

文章编号: 1001-3806(2010)03-0316-04

全光纤自混合散斑干涉可行性研究

刘盛刚^{1,2}, 李泽仁^{1*}, 刘 乔¹

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 研究生部, 北京 100088)

摘要: 为了证明光纤传光、光纤自聚焦透镜收集反馈光进行自混合散斑干涉的可行性, 建立了自聚焦透镜收集效率的理论模型, 重点研究了光纤自聚焦透镜的收集效率随其半径和工作距离的变化关系; 从理论上证明了采用光纤传光、光纤自聚焦透镜收集反馈光进行自混合散斑干涉的可行性; 最后搭建了实验装置, 并进行了实验研究。结果表明, 该装置可以获得较好的自混合散斑干涉信号; 可以解决自由空间自混合散斑干涉测速系统工具距离短、易受环境干扰等问题。

关键词: 激光技术; 速度测量; 自混合散斑干涉; 自聚焦透镜

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1001-3806.2010.03.009

Feasibility study of all-fiber self-mixing speckle interference

LIU Sheng-gang^{1,2}, LI Ze-ren¹, LIU Qiao¹

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Postgraduate Department, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: In order to prove the feasibility of using fiber to transmit light and using self-focus lens to collect feedback light, the collection efficiency model of self-focus lens was built, and then much attention was put on how the collection efficiency of the self-focus lens changes with radius and working distance. The feasibility of using fiber to transmit light and using self-focus lens to collect feedback light is theoretically proved. Finally, the experimental facility was established, the experiments were carried out. The experimental results show that this new instrument can acquire fine signal at long working distance with little disturbance induced by environment.

Key words: laser technique; velocity measurement; self-mixing speckle interference; self-focus lens

引言

利用激光动态散斑的统计特性可以进行运动物体速度的测量^[1-2], 而基于光反馈效应的自混合干涉也有大量的文献报道^[3-5], 将散斑技术和自混合干涉技术相结合产生了自混合散斑干涉技术, 目前国内外关于该技术的报道还较少。1996年, 日本的 SHIBATA, SHINOHARA 等人^[6]首次报道了自混合散斑干涉测速技术, 与传统的散斑测速不同, 自混合散斑干涉测速是利用散射回的光重新进入激光谐振腔内部, 散射回去的光与激光谐振腔内部的光相互作用, 使得激光器输出光强发生波动, 通过分析光强的波动获得外部物体速度信息, 他们详细研究了自混合散斑信号处理方法, 并在 75mm/s ~ 300mm/s 实现了精度为 2% 的速度测量;

1999年, 他们又报道了^[7]可同时进行速度和位移测量的装置, 在 100mm/s ~ 900mm/s 实现了精度为 1% 的速度测量, 在 10mm ~ 100mm 范围内实现了精度为几个百分点的位移测量。SHIBATA 等人建立的系统需要事先进行标定, 1999年, OZDEMIR 等人^[8]建立了双激光管自混合散斑干涉系统, 该系统测量前无需进行标定, 但信号处理精度易受人为主观判断的影响; 同年, 他们又报道了^[9]基于自相关的自混合散斑信号处理方法, 得到了自相关时间的倒数与外部物体运动速度成线性关系的结论。2001年, NORCIA, DONTAI 等人^[10]对迈克耳逊干涉系统在散斑状态下的信号幅度减小以及测量误差进行了详细研究, 提出了追踪自混合散斑信号相对最大幅度技术, 该技术可以克服干涉信号幅度减小以及相位误差等问题。从 2004 年开始, 国内南京师范大学 WANG 等人^[11-13]开展了自混合散斑干涉机理以及速度测量方面的研究。

但是, 目前报道的自混合散斑干涉都局限于自由空间传光, 因此具有工作距离短、易受环境干扰等缺点。作者在此基础上, 首先从理论上分析了系统采用光纤传光, 自聚焦透镜收集反馈光的可行性, 然后搭

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, 硕士研究生, 主要从事激光干涉测速技术方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zeren109@21cn.com

