

doi:10.3799/dqkx.2015.109

面向地学应用的高光谱遥感器指标体系设计

刘银年^{1,2}, 丁学专^{1,2}, 李志忠³

1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

2. 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

3. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100029

摘要: 高光谱成像技术在地物精确分类上的巨大优势,使其成为地学遥感领域的热点与主要技术手段。为确定适合地学应用的高光谱遥感器的指标体系,分析了地学应用的需求,以及高光谱传感器各指标之间的“约束”关系,包括空间分辨率、光谱分辨率、幅宽以及信噪比等。提出了高分辨率与宽幅高光谱遥感器的指标体系,利用宽幅高光谱数据与高分辨率高光谱数据,可同时满足大范围调查以及重点区域详查的地学应用需求,为未来地学应用高光谱遥感器的体系化发展提供了参考和支持。

关键词: 高光谱; 遥感; 地学; 指标体系。

中图分类号: P24

文章编号: 1000-2383(2015)08-1295-06

收稿日期: 2015-04-01

Specification Design of Hyperspectral Imaging Remote Sensor Used in Geosciences

Liu Yinnian^{1,2}, Ding Xuezhuan^{1,2}, Li Zhizhong³

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

2. Infrared Detecting and Imaging, Key Laboratory of Chinese Academy of Science, Shanghai 200083, China

3. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China

Abstract: Enjoying great advantage in accurate classification of ground objects, hyperspectral imaging technology has become popular in geological remote sensing. To determine the suitable sensor specifications for the geological applications, the users' demand and relationship between hyperspectral sensor's specifications including ground resolution, spectral resolution, swath and SNR are analyzed. Specifications of high resolution and wide swath hyper-spectral sensors for geosciences are proposed. Both large area searching and specific area monitoring in details can be achieved with the specifications system, which can facilitate further development of hyperspectral remote sensing in geological applications.

Key words: hyper-spectral; remote sensing; geology; specification.

0 引言

高光谱成像技术是20世纪80年代开始发展起来的,它可以在宽谱段范围内获取成百上千连续精细的光谱,同时采集目标的几何、辐射及光谱信息,集相机、辐射计和光谱仪能力于一体,形成图像立方体,通过获得地面像元的光谱特征曲线,实现地物的“指纹”识别。高成像光谱仪在地物精确分类、目标识

别、地物特征信息的提取等应用方面有巨大的优势,已成为遥感领域的一大热点与主要技术手段(王军霞等,2002;郑玉权和禹秉熙,2002)。

高光谱成像技术完全覆盖了可见到红外的大气窗口波段,其精细的分光能力则可以探测出物质间十分微小的差异。从400~1000 nm的可见近红外波段到1000~2500 nm的短波红外波段,覆盖了植被、水体、矿物、岩石等信息;其中8.0~12.5 μm范

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(Nos.2008AA121100,2012AA12A308,2014AA123201);国家自然科学基金项目(No.41402293)。

作者简介: 刘银年(1971—),男,博士生导师,研究员,主要从事航天遥感仪器方面的研究。E-mail: ynliu@mail.sitp.ac.cn

引用格式: 刘银年,丁学专,李志忠,2015.面向地学应用的高光谱遥感器指标体系设计.地球科学——中国地质大学学报,40(8):1295—1300.

围是热源的光谱特征覆盖区。

可见光与短波红外的反射遥感在地质领域的应用经过多年发展,其方法已逐渐成熟并得到广泛的应用。以长波红外波段为发射光谱,可探测硅酸盐矿物 Si-O 键振动光谱,可区分识别硅酸盐(包括不含水造岩矿物)、硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐、氧化物、氢氧化物等矿物,从而拓宽遥感矿物识别的广度(矿物大类)与深度(矿物种属)。长波红外发射光谱混合为线性混合,与可见短波—反射红外遥感相互补充,增加了遥感矿物识别的种类,提高了识别的定量化程度及可靠性(黄秀华,1999;Yoshiki,2003;闫柏琨和王润生,2005;王俊虎等,2011)。

