

基于超小自聚焦光纤探头的 SS-OCT 测振方法研究

王驰^{1,2}, 温珠莉¹, 孙建美¹, 杨辰焯¹, 李金辉², 方东², 栾信群², 许业文^{2*}¹上海大学精密机械工程系, 上海 200444;²近地面探测技术重点实验室, 江苏 无锡 214035

摘要 采用高精度纳米位移台作为被测振动体目标, 研究基于超小自聚焦 (GRIN) 光纤探头的扫频光学相干层析成像 (SS-OCT) 测振技术。解析基于超小 GRIN 光纤探头的集成化 SS-OCT 工作性能, 理论上该系统可测振动的最大峰峰值达 12.5 mm, 最大频率达 25 kHz。搭建相应的测振实验系统, 并进行微小振动的测试及分析。结果显示, 设置纳米位移台振动峰峰值范围 1 nm~5 μm、频率范围 1~200 Hz, 该集成化 SS-OCT 测振系统可测出频率 1 Hz、峰峰值 6 nm 及以上的微小振动。对振幅为 25 nm、频率为 10 Hz 的单频正弦振动信号, 系统的重复性实验标准偏差为 0.003。结果表明, 基于超小 GRIN 光纤探头的集成化 SS-OCT 系统具有测量微小振动的可行性, 为进一步研究其在微小振动和位移等精确测量领域的应用提供了实验基础。

关键词 成像系统; 扫频光学相干层析成像技术; 超小自聚焦光纤探头; 微小振动测量; 低相干干涉

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1511002

Research on SS-OCT Vibration Measurement Method Based on Ultra-Small GRIN Fiber Probe

Wang Chi^{1,2}, Wen Zhuli¹, Sun Jianmei¹, Yang Chenye¹, Li Jinhui²,
Fang Dong², Luan Xinqun², Xu Yewen^{2*}¹Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;²Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi, Jiangsu 214035, China

Abstract With the high-precision nano-vibrator as the vibration target to be measured, this paper studied the swept-source optical coherence tomography (SS-OCT) method based on ultra-small gradient index (GRIN) fiber probes for vibration measurement. The working performance of the integrated SS-OCT based on ultra-small GRIN fiber probe was assessed. In theory, the system can measure the maximum peak-to-peak value of vibration up to 12.5 mm and the maximum frequency up to 25 kHz. The corresponding vibration measurement system was developed and the tests and analysis of micro-vibrations were performed. The results show that, with the peak-to-peak value range of 1 nm–5 μm for the nano-vibrator and the frequency range of 1–200 Hz, the integrated SS-OCT vibration measurement system can detect micro-vibrations with a frequency of 1 Hz and a peak-to-peak value of 6 nm or above. For a single-frequency sinusoidal vibration signal with an amplitude of 25 nm and a frequency of 10 Hz, the system has a repeatability-test standard deviation of 0.003. It shows that the integrated SS-OCT system based on the ultra-small GRIN fiber probe has the feasibility of measuring micro-vibrations, which provides an experimental basis for further research on its application in precise measurement fields such as micro-vibrations and micro-displacements.

Key words imaging systems; swept-source optical coherence tomography; ultra-small GRIN fiber probe; micro-vibration measurement; low-coherence interference

OCIS codes 110.4500; 110.2760; 120.7280; 030.1640

收稿日期: 2021-01-05; 修回日期: 2021-02-22; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(41704123, 61773249)、近地面探测技术重点实验室基金(TCGZ2020C003)、上海市科技创新行动计划(20142200100)

通信作者: *stnsdl@126.com

1 引言

光学相干层析技术(OCT)作为一种非接触、高精度的层析成像技术,本质上是一种基于宽带光源的低相干干涉仪,自 1991 年 Huang 等^[1]发表文章提出 OCT 的概念以来,在眼科、皮肤科、口腔和牙齿组织、癌症诊断和治疗、胚胎发育动态观察等医学领域得以广泛研究^[1-6]。在材料检测方面,可用于聚合物、碳纤维复合材料、陶瓷、单晶碳化硅、珠宝鉴别和测量^[7-9]等。此外,多种功能型 OCT 也快速发展,如偏振敏感 OCT(PS-OCT)用于生物组织双折射特性研究^[10]、多普勒 OCT(DOCT)用于物体流速研究^[11-12]、OCT 弹性成像(OCTE)用于生物微形变研究^[13]。上述传统 OCT 系统样品臂大都为光学镜头组件,体积大,成像深度限于 1~3 mm,不适用于生物体内器官及工业上狭小细缝、微深孔等检测。随着应用领域的拓展和精密干涉测量技术的发展,OCT 系统的小型化和集成化已成为一个重要的研究方向。其中,基于超小自聚焦光纤(GRIN)探头的内窥式 OCT 近年来得以研究和应用,对离体的人体大隐静脉进行了成像检测,实现了兔子食道和呼吸道、人类食道等成像检测^[14-17]。

扫频 OCT 与光通信领域广泛应用的光学相干域反射测量(OCDF)技术在原理上一致,可用于精密测距与微振动测量领域,与目前常见的光学干涉测距法相比,OCT 测振的优势在于不受 2π 相位模糊影响^[18],在不需增加扫描装置的情况下可实现大范围(十几毫米)的高精度(纳米级别)测量。福州大学的 Zhong 等^[19-20]提出将 OCT 用于微小结构振动测量的思想和方法,并通过搭建由离散光学元件构成的 OCT 系统进行了实验验证。但他们设计的空间型 SD-OCT 测振系统的样品臂是由光学组件构成的光学镜头,体积大,无法用于样品深层、狭小空间的内窥检测。通常的干涉仪一般是由离散光学器件构成,对于有一定集成化的光纤干涉仪,其探测臂的探头是由光纤和离散的曲面微小透镜构成,即便是利用端面是平面的微小自聚焦透镜,也是由光纤和自聚焦透镜通过粘接而成,不仅尺寸不够小(目前工艺最小的自聚焦透镜直径约为 0.8 mm),而且结构不够稳固。作为一种全光纤型超小光学镜头,超小自聚焦光纤探头是由“单模光纤(SMF)+无芯光纤(NCF)+GRIN 光纤透镜”构成的一种尺寸在亚

