

环形光纤激光器自混合散斑自相关测速的研究

陈世佳¹ 韩道福² 马力²

(¹南昌大学物理系, 江西 南昌 330031
²南昌大学基础物理实验中心, 江西 南昌 330031)

摘要 研究了一种基于强度自相关函数的光纤激光器自混合散斑速度测量方法。基于环形激光器光反馈理论,对自混合散斑信号进行自相关分析,推导出自混合散斑信号的自相关频率与表面粗糙物体运动速度之间的关系式。利用构建的环形掺铒光纤(EDF)激光器自混合散斑测速实验系统,对不同速度下的运动物体进行了实验测试,验证了自相关频率与物体运动速度之间的线性关系。研究结果表明该方法可以用于物体运动速度的测量。

关键词 测量;光纤激光器;速度测量;自相关;自混合散斑

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.030601

Autocorrelation-Based Velocity Measurement of Self-Mixing Speckle in Fiber Ring Laser

Chen Shijia¹ Han Daofu² Ma Li²

(¹Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China
²Basic Physics Experiment Center, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract Autocorrelation-based velocity measurement is studied with self-mixing speckle in an erbium-doped ring laser. The autocorrelation function of self-mixing speckle is deduced using the optical feedback theory of fiber ring laser, and a relation between the autocorrelation frequency of speckle signals and the velocities of moving object is theoretically obtained. Utilizing the experimental system based on an erbium-doped fiber (EDF) ring laser, the velocity measurement is carried out toward a dynamic target with different velocities. Linear relationship between autocorrelation frequency and the velocity of the target is proved. The result indicates that the autocorrelation of self-mixing speckle in a fiber ring laser can be applied to velocity measurement.

Key words measurement; fiber lasers; velocity measurement; autocorrelation; self-mixing speckle

OCIS codes 060.2300; 060.2310; 120.6165; 120.7250

1 引言

激光自混合干涉是指激光器出射的激光被外部物体反射或散射后,一部分光又被反馈回激光器的谐振腔,带有物体表面信息的反射光或散射光和原来激光谐振腔中的光混合,引起激光器输出频率和功率发生变化的现象。自混合散斑干涉技术就是基于这一原理,将激光入射到表面具有一定粗糙度的运动物体上,物体反射和散射回来的光和激光器谐振腔中的光混合形成自混合干涉现象,外腔长度和反射率随着表面粗糙度的变化而变化,将光强调制成随机的散斑信号,所以可以利用由激光器和被测物体表面构成的外谐振腔产生的自混合散斑信号来测量物体的状态和速度。1996年,T. Shinohara等^[1]首次报道了基于半导体激光器的自混合散斑速度仪。1999年,他们又报道了应用该自混合散斑干涉仪同时测量速度和长度的系统^[2,3],并扩展到血流流速的测量^[4,5]和相关分析^[6]。1997年,S. Merlo等^[7]应用迈克耳孙干涉仪实现自混合散斑干涉。王鸣课题组^[8~10]从理论上分析了基于半导体激光二极管内自混合散斑产生的机理,为自混合散斑应用提供了理论基础。近年来,掺铒光纤(EDF)激光器由于其结构紧凑、全固化以及传输光纤天然的通融性等优

收稿日期: 2010-11-22; **收到修改稿日期**: 2010-12-08

基金项目: 国家自然科学基金(60808019)和江西省自然科学基金(2008GQW0002)资助课题。

作者简介: 陈世佳(1986—),男,硕士研究生,主要从事光电子技术与激光应用等方面的研究。E-mail: csj3196@163.com

导师简介: 马力(1957—),男,硕士,教授,主要从事光电子技术与激光应用等方面的研究。E-mail: lma@ncu.edu.cn

点,在光纤通信和传感领域得到广泛的应用^[11,12]。将散斑引入光纤激光腔,形成基于自混合散斑的光纤传感应用,在速度传感、测量方面具有重要的应用价值。

本文以环形激光器光反馈理论为基础,研究一种基于强度自相关函数的光纤激光器自混合散斑动态目标速度测量方法。利用强度自相关函数解调方法,计算不同速度下的散斑信号自相关频率和速度的关系。以环形掺铒光纤激光器为光源,构建自混合散斑测速系统实验验证该方法的可行性。

