

文章编号 1004-924X(2019)03-0533-09

大视场快焦比施密特系统在星载光谱仪中的应用

王 欣*, 刘 强, 舒 嵘

(中国科学院 上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083)

摘要:根据大视场和快焦比空间遥感高光谱成像仪的研究目标,采用折叠三反施密特望远镜和自由曲面 Offner 凸面光栅光谱仪结构,设计了一个视场为 5° , 焦比为 2, 工作谱段在 $400\sim 1\,000\text{ nm}$, 光谱分辨率为 5 nm 的星载高光谱成像仪光学系统。推导了非对称非球面施密特主镜的理论计算方法,介绍了镜面的制造方法。利用 Zemax 光学设计软件进行了光线追迹和优化设计,结果显示光谱畸变 $< 0.88\%$, 光谱弯曲 $< 1/3$ 探测器像元,所有谱段的光学传递函数均大于 0.8, 满足星载高光谱成像仪的技术要求。施密特系统结构简单,仅含有一个非球面,在大视场工作时具有像质优良和畸变小特点,且中心遮拦比小、体积紧凑,适合未来大视场快焦比的大口径星载遥感应用。

关键词:高光谱成像;施密特光学系统;非对称非球面;大视场;快焦比

中图分类号:TH744.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192703.0533

Application of Schmidt optical system with wide-field of view and fast focal ratio to aerospace imaging spectrometer

WANG Xin*, LIU Qiang, SHU Rong

(Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Shanghai Institute of Technical & Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

* Corresponding author, E-mail: wang.xin@mail.sitp.ac.cn

Abstract: To meet the application demands of a wide field of view and fast focal ratio for an aerospace imaging spectrometer, a three-mirror folded Schmidt telescope using a freeform Offner convex grating spectrometer was designed to obtain a field of view 5° , focal ratio of 2, spectral range of $400\sim 1\,000\text{ nm}$, and spectral resolution of 5 nm for a space hyperspectral imager. The expression of an axisymmetric anamorphic asphere Schmidt surface was given and calculated, and a manufacturing method was introduced. The optical system for a Schmidt spectrometer was designed and optimized using software Zemax. Results show that spectral distortion is less than 0.88% , the spectral smile is smaller than $1/3$ pixel size, and the optical module transfer function is greater than 0.8. These imaging characteristics can meet the requirements of a space imager. The Schmidt system shows a simple configuration and uses only a single aspherical mirror. Because it possesses excellent imaging specifications, small distortion, small central obscuration, and a compact size, Schmidt is the best candidate for a space instrument with a large aperture, large field of view, and fast focal ratio.

收稿日期:2018-09-11;修订日期:2018-11-10.

基金项目:国家重大科技专项

Key words: imaging spectrometer; Schmidt optical system; axisymmetric anamorphic asphere; large field of view; fast ratio

1 引言

高光谱成像技术把成像技术与光谱技术相结合,可以同时采集地面物体的空间特征和光谱特性,是对地遥感与目标探测的重要手段,在国土资源探测,环境灾害监测,农林渔牧、海洋监测以及目标探测、伪装识别等领域发挥着越来越重要的作用。

欧美等发达国家十分重视空间遥感高光谱成像仪的研究,投入了大量的人力和物力,并取得了多项研究成果。其中,最具代表性的是 2000 年美国 EO-1 卫星上的 Hyperion 高光谱成像仪^[1]和 2001 年欧洲 PROBA 小卫星上的 CHRIS 高光谱成像仪^[2]。2018 年 5 月,我国成功发射了高分五号可见-短波红外高光谱相机载荷^[3]。未来各国均规划了性能更先进的高光谱成像设备,如印度正在研制并计划 2020 年发射的高光谱卫星 CartoSat-3/3A/3B、ResourceSat-3,以及美国计划 2023 年发射的 HypsIRI 卫星^[4]等。

美国 TRW 公司研制的 Hyperion 仪器,采用 TMA(Three Mirror Anastigmatic)共用望远镜和分色片分光成两个 Offner 凸球面光栅光谱成像结构,在 705 km 轨道高度的幅宽为 7.5 km,对应视场为 0.61° ,工作波段在 400~2 500 nm,光谱通道数为 220,空间分辨率为 30 m。英国 Sira 公司研制的 CHRIS 仪器,在 830 km 轨道高度的成像幅宽为 18.6 km,对应视场为 1.28° ,光学系统采用卡式望远镜和棱镜色散光谱成像结构,工作波段为 400~1 050 nm,分为可见光近红外(Visible and Near Infrared, VNIR)和短波红外(Short-Wave Infrared, SWIR)两个光谱通道。VNIR 的光谱通道数为 16,空间分辨率为 17 m; SWIR 的光谱通道数为 62,空间分辨率为 34 m。中国研制的高分五号可见-短波红外高光谱相机载荷,采用离轴三反主光学望远镜和校正透镜凸面光栅 Offner 光谱仪结构,实现了对地成像优于 30 m 的空间分辨率,具有 330 个光谱通道和 60 km 的成像幅宽,与 Hyperion 相比,该载荷幅宽提高了 8 倍。目前,印度正在研制高光谱卫星

