衰减值为 -50 dB, 以使进入探测器的信号为弱相干态脉冲信号. 光脉冲重复频率为 1 MHz, 宽度为 30 ns (厂商: OPEAK, 型号: LSM-DFB-100K-PL, 其静态线宽为 100 kHz). 由量子随机数

发生器^[23]产生随机数并加载在调制器 PM (厂商: 中国电子科技集团公司第四十四研究所, 型号: GC 15PMTC7813, 半波电压 $V_{\pi} = 3.5$ V) 上. 由 BS1 和 BS3 构成的等臂 Mach-Zehnder 干涉仪的上下支路光纤长度均为 4.52 m. 对探测器输出信号的峰值进行采样^[10], 采样率为 1 GSa/s, 样本量为 10^7 . 基于以上标定的零差探测器电噪声为 $V_{\text{ele}} = 0.07N_0$ (N_0 为表征真空涨落的散粒噪声方差). 采集获得的探测器输出信号统计分布如图 4 所示, 与仿真结果一致, 呈现驼峰型.

值得注意的是, 仿真结果的两个驼峰距离较实验结果更远, 这是由于仿真采用的 m_1 , m_2 和 v 与实验中的待测信号光的平均光子数 N 和散粒噪声 N_0 存在差异. N 越多或 N_0 越小, 两个驼峰分离得越明显, 零差探测输出信号方差越大. 为此, 对不同平均光子数的相干态脉冲信号进行测试, 获得的探测器输出信号方差与平均光子数的关系如图 5 所示, 与仿真结果相符, 探测器输出信号方差与待测弱相干态信号的平均光子数呈现良好的线性关系.

4 讨论

在本方案中, 本振光强度、零差探测器光电二极管探测效率、耦合器等无源光器件的透射率和 ADC 采样精度都会影响探测器输出信号的方差值. 而探测器输出信号方差值所对应的平均光子数是依据光功率计测量值结合 (2) 式计算后得到的. 因此, 采用本方案进行实际应用时, 应对探测器输出信号方差值与平均光子数之间的一阶线性关系进行校准, 以保证本方案的实用性.

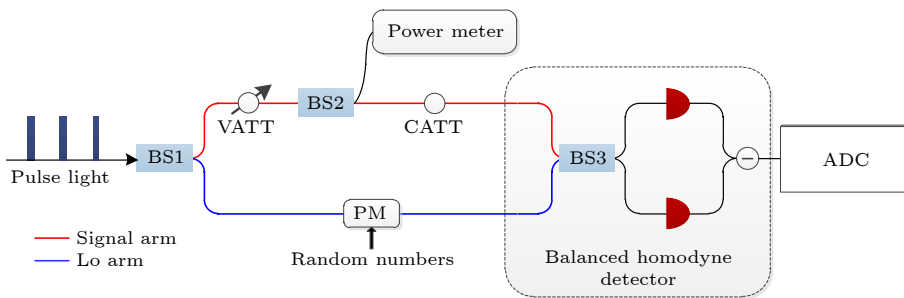


图 3 实验装置图 (BS, 光分束器; VATT, 可调光衰减器; CATT, 固定衰减器; PM, 相位调制器; ADC, 模数转换器)

Fig. 3. Experimental setup. BS, beam splitter; VATT, variable attenuator; CATT, constant attenuator; PM, phase modulator; ADC, analog to digital converter.

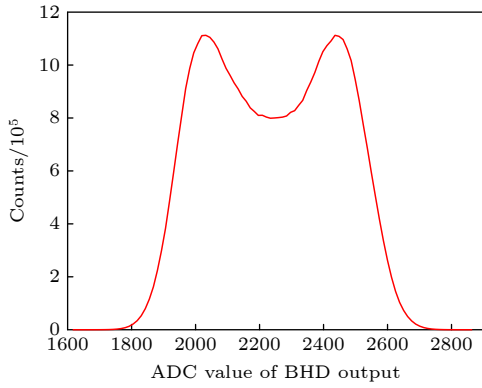


图 4 平衡探测器输出信号分布

Fig. 4. Distribution of balanced homodyne detector output.

