

文章编号: 1001-3806(2012)01-0029-04

基于全光纤自混合干涉技术的微振动测量研究

刘盛刚 刘 乔 李泽仁

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要: 为了解决自由空间自混合干涉测量系统工作距离短、易受环境干扰等不足,采用全光纤传光、光纤自聚焦透镜收集反馈光,设计了一套全光纤自混合干涉测量系统;建立了反射面为镜面时自聚焦透镜收集效率的理论模型,在理论上论证了全光纤自混合干涉测量系统的可行性;最后搭建了全光纤自混合干涉测量系统,并以铝膜作为反射面,进行了微振动实验研究。结果表明,该系统能获得较好的实验信号,可以解决自由空间自混合干涉测量系统工作距离短、易受环境干扰等问题。

关键词: 激光技术; 振动测量; 自混合干涉; 全光纤; 自聚焦透镜

中图分类号: TN248.4; TN247 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.01.009

Tiny vibration measurement based on all-fiber self-mixing interference

LIU Sheng-gang, LIU Qiao, LI Ze-ren

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to overcome disadvantages of a free-space self-mixing system, such as short working distance and susceptibility to the environment, an all-fiber self-mixing interference system was designed using a fiber to transmit light and a gradient refractive index (GRIN) lens to collect feedback light. The collection efficiency model of the GRIN lens with a mirror reflecting surface was built. Then the feasibility of an all-fiber self-mixing interference system was theoretically proved. Finally, the experimental facility was established. Experiments were carried out with aluminous foil as reflecting surface. The experimental results show that this new instrument can acquire fine signal and it also has the ability of remote measurement.

Key words: laser technique; vibration measurement; self-mixing interference; all-fiber; GRIN lens

引言

1963年, KING^[1]在实验中发现:当激光器的出射激光被外部反射体反射回激光谐振腔内部之后,激光器输出光的强度和频率均发生了变化,其变化形式呈正弦形,与传统干涉条纹相类似,但是“干涉”的过程又发生在激光器谐振腔内部,因此,研究人员把 KING 观察到的现象称之为自混合干涉^[2-4]。由于反馈回谐振腔内部的光带有外部反射体的信息,因此,通过分析激光器输出光强度特性,就可以得到外部反射体的运动信息。自混合干涉现象自发现以来,研究人员就自混合干涉相关的理论^[5]以及在振动、速率、位移测量^[6-13]等方面的应用开展了大量的研究工作。

自混合干涉技术与传统的双光束干涉技术相比,

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助项目 (2008B0403038)

作者简介: 刘盛刚(1983-),男,硕士,主要从事光学测试技术方面的研究工作。

E-mail: liushenggangpla@126.com

收稿日期: 2011-04-19; 收到修改稿日期: 2011-05-24

虽具有相同的相位灵敏度,却另有结构简单、紧凑、易准直、便于小型化等优点^[3],并且自混合干涉不依赖于激光器的类型^[14-15],即无论是气体激光器,还是固体激光或者是半导体激光器,无论是单模激光器还是多模激光器,都可以获得较好的自混合干涉信号。早期的自混合干涉技术研究主要是在自由空间传光的情况下进行的,由于采用自由空间传光时,系统稳定性容易受到光学平台振动、温度变化、空气流动以及空气中尘埃等环境因素的影响,尤其是在远距离测量时,这些影响因素会变得更加明显;同时,狭小的空间可能会无法布置光路。而采用全光纤系统设计时,光纤的特性决定了它可以有效地避免以上环境因素的影响。因此,探索全光纤自混合干涉系统的设计,以及开展自混合干涉技术在振动、速度和位移测量等方面的研究具有较大的应用潜力。

本文中首先介绍了自混合干涉振动测量的基本原理,然后从理论上分析了全光纤自混合干涉系统的可行性,最后设计并搭建了全光纤自混合干涉实验系统,进行了实验研究。实验结果表明:该装置可以获得较好的自混合干涉信号,可以解决传统自由空间自混合

