

# 基于主成分分析法的高性能波长计研究与实现

孟凡, 柳扬\*, 王欢, 闫起材

石家庄铁道大学信息科学与技术学院, 河北 石家庄 050043

**摘要** 波长探测作为科学技术中的一个基本工具, 在分析化学、生物传感和光学通信等众多领域具有重要作用。从多模光纤信号传输理论出发, 在绝热、准直模型中建立基于模式干涉效应的强度干涉图像理论; 实验测量时, 在光纤尾端引入缓变(斜率约为 0.01)锥形区域设计, 保证收集到侧面辐射信号的同时, 也近似满足理论模型和数值仿真结果。在搭建的显微共焦成像系统中, 连续扫描窄带激光器进行干涉图像存储, 经过区域选取、向量拼接以及奇异值分解等步骤得到由器件特性决定的校样矩阵。波长的探测过程共分为两个步骤: 在工作带宽内纳米量级粗略扫描波长得到粗略校准矩阵, 一维待测信号强度图像与之进行内积相关性运算后, 选取数值最高的波长值作为预估波长单元; 在此基础上精细扫描得到精细校样矩阵, 选取三个最大主成分并定义与波长欧氏距离最小值确定最终探测波长。采用内积相关性运算联合主成分分析法不仅可以提高波长探测分辨率到 20  $\mu\text{m}$ 、准确率达到 96.7%, 探测效率较其他光谱重建算法提高 50 倍。实验证实该波长计工作范围至少为 400~700 nm, 器件尺寸仅为  $\pi \times (20 \mu\text{m})^2 \times 0.5 \text{ mm}$ 。该器件在高性能、便携式和低成本方面较同类器件有较大提升, 在光谱重建效率也集成了高效算法, 能够广泛应用于光纤传输系统的波长实时探测。

**关键词** 波长探测; 波长计; 主成分分析; 光谱重建

**中图分类号:** O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)11-3625-07

## 引言

近年来, 波长探测作为科学技术中的一个基本工具, 已被广泛应用于分析化学<sup>[1-2]</sup>、生物传感<sup>[3-4]</sup>、材料分析<sup>[5]</sup>以及光学通信<sup>[6-8]</sup>等众多领域, 光谱分辨率、工作带宽和器件尺寸是衡量探测性能的三个重要指标。传统的波长计是通过色散组件分离到对应探测器位置<sup>[9-10]</sup>或不同谐振腔选择对应谐振分量<sup>[11-13]</sup>来进行波长标定, 直接从空间通道即可得到对应的频谱分量。随着光学器件的高性能和集成化发展, 基于模式干涉效应的高性能光谱计浮出水面<sup>[14-18]</sup>。该模式干涉来源于同一波长的多个传输模式间耦合效应, 总强度图案是每个模式电磁场分布的矢量叠加和, 传播常数差会随着传输距离增加逐渐积累, 并产生以  $2\pi$  为周期的强弱分布。通过采用探测器收集波长依赖的干涉图案, 得到每个波长唯一对应的指纹特征, 最后将待测信号图案进行光谱重建实现光谱探测。这种机制通过引入更多模式(增加基模与高阶模传播常

数差)来解决积累可探测相位差的问题, 在提升探测性能的同时可以极大缩小器件的物理尺寸。Redding 等<sup>[16]</sup>使用无序光子晶体中依赖于波长的散射干涉图案, 在半径为 25  $\mu\text{m}$  尺寸实现了 0.75 nm 的分辨率和 25 nm 的工作带宽, 探测指标不够理想。Paudel 等<sup>[18]</sup>提出了基于片上集成马赫-曾德干涉仪的傅里叶变换光谱计, 在达到 140 MHz 光谱分辨率和 12 nm 工作带宽的同时, 需要繁琐的制备工艺。因此, 在微纳器件中同时实现分辨率、工作带宽和探测效率优异的波长探测始终是人们追求的目标。

本文设计并实现了基于锥形多模光纤的波长计, 拉制多模光纤形成的锥形区域与共焦显微系统和可见光相机相集成, 后者可收集得到强烈依赖波长变化的模式干涉图案。在光信号波长精细扫描得到的包含丰富细节图像中, 内积相关性运算联合主成分分析法可以高效处理频谱通道和空间通道构成的庞大数据量。在 400~700 nm 的工作带宽内, 计算粗略校准矩阵的内积相关性可以初步实现精度为 1 nm 的波长探测; 在此基础上, 采用主成分分析法可将分辨率提高到 20

收稿日期: 2020-09-25, 修订日期: 2021-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(12004265), 河北省教育厅青年拔尖人才项目(BJ2021038), 河北省自然科学基金项目(E2020210055, A2020210001)资助

