

文章编号: 1672-8785(2017)09-0028-05

## 基于面阵凝视扫描成像的声光光谱 成像系统及其图像拼接验证试验

徐映宇\* 秦侠格 姬忠鹏 何志平 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所国家主动光电重点实验室, 上海 100076)

**摘 要:** 可见—近红外波段(400~1000 nm)成像光谱仪是光谱探测的重要组成部分。基于地基可见—近红外成像光谱仪的实际应用要求,提出了一种采用面阵探测器的凝视扫描成像光谱仪。该光谱仪还采用了一种新型分光器件声光可调谐滤波器(Acousto-optic tunable filter, AOTF)。其特点在于光谱的选择和施加在它上的射频信号频率相关;通过程序控制射频信号,就可以控制光谱。利用设计的光谱成像原理样机进行了地基月球观测实验。基于实验的特点,在光学设计的基础上增加了另一路共轴辅助光学,以进行粗定位。在获取成像结果之后,进行了辐射定标和尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transformation, SIFT)图像拼接处理。结果表明,利用二维指向机构和面阵凝视成像系统,结合 SIFT 图像拼接算法,可有效获取宽幅高分辨率光谱图像。

**关键词:** 面阵凝视; 扫描; 声光可调谐滤波器; 图像拼接

**中图分类号:** TP73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.09.005

## AOTF Imaging Spectrometer Based on Staring/scanning Area Array Detector and Its Image Stitching Test

XU Ying-yu\*, QIN Xia-ge, JI Zhong-peng, HE Zhi-ping, WANG Jian-yu

(Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology,

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

**Abstract:** A visible and near infrared imaging spectrometer is one of the important parts for spectral detection. According to the actual application requirements of a ground-based visible and near infrared imaging spectrometer, a staring/scanning imaging spectrometer using an area array detector is proposed. The spectrometer also employs a new light splitting device—an Accousto-optical Tunable Filter (AOTF). It has a feature that the selection of spectrum is related to the frequency of the RF signal applied to it. By controlling the RF signal via a program, the spectrum can be controlled. A ground-based lunar observation experiment is carried out with the imaging spectrometer prototype designed. According to the experimental characteristics, another auxiliary coaxial optics is added for rough positioning on the basis of optical design. After the imaging results are acquired, radiometric calibration and SIFT image stitching are implemented. The results show that by combining a two-dimensional pointing mechanism and a staring imaging system with the SIFT image stitching algorithm, wide width high resolution spectral images can be acquired effectively.

**Key words:** imaging spectrometer; area-array staring/ scanning; large FOV; AOTF; image stitching

**收稿日期:** 2017-04-07

**基金项目:** 国家自然科学基金(21105109)

**作者简介:** 徐映宇(1991-),男,安徽亳州人,博士生,主要从事成像光谱技术研究。E-mail: xuyingyua@126.com

## 0 引言

成像光谱技术是上世纪 70 年代发展起来的一种对地遥感观测技术。成像光谱仪能在获取所观测目标二维空间信息的同时, 获取目标像素的光谱信息<sup>[1]</sup>。因此它在地面特殊地形尺度遥感<sup>[2]</sup>、矿物探测<sup>[3]</sup>、大气定量分析<sup>[4]</sup>、水质污染检测<sup>[5]</sup>和食品检测<sup>[6]</sup>等很多方面有重要应用。

成像光谱仪的成像方式有光机扫描式、推扫式和凝视型三种, 其中光机扫描式的扫描视场大, 但像元积分时间短, 空间和光谱分辨率相对较低。实用型模块化 (Operational modular imaging spectrometer, OMIS) 成像光谱仪<sup>[6]</sup>是光机扫描型成像光谱仪的典型, 它有五个波段范围, 扫描总视场为  $70^\circ$ , 瞬时视场为  $3 \text{ mrad}$ 。推扫式成像光谱仪无运动部件, 穿轨空间维像元可同时获取, 成为当前的主流技术, 但其视场及空间分辨率的进一步提高相对困难, 且系统设计复杂。凝视型成像光谱仪具有同时获取二维空间信息的特点, 但其成像视场受面阵探测器和像质要求的制约<sup>[6]</sup>。大视场、高空间和光谱分辨率、光谱可灵活选择是成像光谱仪发展及进一步推广应用追求的目标, 但在实现高性能的同时也受现有技术条件和经济成本的制约<sup>[7-9]</sup>。