高光谱传感器实现光谱分光的方式有棱镜分光、光栅分光和傅里叶干涉分光。由于光栅分光效率高、光谱弯曲小和环境适应性强,因此星载高光谱成像仪一般采用基于凸面光栅的分光方式。本文在国内外高光谱传感器调研的基础上,针对地学应用,提出了高光谱遥感的指标体系。

1 高光谱传感器现状

1.1 国外现状

自 20 世纪 80 年代初期,第一台机载成像光谱仪 (airborne imaging spectrometer, AIS) 由美国 NASA JPL 研制成功,并在地质勘测、植被研究等方面初显了高光谱遥感的魅力之后,成像光谱技术犹如雨后春笋般得以快速发展,先后出现了美国国家航空航天局 JPL 实验室的机载可见/红外成像光谱仪 AVIRIS、欧洲的机载成像光谱仪 APEX 等。进入 21 世纪以来,在机载仪器成功研制并推广应用的基础上,世界各航天大国纷纷开展高光谱成像技术的空间应用,主要如下 (Pearlman *et al.*, 2000; Hollinger *et al.*, 2006)。

(1) 美国于 2000 年 11 月发射了 EO-1 地球遥感卫星,其搭载的 Hyperion 高光谱成像仪采用了 Offner 凸面光栅分光技术。Hyperion 的刈幅宽度为 7.5 km,空间分辨率为 30 m,光谱范围为 0.4~2.5 μm ,光学口径为 125 mm,谱段数共 220 谱段,光谱分辨率为 10 nm。

(2) 2000 年 7 月 19 日发射的美国强力星傅立叶高光谱成像仪 MightySatII-FTHSI。FTHSI 波段范围为 0.47~1.05 μm ,其地面分辨率为 30 m,视场为 3°,光谱分辨率为 86 cm^{-1} ,共 146 个有用通道。主要目的是利用高光谱对军事目标进行有效的识别探测。

(3) 2001 年 10 月 22 日欧洲发射了紧凑型高分辨率成像光谱仪 (compact high resolution imaging spectrometer, CHRIS)。CHRIS 覆盖 0.45~2.35 μm 的光谱范围,具有 205 个光谱通道数,地面分辨率在 600 km 轨道,高度为 30 m。

(4) 2005 年 8 月 10 日发射了火星侦察者——火星侦察紧凑成像光谱仪 (mars reconnaissance orbiter-compact reconnaissance imaging spectrometer for mars, MRO-CRISM)。CRISM 光谱范围为 0.40~4.05 μm ,具有 558 个光谱通道。

(5) 美国海军拥有海军地球测绘观测卫星——海岸海洋成像光谱仪 (naval earth map observer-coastal ocean imaging spectrometer, NEMO-COIS)。NEMO 上面装载海岸海洋成像光谱仪 (COIS),可提供 210 个光谱通道,覆盖 0.4~2.5 μm 光谱范围的沿海区域的图像,幅宽为 30 km,地面采样间距 (ground sampling distance, GSD) 为 60 m,主要用于海岸带及近海的军事高光谱测绘。

表 1 给出了目前已发射的国外星载高光谱成像仪主要技术性能指标,光谱范围基本分布在 0.4~2.5 μm (除 CRISM 覆盖到了 4.05 μm),空间分辨率为 8~60 m,幅宽为 5~30 km,光谱分辨率为 5~20 nm。

在目前已发射的高光谱载荷的基础上,各国均规划了性能更先进的高光谱传感器。主要如下 (Puschell *et al.*, 1997; Sang *et al.*, 2008)。

(1) 德国 ENMAP (the environmental mapping and analysis program) 计划于 2014 年发射,因技术问题推迟发射。ENMAP 在 420~2450 nm 光谱范围内拥有 210 个光谱通道,空间分辨率为 30 m,幅宽为 30 km。

(2) HypsIRI (hyperspectral infrared imager) 是美国在研的新一代空间高光谱遥感仪器,其高光谱成像仪在 380~2500 nm 范围内具有 10 nm 的光谱分辨率,空间分辨率为 60 m,幅宽指标为 90 km,重访周期为 19 d,预计最早将于 2016 年发射。

