

# 用于空间外差光谱技术的 Offner 成像系统设计

徐 标<sup>1,2,3</sup> 罗海燕<sup>1,3\*</sup> 熊 伟<sup>1,2,3</sup> 胡广晓<sup>1,2,3</sup> 沈 静<sup>1,2,3</sup>  
李志伟<sup>1,3</sup> 施海亮<sup>1,3</sup> 方雪静<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

<sup>3</sup>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** Offner 反射式成像镜头相比于透射成像镜头具有适用波段范围宽、像差小、相对数值孔径较大、结构简单紧凑以及空间适应性良好的优点。结合空间外差技术特点和要求,给出了一种 Offner 成像镜头的设计方法和光路结构。该设计通过在出射光路中加入透镜改变缩放比,离轴装配消除像差的方法,可以满足空间外差光谱仪中对定域面干涉条纹进行任意比例缩放的要求。在系统要求数值孔径为 0.042、缩放比为  $-0.8622:1$  的条件下,给出了设计实例,且点列图最大均方根半径优于  $1.81 \mu\text{m}$ 。最后对该系统进行了像质评价和公差分析,分析结果表明其成像质量可以满足空间外差光谱仪对成像镜头的要求,在现有加工和装配水平条件下可工程化实现。

**关键词** 成像系统; 空间外差光谱技术; Offner 成像镜头; 光学设计; 像差校正

中图分类号 O433 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0911007

## Design of Offner Imaging System Used in Spatial Heterodyne Spectroscopy

Xu Biao<sup>1,2,3</sup> Luo Haiyan<sup>1,3</sup> Xiong Wei<sup>1,2,3</sup> Hu Guangxiao<sup>1,2,3</sup> Shen Jing<sup>1,2,3</sup>  
Li Zhiwei<sup>1,3</sup> Shi Hailiang<sup>1,3</sup> Fang Xuejing<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

**Abstract** Comparing with traditional transmission imaging lens, the Offner refractive imaging lens has the advantages of wide band, small aberration, relatively large numerical aperture, compact structure and better space adaptability. In combination with the characteristics and requirements of spatial heterodyne spectroscopy (SHS), the Offner imaging lens and the light path structure are designed. Several pieces of lens are added to the exit light in order to change the pantograph ratio, while the aberration caused by the lens is eliminated by using off-axis assembly, so the requirement of variability in the magnification of interferometric fringe on localization plane on the SHS can be satisfied. Under the precondition of SHS requirements of a 0.042 numerical aperture and a  $-0.8622:1$  magnification, the design example is provided, and the biggest root mean square radius of spot diagram is smaller than  $1.81 \mu\text{m}$ . Finally, the imaging quality of the system is evaluated and the tolerance is analyzed, the result shows that the imaging quality can meet the imaging lens requirements of SHS, the Offner imaging of SHS can be achieved in engineering under the level of conventional machining and assembly.

**Key words** imaging systems; spatial heterodyne spectroscopy technology; Offner imaging lens; optical design; aberration correction

收稿日期: 2016-04-11; 收到修改稿日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(41301373)、中国科学院 GFCX 青年基金(CXJJ-16Q136)

作者简介: 徐 标(1990—),男,硕士研究生,主要从事空间外差光谱仪成像设计方面的研究。

E-mail: 13675514690@163.com

导师简介: 熊 伟(1975—),男,博士,研究员,主要从事超分辨光谱遥感技术方面的研究。E-mail: frank@aiofm.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: luohaiyan@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

空间外差光谱技术是 20 世纪 90 年代迅速发展起来的一种新型超分辨率光谱分析技术,具有超高光谱分辨率的优点,不但适用于痕量气体的精细测量<sup>[1]</sup>,而且适用于大气层中的水汽探测,林云龙等<sup>[2]</sup>基于空间外差光谱技术研制了空间外差观察水汽(SHOW)的水汽探测实验装置,目标是发展星载空间外差光谱仪对大气层中水汽的监测。Offner 成像技术最早由 Offner A 等<sup>[3]</sup>提出的,目前已应用于近红外望远系统<sup>[4]</sup>和成像光谱仪系统中<sup>[5-7]</sup>。2007 年,美国 STPSat-1 卫星搭载的 SHIMMER 载荷将空间外差光谱技术与 Offner 系统相结合,用于紫外波段中高层大气 OH 自由基探测<sup>[8]</sup>,但详细设计和指标并未报道。

