

空间外差光谱仪成像光学系统设计

罗海燕,李 双,施海亮,熊 伟,洪 津

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘 要: 为满足高光谱傅里叶变换光谱仪对高光谱分辨率、小畸变、像面光谱辐照度均匀、高信噪比以及仪器轻量化小型化的要求,设计了空间外差光谱仪成像光学系统。基于傅里叶变换的空间外差光谱仪空间干涉的特点和对成像系统缩放比、畸变等要求,依据干涉图调制度分析了最恶劣面形改变条件下对干涉仪元件面形误差的要求,并采用前后镜组匹配实现了双远心成像系统的设计。设计结果表明:该光学结构可避免调焦产生的成像系统缩放比改变,有效视场内畸变量 $<0.1\%$,传递函数在 38.5 lp/mm 处物面所有点全视场范围 ≥ 0.60 。依据仪器视场角对滤光片安装位置和精度提出要求,并对成像系统进行杂散光和照度均匀性分析提出有效抑制杂散光的措施和方法。系统设计满足了空间外差光谱仪对成像的要求,实现了照度均匀、低畸变、离焦情况下缩放比保持不变等。

关键词: 光学设计; 空间外差光谱仪; 远心系统; MTF

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0818005

Optical design of imaging system based on spatial heterodyne spectrometer

Luo Haiyan, Li Shuang, Shi Hailiang, Xiong Wei, Hong Jin

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: To meet the commands of Spatial Heterodyne Spectrometer (SHS) based on Fourier Transform that are high spectral resolution, minimum distortion, homogeneous illumination, high signal to noise ratio and the limited resources of volume and weight, an imaging optical system of SHS was designed. According to the characteristic of spatial interference in SHS, the interferogram on the location plane of the fringes near the gratings was imaged onto the detector with a specific magnification, which determined the spectral resolution and the band width of SHS. For the case of SHS in which magnification was the limit factor, the constant magnification could be obtained by use of the match of fore lens and rear lens to achieve a telecentric optical system. The imaging optical system actually contained a spread of optical elements from grating to detector, and hence, the diffracted wavefront error of gratings and RMS change in wavefront error of beam splitter and field widened wedges in interferometer would decrease the modulation efficiency. The imaging optical system offered the constant

收稿日期:2015-12-10; 修订日期:2016-01-06

基金项目:国家自然科学基金(41301373)

作者简介:罗海燕(1982-),女,副研究员,博士,主要从事高光谱遥感仪器光机设计方面的研究。Email:luohaiyan@aiofm.ac.cn

magnification, and it is apparent that even minor change in the position of FPA have a slight effect on the spectral resolution and band width, furthermore, the maximum distortion decreases to less than 0.1% over the field of view. The theoretical Modulation Transfer Function (MTF) is high than 0.60 at the spatial frequency in cycles per mm of 38.5 over the entire defined format. Based on the analysis of stray light, uniformly illumination and the ability of field widened of interferometer contained in the imaging optical system, a tolerance sensitivity analysis to determine the worst tilted error of the filter is performed. The optical system has well suited to SHS applications that require high spectral resolution and high modulation efficiency over a relative narrow spectral band.

Key words: optical design; SHS; telecentric optical system; MTF

0 引言

空间外差光谱技术是 20 世纪 70 年代提出概念,到 90 年代因技术条件的进步而快速发展起来的一种新型光谱分析技术,具有高光通量、高光谱分辨率、无运动部件、结构紧凑等优点,较为适合遥感监测技术小型化、模块化和标准化的发展趋势^[1-3]。目前,空间外差光谱仪已从实验室搭建平台、地面原理样机发展为航天的有效载荷,尤其适用于复杂背景下微量气体成分的定量探测。美国、加拿大等国家已经将该技术应用用于大气遥感以及天文观测等方面,并于 2007 年发射了 SHIMMER 有效载荷^[4-5]。国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所等单位正积极开展基于该技术的大气温室气体探测仪器的研究,并成功研制了多台高光谱原理样机并开展了机载验证试验^[6]。

空间外差光谱仪光学系统主要包括前置准直系统、干涉仪组件和成像系统三部分。对于空间外差光谱仪,前置准直系统主要为干涉仪组件提供一定视场角的平行光,且将准直系统出瞳定位于干涉仪组件内色散元件光栅上,经干涉仪组件对入射光进行空间干涉调制后,最终经成像系统将干涉图像成像在探测器上^[7-9]。基于空间外差光谱仪特殊的干涉形式,准直系统出射波前经干涉仪组件两臂进行补偿,因此对前置准直系统的光学质量要求相对较低。

