

doi:10.3788/gzxb20184712.1206004

光程倍增光纤陀螺偏振误差相关抵消的研究

张敏¹,傅长松^{2,3},王金芳^{2,3},胡宗福¹,蒋治国¹

(1 同济大学 电子与信息工程学院,上海 201804)

(2 上海航天控制技术研究所,上海 201109)

(3 上海惯性工程技术研究中心,上海 201109)

摘 要:利用光程倍增光纤陀螺的奇、偶时隙输出之间的相关性对陀螺零偏误差进行相关抵消处理。为了验证该方法的有效性,将光程倍增光纤陀螺置于室温,以 100 s 滑动平均,其每秒输出的奇、偶零偏为 $-0.1^\circ/\text{h}$ 、 $0.08^\circ/\text{h}$,利用相关抵消的方法处理后,其零偏得以修正且零偏稳定性从 $0.008^\circ/\text{h}$ 提高至 $0.002^\circ/\text{h}$ 。该相关抵消的信号处理方法快速简便且有效,为光程倍增光纤陀螺的精度优化提供了新思路。

关键词:光纤陀螺;光程倍增;偏振误差;相关抵消;零偏稳定性

中图分类号:V241.5

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1206004-9

Correlation Counteraction of Polarization Errors in Interferometric Fiber Optic Gyroscope with Double Optical Length

ZHANG Min¹, FU Chang-song^{2,3}, WANG Jin-fang^{2,3}, HU Zong-fu¹, JIANG Zhi-guo¹

(1 School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

(2 Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China)

(3 Shanghai Engineering Research Center of Inertia, Shanghai 201109, China)

Abstract: The correlation between the odd and even time slot outputs of the fiber optic gyro with double optical length is used for the correlation-cancellation processing of gyro zero offset error. To verify the method, the fiber optic gyro with double optical length is at room temperature, with moving average time of 100 s, the per second output biases of odd and even time slot are $-0.1^\circ/\text{h}$ and $0.08^\circ/\text{h}$, after processing of correlation cancellation, the bias is modified and the bias stability is increased from $0.008^\circ/\text{h}$ to $0.002^\circ/\text{h}$. The correlation counteraction signal processing method is fast, simple and effective, which provides a new idea for the precision optimization of the fiber optic gyro with double optical length.

Key words: Fiber optic gyro; Double optical length; Polarization error; Correlation counteraction; Bias stability

OCIS Codes: 060.2800; 060.2370; 060.2420

0 引言

光纤陀螺是目前广泛应用于航空航天导航系统的敏感器件,其主要性能指标是零偏稳定性和角度随机游走。其中,零偏稳定性主要受外界环境因素和光电子器件性能的影响,角度随机游走由陀螺输出中的白噪声决定。为提高陀螺的精度,主要的研究方向有消除误差源,如改善陀螺的结构以减小偏振串扰误差、Shupe 效应误差和法拉第效应误差;采用质量好的光电子器件以减小系统中的噪声;在陀螺的输出端采用合适的滤波等信号处理方法得到平稳线性的输出。光程倍增光纤陀螺具有平行、垂直偏振光交替环行的特性,理论上可以完全抑制偏振串扰与法拉第效应带来的误差。然而,实验表明在室温下,光程倍增光纤陀螺的输出仍然

基金项目:上海航天科技创新基金(No. SAST2015076)和上海市青年科技启明星计划(B类)(No. 17QB1404300)

第一作者:张敏(1994-),女,硕士研究生,主要研究方向为光纤陀螺信号处理技术.Email:mariazhang1994@126.com

导师(通讯作者):胡宗福(1959-),男,教授,博士,主要研究方向为光载无线通信、光纤传感和光纤通信等.Email:huzongfu@tongji.edu.cn

收稿日期:2018-06-13;录用日期:2018-09-10

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

存在零偏误差.通常情况下,传统的低通、高通、带通或带阻等滤波方法无法有效提高陀螺精度.光纤陀螺的研究者通过对误差和信号的统计特性(如自/互相关函数等)进行估计,选择陀螺输出的信号优化算法并设置滤波参数,以提高陀螺精度.常见的陀螺信号处理方法有卡尔曼滤波和基于小波变换或经验模态分解的阈值滤波等.

以上方法,理论上能够很好地滤除陀螺输出中的噪声,提高陀螺的精度,但仍存在缺陷.对陀螺输出信号进行卡尔曼滤波^[1-2]之前,需对其非线性平稳性进行平稳化处理^[4],计算量大,实时性低.小波变换需要手动选取合适的小波基对陀螺输出信号进行分解并重构以得到滤波后的信号^[5,6].尽管经验模态分解^[7,8]具有数据自驱动性,无需对陀螺输出信号进行预处理,但各个模态之间可能存在混叠现象^[9,10].并且,这些方法都是基于对陀螺信号的数理统计,滤除了差异较大的数据,所以,当意外发生造成信号突变时,基于统计的信号处理模型的适应性会大大降低,并且,对陀螺信号进行阈值滤波时,噪声估计带来的误差是不确定的,所以这些方法并不适用于工程应用.

本文根据光程倍增光纤陀螺具有的平行、垂直偏振光交替环行的特性,理论推导陀螺中偏振合束器的有限消光比带来的一次、三次环行状态,然而这使得陀螺的奇偶时隙输出之间具有相关性,所以提出利用这种相关性对零偏进行相关抵消的陀螺信号处理方法,最后采集光程倍增光纤陀螺在室温下的零偏数据进行处理,验证该方法能够有效提高陀螺的精度.本文提出的陀螺信号处理方法利用的是光程倍增光纤陀螺本身具有的奇偶时隙输出之间的相关性,这不会因外界环境的影响而改变,所以,利用该相关性对陀螺零偏进行相关抵消的信号处理方法可为工程应用中光纤陀螺的精度优化提供借鉴.

1 光程倍增光纤陀螺及其偏振误差

1.1 光程倍增光纤陀螺结构及其传输特性

光程倍增光纤陀螺^[11]结构如图1所示,即在普通的干涉型保偏光纤陀螺的Y波导与保偏光纤传感线圈之间,插入一个由两个偏振合束器(Polarization Beam Combiner, PBC)和一个 90° 偏振旋转片组成的偏振环行器.两只PBC的一输入尾纤与Y波导的两个输出尾纤保偏连接(熔接点为H、K),且输入尾纤均保留光束的平行偏振态,消减光束的垂直偏振态;它们的另一输入尾纤保偏对接(熔接点为G),均保留光束的垂直偏振态,消减平行偏振态;它们的输出尾纤与保偏光纤线圈保偏连接(熔接点为I、J),并在偏振合束器PBC1的晶体(见图1中PBC1的小方块)与转置器(PBC1输出端处的暗灰色小长方形)之间放置一个 90° 的Faraday旋转片R(用阴影表示),使得输出光束偏振态改变,实现偏振环行功能.

