

文章编号 1004-924X(2009)11-2629-09

星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计

郑玉权¹,王 慧²,王一凡¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;2. 空军航空大学,吉林 长春 130022)

摘要:对几台国内外典型的星载高光谱成像仪所采用的光学系统结构进行了分析,阐述了棱镜色散、光栅色散、傅里叶变换 3 种主流高光谱成像仪分光方式的结构原理和优缺点。根据宽波段、小型化的研究目标,设计了一个全反射式高光谱成像仪光学系统。该系统由离轴非球面三反射镜望远成像系统和两个 Offner 凸光栅光谱成像系统组成,通过改变两个光谱成像系统的变倍比来实现两种探测器的匹配。给出的该系统的详细设计结果显示,光学系统 128 个谱段的调制传递函数均达到 0.6 以上,畸变 $<0.44\%$,谱线弯曲 $<0.03\%$ 。实验结果表明,选定的全反射式光学系统满足小型化星载高光谱成像仪的技术要求,有效降低了仪器的体积和质量,通过加大光学系统的相对孔径弥补了光栅衍射效率低的缺点。

关键词:高光谱成像仪;凸光栅;TMA 光学系统;Offner 光谱成像系统

中图分类号:TP73;TH744.1 **文献标识码:**A

Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers

ZHENG Yu-quan¹, WANG Hui², WANG Yi-fan¹

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

Abstract: A proper optical system is selected for a compact, wide waveband spaceborne hyperspectral imager by comparing with existing optical systems applied to spaceborne hyperspectral imagers. Firstly, the advantages and disadvantages of optical systems for the hyperspectral imagers are discussed. Then, the principle and characteristics of three spectral-splitting methods with a prism, a grating or FT(Fourier Transform) as dispersion elements are compared and analyzed. Finally, based on the research objective of a hyperspectral imager, a reflective optical system is chosen. The system is composed of an off-axis Three-Mirror Anastigmatic(TMA) telescope and two Offner convex grating spectrometers. By changing the magnification of two spectral imaging systems, two array detectors with different pixel sizes can be matched. The detailed design results are presented, which indicate that the Modulation Transfer Function (MTF) of 128 wavebands from 400 nm to 2 500 nm is all over 0.6, distortion is less than 0.44% and the spectral bend(smile) is less than 0.03%. The chosen reflective op-

收稿日期:2008-11-04;修订日期:2008-12-05.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA121803)

tical system can satisfy the technical requirements of the compact spaceborne hyperspectral imager and can efficiently decrease the volume and weight. By enlarging the relative aperture of the optical system, the low diffraction efficiency of gratings can be compensated.

Key words: hyperspectral imager; convex grating; TMA optical system; Offner spectral imaging system

1 引言

高光谱成像仪从上个世纪 80 年代问世,到现在已历经了 30 年的发展历程,随着探测器、光学设计与加工等相关技术的不断进步,星载高光谱成像仪已经进入应用阶段。

美国航空航天局(NASA)于 1982 年研制出了世界上第一台方案实验性航空成像光谱仪(AIS)^[1]并在飞行试验中成功地采集了成像光谱数据,初步的分析结果显示了它在矿物识别、植被分类等方面的优越性。1987 年美国又研制出了实用型机载可见红外成像光谱仪(AVIRIS)^[2],主要目的是给遥感应用部门提供高质量的成像光谱数据,用于研究分析方法,进行应用实验,考察实验效果,评估仪器性能。

与传统的遥感数据源相比,高光谱数据最显著的特点是光谱范围宽、谱段多、光谱分辨率高,高光谱成像仪的工作波长一般覆盖 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 太阳反射光谱区,波段宽度达到纳米量级,波段数急剧增多,从可见光到近红外光谱区间波段数可达几十个乃至几百个。波段宽度变窄,波段数的剧增,使其可在多项应用中提供更加丰富的数据和研究方法。

随着高光谱数据实验应用验证的不断深入,目前已有多个高光谱成像卫星在轨飞行或正在研制,典型仪器包括美国的 HSI(Hyperspectral Imager)^[3]、欧空局的 ESA-HRIS (High Resolution Imaging Spectrometer)^[4]和 PRISM(Process Research by an Imaging Space Mission)^[5]、美国海军 NEMO 计划中的 COIS(Coastal Ocean Imaging Spectrometer)^[6]、美国强力星(MightySat)II 号上的 FTHSI(Fourier Transfer Hyperspectral Imager)^[7]、欧洲 PROBA 小卫星上的 CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer)^[8]、美国 EO-1 卫星上的 HYPERION 成像

