

文章编号:1004-4213(2010)12-2204-5

反射面形状对光纤位移传感器光强调制特性的影响^{*}

单明广, 彭欢, 钟志[†], 郭黎利

(哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:为了分析反射面形状对单模光纤照射的光纤位移传感器光强调制特性的影响,建立了反射面不为平面时的光强调制特性函数模型. 该模型基于单模光纤出射光场为修正近似高斯分布假设,通过引入反射面形状因子,分析了反射面形状因子对光强调制特性的影响规律. 仿真结果表明,随着凹形反射面曲率半径值的增大,传感器特性曲线的前坡无显著变化,而后坡灵敏度增大,线性范围减小;随着凸形反射面曲率半径值的增大,传感器特性曲线的前坡仍无显著变化,而后坡灵敏度减小,线性范围增大;当曲率半径增大的一定值时,反射面的非平面性影响较小,其作用趋近于平面.

关键词:光纤位移传感器; 单模光纤; 反射面形状; 光强调制

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103912.2204

0 引言

相对于干涉型光纤位移传感器,反射式光强调制型光纤位移传感器(Reflective Intensity-Modulation Fiber Distance Sensor, RIM-FDS)由于具有结构简单、设计灵活、带宽大、成本低以及环境适应性强等突出优点,在要求成本和采样速率的非接触测量领域备受关注,并被广泛应用于位移^[1]、加速度^[2]、振动^[3]、压力^[4]、温度^[5]等物理量的测量. 由于采用强度调制原理,RIM-FDS的输出极易受光源光强波动、光纤参量、探头形状、光纤传输损耗和反射面形状等因素的影响,自20世纪60年代RIM-FDS被提出后,各国学者就从理论、结构、实验等多方面着手,致力于改善该传感器的性能,以提高稳定性、增加灵敏度和扩大线性测量范围^[6-11]. 但是,传统的反射式强度调制光纤位移传感系统多采用LED(Light Emitting Diode)作为照明光源和多模光纤作为照明光纤. 虽然相对于单模光纤(Single Mode Fiber, SMF),多模光纤(Multimode Fiber, MMF)能传输更多的光能量,但LED输出功率通常较小,限制了传感器灵敏度的提高. 而用功率更高、更为稳定的相干激光照射多模光纤时,因为MMF内光线的多路径传播,极易在光纤的出射端面形成

散斑场,且其分布易受光纤的弯曲等的影响,从而引起耦合进接收光纤中光功率的波动,降低探测性能. 而采用单模光纤作为照明光纤,即可消除这种散斑影响. 因此,近年来,采用相干激光作为照明光源和单模光纤作为照明光纤引起了广泛关注,但是这些研究均认为反射面为平面,而在实际的机械位移测量中,反射面为凸面或凹面的情况非常普遍. 陶宝琪^[12]等实验分析了不同曲率半径的凹凸反射面对RIM-FDS光强调制特性的影响;杨华勇^[12]等通过引入反射面形状因子,建立了RIM-FDS的光强调制模型,分析了反射面曲率半径对RIM-FDS光强调制特性的影响规律,但这些研究均是采用LED作为照明光源和多模光纤作为照明光纤.

本文在分析单模光纤照射的RIM-FDS光强调制特性的基础上,通过引入反射面形状因子,建立反射面不为平面时的光强调制特性函数模型,并分析反射面曲率半径对RIM-FDS光强调制特性的影响规律.

1 理论分析

设反射面的形状因子(即反射面曲率半径)为 R_c ,当 $R_c = \infty$ 时,反射面为平面;当 $R_c < 0$ 时,反射面为凹面; $R_c > 0$ 时,反射面为凸面. 反射面不为平面的RIM-FDS基本结构如图1,其中照明光纤为SMF,其模场直径为 $2\omega_i$,数值孔径为NA(Numerical Aperture),其中 θ 为数值孔径角,即 $\theta = \arcsin(\text{NA})$;接收光纤为MMF,其纤芯直径为 $2a_r$,数值孔径为 NA_r ,其中 θ_r 为数值孔径角,即 $\theta_r = \arcsin(\text{NA}_r)$;SMF和MMF的轴间距为 d_t .

