

文章编号 1004-924X(2024)21-3127-11

面向光纤激光的近红外超宽带波长测量

于晨昊¹, 延凤平^{1*}, 杨丹丹¹, 王鹏飞¹, 谭中伟¹, 任文华¹, 冯 亭^{2*}, 李 挺³

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044;

2. 东北大学秦皇岛分校 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

3. 北京交通大学 物理科学与工程学院, 北京 100044)

摘要:提出一种基于迈克尔逊干涉仪原理的面向 0.8~2.4 μm 波段近红外超宽带单频光纤激光的小型化高精度波长快速测量技术。该技术所涉及的光学组件均适用于 0.8~2.4 μm 近红外波段, 伺服电机平移台的最大行程为 50 mm, 基于双折叠光路设计可产生 4 倍于平移台行程的光程差, 由高速采集卡配合 LabVIEW 上位机程序采集处理信号, 实现了该技术的小型化、高精度及快速测量。提出采样数等效分辨率法以简化波长分辨率的设计, 确定波长分辨率仅与信号采样数有直接数值对应关系, 其余参数均以采样数为基准进行自由调整。选用 0.8, 1.06, 1.55, 1.94 和 2.05 μm 5 种典型波段的单频激光器做波长测量实验, 并与商用高精度波长计测量结果比较。实验结果表明: 采样数等效分辨率法单次测量耗时 1.5 s, 测量精度分别为 ± 1.4 , ± 1.1 , ± 1.2 , ± 1.2 和 ± 1.3 pm, 波长分辨率符合理论值 0.2×10^{-6} 。该小型化波长测量技术能够实现 0.8~2.4 μm 全波段近红外光源的高精度快速测量。

关键词: 波长测量; 迈克尔逊干涉仪; 近红外; 超宽光谱范围

中图分类号: O436.1; TN248 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243221.3127

Near-infrared ultra-wideband wavelength measurement for fiber laser

YU Chenhao¹, YAN Fengping^{1*}, YANG Dandan¹, WANG Pengfei¹, TAN Zhongwei¹,

REN Wenhua¹, FENG Ting^{2*}, LI Ting³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University,
Beijing 100044, China;

2. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology,
Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;

3. School of Physical Sciences and Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

* Corresponding author, E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn; fengting@neuq.edu.cn

Abstract: A miniaturized, high-precision wavelength measurement technology for near-infrared ultra-wideband single-frequency fiber lasers in the 0.8-2.4 μm range is proposed, based on the principle of the Michelson interferometer. The optical components utilized are compatible with the entire near-infrared band (0.8-2.4 μm). A servo motor translation stage with a maximum stroke of 50 mm, combined with a

收稿日期: 2024-07-16; 修订日期: 2024-08-16.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2021YFB2800900); 国家自然科学基金重点项目 (No. 62335001); 河北省自然科学基金杰出青年科学基金项目 (No. F202301024)

double-folded optical path design, enables an optical path difference four times the horizontal displacement. Signal acquisition and processing are performed using a high-speed acquisition card and a LabVIEW-based upper computer program, achieving miniaturization, high precision, and rapid measurement. A novel sampling number equivalent resolution method is introduced to simplify the wavelength resolution design process, establishing a direct numerical relationship between wavelength resolution and the number of sampling points, while allowing other parameters to be adjusted independently. Wavelength measurement experiments were conducted on five typical single-frequency lasers (0.8, 1.06, 1.55, 1.94, and 2.05 μm), and the results were compared with those obtained using a commercial high-precision wavemeter. The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed method, with a single measurement time of 1.5 s, measurement accuracies of ± 1.4 , ± 1.1 , ± 1.2 , ± 1.2 , and ± 1.3 pm, and a wavelength resolution consistent with the theoretical value of 0.2×10^{-6} . These findings validate the capability of this miniaturized technology to perform high-precision, rapid measurements across the full 0.8-2.4 μm near-infrared spectrum.

Key words: wavelength measurement; Michelson interferometer; near-infrared; ultra-wide spectral range

1 引言

近红外波段光纤激光器作为近年激光技术研究领域的热点,其中光谱在 1.6~2.1 μm 波段的掺铥光纤激光器(Thulium-doped Fiber Laser, TDFL)在高分子化工焊接、自由空间光通信系统、生物医疗、遥感测距及风速传感等领域具有广泛的应用前景^[1-8]。基于此,本课题组采用掺铥光纤作为增益光纤设计了不同性能的激光器,并提出了一种基于 3×3 耦合器的非平衡迈克尔逊干涉仪和相位噪声信号解调的超宽带激光器线宽测量系统,能够快速且精确计算出包含 2 μm 单频 TDFL 在内的 0.8~2.4 μm 波段单频激光器的线宽值^[9]。在计算激光线宽过程中,需要对待测波长进行精确测量,使得线宽测量系统可根据波长自行调整相关系统参数实现高精度测量线宽值。因此,开发出一套能够与线宽测量系统相兼容的波长测量系统尤为必要。

激光作为“最准的尺”,广泛应用于精密机械加工、微电子、天文观测和地理测绘等领域^[10]。目前,国内外有关激光波长测量技术的研究及商业化应用已取得了诸多重要成果。按照测量原理,这些技术可分为:衍射光栅分光测量技术、干涉仪测量技术、双光电探测测量技术及光频梳拍频测量技术等^[11-12]。法布里-珀罗干涉仪法、迈克尔逊干涉仪法以及斐索干涉仪法是典型的干涉

仪测量技术。2001 年,Alipieva 等基于斐索干涉仪结构结合线阵图像传感器(Charge Coupled Device, CCD),实现对氩气激光器和氦氖激光器连续光源的波长精确测量,精度达到 5×10^{-6} ^[13]。2017 年, Li 等提出了一种基于双法布里-珀罗标准具外加光学线性滤波器的全光纤瞬时激光波长测量系统, C 波段(1 520~1 570 nm)入射光的测量精度达到 ± 1.38 pm^[14]。同年,严利平等提出一种基于单频正交线偏振光的迈克尔逊干涉仪法激光波长测量系统,无需参考光源即可实现对氦氖激光器的波长测量,精度达到 0.27 pm^[15]。2020 年, Porter 等基于三法布里-珀罗标准具结合 CMOS 相机,测量了 461 nm 和 657 nm 可调谐激光器波长,精度可达 3.94×10^{-6} ^[16]。上述 3 种干涉仪测量精度高,技术特点各有千秋:斐索干涉仪结构简单,无需参考光源以及机械位移组件,但加工精度要求高,易受温度变化和机械振动影响,同时光谱宽度较大的线阵 CCD 成本高昂;法布里-珀罗干涉仪的标准具光学间距固定且稳定性强烈依赖于恒温恒压环境,所需传感相机的波段和单位面积像素限制导致其可测量波长范围较窄;迈克尔逊干涉仪对光学元件的加工精度要求较低,结构简单便于维护,得益于廉价的光电探测器使得测量光谱范围较宽,但普遍采用参考光源,反射镜片移动所需行程较长且伴随机械振动干扰。文献[15]虽然不采用参考光源,但是信

