

# 平均波长对光纤陀螺标度因数的影响

陈和宇, 郑月\*, 王夏霄, 徐宏杰, 张春熹

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

**摘要** 分析了宽谱光源的平均波长对标度因数的影响, 初步建立了开环光纤陀螺和闭环光纤陀螺标度因数的系统模型, 详细讨论了平均波长和光纤陀螺第二闭环影响标度因数的机理, 并进行了相关的实验, 实验结果与理论分析结果吻合, 验证了该系统模型的正确性。

**关键词** 光纤光学; 光纤陀螺; 标度因数; 平均波长; 光谱

**中图分类号** V241.5+9

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201946.0306002

## Influence of Mean Wavelength on Scale Factor of Fiber Optic Gyroscope

Chen Heyu, Zheng Yue\*, Wang Xiaoxiao, Xu Hongjie, Zhang Chunxi

*School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China*

**Abstract** The influence of the mean wavelength of a broad-spectral source on the scale factor is analyzed. The systematic models of the scale factors for the open-loop and closed-loop fiber optic gyroscopes are preliminarily established. The mechanism influences of the mean wavelength and the second feedback loop on the scale factor are discussed in detail. The corresponding experiments are conducted. The experimental results coincide well with the theoretical analysis results and the validity of the proposed systematic model is verified.

**Key words** fiber optics; fiber optic gyroscope; scale factor; mean wavelength; optical spectrum

**OCIS codes** 060.2370; 300.6170

## 1 引言

光纤陀螺(FOG)是一种基于 Sagnac 效应的光学角速率传感器,具有寿命长、体积小、质量轻、测量范围大、精度范围广、无运动部件等特点<sup>[1]</sup>,广泛应用于导弹制导、飞机导航、卫星姿态控制等领域。随着光纤陀螺器件水平和相关技术的不断进步以及制造工艺的日渐成熟,光纤陀螺正向着高精度方向不断发展<sup>[2]</sup>。在光纤陀螺性能指标体系中,随机游走系数、零偏稳定性和标度因数稳定性等是较为重要的几项指标。目前对于光纤陀螺随机游走系数和零偏稳定性的研究较多,光路和电路中的影响因素和作用机理也较为明确。标度因数稳定性是目前限制光纤陀螺性能和应用的主要因素之一,这也是光纤陀螺相比于激光陀螺存在的主要短板之一<sup>[3]</sup>。在实际应用中,标度因数稳定性的劣化在小转速、温度变化及长时间工作等情况下尤为明显<sup>[4-5]</sup>。国

内外学者对光纤陀螺标度因数稳定性进行了大量研究。研究的重点为:从器件角度(如光源、光纤环等)关注温度对标度因数的影响<sup>[6-8]</sup>、标度因数的补偿方法<sup>[9-10]</sup>和提升光源输出波长的稳定性<sup>[11]</sup>等。这些研究在改善光纤陀螺标度因数稳定性和推动光纤陀螺的实际工程应用等方面起到了很大的作用。然而,在光纤陀螺中,影响标度因数稳定性的因素较多,包括光谱误差、信号检测中的调制解调和第二闭环(Y波导 $2\pi$ 电压跟踪闭环)等。目前缺少对光纤陀螺标度因数的系统性研究,关于标度因数从光路到电路的系统传递模型的相关报道较少。本文开展了光纤陀螺标度因数的系统性研究,从平均波长出发,初步建立了开环光纤陀螺和闭环光纤陀螺标度因数的系统模型,重点分析了平均波长对标度因数的影响规律和光纤陀螺第二闭环对标度因数的影响机理,为今后的标度因数相关研究提供了一定的理论基础。

收稿日期: 2018-11-11; 修回日期: 2018-12-13; 录用日期: 2018-12-18

\* E-mail: zhengyue@buaa.edu.cn

## 2 传统的光纤陀螺标度因数分析

根据 Sagnac 效应的相关推导, 转速  $\Omega$  引起的 Sagnac 相位差可表示为

$$\Delta\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega, \quad (1)$$

式中:  $\Delta\phi_s$  为 Sagnac 相位差;  $L$  为光纤陀螺中光纤环的长度;  $D$  为光纤环的直径;  $\lambda$  为波长;  $c$  为真空中的光速。可以看出, Sagnac 相位差与敏感转速的光波长直接相关<sup>[1]</sup>。

