

基于双波长和 3×3 光纤耦合器的干涉测量相位解卷绕方法

张冰¹, 王葵如¹, 颜玢玢¹, 周红仙², 王毅², 余重秀¹, 苑金辉¹, 桑新柱¹

¹北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876;

²东北大学秦皇岛分校控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 将 3×3 光纤耦合器相位解调和数字全息中的双波长相位测量方法相结合, 提出了一种适合于相位型光纤传感器并能进行大范围相位测量的相位解卷绕方法。通过利用合成波长的解卷绕相位对单一波长的卷绕相位进行补偿, 得到大范围、无差错的相位变化信息。建立了基于 1310 nm 和 1550 nm 的双波长光纤迈克尔逊干涉系统, 对压电位移台所产生的大范围振动进行测量, 验证了该方法的可行性和有效性。与 1310 nm 单一波长的相位解调结果相比, 该方法可使测量的光程差扩大到原来的 6.5 倍。

关键词 测量; 相位解卷绕; 双波长相位检测; 3×3 光纤耦合器

中图分类号 TP212.1; TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0412004

Phase Unwrapping Method Based on Dual Wavelength and 3×3 Fiber Coupler with Interferometric Measurement

Zhang Bing¹, Wang Kuiru¹, Yan Binbin¹, Zhou Hongxian², Wang Yi²,
Yu Chongxiu¹, Yuan Jinhui¹, Sang Xinzhu¹

¹ State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

² School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract A phase unwrapping method for phase-type optical fiber sensors and large-scale phase measurement is proposed, which combines the phase demodulation of 3×3 fiber coupler and the dual-wavelength phase measurement method in digital holography. The unwrapped phase of the synthesized wavelength is used to compensate the wrapped phase of the single wavelength. And the wide-range, error-free phase change information is obtained. The optical fiber Michelson interferometry system based on dual-wavelength of 1310 nm and 1550 nm is established. The large range vibration generated by the piezoelectric displacement platform is measured. And the feasibility and validity of this method are verified. Compared with the phase demodulated result of the 1310 nm single wavelength, the proposed method can make the measured optical path difference expand to 6.5 times.

Key words measurement; phase unwrapping; dual-wavelength phase detection; 3×3 fiber coupler

OCIS codes 120.3180; 100.5088; 060.1810

1 引 言

光纤传感技术是一种以光为载体、光纤为媒质, 感知和传输外界信号的传感技术, 相对于传统的传

感技术, 光纤传感技术具有灵敏度高、动态响应范围大等优势。相位型光纤传感技术兼具光纤传感和干涉测量的优点, 把待测的物理量转化为相位, 例如温度(光纤温度传感器)、位移(光纤位移传感器)、角速

收稿日期: 2017-08-28; 收到修改稿日期: 2017-11-26

基金项目: 国家自然科学基金(61275214, 61475023)、河北省自然科学基金(A2015501065)

作者简介: 张冰(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器方面的研究。E-mail: zhangbing256@bupt.edu.cn

导师简介: 王葵如(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感技术和光纤通信等方面的研究。

E-mail: krwang@bupt.edu.cn(通信联系人)

度(光纤陀螺仪)等,外部信号作用到相位型光纤传感器的探测端引起探测光和参考光之间的相位差变化,通过测量干涉信号的相位,实现传感测量,获得被探测对象的相关信息^[1-2]。

正确的相位解调是相位型光纤传感器的关键技术之一,但由于干涉耦合项为余弦函数,余弦函数的周期性导致解调的相位一般不是真实相位信息,而是位于 $[-\pi, \pi]$ 的主值部分,即卷绕相位,也称包裹相位,与真实相位之间相差 2π 的整数倍。当物理量的变化范围较大时会导致相应的相位变化较大,相位变化范围超过 $[-\pi, \pi]$,即发生相位卷绕。因此,在目前的相位型光纤传感技术中,只能把相位限定在 $[-\pi, \pi]$ 内,限制了待测物理量的动态范围。对于常用的反射测量模式, $\pm\pi$ 相位对应的光程范围为 $\lambda/2$,因此,选用波长较长的光源,可以相对提高探测范围。

相位卷绕广泛存在于干涉检测技术中,从卷绕相位中恢复实际相位,这一过程即为相位解卷绕,也称相位展开、相位解缠或相位解包裹。目前,已有多种数值解卷绕的方法被提出,有基于可靠性的相位解包裹、最小范数法和最小二乘法相位解包裹等^[3-4]。数值解卷绕的原理是根据相位的连续性,通过比较相邻点之间相位差进行相位卷绕判断,从而进行相应的相位补偿。当待测物体表面变化梯度较大、存在不连续突变(如较深的台阶)或当干涉条纹受噪声影响较大时,相位解卷绕算法容易出现错误。原理上讲,当相邻两点的相位差大于 π 时,就无法正确恢复真实相位^[5-6]。

