

激光与光电子学进展

应用光谱重建理论的傅里叶变换光谱仪

朱书缘^{1*}, 吴朋翰², 鲁贞贞¹, 董景然¹, 冯继宏^{1**}¹北京工业大学环境与生命学部智能化生理测量与临床转化北京市国际科技合作基地, 北京 100124;²北京工业大学樊恭煦荣誉学院, 北京 100124

摘要 本文将重建光谱仪的光谱重建理论应用于傅里叶变换光谱仪中,使光谱仪可以兼具重建光谱仪高光谱分辨率优势以及傅里叶变换光谱仪固有的高光通量优势。利用构建的简易空间外差傅里叶变换光谱仪实验装置在 520~530 nm 光谱范围内进行验证实验。使用实验装置采集的不同单波长入射光光斑图像进行光谱校准实验,证明了傅里叶变换光谱仪可满足光谱重建理论必需的光斑与波长间唯一的一对一映射关系。随后,使用用于光谱校准的光斑图像进行光谱重建实验,实现了 0.10 nm 的光谱分辨率,相比通过傅里叶变换光谱仪原理得到的~5.65 nm 光谱分辨率有明显提高。最后,使用额外采集的波长 525 nm 入射光光斑图像进行光谱重建实验,重建光谱中存在重建误差,且 525 nm 处光谱信号峰的半峰全宽(FWHM)~0.30 nm。光斑图像相关性分析显示,光谱重建受光斑图像采集过程中噪声和相邻波长入射光光斑图像高相似性的影响。尽管如此,重建光谱仍然可以反映入射光的光谱信息,且信号峰的 FWHM 小于傅里叶变换光谱仪原理得到的光谱,验证了将光谱重建理论应用于傅里叶变换光谱仪的可行性和高光谱分辨率优势。

关键词 仪器、测量与计量; 光谱仪和光谱仪器; 傅里叶变换光谱学; 光谱重建理论

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221073

Fourier Transform Spectrometer Using Spectral Reconstruction Theory

Zhu Shuyuan^{1*}, Wu Penghan², Lu Zhenzhen¹, Dong Jingran¹, Feng Jihong^{1**}¹*Intelligent Physiological Measurement and Clinical Translation, Beijing International Base for Scientific and Technological Cooperation, Faculty of Environment and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;*²*Fan Gongxiu Honor College, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract The spectral reconstruction theory of the reconstructive spectrometer is applied to the Fourier transform spectrometer. The method takes advantage of the high spectral resolution of the reconstructive spectrometer and the inherent high incident optical throughput of the Fourier transform spectrometer. Verification experiments were performed in the wavelength range of 520–530 nm with a simple structured experimental setup of a spatial heterodyne Fourier transform spectrometer. We used the collected pattern images of input beams with different single wavelengths for spectral calibration experiments. The spectrometer can realize unique one-to-one mapping between the patterns and wavelengths required by the spectral reconstruction theory. Spectral reconstruction using the spectral calibration patterns realizes a spectral resolution of 0.10 nm, a considerable improvement from ~5.65 nm obtained using the Fourier transform spectrometer principle. Finally, an additional pattern image of the beam with a 525 nm wavelength was used in the spectral reconstruction experiment. The reconstructed spectrum contains reconstruction errors, and the full width at half maximum (FWHM) of the spectral signal peak is ~0.30 nm. The correlation analysis of the pattern images shows that spectral reconstruction is affected by noise during pattern image collection and the high similarity of the pattern images of the incident beams of adjacent wavelengths. Nevertheless, the reconstructed spectrum reveals the spectral information of the incident light. Moreover, the smaller FWHM spectral signal peak than that obtained by the Fourier transform spectrometer verifies the feasibility and the advantage of high spectral resolution of applying the spectral reconstruction theory to the Fourier transform spectrometer.

