

DOI: 10.12086/oe.2022.210368

用于光纤干涉传感器的高稳定 PGC 解调技术

肖文哲¹, 程静², 张大伟^{1*},
孔勇³, 叶华龙¹, 何军¹

¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

²复旦大学材料科学系, 上海 200433;

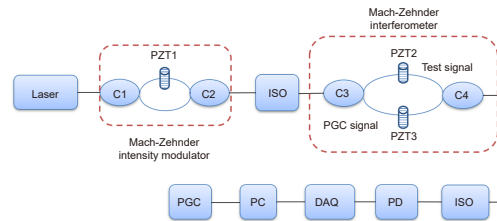
³上海工程技术大学电子与电气工程学院, 上海 201620

摘要: 相位生成载波 (PGC) 解调技术具有高灵敏度、线性度好和动态范围广的优点, 因此广泛应用于分布式光纤传感器中。本文提出了一种单路微分相除和微分自相乘的 PGC (PGC-SDD-DSM) 解调算法, 该解调算法对载波相位调制深度和光强度干扰均不敏感。仿真实验显示, 与 PGC 单路微分相除 (PGC-SDD) 解调算法、传统的 PGC 微分交叉相乘 (PGC-DCM) 和 PGC 反正切 (PGC-Arctan) 解调算法相比较, 改进的 PGC 解调算法具有最佳的解调效果。将改进的 PGC 解调算法应用在光纤干涉传感器中, 实验结果表明改进的解调算法能有效抑制光强和载波调制深度引起的失真。待测信号的频率为 1 kHz, 幅度值为 2 rad, 在引入 1.5 rad 的载波调制深度和 0.7 rad 的光强干扰深度时, 实验系统中使用改进 PGC 解调算法的解调结果信纳比 (SINAD) 可以达到 35.56 dB, 与使用传统的 PGC-DCM、PGC-Arctan 和 PGC-SDD 解调算法相比较分别高出 10.87 dB、24.19 dB 和 6.38 dB, 同时系统的稳定性得到了提升。该技术有效地促进了光纤传感器领域的技术研究。

关键词: 光纤传感器; 相位生成载波解调; 相位调制深度

中图分类号: O436.1; TN29

文献标志码: A



肖文哲, 程静, 张大伟, 等. 用于光纤干涉传感器的高稳定 PGC 解调技术 [J]. 光电工程, 2022, 49(3): 210368

Xiao W Z, Cheng J, Zhang D W, et al. High stability PGC demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(3): 210368

High stability PGC demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor

Xiao Wenzhe¹, Cheng Jing², Zhang Dawei^{1*}, Kong Yong³, Ye Hualong¹, He Jun¹

¹School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China;

³School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: The phase generated carrier (PGC) demodulation technique is widely used in distributed fiber-optic interferometric sensors, for its high sensitivity, good linearity, and large dynamic range. An improved PGC demodulation algorithm with single-path differential divide and the differential-self-multiplication (PGC-SDD-DSM)

收稿日期: 2021-11-17; 收到修改稿日期: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61775140)

*通信作者: 张大伟, dwzhang@usst.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

demodulation algorithm is proposed in this paper, the demodulation result of the PGC-SDD-DSM algorithm is not related to the carrier phase modulation depth (C) and light intensity disturbance (LID). The simulation and experiment results show that the proposed algorithm is insensitive to the C value, and compared with the single-path differential divide to PGC demodulation algorithm (PGC-SDD), the traditional differential-cross-multiplying (PGC-DCM) and PGC Arctangent (PGC-Arctan) demodulation algorithms, and the proposed algorithm has the best demodulation effect. When the proposed demodulation algorithm is applied in the optical fiber interferometric, it is found that the proposed algorithm can suppress the distortion caused by LID and C . The frequency of the signal to be demodulated is 1000 Hz, and the amplitude value is 2 rad. When the carrier modulation depth of 1.5 rad and the light intensity interference depth of 0.7 rad are introduced, the signal-to-noise and distortion ratio (SINAD) of the demodulation result using the improved PGC demodulation algorithm in the experimental system is 35.56 dB, which is 10.87 dB, 24.19 dB, and 6.38 dB higher than using traditional PGC-DCM, PGC-Arctan, and PGC-SDD demodulation algorithms, respectively. It is proved the system's stability improved effectively. This technology effectively promotes technical research in the fields of optical fiber sensors.

Keywords: optical fiber sensor; phase generated carrier (PGC) demodulation; phase modulation depth.

1 引言

分布式光纤干涉传感器作为当前光纤传感技术中最有竞争力的技术之一, 具有抗电磁干扰、抗腐蚀、损耗低、灵敏度高、体积小和定位精确等优势。光纤干涉传感器已经引起了一些研究者的广泛关注^[1-4]。传感器可以将外部干扰转换为沿传感光纤的光相位变化, 通过光电探测器将接收到的光信号转换为电信号, 然后通过解调算法解调相位变化以获得外界干扰^[5-7]。光纤干涉传感器可用于温度、应力以及外界长距离扰动信号的检测^[8-9]。目前, 光纤分布式传感器已广泛应用于生活中的许多领域, 包括周界安全、地震波检测、入侵检测、铁路安全监控以及其他重要领域^[10-16]。

已经提出了许多解调方法应用在分布式光纤干涉传感器中, 常用的包括 3×3 耦合器解调法^[17-20]、数字相干 I/Q 解调法^[21-22]、相位生成载波 (PGC) 解调法^[23-26] 等。其中基于 3×3 耦合器解调法不需要用调制器, 具有结构简单、响应带宽高、动态范围大等优点。但由于需要多个光电探测器进行解调, 增大了解调系统成本, 且系统容易受外界影响^[20]。数字相干 I/Q 解调法是一种利用本地光与瑞利散射光本地外差产生干涉信号后进行正交解调的方法。数字相干 I/Q 解调法结构简单, 系统信噪比和灵敏度也较高。但其解调结果容易受到激光器频率漂移引起的相位噪声和本地光与瑞利散射光偏振态不稳定的影响, 从而使解调准确性下降^[21-22]。PGC 解调法具有动态范围大、灵敏度高、线性度好、信噪比高等优点, 利用 PGC 解调算法有利于消除相位漂移引起的干涉输出不稳定性^[26]。为了解

调出光纤干涉传感器由外界干扰产生的相位变化, 一般采用 PGC 微分交叉相乘 (PGC-DCM) 和 PGC 反正切 (PGC-Arctan) 解调算法。PGC-DCM 解调方法易受光强度干扰 (LID) 的影响, 同时对载波调制深度 C 也比较敏感^[27]。PGC-Arctan 解调方法与 PGC-DCM 解调算法相比算法结构简单从而可以降低信号处理的时间, 同时 PGC-Arctan 解调方法对光强干扰 (LID) 不敏感。但是, 对于 PGC-Arctan 解调结果, 其反正切函数的参数包括解调相位和含有 C 值的贝塞尔函数。此时, C 值会给解调算法引入非线性失真, 当 C 值偏离 2.63 rad 时, 系统会引入较严重的非线性失真^[28]。因此, 由于载波调制深度的偏离而导致解调结果的失真是 PGC-Arctan 算法的主要问题。