CartoSat-3/3A/3B 和 ResourceSat-3,其幅宽为 25 km,空间分辨率为 25 m,光谱分辨率为 12 nm,通道数接近 200。而美国正在研制的 HypsIRI 卫星,其载荷幅宽达到了 150 km,视场接近 13.8° ,空间分辨率为 30 m,光谱分辨率为 10 nm,在 380~2 500 nm 光谱波段内有接近 220 个光谱通道。

综上所述,高光谱成像仪的幅宽由 Hyperion 的 7.5 km 到 HypsIRI 的 150 km,空间分辨率由 Hyperion 的 $42.55 \mu\text{rad}$ 到 CartoSat-3 的 $17.77 \mu\text{rad}$,可见随着空间遥感应用的不断深入,对高光谱遥感的幅宽、空间分辨率、光谱范围、光谱分辨率、时间分辨率与定标精度等指标的要求越来越高^[5]。仪器的视场覆盖范围越大,这样回访周期越短,时间分辨率就越高;同时由于像面照度与相对孔径的平方成正比,相对孔径越大,仪器的集光能力就越强,信噪比就越高。因此,星载大视场、快焦比高分辨率高光谱成像仪成为空间遥感的迫切需求。

本文根据大视场快焦比高光谱成像仪的主要技术指标,采用施密特望远成像系统和自由曲面 offner 光谱成像系统匹配的结构形式,设计了星载遥感高光谱成像仪的光学系统,推导了施密特主镜的理论计算方法和结果,介绍了施密特镜面的制造方法。最后,利用光学设计软件对光学系统进行了优化设计,并对设计结果进行了分析和评价。

2 系统主要技术指标

星载遥感高光谱成像仪要求在 400~1 000 nm 光谱波段对陆地进行成像探测,卫星轨道高度为 800 km,要求幅宽 ≥ 70 km,地面像元分辨率为 35 m,光谱分辨率为 5 nm。探测器采用英国 E2V 公司生产的 CCD 探测器,像元数为 2 048(空间维) \times 1 024(光谱维),像元尺寸为 $26 \mu\text{m}$ 。根据以上需求确定高光谱成像仪光学系统的主要技术指标,如表 1 所示。

根据探测器尺寸和地面像元分辨率计算光学系统的焦距,得到 $f=600$ mm。根据成像幅宽和

轨道高度计算光学系统的成像视场(Field of View, FOV),得到 $FOV = 5^\circ$ 。根据探测器的性能参数和地面的光谱辐射特性,确定光学系统的入瞳口径 $D=300$ mm,焦比为 2。

表 1 高光谱成像仪光学系统的主要技术指标

Tab. 1 Main specifications of hyperspectral imaging optical system

技术指标	值
光谱波段/nm	400~1 000
全视场/($^\circ$)	≥ 5
光学系统焦距/mm	600
焦比	2
入瞳口径/mm	300
探测器像元数/pixel	$2\ 048 \times 1\ 024$
像元尺寸/ μm	26
光学系统传递函数	≥ 0.6
光谱分辨率/nm	5

3 成像模块设计

高光谱成像仪的光学系统由望远成像模块和光谱仪模块组成。入射狭缝放置在望远镜焦面上,地面物体的一个条带信息先经望远成像模块汇聚在入射狭缝上,入射狭缝经光谱仪模块色散后分波长成像在面阵焦平面探测器上。随着平台运行方向推扫获得地面目标图谱合一的图像。在高光谱成像仪的研制过程中,光学系统的选择和设计直接影响着整个高光谱成像仪的性能,结构复杂程度,重量和体积及成本等。

3.1 望远镜模块光学选型

光谱仪望远镜系统的常用形式有同轴两反和离轴三反^[6]。传统的同轴两反卡式结构采用两个非球面组成,次镜遮拦比较大(10%),其成像视场不大于 3° 。离轴三反光学系统采用三个离轴非球面组成,结构较为复杂,难以消除高频误差,制造难度大,而且装调困难。施密特反射式光学系统具有成像视场大、遮拦小,大相对口径工作时像质优良,以及结构简单等特点,被广泛应用在天文望远镜中。综合考虑,大视场快焦比小畸变的施密特光学系统形式可以作为星载光谱仪望远光

学系统的选型参考。施密特光学系统由一个施密特主镜、一个球面镜和一个平面镜组成,结构简单且紧凑;相比同轴两反系统,成像视场更大,可以达到 5° 以上,而遮拦比仅有 5%;相比离轴三反系统,体积相当,非球面镜仅有一个,结构更简单,所以更容易实现。

3.2 反射式施密特望远镜结构形式

B. Schmidt 发明的大视场透射式施密特望远镜的设计理念是采用一个凹的球面镜,孔径光阑放在曲率半径的中心上,但是这种设计导致系统球差非常大。透射校正板放在孔径光阑处以补偿球差,但又引入了色差^[7]。光学形式见图 1。

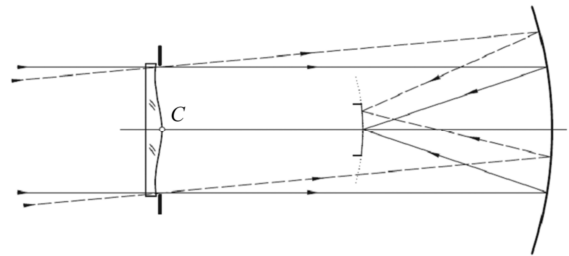


图 1 带有透射校正板的大视场施密特望远镜

Fig. 1 Wide-field Schmidt telescope with refractive entrance corrector

色差可以通过离轴视场反射式校正板来消除,这种方案已被 LAMOST 望远镜所采用,然而焦面仍旧在视场的中间。由于支撑结构会产生遮拦,通过一个反射镜允许焦面位置移到光学系统外,只产生很小的中心遮拦。常用的反射式施密特系统主要有两反式和折叠式三反两种结构,分

