

文章编号: 1672-8785(2018)06-0001-07

宽幅长波红外高光谱扫描成像系统的设计

赵航斌^{1,2} 柴孟阳¹ 孙德新^{1,2,3} 刘银年^{1,2,3,*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院上海技术物理研究所启东光电遥感中心, 江苏 启东 226200)

摘 要: 为了满足宽幅长波红外高光谱成像需求, 基于光导型碲镉汞线列探测器和平面闪耀光栅, 提出了一种在长波红外 8~12.5 μm 范围内具有 150 个连续波段、30°成像视场角、基于地面应用的低成本、轻小型高光谱扫描成像系统的设计方法。该系统由光栅扫描机构和视场扫描机构组成, 两机构同步控制以实现精细分光 and 宽幅成像功能。推导了光栅扫描角度与探测器接收单色光的波长、视场扫描角度与成像视场角间的关系式。在分析扫描系统扫描定位精度的基础上, 设计了一套以步进电机为运动核心, 采用“摆扫定位+停止成像”工作模式的扫描系统。实验表明, 该扫描系统可满足系统视场定位精度及分光精度的要求。获取的硅碳棒在长波红外波段的发射光谱曲线表明该系统的设计合理有效。该扫描系统的设计方法对长波红外高光谱系统的设计具有一定的指导意义。

关键词: 高光谱成像系统; 长波红外; 线列探测器; 扫描系统

中图分类号: TP722.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.06.001

Design of Wide Swath and Long Wave Infrared Hyperspectral Scanning System

ZHAO Hang-bin^{1,2}, CHAI Meng-yang¹, SUN De-xin^{1,2,3}, LIU Yin-nian^{1,2,3,*}

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

3. Qidong Optoelectronic Remote Sensing Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Qidong 226200, China)

Abstract: To meet the demand of wide-swath and long-wave infrared hyperspectral imaging, a new design method of low-cost, light and miniature hyperspectral scanning imaging system for ground imaging is proposed on the basis of photoconductive HgCdTe linear detectors and plane blazed rasters. The system has 150 continuous spectral segments and a 30° imaging field angle in the 8~12.5 μm long-wave infrared range. It consists of a raster scanning mechanism and a field-of-view scanning mechanism, both of which are controlled synchro-

收稿日期: 2018-03-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0500400); 国家高分辨率对地观测系统重大专项(A0106/1112)

作者简介: 赵航斌(1991-), 男, 浙江义乌人, 博士生, 主要从事长波红外成像光谱电子学技术方面的研究。E-mail: sitpzhh@163.com

nously to achieve fine light splitting and wide-swath imaging. The relations both between the angle of raster scanning and the detector received monochromatic wavelength and between the field-of-view scanning angle and the imaging field angle are deduced. On the basis of analyzing scanning positioning accuracy, a scanning system which uses a stepper motor as the core of motion and uses an operating mode of 'whisk positioning+stop imaging' is designed. The experimental result shows that the scanning system can meet the requirements of field of view positioning accuracy and light splitting accuracy. In addition, the silicon carbon emission spectrum curve obtained in the long wave infrared range shows that the design of the system is reasonable and effective. The design method of this scanning system is of guiding significance to the design of long-wave infrared hyperspectral systems.

Key words: hyperspectral imaging system; long-wave infrared; linear detector; scanning system

0 引言

组成岩石的矿物在长波红外波段具有选择性发射的特性。同一矿物在不同波段具有不同的发射率,而不同矿物在同一波段具有不同的发射率。矿物的这种选择性发射特征在岩石发射光谱曲线上表现为矿物的特征发射率峰与谷^[1]。获取岩石在长波红外波段的发射光谱曲线,对识别矿物信息具有重要意义。便携式长波红外高光谱成像仪具有图谱合一的特征,它在获取地物图像信息的同时也获取了地物光谱信息,可应用于矿物的精确识别与分类^[2]。

