光电技术及应用

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260227001

基于迈克尔逊干涉仪的光纤波长计

孔维天，江 毅*

（北京理工大学 光电学院 信息光子技术工业和信息化部重点实验室，北京 100081）

摘 要： 激光波长作为精密光学系统的基准量值标尺，其准确测定直接决定光学系统和测量技术的精度性能，并在光通信、光谱学和光学测试等领域具有重要应用。文章设计并实现了一种基于光程扫描干涉原理的紧凑型光纤波长计系统。该系统采用迈克尔逊干涉结构，通过步进电机驱动实现光程扫描，结合低噪声光电探测器与高速数据采集模块构建实时测量平台。为提升测量精确性与稳定性，对干涉信号的采样链路、机械共振抑制以及算法处理流程进行工程优化。实验结果表明，在1 550 nm通信波段范围内，所设计的系统可实现±2 pm的测量精度，在连续测量条件下，系统波长漂移小于±1 pm，重复性优于±1 pm。

关键词： 光学测量；波长计；光纤干涉仪；3×3耦合器；相位解调

中图分类号： TH741；TN247 **文章编号：** 1001－5868(2026)02－0358－07

Fiber-Optic Wavemeter Based on Michelson Interferometer

KONG Weitian, JIANG Yi

(**Key Laboratory of Photonic Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, CHN**)

Abstract: The accurate determination of laser wavelength, a fundamental metrological reference in precision optical systems, directly influences the accuracy and performance of optical systems and measurement techniques, thus playing a critical role in fields such as optical communications, spectroscopy, and optical testing. In this study, a compact fiber-optic wavemeter, based on the principle of optical path scanning interferometry, is designed and implemented. The system adopts a Michelson interferometer configuration, in which optical path scanning is realized by a stepper-motor-driven mechanism, and a real-time measurement platform is established by integrating a low-noise photodetector with a high-speed data acquisition module. To improve the measurement accuracy and long-term stability, the interferometric signal acquisition chain and signal-processing workflow are subjected to engineering optimization, and optimal mechanical resonance suppression is achieved. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves a wavelength measurement accuracy of ±2 pm within the 1 550 nm telecommunication band. Under continuous measurement conditions, the wavelength drift is less than ±1 pm.

Key words: optical metrology; wavemeter; fiber-optic interferometer; 3×3 coupler; phase demodulation

收稿日期：2026－02－27.

基金项目：两机专项项目(J2022-V-0004-0030)；国家自然科学基金企业联合创新重点基金项目(U20B2057).

* **通信作者：**江 毅

0　引言

高精度光波长测量是现代光通信、精密光谱测量以及光纤传感等领域的基础支撑技术之一[1]。在密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing，DWDM)系统中，激光器工作波长的漂移会直接导致信道间串扰和系统误码率上升，因此需要对工作波长进行实时在线监测和校准；在精密光谱探测[2]与量子光学实验中，激光频率的稳定性和可追溯性是保证实验结果可靠性的前提；在光纤传感领域，许多传感头(如光纤光栅、法布里-珀罗腔等)本质上是将被测物理量编码到反射或透射谱的波长变化上[3]，高灵敏度的波长计量能力是实现高分辨率传感的关键。因此，研制结构紧凑、成本适中，同时兼具高精度和高稳定性的波长计具有重要的工程应用价值。

早在上世纪，Ishikawa等已对激光波长测量技术进行了系统研究。总体而言，现有波长测量方法可归纳为三类：(1) 基于干涉原理的方法；(2) 基于光学拍频/频率比较的方法；(3) 利用特定波长敏感材料响应特性的测量方法[4]。其中，光频梳拍频方案可实现最高测量精度，量级可达到几十赫兹。然而，该类系统结构复杂、成本较高且对环境稳定性要求苛刻，因此难以在工业现场中广泛应用。相比之下，当前工程与科研中更为常用的波长测量方法仍是以光学干涉为基础，包括迈克尔逊[5]、马赫-曾德尔、法布里-珀罗及斐索[6]等干涉结构。2017年，Dobosz与Kożuchowski再次对干涉比较、拍频比较与材料色散三类方法进行了系统梳理，从而形成了当代激光波长测量技术的总体分类框架[7]。

