

文章编号 1004-924X(2021)03-0463-11

轻小型高分辨率星载高光谱成像光谱仪

樊星皓^{1,2,3}, 刘春雨^{1,3*}, 金光^{1,3}, 刘帅^{1,3}, 谢运强^{1,2,3},
徐婷婷^{1,2,3}, 冯钦评^{1,2,3}, 王集^{1,3}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:在小型化成像光谱仪的研制和应用中,如何同时实现轻量化、高地面分辨率和高信噪比是目前亟待突破的技术难题。本文通过将线性渐变滤光片分光技术和数字域时间延迟积分技术相结合,并对镜头进行紧凑化处理,设计了一款工作波段为 403~988 nm、平均光谱分辨率为 8.9 nm、系统总质量为 7 kg 的轻小型星载高光谱成像光谱仪。仿真和实验结果表明,该高光谱成像仪能在 500 km 轨道上得到刈幅宽度为 50.5 km、地面分辨率为 10 m 的高光谱图像,且图像信噪比良好。该成像光谱仪可为微纳卫星获得高分辨率的高光谱图像提供技术支持,推动了我国高光谱遥感探测技术的发展。

关键词:成像光谱仪;高地面分辨率;复消色差;线性渐变滤光片;数字域 TDI

中图分类号:O433.1;TH744 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20212903.0463

Small and high-resolution spaceborne hyperspectral imaging spectrometer

FAN Xing-hao^{1,2,3}, LIU Chun-yu^{1,3*}, JIN Guang^{1,3}, LIU Shuai^{1,3}, XIE Yun-qiang^{1,2,3},
XU Ting-ting^{1,2,3}, FENG Qin-ping^{1,2,3}, WANG Ji^{1,3}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Key Laboratory of Space-based Dynamic & Rapid Optical Imaging Technology,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

* *Corresponding author, E-mail: mmlucy@163.com*

Abstract: Currently, there is an urgent need for a small, high-resolution imaging spectrometer for remote sensing. According to the load requirements of the hyperspectral micro-nano satellite, this study combined a linear variable filter and digital TDI technology, and the lens was compacted and apochromatic in ZE-MAX. Consequently, a light and small spaceborne hyperspectral imaging spectrometer was designed with a working band of 403-988 nm, an average spectral resolution of 8.9 nm, and a total system mass of 7 kg. The simulation and experimental results show that the hyperspectral imaging spectrometer can achieve a

收稿日期:2020-08-25;修订日期:2020-10-23.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2016YFB0501200)

high-ground-resolution hyperspectral image with a swath width of 50.5 km and a ground resolution of 10 m on a 500 km track, and the image signal-to-noise ratio is good. The imaging spectrometer combines the characteristics of low weight and high ground resolution, thereby aiding the development of hyperspectral micro/nano satellites.

Key words: imaging spectrometer; high ground resolution; apochromatism; linear variable filter; digital

1 引言

高光谱遥感技术是在成像光谱学基础上发展而来的一种光学遥感技术,能实现空间信息、光谱信息和辐射信息的综合观测^[1-2]。目前,该技术已经在大气探测、地球资源普查、军事侦察、环境监测、农业和海洋遥感等领域有着广泛的应用^[3-6]。

随着微纳卫星技术的发展,遥感领域对轻小型高光谱成像光谱仪的需求日益强烈,但是当前轻小型高光谱成像光谱仪的空间分辨率普遍较低。国外典型的轻小型高光谱成像光谱仪有欧空局 PROBA 卫星搭载的 CHRIS 和韩国研制的 COMIS 等^[7-8]。CHRIS 质量为 14 kg,长度为 790 mm,空间角分辨率为 0.04 mrad;COMIS 的空间角分辨率为 0.043 mrad,在 500 km 轨道上只能获得空间分辨率为 20 m 的高光谱图像。

近年来,国内多个机构开展了成像光谱仪小型化的研究,但与国外还有一定的差距。中国科学院光电研究院冯蕾等^[9]通过将棱镜分光系统小型化,设计了空间角分辨率为 0.14 mrad,光学系统长度小于 330 mm 的成像光谱仪。北京空间机电研究所王保华等^[10]通过将光栅分光系统小型化,设计了空间角分辨率为 0.075 mrad,长度小于 550 mm 的成像光谱仪,但是仍然不能满足微小卫星的高分辨要求。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的王颖等^[11]设计了一种渐变滤光片型成像光谱仪,虽然空间角分辨率仅为 0.28 mrad,但此光谱仪结构简单轻便,具有低质量实现高地面分辨率的潜力。

本文在上述研究的基础上,首先分析了国内外星载小型高光谱成像光谱仪难以实现较高地面分辨率的原因,提出了将渐变滤光片分光技术和数字域时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)技术相结合,从而实现轻小型星载成像光谱仪的高分辨率对地成像。基于渐变滤光片分

光原理设计了轻小型高分辨率成像光谱仪,并介绍了紧凑化的复消色差光学系统设计方法。最后,通过实验分析了渐变滤光片和数字域 TDI 相结合时成像光谱仪的光谱分辨率、各谱段的能量和数字域 TDI 对光谱分辨率的影响。

2 设计原理

2.1 能量限制

光学系统成像所需的光能量是地物反射的太阳光,一般认为太阳是绝对温度为 5 900 K 的黑体,由普朗克黑体辐射公式和辐照度公式推导可得太阳光在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内对空间目标的辐照度为^[12]:

$$M = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{A}{4\pi R^2} \cdot \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \right] d\lambda, \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, k 为玻尔兹曼常数, T 为太阳的黑体温度, A 为太阳表面积, R 为日地平均距离,均可认为是常量。因此,太阳对地面目标的辐照度主要由波长 λ 的范围决定。

