

消除光强扰动和调制深度影响的相位解调算法

李阳桃子¹,高宏¹,乔学光^{2*}

(1.西安石油大学 陕西省油气井测控技术重点实验室,西安 710065;2.西北大学 物理学院,西安 710127)

摘要:为了消除光强扰动和相位调制深度对相位生成载波(PGC)解调的影响,提出一种基于混频滤波、相除和差分的相位解调算法——PGC解调改进算法。该算法通过滤波和微分两两相除以及差分、积分运算,使得解调信号不含任何变量。对PGC解调改进算法进行了理论分析和推导,利用Labview平台构建仿真模型,验证了该算法相对于传统解调算法的优势,搭建了基于迈克尔逊干涉的解调系统并进行实验验证。实验结果表明:在不同的相位调制深度情况下,PGC解调改进算法解调出的待测信号不会产生谐波失真;在不同光强的情况下,解调出的信号幅度保持一致。

关键词:相位生成载波;相位调制深度;消除光强扰动;迈克尔逊干涉仪;解调算法

中图分类号:TN247;O43 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)03-0038-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Phase demodulation algorithm for eliminating the influence of light intensity disturbance and modulation depth

LI Yangtaozi¹, GAO Hong¹, QIAO Xueguang^{2*}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas wells,

Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. School of Physics, Northwestern University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In order to eliminate the influence of light intensity disturbance and phase modulation depth on the phase generated carrier (PGC) demodulation, this paper proposes a phase demodulation algorithm based on mixing and filtering and phase division differential which is called PGC demodulation improved algorithm. The algorithm makes the demodulated signal without any variables by filtering and differential division and differential and integration operation. PGC demodulation improved algorithm is theoretically analyzed and deduced, and the simulation model is constructed by using Labview platform to verify the advantages of the proposed algorithm over traditional algorithm. A demodulation system based on Michelson interference is built for experimental verification. The experimental results show that the signal to be measured demodulated by the improved PGC demodulation algorithm will not produce harmonic distortion under different phase modulation depth. In the case of different light intensities, the demodulated signal amplitude remains the same.

Key words: phase generated carrier, phase modulation depth, eliminating light intensity disturbance, Michelson interferometer, demodulation algorithm

0 引言

目前,光纤干涉传感器因其灵敏度高、线性度好和响应频段宽等优点,在水声检测、建筑健康检测、地

质勘查和军事装备等领域具有良好的应用前景^[1-2]。在多种干涉型光纤传感器的解调技术中,相位生成载波(PGC)解调技术凭借其高分辨率、大动态范围和高线性度等优点,成为了目前应用最广泛的信号调制解调技术^[3]。

光纤干涉测量技术能够将外界干扰转化为光的相位变化。为获取干涉信号的相位变化,该技术通常将高频信号调制于干涉仪的参考臂,使得外界信号被加载到高频信号的边带上,消除了低频噪声对待测信号的影响。解调算法通过检测干涉信号中的谐波分量,从而正交恢复外界待测信号响应。传统的PGC解

收稿日期:2022-02-23。

基金项目:国家自然科学基金项目(61735014,61927812)资助。

作者简介:李阳桃子(1996—),女,硕士研究生,现就读于西安石油大学理学院光学工程专业,主要研究方向为光纤传感信号解调技术、相位解调中的相位载波生成技术、解调系统、信号处理和界面显示等。

***通信作者:**乔学光(1955—),男,理学博士,教授,主要从事光电子技术、光纤通信与传感、油气田光纤测井、物探和油气管线检测等领域的教学与研究工作。



调算法分为 PGC 交叉相乘 (PGC-DCM) 解调算法和 PGC 反正切 (PGC-Arctan) 解调算法。其中,PGC-DCM 解调算法通过将正交信号微分交叉相乘、做差及积分运算获取待测信号,所得解调结果未消除光源光强 B 及贝塞尔函数因子,因此该解调算法容易受到相位调制深度波动及光源光强扰动影响。PGC-Arctan 解调算法通过将正交信号相除和反正切运算获取待测信号,所得的解调结果仍包含贝塞尔函数因子。为使运算结果系数为 1(只包含待测信号),相位调制深度 C 需取特殊值 2.63 rad,当 C 偏离 2.63 rad 时,解调结果会出现严重失真;另外,由于 Arctan 函数存在一定的范围限制,因此其解调相位的范围有限。针对传统算法的问题,ZHANG A L 等人^[4]提出利用参考补偿方法来消除光源光强扰动;QU Z Y 等人^[5]提出自校准 PGC-Arctan 解调算法,利用椭圆参数和 C 相关分量联合估计出准确的 C 值,通过闭环比例积分微分模块将 C 标定为最优值;YAN L P 等人^[6]提出用正弦和三角信号组合消除光强扰动;ZHANG S H 等人^[7]使用微分交叉相除再相乘的运算降低相位调制深度对解调的影响。