作者简介: 孟凡, 1987年生, 石家庄铁道大学信息科学与技术学院工程师 e-mail: mengfan3426@126.com

\* 通讯作者 e-mail: yangliu\_1020@163.com

pm, 波长探测准确率达到 96.7%。该算法不仅具有较高的波长探测精度, 运算效率也比传统重建算法提升近 50 倍。该器件尺寸为  $\pi \times (20 \mu\text{m})^2 \times 0.5 \text{ mm}$ , 具有高性能、便携式和低成本等优势, 为基于光纤传输系统的波长实时探测提供了可能途径。

## 1 基于主成分分析法的波长探测模型

### 1.1 理论模型

波长为  $\lambda$  的单色光入射进直径为  $D$ 、数值孔径为  $NA$  的多模光纤后, 将激发出具有不同传播常数  $\beta_{m,n}$  的一系列模式<sup>[15-17]</sup>, 各模式电磁场分量满足麦克斯韦方程组, 利用边界条件求解得到模式数目和传播常数分别为

$$M = \frac{16D^2 NA^2}{\pi^2 \lambda^2} \quad (1)$$

$$\beta_{m,n} = n_1 k_0 \sqrt{1 - 2(m+2n)^2 \frac{\Delta}{M}} \quad (2)$$

其中,  $k_0$  为自由空间波数,  $\Delta = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1}$  为相对折射率,  $n_1$  和  $n_2$  分别为纤芯和包层折射率。在传播过程中光信号各个模式间发生干涉效应, 不同位置处的光强度为所有模式电场

矢量和的模长平方, 即

$$I(\lambda, x, y) = |E(\lambda, x, y)|^2 = \left| \sum_{m,n} A_{m,n}(x, y) \cos(-\beta_{m,n}z + \phi_{m,n}(x, y)) \right|^2 \quad (3)$$

这里  $A_{m,n}(x, y)$  和  $\phi_{m,n}(x, y)$  分别为  $(x, y)$  处相应  $(m, n)$  模式的初始振幅和相位, 由实验装置耦合及偏振条件决定。由于全反射条件的破坏, 光纤锥形区域辐射的模式干涉图案与波长值强烈相关, 为基于主成分分析算法的波长探测提供了理论基础。

波长的探测过程共分为两个步骤, 如图 1(a) 所示原理图: 在工作带宽内粗略扫描 (步长为纳米量级) 单色光波长 ( $\lambda_{c1}, \lambda_{c2}, \dots, \lambda_{cm}$ ) 得到一系列二维光强分布图像, 每张图像进行区域截取和向量拼接成为一维行向量, 再按照波长顺序排列成二维矩阵得到粗略校准矩阵。待测信号产生的强度图像经过降维处理后与之进行内积相关性运算, 选取数值最高的波长值作为预估波长单元  $\lambda_{ci}$ , 大致定位到待测信号波长范围。在每个预估波长单元中, 采用可调谐窄带激光器扫描 (步长为皮米量级) 波长得到精细校准矩阵, 如图 1(b) 所示, 精细波长  $\lambda_{fj}$  与空间位置构成了庞大的数据集, 蕴含着频谱信息到空间位置的复杂映射关系。

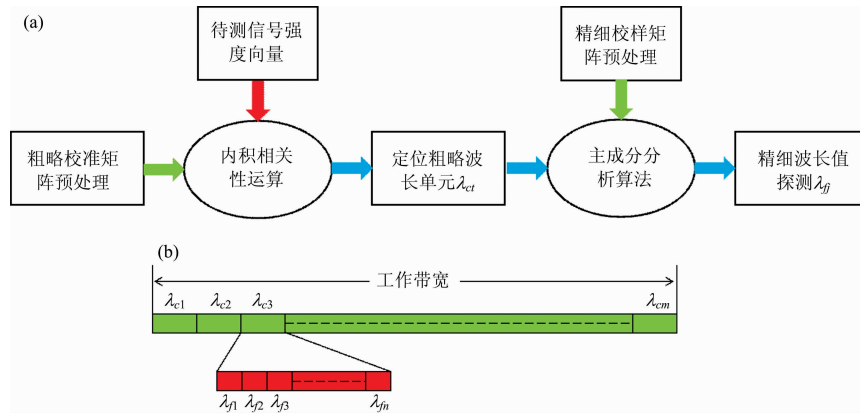


图 1 (a) 两步法探测波长原理图, 待测信号通过内积相关性运算定位到粗略波长单元, 再经过主成分分析算法进一步确定精细波长; (b) 波长探测示意图: 工作带宽分为  $m$  个粗略波长单元, 每个粗略波长单元进一步分为  $n$  个精细波长值