本文提出了一种光机扫描与凝视成像技术相结合的高分辨率成像光谱仪技术途径, 以地基月球高分辨成像光谱观测为实验目标完成了原理样机研制及初步验证实验。实验结果利用基于尺度不变的 SIFT 算法进行图像拼接, 实现了更高分辨率的光谱成像。分析表明, 将 AOTF 凝视型成像光谱仪与二维指向机构的扫描成像结合起来, 既可以提高成像分辨率, 还可以有效扩大其成像视场。

## 1 工作原理及系统设计

基于面阵凝视扫描成像的声光光谱成像系统结合光机扫描能实现更高空间分辨率的成像, 其工作原理为: (1) 在探测器一定时, 选用长焦距光学系统能实现高空间分辨率, 但其单帧

成像视场变小; (2) 利用二维指向机构扫描多次成像, 实现成像视场的扩大。如图 1 所示, 光学系统的焦距变长  $N$  倍时, 其空间分辨率提高  $N$  倍, 但单帧图像的视场为  $1/N$ ; 结合二维指向机构扫描  $N$  次成像后, 最终理论上可以实现空间分辨率提高  $N$  倍的应用目标。如果光学系统的焦距不变, 结合二维指向机构, 扫描  $N$  次成像后, 最终理论上可以提高成像视场  $N$  倍。

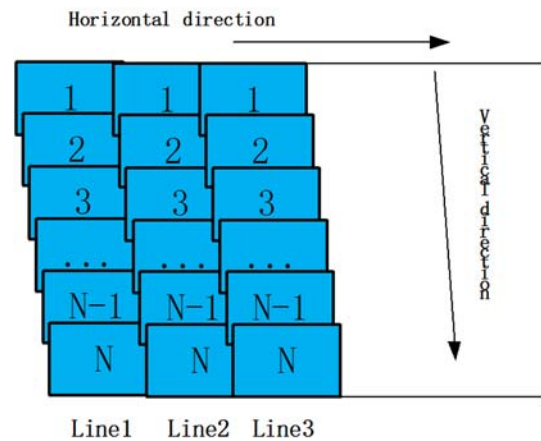


图 1 高分辨率成像原理图

分光器件是成像光谱仪的核心部件, 决定了光谱仪的光谱分辨率、光谱范围、工作模式、工作温度范围、重量和体积等性能指标。声光可调谐滤波器是一种电光调制分光器件, 它采用固态晶体材料, 基于声光效应的原理, 利用声波在各向异性介质中传播时对入射到传播介质中的光的布拉格衍射实现波长选择, 改变施加在晶体上的射频驱动频率, 透射的单色光波长也相应改变, 从而每次获取特定波长的图像信息, 获得成像光谱图像立方体。

基于面阵凝视扫描成像的声光光谱成像系统的设计是: (1) 采用全透射式光学系统, 包括成像镜、视场光阑、准直镜、格兰棱镜 1、AOTF 晶体、格兰棱镜 2、汇聚镜和面阵探测器; (2) 电子学部分主要包括系统供电、通信和射频驱动。其中, 射频驱动为 AOTF 晶体提供相应的射频信号, 获取相应的单色波长; (3) 二维指向机构实现编程可控的扫描成像; (4) 通过 PC 软件进行光谱选择和图像实时显示。