长波红外高光谱成像仪的发展受高性能长波红外面阵探测器、长波红外背景杂散辐射和长波红外精细分光等技术限制^[3],研制难度大,起步时间晚。直到 20 世纪 90 年代,以机载长波红外高光谱成像仪(Airborne Hyperspectral Imager, AHI)^[4]、空间增强宽带阵列光谱仪系统(Spatially-Enhanced Broadband Array System, SEBASS)^[5]、长波红外高光谱成像仪(Long-Wave Hyperspectral Imaging Spectrometer, LWHIS)^[6]、量子势阱红外高光谱成像仪(Quantum Well Infrared Earth Science Tested, QWEST)^[7]等仪器在遥感领域的应用,才标志着长波红外高光谱系统设计逐渐成熟。但 AHI、SEBASS、LWHIS、QWEST 等系统均采用制冷光机系统方法来抑制背景杂散辐射,系统的体积及功耗相对较大,无法便携地应用于野外探测。以热红外高光谱成像仪(Thermal Hyperspectral Imager, THI)^[8]为代

表的干涉式长波红外高光谱成像仪具有高光通量、高输出、多通道、光谱分辨率高等优点,但其内部扫描镜的运动需要极高的精度,对平台的姿态稳定性要求高^[9],目前仍处于实验室应用阶段,离野外应用仍有较大距离。

长波红外辐射经分光系统精细分光后,辐射能量很弱。传统的光伏型碲镉汞长波红外探测器由于光敏面的尺寸较小,探测灵敏度较低,在探测微弱分光信号时易受背景辐射的影响。与光伏型探测器相比,光导型碲镉汞探测器可制备更大的光敏元,具有更高的探测灵敏度。此外,光导探测器接收辐射时对外会呈现出一个变化的电阻,成像不需要积分过程。当环境温度稳定时,通过桥式电路可扣除背景杂散辐射,并放大目标辐射信号。然而,应用光导型碲镉汞探测器时,必须对探测器每个像元采取适当的偏置,以设置相互独立的前置放大电路^[10]。由于前置放大电路规模限制了光导型碲镉汞面阵探测器的发展,目前光导器件仍以线列探测器为主。

本文基于光导型碲镉汞线列探测器,提出了一种低成本、轻小型长波红外高光谱扫描成像系统的设计方法。该高光谱扫描成像系统在 8~12.5 μm 范围内拥有 150 个连续成像波段、30°成像视场角。推导了光栅扫描角度与探测器接收单色光的波长、视场扫描角度与成像视场角间关系式;分析了扫描系统定位的精度要求;设计了一套以步进电机为运动核心,采用“摆扫定位+停止成像”工作模式的扫描控制电

路,对基于该控制电路的高光谱扫描系统定位精度进行了实验与分析。

1 系统设计概述

1.1 探测器概述

自然界中长波红外辐射的大部分辐射能量来自于常温物体辐射。根据斯特藩-玻尔兹曼定律,物体在全波段的辐射出射度与该物体绝对温度的四次方成正比。因此,常温物体在长波红外波段的辐射出射度比高温物体的辐射出射度小很多。此外,高光谱应用时,微弱的长波红外辐射还将被进一步分光,到达探测器焦平面并能够被接收的辐射能量将更小。为了提高微弱长波红外探测灵敏度,系统采用了光敏面尺寸达到 $200\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ 的光导型碲镉汞 40×1 元线列长波红外探测器。图1为探测器两个不同像元的光谱响应曲线。由图1可以看出,探测器在 $7.5 \sim 14\ \mu\text{m}$ 范围内具备较高的响应率,可满足高光谱系统响应波段($8 \sim 12.5\ \mu\text{m}$)的要求。

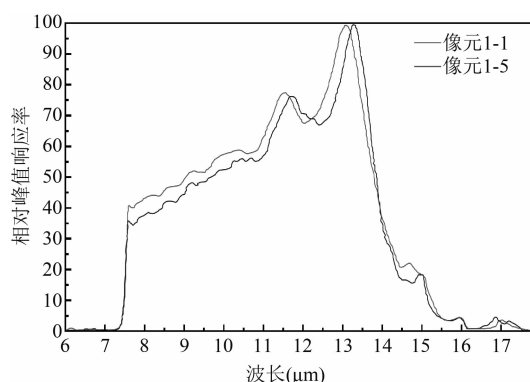


图1 探测器的光谱响应范围

1.2 光学系统的设计

结合长波红外辐射能量弱的特点,光学系统选用光谱分辨率高、色散线性度好、色散效率高的平面闪耀光栅作为系统分光元件。平面闪耀光栅的刻线数为 $50.0\ \text{Lp/mm}$, 闪耀角为 $17^\circ 27'$, 闪耀波长为 $12.0\ \mu\text{m}$, 其衍射效率曲线如图2所示。

