

基于光脉冲延迟法的光纤长度测量方法

郑祥亮 孙权社 朱兴邦

(中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要 提出了一种基于光脉冲延迟的光纤长度测量新方法。该方法中,光源被调制后经光纤耦合器分成两路,分别经过被测光纤和参考光纤,调节调制信号的频率使两路信号重合,通过调制频率分析计算出被测光纤的光纤长度。该技术与传统的光时域反射计(OTDR)相比,测量精度由米级提高到厘米级;与光频域反射计(OFDR)、光相干域反射测量仪(OCDR)及基于频移不对称 Sagnac 干涉仪相比,其对光源的稳定性和相干性要求较低,系统易于实现。实验结果表明,基于光脉冲延迟的光纤长度测量方法不仅测量动态范围大而且测量精度也很高,850 nm 波段和 1300 nm 波段测得的多模光纤最大长度分别为 10 km 和 20 km,测量精度可以达到厘米级。

关键词 光纤光学;时间延迟;光纤长度;调制频率

中图分类号 TN247 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201434.s206003

Method of Measuring Fiber Length Based on Optical Pulse Delaying

Zheng Xiangliang Sun Quanshe Zhu Xingbang

(The 41st Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract Using the method of optical pulse delaying, a novel fiber length measurement method is proposed. The method is that the modulated light source is divided into two parts by the optical fiber coupler and goes through the measured optical fiber and the reference optical fiber. The frequency of modulation signal is regulated so that the two signals can coincide, and then the measured optical fiber length is calculated by analyzing the modulation frequency. Compared with the traditional optical time domain reflectometer, the measurement precision is improved from the meter scale to the centimeter scale. Compared with the optical frequency domain reflectometer, optical coherence domain reflectometer and frequency-shifted asymmetrical Sagnac interferometer, the requirement of stability and coherence properties of light source is lower and the system is more easier to be achieved. The experimental result indicates that fiber length measurement method based on optical pulse delaying has a large dynamic range and a high precision. The maximal multimode optical fiber lengths measured by this method at 850 nm and 1300 nm are 10 km and 20 km, respectively, and the measurement accuracy can reach centimeter magnitude.

Key words fiber optics; time delay; optical fiber length; modulation frequency

OCIS codes 060.2300; 060.2310; 060.2330; 060.2340

1 引 言

光纤在信号传输过程中具有高抗干扰能力、高传输速率以及极低的传输误码率等优点,因此光纤成为现代通信网络传输信息的最佳媒质,光纤通信也成为宽带通信系统的最佳技术选择,在信息高速公路建设中扮演着至关重要的角色^[1-2]。在各类光纤实验以及工程中,经常会涉及到光纤长度的测量。可以说,准确的光纤长度测量在几乎所有的光纤通信以及光纤传感系统中都有着极为重要的作用^[3]。

目前的光纤长度测量仪器主要有低相干光反射测量仪(OLCR)、光时域反射计(OTDR)、光频域反射计(OFDR)、光相干域反射测量仪(OCDR)、基于频移不对称 Sagnac 干涉仪^[4-6]。上述几种测量光纤长度的仪

收稿日期: 2014-05-20; **收到修改稿日期:** 2014-07-14

基金项目: 国防军工技术基础科研项目(J312013A002)

作者简介: 郑祥亮(1987—),男,硕士,助理工程师,主要从事光通信与光显示等方面的研究。

E-mail: zxlhaoyun-619@163.com

器存在如下缺陷:低相干光反射测量仪^[7-8]的测量精度虽然很高,可以达到 10 μm ,但是该测量仪测量动态范围小,只有几厘米;光时域反射计的测量动态范围虽然很大,但是测量精度受到限制,常用光时域反射计精度只能达到 1 m 左右^[9-11];光频域反射计对光源的要求很苛刻,需要窄线宽的单色光源,并且需要外加十几吉赫兹的高频调制信号,导致成本过高^[12];光相干域反射测量仪的测量精度可以达到 10 μm ,并且测量动态范围可以达到几千米,但是它需要光源具有良好的稳定性和相干性^[13];基于频移不对称 Sagnac 干涉仪中干涉信号的极小值点的频率不易读取^[14-15]。最近几年报道国内外光纤长度测量方法主要有基于锁模光纤激光器法^[16]、基于窄带光纤激光器的光频域反射计法^[12]、基于全光纤干涉法^[17]、基于飞秒激光器法^[18]、基于相位调制光链路^[4]等测量方法。