光强扰动和相位调制深度对信号解调影响很大,以上研究中的算法涉及大量运算,实时性较差。因此,本文提出一种基于混频滤波后相除差分的相位解调算法——PGC 解调改进算法,通过相除差分得到含待测信号的导数,最终求积分还原得到待测信号。

1 PGC 解调改进算法的理论分析

PGC 解调改进算法框图如图 1 所示。干涉型传感器输出的干涉信号被光电探测器(PD)转换成电信号,电信号经过数据采集卡(DAQ)中的数/模转换器后被转换成数字信号,通过 USB 连接到电脑进行后续的信号处理,处理过程如下:首先,干涉信号 $S(t)$ 通过直流滤波后得到信号 $I(t)$ 并将其分为 3 路:第一路通过低通滤波器(LPF),其余 2 路分别与调制信号的一倍频

和二倍频相乘,获得的信号分别通过 LPF;滤波后的信号进入二倍频信号微分模块,再与另 2 路滤波后的信号依次进入除法器、减法器、乘法器和积分器等模块,最后通过高通滤波器(HPF)得到待测信号。解调方案输入端的干涉信号 $S(t)$ 表示为

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

其中, A 为干涉光强引起的直流信号, B 为光源光强, ω_c 为调制信号角频率。 $\varphi(t)=\varphi_s(t)+\varphi_n(t)$, $\varphi_s(t)$ 为待测信号, $\varphi_n(t)$ 为外界环境扰动引起的相位变化。干涉信号通过直流滤波器后得到的表达式为

$$I(t)=B\cos[C\cos(\omega_c t)+\varphi(t)] \quad (2)$$

通过低通滤波器后的表达式分别为

$$L=f_{\text{LPF}}[I(t)]=BJ_0(C)\cos\varphi(t) \quad (3)$$

$$L_1=f_{\text{LPF}}[I(t)\cos(\omega_c t)]=-BJ_1(C)\sin\varphi(t) \quad (4)$$

$$L_2=f_{\text{LPF}}[I(t)\cos 2(\omega_c t)]=-BJ_2(C)\cos\varphi(t) \quad (5)$$

其中, $f_{\text{LPF}}(\cdot)$ 为低通滤波函数, $J_0(C)$ 、 $J_1(C)$ 、 $J_2(C)$ 分别为第 0、1 和 2 阶贝塞尔函数。 $L(t)$ 、 $L_2(t)$ 通过微分器后表示为

$$L'=-BJ_0(C)\sin\varphi(t)\varphi'(t) \quad (6)$$

$$L_2'=-BJ_2(C)\sin\varphi(t)\varphi'(t) \quad (7)$$

正交信号 L 和微分后的信号 L' 、 L_2' 分别经过除法器后得到

$$Y=\frac{L'}{L_1}=\frac{J_0(C)}{J_1(C)}\varphi'(t) \quad (8)$$

$$Z=\frac{L_2'}{L_1}=-\frac{J_2(C)}{J_1(C)}\varphi'(t) \quad (9)$$

Y 和 Z 通过减法器后结果为

$$Y-Z=\frac{J_0(C)}{J_1(C)}\varphi'(t)+\frac{J_2(C)}{J_1(C)}\varphi'(t) \quad (10)$$