高光谱成像光谱仪的通道众多,单个通道的光谱范围较窄,因此,单个通道能利用的辐照度很小。本文以光谱分辨率为 10 nm 的高光谱成像光谱仪为例,将某些通道能利用的辐照度与可见光相机(400~800 nm)进行对比,如图 1 所示。从图中可以看出,高光谱成像光谱仪有更多的通道数、更宽的光谱范围和更高的光谱精细度,但是,其每个通道可利用的辐照度却不足可见光相机的 3%。另一方面,空间目标反射的光信号在光学系统入瞳处的光能量 E_1 是辐照度(M)、光学系统的通光口径(D)和空间目标面积(S)的函数^[13],即:

$$E_1 = f(M, D^2, S). \quad (2)$$

卫星的速度恒定,积分时间 t 与地面采样距离(Ground Sampling Distance, GSD)成正比。

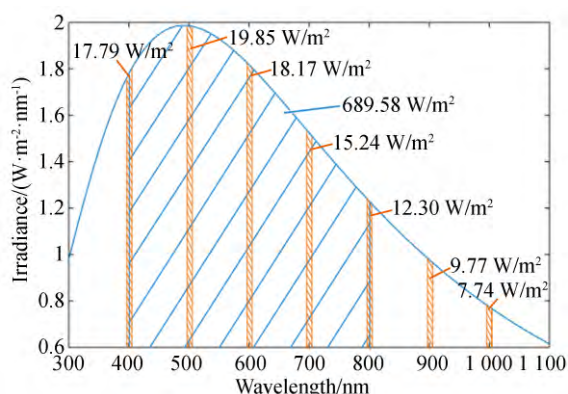


图1 不同谱段的太阳辐照度情况

Fig. 1 Solar irradiance in different spectral bands

假设面积为 S 的空间目标反射的光信号全部会聚在一个像元内,则该像元在曝光时间内接收到的总能量 E_2 与 GSD 的关系如下:

$$E_2 = f(M, D^2, S, t) = f(M, D^2, GSD^3). \quad (3)$$

由公式可以看出,单个像元在曝光时间内接收到的总能量与 M, D^2 和 GSD^3 成正比。

受限于通光口径和单个通道可利用的辐照度,轻小型高光谱成像光谱仪每个通道在曝光时间内接收到的总能量很小,若追求更小的地面采样距离,则能量会进一步下降,从而影响每个通道的图像信噪比^[13]。因此,能量不足造成的图像信噪比下降是轻小型高光谱成像光谱仪无法实现更小地面采样距离的主要原因。

2.2 渐变滤光片与数字域 TDI

该高光谱成像光谱仪采用线性渐变滤光片作为分光器件,其特点是没有狭缝的限制,因此能与数字域 TDI 技术相结合,在不增加成像光谱仪口径的情况下提高能量;同时,与棱镜和光栅分光系统相比,滤光片的体积和质量极小^[11],有利于进一步实现轻量化。

对于法布里-珀罗的线性渐变滤光片,其峰值透射波长为^[14]:

$$\lambda_0 = \frac{2nd}{k + (\varphi_1 + \varphi_2)/2\pi} = \frac{2nd}{m}, \quad (4)$$

式中: n 为谐振腔层的折射率, d 表示谐振腔层的厚度, φ_1 和 φ_2 分别为上反射膜系和下反射膜系的位相, $k=0, 1, 2, \dots$ 。

线性渐变滤光片的谐振腔层厚度沿某一方向线性变化,由式(4)可知,其中心透射波长会沿

谐振腔厚度的渐变方向线性变化。将线性渐变滤光片置于探测器前,可以使探测器的不同像素行对应不同的单色光,如图2所示。同时,由于不受狭缝的限制,探测器的每一行都会对地物成像。图2中地面区域A被探测器的P1到P3行连续成像3次,将3次成像的电子数相加可以提高图像信噪比^[15]。其中,参与成像的3行探测器像元为三级数字域 TDI 的输出行,由于相邻3行的中心波长接近,可以认为是同一光谱通道。

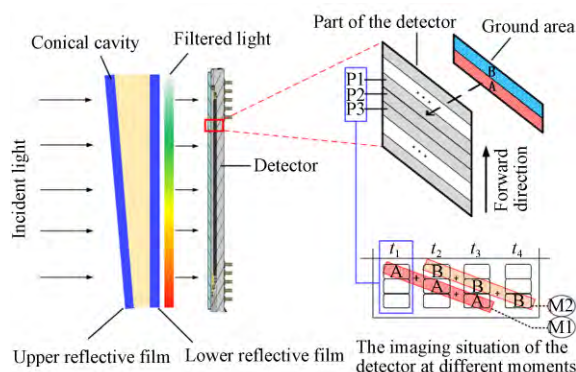


图2 线性渐变滤光片与数字域 TDI 的原理

Fig. 2 Schematic diagram of linear variable filter and digital domain TDI

3 光学系统设计与优化

3.1 光学系统参数的确定

光学系统用于收集地面目标的能量信息和空间信息,其性能的好坏直接影响着目标图像质量和系统的光谱分辨率。为了使微纳卫星获得高分辨率光谱图像,该成像光谱仪要求光学系统具有轻量化和强集光能力等特点。

高光谱成像光谱仪的光学系统的主要性能指标包括:工作波段、焦距、相对孔径、视场角、像元尺寸和调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)等^[10]。其中,工作波段是指系统所能响应的波长范围,它决定了光学系统材料及膜系的选择;焦距是指光学系统聚集光线的的能力,它影响着系统的地面分辨率; F 数是相对孔径的倒数,用于评价系统的实际通光能力, F 数越小,通光能力越强;视场角决定了光学系统能够观测到的视野范围,滤光片型成像光谱仪对视场的要求与面阵相机相似^[11];像元尺寸是指探测

