

超广角短波红外成像光谱仪前置光学系统设计

钟 兴 金 光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 为提高机载短波红外(SWIR)推扫式成像光谱仪遥感工作效率,获取更大的地面覆盖宽度,对视场角(FOV)达到 90° 的超广角前置光学系统进行了研究。针对传统折射式短波红外($1\sim 2.5\ \mu\text{m}$)系统在长波端透射率低的问题,提出了采用新型偏轴反射型式进行前置光学系统设计的思路。归纳了矢量像差理论所描述的控制偏轴系统三阶像差的方法。通过初始结构求解,在优化中控制像方远心及畸变,设计了焦距 $15\ \text{mm}$ 、相对孔径 $1/3.5$ 、视场角达到 90° 的偏轴反射式前置光学系统,在奈奎斯特频率处的平均调制传递函数(MTF)优于 0.68 ,边缘视场的相对照度达到 88% ,且不存在材料吸收引起的透射率下降问题。同时对畸变影响下的推扫图像也进行了仿真。该光学设计应用于大视场短波红外成像光谱仪,可极大地提高系统的探测灵敏度。

关键词 光学设计;成像光谱仪;前置光学系统;矢量像差;短波红外;大视场

中图分类号 O435.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1022004

Design of Extra Wide Short Wave Infrared Spectral Imager's Fore-Optics

Zhong Xing Jin Guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract To increase working efficiency of airborne short wave infrared (SWIR) push-broom spectral imagers and acquire wider coverage, a fore-optics with 90° field of view (FOV) is researched. A new-style tilted component reflective system is put forward to avoid descending of transmittance at long waveband in traditional refractive SWIR fore-optics working in $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$. Three-order aberrations correction of tilted component system is briefly introduced. Based on initial configuration solving, a $15\ \text{mm}$ focal length, $1/3.5$ relative aperture, 90° FOV reflective fore-optics with tilted components is designed, whose distortion is optimized while remain telecentric. Its average modulate transfer function (MTF) at Nyquist frequency is more than 0.68 , and relative illumination of margin field achieves 88% . Besides, there is no transmittance descending caused by material absorption. Push-broom image with fore-optics' distortion is simulated. The optical design can be applied in SWIR spectral imagers with wide FOV and enhance system's detection sensitivity extremely.

Key words optical design; spectral imager; fore-optics; vector aberration; short wave; wide field

OCIS codes 220.4830; 330.6340; 080.4035; 120.0280; 120.6200

1 引 言

机载成像光谱仪显著地提高了遥感技术探测地球表面特征和物体性质的能力,在区域性地质矿产调查评价和基础地质调查应用领域具有重要的应用价值和广阔的应用前景。与光机扫描式成像光谱仪相比,推扫式成像光谱仪光谱分辨率和信噪比更高,

图像几何校正容易,是目前世界各国机载成像光谱仪的发展趋势^[1]。推扫式成像光谱仪的光学系统由前置光学系统和光谱成像系统组成,仪器的总工作视场主要由前置光学系统决定。前置光学系统采用大视场的设计可大大地提高成像光谱仪的遥感作业效率。但视场角的增加给传统的光学设计增加了很

收稿日期: 2012-04-23; **收到修改稿日期**: 2012-06-02

基金项目: 国家 863 计划(2011AA7020103)资助课题。

作者简介: 钟 兴(1982—),男,博士,副研究员,主要从事光学系统设计和光学传感器等方面的研究。

E-mail: ciomper@163.com

大困难,轴外视场的像质和照度都随着视场角的增大而降低。

本文针对宽覆盖短波红外推扫式成像光谱仪的研制需求,从矢量波像差理论出发,利用新型的偏轴四反射镜系统,进行了视场角达到 90° 的超广角^[2]前置光学系统设计。与折射式系统相比,避免了材料的吸收引起的长波端透射率下降,同时像面照度均匀,可有效地提高系统的辐射探测性能。

