

doi: 10.3788/gzxb20164507.0706004

基于调制相移法的高准确度光纤长度测量技术

朱兴邦, 孙权社, 郑祥亮, 韩忠, 刘志明

(中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 26555)

摘要: 为了克服传统调制相移法测量频率范围窄、测量准确度低的缺点, 提出一种基于调制相移法的单模光纤长度精确测量技术. 利用一体化矢量网络分析仪的高速调制信号同步技术及高频信号相位差测量技术, 设计并研制了单模光纤长度测量装置. 基于矢量网络分析仪自带的 VBA 插件编写了自动控制及数据处理软件, 给出了相位变化量自动处理方法. 利用研制的装置分别测量了长度为 2 km、40 km 和 150 km 的单模光纤在不同工作波长点的长度值, 实验结果表明, 2 km 的光纤长度测量值实验标准偏差优于 0.2 mm, 150 km 的光纤长度测量值实验标准偏差接近 0.01 m. 该装置可对 1 310 nm、1 490 nm 以及 1 550 nm 波长的光纤距离进行精确测量, 为光纤长度的高准确度测量提供了一种新的技术途径.

关键词: 标准光纤; 长度测量; 调制相移; 相位差; 矢量网络分析

中图分类号: TN247; TN923.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0706004-5

High Precision Fiber Length Measurement Technique Based on Modulation Phase Shift Method

ZHU Xing-bang, SUN Quan-she, ZHENG Xiang-liang, HAN Zhong, LIU Zhi-ming
(The 41st Research Institute of CETC, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: In order to overcome the defect of narrow frequency band and low accuracy exist in the traditional modulation phase shift method, a single mode fiber length measurement technique based on modulation phase shift method was proposed. The single mode fiber length measuring device was designed and developed using the high-speed modulation signal synchronization and high-frequency signal phase difference measuring technology in the integrated vector network analyzer. An auto-control and data processing software based on VBA plug-in of vector network analyzer was complicated, then an automatic processing method of phase variation was illustrated. Single mode fibers with the length of 2 km, 40 km and 150 km weretested using the developed device at different wavelengths, the results show that the standard deviation of 2 km fiber length measuring value is better than 0.2 mm, and the standard deviation of 150 km fiber length measuring value is close to 0.01 m. The fiber distance can be precisely measured by this device at 1 310 nm, 1 490 nm and 1 550 nm. The proposed device can be expected to provide a new technical approach for precisely measuring of fiber length.

Key words: Single mode fiber; Length measuring; Modulation phase shift; Phase difference; Vector network analyzing

OCIS Codes: 060.0060; 230.0230; 250.0250

0 引言

光纤长度的精确测量对光纤光缆的研制、生产以及维护有非常重要的意义. 目前工程上测量光纤长度比较成熟的方法有光时域反射计 (Optical Time

Domain Reflectometer, OTDR) 法和光频域反射计 (Optical Frequency Domain Reflectometer, OFDR) 法. 高性能的 OTDR 测量能力超过 150 km^[1], 距离偏差 1 m 左右; OFDR 测量准确度优于 1 mm^[2], 但是测量范围有限. 相干光时域反射计 (Coherent Optical Time

基金项目: 国防计量技术基础科研项目 (No. J312013A002) 资助

第一作者: 朱兴邦 (1982-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光电子计量测试技术. Email: xingbang8789@126.com

通讯作者: 孙权社 (1970-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光电子计量测试技术. Email: nsqs@163.com