干涉测速系统工具距离短、易受环境干扰等问题。

1 自混合干涉振动测量的基本原理

进行振动测量即进行振动速率和位移测量。自混合干涉速度测量主要是利用了自混合干涉效应和光学 Doppler 效应,当从激光器发出的激光遇到外部运动物体的反射时,反射回的光频率会发生 Doppler 频移,而发生了 Doppler 频移的光进入激光谐振腔内部之后,就会影响激光器输出光的强度,通过分析激光强度特性就可以获得外部运动体的运动信息。理论研究表明,在弱反馈的条件下,激光器输出光的频率可以近似认为不变^[16],输出激光的光强度变化频率近似为^[17]:

$$f(t) = \frac{2\mu(t)}{\lambda} \quad (1)$$

式中 $\mu(t)$ 为外部物体的运动瞬时速度, λ 为激光器的输出波长。原则上,只要获得了自混合干涉信号,通过对信号进行时频分析,就可以获得干涉信号的频率随时间的变化关系,通过反解(1)式,就可以获得外部物体的运动速度。

另一方面,由于每产生一个干涉条纹,对应外部物体 $\lambda/2$ 的运动距离,因此,只要数出在 Δt 时间内产生的干涉条纹数目 N ,则对应该段时间内物体的平均运动速度为:

$$\mu(t) = \frac{\lambda \cdot N}{2t} \quad (2)$$

以上即为利用自混合干涉技术进行振动速度测量的基本原理,通过对速度进行时间积分,就可以获得振动物体的位移信息。

2 全光纤自混合干涉系统设计与可行性分析

2.1 系统设计

设计的全光纤自混合干涉振动测量系统如图 1 所示。

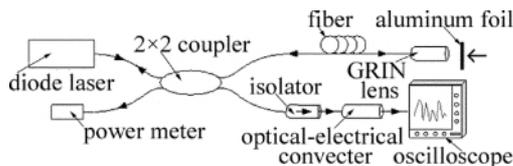


Fig. 1 Schematic diagram of the all-fiber self-mixing interference system for vibration measurement

系统由带尾纤的半导体二极管激光器(多量子阱结构 F-P 型,波长 1550nm,最大输出功率为 2mW)、2×2 光纤耦合器、光纤隔离器、光纤自聚焦透镜、光电转换器、光功率计和示波器组成;二极管激光器、光纤耦合器、光纤隔离器、光纤自聚焦透镜以及光电转换器均配备标准的 FC/APC 接头,因此,系统搭建非常方便。从激光器输出的光首先通过一个 90:10 的光纤耦

合器分为两束,占总功率 90% 的那一束光先通过一段光纤跳线之后,连接在光纤自聚焦透镜的尾纤上,然后再通过自聚焦透镜照射到目标靶面上,从靶面反射回的激光沿原路返回,其中 90% 的反射光进入激光器内部,10% 的反射光进入光功率计中,用以监视返射光的强弱。从光纤耦合器分出的另一束光先通过光纤隔离器,然后再通过光电转换器,将光信号转化为电信号,示波器用来记录电信号随时间的变化,亦即激光器输出光强度随时间的变化。

2.2 可行性分析

采用分立元件搭建的自由空间传光的自混合干涉系统的优点是反馈光的收集效率比较高^[18],由于单模光纤的芯径小,因此,采用全光纤设计的自混合干涉系统需要解决反馈光的收集效率问题;为了增加反馈光的收集效率,采用光通信领域中常用的光纤自聚焦透镜来收集反馈光。下面对采用自聚焦透镜来收集反馈光的全光纤自混合干涉系统的可行性进行简单的理论分析。

参考文献[19]中指出,对于 1mW 的输出光,若有效反馈光达到 1nW 量级就可以观察到自混合干涉现象,即光纤自聚焦透镜的收集效率必须大于 10^{-6} 。为了简化,假设激光照射的靶面为镜面,引入镜面反射系数 R ,收集效率 η 即为自聚焦透镜端面面积与靶面反射光的面积之比,收集效率示意图如图 2 所示。