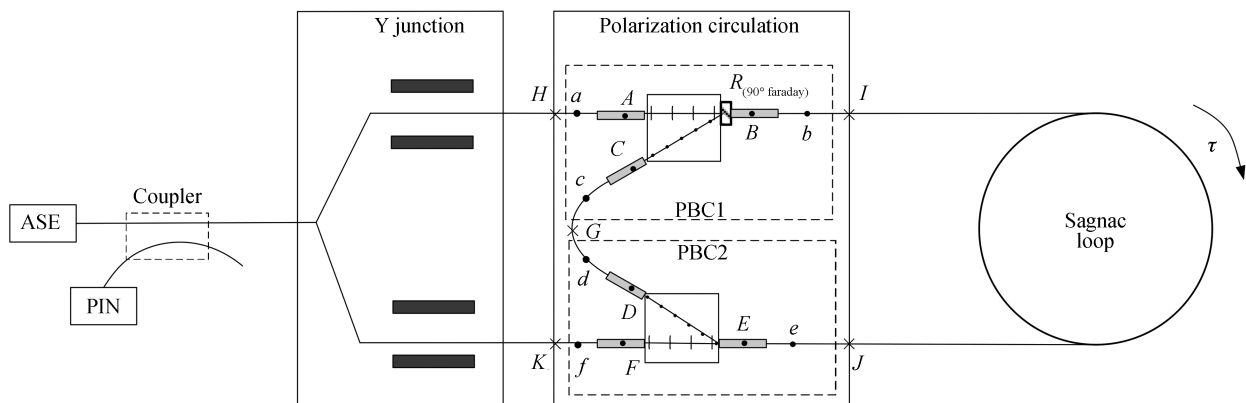


图1 光程倍增光纤陀螺

Fig.1 Fiber optic gyro with double optical length

偏振环行器是一个 2×2 的双入(点H、K)双出(点I、J)模块.Y波导上分支尾纤输出的平行线偏振光由H端口输入偏振环行器时,以平行偏振态传输至R,偏振态旋转 90° ,从偏振环行器I口输出垂直线偏振光进入传感线圈保偏光纤慢轴(x轴),以垂直线偏振态沿线圈慢轴环行,由端口J输入偏振环行器,继续以垂直线偏振态经两PBC的尾纤熔接点G传输至R,偏振态再次旋转 90° ,回到平行线偏振态,从偏振环行器I口输出平行线偏振光进入传感线圈保偏光纤快轴(y轴),以平行线偏振态绕线圈环行,由J输入偏振环行

器,继续以平行线偏振态传输至端口 K 从偏振环行器输出平行线偏振光,再由 Y 波导下分支尾纤返回形成顺时针(Clockwise, CW)光束.同理, Y 波导下分支尾纤输出的平行线偏振光,从 K 端口输入,以平行线偏振态传输至 J 口输出平行线偏振光,进入线圈,以平行线偏振态环行至 I 口,又继续传输至 R ,偏振态改变,又以垂直偏振态经 G 传输至 J 口输出垂直线偏振光,进入线圈,以垂直线偏振态环行至 I 口,又继续传输至 R ,偏振态改变为平行,然后以平行线偏振态传输至 H 从偏振环行器输出平行线偏振光,再由 Y 波导上分支尾纤返回形成逆时针(Counterclockwise, CCW)光束.

1.2 光程倍增光纤陀螺的偏振误差机理

光程倍增光纤陀螺的偏振误差,可分为振幅型和强度型.本文主要考虑偏振环行器的插入带来的偏振误差.由于偏振合束器由晶体、转置器和尾纤组成,所以可将晶体与转置器以及转置器与尾纤之间的耦合点视为一个耦合点,在图 1 中用点 A, B, C, D, E, F 来表示; a, b, c, d, e, f 分别为对应转置器的耦合尾纤中的串扰点.设经 Y 波导后输入偏振环行器的顺(CW)、逆(CCW)时针光束 E_{11}, E'_{11} 与 E_{22}, E'_{22} 分别沿平行偏振轴与垂直偏振轴方向传输,考虑到实验所用的 Y 波导消光比 ϵ 达 50 dB 以上,所以本文仅考虑 E_{11}, E'_{11} 波列.光路中耦合点的功率串扰系数统一表示为 ρ ,偏振环行器损耗幅值系数与线圈损耗功率系数分别为 α, γ .

首先分析振幅型偏振误差,它是偏振串扰次波与主波干涉产生的相位误差.在 Y 波导处合波叠加的 CW、CCW 光波有

1) 在光路中一直沿主轴传输的 E_{1111} 和 E'_{1111} 波列.这是光程倍增光纤陀螺的主波列, E_{1111} 传输路径和偏振态表示为 $// \rightarrow A(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow B(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow B(//) \rightarrow E(//) \rightarrow F(//) \rightarrow //$,同理 E'_{1111} 为 $// \rightarrow F(//) \rightarrow E(//) \rightarrow B(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow B(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow A(//) \rightarrow //$,其相位差为零.

2) 在光路中串扰两次又回到主轴的 E_{1121} 和 E'_{1121} 波列.

a) 当光束(第一次环行时)在 B, b 两点同时发生串扰,则 CW、CCW 传输路径和偏振态分别为 $// \rightarrow A(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow B(//) \rightarrow b(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow B(//) \rightarrow E(//) \rightarrow F(//) \rightarrow //$, $// \rightarrow F(//) \rightarrow E(//) \rightarrow b(\perp) \rightarrow B(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow B(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow A(//) \rightarrow //$,其相位差为 $2l_{Bd} \Delta\beta (\Delta\beta = \beta_{\perp} - \beta_{\parallel})$ 为慢轴 x 与快轴 y 的传播常数之差),与主波列的相位差均为 $l_{Bd} \Delta\beta$,当 $l_{Bd} \Delta\beta < \bar{\beta} L_c$ (L_c 为光源的相干长度)时,会与主波相干,则产生振幅型偏振误差,误差相位为 $\varphi_{e1121} < 2 \left| \frac{E_{1121}}{E_{1111}} \right| = 2\rho$.若 $\rho \sim 10^{-6}$,则振幅型偏振误差导致的相位误差小于 $2 \mu\text{rad}$,对 $L = 2 \times 1\ 300 \text{ m}$, $D = 80 \text{ cm}$ 的光程倍增陀螺,当光源平均波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时, $1^\circ/\text{h}$ 对应的相移是 $13.6 \mu\text{rad}$,则上述串扰引起的陀螺输出误差小于 $0.15^\circ/\text{h}$.

