

文章编号:1004-2474(2014)01-0035-03

# 高精度双波长光纤 F-P 传感系统正交特性研究

单宁<sup>1</sup>, 刘霞<sup>2</sup>

(1. 武警工程大学 装备工程学院, 陕西 西安 710086; 2. 西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**针对光纤 Fabry-Perot (F-P) 传感器在实际应用中, 受外界环境干扰, 造成输出精度较低, 提出了一种采用波分复用器 (DWDM) 输出两路正交信号的双波长稳定系统。基于微分进化 (DE) 算法建立了光纤 F-P 传感系统的双波长稳定优化模型, 设计了一高正交精度传感系统, 构建了传感系统正交实验方案, 研究了其正交输出特性和正交误差。结果表明, DE 算法运行速度快, 能在较短运行时间内得到全局最优解, 可很好的用于光纤 F-P 传感系统结构优化, 误差小于  $10^{-3}$ ; 设计的传感系统具有较高的正交输出精度, 当腔长变化为  $-1 \sim 1 \mu\text{m}$  时, 两路工作波长相位差接近  $\pi/2$ , 传感系统正交误差均小于 6%, 具有良好的稳定性和抗干扰能力, 能满足实际需求。

**关键词:**双波长技术; 光纤; Fabry-Perot 干涉仪; 微分进化算法; 结构优化

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## Study on the Orthogonal Characteristic of Double Wavelength Optical Fiber F-P Sensing System with High Precision

SHAN Ning<sup>1</sup>, LIU Xia<sup>2</sup>

(1. College of Equipment Engineering, Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China;

2. College of Electromechanical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Aiming at the low output precision and easy-to-interfere of the optical fiber Fabry-Perot (F-P) sensor in the applications, a dual wavelength stabilization system in which two orthogonal signals are outputted by DWDM is proposed. The stable optimization model of dual wavelength optical fiber F-P sensing system was established based on DE algorithm. A higher orthogonal precision sensing system was designed and the orthogonal experiment scheme of sensing system was built. The orthogonal output characteristics and orthogonal error of sensing system were studied. The results show that the differential evolution (DE) algorithm is fast in running and the global optimal solution can be attained in shorter run time. The error is less than  $10^{-3}$ . It can be used for the structural optimization design of optical fiber F-P sensor. The designed sensing system has higher orthogonal output precision. When the length of F-P cavity changes from  $-1 \sim 1 \mu\text{m}$ , the orthogonal error of sensing system is all less than 6% and the phase difference of two light waves is approaching to  $\pi/2$ . It has high stability and anti-interference ability, and can meet the practical requirements.

**Key words:** dual-wavelength technology; optical fibers; Fabry-Perot interferometers; differential evolution algorithm; structural optimization

### 0 引言

光纤传感器是近年来迅速发展起来的一种新型传感器。它具有抗电磁干扰, 电绝缘性好, 灵敏度高, 质量轻及能在恶劣环境下工作等一系列优点, 在航空航天、汽车工业、桥梁、建筑、医疗器械等领域具有广阔的应用前景。

光纤 Fabry-Perot (F-P) 传感器采用单根光纤利用多束光干涉来检测待测量, 具有结构简单, 可靠性好, 体积小, 灵敏度高等优点, 在温度、应力、声波、振动、加速度等多种物理量的测量中得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。为使光纤 F-P 传感器获取较高灵敏度, 必须保持其工作点在正交点。但在实际应用中, 由于受

收稿日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51145008)

作者简介: 单宁 (1980-), 男, 山东东明人, 副教授, 博士 (博士后), 主要从事激光超声检测技术及传感器设计的研究。E-mail: ssnn3193@163.com.

环境干扰和加工误差影响,传感器工作点易偏离正交点,导致输出信号衰减,信噪比降低。针对这一问题,产生各种工作点稳定技术,目前常采用可调谐激光光源技术<sup>[4-5]</sup>与双波长稳定技术<sup>[6-7]</sup>两种传感器工作点稳定方法。可调谐激光光源技术是通过监测外界干扰信号进行闭环控制来保持传感器工作点的正交稳定状态,对外界环境敏感,抗干扰能力较差,且系统构成复杂,操作不易,经济成本高。双波长稳定技术是通过合理设计传感系统两路输出光束的中心波长,使两路输出光束间的相位处于正交状态,这样当一路信号处于饱和时,而另一路则处于线性区,从而保证传感器工作点处于最大灵敏区。双波长稳定技术实现方式简单灵活,成本低,灵敏度较高,易操作,故很适合于光纤 F-P 传感器的工作点稳定。通常双波长稳定技术在实现过程中,多采用近似法得到两路工作波长,精度较低,难以实现双波长稳定技术的稳定优越性<sup>[8]</sup>,降低了传感器的实用性。

