

文章编号: 1005-5630(2023)02-0055-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2023.002.007

用于 OFDR 振动传感的改进型相位生成载波算法研究

刘煜, 汪路军, 辛玮, 刘学静, 张学典
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 基于光频域反射(optical frequency domain reflectometry, OFDR)的振动传感技术由于其抗电磁干扰、抗腐蚀、安装方便, 且具有精准的定位能力等, 引起了许多的关注。而相位解调算法是 OFDR 振动传感的关键技术。应用于 OFDR 振动传感的相位解调算法有很多种, 但都或多或少受调制深度或者光强大小的影响。为了同时减少这两种因素对解调结果的影响, 提出了一种改进的相位生成载波算法, 通过数学计算消除解调信号中的光强项和调制深度项等非线性项。分别从理论和仿真两方面与传统算法作对比, 验证了改进型算法的性能, 证实其可以同时减少上述两种因素对解调结果的影响。该算法可用于提高振动传感系统的稳定性。

关键词: 光频域反射; 振动传感; 调制深度; 相位解调算法
中图分类号: TN 253 **文献标志码:** A

Research on improved phase generated carrier algorithm for OFDR vibration sensing

LIU Yu, WANG Lujun, XIN Wei, LIU Xuejing, ZHANG Xuedian
(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The vibration sensing technology based on optical frequency domain reflectometry (OFDR) has attracted a lot of research due to its superior electromagnetic interference resistance, good corrosion resistance, convenient installation and accurate positioning capability. Phase demodulation algorithm is the key technology of vibration sensing based on OFDR. There are many phase demodulation algorithms applied to OFDR vibration sensing, but they are more or less affected by modulation depth or light intensity. In order to reduce the impact of these two factors on the demodulation results at the same time, this paper proposes an improved phase generation carrier algorithm, which eliminates the nonlinear terms of the light intensity term and modulation depth term in the demodulation signal through mathematical calculation. Compared with the traditional

收稿日期: 2022-09-24

第一作者: 刘煜(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光纤传感。E-mail: ksszx98@126.com

通信作者: 张学典(1974—), 男, 教授, 研究方向为光电检测技术与器件, 光纤传感技术等。
E-mail: xdzhang@usst.edu.cn

algorithm from both theoretical and simulation aspects, the performance of the improved algorithm is verified, which can reduce the impact of these two factors on the demodulation results at the same time. The work of this paper can be used to improve the stability of the vibration sensing system.

Keywords: optical frequency domain reflectometry; vibration sensing; modulation depth; phase demodulation algorithm

引 言

光频域反射(optical frequency domain reflectometry, OFDR)是基于光在光纤中的背向瑞利散射的分布式光纤传感技术,可以准确定位应变所在,衍生出多种重要的应用,包括电磁场监测、结构健康监测、温度变化检测,形状传感等。特别是在振动测量领域,由于其抗干扰性好、抗腐蚀性强、易安装、成本低等优点吸引了众多的关注^[1-3]。而振动信号的解调是振动传感的关键。

在 OFDR 的探测采样过程中,需要对返回的信号进行处理,这一处理过程对频率要求比较高。根据奈奎斯特定律可知,如果要还原完整的信号,采样重复频率至少是待测频率的 2 倍以上,在实际应用中,则至少要 4 倍以上。假设振动信号为 100 Hz,采样频率则至少为 400 Hz。而扫频激光器在一次扫频后的空闲时间约为 1 s,重复采样频率为 1 Hz,远远达不到 400 Hz 的要求。所以传统的 OFDR 解调方式并不能很好地解调出振动信号。此时,便可以用分辨率高,动态范围广,线性度好,实时解调能力强的相位生成载波(phase generation carry, PGC)算法来进行解调^[4-5]。