号处理流程复杂,导致单次测量时间普遍高于 4 min,测量镜的运动距离为 250 mm。

为解决上述测量系统存在的测量光谱范围窄、耗时长以及系统体积庞大等问题,本文提出一种基于迈克尔逊干涉仪的近红外超宽带小型化高精度波长快速测量技术。该技术采用近红外超宽带光学组件,短行程高精度伺服电机平移台,双折叠光路结构,高速采集卡及 LabVIEW 操作程序。还提出“采样数等效分辨率法”用以简化系统参数设计流程。使用典型波段的单频激光器进行实验,并与商用高精度波长计进行对比,验证了该技术的测量波长能力。

2 原 理

波长测量技术基于迈克尔逊干涉仪原理,设计结构如图 1 所示。该技术主要包含平面反射镜 (Plane Mirror, PM)、平板分束镜 (Beam Splitter, BS)、中空屋脊反射棱镜 (Hollow Roof Prism Mirror, HRP M)、光电探测器 (Photoelectric Detector, PD)、参考激光器 (Reference laser, RL)、待测激光器 (Unknown Laser, UL)、伺服电机平移台 (Servo Motor Translation Stage, SMTS)、高速采集卡和上位机。光路结构将待测光与参考光分于对称两侧,主要为便于校准搭建光路以及控制适用宽光谱范围的光学元件成本。基于双折叠光路设计方法,将所有 HRP M 安置于同一 SMTS 上,再经过 PM 的反射进行光路调整。相较仅安装一侧 HRP M 于 SMTS 上的非折叠光路

法,双折叠光路可产生更大的光程差改变量,由此也可大幅压缩干涉仪的体积。由于迈克尔逊干涉仪法仅关注光程差改变前后的差量,对于静止状态下的光程差长度并无要求,故各光学元件的安装位置可进行调整。在保证光斑在 SMTS 移动过程中均能被 PD 接收的前提下,沿光路方向上的元件允许根据实际安装环境适当调节彼此间的相对距离。RL 光束经 BS1 以光强比 50:50 分为 1 光和 2 光,1 光依次经 PM2, HRP M1 和 BS1 后由 PD1 接收,2 光依次经 PM1, PM3, HRP M2 和 BS1 后由 PD1 接收。1 光和 2 光为仅存在相位差的相干光,故 PD1 会接收到干涉光信号。当 SMTS 发生位移时,1 光与 2 光所经光程会发生变化且呈此消彼长之势,两者间的光程差进而产生变化,最终使得干涉光信号的光强变化。UL 一侧的光路同理。在理想条件下,当 SMTS 的位移速度为匀速时,该光强会产生周期性变化,经 PD 光电转化后产生的电信号为单频信号。电信号由高速采集卡负责采样并交由上位机分析处理,最终得到波长测量结果。

光程差的改变速度是 SMTS 位移速度的 4 倍,则波长 λ 对应干涉信号的频率 f 为:

$$f = \frac{4v}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 v 为 SMTS 的移动速度。

由于 RL 与 UL 会同时改变光程差且数值一致,则两干涉信号会同时产生和消失。根据迈克尔逊干涉原理^[17], UL 波长 λ_U 为:

$$\lambda_U = \frac{M_R \lambda_R}{M_U}, \quad (2)$$

式中: λ_R 为 RL 波长, M_R 为 RL 干涉信号的周期数, M_U 为 UL 干涉信号的周期数。

根据式(2),求取 λ_U 需要得知其余三量。其中, λ_R 的数值已知,则 M_R 与 M_U 的精确计量关乎最终结果的准确性,即波长分辨率 $\Delta\lambda$ 。波长 λ 的波长分辨率 $\Delta\lambda$ 定义为:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta L}, \quad (3)$$

$$\Delta L = \lambda_U M_U = \lambda_R M_R, \quad (4)$$

式中 ΔL 为光程差改变量。

基于迈克尔逊干涉仪原理测量波长是以 λ_R 作为“标尺”精确丈量 ΔL , 依据 M_R 与 M_U 比值算出 λ_U 。在实际情况下, M_R 与 M_U 均存在整数部分

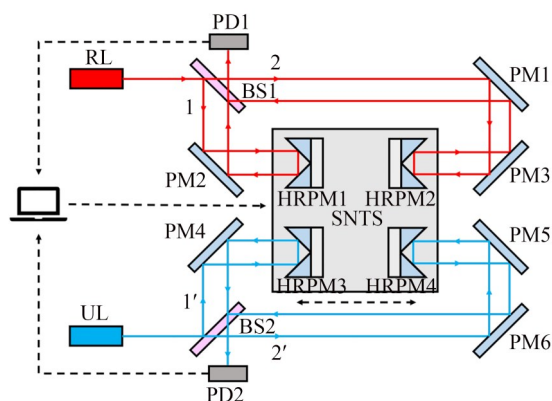


图 1 波长测量技术原理

Fig.1 Schematic diagram of wavelength measurement technology

及小数部分,其中,小数部分的有效数字位数与 $\Delta\lambda$ 存在对应关系。

以 $2\text{ }\mu\text{m}$ 波段为例,若只求 M_R 与 M_U 的整数部分,为保证该波段 $\Delta\lambda$ 为 0.2×10^{-6} ,则根据式(3)和式(4)得出 ΔL 为 10 m 。相对应地,若 ΔL 依次减少至 $1, 0.1$ 和 0.01 m , $\Delta\lambda$ 便会增加至 $2\times 10^{-6}, 20\times 10^{-6}$ 和 200×10^{-6} 。由此推论,若 $0.8\sim 2.4\text{ }\mu\text{m}$ 全波段对应 $\Delta\lambda$ 为 0.2×10^{-6} ,则 ΔL 应为 12 m ,该数值在实际应用条件下难以实现。因此,若求取 M_R 与 M_U 时能够精确至小数部分,则小数点后每精确一位有效数字,在 ΔL 不变下, $\Delta\lambda$ 可以提升一个数量级。由此可得,当求取 M_R 与 M_U 能够精确至小数点后第三位时,便能以 ΔL 为 12 mm 在 $0.8\sim 2.4\text{ }\mu\text{m}$ 波段实现 $\Delta\lambda$ 为 0.2×10^{-6} ,且 12 mm 的 ΔL 实现难度相比 12 m 大大降低。