^{*} 国家自然科学基金(60908026)、中国博士后基金、中央高校基本科研业务费专项资金、黑龙江省自然科学基金(F200930)和哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2009RFQXG055, 2008RFQXG024)资助

[†] Tel: 0451-82589812 Email: zhongzhi@hrbeu.edu.cn
收稿日期: 2010-05-21 修回日期: 2010-07-20

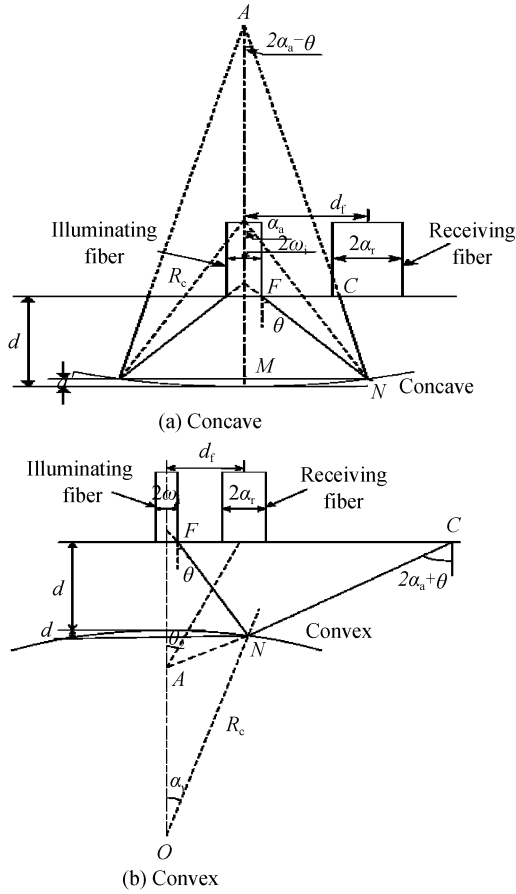


图 1 反射面不为平面 RIM-FDS 原理
Fig.1 Diagram of the reflected fiber distance sensor with nonplanar reflector

假设 SMF 的辐射光束强度分布为修正的近似高斯分布^[13-15],且在传播过程仍保持该分布,即

$$I(r) = \frac{P_0}{\pi\omega^2} e^{-r^2/\omega^2} \quad (1)$$

式中, \$r\$ 表示高斯光束径向半径, \$P_0\$ 表示照明光的总功率, \$\omega\$ 为光强达到高斯分布最大值 \$1/e^2\$ 处的光束半径.

如图 1,辐射光束经过凹面或凸面反射面的反射后形成一个汇聚或发散的光锥,此时反射光束相对 MMF 的最大入射角将有可能大于 MMF 的数值孔径角,例如图 1(b),当 \$2\alpha_v + \theta > \theta_r\$ 时,而不能被 MMF 接收,这种情况比较复杂.为了方便分析,本文选用数值孔径较小的 SMF 作为照明光纤,数值孔径较大的 MMF 作为接收光纤.

当反射面为凹面,即 \$R_c < 0\$ 时传感器光强调制特性如图 1(a),设单模照明光纤的轴线通过凹面的中心,且到凹面底点之间的距离为目标距离 \$d\$,则由图中的几何关系可得

$$\begin{cases} (d-d') \tan \theta + \omega_i = R_c \sin \alpha_a \\ d' = R_c (1 - \cos \alpha_a) \\ FN = \frac{d-d'}{\cos \theta} \\ \frac{FC_a}{\sin 2(\theta - \alpha_a)} = \frac{FN}{\sin(\frac{\pi}{2} + 2\alpha_a - \theta)} \end{cases} \quad (2)$$

