

用于强度解调型非本征法布里-珀罗腔 光纤传感器的光电转换卡

吕涛^{1,2} 李正佳² 夏丹青²

(¹ 中国地质大学数理学院, 湖北 武汉 430074; ² 华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要 利用双光路加参考臂的方法设计了运用于强度解调型非本征法布里-珀罗腔光纤传感器的新型光电转换卡, 以有效地抑制或消除光源和光路中其他有源及无源器件的不稳定性对传感器精度和稳定性的负面影响。在 26 °C ~ 28 °C 的环境温度条件下, 设计的光电转换卡短期不稳定性不大于 0.0702%, 测量精度好于 0.1%。

关键词 光纤光学; 光电转换卡; 光纤传感器; 非本征法布里-珀罗腔

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.080603

Photoelectric Conversion Card Applied in Intensity-Modulated Extrinsic Fabry-Perot Cavity Optical Fiber Sensor

Lü Tao^{1,2} Li Zhengjia² Xia Danqing²

¹ School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China
² Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Method of double optical paths with a reference arm is applied to design a novel photoelectric conversion card to restrain or eliminate the adverse influences induced by the instabilities of light source, other active and passive apparatuses. Under the temperature of 26 °C ~ 28 °C, the short-term instability of less than 0.0702% and measurement precision of better than 0.1% are obtained.

Key words fiber optics; photoelectric conversion card; optical fiber sensor; extrinsic Fabry-Perot cavity

OCIS codes 060.2370; 120.2230; 120.3180

1 引言

相对于传统传感器而言, 非本征法布里-珀罗(F-P)腔光纤传感器具有体积小、灵敏度高、测量精度高、动态范围大、线性度好、不受电磁场干扰等优点, 成为最早在工程中应用的光纤传感器之一^[1~3]。F-P腔光纤传感器输出信号解调主要有强度解调与相位解调两种类型, 前者能进行绝对量的测量、具有快响应速度且只需要相对廉价的解调装置, 但是易受光源及其他元器件不稳定性影响, 精度不高且稳定性差; 而后者则基本不受光源及其他元器件不稳定性影响, 精度高且稳定性好, 目前应用较多, 但响应速度慢、解调装置昂贵^[4]。因此, 研制精度高、稳定性好的强度解调型光电转换卡具有重要意义。

本文利用双光路加参考臂的方法设计了新型的光电转换卡, 在保持强度解调型传感器优点的同时, 能有效地抑制或消除光源及其他元器件不稳定性的影响, 有助于传感器的实用化。

2 理论分析与光电转换卡设计

根据多光束干涉的原理, 光学 F-P 腔的反射干涉光强 I_r 和输入光强 I_0 关系为^[5]

收稿日期: 2011-01-12; 收到修改稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家 973 计划(2011CB710606)国家自然科学基金青年基金(61008054)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 吕涛(1977—), 男, 讲师, 主要从事光纤传感技术及激光医学等方面的研究。E-mail: lvtaohn@sina.com

$$I_r = \frac{2RI_0(1 - \cos \varphi)}{1 + R^2 - 2R\cos \varphi}, \quad (1)$$

式中 R 为腔端面反射率, $\varphi = 4\pi L/\lambda$, L 为腔长, λ 为入射光波长。当外界应变变量作用于 F-P 腔时, 其腔长发生微变化, 从而使得输出反射干涉光强发生变化, 在传感器的线性工作区内, 精确量化输出反射干涉光强即可实现对应变变量的测量。但是 I_r 与光源、光纤、探测器、耦合器等各个环节都有关, 光纤摆放位置变化、探测器老化、光源功率和中心波长波动都会使 I_r 出现波动。

光电转换卡是将光纤传感器输出光信号转换为电信号并对其进行计算和必要优化, 随后将采集和优化的信号传输给上位机(工业控制机)的功能模块(板卡)。采用了双光路加参考臂的方法设计了新型光电转换卡, 其结构如图 1 所示。设计采用双光路检测, 一路检测参考光(不参与动态响应), 一路检测传感器动态信号光。设参考光强度 I_{r1} 和信号光强度 I_{r2} 分别为

$$I_{r1} = \alpha I_0, \quad (2)$$

$$I_{r2} = \frac{2\beta R I_0(1 - \cos \varphi)}{1 + R^2 - 2R\cos \varphi}, \quad (3)$$

