

doi: 10.3788/gzxb20164511.1106007

高精度动态光纤应变传感研究

刘冲冲, 邹翔, 周正仙

(安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241000)

摘 要:传统的光纤应变传感技术无法在满足高精度和强环境适应性的同时实现稳定的动态应变传感. 为了解决该问题, 本文将光干涉原理应用于光纤应变传感, 设计了一种强环境适应性的基于干涉结构的高精度光纤应变传感系统, 基于扫频干涉信号的互相关系数, 该系统可以稳定地探测应变. 本文还提出一种动态探测算法, 该算法弥补了系统只能探测较小应变的缺陷, 大大提升了实际应变的探测范围, 同时还实现了动态的应变检测; 采用三次样条插值算法, 提升了小应变探测的精度. 理论分析和仿真模拟表明, 在加入白噪声的信号信噪比为 15 dB 时, 插值后的探测精度是未插值探测精度的 2.3 倍, 插值后本系统探测结果的最大误差只有约 $9 \text{ n}\epsilon$.

关键词: 光纤传感器; 动态; 光干涉; 应变; 探测算法

中图分类号: TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1106007-6

Study of High-precision Dynamic Optical Fiber Strain Sensing

LIU Chong-chong, ZOU Xiang, ZHOU Zheng-xian

(College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China)

Abstract: Traditional fiber strain sensing technologies can not meet the properties of high precision, good environment adaptability and realize dynamic strain sensing stably at the same time. In order to solve this problem, an optical interference principle was adopted to realize optical fiber strain sensing in this paper, a kind of high-precision dynamic optical fiber strain sensing system with a good environment adaptability based on an interference structure was designed. The system can be used to detect strain stably based on cross correlation coefficient of swept interferometer signal. This paper also proposes the dynamic detecting method that significantly increases practical detection range to overcome the drawback that the system can only detect small strain and realize strain sensing dynamically. The cubic spline interpolation algorithm was used to improve the accuracy of detection of small strain. Theoretical analysis and simulation experiments show that, the precision of measurements after interpolation is 2.3 times which is higher than that before interpolation, and the maximum measurement error of strain is only $9 \text{ n}\epsilon$ when the signal to noise ratio is 15 dB.

Key words: Optical fiber sensors; Dynamic; Optical interference; Strain; Detection algorithm

OCIS Codes: 060.2300; 060.2370; 130.6010; 120.1880; 280.4788

0 引言

光纤传感具有灵敏度高、响应速度快、终端结构简单、抗电磁干扰强等优点, 可以实现折射率^[1]、应变^[2]、曲率^[3]和温度^[4-5]等参数的探测, 已经被广泛应用在周界安防^[6]和建筑健康监测^[7]等领域.

近几年, 光纤应变传感技术吸引了很多研究人员

的关注. 2009 年, Koyamad 等利用相干衰落原理实现了应变和温度的传感^[8], 但是他们的计算方法计算量较大, 并且应变分辨率也不优于 $100 \text{ n}\epsilon$. 2010 年, Gong 等基于 Sagnac 干涉原理, 利用低双折射率的光子晶体光纤实现了光纤应变传感^[9], 虽然这种方法解决了计算量较大的问题, 但是其分辨率只有 $83 \mu\epsilon$. 2016 年, Wang 等基于 Mach-Zehnder 干涉原理, 设计了一种熔锥光

基金项目: 安徽省科技攻关项目(No. 1501041137)、安徽省教育厅自然科学基金项目(No. KJ2015A079)和安徽师范大学博士科研启动基金资助

第一作者: 刘冲冲(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: 734657539@qq.com

导师(通讯作者): 周正仙(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: zhouzhengxian2003@163.com

