

全反射棱镜式激光陀螺自适应稳频技术

马家君^{1,2} 蒋军彪² 刘健宁^{1,2}

¹西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

²西安北方捷瑞光电科技有限公司, 陕西 西安 710111

摘要 针对全反射棱镜式激光陀螺在稳频过程中相敏信号易受噪声干扰的现象,研究了全反射棱镜式激光陀螺自适应稳频技术。理论分析了全反射棱镜式激光陀螺的稳频特性,结合自适应噪声对消原理,建立了全反射棱镜式激光陀螺自适应稳频系统的数学模型。通过硬件电路设计,搭建了基于递归最小二乘算法的自适应稳频控制系统。分别对原有稳频技术与自适应稳频技术进行了实验测试,实验结果表明,自适应稳频能有效消除噪声对相敏信号的干扰,稳频精度提高了近一个数量级,陀螺精度相应提高了60%以上。此分析结果为提高全反射棱镜式激光陀螺的性能提供了重要参考。

关键词 激光光学;全反射棱镜式激光陀螺;稳频;相敏信号;自适应滤波

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0314002

Adaptive Frequency Stabilization Technique for Total Reflection Prism Laser Gyros

Ma Jiajun^{1,2} Jiang Junbiao² Liu Jianning^{1,2}

¹*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*

²*North Jierui Opto-Electronics Technology Ltd, Xi'an, Shaanxi 710111, China*

Abstract For the phase-sensitive signal of the total reflection prism laser gyros (TRPLG) is subjected to noise interference phenomenon during in frequency stabilization, a novel technique for the adaptive frequency stabilization of TRPLG is studied. The theory of frequency stabilization characteristic of the TRPLG is analyzed, combined with the principle of adaptive noise cancellation, a mathematic model of the adaptive frequency stabilization system in TRPLG is proposed. The control system based on recursive least square method for the adaptive frequency stabilization of TRPLG is built by the hardware circuit design. The experimental tests for the original frequency stabilization technique and adaptive frequency stabilization technique are conducted. The results show that, using adaptive frequency stabilization technique, the performance of phase-sensitive signal subjected to noise interference could be eliminated effectively and frequency stabilization accuracy is improved by nearly an order of magnitude, the gyros accuracy could be improved by over 60%. The analytic study provides an important reference for improving the performance of TRPLG.

Key words laser optics; prism laser gyros; frequency stabilization; phase-sensitive signal; adaptive filter

OCIS codes 140.3370; 140.3425; 140.3570; 140.3560

1 引言

全反射棱镜式激光陀螺(TRPLG)利用棱镜的全反射特性构成闭合光路,具有锁区小、可靠性高、寿命长等优点,在航空航天等领域具有广泛的应用^[1-3]。理论研究表明,TRPLG存在零偏误差、比例因子误差和闭锁效应3种主要的误差源^[4-6],每种误差源都与激光振动频率密切相关,激光振荡频率的不稳定性是影响

收稿日期: 2014-08-03; 收到修改稿日期: 2014-10-28

基金项目: 国际科技合作专项(2012DFR70370)

作者简介: 马家君(1985—),男,博士研究生,主要从事激光与光电子技术等方面的研究。E-mail: majiajun_@126.com

导师简介: 蒋军彪(1962—),男,高级工程师,博士生导师,主要从事惯性技术方面的研究。E-mail: jjbiaotz@163.com

TRPLG 性能的关键因素^[7]。小抖动稳频是通过光强的小抖动调制来确定频率工作点的^[8],是 TRPLG 目前应用最为广泛的稳频方式^[9]。在实践中发现,机械抖动会在交流光强中引入尖峰脉冲,尖峰脉冲频谱分布较宽,在小抖动稳频调制频率范围内有功率输出^[10]。采用传统的带通滤波相敏解调很难滤除尖峰脉冲引入的噪声干扰,且带通滤波器相敏解调将引入一定的相位延迟,在一定程度上影响了 TRPLG 的稳频精度和响应速度。