式中 α 和 β 均为与使用的耦合器分光比及光能量损耗有关的比例系数。(3)式与(2)式之比值

$$\frac{I_{r2}}{I_{r1}} = \frac{2\beta R(1 - \cos \varphi)}{\alpha(1 + R^2 - 2R\cos \varphi)}, \quad (4)$$

(4)式与 I_0 变化无关, 可有效抑制或消除光源及其他元器件不稳定性对 F-P 腔光纤传感器精度和稳定性的影响。

为使参考光检测通道与信号光检测通道性能一致, 应尽量使检测光功率与信号光的满量程功率相当, 使两通道的放大量、非线性失真、失调、噪声电压也基本相当。通过光电转换、比例运算可消除电路、光源、光路模块等外界因素带来的负面影响。在图 1 所示结构中, 高稳定性光源输出光经光路模块分为两路, 一路输入到光探测器(PD)1 进行光电转换, 转换后的电信号进入前置放大器 1 进行放大, 然后进入 A/D 转换器。另一路路由光纤传输至传感器, 传感器返回的干涉光信号进入光探测器 2, 转换后的电信号进入前置放大器 2, 随后进入 A/D 转换器。两路信号经 16 位 A/D 转换后由单片机完成数据采集并进行除法运算, 处理后的数据通过串口传输至主机。

光探测器是光电转换卡中重要的器件之一, 它将光信号转换成电流(电压)信号并输送给前置放大器进行信号处理。光探测器的基本要求有: 1) 灵敏度高, 在实际应用中光纤传感器传来的信号比较微弱, 输出的光功率在纳瓦级, 所以光探测器灵敏度要尽可能地高; 2) 响应速度快, 光电转换时延迟要小, 以免影响动态性能; 3) 噪声小, 因为光检测器是在极微弱的信号条件下工作, 又处于系统的最前端, 要特别要求噪声不能过大, 否则会造成信号的信噪比下降, 影响电路的测量精度和产生信号失真; 4) 稳定可靠, 要求检测器的主要性能不受外界环境变化影响, 以提高系统的稳定性和可靠性。光探测器的选用原则为: 1) 暗电流 $0.08 \sim 0.09 \text{ nA}$; 2) 响应度 $0.80 \sim 0.85 \text{ A/W}$; 3) 回波损耗 $45 \sim 50 \text{ dB}$; 4) 两只 PIN 管温度漂移小, 且其他性能参数尽量一致。

前置放大器对光探测器转换成的光电流(电压)值进行处理, 如图 2 所示。为提高光电转换卡的测量精度, 必须采用偏流 $I_B \leq 100 \text{ pA}$ 的放大器, 温度漂移 $V_{os} \leq 1 \sim 3 \mu\text{V}/\text{C}$ 。同时要求放大器具有良好工作性能, 如在 $0.1 \sim$

