

单模光纤照射反射式光纤位移传感实验系统

彭欢^{1,2}, 郑永超¹, 钟志², 单明广², 武学英¹

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100090; 2. 哈尔滨工程大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对传统 RIM-FOS 中 LED 耦合多模光纤作为照明光纤灵敏度低的不足, 引入了 LD 耦合单模光纤作为照明光纤的 RIM-FOS 光强调制模型并设计了 LD 耦合单模光纤作为照明的 RIM-FOS 位移传感实验系统。实验系统由激光器模块、光学单元、光电探测单元、信号检测与信息采集单元、FPGA 控制模块、上位机系统和电源模块等组成。归一化实验结果验证了仿真模型的正确性, 并得出 RIM-FOS 前坡灵敏度为 $3.15 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 线性测量范围为 $380 \mu\text{m}$; 后坡灵敏度为 $0.76 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 线性测量范围为 $690 \mu\text{m}$ 的性能指标。实验表明, 该实验系统具有较好稳定性和重复性, 可应用于单模光纤照射的 RIM-FOS 更深一步的研究。

关键词: 光纤传感器; 反射式; 光强调制; 实验系统; 单模光纤

中图分类号: TN212.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1607-04

Experiment setup for RIM-FDS with single mode illumination

Peng Huan^{1,2}, Zheng Yongchao¹, Zhong Zhi², Shan Mingguang², Wu Xueying¹

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100090, China;

2. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To overcome the shortcoming of low sensitivity in RIM-FOS with LED coupling with multimode fiber as illumination purpose, the intensity modulation model was built and experiment system was designed using LD coupling with single mode fiber as illumination and multimode fiber as receiving purpose. The experiment system was made up of LD module, optic module, PIN detection module, signal collection module, FPGA module, up computer system and power module. The validation of model was proved by experiment results and the performance of RIM-FOS resulting a sensitivity of $3.15 \text{ mV}/\mu\text{m}$ and linear range of $380 \mu\text{m}$ for front slope, a sensitivity of $0.76 \text{ mV}/\mu\text{m}$ and linear range of $690 \mu\text{m}$ for back slope was presented. Good stability and repetition was also proved by experimental results, and the experiment system would play a significant effect for the further study of RIM-FOS with single mode illumination.

Key words: optical fiber sensor; reflective; intensity modulate; experiment setup; single mode fiber

收稿日期: 2012-10-17; 修订日期: 2012-11-20

基金项目: 中央高校基本科研业务专项基金(HEUCFR1018)

作者简介: 彭欢(1987-), 男, 助理工程师, 硕士生, 主要从事光电检测相关方面的研究。Email: penghuan622@163.com

导师简介: 钟志(1972-), 男, 硕士生导师, 博士后, 主要从事光纤通信与传感技术方面的研究。Email: zhongzhi@hrbeu.edu.cn

0 引 言

在非接触测量领域,反射式光强调制型光纤传感器(RIM-FOS)以其结构原理简单、设计灵活、抗电磁干扰、价格低廉等优点而备受关注并成功应用于位移^[1-3]、角度^[4]、压力^[5]、振动^[6]、加速度^[7]等物理量的测量。一个典型的反射式强度调制光纤传感系统如图 1 所示,光源 S 耦合照明光纤投射照明光束到反射镜(Reflector),反射光束被接收光纤接收并由光电探测器 D 将之转换为电信号送至信息处理系统(Pocessor)得到被测物理量大小。由于采用强度调制原理,RIM-FOS 输出灵敏度、线性范围等特性与接收光强大小正相关。传统的 RIM-FOS 传感系统多采用 LED 作为照明光源,多模光纤作为照明(IF)和接收光纤(RF)。虽然相对单模光纤多模光纤能够传输更多的光能量,但 LED 输出功率一般较低,限制了系统灵敏度的提高;随着激光技术的发展,更大输出功率的激光器(LD)正在成为 RIM-FOS 系统的首选光源。但激光器耦合多模光纤时,由于光线在多模光纤芯内的多路径传播,极易在多模光纤出射端面形成散斑场,且该散斑场分布易受光纤弯曲、扰动等因素的影响,引起耦合到接收光纤内光功率的波动而降低系统探测性能^[8]。Huang Haiying 等^[9]提出 LD 耦合单模光纤作为照明光纤能够有效地消除这种影响,建立了单模光纤照射的 RIM-FOS 数学模型并分析了不同系统参数对 RIM-FOS 输出特性的影响。Steven 等^[10]用同轴型结构成功地研制出了用于检测表面抛光度的传感器,发射光纤采用单模光纤,接收光纤采用多模光纤,该传感器实现了较高的横向分辨率和测量精度,具有较强的工程应用价值。