在激光波长测量技术的早期发展阶段，基于法布里-珀罗干涉腔的实现方案研究最为充分。1977年，美国国家标准局(NBS)的Snyder提出斐索干涉型波长测量方法；随后，基于该原理发展的相关仪器被称为斐索波长计或Snyder波长计[8]。此类方案的关键光学单元为斐索干涉腔，其通过等厚干涉形成的条纹特征实现对入射光波长的反演。1988年，Sandia国家实验室的Reiser等提出实体斐索腔波长计设计，利用光学楔板的前、后表面构成固体斐索腔结构，在有效抑制干涉腔温度漂移影响的同时，亦显著降低了腔体加工与装调难度[9]。2001年，法国皮埃尔和玛丽居里大学的Bruneau等面向机载大气激光雷达的波长测量需求，研制了多腔斐索波长计以提升测量能力与适用性[10]。随着国外研究团队持续开展结构优化与工程化验证，该技术路线逐步演化为可用于工业现场高精度测量的成熟仪器产品，典型代表包括德国Highfinesse的WS8系列、美国Bristol的871系列及澳大利亚MOGLabs的FZW600系列等波长计。

国内关于波长计的研究起步较晚。早期，上海光机所和长春光机所对这类波长测量技术开展过研究。例如，上海光机所研制了一套斐索波长计SIOM-01，其光路方案和Snyder类似。2012年，上海光机所提出一种光纤型多楔块斐索波长计。2023年，南京理工大学李建欣教授团队提出一种基于相位差分原理的“虚拟”斐索干涉腔波长测量方法，用于高精度波长测量。2025年，张志荣团队搭建了基于F-P标准具的波长监测系统，该系统克服了传统干涉仪基于条纹计数的缺点[11]。在实际应用中，斐索干涉仪类波长计在工程验证中通常依赖红外CCD线阵探测、成像与精密标定等光学链路，该系统的器件成本高[12]、供应与选型受限。而且系统对准与长期稳定性维护要求较高，难以在低成本、小型化场景中推广。而国内现有的传统光纤波长计仍普遍存在结构复杂、测量精度低等工程性问题，这进一步限制了其应用范围。

基于此，本文围绕波长计的关键理论与方法展开研究，采用光纤干涉仪方案[13]，设计并实现了一种基于光程扫描干涉原理的高精度低成本波长计系统。该系统采用光纤迈克尔逊干涉结构，通过步进电机驱动实现光程扫描，结合低噪声光电探测器与高速数据采集模块构建测量平台，旨在保持系统结构紧凑和器件成本可控的前提下，提高波长测量精度、长期稳定性及工程应用能力。结果表明，在1 550 nm通信波段范围内，所构建的系统测量精度可达±2 pm。在连续测量条件下，系统波长漂移控制在±1 pm以内，且测量重复性优于±1 pm。

1　系统设计

系统的整体处理流程可分为硬件结构和软件算法两部分。硬件结构由参考光和被测光共同注入光纤干涉仪，干涉仪对两束光进行等光程调制，输出携带相位信息的强度调制信号，通过数据采集模块完成信号的多通道同步采样。软件算法在PC端完成数据处理，首先对采集到的干涉信号进行滤波预处理，以削弱光源功率漂移和探测链路不稳定

性对后续解调的影响。

在此基础上，采用基于3×3光纤耦合器的零差解调算法对参考光与被测光对应的干涉信号进行相位解调，分别得到等光程调制条件下的相位变化量$\Delta\phi_1$和$\Delta\phi_2$。