在主流的光纤陀螺配置中, 为了抑制敏感环路中相干特性的漂移, 一般采用低时间相干性的宽谱光源。宽谱光源发出的光中包含了多种波长分量。由(1)式可知, 每个波长的光都对应着一个 Sagnac 相位差。一般来说, 最终检测并输出的 Sagnac 相位差是各波长分量对应的 Sagnac 相位差的平均值, 即

$$\Delta\phi_s = A_{\text{SFO}} \Omega = \frac{2\pi LD}{\bar{\lambda} c} \Omega, \quad (2)$$

式中  $A_{\text{SFO}}$  被认为是光纤陀螺的光学标度因数。在光纤陀螺的研究和测试中, 一般认为宽谱光源发光的平均波长即为(2)式中的平均波长  $\bar{\lambda}$ 。宽谱光源的平均波长通过将光谱  $P(\lambda)$  作为加权因子进行加权平均得到<sup>[12]</sup>:

$$\bar{\lambda} = \frac{\int P(\lambda) \lambda d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

在实际的光纤陀螺中, 影响最终标度因数的因素有很多。受光学器件光谱透射性、光路中振幅型误差光(偏振方向与主干涉光为同一方向的误差光)的影响, 到达探测器的光谱和光源输出的光谱存在差别。另外, 探测器的光谱响应度, 施加在 Y 波导上的电压产生的相位差都与波长相关。因此, 如何评价光纤陀螺中真正决定标度因数的“平均波长”是研究中的一个重要问题, 也是研究光纤陀螺标度因数准确性的理论基础。

## 3 光纤陀螺标度因数的波长相关性分析

### 3.1 开环光纤陀螺标度因数分析

光纤陀螺中检测的信号来自宽谱光源并将其作为基准, 文中采用光谱分析常用的光频率  $\nu$  ( $\nu = c/\lambda$ ) 代替光波长  $\lambda$  作为分析对象, 暂不考虑光学器件的光谱透射性对光谱的影响。Sagnac 干涉仪输出的光谱  $p_{v_0}(\nu)$  可认为是光谱为  $p_u(\nu)$  (光源输出的

基准光谱) 的两束同偏振态线偏振光叠加后的光谱。 $p_{v_0}(\nu)$  与  $p_u(\nu)$  相比, 光谱形状的变化取决于两束光的振幅比和时间差。对于光纤陀螺中的两束干涉主光波, 在理想情况下, Sagnac 干涉仪的互易性使两束主光的振幅比为 1, 相位差仅为 Sagnac 相位差。由 Sagnac 效应的表达式[(1)式]可知, 对于转速  $\Omega$ , 干涉仪产生的与之成比例的等效时间差  $\Delta t_s$  可表示为

$$\Delta\phi_s = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \Omega = 2\pi \Delta t_s \nu, \quad \Delta t_s = \frac{LD}{c^2} \Omega. \quad (4)$$

由(4)式可知, 在不考虑色散的情况下, 转速  $\Omega$  导致的两束光之间的时间差  $\Delta t_s$  可近似认为与光频率无关。因此, 两束光叠加(干涉)后的光谱可表示为<sup>[13]</sup>

$$p_{v_0}(\nu) = \frac{p_u(\nu)}{2} [1 + \cos(2\pi \Delta t_s \nu)]. \quad (5)$$

(5)式只表示了光谱形状的变化, 未表示为归一化形式, 其幅度无实际意义。输出光谱  $p_{v_0}(\nu)$  在输入光谱  $p_u(\nu)$  的基础上受到了一个升余弦调制。随着  $\Delta t_s$  的不同, 光谱受到调制的周期不同, 光谱形状会发生相应变化, 光谱的频率分布(波长分布)和平均频率(平均波长)也会发生变化。