为了避免数值相位解卷绕所存在的上述问题,Wagner等^[7]在数字全息术中提出了双波长相位解卷绕,利用两种不同波长的激光获得两组干涉信号,求出合成波长的相位信息,由于合成波长远大于单一波长,因此,对于合成波长来讲,不发生卷绕的范围大大增加。目前,这种方法已经应用于数字全息术及光学相干层析的光学干涉等技术中^[8-10]。由于噪声正比于波长,合成波长得到的相位信息噪声较大,在传统的双波长相位解卷绕中,利用合成波长的结果对单一波长的卷绕进行半波长分段补偿,由于噪声的影响,在分段的边界不可避免地出现正负半波长的补偿错误。因此还需要对结果做进一步解卷绕处理,这种解卷绕同样受到相邻两点之间相位差不能超过 π 的限制。

相位型光纤传感技术的相位解调方法主要包括相位产生载波法(零差法和外差法)、双光束偏振零

差干涉法、基于 3×3 光纤耦合器的零差解调法、正交信号解调等。其中 3×3 耦合器相位解调方法结构简单,无需进行载波调制,并且可以降低光源频率随机漂移产生的相位噪声^[11]。目前 3×3 耦合器相位解调方法已在光纤水听器、光纤加速度计及光纤陀螺等光纤传感领域得到广泛应用^[12-15]。

本文将 3×3 光纤耦合器相位解调方法与数字全息成像中的双波长相位补偿方法相结合,提出了一种基于1310 nm和1550 nm双波长以及 3×3 光纤耦合器的相位解卷绕方法,使用该方法可实现大范围的相位解调。建立了迈克耳孙干涉实验系统,用纳米压电位移台对所提出的方法进行实验验证。实验结果表明,所提出的相位解调及解卷绕方法简单有效,其可以有效地增大相位型光纤传感器的测量范围。

2 方法及系统

2.1 3×3 耦合器相位解调方法

在 3×3 光纤耦合器相位解调中,由三个输出端得到的干涉信号可以表示为^[16]:

$$\begin{aligned} V_1 &= D_1 + A_1 \cos[\varphi(t)] \\ V_2 &= D_2 + A_2 \cos[\varphi(t) + \Delta\varphi_1], \\ V_3 &= D_3 + A_3 \cos[\varphi(t) + \Delta\varphi_2] \end{aligned} \quad (1)$$

式中,三路干涉信号的相位差为 $\Delta\varphi_1$ 和 $\Delta\varphi_2$, $\varphi(t)$ 是待测相位, $D_{i=1,2,3}$ 和 $A_{i=1,2,3}$ 为与干涉仪输入光强、耦合器分光比和光路损耗有关的参数,由三路干涉信号可以得到待测相位 $\varphi(t)$,表示为:

$$\varphi(t) = \tan^{-1} \left(\frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}{q_1 V_1 + q_2 V_2 + q_3 V_3} \right), \quad (2)$$

式中 $p_{i=1,2,3}$ 和 $q_{i=1,2,3}$ 是由耦合器的分光比和相位差表示的参数,分别表示为:

$$\begin{cases} p_1 = \frac{D_2}{D_1} \frac{A_3}{A_1} \cos\Delta\varphi_2 - \frac{D_3}{D_1} \frac{A_2}{A_1} \cos\Delta\varphi_1 \\ p_2 = \frac{D_3}{D_1} - \frac{A_3}{A_1} \cos\Delta\varphi_2 \\ p_3 = \frac{A_2}{A_1} \cos\Delta\varphi_1 - \frac{D_2}{D_1} \\ q_1 = \frac{D_2}{D_1} \frac{A_3}{A_1} \sin\Delta\varphi_2 - \frac{D_3}{D_1} \frac{A_2}{A_1} \sin\Delta\varphi_1 \\ q_2 = -\frac{A_3}{A_1} \sin\Delta\varphi_2 \\ q_3 = \frac{A_2}{A_1} \sin\Delta\varphi_1 \end{cases} \quad (3)$$

3×3 耦合器相位解调的优点是不受光源光强

涨落的影响,当光源出现强度涨落时,(3)式中 D_i/D_1 、 A_i/A_1 和 $\Delta\varphi_{1,2}$ 不发生改变,因此参数 p_i 和 q_i 不随光强变化,不影响信号解调结果。由于 3×3 耦合器相位解调是通过反正切计算相位,因此其周期为 π ,主值区间为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。

2.2 双波长相位解卷绕

相位型光纤传感器测量的是探测光和参考光之间的相位差,双光束干涉光强振幅可以表示为:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \theta, \quad (4)$$

式中 $\cos \theta$ 为干涉耦合项,通过对 $\cos \theta$ 的解调,得到相位差 θ , θ 可表示为 $\theta_0 + 2k\pi$, θ_0 为主值区间 $[-\pi, \pi]$ 的值。对于常用的反射测量模式, θ 可以表示为 $4\pi d/\lambda$, 其中 d 为探测臂和参考臂的光程差, λ 为波长。假定使用两个波长分别为 λ_1 和 λ_2 的光进行相干探测,由于波长不同,两束光引起的相位差不同, $\theta_1 = 4\pi d/\lambda_1$, $\theta_2 = 4\pi d/\lambda_2$ 。将两束光的相位差 θ_1 和 θ_2 再作差,假定波长 $\lambda_1 < \lambda_2$, 得到:

$$\theta_s = 4\pi d \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) = \frac{4\pi d}{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}}, \quad (5)$$

