应用光学
Journal of Applied Optics
SCOPUS,等来源期刊
中文核心期刊、中国科技核心期刊

基于方波相位调制的多波长位移干涉测量

刘琪 陈善勇

Multi-wavelength displacement interferometry based on square wave phase modulation

LIU Qi, CHEN Shanyong

引用本文:
刘琪, 陈善勇. 基于方波相位调制的多波长位移干涉测量[J]. 应用光学, 2025, 46(3): 538-548. DOI: 10.5768/JAO202546.0311008
LIU Qi, CHEN Shanyong. Multi-wavelength displacement interferometry based on square wave phase modulation[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 538-548. DOI: 10.5768/JAO202546.0311008

在线阅读 View online: https://doi.org/10.5768/JAO202546.0311008

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于光纤激光水听器的PGC改进解调算法

Improved PGC demodulation algorithm based on optical fiber laser hydrophone

应用光学. 2020, 41(2): 421-427 https://doi.org/10.5768/JAO202041.0208001

三维时域散斑动态干涉测量系统的集成化设计

Integrated design of three-dimensional continuous displacement measurement with temporal speckle interferometry

应用光学. 2020, 41(4): 829-836 https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409805

基于混合Kalman椭圆拟合的移相干涉测量算法

Phase-shifting interferometry algorithm based on hybrid Kalman ellipse fitting

应用光学. 2024, 45(6): 1228-1237 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0603003

干涉测量中低频振动的频谱分析

Spectrum analysis of low frequency vibration in interferometry

应用光学. 2024, 45(5): 1019-1024 https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503004

基于波长移相剪切干涉的准直波前重构技术

Collimated wavefront reconstruction based on wavelength phase-shifting shear interferometry

应用光学. 2020, 41(1): 67-73 https://doi.org/10.5768/JAO202041.0102001

干涉测量圆柱外表面的误差分析

Misalignment analysis of cylindrical outer surfaces in interferometric measurement

应用光学. 2020, 41(5): 1005-1013 https://doi.org/10.5768/JAO202041.0503001

关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082 (2025) 03-0538-11
引用格式:刘琪, 陈善勇. 基于方波相位调制的多波长位移干涉测量 [J]. 应用光学, 2025, 46(3): 538-548.
LIU Qi, CHEN Shanyong. Multi-wavelength displacement interferometry based on square wave phase modulation[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(3): 538-548.

在线阅读

基于方波相位调制的多波长位移干涉测量

刘 琪[1,2,3],陈善勇[1,2,3]

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 装备状态感知与敏捷保障全国重点实验, 湖南 长沙 410073; 3. 超精密加工技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要:相位生成载波(phase generated carrier, PGC)技术是多波长光纤位移传感器(multi wavelength fiber displacement sensor, MWFDS)中的核心技术。提出一种基于方波信号相位调制和解调(square-wave phase modulation and demodulation, SWPMD)的方法,研究构建了相应的光路系统,精确控制方波信号对多波长光束进行相位调制,对采集到的干涉信号进行数字处理以实现相位解调,进而复现位移信息。仿真实验部分系统地分析了不同频率调制信号及方波调制信号初始相位变化对位移复现精度的影响,无论调制参数如何变化,位移复原的均方根误差(root-mean-square error, RMSE)均稳定保持在 0.15 μm~0.3 μm 范围内。通过应用 SWPMD 方法,对复杂的位移轨迹进行了复现,证明了该方法在提升 MWFDS 性能方面的普适性和有效性。最后,计算分析了对不同步长方波位移的复现情况,证明了所提方法在理论上能够实现 0.1 nm 位移测量的分辨率。

关键词:相位生成载波技术;光纤位移干涉测量;方波相位调制;解调算法;误差分析
中图分类号:TN206 **文献标志码**:A **DOI**: 10.5768/JAO202546.0311008

Multi-wavelength displacement interferometry based on square wave phase modulation

LIU Qi[1,2,3], CHEN Shanyong[1,2,3]

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 2. National Key Laboratory of Equipment State Sensing and Smart Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 3. Hunan Key Laboratory of Ultra-Precision Machining Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Phase generated carrier (PGC) technology is the core technology of multi-wavelength fiber displacement sensor (MWFDS). A square-wave phase modulation and demodulation (SWPMD) method was proposed. The corresponding optical system was established for research purposes, which precisely controlled the phase modulation of multi-wavelength beams using square-wave signals. Digital processing was applied to the collected interference signals to achieve phase demodulation, thereby reconstructing the displacement information. The simulation experiment systematically analyzed the impact of modulation signals with different frequencies and changes in the initial phase of square-wave modulation signals on the accuracy of displacement reconstruction. The root-mean-square error (RMSE) of displacement reconstruction remained stable within the range of 0.15 μm to 0.3 μm regardless of the modulation parameters. By applying the SWPMD method to reproduce complex displacement trajectories, the universality and effectiveness of the

收稿日期:2024-09-04; **修回日期**:2024-12-24
基金项目:国家重点研发计划(2021YFC2202303)
作者简介:刘琪(2001—),男,硕士研究生,主要从事超精密距离测量研究。E-mail: 790533948@qq.com

SWPMD method in improving the performance of MWFDS were demonstrated. Finally, the reproduction of square wave displacement with different step sizes was calculated and analyzed, proving that the proposed method could theoretically achieve a resolution of 0.1 nm displacement measurement.

Key words: phase generation carrier technology; optical fiber displacement interferometry; square wave phase modulation; demodulation algorithm; error analysis

引言

光学干涉测量在表面计量学中占据重要地位，因其能够对光学表面的几何特征进行精确成像。这项技术以其成熟性和高精度，在仪器仪表校准、航空航天器件检测以及精密工程构件评估等众多领域得到了广泛应用[1-4]。其工作原理基于光波干涉现象，通过分析从被测目标表面反射的光束与一个参考表面反射的光束相遇时产生的干涉图案，来获取有关被测表面形状等信息。对于表面分析，它们与机械接触方法相比更为有利，因为它们不与被测表面进行任何接触，因此在测量过程中不会造成任何严重的损伤。干涉测量技术具备高精度优势，但受限于单一波长导致的“2π 相位模糊”。多波长技术通过结合不同波长的光，有效扩展了测量范围，解决了这一弊端[5-6]。