图3为光学系统的光路图。长波红外高光谱系统成像时利用光栅扫描机构控制光栅运动,在线列探测器上对同一地物分时实现不同

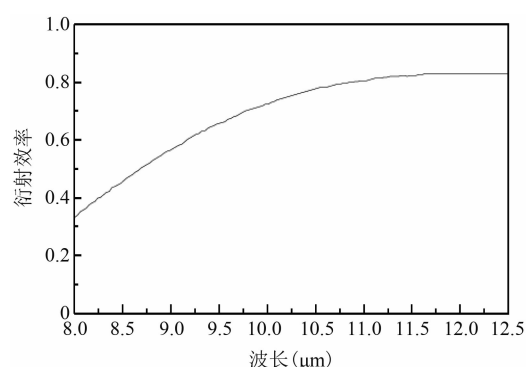


图2 平面光栅衍射效率计算值

波段探测。为了简化外场应用时对扫描平台的需求,系统引入视场扫描机构控制反射镜扫描,以增加系统的成像视场角。

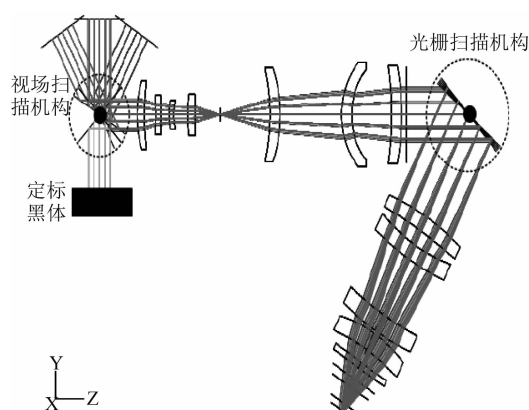


图3 光学系统的示意图

2 光机扫描理论推导

2.1 光栅扫描机构理论推导

图4为光栅扫描机构扫描的原理图。 G_0 为光栅的初始位置。当光栅转动 α (光栅顺时针转动时 $\alpha > 0$)角度到达G位置时,线列探测器上接收到的衍射出射光的波长 λ 随光栅转动角度 α 的变化而变化。图4中, N_0 为光栅初始位置的法线, N 为光栅转动 α 角度后的法线, $i(i_0)$ 为光线入射角, $\theta(\theta_0)$ 为光线衍射角。

由于探测器焦平面安装位置固定,且光学系统安装调试完毕后,从主光学系统入射到光栅光线的方向也将保持不变,当光栅转动 α 角度时,对特定探测波长恒有:

$$i + \theta = i_0 + \theta_0 = 2\phi \quad (1)$$

式中, 2ϕ 为一固定值,光学系统设计完成时

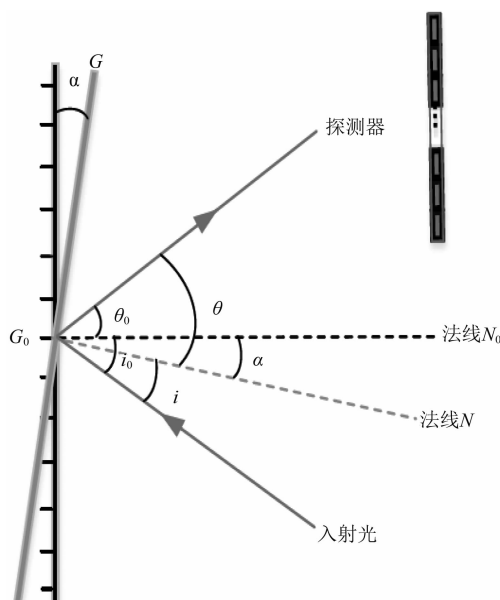


图 4 光栅扫描示意图

该值便已确定,系统设计时取 $2\theta=60^\circ$ 。

光栅旋转 α 角度时,光线入射角 i 及衍射角 θ 满足:

$$i = i_0 - \alpha \quad (2)$$

$$\theta = \theta_0 + \alpha \quad (3)$$

依据光栅方程 $d(\sin i - \sin \theta) = m\lambda$, 取 1 级衍射光谱时 $m=1$, 则有:

$$d(\sin i - \sin \theta) = \lambda \quad (4)$$

由和差化积公式可得:

$$2d \cos \frac{i+\theta}{2} \cdot \sin \frac{i-\theta}{2} = \lambda \quad (5)$$

将式(1)~(3)代入式(5)中,有:

$$\lambda = 2d \cos \frac{i_0 + \theta_0}{2} \cdot \sin \left(\frac{i_0 - \theta_0}{2} - \alpha \right) \quad (6)$$

