

# 环形光瞳对远心光路中法布里-珀罗滤光器的影响

董江琛<sup>1,2</sup> 金振宇<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院云南天文台天文技术实验室, 云南 昆明 650216

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 天文法布里-珀罗滤光器通常有两种配置光路, 平行光路和远心光路。主要研究了在远心光路和环形光瞳情况下, 宽径比与  $F$  数对滤光器的像差、中心波长与带宽的影响。运用数值模拟方法, 对光线进行追踪, 求出滤光器出射面的复振幅叠加结果。数值模拟结果表明, 滤光器的像差在  $F$  数大于 50 时没有明显劣化, 中心波长的偏移量随宽径比的减小而增大, 透过带宽随宽径比减小而减小, 中心波长偏移量和带宽均随  $F$  数增大而减小。当  $F$  数相对较小(如  $F=100$ )时, 可以在获得更大视场的同时获得窄至 5.6 pm 的带宽, 这将成为大型环形太阳望远镜的优势之一。

**关键词** 成像系统; 干涉成像; 法布里-珀罗滤光器; 二维成像光谱仪

**中图分类号** P111.41      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.091103

## Effect of Ring Pupil on Telecentric Fabry-Perot Filter

Dong Jiangchen<sup>1,2</sup> Jin Zhenyu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Astronomy Technology Laboratory, Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming, Yunnan 650216, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** Astronomical Fabry-Perot filter has generally two kinds of optical mountings: collimated configuration and telecentric configuration. The effects of width to radius ratio (WRR) and  $F$ -number on aberration, central wavelength and bandwidth of the filter in telecentric configuration and ring pupil situations are studied. With numerical simulation method and ray tracing, the superposition result of complex amplitude on exit surface of filter is calculated. The numerical simulation result shows that there is no obvious degradation in aberration of filter when  $F$ -number is more than 50, the offset of central wavelength increases with the decrease of WRR, the bandwidth of transmission decreases with the decrease of WRR, and the offset of central wavelength and bandwidth both decrease with the increase of  $F$ -number. When  $F$ -number is relatively small, like 100, the larger field of view and bandwidth as narrow as 5.6 pm can be obtained at the same time, which will be one of the advantages of giant ring solar telescope.

**Key words** imaging systems; interferometric imaging; Fabry-Perot filter; two-dimensional imaging spectrometer

**OCIS codes** 110.3175; 110.1650; 230.4040; 120.2230

## 1 引言

二维成像光谱仪和二维磁像仪是太阳物理观测中的重要设备, 可以对太阳光球和色球流场的速度场与磁场进行高空间分辨率观测。NST(new solar telescope)<sup>[1]</sup>、GREGOR<sup>[2]</sup>等太阳望远镜均已被配备用于太阳二维磁场高分辨测量的二维磁像仪, 目前我国研究人员计划在我国最大的太阳望远镜——1 m 真空太阳

**收稿日期:** 2016-05-23; **收到修改稿日期:** 2016-05-31; **网络出版日期:** 2016-08-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(11473067, 11273059)

**作者简介:** 董江琛(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事天文技术与方法方面的研究。E-mail: djc@ynao.ac.cn

**导师简介:** 金振宇(1971—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事天文技术与方法、天文高分辨率观测技术方面的研究。

E-mail: kim@ynao.ac.cn(通信联系人)

望远镜(new vacuum solar telescope, NVST)<sup>[3]</sup>中引入二维磁像仪和二维成像光谱仪。滤光器是二维成像光谱仪或二维磁像仪的关键部件,通常会采用基于偏振干涉原理的双折射 Lyot 滤光器或法布里-珀罗干涉仪(FPI)<sup>[4-12]</sup>。FPI 的透射率可以达到 80%,远高于双折射 Lyot 滤光器的透射率,这使得 FPI 容易获得皮米量级的光谱分辨率。FPI 多用于高光谱分辨率和高信噪比观测,而双折射 Lyot 滤光器多用于如全日面观测等大视场观测。基于 FPI 的二维成像光谱仪和二维磁像仪可通过改变平板间隔来实现光谱扫描。