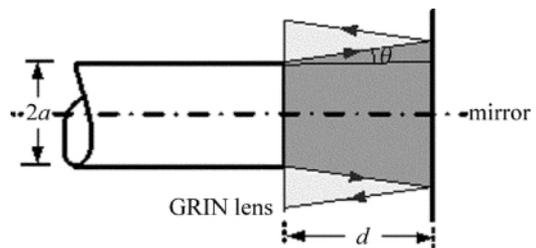


Fig. 2 Schematic diagram of the collection efficiency of the GRIN lens

由图 2 可以得到反射光斑面积为:

$$S = \pi [a + 2d \tan \theta]^2 \quad (3)$$

式中 a 为半径 $\theta = \arcsin d_{NA}$, d_{NA} 为自聚焦透镜的数值孔径, d 为自聚焦透镜的工作距离,即自聚焦透镜与靶面的距离。因此,收集效率为:

$$\eta = R \frac{a^2}{[a + 2d \tan \theta]^2} \quad (4)$$

取 $R = 1$, $d_{NA} = 0.37$,经简单计算得到收集效率随半径 a 、工作距离 d 变化曲线如图 3 所示。

从图 3 可以看出:当工作距离较小时,自聚焦透镜收集效率随着工作距离的增加而急剧减小,当工作距离大于 5mm 之后,收集效率曲线变得比较平缓,因此,可以有较大的测量景深;收集效率随着自聚焦透镜半径的增加而加大。采用的自聚焦透镜半径为 1.4mm,

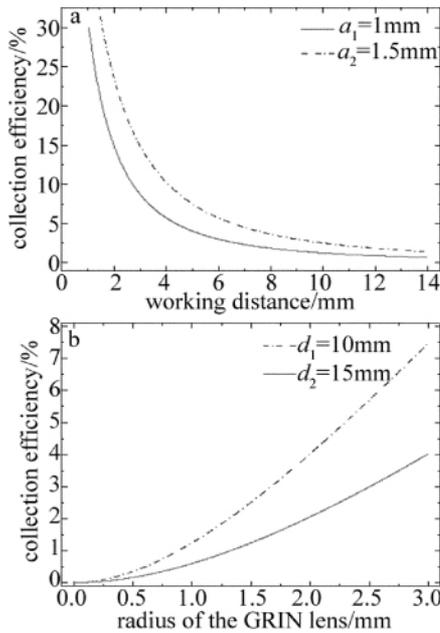


Fig. 3 Collection efficiency of the GRIN lens changing with a—working distance b—radius

工作距离为 10mm, 数值孔径 $d_{NA} = 0.37$, 将相关参量代入 (4) 式, 得到自聚焦透镜的收集效率为 2.23%。实验中通过光功率计的读数, 可以估算出反馈光的收集效率大约为 2%, 满足发生自混合干涉的基本要求。

3 实验结果及分析

按照图 1 所示光路, 搭建了全光纤自混合干涉振动测量系统, 将一片 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 的铝膜贴在一镜架上作为靶面, 通过敲击光学平台使得铝膜获得一个微振动, 该系统获得的典型实验信号如图 4 所示。所获得的实验信号与传统自由空间弱反馈条件下自混合干涉信号形式完全一致, 信号呈正弦形; 实验获得的干涉信号的信噪比较好。

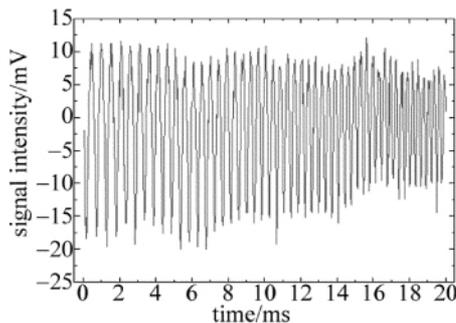


Fig. 4 Experimental signal of the all-fiber self-mixing interference system

利用短时傅里叶变换对收集到的干涉信号进行时频分析, 获得铝膜的振动速率以及位移历史如图 5 所示。测得的铝膜的振动速率为 $1.40\text{mm/s} \sim 2.75\text{mm/s}$, 铝膜的最大位移为 $38.77\mu\text{m}$ 。

