

采用小波变换提取弱反射光纤布拉格光栅干涉信号

丁朋^{1,2}, 黄俊斌^{2*}, 汪云云², 刘文², 顾宏灿², 唐劲松¹

¹海军工程大学电子工程学院, 湖北 武汉 430033;

²海军工程大学兵器工程学院, 湖北 武汉 430033

摘要 提出一种提取基于迈克尔逊干涉的弱反射光纤布拉格光栅(WFBG)时分复用系统中干涉信号的方法,以降低数据采集量并提高零差对称解调精度。对光强信号进行连续小波变换,寻找变换系数的极值,相邻的极小值和极大值用于界定激光干涉区间。针对不同宽度的激光脉冲工况,调整小波尺度因子,以寻找干涉区间,分别基于干涉区内光强信号的最大值和平均值得到干涉信号,最后采用零差对称算法解调干涉信号的相位信号。将 WFBG 传感器放入振动液柱内,多次测量同一弱正弦信号,并对测量信号进行正弦曲线拟合。拟合结果显示采用连续小波变换提取短脉冲干涉区间并以平均值法计算干涉信号有助于提高该传感系统的零差对称解调精度。

关键词 传感器; 光纤布拉格光栅; 弱反射; 干涉信号; 连续小波变换

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.190603

Extraction of Interference Signal of Weak Reflection Fiber Bragg Grating by Wavelet Transform

Ding Peng^{1,2}, Huang Junbin^{2*}, Wang Yunyun², Liu Wen², Gu Hongcan², Tang Jinsong¹

¹College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

²Department of Weapon Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China

Abstract To reduce the data acquisition quantity and improve the accuracy of zero difference symmetric demodulation, a method for extracting interference signals in a time-division multiplexing system with a weak fiber Bragg grating (WFBG) based on Michelson interference is proposed. Continuous wavelet transform is applied to the intensity signal to find the extreme value of the transform coefficient. The adjacent minimum and maximum values are used to define the laser interference region. According to the laser pulses with different width, the wavelet scale factor is adjusted to find the interference region. The interference signal is obtained based on the maximum intensity and the average intensity in the interference region, respectively, and the phase signal of the interference signal is demodulated by the zero difference symmetry algorithm. The WFBG sensor is put into a vibrating liquid column. The same weak sinusoidal signal is measured repeatedly, and the measured signals are fitted by the sinusoidal curve. The fitting results show that extracting the short pulse interference region by the continuous wavelet transform and calculating the interference signal by the average value method are helpful to improve the zero difference symmetric demodulation accuracy of the sensing system.

Key words sensors; fiber Bragg grating; weak reflection; interference signal; continuous wavelet transform

OCIS codes 280.4788; 060.3735; 200.4560; 120.1880

1 引言

弱反射光纤布拉格光栅(WFBG)是在拉丝塔拉制光纤的同时采用“Talbot”^[1]或相位掩模板^[2-3]单

脉冲曝光制备而成,通过大规模时分复用反射不同光程的脉冲。特定样式的发射脉冲或多种干涉仪用于 WFBG 传感器解调中,使反射光脉冲形成干涉,从而高灵敏度地探测外界振动信号^[4-5]。前 WFBG

收稿日期: 2020-01-15; 修回日期: 2020-01-23; 录用日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金(11774432)、湖北省自然科学基金(2018CFB788)

* E-mail: tsyj98@163.com

反射脉冲与后 WFBG 反射脉冲部分重叠干涉时,使用零差对称解调算法对干涉信号进行相位解调^[4];文献[5]采用信号“前后肩”消除“中肩”干涉直流量,对交流分量进行反余弦操作。发射双脉冲^[6-7]会使前 WFBG 反射的后脉冲与后 WFBG 反射的前脉冲发生重叠干涉,这时可使用 10% 的光源参与脉冲干涉以降低光源波动对解调的影响^[6];文献[7]设计了两个特定的偏振脉冲,以消除光的偏振衰落。马赫-曾德尔^[8-9]、迈克耳孙^[10-12]结构的非平衡臂引入光程差,使前 WFBG 反射脉冲产生延时,并恰好与后 WFBG 反射脉冲重叠干涉,这时可使用零差对称解调或反正切算法对干涉信号进行相位解调。迈克耳孙干涉仪内两个法拉第旋转反射镜能够有效抑制光的偏振衰落,在该结构基础上,文献[13]将其中一个反射臂绕在高频振动的压电陶瓷上,并对探测信号进行移频,从而避免了低频噪声的影响。

