

文章编号: 0253-2239(2005)10-1297-5

光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调法及 波长优化设计*

王婷婷 王鸣** 李明 陆敏

(南京师范大学物理科学与技术学院光电技术省重点实验室, 南京 210097)

摘要: 提出了光纤法布里-珀罗(F-P)腔传感器的双通道双波长解调方法,并在此基础上建立了传感器的实验解调系统。理论分析与实验研究了双波长法解调光纤法布里-珀罗腔传感器的基本原理,证明了双波长双通道解调法可以补偿传感器光网中和波长无关的变动引起的误差。根据已知的法布里-珀罗腔传感器初始腔长和腔两端面反射率,从腔长变化的动态范围、线性、灵敏度等方面考虑,对工作波长以及线宽进行了优化设计。对双波长双通道解调系统进行了实验和数据分析,经最小二乘法拟合后的线性拟合度达到 98.35%。实验结果表明:该方法可满足解调光纤法布里-珀罗腔传感器在灵敏度、响应速度以及稳定性上的要求。

关键词: 导波与光纤光学; 光纤传感器; 法布里-珀罗腔; 双波长双通道; 波长优化设计

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Dual-Wavelength Demodulation and Wavelength Optimization for Optical Fiber Fabry-Pérot Sensor

Wang Tingting Wang Ming Li Ming Lu Min

(Provincial Key Lab of Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology,
Nanjing Normal University, Nanjing 210097)

Abstract: A technique for demodulating the fiber Fabry-Pérot (F-P) cavity sensor is presented based on the dual-path and dual-wavelength demodulation principle. The dual-path sensor system is constructed. Theoretical analysis, simulation calculations and experimental result of the dual-path and dual-wavelength demodulation F-P cavity sensor are presented. It is proved that the method can eliminate errors resulting from wavelength-independent variations in the fiber interconnected to the sensor. According to the known initial cavity length and reflectivity, two operating wavelengths and their bandwidths are determined by optimal parameter selection. After least square fitting, the related linear regression coefficient of the experimental result is 98.35%. The experimental results show that the method can satisfy the demands of sensitivity, response speed and stability at the same time.

Key words: guided wave and fiber optics; optical fiber sensors; Fabry-Pérot cavity; dual-wavelength and dual-path; wavelength optimization

1 引 言

随着现代测量技术的发展,光纤传感器越来越受到人们的重视^[1,2]。光纤法布里-珀罗腔(F-P腔)传感器相对于其他光纤传感器具有测量精度高、响应频带宽、微型、抗强电磁干扰、便于遥测等优点,因

而多用于高温、易燃易爆、强电磁干扰等恶劣环境^[3]。基于光纤法布里-珀罗腔的传感器的研究目前主要集中于光波长调制法的研究,这些方法虽然消除了光强度调制法带来的受外界干扰大、工作点难控制等限制,但它的灵敏度低而且还需要非常复

* 江苏省高技术研究计划项目(BG2003024)资助课题。

作者简介:王婷婷(1979~),女,江苏南通人,南京师范大学物理科学与技术学院硕士研究生,主要从事光纤传感的研究。

E-mail: wtt79812@163.com

** 通信联系人。E-mail: wangming@pine.njnu.edu.cn

收稿日期: 2004-08-11; 收到修改稿日期: 2005-04-01

杂和昂贵的信号处理设备^[4,5]。常用的单波长干涉解调法采用单色激光光源,具有原理简单,灵敏度高的优点,但是易受光源和光路扰动的影响。使用稳频和稳定化单色光源可以消除影响,但是设备昂贵^[6,7]。而本文提出的双波长双通道法通过比值处理排除了由在传感器的光纤网中和波长无关的变动引起的误差以及光源波动的影响,有效提高了传感器的抗干扰能力。

2 双波长法腔长解调的系统及基本原理

2.1 双波长光纤传感器的结构

图 1 是双波长腔长解调系统。传感头为光纤法布里-珀罗传感器,主要基于多光束干涉的原理,其结构如图 2 所示。此解调系统用可调谐激光器照明法布里-珀罗腔。由可调谐激光器发出的在时域分

