

基于偏振干涉的光纤光栅传感解调方法^{*}

张锦龙^{1,2)†} 余重秀¹⁾ 王葵如¹⁾ 赵德新¹⁾ 林妹妹¹⁾ 李 成¹⁾

1) 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

2) 河南大学物理与电子学院, 开封 475001)

(2008 年 6 月 14 日收到, 2008 年 11 月 6 日收到修改稿)

提出了一种新的应用于光纤布拉格光栅传感器的波长移动探测方案. 研究基于保偏光纤的光纤环境结构并建立理论模型, 分析其输入光波长和输出光功率分配特性并进行数值仿真和实验验证. 结果证明该装置结构简单、稳定性好、检测精度高且可通过调整光纤环境参数调节测量范围和精度. 在大于 1 nm 解调范围内, 波长平均解调精度小于 1 pm.

关键词: 传感解调, 偏振干涉, 光纤环境

PACC: 4281P, 4280F

1. 引言

随着高楼、道路、桥梁、大坝等基础设施建设的规模不断加大, 对于这些建筑物健康状况的传感、测控成为一个关系国计民生的重要课题. 光纤和光纤布拉格光栅(FBG)作为一种新型的传感器具有良好的稳定性、可靠性、对电磁波的不敏感性、小尺寸、适于在高温、腐蚀性或危险性环境使用、集信息传输与传感于一体等一系列优点, 已经被广泛应用于传感系统. 因此各种光纤布拉格光栅传感系统得到了快速的发展^[1-3]. 随着光栅技术的成熟, 人们研究的重点转向了解调系统. 目前国内外研究的解调方法有很多, 其中干涉法解调以其高分辨率的独特优势成为研究的重点之一. 但有些干涉解调方案易受环境影响, 从而失去了其高精度的意义. 有些方案的系统搭建条件比较苛刻, 很难脱离实验室环境使用^[4-9]. 本文提出了一种基于线偏振光干涉原理的简单无源波长解调系统. 利用矩阵光学原理建立理论模型, 详细研究了保偏光纤长度、耦合器耦合系数、偏振光入射夹角对光纤环境(FLM)反射(透射)率与入射光波长关系影响的特性, 设计了基于保偏光纤环境的分辨率可调的干涉型解调仪, 并对几种

参数的测试结果进行了比较分析. 结果显示该解调仪结构简单、稳定性好、检测精度高且测量范围和精度可调, 与理论分析一致.

2. 理论分析

2.1. 保偏光纤环境原理

光纤环境是各种光纤环中最简单且具有宽带特性的反射镜. 如图 1 所示, 对于普通 FLM, 输入光场 E_i 经宽带耦合器分为相位差 $\pi/2$ 的两束光 E_{01} , E_{02} , 分别沿光纤环相向传输一周后对应 E_{11} , E_{12} 回到耦合器. 两束光沿同一路径传输, 理想情况下, 二者光程相同并在耦合器内发生干涉. 根据耦合器传输矩阵知, 反向传输的两束光相位差和耦合器耦合系数决定了反射光 E_r 、透射光 E_t 的功率分配. 我们所研究的均为低功率信号且光纤长度很短, 忽略自相位调制和交叉相位调制引起的相移, 忽略耦合器和光纤的损耗, 设输入功率 E_i 沿顺时针方向传输的部分 E_{01} 占全部功率的 ρ , 则前向(顺时针)和后向(逆时针)传输光场的振幅为 $A_{01} = \sqrt{\rho} A_i$, $A_{02} = \sqrt{1-\rho} A_i$. 利用光纤耦合器的传输矩阵可以得到

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60677003)教育部新世纪优秀人才支持计划(批准号: NCET-07-0111)和教育部光通信与光波技术重点实验室(北京邮电大学)开放基金项目资助的课题.

[†] E-mail: ZJL@henu.edu.cn

FLM 的透射率 $T = 1 - 2\rho(1 - \rho)\{1 + \cos[(1 - 2\rho)\gamma E_i L]\}$. 若 FLM 采用 3 dB 耦合器, 即 $\rho = 0.5$, 则 $T = 0$, 所有输入光将全部被反射.