收稿日期: 2009-03-05; 收到修改稿日期: 2009-04-30

建了全光纤自混合散斑干涉系统并进行了实验研究,实验结果表明,该系统能获得较好的信号,且有较大的工作距离,信号形式与以往报道的自由空间传光信号相类似。

1 自混合散斑干涉测速原理

自混合散斑干涉主要是利用了动态散斑理论和自混合干涉理论,研究人员^[13]采用的自由空间传光的测量系统结构示意图如图 1 所示。

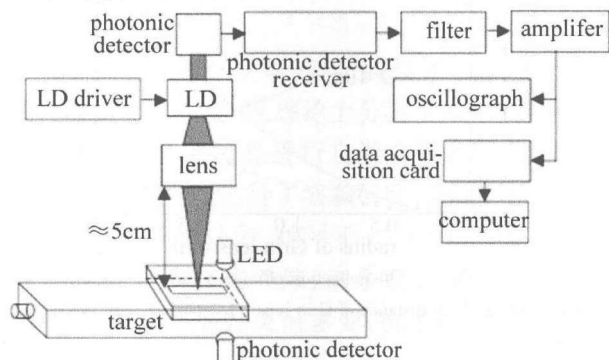


Fig. 1 The schematic diagram of the free space self-mixing speckle interference system

自混合散斑干涉信号波动的平均频率与外部散射体的横向运动速度有如下关系^[6-7]:

$$f = av + f_0 \quad (1)$$

式中, f 为散斑波动的平均频率, v 为散射体的横向运动速度, a 为斜率, f_0 为散斑平均频率的初始值。先通过已知的速度 v 得到散斑波动的平均频率 f , 然后求解出参量 a 和 f_0 , 在最后进行速度测量时, 就可以由自混合散斑信号的平均频率 f 求得散射体的横向运动速度 v 。

2 全光纤系统组成

全光纤自混合散斑干涉系统组成如图 2 所示。

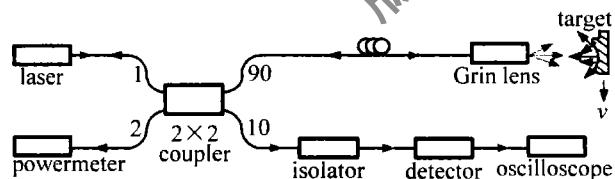


Fig. 2 The schematic diagram of the all-fiber self-mixing speckle interference system

系统由带尾纤的半导体激光二极管、 2×2 耦合器、光隔离器、光纤自聚焦透镜、光电转换器、示波器组成。激光二极管为多量子阱结构 F-P 型, 波长 1550nm, 输出功率 2mW 左右; 2×2 耦合器、光隔离器、光纤自聚焦透镜均采用光通信领域中的通用器件; 不采用激光二极管内置光电探测器监测激光光强的变化, 是由于内置光电探测器的带宽较低, 而在高速测量时需要外部电路有较大的带宽, 因此采用 90:10 的耦合器来分光, 用 Newfoc 的探测器来监测激光二极管

光强的变化; 数据则由数字示波器记录。

3 全光纤系统可行性分析

自由空间传光的优势在于反馈光的收集效率比较高^[14], 因此, 采用光纤传光的自混合散斑干涉系统, 首先要解决的就是反馈光的收集效率问题。作者采用光通信领域中常用的光纤自聚焦透镜来收集反馈光, 下面对全光纤自混合散斑干涉系统的可行性进行理论分析。

有学者^[15]指出, 对于 1mW 的输出光, 若有效反馈光达到 1nW 就可以观察到自混合干涉现象, 因此, 有必要讨论一下光纤自聚焦透镜的收集效率 η 是否满足自混合干涉的要求。假设连接器附加损耗为 α dB, 单向传输有 3 个连接器; 耦合器附加损耗为 β dB, 分光比为 η' , 激光器的输出功率为 P_0 , 则经过一个来回之后, 进入谐振腔内部的有效反馈光强度 P'' 为:

$$P'' = \left(\frac{1}{10^{\frac{\alpha}{10}}} \right)^6 \left(\frac{1}{10^{\frac{\beta}{10}}} \right)^2 \eta \eta'^2 P_0 \quad (2)$$