系统中已知光波相位变化量与光程变化量的关系可以表示为：

$$\Delta\phi=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d \tag{1}$$

式中，$\Delta\phi$为相位变化量，λ为光波波长，Δd为光程变化量。

系统中通过光程调制模块产生Δd，参考光和被测光的光程变化量相同，可表示为：

$$\Delta d_1=\Delta d_2 \tag{2}$$

将公式(1)代入公式(2)可得：

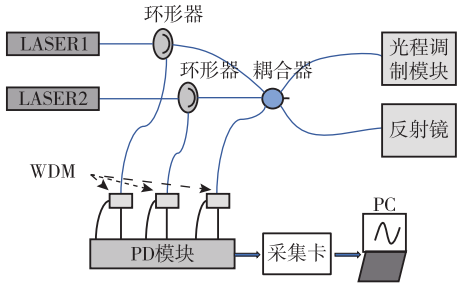
$$\frac{\Delta\phi_1}{\Delta\phi_2}=\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \tag{3}$$

由此可得，在已知参考光的波长λ_1，且能通过系统解调出$\Delta\phi_1$和$\Delta\phi_2$的情况下，可以求出被测光的波长，可表示为：

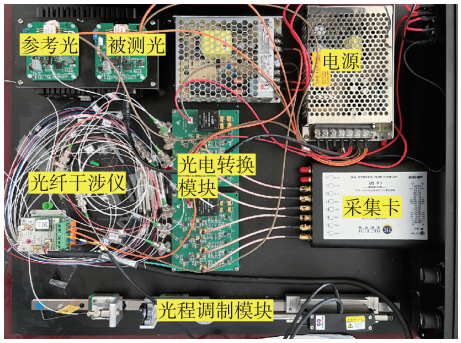
$$\lambda_2=\frac{\Delta\phi_1}{\Delta\phi_2}\cdot\lambda_1 \tag{4}$$

最终，将$\Delta\phi_1$，$\Delta\phi_2$和λ_1的组合求解，即可得到被测光的绝对波长，实现从干涉强度信号到波长量值的完整转换链路。该流程将光学硬件与数字信号处理紧密耦合，为搭建高精度波长测量仪器提供了系统化实现框架。

本系统的核心光学结构采用全光纤迈克尔逊干涉仪，其原理如图1(a)所示。两路窄线宽激光源LASER1和LASER2分别经光纤环形器，注入3×3光纤耦合器，其中LASER1为参考光，LASER2为被测光。环形器保证单向传输并隔离反射信号，经3×3光纤耦合器将功率分配至参考臂和测量臂，参考臂末端串联96%的反射镜，测量臂串联步进电机作为光程调制模块，通过光程调制模块实现光程的周期性调制，从而在输出干涉信号中引入与被测量相关的相位变化。两臂回波在耦合器中再次合束发生干涉，然后经耦合器再分配，产生三束相位差为120°的回波，输出回波分别进入波分复用器(Wavelength Division Multiplexing，WDM)按工作波长进行光域分路，各通道干涉信号随后由PD模块完成光电转换并将其送入上位机PC。PC端对采集信号进行归一化、相位解调与波长计算，实现被测激光器波长干涉信号的精确相位与波长提取。实验系统硬件结构如图1(b)所示。



(a) 系统光学结构



(b) 系统硬件结构

图1 系统结构设计

2 相位解调算法设计

2.1 算法原理

本系统采用基于3×3光纤耦合器的零差相位解调算法，实现了参考光与被测光的干涉相位的直接恢复[14]。在由全光纤3×3耦合器构建的干涉结构中，感应臂光程扫描所引入的相位调制能够在时域内被实时解调。不同于傅里叶变换型干涉测量方案，本系统需同步采集3×3耦合器的三路输出干涉信号。耦合器对两臂合束后的干涉场进行能量与相位的再分配，使三路输出幅度近似一致，并在理想情况下形成约120°的相位互差。实验中，选取其中两路信号绘制的李萨如，如图2所示，信号呈现稳定的闭合椭圆轨迹，表征了约120°的固定相位关系，为后续零差相位解调提供了必要的实验依据。

系统采集的三路干涉信号光谱可以写为：

$$I_k=B(\lambda)+C(\lambda)\cos\left[\phi-(k-2)\frac{2\pi}{3}\right],\quad k=1,2,3 \tag{5}$$