本文提出一种基于光脉冲时间延迟方法的多模光纤长度测量方法,该方法测量多模光纤的动态范围在 850 nm 和 1300 nm 波段分别可以达到 10 km 和 20 km,测量精度可以达到厘米级,可以满足计量工作中对光纤长度的定标要求。而且该技术原理及结构都很简单,是一种很简便而实用的光纤长度测量方法。

2 原 理

光脉冲通过长度为 L 、平均群折射率为 n 的光纤的传输时延 Δt 为

$$\Delta t = \frac{n \cdot L}{c}, \quad (1)$$

式中的 c 为光在真空中的传播速度,取值为 299792458 m/s。

在接入被测光纤的情况下,调节波形发生器的频率使参考光路的第 $N+1$ 个调制脉冲信号与被测光路的第 N 个调制脉冲信号重合,记录此时的频率 ν_1 ;去掉被测光纤的情况下,再调节波形发生器的频率使参考光路的第 $N+1$ 个调制脉冲信号与被测光路的第 N 个调制脉冲信号重合,记录此时的频率 ν_2 ;因此经过被测光纤的时间差为

$$\Delta t = \frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_2}, \quad (2)$$

通过(1)和(2)式就可以得到被测光纤的长度值

$$L = \frac{c}{n} \left(\frac{1}{\nu_1} - \frac{1}{\nu_2} \right). \quad (3)$$

在示波器上被测光路的第 N 个脉冲会介于参考光路的第 N 个脉冲和第 $N+1$ 个脉冲之间,理论计算得到 20 km 的最大测量光纤长度所需的最小重合频率为 10 kHz。因此通过软件设置起始频率为 1 kHz,频率步进为 0.01 Hz,然后缓慢增大频率值可以缓慢实现两路信号的首次重合。再通过软件读取频率计上接入被测光纤与去掉被测光纤两种情况下的两个重合频率值就可以准确计算出被测光纤的长度值。

3 实验装置

实验采用图 1 所示的系统结构图对基于光脉冲延迟法的光纤长度测量技术进行验证。

装置主要由激光二极管(LD)光源、波形发生器、频率计、光电探测器(O/E)、数字存储示波器、多模光衰减器、多模光纤耦合器、多模光纤及多模光纤跳线组成。实验中 850 nm 和 1300 nm 双波长光源分别采用垂直共振腔表面发射激光(VCSEL)和法布里-珀罗(FP)激光器,为系统提供调制光信号;波形发生器可以输出 0~80 MHz 频率范围的任意波形从而为 LD 光源提供频率、脉宽可调的调制信号;频率计测量频率范围为 1 mHz~350 MHz,频率分辨率可以达到 12 bit/s,主要用来实时监测和精确读取波形发生器输出调制信号的频率值;光电探测器采用 Newport 公司研发的带宽为 125 MHz 的光电探测器,主要是用来将两路光信号转变为电信号;所用数字存储示波器是带宽可以达到 3.5 GHz 的 4 通道示波器,主要是对光电探测器转变来的两路电信号进行观测;光衰减器采用衰减范围可达 0 dB~60 dB,精度可达 ± 0.2 dB 的多模光衰减器,主要是调节光路功率值,从而使进入两个探测器的光功率在探测器的最佳响应范围内;多模光纤耦合器和多模光纤跳线主要是起到连接光路的作用。