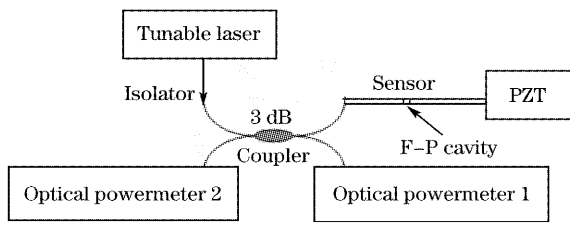


图 1 光纤法布里-珀罗腔传感器双波长解调系统
Fig. 1 Dual-wavelength demodulating system of the fiber F-P cavity sensor

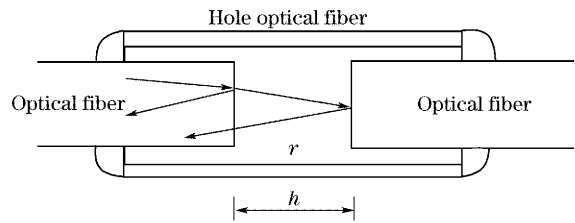


图 2 法布里-珀罗腔传感头多光束干涉模型

离的两个波长分别通过 $2 \times 2(50:50)$ 耦合器分成功率相等的两束光,一束作为入射光进入传感器头,另一束由光功率计 1 接收测得入射光强;传感器的反射光再次通过耦合器由光功率计 2 接收测得反射光强。腔长变化由压电陶瓷(PZT)拉伸实现。

2.2 双波长光纤传感器腔长解调的基本原理

图 1 中,两个时刻得到的四路光信号包含了光源的光强波动、传感光路的扰动、探测器的漂移、光纤传输损耗的变化,不可能测到反射率的绝对数值。本系统采用了在时域分离的双波长和双光路相结合的方法,对这四路光信号进行处理就可以最终抵消各种干扰,得到受腔长调制的信号。这种方案结合了双光路补偿方法和双波长补偿方法的优点,既能补偿光路扰动,也能补偿光源及探测器的波动。

定义相对反射率 R 为两光功率计测得的光功率的比值:

$$R(h, \lambda_1) = a(\lambda_1) \left[\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} P(\lambda) \alpha^2 M(\lambda, h) S_1(\lambda) L_f L_b d\lambda \right] / \left[\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} P(\lambda) (1 - \alpha) S_2(\lambda) L_f d\lambda \right] = a(\lambda_1) \frac{\alpha^2 L_b S_1}{(1 - \alpha) S_2} \int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} M(\lambda, h) d\lambda, \quad (1)$$

$$R(h, \lambda_2) = a(\lambda_2) \frac{\alpha^2 L_b S_1}{(1 - \alpha) S_2} \int_{\lambda_2 - \delta\lambda_2/2}^{\lambda_2 + \delta\lambda_2/2} M(\lambda, h) d\lambda, \quad (2)$$

其中 λ_1, λ_2 是可调谐激光器在扫描时获得的工作波长, $\delta\lambda_1$ 和 $\delta\lambda_2$ 分别是它们的带宽; $a(\lambda_1)$ 和 $a(\lambda_2)$ 分别表示光学系统对应 λ_1, λ_2 引起的任何光损耗; $P(\lambda)$ 是可调谐激光器对应波长 λ 发出的光强; $S_1(\lambda), S_2(\lambda)$ 分别为光功率计 1 和 2 的光谱响应,假设在波长范围内光谱响应不随波长变化; α 是耦合器的分光比; L_f, L_b 分别是耦合器上正反两方向的附加损耗; $M(\lambda, h)$ 为法布里-珀罗腔反射式传感器随波长和腔长变化的反射率,腔两端面反射率及间距分别为 r 及 h (如图 2), 根据多光束干涉理论, 该法

布里-珀罗腔反射率由下列式子给出^[1]:

$$M(\lambda, h) = \frac{2r - 2r \cos[(2\pi/\lambda) \cdot 2h]}{1 + r^2 - 2r \cos[(2\pi/\lambda) \cdot 2h]}. \quad (3)$$

