

# 成像光谱仪大孔径前置物镜设计研究

于建冬<sup>1,2</sup> 梁中翥<sup>1</sup> 梁静秋<sup>1</sup> 吕金光<sup>1</sup> 秦余欣<sup>1</sup> 田超<sup>1,2</sup> 王维彪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 含有阶梯微反射镜和片状分束器的时空联合调制型傅里叶变换成像光谱仪的前置成像系统不仅要满足与阶梯微反射镜参数相匹配, 还需具有实入瞳和像方远心的特性。为此, 研究了将普通红外物镜转变为具有实入瞳的像方远心结构的方法。同时, 研究了片状分束器和补偿板所带来的离轴像差, 并提出了采用柱面和泽尼克面相结合的矫正方法以提高成像质量。设计出满足光谱范围3~5  $\mu\text{m}$ 、 $F$ 数为4、有效焦距为400 mm、视场为4.58°的整个波段全视场范围内无渐晕的红外光学系统。仿真结果表明: 前置成像系统的成像质量接近衍射极限, 最大全视场均方根光斑直径为5.9  $\mu\text{m}$ 。这种设计方法可以用于大孔径时空联合调制型傅里叶变换成像光谱仪前置成像系统设计。

**关键词** 光学设计; 傅里叶变换成像光谱仪; 红外系统; 片状分束器

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0222002

## Research and Design of Prefixing Objective with Large Aperture in Imaging Spectrometer

Yu Jiandong<sup>1,2</sup> Liang Zhongzhu<sup>1</sup> Liang Jingqiu<sup>1</sup> Lü Jinguang<sup>1</sup> Qin Yuxin<sup>1</sup>  
Tian Chao<sup>1,2</sup> Wang Weibiao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

**Abstract** Containing stepped micro-mirror and flaky beam splitter, prefixing objective of spatio-temporally modulated Fourier transform imaging spectrometer is not only to match with parameters of ladder micro-mirror, but also to have telecentric characteristic with a real entrance pupil. To this end, this paper studies a method to transform the ordinary infrared lens into a telecentric construction with a real entrance pupil. Meanwhile, the study of off axis aberrations caused by the sheet beam splitter and compensation plate proposes a correction method applying a combination of cylindrical and Zernike surface to improve image quality. Based on the method, with the specific requirements of 3~5  $\mu\text{m}$  spectral range,  $F$  number of 4, 400 mm effective focal length, no vignetting within full field of view of 4.58°, an infrared optical system is designed. Simulation results show that: the image quality of front objective is closed to the diffraction limit with the maximum root mean square (RMS) spot diameter 5.9  $\mu\text{m}$  in full field, and the distortion less than 0.3%. So this method can be used for the design of the front lens with large aperture in spatio-temporally modulated Fourier transform imaging spectrometer.

收稿日期: 2014-07-17; 收到修改稿日期: 2014-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(60977062, 61027010, 61376122)、国家863计划(2009AA04Z315)、吉林省科技发展计划项目(201205025, 20130206010GX)、长春市科技发展计划项目(2011131, 2013261)

作者简介: 于建冬(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事红外成像光谱仪光学系统设计方面的研究。

E-mail: 15948768620@163.com

导师简介: 梁中翥(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事微光机电系统及光学材料等方面的研究。

E-mail: liangzz@ciomp.ac.cn (通信联系人)

**Key words** optical design; Fourier transform imaging spectrometer; infrared system; flat splitter

**OCIS codes** 220.3620; 300.6300; 110.3080; 230.1360

## 1 引 言

近年来,傅里叶变换成像光谱技术<sup>[1-2]</sup>得到了快速的发展。作为在其基础上发展起来的新一代光学遥感仪器,傅里叶变换成像光谱仪(FTIS)因可同时获得目标物体的二维图像信息和一维光谱信息而广泛应用于空间遥感、地质资源勘探、环境监测、气象分析等领域,其研究受到了国内外学者的高度重视<sup>[3]</sup>。2005年,NASA支持研制的时间调制型FTIS,波段4.4~6.1  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率达到 $0.57\text{ cm}^{-1}$ 。2007年10月,由西安光学精密机械与物理研究所研制的空间调制FTIS搭乘嫦娥1号卫星升空,其波段为0.48~0.96  $\mu\text{m}$ ,光谱分辨率达到 $325\text{ cm}^{-1}$ ,是世界上第一台用于月球探测的空间调制FTIS。

