

引用格式: ZHU Xiao-ming, HE Jin-ping. A 10-million-resolution VIPA Spectrograph Calibrated Simultaneously with a Laser Frequency Comb: The Design and Applications (Invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(11):1149011
朱小明,何晋平. 激光频率梳同步定标的千万分辨率 VIPA 光谱装置设计及应用(特邀)[J]. 光子学报, 2020, 49(11):1149011

激光频率梳同步定标的千万分辨率 VIPA 光谱装置设计及应用(特邀)

朱小明^{1,2}, 何晋平^{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(南京天文光学技术研究所), 南京 210042)

摘 要: 在虚拟成像相位阵列光谱特性基础上, 对激光频率梳同步定标的千万分辨率虚拟成像相位阵列光谱仪器进行了可行性研究, 通过数值计算, 给出了针对不同应用的两个方向设计思路; 并采用一般的常见参数, 模拟出了满足同步定标千万分辨率光谱仪的二维光谱图. 最后, 对该类装置几个代表性应用领域及应用中的主要性能进行了简要讨论.

关键词: 超高分辨率光谱技术; 虚拟成像相位阵列; 激光频率梳; 布里渊散射; 多普勒频移; 极多波长干涉测距

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204911.1149011

A 10-million-resolution VIPA Spectrograph Calibrated Simultaneously with a Laser Frequency Comb: The Design and Applications (Invited)

ZHU Xiao-ming^{1,2}, HE Jin-ping^{1,2}

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

(2 CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: The feasibility of a 10-million-resolution virtually imaged phased-array spectrograph with a laser frequency comb as the calibration source is studied based on the virtually imaged phased-array dispersion characteristics. The numerical simulations propose two design schemes under extreme conditions with respective pros and cons. A simulated 2D spectral image is provided that satisfies the the resolution of 10 million with simultaneous calibration using general parameters. Finally, the performance of such spectroscopy in some foreseeable applications is discussed briefly.

Key words: Ultra-high resolution spectroscopy; Virtually imaged phased-array; Laser frequency combs; Brillouin scattering; Doppler shift; Many-wavelength interferometry

OCIS Codes: 120.6200; 120.4570; 300.6320; 150.1488

0 引言

受益于超快激光技术及非线性光学的发展, 1999 年, HALL J 团队率先将锁模激光的重复频率和偏置频

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 11773045, 11973009, 11933005)

第一作者: 朱小明(1978—), 女, 工程师, 博士, 主要研究方向为超高分辨光谱技术. Email: xmzhu@niaot.ac.cn

通讯作者: 何晋平(1982—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超高分辨光谱技术、天文光子学. Email: jphe@niaot.ac.cn

收稿日期: 2020-09-01; 录用日期: 2020-10-10

<http://www.photon.ac.cn>

率均锁定在射频频率标准上,从而首次在实验上实现了激光频率梳(Laser Frequency Comb, LFC)^[1],这意味着光频精密计量进入了新时代.HALL J也因为这方面工作获得了2005年诺贝尔物理学奖.激光频率梳的出现,为光谱仪带来了迄今为止最佳波长定标源,将定标精度由原来的m/s量级推进到cm/s量级^[2],从而极大地扩展了光谱技术的应用范围.

除波长定标精度外,光谱仪另一个极关键参数是光谱分辨率.目前常见的光谱仪主要有两类:光栅光谱仪和傅里叶光谱仪.傅里叶光谱仪由于在时间分辨率和精度方面的不足,主要用在面探测器比较难获得的红外波段.作为目前使用最广泛的光谱仪,光栅光谱仪分辨率通常在5万以内(此处光谱分辨率使用的是常用的光谱分辨本领的定义).传统的光栅光谱仪在付出极大代价的前提下,如,极大光栅尺寸、超大装置及超高造价,天文高分辨光谱仪的分辨率能达到10万甚至100万^[3-4].如何以较小的代价获得超高分辨光谱仪器,从而推动其它研究方向的发展是一个有意义的课题.

虚拟成像相位阵列(Virtually Imaged Phased-Array, VIPA)作为一种具有极高色散能力的光学元件,为以小代价实现超高分辨率提供了可能.VIPA最早由SHIRASAKI M^[5-6]设计提出并作为波分复用器件应用于光通讯领域^[7-9].随着激光频率梳技术的发展,VIPA与激光频率梳相结合被广泛应用在分子超精细吸收谱测量方面^[10-13].随着研究的深入,VIPA也逐渐被要求十分严苛的天文领域所注意,被作为主色散器件应用于天文高分辨光谱仪中^[14-15].本团队在这方面也有一些前期研究工作:首次利用激光频率梳来同步定标VIPA光谱装置,在760 nm附近同时获得了超高分辨率(100万量级)及超高波长定标精度(10 cm/s量级,或 10^{-10} 量级)^[16].该类光谱技术不仅在天文领域有着重要应用^[17-18],也将为其它研究领域带来极好的研究工具,如,基于布里渊散射的生物力学特性研究^[19-20]、基于布里渊散射的远程温度精测^[21-22]、基于多普勒频移的速度精测^[23-24]、极多波长干涉测距^[25-26]、超精细谱研究^[27]等.

目前关于VIPA光谱技术的研究中,VIPA的色散能力均处于100万量级,为进一步提升该类光谱技术性能,本文将着眼于激光频率梳同步定标的光谱分辨率千万量级的VIPA光谱装置设计.这类装置相对于目前100万量级VIPA光谱装置,在以下方面更有优势:1)分辨率和定标精度都有1个量级的提升,将上述应用领域的测量精度提升1个量级;2)分辨率千万量级能分辨重频100 MHz量级激光频率梳的相邻梳齿,更好地和现有常规激光频率梳匹配,从而极大地降低难度和造价;3)能研究一些目前受限于分辨率及定标精度而暂时无人研究的领域.