b) 当在第一次绕线圈环行时,CW 光束在 B, b 处,而 CCW 光束在 E, e 处同时发生串扰,其相位差为 $l_{Bd} \beta_{\parallel} - l_{Ee} \beta_{\perp}$,与主波列的相位差分别为 $l_{Bd} \Delta\beta, l_{Ee} \Delta\beta$,则当三者均小于 $\bar{\beta} L_c$ 时,产生振幅型偏振误差, $\varphi_{e1121} < 2 \left| \frac{E_{1121}}{E_{1111}} \right| = 2\rho$.

c) 当在其他很近的两点发生串扰,如 $A, a, C, c, D, d, E, e, F, f$ 等,或者在第二次绕线圈环行时发生串扰,与上述情况类似.

再分析强度型偏振误差.强度型偏振误差指与主波不相干的偏振串扰次波之间的干涉或强度涨落.由于原本沿正交轴传输的光束,沿传输轴的光束串扰一次后会直接输出(未实现光程倍增),此处仅考虑光路中串扰两次的这一种情况.

1) 在光路中串扰两次后回到主轴的 E_{1121} 和 E'_{1121} 波列.

2) 在 B, E 两点同时发生串扰时,CW 与 CCW 的相位差为 $2l_{BE} \Delta\beta$,与主波列的相位差均为 $l_{BE} \Delta\beta$,显然 $l_{BE} \Delta\beta > \bar{\beta} L_c$,与主波不相干,产生强度型偏振误差, $\varphi'_{e1121} < 2 \left| \frac{E'_{1121}}{E_{1111}} \right|^2 = 2\rho^2$,引起的陀螺输出误差在 $10^{-7}^\circ/\text{h}$ 左右.

3) 当在其他两点发生串扰,如 b, e, C, D, c, d 等,与上述情况类似.

2 光程倍增光纤陀螺输出信号的相关特性

偏振环行器的插入使得顺/逆时针光束分别以垂直/平行、平行/垂直偏振态绕线圈环行各一次,能使等效传感线圈光纤长度加倍,还消除了光纤陀螺中的 Faraday 非互易相移^[11],并且,其偏振耦合传播互易性和保偏光纤的 $x-y$ 轴对称性,可实现偏振串扰非互易相移的完全抵消。

然而,由于器件的消光比不足,PBC的尾纤消光比通常为20~25 dB,如图1中耦合点B、C、D、E,使得陀螺的输出不仅有在陀螺中环行两次后的光束,可能还有环行一次和三次甚至更多的情况,由于环行三次以上再输出的光束光波场强已衰减至很小,更别说PIN处的输出光功率,故其对陀螺精度影响不大,所以不作考虑。易知,由于偏振环行器的互易结构,顺逆时针的环行状态的互易性也同样适用于B、E两个耦合点造成的一次和三次环行光束。由于光程倍增光纤陀螺中的Y波导消光比可达50~60 dB以上,此处不考虑输入处A、F的串扰;也不考虑C、D点,因为一、三次环行通常为串扰一次的状态,而在C或D串扰的光波会在PBC的输入尾纤处被消减;另外,b、c、d、e作为尾纤中随机的串扰点,使得偏振耦合不具有互易性,尽管它们也会对陀螺输出造成影响,但此处暂时不考虑这种偏振串扰带来的偏振误差。所以,此处仅分析在Y波导处可检测到的光强的典型情况,即B、E耦合点造成的一次、三次环行以及二次环行主波,便于从整体上大致分析陀螺的输出特性。

尽管CW、CCW的一次和三次环行状态的偏振串扰是互易的,但是一次和三次环行状态的非互易相移不能完全抵消。图2为典型的一、三次环行状态,即在B、E处发生串扰的情况,与二次环行的主波列。在顺逆时针光束在光路中的偏振环行状态互易的基础上,且其Sagnac非互易相移相反,需要进一步分析其偏振相位,顺逆时针光束的偏置相位差不总等于 $\pi/2$,具体如表1所示。

表1 CW和CCW输出光束及其偏置相位
Table 1 CW and CCW output beam and offset phase

$\varphi_{CCW}/\varphi_{CW}$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	/	0	$\pi/4$	$\pi/4$	0	0	$\pi/4$	$\pi/4$
2	0	/	$\pi/4$	$\pi/4$	0	0	$\pi/4$	$\pi/4$
3	$-\pi/4$	$-\pi/4$	/	0	$-\pi/4$	$-\pi/4$	0	0
4	$-\pi/4$	$-\pi/4$	0	/	$-\pi/4$	$-\pi/4$	0	0
5	0	0	$\pi/4$	$\pi/4$	/	0	$\pi/4$	$\pi/4$
6	0	0	$\pi/4$	$\pi/4$	0	/	$\pi/4$	$\pi/4$
7	$-\pi/4$	$-\pi/4$	0	0	$-\pi/4$	$-\pi/4$	/	0
8	$-\pi/4$	$-\pi/4$	0	0	$-\pi/4$	$-\pi/4$	0	/

表1中的1~8为时隙,其长度等于光纤传感线圈的光传输时间 τ , 2τ 是倍增陀螺的特征时间;其中“行”为输入时隙值,“列”为输出时隙值,如表1(1,2)指第一时隙输入第二时隙输出的光束,依次类推。由表1易知,每个时隙下对应的一次、两次和三次环行后的输出波所对应的偏置相位情况是以 4τ 为周期循环的,此处就 $5\tau\sim 8\tau$ 时隙PIN处的输出特性进行分析。例如 5τ 时隙,到达PIN处的光波光场应是环行一次、两次和三次的光波光场之和,表示为

$$\begin{cases} E_{5CW} = E_{CW(\tau)} + E_{CW(2\tau)} + E_{CW(3\tau)} \\ E_{5CCW} = E_{CCW(\tau)} + E_{CCW(2\tau)} + E_{CCW(3\tau)} \end{cases} \quad (1)$$

