

单光子调制锁定 Fabry-Perot 腔*

王晶晶 何博 于波 刘岩 王晓波 肖连团[†] 贾锁堂

(山西大学激光光谱实验室, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2012年3月7日收到; 2012年4月10日收到修改稿)

基于 Fabry-Perot (FP) 腔的量子密钥分配系统在相位编码的量子密钥分配应用方面具有优势, 把 FP 腔锁定在携带密钥信息的单光子光学频率上决定着密钥的实用安全. 提出利用单光子调制解调的方法锁定 FP 腔. 使用工作于盖革模式的单光子探测器探测单光子 (平均光子数为 0.1), 对离散的单光子响应脉冲累计锁定放大, 获得的鉴频信号信噪比达 112, 锁定后 FP 腔透射光频率起伏为 2 MHz.

关键词: 单光子, Fabry-Perot 腔, 频率锁定

PACS: 42.60.Fc, 42.62.-b, 42.79.-e

1 引言

基于光纤的量子密钥分配系统采用单光子为信息载体^[1], 利用光子的量子态如偏振、相位等编码信息^[2], 通过单光子探测器进行探测. 在光纤量子密钥分配系统中, 与光子偏振态相比, 光子相位受光纤双折射的影响较小, 因此许多基于光纤的量子密钥分配系统采用相位编码^[2-7]. 相位编码方式是在发送端通过相位编码单光子, 在接收端通过相应的相位措施解码获得密钥信息^[2,8]. 1999年, Mérolla 等^[8,9] 提出基于 Fabry-Perot (FP) 腔的边带单光子相位编码装置, 在发送方对光进行相位调制产生边带, 接收方采用同频相位调制, 使两次产生的边带干涉, 并通过 FP 腔选取一阶边带频率处的单光子干涉信息, 该系统使用电光相位调制器编码解码相位, 从而消除因通常干涉仪的光路延迟带来的热漂移效应, 提高了系统工作的稳定性^[10]. 这里使用 FP 腔选出携带密钥信息的边带单光子频率, 选频稳定性越高, 安全性就会越高. 但在实际应用中 FP 腔的漂移会限制对单光子干涉的有效探测, 因此锁定 FP 腔是非常重要的. 为了把相位编码系

统锁定在单光子水平, 人们采用了在一定取样时间的光子计数调制方法^[4,11,12]; 我们也曾利用单光子的光子计数调制有效提高了测量的信噪比^[13,14]. 然而光子计数调制只适用于低频调制场合, 通常低于 Hz 量级, 不能够用于跟踪 FP 腔的快速漂移. 本文给出通过快速调制解调单光子获得用于锁定 FP 腔的鉴频信号, 用平均光子数为 0.1 的弱光实现 FP 腔的有效锁定.

2 单光子调制解调原理

频率调制是将信号加载到高频波段, 利用锁相放大器压缩探测带宽的方法来降低低频噪声对信噪比的影响. 当 FP 腔的透射光中心波长为 ν_0 且被频率为 f 调制信号调制时, FP 腔透射波中心频率的瞬时值为

$$\nu = \nu_0 + \delta\nu \cos(ft), \quad (1)$$

$\delta\nu$ 为调制振幅.

当入射光子被频率为 f 的正弦波调制时, t 时刻处于盖格模式的单光子探测器的瞬时探测效率

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB921603, 2010CB923103)、国家自然科学基金 (批准号: 11174187, 61178009, 60908019, 10934004)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (批准号: 60821004)、山西省科技基础条件平台建设项目 (批准号: 2011091016)、山西省高等学校中青年拔尖创新人才支持计划和山西省高等学校优秀创新团队支持计划资助的课题.

[†] E-mail: xlt@sxu.edu.cn

可以表示为

$$P_n = r_0 + a \cos(2\pi ft), \quad (2)$$

这里 r_0 为探测器的平均探测效率, a 代表调制深度. 在时间窗口 T 内的有效计数率可以表述为

$$r_T(T) = r_0 + a \left[\frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T} \right] \cos(2\pi ft + \pi f T). \quad (3)$$

在时间窗口 T 内探测到的单光子, 其相位按照正弦调制 f 信号分布, 单光子探测器探测输出信号的幅度可表示为

$$I = \int_0^T \left[\sum_{n=1}^N p_n \frac{\sin(\pi f \tau + \phi_n)}{\pi f \tau + \phi_n} \right] \cos(2\pi ft) 2\pi f dt, \quad (4)$$

其中, I 为单光子调制的解调信号, 相干光的光子探测概率 $p_n = \frac{e^{-r_T T} (r_T T)^n}{n!}$, ϕ_n 为单光子相对于调制信号的实时相位, n 为在时间窗口 T 内探测到的光子数, τ 是从单光子探测器输出的 TTL 脉冲的脉宽, 约为 30 ns.