设 $\lambda_s = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$, 定义为合成波长,其大小主要决定于波长 λ_1 和 λ_2 的差。由于 λ_s 远大于单一波长 λ_1 和 λ_2 , 因此,从(5)式可以看出, θ_s 取决于合成波长,其取值范围(不发生卷绕的范围)与单一波长相比大大增加。

由于噪声正比于波长,且合成波长计算得到的相位噪声较大,通过比较合成波长和单一波长的结果,再对单一波长进行分段补偿,以此降低噪声,这样便可以得到较为理想的相位测量结果。假定波长 λ_1 、 λ_2 和 λ_s 对应的真实相位分别为 $\theta_1(t)$ 、 $\theta_2(t)$ 和 $\theta_s(t)$, 为了得到准确的真实相位值,以 $\theta_1(t)$ 为例,采取的改进双波长相位解卷绕方法步骤如下。

1) 由于干涉系统测量和计算得到波长 λ_1 和 λ_2 的卷绕相位 $\theta_{1w}(t)$ 和 $\theta_{2w}(t)$, 两者相减得到合成波长 λ_s 的相位 $\theta'_{sw}(t)$;

2) 对 $\theta'_{sw}(t)$ 进行过零补偿,当小于零时加 π , 然后对合成波长解卷绕(相邻两点之间相位差超过 $\pi/2$ 作为卷绕判据), 得到合成波长的解卷绕结果 $\theta_s(t)$;

3) $\theta_s(t)$ 乘以因子 λ_s/λ_1 , 得到 $\theta'_1(t)$, $\theta'_1(t)$ 为具有较大噪声的 $\theta_1(t)$ 的估计值;

4) 对 $\theta'_1(t)$ 进行分段(间隔为 π), 根据 $\theta'_1(t)$ 的分段情况对 $\theta_{1w}(t)$ 的卷绕进行补偿, 得到 $\theta''_1(t)$ 。由于噪声的影响,在 $\theta'_1(t)$ 分段边界可能会出现分段

错误,导致 $\theta''_1(t)$ 出现 $\pm\pi$ 的错误;

5) 计算 $\theta''_1(t)$ 和 $\theta'_1(t)$ 的差,当两者差大于 $\pi/2$ 时认为是边界 $\pm\pi$ 错误,进行修正,得到 $\theta_1(t)$ 。

如果 $\theta'_1(t)$ 的噪声较大,可以在步骤 3) 进行降噪处理。 $\theta_2(t)$ 的处理过程和以上步骤相同,只是在步骤 3) 中乘以因子 λ_s/λ_2 。

图 1 所示的是双波长解卷绕的仿真结果,光源波长 λ_1 和 λ_2 分别为 1310、1550 nm, 3×3 光纤耦合器三个端口的固定相位差为 120° , 假定光程是线性增大的。图 1(a) 是由 3×3 光纤耦合器输出的 1310 nm 波长三路干涉信号, 1550 nm 的干涉信号类似(未画出)。仿真中加入了随机函数的模拟噪声,干涉信号的信噪比为 20 dB。图 1 的横坐标表示光程,纵坐标表示相位变化量。图 1(b) 中蓝色、红色曲线表示 λ_1 、 λ_2 的卷绕相位 $\theta_{1w}(t)$ 和 $\theta_{2w}(t)$, 黑线为 $\theta_{1w}(t)$ 和 $\theta_{2w}(t)$ 之差 $\theta'_{sw}(t)$ 。对 $\theta'_{sw}(t)$ 进行过零点处理,当 $\theta'_{sw}(t) < 0$ 时,将 $\theta'_{sw}(t)$ 值加 π , 结果如图 1(c) 中的红线所示。由于噪声的存在,在零点附近,会有判断错误,其位置在图 1(c) 中用竖向箭头标示出来。再经过解卷绕处理(当相邻两点的相位差超过 π , 即认为是卷绕)和补偿得到合成波长的解卷绕结果 $\theta_s(t)$, 如图 1(c) 中棕色线所示。图 1(c) 中黑色线表示 $\theta'_{sw}(t)$ 。图 1(d) 中蓝线为 λ_1 的卷绕相位 $\theta_{1w}(t)$, 棕色线是 λ_s 的解卷绕相位 $\theta_s(t)$, $\theta_s(t)$ 乘以因子 λ_s/λ_1 , 得到 $\theta'_1(t)$, 如图 1(d) 中橙色线所示。 $\theta'_1(t)$ 是由合成波长的结果变换得到的具有较大噪声的 λ_1 相位估计结果,对 $\theta'_1(t)$ 进行分段(间隔为 π), 分段处由图 1(d) 中短划横线表示,根据 $\theta'_1(t)$ 的分段对 $\theta_{1w}(t)$ 的卷绕进行补偿, 得到 $\theta''_1(t)$, 如图 1(d) 中红线所示。由于噪声的影响,在 $\theta'_1(t)$ 分段边界会导致 $\theta''_1(t)$ 出现 $\pm\pi$ 的误判^[17], 其位置在图 1(d) 中也用竖向箭头标示。比较 $\theta'_1(t)$ 和 $\theta''_1(t)$ 这两条曲线的差可以看出,当差较大时,表明为 $\pm\pi$ 补偿错误,在此处进行修正,就可最后得到结果 $\theta_1(t)$, 如图 1(e) 中红线所示。图 1(e) 中蓝线和黄线分别表示 $\theta_{1w}(t)$ 和 $\theta'_1(t)$, 和 $\theta''_1(t)$ 相比, $\theta_1(t)$ 具有较小噪声,其噪声与直接得到的 $\theta_{1w}(t)$ 的噪声水平一致。以上解调过程用 Matlab 软件实现。