仪^[9]等。这些高光谱成像仪提供的丰富高光谱数据已经在多个应用领域发挥了重要作用。

高光谱成像技术是 21 世纪遥感技术的发展前沿和当今世界遥感界关注的焦点之一。在高光谱成像仪的研制过程中,其光学系统的选择和设计是高光谱成像仪研制成败的一个关键环节,直接影响着仪器的性能、体积和质量。本文对高光谱成像仪光学系统的选择进行探讨,并给出一个小型化的高光谱成像仪设计结果。

2 高光谱成像仪光学系统的特点

高光谱成像仪的光学系统一般由两部分组成,望远成像系统和光谱成像系统,望远成像系统将地物目标的一个条带成像在光谱成像系统的入射狭缝上,光谱成像系统对入射狭缝进行色散,然后按波长不同成像在探测器的不同位置,通过适当选择光谱成像系统的色散系数可以获得不同光谱分辨率的图像,图 1 为棱镜色散高光谱成像仪的典型光学系统结构。

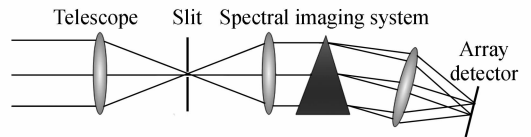


图 1 高光谱成像仪光学系统原理

Fig. 1 Principle of hyperspectral imaging optics

高光谱成像仪的工作波长范围较宽,光谱波段多,探测器接收的能量弱,因此对高光谱成像仪光学系统的要求较高,如:

(1)工作波长范围宽。高光谱成像仪一般的工作波长在 $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 或 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$,因此要求光学系统工作波长应该能够覆盖此范围,有时需要同时覆盖中红外和热红外波段;

(2)能量利用率高。高光谱成像仪具有上百

个谱段,每个谱段的带宽只有 5~20 nm,而来自于地球表面反射的光辐射能量是有限的,这就要求光学系统对入射能量的衰减尽可能的小;

(3)具有较强的集光能力。由于带宽很窄,探测器像元接收的能量弱,在系统性能和仪器体积、质量符合技术要求的前提下,应尽量加大光学系统的相对孔径来提高光学系统能量收集能力;

(4)系统的调制传递函数(MTF)要足够高。高光谱成像仪的信噪比较低,一般在 100~200,要求系统有足够高的 MTF,才能在较弱的光照度条件下对地物目标具有较强的空间分辨能力。

3 3 种主要分光方法的比较

高光谱成像仪的分光方法是仪器的核心,直接影响着仪器的性能、结构复杂程度、质量和体积等。典型的分光方法有棱镜、光栅色散分光、傅里叶变换光谱仪,新发展起来的分光技术包括可调

谐滤光片、渐变滤光片(光楔)、二元光学元件、层析成像和完全无动件的三维成像光谱仪^[10]。

目前比较成熟的星载高光谱成像仪主要有两类:色散型和傅里叶变换型。色散型高光谱成像仪又分为棱镜色散^[11]和光栅色散 2 种。国际上正在研制的和在轨运行的高光谱成像仪除了强力星 2 号上的 FTHSI 采用傅里叶变换方法外,其它的高光谱成像仪全部采用色散分光方式。图 2 给出了 3 种高光谱成像仪的工作原理,3 种高光谱成像仪除了采用的分光方式不同外,并没有本质的区别。为了获得高的地面分辨率,一个体积较大的望远光学系统对任何方式的高光谱成像仪来说都是必不可少的,分光系统的质量和体积与选用的分光方法密切相关,在相同的性能指标要求下,3 种高光谱的体积和质量基本相近,没有哪一种占有绝对优势,表 1 列出了 3 种分光方法的高光谱成像仪的性能比较。

