

大相对孔径宽视场无遮拦平场两反射镜望远物镜分析与设计

周正平^{1,2} 赵知诚^{1,2} 靳阳明^{1,2} 沈为民^{1,2}

¹苏州大学物理与光电·能源学部 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

²苏州大学物理与光电·能源学部 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006

摘要 根据研制宽视场大相对孔径高光谱成像仪的性能指标和应用要求, 研究与设计了结构简单的凸面、凹面反射镜组成的偏视场两反前置系统。基于高斯光学和利用杨氏公式的像散分析, 在系统焦距归一化条件下, 凸面反射镜顶点曲率半径的取值区间为[2.5 mm, 3.24 mm)。给出根据指标要求确定系统初始结构参数的方法与结果。例如, 优化设计得到的偏视场无遮拦像方远心两反前置望远物镜的工作波段为0.4~1.0 μm、相对孔径为1/1.8、视场角为40°。此镜头的两块反射镜面形均为扁球型二次曲面, 具有结构简单、成像性能接近衍射极限、像方远心、及相对孔径大集光本领强、视场大且平像场的优点, 可用作高空间分辨率、高光谱分辨率及高信噪比要求的成像光谱仪的前置物镜。

关键词 光学设计; 无遮拦两反望远系统; 大相对孔径; 宽视场; 像散

中图分类号 O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0322002

Analysis and Design of Unobscured Flat-Field Two-Mirror Telescopic Objective with Wide Field of View and Large Relative Aperture

Zhou Zhengping^{1,2} Zhao Zhicheng^{1,2} Jin Yangming^{1,2} Shen Weimin^{1,2}

¹Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

²Key Laboratory of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, College of Physics, Optoelectronics and Energy, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

Abstract According to the performance and application of the hyperspectral imager with wide field of view and large relative aperture, a simple two-mirror fore objective with biased field of view consisting of one convex and one concave mirror is studied and designed. Based on its Gaussian optics and astigmatism analysis with Young's formulas and under the normalization condition with respect to the optical system's focal length, the vertex curvature radius of the convex mirror should be chosen within the interval of [2.5 mm, 3.24 mm). The approach to determine its initial structural parameters which meet with expected performance and the corresponding results are presented. As an example, a fore two-mirror imagery telecentric objective with biased field of view for non-obscuration is optimally designed. Its working wavelength ranges from 0.4 to 1.0 μm, and its relative aperture and its linear field of view is respectively up to 1/1.8 and 40°. Both of mirrors are oblate ellipsoid surface with only conic coefficient. The designed lens has many advantages of simple and compact construction, near diffraction-limited imaging quality, imagery telecentricity, high speed and collection power, and wide and flat field of view. It will become the ideal fore objective of imaging spectrometers with high and spectral resolution and high signal-to-noise.

Key words optical design; unobscured two-mirror telescope; large relative-aperture; wide field of view; stigmatism

OCIS codes 220.2740; 220.1010

收稿日期: 2014-08-15; 收到修改稿日期: 2014-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61205188)

作者简介: 周正平(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计与光学仪器方面的研究。

E-mail: zhouzhengping1234@126.com

导师简介: 沈为民(1963—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计、仪器光学和航天遥感技术等方面的研究。

E-mail: swm@suda.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

由凸面、凹面两个反射镜组成的光学系统不仅具备全反射系统无色差,结构简单,口径可做大的特点,还可获得宽视场,多年来一直是研究和应用的热点。1905年,Schwarzschild将初级像差理论应用于两反望远系统的轴外点分析^[1],得到同时消除球差、彗差、像散和场曲的凸面、凹面两反望远系统。1968年,Rosin^[2]研究了凸面、凹面同轴球面两反系统,将其称之为逆卡塞格林结构。1969年,Wynne^[3]采用近轴光线追迹研究两反系统的像散特性,总结了两反望远系统消像散的一般性条件,同时给出视场为 11.5° ,相对孔径为 $1/0.7$ 的凸面、凹面同轴两反望远系统的设计实例。国内,1965年,潘君骅等^[4]利用三级像差理论讨论了由两个二次曲面反射镜组成的两反望远系统,得到同时校正除畸变外四种初级像差的凸面、凹面两反望远系统,这些理论研究为宽视场两反望远系统的发展奠定了坚实的基础。2000年以来,无遮拦两反望远系统开始广泛应用于成像光谱仪中,美国JPL研制的PRISM^[5]、NGIS^[6]及UCIS^[7]成像光谱仪,其前置系统采用的均是宽视场无遮拦两反望远系统,线视场角均在 36° 以内,相对孔径不大于 $1/1.8$ 。此外,国内多家单位也开展了无遮拦两反前置系统的研究设计,司福祺等^[8]采用偏轴两镜结构设计出线视场角为 114° , F 数为9,焦距为15 mm的前置系统,该系统两镜均为凹球面镜,存在较大像散;薛庆生^[9]设计出线视场角为 40° , F 数为1.8,焦距为26 mm的成像光谱仪,其前置物镜采用离轴Schwarzschild两镜望远系统,但未对此前置系统进行详细分析。随着离轴装调技术和非球面加工检测技术的不断进步,两镜系统的应用前景将变得更为广阔。