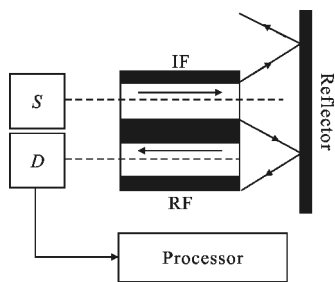


图 1 典型 RIM-FOS 组成

Fig.1 Buildup of typical RIM-FOS

为进一步研究单模光纤照射 RIM-FOS 光强调

制特性,以平行光纤对结构模型为基础,作者搭建了 LD 耦合单模光纤作为照明光纤的 RIM-FOS 实验系统,并成功用于位移测量。

1 RIM-FOS 光纤对光强调制函数

单模光纤照射 RIM-FOS 光路图如图 2 所示,模场直径为 $2\omega_0$ 、数值孔径角为 θ 的单模光纤作为照明光纤,纤芯直径为 $2\omega_r$ 的多模光纤作为接收光纤,两光纤紧密排列并定义其光轴间距为 s ;定义光纤端面到反射镜的距离为目标距离为 d 。

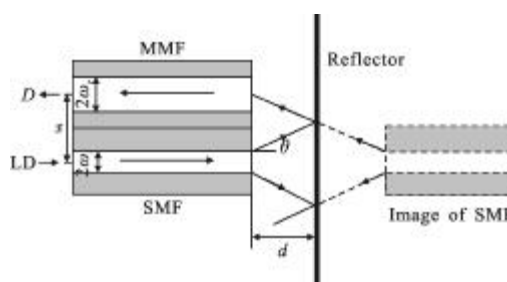


图 2 RIM-FOS 原理

Fig.2 Principle of RIM-FOS

基于单模光纤出射光场为高斯分布,单模光纤照射 RIM-FOS 光强调制函数表达式为^[9]:

$$M(d') = \frac{2(1-C)}{\pi\omega(d')^2} \times \int_{s-\omega_0}^{s+\omega_0} e^{-2r^2/\omega(d')^2} \arccos\left(\frac{r^2+s^2-\omega_r^2}{2rs}\right) r dr \quad (1)$$

其中,

$$\omega(d') = 2d \tan \theta + \omega_0 \quad (2)$$

式中: $\omega(d')$ 为远离单模光纤出射端面距离为 d' 时的模场半径。

公式(1)、(2)中 $d'=2d$,表示单模光纤像投射光束到接收光纤端面光波传播距离; C 为菲涅尔界面反射系数,空气和玻璃界面 C 为 4%。

2 RIM-FOS 实验系统

系统组成如图 3 所示,实验采用 Amonics 公司的 ADFB-1533-020-F-B-A 光纤激光器作为光源,其最大输出功率为 20 mW,功率稳定度可达 0.2%。实验采用调制解调、滤波器设计等相关技术消除背景光和暗电流的影响以提高系统精度和稳定性。PIN 探测器选用 PFWM912 组件,输出信号经带通放大后,由 AD536 解调得到 0-5 V 直流电压信号并送至 ADS7816 模数转换,结果通过 USB 接口送至上位机