基于 FPI 的二维成像光谱仪和二维磁像仪通常有 2 种安装方式<sup>[4]</sup>,一种是将 FPI 安装在平行光路,另一种是将 FPI 安装在远心光路。以 2 种方式安装的法布里-珀罗(F-P)滤光器各有特点。平行光路中 F-P 滤光器受入射光的视场影响,越偏离中心视场,光线的透过波长漂移越大;远心光路中 F-P 滤光器受入射光  $F$  数的影响,导致透过波长整体偏移和带宽展宽,其透过波长不受视场的直接影响。平行光路模式下不同视场透过波长不一致的问题,可以通过对不同视场的波长定标进行修正,而远心光路不需要对不同视场进行波长定标,易于使用。

中国巨型太阳望远镜(Chinese giant solar telescope, CGST)<sup>[13-15]</sup>是由我国太阳物理学家联合提出的下一代太阳望远镜计划,环形望远镜方案是其中最重要的方案。基于 F-P 滤光器的二维磁像仪和二维成像光谱仪将是 CGST 的重要终端设备。环形光瞳对远心光路中磁像仪和成像光谱仪的影响,将决定 CGST 的光路设计和终端设计方案。本文利用数值模拟方法,分析了环形光瞳对远心光路中的 F-P 滤光器的中心波长漂移、带宽展宽和像差等的影响。这些分析不仅对 CGST 的终端设计有帮助,而且对有副镜遮拦的太阳望远镜的终端系统设计也有一定的指导意义。

## 2 基本原理

### 2.1 F-P 滤光器的性能指标

F-P 滤光器的性能指标<sup>[16-17]</sup>如下:

1) 中心波长  $\lambda_c$ : F-P 滤光器的光谱透射峰是分立、等间距、等强度的<sup>[16,18-19]</sup>,通过使用前置滤波器可以选择滤光器的干涉级次,实现单透射峰输出。 $\lambda_c$  可定义为

$$\lambda_c = \frac{2nh \cos \theta}{m}, \quad (1)$$

式中  $n$  为平板间介质的折射率,  $h$  为平板间距,  $\theta$  为光线入射角,  $m$  为干涉级次。

2) 自由光谱范围(free spectral range, FSR):指两个相邻透射峰间的波长距离<sup>[16,18-19]</sup>。自由光谱范围越大,越有利于区分不同干涉级次。当多级 F-P 滤光器串联时,不同滤光器的平板间距不同,各滤光器的 FSR 不同,故只有在设定波长位置的透射峰重合,才能获得单波长透射峰输出。FSR 定义为

$$F_{SR} = \frac{\lambda}{m} = \frac{\lambda^2}{2nh \cos \theta}, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为光波波长。

3) 反射细度  $F_R$ :用于描述滤光器的精细程度<sup>[16]</sup>,细度与带宽成反比,其表达式为

$$F_R = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}, \quad (3)$$

式中  $R$  为 F-P 滤光器平板反射率。

4) 光谱带宽(或简称带宽) $\delta_R$ :指滤光器 1 个透过轮廓的半峰全宽(FWHM)<sup>[16,18-19]</sup>。F-P 滤光器具有二维成像功能,其成像是具有一定光谱带宽的窄带像。光谱带宽定义为

$$\delta_R = \frac{F_{SR}}{F_R} = \frac{\lambda^2}{\frac{2nh \cos \theta}{\pi \sqrt{R}}} = \frac{\lambda^2 (1 - R)}{2\pi nh \sqrt{R} \cos \theta}. \quad (4)$$

5) 峰值透射率  $\tau_R$ :指透射光强度与入射光强度之比的最大值<sup>[16,18]</sup>。定义为

$$\tau_R = \left( \frac{I_t}{I_0} \right)_{\max} = \left( 1 - \frac{A}{1 - R} \right)^2, \quad (5)$$