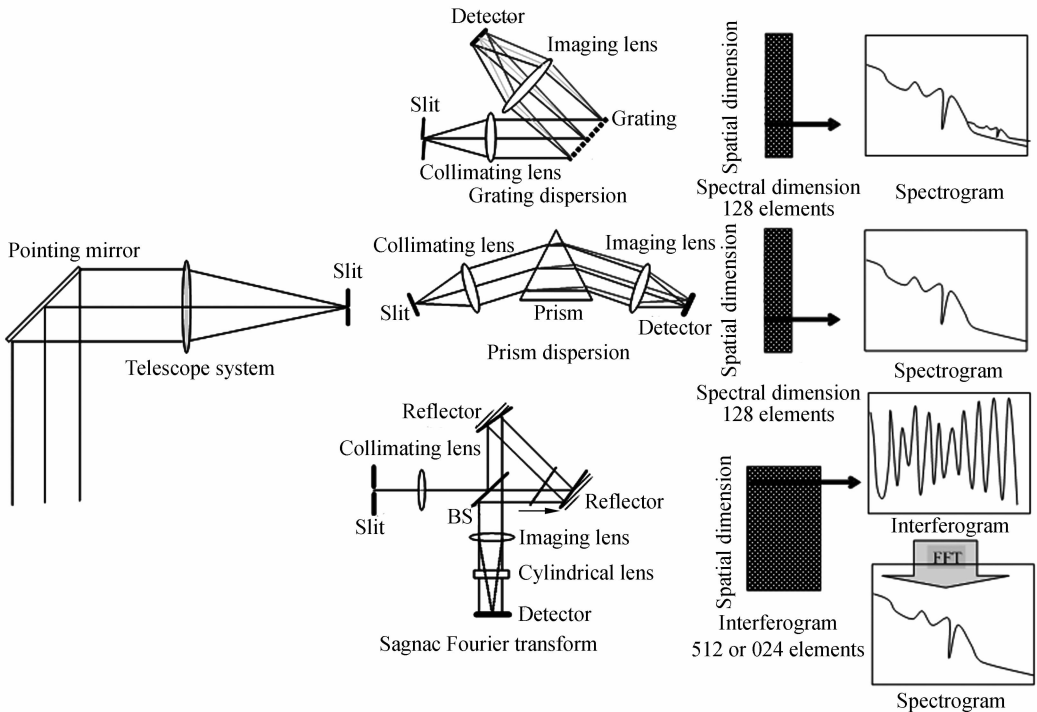


图 2 3 种典型分光方法的比较

Fig. 2 Comparison of three representative spectrum-splitting methods

表 1 3 种高光谱成像仪的性能比较

Tab. 1 Characteristic comparison of three hyperspectral imagers

	光栅色散型	棱镜色散型	傅里叶变换型
能量利用率	低	高	低
光谱线性	线性	校正到近似线性	完全非线性
光谱分辨率	高	低	高
地面分辨率	高	高	低
定标	容易	容易	难
实时光谱图像监视	可以	可以	不可以
直接获得	光谱图像	光谱图像	干涉图
数据变换	不需要	不需要	需要
数据量	低	低	高
体积和重量	小(凸光栅)	大	小

在干涉(傅里叶变化)光谱技术基础上发展的空间调制型干涉高光谱成像仪,需要与色散型相同的望远系统和狭缝,入射光经过 Sagnac 棱镜及傅里叶变换透镜和柱面镜,成像在面阵探测器上,探测器的空间维方向与狭缝平行,另一维为干涉条纹。

在色散型高光谱成像仪中,狭缝一方面与望远系统配合获得确定的地面分辨率(瞬时视场 IFOV),另一方面与光谱仪系统和面阵探测器配合获得确定的光谱分辨率。在空间调制型干涉高光谱成像仪中,为了获得确定的地面分辨率也必须设置同望远系统配合的狭缝,狭缝和分光棱镜导致能量利用率最大只能有 50%,而棱镜色散的能量利用率可达 90%,即使是平面闪耀光栅色散的情况下,峰值波长的衍射效率也可达 80%,平均衍射效率达 50%是没有问题的。三者能量利用率方面的差异可以通过适当改变望远系统的相对孔径来平衡。

从结构和质量来看,傅里叶变换型结构紧凑,质量较轻,近几年发展起来的 Offner 凸光栅光谱成像系统具有最小的体积和质量,平面闪耀光栅色散光谱仪稍大一些,而棱镜色散的高光谱成像仪最重。

对于不同的高光谱成像仪,光束经过同样的狭缝后,色散型光谱仪将狭缝按波长均匀地成像在面阵探测器上,128 个谱段只需要 128 行探测器,且各谱段带宽近似相等。干涉型高光谱成像仪获得的是狭缝的干涉图,经过傅里叶变换后才能获得光谱,且与波长完全不成线性关系,在 0.4~1.0 μm 波段要获得与色散型同样的光谱分辨

