

基于单光子探测的光传输时间实时测量方法

朱 波 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 在单光子探测峰值扫描测量法的基础上,设计了峰值时延跟踪系统。通过扫描前一次峰值位置附近的时间范围,统计比较出各测量点计数率的最大值,实时获得新的峰值位置,从而实现了温度剧烈变化环境下125 km光纤链路上的峰值实时跟踪实验。针对扫描步长大带来的精度受限问题,在峰值判定时引入多项式拟合方法,提高了系统的准确度。通过设计单双程实时测量对比实验,证明了通过峰值时延跟踪系统测得的光脉冲传输时间的准确度优于雪崩光电二极管直接测量法所得结果。

关键词 光纤光学;单光子探测器;峰值扫描;实时测量;拟合

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0205003

Measurement Method for Real-Time Transmission of Optical Signal Based on Single Photon Detection

Zhu Bo 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 The system of peak time delay tracking is designed, which bases on peak count rate scanning method for single photon detector. By scanning the time range near the previous peak position, a group of data can be compared to find the biggest value for determining the new peak position. It implements the peak of real-time tracking experiment during 125 km optical fiber in the environment of rapidly changing temperature. In order to solve the precision problem which is limited by the long step, the system introduces the polynomial fitting method to increase the accuracy. The accuracy of the light pulse transmission time obtained by peak time delay tracking system is superior to that obtained by avalanche photodiode directly measuring method, which is proved by the comparison experiment of single passing and double passing real-time measurements.

Key words fiber optics; single photon detector; peak scanning; real-time transmission; fitting

OCIS codes 040.1345; 060.3510; 120.3930

1 引言

光纤授时已经成为主流的时间传递手段之一^[1-2],其授时精度依赖于对链路上光信号单程传输时间的精确测量。光纤授时精度的峰峰值已经小于1 ns,因此,对单程时延的测量应该向皮秒量级逼近。目前,传输时间的测量是通过使用同一时钟测量光信号双程传输时间的方法来估算单程时间,因此光信号在光纤两个方向传输的时间对称性直接影响单程传输时间的估算精度^[3]。一般来说,光纤授时系统中无源反射方式的双向传输时间对称性最好,但是光信号在链路中传播双向距离所受的损耗是单程的两倍,并且由于光纤中存在背向散射、不宜使用光放大器,使授时距离和传输时间的测量精度之间相互制约。传统光信号的功率检测手段已不适用衰减大的情况,为提高光信号检测的灵敏度、检测到更微弱的光信号,需要采用能探测单个光子能量级别信号的单光子探测器^[4]。

收稿日期: 2015-07-17; 收到修改稿日期: 2015-10-05

基金项目: 国家自然科学基金(61174199,61371121)

作者简介: 朱 波(1990—),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: ny_zhu_bo@163.com

导师简介: 朱 勇(1971—),男,博士,教授,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

峰值扫描测量法是一种基于单光子探测的新型光信号传输时间测量方法^[5]。通过调整门控信号的开闸时间,监测单位时间内单光子探测器接收到的光子计数率,将计数率峰值位置所对应的门控信号开闸时间作为光信号到达的时刻,从而测量出光子飞行时间。该方法将门控信号的开闸时间作为时间间隔测量模块(Time Interval Counter, TIC)的停止信号,有效地避免了单光子探测器探测时间抖动带来的误差,提高了系统的精度。

实际光纤链路的长度随着外界环境变化而变化,光信号传输时间不是一成不变的,为了保持授时系统的准确性,必须不间断地对链路中光信号的传输时间进行测量,获得实时数据。因此,提出基于峰值扫描法设计峰值时延跟踪系统,并进行光纤链路峰值实时跟踪测量;针对系统峰值位置判定不准确带来的误差,提出数据拟合的优化方法,并进行仿真分析;通过单双程时间测量比对实验,证明优化方法的可行性。

