

棱镜色散成像光谱仪的谱线漂移特性

张军强^{1,2}, 颜昌翔¹, 郑玉权¹, 吴清文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 为了研究棱镜色散成像光谱仪的谱线漂移特性, 介绍了成像光谱仪谱线漂移的影响因素及机理, 基于线性光学模型建立了描述谱线漂移特性的数学模型。在 Matlab 环境下利用 Code V 的 API 函数对系统进行了光线追迹, 验证了数学模型的正确性, 分析了谱线漂移的灵敏度系数。结果表明: 工作环境变化引起的镜面刚体位移是导致成像光谱仪谱线漂移的主要原因; 在偏心不大于 0.2 mm、倾斜不大于 0.02° 的小量级干扰下, 不同波长、不同视场位置的谱线漂移量相等, 误差小于 0.1 个像元; 镜面刚体位移对谱线的影响是线性的、相互独立的, 谱线漂移量是各刚体位移引起谱线漂移量的代数和。基于线性光学模型建立的谱线漂移模型可用于描述成像光谱仪的谱线漂移特性, 对光谱定标、复杂工况下的光谱特性分析和预测具有指导意义。

关键词 成像光谱仪; 谱线漂移; 灵敏度; 棱镜色散

中图分类号: TH731; O433.4 文献标识码: A

DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)12-3429-05

引言

成像光谱仪是在多光谱成像遥感仪器的基础上, 从 20 世纪 80 年代初发展起来的先进的新一代光学遥感仪器^[1], 它显著地提高了遥感技术探测地球表面特征和物体性质的能力, 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^[2]。

当成像光谱仪的工作环境(温度、重力、真空度等)或状态(调焦等)发生变化时, 在光谱仪 CCD 光敏面上会产生谱线漂移, 谱线漂移导致的光谱标定误差是系统性误差, 直接影响每个谱段辐射测量的不确定度, 导致地物反射光谱数据反演精度的降低, 这在大气吸收峰附近表现得最为显著^[3,4]。因此, 在成像光谱仪发射前和在轨运行过程中都要监视各光谱通道的中心波长和带宽变化情况, 以保证光谱定标的精度^[5,6]。

当前, 国内外一般用星上光谱定标修正成像光谱仪的谱线漂移。但是, 除了美国的 MODIS^[7] (moderate resolution imaging spectrometer)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, 校准成像光谱仪在轨期间各光谱通道的中心波

长^[8-15]。所以, 在星上光谱定标过程中, 只能以已知的特征谱线作为参考, 通过数据处理确定在轨工作时成像光谱仪的特征谱线位置相对于实验室光谱定标结果的变化量^[16], 并不能确定每个光谱通道的光谱偏移特性。

当前, 国内对成像光谱仪狭缝、棱镜等关键光学元件的热光学特性已有一定研究^[17], 这对研究成像光谱仪的光谱特性具有重要意义, 但对成像光谱仪谱线漂移特性的研究报道较少, 文献^[18]对成像光谱仪的温度漂移特性进行了一定的实验研究; 国外对成像光谱仪谱线漂移的研究也都集中在实验室光谱定标和星上定标的数据处理方面^[19,20], 一些学者对光谱仪的探测器温度效应、光谱定标的时间灵敏度等进行了探讨^[21-23], 尚无对成像光谱仪的谱线漂移特性进行系统的研究。

本文介绍了引起成像光谱仪谱线漂移的主要因素, 将多种因素对成像光谱仪光谱漂移的影响归纳为其对光谱成像系统镜面刚体位移的影响, 并分析了谱线漂移对镜面刚体位移的灵敏度, 建立了描述成像光谱仪谱线漂移特性的数学模型, 得到了小量级干扰下刚体位移对谱线漂移影响的独立性、线性和代数可加性三个重要特性, 这对指导光谱定标以及分析、预测成像光谱仪复杂工况下的谱线漂移量具有积极意义。

收稿日期: 2011-03-14, 修订日期: 2011-07-05

基金项目: 国防预研基金项目(O5001SA050)和国家高技术研究发展计划项目(2010AA1221091001)资助

作者简介: 张军强, 1981 年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员 e-mail: zjq1981_81@163.com