相位生成载波（phase generated carrier, PGC）技术是一种在光纤传感技术中广泛应用的解调技术，具有解调简单、对硬件要求少的特点[7-10]。该技术通过在光纤传感系统中引入一定频率的相位调制信号，将待测信号调制到该载波信号上，从而实现对信号的解调和处理。相位生成载波-反正切解调算法（phase generated carrier arctangent, PGC-Atan）是 PGC 中经典的方法，其基本思想是利用相位生成载波技术将待测信号调制到高频载波上，然后通过反正切解调算法从载波信号中提取出待测信号[11-13]。然而，在某些情况下，载波相位调制深度偏离最优值、存在伴生调幅或载波相位延迟等非线性因素时，PGC-Atan 算法会出现非线性失真问题[14-16]。为了解决这一问题，多种 PGC-Atan 算法的非线性误差修正方法被提出。ALEKSANDR N N 等人在现场可编程门阵列（field programmable gate array, FPGA）的基础上实现了基本 PGC-Atan 解调方案和相位生成载波同步载波恢复（phase generated carrier-synchronous carrier restoration, PGC-SCR）方案，用于单一干涉光纤布拉格光栅传感器的电子处理电路，提出的 PGC-Atan 解调方案能够有效地补偿载波相位延迟[17]。ZHANG G 等人提出了一种结合 PGC 差分与交叉，乘法、几何拟合和反正切算法的光纤干涉传感器算法来有效消除非线性误差[18]。

然而，目前主流研究都聚焦于针对采用正弦信号调制的 PGC-Atan 算法的非线性修正领域，针对采用其他信号进行相位调制并解调的研究较少。本文介绍了一种方波相位调制和解调（square-wave phase modulation and demodulation, SWPMD）方法，可用于多波长光纤位移传感器（multi wavelength fiber displacement sensor, MWFDS）。该技术利用计算机生成的方波信号来控制相位调制器，从而实现精确的移相操作。通过这种相位解调方法，我们能够从检测到的光强信号中准确地解析出被测物体的位移。本文构建了仿真模型，用于测量不同位移并引入误差均方根（RMS）作为评估指标。通过仿真验证，本文所提出的 SWPMD 方法展现出良好的位移复现性能。相较于正弦信号调制的 PGC-Atan 算法，该新方法仅需在时域内完成计算，简化了计算流程，还优化了光路设计，提升了系统的鲁棒性。

1　光纤干涉测量原理

Michelson 光纤传感器作为光纤位移传感器的典型代表[19-21]，该传感器利用光纤作为光的传输介质，通过构造传感臂和参考臂，使两束光波在相遇时发生干涉。当外界被测物理量作用到传感臂时，会引起光波相位的变化，从而导致干涉条纹的移动或光强的变化。通过检测这些变化，可以获取被测物理量的信息。本文依据 Michelson 光纤传感器设计了 MWFDS 测量系统，系统结构图如图 1 所示。MWFDS 系统采用多波长窄线宽激光器作为光源，激光光束的波长为$\{\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_m\}$，$m$ 代表系统中光源的总数，波长范围覆盖 1 530 nm~1 570 nm。这些激光首先通过光隔离器确保光路单向性，随后在多路复用器中合并为单一光束。此光束经分光器一分为二，形成测量臂和参考臂。测量臂中光束经环形器导向聚焦透镜，照射物体表面后反射回光纤，形成包含物体位移信息的反射光。参考臂中光束则通过相位调制器进行相位

调制，并调节光强后，与反射光在耦合器中合流。合流光束经解复用器按波长精细分离，各波长光分别由光电探测器转换成模拟电信号。数据采集模块收集这些信号并传输至计算机，计算机运用本文提出的算法解调信号，精确计算出物体位移。同时，计算机生成的方波调制信号通过驱动器作用于相位调制器，形成动态调制，确保系统稳定运行与高精度测量。

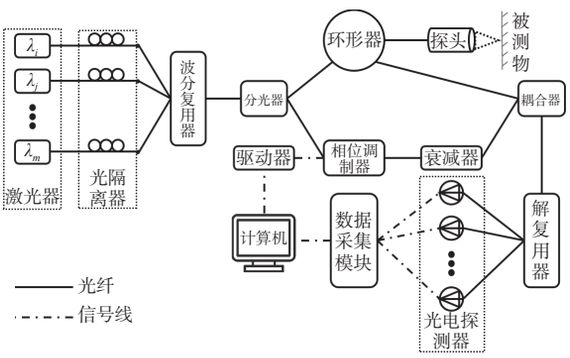


图 1 MWFDS 系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of MWFDS system

数据采集模块采集的单一波长的光强干涉信号可以表示为

$$I(t)=A_1+A_2+2\sqrt{A_1A_2}\cos\left(4\pi\frac{x(t)+d}{\lambda}+\varphi(t)\right) \quad (1)$$

式中：$I(t)$为光电探测器采集到的光强信号；A_1为干涉仪的参考光束光强；A_2为从物体表面反射的测量光束光强；$x(t)$为被测物体发生的位移；d为干涉仪的参考表面与物体表面的固有距离；λ为测量光束的波长；$\varphi(t)$为调制信号所产生干涉仪测量光路的相位变化。

2 相位载波技术

2.1 正弦信号调制的 PGC-Atan 算法

PGC-Atan 解调方法，是基于反正切算法的 PGC 解调方法，是光纤传感技术中常用的一种解调技术。在 PGC 系统中，干涉输出信号可以表示为载波信号与待测信号相位变化的叠加。

正弦信号调制的 PGC-Atan 算法在 MWFDS 中的应用如图 2 所示。对于采集得到的每种波长的光强数字信号 $I_i(n)$和 $I_j(n)$，首先进行归一化处理，得到 $I_{i0}(n)$和 $I_{j0}(n)$，n代表采集得到的数字信号的第 n 个数据。处理后的信号分别与载波信号 $\sin(2\pi f_c n)$和二倍频载波信号 $\sin(4\pi f_c n)$做混频运算，然后进行低通滤波处理，得到每个波长的两路正交信号 $P(n)$和 $Q(n)$。通过对这两个正交项进行除法运算，得到正切信号，再对正切信号进行反正切运算，能够获得包含位移信号的单一波长的相位信息 $\varphi(n)$。后续对不同波长的相位进行相位复合运算，求解出复合波长下的相位 $\phi(n)$。根据复合相位，即可进行位移求解运算。