2.3 实验系统

采用的实验装置主要为一个光纤迈克耳孙干涉仪,如图 2 所示。所用光源是波长分别为 1310 nm 和 1550 nm 的激光二极管,使用分波器(DEMUX)进行 1310 nm 和 1550 nm 光的分离,经过 6 个光电探测器(PD)将两个波长的 6 路光信号分别转化为

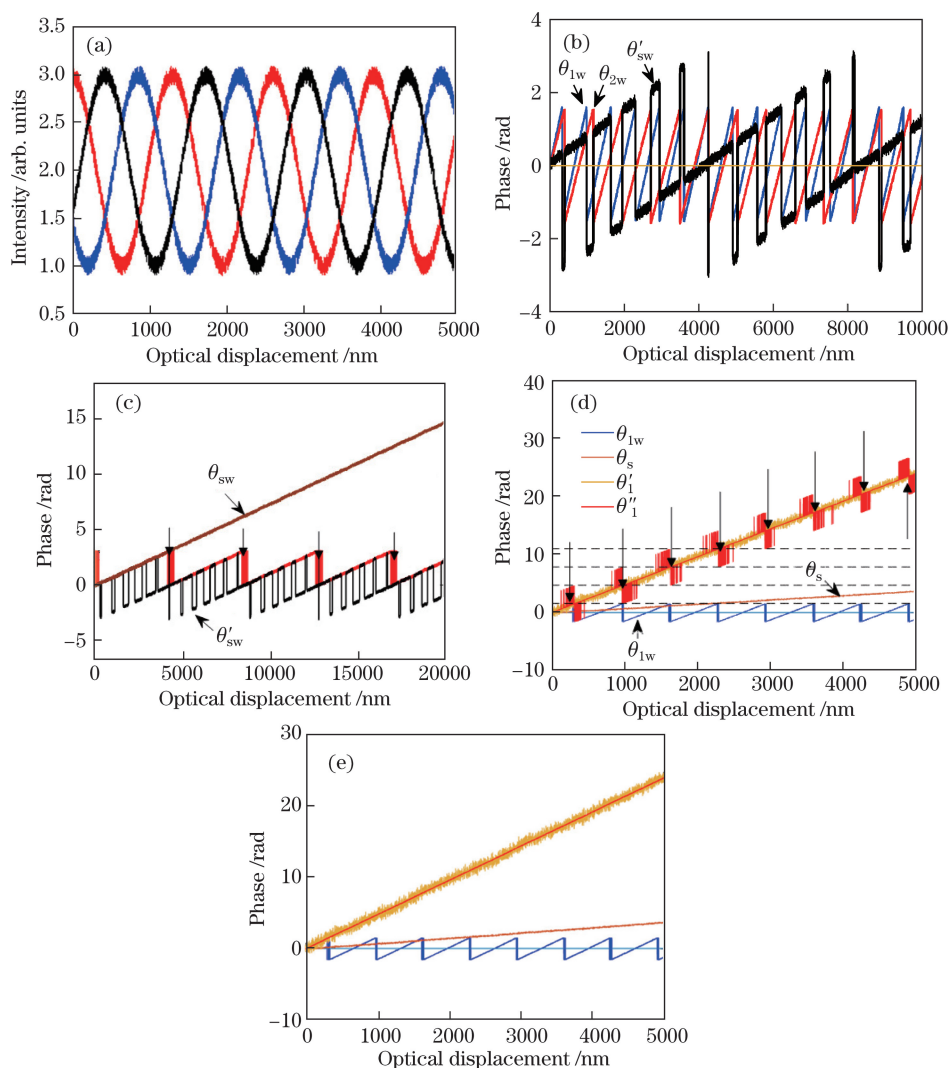


图 1 双波长相位解卷绕仿真结果。(a) 1310 nm 的三路干涉信号;(b) λ_1 、 λ_2 和合成波长的卷绕相位;
(c) 合成波长卷绕相位过零点处理及解卷绕结果;(d) 分段相位补偿的结果;(e) 分段补偿错误修正结果