本文对 TRPLG 的稳频特性进行了理论分析,建立了 TRPLG 自适应相敏解调的理论模型。在现场可编程门阵列(FPGA)中设计了基于递归最小二乘(RLS)算法的自适应滤波器,实现了 TRPLG 自适应稳频技术,在不同温度下对原有带通滤波相敏解调的稳频技术和自适应稳频技术进行了实验测定,实验结果表明,自适应稳频技术消除了各种噪声对相敏信号的干扰,有效提高了相敏信号的信噪比,陀螺稳频精度得到了明显提高。

2 理论模型

TRPLG 采用加热器作为稳频系统的伺服部件,在加热器内部通过压电陶瓷片的正弦振动来实现小抖动调制。通过解调该正弦信号的相位与幅度来确定激光器频率工作点,稳频控制器根据该工作点调节加热器内部加热丝两端的电压,改变稳频调节通道空气折射率,最终实现 TRPLG 频率的稳定,TRPLG 稳频装置如图 1 所示。

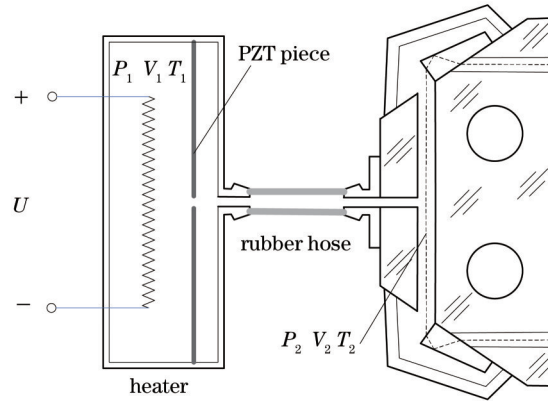


图 1 TRPLG 稳频装置

Fig.1 Frequency stabilization configuration of TRPLG

图 1 中, U 为电热丝两端的电压, P_1 、 V_1 、 T_1 分别为加热器内部的压强、体积和温度, P_2 、 V_2 、 T_2 分别为稳频通道的压强、体积和温度。TRPLG 小抖动调制下激光器光强的变化量与谐振腔程长变化量之间的关系为^[11]

$$\Delta I = K_1 \Delta \langle L \rangle, \quad (1)$$

式中 $K_1 = 2I_0 \frac{1}{k_u} \frac{dv}{k_u} \frac{v_0}{\langle L \rangle}$, v 为激光振荡频率, v_0 为激光振荡的中心频率, I_0 为在中心频率处的激光光强, k_u 为多普勒展宽频率, $\langle L \rangle$ 为谐振腔总光程。稳频通道光学程长的变化量与加热器内部加热丝两端电压的变化量之间的传递函数为

$$H(s) = \frac{\Delta \langle L \rangle (s)}{\Delta U(s)} = \frac{K_2 U}{T_w s + 1}, \quad (2)$$

式中 $K_2 = \frac{1}{HAr \varepsilon_0} \frac{N_1 L_2}{V T_2}$, α 为调节通道气体平均极化率, ε_0 为真空电容率, r 为电热丝电阻, H 为电热丝传热系数, A 为电热丝传热面积, V 为加热器与稳频调节通道总体积, N_1 为加热器内部总分子数, L_2 为调节通道几何程长。TRPLG 原有稳频系统采用带通滤波器进行相敏解调,相敏解调器对应的传递函数为 $G_1(s) = K_3 \exp(-\tau s)$, K_3 为带通滤波器增益, τ 为滤波器延迟时间,相敏解调后 TRPLG 采用积分控制器对系统进行校正,控制器对应的传递函数为 $G_c(s) = 1/T_i(s)$, T_i 为积分时间常数,TRPLG 稳频系统框图如图 2 所示。

