

文章编号: 1001-9014(2008)06-0457-04

基于视场分割方式的宽视场高光谱成像系统的辐射匹配技术

马艳华^{1,2}, 敬忠良¹, 王建宇², 舒嵘²

(1. 上海交通大学 空天研究院, 上海 200240;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 视场分割方案是实现宽视场高光谱成像的可行途径之一, 成像系统除了空间上需要配准外, 辐射亮度也需要匹配. 本文主要分析宽视场高光谱成像仪的视场拼接技术的辐射匹配原理和匹配要素, 简要介绍了实现途径, 通过该途径, 成功地实现了一种机载高光谱成像仪的视场拼接, 给出了该宽视场高光谱成像仪的飞行试验结果, 试验显示辐射匹配结果良好, 通过光谱曲线的对比, 精度在系统误差范围内.

关键词: 宽视场高光谱成像仪; 视场拼接; 辐射校正

中图分类号: TP706 **文献标识码:** A

RADIATION MATCHING TECHNOLOGY FOR WIDE-VIEW HYPERSPECTRAL IMAGER BASED ON FIELD-DIVIDING

MA Yan-Hua^{1,2}, JING Zhong-Liang¹, WANG Jian-Yu², SHU Rong²

(1. Institute of Aerospace Science and Technology, Shanghai Jiaotong university, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy Science, Shanghai 200083, China)

Abstract: Field-dividing technology is a feasible method to realize wide-view hyperspectral imager. The wide-view hyperspectral imager has to be radiationally matched besides spatial matching between every single view. In this article, the radiational matching technology and key factors for hyperspectral imager were analysed, and the method to realize the matching successfully was introduced briefly. Some fly experimental results of the realized hyperspectral imager were showed. The test results show that the radiational matching is well completed and the precision is in the error of the system allowed by comparing the spectral curves.

Key words: wide-view hyperspectral imager; field-butting; radiation calibration

引言

推帚式高光谱成像系统一般采用面阵探测器获取经过分光的一行图像的光谱信息, 通过飞行平台的运动实现空间的二维成像, 由于受到面阵探测器、光学系统的技术限制, 高分辨力的机载系统的视场比较窄, 例如, 加拿大的 *casi-3* 是现有视场最大的高光谱成像仪, 视场为 39° , 其他的一般只有二十几度, 这样的窄视场成像造成了系统作业效率低下, 不适合大面积地面调查.

在面阵探测器和光学系统技术受限制的情况下, 可采用视场分割的方法实现较大视场. 宽视场推

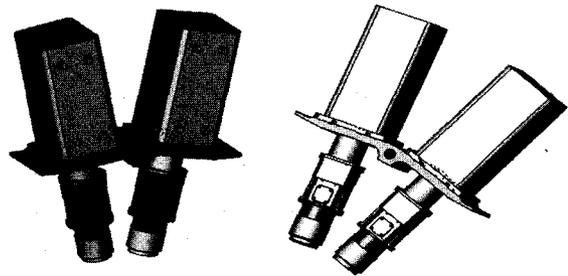


图 1 宽视场高光谱成像仪的机械结构

Fig. 1 Mechanical structure of wide-view hyperspectral imager

帚式成像光谱仪 (PHI-3) 由两台各具 22° 视场角的

收稿日期: 2007-12-07, 修回日期: 2008-08-14

Received date: 2007-12-07, revised date: 2008-08-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (2001AA131090) 资助项目

作者简介: 马艳华 (1970-), 女, 山东济南人, 上海交通大学博士后, 研究方向为航空遥感数据处理.

高光谱成像仪进行视场拼接,合成为 42° 成像视场角的高光谱成像模块,两个视场之间具有 2° 的重合,机械结构采用光、机一体化的设计方法,所选结构形式结合光机装校进行考虑,可实现三维调整,且具有易锁和抗震性能^[1].

本文简要介绍了利用视场分割方案实现高光谱宽视场成像的技术途径,并分析了辐射匹配的原理和方法,最终试验飞行的图像处理结果显示,该方法取得了很好的效果.

1 视场合成技术的空间配准

除了上述机械结构的设计外,还需要在光学、电子学和辐射校正等方面实现两个视场的匹配,如视场合成的实验室光学像元配准、行同步技术与辐射匹配等,这些技术是视场合成方案得以实现的基本保证.

本文所述的系统采用的视场配准包括两成像仪的夹角调整 and 全视场的直线性调整,采用了小光点扫描法进行中心定位^[2],该方法带来的误差不大于瞬时视场的 $1/20$,实现了两个视场图像行成一条直线并且重叠部分的像元获取相同的地面目标.

