

2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪的天文光学频率梳

吴元杰^{1,2,3} 叶慧琪^{1,2} 韩 建^{1,2} 邹 璞⁴ 傅凌统⁴ 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, 江苏 南京 210042

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

³中国科学院大学, 北京 100049

⁴Menlo Systems 公司, 马丁斯里德 82152, 德国

摘要 介绍了应用于我国兴隆观测站 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪的天文光学频率梳。采用掺镱光纤激光频率梳作为源光梳, 通过模式滤波使模式间隔达到 25 GHz, 与天文光谱仪的分辨率相匹配。光谱展宽和平滑后, 光谱覆盖可见光范围达到 270 nm 以上, 光谱平滑度可长期保持在 1 dB 范围内, 边模抑制比达到 42 dB。该天文光学频率梳的视向速度理论定标精度可达 cm/s 量级, 使寻找系外类地行星乃至直接测量宇宙膨胀速度成为可能。

关键词 激光器; 光纤激光器; 天文光谱仪; 视向速度; 超连续光谱

中图分类号 O433.5+4 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0614001

Astronomical Laser Frequency Comb for High Resolution Spectrograph of a 2.16-m Telescope

Wu Yuanjie^{1,2,3} Ye Huiqi^{1,2} Han Jian^{1,2} Zou Pu⁴ Fu Lingtong⁴ Xiao Dong^{1,2}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴Menlo Systems GmbH, Martinsried 82152, Germany

Abstract An astronomical laser frequency comb (astro-comb), which will be applied as a calibrator on the high resolution spectrograph of the 2.16-m telescope in Xinglong Observatory, is introduced. The astro-comb is based on an ytterbium-doped fiber laser frequency comb. By mode filtering, the mode spacing of the comb is increased to 25 GHz, which matches the resolution of the astronomical spectrograph. After spectral broadening and flattening, the spectrum span increases to more than 270 nm in visible range, the spectrum flatness maintains within 1 dB for a long time, and the side mode suppression ratio reaches 42 dB. The theoretical calibration precision of the radial velocity for the astro-comb reaches cm/s level, which meets the requirements for searching the earth-like extrasolar planets and directly detecting the acceleration of the cosmic expansion.

Key words lasers; fiber lasers; astronomical spectrograph; radial velocity; supercontinuum

OCIS codes 140.3510; 300.6320; 320.6629

1 引 言

高分辨率天文光谱仪的发展使高精度的光谱探测成为可能。通过测量一段时间内光谱的红移或蓝移, 利用视向速度, 可以寻找系外类地行星, 甚至直接测量宇宙膨胀速度^[1]。前者需要视向速度的定标精度达到几 cm/s 量级, 观测时间需要几个月或几年。后者需要视向速度的定标精度达到 1 cm/s 量级, 观测时间需要

收稿日期: 2016-01-08; 收到修改稿日期: 2016-02-02

基金项目: 国家自然科学基金(11373051)、国家自然科学基金青年基金(11403069, 11303067)、江苏省青年基金(BK20131061, BK20141062)

作者简介: 吴元杰(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事激光光谱方面的研究。E-mail: yjwu@niaot.ac.cn

导师简介: 肖 东(1967—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光光谱方面的研究。E-mail: dxiao@niaot.ac.cn

十年甚至数十年。因此急需同时满足定标精度与长期稳定性要求的定标源。

天文光谱仪在可见光区的常用定标源为钡氩灯。位于我国兴隆观测站的 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪(HRS)目前也使用钡氩灯定标。但钡氩灯的相邻定标谱线间隔不一致,强度不均匀,且定标线位置不可调,限制了钡氩灯的短期视向速度定标精度在几十 cm/s 量级。钡氩灯有一定的寿命,定标线位置随时间发生变化,所以钡氩灯的长期定标重复性在 m/s 量级。因此,钡氩灯的绝对定标精度和长期稳定性均无法满足高精度光谱定标要求。