设光纤陀螺开环工作时采用方波调制, 调制相位差为  $\pm \Delta\varphi_m$ , 且认为调制相位差与光波频率无关。干涉后的光谱可表示为

$$p_{v_0}(\nu) = \frac{p_u(\nu)}{2} [1 + \cos(2\pi \Delta t_s \nu \pm \Delta\varphi_m)]. \quad (6)$$

光电探测器将所有光谱分量的积分光强转换成电信号进行解调, 暂不考虑探测器的光谱响应度, 最终的开环解调结果可表示为

$$R_{\text{open}} = \int_0^{+\infty} k_0 \cdot p_u(\nu) \sin(\Delta\varphi_m) \sin(2\pi \Delta t_s \nu) d\nu = K \int_0^{+\infty} p_u(\nu) \sin(2\pi \Delta t_s \nu) d\nu, \quad (7)$$

式中:  $k_0$  表示解调通道的增益;  $K$  表示包含调制深度在内的整体增益。解调结果用平均频率  $\bar{\nu}$  可表示为

$$R_{\text{open}} = K \int_0^{+\infty} p_u(\nu) \sin(2\pi \Delta t_s \nu) d\nu = K \sin(2\pi \Delta t_s \bar{\nu}) \int_0^{+\infty} p_u(\nu) d\nu = K I_0 \sin(2\pi \Delta t_s \bar{\nu}). \quad (8)$$

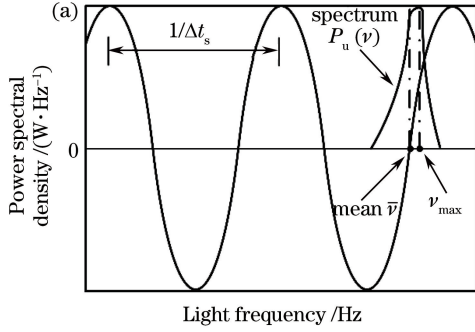
平均频率  $\bar{\nu}$  满足

$$\int_0^{+\infty} p_u(\nu) \sin[2\pi \Delta t_s (\nu - \bar{\nu})] d\nu = 0. \quad (9)$$

(9)式用图像可表示为以平均频率  $\bar{\nu}$  为起点、 $1/\Delta t_s$  为频率周期的正弦函数与光谱乘积的积分值为0,如图1(a)所示<sup>[1]</sup>。当  $\Delta t_s$  很小(转速很小时),即频率周期远大于光谱宽度时,(9)式可简化为

$$\int_0^{+\infty} p_u(\nu)(\nu - \bar{\nu})d\nu = 0. \quad (10)$$

此时的平均频率近似为光谱的线性平均值,满足



$$\int_0^{\bar{\nu}} p_u(\nu)d\nu = \int_{\bar{\nu}}^{+\infty} p_u(\nu)d\nu, \quad (11)$$

小转速时开环光纤陀螺的平均光频率如图1(b)所示。

由上述分析可知,光纤陀螺开环标度因数与平均频率  $\bar{\nu}$  直接相关,平均频率  $\bar{\nu}$  成为了开环光纤陀螺标度因数的一部分。而此时的平均频率  $\bar{\nu}$  与光谱和转速的大小有关。

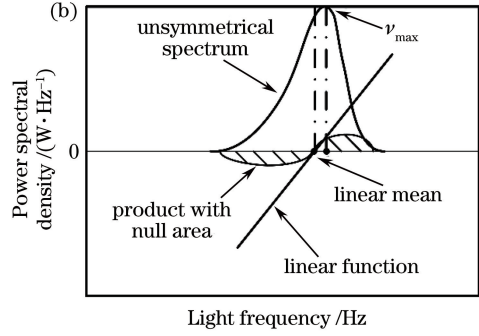


图1 开环光纤陀螺的平均光频率。(a) 一般情况;(b) 小转速

Fig. 1 Mean light frequency for open-loop FOG. (a) General condition; (b) low rotation rate