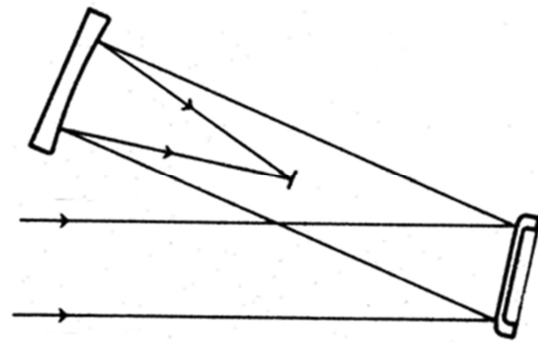


图 2 两反式施密特结构

Fig. 2 Configuration of two-mirror reflective Schmidt system

别如图 2 和图 3 所示。两反式施密特光学系统由一个非球面和一个球面镜组成,球面镜的曲率半径位于非球面反射镜的顶点,施密特反射镜是系统的入瞳。由系统结构可知,光学系统像差主要是五阶高级像散^[8]。

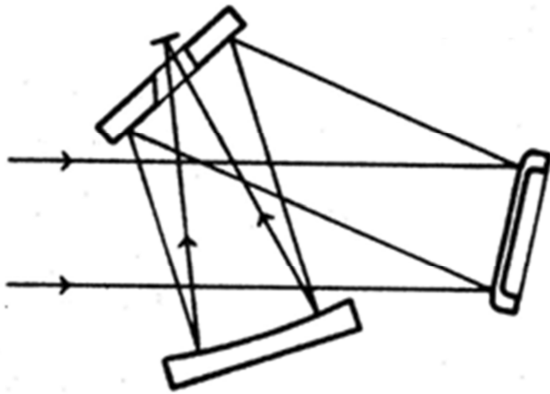


图 3 折叠式三反施密特结构

Fig. 3 Configuration of folded and three-mirror reflective Schmidt system

3.3 反射式施密特望远镜分辨率

反射式施密特系统采用球面主镜充当校正镜,随着视场的增大,五阶像散愈加明显。而同轴球面校正板不能校正像差,得到优良的分辨率,焦比为 2 的施密特系统的分辨率仅为 $18''$,难以满足系统指标 $9''$ 的要求。为了解决这个问题,本文采用非球面校正镜,镜面面形由类似椭球面的非球面组成。望远系统的分辨率 d_{NC} 为^[9]:

$$d_{NC} = 0.012 \left[\frac{\Phi_m}{\Omega^3} \right] \left[\frac{3}{2} i + \Phi_m \right], \quad (1)$$

式中: Ω 代表焦比, i 为主镜倾斜角, Φ_m 为最大半视场角。非对称非球面施密特系统的像差校正效果明显,在主镜倾斜 12.5° 时,焦比为 2 的望远镜的瞬时视场分辨率达到 $5''$,优于空间分辨率 $9.02''$ 的指标要求。

3.4 折叠式三反施密特望远镜光学设计

典型的施密特系统畸变优良且焦面呈球面弯曲状,弯曲半径与系统焦距相同,本文采用在焦面前放置场镜校正像面弯曲的设计方案。依照系统指标要求,针对折叠式三反施密特和场镜结构开展了光学设计,施密特望远镜口径为 300 mm,焦比为 $F/2$,全视场为 5° 。如图 4 所示,系统外形紧凑,尺寸仅为 800 mm(长) \times 660 mm(高) \times 330 mm(宽),

全视场奈奎斯特频率 19.3 lp/mm 处的传递函数大于 0.73,弥散斑和光学传递函数分别见图 5 和图 6。系统像面平直,畸变校正良好,最大视场畸变为 0.66%,转折镜中心开孔口径为 70 mm,系统能量损失为 5.4%,场曲和畸变分布见图 7。

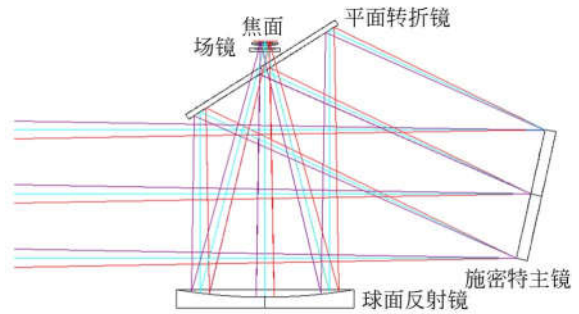


图 4 折叠式三反施密特校正镜设计结构

Fig. 4 Layout of folded and three-mirror reflective Schmidt system with correcting lens