2 设计分析

2.1 设计要求

根据用户的资源勘查要求,短波红外推扫式成像光谱仪工作于 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段,任务指标要求光学系统的工作视场角达到 90° ,相对孔径不小于 $1/4$,特征频率处全视场平均传递函数优于 0.6 。任务指标要求在机载条件下,航高 $2\ \text{km}$ 时中心视场地面像素分辨率 R_{GSD} 达到 $4\ \text{m}$,系统焦距计算公式为

$$f' = \frac{Ha}{R_{\text{GSD}}}, \quad (1)$$

式中 a 为像素尺寸, H 为航高。

选用的短波红外探测器像素尺寸为 $30\ \mu\text{m}$,计算得到系统焦距为 $15\ \text{mm}$ 。成像光谱仪的系统焦距为前置光学系统焦距乘以光谱成像系统的放大倍数。一般选用放大率为 -1 的光谱成像系统。因此,前置光学系统的焦距即为 $15\ \text{mm}$,视场角 90° ,属于短焦距、宽波段、超广角系统。

2.2 选型分析

对于成像光谱仪的前置光学系统而言,其基本要求是具有像方远心特征^[3],色差校正良好。同时,系统的光谱透射率直接关系到图像的信噪比,是非常重要的指标。折射式系统是推扫式机载成像光谱仪前置光学系统的传统选用型式^[4],在只考虑材料吸收的情况下,由 n 种材料组成的折射式光学系统的光谱透射率可表示为

$$\tau(\lambda) = P_1 \sum d_1 P_2 \sum d_2 P_n \sum d_n, \quad (2)$$

式中 P_1, P_2, \dots, P_n 为材料的透射率,定义为光通过 $1\ \text{cm}$ 单位厚度材料时出射光通量与入射光通量之比; $\sum d_1, \sum d_2, \dots, \sum d_n$ 为材料厚度之和,单位 cm 。

为实现本项目超广角设计,折射式系统必须采用多片复杂化型式,因此(2)式中材料厚度 $\sum d_1, \sum d_2, \dots, \sum d_n$ 较大。而短波红外波段光学材料透射率随波长增加而降低,系统的总透射率 τ 也将大幅下降。

通过对 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段透射率最佳的材料进行筛选,选择了3种材料,即熔石英、氟化钙晶体和

ZF12,利用这三种材料初步设计的超广角折射式前置光学系统使用了9片透镜。图1为该系统的频谱透射率曲线。在 $2.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的长波端,由于材料的吸收增加,透射率下降严重, $2.5\ \mu\text{m}$ 处的光谱透射率仅在 30% 左右。

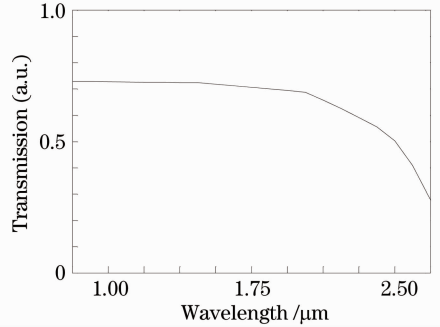


图1 折射式前置光学系统的频谱透射率

Fig. 1 Spectral transmittance of refractive fore-optics

此外,在折射式系统设计中可选用的高透射率材料种类少,镜片组合消色差的性能也难以完全满足要求。由于反射式系统不存在色差,同时也不存在材料的吸收问题,上述问题便不复存在。因此考虑尝试使用反射式系统进行前置光学系统的设计。

3 偏轴光学系统像差特点

传统的同轴和离轴系统所有光学元件都有相同的对称轴。离轴反射系统^[5~7]可以做到无遮拦情况下的大视场,但元件的离轴量随视场角增加,造成加工困难,同时系统的像差增大。偏轴光学系统即非旋转对称光学系统,是近年来发展起来的一类新型光学系统。由于偏轴光学系统在反射式大视场系统的设计方面具有很强的优势,国内外对其进行了大量研究^[8~10]。

