

doi:10.3788/gzxb20184706.0606003

用于干涉型光纤传感系统的相似性解调方法

庞铄, 罗政纯, 常天英, 于森, 王忠民, 陈建冬, 王阳阳, 高璐, 崔洪亮

(吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 长春 130012)

摘 要: 基于扫频激光器和马赫-增德尔干涉结构的光纤传感系统, 针对扫频激光器的频率步进不够精细导致干涉臂长差解调结果不精确的问题, 提出了一种相似性解调方法. 该方法通过在频率步进范围内进一步细分, 构造相应细分值的模拟函数, 与采集到的干涉信号进行相似性对比, 相似性最大时所对应的模拟干涉臂长差即为精确结果, 并通过仿真与实验验证了该方法的可行性. 实验表明该系统中干涉臂长差的解调范围为 2~17 mm, 该范围内解调结果最小分辨率为 1 μm , 可以达到测试量程万分之一的分辨率, 且抗干扰能力强、精度高, 可实现信噪比大于 6.87 dB 时信号的解调. 根据解调原理, 在不强调实时性的应用中, 可以通过提高细分的精细度, 进一步提高系统分辨率.

关键词: 光纤传感; 信号处理; 相似性解调; 干涉臂长差; 马赫-增德尔干涉

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)06-0606003-10

Similarity Demodulation Method of Interferometric Fiber Optic Sensing System

PANG Shuo, LUO Zheng-chun, CHANG Tian-ying, YU Miao, WANG Zhong-min, CHEN Jian-dong,
WANG Yang-yang, GAO Lu, CUI Hong-liang

(College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun, 130012, China)

Abstract: A new similarity demodulation method in fiber optic sensing system based on a frequency-swept laser and a Mach-Zehnder interference structure is proposed and demonstrated. The method is designed specifically to overcome the difficulty due to the finite frequency steps of the frequency-swept laser, which is not fine enough and will result in inaccurate demodulation result of the interference arm length difference. The method relies on the construction of a simulated function by finely subdivide in the frequency step range, and then compare it with the real interference signal, the simulated interference arm length difference corresponding to the maximum similarity is considered closest to the true result. The feasibility of the method is verified by simulation and experiments, which show that the demodulation range of the interference arm length difference of the system is 2~17 mm, and the minimum resolution of the demodulation result over this entire range is 1 μm , corresponding to a resolution of 1/10 000th of the full scale. In addition, the method also features high anti-interference ability, and can perform demodulation satisfactorily as long as the signal-to-noise ratio is greater than 6.87 dB. According to the principle of the new demodulation scheme, in applications that do not emphasize real-time performance, the resolution of the system can be further improved by increasing the subdivision.

Key words: Optical fiber sensing; Signal processing; Similarity demodulation; Interference arm length difference; Mach-Zehnder interference

OCIS Codes: 060.2370; 260.3160; 150.1135; 140.3600; 130.6010; 120.4820

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(No.201405026-01)

第一作者: 庞铄(1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术及其应用. Email: pang_shuo@163.com

导师: 崔洪亮(1956-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信和传感、太赫兹科学与技术、纳米光学和纳米电子学等. Email: hcui@jlu.edu.cn

通讯作者: 常天英(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤传感技术及应用、太赫兹科学与技术等. Email: tchang@jlu.edu.cn

收稿日期: 2017-11-29; 录用日期: 2018-04-02

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

0 引言

光纤干涉型传感器作为一种典型的光纤传感器,具有体积小、质量轻、灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀等优点^[1-3],可以实现非接触式的高精度绝对测量,可用于海洋潮汐监测、水库水位测量、储油罐液位监测、海底地震监测等许多绝对测量领域^[4-7].

被测物理量作用在传感器上导致干涉信号发生变化,干涉信号解调结果的精度关系到整个系统的测量精度,常用的基于扫频激光器的解调方法有傅里叶变换法、条纹分解计数法、互相关解调方法等^[8-10].其中,傅里叶变换法由于频率分辨率的限制导致解调精度较低,不能满足高精度要求.条纹分解计数法是将干涉条纹的总数分为整数部分和小数部分计数,根据条纹数的变化量推导干涉信号的相位变化量,但是条纹变化对环境特别敏感,在测试环境恶劣时受环境影响严重,容易出现计数不精准现象,解调结果不稳定.互相关解调方法是构造与干涉信号相似的一系列函数,找到干涉信号与构造函数相关性最大的位置,互相关解调方法能够解决解调精度低和受环境影响严重的问题,但是互相关算法运算量较大,而且两组数据做互相关运算时,按时间平移后相乘的两数据的相位不同,产生了相位偏差,影响解调结果的准确性.

本文在互相关解调的基础上提出了相似性解调方法,模拟不同的干涉臂长差,令采集到的干涉信号与模拟信号做相似性判断,相似性最大时所对应的模拟干涉臂长差即为精确结果,相似性解调方法精度高,且相比互相关法大大减少了运算量.

1 光纤干涉传感器的相似性解调原理

1.1 系统检测原理

光纤干涉传感器的结构见图 1.

