

基于双重复频率的光时域反射仪

黄仁贵¹, 陈杰¹, 梁焰¹, 沈旭玲¹, 曾和平^{1,2*}

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 华东师范大学 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

摘要:提出并实现一种基于 InGaAs/InP 雪崩光电二极管单光子探测器的双重复频率光时域反射仪系统. 通过发送两列重复频率有差异的脉冲激光信号对同一光纤的断点进行检测. 接收系统采用高速单光子探测器, 保证了回返光探测灵敏度, 同时也提高了数据采样的速度. 通过调节两列激光脉冲重复频率, 不仅可以实现系统测量距离量程的改变, 而且能够改变测量精度.

关键词:光时域反射仪; 双重复频率; 单光子探测器

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

Optical time domain reflectometer based on dual repetition rates

HUANG Ren-Gui¹, CHEN Jie¹, LIANG Yan¹, SHEN Xu-Ling¹, ZENG He-Ping^{1,2*}

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: An optical time domain reflectometer with dual repetition rates was proposed based on the single photon detector with InGaAs/InP avalanche photodiode. Two arrays of laser pulses with slight different repetition rates were injected into the fiber to monitor the fiber broken point. A fast single photon detector was adopted for high sensitivity in reflected pulses detection with reduced measurement time. By adjusting the difference of the repetition rates, not only the measuring range of the system can be extended, but also the measurement accuracy can be changed.

Key words: optical time domain reflectometer, dual repetition rates, single-photon detector

PACS: 42. 87. -d, 85. 60. Gz

引言

光纤物理结构上的易脆性是光纤结构损伤的主要原因, 因此在远距离光通信链路中, 对链路的在线检测是保障通信链路正常工作的基础^[1]. 光时域反射仪(OTDR)或者是光频域反射仪, 利用光纤中的瑞利背向散射以及菲涅尔反射, 即可测量出整个光纤链路上的信息^[2]. 基于单光子探测器(SPD)的瑞利光时域反射仪在空间分辨率、动态范围和事件灵敏度的性能上更为优异, 测量过程抗噪声能力更强^[3], 因此基于单光子探测器的光时域反射仪的发

展备受瞩目. 2013 年, 中国电子科技大学实验小组搭建了一个基于 EDFA 放大和声光调制的瑞利光时域反射仪的分布式光纤传感系统, 在 20 km 的传感距离上获得了 20 m 的空间分辨率.

目前基于 SPD 的 OTDR 中主要有这三种 SPD, 分别为半导体单光子雪崩探测器^[4]、基于频率上转换技术的单光子探测器和超导纳米线单光子探测器. OTDR 利用 SPD 作为接收系统能够将探测到单光子水平的回返光信号, 从而极大提升探测距离^[5-8]. 基于频率上转换技术的单光子探测器利用非线性光学的和频效应, 在这个效应过程中, 红外光子

收稿日期: 2016-10-12, 修回日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(11404212, 11604209)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(11404212, 11604209)

作者简介(Biography): 黄仁贵(1991-), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生. 主要从事光纤传感方面的研究. E-mail: 334931929@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: hpzeng@phy.ecnu.edu.cn

Received date: 2016-10-12, revised date: 2017-04-13

能够高效率转换为可见光子,然后采用硅雪崩二极管单光子探测器对获取的可见光光子进行探测^[9-12].超导纳米线单光子探测器利用超导材料的临界电流密度特性实现高速的单光子探测,虽然超导纳米线单光子探测器在探测效率和噪声方面的性能表现卓越,但是目前超低温的工作条件限制其适用范围^[13-18].相比于超导纳米线单光子探测器和基于频率上转换技术的单光子探测器,单光子雪崩二极管探测器探测效率且噪声在可以接受范围,适用范围更广.在单光子探测器中,基于 InGaAs/InP 单光子探测器性能优异,是应用研究的热点.综合考虑本文采用基于 InGaAs/InP 雪崩光电二极管(APD)的 SPD 作为 OTDR 接收系统,并提出了一种基于 InGaAs/InP 雪崩光电二极管单光子探测器的双重复频率光时域反射仪的新方案.通过采用双重复频率的探测方法能够在提升数据采样率的同时也确保测量精度.