1 谱线漂移的影响因素及影响机理

棱镜色散型成像光谱仪具有透过率高、杂散光小、波长范围宽等优点,已被成功应用于空间对地遥感领域。图 1 为该成像光谱仪光谱成像系统的结构图,由两块非球面反射镜、一块复合棱镜和一块面阵探测器组成,复合棱镜用于校正光谱色散的非线性^[19]。

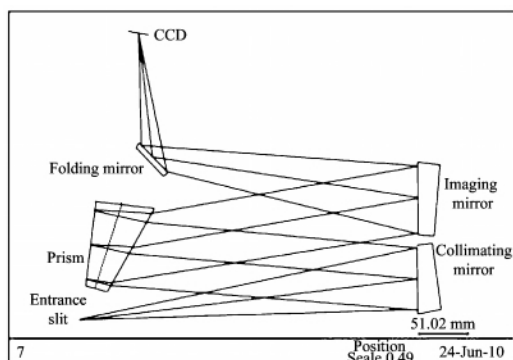


Fig 1 Construction of spectral imaging system

成像光谱仪的谱线漂移特性由光谱成像系统决定,是成像光谱仪热光学特性的重要组成部分。对于光学遥感器的热光学特性,国内外学者已进行了大量的仿真分析和实验研究^[24-28],但都没有涉及到光谱仪器的光谱漂移特性。对于图 1 所示的成像光谱仪而言,影响其谱线漂移的主要因素有以下几方面:

(1) 温度变化引起光谱成像系统结构材料发生膨胀和变形,导致系统镜面发生面形变化和刚体位移。由于在结构设计和材料选择上采取了多种措施,空间成像光谱仪的镜面面形变化和刚体位移都较小^[30,31],系统成像质量满足要求。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,影响谱线漂移的主要原因是镜面的刚体位移。

(2) 温度变化导致棱镜材料色散系数($dn/d\lambda$)发生变化,影响各通道的光谱响应带宽和色散函数,在 CCD 光敏面上产生谱线漂移。研究表明,棱镜材料色散系数随温度变化量很小,对光谱带宽影响不明显,光谱平移主要由材料折射率温度系数决定,但量级较小。

(3) 重力对谱线漂移的影响与温度类似,重力作用以及重力释放将导致成像光谱仪的镜面面形和刚体位移发生变化,导致成像光谱仪 CCD 光敏面上产生谱线漂移。

(4) 真空度的变化不仅会影响复合棱镜的色散,真空放气还会导致光机结构会发生变形,使镜面发生面形变化和刚体位移,进而导致成像光谱仪 CCD 光敏面上产生谱线漂移。真空度变化导致的谱线漂移是定值,不影响在轨运行期间的谱线漂移特性。

(5) 调焦是导致成像光谱仪产生谱线漂移的重要因素^[18],虽然也与温度有关,但是影响机理并不相同。调焦的本质是使得调焦镜产生刚体位移,补偿温度变化产生的像面离焦,保证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,其量级远大于温度和重力载荷的影响。

综上所述,影响成像光谱仪在轨谱线漂移特性的主要原因是光谱成像系统各镜面刚体位移的变化,研究镜面刚体位移对谱线漂移的影响将有助于深入了解成像光谱仪的谱线漂移特性。

2 刚体位移对谱线漂移影响的数学模型

空间成像光谱仪属于小像差光学系统,正常工作时环境变化引起的镜面刚体位移量级较小,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^[31,32]。线性光学模型的优点是只求解单个外部干扰对系统的灵敏度,通过合成即可得到外部干扰的综合作用,模型简单,计算速度较快。

谱线位置用线性光学模型可描述为

$$P = P_0 + \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + O(2) \quad (1)$$

式中, P 为成像光谱仪焦面谱线位置; P_0 为谱线的理论位置; $\partial P / \partial U$ 为谱线位置对每个自由度的导数,即每个自由度单独作用时谱线位置的变化; ΔU 为镜面的刚体位移自由度, $O(2)$ 为二阶和高阶项,对于理想线性系统可以忽略,实际工程中用来表示由于材料、边界条件^[33]等引起的系统非线性,可通过实验数据拟合求解。