2 理论分析

2.1 环形掺铒光纤激光器自混合散斑实验系统及模型分析

图1为环形掺铒光纤激光器自混合散斑测速实验系统。980 nm 抽运光经波分复用器(WDM)耦合入环形腔内,信号光通过 EDF 放大后进入环形器、耦合器,出射光分为两部分,一部分经光纤布拉格光栅(FBG)筛选出 1550 nm 的激光反射回环形腔内,另一部分被动态目标物体散射或反射,通过环形器的另外一个端口反馈回腔内。反馈回的信号光带有目标物面信息,调制了激光器的输出功率和频率。反馈光与腔内原光混合后通过 1×2 光纤耦合器部分被光电探测器(PD)接收,转换成电信号,再由示波器(OSC)采集并分析。

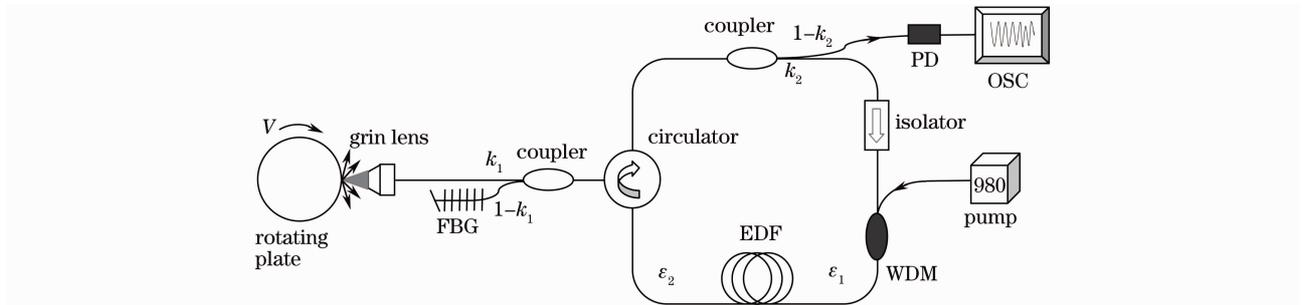


图1 环形掺铒光纤激光器自混合散斑测速系统

Fig. 1 Velocity measurement system of self-mixing speckle based on an erbium-doped fiber ring laser

由图1的测试系统可知探测器接收到的激光输出功率为

$$P_{\text{detector}} = (1 - k_2)\epsilon_2 [k_1^2 \mu + (1 - k_1)^2 r_f] \cdot P_s^{\text{out}}, \quad (1)$$

式中 P_s^{out} 为输出信号光功率, k_1, k_2 是两个耦合器的分光比, ϵ_2 为掺铒光纤左端的功率损耗, r_f 是 FBG 的反射系数, μ 为反馈光与激光器出射光的功率之比, 其值与粗糙表面面对光的散射有关, 可定义为 $\mu \propto |U(x_0)|^2 / |E(x_0)|^2$, 其中 x_0 是散射光点坐标, $E(x_0)$ 为照射到粗糙表面的光场, $U(x_0)$ 是反馈回激光器的复振幅, 可由菲涅耳衍射的光波理论得到。

$$U(x_0) = \int t(x_0) \cdot E(x_0) \cdot \exp(ikr) \cdot \exp[ik \cdot 2h(X)] \cdot \frac{\exp(ikr)}{r} \cdot \cos \theta dX, \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 代表激光波矢, $t(x_0)$ 为透镜和光纤的联合传播函数, X 为散射表面(粗糙面)的坐标, $h(X)$ 为随机表面高度函数, L_e 为点 x_0 到随机表面的距离, r 为点 x_0 到点 X 的距离。 $\exp(ikr)$ 为光从散射光点 x_0 到衍射区域的相位变化, $\exp[ik \cdot 2h(X)]$ 为粗糙表面对入射光的调制, $\frac{\exp(ikr)}{r} \cdot \cos \theta$ 为散射面到接收点的传递函数。一维菲涅耳衍射空间散斑形成示意图如图2所示。