式中，B为直流背景光强，C为条纹振幅，ϕ为待求相位。

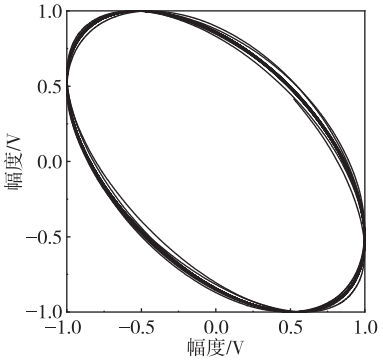


图2　李萨如图

信号解调采用对称解调技术，其数学原理如下：

首先，利用三角函数关系：

$$\sum_{k=1}^{3}\cos\left[x-(k-1)\frac{2\pi}{3}\right]=0,k=1,2,3 \quad (6)$$

将干涉仪三个输出端信号求和，再乘以−1/3，可得：

$$V=-\frac{1}{3}\sum_{k=1}^{3}\left\{C+B\cos\left[\phi(t)-(k-1)\frac{2\pi}{3}\right]\right\}=-C \quad (7)$$

将$-C$分别与三个输入信号相加，设其增益为A_1，可得到：

$$S_k=A_1B\cos\left[\phi(t)-(k-1)\frac{2\pi}{3}\right],k=1,2,3 \quad (8)$$

再将S_k通过三个相同的微分器，设其增益为A_D，可得：

$$D_k=A_DA_1B\dot{\phi}(t)\sin\left[\phi(t)-(k-1)\frac{2\pi}{3}\right],\ k=1,2,3 \quad (9)$$

利用三角关系，将每一路信号乘以另外两路微分信号的差，并设乘法器增益为A_M，再将得到的三路信号相加，可得：

$$V_D=\frac{3\sqrt{3}}{2}A_MA_DA_1^2B^2\dot{\phi}(t) \quad (10)$$

最终将V_D除以三路去除C项的信号S_k的平方和，设除法器增益为A_R，可得：

$$V=\frac{\sqrt{3}A_3A_DA_R}{A_2}\phi(t) \quad (11)$$

积分后得到$\phi(t)$，即需要信号。

基于3×3光纤耦合器的零差解调算法依托三路互差约120°的多相干涉输出，在无需调制光源和反三角函数展开的前提下，即可实现对光强波动和器件非理想具有良好稳定性、兼具高线性度与实时性的相位软件解调[15]，为高稳定度全光纤干涉测量系统的工程实现提供了有效方法。

2.2　误差分析

实际应用中，因为耦合器非理想及其他噪声影响会使解调算法得出的相位变化量存在误差ε，实际相位$\hat{\Delta\phi}_i$可表示为：

$$\hat{\Delta\phi}_i=\Delta\phi_i+\varepsilon_i,i=1,2 \quad (12)$$

式中，$\hat{\Delta\phi}_i$为测量相位变化量，$\Delta\phi_i$为测量相位变化量，ε_i为算法和系统带来的相位估计误差。

将公式(12)代入公式(4)可得到：

$$\hat{\lambda}_1=\frac{\hat{\Delta\phi}_1}{\hat{\Delta\phi}_2}\lambda_1=\frac{\Delta\phi_1+\varepsilon_1}{\Delta\phi_2+\varepsilon_2}\lambda_1 \quad (13)$$

当$\varepsilon_i\ll\Delta\phi_i$时，做一阶展开，得到：

$$\frac{\delta\lambda_2}{\lambda_2}\approx\frac{\delta\lambda_1}{\lambda_1}+\frac{\varepsilon_1}{\Delta\phi_1}-\frac{\varepsilon_2}{\Delta\phi_2} \quad (14)$$

若将ε_1和ε_2视为零均值随机量，其标准差分别为σ_{λ_1}和σ_{λ_2}，则波长估计的标准差(可作为分辨率的统计表征)为：

$$\left(\frac{\sigma_{\lambda_2}}{\lambda_2}\right)^2\approx\left(\frac{\sigma_{\lambda_1}}{\lambda_1}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{\phi_1}}{\Delta\phi_1}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{\phi_2}}{\Delta\phi_2}\right)^2 \quad (15)$$