本文从光线追迹和杨氏公式出发,定量分析由凸面、凹面两块反射镜组成的远心无遮拦两反望远系统的像散特性,根据像散分析结果和高斯光学计算,确定系统的初始结构参量;然后优化设计得到视场角 40° 、相对孔径 $1/1.8$ 、且像方远心的无遮拦偏视场两反望远系统,并详细评价设计结果。

2 结构和原理

两反系统可有四种结构型式,即凹-凸,凹-凹,凸-凹,凸-凸结构。双凸结构无法成实共轭像,双凹结构难以实现平像场,凹凸结构难以在 40° 宽视场范围内获得较好像质,如卡塞格林系统和R-C系统,凸凹结构的光焦度分配遵循“负-正”原则,是反射式反远距结构,可实现宽视场设计。同轴两反系统存在中心遮拦问题,影响能量利用率,采用视场离轴的方式可避开中心遮拦,而系统实质上还是同轴系统,只是偏视场使用,其结构如图1(a)所示。由凸面反射镜 M_1 、凹面反射镜 M_2 、孔径光阑S和像面I组成。两块反射镜的回转对称轴重合,顶点曲率半径分别为 R_1 、 R_2 ,间隔为 d_1 ,反射镜 M_1 到孔径光阑S的距离为 d_{11} ,孔径光阑S到反射镜 M_2 的距离为 d_{12} ,反射镜 M_1 到像面的距离为 Δ (即焦点伸出量),反射镜 M_2 到像面I的距离为 d_2 。

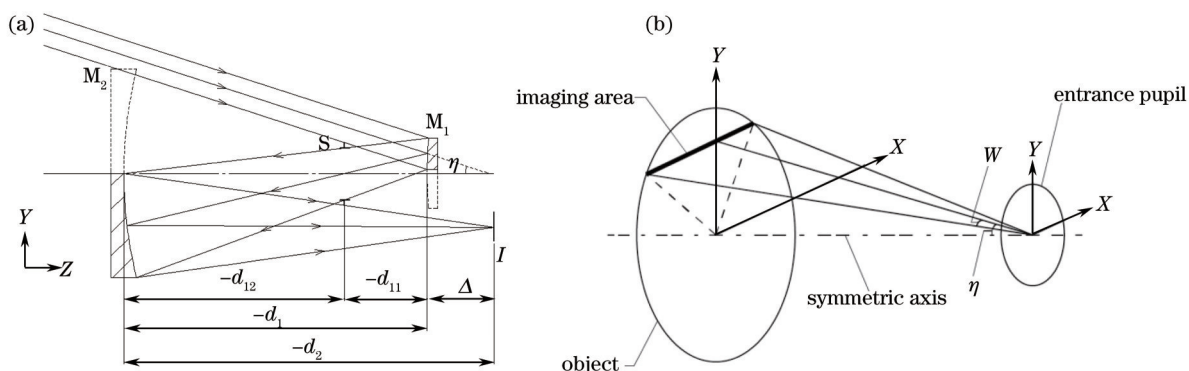


图1 视场离轴两镜望远系统结构。(a)结构示意图;(b)视场示意图

Fig.1 Structure of field off-axis two-mirror telescope. (a) Configuration; (b) field of view diagram