对应表1中的(4,5)、(3,5)与(2,5)状态,即第4、3、2时隙输入分别在线圈中环行1、2、3次后输出的光束,顺时针光束 $E_{5CW} = E_{CW(\tau)} + E_{CW(2\tau)} + E_{CW(3\tau)}$ 包含传输路径与偏振态为 $// \rightarrow A(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow B(//) \rightarrow E(//) \rightarrow F(//) \rightarrow //$ 与 $// \rightarrow A(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow B(\perp) \rightarrow E(//) \rightarrow F(//) \rightarrow //$ 所表示的一次环行; $// \rightarrow A(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow B(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow B(//) \rightarrow E(//) \rightarrow F(//) \rightarrow //$ 所表示的二次环行; $// \rightarrow A(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow B(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow B(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow B(//) \rightarrow E(//) \rightarrow F(//) \rightarrow //$ 与 $// \rightarrow A(//) \rightarrow R(\perp) \rightarrow B(\perp) \rightarrow E(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow B(//) \rightarrow E(\perp) \rightarrow D(\perp) \rightarrow C(\perp) \rightarrow R(//) \rightarrow B(//) \rightarrow E(//) \rightarrow F(//) \rightarrow //$ 所表示的三次环行,如图2所示,逆时针方向不再赘述。

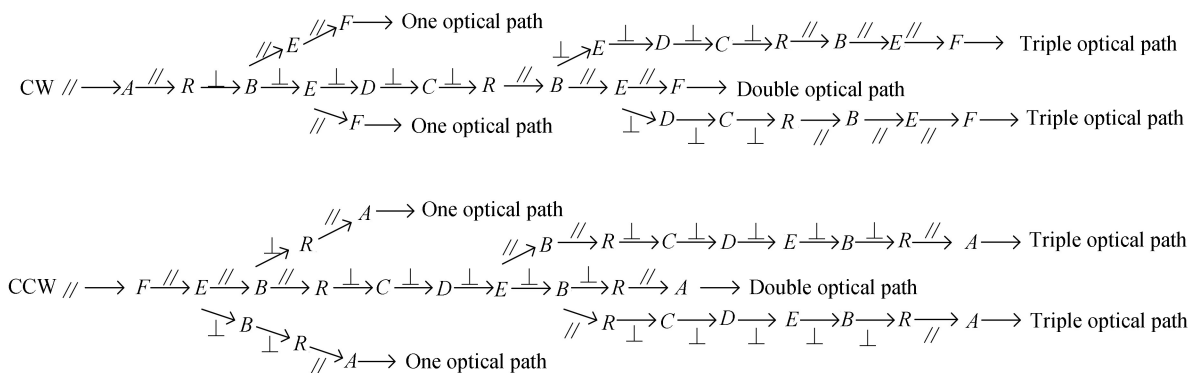


图2 CW、CCW 光环行传输路径与偏振状态图
Fig.2 Transmission path and polarization state of CW and CCW beams

根据干涉式光纤陀螺在开环状态下的方波相位调制系统,其结构如图3,分析光纤陀螺的输出特性.在如图2所示的顺逆时针光束传输路径情况下,若用 $\alpha \sqrt{\rho_0 \rho_B} \gamma e^{i\beta_{\parallel} L} e^{i(\varphi + \varphi_R/2 - \pi/4)}$ 表示在B处发生串扰输出的一次环形波 $// \rightarrow A (//) \rightarrow R (\perp) \rightarrow B (//) \rightarrow E (//) \rightarrow F (//) \rightarrow //$,那么,以此类推, $5\tau, 6\tau, 7\tau, 8\tau$ 时隙 CW 的输出光场强度表示为

$$E_{5CW} = E_{CW(5\tau)} + E_{CW(6\tau)} + E_{CW(7\tau)} = \alpha \sqrt{\rho_0 \gamma} (\sqrt{\rho_B} e^{i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} L}) e^{i(\varphi + \varphi_R/2 - \pi/4)} + \alpha^2 \gamma \sqrt{\rho_0} e^{i\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} e^{i(\varphi + \varphi_R - \pi/4)} + \sqrt{\alpha^6 \gamma^3 \rho_0} (\sqrt{\rho_B} e^{i2\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} (L+2L) + i2\beta_{\parallel} L}) e^{i(\varphi + 3\varphi_R/2)} \quad (2)$$

$$E_{6CW} = \alpha \sqrt{\rho_0 \gamma} (\sqrt{\rho_B} e^{i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} L}) e^{i(\varphi + \varphi_R/2)} + \alpha^2 \gamma \sqrt{\rho_0} e^{i\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} e^{i(\varphi + \varphi_R - \pi/4)} + \sqrt{\alpha^6 \gamma^3 \rho_0} (\sqrt{\rho_B} e^{i2\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} (L+2L) + i2\beta_{\parallel} L}) e^{i(\varphi + 3\varphi_R/2 - \pi/4)} \quad (3)$$

$$E_{7CW} = \alpha \sqrt{\rho_0 \gamma} (\sqrt{\rho_B} e^{i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} L}) e^{i(\varphi + \varphi_R/2 - \pi/4)} + \alpha^2 \gamma \sqrt{\rho_0} e^{i\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} e^{i(\varphi + \varphi_R + \pi/4)} + \sqrt{\alpha^6 \gamma^3 \rho_0} (\sqrt{\rho_B} e^{i2\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} (L+2L) + i2\beta_{\parallel} L}) e^{i(\varphi + 3\varphi_R/2)} \quad (4)$$

$$E_{8CW} = \alpha \sqrt{\rho_0 \gamma} (\sqrt{\rho_B} e^{i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} L}) e^{i(\varphi + \varphi_R/2)} + \alpha^2 \gamma \sqrt{\rho_0} e^{i\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} e^{i(\varphi + \varphi_R + \pi/4)} + \sqrt{\alpha^6 \gamma^3 \rho_0} (\sqrt{\rho_B} e^{i2\beta_{\perp} (L+L) + i\beta_{\parallel} L} + \sqrt{\rho_E} e^{i\beta_{\perp} (L+2L) + i2\beta_{\parallel} L}) e^{i(\varphi + 3\varphi_R/2 + \pi/4)} \quad (5)$$

式中, L 为光纤传感线圈长, l 为环路 BCDE 长, ρ_0 为输入光功率, ρ_B 和 ρ_E 分别是 B 和 E 点的功率串扰系数. φ_R 是一个渡越时间 τ 内 CW、CCW 光束产生的 Sagnac 相位差. $5 \sim 8$ 时刻 CCW 光束光场强度与 CW 相同, 偏振串扰与 CW 互易, Sagnac 相移与相位偏置与 CW 大小相同, 方向相反.