Fig. 1 Simulation results of dual-wavelength phase unwrapping. (a) Three interference signals of 1310 nm;
(b) wrapped phases of λ_1 , λ_2 and the synthetic wavelength; (c) wrapped phase of synthetic wavelength after zero processing
and unwrapping; (d) results with segmentation phase compensation; (e) error correction of segmentation compensation

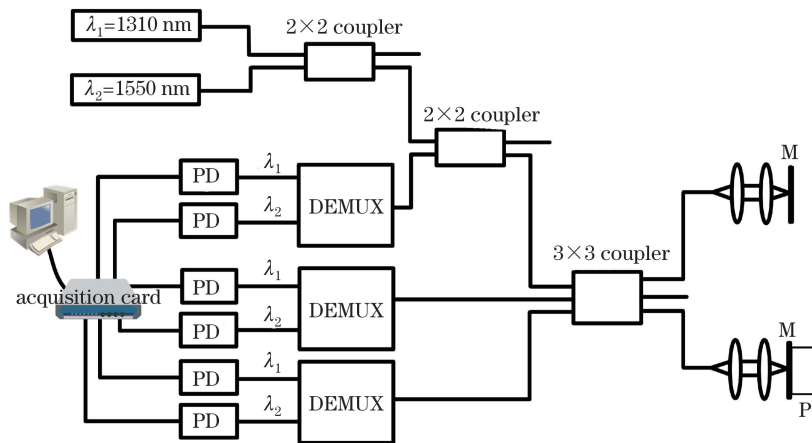


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental system

电信号,再经采集卡(USB-6341,NI)传给计算机。整个系统等效于工作在 1310 nm 和 1550 nm 的两个 3×3 耦合器相位解调系统,同时进行双波长干涉信号检测,在探测臂端,用压电位移台(P)(P-260,PI)驱动反射镜(M)产生光程差。

3 实验结果及讨论

3.1 实验结果

利用压电位移台控制干涉仪探测臂的反射镜振动产生确定的光程变化,解调出对应的相位及光程,以此验证所提出的相位解调方法的有效性。利用压电位移台驱动反射镜振动,位移量是正弦函数(幅度

为 $20 \mu\text{m}$)。实验结果如图 3 所示,图 3(a)为 3×3 耦合器三个端口输出的 $\lambda_1 = 1310 \text{ nm}$ 干涉信号;图 3(b)为 $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$ 的干涉信号;由(1)~(3)式计算得到 1310 nm 和 1550 nm 的卷绕相位 $\theta_{1w}(t)$ 和 $\theta_{2w}(t)$,分别如图 3(c)中第一栏和第二栏曲线所示;由 $\theta_{1w}(t)$ 和 $\theta_{2w}(t)$ 之差得到合成波长的卷绕相位 $\theta'_{sw}(t)$,如图 3(c)中第三栏所示;对 $\theta'_{sw}(t)$ 进行过零点处理和解卷绕处理,得到合成波长的解卷绕结果 $\theta_s(t)$,如图 3(d)中蓝线所示;作为对照,图 3(d)中红线和黑线分别表示 λ_1 和 λ_2 的解卷绕结果 $\theta_{1e}(t)$ 和 $\theta_{2e}(t)$ 。从图 3(d)可以看出,经过同样的解卷绕处理,波长 λ_1 和 λ_2 出现了明显的解卷绕错误,这是由