毫米量级的全光纤型超小光学探头^[21],在医学内窥成像、国防微小监听器、工业发动机微深孔等诸多前沿领域有广阔的应用前景,其中一个关键的应用系统的物理模型是集成化的光纤干涉仪。

本文在前期验证将超小自聚焦光纤探头用于集成化光纤干涉仪的基础上^[22],提出将超小自聚焦光纤探头与扫频 OCT 有机结合的思想,构成超小光纤探头和探测臂集成化的全光纤型扫频光学相干断层扫描(SS-OCT)测振模型和方法。通过对该集成化 SS-OCT 测振模型的解析和实验测试,验证该集成化测振模型及方法的有效性。这种集成化的 SS-OCT 测振模型和方法,对 OCT 技术的应用领域的拓展将有显见的科学意义和应用前景。例如利用这种集成化的 OCT 系统模型和技术,对生物组织(如肿瘤、心脑血管等)的三维结构和振动特性进行融合检测。

2 基于超小 GRIN 光纤探头的 SS-OCT 测振模型

本文利用可产生微小振动的纳米位移台(PI 公司型号为 P-753.1CD 的高精度压电陶瓷,其配套软件 E-709. CRG 能够获得纳米位移台实时振动的位置信息,纳米位移台自身可以设置的频率范围为 1~200 Hz,振幅范围是 1 nm~5 μ m)作为被测物体,搭建如图 1 所示的基于超小 GRIN 光纤探头的集成化 SS-OCT 测振系统模型。由光源发出的光束经分束器传输至样品臂和参考臂,在样品臂中光束经超小 GRIN 光纤探头进行聚焦输出,携带振动信息的反射光耦合进入超小 GRIN 光纤探头并传输至光纤耦合器;在参考臂中,由平面反射镜返回的光耦合进准直器也传输至光纤耦合器。样品光和参考光在光纤耦合器中干涉,依次经光电平衡探测器和高速数字采集卡,在计算机中进行显示与分析处理。

在扫频 OCT 中,宽带光源是随时间编码的函数,经 50:50 的光纤分束器后进入参考臂和样品臂,入射光电场记为 $E_0(k)$,入射光强度记为 $I_0(k)$ 。参考光记为

$$E_R(k) = E_0(k)r_R(k)\exp(-ikt), \quad (1)$$

式中: $r_R(k)$ 为平面反射镜的反射率。样品光记为

$$E_S(k) = E_0(k)\sum_{n=1}^N r_{S,n}(k)\exp[i(k \cdot \Delta_n(t) - ktc)], \quad (2)$$

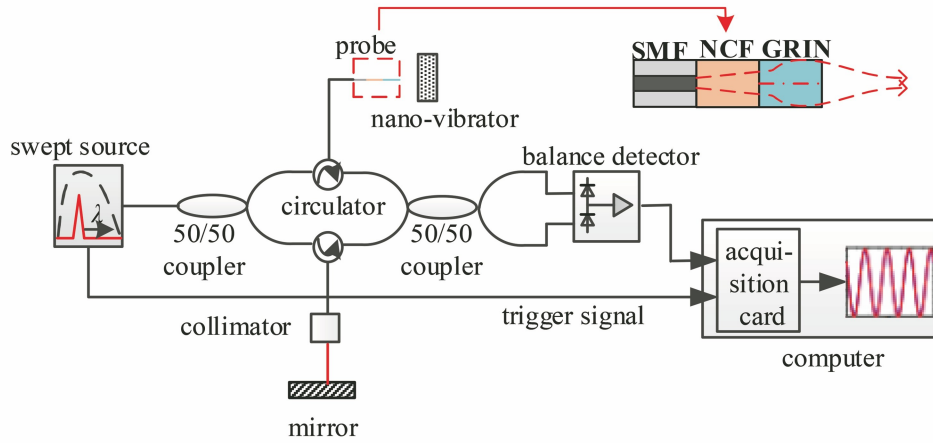


图 1 基于超小 GRIN 光纤探头的集成化 SS-OCT 测振系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of integrated SS-OCT vibration measurement system based on ultra-small GRIN fiber probe

式中： $r_{s,n}(k)$ 为样品第 n 层的反射率，与入射光有关； $\Delta_n(t)$ 为样品第 n 层返回光与参考光的光程差。这两路信号在耦合器中发生干涉，被探测器探得。探测器探测到的总干涉光强为

$$I(k,t) = I_0(k)r_R^2 + I_0(k)\sum_{n=1}^N r_{s,n}^2(k) + 2I_0(k)r_R\sum_{n=1}^N r_{s,n}(k)\cos[k\cdot\Delta_n(t)] + 2I_0(k)\sum_{m\neq n=1}^N r_{s,n}(k)r_{s,m}(k)\cos[k\cdot\Delta_{m\rightarrow n}], \quad (3)$$

式中： $r_{s,m}(k)$ 为样品第 m 层的反射率； $\Delta_{m\rightarrow n}$ 为第 m 层样品与第 n 层样品之间的光程差。等号右边第一、二项是直流项，表示从参考臂平面反射镜和样品各层返回的总光强；第三项是互相关项，表示参考光与样品各层反射光干涉，是用于重建样品内部信息的有效干涉信号，根据 Wiener-Khinchin 定理：一个信号的功率谱密度就是该信号的自相关函数的傅里叶变换，对此干涉光谱数据进行傅里叶变换，即可实现从波数空间到深度空间的转换；第四项表示样品各层之间相互干涉的信号。这三部分的能量从上而下递减，而且三者间的能量差距明显。

利用平衡光电探测器和数据预处理技术，滤除原始干涉信号中的直流项和自相关项，对有效干涉信号进行等波数采集提取，余下的有效光电流干涉信号为

$$I_V(k,t) = 2I_0(k)r_R\sum_{n=1}^N r_{s,n}(k)\cos[k\cdot\Delta_n(t)]. \quad (4)$$

其傅里叶变换表达式为

$$\mathcal{F}^{-1}[I_V(k,t)] = \mathcal{F}^{-1}[W(k,t)] \otimes \left\{ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N [S(z_n) + S(-z_n)] \right\}, \quad (5)$$

式中： $W(k,t)$ 为光源的功率谱函数； $S(z_n)$ 为样品深度为 z_n 的位置返回光的幅值； $S(-z_n)$ 为 $S(z_n)$ 的共轭项。

