

文章编号:1001-2486(2001)03-0107-04

反射面的倾斜度对 RIM-FOS 光强调制特性的影响*

杨华勇,吕海宝,徐涛,颜树华

(国防科技大学机电工程与自动化学院,湖南长沙 410073)

摘要 对反射式强度调制型光纤传感器(RIM-FOS)中光纤轴与反射面的垂直度对光强调制特性的影响问题进行了细致的研究,建立了相应的数学建模,给出了反射面在不同倾斜角时的光强调制特性曲线及特性参数的定量计算结果,并据此提出光纤轴应与反射面垂直的结论。

关键词 光纤传感器;强度调制;建模;垂直度

中图分类号:TP212.14 文献标识码:A

Analysis of the Effect on Intensity Modulation Function of RIM-FOS Induced by the Obliquity of Reflector

YANG Hua-yong, LU Hai-bao, XU Tao, YAN Shu-hua

(College of Mechatronic Engineering and automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Among the theoretical and experimental research of the reflective intensity-modulated fiber optic sensor (RIM-FOS), a very important problem is always neglected, which is the effect on the intensity modulation caused by perpendicularity between the axis of fiber pairs and the reflector, i. e., the obliquity of the reflector. In the light of this, the mathematical analysis of this effect is performed. The simulation results of the RIM-FOS characteristic parameters with the different obliquity of the reflector are computed and the characteristic curves are plotted. Results show that the obliquity of the reflector exerts great influence on the modulation function of the fiber pair. So advice is presented that the axis of fiber pair should be perpendicular to the reflector.

Key words fiber optic sensor; intensity modulation; model; perpendicularity

由于反射式强度调制型光纤传感器(文中简称 RIM-FOS: reflective intensity-modulated fiber optic sensor)有许多独特的优点,如结构简单、设计灵活、成本低、环境适应性强等,国内外许多学者都把研究注意力放在了其理论建模、实验测试及应用研究上。到目前为止,RIM-FOS已在许多物理量的测量中得到了广泛的应用,如位移、振动、压力、温度等的测量^[1,2,4,6,7]。

然而,其中的一个非常关键的问题——光纤与反射面不垂直对光强调制特性的影响常被忽视,仅有一些“光纤轴应保证与反射面垂直”之类的文字性描述,如文献^{[3]~[7]}等。在笔者所能查到的文献中尚未发现对此问题进行定量分析的研究报道。鉴于此,本文试图以光纤对(指发送光纤和接收光纤,如图1所示)模型为切入点,详细分析光纤与反射面不垂直对输出特性的影响,并绘出反射面在不同倾斜角时的光强调制特性曲线,给出定量的结论。

1 光纤对的光强调制特性的数学模型

根据光度学的朗伯余弦定理^[9],设发送光纤为朗伯辐射体,则

$$I_l(\theta) = I_l(0) \cdot \cos\theta \quad (\theta < \theta_{N1}) \quad (1)$$

$I_l(0)$ 表示发送光纤端面法线方向上的光强度, $I_l(\theta)$ 表示与发送光纤端面法线成 θ 角方向的光强度, θ_{N1} 为光纤的数值孔径角,下标 l 代表发送光纤。故发送光纤光锥内的光通量 Φ_l 为^[9]

$$\Phi_l = \int I_l(\theta) d\Omega = \int_{cone} I_l(0) \cdot \cos\theta d\Omega \quad (2)$$

又因为发送光纤光锥内的光通量 Φ_l 同时可表示为^[6]

* 收稿日期:2000-09-29
基金项目:湖南省科委工业科技计划项目(99GKY2009)
作者简介:杨华勇(1974-)男,博士生。

$$\Phi_t = \iint_{S_t} dS_t \int_0^{\theta_{N1}} 2\pi \cdot B_t \sin\theta \cdot \cos\theta d\theta = \pi \cdot B_t \cdot S_t \cdot NA_1^2 \tag{3}$$