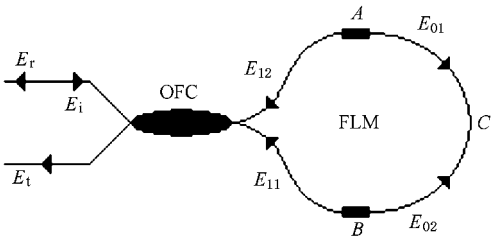


图 1 FLM 结构示意图

图 1 为本系统采用的 FLM 结构. 该结构是在普通光纤环境中接入一段保偏光纤构成. 其中 ACB 段为保偏光纤, 相当于在普通 FLM 中引入双折射效应. 虽然相向传输的光 E_{01} 和 E_{02} 走的是同一根光纤, 二者的双折射强度相同, 但由于两束光进入保偏光纤的位置不同(分别位于 A, B 两点), 导致二者偏振方向与保偏光纤快轴(慢轴)之间的夹角不同, 从而使两束光经过保偏光纤时产生的相位延迟也不同. 因此, A, B 两点相当于旋光器的作用, E_r, E_t 的功率分配将受光纤耦合器的分光比和 E_{01}, E_{02} 偏振方向与保偏光纤的夹角影响. 为研究方便将图 1 光路等效为图 2 所示光路.

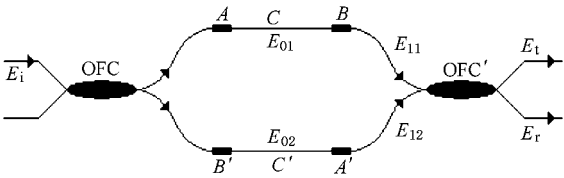


图 2 FLM 等效结构示意图

从图 2 可认为两束光分别经过独立的通道. 利用矩阵光学原理建立描述该等效光路图的传输矩阵^[10-12], E_i, E_{01} 和 E_{02} 满足

$$\begin{bmatrix} E_{01}^{(y)} \\ E_{02}^{(y)} \end{bmatrix} = T_{\text{OFC}} \begin{bmatrix} E_i^{(y)} \\ 0 \end{bmatrix},$$

式中, 耦合器传输矩阵

$$T_{\text{OFC}} = (1 - \gamma)^{1/2} \begin{bmatrix} (1 - \rho_{xy})^{1/2} & j\rho_{xy}^{1/2} \\ j\rho_{xy}^{1/2} & (1 - \rho_{xy})^{1/2} \end{bmatrix},$$

其中 γ 为耦合器损耗系数, ρ_x, ρ_y 分别为耦合器快、慢轴分光比.

忽略耦合器的损耗, 则其传输矩阵为

$$T_{\text{OFC}} = \begin{bmatrix} (1 - \rho_{xy})^{1/2} & j\rho_{xy}^{1/2} \\ j\rho_{xy}^{1/2} & (1 - \rho_{xy})^{1/2} \end{bmatrix}.$$

耦合器的耦合系数随波长变化且近似满足公式

$$K(\lambda) = \frac{1}{2} [\cos(\omega\lambda - \phi)].$$

对于传感系统来说一般检测范围不超过 5 nm, 现在所生产的宽带耦合器带宽可达 60 nm, 且对偏振不敏感, 在偏离耦合器中心波长 ± 2.5 nm 范围内耦合系数变化可忽略不计.

单模光纤传输矩阵

$$T_{\text{SFM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \exp[j(-kl_{12} + ja_{l_{12}})],$$

其中 k 为波矢, α 为单模光纤损耗系数, l_1, l_2 分别为 FLM 中两段单模光纤长度.

旋光器传输矩阵

$$A = (A')^T = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, B = (B')^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

保偏光纤传输矩阵

$$T_{E_{01}} = (T_{E_{02}})^T = \begin{bmatrix} \cos(\delta/2) + j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \cos\varphi & j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \sin\varphi \\ j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \sin\varphi & \cos\delta - j \cdot \sin(\delta/2) \cdot \cos\varphi \end{bmatrix},$$

其中 φ 为偏振光场 E_{01}, E_{02} 从保偏光纤 A, B 两端入射时偏振方向夹角; δ 为两光场分别经过保偏光纤快、慢轴后产生的相位差, 满足关系式

$$\delta = \frac{2\pi \cdot B_m L}{\lambda},$$

其中 $B_m = |n_x - n_y|$ 是保偏光纤模式双折射度, L 为保偏光纤长度, λ 为入射光波长. 光纤光栅反射波长 λ 与温度呈线性关系 $\lambda = \lambda_0 + Ct$, 其中 λ_0 为 0°C

时光纤光栅的反射波长, C 为光纤光栅的温度系数, t 为温度^[13].