1 千万量级分辨率VIPA光谱仪的设计

1.1 VIPA及其色散特性

VIPA结构及工作原理如图1所示.VIPA本质是一个法布里-帕罗(Fabry-Perot, F-P)腔,但使用方法与传统F-P腔不同.VIPA有三个不同镀膜区域:入口处镀有增透膜(Anti-Reflective, AR)用作光束输入,前表面镀有高反膜(High-Reflective, HR),后表面镀有部分反射膜(Partially-Reflective, PR).输入光被柱面镜聚焦成线型,以小角度入射近VIPA并在其前后表面多次反射,输出一系列光程差恒定的线型光束(相位阵列);这些线性光束经透镜汇聚后在焦平面上进行多光束干涉,从而引入色散.可见,VIPA色散机制与光栅

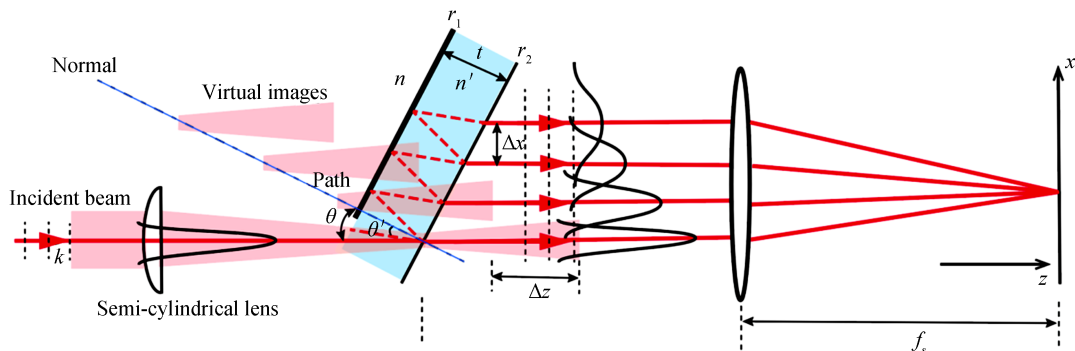


图1 VIPA结构及色散原理

Fig. 1 The schematic of the VIPA and its dispersion principle

类似,同属相位阵列型.由于VIPA出射各光束经VIPA前后表面反射次数不同,从而导致其输出点离束腰(虚像位置)距离各不相同,因而,输出位置处各光束空间宽度成逐渐展宽排列,如图1所示.这会为后续的多光束干涉带来问题,本团队会在其它地方详细讨论该问题及其解决方案.

作为相位阵列型色散器件,VIPA的色散本领与光栅一样,取决于总光程差 $L = N \times \Delta L$,其中 N 为相位阵列中光束总数(参与多光束干涉的光束数目), ΔL 为相位阵列中相邻光束间的光程差(决定干涉级次).VIPA的 ΔL (取决于厚度和入射角,由于小角入射, ΔL 约等于VIPA光学厚度的两倍)能达到毫米甚至厘米量级,相对于光栅来说(一般为纳米到微米量级),要高出3个量级甚至更多.这意味着在 N 相当(甚至小1~2个量级)的情况下,VIPA的色散能力相对光栅也有数量级提高.因此,极高的色散能力决定了VIPA极适合作超高分辨率光谱仪的主色散器件.

从F-P腔传输特性出发,推导出的VIPA的分辨本领(resolving power)公式为

$$\mathcal{R} \simeq \frac{\pi r_1 r_2}{1 - r_1^2 r_2^2} \cdot \frac{2n't}{\lambda \cdot \cos \theta} \quad (1)$$

式中, t 为VIPA厚度, n' 为材料折射率,前后表面反射率分别为 r_1 和 r_2 ,波长 λ 的光入射到VIPA的入射角为 θ .

式(1)中, $\frac{\pi r_1 r_2}{1 - r_1^2 r_2^2}$ 与VIPA的镀膜相关,一般可定义VIPA的镀膜精细度 $\mathcal{F} = \pi r_1 r_2 / (1 - r_1^2 r_2^2)$,它将决定最大能支持多少光束进行干涉.显而易见的是,反射率越高,VIPA的精细度也越高,能支持的光束数目越多,理论上分辨本领越高. $\frac{2n't}{\lambda \cdot \cos \theta}$ 与多光束干涉级次相关,由式(1)可见VIPA越厚,其分辨本领越高.由此可见,要进一步提高现有VIPA的分辨本领或色散能力,可从提高镀膜反射率或增加VIPA光学厚度两方面着手.

VIPA的自由光谱范围为 $\text{FSR} = \lambda^2 / (2n't / \cos \theta)$,其决定光谱采集范围及正交色散器件色散能力.将FSR带入式(1)中,可得VIPA的分辨本领另一表示形式

$$\mathcal{R} \simeq \mathcal{F} \cdot \frac{\lambda}{\text{FSR}} \quad (2)$$

由式(2)可见,基于增加VIPA光学厚度来提高其分辨本领,将会导致VIPA的自由光谱范围过小,这对正交色散器件的色散能力提出较高要求.因此如要考虑仪器实现的可能性,在千万分辨率光谱仪设计过程中,需仔细权衡各参数.

1.2 千万量级分辨率VIPA光谱仪设计思路

在推导VIPA的分辨本领理论公式(1)的时候做了一个假设:VIPA的截面无穷大.这带来的好处是基于无穷多束光干涉能积分出解析表达式,从而方便给出定性图像以获得对VIPA分辨本领影响因素的初步印象.但实际情况是VIPA不但尺寸有限,且为保证光有效耦合进去,入射角必须要大于一定角度,这必然导致参与干涉的光束数目受限.因此VIPA实际分辨本领会小于式(1)所得的计算值.为更真实数值模拟实际情况,将VIPA放置在光谱仪器内来整体考虑,利用光传输特性来研究整个系统色散特性.VIPA光谱装置示意图如图2所示.