用贝塞尔递推公式 $J_{n-1}(x)+J_{n+1}(x)=\frac{2n}{x}J_n(x)$ ^[8] 化简式(10),得

$$Y-Z=\frac{2}{C}\varphi'(t) \quad (11)$$

$\frac{2}{C}\varphi'(t)$ 通过积分模块和 HPF 后得到的最终解调

结果表示为 $\frac{2}{C}\varphi_s(t)$ 。其中, $\varphi_s(t)=$

$D_s\cos(\omega_s t)=D_s\cos(2\pi f_s t)$, D_s 为待测信号幅度, ω_s 为振动信号角频率。可以看出,该结果不再与光源光强 B 相关,而实际 C 的大小为给定值, $\frac{2}{C}$ 为一个已知的系数,不会对待测信号造成非线性失真。

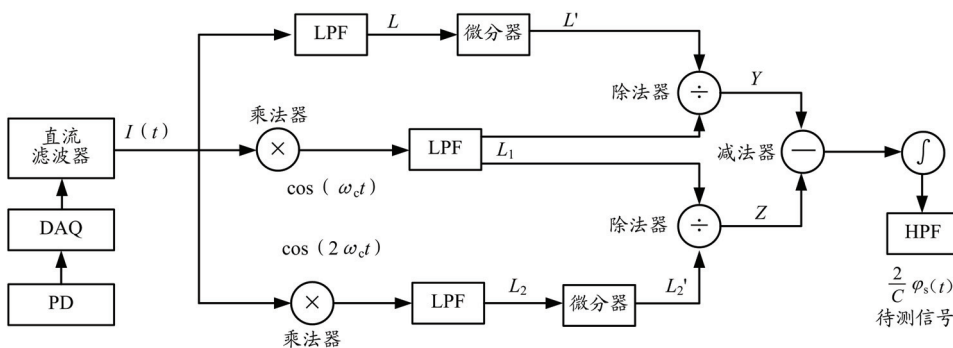


图 1 PGC 解调改进算法原理框图

2 PGC 解调改进算法的数值仿真

本文利用 Labview 平台通过改变光源光强和调制深度对 PGC 解调改进算法进行仿真,仿真参数设定如下:相位调制频率为 15 kHz,待测信号频率为 100 Hz,幅度为 1 rad。

2.1 相位调制深度 C 对解调结果影响分析

设光源光强 B 不变,将相位调制深度 C 分别取 1 rad、2 rad 和 3 rad,采用 PGC 解调改进算法进行解调,得到的结果如图 2 所示。

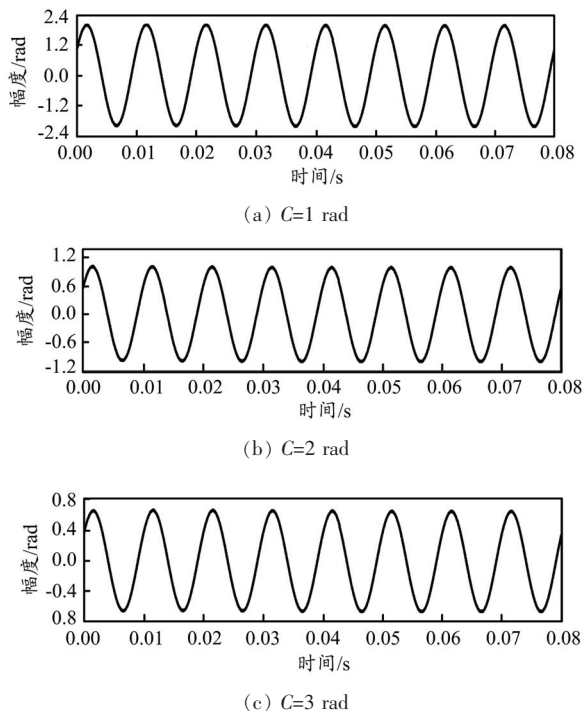


图 2 在不同调制深度 C 下,PGC 解调改进算法的解调结果

由图 2 可知,当改变 C 值为 1 rad、2 rad 和 3 rad 时,PGC 解调改进算法的解调信号频率和相位保持一致,仿真结果和理论结果相符,待测信号与实际解调结果呈线性关系。相比传统解调算法要求 C 取特殊值时才能解调出待测信号,改进算法运用范围更广。

2.2 光源光强 B 变化对解调结果影响分析

设相位调制深度 $C=2$ rad,光源光强 B 分别为 1~4 mW(步长为 1 mW),得到的解调结果如图 3 所示。可以看出,当 B 分别为 1 mW、2 mW、3 mW 和 4 mW 时解调出的信号、频率、相位和幅度保持一致,这表明 B 的变化不影响 PGC 解调改进算法的解调结果。