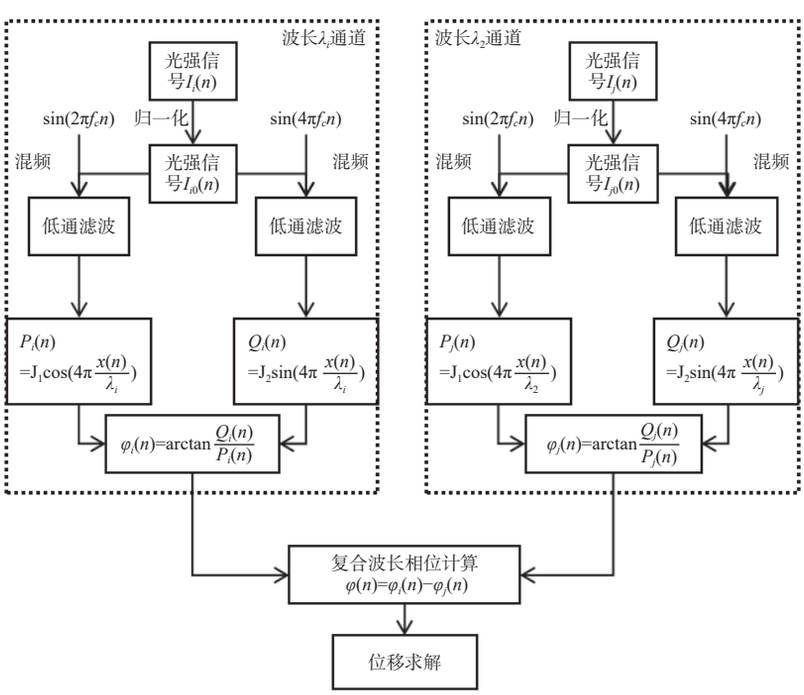


图 2 多波长 PGC-Atan 算法

Fig. 2 Multi-wavelength PGC-Atan algorithm

正弦信号调制的 PGC-Atan 算法虽然在光纤干涉传感器中应用广泛, 但仍然存在一些缺点, 特别是在相位失调的情况下。当正弦调制信号存在相位延迟时, 在相位解调过程中会引入明显的非线性误差, 从而导致解调结果失真。

2.2　SWPMD 方法

本文提出一种采用方波信号进行相位调制和解调的方法, 利用占空比为 50% 的方波调制信号对 MWFDS 中激光的相位进行调制, 以生成具有移相模式的光强干涉信号。该方法适用于处理包含多个相近波长激光光束的测量系统, 方波调制信号的表达式为

$$\varphi(t)=\begin{cases}1, & 0\leqslant t\leqslant\dfrac{T}{2}\\ 0, & \dfrac{T}{2}\leqslant t\leqslant T\end{cases},T=\frac{1}{f_c} \tag{2}$$

式中: T为信号周期; f_c为调制信号的调制频率。所述方波调制信号通过驱动器作用于相位调制器后使得当方波调制信号为高电位时, 相位调制器对系统光路中的多光束复合光路相对于多个激光光束波长的平均值$\bar{\lambda}$产生 π/2 的移相。

多波长 SWPMD 解调算法如图 3 所示。分别对数字采集得到的波长为λ_i的光强干涉信号$I_i(n)$和波长为λ_j的光强干涉信号$I_j(n)$以及方波调制信号$\varphi(n)$进行处理。

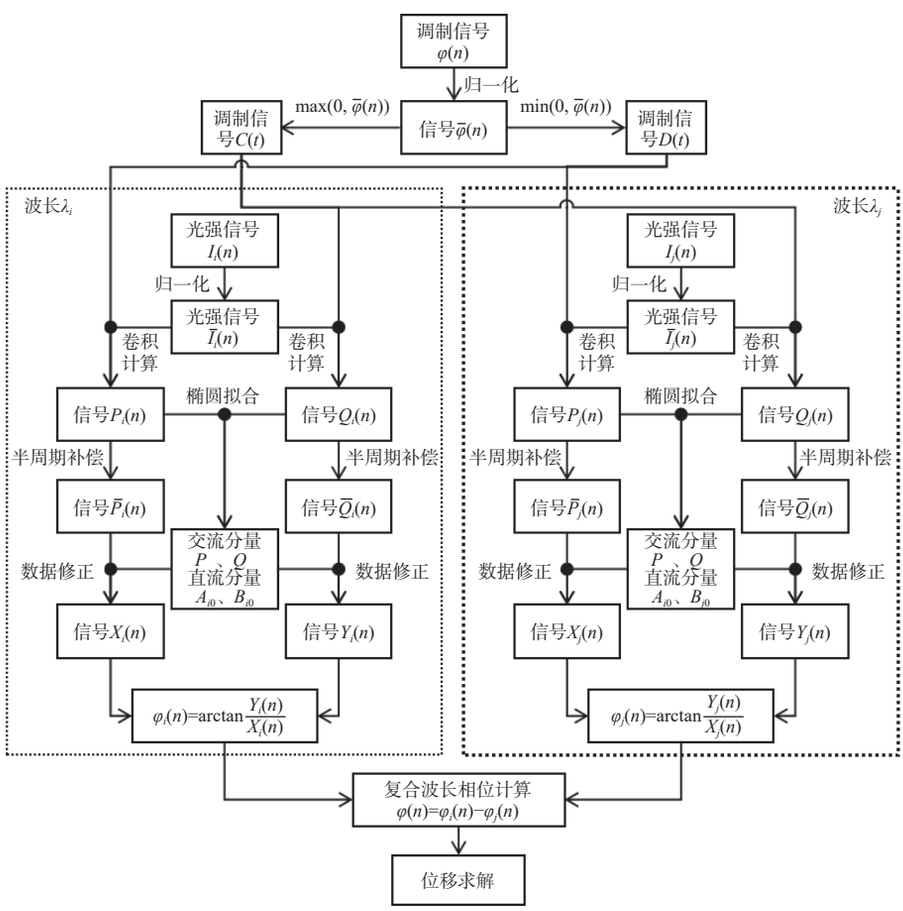


图 3　多波长 SWPMD 解调算法

Fig. 3　Multi-wavelength SWPMD demodulation algorithm

首先对采集到的光强信号进行滤波处理, 其目的是消除信号中的噪声, 提高信号质量。对滤波后的信号进行归一化处理。归一化的目的是去除信号中背景光强所带来的直流分量同时保留和放大由于物体位移引起的相位变化所产生的干涉光强变化。归一化后得到的信号记为$I_i(n)$和$I_j(n)$。