器感光芯片上单个像元的大小,像元越小,同等地面分辨率下系统的焦距越小;MTF 是评价光学系统像质的重要指标,MTF 值越大,系统像质越好;畸变反映了系统成像的形变,会影响不同通道的光谱匹配,畸变越小,匹配越精准。

该成像光谱仪使用 GSENSE 5130 探测器,并要求它在 500 km 轨道上能获得 10 m 地面分辨率的图像。根据应用需求,表 1 列出了该成像光谱仪的主要设计指标。

表 1 光学系统的设计指标

Tab. 1 Design parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength/nm	400—1 000
Focal length/mm	212.5
<i>F</i> number	4.5
FOV 2w/(°)	6.8
Pixel size/μm	4.25
Distortion	≤0.05
Modulation transfer function@118/(lp·mm ⁻¹)	≥0.3

3.2 光学系统设计

光学系统的结构形式主要有折射式、反射式和折反式。其中,同轴反射结构和折反式结构的视场角一般不会超过 3°,不满足光学系统的视场要求;离轴反射结构的体积较大且较难加工和装调,会增加光学系统的制造成本;折射式结构视场大、相对孔径大、结构简单,适合轻小型成像光谱仪的设计要求。

综合考虑各方面因素,最终将光学系统结构选为折射式望远型结构,并在其中加入像方远心镜组,如图 3 所示。图中前组为望远型基本结构,能缩短光学系统长度^[16],后组为像方远心镜组,使各视场的光线在滤光片和探测器上的入射角度相同,既能保证像面照度的均匀性,又能避免因主光线入射角度不同而引起的光谱蓝移^[17]。

该高光谱成像光谱仪的波段宽、像元尺寸小,因此像质受色差影响大。本文采用正负透镜组合的方式校正色差,同时,选用合适的玻璃材料减小二级光谱色差,以保证每一个光谱通道的成像质量。

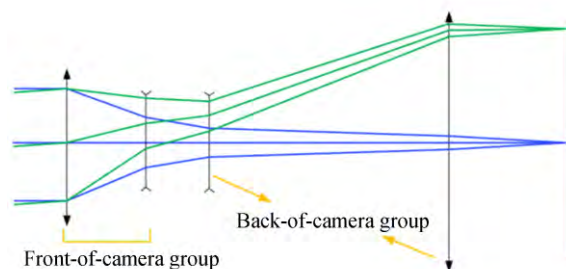


图 3 望远型像方远心系统光路结构

Fig. 3 Optical path structure of telephoto image telecentric system

根据薄透镜像差理论,当相邻正负透镜的光焦度 ϕ_x 满足:

$$\phi_1 = \left(\frac{v_1}{v_1 - v_2} \right) \phi, \quad (5)$$

$$\phi_2 = \left(\frac{-v_2}{v_1 - v_2} \right) \phi. \quad (6)$$

此时即可完全消除色差,同时剩余的二级光谱色差为:

$$\Delta L'_{\lambda_2 \lambda_3 \lambda_1} = -f' \left(\frac{P_1 - P_2}{v_1 - v_2} \right). \quad (7)$$

由式(7)可知,当玻璃组合的阿贝数 v 相差较大时,有助于减小正负透镜承担的光焦度 ϕ ,而二级光谱色差的大小则受 v - P 图中玻璃连线斜率的影响。对成都光明的玻璃材料数据库进行分析,玻璃材料在 400~1 000 nm 波段的阿贝数 v 与相对部分色散系数 P 分布如图 4 所示。选用 H-FK61 和 HTF3L 这一对相对色散系数接近而阿贝数相差较大的玻璃组合,同时校正色差和二级

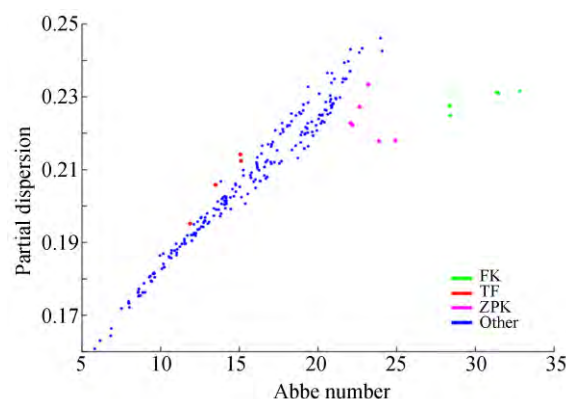


图 4 玻璃阿贝数与部分色散关系

Fig. 4 Relation between Abbe number and partial dispersion of glass

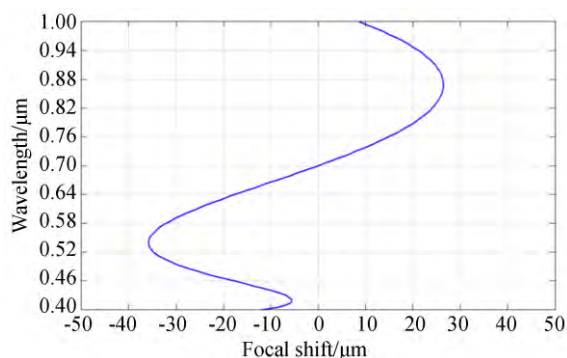


图5 不同波长的焦点位移

Fig. 5 Chromatic focal shift at different wavelengths

光谱色差,同时在Zemax中对望远型初始结构进行像方远心设计和像质优化,最终的色差优化结果如图5所示。由图可知,各个波长相对于主波长的焦点位置差小于 $36\ \mu\text{m}$,若选择合适的像面位置,则所有波长的焦点均在一倍焦深之内,成功消除了色差和二级光谱色差对成像的影响,保证了所有波长的成像质量。