2.3 PGC-Arctan 解调算法和 PGC-DCM 解调算法与 PGC 解调改进算法的对比

设相位调制深度 $C=1$ rad,得到 PGC-Arctan 解调算法和 PGC 解调改进算法的解调结果如图 4 所示。可

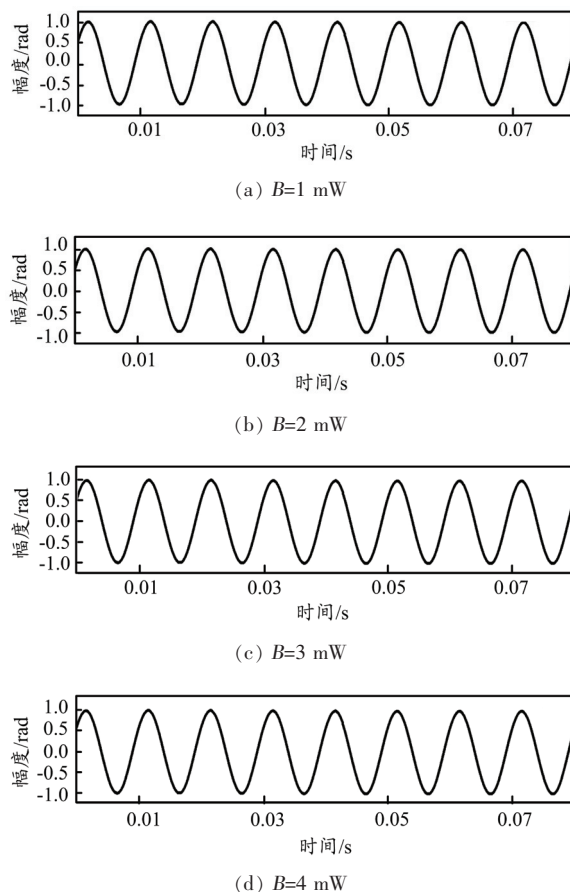


图 3 在不同光源光强 B 下,PGC 解调改进算法的解调结果

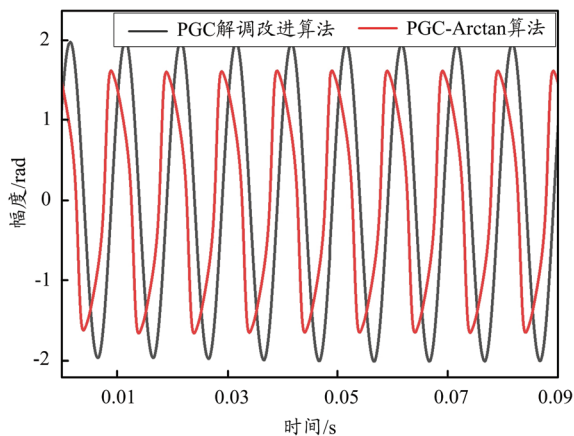


图 4 在 $C=1$ rad 时,PGC-Arctan 解调算法与 PGC 解调改进算法的解调结果对比

以看出,PGC-Arctan 解调算法解调出的信号存在明显失真,而 PGC 解调改进算法仍能还原出待测信号。

由于 PGC-DCM 解调算法解调结果与光源光强扰动有关,本文设 PGC-DCM 算法中 C 为 2.37 rad, B 分别为 1 mW、2 mW、3 mW 和 4 mW,得到不同光强下 PGC-DCM 解调算法的解调结果如图 5 所示。