偏轴系统的像差特点可以用矢量像差理论进行描述^[11~13]。偏轴光学系统的第 j 面的三阶波前像差贡献为

$$W_j = W_{040,j}(\rho\rho)^2 + W_{131,j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)\boldsymbol{\rho}][\rho\rho] + W_{222,j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)\boldsymbol{\rho}]^2 + W_{220,j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)] \times (\rho\rho) + W_{311,j}[(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)][(\mathbf{H} - \boldsymbol{\sigma}_j)\boldsymbol{\rho}], \quad (3)$$

式中 \mathbf{H} 为归一化的视场矢量, $\boldsymbol{\rho}$ 为归一化的孔径矢量, $\boldsymbol{\sigma}_j$ 为第 j 面的像差贡献中心的偏移矢量。根据(3)式对偏轴系统的像差特点进行分析,球差 $\sum_j W_{040,j}(\rho\rho)^2$ 中不含 \mathbf{H} 项,因此镜面的倾斜偏心并不影响其对系统球差的贡献,可以按照轴旋转对称光学系统消球差来消除偏轴光学系统的球差。系统彗差为

$$\sum_j W_{131,j}[(H - \sigma_j)\rho](\rho\rho) = \sum_j W_{131,j}(H\rho)(\rho\rho) - \sum_j W_{131,j}(\sigma_j\rho)(\rho\rho), \quad (4)$$

式中 $-\sum_j W_{131,j}(\sigma_j\rho)(\rho\rho)$ 为偏心倾斜引入的彗差, 该项中不含 H 项, 因此偏心倾斜引入视场常量彗差。由于各镜面偏心倾斜引入的视场常量彗差可以通过对偏心倾斜的调整相互抵消, 因此光学系统总的彗差可消除。偏轴光学系统的一个重要性质是其像散具有两个节点:

$$H = a_{222} \pm ib_{222}, \quad (5)$$

式中

$$a_{222} = \frac{\sum_j W_{222,j}\sigma_j}{\sum_j W_{222,j}},$$

$$b_{222} = \frac{\sum_j W_{222,j}\sigma_j^2}{\sum_j W_{222,j}} - \frac{\sum_j W_{222,j}\sigma_j}{\sum_j W_{222,j}}. \quad (6)$$

通过平衡各镜面像散贡献消除系统的像散, 使得 $b_{222} = 0$, 这样在像面中心的像质可以得到保证。

虽然畸变并不影响光学系统的像质, 但在实际应用中须对畸变进行严格标定。偏轴光学系统存在的畸变称为楔形畸变^[14], 如图 2 所示。成像除了 y 方向的放大倍率不一样, 在 x 方向上存在不同程度的弯曲。但对于成像光谱仪而言, 所需的观测视场是狭缝对应的线视场, 因此, 在设计中需要找到偏轴系统像面中成像弯曲最小的位置并进行评估。

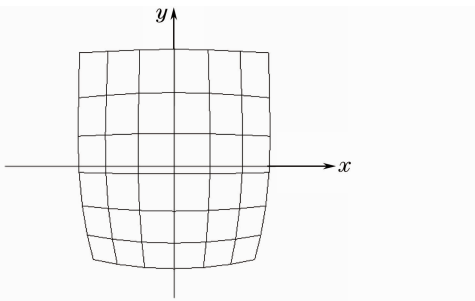


图 2 偏轴系统的楔形畸变

Fig. 2 Keystone distortion of tilted component system

4 大视场偏轴前置光学系统设计

4.1 初始结构

为了实现像质的优化, 偏轴系统除了曲率半径、面形和间隔等与传统同轴光学系统一致的参数可以作为变量外, 表面的偏心和倾斜也将作为变量参与优化。由于每个表面的面形、偏心和倾斜等都是独立的变量, 因此偏轴系统中的光学表面采用自身的

坐标系进行表述可以便于面形的描述和优化。由于偏轴系统中每个光学表面对系统像差的贡献量以主光线为中心, 因此在光学表面的自身坐标系中将主光线与表面的交点定义为坐标原点。在初始结构计算中, 可以从同轴系统出发。将光学表面从系统坐标系描述转换为使用自身坐标描述, 即可得到光焦度分配合理的偏轴系统雏形。