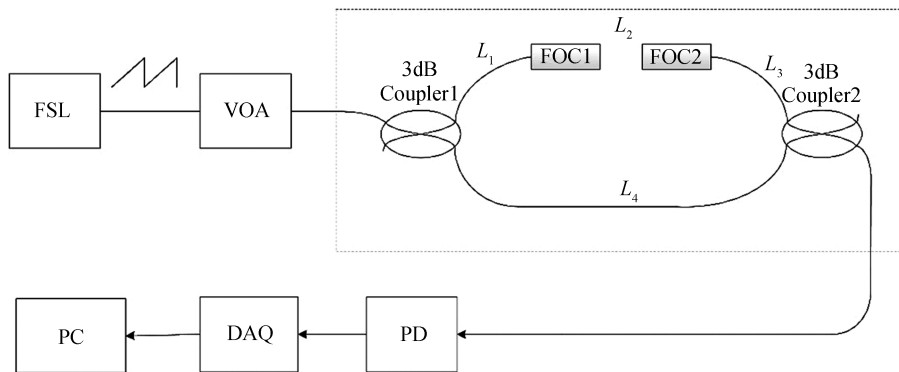


图 1 光纤干涉传感系统结构
Fig.1 Fiber optic interference sensing system

扫频激光器(Frequency Scanning Laser, FSL)输出周期性扫频光源,经过可变光学衰减器(Variable Optical Attenuator, VOA)降低光功率,再经过敏感探头(Sensitive Probe)形成干涉,其中敏感探头是由 3 dB 耦合器(Coupler)、光纤光学准直器(Fiber Optic Collimator, FOC)和传感光纤构成的马赫-增德尔干涉结构^[11-12],经过第一个耦合器后分为光强相等的两路,一路连接两个准直器构成信号臂,另一路直接连接导光光纤构成参考臂,其中两准直器的间距为 L_2 ,则信号臂的长度为 $L_1 + L_2 + L_3$,参考臂的长度为 L_4 ,保证光纤长度 $L_1 + L_3$ 与 L_4 的差值 $L_d = L_1 + L_3 - L_4$ 固定,则干涉臂长差为 $L = L_2 + L_d$,由于信号臂和参考臂的臂长不同,两路光信号经过信号臂和参考臂时产生光程差 L ,继而产生相位差,经第二个耦合器汇合形成干涉,敏感探头作为感受被测物理量变化的敏感元件,当被测物理量改变时,作用在敏感探头上使两准直器间距改变,从而使干涉信号也发生变化,再经过光电探测器(Photodetector, PD)探测干涉信号并经数据采集卡(Data Acquisition, DAQ)采集后转换为离散信号上传到上位机(Personal Computer, PC),在上位机中可采用相应的解调算法计算出干涉臂长差 L 的值.

1.2 相似性解调原理

扫频激光器^[13]的起始频率为 f_0 ,扫描频率记为 $f(t)$,则

$$f(t) = f_0 + kt \quad (1)$$

式中 k 为激光器扫描步进频率, t 为时间.

根据图 1 所示,扫频激光器的输出首先经过 VOA,防止因输入光功率过高而使接收端信号失真,继而经过敏感探头发生干涉后,干涉信号的光强表达式^[14]为

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi(f_0 + kt)L}{c}\right) \quad (2)$$

式中 I_1 为探测臂的输出光强, I_2 为参考臂的输出光强, $\Delta\varphi(t)$ 为探测臂信号和参考臂信号的相位差, L 为干涉臂长差, c 为光速.

经 PD 探测并经 DAQ 采集后将离散干涉信号上传到 PC 机,PC 机接收到的干涉信号表达式为

$$I(n) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi(f_0 + kn)L}{c}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

式中 N 为激光器一个扫频周期内的采样点数.该信号包含直流分量,为了方便信号处理,对信号做归一化运算,得到归一化后的干涉信号为

$$\phi(n) = \cos\left(\frac{2\pi(f_0 + kn)L}{c}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

对于归一化后的干涉信号,可以通过相似性算法实现干涉臂长差的解调,整体算法结构图见图 2.图中流程①为利用傅里叶变换得到干涉臂长差 L 的估计值^[15],对归一化后的干涉信号 $\phi(n)$ 做傅里叶变换,即

$$X(k_F) = \sum_{n=0}^{N-1} \phi(n) e^{-i\frac{2\pi}{N}nk_F} \quad k_F = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

式中 k_F 表示不同的频率点位置.

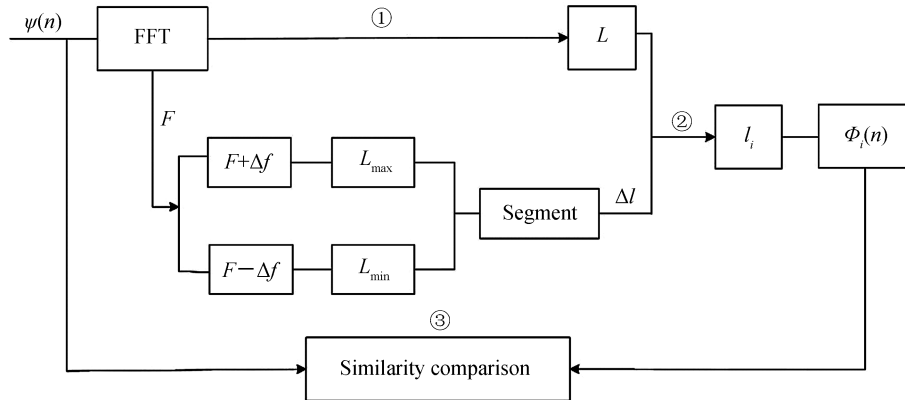


图 2 相似性算法结构

Fig.2 Similarity algorithm structure chart

根据傅里叶变换结果,最大谱线处对应的频率即为该信号的频率 $F = k_F \Delta f$,继而可以得到干涉臂长差 L 的粗略值为

$$L = k_F \Delta f c / k \quad (6)$$

式中, $\Delta f = f_s / N$ 为系统的频率分辨率, f_s 为该系统的采样频率.