从而可得

$$\alpha_a = \arcsin\left(\frac{(d-R_c) \sin \theta + \omega_i \cos \theta}{R_c}\right) + \theta \quad (3)$$

$$FC_a = \frac{\sin 2(\theta - \alpha_a)(d-d')}{\cos(2\alpha_a - \theta) \cos \theta} \quad (4)$$

辐射光束经凹反射面反射后,在多模接收光纤接收端面形成一个椭圆形的反射光斑,如图 2,其模

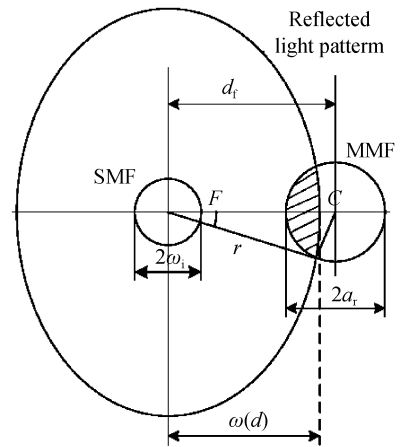


图 2 反射光锥与接收光纤端面关系
Fig.2 Relationship between reflected light pattern and collecting plane of the receiving fiber

场半径 \$\omega_a(d)\$ 由图 1(a) 计算可得

$$\omega_a(d) = FC_a + \omega_i = \frac{\sin 2(\theta - \alpha_a)(d - R_c(1 - \cos \alpha_a))}{\cos(2\alpha_a - \theta) \cos \theta} + \omega_i \quad (5)$$

当反射面为凸面,即 \$R_c > 0\$ 时多模接收光纤接收端面处反射光斑的模场直径 \$\omega_v(d)\$ 为

$$\omega_v(d) = \frac{\sin 2(\theta + \alpha_v)(d + R_c(1 - \cos \alpha_v))}{\cos(2\alpha_v + \theta) \cos \theta} + \omega_i \quad (6)$$

式中

$$\alpha_v = \arcsin\left(\frac{(d+R_c) \sin \theta + \omega_i \cos \theta}{R_c}\right) - \theta \quad (7)$$

从而可得,多模接收光纤接收端面处反射光斑的模场直径 \$\omega(d)\$ 为

$$\omega(d) = \begin{cases} \frac{\sin 2(\theta - \alpha_a)(d - R_c(1 - \cos \alpha_a))}{\cos(2\alpha_a - \theta) \cos \theta} + \omega_i & (R_c < 0) \\ \frac{\sin 2(\theta + \alpha_v)(d + R_c(1 - \cos \alpha_v))}{\cos(2\alpha_v + \theta) \cos \theta} + \omega_i & (R_c > 0) \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)带入式(1),可得到反射光斑在多模接收光纤接收端面处的强度分布为

$$I(r, d) = \frac{P_0}{\pi\omega(d)^2} e^{-r^2/\omega(d)^2} \quad (9)$$

随着目标距离的增大,反射光斑与多模接收光纤纤芯开始交叠,且部分反射光束被多模接收光纤接收.多模接收光纤接收到的光功率由式(10)确定

$$P_r = \int_{S_i} I(r, d) ds \quad (10)$$

式中, S_i 为反射光斑与多模接收光纤纤芯的交叠面积.

根据文献[13]可得,耦合进多模接收光纤的总光功率为

$$P(d) = \frac{2P_0(1-C)}{\pi\omega(d)^2} \times \int_{d_i-a_r}^{d_i+a_r} e^{-r^2/\omega(d)^2} \times \arccos\left(\frac{r^2+d_i^2-a_r^2}{2rd_i}\right) r dr \quad (11)$$

式中, P_0 为单模照明光纤出射光功率; C 为非涅尔反射系数.