系统实际视场为沿 X 方向的线视场,如图1(b)所示,此线视场在 Y 方向(子午面内)上离轴。无穷远处目标物发出的光束入射到反射镜 M_1 上,设中心视场主光线与两镜回转对称轴的夹角为 η ,即离轴角为 η ,光线经反射镜 M_1 反射后发散,通过孔径光阑入射到反射镜 M_2 上,最后经反射镜 M_2 会聚成像于像面I处。边缘视场主光线与中心视场主光线的夹角为 W ,即系统半视场角为 W 。离轴角 η 最小值由下式确定:

$$\eta = \arctan \frac{f'}{F/\# \times (R_1 - 2f')} \quad (1)$$

式中 f' 为系统总焦距, $F/\#$ 为系统相对孔径倒数,由(1)式可知,当系统焦距和反射镜 M_1 曲率半径 R_1 确定,离轴角 η 随着相对孔径的增大而增大。

3 高斯光学分析

目前研制的分光系统多为物像方远心光路,为实现光瞳匹配,前置系统应该设计成像方远心光路。如图1(a)所示,为满足像方远心,要将孔径光阑置于反射镜 M_2 的物方焦面上,即需满足条件

$$d_{12} = -f'_2 = -\frac{R_2}{2}, \quad (2)$$

两镜系统的平场条件为

$$R_1 - R_2 = 0, \quad (3)$$

根据高斯光学理论,系统的总焦距 f' 和像距 d_2 与结构参数的关系是:

$$f' = \frac{R_1 R_2}{2R_1 - 2R_2 - 4d_1}, \quad (4)$$

$$\frac{d_2}{f'} = 1 - \frac{2d_1}{R_1}. \quad (5)$$

由(3)~(5)式及几何关系,可得间隔 d_1 、 d_{11} 、焦点伸出量 Δ 与反射镜 M_1 顶点曲率半径 R_1 及总焦距 f' 的关系是:

$$d_1 = -\frac{R_1^2}{4f'}, \quad (6)$$

$$d_{11} = \frac{R_1}{2} - \frac{R_1^2}{4f'}, \quad (7)$$

$$\Delta = f' + \frac{R_1}{2} - \frac{R_1^2}{4f'}. \quad (8)$$

为了便于分析,将系统总焦距归一化,即取 $f'=1$ mm,根据(6)~(8)式,得到两镜间隔 d_1 ,反射镜 M_1 到孔径光阑S的距离 d_{11} 及焦点伸出量 Δ 随反射镜 M_1 顶点曲率半径 R_1 (单位为毫米)的变化曲线如图2所示。

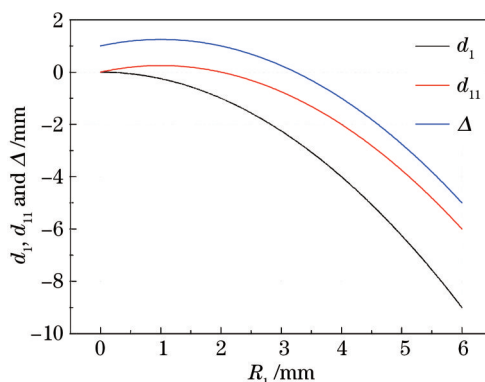


图2 d_1 、 d_{11} 及 Δ 随 R_1 的变化曲线

Fig.2 Curves of variation of d_1 , d_{11} and Δ with R_1

M_1 为凸面反射镜,故 $R_1 > 0$ 。当 $0 < R_1 \leq 2$ 时,两块反射镜光焦度较大,随着相对孔径和视场的增大,高级像差会迅速增大,不利于像差校正,此时 $d_{11} \geq 0$,孔径光阑将置于反射镜 M_1 上($R_1=2$)或背后($0 < R_1 < 2$);当 $R_1 \geq 3.24$,焦点伸出量 $\Delta \leq 0$,即焦点无法引出至反射镜 M_1 背后,实际应用中不利于前置系统与分光系统的对接。因此,从设计和应用要求的角度出发, R_1 的取值区间选为(2, 3.24)。

4 像差特性分析

全反射系统无色差,初级像差只须考虑单色像差,即球差、彗差、像散、场曲和畸变,若两块反射镜均为

球面反射镜,系统共有三个自由参数: R_1 、 R_2 和 d_1 。在满足焦距和平像场要求后,仅剩下一个自由参数,只能校正除场曲外的一种单色初级像差,难以实现宽视场大相对孔径设计,因此有必要采用非球面。设两块反射镜都为二次曲面,则它们的面形表达式可写为

