

# 航天高光谱成像技术研究现状及展望

王跃明<sup>1</sup> 郎均慰<sup>1,2</sup> 王建宇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 自1997年8月23日首颗高光谱卫星LEWIS发射以来,航天高光谱成像技术走过了15年的路程,我国在该领域的技术也取得了跨越式的发展。当前我国正按照国家中长期科技规划,努力构建下一代高分辨率对地观测系统,深入全面地总结过去若干年的航天高光谱成像技术发展情况,并分析发达国家的发展计划,对制定我国的航天高光谱成像技术发展策略具有重要意义。从当前的主流高光谱分光技术、应用情况和发展趋势三个方面进行了全面的分析总结,认为民用高光谱成像系统应该朝着宽幅、定量化和应用细分的方向发展;军用高光谱成像系统的发展重点应该是高空间分辨率、宽波段以及快速信息处理技术。

**关键词** 高光谱成像; 航天遥感; 光谱仪; 光谱探测

**中图分类号** TH7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010008

## Status and Prospect of Space-Borne Hyperspectral Imaging Technology

Wang Yueming<sup>1</sup> Lang Junwei<sup>1,2</sup> Wang Jianyu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Since the first launch of hyperspectral imaging satellite on August 23, 1997, space-borne hyperspectral imaging technology has been developed for 15 years. In these years, rapid progress was made in China. Before constructing the high resolution earth observing system, it is important to review the status of space-borne hyperspectral imaging technology in the past years. The developed country's future plan should be of benefit to our space-borne strategy. Typical imaging spectrometers are summarized, application capabilities of space-borne hyperspectral imaging technology analyzed, and the prospect of hyperspectral imaging technology is presented. To realize wider swath and higher accuracy, technological innovation will occur for future civil space-borne hyperspectral imaging system. Higher spatial resolution, wider spectral range and rapid data processing technology will be expected for defense and security continuously.

**Key words** hyperspectral imaging; space-borne remote sensing; spectrometer; spectral detection

**OCIS codes** 300.6190; 280.4788; 280.4991; 230.2090; 110.2970

## 1 引言

2012年8月,中国载人航天工程办公室在其官方网站——中国载人航天工程网上正式公布了一批天宫一号空间应用成果,其中包括我国首台航天高分辨率高光谱成像仪<sup>[1]</sup>,揭示了航天高分辨率高光谱成像技术在中国的最新进展。网站通过丰富的实例展示了航天高分辨率高光谱成像技术在地球科学领域的广阔应用前景。

航天高光谱成像技术是在20世纪80年代左右兴起的机载成像光谱技术的基础上发展起来的。国际上在2000年前后曾经兴起过一阵航天高光谱成像技术的发展热潮,许多国家进行了仪器研制和卫星发射,还有一些国家公开了自己的航天高光谱发展计划。美国始终是该项技术的领跑者,先后发起的航天高光谱计

收稿日期: 2012-09-14; 收到修改稿日期: 2012-10-24; 网络出版日期: 2012-11-27

作者简介: 王跃明(1977—),男,博士,研究员,主要从事光谱成像技术方面的研究。E-mail: wangym@mail.sitp.ac.cn

划包括 LEWIS 卫星、EO-1 卫星、Mighty-Sat 卫星、OrbView-4 卫星等,其中 EO-1 卫星的 Hyperion 仪器堪称具有里程碑意义的航天高光谱成像仪器,在轨获取了大量的珍贵数据,向全世界的遥感技术人员和决策层展示了航天高光谱成像技术的信息获取能力。除美国之外,欧洲太空局发射的 Proba 卫星主载荷 CHRIS 仪器于 2001 年发射,入轨后也获取了大量高质量的光谱图像数据,唯一不足的是该仪器仅覆盖可见近红外(VNIR)光谱( $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$ )范围。我国于 2008 年发射了国内首颗高光谱成像仪卫星——HJ-1A 卫星,空间分辨率 100 m,光谱覆盖范围  $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 。

随着技术的进步和需求的进一步牵引,航天高光谱成像技术近年的发展呈现出一些新的趋势。对该技术发展现状与未来趋势进行分析研究,对于制定我国在该技术领域的发展战略具有十分重要的意义。

## 2 航天高光谱成像仪主要类型与原理

1988 年,美国国家地质调查局的 Kruse 教授<sup>[2]</sup>在《环境遥感》(*Remote Sensing of Environment*)上发表了利用航空成像光谱仪(AIS)获取连续光谱图像数据并开展矿物探测识别及制图的研究结果,这是历史上第一次通过遥感手段获取了目标的特征吸收连续光谱信息<sup>[2]</sup>。美国宇航局喷射推进实验室(JPL)在 AIS 的基础上进一步发展了机载可见-红外成像光谱仪(AVIRIS),1987 年开始飞行,并经过多次升级改进,直到今天仍然是全世界最先进的高光谱成像仪<sup>[3]</sup>。