式(6)为探测器接收光的波长 λ 与光栅转动角度 α 的关系式。当光栅 G 转动时,在探测器线列上可获得不同波长的单色光。

系统平面闪耀光栅的光栅常数 $d=20 \mu\text{m}$ 。设探测器的接收波长为 $8 \mu\text{m}$ 时,平面光栅处于初始位置(光栅旋转角度 $\alpha=0$)。由式(4)并结合式(1),光栅处于初始位置时的入射角满足:

$$\sin i_0 - \sin \left(\frac{\pi}{3} - i_0 \right) = \frac{\lambda_0}{d} \quad (7)$$

解三角函数关系,得到当探测器的接收波长为 $8 \mu\text{m}$ 时,入射平面光栅光线的入射角 i_0

$=43.35^\circ$, 相应的平面光栅衍射光线的衍射角 $\theta_0=16.65^\circ$ 。

将 i_0 和 θ_0 代入式(6)中,得到线列探测器上接收的辐射波长与光栅转动角度的关系曲线,如图 5 所示。

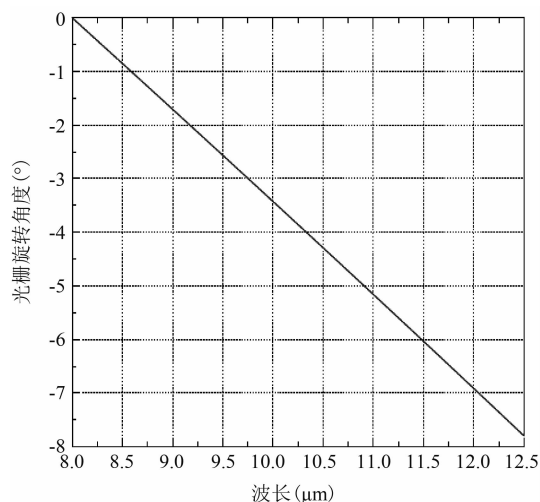


图 5 光栅旋转角度与探测器接收单色光的关系

由图 5 可知,采用电机控制光栅转动时,线列探测器可获取不同波长的线列目标辐射信息。当光栅旋转角度较小时,光栅旋转角度的大小与探测器接收到的波长呈线性关系。

2.2 视场扫描机构推导

本系统应用于地物探测时,通过引入视场扫描机构,实现了大幅宽探测的目的,并简化了外场应用时扫描平台的使用。当系统安装平台固定时,其扫描过程与系统焦距和探测器光谱维的尺寸有关。平面反射镜出射光方向保持不变,入射光方向变化是视场扫描系统转动角度的一半,则在相邻的两个成像条带内,视场扫描机构的转动角度满足:

$$\tan \beta \approx \beta = \frac{l}{2f} \quad (8)$$

本系统焦距 $f=20 \text{ mm}$, 探测器光谱方向像元的尺寸 $l=50 \mu\text{m}$ 。由式(8)得到,在相邻两个成像条带内,视场扫描机构每次步进 $4.297'$, 相机视场增加 $8.594'$ 。

2.3 总体扫描模式

通过视场扫描机构与光栅扫描机构的同步

控制, 对地物进行了无漏扫高光谱成像。当系统安装平台固定时, 图 6 为扫描机构的总体扫描成像模式图。

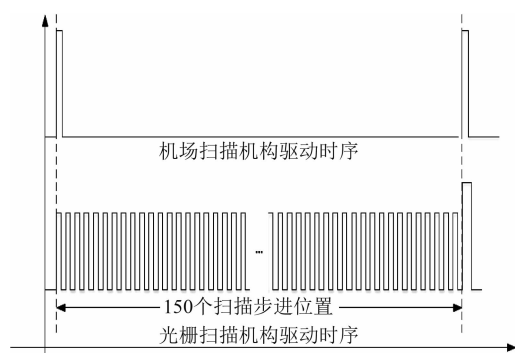


图 6 电机扫描模式

成像过程中, 为了得到同一成像条带不同光谱波段的图像, 扫描机构采用“扫描定位+停止成像”的工作模式。视场扫描机构扫描定位时探测器停止成像; 视场扫描机构到达目标位置后, 视场扫描机构停止扫描, 光栅扫描机构开启扫描, 探测器开始成像。由光学系统的焦距和探测器像元的尺寸可知, 系统角分辨率大小为 $8.594'$ 。成像时, 为了降低地物漏扫率和成像重叠率, 要求定位精度尽量高, 以细分后步进电机的最小步进角为目标, 即定位误差应小于 $50.625''$ 。