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}}, \quad (9)$$

式中 z 是表面上离旋转对称轴距离 r 的点的矢高, $c=1/R$ 是反射镜顶点曲率, k 是二次曲面系数。

添加二次曲面系数后,系统的自由参数增加为5个,二次曲面系数对初级场曲没有贡献,满足焦距和平像场要求后,剩下三个自由参数,可校正除场曲外的三种单色初级像差。为实现大相对孔径,需同时校正初级球差和彗差,此时两块反射镜的二次曲面系数 k 与曲率半径 R_1 的关系^[10]为

$$k_1 = \frac{R_1^2}{2} + R_1 - 1, \quad (10)$$

$$k_2 = \frac{-R_1^3 + 2R_1^2 + 12R_1 - 8}{(R_1 + 2)^3}. \quad (11)$$

宽视场系统中像散对轴外点成像影响较大,并且采用视场离轴的方式避开中心遮拦,此时根据初级像差公式计算的像散值与实际状况存在较大差异,可通过光线追迹确定轴外物点的子午像点和弧矢像点位置,求其像散。为了便于说明,下面以中心视场的光路追迹作为示例,追迹光路如图3所示,与两镜回转对称轴夹角为 η 的轴外点发出无限细光束,其主光线与反射镜 M_1 交于点 A ,点 A 在 M_1 上的局部坐标为 (r_1, z_1) ,经 M_1 反射后的光线与两镜回转对称轴交于 O 点,与反射镜 M_2 交于 B 点,点 B 在 M_2 上的局部坐标为 (r_2, z_2) ,点 A 和点 B 连线的长度为 D ,与光轴的夹角 $u'_1 = u_2$,反射镜 M_1 上光线的入射角和出射角分别为 I_1 、 I'_1 ,反射镜 M_2 上光线的入射角和出射角分别为 I_2 、 I'_2 。

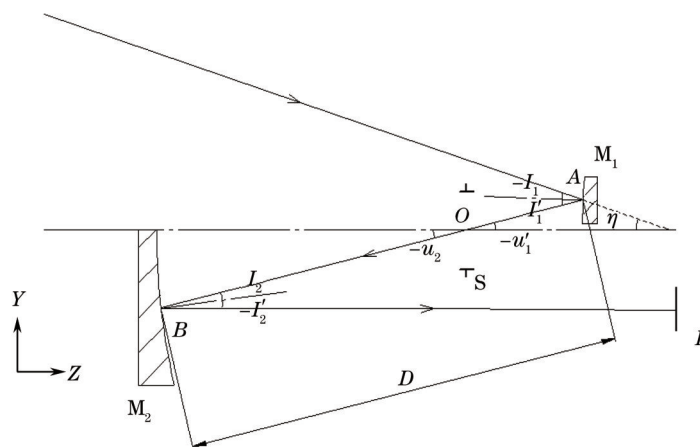


图3 轴外点细光束追迹示意图
Fig.3 Thin ray tracing of off-axis point

根据反射定理可知:

$$I'_1 = -I_1, \quad (12)$$

$$I'_2 = -I_2. \quad (13)$$

由三角形角度关系及像方远心可得

$$u'_1 = u_2 = \eta + 2I_1, \quad (14)$$

$$u_2 = -2I_2, \quad (15)$$

根据几何关系,可得点 A 和 B 的局部坐标与系统结构参数的关系为

$$\frac{r_1}{R_1/2 - 1 - z_1} = \tan \eta, \quad (16)$$

$$\frac{r_2}{R_2/2 - z_2} = \tan u_2, \quad (17)$$

$$D = \frac{r_1 - r_2}{\sin u_1}. \quad (18)$$

两块反射镜均为二次非球面,点A和B处的曲率半径不等于顶点曲率半径,分别为 R_{11} 、 R_{22} :

$$R_{11} = \sqrt{R_1^2 - k_1 r_1^2}, \quad (19)$$

$$R_{22} = \sqrt{R_2^2 - k_2 r_2^2}, \quad (20)$$

光线在反射镜 M_1 上的入射角 I_1 随着离轴角 η 的改变而改变,根据三角形正弦定理可得

$$\frac{\sin I_1}{R_1/2 - 1 - z_1 - \sqrt{R_1^2 - (1 + k_1)r_1^2}} = \frac{\sin \eta}{R_{11}}, \quad (21)$$

根据杨氏公式^[11],求得离轴角 η 的轴外点细光束的像散表达式为

$$X_{is} = R_{22} \cdot \frac{-\left[\frac{R_{11}^2}{2} - R_{11}D\left(\frac{1}{\cos I_1} + \cos I_1\right) + 2D^2\right] \cdot \sin^2 I_2 + \frac{\left(\frac{1}{\cos I_1} - \cos I_1\right)R_{11}R_{22} \cos I_2}{2}}{(R_{11} \cos I_1 - R_{22} \cos I_2 - 2D)\left(\frac{R_{11} \cos I_2}{\cos I_1} - R_{22} - 2D \cos I_2\right)}, \quad (22)$$

