

文章编号 1004-924X(2010)10-2171-07

微小型光纤陀螺组合分时复用技术

马东营, 宋凝芳, 金 靖, 宋镜明

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 为了有效减小多轴光纤陀螺组合的功耗、体积和重量, 实现光纤陀螺组合的微小型化, 应用分时复用技术, 提出了一种基于 3×3 耦合器, 工作在 850 nm 短波长的光纤陀螺分时复用组合结构。分析了陀螺输出数据处理方法, 得到了分时复用光纤陀螺组合的相对极限零偏稳定性。建立了分时复用光纤陀螺切换模型, 揭示了分时复用导致光纤陀螺轴向切换必然存在一个过渡过程, 分析了过渡过程对陀螺组合静态、动态特性的影响。结果显示, 光纤陀螺组合的相对零偏稳定性是传感方法的 2.1 倍, 最大输入信号检测带宽为 1.1 kHz, 标度因数的不对称性和非线性度均小于 50×10^{-6} 。最后, 通过仿真进行了实验验证, 结果表明, 该技术可以用于中低精度微小型多轴光纤陀螺组合中。

关键词: 光纤陀螺; 微小型化; 分时复用; 过渡过程; 零偏稳定性

中图分类号: TN253; V241.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101810.2171

Time-division multiplexing for micro-miniature fiber-optic gyroscopes

MA Dong-ying, SONG Ning-fang, Jin Jing, SONG Jing-ming

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: To reduce the power consumption, volume and the weight of a fiber optic gyroscope, the structure of a time division multiplexing fiber-optic gyroscopic system worked at 850 nm was presented based on a 3×3 coupler. The data processing method of gyroscopic output was analyzed, and the relative bias stability of the time division multiplexing system was obtained. A switching model of the time division multiplexing fiber-optic gyroscope was established, which pointed out that there is a transient process in axis switching. The effects of the transient process on the static and dynamic characteristics of the gyroscopic system were analyzed, which shows that the relative bias stability is about 2.1 times that of the traditional method, the maximum bandwidth is about 1.1 kHz and both the nonlinearity and uniformity of the real scale factor are less than 50×10^{-6} . Finally, the results were tested and verified by simulations and experiments, and results indicate that the time division multiplexing can satisfy the requirements of applications to micro-miniature fiber-optic gyroscopes.

Key words: fiber-optic gyroscope; microminiaturization; time division multiplexing; transient process; zero bias stability

收稿日期: 2009-10-15; 修订日期: 2009-12-28.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA04Z436)

1 引言

光纤陀螺是一种新型的角速率传感器,随着飞行器、航天器和机载武器系统朝着高精度、轻小型、低功耗的方向发展,对惯性测量系统也有了轻小型、高集成度和高可靠性的要求,从而迫使所使用的陀螺做出相应的改进。在微机械陀螺(MEMS)的精度和环境适应性还有很大差距的情况下,光纤陀螺微型化是必然选择^[1-3]。

近年来,国际上光纤陀螺的研究朝着“高精度”和“轻小型”两个方向发展,光纤陀螺应用领域已经扩展到航天运载、空间载体和战略战术武器制导系统。在这些领域应用中,常要用到 3 个正交安装的光纤陀螺,以敏感不同方向的位置信息。而采用三轴一体化装置代替单轴陀螺会降低光纤陀螺的体积、重量、功耗和成本,是光纤陀螺的发展趋势,尤其是三轴数字闭环光纤陀螺组合的光路组件和电路组件多路复用及组件小型化将成为发展主流。传统的光纤陀螺组合一般以复用光源为主^[4-5],分时复用技术的采用可使陀螺在传统复用光源的基础上,对电路和光路进一步复用,复用程度的复杂性超出了传统的三轴陀螺组合^[6-7]。

分时复用技术使得光纤陀螺组合重量、体积和功耗都得到有效控制,但同时也丢失了部分角速率信息,致使陀螺组合精度下降。本文提出一种三轴光纤陀螺组合分时复用结构,通过对数据输出处理方法的分析,给出相对于不分时状态的极限精度,同时揭示切换过渡过程的存在,进一步分析其对陀螺性能的影响。最后指出这种技术可以用于中低精度,微小型多轴光纤陀螺组合中。