为方便分析，在图 1 所示系统模型中，设定只有纳米位移台的前表面有反射光。干涉信号经过光电平衡探测器和数据预处理后，得到的有效干涉光强表达式为

$$I_V(k,t) = 2I_0(k)r_Rr_S(k)\cos[k\cdot\Delta(t)], \quad (6)$$

式中： $r_S(k)$ 为纳米台前表面反射率； $\Delta(t)$ 为纳米位移台前表面反射光与参考光的光程差。纳米位移台如在振动状态下，其绝对振动位移 $d(t)$ 会发生变化，也就改变了其参考光路与样品光路的光程差 $\Delta(t)$ ， $\Delta(t) = 2n'd(t)$ 。 n' 为样品臂所在空间介质折射率，本文实验在空气中进行， n' 取 1。则

$$\Delta(t) = 2d(t). \quad (7)$$

将(7)式代入(6)式得

$$I_V(k,t) = 2I_0(k)r_Rr_S(k)\cos[k\cdot 2d(t)]. \quad (8)$$

设置纳米位移台反射端面与超小 GRIN 光纤探头间初始距离 d_0 为光纤探头的聚焦工作距离 Z_w ，调整参考光路使此时的纳米位移台反射端面位于零光程差处。纳米位移台产生的振动位移 $d(t)$ 为正弦形式，可用公式表示为

$$d(t) = A + A\sin\left(2\pi ft - \frac{\pi}{2}\right), \quad (9)$$

式中： A 为纳米位移台振动振幅； f 为振动频率。将(9)式中正弦函数进行三角变换可得

$$d(t) = A - A\cos(2\pi ft). \quad (10)$$

将(10)式代入(8)式可得有效干涉光强公式为

$$I_V(k,t) = 2I_0(k)r_Rr_S(k)\cos\{k\cdot 2[A - A\cos(2\pi ft)]\}. \quad (11)$$

根据(11)式可知,干涉信号受振动的振幅和频率影响,在确定纳米位移台振幅和频率的情况下,每个时间点各自对应着一个干涉信号,将这个干涉信号进行傅里叶变换就能得到相应时间点的位置信息。记录一段时间的干涉信号,对应时间点位置信息连成的曲线便是位移台的位移曲线。对比 SS-OCT 测振系统所测信号与纳米位移台实际振动的时域信号,及它们的频谱图,便能验证系统的可行性。

3 测振实验系统的搭建

根据基于超小 GRIN 光纤探头的集成化 SS-OCT 测振系统理论模型分析,合理选择光学器件,构建集成化 SS-OCT 测振实验系统。其中,超小 GRIN 光纤探头是集成化 SS-OCT 测振系统的关键器件,因具有聚焦性能好、体积小、易于集成化等优势,可在实现 SS-OCT 高分辨率的同时实现小型化。超小 GRIN 光纤探头是一种全光纤型光学镜头,其模型图如图 2 所示,由 SMF+NCF+GRIN 光纤依次构成。单模光纤与样品臂尾纤熔融连接,

具有传光作用;无芯光纤是一种折射率均匀的光纤,发散的光在其中因不受传输限制,可起到克服单模光纤模场直径小的作用;GRIN 光纤是一种折射率渐变光纤,具有自聚焦作用,对来自无芯光纤光束聚焦输出。

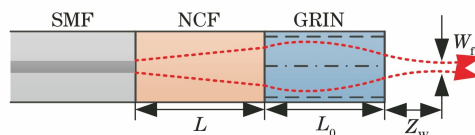


图 2 超小 GRIN 光纤的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of ultra-small GRIN fiber

图 2 模型图中, L 和 L_0 分别为无芯光纤和 GRIN 光纤的长度; Z_w 为超小光纤探头工作距离,即探头输出端面至光束聚焦位置的距离; W_f 为探头聚焦光斑直径。在探头设计过程中, L 和 L_0 的大小影响着探头性能参数 Z_w 和 W_f 的优劣。根据本实验室对超小自聚焦光纤探头的数值分析、仿真设计、制作检测及封装方法^[21,23-25],研制适用于本实验系统的光纤探头。其研制过程如图 3 所示,图 3(a)是

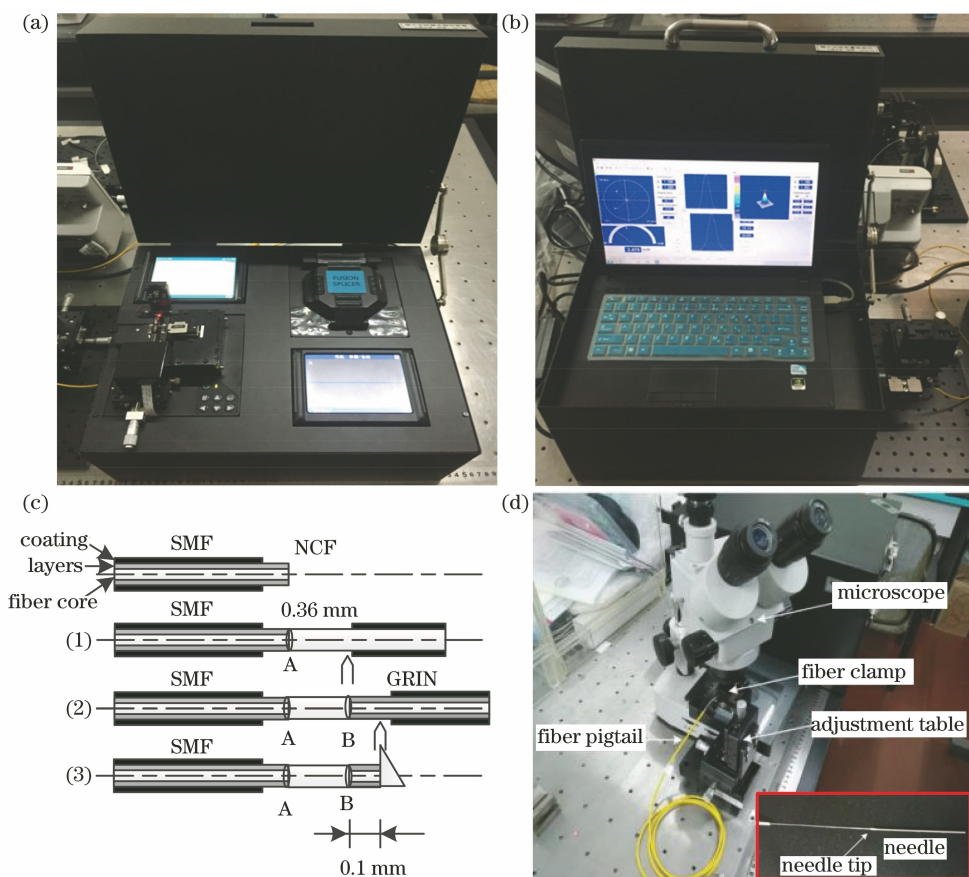


图 3 超小 GRIN 光纤探头的研制过程。(a) 光纤切割-熔接一体机;(b) 微小光斑质量检测仪;(c) 光纤制作过程;(d) 系统封装及探针样品

Fig. 3 Development process of ultra-small GRIN optical fiber probe. (a) Precision fiber cutting-fusion machine; (b) micro spot quality detector; (c) probe production process; (d) packaging system and samples