关于相位解调算法的研究有很多,Wang 等^[6]用 3×3 耦合器解调相位信号,方法是在构成的干涉仪中,让相邻的两个干涉臂具有 120°的相位差,利用该特点直接对光电探测器接收到的 3 路信号进行交叉微分相乘,解调出信号。王旭等^[7]用数字正交解调算法将瑞利散射光信号经过数学算法之后,形成两路正交信号,再将这两路信号交由解调模块进行相位的解调。Wang 等^[8]提出一种基于时间门控数字 OFDR 相

位提取的分布式光纤振动传感方法,通过采用时间门控 OFDR 技术实现了高空间分辨率的振动应力传感。现阶段,一般使用对调制深度敏感度不高的微分交叉解调算法来解调振动信号^[9],但是这种算法对光线内光强要求很高,易受外界影响。当要求较高时,人们会使用微分交叉和反正切相结合的算法来解调振动信号^[10],但是过程相对繁琐。本文提出了一种可以避免光强和调制深度影响的改进型算法,将其用于 OFDR 振动信号的解调,并通过仿真实验验证其提高系统抗干扰的能力。

1 PGC 算法

1.1 PGC 调制

在实际测量中,如果对待测信号相位直接进行测量,环境噪声产生的随机相位漂移和解调电路产生的直流漂移会对解调结果产生严重的影响。可以通过引入一个待测信号带宽以外的大振幅周期信号对待测信号进行调制,使得待测信号位于调制信号的边带上,将外界的噪声影响转移到调制信号上,这便是 PGC 调制^[11]。经过调制可将噪声信号与待测信号分离,后续通过滤波器对信号进行简单的滤波处理,便可得到滤除了噪声信号的调制信号。

根据生成调制载波信号方式的不同,PGC 调制又分为内调制和外调制。由于内调制需要改变光源的驱动电流,从而影响扫频激光器的工作,在 OFDR 系统中不予采纳。本文主要介绍外部调制。

外部调制方式为在光路外部直接对参考光路光纤施加外力,使其产生周期性的调制载波信号。具体方法是将光纤缠绕在压电陶瓷换能器

(piezoelectric ceramic transducer, PZT) 上, 通过计算机控制 PZT, 使其产生一个周期性的电压, 从而导致 PZT 发生伸缩效应, 导致光纤发生形变, 光纤中的光波相位发生变化, 由此来实现外部调制。

1.2 PGC 传统解调方法

最常用的两种传统解调方式为微分交叉相乘解调法和反正切解调法。

1.2.1 微分交叉相乘 (differential and cross multiplying, DCM) 解调法

具体流程为: 首先, 将输入的干涉信号分别与基频和二倍频混频; 然后, 通过低通滤波器分别过滤掉高于基频和二倍频的部分; 接着, 将两路信号进行微分自相乘运算, 得到两个正交信号的平方项, 利用三角函数公式化简后对其进行积分; 通过高通滤波器滤除噪声信号, 最终得到解调信号^[12]。解调信号表达式为

$$\varphi(t) = B^2GHJ_1(C)J_2(C)D\cos(\omega_v t) \quad (1)$$

式中: B 为光源光强; G, H 分别为一倍频和二倍频正交信号的光强振幅; $J_1(C)$ 和 $J_2(C)$ 为调制深度 C 的一阶和二阶贝塞尔函数; D 为常数, 为振动信号的幅值; ω_v 为振动信号的角频率。可看到, 解调结果和待测信号成线性关系, 所以这种解调信号方式的优点为线性失真较小。但由于解调信号含有系数 B 和系数 C , 系数 B^2 为干涉幅度, 干涉幅度受多种因素影响, 包含光在传输中偏振态的变化、光源光功率的稳定性、光路传输中各种损耗衰减、激光光强等, 因此, 微分交叉相乘算法稳定性不高, 易受外界影响。