视场扫描机构到达目标位置后停止扫描, 光栅扫描机构开始扫描。光栅电机扫描总角度约为 7.8° , 条带扫描时间为 0.25 s , 相邻步进时间约为 0.45 ms 。视场扫描机构到达成像位置时, 系统控制探测器开始成像。在光栅扫描机构完成一个周期扫描的时间内, 探测器同时完成对同一条带景物共 150 个谱段的高光谱成像。为了实现 30 nm 光谱采样间隔和满足 5 nm 光谱测量精度要求, 光栅扫描机构扫描时, 相邻两光谱波段光栅扫描机构的转动角度约为 $3.328'$ 。光栅扫描机构成像时, 定位误差应小于 $33.18''$ 。

3 实验电路方案

扫描成像系统工作时, 电机定位位置的准确性和成像时电机的稳定度是系统须考虑的首

要因素, 而对电机运动速度的稳定性、加速度的稳定性要求较低。步进电机在励磁状态停止时, 具有很大的保持力矩, 可保证成像过程中电机位置稳定不变。此外, 步进电机具有成本低、工作模式简单、加速性能好、响应速度快的特点, 在需要频繁启动及停止的应用上有较大优势。基于以上原因, 本系统采用步进电机作为核心驱动机构。为了降低步进电机失步对系统定位精度的影响, 系统引入了高精度测角模块, 实现了高精度测角与定位。图 7 为扫描控制系统的原理图。

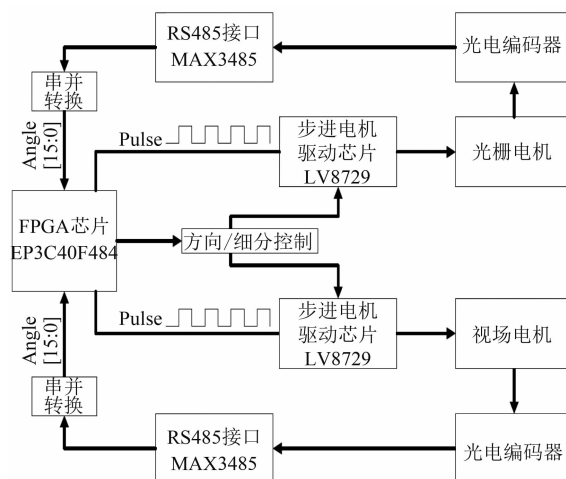


图 7 扫描控制系统的原理图

控制系统以现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)为核心, 主要包含电机驱动模块和角度测量模块两部分。步进电机驱动芯片采用最大驱动电流为 1.8 A 、具备 128 细分的集成步进电机控制芯片 LV8729, 控制步进电机最小步进角约为 $50.625''$ 。工作时, 由 FPGA 产生驱动脉冲信号、电机运行方向信号与细分控制信号, 驱动 LV8729, 对步进电机进行运动控制。测角模块采用外径仅为 28 mm 的轻小型 16 位绝对值旋转变压器型角度编码器, 编码器的角度分辨率约为 $0.33'$, 角度测量精确度可达 $\pm 1'$ 。角度编码器与 FPGA 间通过 RS485 连接, 工作时由 FPGA 向角度编码器发送读取当前角度的指令; 角度编码器接收指令后, 将当前电机的角度位置通过 RS485 以串行形式发送给 FP-