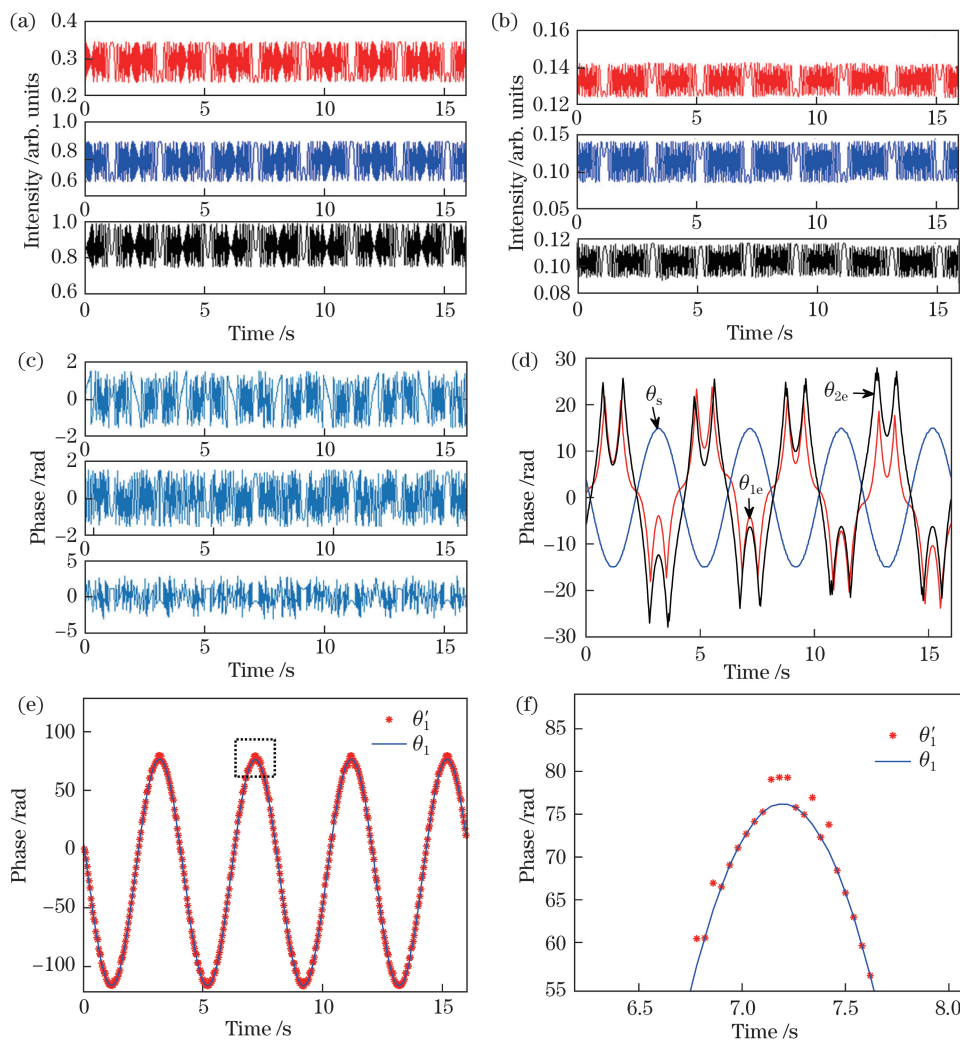


图 3 光程差为正弦函数时的解调结果。(a) 1310 nm 的三路干涉信号;(b) 1550 nm 的三路干涉信号;

(c) λ_1 、 λ_2 和合成波长的卷绕相位;(d) λ_1 、 λ_2 和合成波长的解卷绕相位;

(e) 相位补偿前后的 θ'_1 和 θ_1 ;(f) 图(e)中矩形框的放大图

Fig. 3 Demodulation results when the optical path difference is sinusoidal function. (a) Three interference signals of 1310 nm;

(b) three interference signals of 1550 nm; (c) wrapped phases of λ_1 , λ_2 and the synthetic wavelength;

(d) unwrapped phases of λ_1 , λ_2 and the synthetic wavelength; (e) θ'_1 and θ_1 before and after phase compensation;

(f) enlarged view of the region in the rectangular box in Fig. (e)

于相邻两点的光程差较大,当对应的相位超过 $\pi/2$ 时,传统的解卷绕方法失效,而合成波长(8460 nm)远大于单一波长,对于同样的光程变化,相邻两点的相位差小于 $\pi/2$,因此能得到正确的解卷绕结果。图3(e)红星线所示是经过分段补偿后的 θ'_1 。再经步骤5)处理,得到波长1310 nm的真实相位 θ_1 ,如图3(e)蓝实线所示。图3(f)是(e)中矩形框的放大图,可以看出,分段补偿会引入 $\pm\pi$ 的跳变,经过步骤5)处理,可得到平滑的 $\theta_1(t)$,最终处理结果和前面的分析及仿真结果一致。压电换能器(PZT)设定的正弦振动幅度为 $20\ \mu\text{m}$,实验得到的 $\theta_1(t)$ 的幅度为 $20.061\ \mu\text{m}$,由计算可知相对误差为0.3%。

图4所示是反射镜位移为三角函数(幅度为 $20\ \mu\text{m}$)和矩形函数(幅度为 $3\ \mu\text{m}$)的相位解调结

果,图4(a)表示反射镜位移为三角函数时1310 nm的三路干涉信号,图4(c)表示反射镜位移为矩形函数时1310 nm光的三路干涉信号,图4(b)和(d)中,黑线表示使用所提出的双波长方法、反射镜位移分别为三角函数和矩形函数时得到的1310 nm波长的相位解调结果,和预设位移一致。在图4(b)和(d)中,红线表示使用传统解卷绕方法得到的1310 nm波长的相位,可以明显地看出,两者的相位幅度都较小,在图4(d)中还出现了解调错误。在图4(d)中,传统方法和所提出的方法在矩形函数高低台阶的起始部分都出现了震荡,这是由于当压电位移台的位移变化较快时,稳定性变差,利用相敏光学相干层析的方法进行检测,也出现了类似的震荡。