Fig. 1 (a) Schematic diagram of two-step wavelength detection: the signal to be measured is located to the rough wavelength unit through the inner product correlation operation, and the fine wavelength value is further determined by the principal component analysis algorithm; (b) Further illustration: the working bandwidth is divided into  $m$  coarse wavelength units, and each unit is sub-divided into  $n$  fine wavelengths

在粗略波长单元中, 将每个波长  $\lambda_{fj}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 的二维强度分布按相同方式逐行拼接为一维特征向量  $\Delta_j = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ , 以波长序号排列得到维度为  $n \times N$  的精细校准矩阵  $C$ , 进一步求解协方差矩阵  $C' = C^T C / (N-1)$ , 表征了波长变化引起不同位置强度变化的统计特性。此时, 求解  $C'$  特征向量得到主成分空间的一组完备正交基, 即  $P = P_1, P_2, \dots, P_N$ ;  $P_i \in R^N$ ; 与之对应的本征值与具体波长值相关, 它决定了后面主成分的排序。任意探测波长  $\lambda_{fj}$  形成的光强图像可以表示如式(4)

$$\Delta_j = c_{1j} P_1 + c_{2j} P_2 + \dots + c_{Nj} P_N \quad (4)$$

考虑到主成分基向量的归一性, 系数为特征向量在相应基向

量上的投影

$$C_{ij} = P_i \Delta_j \quad (5)$$

对于探测信号来说, 只有少数主成分占据主导地位, 且选取数量与探测效率相互制约。在这里, 选取三个最大主成分并定义与波长  $\lambda_{fj}$  的欧式距离

$$d = \sqrt{|c_1|^2 + |c_2|^2 + |c_3|^2} \quad (6)$$

选取与最短距离对应的波长值为探测波长。

### 1.2 实验系统

基于锥形多模光纤的波长探测系统如图 2(a) 所示, 各种类型激光光源 (包括超连续谱光源 NKT SuperK Extreme + 单色器 Acton SP2500、 $< 10 \text{ MHz}$  窄带可调谐激光器等) 通

过特定光纤组合(固定偏振状态和提高信噪比)将单一模式、偏振态固定的光信号传输到已封装的锥形多模光纤中,确保初始振幅和相位不变。该信号在多模光纤中发生模式色散和干涉效应,而锥形区域的引入破坏了全反射条件并将干涉图案沿径向辐射。可见光 CCD 相机(Photometrics CoolSNAP K4, 像素数:  $2\,048 \times 2\,048$ , 像素尺寸:  $7.4\ \mu\text{m} \times 7.4\ \mu\text{m}$ )前置放大倍数为  $17\times$ 、数值孔径为 0.4 的显微物镜,在充分利用探测区域的同时捕捉尽可能多的图像细节。笔记本电脑同

时控制激光光源和可见光相机,在不同波长处收集相应干涉强度图像进行存储。三维压电扫描台上的锥形多模光纤通过氢气焰流拉制多模裸光纤(型号: AFS105/125y)制备,锥形区域总长度为 3 mm。如图 2(b)所示为输入不同波长的单色光信号(450 nm 蓝光和 635 nm 红光)在不同锥形区域(光纤直径: 20, 50, 60 和  $90\ \mu\text{m}$ )形成的干涉图像,具有很强的波长和尺寸依赖性。