双波长法就是利用在一定的腔长变化范围内两个不同波长 λ_1 和 λ_2 的相对反射率的比值与腔长变化的单值线性关系确定腔长的变化。相对反射率的比值 $I(h, \lambda)$ 由下式算出^[8,9]

$$I(h, \lambda) = R(\lambda_1) / [R(\lambda_1) + R(\lambda_2)], \quad (4)$$

其中 $R(\lambda_1)$ 和 $R(\lambda_2)$ 是在波长 λ_1 和 λ_2 测得的相对反射率,假设由光学系统引起的任何光损耗 $a(\lambda)$ (包

括光纤间的耦合损耗)在波长范围内与波长无关, (1)式、(2)式代入(4)式并化简得:

$$I(h, \lambda) = \left[\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} M(\lambda, h) d\lambda \right] / \left[\int_{\lambda_1 - \delta\lambda_1/2}^{\lambda_1 + \delta\lambda_1/2} M(\lambda, h) d\lambda + \int_{\lambda_2 - \delta\lambda_2/2}^{\lambda_2 + \delta\lambda_2/2} M(\lambda, h) d\lambda \right], \quad (5)$$

利用(3)式、(5)式可绘出比值 $I(h) - h$ 的关系曲线, 如图 3 所示。

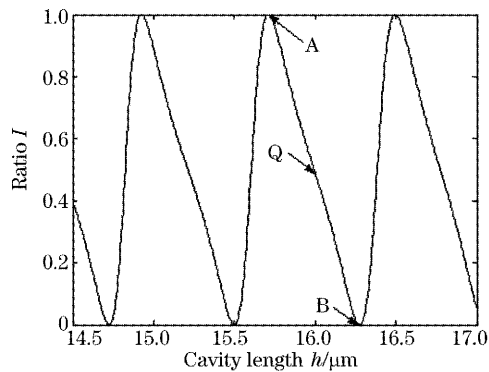


图 3 输出特性曲线

Fig. 3 Ratio $I(h)$ versus cavity length
($\lambda_1 = 1550 \text{ nm}$, $\lambda = 20 \text{ nm}$, $\delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$)

从(5)式可以看出当输入光波长 λ_1, λ_2 恒定时, 由于法布里-珀罗腔长的变化改变了相干光的光程差, 引起法布里-珀罗传感器输出光强的变化, 进而引起相对反射率的比值 $I(h, \lambda_1, \lambda_2)$ 的变化(如图 3 所示)。当法布里-珀罗腔腔长 $h = n\lambda_1/2$ ($n = 1, 2, \dots$) 时, 比值达到最小值(B点), 当法布里-珀罗腔腔长 $h = n\lambda_2/2$ ($n = 1, 2, \dots$) 时, 比值达到最大值(A点), 此时信号是非线性的, 系统的灵敏度也最低, 而在 Q 点(信号斜率最大的点), 信号的线性最好, 灵敏度也最高。当传感器受到外界扰动很小时[腔长变化范围 h 满足关系: $n\lambda_2/2 < h < (n+1)\lambda_2/2$, $n = 1, 2, \dots$]时, 比值信号与传感器腔长存在一定线性关系, 这时通过测量计算比值的大小就可以反推出腔长微位移。实际应用中当腔长变化范围很小时, 通过测量计算得比值 I 后代入用最小二乘法拟合得到的校正公式就可以得到腔长 h 。输出光强比值的变化是以光波长 λ 为基准, 故它对腔长的变化极其灵敏, 因而可将光纤法布里-珀罗腔视作一个高灵敏度的光纤传感器。

