

温度对机载成像光谱仪光学性能的影响

贤 光^{1,2}, 颜昌翔¹, 吴从均¹, 张军强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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了研究温度对机载成像光谱仪光学性能的影响, 分析了机载环境下仪器温度载荷的特点, 阐述了温度载荷的作用机理和表现形式, 研究了光谱仪的热光学性能。首先, 分析了机载环境下温度载荷特点; 其次, 以最小二乘法 and 坐标转换法为理论依据, 编制了面形误差及刚体位移求解程序, 并结合有限元法计算了光机系统在温度载荷作用下各镜面的变形值和刚体位移大小; 最后, 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, 研究其谱线漂移特性, 并计算了刚体位移对传递函数(MTF)的影响。计算结果表明, $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内, 谱线漂移量小于光谱定标精度要求的 1/3, 不需要再进行光谱定标和光谱修正; 系统传递函数也能够满足成像质量要求。这些结论会对仪器研制有很大的工程实用价值。

关键词: 谱线漂移; 遥感; 温度载荷; 光学传递函数; 成像光谱仪

中图分类号: TH73; O433.4; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1647-07

Effect of temperature on airborne imaging spectrometer optical properties

Xian Guang^{1,2}, Yan Changxiang¹, Wu Congjun¹, Zhang Junqiang¹

- (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)

Abstract: In order to study the effect of temperature on airborne imaging spectrometer optical performance, the characteristics of the instrument under temperature load onboard were analyzed, the mechanism and manifestations of temperature load were described, the thermal performance of the spectrometer was studied. Firstly, the characteristics of the temperature load under airborne was analyzed. Secondly, the least squares method and coordinate transformation method were taken as the theoretical basis for the preparation of the surface error and rigid displacement solver, combined with the finite element method to calculate the deformation and rigid body displacement of the mirror of the optical systems at a temperature load. Finally, a ray tracing was used to solve the mirror line position change due to displacement of the rigid body displacement, study its spectral drift, and calculate the effect of the rigid body displacement on the modulation transfer function(MTF). The results show that within the range $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, line drift is less than 1/3 of the required accuracy of spectral calibration, no further spectral

收稿日期: 2014-09-21; 修订日期: 2014-10-24

基金项目: 国家 863 计划(2011AA12A103); 中国地质调查局工作项目(1212011120227)

作者简介: 贤光(1988-), 女, 博士生, 主要从事航空成像质量研究。Email: xg1004@163.com

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

calibration and correction is needed.

Key words: spectral-line shift; remote sensing; temperature load; optical transfer function; imaging spectrometer

0 引言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代开始在多光谱遥感成像技术上发展起来的新型探测识别技术^[1]。它能够对地物反射光谱进行连续的光谱采样,完成地物空间信息、辐射信息和光谱信息的同时获取,实现地物精细识别和分类。目前已经发展成为一种成熟的侦查技术,在军事侦察及农、林、水、土、矿等资源调查领域具有巨大的应用价值和广阔的发展前景。

机载成像光谱仪应用时,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^[2],而光谱测量精度直接影响辐射测量精度。为了提高光谱测量精度,在地面测试阶段,对成像光谱仪进行精细的光谱定标,确定每个像元中心波长和带宽。可当光谱仪飞行成像时,温度载荷、平台运动、振动载荷等环境因素发生变化时会导致成像光谱仪像面上产生谱线漂移,引起探测器每个像元的中心波长发生变化,严重影响成像光谱仪的光谱、辐射测量精度,严重的还可能导致仪器成像质量下降。通常机载设备都配有高精度姿态稳定系统及减震系统来控制并减小平台运动和振动对成像的影响^[3-4]。但是由于光学材料与结构材料的热不稳定性等,温度载荷还是会导致成像光谱仪成像质量下降和像面谱线漂移。参考文献[5]对成像光谱仪的温度漂移特性进行了一定的实验研究;参考文献[6]研究了温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响;参考文献[7]分析了谱线弯曲对成像光谱仪辐射采集的影响。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^[8]。目前,关于温度载荷引起的谱线漂移对成像质量的影响尚无系统的研究。