从而可得反射面不为平面时 RIM-FDS 光强调制函数为

$$\bar{P}(d) = \frac{P(d)}{P_0} = \frac{2(1-C)}{\pi\omega(d)^2} \times \int_{d_i-a_r}^{d_i+a_r} e^{-r^2/\omega(d)^2} \times \arccos\left(\frac{r^2+d_i^2-a_r^2}{2rd_i}\right) r dr \quad (12)$$

2 仿真计算与分析

为了更好地理解反射面形状因子对 RIM-FDS 光强调制特性的影响规律,利用式(9)对 RIM-FDS 光强调制特性进行仿真,并设 RIM-FDS 的结构参量为:单模照明光纤的模场直径为 $2\omega_i = 10 \mu\text{m}$,数值孔径为 $\text{NA} = 0.10$;多模接收光纤纤芯直径为 $2a_r = 50 \mu\text{m}$,与单模照明光纤的轴间距为 $d_i = 125 \mu\text{m}$;菲涅尔系数取 $C = 0.04$.

凹形反射面曲率半径 R_c 对 RIM-FDS 光强调制特性曲线的影响如图 3,其中 $R_c = \infty$ 为平面反射面的光强调制特性曲线,依据文献[13]给出的反射面为平面的光强调制模型仿真所得.从图中可以看出,曲率半径 R_c 对特性曲线的死区范围和前坡影响较小,而对后坡影响较大.随着曲率半径 R_c 值的增大,特性曲线后坡灵敏度增大,而线性范围减小;当曲率半径 R_c 值增大到一定时候,如 $R_c = -200 \mu\text{m}$,凹反射面对传感器的特性曲线影响较小,其作用趋近于平面.图 4 给出了反射面为凹面时传感器的后坡灵敏度随 R_c 的变化规律.从图中可以看出, $R_c = -200 \text{ mm}$ 时特性曲线后坡灵敏度是 $R_c = -6 \text{ mm}$ 时的 1.85 倍.

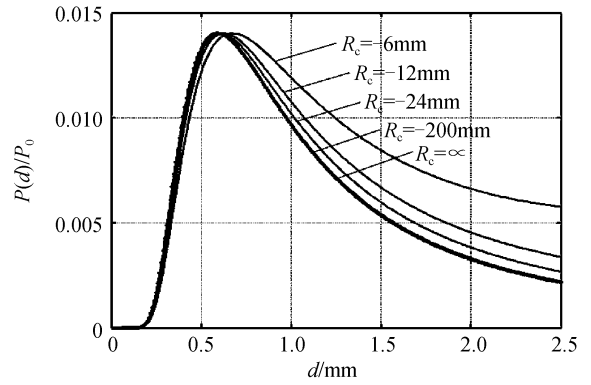


图 3 凹面不同曲率半径对光强调制特性曲线的影响
Fig. 3 Effect of the radius of concave reflector on the intensity modulation curve

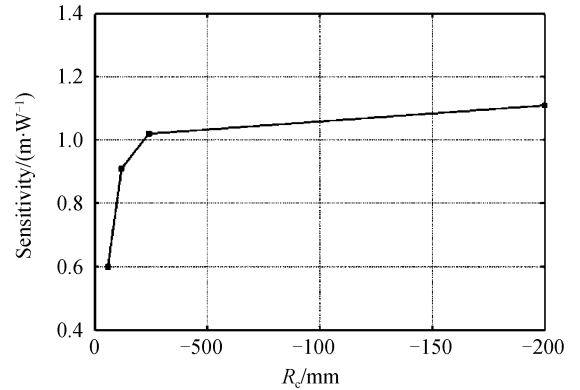


图 4 凹面不同曲率半径对特性曲线后坡灵敏度的影响
Fig. 4 Effect of the radius of concave reflector on the back-slope sensitivity of intensity modulation curve

图 5 为 RIM-FDS 不同曲率半径的凸形反射面的特性曲线,图 6 为其后坡灵敏度随 R_c 的变化规律.从图中可以看出,曲率半径 R_c 对特性曲线的死区范围和前坡同样影响较小,而对后坡影响较大.随着曲率半径 R_c 值的增大,特性曲线后坡灵敏度减小,而线性范围增大;当曲率半径 R_c 增大到一定时候,如 $R_c = 200 \mu\text{m}$,凸形反射面对传感器的特性曲线影响较小,其作用趋近于平面.

