

利用变形镜抑制光纤模态噪声

王嘉琦 许良 常亮

Suppression of fiber modal noise by using deformable mirror

Wang Jiaqi, Xu Liang, Chang Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210763>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

角度多样性激光散斑抑制方法的比较

Comparison of laser speckle suppression due to angle diversity

红外与激光工程. 2017, 46(8): 806004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0806004>

横向压电驱动变形镜的迟滞特性及其闭环校正

Hysteresis characteristics and closed loop correction of unimorph deformable mirror

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1020001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1020001>

薄膜残余应力和表面杂质对变形镜疲劳寿命的影响

Influence of thin-film residual stress and surface impurities on fatigue life of deformable mirror

红外与激光工程. 2019, 48(9): 916002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0916002>

0-1故障模型在自适应光学系统中的应用

Application of 0-1 fault model in adaptive optics system

红外与激光工程. 2018, 47(11): 1111004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1111004>

数字微镜Hadamard变换光谱仪光谱反演矩阵标定及实验

Spectral recovery matrices identification and experiment of Hadamard transform spectrometer based on DMD

红外与激光工程. 2019, 48(7): 717005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0717005>

基于大气湍流传输激光散斑的真随机数提取研究

Study on extraction of true random numbers based on propagated laser speckle in atmospheric turbulence

红外与激光工程. 2019, 48(12): 1205005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1205005>

利用变形镜抑制光纤模态噪声

王嘉琦^{1,2}, 许良^{1*}, 常亮^{1,2,3*}

1. 中国科学院云南天文台, 云南昆明 650216;
2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101)

摘要: 光纤模态噪声限制了下一代高精度视向速度光谱仪的测量精度。特别是当使用相干光源进行波长定标时, 模态噪声会引起视向速度测量误差, 降低视向速度测量精度。为了抑制光纤模态噪声, 提出了一种基于变形镜的动态改变散斑花样的技术方法, 该方法是在单次曝光时间内通过动态改变变形镜的面型, 平滑光纤引起的散斑花样, 提高定标光谱的质心稳定性, 从而保证视向速度的测量精度。通过实验, 利用 632.8 nm 氦氖激光器作为定标光源, 验证了该方法的有效性。实验结果表明, 单次曝光图像包含约 10^5 个变形镜形变模式时, 可以有效抑制光纤模态噪声。针对分辨率 $R=100\,000$ 的光谱仪, 单根定标谱线的情况下, 光纤模态噪声引起的视向速度定标误差约为 19.8 cm/s, 与国际上其他技术方法的精度持平, 该方法不仅可以提高能量利用率, 且不影响光纤的使用寿命。

关键词: 激光散斑; 视向速度; 变形镜; 光谱仪

中图分类号: P111 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210763

Suppression of fiber modal noise by using deformable mirror

Wang Jiaqi^{1,2}, Xu Liang^{1*}, Chang Liang^{1,2,3*}

1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The modal noise in optical fiber limits the measurement accuracy of the next generation of high precision radial velocity spectrograph. Especially when using coherent light sources for wavelength calibration, modal noise can induce radial velocity errors that reduce the accuracy of radial velocity measurement. In order to suppress optical fiber modal noise, a technical method based on deformable mirror to dynamically change speckle pattern is proposed. The method smoothes the speckle pattern caused by optical fiber and improves the centroid stability of calibration spectrum by dynamically changing the shape of deformable mirror in one single exposure time, so as to ensure the measurement accuracy of radial velocity. A 632.8 nm He-Ne laser is used as a coherent calibration light source to verify the effectiveness of the device. Experimental results show that the optical fiber modal noise can be effectively suppressed when a single exposure image contains about 10^5 speckle patterns. For the spectrograph with resolution $R=100\,000$, the radial velocity calibration error caused by optical fiber modal noise is about 19.8 cm/s in use of one single calibration line, which is similar to the effect of other suppression

收稿日期: 2022-01-20; 修订日期: 2022-02-28

基金项目: 国家自然科学基金 (11803087, 11973089); 云南省科技厅重点研发计划 (202003 AD150019); 中德科学基金 (M-0086)

作者简介: 王嘉琦, 男, 博士生, 主要从事天文技术与方法方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 常亮, 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事天文技术与方法方面的研究。

通讯作者: 许良, 男, 工程师, 博士, 主要从事天文技术与方法方面的研究。

methods in the world. And this method can not only improve the energy utilization rate but also not affect the service life of optical fiber.

Key words: laser speckle; radial velocity; deformable mirror; spectrograph

0 引言

在过去的几十年间,高分辨率光谱仪在系外行星探测、恒星结构与演化、星系演化和宇宙大尺度结构、食双星引力红移效应测量以及宇宙膨胀速度测量等天体物理领域被广泛应用。以类地行星探测为例,为了找到宜居带的类地行星,光谱仪的视向速度测量精度要达到 0.1~1 m/s 量级,因此视向速度测量光谱仪需要复杂的工程设计、稳定的系统环境和高精度光谱定标技术来实现科学目标。

对于系外行星探测来说,选择合适的定标光源以及定标方案是实现高精度光谱定标的重要因素。传统的定标光源采用 ThAr 灯配合碘吸收线并利用同步定标的方式实现高精度光谱定标,其缺点是虽然 ThAr 灯光谱覆盖范围大,但是波长稳定性差;碘吸收线波长稳定性好但波长覆盖范围窄。ThAr 灯配合碘吸收线长时间的视向速度定标精度能达到 1 m/s。近些年来,激光频率梳(Laser Frequency Comb, LFC)作为光谱定标光源被应用到天文视向速度测量中^[1]。LFC 可以在宽波段范围内,产生数千个等间隔的定标梳齿,原则上其长期稳定性可达到 0.3 cm/s 的视向速度定标精度^[2-3]。

由于光谱仪和 LFC 之间通常是利用多模光纤进行连接的,激光在通过多模光纤时,会发生模式干涉,在光纤出射端形成干涉图案,称为散斑或模态噪声。这些散斑会限制测量数据的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR),带来误导性的视向速度测量信号;由于这些散斑对环境极其敏感,散斑质心的位置也会随着时间发生漂移,直接影响到光谱仪视向速度的测量精度^[4]。所以要利用 LFC 实现如此高的光谱定标精度还需要解决多项核心关键技术,其中光纤模态噪声的抑制技术直接影响光谱定标精度。

目前,主要采用积分球、漫反射片以及光纤扰频(机械扰频)等方法抑制 LFC 光纤模态噪声。2012 年,宾夕法尼亚州立大学 KS Mccoy 等在实验室利用多种单色光源和光纤机械扰频方法对 10 m HET(Hobby Eberly Telescope)望远镜的宜居带行星探测器 HPF

(The Habitable Zone Planet Finder)进行光纤模态噪声抑制实验,比较了光纤高频振动、低频振动以及静止状态下的模态噪声情况^[5];2014 年,宾夕法尼亚州立大学 Mahadevan 等采用单色红外光源,并结合漫反射片和积分球的方法来降低入射激光的相干性,进而缓解散斑效应提高视向速度测量精度^[6];2016 年,日本东京农工大学的 T.Kokuboa 等在单色光源下,采用旋转的 1/2 波片和 1/4 波片去偏振,并利用旋转漫反射片的方法去相干,再结合抖动光纤进行激光散斑的抑制^[7];2018 年,加利福尼亚大学的 Martin 等采用激光光源和八角光纤,结合抖动光纤和双透镜做成的双光纤扰模器来抑制散斑^[8];同年,耶鲁大学的 Petersburg 等利用单色光源,对圆形光纤、八角光纤和矩形光纤等不同芯径的光纤施加高频和低频振动来抑制散斑^[9];2015 年,南京天文光学技术研究所的杨聪等利用单色光源,通过抖动光纤对抑制激光散斑进行了实验研究^[10]。

以上研究结果表明,一次曝光时间内连续改变散斑花样可以有效抑制模态噪声。从实验手段的角度来说,可以细分为两个类别:第一类是对光纤施加外力,使得光纤形态产生连续的变化,进而改变出射端面的散斑花样,但是对光纤施加应力存在缩减光纤寿命的隐患;第二类是通过改变光纤入射端的照明情况从而改变出射端面的散斑花样,比如积分球和漫反射片器件的组合,但是这些光学器件的应用会极大降低光能的利用率。

文中提出一种基于变形镜抑制光纤模态噪声的技术方法^[11],在单次曝光时间内通过多次改变变形镜面型来改变散斑花样,借此叠加形态不同的散斑花样,实现抑制光纤模态噪声的目标。该方法不仅可以提高能量利用率而且不影响光纤的使用寿命,并通过实验分别研究了在光纤出射端和入射端增加变形镜的模态噪声抑制效果。

1 光纤模态噪声抑制系统设计和原理

系统示意如图 1 所示,以中心波长 632.8 nm 的氦

氩激光器作为光源,通过透镜耦合到多模光纤,准直后的出射光经过变形镜反射,经过成像系统成像于位置 a 处的相机,研究光纤出射端增加变形镜的模式噪声抑制效果,随后耦合进入另一根多模光纤,成像于位置 b 处的相机,研究光纤入射端增加变形镜的模式噪声抑制效果。成像位置 a 和 b 均对应着一个 10 倍放大的成像系统。实验中还采用了宽波段的 LED 光源,对于非相干 LED 光源来说,模式噪声的影响可以忽略,所以 LED 光源的结果可以作为模式噪声抑制的极限效果。

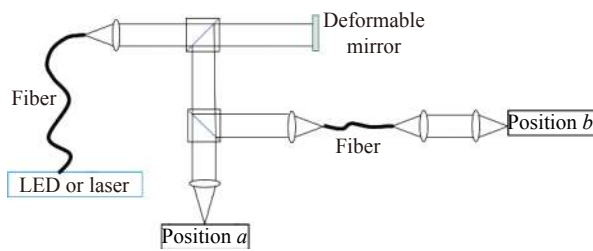


图 1 光纤模式噪声抑制系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of optical fiber modal noise suppression system

实验采用的两段多模光纤参数是相同的,均是直径 $105\ \mu\text{m}$ 的圆形内芯,长度 1 m,数值孔径为 0.22。相机采用的是 Andor 公司生产的 Marana sCMOS 相机,单个像素尺寸为 $11\ \mu\text{m}$ 。变形镜采用的是 OKO Technologies 生产的 96 单元薄膜变形镜,变形镜面形控制采用的是大气湍流模型和前 21 项泽尼克多项式拟合^[12]。将变形镜的不同面型引起的光斑像称为散斑花样。实验中变形镜工作频率为 200 Hz,相机曝光时间为 1 s,也就是说单幅图像包含 200 个散斑花样。两个成像位置分别连续采集了 7200 张图像,通过叠加多张图像研究包含不同散斑花样数目的图像统计特性。

2 模式噪声抑制性能测试

基于图 1 的实验系统,分别对光纤出射端和入射端增加变形镜的模式噪声抑制效果进行了测试,测试内容包括:

- (1) 成像光斑的归一化功率谱密度;
- (2) 成像光斑的信噪比;
- (3) 成像光斑的质心稳定性。

2.1 归一化功率谱密度

图 2 分别给出了光纤出射端和入射端增加变形镜的图像,图 2(a)~(c) 是出射端增加变形镜的实验结果,图 2(d)~(f) 是对应的入射端增加变形镜的实验结果。由图 2(a) 和 (d) 可以看出,当变形镜不工作时,光斑图像呈现典型的激光散斑花样,图 2(b) 和 (e) 展示的叠加了 10^5 种散斑花样的光斑图像,图 2(c) 和 (f) 给出的是 LED 光源的实验结果,均不存在散斑花样。

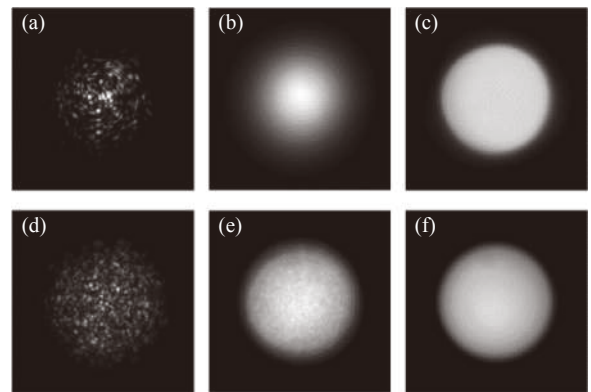


图 2 不同实验条件下的图像。(a) 原始散斑花样;(b) 包含 10^5 种散斑花样的图像;(c) LED 光斑像;(d) 原始散斑花样;(e) 包含 10^5 种散斑花样的图像;(f) LED 光斑像

Fig.2 Images under different experimental conditions. (a) Original speckle pattern; (b) Images containing 10^5 speckle patterns; (c) LED light pattern; (d) Original speckle pattern; (e) Images containing 10^5 speckle patterns; (f) LED light pattern

为了获得散斑花样强度的抑制效果,计算了不同图像的径向归一化功率谱密度。

在功率谱密度中,高频成分对应的强度表征散斑花样的强度。图 3(a) 展示了变形镜放置于出射端的实验结果,分别计算了原始散斑图、包含了 10^3 、 10^4 和 10^5 种散斑花样的图像以及 LED 光源图像的归一化功率谱密度。由图中可以看出,针对于激光散斑,随着图像包含的散斑花样增多,功率谱密度在高频部分整体上是下降的,同时在空间频率小于 $2\ \text{mm}^{-1}$ 的区域曲线基本重合,表明不同实验条件下光斑的尺度稳定。图 3(b) 展示了变形镜放置于入射端的实验结果,针对于激光散斑,结论与图 3(a) 不同之处为图像包含的散斑花样多于 10^4 时,其功率谱密度曲线接近于重合。

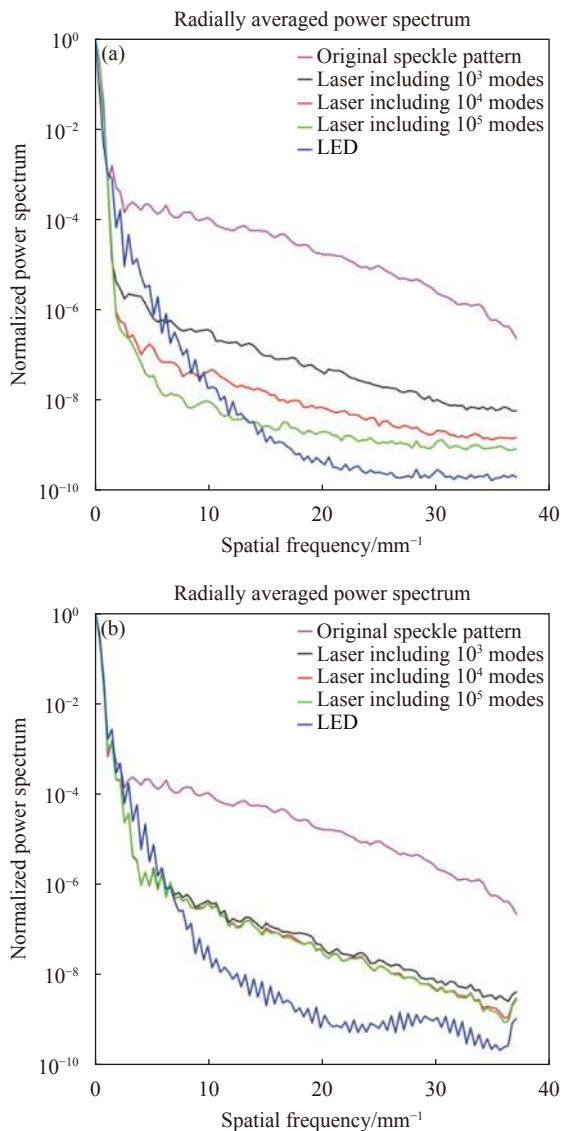


图 3 不同实验条件下的归一化径向功率谱密度。(a) 变形镜放置于出射端; (b) 变形镜放置于入射端

Fig.3 Normalized radial power spectrum under different experimental conditions. (a) Deformable mirror is placed at the exit end; (b) Deformable mirror is placed at the incident end

2.2 信噪比

参考文献 [9] 提出了一种基于图像灰度的 SNR 计算公式:

$$SNR = \frac{\text{median}(I_{filt})}{\text{stdev}(I_0 - I_{filt})} \quad (1)$$

式中: I_0 为原始图像的灰度值; I_{filt} 为原始图像经过中值滤波后的灰度值, 信噪比是中值滤波后的图像的中值灰度除以原始图像减去中值滤波后的图像灰度的标准差。图 4(a) 为变形镜放置于光纤出射端散斑花

样 SNR 的计算结果, 由图可以看出, 当单幅图像包含的散斑花样较少时, SNR 增速较快, 当叠加约 10^5 个散斑花样时, SNR 趋近一个极限值 240。图 4(b) 为变形镜放置于光纤入射端散斑花样 SNR 的计算结果, 曲线的趋势与图 4(a) 类似, 值得注意的是当叠加约 10^4 个散斑花样时, SNR 趋近于极限值 50。

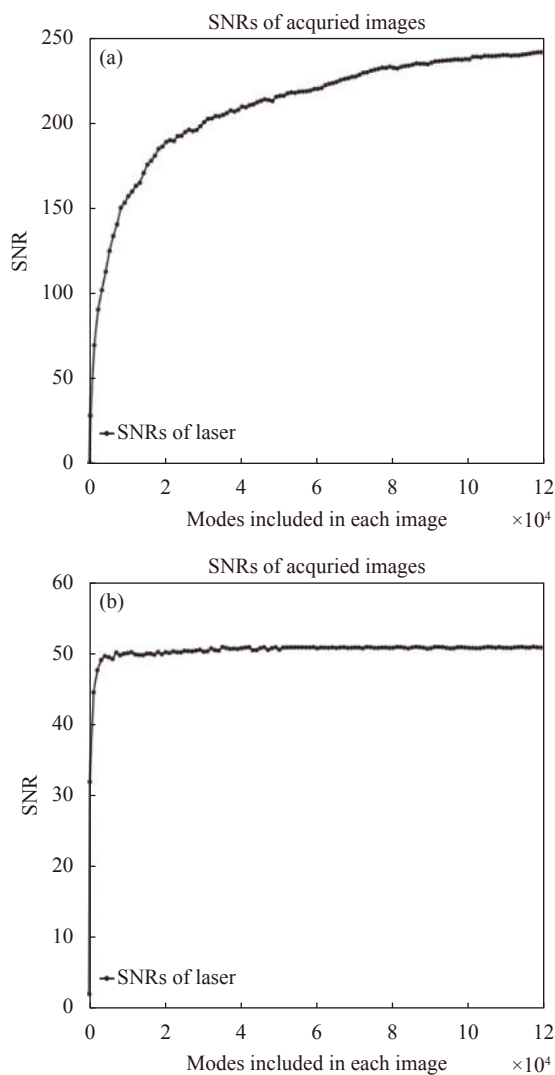


图 4 不同实验条件下图像信噪比计算。(a) 变形镜放置于出射端; (b) 变形镜放置于入射端

Fig.4 Image SNR calculation under different experimental conditions. (a) Deformable mirror is placed at the exit end; (b) Deformable mirror is placed at the incident end

2.3 质心稳定性

最后测试了变形镜的引入对散斑图像的质心位置变化的影响, 不同数目散斑花样的图像实际上是由

单张 1 s 曝光图像叠加而来。通常情况下,满足以下两条假设:(1) 1 s 曝光图像的质心漂移量符合均值为 0, 标准差为 σ 的随机分布;(2) 不同 1 s 曝光图像的质心漂移量是独立同分布的随机变量。基于以上假设, N 张图像叠加计算出的质心漂移量符合均值为 0, 标准差为 $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ 的随机分布。图 5 给出了质心位置变化的

标准差随散斑花样数目 M 的变化曲线, 同时利用公式 (2) 进行了拟合, 则:

$$y = a / \sqrt{M} + b \quad (2)$$

式中: M 为散斑花样数目; a 和 b 为拟合参数, 拟合参数 a 和 b 用蓝色字体标注于图 5 曲线上方。

图 5(a) 给出了变形镜放置于出射端的实验结果, 可以看到激光散斑引起的质心变化与拟合曲线基本吻合; 拟合参数 $b_{\text{laser}} = -9.43 \times 10^{-3}$, 表明随着叠加散斑花样数目 M 逐渐增加, 质心稳定性将趋近于系统稳定性, 而不再受模态噪声的限制。由于 LED 光源的不稳定性引起了质心的不稳定, 与拟合曲线存在一些偏差, 特别是在 M 较小时。图 5(b) 给出了变形镜放置于入射端的实验结果, 结论与图 5(a) 类似。拟合参数 $b_{\text{laser}} = 6.02 \times 10^{-3}$, 表明随着叠加散斑花样数目 M 逐渐增加, 质心变化标准差趋近于 0.006 个像素。图 5(c) 给出了变形镜不工作时, 原始散斑的质心漂移情况。随着叠加图像数目 (等效曝光时间) 的增加, 质心变化标准差会略微缩小, 最后在 0.2 个像素附近振荡。这说明在不使用变形镜的情况下, 散斑质心的位置会随着时间发生较大漂移, 直接影响到光谱仪视向速度的定标精度。

利用参考文献 [9] 中视向速度定标误差 δ_{RV} 的计算方法:

$$\delta_{RV} \approx \frac{c\delta_d}{RD} \quad (3)$$

式中: c 为光速 3×10^8 m/s; δ_d 为近场散斑质心漂移的标准差; R 为光谱仪分辨率; D 为光谱仪狭缝宽度或者光纤直径。利用文中的实验结果对分辨率 $R = 100000$ 光谱仪进行计算, 包含 10^5 个散斑花样的图像的 $\delta_d = 0.0063 \times 11 \mu\text{m} = 0.0693 \mu\text{m}$, $D = 1050 \mu\text{m}$ (由于相机耦合了一个 10 倍放大光路, 因此光纤光斑的直径

为 $1050 \mu\text{m}$), 在不考虑环境稳定性等其他因素的影响, 只考虑散斑效应时, 代入相应数字可知对于单根谱线视向速度的定标精度约为 19.8 cm/s, 该结果与国际上利用其他定标技术得到的结果持平 (见表 1)。

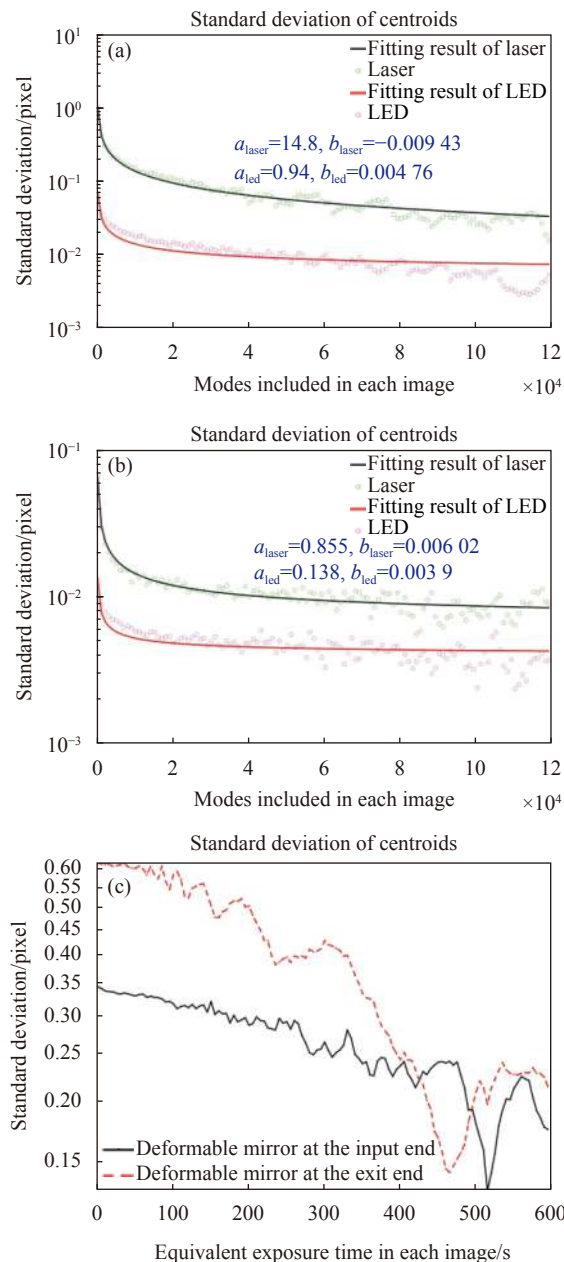


图 5 不同数量图像叠加后的质心稳定情况。(a) 变形镜放置于出射端; (b) 变形镜放置于入射端; (c) 变形镜不工作

Fig.5 Stability of centroid after superposition of different numbers of images. (a) Deformable mirror is placed at the exit end; (b) Deformable mirror is placed at the incident end; (c) Deformable mirror doesn't work

表 1 国际上主要光谱仪视向速度定标误差

Tab.1 Radial velocity calibration errors of major spectrographs

Name	Calibration source	$RV/cm \cdot s^{-1}$	Resolution R
ESPRESSO ^[13]	LFC	<10	200 000
HPF ^[14]	LFC	<6	53 000
HARPS-N ^[15]	LFC	<10	115 000
HARPS ^[3]	LFC	2	115 000
EXPRES ^[16]	LFC	2	137 500
HRS ^[17]	LFC	10	50 000

3 分析与讨论

根据多模光纤模式激励理论和散斑理论可知,多模光纤入射光的分布与激励出的光纤模式密切相关,且光纤出射端散斑的数量与激励出的模式数量成正比相关。

当高斯光束正入射到多模光纤时,只有轴对称的导波可以被激励,倾斜或者偏心入射可以激励出更多的高阶模式。图 2(a)是由激光器直接透镜耦合进入光纤激励出的散斑图(图 1 中 a 位置),近似满足高斯光束正入射,能够激励出的模式数目有限,对应的散斑数量也较少。图 2(e)是激光耦合进入一段多模光纤后,出射光再次耦合进入多模光纤后出射端的结果(图 1 中 b 位置)。出射光包含了倾斜和偏心成分,可以激励出更多的模式,对应的散斑数量也较多。为了进一步分析光纤模式激励对于光纤出射端散斑的影响,参考文献 [6] 从光纤散斑统计理论角度给出了一个散斑的理论信噪比公式:

$$SNR = \frac{\rho}{v} \times \sqrt{((S+1)/(1-\rho^2))} \quad (4)$$

式中: v 为条纹可见度; S 为多模光纤激励出的模式数量; ρ^2 为相机接收到光纤出射端的能量与光纤出射端能量的比。

由此可知,模态噪声引起的 SNR 正比于 $\sqrt{S+1}$,反比于条纹可见度 v 。激光光源的 v 近似等于 1,非相干光源的 v 很小,因此非相干光源的模态噪声对 SNR 的影响可以忽略。对于给定的多模光纤来说,能够激励出的最大模式数目 S_{max} 可以由下式估算:

$$S_{max} = 0.5 \times \left(\frac{\pi \times d \times NA}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

式中: d 为光纤直径; NA 为光纤数值孔径; λ 为波长。这时公式 (5) 限制了公式 (4) SNR 的上限值。

以上分析可知,光源有模式变化时经过多模光纤成像的 SNR 受到光纤激励出的模式数目限制,通过改变入射光的分布,可以激励出不同强度的高阶模式,大量模式干涉形成的散斑花样叠加可以有效提高 SNR; 对于给定的波长和多模光纤,激励模式数目存在上限。这解释了变形镜位于入射端时模态噪声抑制的有效性以及 SNR 存在极限值的现象,对应了图 4 (b)。图 4(a) 为入射光源无模式变化,经过变形镜动态变化后,光纤出射光相当于在自由空间传播,传播模式的数目不受公式 (5) 限制,可以取得较大的 SNR。

对于任意光束入射到光纤后能够激励出的模式数量和耦合系数还没有解析理论,而变形镜作为一种可控的元件,下一步工作将从实验的角度研究如何利用变形镜激励出更多模式,进而提高 SNR 的上限。

表 1 列出了现阶段国际上主要的采用 LFC 作为定标光源的视向速度光谱仪的定标精度。文中计算的单根谱线的定标精度为 19.8 cm/s, 实际应用中 LFC 包含有 X 条定标谱线,利用这 X 根定标谱线的互相关可以将单根谱线的定标精度提高 $\propto \sqrt{X}$ 倍^[9],表 1 所列光谱仪均采用了多根谱线定标的方法。因此文中提出的方法与 LFC 结合后,在不考虑外界环境稳定性因素的前提下,可以达到国际上主要光谱仪的视向速度定标精度。

4 结论

文中提出一种基于变形镜抑制光纤模态噪声的技术方法。通过动态改变变形镜的面型,在单次曝光时间内匀滑光纤带来的散斑结构,实现抑制光纤模态噪声的功能。实验结果表明:当变形镜位于出射端时,单次曝光图像包含不低于 10^5 个散斑花样时,可以有效抑制光纤模态噪声,提高 SNR 和光斑质心稳定性;当变形镜位于入射端时,单次曝光图像包含不低于 10^4 个散斑花样时,也可以达到抑制模态噪声的效果,但其性能低于前者。针对分辨率 $R=100\,000$ 的光谱仪,单根定标谱线引起的视向速度定标误差约为 19.8 cm/s,可以达到国际上主要光谱仪的定标精度。变形镜的使用避免了对光纤施加应力,对光纤使用寿命没有影响;也避免了积分球和漫反射片的引入,提

高了光能利用率;变形镜体积小,有助于后期系统的集成化和小型化,便于集成到光谱仪中。

文中在原理和实验上验证了变形镜对于抑制光纤模态噪声的有效性。除了变形镜所处位置,变形镜的控制模型和变形幅度、光纤截面形状和直径都是影响实验结果的重要因素。在后续工作中,笔者将系统研究这些因素对抑制光纤模态噪声的影响。

参考文献:

- [1] Zheng Li, Wang Huibo, Tian Wenlong, et al. LD-pumped high-repetition-rate all-solid-state femtosecond lasers (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(12): 20201069. (in Chinese)
- [2] Sun Jinghua, Sun Kexiong, Lin Zhifang, et al. High power high repetition rate femtosecond Ytterbium-doped fiber laser frequency comb(invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0103001. (in Chinese)
- [3] Probst R A. A crucial test for astronomical spectrograph calibration with frequency combs [J]. *Nature Astronomy*, 2020, 4(6): 603-608.
- [4] Chang Liang, Zhang Jujia, Dou Liming, et al. Study on the gain characteristics of optical fiber in astronomical instruments [J]. *Yunnan Keji Guanli*, 2015, 28(5): 84. (in Chinese)
- [5] McCoy K S, Ramsey L, Mahadevan S, et al. Optical fiber modal noise in the 0.8 to 1.5 micron region and implications for near infrared precision radial velocity measurements[C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8446: 8446J.
- [6] Mahadevan S, Halverson S, Ramsey L, et al. Suppression of fiber modal noise induced radial velocity errors for bright emission-line calibration sources [J]. *Astrophysical Journal*, 2014, 786(1): 18.
- [7] Kokubo T, Mori T, Kurokawa T, et al. 12.5-GHz-spaced laser frequency comb covering Y, J, and H bands for infrared Doppler instrument[C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9912: 99121R.
- [8] Sirk M M, Wishnow E H, Weisfeiler M, et al. A optical fiber double scrambler and mechanical agitator system for the Keck planet finder spectrograph [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10702: 107026F.
- [9] Petersburg R R, Mccracken T M, Eggerman D, et al. Modal noise mitigation through fiber agitation for fiber-fed radial velocity spectrographs [J]. *Astrophysical Journal*, 2018, 853(2): 181.
- [10] Yang Cong, Han Jian, Wu Yuanjie, et al. Theoretical and experimental study on suppression of speckle from a multimode optical fiber by dynamic scrambling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 090602. (in Chinese)
- [11] Xu L, Chang L, Wang X L, et al. A device and method to improve the uniformity of laser output energy distribution: CN, 201710951229.7[P]. 2017-12-26. (in Chinese)
- [12] Roddier N A. Atmospheric wavefront simulation using Zernike polynomials [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1174-1180.
- [13] Pepe F, Cristiani S, Rebolo R, et al. ESPRESSO at VLT: On-sky performance and first results [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 645: A96.
- [14] Metcalf A J, Anderson T, Bender C F, et al. Stellar spectroscopy in the near-infrared with a laser frequency comb [J]. *Optica*, 2019, 6(2): 233-239.
- [15] Milbourne T W, Haywood R D, Phillips D F, et al. HARPS-N solar RVs are dominated by large, bright magnetic regions [J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 874(1): 107.
- [16] Blackman R T, Fischer D A, Jurgenson C A, et al. Performance verification of the extreme precision spectrograph [J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(5): 1-30.
- [17] Hao Z, Ye H, Han J, et al. Calibration tests of a 25-GHz mode-spacing broadband astro-comb on the fiber-fed high resolution spectrograph (HRS) of the Chinese 2.16-m telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2018, 130(994): 125001.