光学频率梳的发明及其在原子分子物理领域的成功应用开启了激光光谱学的新领域^[2-4]。而基于光学频率梳发展起来的天文光学频率梳则将光学频率梳的应用范围扩展到了天文领域。天文光学频率梳在频率域内可以产生均匀的模式间隔,并且间隔可调,谱线的强度可以通过平滑装置均匀分布,谱线位置也可根据需要进行调节。天文光学频率梳可以锁定在稳定的参考源上,保障了绝对定标精度和长期稳定性。因此,目前天文光学频率梳是最为理想的高精度天文光谱仪定标源^[5-8]。

将飞秒激光器的重复频率和相移频率锁定,即形成光学频率梳。目前利用锁模飞秒激光器难以直接产生 10 GHz 以上的模式间隔,因此需要对低模式间隔光梳进行滤波。美国麻省理工大学与哈佛大学等合作研制了用于 HARPS-N 光谱仪的天文光学频率梳,采用全球定位系统(GPS)作为参考源。其设计特点在于使用钛宝石激光器产生 1 GHz 的源光梳,将光谱展宽后再进行模式滤波,模式间隔增加至 16 GHz,光谱范围为 500~600 nm,但该光谱存在起伏结构^[9-10]。德国马普量子光学研究所与 Menlo Systems 研制的用于 HARPS 光谱仪的天文光学频率梳,采用铷原子钟作为参考源,由 250 MHz 掺镱光纤激光器作为源光梳,采用先模式滤波再展宽光谱的设计。为配合 HARPS 光谱仪的分辨率,定标模式间隔选定为 18 GHz。-20 dB水平平滑后的光谱范围达到 440~600 nm^[11]。以上两种设计均采用了法布里-珀罗腔(FPC)进行模式滤波,但对于宽带光谱,腔内的色散会影响滤波效果。所以采用先模式滤波再展宽光谱的设计更有利于得到带宽较宽的天文光学频率梳。

2 HRS 天文光学频率梳总体设计

使用天文光学频率梳定标光谱,当频率梳的模式间隔是光谱仪频率分辨率的 2~3 倍时定标效果最佳^[12]。我国 2.16 m 天文望远镜装备了分辨率为 4.98×10^4 的 HRS,在波长 532 nm 处,HRS 频率分辨率为 11.3 GHz。因此,该天文光学频率梳的模式间隔选定为 25 GHz。

HRS 的工作波长范围为 360~1000 nm,即覆盖了整个可见光范围,因此定标源应尽量覆盖可见光范围。同时,如果定标谱线的强度差别过大,则需要调节光谱仪的积分时间以保证最强谱线正确曝光。而在其他强度较弱的谱线上,光谱仪接受的光子数可能过少,不利于定标。因此,平滑宽带光谱非常必要。

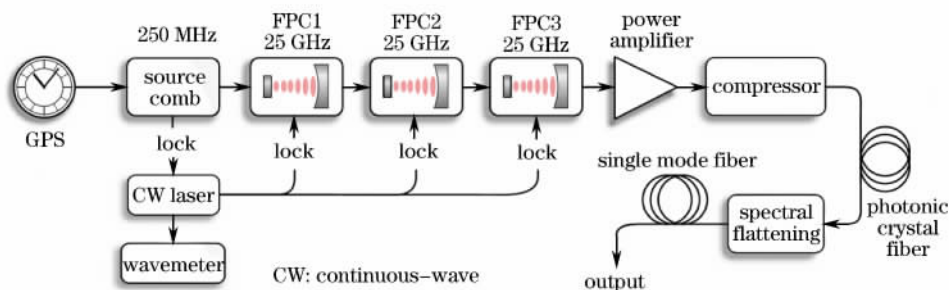


图 1 天文光学频率梳的总体设计

Fig. 1 Overall design of astro-comb

基于上述要求,HRS 天文光学频率梳总体设计如图 1 所示。源光梳选用 250 MHz 掺镱光纤激光器,中心波长为 1040 nm,锁定在 GPS 参考源上。相对掺铒光纤激光器,选用的掺镱光纤激光器中心波长更接近可见光,更易通过光谱展宽产生可见光范围内的宽带光谱。经过三个法布里-珀罗腔,模式间隔提升至 25 GHz。法布里-珀罗腔的腔长均被锁定,以稳定模式间隔。之后光束经过功率放大和脉冲压缩,入射到一根拉锥的光子晶体光纤中展宽光谱。展宽后的光谱进行平滑得到最终输出,输出端使用可见光区单模光纤