2 峰值时延跟踪系统

2.1 跟踪系统的方案设计

在弱光状态下,到达单光子探测器的光子数很少,每脉冲所含光子数不会使探测器饱和。通过调整门控信号的到达时间,改变门控信号与发脉冲信号在时间上的相对位置,即改变探测时门控信号和光脉冲的匹配程度,统计探测器单位时间内的光子计数率,比较后可以获得曲线峰值位置,峰值位置对应的门控信号开闸时间即为光子飞行时间。利用峰值扫描系统实时测量光信号传输时间,需要不断地对门控信号开闸时间进行扫描,跟踪光子计数率曲线峰值的变化,更新峰值出现的时刻。

重复扫描过程需要耗费时间,扫描时间越短,系统的实时性越好。为缩短时间,设计了峰值时延跟踪系统的方案:使用已知粗略长度为 L 的待测光纤,利用峰值扫描法对回波光信号进行扫描,得到光子计数率曲线峰值出现的时刻为 T_{p1} 。然后以 T_{p1} 为基础,现场可编程逻辑控制器件(Field Programmable Gate Array, FPGA)控制单光子探测器门控信号的开门时间,使其在时间 $[T_{p1} - m \times t_{step}, T_{p1} + m \times t_{step}]$ 范围内进行一次扫描(m 是预设值,决定了扫描点的个数; t_{step} 是扫描步长,时间范围单位为ps),每个扫描点停留单位时间(1 s),探测器统计各扫描点光子计数率,计数率最大的时刻即为新的峰值时刻 T_{p2} 。重复此扫描过程,实现峰值时延的跟踪。光纤长度在短时间内不会发生剧变,光信号传输时间也不会发生剧变,系统只在上一个峰值位置周围进行扫描搜索,寻找出新的峰值时刻,节省了扫描时间。为了准确获得光脉冲的传输时间,需要采用TIC来进行测量,激光器发脉冲信号作为TIC的start信号,峰值时刻 T_p 对应的门控信号作为TIC的stop信号,两个信号的时间间隔就是光脉冲双程传输时间。

2.2 正常跟踪条件

长距离光纤在受到挤压或者温度变化的情况下,光脉冲在链路中传输时间会发生变化。峰值时延的判定和测量是在每个扫描周期结束之后进行的,实时跟踪的关键在于扫描周期内光脉冲传输时间变化量要小于门控信号时延的最大变化量。跟踪系统运行时,新获得的峰值时延值与前一次比较,变化量最大为 $t_{step} \times m$ 。如果温度变化剧烈,扫描周期内实际光脉冲的传输时间变化量大于 $t_{step} \times m$,那么跟踪系统获得的峰值就没有完全跟上实际光脉冲峰值,跟踪结果出现偏差。长时间运行时,系统每次扫描过后获得的峰值都跟不上实际峰值,偏差朝单一方向扩大,最终门控信号与光脉冲完全不匹配,探测器计数率下降为零,跟踪失败。

为便于比对,这里将扫描周期内的时延变化量统一换算成单位时间内的时延变化率。光脉冲传输时间变化率为 v_{laser} ,门控信号最大时延变化率为

$$v_{gate} = t_{step} \times m / (2m + 1), \quad (1)$$

系统只有在 $v_{laser} < v_{gate}$ 的情况下才能实现实时跟踪。由(1)式可以看出,增大测量点数或者步长都可以保证系统正常运行,但是,增加测量点的数量,相应的扫描周期也会增加,系统的实时性会变差,所以增大步长就成了唯一的选择。

2.3 实验

将室温下的光纤放入冰箱内来模拟温度剧烈变化的过程。为验证系统的跟踪性能,比较不同步长情况下系统的运行结果,设计了单双程实时测量比对方案,双程系统是对峰值时延的精确测量,单程系统测量出