3.3 像质评价

光学系统由1片保护玻璃和9片球面镜构成,其结构如图6所示。系统使用望远型像方远心结构,其焦距为 $212.5\ \text{mm}$,筒长为 $227\ \text{mm}$,光学系统的筒焦比接近1,达到了紧凑化的目的;系统的工作波段为 $400\sim 1\ 000\ \text{nm}$,相对孔径为 $1/4.5$,全视场 2ω 为 6.8° ,后工作距为 $52\ \text{mm}$,镜片质量约为 $258\ \text{g}$,最大畸变低于 0.047% ,满足设计要求。

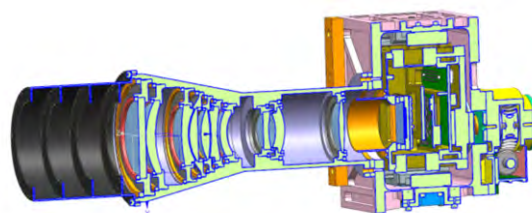
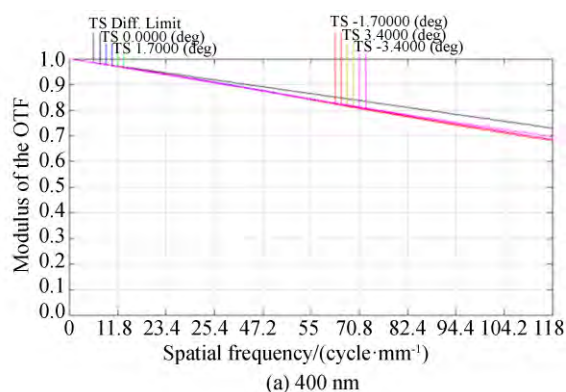
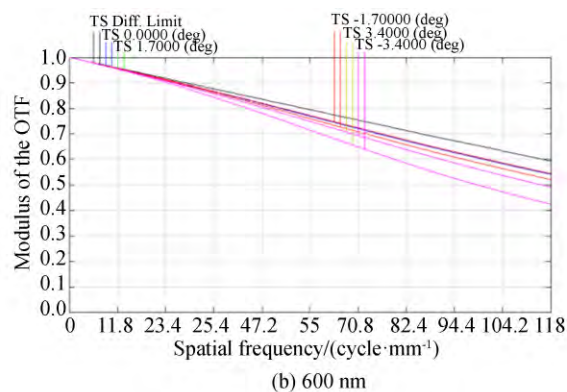


图6 星载高光谱成像仪的光学系统结构

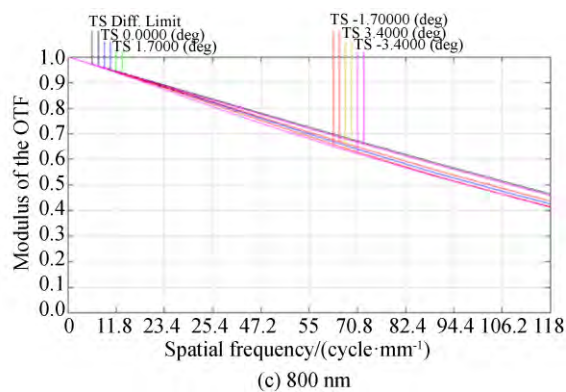
Fig. 6 Structure diagram of optical system of space borne hyperspectral imaging spectrometer



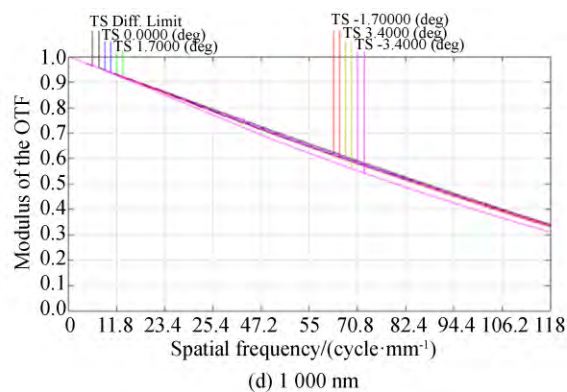
(a) 400 nm



(b) 600 nm



(c) 800 nm



(d) 1 000 nm

图7 各个谱段的调制传递函数曲线

Fig. 7 Modulation transfer function curve of each spectral segment

MTF 可以全面反映其成像质量,图 7 给出了 400,600,800 和 1 000 nm 波段在 Nyquist 频率 118 lp/mm 处的 MTF。从结果可见,400 nm 和 800 nm 波段的 MTF 接近衍射极限,在 Nyquist 频率处的 MTF 值均优于 0.4;600 nm 波段存在剩余像差,在 Nyquist 频率处的 MTF 值仍可达到 0.4;受限于衍射极限,1 000 nm 波段在 Nyquist 频率处的 MTF 值有所下降,但所有波段在 Nyquist 频率处的 MTF 均大于 0.3 的设计要求,成像质量良好。

该系统场曲与畸变曲线如图 8 所示,光学系统全视场相对畸变小于 0.047%,高于 0.05% 的设计要求。图 9 则给出了该光学系统不同波长的弥散斑的均方根半径情况,结果显示,弥散斑直径在 425 nm 处取最大值 3.7 μm ,说明各个谱段的弥散斑直径均小于一个像元尺寸,像差较小,满足成像要求。