相较于前置准直系统,其成像系统的缩放比直接影响光谱分辨率,而成像镜头 MTF、有效视场外杂散光、重要光学元件滤光片的安装精度、干涉仪组件面形及分束膜特性等均会对干涉信号调制度产生影响,降低光谱反演的精度。文中采用前后镜组匹配实现了双远心成像,实际装调过程产生微量离焦仍

能保证其缩放比不变。设计结果表明,成像系统设计满足了空间外差光谱仪对干涉信号调制度及对成像系统照度均匀、低畸变、缩放比恒定、有效视场外杂散光抑制等设计要求。

1 成像系统设计

成像光学系统不仅影响光谱仪的主要性能指标——干涉信号调制度、光谱分辨率,其元件面形、系统畸变、MTF 以及弥散斑大小都会对系统性能造成影响,依据光谱仪性能指标综合对成像系统设计提出要求。

1.1 成像系统设计的要求

空间外差干涉技术属于定域干涉,其原理如图 1 所示,成像系统的功能是将定域面上的干涉条纹成像在探测器面上,光栅参数,即刻线密度 d 、衍射方向有效宽度 w' 以及基频 Littrow 波长的选择决定了仪器的光谱分辨能力 R 。

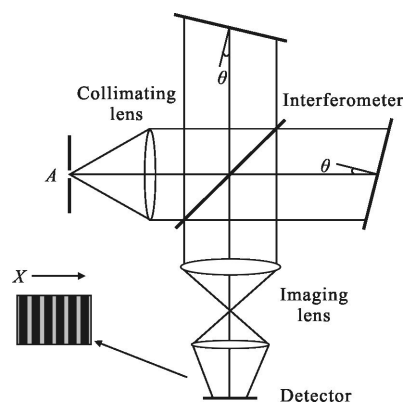


图 1 空间外差光谱仪原理图

Fig.1 Schematic diagram of basic SHS configuration

对于光谱维既定像元数 M 和像元大小 t 的探测器,成像系统的缩放比 R_m 直接决定了光谱仪的光谱分辨能力,如下式所示:

$$R=2w' \times d \quad (1)$$

$$w'=w \times \cos \theta_L=M \times t \times R_m \quad (2)$$

根据系统设计,前置准直镜头出射视场角 $\pm 2^\circ$,限制其入射干涉仪,加经光栅在有效带宽内产生的衍射偏角 0.52° ,即理论通过的极限视场角为 $\pm 2.52^\circ$ 。

根据上述系统原理,成像镜头的物方远心应由准直系统的设计保证,满足干涉仪在要求光谱分辨能力的条件下,扩展光源对干涉调制度的影响下降最小;而成像镜头的缩放比直接影响仪器的光谱分辨率。因此,需要成像系统在像方远心的基础上实现物方远心,避免系统在装调过程中由于离焦导致缩放比改变对光谱仪性能的影响。成像镜头对应的物方数值孔径角应在准直出射平行光视场角的基础上加有效波段内干涉仪产生的衍射偏角。

理想光学系统,共轭物像平面上的垂轴放大率为常数,当随着视场增大像的垂轴放大率改变,使得物像失去相似性导致畸变。根据空间外差干涉原理,探测器在光谱维数目对应为干涉条纹的数目,理论上光谱仪带宽极大情况下,干涉条纹空间频率与探测器采样频率相同,因此对于 1024×1024 的探测器而言,要求光学系统设计畸变应小于探测器对应的极限畸变值 0.1% 。

当系统为非像方远心光路时,整个像面上光照度是不均匀的,轴外像点的照度随着像方孔径角 ω' 余弦的四次方而降低,由中心向边缘光照度呈现二次或高次曲线,对于低频干涉信号造成干扰,导致低频光谱定标精度降低。因此,在成像系统中需利用中间实像面对其光学系统视场角进行限制,保证其像面照度的均匀性^[10]。在物面照度均匀一致的情况下,轴外像点的光照度 E_M' 与轴上像点光照度 E_0' 关系如下:

$$E_M'=E_0' \times \cos^4 \omega' \quad (3)$$

对于准直系统的出射光波经分束棱镜分束后,经由干涉仪两臂衍射最终在定域面处形成干涉条纹,因此准直系统的出射波前误差理论上可通过两臂进行补偿。

成像系统包含干涉仪部分和球透镜组成的前后镜组,因此干涉仪元件的波前误差会对干涉图调制

度产生不利的影响,图 2 为空间外差干涉仪光学结构形式,两臂光路如下所示:

