

文章编号 1004-924X(2012)09-1945-08

## 用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪

赵慧洁,程 宣\*,张 颖

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 教育部精密光机电一体化技术实验室,北京 100191)

**摘要:**面向火星探测,设计并研制了一种基于声光可调谐滤波器(AOTF)原理的成像光谱仪地面原理样机。该样机由前置光机系统和后置电子学系统组成,光学系统采用消色差远心光路结构,工作波段为 550~1 000 nm,光谱分辨率为 0.9~4.0 nm。在电子学系统中引入可编程片上系统技术,并设计了新型 SpaceWire 高速总线接口用于数据传输。样机在实验室定标的基础上,搭载于模拟火星探测器上进行了成像试验。试验结果表明:样机成像质量良好;与 ASD 光谱仪的一致性对比检验表明,光谱测量准确可靠,两者数据匹配精度超过 96%。SpaceWire 接口实现了 100 Mb/s 数据率的稳定传输,满足设计指标 25 Mb/s 的要求。样机的研制为 AOTF 成像光谱技术在火星遥感探测领域的应用奠定了技术基础。

**关键词:**火星探测;声光可调谐滤波器;成像光谱仪;SpaceWire

**中图分类号:**TH744.1;TN65 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122009.1945

## Design of acousto-optic imaging spectrometer for mars exploration

ZHAO Hui-jie, CHENG Xuan\*, ZHANG Ying

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology of the Ministry of Education,  
School of Instrumentation Science & Opto-electronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: chengxuan2002@163.com

**Abstract:** For mars exploration, a novel prototype of imaging spectrometer consisting of an optomechanical subsystem and an electronic subsystem was designed based on an Acousto-optic Tunable Filter(AOTF). An achromatic telescopic optical system was used in the spectrometer and its spectral range was between 550 nm and 1 000 nm, while the spectral resolution was 0.9-4 nm. In electronic subsystem, a system-on-a-programmable-chip was introduced and data transmission was implemented by employing a novel bus technology of SpaceWire. On the basis of laboratory calibration, the prototype was installed in the stimulant mars explorer, and a hyperspectral imaging experiment was performed. Experimental results indicate that the prototype of imaging spectrometer can offer good imaging quality and the measurement identify between the prototype and an ASD spectrometer is over 96%. Furthermore, the SpaceWire bus can transport data at a rate of 100 Mbps continuously, which satisfies the technique requirement of 25 Mbps. The development of the prototype provides technical

**收稿日期:**2012-04-17;**修订日期:**2012-05-09.

**基金项目:**国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA12A201);国家自然科学基金资助项目(No. 61177008, No. 61107013)

foundation for applications of AOTF imaging spectral technique to mars-based remote sensing in future.

**Key words:** mars exploration; Acousto-optic Tunable Filter (AOTF); imaging spectrometer; SpaceWire

## 1 引言

火星探测是深空探测的重要组成部分,随着人类空间探测活动范围的扩大及探测任务的多样化,用于火星探测的新型传感器和载荷技术得到了长足的发展,并在火星探测活动中发挥了重要作用。分析地表反射的太阳光谱,寻找不同的岩石矿物分布是火星探测的主要任务之一<sup>[1]</sup>。成像高光谱具有成像光谱紧密、连续的特点,能够同时提供目标的空间几何特征信息和反映物质属性与材料的光谱特征信息,其光谱分辨率高、波段多、图谱合一<sup>[2]</sup>,使它在遥感测量各领域广泛应用。成像光谱探测能有效地对火星表面矿物成分进行信息反演与分布填图,从而获得火星岩石类型、土壤与矿物组成成分、矿物分布特征与规律等,这将为研究火星起源和演化等提供科学依据。

为了实现火星表面矿物成分与火星大气成分组成以及分布的定量化探测,高光谱载荷成为火星探测计划中的关键载荷之一。高光谱成像探测系统按照分光原理不同分为:色散型、干涉型<sup>[5]</sup>和滤光片型 3 种。其中,采用声光可调谐滤波器(Acousto-optic Tunable Filter, AOTF)作为色散元件的滤光片型高光谱成像系统具有体积小,质量轻等优点<sup>[6]</sup>;相比于传统的色散型和干涉型系统,它具有快速电控波长调谐以及波段可编程控制的特点,能够降低数据冗余度,减小数据传输压力。同时,其画幅式成像特征可以实现火星表面的目标跟踪和凝视成像,能够实现感兴趣区域的重点勘查,因此,十分适合于以火星探测为代表的深空探测应用。近 10 年来,用于深空探测的 AOTF 高光谱成像仪已成为美国和欧洲等发达国家的热点,并取得了不错的研究成果。美国国家航空航天局 NASA 研制的 AIMS<sup>[7]</sup>和欧洲航天局 ESA 研制的 SPICAM<sup>[8]</sup>等 AOTF 成像光谱载荷均已用于他们各自的火星探测任务。