式中  $I_t$  为透射光强度,  $I_0$  为入射光强度, 二者都与波长相关, 当波长满足干涉极大条件时, 透射率最大,  $A$  为吸收损耗。

6) 衬比因子  $C$ : 指透过轮廓最大值与最小值的比值<sup>[16]</sup>, 定义为

$$C = 1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (6)$$

## 2.2 产生误差的因素

F-P 滤光器的性能指标不仅受到基本参数的影响, 还受到以下因素的综合影响:

### 1) 平板面型精度

平板面型精度指的是 F-P 滤光器两平行平板的表面精度, 包括表面球面弯曲、随机分布缺陷以及调整误差等<sup>[17]</sup>。面型精度会引入波前像差, 影响滤光器的像质。远心光路中的 F-P 滤光器通常放置在焦点前 1~2 mm, 以减小面型精度对像质的影响。同时, 平板大量随机起伏造成滤光器的带宽展宽。

F-P 滤光器的平板面型精度要求高达  $\lambda/100$ 。为使系统的光强透射率最大, 根据最优化设计条件得到平板面型精度为<sup>[16]</sup>

$$\delta_x = \frac{(1-R)\lambda}{2\pi\sqrt{R}} \quad (7)$$

从(7)式可以得出面型精度与反射率应相互匹配, 面型精度越高要求反射率越大。

### 2) 平板平行度

在实际的 F-P 滤光器中, 两平板并不严格平行<sup>[17]</sup>。平板平行度误差会导致光线在平板间传输时透射光线间的夹角逐渐增大。

如图 1 所示, 当光线垂直入射, 平板夹角为  $\alpha$  时, 第 1 次光线反射后光线的夹角为  $2\alpha$ , 第 2 次反射后为  $4\alpha$ , 第 3 次后为  $6\alpha$ , 以此类推, 第  $k$  次反射后为  $2k\alpha$  ( $k=1, 2, 3, \dots$ )。

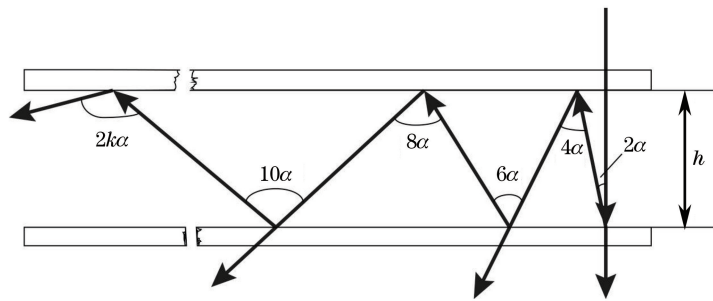


图 1 平行度误差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parallelism error

平行度误差会使透射光线每次在平板后表面叠加的位置稍有不同, 从而导致像质下降、 $\lambda_c$  偏移和带宽展宽。

### 3) 光线入射角

光线入射角  $\theta$  的变化会使  $\lambda_c$  偏移原来的位置。由(1)式可知  $\lambda_c$  随入射角  $\theta$  增大而减小。对于非正入射的光线, 当入射角往相同方向偏移时, 不同视场的  $\lambda_c$  偏移量具有不对称性<sup>[17]</sup>。

### 4) 远心光路 $F$ 数

$F$  数 ( $F$ -number) 是远心光路中的重要参数<sup>[20]</sup>。远心光路中瞳面像被准直, 光线形成锥角相同的锥形光束, 所有视场的光轴垂直于平行平板表面, 而  $F$  数会影响锥形入射光束的锥角。锥形光束的中心部分对应垂直于平板表面入射的理想情况, 锥形光束的边缘以一定夹角入射平板, 使得这些光线透过 F-P 滤光器后的  $\lambda_c$  偏离理想情况。这种偏移造成整个锥形光束透过后的  $\lambda_c$  偏移和带宽展宽, 故远心光路常用较大的  $F$  数来减小锥形光束的张角, 从而减小  $\lambda_c$  偏移和带宽展宽。然而较大的  $F$  数会导致视场较小, 故需要综合考虑才能选出合适的  $F$  数。