1.2.2 反正切算法解调法

反正切的前部分算法与微分自相乘算法基本相同, 主要差异在于后面提取信号部分。在两路信号通过低通滤波器后, 直接进行相除运算得到

$$Div = \frac{G \times J_1(C)}{H \times J_2(C)} \tan \varphi(t) \quad (2)$$

式中, $\varphi(t)$ 为振动信号关于时间的函数。对其进行反正切处理, 通过高通滤波滤去噪声信号, 便可提取出待测信号^[13-14], 如式(3)所示

$$\phi_s(t) = D\cos(\omega_v t) + \psi(t) = \arctan\left(\frac{I(t) * HJ_2(C)}{Q(t) * GJ_1(C)}\right) \quad (3)$$

式中: $\psi(t)$ 为环境噪声; $I(t)$ 和 $Q(t)$ 别为主频的一倍频和二倍频信号。相比于微分相乘算法, 此计算过程简单很多, 所以数据处理快, 具有很好的实时性。同时, 反正切算法消除了干涉幅度对解调结果的影响。但由于有 $J_1(C)/J_2(C)$ 的存在, 只有在 $C=2.63$ 这个特殊值时, $J_1(C)=J_2(C)$, 两式相除等于 1, 不会影响解调结果。在 C 取其他数值时, 一阶和二阶贝塞尔函数不相等, 数值会变化, 从而使输出信号具有非线性, 信号失真, 导致解调失败。

由上述可知, 这两种传统 PGC 解调方法会随光强 B 和调制深度 C 的变化影响解调结果。而在基于 OFDR 的振动传感解调过程中, 光强易受光纤损耗和环境的影响, 不会是一个理想的定值, 调制深度也是如此, 所以需要一个可以规避这些因素改进型算法。

2 改进型 PGC 算法

改进型 PGC 算法的核心问题为消除光强幅值 B 对结果的影响, 将调制深度 C 对解调结果的影响从非线性转换为容易处理的线性。基于此, 本文采用参考文献 [15] 提出的改进型算法, 相关流程图如图 1 所示。

光信号经光电传感器转换为电流信号, 再通过直流滤波器后的表达式为

$$I(t) = B(C\cos(\omega_c t) + \varphi(t)) \quad (4)$$

式中, ω_c 为调制信号角频率。电流信号分为 3 路: 第 1 路通过低通滤波器后结果为

$$L = BJ_0(C)\cos\varphi(t) \quad (5)$$

第 2 路与一倍频调制信号混频后通过低通滤波器滤去一倍频及以上的信号得到的结果为

$$L_1 = -BJ_1(C)\sin\varphi(t) \quad (6)$$

第 3 路与二倍频调制信号混频后滤去二倍频及以上的信号得到的结果为

$$L_2 = -BJ_2(C)\cos\varphi(t) \quad (7)$$

式中, $J_0(C)$, $J_1(C)$, $J_2(C)$ 分别为零阶、一阶

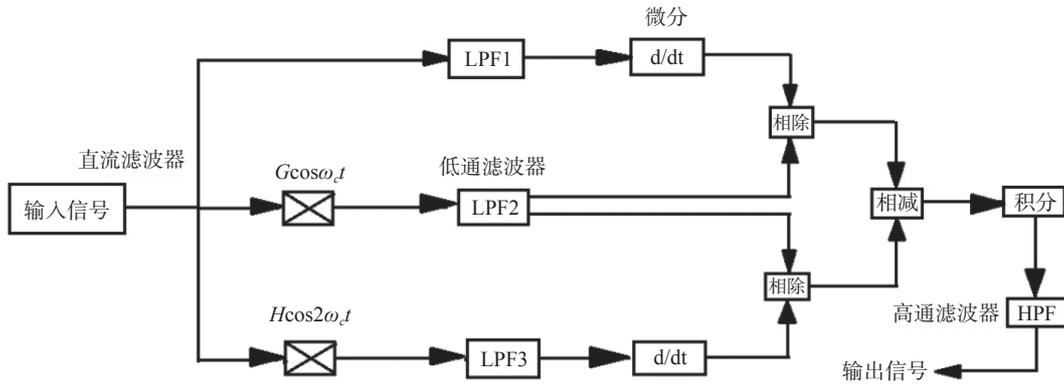


图 1 改进型 PGC 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of improved PGC algorithm