为了探测火星表面矿物成分的分布,本文在可见光-近红外波长范围内设计并研制了高光谱分辨率滤光片型 AOTF 成像光谱仪原理样机,该

样机搭载在模拟火星探测器上进行了成像试验,采用新型 SpaceWire 总线技术进行数据传输,并对试验结果进行了分析。该样机的研制为 AOTF 型高光谱成像仪在我国火星探测中的应用奠定了技术基础。

## 2 AOTF 工作原理

AOTF 是双折射晶体,由压电换能器和双折射单轴晶体组成,利用光束和超声波在透明介质里的相互作用进行工作。选用的 AOTF 材料为二氧化碲( $\text{TeO}_2$ ),基本工作原理如图 1 所示。

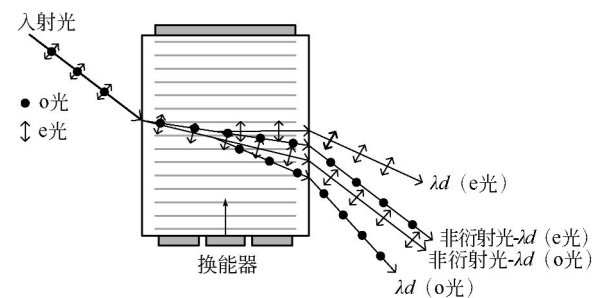


图 1 AOTF 原理图

Fig. 1 AOTF working scheme

当一束自然光以一定的角度入射到 AOTF 的晶体时,该光束中波长满足动量匹配条件<sup>[9]</sup>的光可以产生衍射,如式(1)所示。

$$\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_a \pm \mathbf{k}_i. \quad (1)$$

其中: $\mathbf{k}_d$ ,  $\mathbf{k}_i$  分别为衍射光和入射光矢量; $\mathbf{k}_a$  为超声矢量。对应的模分别为:

$$|\mathbf{k}_i| = \frac{2\pi n_i}{\lambda_0}, |\mathbf{k}_d| = \frac{2\pi n_d}{\lambda_0}, |\mathbf{k}_a| = \frac{2\pi n}{v}. \quad (2)$$

式(2)中, $n_i$ ,  $n_d$  分别表示入射光和衍射光的折射率; $\lambda_0$  为衍射光波长; $f$  为超声波驱动频率; $v$  是声波在晶体内的传播速度。对于满足动量匹配的衍射光,o光和e光的轴向折射率 $n_o$ 和 $n_e$ 与入射光与晶体晶轴的夹角 $\theta_i$ 满足下列关系<sup>[10]</sup>:

$$\frac{1}{n_e^2} = \frac{\cos^2 \theta_i}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta_i}{n_e^2}. \quad (3)$$

入射光矢量  $\mathbf{k}_i$  在超声矢量  $\mathbf{k}_a$  的作用下变为

偏振态相互垂直的 o 光和 e 光,遮挡 e 光和非衍射光,出射光即为具有很窄带宽的线偏振光。由公式(2)可以看出,超声频率与超声矢量成正比关系,改变超声频率,根据动量匹配条件即可实现分光滤波作用。这样,以物空间的平面二维和波长,构成了三维的数据立方体,实现了图谱合一<sup>[1]</sup>。

### 3 系统设计

光谱是区分物质各种不同组分最有效的方式<sup>[1]</sup>。可见光-近红外波段范围的成像光谱仪,主要用来分析地表反射的太阳光谱以寻找并分析不同的岩石矿物分布。相比于空间分辨率,更需要高光谱分辨率的探测模式。在对面向火星探测成像光谱仪的应用要求和原理分析的基础上,设计并研制了该原理样机。

#### 3.1 系统结构

用于火星探测的 AOTF 成像光谱仪由光机分系统和电子学分系统两大部分组成。前者主要包括:光学系统、声光可调谐滤波器(AOTF)和用于光谱成像的 CCD 探测器;后者主要包括:图像采集电路、主控电路、二次电源以及 AOTF 驱动电路等。图 2 为系统结构图。入射光束经前置光学系统后成像在 AOTF 的中轴面,再经后置光学

系统成像在 CCD 焦面上。AOTF 在该系统中作为色散元件实现光谱分光。电子学分系统中的 AOTF 驱动电路产生不同频率的射频信号控制波长调谐,得到目标在该波长处的图像。主控电路顺序改变射频信号的频率,序列采集不同波长处的目标,即得目标的成像光谱信息。图像数据在 主控电路的控制下由图像采集电路获取,并通过 SpaceWire 总线传输至载荷数据管理单元。表 1 给出了系统的设计参数。