$F$  数对远心光路中的 F-P 滤光器有较大影响。Beckers 等<sup>[21-22]</sup> 提出了 Beckers 效应, 即远心光路中 F-P

滤光器的光瞳切趾效应。同时考虑环形光瞳和远心光路对 F-P 滤光器的影响,情况会有所不同。

### 3 数值模拟

使用光线追迹方法对 F-P 滤光器进行数值模拟,计算光线在平板间反射透射过程中的复振幅变化,得出滤光器出射面上的复振幅分布。图 2 是 F-P 滤光器数值模拟原理图。

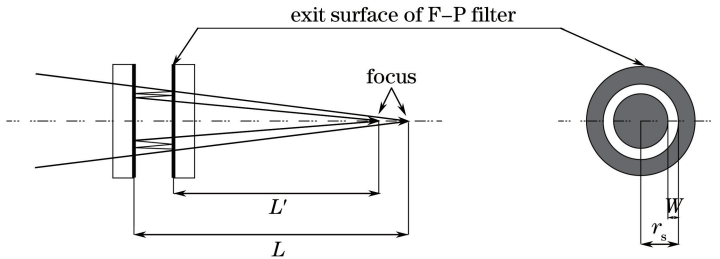


图 2 远心光路中的 F-P 滤光器光线追迹原理图

Fig. 2 Schematic of ray tracing for telecentric Fabry-Perot filter

图 2 左侧给出了远心光路在 F-P 滤光器中的传播过程。入射光线是一束具有一定光谱宽度的环形聚焦光束。它以光轴垂直于 F-P 滤光器表面方向入射,在平板间多次反射,每当光线传播到滤光器的出射面(exit surface)时,都有一部分光透射出去,这些透射出去的光在出射面形成如图 2 右侧所示的光斑。光斑的白色位置代表有光线照射,是环形光瞳的透光部分,灰色部分为不透光部分。

模拟的核心是求出 F-P 滤光器出射面的复振幅分布。根据复振幅分布求出强度分布,通过傅里叶变换算出点扩展函数(PSF)用于分析像差。在距离滤光器入射面  $L$  处的焦面分别对不同波长的光强度求和,得到强度的光谱透过轮廓,对透过轮廓进行分析得到  $\lambda$ 。相对理想值的偏移量和带宽展宽量。

定义宽径比( $WRR, W_{RR}$ )为环形光瞳中圆环的宽度与外圆半径之比<sup>[12]</sup>:

$$W_{RR} = W/r_s, \quad (8)$$

式中  $W$  是圆环的宽度,  $r_s$  是外圆半径。  $W_{RR}$  为 1 时代表完整的圆形。

光线照射到滤光器的平板上时,在平板上的投影是一个环形光斑。以环形光斑作为波前进行模拟,先计算圆形光斑的波前叠加结果,再加入环形光瞳的影响。对圆形光斑上的每一点进行计算,最终透射的光斑复振幅由第 1 次到第  $N$  次透射的复振幅叠加得到。  $N$  次反射后在 F-P 滤光器出射表面的光斑半径大小为

$$r = \frac{L - 2N \cdot h}{2F_{\text{num}}}, \quad (9)$$

以这个光斑半径作为最终叠加的光斑半径。

光线在平板间走过一定光程后,焦点位置发生变化,向 F-P 滤光器方向靠近。设  $L'$  为反射  $N$  次后焦点与滤光器出射面间的距离。波前往返反射一次,走过的光程为  $2h$ ,则  $L'$  为

$$L' = L - 2N \cdot h. \quad (10)$$

设光斑上任意一点与光斑中心的距离为  $a$ ,该点从入射平板经过  $N$  次反射走过的光程为  $S$ ,由于  $F$  数的存在,光线走过的光程  $S$  为