光脉冲传输时间的变化率,与双程测量进行比对分析。

图 1 中实线部分表示电路系统,虚线部分表示光路系统。实验使用 G.652 光纤,衰减系数为 0.2 dB/km,长度为 125 km,使用增益开关(G-S)半导体激光器作为光源^[6],光脉冲时域包络为高斯型^[7],输出光的波长为 1530 nm,半峰全宽约 50 ps,频率为 500 Hz。利用 FPGA 控制激光器发出光脉冲,待测光纤的末端用 50:50 的光分束器(Spectrometer)将光脉冲分成两部分。一部分进入法拉第旋光反射镜(Faraday Rotation Mirror, FM)反射回发送端,经环形器(Optical Circulator)进入单光子探测器(SPAD)。受色散影响,光脉冲展宽约 2700 ps。FPGA 通过延时芯片控制工作在盖格模式下单光子探测器的触发时间,探测器门宽约 3 ns,时间抖动约 500 ps。在前一个峰值时刻附近扫描各点的光子计数率,将新的峰值时刻作为双程时间间隔测量模块 TIC1 的 stop 信号。另一部分光直接进入雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)进行检测,转换成电信号后成为时间间隔测量模块 TIC2 的 stop 信号,用于单程传输时间测量。每个扫描周期过后,系统进行一次单双程传输时间测量,发光脉冲的时刻作为两个 TIC 模块的 start 信号,TIC1 和 TIC2 模块的 start 和 stop 信号之间的时间间隔分别为实际光脉冲双程和单程传输时延。

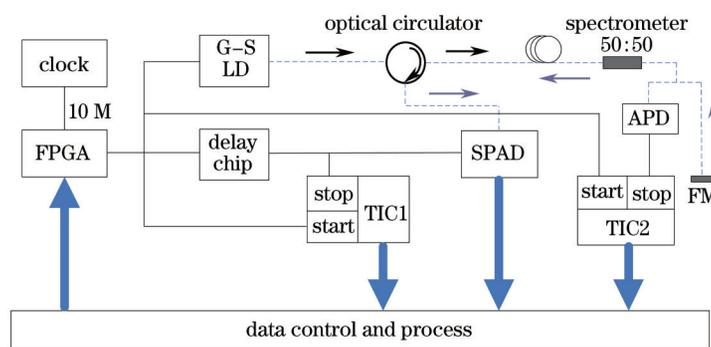


图 1 峰值时延跟踪实验配置图

Fig.1 Schematic diagram of peak real-time tracking experiment

分别选用步长为 30.6 ps 和 71.3 ps 进行实验,扫描点数为 7,室温约 24 ℃,冰箱内温度约 5 ℃,测量结果如图 2 中(a)、(b)所示。为便于比较,将单程时延乘以 2 置于图中,由于双程测量系统存在基础时延,导致两条曲线并不重合,存在固定的时延差。实验先在室温下运行一段时间,然后将光纤放入冰箱,观察峰值跟踪情况。从图中可以看出,步长选 30.6 ps 时,700 s 后双程时延跟踪系统跟踪失败;步长选择 71.3 ps 时能实现长时间跟踪,并且曲线斜率由大变小,说明光纤温度的变化越来越缓慢,符合热力学中温差越小、温度传导越慢的规律。图 2(a)中红色曲线是单程时延测量结果,虽然采用 APD 进行检测,曲线抖动较大,但还是能准确反映出光脉冲传输时间的变化。由单程测量曲线计算可得,光纤放入冰箱后,光脉冲传输时间变化率为 16.747 ps/s。由(1)式计算可得,步长为 30.6 ps 时,门控信号最大时延变化率为 13.114 ps/s,小于光脉冲传输时间变化率,最终跟踪失败;步长为 71.3 ps 时,门控信号最大时延变化率为 30.557 ps/s,大于光脉冲传输时间变化率,系统正常跟踪,实验结果与理论分析一致。

