

温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响

张军强^{1,2} 颜昌翔¹ 蔺超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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为了研究温度对成像光谱仪谱线漂移的影响, 分析了谱线漂移与光谱成像系统各镜面刚体位移之间的关系, 建立了温度对成像光谱仪谱线漂移影响的理论模型, 通过软件仿真和热光学试验对理论模型进行了验证和修正。基于线性光学理论建立了镜面刚体位移对谱线漂移影响的数学模型, 使用蒙特卡罗法对理论模型进行了数值仿真验证; 采用有限元法求解了温度载荷下各镜面的刚体位移, 在 Matlab 软件环境下利用 Code V 的 API 函数对变形后的光学系统进行了光线追迹, 求解了镜面刚体位移导致的谱线位置变化, 研究了成像光谱仪的谱线漂移特性, 得到了温度载荷作用下的谱线漂移模型; 通过热光学试验对理论模型进行了验证和修正。结果表明, 在 8 °C ~ 28 °C 范围内, 谱线在光谱方向仅发生整体平移, 没拉伸或压缩效应; 基于线弹性理论和线性光学模型建立的理论模型与试验结果吻合较好, 最大偏差不超过 12%, 修正后的谱线漂移模型相对误差小于 5%, 绝对精度优于 0.2 pixel。

关键词 遥感; 谱线漂移; 仿真分析; 热光学试验; 成像光谱仪

中图分类号 TH73; O433.4; TP391.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0528001

Thermal Effect on Spectral-Line Shift of Spaceborne Imaging Spectrometer

Zhang Junqiang^{1,2} Yan Changxiang¹ Lin Chao¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To study the thermal effect on spectral-line shift of spaceborne imaging spectrometer, the relation between spectral-line shift and rigid-body motion of the mirror is analyzed, and the theoretical model, which is verified and corrected by simulation and thermal-optical test, is established to describe the spectral-line shift property. The mathematical model based on linear optics model is established to describe the relation between spectral-line shift and rigid-body motion of the mirror, and the Mont Carlo method is employed to do the verification. The finite element analysis (FEA) method is used to get the rigid-body motion of mirror under different thermal loads. Code V API functions are used, in Matlab environment, to calculate the variation of the spectral line caused by rigid-body motions, and the spectral-line shift property is studied at the same time. The spectral-line shift model is corrected and verified by thermal-optical test. The results show that spectral-line integral deviation without extension and compression under the temperature from 8 °C to 28 °C. Spectral-line shift values obtained by the thermal optical test are well coincident with the ones calculated by theoretical model. The maximum deviation between theoretical analysis and thermal optical test is not exceeding 12%. The new spectral-line shift model, corrected by the test data, realizes a high precision spectral line shift forecasting. The relative error is less than 5% and the absolute accuracy is better than 0.2 pixel.

Key words remote sensing; spectral-line shift; simulation analysis; thermal optical experiment; imaging spectrometer

OCIS codes 280.6780; 300.6430; 120.0280; 120.6200

收稿日期: 2011-11-01; **收到修改稿日期**: 2011-12-18

基金项目: 国防预研基金(O5001SA050)和国家 863 计划(2011AA12A103)资助课题。

作者简介: 张军强(1981—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事空间光学遥感仪器研制、光机系统整体性能评价等方面的研究。E-mail: zjq1981_81@163.com

导师简介: 颜昌翔(1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp.ac.cn

1 引 言

星载成像光谱仪是同时获取地物图像和光谱信息的新一代光学遥感仪器^[1,2],能够实现窄带谱段带宽、波长相邻的超多谱段通道连续采样,可以对地面物体进行精细识别和分类,做到对地球表面固体和液体物质的成分分析和理化生物性能诊断^[3]。成像光谱仪将传统的二维遥感信息扩展到三维,在军事、资源调查与环境监测等许多领域有重要的应用前景^[4]。