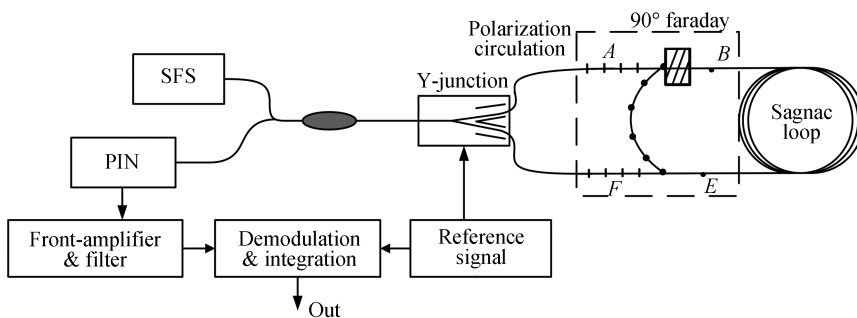


图3 干涉式光纤陀螺的开环结构原理
Fig.3 Principle of open loop architecture of interferometric fiber optic gyroscope

式(2)中第一项为顺时针光束的一次环行, Sagnac 相移是 $\varphi_R/2$, φ 是 Y 波导上/下分支尾纤输出的平行线偏振光的初始相位, 偏置相位是 $-\pi/4$; 第二项为二次环行, Sagnac 相移是 φ_R , 偏置相位也是 $-\pi/4$; 第三项为三次环行, Sagnac 相移是 $3\varphi_R/2$, 偏置相位是零, 所以三次环行对解调输出无影响. 同理, 由式(3)(4)(5)可知, 一次环行影响 5、7 时隙的解调输出, 三次环行影响 6、8 时隙.

根据干涉式光纤陀螺方波相位调制的解调方法^[12], 在开环状态下, 其解调输出是幅值分别为 5 时隙减

去 7 时隙和 6 时隙减去 8 时隙输出光功率的周期方波信号,周期等于倍增陀螺的特征时间 2τ .

$$V_{5-7} = 4\alpha^4 \gamma^2 R \mathfrak{R} \rho_0 \sin 2\varphi_R + 4\alpha^2 \gamma R \mathfrak{R} \rho_0 (\rho_B + \rho_E) \sin \varphi_R \quad (6)$$

$$V_{6-8} = 4\alpha^4 \gamma^2 R \mathfrak{R} \rho_0 \sin 2\varphi_R + 4\alpha^6 \gamma^3 R \mathfrak{R} \rho_0 (\rho_B + \rho_E) \sin 3\varphi_R \quad (7)$$

式中, \mathfrak{R} 为光电检测器的响应度, R 为光电检测器的负载电阻. 明显地, 光程倍增光纤陀螺的解调输出信号相比于普通的干涉型保偏光纤陀螺增大了一倍, 降低了陀螺这种微弱信号的采集难度, 提高了陀螺系统的灵敏度. 并且, 可知奇、偶时隙的开环输出之间具有相关性, 其中, 奇数时隙中含有的是一次环行, 而偶数时隙中含有三次环行.

闭环状态下, 反馈相位差 φ_F 应与 Sagnac 相位差 $\Delta\varphi_R$ 相抵消, 陀螺输出的反馈相位差 φ_F 即为 Sagnac 相移. 则令 $V'_{5-7} = 0, V'_{6-8} = 0$, 即

$$V'_{5-7} = 4\alpha^4 \gamma^2 R \mathfrak{R} \rho_0 \sin(2\varphi_R - \varphi_{F_odd}) + 4\alpha^2 \gamma R \mathfrak{R} \rho_0 (\rho_B + \rho_E) \sin(\varphi_R - \varphi_{F_odd}) = 0 \quad (8)$$

$$V'_{6-8} = 4\alpha^4 \gamma^2 R \mathfrak{R} \rho_0 \sin(2\varphi_R - \varphi_{F_even}) + 4\alpha^6 \gamma^3 R \mathfrak{R} \rho_0 (\rho_B + \rho_E) \sin(3\varphi_R - \varphi_{F_even}) = 0 \quad (9)$$

式中,

$$\varphi_{F_odd} \approx \frac{2\alpha^2 \gamma + \rho_E + \rho_B}{\alpha^2 \gamma + \rho_E + \rho_B} \cdot \varphi_R = \left(2 - \frac{\rho_E + \rho_B}{\alpha^2 \gamma + \rho_E + \rho_B} \right) \varphi_R, t = \tau, 3\tau, 5\tau \dots \quad (10)$$

$$\varphi_{F_even} \approx \frac{2 + 3\alpha^2 \gamma (\rho_E + \rho_B)}{1 + \alpha^2 \gamma (\rho_E + \rho_B)} \varphi_R = \left[2 + \frac{\alpha^2 \gamma (\rho_E + \rho_B)}{1 + \alpha^2 \gamma (\rho_E + \rho_B)} \right] \varphi_R, t = 0, 2\tau, 4\tau \dots \quad (11)$$

易知, 当反馈相位使 $V'_{5-7} = 0$ 时, 不能同时使 $V'_{6-8} = 0$, 而 Y 波导的相位调制难以实现奇偶时隙的不同步, 故通常工作在开环状态下. 并且, 式(10)、(11)进一步验证陀螺奇偶时隙的输出具有负相关性.

当光路中耦合点的功率串扰系数 $\rho \sim 10^{-6}$, 偏振环行器损耗 $\alpha = 2$ dB, 绕线圈环行一次的损耗 $\gamma = 0.25$ dB, 可估算出其奇偶时隙中一次、三次环行造成的输出误差量级分别为 $4 \times 10^{-6} \varphi_R$ 与 $10^{-6} \varphi_R$. 这是一个极小的误差量级. 然而, 在实际中, 偏振合束器的尾纤消光比通常在 $20 \sim 25$ dB 左右, 即 B、E 两处的功率耦合系数 $\rho_{B(E)} \sim 10^{-2}$, 故一次、三次环行误差可达 $\frac{\varphi_R}{25}, \frac{\varphi_R}{100}$, 不可忽略. 所以, 可利用一次、三次环行光束所造成的奇、偶时隙输出之间的确定相关性, 对输出数据进行处理, 即相关性抵消, 以抵消零偏并改善其零偏稳定性.