### 3.2 闭环光纤陀螺标度因数分析

下面考虑光纤陀螺闭环工作的情况。目前,闭环光纤陀螺普遍采用Y分支集成光学调制器(Y波导)作为光纤陀螺调制、反馈用的光学器件。Y波导的电光调制效应是基于电场导致折射率的改变。在不考虑色散的情况下,折射率的变化可近似认为与光频率无关。因此,在一阶近似时,可认为施加在Y波导电极上的电压产生的光程差与光频率无关。光纤陀螺产生的反馈相位差可表示为

$$\Delta\phi_f = \frac{2\pi\Delta n_f L_f}{\lambda} = 2\pi\nu \frac{\Delta n_f L_f}{c}, \quad (12)$$

式中: $\Delta n_f$  为反馈信号产生的折射率差; $L_f$  为施加电压的等效作用长度。反馈信号产生的两束光之间的等效时间差可表示为

$$\Delta t_f = \frac{\Delta n_f L_f}{c}. \quad (13)$$

与反馈信号相似,施加在Y波导上的调制电压会使折射率发生  $\Delta n_m$  的变化,调制信号产生的等效时间差可表示为

$$\Delta t_m = \frac{\Delta n_m L_f}{c}. \quad (14)$$

因此,对于闭环光纤陀螺,采用方波调制时,其干涉后输出光谱的形状可表示为

$$p_{uc}(\nu) = \frac{p_u(\nu)}{2} [1 + \cos(2\pi\Delta t_s \nu - 2\pi\Delta t_f \nu \pm 2\pi\Delta t_m \nu)]. \quad (15)$$

在此情况下,光纤陀螺的解调结果可表示为(暂不考虑探测器的光谱响应度)

$$R_{\text{closed}} = k_0 \int_0^{+\infty} p_u(\nu) \sin(2\pi\Delta t_s \nu - 2\pi\Delta t_f \nu) \sin(2\pi\Delta t_m \nu) d\nu, \quad (16)$$

式中  $k_0$  表示解调通道的增益。在闭环工作的情况下,解调值应为0。可以看出, $\Delta t_f = \Delta t_s$  为(16)式等于0的解,即在一阶近似下有

$$\Delta t_s = \frac{LD}{c^2} \Omega = \Delta t_f = \frac{\Delta n_f L_f}{c} = \frac{K_f L_f}{c} \Delta D_f, \quad (17)$$

式中  $K_f$  为从数字台阶高度  $\Delta D_f$  到折射率变化  $\Delta n_f$  的反馈通道增益,包含数字台阶变换到模拟电压并产生电场,再到折射率变化的过程。数字台阶高度作为反馈信号的同时也表示光纤陀螺的输出。此时光纤陀螺的输入输出关系为

$$\Delta D_f = A_{\text{SF1}} \Omega = \frac{LD}{K_f L_f c} \Omega. \quad (18)$$

由(18)式可知,光纤陀螺此时的闭环标度因数  $A_{\text{SF1}}$  与光频率在一阶近似时无关。此时影响标度因数的主要因素为反馈通道增益( $K_f$ )本身的波动,如Y波导调制系数随温度、调制电压的变化等。以上关系只在反馈阶梯波不存在复位时成立。由于在实际应用中阶梯波不能无限增长,必然要进行复位;为避免复位误差,对Y波导  $2\pi$  电压跟踪的第二闭环是必须的。第二闭环的引入可使反馈增益稳定,同时也重新建立了闭环标度因数与光频率(波长)的相

关性。

### 3.3 第二闭环对光纤陀螺标度因数的影响分析

在阶梯波发生复位时,类似于反馈相位差的表达式,复位产生的相位差可表示为

$$R_{\text{closed-r1}} = k_0 \int_0^{+\infty} p_u(\nu) [\cos(2\pi\Delta t_s \nu - 2\pi\Delta t_f \nu + 2\pi\Delta t_r \nu + 2\pi\Delta t_m \nu) - \cos(2\pi\Delta t_s \nu - 2\pi\Delta t_f \nu + 2\pi\Delta t_m \nu)] d\nu, \quad (20)$$

$$R_{\text{closed-r2}} = k_0 \int_0^{+\infty} p_u(\nu) [\cos(2\pi\Delta t_s \nu - 2\pi\Delta t_f \nu + 2\pi\Delta t_r \nu - 2\pi\Delta t_m \nu) - \cos(2\pi\Delta t_s \nu - 2\pi\Delta t_f \nu - 2\pi\Delta t_m \nu)] d\nu. \quad (21)$$