在 AIS 和 AVIRIS 的基础上,世界各国科学家和技术人员研制了各种各样的高光谱成像仪。根据成像方式的不同,可以分为光机扫描型、推扫型、凝视型三大类。光机扫描型高光谱成像仪具有成像视场大、可以实时定标等优点,比较适合于相对运动速度慢的机载平台,比较典型的仪器如 AVIRIS、OMIS<sup>[4,5]</sup> 和 HyMAP<sup>[6]</sup> 等。推扫型高光谱成像仪相对灵敏度较高,因此航天高光谱成像仪绝大部分为推扫型;光机扫描型适于中低分辨率超大幅宽应用,如 MODIS<sup>[7]</sup>。凝视型高光谱成像仪通常应用于近场探测,单次成像时间较长,但可以获得很高的探测灵敏度和光谱分辨率,例如 AOTF 型高光谱成像仪<sup>[8]</sup>。

航天高光谱成像仪系统能够充分利用卫星平台全球覆盖的优点,获取全球任意目标的静态、动态的光谱信息,受到地球科学研究、产业界以及军方用户的重视。但由于太阳同步低轨卫星平台运动速度快(约 7 km/s),实现高分辨率的航天高光谱成像系统难度大,因此通常采用推扫成像方式。根据分光方式不同,航天推扫型高光谱成像系统可以分为棱镜分光、干涉分光和光栅分光三大类。

### 2.1 棱镜分光高光谱成像仪

棱镜分光高光谱成像仪主要利用不同波长光线在棱镜材料中的不同折射率来实现色散,最经典的棱镜分光是光楔<sup>[9]</sup>。但传统光楔主要是针对平行光有良好的色散性能,而有一定视场角和孔径的高光谱成像系统要实现良好色散,必须经过一些特殊设计,才能满足像质和空间环境稳定性的要求。

中国科学院上海技术物理研究所和长春光学精密机械与物理研究所等单位在棱镜分光成像光谱仪方面分别开展了研究工作<sup>[10~13]</sup>,棱镜的设计继承了传统光楔色散的思路,主要通过准直镜以及采用了离轴非球面技术的会聚成像镜来扩大分光系统的像场,并改善像质,必要时还可增加校正透镜,以进一步改善光谱仪的成像与分光性能。但由于成像光谱仪的不同视场(对应狭缝线度方向不同位置)通过光楔棱镜的色散顶角不同,导致不同视场的光线经光谱仪色散后的偏转角度有微小差别,形成光谱弯曲。通常情况下,光楔棱镜光谱仪的光谱弯曲能够到达  $1\sim 2\ \text{pixel}$ (与像场大小或狭缝长度有关)。如图 1(a)所示,典型的光楔棱镜光谱仪为了扩大像场,改善像质,在探测器焦平面前设置了非球面离轴校正透镜。

欧洲的相关研究机构则在光楔棱镜的基础上发展了曲面棱镜分光技术,设计出了光谱弯曲(Smile)和畸变(Keystone)均相对较小的高光谱成像仪。英国的 Sira 公司研制的小型化高分辨率高光谱成像仪 CHRIS 于 2001 年搭载 Proba-1 卫星发射入轨,获得很好的应用效果。CHRIS 仪器的光学设计利用曲面棱镜很好地解决了光谱弯曲问题,弯曲量控制在 0.01 pixel 水平,基本上达到光机加工装调的误差水平<sup>[14,15]</sup>。CHRIS 仪器设计的光谱采样间隔从 1.25 nm(415 nm 处)到 11.5 nm(1050 nm 处),设计者通过 CCD 像元合并技术解决光谱采样间隔过小产生的低信噪比(SNR)问题。如图 1(b)所示,曲面棱镜光谱仪采用了对称结构,曲面棱镜 2 能够补偿曲面棱镜 1 产生的光谱弯曲。