1 基于 SPD 双脉冲列 OTDR 测量方法

文中之所以采用单光子探测器作为接收系统,是因为回返光能量极弱,采用其它常规探测器无法检测到该信号.其中脉冲光频率为 10 MHz 时通过功率计可知激光器输出平均功率为 11.55 μW .本文中器件衰减系数采用分段式测量,其中衰减器衰减系数为 43 dB,环行器从一号口进经过光纤再往返至三号口衰减系数为 -34 dB,信号光从发射至 SPD 共衰减 77 dB.可得 SPD 接收到单个脉冲的能量为 2.31×10^{-20} J.脉冲光为 1550 nm 波长,对应单个光子能量为 1.28×10^{-19} J,通过计算可知每脉冲下光子数为 0.18.

根据泊松分布公式:

$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad (1)$$

其中 X 为光子数, k 为某一个激光脉冲中光子数, λ 为平均每脉冲的光子数, $P(X = k)$ 表示某一个激光脉冲中光子数等于 k 的概率.根据计算可知此时激光脉冲中光子数为 0 的概率是 83.5%,光子数为 1 的概率是 15.0%,光子数大于等于 2 的概率是 1.5%.也就是说,在每个激光脉冲中,多光子的概率小于 1.5%.通过计算可知每脉冲下单光子的概率比多光子的概率要大很多,从而确保回返光中相对于多光子而言主要是单光子.

双脉冲列 OTDR 采用高频信号探测,相对于传统方案中在相同采样时间下获取的数据更快.脉冲

光信号在光纤中传输时会有损耗,距离越长损耗越大,脉冲光信号传输距离越长瑞利背向散射的干扰越大,最终会淹没掉回返光信号在 SPD 中的有效计数.通常为了提高测试距离采用展宽探测信号光的脉宽,以此来提高单脉冲能量.采用双脉冲列信号作为探测信号,即使脉宽增加,对于分辨率的影响微乎其微,理论上能对测量分辨率造成影响的主要因素是两列重复频率的差值(Δf).相对于传统的测量方案克服了脉宽对于测量分辨率的影响.测量中需通过调节 LD 延时来对准 SPD 门脉冲,根据两列脉冲所对应的延时点,即可算出光纤断点处距离信息.

2 实验装置图

由图 1 可知,首先通过信号发生器给 LD 以及 SPD 提供同步时钟信号. LD 出射的脉冲光信号先经过衰减器再通过环行器进入光纤,最后由瑞利背向散射以及菲涅尔反射的回返光经过环行器再进入单光子探测器.该同步信号装置采用的是型号为 AFG3252 的 Tektronix 信号发生器,其主要用途是给 LD 以及 SPD 提供同步时钟信号.1550 nm 波长的窄脉冲激光器采用实验团队设计的窄脉冲电路驱动板.激光器采用四川腾光的 DFB-1550 激光管. LD 脉冲光脉宽为 1 ns,输出脉冲光功率可调.单光子探测器 (SPD) 采用上海朗研光电科技有限公司的 SPD4SMF07 单光子探测器,其工作频率为 100 kHz ~ 100 MHz,盖革模式的门脉宽为 1 ns.本文实验中的 SPD 偏压都设置为 47 V,保证探测效率相同,外部时钟频率时刻跟 LD 保持同步.可调谐光衰减器主要是用作衰减 1550 nm 脉冲激光器的能量,避免回返光能量过高,损坏单光子探测器.环行器采用非保偏环行器,具体功能是引导脉冲光传输方向.2.046 km 以及 9.928 km 采用康宁公司的 G652D 单模光纤. PC 为笔记本电脑,利用电脑中的 LABVIEW 程序进行远程控制 SPD 并采集数据.

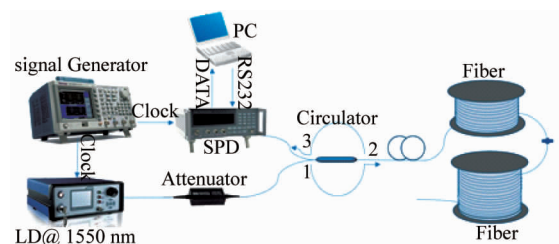


图 1 实验装置图
Fig. 1 Experimental apparatus

3 双脉冲列原理

3.1 双脉冲列原理分析

本方案的具体测量方法如下:初始状态确保 SPD 盖革模式 (Geiger-mode) 的重复频率跟脉冲激光器的重复频率保持同步一致, LD 与 SPD 的门脉冲宽度相同.