Yu 等^[29] 提出了基于 Φ -OTDR (phase optical time-domain reflectometer) 和相位载波解调算法的分布式光纤振动传感器, 但是其解调结果受到调制深度和光强度干扰的影响, 所以会给解调系统带来不稳定性。然后, 他们提出 PGC 单路微分相除 (PGC-SDD) 解调算法^[30-31], 与传统的 PGC-DCM 和 PGC-Arctan 解调算法相比, PGC-SDD 解调方法具有较高的稳定性和较低的谐波失真, 但是 C 值的偏离会给 PGC-SDD 算法引入较严重的谐波失真。然而, 在分布式光纤干涉传感器中, 外界温度的变化会影响相位调制器的性能, 进而影响施加到压电换能器 (PZT) 上的调制信号。在实际应用中, 调制深度由施加到 PZT 上的调制信号的幅度、环境温度和 PZT 的特性决定。因此很难将 C 值保持在一个稳定的值。之后, 又有一些研究学者采用一些方法来计算相位调制深度来消除调制深度的

影响提高系统的稳定性, 但是它们解调过程太复杂^[32-34]。因此, 如何消除相位调制深度和光强扰动以提高系统的稳定性成为 PGC 解调技术中的一个重要问题。

本文提出了一种改进的 PGC 解调算法 (PGC-SDD-DSM)。我们引入了一种差分自乘 (DSM) 算法来消除基于单路微分相除 PGC 解调算法 (PGC-SDD) 的调制深度 C 的影响。将解调结果不受调制深度和光强干扰影响的新型 PGC 解调算法首次应用于光纤干涉传感器, 有效抑制谐波干扰, 提高传感系统的稳定性。本文第二部分介绍了光纤干涉传感器的工作原理和解调算法的原理, 第三部分介绍了解调算法的仿真结果, 第四部分阐明了实验和结果, 第五部分是本文的结论。

2 理论推导

分布式光纤干涉传感器的干涉信号可表示为

$$I(t) = A + B \cos[C \cos(\omega_c t) + \varphi(t)], \quad (1)$$

其中: A 为输入光的强度, 与光源强度有关; $B = kA$ 为干涉光的强度 (干涉条纹可见度 $k \leq 1$), 与光源强度和干涉条纹可见度有关; $C \cos(\omega_c t)$ 为 PGC 调制信号, 其中 C 为调制深度, ω_c 为调制频率; $\varphi(t)$ 为包含扰动信息的待测信号。

然后将干涉信号 $I(t)$ 进行处理, 干涉信号展开可以得到:

$$I(t) = A + B \cdot \begin{cases} \cos \varphi(t) \left[J_0(C) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n J_{2n}(C) \cos(2n\omega_c t) \right] \\ -\sin \varphi(t) \left[2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C) \cos[(2n+1)\omega_c t] \right] \end{cases}, \quad (2)$$

其中: $J_{2n+1}(C)$ 和 $J_{2n}(C)$ 分别是奇次贝塞尔函数和偶次贝塞尔函数。PGC-Arctan、PGC-DCM、PGC-SDD 和改进的 PGC 算法的原理框图分别如图 1(a)~1(d) 所示。

通过两个乘法器将干涉信号 $I(t)$ 分别与基本载波 $G \cos \omega_c t$ 和第二谐波 $H \cos 2\omega_c t$ 相乘, 为了得到更好的解调结果, 载波信号与干涉信号需要满足同步进行。通过两个截止频率略低于载波的低通滤波器进行滤波, 滤波后的信号可以表示为

$$L_1 = LPF [I(t) \cdot G \cos(\omega_c t)] = -BGJ_1(C) \sin \varphi(t), \quad (3)$$

$$L_2 = LPF [I(t) \cdot H \cos(2\omega_c t)] = -BHJ_2(C) \cos \varphi(t). \quad (4)$$

经过两个低通滤波器滤波后, 信号直接相除, 相除后的信号通过反正切函数进行扩展, 再通过高通滤波器得到 PGC-Arctan 的解调结果:

$$S_{PGC-Arctan}(t) = \arctan \left\{ \left[\frac{GJ_1(C)}{HJ_2(C)} \right] \tan \varphi(t) \right\}. \quad (5)$$

经过微分交叉相乘、相减、积分运算处理之后, 再通过高通滤波器可得到 PGC-DCM 算法^[35] 解调结果:

$$S_{PGC-DCM}(t) = B^2 GHJ_1(C) J_2(C) \varphi(t). \quad (6)$$

令 $G = H = 1$, 则 PGC-DCM 算法的解调结果受调制深度和光强干扰的影响。PGC-Arctan 算法的解调结果不受干涉光强干扰的影响, 但是调制深度变化会导致 $J_1(C)/J_2(C)$ 发生变化, 使得 $J_1(C)/J_2(C) \neq 1$, 给解调系统造成影响, 导致解调结果出现非线性失真。为降低谐波失真对解调结果的干扰, 后来提出了一种单路径差分相除 PGC 解调算法^[30] (PGC-SDD), 该解调算法流程图如图 1(c) 所示, $L_1(t)$ 经过微分, 可得到:

$$L_1'(t) = -BJ_1(C) \cos \varphi(t) [\varphi(t)']. \quad (7)$$

将 $L_1'(t)$ 与 $L_2(t)$ 相除然后进行积分器和高通滤波器, 可以得到:

$$S_{PGC-SDD}(t) = [J_1(C)/J_2(C)] \cdot \varphi(t). \quad (8)$$

从上式 (8) 相位解调的理论表达式中可以看出, PGC-SDD 算法能够抑制光强的影响, 也能够抑制由于 C 值影响的非线性谐波失真, 但是该解调算法仍然与调制深度 C 值相关。受到调制深度 C 值影响出现线性失真, 给解调结果造成干扰。为了消除 PGC-SDD 算法中的 C 值的影响, 提出了一种施加在分布式干涉传感器中的新型解调算法, 其原理框架如图 1(d) 所示。经过低通滤波器滤波后的信号为 L_1 和 L_2 , 如式 (3) 和式 (4) 所示, 然后分别对 L_1 和 L_2 进行微分运算, 再将微分后的式子分别与 L_1 和 L_2 自身相乘, 得到:

$$X(t) = L_1 \cdot L_1' = B^2 [J_1(C)]^2 \sin \varphi(t) \cos \varphi(t) [\varphi(t)'], \quad (9)$$

$$Y(t) = L_2 \cdot L_2' = -B^2 [J_2(C)]^2 \sin \varphi(t) \cos \varphi(t) [\varphi(t)'], \quad (10)$$

$Y(t)$ 与 $X(t)$ 相除得到:

$$a = \frac{Y(t)}{X(t)} = -[J_2(C)/J_1(C)]^2, \quad (11)$$

接下来计算式 (11) 取负运算后的平方根:

$$Z(t) = \sqrt{-a} = J_2(C)/J_1(C). \quad (12)$$

实际应用中, 相位调制深度通常在 0 到 3.7 rad 范围内。根据贝塞尔函数性质, 当 $0 < C < 3.7$ rad 时, $J_1(C) > 0$ 和 $J_2(C) > 0$ 。将式 (8) 与式 (12) 相乘, PGC-SDD-DSM 算法的解调结果可得:

$$S_{PGC-SDD-DSM} = \varphi(t). \quad (13)$$

从上式可以看出, 改进的 PGC 解调算法对光强干扰和调制深度均不敏感, 可以消除光强干扰和调制深度变化引起的谐波失真, 从而大大降低解调结果的误差。表 1 是上述四种 PGC 算法的参数性能比较。