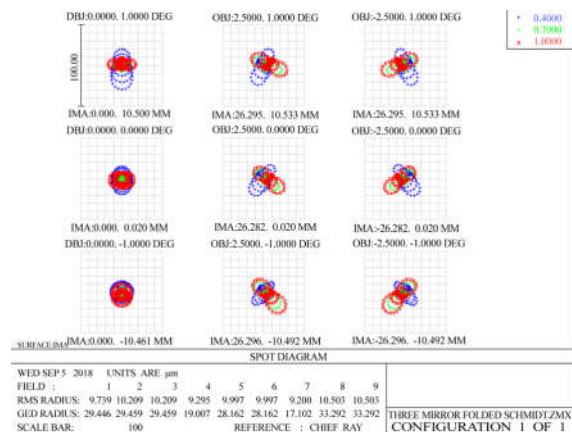


图 5 弥散斑设计结果

Fig. 5 Spot diagram of folded and three-mirror reflective Schmidt system

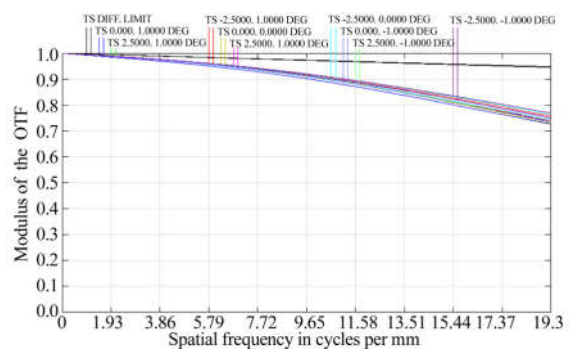


图 6 光学传递函数设计结果

Fig. 6 Modulation transfer function of folded and three-mirror reflective Schmidt system

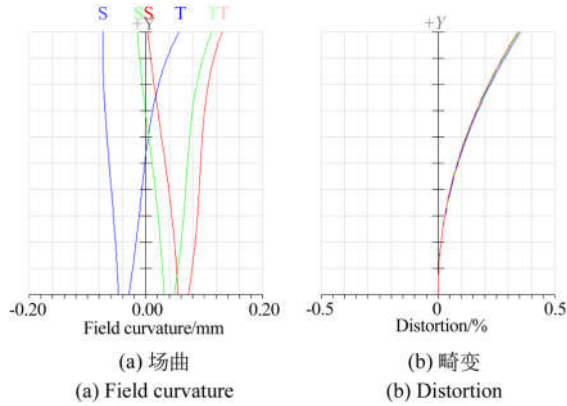


图 7 折叠式施密特系统的场曲和畸变分布

Fig. 7 Field curvature and distortion distribution of folded Schmidt system

3.5 非圆对称施密特主镜设计

施密特主镜为椭球面非圆对称非球面面形,面形如下:

$$Z(X = 150/\cos 12.5^\circ, Y = 0) = \frac{C_x \times (150/\cos 12.5^\circ)^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_x) \times (C_x^2 \times (150/\cos 12.5^\circ)^2)}} + AR \times [(1 - AP) \times (150/\cos 12.5^\circ)^2]^2 + BR \times [(1 - BP) \times (150/\cos 12.5^\circ)^2]^3, \quad (3)$$

$$Z(X = 0, Y = 150) = \frac{C_y \times (150)^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_y) \times (C_y^2 \times (150)^2)}} + AR \times [(1 + AP) \times (150)^2]^2 + BR \times [(1 + BP) \times (150)^2]^3. \quad (4)$$

通过式(3)和式(4),相同阶数系数可以认为相等,即可求解出 $C_x = 0.953\ 15 \times C_y$, $AP = -0.023\ 704$, $BP = -0.023\ 704$ 。施密特主镜镜面的解算在法国马赛天文物理研究所 Gerard Lemaître 教授的书里有详尽说明^[9]。施密特镜面面形也可以采用以下简化形式:

$$Z_{opt} \cong \frac{s}{\cos i} \left\{ \frac{3}{2^7 \Omega^2 R} (h^2 X^2 + Y^2) - \frac{1}{8R^3} (h^2 X^2 + Y^2)^2 - \left[\frac{3}{8} - \frac{2M(1 + M - M^6)}{(1 + M)^5} - \frac{3M^2}{2(1 + M)^2} \right] \frac{(h^2 X^2 + Y^2)^3}{R^5} \right\}, \quad (5)$$

其中:校正系数 $s = 1$,入射角度 $i = 12.5^\circ$,焦比 $\Omega = 2$,球面镜的曲率半径 R 为 1 200 mm,放大率参数 $M = 3/2^6 \Omega^2$, $h^2 = \cos^2 i$ 。根据式(2)和式(5)计算得到 C_x, C_y, K_x, K_y, AR 和 BR ,如表 2 所示。

$$Z = \frac{C_x X^2 + C_y Y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K_x)(C_x^2 X^2) - (1 + K_y)(C_y^2 Y^2)}} + AR \times [(1 - AP) X^2 + (1 + AP) Y^2]^2 + BR \times [(1 - BP) X^2 + (1 + BP) Y^2]^3, \quad (2)$$

式中: Z 为施密特主镜矢高, X 和 Y 是两个方向轴 X 轴和 Y 轴的半口径坐标, C_x 和 C_y 是 X 轴和 Y 轴的曲率, K_x 和 K_y 是两个轴向的二次非球面系数, AR 和 AP 是二阶非球面参数, BR 和 BP 是三阶非球面参数。