第一次测量是将脉冲激光器以及 SPD 的重复频率设置为 f_a , 由信号发生器提供同步信号给 SPD 门脉冲以及 LD 门脉冲. LD 的脉冲光信号经光纤传输, 当光信号传输到光纤断点处会反射回一个幅值衰减的脉冲信号, 光信号将从断点处沿着光纤往回继续传输至 SPD, 此时 SPD 的门脉冲并不一定能够跟往返回来的 LD 脉冲信号完全重合. 假设两个脉冲信号的门没有完全重合, 则此时需要调节 LD 门脉冲的延时来与 SPD 门脉冲完全重合, 两脉冲信号重合的同时 SPD 会发生雪崩并得到最大的光子计数. 完整扫描一个周期的时间内 SPD 出现 n 个大计数点, 则说明此段光纤有 n 个断点, 分别记录 SPD 出现大计数时的延时值. 假设出现的第一个断点的延时为 $t_{\text{delay } a}$. 虽然此时 LD 与 SPD 门脉冲完全重合, 由于采用高重复频率的原因, 并不知道光脉冲从 LD 经光纤断点往返至 SPD 共遍历了多少个 LD 的门脉冲信号, 因此无法算出 LD 光脉冲往返的总时间. 为此需要发送另一频率进行测量.

第二次测量是将脉冲激光器以及 SPD 的重复频率设置为 f_b , 其中 $f_b < f_a$. 同理通过 LD 调节时钟信号的延时使激光脉冲信号与 SPD 盖革模式下的门脉冲能够完全重合, 当两个脉冲信号完全重合时, SPD 发生雪崩效应, 单位时间光子计数值会出现剧增, 分别记下光子计数出现剧增的延时值, 与 $t_{\text{delay } a}$ 这个延时点时 SPD 计数为同等数量级的延时值记为 $t_{\text{delay } b}$.

重复频率 f_a 和重复频率 f_b 的单个周期时间差为 Δt . 其中由 $t_{\text{delay } a}$ 和 $t_{\text{delay } b}$ 可得两频率光脉冲传输到断点的相对延时差为 ΔT . 通过 ΔT 与 Δt 可知 N , 其中 N 是正整数, N 是 LD 经光纤断点再返回至 SPD 所遍历最近的整数个光脉冲. 因此可以求得总的往返的时间, 最终可知断点处的距离 L . 同理其它断点也采用这种方法进行计算即可求得其它断点距离信息.

本文实验中单个断点测量原理如图 2 所示:

由图 2 可知, SPD 工作在盖革模式, LD 脉冲光信号与 SPD 门脉冲信号完全重合, SPD 内部的 APD

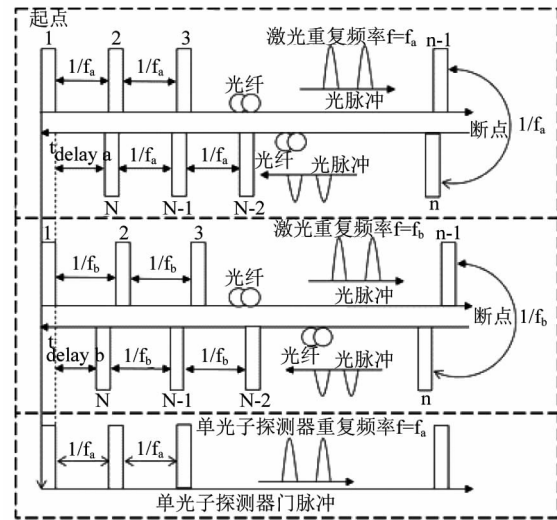


图 2 频率为 f_a 与 f_b 时的光程图

Fig. 2 The optic path diagram at frequencies f_a and f_b

发生雪崩得到最大光子计数.

图 2 表示在光纤往返的光路中遍历了 N 个光脉冲信号, 起点处的光脉冲信号记为第 1 个脉冲, 离 SPD 最近的一个光脉冲记为第 N 个光脉冲, 第 N 个光脉冲是指脉冲光从起点到光纤断点处再往返至 SPD 所遍历的整数个脉冲数. 在两次测量中通过调节 LD 延时值时, 在两列重复频率下扫描 LD 延时值过程中 SPD 出现剧增计数相似时所对应的延时值分别记为 $t_{\text{delay } a}$ 和 $t_{\text{delay } b}$, 最终求的 N 再加上 LD 的延时值, 就能求出光往返的时间, 即可得光纤某处断点的距离信息.