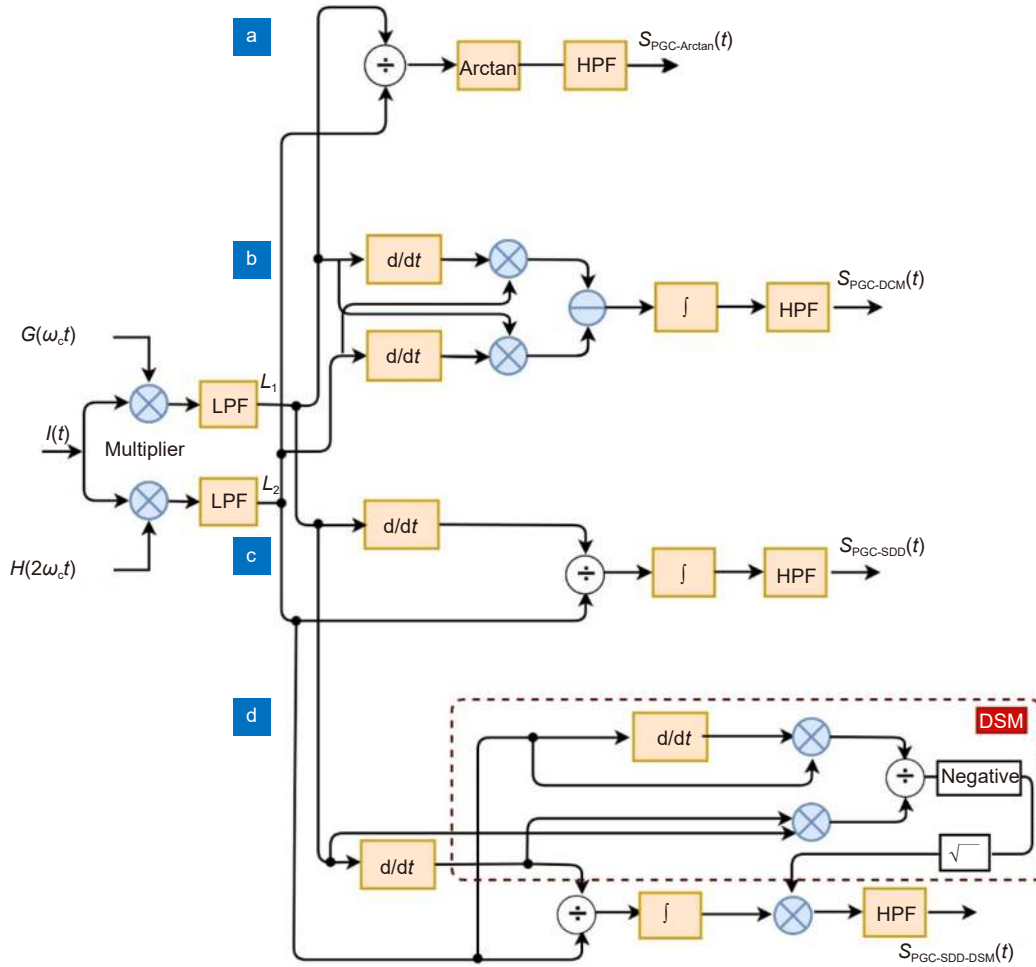


图 1 PGC 解调算法结构框架图。

(a) PGC-Arctan; (b) PGC-DCM; (c) PGC-SDD; (d) PGC-SDD-DSM

Fig. 1 Schematics of the PGC demodulation algorithm.

(a) PGC-Arctan; (b) PGC-DCM; (c) PGC-SDD; (d) PGC-SDD-DSM

表 1 四种算法的性能比较

Table 1 Comparisons of four PGC demodulation algorithms

Parameters	Demodulation formula	Modulation depth(C)	Light intensity disturbance(LID)	Total harmonic distortion(THD)
PGC-DCM	$S_{PGC-DCM}(t) = B^2GHJ_1(C)J_2(C)\varphi(t)$	Sensitive	Sensitive	Low THD
PGC-Arctan	$S_{PGC-Arctan}(t) = \arctan\left\{\left[\frac{GJ_1(C)}{HJ_2(C)}\right]\tan\varphi(t)\right\}$	Sensitive	Non-sensitive	High THD
PGC-SDD	$S_{PGC-SDD}(t) = [J_1(C)/J_2(C)] \cdot \varphi(t)$	Sensitive	Non-sensitive	Low THD
PGC-SDD-DSM	$S_{PGC-SDD-DSM} = \varphi(t)$	Non-sensitive	Non-sensitive	Low THD

3 仿真与分析

为了验证提出的新型 PGC-SDD-DSM 算法的有效性, 进行了一系列仿真对比实验。利用改进的算法方案对传感系统进行解调, 测试该方案对调制深度 C 值的敏感度, 以及与 PGC-SDD、PGC-DCM 和 PGC-Arctan 算法的对比实验。实验中, 载波信号频率为

50 kHz, 采样频率为 4 MHz, 干涉信号中直流分量和交流分量分别设置为 1 V。

将频率为 1 kHz, 幅度为 1.4 rad 的干扰信号施加在系统当中, 来测试 PGC-SDD-DSM 解调算法对 C 值的敏感程度。在调制深度 C 值取 1.5 rad、2.0 rad、2.5 rad、3.0 rad 和 3.5 rad 时, 几种解调算法解调出来的仿真实验结果分别如图 2(a)~2(d) 所示。

如图 2(a) 所示, 当 C 取不同值时, PGC-SDD-DSM 算法解调结果几乎不发生变化, 其幅值大小在 1.4 rad 左右。如图 2(b) 所示, PGC-SDD 解调算法的解调结果随 C 值变化显著。由理论计算可知当 C 值取 2.63 rad 时 $J_1(C)/J_2(C) = 1$, 此时解调结果的线性误差最小。因为 C 值取 2.5 rad 时相比 C 值取 1.5 rad、2.0 rad、3.0 rad 和 3.5 rad 而言更接近 2.63 rad, 此时 $J_1(C)/J_2(C)$ 更加接近 1, 所以 C 值取 2.5 rad 时在仿真实验中能达到最好的解调效果。如图 2(c) 所示, PGC-Arctan 解调算法解调结果对于不同的调制深度 C 值, 解调结果变化显著。随着 C 值与 2.63 rad 偏差越小, 谐波失真越小, 解调效果就越好。所以 $C=2.5$ rad 时解调结果非线性失真最小。然而当 $C=3.5$ rad 和 $C=1.5$ rad 时出现严重谐波失真, 此时解调结果非线性失真最大。所以调制深度 C 值变化会使得 PGC-Arctan 算法的解调波形幅值发生变化, 同时使得解调波形失真。如图 2(d) 所示, PGC-DCM 解调算法解调波形随 C 值变化显著。随着 C 值与 2.37 rad 的偏差增加, 解调出来信号幅度递减, 解调信号失真越

大。当 C 值取值为 2.5 rad 时能够还原出 0.98 rad 振幅的信号, 此时能够解调出最大的原始信号。当 C 值取 3.5 rad 时还原信号振幅大小为 0.72 rad, 此时解调出的信号与原始信号存在最大偏差。所以调制深度 C 值变化会使得 PGC-DCM 解调算法解调波形幅值发生明显变化。由此可见, 实际仿真验证与理论推导相一致。

从图 2 可看出在同样干涉信号和实验条件的情况下, PGC-SDD-DSM 解调算法解调结果优于其它三种算法, 且其对调制深度 C 值不敏感, 具有较高的稳定性。

4 实验和结果分析

搭建了一套实验系统来验证所提出的 PGC 解调算法的性能, 如图 3 所示。在该实验系统中, 传感光纤为单模光纤, 信号发生器作为振动源驱使缠绕在 PZT 上的光纤发生振动, 从而产生振动信号。为了进行 PGC 调制并获得外部干扰信号, 实验系统包含两个马赫-曾德尔 (Mach-Zehnder) 干涉仪。其中第一个