以确保最优光束质量。

3 源光梳与模式滤波

源光梳的重复频率和相移频率分别锁定在两台微波合成器上。这两台微波合成器从 GPS 上得到参考信号,处理后产生频率可调的输出信号。光电二极管探测到的飞秒脉冲激光器重复频率信号四倍频后频率为 1 GHz,再与一个 980 MHz 的信号混频,得到 20 MHz 信号,将此信号锁定于微波合成器提供的 20 MHz 参考信号,实现重复频率的锁定,并利用比例-积分法进行控制。通常重复频率不变,如果需要更改重复频率,只需要改变微波合成器的信号值。需要注意的是重复频率的变化量为微波合成器频率变化量的 1/4。使用光电二极管探测由自参考技术产生的信号^[12],将其直接锁定于另一台微波合成器,实现相移频率的锁定,同样使用比例-积分法控制,锁定相移频率。相移频率可以通过调整相应微波合成器的频率进行等比例更改。

将 250 MHz 重复频率提升至 25 GHz,则每 100 个光梳谱线中仅有一个被保留。为尽可能压制不需要的谱线,使用三个相同的法布里-珀罗腔^[13],将三个腔的腔长锁定于一个连续激光,此连续激光锁定于一个过滤后的光梳梳齿。为锁定连续激光,引入一个 150 MHz 的声光移频器。连续光经过移频后,与光梳的对应梳齿进行拍频,得到的 150 MHz 拍频信号锁定于一个 150 MHz 的微波参考源。声光移频器也锁定于此微波参考源,从而使连续光相对光梳梳齿稳定锁定。由于锁定连续光和光梳梳齿的 0 Hz 拍频信号存在困难,因此使用声光移频器。使用波频计测量连续激光的频率,从而确定模式滤波后梳齿的频率。

使用 Pound-Drever-Hall 稳频方法锁定法布里-珀罗腔,同样利用比例-积分法进行控制。腔镜固定于压电陶瓷上,压电陶瓷的位移可细调腔长。腔内温度可由半导体制冷器调节,腔温可粗调腔长。

腔镜的精细度 F 可通过测量连续光透过该腔后的信号来计算, F 可表示为

$$F = R_{FS}/\omega_{1/2}, \quad (1)$$

式中 R_{FS} 为法布里-珀罗腔的自由光谱范围, $\omega_{1/2}$ 为透过腔后连续光的半峰全宽。

经过测试,该光梳腔镜的精细度为 2300。腔的输入光重复频率 f_i 为 250 MHz,输出光重复频率为 25 GHz,重复频率放大倍数 m 为 100。边模抑制比 S 可表示为^[14]

$$S \approx (2F/m)^2. \quad (2)$$

因此,每个腔的边模抑制比为 2116,即 33.3 dB,三个腔的总抑制比约为 100 dB。

4 光谱展宽与平滑

滤波后的光谱处于红外波段,需要将光谱展宽至可见光范围,并尽可能覆盖可见光范围。光谱的展宽利用了拉锥的光子晶体光纤的色散控制与非线性效应,因此需要高功率与短脉冲。使用掺镱光纤放大器放大滤波后的光功率,为使用大功率的多模尾纤抽运源,抽运方式为包层抽运。经过放大后,最高功率可以达到 15 W。但是脉冲经过放大器中近 30 m 的光纤,色散严重,需要重新压缩。使用光栅-棱镜组合脉冲压缩器,重新将脉冲压缩至 140 fs。脉冲在功率放大和重新压缩后,满足光谱展宽条件。