收稿日期: 2016-05-26; 录用日期: 2016-08-31

<http://www.photon.ac.cn>

纤,结合长周期光纤布喇格光栅实现了应变传感^[10],同年,Mas等采用非相干宽带光源和双熔锥光纤实现了较高精度的光纤应变传感^[11].在基于熔锥光纤的应变传感方案中,虽然应变传感的动态范围比较大,但是熔锥光纤的制作有一定的工艺难度,而且它的精度只有微应变量级,此外,光纤的熔锥部分也较容易损坏.为了实现更加精确的应变传感,2011年,Yang等基于内干涉光时域反射技术(Coherent Optical Time Domain Reflectometer, COTDR)设计了一种应变传感方案,其分辨率可以达到 200 ne ^[12].2013年,Masoudi等基于相位敏感光时域反射技术(Phase Sensitive Optical Time Domain Reflectometer, Φ -OTDR)利用两段光纤散射光的相对相位差实现了一种动态光纤应变传感^[13],在他们的方案中,应变分辨率可以达到 20 ne .但是基于OTDR的应变传感中,散射光的功率较弱,应变传感容易受到外界的干扰,这严重地影响了整个系统的稳定工作.2014年,Hu等利用光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)阵列也实现了高精度的光纤应变传感,但是这种方案需要在光纤沿线安装大量FBG,成本较高,而且也不容易维护^[14].关于光纤应变传感的研究还有很多^[15-17].可以看出,与传统的应变传感相比,光纤应变传感具有很高的精度,但是现有的光纤应变传感技术无法在满足高精度和强环境适应性的同时实现稳定的动态应变传感,而且其探测精度还不是很高,所以光纤应变传感技术依然有很大的改善和提升空间.

本文设计了一种基于新型干涉结构的光纤应变传感系统,结构简单,解调简单,受环境影响小,可以稳定地工作,具有很高的应变探测精度.提出的动态探测法,弥补了系统只能探测较小应变的缺陷,大大提升了实际应变的探测范围,同时还实现了动态的应变检测.本文还采用三次样条插值法,提升了小应变的探测精度.

1 高精度的动态光纤应变传感系统及其原理

高精度的动态光纤传感系统如图1,整个系统由窄线宽频率可调稳频激光器、环形器、耦合器、传感光纤、法拉第旋转镜、光隔离器、同步触发器、光电探测器(Photo Detector, PD)、数据采集卡(Data Acquisition, DAQ)和信号处理几部分组成.光纤末端的法拉第旋转镜不仅具有将光按原路反射形成干涉的功能,而且可以补偿BDB段光纤双折射引起的“偏振诱导信号衰落”^[18].光隔离器使得在耦合器处形成干涉的光只有两路,它们分别为

- 1) A-B-C-B-D-B-A
- 2) A-B-D-B-A

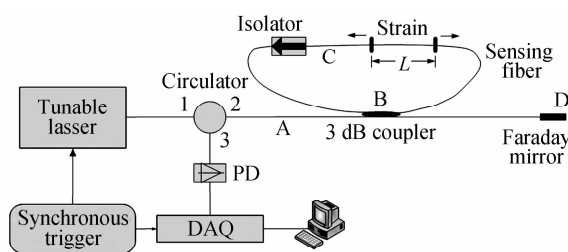


图1 高精度的动态光纤传感系统

Fig. 1 Schematic diagram of high-precision dynamic fiber optical strain sensing system

利用此系统进行应变传感的原理是,当外界没有扰动作用在传感光纤上时,环形器端口3会有稳定的干涉输出.假设,频率可调激光器输出的激光光强为 $2I_0$,BCB段光纤长度为 ΔL ,则干涉输出为

$$I(\nu) = I_0 [1 + \gamma \cos(\frac{2\pi n \Delta L \nu}{c} + \phi_0)] \quad (1)$$

式中, n 为光纤的纤芯折射率, ν 是激光器输出的激光频率, ϕ_0 是两路光干涉时存在的初始固定相位差, c 是真空中光速, γ 是干涉可见度. ΔL 的存在会使得两路探测光发生干涉时,存在偏振态不匹配的问题,而偏振态不匹配会影响 γ 变化.然而,当两路干涉光在传感光纤中的光程差比偏振态演化拍长(通常几十米)小得多时,这种不匹配可以忽略^[19], γ 可以认为是不变的.实际应用只关心交变部分,即

$$I_{ac}(\nu) = I_0 \cdot \gamma \cos(\frac{2\pi n \Delta L \nu}{c} + \phi_0) \quad (2)$$