在较小 ΔL 内实现较高的 $\Delta\lambda$,一般采用高速信号采集来精细观察信号的相位变化,以便提高 M_R 与 M_U 小数点后的有效数字位数。这涉及干涉信号频率 f 、信号采样率 f_s 、信号周期数取值精度以及采样数 F 等多项参数的综合搭配,导致系统设计过程繁琐。因此,这里提供了一种简化设计思路。

式(4)的数值关系阐述了波长计算原理,即不同波长乘以对应的不同周期数,从而构建同等的 ΔL 。根据式(3)可知, $\Delta L = \lambda \times (\lambda/\Delta\lambda)$,即 ΔL 被均分成等间隔区段, λ 为间隔长度, $\lambda/\Delta\lambda$ 为间隔数量。由 λ 与 $\lambda - \Delta\lambda$ 存在波长差,可建立等式:

$$\lambda \frac{\lambda - \Delta\lambda}{\Delta\lambda} = (\lambda - \Delta\lambda) \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (5)$$

高速信号采集可以提高周期数的计量精度,使得间隔长度 λ 与 $\lambda - \Delta\lambda$ 可被细化计量。根据式(5)所反映的数值关系,在 f_s 较高时,可将间隔长度由 λ 与 $\lambda - \Delta\lambda$ 细化为 $\frac{\lambda}{n}$ 与 $\frac{\lambda - \Delta\lambda}{n}$,则在间隔数量 $\frac{\lambda - \Delta\lambda}{\Delta\lambda}$ 与 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ 不变的前提下,光程差改变量由 ΔL 缩短为 $\frac{\Delta L}{n}$,基于式(5)的等值关系仍然成立,即有:

$$\frac{\lambda}{n} \cdot \frac{\lambda - \Delta\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda - \Delta\lambda}{n} \cdot \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (n > 0). \quad (6)$$

根据式(6)的数值关系可知,分辨 $\Delta\lambda$ 的关键在于间隔数量,与间隔距离并不直接相关。因此,仅

需关注间隔数量即采样数 F 便可满足数值关系:

$$F = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}. \quad (7)$$

且 f_s 满足奈奎斯特采样定律即 $f_s \geq 2f$ 时,可实现理论值 $\Delta\lambda$ 。本文将这一简化设计方法命名为“采样数等效分辨率法”。相较于匹配 M_R 与 M_U 取值精度, v, f_s 以及 ΔL 等诸多参数间的数值关系,该方法仅关注 F 值更易理解和操作,其余参数可依照 F 自由设计搭配。根据式(7)可得, $0.8\sim 2.4\text{ }\mu\text{m}$ 全波段实现 $\Delta\lambda$ 为 0.2×10^{-6} 仅需 F 为 5 M 即可。该结论对后续干涉信号的采集处理至关重要。

3 信号采集及处理

SMTS匀速运动生成光信号,经PD转换后的电信号被高速采集卡采集、存储并传输给上位机程序处理分析,此外SMTS的运动也由上位机程序同步控制。该程序是在上位机(Inspiron 13 Pro, Dell)上以Windows 11操作系统环境下开发的LabVIEW程序,其流程如图2所示。

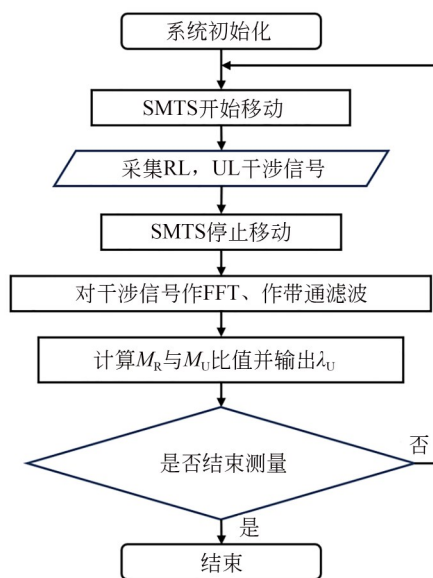


图2 LabVIEW波长测量流程

Fig. 2 Flow chart of LabVIEW wavelength measurement

波长测量技术的工作流程可主要分为三部分:生成、采集和处理信号。

3.1 生成信号

在UL与RL稳定运行下,为保证生成的干

涉信号频率足够稳定,以准确反映两者间波长的数值对应关系,在此过程中光程差的改变速度应尽可能均匀。因此,选用的电控平移台对匀速运动性能要求较高。电控平移台的驱动电机影响速度均匀性,主要分为两类:步进电机与伺服电机。步进电机的定位能力优异但速度均匀性较差,经实际测试发现获得的干涉信号频率稳定性较差,故决定采用匀速性能良好的伺服电机驱动电控平移台。

SMTS (XMS50-S, Newport) 的行程为 50 mm,最大移速为 300 mm/s,最大加速度为 2 500 mm/s²,匀速运动稳定性在 1% 以内。上位机 LabVIEW 程序对 SMTS 实时控制,可调节其加速度、速度以及到达坐标点的精确位置。

在系统初始化阶段,上位机程序除了主要负责各项系统参数的初始化设定,包括对 SMTS 进行位置归零校准,归至 0 mm 点位。随后 SMTS 会先以最大速度 300 mm/s 前往 -25 mm 点位,随后再以合适的较小速度前往 +25 mm 点位。在 SMTS 由 -25 mm 点位匀速移动至 +25 mm 点位期间,上位机程序会启动采集信号功能,以保证信号的频率稳定性。当 λ_U 的测量结果输出后,SMTS 会以最大速度 300 mm/s 从 +25 mm 点位重新回至 -25 mm 点位,以便新一轮测量。