2 分时复用总体结构

用于精度分析的分时复用总体结构方案如图 1 所示。该分时调制方案采用 1 个光源、1 个探测器、1 个 3×3 耦合器、3 个相位调制器、3 个光纤环、1 个选通开关,并共用 1 套单轴信号处理电路。对陀螺每个轴向按时间顺序依次施加调制,当为某 1 个轴向施加调制时,该轴处于闭环工作状态,其输出的闭环信号和另外两个轴向输出的开环信号经光电探测器转化为电信号,经过解调信号解调得到该轴的闭环信号,从而得到该轴向

的角速率。

方案中采用工作波长为 850 nm 的光路,光源和光纤角速度敏感环的工作波长亦均为 850 nm,期望能用较短的光纤获取较高的精度,同时能够有效减小陀螺组合的重量和体积。

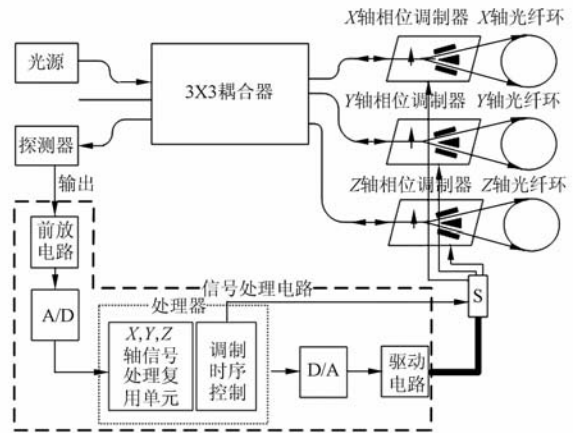


图 1 分时复用光纤陀螺总体结构

Fig. 1 Block diagram of time division multiplexing fiber optic gyroscope

3 数据输出处理方法

根据分时复用方案,设陀螺 3 个轴向依次工作时间为 t_x, t_y, t_z , 3 个轴向的陀螺全部闭环 1 次的工作时间为 t , 设 $t_x \approx t_y \approx t_z \approx 1/3t$ 。也就是说每个轴向的陀螺工作时间将是单轴陀螺(不分时)工作时间的 $1/3$ 。

衡量陀螺精度的 1 个重要指标是陀螺的零偏稳定性(零漂),其定义是陀螺在单位时间内输出数据的标准差^[8]。

陀螺输出数据包含两部分,一部分是真实角速率,另一部分是噪声项。陀螺每个渡越周期的闭环反馈量(陀螺输出)可以表示为 Sagnac 相移项与噪声项的加和。相移项的积分值是角速率;噪声项在通常情况下表现为白噪声^[9]。

由此,陀螺单位时间内数据输出可以表示为 Sagnac 相移均值和噪声均值的加和,陀螺输出数据的标准差为 σ 。

当采用分时复用技术后,单位时间内陀螺输出数据的样本容量由 n 缩减为 $n/3$, 因此可以得到此时陀螺输出数据的标准差为 $\sqrt{3/n} \sigma$ 。所以分

时状态的陀螺零偏稳定性增大为不分时状态的 $\sqrt{3}$ 倍。

4 过渡过程仿真及实验

分时复用光纤陀螺组合通过开关使得 3 个轴

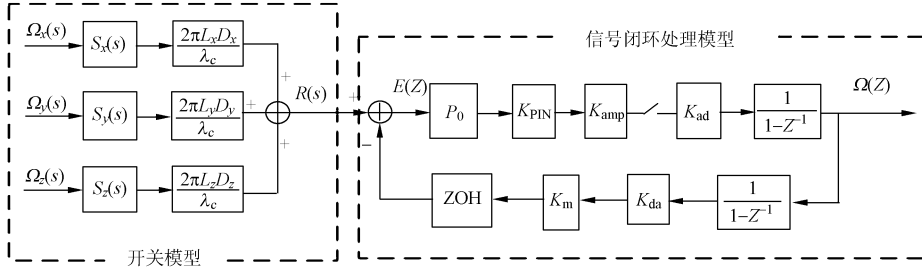


图 2 分时复用光纤陀螺三轴闭环切换工作模型

Fig. 2 Switching close-loop model of three-axis in time division multiplexing fiber optic gyroscope

