

## 单模光纤照射反射式光纤位移传感实验系统

彭欢<sup>1,2</sup>, 郑永超<sup>1</sup>, 钟志<sup>2</sup>, 单明广<sup>2</sup>, 武学英<sup>1</sup>

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100090;

2. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 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  $3.15 \text{ mV}/\mu\text{m}$ , 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:** TP212.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1074-05

## Experiment set up for RIM-FDS with single mode illumination

Peng Huan<sup>1,2</sup>, Zheng Yongchao<sup>1</sup>, Zhong Zhi<sup>2</sup>, Shan Mingguang<sup>2</sup>, Wu Xueying<sup>1</sup>

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

2. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To overcome the shortcoming of low sensitivity in RIM-FOS with LED illuminating, a theoretical model was introduced and an experiment system was designed using LD coupling with single mode fiber as illumination purpose. The system is made up with 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 was presented. Experimental results indicate a sensitivity of  $3.15 \text{ mV}/\mu\text{m}$  and linear region of  $380 \mu\text{m}$  for front slope, a sensitivity of  $0.76 \text{ mV}/\mu\text{m}$  and linear region of  $690 \mu\text{m}$  for back slope of RIM-FOS. Good stability and repetition are proved for system, and the system will play a significant effect for the further study of RIM-FOS with single mode illumination.

**Key words:** optical fiber sensor; reflective; intensity modulated; experiment system; single mode fiber

收稿日期: 2012-08-20; 修订日期: 2012-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(40905011)

作者简介: 彭欢(1987-), 男, 工程师, 硕士, 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(1971-), 男, 副教授, 博士, 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<sup>[1-3]</sup>、角度<sup>[4]</sup>、压力<sup>[5]</sup>、振动<sup>[6]</sup>、加速度<sup>[7]</sup>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,光源耦合照明光纤投射照明光束到反射

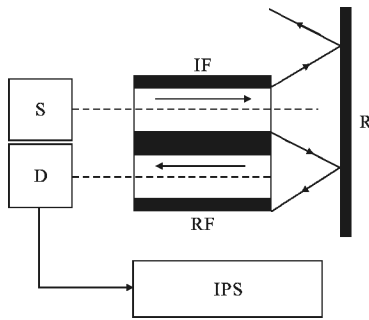


图 1 典型 RIM-FOS 工作原理  
Fig.1 Principle of RIM-FOS

镜,反射光束被接收光纤接收并由光电探测器将之转换为电信号送至信息处理系统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,多模光纤作为照明和接收光纤。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,更大输出功率的相干激光器(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<sup>[8]</sup>。Huang Haiying 等<sup>[9]</sup>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<sup>[10]</sup>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。为了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,笔者搭建了 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,实现了良好的测试效果。

## 1 单模光纤照射 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  $2\omega_1$ 、数值孔径角为  $\theta$  的单模光纤作为照明光纤,纤芯直径为  $2\omega_1$  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  $d$ 。

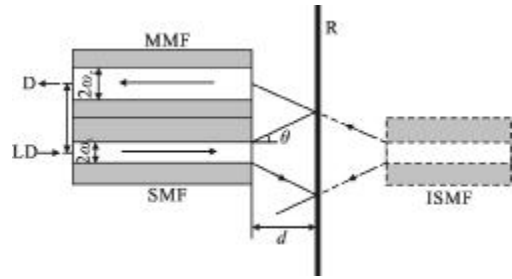


图 2 RIM-FOS 光路图  
Fig.2 Optical path of RIM-FOS

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<sup>[9]</sup>:

$$M(d') = \frac{2(1-C)}{\pi \omega(d')^2} \times \int_{s-\omega_1}^{s+\omega_1} e^{-2r^2/\omega(d')^2} \cos^{-1} \left( \frac{r^2+s^2-\omega_1^2}{2rs} \right) r dr \quad (1)$$

其中,

$$\omega(d') = 2d \tan \theta + \omega_1 \quad (2)$$

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。 $C$  为菲涅耳界面反射系数,空气和玻璃界面  $C$  为 4%。