图像行之间的行同步配准也就是两台成像仪的数据采集时间上的同步是通过一块同步控制信号板来实现的,由 Jupiter-T GPS 板的 10KHz 频率分频产生同步的 50Hz、50Hz 和 500Hz,分别触发两台成像仪和 POS 数据的采集和记录.此外还在记录图像数据的同时,两台成像仪数据采集系统分别记录系统的 64 位时间片数据,通过考察此时间信号的变化来检测可能发生的漏行,从而进一步保证两台仪器数据的行配准.基于此设计,两个光谱仪的同步误差保持在一个采样周期内.

2 光学目标特性的匹配

目标特性匹配的目标是实现两个视场的探测单元具有相同的目标特性,即光谱匹配(相同的中心波长和波段宽度)和目标匹配(相同的瞬时视场的大小).光学系统包括镜头、狭缝与色散器件,采用完全相同的系统显然是理想的状态,其中狭缝是最容易做到高度一致的器件.

设光学系统焦距为 f ,光敏元尺寸为 $a \times a$ (垂直 \times 水平),瞬时视场 IFOV 为 $\text{IFOV}_v = \alpha = \frac{a}{f}$,在探测器尺寸确定的情况下,通过对系统的标定^[3],选用相同焦距的光学系统可以实现瞬时视场的匹配.

其次是光谱的匹配,这是通过选用色散特性相近的光栅并通过光谱位置的高精度调节(光谱标定)来实现的.采用波长扫描法分别确定两个视场成像仪的各个波段的中心波长,使之有相同的光谱分布^[4].皱眉和微笑效应需要予以校正.

3 辐射响应的匹配

光学系统的光学传递函数(包含镜头和色散器件),决定了照射到探测器上来自瞬时视场的目标信号亮度在光学系统中传输中的变化,这里无需考虑相位,也不考虑其频率特性,可以将光学传递函数简化为一个与在光学镜头上的位置有关的衰减系数 $T_{j,k}(\lambda)$, $L_s^{j,k}(\lambda)$, $L_i^{j,k}(\lambda)$ 分别为入瞳和照射到某探测器 (j, k) 上的光谱辐射亮度值, $L_i^{j,k}(\lambda)$, $L_z^{j,k}(\lambda)$ 分别为入瞳处目标辐射值和杂散光辐射值(散射光为干扰信号,在此不作讨论)

$$\begin{aligned} L_i^{j,k}(\lambda) &= T^{j,k}(\lambda) \cdot L^{j,k}(\lambda) \\ &= T^{j,k}(\lambda) \cdot (L_i^{j,k} + L_z^{j,k}) \end{aligned} \quad (1)$$

j, k 为该探测元在探测阵列上的位置坐标.进一步简化也是可行的,因为狭缝的作用,系统的成像仅在一维空间上进行.

光电探测器 (CCD) 上的电磁辐射能量到存储数据的信号传递过程函数,该过程核心是光电探测器的信号转换特性和 A/D 转换器性能,转换模型可表示为

$$\begin{aligned} DN^{j,k} &= \Delta t \cdot e_q^{j,k} \cdot \tau_{opt}^{j,k} \cdot g_a^j L_s^{j,k} + \Delta t \cdot e_{dc}^{j,k} \cdot g_a^j + S^{j,k} \\ &= \Delta t \cdot G^{j,k} L_s^{j,k} + DC^{j,k} + S^{j,k} \\ &= DN_0^{j,k} + S^{j,k} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $DN^{j,k}$ 为探测单元的输出值, Δt 是曝光时间(又称积分时间),可根据需要进行系统设置, $\tau_{opt}^{j,k}$ 为光学透过率, g_a^j 为读出电路增益, $e_q^{j,k}$ 为该探测单元的量子效率, $e_{dc}^{j,k}$ 为电子噪声, $DC^{j,k}$ 即为暗电流, $S^{j,k}$ 为读出拖尾噪声.

上述模型中读出电路增益 g_a^j 的设定表示该模型假设探测单元输出值转化为数字量是完全线性的,否则 g_a^j 应表示为以函数探测单元输出值为自变量的函数,同样如果探测单元输入输出特性非线性(包含线性度较好的探测单元进入饱和), $e_q^{j,k}$ 也是输入变量的函数,这些非线性会给整个系统的辐射校正带来复杂性,不利于亮度匹配,因此需要尽量选择线性度好的探测器.此外光学透过率是否是波长的函数也是需要考虑的,不过利用针对各个探测单元的辐射标定方法,这个因素也可以看作是一个简

单的对对应探测单元的衰减系数.