和二阶贝塞尔函数。

对 L 和 L_2 进行微分得到

$$L' = -BJ_0(C) \sin \varphi(t) \varphi'(t) \quad (8)$$

$$L'_2 = BJ_2(C) \sin \varphi(t) \varphi'(t) \quad (9)$$

分别再与式(6)相除，消除光强 B 的影响。得到的结果为

$$Y = \frac{L'}{L_1} = \frac{J_0(C)}{J_1(C)} \varphi'(t) \quad (10)$$

$$Z = \frac{L'_2}{L_1} = -\frac{J_2(C)}{J_1(C)} \varphi'(t) \quad (11)$$

两式相减，然后再利用贝塞尔递推函数就可以分离出待测信号。

$$Y - Z = \frac{2}{C} \varphi'(t) \quad (12)$$

式中，系数 $\frac{2}{C}$ 为常数，对其进行积分便可得出待测信号 $\varphi(t)$ 。由得出的结果可以看出，解调出的信号与原信号呈线性关系，和调制深度也呈线性关系，不会发生信号曲线的畸变。所以，此解调算法不会产生线性失真，且结果式中没有系数 B ，得出的结果也不受光强幅度的影响，具有很好的还原性和抗干扰性。

3 仿真实验

3.1 仿真模型的建立

为了验证本文提出的改进型相位解调算法可

以在外界光强和调制深度波动的情况下，不受影响地解调出 OFDR 振动传感中的振动相位信号，建立了振动信号相位与光纤中传播的光波之间的数学模型。

光在光纤中传输时，定义光波数 β 为光在 2π 长度内波动的次数，表达式为

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda} = \frac{2\pi n f}{c} \quad (13)$$

式中： λ 为光波长； f 为光频率； n 为光纤的折射率； c 为真空中的光速。

当振动信号作用在光纤上时，相位的变化量 $\Delta\varphi_v$ 可以表示为

$$\Delta\varphi_v = \beta\Delta l + l \frac{\partial\beta}{\partial n} \Delta n + l \frac{\partial\beta}{\partial d} \Delta d \quad (14)$$

式中： $\beta\Delta l$ 为光纤长度变化导致的相位增量（ β 为光波数），即应变效应； n 为光纤折射率； d 为光纤直径。振动信号的相位调制主要由应变效应引起，所以公式可以近似表示为

$$\Delta\varphi_v = \beta\Delta l \quad (15)$$

将光波数公式代入式(15)可得

$$\Delta\varphi_v = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot \Delta l \quad (16)$$

由此可知，调制相位的变化是振动信号引起的光纤应变引起的。此时，设振动信号的数学模型为 $V(t)$

$$V(t) = a \sin(2\pi f_v t) \quad (17)$$

式中： a 为振动信号振幅； f_v 为振动信号频率。

当振动信号产生调制时，光纤的长度变化量

Δl 会随着振动的变化而改变。将式(17)代入式(16)中,调制的相位可表达为

$$\Delta\varphi_v(t) = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot a \sin(2\pi f_v t) \quad (18)$$

令 $\theta = \frac{2\pi n}{\lambda} \cdot a$, 为常数,原式可化简为

$$\Delta\varphi_v(t) = \theta \sin(2\pi f_v t) \quad (19)$$

由此可见,只要求出调制相位 $\Delta\varphi_v(t)$, 便可求出振动信号的频率和幅值。

此时可设光电传感器接收到的电流信号为

$$I = A + B \cos(C \cos \omega_c t + \varphi(t)) \quad (20)$$

式中: A 为直流项; B 为光源光强; C 为调制深度; ω_c 为调制信号角频率, $\omega_c = f_c * 2\pi$; f_c 为调制信号频率; $\varphi(t) = \varphi_v(t) + \varphi_n(t)$, 其中 $\varphi_v(t)$ 为待测信号, $\varphi_n(t)$ 为噪声信号。