棱镜分光高光谱技术的最新发展是德国的 EnMap 高光谱计划。2008 年,德国 Kayser-Threde 公司的

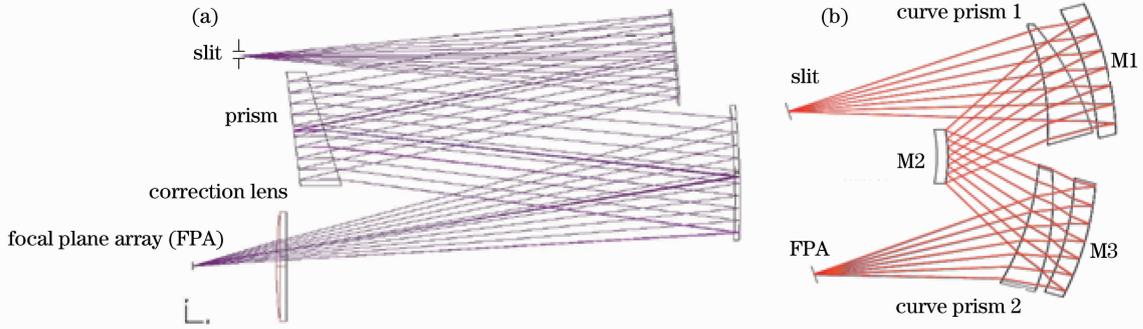


图 1 棱镜分光光谱仪型式。(a) 传统的光楔棱镜光谱仪；(b) Fery 曲面棱镜光谱仪

Fig. 1 Typical prism imaging spectrometers. (a) Classical wedge prism spectrometer; (b) Fery curve prism spectrometer

研究人员公布了目前最先进的基于对称 Fery 曲面棱镜结构的高光谱成像仪设计结果<sup>[16,17]</sup>。对称的曲面棱镜结构消除了传统光楔棱镜像场较小、光谱畸变较大的问题。EnMap 光谱仪的 Smile 畸变优于  $\pm 0.1$  pixel, Keystone 畸变优于  $\pm 0.01$  pixel (狭缝长度为 24 mm)。成像质量达到了美国流行的凸面光栅 Offner 光谱仪的水平。唯一不足的是受棱镜材料折射率决定的色散非线性, EnMap 高光谱成像仪 VNIR 谱段的光谱采样间隔 4.8~8.1 nm 不等 (平均 6.5 nm), 短波红外 (SWIR) 谱段的光谱采样间隔为 7.4~12.0 nm 不等 (平均 10.2 nm), 采样间隔变化呈平滑过渡。较高的棱镜光学效率和相对较大的相对孔径 ( $F/3.0$ ) 使仪器具备很高的探测灵敏度 (SWIR 谱段在典型条件下信噪比能达到 200)<sup>[18]</sup>。

## 2.2 干涉分光高光谱成像仪

干涉分光高光谱成像仪将目标信号分成两束相干光, 对两束相干光之间的光程差进行调制并对不同光程差的相干结果进行采样, 对采样后的干涉图进行变换, 获得目标光谱信息, 如图 2 所示。最经典的干涉分光高光谱成像仪基于迈克耳孙干涉仪原理, 但这种基于时间调制的高光谱成像仪应用于太阳同步轨道平台很难实现高空空间分辨率成像。

2002 年美国空军研究实验室 (AFRL) 公布了基于空间调制技术的星载高光谱成像计划 (MightySat II. 1), 该计划主载荷为一台空间调制的傅里叶变换高光谱成像仪, 设计分辨率 30 m (575 km 远处), 幅宽 30 km<sup>[19]</sup>。该仪器干涉光谱仪设计有一个狭缝光阑, 地物目标信号经过狭缝后被一个  $45^\circ$  分束片分成两束相干光, 两束光相互逆向经过相同的三角光路后合并干涉成像, 探测器采样干涉图后经变换获得目标光谱。该仪器是干涉分光型航天高光谱成像仪的首次实践, 也揭示了该类型分光的一些天生缺陷。例如:  $45^\circ$  分束片在合并两束相干光时会造成系统 50% 的能量损失; 对于波长较短的太阳光主要反射谱段 (0.4~2.5  $\mu\text{m}$ ), 仪器的力学、热学稳定性对干涉谱的准确性影响较大, 而且在轨光谱定标难度大; 由于干涉图变换采样后的数据是按波数 (光频率) 均分的, 因此干涉光谱仪对波长短的信号光谱分辨率高, 而对波长长的信号光谱分辨率低, 这导致 400~500 nm 附近的图像信噪比较低, MightySat II. 1 在这个附近的波段信噪比低于 50<sup>[19]</sup>, 如图 3 所示。

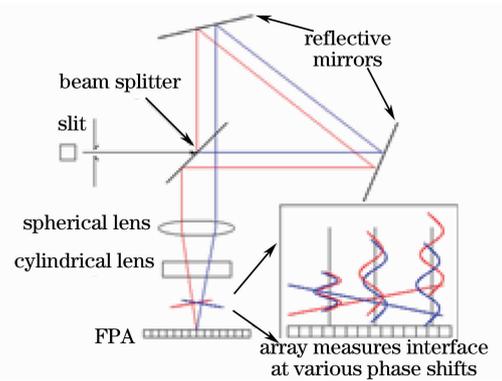


图 2 空间调制干涉光谱仪

Fig. 2 Spatial modulation interference spectrometer

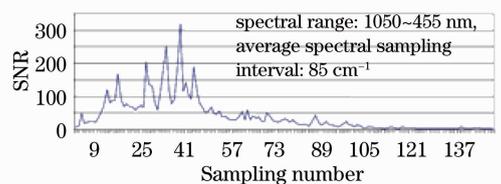


图 3 美国 MightySat II. 1 干涉高光谱成像系统信噪比测试结果

Fig. 3 SNR measurement of MightySat II. 1 hyperspectral imaging system

中国科学院的相里斌研究员对干涉型高光谱成像技术有着比较全面系统的研究, 其团队研制的环境一号 A 星高光谱成像仪采用的技术方案与 MightySat II. 1 类似, 空间分辨率 100 m, 幅宽 50 km, 波段数约