能观察到自混合干涉现象的前提条件为:

$$P'' \geq P_{th}'' \quad (3)$$

假设连接器附加损耗 $\alpha = 0.2$ dB, 耦合器的附加损耗为 $\beta = 0.2$ dB, 分光比 $\eta' = 0.9$, $P_0 = 1$ mW, $P_{th}'' = 1$ nW, 将相关参量带入(3)式解得:

$$\eta \geq 10^{-5.7475} \quad (4)$$

此处, 由于考虑了连接器的附加损耗, 再考虑到光纤传输损耗较小, 光纤也只有几米长, 因此, 在上面的讨论中, 没有单独考虑光纤的传输损耗。

另一方面, 为了从理论上研究自聚焦透镜收集效率 η 是否满足(4)式, 采用如下简化模型: 假设被出射激光照射的靶面为理想漫反射面, 因此, 可以将靶面等效为一个朗伯光源。在球坐标系下, 靶面辐射强度 $B(\theta, \varphi)$ 与 θ 角度的关系可以写为:

$$B(\theta, \varphi) = B_0 \cos(\theta) \quad (5)$$

式中, B_0 表示沿辐射面法线方向的辐射强度。因此, 进入自聚焦透镜的反馈光可以写为:

$$P' = \int_{A_s} dA_s \int_{\Omega} B(\theta, \varphi) d\Omega = \int_0^{r_s} r dr \int_0^{2\pi} d\theta_s \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_{max}} B_0 \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \right] \quad (6)$$

式中, r_s 为等效光源半径; θ_{max} 为等效光源相对于自聚焦透镜的最大张角; Ω 表示立体角, 即自聚焦透镜相对于朗伯光源的立体角; θ, φ 为球坐标系下表示方向的两个参量。

现在来考虑最大接收角问题, 由于自聚焦透镜的半径为毫米量级, 而从自聚焦透镜出射的光斑直径约

为几个微米,因此,在考虑最大接收角时,可以将靶面等效为一个点光源。

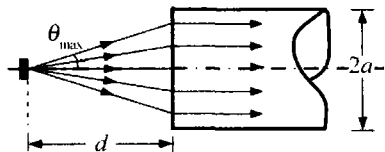


Fig. 3 The schematic diagram of the maximal acceptance angle of the Grin lens

如图3所示,则最大张角满足:

$$\tan\theta_{\max} = \frac{a}{d} \quad (7)$$

式中, d 为自聚焦透镜与靶面的距离,定义为自聚焦透镜的工作距离。由于 θ_{\max} 角度较小,因此有:

$$\theta_{\max} \approx \frac{a}{d} \quad (8)$$

选取的自聚焦透镜的半径 $a \approx 1.4\text{mm}$, 其工作距离 $d \approx 10\text{mm}$, 因此对应的 $\theta_{\max} \approx 8.0^\circ$, 而自聚焦透镜的数值孔径的一般大于 0.37, 其对应的最大接收角则大于 43.4° , 因此,可以近似认为照射到自聚焦透镜端面上的光都是能够进入光纤的。进入自聚焦透镜的光功率 P' 为:

$$P' = \int_0^{r_s} r dr \int_0^{2\pi} d\theta_s \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} B_0 \cos\theta \sin\theta d\theta d\varphi \right] = \frac{\pi^2 r_s^2 B_0}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2a}{d}\right) \right] \quad (9)$$

对 θ 在 $0 \sim \pi/2$ 之间进行积分,得到靶面作为一个朗伯光源发射的总功率 P_s :

$$P_s = \pi^2 r_s^2 B_0 \quad (10)$$

靶面能够等效为一个光源,主要是由于受到自聚焦透镜的出射光功率 P 的照射,假设靶面反射系数为 R (通常 R 量级约为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$), 因此有:

$$P_s = R \cdot P \quad (11)$$

因此收集效率 η 为:

$$\eta = \frac{P'}{P} = \frac{R}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2a}{d}\right) \right] \quad (12)$$