由式(1)可知,光谱仪 CCD 光敏面上的谱线位置由理论位置、镜面的刚体位移导致的谱线漂移量、系统非线性误差三部分组成,谱线的实际位置与理论位置的差值即为谱线漂移 δ

$$\delta = \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U + O(2) \quad (2)$$

谱线漂移对每个自由度的导数 $\partial P / \partial U$ 即为刚体位移的谱线漂移灵敏度系数 s ,若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,则

$$\delta = \sum_{i,j} s_{i,j} \Delta u_{i,j} + O(2) \quad (3)$$

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; $\Delta u_{i,j}$ 为第 i 镜面第 j 自由度的刚体位移,与温度、重力、调焦等外界条件有关。

灵敏度系数反映了目标函数(谱线漂移量)对设计变量变化(镜面刚体位移)的响应^[34]。引入灵敏度分析有利于分析镜面刚体位移对谱线漂移的影响程度,能为谱线漂移特性分析、漂移量预测提供重要的梯度信息。

3 计算分析

3.1 数学模型验证

为了验证成像光谱仪 CCD 光敏面上的谱线漂移量是各个镜面刚体位移引起谱线漂移量的代数和,进行了基于蒙特卡洛法的数值模拟,步骤如下:

(1) 由于外部干扰引起光谱成像系统各镜面刚体位移较小,假设偏心不大于 0.2 mm、倾斜不大于 0.02° 且相互独

立,各镜面刚体位移大小为均匀分布。

(2)对应表 1 中的 42 个变量(7 个镜面,每个镜面 6 个自由度)生成 42 个伪随机数序列 $u_{i,j}^k, k=1, 2, \dots, n(n$ 为计算采样数,一个比较大的数,本文取 $n=100$); $i=1, 2, \dots, m$ ($m=7$,即光谱成像系统的 7 个镜面); $j=1, 2, \dots, m(m=6$,即刚体位移的 6 个自由度)。

(3)在 Matlab 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 42 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 42 个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 和 δ_y 。

(4)对 42 个刚体位移独立作用下的谱线漂移量求和 δ' ,比较 δ' 与 42 个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。

$$\Delta_x = \delta'_x - \delta_x = \sum_{i,j} \delta_x(i, j) - \delta_x \quad (4)$$

$$\Delta_y = \delta'_y - \delta_y = \sum_{i,j} \delta_y(i, j) - \delta_y \quad (5)$$

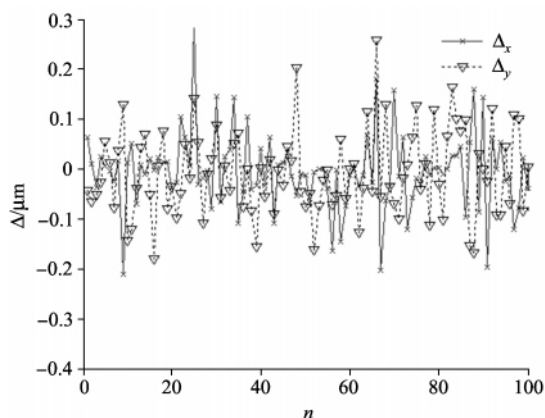


Fig 2 Error of mathematical model

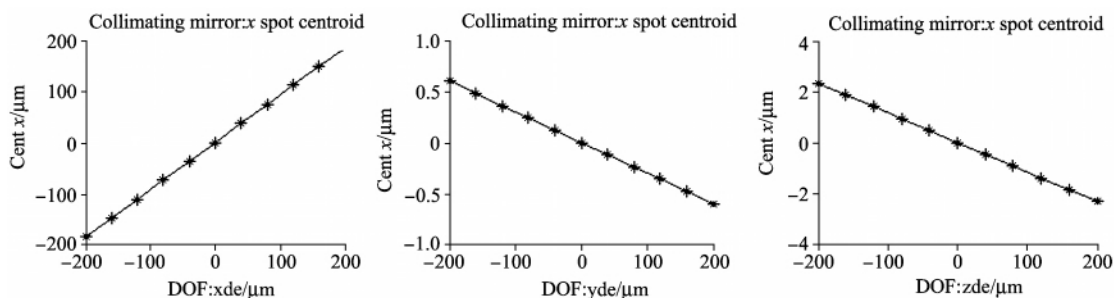


Fig 3 Spectral line shift caused by collimating mirror's translation in cross track direction

