

# 环形掺铒光纤激光器自混合散斑及动态目标距离测量

韩道福 俞进 马力 戚小平

(南昌大学基础物理实验中心, 江西 南昌 330031)

**摘要** 研究了一种基于环形腔的光纤激光器自混合散斑动态目标距离测量方法。提出环形掺铒光纤激光器自混合散斑效应的实验模型, 对环形光纤激光器内自混合散斑信号的产生进行了理论分析, 并通过实验得到了动态自混合散斑信号。应用动态散斑信号的频谱能量密度分析, 得到垂直扫描光束探测距离与频谱能量密度的线性关系。研究结果表明, 应用光纤激光器和自混合散斑效应, 可以对动态目标的距离进行高精度测量。

**关键词** 光纤激光器; 自混合散斑; 距离; 动态测量

中图分类号 TO436 OCIS 060.2320 120.6160 280.4788 文献标识码 A

## Self-Mixing Speckle and Dynamic Target Distance Measurement Using Erbium-Doped Fiber Ring Laser

Han Daofu Yu Jin Ma Li Qi Xiaoping

(Basic Physics Experiment Center, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China)

**Abstract** A new method of dynamic target distance measurement based on self-mixing speckle in an erbium-doped fiber-optic ring laser is studied. The model of self-mixing speckle measurement system is presented, and the theoretical analysis of the production of self-mixing speckle signal is also given. Through the experiments, the dynamic speckle signal is obtained. The spectrum energy density analysis is applied to the dynamic speckle signals, and a linear relationship between the spectrum energy density and the detection distance is obtained. The result shows that highly precise distance dynamic measurements can be performed by using self-mixing speckle and fiber laser.

**Key words** fiber laser; self-mixing speckle; distance; dynamic measurement

### 1 引言

激光自混合散斑是指激光器的出射光被外部动态的反射物反射或散射后, 其中一部分光返回到激光器的谐振腔, 与腔内的原光混合, 引起输出功率变化和频率变化, 形成的外光学反馈效应。激光自混合散斑的研究开始于 1996 年 T. Shibara 等<sup>[1]</sup>对自混合散斑速度测量仪的报道, 此后研究主要以半导体激光器为对象, 集中于血流速度和物体位移的测量, 并发展了波形脉冲计数、自相关和平均频率等一系列自混合动态散斑信号的分析方法<sup>[2-6]</sup>。随着研究的深入和一些新型激光器的出现, 激光自混合散斑又转向结合新型激光器而产生新的应用。2007 年, 我们利用掺铒光纤放大器组成 1.55  $\mu\text{m}$  波长环形光纤激光器, 研究了基于光纤激光器的自混合散斑效应及其速度传感应用, 并提出了自混合动态散斑信号的分形处理方法<sup>[7,8]</sup>。把散

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-05-16

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: 韩道福(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电子技术与激光应用等方面的研究。E-mail: dfhan@ncu.dedu.cn

斑效应引入光纤激光器,应用光纤有源腔内光的自混合原理实现光纤有源传感,在动态目标的传感测量中可产生许多新的应用。本文用掺铒光纤放大器、环形器和光纤光栅等光纤器件组成环形光纤激光器为主的光纤有源传感测量系统,利用自混合散斑原理对动态目标距离进行探测实验,研究了一种新的动态目标距离测量方法。

## 2 自混合散斑动态测量实验系统及理论分析

### 2.1 自混合散斑动态测量实验系统

图1为环形掺铒光纤激光器自混合散斑动态测量实验系统。它由抽运激光器、980/1550波分复用器、掺铒光纤、环形器、耦合器、光纤光栅和聚焦透镜等器件组成。环形器保证输出的光和返回的光能够单向环形传播。光纤光栅作为光功率反射器和激光波长选择器。光束经光纤陶瓷插针端面出射照到动态旋转台的粗糙表面上,被表面面元散射,部分散射光向后传播,从陶瓷插针端面耦合返回到环形腔,产生激光强度和频率的调制。为了探测激光功率变化,用1×2光纤耦合器分出部分光到光电探测器(PD)后变成电信号,由示波器(OSC)采集并显示。该实验系统采用全光纤结构配置,有利于信号稳定,方便传输和接收,形成光纤有源传感测量网络。