表 1 系统比例尺的标定结果  
Tab. 1 Results of system scale calibration

| 参数    | 技术指标                 |
|-------|----------------------|
| 视场角   | 10°×10°              |
| 波段范围  | 550~1 000 nm         |
| 驱动频率  | 87~175 MHz           |
| 驱动功率  | <2 W                 |
| 光谱分辨率 | 0.9~4 nm             |
| 像元数   | 256 pixel×256 pixel  |
| 量化位数  | 12 bit               |
| 数据率   | 25 Mb/s              |
| 体积    | 340 mm×210 mm×180 mm |
| 质量    | 6 kg                 |
| 功耗    | <50 W                |

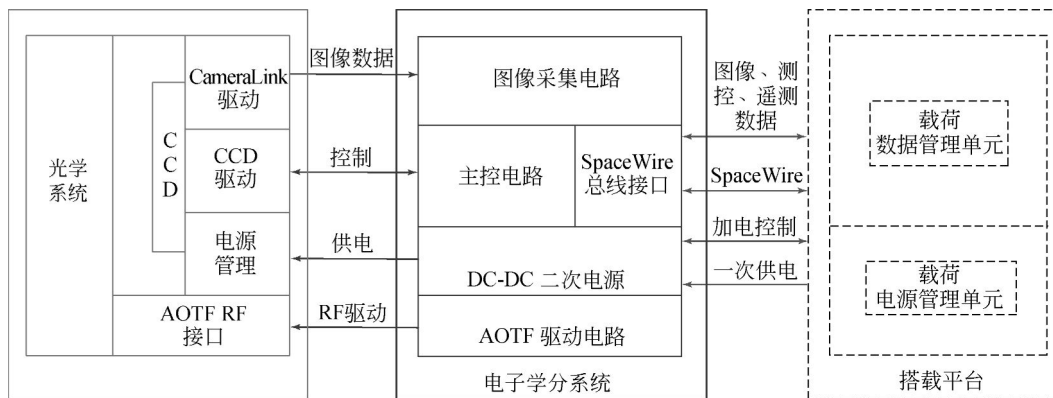


图 2 AOTF 成像光谱仪系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of AOTF imaging spectrometer

#### 3.2 光学系统设计

为保证系统的成像质量,选用远心光路结构进行系统的光学设计,使得无穷远物点成像在 AOTF 的中心线上,利用后置透镜弥补由超声发散带来的横向色差。由于系统需要利用 AOTF 的 1 级衍射光进行光谱成像,AOTF 出射面后的 1 级衍射光会发生约 6.49°的偏转,因此将 AOTF

之后的后置系统光轴沿着 1 级光偏转方向偏转 6.49°。利用 ZEMAX 软件经过优化设计后的光学系统如图 2 所示;系统像方点列图如图 3 所示,在全波段范围内,像面的均方根弥散斑半径 < 6 μm,32 lp/mm 时的像方 MTF>0.6,系统获得了良好的成像质量。

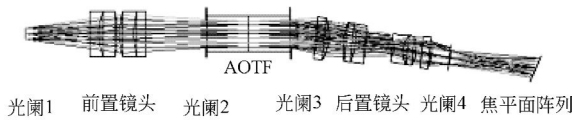


图 3 光学系统结构图

Fig. 3 Schematic diagram of optical system

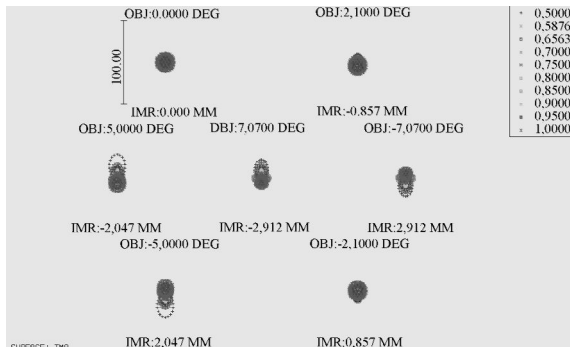


图 4 系统像方点列图

Fig. 4 Spot diagram of system

### 3.3 电子学设计

电子学系统的主要任务是将 CCD 产生的光谱图像信息转换为数字信号,通过数据输出接口传送到载荷数据管理单元,并完成系统的工作控制。系统的参数和工作模式由下位机通过 SpaceWire 总线进行控制。

AOTF 成像光谱仪电子学系统主要由主控电路、AOTF 射频驱动电路、光谱图像数据采集电路以及二次电源组成。通过响应星上综合电子系统的测控信号,对 AOTF 进行可编程分光控制,实现光谱图像采集,SpaceWire 总线逻辑、遥测信号输出以及数据预处理等功能,同时完成反射率光谱数据的存储、显示等功能。

