

# 基于锯齿波调制的光纤陀螺本征频率跟踪测量

王翔, 王夏霄, 于佳, 郑月, 王婷婷, 马福

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 为了实现快速且高精度的光纤陀螺(FOG)本征频率跟踪测量,提出了一种基于锯齿波调制的本征频率跟踪方法。根据基于偶数倍本征频率锯齿波调制的光纤陀螺本征频率测量理论,对相位调制器施加接近偶数倍本征频率的锯齿波调制信号,然后对光波进行相位调制,解调得出的误差信号强度反映锯齿波调制频率偏离偶数倍本征频率的程度。根据误差信号的强度调节锯齿波调制信号的频率,使误差信号为零,此时锯齿波信号的频率等于本征频率的偶数倍且方波偏置调制准确地处于本征频率上。实验结果表明,该方法可以实现光纤陀螺本征频率的跟踪。与传统测量方法相比,该方法具有快速、高精度等优点,测量的精度优于1 Hz。

**关键词** 测量; 光纤陀螺; 本征频率; 频率跟踪; 相位调制

中图分类号 TN929

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1204002

## Eigen Frequency Tracking Measurement of Fiber Optic Gyroscope Based on Sawtooth Wave Modulation

Wang Xiang, Wang Xi Xiao, Yu Jia, Zheng Yue, Wang Tingting, Ma Fu

School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

**Abstract** To realize fast and high precision tracking measurement of fiber optic gyroscope (FOG) eigen frequency, a eigen frequency tracking method based on sawtooth wave modulation is proposed. Based on the eigen frequency measurement theory of fiber-optic gyroscope from even times eigen frequency sawtooth wave modulation, the sawtooth wave modulation signal with nearly even times eigen frequency is applied on the phase modulator, and phase of the wave is modulated. The demodulated error signal intensity represents the degree of sawtooth wave modulation frequency away from even times eigen frequency. The frequency of sawtooth wave modulation signal is modulated by the intensity of error signal, and the error signal is set to zero. At this time, the frequency of sawtooth wave signal is equal to even times eigen frequency, and the bias modulation of square wave is located at the eigen frequency exactly. The experiment results show that the proposed method can realize tracking of fiber-optic gyroscope eigen frequency. Compared with the traditional measurement method, the proposed method have the advantages of speediness and high precision. The accuracy of the measurement is better than 1 Hz.

**Key words** measurement; fiber optic gyroscope; eigen frequency; frequency tracking; phase modulation

**OCIS codes** 120.1880; 060.5060; 060.2800; 060.2370

## 1 引言

光纤陀螺(FOG)是一种利用萨尼亚克效应获取角速率的惯性仪表,具有体积小、质量轻、动态范围大、耐冲击等优点。光纤陀螺以其杰出的性能不仅被广泛应用于军用领域(如卫星的在轨控制、直升机姿态的校正),也被广泛应用于民用领域(如钻井测斜)。

中高精度的光纤陀螺一般采用数字闭环结构,数字闭环光纤陀螺通常需要用与本征频率同频的方波偏

收稿日期: 2017-06-30; 收到修改稿日期: 2017-07-26

作者简介: 王翔(1991—),男,硕士研究生,主要从事光纤陀螺及光纤传感技术方面的研究。

E-mail: wangxiang@buaa.edu.cn

导师简介: 王夏霄(1977—),男,博士,副教授,主要从事光纤陀螺及光纤传感技术方面的研究。

E-mail: wangxi Xiao@buaa.edu.cn(通信联系人)

置调制信号进行调制,方波偏置调制信号的频率偏离本征频率会降低光纤陀螺的精度<sup>[1-3]</sup>。因此有必要研究光纤陀螺高精度的本征频率的跟踪方法,获取本征频率的数值并将方波偏置调制的频率准确地调制到本征频率上。