与时间调制及空间调制方式相比,时空联合调制FTIS不含有狭缝和可动部件,具有高通量,多通道,信噪比高,稳定性好的优点,在获取目标物体光谱信息的同时,将物体成像在红外面阵探测器上,形成关于目标的三维数据立方体,具有广阔的发展前景。本文研究了一种应用于中波红外波段的含有阶梯微反射镜和片状分束器的新型时空联合调制FTIS,对大孔径前置成像系统进行了设计研究。

在中波红外前置成像系统的设计<sup>[4-5]</sup>中,考虑到同轴反射式系统由于存在中心遮拦而导致光能利用率低,致使系统传递函数在中频部分下降严重的问题,以及离轴反射式系统装调难度大的情况<sup>[6-7]</sup>,本成像光谱仪采用折射式结构,具有加工装调容易,成像质量好,可以实现面视场等优点<sup>[8]</sup>。由于时空联合调制型FTIS需兼顾成像功能和对光程差在空间频率域的离散采样,因此,对分束器和补偿板所形成的倾斜平板引入的像差进行矫正是前置成像系统光学设计的重要内容。本文利用折射式光学系统实现像方远心,研究了片状分束器和补偿板所带来的离轴像差<sup>[9]</sup>,并且提出了采用柱面和泽尼克面相结合的矫正方法,最终得到了接近衍射极限的前置成像系统。

## 2 设计思路

所研究的时空联合调制型FTIS以迈克耳孙干涉仪为原型,采用阶梯微反射镜代替动镜,实现对光程差在空间域的离散取样,以此来取得关于物体的三维数据立方体。

### 2.1 成像光谱仪工作原理

系统的工作原理如图1所示,整个系统由前置成像系统、分束系统、平面镜和阶梯型微反射镜、后置成像系统、中波红外探测器等组成<sup>[10]</sup>。某一时刻目标物体发出的光以视场角 $\omega$ 进入系统,经过前置成像系统和分束系统之后,分别成像在平面反射镜和阶梯微反射镜的某一阶梯反射面上,由于阶梯微反射镜和平面镜之间存在光程差,两束光线经过后置成像系统成像于面阵探测器上时发生干涉,产生稳定的干涉条纹。随着摆镜的扫描,下一时刻目标物体以另外一个视场角进入系统。在一个扫描模式之内,系统就能完成在所有

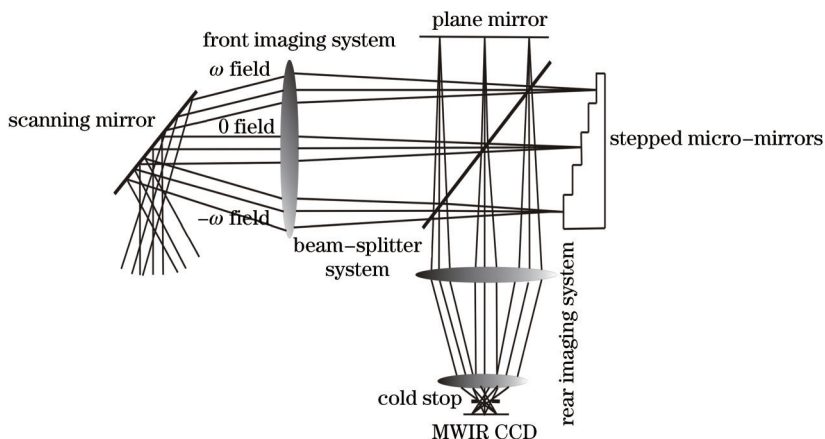


图1 时空联合调制型FTIS的工作原理

Fig.1 Principle of spatio-temporally modulated FTIS

的阶梯反射面上的成像过程,从而可以获得关于目标物体的完整的干涉图序列,通过对干涉图序列作傅里叶变换即可得到物体的光谱信息。由此可见,前置成像系统的作用是将不同视场的目标物体清晰的成像在平面反射镜和阶梯微反射镜不同的阶梯反射面上。同时,为了保证能形成稳定的干涉条纹,要求各视场主光线垂直于平面镜入射,即要求系统为像方远心结构。