本文构建双波长光纤 F-P 传感系统方案,建立传感系统微分进化算法(DE 算法)优化模型,设计了一正交高精度的光纤 F-P 传感系统,研究其正交输出特性和正交误差,建立传感系统的正交解调实验装置,实验验证了该传感系统的正交输出性能。

### 1 双波长稳定系统建立

本文建立的双波长光纤 F-P 传感系统如图 1 所示。放大自辐射(ASE)宽带光源输出具有一定波长范围的光波,1×2 光纤耦合器将输入光波经传导光纤传输到 F-P 腔,光被信号调制后,携带外界信息的干涉光再次通过光纤耦合器传输到 1×2 波分复用器(1×2DWDW)中,波分复用器按设定的波长滤出两路光波,输出两路正交光信号,然后经光电探测器转换成电信号。

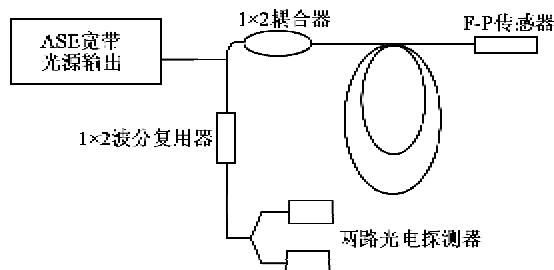


图1 双波长光纤 F-P 传感系统

### 2 传感系统 DE 算法优化模型

根据光干涉原理,F-P 腔长( $d$ )与两路光相位 $\theta$ 的关系有<sup>[9]</sup>

$$\theta_m = (4\pi nd) / \lambda_m \quad m=1,2 \quad (1)$$

式中: $\lambda_m$ 为光波长; $n$ 为 F-P 腔折射率。本文传感系统使用 1×2DWDW 输出两路光,在两路输出光近似为单色光条件下,与中心波长对应的两路输出光的相位差为

$$\Delta\theta = 4\pi nd \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (2)$$

由式(2)可知,为了使两路输出光满足正交,只需两路输出光的相位差等于 $\pi/2$ 。为此建立数学模型为

$$\begin{aligned} \min |f(\lambda_1, \lambda_2, d)| &= \min \left| 4\pi nd \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) - \frac{\pi}{2} \right| \\ d_{\min} &\leq d \leq d_{\max}; \lambda_{\min} \leq \lambda_1 \leq \lambda_{\max}; \\ \lambda_{\min} &\leq \lambda_2 \leq \lambda_{\max}; 0 < \lambda_2 - \lambda_1 < \frac{\lambda_1^2}{2d} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $n \approx 1$ ; $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$ 分别为 F-P 腔设计要求的最小与最大长度; $\lambda_{\min}$ 、 $\lambda_{\max}$ 分别为光源光谱范围内的最小和最大波长。

DE 算法可实现并行计算,全局搜索能力强,鲁棒性好,收敛速度快,能更简单、有效地解决复杂优化问题,故广泛应用于优化领域<sup>[10-13]</sup>。但传统 DE 算法一般适用于求解无约束规划,因此采用罚函数法将式(3)转化为无约束问题,即

$$\begin{aligned} F(\lambda_1, \lambda_2, d, M_t) &= |f(\lambda_1, \lambda_2, d)| + \\ M_t \sum_{e=1}^2 &\left[ \frac{G_e(\lambda_1, \lambda_2, d) + |G_e(\lambda_1, \lambda_2, d)|}{2} \right]^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $M_{t+1} = 0.1(t+1) + M_t$ 为惩罚因子; $G_e$ 为罚函数, $e=1,2$ 有

$$\begin{cases} G_1(\lambda_1, \lambda_2, d) = \lambda_1 - \lambda_2 \\ G_2(\lambda_1, \lambda_2, d) = \lambda_2 - \lambda_1 - \frac{\lambda_1^2}{2d} \end{cases} \quad (5)$$

此时,对于式(4)则可按 DE 算法的流程进行优化求解。

### 3 仿真与实验研究

采用 DE 算法对双波长光纤 F-P 传感系统进行结构优化设计,DE 算法的控制参数分别设置为:种群规模 $N=30$ ,交叉因子 $F=0.5$ ,交叉概率 $P_c=0.5$ ,惩罚因子初值 $M_0=5$ ;最大迭代次数为 100 次。实验中使用的 ASE 宽带光源波长范围为 1 525~1 610 nm,假设 F-P 腔设计要求的长度范围为 15~

50  $\mu\text{m}$ 。优化结果如表 1 所示。根据实际加工精度和 ITU-T 制定的 DWDM 波长选取标准,取  $d=20\ 500\ \text{nm}$ ,  $\lambda_1=1\ 559.39\ \text{nm}$ ,  $\lambda_2=1\ 574.46\ \text{nm}$ 。当 F-P 腔长变化为  $-1\sim 1\ \mu\text{m}$  时, DWDM 输出的两路正交光信号如图 2 所示, 正交误差如图 3 所示。