式中 S_t 为发送光纤端面的有效面积, B_t 为光源的亮度, NA_1 表示发送光纤的数值孔径。所以, 根据上面的推导可以得出

$$I(\theta) = I(0) \cdot \cos\theta = B_t \cdot S_t \cdot \cos\theta \tag{4}$$

下面介绍单光纤对的光调制特性的建模。建模时先作适当假设, 以便使问题简化。

- (i) 反射面为理想镜面;
- (ii) 两根光纤的轴互相平行且垂直于反射面;
- (iii) 发送光纤光锥内的光强均匀分布。

如图 1 所示, r_1 和 r_2 分别为发送光纤与接收光纤的半径, NA_1 和 NA_2 则为数值孔径, θ_{N1} 和 θ_{N2} 为孔径角, p 为光纤对轴间距, 令 $a = p - r_1 - r_2$ 。又因为计算光纤对耦合时, 只有 $\theta < \min(\theta_{N1}, \theta_{N2})$ 的光才能被发送并接收, 故可设 $\theta_N = \min(\theta_{N1}, \theta_{N2})$ 。

(a) 当 $d < a / (2 \cdot \text{tg}\theta_N)$ 时, 由于接收光纤的像不在发送光纤光锥内, 故接收到的光通量 Φ_r 为 0。所以光强调制函数

$$M = 0 \tag{5}$$

(b) 当 $d \geq (a + 2r_2) / (2 \cdot \text{tg}\theta_N)$ 时, 接收光纤的像完全在发送光纤光锥内, 故接收到的光通量为

$$\Phi_r = I(\theta) \cdot \Omega_r = I(\theta) \cdot \frac{S_r \cdot \cos\theta}{(2d/\cos\theta)^2} = \frac{B_t \cdot S_t \cdot S_r \cdot \cos^4\theta}{(2d)^2} \tag{6}$$

所以光强调制函数

$$M = \frac{\Phi_r}{\Phi_t} = \frac{S_r \cos^4\theta}{\pi(2d \cdot NA_1)^2} \tag{7}$$

式中 $S_r = \pi r_1^2$ 为接收光纤端面的有效接收面积, $\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{1+(p/2d)^2}}$ 。

(c) 当 $a / (2 \cdot \text{tg}\theta_N) \leq d \leq (a + 2r_2) / (2 \cdot \text{tg}\theta_N)$ 时, 由于接收光纤的像仅有部分在发送光纤的光锥内, 所以先要计算这部分面积 S'_r 。此部分面积对于接收光的贡献为^[6]

$$\eta = \frac{S'_r}{S_r} \tag{8}$$

因为在这个范围内, 同样仅有一部分发送光纤的像的端面在接收光纤的光锥内, 这个比例也为 η , 所以计算接收光强时应该乘以 η^2 ^[3], 并且由于在这个范围内 θ 大于 θ_N , 而大于 θ_N 的光实际上又不存在, 故由(7)式可得光强调制函数为

$$M = \eta^2 \frac{S_r \cos^4\theta_N}{\pi(2d \cdot NA_1)^2} \tag{9}$$

因此, 整个位移范围内光强调制函数由(5)、(7)和(9)式来描述。

2 光纤与反射面不垂直的分析

前面的建模是基于“两根光纤的轴互相平行且垂直于反射面”这一假设的, 然而在实际测量中很难有可靠的措施保证这一点, 所以必然会因为光纤与反射面不垂直问题给测量带来误差。下面就以单光纤对建模为基础, 对这个问题进行详细讨论。在分析前同样需作假设。

- (i) 和 (iii) 的假设同前;
- (ii) 为使问题简化, 设 $r_1 = r_2 = r$, $\theta_{N1} = \theta_{N2} = \theta_N$;

(iv) 两根光纤的轴互相平行且与反射面的法线有一很小的夹角 α , 也称反射面的倾斜角或光纤与反射面的垂直度。当反射面向着靠近接收光纤的方向倾斜时, α 为正, 反之则为负, 图 2 中的 α 为正。但