当有应力拉伸或收缩传感光纤时,传感光纤产生形变,形变产生的光程差会对干涉光产生一个相位差,即

$$I'_{ac}(\nu) = I_0 \gamma \cos(\frac{2\pi n \Delta L \nu}{c} + \Delta\phi + \phi_0) \quad (3)$$

式中,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n \nu \xi L_\epsilon}{c} \quad (4)$$

式中, L_ϵ 是应力使光纤产生的形变, ξ 是光纤的应变光学校正系数.式(4)可以写成

$$\frac{L_\epsilon}{L} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\lambda}{2\pi \cdot n \cdot \xi} \cdot \Delta\phi \quad (5)$$

式中 $\lambda = c/\nu$,为激光波长, L 是用于探测应变的光纤长度.从式(5)可以看出, L_ϵ 与 $\Delta\phi$ 是线性的关系,而且 L_ϵ 的探测灵敏度在 nm/rad 量级.只要解调出 $\Delta\phi$,即可以根据式(5)计算出应变. L 在某种程度上影响着系统的探测精度, L 越大,系统探测的应变越精确,但是探测范围越小,而且由于 L 小于BCB段光纤长度 ΔL ,如果 ΔL 很大,那么两路干涉光在传感光纤中的光程差就会很大,干涉发生时,偏振态不匹配现象不能忽略,这将导致系统无法稳定地工作.如果 L 很小,此时系统虽然可以探测更大的应变,但是探测的精度却减小了.

2 数据处理算法

2.1 应变解调算法

根据式(5),解调出应变的关键就是得到 $\Delta\phi$,但是 I_{ac} 与 $\Delta\phi$ 不是线性关系,很难直接根据光强准确地解调出 $\Delta\phi$,所以本文采用以下方法计算 $\Delta\phi$.

注意到干涉输出 I_{ac} 是激光频率 ν 的函数,因此频率可调激光器输出扫频信号光,数据采集卡采集每一个频率的信号光产生的干涉信号,可以得到一条正弦形状的 $I-\nu$ 曲线,如图2实线.在获得干涉信号时,可以采用大量叠加平均的方法消除振动等瞬态干扰因素的影响.这里假设激光波长为 $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$, $\Delta L=4\ \text{m}$, $\phi_0=\pi/6$,波长可调激光器的扫频范围为 $0\sim 50\ \text{MHz}$,由于扫频激光的频率变化只有几十 MHz,相对于激光频率很小,所以频率变化对光纤折射率的影响,以及激光波长的变化可以忽略不计.

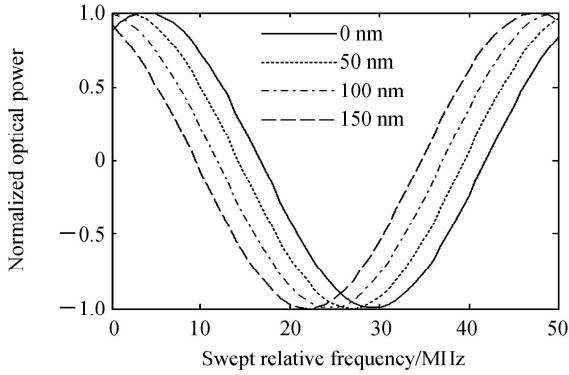


图2 传感光纤形变不同时的 $I-\nu$ 曲线

Fig.2 $I-\nu$ curves when sensing fiber is in different deformations

当有应力拉伸或者收缩传感光纤时,传感光纤产生形变,形变产生的光程差会对干涉光产生一个相位差,此时激光扫频得到的 $I-\nu$ 曲线与无应力作用时的 $I-\nu$ 曲线相比存在偏移,偏移量与光纤形变大小有关,图2为光纤形变分别为 $0\ \text{nm}$, $50\ \text{nm}$, $100\ \text{nm}$ 和 $150\ \text{nm}$ 时的扫频 $I-\nu$ 曲线.为了得到 $\Delta\phi$,本文计算 $I_{ac}(\nu)$ 和 $I'_{ac}(\nu)$ 的互相关系数,即

$$R(\Delta\nu) = \text{corrcoef}[I_{ac}(\nu + \Delta\nu), I'_{ac}(\nu)] \quad (6)$$