电子学系统的基本工作流程为:成像光谱仪利用二次电源进行上电,进入“复位”模式,分别进行初始化,主控电路通过 SpaceWire 总线接收遥测控制指令后向 AOTF 驱动电路发送采集指令,同时以遥测帧的形式返回应答信号;此时光谱仪进入数据采集模式,驱动电路收到采集指令后按照预先设置的工作模式控制驱动频率,实现波长的切换,并同步外触发 CCD 探测器,完成光谱图像的获取;光谱图像数据采集电路从前端光机系统中的 CCD 组件输出接收光谱图像数据,并

采用双缓存模式将一景数据通过 20 位同步并行总线(16 位数据,1 位同步时钟,3 位同步控制线)传输至主控电路;主控电路将数据打包成指定的数据帧通过 SpaceWire 总线发送至载荷数据管理单元,完成一次数据采集<sup>[12]</sup>。

为提高采集速率,缩短图像采集周期,系统采用美国 Sarnoff 公司的 CCD180-1M-SFT 16 抽头帧转移 CCD 探测器,全帧数据的读出时间仅为 5 ms,曝光时间设置为 25 ms,帧频为 30 frame/s,因此,全波段数据的采集周期约为 3.3 s,数据率为 25 Mb/s。

图 5 为主控电路结构,考虑到电路设计的复杂性、系统控制的稳定性和响应的实时性,以及航天仪器对体积功耗的要求,采用可编程片上系统(System-on-chip)的设计方案。通过单个带嵌入式处理器软核的 FPGA 芯片完成系统控制、数据缓存、数据输出等功能,各功能模块通过 avalon 片上总线互连通信<sup>[12]</sup>。

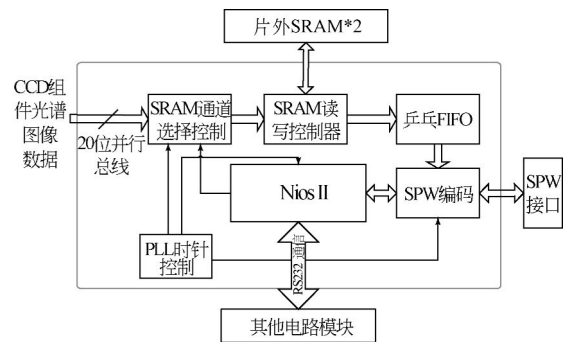
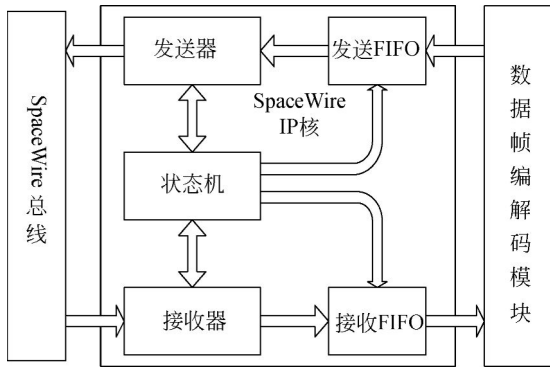


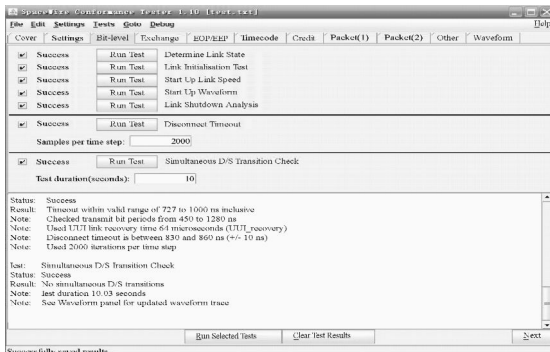
图 5 主控电路结构

Fig. 5 Block diagram of main board

系统的数据输出接口采用新型的 SpaceWire 总线协议。SpaceWire 总线是 ESA 提出的为航天应用而设计的一种高速、可升级、低功耗、低成本的高速串行总线<sup>[13]</sup>。其数据率可达 100 Mb/s,远大于传统的 1553B 总线,因此更适用于大数据量的高光谱成像设备在空间系统中的应用。结合系统的应用需求,SpaceWire 协议采用自行设计的 IP 软核的方式实现,并实现了与可编程片上系统中 avalon 总线的互连<sup>[12]</sup>。并利用官方的 Conformance Tester 和 Brick 测试仪进行了链路测试,测试结果表明:系统能够达到 100 Mb/s 速率的数据可靠传输,如图 6 所示,完全满足系统数据率的要求。