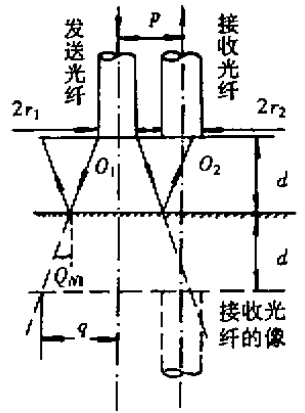


图 1 光纤对光调制示意图
Fig.1 Schematic figure of light modulation of fiber pair

是当 α 为负时, 发送光纤中出射方向在 $(\theta_N + 2\alpha, \theta_N)$ 区间范围内的光经过反射面反射后不能在接收光纤中传输, 情况比较复杂, 故在此暂不考虑。

假设两光纤的中间点 C 离反射面的距离为 d , 且令 $\theta_N - \alpha = \gamma$ 。将图 2 简化为图 3, 其中 O_1O_2 代表光纤端面, O_1G 代表发送光纤的光轴, O_2H 代表接收光纤的光轴, GH 代表倾斜的反射面。下面研究从发送光纤纤芯的边缘处 E 点发出的, 与光纤轴夹角为 θ_N 的光线 EF 经过反射后到达 J 点的情况。

(a) 当 $|EJ| < a$ 时, 很显然从发送光纤发出的光经反射面反射后不能进入接收光纤, 故

$$M = 0 \tag{10}$$

通过三角关系可求得

$$|EJ| = \frac{2d + a \cdot \operatorname{tg}\alpha}{\operatorname{ctg}\gamma + \operatorname{tg}\alpha} \tag{11}$$

所以, 此时 d 应该满足

$$d < a(2 \cdot \operatorname{tg}\gamma) \tag{12}$$

(b) 当 $|EJ| > a + 2r$ 时, 接收光纤的有效范围内都能接收光, 故由(11)式可得

$$d > a(2 \cdot \operatorname{tg}\gamma) + r(\operatorname{ctg}\gamma + \operatorname{tg}\alpha) \tag{13}$$

此时接收光纤接收到的光通量为

$$\Phi_r = I_r(\theta) \cdot \Omega_r = I_r(\theta) \cdot \frac{S_r \cdot \cos(\theta - 2\alpha)}{(|O_1O'_1| / \cos\theta)^2} \tag{14}$$

式中 $|O_1O'_1| = (2d - p \cdot \operatorname{tg}\alpha) \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos\theta = 1/\sqrt{1 + (p'/|O_1O'_1|)^2}$; $p' = d \cdot \sin 2\alpha + p \cdot \cos^2\alpha$ 。所以, 光强调制函数为

$$M = \frac{\Phi_r}{\Phi_i} = \frac{r^2 \cdot \cos(\theta - 2\alpha) \cos^3\theta}{(|O_1O'_1| \cdot NA)^2} \tag{15}$$

(c) 当 $a \leq |EJ| \leq a + 2r$ 时, 很显然接收光纤只有部分可以接收光, 即此时应当满足

$$a(2 \cdot \operatorname{tg}\gamma) \leq d \leq a(2 \cdot \operatorname{tg}\gamma) + r(\operatorname{ctg}\gamma + \operatorname{tg}\alpha) \tag{16}$$

此部分的面积 S'_r 计算与前面类似, 只不过还要把所求的面积折算到与 KO'_2 垂直的方向, 因篇幅关系此略。因此该部分面积对于接收光的贡献亦为 $\eta = \frac{S'_r}{S_r}$ 。所以, 同理可得光强调制函数为

$$M = \eta^2 \frac{r^2 \cos^3\theta_N \cos(\theta_N - 2\alpha)}{(|O_1O'_1| \cdot NA)^2} \tag{18}$$

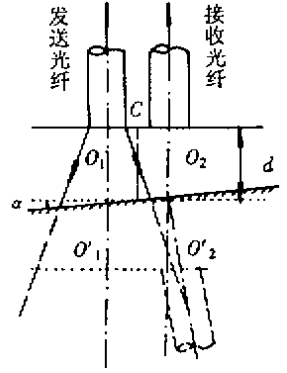
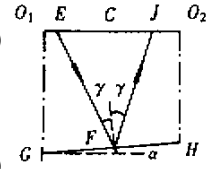