上述采用迈克耳孙干涉仪解调基于时分复用的 WFBG 传感器时,通常需要采集声光调制器(使连续光调制成脉冲光)驱动信号,将其作为参考信号获得每个调制周期内的干涉区间。对干涉区间的光强信号进行处理,形成该区间的干涉特征值。每个干涉区间在所有调制周期内的特征值组成对应区间的干涉信号。对干涉信号进行零差对称或反正切解调,即可获得待探测的振动信号。上述信号解调过程显示,干涉区间长度和特征值(对干涉区间内光强信号求最大值或平均值得到)的选择将会影响干涉信号的干涉对比度和噪声,并进一步影响传感系统的解调精度。目前,在干涉区间长度选择上,发射光脉宽只满足 WFBG 反射光脉冲能够重叠干涉(最小脉宽)和相邻干涉区间不发生混叠(最大脉宽)的要求。现有研究并未在最小和最大脉宽之间探讨最为合适的脉宽和干涉特征值求取方法以提高系统解调精度。

参考光纤布拉格光栅(FBG)传感器自动寻找波峰的方法,如希尔伯特变换(HT)法^[14-15]和连续小波变换(CWT)法^[16],对上述 WFBG 解调系统的光强信号进行 CWT,寻找变换系数极值,并以相邻的最小值和最大值界定干涉区间。该方法的优势在于以待处理的光强信号作为自参考信号,无需采集上述连续光并将其调制成脉冲光信号,从而减少了一路采集信号。通过调整 CWT 尺度因子,寻找不同激光脉宽下的干涉区间长度,并分别采用区间内光强的最大值和平均值求取干涉信号,而后采用零差对称算法获得干涉信号的相位信号。采用振动液柱

法对 WFBG 传感器施加同一微弱正弦振动信号,对多次测量的解调信号进行正弦曲线拟合,利用平均拟合度、频率均方根误差、幅度标准差三个指标,探讨不同发射脉宽以及采用最大值或平均值法提取干涉特征值对基于迈克耳孙干涉和时分复用的 WFBG 传感器解调精度的影响,结果显示采用平均值法获取短脉冲干涉信号有助于提高该系统的零差对称解调精度。

2 CWT 自动寻找干涉区间

基于迈克耳孙干涉的 WFBG 时分复用系统传感原理如图 1(a)所示。1550 nm 的连续激光经声光调制器(AOM)转换为脉冲光。AOM 受脉冲电信号控制,控制电信号脉冲 τ 使其与光脉宽基本相等,周期 $T_{\text{AOM}} > 2Ln_{\text{eff}}(N+1)/c$,其中 n_{eff} 为光纤有效折射率, N 为 WFBG 个数, c 为光速。采用掺铒光纤放大器(EDFA)对脉冲光进行放大。两个 WFBG 的间隔为 L ,用于反射光脉冲。迈克耳孙干涉仪的两臂相差 L 。一个 T_{AOM} 内,前 WFBG 的反射脉冲光在迈克耳孙干涉仪长臂内往返后进入光电探测器,后 WFBG 的反射脉冲光在迈克耳孙干涉仪短臂内往返后也进入光电探测器,它们在时间上刚好重叠,并发生干涉。WFBG 反射光时序图如图 1(b)所示,其中第一个和最后一个区间为反射区间,中间为干涉区间。光电探测器将光强信号转换为电信号,并将电信号输入采集卡。对光强信号 I 进行 CWT^[17]:

$$(T^{\text{wav}}f)(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int I\bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

式中: $\psi(t)$ 为小波基,此处选择一阶高斯小波函数; $\bar{\psi}(\cdot)$ 为 $\psi(t)$ 的共轭; a 是尺度因子; b 是平移因子; $(T^{\text{wav}}f)(a,b)$ 是对 I 进行小波变换后的值。该小波变换系数的极值突出反映了光强电信号的突变点,并降低了噪声毛刺,便于寻找峰值。