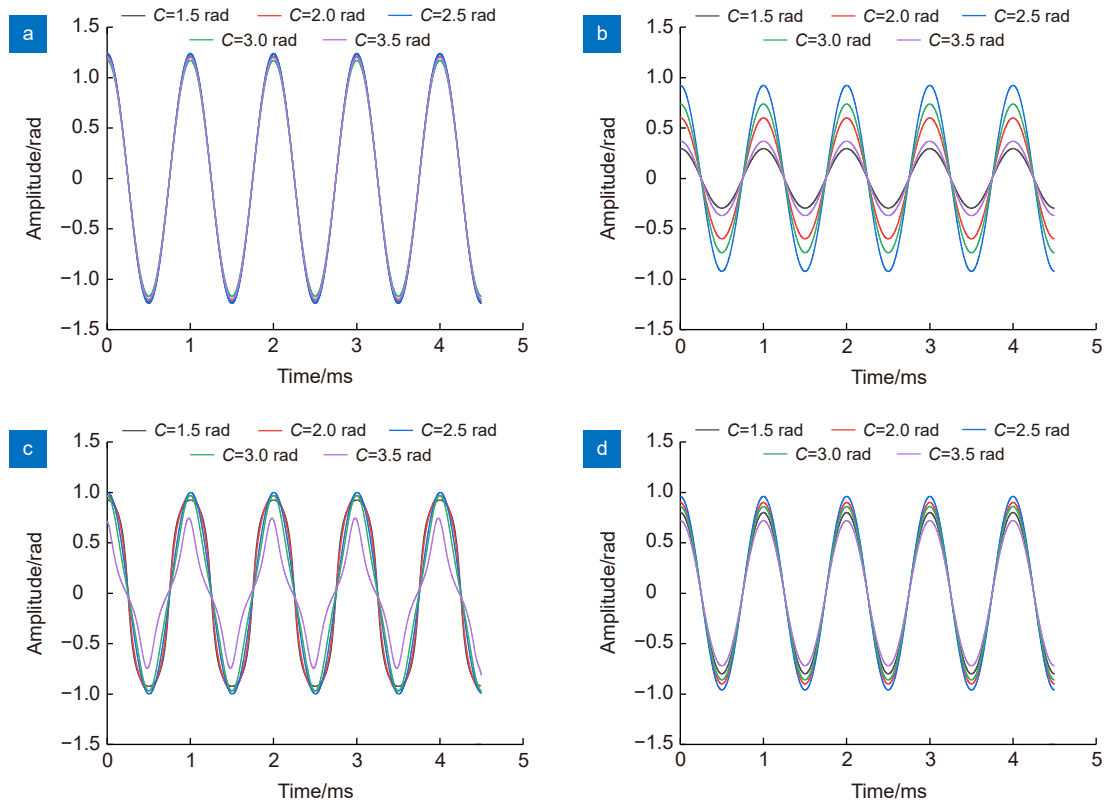


图 2 $C=1.5$ rad、2.0 rad、2.5 rad、3.0 rad 和 3.5 rad 时不同 PGC 算法解调结果。

(a) PGC-SDD-DSM; (b) PGC-SDD; (c) PGC-Arctan; (d) PGC-DCM

Fig. 2 Demodulation signals of different PGC demodulation algorithms with $C=1.5$ rad, 2.0 rad, 2.5 rad, 3.0 rad and 3.5 rad.

(a) PGC-SDD-DSM; (b) PGC-SDD; (c) PGC-Arctan; (d) PGC-DCM

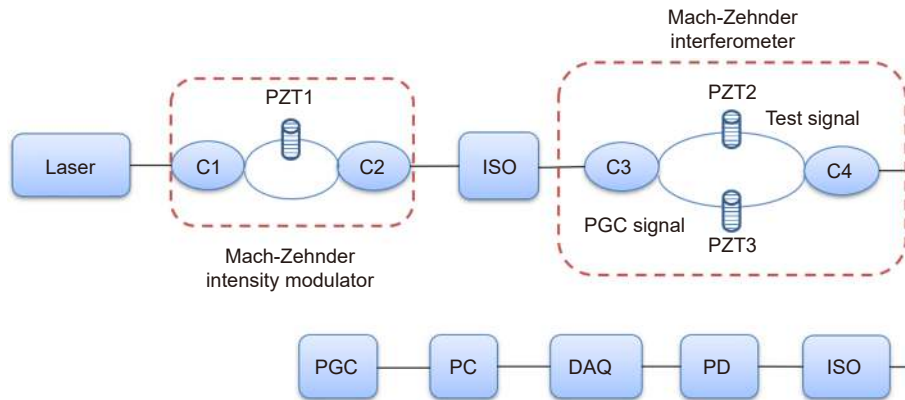


图3 实验系统结构图

Fig. 3 Schematic of experimental setup

Mach-Zehnder 干涉仪的作用是评估系统在引入光强干扰条件下的稳定性, 第二个 Mach-Zehnder 干涉仪的作用是引入外部干扰信号和 PGC 信号。波长为 1550 nm 的稳定可调谐激光器用作传感器系统的光源。将频率为 50 Hz 的正弦信号施加到 PZT1 上以产生干扰深度为 0.7 rad 的光强干扰 (LID) 信号。使用隔离器 (ISO) 降低光纤传感器中相干瑞利散射噪声, 然后将频率为 1 kHz 的测试信号和频率为 50 kHz 的载波信号分别施加到 PZT2 和 PZT3。高灵敏度光电探测器 (PD) 将干涉光信号转换为电信号, 输出信号由数据采集卡 (美国 NI 公司生产的 DAQ, USB-6251) 以 1.25 MS/s 的采样率进行采样, 然后通过 USB 存储器传输到计算机。采用 MATLAB 和 Labview 软件, 对提出的 PGC 算法进行解调处理得到解调信号。

在 PZT2 处施加频率为 1 kHz, 信号幅度为 2.0 rad 的振动信号, 原始振动信号波形图如图 4 所示。PZT3 处施加相位载波信号的频率为 50 kHz, 调制深度 C 设置为 1.5 rad。

图 5(a)~5(d) 分别是 PGC-DCM、PGC-Arctan、

PGC-SDD 和 PGC-SDD-DSM 解调算法的解调结果。实验中调制深度 C 主要与外加电信号的稳定性、压电陶瓷的特性以及光纤参数的变化有关。一般来说, 电信号和压电陶瓷的稳定性较好, 但光纤的折射率同时会受到温度、应变等因素的影响, 因此调制深度 C 可能会出现波动。从图 5(a) 可以看出基于 PGC-DCM 解调算法的解调结果不稳定, 解调幅值受到光强的影响, 使得其幅值发生不同程度的变化。其最大幅值也与原始信号幅值存在较大差异, 这主要是由于光强干扰和调制深度 C 值而导致的。从图 5(b) 可看出 PGC-Arctan 解调结果不受光强干扰的影响, 使得其具有稳定的幅值, 但是由于调制深度 C 值的影响导致谐波失真, 从而出现明显的非线性失真现象。在图 5(c) 中, PGC-SDD 的解调信号仍然不稳定, 其最大幅值接近 1 rad, 该算法解调结果受 C 值变化明显而出现线性失真现象。相比之下, 从图 5(d) 可以看出, PGC-SDD-DSM 的解调结果与原始信号非常接近。解调结果的幅值稳定且谐波失真小。这表明提出的 PGC-SDD-DSM 算法稳定性高, 不受调制深度和光强干扰