(20)式和(21)式分别代表了在调制方波正半周期和负半周期发生复位的复位误差值,实际情况下的复位误差累积值为这两个误差值的组合,简化分析时可认为两种情况在长时间下等概率发生。设第一闭环理想工作,即  $\Delta t_s = \Delta t_f$ , (20)式和(21)式相加的结果可简化为

$$R_{\text{closed-r}} = k_0 \int_0^{+\infty} p_u(\nu) \cos(2\pi\Delta t_m \nu) [\cos(2\pi\Delta t_r \nu) - 1] d\nu. \quad (22)$$

设(22)式等于0的解为

$$\Delta t_r = 1/\bar{\nu}_r, \quad (23)$$

式中  $\bar{\nu}_r$  为第二闭环产生的等效平均频率。此平均频率与传统的光纤陀螺标度因数分析中的平均波长和平均频率的定义是不同的。复位时的数字量  $\Delta D_r$  由阶梯波寄存器的位数决定,在实际应用中是固定的,因此有

$$\Delta t_r = 1/\bar{\nu}_r = \frac{\Delta n_r L_f}{c} = \frac{K_f \Delta D_r L_f}{c}. \quad (24)$$

由(24)式可知,理想情况下,反馈通道的增益  $K_f$  由第二闭环结果产生的平均频率  $\bar{\nu}_r$  (或平均波长  $\bar{\lambda}_r$ ) 决定,可表示为

$$K_f(\bar{\nu}_r) = \frac{c}{\Delta D_r L_f \bar{\nu}_r}, K_f(\bar{\lambda}_r) = \frac{\bar{\lambda}_r}{\Delta D_r L_f}, \quad (25)$$

式中  $\bar{\lambda}_r = c/\bar{\nu}_r$ 。在复位产生误差时,第二闭环通过调整反馈通道中的增益可变部分使得(24)式保持成立,即保证(22)式等于0始终成立。(22)式中的影响因素远少于反馈通道增益中的影响因素,因此,第二闭环的正常工作极大增大了标度因数的稳定性。在第一闭环中,输入转速决定了反馈量,即反馈量需满足  $\Delta t_f = \Delta t_s$ 。因此,光纤陀螺的最终输出与转速的关系可表示为

$$\Delta\phi_r = \frac{2\pi\Delta n_r L_f}{\lambda} = 2\pi\nu \frac{\Delta n_r L_f}{c} = 2\pi\nu \Delta t_r, \quad (19)$$

式中  $\Delta n_r$  和  $\Delta t_r$  为复位台阶产生的等效折射率差和等效时间差。复位误差(第二闭环误差)的典型解调值为

$$\Delta D_f = \frac{LD}{K_f(\bar{\nu}_r) L_f c} \Omega = \frac{LD \Delta D_r \bar{\nu}_r}{c^2} \Omega = A_{\text{SF2}} \Omega. \quad (26)$$

可以看到,闭环标度因数  $A_{\text{SF2}}$  与第二闭环决定的平均频率(或平均波长)直接相关,为保证标度因数中平均频率的稳定,必须使第二闭环解调值,即(22)式等于0的解保持稳定。由(22)式可知,此时的标度因数与光路中的实际光谱密切相关。