目前根据调制方式的不同,本征频率测量方法主要分为基于方波信号调制的本征频率测量方法<sup>[4-9]</sup>和基于正弦波信号调制的本征频率测量方法<sup>[9]</sup>。杨明伟等<sup>[9]</sup>提出的本征频率测量方法,所得结果的精度优于5 Hz;该测量方法是目前已报道的方波调制方法中测量精度最高的,但是其测量精度依然不能满足高精度测量的要求,因为温度的变化导致本征频率的相对变化率约 $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,小范围的温度变化引起的本征频率的变化很难被探测出来,而且该方法也不能实现本征频率的跟踪。国外有通过偶数倍本征频率正弦波调制的本征频率测量方法<sup>[10]</sup>,该方法通过获取由于正弦波调制信号的频率偏离本征频率的偶数倍导致的误差信号,根据误差信号强度以及强度的变化调节调制频率使得误差信号为零,从而实现本征频率的跟踪,但该方法需要引入复杂的电路结构,增加了测量成本。

本文提出了一种基于锯齿波调制的本征频率跟踪测量方法,以实现低成本、高精度的光纤陀螺本征频率测量。本方法原理为:向相位调制器施加叠加了方波偏置调制的偶数倍本征频率的锯齿波信号对光波进行相位调制,根据获得的误差信号强度及强度的变化,调节锯齿波调制信号的频率,使得解调得到的误差信号为零。此时的锯齿波调制信号的频率除以倍频数作为本征频率的测量值向计算机输出,方波偏置调制的频率处于本征频率上。

## 2 本征频率跟踪的理论分析

### 2.1 本征频率跟踪系统的基本构成

光纤陀螺本征频率跟踪装置框图如图1所示,主要包括光源、光纤耦合器、集成光学调制器、光纤敏感环、光电探测器、模/数(A/D)转换、现场可编程逻辑门阵列(FPGA)、数/模(D/A)转换和计算机等部分。其中,FPGA、数/模转换、放大滤波模块用于锯齿波信号、方波偏置调制信号的生成,生成的电压信号作用在集成光学调制器上改变光波的相位;光电探测器、前放滤波、模/数转换、FPGA用于误差信号提取及检测,获得锯齿波调制信号频率偏离偶数倍本征频率导致的误差信号的强度,进而调节调制信号的频率;计算机用于本征频率数值的可视化显示。

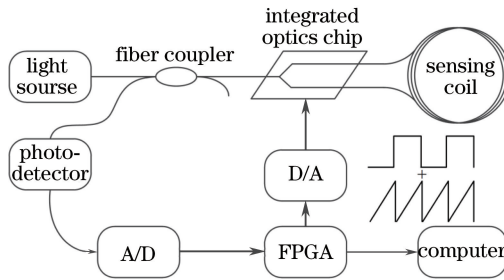


图1 本征频率跟踪装置框图

Fig. 1 Diagram of the eigen frequency tracking setup

### 2.2 基于锯齿波调制的本征频率跟踪测量理论

光纤陀螺的本征频率  $f_e$  可以表示为

$$f_e = \frac{1}{2\tau} = \frac{c}{2nL}, \quad (1)$$

式中  $\tau$  为渡越时间,即光波在光纤敏感环中传播的时间, $c$  为真空中的光速, $n$  为光纤的折射率, $L$  为光纤敏感环的长度。

由光源发出的光经过光纤耦合器进入集成光学调制器。光在集成光学调制器中经起偏后被Y波导分为两束强度相等的线偏振光,一束线偏振光沿光纤敏感环顺时针传播,另一束则沿光纤敏感环逆时针传播。向集成光学调制器施加接近偶数倍本征频率的锯齿波调制信号,由于调制信号的频率偏离偶数倍的本征频

率,因而在光纤敏感环中顺时针传播的光波和逆时针传播的光波受到不同的相位调制,顺时针传播的光波和逆时针传播的光波之间产生了一个与偏离量成比例的误差相位。图 2 展示了误差相位的产生过程。

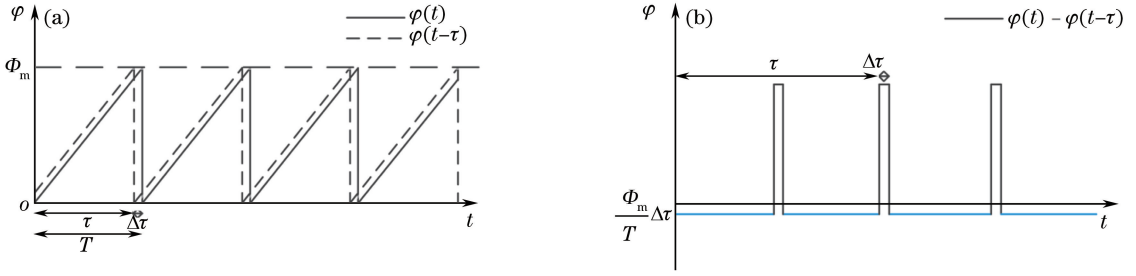


图 2 (a)偶数倍本征频率锯齿波相位调制;(b)相位误差的产生

Fig. 2 (a) Phase modulation of sawtooth wave at the frequency about even times eigen frequency; (b) generation of the phase error