(a)SpaceWire IP核结构  
(b)Structure of SpaceWire IP



(b)Bit Level测试结果  
(c)Testing result of bit level

图 6 SpaceWire 接口链路测试

Fig. 6 Link layer test of SpaceWire interface

3.4 实验室定标

系统的实验室定标包括光谱定标和辐射定标。光谱定标是确定成像光谱仪各个通道的光谱响应函数。AOTF 系统具有画幅式成像的特点,较为准确的波长调谐关系为<sup>[14]</sup>:

$$f(\lambda) = \frac{v[n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d)]^{1/2}}{\lambda} \quad (4)$$

式中: $\theta_d$  为衍射光与晶体晶轴的夹角。可以看出,驱动频率和衍射光波长间呈现反比关系。系统的光谱分辨率主要由 AOTF 晶体自身特性决定,根据衍射原理,用于光谱成像的非共线 AOTF 的光谱分辨率  $\Delta\lambda$ (半峰高宽度)的计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$\Delta\lambda = \frac{1.8\pi\lambda_0}{bL\sin^2\theta} \quad (5)$$

式中: $b$  为色散常数, $L$  为声光互作用长度, $\theta$  为入射光极角, $\lambda_0$  为中心波长。可见,光谱宽度随中心波长增大而增大,波长较短时,系统具有更高的光谱分辨率。由于 AOTF 的设计参数与实际制作存在差异,特别是  $L$  的值不够精确,需要通过定标来测量系统实际的衍射光波长和光谱分辨

率。光谱定标方法是:选定 AOTF 的一个驱动频率作为波段通道,根据式(4)估算衍射光波长,并以该波长为依据,令校准好的单色仪以一定的步长输出单色光,同时 CCD 探测器记录测得的光谱响应值,将测得的光谱响应拟合成高斯响应曲线,从而确定各个波段的中心波长及光谱带宽度。由于 AOTF 光谱分辨率较高,单色仪波长扫描范围较小,一般为 2~10 nm,因此,CCD 像元随波长的光谱响应差异对定标精度影响很小,将该误差作为光谱定标的不确定因子加以考虑。定标中,单色仪选用美国 PI 公司的 SpectraPro-2500 i,光谱分辨率在可见光波段(380~760 nm)为 0.05 nm,近红外波段(760~1200 nm)为 0.1 nm,是 AOTF 成像光谱仪光谱分辨率的 10 倍以上,满足光谱定标的要求。

辐射定标采用基于标准辐射源的辐射定标方法,以积分球作为面辐射源进行定标<sup>[15-16]</sup>。在对系统辐射响应线性度标定和校正的基础上,分别进行了相对定标和绝对定标。图 7 给出了驱动频率和中心波长的关系曲线,表 2 为部分波段的光谱定标结果。这些结果表明:在 550~1 000 nm,系统的光谱分辨率可达 0.9~4 nm,完全能够满足火星多种矿物成分的探测需求。经过分析,实验室定标的不确定度为 7.2%,表 3 列出了各误差因子分量。研制成的原理样机如图 8 所示。

表 2 光谱定标结果(部分)

Tab. 2 Partial results of spectral calibration

| 中心波长/nm         | 550    | 600    | 650    | 700    | 750    |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 驱动频率/MHz        | 174.95 | 156.69 | 141.83 | 129.88 | 119.79 |
| $\Delta\lambda$ | 0.918  | 1.18   | 1.73   | 1.52   | 2.03   |
| 中心波长/nm         | 800    | 850    | 900    | 950    | 1 000  |
| 驱动频率/MHz        | 111.38 | 103.96 | 97.62  | 91.97  | 86.90  |
| $\Delta\lambda$ | 2.72   | 3.32   | 3.39   | 3.76   | 4.03   |

表 3 实验室定标不确定度分析

Tab. 3 Uncertainty analysis of calibration

| 不确定因素        | 量值(%) |
|--------------|-------|
| 光谱定标的不确定度    | 1.5   |
| 光谱辐射计响应不确定度  | 3.7   |
| 积分球辐亮度标定不确定度 | 2     |
| 相对定标不确定度     | 4     |
| 仪器响应非线性      | 3.6   |
| 杂散光          | 2     |
| 合成不确定度       | 7.2   |