光纤切割-熔接一体机,具体熔接切割步骤如图 3(c)所示,先将单模光纤熔接上无芯光纤;然后以第一个熔点 A 为起点,切割一定长度的无芯光纤;最后再熔接 GRIN 光纤,以第二个熔点 B 为起点切割一定长度的 GRIN 光纤。图 3(b)是微小光斑质量检测仪,用于检测超小光纤探头的实际性能,如光斑直径、工作距离等。图 3(d)是探头封装系统,由于光纤易碎、容易损坏,需要将制作、检测好的超小光纤探头在显微镜下封装进不锈钢薄壁注射器针头中。

根据集成化 SS-OCT 测振系统模型,结合研制的超小 GRIN 光纤探头,搭建集成化 SS-OCT 测振实验系统。实验系统如图 4 所示,其系统构成主要有:扫

频光源、光纤耦合器、光纤环形器、超小 GRIN 光纤探头、位置调整平台、纳米位移台、准直器、平面反射镜及光电平衡探测器、高速数据采集卡、计算机等。其主要工作方法为:由扫频光源出射的光经光纤分束器一路到参考臂,另一路到样品臂。进入样品臂的光传输至超小光纤探头,此后经超小光纤探头垂直入射到可振动的纳米位移台端面上,反射光耦合进入超小光纤探头传输至光纤耦合器。平面反射镜反射回来的光和纳米位移台端面反射回来的光在光纤耦合器处发生干涉,当纳米位移台振动时,带有振动信息的干涉信号将发生变化,由光电平衡探测器接收,通过数据采集卡采集并传输到计算机显示与分析处理。

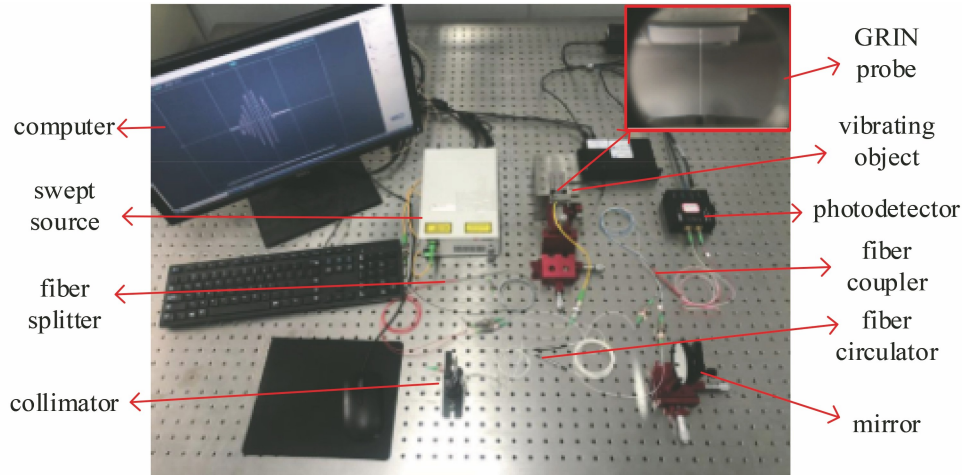


图 4 集成化 SS-OCT 测振实验系统

Fig. 4 Integrated SS-OCT vibration measurement experimental system

本系统采用的是日本 Santec 公司型号为 HSL-20-50-B 的扫频光源,频率为 50 kHz,有两个触发信号。A-trigger 的作用是触发采集,K-trigger 的作用是等波数(k)采集。光源中心波长 $\lambda_0 = 1300.4$ nm、带宽 $\Delta\lambda = 106.3$ nm,由轴向分辨率公式^[26]可求得系统理论轴向分辨率为

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{n \Delta \lambda} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{1300.4^2}{1 \times 106.3} = 7 \mu\text{m}. \quad (12)$$

与大部分光学成像系统一样,OCT 的横向分辨率取决于聚焦光束的艾里斑大小。根据 OCT 系统的横向分辨率公式^[27]结合本文探头的特性可知本系统的理论横向分辨率为

$$\Delta x = \frac{4 \lambda_0}{\pi} \frac{Z_w}{W_f}. \quad (13)$$

所用光源是 50 kHz 的,即每秒扫描 50000 次。由采样定理可知,理论上本系统可测振动的最大频率达 25 kHz,可通过提高光源频率来提高可测振动

的最大频率。其可测最小频率受限于计算机与采集卡的性能,在给定实验条件下能测振动频率范围为 1~200 Hz。在扫频 OCT 中,“穿透深度”受限于光在样品深度中的衰减,“成像深度”取决于光电探测器和数据采集卡的性能指标,最大成像深度公式为

$$Z_{\max} = \frac{\lambda_0^2}{4n \cdot \delta\lambda_{\text{source}}}, \quad (14)$$

式中: $\delta\lambda_{\text{source}}$ 为光源的瞬时线宽,根据光源的瞬时相干长度 22.1 mm 可求得

$$\delta\lambda_{\text{source}} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{n l_c} = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{1300.4^2}{1 \times 22.1 \times 10^6} = 0.0338 \text{ nm}. \quad (15)$$

代入(13)式,求得本系统理论最大成像深度为

$$Z_{\max} = \frac{\lambda_0^2}{4n \cdot \delta\lambda_{\text{source}}} = \frac{1300.4^2}{4 \times 1 \times 0.0338} \approx 12.5 \text{ mm}. \quad (16)$$