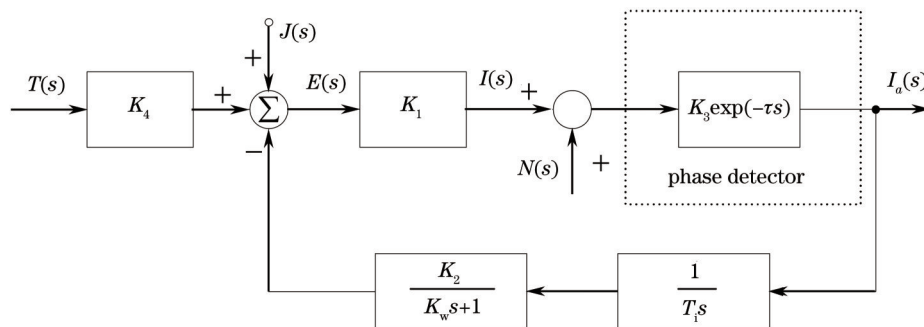


图2 TRPLG 稳频系统框图

Fig.2 Block diagram of frequency stabilization system of TRPLG

图2中 K_4 为外界温度引入谐振腔激光频率变化的增益, $N(s)$ 和 $J(s)$ 分别为扰动信号和小抖动调制信号的拉氏变换。由控制理论, 稳频控制系统在扰动作用下的误差信号为

$$E(s) = -\frac{K_3 \exp(-\tau s)}{1 + K_1 K_3 \exp(-\tau s) G_c(s) H(s)} N(s). \quad (3)$$

以上分析结果表明, TRPLG 稳频精度受到扰动信号的影响, 在中心频率附近相敏信号仅有几个毫伏, 由于机械抖动在交流光强中尖峰脉冲以及其他各种干扰信号, 采用原有带通滤波器相敏解调, 在增益曲线中心频率的一定范围内难以准确检测到相敏信号。针对以上问题, 可以采用自适应噪声对消来进行相敏解调, 以消除随机噪声产生的干扰, 提高 TRPLG 稳频控制的性能。

自适应噪声对消通过自适应滤波器对小抖动调制原始信号进行滤波, 使自适应滤波器输出与交流光强信号中的小抖动调制相匹配的信号, 从而实现对交流光强中相敏信号的自适应提取。自适应滤波器权系数通过自适应算法进行调节, 使滤波器输出为小抖动调制信号的最佳最小均方(LMS)估计, 以获得好的噪声对消效果。目前, 常用的自适应算法有 LMS 算法和 RLS。LMS 算法是一种梯度估值的自适应算法, 它具有计算量小, 易于实现等特点, 但在计算精度和收敛速度上不如 RLS 算法。RLS 算法采用在一段时间内输出误差信号平均功率达到最小作为衡量自适应系统的性能函数, 其权值迭代公式为^[12]

$$\varepsilon_{p,k} = d_k - \mathbf{W}_k^T \mathbf{L}_k, \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_k^{-1} = \frac{1}{\alpha} \left[I - \frac{1}{\alpha + \mathbf{L}_k^T \hat{\mathbf{R}}_{k-1}^{-1} \mathbf{L}_k} \hat{\mathbf{R}}_{k-1}^{-1} \mathbf{L}_k \mathbf{L}_k^T \hat{\mathbf{R}}_{k-1}^{-1} \right], \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_k = \hat{\mathbf{R}}_k^{-1} \mathbf{L}_k^*, \quad (6)$$

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k - \mathbf{M}_k \varepsilon_{p,k}, \quad (7)$$

式中 d_k 为 k 时刻的期待输出, \mathbf{L}_k 为 k 时刻的输入向量, $\hat{\mathbf{R}}_k^{-1}$ 为输入向量相关矩阵的逆矩阵, α 为遗忘因子, \mathbf{M}_k 为 k 时刻的增益向量, \mathbf{W}_k 为 k 时刻的权值向量, $\varepsilon_{p,k}$ 为 k 时刻的误差值。为了保证计算精度, 在此选用 RLS 算法。TRPLG 自适应稳频系统如图 3 所示。