3 系统参量的最佳设计

本文主要从腔长测量曲线的动态范围、线性、灵敏度、相对灵敏度等方面考虑^[10], 确定出两个波长

λ_1, λ_2 以及线宽 $\delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 的最佳范围。从(3)式、(5)式可以看出, 比值 I 与腔长 h 及参量 $\lambda_1, \lambda_2, \delta\lambda_1, \delta\lambda_2$ 均有关。设 $\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda, \delta\lambda_1 = \delta\lambda_2 = \delta\lambda$, 其中 $\Delta\lambda$ 为两波长的间隔, $\delta\lambda$ 为线宽。数值模拟中涉及的各个物理量取值为: 测量范围 $15.68 \sim 16.18 \mu\text{m}$, 法布里-珀罗腔初始腔长 $h_0 = 15.68 \mu\text{m}$, 腔两端面反射率 $r = 0.037$ 。

3.1 λ_1 的选取

图 4 所示的是 $I(h)$ 与 h 的关系图, 各条曲线分别对应不同的参量 λ_1 。根据几个常用的激光光源波长, 选择了 $650 \text{ nm}, 850 \text{ nm}, 1310 \text{ nm}, 1550 \text{ nm}$ 以及 2000 nm 。 $I(h) - h$ 曲线良好的线性说明了在测量范围内灵敏度均匀、精度一致性好, 如果后接模拟仪表, 则仪表的刻度均匀, 计算与处理十分方便。考察该图在 $15.68 \sim 16.18 \mu\text{m}$ 范围内的线性, 可以选择 1550 nm 附近的波长。

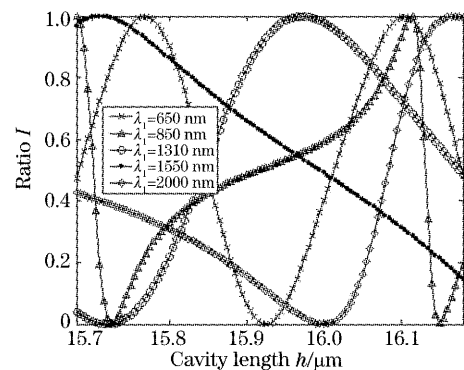


图 4 $I(h) - h$ 关系曲线

Fig. 4 Ratio $I(h)$ versus cavity length h
($\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$, $\delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$)

这里定义灵敏度 $S = \Delta I(h) / \Delta h$, 表示腔长变化 $1 \mu\text{m}$ 时 $I(h)$ 的变化量。图 5 所示为 λ_1 分别为 $1520 \text{ nm}, 1530 \text{ nm}, 1545 \text{ nm}, 1550 \text{ nm}, 1580 \text{ nm}$ 时的灵敏度曲线。设采集数据用的是 12 位 A/D 转换器(分辨力 2.4×10^{-4}), 若要求可分辨的最小腔长变化 $10^{-3} \mu\text{m}$, 则灵敏度 S 不应低于 $0.5 \mu\text{m}^{-1}$ 。

观察图 5, 在 $1520 \sim 1580 \text{ nm}$ 范围内, 对于 $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$, 比较灵敏度的大小和平坦程度, 选择 λ_1 在 1545 nm 附近。

3.2 $\Delta\lambda$ 的选取

$\Delta\lambda$ 的选择也就是 λ_2 的选择, 取 $\lambda_1 = 1546 \text{ nm}$,

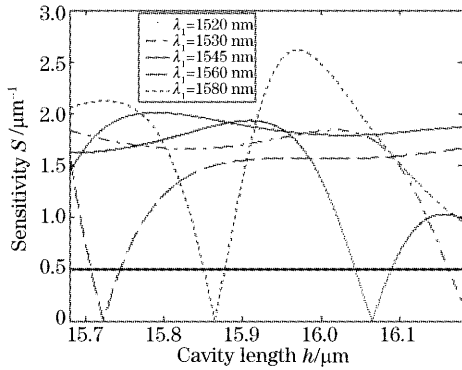


图 5 灵敏度 $S(h)$ — h 关系曲线

Fig. 5 Sensitivity $S(h)$ versus cavity length h
($\Delta\lambda=20$ nm, $\delta\lambda=0.1$ nm)

以 h 为自变量, $\Delta\lambda$ 为参变量, $I(\Delta\lambda, h)$ — h 的关系曲线如图 6 所示。观察腔长在 15.68~16.18 μm 内的线性, 选择两个工作波长间隔 $\Delta\lambda$ 在 21 nm 附近。

