

单频长基线激光干涉仪的在线稳定性监测方法

吴 冰 杨 军* 苑 勇 贵 彭 峰 苑 立 波

(哈尔滨工程大学理学院光子科学与技术研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 研究了一种长基线激光干涉仪的在线稳定性监测技术,可用于纳米量级的位移和振动测量。构建了一个臂长 22 m 的激光干涉仪用于位移和振动测量。基于相位生成载波(PGC)解调技术,通过在相位调制载波中增加已知频率、固定幅值的指示信号,利用指示信号的幅度变化,实现激光干涉仪的工作状态监测,以及测量环境的变化与波动的指示。实验结果表明,加入已知幅度频率的指示信号可以实现激光干涉仪在线运行状态的监测。该方法的优点是没有增加硬件负载,可实现激光干涉仪的在线稳定性监测,简化了干涉仪调试过程,提高了运行效率。

关键词 测量;激光干涉仪;纳米测量;相位生成载波;在线稳定性监测

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.0608003

Online Stability Monitoring Technology of Long-Baseline Homodyne Laser Interferometer

Wu Bing Yang Jun Yuan Yonggui Peng Feng Yuan Libo

(Photonics Research Center, School of Science, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract On the Basis of the long-baseline laser interferometer, an online stability monitoring technique is studied for nanoscale displacement and vibration measurement. A laser interferometer with 22 m arm is built to measure displacement and vibration. Based on phase generated carrier (PGC) demodulation technique, an indication signal with known frequency and fixed amplitude is added. Working condition monitoring of laser interferometer, measurement of environmental changes and fluctuation indication can be realized by the variation of the amplitude of indication signal. Experimental results show that online condition monitoring of the laser interferometer can be achieved by adding a known indication signal. This method can carry out online stability monitoring of laser interferometer without extra hardware load, which can simplify the debugging process of interferometer and improve the running efficiency.

Key words measurement; laser interferometer; nano-measurement; phase generated carrier; online stability monitoring

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 280.4788; 350.4600

1 引 言

激光干涉仪由于其测量精度高、动态范围大以及响应频带宽,被广泛应用于高精度振动测量^[1~3],其中长基线激光干涉仪可用于地表震动及应变测量和引力波探测,目前各国均在大力开展长基线激光

干涉仪方面的研究工作。美国的地球透镜计划构建了以 5 个激光应变仪为代表的大陆板块边界观测系统,它能够为地壳运动的研究提供丰富可信的科学信息^[4,5];此外美国还建立了激光干涉引力波天文台,其干涉臂长达 5 km^[6~8],用于探测宇宙引力波。

收稿日期: 2012-02-22; 收到修改稿日期: 2012-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(60927008, 41174161)和科技部国际合作专项(2010DFA22770, 2011DFB11520)资助课题。

作者简介: 吴 冰(1983—),男,博士研究生,主要从事纳米精度激光干涉测量技术等方面的研究。

E-mail: wubing_0107@163.com

导师简介: 苑立波(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事白光干涉,光纤智能结构及光学极限测量等方面的研究。

E-mail: lbyuan@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: yangjun141@263.net

英国和德国合作建造了 GEO600 引力波探测系统,其核心为干涉臂长 600 m 的长基线激光干涉仪^[9~11]。意大利、俄罗斯和日本均建立了长基线激光应变仪^[12~16],用于测量地壳应变,以便为研究地球内部的地质活动提供依据,进而为预测地质灾害提供参考。用于地壳应变监测时,长基线激光干涉仪的测量机构(反射镜)要求与地质结构固接,需要将其直接布设于地质结构的基岩上,基岩一般被看作是激光干涉仪的一部分,因此地质结构对干涉仪的稳定性也有一定影响。此外,长臂激光干涉仪一般尺度较大,受各种噪声及如大气湍流、温度梯度和振动等环境因素影响的几率大大增加^[17]。受上述因素限制,长基线激光干涉仪现场稳定性的监测问题是干涉仪外场使用和实用化过程中的一个关键问题。

目前长基线激光干涉仪的稳定性监测,需要构建单独复杂的监测系统,成本较高。本文提出了一种在线稳定性监测方法与技术,在不增加硬件负载,以相位生成载波(PGC)信号解调为基础的前提下^[18],通过在调制载波中增加已知参数的稳定性监测信号,利用该信号的幅度变化,实现激光干涉仪的