在一个 T_{AOM} 内计算光强信号的一阶高斯小波变换系数,通过系数相邻的最小值和最大值对光强信号进行切割,从而寻找干涉区间,如图 1(b)所示。

寻找连续多个 AOM 内干涉区间的步骤为

1) 寻找第一个 T_{AOM} 内的第一个反射区间,并作为基准区间。对前 $3T_{\text{AOM}}$ 内的采集数据进行 CWT,判断相邻两个极大值的间隔长度,当相邻两个极大值的间隔长度大于 $2T_{\text{AOM}}/3$ 时,寻找到第一个完整的 AOM 调制周期,后一个极大值对应的区间即为完整的 AOM 调制周期内的第一个反射区间。

2) 以第一个 T_{AOM} 内的基准区间为参考, 区间左端点不变, 右端点加上 $T_{AOM} - \tau$, 形成新的区间即第一个 AOM 调制区间, 采用 CWT 法提取该 AOM 调制周期内的干涉区间。

3) 同样以第一个 T_{AOM} 内的基准区间为参考, 区间左端点加上 T_{AOM} , 区间右端点加上 $2T_{AOM} - \tau$, 形成新的区间即第二个 AOM 调制区间, 采用 CWT

法提取该 AOM 调制周期内的干涉区间和第一个反射区间, 反射区间作为新的基准区间。

4) 根据新的基准区间, 获得下一个 AOM 调制区间, 提取调制区间内的干涉区间和反射区间(作为后续新的基准区间)。

5) 重复执行步骤 4), 即可获得所有 AOM 调制区间内的干涉区间。

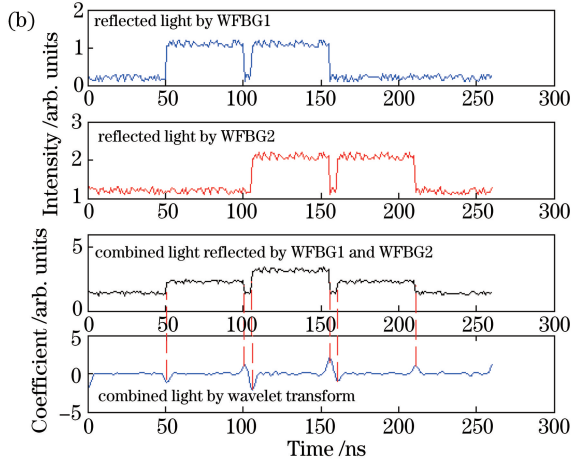
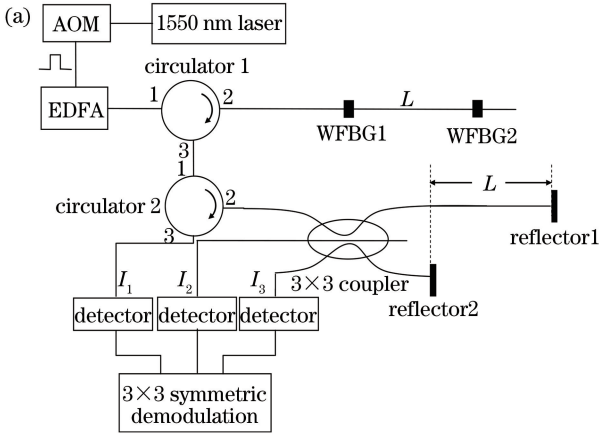


图 1 WFBG 传感系统及信号时序图。(a) WFBG 传感系统示意图; (b) 时序

Fig. 1 Diagram of WFBG sensing system and signal sequence. (a) Diagram of WFBG sensing system; (b) time sequence

3 实验与分析

3.1 寻找干涉区间

图 2 显示采用 AOM 调制信号或 CWT 提取的不同脉宽、不同 WFBG 个数的干涉区间。图 2(a) 为基于传统的 AOM 调制信号提取的干涉区间。图 2(b) 为使用 CWT 在 300 ns 调制脉宽下提取的 2-WFBG 干涉区间。此方法只需采集三路信号。原始光强信号受噪声的影响会出现伪峰, 不适合直接寻找峰值。希尔伯特变换后系数也存在伪峰, 不适合直接寻峰。设置 CWT 的尺度因子为 2, CWT 后变换系数峰值清晰, 易于寻找, 通过相邻的最小值和最大值即可提取原始光强信号的干涉区间。通过第 2 节 CWT 方法即可获得每个 AOM 的调制周期内的干涉区间。图 2(c) 为使用 CWT 在 450 ns 调制脉宽下提取的 2-WFBG 干涉区间, 设置尺度因子为 3, 即可寻找到相应的干涉区间。图 2(d) 为使用 CWT 在 300 ns 调制脉宽下提取的 5-WFBG 的干涉区间, 由图可见 WFBG 复用数量增加后, CWT 方法仍然能够正确地寻找到相应的干涉区间。