$$S = L' \frac{\sqrt{F^2 + 1}}{F} - \sqrt{L'^2 + a^2} + L', \quad (11)$$

将走过的光程换算成复振幅的相位变化  $\Delta\delta$ ,即

$$\Delta\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot S, \quad (12)$$

第  $N$  次反射后在滤光器平板出射面的复振幅  $E_N$  为

$$E_N = \cos \Delta\delta - i \cdot \sin \Delta\delta, \quad (13)$$

在滤光器出射面的复振幅为光线从第 1 次反射到第  $N$  次反射间所有透射复振幅叠加  $E_{\text{tot}}$ ,即

$$E_{\text{tot}} = T^0 \cdot E_0 + T^1 \cdot E_1 + \dots + T^N \cdot E_N, \quad (14)$$

式中  $T$  为平板透射率,理想情况下满足

$$T = 1 - R. \quad (15)$$

复振幅  $E_{\text{tot}}$  与参数  $a$  有关,根据  $a$  的大小将复振幅  $E_{\text{tot}}$  在空间上赋值,构造出滤光器出射面的复振幅空间分布  $E_{\text{tot}}(x, y)$ 。为了研究环形光瞳的影响,在构造  $E_{\text{tot}}(x, y)$  时,将不透光的部分赋值为 0,即产生具有一定宽径比的环形光瞳。

## 4 计算结果

### 4.1 参数设置

太阳色球和磁场观测中通常要求滤光器带宽小于 10 pm,设置 F-P 滤光器工作在太阳观测  $H_{\alpha}$  波段,则理想  $\lambda_c$  应为 656.281 nm。为了使介质折射率稳定,需要对 F-P 滤光器安装环境进行温控,模拟中假设滤光器处于真空状态。入射角稳定为 0,根据(1)式,工作级次可以设置为 3000,平板间隔为 984421.50 nm,反射率设定为常见的 95%<sup>[23]</sup>,根据(4)式理论带宽值为 3.57 pm,符合观测要求。根据(2)式,理论 FSR 值为 0.219 nm。远心光路中的  $F$  数减小会导致带宽展宽,故  $F$  数一般较大,参考 TESOS<sup>[20]</sup>、ATST<sup>[4]</sup> 的 F-P 滤光器  $F$  数在 100~300 之间,设置仿真  $F$  数为 50,100,150。由于现有环形太阳望远镜计划中最具代表性的是 8 m 环形太阳望远镜(8 m ring solar telescope)<sup>[24]</sup>,其宽径比为 0.25,因此设置  $W_{\text{RR}}$  为 0.2~0.8,步长为 0.1,从环形太阳望远镜逐渐过渡到有副镜遮拦的非环形望远镜。为模拟非单色光,设置波长范围为 656.281 nm $\pm$ 0.18 nm,波长步长为 0.1 pm。反射次数设置为 100,因反射多次后透射系数  $T^N$  很小,当反射次数  $N$  取更大值时,透射的复振幅可以忽略。

### 4.2 结果与分析

#### 1) 像差分析

将 F-P 出射面复振幅分布转化为强度分布,通过傅里叶变换得到 PSF。分别求出  $F$  数为 50,100,150,宽径比从 0.2 到 0.8 时,斯特列尔比的值,如表 1 所示。

表 1 不同  $F$  数、宽径比时的斯特列尔比

Table 1 Strehl ratio with different  $F$ -number and  $W_{\text{RR}}$

| $F$ -number | Width to radius ratio |          |          |          |          |          |          |
|-------------|-----------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|             | 0.2                   | 0.3      | 0.4      | 0.5      | 0.6      | 0.7      | 0.8      |
| 50          | 0.979028              | 0.980353 | 0.979234 | 0.976622 | 0.974011 | 0.972739 | 0.972739 |
| 100         | 0.979634              | 0.981141 | 0.982111 | 0.983866 | 0.985173 | 0.985518 | 0.984523 |
| 150         | 0.977515              | 0.981500 | 0.981309 | 0.979446 | 0.978039 | 0.978697 | 0.977565 |