通常λ_1为已标定参考光，σ_λ很小，可忽略，则：

$$\sigma_{\lambda_2}\approx\lambda_2\sqrt{\left(\frac{\sigma_{\phi_1}}{\Delta\phi_1}\right)^2+\left(\frac{\sigma_{\phi_2}}{\Delta\phi_2}\right)^2} \quad (16)$$

可以得出，$\sigma_{\lambda_2}\propto\Delta\phi$，即相位变化量越大，误差越小，光程扫描距离越大，分辨率越高。

同时通过LabVIEW对光程扫描距离与分辨率的关系进行仿真，根据实验分析引入固有误差ε_1和ε_2，将仿真得到的测量值与真值进行做差，所得结果如图3所示。结果表明：当光程扫描距离越大时，测量值与真实值的差值越小，即光程扫描距离越大，分辨率越高。

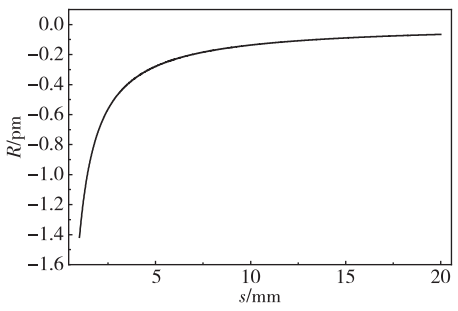


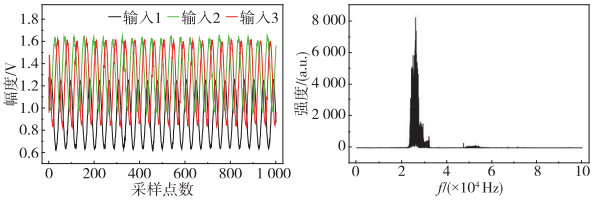
图3　光程扫描距离与分辨率的关系

3 实验结果

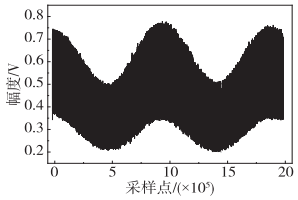
3.1 实验流程

在完成光纤波长计的系统结构搭建与算法实现后，对系统噪声进行分析，系统评估相位解调算法的有效性以及仪器测量精度和长期测量稳定性等关键性能指标。

被测光与参考光在干涉仪中经历相同的相位调制后，被分配为两组三路且相位差约为120°的干涉信号，作为后续相位解调的原始输入。三路光信号经光电转换后由USB接口的数据采集卡送入上位机PC。本系统采用单通道采样频率为2 MHz的数据采集卡，对持续1 s的干涉信号数据进行采集，截取前1 000个采样点结果，如图4(a)所示。结果表明，原始信号中叠加了高频噪声，观察其频谱图如图4(b)所示，其有效信号集中于27 000 Hz。再结合图4(c)所示的全部原始信号采样点图，可得知原始干涉信号由缓慢变化的强度包络与叠加其上的高频噪声共同构成。



(a) 部分原始信号采样点　(b) 原始信号频谱图



(c) 全部原始信号采样点

图4 原始信号噪声分析

系统通过驱动步进电机以近似匀速方式扫描光程，对干涉信号施加线性调制，理论上解调相位应随时间呈线性变化，但实际应用中步进电机运动速度以及机械振动会对解调结果产生影响。实验中将驱动电机运动速度设定为20 mm/s，通过采集驱动电机运动速度的反馈信号验证得到驱动电机运动速度会有明显的误差，如图5所示。

