

单光子探测峰值扫描法高精度光纤传输时间测量研究

曾智龙 朱 勇 卢 麟* 张宝富 吴传信 韦毅梅

解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007

摘要 提出了一种基于单光子探测的光纤传输时间峰值扫描测量方法。通过调节门控信号的到达时间以及与光脉冲匹配的开闸宽度,统计单光子探测器的计数率峰值来判断光脉冲的准确到达时刻,避免了单光子探测器在盖格工作模式下输出雪崩脉冲的时间抖动测量误差。在理论分析峰值扫描测量法的基础上,设计了峰值扫描测量实验系统,在长度为125 km光纤信道上测量光脉冲传输时间精度达到35 ps,同时验证了实验系统测量的准确度约为13 ps。

关键词 光纤光学; 时间间隔测量; 峰值扫描; 单光子探测器; 门模式

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0508003

Research of Peak Count Rate Scanning Method for Single Photon Detector Used in High Precision Optical Transfer Time Measurement

Zeng Zhilong Zhu Yong Lu Lin Zhang Baofu Wu Chuanxin Wei Yimei

*Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210007, China*

Abstract A new method to measure transfer time delay in optic fiber more accurately is proposed to deal with timing jitter of single photon avalanche detector worked in Geiger mode. The arrival time of echo optical signal is determined by adjusting the arrival time and width of gate signal to make the photon count rate reach the maximum value. The method avoids the intrinsic timing jitter of single photon avalanche detector. After deliberately theory analysis, system experiment is performed in fiber of length approximate 125 km, the experiment shows that measurement precision is about 35 ps and the accuracy is about 13 ps.

Key words fiber optics; time interval detect; peak scanning; single photon detector; Geiger mode

OCIS codes 040.1345; 060.3510; 120.3930

1 引言

高精度光信号传输时间测量在激光测距、天文测距、光传感以及光纤时间传递等领域都有广泛的应用。当前,无论在自由空间还是光纤中,基于单光子探测技术的飞行时间测量法^[1-2]是在信道损耗较大条件下精确测量光信号传输时间的有效手段之一。在光纤中通常使用波长为1550 nm的光信号进行传输时间间隔测量,一般采用工作在盖格模式下的InGaAs/InP雪崩光电二极管(APD)的单光子探测器作为检测手段^[3-4]。在盖革模式下,单光子探测器的工作电压远高于雪崩电压,对光子的灵敏度极高,检测到单个光子后就有可能产生雪崩电流。但InGaAs/InP APD单光子探测器在探测到光子并产生雪崩电流的时间抖动为500 ps(半峰全宽)左右^[5],这个时间抖动成为影响整个飞行时间测量系统精度的关键因素。引起这种时间间隔测量抖动主要因素有两个:一方面是在单光子条件下,到达探测器的光脉冲包含的光子数较少,光子到达时间服从

收稿日期: 2014-11-10; 收到修改稿日期: 2014-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(61174199,61371121)

作者简介: 曾智龙(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤时间传输测量方面的研究。E-mail: zllinyun@163.com

导师简介: 朱 勇(1971—),男,教授,硕士生导师,主要从事光信息技术、量子信息技术等方面的研究。

E-mail: jlzhuy@163.com

* 通信联系人。E-mail: nj_lulin@163.com

泊松分布^[6],具有不确定性;另一方面,由于光子到达探测器后产生载流子的初始能量不确定,因此光生载流子获得阈值能量产生雪崩电流的时间也具有随机性。本文采用一种新型峰值扫描统计测量方法,通过精细可控的时延技术调整门控信号的开闸时间,同时对单光子探测器的光脉冲响应计数率进行实时监测,通过搜索将探测到光子数目最多的门控信号时间作为光子到达时刻,能够在信道时延缓变的条件下,避免单光子检测器的抖动问题,从而更加精确地确定光信号到达时间,提高测量系统的稳定性和精确度。