128, 图像质量良好, 但 400~500 nm 光谱范围明显信噪比偏低, 与 MightySat II.1 现象类似<sup>[20]</sup>。

自 2000 年 MightySat II.1 卫星发射以来, 未见国外再有类似的较高分辨率干涉型航天高光谱成像仪报道。

### 2.3 光栅分光高光谱成像仪

光栅是一种常见的色散分光元件, 凹面光栅因小巧紧凑常用于便携式光谱仪, 平面光栅则常用于单色仪中, 凸面光栅光谱仪因其对称结构、全反射式和像场大等优点较多应用于航天高分辨率高光谱成像系统中。典型的凸面光栅分光航天高光谱成像仪包括 EO-1 卫星 Hyperion 仪器<sup>[21]</sup>、OrbView-4 卫星 Warfighter-1 仪器<sup>[22]</sup>、火星勘探飞行器 CRISM 仪器<sup>[23]</sup>、月球矿物制图仪 M<sup>3</sup> 仪器<sup>[24]</sup>和 TacSat-3 卫星 ARTEMIS 仪器<sup>[25]</sup>等。不难发现, 相比较而言, 凸面光栅分光的航天高光谱成像仪明显较前面两种分光方式的仪器要多。这一方面是因为美国是航天大国, 高光谱卫星计划较多; 另一方面因为美国掌握了凸面闪耀光栅关键技术, 并且凸面光栅综合性更佳。例如: 1) 色散线性有利于量化应用; 2) 闪耀波长选择与探测器响应、太阳光谱辐照度匹配设计可以获得较好的探测灵敏度一致性<sup>[26]</sup>; 3) 全反射式结构比较容易实现焦面稳定性和辐射/光谱稳定性, 适合于空间环境应用。这些优点都是棱镜分光与干涉分光所不具备的, 但对于航天应用却十分重要。

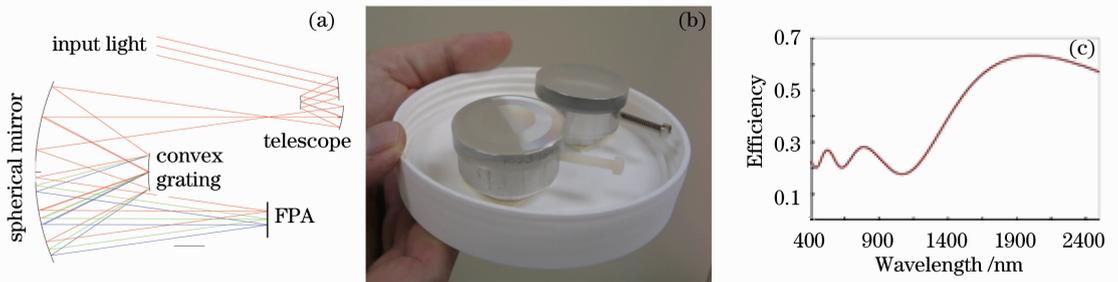


图 4 凸面光栅分光技术。(a) Offner 成像光谱仪结构; (b) 多闪耀角凸面光栅; (c) 多闪耀角凸面光栅效率

Fig. 4 Convex grating spectrometry. (a) Typical Offner imaging spectrometer; (b) multi-blazed-angle convex grating; (c) diffraction efficiency of multi-blazed-angle convex grating

凸面光栅光谱仪的最新发展是 2008 年发射月球矿物制图仪和 2009 年发射 ARTEMIS 仪器, 这两台仪器均采用了多闪耀技术, 单片光栅光谱仪工作光谱范围拓展到 0.4~2.5  $\mu\text{m}$  乃至 0.4~3.0  $\mu\text{m}$  整个太阳反射谱段范围。配合 VisMCT 技术(响应覆盖可见光范围的碲镉汞焦平面), 将传统(Hyperion、CRISM 等)系统的 VNIR 和 SWIR 两个光谱仪集成为一个光谱仪, 如图 4 所示。因为它采用单个焦平面组件获取 0.4~2.5  $\mu\text{m}$  或 0.4~3.0  $\mu\text{m}$  的所有高光谱图像, 不仅简化了仪器的工程设计实现, 更改善了 VNIR 和 SWIR 两个谱段的图像配准质量。传统的 VNIR/SWIR 双光谱仪设计需要解决两个光谱仪放大率误差以及系统集成装配误差问题, 难度非常大。