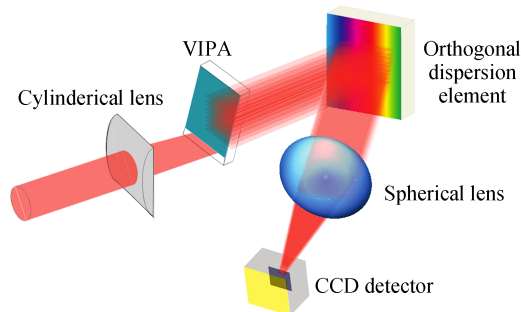


图2 VIPA光谱装置示意图

Fig. 2 The schematic of the VIPA spectroscopic instrument

成像透镜焦平面(光谱探测器)上的光场可看做 VIPA 前后表面反射产生的有限束光束的相干叠加,在傍轴近似下,该公式为^[28]

$$E_x(\lambda) \propto \exp\left(-\frac{f_c^2}{f_s^2} \cdot \frac{x^2}{W^2}\right) \times \sum_{n=0}^N \left[(r_1 r_2)^2 \exp\left(-i \frac{4\pi n t \cos \theta_{in}}{\lambda}\right) \times \exp\left(i \frac{2\pi n t \cos \theta_{in}}{\lambda} \cdot \frac{x^2}{f_s^2}\right) \times \exp\left(i \frac{4\pi t \tan \theta_{in} \cos \theta}{\lambda} \cdot \frac{x}{f_s}\right) \right] \quad (3)$$

式中, f_c 为柱面镜焦距, f_s 为成像透镜焦距, W 为入射平行光的半径, θ_{in} 为光线进入 VIPA 后在前后两表面反射时的反射角. 光束数目 N 是 $d/(2t \tan \theta_{in})$ 计算值的向上取整, d 为 VIPA x 方向的尺寸(如图 1).

由式(3)所得的光场可计算出探测器上的光强分布,即^[28]

$$I_x(\lambda) = |E_x(\lambda)|^2 \propto \exp\left(-\frac{2f_c^2 x^2}{f_s^2 W^2}\right) \times \frac{1}{(1 - r_1 r_2)^2 + 4(r_1 r_2) \sin^2\left(\frac{k\Gamma}{2}\right)} \quad (4)$$

式中, $\Gamma = 2n't \cos \theta_{in} - 2t \tan \theta_{in} \cos \theta \cdot \frac{x}{f_s} - n't \cos \theta_{in} \cdot \frac{x^2}{f_s^2}$. 在设计中,考虑到实际干涉光束数目,利用式(3)计算出的分辨率将非常接近实际情况下的分辨率^[16].

基于式(4)得到光谱仪理想点扩散函数,并同时用高斯分布和洛伦兹分别进行拟合,如图 3 所示,得到的卡方分别为 17 722 和 8.182,表明 VIPA 的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)更接近洛伦兹分布.

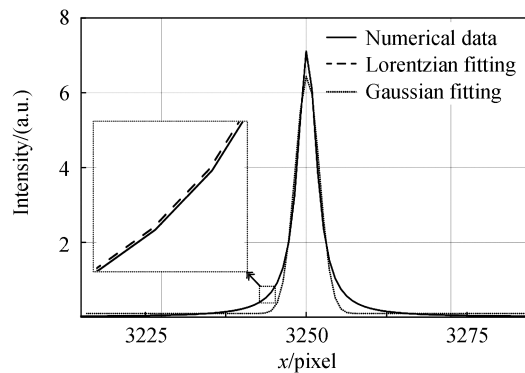


图 3 VIPA 点扩散函数的高斯及洛伦兹拟合

Fig. 3 The PSF of the VIPA fitted with Gaussian and Lorentzian functions

由式(4)可见,与衍射光栅类似,VIPA的光强分布也可以看成是衍射因子 $\exp\left(-2f_c^2 x^2/f_s^2 W^2\right)$ 与干涉因子 $\frac{1}{(1 - r_1 r_2)^2 + 4(r_1 r_2) \sin^2\left(\frac{k\Gamma}{2}\right)}$ 的乘积.很明显,输入平行光半径 W 、柱面镜焦距 f_c 及成像透镜焦距 f_s

均会影响衍射因子 $\exp\left(-2f_c^2 x^2/f_s^2 W^2\right)$ 的特性.在 VIPA 光谱仪,尤其是超高分辨 VIPA 光谱仪设计中,为提高光利用率及合理利用探测器靶面,应尽量让干涉条纹出现在主级次上,压制次级次光强,故宜采用长焦柱面镜且半径较小的输入平行光束.另外,长焦柱面镜和较小的入射光束也会使得入射角限制放宽.

值得注意的是,在衍射包络内,某些位置会存在光谱信号干涉相消的状况.图 4 中实线给出了 $\theta = 0.2^\circ$, $f_s = 516.8$ mm 时,式(4)计算出的 $\lambda = 1050$ nm 附近单频激光经 $t = 3.371$ mm 的 VIPA 色散后在探测器上光强分布,可以看出,在坐标 $-2 \sim 0$ mm 间光谱信号存在干涉相消区域.通过改变不同参数可总结出干涉相消区域一般发生在 $\partial\Gamma/\partial x = 0$ 附近(图 4 中虚线),即

$$x = -\frac{\sin 2\theta}{2(n'^2 - \sin^2 \theta)} f_s \quad (5)$$

因此,为使得 CCD 靶面避开光谱信号干涉相消区域,一方面可以调节入射角 θ 和成像透镜焦距 f_s ,使得 $\partial\Gamma/\partial x = 0$ 出现在 CCD 靶面位置之外,即若 CCD 靶面宽度为 X ,则满足 $x < -X/2$ 即可.这要求 f_s 和入

射角 θ 满足

$$f_s > X \cdot \frac{n'^2 - \sin^2 \theta}{\sin 2\theta} \quad (6)$$

另一方面若参数导致 f_s 无法满足式(6),则应将探测器靶面置于零点右边避开光谱信号干涉相消区域.

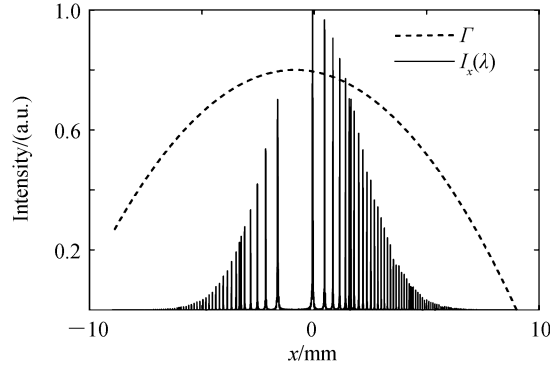


图4 VIPA光谱中的干涉相消
Fig. 4 The interference destruction in the VIPA spectra

如1.1节所述,VIPA的FSR主要决定于其厚度,若想同时采集到的光谱宽度宽于其FSR,一般需要一个正交色散元件将VIPA的各级次光在另一方向色散开来.此类正交色散元件可以是闪耀光栅、阶梯光栅、体全息光栅甚至是另一个VIPA.但是,不管选择何种正交色散器件,该器件能分辨出的波长细节应满足 $\Delta\lambda_{\min} < \text{FSR} = \lambda^2 / (2n't / \cos \theta_m)$, 即其分辨本领应满足 $\lambda / \Delta\lambda > (2n't / \cos \theta_m) / \lambda$.