图 2(a)所示的锯齿波调制信号的频率处于 2 倍本征频率附近,略小于 2 倍本征频率。实线部分代表顺时针传播的光波受到的相位调制,虚线部分代表逆时针传播的光波受到的相位调制。两束光波之间的误差相位如图 2(b)所示,顺时针传播的光波受到的相位调制减去逆时针传播的光波受到的相位调制即为两束光波之间的误差相位。从图 2(b)可以看出,由于施加的锯齿波调制信号的频率偏离了 2 倍本征频率,产生了一个与频率偏离量成比例的相位误差  $\varphi_e$ ,在图 2(b)中以蓝色实线标出。这个误差相位可以表示为

$$\varphi_e = \varphi(t) - \varphi(t - \tau) = -\frac{\Phi_m \Delta f}{f_e}, \quad (2)$$

式中  $\varphi(t)$  为顺时针传播的光波受到的相位调制,  $\varphi(t - \tau)$  为逆时针传播的光波受到的相位调制,  $T$  为锯齿波调制信号的周期,  $f$  为锯齿波调制信号的频率,  $\Delta\tau = T - \tau$ ,  $\Delta f = f/2 - f_e$ ,  $\Phi_m$  为锯齿波相位调制的最大调制值。当  $\Phi_m$  和  $f_e$  确定时,误差相位  $\varphi_e$  随着频率偏差  $\Delta f$  的减小而减小。当  $\Delta f$  为零时,误差相位等于零。

对于一般的情况,即锯齿波调制信号的频率处于本征频率的任意偶数倍附近时,将有如下关系:

$$\varphi_e = \varphi(t) - \varphi(t - \tau) = \frac{m\Phi_m \Delta f}{2f_e}. \quad (3)$$

由(3)式可以看出,理论上锯齿波调制频率的倍频数  $m$  越大,相位误差  $\varphi_e$  也越大。在器件性能允许的范围内,可以通过提高倍频数来增加误差信号的强度。

这个相位误差以光强的形式被光电探测器获取。探测器接收到带有相位误差的干涉光强,干涉光光强的表达式为

$$I = I_0 \{1 + \cos[\Delta\varphi(t)]\}, \quad (4)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $\Delta\varphi(t)$  为两束光之间的相位差。从(4)式可以看出,两束光相干的光强的表达式为余弦响应。由于施加频率为本征频率附近的方波偏置调制信号,因此提高了信号检测的灵敏度。

由于萨尼亚克效应的存在,干涉时两束光之间的相位差不仅包含锯齿波频率偏离本征频率偶数倍导致的误差相位  $\varphi_e$ ,方波偏置调制提供的相位差  $\pm\varphi_b$ ,同时还包含因旋转角速率的存在造成的相位信号  $\varphi_s$ 。因此探测器端接收到的光强信号为

$$I = I_0 [1 + \cos(\varphi_e \pm \varphi_b + \varphi_s)]. \quad (5)$$

光信号被光电探测器接收转换为电信号,对电信号进行信号采集和解调,就可以得到与误差相位相关的解调结果。图 3、图 4 反映了信号采集过程。

图 3 为施加锯齿波信号时的信号采集过程示意图。首先,光电探测器接收干涉光强信号并将其转化为电信号,对方波正半个周期内产生的干涉信号对应的电信号进行采集,然后对方波负半个周期内产生的干涉信号对应的电信号进行采集,采集得到的结果在 FPGA 中分别进行累加,之后将累加的结果相减,从而得到在施加了锯齿波调制信号后的解调结果,解调结果为