3.2 双脉冲列单个断点推导公式

由两个脉冲光的重复频率 f_a 和 f_b , 能求得两重复频率脉冲光单个周期时间差为 Δt , 理论上 Δt 也为距离上的最小分辨率:

$$\Delta t = 1/f_b - 1/f_a \quad (2)$$

频率 f_b 的脉冲光每走的一个周期时间内都比频率 f_a 的脉冲光多一个 Δt . 两个频率下由 SPD 扫描到的总的相对延时差为 ΔT :

$$\Delta T = t_{\text{delay } a} - t_{\text{delay } b} \quad (3)$$

总延时差除单位时间差 Δt 即可得出脉冲光往返到离 SPD 最近距离处遍历 N 个脉冲光, 即

$$N = (t_{\text{delay } a} - t_{\text{delay } b}) / (1/f_b - 1/f_a) = \Delta T / \Delta t \quad (4)$$

因此可得光信号往返的总时间为:

$$T = N \cdot 1/f_b + t_{\text{delay } b} \quad (5)$$

其中 n 为光纤折射率, c_1 为光在光纤中的传播速度:

$$c_1 = c/n \quad , \quad (6)$$

因此求得光纤断点处的距离为:

$$L = T \cdot c_1/2 \quad . \quad (7)$$

同理对于其它断点的距离信息也能够求得.

其中由两个频率可以求的来回所需最大脉冲个数为:

$$N_{\max} = (1/f_a)(1/f_b - 1/f_a) \quad , \quad (8)$$

因此最大的可测距离为:

$$L_{\max} = c_1(N_{\max}/f_a)/2 \quad . \quad (9)$$

通过综合的推导可知:采用双脉冲列的脉冲信号,极大的提高了测量的距离,通过调节重复频率的精度可以快速的调节测量量程,并改善测量精度.

4 实验数据

4.1 实验数据计算

本实验采用光纤长度为 9.928 km 与 2.027 km 光纤连接而成的总长度为 11.955 km 的光纤.

第一组实验采用重复频率为 $f_1 = 9.999$ MHz 时,通过调节 LD 上的延时扫描出 SPD 计数值最大时所对应的延时值分别为 $t_{\text{delay-1a}} = 35.12$ ns, $t_{\text{delay-1b}} = 81.30$ ns, 当采用重复频率 $f_2 = 10.000$ MHz 时同理扫描出的延时值记为 $t_{\text{delay-2a}} = 23.20$ ns, $t_{\text{delay-2b}} = 71.35$ ns. 其中 $t_{\text{delay-1a}}$ 和 $t_{\text{delay-2a}}$ 的 SPD 计数相似判定为同一断点在不同频率下的延时值, $t_{\text{delay-1b}}$ 和 $t_{\text{delay-2b}}$ 的 SPD 计数相似, 同理也判定为同一断点在不同频率下的延时值.

其中两频率的周期时间差为 Δt_1 :

$$\Delta t_1 = 1/f_1 - 1/f_2 = 0.01001 \text{ ns} \quad . \quad (10)$$

信号往返离 SPD 最近的门脉冲共需遍历 N 个脉冲光信号, N 为正整数, 所以结果取整:

$$N_1 = (t_{\text{delay-1b}} - t_{\text{delay-2b}})/\Delta t_1 = 995 \quad , \quad (11)$$

因此可以知道脉冲光往返的时间为 T_1 :

$$T_1 = N_1 \cdot 1/f_2 + t_{\text{delay-2b}} = 99571.35 \text{ ns} \quad , \quad (12)$$

因此求得光纤第一个断点距离为 L_1 :

$$L_1 = T_1 \cdot c_1/2 = \{ [(t_{\text{delay-1b}} - t_{\text{delay-2b}})/\Delta t_1 \cdot 1/f_2] + t_{\text{delay-2b}} \} \cdot c_1/2 = 9.957 \text{ km} \quad . \quad (13)$$

同理:

$$N_2 = (t_{\text{delay-1a}} - t_{\text{delay-2a}})/\Delta t_1 = 1192 \quad , \quad (14)$$

因此可以知道脉冲光往返的时间为 T_2 :

$$T_2 = N_2 \cdot 1/f_2 + t_{\text{delay-2a}} = 119223.2 \text{ ns} \quad , \quad (15)$$

因此求得光纤第一个断点距离为 L_2 :

$$L_2 = T_2 \cdot c_1/2 = \{ [(t_{\text{delay-1a}} - t_{\text{delay-2a}})/\Delta t_1 \cdot 1/f_2] + t_{\text{delay-2a}} \} \cdot c_1/2 = 11.922 \text{ km} \quad . \quad (16)$$