3.2 采集信号

UL 与 RL 的光信号需要同步采集,以保证两者的相位变化是由同一时刻的光程差变化引起的。高速采集卡 (PXIe-1071, National Instruments) 多通道采样时,单通道采样率最大可达 14 MHz,而在实际测试中 v 最高仅设定为 10 mm/s,该情况下信号频率最高为 50 kHz,故在采集双通道信号时能够满足需求。RL 选用 1.5 μm 半导体激光器 (VLSS-1550-M-10-FA, Connet)。因 PD 的成本会随着探测光谱宽度的增加而增加,这里选取两种适用波段的 PD 以节约搭建成本。PD1 (PDD10MBKFS, Discovery Optica) 采用铟镓砷探测器类型,响应度仅覆盖 0.4~1.7 μm 全波段 (0.9 A/W@1550 nm),负责采集 RL 信号。PD2 (PDD10MD1KFS, Discovery Optica) 也采用铟镓砷探测器类型,响应度覆盖 0.8~2.4 μm 全波段 (1.0 A/W@2100 nm),负责采集 UL 信号。

PD 所采集的光信号经光电效应转换为模拟

信号,由高速采集卡接收并转化为数字信号。较高 f_s 可以充分体现信号的电平变化,便于后续信号处理得以准确测量信号的周期性变化。

3.3 处理信号

高速采集卡的输出信号传输至上位机,由 LabVIEW 程序处理分析。该部分程序功能上需要实现高精度的信号周期数计算,同时优化信号周期判定算法以加快处理速度。

为精确计算 M_R 与 M_U ,需要提取信号所反映的信号周期变化。周期数计算涉及信号各采样点的统计归类,将其从时域特征上分为整周期和非整周期部分,两部分最终的计算结果即分别对应 M_R 与 M_U 的整数和小数部分。在实际情况下,信号的首尾两端均极大概率为非整周期部分,其余为整周期部分。对于精确测量波长来说,使 M_R 与 M_U 的小数部分得到准确计量,即准确计算非整周期相较于整周期的占比是重点,而其关键在于如何得到整周期的准确时长。为方便计算,用周期内占据的采样数量表示时长。设定合适的 0 电平值,高于该电平的采样点为“高电平”,低于该电平的采样点为“低电平”,将信号整形为方波,便于以上升沿或下降沿精确判定周期变化情况。

值得注意的是,对于实际使用的激光器光源,直接采集的信号内各频率分量均存在一定幅值。除有价值的光源波长对应主频外,以直流信号和主频附近因拍频现象产生的噪声作为主要干扰项,是周期数计算时的主要误差来源。

举例说明主要噪声干扰,SMTS 以 1 mm/s 为间隔从 1 mm/s 逐步增加至 10 mm/s,不同 v 值条件下以 5 MHz 采样率和 1 s 采样时间进行信号采集,测量自制的 2 μm 单频光纤激光器获得 10 组信号。这些信号经快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 求得频谱密度,将各组频谱的幅值以对应主频的幅值进行归一化,结果如图 3 所示。从图中可以观察到,除直流信号外,干涉信号主频随 v 增加而线性增加,分布于主频左右两侧幅值较低的拍频频率分量也随 v 的增加而线性增加。这部分噪声干扰会影响主频信号的周期数计算,从而产生较大偏差。

采用带通滤波法处理采集信号,根据待测波长的波段设定带通滤波器的上下限截止频率,滤

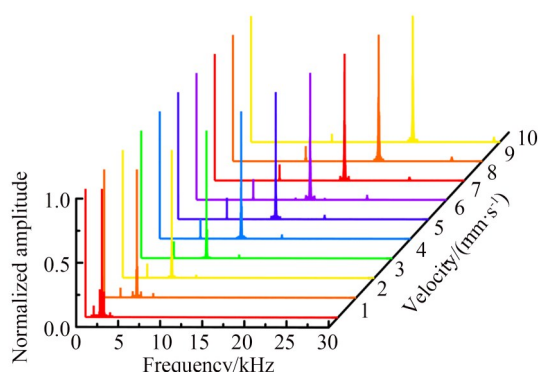


图3 SMTS不同位移速度情况下2 μm 单频光纤激光器干涉信号的归一化频谱

Fig. 3 Normalized spectra of interference signals of 2 μm single frequency fiber laser with different velocities of SMTS

除其他干扰项保留主频信号分量。通带上下限主要由信号主频和因为SMTS速度不稳定性导致的频率偏移范围决定。其中,频率偏移范围设定可略高于速度稳定指数。SMTS速度稳定在1%,则频率偏移范围设为2%。基于FFT可根据UL信号频谱迅速辨别信号主频。该主频对应波长的粗略数值,精确至1 nm水平即可满足系统需求。这类似于傅里叶变换光谱仪原理,其波长分辨率 $\Delta\lambda$ 为^[18]:

$$\Delta\lambda = \frac{1}{2\Delta L_{\max}}, \quad (8)$$

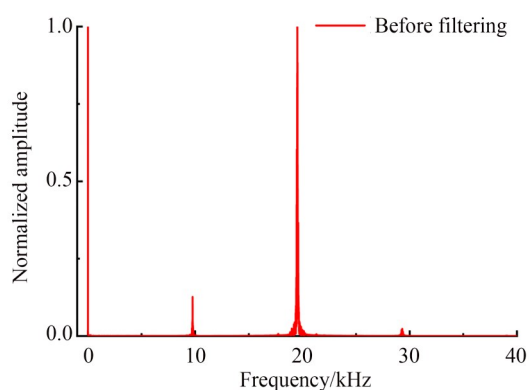
式中 $\Delta L_{\max}$ 为最大光程差改变量。

由于SMTS的最大行程为50 mm,双折叠光路设计可以产生4倍于该行程的光程差改变量,

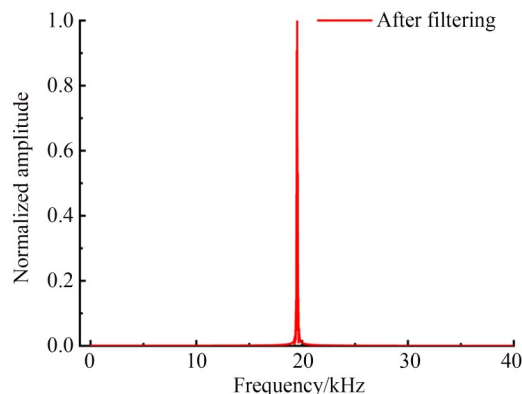
即200 mm。根据式(8),作FFT对应 $\Delta\lambda$ 为 0.025 cm^{-1} 。该数值单位由波数转换为波长后,可观察到 $\Delta\lambda$ 随波长增加单调递增(1.6 pm@800 nm, 6.0 pm@1550 nm, 14.4 pm@2400 nm)。然而,在实际使用时,SMTS行程虽未达最大值, $\Delta\lambda$ 仍满足1 nm水平,这足以准确判定待测波长范围。故对于确认带通滤波器的上下限截止频率,FFT可满足需求。