设 $A=1$, 光强 B 待定, 调制深度 C 待定。设 $\varphi_v(t) = D * \cos(2\pi f_v * t)$, 其中 D 为待测信号幅度; f_v 为待测信号频率。假设噪声信号 $\varphi_n(t) = 0.05 \cos(2\pi * f_n * t)$, 其中 f_n 为噪声信号频率。仿真实验分为两个部分: 第一部分为微分交叉相乘与新算法做对比, 在固定调制深度 C 的情况下, 改变光强 B 的值, 将两者解调结果与原始信号做对比; 第二部分为反正切算法与新算法做对比, 在固定光强 B 的值的条件下, 改变调制深度 C 的值, 将两者解调结果与原始信号做对比。

在基于 OFDR 的振动传感中, 式(20)模拟光电传感器采集到的信号。同时在仿真中不同的光强 B 值和调制深度 C 值模拟将影响调制结果的外界因素。

3.2 改进型 PGC 算法与 DCM 算法的比较

改变参数光强幅值 B , 模拟不同光强环境, 比较两种算法对同一信号的解调结果。当使用交叉相乘算法解调时, 为使调制出的信号幅值最大, 由式(1)可知, 当 $J_1(C) * J_2(C)$ 值最大时, 信号幅度最大最直观。计算可得, 当 $C = 2.37$ 时, 由式(1)求得的值最大, 所以在交叉相乘算法中调制深度 C 取值定为 2.37。改变光强 B 的值, 分别取 1, 2, 3 和 4; 结果如图 2(a)—(d) 所示。