3 偏振误差相关抵消的理论分析

相关抵消对于信号估计是最佳线性处理方法, 利用线性变换去掉信号 \mathbf{x} (N 维)、 \mathbf{y} (M 维) 之间相关的部分. 假设对 \mathbf{y} 进行线性变换的矩阵是 \mathbf{H} , 且 \mathbf{y} 与 \mathbf{x} 相关的部分为

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}\mathbf{y} \quad (12)$$

适当地选择 $N \times M$ 的变换矩阵 \mathbf{H} , 使得随机矢量 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{H}\mathbf{y}$ 与 \mathbf{y} 无关, 即 $\mathbf{R}_{e\mathbf{y}} = E[\mathbf{e}\mathbf{y}^T] = 0$. 设 $\mathbf{x} = \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2$, 其中 \mathbf{x}_1 与 \mathbf{y} 相关, \mathbf{x}_2 与 \mathbf{y} 不相关, 则有

$$\mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{y}} = E[\mathbf{x}\mathbf{y}^T] = E[(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2)\mathbf{y}^T] = \mathbf{R}_{\mathbf{x}_1\mathbf{y}} + \mathbf{R}_{\mathbf{x}_2\mathbf{y}} = \mathbf{R}_{\mathbf{x}_1\mathbf{y}} \quad (13)$$

$\hat{\mathbf{x}}$ 是对 \mathbf{x}_1 的估计, 即对 \mathbf{x} 中与 \mathbf{y} 相关部分的估计, 对 \mathbf{y} 的线性变换不可能估计与 \mathbf{y} 不相关的部分 \mathbf{x}_2 . 所以由 \mathbf{y} 估计 \mathbf{x} 的误差矢量 $\mathbf{e} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 - \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_1 - \hat{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{x}_2$ 包含了 \mathbf{x}_1 部分的估计误差和 \mathbf{x}_2 部分, 当相关部分完全抵消时, 误差 \mathbf{e} 与 \mathbf{y} 不相关, 这是 \mathbf{x} 的最小均方误差估计, 也是 \mathbf{x} 的最佳线性估计.

4 陀螺偏振误差相关抵消的实验研究

4.1 输出零偏实验

对光程倍增光纤陀螺进行零偏实验, 实验现场图如图 4 所示. 实验选用超荧光光纤光源 (Super fluorescent Fiber Source, SFS), 其输出光功率为 5 mW, 两只 PBC 的尾纤消光比在 27 dB 左右, 光纤线圈长 1 243 m (由于光程两倍增, 所以等效线圈长 2 486 m), 以 50 MHz 的频率对陀螺进行采样, 首先得到陀螺的直接输出数 (经 AD 转换后), 并以 100 s 为滑动平均时间, 每秒得到一个输出, 如图 5 所示, 其中, 实线是“5-7”, 即奇数时隙的输出; 点横虚线是“6-8”, 即偶数时隙的输出. 正如式(6)、(7)所示, 奇数时隙输出表示 2 次环行+1 次环行; 偶奇数时隙输出表示 2 次环行+3 次环行.



图4 光程倍增光纤陀螺零偏实验图

Fig.4 Zero bias experimental diagram of interferometric fiber optic gyroscope with double optical length

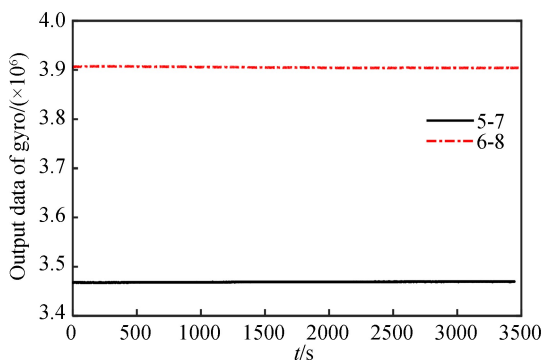


图5 状态1的陀螺输出数

Fig.5 The Output data of gyro in test 1

对陀螺进行翻转测试,得到陀螺在朝天与朝地状态下的输出, $F_{up} = F_{earth_up} + F_1$, $F_{down} = F_{earth_down} + F_2$. 其中, F_{up} 、 F_{down} 分别为陀螺在朝天/地测试状态下的输出数; F_{earth_up} 、 F_{earth_down} 分别为地球自转角速度的朝天/地分量影响的陀螺输出数,应互为相反数; F_1 、 F_2 分别为陀螺在朝天/地状态下无地球自转影响时的输出数.因为短时间内测试环境不会变,则 $F_1 = F_2$; 并且,上海地区地球转速的竖直分量约为 $-7.8^\circ/h$,即对陀螺零偏造成的影响为 $B_{earth_up} = -7.8^\circ/h$, $B_{earth_down} = 7.8^\circ/h$.故联立以上两式,求差值,可得到地球自转角速度的竖直分量引起的陀螺输出数,又根据 GJB2426A-2004 光纤陀螺仪测试方法,可得其标度因数 $K = \overline{F_{earth_down}} / B_{earth_down} = (F_{down} - F_{up}) / 2B_{earth_down}$,其中上横线表示求取平均.

分别对奇偶时隙的输出数据进行以上处理,得到奇偶时隙的标度因数分别为 $K_1 = 439\ 977$, $K_2 = 508\ 043$,则可得到陀螺在无地球自转影响下的奇/偶时隙输出, $B_{0_odd} = F_{down_odd} / K_1 - B_{earth_down}$, $B_{0_even} = F_{down_even} / K_2 - B_{earth_down}$,如图6所示.奇数时隙(实线)与偶数时隙(点横线)的零偏具有负相关性,奇数时隙输出零偏增大时,偶数时隙输出零偏是减小的(符号相反),满足理论推导中的负相关特性;并且,奇偶时隙的输出零偏为 $-0.1^\circ/h$ 与 $0.08^\circ/h$,该量级与光程倍增光纤陀螺的偏振误差中所分析的振幅型偏振误差在 $0.15^\circ/h$ 范围内相契合;除此之外,偶数时隙的零偏绝对值大于奇数时隙的,应该是三次环行中产生的偏振串扰误差大于一次环行中所产生的偏振串扰误差.