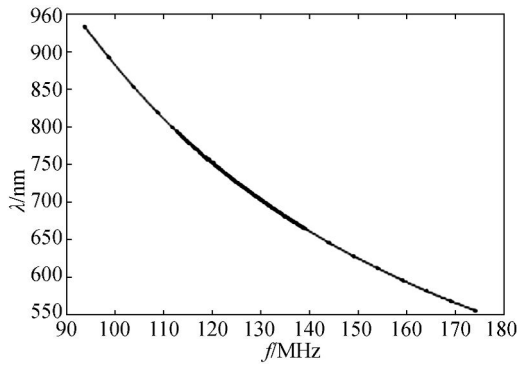
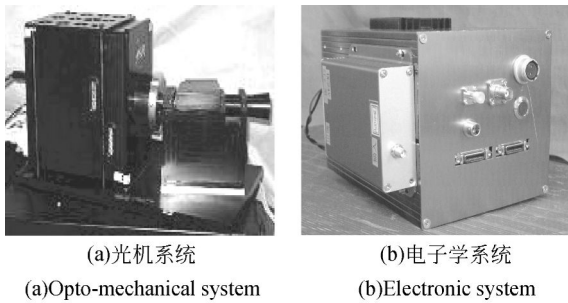


图 7 驱动频率与中心波长的关系曲线

Fig. 7 Relation between driver frequency and wavelength



(a)光机系统

(b)电子学系统

(a)Opto-mechanical system

(b)Electronic system

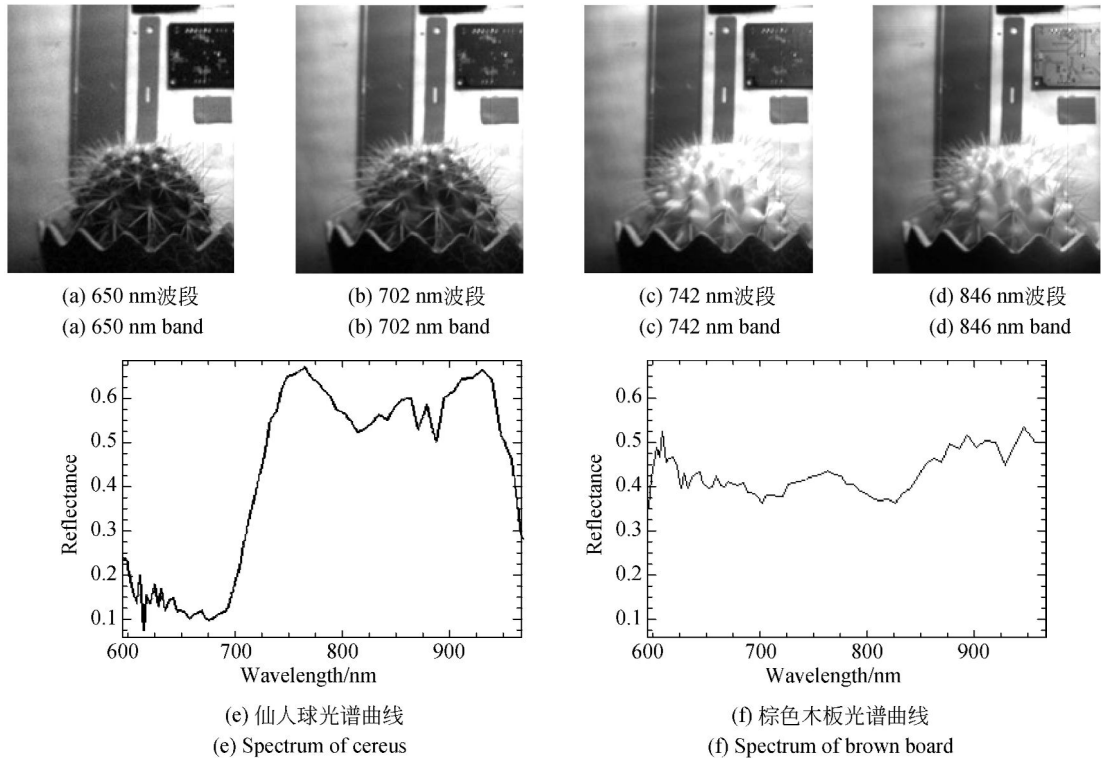
图 8 AOTF 成像光谱仪原理样机

Fig. 8 Prototype of AOTF imaging spectrometer

### 4 成像试验及结果

在实验室定标基础上,仪器搭载在模拟火星探测器上进行了成像试验,并利用 SpaceWire 新型总线技术实现了数据传输;然后对仪器实时下传数据进行快速处理,得到了被测物的高光谱图像。试验中,AOTF 的光谱调谐在 550~900 nm,光谱采样间隔为 4 nm,一组数据共 87 个波段。获取的原始数据通过速率为 100 Mb/s 的 SpaceWire 总线传输至载荷数据管理单元,在扣除非均匀性、暗电流及增益影响后,经过辐亮度反演和反射率计算,分别得到了最终的光谱辐亮度数据和光谱反射率数据,并将数据转换为标准的 bsq 遥感图像格式,得到高光谱数据文件。