率(5 nm,128 谱段),干涉条纹至少要记录 512 级或更高,数据率大。

在数据图像直观性方面,光栅和棱镜色散分光方法可以直接选取单通道图像进行选择性地下传,而傅里叶变换方法则只能整体数据下传,经过数据变换后才能抽取单通道图像,光谱辐射定标困难。

综合各方面来考虑,光栅和棱镜色散方法具有较大的优势。

4 国外高光谱成像仪采用的光学系统

目前,国际上已经成功发射了多颗高光谱成像卫星,搭载的高光谱仪器分别为 Hyperion、FTHSI、COIS、CHRIS,这些仪器采用的光学系统也各有特点,下面对这几台仪器的光学系统分别简要介绍。

4.1 Hyperion

Hyperion 由美国 TRW 公司研制,共用望远镜采用 TMA 光学系统,视场角为 0.624° ,瞬时视场为 $42.55 \mu\text{rad}$,望远系统将地面一个条带成像在置于其后焦面的狭缝上,成像幅宽对应地面 7.5 km(@705 km 卫星轨道),利用分色滤光片将光束分为两束分别进入可见近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)两个 Offner 凸球面光栅光谱成像系统,反射光束进入 VNIR 光谱仪,光谱波段为 400~1 000 nm,透射光束进入 SWIR 光谱仪,光谱波段为 900~2 500 nm,两个光谱仪在 900~1 000 nm 内的跨越,便于二者的交互定标。由 CCD 和 HgCdTe 面阵探测器获取地面一条窄带

的光谱图像信息,通过卫星推扫获得地面二维空间的高光谱图像。图 3 为 Hyperion 仪器采用的光学系统结构。

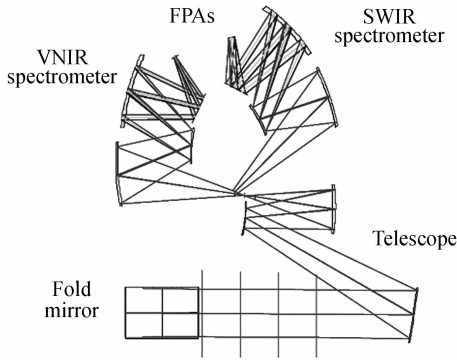


图 3 Hyperion 光学系统结构图

Fig. 3 Optical construction of Hyperion sensor

4.2 FTHSI

MightySat II 携带的高光谱成像仪 FTHSI 由美国茶隼(Kestrel)公司制造,是唯一一个利用傅里叶变换技术的星载高光谱成像仪,其光学系统结构如图 4 所示。

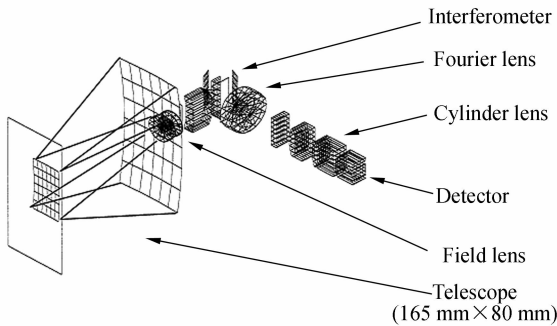


图 4 FTHSI 光学系统原理图

Fig. 4 Optical principle of FTHSI

望远系统采用卡式系统,把地面一个条带成像在焦面的狭缝上,经过狭缝的光束被分束器分成透射和反射两部分,这 2 束光经过二次反射后又返回分束器,经分束器复合后出射。由于两个反射镜到分束器的距离不相等,因此传播路径长度不同,相当于产生一个相干的虚物。傅里叶透镜和柱面镜把出射相干光束准直、会聚,探测器接收入射狭缝各像元的双光束干涉图。数据下传后进行数字处理和傅里叶变换,得到各像元的光谱图。

4.3 COIS

COIS 是美国海军 NEMO 卫星的主要载荷。COIS 波长为 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$,210 个谱段光谱分辨率为 10 nm,该仪器采用的光学系统与 Hyperion 基本相同,采用大相对孔径($D/f=1/2.5$)离轴非球面 TMA 望远成像系统和两个 Offner 凸光栅光谱仪,图 5 为该仪器采用的光学系统。