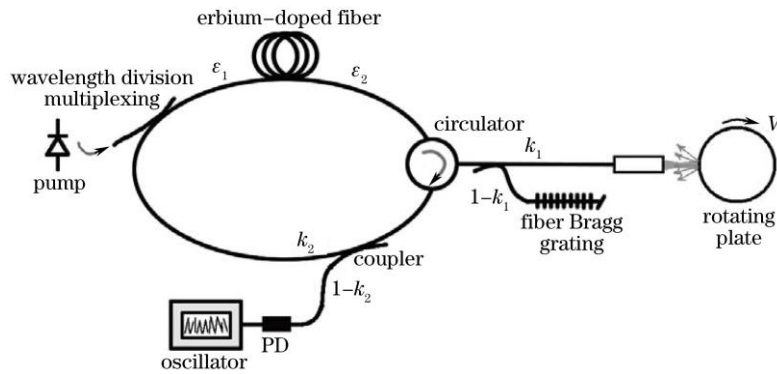


图1 自混合散斑动态测量实验系统  
Fig.1 Self-mixing speckle experimental system for dynamic measurement

### 2.2 实验系统的理论分析

参考 Peter D. Dragic<sup>[9]</sup>对种子光注入环形掺铒光纤激光器的理论分析,针对图1所示实验系统,可推导得到关于光功率的超越方程:

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

式中  $A = k_2 \varepsilon_1 \varepsilon_2 [k_1^2 \mu + (1-k_1)^2 r]$ , 表示稳态时掺铒光纤的输入信号功率。 $P_p^{\text{in}}$  和  $P_s^{\text{out}}$  分别为输入掺铒光纤的抽运功率和输出信号的光功率,下标 p 和 s 分别代表抽运和信号, $P_p^s$  ( $P_s^s$ ) 为抽运或信号光的饱和功率, $\alpha_p$  ( $\alpha_s$ ) 为小信号吸收系数, $L$  为掺铒光纤长度, $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  为掺铒光纤两端的光功率系数, $k_1$  和  $k_2$  分别为两个光纤耦合器的分光比, $r$  为光纤光栅的反射系数, $\mu$  为散射回激光器的光与陶瓷插针端面出射光的功率之比。 $\mu$  值的大小跟粗糙表面面元对光的散射有关,可定义为  $\mu \propto |U(x_0, y_0)|^2 / |E_{\text{out}}|^2$ , 其中  $E_{\text{out}}$  为照射到粗糙表面的光场,  $(x_0, y_0)$  为散射光点坐标,这里散射光从端面投射入光纤,  $U(x_0, y_0)$  为反馈回激光器的散射光的复振幅,它可以由粗糙表面的光波散射理论计算<sup>[10]</sup>

$$U(x_0, y_0) = E_{\text{out}} \iint t(x_0, y_0) A(X, Y) \exp[-i4\pi h(X, Y) / \lambda] \times \exp[-i2\pi(X \cdot x_0 + Y \cdot y_0) / (\lambda L_E)] dX dY, \quad (2)$$

式中为激光波长,  $t(x_0, y_0)$ 为透镜和光纤的联合传播函数,  $(X, Y)$ 为散射表面(粗糙面)的坐标,  $A(X, Y)$ 为散射区域孔径函数,  $h(X, Y)$ 为随机表面高度函数。

求解(1)式的数值解, 可以得到掺铒光纤信号光输出功率  $P_s^{\text{out}}$ , 将  $P_s^{\text{out}}$  代入

$$P_{\text{detector}} = (1 - k_2) \varepsilon_2 [k_1^2 \mu + (1 - k_1)^2 r] \cdot P_s^{\text{out}} \quad (3)$$

最终可以得到探测器接收的激光输出功率。

以上对实验系统理论分析, 忽略了放大自发辐射(ASE)和激发态吸收(ESA), 因为当激光器注入 980 nm 抽运光时, 大部分粒子将吸收能量跃迁至高能级, ESA 将变弱, 而当激光功率远大于阈值, 受激辐射占主导作用, ASE 将消失。