### 2.2 设计指标

根据阶梯型微反射镜的参数,选取 1024 pixel×1280 pixel,像元尺寸为 15 μm 的红外面阵电荷耦合器件 (CCD),则前置成像系统的设计指标如下:焦距  $f'$  为 400 mm,  $F$  数为 4,视场角  $2\omega$  为  $4.58^\circ$ ,系统的特征频率  $u_n$  为 16 lp/mm。

### 2.3 初始结构

选用的初始结构基本光路如图 2 所示<sup>[11]</sup>,为四片式结构,材料为硅和锗的组合,这是中波红外消色差最好的材料组合<sup>[12]</sup>。该初始结构  $F$  数为 1.5,半视场角为  $4^\circ$ ,相对孔径和视场角都远大于设计指标。

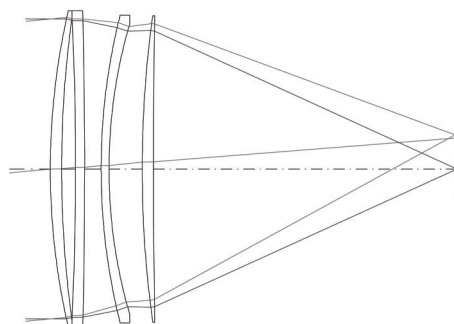


图 2 初始结构基本光路

Fig.2 Optical path of the initial structure

### 2.4 实现像方远心

设计过程中,首先使出瞳位于无限远位置,将初始结构改进为像方远心光路。由于红外系统一般采用扫描模式,因此,需要在系统前方加一实入瞳,代表实际应用中的扫描摆镜,为了降低系统装调难度,实入瞳放置在透镜 1 前 100 mm 处。

实现像方远心光路的原理如图 3 所示,在初始结构之后,加入一平凹透镜,将出瞳定位在无穷远的同时,提高系统矫正负像散的能力。

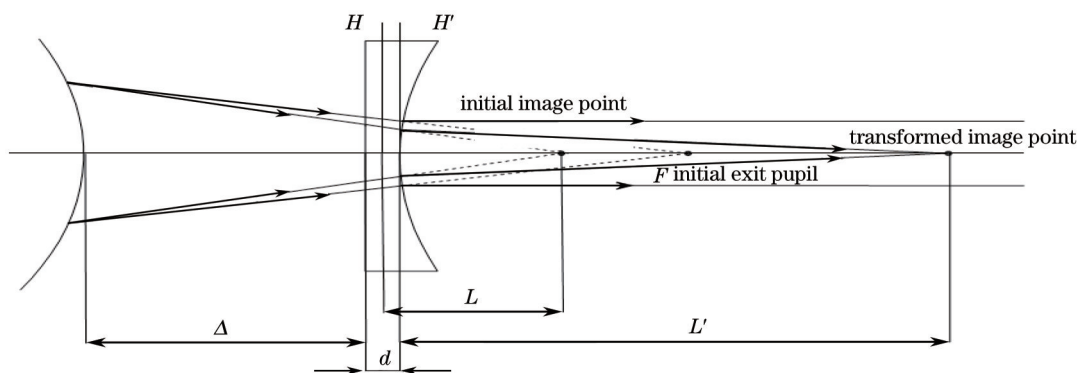


图 3 像方远心光路原理图

Fig.3 Principle of the telecentric structure

图 3 中,初始结构原像点到平凹透镜物方主面距离为

$$L = l' - \frac{d}{n} - \Delta, \quad (1)$$

式中  $l'$  为初始结构后工作距离,  $d$  为平凹透镜中心厚度,  $n$  为平凹透镜折射率,  $\Delta$  为平凹透镜到初始结构最后表面距离。