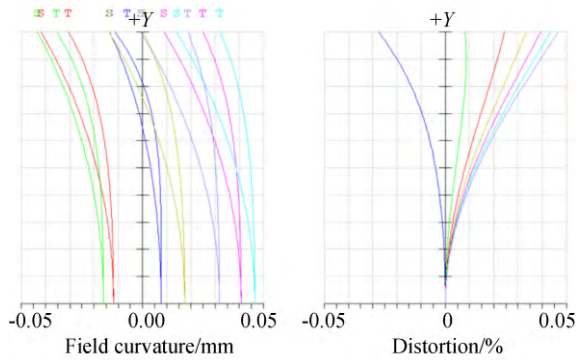


图 8 光学系统的场曲与畸变曲线

Fig. 8 Field curvature and distortion curves of optical system

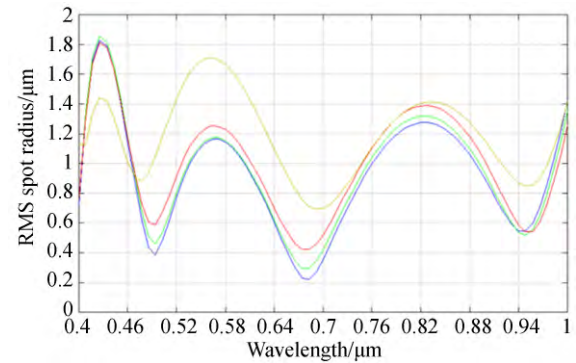


图 9 点列图半径的均方根值随波长的变化曲线

Fig. 9 RMS spot radius versus wavelength of optical system

3.4 工程分析

为了检验该成像光谱仪的工程可行性,本文对该成像光谱仪的杂散光和光学公差等进行了分析。

3.4.1 公差分析

光学系统的公差主要为镜片加工和装调时引入的偏差值,包括镜面的半径、不规则程度的偏差,镜片厚度、镜片安装间距的偏差,镜面的偏心和倾斜公差、镜片的偏心和倾斜公差,以及材料的折射率和阿贝数的偏差等,其公差分配结果如表 2 所示。

由于该成像光谱仪有调焦机构,因此设置像面位置补偿,并以成像光谱仪光学系统的所有视场在 118 lp/mm 处的综合 MTF 为评价指标进行蒙特卡罗公差分析,表 3 给出了光学系统 300 次加工装调的模拟结果。虽然该成像光谱仪探测器的 Nyquist 频率较大,但是依旧有 50% 的光学系统在 118 lp/mm 处的综合 MTF 大于 0.23,经过仔细装调可以满足使用要求。

表 2 光学系统的系统公差

Tab. 2 Tolerance of optical system

Type	Tolerance term	Tolerance
Surface tolerances	x decentered tolerances/mm	0.01
	y decentered tolerances/mm	0.01
	x tilt tolerance/($^{\circ}$)	10
	y tilt tolerance/($^{\circ}$)	10
	Radius tolerance/fringe	2
	Irregularity tolerance/fringe	0.2
Element tolerances	x decentered tolerances/mm	0.01
	y decentered tolerances/mm	0.01
	x tilt tolerance/($^{\circ}$)	10
	y tilt tolerance/($^{\circ}$)	10
Index tolerances	Index	0.000 3
	Abbe/%	0.5

表 3 蒙特卡洛分析结果

Tab. 3 Results of Monte Carlo analysis

Monte Carlo probability/%	MTF value@118 lp/mm
90	0.15
80	0.17
50	0.23

3.4.2 杂散光分析

高光谱载荷的功能主要是对地成像,其杂散光主要来源为地面表面杂光,所以,其消杂光要求相对来讲并不是很高,但也要保证视场外地表杂散光不会通过透镜组入射到像平面上,导致系统成像质量和光谱准确性的降低。利用12万条光线对光学系统的杂散光情况进行追迹分析。来自不同视场的光线的杂散光点源透射比分析情况如表4所示,可见其视场外光线的点源透射率(Point Source Transmission, PST)很小,满足系统成像需求。其中,0和2.5°在有效视场范围内。

表4 各视场光线的PST数据

Tab. 4 PST data of rays in each field of view

Field of view/(°)	Total flux/W	PST
0	48.751	—
2.5	48.432	0.993 457
5	8.73×10^{-2}	0.001 791
7.5	1.99×10^{-2}	0.000 409
15	3.13×10^{-3}	6.43×10^{-5}
30	8.57×10^{-5}	1.76×10^{-6}
45	7.59×10^{-7}	1.56×10^{-8}
60	7.51×10^{-8}	1.54×10^{-9}
75	5.37×10^{-7}	1.10×10^{-8}
90	0	0

3.4.3 辐射防护

太空辐射会对镜片、成像光谱仪的电子器件等产生不可逆转的损害,因此在选择镜片时排除了不耐辐射的镧系玻璃,使用了辐射抗性较强的玻璃材料。探测器则采用成功在轨验证的航天级CMOS,并且系统关键的电子部件使用冗余设计和防辐射加固,最后在成像光谱仪外表面包裹一层防空间辐照性能优良的被动热控涂层,通过多种措施并举,能够有效降低太空辐射对该成像光谱仪的影响。