E_r, E_t 和 E_{11}, E_{12} 之间满足

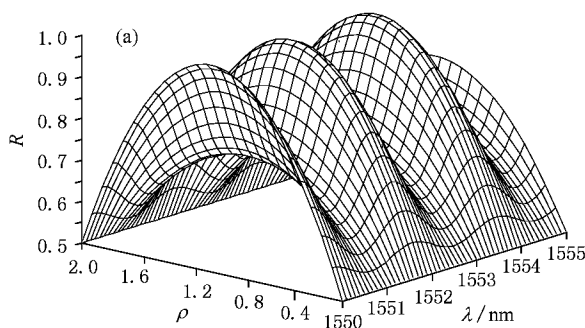
$$\begin{bmatrix} E_r^{(y)} \\ E_t^{(y)} \end{bmatrix} = T_{\text{OFC}} \begin{bmatrix} E_{12}^{(y)} \\ E_{11}^{(y)} \end{bmatrix}.$$

依据图 2 等效光路, 忽略偏振效应对耦合系数的影响, 即 $\rho_x = \rho_y = \rho$, 忽略光纤损耗, 将以上各传输矩阵联合求解可得如下反射率 R 和透射率 T ^[14]

$$R = \frac{E_r \cdot E_r^*}{E_i \cdot E_i^*} = 4\rho(1 - \rho) \times \left[\cos^2\left(\frac{\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right) + \sin^2\left(\frac{\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right) \cdot \cos^2\varphi \right] \times \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)], \quad (1)$$

$$T = \frac{E_t \cdot E_t^*}{E_i \cdot E_i^*} = \left\{ (2\rho - 1) \left[\cos^2\left(\frac{\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right) + \sin^2\left(\frac{\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right) \cdot \cos^2\varphi \right] + \sin^2\left(\frac{\pi \cdot B_m L}{\lambda_0 + Ct}\right) \sin^2\varphi \right\} \times \exp[-2\alpha(l_1 + l_2)]. \quad (2)$$

由以上两公式分析得:保偏光纤参数确定时,有效折射率差为定值,光纤环境的反射率 R (透射率 T)是耦合器分光比 ρ 、温度 t 、保偏光纤长度 L 和两端偏振方向夹角 φ 的函数(从光纤光栅传感应用的角度考虑,普通光纤长度 l_1, l_2 对结果无影响,故忽略系数 $\exp[-2\alpha(l_1 + l_2)]$,使 R 和 T 的和归一化)。



对于一个固定的光路系统来说, ρ, L 和 φ 为定值,因此 $R(T)$ 和 t 存在一一对应关系.通过测定 $R(T)$ 可求得温度值 t 。

2.2. 数值模拟

由于光纤光栅反射波长与温度是线性关系,且该问题不是本文研究重点,故直接研究 $R(T)$ 和 λ 的关系.归一化后 R 和 T 应为互补关系,因此先研究 R 和 λ 的关系特性.根据(1)式通过数值计算研究各参数 (ρ, L, φ) 对 $R(T)$ 和 λ 对应关系特性的影响.设保偏光纤 $B_m = 6.4 \times 10^{-4}$ 。

图3显示了 L, φ 为固定值($L = 2 \text{ m}, \varphi = \pi/4$)时 ρ 由0到1变化对应的 R 和 λ 的关系.图3(a)是耦合器分光比 ρ 连续变化时 R 和 λ 的关系图(b)是 ρ 分别为0.22, 0.3, 0.5, 0.95时 R 和 λ 关系图,由图可知当 $\rho = 0.5$ 时 R 随 λ 变化灵敏度最高; ρ 接近0或1时反射率变化区间接近0, R 随 λ 变化灵敏度为0,这时波长变化而反射率几乎不变; ρ 为其他值时 R 随 λ 变化区间介于0—50%之间,且 ρ 值越接近0.5灵敏度越高.故在传感系统中应选 ρ 接近0.5。