接着, 将方波调制信号进行归一化和规范化处理, 包括: 将方波调制信号$\varphi(n)$经过归一化和规范化处理后得到信号$\bar{\varphi}(n)$, 可表示为

$$\bar{\varphi}(n)=\begin{cases}1, 0\leqslant n\leqslant\dfrac{N}{2}\\ -1, \dfrac{N}{2}\leqslant n\leqslant N\end{cases} \tag{3}$$

式中：N表示所采集数字信号的一个周期内的个数。该信号在一个周期内被简化为两部分：$\varphi(n)$中高电平部分被映射为 1，$\varphi(n)$中低电平部分被映射为−1。根据信号$\bar{\varphi}(n)$的正负值，将信号$\bar{\varphi}(n)$分解为两路互补的信号$\bar{C}(n)$和$\bar{D}(n)$，信号$\bar{\varphi}(n)$为高电平时信号$\bar{C}(n)$为 1，否则信号$\bar{C}(n)$为 0；信号$\bar{\varphi}(n)$为低电平时信号$\bar{D}(n)$为 1，否则信号$\bar{D}(n)$为 0，可表示为

$$\bar{C}(n)=\begin{cases}1, 0\leqslant n\leqslant \dfrac{N}{2}\\ 0, \dfrac{N}{2}\leqslant n\leqslant N\end{cases} \tag{4}$$

$$\bar{D}(n)=\begin{cases}0, 0\leqslant n\leqslant \dfrac{N}{2}\\ -1, \dfrac{N}{2}\leqslant n\leqslant N\end{cases} \tag{5}$$

将归一化处理后的光强干涉信号和方波调制信号分别进行卷积运算。卷积运算的方法具体为

$$P_i(n)=\bar{I}_i(n)*\bar{D}(n) \tag{6}$$

$$Q_i(n)=\bar{I}_i(n)*\bar{C}(n) \tag{7}$$

$$P_j(n)=\bar{I}_j(n)*\bar{D}(n) \tag{8}$$

$$Q_j(n)=\bar{I}_j(n)*\bar{C}(n) \tag{9}$$

将得到的数据样本$P_i(n)$，$Q_i(n)$，$P_j(n)$，$Q_i(n)$中周期性出现的 0 数据进行去除，并采用最小二乘法依据相邻周期内的数据进行补偿[22]，补偿得到数据$\bar{P}_i(n)$，$\bar{Q}_i(n)$，$\bar{P}_i(n)$，$\bar{Q}_j(n)$。同时依据数据$P_i(n)$，$Q_i(n)$和$P_j(n)$，$Q_i(n)$中周期性出现的非 0 数据，按照波长进行最小二乘椭圆拟合[23]，得到信号对应的交流分量P_{i0}，Q_{i0}，P_{j0}，Q_{j0}和直流分量A_{i0}，B_{i0}，A_{j0}，B_{j0}。

接着将得到的半周期补偿后数据$\bar{P}_i(n)$，$\bar{Q}_i(n)$，$\bar{P}_i(n)$，$\bar{Q}_j(n)$依据椭圆拟合的结果进行数据修正，此步骤是为了减少测量过程中信号波动造成的测量误差，修正方式为

$$X_i=\frac{\bar{P}_i(n)-A_{i0}}{P_{i0}} \tag{10}$$

$$Y_i=\frac{\bar{Q}_i(n)-B_{i0}}{Q_{i0}} \tag{11}$$

$$X_j=\frac{\bar{P}_j(n)-A_{j0}}{P_{j0}} \tag{12}$$

$$Y_j=\frac{\bar{Q}_j(n)-B_{j0}}{Q_{j0}} \tag{13}$$

最后将数值修正后的信号进行反正切运算，得到单个波长干涉相位信息的函数表达式为

$$\varphi_i(n)=\arctan\frac{Y_i(n)}{X_i(n)} \tag{14}$$

$$\varphi_j(n)=\arctan\frac{Y_j(n)}{X_j(n)} \tag{15}$$

在式(14)和式(15)中，$\varphi_i(n)$和$\varphi_j(n)$分别为不同波长λ_i和λ_j的相位信息，最终根据式(16)进行多个波长的复合计算：

$$\phi(n)=\varphi_i(n)-\varphi_j(n)=4\pi\frac{X(n)+d}{\Lambda} \tag{16}$$

式中$\Lambda=\lambda_i\lambda_j\big/\left|\lambda_i-\lambda_j\right|$。由于相位的 2π 周期性，所以在计算绝对距离时，取$\bar{d}$为$2d/\Lambda$的余数，因此最终的位移测量结果为

$$X(n)=\frac{\phi(n)\Lambda}{4\pi}-\bar{d} \tag{17}$$

3 仿真实验

为了验证本文提出的 MWFDS 测量中 SWP-MD 方法的可行性，针对不同的情景进行仿真实验，并将位移复现结果与正弦相位调制驱动下的 PGC-Atan 算法结果进行比较。采用的方波调制信号如式(2)所示，采用的正弦调制信号为$\varphi(t)=M\sin(2\pi f_c t)$，其中$M$表示正弦调制信号的调制深度。

本文设置的仿真计算参数如表 1 所示。设定波长λ_1为 1 530.33 nm，波长λ_2为 1 560.61 nm，仿真时间t为 0~0.1 s，参考面与反射面固有距离d为 0.1 m，数据采集模块的采样率f_k为 250 kHz，干涉光路中参考光和测量光的光强比例A_1/A_2为 50/50。在 PGC-Atan 算法中，当正弦调制信号的调制深度M为 2.63 rad 时，可达到最优调制效果[17]。

表 1 仿真实验参数

Table 1 Simulation experiment parameters

变量	赋值
λ_1/nm	1 530.33
λ_2/nm	1 560.61
t/s	0.1
d/m	0.1
f_k/kHz	250
A_1, A_2	50
M/rad	2.63

为了系统地探究调制信号频率f_c对多波长位移测量调制效果的具体影响，分别选用了频率f_c为 5 kHz、10 kHz 以及 15 kHz 的调制信号进行相

位调制, 方波调制信号的数据采集方式设置为上升沿触发采集。利用本文提出的 SWPMD 解调算法与正弦信号调制的 PGC-Atan 算法分别对预定的位移轨迹 $x(t) = 10\sin(40\pi t)(\mu m)$进行位移复现, 并将复现结果进行对比。