在对上述高频噪声以及低频包络进行滤波处理后，获得两组三路干涉的预处理信号，分别采用基于3×3光纤耦合器的零差解调算法进行相位恢复。将

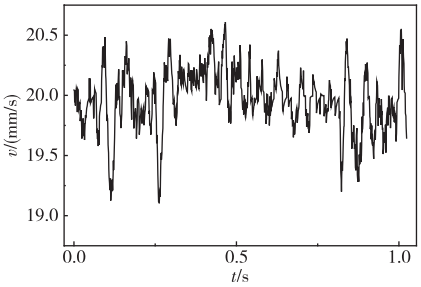
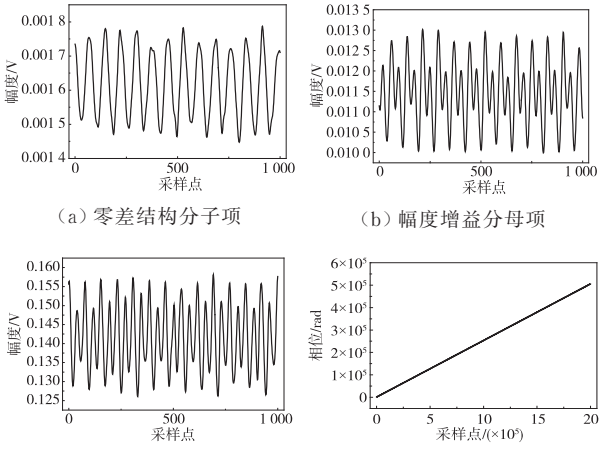


图5 速度非线性

3×3耦合器三路互差约120°的干涉输出记为$x_1(t)$，$x_2(t)$和$x_3(t)$，首先通过求取三路平均值并相减实现去直流与幅度均衡，得到零均值归一化信号，随后对三路信号求时间导数，并按零差结构组合构造分子项$N(t)=x_1(\dot{x}_2-\dot{x}_3)+x_2(\dot{x}_1-\dot{x}_3)+x_3(\dot{x}_1-\dot{x}_2)$，结果如图6(a)，同时由能量项$D(t)=x_1^2+x_2^2+x_3^2$获得幅度增益，结果如图6(b)，从而得到瞬时相位变化率如图6(c)所示，再通过数值积分恢复干涉相位$\phi(t)$如图6(d)所示。可见相位曲线近似线性，表明光程扫描与零差解调过程实现正确，且与理论预期一致。



(a) 零差结构分子项　(b) 幅度增益分母项

(c) 瞬时相位变化率　(d) 相位解调信号

图6 相位解调流程

由于步进电机实际运动速度存在误差，会在解调结果中引入附加相位噪声。因此，采用线性拟合的方式对相位序列进行非线性成分抑制与平滑处理。用处理后的相位-采样点曲线的斜率k来表征参考光与被测光之间的相位差增量$\phi(t)$。结合系统标定建立的相位与波长的函数关系，即可求得被测光的绝对波长。

3.2 系统精度

为验证系统的测量精度，在光纤波长计的检测

量程范围内进行 10 次波长测试，同时使用 Yokogawa 公司 AQ6151B 波长计对 10 次测量的波长进行校准。二者线性拟合和残差如图 7 所示，拟合度为 0.999 9，拟合残差在±2 pm 之间，这证明光纤波长计精度良好，测量结果可靠。

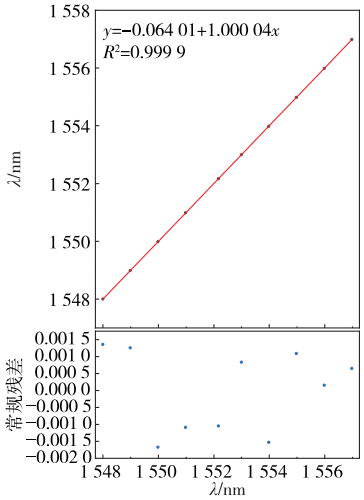


图 7　系统的测量结果与参考波长计的测量结果之间的线性关系以及二者的残差

为验证系统的重复性，设置激光器波长分别为 1 552.717 5 nm，1 553.716 2 nm，1 554.717 2 nm，1 555.710 5 nm，1 556.710 7 nm，1 557.710 9 nm，1 558.704 5 nm，使用光纤波长计分别对不同波长进行重复测量，结果如图 8 所示。可得到最大变化标准差为 3.797×10^{-5} nm，按 3σ 准则得到精度（误差限）为 $\pm1.139\ 0\times10^{-4}$ nm，对应的置信覆盖概率约为 99.73%，可证明该系统具有良好的重复性和精确度。