第二组实验采用重复频率为 $f_3 = 4.999$ MHz,

$f_4 = 5.000$ MHz, 同理可以得到 f_3 下两个延时点分别为 $t_{\text{delay-1a}} = 76.38$ ns, $t_{\text{delay-1b}} = 40.96$ ns 以及 f_4 下 $t_{\text{delay-2a}} = 52.48$ ns, $t_{\text{delay-2b}} = 21.04$ ns 同理可得:

$$L_1 = 11.945 \text{ km} \quad , \quad (17)$$

$$L_2 = 9.942 \text{ km} \quad . \quad (18)$$

第三组实验采用重复频率为 $f_5 = 1.999$ MHz, $f_6 = 2.000$ MHz. 同理可以得到 f_5 下两个延时点分别为 $t_{\text{delay-1a}} = 247.32$ ns, $t_{\text{delay-1b}} = 455.53$ ns 以及 f_6 下 $t_{\text{delay-2a}} = 187.39$ ns, $t_{\text{delay-2b}} = 405.90$ ns 同理可得:

$$L_1 = 11.968 \text{ km} \quad , \quad (19)$$

$$L_2 = 9.940 \text{ km} \quad . \quad (20)$$

第四组实验采用重复频率为 $f_7 = 0.999$ MHz, $f_8 = 1.000$ MHz. 同理可以得到 f_7 下两个延时点分别为 $t_{\text{delay-1a}} = 741.20$ ns, $t_{\text{delay-1b}} = 319.80$ ns 以及 f_8 下 $t_{\text{delay-2a}} = 621.59$ ns, $t_{\text{delay-2b}} = 220.40$ ns 同理可得:

$$L_1 = 11.962 \text{ km} \quad , \quad (21)$$

$$L_2 = 9.922 \text{ km} \quad . \quad (22)$$

数据整理见表 1.

表 1 实验结果数据

Table 1 The results of the experimental data

Physical length /km	Repetition rate /MHz	Δt /ns	Measuring length /km	Δ length /m
9.928	10.000&9.999	0.01	9.957	29
	5.000&4.999	0.04	9.942	14
	2.000&1.999	0.25	9.940	12
	1.000&0.999	1.001	9.922	-6
11.955	10.000&9.999	0.01	11.922	-33
	5.000&4.999	0.04	11.945	-10
	2.000&1.999	0.25	11.968	13
	1.000&0.999	1.001	11.962	7

由表 1 可知, 测量数据与实际距离存在一定的误差, 其中主要误差来源是文中使用该方法带来的误差. 另一误差来源是电路内部时钟抖动造成的影响, 当本文实验中采用的两列重复频率越小时, Δt 越大, 测量的误差越小, 但带来的影响是数据采集速度的下降. SPD 内部时间抖动假设是一定的, 那么当两列重复频率下降时, 相应的 Δt 变大, 时间抖动所占 Δt 的比例越小, 带来的时间误差越小, 从而精度相应提高.

4.2 实验数据图

其中通过编写的 LABVIEW 程序对 SPD 进行数据采集得到数据整理如下图:

脉冲光经过光纤断点端面为另一传输介质时, 菲涅尔反射会产生较强的回返光, 大部分光往前继

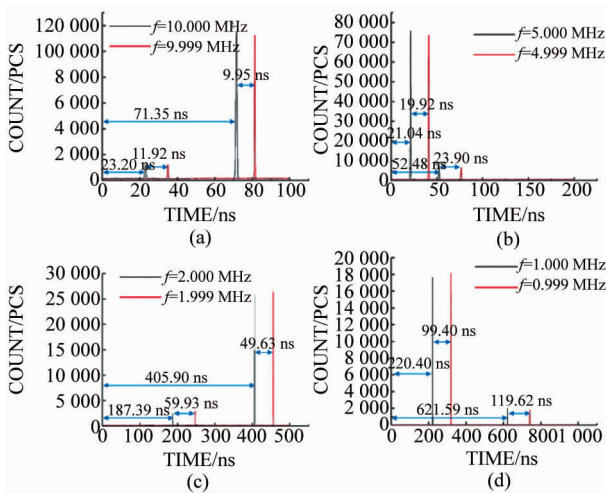


图3 相同光纤长度下不同频率的SPD扫描计数值(a-d)SPD在一个周期的扫描计数值(a)1.000 MHz & 0.999 MHz, (b)2.000 MHz & 1.999 MHz, (c)5.000 MHz & 4.999 MHz, (d)10.000 MHz & 9.999 MHz

Fig. 3 The SPD's counting at different frequency with the same fiber length (a-d)The SPD's counting in one cycle

续传输,小部分光相当于经过幅值衰减后往回继续传输.当断点处端面介质为光纤-空气,回返光能量约为出射时能量的4%,即返回的损耗为-14 dB.