利用上面的(3)式和(9)~(21)式,可将(22)式中的 R_{11} 、 R_{22} 、 I_1 、 I_1' 、 I_2 、 I_2' 和 D 用 M_1 的顶点曲率半径 R_1 和视场离轴角 η 表示,从而将像散表示为这两个变量(R_1 , η)的函数关系,函数关系式较为复杂,直接求解有困难,通过编写 Matlab 程序求解像散值:离轴角 η 取离散的定值, R_1 作为连续变量,将结构参量(如 d_{11} 、 d_{12})和面形参量(如 k_1)表示成 R_1 的函数,根据离轴角 η 及入瞳位置得出入射光线在反射镜 M_1 上局部坐标,进而将入射点的曲率半径 R_{11} 表示成 R_1 的函数,通过三角形正弦定理得出 I_1 与 R_1 的函数关系;接下来根据 M_1 反射光线与回转对称轴的夹角及交点位置,得到反射镜 M_2 上的入射点的局部坐标、曲率半径 R_{22} 及入射角 I_2 与 R_1 的函数关系;最后根据两反射镜上入射点的坐标和 M_1 反射光线与回转对称轴的夹角得到两点间隔与 R_1 的函数关系。至此,像散表达式中所有的参量均表示成 R_1 的函数, η 取离散值,得到像散值随 R_1 取值的变化关系曲线,如图4所示。由图可看出随着离轴角 η 的增大,像散迅速增大,结合像散值局部较小条件和应用要求,最终, R_1 的取值区间选为[2.5 mm, 3.24 mm)。

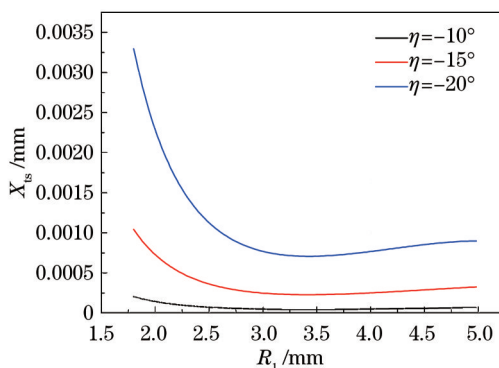


图4 像散值与 R_1 、 η 的关系

Fig.4 Relationship between astigmatism and R_1 , η

两镜系统校正初级球差、彗差、像散和场曲后,没有多余变量校正畸变,而畸变大小与视场三次方成正比,因此,可以预见所设计系统剩余畸变较大。光学系统产生畸变是因为在物像共轭面上,垂直放大率随视场大小而改变,使像相对于物失去了相似性,因此,畸变会造成图像失真变形,但并不影响像的清晰度,图像的失真变形可以看作物方到像方的射影变换^[12]。偏视场两镜系统的像除了 X 方向的放大倍率不一样,在 Y 方向上存在一定弯曲,因此,在设计中须找到畸变的规律,以便实际应用中对其标定后加以校正。

5 光学设计

根据宽视场成像光谱仪的性能指标,确定前置光学系统的设计要求如下:光谱范围0.4~1 mm、 $F/\#$ 为1.8、焦距 $f'=30$ mm、全视场 $2W=40^\circ$,探测器像元尺寸为 $27\ \mu\text{m}\times 27\ \mu\text{m}$ 。

要确定的初始结构参数有:反射镜表面顶点曲率半径、非球面二次系数、各元件间隔。此外,该两反前置物镜为视场离轴系统,还需确定离轴角 η 的量。根据以上第3、4节的分析,取 $R_1=2.83$ mm。由此,根据(2)~(8)式,(10)式和(11)式,计算得到系统的初始结构参数如表1所示,两块反射镜面形均为扁球型二次曲面,两镜间隔约为系统焦距的2倍。

表1 初始结构参数

Table 1 Initial structure parameters

Parameters	Value	Parameters	Value
R_1 /mm	2.830	d_{11} /mm	-0.587
R_2 /mm	2.830	d_{12} /mm	-1.415
k_1	5.834	d_2 /mm	2.415
k_2	0.171	Δ /mm	0.413