综上, 针对不同宽度的脉冲和不同的 WFBG 复用数量, CWT 均能够获取干涉区间, 无需采集

AOM 驱动信号。

3.2 系统解调精度的影响因素

50 m 的单模光纤两端熔接 2 根 WFBG, 作为传感元件, 将其卷成直径为 6 cm 的光纤环放入振动液柱内。迈克耳孙干涉仪臂差同样为 50 m, 以匹配传感光纤长度。对振动台施加频率为 500 Hz、振幅为 0.6 m/s^2 的正弦信号。AOM (CETC SGTF150-1550-1T) 调制脉宽分别设置为 300 ns 和 450 ns。分别采用最大值和平均值法求取干涉区间的特征值, 以得到干涉光强信号, 对 3 路干涉光强信号进行零差对称解调, 得到振动液柱的振动信号。图 3 显示为同一正弦振动源下, 针对 300 ns 和 450 ns 调制脉宽的 AOM 调制脉冲, 分别采用最大值和平均值法提取干涉区间特征值, 并经 9 次测量得到的振动液柱振动信号。图 3(a) 为 300 ns 调制脉宽下, 分别采用最大值法和平均值法提取干涉信号后, 经零差对称解调获得的振动液柱的正弦信号, 从图中可以看出采用平均值法获得的正弦波噪声较小。图 3 (b) 对应 450 ns 调制脉宽的情况, 同样得到采用平均值法获得的正弦信号较好的结论。进一步地, 对图 3 的相位信号进行正弦曲线拟合, 具体数据如表 1 所示。