成像光谱仪的应用以量化的数据为基础,除了需要获取清晰的图像外,还需要遥感数据具有足够的光谱和辐射测量精度,而光谱测量精度直接影响辐射测量的精度^[5]。温度变化是导致成像光谱仪 CCD 光敏面上产生谱线移动的主要原因^[6],当前在轨运行的多台成像光谱仪除了 MODIS^[7]采用单色仪作为星上光谱定标装置外,其他成像光谱仪的星上光谱定标都是利用波长已知的特征谱线作为参考^[8~14],通过数据处理确定在轨工作时成像光谱仪的谱线位置相对于实验室光谱定标结果的变化量^[15],然后通过平移实验室内测定的中心波长矩阵表得到在轨工作的中心波长矩阵表。成像光谱仪 CCD 光敏面上谱线在光谱方向仅发生整体平移,没拉伸或压缩是以特征谱线作为参考实现星上光谱定标的前提和基础,但除了文献^[6]对成像光谱仪的温度漂移特性进行了一定的实验研究外,尚无关于这方面理论研究的报道。

本文分析了温度对成像光谱仪谱线漂移影响的根本原因,基于线性光学理论建立了镜面刚体位移对谱线漂移影响的数学模型,研究了刚体位移所致成像光谱仪的谱线漂移特性,得到了温度载荷作用下的谱线漂移模型,并通过热光学试验进行了验证,还对以特征谱线作为参考实现成像光谱仪星上光谱定标的正确性和可行性进行了论述。

2 温度对成像光谱仪谱线漂移的影响

成像光谱仪搭载于航天器上,处于真空的空间环境,仪器的热状态受到多种外热流的复合耦合作用,所处的热环境十分恶劣^[16]。虽然合理的热设计已能保证仪器的温度水平和温度分布维持在一定的范围内,满足光学元件及光机结构尺寸稳定性的要求^[17,18],但温度变化导致的谱线漂移仍然严重影响着成像光谱仪的光谱测量精度^[6]。图 1 为成像光谱仪光谱成像系统的结构原理图。

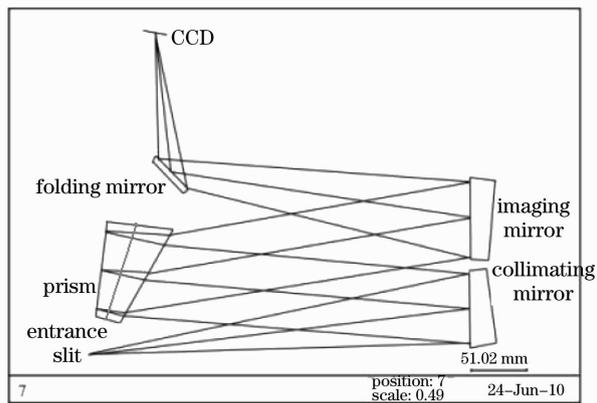


图 1 光谱成像系统结构图

Fig. 1 Structure of spectral imaging system

温度变化对谱线漂移的影响主要表现在其对光机结构稳定性的影响上。由于结构材料选用的是膨胀系数较大的铝合金,温度变化将使光谱成像系统的各光学元件产生面形变化和刚体位移,几纳米至几十纳米的镜面面形变化导致的谱线漂移可以忽略^[19],影响谱线漂移的主要原因是镜面的刚体位移。

此外,由于温度变化导致光谱成像系统产生的离焦量需要通过前后移动的调焦反射镜补偿,保证系统获得清晰的光谱图像,调焦镜移动将导致成像光谱仪 CCD 光敏面上产生显著的谱线漂移。

综上所述,导致成像光谱仪发生谱线漂移的主要原因是温度变化引起的光谱成像系统各光学元件的刚体位移,要研究温度对谱线漂移的影响,考查仪器在不同温度下的谱线漂移量,就必须从理论上研究镜面刚体位移对谱线漂移的影响,这将有助于深入了解成像光谱仪的温度谱线漂移特性。

3 谱线漂移模型

3.1 刚体位移对谱线漂移影响的理论模型

成像光谱仪属于小像差光学系统,由于温度变化导致结构变形引起的镜面面形变化和刚体位移都较小^[19],系统性能接近线性系统,光学系统可以用线性光学模型描述,计算精度可以满足性能评价要求^[20,21]。

成像光谱仪 CCD 光敏面上的谱线漂移量用线性光学模型可表示为

$$\delta = \sum_{i,j} s_{i,j} \Delta u_{i,j} + O(2), \quad (1)$$

式中 $s_{i,j}$ 为第 i 镜面、第 j 个自由度刚体位移的谱线

漂移灵敏度系数; $\Delta u_{i,j}$ 为由于温度引起的第 i 镜面第 j 自由度的刚体位移; $O(2)$ 为二价和高阶项,对于理想线性系统可以忽略,实际工程应用中用来表示由于材料、边界条件^[22]等引起的系统非线性,表现为理论模型与试验实测数据的误差。