$\text{corrcoef}(*, *)$ 表示互相关系数运算.找出互相关系数 $R(\Delta\nu)$ 最大时对应的 $\Delta\nu$,结合式(2)、(3)、(4),即可解得对应的 $\Delta\phi$,进而由式(5)解得应变.

2.2 应变的动态解调算法

由于扫频 $I-\nu$ 曲线是正弦周期变化的,所以这种方法解得的 $\Delta\phi$ 是在 $(-\pi, \pi)$ 范围的,根据式(5),本系统能准确探测的最大形变量为 $\lambda/2n\xi$.为了获得更大的探测范围,本文提出一种动态的解调方法,具体原理为:

假设第 i 次扫频时,光纤的形变量为 $L_{\epsilon,i} = L_0 +$

$\lambda/2n\xi$,第 $i-1$ 次扫频时的光纤形变量为 $L_{\epsilon,i-1}$,其中 $L_0 > 0, \lambda/2n\xi > L_{\epsilon,i-1} > L_0$.此时, $L_{\epsilon,i}$ 相对于 $L_{\epsilon,i-1}$ 变化了 $L_{\epsilon,i} - L_{\epsilon,i-1} < \lambda/2n\xi$.本系统虽然无法直接准确探测 $L_{\epsilon,i}$,但是可以准确探测 $L_{\epsilon,i-1}$ 和 $L_{\epsilon,i} - L_{\epsilon,i-1}$,间接得到 $L_{\epsilon,i}$.因此,即使 $L_{\epsilon,i}$ 很大,只要激光器扫频足够快,使相邻两次扫频时的光纤相对形变量不超过 $\lambda/2n\xi$,都可以采用这种间接方法得到 $L_{\epsilon,i}$,进而计算出应变,即

$$\frac{L_{\epsilon,i}}{L} = \frac{1}{L} \cdot (L_{\epsilon,i-1} + \frac{\lambda}{2\pi \cdot n \cdot \xi} \cdot \Delta\phi_i) \quad (7)$$

式中, $\Delta\phi_i$ 表示第 $i-1$ 次和第 i 次的扫频 $I-\nu$ 曲线的相位差.这种动态探测法,弥补了系统只能探测较小应变的缺陷,大大提升了实际应变的探测范围,同时还实现了动态的应变检测.事实上,采用动态探测法,只要相邻两次扫频时的应变变化量小于 $\lambda/2n\xi$,本系统甚至可以探测光纤可以承受的最大应变.

2.3 提升小应变探测精度的算法

值得注意的是,扫频 $I-\nu$ 曲线是离散的,利用式(7)解得的 $\Delta\phi_i$ 精度与 $I-\nu$ 曲线相邻两点的间隔 $\Delta\nu_{\text{int}}$ 有关,当两次扫频时的光纤应变变化很小,产生的频移小于 $\Delta\nu_{\text{int}}$ 时,本系统将无法准确探测.为了提升小应变的探测精度,本文先采用三次样条插值法^[20]对扫频 $I-\nu$ 曲线进行插值,再计算应变.插值次数越多,插值后的 $I-\nu$ 曲线相邻两点间隔越小,相应地,应变的探测精度也会随之增加.图3是未插值和插值2次后的扫频 $I-\nu$ 曲线点图的对比.可以看出,插值后的 $I-\nu$ 曲线点图更加精细,此时相邻两点的间隔只有 $\Delta\nu_{\text{int}}/3$,因此基于插值后的扫频 $I-\nu$ 曲线计算光纤应变可以提升精度.需要指出的是,在实际应用中,采集到的 $I-\nu$ 曲线不可避免地会受到噪声干扰,随着插值次数的增加,应变探测精度的提升会越来越小,但是计算量却会越来越大.