由表 1 可以看出,随着宽径比从 0.2 增大到 0.8,斯特列尔比没有明显的增大或减小趋势,且斯特列尔比均大于 0.97,变化幅度不超过 0.01,这说明环形光瞳没有使像质明显劣化。

#### 2) $\lambda_c$ 偏移量分析

符合(1)式的  $\lambda_c$  理想值为 656.281 nm,对透射 F-P 滤光器后表面的复振幅按波长点区分,分别求强度和,得到透射强度随波长的变化图。如  $F$  数为 100,宽径比为 0.8 时,求出的透过轮廓如图 3 所示。

对透过轮廓进行高斯拟合,分别求出  $F$  数为 50,100,150,宽径比从 0.2 到 0.8 时, $\lambda_c$  的值。设  $\lambda_c$  相比理想  $\lambda_c = 656.281$  nm 的偏移值为  $\Delta\lambda_c$ ,有

$$\Delta\lambda_c = \lambda_c - 656.281. \quad (16)$$

图 4 为不同  $F$  数时中心波长  $\lambda_c$  随宽径比的变化曲线图。由图 4 可见, $\lambda_c$  同时受到  $F$  数和宽径比的影响。 $\lambda_c$  的偏移值  $\Delta\lambda_c$  始终为正值,表明  $\lambda_c$  始终向红端漂移。 $F$  数越小, $\lambda_c$  向红端偏移越多;宽径比越小  $\lambda_c$  向红端偏移也越多。同时, $F$  数越小,偏移量曲线斜率越大,表明此时宽径比对  $\lambda_c$  的影响更明显。

#### 3) 带宽分析

利用透过轮廓高斯拟合时得到的带宽信息,得到带宽随  $F$  数、宽径比的变化图如图 5 所示。

由图 5 可知,带宽同时受  $F$  数和宽径比影响。 $F$  数较小时带宽较宽,宽径比较小时带宽较小。所以可以在采用小  $F$  数获得大视场的同时使用小宽径比来获得窄带宽。当  $F$  数为 100 时,宽径比 0.2 对应带宽为



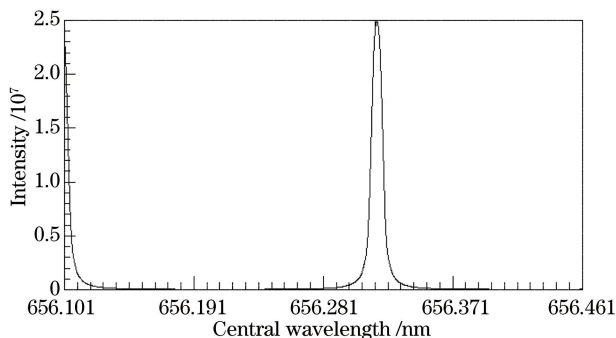
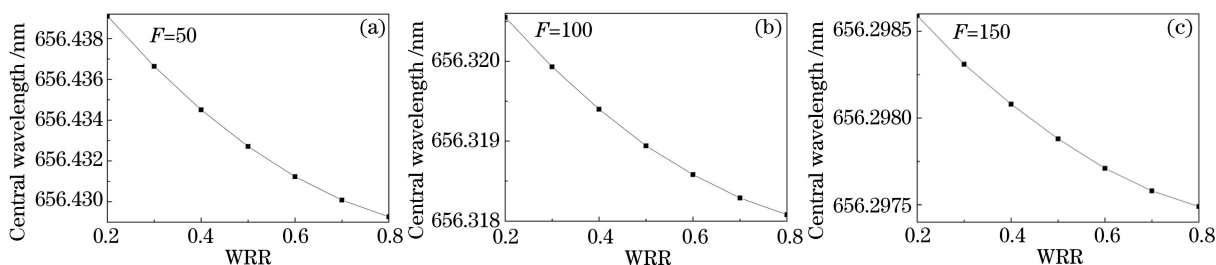
图 3 F-P 滤光器透过轮廓图 ( $F=100, W_{RR}=0.8$ )Fig. 3 Transmission profile of F-P filter ( $F=100, W_{RR}=0.8$ )