单光子调制解调锁定方法是将单光子探测器输出的 TTL 信号送入锁相放大器进行一定积分时间的累计调制解调, 最终输出光子脉冲的输出进行傅里叶变换后, 有

$$\begin{aligned} S(f) &= \sum_{n=1}^N P_n \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} e^{-i\phi_n} \\ &= \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} \int_0^{2\pi} P_n e^{-i\phi} d\phi. \end{aligned} \quad (5)$$

由 (2) 和 (5) 式, 我们可得出解调后的幅度为

$$|S(f_m)| = \pi \tau \frac{\sin(\pi f_m \tau)}{\pi f_m \tau}. \quad (6)$$

当解调频率与调制频率不等时, 此时探测到的单光子信号与调制光的相对相位是随机变化的, 因此有 $|S(f, f \neq f_m)| = 0$.

解调信号的信噪比为

$$\text{SNR} = \frac{S}{(N_s + N_b)(\Delta f / f_n)}, \quad (7)$$

其中 S 为光子计数对应的模拟信号幅值, N_s 是指散粒噪声, N_b 是背景噪声, 包含暗计数和背景光子数对应的模拟信号, Δf 为滤波带宽, f_n 为噪声分布带宽. 压缩滤波带宽 $\Delta f \propto 1/T$, 即增加积分时间 T 可降低相应的噪声信号, 增大信噪比. 而适当提高积分时间 T , 可以得到更好的信号灵敏度 (正比于 T^{-1}), 但是在脉冲重复频率一定的情况下, 灵敏度的提高要以损失分辨率为代价, 所以通常需要

根据系统所需的分辨率或灵敏度选取合适的采样时间.

3 实验装置

实验装置如图 1 所示, 波长为 1531 nm 可调谐光纤激光器 (NKTK81-151-11) 作为光源. 在激光输出端放置基于法拉第旋光效应的隔离器 (ISO), 防止激光被腔镜反射后沿原路返回造成激光工作的不稳定. ATT 是连续可调光衰减器, HVout 是 FP 腔 (Toptic, FPI100) 的控制器, 输出三角波扫描信号, 加载到 FP 腔的压电陶瓷 (PZT) 上, 控制 FP 腔腔长变化. 锁相放大器 (SRS, SR830) 参考输出端输出频率 9 kHz 的正弦波, 与三角波扫描信号叠加后加在 FP 腔的压电陶瓷上, 用于对 FP 腔腔长的调制. 图 2 为未施加调制信号时, FP 腔的透射峰, 透射带宽为 30 MHz, 自由光谱区为 1 GHz.

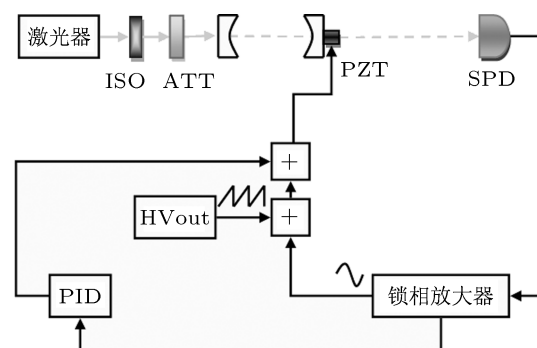


图 1 单光子锁定 FP 腔实验装置图, 虚线表示自由空间传输

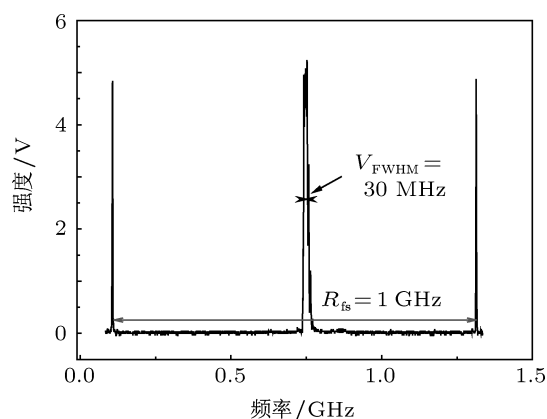


图 2 未施加调制信号时的 FP 腔透射模

实验中, 将 FP 腔的透射光耦合到光纤中输入雪崩光电二极管单光子探测器 (SPD RGA-600 型, Princeton), SPD 工作于盖格模式, 内触发工作 (触