收稿日期: 2015-12-17; 录用日期: 2016-04-08

<http://www.photon.ac.cn>

Domain Reflectometer, COTDR)克服了 OTDR 测量范围小的缺点,但是准确度相对较差^[3],而且成本昂贵,限制了该仪器的应用.飞行时间法^[4-5]在实验室中可以测量 40 km 长的光纤,传统的调制相移法^[6]由于对相位测量要求高而限制了其在光纤长度定标领域的应用.近年来有关光纤长度测量的研究有了很大进展,北航张春熹研究组利用飞秒脉冲法^[7]实现了 16 cm 的绝对测量,准确度达到 334 nm;韩国 J. LEE 等利用锁相技术控制飞秒脉冲的方法^[8-9],在 0.7 km 的范围内实现了 117 nm 分辨力的长度测量.这两种基于脉冲法的技术使测量准确度和分辨力得到了极大的提高,但是测量距离却非常小.一些学者基于干涉提出了全光纤干涉法^[10-11]、相位调制干涉法^[12]等,但它们测量范围小,且对实验室环境要求比较高,不利于推广应用.太原理工大学的王云才等采用混沌激光相关法^[13-14]测量光纤长度,通过 200 m 测长实验预测了该技术可以实现 25 km 的测量范围.然而这些方法在测量范围和测量准确度上不能兼顾,影响了其在大动态范围、高准确度光纤长度计量需求领域的推广应用.

本文提出了一种基于调制相移法精确测量光纤长度的方法,该方法用矢量网络仪代替传统方法中的相位计和调制源,用矢量网络仪内部的 VBA 插件编写了自动控制及数据处理软件,研制出光纤长度自动测量装置.由于可精确测量任意变化的相位,调制频率(Frequency Modulation, FM)得到提高.

1 装置组成及工作原理

单模光纤长度测量装置组成原理如图 1,主要由分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器、矢量网络分析仪、光电转换器(O/E),前置放大器、光分路器等组成.采用窄线宽的激光光源可以减少色散对光纤长度测量的影响,光源的颜色越纯,即光谱越窄,产生的色散效应就越小^[15-17].因此装置中光源线宽为 10 MHz,测量 150 km 的光纤长度时色散对测量结果的影响可以忽略不计.

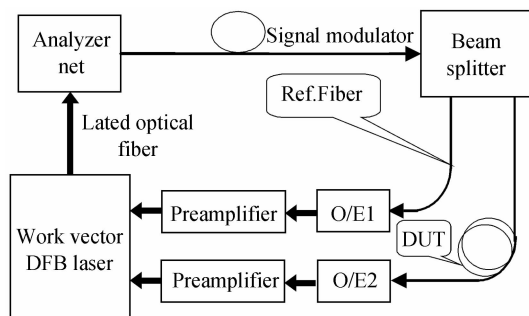


图 1 单模光纤长度测量装置原理

Fig. 1 Schematic diagram of measurement facility of the single mode fiber length

利用一体化矢网内部信号源提供调制信号,既能保证起始相位的同步性,又能提高光信号的调制频率,从而实现对短光纤长度的精确测量.调制光信号分为两路,一路做为参考信号经 O/E1 转换成电信号,并经前置放大器 1 放大后进入到矢量网络分析仪的一个端口;另一路光经过被测光纤(Device Under Test, DUT)传输后被 O/E2 转换成电信号进入矢量网络分析仪的另一个端口,这样矢量网络分析仪就可测出两端口信号的相位差,再根据相位差计算出被测光纤的长度.

设参考相位为 φ_{ref} ,光通过被测光纤后的相位为 φ_{sig} ,则被测光纤的长度为

$$L = \frac{(\varphi_{\text{sig}} - \varphi_{\text{ref}})c}{2\pi N f_{\text{max}}} \quad (1)$$

式中, φ_{ref} 为相位校准光纤或所用尾纤的参考相位,单位为 rad; φ_{sig} 为被测光纤加相位校准光纤或加所用尾纤的相位,单位为 rad; f_{max} 为最大调制频率,单位为 Hz; c 为光在真空中的速度,单位为 m/s; N 为待测光纤的折射率.