经滤波后,干涉信号中除主频以外的其他频率分量被有效滤除,确保对信号周期数的精确计量。为说明滤波对准确计算周期时长的重要性,设定 v 为10 mm/s,采样率为5 MHz,采样时间为0.2 s,测量自制2 μm 单频光纤激光器获得信号后,将滤波前和滤波后的信号分别进行FFT得到归一化频谱密度,结果如图4(a)和4(b)所示。通过观察可发现,经过滤波后直流信号和拍频噪声均得到有效滤除,而主频部分被完整保留。

对整形后的方波进行上升沿周期判断,将相邻两上升沿之间的采样点视作一个完整周期后,共计1M采样点的周期时长情况,按时域顺序记录如图4(c)~4(d)所示。针对滤波前信号,本文以信号波峰均值与波谷均值求和后的一半视作0相位电平为周期变化划分依据,光源功率的波动会导致该处理方式的误差较大。滤波后直流信号被剔除,从而避免了功率波动带来的干扰,且其余频率分量在时域上均会以0电平值对应0相位点,可直接将负电平点归为“低电平”,正电平点归为“高电平”,简化周期数的计算。如图4(c)



(a) 滤波前信号频谱
(a) Signal spectrum before filtering



(b) 滤波后信号频谱
(b) Signal spectrum after filtering

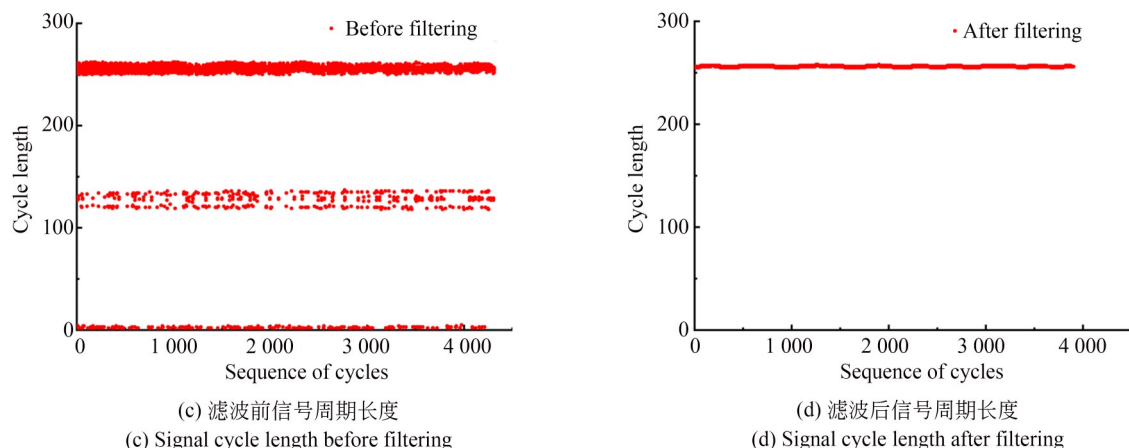


图 4 采样信号滤波前后对比

Fig. 4 Comparison of sampled signal and signal spectrum before and after filtering

所示,总共涉及 4 314 个周期值,其中有 2, 3, 4, 128, 129, 250, 257, 262 等不同且差距较大的数值,统计上均值为 231.73, 标准差为 63.99, 最小值为 2, 中位数为 255, 最大值为 262; 图 4(d) 中总共涉及 3 905 个周期值, 其中仅有 255, 256, 257, 258 四种数值, 统计上均值为 256.06, 标准差为 0.62, 最小值为 255, 中位数为 256, 最大值为 258。对比滤波前后的周期数统计结果, 可知滤波处理能大幅提高周期数计算的准确度。一部分偏差较大的周期数值被剔除, 同时中位数与均值基本持平, 表明该计算结果的可信度较高。用整周期数的平均值来衡量非整周期部分的占比, 可实现对 M_R 与 M_U 的精确计算。

4 实验与结果

波长测量系统的实物如图 5 所示。该波长测量系统除高速采集卡和上位机以外, 其他组件均固定在硬铝质光学面包板上, 并封装于标准机箱内遮光隔噪, 保证空间光学系统的精密性和稳定性。UL 从箱体前面板的法兰盘引入系统, 经可调焦距的准直镜部件调整为合适光斑尺寸后由 PD 接收光信号。RL 内置于机箱并固定于面包板上, 且与 UL 同理接入系统。PD 与 SMTS 通过箱体后面板的数据线与上位机及高速采集卡连接, 实现信号传输。为验证该系统对 0.8~2.4 μm 全波段近红外光源的高精度波长测量性能, 选用 0.8, 1.06, 1.55, 1.94 和 2.05 μm 5 种典型

波段的单频激光器进行测试。0.8 μm 光源 (PHX-C-F-MA795-15, Photonx) 为商用单频半导体激光器, 1.55 μm 光源 (E15, NKT) 为波长可调谐的商用单频光纤激光器, 余下 3 种光源均为固定波长的自制单频光纤激光器。

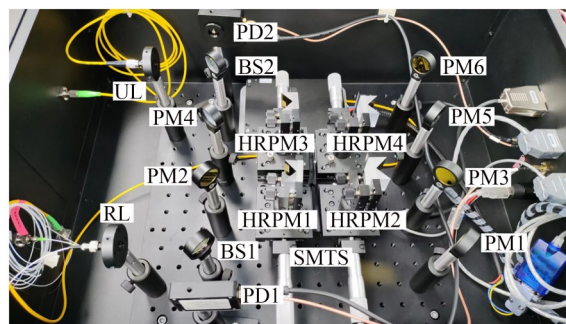


图 5 波长测量系统实物图

Fig. 5 Physical picture of wavelength measurement system

为验证本文提出的采样数等效分辨率法, 需要对测量系统的采样率、采样时间和 SMTS 位移速度 3 项主要参数组合进行对比测试。0.8~2.4 μm 全波段实现 $\Delta\lambda$ 为 0.2×10^{-6} , F 为 5 M, 则参数组设置如下:

(1) 采样率为 5 MHz, 采样时间为 1 s, SMTS 位移速度为 10 mm/s;