P_s^{out} 可通过光功率的超越方程数值求解得到。光功率的超越方程^[13]为

$$P_s^s \left[\alpha_s L - \frac{(A-1)P_s^{\text{out}}}{P_s^s} - \ln A \right] = P_p^{\text{in}} \left\{ 1 - \exp \left[-\alpha_p L + \frac{P_s^s}{P_p^{\text{in}}} (\alpha_s L - \ln A) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 $A = k_2 \epsilon_1 \epsilon_2 [k_1^2 \mu + (1 - k_1)^2 r_f]$, 代表稳态条件下 EDF 的输入信号光功率, P_p^{in} 代表输入 EDF 的抽运功率,

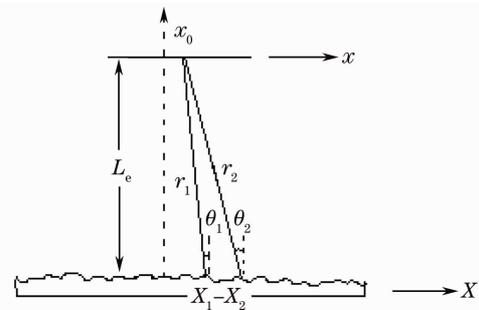


图2 菲涅耳衍射区光散射原理图

Fig. 2 Schematic diagram for light scattering in diffraction region

$P_s^*(P_p^s)$ 代表信号(或抽运)光的饱和功率, $\alpha_p(\alpha_s)$ 代表抽运光(小信号)吸收系数, L 是 EDF 的长度, ϵ_1 为掺铒光纤右端的功率损耗。

以上分析忽略了自发辐射放大(ASE)和受激吸收(ESA)的影响, 因为当激光器注入 980 nm 抽运光时, 大部分粒子吸收能量跃迁至高能级, ESA 变弱, 而当激光功率大于阈值时, 受激辐射占主导地位, ASE 减弱。

2.2 自混合散斑信号自相关分析

设 $\Delta I(t)$ 为 t 时刻探测到的信号光强度, 过了一段时间 τ 后, 光强变为 $\Delta I(t+\tau)$, 则动态散斑信号的归一化自相关函数可以用下式表示

$$\gamma_I(\tau) = \frac{\int \Delta I(t) \Delta I(t+\tau) dt}{\int \Delta I(t) \Delta I(t) dt}, \quad (4)$$

将 $\gamma_I(\tau)$ 相对于光出射点的位置关系考虑进去, 可表示为

$$\gamma_I(\tau) \simeq \gamma_\mu(x_0; \tau), \quad (5)$$

式中 $\gamma_\mu(x_0; \tau)$ 为点 x_0 归一化的时空强度自相关函数。

为了得到 $\gamma_\mu(x_0; \tau)$, 需要计算变量 μ 的时空自相关函数, 其由下式决定

$$\Gamma_\mu(x_0; t_1, t_2) = \langle \mu(x_0; t_1) \mu^*(x_0; t_2) \rangle = \iint \langle \exp\{i2k[h(X_1; t_1) - h(X_2; t_2)]\} \rangle \exp[i2k(r_1 - r_2)] \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) / (r_1 r_2) dX_1 dX_2, \quad (6)$$

$\langle \dots \rangle$ 代表系综平均值, r_1 和 r_2 分别表示 x_0 到 X_1 和 X_2 的距离。

假定随机表面的高度分布遵循高斯概率密度分布, 可以得到

$$\langle \exp\{i2k[h(X_1; t_1) - h(X_2; t_2)]\} \rangle = \exp\{-(2k)^2[\omega^2 - \Gamma_h(X_1 - X_2)]\}, \quad (7)$$