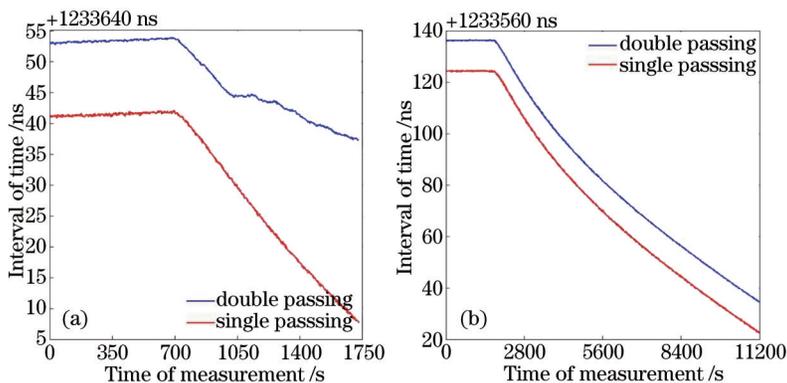


图 2 跟踪结果。(a) 步长 30.6 ps; (b) 步长 71.3 ps

Fig.2 Results of tracking. (a) Step is 30.6 ps; (b) step is 71.3 ps

为了避免出现跟踪失败的情况,实际测量中步长设置应尽量大。系统的峰值判定是由各测量点的计数率比较得出的,在噪声干扰下,相邻测量点计数率可能出现相等甚至是与实际大小完全相反的情况,使判定结果出现偏差。另外,步长选择较大时,实际峰值位置可能出现在相邻两个测量点之间,仅通过比较有限测量点的计数率来判定会出现丢峰现象,影响系统的准确度。为了解决这一问题,需要对跟踪系统的峰值判定过程进行优化。

3 系统的优化与验证

单光子条件下,光脉冲时域包络为高斯型^[7],光子到达探测器的时间取决于其时域包络形状,也为高斯型。设脉冲经过探测器探测后产生光子计数值 y 与时延 x 之间的关系为 $y=f(x)$,实验中无法直接获得该连续解析表达式,只能通过测量获得离散测量点 x_i 对应的单位时间内探测到的光子计数值 y_i ,测量值都会不同程度地带有测量噪声,无法准确地获得曲线真正的峰值位置。根据有限离散测量点进行曲线拟合是工程中常用的方法^[8],利用 (x_i, y_i) 之间的相关性进行曲线拟合,逼近真实的脉冲曲线 $f(x)$,通过插值计算可以较准确地找到峰值位置。

3.1 拟合算法

多项式拟合是一种常用的拟合优化方法,通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配^[9]。假设给定数据 $(x_i, y_i) (i=0, 1, \dots, m)$, 求拟合曲线 $y=p_n(x)=\sum_{k=0}^n a_k x^k$, 使得误差平方和 $I=\sum_{i=0}^m [p_n(x)-y_i]^2=\sum_{i=0}^m \left(\sum_{k=0}^n a_k x_i^k - y_i\right)^2$ 最小, I 是关于 a_0, a_1, \dots, a_n 的多元函数。由多元函数求极值的必要条件得: I 对 a 求偏导得到关于 a_0, a_1, \dots, a_n 的线性方程组: $\sum_{k=0}^n \left(\sum_{i=0}^m x_i^{j+k}\right) a_k = \sum_{i=0}^m x_i^j y_i$, 式中 $j=0, 1, \dots, n$, 解出该线性方程组即为解析多项式,计算出所需要的数值。

系统选用二次多项式进行拟合,通过编写上位机软件,把拟合算法嵌入峰值判定过程中。在每个扫描周期过后程序会自动进行数据拟合,然后在扫描范围内进行插值计算,得出扫描范围内的最大值,将最大值对应的门控信号开闸时间作为峰值设置值。

3.2 仿真分析

为了比较拟合前后峰值位置判定的误差,给出以下仿真分析结果。首先获得理论参考曲线,这里只对曲线峰值附近进行仿真;然后在时间 2.5~3.5 s 之间随机选取扫描起始点并对各点加随机噪声,扫描点时间间隔为 0.6 s, 点数为 7;对扫描各点进行二次拟合,获得拟合曲线;比较拟合前后峰值判定位置与理论曲线的偏差。图 3 是某次仿真结果,各曲线峰值点位置已标出,可以直观地看到,拟合后获得的峰值位置更加接近理论曲线的峰值位置。