2 峰值扫描测量法原理及分析

峰值扫描测量方法是发送一定重复频率的探测光脉冲,通过调整门控信号开闸时刻,使得单光子接收系统单位时间内(如1 s)的光子计数率达到峰值,将此时的门控开闸时间作为光信号到达的时刻,从而测量出飞行时间。该方法与传统方法的区别在于:传统利用单光子探测测量飞行时间的方法中,直接将单光子探测器探测到光子产生的响应电流作为系统的Stop信号,时间抖动较大,而本文采用的峰值扫描测量系统,是测量门控信号的开闸时间作为Stop信号,有效地避免了单光子探测器探测时间抖动带来的误差。

门控信号的扫描过程如图1所示,其中 $g(t)$ 表示门控信号, $f'(t)$ 表示光脉冲信号, t_1 和 t_2 分别表示门控信号和光脉冲的到达时间。

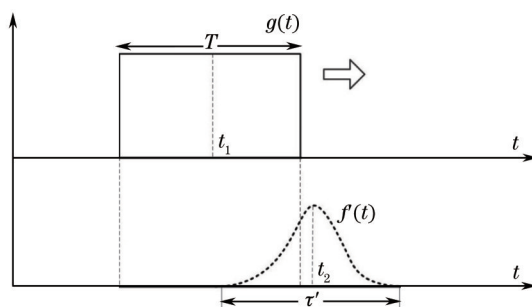


图1 门控信号和光脉冲到达时间相互作用的关系

Fig.1 Relationship between the time of gate and optical pulse

由于光纤长度的不确定性,对每个光脉冲而言,为了使光脉冲能够在门控信号的宽度之内被探测到,需要调整门控信号的到达时间和宽度,而门控信号开闸时间的不同会导致单光子探测器探测到光子数目的不同,引起光子计数的概率也会有不同。在弱光检测条件下,由于回波光光子数很少以至于每脉冲所含光子数不会使单光子探测器对光子的探测效率饱和,此时通过调整门控信号的到达时间及宽度使得门控信号和光脉冲达到最佳匹配条件,光脉冲内可以被探测到的光子数目最多,单光子探测器产生的光子计数率最大,可以认为门控信号的到达时刻即为光脉冲的实际到达时刻。

假设激光器发光脉冲平均功率大小为 P_f , 脉冲宽度为 τ , 光信号强度与时间的关系为 $f(t)$, 由于每个光子能量的大小为 $h\nu$, 因此发脉冲的每脉冲平均光子数为 $N_0 = P_f \cdot \tau / (h\nu)$ 。经过光纤传输后,光信号的衰减倍数为 $A(\text{dB})$, 因此到达探测器的光信号每脉冲平均光子数为 $N_1 = N_0 \cdot 10^{(-A/10)}$, 衰减之后的光信号可以表示为

$$f'(t) = f(at + b) \cdot N_1 / N_0 = f(at + b) \cdot P_f \cdot \tau \cdot 10^{(-A/10)} / (h\nu), \quad (1)$$

式中 $a = \tau / \tau'$ 表示由于色散的影响造成光脉冲宽度的展宽, $b/a = t_2$ 表示光脉冲的到达时间。假设光脉冲的发出时刻为 $t = 0$, 所含的光子数随时间呈高斯分布^[7], 则光子数目随时间的概率密度函数可以写为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

光子探测器的门控信号一般使用矩形电信号, 在实际电路中考虑到门信号的上升沿和下降沿所需时间, 可以用阶数为 N 的平顶高斯函数模拟门控信号:

$$g(t) = \exp\left[-\left(\frac{t-t_1}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2\right] \sum_{k=0}^N \frac{1}{k!} \left[\frac{(t-t_1)^2}{2\sigma^2}\right]^k. \quad (3)$$

由于单光子探测器的概率分布情况可以认为是光脉冲的包络与门控信号函数的卷积^[7], 因此门控时间之内

能够到达探测器的光子数目为

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f'(s) g(t-s) ds. \quad (4)$$

一般情况下门控信号的宽度 T 总是大于光脉冲的宽度 τ' , 并且只有当光脉冲在门控信号之内才有可能被探测器探测到, 因此积分区间为 $\left[\mu - \frac{\tau'}{2} - T, \mu + \frac{\tau'}{2} + T\right]$ 。