转换过程的举例说明如图 3 所示。某同轴光学系统的坐标系如图 3 所示, z 轴为光轴。口径为 D 、半径为 R 的离轴球面反射镜为虚线球面的一部分, 相对系统光轴的离轴量为 d , 在系统坐标系中, 该反射镜表面需要三个参量 D, d 和 R 来描述。系统坐标系 O 点旋转角度 θ 并进行 z 和 y 方向的平移, 可得到反射镜表面与主光线交点 O' 为原点的坐标系, 即反射镜自身坐标系。在这个坐标系中, 反射镜的参数用旋转角度 θ 、半径 R 和平移量 d 表示。

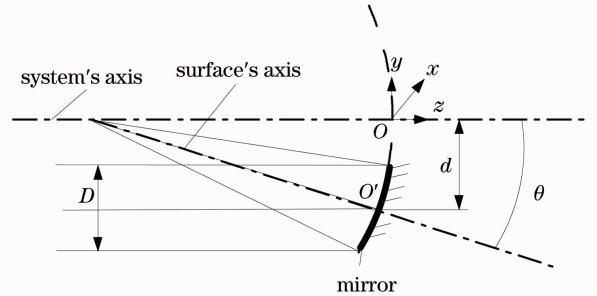


图 3 偏轴系统光学表面的描述

Fig. 3 Surface description in tilted component system

对于多个反射面组成的偏轴系统, 第一个表面的自身坐标系由主光线进行定义, 后续每个表面的自身坐标系均依据上一个表面的自身坐标旋转平移得到。参考具有像方远心特征的四反射镜 SEAL 型系统^[15], 将面形去掉二次系数变为球面, 并进行坐标转换, 即得到偏轴反射式前置光学系统的初始

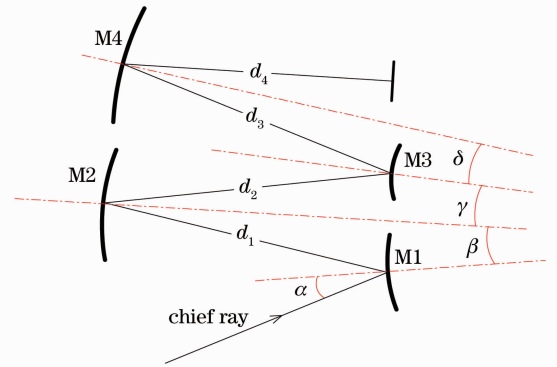


图 4 四反射镜偏轴系统初始结构

Fig. 4 Initial configuration of four mirror tilted component system

结构,如图 4 所示。

4.2 优化过程

利用 Zemax 软件进行设计,以网格光线追迹弥散斑尺寸作为评价函数,附加自定义操作数的方式进行像质的优化。在设计中将 y 方向的视场值设为定值,在 x 方向定义 m 个视场,在优化中利用 Zemax 软件操作数自定义评价函数为^[16]

$$\sum_{n=1}^m [C_{\text{ENY}}(fx, n) - C_{\text{ENY}}(fx, n+1)] = 0, \quad (7)$$

式中操作数 $C_{\text{ENY}}(fx, n)$ 表示 x 方向第 n 个视场的像点质心在像面坐标系中 y 方向的坐标值。因此 (7) 式表示像点排列为一条直线,可以在设计中实现对成像弯曲的优化。

为了尽量保持系统的像方远心,也需要在优化中利用操作数构成评价函数。理想像方远心光学系统的特征是每个视场的主光线与像面垂直。偏轴光学系统的视场需从 x 和 y 两个方向进行描述,因此,同时定义视场主光线与像面夹角的 x 方向余弦(Zemax 操作数 REAA)和 y 方向余弦(Zemax 操作数 REAB)为 0 即可。

在偏轴系统的设计过程中引入非球面是提高像质的有效途径。由于使用自身坐标系进行描述,表面的面形定义更为方便。在优化中,根据像差计算结果,通过不同的非球面面形定义方式,在球面上附加系数转换为各种非球面,可满足不同的设计需要。由于偏轴系统具有双节点像散特征,因此非轴对称的自由曲面(如超环面)是偏轴系统的较为合适的非球面面形,但加工相对困难。在优化过程中,通过引入轴对称的二次非球面由于提供了更多变量,也可以在一定程度上起到优化像质的作用。