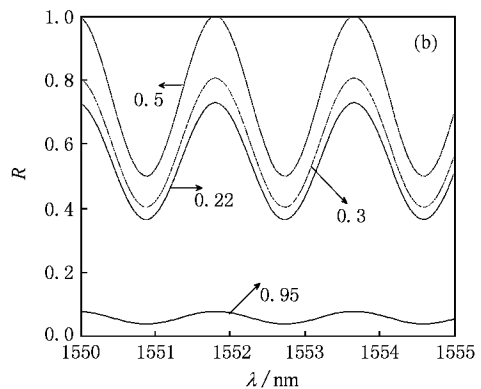


图3 耦合器分光比 ρ 变化时反射率 R 和波长 λ 关系图 (a) ρ 从0到1变化时 R 和 λ 关系 (b) ρ 取不同值时 R 和 λ 关系

图4显示了 ρ, φ 为固定值($\rho = 0.5, \varphi = \pi/4$)时 L 由0到2 m变化对应的 R 和 λ 的关系.图4(a)是保偏光纤长度 L 连续变化时 R 和 λ 的关系图(b)是 L 分别为0.5, 1, 1.5, 2 m时 R 和 λ 的关系图.由图可知反射率 R 随波长 λ 变化灵敏度随 L 的增加而增加; L 的大小对反射率直流分量无影响.理论上应选取尽量长的保偏光纤以达到更高的检测灵敏度,但从图4可以看出 R 随 λ 呈周期性变化, L 越长则周期越短,传感系统中只能选取其中一段单调区间进行检测,故应根据所需检测温度范围选取合适

的长度 L 。

图5显示了 ρ, L 为固定值($\rho = 0.5, L = 2 \text{ m}$)时 φ 由0到 π 变化对应的 R 和 λ 的关系.图5(a)是保偏光纤两端偏振方向夹角 φ 连续变化时 R 和 λ 的关系图(b)是 φ 为0, $\pi/4$, $\pi/2$, $5\pi/6$, π 时 R 和 λ 关系图.由图可知当 $\varphi = 0, \pi$ 时反射率 R 始终为100%,随波长变化灵敏度为0,这时无论 λ 如何变化 R 均不变,此时两束相向传输的光场 E_{01}, E_{02} 同时沿保偏光纤的长轴或者短轴传输,光纤环境退化为普通FLM;当 $\varphi = \pi/2$ 时 R 随 λ 变化灵敏度最高,直

流分量为零; φ 为其他值时 R 随 λ 变化区间介于 0%—100% 之间,且 φ 值越接近 $\pi/2$ 直流分量越小,灵敏度越高.故在搭建传感系统时应尽量使 φ 接近 $\pi/2$.

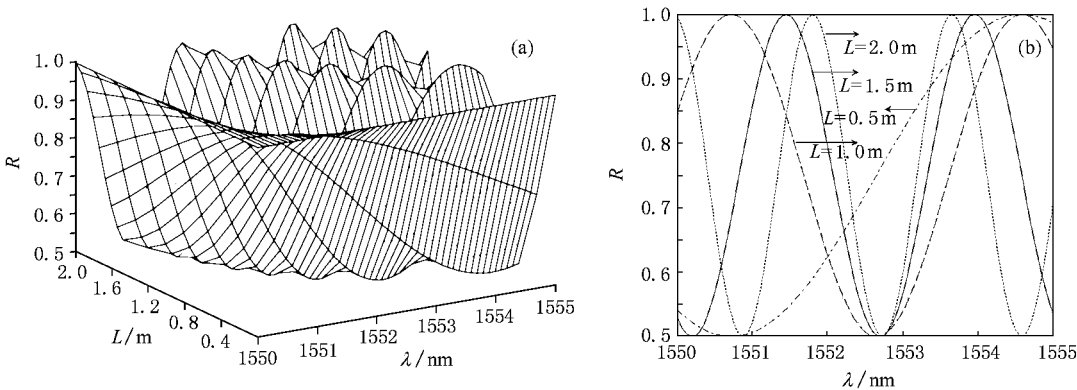


图4 保偏光纤长度 L 变化时反射率 R 和波长 λ 关系图 (a) L 从 0 到 2 m 变化时 R 和 λ 的关系 (b) L 取不同值时 R 和 λ 的关系