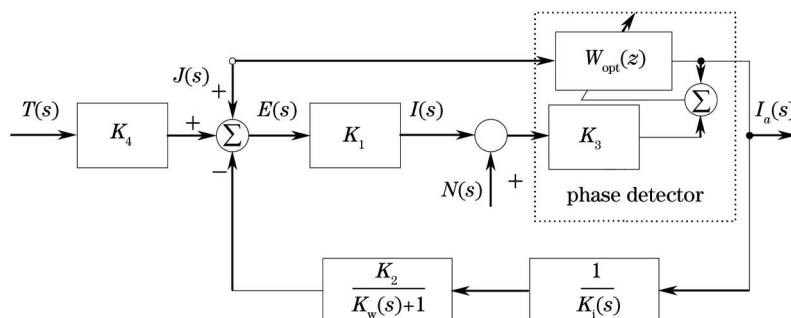


图3 自适应稳频系统框图

Fig.3 Block diagram of adaptive frequency stabilization system

自适应稳频控制系统采用了自适应噪声对消的方式从光强交流中提取相敏信号,能有效提高相敏信号的信噪比和灵敏度。因此,可以降低加热器内部压电陶瓷片上正弦电压的幅度,减小抖动调制对陀螺稳频精度的影响。另外,由(3)式可知,提高相敏信号的信噪比能有效提高TPRLG的稳频精度。

3 系统硬件设计

TRPLG自适应稳频系统采用FPGA作为主控单元,谐振腔输出的光信号经光电转换放大后采用高精度模数转换器(ADC)采集,并将采集到的数字信号送入FPGA,在FPGA中实现自适应相敏解调,并通过数字比例-积分-微力控器(PID)控制输出稳频控制电压,经数模转换器(DAC)转换为模拟信号调节加热器内部加热丝两端的电压来实现自适应稳频,自适应稳频控制系统如图4所示。

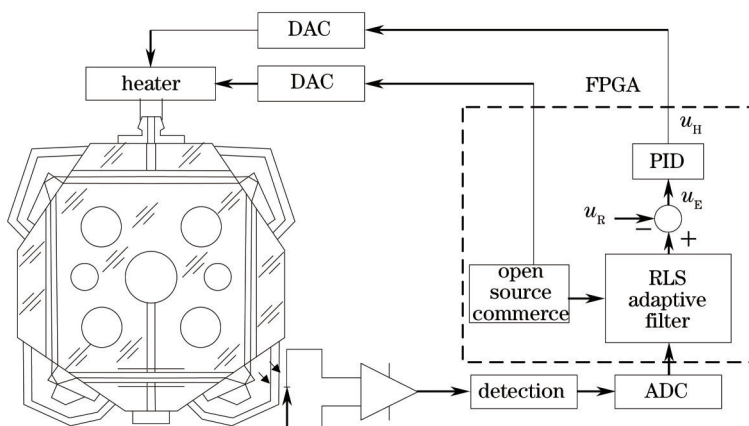


图4 自适应稳频控制系统

Fig.4 Adaptive frequency stabilization control system

自适应稳频系统的核心是RLS自适应滤波器,自适应滤波器权系数调节算法可以采用软件和硬件两种方式来实现。软件实现相对于硬件实现较为简单,但由于RLS自适应算法运算量大,软件实现难以满足自适应稳频的实时性要求;硬件实现具有并行处理能力,运算速度快,能满足自适应稳频的实时性要求。在此,选用基于FPGA硬件逻辑电路来实现RLS自适应算法。根据RLS自适应算法的权值迭代公式,设计了一种交替存储的乘累加结构来实现自适应算法,基于硬件实现的RLS算法结构图如图5所示。