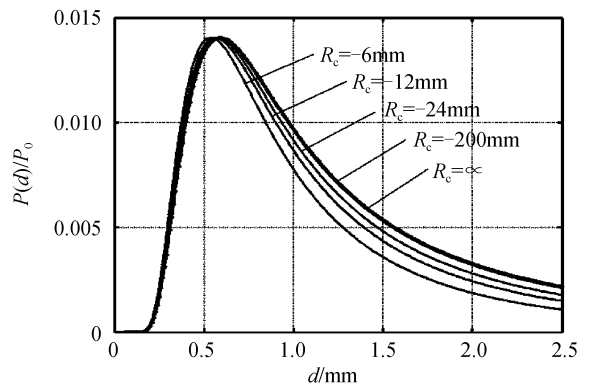


图 5 凸面不同曲率半径对光强调制特性曲线的影响
Fig. 5 Effect of the radius of convex reflector on the intensity modulation curve

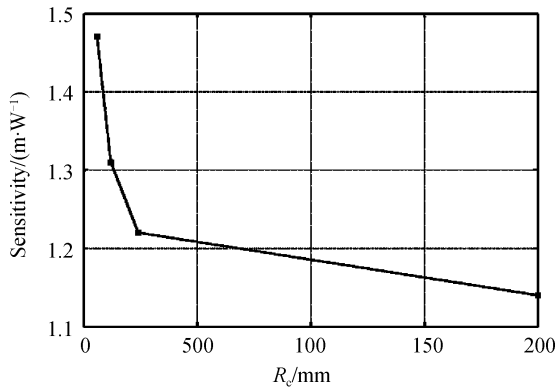


图6 凸面不同曲率半径对特性曲线后坡灵敏度的影响

Fig. 6 Effect of the radius of convex reflector on the back-slope sensitivity of intensity modulation curve

3 结论

通过引入反射面形状因子建立了单模照射的RIM-FDS的光强调制特性函数模型,并对不同参量的形状因子对RIM-FDS光强调制特性的影响进行了仿真实验.结果表明,凹形和凸形反射面形状对传感器特性曲线死区范围和前坡影响均很小;当反射面的曲率半径值增大时,凹形反射面特性曲线的后坡灵敏度增大、线性范围减小,而凸形反射面特性曲线的后坡灵敏度减小、线性范围增大;当曲率半径值增大到一定值时,反射面的非平面性影响较小,其作用趋近于平面.