入射和出射施密特主镜的光线夹角由镜面口径和主镜到折镜的距离决定,选择主镜到折镜的距离为 640 mm,主镜口径为 300 mm,则进出主镜的光线夹角 $i \approx 25^\circ$,所以施密特主镜的倾斜角度为 12.5° 。

施密特主镜为双轴对称均匀椭球状面形,因此两个方向轴半口径处的矢高是相等的,即坐标点 $X = 150/\cos 12.5^\circ, Y = 0$ 与坐标点 $X = 0, Y = 150$ 处的矢高相等,因此式(2)可以改写为:

表 2 施密特主镜的设计参数

Tab. 2 Design parameters of Schmidt primary mirror

施密特镜面参数	设计结果	
X 轴二次非球面系数	K_x	-1
Y 轴二次非球面系数	K_y	-1
X 轴曲率	C_x	$-6.860\ 269 \times 10^{-6}$
Y 轴曲率	C_y	$-6.538\ 866 \times 10^{-6}$
X 轴二阶非球面参数	AR	$7.002\ 704 \times 10^{-11}$
Y 轴二阶非球面参数	BR	$7.233\ 662 \times 10^{-17}$
X 轴三阶非球面参数	AP	-0.023 704
Y 轴三阶非球面参数	BP	-0.023 704

施密特主镜面形可以通过应力抛光或者应力变形法获得^[10-11]。应力抛光技术是对薄镜面施加应力获取需要的面形结果进行加工,避免产生高

阶面形误差,可以制造超光滑表面。应力变形法是对一个薄镜面进行加力弹性变形后形成所需面形。弹性设计方案采用一个封闭的椭圆平面镜获得,平板中心设计一个与气压计接口的装置,通过结构对镜面平面施加一个均匀的压力,即可获得镜面面形。

4 光谱仪模块设计

采用凸面光栅^[12]作为色散元件的 Offner 光谱成像系统具有性能高、体积小、质量轻和空间应用稳定性好的特点^[13],广泛应用于星载光谱仪成像系统中。经典的 Offner 结构由三个球面组成,三个球面中心重合。随着视场变大,以及对系统畸变、光谱弯曲的要求越来越高,Offner 结构中的两个凹球面被设计成二次非球面来校正像差。针对系统应用指标,光谱仪的入射狭缝尺寸为 55 mm(长)×26 μm(宽),本文采用一种自由曲面的 Offner 结构形式(见图 8),采用光学软件 Zemax 中的 Zernike Fringe Sag 形式来表达凹面反射镜的 Zernike 多项式镜面面形^[14],更好地校正了轴外像差,光谱仪设计轴上的放大率为 1:1,色散通道数为 180,设计两端波长对应的色散宽度为 4.68 mm,光谱分辨率为 3.33 nm,轴外视场的光谱弯曲为一个像元的 0.12%,光谱畸变为 0.73%。设计结果显示,光谱仪的光学传递函数大于 0.8。光谱仪的设计参数详见表 3,色散宽度和传递函数分别见图 9 和图 10。

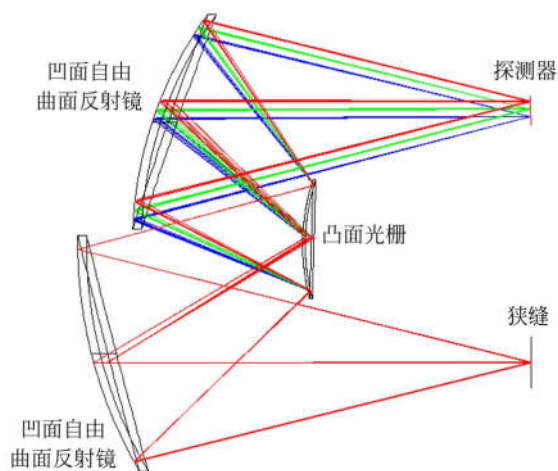


图 8 自由曲面 Offner 光学设计

Fig. 8 Layout of Offner spectrometer using freeform reflectors

表 3 Offner 光谱仪的设计参数

Tab. 3 Design parameters of Offner spectrometer

光学零件名称	光学参数	设计结果
狭缝	到凹面反射镜距离	160 mm
凹面反射镜(靠近狭缝)	曲率半径	157.7 mm
	口径	95 mm
	Zernike Fringe 系数	Z_5 9.8 μm Z_8 3 μm
凸面光栅	到凸面光栅距离	80 mm
	曲率半径	74.2 mm
	光栅常数	160 line/mm
凹面反射镜(靠近探测器)	口径	45 mm
	到凹面反射镜距离	61 mm
	曲率半径	138.1 mm
	口径	78 mm
	Zernike Fringe 系数	Z_5 9.2 μm Z_8 4.9 μm
	到焦面距离	142 mm