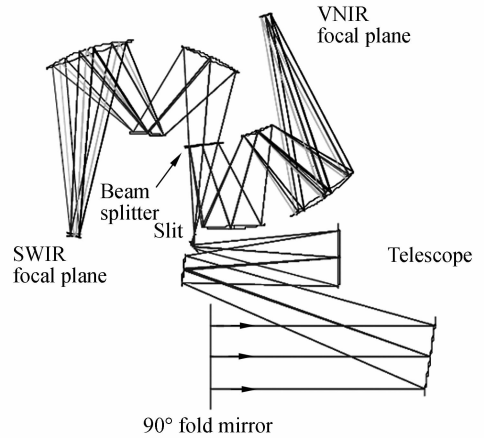


图 5 COIS 的光学系统结构

Fig. 5 Optical construction of COIS sensor

4.4 CHRIS

CHRIS 高光谱成像仪是英国 Sira 公司为欧空局小卫星 PROBA (Project for On-Board Autonomy) 研制的主要载荷,该仪器采用的光学系统(见图 6)比较特殊,望远系统采用卡式系统,光谱仪采用了 Sira 公司专利技术的棱镜色散 Offner 光谱成像系统,该结构是在入射和出射的 2 个发散光束中使用 2 片曲面色散棱镜,既具有 Offner 系统的小型化特点,又克服了光栅色散高级次光谱干扰问题。该系统的光谱非线性较大,光谱分辨率不均匀,从短波长($0.4 \mu\text{m}$) $\Delta\lambda=1.25 \text{ nm}$ 变化到长波($1.0 \mu\text{m}$) $\Delta\lambda=11 \text{ nm}$ 。

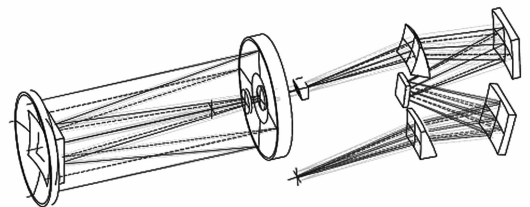
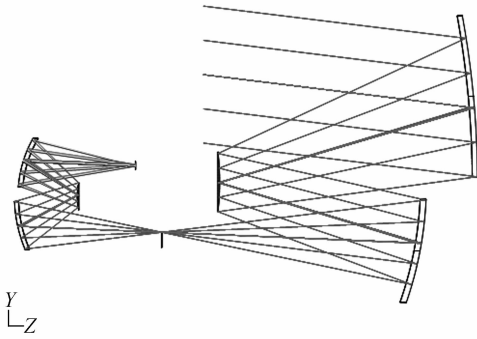


图 6 CHRIS 仪器光学系统原理图

Fig. 6 Optical principle of CHRIS

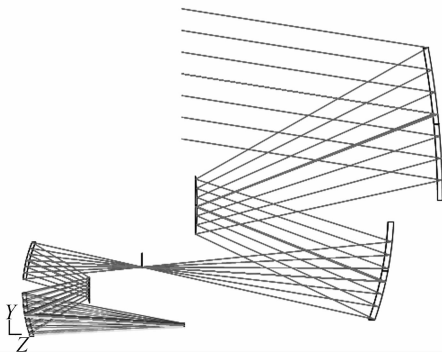
5 小型高光谱成像仪光学系统设计

星载高光谱成像仪的光学系统设计不仅考虑工作波长范围、性能、体积和质量等问题,还要考虑空间应用环境下系统的工作稳定性问题。由于透射材料本身的温度不稳定性,高光谱成像仪采用反射式系统较佳,作者在对比了国内外高光谱成像仪光学系统的特点以后,考虑到目前光学设计与加工技术的进展,给出了一个小型化、全反射式高光谱成像仪光学系统设计结果(见图 7)。该光学系统由共用离轴非球面 TMA 望远系统^[12-13]和两个 Offner 凸光栅光谱成像系统组成。