Key words instrumentation, measurement, and metrology; spectrometers and spectroscopic instrumentation; Fourier transform spectroscopy; spectral reconstruction theory

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-04-21; 录用日期: 2022-05-23; 网络首发日期: 2022-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(81971683)

通信作者: *zsy14090212@emails.bjut.edu.cn; **jhong@bjut.edu.cn

1 引言

光学光谱仪是科学和工业研究中功能强大且广泛使用的表征工具^[1]。根据不同的光谱测量原理,可分为基于色散光学^[2-4]、可调谐或阵列窄带滤波器^[5-6]、傅里叶变换^[7-9]和光谱重建^[10-11]的光谱仪系统。其中,基于傅里叶变换的光谱仪系统,即傅里叶变换光谱仪,具有两个固有优势,分别为可执行多路测量的 Fellgett 优势和高入射光通量的 Jacquinot 优势。这两个优势也使傅里叶变换光谱仪具有高信噪比的优点^[1,12-15]。同时,在红外光谱范围,傅里叶变换红外光谱已成为红外光谱分析的标准方法^[13]。在傅里叶变换光谱仪中,空间外差傅里叶变换光谱仪,也称固定式傅里叶变换光谱仪,通过并行和瞬时地进行干涉测量,避免了对移动部件的需求,大大降低了时间稳定性要求,同时可允许进行时间分辨光谱测量,并且其本身还具有成本较低、机械结构简单且稳定以及可小型化的优势^[12-14]。然而,由于使用探测器阵列,空间外差傅里叶变换光谱仪信噪比、光谱分辨率和光谱范围相对较低^[12,14]。

近十年内出现的基于光谱重建的光谱仪系统具有高光谱分辨率和结构紧凑的优势^[1,16-19]。其原理利用预校准的光谱信息来对入射光光谱进行重建或近似。根据预校准的光谱信息不同,重建光谱仪分为两种策略,即光谱到空间映射和光谱响应策略。前者的预校准信息为不同波长的入射光在空间域中的不同特征光斑^[17-18],而后者的预校准信息为不同探测器的不同光谱响应^[10-11,16]。对于光谱到空间映射策略,光谱重建理论需要建立在光斑和波长之间唯一的一对一映射关系。目前,该策略的研究多采用如多模波导和光学晶体的波导光学结构以及如磨砂玻璃和随机像素光栅的无序微纳空间结构形成与入射光波长成分相关的散斑^[20-23]。Çetindağ等^[24]提出了一种基于纳米颗粒散斑增强的棱镜光谱仪,其原理为利用在棱镜光谱仪前端光路中插入的散射元件的散斑机制提高光谱分辨率。

重建光谱仪在光谱分辨率和紧凑结构上具有突出优势,突破了传统光谱仪复杂、笨重、高成本等的限制,提供了高精度、低成本和便携式的光谱检测方法。然而到目前为止,还没有任何重建光谱仪系统达到足够的商业成熟度,重建光谱仪仍需要在集成化、智能化和适用性方面的发展来推动光谱技术的应用,提高光谱定标效率和重建精度,以及提高对于多种环境的适用性^[1,19]。本文提出将重建光谱仪技术与目前相对成熟的傅里叶变换光谱仪技术相结合,通过将重建光谱仪的光谱重建理论应用于傅里叶变换光谱仪中,使光谱仪可以兼具重建光谱仪高光谱分辨率的优势和傅里叶变换光谱仪高光通量的优势。利用构建的简易空间外差傅里叶变换光谱仪实验装置进行实验验证。使用实验装置采集的不同波长入射光光斑图像进行光谱校准和重建实验,并与利用傅里叶变换光谱仪原理得到的

光谱进行比较,验证了实验装置应用光谱重建理论的光谱测量能力以及将光谱重建理论应用于傅里叶变换光谱仪的可行性。

2 实验装置与基本原理

2.1 空间外差傅里叶变换光谱仪

本文设计的简易空间外差傅里叶变换光谱仪实验装置采用 Michelson 干涉仪结构,如图 1 所示。入射光经过针孔或直接由点光源发射后,经过准直镜准直后被与入射光方向成 45° 的分光镜分为两束光分别沿干涉仪两个臂传播,每个臂各包含一个反射镜。其中一臂中反射镜 1 平面与入射光方向垂直,而另一臂中反射镜 2 平面法向量与入射光方向成夹角 β ,因此对应的反射光与入射光将成 2β 的夹角。随后两臂反射光返回分光镜发生干涉并成像于探测器上。 θ 为两臂反射光夹角,数值上等于 2β , X 表示在探测器阵列表面建立的二维坐标系坐标轴。因此从干涉仪两臂反射的光在探测器阵列上的光程差可以表示为

$$\delta_{\text{OPD}} = x \sin \theta + \varphi, \quad (1)$$

式中: δ_{OPD} 表示两束光在探测器阵列上的光程差; x 为探测器阵列上点的 X 轴坐标值,在图中探测器阵列最左侧为 0; φ 表示两臂反射光在探测器阵列最左侧的光程差。最后,对探测器采集的干涉光斑图像中对应相同光程差的像素进行叠加得到干涉信号,并对干涉信号进行傅里叶变换计算得到波数空间的入射光光谱。