使用拉锥的光子晶体光纤展宽光谱有两种方法。一种曾经使用在 HARPS 光谱仪的天文光学频率梳上。文献^[11]中选用三硼酸锂晶体将 1040 nm 的光倍频至 520 nm,520 nm 大致位于可见光波长范围的中心,倍频后光功率最高可达到 400 mW,将此绿光耦合进光子晶体光纤进行光谱展宽。光子晶体光纤的展宽效果主要取决于其拉锥后拉伸段(即等外径段)纤芯的直径。拉伸段光纤的群色散曲线随纤芯直径的不同而改变,产生不同的零色散波长,形成不同的展宽效果^[15]。但使用该方法时,光子晶体光纤展宽寿命较短,即使用一段时间后出射光谱变窄。研究发现,光纤的玻璃材料在强光的照射下产生了色心,影响了光子晶体光纤的光谱展宽效果。因此使用天文光梳时,不得不经常替换光纤。另一种方法同样利用了拉锥的光子晶体光纤,直接展宽 1040 nm 的光谱。这时光谱的展宽发生在过渡段(即光纤外径不断变小的区段),需要优化过渡段的形状^[16]。使用这种方法时,需要特别处理拉锥后的光纤,如在光纤入射与出射端加装光纤头等,以确保其在大功率抽运光下安全工作。绿光抽运和红外光抽运的展宽效果对比如图 2 所示。其中,绿光抽运光谱展宽数据来自文献^[11],红外光抽运光谱展宽使用保偏光子晶体光纤的纤芯直径为 $2.8 \mu\text{m} \times 4.1 \mu\text{m}$ 。

红外光抽运虽然缺失了一部分短波长段的光谱,但很好地覆盖了长波长段的光谱。尽管有光谱平滑装置,相对于从红外光抽运,从绿光抽运得到的光谱结构更为粗糙,平滑后能量损失较大。更重要的是,1040 nm 波长光子的能量相对 520 nm 波长光子的能量小得多,大大延长了光子晶体光纤的寿命,因此使用红外光抽运提高了光谱展宽的长时间稳定性。综上所述,在该天文光学频率梳中选用红外光抽运的展宽光谱。

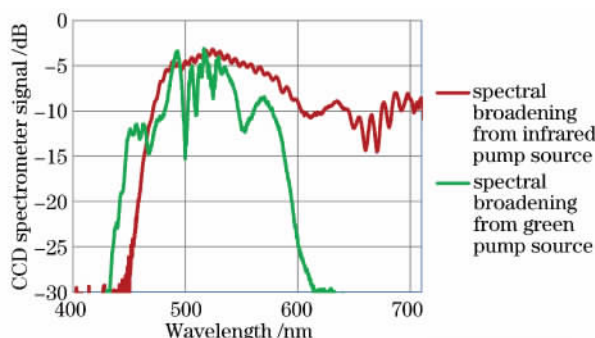


图 2 绿光抽运与红外光抽运的光谱展宽效果

Fig. 2 Spectral broadening from infrared pump source and green pump source

光谱的展宽过程中,边模会再放大^[14,17]。而当天文光梳用于光谱定标时,边模使定标谱线的重心发生偏移,频移量用 Δf 表示。假定发生最坏的情况,即边模仅出现在定标谱线的一侧,而另一侧的边模被完全抑制,此时偏移量可表示为

$$\Delta f \approx f_i/S. \quad (3)$$

使用频率可调连续激光与光谱展宽后的光束在 532 nm 波长处拍频,测量得到天文光学频率梳经过光谱展宽后边模抑制比放大至 42 dB。可导致的最大定标谱线频率偏移量为 15.8 kHz,换算得到最大视向速度测量偏移量为 8 mm/s。该精度可满足系外类地行星的探测要求。

使用空间光调制器平滑光谱^[18]。由光栅、透镜与空间光调制器组成 4F 系统,如图 3 所示。具有宽带光谱的平行光经光栅色散后由透镜聚焦到反射式空间光调制器上,空间光调制器不同的像素对应不同波长的光,反射后,光再经过透镜的准直和光栅的色散后,由内置的光谱仪实时监测光谱。光谱仪与空间光调制器形成反馈,通过改变空间光调制器各像素的电压,调节光的偏振态。空间光调制器的入射端和出射端均放置一个偏振片,二者的偏振方向相互垂直。空间光调制器对各波长光的偏振态控制即转化为对各波长处光谱强度的控制,最终实现光谱的平滑。受到空间光调制器的尺寸和用于传输的单模光纤的单模工作波长范围的限制,经过平滑装置的光谱在长波长端截止在 735 nm。图 4 所示为光谱经过 -15 dB 水平平滑后近 10 h 的不间断检测结果,该光谱范围达到 460~730 nm,强度均方根粗糙度稳定在 1 dB 以下。因为天文观测通常在夜间进行,10 h 的稳定光谱可以提供完整天文观测夜晚的定标。