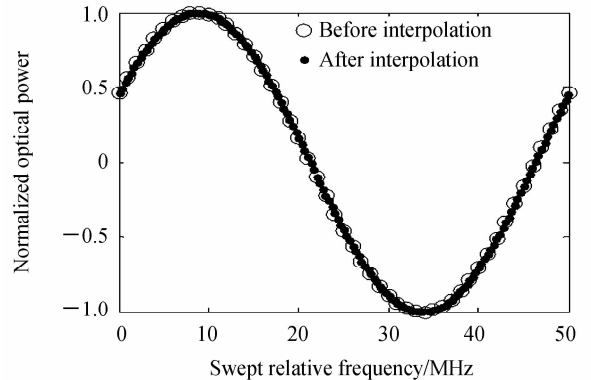


图3 未插值和插值后的 $I-\nu$ 曲线

Fig.3 $I-\nu$ curves before and after interpolation

3 仿真模拟实验

采用仿真模拟实验对高精度动态光纤应变传感系统做进一步说明.在接下来的模拟实验中,假设 $n=1.48$, $\lambda=1\ 550\ \text{nm}$, $\xi=0.8$, $\phi_0=\pi/6$,波长可调激光器

的扫频范围为0~50 MHz,每次步进1 MHz.考虑到L太长会减小系统的探测范围,而且会使两路探测光发生干涉时的偏振态不匹配,L太短会降低应变的探测精度.本文折中考虑,令 $\Delta L=4$ m, $L=2$ m.采集到的干涉信号加入了白噪声,信噪比为15 dB.在实际应用中,采集到的I-v曲线不可避免地会受到噪声干扰,因此加入白噪声可以增加模拟仿真实验的可信度,证明本方案有着较强的可靠性.图4是受白噪声干扰时,光纤形变分别为0 nm、50 nm、100 nm和150 nm时的扫频I-v曲线.

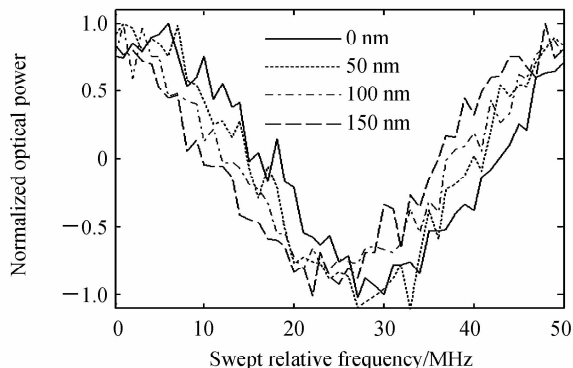


图4 白噪声干扰时传感光纤形变不同的I-v曲线
Fig.4 I-v curves when sensing fiber is in different deformations with white noise interference

可以看出,白噪声的加入使得扫频I-v曲线不再是标准的正弦形状曲线,因此计算 $\Delta\phi_i$ 会存在一定的误差,最终计算得到的应变也会存在一定的误差.而且,应变越小,引起的频移越小,白噪声带来的相对误差就越大.式(8)定义的平均相对误差用于衡量探测应变的精度.

$$R = \frac{1}{i_{\max}} \cdot \sum_{i=1}^{i_{\max}} \left| \frac{s_r(i) - s_m(i)}{s_r(i)} \right| \quad (8)$$

式中, $s_r(i)$ 表示第*i*个参考应变, $s_m(i)$ 表示测得的第*i*个应变,共有*i_{max}*个参考应变.