即理论上本系统可测振动的最大峰值约为

12.5 mm。

4 集成化 SS-OCT 测振系统的验证分析

制作无芯光纤长度 0.35 mm 和 GRIN 光纤长度 0.12 mm 的光纤探头作为样品臂搭建实验系统，

表 1 实验数据记录表 ($A=0.025 \mu\text{m}$, $f=10 \text{ Hz}$)

Table 1 Experimental data record table ($A=0.025 \mu\text{m}$, $f=10 \text{ Hz}$)

| Number of experiments | Fitting time domain signal | | | | | | Fitting frequency domain signal | | | |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------|--------|-------------------------------|-------------------|--------|---------------------------------|---------------------------|----------------|---------------------------|
| | OCT | | | Nano-vibrator | | | OCT | | Nano-vibrator | |
| | $P\text{-to-}P / \mu\text{m}$ | $R\text{-square}$ | RMSE | $P\text{-to-}P / \mu\text{m}$ | $R\text{-square}$ | RMSE | Frequency / Hz | Amplitude / μm | Frequency / Hz | Amplitude / μm |
| 1 | 0.044 | 0.9872 | 0.0018 | 0.049 | 0.9993 | 0.0005 | 9.766 | 0.022 | 9.766 | 0.024 |
| 2 | 0.043 | 0.9814 | 0.0021 | 0.049 | 0.9992 | 0.0005 | 9.766 | 0.021 | 9.766 | 0.024 |
| 3 | 0.045 | 0.9824 | 0.0021 | 0.049 | 0.9993 | 0.0005 | 9.766 | 0.023 | 9.766 | 0.025 |
| 4 | 0.049 | 0.8035 | 0.0086 | 0.049 | 0.9993 | 0.0005 | 9.766 | 0.024 | 9.766 | 0.024 |
| 5 | 0.052 | 0.8862 | 0.0065 | 0.049 | 0.9993 | 0.0005 | 9.766 | 0.026 | 9.766 | 0.024 |
| 6 | 0.048 | 0.9780 | 0.0025 | 0.049 | 0.9993 | 0.0005 | 9.766 | 0.024 | 9.766 | 0.024 |
| 7 | 0.044 | 0.9786 | 0.0023 | 0.049 | 0.9993 | 0.0005 | 9.766 | 0.022 | 9.766 | 0.025 |
| 8 | 0.051 | 0.9698 | 0.0032 | 0.049 | 0.9993 | 0.0005 | 9.766 | 0.025 | 9.766 | 0.024 |
| Average value | 0.047 | | | 0.049 | | | 9.766 | 0.023 | 9.766 | 0.024 |

由表 1 可知,纳米位移台振动的实际峰峰值为 49 nm,实际频率为 9.766 Hz,这是纳米位移台本身测量精度所致;系统测得振动的峰峰值平均值是 47 nm,平均误差是 2 nm,频率是 9.766 Hz,具有很好的频率跟随性。

对于系统可行性,可以通过重复性标准偏差来表征。重复性标准偏差 S 通过极差法计算,计算公式^[28]为

$$S = \frac{R}{C}, \quad (17)$$

式中: R 为多次实验测量结果的极差,即最大值与最小值之差; C 为极差系数,因单点测量次数为 8 次,

该探头的实验检测工作距离 $Z_w=0.54 \text{ mm}$,聚焦光斑直径 $W_i=30 \mu\text{m}$ 。设定纳米位移台做振幅 $A=0.025 \mu\text{m}$,频率 $f=10 \text{ Hz}$ 的正弦振动,进行系统可行性实验。重复进行 8 次实验,所测数据如表 1 所示,其中 $R\text{-square}$ 是“拟合确定系数”、 RMSE 是“均方根误差”、 $P\text{-to-}P$ 是“振动峰峰值”。

$C=2.85$ 。根据(17)式对表 1 中实验数据进行重复性计算,计算结果为

$$S = \frac{R}{C} = \frac{0.052 - 0.043}{2.85} = 0.003. \quad (18)$$

以表 1 中第 6 次实验数据作图,SS-OCT 测振系统测得的振动位移曲线和纳米位移台的实际振动曲线如图 5(a) 所示,其中虚线是 SS-OCT 测振系统得到的振动位移曲线,实线是纳米位移台的实际振动曲线;图 5(b) 为图 5(a) 对应的频谱图。由图 5 可知,系统所测信号与标准信号的振动位移曲线及其频谱图基本吻合,进一步说明测试系统的可行性。

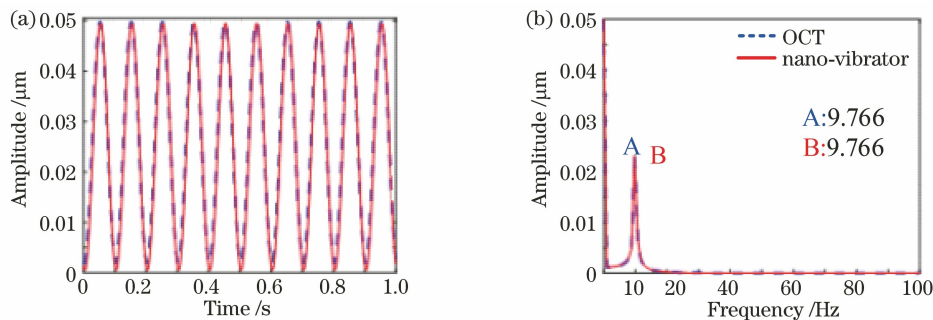


图 5 $A=0.025 \mu\text{m}$, $f=10 \text{ Hz}$ 。(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线;(b) 频谱图

Fig. 5 $A=0.025 \mu\text{m}$, $f=10 \text{ Hz}$. (a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