式中 ω 表示表面粗糙度的均方根误差, $\Gamma_h(X_1 - X_2) = \langle h(X_1)h(X_2) \rangle$ 为表面高度的自相关函数。 X_1 和 X_2 非常接近, 得到 $\theta_1 \approx \theta_2$ 。根据关系式 $\sin \theta_1 \approx \sin \theta_2 = (X_1 - x_0)/r_1$, 可以得到

$$r_2 - r_1 \approx \Delta X \sin \theta_1, \quad (8)$$

通过变量代换 $X_2 = X_1 + \Delta X$ 和 $X_1 = r_1 \sin \theta_1 + x_0$, (6)式可表示为

$$\Gamma_\mu(x_0; \Delta X) = (1/L_e) \iint \exp\{-(2k)^2[\omega^2 - \Gamma_h(-\Delta X)]\} \cdot \exp[-i2k\Delta X \cdot \sin \theta_1] \cdot \cos^3 \theta_1 d\sin \theta_1 d\Delta X. \quad (9)$$

(9)式用到了关系式 $\cos \theta_2 \approx \cos \theta_1$, $r_2 \approx r_1 = L_e / \cos \theta_1$, $dX_1 = r_1 d\sin \theta_1$, $dX_2 = d\Delta X$ 。倾斜因子 $\cos \theta_1$ 随散射光强度变化时改变不大, 近似有 $\cos \theta_1 \approx 1$, 所以(9)式可以简化为

$$\Gamma_\mu(x_0; \Delta X) = (1/L_e) \iint \exp\{-(2k)^2[\omega^2 - \Gamma_h(-\Delta X)]\} \cdot \exp[-i2k\Delta X \cdot \sin \theta_1] d\sin \theta_1 d\Delta X. \quad (10)$$

(10)式的右边可以看作是 $\exp\{-(2k)^2[\omega^2 - \Gamma_h(-\Delta X)]\}$ 的傅里叶变换对, 故自相关函数可以写为

$$\Gamma_\mu(x_0; \Delta X) = (1/L_e) \exp\{-(2k)^2[\omega^2 - \Gamma_h(\Delta X)]\}, \quad (11)$$

表面高度自相关函数可以表示为

$$\Gamma_h(\Delta X) = \omega^2 \exp[-(\Delta X/l_0)^2], \quad (12)$$

式中 l_0 为水平方向的相关长度, 表示随机表面的平均颗粒大小。

将(12)式代入(11)式中, 得到归一化的自相关函数:

$$\gamma_\mu(x_0; \Delta X) = |\Gamma(x_0; \Delta X)|^2 / |\Gamma(x_0; 0)|^2 = \exp\{-2(2k)^2 \omega^2 [1 - \exp(-\Delta X/l_0)^2]\}, \quad (13)$$

在速度测量中, 如果 t 时刻光斑位于 X_1 , 过了一段时间 τ 后, 光斑位于 $X_2 = X_1 + v\tau$, 式中 v 表示表面运动的速度。利用(5), (13)式, 散斑信号在点 x_0 处的空间自相关可以转换为时间自相关:

$$\gamma_I(\tau) = \exp\{-2(2k)^2 \omega^2 [1 - \exp(-v\tau/l_0)^2]\}. \quad (14)$$

(14)式是速度测量的表达式, 可以看出速度与自相关时间成反比关系, $\gamma_I(\tau)$ 可以通过实验测得的散斑信号计算得到。

3 自混合散斑速度测量实验及信号分析

3.1 自混合散斑速度测量实验

在图 1 的实验系统中,抽运源、隔离器、EDF、WDM 采用一个整体的掺铒光纤放大器(EDFA)实现,将 EDFA 与环形器,耦合器用光纤连接起来,组成全光纤结构的环形激光器,其输出功率约为 6 dBm。两个耦合器的分光比为 $k_1=0.5, k_2=0.9$ 。高速旋转平台具有铝制粗糙表面,其转速可由步进电机精确调节。实验时,调节聚焦透镜角度,使激光束垂直照射在运动物体表面,改变平台的转动速度,通过示波器可以观察和采集到不同表面速度下产生的自混合散斑信号。