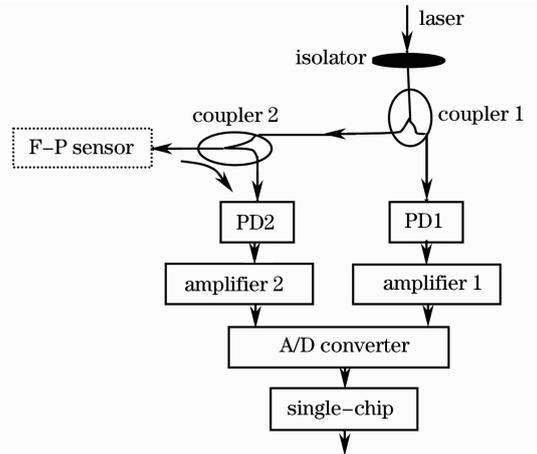


图 1 光电转换卡结构示意图

Fig. 1 Schematic of photoelectric conversion card

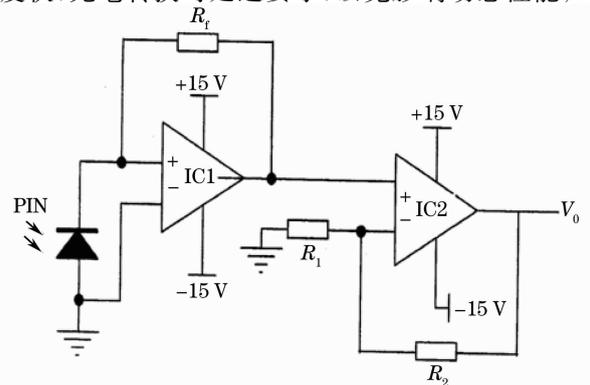


图 2 前置放大电路基本原理图

Fig. 2 Fundamental schematic of pre-amplification circuit

10 Hz 时噪声不大于 $2.5\sim 3\ \mu\text{V}$ 、灵敏度高和带宽足够。放大电路按两级设计,前级为互阻抗放大器(选用 AD 公司 AD795),后级为电压放大器。电路中所选的阻容电气元件精度误差不大于 0.01% ,温度漂移不大于 $0.1\times 10^{-6}\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。前置放大器要求低噪声、低失调、低偏置电流,为保证线性度,还要求高的开环增益和共模抑制比。采用 AD 公司生产的 AD795 的偏置技术要求和印刷线路板的布线工艺进行线路的设计。由于基流已达到皮安级,所以必须严格注意电路中潜在的泄漏路径。严格按照 AD 公司对 AD795 地线的走向、分布电容、去耦、接地等方面的技术要求进行印制线路板的优化设计。

A/D 转换的选择依据是量程和测量精度,可选择 16 位 A/D 转换器。A/D 器件的误差不能大于 2 个最低有效值(LSB),如检测精度为 $\pm 2\ \text{mm}$,总量程为 $9\ \text{m}$,其分辨力要求为 $2\ \text{mm}/9\ \text{m}\approx 0.02\%$ 。对于强度满量程为 $1\ \mu\text{W}$ 的光信号,设 PIN 管的响应度为 $0.85\ \text{A}/\text{W}$,则最大光电流为 $0.85\ \mu\text{A}$ 。取 A/D 转换器最大输入电压为 $10\ \text{V}$,则需光电转换系数为 $10\ \text{V}/0.85\ \mu\text{A}\approx 1.18\times 10^7\ \text{V}/\text{A}$ 。单片机选用 MCS51 系列,其主要功能是数据采集和对两通道信号进行除法运算。

光电转换卡自身的噪声和稳定性对系统的灵敏度或信噪比有着决定性的影响。在光电转换卡中,尽管使用性能良好的放大器,布线工艺合理,但是系统中仍可能会引入附加噪声。由于放大器的输出噪声主要由前置级决定,只要第一级放大器的增益很大,以后各级的噪声就可以忽略,为此选好前置放大电路极为重要。衡量光电转换系统性能的主要指标是接收灵敏度及动态范围,此外还要考虑快速响应时间、数据处理的能力、低功耗及价格等。这些要求有些是相互矛盾的,在设计时需折中处理。

3 实验及结果

在 $26\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度和外接光路不接传感器的条件下,放大自发辐射(ASE)光源(C+L 波段, $P_{\text{out}}=30.63\ \mu\text{W}$)输出光经过 $50\ \text{GHz}$ 滤波片和 $3\ \text{dB}$ 耦合器后分别进入信号光通道(光功率为 $112.73\ \text{nW}$)和参考光通道(光功率为 $116.0\ \text{nW}$),对光电转换卡的参考光通道和信号光通道的工作稳定性、测试精度进行实验。工作 24 h 后,通过计算机输出信息,如图 3 所示,信号光通道和参考光通道的长期非稳定度分别为 $3.981\ 2\%$ 和