图中流程②确定干涉臂长差的前后范围,在该范围内进行细分,确定干涉臂长差的细分值 l_i .当频率分辨率 Δf 较低时,干涉臂长差 L 的精度也很低,不能达到系统要求,为了提高解调精度,取频率 $F_{\max} = F + \Delta f$ 和 $F_{\min} = F - \Delta f$,分别得到 F_{\max} 和 F_{\min} 对应的干涉臂长差 L_{\max} 和 L_{\min} ,则 $L_{\min} \sim L_{\max}$ 即为干涉臂长差的范围,在 $L_{\min} \sim L_{\max}$ 之间进行 m 细分,每两个细分值间距为 Δl ,得到干涉臂长差的细分值 $l_i = L_{\min} + (i-1)\Delta l$ ($i = 1, 2, \dots, m+1$),使最小分辨率可以达到 δ .

图中流程③分别以细分值构造模拟干涉信号 $\phi_i(n)$,并判断各模拟干涉信号 $\phi_i(n)$ 与实际干涉信号 $\phi(n)$ 的相似性,相似性最高时该模拟信号对应的干涉臂长差即为精确值.分别以 l_i ($i = 1, 2, \dots, m+1$) 作为干涉臂长差,构造模拟干涉信号

$$\varphi_i(n) = \cos\left(\frac{2\pi(f_0 + kn)l_i}{c}\right) \quad i=1,2,3,\dots,m+1 \quad (7)$$

根据相似性算法判断构造的模拟信号与实际干涉信号的相似性

$$p_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{2\psi(n) \times \varphi_i(n)}{\psi(n)^2 + \varphi_i(n)^2} \quad i=1,2,\dots,m+1 \quad (8)$$

当相似性 p_i ($i=1,2,\dots,m+1$) 最大时,其所对应的干涉臂长差即为解调精确值。

根据该解调原理,若不强调实时性,可以通过提高细分的精细度,进一步提高系统解调精度.在干涉臂长差的范围内做 m 次细分和 $a \times m$ (a 为整数)次细分时的运算量和分辨率对比如表 1 所示,增大细分次数会增大运算量,但精度可提高 a 倍。

表 1 不同细分次数时的运算量和分辨率对比

| | m subdivision | $a \times m$ subdivision |
|----------------|---------------------------------|--|
| Multiplication | $4mN$ | $a \times 4mN$ |
| Division | mN | $a \times mN$ |
| Addition | $(2N-1)m$ | $a \times (2N-1)m$ |
| Resolution | $\frac{L_{\max} - L_{\min}}{m}$ | $\frac{L_{\max} - L_{\min}}{a \times m}$ |

2 仿真分析

为了验证相似性解调方法的可行性,首先进行数据仿真.为使仿真数据与实验数据一致,激光器的参数设置和系统采样频率等与实际保持一致,扫频激光器起始扫描频率为 $f_0 = 191\,200$ GHz,扫描步进频率为 $k=1$ GHz/step,在 1 GHz 扫描步进下,可实现 40 nm 范围 2 kHz 的扫描速度,扫描一个周期的时间为 0.5 ms,该系统采样频率 $f_s = 10$ MHz,每个扫频周期内的采样点数为 $N=5\,000$ 。

假设干涉臂长差为 $L=9.075$ mm,以 $L=9.075$ mm 构造干涉信号 $\psi(n)$ 为

$$\psi(n) = \cos\left(\frac{2\pi(f_0 + kn)L}{c}\right) = \cos\left(\frac{121\pi}{2000}n + \frac{115\,676\pi}{10}\right) \quad n=1,2,3,\dots,5\,000 \quad (9)$$

取前 1 000 个点做区间展开^[17-18],构造的干涉信号如图 3。

对仿真干涉信号做傅里叶变换,最大谱线处对应的频率即为该信号的频率,如图 4 所示,可以得到该信号的频率 $F=302$ kHz,由此可得到干涉臂长差的粗略值 $L=(F \times c)/k=9.060$ mm。

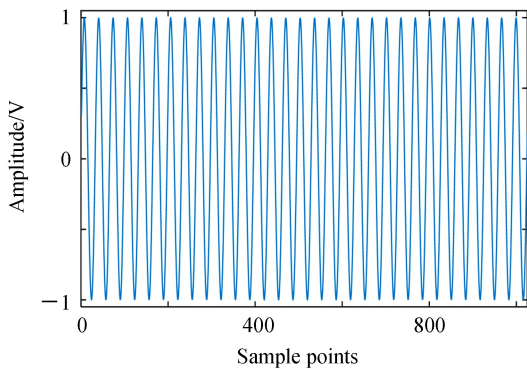


图 3 构造的仿真干涉信号
Fig.3 The simulated interference signal

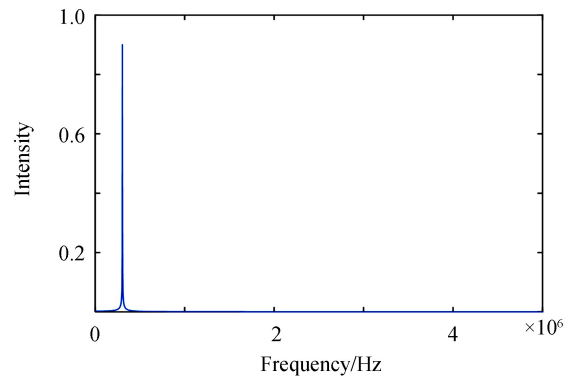


图 4 仿真干涉信号的傅里叶变换
Fig.4 Fourier transform of simulated interference signal

取信号频率 F 前后各一个 Δf 的频率,即 $F_{\max} = F + \Delta f$ 和 $F_{\min} = F - \Delta f$,并分别得到对应的干涉臂长差 $L_{\max} = 9.120$ mm 和 $L_{\min} = 9.000$ mm,根据解调结果的综合考虑,将 $L_{\min} \sim L_{\max}$ 之间进行 $m=120$ 份细分,此时最小分辨率可以达到 $1 \mu\text{m}$,以细分后的干涉臂长差 $l_i = 9.000 + (i-1) \times 1 \mu\text{m}$ ($i=1,2,\dots,121$) 构造模拟干涉信号