文中研究对象是一台机载宽幅成像光谱仪,光谱范围 400~2 500 nm,包括可见近红外(VNIR)、短波红外(SWIR)两台光谱仪和对应的面阵 CCD 探测组件。VNIR 光谱仪光谱范围 400~1 000 nm,平均光谱分辨率为 5 nm。文中以其为研究对象,通过理论分析和试

验验证,探讨温度对成像光谱仪光学性能的影响。文中从机载光谱仪光机结构设计的工程实际需要出发,分析了温度载荷对机载成像光谱仪像质变化和谱线漂移的影响。采用 PATRAN & NASTRAN 软件计算了不同温度工况下的光谱仪系统的镜面面形变化和刚体位移量,利用 ZEMAX 软件分析了镜面面形变化和刚体位移对光谱仪系统的像面谱线漂移和 MTF 的影响,完成温度载荷下光谱仪光学性能的定量评价,为仪器标定、机载飞行提供了理论依据。

1 机载环境对机载成像光谱仪光学性能的影响

与卫星遥感相比,机载成像光谱仪具有更恶劣的温度环境^[9]、平台姿态稳定性差、飞行高度低、视场角大等特点。当成像光谱仪所处的环境(如温度载荷、平台运动、振动载荷)发生变化时,镜面将产生新的刚体位移,这将导致光谱仪的视轴漂移和波前畸变^[10],造成影像模糊,影响成像质量。

机载光谱仪进行飞行成像时都配有高精度姿态稳定系统、减震系统及热控措施等来控制机载环境对成像的影响。但仪器光机装调、地面测试以及飞行成像时的温度水平很难达到完全一致性,是影响机载成像光谱仪光学性能的主要因素之一,主要表现在对仪器光机结构的影响,从而导致成像质量的下降和像面谱线漂移。机载光谱仪通常没有实时定标系统,这将导致定标状态和工作状态的不一致性,而飞行前、后标定需要不同工况下成像质量和谱线漂移特性的理论支持。通过研究温度载荷对成像光谱仪像面谱线漂移及像质的影响特性,可指导仪器的标定、校正、成像和数据处理,进而提高仪器的光谱、辐射测量精度,最终提高成像光谱仪对地物目标识别和分类的准确度。

2 机载温度载荷的特点分析

2.1 机载光谱仪结构热设计

机载成像光谱仪是一个推扫式大视场、离轴非

球面光谱成像系统,结构复杂,为了确保仪器在冲击载荷、热载荷作用下保持应有的精确度,光学机械结构设计重点考虑了刚度和热稳定性。光谱仪系统采用钛合金箱式结构的主框架,狭缝组件、准直镜组件、凸面光栅组件、成像镜组件和焦面组件按模块化思想设计,光机装调时通过螺钉连接安装在主框架上。其中,准直镜、成像镜采用背部芯轴支撑,使用光学环氧胶完成芯轴与反射镜的粘接,利用三脚架柔性结构提高热稳定性。各镜支撑采用不同线膨胀系数的殷钢材料,有效解决线胀系数不匹配的问题,使镜面面形变化和刚体位移较小。光机结构如图1所示。由于环境温度变化和机上电子学的影响,在实验室定标和在轨成像阶段光谱仪自身的温度必将发生变化,而对于成像光谱仪这样一个复杂的光机系统,完全实现无热化设计几乎是不可能的。所以必须深入研究温度对光机结构影响导致的谱线漂移,进而指导实验室定标和在轨成像,提高仪器的光谱、辐射测量精度。

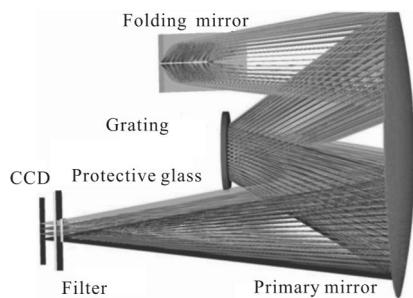


图1 光谱仪系统光学结构图
Fig.1 Optical design of the spectrometer system

在被动热控方面,光谱仪主体对外隔热安装,减小平台对仪器的影响;各反射镜组件、调焦组件、光栅组件、焦面组件等与主框架导热安装,提高整机温度均匀性;机上电箱与主体隔热安装,降低电子器件工作对主体的影响;主体框架内表面喷涂 ERB-2B 黑漆,表面发射率 $\epsilon_h \geq 0.85$ 。在主动热控方面,采用主动加热补偿的方式将整机温度拉平,满足等温化的要求。