$$\begin{aligned} A: T_1 \rightarrow T_{2/3} \rightarrow T_4 \rightarrow T_{w2a} \rightarrow T_{w2b} \rightarrow D_8 \rightarrow T_{w2b} \rightarrow \\ T_{w2a} \rightarrow T_4 \rightarrow R_{2/3} \rightarrow T_6 \\ B: T_1 \rightarrow R_{2/3} \rightarrow T_5 \rightarrow T_{w1a} \rightarrow T_{w1b} \rightarrow D_7 \rightarrow T_{w1b} \rightarrow \\ T_{w1a} \rightarrow T_5 \rightarrow T_{2/3} \rightarrow T_6 \end{aligned} \quad (4)$$

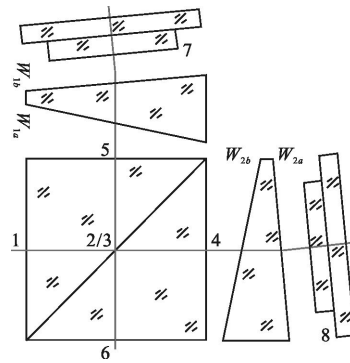


图 2 空间外差干涉仪光学布局图

Fig.2 Schematic diagram of SHS interferometer

理想波面经由具有波前误差 $h'(x)$ 的干涉仪元件后,干涉图表示为:

$$I(x, \lambda)=2B(\lambda)\left[1+\frac{\lambda}{\pi h'(x)} \sin \frac{\pi h'(x)}{\lambda} \cdot \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda}-\frac{\pi h'(x)}{\lambda}\right)\right] \quad (5)$$

单色光调制度表示为:

$$K=\frac{I_{\max }-I_{\min }}{I_{\max }+I_{\min }}=\sin \frac{\pi h'(x)}{\lambda} / \frac{\pi h'(x)}{\lambda} \quad (6)$$

在干涉仪两臂波前误差变换量最恶劣的条件下,不计分束表面的波前误差,根据斯涅耳定律可得到如下的波前误差表达式:

$$\begin{aligned} h'=2h_4\left(\frac{n}{\cos i'}-\frac{1}{\cos i}\right)+2h_5\left(\frac{1}{\cos i}-\frac{n}{\cos i'}\right)+2h_6 \cos j+ \\ 2h_7 \cos j+2h_8\left(\frac{n}{\cos k'}-\frac{1}{\cos k}\right)+2h_b\left(\frac{n}{\cos t'}-\frac{1}{\cos t}\right) \approx \\ 4h_{b/s}(n-1)+4h_g+2h_{wa} \times 0.4294+2h_{wb}(n-1)= \\ 1.861h_{b/s}+4h_g+0.858h_{wa}+0.908h_{wb} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $h_4=h_5=h_{b/s}$ 为分束棱镜除分束面其余四个工作面的面形误差; $h_7=h_8=h_g$ 为光栅衍射面的面形误差,且由于入射和出射分束棱镜及光栅视场角为 $\pm 2.52^\circ$,可近似认为 $\cos i'=\cos i=1, \cos j=1$ 。根据图 3 所示,当理论干涉图调制度为 0.75 时,对应 $h'(x)/\lambda$ 为 0.4 ,此时要求分束器、扩视场棱镜及光栅上的平均面形

误差为 0.05λ 。

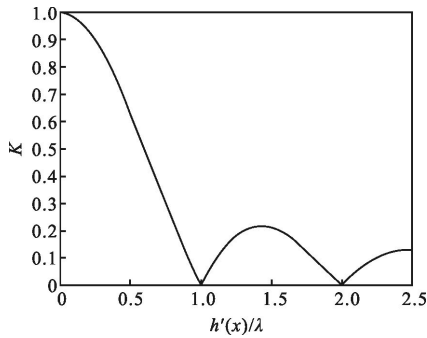


图 3 调制度与元件波前误差关系曲线

Fig.3 Relationship curve between modulation efficiency and element wavefront error

在设计加工过程中，由于光栅采用同一母版进行复制，其面形误差基本一致，因此该项误差可经两臂光栅衍射得到补偿。上述条件下，不计光栅衍射面形误差，调制度为 0.75 时对应分束器、扩视场棱镜平均面形误差 0.1λ ，对于尺寸 $60\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 以内平面镜的加工精度可满足上述要求。