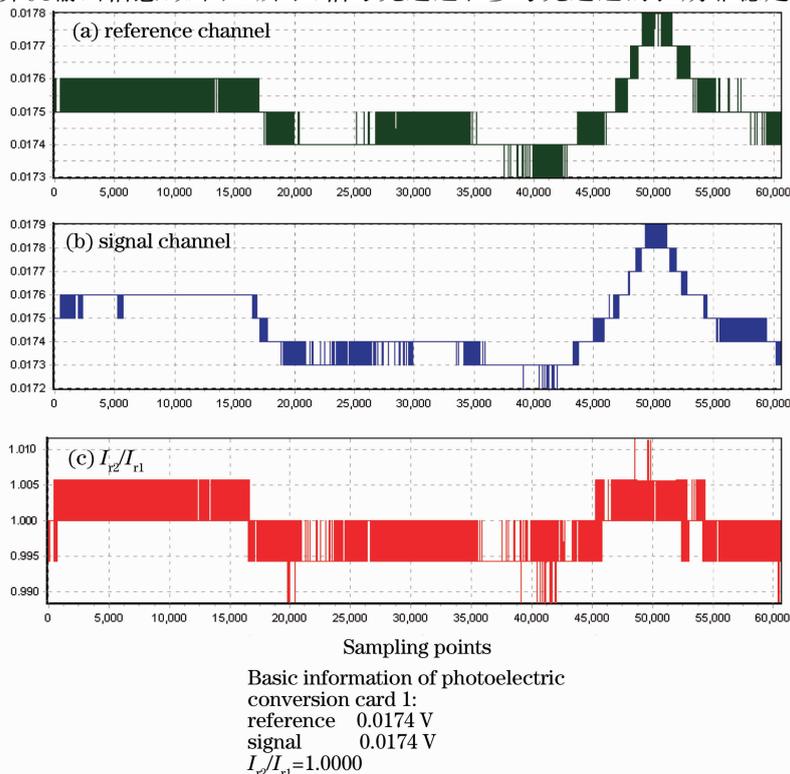


图 3 光电转换卡性能测试实验结果图

Fig. 3 Experimental results of the performances of the photoelectric conversion card

2.873 6%。通过对比可以看出,两通道的变化趋势基本一致,跟随性较好,但测试精度和稳定性能存在一定的差异。现场对测试环境温度的变化和光源输出功率的变化对应关系的监测表明,系统输出信号的变化与环境温度有着紧密的联系。外界温度变化 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光源的变化为2%~3%。

实验用传感器如图4所示,圆形恒弹性片中心部分与单模光纤端面构成一非本征F-P腔,光纤由陶瓷套管固定于传感器结构框架上。当外界应变(应力)均匀作用于圆形恒弹性片上并诱导其中心位置发生不同程度挠度(纳米级微位移)时,调制了F-P腔的初始腔长(约 $10\text{ }\mu\text{m}$),从而使得通过单模光纤输出的反射干涉光能量发生变化,通过光电转换卡后测量出对应电压值即可实现对被测应变量的精确量化。

接上如图4所示的传感器后^[6],利用空气压缩机对传感器施加足够的压力,传感器的动态实验结果如图5所示。图5与图3最显著的区别是实际的信号光和参考光被参考光通道和信号光通道分别检测。另外,图5中信号光为F-P腔输出的近似余弦特性曲线^[5],后端不规则曲线(P点以后部分)为传感器停止工作时的静态输出曲线。图中参考光非稳定性为0.0702%,与图3中参考光非稳定性相比,降低至原来的1/40左右,其主要原因是光源采取了自动温度控制(ATC)和自动功率控制(APC)措施使激光器输出功率更加稳定,同时在光源后端加上光隔离器(回波损耗为60 dB)抑制了反射光对光源功率稳定性的负面影响。

