

使用微波作为副载波的光纤应力传感器

夏超, 周柯江

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要: 光纤应力传感器是以光纤传感技术为基础的应变、应力测量系统, 具有重要的民用、军用价值。其中有一种能用于大型建筑物形变监测的传统的光纤应力传感器又叫 SOFO。它使用迈克尔逊干涉仪作为信号解调器, 因为需要扫描, 所以响应时间较长。为了解决这一问题, 出现了以微波作为副载波的应力传感器。但是其中使用的光环行器又引入了较大误差, 使得系统性能不理想。本文分析了误差原因, 并使用耦合器、相位比较器分别替代了环形器、乘法器, 取得了良好的实验结果。

关键词: 光纤传感; 光纤应力传感器; 光环行器

中图分类号: TP212.4⁺4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2015.06.018

Fiber tension sensor using microwave as subcarrier

XIA Chao, ZHOU Ke-jiang

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Fiber tension sensor is a fiber sensing system for measuring strain and stress, and it has significant commercial and military value. One of the traditional fiber tension sensors can be used to monitor the deformation of buildings, and is also known as SOFO. It uses Michelson interferometer as signal demodulator. Its response time is long as scanning is needed. In order to solve this problem, fiber tension sensors using microwave as subcarrier is presented. However, the optical circulator used in it brings large error, which makes the performance unsatisfactory. The error sources was analyzed, and optical coupler and phase comparator were used to replace the optical circulator and the multiplier. Good experiment result has been gotten.

Key words: fiber sensing; fiber tension sensor; optical circulator

1 引言

光纤应力传感器是一种基于光纤传感技术的应变、应力测量系统, 由于其具有精度高、温度稳定性好、寿命长等优点, 非常适合于桥梁、大坝等大型建筑物的形变监测。传统的此种类型的光纤应力传感器又叫 SOFO (法语 Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques 的首字母简称), 是一种基于低相干涉原理的系统, 其结构如图 1 所示^[1]。

如图 1 所示, 一个完整的 SOFO 由光纤传感器、LED 光源、迈克尔逊干涉仪、信号处理数字电路及接收信号的外部 PC 机等若干部分组成。

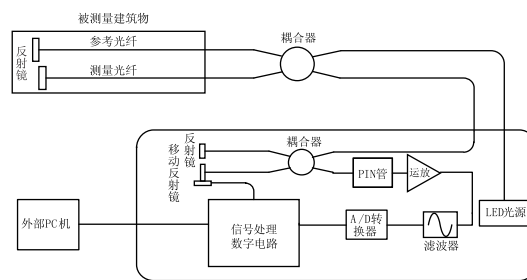


图1 传统 SOFO 结构图

光纤传感器由一对单模光纤组成。一条一端连接耦合器, 另一端与待测建筑物相连, 为测量光纤; 另一条一端与耦合器相连, 另一端则自由放置

不与待测建筑物相连,为参考光纤。两段光纤的末端各有一面反射镜。LED光源发出的光经耦合器分束分别入射至参考光纤及测量光纤后,被各自的反射镜反射又再返回耦合器。设置参考光纤的长度与测量光纤相同,则返回光相位亦完全相同。若建筑物发生形变则测量光纤伸长或缩短,引入光程差,两束光相遇发生干涉。利用这些干涉图像便可推断出测量光纤的形变量,亦即被测建筑物的形变情况。参考光纤的存在同时也补偿了由温度变化引起的硅光折射率的变化,提高了系统的温度稳定性。

干涉光的解调器是一个迈克尔逊干涉仪,其一端反射镜固定、另一端反射镜位置可调。调节移动反射镜可以补偿建筑物形变带来的测量光纤与参考光纤的光程差。

通过对光纤传感器部分的一些改进,如使用加长传感器、薄膜传感器、超薄传感器、刚体传感器等,可以使得 SOFO 能够适应各种不同类型建筑物的形变监测的要求^[2]。

2 使用微波作为副载波的应力传感器

由于采用了短相干光源,SOFO 测量时需要移动迈克尔逊干涉仪的反光镜进行扫描,所以系统响应时间较长且机械性能不佳,无法应用于强振动场合。故而,一种新的结构被提出。该结构使用微波作为副载波,不再需要迈克尔逊干涉仪^[3]。其原理图如图2所示。

