

激光干涉条纹锁定系统测量地面低频振动谱

易迎彦^{1,2}, 刘德明²

(1. 武汉理工大学理学院物理系, 湖北 武汉 430070; 2. 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:地面振动噪声是在地面高精度实验中一个重要的误差来源, 安静环境下地面振动噪声水平的幅度为纳米量级, 通常干涉仪无法直接测量。设计并制作用于了纳米精度测量的激光干涉仪反馈控制系统, 该系统由激光器及稳频装置、干涉系统、检测及控制电路和位移反馈执行机(压电陶瓷)组成。采用一个长周期的折叠摆对水平方向 0.3 Hz 以下的振动频率进行隔振, 利用该系统对 0.3 ~ 3 Hz 的低频地面水平振动谱密度进行测量了。测量结果表明在 1 Hz 处, 水平地脉动噪声为 $10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级。

关键词:激光干涉仪; 折叠摆; 低频振动; 反馈控制

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A

Low-frequency seismic spectrum measured by a laser interference fringe locking system

YI Ying-yan^{1,2}, LIU De-ming²

(1. Department of Physics, School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. College of Opto-electronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Seismic noise is one of the crucial problems for terrestrial precision experiment. It can not be measured by the general interferometric method because the seismic noise usually has the level of nanometer. A laser in interferometer control system, which consists of a laser interferometer, a detector, a control circuit, and a displacement feedback actuator (piezoelectric ceramic), has been built up. The low-frequency (0.3 ~ 3 Hz) seismic noise level is measured using the lock-in laser interferometer combined with a long period folded pendulum. The results show that the maximum vibration noise level is $10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz.

Key words: laser interference; folded pendulum; seismic noise; feedback control

1 引言

在地面进行的高精度实验中, 例如弱等效原理的实验检验, 万有引力常数 G 的精确测量和引力波探测等实验^[1-3], 地面振动是一个重要的误差来源, 需要仔细考虑或隔离。Berger 利用激光应变仪测量地球应变在 $10^{-8} \sim 10^2$ Hz 范围内的频谱, 结果表明在整个观察的频带内其复功率谱近似以频率的平方衰减^[4]。Cheng 等人采用倾斜传感器对澳大利亚 AIGO 地下实验室里的两个正交方向上的地面倾斜

角度位移谱进行测量, 其结果表明在午夜比较安静的情况下, 1 Hz 处地面倾斜噪声谱为 $10^{-9} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$; 而在白天由于附近人为因素的影响, 地面倾斜噪声增加到 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[5]。Liu 等人利用水平折叠摆作为参考系对近海海潮进行测量^[6]。Araya 等人利用干涉仪制作的高灵敏度宽带地震仪, 用

作者简介: 易迎彦(1978 -), 男, 博士研究生, 现主要从事光电检测与光通信器件设计的研究。E-mail: yiyinyan0410@163.com
收稿日期: 2010-12-20

一个悬挂镜子作为参考系,其敏感方向为地面水平方向,测量结果在 1 Hz 处的水平振动位移谱为 $10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[7]。激光干涉仪通常可用来测量微小位移的变化,安静环境下地面振动噪声水平的幅度达到了纳米量级,通常干涉仪将无法用来测量。本文采用一种反馈型激光干涉仪系统,利用长周期折叠摆为参考,对地面水平方面的振动噪声位移谱进行了测量。