空间外差光谱技术的成像系统用于对于干涉条纹图像的比例缩放,缩放比直接影响光谱分辨率,而系统的畸变等像差因素影响成像效果,进而降低光谱质量,因此成像系统的设计对空间外差光谱仪非常重要。成像系统的设计可以选择透射式或反射式成像,传统的透射式成像采用前后镜组实现双远心成像,镜片数量多,装校难度增加,且光学效率损失较为严重。Offner 反射式成像可以采用较少的镜面,实现较大的相对孔径,且具有不受色差的限制、适用于较宽的光谱范围、光学系统的利用率高、结构简单紧凑及双远心等优点<sup>[9-11]</sup>。基于上述考虑,本文对 Offner 反射式成像进行了研究,并完成了应用于空间外差光谱仪成像系统的光路结构设计、像质评估和公差分析。

## 2 成像系统设计

### 2.1 Offner 系统成像原理

图 1 为典型 Offner 结构的光路示意图,整个系统由主镜  $M_1$  和次镜  $M_2$  两面反射镜组成,其曲率半径分别为  $R_1$  和  $R_2$ ,且曲率中心重合于  $O$  点,物点  $A$  发出的光线经主镜  $M_1$  入射到次镜  $M_2$  上,再由次镜  $M_2$  至主镜  $M_1$  上,并成像于像点  $A'$  处,物点  $A$  与像点  $A'$  关于  $O$  点对称并且 3 点位于同一平面。由于光线在主镜  $M_1$  发生 2 次反射,因此 Offner 系统也属于 1 种三反射光学系统,根据三反系统的平像场条件<sup>[12]</sup>可得  $R_1 = 2R_2$ ,系统可自动消 3 级像差,具有良好的成像能力。当孔径光阑位于次镜  $M_2$  上时,入射主光线  $Aa$  和出射主光线  $a'A'$  平行于光轴,为双远心光路。

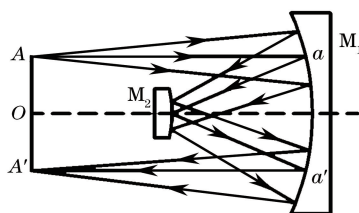


图 1 Offner 光学系统结构图

Fig. 1 Structure drawing of Offner optical system

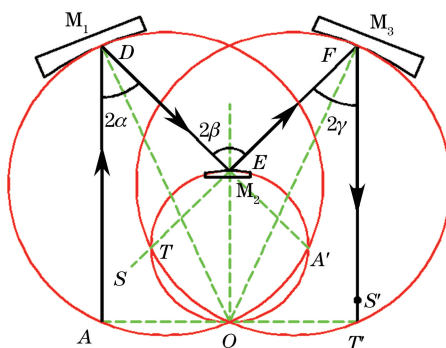


图 2 Offner 成像系统的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of Offner imaging system

Offner 成像原理如图 2 所示,图中主镜  $M_1$ 、次镜  $M_2$  和三镜  $M_3$  的曲率半径中心重合于  $O$  点,光线在 3 个反射镜的入射点和出射点为  $D$ 、 $E$ 、 $F$ ,入射角为  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ 。 $l$  为物点经主镜反射后的像点  $A'$  到次镜入射点  $E$  的距离, $l_T$  为次镜子午像点  $T$  到次镜入射点  $E$  的距离, $l_S$  为次镜弧矢像点  $S$  到次镜入射点  $E$  的距离。

次镜对子午像点成像满足<sup>[13]</sup>:

$$\frac{\cos^2 \beta}{l} + \frac{\cos^2 \beta}{l_T} = \frac{2\cos \beta}{R_2}, \quad (1)$$

次镜对弧矢像点成像满足<sup>[13]</sup>:

$$\frac{1}{l} + \frac{1}{l_S} = \frac{2\cos \beta}{R_2}, \quad (2)$$

当物点在球面反射镜的罗兰圆上时,即满足  $l = R_2 \cos \beta$  时,根据上述公式即可求出子午像距和弧矢像距分别为:

$$l_T = R_2 \cos \beta, \quad (3)$$

$$l_S = \frac{R_2 \cos \beta}{\cos 2\beta}, \quad (4)$$

由结果可知子午像在罗兰圆上,弧矢像在罗兰圆之外,子午和弧矢像点不重合使系统存在像散,可以通过调整结构参数  $R_2$ ,找到像散最小的结果。

### 2.2 成像系统设计及像质评估

Offner 成像空间外差光谱仪原理图如图 3 所示,衍射光栅  $G_1$ 、 $G_2$  代替了传统迈克耳孙干涉仪中的 2 个平面反射镜。物点  $A$  发出的光,经透镜  $L_1$  准直后入射到分束器上,分束器将入射光分为强度相等的 2 束相干光,经两臂的光栅反射后在出射面上形成干涉条纹,并由 Offner 成像系统成像在 CCD 面上。根据对干涉仪系统的输出参数和探测器参数的分析,可以得到成像系统的设计指标参数如表 1 所示。