图 9 为室内卤钨灯光源照射下植物的成像光谱数据。图 10 中的目标物为白色鹅卵石和用于模拟火星地表的赤铁矿石,并在两侧放置了用于反射率计算的黑白参考布,图中左侧为经过数据处理后的光谱反射率数据立方体,右侧为赤铁矿石的光谱曲线。为验证数据的准确性,试验中利用 ASD 光纤光谱辐射计进行了同步比对测量,并

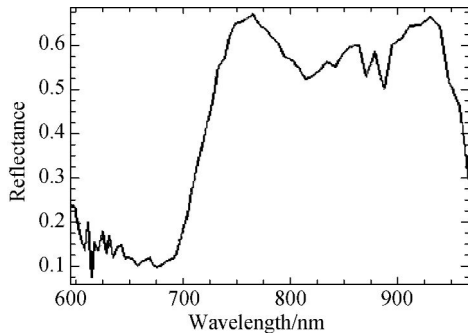


(a) 650 nm 波段  
(a) 650 nm band

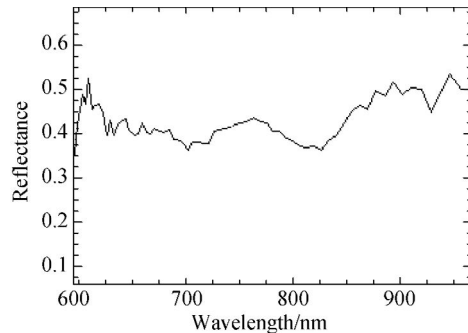
(b) 702 nm 波段  
(b) 702 nm band

(c) 742 nm 波段  
(c) 742 nm band

(d) 846 nm 波段  
(d) 846 nm band



(e) 仙人掌光谱曲线  
(e) Spectrum of cactus



(f) 棕色木板光谱曲线  
(f) Spectrum of brown board

图 9 被测物的光谱图像和典型目标的光谱曲线

Fig. 9 Hyperspectral images of targets and spectra of representative targets

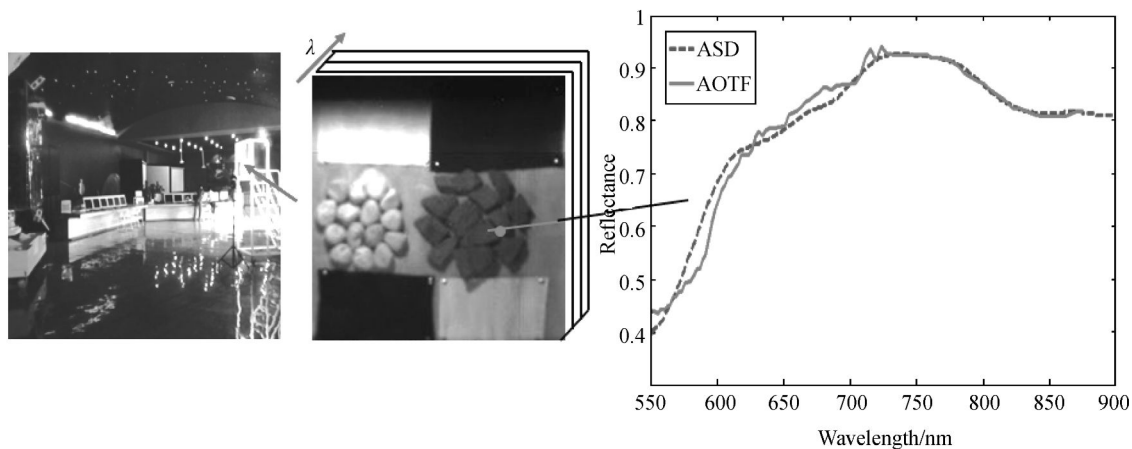


图10 试验场赤铁矿石数据及光谱曲线

Fig. 10 Spectrum of hematite ore in test

利用光谱角和相关系数两种一致性评价方法进行检验,两种方法下的数据匹配精度均超过96%。由此可知,此系统能够准确提取出被测物的光谱信息,从而验证了仪器光谱探测的有效性。

## 5 结论

本文完成了一种用于火星遥感探测,由前置光机系统和后置电子学系统组成的AOTF成像光谱仪的设计与研制。将该仪器搭载在模拟卫星平台上对人工目标进行了成像试验,并利用SpaceWire新型总线技术实现了码速率为25 Mb/s