取 $R=0.1$, 由(12)式计算得到图4。

从图4可以看出,当自聚焦透镜的工作距离较小时,自聚焦透镜收集效率随着其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 $a = 1.4\text{mm}$, 其工作距离 $d = 10\text{mm}$, 取 $R = 0.1$, 则收集效率 $\eta = 0.1947\%$, 满足(4)式的要求。通常反射系数 $R > 10^{-1}$ 量级,因此收集效率会更高。从(4)式和图4以及上面的讨论,可以得出如下结论:采用全光纤传光、光纤耦合器分光、光

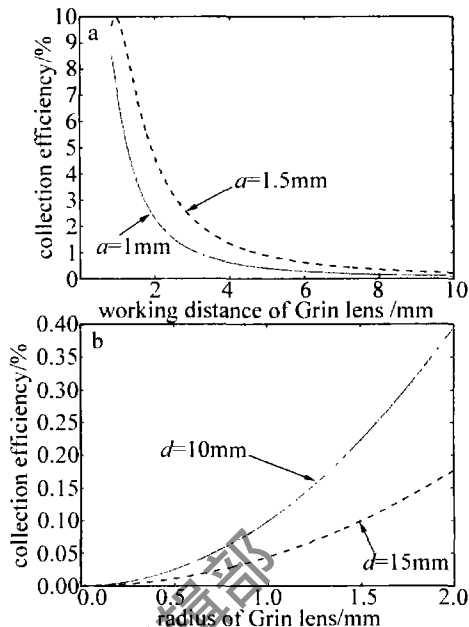


Fig. 4 The collection efficiency curve

a—change with working distance of Grin lens b—change with the radius of Grin lens

纤自聚焦透镜收集反馈光,可以满足自混合散斑干涉的基本条件,设计的全光纤系统原则上是可行的。

4 实验结果与讨论

按照图2搭建了实验光路,并进行了相应的实验研究,实验结果如图5所示。图5a为靶面静止时,通过示波器观察到的激光光强变化;图5b为靶面运动时,通过示波器观察到的某一段时间内的激光光强变化,亦即自混合散斑干涉信号。

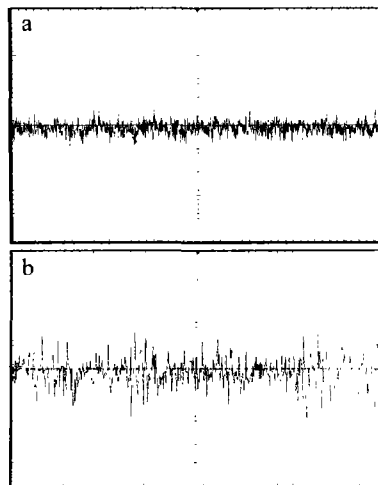


Fig. 5 The experiment results

a—no motion b—transversal motion

对比图5a和图5b发现,当靶面静止时,激光光强变化表现为一种随即波动;当靶面运动时,激光光强受到反馈回去的散斑的影响,光强出现较大的波动,且不同时刻波动频率明显不一致。观察到的信号形式与以往自由空间的报道^[6,9]完全一致。当在激光器和耦合

器之间接一个光隔离器时,观察不到光强的变化,从而说明前面观察到的信号确实是自混合散斑干涉信号。在耦合器与光纤自聚焦透镜之间加入一段10m左右的光纤跳线后,仍能观察到自混合散斑干涉信号,说明该系统的工作距离至少大于10m;而自由空间自混合散斑干涉系统的工作距离受聚焦透镜焦距的限制,通常只有厘米量级。由于采用了全光纤设计,光路更加灵活多变,系统抗干扰能力得到了极大的提高。