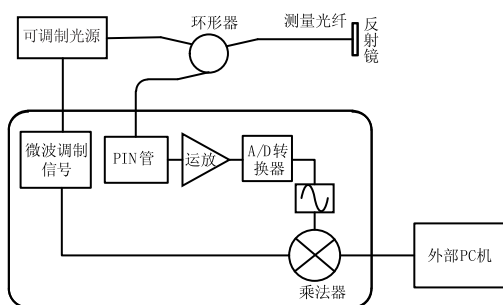


图2 使用微波作为副载波的应力传感器结构图

如图2所示,该结构舍弃了迈克尔逊干涉仪结构,并将传感器简化为单根,测量光纤一端固定在环形器上,另一端固定在嵌入待监测建筑物的反射镜上。光源带有信号调制功能。

外界扰动对传感光纤中光波的相位调制 $\Delta\phi(t)$ 可以表示为: $\Delta\phi(t) = \beta L \frac{\Delta L}{L} + L \frac{\partial \beta}{\partial n} \Delta n + L \frac{\partial \beta}{\partial a} \Delta a$, 其中 t 为时间; β 为光波在光纤中的传播常数; L 为光纤长度; n 为光纤折射率; a 为光纤半径。根据弹性

力学的相关结论,可将上式化简为 $\Delta\phi(t) = CL \{ nk_0 \frac{2\mu}{E} + \frac{k_0}{2E} n^3 [(1-\mu)P_{11} + (1-3\mu)P_{12}] \}$, 其中 C 为比例系数, $k_0 = \beta/n$, E 为杨氏弹性模量, μ 为泊松比, P_{11} 、 P_{12} 为光纤的光弹系数。此即外力作用于光纤引起相位变化的原理^[4]。

设光源发出光信号为 $I_s = I_o(1 + \cos\omega t)$, PIN 管接收到的信号为 $I_p = I_o \{ 1 + \cos[\omega(t + \Delta t)] \} = I_o \{ 1 + \cos[\omega t + \omega\Delta t] \}$, 其中 Δt 表征了光在测量光纤中经历的传播、反射带来的相位改变。设置测量光纤的初始长度满足特定条件,即该相位改变恰为 2π 的整数倍,则此时 $I_s = I_p$ 。之后,当建筑物发生形变时带动测量光纤伸长或缩短从而引入了前述的相位差 Δt 。

PIN 管接收到的信号经历放大、A/D 转换、滤波等操作后,与光源的微波调制信号相乘。此时,在 Δt 已经确定的情况下,在量程内调节 ω 使得 $\omega\Delta t = \pm 2\pi$ (正负分别代表测量光纤伸长或缩短) 仍能使最终信号保持频率稳定,读出此时的微波调制频率 ω , 根据 $\Delta d = \frac{\pi c}{\omega n}$, 其中 n 代表测量光纤的折射率,

即可计算出此时建筑物的形变量 Δd 。

3 环形器带来的误差及改进方法

环形器的结构如图3所示。

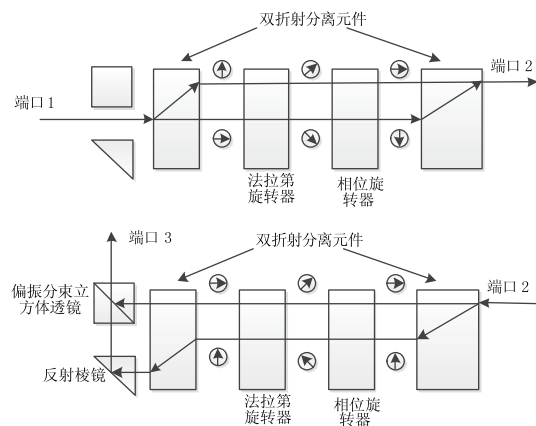


图3 环形器结构图

环形器是由双折射分离元件、法拉第旋转器和偏振面旋转器组成的三端口器件,其主要工作原理如下^[5]。

当光束由端口1入射时,入射光经过第一个双折射分离元件后,被分离成两束,上束为垂直偏振光(也称E光),下束为水平偏振光(也称O光)。经过法拉第旋转器和相位旋转器分别旋转 45° 后,上束变为水平偏振光,下束变为垂直偏振光。由于水平偏振光通过第二个双折射分离元件时其偏振方向