为了进一步探索本文提出的 SWPMD 方法在实际信号采集场景下的可行性, 由于实际应用中方波信号的采集触发方式一般为上升沿或下降沿触发以及信号传输过程中可能遭遇的相位延迟现象[24-26]。分别选用初始相位在单个周期内的占比分别为 0, 0.25, 0.5 及 0.75 的频率 f_c为 5 kHz 的方波信号进行相位调制, 针对预定的位移轨迹 $x(t) = 10\sin(40\pi t)(\mu m)$进行位移复现。本文所指的初始相位值占比, 是指方波信号周期开始时所处的电位值, 往前追溯至该周期内上一个高电平状态开始时刻的时间段, 占整个周期时间的比例。其中初始相位在单个周期占比为 0 和 0.5 的两种情况, 分别对应于信号采集的上升沿和下降沿触发采集条件的情况。

为了验证本文提出的 SWPMD 方法在位移测量领域的普适性, 实验还选取了两种具有代表性的复杂位移轨迹进行深入分析。位移轨迹一结合了正弦波动与线性漂移, 具体形式为 $x(t) = 10\sin(40\pi t) + 500t(\mu m)$, 这一位移轨迹在实际应用中主要出现在周期性运动叠加线性变化的场景中[27]。位移轨迹二则采用了随机生成的阶跃位移模型, 其中位移每 0.01 s 发生一次变化, 且每次变化的幅度遵循以 0 为均值、100 μm 为标准差的正态分布, 这一位移轨迹主要出现在点扫描拼接复现样品表面轮廓中[28-29]。在这个实验中, 采用频率 f_c为 5 kHz 的方波调制信号, 并设定信号的采集方式为上升沿触发。

在评估位移复现的准确性时, 本文采用了误差均方根(RMS)值作为核心评价指标[30]。复现位移与原始位移之间的误差$e(t)$被定义为

$$e(t) = X(t) - x(t) \tag{18}$$

式中$X(t)$代表复现得到的位移信号。针对通过算法计算得到的样本位移复现结果, RMS 的计算公式精确定义为

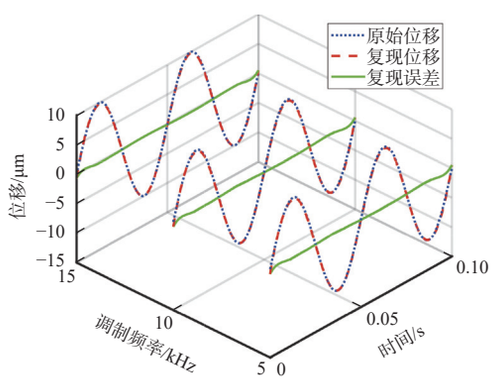
$$R_{\mathrm{MS}} = \sqrt{\frac{\sum |e(k)|^2}{M}} \tag{19}$$

式中: $e(k)$为每个离散采样点的复现误差; M 为选定评估区间内采样点的总数。通过这种评价方式, RMS 能够有效地量化位移复现过程中复现误差的总体水平, 从而提供一个全面且客观的评价标准。

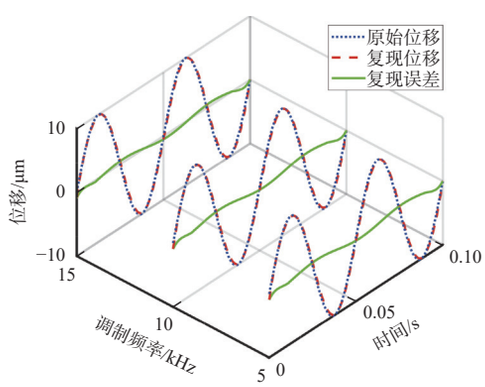
4　实验结果与分析

4.1　不同频率调制信号的位移复现结果

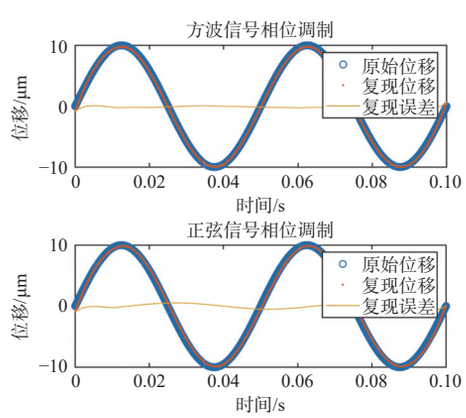
为了全面评估本文提出的 SWPMD 方法的性能, 本文依次选用了频率 f_c为 5 kHz、10 kHz 及 15 kHz 的方波信号与正弦信号作为调制源, 对图 1 所示的 MWFDS 进行相位调制。依据前期建立的仿真模型得到光强信号, 分别应用了 SWPMD 解调算法及正弦信号调制的 PGC-Atan 算法, 对输入的位移进行了复现。复现结果如图 4 所示。



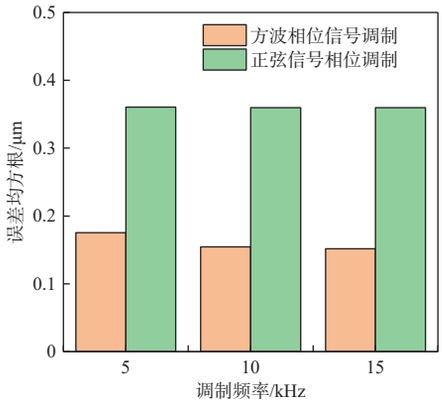
(a) 不同频率的方波调制信号位移复现结果



(b) 不同频率的正弦调制信号位移复现结果



(c) 频率5 kHz的调制信号位移复现结果



(d) 不同频率的调制信号位移复现RMS值

图 4　不同频率的调制信号解调后位移复现结果

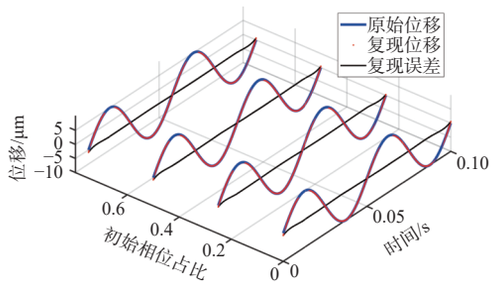
Fig. 4　Displacement reproduction results of modulated signals with different frequencies after demodulation

图 4(a)与图 4(b)分别清晰地展示了在不同频率下，方波信号与正弦信号调制后的位移复原情况。对比结果显示，在相同的调制频率下，本文提出的 SWPMD 解调算法在位移复原精度上与正弦信号调制的 PGC-Atan 算法达到了相似的效果。为了深入分析这一结果，如图 4(c)所示，特别针对 5 kHz 调制频率下的位移复原结果进行了详细对比。分析表明，采用 SWPMD 解调算法时，位移复原误差主要集中在测量的开始与结束阶段，这很可能归因于该算法在数据首尾部分采用的数据拟合策略。相比之下，基于正弦信号相位调制的 PGC-Atan 解调算法则表现出随正弦位移波动而产生的周期性扰动误差。