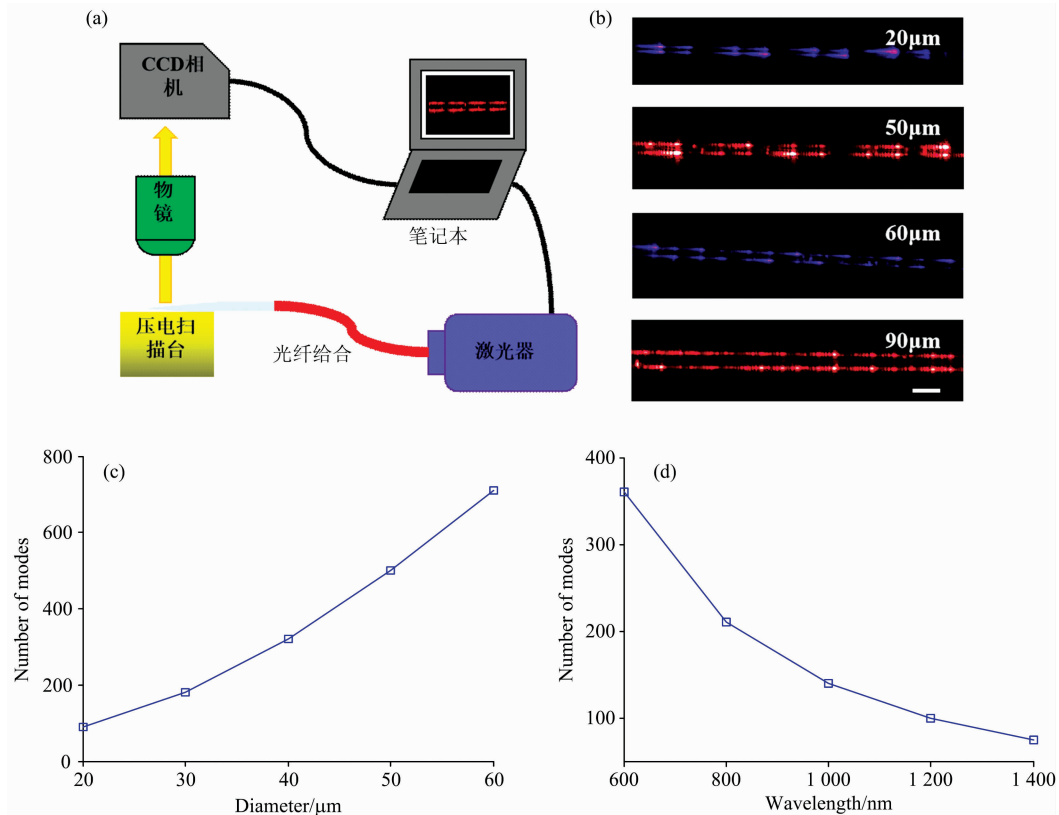


图 2 (a) 基于锥形多模光纤波长探测的实验装置图; (b) 不同区域和入射波长的锥形光纤辐射图像, 标尺:  $100\ \mu\text{m}$ ; 传输模式数关于 (c) 光纤直径和 (d) 入射波长的变化曲线

Fig. 2 (a) Experimental diagram of wavelength detection based on tapered multimode fiber; (b) Radiation images of tapered fiber in different regions and incident wavelengths, scale bar:  $100\ \mu\text{m}$ ; Plots of transmission mode number with respect to (c) fiber diameters and (d) incident wavelengths

为了进一步分析解释强度干涉图像的内在机制,如图 2(c)和(d)所示为传输模式数关于光纤直径和输入波长的变化曲线。结合式(1)可知,较大直径波导和较短入射波长均会引入更多模式,可以增加高阶模与基模的传播常数差,在相同器件长度下,积累到更大相位差  $\Delta\Phi = \Delta\beta L$  (其中  $\Delta\beta$  为传播常数差,  $L$  为传输距离)。而器件的光谱分辨性能直接由可探测相位差决定,因此传输模式数直接影响了光强干涉图像的细节程度,也反映了锥形光纤对波长变化的灵敏度。在该波长范围内,多模光纤对于不同波长值支持模式数不同,会产生依赖波长值的模式干涉图案。在器件参数优化方面,直径较大的锥形区域在短波长范围具有更好的效果,这里我们主要选取直径为  $40\ \mu\text{m}$ 、波长为  $635\ \text{nm}$  的参数组合,大约有 350 个模式被激发并相互干涉。

## 2 性能指标测量与分析

如图 3 所示,当输入波长为  $635\ \text{nm}$  时,在不同锥形区域(光纤直径分别为  $40, 50$  和  $60\ \mu\text{m}$ )沿光纤轴线提取强度干涉图像,明显观察到类似周期性分布。与高品质因数的谐振腔不同,该结构可对其工作带宽内的波长分量进行相位差积累,并形成细节丰富的频谱特征,包括传导谐振产生的尖锐峰值、法布里-珀罗谐振产生的宽谱背景变化和法诺干涉产生的不规则形状等。这种频谱特征与尺寸参数和信号波长密切相关,可以视为单色光波长信号的独特空间编码。随着直径的增大,一方面参与干涉的模式数急剧增多(增长率约  $20\ \text{个} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ),另一方面反射路径变长,两者都会导致空间周

期变短。这里通过拍长  $\Delta z = 2\pi/\Delta\beta$  进行描述: 由于  $\Delta\beta/\beta$  远小于 1, 可以用准直波导和线性增长的传播常数进行模型近似, 得到  $\Delta z$  为  $43 \mu\text{m}$ 。在实验中, 根据显微物镜放大倍数和相机像素尺寸进行计算, 拍长为  $41 \mu\text{m}$ , 与估计值基本一致。