2.2 机热件外场试验

2013年6月19日在湖南衡阳通用航空机场上进行了机载光谱仪机热件的飞行试验。采用15个测温点,热控仪测过程从7:25飞机起飞至9:58飞机着

陆为止。试验结果表明,从起飞到着陆整个过程最大温变不超过 10°C ,飞行高度为 2 km 时最大温变不超过 5°C 。框架焦面安装面和光谱仪安装面上的测温点为例,在整个测试过程中的温度变化曲线如图2所示。其中7:41~8:15、9:15~9:35之间,飞行高度为 2 km 。

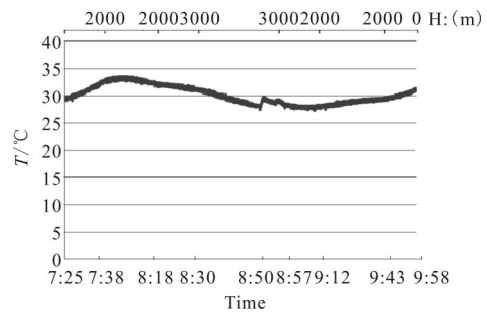


图2 测温点7的温度曲线
Fig.2 Temperature curve of point 7

正常成像状态下,由于采取了合理的热控策略和有效的热控措施,光谱仪整机温度均匀性较好,地面验证试验和在轨测试数据表明,整机温度梯度小于 1.4°C ,VNIR 光谱仪的温度梯度小于 0.5°C ;温度水平变化范围小于 $\pm 10^\circ\text{C}$ 。因此温度梯度对光机结构的影响基本可以忽略,主要考虑温度水平变化对仪器光学性能带来的影响。

3 温度对机载成像光谱仪光学性能影响的分析及预测

在温度载荷作用下,光机结构将发生热弹性变形,导致系统镜面发生面形变化和刚体位移,造成像面上各波长主光线成像位置发生变化,产生谱线漂移或影响成像质量。由于在结构设计和材料选择上采取了多种措施,机载成像光谱仪的镜面面形变化和刚体位移都较小,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^[11],影响谱线漂移和传递函数下降的主要原因是镜面的刚体位移。

在外场试验中得到的成像光谱仪温度水平范围小于 $\pm 10^\circ\text{C}$ 。热光学试验中,成像光谱仪在该温度范围内获取了清晰的图像数据,满足系统成像质量。以下将分析温度载荷引起光学元件和机械结构的弹性变形,进而研究其引起的刚体位移对谱线漂移和成

像质量的影响。

3.1 刚体位移求解

采用 MSC.PATRAN&MSC.NASRTAN 软件进行热弹性分析, 获取光学元器件的面形变化和产生的刚体位移。有限元分析软件输出的结果为各节点在特定载荷下的结构变形值, 无法直接代入 ZEMAX 等光学软件进行光学性能分析。需要通过曲面拟合将有限元分析软件计算出的结构变形值直接拟合为镜面的面形误差和刚体位移。

有些文献介绍了“一维搜索法”和“下山法”等算法来处理镜面面形误差, 并在工程实践中得到了很好的应用^[12]。它们基本思想是通过基于多次迭代找到满足标准差最小的逼近方程, 所以算法较繁琐, 求解效率不高。文中基于其次坐标变换法建立镜面变形前后各节点的对应关系, 构建 6 元 1 次方程组, 利用最小二乘法求解镜面的刚体位移精确的解析解。

假设在镜面发生刚体位移前的局部坐标系 C_0 内, 节点原始位置为 (x_0, y_0, z_0) , 变形后节点位置为 (x_m, y_m, z_m) , 而在镜面发生刚体位移后的局部坐标系 C_1 内, 变形后的节点位置仍为 (x_0, y_0, z_0) 。假设镜面的刚体位移为 $[T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z]$, 则 (x_m, y_m, z_m) 的解析解 (x'_m, y'_m, z'_m) 可通过齐次坐标变换法求解:

$$x'_m = x_m \cos(R_y) \cos(R_z) - y_m \cos(R_y) \sin(R_z) + z_m \sin(R_y) + T_x \quad (1)$$

$$y'_m = x_m [\sin(R_x) \sin(R_y) \cos(R_z) + \cos(R_x) \sin(R_z)] - y_m [\sin(R_x) \sin(R_y) \sin(R_z) - \cos(R_x) \cos(R_z)] - z_m \sin(R_x) \cos(R_y) + T_y \quad (2)$$

$$z'_m = x_m [-\cos(R_x) \sin(R_y) \cos(R_z) + \sin(R_x) \sin(R_z)] + y_m [\cos(R_x) \sin(R_y) \sin(R_z) - \sin(R_x) \cos(R_z)] + z_m \cos(R_x) \cos(R_y) + T_z \quad (3)$$