图 4 中心波长随宽径比变化

Fig. 4 Central wavelength varies with WRR

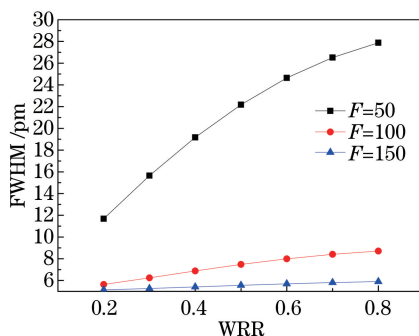


图 5 带宽随宽径比变化

Fig. 5 Spectral band width varies with WRR

5.6 pm, 与  $F$  数为 150 时差别不大。由于  $F$  数与视场成反比, 此时视场扩大了 1.5 倍。通过使用小宽径比的环形光瞳可以显著扩大视场。

## 5 结 论

使用数值模拟方法对 F-P 滤光器进行分析, 得出以下结论: 1) 对 F-P 滤光器的定标是一个系统性工作, 必须考虑光路配置等问题。该仿真可为定标工作提供指导。2) 远心光路中的中心波长虽然会漂移, 但是不存在不同视场的波长漂移, 整个视场具有相同的中心波长, 这样就可以通过对整个视场定标来找到正确的中心波长; 平行光路则必须对不同视场分别定标。3)  $F$  数与视场大小成反比, 当宽径比较小时, 在获得窄带宽的同时, 可以使用相对小的  $F$  数获得较大视场。减小宽径比可以减小带宽。这种效应表明, 小宽径比的环形太阳望远镜可以在使用远心光路时, 在缩小远心光路带宽展宽效应的同时, 还能获得较大视场。由于太阳是扩展目标, 大视场更有利于太阳物理的实测研究。对于 CGST 或其他太阳望远镜的基于 F-P 滤光器的后端光学仪器, 需要根据科学目标和技术要求具体设计。