(3) 日本在规划的 ALOS-3 卫星中,拟搭载 HISUI 高光谱成像传感器,主要应用于石油、天然气、金属矿的探测。其高光谱成像仪波段范围为 0.4~2.5 μm ,望远镜口径为 300 mm,地面分辨率为 30 m,幅宽为 30 km。

1.2 国内现状

国内高光谱成像技术的研究发展,主要分机载和星载两个方面。机载高光谱成像技术的研究发展

表 1 国外星载高光谱遥感传感器参数
Table 1 Parameters of foreign satellite hyperspectral sensors

仪器指标		HSI	Hyperion	COIS	CHRIS	OrbView-4	CRISM
国家		U.S.A.	U.S.A.	U.S.A.	E.S.A.	U.S.A.	U.S.A.
卫星名		LEWIS	EO-1	NEMO	PROBA-1	Orbview-4	MRO
波段范围(μm)	VNIR	0.40~1.00	0.40~1.00	0.40~1.00	0.40~1.05	0.45~5.00	0.40~1.05
	SWIR	1.00~2.50	0.90~2.50	0.90~2.50			1.05~4.05
光谱通道数(个)	VNIR	128			18 or 62	200	558
	SWIR	256	220	210			
空间分辨率(m)	VNIR	30	30		17 or 34	8 or 20	<50
	SWIR	30	30	30 or 60			
刈副(km)		7.68	7.50	30.00	18.60	5.00	>10
光谱分辨率(nm)	VNIR	5.00~6.00	10.00			11.70	
	SWIR	5.80		10.00	1.25~11.00		<9
扫描方式		推帚式	推帚式	推帚式	推帚式	推帚式	推帚式
分光		grating	grating	grating	棱镜	grating	grating
轨道高度(km)		523.0	705.0	605.5	830.0	470.0	325.0
瞬时视场(mrad)		0.057	0.043	0.050	0.030		
空间维像元		256	250	1 024	744	640	640

基本与国际同步,由上海技术物理研究所研制的模块化航空成像光谱仪(modular airborne imaging spectrometer,MAIS)、实用模块化成像光谱仪(operational modular imaging spectrometer,OMIS)、推扫型高光谱成像仪(pushbroom hyper-spectral imager,PHI)等机载成像光谱仪,性能指标达到了国际先进水平.在国内地质找矿、环境监测、城市规划、土地分类、精细农业遥感、军事目标识别及伪装揭露等方面,我国进行了大量的遥感飞行试验及应用,同时在前苏联、美国、法国、澳大利亚、日本、马来西亚等国均进行了遥感飞行作业,其应用结果充分验证了高光谱成像技术的重要应用价值,在国际上产生了重大的影响,并实现了高光谱成像仪向国外出口(刘银年等,2002).

国内第一个星载光谱成像仪于 2002 年装载于载人航天神舟三号飞船上并发射成功,性能指标与美国发射的中分辨率成像光谱仪 MODIS 相当.之后相继发射了多个星载高光谱成像仪器:2008 年发射的 HJ-1-A 卫星上装载了一台傅立叶干涉高光谱成像仪,谱段范围为 450 nm~1 050 nm,光谱通道数 105 个,光谱分辨率为 2~11 nm,空间分辨率为 100 m,幅宽为 50 km;2011 年发射的“天宫一号”飞船上装载了一台基于棱镜分光的高光谱成像仪,在轨道高度 400 km,空间分辨率为 10~20 m,幅宽为 10 km,光谱覆盖 400~2 500 nm,共 128 个谱段(Tong *et al.*,2014).