由仿真结果可知, 当光强 B 不断变化时, 传

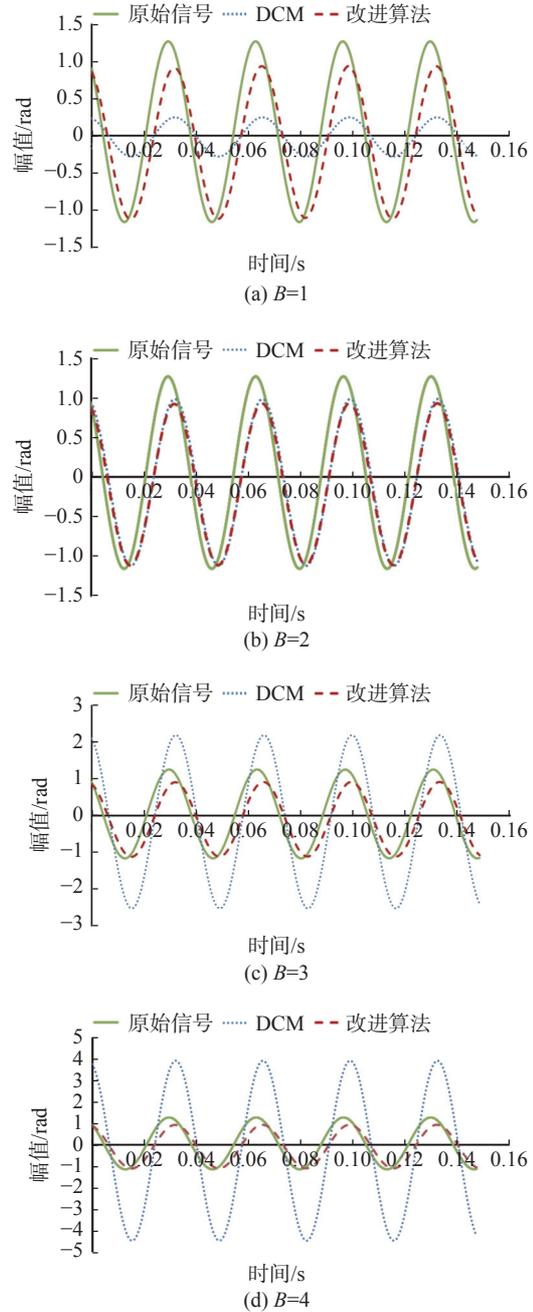


图 2 不同光强下信号对比图

Fig. 2 Signal contrast diagram under different light intensity

统 DCM 算法的波形没有发生畸变, 频率也与原始信号一致, 但是其幅值变化较大, 需进行后续的处理。而改进型解调算法由于计算过程消除了系数 B , 所以在波形、频率和幅值上与原始信号相比, 几乎没有变化。仿真实验论证了光强 B 的改变不会对改进型算法的解调结果产生影响, 方便了对信号的后续处理, 能提高系统的处理速度和实时性。

3.3 改进型算法对比反正切算法

固定光强 B ，改变调制深度 C ，以此模拟相同光强环境，不同调制深度，比较两种算法对同一信号的解调结果。结果如图 3(a)—(d)所示：

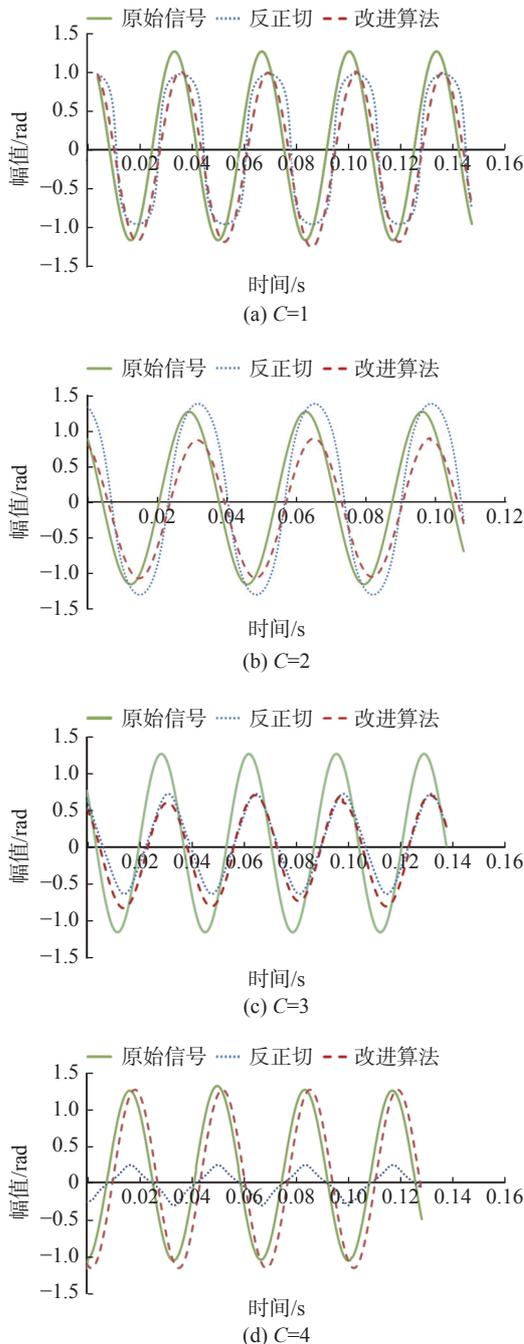


图 3 不同调制深度下信号对比

Fig. 3 Signal comparison under different modulation depths

当调制强度 C 发生变化时，由于解调信号的系数含有非线性项 $J_1(C)/J_2(C)$ ，传统的反正切算

法的解调结果相比于原始信号会有不同程度的畸变，不利于后期的处理。而改进型解调算法由于没有非线性项，解调结果的曲线不会发生畸变，但由于结果含有关于 C 的线性项，幅值会随着 C 的变化发生改变，通过简单的后续处理便可。