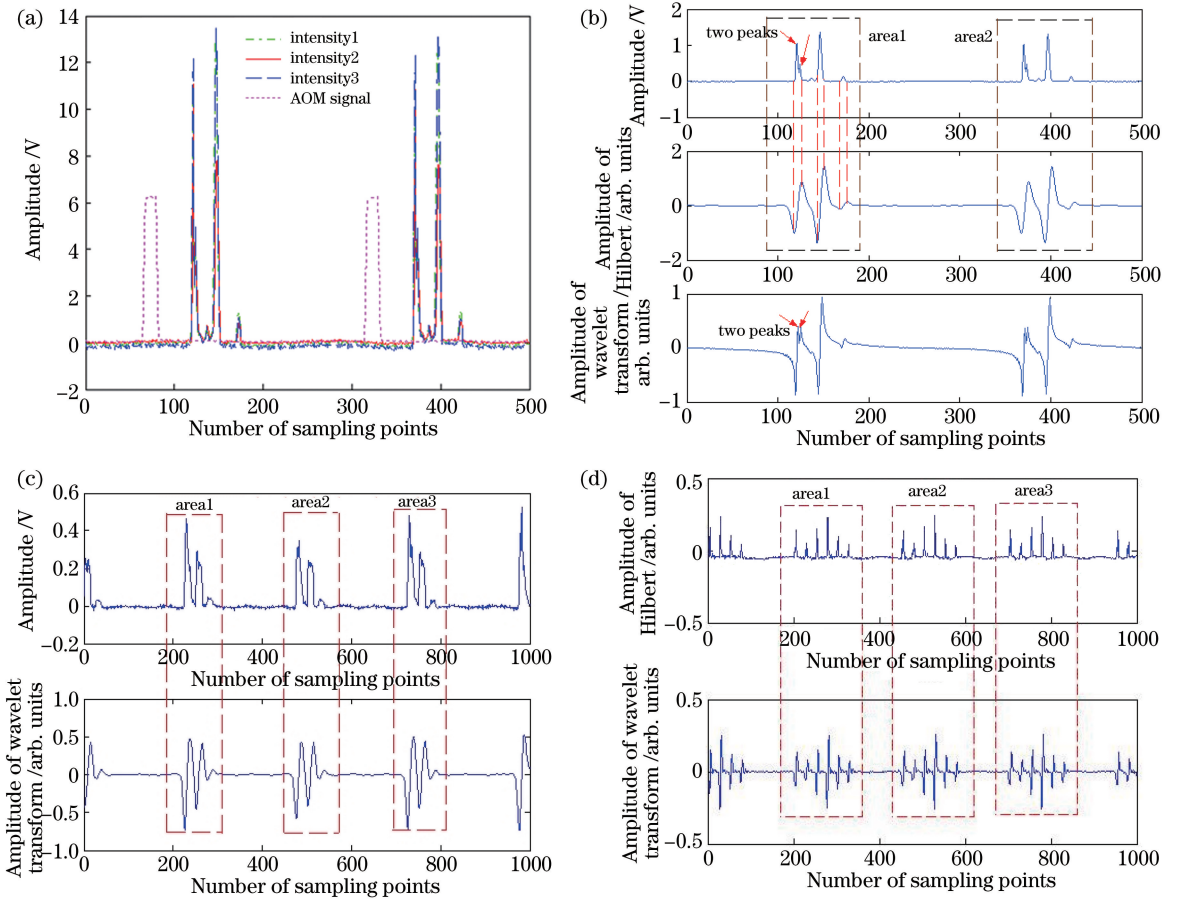


图 2 在不同调制脉宽、不同 WFBG 个数下基于 AOM 调制信号或 CWT 提取的干涉区间。(a)基于 AOM 调制信号在 300 ns 调制脉宽下提取的 2-WFBG 干涉区间;(b)采用 CWT 在 300 ns 调制脉宽下提取的 2-WFBG 干涉区间;(c)采用 CWT 在 450 ns 调制脉宽下提取的 2-WFBG 干涉区间;(d)采用 CWT 在 300 ns 调制脉宽下提取的 5-WFBG 干涉区间

Fig. 2 Interference intervals obtained based on AOM modulation signal and CWT for different modulation pulse widths and different numbers of WFBGs. (a) Interference intervals obtained based on AOM modulation signal for 300 ns modulation pulse width and 2-WFBG; (b) interference intervals obtained by CWT for 300 ns modulation pulse width and 2-WFBG; (c) interference intervals obtained by CWT for 450 ns modulation pulse width and 2-WFBG; (d) interference intervals obtained by CWT for 300 ns modulation pulse width and 5-WFBG

基于表 1 数据,比较 4 种情况下的平均拟合度 [R 方 (R-square) 的平均值]、频率均方根误差 (RMSE)和幅度标准差,如图 4 所示。由图 4 可知,300 ns 调制脉宽下,使用平均值法得到的解调信号平均拟合度为 0.8426,频率 RMSE 为 28.44 Hz,幅度标准差为 0.95 rad;使用最大值法得到的平均拟合度为 0.7827,频率 RMSE 为 31.54 Hz,幅度标准差为 1.39 rad。450 ns 调制脉宽下,使用平均值法得到的解调信号平均拟合度为 0.8304,频率 RMSE 为 32.99 Hz,幅度标准差为 2.95 rad;使用最大值法得到的平均拟合度为 0.7259,频率 RMSE 为

35.28 Hz,幅度标准差为 3.08 rad。由此可得,在调制脉宽确定后,使用平均值法提取干涉信号有助于提高系统解调精度,其主要原因是平均值法降低了干涉信号的噪声。

对比 300 ns 和 450 ns 调制脉宽下采用平均值法得到的解调信号三项指标可得:300 ns 调制脉宽时的结果均优于 450 ns 调制脉宽时的结果。当发射的激光脉冲变宽后,脉冲光强整体下降,并且脉冲顶部伴随着较大的不规则起伏(图 5),出现该现象的原因是引入的随机起伏噪声导致系统解调精度下降。