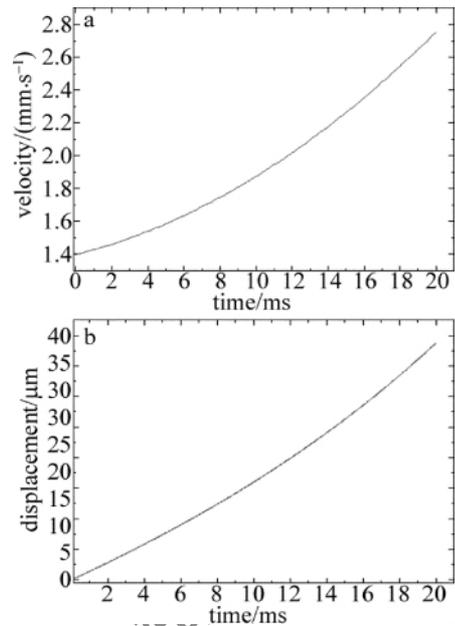


Fig. 5 Experimental results of the all-fiber self-mixing interference system a—velocity-time curve b—displacement-time curve

另一方面, 按照自混合干涉的相关理论, 每产生一个干涉条纹, 对应外部物体运动的距离为 $\lambda/2$, 其中 λ 为激光波长。在图 4 所示的实验信号中, 总共产生了 50 个干涉条纹, 则对应的运动距离为 $38.75\mu\text{m}$, 而与其对应的时间为 20ms, 因此, 在该段时间内, 铝膜振动的平均速率为 1.9375mm/s 。当在光纤耦合器和光纤自聚焦透镜之间加入一段长为 10m 的光纤跳线之后, 系统仍然能得到较为理想的自混合干涉信号, 说明该系统具备远距离测量的能力。

4 结论

基于自混合干涉的基本原理, 设计了一套全光纤自混合干涉振动测量系统; 从理论上简单分析了采用光纤传光、自聚焦透镜收集反馈光进行自混合干涉的可行性; 搭建了实验光路; 利用铝膜作为运动靶面, 进行了微振动实验研究, 获得了较为理想的自混合干涉信号, 信号形式与传统的自由空间自混合干涉形式一致; 当光纤跳线长度大于 10m 时, 仍然能得到具有较好信噪比的自混合干涉信号, 故该系统可以进行远距离的测量。由于采用了全光纤的设计, 因此, 该系统具有光路灵活多变、抗干扰能力强、可实现远距离测量等优点。

参 考 文 献

- [1] KING P G R. Metrology with an optical master[J]. Review of Scientific Instruments, 1963, 17: 180-182.
- [2] ZHOU J P, WANG M, HAN D F. Experiment observation of self-mixing interference in distributed feedback laser[J]. Optics Express, 2006, 14(12): 5301-5306.
- [3] SCALISE L, PAONE N. Laser Doppler vibrometry based on self-mix-