由于在弱光条件下, 到达探测器光脉冲的光子数很少, 其到达时间服从参数为 $F(t)$ 的泊松分布, 假设单光子探测器的探测效率为 $\eta_{\text{det}} = 0.1$, 到达探测器的每脉冲光子数 $N_1 = 10$, 则单光子探测器产生光子计数概率 $P(t)$ 为

$$P(t) = \sum_k \exp[-F(t)] \frac{F(t)^k}{k!} \left[1 - (1 - \eta_{\text{det}})^k\right]. \quad (5)$$

将(2)~(4)式代入到(5)式, 可以计算得出不同宽度门控信号在不同时刻到达引起的光子计数概率, 其结果如图2所示。

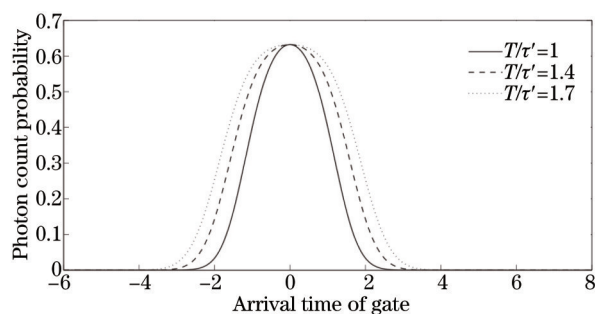


图2 门控信号到达时间与光子计数概率的关系

Fig.2 Relationship between arrival time of gate and photon count probability

图2的仿真曲线中, 坐标横轴以光脉冲到达时间为零点表示门控信号的到达时间, 纵轴表示单光子探测器的光子计数概率, 不同的曲线表示不同的门控信号宽度与光脉冲宽度之比 (T/τ') 条件下的探测器光子计数概率曲线。不同的门宽与脉宽比条件下, 探测器的计数概率曲线有明显的不同, 当 $T/\tau' = 1$, 门控信号的到达时刻与光脉冲完全匹配时, 可以看出光子计数率最大, 并且曲线的峰值比较明显; 当 $T/\tau' > 1$ 时, 曲线顶部的峰值出现较为平滑, 并且在相同脉宽的条件下, 门宽越大曲线的顶部越平滑, 这说明当门宽较大时, 光子全部位于门信号宽度之内, 同时产生峰值探测概率的时刻较多, 此时可以通过设置判决门限等方法来判断光脉冲的到达时刻。

由理论分析可以看出, 峰值扫描测量方法的主要优点在于系统的测量误差仅与门控信号的调整步长以及测量系统自身的误差有关, 门控信号到达时间和宽度与光脉冲最佳匹配时, 峰值扫描测量系统对光子到达时间的判别与单光子探测器响应电流的时间抖动无关, 大大减小了探测器自身响应时间抖动的影响。

3 峰值扫描法测量实验研究

3.1 峰值扫描系统

峰值扫描法配置结构如图3所示。

实验系统主要由信号产生、信号测量、光纤和数据控制四个部分组成。在信号产生部分中, 系统使用增益开关半导体激光器(G-S LD)^[8-9]作为光源, 通过光谱仪 Anritsu MP970C 和光示波器 Lecroy NR9000 可以观测到激光器产生的光信号的脉冲的半峰全宽约为 50 ps, 中心波长为 1532.85 nm, -20 dB 谱宽为 0.71 nm, 如图4所示。

系统利用现场可编程门阵列(FPGA)产生调制激光器的电信号和单光子探测器的门控信号, 系统采用的FPGA型号为: EP3C5E144C8N, 使用铷原子钟(FS725)产生的 10 MHz 信号作为时钟信号, 通过FPGA内部的计数器用计数分频的方式产生频率较低的激光器调制信号和探测器门控信号, 由于发光脉冲的重复频率与