用此系统测量频率 1 Hz、振幅为 1.5 μm 的纳米位移台的振动,得到的时域振动曲线和频谱分析曲线如图 6 所示。由图 6 可知,本系统对 1 Hz 的振

动测量也能做到同步跟随,振幅存在误差,频率完全一致,因此,本系统可用于测量微小振动。

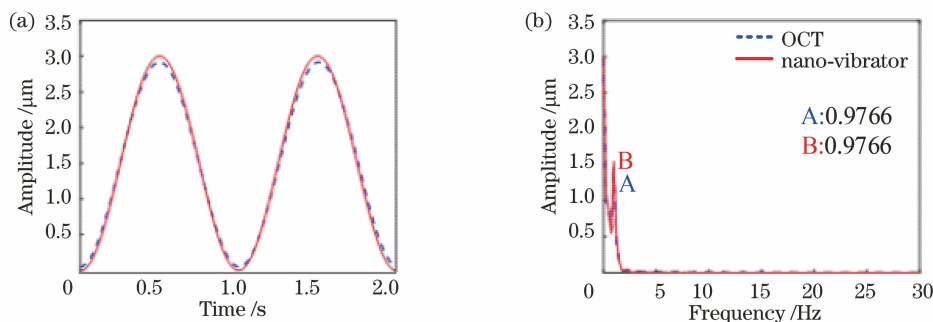


图 6 正弦波 $A=1.5 \mu\text{m}$, $f=1 \text{ Hz}$ 。(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线;(b) 频谱图

Fig. 6 Sine wave with $A=1.5 \mu\text{m}$, $f=1 \text{ Hz}$. (a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

5 集成化 SS-OCT 测振系统的性能参数测试及分析

5.1 单频振动实验

为了进一步验证系统不仅可测量正弦振动激励,还可测量其他振动激励。分别将纳米位移台设

置为振幅 $A=2.5 \mu\text{m}$, 频率 $f=5 \text{ Hz}$ 的正弦波和三角波。测得的振动曲线和频率信号如图 7、8 所示。分析数据可知,对于相同振幅和频率的不同波形激励,测量结果完全相同,得到的频率都是 4.883 Hz。但是由于三角波的固有特性,图 8(b) 中有分频出现。

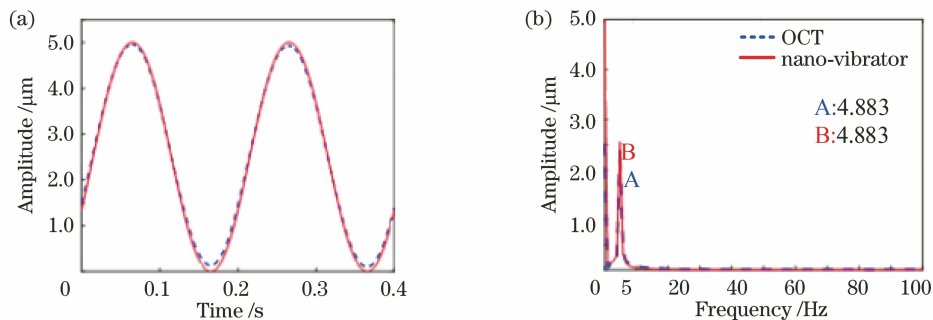


图 7 正弦波 $A=2.5 \mu\text{m}$, $f=5 \text{ Hz}$ 。(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线;(b) 频谱图

Fig. 7 Sine wave with $A=2.5 \mu\text{m}$, $f=5 \text{ Hz}$. (a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

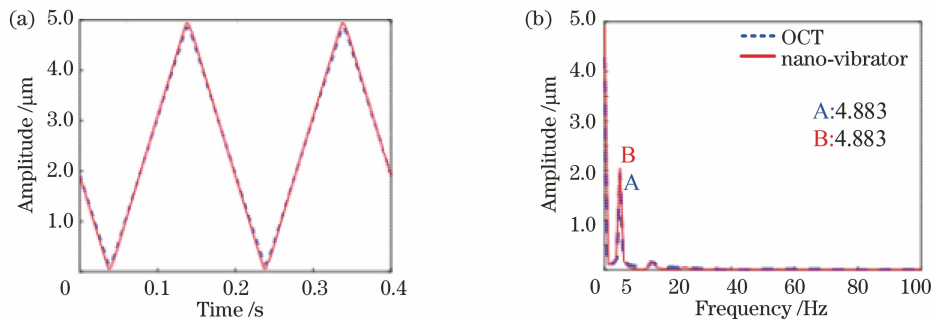


图 8 三角波 $A=2.5 \mu\text{m}$, $f=5 \text{ Hz}$ 。(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线;(b) 频谱图

Fig. 8 Triangle wave with $A=2.5 \mu\text{m}$, $f=5 \text{ Hz}$. (a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

5.2 混频振动实验

将纳米位移台分别设置成“正弦波 1 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + 正弦波 2 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$)”、“三角波 1 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + 三角波 2 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$)”、“正弦波 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + 三角波 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$)”、“正弦波 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$)”接“三角波 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$)”, 测量得到的振动

曲线和频率曲线分别如图 9~12 所示。4 幅图中的振动曲线均与纳米位移台的振动曲线几乎完全重合, 说明系统不仅可以测单频振动, 对于多频的复杂振动也可以测量。其中, 从图 9~11 的频率图中可以看出, 振动的激励信号的频率含有 20, 40, 60 Hz, 从图 12 的频率图中可以看出这种激励是一种含有 13.67, 26.37, 40.04, 53.71 Hz 多种频率的振动, 其中 26.37 Hz 的频率幅度最强。

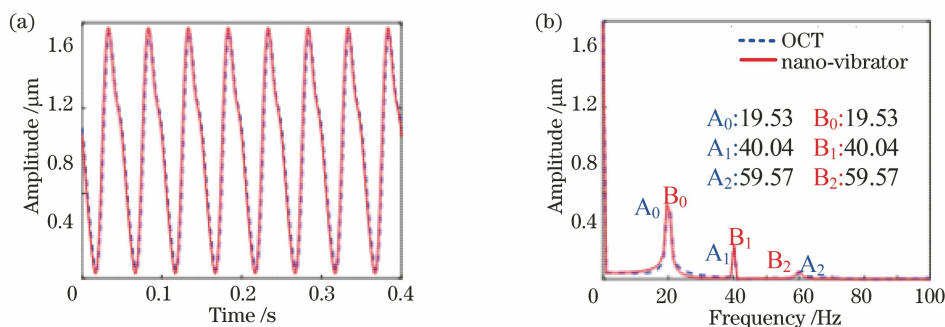


图 9 正弦波 1 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + 正弦波 2 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$)。
(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线; (b) 频谱图

Fig. 9 Sine wave 1 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + sine wave 2 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$). (a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