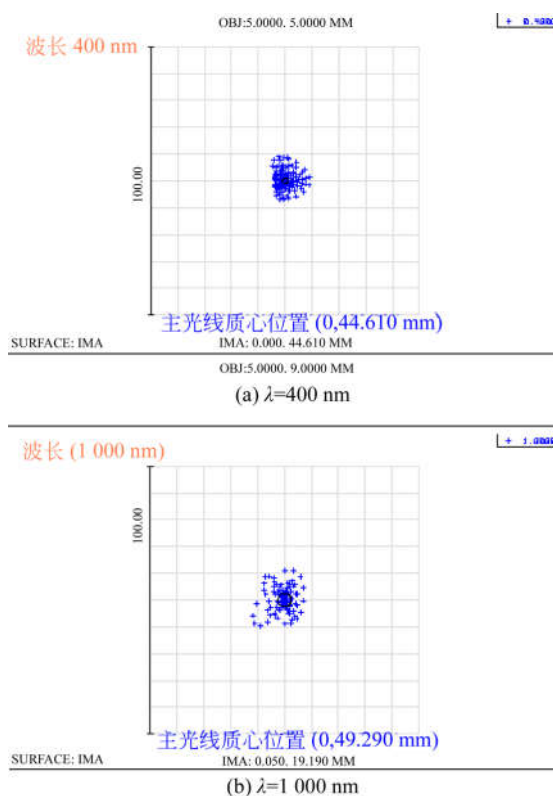
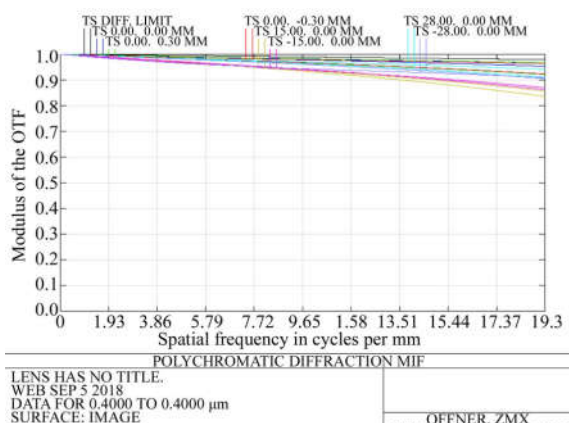
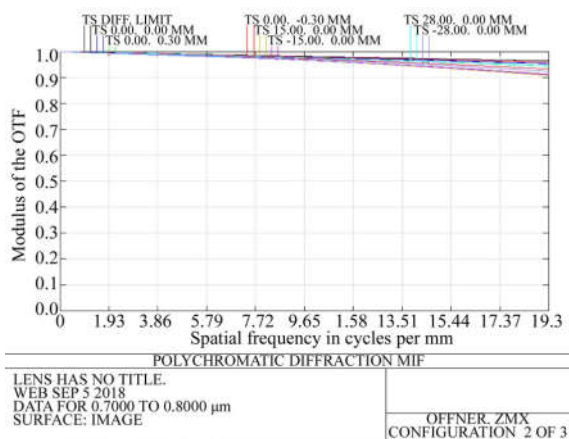


图 9 自由曲面光谱仪的色散宽度

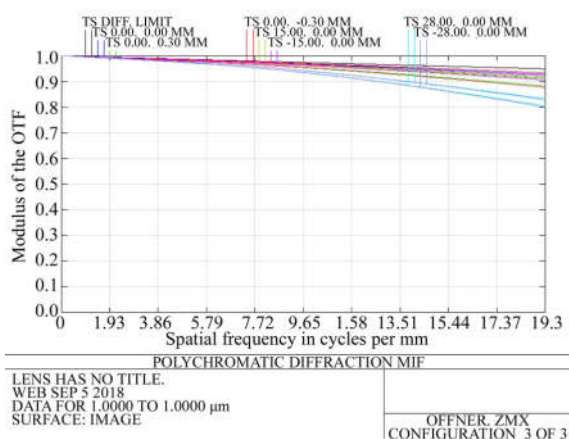
Fig. 9 Spectral ranges of freeform spectrometer



(a) 自由曲面光谱仪 400 nm 波长处的传递函数曲线
(a) MTF of freeform spectrometer at wavelength of 400 nm



(b) 自由曲面光谱仪 700 nm 波长处的传递函数曲线
(b) MTF of freeform spectrometer at wavelength of 700 nm



(c) 自由曲面光谱仪 1 000 nm 波长处的传递函数曲线
(c) MTF of freeform spectrometer at wavelength of 1 000 nm

图 10 自由曲面光谱仪各个波长处的传递函数曲线
Fig. 10 MTFs of freeform spectrometer at different wavelengths

两个凹面自由曲面反射镜的 Zernike 多项式与 Seidel 像差有对应关系, Z_5 为 0° 或 90° 像散, Z_8 是 Y 轴三阶彗差, 与接近球面的矢高差最大为 $5.2 \mu\text{m}$, 去除量非常小, 可通过磨盘接触式小磨头研抛技术或金刚石单点车技术进行加工, 采用计算全息补偿技术 (CGH) 实现面形检测。

凸面光栅作为 Offner 成像光谱仪分光系统的核心元件, 决定了成像光谱仪的光谱性能和尺寸。凸面光栅的制作方法有全息法、离子束刻蚀法、电子束光刻法和 X 射线光刻法等。自由曲面光谱仪采用的全息凸面闪耀光栅为 160 line/mm , 使用光栅的一级衍射光, 闪耀角为 5° , 在使用波段内的平均衍射效率高于 40% 。