表 1 优化结果

参数	$d/\text{nm}$	$\lambda_1/\text{nm}$	$\lambda_2/\text{nm}$	运算时间/s	目标值
优化结果	20 513.6	1 559.5	1 574.46	0.741	0.000 2

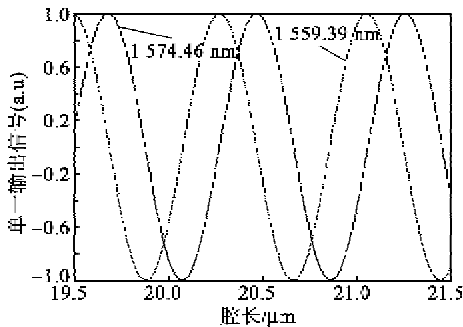


图 2 两路正交输出信号

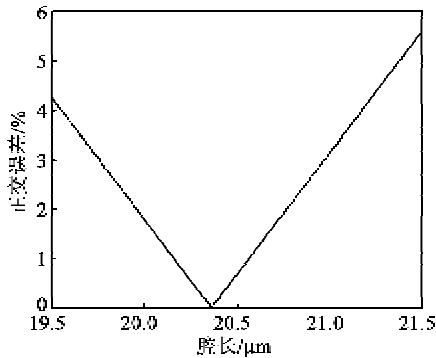


图 3 正交误差

为验证设计的传感系统正交输出性能,建立双波长光纤 F-P 传感系统正交实验系统装置,如图 4 所示。将 F-P 探头粘贴在柱状压电晶体表面,二者轴向方向一致。在压电晶体两端加上驱动电压,使压电晶体做轴向伸缩变化。由于 F-P 探头是粘贴在压电晶体表面,故 F-P 腔的变化与压电晶体的变化同步。分别测试两路光电探测器的输出信号,图 5 为 F-P 腔长拉伸、压缩约  $1\ \mu\text{m}$  时两路光电探测器的正交输出结果。

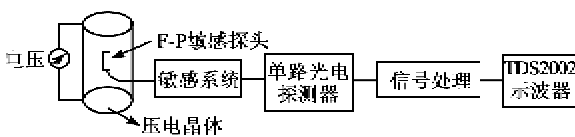


图 4 正交实验系统

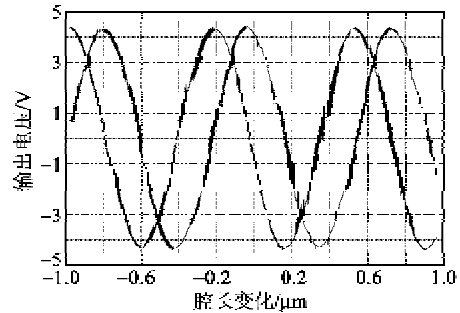


图 5 两路正交输出结果

#### 4 结束语

本文针对光纤 F-P 传感器工作点易偏离问题,构建了双波长光纤 F-P 传感系统方案,建立了传感系统 DE 算法优化模型,设计了一正交高精度的光纤 F-P 传感系统,研究了其正交输出特性和正交误差,建立了传感系统的正交解调实验装置,实验验证了该传感系统的正交输出性能。结果表明,DE 算法充分利用了设计资源,运行速度快,效率高,能很好的用于光纤 F-P 传感系统结构优化,误差小于  $10^{-3}$ ;设计的传感系统具有较高的正交输出精度,当腔长变化为  $-1\sim 1\ \mu\text{m}$  时,传感系统正交误差均小于 6%,能满足实际需求,具有良好的稳定性和抗干扰能力。

#### 参考文献:

- [1] YU Qingxu, WANG Xiaona, SONG Shide, et al. Fiber optical pressure sensor system based on extrinsic F-P interferometer for high temperature oil well measurement[J]. Journal of optoelectronics Laser, 2007, 18 (3):299-302.
- [2] ZHAO Jianghai, SHI Yikai, SHAN Ning, et al. Stabilized fiber-optic extrinsic Fabry-Perot sensor system for acoustic emission measurement[J]. Optics and Laser Technology, 2008, 40(6):874-880.
- [3] SHAN Ning, SHI Yikai, ZHAO Jianghai, et al. Design and application study of optical fiber Fabry-Perot sensing system for detecting ultrasonic waves[J]. Journal of optoelectronics Laser, 2008, 19(7):489-501.
- [4] KIM D H, KOO B Y, KIM C G, et al. Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system[J]. Smart Mater Struct, 2004, 13(3):593-598.
- [5] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENGSARKAR A M, et al. Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors[J]. Opt Lett, 1991, 16(4):273-275.

(下转第 41 页)