高光谱成像仪对目标精细识别的突出作用,已越来越受到重视.国内高分辨率对地观测系统重大

专项把发展高光谱分辨率的遥感仪器作为其中最主要的方向之一.已立项的高分辨率对地观测卫星上,装载了一台宽幅高光谱成像仪,光谱范围为 400~2 500 nm,可见光分辨率为 5 nm,短波红外光谱分辨率为 10 nm,幅宽为 60 km,空间分辨率为 30 m,性能指标处于国际领先水平,目前已进入初样阶段,其中的高光谱成像宽幅宽谱集成、在轨高精度定标、高帧频大规模探测器组件等关键技术已突破,为高轨高光谱成像技术的发展奠定了良好的基础.

2 高光谱成像技术在地学中的应用需求

高光谱成像技术从诞生之初就与地学应用结合在一起,在地学应用中主要有:资源能源勘探、矿物分类、海岸带监测、海洋监测、火山与地震监测等.

(1)在国土资源遥感应用方面,对半覆盖地区、植被覆盖地区的遥感蚀变矿化信息提取以及矿物精细填图工作,需依靠高光谱图像数据.2007 年 5 月,以“遥感找矿面临的新挑战”为主题的第 302 次香山科学会议一致认为高光谱遥感极大地增强了遥感对地观测能力和对地物的鉴别能力,提高了遥感技术的定量化水平,使遥感从对地物的鉴别发展到对地物的直接识别阶段,利用高光谱遥感技术探测矿产是遥感技术应用的主要方向.

(2)海岸带作为海陆相互作用的特殊区域,是连结陆地和海洋人类活动的重要场所.海岸带因其高密度聚集活动,具有复杂性和多变性的特点,同时这

些活动也引发了海岸带生态退化、环境污染、资源枯竭、灾害频发等诸多问题。高光谱遥感具有大面积同步数据获取、实时动态监测的独特优势,已广泛应用于海岸带资源开发、环境监测、保护海洋环境及海上航行等方面,对我国海岸带的环境监测、开发规划及管理具有十分重要的意义。

(3)利用成像光谱技术还可以观测到海洋中的沉积性悬浮物、浮游生物、叶绿素分布等海况。例如,用于估计海洋沉淀物和叶绿素含量,而叶绿素含量的估值可以用于监视海藻的生长和推断水产研究中浮游生物的分布和鱼群位置。对我国而言,随着沿海地区工业化、城市化的发展,海洋环境污染日趋严重。海洋污染给国家造成了巨大的经济损失。以高光谱图像为数据源可对陆源污染、海水养殖、滩涂等海岸带典型要素的光谱特性进行研究,是海洋水色、水温的有效探测工具。

(4)由于一些火山的相继活动,有必要对火山进行实时监测,包括对火山和 SO_2 气体含量的监测。 SO_2 不仅对人类有害,而且可以形成酸雨。对 SO_2 的含量监测可以作为预测火山活动加剧或者减缓的依据。

3 面向地学应用的高光谱传感器指标设计

高光谱传感器的指标体系设计决定了高光谱数据的幅宽、分辨率、重访时间以及信噪比,为更好的满足我国地质找矿、海洋监测、火山与地震监测的高光谱遥感需求,需要对传感器的指标体系进行优化设计。高光谱遥感的成像幅宽决定了单次扫描获取图像的区域大小;空间分辨率则反映了获取目标的精细程度;光谱分辨率反映了获取目标光谱的精细程度;信噪比决定了高光谱图像数据的质量;定标精度则是高光谱数据定量化应用的保证。

根据高光谱传感器的成像原理,笔者分析了空间分辨率、光谱分辨率和信噪比 3 个性能指标之间存在的相互影响的机制,建立光谱分辨率、空间分辨率与信噪比之间的约束关系。用于地学观测的高光谱探测手段可按高空间分辨和大幅宽两种模式发展。

3.1 高分辨率高光谱传感器指标体系设计

根据上述地学应用的需求,遥感高光谱载荷具有可见光及短波红外反射通道,同时具备热红外发射通道,通过反演发射率与波长的关系,可增加遥感矿物识别的种类,提高识别的定量化程度及可靠性。