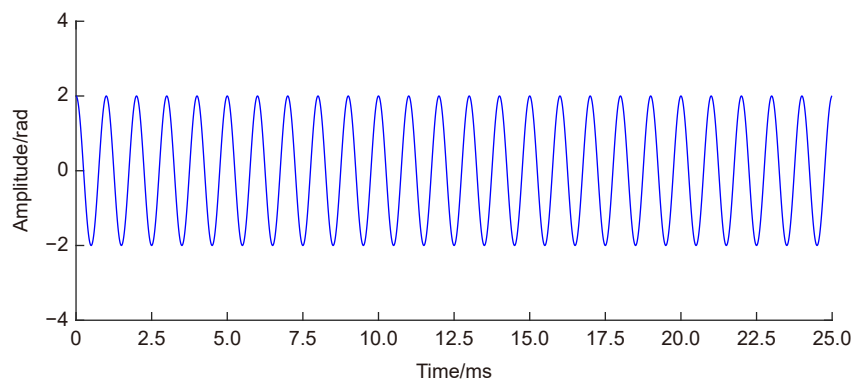
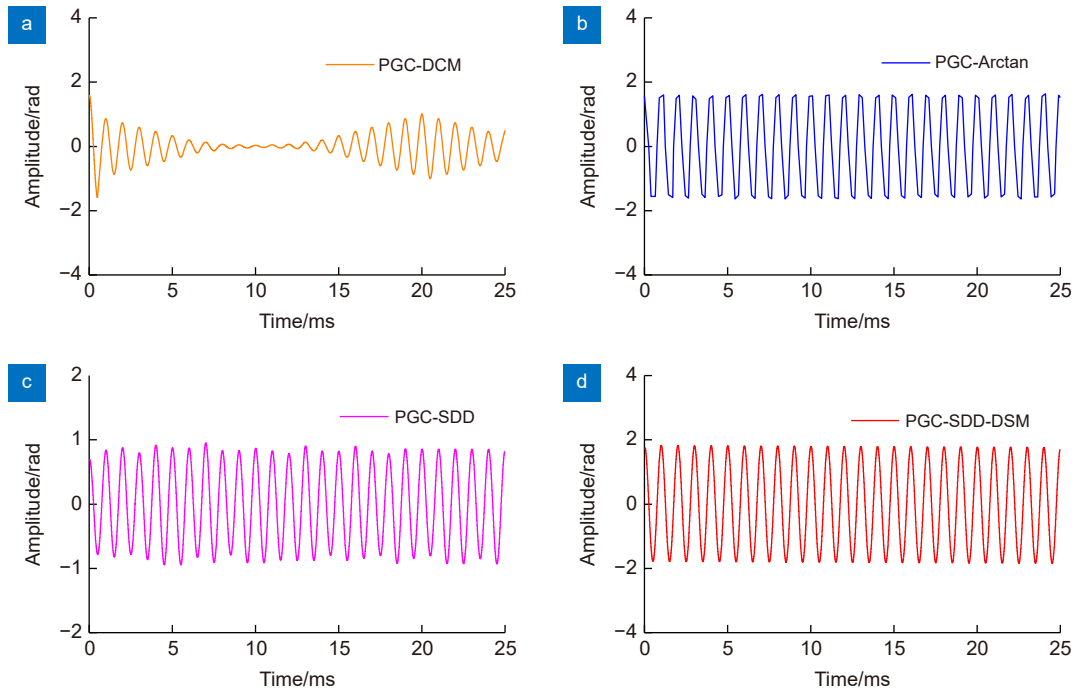


图4 原始信号

Fig. 4 Original signal

图 5 当 $C=1.5$ rad 时不同 PGC 算法的解调时域结果。

(a) PGC-DCM; (b) PGC-Arctan; (c) PGC-SDD; (d) PGC-SDD-DSM

Fig. 5 Demodulation time domain results of different PGC algorithms when $C=1.5$ rad.

(a) PGC-DCM; (b) PGC-Arctan; (c) PGC-SDD; (d) PGC-SDD-DSM

的影响。

基于四种不同算法的解调结果的频谱图如图 6 所示, 其对应图 5 中的四种解调结果。我们使用信纳比 (SINAD) 和总谐波失真 (THD) 来评估 PGC 算法的解调性能。THD 定义为所有谐波的等效均方根 (RMS) 幅度与基频幅度之比, SINAD 定义为基频功率与所有噪声和谐波功率之和的比值。

从图 6(a) 可以看出, 基于 PGC-DCM 算法的解调结果的失真分量主要是测试信号的一阶和二阶边带, 这是由光强扰动和外部环境干扰引起。与 PGC-DCM 解调算法相比, 改进的解调算法可以抑制 LID 引起的失真, 并具有更高的 SINAD。与 PGC-Arctan 解调算法相比, 改进后的解调算法可以很好地抑制谐波失真, 大大降低无关信号的频率干扰。当 $C=1.5$ rad 时, 实验中使用改进解调算法产生 35.56 dB 的 SINAD, 相比使用 PGC-DCM、PGC-Arctan 和 PGC-SDD 算法分别可获得 10.87 dB、24.19 dB 和 6.38 dB 的增益。表 2 中对四种算法的解调结果进行了比较。从表 2 中可看出, 改进 PGC 解调算法的解调结果相比其它三种解调算法而言, 具有最低的 THD 和最高的 SINAD。

根据解调结果计算出 THD 和 SINAD, 以评估改进的 PGC 方法的谐波失真性能。图 7 和图 8 分别显

示了在不同调制深度 C 值下, PGC-DCM、PGC-Arctan、PGC-SDD 和改进的 PGC 解调算法测得的 THD 和 SINAD。

如图 7 和图 8 所示, 当 C 值的范围从 1.5 rad 到 3.5 rad 时, 对于 PGC-DCM 方法, THD 范围从 0.07% 到 0.09%, SINAD 从 23 dB 到 25 dB。对于 PGC-SDD 解调算法, 其 THD 值从 0.035% 到 0.07%, SINAD 值在 25 dB 到 30 dB 范围内, 由于 PGC-DCM 受光强干扰的影响, 相比 PGC-SDD 解调算法而言具有较低 SINAD 和较高的 THD。对于 PGC-Arctan 解调算法, 其解调结果的 THD 值在 $C=2.63$ rad 左右时达到最低值 0.08%, C 值越偏离 2.63 rad, THD 值就越大, 最大可达 0.7%。同样地, SINAD 在 $C=2.63$ rad 左右时达到最大值 35 dB, C 值越偏离 2.63 rad, 则 SINAD 值就越小, 最小值为 11 dB。这主要是因为, 在 $C=2.63$ rad 时, $J_1(C)/J_2(C)=1$, 此时 PGC-Arctan 解调结果几乎不受调制深度 C 值影响, 从而可以消除解调结果中由于调制深度而导致的非线性谐波失真, 使得其在 $C=2.63$ rad 时具有最优的解调性能。这表明对于 PGC-Arctan 解调算法而言, C 值为 2.63 rad 左右时可取得最低的 THD 值和最高的 SINAD 值, PGC-Arctan 解调算法随 C 值偏离 2.63 rad 而出现不同程度的非线性