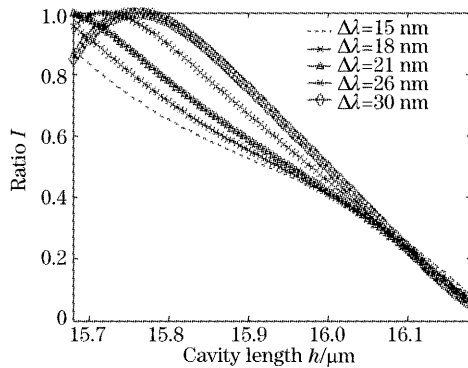


图 6 不同参变量 $\Delta\lambda$ 的 $I(h)$ — h 关系曲线

Fig. 6 Ratio $I(h)$ versus cavity length h with different $\Delta\lambda$
($\lambda_1=1546$ nm, $\delta\lambda=0.1$ nm)

取 $\lambda_1=1546$ nm, 以 h 为自变量, $\Delta\lambda$ 为参变量, $S(\Delta\lambda, h)$ — h 的关系曲线如图 7 所示, 同 3.1 节取灵敏度阈值为 $0.5/\mu\text{m}$ 。观察图 7 对应不同 $\Delta\lambda$ 的灵敏度曲线的大小和平坦度, 选择两个工作波长间隔

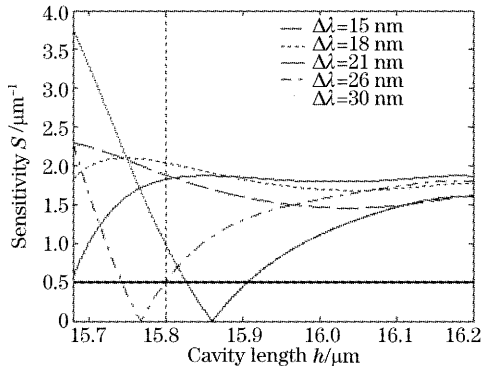


图 7 不同参变量 $\Delta\lambda$ 下的 $S(h)$ — h 关系曲线

Fig. 7 Ratio $S(h)$ versus cavity length h with different $\Delta\lambda$
($\lambda_1=1546$ nm, $\delta\lambda=0.1$ nm)

$\Delta\lambda$ 为 21 nm, 此时的灵敏度在腔长为 15.8~16.2 μm 内较稳定, 即这段的线性较好。

综合以上分析, 选择实用化光纤法布里-珀罗腔传感系统的两个工作波长间隔 $\Delta\lambda$ 为 21 nm。

3.3 带宽 $\delta\lambda$ 的选取

带宽 $\delta\lambda$ 也是重要的参量。取 $\lambda_1=1546$ nm, $\Delta\lambda=21$ nm, 如图 8 是 $I(\delta\lambda, h)$ — h 关系曲线, 图 9 是灵敏度 $S(h)$ — h 曲线, $\delta\lambda$ 为参变量。

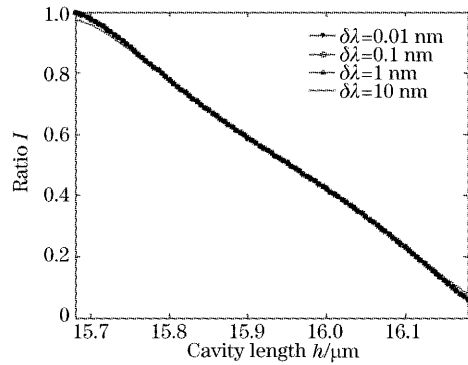


图 8 不同参变量 $\delta\lambda$ 下的比值 $I(\delta\lambda)$ — h 关系曲线 A

Fig. 8 Ratio I versus h with different $\delta\lambda$
($\lambda_1=1540$ nm, $\Delta\lambda=20$ nm)