由上述分析可知,光纤陀螺的闭环标度因数由第二闭环确定。当第二闭环存在较小的误差时,设输入转速为正,实际反馈通道增益大于第二闭环正常工作时的反馈通道增益,则在非复位处输出的陀螺数字量会小于第二闭环正常工作时的陀螺输出。由于  $2\pi$  电压偏大,在复位处会产生一个正的额外解调误差。在光纤陀螺输出中,非复位处输出偏小,复位处输出偏大,与锯齿波反馈时的分析相同,两者会互相抵消,剩下的误差理论上只是  $\sin$  函数造成的三阶小量<sup>[1]</sup>。

以上分析是在第一闭环和第二闭环互相独立的情况下完成的,即第一闭环的结果与第二闭环的结果互不影响,可求出各自的解调结果。但实际情况并非如此,第一闭环为0时往往导致第二闭环的结果不为0,同样,第二闭环的结果为0时往往导致第一闭环的结果不为0。在实际情况下需要更加详细的分析和计算。

## 4 标度因数的波长相关性实验

### 4.1 第二闭环对标度因数影响的实验验证

对于采用 1550 nm 波长体系的高精度光纤陀螺,其光源一般为基于放大自发辐射的掺铒光纤光源(ASE光源)。掺铒光纤受到激发后发出的光为 1550 nm 附近的宽谱光,其光谱在 1531 nm 处(前

峰)和 1560 nm 处(后峰)存在两个峰值。在实际应用中,为了使光谱更加接近高斯光谱,一般在 ASE 光源最终输出前加入光学滤波器,使输出光谱为单峰形式。根据滤波器的不同,ASE 光源一般可分为前峰光源(中心波长 1531 nm 附近)和后峰光源(中心波长 1560 nm 附近)两种。在光纤陀螺电路配置中,常见的第二闭环实现方式是控制调节串行 DA 输出到并行 DA 的基准电压,从而改变反馈通道的增益。

选取光纤环直径约 110 mm、光纤长度约

表 1 不同光源在不同条件下的标度因数测试结果

Table 1 Test results of scale factor of different light sources under different conditions

$s \cdot (^{\circ})^{-1}$

Test status	Mean wavelength of 1560 nm	Mean wavelength of 1531 nm
Second feedback loop working	2050575	2089412
Second feedback loop not working	2050575	2082694
Reset error not involved in rotation feedback loop	2050456	2059007

下面对此陀螺状态进行改变,共包含以下几个过程。

1) 串行 DA 基准电压初值为后峰光源时的准确值且保持不变,将光纤陀螺光源更换为同样功率输出的前峰光源(光纤陀螺其他部分保持不变)。由于光源中心波长发生了变化,在第二闭环正常工作的情况下,适用于后峰光源的串行 DA 基准电压值不再适用于前峰光源,串行 DA 基准电压值会随着第二闭环的调整发生变化。第二闭环工作的结果是采用前峰光源的陀螺标度因数数值变为约  $2089412 s \cdot (^{\circ})^{-1}$ 。此时,标度因数与中心波长(约等于平均波长)存在对应关系: $2089412/2050575 \approx 1560 \text{ nm}/1531 \text{ nm}$ 。

2) 采用前峰光源时,串行 DA 基准电压初值保持为后峰光源时的准确值不变且第二闭环不工作,此时会存在较大的复位误差。在此情况下测得标度因数的结果约为  $2082694 s \cdot (^{\circ})^{-1}$ ,与第二闭环正常工作时的标度因数  $2089412 s \cdot (^{\circ})^{-1}$  相比变化较小。这说明复位误差对标度因数的影响较小(理论上为三阶小量,此结果为一次的实验结果,可能存在一定的误差)。

存在复位误差的情况下,光纤陀螺的静态测试典型输出如图 2 所示(采样间隔为 2.5 ms)。可以看到,在复位点处的输出值大于整体输出均值,非复位点处的输出均值小于整体输出均值,最终的平均效果使得标度因数误差较小。