虽然拍长在微调信号波长值时变化不明显, 但局部强度分布仍然有所改变(闪烁现象), 说明充分利用图像细节可以得到更高分辨率, 势必引入更多空间信息带来计算冗余度。

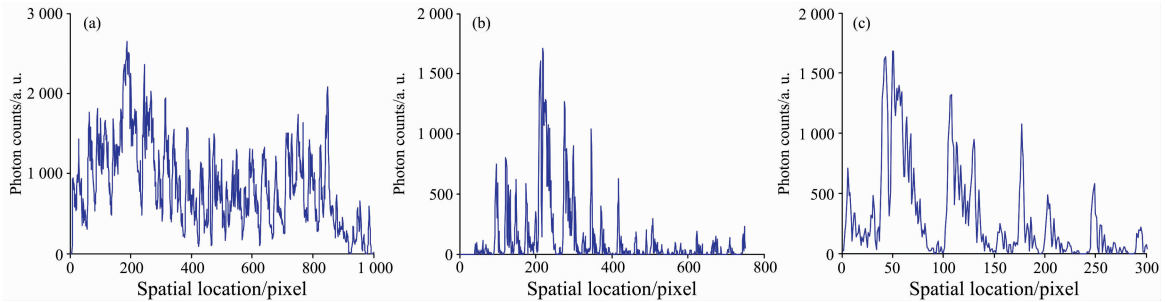


图 3 不同锥形区域即光纤直径(a)  $40 \mu\text{m}$ , (b)  $50 \mu\text{m}$  和 (c)  $60 \mu\text{m}$  下, 沿轴线提取的强度分布图

Fig. 3 The intensity distribution patterns are extracted along the axis of the fiber with different taper diameters

(a)  $40 \mu\text{m}$ , (b)  $50 \mu\text{m}$  and (c)  $60 \mu\text{m}$

由于模式干涉图案具有强烈波长依赖性, 与整个工作带宽对应的校准矩阵可以表征该器件的内在特性。内积相关性反映某个波长与其他波长产生的强度图像间相似程度: 归一化后值为 0 说明两张图像完全不相同; 值为 1 说明图像完全相同; 而值在  $0 \sim 1$  之间说明有一定相似性。这从另一个角度衡量了器件的波长探测能力。采用超连续谱光源+单色器组合的激光光源(带宽  $1 \text{ nm}$ ) 获取粗略校准矩阵, 进行内积运算后可以粗略实现纳米级别的光谱分辨率。这里, 对不同结构参数组合的锥形光纤进行测量计算: 如图 4(a) 所示, 光纤直径越大, 激发出的干涉模式越多, 对波长分辨能力就更强

(对应半高全宽越小); 如图 4(b) 所示, 探测长度越长, 会包含进更多的空间通道作为采样点, 波长分辨能力也越强, 从实验上印证了理论模型的准确性。在特定参数器件中, 扫描信号波长形成的模式干涉图像“闪烁”现象说明空间与波长通道一一映射, 内积曲线应当具有较高信噪比。如果选用窄带信号光源、克服工艺不完美性和提升可见光相机性能(如降低像素尺寸、提高量子效率等), 通过内积运算即可达到最优分辨率。综合考虑波长计各项性能指标, 选择测量直径为  $40 \mu\text{m}$  和长度为  $500 \mu\text{m}$  的光纤区域。

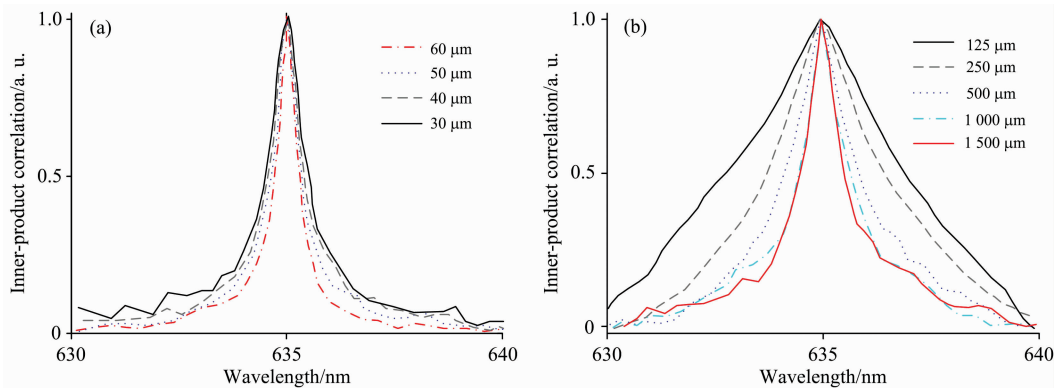


图 4 测试波长选用  $635 \text{ nm}$  时, 内积曲线与锥形光纤(a) 直径和 (b) 长度的关系

Fig. 4 The relationship between the inner product and (a) diameter and (b) length of the tapered fiber at the wavelength of  $635 \text{ nm}$