图 2 光纤与反射面不垂直分析
Fig.2 Analysis on the obliquity between the reflector and fibers



3 反射面倾斜情况的简化图
Fig.3 Simplicity of Fig.2

3 反射面倾斜度对光强调制特性的影响

根据以上推导的 RIM-FOS 光强调制函数的计算公式, 计算光强调制函数随位移变化的情况。设 $r_1 = r_2 = 40\mu\text{m}$, $NA_1 = NA_2 = 0.56$, $a = 20\mu\text{m}$, 反射面的倾斜角 α 分别等于 $0^\circ, 0.5^\circ, 1.0^\circ, 1.5^\circ$ 和 2.0° 。所得特性曲线如图 4 所示。表 1 给出了仿真曲线的参数比对结果, 其中 d_0 为起始距离 (μm), d_p 为峰值距离 (μm), M_p 为峰值点调制系数 (如图中的曲线 5), 灵敏度估算公式为 $S_E = M_p / (d_p - d_0)$ ($1/\mu\text{m}$)。

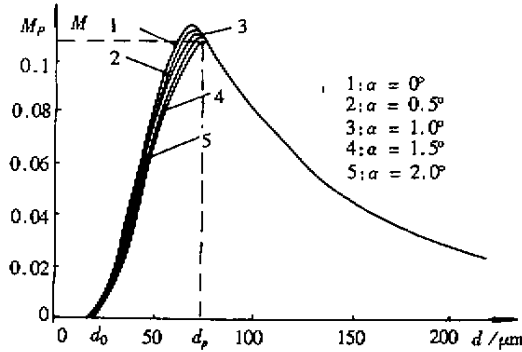


图4 反射面的垂直度对光强调制特性的影响

Fig.4 Effect of the obliquity of the reflector

表1 仿真曲线的定量分析结果

Tab.1 Results of simulation

α	0°	0.5°	1.0°	1.5°	2.0°
d_0	14.79	15.08	15.37	15.66	15.97
d_p	73.97	75.73	77.53	79.36	81.24
M_p	0.115	0.113	0.111	0.110	0.108
S_E	0.00194	0.00186	0.00179	0.00173	0.00165

4 结论

(1) 随着反射面倾斜角的增加,起始距离和峰值距离逐渐增大,而峰值点的光调制系数在不断减小。以 0° 为基准,反射面的倾斜角每变化 0.5° ,峰值点的光调制系数大约减小 $1.5\% \sim 2\%$;

(2) 随着反射面的倾斜角的增加,曲线的前坡逐渐变缓,即位移灵敏度下降。以 0° 为基准,反射面的倾斜角每变化 0.5° ,估算的位移灵敏度大约变化 $3.5\% \sim 4.5\%$ 。

如此大的误差将对位移或粗糙度测量引入较大的系统误差。由此可见,反射面的倾斜角对RIM-FOS光强调制的影响比较大,不能忽略。建议在用RIM-FOS测量时采取措施保证光纤轴与反射面垂直,或者采取预先标定的方法消除反射面不垂直的影响。

参考文献:

- [1] Kissinger C D. Fiber Optic Proximity Probe [P]. US Patent 3327584, 1967.
- [2] Cook R O, Hamm C W. Fiber optic lever displacement transducer [J]. Applied Optics, 1979, 18(19): 3230 ~ 3241.
- [3] Zhao Z Q, et al. Modulation function of the reflective optical fiber sensor for specular and diffuse reflector [J]. Optical Engineering, 1994, 33(9): 2986 ~ 2991.
- [4] Johnson M. Fiber displacement sensors for metrology and control [J]. Optical Engineering, 1985, 24(6): 961 ~ 965.
- [5] Zheng J L, Sacharia A. Self-referenced reflective intensity modulated fiber optic displacement sensor [J]. Optical Engineering, 1999, 38(2): 227 ~ 232.
- [6] 吕海宝等. 反射式光纤传感器光纤对输出特性的数学模型 [J]. 光电工程, 1998, 25(5).
- [7] 朱建中. 非接触式微位移光纤传感器 [J]. 传感技术学报, 1990, 2: 13 ~ 16.
- [8] 温志渝, 钟先信. 硅微机械与光纤组合式阵列传感器 [J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(1)(增): 336 ~ 441.
- [9] 李景镇. 光学手册 [M]. 太原: 陕西科学技术出版社, 1985.