3.1 不使用和使用动态探测法的应变传感实验

当不使用动态探测法时,由于I-v曲线的正弦周期性,解调的 $\Delta\phi$ 会在 $(-\pi, \pi)$ 范围内周期性变化,根据式(5),这会导致解调的应变在 $(-327 \text{ n}\epsilon, 327 \text{ n}\epsilon)$ 范围内也呈周期性变化,但是在每一个周期内,应变变化均是线性的.图5是当拉伸传感光纤的应力逐渐增大时,参考应变、未使用动态探测法测得的应变和使用动态探测法测得的应变对比.可以看出,当应变小于327 n ϵ 时,系统探测的应变与参考应变吻合得很好,误差很小.当应变大于327 n ϵ 时,系统探测应变进入下一个周期,所以探测结果大大偏离了参考值,但是偏离后的探测结果在该周期内仍然是线性的,其探测结果的平均

相对误差为0.666 8.而采用动态探测法时,即使应变很大,系统也可以准确地测得应变,其探测结果的平均相对误差只有0.029 1.

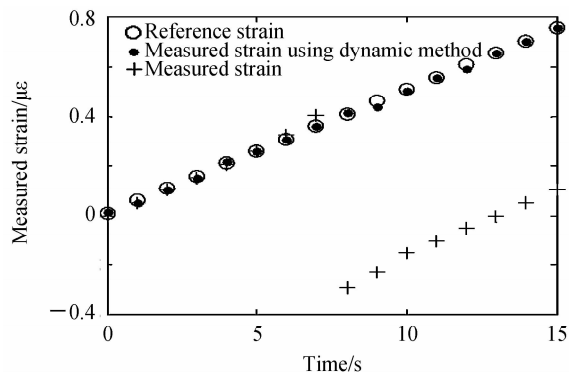


图5 参考应变,未使用动态探测法测得的应变和使用动态探测法测得的应变对比
Fig.5 Comparison of reference strain, measured strain and measured strain using dynamic method

图6是正弦变化的应力伸缩传感光纤时,产生的振幅为1 $\mu\epsilon$ 的正弦变化的参考应变与使用动态探测法测得的应变对比.可以看出,虽然参考应变在某些时刻超过了327 n ϵ ,但是采用动态探测法测得的应变依然比较准确,与参考应变吻合得很好,平均相对误差只有0.098 4.

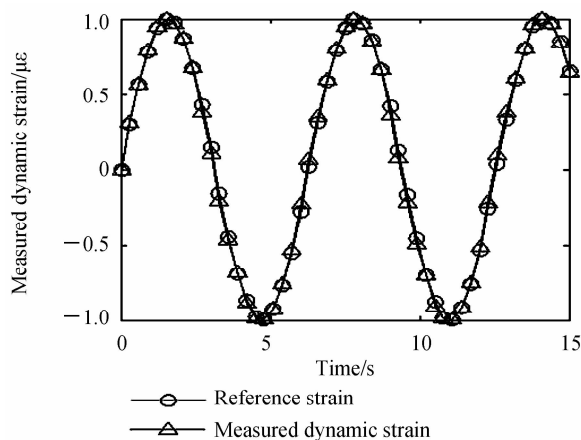


图6 振幅为1 $\mu\epsilon$ 的参考应变与动态测得的应变对比
Fig.6 Comparison of reference strain with amplitude of 1 $\mu\epsilon$ and measured dynamic strain

3.2 未插值和插值处理后的小应变传感实验

小应变引起的I-v曲线频移较小,白噪声带来的相对误差较大.图7是正弦变化的应力伸缩传感光纤时,产生振幅为25 n ϵ 的正弦变化的参考应变与使用动态探测法测得的应变对比.可以看出,探测到的应变在总体上符合参考应变的变化趋势,但是在某些时刻,虽然参考应变在变化,探测的应变却保持不变.