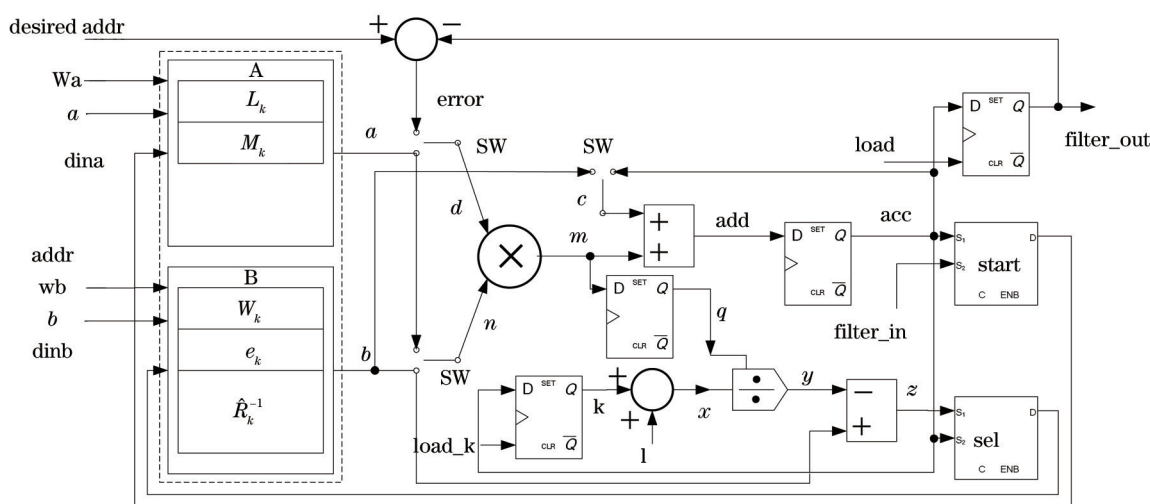


图5 RLS算法硬件结构图

Fig.5 Hardware structure diagrams of RLS algorithm

在图5中,RAM分为A、B两部分,A部分前 p 个储存单元用于储存输入向量 L_k ,后 p 个储存单元用于储存中间变量及滤波器增益向量 M_k ,总储存深度为 $2p$, p 为自适应滤波器阶数;B部分前 p 个储存单元储存

滤波器权向量 \mathbf{W}_k , 中间 p 个储存单元储存中间变量, 后 $p \times p$ 个储存单元储存相关矩阵的逆矩阵 $\hat{\mathbf{R}}_k^{-1}$ 。通过逻辑电路时序控制, 完成 RLS 自适应算法的权值迭代, 从而实现自适应稳频控制。

4 实验结果与分析

为了使小抖动调制强度在各温度下稳定, 小抖动频率的选择应尽量避免开压电陶瓷片的谐振频率、陀螺机械抖动频率和电源工频干扰, 小抖动频率选取为 266.6 Hz 正弦信号。对陀螺交流光强信号进行采集并进行频谱分析, 交流(AC)光强信号及其频谱如图 6 所示。

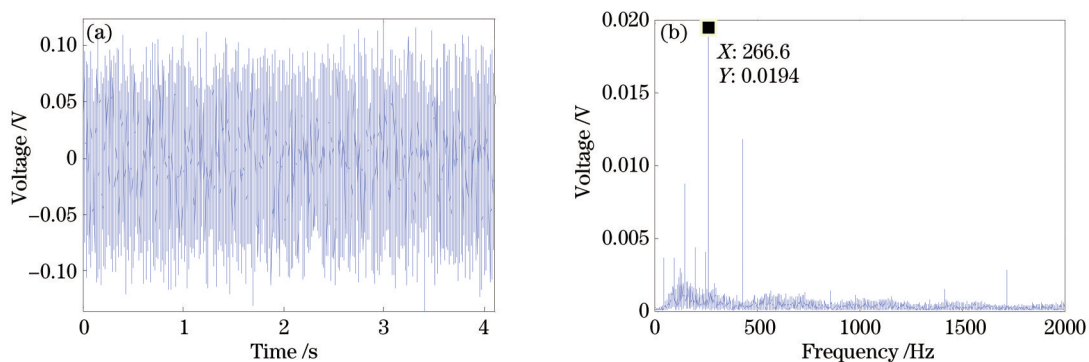


图 6 (a) TRPLG 交流光强信号; (b) 交流光强信号的频谱

Fig.6 (a) AC intensity signal of TRPLG; (b) amplitude spectrum of AC intensity signal