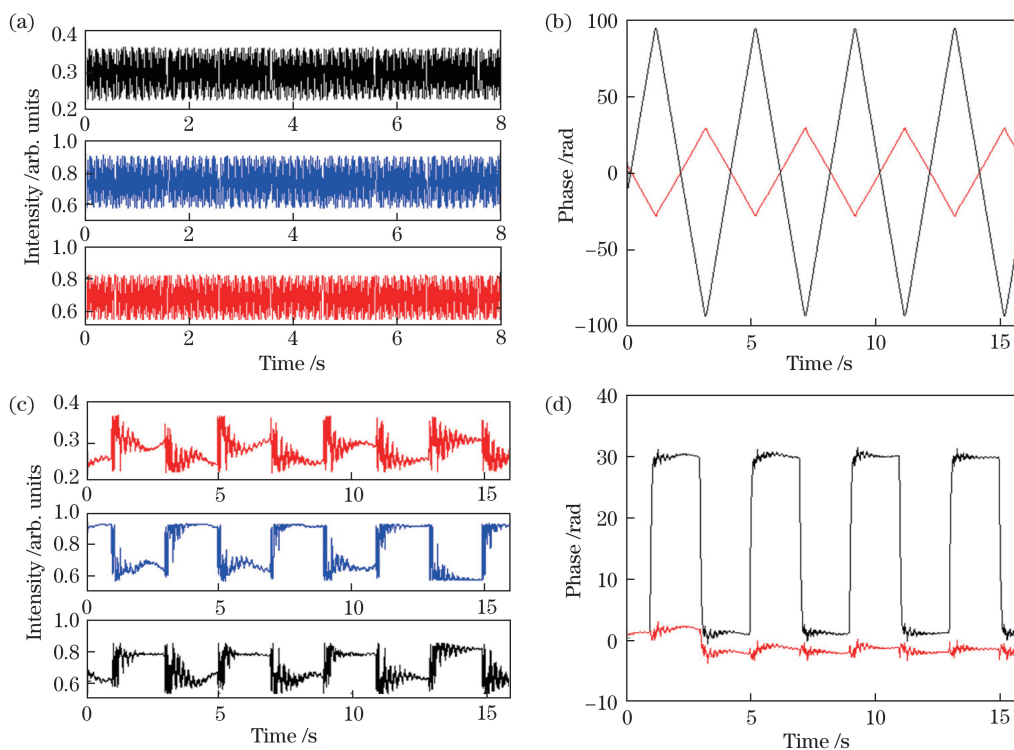


图4 三角函数和矩形波函数振动的解调曲线。(a)三角函数振动时 λ_1 的三路采样信号;(b)三角函数解调结果;(c)矩形函数振动时 λ_1 的采样信号;(d)矩形函数解调结果

Fig. 4 Demodulation curves of the vibration with triangular function and rectangular function.

(a) Three sampling signals of λ_1 under the vibration with triangular function; (b) demodulation result of the triangular function; (c) sample signals of λ_1 under the vibratory with rectangular function; (d) demodulation result of the rectangular function

3.2 讨论

从图3和图4所示结果可以看出,建立的系统可以正确地进行大范围相位解调。在以往的双波长相位解卷绕中,也有利用合成波长的结果对单一波长的卷绕相位进行半波长分段补偿,为了消除分段边界正负半波长的补偿错误,通过比较相邻两点的相位差进行处理,但是这种方法同样受到相邻两点

之间相位差(单一波长)不能超过 $\pi/2$ 的限制。先通过合成波长得到单一波长相位的估计值,然后比较估计值和分段补偿结果在同一点的相位差,将其作为正负半波长补偿错误的判据,当两者的差较大时,则判断为半波长补偿错误。这种方法的优点是不要比较相邻点的相位差,消除了相邻两点之间相位差不能超过 $\pi/2$ 的限制。

在相位解调中,也使用了传统的数值相位解卷绕方法,如步骤 2)所示,但由于传统解卷绕方法在相邻两点的相位差超过 $\pi/2$ 时会失效,因此采用双波长干涉测量的方法。由于合成波长远大于单一波长,对于同样的光程变化,合成波长的相位远小于单一波长,对于本系统来讲,合成波长计算得出为 8460 nm,解卷绕的有效范围相对于单一波长 1310 nm 扩大了 5.5 倍。从图 4(b)和(d)可以看出,经过同样的解卷绕处理,使用单一波长 λ_1 或 λ_2 会出现明显的相位差错,而使用双波长检测,可得到正确的相位结果。

图 2 所示系统是在传统的基于 3×3 光纤耦合器的迈克耳孙干涉仪相位解调中,使用分波器实现双波长干涉信号采集及解调,由于是利用双波长的结果对单一波长进行相位卷绕补偿,其相位计算精度和单一波长相同。所示的双波长相位解卷绕方法不局限于使用 3×3 耦合器,也可以和其他相位解调方法结合,实现大范围的相位检测。

所建立的实验系统,主要目的是为了验证使用双波长解卷绕方法的有效性,因此,在实验中没有测量系统的抗噪能力。但因为是利用合成波长的结果对单一波长解卷绕,理论上系统抗噪能力应等同于用常规的 3×3 耦合器进行解调的系统抗噪能力。