4 仿真与测试

高光谱成像光谱仪是典型的光谱探测系统,为保证光谱探测的准确性,要求高光谱成像光谱仪的各个通道具有较高的图像信噪比。

除了辐照度 M 、光学系统的通光口径 D 和空间目标的面积 S 外,空间目标反射的光信号在光学系统入瞳处的光能量 E_1 还与地物反射率、光学系统透过率等因素有关,如下^[12]:

$$E_1 = \frac{\rho M S_1 \cos \theta_1 \cos \theta_2 S \tau}{L^2}, \quad (8)$$

式中: S 为光学系统的入瞳面积, S_1 为空间目标的有效反射面积, θ_1 和 θ_2 分别为太阳光入射方向和光线出射方向与目标表面法线方向的夹角, ρ 为目标的反射率, L 为目标与探测系统的距离, τ 为光学系统的透过率。光学系统由9片光学玻璃和1片保护硅玻璃组成,镜组透过率约为75%。光学系统的透过率由镜组透过率和滤光片透过率共同决定,根据滤光片的实验测试结果,光学系统在各谱段的透过率情况如表5所示。

表5 光学系统在各谱段的透过率

Tab. 5 Transmittances of optical system in each spectrum

Spectral segment /nm	Transmittance of lens group/%	Transmittance of filter/%	Transmittance of optical system/%
400		35	26.25
500		52	39.00
600		62	46.50
700	75	68	51.00
800		74	55.50
900		79	59.25
1000		85	63.75

光学系统入瞳处的光能量影响着探测器的信号电子数,从而影响图片的信噪比,如式(9)所示^[13]:

$$\begin{cases} N_s = \frac{\eta \epsilon t E_1}{(hc/\lambda)n} \\ SNR = 20 \log \left(\frac{N_s}{\sqrt{N_s + N_b + N_d}} \right) \end{cases}, \quad (9)$$

式中: N_b 为探测器的读出噪声电子数, N_d 为暗电流产生的电子数, N_s 为信号的光生电子数, m 为数字域TDI积分级数, t 为曝光时间, η 为量子效率, n 为目标光斑在探测器上所占的像元数, ϵ 为像元的填充因子。

假设数字域TDI取了连续 m 行像元在不同时刻的灰度值,可近似相当于同一行像元读出了

m 次,探测器的读出噪声电子数、暗电流电子数和信号的光生电子数被同时放大 m 倍。因此, m 级数字域 TDI 的信噪比可以表示为:

$$SNR = 20 \log \left(\frac{\sqrt{m} \cdot N_s}{\sqrt{N_s + N_b + N_d}} \right). \quad (10)$$

在 500 km 轨道上,卫星相对于地面的速度约为 7.2 km/s,因此当空间分辨率为 10 m 时,可计算出成像光谱仪的曝光时间 t_0 约为 1.4 μ s。探测器使用长光辰芯公司的 GSENSE 5130,其量子效率、像元填充因子、噪声电子数和暗电流电子数均可由手册获得,其中每个谱段的光谱响应情况如图 10 所示。而滤光片采用本所自研的线性渐变滤光片,它在每个通道的通光范围则需通过实验测得。

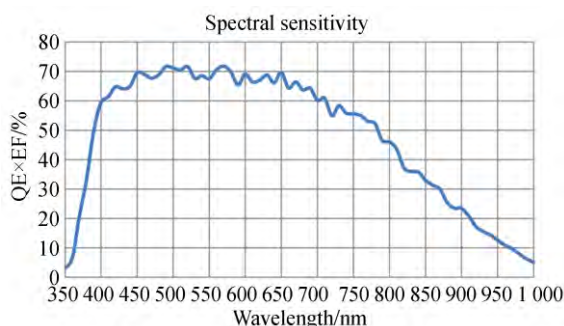


图 10 GSENSE 5130 的光谱响应曲线

Fig. 10 Spectral response characteristic curve of GSENSE 5130

利用单色仪和积分球测试了该高光谱成像光谱仪每一行像素对单色光的光谱响应情况,图 11 给出了探测器第 600 行、第 1 200 行、第 1 800 行和第 2 400 行像素的光谱响应曲线。由图 11 可知,探测器的每一行像素的光谱响应特性不同,可根据此特点确定每个波长的输出行。以 450 nm 波长为例,取对其响应最灵敏的探测器行像素作为 450 nm 波长的输出行,并根据该输出行的光谱响应曲线确定 450 nm 波长的半波宽度,即该波长的光谱分辨率。同理可求其他波长的光谱分辨率,去掉无效数据后将波长与光谱分辨率的对应关系绘制于图 12。