波形发生器产生的脉冲信号对光源进行内调制,调制后的光信号经过多模光衰减器,再经过分光比例为

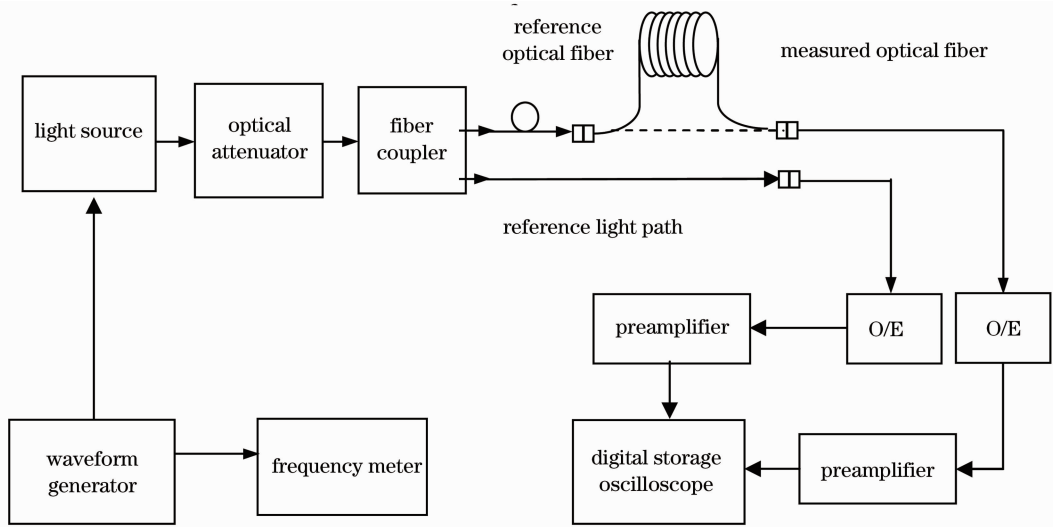


图 1 光纤长度测量结构图

Fig.1 Schematic diagram of the fiber length measurement

10:90 的光纤耦合器分成两路,其中一路光作为参考光路直接进入探测器,另一路作为测试光路经过待测光纤后再进入另一个探测器。由两个探测器得到的电信号接入示波器,从示波器的屏幕上判断两路信号的重合时间,并通过频率计数器将波形发生器此时的调制信号频率记录下来,从而得到被测光纤的长度值。

4 实验结果及数据分析

4.1 参考光纤对长度测量结果的影响

为了比较在被测光路中加入参考光纤和不加入参考光纤对光纤长度测量的影响,实验选择不加参考光纤的情况下对光纤长度进行测量,此时设置调制信号脉冲宽度为 100 ns。在含有被测光纤的情况下通过调节波形发生器的频率使参考光路的第 $N+1$ 个调制脉冲信号与被测光路的第 N 个调制脉冲信号重合,记录此时的调制脉冲信号频率 ν_1 ;当去掉被测光纤时,由于参考光路与被测光路的路径相同,因此此时两路信号产生的时间差很小,可以忽略不计。表 1 给出了在未接参考光纤情况下不同调制频率下的光纤长度测量值。

表 1 未接参考光纤时光纤长度值与频率的关系

Table 1 Relationship between the frequency and optical fiber length under unconnecting reference optical fiber

Modulation frequency /kHz	Time delay of fiber / μ s	Fiber length /m
45.660	21.9010	4497.094

实验选择在含有参考光纤的情况下对光纤长度进行测量,并设置调制信号脉冲宽度为 100 ns。在含有被测光纤的情况下通过调节波形发生器的频率使参考光路的第 $N+1$ 个调制脉冲信号与被测光路的第 N 个调制脉冲信号重合,记录此时的调制脉冲信号频率 ν_1 ;当去掉被测光纤时,通过调节波形发生器的频率使参考光路的第 $N+1$ 个调制脉冲信号与被测光路的第 N 个调制脉冲信号重合,记录此时的调制脉冲信号频率 ν_2 。表 2 给出了在含有参考光纤情况下不同调制频率下的光纤长度测量值。

表 2 连接参考光纤时光纤长度值与频率的关系

Table 2 Relationship between the frequency and optical fiber length under connecting reference optical fiber

Modulation frequency /kHz	Time delay of fiber / μ s	Fiber length /m
45.661	21.9005	4496.995

从表 1 和表 2 中可以看出,在加参考光纤与不加参考光纤的情况下得到的被测光纤长度值是不同的,该多模光纤是经过英国国家实验室(NPL)标定的,在 850 nm 波长点的长度标准值为 4497.1 m(折射率设置为 1.46)。实验结果表明在不加参考光纤的情况下所得到的光纤长度测量值不确定度更小。分析原因是读取一个重合频率值产生的不确定度要比读取两个重合频率值产生的不确定度要小,这样就提高了光纤长度测

量的准确度。

4.2 不同脉冲宽度对光纤长度测量的影响

为了比较不同脉冲宽度对光纤长度测量的影响,实验选择在不加参考光纤的情况下选择不同的脉冲信号宽度,再调节调制信号频率使参考光路的第 $N+1$ 个调制脉冲信号与被测光路的第 N 个调制脉冲信号重合,记录下此时的调制信号频率值。由于波形发生器产生的脉冲信号,在频率为 45 kHz 情况下脉宽最大为 4 μs 。表 3 给出了在不加参考光纤的情况下在不同脉冲宽度下测得的光纤长度值。