基于线性光学建立的谱线漂移模型的前提是假设刚体位移对谱线漂移的影响相互独立,且具有代数可加性,即每个镜面不同自由度对成像光谱仪焦面谱线漂移量的影响是相互独立的,总体漂移量的大小等于各自由度独立作用时产生谱线漂移量的代数和。为了验证这一假设,用蒙特卡罗法进行数值模拟,步骤如下:

1) 生成表示第 i 镜面、第 j 个自由度刚体位移的伪随机数序列 $u_{i,j}^k, k = 1, 2, \dots, n$ (n 为计算采样数, $n = 100$);

2) 在 Matlab 软件环境下利用 Code V 的 API 函数对光谱成像系统进行光线追迹,计算每个刚体位移独立作用时成像光谱仪 CCD 光敏面上的谱线漂移 $\delta_x(i,j)$ 、 $\delta_y(i,j)$ 以及全部刚体位移共同作用时成像光谱仪 CCD 光敏面上的谱线漂移 δ_x 、 δ_y ;

3) 对每个刚体位移独立作用下的谱线漂移量求和 δ' ,比较 δ' 与全部刚体位移共同作用时谱线漂移量 δ 的差值 Δ ,结果如图 2 所示。

$$\Delta_x = \delta'_x - \delta_x = \sum_{i,j} \delta_x(i,j) - \delta_x, \quad (2)$$

$$\Delta_y = \delta'_y - \delta_y = \sum_{i,j} \delta_y(i,j) - \delta_y. \quad (3)$$

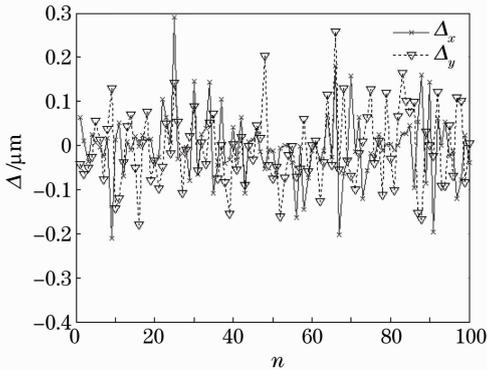


图 2 数学模型理论误差

Fig. 2 Theoretical error of mathematical model

仿真结果表明,在小量级干扰下,镜面刚体位移对谱线漂移的影响是相互独立的,谱线漂移量是各个刚体位移引起谱线漂移量的代数和,极限误差小于 0.01 pixel,(1)式描述的谱线漂移与镜面刚体位移的数学模型是合理的。

3.2 温度载荷作用下谱线漂移的特性

为了研究温度载荷作用下谱线漂移的特性,需要对光机系统进行热光学分析^[23],采用 MSC. PATRAN&MSC. NASTRAN 软件计算了光机系统在 10 °C 温升载荷下各镜面的变形,使用最小二乘法和坐标变换法求解了镜面局部坐标系下的刚体位移^[24]。在 Matlab 软件环境下利用 Code V 的 API 函数对变形后的光学系统进行了光线追迹,求解了镜面刚体位移导致光谱成像系统 CCD 光敏面上的谱线位置变化。比较表 1、表 2 数据,可知:

1) 空间方向:同一视场(FOV)、不同波长间的谱线漂移量相等,极差值约为 0.7 μm,相当于 0.04 pixel;同一波长、不同视场间的谱线漂移量不相等,极差值约为 3.3 μm,相当于 0.2 pixel;不同视场、不同波长间的谱线漂移量不相等,极差值约为 3.9 μm,相当于 0.2 pixel。所以,温度载荷作用下不同视场间的谱线位置在空间方向发生整体平移的同时有一定的拉伸(温降)和压缩(温升)。

2) 光谱方向:同一视场、不同波长间的谱线漂移量相等,极差值约为 0.6 μm,相当于 0.02 pixel;同一波长、不同视场间的谱线漂移量相等,极差值约为 0.3 μm,相当于 0.01 pixel;不同视场、不同波长间的谱线漂移量相等,极差值约为 0.8 μm,相当于 0.02 pixel。所以,温度载荷作用下谱线位置在光谱方向发生整体平移,没拉伸和压缩。