发频率为 1 MHz), 将激光适当衰减, 经 FP 腔透射后用单光子探测器进行探测, 探测器探测到的平均光子计数约为 0.1. 实验中将经单光子探测器探测后输出的 TTL 信号输入锁相放大器进行累计相敏检波和锁相放大, 通过选择合适的积分时间和时间灵敏度, 得到透射峰的一阶微分信号, 一阶微分信号经过高压放大器放大后输入比例积分微分控制器 (PID), 经选择合适的比例、积分、微分参数后得到较为规整的色散型曲线 (可以通过示波器观察), 即为用于锁腔的鉴频曲线. 将鉴频信号与被 9 kHz 正弦信号调制后的三角扫腔信号经加法器一并加载到 FP 腔控制端. 逐渐减小 FP 腔扫腔信号幅度, 期间通过调节扫腔信号的偏置电压保持鉴频信号的中心始终在示波器的中心, 最终使三角波的电压幅值为零, 此时 FP 腔扫描电压处于关断状态, 即实现对 FP 谐振腔锁定在单光子光学频率上.

4 实验结果与分析

图 3(a) 是观察到的由单光子探测器 TTL 输出端输出的实时信号, 可以看到, 在对应普通光电探测器探测到的透射峰中心位置, 单光子响应脉冲比较密集, 离透射中心频率越远脉冲越稀疏, 与单光子强度调制特性相符. 图 3(b) 是采到的单光子调制信号的快速傅里叶变换 (FFT) 图像, 对应频率为 9 kHz 的位置即为调制信号, 表明通过解调可以将与调制信号同频率的有用信号解调出来.

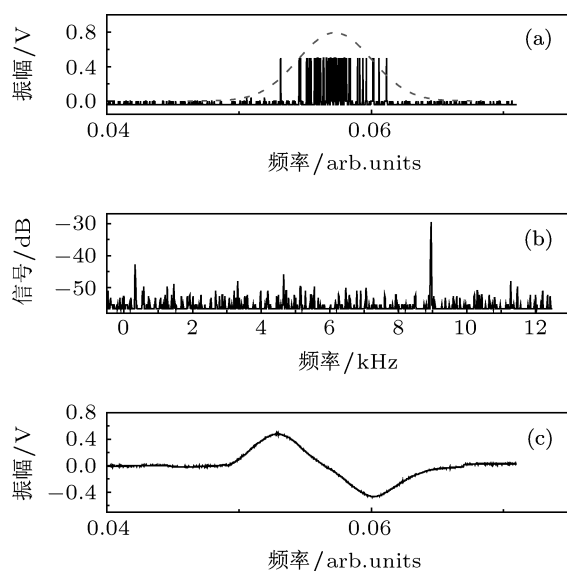


图 3 (a) 脉冲为实验中采得的单光子响应分布情况, 虚线为理论拟合的透射模; (b) 单光子调制信号的 FFT 图形; (c) 锁频输出的用于锁定 FP 腔的鉴频信号

将单光子探测器 TTL 输出信号送入锁相放大器, 对离散的信号累计同频解调后, 并经过 PID 后示波器上可观察到经锁相放大器调制解调后的一阶微分信号, 即用于 FP 腔锁定的鉴频信号, 如图 3(c) 所示. 此时锁相放大器的积分时间 30 ms, 对应的滤波带宽 Δf 为 3 Hz. 实际获得的鉴频信号信噪比 112. 而通过单光子调制信号的 FFT 图形得到信号功率为 -32 dB, Δf 为 3 Hz 的噪声功率为 -53.75 dB -20 dB $= -73.75$ dB, 利用 (7) 式计算获得 $SNR = 123$, 与实际测量得到的鉴频信号信噪比符合得较好.

图 4(a) 为未施加反馈信号时, 锁相放大器的输出随时间的变化特性, 表明自由运转的 FP 腔很不稳定, 且短时间 (小于 1 s) 的频率漂移起伏大约有 30 MHz. 我们将鉴频信号通过加法器加到 FP 腔控制器的偏置端后, 逐渐减小扫腔信号幅度, 通过调节 PID 的参数使锁相放大器的输出信号幅度尽量最窄, 此时 PID 的比例、积分、微分常数分别为 0.8, 320, 0.008, 使得锁住 FP 腔后频率变化范围最小. 如图 4(b) 所示, FP 腔被锁定后锁相放大器的输出 1 h 内基本平稳, 经计算得 FP 腔透射峰的频率变化范围即带宽为 2 MHz, 锁住后单光子探测到的光子数基本稳定为 10 k, 单光子探测器的触发频率是 1 MHz, 探测效率是 10%, 则平均光子数为 0.1, 即锁定后仍然维持在单光子量级.