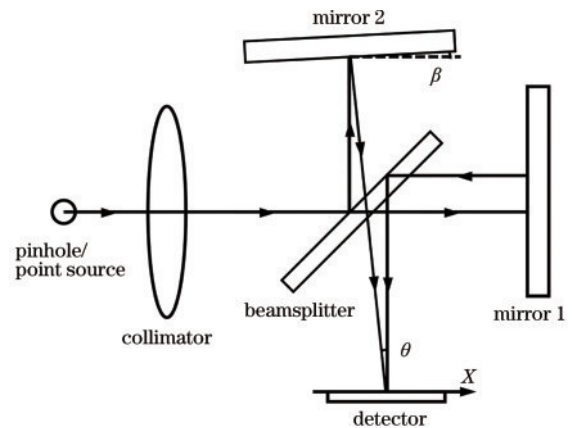


图 1 采用 Michelson 干涉仪结构的空 间外差傅里叶变换光谱仪实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for spatial heterodyne Fourier transform spectrometer using Michelson interferometer structure

实验使用 NKT Photonics 公司的白光超连续激光器 (FIU-15, NKT Photonics, Denmark) 和多通道声光可调谐滤波器 [VIS(4X), NKT Photonics, Denmark] 作为光源输出单波长入射光,后经过光纤传输系统 (FD1 PM, NKT Photonics, Denmark) 入射进入实验装置。其中,多通道声光可调谐滤波器波长的调节步长为 0.1 nm。光纤传输系统输出端由光纤输出端和准

直镜组成,在实验装置中充当针孔或点光源和准直镜结构。由于从光纤传输系统引入的入射光光束直径小于 1 mm,因此实验中在光纤传输系统输出端和分光镜之间引入一 Galileo 扩束镜,扩束倍数为 6 倍,并对入射光进一步准直。实验装置中,反射镜 2 平面法向量与入射光方向夹角 β 为 0.3° ,因此反射光与入射光夹角为 0.6° ,干涉仪两臂反射光夹角 θ 为 0.6° 。光电探测器阵列选用 Lumenera 公司的单色 CCD 相机 (INFINITY2-1M, Lumenera, Canada), 包含 1392×1040 个探测器单元,每个探测器单元为边长 $4.65 \mu\text{m}$ 的正方形。根据 Nyquist 采样定理,采样频率 f_s 应大于信号中最高频率 f_{max} 的 2 倍,描述为

$$f_s \geq 2f_{\text{max}} \quad (2)$$

因此,入射光干涉条纹周期长度应大于 CCD 相机探测器单元边长的 2 倍,即 $9.3 \mu\text{m}$ 。根据式(1)和设计的两臂反射光夹角 0.6° ,计算得到探测器阵列上坐标轴 X 方向变化 $9.3 \mu\text{m}$ 对应两臂反射光在面阵探测器上的光程差变化 $\sim 97.65 \text{ nm}$ 。因此,实验装置可测量的最小波长 $\sim 97.65 \text{ nm}$,即能够进行可见光波段入射光的测量。

2.2 光谱重建原理

在利用光谱到空间映射策略的重建光谱仪光谱重建理论中,利用校准矩阵建立光斑与光谱的对应关系,可以描述为

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

或

$$\mathbf{P} = \mathbf{C}\mathbf{S}, \quad (4)$$

式中: m 维向量 \mathbf{P} 为光斑向量,其中元素 p_i 表示光斑图像感兴趣区域的 m 个像素中像素 i 的灰度值; n 维向量 \mathbf{S} 为光谱向量,其中元素 s_j 表示将感兴趣的光谱范围划分为具有 n 个不同波长的通道中通道 j 的强度值; $m \times n$ 矩阵 \mathbf{C} 为校准矩阵,其中元素 c_{ij} 为校准系数。通过测量不同单波长光束的光斑图像,可以根据式(4)求解校准矩阵。随后,可以根据式(4)使用光斑图像对入射光的重建光谱进行计算。