工作状态监测。其优点是简化了激光干涉仪现场安装调试过程,提高了运行效率。

2 激光干涉仪的在线标定原理

长臂激光干涉仪的在线标定技术实现方法如图 1 所示,在相位调制器上加载高频载波(HFM)信号,并在测量频段(0~200 Hz)外增加一个 400 Hz 指示信号[全称为低频指示信号(LFI)],对比应变仪输出的指示信号幅度与已知幅度实现在线稳定性监测。

采用 PGC 信号解调方法的激光干涉仪,其光探测器(PD)接收到的干涉信号为

$$V = A + B\cos[C\cos(\omega_0 t) + D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)], \quad (1)$$

式中 A 为干涉信号直流幅度, B 为交流幅度, C 为相位调制器调制深度, D 为已知的在线监测信号幅度, ω_0 为调制载波频率, ω_c 为已知指示信号频率, $\varphi(t)$ 为含有噪声的待测相位。其中 $C\cos(\omega_0 t) + D\cos(\omega_c t)$ 是通过光学调制器压电陶瓷(PZT)加载的, $C\cos(\omega_0 t)$ 为 HFM 信号, $D\cos(\omega_c t)$ 为 LFI。将(1)式以贝塞尔函数形式展开,得到

$$V = A + B \left\{ \left[J_0(C) + 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k J_{2k}(C) \cos(2k\omega_0 t) \right] \cos[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)] - \left[2 \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(C) \cos(2k+1)\omega_0 t \right] \sin[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)] \right\}, \quad (2)$$

式中 $J_k(C)$ 为第一类 k 阶贝塞尔函数。

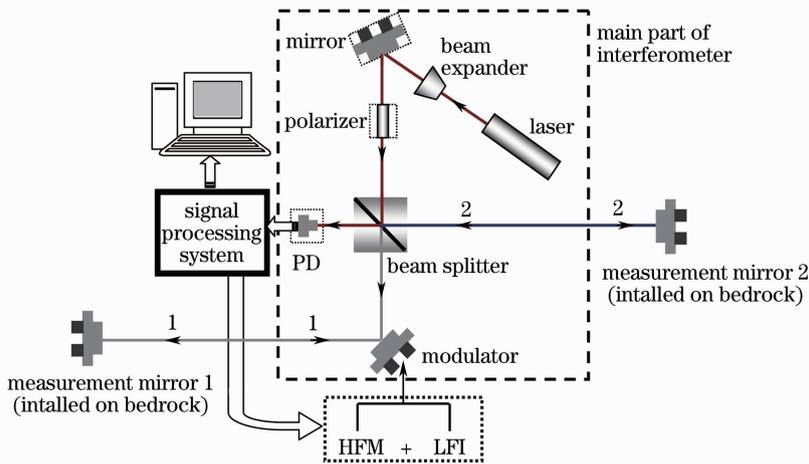


图 1 激光干涉仪在线稳定性监测结构示意图

Fig. 1 Online stability monitoring sketch of laser interferometer

图 2 为改进的 PGC 解调算法框图,将光电检测信号采用贝塞尔展开后,分别与 ω_0 和 $2\omega_0$ 调制信号相乘,当调制频率 ω_0 远远大于被测信号频率,通过

低通滤波器(LPF)滤波后所有含 ω_0 及其倍频项均被滤去,此时可写为

$$J_1 = -BJ_1(C) \sin[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)], \quad (3)$$

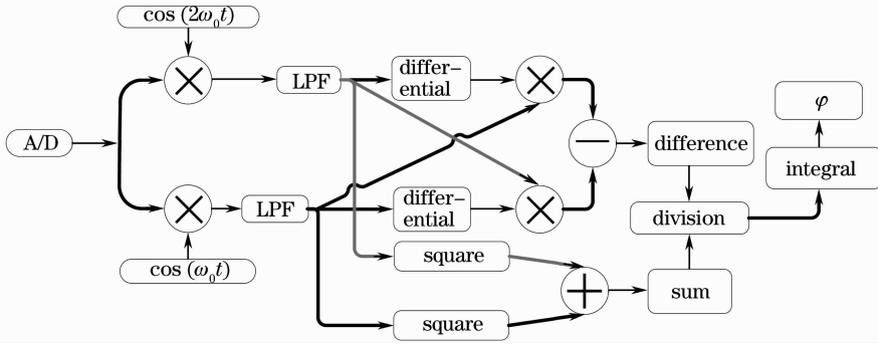


图 2 改进型 PGC 解调算法框图

Fig. 2 Improved PGC demodulation algorithmic

$$J_2 = -BJ_2(C) \cos[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)]. \quad (4)$$