为了研究不同运动速度对自混合散斑信号的影响,选定探测距离为 2 mm,转台线速度分别为 185 mm/s, 210 mm/s, 242 mm/s 时进行实验,图 3(a)和(b)分别是 3 种速度下得到的自混合散斑信号波形图和与之对应的振幅概率密度分布图。从图 3 可以看出,探测距离一定时,随着线速度的增加,自混合散斑信号波动的幅度和频率均增加,强度变化越快,相关度越低, τ_c 越小。

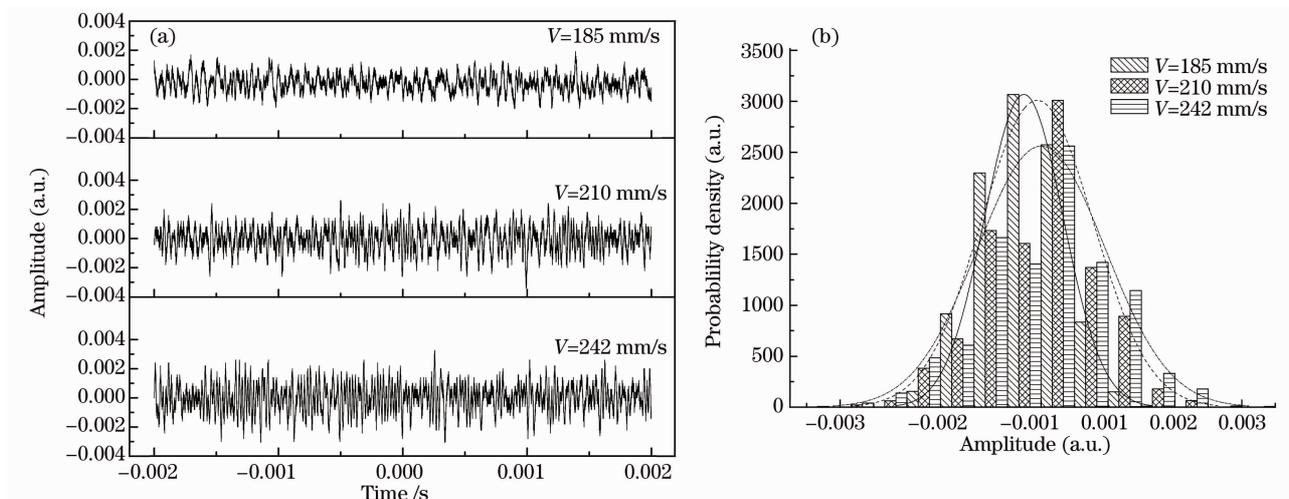


图 3 (a) 自混合散斑信号波形图, (b) 与之对应的振幅概率密度分布图

Fig. 3 (a) Waveform of self-mixing speckle signal, (b) corresponding probability density distribution

3.2 自混合散斑信号与运动速度的关系

选取 10 个不同的速度值进行实验,采集各个速度下产生的自混合散斑信号,再用 Matlab 编程处理数据。对于每个速度点,采集 10 个自混合散斑信号,计算出自相关频率的平均值。将不同的速度值和与之对应的自相关频率绘图,并进行数值拟合,结果如图 4 所示。图 4 中,自相关频率为自相关时间的倒数,拟合直线的表达式为 $V=1.06f+66.59$ 。实验上验证了自混合散斑信号的自相关频率与物体速度之间存在线性关系。

通过对采集的自混合散斑信号进行自相关分析,得到自相关频率,代入上述线性表达式,可以计算出速度值。图 5 是实验测得速度值与实际值的对比图,平均相对误差为 1.1%,故此方法可以实现高精度的速度测量。