由于光谱仪采用复合棱镜对色散非线性和谱线弯曲进行了校正,全谱段的平均谱线弯曲跨度基本在两个光谱探测像元以内^[6],所以全视场、全谱段内空间方向相邻像元中心波长差异远小于 1/10 光谱带宽,且同一视场、不同波长在空间方向的谱线漂移量相等,所以,空间方向的谱线平移、拉伸和压缩对光谱方向谱线漂移的影响可以忽略。

综上所述,在温度载荷作用下,成像光谱仪 CCD 光敏面上谱线在光谱方向仅发生整体平移,没拉伸或压缩效应,在空间方向虽然会发生整体平移、拉伸(温降)或压缩(温升),但其不影响光谱方向的谱线漂移量。

因此,在星上光谱定标过程中,可以以少数已知特征谱线作为参考,确定在轨工作时光谱仪每个视场的谱线位置相对于实验室光谱定标结果的变化量,然后利用实验室内测定的中心波长矩阵表得到工作状态的精确中心波长矩阵表。

表 1 10 °C 温升作用下,空间方向的谱线漂移量

Table 1 Spectral-line shift in spatial direction with 10 °C thermal load

Spectral shift / μm	FOV / $^{\circ}\text{C}$															Max / μm	
	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7		
1000	-35.15	-34.92	-34.68	-34.44	-34.21	-33.97	-33.74	-33.51	-33.28	-33.04	-32.81	-32.58	-32.35	-32.12	-31.90	3.26	
940	-35.18	-34.94	-34.70	-34.47	-34.23	-34.00	-33.76	-33.53	-33.30	-33.07	-32.84	-32.61	-32.38	-32.15	-31.92	3.26	
880	-35.20	-34.96	-34.73	-34.49	-34.26	-34.02	-33.79	-33.56	-33.32	-33.09	-32.86	-32.63	-32.40	-32.17	-31.95	3.26	
820	-35.23	-34.99	-34.76	-34.52	-34.29	-34.05	-33.82	-33.58	-33.35	-33.12	-32.89	-32.66	-32.43	-32.20	-31.97	3.26	
760	-35.26	-35.03	-34.79	-34.55	-34.32	-34.08	-33.85	-33.62	-33.39	-33.15	-32.92	-32.69	-32.46	-32.24	-32.01	3.26	
λ /nm	700	-35.30	-35.07	-34.83	-34.59	-34.36	-34.12	-33.89	-33.66	-33.43	-33.19	-32.96	-32.73	-32.50	-32.28	-32.05	3.26
	640	-35.35	-35.12	-34.88	-34.64	-34.41	-34.17	-33.94	-33.71	-33.47	-33.24	-33.01	-32.78	-32.55	-32.33	-32.10	3.25
	580	-35.42	-35.18	-34.94	-34.71	-34.47	-34.24	-34.00	-33.77	-33.54	-33.31	-33.08	-32.85	-32.62	-32.39	-32.16	3.25
	520	-35.50	-35.27	-35.03	-34.79	-34.56	-34.32	-34.09	-33.86	-33.63	-33.39	-33.16	-32.93	-32.70	-32.48	-32.25	3.25
	460	-35.63	-35.39	-35.15	-34.92	-34.68	-34.45	-34.21	-33.98	-33.75	-33.52	-33.29	-33.06	-32.83	-32.60	-32.37	3.25
	400	-35.81	-35.58	-35.34	-35.11	-34.87	-34.64	-34.40	-34.17	-33.94	-33.71	-33.48	-33.25	-33.02	-32.79	-32.57	3.25
Max / μm	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	3.91