可见近红外(VNIR)波段范围覆盖 400~1 000 nm,光谱分辨率为 5~10 nm,可获取地物精细的反射光谱信息。短波红外波段覆盖 1 000~2 500 nm,光谱分辨率为 10~20 nm;热红外覆盖 8 000~12 500 nm,光谱分辨率为 40~160 nm。

高空间分辨率高光谱观测卫星,其单幅图像幅宽 20 km×40 km,空间分辨率可见光和短波红外分别为 2.5 m 和 5.0 m,热红外波段为 10 m,可满足地学精细化应用的空间分辨率需求。同时为了满足地学应用光谱反演的精度,要求可见短波红外信噪比大于 150,辐射定标精度优于 5%,光谱定标精度为 0.5 nm。热红外探测灵敏度优于 0.2 K@300 K,辐射定标精度为 0.5 K,光谱定标精度为 8.0 nm。

通过上述分析,提出面向地学应用的高分辨率高光谱成像仪的技术指标体系(见表 2)。

3.2 宽幅高光谱传感器指标体系设计

在资源能源勘探、海洋水体植被监测等应用上,要求高光谱传感器具有较大的幅宽,以获取单幅较大区域的图像,同时缩短重放时间,以进行多次观测,因此人们面向地学应用提出了宽幅高光谱观测卫星。

目前国际上规划的高光谱成像仪最大为 90 km,根据遥感找矿的需求,宽幅高光谱传感器的幅宽指标定为单幅图像幅宽为 120 km×120 km。该

表 2 高分辨率高光谱遥感传感器指标体系

Table 2 Parameters of high resolution hyper-spectral sensor

项目	VNIR	SWIR	LWIR
光谱范围(μm)	0.4~1.0	1.0~2.5	8.0~12.5
光谱分辨率(nm)	5~10	10~20	40~160
每景图像幅宽(km)	30×30	30×30	30×30
空间分辨率(m)	5	5	20
信噪比	≥ 200	≥ 150	$\text{NE}\Delta\text{T}: 0.2\text{K}@300\text{K}$
辐射定标精度	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	0.5K
光谱定标精度(nm)	0.5	1	8.0

表 3 宽幅高光谱传感器指标体系

Table 3 Parameters of wide swath hyper-spectral sensor

项目	VNIR	SWIR	LWIR
光谱范围(μm)	0.4~1.0	1.0~2.5	8.0~12.5
光谱分辨率(nm)	5~10	10~20	40~160
每景图像幅宽(km)	120×120	120×120	120×120
空间分辨率(m)	30	30	60
信噪比	≥ 250	≥ 200	NE Δ T : 0.2K@300K
辐射定标精度	$\leq 5\%$	$\leq 5\%$	0.5K
光谱定标精度(nm)	0.5	1	8.0

幅宽可大大提高遥感找矿的效率.在大幅宽下,空间分辨率可见短波红外为 30 m,热红外为 60 m.同时要求可见光信噪比大于 250,短波红外波段信噪比大于 200,图像质量进一步提高.利用宽幅高光谱数据与高分辨率高光谱数据,可同时满足大范围调查以及重点区域详查的地学应用需求(表 3).

4 面向地学应用的高光谱成像技术发展方向

高光谱遥感技术将在地学应用中发挥越来越重要的作用.针对地学的应用需求,高光谱遥感技术的发展方向有以下 4 个方面.

(1)宽幅高光谱成像技术.高光谱载荷一般幅宽较小,因此重放时间长,探测效能较低,因此研制更大幅宽的高光谱遥感载荷是未来的发展方向之一.目前上海技术物理研究所研制了 60 km 幅宽的高光谱载荷,下一代高光谱遥感载荷拟发展 120 km 幅宽.

(2)低轨高空间分辨率高光谱遥感载荷.进一步提高高光谱遥感载荷的空间分辨率,实现米级分辨率,对矿区的边缘判断更加有效.

(3)高轨高光谱遥感载荷.在静止轨道,长时间对地面同一区域进行观测,更有利于地学的科学研究.