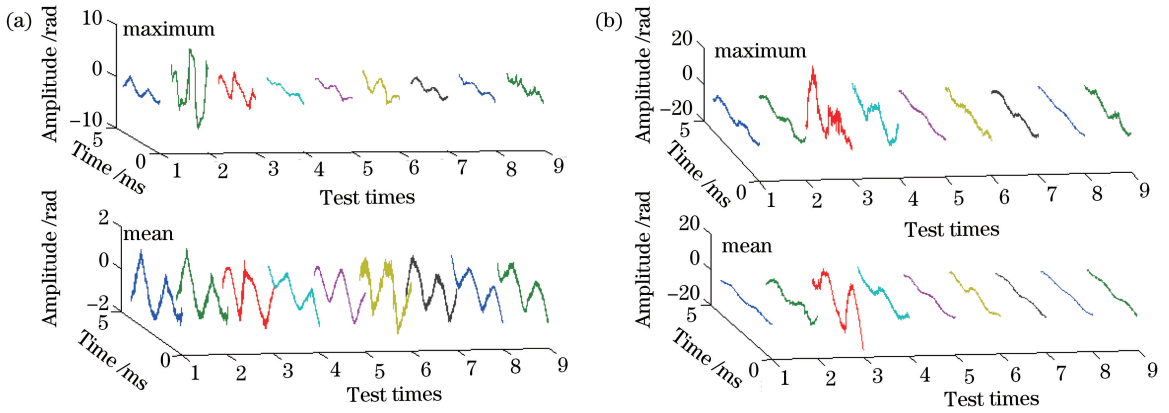


图3 同一振动源下,针对不同调制脉宽采用不同方法提取干涉区间特征值,并经多次测量得到的振动液柱振动信号。

(a) 300 ns 调制脉宽;(b) 450 ns 调制脉宽

Fig. 3 Vibration signals of vibrating liquid column obtained by multiple measurements and characteristic values of interference intervals for different modulation pulse widths under the same vibration source. (a) 300 ns modulation pulse width; (b) 450 ns modulation pulse width

表1 对探测的相位信号进行正弦曲线的拟合数据

Table 1 Sine curve fitting data of detected phase signals

Test times (300 ns, maximum)	R-square	Amplitude /rad	Frequency /Hz	Test times (300 ns, mean)	R-square	Amplitude /rad	Frequency /Hz
1	0.83808	0.89718	473.49	1	0.84189	0.89543	501.94
2	0.74502	5.07631	481.38	2	0.85042	3.75555	462.64
3	0.70192	1.07501	465.12	3	0.73416	0.80380	511.02
4	0.75676	0.41166	527.15	4	0.86082	0.50245	535.79
5	0.86125	0.63180	471.83	5	0.88827	0.76465	472.57
6	0.85579	1.45807	464.37	6	0.78366	0.98631	491.92
7	0.87135	0.65611	538.71	7	0.86537	0.80427	536.52
8	0.86534	0.48561	541.95	8	0.90169	0.60826	540.56
9	0.54917	0.56251	525.05	9	0.85724	0.65250	473.87

Test times (450 ns, maximum)	R-square	Amplitude /rad	Frequency /Hz	Test times (450 ns, mean)	R-square	Amplitude /rad	Frequency /Hz
1	0.73496	1.85052	504.45	1	0.78920	0.95347	531.62
2	0.81808	2.19652	543.47	2	0.72139	2.48373	523.31
3	0.49614	10.38246	497.63	3	0.80550	10.54663	459.91
4	0.82090	5.46085	445.18	4	0.89036	2.97201	445.53
5	0.80965	0.96564	498.34	5	0.85219	1.08819	525.97
6	0.60672	1.46598	456.47	6	0.86163	2.10007	466.14
7	0.79993	1.61710	533.54	7	0.86096	0.84263	477.35
8	0.75714	0.50143	516.89	8	0.87285	0.56991	536.64
9	0.68947	2.05263	554.51	9	0.81928	0.92717	499.23

综上,基于迈克耳孙干涉的 WFBG 时分复用系统在设置脉宽时应使用短脉冲,在提取干涉信号时应采用平均值法。

4 结 论

针对基于迈克耳孙干涉的 WFBG 时分复用系统,提出采用 CWT 方法自动获取干涉区间的方法,

并实现了 300 ns 和 450 ns 调制脉宽下对 2-WFBG 与 5-WFBG 干涉信号的自动提取,所提方法与传统方法相比减少了一路采集信号。采用振动液柱法多次测量同一弱正弦振动信号,探讨调制脉宽选择、干涉区间的干涉特征值提取方法对系统解调精度的影响。采用 300 ns 调制脉宽和平均值法提取干涉信号后,解调得到的相位信号平均拟合度、频率均方根