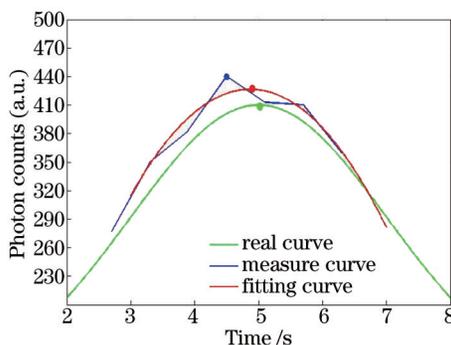


图 3 曲线拟合示意图

Fig.3 Schematic diagram of fitting curve

重复 1000 次仿真,数据拟合前后峰值位置与理论曲线峰值位置之间的误差如图 4 所示。经计算,拟合前后的误差均方差分别为 0.2829 s 和 0.1015 s,说明通过拟合的方法,系统降低了峰值判定时的误差,准确度提高了近 2 倍。

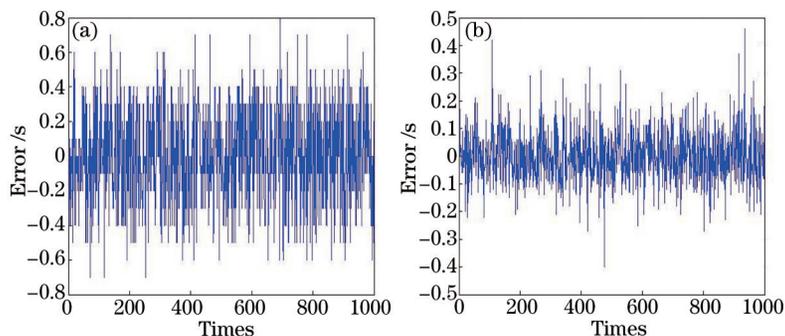


图4 峰值位置误差。(a) 拟合前; (b) 拟合后

Fig.4 Errors of peak position. (a) Before fitting; (b) after fitting

3.3 比对实验

重复2.3中实验过程,步长设置为71.3 ps,采用拟合的方法进行峰值判定,测量结果如图5所示。图5(a)中蓝线分别显示单双程时延测量值,中间红线表示各自的滑动平均值。图中单双程光脉冲传输时间测量结果的两条曲线相似程度很高,当温度变化时,两套测量系统的结果也发生相应变化,并且基本保持一致。

为比较单双程光传输时间测量结果的精度,取出图5(a)中曲线较平整的一段,计算其均方差。经过计算得出,直接测量系统测量单程传输时间的均方差为92.9 ps,而峰值时延跟踪系统的双程传输时间均方差为58.4 ps,可以看出跟踪系统的测量精度(均方差)比直接测量系统精度提高了34.5 ps。

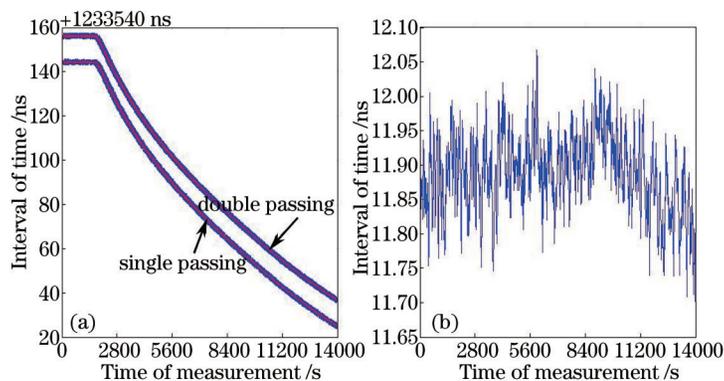


图5 拟合条件下单双程比对实验。(a) 测量结果; (b) 单双程时延差

Fig.5 Comparison experiment of single and double passing under fitting. (a) Measured results;

(b) difference of peak time delay between single passing and double passing

图5(b)是将图5(a)中两条测量结果的曲线滑动平均值相减得到的差值结果。两者之间的差值变化很小,均方差为54.2 ps,优于图2(b)中未使用拟合时103.2 ps的测量结果。图5(b)中曲线没有随温度变化而变化,说明峰值时延跟踪系统和直接测量系统对光脉冲传输时间的测量结果都能正确反映出光纤长度随温度的变化。