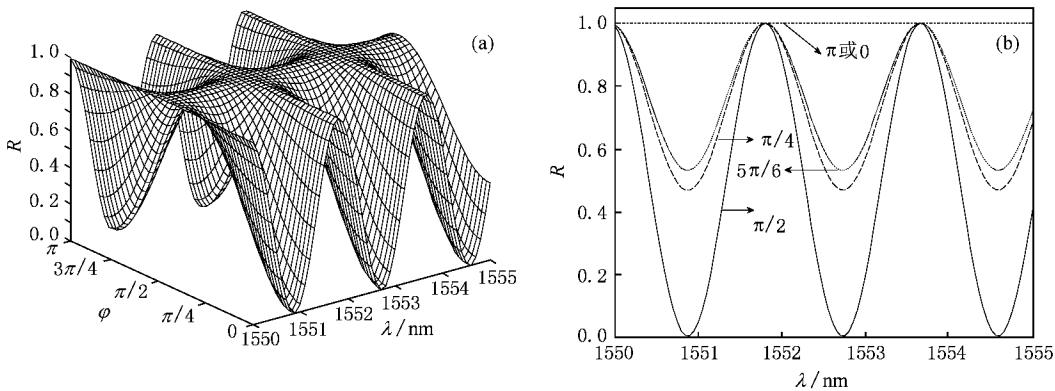


图5 保偏光纤熔接角度 φ 变化时反射率 R 和波长 λ 的关系图 (a) φ 取不同值时 R 和 λ 的关系,(b) φ 从 0 到 π 变化 R 和 λ 的关系

2.3. 光纤光栅传感系统结构及原理

由以上分析可知,采用保偏光纤结构的 FLM,其反射率 R 与波长 λ 存在对应关系.因此该结构可应用于光纤光栅传感系统.

显然,定义反射率(透射率)

$$R(T) = \frac{\text{反射光强(透射光强)}}{\text{透射光强} + \text{反射光强}} \times 100\% .$$

通过测定反射光强和透射光强,即可算出反射率(透射率),进而算出温度.同时可以看出,光源自身功率随波长的变化和外界因素引起的光源功率波动均不影响反射率(透射率),即光源的功率波动不影响测量准确度.从数值仿真结果知,选取恰当的结构参数可使该系统达到比现有传感系统高得多的测

量精度.具体结构如图 6 所示.

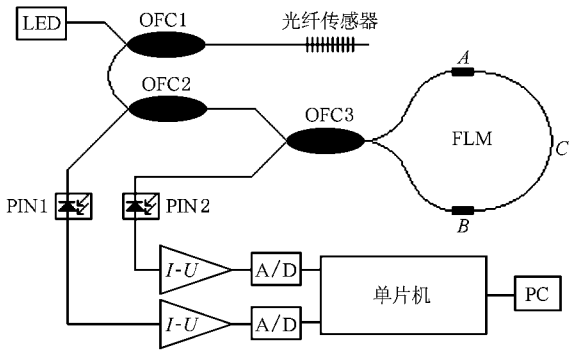


图6 光纤光栅传感解调系统原理图

系统采用 LED 作为宽带光源,宽光谱经 OFC1

进入光纤光栅,反射后变为窄带光谱经 OFC1 和 OFC2 进入到 OFC3,分成两束光沿 FLM 相向传输,经保偏光纤后回到 OFC3 并产生干涉,反射光由 OFC2 输出,透射光由 OFC3 输出.利用光电探测器 PIN 管将探测到的反射光强和透射光强转化成电流,再经 $I-U$ 转换电路变成电压,由 A/D 转换电路将电压的模拟信号转化为数字信号,由单片机采集数据进行处理后发送给计算机,由 LabVIEW 接收数据并计算,实时绘出温度-时间图.

3. 实验验证

为验证上述理论和仿真结果,研究 FLM 各参数对光纤光栅传感系统精度特性的影响,搭建了多组测试系统.系统采用可调谐激光器 AQ4321D 模拟光纤光栅反射波长变化.可调谐激光器带宽 0.01 nm,最小调谐精度 0.001 nm,武汉光迅生产的宽带耦合

器(ρ 约为 0.5 和 0.95);北京长飞生产的熊猫型保偏光纤 PM1017-A,拍长小于 4 mm;PIN 管灵敏度 0.85 A/W,A/D 为 16 位转换精度,使用的探测、数据采集处理和计算机通信模块为本中心自主研制,使用 AQ6370 光谱分析仪同步对比检测,最小分辨率为 0.02 nm.