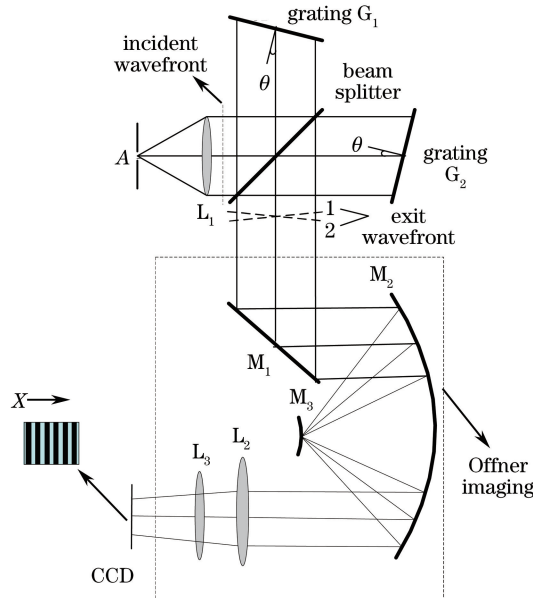


图 3 Offner 成像空间外差光谱仪原理图

Fig. 3 Schematic of Offner imaging spatial heterodyne spectroscopy

表 1 成像系统光学设计参数指标

Table 1 Optical design specifications of imaging system

Parameter	Value
Distortion	<0.1%
Spectral range	307~311 nm
Object height	15.44 mm
Object space NA	0.042
MTF@38.5 lp/mm	>0.6
Magnification	-0.8622:1



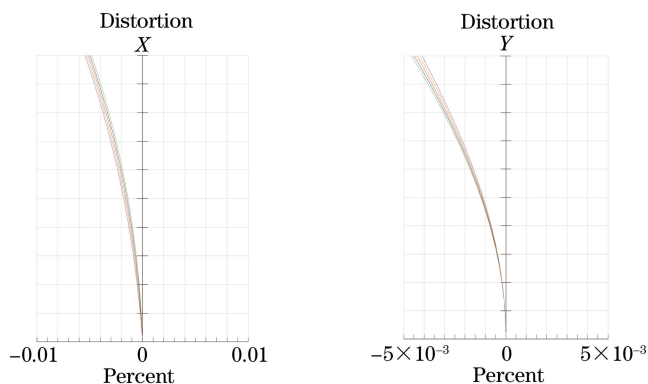


图 6 光学系统的畸变

Fig. 6 Distortion of optical system

1%。完成系统公差分配后,以 RMS 弥散斑大小的变化作为标准,对成像系统进行敏感度分析,由于干涉仪系统已给出,公差分析时从第 5 面开始,选择焦面补偿,最终影响系统成像性能的前 10 个公差如表 3 所示。

表 3 10 个主要公差

Table 3 Ten main tolerances

Type	Surface1	Surface2	Value	Criterion	Change
TIRR	11		-0.1	0.00180	0.000695
TIRR	11		0.1	0.00167	0.000568
TFRN	11		-2.0	0.00140	0.000293
TETY	12	12	-0.0167	0.00137	0.000273
TFRN	11		2.0	0.00134	0.000234
TEDX	12	12	-0.05	0.00130	0.000201
TFRN	7		-1.5	0.00130	0.000196
TSDX	19		0.05	0.00123	0.000126
TETY	10	10	0.008	0.00123	0.000124
TEDX	10	10	0.03	0.00122	0.000115

从分析结果中可以得出,第 11 面(即次镜)的表面不规则度公差是影响弥散斑半径的最主要因素,主要靠光学加工精度来保证。其次影响较大的是第 11 面曲率半径与样板偏差的光圈数,同样需要靠光学加工精度保证,因此整个系统对次镜的光学加工的精度要求比较高,其他的公差对弥散斑的影响较小。