5 结论

基于自混合散斑干涉的原理,设计了一套全光纤自混合散斑干涉系统;从理论上分析了采用光纤传光,自聚焦透镜收集反馈光进行自混合散斑干涉的可行性;搭建了实验光路进行了实验研究,获得了较为理想的自混合散斑干涉信号,信号形式与传统的自由空间自混合散斑干涉形式一致;该系统的工作距离大于10m。该系统具有光路灵活多变、抗干扰能力强、工作距离远等优点。

参考文献

- [1] TOH S L, QUAN C, WOO K C, *et al.* Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique[J]. *Optical and Laser Technology*, 2001, 33(6):427-434.
- [2] LI E B, TIEU A K, WANG K F. Dynamic laser speckle method for determining the relative velocity between two objects[J]. *Opt Commun*, 2003, 219(1/6):1-8.
- [3] 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.
- [4] WANG X J, ZHANG Sh L, TAN Y D. Development of optical feedback technology of LD pumped microchip lasers[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(1):9-13 (in Chinese).
- [5] LIU G, ZHANG Sh L, ZHU J, *et al.* Interference of two beams in a He-Ne laser with optical feedback[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(5):470-472 (in Chinese).
- [6] SHIBATA T, SHINOHARA S, IKEDA H, *et al.* Laser speckle velocimeter using self-mixing laser diode[J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(2):499-503.
- [7] SHIBATA T, SHINOHARA S, IKEDA H, *et al.* Automatic measurement of velocity and length of moving plate using self-mixing laser diode[J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1999, 48(6):1062-1067.
- [8] OZDEMIR S K, TAKASU T, SHINOHARA S, *et al.* Simultaneous measurement of velocity and length of moving surfaces by a speckle velocimeter with two self-mixing laser diodes[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(10):1968-1974.
- [9] OZDEMIR S K, ITO S, SHINOHARA S, *et al.* Correlation-based speckle velocimeter with self-mixing interference in a semiconductor laser diode[J]. *Appl Opt*, 1999, 38(33):6859-6865.
- [10] NORGIA M, DONATI S, D'ALESSANDRO D. Interferometric measurement of displacement on a diffusing target by a speckle tracking technique[J]. *IEEE J Q E*, 2001, 37(6):800-806.
- [11] LU M, WANG M, HAO H. Measurement of flow velocity using self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2):190-194 (in Chinese).
- [12] LU M, WANG M, HAO H, *et al.* Self-mixing speckle interference generated in laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(9):1229-1236 (in Chinese).
- [13] 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]. *Opt Commun*, 2006, 260(1):242-247.
- [14] HUANG W, LÜ L, GUI 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).
- [15] 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302页)

- [3] SHEN X F, WANG Y, YAO J, *et al.* Finite element simulation of thermal stress distribution in direct metal laser sintering [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4):343-346 (in Chinese).
- [4] LIU Zh X, HUANG W D, WAN B T. Investigation of basic problems of the numerical model for powder-feed laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(6):567-570 (in Chinese).
- [5] LIN J M. Laser attenuation of the focused powder streams in coaxial laser cladding[J]. *Journal of Laser Application*, 2000, 12(1):28-33.
- [6] XI M Zh, YU G, ZHANG Y Zh, *et al.* Interaction of the laser beam and the metal powder conveyed by coaxial powder feeder[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(4):562-566 (in Chinese).
- [7] YANG X Ch, LI H Sh, LEI J B, *et al.* DPIV method of measurement of powder stream of co-axial feeding for laser manufacturing[J]. *Proc SPIE*, 2005, 5629:93-102.
- [8] LI H Sh, YANG X Ch, LEI J B, *et al.* A numerical simulation of movement powder flow and development of the carrier-gas powder feeder for laser repairing[J]. *Proc SPIE*, 2005, 5629:557-564.
- [9] YANG X Ch, LEI J B, LIU Y W, *et al.* Experimental measurement of metal powder stream concentration field in laser manufacturing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(7):993-997 (in Chinese).
- [10] JIN X Sh, YANG X Ch, FENG L W, *et al.* Numerical simulation of coaxial powder flow with carrying gas in laser manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(5):161-166 (in Chinese).