处理。探测器及滤波器输出信号波形如图 4 所示。

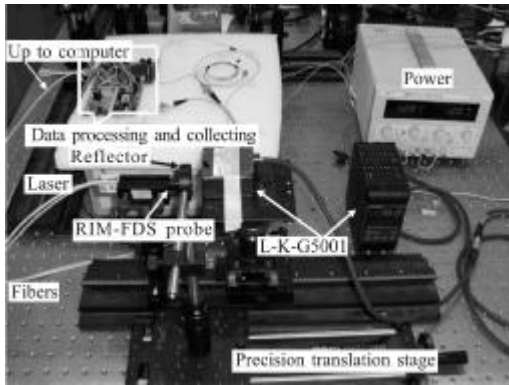


图 3 RIM-FDS 实验装置图

Fig.3 Experiment setup of RIM-FDS

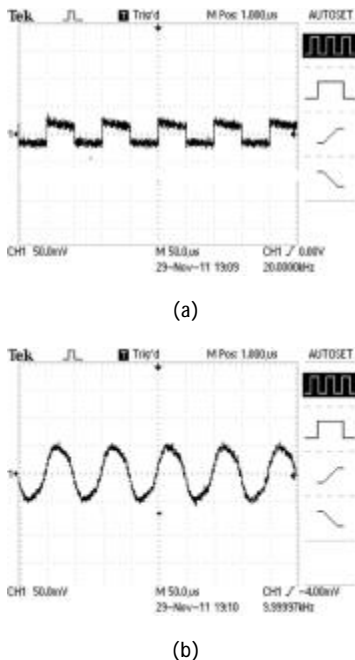


图 4 探测器及滤波器输出波形图

Fig.4 Output graphs after PIN and filter

实验过程如下，光纤探头通过支架固定在光学平台上,反射镜由支架固定在精密位移平台,通过精密位移平台产生相对位移并通过三角光位移传感器标定位移大小。初始设置光纤探头和反射镜相互垂直且距离近似为零，实验过程中通过旋转精密位移平台产生相对位移,通过计算机获取对应的电压值并记录,并将记录数据处理得到 RIM-FOS 光强调制特性曲线。

3 RIM-FOS 实验结果

将 RIM-FOS 实验装置连通并设置特定位移量测试系统输出稳定性如图 5 所示,实验表明系统 4 h

内具有较高的稳定性。

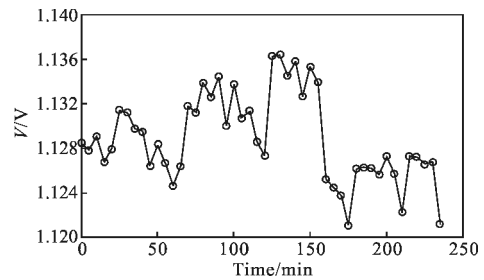


图 5 实验系统稳定性测试结果

Fig.5 Stability test output of experiment setup

以 10 μm 步进旋转精密位移平台实现 2.5 mm 位移量程，记录 250 组数据得到光强调制特性曲线如图 6 所示，其归一化结果和仿真结果对比如图 7 所示，实验结果和仿真结果良好的一致性充分验证了光强调制模型的正确性。

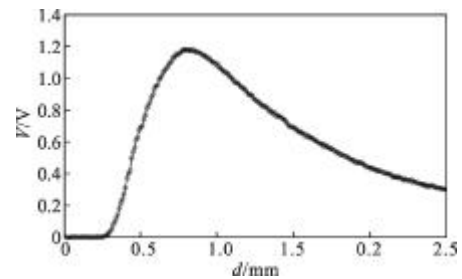


图 6 RIM-FDS 实验调制特性曲线

Fig.6 Intensity modulated curve of RIM-FDS

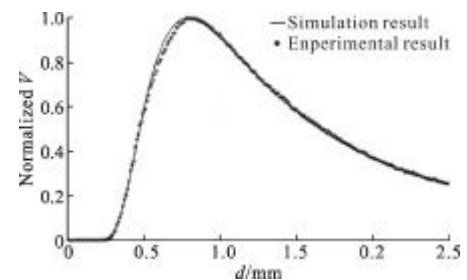


图 7 RIM-FOS 实验与仿真结果对比

Fig.7 Contrast between simulation and experimental results

对 RIM-FOS 输出特性而言,灵敏度是一个十分重要的量,它反映了在稳态输出情况下 RIM-FOS 对被测量变化的反应能力。图 8 反映了 RIM-FOS 镜面反射时光强调制特性曲线以及采用 $R^2 \geq 99\%$ 算法前后坡的线性拟合结果,表 1 为前坡测试数据,表 2 为后坡部分测试数据。计算得知,该传感器的前坡灵敏度为 3.15 $\text{mV}/\mu\text{m}$,线性测量范围为 380 μm ;后坡灵敏度为 0.76 $\text{mV}/\mu\text{m}$,线性测量范围为 690 μm 。