$$\varphi_i(n) = \cos\left(\frac{2\pi(f_0 + kn)l_i}{c}\right) \quad i=1,2,\dots,121 \quad (10)$$

令 $\varphi_i(n)$ ($i=1,2,\dots,121$) 分别与模拟干涉信号 $\psi(n)$ 做相似性判断,如图 5 所示,从模拟信号 $\varphi_i(n)$ ($i=1,2,\dots,121$) 与仿真干涉信号 $\psi(n)$ 的相似程度可以看到,第 76 个点的位置处相似性最大,相似性为 100%,则第 76 个点对应的干涉臂长差 $l_{41}=9.000+(76-1)\times 1\ \mu\text{m}=9.075\ \text{mm}$ 为精确的干涉臂长差值。

从仿真计算结果可以看出,按照相似性方法解调出的干涉臂长差值与设定值完全相同,验证了相似性解调方法的可行性。

在该仿真干涉信号中加入随机噪声,令加噪干涉信号分别与模拟干涉信号 $\psi(n)$ 做相似性判断,

图 6 为加噪干涉信号的傅里叶变换和相似性解调结果,如图中所示加入噪声后相似度虽然降低,但相似性最大的位置不变,即解调结果不变.这是由于加噪干涉信号的傅里叶变换结果中最大谱线的幅值虽然减小,但其对应的频率不变,即干涉信号的频率不变,解调结果中相似性最大为 71.42%,相似性虽然降低,但依然是第 76 个点位置处相似性最大,因此解调结果不变,验证了该解调方法具有一定的抗干扰能力。

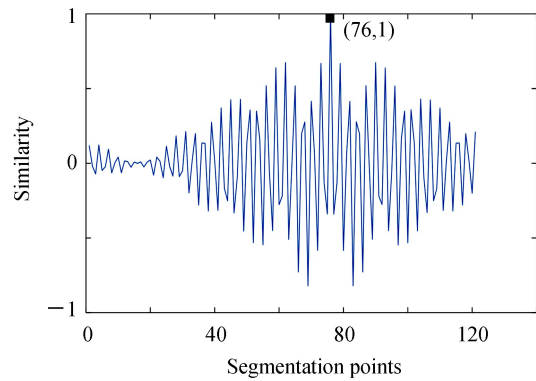


图 5 模拟信号与仿真干涉信号的相似性

Fig.5 Similarity between simulated signal and simulation interference signals

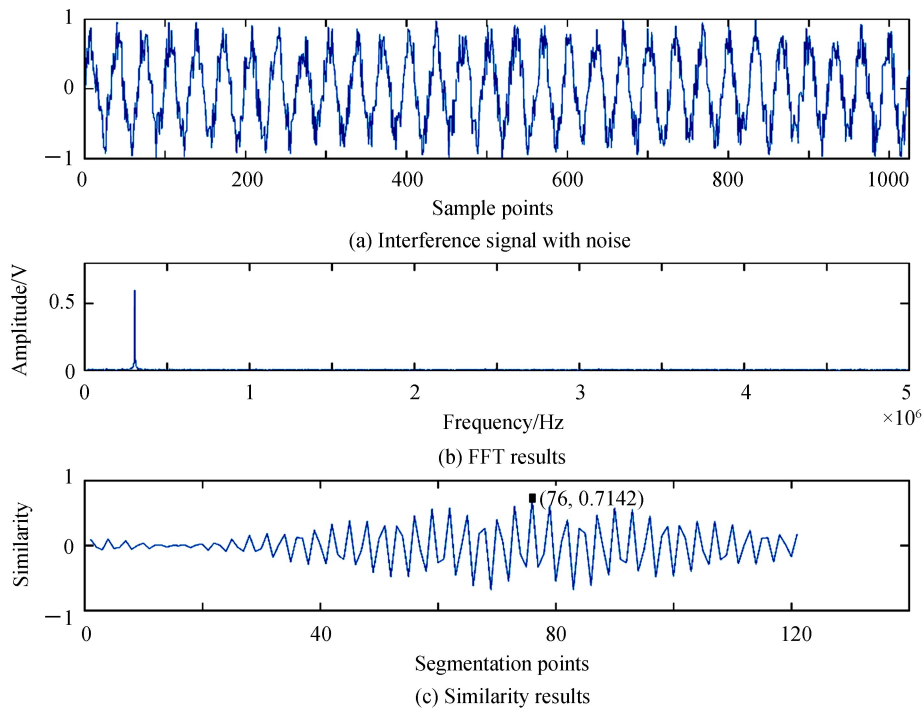


图 6 加噪后的干涉信号、傅里叶变换结果和相似性结果

Fig.6 Interference signal with noise, FFT results and similarity results

干扰噪声的大小对解调结果有不同的影响,通过改变所加噪声大小来判断该解调方法的适用性.保持该仿真干涉信号不变,即仿真干涉信号峰峰值为 2 V,改变加入噪声的大小,每次增加噪声的峰峰值为 0.2 V,所加噪声范围为 0~2.6 V,分别记录信噪比 R_{SN} 和相应的解调结果最大相似性 P 的数值。