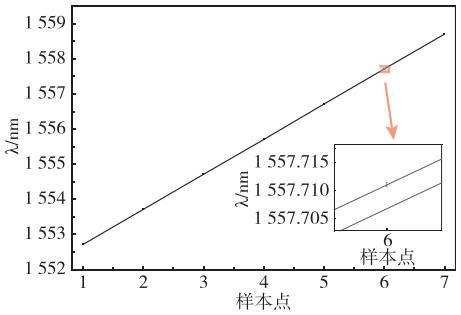


图 8　波长测量误差棒

为了验证光纤波长计长时间工作的测量稳定性，保持被测激光器波长不变，在实验室环境下，使用光纤波长计每分钟对波长进行一次测量，连续工作 5 h 得到 300 个波长数据，测量结果如图 9 所示。测量波长的最大值和最小值分别为 1 548.417 22 nm 和 1 548.415 26 nm，所有测量值相对于标定值的偏差均落入±1 pm 的精度范围内，表明该波长计的测量精度满足设计指标，且在稳态条件下具有良好的短期重复性与稳定性。

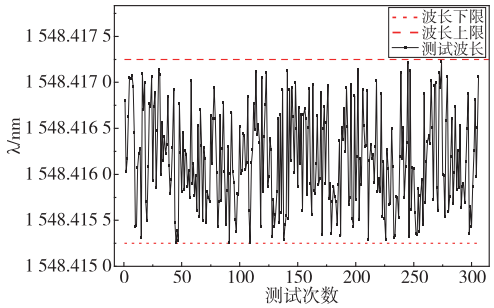


图 9　5 小时波长测量漂移情况

3.3　精度分析

当 $\sigma_{\phi_1}\approx\sigma_{\phi_2}=\sigma_\phi$ 时，公式（16）可化简为：

$$\sigma_\phi\approx\frac{\sigma_\lambda}{\left[\lambda^2/(2\pi\Delta d)\right]\sqrt{2}}\tag{17}$$

取工作波长 λ=1 550 nm，调制光程 Δd=20 mm，将重复性实验中的 $\sigma_\lambda=3.797\times10^{-2}$ pm 作为随机误差，可反推出该精度水平对应的等效相位噪声为 $\sigma_\phi\approx1.40\times10^{-3}$ rad。因而，在实验条件下，若系统相位解调的等效噪声维持在上述量级，系统在工作波段随机误差主导的理论精度可达到 10^{-1} pm 量级。

但实际测量精度在±2 pm，说明除随机噪声外，相位中还叠加系统性噪声。造成这种现象的原因主要包括：步进电机速度误差与机械振动会影响相位线性并引入附加相位噪声，即使线性拟合可抑制非线性分量，仍可能残留偏置项；耦合器非理想及噪声会导致相位变化量存在误差项；WDM 分路、PD 与采集链路增益及相位响应差异也会将相位误差转化为不可完全互消的系统误差。

4　结论

本文完成了基于全光纤迈克尔逊干涉结构的光纤波长计的研制与性能测试，搭建了由窄线宽光源、光纤干涉仪及光程调制模块构成的测量系统，并实现了相位解调与归一化算法的上位机软件。实验结果表明，系统可获得较高信噪比的干涉信号并实现稳定解调，在 1 550 nm 通信波段范围内，所搭建的系统可实现±2 pm 的测量精度，在连续测量条件下，系统波长漂移小于±1 pm，重复性优于±1 pm。综上所述，该光程扫描波长计在工作波段

内具有结构紧凑、参数可标定、性能受控、成本较低和工程化应用能力强的特点，可作为后续扩展工作范围、优化器件配置、提升测量精度和产品开发的基础平台。

参考文献：

[1] 何海军，邹喜华，蒲正宇，等. 光纤通信传感一体化研究进展[J]. 光学学报，2025，45(13)：1306002.
He Haijun，Zou Xihua，Pu Zhengyu，et al. Research advances of fiber-based integrated sensing and communication[J]. Acta Optica Sinica，2025，45(13)：1306002.