根据成像系统设计指标的分析，对于光学系统设计指标要求如表 1 所示。

表 1 成像系统光学设计指标

Tab.1 Specification of imaging optical system

No.	Parameters	Performance index
1	Field of view/(°)	Horizontal/vertical FOV:2.52
2	Telecentric limitation/(°)	≤ 0.1
3	Wavelength/nm	757-771
4	Size of image/mm	13.312×13.312
5	Resolution/pixel	1 024×1 024
6	Size of pixel/ μm	13
7	Diameter of the entrance/mm	30
8	Modulation transfer function / $\text{lp}\cdot\text{mm}^{-1}$	$\geq 0.60@38.5$
9	Distortion	$\leq 0.1\%$
10	Total length/mm	≤ 300

1.2 成像系统设计

为满足上述光学系统设计指标要求，对有限物距进行双远心成像，以及照度均匀性和杂散光抑制等要求，采用前后镜组匹配中间成实像面的初始结

构，在满足成像镜头畸变要求的条件下，将光阑放置在前后镜组的焦面上，尽可能保证物面和像面的远心度。以主光线与像面夹角、主光线高度和最大畸变量为约束条件进行优化设计。光学结构如图 4 所示。

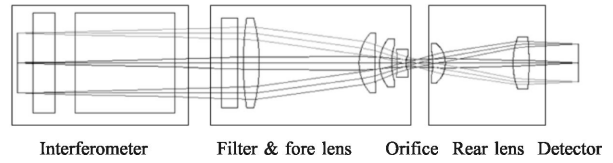
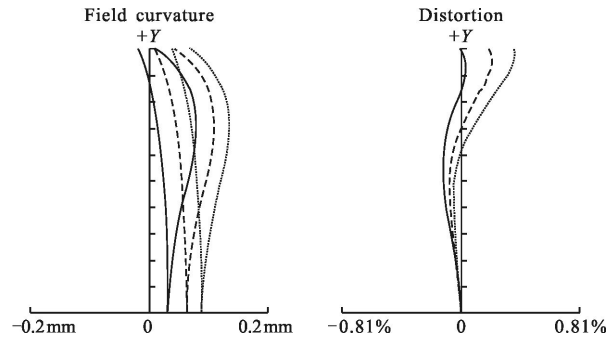


图 4 成像光学系统结构

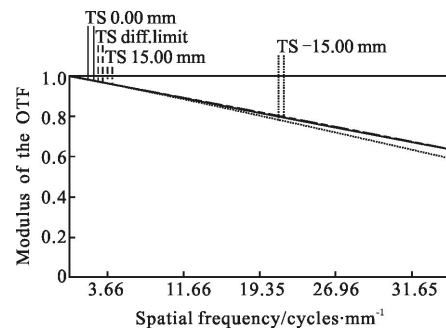
Fig.4 Structure of imaging optical system

由图 4、5 可知，光学设计完全满足成像系统的指标要求，其中像方远心度为 0.0189° ，包含干涉仪部分由光栅成像至探测器面光路总长在 282 mm 以内。所有视场传递函数在 38.5 lp/mm 接近衍射极限，且弥散斑直径在一个像元以内。全视场范围内最大畸变量小于 0.01% ，在 0.707 FOV 处畸变校正值为零。



(a) 场曲与畸变

(a) Field curvature and distortion



(b) 调制传递函数

(b) MTF

图 5 成像系统设计结果

Fig.5 Results of imaging system

2 成像系统分析

空间外差光谱仪内滤光片安装在成像镜头与干涉仪之间,最大程度地满足平行光入射滤光片。由于滤光片镀膜水平受限,透过率为高斯曲线,因此在滤光片透过率上升或下降区存在多次反射光经过干涉仪后进入探测器的非正常光路,会对干涉信号的调制度和像面照明均匀性产生影响。

首先,经滤光片反射后进入干涉仪的孔径角将大于成像镜头理论设计物方孔径角的入射光线,由扩展光源对调制度的影响可知,其形成的干涉条纹调制度将不再满足上述 $\pm 2^\circ$ 视场所产生的理论调制度 V ,如公式(8)所示,其中 $C(n, \alpha)$ 为关于扩视场棱镜折射率和顶角的函数;其次,该部分非正常光路在像面上形成的照明区域改变,像面照度均匀性也相应降低。

$$V = \text{sinc} \left(\frac{u\sigma\Omega C(n, \alpha)}{2\pi \tan \theta_L} \right) \quad (8)$$