如图 7 所示为解调结果最大相似性 P 和信噪比 R_{SN} 的关系,随着噪声的增大信噪比 R_{SN} 减小,相似度 P 也逐渐减小,对数据进行曲线拟合,拟合关系式为: $P=0.96498-10^{(0.011244-0.05\cdot R_{SN})}$,拟合度为 98.069%,分析可知:当信噪比小于 6.87 dB 时,加噪仿真干涉信号与模拟信号的相似性小于 50%,此时解调结果中出现最大相似性位置改变的情况,使解调结果与初始设定值出现偏差,因此当信噪比小于 6.87 dB 时该解调方法不适用。

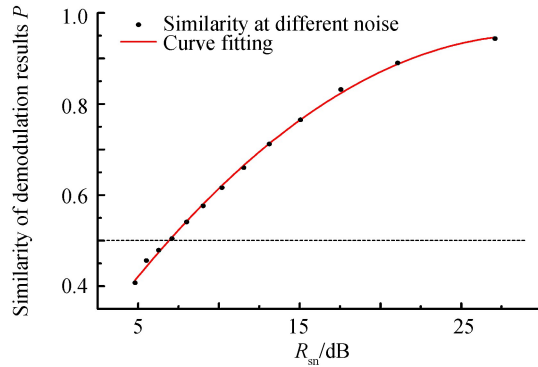


图7 相似性大小与信噪比的关系

Fig.7 The relationship between similarity and SNR

3 实验验证

在利用仿真信号进行解调的基础上,用实验数据对解调方法进行了验证.光纤干涉传感系统采用FCFR-USB9812 数据采集卡,采样率最高支持每通道 100 MS/s,耦合器为 2×2 的 3 dB 耦合器,光纤采用普通单模($9/125 \mu\text{m}$)光纤,上位机处理程序利用 LabView 与 Matlab 联合开发.该系统采样频率 $f_s = 10 \text{ MHz}$,每个扫频周期内的采样点数为 $N = 5000$,则频率分辨率为 $\Delta f = f_s/N = 2 \text{ kHz}$.

利用调节架分别固定两个准直器,调整两调节架使两准直器对准,保证光最大效率地耦合进另一个准直器中.实验过程中,调整两准直器间的距离来改变干涉臂长差,每次调整 $10 \mu\text{m}$,调整范围为 $0 \sim 400 \mu\text{m}$,分别记录解调结果与调整值的数值^[17],测量数据与拟合曲线如图 8 所示.

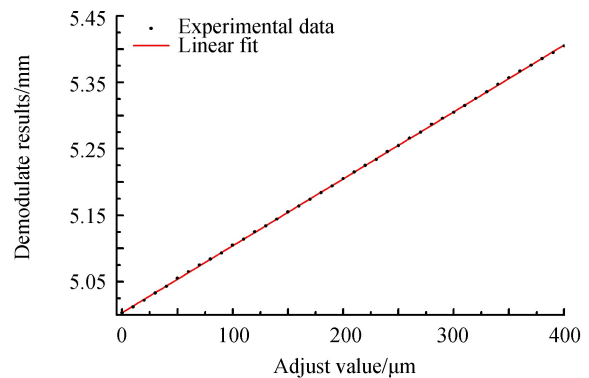


图8 该系统解调结果的范围

Fig.8 The system demodulates the range of results

干涉臂长差解调结果与调整值呈线性关系,对数据进行拟合,拟合线性度 99.998%,拟合直线方程为: $y = 9.90991 \times 10^{-4} \cdot x + 5.00757$,验证了该相似性解调方法的可行性.

在干涉臂长差调整值 $0 \mu\text{m} \sim 400 \mu\text{m}$ 范围内,重复测量 3 次,测量该光纤干涉传感器的重复性,如图 9 所示,三次测量数据基本重合,可见干涉臂长差解调结果的重复性很高.

利用调节架调整两准直器间的距离,每次调整 $250 \mu\text{m}$,改变干涉臂长差,测试干涉臂长差的解调极限距离.如图 10 所示,干涉臂长差解调结果与调整值呈线性关系,拟合线性度 99%,拟合直线方程为: $y = 0.001 \cdot x + 1.98933$,干涉臂长差的解调范围为 $2 \sim 17 \text{ mm}$,超过该范围时无法形成干涉信号,在该解调范围内,解调结果最小分辨率为 $1 \mu\text{m}$,因此可以达到测试量程万分之一的分辨率.