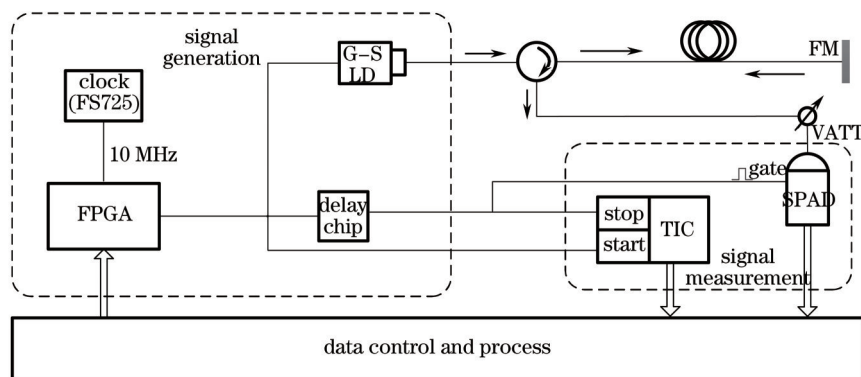


图3 峰值扫描法实验配置原理图

Fig.3 Schematic diagram of peak count rate scanning system

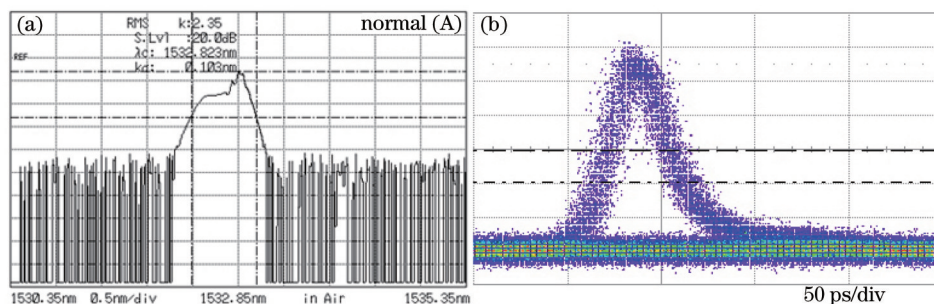


图4 (a)光脉冲频谱; (b)光脉冲时域波形

Fig.4 (a) Spectrum; (b) waveform

光纤的长度有关,为了避免散射光子的影响,在光纤长度为 125 km 的条件下,设置发光脉冲的重复频率为 500 Hz。系统对门控信号的时延控制是通过延时芯片和 FPGA 共同完成的,由于门控信号的到达时间需要在一定范围内精细调整,因此利用粗时延和精时延相结合的方法进行调整,对于大于 5ns 以上的时延是通过 FPGA 调整,而小于 5 ns 的时延是通过延时芯片(NB6L295)调整,最小步长可达 11 ps,时间抖动均方差为 3 ps。

实验系统的信号测量部分主要包括单光子探测器和时间间隔测量模块,系统使用的单光子探测器是安徽量子通信技术有限公司的单光子探测器 QCD-302,在 1550 nm 处单光子探测效率为 10%左右,时间间隔测量模块(TIC)中使用了德国 ACAM 公司的高精度时间间隔测量芯片 TDC-GP21,使用铷原子钟作为钟源,最高分辨率可达 22 ps。

实验选用 G.652 光纤作为测量信道,为了加强光纤末端的反射率,在光纤的末端装置法拉第反射镜(FM),同时在单光子探测器的光输入端加上可调衰减器(VATT)调整回波光脉冲的功率以达到弱光检测条件。

3.2 峰值扫描系统在长距离光纤信道条件下测量实验

3.2.1 系统初值校准

为准确测量光信号传输的时间,在不加待测光纤的条件下校准测量系统的固有时延 t_0 ,主要包括 FPGA 和 TIC 的电路系统时延 t_{ele} 、光电及电光转换时延和基础光路系统的时延 t_{opt} 。实验首先使用 TIC 测量 t_{ele} ,其次使用峰值扫描法测量出电路和光路系统(包括电光和光电转换、环形器、衰减器以及法拉第反射镜)的总时延 $t_0 = t_{ele} + t_{opt}$ 。因此光信号在光纤上传输的时间应当为系统测得的全部时间间隔 $t_{total} - t_0$,如表 1 所示。