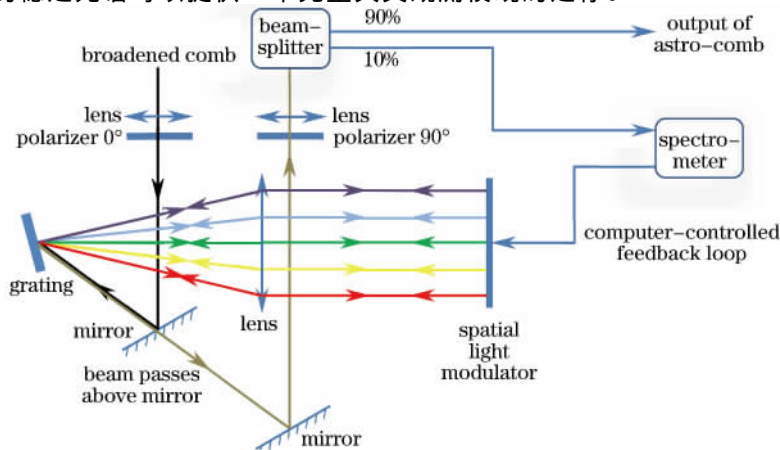


图 3 光谱平滑装置结构

Fig. 3 Spectrum flattening setup

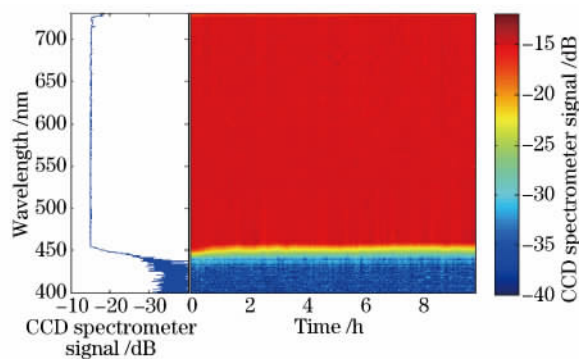


图 4 光谱展宽与平滑稳定性测量

Fig. 4 Test of broadening and flattening stability

图 5 所示为本台天文光学频率梳的实物图,各组成部分如图中标示。图 5(a)中 XPS 为基于自参考技术的相移频率锁定信号产生模块。图 6 所示为该天文光学频率梳经平滑后在 2.16 m 望远镜 HRS 上的谱线,其中图 6(b)为局部放大图,曝光时间为 0.2 s。天文光学频率梳的实际定标精度除了受本身精度影响以外,很大程度上取决于天文光谱仪的稳定性以及天文光梳与天文光谱仪间多模光纤的激光散斑抑制效果^[19-20]。因此仍需大量的实验测量实际应用本台天文光学频率梳时可达到的视向速度定标精度与稳定性。