由于低温光学的必要性, 美国宇航局 JPL 实验室目前正在发展热红外高光谱成像系统, 仍然在采用光栅分光技术<sup>[27]</sup>。

## 3 航天高光谱成像技术的应用情况

多年实践表明, 高光谱成像技术“图谱合一”的特点及量化探测能力, 使其在地球科学、防务安全等诸多领域表现优异, 成为各界关注的热点。强烈的应用需求对技术发展形成了有利牵引。

### 3.1 在地球科学与应用领域的发展情况

航天高光谱成像技术的发展应用建立在机载高光谱成像仪的应用基础上。从 AIS 首飞到 AVIRIS 的逐渐业务化飞行, 机载高光谱成像仪的应用实践为航天高光谱成像仪的研制和光谱/辐射信息传输链路的建立奠定了坚实基础。但由于平台的独特优势, 航天高光谱成像仪在地球科学与应用领域的发展速度很快。航天高光谱成像仪可以实现全球访问, 发射入轨后的运行相对简单。这对于关注宏观尺度、长周期变化的地球科学与应用十分重要。

目前, 航天高光谱成像技术仍然处于发展过程中, 但在地球科学与应用领域的作用已经突出显现。

EO-1卫星 Hyperion 高光谱成像仪在这方面进行了充分的演示验证,图 5 是该仪器获取的典型目标的光谱辐亮度数据。

EO-1 高光谱成像仪通过反射谱的精细探测可以识别植被种类、生长阶段乃至实现作物产量的估算,可以为全球粮食安全、生态安全形势提供及时准确的信息。

大量的数据表明,EO-1 高光谱成像仪有能力对矿产的成分、储量等地质信息进行探测。天宫一号高光谱成像仪的初步应用结果也证实了这一点,许多地区的勘探依靠人工或机载飞行的代价非常大,而航天高光谱成像仪的探测则非常简单。

航天高光谱成像仪对水资源等区域环境质量的评估监测也被证明是可行和有效的,水体中的含沙量、叶绿素含量等信息表现为反射率差异,高光谱成像仪能识别这些微小的差异,从而可实现监测的目标。近些年各航天大国还在发展专用于温室气体监测的航天高光谱成像仪,用于全球变暖趋势研究<sup>[28]</sup>。

欧洲太空局 Proba-1 卫星的 CHRIS 工作谱段范围是  $0.4 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ,主要在生态环境、农林业等方面发挥作用<sup>[29~32]</sup>。

### 3.2 在深空探测领域的发展情况

深空探测是人类走出地球、探索宇宙生命起源和演变的重要步骤,高光谱成像仪在这方面扮演着重要角色。火星和月球探测是当前深空探测的热点目标,高光谱成像仪在其中发挥着重要作用。

2005 年 8 月发射的火星勘探轨道器(MRO)上搭载了高光谱成像仪,该仪器的目标是利用光谱信息了解火星上的水和热液分布情况,进行火星表明地层、成份等地学信息制图,并进行火星尘埃、冰晶气溶胶、表面水含量等随火星季节变化规律的研究<sup>[23]</sup>。经过长期飞行后,2006 年,MRO 陆续传回大量的火星表面高光谱图像,进一步揭示了火星表面存在水等物质的证据。

2008 年,美国宇航局 JPL 实验室研制的小型化高光谱成像仪-月球矿物制图仪(M3)成功搭载印度月船 1 号探测器进入月球轨道。该仪器首次采用多闪耀凸面光栅技术,整机重量仅 14 kg。随后仪器发回了大量月球表面矿物分布图像数据。

### 3.3 在防务安全领域的发展情况

航天高光谱成像技术的快速发展,军事需求发挥了重要作用。美国军方主导的 MightSat II.1 卫星、NEMO、OrbView-4、TacSat-3 等高光谱卫星计划很大程度上引领着高光谱技术的发展趋势。最成功的 TacSat-3 卫星(2009 年发射)ARTEMIS 高光谱成像仪的主要技术性能目前仍然是美国军方的高度机密。但从公开的 2 幅图像来看,其空间分辨率应该达到了 5 m 左右,如分析家所称“具备了战术侦察的能力”。除了空间分辨率很高之外,快速在轨数据处理是 ARTEMIS 的另一个重要特色。ARTEMIS 能够在轨近实时地将获取的海量高光谱数据进行处理,提取出目标信息,通过通信链路直接发送到战场前沿的终端设备,满足一线指挥官对信息的时效性要求。