实验选取多组 L 值、两组 ρ 值和两组 φ 值组合构建测试系统,可调谐激光器在 1550—1560 nm 范围内扫描,得到图 7 所示 $R(T)$ 和 λ 关系图.

将各系统采集的数据分别选取一个单调上升区间进行处理并对比,关系如表 1 所示.

由实验结果对比知,同等检测精度条件下,显现如下特性:

1) 保偏光纤长度 L 决定了反射率 R 的周期, L 越长,周期越短,波长解调灵敏度越高,但测量范围变窄.

表 1 不同系统参数测试结果对比表

L/m	ρ	φ	单调区间宽度/nm	反射率变化区间(理论值)/%	反射率变化区间(实验值)/%
1.2	0.5	$\pi/2$	1.565	0—100	1.98—99
2	0.5	$\pi/2$	0.940	0—100	2—99.1
0.9	0.95	$\pi/2$	2.085	0—19	0.3—19.2
1.8	0.95	$\pi/2$	1.040	0—19	0.1—19.3
1.1	0.5	$\pi/4$	1.706	50—100	49.1—98.7
1.9	0.5	$\pi/4$	0.987	50—100	49—98.5
0.8	0.95	$\pi/4$	2.348	9.5—19	10—19.8
1.7	0.95	$\pi/4$	1.100	9.5—19	9.6—19.2

2) 耦合系数 ρ 决定了反射率 R 的峰值,越接近 0.5,峰值越高, R 变化区间越大,波长解调灵敏度越高,测量范围不变.

3) 偏振方向夹角 φ 决定了反射率 R 的谷值,越接近 $\pi/2$,谷值越低, R 变化区间越大,波长解调灵敏度越高,测量范围不变.

所得实验结果与数值仿真结果一致.实验值与理论值之间的偏差来源于三方面:保偏光纤长度测量误差,耦合器分光比制作误差,偏振方向控制熔接误差.

由于普通光纤光栅中心波长温度系数 0.01 nm/℃,依据以上结果,选用 $L=1.2\text{ m}$, $\rho=0.5$, $\varphi=$

$\pi/2$ 的系统,可测量范围超过 1 nm(即温度测量范围超过 100℃),且反射率 R 变化区间最大.对该系统每隔 10 min 扫描一次,进行 30 次扫描,扫描宽度 16.8 nm,图 8 所示为其中 10 组测试结果.

图 8 数据表明,该参数构成的系统最宽测量范围不大于 1.5 nm;理论上输入信号功率达到 -10 dBm 时平均分辨率 0.054 pm(主要由 A/D 转换位数决定),由于可调激光器和光谱仪最高分辨率为 1 pm,测量结果只能校准到 pm 量级,故认为该系统对波长分辨率在 1 pm 以下,测量精度小于 $\pm 1\text{ pm}$.该方案虽然大大提高了稳定性但并没有完全杜绝环境的影响,温度对保偏光纤 B_m 的影响在 10^{-3} 数量级,

对环境温度仍有一定依赖性,但远远小于其他干涉解调方案.