GA, 在 FPGA 内部将 2 进制串行角度数据解码成电机的当前角度位置。角度编码器角度位置的更新时间约为 0.5 ms。

4 实验验证

4.1 光栅扫描机构实现

光栅扫描机构采用“扫描定位+停止成像”的工作模式, 当电机到达成像位置时, 电机控制系统控制探测器开始成像, 并记录电机成像时的角度位置信息。图 8 为光栅扫描电机的理论成像位置与实际成像位置的曲线。光栅电机的理论位置曲线与实际成像位置曲线相互重叠, 扫描过程具有很高的定位精度。图 9 为每一个成像波段光栅电机的实测位置与理论位置的差值数据。各光谱通道间的平均误差约为 $8.8''$, 平均误差约占光谱通道宽度的 4.38%; 各光谱通道间光栅实测位置与理论位置的均方根误差约 $22''$, 均方根误差约占光谱通道宽度的 10.95%。各通道的平均误差及均方根误差均小于 16.7% 的设计目标值。利用步进电机匀速扫描模式, 在 30 nm 光谱采样间隔下, 能够满足光谱分辨误差为 5 nm 的精度要求。

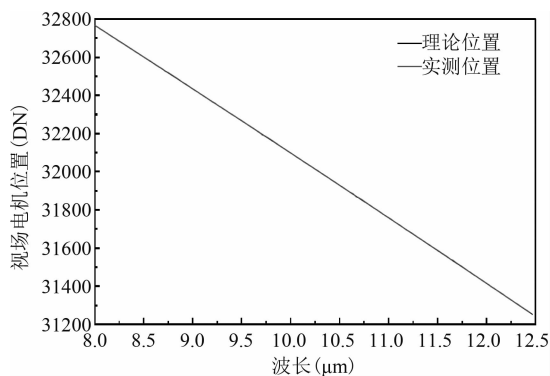


图 8 光栅电机的位置曲线

4.2 视场扫描机构实现

由于光导碲镉汞线列探测器像元的总数少, 系统成像的视场范围有限。在成像过程中, 为了减小图像失真, 视场电机扫描定位误差需达到步进电机最小步进角。图 10 为视场扫描电机的理论定位位置与实际定位位置的曲线。视场电机两曲线具备很好的重叠率, 采用“摆动定位+停止成像”模式的视场电机具备较

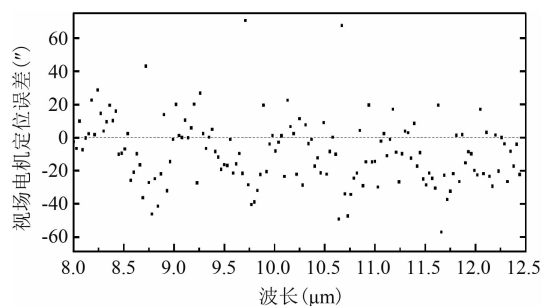


图 9 光栅电机的角度误差

高的定位精度。图 11 为视场扫描电机的实际定位位置与理论定位位置的差值数据。视场扫描电机的实际位置曲线与理论曲线的平均误差约为 $6.64''$, 平均误差约占两视场扫描间距的 2.60%。不同视场时, 视场电机位置与理论位置间的均方根误差约为 $43.97''$, 均方根误差小于步进电机最小步进角要求。

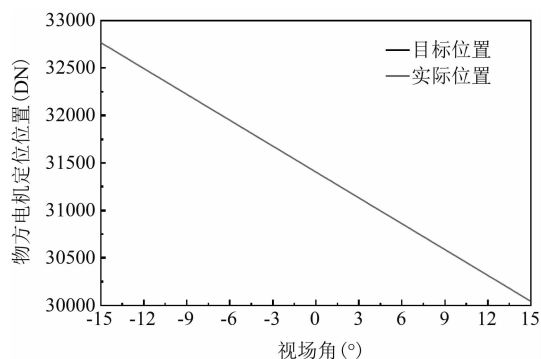


图 10 视场电机的位置曲线

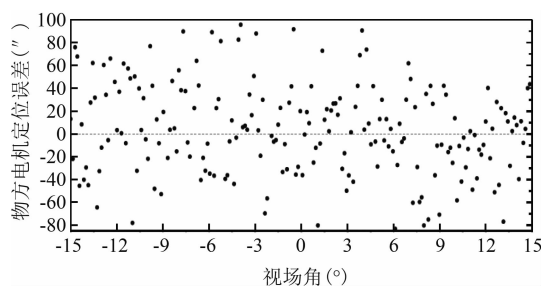


图 11 视场电机的角度误差

4.3 硅碳棒光谱测试

硅碳棒在加热时可产生稳定、宽谱的长波红外辐射, 是长波红外高光谱系统定标的重要光源。利用设计的长波红外扫描成像系统获取了硅碳棒在温度为 900 K 时在 $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 波段的发射光谱曲线。由于光栅扫描时各波段的