信号闭环处理模型中每个轴向陀螺具有不同的闭环参数设置。3 个轴向依次闭环工作的时间为 t_x, t_y, t_z , 其中

$$t_x = n_x \tau_x, t_y = n_y \tau_y, t_z = n_z \tau_z, \quad (1)$$

n_x, n_y, n_z 表示闭环工作期间各轴采样次数; τ_x, τ_y, τ_z 表示采样时间, 实际工作中 $\tau_x \approx \tau_y \approx \tau_z \approx \tau$, 因此式(1)可写为

$$t_x = n_x \tau, t_y = n_y \tau, t_z = n_z \tau, \quad (2)$$

$\Omega_x(s), \Omega_y(s), \Omega_z(s)$ 是陀螺 3 个轴向输入的角速率拉氏变换, $S_x(s), S_y(s), S_z(s)$ 表示开关函数的拉氏变换。

$$\begin{cases} S_x(s) = \frac{e^{-n'(n_x+n_y+n_z)\tau s}}{s} [1 - e^{-n_x \tau s}] \\ S_y(s) = \frac{e^{-n'(n_x+n_y+n_z)\tau s}}{s} [e^{-n_x \tau s} - e^{-(n_x+n_y)\tau s}] \\ S_z(s) = \frac{e^{-n'(n_x+n_y+n_z)\tau s}}{s} [e^{-(n_x+n_y)\tau s} - e^{-(n_x+n_y+n_z)\tau s}] \end{cases}, \quad (3)$$

其中 $n' = 0, 1, 2, \dots$, 表示分时复用陀螺 3 个轴向共同闭环工作的周期数。

$$\begin{aligned} R(s) = & \Omega_x(s) S_x(s) \frac{2\pi L_x D_x}{\lambda c} + \\ & \Omega_y(s) S_y(s) \frac{2\pi L_y D_y}{\lambda c} + \\ & \Omega_z(s) S_z(s) \frac{2\pi L_z D_z}{\lambda c}. \end{aligned} \quad (4)$$

设 n 为分时复用陀螺 3 个轴向共同闭环工作

向能够分时共用 1 个信号处理电路。当某 1 个轴向陀螺处于闭环工作状态时, 其输出是对输入信号的跟踪。三轴分时复用光纤陀螺闭环切换工作模型包括开关模型和信号闭环处理模型, 其闭环切换工作模型框图如图 2 所示:

的采样数, 对式(4)讨论得:

当 $n \in [n'(n_x+n_y+n_z), (n'+1)n_x+n'(n_y+n_z))$,

$$R(s) = \Omega_x(s) \frac{2\pi L_x D_x}{\lambda c}, \quad (5-1)$$

当 $n \in [(n'+1)n_x+n'(n_y+n_z), (n'+1)(n_x+n_y)+n'n_z)$,

$$R(s) = \Omega_y(s) \frac{2\pi L_y D_y}{\lambda c}, \quad (5-2)$$

当 $n \in [(n'+1)(n_x+n_y)+n'n_z, (n'+1)(n_x+n_y+n_z))$,

$$R(s) = \Omega_z(s) \frac{2\pi L_z D_z}{\lambda c}. \quad (5-3)$$

由此得到分时复用陀螺某一轴向(以 X 轴为例)闭环工作动态线性简化离散模型^[10-12]如图 3 所示:

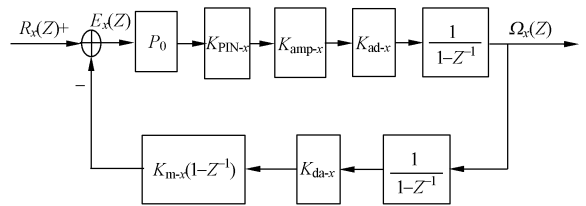


图 3 分时复用光纤陀螺单轴闭环工作简化模型

Fig. 3 Simplified close-loop model of one-axis in time division multiplexing fiber optic gyroscope

系统模型用离散方程来描述, P_0 表示光功率, K_{PIN-x} 表示探测器的光电转换系数, K_{amp-x} 表

示前置放大器的放大系数, K_{ad_x} 表示 A/D 转换系数, K_{da_x} 表示 D/A 转换系数, K_{m_x} 表示调制器转换系数。

当分时复用陀螺切换到 X 轴, 此时施加闭环调制, X 轴切换进入闭合工作状态。此时无论陀螺处于何种运动状态(静止、匀速、加速、变加速)在切换瞬时, 相当于对陀螺施加了一个阶跃输入, 此时陀螺输入信号为 X 轴方向的角速率。