$$D_1 = -2\eta I_0 \sin\varphi_b \sin(\varphi_e + \varphi_s), \quad (6)$$

式中  $\eta$  为解调相关的系数,其大小与电路系统的各部分参数有关,也与解调时的累加数目有关。

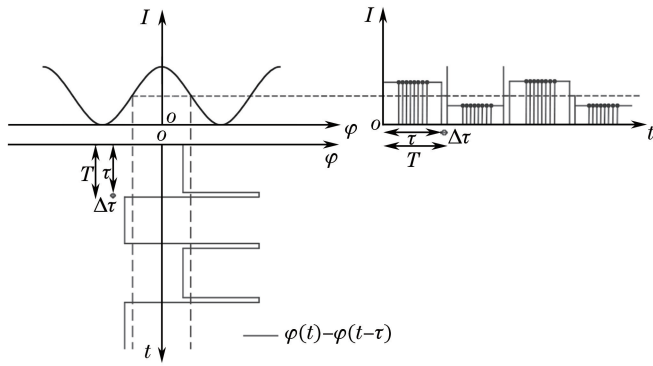


图 3 施加了锯齿波调制信号时的信号采集过程示意图

Fig. 3 Diagram of signal acquisition process with sawtooth wave modulation

图 4 为未施加锯齿波调制信号时的信号采集过程示意图。

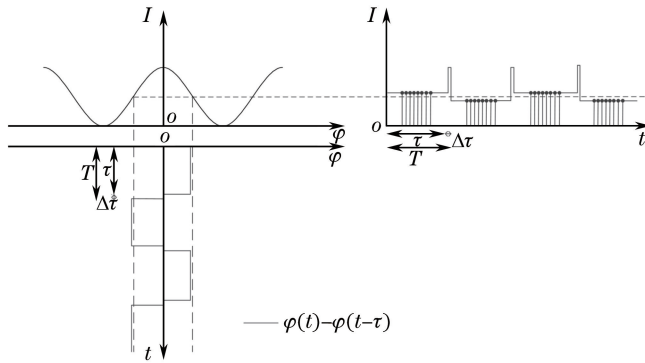


图 4 未施加锯齿波调制信号时的信号采集过程示意图

Fig. 4 Diagram of signal acquisition process without sawtooth wave modulation

经过同样的信号采集和解调过程,得到未施加锯齿波调制信号时的解调结果:

$$D_2 = -2\eta \sin \varphi_b \sin \varphi_s, \quad (7)$$

然后,将施加锯齿波调制信号和未施加锯齿波调制信号的解调结果相减,就可以得到最终的解调结果。最终的解调结果在频率偏移量不大的情况下,近似表示为一个与频率偏离量相关的量:

$$D = D_1 - D_2 \approx -(2\eta \sin \varphi_b) \cdot \varphi_e = -\gamma \cdot \frac{m\Phi_m \Delta f}{2f_e}, \quad (8)$$

式中  $\gamma$  为与解调相关的系数,它的大小与实际的电路系统的各部分参数有关,与解调过程有关。在此过程中,由于旋转角速率引起的误差信号被去除。

从(8)式可以看出,当解调结果为零时, $\Delta f$  则为零,此时锯齿波调制信号的频率恰好为本征频率的偶数倍,方波偏置调制处于本征频率上;当解调结果不为零时,根据解调结果的大小及变化施加一个反馈信号,用来调节锯齿波调制频率的数值,使得最终的解调结果为零。

锯齿波调制信号频率值和解调得到的误差量被同时传入计算机并显示。当解调误差为零时,可以认为此时锯齿波调制信号的频率输出值除以倍频数作为测量得到的数值即为光纤陀螺本征频率,方波偏置调制的频率准确地处于本征频率上。这样就实现了光纤陀螺本征频率的跟踪。

### 3 实验结果及讨论

实验中对一只含有长度为 1200 m 左右的光纤敏感环的光纤陀螺进行本征频率的跟踪。综合考虑了各部分器件的实际性能,向集成光学调制器施加 2 倍本征频率附近的锯齿波信号。方波偏置调制信号的频率总是等于锯齿波调制频率的一半,用于产生  $\pm\pi/2$  的相位偏置。由于从 FPGA 中生成的锯齿波信号为数字锯齿波信号,是一种阶梯波信号,通过增加生成数字锯齿波信号的阶梯数目和利用电路的滤波作用,可以达