- ing effect [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 38(3/4): 173-184.
- [4] WANG M, LU M, HAO H, *et al.* Statistics of the self-mixing speckle interference in a laser diode and its application to the measurement of flow velocity [J]. *Optics Communication*, 2006, 260(1): 242-247.
- [5] HU X F. Effect of external cavity's feedback light on state density of photon in internal cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2684-2689(in Chinese).
- [6] SHINOHARA S, MOCHIZUKI A, YOSHIDA H, *et al.* Laser Doppler velocimeter using the self-mixing effect of a semiconductor laser diode [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(9): 1417-1419.
- [7] KOELINK M H, SLOT M, de MUL F F M, *et al.* Laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(18): 3401-3408.
- [8] JENTINK H W, de MUL F F M, SUICHIES H E, *et al.* Small laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a diode laser [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(2): 379-385.
- [9] OZDEMIR S K, ITO S, SHINOHARA S, *et al.* Correlation-based speckle velocimeter with self-mixing interference in a semiconductor laser diode [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(33): 6859-6865.
- [10] LIU Sh G, LI Z R, LIU Q. Feasibility study of all-fiber self-mixing speckle interference [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(3): 316-319 (in Chinese).
- [11] YU Y G, GUO Ch Y, YE H Y. Vibration measurement based on moderate optical feedback self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(8): 1430-1434(in Chinese).
- [12] HU X F. Reconstruction of vibration signal from laser diode self-mixing interference signal [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1498-1502(in Chinese).
- [13] HU X F. Observation and analysis on self-mixing interference of multi-longitudinal mode laser diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 432-439(in Chinese).
- [14] CHURNSIDE J H. Laser Doppler velocimetry by modulating a CO₂ laser with backscattered light [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(1): 61-66.
- [15] ACKET G, LENSTRA D, BOET A D, *et al.* The influence of feedback intensity on longitudinal mode properties and optical noise in index-guide semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(10): 1163-1169.
- [16] HU X F. Calculation analysis and experimental observation on laser diode self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1111-1116(in Chinese).
- [17] LIU Sh G, LI Z R, LIU Q. The study of self-mixing interference signal processing based on time-frequency analysis [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(6): 626-629(in Chinese).
- [18] HUANG W, LÜ L, GU H Q, *et al.* Analysis on the laser self-mixing vibration signal transmitted through optical fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(1): 50-53(in Chinese).
- [19] de GROOT P J. Range-dependent optical feedback effects on the multimode spectrum of laser diodes [J]. *Journal of Modern Optics*, 1990, 37(7): 1199-1214.

(上接第28页)

法具有很好的应用前景,为下一步实现3维立体图的实时计算全息图研究奠定了良好的技术基础。

参 考 文 献

- [1] YU Z L, JIN G F. Computer generated hologram [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984: 1-22(in Chinese).
- [2] ABOOKASIS D, ROSEN J. Three types of computer-generated hologram synthesized from multiple angular viewpoints of a three-dimensional scene [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(25): 6533-6538.
- [3] YOSHIKAWA N, YATAGAI T. Interpolation method for computer-generated holograms using random phase technique [J]. *Optical Review*, 1999, 6(5): 433-438.
- [4] WANG H, LI Y, JIN H Zh, *et al.* Visualization using computer generated hologram (CGH) based on three-dimensional shape measurement data of object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(3): 284-288(in Chinese).
- [5] LI Y, WANG H, YING Ch F, *et al.* Research of the computer-generated rainbow hologram with large viewing angle [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(5): 595-597(in Chinese).
- [6] SHI Y L, WANG H, LI Y. Practical method for color computer-generated rainbow holograms of real-existing objects [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(21): 4219-4226.
- [7] SHIMOBABA T, ITO T. An efficient computational method suitable for hardware of computer-generated hologram with phase computation by addition [J]. *Computer Physics Communications*, 2001, 13(8): 44-52.
- [8] ITO T, MASUDA N, YOSHIMURA K, *et al.* Special-purpose computer HORN-5 for a real-time electroholography [J]. *Optics Express*, 2005, 13(6): 1923-1932.
- [9] SHIMOBABA T, HISHINUMA S, ITO T, *et al.* Special-purpose computer for holography HORN-4 with recurrence algorithm [J]. *Computer Physics Communications*, 2002, 14(8): 160-170.
- [10] ICHIHASHI Y, NAKAYAMA H, ITO T, *et al.* HORN-6 special-purpose clustered computing system for electroholography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13895-13903.
- [11] ZHANG Q Sh. Studies of synthetic aperture method in digital holography based on gray correlation algorithm [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(3): 276-279(in Chinese).