采用窄带可调谐激光器  $634.80 \sim 639.40 \text{ nm}$  进行步长为  $10 \text{ pm}$  的波长扫描获得精细校准矩阵。随机选取其中两个波长并在不同功率下收集强度图像, 经过主成分分析算法可以准确探测出分立的单色光信号, 如图 5(a) 所示, 探测结果与校准波长基本吻合。光谱分辨率是衡量光谱器件辨识邻近波长能力的重要指标, 定义为重建单色光信号的半高全宽(FWHM)。在此基础上, 选取两个相邻波长的强度图像并逐渐增加波长间隔, 图像叠加后与精细采样矩阵进行内积运算

得到如图 5(b), 根据瑞利判据得到分辨率为  $20 \text{ pm}$ , 证明该器件具有皮米量级的分辨能力。将一组待测单色光信号同时输入该器件和商用光谱仪(Princeton Instrument SP2500, 分辨率  $0.26 \text{ nm}$ ) 中, 前者通过两步法(内积相关性运算和主成分分析算法)探测波长后, 与后者测量结果(校准波长)进行比较, 如图 5(c) 所示: 在实验测量过程中, 设置激光器  $632.0 \sim 638.0 \text{ nm}$  范围、以  $0.1 \text{ nm}$  为步长进行波长扫描, 将波长计测量结果作为探测波长并与校准波长进行比较, 两者

吻合并保持理想的线性关系(为了清楚起见, 62 个波长值中只选择奇数序号波长值进行展示)。对于波长结果的认定, 定义差值超过分辨率一半即 10 pm 即为探测误差, 由测量结