到生成的锯齿波信号接近理想锯齿波信号的目的。实验中生成锯齿波的阶梯数目设置为 50, 即 50 个台阶合成一个锯齿波信号。锯齿波信号频率和方波偏置调制信号频率的调整通过 FPGA 分频实现, 锯齿波信号频率的最小频率调整间隔设置约为 0.1 Hz, 频率调整间隔设置为 1 s。每秒向计算机输出一次, 处理后的本征频率跟踪结果显示在计算机上。

通过本方法获得了如图 5 所示的本征频率跟踪结果。图 5 中黑色曲线代表输出的本征频率数值随时间的变化曲线, 蓝色曲线代表解调得到的误差信号的强度随时间的变化曲线。从图 5 可以看出, 本征频率跟踪装置在启动初期经历了一个本征频率搜寻的过程, 此时解调误差信号较大, 较大的解调误差信号反映出此时输出的频率值偏离本征频率较大。而 50 s 后解调得到的误差信号已经很小, 由于受到噪声的影响, 误差信号的强度在零上下波动, 此时本征频率测量结果的波动主要是由噪声引起的。根据基于锯齿波调制的本征频率跟踪理论, 解调结果为零时测量得到的本征频率与本征频率完全相等。而在存在噪声的情况下, 可以把解调结果与零偏离不大时的频率值作为光纤陀螺的本征频率。

从图 5 中可以看出, 本征频率随时间呈现出缓慢减小的趋势。这是因为陀螺启动后, 装置内部产生热量, 光纤敏感环附近温度逐渐上升, 温度的升高导致本征频率减小。图 6 中蓝色曲线反映了陀螺内部温度随时间的变化, 可以看出温度随时间呈现出单调增加的变化趋势。

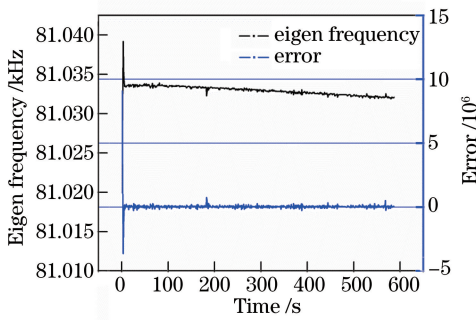


图 5 本征频率跟踪结果

Fig. 5 Eigen frequency tracking results

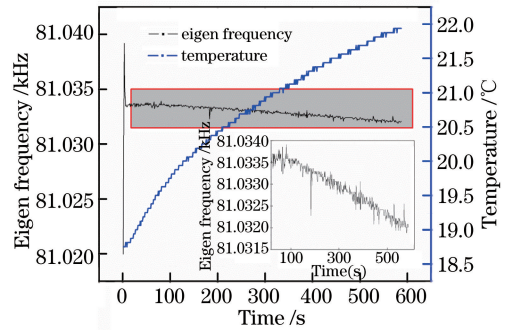


图 6 本征频率与温度的关系, 内插图为局部放大图

Fig. 6 Relationship between eigen frequency and temperature, inset shows the partial enlargement

温度上升会导致光纤敏感环的长度和折射率的变化, 由于本征频率是长度和折射率的函数, 温度的变化导致本征频率的变化<sup>[11-13]</sup>。从图 6 可以看出, 光纤环附近的温度升高约 3 °C, 本征频率减少约 2 Hz。这反映出本征频率随温度的增加而减小的变化特性, 也体现出了所用测量装置测量本征频率具有良好的灵敏度。对图 6 红色框中 20~600 s 范围内的本征频率跟踪曲线进行局部放大, 可以看出 100 s 后本征频率的跟踪结果趋于稳定, 本征频率处于 81.0325 kHz 附近, 测量精度优于 1 Hz。将所建方法的测量精度与其他本征频率测量方法的精度进行对比, 结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 所建方法具有更高的测量精度。

所建方法的测量精度受到可调频率间隔和噪声的共同限制, 通过提高可调频率间隔的分辨率和抑制噪声, 可以提高本征频率的测量精度。实验中频率调整间隔设置约为 0.1 Hz, 而噪声对本征频率测量结果较大(但不大于 1 Hz)。比较频率调整间隔和噪声对本征频率测量的影响, 可以看出噪声是影响测量精度的主要因素, 因此降低系统的噪声有利于精度的提高。