表 2 10 °C 温升作用下,光谱方向的谱线漂移量

Table 2 Spectral-line shift in spectral direction with 10 °C thermal load

Spectral shift / μm	FOV / $^{\circ}\text{C}$															Max / μm	
	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7		
1000	18.19	18.21	18.23	18.25	18.27	18.29	18.31	18.33	18.34	18.36	18.38	18.40	18.41	18.43	18.44	0.25	
940	18.21	18.23	18.25	18.27	18.29	18.31	18.33	18.35	18.37	18.39	18.40	18.42	18.44	18.45	18.47	0.25	
880	18.24	18.26	18.28	18.30	18.32	18.34	18.36	18.38	18.39	18.41	18.43	18.44	18.46	18.48	18.49	0.26	
820	18.26	18.29	18.31	18.33	18.35	18.37	18.38	18.40	18.42	18.44	18.46	18.47	18.49	18.51	18.52	0.26	
760	18.30	18.32	18.34	18.36	18.38	18.40	18.42	18.43	18.45	18.47	18.49	18.50	18.52	18.54	18.55	0.26	
λ /nm	700	18.33	18.35	18.37	18.39	18.41	18.43	18.45	18.47	18.49	18.51	18.52	18.54	18.56	18.57	18.59	0.26
	640	18.37	18.40	18.42	18.44	18.46	18.48	18.50	18.52	18.53	18.55	18.57	18.59	18.60	18.62	18.64	0.26
	580	18.43	18.45	18.47	18.49	18.51	18.53	18.55	18.57	18.59	18.61	18.62	18.64	18.66	18.68	18.69	0.26
	520	18.50	18.52	18.54	18.56	18.59	18.61	18.62	18.64	18.66	18.68	18.70	18.72	18.73	18.75	18.77	0.27
	460	18.60	18.62	18.64	18.66	18.69	18.71	18.73	18.74	18.76	18.78	18.80	18.82	18.84	18.85	18.87	0.27
	400	18.75	18.77	18.79	18.81	18.83	18.85	18.87	18.89	18.91	18.93	18.95	18.97	18.98	19.00	19.02	0.27
Max / μm	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.58	0.84	

3.3 温度载荷作用下的谱线漂移模型

由于在温度载荷作用下成像光谱仪 CCD 光敏面上谱线在光谱方向仅发生整体平移,没有拉伸或压缩效应,选取中心视场数据求解了(1)式中各镜面 6 个自由度的谱线漂移灵敏度系数,如表 3、4 所示。由表 4 可知,当调焦镜沿 z 轴平移做温度补偿运动时,成像光谱仪 CCD 光敏面上的谱线将在光谱方向产生显著的谱线漂移。

采用 MSC. PATRAN 和 MSC. NASTRAN 对光谱成像系统进行热弹性分析,求解典型温度条件下各镜面的刚体位移,根据(1)式计算各温度点对应的谱线漂移量,将谱线漂移量进行以温度为变量的曲线拟合,即可求解温度载荷作用下的谱线漂移模型。

温度载荷不大于 10 K 时,温度水平变化和调焦导致的谱线漂移量为

$$\delta(\Delta T, \Delta N) = 4.98\Delta T - 0.0605\Delta N, \quad (4)$$

式中 $\delta(\Delta T)$ 为温度载荷引起的谱线漂移量; ΔT 为温度变化量; ΔN 为调焦码值变化量(十进制数)。

本文采用成像光谱仪 CCD 光敏面上谱线的几何位置变化量描述谱线漂移,谱线漂移量与温度调焦码值成线性关系。而文献[6, 15]中用中心波长的变化量描述谱线漂移量,但棱镜色散型成像光谱仪的色散具有一定的非线性,所以得到谱线漂移量与温度变化量并不成线性关系的结论。此外,温度调焦系数的非线性也是重要的影响因素之一。

在实验室光谱定标中测定的中心波长矩阵表记录了成像光谱仪 CCD 每个像元对应的中心波长,所以本文以谱线的几何位置变化量为单位描述谱线漂移量更有利于实验室标定中心波长矩阵表的在轨修正,也更能揭示温度对成像光谱仪谱线漂移影响的本质,而不受棱镜色散和调焦的影响。

表 3 空间方向谱线漂移灵敏度系数

Table 3 Sensitivity coefficient of spectral-line shift caused by rigid-body motion in spatial direction

Composition of spectrometer	Sensitivity of different freedoms					
	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$	$S_{i,3}$	$S_{i,4}$	$S_{i,5}$	$S_{i,6}$
Collimating mirror	0.9281	0.0000	0.0000	0.0000	3.4536	0.0000
Prism 1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.5222	0.0000
Prism 2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.6665	0.0000
Prism 3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	-5.3926	0.0000
Imaging mirror	1.0777	0.0000	0.0000	-0.0001	3.9121	0.0000
Folding mirror	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	-0.7823	0.0000
Focal plane	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0084