当反射镜 M_1 顶点曲率半径 R_1 取表1所列的值时,由(1)式可得离轴角 η 与系统 F 数的关系如图5所示,可知随着相对孔径的增大($F/\#$ 减小),为避开遮光,离轴角 η 迅速增大, $F/\#=1.8$ 时, $\eta>33^\circ$,不利于像散的校正,为了避免引入较大离轴角同时保证像方远心光路,将孔径光阑置于系统的物方焦点,此时光阑是初始结构中的光阑关于反射镜 M_1 所成的虚像,而实际光路中并没有孔径光阑,故为虚光阑。经优化设计得到满足指标且成像质量优异的光学系统,其结构如图6所示,系统尺寸为 $71\ \text{mm}\times 58\ \text{mm}\times 43\ \text{mm}$,离轴角 $\eta=20.7^\circ$ 。

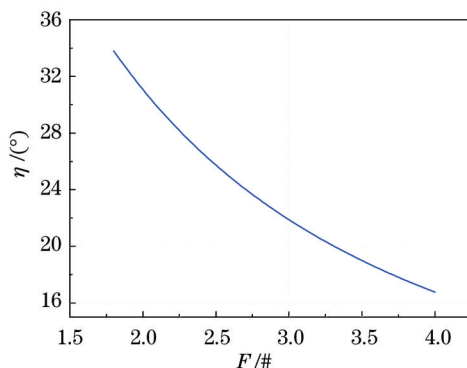


图5 离轴角与 $F/\#$ 的关系

Fig.5 Relationship between off-axis angle and $F/\#$

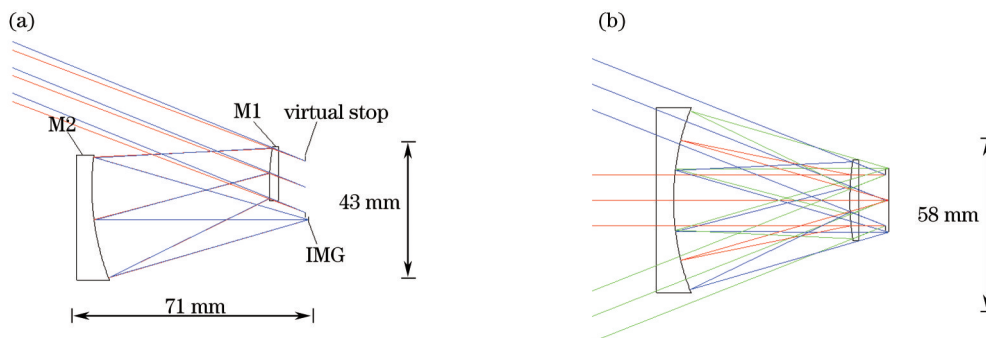


图6 光学系统。(a)侧视图;(b)俯视图

Fig.6 Diagram of optical system. (a) Side view; (b) top view

图7是系统的调制传递函数(MTF)曲线,在探测器奈奎斯特频率(18.5 lp/mm)处大于0.9,接近衍射极限;图8是系统的点列图,点列图RMS直径最大为 $6.35\ \mu\text{m}$,图中方框代表探测器像元尺寸,边长为 $27\ \mu\text{m}$,可见所有像点都能比较集中的落在单个探测器像元范围内,系统主要剩余像差是像散,经计算,全视场范围

内像散最大值为 $21.4 \mu\text{m}$, 小于单个像元; 图9是系统衍射能量集中度曲线图, 横坐标为像元尺寸的一半, 可以看出单个探测器像元范围内衍射能量集中度大于95%。