最后讨论探测器参数选择.VIPA光谱仪色散关系倒数公式为^[16]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\sin 2\theta}{2(n'^2 - \sin^2 \theta)} \cdot \frac{\Delta x}{f_s} + \frac{\Delta x^2}{2f_s^2} \quad (7)$$

式(7)给出了一定带宽 $\Delta\lambda$ 的光谱在探测器上所占宽度 Δx 间的关系.若 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 为光谱仪分辨率的倒数(即 $\Delta\lambda$ 为光谱仪能分辨的最小光谱细节时), Δx 对应于光谱仪点扩散函数的半高全宽.为充分采样,光谱仪设计中,点扩散函数在CCD上需要至少占用两个像元(pixel),因此式(7)给出了光谱仪分辨率、成像透镜焦距及探测器像元大小间的关系,以及光谱测量范围对探测器靶面大小的要求.从式(7)可以看出,在分辨率确定的情况下,VIPA的材料折射率一般无法做出太大调整,因此,主要的可调参数只有成像透镜焦距 f_s 及入射角大小.而上述2个可调参数同样也会影响公式衍射因子特性,即影响能量在各级次间的分配.因此,在光谱仪设计中,各参数选择需要综合考虑.

要实现千万量级分辨率的VIPA光谱仪,有些参数要求必然十分苛刻,这不仅涉及到是否能在实验上实现,也关系到实现代价.由于参数较多,无法给出通用情况,只能根据具体需求具体分析.这里仅讨论实现VIPA千万分辨能力的两种极限情况:极限精细度 \mathcal{F} 及极限厚度 t .实际VIPA光谱仪设计应在这两种极限范围以内.

设计中取VIPA为常见的熔融石英材料,截面大小为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,光谱仪工作中心波长 $\lambda = 1050 \text{ nm}$,此时熔融石英折射率为 $n' = 1.4498$.参考本团队前期研究基础,经综合考虑,光谱仪中的柱面镜、成像透镜及CCD采用以下参数,即: $f_c = 400\sqrt{2} \text{ mm}$, $f_s = 516.8 \text{ mm}$,探测像元为 $2.5 \mu\text{m}$,入射光直径选为 8 mm .

1.2.1 极限精细度情况

VIPA镀膜精细度主要与前后两表面的镀膜反射率有关.现代镀膜工艺已经可以使得反射率达到极高水平,如目前SIGMA KOKI公司生产的高反射膜反射率已经做到99.999%.考虑后续镀膜技术进一步发展,给出的精细度极限条件为 $r_1^2 = 99.9999\%$, $r_2^2 = 99.999\%$,精细度 $\mathcal{F} \simeq 5.71 \times 10^5$.考虑入射光耦合效率,入射角设为 0.6° .输入光设为频率间隔为 100 MHz 的梳齿序列,其中心波长为 1050 nm ,带宽为 0.12 nm (为在一个级次内采集到所有数据,入射光光谱带宽被设为小于FSR).利用式(3)数值计算可得,当VIPA厚度为 0.9 mm 时,光谱分辨率可达 1.215×10^7 ,此时FSR为 0.423 nm .数值模拟结果参考图5所示,可以看到, 100 MHz

频率间隔的梳齿可以被完全区分. 由于要达到千万量级光谱分辨率, 需要保证足够多的光束参与干涉过程, 因此, 在此处选择了较小入射角, 但此参数选择无法满足式(7)要求的条件, 导致 ~ -2.5 mm处存在光谱缺失, 尽管此处光谱信号受衍射包络调制已经很小, 还是需将探测器置于光轴偏右侧位置来避开此缺失区域, 以实现探测器像素的高效率利用. 探测器靶面大小至少需要覆盖一个FSR的范围, 根据式(7), 该范围对应VIPA色散方向上至少12.3 mm探测宽度, 即4 920个像素.

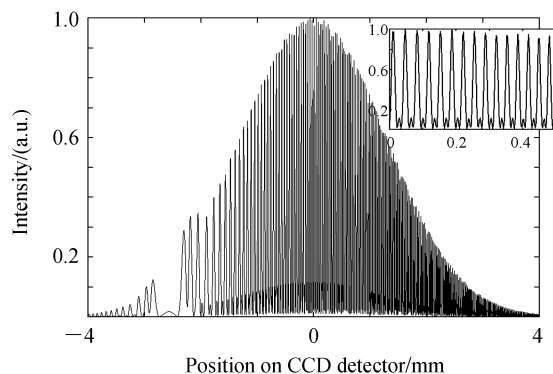


图5 极限精细度情况下CCD上光强分布

Fig. 5 The intensity distribution on the CCD under the finesse extreme conditions

1.2.2 极限厚度情况

目前商用VIPA较高的镀膜反射率只为 $r_1^2 = 99.5\%$, $r_2^2 = 98.2\%$, 对应的镀膜精细度 $\mathcal{F} \simeq 135$. 在此镀膜条件下, 且入射角仍为 0.6° , 想要达到千万量级分辨本领, 据式(3)计算, VIPA厚度至少为15 mm; 此厚度对应的FSR计算值为25.35 pm, 远小于精细度极限下的0.423 nm, 这为正交色散器件选取带来了较大挑战(前者需要至少4万分辨率才能实现不同FSR光信号的正交方向区分, 而后者仅需 ~ 2500 分辨率即可). 图6给出了该条件下探测器上的光强分布. 图中输入光同样为频率间隔为100 MHz的梳齿, 其中心波长为1 050 nm, 但带宽为25 pm (略小于FSR). 根据图6中光强分布, 可得此时光谱分辨率为 1.027×10^7 , 100 MHz频率间隔的梳齿同样可以被完全区分. 与精细度极限情况类似, 由于相同的入射角度选择, 探测器仍需置于光轴右侧位置来避开光谱信号缺失位置. 此时探测器在VIPA色散方向上需要至少1.9 mm的探测宽度, 即760个像素.