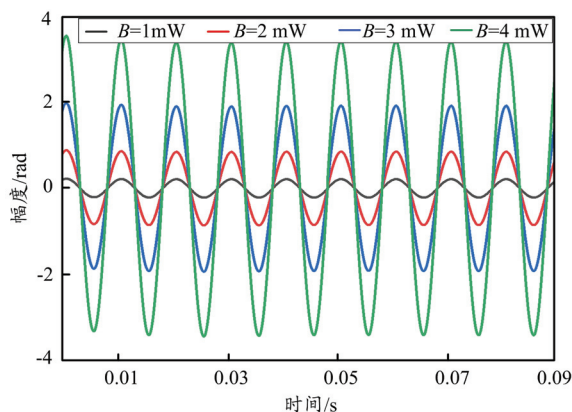


图5 不同光源光强 B 下,PGC-DCM 解调算法的解调结果

从图5可以看出,随着 B 的增加,PGC-DCM 解调算法解调出来的待测信号幅度也逐渐增加。这表明 B 值的改变对 PGC-DCM 解调算法解调出的待测信号幅度有较大的影响。对比图3和图5可知,相比 PGC-DCM 算法,PGC 解调改进算法能消除光源光强扰动项。

3 实验验证

为验证 PGC 解调改进算法在实际测量中的作用,本文搭建了基于迈克尔逊干涉仪(MI)的解调系统。系统结构图如图6所示,由窄线宽激光器、衰减器、MI、PD、信号发生器和数据采集卡等组成。其工作原理如下:窄线宽激光器发出的连续光经过光衰减器进入 MI 中,通过给 MI 探测臂上的压电换能器(PZT1)施加频率为 15 kHz 的余弦信号作为前端干涉光路的调制信号,给 PZT2 施加频率和幅度分别为 300 Hz 与 1 rad 的余弦信号作为传感信号。干涉仪两臂的输出信号在耦合器处形成干涉信号并返回至 PD,然后,通过数据采集卡将电压信号转换成数字信号,经 USB 连接至电脑,并在 Labview 平台中采用 PGC 解调改进算法进行实时解调,还原传感信号。

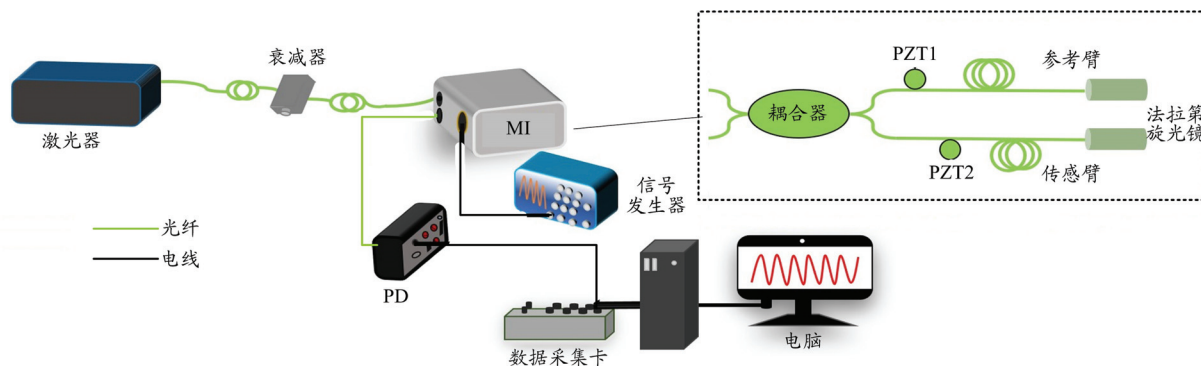


图6 基于 MI 的解调系统结构图

为了验证相位调制深度 C 取非特殊值 (2.37 rad 或 2.63 rad) 对 PGC-Arctan 解调算法和 PGC 解调改进算法解调结果的影响,设 C 为 1 rad,并对解调波形进行傅里叶变化(FFT),得到的结果如图7所示。可以看出,PGC-Arctan 解调算法解调的信号波形出现谐波失真,除了存在待测信号的频率以外,还存在待测信号的二次谐波和三次谐波;而 PGC 解调改进算法仍能还原待测信号,其解调结果的频谱只存在待测信号的频率,谐波处无频率分量。这说明 C 取非特殊值给 PGC-Arctan 解调算法的解调结果带来非线性的改变,但不会影响 PGC 解调改进算法的解调结果。

为了进一步验证 C 值对 PGC 解调改进算法的影响,本文将 C 值增大为 2 rad,并对解调结果进行 FFT,得到的结果如图8所示。可以看出,采用 PGC 解调改进算法时, C 值增大只会影响解调信号的幅度,解调结果频谱仅存在传感信号(300 Hz),没有出现其它频率成分,不会给解调结果带来非线性误差,实验结果与理论分析和仿真结果一致。