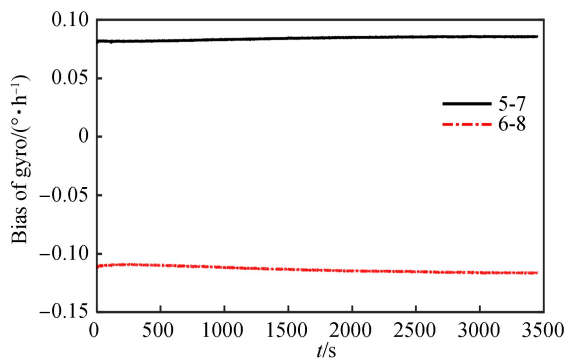


图6 状态1的“5-7”和“6-8”的零偏

Fig.6 The bias of "5-7" and "6-8" in test 1

4.2 偏振误差相关抵消实验

在光程倍增光纤陀螺的零偏实验中,奇偶时隙的输出零偏存在 $\pm 0.1^\circ/h$ 的误差,但通常情况下,零偏可以被抵消掉.根据前面推导的偏振串扰使得陀螺奇偶时隙输出具有相关性,那么,陀螺在任意状态下均存在这种相关性,可以根据该相关性对零偏进行抵消.

利用相关抵消的方法对其奇偶时隙输出中的零偏进行补偿,使得补偿后的输出等于0(零输入状态下),即

$$B'_{0_odd} = B_{0_odd} + k_1(B_{0_even} - B_{0_odd}) \quad t = \tau, 3\tau, 5\tau \dots \quad (14)$$

$$B'_{0_even} = B_{0_even} + k_2(B_{0_even} - B_{0_odd}) \quad t = 0, 2\tau, 4\tau \dots \quad (15)$$

式中, k_1 、 k_2 为奇、偶时隙输出与一次和三次环行相关的部分,即上述中的 H 矩阵,对其进行估计之后对相关部分进行抵消.然而,由于环路中存在其他的偏振误差,并且该误差是随机的,所以该相关系数也是不确定的,在工程应用中,为简化计算量,可取零输入状态时零偏实验中的特值.

利用陀螺输出的相关性对其零偏进行相关抵消,可得修正后的奇时隙(实线)输出如图7所示,不仅修正了零偏,其零偏稳定性从 $0.008^\circ/h$ 改善至 $0.002^\circ/h$.由于奇偶时隙之间具有相关性,所以利用相关抵消对偶时隙的零偏进行处理可以得到同样的效果.

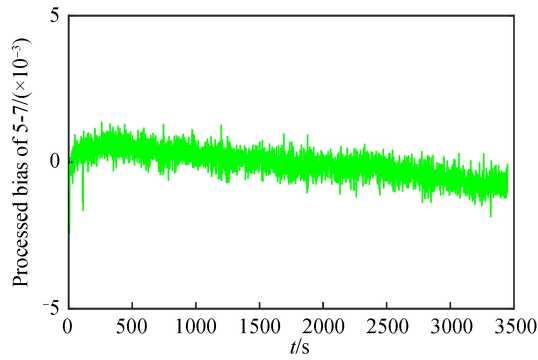


图7 状态1 相关抵消后的“5-7”零偏

Fig.7 The bias after correlative counteraction of "5-7" in test 1

另外,为了验证该方法的稳定性,本项目组还进行了观测时间在一至三小时(时间不等)的七次测试,陀螺的奇偶输出均存在 $0.1^\circ/\text{h}$ 量级的零偏和 $0.01^\circ/\text{h} \sim 0.1^\circ/\text{h}$ 量级的零偏稳定性,但通过零偏相关抵消后其零偏修正且零偏稳定性得以提高.此处再描述另外两种较为典型的状态.当在朝南实验室内,午后12点时阳光直射,室内温度缓慢上升的情况下,延长测试时间为2.5小时,其零偏在 $0.10^\circ/\text{h}$ 左右,零偏稳定性在 $0.02^\circ/\text{h}$ 左右,如图8,相关抵消后的零偏如图9,其零偏稳定性小于 $0.002^\circ/\text{h}$.当陀螺处于变温环境下,利用电吹风对陀螺进行持续加热时,观测2.5小时,其零偏在 $0.03^\circ/\text{h}$ 左右,零偏稳定性在 $0.01^\circ/\text{h}$ 左右,如图10,相关抵消后的零偏稳定性,如图11,仍小于 $0.002^\circ/\text{h}$.由于状态2、3中温度状态的改变,陀螺(尤其是线圈)与外界进行热量传递时,与其外部的稳态平衡不断被打破并改变,所以还呈现了周期性的漂移,且在利用特值对其零偏进行相关抵消时也不能将该漂移量去除.