5 成像光谱仪系统设计

将设计的望远镜模块与光谱仪结合起来, 得到大视场快焦比高光谱成像仪全系统的光学结构, 如图 11 所示, 系统的三维立体示意图如图 12

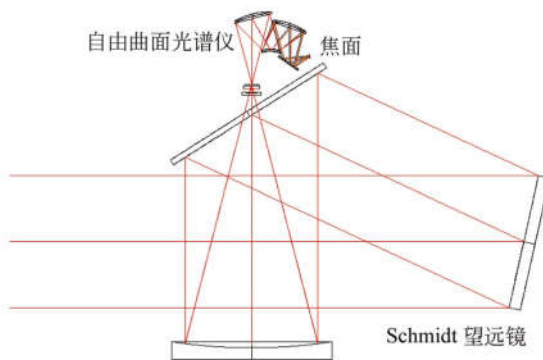


图 11 施密特光谱仪结构
Fig. 11 Layout of Schmidt spectrometer

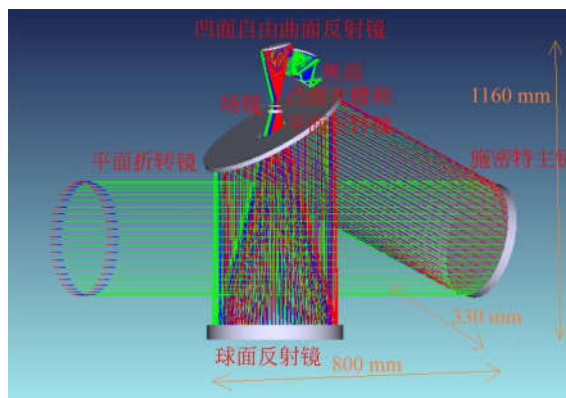
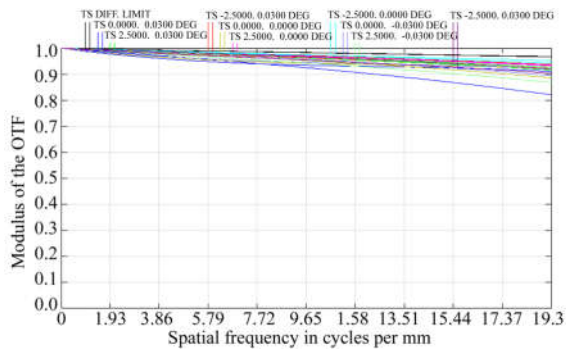
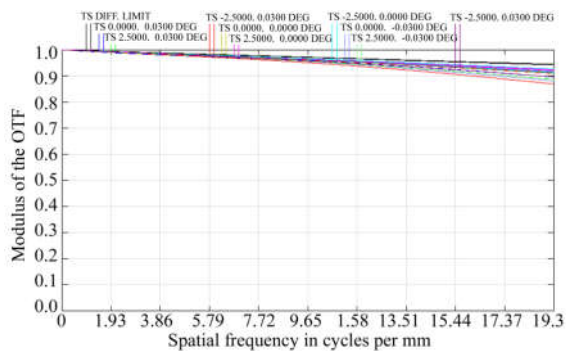


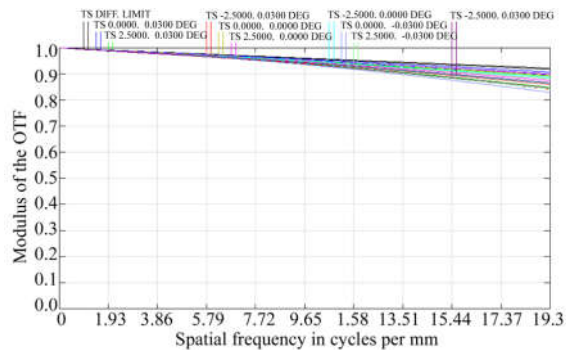
图 12 施密特光谱仪系统的三维立体示意图
Fig. 12 3D diagram of Schmidt spectrometer



(a) 施密特光谱仪 400 nm 波长处的传递函数
(a) MTF of Schmidt spectrometer at wavelength of 400 nm



(b) 施密特光谱仪 700 nm 波长处的传递函数
(b) MTF of Schmidt spectrometer at wavelength of 700 nm



(c) 施密特光谱仪 1 000 nm 波长处的传递函数
(c) MTF of Schmidt spectrometer at wavelength of 1 000 nm

图 13 施密特光谱仪的光学传递函数

Fig. 13 MTFs of Schmidt spectrometer

所示。不同波长处的光学传递函数曲线见图 13, 在奈奎斯特频率 19.3 lp/mm 处 MTF 均能达到 0.80 以上, 优于 0.6 的指标要求; 其尺寸为 800 mm(长)×1 160 mm(高)×330 mm(厚), 具有小型化特点; 400, 700 和 1 000 nm 波长光谱各个视场的成像位置见图 14。400 nm 波长的中心

视场的成像光线坐标为 (0, 132.251), 边缘视场坐标为 (25.966, 132.242), 可见光谱弯曲 0.009 mm 为 1/3 个像元, 最大视场的光谱绝对畸变为 0.231 mm, 相对理论像高为 26.197 mm, 小于 0.88%, 设计结果优良, 可满足星载遥感需求。