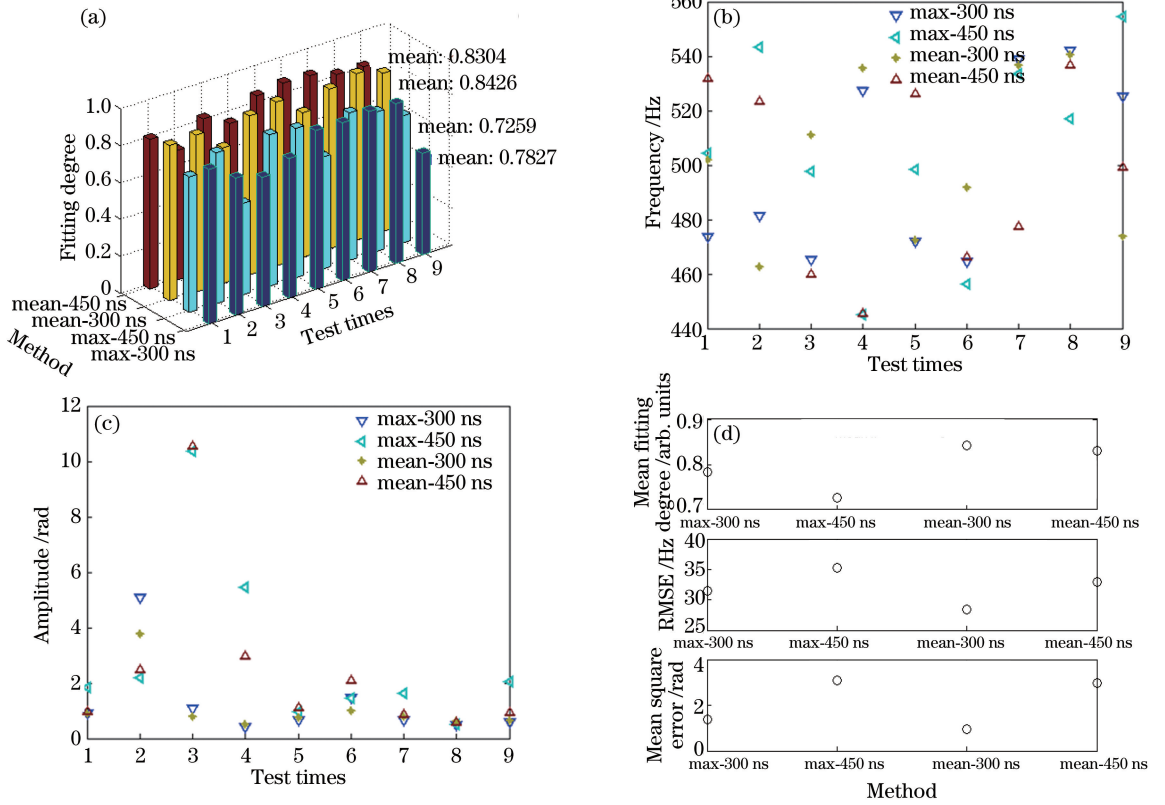


图 4 经正弦曲线拟合后的测量信号。(a)拟合度;(b)频率;(c)幅度;(d)平均拟合度、频率均方根误差和幅度标准差
 Fig. 4 Measured signals fitted by sine curve. (a) Fitting degree; (b) frequency; (c) amplitude; (d) average fitting degree, RMSE of frequency, and mean square error of amplitude

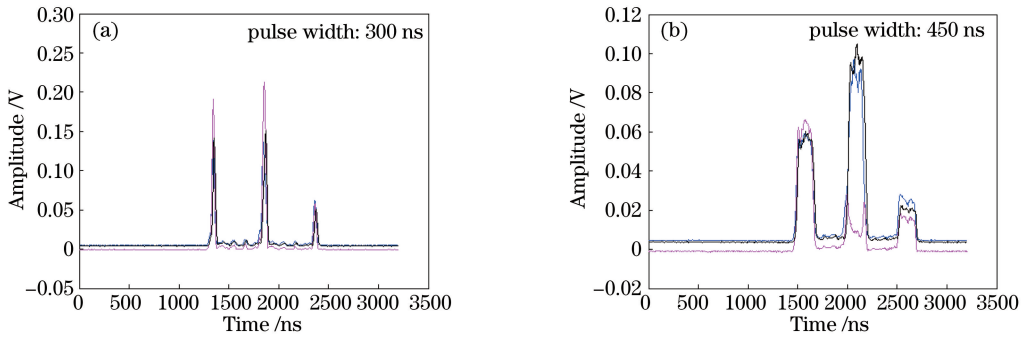


图 5 不同调制脉宽下的光强。(a) 300 ns;(b) 450 ns
 Fig. 5 Light intensity under different modulation pulse widths. (a) 300 ns; (b) 450 ns