(4)热红外高光谱遥感载荷.通过长波的高光谱数据,对矿物进行进一步精确的分类.长波红外光谱数据代表了物体自身的辐射,可反演出地物的温度与发射率信息,可用于物质成分的特征分析.因此,长波红外高光谱数据在地质应用中,在岩石分类和矿物识别领域具有很大的优势.将在寻找地热资源热源散出型矿产(如铀矿)中发挥更大的作用,其还可应用于热岛效应监测、火灾与火山监测等领域.

References

- Hollinger, A., Bergeron, M., Maskiewicz, M., et al., 2006. Recent Developments in the Hyperspectral Environment and Resource Observer (HERO) Mission. *IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, (42): 1620–1623. doi:10.1109/igarss.2006.418
- Huang, X. H., 1999. Evaluation of Effectiveness of Thermal Infrared Remote Sensing Applied in Oil Gas Exploration. IRSA. Collections on Knowledge Innovation in Remote Sensing. China Science and Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, Y. N., Xue, Y. Q., Wang, J. Y., et al., 2002. Operational Modular Imaging Spectrometer. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 10(1): 9–14 (in Chinese with English abstract).
- Pearlman, J., Segal, C., Liao, L., et al., 2000. Development and Operations of the EO-1 Hyperion Imaging Spectrometer. *Proceedings of SPIE*, 4135: 243–253. doi: 10.1117/12.494251
- Puschell, J. J., Tompkins, P. A., 1997. Imaging Spectrometers for Future Earth Observing Systems. *Proceedings of SPIE*, (3117): 36–48. doi: 10.1117/12.283819
- Sang, B., Schubert, J., Kaiser, S., et al., 2008. The EnMAP Hyperspectral Imaging Spectrometer: Instrument Concept, Calibration, and Technologies. *Imaging Spectrometry XIII*, 708605. doi:10.1117/12.794870
- Tong, Q. X., Xue, Y. Q., Zhang, L. F., 2014. Progress in Hyperspectral Remote Sensing Science and Technology in China over the Past Three Decades. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(1): 2200–2215. doi: 10.1080/01431161.2012.742216
- Wang, J. H., Zhang, J. L., Liu, D. C., 2011. Discussion on the Application Potential of Thermal Infrared Remote Sensing Technology in Uranium Deposits Exploration. *World Nuclear Geoscience*, 28(1): 32–41 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. X., Wang, H., Gao, J., 2000. Analysis Application of

Space-Borne Hyperspectral Imaging Technology. *Space Craft Recovery & Remote Sensing*, 21(1): 40–42 (in Chinese with English abstract).

Yan, B. K., Wang, R. S., 2005. Progress in Minerals Information Exploration Using Thermal Remote Sensing. *Advances in Earth Science*, 20(10): 1116–1125 (in Chinese with English abstract).

Yoshiki, N., 2003. Rock Type Mapping with Indices Defined for Multispectral Thermal Infrared ASTER Data: Case Studies. *Proceedings of SPIE*, (4886): 123–132. doi: 10.1117/12.462358

Zheng, Y. Q., Yu, B. X., 2002. Overview of Spectrum Dividing Technology in Imaging Spectrometers. *Journal of Remote Sensing*, 6(1): 75–80 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

黄秀华, 1999. 热红外遥感找油应用效果评价. 中国科学院遥感应用研究所, 遥感知识创新文集. 北京: 中国科学技术出版社.

刘银年, 薛永祺, 王建宇, 等, 2002. 实用型模块化成像光谱仪. 红外与毫米波学报, 10(1): 9–14.

王俊虎, 张杰林, 刘德长, 2011. 热红外遥感技术在铀矿勘查中的应用潜力探讨. 世界核地质科学, 28(1): 32–41.

王军霞, 王慧, 高军, 2000. 星载超光谱成像技术应用及现状分析. 航天返回与遥感, 21(1): 40–42.

闫柏琨, 王润生, 2005. 热红外遥感岩矿信息提取研究进展. 地球科学进展, 20(10): 1116–1125.

郑玉权, 禹秉熙, 2002. 成像光谱仪分光技术概览. 遥感学报, 6(1): 75–80.