在图 12 中,有效数据起于 403 nm,止于 988 nm,因此该高光谱成像光谱仪的最终光谱范围为 403~988 nm。同时,从图中可以看出,该高光

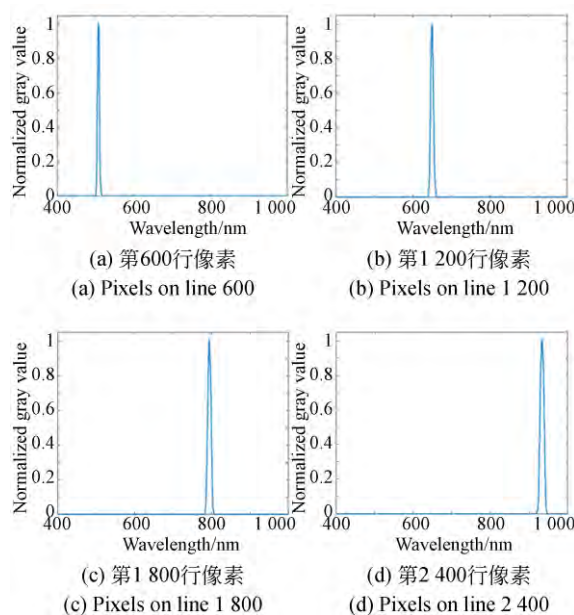


图 11 不同积分级数的光谱响应

Fig. 11 Spectral response of different integration series

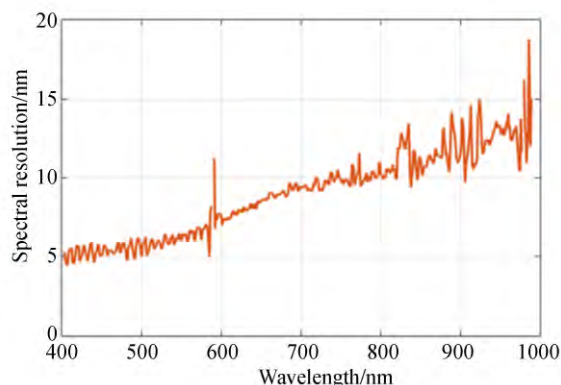


图 12 高光谱成像光谱仪的半波宽

Fig. 12 Half-bandwidth of hyperspectral imaging spectrometer

谱成像光谱仪的光谱分辨率随波长的增大呈波动上升态势,且光谱分辨率约为中心波长的 1.25%。

将实验测得的每个波长光谱分辨率情况代入式(9)和式(10)所示的信噪比数学模型,可求得在太阳高度角为 30°,地表反射率为 0.05 的光照条件下该成像光谱仪的信噪比情况,分析结果如表 6 所示。从表中可以看出,在不使用数字域 TDI 技术(积分级数为 1)时系统在 400 nm 和 1 000 nm 波长处的信噪比不足 20 dB,而使用数字域 TDI 后可以将信噪比提高到 25 dB 以上;在其他谱段处,滤光片的透过率和探测器的量子效

率都较高,通过选择合适的积分级数,该成像光谱仪均可获得信噪比大于 30 dB 的图像。

表 6 信噪比分析结果
Tab. 6 Results of signal-to-noise ratio analysis (dB)

Spectral segment /nm	Spectral resolution /nm	Integral stage			
		1	2	4	8
403	4.8	18.07	21.19	24.26	27.30
500	5.0	22.23	25.29	28.32	31.34
600	7.5	25.06	28.09	31.12	34.14
700	9.3	25.69	28.72	31.74	34.76
800	10.1	24.89	27.93	30.95	33.97
900	11.5	22.26	25.32	28.35	31.38
988	12.0	16.50	19.68	22.77	25.82

参与数字域 TDI 积分的几行像素所对应的中心波长会有差别,因此,在使用数字域 TDI 提高图像信噪比时可能会造成光谱的展宽。本文分析了几个典型谱段在 1~8 级积分时的光谱分辨率,1~8 级积分相对于 1 级积分的光谱分辨率变化如图 13 所示。

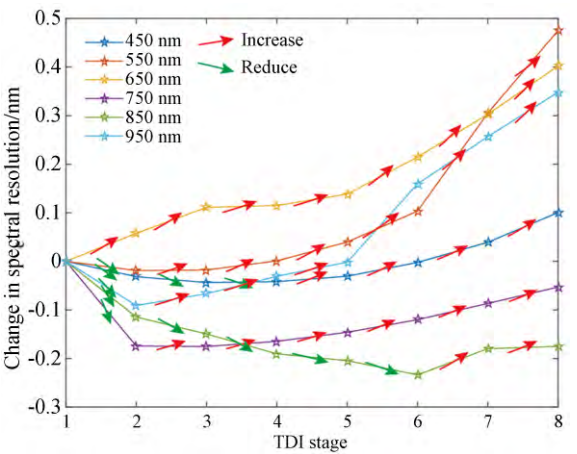


图 13 典型光谱在不同积分级数的光谱分辨率
Fig. 13 Spectral resolution of different integration series of typical spectra

从图 13 中可知,积分级数确实会对输出谱段的光谱分辨率产生影响,且随积分级数的增加,光谱分辨率多呈增大的趋势。但也应注意到,存在随积分级数的增加,光谱分辨率下降的情况,这可能和测量精度和数据拟合精度有关。但无

论如何,图中各波段的光谱分辨率的变动均在 0.5 nm 之内,说明在积分级数为 1~8 时,数字域 TDI 对光谱分辨率的影响微乎其微。因此,线性渐变滤光片结合数字域 TDI 可以解决小口径高光谱成像光谱仪的能量问题,提高其图像信噪比,并且该方案对光谱分辨率的影响较小,满足使用要求。

值得一提的是,受限于微小卫星的数据传输能力,该成像光谱仪选择了 32 个波长作为输出谱段。因此,在辐射定标和光谱定标时可以遍历每一个输出谱段和其所对应的数字域 TDI 情况,从而消除无效数据、光谱分辨率波动对光谱精度的影响。

最后,使用原理样机进行对地成像实验,验证其实际成像效果,相机在中心波长为 467,701,939 nm 处的实际成像结果如图 14 所示。从图中可以看出,各谱段成像质量良好,能满足实际应用需求。

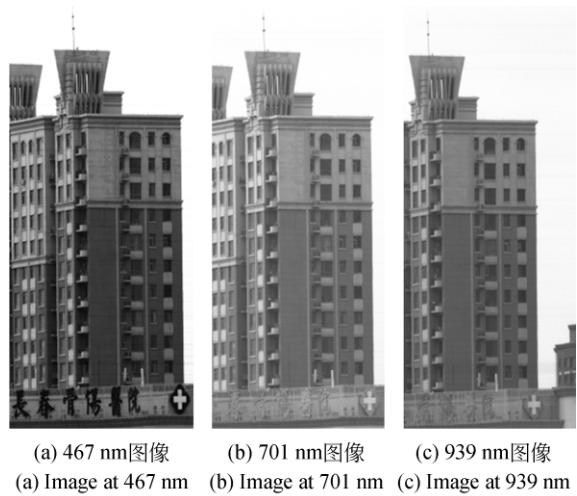


图 14 某些谱段的成像结果
Fig. 14 Imaging result in some spectral channels

5 结 论

本文分析了轻小型高光谱成像光谱仪难以实现较高地面分辨率的原因,并将线性渐变滤光片分光技术和数字域 TDI 技术相结合设计了一款轻小型高光谱成像光谱仪。给出了该成像光谱仪的设计过程,并通过仿真和实验分析了其分光效果和成像信噪比。最终,设计了一款波长为 403~988 nm、空间角分辨率为 0.021 mrad、光学