各镜面刚体位移较小, 公式(1)~(3)可简化为:

$$x'_m = x_m - y_m R_z + z_m R_y + T_x \quad (4)$$

$$y'_m = x_m R_z + y_m - z_m R_x + T_y \quad (5)$$

$$z'_m = -x_m R_y + y_m R_x + z_m + T_z \quad (6)$$

将 (x_m, y_m, z_m) 与公式(4)~(6)计算的解析解之差定义为误差 E , 则:

$$E = \sum_m [(x'_m - x_m)^2 + (y'_m - y_m)^2 + (z'_m - z_m)^2] \quad (7)$$

可以对 E 的 6 个刚体位移分量求解偏导数并置零, 由此可以得到 6 元 1 次方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial T_x} = 0, \frac{\partial E}{\partial T_y} = 0, \frac{\partial E}{\partial T_z} = 0 \\ \frac{\partial E}{\partial R_x} = 0, \frac{\partial E}{\partial R_y} = 0, \frac{\partial E}{\partial R_z} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

求解该方程组, 即可得到镜面的刚体位移的最小二乘解。该算法与镜面的形状无关, 比较稳定, 实现简单, 求解效率高。在 MATLAB 环境下编制了求解程序。

3.2 温度对像面谱线漂移的影响

通常, 谱线漂移量的大小可用波长偏移量或通道偏移量来定量描述。谱线漂移是指由于外界干扰引起光谱仪焦面上谱线产生几何位移, 导致 CCD 像元的相对采样位置发生变化, 表现为光谱仪探测器每个像元对应的中心波长发生变化。用通道偏移量描述漂移量更能揭示光谱仪器的本质特性, 而不受色散函数非线性的影响。文中将以公式(9)定量描述谱线漂移量。

$$\Delta P = \frac{\Delta S_{m,n} - \bar{\Delta S}_n}{a} \quad (9)$$

式中, ΔP 为相对谱线漂移量; $\Delta S_{m,n}$ 为 m 视场 n 波长像元对应的谱线漂移量; $\bar{\Delta S}_n$ 为 n 波长漂移量均值; a 为像元尺寸。

为了研究温度载荷作用下像面谱线漂移的特性, 在仪器正常工作的温度范围内, 设置了 -10°C 、 -5°C 、 0°C 、 $+5^\circ\text{C}$ 、 $+10^\circ\text{C}$ 共 5 种温差载荷工况, 计算其刚体位移, 用 ZMAX 软件对变形后的光学系统进行了光线追迹, 求解了上述 5 个工况下的镜面刚体位移导致的光谱成像系统 CCD 像面上的谱线位置变化。文中研究的成像光谱仪光谱方向 CCD 像元尺寸为 $36\ \mu\text{m}$, 空间方向 CCD 像元尺寸为 $18\ \mu\text{m}$ 。

表 1 和表 2 分别给出了 5°C 温降载荷下空间维和光谱维的漂移量大小, 从中可以分析得出:

(1) 空间维 同一视场、不同波长间的谱线漂移量不相等, ΔP 极值约为 $1.6\ \mu\text{m}$, 小于 $0.1\ \text{pixel}$; 同一波长、不同视场间的谱线漂移量相等, ΔP 极值约为 $0.2\ \mu\text{m}$, 约为 $0.01\ \text{pixel}$; 不同视场、不同波长间的谱线漂移量不相等, ΔP 极值约为 $1.6\ \mu\text{m}$, 小于