### 3 自混合散斑动态测量实验及信号分析

#### 3.1 自混合散斑动态测量实验

按照图 1 组建实验系统, 其中抽运光源、波分复用器、掺铒光纤采用一个整体的掺铒光纤放大器实现, 将耦合器、环形器、光纤光栅与掺铒光纤放大器连接, 组成环形光纤激光器, 输出光功率约 +6 dBm。两光纤耦合器的分光比分别为  $k_1=0.5$ ,  $k_2=0.9$ 。旋转平台为铝质材料, 转速通过步进电机精确可调, 激光照射的表面为粗糙表面。实验时, 让旋转平台在一定速度下运动, 将陶瓷插针出射激光照射到旋转平台的外侧表面上, 从示波器上可以观察和采集动态散斑信号。

为了研究探测距离对自混合散斑信号的影响, 选定探测表面的线速度  $V$  为 225 mm/s, 探测距离  $d$  分别为 1.750, 2.250 和 2.750 mm 进行实验, 图 2(a)和(b)分别是三种情况下得到自混合散斑信号波形图和与之对应的振幅概率密度分布, 从图 2 可以看出, 物体按一定速度运动时, 随着探测距离的增加, 所产生的自混合散斑信号波动幅度减小。

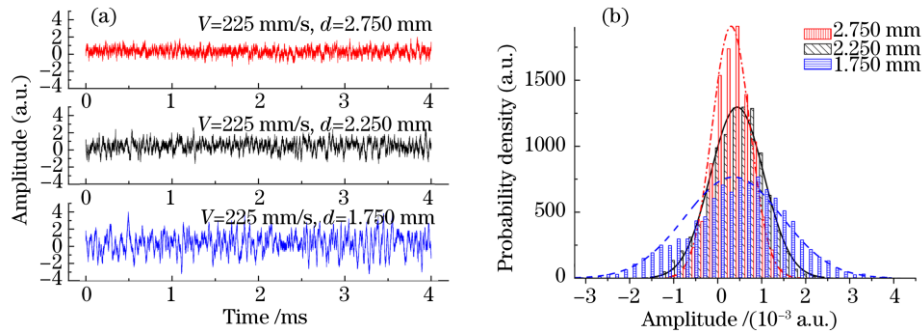


图 2 自混合散斑信号波形(a)与之对应的振幅概率密度分布图(b)  
Fig.2 (a) Waveform of self-mixing speckle signal, (b) the probability density of (a)

对图 2(a)三个信号分别从频率角度分析, 将它们进行傅里叶变换, 得到与之对应的频谱图, 如图 3 所示。在同一速度下, 不同探测距离得到的信号其振幅的频谱带宽基本不变, 保持在 0~50 kHz 这个范围内, 但是振幅频谱的能量却随着探测距离的增加而减小。