果得到波长探测准确率为 96.7%, 如图 5(d)所示, 误差主要源于激光器中心波长漂移和器件工艺缺陷。

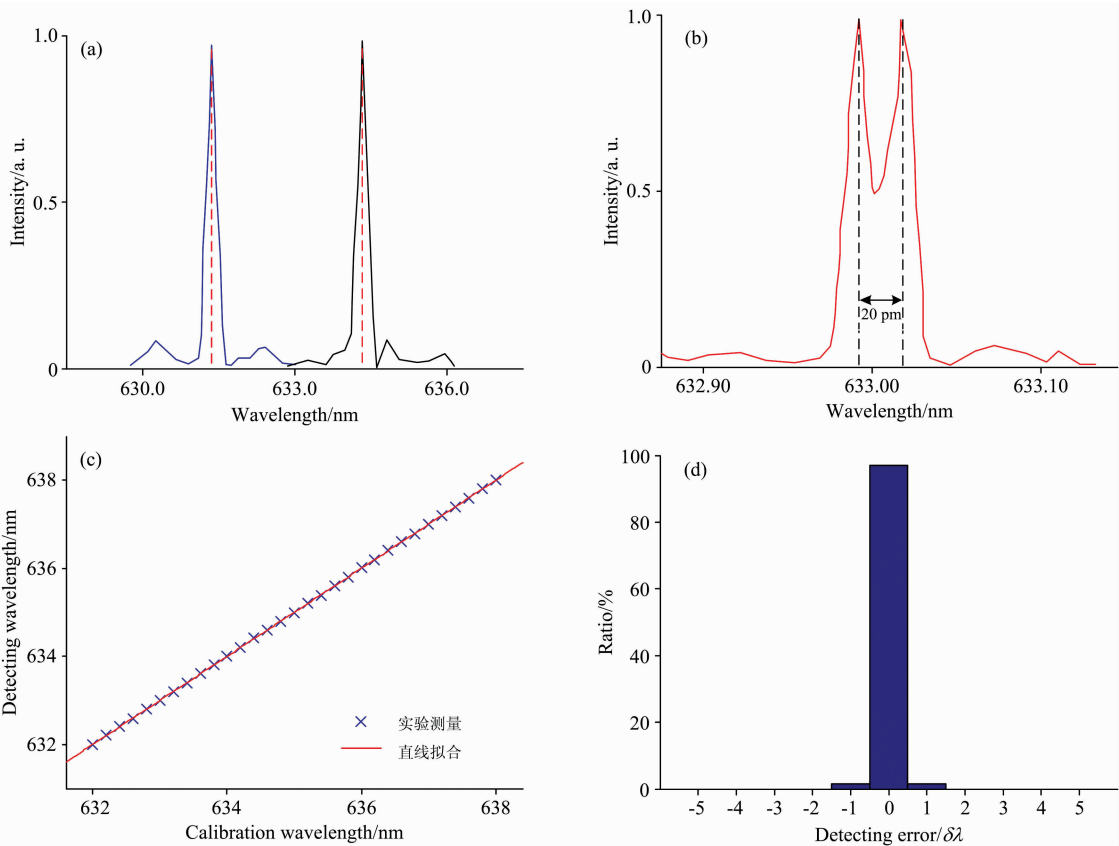


图 5 (a) 两个分立单色光信号的探测; (b) 波长计分辨率为 20 pm; (c) 探测波长与校准波长的关系曲线; (d) 波长探测结果统计分析图

Fig. 5 (a) Detection of two separate monochromatic light signals; (b) spectral resolution of 20 pm; (c) plot of the detected wavelength versus calibrated wavelength; (d) statistical histogram of wavelength detection results

### 3 光谱探测应用探讨

基于锥形多模光纤波长计的工作带宽由多模光纤和 CCD 探测范围共同决定。受限于激光光源种类和参数, 实验中仅选择 630~640 nm 波长范围进行波长探测。考虑到多模光纤传输窗口和硅材料探测曲线, 采用超连续谱光源与单色器组合对该范围进行步长为 1 nm 的粗略扫描, 每个波长值均得到单峰内积相关性曲线, 说明在该范围内模式干涉图案与波长一一映射, 工作带宽达到 400~1 100 nm 范围。得益于内积相关性和主成分分析联合算法, 该锥形光纤波长计不必扫描感兴趣区域以外的精细波长, 减少了近 50 倍数据存储量和重建时间(=1 μm/20 nm), 探测效率(与波长探测时间成反比)较常规重建算法提高近 50 倍<sup>[15-18]</sup>。与宽谱连续信号相比, 分立窄带信号仅有有限频谱通道, 重建时不易遗漏信号分量, 该器件更加适合波长探测的应用。在实际应用中, 器件的机械性能、温度特性和可重复性至关重要。前者可以通过固定封装和反馈控制进行克服, 而后者主要来自

校准光路的漂移和散焦。将 1, 5 和 12 h 后扫描得到的校准矩阵与初始矩阵进行内积运算, 得到如图 6 所示的内积带宽曲线。较长时间后, 光路未经校准的半高全宽增加 0.1 nm (变化率为 13.8%), 而经校准仅增加 0.01 nm(2.5%), 说明可重复性能够通过自动校准系统或将多模光纤与探测器阵列

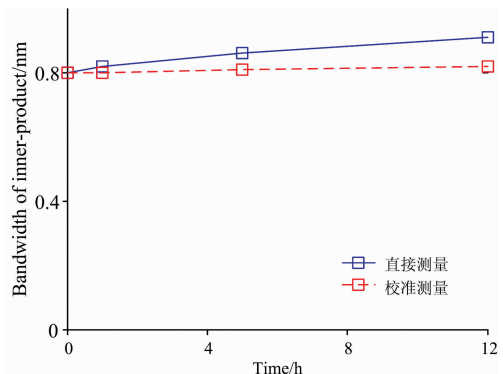


图 6 内积带宽随时间变化规律

Fig. 6 Variation of inner product bandwidth with time

相互集成得到有效改善。

## 4 结 论

在基于锥形多模光纤的波长计中,证实了内积相关性运算可以初步实现粗略波长探测,而进一步采用主成分分析法可以实现 20  $\mu\text{m}$  的精细探测。利用搭建的显微共焦成像系统,在微纳尺度器件中不仅具有较高波长探测精度,运算效率也较传统算法大大提升。

强度分布图像中的噪声主要包括散粒噪声和暗噪声两种成分。对于散粒噪声,假设探测信号在某波长处光子数为

$Np$ , 则在每个频谱通道中光子平均数为  $Np/N$ , 总散射噪声功率为两者乘积平方根,这与光栅光谱仪的散射功率相同;而对于暗噪声,需要在所有空间通道进行积累,对光谱重建作用与信号强弱、探测深度等因素密切相关。将基于锥形多模光纤波长计的性能向极限推进,可行的途径有两个:通过模式干涉图案去相关、降低实验噪声和误差后处理等手段进一步优化探测算法;改善可见光相机性能,如降低像素尺寸和探测噪声、提高量子探测效率等,这将是下一步研究方向。由于锥形多模光纤侧面泄露的信号能量仅占总入射能量的 20%~30%,在基于光纤连接和传输的通信系统中,可通过剥皮、拉锥和成像三个步骤进行波长实时探测。