通过对全球面系统进行分析可知,由于系统视场角较大,因此场曲是限制像质提高的主要因素,而离焦点较近的表面场曲影响较大。因此,考虑将四镜优化为非球面,提高系统的像质。最终将四镜优化为二次系数 $K=0.362$ 的扁球面,进一步提高了系统的像质。

4.3 优化结果

经过优化和调整,最终得到了 15 mm 焦距、工作视场 90° 、相对孔径 1/3.5 的偏轴反射式前置光学系统设计结果,如图 5 所示。主镜、次镜和三镜均为球面镜,三镜为光阑,四镜为扁球镜。虽然在优化中利用操作数对主光线角度进行了限制,但前置光学系统仍存在轻微的非像方远心,在与后续光谱成像系统组合时,采用调整光谱成像系统各元件通光孔

径的方法,可以适应这种非像方远心造成的光线角度变化,不会对像质造成影响,同时避免渐晕。以典型的 Offner 系统^[17]为例,联合后的整体光路图如图 6 所示。整体光路的评价显示可以满足成像光谱仪工作要求。

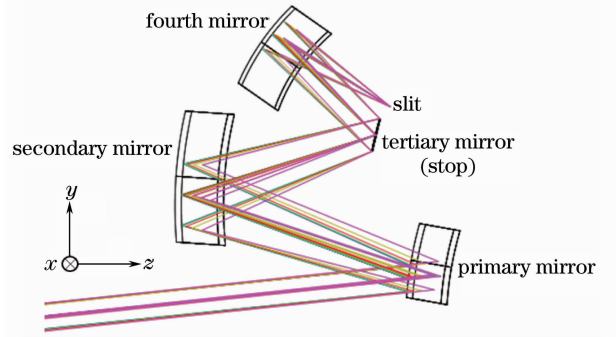


图 5 偏轴式前置光学系统

Fig. 5 Optical system of tilted component fore-optics

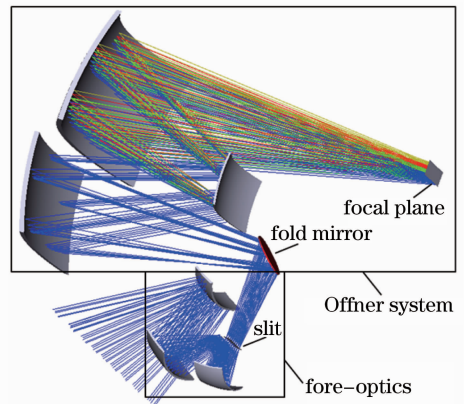


图 6 成像光谱仪光学系统三维图

Fig. 6 Three-dimensional layout of imaging spectrometer optical system

通过设计,前置光学系统实现了 1/3.5 相对孔径下的良好成像质量,前置光学系统的传递函数曲线如图 7 所示,在奈奎斯特频率 16.7 line/mm 处的传递函数优于 0.68。相对照度得到了很大提高,如图 8 所示,边缘视场相对照度达到 88%。由于是反射式系统,不存在材料的吸收,因此,光谱反射率的下降问题(特别是 2000~2500 nm 谱段)便不复存在。

4.4 非球面镜补偿检测光路

偏轴反射式前置光学系统前三个反射镜均为球面,研制不存在困难,但四镜采用了二次系数 $K=0.362$ 的扁球面,必须对它的检测方案进行考虑。使用零位补偿方法设计了该非球面镜的补偿检测光路,如图 9 所示,检测元件由两片平凹 K9 透镜组成。补偿检测光路的设计波前差 R_{MS} 为 0.0084λ