该仪器的研制机构——美国雷神公司——目前正在研制性能更先进的军用高光谱成像系统。

## 4 未来发展趋势分析

十余年的实践表明,航天高光谱成像技术的应用前景十分广阔,对仪器性能的期望也越来越高,除空间分辨率、光谱分辨率等常规指标外,对仪器的定量化水平、对目标的访问能力(时间分辨率)均提出了更高的要求。同时,相关关键技术的进步也为航天高光谱成像仪器的未来发展提供了保障。除了分光技术日趋完善以外,高性能图像传感器以及信息获取技术也日新月异。探测器继续朝大面阵、高帧频和高灵敏度方向发展,配合高速、海量信息采集处理技术,使得成像光谱仪能够获得更大幅宽、更短重访周期以及更高分辨率;探测器的响应波长不断扩大,得以将以往多个不同波段的光谱仪集成合一,实现小型化和高配准精度。此

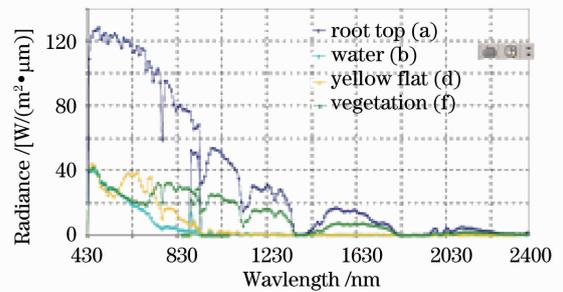


图 5 EO-1 Hyperion 获取的典型目标光谱  
Fig. 5 Spectral radiance of typical targets acquired by EO-1 Hyperion

外,光学、精密机械和热学领域的进步都促进了航天高光谱成像仪的性能提升。

#### 4.1 具有代表性的航天高光谱成像仪发展计划

1) 美国“十年勘探(Decadal Survey)”高光谱卫星 HypsIRI。

该计划最早由美国宇航局于 2006 年提出,面向未来地球科学与应用需求,着重于系统性,通过较少的卫星数量和多种探测手段、多种平台的综合应用,实现“成本下降、能力提升和多任务并举”的发展目标。

HypsIRI 卫星主载荷为一台可见/短波红外高光谱成像仪和一台中/长波红外多光谱扫描仪。其空间分辨率均为 60 m,高光谱成像仪幅宽达到 150 km,多光谱成像仪幅宽达到 600 km,10 nm 光谱采样间隔,典型条件下的信噪比能够达到 300 以上。赤道目标重访周期为 19 天,通过穿轨指向可以缩短到 3 天。优异的综合性能将使其能够监测陆地及水生态环境,包括人类活动对自然生态的影响以及相互作用。

该卫星预计 2021 年发射<sup>[33]</sup>。

2) 美国 LandSat 卫星后续光谱成像仪。

早在 1996 年,美国宇航局就着眼于 LandSat 卫星后续光谱成像技术的研究。2000 年,在 EO-1 卫星上搭载了先进陆地成像仪(ALI),演示验证了推扫型宽幅多光谱成像仪<sup>[34]</sup>,空间分辨率和谱段设置与 LandSat7 卫星 ETM+ 完全一致,幅宽为 30 km,但由于采用推扫技术,灵敏度有了大幅提升。在此基础上,美国宇航局与美国地质调查局决定沿用 EO-1 卫星 ALI 技术方案,研制 LDCM 任务(LandSat-8 卫星)的实用型陆地成像仪(OLI),主要技术指标与 ALI 一致,但幅宽达到 ETM+ 的 185 km 水平。仪器由 BATC (Ball Aerospace & Technology Corporation)公司研制,计划于 2012 年 12 月发射入轨。

与此同时,作为先进航天高光谱成像仪制造商的美国雷神公司也在着眼于未来陆地卫星光谱成像仪的技术发展,直接提出了高光谱成像解决方案,即研制空间分辨率、幅宽和灵敏度均与 OLI 相当的超大幅宽高光谱成像仪,采用在轨编程技术,按任务所需下行光谱图像数据,并研制出了地面原理样机,预计该技术方案有可能会被美国 LandSat-8 或 9 号卫星所采用<sup>[33]</sup>。

#### 4.2 航天高光谱成像仪进一步发展的技术突破点

高光谱成像系统涉及光学、精密机械、电子学、半导体探测器和信息处理等诸多技术,每一项技术的突破都有可能带动系统的性能提升,并改进仪器的设计。过去的经验表明,精细分光光谱仪效率、像场尺寸等性能的改善,高强度良好力学热学稳定性复合材料的应用,高灵敏度探测器等方面的技术进步都促进了高光谱系统技术的进步。