4 结 论

对成像光谱仪谱线漂移的影响因素及影响机理进行了分析,针对小像差空间成像光谱仪系统性能接近线性系统的特点,基于线性光学模型建立了描述谱线漂移特性的数学模型,并通过光线追迹对数学模型进行了验证,结论如下:

(1)在 Matlab 环境下,利用 Code V 的 API 函数对光学

结果表明,在镜面偏心不大于 0.2 mm、倾斜不大于 0.02° 的小量级干扰下,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 像元大小(光谱方向像元尺寸 36 μm),式(3)描述的谱线漂移与镜面刚体位移的数学模型是正确的。

3.2 灵敏度系数求解

由于在镜面偏心不大于 0.2 mm、倾斜不大于 0.02° 的小量级干扰下,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,因此谱线漂移对某一刚体灵敏度系数可以分别独立求解,步骤如下:

(1)假设某一极值为 α 的刚体位移独立作用在光学系统的镜面上,在 $[-\alpha, \alpha]$ 范围内将其均分为 n 等分,生成 $n+1$ 个数据点;

(2)在 Matlab 环境下,利用 CODE V 的 API 函数追迹光学系统在 α_i 作用下谱线位置 (x_i, y_i) ,并计算谱线漂移量

$$\Delta x_i = x_i - x_0 \quad (6)$$

$$\Delta y_i = y_i - y_0 \quad (7)$$

(3)根据谱线漂移量数据 Δx_i 和 Δy_i 可以判断不同视场、不同波长处谱线漂移是否相等,为星上定标数据处理时谱线发生整体平移的假设提供理论基础;

(4)对 $[\alpha_i, \Delta x_i]$ 和 $[\alpha_i, \Delta y_i]$ 进行线性拟合,即可求解该刚体位移的谱线漂移灵敏度系数 δ_x 和 δ_y 。

结果表明,在 10 °C 均匀温差作用下^[30],由于刚体位移导致的波长、不同视场位置的谱线漂移量相等,误差小于 0.1 个像元大小。由于篇幅有限,在此仅给出 0.4° 视场、1 000 nm 波长谱线在穿轨方向(x 方向)的漂移量与准直镜刚体位移的关系曲线,如图 3、图 4 所示,该视场其他光学表面刚体位移的谱线漂移灵敏度系数如表 1、表 2 所示。

系统进行光线追迹的方法是分析复杂光学系统、复杂工况下光学性能的有效手段之一。

(2)成像光谱仪的谱线漂移与温度变化、重力、调焦等因素有关,根本原因是工作环境和工作状态变化引起光谱成像系统镜面发生刚体位移,镜面刚体位移是导致光谱仪 CCD 光敏面上发生谱线漂移的主要原因。

(3)空间成像光谱仪属于小像差光学系统,环境变化引起的镜面刚体位移量级较小,系统性能接近线性系统,基于

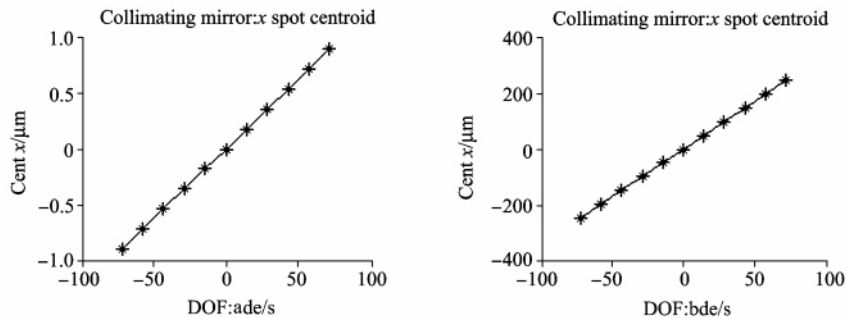


Fig 4 Spectral line shift caused by collimating mirror’s rotation in cross track direction