表 1 5 °C温降载荷下,空间维上的谱线漂移量

Tab.1 Line drift on the space dimension at -5 °C temperature

$\Delta S_{m,n}/\mu\text{m}$	FOV/(°)											$\bar{\Delta S}_n/\mu\text{m}$
	-45°	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	45°	
1 000	-9.0	-8.1	-7.9	-8.0	-8.3	-8.8	-8.9	-9.2	-9.3	-9.1	-8.2	-8.62
800	-9.1	-8.3	-8.1	-8.1	-8.4	-8.7	-9.0	-9.2	-9.3	-9.1	-8.2	-8.68
600	-9.4	-8.5	-8.2	-8.2	-8.5	-8.7	-9.0	-9.2	-9.3	-8.9	-8.0	-8.72
400	-10.6	-9.3	-8.8	-8.5	-8.7	-8.8	-8.9	-9.1	-8.9	-8.2	-7.0	-8.80

表 2 5 °C温降载荷下,光谱维上的谱线漂移量

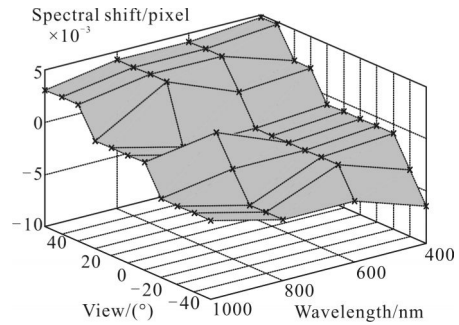
Tab.2 Line drift on the spectral dimension at -5 °C temperature

$\Delta S_{m,n}/\mu\text{m}$	FOV/(°)											$\bar{\Delta S}_n/\mu\text{m}$
	-45°	-40°	-30°	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°	40°	45°	
1000	49.6	49.6	49.6	49.6	49.5	49.5	49.5	49.5	49.4	49.4	49.4	49.51
800	49.6	49.6	49.6	49.5	49.4	49.5	49.5	49.3	49.3	49.3	49.3	49.45
600	49.5	49.4	49.4	49.4	49.4	49.4	49.4	49.3	49.2	49.2	49.2	49.35
400	49.5	49.4	49.3	49.3	49.3	49.3	49.3	49.2	49.2	49.1	49.1	49.27

0.1 pixel。所以温度载荷作用下不同视场间的谱线位置在空间维上将发生整体平移,拉伸和压缩效应可以忽略。

(2)光谱维 同一视场、不同波长间的谱线漂移量相等, ΔP 极值约为 $0.3 \mu\text{m}$, 小于 0.02 pixel ; 同一波长、不同视场间的谱线漂移量相等, ΔP 极值约为 $0.2 \mu\text{m}$, 小于 0.01 pixel ; 不同视场、不同波长间的谱线漂移量相等, ΔP 极值约为 $0.3 \mu\text{m}$, 小于 0.02 pixel 。所以温度载荷作用下谱线位置在光谱维上将发生整体平移,拉伸和压缩效应可以忽略。

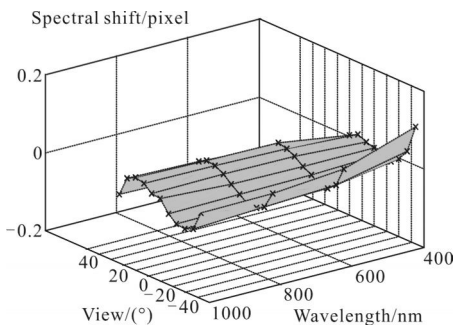
同理计算了光机系统在不同温差工况下的谱线漂移规律,利用 Matlab 软件进行数据拟合。+5 °C、+10 °C温升载荷工况下的谱线漂移量,如图 3、图 4 所示。从中可以分析出,温差载荷不大于 10 °C时,可看做 CCD 像面上谱线,在空间维上虽然整体平移还会附加



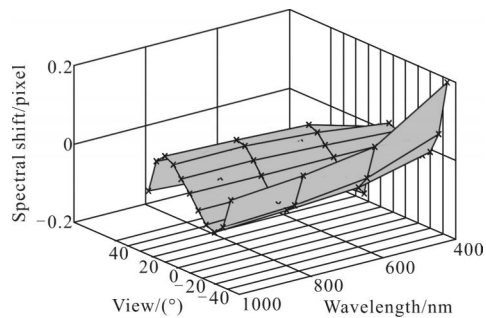
(b)光谱维
(b) Spectral dimension

图 3 5 °C温升载荷的谱线漂移量
Fig.3 Line drift of 5 °C conditions

一定的拉伸,但均满足成像要求。在光谱方向仅发生整体平移,拉伸量很小,基本可以忽略。这说明以特征谱线作为参考实现成像光谱仪星上定标的方法是正确可行的,不需要再进行光谱定标和光谱修正^[13]。