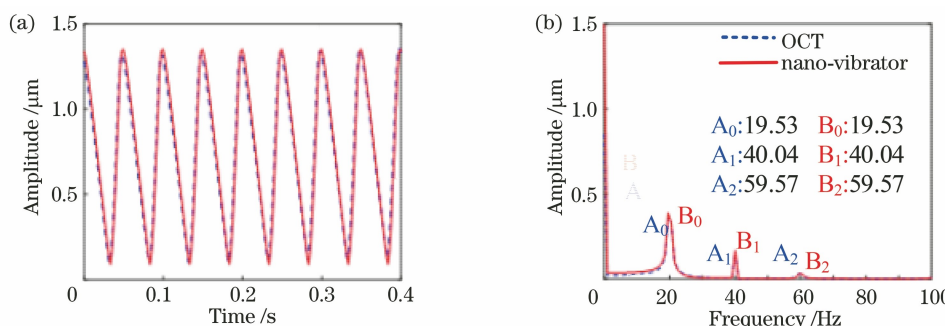


图 10 三角波 1 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + 三角波 2 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$)。
(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线; (b) 频谱图

Fig. 10 Triangle wave 1 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + triangle wave 2 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$).
(a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

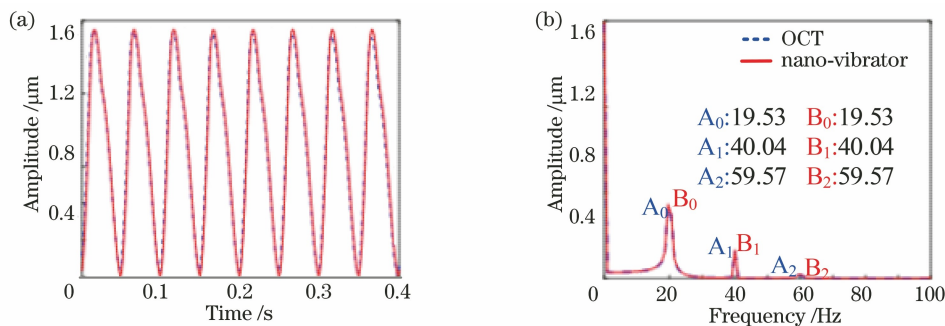


图 11 正弦波 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + 三角波 ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$)。
(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线; (b) 频谱图

Fig. 11 Sine wave ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 20 \text{ Hz}$) + triangle wave ($A = 0.5 \mu\text{m}, f = 40 \text{ Hz}$). (a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

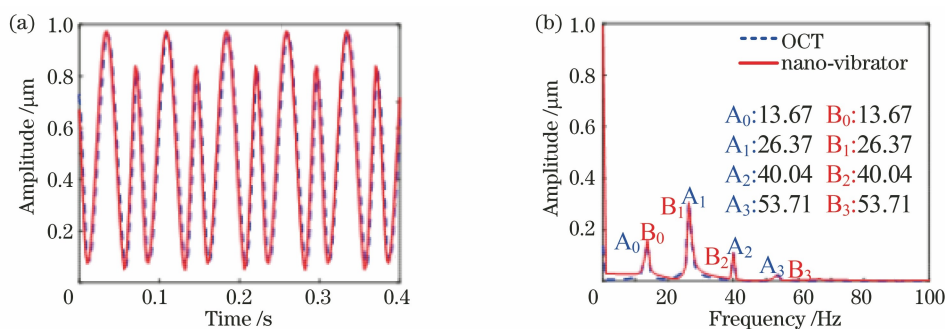


图 12 正弦波 ($A=0.5 \mu\text{m}$, $f=20 \text{ Hz}$)“接”三角波 ($A=0.5 \mu\text{m}$, $f=40 \text{ Hz}$)。

(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线; (b) 频谱图

Fig. 12 Sine wave ($A=0.5 \mu\text{m}$, $f=20 \text{ Hz}$) appended to triangle wave ($A=0.5 \mu\text{m}$, $f=40 \text{ Hz}$).

(a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

5.3 振幅精度实验

由理论分析可知,本系统在空气中的理论轴向分辨率为 $7 \mu\text{m}$,最大成像深度约为 12.5 mm 。在数据处理过程中,对于难以直接测得微小位移,可以通过相位变化反解出位移变化。本文利用能量重心

频谱校正算法对位移信息进行解调^[29],可将轴向分辨率由微米级提高到纳米级。将纳米位移台设置为峰峰值 10 nm 、频率 200 Hz 的正弦运动。重复 8 次实验,实验数据如表 2 所示。

表 2 实验数据记录表 ($A=0.010 \mu\text{m}$, $f=200 \text{ Hz}$)

Table 2 Experimental data record table ($A=0.010 \mu\text{m}$, $f=200 \text{ Hz}$)

| Number of experiments | Fitting time domain signal | | Fitting frequency domain signal | |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------|
| | OCT | Nano-vibrator | OCT | Nano-vibrator |
| | $P\text{-to-}P / \mu\text{m}$ | $P\text{-to-}P / \mu\text{m}$ | Frequency / Hz | Frequency / Hz |
| 1 | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| 2 | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| 3 | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| 4 | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| 5 | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| 6 | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| 7 | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| 8 | 0.004 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |
| Average value | 0.005 | 0.006 | 200.2 | 200.2 |

在纳米台设置为可设最高频 (200 Hz) 的情况下,其实际振动峰峰值为 6 nm ,频率为 200.2 Hz 。OCT 测振系统所测振动的峰峰值均值为 5 nm ,频

率也为 200.2 Hz 。峰峰值重复测量的平均误差为 0.125 nm ,重复性标准偏差为 0.003 ,频率误差小于 0.001 Hz 。以表 2 第 1 次实验数据作图,如图 13 所

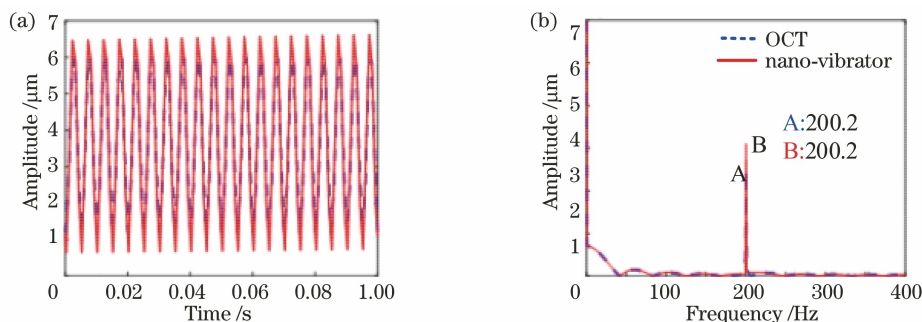


图 13 振幅精度实验图。(a) 振动信号与干涉信号随时间变化曲线; (b) 频谱图

Fig. 13 Experimental diagrams of amplitude accuracy. (a) Time-varying curve of vibration signal and interference signal; (b) frequency spectrum