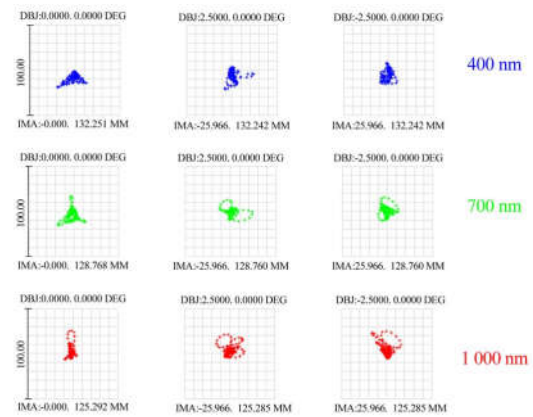


图 14 400, 700 和 1 000 nm 三种波长各个视场光线位置

Fig. 14 Chief ray image coordinate of 400, 700 and 1 000 nm wavelengths in different fields of view

6 结 论

本文基于大视场快焦比的技术需求, 采用反射式施密特望远成像系统和自由曲面 Offner 光谱成像系统匹配的结构形式, 该系统的视场为 5° , 焦比为 2, 波长覆盖 400~1 000 nm, 谱段数达到 180 个。然后, 使用光学设计软件 Zemax 进行了优化设计, 推导计算施密特非对称非球面的主镜面参数, 所有谱段的 MTF 均大于 0.8, 光学系统的光谱分辨率为 3.33 nm, 优于指标 5 nm, 畸变 $< 0.88\%$, 谱线弯曲 $< 1/3$ 探测器像元, 设计结果满足星载高光谱成像仪空间应用的技术要求。施密特结构简单, 相对离轴三反系统, 仅含有一个非球面, 共轴设计更适合大口径方案; 相比同轴两反系统, 它具有大视场工作时的优良像质和小畸变特点, 同时中心遮拦小且体积紧凑, 适合于未来大视场快焦比的大口径星载遥感应用。

参考文献:

- [1] PEARLMAN J S, BARRY P S, SEGAL C C, *et al.*. Hyperion, a space-based imaging spectrometer [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, 41(6): 1160-1173.
- [2] BARNESLEY M J, SETTLE J J, CUTTER M A, *et al.*. The PROBA/CHRIS mission: a low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the earth surface and atmosphere [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2004, 42(7): 1512-1520.
- [3] 刘银年. “高分五号”卫星可见短波红外高光谱相机的研制[J]. *航天返回与遥感*, 2018, 39(3): 25-28.
LIU Y N. Visible-shortwave infrared hyperspectral imager of GF-5 satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 25-28. (in Chinese)
- [4] LEE C M, CABLE M L, HOOK S J, *et al.*. An introduction to the NASA hyperspectral infrared imager (HypSIIRD) mission and preparatory activities [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 167: 6-19.
- [5] 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2629-2637.
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2629-2637. (in Chinese)
- [6] 金光, 张亮, 胡福生. 大 F 数高分辨率空间望远镜光学系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(2): 155-159.
JIN G, ZHANG L, HU F SH. Investigation on space optical system of high F number and high resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 155-159. (in Chinese)
- [7] HUGOT E, WANG X, VALLS-GABAUD D, *et al.*. A freeform-based, fast, wide-field and distortion-free camera for ultra low surface brightness surveys [J]. *SPIE*, 2014, 9143(4X-1): 1-11.
- [8] MUSLIMOV E, VALLS-GABAUD D, LEMAITRE G, *et al.*. Fast, wide-field and distortion-free telescope with curved detectors for surveys at ultralow surface brightness [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): 8639-8647.
- [9] LEMAITRE G R. *Astronomical Optics and Elasticity Theory* [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [10] LEMARED S, HUGOT E, CHALLITA Z, *et al.*. Smart warping harnesses for active mirrors and stress polishing [J]. *SPIE*, 2018, 991267: 1-11.
- [11] FARKAS S, AGOCS T, AITINK-KROES G, *et al.*. Characterization of an $f/2$ freeform active mirror [J]. *SPIE*, 2018, 1070617: 1-11.
- [12] 朱嘉诚, 靳阳明, 黄绪杰, 等. 宽波段凸面闪耀光栅优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(11): 1120003-1-7.
ZHU J CH, JIN Y M, HUANG X J, *et al.*. Design and optimization of broadband convex blazed grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(11): 1120003-1-7. (in Chinese)
- [13] 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.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)
- [14] MUSLIMOV E R, FERRARI M, HUGOT E, *et al.*. Spectrographs with holographic gratings on freeform surfaces: design approach and application for the LUVOIR mission [J]. *SPIE*, 2018, 106901H: 1-9.

作者简介:



王欣(1977—),女,陕西杨凌人,博士,研究员,2002年于中国科学院南京天文光学技术研究所获得硕士学位,2010年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位,主要从事航天激光三维成像仪、高光谱成像仪、红外相机光学设计、光机一体化仿真和光电系统检测方面的研究。E-mail: wangxin@mail. sitp. ac. cn



刘强(1989—),男,安徽安庆人,助理研究员,2016年于中国科学院南京天文光学技术研究所获得硕士学位,主要从事激光三维成像系统大口径光学计算机辅助装调和光学检测方面的研究。E-mail: qliu@niaot. ac. cn