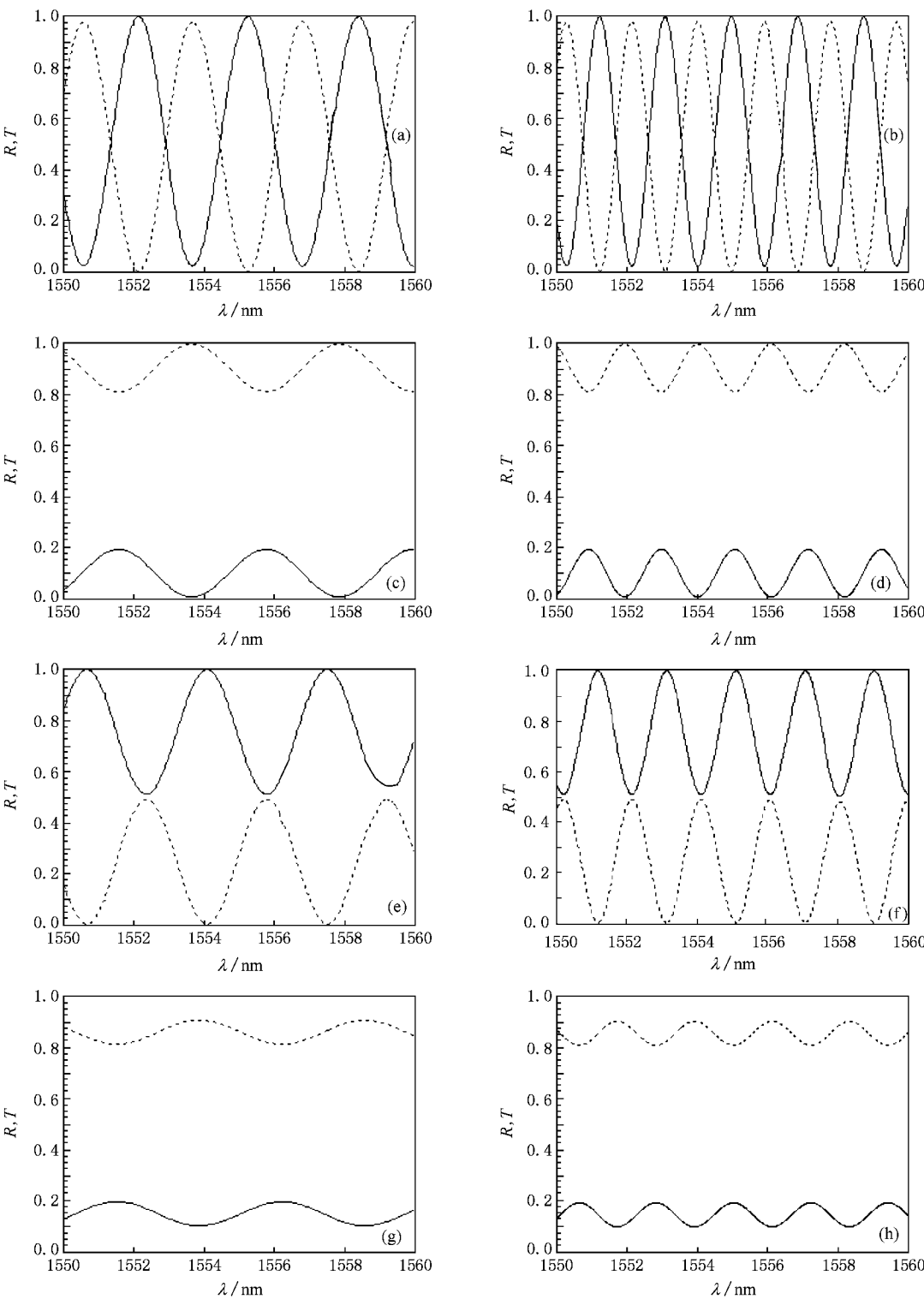


图7 R, T 与 λ 的关系 (a) $L=1.2\text{ m}$, $\rho=0.5$, $\varphi=\pi/2$ (b) $L=2\text{ m}$, $\rho=0.5$, $\varphi=\pi/2$ (c) $L=0.9\text{ m}$, $\rho=0.95$, $\varphi=\pi/2$ (d) $L=1.8\text{ m}$, $\rho=0.95$, $\varphi=\pi/2$ (e) $L=1.1\text{ m}$, $\rho=0.5$, $\varphi=\pi/4$ (f) $L=1.9\text{ m}$, $\rho=0.5$, $\varphi=\pi/4$ (g) $L=0.8\text{ m}$, $\rho=0.95$, $\varphi=\pi/4$ (h) $L=1.7\text{ m}$, $\rho=0.95$, $\varphi=\pi/4$