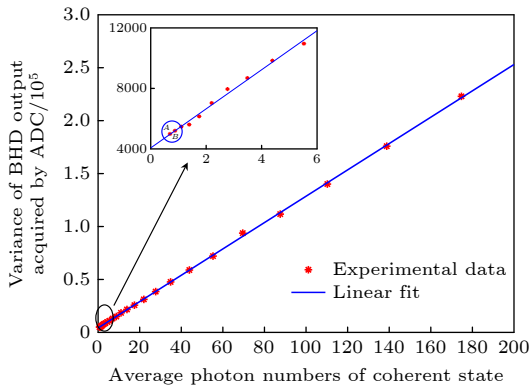

 图 5 探测器输出信号方差与平均光子数关系 (电噪声 $V_{\text{ele}} = 0.07N_0$, 平衡零差探测效率 $\eta = 0.6044$, ADC 采样精度为 14 bit)

 Fig. 5. Variance of detector output varies with average photon numbers. Electrical noise is $V_{\text{ele}} = 0.07N_0$, the efficiency of BHD is $\eta = 0.6044$ and sampling accuracy is 14 bit.

图 5 给出了平均光子数与零差探测器输出信号方差之间的一阶线性关系曲线, 在实际实验中是通过控制信号光支路的光功率以 1 dB 步进变化, 并计算对应平均光子数值, 同时测量零差探测器输出信号方差得到的. 影响本方案量化精度的主要因素有: ADC 采样精度和量程、光功率计测量不确定度以及探测器性能等.

其中 ADC 是将探测器输出的模拟电压信号转化成数字信号, 其可分辨的最小模拟电压由 ADC 采样精度和量程决定, 因而实验获得的探测器输出信号方差值的最小可分辨值也是由 ADC 决定的. 在采样精度、量化量程确定的情况下, 输出信号方差的最小可分辨值是确定的. 实验中使用的功率计生产厂家为 Thorlabs, 型号为 PM20CH, 其测量不确定度为 ± 0.25 dB (< 1 dB). 光功率越小, 依据

其测量结果计算得到的平均光子数越准确. 由于 ADC 提取数据信号的最小可分辨方差值是确定的, 因此在图 5 中实验结果的典型值给出了探测输出信号方差与平均光子数之间的趋势关系, 其测量精度是由 ADC 能够分辨的最小方差值来保证的.

图 5 所示的实验结果中, 蓝色圆圈线中 A 和 B 两个点纵坐标方差值分别为 4990.8 和 5200.1, 对应平均光子数分别为 0.696 个/脉冲和 0.827 个/脉冲, 差值为 0.131 个/脉冲. 因此, 将实验测得的最小可分辨方差值对应的可分辨平均光子数近似为 0.1 个/脉冲作为本方案测量精度.

有关 ADC 性能与本方案的量化精度之间的关系, 以及测量结果的误差来源分析是一个非常值得研究的问题, 我们会在接下来的工作中在这个方向继续深入.

由于采用了主动控制本振光相位并将其随机化的方法, 本方案同样适用于光脉冲时域消光比的测量. 即为信号光添加延时, 按需要控制衰减器的衰减值并先后标定脉冲光“有光”和“无光”部分的光子数, 而无需考虑由于激光器相位噪声引入的测量误差.

实验表明, 依据平衡探测的输出方差来获得当前光脉冲的平均光子数是切实可行的技术方案.

5 结 论

本文提出了一种基于平衡零差探测技术测量光脉冲平均光子数的方法, 采用对本振光相位随机化消除相位漂移引入的测量误差. 仿真并实验验证了零差探测器输出信号方差与光脉冲平均光子数的线性关系, 采用该方案实现的平均光子数测量精度为 0.1 个光子/脉冲, 测量范围达 23 dB. 为连续变量量子密钥分发系统中平均光子数和光脉冲消光比的测量提供了一种参考方案.

参考文献

- [1] Lodewyck J, Debuisschert T, Tualle B R, Grangier P 2005 *Phys. Rev. A* **72** 050303
- [2] Lodewyck J, Bloch M, García P R, Fossier S, Karpov E, Diamanti E, Grangier P 2007 *Phys. Rev. A* **76** 042305
- [3] Namiki R, Hirano T 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 117901
- [4] Heid M, Lütkenhaus N 2007 *Phys. Rev. A* **76** 022313
- [5] Eriksson T A, Hirano T, Puttnam B J, Rademacher G, Luís R S, Fujiwara M, Namiki R, Awaji Y, Takeoka M, Wada N 2019 *Commun. Phys.* **2** 1