## References

- [ 1 ] WU Zhen-gang, LIU Yan-mei, WU Ming-ming, et al(吴振刚, 刘燕梅, 吴明明, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2020, 40(2): 420.
- [ 2 ] ZHOU Yu, CAO Yuan, ZHU Gong-dong, et al(周 或, 曹 渊, 朱公栋, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2018, 67(8): 084201.
- [ 3 ] Zhou D P, Peng W, Chen L, et al. Optics Express, 2019, 27(12): 17069.
- [ 4 ] Qu R X, Luo Y, Chai Q, et al. Optical Engineering, 2019, 58(7): 072005.
- [ 5 ] MENG Fan, HU Jin-hua, WANG Hui, et al(孟 凡, 胡劲华, 王 辉, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2019, 68(23): 237801.
- [ 6 ] Semrau D, Killey R, Bayvel P. Optics Express, 2017, 25(12): 13024.
- [ 7 ] LI Han-shuang, LI Bo, WANG Shu-rong(李寒霜, 李 博, 王淑荣). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(1): 0112006.
- [ 8 ] ZHANG Li, ZHENG Hai-yang, WANG Ying-ping, et al(张 莉, 郑海洋, 王颖萍, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2016, 65(5): 054206.
- [ 9 ] Imazono T, Ukita R, Nishihara H, et al. Applied Optics, 2018, 57(27): 7770.
- [10] Gourgues R, Zadeh I E, Elshaari A W, et al. Optics Express, 2019, 27(3): 3710.
- [11] Li X, Wang C, Wang Z, et al. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(10), 2209.
- [12] Serafimovich P G, Kazanskiy N L. Pattern Recognition and Image Analysis, 2015, 25(3): 526.
- [13] Cheng W, Han Z, Du Y, et al. Optics Express, 2019, 27(11): 16071.
- [14] Redding B, Alam M, Seifert M, et al. Optica, 2014, 1(3): 175.
- [15] Bruce G D, O'Donnell L, Chen M, et al. Optics Letters, 2019, 44(6): 1367.
- [16] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Nature Photonics, 2013, 7(9): 746.
- [17] Meng F, Zhao Y, Wang H, et al. Optics Express, 2019, 27(26): 38349.
- [18] Paudel U, Rose T. Optics Express, 2020, 28(11): 16469.

# Research and Implementation of High-Performance Wavemeter Based on Principle Component Analysis

MENG Fan, LIU Yang\* , WANG Huan, YAN Qi-cai

School of Information Science and Technology, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

**Abstract** As an essential tool in science and technology, wavelength detection plays a vital role in analytical chemistry, bio-sensing and optical communication. The traditional spectrometers based on dispersing components or resonant cavities greatly suffer from bulky size, high power consumption and fabrication imperfection. With the rapid development of micro processing, novel types of high-performance and portable spectrometers emerged, and the pursuit of pushing the performance to limit remains unsettled. Based on the signal transmission theory in multimode fiber, the intensity interference patterns are resulting from the mode interference effect were established in adiabatic and collimated model. In the experimental measurement, the tapered region with a slowly varying slope (about 0.01) was introduced near the end of the fiber to ensure that the side radiation signal could be collected. To estimate the number of modes supported in different structures, both the theoretical and numerical simulations are consistent with the experimental tendency. Using the confocal microscope system we made, the interference patterns are stored by continuous scanning a narrow-band laser. The calibration matrix corresponding to the device's unique characteristics is obtained by region selection, vector splicing and singular value decomposition. The following wavelength detection process can be divided into two steps: the rough calibration matrix within the working bandwidth is obtained after the rough scanning of the wavelength in 1nm scale, and the wavelength units with the non-zero value are selected as the target after inner product correlation operation with the degraded one-dimensional signal intensity vector. This initial procedure provides the criterion of optimizing the structural parameters. On this basis, fine scanning is performed to obtain the refine calibration matrix. The three largest principal components are selected and defined as the final detected wavelength based on the minimum Euclidean distance. The inner product correlation operation combined with the principal component analysis can improve the wavelength detection resolution to 20 pm with the accuracy rate of 96.7%. The detection efficiency is fifty times higher than other nonlinear spectral reconstruction algorithms reported. The experimental results show that the working bandwidth is at least from 400 to 700 nm, and the device size is only  $\pi \times (20 \mu\text{m})^2 \times 0.5 \text{ mm}$ . The practical feasibility and photon detection are also investigated, considering its further application. Compared with its counterparts, this device has a significant improvement in high performance, portability and low cost, it also integrates with an efficient algorithm in wavelength detection procedures. Both device and theory could be widely used in real-time wavelength detection of optical fiber transmission systems.

**Keywords** Wavelength detection; Wavemeter; Principle component analysis; Spectral reconstruction

(Received Sep. 25, 2020; accepted Jan. 30, 2021)

\* Corresponding author