在没有加入被测光纤前,为了减小两路光因光程不一致而带来的影响,可对参考通道与测量通道相位变化量进行归一化,有 $\varphi_{\text{ref}} = 0$,当被测光纤接入到测量通道时,式(1)变为

$$L = \frac{c \cdot \varphi_{\text{sig}}}{2\pi N f_{\text{max}}} \quad (2)$$

由式(2)可知,在被测光纤折射率和光速已知的情况下,被测光纤的长度只与光信号在通过被测光纤后相位的变化量和光信号的调制频率有关.在光纤长度不变时,相位变化量随着调制频率的增大而增大,通常情况下这种变化远远大于 2π 周期.为了准确统计相位变化的周期数,必须从一个小的初始频率缓慢增加调制频率.

当光纤的长度为 L (单位:m),群折射率为 N 时,最大的初始频率 f_{start} (单位:Hz)为

$$f_{\text{start}} \leq \frac{c}{NL} \quad (3)$$

光纤长度 L 通常可用光时域反射计测量得到,无需知道精确的量值.在没有软件支持的情况下,这种方法会给实验带来很大困难,因此必须通过软件来快速得到实际的相位变化量.

2 相位变化量的测量方法

为了快速而精确地得到光信号经光纤传输后实际的相位变化量,利用矢量网络分析仪自带的 VBA 插件编写了自动控制及数据处理软件,并将软件应用程序写入矢量网络分析仪中,以提高相位测量的速度.软件流程如图 2.

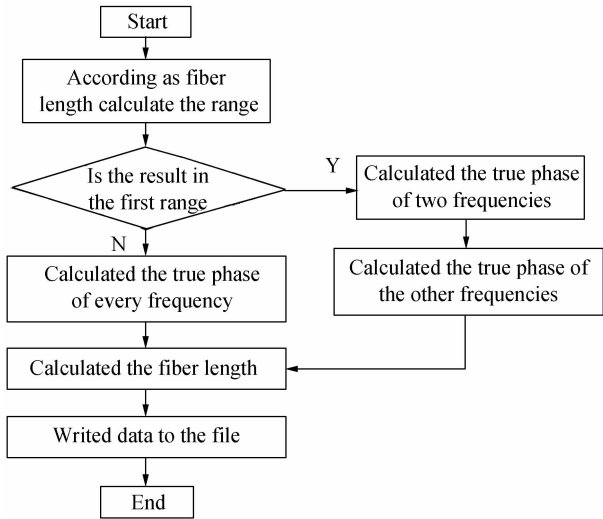


图2 软件流程

Fig. 2 Flow chart of test software

为了得到不同调制频率时光信号相位变化周期数,要求每两个相邻调制频率点的光信号相位差要小于 360° 。而矢量网络分析仪每次可测量的频率点数最多为1601个,一次可测量的频率区间和所能达到的频率都较小,无法得到光纤长度的精确值,因此通过软件自动控制分次测量多个连续的频率区间,从而实现在较大频率范围内对光纤长度的精确测量。每次测量的起始频率与截止频率的选择是精确测量相位变化量的关键。

为了确定调制频率区间的宽度,首先根据光纤的粗略长度计算出当两个通道的相位差变化 360° 时频率的变化量,然后用频率变化量乘以采样点数计算出每个频率区间的宽度。例如对于40 km的光纤,频率每增加5 kHz,两个通道的相位差增加 360° ,如果设定采样点数为801,则频率区间宽度为4 MHz。为了避免临界值可能引起的测量错误,实验中取频率区间宽度的0.8倍,即3.2 MHz。而矢量网最小测量频率为9 kHz,因此测量的频率区间可划分为9 kHz~3.2 MHz、3.2 MHz~6.4 MHz、6.4 MHz~9.6 MHz等。

根据编写的软件可计算出不同调制频率所对应的相位变化量,最后利用式(2)计算出被测光纤的长度。

3 实验与数据分析

通过对长度为2 km、40 km、150 km的光纤进行测量来验证装置的性能。

3.1 2 km 光纤长度测量

对2 km的光纤在不同调制频率区间的长度进行测量,光源波长为1 490 nm,测量起始频率为100 kHz,这是因为调制频率在100 kHz时,光信号通过2 km光纤传输后相位变化量接近 360° ,测量结果见表1。

从表1的实验数据可以看出,随着调制频率的增加,光信号通过固定长度的光纤传输后,相位的变化量

表1 2 km 光纤长度测量数据($\lambda=1\ 490\ \text{nm}$)Table 1 Test data of the 2 km fiber length ($\lambda=1\ 490\ \text{nm}$)

Frequency range/MHz	Phase Range/ $^\circ$	Average length/m	STDEVA /m
0.1~1	354~3 544	2 021.3	0.6
1~20	3 544~70 880	2 021.43	0.05
20~40	70 880~141 760	2 021.430	0.003
40~60	141 760~212 640	2 021.430	0.002
60~140	212 640~496 160	2 021.429 7	0.000 8
140~220	496 160~779 680	2 021.429 7	0.000 2
220~300	779 680~1 063 200	2 021.429 5	0.000 1
300~380	1 063 200~1 346 720	2 021.429 4	0.000 1
380~460	1 346 720~1 630 240	2 021.429 38	0.000 07
460~540	1 630 240~1 913 760	2 021.429 31	0.000 07
540~620	1 913 760~2 197 280	2 021.429 24	0.000 07
620~700	2 197 280~2 480 786	2 021.428 87	0.000 02
700~780	2 480 786~2 764 316	2 021.428 78	0.000 02
780~860	2 764 316~3 074 836	2 021.428 66	0.000 02
860~940	3 074 836~3 331 354	2 021.428 50	0.000 02
940~1 020	3 331 354~3 614 874	2 021.428 65	0.000 02

也逐渐增加,而且长度测量值实验标准偏差逐渐变小,从1 MHz调制频率时的0.6 m减小到700 MHz时的0.000 2 m。当调制频率增加到700 MHz后,调制频率对长度测量值实验标准偏差的影响越来越小。实验表明,增大调制频率,可以提高光纤长度测量准确度。根据表1的数据可得到如图3所示的调制频率与相位变化关系。

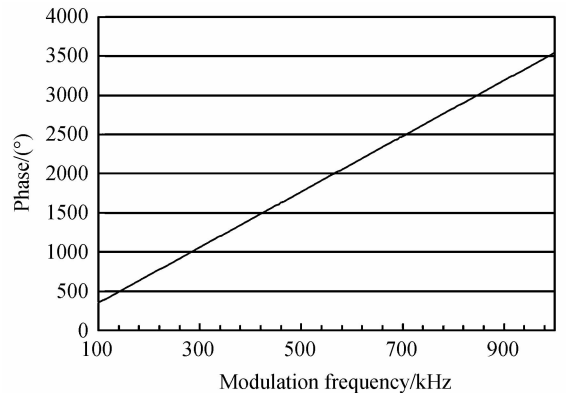


图3 相位变化与调制频率的关系曲线

Fig. 3 The relation of the phase change and frequency modulation

从图3可以看出,在其它条件不变的情况下,光信号通过被测光纤传输后相位的变化量与调制频率近似成正比。

装置选用矢量网络分析仪的相位分辨率不足 0.01° ,测量准确度为 0.5° ,而在较大频率范围内,实验标准偏差却小于0.000 2 m,显然在相位测量分辨率无法提高时,可通过提高调制频率来提高光纤长度的测量准确度,这是因为调制频率越高,调制的光信号通过固定距离光纤传输后的相位变化量就越大,相位相对

测量不确定度就越小.

3.2 40 km 光纤长度测量

利用本装置对 40 km 的光纤长度量值进行了实验测试,光波长为 1 310 nm,测量结果如图 4.

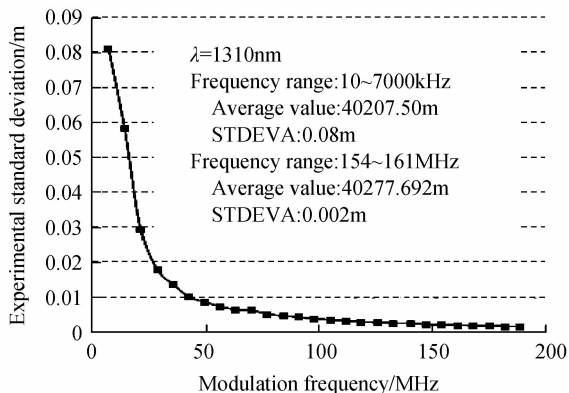


图 4 长度测量实验标准偏差与调制频率的关系
Fig. 4 The relation of experimental standard deviation of fiber length and modulation frequency

实验中,矢量网络分析仪在每个频率区间的采样点设置为 1 601. 由实验结果可以看出,在 10~7 000 kHz 频段,光纤长度测量平均值为 40 207. 50 m,实验标准偏差为 0. 08 m;在 154~161 MHz 频段,光纤长度测量平均值为 40 207. 692 m,实验标准偏差优于 0. 002 m,显然,随着调制频率的增加,实验标准偏差逐渐变小,测量准确度也逐渐降低. 当调制频率大于 160 MHz 后,实验标准偏差变化很小,进一步证明当调制频率超过一定范围,其对测量结果的影响会越来越小.

3.3 150 km 光纤长度测量

即使采用较低频率的调制光,光信号经长距离传输后相位也会发生较大变化. 而随着调制频率的缓慢变化,相位的变化量会显著增加. 图 5 和图 6 给出了光信号分别通过长度为 150 km 光纤和 1 km 光纤后调制

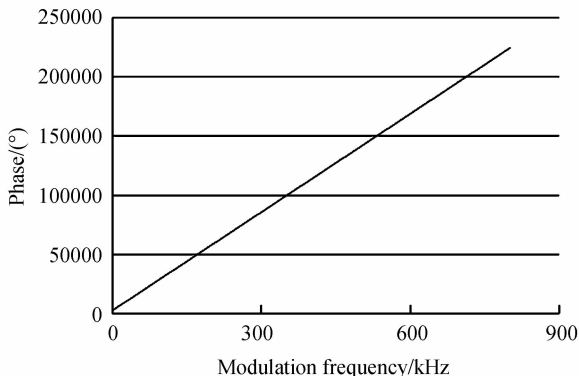


图 5 150 km 长光纤相位变化量与调制频率关系
Fig. 5 The relation of the phase change of the fiber with a length of 150 km and frequency modulation

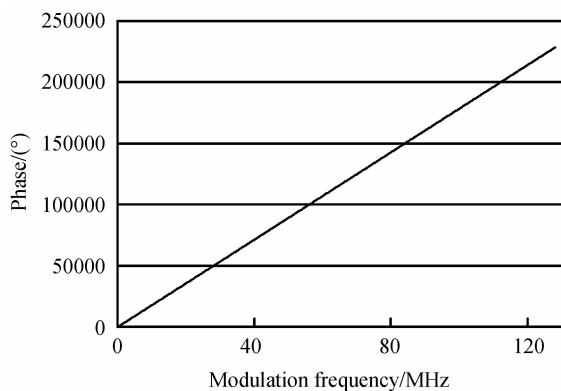


图 6 1 km 长光纤相位变化量与调制频率关系
Fig. 6 The relation of the phase change of the fiber with length of 1 km and frequency modulation

频率与相位的变化关系. 实验采用 1 550 nm 激光光源. 从图 5 和图 6 可以看出,相位发生相同的变化量,被测光纤越短,需要的调制频率越大,被测光纤越长,需要的调制频率越小. 例如当光信号经过 150 km 的光纤传输后相位变化 250 000° 时,只需 850 kHz 的调制频率,而调制信号经过 1 km 长光纤传输后,相位若要变化 250 000°,调制频率须达到 120 MHz.