3) 为了验证不存在阶梯波复位时的标度因数变化规律,将阶梯波复位位置产生的复位误差不累加到光纤陀螺第一闭环中,并将光纤陀螺第二闭环

1500 m 的一只高精度光纤陀螺进行实验,实验结果如表 1 所示。以后峰光源的陀螺状态为实验基准,采用后峰光源时,在第一闭环、第二闭环均正常工作的情况下测试标度因数,测试结果约为  $2050575 s \cdot (^{\circ})^{-1}$ 。基于此,在串行 DA 的基准电压(用于第二闭环控制)初始值保持准确的情况下,将第二闭环关闭,标度因数测试结果仍约为  $2050575 s \cdot (^{\circ})^{-1}$ 。这说明准确的串行 DA 基准电压值不会产生任何的复位误差。

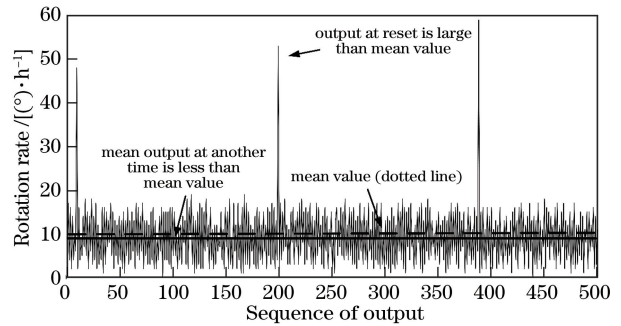


图 2 存在  $2\pi$  复位误差时 FOG 静态 400 Hz 输出数据

Fig. 2 400 Hz output data of FOG with  $2\pi$ -reset error at rest

关闭,串行 DA 基准电压值保持为采用后峰光源时的准确值不变。此时,采用后峰光源的光纤陀螺标度因数约为  $2050456 s \cdot (^{\circ})^{-1}$ ,采用前峰光源的光纤陀螺标度因数约为  $2059007 s \cdot (^{\circ})^{-1}$ 。可以看到,此时的标度因数数值与光源中心波长的关系不再明显,两种情况下的标度因数数值变得十分接近,验证了第 3.2 节的分析(此情况对应图 2 中非复位点的状态)。采用两种光源的实际标度因数的偏差是由反馈通道存在波长相关性引起的,如 Y 波导调制系数的波长相关性等。

需要说明的是,在第一闭环工作忽略复位点时得到的标度因数线性度测试结果十分差,这是由于此时反馈通道本身的误差变得十分显著,如 Y 波导响应不同阶梯波台阶的性能有所不同。

#### 4.2 光学器件光谱透射性对标度因数的影响实验

在标度因数的分析中,光学器件对光谱形状的改变也占有十分重要的作用,最终的标度因数特性与光路组成、光电转换、电路解调都密不可分。在分

析光谱透射性对标度因数的影响时,需要将第3节分析中的光谱乘以对应的光谱透射函数。下面的实验简要说明了光学器件的光谱透射性对标度因数的影响。

在光电探测器组件尾纤前面熔入一段掺铒光纤,其作用是改变光谱形状和到达探测器的平均波长;此时实验测得到达探测器的平均波长约为1562.8319 nm,测得的光纤陀螺标度因数约为

$3023900 \text{ s}\cdot(\text{^\circ})^{-1}$ 。取下滤波(掺铒光纤)部分用同等长度的耦合器替代,并保证到达探测器组件的光功率不变;此时测得到达探测器的平均波长约为1560.6466 nm,测得的光纤陀螺标度因数约为  $3028800 \text{ s}\cdot(\text{^\circ})^{-1}$ 。平均波长与标度因数的变化情况如表2所示。实验表明了光纤陀螺中除光源外的其他光学器件对光谱的作用也会对标度因数产生影响。

表2 光学器件光谱透射函数对标度因数影响的测试结果

Table 2 Test results for influences of spectral transmission functions of optical devices on scale factor

Experimental condition	Mean wavelength at detector /nm	Measured scale factor / $[\text{s}\cdot(\text{^\circ})^{-1}]$
With Er-doped optical fiber	1560.6466	3028800
With coupler	1562.8319	3023900
Variation	$1.400\times 10^{-3}$	$1.618\times 10^{-3}$