根据组合光学系统公式,远心结构现像点到平凹透镜像方主面距离为

$$L' = l, \quad (2)$$

式中  $l$  为改进后系统后工作距离,其值为 100 mm。

改进后的系统为像方远心结构,则初始系统原出瞳位于平凹透镜物方焦点处,平凹透镜焦距为

$$F = \frac{R}{n-1} = s - \Delta - \frac{d}{n}, \quad (3)$$

式中  $R$  为平凹透镜凹面半径,  $s$  为初始结构出瞳距。

根据理想光学系统高斯公式,有

$$\frac{1}{L'} - \frac{1}{L} = -\frac{1}{F}. \quad (4)$$

将(1)~(4)式联立,得到关于  $d, n, \Delta, R$  的方程组,在方程组中,平凹透镜材料选择锗,  $n=4$ ,解余下方程,得  $d=6$  mm,  $\Delta=15$  mm,  $R=320$  mm。

### 2.5 系统初步优化

在加入倾斜平板之前,需要对系统进行初步优化,得到远心结构光路如图4所示,参数如表1所示。

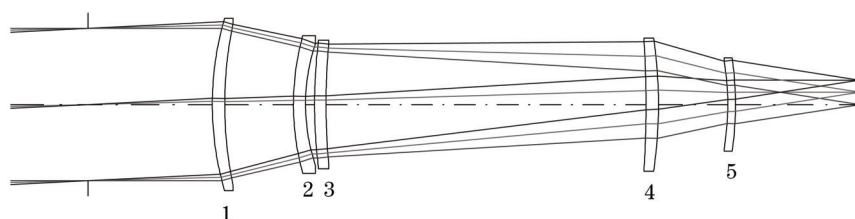


图4 远心结构光路

Fig.4 Optical path of the telecentric structure

表1 远心结构参数

Table 1 Parameter of the telecentric structure

Parameter	Value
Effective focal length /mm	400.00
$F^\#$	4.00
Back focal length /mm	100.35
Exit pupil distance /mm	9479.74

## 3 倾斜平板像差分析及矫正

### 3.1 分束器和补偿板模型建立

分束器和补偿板的加入会给系统引入倾斜和偏心,所采用的分束器和补偿板为硒化锌材料,厚度为 10 mm,则  $X$  方向倾斜量  $\alpha=\pi/4$ ,  $Y$  方向偏心量为

$$dy = \frac{t \sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = 2.15 \text{ mm}, \quad (5)$$

式中  $t$  为分束器和补偿板的厚度,  $n$  为硒化锌的折射率。同理可得,  $Z$  方向偏心量为

$$dz = \frac{-t \sin^2 \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} = -2.15 \text{ mm}. \quad (6)$$

这使得系统不再是一个简单的同轴系统,而变成了一个复杂的倾斜偏心系统,原有的像差优化方法对现有系统不再适用,需采用矢量像差理论<sup>[13-14]</sup>来分析矫正系统像差,图5为加入倾斜平板之后的点列图,弥散斑直径达到了毫米量级。

### 3.2 倾斜平板像差分析

根据倾斜偏心系统像差分析理论,对于倾斜平板引入的像差有如下公式:

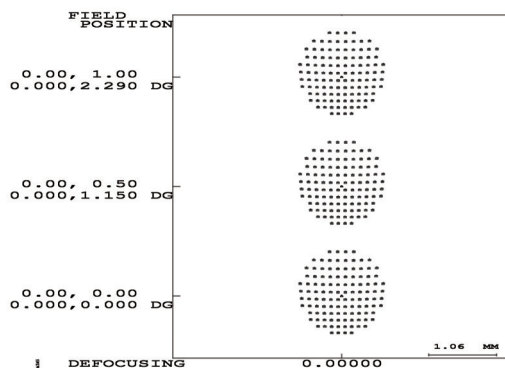


图5 加入倾斜平板后的点列图

Fig.5 Spot diagram after adding in tilted flat bed

$$B_{\text{spher}} = \frac{(N^2 - 1)t}{32N^3(F^\#)^3}, \quad (7)$$

$$B_{\text{coma}} = \frac{(N^2 - 1)tu_p}{8N^3(F^\#)^2}, \quad (8)$$

$$B_{\text{astig}} = \frac{(N^2 - 1)tu_p^2}{2N^3(F^\#)}, \quad (9)$$

(7)、(8)、(9)式分别代表了由倾斜平板引入的球差、彗差和像散,式中, $t$ 为倾斜平板的厚度, $N$ 为倾斜平板折射率, $u_p$ 为主光线入射角,取中心波长 $4\ \mu\text{m}$ ,则 $B_{\text{spher}}=1.65\ \mu\text{m}$ , $B_{\text{coma}}=20.84\ \mu\text{m}$ , $B_{\text{astig}}=263.2\ \mu\text{m}$ 。由此,倾斜平板对系统像质主要的影响体现在彗差和像散两方面,其中彗差达到了几个波长量级,而像散则达到了几十个波长量级。

### 3.3 像差矫正

对于倾斜偏心系统,光学设计软件自带的约束条件和优化函数不再适用,需用真实光线追迹不同视场的主光线,子午方向光线和弧矢方向光线。以轴上视场为例,表2是其真实光线追迹的结果, $X, Y$ 值为像面上各光线坐标,OPD为各光线波像差。

表2 轴上视场真实光线追迹

Table 2 Real ray trace on  $0^\circ$  field of view

Rays	$X$ /mm	$Y$ /mm	OPD / $\lambda$
Chief ray	0.00	10.83	0
+ $X$ ray	0.66	10.87	-10.24
- $X$ ray	-0.66	10.87	-10.24
+ $Y$ ray	0.00	12.14	-19.76
- $Y$ ray	0.00	9.74	-17.47

在表2中,系统子午彗差表现为+ $Y$ 和- $Y$ 关于主光线的不对称性,而像散表现为子午方向光线和弧矢方向光线聚焦位置的不重合。根据(9)式,影响系统成像质量的主要因素是像散,因此,在系统中加入柱面,改变 $X$ 方向光线的聚焦位置,使其与- $Y$ 光线在10.87 mm高度重合,经过计算和仿真,此时象距为53.00 mm,柱面镜前表面位于远心结构第四片透镜后51.87 mm处,厚度为3 mm, $X$ 方向半径为无穷,后表面位于远心结构第五片透镜前5 mm处, $X$ 方向半径为4600 mm,引入柱面镜后,系统的点列图如图6所示。

此时,系统的主要像差为彗差,同时残留了少量的像散和球差,至此,传统的球面已经无法提高系统像质,需要采用非球面来优化。根据矢量像差理论<sup>[15-16]</sup>,倾斜偏心光学系统各类像差和泽尼克多项式之间存在直接联系,引入泽尼克多项式面型来矫正像差有很好的效果。

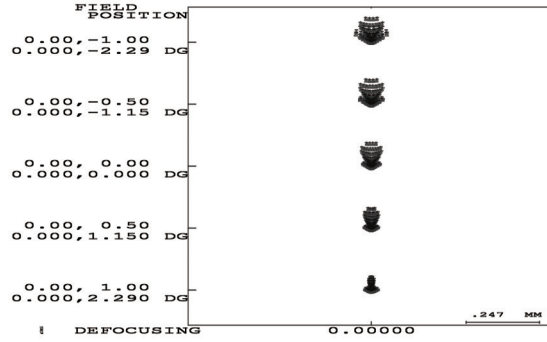


图6 引入柱面镜后的点列图

Fig.6 Spot diagram after plugging in cylindrical surface

### 4 优化和像质评价

将透镜2后表面和透镜3前表面改为泽尼克曲面,利用软件来优化系统,得到最终结果如图7所示,最终系统的有效焦距为396.79 mm,出瞳距为7346.07 mm。表3表示了透镜2后表面和透镜3前表面各阶系数。图8为最终系统像质评价。

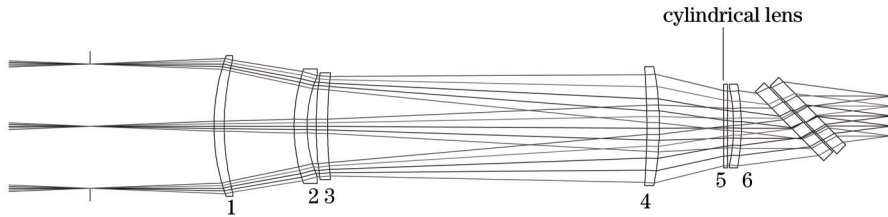


图7 最终系统结构

Fig.7 Structure of the ultimate structure

表3 泽尼克表面各阶系数

Table 3 Coefficient of each step of Zernike surface

Order of Zernike coefficient	Front surface of len 2	Rear surface of len 3
1	-1.71	-0.72
2	$-1.97 \times 10^{-5}$	$-9.21 \times 10^{-6}$
3	$-3.08 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-3}$
4	$2.60 \times 10^{-6}$	$5.53 \times 10^{-7}$
5	$7.43 \times 10^{-6}$	$6.20 \times 10^{-7}$
6	$1.90 \times 10^{-10}$	$-3.35 \times 10^{-10}$
7	$4.73 \times 10^{-11}$	$7.89 \times 10^{-11}$
8	$-5.2 \times 10^{-11}$	$-8.14 \times 10^{-11}$
9	$-2.26 \times 10^{-8}$	$-1.29 \times 10^{-8}$
10	$-1.51 \times 10^{-8}$	$-2.56 \times 10^{-8}$

如图8所示,像差矫正后的系统传递函数(MTF)接近衍射极限,在特征频率处的传递函数为0.67,最大均方根光斑直径为5.9 μm。

### 5 结 论

对一种新型基于阶梯微反射镜和片状分束器的时空联合调制型傅里叶变换成像光谱仪的前置成像系统进行了分析与设计。由于前置成像系统的设计需要实现系统的像方远心化,同时矫正倾斜平板引入的大数量级像差,为此,研究了在初始结构后加入平凹透镜的方法,将出瞳成像在无穷远,而对于传统球面无法矫正的像差,先利用真实光线追迹,将五条主要光线聚焦于像面上接近的位置,最后在系统中引入柱面和泽