应用领域的细分有可能促进高光谱成像技术发展与应用推广。由于技术复杂、成本高昂,航天高光谱成像系统主要作为一种通用仪器供各类用户进行应用研究。由于需要兼顾各类用户的特殊要求,仪器设计所受的约束较多。这在一定程度上制约了航天高光谱成像技术的产业应用。计划 2012 年发射的欧洲 GMES 计划 Sentinel-2 卫星在这方面进行了尝试,该卫星主载荷为全球环境变化探测光谱成像仪,通过减少探测波段方面的压力,把仪器的幅宽提高到了 290 km(空间分辨率最高达到了 20 m),极大提高了光谱成像仪的全球重访能力<sup>[35]</sup>。

## 5 结束语

根据目前公开的信息,可以认为航天高光谱成像仪将进入新一轮发展。在仪器性能方面,民用高光谱成像仪主要通过扩大幅宽、提高灵敏度等措施来满足地球科学等应用需求。军用高光谱成像仪将在空间分辨率、谱段覆盖和信息实时处理能力方面进一步发展。美国空军在 2009 年将航天高性能高光谱技术作为空军未来关键技术规划的重要内容之一。

从我国来看,应抓住国家实施中长期科技规划的历史机遇,大力推进与航天高光谱成像技术相关的核心分光器件、大规模高帧频焦平面、定标、信息处理与反演等技术与攻关,以满足国民经济建设、社会发展及国防安全需要。

根据现有能力和水平,国内发展空间分辨率 30 m 左右,幅宽大于 60 km 的航天高光谱成像系统的条件已经基本具备。这样的技术指标已经能够满足矿产调查、环境监测和农林估产等需求,并具有一定的先进性。

国防安全中需要的光谱侦察、目标特性识别等应用要求更高的空间分辨率,研制的难度更大,需要抓紧攻关,应该采取滚动发展的路线,使需求牵引与技术推动两股力量形成合力。利用现有条件,先行先试,将仪器升级换代的台阶设置得小些,小步快跑,最终实现能力提升。

紧紧把握航天高光谱成像技术的发展趋势,进行深入的需求分析,突破核心关键技术,实现我国航天高性能高光谱成像技术的跨越发展,将大大提升对地观测系统服务我国经济社会发展与国防安全的能力。

### 参 考 文 献

- 1 中国载人航天工程网. 天宫一号空间应用成果展示[EB/OL]. <http://www.cmse.gov.cn/news/list.php?catid=459>
- 2 F. A. Kruse. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydro thermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, **24**(1): 31~51
- 3 Robert O. Green, Michal L. Eastwood, Charles M. Sarture *et al.*. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **65**(3): 227~248
- 4 Qingxi Tong, Bing Zhang, Lanfen Zheng. Hyperspectral remote sensing technology and applications in China [C]. Proc. of the 2nd CHRIS/Proba Workshop, ESA/ESRIN, 2004
- 5 Jianyu Wang, Rong Shu, Yongqi Xue. The development of Chinese hyperspectral remote sensing technology [C]. *SPIE*, 2005, **5640**: 358~367
- 6 T. Cocks, R. Janssen, A. Stewart *et al.*. The HYMAP™ Airborne Hyperspectral sensor: the system, calibration and performance [C]. 1st EARSSEL Workshop on Imaging Spectroscopy, 1998
- 7 Xiaoxiong Xiong, William Barnes. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, **23**(1): 69~79
- 8 Jifan Liu, Rong Shu, Yanhua Ma *et al.*. A hyperspectral imager with adjustable spectral selectivity based on AOTF [C]. *SPIE*, 2010, **7857**: 78571K
- 9 Wang Jianyu, Shu Rong. Introduction to Imaging Spectrometer Technology [M]. Beijing: Science Press, 2011. 61  
王建宇, 舒 嵘. 成像光谱技术导论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 61
- 10 Wang Xin, Ding Xuezhuan, Yang Bo *et al.*. Optical design and spectral calculation of prism spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1334~1339  
王 欣, 丁学专, 杨 波 等. 棱镜分光光谱仪的光学系统设计与光谱特性计算[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1334~1339
- 11 Yueming Wang, Xiaoqiong Zhuang, Shengwei Wang *et al.*. Application of advanced IR-FPA in high-sensitivity pushbroom SWIR hyper-spectral imager [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532V
- 12 Wang Xin, Yang Bo, Ding Xuezhuan *et al.*. The optical design of shortwave infrared imaging spectrometer in space [J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(12): 687~693  
王 欣, 杨 波, 丁学专 等. 空间遥感短波红外成像光谱仪的光学系统设计[J]. 红外技术, 2009, **31**(12): 687~693
- 13 Sun Yanping, Gao Jun. Investigation on dispersion characteristics for prism spectrograph [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1999, **20**(4): 23~26  
孙燕萍, 高 军. 棱镜成像光谱仪色散特性研究[J]. 航天返回与遥感, 1999, **20**(4): 23~26
- 14 Mike A. Cutter. Compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) design and performance [C]. *SPIE*, 2004, **5546**: 126~131
- 15 M. A. Cutter, D. R. Lobb, T. L. Williams *et al.*. Integration & testing of the compact high-resolution imaging spectrometer (CHRIS) [C]. *SPIE*, 1999, **3753**: 1~12
- 16 H. Kaufmann, K. Segl, S. Chabrillat *et al.*. EnMAP-an advanced hyperspectral mission [C]. 4th EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, 2005. 55~60
- 17 Stefan Kaiser, Bernhard Sang, Josef Schubert *et al.*. Compact prism spectrometer of pushbroom type for hyperspectral imaging [C]. *SPIE*, 2008, **7100**: 710014
- 18 B. Sang, J. Schubert, S. Kaiser *et al.*. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration and technologies [C]. *SPIE*, 2008, **7086**: 708605
- 19 Summer Yarbrough, Thomas Caudill, Kouba Eric *et al.*. MightySat II. 1 hyperspectral imager: summary of on-orbit performance [C]. *SPIE*, 2002, **4480**: 186~197
- 20 Zhang Lifu. Preliminary evaluation of HJ-1A spaceborne hyperspectral imagery [C]. Proceeding of 7th Imaging Spectrometer Technology and Application Symposium, 2009  
张立福. HJ-1A 卫星高光谱遥感图像质量初步评价[C]. 第七届成像光谱技术与应用研讨会文集, 2009