- [6] Qi B, Zhu W, Qian L, Lo H K 2010 *New J. Phys.* **12** 10
- [7] Kumar R, Qin H, Alléaume R 2015 *New J. Phys.* **17** 043027
- [8] Kleis S, Steinmayer J, Derksen R H, Schaeffer C G 2019 *Optical Fiber Communication Conference, OSA San Diego, California, USA, March 3–7, 2019* pTh1J.3
- [9] Karinou F, Brunner H H, Fung C H F, Comandar L C, Bettelli S, Hillerkuss D, Kuschnerov M, Mikroulis S, Wang D, Xie C S, Peev M, Poppe A 2018 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 7
- [10] Jouguet P, Kunz J S, Diamanti E 2013 *Phys. Rev. A* **87** 062313
- [11] Jouguet P, Kunz J S, Leverrier A, Grangier P, Diamanti E 2013 *Nat. Photonics* **7** 378
- [12] Sasaki T, Yamamoto Y, Koashi M 2014 *Nature* **509** 7501475
- [13] Qi B, Hunag L L, Qian L, Lo H K 2007 *Phys. Rev. A* **76** 052323
- [14] Huang D, Huang P, Lin D K, Zeng G H 2016 *Sci. Rep.* **6** 19201
- [15] Wang X Y, Liu J Q, Li X F, Li Y M 2015 *IEEE J. Quantum Electron.* **51** 6
- [16] Huang D 2017 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [黄端 2017 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [17] Hansen H, Aichele T, Hettich C, Lodahl P, Lvovsky A I, Mlynek J, Schiller S 2001 *Opt. Lett.* **26** 21
- [18] Liu W Y 2020 *Ph. D. Dissertation* (Shanxi: Shanxi University) (in Chinese) [刘文元 2020 博士学位论文 (太原: 山西大学)]
- [19] Wang C 2012 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [汪超 2012 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [20] Li Y 2019 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiaotong University) (in Chinese) [李源 2019 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [21] Nie Y Q, Huang L, Liu Y, Payne F, Zhang J, Pan J W 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 2435
- [22] Guo H, Li Z Y, Peng X 2016 *Quantum Cryptography* (Beijing: National Defense Industry Press) P138 (in Chinese) [郭弘, 李政宇, 彭翔 2016 量子密码 (北京: 国防工业出版社) 第138页]
- [23] Yang J, Liu J L, Su Q, Li Z Y, Fan F, Xu B J, Guo H 2016 *Opt. Express* **24** 27475

An average photon number measurement scheme based on balanced homodyne detection*

Liu Jin-Lu Yang Jie Zhang Tao Fan Fan Huang Wei Xu Bing-Jie[†]

(*Science and Technology on Communication Security Laboratory, Institute of Southwestern Communication, Chengdu 610041, China*)

(Received 30 June 2021; revised manuscript received 11 August 2021)

Abstract

Quantum key distribution (QKD) has become an alternative technology defending the security threat resulting from quantum computing. Owing to its superiority in coexistence with optical infrastructures and cost-effective, continuous variable QKD (CV-QKD) is widely studied and developed towards the practical application stage. The standardized measurement of critical parameters of the system should be studied urgently.

In this work we propose a scheme based on balanced homodyne detection with phase-randomized local oscillator to realize the average photon number measurement. By controlling local oscillator phase positively, which obeys $[0, 2\pi]$ uniform distribution, a linear relationship between average photon numbers and the variance of detector output can be obtained in simulation and experiment. With high-accuracy (~ 0.1) photons/pulse and large range ~ 23 dB, this average photon number measurement scheme provides a great reference to evaluating the critical parameters of CV-QKD system in the practical process.

Keywords: photon number measurement, quantum key distribution, standardization

PACS: 03.67.Hk, 03.65.Yz, 03.67.-a, 03.67.Dd

DOI: 10.7498/aps.70.20211216

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U19A2076, 61771439, 61901425), the National Cryptography Development Fund, China (Grant No. MMJJ20170120), the Sichuan Science and Technology Program, China (Grant Nos. 2019JDJQ0060, 2020YFG0289, 2020YJ0482), and the Innovation Special Zone Funds, China (Grant No. 18-163-00-TS-004-040-01).

[†] Corresponding author. E-mail: xbjpk@163.com