3.2.2 峰值扫描系统测量光信号传输时间

实验测试过程如下:当 FPGA 将激光器发脉冲的时刻传递给 TIC 作为 Start 信号时,同时产生一个延时的门控信号给单光子探测器,由于光纤的大略长度已知(实验中光纤长度约为 125 km,计算得出光信号在光纤中传输一个来回所需的基础时延),在门控信号时延值扫描过程中,每秒钟调整一次门控信号的时延值,同时控制终端统计每秒内单光子探测器的计数率。调整步长 t_{step} 的大小决定了峰值判定的精度, t_{step} 较大会导致峰值时刻门控信号时延值判定的误差较大, t_{step} 过小会导致扫描峰值所需的时间过长,当计数率最大并且出现峰值时,

设置此时的门控信号时延作为 TIC 的 Stop 信号,则 Start 和 Stop 信号之间的时间差 $t_{total} = t_{start} - t_{stop}$ 即为整个峰值扫描系统的时间测量值,再将测量值减去系统的固有时延 t_0 就是光信号在光纤中传输一个来回的时间。

3.2.3 测量结果及分析

实验使用光纤长度为 125 km,激光器发脉冲频率为 500 Hz,平均功率为 5.89×10^{-7} mW,光脉冲在光纤中经过一次往返之后,可以计算出光脉冲由于色散造成的脉冲宽度 τ' 为 2700 ps 左右,平均每脉冲的光子数衰减至 40 个,利用 VATT 降低光脉冲能量使每脉冲所含光子数为 10 个左右,此时门控信号完全包含光脉冲时的峰值探测计数概率为 70%左右。实验中设置 $t_{step} = 55$ ps,单光子探测器门控信号宽度在 2~3.3 ns 范围内调整。在门控信号宽度分别为 $T/\tau' = 1$ 、 $T/\tau' = 1.15$ 和 $T/\tau' = 1.25$ 的条件下进行实验,单光子探测器将光子计数率上报控制端后,通过 Matlab 软件重新画出计数率曲线图,如图 5 所示。

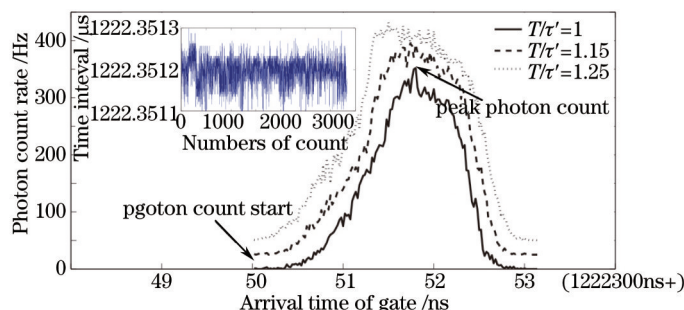


图 5 门控信号到达时间与探测器光子计数的关系

Fig.5 Relationship between the arrival time of gate and photon count rate

图 5 中,坐标横轴表示门控信号的到达时间(为方便显示,坐标横轴时间已减去 1222300 ns),纵轴表示 1 s 内的光子计数率,左边箭头标注出光子开始计数的时刻,右箭头标注出光子计数峰值出现时刻, T/τ' 表示门控信号宽度和光脉冲宽度的比值。(由于不同门宽条件下的光子计数率的最大值基本相同,为了方便区分不同门宽条件下的光子计数曲线,图中 $T/\tau' = 1.15$ 时,光子计数率统一加 25, $T/\tau' = 1.25$,光子计数率统一加 50。左上方小图显示的是 $T/\tau' = 1$ 条件下,以峰值点处门控信号作为 Stop 信号测量得到的光信号传输间隔。)

门控信号的时延扫描过程中,光子计数率随门控信号时延值的变化而变化,在 125 km 条件下,当门控信号的宽度设置为 2750 ps 时,此时的门控信号宽度与光脉冲宽度基本相同,门控信号宽度能够完全包含回波光脉冲宽度,计数率曲线的峰值十分明显,且峰值点的计数率为 354,计算得出探测器的计数概率为 70.8%,与理论计算时的峰值计数率十分接近。