误差和幅度标准差分别为 0.8426、28.44 Hz 和 0.95 rad,三个指标均优于对其他方法提取的干涉信号进行解调得到的相位信号。综上,采用 CWT 寻找窄脉冲干涉区间并以平均值法提取干涉信号有助于提高基于迈克耳孙干涉的 WFBG 时分复用系统的解调精度。

参 考 文 献

[1] Chojetzki C, Rothhardt M, Ommer J, et al. High reflectivity draw tower fiber Bragg gratings arrays

and single gratings of type II [J]. Optical Engineering, 2005, 44(6): 060503.

[2] Luo Z H, Wen H Q, Guo H Y, et al. A time- and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22799-22807.

[3] Yang M H, Bai W, Guo H Y, et al. Huge capacity fiber-optic sensing network based on ultra-weak draw tower gratings[J]. Photonic Sensors, 2016, 6(1): 26-41.

[4] Li W, Zhang Y J. Enhanced phase sensitive optical

- time-domain reflectometer vibration sensing system based on weak grating array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0810001.
- 黎威, 张永佳. 基于弱光栅阵列的增强相位敏感光时域反射仪振动传感系统[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0810001.
- [5] de Miguel Soto V, Jason J, Kurtoglu D, et al. Spectral shadowing suppression technique in phase-OTDR sensing based on weak fiber Bragg grating array[J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 526-529.
- [6] Liu T, Wang F, Zhang X P, et al. Interrogation of ultra-weak FBG array using double-pulse and heterodyne detection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(8): 677-680.
- [7] Wang F, Liu Y, Wei T, et al. Polarization fading elimination for ultra-weak FBG array-based Φ -OTDR using a composite double probe pulse approach[J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20468-20478.
- [8] Jiang P, Ma L N, Hu Z L, et al. Low-crosstalk and polarization-independent inline interferometric fiber sensor array based on fiber Bragg gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(18): 4232-4239.
- [9] Tong Y H, Li Z Y, Wang J Q, et al. High-speed Mach-Zehnder-OTDR distributed optical fiber vibration sensor using medium-coherence laser [J]. Photonic Sensors, 2018, 8(3): 203-212.
- [10] Li Y, Qian L, Zhou C M, et al. Multiple-octave-spanning vibration sensing based on simultaneous vector demodulation of 499 Fizeau interference signals from identical ultra-weak fiber Bragg gratings over 2.5 km[J]. Sensors, 2018, 18(1): 210.
- [11] Li W, Zhang J. Distributed weak fiber Bragg grating vibration sensing system based on 3×3 fiber coupler [J]. Photonic Sensors, 2018, 8(2): 146-156.
- [12] Xu Q N, Zhou C M, Fan D, et al. Experimental study on ultra-weak fiber Bragg grating hydrophone arrays based on Fizeau interference [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(15): 150602.
- 徐倩楠, 周次明, 范典, 等. 基于斐索干涉的超弱光纤光栅水听器阵列实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(15): 150602.
- [13] Zhou C M, Pang Y D, Qian L, et al. Demodulation of a hydroacoustic sensor array of fiber interferometers based on ultra-weak fiber Bragg grating reflectors using a self-referencing signal[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(11): 2568-2576.
- [14] Chen Y, Yang K, Liu H L. A self-adaptive peak detection algorithm to process multi-peak fiber Bragg grating sensing signal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0805008.
- 陈勇, 杨凯, 刘焕淋. 多峰光纤布拉格光栅传感信号的自适应寻峰处理[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805008.
- [15] Theodosiou A, Komodromos M, Kalli K. Accurate and fast demodulation algorithm for multi-peak FBG reflection spectra using a combination of cross correlation and Hilbert transformation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(18): 3956-3962.
- [16] Ding P, Huang J B, Tang J S. Multi-peak FBG reflection spectrum segmentation based on continuous wavelet transformation [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 250-255.
- [17] Daubechies I. Ten lectures of wavelets[J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1992, 24: 499-519.