参考文献

- [1] CONG Hong. Reflective optical fiber micro-displacement sensor[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2003, **22**(9): 71-73.
丛红. 反射式光纤微位移传感器[J]. *传感器技术*, 2003, **22**(9): 71-73.
- [2] CAO J N, WANG W X, ZHANG Y B, *et al.* Design of a practical intensity modulated dynamic optical fiber accelerometer[C]. *SPIE*, 2005, **5634**: 548-552.
- [3] LI X, NAKAMURA K, UEHA S. Reflectivity and illuminating power compensation for optical fiber vibrometer [J]. *Mea Sci Technol*, 2004, **15**(9): 1773-1778.
- [4] YANG Shu-lian. Development of a new type of optical fiber pressure transducer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 838-841.
杨淑连. 一种新型光纤压力传感器的设计[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 838-841.
- [5] WANG Dong-sheng, PAN Wei-wei. Sapphire optic fiber thermometer for high temperature in tundish [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 614-617.
王冬升, 潘玮炜. 一种测量高温中间包的蓝宝石光纤温度计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 614-617.
- [6] SUI Xin, XU Xi-ping, XU Hai-feng, *et al.* Analysis on intensity modulation characteristics for optic fiber pair of reflective fiber optic sensor [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, **32**(2): 220-223.
隋鑫, 徐熙平, 徐海峰, 等. 反射式光纤传感器光纤对强度调制特性分析[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2009, **32**(2): 220-223.
- [7] YANG Hua-yong, LÜ Hai-bao, XU Tao, *et al.* Effects of optical fiber parameters on the intensity modulation property of the reflective fiber optic sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(1): 74-78.
杨华勇, 吕海宝, 徐涛, 等. 反射式光纤传感器光纤参量对调制系数的影响[J]. *光子学报*, 2002, **31**(1): 74-78.
- [8] WANG Xiao-dong. Mathematical model optimization of the reflective fiber-optic displacement sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(10): 1266-1269.
汪晓东. 反射式光纤位移传感器数学模型的优化[J]. *光子学报*, 2002, **31**(10): 1266-1269.
- [9] CAO H M, CHEN Y P, ZHOU Z D, *et al.* Theoretical and experimental study on the optical fiber bundle displacement sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, **136**(2): 580-587.
- [10] YANG H Z, HARUN S W, AHMAD H. Displacement sensing with two asymmetrical inclined fibers[J]. *Microw Opt Techn Let*, 2010, **52**(6): 1271-1274.
- [11] ZHONG Z, PENG H, SHAN M G, *et al.* Effect of structural parameters on the performance of fiber distance sensor with single mode illumination and inclined-fiber receiving[C]. *SPIE*, 2010, **7855**: 12-1-12-7.
- [12] YANG Hua-yong, LÜ Hai-bao. Influence on the intensity modulation of a reflective fiber optic displacement sensor induced by reflector shape [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **10**(4): 379-382.
杨华勇, 吕海宝. 反射面形状对反射式光纤位移传感器理论特性的影响[J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(4): 379-382.
- [13] HUANG H Y, TATA U. Simulation, implementation, and analysis of an optical fiber bundle distance sensor with single mode illumination[J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(9): 1302-1309.
- [14] PUANGMALI P, ALTHOEFER K, SENEVIRATNE L D. Mathematical modeling of intensity-modulated bent-tip optical fiber displacement sensors[J]. *IEEE Trans on Instrum and Meas*, 2010, **59**(2): 283-291.
- [15] BUCK J A. Fundamentals of optical fibers[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 1995: 79-81.

Influence of Reflector Shape on the Intensity Modulation of Fiber Optical Distance Sensors

SHAN Ming-guang, PENG Huan, ZHONG Zhi, GUO Li-li

(College of Information and Communications Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To study the impact of reflector shape on the performance of a reflective intensity-modulated fiber optical distance sensor with single mode illumination, a theoretical model was established based on the assumption that the single mode fiber output light field is the modified approximate Gaussian distribution. By introducing the reflector shape factor, the influence discipline of the reflector shape factor on the intensity modulation characteristics was analyzed. Simulation results indicate that for concave reflector, as the radius of curvature increases, the sensitivity of the back slope becomes larger and the linear range of the back slope becomes smaller while those of the front slope remain almost unchanged. However, for convex reflector, as the radius of curvature increases, the sensitivity of the back slope becomes smaller and the linear range of the back slope becomes larger while those of the front slope also remain almost unchanged. As the radius of curvature increases, the effect of the nonplanar reflector becomes weaker until it disappears.

Key words: Fiber optical distance sensor; Single mode fiber; Reflector shape; Intensity modulation



SHAN Ming-guang was born in 1979, and received the Ph. D. degree in instrumentation science and technology from Department of Automatic Measurement and Control Engineering, Harbin Institute of Technology, in 2008. Now he works at College of Information and Communications Engineering, Harbin Engineering University, and his current research interests focus on precision measurement and micro-optics.