由陀螺闭环工作原理可知, 陀螺输出必须要跟踪输入, 因此其误差传递函数可以表示为:

$$\frac{E_x(Z)}{R_x(Z)} = \frac{1}{1 + K_{PIN_x} K_{amp_x} K_{ad_x} K_{da_x} K_{m_x} \frac{1}{1 - Z^{-1}}}, \quad (6)$$

输入 $R_x(t)$ 为阶跃信号, 其 Z 变换表达式为:

$$R_x(z) = \frac{z}{z-1}, \quad (7)$$

陀螺的稳态误差为:

$$e_{ss_x} = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) E_x(z) = \lim_{z \rightarrow 1} (z-1) \frac{E_x(z)}{R_x(z)} = 0. \quad (8)$$

在仿真中所使用的参数同实验中所使用的陀螺参数一致, 参数设置如表 1:

表 1 仿真实验中的参数设置

Tab. 1 Parameter configuration in simulation

参数	数值	参数	数值
L_x/m	220	$K_{PIN_x}/(V \cdot W^{-1})$	7.2×10^5
D_x/m	29.4×10^{-3}	K_{amp_x}	10
λ/m	0.85×10^{-6}	K_{ad_x}	1 024
$C/(m \cdot s^{-1})$	3×10^8	K_{da_x}	1.22×10^{-4}
$P_0/(W)$	1.5×10^{-7}	$K_{m_x}/(\text{rad} \cdot V^{-1})$	0.785

X 轴闭环工作时探测器信号和阶梯波调制信号仿真结果如图 4 所示:

从仿真结果可以看出, 陀螺切换完成后, 在进入正常闭环工作状态前需要一个过渡过程, 以确保此时输出是输入的正确跟踪量。过渡过程持续的时间这里称之为稳定时间 t_x' , 相应的 Y、Z 轴的稳定时间为 t_y' , t_z' 。为了保证陀螺输出是实际测量的角速度, 必须要求在稳定时间过后, 输出量对输入量是 100% 的跟踪。这是分时复用系统中最重要的参数, 它不仅对陀螺的零偏稳定性有重要的影响, 而且还影响陀螺的动态特性, 尤其是决定了陀螺可以检测的信号带宽。

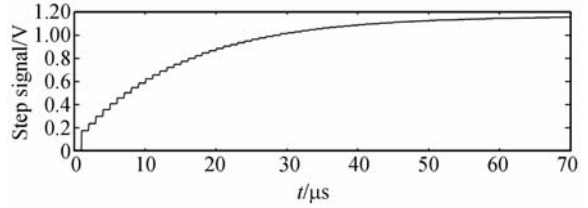
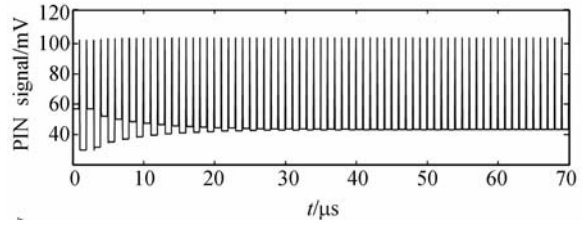


图 4 分时复用陀螺 X 轴阶跃响应仿真

Fig. 4 Step response simulation of X-axis in time division multiplexing fiber optic gyroscope

由仿真结果得到: X 轴完成切换, 稳定时间约为 $40 \mu s$, 为了保证达到稳态的 100%, 给出 $10 \mu s$ 的裕量, 即

$$t_x' \approx 50 \mu s, \quad (9)$$

相应的对 Y、Z 轴进行仿真, 得到

$$t_y' \approx 50 \mu s, t_z' \approx 50 \mu s. \quad (10)$$

在实验中, 选取

$$t_x \approx 3t_x', t_y \approx 3t_y', t_z \approx 3t_z', \quad (11)$$

因此每个轴闭环工作时仅有 2/3 的角速率信息为有效信息。单位时间内的有效信息就变为单轴陀螺的 2/9。由第三节分析可知, 由于稳定时间的存在, 分时复用状态下的陀螺零偏稳定性是不分时状态的 2.1 倍。