(a)空间维
(a) Spatial dimension



(a)空间维
(a) Spatial dimension

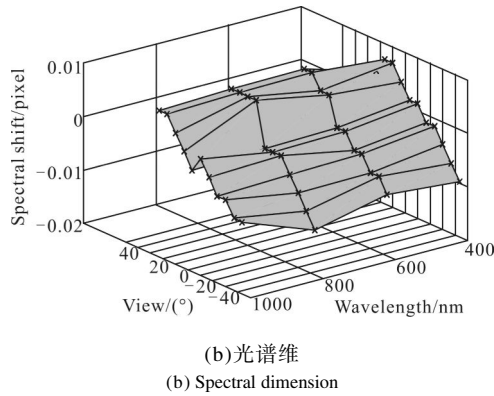


图 4 10 °C 温升载荷的谱线漂移量
Fig. 4 Line drift of 10 °C conditions

3.3 温度对成像质量的影响

当成像光谱仪所处的环境(如温度载荷、平台运动、振动载荷)发生变化时,引起光谱仪的视轴漂移和波前畸变,影响成像质量。这里仅考虑温度变化引起的刚体位移导致的静态传递函数下降。文中用 ZMAX 软件分析不同温差工况下的 MTF 变化,拟合出如图 5 所示 MTF 随温度工况变化的关系曲线。从图 5 可以得出工况变化对于 MTF 的影响主要有以下几个方面:

(1)对于任意波长的谱线,对称视场内 MTF 随不同工况变化基本一致。如 400 nm 时,正负边缘视场位置 MTF 都从 0.491 升高到 0.528。

(2)工况变化导致不同视场,不同谱段内 MTF 变化的复杂性。同一谱段内,不同视场内 MTF 随工况变化的趋势也不相同;不同谱段,不同视场之间 MTF 变化随工况的变化也不一致。如对于 400 nm 谱段而言,边缘视场 MTF 随温度变化值的升高而升高,边缘视场则一直升高,1 000 nm 谱段则刚好相反,这表明,在温度升高时,有利于 400 nm 边缘视场和 1 000 nm 谱段中心像质的提高;然而对于 600 nm 和 800 nm 谱段而言,MTF 会随着温度升高而降低,且下降量最大都约在 0.7 视场位置,前者下降极差值约为 0.2,后者约下降极差值为 0.1。

(3)不同波段、不同视场之间,MTF 变化极差值不同,对于文中所分析的系统而言,温度升高导致的 MTF 下降对于 600 nm 左右影响最大,极差值约为 0.2,对于 400 nm 边缘视场影响最小,极差值约为 0.1。

(4)从图中可以看出,有些视场的 MTF 在某一光谱处随温度升高而增大,有些反而减小。这是因为在

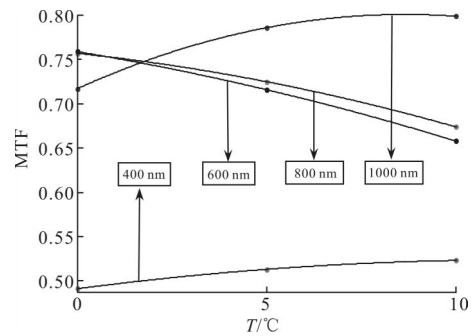
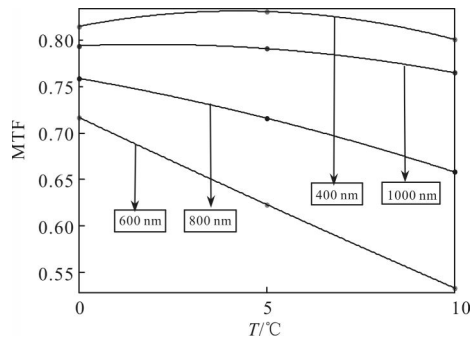
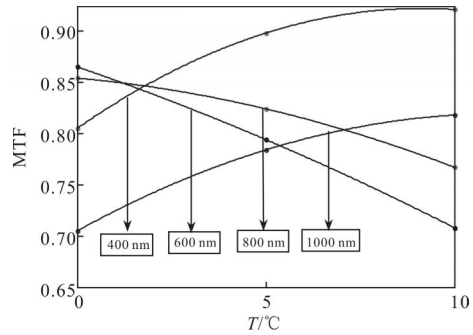