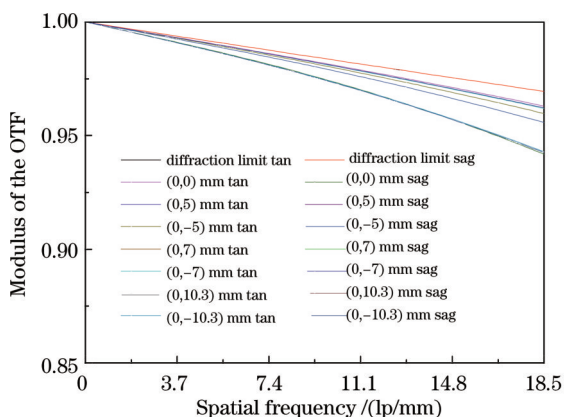


图7 MTF曲线

Fig.7 MTF curves

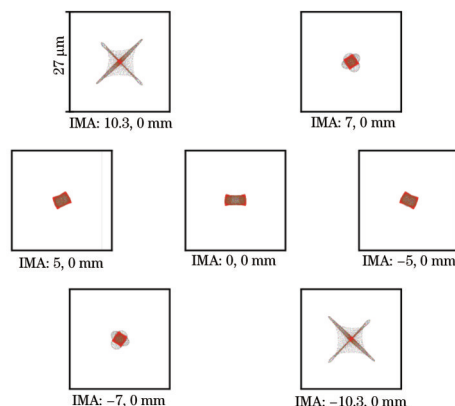


图8 点列图

Fig.8 Spot diagram

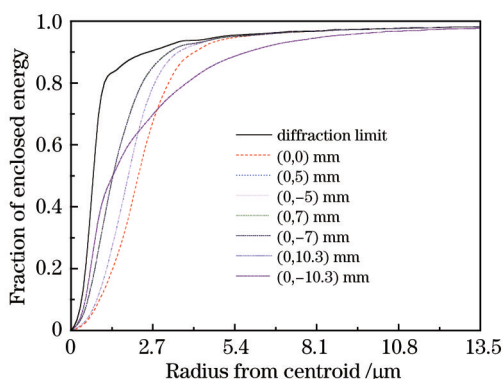


图9 衍射能量集中度曲线

Fig.9 Concentration curves of diffractive energy

根据像差分析可知, 该系统没有冗余变量校正畸变, 畸变使图像在两个方向具有不同特征: X 方向变化规律如图10(a)所示, 横坐标为理想成像各视场点 X 方向对应的像元数, 纵坐标为实际成像对应理想成像时各视场点 X 方向像元偏差; Y 方向变化规律如图10(b)所示, 横坐标为实际成像各视场点 X 方向对应的像元数, 纵坐标为实际成像时各视场点对应中心视场点 Y 方向像元偏差。畸变对最终图像的影响表现为 X 方向的压缩, Y 方向的弯曲, X 方向最大压缩量约24.5个像元, Y 方向最大弯曲量约23.7个像元。根据系统的畸变

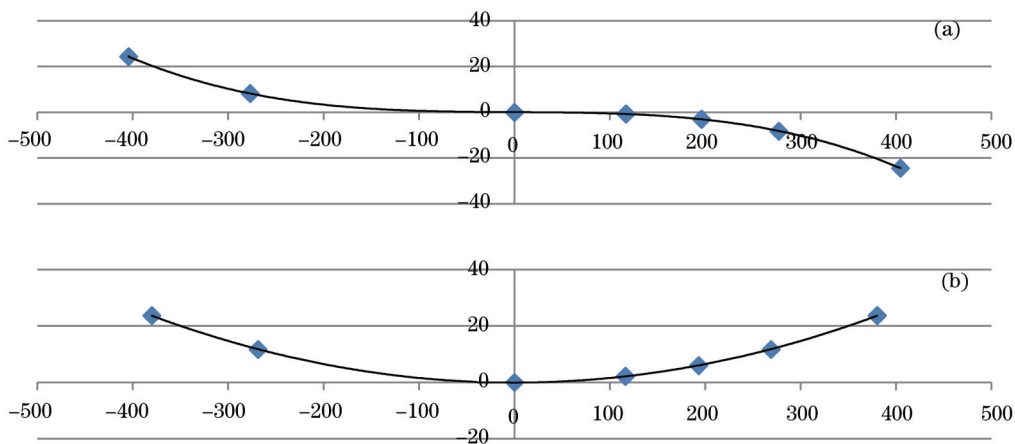


图10 畸变规律。(a) X 方向; (b) Y 方向

Fig.10 Distortion regularity. (a) X direction; (b) Y direction

特性并按推扫原理,对系统进行成像仿真,由地面场景进行仿真计算得到图像如图 11 所示。以往一般认为,较大的畸变是不能接受的,但随着计算机技术在光学成像和图像处理中的应用,已发展了多种有效的畸变校正算法,且引入的畸变是有规律的,经标定后可通过校正以满足应用要求^[13-14]。