(2) 采样率为 2 MHz, 采样时间为 2.5 s, SMTS 位移速度为 6 mm/s;

(3) 采样率为 1 MHz, 采样时间为 5 s, SMTS 位移速度为 5 mm/s;

(4) 采样率为 10 MHz, 采样时间为 0.5 s, SMTS 位移速度为 8 mm/s。

由于测量精度与分辨率并非同一概念, 仅在理想情况下两者才近乎等同, 而实际情况下分辨率优于精度, 因此两者的测定方式有区别。本文通过对比中心波长多次测量结果的波动水平求得实际精度, 通过比较波长调谐前后中心波长多次测量结果的均值差求得实际分辨率。

首先测试精度。激光器接入波长测量系统后, 以 4 组不同系统参数进行波长测量, 每组均连续测量 30 次, 结果如图 6 所示。表 1 记录了 4 组参数条件下各激光器波长测量结果的最大值、最小值、波动范围和均值。其中, 波动范围指的是每组中单次测量结果相较于均值的最大偏差情况。根据图表内容, 在 4 组不同参数下测量结果的均值与波动范围均高度一致, 说明在采样数相同情况下测量精度也相同。各激光器的波长测量精度依次为 ± 1.4 , ± 1.1 , ± 1.2 , ± 1.2 和 ± 1.3 pm, 波长测量不确定度分别为 1.76×10^{-6} , 1.03×10^{-6} , 0.77×10^{-6} , 0.62×10^{-6} 和 0.63×10^{-6} 。

波长测量不确定度主要与 RL, UL 波长漂移以及环境干扰有关, 可通过计算相对不确定度 u 来分析, 即:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}, \quad (9)$$

式中: u_1 为 RL 波长不确定度, u_2 为 UL 波长不确定度, u_3 为 SMTS 位移量不确定度。

经 $\Delta\lambda$ 为 0.1×10^{-6} 的商用高精度波长计 (OSA202C & 203C, Thorlabs) 检验, RL 标准中心波长为 1 549.367 5 nm, 波长漂移量为 ± 1.0 pm, 则 u_1 为 0.65×10^{-6} 。UL 标准中心波长分别为 794.800 8, 1 064.522 5, 1 550.196 3,

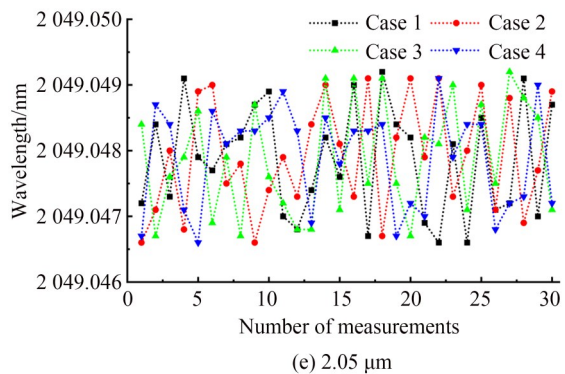
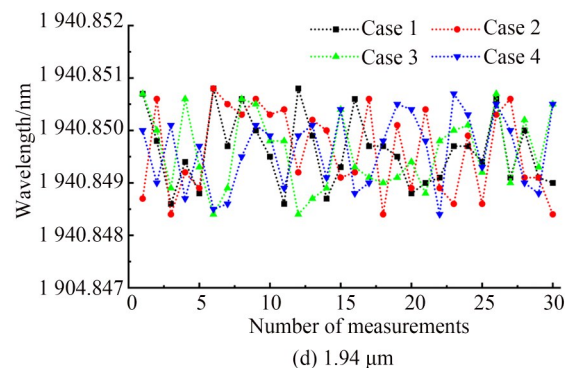
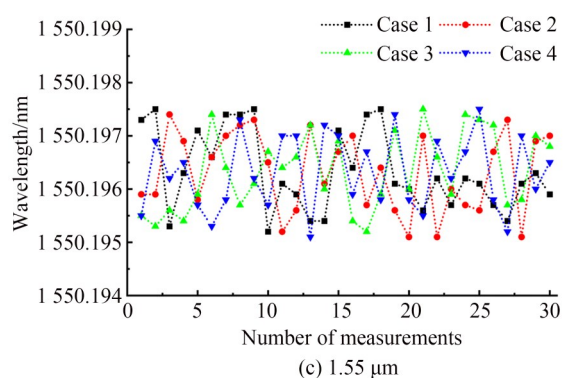
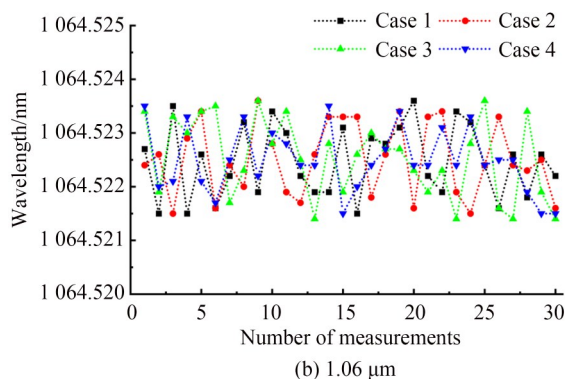
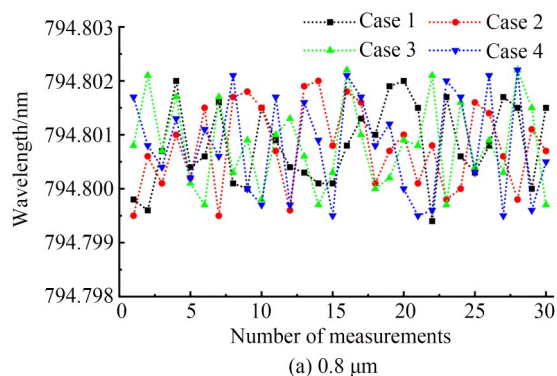


图 6 单频激光器波长测量结果

Fig. 6 Wavelength measurement results of single-frequency lasers

表 1 不同单频激光器的波长测量结果

Tab. 1 Wavelength measurement results of different single-frequency lasers (nm)