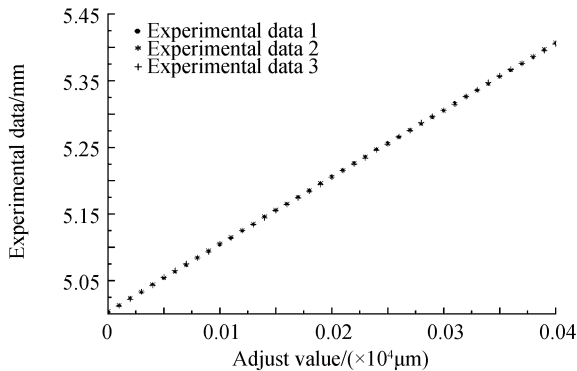


图9 干涉臂长差重复测量

Fig.9 Repeated measurement of interference arm length difference

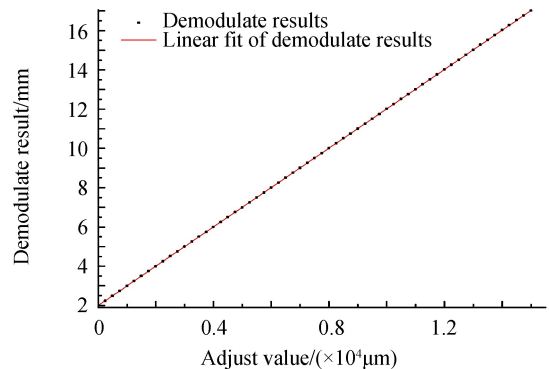


图10 该系统解调结果的范围

Fig.10 The system demodulates range

3.1 抗干扰性分析

测试环境恶劣时会对干涉信号造成噪声干扰,但是对干涉信号做傅里叶变换后,干扰信号的频率幅值很小,最大谱线处对应的频率不会改变,即干涉信号频率不变,对解调结果的影响很小,因此有较高的抗干扰能力.

采集原始干涉信号做相似性解调,如图 11 所示为原始干涉信号的傅里叶变换和相似性解调结果,原始干涉信号截取放大了前 2500 个点,可以看到第 41 个点位置处相似性最大,相似性为 80.12%,则第 41 个点对应的干涉臂长差为精确的干涉臂长差值.

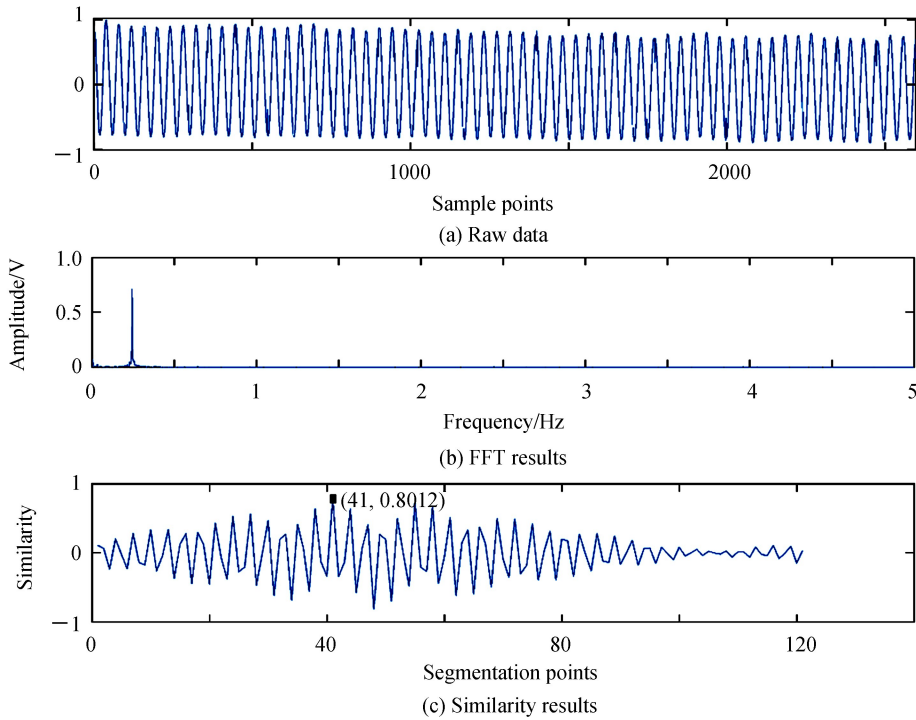


图 11 干涉信号的傅里叶变换和相似性解调结果
Fig.11 Raw data,FFT results and similarity results

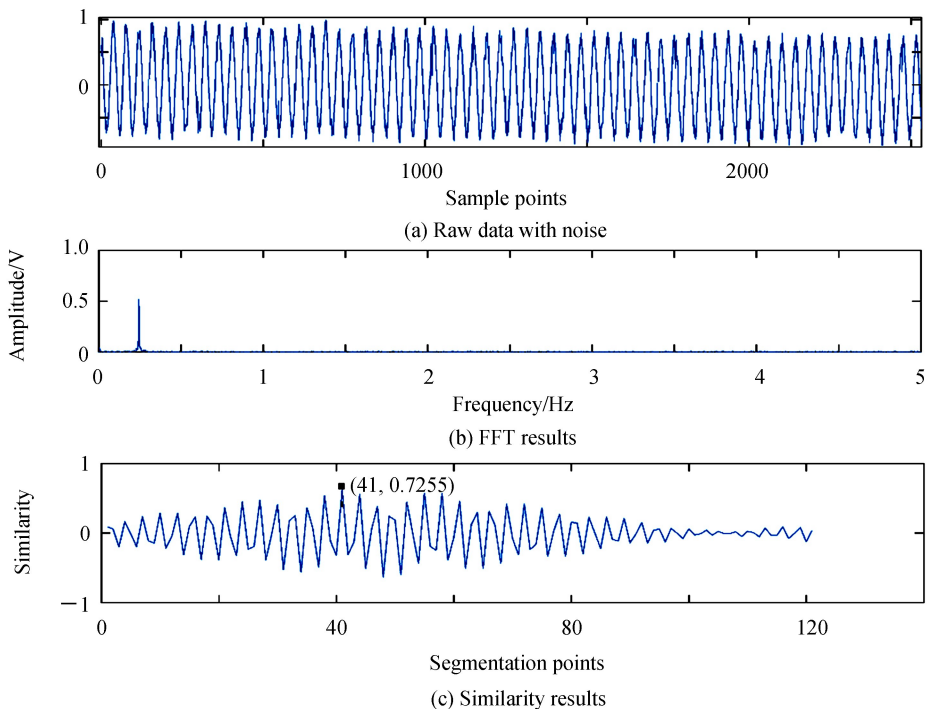


图 12 加噪后的干涉信号、傅里叶变换结果和相似性结果
Fig.12 Interference signals with noise, FFT results and similarity results

在实验过程中引入干扰噪声,如振动、人员走动等,此时加噪后的原始干涉信号的傅里叶变换及相似性结果如图 12 所示.