4 结 论

传统的相位型光纤传感技术,其检测范围受到相位卷绕的限制。将 3×3 光纤耦合器相位解调和双波长解卷绕相结合,给出了一种改进型的全光纤相位检测方法。建立了双波长迈克耳孙干涉系统,利用压电平移台对该系统的可行性进行了实验验证,结果表明该系统能够实现简单有效的大范围相位检测。该方法可以利用现有的 3×3 光纤耦合器相位解调系统结构,仅需增加分波器进行双波长干涉信号的分离和同时采集,因此可方便地直接应用于已有的基于 3×3 光纤耦合器的相位解调光纤传感系统。

参 考 文 献

- [1] Pei L, Weng S J, Wu L Y, *et al.* Progress in optical fiber laser sensing system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0700001.
裴丽, 翁思俊, 吴良英, 等. 光纤激光传感系统的研究进展[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0700001.
- [2] Li C S, Yan B B, Wang D P, *et al.* Fiber Bragg grating sensing by ultra-broadband light source based on bismuth-erbium co-doped fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0110003.
李春生, 颜玢玢, 王大朋, 等. 基于超宽带铋铒共掺光纤光源的光纤光栅传感[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0110003.
- [3] Zheng G, Wang W G, Luo C H. Phase unwrapping algorithm based on the reliability[J]. Optical Technique, 2004, 30(4): 510-512.
郑刚, 王文格, 罗春红. 基于可靠性的相位去包裹算法[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 510-512.
- [4] Zhang Y Z, Wang D Y, Zhao J, *et al.* Investigation on phase unwrapping algorithms in digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(12): 3323-3327.
张亦卓, 王大勇, 赵洁, 等. 数字全息中实用相位解包裹算法研究[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3323-3327.
- [5] Wyant J C. Two-dimensional phase unwrapping-theory, algorithms, and software, by Dennis C. Ghiglia and Mark D. Pritt[J]. Optics & Photonics News, 2000, 11(11): 47.
- [6] Spagnolini U. 2-D phase unwrapping and phase aliasing[J]. Geophysics, 2012, 58(9): 1324-1334.
- [7] Wagner C, Osten W, Seebacher S. Direct shape measurement by digital wavefront reconstruction and multi-wavelength contouring[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 79-85.
- [8] Ye Q, Li F X, Liu Y, *et al.* Dual-wavelength optical coherence tomography system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(4): 041701.
叶青, 李福新, 刘宇, 等. 双波长光学相干层析成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(4): 041701.
- [9] Kou Y L, Li E P, Di J L, *et al.* Surface morphology measurement of tiny object based on dual-wavelength digital holography[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0209010.
寇云莉, 李恩普, 邸江磊, 等. 利用双波长数字全息术测量微小物体表面形貌[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209010.
- [10] Wang Y J, Jiang Z Q, Gao Z R, *et al.* Investigation on phase unwrapping in dual-wavelength digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1009001.
王羽佳, 江竹青, 高志瑞, 等. 双波长数字全息相位解包裹方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1009001.
- [11] Pei Y P, Yang J, Yuan L B. Principle of fiber optic interferometric sensors and their phase demodulation techniques[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2005, 3(3): 17-21.
裴雅鹏, 杨军, 苑立波. 光纤干涉型传感器原理及其

- 相位解调技术[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(3): 17-21.
- [12] Yamaguchi I, Ida T, Yokota M. Measurement of surface shape and position by phase-shifting digital holography[J]. Strain, 2008, 44(5): 349-356.
- [13] Chen D S, Xiao L, Cui J, *et al.* Analysis of 3×3 coupler demodulation method for optical fiber interferometer and polarization fading[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2007, 18(5): 523-525.
陈德胜, 肖灵, 崔杰, 等. 光纤干涉信号的 3×3 耦合器解调及偏振衰落分析[J]. 光电子 • 激光, 2007, 18(5): 523-525.
- [14] Jiang Y. Wavelength division multiplexing addressed four-element fiber optical laser hydrophone array[J]. Applied Optics, 2007, 46(15): 2939-2948.
- [15] Wang J H, Meng J, Chen C H, *et al.* Design scheme of intelligent instrument interface and digital processing system[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(2): 285-288.
王金海, 孟菊, 陈才和, 等. 智能仪器接口与数字处理系统设计方案[J]. 传感技术学报, 2005, 18(2): 284-288.
- [16] Zhang H Y, Wang L W, Shi Q P, *et al.* A new demodulation method for time division multiplexing system of fiber-optic hydrophone using a 3×3 coupler[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0505011.
张华勇, 王利威, 施清平, 等. 光纤水听器时分复用系统通过 3×3 耦合器信号解调的一种新算法[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0505011.
- [17] Gass J, Dakoff A, Kim M K. Phase imaging without 2π ambiguity by multiwavelength digital holography[J]. Optics Letters, 2003, 28(13): 1141-1143.