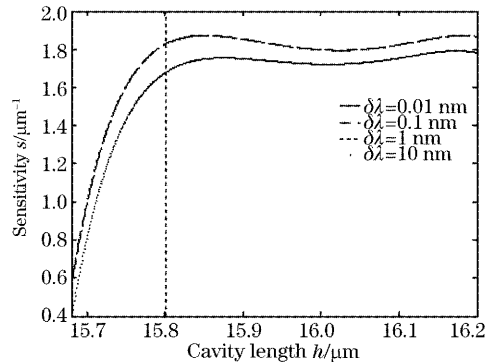


图 9 不同参变量 $\delta\lambda$ 下的灵敏度 $S(h)$ — h 关系曲线

Fig. 9 Sensitivity S versus h with different $\delta\lambda$
($\lambda_1=1540$ nm, $\Delta\lambda=20$ nm)

可见 $\delta\lambda$ 从 0.01 nm 到 1 nm 变化对 $I(h)$ 曲线没有明显影响。而可调谐激光器的线宽约 0.1 nm, 因此就本系统而言, $\delta\lambda$ 取 0.1 nm。

观察图 9, 腔长变化范围在 15.8~16.2 μm 时灵敏度较稳定, 线性也较好。

通过上面的分析, 最后选择 λ_1 为 1546 nm, $\Delta\lambda$ 为 21 nm, $\delta\lambda$ 取 0.1 nm。

4 双波长法法布里-珀罗腔腔长解调实验

实验系统如图 1 所示。其中, 可调谐激光器采

用美国安捷伦公司的 Agilent 81949A; 光功率计 1 采用日本安藤公司 AQ2160-01; 为了能在测反射光功率时同时观测到反射光谱, 实验中用光谱分析仪代替了光功率计 2; 压电陶瓷采用美国 PI 公司的, 位移精度 1 nm。将一初始腔长 $h_0 = 15.68 \mu\text{m}$ 的光纤法布里-珀罗传感器一端夹持在固定台上, 另一端夹持在压电陶瓷上。当压电陶瓷拉伸传感器时, 法布里-珀罗腔也被拉伸。

当压电陶瓷以 $0.5 \mu\text{m}$ 的步长从 $2.5 \mu\text{m}$ 到 $6 \mu\text{m}$ 拉伸时, 对应法布里-珀罗腔被拉伸 $0.24 \mu\text{m}$ 到 $0.25 \mu\text{m}$, 即腔长为 $15.92 \mu\text{m}$ 到 $15.93 \mu\text{m}$, 测得的一组相对反射率如图 10 所示。

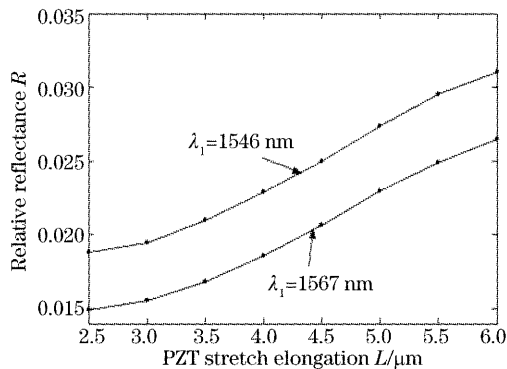


图 10 两不同波长($\lambda_1 = 1546 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1567 \text{ nm}$)对应的相对反射率 R 与压电陶瓷拉伸量 L 的关系曲线

Fig. 10 Relative reflectance R as a function of PZT stretch elongation L at two wavelengths ($\lambda_1 = 1546 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 1567 \text{ nm}$)

从图 10 可以看出虽然两波长对应的数据稍有不同, 但都显示出关于腔长的稳定的近乎线性的变化。

图 11 表示的是在传感器在两个波长测量的相对反射率比, 通过最小二乘法进行线性拟合, 得出校

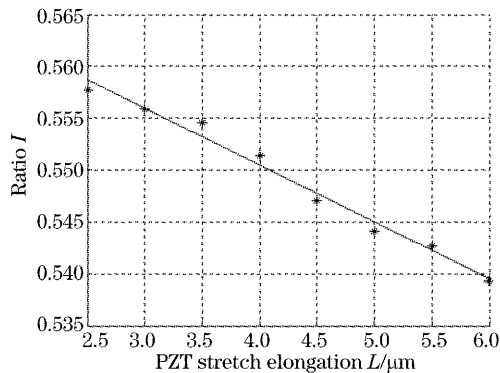


图 11 比值 I 与压电陶瓷拉伸量 L 的关系曲线

Fig. 11 The ratio I as a function of PZT stretch elongation L

($\lambda_1 = 1546 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 1567 \text{ nm}$)