采用交叉微分相乘(DCM)技术,可获得相位信号

$$J_2 J_1' - J_1 J_2' =$$

$$B^2 J_1(C) J_2(C) \frac{d[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)]}{dt}. \quad (5)$$

同时,

$$J_1^2 + J_2^2 = B^2 J_1^2(C) \sin^2[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)] + B^2 J_2^2(C) \cos^2[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)]. \quad (6)$$

调整载波信号,令 $C = 2.63$,此时 $J_1(C) = J_2(C)$,则(5)、(6)式变换为

$$J_2 J_1' - J_1 J_2' =$$

$$B^2 J_1^2(C) \frac{d[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)]}{dt}, \quad (7)$$

$$J_1^2 + J_2^2 = B^2 J_1^2(C), \quad (8)$$

将(7)式除以(8)式,使得 B 值抵消,降低 PD 探测的干涉信号强度波动引起的解调误差,即

$$\frac{J_1' J_2 - J_1 J_2'}{J_1^2 + J_2^2} = \frac{d[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)]}{dt}. \quad (9)$$

对(9)式进行积分即可获得解调出的相位信号,其中 $\varphi(t)$ 为待解调信号, $D\cos(\omega_c t)$ 为 LFI 信号,而且 LFI 信号频率在系统测量频段之外,以此信号作为干涉仪的在线监测信号,解调状态指示不会对测量造成干扰。

由于上述算法在 $C = 2.63$ 时才能实现,因此要获得信号解调过程中的 C 值。 C 值计算方法图如图 3 所示,取 $3\omega_0$ 和 $4\omega_0$ 对信号进行检测,经低通滤波,可得

$$J_3 = BJ_3(C) \sin[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)], \quad (10)$$

$$J_4 = BJ_4(C) \cos[D\cos(\omega_c t) + \varphi(t)]. \quad (11)$$

将(3)、(4)式分别除以(10)、(11)式可得

$$J_1/J_3 = -\frac{J_1(C)}{J_3(C)}, J_2/J_4 = -\frac{J_2(C)}{J_4(C)}. \quad (12)$$

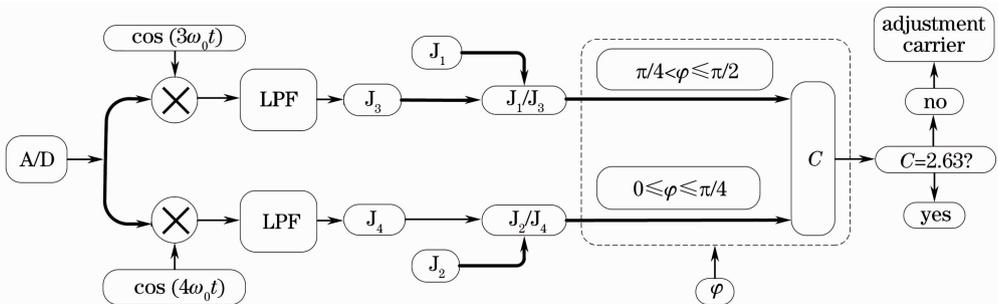

 图 3 C 值计算方法及载波调整

 Fig. 3 Calculation algorithm of C and adjustment of carrier

载波信号是解调过程中加入的已知信号,(12)式中 J_1/J_3 和 J_2/J_4 的结果均为 C 的函数,所以可以根据 J_1/J_3 和 J_2/J_4 的值计算获得 C 值。同时根据获得的 C 值可以得到信号解调过程中 PZT 调制器的高频调制性能,根据 C 值与预设值 2.63 之间的偏差来调整 HFM,以使信号解调运算中 $J_1(C) = J_2(C)$,降低信号解调误差。

之所以采用(12)式计算 C 值,是因为当 $0 \leq \varphi(t) \leq \pi/4$ 时,在此区间内余弦函数变化较为平缓,且在此区间内余弦函数不会出现为零的情况^[19],而 J_2 和 J_4 为余弦函数,所以采用 J_2/J_4 的结果来反求 C 值;反之,当 $\pi/4 < \varphi(t) \leq \pi/2$ 时,在此区间内正弦函数变化较为平缓,此区间内正弦函数不会出现为零的情况,所以采用 J_1/J_3 的结果来反求 C 值,根据

求得的结果调整 HFM, 实现信号解调的自校准。

$$\frac{C}{\pi} = \frac{Uk}{\lambda}, \quad (13)$$

3 干涉仪标定实验

3.1 光学调制器的标定实验

由于干涉仪的工作状态需要通过 400 Hz LFI 的信号来指示, 而光学调制器是 PZT 驱动的反射镜, 由于工艺原因使得反射镜上各点的振动量随着位置不同而变化, 因此需要测量光斑在 PZT 反射镜不同位置时的驱动电压与振动量的对应关系。

C 是载波信号的相位调制幅度, 通过调整 PZT 驱动电压获得不同的 C 值为

式中 U 是 PZT 驱动电压; k 是 PZT 单位电压位移量, 单位是 V/nm ; λ 是光源波长。PZT 反射镜镜面上各点振动量与位置关系是通过购自 Renishaw 公司的激光尺来测定, 将 PZT 反射镜镜面中心设为原点。图 4 所示光束位置与调制器振动量的关系, 分别测量镜面沿 x 方向和沿 y 方向各点的振动量, 经过检测分析, PZT 反射镜镜面上各点的振动量随各点位置变化呈线性变化。选取测量反射镜上多个点的振动量, 根据各点对应的振动量采用数据拟合的方法, 获得反射镜上各点对应的振动量函数。

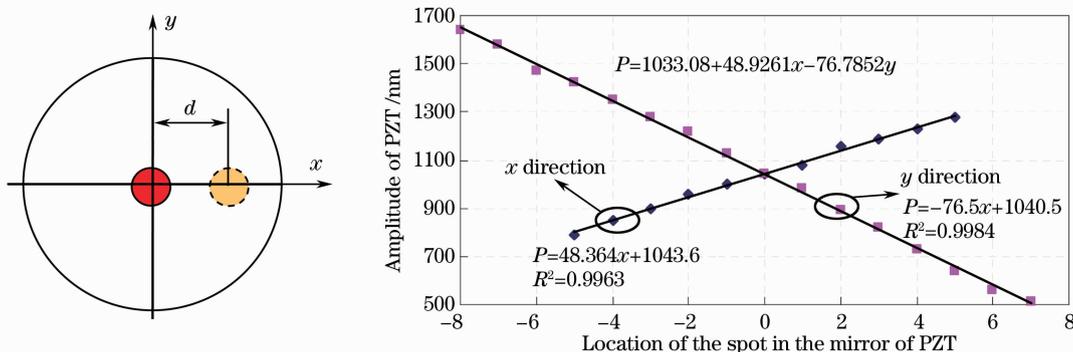


图 4 400 Hz 时光学调制器的振幅随光束位置变化的实验结果

Fig. 4 Relation between the amplitude of the optical modulator and position of the beam

通过将 PZT 上加载的已知驱动信号与激光尺测量出的振动量进行对比分析, 最终计算出 k 值。激光光源波长已知, 根据这些参数及 PZT 驱动电压就能确定 C 值。根据 PZT 反射镜镜面振动函数, 以及光束在 PZT 反射镜上的调制位置, 可以确定 400 Hz 的 LFI 信号振动幅度, 以此作为信号解调结果的监测信号, 并以此监测干涉仪的工作状态。

3.2 在线标定实验

图 5 为实验所采用的长基线激光干涉仪, 干涉仪主体结构安装在管道中部的罐体中, 两端罐体安装反射镜。罐体分别固定在水泥台上, 罐体和光路管道之间采用波纹管连接, 以降低各水泥台之间的振动串扰。分别在光路通道不封闭和封闭的情况下进行了长时间自标定信号加载实验。



图 5 长基线激光干涉仪光路密封装置

Fig. 5 Long-baseline interferometer sealed instrument

图 6 所示为 12 h 内稳定性监测信号的幅度值变化情况。根据图 6(a) 所示, 长期漂移约为 1.2%, 此信号是在光路管道未封闭情况下测得的, 实验环境中气体湍流使得光束传输介质(空气)的折射率出

现较大波动, 从而引入了较大误差, 根据计算其标准偏差约为 1.098 nm。如图 6(b) 所示, 长期漂移小于 0.8%, 此信号是在光路管道已封闭的情况下测得的, 干涉仪工作环境中的气体湍流得到较好的抑

制,有效降低了气流引起的干涉仪解调误差,根据计算 12 h 稳定性监测信号幅值的标准偏差约为 0.645 nm,干涉仪工作状态相对稳定。

图 7(a)为 42 h 的时域信号,根据图示,在 12 月 25 日 14:30 至 15:30 期间的信号幅度出现快速变化。图 7(b)为该时刻解调信号的幅度随时间变化,

通常情况下可以判断该信号为大幅度应变信号。但是根据同时采集的指示信号幅度,如图 7(c)所示,发现在该时间段监测信号幅度出现大范围波动,解调误差增大。该时段由于实验场地附近出现人员活动,而高精度激光干涉仪极为灵敏,导致干涉仪信号解调的误差增大。

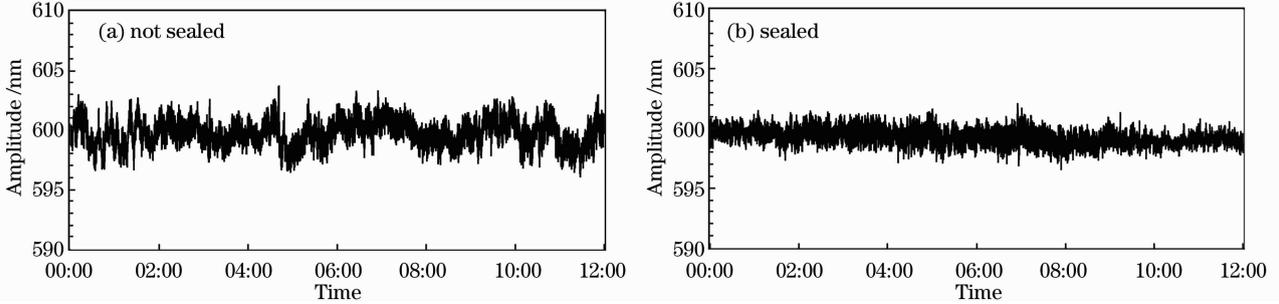


图 6 干涉仪光路 400 Hz 稳定性指示信号幅值在 12 h 内的变化

Fig. 6 Fluctuation of 400 Hz stability indication signal amplitude during 12 h

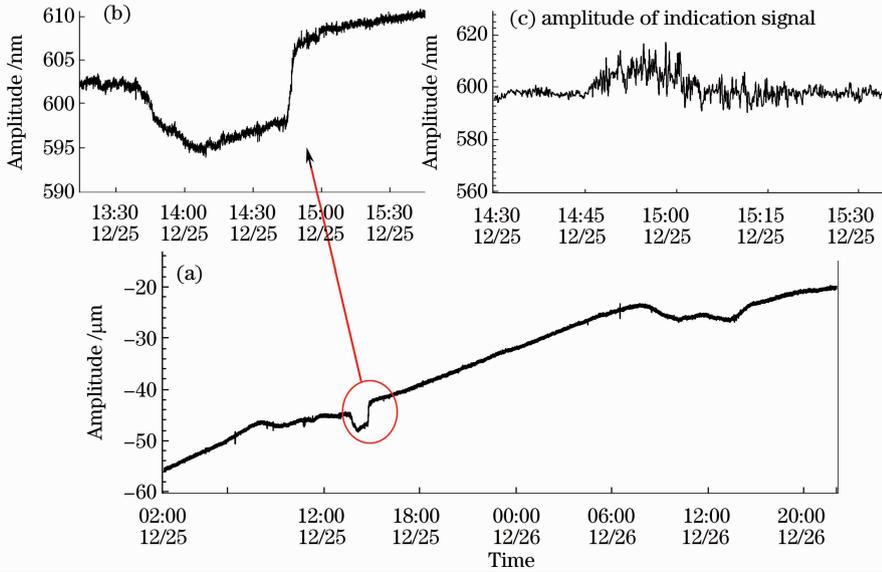


图 7 12 月 25 日凌晨至 12 月 26 日晚间 42 h 的时域信号图

Fig. 7 Time domain signal amplitude during 42 h for optical system sealed

4 结 论

在基于 PGC 解调技术的载波信号中加入低频监测信号,在不增加硬件负担的条件下实现了干涉仪的实时在线稳定性监测,并且为信号分析提供系统的工作状态数据,降低信号分析过程中的误差。实验结果表明,单频激光长基线干涉仪在线稳定性监测技术可有效地在线监测干涉仪信号解调的工作状态,降低了长基线激光干涉仪的现场实验和稳定性判定的难度,提高了干涉仪调试及运行效率,使其更接近实用化。

参 考 文 献

- Li Liyan, Yuan Yonggui, Wu Bing *et al.*. Effect of wave plate on nonlinear error in single-frequency polarized laser interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112009
李立艳, 苑勇贵, 吴 冰等. 单频偏振激光干涉仪中波片对非线性误差的影响[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112009
- Li Liyan, Wang Jian, Han Chunyang *et al.*. Integration single-frequency laser interferometer used to nanometer measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0408001
李立艳, 王 坚, 韩春阳等. 用于纳米测量的集成化单频激光干涉仪[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0408001
- Li Liyan, Wu Bing, Yuan Yonggui *et al.*. Research on nonlinear error compensation method for single-frequency laser interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0726003
李立艳, 吴 冰, 苑勇贵等. 单频激光干涉仪非线性误差补偿方法研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(7): 0726003

- 4 Zhang Baohong. Plate boundary observation (PBO) project of USA[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2004, **24**(3): 105~108
张宝红. 美国的板块边界观测(PBO)计划[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, **24**(3): 105~108
- 5 M. E. Jackson. Geophysics at the speed of light: earth scope and the plate boundary observatory[J]. *Leading Edge (Tulsa, OK)*, 2003, **22**(3): 262~267
- 6 D. Sigg. Commissioning of the LIGO detectors[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2002, **19**(7): 1429~1435
- 7 A. Weinstein. Advanced LIGO optical configuration and prototyping effort [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2002, **19**(7): 1575~1584
- 8 G. M. Harry. Advanced LIGO: the next generation of gravitational wave detectors[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2010, **27**(8): 084006
- 9 H. Lück. The GEO600 project [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 1997, **14**(6): 1471~1476
- 10 H. Grote, G. Heinzel, A. Freise *et al.*. Automatic beam alignment for the mode-cleaner cavities of GEO 600[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(9): 1938~1945
- 11 S. Hild. The status of GEO 600 [J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2006, **23**(9): S643~S651
- 12 S. Takemoto. A 100 m laser strainmeter system installed in a 1 km deep tunnel at Kamioka, Gifu, Japan[J]. *J. Geodynamics*, 2004, **38**(3-5): 477~488
- 13 G. I. Dolgikh, M. N. Dubrov, S. G. Dolgikh *et al.*. Application of laser strainmeters to the study of earthquake physics[J]. *Acta Geophysica*, 2006, **54**(2): 187~197
- 14 M. N. Dubrov, D. V. Aleksandrov. Laser interferometer antenna array records seismo-acoustic earth strains [C]. International Conference on Antenna Theory and Techniques, 2007. 307~308
- 15 A. Amoroso, L. Crescentini. Coseismic and aseismic strain offsets recorded by the gran sasso strainmeter[J]. *Phys. Chem. Earth A*, 1999, **24**(2): 101~104
- 16 L. Crescentini, A. Amoroso, G. Fiocco *et al.*. Installation of a high-sensitivity laser strainmeter in a tunnel in central Italy[J]. *Rev. Scient. Instrum.*, 1997, **68**(8): 3206~3210
- 17 Rao Ruizhong, Wang Shipeng, Liu Xiaochun *et al.*. Experimental study of spot dancing of laser beam in a turbulent atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(11): 1011~1015
饶瑞中, 王世鹏, 刘晓春 等. 湍流大气中激光束漂移的实验研究[J]. 中国激光, 2000, **27**(11): 1011~1015
- 18 A. Dandridge, A. B. Tveten, T. G. Giallorenzi. Homodyn demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1982, **18**(10): 1647~1653
- 19 Cao Jianian, Li Xuyou, Zhang Likun *et al.*. Research on digital interferometric fiber optic sensors using moire grating sub-division technique[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 1999, **20**(5): 83~89
曹家年, 李绪友, 张立昆 等. 数字式干涉型光纤传感器进行条纹细分的研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1999, **20**(5): 83~89

栏目编辑:何卓铭