公式(1)为基于假设单模光纤出射光强为近似高斯分布情况下单模光纤照射的 RIM-FOS 光纤对结构光强调制函数表达式。典型的反射式光强调制特性曲线如图 3 所示。图中  $d_0$  为初始距离,表示接收光纤刚好能够接收到反射光能量时的目标距离,并定义区间  $(0, d_0)$  为特性曲线死区; $d_p$  为峰值距离,对应的光强调制函数  $M_p$  为峰值调制函数( $M_p$  为无量纲数); $(d_0, d_p)$  称为特性曲线前坡。一般情况下,前坡灵敏度较高而线性测量范围较小,适用于对灵敏度和线性度高

的小量程测量；特性曲线后坡灵敏度较低而线性测量范围较大,适用于对灵敏度、线性度要求不高的大量程测量。峰值区间对位移变化不明显而对被测表面粗糙度变化敏感,适用于表面粗糙度的测量<sup>[1]</sup>。

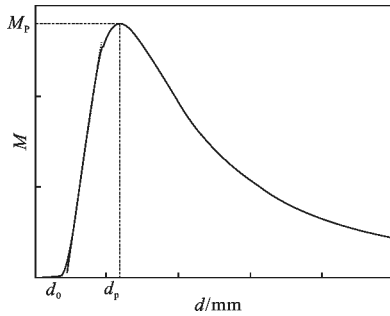


图 3 典型 RIM-FOS 光强调制特性曲线

Fig.3 Intensity modulation characteristics curve of RIM-FOS

## 2 RIM-FOS 实验系统

单模光纤照射 RIM-FOS 实验系统如图 4 所示。激光器模块为系统工作提供稳定的调制光波输出,包括激光器驱动电路及功率控制电路(APC)等;光学系统接收激光器入射光波,并反射光波至光电接收模块进行光电转换,得到与位移变化相关的电压信号,而后将此电压信号送至信号处理单元放大、滤波、解调处理,A/D 采集结果通过 USB 接口送至上位机进行拟合处理,得到 RIM-FOS 光强调制特性曲线。其中电源模块为系统提供符合要求的电压输出,FPGA 控制模块负责激光器驱动信号的产生及数据采集、传输等时序的控制。

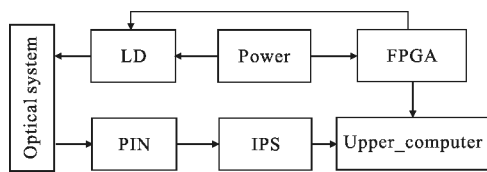


图 4 RIM-FOS 实验系统框图

Fig.4 Experimental system of RIM-FOS

实验系统采用 Amonics 公司的 ADFB-1533-020-F-B-A 光纤激光器作为光源,其输出波长为 1533 nm,最大输出功率为 20 mW。激光器内置 APC 控制模块,其功率稳定度可达 0.2%。为消除背景光和探测器暗电流等因素的影响,提高测量精度和稳定性,实验系统采用了调制解调、滤波器设计等相关技术。实验系统采用脉冲方式驱动激光器,驱动频率

为 10kHz,幅度为 0~5V。光电转换单元选用灵敏度高和暗电流低的 PFWM912 光电探测器,输出信号经过带通滤波、放大后,由交直流转换芯片 AD536 解调、放大,得到 0~5V 直流电压信号送至 ADS7816 模数转换,并由 USB 控制芯片 CY7C68013 通过 USB 接口送至上位机处理。激光器驱动信号、探测器接收信号及滤波器输出信号波形如图 5 所示。系统软件包括控制时序和上位机软件,其中 FPGA 主要完成产生 AD 转换、数据滤波及 CY7C68013 的控制时序,上位机软件主要完成数据获取、格式转换及存储显示等。

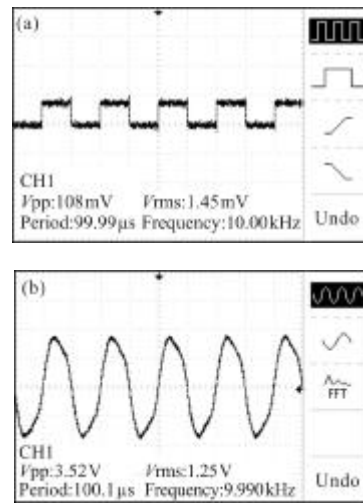


图 5 探测器接收及滤波器输出波形图

Fig.5 Signal output of PIN and filter

整个实验系统的实物图如图 6 所示,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



图 6 RIM-FDS 实验装置图

Fig.6 Experimental set\_up for RIM-FDS

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 7 所示,实验结果表明:峰峰值较均值波动为 1.36%,说明采用调制解调、滤波器设计等技术能够一定程度上提高系统的稳定性。