实验中,FPGA和TIC的电路系统时延、光电及电光转换时延和基础光路系统的时延均方差为33.6 ps,受其影响,跟踪精度不会优于固有误差。同时,受噪声的影响,拟合过程中探测器探测到的各扫描点光子数可能不完呈二次曲线,会导致拟合结果存在偏差。光子到达时间是高斯型,二次拟合并不能完全逼近高斯曲线,拟合后峰值位置也会出现偏差。门控信号的到达时间采用粗时延和精时延相结合的方法进行调整。精时延通过延时芯片(NB6L295)调整,最小步长约为11 ps。数据拟合后得到新峰值,新峰值的精时延会自动取最近的11 ps的倍数值,峰值的拟合判定值与设置值不完全一致,也会导致精度的折损。为提高系统精度,可以采用精度更高的TIC测量板,峰值位置判断时采用高斯曲线拟合。

峰值判断正确率与激光器发射脉冲次数有关,增加发射脉冲次数可以提高峰值位置判断的准确度和系统的精度^[10]。受背向散射光的影响,光纤长度限制了激光器的发射脉冲频率,每个时刻光纤链路上只传递一个光脉冲。为提高系统的精度,扫描各点需要停留足够长的时间进行多脉冲探测来准确判断峰值位置,扫描的时间过长,系统的实时性会大大降低。针对背向散射光的影响,一直采取“躲”的方式,限制了发射脉冲

频率,增加了扫描时间。因此提出:增大发射脉冲频率(通过计算确定脉冲间隔),每个时刻光纤链路上传递多个光脉冲,保证每次探测器开门时,到达探测器的背向散射光脉冲强度远远小于反射光脉冲强度,忽略背向散射光对反射光探测的影响。增加发射脉冲频率,减小各扫描点扫描时间,在保证系统精度的前提下,提高跟踪速度。

4 结 论

通过分析所设计的基于峰值扫描法的峰值时延跟踪系统正常跟踪的条件,发现增大步长可以避免跟踪失败,实现了在步长为 71.3 ps、温度剧烈变化环境下 125 km 光纤上的峰值实时跟踪;针对大步长带来的准确度低的问题,提出了多项式拟合的方法,仿真结果表明,拟合后峰值判定的准确度要高于拟合前的准确度;通过单双程实时测量比对实验,不仅证明了通过峰值时延跟踪系统获得的光脉冲传输时间的准确度要优于 APD 直接测量法所得结果,而且数据拟合后峰值判定准确度也高于拟合前的准确度;最后,给出了提高系统精度和跟踪速度的方法。

参 考 文 献

- 1 K Jaldehag, S C Ebenhag, P O Hedekvist, *et al.*. Time and frequency transfer using asynchronous fiber-optical networks: Progress report [C]. Proceedings of the 41st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, 2009, 11: 383-296.
- 2 B Wang, C Cao, L J Wang, *et al.*. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level[R]. Scientific Reports, 2012, 2: 556.
- 3 P Krehlik, L Sliwczynski, L Buczek, *et al.*. Fiber-optic joint time and frequency transfer with active stabilization of the propagation delay [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2012, 61(10): 2844-2851.
- 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 Zeng Zhilong, Zhu Yong, Lu Lin, *et al.*. Research of peak count rate scanning method for single photon detector used in high precision optical transfer time measurement[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0508003.
曾志龙, 朱勇, 卢麟, 等. 单光子探测峰值扫描法高精度光纤传输时间测量研究[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0508003.
- 6 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.
- 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 Li Qingyang, Wang Nengchao, Yi Dayi. Numerical Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008: 73-78.
李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 73-78.
- 9 Qi Guoqing, Lü Jian. Investigation of sine wave fitting algorithms[J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(14): 3677-3680.
齐国清, 吕健. 正弦曲线拟合若干问题探讨[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(14): 3677-3680.
- 10 Zeng Zhilong, Zhu Yong, Lu Lin, *et al.*. Research on scanning measurement precision of flight time peak value for single photon[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, (7): 1324-1327.
曾志龙, 朱勇, 卢麟, 等. 单光子飞行时间峰值扫描测量系统精度研究[J]. 光电子·激光, 2015, (7): 1324-1327.

栏目编辑: 王晓琰