示。综上,在实验条件下,该系统可实现峰峰值达 6 nm 及以上的微小振动测量。

6 结 论

本文研制了基于超小 GRIN 光纤探针的集成化 SS-OCT 测振系统模型,并建立了实验系统。验证了系统性能可行性,对不同振幅与频率的单频、混频振动进行测量与分析,通过实验验证和理论分析可知,在给定实验条件下,该集成化 SS-OCT 测振系统可实现峰峰值达 6 nm 及以上的微小振动测量,对振幅为 50 nm、频率为 10 Hz 的单频正弦振动信号,系统的重复性实验标准偏差是 0.003。结果表明,基于超小 GRIN 光纤探头的集成化 SS-OCT 测振系统可用于多种复杂微小振动的测量,在狭窄空间(如微深孔)的微位移、微振动测量方面具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P, et al. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035): 1178-1181.
- [2] Gladkova N D, Petrova G A, Nikulin N K, et al. *In vivo* optical coherence tomography imaging of human skin: norm and pathology [J]. *Skin Research and Technology*, 2000, 6(1): 6-16.
- [3] Baumgartner A, Hitzenberger C K, Dichtl S, et al. Optical coherence tomography of dental structures [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3248: 130-136.
- [4] Tsai M T, Lee H C, Lu C W, et al. Delineation of an oral cancer lesion with swept-source optical coherence tomography [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2008, 13(4): 044012.
- [5] Boppart S A, Brezinski M E, Bouma B E, et al. Investigation of developing embryonic morphology using optical coherence tomography [J]. *Developmental Biology*, 1996, 177(1): 54-63.
- [6] Sun W, Li J N, Qi L Y, et al. Detection of dental root fractures based on endoscopic swept source optical coherence tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(8): 0811002.
孙伟, 李嘉男, 戚芳源, 等. 内窥扫频光学相干层析探测牙齿根裂的研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(8): 0811002.
- [7] Wiesauer K, Pircher M, Götzinger E, et al. En-face scanning optical coherence tomography with ultra-high resolution for material investigation [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 1015-1024.
- [8] Fercher A F, Drexler W, Hitzenberger C K, et al. Optical coherence tomography-principles and applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2003, 66(2): 239-303.
- [9] Chang S D, Mao Y X, Flueraru C, et al. Optical coherence tomography: technology and applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7156: 715606.
- [10] Hee M R, Swanson E A, Fujimoto J G, et al. Polarization-sensitive low-coherence reflectometer for birefringence characterization and ranging [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1992, 9(6): 903-908.
- [11] Chen Z, Milner T E, Dave D, et al. Optical Doppler tomographic imaging of fluid flow velocity in highly scattering media [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(1): 64-66.
- [12] Izatt J A, Kulkarni M D, Yazdanfar S, et al. *In vivo* bidirectional color Doppler flow imaging of picoliter blood volumes using optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(18): 1439-1441.
- [13] Ophir J, Alam S K, Garra B, et al. Elastography: ultrasonic estimation and imaging of the elastic properties of tissues [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H, Journal of Engineering in Medicine*, 1999, 213(3): 203-233.
- [14] Tearney G J, Boppart S A, Bouma B E, et al. Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(7): 543-545.
- [15] Tearney G J. *In vivo* endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography [J]. *Science*, 1997, 276(5321): 2037-2039.
- [16] Li X, Chudoba C, Ko T, et al. Imaging needle for optical coherence tomography [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(20): 1520-1522.
- [17] Wang C, Mao Y X, Tang Z, et al. Numerical analysis of GRIN lens based miniature probes for optical coherence tomography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2300-2307.
- [18] Bhushan B, Wyant J C, Koliopoulos C L. Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry [J]. *Applied Optics*, 1985, 24(10): 1489-1497.
- [19] Zhong S C, Shen H, Shen Y C. Real-time monitoring of structural vibration using spectral-domain optical coherence tomography [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(1): 127-131.
- [20] Zhong S C, Zhang Q K. Enhanced optical coherence vibration tomography for subnanoscale-displacement-resolution calibration of piezoelectric actuators [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 233: 42-46.

- [21] Wang C, Xu T T, Bi S B, et al. Measurement of the focusing constant of gradient-index fiber lens and its application in developing GRIN fiber probes [J]. *Measurement*, 2016, 90: 542-548.
- [22] Wang C, Xu L L, Zhu J, et al. A novel integrated fiber-optic interferometer model and its application in micro-displacement measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86: 125-131.
- [23] Wang C, Bi S B, Ding W, et al. Optical characteristic parameters of gradient-index fiber probe [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39 (9): 0905001.
王驰, 毕书博, 丁卫, 等. 梯度折射率光纤探针的光学特征参数[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0905001.
- [24] Wang C, Xia X Q, Bi S B, et al. A numerical method for designing gradient-index fiber probes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8769: 87693B.
- [25] Bi S B, Wang C, Zhu J, et al. Detection method for the focusing performance of small fiber lens [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10449: 104491E.
- [26] Swanson E A, Huang D, Lin C P, et al. High-speed optical coherence domain reflectometry: erratum[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(7): 547.
- [27] McLaughlin R A, Lorenser D, Sampson D D. Needle probes in optical coherence tomography [M]. New York: Springer, 2013: 1065-1102.
- [28] Li L Y. Talking about the methods of two common formulas to deal with the experimental standard deviation[J]. *Standard & Quality of Light Industry*, 2013(4): 52-53.
李亮宇. 浅谈两种常用公式处理实验标准偏差的方法[J]. *轻工标准与质量*, 2013(4): 52-53.
- [29] Xi J T, Chicharo J F. A new algorithm for improving the accuracy of periodic signal analysis [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, 45(4): 827-831.