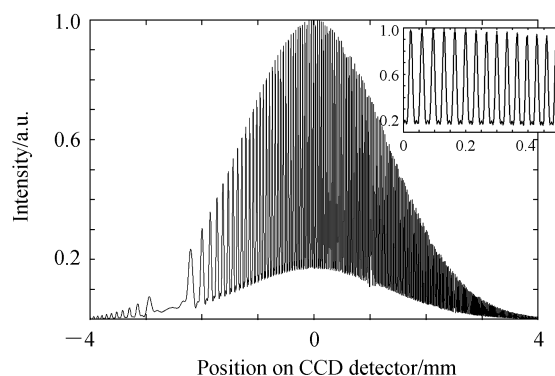


图6 极限厚度情况下CCD上光强分布

Fig. 6 The intensity distribution on the CCD under the thickness extreme conditions

可以看到, 极限精细度情况虽对镀膜有较大挑战, 但可以使得VIPA的厚度在低于1 mm时达到千万量级分辨率, 对光路中正交色散元件的色散能力要求大大降低. 在对光谱测量范围要求不高的情况下(小于0.4 nm), 甚至可以不需要正交色散元件, 从而使得探测器可以选用一维线探测. 而极限厚度情况下VIPA的FSR过小, 这对光路中正交色散元件色散能力要求很高, 可能需要较大阶梯光栅. 另外, 由于上述计算均未考虑材料吸收及散射带来的问题, 而这些问题在VIPA过厚时也会更明显. 因此, 实际VIPA光谱仪设计中,

在镀膜能力能满足条件时,应尽量靠向极限精细度情况.千万量级分辨率VIPA光谱仪的设计需要综合各种参数权衡利弊.

2 激光频率梳同步定标设计及定标精度讨论

超高波长定标精度对研究光谱信号的微小频率漂移至关重要.而要获得极高波长定标精度,除了需要极端稳定波长定标源外,还得考虑光谱仪器的稳定性.仪器稳定性问题主要由机械振动、温度漂移、气流等引起.为解决此类问题,目前除了通过将仪器置于真空环境并严格控制温度(精度可达1 mK量级)以外,波长同步定标作用也极其显著.

波长同步定标是将定标光和信号光在光路中同时传输相同的光学元件并被同一探测器所探测,此设置能有效消除环境因素导致的大部分光谱漂移,从而在仪器无需做到极端稳定的情况下也能获得高精度定标光谱数据.

图7为激光频率梳同步定标的VIPA光谱装置示意图.为使得定标光束LFC和信号光被同一探测器同步探测,二者相对空间位置在正交色散方向稍有错移,刚好使得信号光分布在定标光的相邻级次中间位置.图8给出了数值模拟得到的VIPA光谱仪同步定标二维光谱,其中点阵为光梳各梳齿(对应不同波长),线条为信号光;二者相互间隔,不同干涉级次相邻且对应,实现同步定标探测.

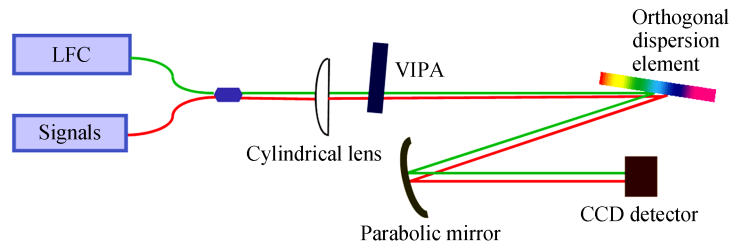


图7 同步定标示意图

Fig. 7 The optical schematic of the simultaneous calibration

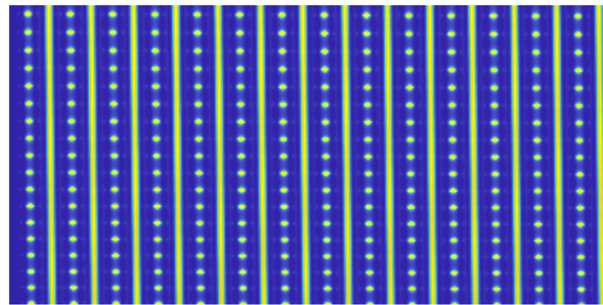


图8 CCD二维光谱样图

Fig. 8 The simulation 2D spectra on the CCD

需要注意的是,同步定标时,定标光和信号光各干涉级次在正交色散方向依次间隔排列,这要求正交色散元件的分辨能力至少要是非同步定标的2倍才可以使得两个通道信号均不产生交叠.因此正交色散元件的分辨本领至少为 $\lambda/\Delta\lambda > 2 \cdot (2n't/\cos\theta_m)/\lambda$.如1.2节所讨论,要达到千万量级分辨率,可选择增加VIPA厚度或镀膜精细度两种方式,这两种极限情况下正交色散器件的参数要求为:1)极限镀膜精细度情况下,镀膜反射率为 $r_1^2 = 99.9999\%$, $r_2^2 = 99.999\%$,VIPA厚度为0.9 mm,入射角度为 0.6° ,自由光谱范围约为0.423 nm,此时对正交色散器件色散能力要求不高,约为5 000,较合适的色散元件为闪耀光栅,在常规尺寸下刻线数600/mm足够;2)在目前商用镀膜条件下($r_1^2 = 99.5\%$, $r_2^2 = 98.2\%$),入射角仍为 0.6° ,VIPA厚度需约为15 mm,自由光谱范围约为25.35 pm,对应正交色散方向色散能力需达到83 000,此时色散元件需使用高色散能力阶梯光栅.通常可对二者进行权衡,选择满足分辨率及同步定标要求,但都不需要极限的情况.