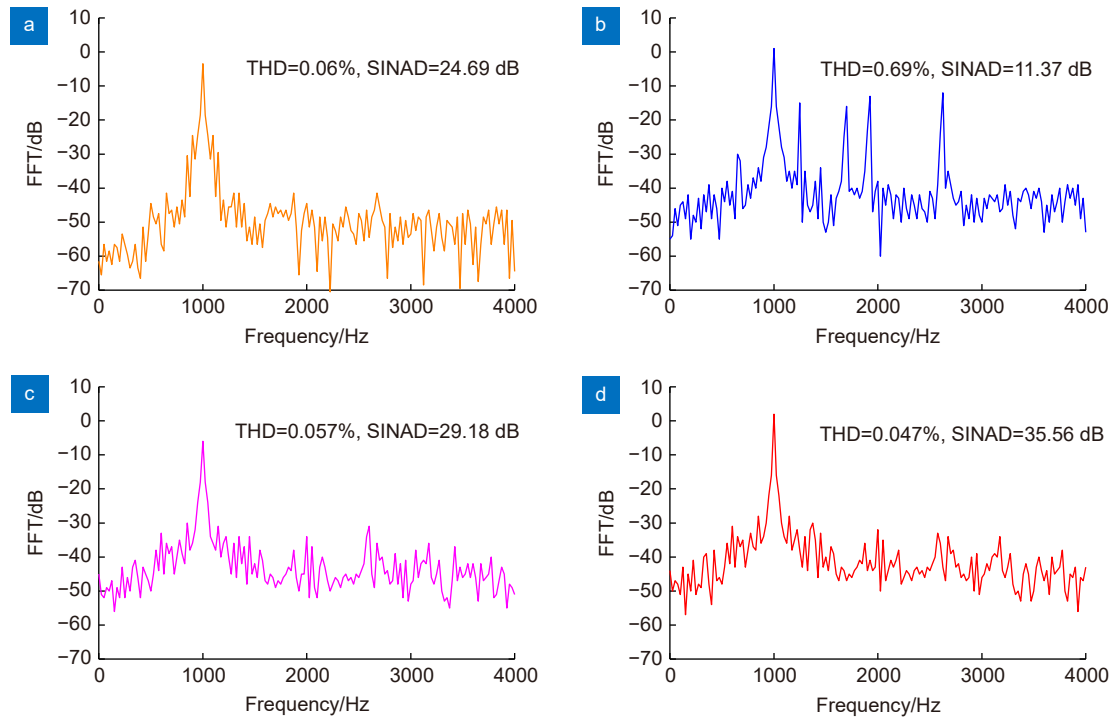


图 6 当 $C=1.5$ rad 时不同 PGC 算法的解调频域结果。

(a) PGC-DCM; (b) PGC-Arctan; (c) PGC-SDD; (d) PGC-SDD-DSM

Fig. 6 Frequency spectrums of the demodulation results of different PGC algorithms when $C=1.5$ rad.

(a) PGC-DCM; (b) PGC-Arctan; (c) PGC-SDD; (d) PGC-SDD-DSM

表 2 四种算法的解调结果性能对比

Table 2 Performance comparison of demodulation results of four algorithms

	PGC-DCM	PGC-Arctan	PGC-SDD	PGC-SDD-DSM
SINAD/dB	24.69	11.37	29.18	35.56
THD/(%)	0.060	0.690	0.057	0.047

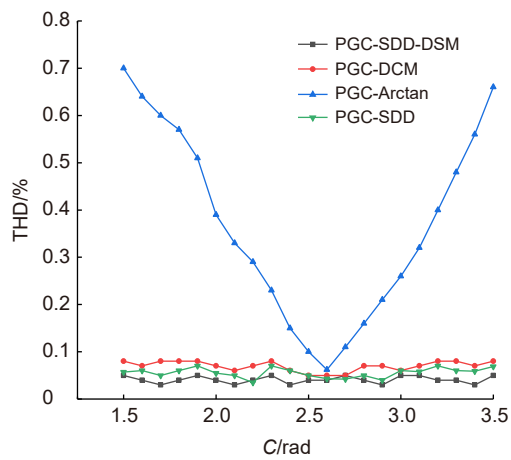


图 7 对不同的调制深度 C 值对应的 THD

Fig. 7 THD of the proposed PGC algorithm with modulation depth C

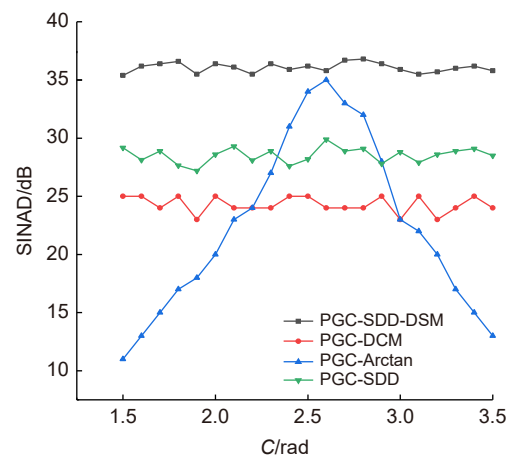


图 8 对不同的调制深度 C 值对应的 SINAD

Fig. 8 SINAD of the proposed PGC algorithm with modulation depth C

谐波失真, 使得其解调结果偏离最低 THD 值和最高的 SINAD 值。然而, 对于 PGC-SDD-DSM 解调方法, 该解调算法不受调制深度和光强的干扰, 其解调结果的 THD 从 0.02% 变为 0.05%, SINAD 从 35 dB 变为 37 dB, 这表明了 PGC-SDD-DSM 解调方法几乎不随调制深度 C 值变化而变化。与 PGC-DCM、PGC-SDD 和 PGC-Arctan 解调方案相比, PGC-SDD-DSM 解调方案在 1.5 rad 至 3.5 rad 的 C 值范围内实现了低于 0.1% 的低 THD 和高于 35 dB 的高 SINAD。这些均表明 PGC-SDD-DSM 方法的高稳定性能。实验中改进 PGC 解调算法随 C 值变化而产生 THD 值和 SINAD 值的小范围波动现象, 这主要是因为光纤传感器随外界环境变化而导致其解调信号发生改变, 进而影响到解调信号的 THD 值和 SINAD 值。

信号发生器用于在 PZT2 处产生 50 Hz 的正弦调幅信号, 以验证同一频率下不同幅度信号的解调精度和幅度响应。我们将理论值与实际值进行比较。振动信号的原始实际信号 (蓝色曲线) 和解调信号 (红色曲线) 的时域波形如图 9 所示。结果可看出, 所提出的

解调系统具有较高的幅度解调精度和良好的线性幅度响应。

接下来, 为了进一步验证光纤干涉仪解调系统中相同幅度的不同频率信号的解调精度和频响特性。信号发生器生成幅度为 1.0 V、频率范围为 80 Hz 至 280 Hz 的扫描信号。该信号也作用于 PZT2, 然后使用所提出的 PGC-SDD-DSM 解调算法解调出施加在 PZT2 处的变频信号。实际信号 (蓝色曲线) 和解调信号 (绿色曲线) 时域信号如图 10 所示。实验结果表明, 信号波形恢复效果较好。同时, 图中的时域信号清楚地表明, 当振动信号的幅度恒定时, 所提出的解调系统具有良好的频率响应。

动态范围定义为在没有明显失真情况下的最大可探测信号幅度和最小可探测信号幅度的功率比值。经过 PGC 解调之后的传感系统的背景噪声可视为最小可探测信号幅度。本实验系统中使用 PGC-SDD-DSM 解调技术的背景噪声接近 -33 dB, 基于 PGC-SDD-DSM 解调系统的动态范围随着测试信号频率的增加而减小, 如图 11 所示。当测试信号频率为 100 Hz 时