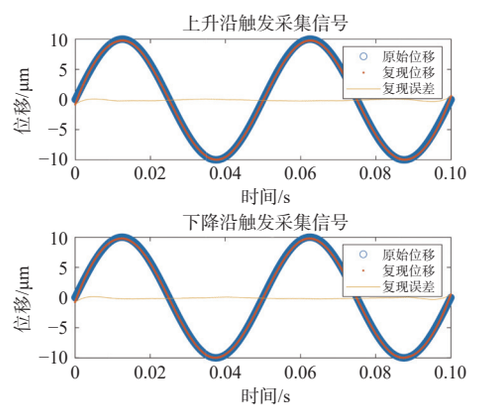
图 4(d)展示了在不同调制频率下，两种解调算法位移复现的 RMS 值对比。结果表明，本文提出的 SWPMD 方法呈现出随着调制频率 f_c 的增加，位移复现的精度略有提升的趋势，表明该方法在高频调制下具有更优异的解调性能。然而基于正弦信号相位调制的 PGC-Atan 解调算法，其位移复现精度并未随着调制频率的变化而表现出明显的相关性，说明该算法的性能可能受其他因素影响更为显著。进一步地，通过具体计算得到位移复现 RMS 值，本文验证了在相同条件下，SWPMD 方法能够实现更高的位移复现精度，从而证明了该方法在此应用场景下的优越性。

4.2　不同初始相位的调制信号位移复现结果

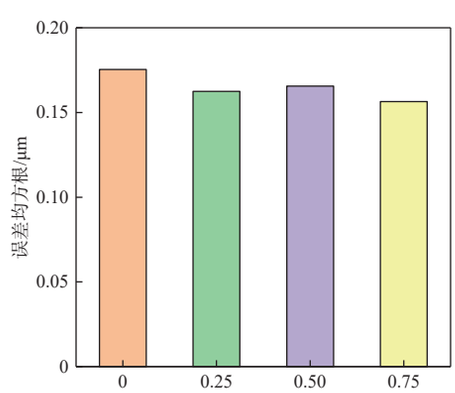
针对方波信号在实际采集过程中上升沿与下降沿触发条件的差异性，以及实际系统应用中可能引入相位延迟的问题，针对不同初始相位的方波调制信号位移复现结果进行了详尽的仿真分析，分析结果如图 5 所示。



(a) 不同初始相位的调制信号位移复现结果



(b) 上升沿/下降沿触发信号采集时的位移复现结果



(c) 不同初始相位的调制信号位移复现RMS值

图 5　采用不同初始相位的方波调制信号位移复现结果

Fig. 5　Displacement reproduction results of square wave modulation signals by using different initial phases

图 5(a)中不同初始相位的调制信号位移复现结果表明：本文提出的 SWPMD 方法在初始相位值占比不同的方波调制信号调制下均能实现良好的位移复现效果。当初始相位占比恰好为 0 和 0.5 时，分别对应触发方波信号采集的上升沿和下降沿条件，此时位移复现的详细结果如图 5(b)所示，此时的位移复现结果较为精准。由此可以推断 SWPMD 方法对 MWFDS 系统要求较低，具有广阔的应用空间。

图 5(c)进一步对比了不同初始相位下方波调制信号位移复现的 RMS 值，结果表明 RMS 值在整体上保持稳定，说明了本方法在不同初始相位条

件下的稳定性和一致性, 同时这一结果与之前关于不同频率下方波信号调制时位移复现 RMS 值的分析相呼应, 共同证明了本仿真计算模型的有效性和可重复性。当方波调制信号的初始相位占比为 0.75 时, 即信号为低电平输入时, 观察到位移复现的 RMS 值达到最小, 显示出较高的复现精度。这一现象可能与仿真计算中采样点选择的特定分布有关。

4.3　复杂位移复现结果

为了进一步研究 SWPMD 方法在实际应用中的普适性, 选取了两种具有代表性的位移轨迹复现, 并对复现结果进行对比分析。位移轨迹一为正弦波形与线性趋势的叠加, 其时域表达式为 $x(t)=10\sin(40\pi t)+500t(\mu m)$。位移轨迹二为每隔 0.01 s 发生一次变化的阶跃运动, 这些阶跃运动的幅度遵循以 0 为均值、100 μm 为标准差的正态分布。图 6 展示了针对这两种不同类型的运动轨迹, 采用 SWPMD 方法进行位移复现得到的结果。

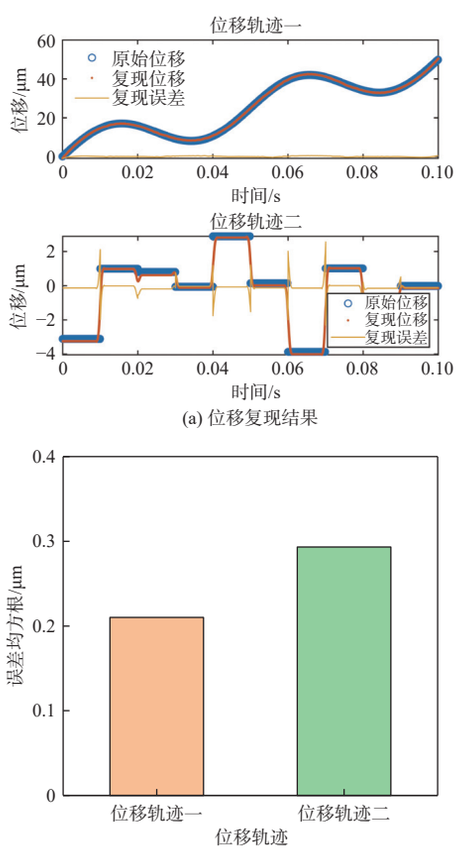


图 6　复杂位移复现结果

Fig. 6　Complex displacement reproduction results

图 6(a)展示了 SWPMD 解调算法在时域上的位移复现结果。连续变化的位移轨迹一的位移特征被较为精确的复现。阶跃变化的轨迹二在位移轨迹的平滑部分复现结果准确。然而, 在位移发生突变的时刻, 复现过程中出现了短暂的衔接误差。图 6(b)表示两种位移轨迹复现的 RMS 值, 结果表明, 尽管轨迹二在阶跃位移的阶跃变化处处产生了较大的瞬时复现误差, 但其整体复现误差的 RMS 值与连续位移轨迹一的 RMS 值和前文正弦位移轨迹复现的 RMS 值相近, 说明本文提出的 SWPMD 方法在复杂位移测量中的整体性能上仍然保持稳定。