#### 3.2 动态自混合散斑信号与探测距离的关系

图 3 分析的结果表明, 探测距离的变化会导致信号振幅的频谱能量密度变化, 所以有必要研究频谱能量密度与探测距离的关系。定义频谱能量密度为

$$\bar{F} = \frac{\sum f_i F_i}{\sum f_i}, \quad (4)$$

式中  $f_i$  代表频率,  $F_i$  是频率  $f_i$  处变换结果的模,  $i=1,2,3\cdots$ 。

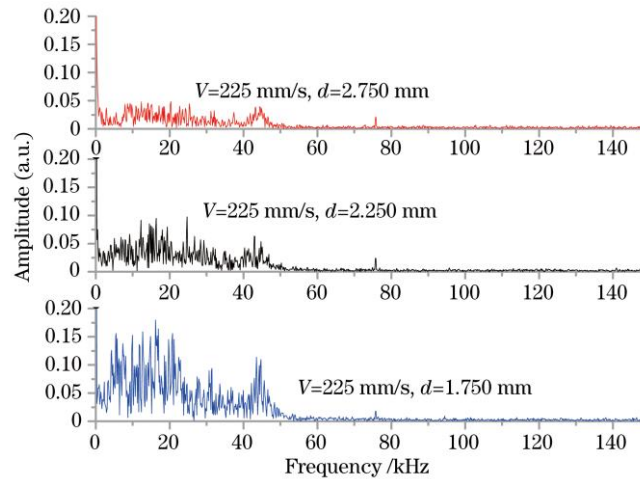


图 3 自混合散斑信号的变换频谱  
Fig.3 FFT spectrum of self-mixing speckle signals

根据(4)式的定义,对探测目标运动速度为 225 mm/s 时,一组探测距离( $d=1.000, 1.250, 1.500, 1.750, 2.000, 2.250, 2.500, 2.750$  mm)所得到的自混合散斑信号进行处理,分别求出它们的频谱能量密度,以曲线的形式描述能量密度与探测距离的关系,结果如图 4 的曲线 a 所示。从曲线 a 可以看出,频谱能量密度与探测距离满足较好的线性关系,且直线方程为:  $d = 3.37 - 76.08 \times \bar{F}$ 。

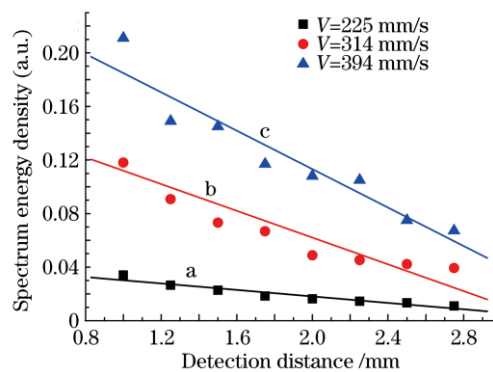


图 4 频谱能量密度与探测距离的关系  
Fig.4 Relation between spectrum energy density and the detection range

为了研究动态目标速度变化后频谱能量密度与探测距离是否具有线性关系,选取两个不同的运动速度(314 mm/s 和 394 mm/s)继续以上述相同的一组探测距离进行实验,计算各信号的频谱能量密度,绘出关系曲线,如图 4 的 b, c 所示。比较 a, b, c 三条曲线,发现动态目标速度的改变不会影响频谱能量密度与探测距离的线性关系,且随着目标速度的增加,曲线斜率的绝对值增大,动态测量的灵敏度提高。图 4 表明,测量精度在毫米的百分量级到十分量级之间。实验中测量的有效范围与目标的速度有关,速度为 225 mm/s 时,测量有效范围在 0~10 mm。实验研究结果表明,尽管自混合散斑信号具有动态随机性,然而用自混合散斑效应实现动态目标距离的高精度测量是可行的。

## 4 结 论

研究了基于光纤激光器的自混合散斑动态目标距离测量方法。首先提出测量系统的实验模型,通过理论研究,得到动态目标的光反馈到激光器产生的功率变化,导出有关表达式;其次通过实验研究获得不同探测距离下的自混合散斑信号,应用频谱能量密度分析方法对信号进行分析,得到探测距离与频谱能量密度的线性关系,同时指出目标速度的改变不会影响频谱能量密度与探测距离的线性关系,且随着目标速度

的增加, 动态测量的灵敏度将提高。研究表明, 自混合散斑与光纤激光器相结合, 实现动态目标距离的高精度测量是可行的。

### 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, 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
- 3 O. K. Sahin, I. Satoshi, T. Sotetsu *et al.*. Velocity measurement by a self-mixing laser diode using speckle correlation[C]. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1999. 1756~1760
- 4 G. G. Romero, E. E. Alanis, H. J. Rabal. Statistics of the dynamic speckle produced by a rotating diffuser and its application to the assessment of paint drying[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(6): 1652~1658
- 5 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, **60**(1): 242~247
- 6 D. Han, M. Wang, J. Zhou. Self-mixing speckle interference in DFB lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3312~3317
- 7 D. Han, M. Wang, J. Zhou. Fractal analysis of self-mixing speckle signal in velocity sensing[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 3204~3211
- 8 D. Han, M. Wang, J. Zhou. 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
- 9 Peter D. Dragic. Analytical model for injection-seeded erbium-doped fiber ring lasers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**( 8): 1629~1631
- 10 J. A. Ogilvy. Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces[M]. New York: Adam Hilger Press, 1991