2 测量原理与装置

2.1 激光干涉仪系统

激光干涉仪测地面振动的系统原理框图如图 1 所示,由激光干涉系统、折叠摆参考装置、检测及控制电路、数据采集系统四部分组成。激光干涉系统是一个常用的迈克尔逊干涉仪,包括兰姆凹陷稳频激光、分束镜以及两个反射镜 M_1, M_2 和光电探测器 PD(RS Ltd. OSD15-5T) 等器件构成。激光干涉条纹由透镜会聚到光电探测器上。为降低低频 $1/f$ 噪声,信号发生器产生的高频 f_m (这里设为 1 kHz) 正弦信号送到 PZT1 上,使 PZT1 的长度作频率为 f 的伸长缩短的周期运动,从而使得其光电探测器 PD 记录的干涉光强也随之发生周期性的变化,这里将这种工作在高频的干涉系统称为激光干涉调制测量系统^[8]。这样的激光干涉调制测量系统再加上一个位移反馈执行机便构成一个常用的激光干涉锁定系统。如图 1 所示,PZT2 为位移执行机,通过检测控制系统反馈一电压给 PZT2,从而改变 M_2 的位置,始终维持 M_2 与 M_1 的光程差始终不变,干涉仪的这部分放置在折叠摆的中间摆盘上,当地面水平振动频率高于折叠摆的共振频率时,干涉仪的输出就是地面的微振动。为减小空气扰动的影响,实验过程中将折叠摆系统放置在一玻璃罩中。鉴于光散粒噪声抑制考虑,通常激光干涉锁定系统维持在干涉极小(暗点)^[9-10]。

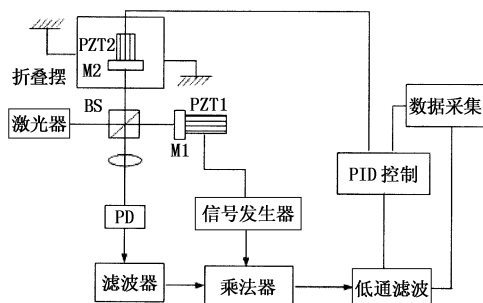


图 1 激光干涉仪低频微振动测量系统原理图

Fig.1 schematic diagram of a laser interference seismometer

2.2 折叠摆隔振系统

折叠摆系统主要由正摆杆、倒摆杆、中间摆盘以及刚性支架与测量系统组成^[11],将用作参考的反射镜通过一个质量块放置在中间摆盘上。这里出于稳定性的考虑,将折叠摆的周期设置在 10 s 左右。采用日本 SONY 公司生产的 SET-B3 型磁位移传感器来对折叠摆的运动进行测量,折叠摆在空气中的自由振荡曲线如图 2 所示。由该图很容易得知:折叠摆的固有频率 $f_0 = 0.116 \text{ Hz}$ 。图 3 为折叠摆水平隔振理论曲线,由图可知,折叠摆在 0.3 Hz 处隔振率 $H_{fp}(\omega)$ 达到 10 dB 以上,在 10 Hz 处达到 40 dB 以上。由此可知,在 0.3 Hz 以上时折叠摆就具有较好隔振效果,即在 0.3 Hz 以上频段范围,折叠摆可作为水平振动测量的参考系。

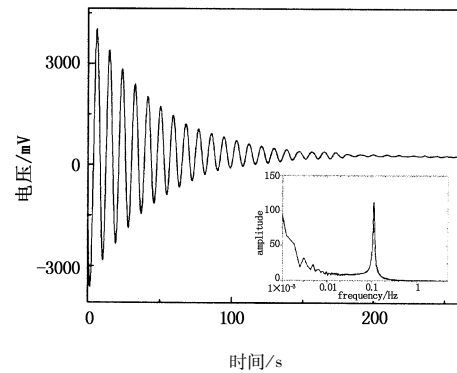


图 2 折叠摆在空气中自由振荡曲线

Fig.2 free oscillation of the folded pendulum

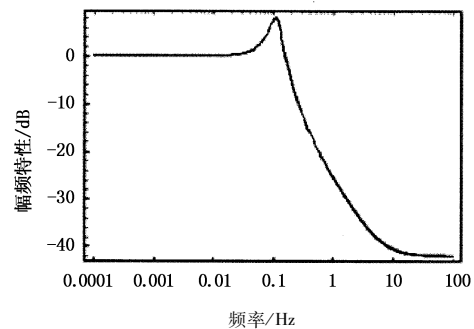


图 3 折叠摆水平隔振理论曲线

Fig.3 theoretical isolation ration cure of the folded pendulum

2.3 测量原理

设支座与地面的运动用 $X_s(t)$ 表示,折叠摆中间摆盘的运动用 $X_r(t)$ 表示,则干涉两臂之间的光程差为 $2[X_s(t) - X_r(t)]$,对应干涉仪的输出用光电探测器进行探测,然后通过反馈控制电路加给反馈 PZT2 上,使得干涉仪始终工作在暗点。整个系统的闭环传递函数由图 4 所示,由此可得:

$$V_f(\omega) = F(\omega) \{ [X_s(\omega) - X_r(\omega)] - S_p V_f(\omega) \} \quad (1)$$

其中, $V_f(\omega)$ 为加给 PZT2 的反馈电压信号; S_p 为 PZT2 对应的伸长系数; $X_f(\omega)$ 表示反馈电压驱动压电陶瓷的位移量; $F(\omega)$ 代表整个电路的传递函数, 它包括光电探测器及其整个电路的传递函数。

由式(1)可以得到:

$$X_f(\omega) = \frac{S_p F(\omega)}{1 + S_p F(\omega)} [X_s(\omega) - X_r(\omega)] \quad (2)$$

将折叠摆的传递函数 $H_{fp}(\omega) = \frac{X_r(\omega)}{X_s(\omega)}$ 代入上

式可以得到:

$$X_s(\omega) = \frac{X_f(\omega)}{H_{elec}(\omega) [1 - H_{fp}(\omega)]} = \frac{X_f(\omega)}{H_{total}(\omega)} \quad (3)$$

其中, $H_{elec} = \frac{S_p F(\omega)}{1 + S_p F(\omega)}$ 为闭环电路的传递函数; $H_{total}(\omega) = H_{elec}(\omega) [1 - H_{fp}(\omega)]$ 为整个闭环系统的传递函数。根据上式可知, 通过测量反馈 PZT2 的位移信号可量度地面振动。

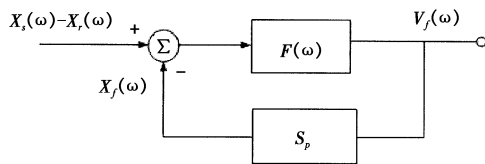


图4 闭环反馈控制系统方框图

Fig. 4 schematic diagram of the closed-loop system

根据调相(或调频)原理, 乘法器前的滤波电路(包括 $2F$ 带阻滤波器和 $1F$ 带通滤波器)对待测低频信号而言, 没有滤波作用, 只有放大效果。故在下面讨论中略去乘法器前的高频滤波环节对待测信号的滤波影响。乘法器解调后利用一个低通滤波器将待测的低频信号提取出来, 为了让测量的低频信号可以 1:1 地通过, 将低通滤波器的截止频率设置为 150 Hz。为此, 将 PI 控制器的积分时间常数设定为 $\tau = 1$ ms, 若整个电路系统的放大倍数(包括光电转换系数)用 G 表示, 则 $F(\omega) = G/\tau\omega$, 对应的整个电路系统的频率响应(H_{elec})如图 5 所示, 而最后整个闭环系统传递函数的幅频特性(H_{total})如图 6 所示。由图 6 可知, 在 0.3 ~ 10 Hz 频段内地面振动信号几乎都以 1:1 的比例通过。因此该系统能够较好地测量 0.3 ~ 10 Hz 之间的地面振动谱。即当外界的激励频率 f 在 0.3 ~ 10 Hz 时, 可以近似认为 $X_s(\omega) \approx$

$X_f(\omega)$, 即实际测量得到的反馈 PZT2 的位移量可近似认为是待测的地面振动信号。

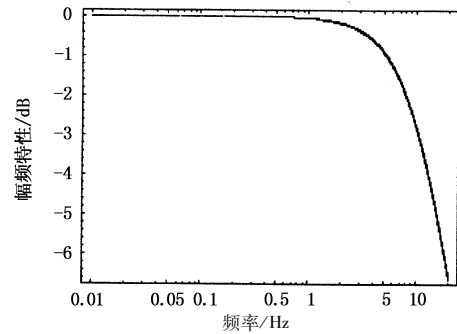


图5 电路传递函数的幅频特性

Fig. 5 amplitude performance of the transfer function of the electric circuit

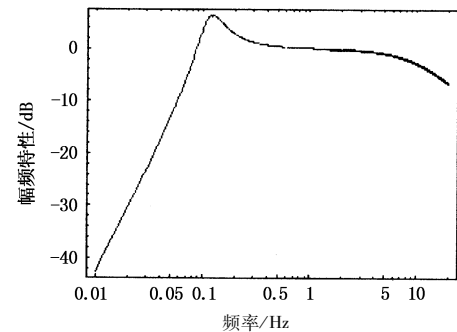


图6 整个闭环系统传递函数的幅频特性

Fig. 6 amplitude performance of the transfer function of the close-loop system

3 实验结果

图 7 和图 8 分别是地面水平振动测量结果与相应的低通残差噪声水平。由图 7 可知, 在 1 Hz 处, 振动噪声约为 $1 \times 10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$, 由图 8 可知其低通输出残差噪声水平为 $3 \times 10^{-11} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。在测量频段内时, 低通输出的残差噪声比实际测得的地面振动噪声低一个多数量级, 因此可通过由反馈控制信号得到的噪声功率谱去估计地面水平振动。由图 7 可知在 0.1 ~ 1 Hz 之间的噪声以 $1/f$ 的形式衰减。值得说明的是, 这里测量信号除了地脉动信号以外, 还包括激光干涉系统受温度、气压等涨落的影响。由测量结果还可看出在 5 ~ 8 Hz 之间有明显的峰出现。在实验结束后, 将整个光学系统去掉, 利用商用加速度计(SM6)对光学平台的振动模式进行测量。结果表明 8 Hz 处的共振模式为光学平台的本振模式, 而 5 ~ 7 Hz 之间共振模式主要来自于反射镜、分束镜和激光器等的支持系统。

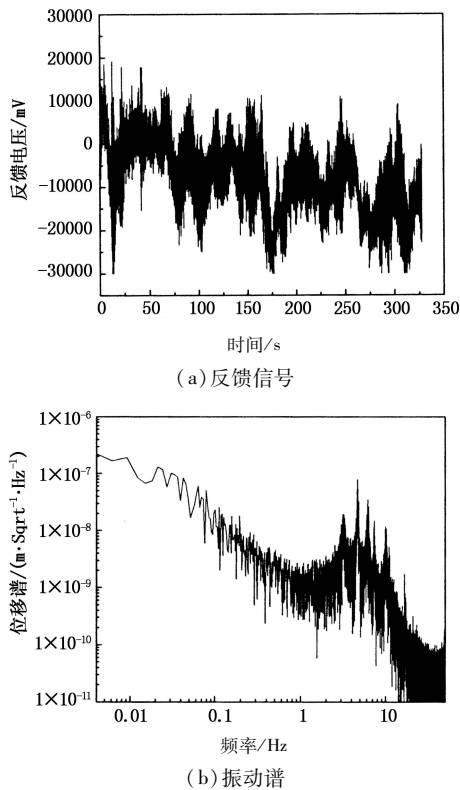


图7 地面水平振动测量结果
Fig.7 typical experimental result of the seismic noise spectrum measured

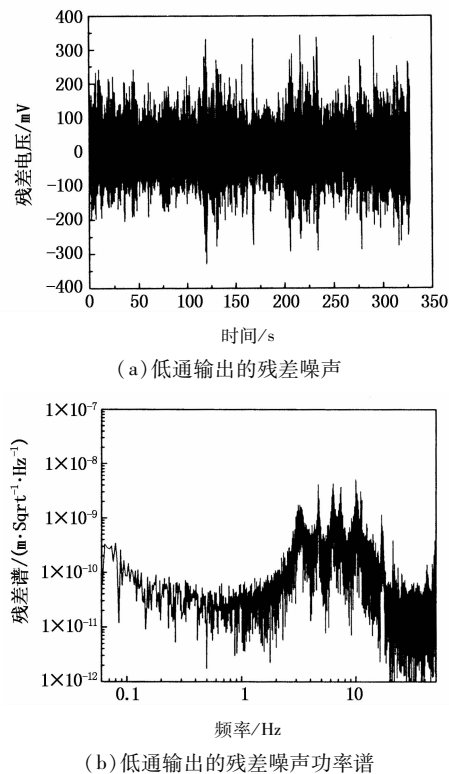


图8 低通输出结果
Fig.8 output of the low pass filter

水平隔振系统对本实验室的 0.3 ~ 3 Hz 的低频水平地面振动谱密度进行测量。结果表明在 1 Hz 处,水平地脉动噪声为 $10^{-9} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$ 量级,表明实验室是一个很安静的实验环境。在 5 ~ 8 Hz 之间由于光学平台和激光干涉系统的支持支架本征振动模式的影响,会出现明显的振动峰值。这也是下一步利用干涉仪测量微位移实验中,必须考虑的问题之一——如何优化机械部件的设计。由于在 5 ~ 10 Hz 之间干涉仪系统有数个共振模式出现,实际上测量地面振动噪声的带宽为 0.3 ~ 3 Hz 之间。

参考文献:

[1] Zhou Z B, Jun L, Yan Q, et al. Seismic noise effect on equivalence principle test using free-fall interferometry [J]. Chin. Phys. Lett., 2001, 18: 10 - 12.

[2] Jun Luo, Hu Zhongkun, Fu Xianghui, et al. Determination of the newtonian gravitation constant G with a nonlinear fitting method [J]. Phys. Rev. D., 1999, 59: 042001.

[3] Abramovici A, Althouse W, Drever R, et al. LIGO: the laser interferometer gravitation-wave observatory [J]. Science, 1992, 256: 325 - 333.

[4] Berger J, Levine J. The spectrum of earth strain from 10^{-8} to 10^2 Hz [J]. J. Geophys. Res., 1974, 79(8): 1210 - 1214.

[5] Cheng Y, Winterflood J, Ju L, et al. Tilt sensor and servo control system for gravitational wave detection [J]. Classical and Quantum Gravity, 2002, 19: 1723 - 1729.

[6] Liu Jianfeng, Blair D G, Ju Li. Near-shore ocean wave measurement using a very low frequency folded pendulum [J]. Mea. Sci. Technol, 1998, 9: 1772 - 1776.

[7] Araya A, Kawabe K, Sato T, et al. Highly sensitive wide-band seismometer using a laser interferometer [J]. Rev. Sci. Instrum., 1993, 64(5): 1337 - 1341.

[8] Yi Yingyan, Zhou zebing. Study of modulated laser interferometry for piezoelectric characteristic measurement of piezoelectric ceramic [J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(3): 27 - 32. (in Chinese)

易迎彦, 周泽兵. 压电陶瓷压电特性的激光调制法测量研究 [J]. 应用光学, 2004, 25(3): 27 - 32.

[9] Braccini S, Bradaschia C, Cobal M, et al. An improvement in the vibration isolation GRO super-attenuator for interferometric detection of gravitational waves: The using of a magnetic anti-spring [J]. Rev. Sci. Instrum., 1993, 64: 310.

[10] Braccini S, Bradaschia C, Fabbro R, et al. Design and operation of an interferometer developed to test the suspensions of the virgo gravitation wave antenna [J]. Phys. Lett. A, 1993, 173: 252 - 256.

[11] Wu S C, Fan S H, Luo J. Folded pendulum tiltmeter [J]. Rev. Sci. Instrum., 2002, 73: 2150 - 2156.

4 结论

本文利用激光干涉锁定技术和长周期的折叠摆