的数据传输;通过对上传数据的快速处理,得到了550~1 000 nm的高光谱数据立方体,成像质量良好,利用ASD光纤光谱仪进行一致性检验,两者的数据匹配精度大于96%,证实了该仪器光谱测量的准确性。利用该系统对火星遥感探测是一种有益的新尝试,该原理样机的研制为AOTF成像光谱技术在火星遥感探测领域的应用奠定了技术基础。

由于仪器目前属于地面原理样机阶段,并未考虑空间环境对AOTF晶体光谱和成像特性的影响,这些需要在下一步工作中开展研究。

## 参考文献:

- [1] 许春,王成良. 火星探测技术综述[J]. 红外, 2008, 29(7): 1-8.  
XU CH, WANG CH L. Overview of mars exploration technology [J]. *Infrared*, 2008, 29(7): 1-8. (in Chinese)
- [2] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感—原理、技术与应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.  
TONG Q X, ZHANG B, ZHENG L F. *Hyperspectral Remote Sensing*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 薛庆生,王淑荣,李福田,等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 824-830.  
XUE Q SH, WANG SH R, LI F T, et al.. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 824-830. (in Chinese)
- [4] 肖功海,舒嵘,薛永祺. 显微高光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程, 2004, 12(4): 368-372.  
XIAO G H, SHU R, XUE Y Q. Design of microscopic hyperspectral imaging system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(4): 368-372. (in Chinese)
- [5] 郑玉权,王慧,王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2630-2637.  
ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2630-2637. (in Chinese)

- [6] WANG J Y, HE Z P, SHU R. Design and applications of space-borne imaging spectrometer based on acousto-optic tunable filter (AOTF) [J]. *SPIE*, 2010, 7857: 78570N-1-78570N-6.
- [7] DAVID A G, DIANA L B, JOHN J H. AIMS: Acousto-optic imaging spectrometer for spectral mapping of solid surfaces[J]. *Acta Astronautica*, 2003, 52: 389-396.
- [8] KORABLEV O, BERTAUX J L, DIMARELLIS E, *et al.*. An AOTF-based spectrometer for mars atmosphere sounding[J]. *SPIE*, 2002, 4818: 261-271.
- [9] CHANG I C. Acousto-optic tunable filters [J]. *Optical Engineering*, 1984, 20: 824-829.
- [10] 江益. 声光可调谐滤波器光谱成像的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.  
JIANG Y. *The research of spectral imaging based on AOTF* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese)
- [11] 刘石神. 声光可调谐滤波器及其在成像光谱仪上的应用[J]. *红外*, 2004, 7: 12-17.  
LIU SH SH. Acousto-optic tunable filter and its application to imaging spectrometer[J]. *Infrared*, 2004, 7: 12-17. (in Chinese)
- [12] CHENG X, ZHAO H J, DAI Y L, *et al.*. Image acquisition design of the AOTF imaging spectrometer based on SOPC [C]. *Proc. of International SoC Design Conference*, 2011: 266-269.
- [13] Space Wire-Links, nodes, routers, and networks [R]. *ECSS Secretariat*, ESA-ESTEC, 2008.
- [14] 赵慧洁, 周鹏威, 张颖, 等. 声光可调谐滤波器的成像光谱技术[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 189-193.  
ZHAO H J, ZHOU P W, ZHANG Y, *et al.*. Acousto-optic tunable filter based spectral imaging technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 189-193. (in Chinese)
- [15] 计忠瑛, 相里斌, 崔燕, 等. 超光谱成像仪的实验室定标[J]. *航天器工程*, 2010, 19(1): 67-71.  
JI ZH Y, XIANG L B, CUI Y. Labosphere calibration of hyperspectral imaging spectrometer [J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(1): 67-71. (in Chinese)
- [16] 邢辉, 赵慧洁, 程宣, 等. AOTF 的高光谱成像光谱仪的辐射定标技术[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(2): 206-209.  
XING H, ZHAO H J, CHENG X, *et al.*. Radiometric calibration of hyperspectral imaging spectrometer based on AOTF[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(2): 206-209. (in Chinese)

#### 作者简介:



赵慧洁(1966—),女,辽宁人,教授,博士生导师,1988年,1991年,1994年于哈尔滨工业大学精密仪器系分别获学士、硕士和博士学位,1999-2000年在美国密西根大学做博士后研究,主要从事光电测试、高光谱遥感探测、机器视觉方面的研究。E-mail: hjzhao@buaa.edu.cn



张颖(1979—),女,山西朔州人,博士,讲师,2002年、2007年于北京理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事光学设计、偏振探测、高光谱探测、光电探测等方面的研究。E-mail: ying-zhang@buaa.edu.cn



程宣(1981—),男,山东济宁人,博士研究生,2005年于四川大学获得学士学位,主要从事高光谱成像探测、光电探测等方面的研究。E-mail: chengxuan2002@163.com