

文章编号: 1000-5013(2010)03-0252-04

反射式强度型光纤声音传感器的 光强调制特性

蔡洁, 张认成, 吴仕平, 张亮

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 在假设发送光纤出射端光强分布为高斯分布, 以及平面镜成像原理和能量守恒的基础上, 建立光纤声音传感器的光强调制函数, 并对该函数进行仿真分析. 光强调制特性的实验曲线与理论分析结果基本吻合, 强度调制型光纤声音传感器中, 薄膜的位移与声音的压力成正比. 当薄膜和光纤端面距离在 40~90 μm 的区间上, 光强的变化与声压变化具有较好的线性关系, 且线性度误差小, 表明理论研究中纤端光强分布的简化和基于平面镜成像的推导是合理的.

关键词: 光强调制函数; 高斯分布模型; 反射式强度型光纤声音传感器; 平面镜成像原理; 能量守恒

中图分类号: TP 212.14 文献标识码: A

光纤传感器按被测量与光波特征参量的关系, 可分为强度调制、相位调制、偏振调制, 以及频率调制 4 种类型^[1]. 反射式光纤声音传感器一般采用强度调制方式, 合理的纤端光强分布函数是研究反射式光纤传感器的重要理论基础. 本文从理论上分析反射式强度型光纤声音传感器(Reflective Intensity Modulating Fiber Optical Acoustic Sensor, RIM-FOAS) 的光强调制特性, 并进行相关的实验研究.

1 RIM-FOAS 的光学耦合原理

反射式强度调制光纤声音传感器的光学耦合原理, 如图 1 所示. 发送光纤 TF 和接收光纤 RF 的轴相互平行且垂直于镜反射面. 光强调制函数 M 与多种损耗因素有关, 大部分损耗都是测试系统所固有的, 一旦系统固定, 损耗一般不会改变. RIM-FOAS 的光强调制函数 M 为

$$M = \frac{P_r}{P_i} = \frac{\Phi}{\Phi'} \tag{1}$$

其中: P_r , Φ 分别是 RF 接收的光功率和光通量; P_i , Φ' 分别是 TF 发送的光功率和光通量. 因此, 图 1 所示的光纤对传感器的光强调制函数, 可表示为与光纤芯径、数值孔径、光纤对轴间距、反射面特性等有关的复杂函数, 即

$$M = f(r_1, NA_1, r_2, NA_2, p, d, \delta, k). \tag{2}$$

式(2)中: r_1, r_2 分别为 TF 和 RF 纤芯的半径; NA_1, NA_2 为数值孔径, 一般选择 $NA_1 = NA_2$; p 为两光纤的轴间距; d 为光纤端面到反射面的距离; δ 为表征反射面反射特性的因子; k 为所有其他因素包括损耗的综合影响参数.

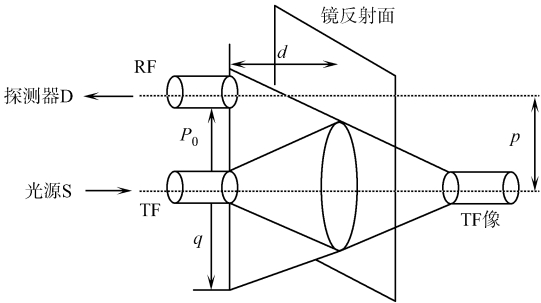


图 1 RIM-FOAS 光学耦合原理图
Fig. 1 Principle diagram of optical coupling of RIM-FOAS

光纤结构参数、反射面的物理特性、光纤与反射面的相对位置关系都会直接影响光强调制特性. 光强调制函数, 是建立在发送光纤出射端光强分布的模型基础之上的^[1-9]. 光纤端面的光场分布是由光强沿轴向均匀分布的平面波和光强, 沿径向高斯分布的高斯光束两部分构成的; 发射光纤的纤端光强分布, 采用的高斯分布模型是与实际情况最符合的光强分布. Faria^[9]进行双光纤束的建模时, 提出了在高斯分布假设下, 光强沿径向和轴向的综合表达式, 有

$$I(\rho, d) = \frac{2P_0}{\pi\omega^2(d)} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{\omega^2(d)}\right]. \tag{3}$$

式(3)中: P_0 为发射光纤的出纤光功率; $\omega(d)$ 为离纤端 d 处的光斑半径.