表 4 光谱方向谱线漂移灵敏度系数

Table 4 Sensitivity coefficient of spectral-line shift caused by rigid-body motion in spectral direction

Composition of spectrometer	Sensitivity of different freedoms					
	$S_{i,1}$	$S_{i,2}$	$S_{i,3}$	$S_{i,4}$	$S_{i,5}$	$S_{i,6}$
Collimating mirror	0.0000	1.0244	0.0200	-3.8915	0.0000	0.0000
Prism 1	0.0000	0.0000	-0.0167	-3.2398	0.0001	0.0000
Prism 2	0.0000	0.0000	0.0029	0.9217	0.0000	0.0000
Prism 3	0.0000	0.0000	-0.0165	6.2940	-0.0001	0.0000
Imaging mirror	0.0000	1.1378	-0.0454	-4.1540	0.0000	0.0000
Folding mirror	0.0000	0.0000	1.5893	1.2484	-0.0003	0.0000
Focal plane	0.0000	-1.0000	-0.2765	0.0023	0.0000	0.0001

4 实 验

为了考查成像光谱仪在不同温度状态下的谱线漂移量,进行了热光学实验^[15],以验证理论模型的正确性,并通过试验数据对理论模型进行修正。

本次实验在成像光谱仪的工作温度范围内,设

置了 8 °C、12 °C、16 °C、20 °C、24 °C、28 °C 共 6 种工况,利用成像光谱仪内置的星上定标(以钨镱玻璃特征光谱为参考)完成不同工况下的谱线漂移量检测,单色仪系统主要完成星上定标吸收峰处中心波长的校准和异常数据校验,图 3 为热光学试验示意图。

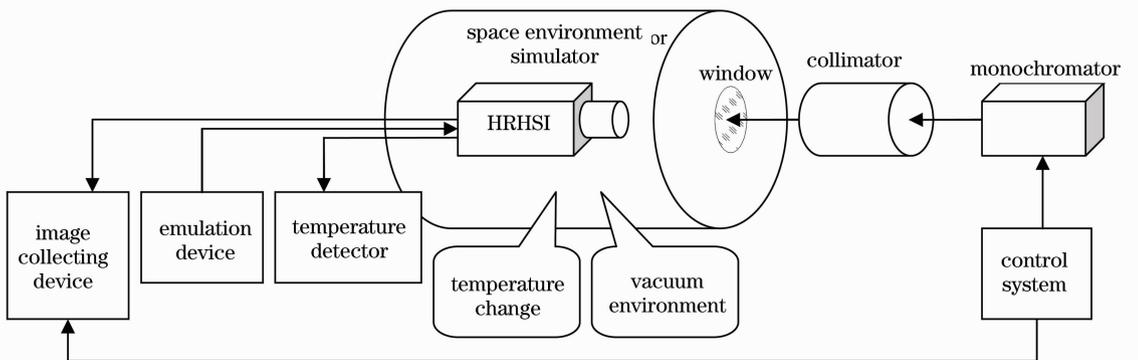


图 3 成像光谱仪热光学试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of thermal optical test for imaging spectrometer

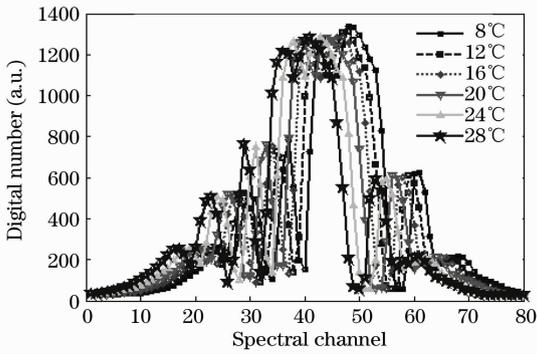


图 4 星上定标参考谱线随温度变化漂移结果

Fig. 4 Reference spectral-line of onboard spectral calibration shift with temperature

图 4 为中心视场星上定标参考谱线(CCD 响应值)随温度变化漂移结果,表 5 列出了不同温度下参考谱线吸收峰之间的间距(选取 879.4, 808, 741.6, 684.6,