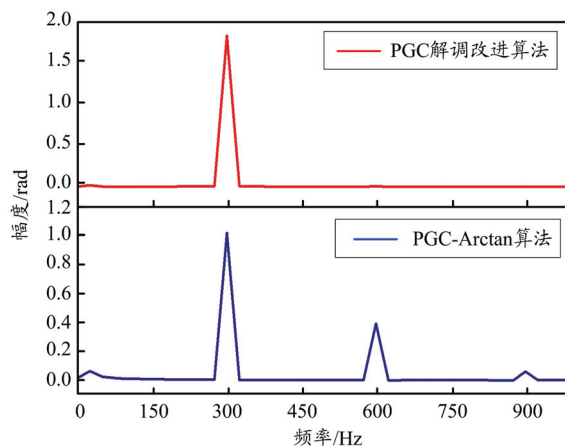
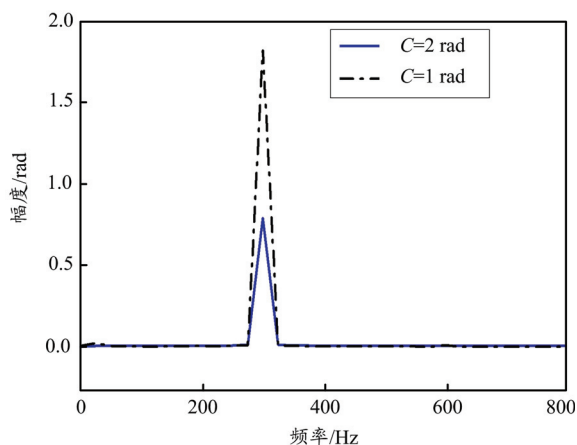


图7 调整相位调制深度 C 取非特殊值对 PGC-Arctan 解调算法和 PGC 解调改进算法解调结果的影响

图8 相位调制深度 C 改变对 PGC 解调改进算法的影响

本文最后通过实验验证光强干扰是否会影响 PGC 解调改进算法的解调结果。调节光纤衰减器使激光器输出光强分别为 0.1 mW、0.2 mW 和 0.3 mW, 针对 3 种不同光强进行实验, 得到的实验结果与前文仿真结果相似, 从而进一步说明了 PGC 解调改进算法能消除光强干扰, 即光强改变不影响解调效果。

4 结束语

本文针对 PGC 相位解调过程中易受到光强干扰和相位调制深度波动影响而产生误差的问题, 提出了一种基于混频滤波后相除差分的相位解调算法。该算法经过滤波微分两两相除, 再通过差分、积分运算获取最终待测信号。数值仿真和实验验证表明: 采用

PGC 解调改进算法后, 调制深度不取特殊值时仍能解调出信号且无谐波失真, 光强改变也不会对待测信号解调产生影响, 这证明了该算法的有效性和实用性。本文的研究成果可广泛应用于水听器、振动信号测量和激光语音探测等领域。

参考文献:

- [1] DANDRIDGE A, TVETEN A B, KERSEY A D, et al. Erratum: multiplexing of interferometric sensors using phase-generated carrier techniques[J]. Electronics letters, 1987, 23(16): 867–868.
- [2] 李丽艳, 范松涛, 周燕. 消光强扰动的相位载波解调算法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 218–225.
- [3] 李鹏, 柏楠, 陆星. 干涉型光纤传感器相位解调技术研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(3): 9–14.
- [4] ZHANG A L, ZHANG S. High stability fiber-optics sensors with an improved PGC demodulation algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(21): 7681–7684.
- [5] QU Z Y, GUO S, HOU C B. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors [J]. Optics express, 2019, 27(16): 23593–23609.
- [6] YAN L P, CHEN Z Q, CHEN B Y, et al. Precision PGC demodulation for homodyne interferometer modulated with a combined sinusoidal and triangular signal[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4818–4831.
- [7] 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 [EB/OL]. [2022-02-23]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030401820306003>
- [8] 尹晓春. 多层厚壁圆筒频率方程的简化及一类贝塞尔函数递推公式[J]. 应用数学和力学, 1999, 20(3): 319–324.