表 3 未接参考光纤时被测光纤长度值与脉宽的关系

Table 3 Relationship between the width of pulse and the values of the measured optical fiber length under unconnecting reference optical fiber

Number of measurements	Width of pulse /ns	Modulation frequency /kHz	Time delay of fiber / μs	Measured value of fiber length /m
1	20	45.659997	21.90101	4497.094
2	20	45.659977	21.90102	4497.096
3	20	45.660018	21.90100	4497.092
1	50	45.660018	21.90100	4497.093
2	50	45.659997	21.90101	4497.094
3	50	45.660018	21.90100	4497.092
1	100	45.659977	21.90102	4497.096
2	100	45.659997	21.90101	4497.094
3	100	45.659957	21.90103	4497.098
1	200	45.655992	21.90293	4497.488
2	200	45.656048	21.90290	4497.482
3	200	45.656048	21.90290	4497.483
1	300	45.653003	21.90436	4497.783
2	300	45.652972	21.90438	4497.786
3	300	45.653003	21.90436	4497.782
1	400	45.653003	21.90436	4497.783
2	400	45.652972	21.90438	4497.786
3	400	45.652952	21.90439	4497.788
1	500	45.653003	21.90436	4497.783
2	500	45.653023	21.90435	4497.781
3	500	45.652962	21.90438	4497.787
1	1000	45.652018	21.90484	4497.880
2	1000	45.651978	21.90486	4497.884
3	1000	45.652008	21.90484	4497.881
1	2000	45.650993	21.90533	4497.981
2	2000	45.651024	21.90531	4497.978
3	2000	45.650963	21.90534	4497.984
1	4000	45.649988	21.90581	4498.080
2	4000	45.650029	21.90579	4498.076
3	4000	45.650052	21.90578	4498.073

从表 3 可以看出,脉冲宽度在 20~100 ns 范围内时得到的被测光纤长度基本相同,而在 100~4000 ns 范围内得到的光纤长度随着光脉冲宽度的增大而变大。但是在相同的脉冲宽度下进行的 3 次测量所得到的结果偏差不大于 0.01 m。实验分析:实验中脉冲宽度越大,脉冲信号的上升沿和下降沿时间也越大,两路信号在示波器上读取重合时间的不确定度也越大,而单个脉冲宽度所对应的光纤长度值为 $v_g \tau$,其中 v_g 为光在光纤中的传播速度, τ 为注入待测光纤后的光脉冲宽度。两路信号的重合是通过在存储示波器上读取的,因此光源的调制信号脉冲宽度对重合信号的读取会产生影响。

除此之外,波形发生器与示波器的信号抖动也是影响光纤长度测量准确度的一个重要因素。该测量方

法中所用的波形发生器的抖动为 30 ps,而所用示波器的抖动为 1.5 ps,因此理论上由于波形发生器和示波器而引起的长度测量不确定度为 0.0065 m。

4.3 不同长度的光纤对长度测量的影响

为了验证在相同测量精度的情况下该方法的测量动态范围,实验采用相同脉冲宽度(设置为 100 ns)对不同长度的光纤进行测量,表 4 和表 5 分别给出了在 850 nm 和 1300 nm 波段处几盘不同长度多模光纤的测量结果。

表 4 在 850 nm 波段不同光纤在脉冲宽度相同情况下的测量结果

Table 4 Measured results of different optical fibers under the same width of pulse at 850 nm waveband

Number of fiber	Width of pulse /ns	Modulation frequency /kHz	Time delay of fiber / μ s	Measured value of fiber length /m	Measured value of fiber length by OTDR /m
1	100	95.486	10.4727	2151.925	2152.0
2	100	45.660	21.9010	4497.094	4497.1
3	100	32.912	30.3841	6243.308	6243.3
4	100	24.588	40.6702	8356.890	8356.9
5	100	21.629	46.2342	9500.178	9500.1
6	100	17.766	56.2873	11557.882	11556.5

表 5 在 1300 nm 波段不同光纤在脉冲宽度相同情况下的测量结果

Table 5 Measured results of different optical fibers under the same width of pulse at 1300 nm waveband