图 5 不同温差工况下的 MTF 变化曲线
Fig.5 MTF curves in different conditions

离轴系统设计中得到 MTF 曲线是对几个波长和视场的综合考虑,而温度变化导致的偏心 and 倾斜,对于像面的影响是使最佳像面整体二维旋转,而实际像面仅仅平动,没有旋转。因此温度变化对某些视场或者波长 MTF 有利,对某些视场和波长 MTF 反而不利。从总体看 MTF 在 10 °C 温变以内的工况变化,均满足光学系统 MTF 大于 0.4 的要求。

4 结论

文中探讨了温度对成像光谱仪光学性能的影响

响。分析了机载环境下仪器温度载荷的特点,阐述了温度载荷的作用机理和表现形式,研究了光谱仪的热光学性能。以最小二乘法 and 坐标转换法为理论依据,编制了面形误差及刚体位移求解程序,并结合有限元法计算了光机系统在温度载荷作用下各镜面的变形值和刚体位移大小。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,研究其谱线漂移特性,并计算了刚体位移对MTF的影响。计算结果表明,±10℃温度变化范围内,谱线漂移量小于光谱定标精度要求的1/3,不需要再进行光谱定标和光谱修正。系统函数也能够满足成像质量要求。实现了温度载荷下仪器光学性能的定量预测,对仪器研制有很大的工程实用价值。

参考文献:

- [1] Xue Qingsheng, Huang Yu, Lin Guanyu. Optical system design of wide-angle and high-resolution space-borne imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0822001. (in Chinese)
薛庆生, 黄煜, 林冠宇. 大视场高分辨率星载成像光谱仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0822001.
- [2] Li Xiaohui, Yan Changxiang. Onboard calibration technologies for hyper-spectral imager[J]. *Chinese J Optics and Applied Optics*, 2009, 2(4): 309-315. (in Chinese)
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.
- [3] Barry P S, Shepanski J, Segal C. Hyperion on-orbit validation of spectral calibration using atmospheric lines and an on-board system[C]//SPIE, 2002, 4480: 231-235.
- [4] Delwart S, Huot J P, Bourg L. Calibration and early results of MERIS on ENVISAT[C]//SPIE, 2003, 4881: 337-344.
- [5] Zheng Yuquan. Precise spectral calibration for hyper-spectral imager[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2348-2354. (in Chinese)
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.
- [6] Zhang Junqiang, Yan Changxiang. Thermal effect on spectral-line shift of space-borne imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528001. (in Chinese)
张军强, 颜昌翔. 温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响. *光学学报*, 2012, 32(5): 0528001.
- [7] Feng Yutao, Xiang Yang. Effects of spectral position offset on radiance measurement of imaging spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1083-1086. (in Chinese)
冯玉涛, 向阳. 光谱移位对成像光谱仪辐射测量的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 1083-1086.
- [8] Gao B C, Montes M J, Davis C O. A curve-fitting technique to improve wavelength calibration of imaging spectrometer data [C]//Proceedings of the 11th JPL Airborne Earth Science Workshop, 2002, 3: 4.
- [9] 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. (in Chinese)
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.
- [10] 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(S): 242-247. (in Chinese)
张军强, 董德义, 吴清文, 等. 光学传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(S): 242-247.
- [11] Zhang Junqiang, Shao Jianbing. Data processing of on-orbit spectral calibration of space-borne high resolution imaging spectrometer [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4 (2): 175-181. (in Chinese)
张军强, 邵建兵. 成像光谱仪星上定标的数据处理[J]. *中国光学*, 2011, 4(2): 175-181.
- [12] Gong Dun. The thermal effect on image quality of the remote sensor optical system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
巩盾. 温度对遥感器光学系统成像质量的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010.
- [13] Qi Xiangdong, Han Pengpeng, Pan Mingzhong, et al. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2871-2876. (in Chinese)
齐向东, 撤芑芑, 潘明忠, 等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2871-2876.