528.7 nm 处的吸收峰作为参考),表 6 为不同温度下参考谱线相对 8 °C 时的漂移量。

由表 5 可知,在 8 °C~28 °C 范围内,钕谱玻璃特征波长吸收峰间的间距随温度变化的极值在 0.25 pixel,吸收峰间每个像元平均偏差小于 0.05 pixel。所以,可以认为谱线在光谱方向仅发生整体平移,没拉伸或压缩效应。

由表 6 可知,热光学试验中谱线漂移量实测值与模型计算值吻合较好,验证了理论模型的正确性。误差主要来源于有限元分析精度、温度测量精度和试验的外部干扰^[25]。

(5)式为使用试验数据修正后的谱线漂移模型,修正后的谱线漂移量相对误差小于 5%,绝对精度优于 0.2 pixel,如表 7 所示。

$$\delta(\Delta T, \Delta N) = 5.92\Delta T - 0.0605\Delta N. \quad (5)$$

表 5 不同温度下参考谱线吸收峰间的间距

Table 5 Space between the absorption peak of the reference spectral line in different conditions

$t / ^\circ\text{C}$	Space between different reference spectral lines / pixel				Folding-mirror position
	Δ_{1-2}	Δ_{2-3}	Δ_{3-4}	Δ_{4-5}	N
8	7.04	5.99	6.23	18.35	6AA5
12	7.11	5.86	6.14	18.56	6FA3
16	7.07	6.03	6.19	18.39	74A3
20	7.19	6.02	6.00	18.56	7915
24	7.00	5.93	6.27	18.35	7EA1
28	7.11	5.81	6.15	18.55	83A0
Mean	7.09	5.94	6.16	18.46	—
Standard	0.07	0.09	0.09	0.11	—
Extreme difference	0.19	0.22	0.27	0.21	—
Average deviation of each pixel	0.03	0.04	0.04	0.01	—

表 6 不同工况下参考谱线的相对漂移量

Table 6 Relative shift of reference spectral line in different conditions

$\Delta t / ^\circ\text{C}$	Spectral line shift / μm		Relative error / %	Absolute error / pixel
	Measured value	Calculated value		
4	-53.3	-57.4	7.6	0.11
8	-105.8	-114.9	11.9	0.34
12	-154.6	-163.8	6.0	0.26
16	-208.9	-229.8	10.0	0.58
20	-270.6	-287.3	6.2	0.46

表 7 修正后谱线漂移模型的预测精度

Table 7 Predicted precision of the corrected spectral-line shift model

Temperature changes $\Delta t / ^\circ\text{C}$	Folding-mirror position changes ΔN	Spectral-line shift / μm		Forecasting error	
		Measured value	Calculated value with corrected model	Relative error / %	Absolute error / pixel
4	1278	-53.3	-53.6	0.6	0.01
8	2558	-105.8	-107.4	4.6	0.13
12	3696	-154.6	-152.6	1.3	0.06
16	5116	-208.9	-214.8	2.8	0.16
20	6395	-270.6	-268.5	0.8	0.06

5 结 论

分析了温度对成像光谱仪谱线漂移的影响,研究了温度载荷作用下仪器的谱线漂移特性,论述了以特征谱线作为参考实现成像光谱仪星上光谱定标的正确性和可行性,推导了谱线漂移量预测的理论模型,并通过热光学试验验证了理论模型的正确性。结果表明:

1) 在 8 °C ~ 28 °C 温度范围内,成像光谱仪 CCD 光敏面上谱线在光谱方向仅发生整体平移,没拉伸或压缩效应,以特征谱线作为参考实现成像光谱仪星上光谱定标的方法是正确的和可行的;

2) 基于线弹性理论和线性光学模型建立的理论模型与试验结果吻合较好,最大偏差不超过 12%;修正后的谱线漂移模型相对误差小于 5%,绝对精度优于 0.2 pixel。