[2] 孟 凡，柳 扬，王 欢，等. 基于主成分分析法的高性能波长计研究与实现[J]. 光谱学与光谱分析，2021，41(11)：3625-3631.
Meng Fan，Liu Yang，Wang Huan，et al. Research and implementation of high-performance wavemeter based on principle component analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis，2021，41(11)：3625-3631.

[3] 江 毅，张树桓. 光纤激光干涉测量技术在EFPI传感器信号解调中的研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(13)：1306017.
Jiang Yi，Zhang Shuhuan. Research progress on fiber optical laser interferometry in signal demodulation of EFPI sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2021，58(13)：1306017.

[4] Ishikawa J，Ito N，Tanaka K. Accurate wavelength meter for cw lasers[J]. Applied Optics，1986，25(5)：639-643.

[5] 杨 帅，孙 剑，严强强，等. 星载迈克尔逊干涉仪直线动镜的柔性支撑结构研究[J]. 光子学报，2024，53(10)：1022002.
Yang Shuai，Sun Jian，Yan Qiangqiang，et al. Study on the flexible support structure of the linear moving mirror of the spaceborne Michelson interferometer[J]. Acta Photonica Sinica，2024，53(10)：1022002.

[6] Dorrío B V，Blanco-García J，López C，et al. Phase error calculation in a Fizeau interferometer by Fourier expansion of the intensity profile[J]. Applied Optics，1996，35(1)：61-64.

[7] Dobosz M，Kożuchowski M. Overview of the laser-wavelength measurement methods[J]. Optics and Lasers in Engineering，2017，98：107-117.

[8] Morris M B，McIlrath T J，Snyder J J. Fizeau wavemeter for pulsed laser wavelength measurement[J]. Applied Optics，1984，23(21)：3862-3868.

[9] Reiser C，Lopert R B. Laser wavemeter with solid Fizeau wedge interferometer[J]. Applied Optics，1988，27(17)：3656-3660.

[10] Bruneau D，Quaglia P，Flamant C，et al. Airborne lidar LEANDRE II for water-vapor profiling in the troposphere. I. System description[J]. Applied Optics，2001，40(21)：3450-3461.

[11] 林雨晴，夏 滑，张志荣，等. 基于Fabry-Perot标准具的高精度波长实时监测方法研究[J]. 量子电子学报，2025，42(2)：187-195.
Lin Yuqing，Xia Hua，Zhang Zhirong，et al. Investigation of high-precision real time wavelength monitoring method based on Fabry-Perot etalon[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics，2025，42(2)：187-195.

[12] Masuda S，Kanoh E，Irisawa A，et al. Highly accurate Michelson type wavelength meter that uses a rubidium stabilized 1560 nm diode laser as a wavelength reference[J]. Applied Optics，2009，48(22)：4285-4290.

[13] 宋雨轩，陈伟根，张知先，等. 基于光纤迈克尔逊干涉仪的GIS内置局部放电超声传感技术[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3088-3097.
Song Yuxuan，Chen Weigen，Zhang Zhixian，et al. Ultrasonic sensing technology of partial discharge built into GIS based on fiber optic Michelson interferometry[J]. High Voltage Engineering，2022，48(8)：3088-3097.

[14] Jiang Y. Wavelength-scanning white-light interferometry with a 3 × 3 coupler-based interferometer[J]. Optics Letters，2008，33(16)：1869-1871.

[15] 江 毅，娄英明，王惠文. 基于对称3×3耦合器的光纤干涉信号的软件解调技术[J]. 光子学报，1998，27(2)：152-155.
Jiang Yi，Lou Yingming，Wang Huiwen. Software demodulation for 3 × 3 coupler based fiber optic interferometer[J]. Acta Photonica Sinica，1998，27(2)：152-155.

作者简介：

孔维天(2001—)，男，河北省保定市人，硕士研究生，主要从事光学精密检测及光纤传感技术等方面研究；

江 毅(1967—)，男，四川省宜宾市人，教授，博士生导师，主要从事光纤传感技术、光纤测量仪器及高温光纤传感等方面的研究。