3 分析与讨论

3.1 傅里叶变换光谱仪光谱测量

实验首先使用白光超连续激光器和声光可调谐滤波器作为光源分别输出单波长为 501 nm 和 600 nm 的入射光对傅里叶变换光谱仪进行实验。图 2(a) 和 2(b) 分别展示了实验装置采集入射光光斑图像。随后选择图像中心的 50×1040 像素区域,并将像素值纵向叠加得到干涉信号,归一化如图 2(c) 所示。从图中波长为 501 nm 和 600 nm 入射光的干涉信号,发现干涉

信号呈周期波动且波长 501 nm 入射光的干涉信号频率高于波长 600 nm 入射光的干涉信号,周期分别为 $\sim 10.6 \text{ pixel}$ 和 $\sim 12.7 \text{ pixel}$ 。分别对两干涉信号进行傅里叶变换计算得到两束入射光的光谱,归一化如图 2(d) 所示。两束入射光的光谱信号峰值分别在频率 ~ 0.079 和 ~ 0.094 位置,计算出实验装置中干涉仪两臂反射光夹角为 $\sim 0.58^\circ$,略小于设计的两臂反射光夹角,因此实验装置可测量的最小波长为 $\sim 94.07 \text{ nm}$ 。根据波长 λ 与波数 k 的关系:

$$k = \frac{1}{\lambda}, \quad (5)$$

计算对应波数为 $\sim 1.063 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$ 。再根据 CCD 相机探测器阵列单元总列数 1040,可以得出光谱分辨率为 $\sim 204.42 \text{ cm}^{-1}$ 。同时,也可以得出图 2(d) 中频率 f 与波数 k 的关系为

$$k = 212600 \times f. \quad (6)$$

根据式(6),在图 2(d) 中标注波数。

3.2 光谱校准与重建

在图 2(a) 和 2(b) 所示的光斑图像中,不仅可以观察到不同空间频率的入射光干涉条纹,还存在由于光学器件引入的散射和衍射光斑。由于空间外差傅里叶变换光谱仪结构固定,理论上对应不同波长入射光的光斑图像也是固定的。因此,本文尝试在实验装置应用重建光谱仪的光谱重建理论,进行光谱校准和重建实验。实验选择 520~530 nm 作为感兴趣光谱范围,并划分为 100 个光谱通道,波长范围为 520.1~530.0 nm,间隔 0.1 nm。使用白光超连续激光器和声光可调谐滤波器分别输出 100 个光谱通道对应的单波长的入射光。根据式(4)中的光谱矢量 \mathbf{S} ,利用入射光光谱成分生成对应的 100 个 100 维光谱矢量。然后采集入射光对应的 100 幅光斑图像,实验选择每幅光斑图像中间一行像素,即第 696 行像素,并对每幅图像选择的像素灰度值进行归一化处理。根据式(4)中光斑向量 \mathbf{P} ,使用每幅图中归一化后的像素灰度值生成 100 个 1040 维光斑向量。随后,利用 100 个光斑向量以及对应的 100 个光谱向量,根据式(4)求解 1040×100 校准矩阵,即完成光谱校准实验。将校准矩阵转置并作热图图像,如图 3 所示。校准矩阵秩数为 100,为列满秩矩阵。实验结果表明,空间外差傅里叶变换光谱仪可以满足光谱重建理论中光斑和波长之间唯一的一对一映射的要求,光谱重建理论可以应用于光栅光谱仪。

利用光谱校准实验得到的校准矩阵,使用用于光谱校准实验的 100 幅光斑图像进行理想条件下的光谱重建实验。根据式(4)中的光斑向量 \mathbf{P} ,利用 100 幅光斑图像中的第 696 行像素值生成 100 个光斑向量。再结合光谱校准实验得到的校准矩阵根据式(4)计算出 100 个单波长入射光的重建光谱,如图 4(a) 所示。在 100 个单波长入射光的重建光谱中,可以识别不同入射光的单波长光谱成分,在理想条件下实现了 0.1 nm