当门控信号的宽度分别设置为 3000 ps 和 3300 ps 时,门控信号与光脉冲的宽度之比为 1.15 和 1.25,在这两种情况下可以看出光子计数率曲线的最大值仍然在 70%左右,但是出现的时刻较多,曲线顶端较为平缓,与理论仿真曲线接近,主要原因是在门控信号宽度大于比脉宽情况下,光脉冲内所有光子都被探测的时刻较多,造成多种时延的门控信号内的光子计数率都能达到最大值。

在门控信号宽度与光脉冲宽度一致 ($T/\tau' = 1$) 的情况下,将峰值点出现时刻的门控信号作为 TIC 的 Stop 信号可以测得时间间隔,具体实验结果见表 1。

表 1 峰值扫描法测量实验结果

Table 1 Result of peak count rate scanning

	t_{ele} /ps	$t_0 = t_{ele} + t_{opt}$ /ps	t_{total} /ps	$t_{total} - t_0$ /ps
Mean	11977.36	87467.93	1222351195.76	1222263727.83
Variance	32.56	33.61	33.39	

表 1 中, t_{ele} 表示测量系统中电路时延, t_0 如前所述表示电路时延与基础光路时延之和, t_{total} 表示加入 125 km 光纤之后测得的时间间隔,而最终光信号的传输时间可以通过计算 $t_{total} - t_0$ 得到。从实验结果可以看出 t_{ele} 、 t_0 和 t_{total} 的方差几乎相同,说明由于本方法测量门控信号的到达时间,因此包含单光子探测器在内的其他模块的时间抖动并没有对测量结果造成影响。

3.3 峰值扫描系统准确性实验

为了验证系统的准确性,实验在待测光纤末端连接上一段已知长度的短光纤替换法拉第反射镜,由于光纤连接处和端面都有一定的反射光子,当门控信号的时延扫描经过连接处以及端面两个反射点时,在两个反射点范围之内会出现两个反射峰值,这两个峰值之间的时间间隔就应当是光信号在短光纤中传输一个来回的时间。实验首先使用普通 PIN 作为测量手段,分别测量光信号在 50 km 光纤和(50 km+1 m)光纤上传输所需的时间,相减得到在 1 m 短光纤传输一个来回的时间 $t_{short} = 10252.45$ ps,然后将短光纤连接至光纤末端,由于光纤连接点的反射率较低,为明显观测到两个峰值的出现,末端不再使用法拉第反射镜,同时使用待测光纤长度为 50 km,以减小回波信号的路程损耗。实验结果如图 6 所示。

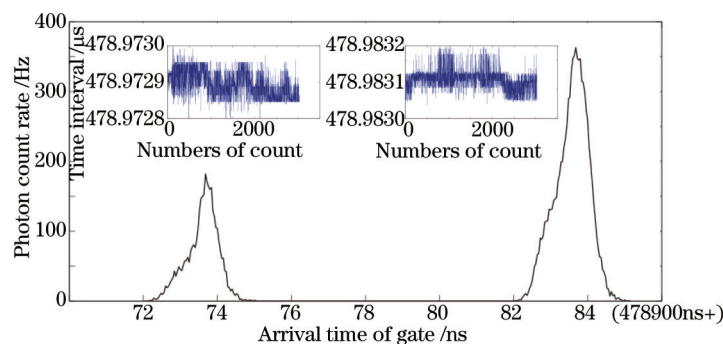


图 6 门控信号时间经过两处反射点时的光子计数率

Fig.6 Photon count rate of two reflection points

图 6 中的第一个反射峰值点表示了光纤连接处的反射点,第二个峰值表示了光纤端面的反射点,由于光纤连接处的反射率比端面反射率要小,回波光光子数少,因此在第一个反射峰值点的单光子探测器计数概率也比较低。将两个峰值点的门控信号时延值分别作为 TIC 的 Stop1 和 Stop2 信号,可以同时测得两个反射点的时间间隔 t_{total1} 和 t_{total2} ,再通过计算两个时间间隔的差值 $t_{total2} - t_{total1}$ 就得到光信号在短光纤中传输来回的时间,具体实验结果见表 2。