在实验中, X 轴处于闭环工作状态, Y 轴和 Z 轴处于开环工作状态, X 轴在连续几个闭环工作周期内的阶梯波信号如图 5。

图 5 中显微图形显示了每个闭环工作周期中的过渡过程及其稳定时间 t_x 所占的比例。从实验结果可以看出, 陀螺稳定时间大概是 $50 \mu s$, 同仿真结果基本一致。

分时复用陀螺 3 个轴向的陀螺全部闭环一次的工作时间为 t ,

$$t = t_x + t_y + t_z \quad (12)$$

在一个周期 t 时间内, 3 个轴向的陀螺能够分别对角速率信息进行一次采样, 每个轴的采样

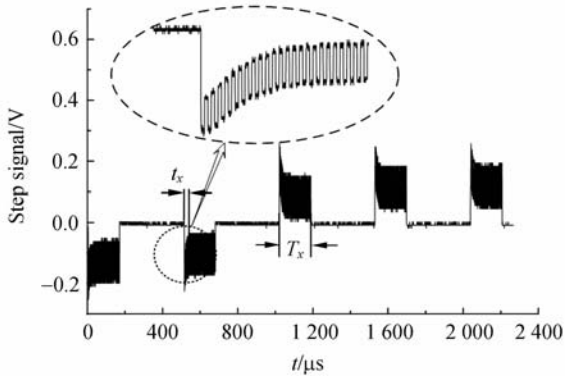


图5 分时复用陀螺 X 轴的连续闭环工作周期阶梯波信号
Fig. 5 Several cycle step signals of X-axis in time division multiplexing fiber optic gyroscope

频率为:

$$f = \frac{1}{t} \quad (13)$$

由香农定理可知,为了使输出信号能够从输入信号中恢复出来,被采样的输入信号最大频率为 $\frac{1}{2}f$,因此陀螺可以检测的角速率最大输入信号带宽为 $\frac{1}{2}t$ 。当 $t_x = t_x', t_y = t_y', t_z = t_z'$ 时,陀螺可以获得最大检测带宽,将式(9),(10)代入式(12),(13)可得最大检测带宽为 3.3 kHz。在实际应用中为了保证输出信号对输入信号的正确跟踪,采用式(11)的参数设置,可得实际闭环直接输出的最大检测带宽为 1.1 kHz。利用高速采集,按照国军标对频带带宽进行测试,试验结果如图 6 所示。

图 6 中,“·”表示实际测量的数据,曲线是对测试数据的拟合。从图中可以得到陀螺的带宽大概有 0.9 kHz,基本与计算结果吻合。

对于同一个轴向的陀螺,在分时和不分时状态下各自进行了一组实验,其零偏稳定性的实验结果如图 7 所示。在分时状态下,X 轴的零偏稳定性是 $2.1(^{\circ})/h(1\sigma)$;在不分时状态下,X 轴的零偏稳定性是 $0.72(^{\circ})/h(1\sigma)$,在分时状态下的零偏稳定性大概是不分时状态下零偏稳定性的 2.9 倍,而不是理论值 2.1 倍,这是因为分时额外地引入了一部分噪声。

在分时状态与不分时状态下,分别对 X 轴在 $[-300^{\circ}/s, +300^{\circ}/s]$ 范围内进行标度因数对比测试^[8],结果如表 2、表 3 所示。

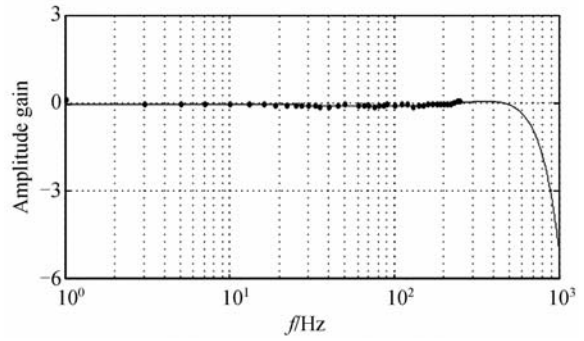


图 6 分时复用陀螺 X 轴的带宽测试
Fig. 6 Bandwidth test of X-axis in time division multiplexing fiber optic gyroscope