表 1 不同本征频率测量方法的测量精度对比

Table 1 Accuracy comparison among different eigen frequency measuring methods

Method	Accuracy
Auto-test method for FOG eigen frequency based on asymmetric square wave modulation <sup>[4]</sup>	100
Auto-test method for FOG eigen frequency based on symmetric square wave modulation <sup>[7]</sup>	10
Low cost method for FOG eigen frequency based on double-eigen frequency square wave modulation <sup>[8]</sup>	50
New measurement method for eigen frequency of a fiber optic gyroscope <sup>[9]</sup>	5
Eigen frequency tracking based on sawtooth wave modulation	1

## 4 结 论

提出了一种基于锯齿波调制的光纤陀螺本征频率的跟踪测量方法,并在一款光纤环长度约为 1200 m 的光纤陀螺上进行了实验验证。实验结果表明,本征频率跟踪装置在启动初期经历了本征频率搜寻的过程,100 s 后本征频率的测量结果趋于稳定。本方法获得了测量精度优于 1 Hz 的本征频率测量结果,实现了对光纤陀螺本征频率的快速且高精度的跟踪。

## 参 考 文 献

- [1] Lefevre H. The fiber-optic gyroscope[M]. London: Artech House, 1993.
- [2] Tian H T, Zhang C X, Jin J, *et al.* Effect of modulation frequency jitter on coherent detection and its elimination algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(4): 604-610.
- [3] Lefevre H C. Comments about fiber-optic gyroscopes[C]. SPIE, 1988, 838: 86-97.
- [4] Song Ningfang, Lü Fengjian, Zhao Hui, *et al.* Auto-test method for FOG eigenfrequency based on asymmetric square wave modulation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(4): 494-496.  
宋凝芳, 吕峰建, 赵慧, 等. 基于不对称方波调制的光纤陀螺本征频率测试方法[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(4): 494-496.
- [5] Song Ningfang, Zhang Jinbao, Ma Dongying, *et al.* Test method for FOG loop eigenfrequency[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 318-321.  
宋凝芳, 张金保, 马东营, 等. 光纤陀螺本征频率的测量方法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 318-321.
- [6] Zhang Jinbao, Song Ningfang, Ma Dongying, *et al.* Measurement method for FOG loop eigenfrequency and half-wave voltage[J]. Electronics Optics & Control, 2009, 16(7): 17-20.  
张金保, 宋凝芳, 马东营, 等. 光纤陀螺本征频率和半波电压测量方法研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(7): 17-20.
- [7] Zhou Youwei, Liu Tiegeng, Li Maochun, *et al.* Auto-test method for FOG eigenfrequency based on symmetric square wave modulation[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(7): 676-679.  
周友伟, 刘铁根, 李茂春, 等. 基于对称方波调制的光纤陀螺本征频率自动测试方法[J]. 激光与红外, 2008, 38(7): 676-679.
- [8] Wang Xi, Gao Yanbin, Huo Liang. Low cost method for FOG eigenfrequency based on double-eigenfrequency square wave modulation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(4): 477-481.  
王曦, 高延滨, 霍亮. 基于 2 倍本征频率调制的光纤陀螺本征频率测量方法[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(4): 477-481.
- [9] Yang M W, Yang Y H. New measurement method for eigen frequency of a fiber optic gyroscope [J]. Optical Engineering, 2013, 52(2): 024401.
- [10] Standjord L K, Doheny D A. Eigen frequency detector for Sagnac interferometers: US7038783[P]. 2006-05-02.
- [11] Cohen L G, Fleming J W. Effect of temperature on transmission in lightguides[J]. The Bell System Technical Journal, 1979, 58(4): 945-951.
- [12] Yuan Libo. Effect of temperature and strain on fiber optic refractive index[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(12): 1713-1717.  
苑立波. 温度和应变对光纤折射率的影响[J]. 光学学报, 1997, 17(12): 1713-1717.
- [13] Ning Tigang, Qin Xi, Pei Li, *et al.* A novel way to measure the temperature characteristic of polarization-maintaining fiber[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(8): 1078-1080.  
宁提纲, 秦曦, 裴丽, 等. 新型保偏光纤温度特性的测试方法[J]. 中国激光, 2006, 33(8): 1078-1080.