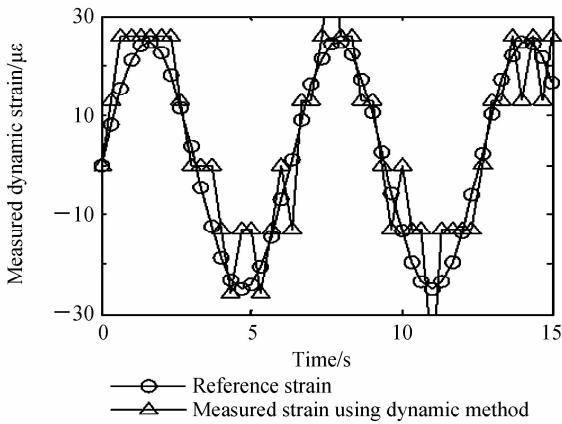


图7 振幅为 25 ne 的参考应变与动态测得的应变对比
Fig. 7 Comparison of reference strain with amplitude of 25 ne and measured dynamic strain

这是因为,激光器扫频每次步进 1 MHz ,相当于 $\Delta v_{\text{int}} = 1 \text{ MHz}$,此时本系统能准确探测的最小应变约为 13 ne ,所以在某些时刻,例如 $0.6 \sim 2 \text{ s}$ 范围内,虽然参考应变在变化,但是由于应变的变化量小于 13 ne ,引起的扫频 $I-v$ 曲线频移很小,与 Δv_{int} 相当,系统无法准确探测这些变化.而且在某些时刻,信号受到白噪声的干扰,探测应变与参考应变的变化趋势相反,其最终探测结果的平均相对误差为 0.7252 .

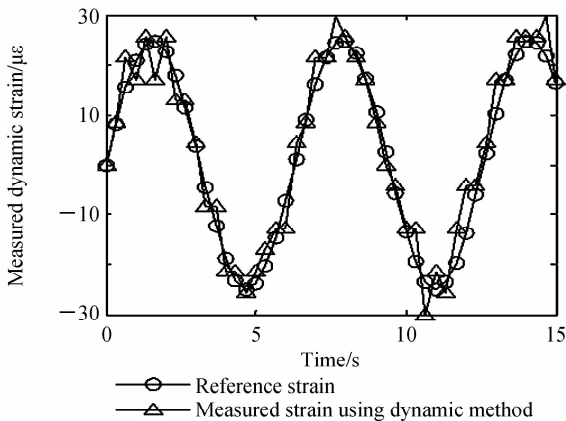


图8 插值操作后振幅为 25 ne 的参考应变与动态测得的应变对比

Fig. 8 Comparison of reference strain with amplitude of 25 ne and measured dynamic strain after interpolation

为了提升小应变的探测精度,本文先采用三次样条插值法对扫频 $I-v$ 曲线进行插值,然后再计算相应的应变,兼顾运算速度和探测精度的提升程度,插值次数设为 2 次.插值后的扫频 $I-v$ 曲线相邻两点的频率差只有 $1/3 \text{ MHz}$,系统可以探测的最小应变约为 4.3 ne .图8是插值操作后,振幅为 25 ne 的正弦变化的参考应变与使用动态探测法测得的应变对比.与图7相比,插值算法提高了本系统探测小应变的精度,在干涉信号信噪比只有 15 dB 时,探测结果的最大误差为 9 ne ,平均相对误差只有 0.3095 ,精度是未插值探测结果的

2.3 倍.

4 结论

本文详细介绍了一种基于光干涉原理的高精度的动态光纤应变传感系统,窄线宽频率可调稳频激光器是本系统的关键器件.本文通过不同时刻的 $I-v$ 曲线的互相关系数计算应变产生的干涉相位差,进而解调出应变.采用动态探测法,弥补了系统只能探测较小应变的缺陷,大大提升了实际应变的探测范围,同时还实现了动态的应变检测.本文还采用三次样条插值算法,提升了小应变探测的精度.理论分析和仿真模拟实验证明,在信号信噪比为 15 dB 时,采用三次样条插值后,精度是未插值探测结果精度的 2.3 倍,探测结果的最大误差只有约 9 ne .

需要指出的是,本文提出的动态光纤应变传感系统和方法要求相邻两次扫频时的应变变化量产生的相位差不超过 π ,这是本系统的一大缺点,因此,光纤应变传感技术仍然需要更加深入地研究和改进.