激光器波长/ μm	参数组	最大值	最小值	波动范围	均 值
0.8	Case 1	794.802 0	794.799 4	$\pm 0.001\ 4$	794.800 8
	Case 2	794.802 0	794.799 5	$\pm 0.001\ 3$	794.800 8
	Case 3	794.802 2	794.799 7	$\pm 0.001\ 4$	794.800 8
	Case 4	794.802 2	794.799 5	$\pm 0.001\ 4$	794.800 8
1.06	Case 1	1 064.523 6	1 064.521 5	$\pm 0.001\ 1$	1 064.522 5
	Case 2	1 064.523 6	1 064.521 5	$\pm 0.001\ 1$	1 064.522 5
	Case 3	1 064.523 6	1 064.521 4	$\pm 0.001\ 1$	1 064.522 5
	Case 4	1 064.523 5	1 064.521 5	$\pm 0.001\ 0$	1 064.522 5
1.55	Case 1	1 550.197 5	1 550.195 2	$\pm 0.001\ 2$	1 550.196 3
	Case 2	1 550.197 4	1 550.195 1	$\pm 0.001\ 2$	1 550.196 3
	Case 3	1 550.197 5	1 550.195 2	$\pm 0.001\ 2$	1 550.196 3
	Case 4	1 550.197 5	1 550.195 1	$\pm 0.001\ 2$	1 550.196 3
1.94	Case 1	1 940.850 8	1 940.848 6	$\pm 0.001\ 2$	1 940.849 6
	Case 2	1 940.850 8	1 940.848 4	$\pm 0.001\ 2$	1 940.849 6
	Case 3	1 940.850 7	1 940.848 4	$\pm 0.001\ 2$	1 940.849 6
	Case 4	1 940.850 7	1 940.848 4	$\pm 0.001\ 2$	1 940.849 6
2.05	Case 1	2 049.049 2	2 049.046 6	$\pm 0.001\ 3$	2 049.047 9
	Case 2	2 049.049 1	2 049.046 6	$\pm 0.001\ 3$	2 049.047 9
	Case 3	2 049.049 2	2 049.046 7	$\pm 0.001\ 3$	2 049.047 9
	Case 4	2 049.049 1	2 049.046 6	$\pm 0.001\ 3$	2 049.047 9

1 940.849 6 和 2 049.047 9 nm,波长漂移量分别为 $\pm 1.1, \pm 0.1, \pm 0.2, \pm 0.2$ 和 $\pm 0.3\ \text{pm}$,则 u_2 分别为 $1.38 \times 10^{-6}, 0.09 \times 10^{-6}, 0.13 \times 10^{-6}, 0.10 \times 10^{-6}$ 和 0.15×10^{-6} 。环境干扰源头以机械振动、楼体振动以及人员走动为主,虽无法直接进行量化分析,但通过观察 SMTS 位移监测信息,发现环境干扰下 SMTS 每移动 1 mm 便会累计约 350 pm 的位移偏差。本文以此对环境干扰进行间接量化分析,则 u_3 为 0.35×10^{-6} 。由式(9)计算所得的 UL 波长相对不确定度分别为 $1.57 \times 10^{-6}, 0.74 \times 10^{-6}, 0.75 \times 10^{-6}, 0.74 \times 10^{-6}$ 和 0.75×10^{-6} ,与前文波长测量系统的实测结果基本一致。

然后测试分辨率。 0.2×10^{-6} 的分辨率在波长 1.55 μm 时实为 0.3 pm。将 1.55 μm 波长可调谐激光器接入波长测量系统后,先在波长为 1 550.200 0 nm 状态下进行测量,再在波长调谐至 1 550.200 3 nm 状态下进行测量。两次测量仍然以 4 组参数进行,每组均连续测量 30 次,结果如图 7 所示。表 2 记录了激光器调谐前后测量

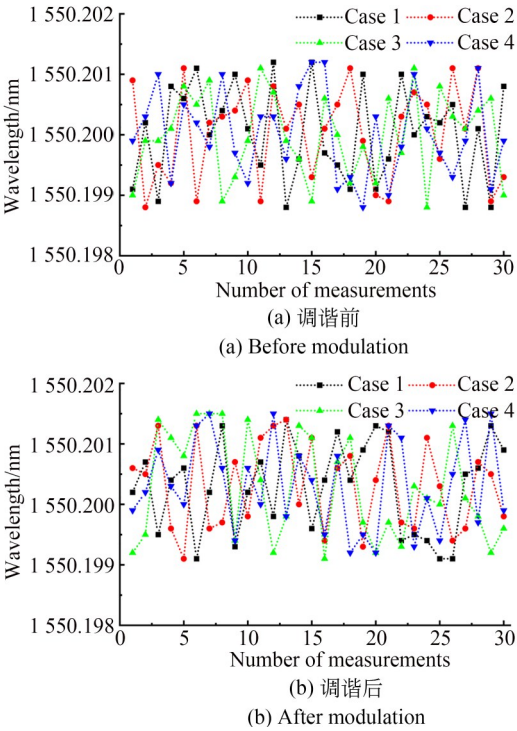


图 7 1.55 μm 波长可调谐单频光纤激光器的波长测量结果

Fig. 7 Wavelength measurement results of 1.55 μm wavelength tunable single-frequency fiber laser

结果的均值及两者差值。由图 7 和表 2 可知, 4 组不同参数下激光器调谐前后的均值差均为 0.3 pm, 这与激光器自身的波长调谐量一致, 且与系统分辨率 0.3 pm 一致。实验结果表明, 系统的波长测量分辨率为 0.2×10^{-6} , 采样数等效分辨率法是有效的。

表 2 1.55 μm 波长可调谐单频光纤激光器波长测量结果

Tab. 2 Wavelength measurement results of 1.55 μm wavelength tunable single-frequency fiber laser (nm)

参数组	调谐前均值	调谐后均值	均值差
Case 1	1 550.200 0	1 550.200 3	$\pm 0.000\ 3$
Case 2	1 550.200 0	1 550.200 3	$\pm 0.000\ 3$
Case 3	1 550.200 0	1 550.200 3	$\pm 0.000\ 3$
Case 4	1 550.200 0	1 550.200 3	$\pm 0.000\ 3$

此外, 系统在单次处理 UL 与 RL 共 10 M 采样数据时耗时 1 s, 而系统默认的采样时间为 0.5 s, 因此系统单次测量总耗时为 1.5 s。

相较于文献[13-16]报道的性能参数, 通过测量 0.8, 1.06, 1.55, 1.94 和 2.05 μm 5 种激光器, 可知本文所提出的波长测量技术具备 0.8~2.4 μm 的超宽光谱适用范围, 得益于 50 mm 短