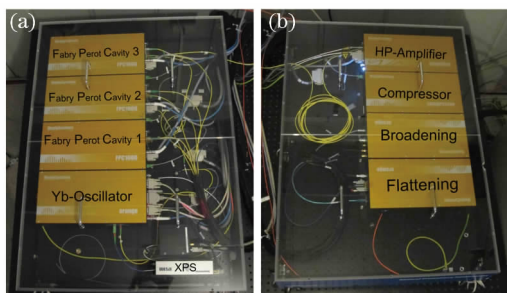


图 5 天文光梳光学系统

Fig. 5 Optical system of astro-comb

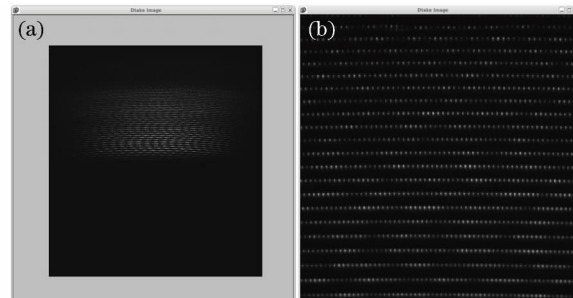


图 6 天文光梳在 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪上的谱线

Fig. 6 Spectral lines of astro-comb on HRS of 2.16-m telescope

5 结 论

介绍了用于我国兴隆观测站 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪上的天文光学频率梳。该天文频率梳使用稳定可靠的掺镱光纤激光器作为光梳源,为配合光谱仪的分辨率,经过模式滤波,得到 25 GHz 频率间隔。光谱经展宽与平滑后,得到光谱范围为 460~730 nm、平滑度优于 1 dB 的波长定标源。定标谱线约为 1×10^4 条,覆盖了光谱仪可见光光谱范围的 71% 以上。边模抑制比约为 42 dB,对频率定标的影响小于 8 mm/s。该天文光学频率梳提供的定标谱线精度高、稳定性好,满足系外行星探测的要求。天文光学频率梳在天文光谱仪上的实际定标精度与天文光谱仪稳定性之间的关系,有待进一步实验研究。

参 考 文 献

- 1 Bouchy F, Isambert J, Lovis C, *et al.*. Charge transfer inefficiency effect for high-precision radial velocity measurements [J]. *EAS Publications Series*, 2009, 37: 247-253.
 - 2 Diddams S A, Jones D J, Ye J, *et al.*. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102-5105.
 - 3 Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology[J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
 - 4 Yan Lulu, Zhang Yanyan, Zhao Wenyu, *et al.*. 186 MHz low amplitude noise erbium-doped-fiber femtosecond laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(8): 0802004.
- 闫露露, 张颜艳, 赵文宇, 等. 186 MHz 低幅度噪声掺铒光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802004.

- 5 Li C H, Benedick A J, Fendel P, *et al.*. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ [J]. *Nature*, 2008, 452(7187): 610-612.
- 6 Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, *et al.*. Laser frequency combs for astronomical observations[J]. *Science*, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- 7 Wilken T, Curto G L, Probst R A, *et al.*. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level[J]. *Nature*, 2012, 485(7400): 611-614.
- 8 Zhang Zhigang. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900130. 张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900130.
- 9 Li C H, Glenday A G, Phillips D F, *et al.*. Green astro-comb for HARPS-N[C]. *SPIE*, 2012, 8446: 84468X.
- 10 Glenday A G, Li C H, Langellier N, *et al.*. Operation of a broadband visible-wavelength astro-comb with a high-resolution astrophysical spectrograph[J]. *Optica*, 2015, 2(3): 250-254.
- 11 Probst R A, Curto G L, Avila G, *et al.*. A laser frequency comb featuring sub-cm/s precision for routine operation on HARPS[C]. *SPIE*, 2014, 9147: 91471C.
- 12 Murphy M, Udem T, Holzwarth R, *et al.*. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 380(2): 839-847.
- 13 Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, *et al.*. Fabry-Pérot filter cavities for wide-spaced frequency combs with large spectral bandwidth[J]. *Applied Physics B*, 2009, 96(2-3): 251-256.
- 14 Probst R A, Steinmetz T, Wilken T, *et al.*. Nonlinear amplification of side-modes in frequency combs[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11670-11687.
- 15 Stark S P, Steinmetz T, Probst R A, *et al.*. 14 GHz visible supercontinuum generation: Calibration sources for astronomical spectrographs[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 15690-15695.
- 16 Stark S P, Travers J C, Russell P S J. Extreme supercontinuum generation to the deep UV[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 770-772.
- 17 Chang G, Li C H, Phillips D F, *et al.*. Toward a broadband astro-comb: Effects of nonlinear spectral broadening in optical fibers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12736-12747.
- 18 Probst R A, Steinmetz T, Wilken T, *et al.*. Spectral flattening of supercontinua with a spatial light modulator[C]. *SPIE*, 2013, 8864: 88641Z.
- 19 Wilken T. Calibrating astronomical spectrographs with frequency combs[D]. Munich: LMU Munich, 2010.
- 20 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. 杨聪, 韩建, 吴元杰, 等. 动态扰模抑制多模光纤散斑的理论及实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 090602.