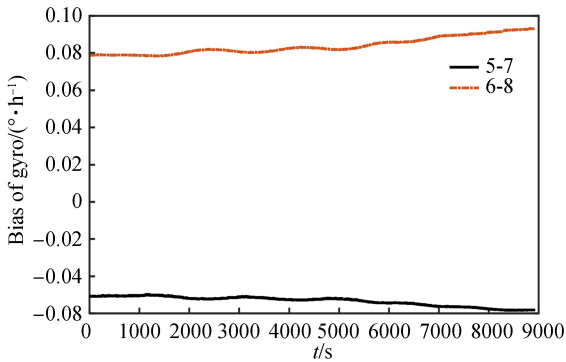


图8 状态2的“5-7”和“6-8”的零偏

Fig.8 The bias of "5-7" and "6-8" in test 2

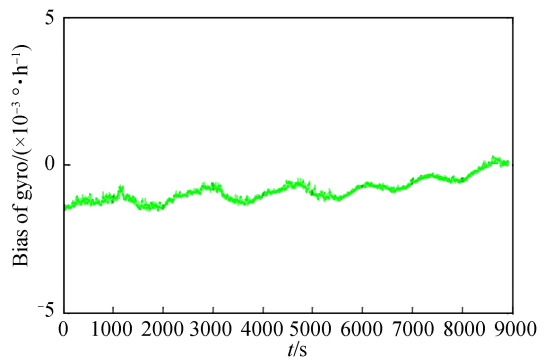


图9 状态2 相关抵消后的“5-7”零偏

Fig.9 The bias after correlative counteraction of "5-7" in test 2

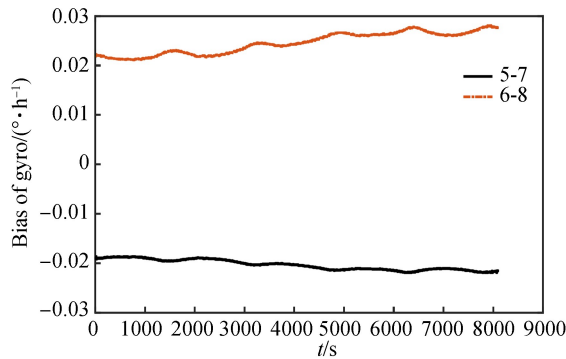


图10 状态3的“5-7”和“6-8”的零偏

Fig.10 The bias of "5-7" and "6-8" in test 3

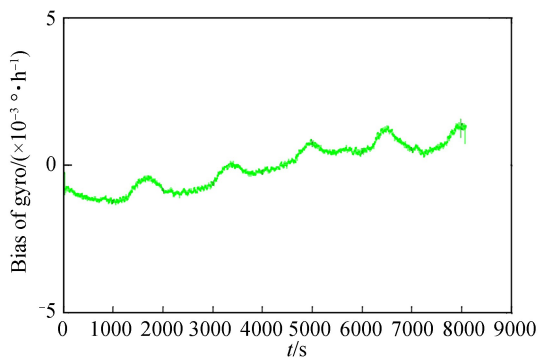


图11 状态3 相关抵消后的“5-7”零偏

Fig.11 The bias after correlative counteraction of "5-7" in test 3

测试结果显示,根据陀螺奇偶输出的相关性进行零偏抵消之后,其零偏及稳定性得到改善.相比于同等条件下的传统陀螺,本实验中光程倍增光纤陀螺本身已经有较好的精度,并根据其奇偶输出表现出的负相关性,进一步进行零偏抵消,能够进一步把零偏稳定性控制在 $0.005^\circ/\text{h}$ 内.

5 结论

在光程倍增光纤陀螺中,其 Sagnac 效应被放大且具有偏振环行的光路特性及奇偶输出之间的相关性.本文分析偏振串扰所造成的奇偶时隙输出的相关性,利用该相关性对陀螺输出的零偏进行抵消,并且能使陀螺的零偏及其稳定性得以改善,小于 $0.005^\circ/\text{h}$.相比于其他研究学者提出的基于统计的零偏误差补偿模型,本文提出的偏振误差相关抵消的零偏信号处理模型原理简单,计算量小,零偏改善效果明显,且对外界环境的适应性很强,为工程应用中优化光纤陀螺的精度提供了参考.然而,利用相关抵消对零偏进行处理的方法,是在光程倍增结构的基础上,其他陀螺的奇偶输出不存在这样的相关性,并不适用;另外,在室温环境下,光程倍增光纤陀螺的零偏不太稳定,除偏振环行器中偏振合束器的消光比不足外,可能还存在其他问题.所以,该方案能否推广到工程应用,有待进一步的理论论证和实验验证.

致谢 在本文实验工作中,得到了上海航天控制技术研究所傅长松,王金芳等的大力支持,深表感谢!

参考文献

- [1] HALIM S, BISONO I N. Automatic seasonal auto regressive moving average models and unit root test detection[J]. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2008, **3**(4): 266-274.
- [2] XUE Liang, JIANG Cheng-yu, CHANG Hong-long, *et al.* A novel Kalman filter for combining outputs of MEMS gyroscope array[J]. *Measurement*, 2012, **45**(4): 745-754.
- [3] DANG Shu-wen, TIAN Wei-feng, QIAN Feng. EMD- and LWT-based stochastic noise eliminating method for fiber optic gyro[J]. *Measurement*, 2011, **44**(10): 2190-2193.
- [4] XU Xiao-su, WU Liang, LIU Yi-ting. Fiber optic gyro denoising algorithm based on LMS and second generation wavelet transform[J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2014, **22**(6): 810-814.
徐晓苏,吴亮,刘义亭.基于 LMS 与二代小波变换的光纤陀螺去噪算法[J].中国惯性技术学报,2014,**22**(6):810-814.
- [5] DANG Shu-wen. Research on signal analysis and filtering technology of fiber optic gyro[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.
党淑雯.光纤陀螺的信号分析及滤波技术研究[D].上海:上海交通大学,2010.
- [6] GAO Wei-wei, WANG Guang-long, ZHANG Chun-xi, *et al.* An AMA-DWT-DMKF algorithm for fiber optic gyro signal filtering[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(6): 122-128.
高伟伟,王广龙,张春熹,等.一种用于光纤陀螺信号滤波的 AMA-DWT-DMKF 算法[J].中国激光,2014,**41**(6):122-128.
- [7] CUI Bing-bo, CHEN Xi-yuan, GONG Zheng-yang. Signal processing of fiber optic gyro based on empirical mode probability distribution[J]. *Chinese Journal of Inertial Technology*, 2015, **23**(5): 690-695.
崔冰波,陈熙源,龚政仰.基于经验模态概率分布的光纤陀螺信号处理[J].中国惯性技术学报,2015,**23**(5):690-695.
- [8] CUI Bing-bo, CHEN Xi-yuan, SONG Rui. Application of EMD threshold filtering in fiber optic gyro drift signal denoising[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 0207001.
崔冰波,陈熙源,宋锐.EMD 阈值滤波在光纤陀螺漂移信号去噪中的应用[J].光学学报,2015,**35**(2):0207001.
- [9] WU Zhao-hua, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, **1**(1): 1-41.
- [10] KOPSINIS Y, MCLAUGHLIN S. Development of EMD-based denoising methods inspired by wavelet thresholding[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, **57**(4): 1351-1362.
- [11] HU Zong-fu, JIANG Run-zhi, ZHOU Jian. Magnetic field error analysis and suppression method for polarization-maintaining fiber interferometric gyroscope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(6): 53-57.
胡宗福,姜润知,周剑.保偏光纤干涉型陀螺的磁场误差分析与抑制方法[J].光学学报,2014,**34**(6):53-57.
- [12] WANG Wei. Interferometric fiber optic gyroscope technology[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2010: 86-93.
王巍.干涉型光纤陀螺仪技术[M].北京:中国宇航出版社,2010:86-93.

Foundation item: Shanghai Aerospace Science and Technology Innovation Fund (No. SAST2015076), Shanghai Rising-star Program (B type) (No.17QB1404300)

引用格式:ZHANG Min, FU Chang-song, WANG Jin-fang, *et al.* Correlation Counteraction of Polarization Errors in Interferometric Fiber Optic Gyroscope with Double Optical Length[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1206004

张敏,傅长松,王金芳,等.光程倍增光纤陀螺偏振误差相关抵消的研究[J].光子学报,2018,**47**(12):1206004