参考文献

- [1] ZHOU X, CHEN K, MAO X, *et al.* A reflective fiber-optic refractive index sensor based on multimode interference in a coreless silica fiber[J]. *Optics Communications*, 2015, **340**: 50-55.
- [2] FU Xing-hu, XIE Hai-yang, WANG Liu-liu, *et al.* Pressure sensor based on cascading single mode fiber with multimode fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0406005. 付兴虎,谢海洋,王柳柳,等.单模与多模光纤级联型压力传感器[J].光子学报,2015, **44**(4): 0406005.
- [3] DONG Xin-yong, ZHANG Ying, GUAN Bo-ou, *et al.* Experimental research of fiber grating circumflexion sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9): 806-809. 董新永,张颖,关柏鸥,等.光纤光栅曲率传感的实验研究[J].光子学报,2000, **29**(9): 806-809.
- [4] CAO Ye, ZHAO Chen, TONG Zheng-rong. Interferometric type all fiber optic sensor with simultaneous dual parameter measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 1006002. 曹晔,赵晨,童峥嵘.可双参量同时测量的干涉型全光纤传感器[J].光子学报,2015, **44**(10):1006002.
- [5] MINDRAO A, BEMINI R, ZENI L. Distributed temperature sensing in polymer optical fiber by BOFDA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(4): 387-390.
- [6] ZHEN Yin, DUAN Fa-jie, TU Qin-chang, *et al.* Signal processing of intrusion monitoring based on Φ -OTDR[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0106004. 郑印,段发阶,涂勤昌,等.相位敏感光时域反射计识别入侵时间算法[J].光子学报,2015, **44**(1): 0106004.
- [7] LU Y, ZHU T, CHEN L, *et al.* Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, **28**(22): 3243-3249.
- [8] KOYAMADA Y, IMAHAMA M, KUBOTA K, *et al.* Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(9): 1142-1146.
- [9] GONG H, CHAN C C, CHEN L, *et al.* Strain sensor realized

- by using low-birefringence photonic-crystal-fiber-based sagnac loop[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(16): 1238-1240.
- [10] WANG Y, SHEN C, LOU W, *et al.* Intensity modulation type fiber-optic strain sensor based on a Mach - Zehnder interferometer constructed by an up-taper with a LPG[J]. *Optics Communications*, 2016, **364**: 72 - 75.
- [11] MAS S, MARTI J, MONZÓN-HEMÁNDEZ D, *et al.* Low-cost refractive index and strain sensor based on tapered fibers [J]. *Optics Communications*, 2016, **361**:99 - 103.
- [12] YANG Z, SHI P, LI Y. Research on COTDR for measuring distributed temperature and strain [C]. International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering, 2011, (1): 590-593.
- [13] MASOUDI, BELAL M, NEWSON T. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR [J]. *Measurement Science & Technology*, 2013, **24**(8): 085204-1-085204-7.
- [14] HU C, WEN H, BAI W. A novel interrogation system for large scale sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(8): 1406 - 1411.
- [15] MAY-ARRIOJA D A, ROIZ-PEREZ V I, BUSTO-TERRONES Y, *et al.* Fiber optic pressure sensor using a conformal polymer on multimode interference device [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, **16**(7): 1956-1961.
- [16] LUO Z, WEN H, GUO H, *et al.* A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(19): 22799 - 22807.
- [17] WU Jun, CHEN Wei-min, YU Kui, *et al.* Strain sensing properties of grating ends packaged FBG sensors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0206004.
吴俊,陈伟民,余葵,等. 非栅区封装光纤布拉格光栅应变传感特性研究[J]. 光子学报, 2016, **45**(2): 0206004.
- [18] LI Zhi-neng, SHEN Liang, YE Xian-feng. Study of polarization insensitive fiber optic michelson interferometric sensors[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, **36**(1):44 - 46.
- [19] ZHU F, ZHANG Y, XIA L, *et al.* Improved Φ -OTDR sensing system for high-precision dynamic strain measurement based on ultra-weak fiber Bragg grating array[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, **33**(23): 4775-4780.
- [20] CHUDINOV A V, GAO W, HUANG Z, *et al.* Interpolational and smoothing cubic spline for mass spectrometry data analysis [J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2016, **396**: 42-47.