## 2 原理样机研制及试验方案设计

原理样机研制以月球高分辨成像光谱探测为应用目标,其主要技术指标见表1,成像光谱仪工作于400~1000 nm光谱范围内。为了获取高分辨率光谱图像,选用1500 mm的成像镜头,对应的空间分辨率为 $0.022 \mu\text{rad}$ ,光谱分辨率为5 nm,单帧图像视场约为 $0.1^\circ$ 。通过二维转台,凝视扫描成像6次。将成像视场在纵横两个方向上各扩大6倍。其中,二维指向机构选用星特朗公司生产的NexStar 6 SE型号产品所配带的程控三脚架,其自带的标准RS232接口可通过程序控制转向,标准软件可进行9种不同的转速设置,精度达到 $0.08''$ ,除此之外还提供了手动控制器和双行显示、每行16字符的液晶显示屏。

表1 成像光谱仪的技术指标

项目	描述
光谱范围 (nm)	400 ~1000
光谱分辨率 (nm)	5
光谱采样间隔 (nm)	1~5(可选)
波段数	5~1000(可选)
焦距 (mm)	1500 mm
瞬时视场	$0.022 \mu\text{rad}$
成像视场	$0.6^\circ \times 0.6^\circ$ (扫描实现全月亮探测)

在实际应用中,长焦距光谱仪不利于定位月球的位置,因此设计了另一条共轴的短焦(75 mm)光路,此光路仅包含成像镜和面阵探测器。由于此路光轴和主光路几乎共轴,当月球出现在此光路的图像中心时,只要高分辨率月球光谱图像呈现在主光学系统中,即可实现粗跟踪的目的。

## 3 实验过程和处理结果

### 3.1 实验过程

实验以月球作为观测目标,为了获取高分辨率的月球光谱图像,程控三脚架对月球各个部分分别进行扫描成像,整个过程耗时约15 min。



图2 成像光谱仪和转动平台的实物图

### 3.2 数据处理

图像获取之后,首先进行辐射定标处理,将数字量值(Digital Number, DN)图像转化为辐亮度图像。随后进行各波段的图像拼接,获取大视场高分辨率图像。最后对各个波段的全幅月球辐亮度图像进行配准,获取各个点的光谱辐亮度曲线。

#### 3.2.1 特征点提取

图像获取结束之后,我们利用SIFT算法<sup>[10]</sup>进行特征点识别的图像拼接。SIFT算法又称尺度不变特征点提取方法,其实现主要有4个步骤:(1)检测尺度空间极值;(2)精炼特征点的位置;(3)计算特征点的描述信息;(4)生成本地特征的描述符。即先使用高斯过滤器对原始图像进行若干次连续滤波以建立第一个尺度组。再把图像减小到原来的一半,进行同样的高斯滤波以形成第二个尺度组,之后,重复操作直到图像小于某一给定阈值为止。接下来对每个尺度组中的高斯图像进行差分,形成高斯差分尺度组。然后,取这些高斯差分图像中的局部极值,便可得到尺度空间域上的图像特征点。最后,用128维的向量(包括位置、尺度、方向等信息)表示每个特征点,这样就生成了用于图像特征匹配的图像特征描述符。

#### 3.2.2 特征点匹配

我们采用最邻近欧式距离和次临近欧氏距离的比值作为两个点是否匹配的度量。则对于P

图中的某一关键点, 若要与 Q 图中的某一关键点匹配, 就需满足以下条件:

$$\frac{d(p_i, q_m)}{d(p_i, q_n)} < 0.7 \quad (1)$$

式中,  $q_m$  为与  $p_i$  欧氏距离最小的特征点,  $q_n$  为与  $p_i$  欧式距离次小的特征点。此种判断方法的原理在于特征点与正确的匹配特征点的距离应该明显小于与最近的错误匹配特征点的距离。