长度为 227 mm、光谱分辨率约为中心波长 1.25% 的轻小型高分辨率成像光谱仪。实验结果表明,8 级数字域 TDI 能大幅提升图像的信噪比,并且对光谱分辨率的影响不大。该成像光谱仪的成像质量良好,具有在 500 km 轨道上获

得平均光谱分辨率为 8.9 nm、地面分辨率为 10 m 的高光谱图像的能力,在不考虑大气吸收的情况下,其大部分通道的图像信噪比高于 30 dB,能满足微纳卫星成像光谱仪的实际应用需求。

参考文献:

- [1] 杨晋,张锐,潘明忠,等. 大孔径面视场 PG 成像光谱仪的光学设计[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 867-874.
YANG J, ZHANG R, PAN M ZH, *et al.*. Optical design of PG imaging spectrometer with large aperture and surface field [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 867-874. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] 曹佃生,石振华,林冠宇. 机载海洋改进型 Dyson 高光谱成像仪的研制[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1403-1409.
CAO D SH, SHI ZH H, LIN G Y. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(6): 1403-1409. (in Chinese)
- [4] TRANSON J, D'ANDRIMONT R, MAUGNARD A, *et al.*. Survey of current hyperspectral Earth observation applications from space and synergies with Sentinel-2 [C]. 2017 9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). June 27-29, 2017, Brugge. IEEE, 2017: 1-8.
- [5] 梅风华,李超,张玉鑫. 光谱成像技术在海域目标探测中的应用[J]. 中国光学, 2017, 10(6): 708-718.
MEI F H, LI CH, ZHANG Y X. Application of spectral imaging technology in maritime target detection[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 708-718. (in Chinese)
- [6] 陈伟,郑玉权,薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 15-21.
CHEN W, ZHENG Y Q, XUE Q SH. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 15-21. (in Chinese)
- [7] 张淳民,穆廷魁,颜廷昱,等. 高光谱遥感技术发展展望[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 104-114.
ZHANG CH M, MU T K, YAN T Y, *et al.*. Overview of hyperspectral remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 104-114. (in Chinese)
- [8] LEE J H, LEE C W, KIM Y M, *et al.*. Optomechanical design of a compact imaging spectrometer for a microsatellite STSAT3[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2009, 13(2): 193-200.
- [9] 冯蕾,魏立冬,杨雷,等. 双通道曲面棱镜高光谱成像系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0511002.
FENG L, WEI L D, YANG L, *et al.*. Design of double-channel hyperspectral imaging system based on curved prism[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0511002. (in Chinese)
- [10] 王保华,阮宁娟,郭崇岭,等. 机载轻小型高分辨率成像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1022001.
WANG B H, RUAN N J, GUO C L, *et al.*. Optical system design of airborne light and compact high resolution imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022001. (in Chinese)
- [11] 王颖,巩岩. 线性渐变滤光片型多光谱成像光谱仪设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(1): 013003.
WANG Y, GONG Y. Design of multispectral imaging spectrometer using linear variable filter[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(1): 013003. (in Chinese)
- [12] 张颖,牛燕雄,杨露,等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0111004.
ZHANG Y, NIU Y X, YANG L, *et al.*. Analysis and study on detection capability of satellite pho-

- toelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0111004. (in Chinese)
- [13] 卢栋, 张占月, 郝大功, 等. 天基可见光相机探测距离仿真分析[J]. 光机电信息, 2011, 28(10): 39-43.
- LU D, ZHANG ZH Y, HAO D G, *et al.*. Simulation and analysis of detection ability for space-based optical camera [J]. *OME Information*, 2011, 28(10): 39-43. (in Chinese)
- [14] 陈鹏, 罗露雯, 盛斌, 等. 线性渐变滤光片的制备方法研究[J]. 光学仪器, 2016, 38(4): 308-312.
- CHEN P, LUO L W, SHENG B, *et al.*. Study on fabrication method of linear variable filter [J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(4): 308-312. (in Chinese)
- [15] 陶淑苹, 金光, 曲宏松, 等. 采用卷帘数字域TDI技术的CMOS成像系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2380-2385.
- TAO SH P, JIN G, QU H S, *et al.*. Design of CMOS imaging system based on rolling TDI in digital domain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2380-2385. (in Chinese)
- [16] 张婉怡. 红外折衍混合摄远光学系统无热化设计[J]. 应用光学, 2017, 38(1): 12-18.
- ZHANG W Y. Athermalization design of infrared refractive-diffractive telephoto objective [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(1): 12-18. (in Chinese)
- [17] 于登群. 大视场航空测绘相机光学系统设计[D]. 西安: 西安光学精密机械研究所, 2013.
- YU D Q. *Optical System Design for Airborne Mapping Camera* [D]. Xi'an: Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

作者简介:



樊星皓(1995—),男,山东济南人,博士研究生,2017年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: xinghao. fan@fox-mail.com

通讯作者:



刘春雨(1982—),女,吉林长春人,研究员,2005年于吉林大学获得学士学位,2011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,主要从事光学系统设计、光电系统总体设计等方面的研究。E-mail: mmlucy@163.com