(a) VNIR 波段光学系统结构

(a) Optical construction for VNIR waveband



(b) SWIR 波段光学系统结构

(b) Optical construction for SWIR waveband

图 7 小型高光谱成像仪光学系统设计结果

Fig. 7 Optical design of a compact hyperspectral imager

该高光谱成像仪工作在 645 km 的太阳同步轨道,地面覆盖宽度为 30 km,总视场为 2.67° ,地

面分辨率为 30 m,光谱波段为 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$,光谱分辨率为 10 nm。由于采用市售 CCD 产品和 HgCdTe 面阵探测器,可选择的余地非常有限,可用的 CCD 探测器像元尺寸为 $18\ \mu\text{m}$,HgCdTe 探测器的像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$,两种探测器的像元尺寸不匹配,若要同时获得 30 m 分辨率的地物图像,必须使用不同焦距的光学系统,在设计中适当选择共用望远系统的焦距,然后通过改变 Offner 凸光栅光谱成像系统的放大率来获得 VNIR 和 SWIR 两个波段不同的焦距。

根据光谱成像系统的变倍能力,选定望远系统的参数如下:焦距 $f=483.75\ \text{mm}$,焦比 $F\# = 3$,视场 $\text{TFOV}=2.67$,光谱波段为 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$,焦面处狭缝宽度为 $22.5\ \mu\text{m}$,设计的 VNIR 光谱仪的放大率为 0.8,则组合系统的焦距 $f=387\ \text{mm}$, $F\# = 2.4$,成像在 CCD 探测器上的狭缝像宽度为 $18\ \mu\text{m}$,与探测器像元尺寸匹配,VNIR 波段组合光学系统的结构如图 7(a) 所示。对于 SWIR 波段,放大率为 1.333,则组合系统的焦距 $f=645\ \text{mm}$, $F\# = 4$,成像在 HgCdTe 探测器上的狭缝像宽度为 $30\ \mu\text{m}$,与 HgCdTe 探测器像元尺寸匹配,SWIR 波段组合光学系统的结构如图 7(b) 所示。

该光学系统 VNIR 和 SWIR 波段光学系统结构数据见表 2 和表 3,每个波段光路中,光线需要经过 5 块反射镜和一块凸球面光栅到达探测器。

表 2 VNIR 波段光学系统数据

Tab. 2 Optical system construction data for VNIR waveband

Surf	Radius	Thickness	Glass	Conic
1	Infinity	322.5	0	
2	-1 065.958	-303.61	MIRROR	-1.676
STO	-312.270 2	243.61	MIRROR	0
4	-437.520 2	-311.73	MIRROR	0.206
5	Infinity	-173.56		
6	162.243 5	75.67	MIRROR	-0.079 0
7	73.293 15	-67.11	MIRROR	0
8	136.975 8	135.86	MIRROR	0.047 0
IMA	Infinity			0

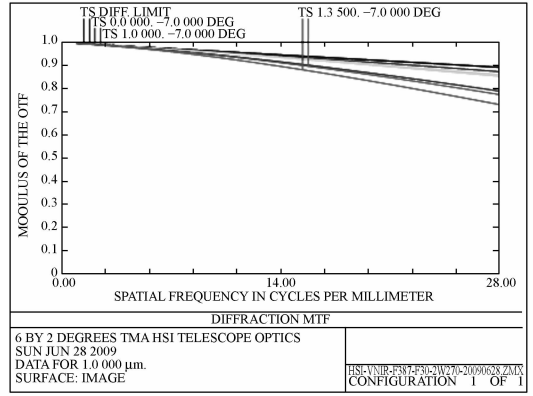
表 3 SWIR 波段光学系统数据

Tab.3 Optical system construction data for SWIR waveband

Surf	Radius	Thickness	Glass	Conic
1	Infinity	322.5		0
2	-1 065.96	-303.61	MIRROR	-1.676
STO	-312.27	243.61	MIRROR	0
4	-437.52	-311.73	MIRROR	0.206
5	Infinity	-147.65		0
6	157.49	81.20	MIRROR	0.057
7	85.95	-81.20	MIRROR	0
8	181.32	200	MIRROR	-0.103
IMA	Infinity			0