2 RIM-FOAS 光强调制特性的理论分析

在反射式强度型光纤声音传感器中, 振动薄膜受到声音压力作用时产生位移, 改变了光纤相对于反射薄膜的间距, 从而对接收光纤的光强进行调制. 因此, 研究和建立 RIM-FOAS 的光强调制函数, 是设计反射式光纤声音传感器的重要理论基础.

文[5]假设薄膜受到声压时弯曲成球冠形状, 如图 2 所示. 图 2 中, A 为发射光纤, B 为等效接收光纤. 假设光纤出射端光强分布是沿径向呈高斯或准高斯型分布时, 得到等效接收光纤的接收光强为

$$P(d) = \iint_B \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega^2(d+d')} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{\omega^2(d+d')}\right] ds. \tag{4}$$

式(4)中: $I(0)$ 为 $d=0$ 处的光强; $\omega_0 = \sigma r_0$, r_0 为纤芯半径; σ 为一表征光纤折射率分布的相关参数, 实际使用过程中, 对于渐变折射率光纤, 通常取 $\sigma = 2^{-1/2}$; 对于突变折射率分布的光纤, 通常取 $\sigma \approx 1$.

式(4)求解复杂, 而且在声压作用下, 薄膜的弯曲并不是球冠形的^[2], 因而球冠面假设相当于对真实的曲面加了一个微弱的约束, 使得求解结果会稍微偏高.

由于薄膜的位移 $\omega(0)$ 为纳米级, 远小于薄膜厚度 h (毫米级) 和半径 R_0 (毫米级), 即 $\omega(0) \ll h$, $\omega(0) \ll R_0$, 而光纤模场直径也远小于薄膜直径, 即 $2\omega(0) \ll 2R_0$. 所以, 可以将薄膜反射近似等效为平面镜成像, 如图 3 所示.

从图 3 中可以看出, 当薄膜与发射光纤 A 距离为 d 时, 等效接收光纤 B 和发射光纤关于薄膜成镜像关系, 即 A 和 B 的距离为 $2d$. 结合高斯分布假设和能量守恒定律, 可得 B 光纤的接收光强为

$$P(d) = \int_0^{\omega_0} 2\pi \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega^2(2d)} \exp\left[-\frac{2\rho^2}{\omega^2(2d)}\right] \rho d\rho = \frac{\pi I(0)\omega_0^2}{2} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{2\omega_0^2}{\omega^2(2d)}\right] \right\}. \tag{5}$$

式(5)中: $\omega(d) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d}{\pi\omega_0^2}\right)^2}$. 当 $d=0$ 时, $\omega(d) =$

ω_0 , 可得光纤端面处(即薄膜紧贴光纤端面 ρ 时)的接收光强为

$$P(0) = \int_0^{\omega_0} 2\pi \frac{I(0)\omega_0^2}{\omega_0^2} \exp(-\frac{2\rho^2}{\omega_0^2}) \rho d\rho = \frac{\pi I(0)\omega_0^2}{2} [1 - \exp(-2)]. \tag{6}$$

由式(5), (6)可得到归一化的光强调制函数为

$$Q(d) = \frac{P(d)}{P(0)} = \frac{1 - \exp\left[-\frac{2\omega_0^2}{\omega^2(2d)}\right]}{1 - \exp(-2)}. \tag{7}$$

图 4 是归一化光强调制特性曲线. 从图 4 中可见, 在薄膜和光纤端面距离 $d > 0.1 \mu\text{m}$ 附近, 发射光

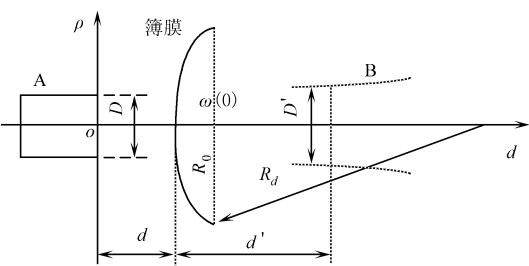


图 2 接收光纤的等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of receiving optical fiber