正公式(6), 线性拟合度达到 98.35%。

$$I = -0.0055L + 0.5724. \quad (6)$$

从图 11 中可以看出, 利用双波长法对光纤法布里-珀罗传感器腔长解调在法布里-珀罗腔被拉伸 $0.24 \mu\text{m}$ 到 $0.25 \mu\text{m}$ 范围内具有良好的线性关系。

5 结 论

光纤法布里-珀罗腔传感器腔长的双波长双通道解调方法采用了合理的光学结构以及波长优化设计, 不受光路扰动和光源波动的影响, 可分辨的最小腔长变化小于 1 nm, 可以获得很高的灵敏度、精度和稳定性。

参 考 文 献

- Liao Yanbiao. The promotion of OFS to the development of industry[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, 16(5): 1~6 (in Chinese)
- 廖延彪. 我国光纤传感技术现状和展望[J]. *光电子技术与信息*, 2003, 16(5): 1~6
- Zhigang Li, Zhenhui Du, Baoguang Wang. Optical fiber temperature sensor based on wavelength-dependent detection[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, 2(4): 220~222
- Matthew J. Gander. Embedded micromachined fiber-optic Fabry-Perot pressure sensors in aerodynamics applications[J]. *IEEE Sensors J.*, 2003, 3(1): 102~107
- Chen Weimin, Wang Ning, Zhu Yong *et al.*. Experimental study on the affection of Gaussian spectrum of light source on the optical fiber F-P strain sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, 30(1): 88~92 (in Chinese)
- 陈伟民, 王宁, 朱永等. 实际光源光谱分布对相位型光纤法-珀应变传感器的影响及其实验研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(1): 88~92
- Jiang Jian, Rao Yunjiang, Ran Zengling *et al.*. A novel extrinsic fiber-optic Fabry-optic Fabry-Perot interferometric sensing system based on optical amplification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(2): 183~186 (in Chinese)
- 江建, 饶云江, 冉曾令等. 光放大外腔式光纤法布里-珀罗干涉传感系统[J]. *光学学报*, 2004, 24(2): 183~186
- Jie Zhou, Samhita Dasgupta, Hiroshi Kobayashi *et al.*. Optically interrogated MEMS pressure sensors for propulsion applications[J]. *Opt. Engng.*, 2001, 40(4): 598~604
- Jin Xiaodan, Liao Yanbiao. Compensation technique of intensity modulated optical fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, 16(7): 1002~1005 (in Chinese)
- 金晓丹, 廖延彪. 强度调制型光纤传感器的补偿技术[J]. *光学学报*, 1996, 16(7): 1002~1005
- Weizhuo Li, Don C. Abeysinghe, Joseph T. Boyd. Wavelength multiplexing of microelectromechanical system pressure and temperature sensors using fiber Bragg gratings and arrayed waveguide gratings[J]. *Opt. Engng.*, 2003, 42(2): 431~438
- Roger A. Wolthuis, Gordon L. Mitchell, Elric Saaski *et al.*. Development of medical pressure and temperature sensors employing optical spectrum modulation[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1991, 38(10): 974~981
- Xin Jun, Feng Qibo, Lin Tiesheng *et al.*. Wavelength optimization of a high-precision noncontact dual-wavelength fiber-optic pyrometer[J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, A26(2): 121~126 (in Chinese)
- 辛军, 冯其波, 林铁生等. 高精度及双波长非接触光纤高温计的波长最优设计[J]. *中国激光*, 1999, A26(2): 121~126