Number of fiber	Width of pulse /ns	Modulation frequency /kHz	Time delay of fiber / μ s	Measured value of fiber length /m	Measured value of fiber length by OTDR /m
1	100	95.523	10.4687	2149.615	2149.6
1	100	45.819	21.8250	4481.487	4481.5
3	100	32.922	30.3748	6237.079	6237.1
4	100	24.596	40.6570	8348.399	8348.4
5	100	21.636	46.2193	9490.546	9490.6
6	100	17.784	56.2303	11546.178	11546.2
7	100	12.639	79.1202	16246.534	16246.7
8	100	9.7519	102.5441	21056.129	21056.3
9	100	7.94881	125.8050	25832.459	25832.8
10	100	6.30903	158.50297	32546.572	32547.1

由于所用多模光源的功率为 6 dBm,经过 10:90 的光纤耦合器后进入被测光纤的功率值为 5.56 dBm,探测器能够响应的最小功率值为-25 dBm,而经过多模 OTDR 测得的多模光纤在 850 nm 和 1300 nm 波段的损耗分别为 2.133 dB/km 和 0.407 dB/km,因此理论上该方法能测得的多模光纤的最大距离分别为 14.327 km 和 75.086 km。而从表 4 和表 5 实验数据中可以看出在保证测量精度不变的情况下,该测量方法在 850 nm 和 1300 nm 波段处所能测得的最大距离为 10 km 和 20 km,与理论上的最大测量距离有一定差异。结合实验现象和数据分析原因,主要是在多模光纤在 850 nm 波段传输损耗比较大,再加上光路连接带来的损耗,导致到达探测器的光功率太小,使得测试光路的信号质量很差,从而无法准确判别两路信号的重合点,在 1300 nm 波段尽管经过 20 km 多模光纤后被测光路的信号质量很好,但是由于经过 20 km 多模光纤传输后调制信号产生了脉冲展宽,从而影响了系统的测量精度。因此该方法在 850 nm 和 1300 nm 波段测量多模光纤的最大距离分别为 10 km 和 20 km。

综上所述,该方法测量多模光纤长度的限制因素主要包括光源的输出功率、探测器响应灵敏度、示波器的输入灵敏度、以及多模光纤的衰减和色散。

4.4 连接被测光纤顺序对光纤长度测量的影响

为验证接入被测光纤的顺序对光纤长度测量的影响,实验采用在加上参考光纤的情况下对被测光纤分两种方法进行测量。其中一种方法是按照前面介绍的步骤即先测量含有被测光纤的两路信号重合频率,再去掉被测光纤后测量两路信号的重合频率;另一种方法是先测量未加被测光纤时两路信号的重合频率,再测量加上被测光纤后两路信号的重合频率。实验中采用方法一得到了表 2 中的测量结果,而采用后一种方法

无法得到准确的重合频率值。

综上所述:当接入被测光纤时的信号重合频率低,而未接入被测光纤时的信号重合频率高;从低频率到高频率可以通过缓慢调节波形发生器,在示波器上准确得到两路信号的重合频率点。而从高频率到低频率时,两路信号已经重合了若干次,无法得到准确的重合频率点。

5 结 论

提出了一种基于光脉冲延迟的多模光纤长度方法,通过对光源的内调制消除了偏振态对光纤测量过程中的影响,通过示波器的图形分析和频率计的实时监测来确定经过被测光纤的精确时间。此方法还研究了调制信号脉宽、参考光纤及被测光纤接入顺序对光纤长度测量的影响以及光纤的测量动态范围。实验结果表明,在相同测量条件下、对 NPL 标定的多模光纤进行测量的结果与 NPL 标定值仅相差 0.01 m,测量精度可以达到厘米级。