在不对成像镜头进行视场限制的条件下,经滤光片反射形成的入射干涉仪孔径角加衍射偏角达到 3.31° 时,理论设计弥散斑由 $\text{RMS Spot } 3.566 \mu\text{m}$ 变为 $\text{RMS Spot } 10.455 \mu\text{m}$,一次反射形成的干涉图再次透射后成像质量变差,与理论视场角内的像点叠加,单像元内的能量将重新分配,从而影响干涉图像对比度。如图 6 所示,同一成像镜头在既定的通光孔径条件下,得到物方数值孔径分别为 0.033 5 和 0.09 的像面照明图像,可知当光学系统内无视场光阑限制时,会产生中心亮、边缘暗的像面照度不均匀的现象。

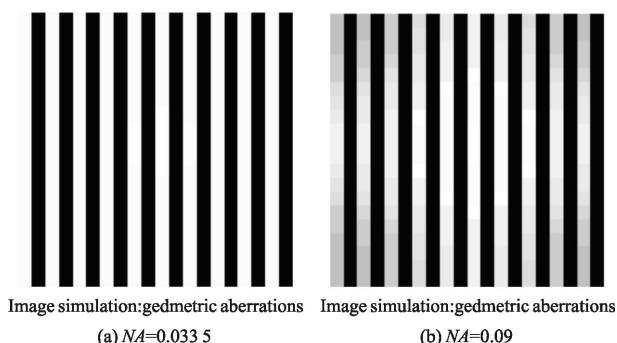


图 6 不同物方数值孔径像面照明

Fig.6 Illumination analysis of image surface in different object space NA

由干涉仪组件扩视场能力可知,该波段干涉仪所能接受的极限视场角为 $\pm 3.31^\circ$,如表 2 所示,当滤光片转角为与光栅衍射方向相反时,经滤光片一次反射进入干涉仪的视场角偏离理论设计值最大,由此可推算出在干涉仪允许的视场极限角内,滤光片的安装精度应高于 0.715° 。

表 2 滤光片旋转角度与干涉仪出射角度关系

Tab.2 Relationship between filter rotation angle and emergence angle of the interferometer

Filter rotation	Incidence angle	Emergence angle	Re-incidence angle	Re-emergence angle
0°	1.36°	1.88°	-1.88°	-1.36°
0°	-1.36°	-0.84°	0.84°	1.36°
1°	1.36°	1.88°	0.12°	0.64°
1°	-1.36°	-0.84°	2.84°	3.36°
-1°	1.36°	1.88°	-3.88°	-3.36°
-1°	-1.36°	-1.36°	-1.16°	-0.64°
-0.715°	1.36°	1.88°	-3.31°	-2.79°

也可利用滤光片偏转一定角度将一次反射形成的杂散光避开主光路,入射至镜筒内壁形成散射,通过计算,该滤光片需偏转约 7° 能完全避开反射形成的杂散光。滤光片偏转,则相对垂直入射滤光片的状态发生改变,对于空间外差光谱仪中窄带滤光片而言,会向短波反向漂移约 2 nm ,导致仪器光谱范围发生改变。因此,滤光片的安装方式直接决定了制备滤光片的指标要求。

经滤光片反射再次在干涉仪内进行干涉,对于窄带滤光片窄带光谱范围内某一波长透过率为 t_λ ,反射率为 $1-t_\lambda$,经多次反射与理想轴上光形成的干涉图进行非相干叠加,则干涉强度表达式如下:

$$I(\lambda, N) = A \times t_\lambda \times t_{IN} + A \times t_{IN}^2 \times (1-t_\lambda) + A \times t_{IN}^3 \times (1-t_\lambda)^2 + \dots + A \times t_{IN}^{N+1} \times (1-t_\lambda)^N \quad (9)$$

式中: t_{IN} 为干涉仪效率; A 为入射干涉仪在波长 λ 上的振幅; N 为经滤光片反射的级次。轴外视场过大从单波长表现为相位差增大导致光谱分辨率降低。对于白光理想干涉图叠加形式,如图 7 所示,干涉次峰强度不足主干扰级的 $1/10$,因此经滤光片一次反射形成的干涉强度大于干涉次峰强度,当滤光片安装精度不满足上述要求时,该干涉成为有害信号,影响最终光谱复原准确性。