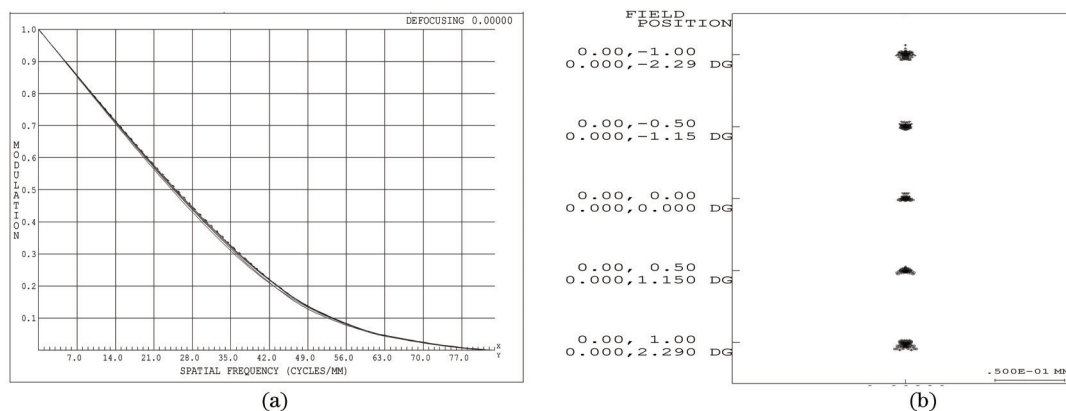


图8 最终系统像质评价。(a) 传递函数; (b) 点列图

Fig.8 Image quality evaluation of ultimate system. (a) MTF; (b) spot diagram

尼克面型, 矫正剩余像差, 使系统传递函数接近衍射极限, 证明了这种设计方法是可行的。

### 参 考 文 献

- 1 W Michael, Kudenov, Eustace L Dereniak. Compact real-time birefringent imaging spectrometer [J]. Opt Express, 2012, 20(16): 17973-17986.
- 2 Yann Ferrec, Jean Taboury, Hervé Sauer, *et al.*. Experimental results from an airborne static Fourier transform imaging spectrometer [J]. Appl Opt, 2011, 50(30): 5804-5904.
- 3 Wei Ruyi. Study on Time-resolved Fourier Transform Infrared Spectral Imaging Technology and its Applications[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences, 2013. 9-23.  
魏儒义. 时间调制傅里叶变换红外光谱成像技术与应用研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2013. 9-23.
- 4 Xue Qingsheng. Optical system design of large relative-aperture and wide field of view space borne imaging spectrometer [J]. Chinese J Lasers, 2012, 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, 2012, 41(3): 0316003.
- 5 Zhang Xuemin, Wei Ruyi, Yu Tao, *et al.*. A method to measure off-axis fabrication and off-axis angle of axis aspheric mirror precisely [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416001.  
张学敏, 魏儒义, 于涛, 等. 一种实现离轴非球面反射镜离轴量和离轴角精确测量的方法[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416001.
- 6 Zhong Xing, Jin Guang. Design of extra wide short wave infrared spectral imager's fore-optics [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022004.  
钟兴, 金光. 超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022004.
- 7 Gong Dapeng, Guo Jiang, Wang Guoliang, *et al.*. Outdoor stereoscopic imaging of mapping camera with long focus off-axis three-mirror [J]. Optical and Precision Engineering, 2013, 21(1): 137-143.  
龚大鹏, 郭疆, 王国良, 等. 长焦距离轴三反测绘相机的外场立体成像[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 137-143.
- 8 Luo Shoujun, He Wubin, Li Wenhui, *et al.*. Design of middle infrared continuous zoom optical system with a large FPA [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(10): 2117-2122.  
骆守俊, 何伍斌, 李文虎, 等. 大面阵中波红外连续变焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2117-2122.
- 9 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722002.  
林晶, 崔庆丰, 朱浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002.
- 10 Fu Jianguo, Liang Jingqiu, Liang Zhongzhu. Analysis and design for the optical system of a static infrared Fourier transform spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(2): 0222006.  
付建国, 梁静秋, 梁中翥. 一种静态傅里叶变换红外光谱仪的光学系统分析与设计[J]. 光学学报, 2012, 32(2): 0222006.
- 11 Warren J Smith. Modern Lens Design [M]. New York: McGraw Hill Professional, 2004. 393-410
- 12 Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, *et al.*. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0322003.

- 曲贺盟, 张 新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003.
- 13 Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang, *et al.*. Design of long-wave infrared imaging spectrometer with eliminating spectral curvature [J]. Optical and Precision Engineering, 2014, 22(2): 265-273.
- 张晓龙, 刘 英, 孙 强, 等. 消谱线弯曲长波红外成像光谱仪设计[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(2): 265-273.
- 14 Lü Shiliang, Liu Jinguo, Jia Ping, *et al.*. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA [J]. Optical and Precision Engineering, 2013, 21(8): 2154-2160.
- 吕世良, 刘金国, 贾 平, 等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(8): 2154-2160.
- 15 Sun Jingwei, Lü Tianyu, Yao Lishuang, *et al.*. Design and assembly of transmitter-telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2): 369-375.
- 孙敬伟, 吕天宇, 姚丽双, 等. 发射望远镜的设计与装调[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(2): 369-375.
- 16 Xue Qingsheng, Chen Wei. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 232-240.
- 薛庆生, 陈 伟. 改进的宽光谱段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2): 232-240.

栏目编辑: 韩 峰