图 7 给出了调制频率在 10~850 kHz 范围内变化时,150 km 光纤长度测量结果与调制频率的关系.

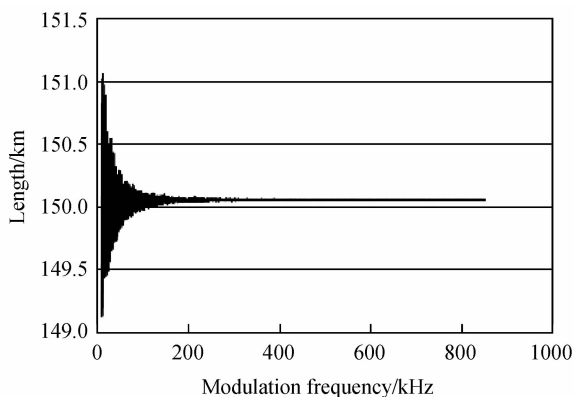


图 7 150 km 光纤长度测量值与调制频率关系
Fig. 7 The relation of test value of the fiber with a length of 150 km and frequency modulation

从图 7 可以看出,在调制频率较低时,长度测量值很不稳定,但随着调制频率的增加,测量结果逐渐趋于稳定,这是因为调制频率较低时,相位测量相对测量不确定度较大. 表 2 给出了调制频率在 10 kHz~11 MHz 频段范围内的长度测量结果.

在矢网的测量下限 10~853 kHz,实验标准偏差超过 26 m,但是当频率增加到 11 MHz 后,实验标准偏差接近 0.01 m. 因此利用本装置在测量较长光纤时,尽可能选择较高的调制频率范围.

表 2 150 km 光纤在不同频率范围的测量结果

Table 2 The test value of difference FM range

FM range/MHz	Average value/m	STDEVA/m
0.01~0.853	150 058.8	26.0
0.854~1.706	150 060.36	0.45
1.706~2.559	150 060.47	0.28
2.56~3.41	150 061.15	0.17
3.41~4.265	150 061.17	0.14
4.265~5.118	150 061.51	0.11
5.119~5.97	150 061.32	0.10
5.97~6.82	150 061.36	0.08
6.82~7.68	150 061.15	0.07
7.68~8.53	150 061.29	0.06
8.53~9.38	150 061.34	0.06
9.38~10.23	150 061.34	0.01
10.23~11.09	150 061.29	0.01

4 结论

本文将矢量网络分析仪的相位测量功能用于光传输距离分析,克服了其它光纤长度测量方法频率范围窄、测量准确度低的缺点.实验结果表明,长度为 2 km 的短光纤其实验标准偏差为 20 μm ,长度为 150 km 的长光纤,实验标准偏差为 0.01 m.研制的测量装置可扩展性强,可用于波长为 1 310 nm、1 490 nm 以及 1 550 nm 时的光纤测量,适合实验室对光纤长度的精确标定,解决光时域反射计长度量值的溯源需求.由于光纤长度和折射率会随温度的变化而变化,因此开展温度对光纤长度的影响研究,进一步提高测量准确度将是后续研究的重点.