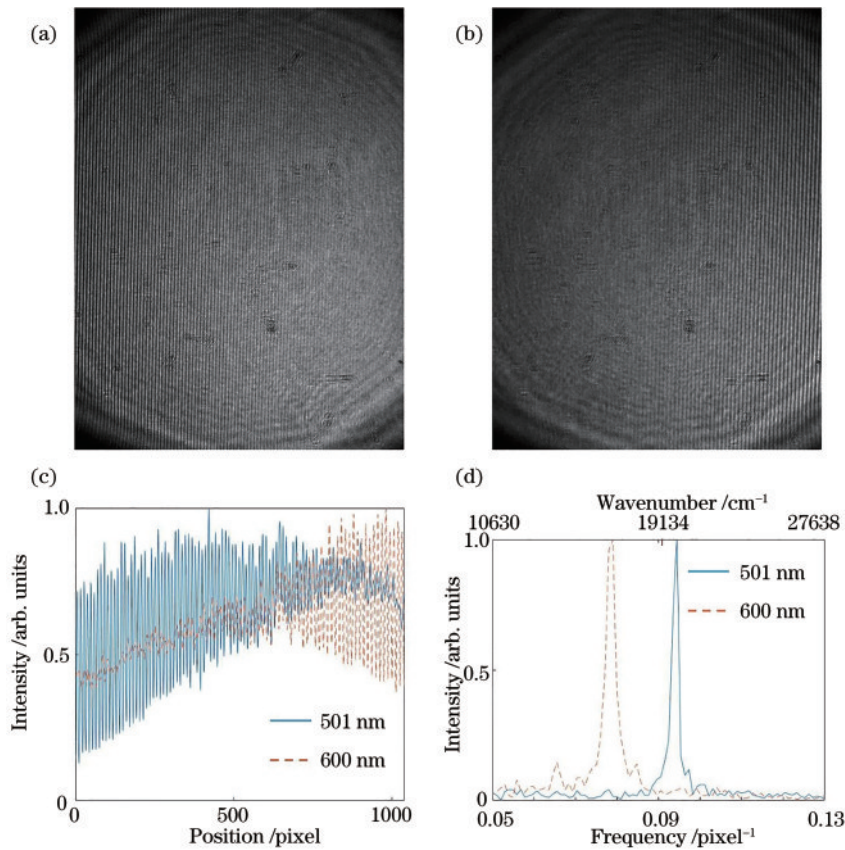


图 2 傅里叶变换光谱仪实验。(a)单波长 501 nm 的入射光光斑图像;(b)单波长 600 nm 的入射光光斑图像;(c)单波长为 501 nm(实线)和 600 nm(双划线)的归一化入射光干涉信号;(d)傅里叶变换方法计算的单波长为 501 nm(实线)和 600 nm(双划线)的归一化入射光光谱

Fig. 2 Fourier transform spectrometer experiment. (a) Pattern image of incident beam with single wavelength of 501 nm; (b) pattern image of incident beam with single wavelength of 600 nm; (c) normalized interference signals of incident beams with single wavelengths of 501 nm (solid line) and 600 nm (dash line); (d) normalized spectra of incident lights with single wavelengths of 501 nm (solid line) and 600 nm (dash line) calculated by Fourier transform method



图 3 校准矩阵转置的热图图像

Fig. 3 Heat map of transpose of calibration matrix

的光谱分辨率。同时,使用相同的 100 幅光斑图像进行傅里叶变换光谱仪原理对比实验。使用 3.1 节中傅里叶变换方法,得到 100 个干涉信号并进行傅里叶变换计算得到入射光的光谱。根据式(5)将得到的入射光光谱从波数空间转换到波长空间,如图 4(b)所示。由于傅里叶变换光谱仪光谱分辨率限制,100 条入射光光谱中显示的单波长光谱成分主要集中在 519.4、525.0、530.7 nm 处,相互重叠无法分辨。结果展示了构建的傅里叶变换光谱仪实验装置在 525.0 nm 的光谱分辨率~5.65 nm,与 3.1 部分中计算的光谱分辨率~204.42 cm⁻¹相符。而基于光谱重建理论的光谱重建实验得到的重建光谱分辨率 0.1 nm 远高于利用傅里叶变换光谱仪原理得到的光谱分辨率~5.65 nm。

使用白光超连续激光器和声光可调谐滤波器输出

波长 525.0 nm 的单波长的入射光并采集光斑图像进行光谱重建测试实验。根据式(4)中的光斑向量 \mathbf{P} ,利用光斑图像中第 696 行像素灰度值生成光斑向量。再利用光斑向量和光谱校准实验得到的校准矩阵根据式(4)计算得到入射光重建光谱,归一化如图 5 中实线所示。同时在图中作出双划线所示的理想条件下波长 525.0 nm 入射光的重建光谱,以及虚线所示的使用 3.1 节中傅里叶变换方法得到的入射光光谱。测试实验的入射光重建光谱单波长峰位于 525.0 nm,半峰全宽(FWHM)~0.3 nm,峰值位置与理想条件下重建光谱一致,两重建光谱信号峰的 FWHM 远低于傅里叶变换方法得到的光谱信号。因此,重建光谱可以有效反映入射光光谱信息,且光谱信号峰的 FWHM 展示了重建光谱分辨率高于傅里叶变换方法得到的光谱。结果证明了将光谱重建理论应用于傅里叶变换光谱仪的可行性和高光谱分辨率优势。

然而,测试实验的入射光重建光谱信号单波长峰的 FWHM 高于理想条件下重建光谱信号单波长峰的 FWHM,且存在重建误差。为探究重建误差,对采集

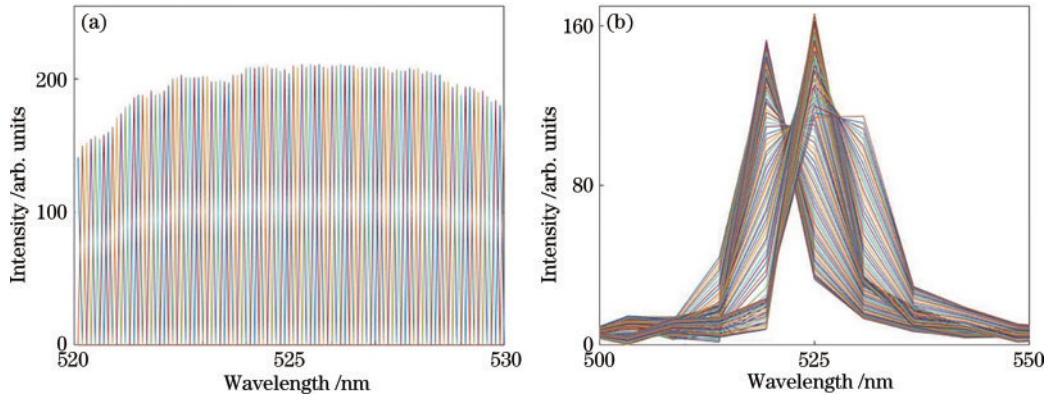


图 4 重建光谱与傅里叶变换方法得到的光谱对比实验。(a)理想情况下 100 个单波长为 520.1~530.0 nm 的入射光重建光谱;(b)傅里叶变换方法计算的 100 个单波长为 520.1~530.0 nm 的入射光光谱

Fig. 4 Comparative experiment between reconstructed spectra and spectra calculated by Fourier transform method. (a) Reconstructed spectra of 100 incident lights with single wavelengths of 520.1~530.0 nm in ideal situation; (b) spectra of 100 incident lights with single wavelengths of 520.1~530.0 nm calculated by Fourier transform method

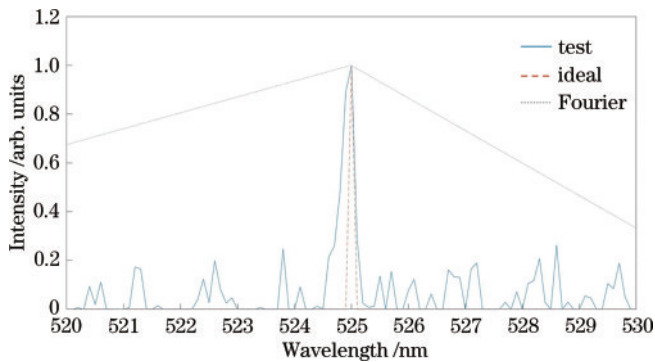


图 5 光谱重建测试实验的归一化单波长 525.0 nm 入射光重建光谱信号(实线)、理想条件下的归一化重建光谱信号(双划线)以及傅里叶变换方法计算的归一化光谱信号(虚线)

Fig. 5 Normalized reconstructed spectral signal of incident beam with single wavelength of 525.0 nm (solid line), normalized reconstructed spectral signal in ideal situation (dash line), and normalized spectral signal calculated by Fourier transform method (dotted line) of spectral reconstruction test experiment

的光斑图像进行相关性分析。相关性系数计算公式为

$$C(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n [x_i - \text{mean}(X)][y_i - \text{mean}(Y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [x_i - \text{mean}(X)]^2 \sum_{i=1}^n [y_i - \text{mean}(Y)]^2}}, \quad (7)$$

式中: $C(X, Y)$ 表示为相关性系数; X 和 Y 分别表示两幅光斑图像中选择进行光谱重建实验的像素; x_i 和 y_i 分别表示 X 和 Y 中第 i 个像素灰度值; $\text{mean}(X)$ 和 $\text{mean}(Y)$ 分别表示 X 和 Y 中像素灰度值的平均值。两幅波长 525.0 nm 的入射光光斑图像根据相关性分析得到的相关性系数为 ~ 0.999 ,而其他波长相差 0.1 nm 的入射光光斑图像相关性系数平均值

为 ~ 0.992 。因此认为,重建误差可能由于实验装置稳定性不足造成的相同波长入射光光斑图像不同所导致,而不同波长入射光光斑图像的高相似性使重建光谱信号中单波长峰的 FWHM 增加。

4 结 论

本文提出将重建光谱仪的光谱重建理论应用于傅里叶变换光谱仪中,使光谱仪可以兼具重建光谱仪高光谱分辨率优势以及傅里叶变换光谱仪固有的高光通量优势。利用构建的简易空间外差傅里叶变换光谱仪实验装置,在 520~530 nm 光谱范围内进行了验证实验。光谱校准实验验证了空间外差傅里叶变换光谱仪可以满足光谱重建理论所必需的光斑与入射光波长之间唯一的一对一映射关系。光谱重建实验验证了该光谱仪的光谱测量能力以及将光谱重建理论应用于傅里叶变换光谱仪的可行性。对比重建光谱和通过傅里叶变换得到的光谱,其中,光谱信号峰的 FWHM 展示了应用光谱重建理论的傅里叶变换光谱仪具有重建光谱仪高光谱分辨率优势。在此基础上,如果在更宽的光谱范围进行光谱校准实验,并且在实验中利用波长间隔更小的入射光,应用光谱重建理论的傅里叶变换光谱仪将获得更高的光谱范围和光谱分辨率。同时,实验还利用了通常被视为噪声的由于光学器件引入的散射和衍射光斑,理论上可以提高光谱测量的信噪比。

然而,重建光谱信号中存在单波长峰 FWHM 增加和重建误差的问题。通过对采集的光斑图像进行相关性分析,一方面,两幅波长 525.0 nm 的入射光光斑图像相关性系数小于 1 展示了两幅光斑图像存在差异,可能是由于实验装置稳定性不足造成的,进而导致重建光谱信号中存在重建误差。另一方面,波长相差 0.1 nm 入射光光斑图像相关性系数平均值 ~ 0.992 展示了不同波长入射光光斑图像的高相似性,认为这是导致重建光谱信号中单波长峰 FWHM 增加的原因。

针对第一方面,可以通过采用波导、更简单的实验装置结构或商业成熟的小型化固定式傅里叶变换光谱仪,从而使实验装置具有更高的鲁棒性。同时,还可以利用如截断奇异值分解法^[20]和最小二乘法^[23]的处理算法,降低由于实验装置带来的噪声影响。针对第二方面,可以利用散斑增强^[24]的方式在针孔位置引入一随机散射介质,从而增大不同波长入射光光斑图像的差异。

此外,将重建光谱仪技术应用于成熟的傅里叶变换光谱仪中使傅里叶变换光谱仪性能提高,有望推动重建光谱仪技术的应用发展。而将光谱重建理论与傅里叶变换光谱理论联用,可弥补傅里叶变换光谱仪在某些感兴趣光谱范围的低分辨率。

参 考 文 献

- [1] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cai W W, et al. Miniaturization of optical spectrometers[J]. *Science*, 2021, 371(6528): eabe0722.
- [2] Faraji-Dana M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Compact folded metasurface spectrometer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4196.
- [3] Meng X, Yang Z M, Du J Y, et al. Double-pass grating imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 011202.
- [4] 贾文波, 秦天翔, 黄蕴涵, 等. 红外双波段成像光谱仪光学系统的设计与分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(23): 2311002. Jia W B, Qin T X, Huang Y H, et al. Design and analysis of optical system of an infrared dual-band imaging spectrometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(23): 2311002.
- [5] Tittl A, Leitis A, Liu M K, et al. Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces [J]. *Science*, 2018, 360(6393): 1105-1109.
- [6] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cui H X, et al. Single-nanowire spectrometers[J]. *Science*, 2019, 365(6457): 1017-1020.
- [7] Ma X, Zou J, Li W H, et al. Miniature spectrometer based on a Fourier transform spectrometer chip and a commercial photodetector array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(12): 123001.
- [8] Herrero-Bermello A, Li J F, Khazaei M, et al. On-chip Fourier-transform spectrometers and machine learning: a new route to smart photonic sensors[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5840-5843.
- [9] 吕金光, 梁静秋, 王维彪, 等. 快照傅里叶变换成像光谱仪阵列非均匀特性的 Monte Carlo 分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2430001. Lü J G, Liang J Q, Wang W B, et al. Monte Carlo analysis of array non-uniformity in snapshot Fourier transform imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2430001.
- [10] Li H Y, Bian L H, Gu K, et al. A near-infrared miniature quantum dot spectrometer[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, 9(15): 2100376.
- [11] Huang E, Ma Q, Liu Z W. Etalon array reconstructive spectrometry[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40693.
- [12] Junttila M L, Kauppinen J, Ikonen E. Performance limits of stationary Fourier spectrometers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8(9): 1457-1462.
- [13] Velasco A V, Cheben P, Florjańczyk M, et al. Spatial heterodyne Fourier-transform waveguide spectrometers [M]//Wolf E. *Progress in optics*. Amsterdam: Elsevier, 2014, 59: 159-208.
- [14] Schardt M, Murr P J, Rauscher M S, et al. Static Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7767-7776.
- [15] 郑莹, 吕金光. 新型静态傅里叶变换光谱仪干涉系统仿真与分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(18): 1830001. Zheng Y, Lü J G. Simulation and analysis of interference system in novel static Fourier transform spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1830001.
- [16] Zhu X X, Bian L H, Fu H, et al. Broadband perovskite quantum dot spectrometer beyond human visual resolution [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, 9: 73.
- [17] Wang P, Menon R. Computational spectrometer based on a broadband diffractive optic[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 14575-14587.
- [18] Yang T, Xu C, Ho H P, et al. Miniature spectrometer based on diffraction in a dispersive hole array[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 3217-3220.
- [19] 郑麒麟, 文龙, 陈沁. 基于散斑检测的微型计算光谱仪研究进展[J]. *光电工程*, 2021, 48(3): 200183. Zheng Q L, Wen L, Chen Q. Research progress of computational microspectrometer based on speckle inspection[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(3): 200183.
- [20] Redding B, Popoff S M, Cao H. All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 6584-6600.
- [21] Yang T, Peng J X, Li X G, et al. Compact broadband spectrometer based on upconversion and downconversion luminescence[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4375-4378.
- [22] Redding B, Liew S F, Sarma R, et al. Compact spectrometer based on a disordered photonic chip[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(9): 746-751.
- [23] Wu L, Cai Z J, Su Y F, et al. Simulative study on speckle-spectral properties of a random pixelated grating [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(8): 1410-1417.
- [24] Çetindağ Ş K, Toy M F, Ferhanoglu O, et al. A speckle-enhanced prism spectrometer with high dynamic range[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(24): 2139-2142.