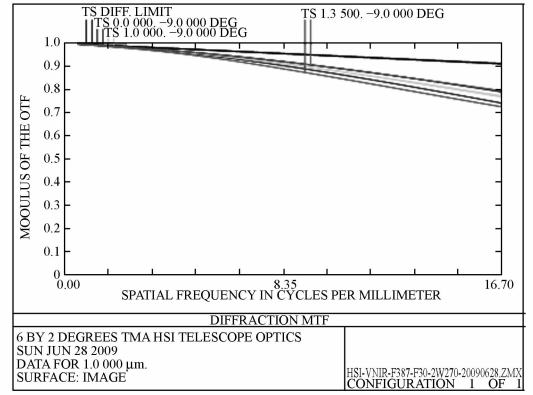
两个波段的不同谱段的 MTF 如图 8 所示, VNIR 波段的 MTF(@28 lp/mm)均达到 0.7 以上,SWIR 波段的 MTF(@16.7 lp/mm)均达到 0.6 以上,设计结果远远高于 MTF≥0.5 设计指标要求。VNIR 波段的边缘视场最大畸变为 0.44%,谱线弯曲为 8 μm,相当于 0.22 探测器像元,对目标光谱探测的影响可以忽略;SWIR 波段边缘视场最大畸变为 0.13%,谱线弯曲也为 8 μm,相对弯曲<0.03%,较小的谱线弯曲有效降低了高光谱数据光谱校正的难度,在波长要求不高的情况下,高光谱数据可以不经光谱校正直接应用^[14]。

本系统的两个光谱仪采用不同于 Hyperion 和 COIS 的分色片谱段分离方法,即视场分离的方法,结构原理如图 9 所示,VNIR 和 SWIR 光谱仪使用各自独立的狭缝,在望远系统的焦面前放置一个刀口反射镜,精确控制刀口反射镜切入光束的位置,使其边缘既不阻挡 VNIR 光谱仪的入



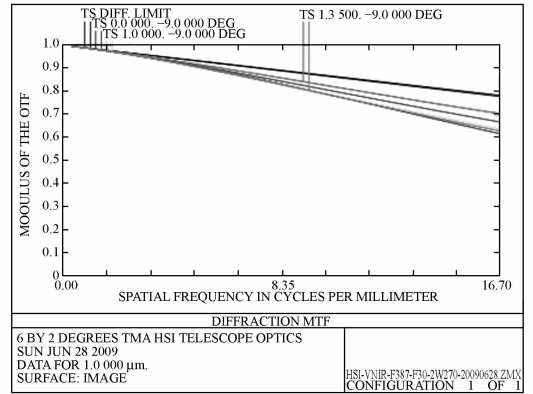
(b) VNIR 1 000 nm 谱段

(b) VNIR 1 000 nm spectral band



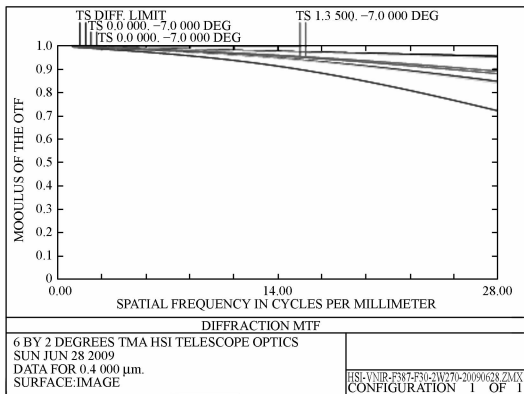
(c) SWIR 1 000 nm 谱段

(c) SWIR 1 000 nm spectral band



(d) SWIR 2 500 nm 谱段

(d) SWIR 2 500 nm spectral band



(a) VNIR 400 nm 谱段

(a) VNIR 400 nm spectral band

图 8 不同谱段的 MTF

Fig. 8 MTF of different spectral bands

射光束,又能完全反射至 SWIR 光谱仪的光束,控制刀口反射镜的方向可以转动 SWIR 光谱仪

的空间位置,减小仪器的体积。视场分离的分波段方法,两个狭缝的位置精确匹配控制,VNIR 和 SWIR 光谱仪不能同时对地面同一目标成像,但通过数据重组能够获得地物目标 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的光谱图,与分色片的方法比较,该方法可减少 $10\% \sim 20\%$ 的能量损失,有利于提高高光谱成像仪的信噪比。

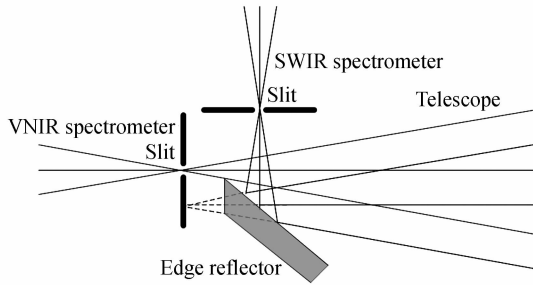


图 9 视场分离结构原理图

Fig. 9 Principle of viewing field splitter

6 结 论

星载高光谱成像仪光学系统的选择需要从

性能、应用环境、体积和质量综合来考虑^[15]。本文对国内外星载高光谱成像仪采用的光学系统进行了介绍和对比,对 3 种主要的高光谱分光方法进行了分析和比较。比较结果表明,采用凸光栅作为色散元件的 Offner 光谱成像系统具有性能高、体积小、质量轻、空间应用稳定性好的特点。本文设计了一个全反射式高光谱成像仪光学系统,该系统由离轴非球面 TMA 望远系统与两个 Offner 凸光栅光谱成像系统组成,通过选择两个光谱成像系统的变倍比来匹配探测器像元尺寸的差异。