参 考 文 献

- 1 Li Xuejin. Research on Microbending Optical Fiber Sensors and Reflective Intensity-Modulated Optical Fiber Sensors [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 1-5.
李学金. 光纤微弯传感器及反射式强度调制光纤传感器研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. 1-5.
- 2 Huang Shaomei, Duan Fajie, Ye Shenghua. System of measuring range multiplication in the distance measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(4): 514-517.
黄绍梅, 段发阶, 叶声华. 光纤干涉测距中的量程倍增系统[J]. 光学学报, 2000, 20(4): 514-517.
- 3 R Mavadaat. Ray analysis of microbend fiber sensor [J]. Sensors and Actuators, 1984, 6(4): 289-295.
- 4 Ye Quanyi, Yang Chun. Fiber length measurement system based on phase modulation optical link [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0505003
叶全意, 杨 春. 基于相位调制光链路的光纤长度测量系统[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0505003
- 5 A H Hartog, M P Gold. On the theory of backscattering in single-mode optical fiber [J]. J Lightwave Technol, 1984, LT-2: 76-82.
- 6 B J Soller, S T Kreger, D K Gifford, *et al.*. Optical frequency domain reflectometry for single and multimode avionics fiber-optics applications [C]. Avionics Fiber-Optics and Photonics, 2006, 38-39.
- 7 Yan Chengzhi, Li Shangyuan, Zheng Xiaoping, *et al.*. Time delay measurement of photonic crystal fiber by phase sensitive optical low-coherence reflectometry [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2010, 21(12): 1813-1816.
闫成至, 李尚远, 郑小平, 等. 低相干光干涉法测量光子晶体光纤延时[J]. 光电子·激光, 2010, 21(12): 1813-1816.
- 8 Li Zhaoying, Xie Fang, Ma Sen, *et al.*. Research on an optical-fiber low-coherence interferometric sensing system based on multiplexing interferometric technology [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0612004
李昭莹, 谢 芳, 马 森, 等. 基于复合干涉的光纤低相干干涉传感系统研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0612004.
- 9 Wang Xia, Ouyang Hong, Li Su. Coupling technology of LD and optical fiber [J]. Electro-Optic Technology Application, 2010, 25(3): 26-32.
王 侠, 欧阳宏, 李 苏. 半导体激光二极管的光纤耦合技术[J]. 光电技术应用, 2010, 25(3): 26-32.
- 10 F Scholder, M Wegmuller, N Gisin. Long-distance OTDR using photon counting and large detection gates at telecom wavelength [J]. Opt Commun, 2002, 213(1-3): 57-61.
- 11 Brian Walker. Calibration and use of optical time domain reflectometers (OTDR) [OL]. [http://www.npl.co.uk/publications/calibration-and-use-of-optical-time-domain-reflectometers-\(otdr\)](http://www.npl.co.uk/publications/calibration-and-use-of-optical-time-domain-reflectometers-(otdr)). [2014-10-10].
- 12 Gu Yihong, Dai Jizhi, Dai Zhiyong. Development and application of optical frequency domain reflectometer with high resolution [J]. Infrared, 2009, 30(4): 37-40.
顾一弘, 戴基智, 代志勇. 高分辨率光频域反射计的发展和应[J]. 红外, 2009, 30(4): 37-40.
- 13 U Globitza, E Brinkmeyer. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated optical waveguides [J]. J Lightwave Technol, 1993, 11(8): 1377-1384.
- 14 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin. Pipeline leakage detection and location technology based on Sagnac interferometer [J]. Optical Technique, 2007, 33(5): 651-653.
杭利军, 何存富, 吴 斌. 基于 Sagnac 光纤干涉仪的管道泄漏检测和定位技术[J]. 光学技术, 2007, 33(5): 651-653.
- 15 Zhang Ailing, Wu Xiaojun. Negative coefficient band-pass microwave photonic filter with improved mainlobe-to-sidelobe suppression ratio by Sagnac interferometer [J]. Optoelectronics Letters, 2013, 9(2): 108-111.
- 16 Hu Yanli. Research on Measurement of Fiber Length Based on Mode-Locked Fiber Laser [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007. 78-85.
胡艳丽. 基于锁模光纤激光器的光纤长度测量方法的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. 78-85.
- 17 Jia Bo, Qian Songrong, Hua Zhongyi, *et al.*. Optic fiber length measurement using all-fiber interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(1): 73-75.
贾 波, 钱松荣, 华中一, 等. 全光纤干涉系统用于光纤长度测量实验 [J]. 中国激光, 2002, 29(1): 73-75.
- 18 Jia Yudong, Zhang Xiaoqing, Lü Yong, *et al.*. Fiber length measurement based on femtosecond fiber lasers [J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2013, 28(2): 31-33.
贾豫东, 张晓青, 吕 勇, 等. 基于飞秒激光的光纤长度测试方法[J]. 北京信息科技大学学报, 2013, 28(2): 31-33.