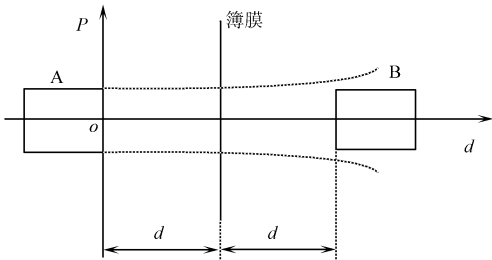


图 3 等价光纤坐标系统

Fig. 3 Equivalent coordinate system for optical fiber

强几乎全部被接收光纤所接收,故接收光纤接收到的光强变化不明显;当 $d > 80\text{ }\mu\text{m}$ 时,接收光强受到外界干扰的影响,即光纤除接收光纤发射光强被薄膜反射的光以外,还接收其他干扰光源被反射回的光,光强变化变得不明显.

从仿真曲线看出, $d > 40\text{ }\mu\text{m}$ 处为曲线的一个拐点,以此点为分界点对该曲线进行最小二乘法拟合,拟合曲线如 4 图中虚线所示. 在 $5\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 内,拟合的线性度误差 e 为 2.92% ,而在 $40\sim 85\text{ }\mu\text{m}$ 内,拟合的线性度误差 e 为 1.89% .

由于薄膜的位移与声音的压力成正比,所以在这两个区间上接收光纤的光强与声压成线性关系. 在进行 RIM-FOAS 声音传感器设计时,薄膜和光纤端面距离应选择在 $5\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 或 $40\sim 85\text{ }\mu\text{m}$ 区间范围内,精度要求高时,应分段标定.

3 实验结果与分析

采用芯径小的单模光纤,纤芯直径为 $11\text{ }\mu\text{m}$,研究 RIM-FOAS 光强调制特性. 光源采用光谱宽度窄且能量相对集中的激光二极管,波长为 $1\text{ }310\text{ nm}$. 使用精密位移工作台作为光强调制特性研究的实验台,用螺钉将光纤固定架固定在实验台上,固定架上的 4 个螺钉用于调节光纤与反射薄膜的垂直度,垂直度误差为 0.1 mm ; x, y 两个千分头分别用于两个方向的微调进给,它们的最小刻度都是 0.01 mm .

实验时,对准反射器并将光纤探头与反射镜间距调到 0.1 mm ,调整 x 方向的千分头来改变光纤端面和反射薄膜之间的距离;从零开始,每次调节步距为 $10\text{ }\mu\text{m}$,通过 PIN 光功率计测量反射光路 PIN 的输出光强. 为减小误差,实验中光电检测输出电压的采样频率设为 100 Hz ,采样 10 s 取平均值.

光强调制特性的归一化曲线,如图 5 所示. 对于光强调制特性的归一化实验数据,求得其平均值 $E = 0.554\text{ }8$,方差 $\delta^2 = 0.075\text{ }9$. 与仿真曲线的数学期望值 $E_0 = 0.544\text{ }2$ 和方差 $\delta^2_0 = 0.050\text{ }5$ 相比,实验值略大于理论值. 这是由于在小挠度区域,薄膜有一定的抗弯效应,而平面镜成像则忽略了弯曲效应.

实验的同时也存在一定的误差,究其原因主要有如下 4 点. (1) 光纤端面出射的激光在空气中传输会损耗. (2) 理论分析中假设发射光纤和反射薄膜相互垂直,但是在实际的安装中,光纤与薄膜不可能绝对垂直. (3) 实验中的精密位移工作台本身存在制造误差. (4) 光源光功率的波动.

图 5 中,实线和虚线分别为实验和理论分析的光强调制特性归一化曲线. 从图 5 可以看出,两条曲线基本吻合,且实验值略大于理论值. 当薄膜和光纤端面距离在 $40\sim 90\text{ }\mu\text{m}$ 的区间上,光强的变化与声压变化具有较好的线性关系,且线性度误差小. 这表明,理论研究中 对纤端光强分布的简化和基于平面镜成像的推导是合理的.