在原始干涉信号中引入干扰噪声后,傅里叶变换结果中最大谱线处的幅值虽然减小,但最大谱线对应的频率不变,即干涉信号的频率不变,解调结果中相似性降低,由 80.12%减小为 72.55%,但依然是第 41 个点位置处相似性最大,即第 41 个点对应的干涉臂长差为精确的干涉臂长差值,因此加入噪声干扰后虽然相似性降低,但与未加噪声时的解调结果一致.良好的抗干扰性可以降低干扰噪声的影响,保证干涉臂长差解调结果的准确性.

3.2 相似性解调结果与互相关解调结果对比

若对原始干涉信号与模拟干涉信号做互相关运算,其表达式为

$$r(M) = \sum_{n=1}^N \phi(n) \times \phi_i(n - M) \quad M = 0, \pm 1, \dots, \pm N - 1 \quad (11)$$

两组数据做互相关运算时,按时间平移 M 后相乘的两数据的相位不同,产生了相位偏差,影响解调结果的精度.

表 2 为相似性解调和互相关解调结果对比,干涉臂长差每次改变量为 1 mm,将采集到的一系列干涉信号分别用两种方法解调,可以看到解调结果有一定差距.

表 2 相似性解调和互相关法解调结果对比

Table 2 Similarity demodulation and cross correlation results

| Change in L /mm | Similarity demodulation/mm | cross correlation results/mm |
|-------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0 | 3.157 | 3.163 |
| 1 | 4.159 | 4.159 |
| 2 | 5.154 | 5.146 |
| 3 | 6.157 | 6.138 |
| 4 | 7.150 | 7.124 |
| 5 | 8.150 | 8.143 |
| 6 | 9.160 | 9.159 |
| 7 | 10.162 | 10.166 |
| 8 | 11.154 | 11.153 |
| 9 | 12.156 | 12.157 |
| 10 | 13.160 | 13.163 |

干涉臂长差每次改变量为 1 mm 时,两种解调结果的误差如图 13 所示,其中相似性解调结果的误差记为 $x_i (i=1, 2, \dots, 10)$,标准差用 δ_1 表示,互相关解调结果的误差记为 $y_i (i=1, 2, \dots, 10)$,标准差用 δ_2 表示,则

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i^2} = 0.00524 \text{ mm}$$

$$\delta_2 = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} y_i^2} = 0.01154 \text{ mm}$$

可以看到,相似性解调结果的标准差为 0.00524 mm,而互相关解调结果的标准差为 0.01154 mm,远大于相似性解调结果的标准差,验证了相似性解调方法具有更高的精度.

相似性解调和互相关解调公式包含加、乘除运算,在干涉臂长差的范围 $L_{\min} \sim L_{\max}$ 内做 m 次细分时,相似性解调和互相关解调的运算量对比如表 3 所示,可以看到相似性解调方法的运算量远小于互相关方法,较少的运算量可以提高解调速度.

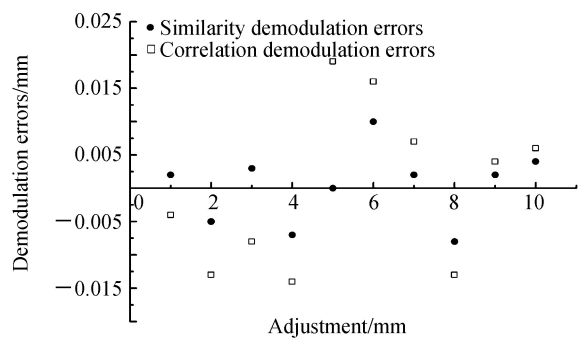


图 13 两种解调结果误差对比

Fig.13 Two kinds of demodulation result error contrast

表 3 不同细分次数的运算量对比
Table 3 Comparison of the calculation of different segments

| | Similarity demodulation | Cross-correlation demodulation |
|----------------|-------------------------|--------------------------------|
| Multiplication | $4(m+1)N$ | $(m+1)N^2$ |
| Division | $(m+1)N$ | 0 |
| Addition | $(m+1)(2N-1)$ | $(m+1)(N-1)^2$ |

4 结论

介绍了基于扫频激光器和马赫-增德尔干涉的光纤传感系统,并对解调方法进行了深入研究,对比不同方法,在互相关解调的基础上提出了相似性解调方法,并通过仿真与实验验证了该解调方法的可行性,结果表明,该系统干涉臂长差的解调范围为 2~17 mm,解调结果的最小分辨率为 1 μm ,即可以达到测试量程万分之一的分辨率;同时,相似性解调方法的抗干扰能力强,可实现信噪比大于 6.87 dB 时信号的解调;当干涉臂长差改变量为 1 mm 时,互相关解调结果的标准差为 0.011 54 mm,而相似性解调结果的标准差为 0.005 24 mm,远小于互相关解调结果,因此相似性解调方法的解调精度较高.干涉式光纤传感器具有广泛的应用,本文针对基于扫频激光器的光纤传感系统,提出了相似性解调方法,该解调方法在高精度绝对距离的测量上具有重要意义.