数值模拟所采用的VIPA材料为熔融石英,厚度为5 mm,前后镀膜反射率分别为99.99%和99.8%,入

射角为 0.6° . 正交色散元件为阶梯光栅, 刻线数为 $79/\text{mm}$, 闪耀角为 75° , 入射角为 82.5° . 激光频率梳重频为 100 MHz . 从图中可以看出, 重频为 100 MHz 的激光频率梳梳齿可以被光谱仪完全区分开. 这意味着千万量级分辨率 VIPA 光谱装置能更好地和现有常规激光频率梳 (重复频率一般为 100 MHz 左右) 匹配, 从而避免了获取高重频光梳所带来的难度、造价及稳定性等方面的问题, 如, 天文光谱定标所用的天文光梳为了获得与光谱分辨率 (一般 10 万左右) 匹配的梳齿间隔 (需达到 $20\sim 30\text{ GHz}$), 而引入的多级 F-P 腔滤波一方面带来了长期稳定性方面的问题 (F-P 腔较易受环境影响而失锁), 另外装置复杂性与造价也大大提高.

根据长期经验总结, 单个波长的定标精度为^[29]

$$\sigma = A \frac{\text{FWHM}}{\text{SNR} \times \sqrt{n}} \quad (8)$$

式中, SNR 为单波长的信号噪声比, n 为信号半高全宽所占像元个数, 对于类高斯分布, FWHM 对应光谱仪分辨率, 常数 $A=0.41$. 由式 (8) 可见, 波长定标精度和光谱仪分辨率成正比, 因此, 在同等环境参数及定标源稳定性情况下, 千万量级光谱仪比百万量级光谱仪定标精度要高 1 个量级. 若光谱分辨率为 1 千万, $\text{SNR}=250$, $n=3$, 则定标精度将优于 10^{-10} .

本文所设计的激光频率梳同步定标的千万量级 VIPA 光谱装置与本团队现有的百万量级分辨率双通道同步定标 VIPA 光谱仪^[16]相比较, 光路设计基本不变, 仅通过改变 VIPA 镀膜及厚度、正交色散器件色散能力等即可实现. 目前主要问题是 VIPA 器件的设计及制造, 这也会是本团队后续工作的立足点.

3 千万量级分辨率光谱仪的应用

3.1 基于布里渊散射的力学特性研究

布里渊散射是伴随声子产生或吸收的非弹性光散射. 布里渊光谱由激发光频移 $\pm \nu_b$ 形成的双峰组成. 频移 $\nu_b = \frac{2n}{\lambda} \mu \sin \frac{\theta}{2}$, 其中 λ 是激发光在真空中的波长, n 是折射率, μ 是声速, θ 是散射角. 因此通过测量频移可以得到声速值. 又通过关系 $M(\nu_b) = \rho \mu^2$ 来得到绝热弹性模量. 而布里渊线宽则有两个贡献: 1) 由于 ν_b 分布导致的非均匀展宽; 2) 由于耗散过程中声子有限寿命而导致的均匀展宽. 在忽略非均匀展宽的情况下, 布里渊谱线的半高全宽 Γ_b 与粘度系数 η 的关系是^[30] $\eta(\nu_b) \propto \Gamma_b / \nu_b^2$. 因此布里渊光谱测量可以用来重构材料的力学性质, 并由此推算出其温度及粘度系数等.

目前布里渊散射光谱主要使用扫描光栅单色仪^[31]、光学拍频^[32]和多通道扫描法布里-珀罗干涉仪^[33]等来实现, 这些方法每个光谱分量都要按顺序测量, 因此获取单个布里渊光谱需要几分钟到几个小时, 限制了布里渊光谱测量只能用于单点或静态测量. VIPA 光谱仪由于其简单性和相对高通光率的优势而很快在生物成像的布里渊散射光谱技术中得到了认可并应用^[19, 34-35], 且可以通过添加第二和第三阶 VIPA 来改善布里渊光谱的对比度^[36].

在布里渊散射光谱诸多应用里, 激发光的频移 ν_b 和半高全宽 Γ_b 精密测量尤为重要. 在生物成像领域, 对布里渊频移在 200 MHz 以内变化的观测对研究人眼角膜和晶状体的弹性至关重要^[35], 现有的用于布里渊散射光谱技术的 VIPA 光谱仪的分辨率一般在 50 万左右^[35-37], 无法进行如此窄的频率扫描. 而激光频率梳定标的千万量级分辨率 VIPA 光谱仪可以对 50 MHz 以下的频移进行精确测量, 并可以随时监控其动态过程, 这将会为生物器官的布里渊光谱测量提供丰富的测量数据.

在利用布里渊激光雷达技术进行液体温度遥感测试时^[22, 38-39], 频移测量 20 MHz 的不确定性会导致测温时 1°C 的误差^[40], 如要测量的温度变化小于 1°C , 将会为现有的布里渊激光雷达温度遥感技术带来极大挑战. 采用激光频率梳定标的千万量级分辨率 VIPA 进行光谱测量温度导致的布里渊边带频移, 可以使得液体温度的测量误差在 1 mK 量级, 极大地提高了布里渊激光雷达技术液体温度测量的精度, 这在科研及国防领域都有重要应用.

3.2 基于多普勒效应的速度精测

利用运动物体的光谱多普勒频移数据推算出运动物体速度, 是光谱信息的一个重要应用. MAYOR M 及其学生 QUELOZ D 利用行星引起的宿主恒星的周期性多普勒频移来探测类地行星的存在^[41], 天文上把

这种方法称作视向速度法,而这两人也因此创造性方法获得2019年诺贝尔物理学奖。

基于多普勒频移的视向速度测量精度 σ_v 依赖于光信号强度 S ,光谱测量范围 $\Delta\lambda$ 以及光谱分辨率 \mathcal{R} ,其关系为^[42]

$$\frac{1}{\sigma_v} \propto S^{0.5} \Delta\lambda^{0.5} \mathcal{R}^{1.5} \quad (9)$$

利用激光频率梳定标时, $\Delta\lambda$ 决定了用于定标的光梳梳齿总个数。LI Chih-hao等通过空间F-P腔滤波来提升激光频率梳的重复频率,从而用来给 HARPS 光谱仪定标,理论上速度测量精度可达到 1 cm/s ^[2]。定标测试中 HARPS 光谱仪的分辨率为120 000,所记录到的用于定标光梳梳齿约为10 000个。根据式(9),结合千万量级分辨率VIPA光谱仪的参数,速度测量精度则可达 $15 \mu\text{m/s}$ 。