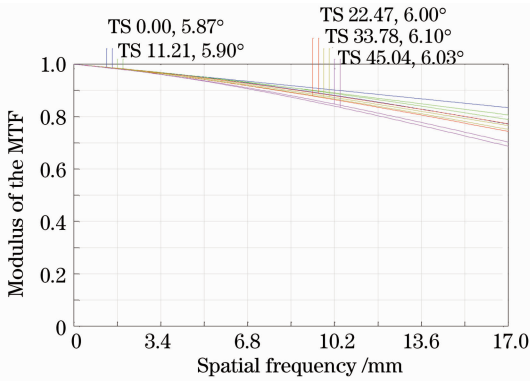


图 7 传递函数曲线

Fig. 7 Modulation transfer function

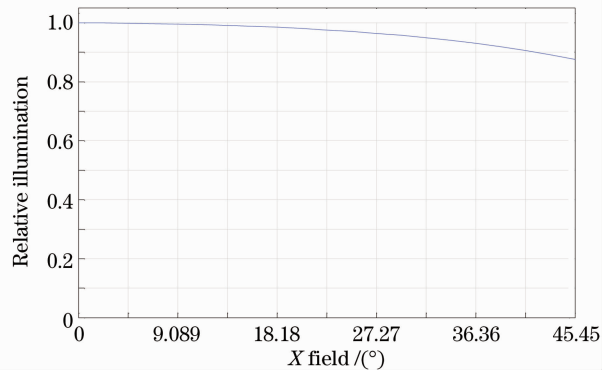


图 8 相对照度曲线

Fig. 8 Curve of relative illumination

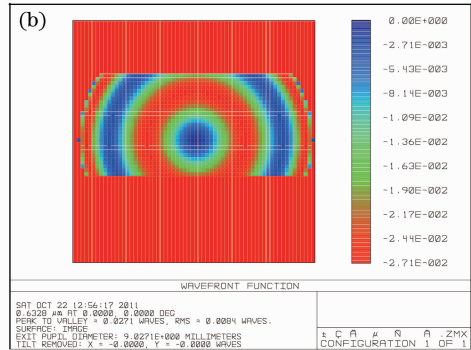
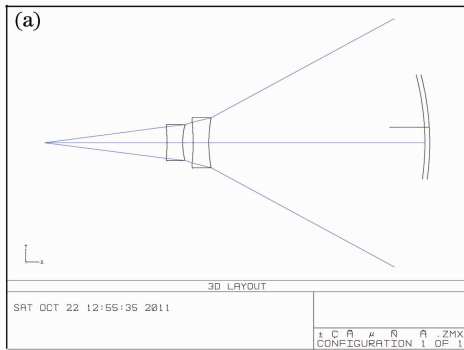


图 9 非球面镜补偿检测光路。(a)检测光路;(b)设计波前差

Fig. 9 Aspheric mirror compensation testing optical path. (a) Testing optical path; (b) designed wave-front error

($\lambda=632.8 \text{ nm}$), 满足该元件的检测要求。通过非球面的定量检测,可以为四镜的加工提供依据,保障系统的研制顺利进行。

4.5 畸变特征与成像仿真

光学系统的畸变引起的图像变形可以看作物方到像方的射影变换^[18],根据射影变换原理可以对成像进行仿真。偏轴系统的楔形畸变引起图像在两个方向的具有不同特征。偏轴反射式前置光学系统在 x 方向(即狭缝方向)上,畸变基本满足 $f-\theta$ 分布(半视场 45° 情况下的相对畸变约 22.3%)。在 y 方向(即推扫方向),物方一条直线所成像的中心和边缘距离为 0.05 mm,不到 2 个像素。由于一般采用直线型狭缝,畸变的影响相当于在推扫方向中心视场与边缘视场相差 2 个像素即相当于地面 8 m 的距离。按推扫原理,在不考虑光谱特征的情况下,对系统进行成像仿真,得到地面场景与仿真图像如图 10 所示,畸变对最终图像的影响主要是 x 方向的压缩,不影响成像的清晰度,对于普查应用基本没有影响。由于畸变具有规律,因此,经标定后可以在图像上进行校正,以满足目标的定位要求。

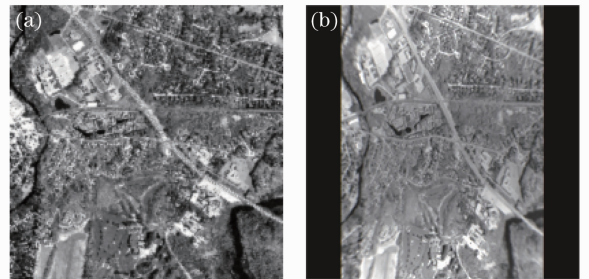


图 10 推扫成像仿真。(a)地面场景;(b)仿真图像
Fig. 10 Simulation of push-broom image. (a) Ground scene; (b) simulated image

5 结 论

针对超广角短波红外推扫式成像光谱仪的研制需求,通过系统选型和矢量波像差基本理论的分析,实现了新型偏轴反射式前置光学系统的设计,工作视场角达到 90° ,相对孔径 1/3.5。像质优良,奈奎斯特频率处的传递函数达到 0.68 以上。同时,对偏轴系统固有畸变引起的成像弯曲进行了优化,对畸变对成像的影响进行了仿真。该光学系统的显著优点在于,利用全反射式系统有效避免了材料吸收引

起的短波红外谱段透射率下降,同时设计结果的整体视场范围内像面照度均匀,对于增加探测信噪比,提高仪器灵敏度非常有利。

参 考 文 献

- 1 Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution spaceborne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0822001
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨力星载成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0822001
- 2 Wang Yongzhong. Fish-eye Lens Optics [M]. Beijing: Science Press, 2006. 61~64
王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 61~64
- 3 Liu Xiaomei, Xiang Yang. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(6): 0622004
刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(6): 0622004
- 4 Zheng Yuquan. Design of compact Offner spectral imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(6): 650~657
郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2005, **13**(6): 650~657
- 5 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin *et al.*. Design on three reflective mirror system used in space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 216~219
常军, 翁志成, 姜会林等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(2): 216~219
- 6 Liu Lin, Xue Mingqiu, Shen Weiming. Approach to increase the image performance of the uncoaxial three-mirror reflective system [J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 181~184
刘琳, 薛鸣球, 沈为民. 提高离轴三反射镜系统成像质量的途径[J]. 光学技术, 2002, **28**(2): 181~184
- 7 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
郭永祥, 李英才, 梁天梅等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 8 Kong Xiaohui, Fan Xuewu. Alignment of two-mirror aspherical optical system based on vector aberration theory [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(8): 082202
孔小辉, 樊学武. 基于矢量波像差理论的两镜系统装调技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(8): 082202
- 9 R. A. Buchroeder, A. S. Leonard. Wide-field tilted-component telescope; a leonard extended yolo all-reflecting system [J]. *Appl. Opt.*, 1972, **11**(7): 1649~1651
- 10 Junhua Pan, Xinnan Li. Design of a tilted two-mirror system [J]. *Opt. Rev.*, 1994, **1**(2): 246~247
- 11 K. P. Thompson. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(7): 1389~1401
- 12 J. M. Sasian. How to approach the design of bilateral symmetric optical system[J]. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(6): 2045~2061
- 13 Jose M. Sasian. Image plane tilt in optical systems[J]. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(3): 527~532
- 14 Kristof Seidl, Jens Knobbe, Danilo Schneider *et al.*. Distortion correction of all-reflective unobscured optical-power zoom objective[J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(14): 2712~2719
- 15 Lloyd Jones. Reflective, Catadioptric Objectives. Handbook of Optics, Volume II [M]. New York: McGraw-Hill Books, 1995
- 16 ZEMAX Optical Design Program User's Guide [M]. ZEMAX Development Corporation, 2009. 461~495
- 17 Tong Yajun, Wu Gang, Zhou Quan *et al.*. Design method of Offner-type imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1148~1152
佟亚军, 吴刚, 周全等. Offner 成像光谱仪的设计方法[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1148~1152
- 18 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Yang Jiasun Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. 136~142
波恩, 沃耳夫, 光学原理[M]. 杨葭孙译. 北京: 电子工业出版社, 2005. 136~142

栏目编辑: 韩峰