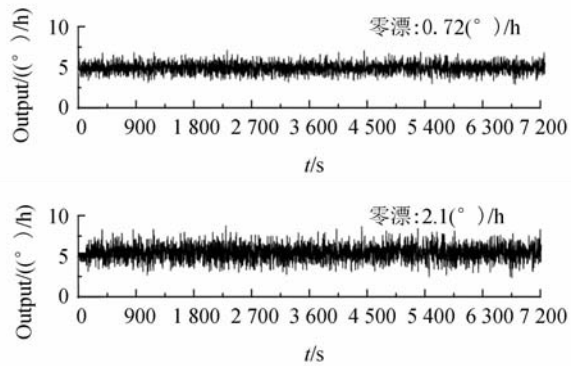


图 7 不分时状态与分时状态下 X 轴的零偏稳定性对比
Fig. 7 Comparison of bias stabilities of X-axis under non-time division and time division

表 2 陀螺 X 轴分时标度因数测试

Tab. 2 Scale factor test of X-axis with time division

输入角速率 /($^{\circ}$)/s)	陀螺输出 /bit	输入角速率 /($^{\circ}$)/s)	陀螺输出 /bit
0.00	83.0	0.00	70.0
-0.10	-1 912.0	0.10	2 032.0
-0.50	-9 878.0	0.50	9 976.0
-1.00	-19 830.0	1.00	19 939.0
-1.50	-29 779.0	1.50	29 925.0
-3.00	-59 649.0	3.00	59 779.0
-8.00	-159 213.0	8.00	159 539.0
-20.0	-398 197.0	20.0	398 212.0
-60.0	-1 194 601.0	60.0	1 194 723.0
-120.0	-2 389 210.0	120.0	2 389 430.0
-180.0	-3 583 927.0	180.0	3 584 042.0
-220.0	-4 380 250.0	220.0	4 380 471.0
-260.0	-5 176 698.0	260.0	5 176 984.0
-300.0	-5 973 199.0	300.0	5 973 387.0

表 3 陀螺 X 轴不分时标度因数测试

Tab. 3 Scale factor test of X-axis without time division

输入角速率 /($^{\circ}$ /s)	陀螺输出 /bit	输入角速率 /($^{\circ}$ /s)	陀螺输出 /bit
0.00	1.0	0.00	0.0
-0.10	-1 975.0	0.10	1 980.0
-0.50	-9 734.0	0.50	9 830.0
-1.00	-19 560.0	1.00	19 579.0
-1.50	-29 352.0	1.50	29 397.0
-3.00	-58 678.0	3.00	58 698.0
-8.00	-156 516.0	8.00	156 527.0
-20.0	-391 360.0	20.0	391 357.0
-60.0	-1 174 116.0	60.0	1 174 168.0
-120.0	-2 348 192.0	120.0	2 348 223.0
-180.0	3 522 323.0	180.0	3 522 358.0
-220.0	-4 304 992.0	220.0	4 305 062.0
-260.0	-5 087 698.0	260.0	5 087 846.0
-300.0	-5 870 540.0	300.0	5 870 676.0

对实验数据处理可得:

(1)在分时状态下,标度因数为 19 910.9 bits/($^{\circ}$ /s),标度因数对称性为 16.1×10^{-6} ,标度因数线性度为 28.6×10^{-6} 。

(2)在不分时状态下,标度因数为 19 568.4 bits/($^{\circ}$ /s),标度因数对称性为 16.2×10^{-6} ,标度因数线性度为 17.2×10^{-6} 。

从实验数据可以看出,在分时与不分时 2 种状态下,对于同 1 个轴向的陀螺,由于信号处理过

程存在差别,标度因数的大小略有差别,但是标度因数对称性和线性度基本维持在同一个水平。这表明,分时复用陀螺可以在 $[-300 (^{\circ})/s, +300 (^{\circ})/s]$ 的动态范围内同不分时陀螺具有相同的动态特性。