参考文献

- [1] TANG Cang-hai. High-performance optical time domain reflectometer technology research and development[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
汤沧海. 高性能光时域反射计技术研发[D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
- [2] YE Lei. Optical frequency domain reflectometer based on narrow band fiber laser[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2013, **5**: 38-41.
叶蕾. 基于窄带光纤激光器的光频域反射计研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2013,**5**:38-41.
- [3] LÜ Li-dong. Research on frequency division multiplexing probe based coherent optical time domain reflectometry[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
吕立冬. 频分复用相干光时域反射系统研究[D]. 南京:南京大学,2012.
- [4] TERRAO, HUSSEIN H. Accurate fiber length measurement using Time-of-Flight technique [J]. *Journal of Optical Communications*, 2015, **11**(4): 1-5.
- [5] FERRIERE R, CUSSEY J, DUDLEY J. Time of flight range detection using low-frequency intensity modulation of a cw laser diode: application to fiber length measurement [J]. *Optical Engineering*, 2008, **47**(9): 093602.
- [6] GB/T 15972. 22-2008. Specifications for optical fibre methods-Part 22: Measurement methods and test procedures

- for dimensions length measurement[S]. 2008
GB/T 15972. 22-2008. 光纤试验方法规范-第 22 部分:尺寸参数的测量方法和实验程序-长度[S]. 2008.
- [7] XIA H, ZHANG C. Ultrafast ranging lidar based on real time Fourier transformation[J]. *Optics Letter*, 2009, **34**(14): 2108-2110.
 - [8] LEE J, KIM Y J, LEE K, et al. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(10): 716-720.
 - [9] JIA Yu-dong, ZHANG Xiao-qing, LÜ Yong, et al. Fiber length measurement based on femtosecond fiber lasers[J]. *Journal of Beijing Information Science & 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.
 - [10] LI Chu-rui, WANG Chao, XIAO Qian. Novel fiber length measurement system based on fiber interferometer[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(2): 415-418.
李楚瑞, 王超, 肖倩. 基于全光纤干涉的新型光纤长度测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, **32**(2): 415-418
 - [11] WU Dong-fang, ZHANG Tian-zhao, DONG Xiang. The differentiating-ring interferometer for measuring optic fiber length[J]. *Information Technology*, 2010, **7**: 103-106.
吴东方, 张天照, 董翔. 基于微分环干涉技术的光纤长度测量系统[J]. 信息技术, 2010, **7**: 103-106.
 - [12] YE Quan-yi, YANG Chun. Fiber length measurement system based on phase modulation optical link[J]. *Chinese Journal of Laser*, 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.
 - [13] WANG Yun-cai, ZHANG Jian-guo, XU Hang, et al. Optical time domain reflectometer based on the chaotic signal[J]. *Optical Instruments*, 2014, **36**(5): 451-454
王云才, 张建国, 徐航, 等. 基于混沌信号的光时域反射仪[J]. 光学仪器, 2014, **36**(5): 451-454.
 - [14] WANG An-bang, WANG Yun-cai. OTDR measurement technology based on correlation method with chaotic laser signal[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2010, **40**(3): 512-518.
王安帮, 王云才. 混沌激光相关法光时域反射测量技术[J]. 中国科学:信息科学, 2010, **40**(3): 512-518.
 - [15] ZHAO Tong-gang, WU Yong-gang, REN Jian-hua, et al. Effects of linewidth broadening factor on optical fiber dispersion-supported transmission system [J]. *Study on Optical Communications*, 2004, **122**(2): 50-54.
赵同刚, 吴永刚, 任建华, 等. 线宽增长因子对光纤色散传输系统的影响[J]. 光通信研究, 2004, **122**(2): 50-54.
 - [16] PENG Cheng-zhu. The techniques of overcoming fiber dispersion effect[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications*, 1999, **11**(2): 12-16.
彭承柱. 克服光纤色散影响的技术 [J]. 重庆邮电学院学报, 1999, **11**(2): 12-16.
 - [17] LI Xue-yi, LIU Wei-ping, HUANG Hong-bin, et al. Light source spectrum-induced and dispersion-induced bit-rate limitation of fiber Bragg-grating filter in DWDM communications systems[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **31**(11): 1355-1358.
李学易, 刘伟平, 黄红斌, 等. 光源线宽和色散对 DWDM 通信系统光纤光栅滤波器的码率限制[J]. 光子学报, 2013, **32**(11): 1355-1358.