通过使用蒙特卡罗方法对成像系统进行综合性能分析,计算了 50 个样本,所有制造公差样本按照概率分布在最大值和最小值之间,最终从统计结果可以得出成像系统 90% 弥散斑半径均小于  $2.8 \mu\text{m}$ , 满足 1 个像元半径  $6.5 \mu\text{m}$  的指标要求,系统具有合理的公差要求,可以工程化实现。

### 3 结 论

研究了 Offner 成像系统的原理,分析了成像系统的输入条件,并运用光学设计软件完成了用于空间外差光谱仪的 Offner 成像镜头的设计。最后得到 Offner 成像镜头的设计结果表明成像系统缩放比为  $-0.8628:1$ , 弥散斑均方根半径优于  $1.81 \mu\text{m}$ , MTF 在探测器截止频率  $38.5 \text{ lp/mm}$  处优于 0.78, X、Y 方向的畸变均优于 0.006%, 后截距 48 mm, 远心度为  $0.5^\circ$ , 系统 F 数为 10, 设计结果满足了空间外差光谱技术对成像系统的指标要求。在反射率和透射率均为 99%, 不考虑材料吸收的情况下, Offner 成像镜头 4 个反射面和 4 个透射面的光学效率为 92.3%, 而透射式 16 个透射面的光学效率只有 85.1%, 透射式光学效率损失较多; 与透射式成像相比, Offner 成像镜头的像差小, 畸变优于 1 个量级, 弥散斑的半径减小了一半; 同时, 还具有体积小、结构简单, 适用于深紫外、红外以及宽波段空间大气的探测等优点。下一步工作将在结构设计的基础上定量研究成像系统的空间环境适应性和系统的杂散光性能。

## 参 考 文 献

- 1 Luo Haiyan. Research on imaging spatial heterodyne spectroscopy [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2015.  
罗海燕. 空间外差干涉成像光谱仪技术研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2015.
- 2 Lin Y L, Shepherd G, Solheim B, *et al.* Introduction to spatial heterodyne observations of water (SHOW) project and its instrument development[C]. Beijing: International TOVS Study Conference-XIV Proceedings, 2005.
- 3 Offner A, Darien C T. Unit power imaging catoptric anastigmat: US 3748015 [P]. 1973-07-24.
- 4 Jacqueline Fischer, Frederick Vrba, Douglas Toomey, *et al.* Astrocim: Offner re-imaging  $1024 \times 1024$  InSb camera for near-infrared astrometry on the USNO 1.55-m telescope[C]. SPIE, 2003, 4841: 564-577.
- 5 Liu Guanghong, Wu Gang, Ling Qing, *et al.* Modelling of Offner imaging spectrometers and aberration analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0322001.  
刘光宏, 吴 刚, 凌 青, 等. Offner 成像光谱仪建模及像差分析[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0322001.
- 6 Wang Baohua, Ruan Ningjuan, Guo Chongling, *et al.* Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1022001.  
王保华, 阮宁娟, 郭崇岭, 等. 机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022001.
- 7 Xue Qingsheng. Optical design of space-based wide field-of-view differential optical absorption imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122002.  
薛庆生. 星载宽视场差分吸收成像光谱仪光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122002.
- 8 Christoph R Englert, Michael H Stevens, David E Siskind, *et al.* Spatial heterodyne imager for mesospheric radicals on STPS at-1[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D20): 898-907.
- 9 Han Shan, Huang Yuanshen, Li Baicheng, *et al.* Theoretical analysis and research about high image quality Offner imaging spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0430001.  
韩 珊, 黄元申, 李柏承, 等. 高成像质量 Offner 成像光谱仪的理论分析与研制[J]. 光子学报, 2014, 43(4): 0430001.
- 10 Wu Congjun, Yan Changxiang, Liu Wei, *et al.* Sub-field imaging spectrometer design based on Offner structure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8): 2272-2276.  
吴从均, 颜昌翔, 刘 伟, 等. 基于 Offner 结构分视场成像光谱仪光学设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2272-2276.
- 11 Prieto Blanco X, Montero Orille C, Couce B, *et al.* Analytical design of an Offner imaging spectrometer[J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9156-9168.
- 12 Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(4): 706-709.  
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐 军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.
- 13 Gao Zhenyu, Fang Wei, Song Baoqi, *et al.* Design of off-plane Offner spectrometer with high spectral resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0211002.  
高震宇, 方 伟, 宋宝奇, 等. 非共面 Offner 结构高分辨率成像光谱设计[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0211002.