该系统波长覆盖 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$,谱段数达到 128 个,所有谱段的 MTF 均大于 0.6,光学系统的畸变 $< 0.44\%$,谱线弯曲 < 0.22 探测器像元,各项设计结果满足星载高光谱成像仪空间应用的技术要求。

该系统采用了视场分离分光方法,与分色片法相比,能量损失减少了 $10\% \sim 20\%$ 。另外,凸球面光栅的应用大大降低了仪器的体积和重量,全反射光学元件增强了系统的空间环境适应性,该系统是星载高光谱成像仪的优选系统。

参考文献:

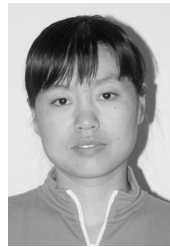
- [1] LABAW C. Airborne imaging spectrometer: an advanced concept instrument[J]. *SPIE*, 1983, 430: 68-73.
- [2] MACENKA S A, CHRISP M P. Airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *SPIE*, 1987, 834: 32-43.
- [3] MARMO J, FOLKMAN M A, KUWAHAVA C Y, et al. Lewis hyperspectral imager payload development[J]. *SPIE*, 1996, 2819: 80-90.
- [4] BLECHINGER F, CHARLTON D E. High resolution imaging spectrometer (HRIS)- optics, focal plane and calibration [J]. *SPIE*, 1993, 1937: 207-224.
- [5] PRISM K B. (processes research by an imaging spaceborne mission)-high resolution hyperspectral imager for scientific land processes monitoring applications[J]. *SPIE*, 1995, 2585: 283-286.
- [6] THOMAS L W, CURTISS O D. Hyperspectral remote sensing technology (HRST) program and the Naval EarthMap Observer (NEMO) satellite [J]. *SPIE*, 1998, 3437: 2-11.
- [7] OTTEN L J, MEIGS A D. MightySat II. 1: an optical design and performance update [J]. *SPIE*, 1996, 2957: 390-398.
- [8] PETER A F. Image acquisition planning for the CHRIS sensor onboard PROBA [J]. *SPIE*, 2004, 5546: 141-150.
- [9] MARK A F, JAY P, LUSHALAN B L, et al. EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [J]. *SPIE*, 2001, 4151: 40-51.
- [10] 郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览 [J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 75-80.
ZHENG Y Q, YU B X. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(1): 75-80. (in Chinese)
- [11] 李幼平, 禹秉熙, 韩昌元, 等. 成像光谱仪工程权衡优化设计的光学结构 [J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 974-979.
LI Y P, YU B X, HAN CH Y, et al. Tradeoff optimization design of optical configuration on ima-

- ging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(6):974-979. (in Chinese)
- [12] 常军,翁志成,姜会林,等. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. *光学精密工程*,2003,11(1):55-57.
CHANG J, WENG ZH CH, JIANG H L, *et al.*. Optical design of wide field-of-view, off-axis spaceborne camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1):55-57. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 陈风,郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. *光学精密工程*,2008,16(3):415-419.
CHEN F, ZHENG X B. Influence of spectrum not-matching on calibration precision of remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(3):415-419. (in Chinese)
- [15] 任建伟,万志,李宪圣,等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. *光学精密工程*,2007,15(8):1186-1190.
REN J W, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1186-1190. (in Chinese)

作者简介:



郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,1993年、1996年分别于长春光学精密机械学院获得学士、硕士学位,1999年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: derek_zheng001@hotmail.com



王慧(1975—),女,吉林长春人,博士,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现主要从事光学检测方面的研究。E-mail: 315_wang_hui@sina.com

通讯作者:



王一凡(1958—),男,吉林长春人,研究员,主要从事机总体结构设计方面的研究。E-mail: wangyifan1958@163.com