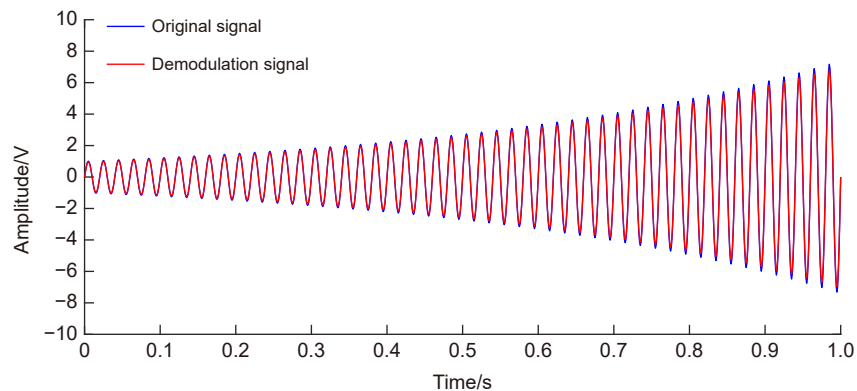


图 9 解调波形 (红色) 和原始波形 (蓝色)

Fig. 9 Demodulated signal waveform (red) and original signal (blue)

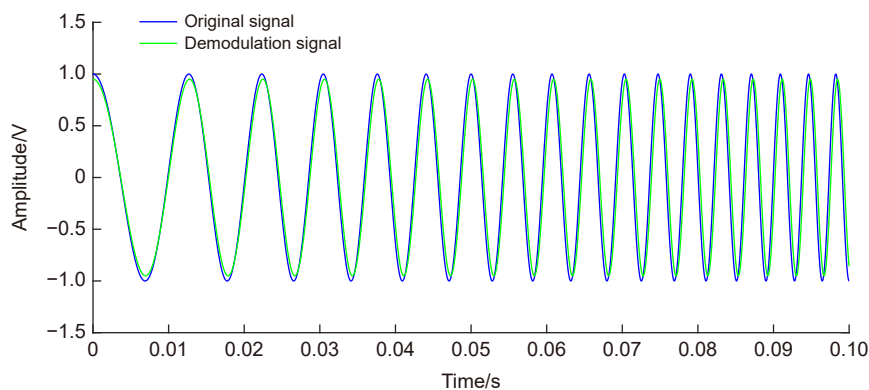


图 10 解调波形 (绿色) 和原始波形 (蓝色)

Fig. 10 Demodulated signal waveform (green) and original signal (blue)

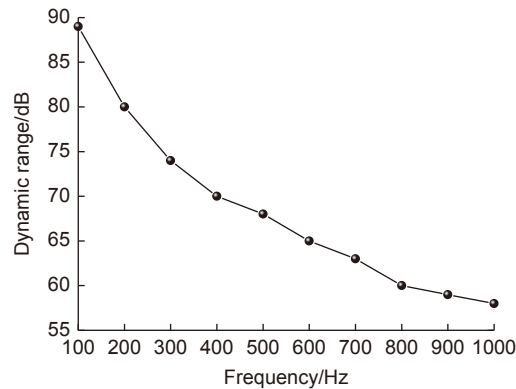


图 11 基于 PGC-SDD-DSM 算法解调系统的动态范围

Fig. 11 Dynamic range of the demodulation system based on the PGC-SDD-DSM algorithm

的动态范围为 88.29 dB, 测试号频率为 1 kHz 时的动态范围为 57.63 dB。

5 结论

本文介绍并实验证明了一种对调制深度 C 和光强干扰 LID 均不敏感的新型 PGC-SDD-DSM 解调算法。这种 PGC-SDD-DSM 解调算法稳定性高、谐波失真小。理论仿真结果表明, 与 PGC-SDD、PGC-DCM 和 PGC-Arctan 算法相比, 所提出的解调算法对相位调制深度不敏感。对于不同的调制深度 C 值, 改进 PGC 算法的解调信号幅度值几乎不发生变化。首次将 PGC-SDD-DSM 算法应用于光纤干涉传感器中。实验结果表明, PGC-SDD-DSM 算法可以同时抑制由于光强干扰和调制深度引起的谐波失真。该算法能够准确解调出原始信号, 具有较高的稳定性。当 C 值为 1.5 rad 时, 实验系统中使用所提出 PGC 解调算法解调结果的 SINAD 为 35.56 dB, 与使用 PGC-DCM、PGC-Arctan 和 PGC-SDD 算法相比分别可获得 10.87 dB、24.19 dB 和 6.38 dB 的增益。此外, 使用改进后的 PGC 解调算法还可以解调具有更好幅度响应和频率响应的非周期信号。随着 PGC-SDD-DSM 解调技术的引入, 可以显著提高光纤干涉传感器的性能。

参考文献

- [1] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse ϕ -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in direct detection[J]. *Opt Express*, 2018, **26**(2): 687-701.
- [2] Peng F, Wu H, Jia X H, et al. Ultra-long high-sensitivity ϕ -OTDR for high spatial resolution intrusion detection of pipelines[J]. *Opt Express*, 2014, **22**(11): 13804-13810.
- [3] Kuang Y, Wu H T, Zhang J D, et al. Advances of key technologies on distributed fiber system for multi-parameter sensing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(9): 170678.
- [4] Zhong X, Gui D L, Zhang B F, et al. Performance enhancement of phase-demodulation ϕ -OTDR using improved two-path DCM algorithm[J]. *Opt Commun*, 2021, **482**: 126616.
- [5] Chen D, Liu Q W, Wang Y F, et al. Fiber-optic distributed acoustic sensor based on a chirped pulse and a non-matched filter[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(20): 29415-29424.
- [6] Lu Y L, Zhu T, Chen L, et al. Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, **28**(22): 3243-3249.
- [7] Qian X L, Kong Y, Du T Y, et al. Modified phase-generated carrier demodulation compensated for the propagation delay of the fiber[J]. *Opt Commun*, 2020, **457**: 124595.
- [8] Juarez J C, Maier E W, Choi K N, et al. Distributed fiber-optic intrusion sensor system[J]. *J Lightwave Technol*, 2005, **23**(6): 2081-2087.
- [9] Wang H, Zheng G, Chen H B, et al. Frequency-modulated continuous-wave laser interferometric optical fiber temperature sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, **46**(5): 180506.
- [10] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2014, **26**(20): 2055-2057.
- [11] Lindsey N J, Yuan S Y, Lellouch A, et al. City-scale dark fiber DAS measurements of infrastructure use during the covid-19 pandemic[J]. *Geophys Res Lett*, 2020, **47**(16): e2020GL089931.
- [12] Zhu C H, Qu Y Z, Wang J P. The vibration signal recognition of optical fiber perimeter based on time-frequency features[J]. *Opto-Electron Eng*, 2014, **41**(1): 16-22.
- [13] Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 2509.
- [14] Wu H J, Liu X R, Xiao Y, et al. A dynamic time sequence recognition and knowledge mining method based on the hidden Markov models (HMMs) for pipeline safety monitoring with ϕ -OTDR[J]. *J Lightwave Technol*, 2019, **37**(19): 4991-5000.
- [15] Liu Z Y, Zhou L M, Liu W M, et al. Research on ESPRIT