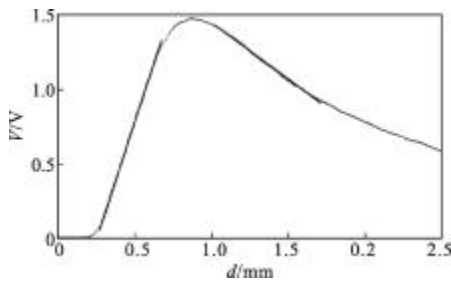


图 8 特性曲线线性拟合结果

Fig.8 Linear equation results of characteristic curve

表 1 RIM-FOS 前坡测试数据

Tab.1 Experiment results of front slope

d/ μm	V/V	d/ μm	V/V	d/ μm	V/V	d/ μm	V/V
283.0	0.078	388.5	0.391	494.3	0.736	600.2	1.072
294.1	0.100	400.5	0.426	505.8	0.771	612.4	1.102
305.5	0.124	410.8	0.460	514.5	0.807	620.8	1.131
317.0	0.151	421.6	0.494	528.1	0.843	632.0	1.160
327.0	0.182	430.7	0.527	538.4	0.878	641.5	1.189
338.8	0.215	441.0	0.561	548.4	0.913	654.5	1.217
348.6	0.251	451.2	0.595	559.3	0.946	667.4	1.244
359.9	0.287	460.5	0.629	572.0	0.978	675.4	1.270
370.5	0.322	471.5	0.665	579.2	1.010	-	-
379.5	0.356	484.6	0.700	591.6	1.042	-	-

表 2 RIM-FOS 后坡测试数据

Tab.2 Experiment results of back slope

d/ μm	V/V	d/ μm	V/V	d/ μm	V/V
1 021.5	1.428	1 312.8	1.204	1 589.9	0.984
1 040.3	1.418	1 335.8	1.186	1 608.3	0.970
1 060.7	1.402	1 357.5	1.170	1 627.5	0.958
1 083.3	1.389	1 377.9	1.157	1 636.9	0.946
1 103.2	1.375	1 389.6	1.141	1 655.8	0.936
1 122.6	1.361	1 410.4	1.124	1 673.6	0.926
1 144.5	1.348	1 431.3	1.106		
1 165.9	1.332	1 451.5	1.087		
1 186.6	1.317	1 470.2	1.070		
1 208.7	1.301	1 491.5	1.055		
1 228.9	1.280	1 513.4	1.029		
1 249.6	1.258	1 534.0	1.021		
1 269.7	1.237	1 552.8	1.012		
1 290.8	1.221	1 570.6	0.999		

4 结 论

设计了基于单模光纤照射的 RIM-FOS 实验系

统,该实验系统由电源模块、激光器模块、光学模块、光电转换模块、信号处理模块、上位机模块及控制模块组成。实验结果验证了光强调制模型的正确性,并得出 RIM-FDS 前坡灵敏度为 $3.15 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 线性测量范围为 $380 \mu\text{m}$;后坡灵敏度为 $0.76 \text{ mV}/\mu\text{m}$, 线性测量范围为 $690 \mu\text{m}$ 。稳定性测试结果表明实验系统具有良好的稳定性和重复性,为单模光纤照射的 RIM-FOS 的研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] Cook R O, Hamm C W. Fiber optic lever displacement transducer[J]. *Applied Optics*, 1979, 18(19): 3230-3241.
- [2] Fukuo S, Suganuma, Atsushi Shimamoto, Kohichi Tanaka. Development of a differential optical-fiber displacement sensor[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(7): 1103-1109.
- [3] Tao Peilin, Yan Fengping, Yin Guolu, et al. Effect of spectrum distribution of light source on sensitivity and precision of two-beam interferometric optic-fiber sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 501-505. (in Chinese)
- [4] Li Fang, He Jun, Xu Tuanwei, et al. Fiber laser sensing technology and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1025-1032. (in Chinese)
- [5] Cao Jianian, Cao Weixin, Zhang Yabin, et al. Design of a practical intensity modulated dynamic optical fiber accelerometer[C]//*SPIE*, 2005, 5634: 548-552.
- [6] Li X, Nakamura K, Ueha S. Reflectivity and illuminating power compensation for optical fiber vibrometer [J]. *Meas Sci Technol*, 2004, 15: 1773-1778.
- [7] Xiao Hai, Deng Jiangdong, Wang Zhiyong, et al. Fiber optic pressure sensor with self-compensation capability for harsh environment applications [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 054403-1-054403-10.
- [8] Shan Mingguang, Peng Huan, Zhong Zhi, et al. Influence of reflector shape on the intensity modulation of fiber optical distance sensors [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2004-2008. (in Chinese)
- [9] Haiying Huang, Uday Tata. Simulation, implementation, and analysis of an optical fiber bundle distance sensor with single mode illumination [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(9): 1302-1309.
- [10] Steven C F, Richard F K. Use of a fiber optical displacement probe as a surface finish sensor [J]. *Sensor and Actuators*, 1990, A24: 5.