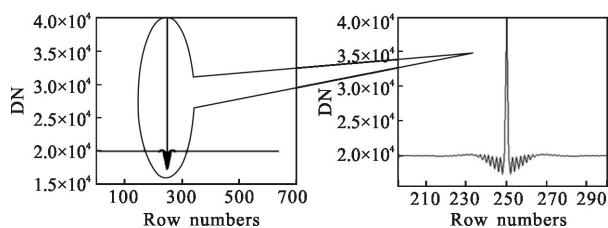


图 7 理论仿真干涉图

Fig.7 Simulated theoretical interferogram

杂散光来源主要包括外部辐射源、内部辐射源及非成像杂散光^[11],它对光学系统的影响直接表现在降低像面的对比度,降低信噪比,杂散光淹没有效干涉信息将会导致系统失效。空间外差光谱仪成像系统对杂散光的抑制主要表现为光机结构的优化设计以及后期的干涉图像预处理。空间外差光谱仪成像系统入射光是经前置准直镜头和干涉仪进入的光,因此主要存在非成像杂散光的影响。成像光学系统杂散光抑制主要从两方面入手:对于大的离轴光线在成像系统的中间实像面处增设限制视场角的光阑;小离轴角度产生的杂散光主要降低反射表面的散射率。

根据上述分析,成像镜头需要有中间实像面,并将滤光片倾斜微小的角度,即成像镜头对应的物方孔径角,从理论上便可完全消除非正常光路形成的干涉调制度降低和像面照明不均匀的现象。

3 结 论

采用前后镜组匹配中间加实像面光阑的结构实现了双远心成像镜头的设计,讨论分析了成像光学系统的设计指标要求,利用中间实像面对其进行视场角限制,防止干涉仪扩视场角度范围外的干涉图叠加至有效信号内。设计结果表明,光学系统畸变小于 0.01%,全视场内传递函数在探测器截止频率 38.5 lp/mm 处达到 0.60,总长度在 282 mm 以内。同时,依据光谱反演精度要求的干涉信号调制度指标,对参与成像系统的干涉仪元件面形容差提出合理的要求。通过干涉仪极限视场角分析,对镜头内滤光片安装精度及位置和消杂散光措施提出合理的要求和改进措施。设计结果满足了空间外差光谱仪对成像光学系统的设计指标和干涉信号调制度要求。

然而,由于实际焦面装调误差,定域面内的点函

数经成像系统卷积其点扩散函数后,在探测器面上对能量进行重新分配,依然会对干涉信息的调制度甚至光谱形状产生严重的影响,这也是后续工作中需要定量解决的问题。

参 考 文 献:

- [1] Smith B W, Harlander J. Imaging spatial heterodyne spectroscopy: theory and practice [C]//SPIE, 1999, 3698: 925-931.
- [2] Watchorn S, Roesle F L, Harlander J, et al. Development of the spatial heterodyne spectrometer for VUV remote sensing of the interstellar medium[C]//SPIE, 2001, 4498: 284-295.
- [3] Harlander J, Roesler F L, Cardon J G, et al. SHIMMER: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth's middle atmosphere [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(7): 1343-1352.
- [4] Fabien Dupont, Frederic Grandmont, Brain Solheim, et al. Spatial heterodyne spectrometer for observation of water for a balloon flight: overview of the instrument & preliminary flight data results [C]//FTS/HISE, 2015: FW4A. 5.
- [5] Englert C R, Stevens M H, Siskind D E, et al. The Spatial Heterodyne Imager for Mesospheric Radicals(SHIMMER) on STPSat-1[J]. *J Geophys Res*, 2010, 115(D20): D20306.
- [6] Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, et al. Study on spectral calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528002. (in Chinese)
- [7] Li Zhiwei, Xiong Wei, Shi Hailiang, et al. Phase error correction of spatial heterodyne spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 33(4): 0430002. (in Chinese)
- [8] Li Zhiwei, Shi Hailiang, Xiong Wei, et al. Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 33(5): 0530001. (in Chinese)
- [9] Harlander J, Reynolds R J, Roesler F L, et al. Spatial heterodyne spectroscopy: Laboratory tests of field-widened, multiple-order, and vacuum ultraviolet systems [C]//SPIE, 1992, 1743: 48-59.
- [10] Xue Qingsheng, Chen Wei. Optical system design of space-based UV panoramic imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 517-522. (in Chinese)
- [11] Lu Tianxiong, Bai Jian, Huang Zhi, et al. Stray light analysis and suppression of panoramic annular lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0511003. (in Chinese)