Table 1 Sensibility of spectral line shift caused by rigid body motion in cross track direction

光谱成像系统镜面	刚体位移					
	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
准直镜	0.927 9	−0.003 0	−0.011 6	0.012 4	3.4529	0
棱镜面 1	0	0	0.000 9	0.005 1	2.483 3	0
棱镜面 2	0	0	−0.000 1	−0.001 4	−0.647 0	0
棱镜面 3	0	0	0.001 4	−0.010 3	−5.373 9	0
成像镜	1.077 7	0.001 6	−0.008 1	−0.003 5	3.912 1	0
调焦镜	0	0	0.011 8	0.002 2	−0.787 6	0
CCD 光敏面	−1	0	−0.007 2	0.000 1	−0.000 2	0.013 3

Table 2 Sensibility of spectral line shift caused by rigid body motion in along track direction

光谱成像系统镜面	刚体位移					
	T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
准直镜	−0.007 1	1.022 5	0.020 0	−3.884 5	−0.027 6	0
棱镜面 1	0	0	−0.016 4	−3.183 8	−0.009 4	0
棱镜面 2	0	0	0.002 8	0.893 4	0.002 6	0
棱镜面 3	0	0	−0.016 3	6.262 2	0.016 8	0
成像镜	0.000 4	1.137 5	−0.045 6	−4.152 1	−0.001 2	0
调焦镜	0	0	1.588 8	1.245 8	0.038 8	0
CCD 光敏面	0	−1	−0.276 2	0.003 7	−0.006 7	−0.024 4

线性光学模型建立的谱线漂移模型复合实际情况，可以用于描述成像光谱仪的谱线漂移特性。

(4)在偏心不大于 0.2 mm、倾斜不大于 0.02°的小量级干扰下，不同波长、不同视场位置的谱线漂移量相等，误差小于 0.1 个像元尺寸；镜面刚体位移对谱线的影响是线性的、相互独立的，谱线漂移量是各刚体位移引起谱线漂移量

的代数和。

对成像光谱仪谱线漂移特性的研究对光谱定标、复杂工况下的光谱特性分析和预测具有指导意义，下一步工作是建立镜面刚体位移与温度、重力、调焦等因素之间的关系，并进行热光学实验验证。

References

[1] Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. Science, 1985, 228: 1147.
[2] YU Bing-xi(禹秉熙). OME Information(光机电信息), 2000, 17(4): 1.
[3] Green R O. Applied Optics, 1998, 37(4): 683.
[4] FENG Yu-tao, XIANG Yang(冯玉涛, 向阳). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2008, 37(6): 1083.
[5] CUI Dun-jie(崔敦杰). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 1996, 11(3): 56.
[6] LI You-ping, YU Bing-xi, WANG Yu-peng(李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2006, 14(5): 822.
[7] Xiong X, Chiang K, Esposito J, et al. Metrologia, 2003, 40: 89.
[8] Immermann G, Neumann A, Siimnich H, et al. SPIE, 1993, 1937: 201.
[9] Blechinger F, Charlton D E, Davancens R, et al. SPIE, 1993, 1937: 207.
[10] Baudin G, Matthews S, Bessudo R, et al. SPIE, 1996, 2819: 141.