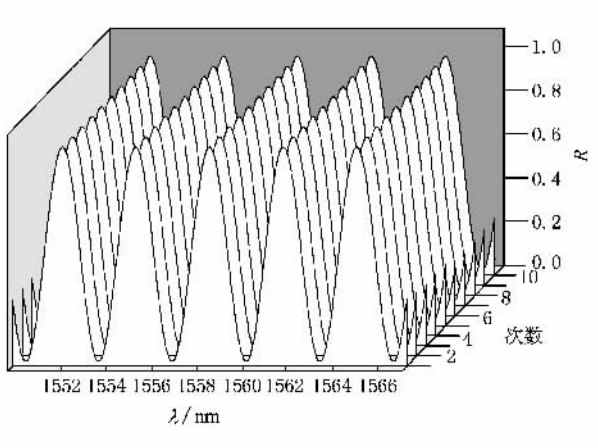


图 8 测试结果

4. 结 论

通过探测保偏光纤环镜的反射能量和透射能量进行波长的测定是一种比较新颖的方法. 本文分析了波长与 FLM 输出光场之间关系的理论模型并进行了实验验证, 理论分析、数值仿真和实验结果符合. 调节保偏光纤长度、选用不同耦合系数的耦合器、调节保偏光纤主轴角度都可以调整测量范围和系统分辨率, 分辨率小于 1 pm, 测量精度小于 ± 1 pm. 与其他解调仪相比, 该方案不仅有较好的偏振独立性和稳定性, 而且采用全光纤搭建, 易于实现小型化, 对光纤光栅传感器的应用具有重要意义.

[1] Kersey A D , Davis M A , Patrick H J 1997 *Lightwave Technology* **15** 1442

[2] Sun J L 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2382 (in Chinese) [孙家林 2001 *物理学报* **50** 2382]

[3] Liu Y Q , Liu Z G , Guo Z Y , Ge C F , Dong X Y , Zheng J C , Li J A 1998 *Acta Photonica Sinica* **27** 1111 (in Chinese) [刘云启、刘志国、郭转运、葛春风、董孝义、郑建成、李家安 1998 *光子学报* **27** 1111]

[4] Xu K , Pan S , Wu S F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1190 (in Chinese) [徐 凯、潘 石、吴世法 2003 *物理学报* **52** 1190]

[5] Morey W W , Meltz G , Glenn W H 1989 *Proc. SPIE* **1169** 98

[6] Wang Y P , Rao Y J , Ran Z L , Zhu T 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1432 (in Chinese) [王义平、饶云江、冉曾令、朱 涛 2003 *物理学报* **52** 1432]

[7] Jiang J , Rao Y J , Zhou C X 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2221 (in Chinese) [江 建、饶云江、周昌学 2004 *物理学报* **53** 2221]

[8] Zhang J L , Yu C X , Wang K R , Lin M M , Zeng Y Y 2007 *Proc. SPIE* **6781** 2L

[9] Zhang J L , Yu C X , Wang K R , Zeng J Y 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 779 (in Chinese) [张锦龙、余重秀、王葵如、曾军英 2008 *光学学报* **28** 779]

[10] Feng S J , Shang L , Mao Q H 2004 *Acta Phys. Sin.* **56** 4677 (in Chinese) [冯素娟、尚 亮、毛庆和 2004 *物理学报* **56** 4677]

[11] Roman K , Byoung Y K 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 340

[12] Zhang J L , Yu C X , Wang K R , Lin M M , Zhao D X 2008 *Journal of Optoelectronics · Laser* **19** 743 (in Chinese) [张锦龙、余重秀、王葵如、林妹妹、赵德新 2008 *光电子·激光* **19** 743]

[13] Qiao X G , Jia Z A , Fu H W , Li M , Zhou H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 494 (in Chinese) [乔学光、贾振安、傅海威、李 明、周红 2004 *物理学报* **53** 494]

[14] Chung S H , Kim J , Yu B A , Lee B 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 1343

Fiber grating sensor demodulation method based on polarization interference^{*}

Zhang Jin-Long^{1,2)†} Yu Chong-Xiu¹⁾ Wang Kui-Ru¹⁾ Zhao De-Xin¹⁾ Lin Mei-Mei¹⁾ Li Cheng¹⁾

1 *✉ School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunication, Beijing 100876, China*

2 *✉ School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475001, China*

(Received 14 June 2008; revised manuscript received 6 November 2008)

Abstract

A novel wavelength shift detection scheme for use in fiber Bragg grating sensing systems is proposed. The structure of the polarization maintaining fiber loop mirror is studied and its theoretical model is established. In addition, the distribution characteristics of the input light wavelength and the output power are analysed. Moreover, numerical simulation and experimental validation are also performed. The results show that the device has simple structure, high stability and high detection precision. The measuring range and the precision can be adjusted by varying the parameters of the fiber loop mirror. In the demodulation range larger than 1 nm, the average precision of the wavelength demodulation is lower than 1 pm.

Keywords: sensor demodulation, polarization interference, fiber loop mirror

PACC: 4281P, 4280F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677003), Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (Grant No. NCET-07-0111), and the Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies (Beijing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education of China.

[†] E-mail: ZJL@henu.edu.cn