- 21 Jay Pearlman, Carol Segal, Lushalan B. Liao *et al.*. Development and operations of the EO-1 Hyperion imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 2004, **4135**: 243~253
- 22 D. W. Wilson, P. D. Maker, R. E. Muller *et al.*. Diffractive optical elements for spectral imaging. Optical Society of America (OSA) Diffractive Optics and Micro-Optics (DOMO) Conference, 2000
- 23 Peter R. Silverglate, Dennis E. Fort. System design of the CRISM (compact reconnaissance imaging spectrometer for mars) hyperspectral imager [C]. *SPIE*, 2003, **5159**: 283~290
- 24 B. Van Gorp, P. Mouroulis, D. W. Wilson *et al.*. Optical design and performance of the ultra-compact imaging spectrometer [C]. *SPIE*, 2011, **8158**: 81580L
- 25 Ronald B. Lockwood, Thomas W. Cooley, Richar M. Nadile *et al.*. Advanced responsive tactically-effective military imaging spectrometer (ARTEMIS) system overview and objectives [C]. *SPIE*, 2007, **6661**: 666102
- 26 Wang Jianyu, Wang Yueming, Li Chunlai. Noise model of hyperspectral imaging system and influence on radiation sensitivity [J]. *J. Remote Sensing*, 2010, **14**(4): 614~620  
王建宇, 王跃明, 李春来. 高光谱成像系统的噪声模型和对辐射灵敏度的影响[J]. *遥感学报*, 2010, **14**(4): 614~620
- 27 Pantazis Mouroulis. Compact infrared spectrometers [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 729803
- 28 D. Crisp, R. M. Atlas, F. M. Breon *et al.*. The orbiting carbon observatory (OCO) mission [J]. *Advances in Space Research*, 2004, **34**(4): 700~709
- 29 Antonio Ruiz-Verdú, José-Antonio Domínguez-Gómez, R. Peña-Martínez. Use of CHRIS for monitoring water quality in rosarito reservoir [C]. Proc. of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 2005
- 30 Giuseppe Ottavianelli, Stephen Hobbs, Davide Bruno. Assessment of hyperspectral and SAR remote sensing for solid waste landfill management [C]. Proc. of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 2005
- 31 Luis Guanter, Luis Alonso, Jose Moreno. Methods for the surface reflectance retrieval fromchris/proba data over land and inlandwaters [C]. Proc. of the 3rd ESA CHRIS/Proba Workshop, 2005
- 32 Barbara Van Mol, Young-Je Park, Kevin Ruddick *et al.*. Mapping of chlorophyll and suspended particulate matter maps from chris imagery of the oostende core site [C]. Proc. of the 2nd CHRIS/Proba Workshop, 2004
- 33 John F. Silny, Thomas G. Chrien. Large format imaging spectrometers for future hyperspectral Landsat mission [C]. *SPIE*, 2011, **8158**: 815803
- 34 William E. Bicknell, Constantine J. Digenis. EO-1 advanced land imager [C]. *SPIE*, 1999, **3750**: 80~88
- 35 Ferran Gascon, Philippe Martimort, François Spoto. Sentinel-2 optical high resolution mission for GMES land operational services [C]. *SPIE*, 2009, **7474**: 747404