背景杂散辐射不同, 成像时先获取无目标辐射时不同波段的背景杂散辐射; 再获取硅碳棒在各波段的辐射信息; 通过扣除相应背景杂散辐射获取当前成像波段的辐射能量。图 12 为扫描成像系统获取的硅碳棒的光谱合成图像。结合平面光栅衍射效率曲线, 图 13 为硅碳棒在 $8\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 范围内的发射光谱曲线。硅碳棒发射光谱在 $8\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 范围内连续, 随着辐射波长的增加, 辐射出射度快速降低。

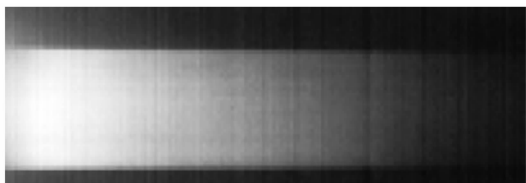


图 12 硅碳棒的扫描光谱图像

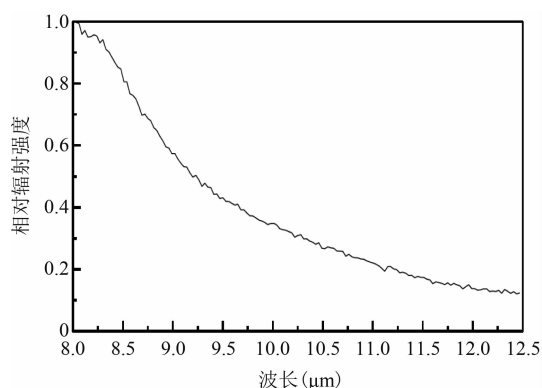


图 13 硅碳棒的发射光谱曲线

5 结论

用光导碲镉汞线列探测器和平面闪耀光栅设计了一套野外应用的宽幅长波红外高光谱扫描成像系统。该扫描系统由光栅扫描机构和视场扫描机构组成。通过对扫描系统理论分析得到, 在高光谱成像时, 光栅扫描机构通过控制光栅转动, 在线列探测器上分时获取同一地物不同波段的高光谱图像; 视场扫描机构同步扫描以实现宽幅成像需求。利用步进电机及角度编码器搭建了一套在 $8\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 长波红外范围内包含 150 个连续谱段、成像总视场达 30° 的扫描验证系统。该系统采用“摆扫定位+停

止成像”的工作模式。实验测试表明, 各光谱通道光栅电机的实际位置与理论位置间的均方根误差约为 $22''$, 不同视场内视场电机的实际位置与理论位置间的均方根误差约为 $43.97''$, 扫描精度误差满足设计指标要求。利用该光栅扫描系统得到了硅碳棒的发射光谱曲线, 表明该系统的设计合理有效。该扫描系统的设计方法对低成本、轻小型长波红外高光谱系统的设计具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 田国良, 柳钦火, 陈良富, 等. 热红外遥感(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [2] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [3] 王建宇, 徐卫明, 袁立银, 等. 热红外高光谱成像系统的背景抑制和性能优化 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, **29**(6): 419-423.
- [4] 刘银年, 薛永祺, 王建宇, 等. 实用型模块化成像光谱仪 [J]. 红外与毫米波学报, 2002, **21**(1): 9-14.
- [5] 袁立银, 林颖, 何志平, 等. 长波红外高光谱成像系统的设计与实现 [J]. 红外与激光工程, 2011, **40**(1): 181-185.
- [6] Lucey P G, Julian J, Schaff W, et al. AHI: an Airborne Long-wave Infrared Hyperspectral Imager [C]. SPIE, 1998, **3431**: 36-43.
- [7] Johnson W R, Hook S J, Mouroulis P Z, et al. QWEST: Quantum Well Infrared Earth Science Testbed [C]. SPIE, 2008, **7086**: 708606.
- [8] Lucey P G. A Low Cost Thermal Infrared Hyperspectral Imager for Small Satellites [C]. SPIE, 2012, **8385**: 838509.
- [9] 王建宇, 李春来, 姬弘帧, 等. 热红外高光谱成像技术的研究现状与展望 [J]. 红外与毫米波学报, 2015, **34**(1): 51-59.
- [10] 袁红辉, 陈永平. 一种长波红外光导探测器 CMOS 电路设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(3): 762-765.