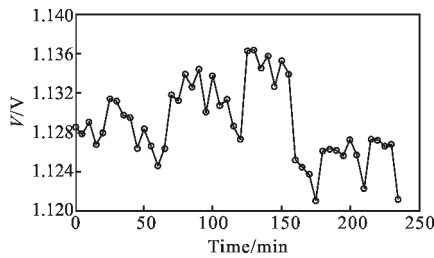


图 7 实验系统连通稳定性测试

Fig.7 Stability test for experimental system

实验过程中,旋转精密位移平台实现  $10\ \mu\text{m}$  步进,  $0\sim 2.5\ \text{mm}$  位移量程,记录 250 组数据得到光强调制特性曲线如图 8 所示,其归一化结果和仿真结果对比如图 9 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。

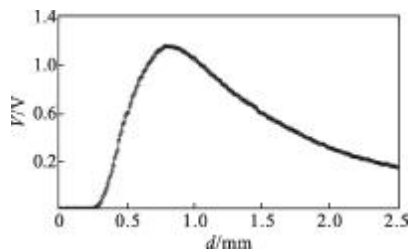


图 8 RIM-FOS 实验调制特性曲线

Fig.8 Experimental result of intensity modulation characteristics curve for RIM-FOS

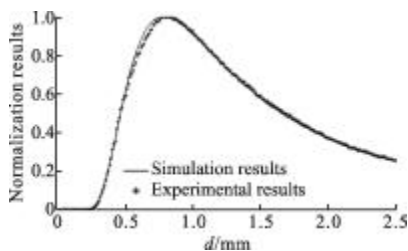


图 9 RIM-FOS 实验与仿真调制特性曲线对比

Fig.9 Result comparison between simulation and experiment

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 10 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 为后坡测试数据(因数据较多,后坡仅取部分数据),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  $380\ \mu\text{m}$ ;后坡灵敏度为  $0.76\ \text{mV}/\mu\text{m}$ ,线性测量范围为  $690\ \mu\text{m}$ 。

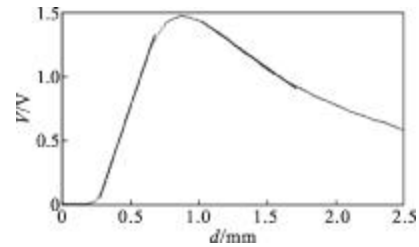


图 10 RIM-FOS 光强调制特性曲线及线性拟合结果

Fig.10 Experimental result of intensity modulation characteristics and linear fitting

表 1 RIM-FOS 前坡测试数据

Tab.1 Testing data for front slope of RIM-FOS

Dis-tance	Voltage	Dis-tance	Voltage	Dis-tance	Voltage	Dis-tance	Voltage
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(部分)

Tab.2 Part of testing data for back slope of RIM-FOS

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

## 4 结 论

研究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,并采用 VC++ 编写了上位机软件。实验结果验证了光强调制模型的正确性,并得出 RIM-FOS 前坡灵敏度  $3.15 \text{ mV}/\mu\text{m}$ , 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  $690 \mu\text{m}$ 。RIM-FOS 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] Khiat A, Lamarque F, Prella C, et al. Two-dimension fiber optic sensor for high-resolution and long-range linear measurements[J]. *Sensor and Actuators*, 2010, A158: 43-50.
- [4] Jin Hui. Line-array fiber-optic image bundles on the contrast transfer function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(1): 94-97. (in Chinese)  
金辉. 线列光纤传像束的对比度调制传递函数[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(1): 94-97.
- [5] Cao Jianian, Wang 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 Jiandong, 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 Sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(12): 2004-2008. (in Chinese)  
单明广, 彭欢, 钟志, 等. 反射面形状对光纤位移传感器光强调制特性的影响[J]. *光子学报*, 2010, 39(12): 2004-2008.
- [9] Huang Haiying, Tata Uday. 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 CF, Richard FK. Use of a fiber optical displacement probe as a surface finish sensor [J]. *Sensor and Actuators*, 1990, A24: 5.
- [11] Li Fang, He Jun, Xu Tuanwei, et al. Fiber laser sensing technology and its application [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1025-1030. (in Chinese)  
李芳, 何俊, 徐团伟, 等. 光纤激光传感技术及其应用[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 1025-1030.