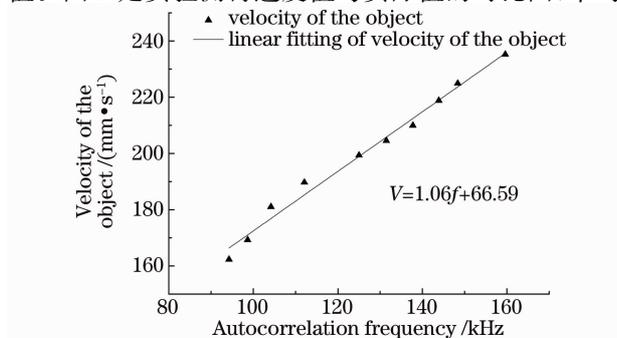


图 4 自相关频率与物体运动速度之间的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between autocorrelation frequency and velocity of the object

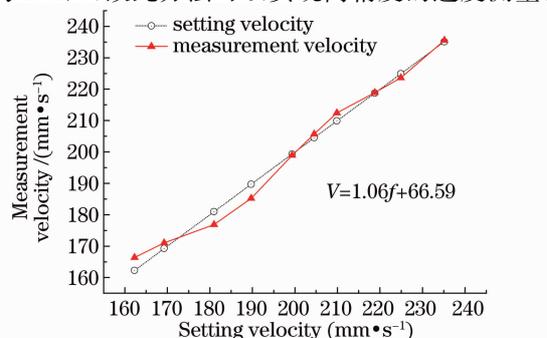


图 5 速度测量值与实际值对比图

Fig. 5 Comparison of measurement velocity and setting velocity

4 结 论

以环形激光器光反馈理论为基础,结合信号自相关理论,推导了自混合散斑信号自相关频率与构成外腔的粗糙物体运动速度之间的关系式。利用光纤放大器、光纤光栅、耦合器、环形器等器件组建了环形掺铒光纤激光器自混合散斑测速实验系统,在不同速度下测得了自混合散斑信号,并对其进行自相关分析计算出自相关频率,得到自相关频率与物体速度之间的线性关系式,与理论推导的结果相符合。实验结果表明,基于强度自相关函数的光纤激光器自混合散斑速度测量方法可用于物体速度的传感测量。

参 考 文 献

- 1 T. Shibata, S. Shinohara, H. Ikeda *et al.*. Laser speckle velocimeter using self-mixing laser diode[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1996, **45**(2): 499~503
- 2 S. K. Ozdemir, T. Takasu, S. Shinohara *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
- 3 S. K. Ozdemir, S. Takamiya, S. Shinohara *et al.*. A speckle velocimeter using a semiconductor laser with external optical feedback from a moving surface: effects of system parameters on the reproducibility and accuracy of measurements[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**(10): 1447~1455
- 4 S. K. Ozdemir, S. Takamiya, S. Ito *et al.*. Self-mixing laser speckle velocimeter for blood flow measurement[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(5): 1029~1035
- 5 S. K. Ozdemir, S. Shinohara, S. Takamiya *et al.*. Noninvasive blood flow measurement using speckle signals from a self-mixing laser diode: in vitro and in vivo experiments[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(9): 2574~2580
- 6 S. K. Ozdemir, S. Ito, S. Shinohara *et al.*. Correlation-based speckle velocimeter with self-mixing interference in a semiconductor laser diode[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(33): 6859~6865
- 7 S. Merlo, S. Donati. Reconstruction of displacement waveforms with a single-channel laser-diode feedback interferometer [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1997, **33**(4): 527~531
- 8 Han Daofu, Wang Ming, Zhou Junping. Self-mixing speckle interference in DFB lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3312~3317
- 9 Han Daofu, Wang Ming, Zhou Junping. Fractal analysis of self-mixing speckle signal in velocity sensing[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 3204~3211
- 10 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
- 11 Han Daofu, Wang Ming, Zhou Junping. Self-mixing speckle in an erbium-doped fiber ring laser and its application to velocity sensing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(18): 1398~1400
- 12 Han Daofu, Yu Jin, Ma Li *et al.*. Self-mixing speckle and dynamic target distance measurement using erbium-doped fiber ring laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 020601
韩道福, 俞进, 马力等. 环形掺铒光纤激光器自混合散斑及动态目标距离测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 020601
- 13 Peter D. Dragic. Analytical model for injection-seeded erbium-doped fiber ring lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(8): 1629~1631