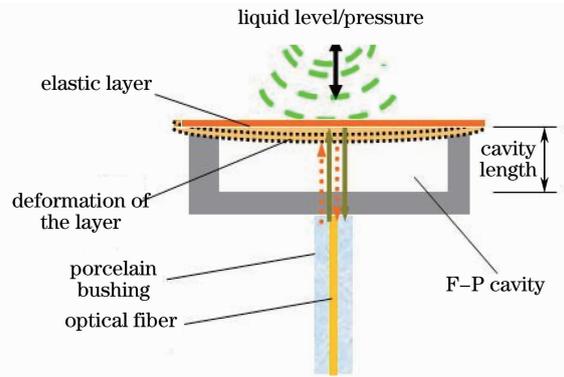
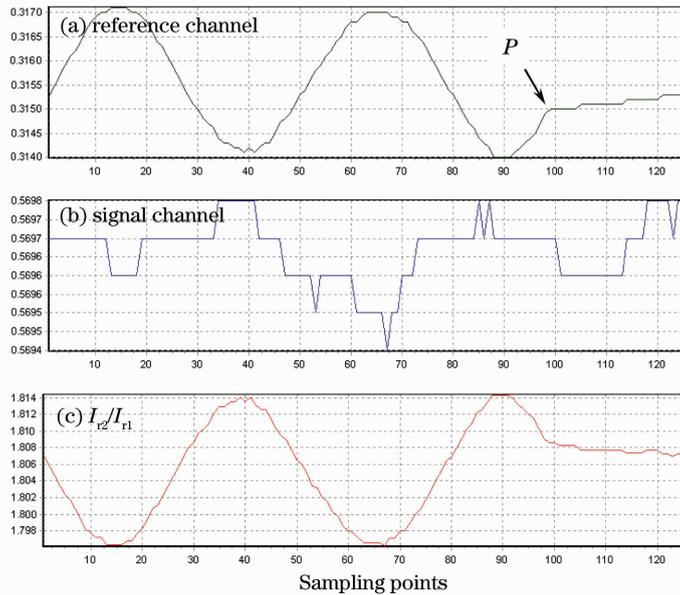


图4 F-P腔光纤液位(压力)传感器示意图

Fig.4 Schematic diagram of F-P cavity optical fiber liquid-level (pressure) sensor



Basic information of photoelectric conversion card 1:
reference 3.3153 V
signal 0.5698 V
 $I_s/I_r=1.8072$

图5 F-P光纤传感器动态测试结果图

Fig.5 Dynamic test results of F-P optical fiber sensor

由图3和图5可见,对传感器系统和光电转换卡加以优化后,参考光的稳定性很好,其变化幅值最大为0.0002 V,与信号光参考值0.3153 V相比为0.06343%。可见参考光相对信号光而言可以看作近似直线输出,参考光信号强度波动的负面影响在一定的传感器测量精度条件下可以忽略,所以实际参考光与信号光的比值结果曲线应与信号光曲线恰好反相位。实验结果与理论分析相吻合。

4 结 论

利用双光路加参考臂的方法设计的新型光电转换卡在 F-P 光纤传感系统优化的条件下基本上可满足传感器高精度和长期稳定性的要求。该方案的特点是数据采集的本地化,可避免长线传输对微弱信号的干扰,也使数据采集单元与主机的位置可随意安排,增强了系统的灵活性。

致谢:感谢广州敏通光电科技有限公司刘志麟先生的指导与帮助。

参 考 文 献

- 1 Sang-Hoon Kim, Jung-Ju Lee. Phase-shifted transmission/reflection-type hybrid extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(3): 797~804
- 2 Zhao Yan, Wang Daihua. Mathematical model of optical wedges for cross-correlation demodulation of cavity length of optical fiber Fabry-Perot sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106007
赵 艳, 王代华. 用于光纤法布里-珀罗传感器腔长互相关解调的光楔的数学模型研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106007
- 3 Xu Fuguo, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Optical fiber Fabry-Perot strain sensor fabricated by using laser micromachining[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2202~2207
徐富国, 饶云江, 冉曾令. 激光微加工的光纤法布里-珀罗应变传感器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2202~2207
- 4 Guiju Zhang, Qingxu Yu, Shide Song. An investigation fo interference/intensity demodulated fiber-optic Fabry-Perot cavity sensor[J]. *Sens. Actuator A*, 2004, **116**(1): 33~38
- 5 Lü Tao, Liu Desen, He Kaihua. Output characteristics of high-precision optical fiber liquid-level sensor based on extrinsic and sensitive Fabry-Perot cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1614~1618
吕 涛, 刘德森, 何开华. 非本征敏感法布罗-珀罗腔高精度光纤液位传感器输出特性[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11): 1614~1618
- 6 Lü Tao, Yang Suping. Extrinsic Fabry-Perot cavity optical fiber liquid-level sensor[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(18): 3682~3687