## 5 结 论

推导了开环光纤陀螺和闭环光纤陀螺标度因数的表达式,在推导过程中进行了部分近似,得到了应用宽谱光源时平均波长对标度因数的影响规律。光纤陀螺开环工作时,标度因数表达式中的平均频率(平均波长)取决于光谱形状和转速的大小;光纤陀螺闭环工作时,如果不考虑第二闭环的影响,标度因数表达式近似与光波长无关;第二闭环的引入重构了闭环标度因数与光波长的相关性,并大大提升了标度因数的稳定性。实际情况中,影响光纤陀螺标度因数的因素较多,通常对这些因素未加以考虑,如光学器件和光路误差对光谱的影响等;而在实际光路中,光学器件的光谱透射性和光路误差对光谱和平均波长的影响十分显著。另外,讨论标度因数时认为光纤陀螺第一闭环和第二闭环均为理想情况,且各自独立工作;实际上,第一闭环和第二闭环会互相影响,使标度因数模型更加复杂。对标度因数的研究可在本文的基础上进一步细化,建立更加符合实际情况的标度因数系统模型,该模型是研究标度因数精度优化的理论工具。初步建立的光纤陀螺标度因数系统模型为标度因数准确性和稳定性的研究提供了一定的理论基础。

## 参 考 文 献

[1] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Norwood: Artech House Publishers, 2014: 23-41.  
 [2] Paturel Y, Couderette A. High performance FOG: an industrial feedback from mass production [C]. IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS) Proceedings, 2015: 1-4.

[3] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope: achievement and perspective [J]. Gyroscopy and Navigation, 2012, 3(4): 223-226.  
 [4] Na Y L, Li L K, Wu Y J, *et al.* Measurement error analysis of FOG's scale factor[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(4): 472-477.  
 那永林, 李丽坤, 吴衍记, 等. 光纤陀螺标度因数的测试误差分析[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(4): 472-477.  
 [5] Jin J, Zhang C X, Song N F. Analysis and compensation of temperature errors for fiber optic gyroscope scale factor[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 167-171, 177.  
 金靖, 张春熹, 宋凝芳. 光纤陀螺标度因数温度误差分析与补偿[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 167-171, 177.  
 [6] Alphonse G A, Gilbert D B, Harvey M G, *et al.* High-power superluminescent diodes [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(12): 2454-2457.  
 [7] Mikami O, Noguchi Y, Magari K, *et al.* Polarization-insensitive superluminescent diode at 1.5  $\mu\text{m}$  with a tensile-strained-barrier MQW [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1992, 4(7): 703-705.  
 [8] Wang X X, Wei L Y, Wang X, *et al.* Scale factor error during startup process of fiber optic gyro [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(12): 120602.  
 王夏霄, 魏良勇, 王翔, 等. 光纤陀螺启动过程标度因数误差研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(12): 120602.  
 [9] Yang Z H, Zhang X Y, Song L W, *et al.* Analysis on hysteresis phenomenon of FOG scale factor model and compensation technology [J]. Journal of Chinese

- Inertial Technology, 2017, 25(4): 514-517.
- 杨志怀, 张晓雅, 宋丽薇, 等. 光纤陀螺标度因数迟滞模型分析与补偿技术[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(4): 514-517.
- [10] Wang X L, Ma S. Nonlinearity of temperature and scale factor modeling and compensating of FOG [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(1): 28-31.
- 王新龙, 马闪. 光纤陀螺温度与标度因数非线性建模与补偿[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(1): 28-31.
- [11] Ou P, Cao B, Zhang C X, *et al.* Analysis of mean-wavelength stability of Er-doped super fluorescent fiber sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(5): 26-31.
- 欧攀, 曹彬, 张春熹, 等. 超辐射掺铒光纤光源平均波长稳定性分析[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(5): 26-31.
- [12] Cao Y. Analysis of the effect of broad-band source's spectral characteristic on the performance of fiber optic gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006: 6-7.
- 曹毓. 宽带光源光谱特性对光纤陀螺性能影响的分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006: 6-7.
- [13] Goodman J W. Statistical optics [M]. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2000: 158-170.