$$DN^{j,k} = \Delta t \cdot G^{j,k} \cdot T^{j,k}(\lambda) \cdot L_s^{j,k} + DC^{j,k} + S^{j,k} \quad (3)$$

由式(3)可知,当两个视场成像仪空间配准、光谱配准后,只要保证 $\Delta t, G^{j,k}, DC^{j,k}$ 一致,则可以实现直接的亮度匹配,而实际上这是不可能的,探测器以及电子学系统具有的离散性使筛选参数相同器件的工作显得很现实,因此测得这些参数在事后校正更为可行:

$$L_s^{j,k} = [DN^{j,k} - (DC^{j,k} + S^{j,k})] / [\Delta t \cdot G^{j,k} \cdot T^{j,k}(\lambda)]$$

$$= (DN^{j,k} - DC^{j,k}) / G_3^{j,k} - S^{j,k} / G_3^{j,k} \quad (4)$$

其中 $S^{j,k}$ 作为公式中很难测量的一个量,且会对校正结果有影响,但是其大小一般可以假设具有下述规律: $S^{j,k} = \frac{\Delta t_s}{\Delta t} \sum_{j_s=1}^{n_j-1} DN_0^{j_s,k}$, 本系统通过两个视场重合部分的像元亮度关系减小此项的影响,原理如式(4)所示:

$$\begin{cases} L = (DN^1 - DC^1 - S^1) / G_3^1 \\ L = (DN^2 - DC^2 - S^2) / G_3^2 \end{cases} \quad (5)$$

其中 L 为一个重合部分像元的光谱辐照强度,式

spectro of some article in left and right view field(20031015111125processed)

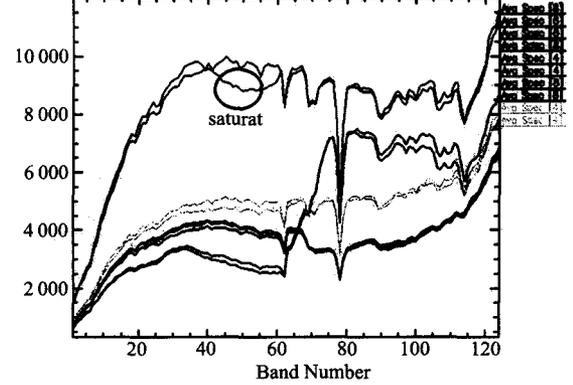


图2 两视场重合部分的光谱比较

Fig. 2 The comparison of spectra of superposition part between two view fields

(5)中第一个表达式为一个视场的成像仪的输入输出关系表达式,即式(4),上标为2的为另一个视场的输入输出关系表达式,由此公式可以获得两个 $S^{j,k}$ 之间的关系, $S^{j,k}$ 无法完全消除,只要消除两者的差别就可以实现亮度的匹配,配合面向高