参 考 文 献

- 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
- 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
- Jiang Jingshan. *Space Science and Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2001
- 姜景山. *空间科学与应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2001
- Yu Bingxi. Research of high resolution imaging spectrometer[J]. *One Information*, 2000, **17**(4): 1~5
- 禹秉熙. 高分辨率成像光谱仪(C-HRIS)研究[J]. *光机电信息*, 2000, **17**(4): 1~5
- Li Xiaohui, Yan Changxiang. Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(4): 309~315
- 李晓晖, 颜昌翔. 成像光谱仪星上定标技术[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(4): 309~315
- Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyperspectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(11): 2348~2354
- 郑玉权. 超光谱成像仪的精细光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(11): 2348~2354
- X. Xiong, K. Ching, J. Esposito *et al.*. MODIS on-orbit calibration and characterization[J]. *Metrologia*, 2003, **40**(1): 89~92
- G. Immermann, A. Neumann, H. Siimnich *et al.*. MOS/PRIROD-an imaging VIS/NIR spectrometer for ocean remote sensing[C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 201~206
- F. Blechinger, D. E. Charlton, R. Davancens *et al.*. High resolution imaging spectrometer "HRIS" optics, focal plane and calibration[C]. *SPIE*, 1993, **1937**: 207~224
- P. S. Barry, J. Shepanski, C. Segal. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system[C]. *SPIE*, 2002, **4480**: 231~235
- H. Werij, B. Kruizinga, C. Olij *et al.*. Calibration aspects of remote sensing spaceborne spectrometers [C]. *SPIE*, 1996, **2820**: 126~137
- M. A. Cutter, D. R. Lobb, T. L. Williams *et al.*. Integration & testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 180~191
- S. Delwart, J. P. Huot, L. Bourg. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT[C]. *SPIE*, 2003, **4881**: 337~344
- M. Folkman, J. Pearlman, L. Liao *et al.*. EO-1/hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration [C]. *SPIE*, 2001, **4151**: 40~51
- Zhang Junqiang, Shao Jianbin, Yan Changxiang. Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2011, **4**(2): 175~181
- 张军强, 邵建兵, 颜昌翔. 成像光谱仪星上光谱定标的数据处理[J]. *中国光学*, 2011, **4**(2): 175~181
- Lu e, Yan Changxiang, Wu Qingwen *et al.*. Research on adaptability of optical remote sensors in mechanical and space thermal environments [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(5): 364~376
- 卢 镒, 颜昌翔, 吴清文等. 空间光学传感器环境适应性设计与实验研究[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(5): 364~376
- Gong Dun, Wang Hong, Tian Tiejun. Temperature effect on imaging performance of three-line CCD satellite camera and temperature indicators affirmed[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2017~2021
- 巩 盾, 王 红, 田铁印. 温度对星载相机的影响和温控指标的制定[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2017~2021
- Guo Liang, Wu Qingwen, Yan Changxiang. Thermal design of space spectral imaging apparatus and its analysis and verification[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1272~1280
- 郭 亮, 吴清文, 颜昌翔. 空间光谱成像仪热设计及其分析与验证[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6): 1272~1280
- Zhang Junqiang, Dong Deyi, Wu Qingwen *et al.*. Primary support space high resolution imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(10): 2450~2455
- 张军强, 董得义, 吴清文等. 空间成像光谱仪的主体支撑方式[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(10): 2450~2455
- G. Stoeckel, D. Crompton, G. Perron. Advancements in integrated structural/thermal/optical (STOP) analysis of optical systems [C]. *SPIE*, 2007, **6675**: 66750D
- J. M. Howard. Optical modeling activities for the james webb space telescope (JWST) project: I. the linear optical model [C]. *SPIE*, 2004, **5178**: 82~88
- Chen Changzheng, Xin Hongwei, Lu Qingtao *et al.*. Reflector subassembly engineering analysis based on combined nonlinear and linear method [J]. *Computer Simulation*, 2008, **25**(3): 323~326
- 陈长征, 辛宏伟, 吕清涛等. 某反射镜组件的线性与非线性工程分析[J]. *计算机仿真*, 2008, **25**(3): 323~326
- Li Ming, Wu Qingwen, Yu Fei. Optimization of optical window glass thickness based on the thermal optical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 210~213
- 黎 明, 吴清文, 余 飞. 基于热光学分析的光学窗口玻璃厚度的优化[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 210~213
- Zhang Junqiang, Dong Deyi, Wu Qingwen *et al.*. Treatment of surface figure error and rigid body motion for mirror/lens in optical remote sensor [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2011, **32**(supplement): 242~247
- 张军强, 董得义, 吴清文等. 光学遥感器镜面面形误差及刚体位移处理方法[J]. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(增刊): 242~247
- Gong Dun. The Thermal Effect on Image Quality of the Remote Sensor Optical System [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2010
- 巩 盾. 温度对遥感器光学系统成像质量的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010