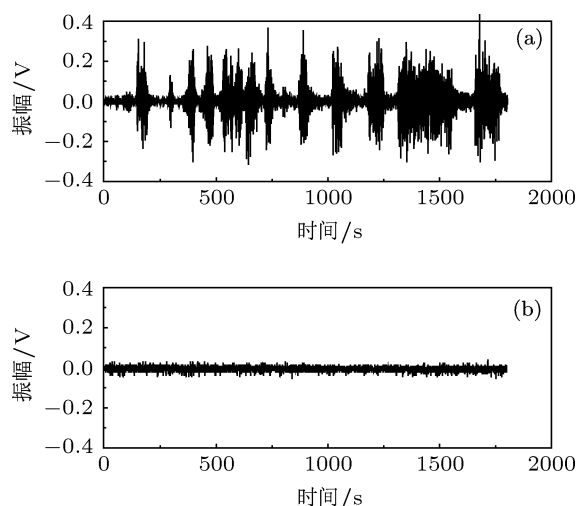


图 4 (a) 无锁定时 FP 腔随时间的漂移变化; (b) 锁定 FP 腔后其透射光学频率特性

5 结论

采用单光子调制技术实现 FP 腔的锁定, 利

用 9 kHz 的正弦波调制信号对 FP 腔进行单光子波长调制, 由单光子探测器探测经过 FP 腔的平均光子数为 0.1 的弱光, 解调后的鉴频信号的信噪比达

到 112, 对 FP 腔进行锁定, 获得了 2 MHz 的频率稳定度. 这种单光子直接锁定 FP 腔的方法可以应用于增强单光子与物质的相互作用^[15].

-
- [1] Piro N, Rohde F, Eschner J 2011 *Nat. Phys.* **7** 17
- [2] Nicolas G, Gre'goire R, Wolfgang T, Hugo Z 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [3] Gui Y Z, Han Z F, Guo G C 2002 *Prog. Phys.* **22** 371
- [4] Xavier G B, Weid J P 2011 *Opt. Lett.* **36** 1764
- [5] Zhang L J, Wang Y G, Yin Z Q, Chen W, Yang Y, Zhang T, Huang D J, Wang S, Li F Y, Han Z F 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 2305
- [6] Wei Z J, Wan W, Wang J D, Liao C J, Liu S H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 094216 (in Chinese) [魏正军, 万伟, 王金东, 廖常俊, 刘颂豪 2011 **60** 094216]
- [7] Wang J D, Wei Z J, Zhang H, Zhang H N, Chen S, Qin X J, Guo J P, Liao C J, Liu S H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5514 (in Chinese) [王金东, 魏正军, 张辉, 张东妮, 陈帅, 秦晓娟, 郭建平, 廖常俊, 刘颂豪 2010 **59** 5514]
- [8] Merolla J M, Mazurenko Y, Goedgebuer J P, Porte H, Rhodes W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1656
- [9] Merolla J M, Mazurenko Y, Goedgebuer J P, Duraffourg, Porte H, Rhodes W 1999 *Phys. Rev. A* **60** 1899
- [10] Wang J J, He B, Wang X B, Xiao L T, Jia S T 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 091404
- [11] Pulford D, Robillard C, Huntington E 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 063114
- [12] Bateman J E, Murray R L D, Freegarde T 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1530
- [13] Huang T, Dong S L, Guo X J, Xiao L T, Jia S T 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061102
- [14] Wang X B, Wang J J, Zhang G F, Xiao L T, Jia S T 2011 *Chin. Phys. B* **20** 064204
- [15] Celebrano M, Kukura P, Renn A, Sandoghdar V 2011 *Nat. Phot.* **5** 95

Fabry-Perot cavity locked by using single photon modulation*

Wang Jing-Jing He Bo Yu Bo Liu Yan Wang Xiao-Bo
Xiao Lian-Tuan[†] Jia Suo-Tang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Laser Spectroscopy Laboratory, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 7 March 2012; revised manuscript received 10 April 2012)

Abstract

Fabry-Perot (FP) cavity-based quantum key distribution has some advantages in the phase-coded quantum key distribution (QKD). Locking the frequency of the FP cavity transmission to the frequency of single photon carrying the key information determines the security of QKD. In this paper, we propose an FP cavity locked to a single photon (the mean photon number is about 0.1) frequency using single-photon modulation/demodulation method. The single photon detector working in the Geiger mode is used to detect modulated single photons then directly demodulated by the lock-in amplifier. The discrete single photon response pulses accumulated fulfills the phase sensitive detection, and the signal-to-noise ratio of signal frequency discrimination is up to 112. The transmission frequency fluctuation of the locked FP is limited to 2 MHz.

Keywords: single photon, Fabry-Perot cavity, frequency lock-in

PACS: 42.60.Fc, 42.62.-b, 42.79.-e

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2012CB921603, 2010CB923103), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174187, 61178009, 60908019, 10934004), the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60821004), the Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2011091016), TSTIT and TYMIT of Shanxi, China, and the Shanxi Province Foundation for Returned Scholars, China.

[†] E-mail: xlt@sxu.edu.cn