4 结束语

提出一种建立反射式强度调制型光纤声音传感器的光强调制特性函数的方法,其光强调制特性的实验曲线与理论分析结果基本吻合. 结果表明,该光强调制特性函数推导合理,对反射式光纤声音传感

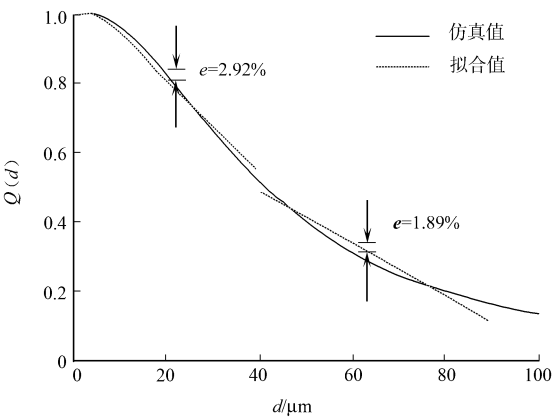


图 4 理论归一化曲线

Fig. 4 Theoretical normalized curve

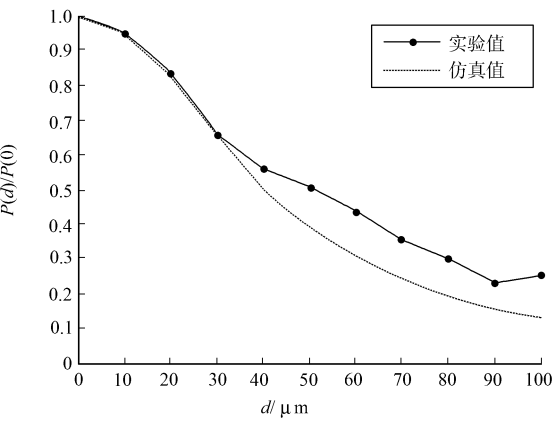


图 5 光强调制特性的归一化曲线

Fig. 5 Normalized curve of light intensity-modulating characteristic

器的设计、制造具有很好的指导意义. 在进一步的研究中, 如果考虑到纤端出射光场场强分布, 是由不同权重下的高斯分布和平面波场的圆孔衍射分布叠加的结果, 建立的光强调制函数将会更加准确.

参考文献:

- [1] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000: 37-48, 165-168.
- [2] 徐志保. 反射式光纤声音传感器的关键技术研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2007.
- [3] 杨华勇. 反射式强度型光纤传感器强度调制特性的数学模型与关键技术的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
- [4] 李亚非, 董树信. 一种反射式光纤传感器的受光特性分析[J]. 西安交通大学学报, 1992, 26(2): 115-120.
- [5] 李学金, 张百钢, 姚建铨, 等. 一种光纤压力传感器的设计理论分析[J]. 传感技术学报, 2004, 17(1): 133-135.
- [6] 李艳萍, 张丽红, 伦翠芬, 等. 反射式强度调制型光纤压力传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(1): 180-183.
- [7] 郝爱花, 毛智礼, 葛海波. 声光技术在激光技术领域中的应用研究[J]. 西安邮电学院学报, 2005, 10(3): 111-114.
- [8] HOOGENBOOM L. Theoretical and experimental analysis of a fiber optic proximity probe[J]. SPIE, 1984, 478: 46-57.
- [9] FARIA J B. A theoretical analysis of the bifurcated fiber bundle displacement sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(3): 742-747.

Research on Light Intensity-Modulating Characteristic of Reflective Intensity Modulating Fiber Optical Acoustic Sensor

CAI Jie, ZHANG Ren cheng,
WU Shi ping, ZHANG Liang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The light intensity modulating function of the fiber optical acoustic sensor is built on the basis that the light intensity distribution of the exit end of the emitting optical fiber is assumed as the Gauss distribution and the principle of plane mirror imaging and the principle of energy conservation is satisfied, also the function is simulated and analyzed. The experimental curve of the light modulating characteristic closely fits the result of theoretical analysis, in which the membrane's displacement is proportional to the acoustic stress for the intensity modulation fiber optic acoustic sensor. When the distance between the membrane and the fiber end is 40 to 90 μm , the light intensity varies with the acoustic stress in a good linear relationship and the linearity error is small, which has indicated that it is feasible for the simplification of the light intensity distribution at fiber ends and the derivation of the plane mirror imaging in the theoretical analysis.

Keywords: light intensity modulating function; Gauss distribution model; reflective intensity modulating fiber optical acoustic sensor; plane mirror imaging principle; energy conservation

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)