从图 6(b) 中可知, 在 266.6 Hz 的相敏信号附近, 交流光强中有其他干扰信号的频率分量。原有电路采用通带上限频率为 261.6 Hz, 通带下限频率为 271.6 Hz, 阻带上限频率为 206.6 Hz, 阻带下限频率为 326.6 Hz, 阻带衰减为 70 dB 的带通滤波器进行相敏解调, 测试中发现, 在中心频率 10 MHz 的频率范围内, 相敏信号将淹没到噪声信号中, 原有相敏解调很难消除噪声对相敏信号的干扰。对中心频率附近的交流光强信号, 分别采用带通滤波器和 RLS 自适应滤波对相敏信号进行提取, 提取后的相敏信号如图 7 所示。

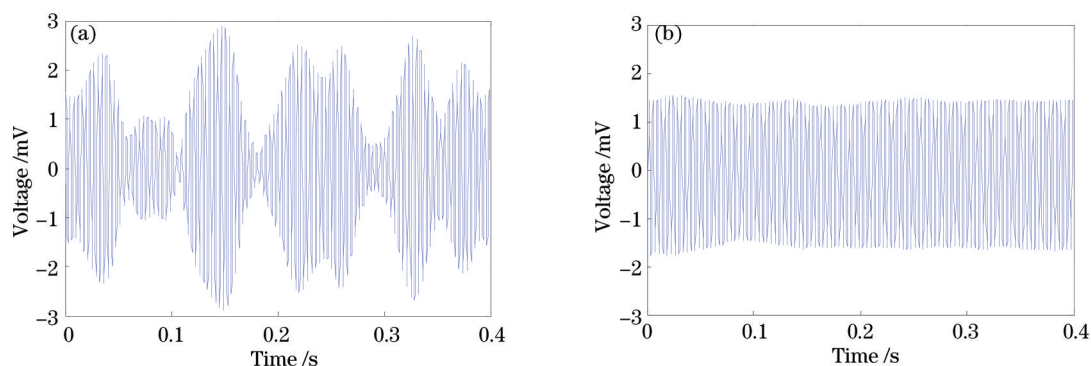


图 7 原有相敏解调与自适应相敏解调对比。(a) 原有相敏解调; (b) 自适应相敏解调

Fig.7 Comparison of original phase sensitive demodulation and adaptive phase sensitive demodulation. (a) Original phase sensitive demodulation; (b) adaptive phase sensitive demodulation

从图 7 可以看出, 与原有相敏解调相比, 自适应相敏解调有效消除了噪声产生的干扰, 提高了相敏信号的信噪比。由于自适应对相敏信号的提取有很高的灵敏度, 可以降低小抖动调制信号的幅值, 减小调制信号对 TRPLG 稳频精度的影响。另外, 由(3)式可知, 在提高相敏信号信噪比的条件下, 增大稳频控制开环增益, 可以有效提高稳频控制的稳态精度。为了进一步验证自适应稳频的有效性, 搭建了 TRPLG 自适应稳频精度检测实验装置如图 8 所示。

分别采用原有稳频技术和 RLS 自适应稳频技术, 将 TRPLG 输出的激光与频率稳定度为 10^{-13} 的碘饱和氩氦激光器进行拍频, 对 TRPLG 稳频精度和性能进行了测试, 测试结果如表 1 所示。

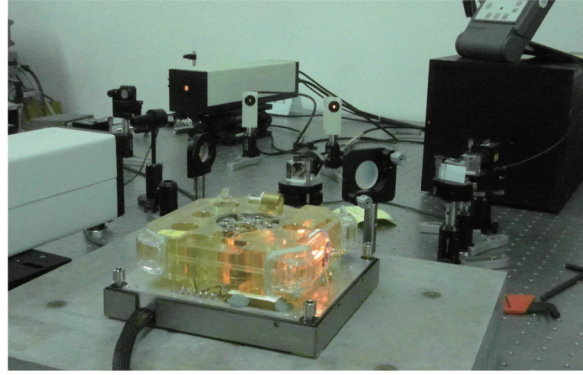


图 8 自适应稳频精度测试实验装置

Fig.8 Testing experimental configurations of adaptive frequency stabilization accuracy.