- estimation algorithm for the central frequency of gain spectrum in Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. *Opto-Electron Eng*, 2018, **45**(6): 180007.
- 刘张云, 周黎明, 刘伟民, 等. BOTDR中散射谱中心频率的 ESPRIT估计算法研究[J]. *光电工程*, 2018, **45**(6): 180007.
- [16] Fernández-Ruiz M R, Soto M A, Williams E F, et al. Distributed acoustic sensing for seismic activity monitoring[J]. *APL Photonics*, 2020, **5**: 030901.
- [17] Wang C, Shang Y, Zhao W A, et al. Distributed acoustic sensor using broadband weak FBG array for large temperature tolerance[J]. *IEEE Sens J*, 2018, **18**(7): 2796–2800.
- [18] Wang C, Wang C, Shang Y, et al. Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry[J]. *Opt Commun*, 2015, **346**: 172–177.
- [19] Martins H F, Shi K, Thomsen B C, et al. Real time dynamic strain monitoring of optical links using the backreflection of live PSK data[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(19): 22303–22318.
- [20] Ma P F, Sun Z S, Liu K, et al. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, **124**: 105966.
- [21] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Opt Express*, 2016, **24**(2): 853–858.
- [22] Shang Y, Yang Y H, Wang C, et al. Optical fiber distributed acoustic sensing based on the self-interference of Rayleigh backscattering[J]. *Measurement*, 2016, **79**: 222–227.
- [23] Qian H, Luo B, He H J, et al. Phase demodulation based on DCM algorithm in Φ -OTDR with self-interference balance detection[J]. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2020, **32**(8): 473–476.
- [24] Fang G S, Xu T W, Feng S W, et al. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm[J]. *J Lightwave Technol*, 2015, **33**(13): 2811–2816.
- [25] Zhang S H, Chen Y P, Chen B Y, et al. A PGC-DCDM demodulation scheme insensitive to phase modulation depth and carrier phase delay in an EOM-based SPM interferometer[J]. *Opt Commun*, 2020, **474**: 126183.
- [26] He J, Wang L, Li F, et al. An ameliorated phase generated carrier demodulation algorithm with low harmonic distortion and high stability[J]. *J Lightwave Technol*, 2010, **28**(22): 3258–3265.
- [27] Zhang A L, Zhang S. High stability fiber-optics sensors with an improved PGC demodulation algorithm[J]. *IEEE Sens J*, 2016, **16**(21): 7681–7684.
- [28] Nikitenko A N, Plotnikov M Y, Volkov A V, et al. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors[J]. *IEEE Sens J*, 2018, **18**(5): 1985–1992.
- [29] Yu Z H, Zhang Q, Zhang M Y, et al. Distributed optical fiber vibration sensing using phase-generated carrier demodulation algorithm[J]. *Appl Phys B*, 2018, **124**(5): 84.
- [30] Yu Z H, Dai H L, Zhang M Y, et al. High stability and low harmonic distortion PGC demodulation technique for interferometric optical fiber sensors[J]. *Opt Laser Technol*, 2019, **109**: 8–13.
- [31] Yu Z H, Dahir A K A, Dai H L, et al. Distributed optical fiber vibration sensors based on unbalanced Michelson interferometer and PGC demodulation[J]. *J Opt*, 2021, **50**: 1–6.
- [32] Qu Z Y, Guo S, Hou C B, et al. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(16): 23593–23609.
- [33] Volkov A V, Plotnikov M Y, Mekhregin M V, et al. Phase modulation depth evaluation and correction technique for the PGC demodulation scheme in fiber-optic interferometric sensors[J]. *IEEE Sens J*, 2017, **17**(13): 4143–4150.
- [34] Dong Y S, Hu P C, Ran M, et al. Phase modulation depth setting technique of a phase-generated-carrier under aom in fiber-optic interferometer with laser frequency modulation[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(21): 31700–31713.
- [35] Dandridge A, Tveten A, Giallorenzi T. Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1982, **18**(10): 1647–1653.

作者简介



肖文哲 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感器相关研究。

E-mail: xiaowz0219@163.com

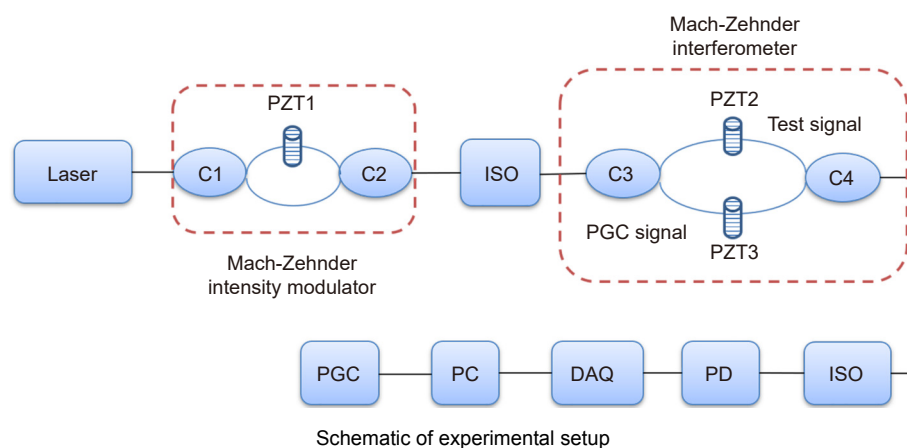


【通信作者】张大为 (1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事微纳光学和光学生物传感器相关研究。

E-mail: dwzhang@usst.edu.cn

High stability PGC demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor

Xiao Wenzhe¹, Cheng Jing², Zhang Dawei^{1*}, Kong Yong³, Ye Hualong¹, He Jun¹



Overview: Phase generated carrier demodulation is widely used in distributed fiber-optic interferometric sensors. Traditional PGC demodulation methods include the PGC-DCM (differential-cross-multiplying), the PGC-Arctan (PGC Arctangent) demodulation methods, and the PGC-SDD (single-path differential divide) demodulation scheme proposed by previous researchers. While the demodulation results of those demodulation algorithms are influenced by light intensity disturbance or phase modulation depth, which affects the stability of the demodulation system. Here, high stability and low harmonic distortion PGC demodulation technique with single-path differential divide and differential-self-multiplication (PGC-SDD-DSM) is proposed, and the demodulation result of which is not affected by light intensity and C value shift of the phase modulation depth. The simulation results show that when the C value is 1.5 rad, 2.0 rad, 2.5 rad, 3.0 rad, and 3.5 rad, the amplitude of PGC-DCM, PGC-Arctan, and PGC-SDD demodulation algorithm changes obviously, while the result of PGC-SDD-DSM demodulation algorithm hardly changes. The improved PGC demodulation algorithm is applied to the experiment system, the system composed of two Mach-Zehnder fiber-optic interference sensors verifies the performance of the proposed PGC demodulation algorithm. The first Mach-Zehnder sensor is used to generate light intensity interference, and the second one is used to generate PGC modulation signals and test signals. When the modulation depth C value is 1.5 rad, the time domain and frequency domain demodulation result show the improved PGC demodulation algorithm can suppress the interference of light intensity, and its demodulation result is better than the other three algorithms. The signal to noise and disturbance ratio (SINAD) of the demodulation signal using the proposed PGC algorithm is 35.56 dB, which is 10.87 dB, 24.19 dB, and 6.38 dB, higher than those of the PGC-DCM, PGC-Arctan, and PGC-SDD algorithms, respectively. For the improved PGC demodulation algorithm, when the phase modulation depth C changes from 1.5 rad to 3.5 rad, the total harmonic distortion (THD) varies from 0.02% to 0.05%, and the SINAD varies from 35 dB to 37 dB. Compared with the other three demodulation algorithms, the SINAD and THD of demodulation signal using the improved PGC demodulation algorithm are better than others and hardly change with the change of C value, which indicates that the PGC-SDD-DSM demodulation algorithm has higher stability and lower harmonic distortion. At the same time, the improved PGC demodulation algorithm can also demodulate aperiodic signals with better frequency response and amplitude response. It is believed that the proposed PGC demodulation algorithm can be further developed in the field of optical fiber sensors.

Xiao W Z, Cheng J, Zhang D W, et al. High stability PGC demodulation technique for fiber-optic interferometric sensor[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(3): 210368; DOI: 10.12086/oe.2022.210368

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61775140)

¹School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

²Department of Materials Science, Fudan University, Shanghai 200433, China; ³School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

* E-mail: dwzhang@usst.edu.cn