4.4　位移复现分辨率分析

为了进一步探究 SWPMD 方法在位移测量中的分辨率特性, 本文进行了仿真分析, 模拟生成了步长分别为 0.1 nm, 0.25 nm, 0.5 nm 和 0.1 nm 并且每隔 25 ms 变化一次的方波位移, 并根据前文提到的光强干涉模型生成光强信号, 利用 SWPMD 方法进行位移复现, 复现的结果如图 7 所示。

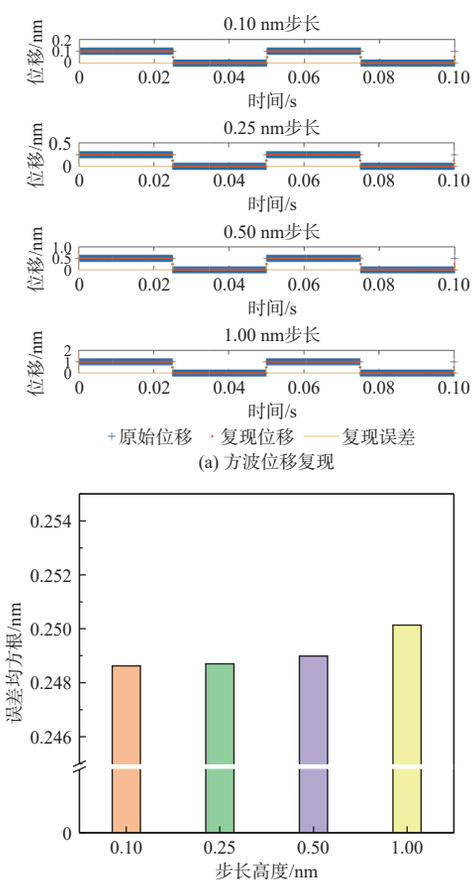


图 7　方波位移复现结果

Fig. 7　Square wave displacement reproduction results

图 7(a)展示了 4 个不同步长方波位移的恢复情况, 结果显示 SWPMD 算法能够较好地重建出各

个步长的方波轨迹。为了量化位移复现的误差，本文计算了每个步长方波位移恢复误差的 RMS 值，结果如图 7(b)所示。尽管在位移跳变点附近，由于信号处理的瞬态特性导致误差有所增大，但整体上 RMS 误差值稳定在 0.248 nm~0.252 nm 之间。这一结果表明，在理想条件下，SWPMD 算法具有较高的位移测量分辨率。然而，实际测量环境往往比仿真环境更为复杂。在实际应用中，信号可能会受到噪声、相位调制深度不稳定、光强波动等多种因素的干扰，这些因素都可能影响 SWPMD 算法的位移测量精度。因此，尽管仿真分析表明 SWPMD 算法在理论上具有实现高精度位移测量的潜力，但在实际应用中，其位移测量分辨率仍会受到测量系统整体性能的制约。

5 结论

本文提出了一种应用于 MWFDS 系统的 SWPMD 方法，该方法包含了多波长光源的相位调制方法及光强干涉信号解调以精确重构位移的方法。通过对实验过程中可能遇到的各种情况进行分析，系统地探讨了该方法在相位调制阶段不同参数的设置与优化。

首先，本文对比了不同频率调制信号在解调过程中对位移重构精度的影响，并与正弦信号调制的 PGC-Atan 算法位移解调结果进行了对比分析。结果表明，采用 SWPMD 方法实现的位移重构精度显著优于正弦信号调制的 PGC-Atan 算法，并且随着调制信号频率的提升，SWPMD 方法的位移复现精度呈现出略微增强的趋势，验证了该方法在提升测量精度方面的有效性。其次，鉴于实际应用中方波信号的数据采集机制为电平跳变触发以及电路中村在的相位延迟问题，本文进一步分析了方波调制信号初始相位对位移重构结果的影响。实验结果表明，初始相位的变化对位移重构精度的影响较小，这一发现增强了该方法在实际应用中的灵活性和可靠性。最后，为了验证 SWPMD 方法的广泛适用性，本文还针对复杂位移轨迹进行了重构实验，包括正弦波形与线性趋势叠加的轨迹以及连续阶跃变化的轨迹。结果表明，该方法均能实现复杂轨迹的准确复现，展示了其在复杂位移测量场景中的良好性能。最后，本文针对步长从 0.1 nm~1 nm 的方波位移轨迹进行了复现分析，其复现结果均较为准确，证明了 SWPMD 方法的位移复现分辨率理论上可达 0.1 nm。

本文提出的 SWPMD 方法，其优势在于仅依赖时域进行计算，操作简便且对光路系统要求较小，能实现高精度的位移复现，展现出对多种位移测量场景的强适应性。然而，这种纯时域处理策略对信号噪声具有较高敏感性，这要求在实际应用中必须采取有效措施来抑制或消除噪声干扰，以确保测量结果的准确性和可靠性。为了进一步提升该方法的实用性和性能，未来的研究将基于本文的研究成果，设计并实施一系列具体实验，深入探索并优化噪声处理策略，对该方法进行必要的修正和完善。

参考文献：

[1] LI D, JIANG X Q, ZHEN T, et al. Development and application of interferometric on-machine surface measurement for ultraprecision turning process[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2019, 141(1): 1-9.

[2] YANG Y C, KOHEI Y, VICTOR H, et al. Single-element dual-interferometer for precision inertial sensing[J]. Sensors, 2020, 20(17): 4986.

[3] NICOLA M K, LUCAS I F, MICHAEL R, et al. Twisted light Michelson interferometer for high precision refractive index measurements[J]. Optics Express, 2022, 30(16): 29722-29734.

[4] JANG Y, LIU H, YANG J H, et al. Nanometric precision distance metrology via hybrid spectrally resolved and homodyne interferometry in a single soliton frequency microcomb[J]. Physical Review Letters, 2021, 126(2): 023903.

[5] 杨练根, 杨光明, 王选择. 多波长表面形貌测量系统中波长校准方法[J]. 光学技术, 2018, 44(3): 300-304.
YANG Liangen, YANG Guangming, WANG Xuanze. Wavelength calibration method in multi wavelength surface topography measurement system[J]. Optical Technology, 2018, 44(3): 300-304.