有别于夜天文观测,太阳的强亮度使得千万量级分辨率太阳光谱仪可以利用视向速度法应用于太阳光谱的超精细结构研究和磁场横向运动研究,其极高的速度测量精度可以帮助实现对太阳耀斑、日冕物质抛射及暗条活动进行跟踪分析及预报^[43-44]。另外,若该光谱技术应用于激光雷达测速^[24],也有望能大大提高其测量精度。

3.3 极多波长干涉测距

在激光精密测距领域, Van den BERG S A 提出的VIPA光谱加激光频率梳的极多波长干涉测距法^[25-26]因其结构简单、测量速度快(百赫兹)、测量精度高(50 m精度 10^{-8})且可兼顾大测距范围等优势在绝对距离测量方面得到了广泛关注。根据本团队的数值模拟,基于该方法的相对位移测量,最小测量位移更可达到40 pm甚至更优^[45]。该方法是将激光频率梳各梳齿作为独立波长来实现极多波长同时测距,通过采集多个光梳梳齿信号由于待测距离与参考距离之间的光程差导致的干涉信号在探测器上的强度差异,来反演相位得到待测距离。

该方法中,激光频率梳的重复频率(也对应梳齿频率间隔)需要与VIPA光谱仪的分辨率相匹配,即VIPA需要能在光谱上完全分开各个梳齿。100万分辨率VIPA光谱仪一般需要和梳齿频率间隔大于800 MHz的激光频率梳搭配效果才好。而目前常规光梳重复频率一般是小于250 MHz。基于掺Yb光纤的激光频率梳能达到800 MHz^[46],但这也接近目前的极限。而基于飞秒钛宝石激光的频率梳能做到1 GHz以上的重复频率^[10],但由于体积较大、造价昂贵及对环境要求较高等特点,其很难在野外或实地进行测量。对于千万量级分辨率VIPA光谱仪来说,重频为100 MHz的光纤激光频率梳可作为探测光源,为该方法应用于野外或实地距离测量、折射率测量及野外实地微量元素测量提供了可能。

相较于重频为1 GHz的光梳配合100万量级分辨率VIPA光谱装置,本文提出的千万量级光谱装置使用100 MHz重频光梳,其脉冲到脉冲距离($l_{pp} = c/f$)可达3 m,意味着可测无模糊距离更大,对于超出 l_{pp} 的距离进行飞行时间法测距精度要求更低,可以在保证测距绝对精度的前提下大大拓展激光测距范围。但值得注意的是,VIPA光谱仪配合激光频率梳的极多波长干涉测距方法的测距精度主要与探测器上探测到的梳齿个数有关,与光梳本身重频无关,因此千万量级分辨率和百兆赫兹光梳的选用不会影响该方法绝对距离测量精度。

该测距方法仪器体积小、测量精度高、测距范围大、数据获得速度快,非常适合空间高精度测距等方面的应用。

4 结论

本文在讨论VIPA色散特性基础上,给出了VIPA实现千万量级分辨率的两个途径:镀膜精细度极限或大幅增加光学厚度。二者分别在自由光谱范围宽度及实现难度上有优势,后续实际VIPA更多应是在二者之间平衡选择。对激光频率梳同步定标系统进行了初步设计,并给出了主要器件参数,原则上这些参数目前都能够实现。最后给出了激光频率梳同步定标的千万量级分辨率VIPA光谱装置在布里渊散射力学特性测量、基于多普勒效应的速度测量以及极多波长干涉的距离测量等应用方面的性能及应用前景。本文可能是国内外对千万量级分辨率及cm/s量级波长定标精度的极端光谱测量装置设计的首次尝试,本团队后续将持续推进关键器件及装置仪器的实现。

参考文献

- [1] JONES D J, DIDDAMS S A, RANKA J K, *et al.* Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, **288**(5466): 635-639.
- [2] LI C H, BENEDICK A J, FENDEL P, *et al.* A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s⁻¹[J]. *Nature*, 2008, **452**(7187): 610-612.
- [3] PEPE F, MAYOR M, DELABRE B, *et al.* HARPS: a new high-resolution spectrograph for the search of extrasolar planets[C]. *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, 2000, 4008: 582-592.
- [4] BARLOW M J, CRAWFORD I A, DIEGO F, *et al.* First results from the UHRF: ultra-high-resolution observations of atomic interstellar lines towards ζ Ophiuchi[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1995, **272**(2): 333-345.
- [5] SHIRASAKI M. Large angular-dispersion by virtually-imaged phased-array (VIPA) and its application to wavelength demultiplexing: Technical Digest[C]. *Microoptics Conference (MOC'95)*, Hiroshima, Japan, 1995: PD3.
- [6] SHIRASAKI M. Large angular dispersion by a virtually imaged phased array and its application to a wavelength demultiplexer[J]. *Optics Letters*, 1996, **21**:366-368.
- [7] XIAO S, WEINER A M. 2-D wavelength demultiplexer with potential for ≥ 1000 channels in the C-band[J]. *Optical Express*, 2004, **12**:2895-2902.
- [8] XIAO S, WEINER A M, LIN C, Experimental and theoretical study of hyperfine WDM demultiplexer performance using the virtually imaged phased-arrays (VIPA)[J]. *Journal of Lightwave Technology*. 2005, **23**:1456-1467.
- [9] LUO H, LIU Y. Progress and application of the virtually imaged phased array[C]. *Laser & Optoelectronics Progress* 2, 2006.
- [10] DIDDAMS S A, HOLLBERG L, MBELE V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb[J]. *Nature* 2007, **445**:627-630.
- [11] NUGENT-GLANDORF L, NEELY T, ADLER F, *et al.* Mid-infrared virtually imaged phased array spectrometer for rapid and broadband trace gas detection[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**: 3285-3287.
- [12] KLOSE A, YCAS G, CRUZ F, *et al.* Rapid, broadband spectroscopic temperature measurement of CO₂ using VIPA spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2016, **122**:78.
- [13] SCHOLTEN S K, ANSTIE J D, HEBERT N B, *et al.* Complex direct comb spectroscopy with a virtually imaged phased array[J]. *Optics Letters*. 2016, **41**:1277-1280.
- [14] BOURDAROT G, LE COARER E, MOUILLET D, *et al.* Experimental test of a 40 cm-long R= 100 000 spectrometer for exoplanet characterisation [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, International Society for Optics and Photonics, 2018, **10702**: 107025Y.
- [15] BOURDAROT G, LE COARER E, BONFILS X, *et al.* Nanovipa: a miniaturized high-resolution echelle spectrometer, for the monitoring of young stars from a 6u cubesat[J]. *CEAS Space Journal*, 2017, **9**(4): 411-419.
- [16] ZHU X M, LIN D, HAO Z B, *et al.* A VIPA spectrograph with ultra-high resolution and wavelength calibration for astronomical applications[J]. *The Astronomical Journal*, 2020, **160**:135
- [17] SNELLEN I A G, DE KOK R J, LE POOLE R, *et al.* Finding extraterrestrial life using ground-based high-dispersion spectroscopy[J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **764**(2): 182.
- [18] LÓPEZ-MORALES M, CURRIE T, TESKE J, *et al.* Detecting earth-like biosignatures on rocky exoplanets around nearby stars with ground-based extremely large telescopes[J]. *arXiv preprint arXiv:1903.09523*, 2019.
- [19] SCARCELLI G, YUN S H. Confocal Brillouin microscopy for three-dimensional mechanical imaging [J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(1): 39-43.
- [20] MENG Z, TRAVERSO A J, BALLMANN C W, *et al.* Seeing cells in a new light: a renaissance of Brillouin spectroscopy[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, **8**(2): 300-327.
- [21] SCHORSTEIN K, POPESCU A, GÖBEL M, *et al.* Remote water temperature measurements based on Brillouin scattering with a frequency doubled pulsed Yb: doped fiber amplifier[J]. *Sensors*, 2008, **8**(9): 5820-5831.
- [22] SCHORSTEIN K, FRY E S, WALTHER T. Depth-resolved temperature measurements of water using the Brillouin lidar technique[J]. *Applied Physics B*, 2009, **97**: 931 - 934.
- [23] LI C H, BENEDICK A J, FENDEL P, *et al.* A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s⁻¹[J]. *Nature*, 2008, **452**(7187): 610-612.
- [24] LIU Z, BARLOW J F, CHAN P W, *et al.* A review of progress and applications of pulsed doppler wind LiDARs[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(21): 2522.
- [25] BERG S AVAN DEN, PERSIJN S T, KOK G J P, *et al.* Many-wavelength interferometry with thousands of lasers for absolute distance measurement[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(18): 183901.
- [26] BERG S AVAN DEN, ELDIK SVAN, BHATTACHARYA N. Mode-resolved frequency comb interferometry for high-accuracy long distance measurement[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(1): 1-10