5 结 论

本文分析了光纤陀螺组合分时复用中的角速率信息损失对其精度的影响,通过对数据处理方法的分析得出分时状态下的极限零偏稳定性是同参数不分时状态下的 $\sqrt{3}$ 倍。对陀螺分时切换过渡过程的分析表明,稳定时间进一步影响陀螺的精度,零偏稳定性增大为不分时状态下的 2.1 倍,实验中由于分时引入的额外干扰使陀螺精度增大为不分时状态下的 2.9 倍。同时过渡过程影响了陀螺的动态特性,稳定时间的长短限制了分时复用陀螺输入信号可检测带宽,但仍然具有较高的带宽。通过对标度因数测试,分时复用陀螺在 $[-300 (^{\circ})/s, +300 (^{\circ})/s]$ 动态范围内具有较高的精度。

分时复用技术带来陀螺性能部分下降,但是使得陀螺组合重量、体积和功耗得到了有效控制,实验表明这种技术可以用于对重量体积要求比较严格的中低精度微小多轴光纤陀螺组合中。

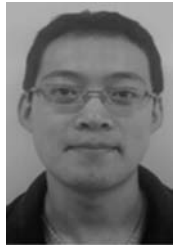
参考文献:

- [1] HERVE C. *The Fiber-optic Gyroscope* [M]. London: ArtechHouse, 1993.
- [2] 王德,李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3): 279-283.
WANG D, LI X Q. New progress in semiconductor lasers and their applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3): 484-491. (in Chinese)
- [3] 李建利,房建成,盛蔚,等. 双质量块调谐输出式硅 MEMS 陀螺仪的理论计算及仿真[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 484-491.
LI J L, FANG J C, SHENG W, et al.. Calculation and simulation of silicon MEMS gyroscope with dual-mass resonant output [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 484-491. (in Chinese)
- [4] 潘雄,宋凝芳,金靖,等. 三轴一体轻小型光纤陀螺仪的时序设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 13377-1379.
PAN X, SONG N F, JIN J, et al.. Timing for miniaturized three-cluster fiber optic gyro[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(11): 13377-1379. (in Chinese)
- [5] 冯丽爽,徐小斌. 光纤陀螺光路小型化技术[J]. 中国惯性技术学报, 2006, 14(4): 49-52.
FENG L S, XU X B. Miniaturization optical techniques of fiber optic gyro[J]. 2006, 14(4): 49-52. (in Chinese)
- [6] JIN W, CULSHAW, XU Y Z. Multiplexing of fiber optic gyroscope[J]. *SPIE*, 2837, 1993: 140-151.

- [7] 李丽,林玉池,付鲁华. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 473-477.
LI L, LIN Y C, FU L H. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)
- [8] GJB 2426A_2004 光纤陀螺仪测试方法[S].
GJB 2426A_2004 The test method of fiber optic gyroscope[S].
- [9] 李颖,陈兴林,宋申民. 小波神经网络用于光纤陀螺漂移误差辨识[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5): 773-778.

- LI Y, CHEN X L, SONG S M. Application of wavelet neural network for identification of drifts errors in fiber optical gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5): 773-778. (in Chinese)
- [10] HAN J L, GE S M. Modeling and Simulation of digital closed-loop fiber optic gyroscope[C]. *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 2006, Dalian, China.
- [11] MICHAEL S. Stochastic and dynamic modeling of fiber gyros [J]. *SPIE*, 1994, 2292: 240-253.
- [12] RALPHA A. Simplified control theory for closed-loop fiber-optic gyroscopes [J]. *SPIE*, 1992, 1795: 105-117.

作者简介:



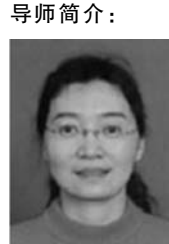
马东营(1983—),男,山东人,博士研究生,主要从事精密仪器、光纤传感等方面的研究。E-mail: mdy@aspe.buaa.edu.cn



宋镜明(1974—),男,云南人,博士后,讲师,主要从事光学工程、光纤传感等方面的研究。E-mail: Saskm@163.com



金靖(1975—),男,内蒙古包头人,讲师,博士,副研究员,主要从事光纤传感器、微弱信号检测等方面的研究。E-mail: jinjing@buaa.edu.cn



宋凝芳(1968—),女,辽宁人,研究员,博士生导师,北京航空航天大学光电技术研究所所长,主要从事精密仪器、光纤传感、信号检测等方面的研究。E-mail: songnf@buaa.edu.cn

导师简介: