

固体微片激光回馈技术在远程振动测量中的研究

吴 鹏¹, 秦水介²

(1. 贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025;

2. 贵州大学 贵州省光电子技术及应用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: 激光回馈技术具有极高的测量灵敏度, 在振动测量中具有突出的优势。在激光回馈理论和技术的基础上, 研究并提出了基于激光回馈技术的远程振动测量方法, 构建了完整的固体微片激光远程振动测量系统, 详细分析了系统各个部分的基本结构及其工作原理, 并在实验中很好地实现了不同频率振动信号的测量及恢复。该研究将振动测量的工作距离提高到 25 m 以上, 实现了远程微振动的非接触测量, 拓展了激光回馈技术的应用。实验系统具有较大的振幅与频率测量范围, 在振动测量方面具有突出的性能, 能够适用于多种场合和目标的振动测量需求。

关键词: 激光回馈; 固体微片; 振动测量; 远程

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0206005

Study of solid-state microchip laser feedback technology in remote vibration measurement

Wu Peng¹, Qin Shuijie²

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Key Laboratory of Photoelectric Technology and Application of Guizhou Province, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: The technology of laser feedback has ultra high sensitivity and great advantages in vibration measurement. Based on laser feedback theory and technologies, method of remote vibration measurement with laser feedback technologies was studied and presented. The remote vibration measurement system based on microchip solid-state laser feedback was built, the structure and working principles of each parts of the system were studied in detail. The vibration signals of different frequencies in experiments were measured and restored. The working distance of vibration measurement was improved to 25 meters, realizing non-contact measurement of remote vibration. The application of laser feedback technology was expanded. The experimental system has superior performance and large range of amplitudes and frequencies in vibration measurement, and it can be applied in various occasions and can meet various target measurement requirements.

Key words: laser feedback; solid-state microchip; vibration measurement; remote

收稿日期: 2017-08-12; 修订日期: 2017-10-28

基金项目: 贵州省社会发展基金项目(SY 字[2013]3129)

作者简介: 吴鹏(1982-), 男, 博士生, 主要从事激光及其精密测量技术方面的研究。Email: cme.pwu@gzu.edu.cn

导师简介: 秦水介(1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与光电技术方面的研究。Email: shuijie_qin@sina.com

0 引言

自 1963 年 King 和 Steward 首次发现激光回馈 (Laser Feedback) 效应以来^[1], 研究者围绕激光回馈的理论及其应用技术方面开展了大量的研究工作。激光回馈也称为激光自混合干涉 (Self-Mixing), 是指在激光系统中, 激光器输出光的一部分被外部物体反射回到激光谐振腔内与腔内光场发生干涉, 使激光器输出光的物理特性, 如功率、频率、偏振态、模式等发生变化的一种物理现象。在回馈光中包含了外部物体的运动信息, 如位移、距离、速度等, 通过对调制信号的解调就能够得到外部被测物体的运动信息。

激光回馈系统具有结构简单、灵敏度高、易于准直等优点, 在位移、距离、速度、表面形貌等领域得到了广泛的关注和研究。E.Lacot、S.Donati 等研究了激光回馈的相关理论及应用^[2-7], 清华大学张书练课题组在激光回馈理论及应用技术的研究方面取得了丰富的成果并实现了仪器化^[1,8-11]。

目前, 激光回馈技术的研究和应用主要集中在位移、速度和表面形貌等领域, 而在振动测量方面的研究和应用相对较少。实际上, 激光回馈技术具有很高的测量灵敏度, 可以在一些特殊环境中测量非配合的目标, 实现真正意义上的非接触测量, 在远程微振动测量方面具有广阔的科研和应用前景。与三角法、干涉法和多普勒法等其他传统的激光测量技术相比, 激光回馈技术在分辨率、工作距离、信噪比等方面都更具优势, 具有很强的实用性。Otsuka 等利用 LNP 微片激光器构建了基于回馈效应的振动测量系统^[12], 实现了 nm 量级的微振动测量; 郭波等利用钕酸钇微片激光器开展了振动测量的研究工作, 工作距离达到 15.7 m^[13]。

文中在激光回馈理论和技术的基础上, 系统地分析了激光回馈振动测量的工作原理, 开展了远程微振动测量方法和技术的研究, 设计并构建了基于激光回馈技术的远程微振动测量系统, 在保证高分辨率的同时, 提高了振动测量的信噪比和工作距离, 取得了较好的效果。

1 系统结构及原理

激光回馈振动测量系统的结构及组成如图 1 所

示, 其中包括固体微片激光器、声光调制器、准直系统和信号处理模块。

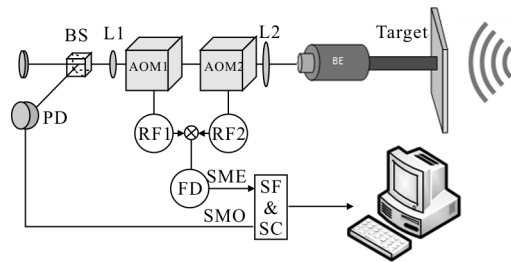


图 1 振动测量系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of vibration measurement system

1.1 固体微片激光器

激光器是整个回馈系统的核心, 研究中采用了固体微片激光器, 它具有全固态、体积小、结构简单、寿命长等优点, 且无需额外光学器件即可获得单纵模输出, 在激光测量领域有广泛的应用。

文中的激光器由半导体激光器 (LD) 和厚度为 0.75 mm 的钕酸钇 (Nd:YVO₄) 微片集成在一微结构内, 构成了固体微片激光器。半导体激光器输出波长 808 nm 的激光, 经过光纤整形后直接照射在钕酸钇微片表面进行泵浦, 钕酸钇受到激发后输出单纵模、波长为 1 064 nm 的激光。

钕酸钇对 808 nm 波长存在很强的吸收带, 泵浦光的转换效率高, 在 1 064 nm 处的受激发射截面比较大, 容易获得较高的增益, 并且它能够形成更高的弛豫振荡频率, 很大程度上提高了系统测量的速度和灵敏度。

1.2 准直系统

激光在经过长距离的传输后, 激光的光功率密度会随着传输距离的增大而迅速降低。距离光源 r 处的光功率密度与距离 r 的平方成反比 $p(r) = \frac{P_0}{\pi r^2 \theta_0^2}$, 其中高斯光束的空间发散角为 θ_0 。光功率密度下降使得测量信号强度过低以致无法测量, 因此激光测量系统都需要专门的光束传输系统对激光进行准直。

而与其他激光测量技术不同, 回馈测量中的光学系统不仅发射激光, 同时还接收激光回馈信号, 所以光束的准直对回馈测量系统就更为重要。文中设计了如图 2 的准直系统, 大大减小了光束的空间发散角, 保证了激光在远距离传输后仍然具有足够高

的光功率密度以及测量信噪比。

准直系统主要由透镜 L1、L2 和准直扩束镜 BE 组成。透镜 L1 和 L2 的焦距分别为 f_1 和 f_2 ，组成了一个倒置的望远镜系统，其作用是减小激光束的空间发散角。准直扩束镜 BE 则进一步压缩了光束的空间发散角。

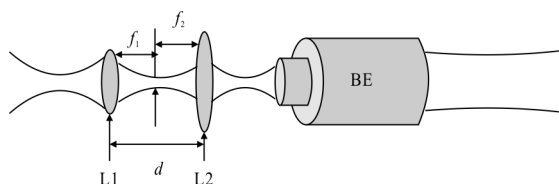


图 2 准直系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of collimating system

光束通过透镜 L1 和 L2，其准直倍率 $M_1=f_2/f_1$ ，则光束的空间发散角 $\theta'=\theta_0/M_1$ 。经过准直扩束镜 BE 后，空间发散角 $\theta''=\theta'/M_2$ ， M_2 为 BE 的准直倍率。准直系统的总的准直倍率 $M=M_1 \times M_2$ ，即经过准直后，光束发散角减小为原来的 $1/M$ 。

1.3 声光调制器

声光调制器是移频回馈测量系统中的重要组成部分，其作用是对激光器输出的激光产生调制，使其产生大小为 Ω 的移频。固体微片激光器输出频率为 ω 的激光通过声光调制器后，经过衍射形成频率为 ω 和 $\omega+\Omega$ 的两束光，研究中使用频率为 $\omega+\Omega$ 光束作为测量光。测量光经过目标后由原光路再次通过声光调制器，并产生频率为 Ω 的移频，其频率变为 $\omega+2\Omega$ 。通过分析测量光的相位变化就可以解调出目标的振动信息。

在移频回馈系统中，激光器输出功率的相对调制^[14]为：

$$\frac{\Delta I(2\Omega)}{I} = \kappa G(v) \cos(2\Omega t - \phi + \phi_s) \quad (1)$$

式中： $G(v)$ 为增益项，可以写为公式(2)，表示回馈光的增益系数； κ 为外腔的电场反射系数， $\kappa=AOM$ 衍射效率² \times 透镜透过率乘积² \times 目标发射率； ϕ 为外腔运动产生的相位变化； ϕ_s 为系统的固定相位偏移。

$$G(x) = 2\gamma_c \frac{(\eta^2 \gamma^2 + x^2)^{1/2}}{[\eta^2 \gamma^2 x^2 + (\omega_r^2 - x^2)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

式中： γ_c 为激光器谐振腔内的光场衰减速率； η 为激光器的相对泵浦水平； γ 为腔内反转粒子的衰减速

率； ω_r 为激光的弛豫振荡频率。对固体激光器(Nd:YAG 或 Nd:YVO₄)而言，其回馈光得到的增益系数超过一百万倍(10⁶)。

从公式(1)可以看出，较弱的回馈光进入谐振腔内部后，受到弛豫振荡的放大作用，同时也携带了外腔运动产生的相位变化信息，对相位信号进行采集和解调，就能够得到由于运动产生的外腔腔长变化 ΔL ：

$$\Delta L = \frac{c}{2n\omega} \Delta\phi \quad (3)$$

通过记录和分析外腔腔长随时间的变化规律，就可以得到待测目标振动的频率和幅度。

信号处理模块包括光电探测器、信号处理电路、数字相位卡等，主要作用包括光电信号转换、电信号的滤波放大、相位识别及解调等。

2 实验结果及分析

实验系统实物如图 3 所示。实验中采用的透镜 L1 和 L2 的焦距 f_1 、 f_2 分别为 80 mm 和 200 mm，计算得到 $M_1=2.5$ ，BE 的准直倍率 $M_2=8$ ，系统总的准直倍率为 $M=M_1 \times M_2=20$ ，即光束的空间发散角被压缩了 20 倍。

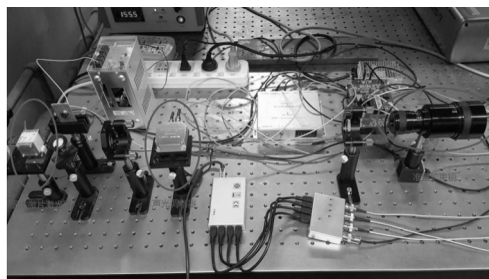


图 3 实验系统实物图

Fig.3 Physical map of experiment system

激光器的输出功率为 18 mW，波长为 1 064 nm，弛豫振荡频率为 3.5 MHz。声光调制器 YSGMN-1 的衍射效率 $\geq 60\%$ ，移频频率 Ω 为 1 MHz，数字相位卡 PT-1313B 的信号输入要求在 2~10 V 之间，需要信噪比 $SNR \geq 20$ dB。

从图 4 所示的测量系统频域信号中可以看出，经过光束准直后，当工作距离超过 25 m 时，测量信号的信噪比仍然超过 40 dB，完全可以满足数字相位卡的信号解调要求，提高了系统的工作距离。

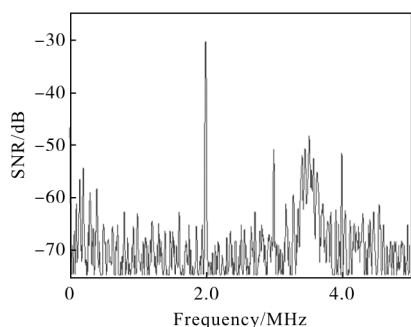


图 4 测量信号(频域)

Fig.4 Measurement signal in frequency domain

实际上,光学器件的透射率无法达到 100%,在激光回馈系统中,声光调制器中的声光晶体表面、透镜表面、准直镜表面都会产生微弱的反射光,回到激光器谐振腔的内部形成回馈信号。这样形成的回馈信号不是待测目标的实际信号,而是测量信号中掺杂的本底噪声,会在一定程度上降低信噪比。因此,在工作中需要尽可能地提高回馈信号的强度,同时要尽量减少光学器件的数量,以降低器件产生的噪声。

振动测量实验中,由软件生产了一系列标准的单频正弦波信号,使目标附近的音响发出不同的单频声音信号,目标在声音的作用下产生受迫振动。激光经过分光镜、声光调制器、透镜、准直扩束镜等元件,照射在目标表面;回馈光从原光路回到激光谐振腔内发生回馈干涉;信号处理系统将采集到的干涉信号进行滤波、放大及相位识别,最后由计算机恢复信号。

回馈系统测量得到了目标的运动信息,经过数据处理以后,课题组很好地还原了目标的原始振动。图 5 所示为由测量信号还原得到的目标运动的时域信号图,在 0.1 s 的时间内,有 20 个周期的正弦波动,其对应的振动频率为 200 Hz。从图 6 的频域信号中也可以看出,200 Hz 振动信号的频谱非常清晰,目标振幅在 1 μm 左右。另外,可以看到图 5 的时域信号中,正弦波动随着时间有一个小幅度的漂移,从图 6 也可以发现,频谱中包含有几十赫兹的幅度为 100 nm 左右的小幅波动。这是由于光路中空气产生的扰动以及声光调制器工作中的热漂移,目前的实验系统中还无法很有效地消除,可以通过数字滤波的方法去除或减小影响。

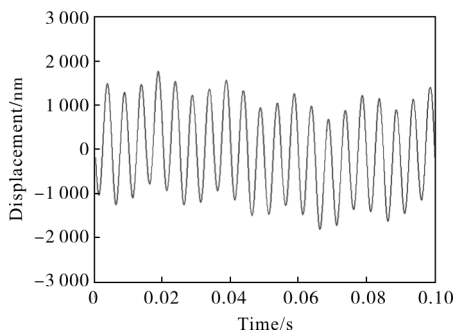


图 5 200 Hz 振动信号(时域)

Fig.5 Vibration signal of 200 Hz in time domain

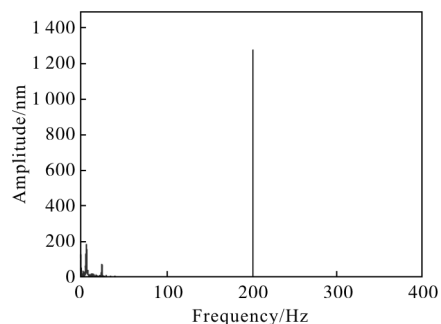


图 6 200 Hz 振动信号(频域)

Fig.6 Vibration signal of 200 Hz in frequency domain

相对于低频振动而言,2 kHz 高频振动的频域信号如图 7 所示,在 2 kHz 的高频声音的驱动下,目标的振幅在 30 nm 左右,远小于低频的情况。这是由于目标对高频振动的响应能力比较弱,驱动信号无法使目标产生较大幅度的振动。从图 7 中可以看出,该方法能够测量振幅低于 40 nm 的微振动,表现出较高的测量灵敏度。而激光回馈技术具有 nm 量级的测量精度,该方法在理论上可以实现 nm 量级振幅的微振动测量。

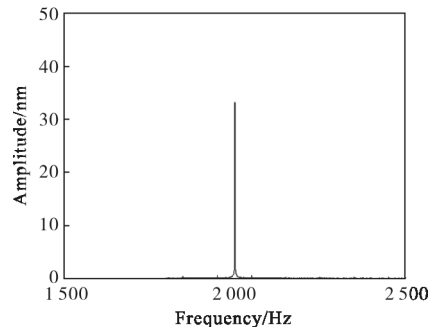


图 7 2 kHz 振动信号(频域)

Fig.7 Vibration signal of 2 kHz in frequency domain

3 测量性能分析

对振动测量而言,频率和振幅的测量范围是非

常重要的性能指标。固体微片激光干涉系统的最大测量速度可由多普勒效应得到,表示为:

$$v_m = \Delta v \cdot \lambda / 2 \quad (4)$$

式中: v_m 为系统的最大测量速度; Δv 为信号处理系统的单边检测带宽; λ 为激光波长。限制测量系统测量速度的直接因素是信号处理系统的检测带宽。实验中选择的检测带宽为 200 kHz,由上式计算得到的最大测量速度为 53.2 mm/s。

物体在周期性外力的作用下产生受迫振动的运动方程为:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = q \sin \omega t \quad (5)$$

其稳态解为 $x = A \cos(\omega t + \phi)$ 。则其速度 $v = 2\pi A f \sin(2\pi f t + \phi)$,其中 A 是振幅, f 为振动频率。当 $f = 200$ Hz 时,其对应的最大振幅为 42.4 μm ,而当时 $f = 200$ Hz,则最大振幅为 42 nm。

从前面的分析可以看出,系统能够测量的振幅与目标的振动频率成反比,随着振动频率的增加,振幅下降。得到测量的振幅和频率间的关系如图 7 所示。从前面的结果可以看出,该系统能够测量幅度在 30 nm 左右的微振动,其对应的测量频率超过 200 kHz。

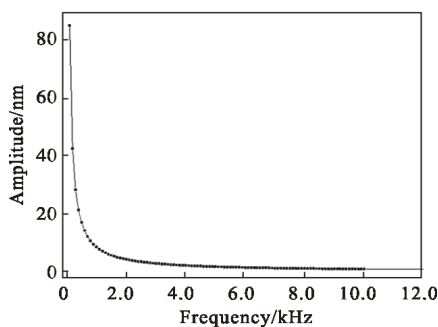


图 7 振幅频率测量范围

Fig.7 Measurement range of amplitude and frequency

远程测量中,激光在空气中传播,温度、湿度等因素会影响测量的信噪比,降低测量的精度,空气扰动会使测量结果产生漂移。通过滤波、降噪等处理方法可以降低其影响,也可采用准共路的方法有效地抑制环境影响。

尽管实际环境较实验室情况更为复杂,但该方法具备了较大的测量范围和较高的测量精度,在远程微振动测量中,能够满足在大部分实际情况下的

振动测量的要求。

4 结 论

文中将激光回馈技术应用于远程振动测量中,系统地研究并提出了基于固体微片激光回馈技术的振动测量方法,设计并构建了振动测量系统,实现了不同频率振动信号的测量,拓展了微片激光回馈技术的应用。通过分析该方法测量的频率和振幅之间的关系,得到了振幅和频率的测量范围,能够适用于绝大多数场合和目标的振动测量。文中的研究将远程振动测量的工作距离提高到 25 m 以上,实现了微振动的非接触测量,为振动测量的实际应用提供了新的思路和方法。该方法是基于激光回馈技术的振动测量方法,与其他的激光振动测量方法和技术相比,无需测量靶镜,具有较大的工作距离,对目标表面反射率没有特殊要求,灵敏度和信噪比都较高,能够实现真正的远程非接触测量,在国防军事、安保、灾难预防等方面都有非常广阔的应用前景。

在下一步工作中,将通过改进测量方法和优化系统参数,进一步提高系统测量的精度、工作距离和抗干扰能力,实现更为准确的振动测量。

参 考 文 献:

- [1] Zhang Shulian. The laser feedback technology and development[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(11): 65-71. (in Chinese)
张书练. 激光回馈技术及发展 [J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(11): 65-71.
- [2] Lacot E, Day R, Stoeckel F. Coherent laser detection by frequency-shifted optical feedback [J]. *Physical Review A*, 2001, 64(4): 043815.1-043815.11.
- [3] Silvano Donati. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements [J]. *Laser Photonics Rev*, 2012, 3(6): 393-417.
- [4] Thomas Taimre, Milan Nikoli'c, Karl Bertling, et al. Laser feedback interferometry: a tutorial on the self-mixing effect for coherent sensing [J]. *Advance in Optics and Photonics*, 2015, 7(3): 570-631.
- [5] Russell Kliese, Thomas Taimre, Bakar A Ashrif A, et al. Solving self-mixing equations for arbitrary feedback levels: a concise algorithm[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(17): 3723-3736.

- [6] Takaaki Shibata, Shigenobu Shinohara, Hiroaki Ikeda, et al. Laser speckle velocimeter using self-mixing laser diode[J]. *Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45 (2): 499-503.
- [7] Kazutaka Abe, Kenju Otsuka, Ko Jing-Yuan. Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: application to real-time sound reproduction[J]. *New Journal of Physics*, 2003, 5: 8.1-8.9.
- [8] Zhang Shulian. Principle of Orthogonally Polarized Laser [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 99-209. (in Chinese)
张书练. 正交偏振激光原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 99-209.
- [9] Zhang S, Holzapfel W. Orthogonal Polarization in Lasers: Physical Phenomena and Engineering Applications [M]. Berlin: John Wiley & Sons, 2013: 311-426.
- [10] Zhang Shulian, Fei Ligang, Liu Weixin. Nano-width interference fringes of laser feedback [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 208-211. (in Chinese)
张书练, 费力刚, 刘维新. 激光回馈纳米级宽度干涉条纹[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 208-211.
- [11] Zhang Shaohui, Zhang Shulian, Tan Yidong, et al. Self-mixing interferometry with mutual independent orthogonal polarized light[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 844-846.
- [12] Kenju Otsuka, Kazutaka Abe, Jing-Yuan Ko, et al. Real-time nanometer-vibration measurement with a self-mixing microchip solid-state laser[J]. *Optics Letters*, 2002, 27 (15): 1339-1341.
- [13] Guo Bo, Qin Shuijie, Tan Yidong. Remote vibration measurement based on Nd:VO₄ laser feedback system [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2016, 27(3): 298-302. (in Chinese)
郭波, 秦水介, 谈宜东. 基于 Nd:VO₄ 激光回馈效应的远距离振动测量研究[J]. *光电子·激光*, 2016, 27(3): 298-302.
- [14] Tan Yidong, Zhang Song, Ren Zhou, et al. Real-time liquid evaporation rate measurement based on a microchip laser feedback interferometer [J]. *Chin Phys Lett*, 2013, 30(12): 124202.1-124202.3