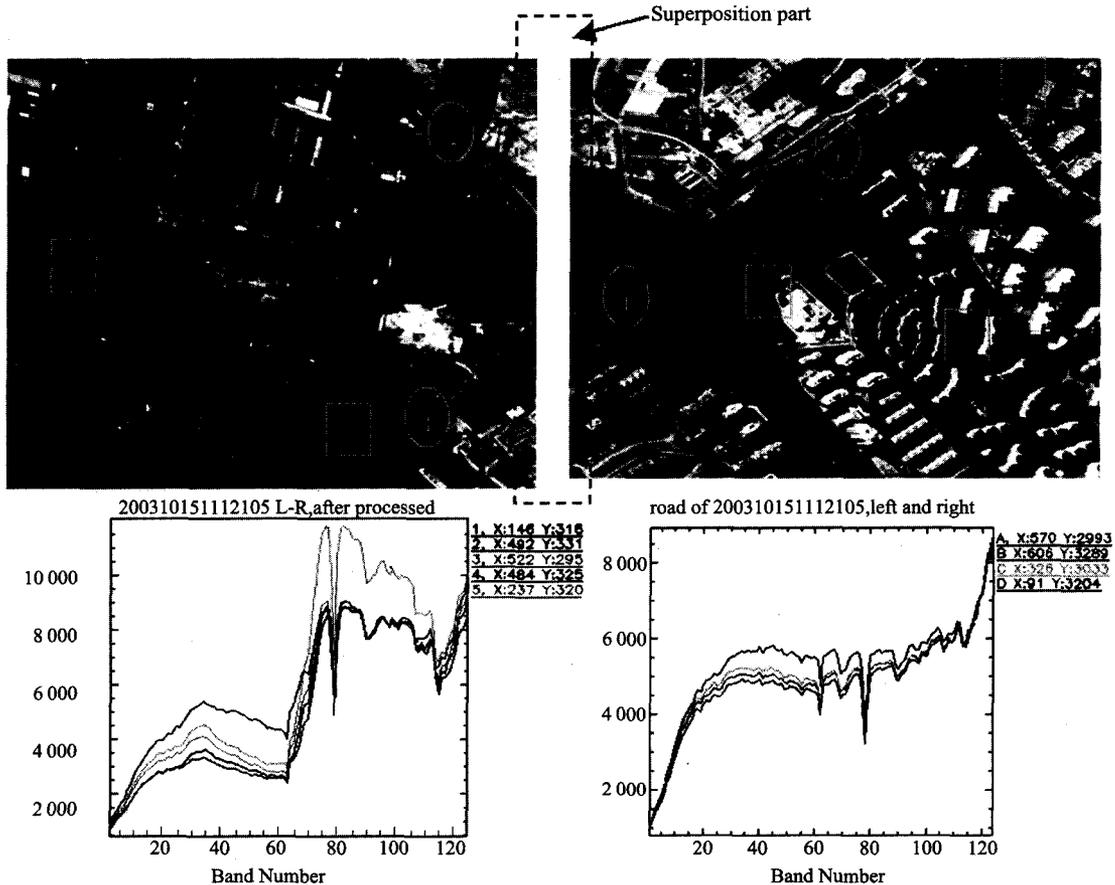


图3 两个视场图像同类地物光谱曲线比较

Fig. 3 The comparison of spectra of the same kinds of targets between two view fields

光谱遥感应用的地面同步测量最终实现量化应用.

4 辐射匹配的实现

由上述分析可知,实现视场合成的高光谱成像系统的关键在于:光学镜头焦距和分光器件参数的一致性、线性度好的同尺寸探测器,以及辐射校正的精度.进一步,为了提高视觉效果,两个视场的重合部分的亮度关系可以用来进行辐射亮度的相对校正,实现良好的匹配效果.

首先,通过对同一型号镜头的多组镜头测试和挑选来实现光学镜头参数的一致性,选用线性度好的 CCD 探测器.

其次,进行光谱标定和调整,使两个成像仪的同一个波段对应同一个波长,采用常规的波长扫描法进行光谱定标.

本系统采用的单色仪的光谱分辨力优于 0.2nm,两视场光谱定位精度 $< 1/4$ 波段,也就是在光谱采样间隔 $< 4 \sim 5\text{nm}$ 的本文系统中,匹配差异 $< 1 \sim 2\text{nm}$.

第三,对采集的图像进行辐射校正,本系统采用两个视场的高光谱成像仪同时通过高精度积分球进行辐射定标,分别获取每个像元的辐射校正系数,根据式(5)和式(6)进行辐射校正和匹配.

最后,根据重合部分图像亮度残存的差异,进行简单的线性校正.

5 实验结果

系统实现后,进行了飞行试验的验证,图像拼接

视觉效果良好,重合部分的图像相关性强.

高光谱系统的左右视场分别进行辐射校正后,重合部分的同名点的辐射量数值应该相同,因此视场合成图像的图像亮度的比较采用了图像重合部分的同名点对比来进行的,比较结果显示利用该方法,得到相对误差绝大部分波段优于 4% (误差/信号强度),如图 2 所示.同时,两个视场的同类地物的光谱曲线也具有很好的一致性,如图 3 所示.

6 结语

宽视场高光谱成像系统的视场分割方案在上述技术的保证下,得到了较好的实现,飞行试验的数据拼接结果显示,图像拼接视觉效果、光谱曲线对比结果良好,证明了这种技术途径的可行性.

REFERENCES

- [1] XU Wei-Ming, LIU Jun. An operational airborne linear pushbroom imaging spectrometer [J]. *Infrared Technology* (徐卫明,刘军.一种宽实用化的机载线阵推扫成像光谱仪.红外技术),2005,27(6): 347—352.
- [2] HE Zhi-Ping, FANG Kang-Mei, PAN Li-Yun, et al. Field putting technique of wide field hyperspectral imager, advanced sensor systems and applications II [J]. *Proceedings of SPIE*,2005,5634:775—781.
- [3] WANG Zhi-He, SHU Rong, HE Zhi-Ping, et al. New method of CCD camera calibration based on collimator [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王志和,舒嵘,何志平,等.基于平行光管的 CCD 相机标定新方.红外与毫米波学报),2007,26(6):465—468.
- [4] SHU Rong, XUE Yong-Qi, YANG Yi-De. Calibration and application of airborne pushbroom hyperspectral imager (PHI), Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VII [J]. *Proceedings of SPIE, Bellingham, WA, 2004*, 5234:668—675.