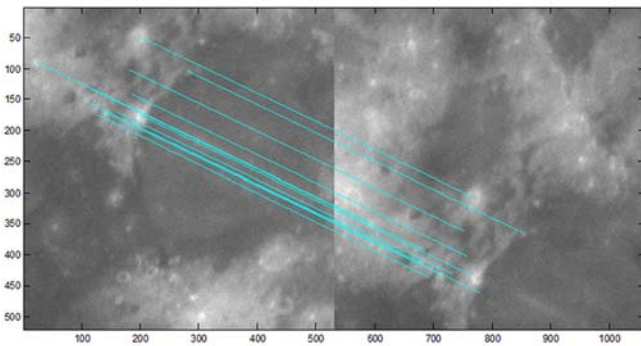


图 3 特征点匹配

### 3.2.3 图像配准

常用的图像变换形式包括平移、旋转、透射、缩放和亮度变化等, 这些变换模型都可以用自由度为 8 的透射变换矩阵表示, 透射变换是一种利用图像的全局特征将图像的一些边缘连接起来, 形成平滑边缘的一种图像变换方法, 是图像透射变换的一种基础变换。其形式为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 & h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 & h_5 \\ h_6 & h_7 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $(x, y)$  和  $(x', y')$  分别为两幅图像的坐标。矩阵  $H$  为自由度为 8 的变换矩阵。

随机抽样一致算法 (Random Sample Consensus, RANSAC) 是根据一组既包含正确数据又包含错误数据的样本集合, 选出最优的样本数据代表, 得出最优的数学模型。在图像拼接的问题中, 特征点的匹配有正确的匹配和错误的匹配, 我们需要从这些匹配中选取四组最优的匹配点来计算式中的  $H$  变换矩阵的 8 个未知量。

利用 RANSAC 算法进行特征点选择的过程如下:

(1) 从所有匹配的特征点对中随机选取四组特征点对, 利用式 (2) 计算变换矩阵  $H$ ;

(2) 利用 (1) 计算出的  $H$ , 对其他没有被选中的特征点做变换, 得到实际匹配的点和利用  $H$  计算出的点的差值; 若此差值大于 4 个像素值, 则认为此点为“外点”; 否则, 认为此点为“内点”。

(3) 统计“内点”个数并将其与当前“内点”个数最大值作比较, 若大于当前最大值, 则更新当前最大值和变换矩阵  $H$ 。若“内点”个数大于总数的 80%, 退出循环; 否则回到 (1);

(4) 若循环次数大于 30 次, 依然没有找到可以使“内点”个数大于总数的 80% 的  $H$ , 则退出循环, 选择“内点”个数最多的  $H$ 。

利用变换矩阵  $H$  对待拼接图像进行映射。在映射过程中, 由于图像尺寸有可能发生了改变, 所以可能会在图像的某些位置出现空洞, 需要进行插值操作。遇到此种情况时, 我们选择最近邻插值进行处理。至此, 图像变换步骤完成。

### 3.2.4 图像融合

融合是指对两幅图的公共部分进行重构, 主要包含两个原则: 一是融合的缝线不要太明显, 几部分之间不要出现亮度的断崖式陡变, 满足人类的视觉效果; 二是尽可能保留原始图像的信息。加权平均法对重叠区域的处理是由两幅图共同构成, 其数学表达式为

$$f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y), & (x, y) \in f_1 \\ w * f_1(x, y) + (1 - w) * f_2(x, y), & (x, y) \in f_1 \cap f_2 \\ f_2(x, y), & (x, y) \in f_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $0 \leq w \leq 1$ ,  $w$  的取值是根据重叠区域像素到重叠区域边界的距离计算出的。沿着图 1 到图 2,  $w$  逐渐由 0 变成 1, 令  $d_1$  和  $d_2$  分别为重叠区域中像素点到重叠区域边界的距离,