不变,且不发生折射,而垂直偏振光通过时发生折射,过程与通过前一分离元件时相反,所以光束在端口2处被合成后输出。

当光束由端口2入射时,输入光束首先被靠近端口2的双折射分离元件分成两束正交偏振光。由于法拉第旋转器的非互异性,相位旋转器和法拉第旋转器的作用相互抵消,因而两个分量通过这两个器件后偏振态保持不变。经过靠近端口3的双折射分离元件的分离后,它们已偏离了端口1的轴,两束光分别通过反射棱镜和偏振分束立方体透镜重新组合,并从端口3输出。

理想情况下,环形器是无损耗器件,光源发出的光最终将全部进入PIN管,这对系统信噪比的提升作用明显。然而,其缺点也显而易见,主要体现在下述两个方面。

首先,在环形器中,不同偏振态的光经历的路径不同。如图3所示,端口1到端口2情况下,虽然上下两束光路径对称,但由于左右两个双折射分离元件的长度很难保证相同,故两束光之间存在光程差 $n(l_1 - l_2)$,其中 n 表示双折射分离元件的折射率, l_1 、 l_2 分别表示上下两束光的光程;而对于端口2到端口3的情况,上下两束光的路径并不对称,固然存在一个光程差 $n(l_3 - l_4)$,其中 l_3 、 l_4 分别表示上下两束光的光程,而且下束光在出射双折射分立元件之后还有一个反射棱镜的反射及保偏分束立方体透镜的入射过程,还会再次引入光程差。由于光纤中偏振态的不可预见性,导致光实际经过环形器时上下两条路径的比重亦随时间而变化,且这四束光相互之间还会相互发生干涉,使得即使在外界应力施加的情况下进入PIN管的两束光的偏振态仍有可能不同,所以过零位依然有可能波动。

其次,光环形器复杂的结构带来了较大的偏振耦合,也给最终结果带来了较大的误差。如图3所示,对于一个典型的三端口光环形器,以光从1端口入射2端口出射为例,光总共经历了8次的端面透射。由于实际器件之间总存在一些轴对准误差(通常为 2° 左右),在经历了8次偏振耦合之后,已有相当一部分的偏振态发生了主轴与副轴之间的耦合,从而带来了寄生干涉,影响系统性能。当然,若是再考虑这些端面反射则情况就又更复杂。

鉴于以上情况光环形器并不适用于本系统,故考虑使用耦合器代替环形器。这样做虽然带来了6 dB的光能损耗,但是由于耦合器中光路对称,且其本身的反射率较小(小于60 dB)、内部端面较少偏

振耦合又较为微弱,故系统整体性能仍有较大幅度提升。同时,由于本系统只关心过零位,故使用相位比较器代替了乘法器,这样能让正弦波信号幅值取得更大,从而进一步提高系统精确性。