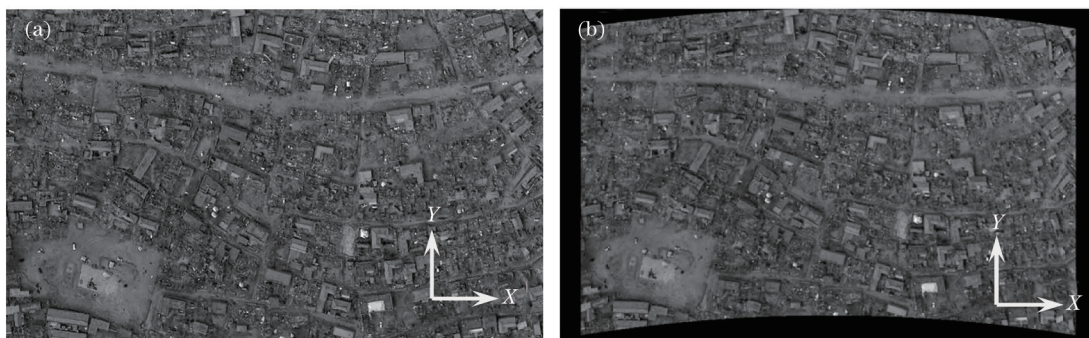


图 11 推扫成像仿真。(a)地面场景;(b)仿真图像

Fig.11 Simulation of push-broom imaging. (a) Ground scene; (b) simulated image

6 结 论

以上根据光线追迹和杨氏公式研究分析了凸凹两反望远系统的像散特性,同时结合高斯光学和成像指标要求给出系统初始结构参量,优化设计得到满足指标要求的无遮拦两反望远系统。利用 MTF 曲线、点列图、能量集中度、成像仿真对设计结果进行像质评价,结果显示设计的系统成像接近衍射极限,但存在一定大小的畸变。系统的畸变问题是由结构决定的,但无法掩盖该系统结构简单、无色差、宽视场、大相对孔径及远心平像场的特点,该两反望远系统用作成像光谱仪的前置系统,能大大提高系统的探测效率和灵敏度。目前,自由曲面理论研究和加工技术日渐成熟,若选用自由曲面反射镜,可实现更宽视场的两反望远系统。

参 考 文 献

- 1 R N Wilson. Reflecting Telescope Optics I [M]. Berlin: Springer, 2004. 110-122.
- 2 S Rosin. Inverse cassegrainian systems [J]. Appl Opt, 1968, 7(8): 1483-1498.
- 3 C G Wynne. Two-mirror anastigmats [J]. J Opt Soc Am, 1969, 59(5): 572-578.
- 4 Pan Junhua, Hao Peiming. A general study of the optical system with two aspherical mirrors [J]. Acta Astronomica Sinica, 1965, 13(1): 46-56.
潘君华,郝沛明.两个二次曲面反射镜组成的光学系统的一般研究[J].天文学报,1965,13(1):46-56.
- 5 P Mouroulis, R O Green, D W Wilson. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer [J]. Opt Express, 2008, 16(12): 9087-9096.
- 6 H A Bender, P Mouroulis, R O Green, *et al.*. Optical design, performance and tolerancing of next-generation airborne imaging spectrometers [C]. SPIE, 2010, 7812: 78120P.
- 7 B Van Gorp, P Mouroulis, D W Wilson, *et al.*. Optical design and performance of ultra-compact imaging spectrometer [C]. SPIE, 2011, 8158: 81580L.
- 8 Si Fuqi, Jiang Yu, Jiang Qingwu, *et al.*. Design of fore optical system in space-borne differential optical absorption spectrometer for atmospheric trace gas monitoring [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0322002.
司福祺,江宇,江庆五,等.星载大气痕量气体差分吸收光谱仪前置光学系统设计[J].光学学报,2013,33(3):0322002.
- 9 Xue Qingsheng. Optical system design of wide field of view and large relative-aperture hyperspectral imager [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0222003.
薛庆生.宽视场大相对孔径高光谱成像仪光学系统设计[J].光学学报,2014,34(2):0222003.
- 10 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 12-15.
潘君华.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.12-15.
- 11 Zhang Yimong. Applied Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. 201-205.
张以谟.应用光学[M].北京:机械工业出版社,1982.201-205.

- 12 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.
- 13 K Seidl, J Knobbe, D Schneider, *et al.*. Distortion correction of all-reflective unobscured optical-power zoom objective [J]. Appl Opt, 2010, 49(14): 2712-2719.
- 14 Liu Hang, Yu Daoyin, Du Ji, *et al.*. Distortion correction of the wide-angle optical system with digital technology [J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(8): 1108-1112.
刘 航, 郁道银, 杜 吉, 等. 广角成像系统光学畸变的数字校正方法[J]. 光学学报, 1998, 18(8): 1108-1112.

栏目编辑: 韩 峰