## 参 考 文 献

- 1 Cao W Z, Gorceix N, Coulter R, *et al.* Scientific instrumentation for the 1.6 m new solar telescope in Big Bear[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2010, 331(6): 636-639.
- 2 Schmidt W, Lühe O V D, Volkmer R, *et al.* The 1.5 meter solar telescope GREGOR[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2012, 333(9): 796-809.
- 3 Liu Z, Xu J, Gu B Z, *et al.* New vacuum solar telescope and observations with high resolution[J]. *Research in Astronomy & Astrophysics*, 2014, 14(6): 705-718.
- 4 Kentischer T J, Schmidt W, Lühe O V D, *et al.* The visible tunable filtergraph for the ATST[C]. *SPIE*, 2012, 8446: 844677.
- 5 Wu Dongcheng, Gao Songtao, Wu Zhihui, *et al.* Gravity deformation of high-precision optical flat under three-point support[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1212001.  
武东城, 高松涛, 吴志会, 等. 高精度光学平板在三点支撑下自重变形的研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1212001.
- 6 Feng Mingchun, Liu Wenqing, Xu Liang, *et al.* Analysis of the mirror surface errors in a Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0423002.  
冯明春, 刘文清, 徐亮, 等. 迈克耳孙干涉仪中的镜面面形误差研究分析[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0423002.
- 7 Zhao Minjie, Si Fuqi, Lu Yihuai, *et al.* Spectral image correction method for space-born differential optical absorption spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1230002.  
赵敏杰, 司福祺, 陆亦怀, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1230002.
- 8 Zhang Feifei, Wang Guocheng, Sun Dongsong, *et al.* Research on the radial velocity bias in Doppler wind lidar based on Fabry-Perot interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0814002.  
张飞飞, 王国成, 孙东松, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪多普勒测风激光雷达径向风速漂移研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0814002.
- 9 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view spaceborne imaging spectrometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0316003.  
薛庆生. 星载大相对孔径宽视场成像光谱仪光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0316003.
- 10 Chang Yayun, Yi Weining, Du Lili, *et al.* A new method of on-orbit relative calibration for spatially modulated imaging Fourier transform spectrometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 083004.  
常亚运, 易维宁, 杜丽丽, 等. 空间调制干涉成像光谱仪在轨相对定标新方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 083004.
- 11 Wang Ning, Fu Jianbo, Zhu Huafeng, *et al.* Temperature and pressure response study of intrinsic Fabry-Perot optical fiber sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100604.  
王宁, 付剑波, 朱化凤, 等. 本征法布里-珀罗光纤传感器温压响应研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 100604.
- 12 Li Dandan, Chen Xinwei, He Shengnan, *et al.* Research on optical voltage sensor based on Michelson interferometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070605.  
李丹丹, 陈信伟, 贺胜男, 等. 基于迈克耳孙干涉技术的光学电压传感器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070605.
- 13 Liu Zhong, Deng Yuanyong, Ji Haisheng, *et al.* Ground-based giant solar telescope of China [J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 42(12): 1282-1291.  
刘忠, 邓元勇, 季海生, 等. 中国地基大太阳望远镜[J]. *中国科学: 物理学, 力学, 天文学*, 2013, 42(12): 1282-1291.
- 14 Liu Zhong, Jin Zhenyu, Lin Jing, *et al.* Introduction to the 30 m ringy interferometric telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2006, 3(1): 64-72.  
刘忠, 金振宇, 林京, 等. 30 m 环形干涉望远镜[J]. *天文研究与技术*, 2006, 3(1): 64-72.
- 15 刘忠. 环形干涉望远镜及其关键技术[C]. *战略性新兴产业的培育和发展——首届云南省科协学术年会论文集*, 2011.
- 16 Chang Liang. Research on the characteristics of Fabry-Perot filter in astronomy[D]. Kunming: Yunnan Observatories,

Chinese Academy of Sciences, 2007.

常 亮. 天文用 Fabry-Perot 滤光器的特性研究[D]. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2007.

- 17 Chang Liang, Liu Zhong. Error analysis of Fabry-Perot filter[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2007, 4(4): 389-394.  
常 亮, 刘 忠. Fabry-Perot 滤光器的误差分析[J]. *天文研究与技术*, 2007, 4(4): 389-394.
- 18 Shumko S, Denker C J, Varsik J, *et al.* Control and acquisition software for the visible-light Fabry-Pérot interferometer at the Big Bear solar observatory[C]. *SPIE*, 2002, 4848: 483-489.
- 19 Bazin C, Koutchmy S. Photometric properties of new solar H $\alpha$  commercial Fabry-Perot etalons. Application to the analysis of the chromospheric fringe[J]. *Physics*, 2012: 1-16.
- 20 Kentischer T J, Schmidt W, Sigwarth M, *et al.* TESOS, a double Fabry-Perot instrument for solar spectroscopy[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1998, 340(2): 569-578.
- 21 Beckers J M. On the effect of narrow-band filters on the diffraction limited resolution of astronomical telescopes[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 1998, 129(s1): 191-194.
- 22 Beckers J M. Effect of telecentric use of narrow-band filters on diffraction-limited imaging[C]. *SPIE*, 1998, 3355: 955-961.
- 23 Puschmann K G, Denker C, Balthasar H, *et al.* The GREGOR Fabry-Pérot interferometer and its companion the blue imaging solar spectrometer[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(8): 081606.
- 24 Liu Z. Simulation of Chinese giant solar telescope[C]. *SPIE*, 2011, 8336(5): 1413-1417.