- [11] Labandibar J Y, Baudin G, Baillion Y. SPIE, 2004, 5234: 232.
- [12] Barry P S, Shepanski J, Segal C. SPIE, 2002, 4480: 231.
- [13] Werij H, Kruizinga B, Olij C, et al. SPIE, 1996, 2820: 126.
- [14] Cutter M A, Lobb D R, Williams T L, et al. SPIE, 1999, 3753: 180.
- [15] Delwart S, Huot J P, Bourg L. SPIE, 2003, 4881: 337.
- [16] Neville R A, Sun L, Staenz K. SPIE, 2003, 5093: 144.
- [17] LI Ze-xue, WU Qing-wen, YAN Chang-xiang, et al(李泽学, 吴清文, 颜昌翔, 等). Optical Technique(光学技术), 2008, 34(3): 437.
- [18] ZHENG Yu-quan(郑玉权). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2010, 18(11): 2347.
- [19] Gao B C, Montes M J, Davis C O. Proceedings of the 11th JPL Airborne Earth Science Workshop, Robert O. Green, Editor, JPL Publ. 03-4, 99-105, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 2002.
- [20] Neville R A, Sun L, Staenz K. SPIE, 2003, 5093: 144.
- [21] Starks P J, Walter-Shea E A, Schiebe F R, et al. Remote Sens. Environ., 1995, 51: 385.
- [22] Martinsen P, Mcglone V A, Jordan R B, et al. Applied Spectroscopy, 2010, 64: 1325.
- [23] Salim S G R, Fox N P, Theocharous E, et al. Applied Optics, 2011, 50(6): 866.
- [24] DING Yan-wei, LU E(丁延卫, 卢 铿). Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences(中国科学院研究生院学报), 2003, 20(4): 407.
- [25] YANG Yi, CHEN Shi-jin, ZHANG Wei(杨 恸, 陈时锦, 张 伟). Optical Technique(光学技术), 2005, 31(6): 913.
- [26] LIU Ju, XUE Jun, REN Jian-yue(刘 巨, 薛 军, 任建岳). Journal of Astronautics(宇航学报), 2009, 30(2): 422.
- [27] Stoeckel G, Crompton D, Perron G. SPIE, 2007, 6675: 66750D.
- [28] DING Yan-wei, LIU Jian, LU E(丁延卫, 刘 剑, 卢 铿). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2002, 10(1): 106.
- [29] ZHANG Jun-qiang, DONG De-yi, YAN Chang-xiang(张军强, 董得义, 颜昌翔). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2009, 17(10): 2450.
- [30] CHEN Chang-zheng, ZHAO Gui-jun, ZHANG Xing-xiang, et al(陈长征, 赵贵军, 张星祥, 等). Opt. Precision Eng.(光学精密工程), 2007, 15(5): 668.
- [31] Stoeckel G, Crompton D, Perron G. SPIE, 2007, 6675: 66750D.
- [32] Howard J M. SPIE, 2004, 5178: 82.
- [33] CHEN Chang-zheng, XIN Hong-wei, LÜ Qing-tao, et al(陈长征, 辛宏伟, 吕清涛, 等). Computer Simulation(计算机仿真), 2008, 25(3): 323.
- [34] DING Yan-wei, HAN Shuang-li, LI Ji-hui(丁延卫, 韩双丽, 李积慧). Opto-Electronic Engineering(光电工程), 2002, 29(5): 15.

Spectral Line Shift Property of Prism Dispersive Imaging Spectrometer

ZHANG Jun-qiang^{1,2}, YAN Chang-xiang¹, ZHENG Yu-quan¹, WU Qing-wen¹

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to study the spectral line shift property of prism-dispersive imaging spectrometer, the influencing factors and mechanisms of spectral line shift were presented, and the mathematical model based on linear optics model was established to describe the spectral line shift property. Code V API functions was used, in Matlab environment, to verify the validity of mathematical model, and the sensitivity coefficient of spectral line shift was analyzed. Results indicate that rigid body motion of optical mirror surface generated by environmental variation is the key causation of spectral line shift. When the decenter of mirror surface is no more than 0.2 mm and the tilt is less than 0.02°, the value of spectral line shift of different wavelengths at different fields is equivalent, and the error is less than 0.1 pixel. Spectral line shift due to mirror rigid body motion is linear and independent, and the total shift of the spectral line is the algebraic sum of values produced by the single freedom of motion (DOF) of single mirror surface. The mathematical model based on linear optics model can be used to study the spectral line shift property of the prism-dispersive imaging spectrometer. It will provide some guidance for spectral calibration and spectral property analysis under complex work condition.

Keywords Imaging spectrometer; Spectral line shift; Sensibility; Prism-dispersive

(Received Mar. 14, 2011; accepted Jul. 5, 2011)