仿真实验结果的对比，证实了两种传统的算法各有其各自的优点和缺点。微分交叉相乘法解调出的信号相对于原始信号，其曲线没有畸变且完整，但是幅值受调制深度 C 和光强 B 的双重影响。如果后续加入对初步解调信号的再处理算法，整个处理过程会比较复杂，造成的结果就是解调缺乏实时性且容错度低。反正切算法流程简单且消除了光强 B 产生的影响，但由于该算法中有非线性项 $J_1(C)/J_2(C)$ ，只有调制深度在指定数值时，还原出的信号才是比较好的，所以其稳定性也不高。而改进型相位解调算法即使在调制深度和光源光强变化时，依旧能很好地解调出原始信号，可见其拥有优秀的抗干扰能力。

4 总结与展望

本文针对基于 OFDR 振动传感的相位解调部分易受光源光强和调制深度影响的问题，提出了可以消除光强和调制深度影响的改进型算法。分别从原理和仿真模拟中验证了该算法相较于传统解调算法，可以有效消除光强 B 和调制深度 C 对解调结果的影响，提高了该系统的稳定性。

虽然改进型相位解调算法在理论仿真上可以很好地提高系统稳定性，但是还没有实际应用于基于 OFDR 振动信号传感的实际测量，需要通过进一步实验来验证其相较于传统相位解调算法的优越性。

参考文献：

[1] ARBEL D, EYAL A. Dynamic optical frequency domain reflectometry[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 8823 – 8830.

[2] KAPLAN N, JASENEK J, ČERVEŇOVÁ J. Simultaneous measurement of temperature and strain based on HiBi FBG using OFDR[C]//Proceedings of the 2017 11th International Conference on

- Measurement. Smolenice, Slovakia: IEEE, 2017: 91 – 94.
- [3] 郁胜过, 张玲, 谢玮霖, 等. 基于遗传算法与 Zoom FFT 的光频域反射仪快速高精度频谱分析 [J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0406003.
- [4] FROGGATT M, MOORE J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735 – 1740.
- [5] ZHOU D P, QIN Z G, LI W H, et al. High-spatial-resolution distributed vibration measurement using time-resolved optical frequency-domain reflectometry [C]//Proceedings of SPIE 8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors. Beijing: SPIE, 2012: 842115.
- [6] WANG C, WANG C, SHANG Y, et al. Distributed acoustic mapping based on interferometry of phase optical time-domain reflectometry[J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 172 – 177.
- [7] 王旭, 刘珉含, 于森, 等. 相位敏感光时域反射系统数字正交解调算法分析及改进研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(12): 269 – 275.
- [8] WANG S, FAN X Y, LIU Q W, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33301 – 33309.
- [9] 张猛. 基于光纤频域反射的变压器机械振动检测方法研究 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [10] 范旭军. 基于 OFDR 分布式振动传感及其风电监测应用 [D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- [11] 杨东升, 慕德俊, 戴冠中. 机载红外诱饵运动特性仿真技术研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2009, 27(6): 781 – 785.
- [12] 夏东明, 娄淑琴, 温晓栋, 等. 干涉型光纤传感器相位载波解调技术研究 [J]. *光电技术应用*, 2011, 26(5): 47 – 50.
- [13] 王凯, 施清平, 蒋佳佳, 等. 参数估计误差对光纤水听器 PGC 反正切解调性能的影响 [J]. *光电子·激光*, 2012, 23(10): 1856 – 1862.
- [14] 孟鑫, 宫铭举, 张爱玲, 等. 一种光源调频的相位生成载波的反正切解调方法 [J]. *天津理工大学学报*, 2012, 28(3): 38 – 40.
- [15] 李阳桃子, 高宏, 乔学光. 消除光强扰动和调制深度影响的相位解调算法 [J]. *光通信技术*, 2022, 46(3): 38 – 42.

(编辑: 李晓莉)