表 2 峰值扫描法准确度测量实验结果

Table 2 Accuracy of peak count rate scanning result

	t_{total1} (50 km) /ps	t_{total2} (50 km+1 m) /ps	$t_{total1} - t_{total2}$ (1 m) /ps	t_{short} /ps
Mean	478972892.74	478983133.09	10240.35	10252.45
Variance	36.72	35.09		

从表 2 中的结果可以看出峰值扫描系统得到的短光纤传输时间 $t_{total2} - t_{total1}$ 和通过 PIN 测量得到的时间数据 t_{short} 的均值差为 12.1 ps,说明系统利用峰值来判定回波光信号的到达时间的方法能够准确地测量光信号在光纤中的传输时间,达到预期的目标。

4 结 论

提出了通过调整单光子探测器门控信号的时延和宽度,统计不同到达时间门控信号产生的探测器计数峰值的方法来精确测量光脉冲到达时间的方法,消除了单光子探测器时间抖动对时间间隔测量的影响,提高了系统测时的精度。实验结果表明:在反射光脉冲与门控信号最佳匹配的条件下能够通过光子计数率的峰值判断光脉冲到达时间,获得最佳测量结果;在 125 km 的光纤中测得峰值扫描法的精度达到 35 ps,并且利用双反射峰值的方法验证了系统的准确性约为 13 ps。

参 考 文 献

- 1 Guo-Liang Shentu, Qi-Chao Sun, Xiao Jiang, *et al.* 217 km long distance photon-counting optical time-domain reflectometry based on ultra-low noise up-conversion single photon detector[J]. Opt Express, 2013, 21(21): 24674-24679.
- 2 Prochazka I, Blazek J, Kodet J. New technologies for time transfer with picoseconds precision and accuracy[C]. Frequency Control Symposium (FCS), 2012 IEEE International, 2012: 1-7.

- 3 Ribordy G, Gautier J D, Zbinden H, *et al.*. Performance of InGaAs/InP avalanche photodiodes as gated-mode photon counters[J]. *Appl Opt*, 1998, 37(12): 2272-2277.
- 4 Huang Jianhua, Wu Guang, Zeng Heping. Study of 1.5 GHz harmonics ultrashort pulse gated InGaAs/InP avalanche photodiode single-photon detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0204001.
黄建华, 吴光, 曾和平. 基于 1.5 GHz 多次谐波超短脉冲门控 InGaAs/InP 雪崩光电二极管的近红外单光子探测技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0204001.
- 5 Thew R T, Curtz N, Eraerds P, *et al.*. Approaches to single photon detection[J]. *Nuclear Instrum Meth Phys Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, 610(1): 16-19.
- 6 Luo Hanjun, Yuan Xiuhua. Accuracy of photon pulsed heterodyne detection system[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(12): 1208004.
罗韩君, 元秀华. 光子脉冲外差探测系统的测距精度[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208004.
- 7 Li Xiongjie, Ding Jingxin, Tang Ruikai, *et al.*. Research on quantum statistic properties of photon number in pulse mode nonlinear frequency up-conversion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0527002.
李雄杰, 丁晶新, 汤瑞凯, 等. 脉冲模式非线性频率上转换的光子数量子统计特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0527002.
- 8 Zhang Weizai, Ding Hao, Zhao Hao, *et al.*. An active mode-locked semiconductor laser with a single-mode fiber phase-grating external cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(12): 1681-1683.
张位在, 丁浩, 赵浩, 等. 单模光纤相位光栅外腔主动锁模半导体激光器[J]. *光学学报*, 1996, 16(12): 1681-1683.
- 9 Fang Tao, Lu Lin, Li Yuquan, *et al.*. Application of optical pulse source with frequency chirp in OCDMA system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 623-628.
方涛, 卢麟, 李玉权, 等. 啁啾脉冲光源用于光码分多址系统的研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(3): 623-628.

栏目编辑: 何卓铭