SPD计数值为一秒时间内的累计计数值.本底噪声计数主要为光纤中非断点处瑞利散射的回返光子,距离相同频率越高门脉冲越多因此本底噪声计数越大.

通过以上的具体实验验证,可以得到本文的新方案是实际有效的,相比于传统方法,通过采用高频脉冲光去探测光纤断点处的信息,所需扫描的时间更少,从而提高扫描速度,同时也会导致测量精度下降.通过降低脉冲重复频率,可以一定程度上提高精度,但也同时导致扫描时间增长.

5 采集数据速率对比

5.1 传统 OTDR 等效扫描时间

传统采用门控SPD的方法对于12.000 km光纤测量断点信息最高采用8.300 kHz的脉冲光,通过逐步扫描延时值信息来获取断点的时间位置.因此所需扫描时间最少为120.00 μ s.

5.2 双脉冲列 OTDR 等效扫描时间

本文中的新方案对于12.000 km的光纤采用10.000 MHz和9.999 MHz的脉冲光,而10.000 MHz对应的周期为100.00 ns,9.999 MHz的周期为100.01 ns,同理可知需要扫描的时间为200.01 ns.采用5.000 MHz和4.999 MHz的脉冲光,同理可知

需要扫描的时间为400.04 ns.采用2.000 MHz & 1.999 MHz的脉冲光,同理可知需要扫描的时间为1.000 25 μ s.采用1.000 MHz和0.999 MHz的脉冲光,同理可知需要扫描的时间为2.001 μ s.

对比两个方法可知,本文方案上当采用1.000 MHz和0.999 MHz的脉冲光扫描速率上对于传统方案,在获取有效数据的时间上快于传统测量方法60倍的数量级上,同时精度能够达到米级.

6 结论

传统基于门控SPD的OTDR最高采用8.3 kHz重复频率的信号光来测量12.000 km光纤的断点信息.当双重复频率选为 $f_a = 1.000$ MHz, $f_b = 0.999$ MHz时,在12.000 km光纤断点的测量中,本文的进行测试的优点有:1.扫描时间快于传统60倍,2.测量量程可达99.900 km,3.精度达到米级.

本文针对传统基于线性光电探测器的OTDR测距过程中耗时过长且测距量程过短,建立了一个基于InGaAs/InP雪崩光电二极管单光子探测器的双重复频率光时域反射仪.SPD和LD采用高重复频率时钟信号,脉冲间隔远小于光脉冲走完被测路径的时间的特点,所以在相同的采样时间内,该方法能比传统方法采样更多的计数样本,大大提升信噪比的同时减少了测量时间,并且通过改变两组动态脉冲光的重复频率,能够快速改变测量量程,并改变测量精度.

References

- [1] Derickson D. *Fiber Optic-Test and Measurement* [M]. 1sted., Prentice Hall, 1998.
- [2] Barnoski M K, et al, Optical time domain reflectometer[J]. *OSA-Applied Optics*, 1977, **16**, 2375 - 2379.
- [3] Eraerds P, Legre M, Zhang J, et al. Photon counting OTDR: advantages and limitations [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(6):952 - 964.
- [4] LI Yong-Fu, LIU Jun-Liang, WANG Qing-Pu, et al. Avalanche characterization of high speed single-photon detector based on InGaAs/InP APD[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李永富,刘俊良,王青圃,等.基于InGaAs/InP雪崩光电二极管的高速单光子探测器雪崩特性研究. *红外与毫米波学报*). 2015, **34**(4):427 - 431.
- [5] Scholder F, Gautier J D, Wegmuller M, et al. Long-distance OTDR using photon counting and large detection gates at telecom wavelength[J]. *Opt. Commun*, 2002, **213**, 57 - 61.
- [6] Fujiwara M, Miki S, Yamashita T, et al. Photon level rostalk between parallel fibers installed in urban area[J]. *Opt. Exp.*, 2010, **18**(21):22199 - 22207.

(下转第738页)