[6] 张齐元. 典型透射系统多波长波前检测方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
ZHANG Qiyuan. Research on multi wavelength wavefront detection methods for typical transmission systems[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.

[7] 宋美杰, 于廷宽. 一种基于 3×3 耦合器的光纤相位解调

算法[J]. 光通信技术, 2019, 43(5): 51-53.
SONG Meijie, YU Tingkuan. A fiber phase demodulation algorithm based on 3×3 couplers[J]. Optical Communication Technology, 2019, 43(5): 51-53.

[8] 张晓琳, 毛红杰, 李凯, 等. 相位解调实现低频水表面声波振幅探测[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 59-65.
ZHANG Xiaolin, MAO Hongjie, LI Kai, et al. Phase demodulation for low-frequency surface acoustic wave amplitude detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(5): 59-65.

[9] 周朕蕊, 张国强, 邱宗甲, 等. 光纤法珀传感器的改进型相位生成载波法解调[J]. 中国光学, 2024, 17(2): 312-323.
ZHOU Zhenrui, ZHANG Guoqiang, QIU Zongjia, et al. Improved phase generated carrier demodulation for fiber Fabry Perot sensors[J]. China Optics, 2024, 17(2): 312-323.

[10] ZHAO H Y, XU Z M, MA D L. Direct nonlinear parameter estimation method for a phase generated carrier position sensor[J]. Optics Express, 2023, 31(15): 24702-24716.

[11] QU Z Y, GUO S A, HOU C B, et al. Real-time self-calibration PGC-Arctan demodulation algorithm in fiber-optic interferometric sensors[J]. Optics Express, 2019, 27(16): 23593-23609.

[12] ZHANG L S, XIAO W, FANG W J. A PGC demodulation scheme based on the Lissajous ellipse fitting for homodyne interferometer without using second harmonic carrier signal[J]. Applied Acoustics, 2024, 221: 109993.

[13] ZHOU K, XIE M, ZHAO S L, et al. Periodic narrowband noise rejection with high fidelity of partial discharge on line monitoring based on improved FastICA algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2604-2612.

[14] 严利平, 周春宇, 谢建东, 等. 基于卡尔曼滤波的 PGC 解调非线性误差补偿方法[J]. 中国激光, 2020, 47: 142-149.
YAN Liping, ZHOU Chunyu, XIE Jiandong, et al. Nonlinear error compensation method for PGC demodulation based on Kalman filter[J]. China Laser, 2020, 47: 142-149.

[15] 熊新中. 基于 LabVIEW 的 Sagnac 分布式光纤振动传感技术研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
XIONG Xinzhong. Research on Sagnac distributed fiber optic vibration sensing technology based on LabVIEW[D]. Nanchang: Nanchang University of Aeronautics and Astronautics, 2021.

[16] CHEN B Y, JIANG J C, LOU Y T, et al. Active linearized PGC demodulation with fusion of PGC-Arctan and PGC-DCM schemes for nonlinear error elimination in SPM interferometer[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22999-23010.

[17] ALEKSANDR N N, MIKHAIL Y P, ANTON V V, et al. PGC-Atan demodulation scheme with the carrier phase delay compensation for fiber-optic interferometric sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(5): 1985-1992.

[18] ZHANG G, GE Q, XU L G, et al. Nonlinear error elimination using the fusion of PGC-DCM, geometric fitting, and Atan algorithms[J]. Optics Letters, 2024, 49(8): 1888-1891.

[19] 郑来芳, 张俊生, 梁海坚, 等. 一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 184-190.
ZHENG Laifang, ZHANG Junsheng, LIANG Haijian, et al. Research on an improved phase demodulation method for fiber optic vibration sensors[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 184-190.

[20] HONG C, KIM C, KWON I, et al. Simultaneous strain and failure sensing of composite beam using an embedded fiber optic extrinsic Fabry-Perot sensor[J]. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1996, 2718: 122-133.

[21] 周宏扬, 马国明, 张猛, 等. 基于 Michelson 光纤干涉的 GIS 局部放电超声信号检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6452-6460.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHANG Meng, et al. Partial discharge ultrasonic signal detection technology in GIS based on the Michelson fiber optic interferometer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6452-6460.

[22] 姜伟, 付佳媛. 最小二乘法及其应用[J]. 中国传媒大学学报 (自然科学版), 2020, 27(5): 72-78.
JIANG Wei, FU Jiayuan. Least squares method and its applications[J]. Journal of Communication University of China (Natural Science Edition), 2020, 27(5): 72-78.

[23] ZHANG G, XU L G, GE Q, et al. Ameliorated PGC demodulation scheme using Taubin least squares fitting of ellipse in fiber optic interferometric sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 80: 103374.

[24] 王艳艳, 朱轶龙, 陈亚奇, 等. 多源触发装置设计[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(12): 273-276.

WANG Yanyan, ZHU Yilong, CHEN Yaqi, et al. Design of multi-source triggering device[J]. Computer Measurement and Control, 2019, 27(12): 273-276.

[25] 顾聪, 王晓琳, 邓智泉. 一种基于双重锁相环的高速永磁同步电机转子位置估计误差全补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 962-970.
GU Cong, WANG Xiaolin, DENG Zhiquan. A fully compensated method for rotor position estimation error of high-speed permanent magnet synchronous motor based on dual phase-locked loop[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 40(3): 962-970.

[26] XIE J D, YAN L P, CHEN B Y, et al. Extraction of carrier phase delay for nonlinear errors compensation of PGC demodulation in an SPM interferometer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(13): 3422-3430.

[27] 高晨家. 显微散斑干涉测量方法与技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
GAO Chenjia. Research on microscopic speckle interference measurement methods and technologies [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.

[28] BERGER G, PETTER J. Non-contact metrology of aspheric surfaces based on MWLI technology[C]//Optifab 2013. New York: SPIE Optifab, 2013.

[29] SHARMA S, EISWIRT P, PETTER J. Study on interferometric stability based on modulating frequency, operating wavelengths and temperature using an electro optic multiwavelength distance sensor[J]. Sensors & Transducers, 2018, 225(9): 1-7.

[30] BAKAR A A A, LIM Y L, WILSON S J, et al. Electrocardiographic signal detection using self-mixing interferometer technique with customized electro-optic phase modulator[C]//2012 IEEE 3rd International Conference on Photonics. Penang: [s. n.], 2012: 299-302