参考文献

- [1] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, *et al.* Interferometric fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, **12**(3): 2467-2486.
- [2] LIAO Yi, AUSTIN E, PHILIP J N, *et al.* Highly scalable amplified hybrid TDM/DWDM array architecture for interferometric fiber-optic sensor systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, **31**(6): 882-888.
- [3] REN Zhong-jie, LI Jian-xin, ZHU Ri-hong, *et al.* Phase-shifting optical fiber sensing with rectangular-pulse binary phase modulation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **100**:170-175.
- [4] DU Zhi-quan, NI Feng, XIAO Xin-fa. Development and application of optical fiber sensing technology[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2014, **29**(6):7-17.
杜志泉,倪锋,肖发新.光纤传感技术的发展与应用[J].光电技术应用,2014,**29**(6):7-17.
- [5] CHANG Jian-hua, YANG Zhen-bo, WANG Ting-ting. Oil level sensor based on all-fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2013, **36**(6): 928-930.
常建华,杨镇博,王婷婷.全光纤马赫-曾德干涉型高精度油罐液位传感器[J].电子器件,2013,**36**(6):928-930.
- [6] GAO Wen-zhi, CHEN Jian-dong, GE Zhao-bin, *et al.* Calculation method for stiffness coefficient of compliant cylinder in fiber-optic interferometric vibration sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(3):0310002.
高文智,陈建冬,葛兆斌,等.光纤干涉式振动传感器中顺变柱体刚度系数的计算方法[J].中国激光,2017,**44**(3):0310002.
- [7] CHEN Jian-dong, CHANG Tian-ying, FU Qun-jian, *et al.* A fiber-optic interferometric Tri-component geophone for ocean floor seismic monitoring[J]. *Sensors*, 2016, **17**(1):1125-1137.
- [8] ZHANG Zhen-rong, XIA Ji, LUO Hong. Study on the cavity length demodulation of intrinsic fabry-perot interferometric optical fiber sensors[J]. *High Technology Letters*, 2015, **25**(12): 1011-1016.
张振荣,夏霁,罗洪. EFPI 光纤传感器腔长解调方法研究[J].高技术通信,2015, **25**(12): 1011-1016.
- [9] ZHAO Wen-jian. Research on fiber optical interferometer using digital tunable laser[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2015:9-11.
赵文建.采用数字调谐激光器的光纤光学相干测距仪的研究[D].杭州:浙江理工大学,2015:9-11.
- [10] ZHAO Yan, WANG Dai-hua. 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.
- [11] ZENG Zhou-mo, LIU Fang, FENG Hao, *et al.* Digitalized demodulation based on 3×3 coupler for dual Mach-Zehnder fiber interferometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(6):1410-1417.
增周末,刘芳,封皓,等.基于 3×3 耦合器的双马赫-曾德尔干涉仪数字化相位解调[J].光学精密工程,2014,**22**(6):1410-1417.
- [12] CAO Zhen-zhou, LIU Wei. Experimental study on the hydrophone characteristics based on all optical fiber Mach-Zehnder's interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**: 64-66.
曹振洲,刘维.基于光纤马赫-曾德尔干涉仪光纤水听器的实验研究[J].光子学报,2010, **39**:64-66.
- [13] LV Tao, LIU Zhi-gang, DENG Zhong-wen, *et al.* A range amplified absolute distance measurement system with laser frequency sweeping interferometry by optical fiber pairs[J]. *Journal of Xian Jiaotong University*, 2013, **47**(9):77-82.

- 吕涛, 刘志刚, 邓忠文, 等. 一种光纤组量程扩增的激光频扫描干涉绝对测距系统[J]. 西安交通大学学报, 2013, **47**(9): 77-82.
- [14] LIU Ye. Research on soft-demodulation technology of high precision water level measurement system based on optical fiber interferometer[D]. Changchun: Jilin University, 2016: 11-13.
刘野. 基于光纤干涉法的高精度水位检测系统软件解调的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016: 11-13.
- [15] XIE Jie-hui. Studies on wavelength demodulation and multiplexing methods of fiber optic fabry-perot sensors[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 31-32.
谢杰辉. 光纤法珀传感器波长解调及复用技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 31-32.
- [16] ZHANG Xiao-jun, TANG Chong, SUN Jing-hua. Demodulation method based on the 3×3 optical fiber coupler[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, **34**(5): 665-671.
张晓峻, 康崇, 孙晶华. 3×3 光纤耦合器解调方法[J]. 发光学报, 2013, **34**(5): 665-671.
- [17] SHARMA A K, GUPTA J, BASU R. Simulation and performance evaluation of fiber optic sensor for detection of hepatic malignancies in human liver tissues[J]. *Optics and Laser Technology*, 2018, **98**: 291-297.
- [18] JIANG Xiao-feng, LIN Chun, XIE Hai-he, *et al.* Optic fiber MEMS pressure sensor based on white light interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1006003.
江小峰, 林春, 谢海鹤, 等. 白光干涉解调光纤 MEMS 压力传感器[J]. 光子学报, 2014, **43**(10): 1006003.

Foundation item: State Administration of Oceanography of China (No.201405026-01)

引用格式: PANG Shuo, LUO Zheng-chun, CHANG Tian-ying, *et al.* Similarity Demodulation Method of Interferometric Fiber Optic Sensing System[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0606003

庞铄, 罗政纯, 常天英, 等. 用于干涉型光纤传感系统的相似性解调方法[J]. 光子学报, 2018, **47**(6): 0606003