### 3.3 数据处理结果

我们对若干幅图像逐个进行上述自动图像拼接, 得到了高分辨率大视场的月球光谱图像。

图4为700 nm波段的光谱图像。成像光谱仪经过光谱定标和辐射定标之后,可以获取月球上每一点的辐亮度曲线。图5展示了其中三点的辐亮度曲线。



图4 月球700 nm波段宽幅高分辨率光谱图像

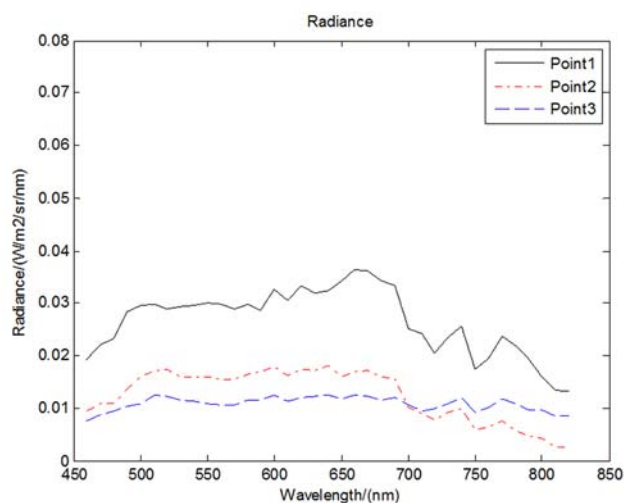


图5 月球三点辐亮度曲线

## 4 结论

成像光谱技术是一种重要的遥感观测技术。自从上世纪70年代以来,它在越来越多的领域获得了广泛应用。400~1000 nm的可见—近红外波段成像光谱仪是光谱探测的重要分支。本文根据宽幅、高分辨率和光谱可选的应用要

求,提出了采用面阵凝视扫描和可编程选择波段的AOTF分光晶体相结合的技术方案,并设计了原理样机。随后进行了地基月球观测实验验证技术方案,根据实验需求对样机进行了改造,除了主光路之外增加了一辅助光路,以对月球进行粗跟踪。实验对一个月球进行了40个区域的成像,每个区域采集了80个波段的光谱图像,并对图像进行了辐射定标和图像拼接。结果表明,这种技术途径可有效提高图像的视场和空间分辨率,同时可进行波段的程控选择。

## 参考文献

- [1] 沈中,葛之江,张连台. 航天超光谱成像仪技术原理及其发展现状[J]. *航天器工程*,2001,10(4):45-52.
- [2] 刘济凡,马艳华,张雷,等. AOTF成像光谱仪及其在青藏高原多尺度遥感中的试验应用[J]. *红外与毫米波学报*,2013,32(1):86-90.
- [3] He Z P, Wang B Y, Lv G, et al. Visible and Near-infrared Imaging Spectrometer and its Preliminary Results from the Chang'E 3 Project[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014,85(8):083104-083104-3.
- [4] 郝慧敏,曹建安,于志强,等. AOTF-NIR光谱仪用于混合气体定量分析的探索[J]. *光谱学与光谱分析*,2009,29(8):87-91.
- [5] Gupta N, Dahmani R. AOTF Spectrometer for Water Pollutant Monitoring[C]. *Engineering in Medicine and Biology Society, Proceeding of the 19th Annual International Conference of the IEEE*, 1997:751-752.
- [6] 王建宇,舒嵘,刘银年,等. *成像光谱技术导论*[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [7] 郝爱花,胡炳,白加光,等. 大视场宽波段高分辨率分波段机载紫外—可见光成像光谱仪设计[J]. *光谱学与光谱分析*,2013,33(12):3432-3436.
- [8] 李新娥. 大视场多光谱相机图像拼接与融合技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2015.
- [9] 邱民朴. 大视场红外扫描成像光学系统设计[J]. *红外技术*,2012,34(11):648-651.
- [10] Li H, Niu J Z, Guo H. Automatic Seamless Image Mosaic Method Based on Feature Points[J]. *Computer Engineering and Design*,2007,28(9):2083-2085.