改进后的系统结构图如图4所示。

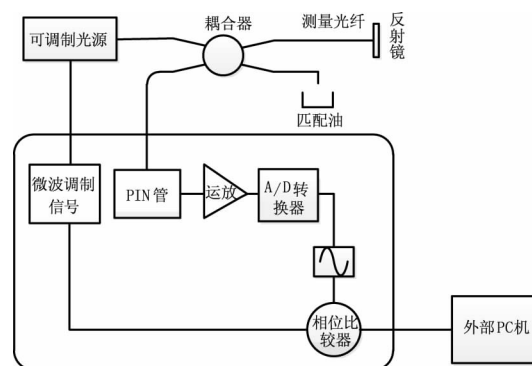


图4 改进后的使用微波作为副载波的应力传感器结构图
改进前系统的频率扫描如图5所示。

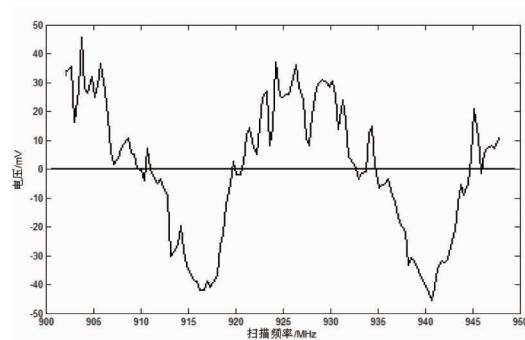


图5 使用环形器的系统频率扫描图

由图可见扫描结果噪声较大,过零点不稳,甚至某些情况下根本无法准确判定过零点位置。

改进后系统的频率扫描如图6所示。

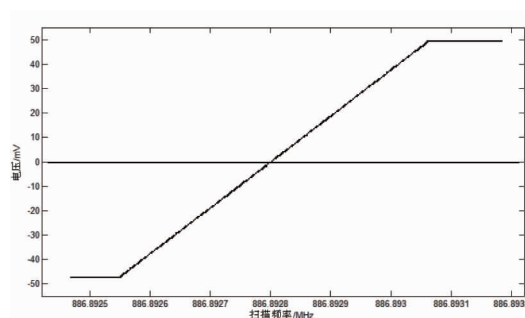


图6 使用耦合器和相位比较器的系统频率扫描图

由图可见系统响应稳定、零点判定十分准确。由于使用了相位比较器,一旦相位差超过了动态范围则响应截止,故图线两端为直线。

改进后的系统的实验测试结果如图7所示。

如图7所示,星点为测量值,直线为最小二乘法拟合直线。由图可见,计算形变量百分比与实测形变量百分比呈较好的线性关系,可见系统性能优良。

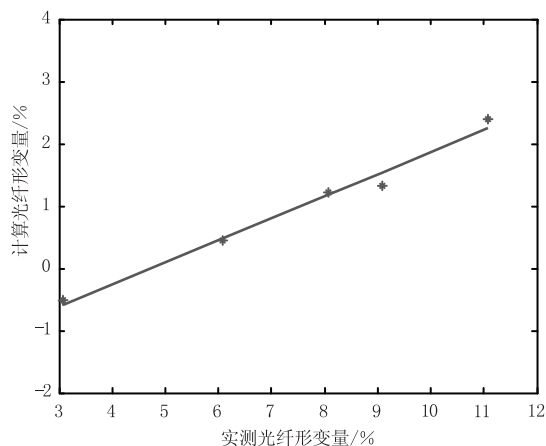


图7 改进后的系统实验测试结果图

4 不足及改进

对于该改进系统,目前主要存在的问题及需要进一步改进之处主要有两点。

首先是开机稳定性不理想,需要进一步解决。图8为实验环境下,不加负载时反馈微波调制频率变化图。

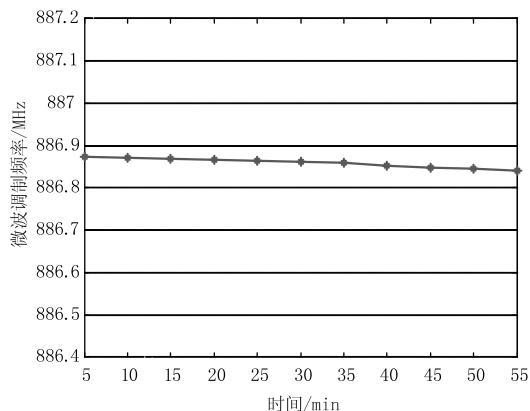


图8 开机反馈频率变化图

由图可见,即使在实验室较理想环境中、无负载情况下,反馈微波调制频率仍有一定漂移。如何解决该漂移,改善系统开机稳定性,是下一步继续改进该系统的一个重要问题。

其次是温度稳定性需要补偿。由于将原有的用于补偿温度漂移的参考光纤舍去,导致本系统的测量结果将受到周围环境温度变化的影响。可以考虑另加一个完全相同的系统来进行参考补偿。

参考文献:

- [1] Daniele Inaudi, Sandra Lloret. Ranging of reflective markers in optical fiber sensors by double-pass phase modulation[J]. Opt. Eng. 1997,36(9):2457-2465.
 - [2] Branko Glisic, Daniele Inaudi, Pascal Kronenberg, et al. Special sensors for deformation measurements of different construction materials and structures[J]. Proc. SPIE, 1999,3670:505.
 - [3] Alan Johnstone; Sebastian Portou; S. Gareth Pierce and Brian Culshaw. Dynamic displacement measurements with submicron resolution using microwave subcarrier interferometry[J]. Proc. SPIE, 1990,3860:127.
 - [4] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000:71-74.
 - [5] MO Bincheng. Research and design of non-reciprocal optical devices[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2013. (in Chinese)
- 莫槟诚. 非互易光器件的研究与设计[D]. 武汉:华中科技大学,2013.