- [27] HUANG Y C, GUAN Y C, SUEN T H, *et al.* Absolute frequency measurement of molecular iodine hyperfine transitions at 647 nm[J]. *Applied Optics*, 2018, **57**(9): 2102-2106.
- [28] XIAO S, WEINER A M, LIN C. A dispersion law for virtually imaged phased-array spectral dispersers based on paraxial wave theory[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(4): 420-426.
- [29] BRAULT J W. High precision Fourier transform spectrometry: the critical role of phase corrections[J]. *Microchimica Acta*, 1987, **93**(1-6): 215-227.
- [30] CHAIKIN P M, LUBENSKY T C. Principles of condensed matter physics[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2000.
- [31] BENASSI P, ERAMO R, GIUGNI A, *et al.* A spectrometer for high-resolution and high-contrast Brillouin spectroscopy in the ultraviolet[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, **76**(1): 013904.
- [32] MATSUOKA T, SAKAI K, TAKAGI K. Hyper-resolution Brillouin - Rayleigh spectroscopy with an optical beating technique[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, **64**(8): 2136-2139.
- [33] SANDERCOCK J R. Some recent developments in Brillouin scattering[J]. *RCA Review*, 1975, **36**(1): 89-107.
- [34] SHIODA T, MORISAKI T, ONO H. Single-shot tomography by means of VIPA and spatial phase modulator installed optical interferometer[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(1): 144-147.
- [35] SCARCELLI G, YUN S H. In vivo Brillouin optical microscopy of the human eye[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(8): 9197-9202.
- [36] SCARCELLI G, YUN S H. Multistage VIPA etalons for high-extinction parallel Brillouin spectroscopy [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(11): 10913-10922.
- [37] MENG Z, YAKOVLEV V V. Precise determination of Brillouin scattering spectrum using a virtually imaged phase array (VIPA) spectrometer and charge-coupled device (CCD) camera[J]. *Applied Spectroscopy*, 2016, **70**(8): 1356-1363.
- [38] SCHORSTEIN K, POPESCU A, SCHEICH G, *et al.* Towards a Brillouin-LIDAR for remote sensing of the temperature profile in the ocean[C]. *IEEE OCEANS*, 2006: 1-6.
- [39] RUDOLF A, WALTHER T. Laboratory demonstration of a Brillouin lidar to remotely measure temperature profiles of the ocean[J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(5): 051407.
- [40] FRY E S, EMERY Y, QUAN X, *et al.* Accuracy limitations on Brillouin lidar measurements of temperature and sound speed in the ocean[J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(27): 6887-6894.
- [41] MAYOR M, QUELOZ D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J]. *Nature*, 1995, **378**: 355-359
- [42] HATZES A P, COCHRAN W D. Spectrograph requirements for precise radial velocity measurement [C]. *ESO Workshop on High-Resolution Spectroscopy with the VLT*, ESO, Garching, 1992: 275-278.
- [43] WATANABE H, VISSERS G, KITAI R, *et al.* Ellerman bombs at high resolution. I. Morphological evidence for photospheric reconnection[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **736**(1): 71.
- [44] WANG H, LIU R, LI Q, *et al.* Extending counter-streaming motion from an active region filament to a sunspot light bridge[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2018, **852**(1): L18.
- [45] ZHU X, HE J. Numerical study of comb-based high-accuracy distance measurement utilizing VIPA interferometry[J]. *Journal of Optics*, 2019, **21**(2): 025703.
- [46] XU B, YASUI H, NAKAJIMA Y, MA Y, ZHANG Z, MINOSHIMA K. Fully stabilized 750-MHz Yb: fiber frequency comb[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(10): 11910-11918.