行程 SMTS 的小型化系统体积以及单次耗时 1.5 s 的快速测量能力。5 种激光器的实测波长精度依次为 ± 1.4 , ± 1.1 , ± 1.2 , ± 1.2 和 ± 1.3 pm, 波长测量分辨率达到 0.2×10^{-6} , 充分证明该技术具有较高的测量精度。

5 结 论

本文提出一种基于迈克尔逊干涉仪的近红外超宽带小型化高精度波长快速测量技术。该技术采用近红外超宽带光学组件, 短行程高精度伺服电机平移台, 双折叠光路结构, 高速采集卡及用于处理分析信号的 LabVIEW 上位机程序。同时, 提出“采样数等效分辨率法”, 发现波长分辨率仅与信号采样数有直接对应关系, 其余参数以采样数为基准自由调整。最后, 采用 0.8, 1.06, 1.55, 1.94 和 2.05 μm 5 种典型波段的单频激光器进行实验验证, 并与商用高精度波长计的测量结果进行比较。实验结果表明, 所提出的技术能够实现对这 5 种光源的波长精确测量, 单次测量耗时 1.5 s, 测量精度分别为 ± 1.4 , ± 1.1 , ± 1.2 , ± 1.2 和 ± 1.3 pm, 波长分辨率符合理论值 0.2×10^{-6} , 验证了采样数等效分辨率法的有效性。该小型化技术能够实现 0.8~2.4 μm 全波段近红外光源的高精度快速测量。

参考文献:

- [1] JACKSON S D, SABELLA A, LANCASTER D G. Application and development of high-power and highly efficient silica-based fiber lasers operating at 2 μm [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 567-572.
- [2] BELAL M, PETROVICH M, WHEELER N, *et al.* First demonstration of a 2- μm OTDR and its use in photonic bandgap CO₂ sensing fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(9): 889-892.
- [3] LI Y K, LI M M, DUAN R D, *et al.* Transmission performance of a 1.96 μm active mode-locked laser in smoke channel [J]. *Applied Optics*, 2022, 61(8): 1912-1917.
- [4] YE N, GLEESON M R, SADIQ M U, *et al.* InP-based active and passive components for communication systems at 2 μm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(5): 971-975.
- [5] BREMER K, PAL A, YAO S, *et al.* Sensitive detection of CO₂ implementing tunable thulium-doped all-fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17): 3957-3963.
- [6] KOCH G J. Field testing of a high-energy 2- μm Doppler lidar [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4(1): 043512.
- [7] 韩文国, 延凤平, 冯亭, 等. 高功率掺铥光纤激光器及其在生物组织切割中的应用 [J]. *发光学报*, 2021, 42(5): 708-716.
- [8] HAN W G, YAN F P, FENG T, *et al.* High-power thulium-doped fiber laser and its application in biological tissue cutting [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(5): 708-716. (in Chinese)
- [8] 刘敏秋, 欧阳德钦, 李春波, 等. 两微米激光无吸收剂焊接透明 PET/纯白 PP 实验研究 [J]. *应用激*

- 光, 2018, 38(4): 610-617.
- LIU M Q, OUYANG D Q, LI CH B, *et al.* Experimental research on 2 μm laser non-absorbent welding of transparent PET/white PP[J]. *Applied Laser*, 2018, 38(4): 610-617. (in Chinese)
- [9] 李光波, 延凤平, 秦齐, 等. 基于 3×3 干涉仪和相位信号解调的信号采样对激光噪声的影响[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(7): 982-991.
- LI G B, YAN F P, QIN Q, *et al.* Effect of signal sampling on laser noise based on 3×3 interferometer and phase signal demodulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(7): 982-991. (in Chinese)
- [10] 陈本永, 杨万福, 严利平. 激光频率(波长)测量技术研究现状及发展[J]. *激光杂志*, 2009, 30(2): 1-3.
- CHEN B Y, YANG W F, YAN L P. Review on laser frequency(wavelength) measurement[J]. *Laser Journal*, 2009, 30(2): 1-3. (in Chinese)
- [11] 聂建华, 刘加庆, 孟鑫, 等. 光谱分析仪器分类及研究现状[J]. *红外*, 2019, 40(6): 44-48.
- NIE J H, LIU J Q, MENG X, *et al.* Classification and research status of optical spectrometer[J]. *Infrared*, 2019, 40(6): 44-48. (in Chinese)
- [12] KÖNIG K, IMGRAM P, KRÄMER J, *et al.* On the performance of wavelength meters: part 2-frequency-comb based characterization for more accurate absolute wavelength determinations[J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(5): 86.
- [13] ALIPIEVA E A, STOYKOVA E V, NIKOLOVA V. Wavemeter with Fizeau interferometer for cw lasers[C]. *11th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications. Varna, Bulgaria*. SPIE, 2001: 129-133.
- [14] LI Y, CHEN B, HU S, *et al.* Instant laser wavelength measurement based on dual Fabry-Pérot etalons[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2039-2042.
- [15] 严利平, 刘朋朋, 谢建东, 等. 基于单频正交线偏振光的激光波长直接测量方法[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 42(5): 699-704.
- YAN L P, LIU P P, XIE J D, *et al.* Laser wavelength direct measurement method based on the single frequency orthogonal polarized lights[J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 42(5): 699-704. (in Chinese)
- [16] NICHOLAS PORTER J, JACKSON J S, DURFEE D S, *et al.* Laser wavelength metrology with low-finesse etalons and Bayer filters[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37788-37797.
- [17] ISHIKAWA J, ITO N, TANAKA K. Accurate wavelength meter for cw lasers[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(5): 639.
- [18] LI J Y, LU D F, QI Z M. A modified equation for the spectral resolution of Fourier transform spectrometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(1): 19-24.

作者简介:



于晨昊(1995—),男,河南洛阳人,博士研究生,2020年于北京交通大学获得硕士学位,主要从事光纤激光器、光学精密仪器方面的研究。E-mail: 20111014@bjtu.edu.cn

通讯作者:



冯 亭(1986—),男,河北张家口人,博士,教授,2014年于北京交通大学获得博士学位,主要从事光纤激光、光纤传感器及其应用等方面的研究。E-mail: fengting@neuq.edu.cn

通讯作者:



延凤平(1966—),男,山西兴县人,教授,博士生导师,1992年于合肥工业大学获得硕士学位,1996年于北京交通大学获得博士学位,主要从事光纤通信、光纤传感及光纤激光技术等方面的研究。E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn