

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.22

天文激光频率梳的运行状况 及光纤噪声的抑制

叶慧琪^{1,2}, 韩 建^{1,2}, 吴元杰^{1,2,3}, 肖 东^{1,2}

(1. 中国科学院 国家天文台/南京天文光学技术研究所, 南京 210042; 2. 中国科学院 天文光学技术重点实验室, 南京 210042; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 天文激光频率梳(简称天文光梳)是一种理想的定标光源,理论上可以实现 1 cm/s 的视向速度测量精度,从而满足天文光谱测量越来越高的精度要求。随着技术的不断发展,天文光梳已成为高精度天文光谱定标的必然选择。南京天文光学技术研究所向德国 Menlo Systems 公司定制了一台可见光范围的天文光梳,力争将国内视向速度测量精度提高 1~2 个量级,为太阳系外行星搜索做出贡献。在定标过程,将天文光梳耦合进天文光谱仪通常要求使用多模光纤,而多模光纤传输光梳光束时会产生严重的光纤噪声,这极大限制了定标精度的提高。介绍了这台天文光梳目前的基本运行状况,以及光纤噪声和光梳噪声的控制方法。

关键词: 天文激光频率梳; 天文光谱定标; 光纤噪声; 光梳耦合器

中图分类号: P111.4 **文献标识码:** A

1 引 言

激光频率梳巧妙地将光学频率与微波频率直接联系,可以实现光学频率的绝对测量。由于激光频率梳在高精度光钟、精密光谱学研究、基本物理常数测量、阿秒脉冲产生等领域的重要应用,2005 年诺贝尔物理学奖颁给了对激光频率梳技术做出重要贡献的 Haensch 和 Hall 教授。在天文研究上,2007 年,科学家首次提出将激光频率梳技术应用到多普勒视向速度测量中^[1]。由于天文光梳梳齿在频域上间隔均匀、强度均匀、谱线高、密度高、频率稳定性好,是理想的天文光谱仪波长定标光源,从理论上可实现 1 cm/s 量级的视向速度测量精度。

天文光梳受到全世界天文学家的瞩目,发展迅猛,技术也越来越成熟。目前德国 Menlo systems 公司已经将天文光梳商品化。Menlo systems 公司与欧洲南方天文台(ESO)合作,

资助项目: 国家自然科学基金(11373051, 11403069, 11303067); 江苏省自然科学基金(BK20141062, BK20131061); 中国科学院南京天光所优秀青年人才领域前沿项目(Y-09)

通讯作者: 肖东, dxiao@niaot.ac.cn

在 2008 年, 首次将基于光纤的天文光梳在德国真空塔望远镜 (VTT) 进行实验, 并对太阳光谱线进行测量, 得到 9 m/s 的绝对定标精度; 同时发现天文光梳定标技术对光谱仪漂移造成的系统误差也有良好的校正作用^[2]。2010 年, 进一步使用天文光梳给 ESO 的高精度视向速度行星搜索器 (HARPS) 进行定标, 在几个小时内的重复定标精度达到了 15 cm/s^[3]。2012 年, 在 HARPS 上短时间的重复定标精度已经达到 cm/s 量级^[4]。2015 年 4 月, HARPS 又采用两台不同重复频率光梳 (25 GHz 和 18 GHz) 进行定标实验^[5]。

天文光梳从提出至今短短几年时间, 其优异的定标性能得到普遍认可。世界各大天文台都在争相发展天文光梳光谱定标技术, 中国也不例外^[6, 7]。在此背景下, 南京天文光学技术研究所向德国 Menlo systems 公司定制了一台天文光梳, 希望配合兴隆 2.16 m 望远镜高分辨率光纤阶梯光谱仪 (仪器的视向速度测量精度约 6 m/s), 将国内视向速度测量精度提高 1~2 个量级。

2 天文光梳的基本状况

光梳的模式间隔是光谱仪频率分辨率的 2~3 倍时, 采用天文光梳为天文光谱仪进行波长定标可达到最优效果。结合我国 2.16 m 望远镜高分辨率光纤阶梯光谱仪的性能指标以及 Menlo systems 公司现有技术水平, 选定本台天文光梳的模式间隔为 25 GHz。光梳的光谱范围尽量覆盖光谱仪的工作范围, 为可见光范围。同时, 如果定标谱线强度差别过大, 为了避免 CCD 过饱和, 需要根据最强的谱线调节光谱仪积分时间, 那么其他谱线的强度就会太弱, 不利于定标, 因此要求光梳的光谱平坦度小于 5 dB RMS。

根据以上要求, 本台天文光梳采用了图 1 的总体结构设计。由于目前无法直接从锁模飞秒光纤激光器产生 10 GHz 以上的模式间隔, 因此需要对低模式间隔的源光梳进行滤波处理。选用基于掺镱光纤振荡器的光梳作为源光梳, 重复频率为 250 MHz, 中心波长为 1 040 nm, 锁定在 GPS 参考源上。采用法布里帕罗腔进行滤波, 模式间隔被提升到 25 GHz。由于滤波过程损耗了大部分能量, 滤波前后需要对光梳进行放大。为了使边模抑制率达到 40 dB 以上, 使用了三个法布里帕罗腔, 因为边模会极大降低定标精度。滤波后的光梳再经过放大和压缩, 入射到拉锥的光子晶体光纤中进行光谱展宽。展宽后的光谱进行平滑后得到最终输出。

2015 年 3 月, 天文光梳在南京天文光学技术研究所实验室进行安装验收。主要技术指标都达到了合同要求: (1) 光谱覆盖范围 200 nm, 中心波长 (540±30) nm; (2) 光谱平坦度 5 dB RMS; (3) 光梳模式间隔: 25 GHz; (4) 光功率 (全谱段) 大于 100 μW。

经过将近一年的实验室运行测试, 2016 年 1 月, 天文光梳运往兴隆 2.16 m 望远镜现场安装调试, 与天文光谱仪对接进行光谱定标实验。在调试过程中虽然碰到一些问题, 但总体来说比较顺利, 初步完成调试, 天文光梳已经正常出光。图 2 为 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪测试天文光梳谱线的截图: a) 为全谱图, 大致覆盖 470~710 nm; b) 为局部放大图。

计划将于 2016 年 3—4 月进行更加细致的工作。相信到时将会给出这台天文光梳结合 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪所能达到的光谱定标精度。

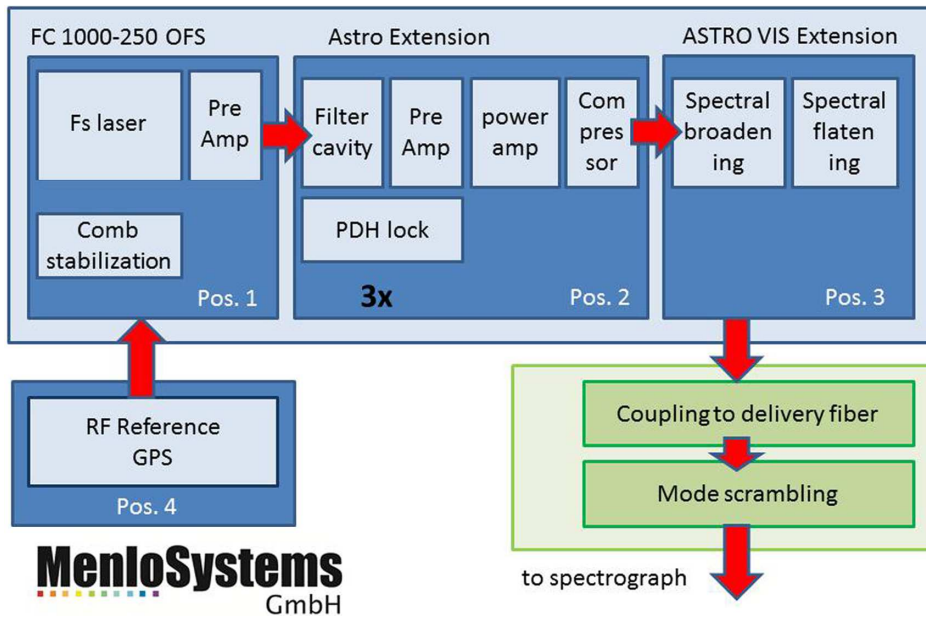


图 1 天文光梳的总体结构 (Menlo Systems 公司提供)

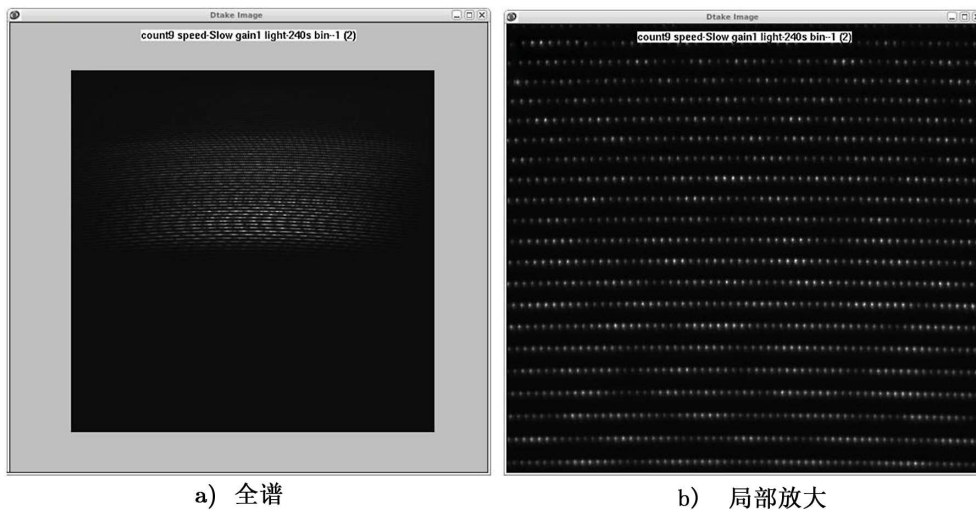


图 2 天文光梳谱线截屏

3 光纤噪声及抑制方法

天文光梳的输出通常使用多模光纤导入光谱仪。传统的圆柱型阶跃多模光纤在传输光时会产生各种各样的噪声, 从而引入通道漂移, 造成定标精度的降低。在天文光谱测量中光纤噪声主要来源于以下几个方面:

(1) 耦合条件改变引起光谱测量误差^[8, 9]。理想条件下, 目标光与传输光纤耦合, 平行于光纤芯轴方向正入射, 出射光束强度为高斯分布。但由于望远镜跟踪误差、大气扰动、耦合对准等因素影响, 目标光与光纤耦合条件会发生改变; 虽然多模光纤具有一定的扰模特性, 能够消除一些环境干扰, 但多模光纤的扰模特性并不完美, 耦合条件的改变会造成光的出射状态改变, 甚至出现环形出射场现象, 最终引起伪光谱漂移和伪光谱结构。

(2) 散斑效应^[10, 11]。相干光在多模光纤中传输, 模间干涉产生散斑效应。天文光梳也是相干光源, 在多模光纤中传输也会产生严重的散斑效应。散斑造成光束强度和相位空间分布的极不均匀, 经过光谱仪后将影响谱线质心的确定, 进而降低谱线波长的测量精度。散斑的分布对环境变化和光纤扰动非常敏感, 实时随机改变的散斑也极大降低了光谱测量的稳定性。

(3) 模式噪声^[12, 13]。实施随机变化的散斑加上耦合失配或孔径限制, 传输光非常容易被加载实时随机的寄生强度调制, 称作模式噪声。模式噪声会极大降低光谱测量的信噪比, 而信噪比是影响视向速度测量精度提高的一大因素。

据国外的一些经验, 光纤噪声能引起 m/s 量级的视向速度测量精度漂移。因此天文光梳要达到预期的定标能力, 必须对光纤噪声进行抑制。利用我们研究小组^[14]及国内外其他研究小组的研究成果^[8-13, 15, 16], 结合 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪的参数要求和实际情况, 我们采用图 3 所示的耦合方案, 搭建了光梳耦合器。光梳耦合器充分考虑了光纤噪声的抑制、光学参数与天文光谱仪的匹配。耦合器中还配备了滤光片、衰减片安装基座以及光学快门, 以方便对天文光梳进行滤波、衰减、曝光时间控制等操作。

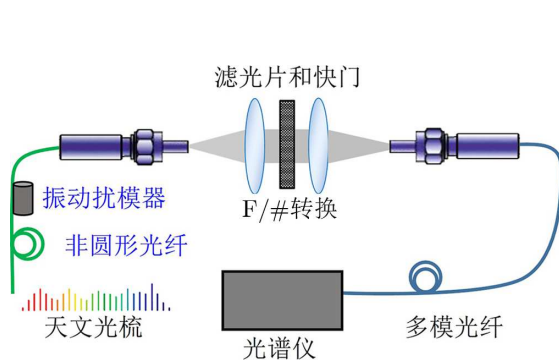


图 3 天文光梳-天文光谱仪耦合方案

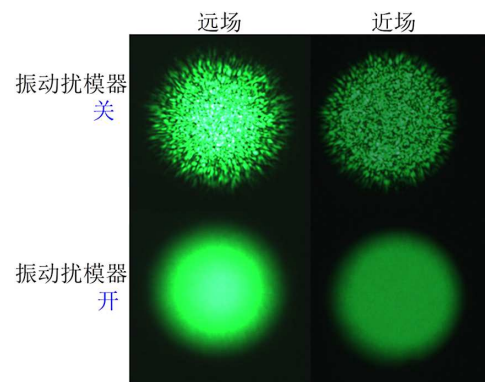


图 4 光梳耦合器的散斑抑制效果

在实验室中用 532 nm 单纵模激光器作为光源模拟光梳单根梳齿, 对光梳耦合器的基本

性能进行了测试。图 4 展示了经光梳耦合器后多模光纤出射远、近场的散斑抑制效果，图中上、下分别是光梳耦合器中振动扰模器关与开时的光斑远、近场像。可以看出在振动扰模器打开时，光梳耦合器对散斑有很好的抑制效果。同时，将多模光纤输出光送入实验室中的高分辨率光谱仪（极限分辨率 0.02 nm），多次测量对比光谱曲线。图 5 a) 中振动扰模器关，光谱曲线有很强的噪声，并且光谱出现复杂的结构，结构随机变化；b) 中振动扰模器开，光谱复杂结构消失，信噪比有显著提高。

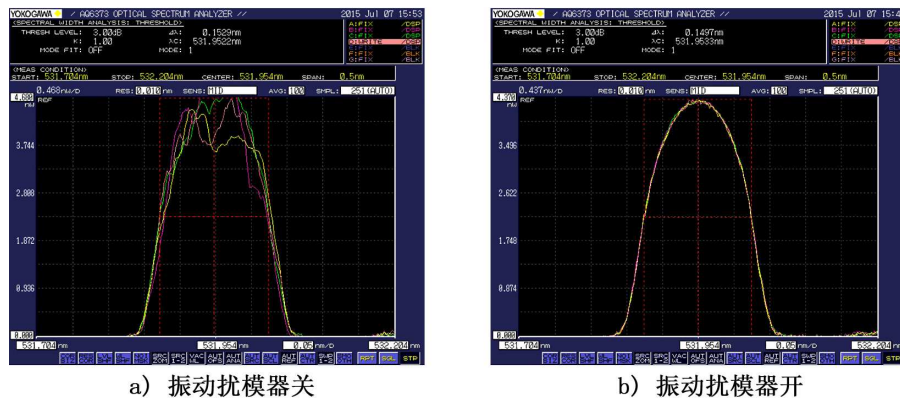


图 5 光梳耦合器的光纤噪声抑制效果

4 结 论

我们向德国 Menlo Systems 公司定制的天文激光频率梳，于 2015 年 3 月在南京天文学技术研究所实验室进行安装验收；经过将近一年的运行测试，于 2016 年 1 月运往兴隆，在 2.16 m 望远镜现场进行调试，顺利出光；计划于 2016 年 3—4 月进行更详细的光谱定标实验。为解决光谱定标过程中由于多模光纤传输引起的噪声，研究团组研制了光梳耦合器，在实现天文光梳—光谱仪对接的同时，对光纤噪声进行抑制。

参考文献:

- [1] Murphy M, Udem T, Holzwarth R, et al. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2007, 380: 839
- [2] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, et al. Science, 2008, 321: 1335
- [3] Wilken T, Lovis C, Manescau A, et al. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2010, 405: 16
- [4] Wilken T, Curto G, Probst R, et al. Nature, 2012, 485: 611
- [5] Probst R A, Curto G L, Avila G, et al. Proc. of SPIE, 2016, 9908: 990864
- [6] 韩海年, 魏志义, 赵刚. 物理, 2012, 41: 249
- [7] 姜明达, 肖东, 朱永田. 天文学进展, 2012, 30: 246
- [8] Avila G, Singh P. SPIE, 2008, 70184W: 1

- [9] Barnes S, MacQueen P. SPIE, 2010, 773567: 1
[10] Grupp F. A&A, 2013, 412: 897
[11] Chen C, Reynolds R, Kost A. Appl. Opt., 2006, 45: 519
[12] Baudrand J, Walker G. Publ. Astron. Soc. Pac., 2001, 113: 851
[13] Lemke U, Corbett J, Allington-Smith J, et al. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2011, 417: 689
[14] 杨聪, 韩建, 吴元杰, 等. 激光与光电子学进展, 2015, 52: 090602
[15] Halverson S, Roy A, Mahadevan S, et al. Astrophys. J., 2015, 806: 61
[16] Sturmera J, Stahla O, Schwab C, et al. SPIE, 2014, 915152: 1

Working Status of Chinese Astro-comb and Fiber-noise Suppression

YE Hui-qi^{1,2}, HAN Jian^{1,2}, WU Yuan-jie^{1,2,3}, XIAO Dong^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042; 2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Astronomical Laser Frequency Combs (astro-comb) are the ideal calibration sources for astronomical spectrographs. The radial velocity precision calibrated by astro-comb with existing echelle spectrographs could be 1 cm/s that is required by the higher precision of astronomical spectral measurement, like searching for extra-solar planets and measuring the acceleration of the Universal expansion. As the improvement of technology, high precision wavelength calibration of astronomical spectrograph with astro-comb is an inexorable trend. So Nanjing institute of astronomical optics and technology bought a custom made astro-comb from the Menlo Systems Company, in order to improve 1 ~ 2 orders of the radial velocity precision for extra-solar planets searching in China. Otherwise, the fiber noise limits the precision when the astro-comb coupling into the spectrograph by multi-mode fibers. We had an introduction for the astro-comb and fiber noise and the suppression of fiber noise.

Key words: astronomical laser frequency combs; astronomical wavelength calibration; fiber noise; astro-comb coupler