表 1 原有稳频系统和自适应稳频系统测试比较

Table 1 Comparison of testing under original frequency stabilization and adaptive frequency stabilization

Time /s	Original frequency stabilization		Adaptive frequency stabilization	
	Frequency stabilization accuracy	Gyros accuracy / (°/h)	Frequency stabilization accuracy	Gyros accuracy / (°/h)
1	4.1×10^{-9}	0.09	4.8×10^{-10}	0.06
100	4.2×10^{-9}	0.03	5.0×10^{-10}	0.01
1000	4.0×10^{-9}	0.02	4.8×10^{-10}	0.008

以上测试结果表明,自适应稳频系统与原有稳频系统相比,自适应稳频系统在稳频精度上比原有稳频系统提高了近一个数量级,陀螺性能相应提高了60%以上。

5 结 论

针对全反射棱镜式激光陀螺相敏信号受到噪声干扰的现象建立了自适应稳频的理论模型,采用交替存储的乘累加结构,给出了基于RLS算法的自适应稳频的FPGA硬件设计,并对TRPLG自适应稳频进行了相关测试。结果表明,自适应稳频技术可以消除各种噪声对相敏信号的干扰,有效提高相敏信号的信噪比。在采用自适应稳频的基础上,通过降低小抖动调制信号幅值及提高稳频控制开环增益,自适应稳频系统在稳频精度上比原有稳频系统提高了近一个数量级,陀螺性能相应提高了60%以上。该技术对提高TRPLG的性能以及对提高其他小抖动稳频激光器的稳频精度有重要的参考价值。

参 考 文 献

- 1 Y V Bakin, G N Ziouzev, M B Lioumirski. Laser Gyros with Total Reflection Prisms [M]. Moscow: Moscow Bauman State Technical University, 2003. 1-34.
- 2 Yao Chengkang, Zeng Xiaodong, Cao Changqing. Intensity properties of output light in prism laser gyro with mechanical dither bias [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 094216.
姚呈康, 曾晓东, 曹长庆. 机械抖动棱镜式激光陀螺出射光强度特性[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 094216.
- 3 Liu Jianning, Jiang Junbiao, Shi Shunxiang, et al.. Analysis of total reflection prism ring laser's output characteristic and gyroscope's accuracy [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102002.
刘健宁, 蒋军彪, 石顺祥. 全反射棱镜式环形激光器和光输出及陀螺精度特性分析[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102002.
- 4 Ma Jiajun, Jiang Junbiao, Liu Jianning. Frequency stabilization technique of total reflection prism laser gyros with double longitudinal modes [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0902011.
马家君, 蒋军彪, 刘健宁. 全反射棱镜式激光陀螺双纵模稳频技术[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902011.
- 5 Leonel N Menegozzi, Willis E Lamb, Jr. Theory of a ring laser [J]. Phys Rev, 1973, 8(4): 2103-2125.
- 6 Frederick Aronowitz. Theory of a traveling-wave optical maser [J]. Phys Rev, 1965, 139(3A): 635-646.
- 7 Gao Bolong, Li Shutang. Ring Laser Gyro [M]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 1984. 50-52.

- 高伯龙, 李树棠. 激光陀螺[M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 1984. 50-52.
- 8 H J Murphy. Digital path length control for ring laser gyros: US 5108182 [P]. 1992-04-28.
- 9 Tae W Hahn. Cavity length control apparatus for a multioscillator: US, 4963026 [P]. 1990-10-26.
- 10 Xie Yuanping. Investigation of Phase-demodulation and Frequency Stabilization techniques inMechanically Dithered ring Laser Gyroscopes [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000.
- 谢元平. 机械抖动激光陀螺鉴相解调与稳频技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2000.
- 11 Ma Jiajun, Jiang Junbiao. Research on the frequency stabilization properties of total reflection prism laser gyros [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0102002.
- 马家君, 蒋军彪. 全反射棱镜式激光陀螺稳频特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102002.
- 12 He Zhenya. Adaptive Signal Processor [M]. Beijing: Science Press, 2002. 136-144.
- 何振亚. 自适应信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 136-144.

栏目编辑: 张 雁