0254-6124/2021/41(1)-022–12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Jianyu, LI Chunlai. Development and prospect of hyperspectral imager and its application (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2021, **41**(1): 22-33. DOI:10.11728/cjss2021.01.022

高光谱遥感成像技术的发展与展望

王建宇　李春来

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室　上海 200083)

(中国科学院大学杭州高等研究院　杭州 310024)

摘　要　地表形态和目标特性是空间对地遥感的两个重要问题. 经过近 40 年的发展, 高光谱遥感技术已取得了巨大的进展, 从数据获取、处理到应用都积累了大量成果. 作为涉及多学科交叉的年轻学科, 高光谱遥感技术的发展经历了一个以需求为导向, 在发展中又不断探索完善需求的历程. 高光谱成像仪作为获取目标图谱数据的重要仪器, 其发展对于整个高光谱遥感的发展至关重要. 本文分析了国内外不同类型高光谱成像仪的成像体制及应用案例, 得出了近 40 年来高光谱成像仪发展历程所展现出的技术特点, 结合当前发展现状, 对未来高光谱成像仪的发展趋势, 尤其是核心指标的提升和技术体制拓展进行了综合展望, 以期为该领域的后续研究提供一些思路, 同时为相关领域的科技规划提供参考.

关键词　目标特性, 高光谱成像, 精细分光, 热红外

中图分类号　V 443

Development and Prospect of Hyperspectral Imager and Its Application

WANG Jianyu　LI Chunlai

(*Key Laboratory of Space Active Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 200083)

(*Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou* 310024)

Abstract　Surface morphology and target characteristics are two important problems in remote sensing. Surface morphology is a geometric problem and the aim of photogrammetry. Target characteristics are not only a physical and chemical problem, but also an important problem to be solved in the development of hyperspectral remote sensing. After decades of development, hyperspectral remote sensing technology has made great progress, from data acquisition, processing to application. As a new and young technology involving multiple disciplines, hyperspectral remote sensing development is a demand-oriented process in which the demand is constantly explored. Especially, the hyperspectral imager is the only tool to obtain hyperspectral data, and its development is very important for the development of hyperspectral remote sensing. In the paper, the feature and application of different types of hyperspectral imagers are analyzed, and some conclusions of hyperspectral

2021-01-03 收到原稿

E-mail: jywang@mail.sitp.ac.cn

imagers in recent 40 years are obtained. Combined with the current development status of hyperspectral imager, the future development trend of hyperspectral imager, especially the development of key indices and technology, is prospected to provide some ideas for the follow-up research in this field, and also to provide a reference for the related remote sensing satellite missions.

Key words Target characteristics, Hyperspectral imager, Fine spectroscopy, Thermal infrared

0 引言

高光谱遥感技术是光学遥感的重要分支, 可以同时获取观测目标的图像和连续光谱, 也可实现目标空间特征与光谱特征的同步探测, 即通常所说的图谱合一. 高光谱遥感技术不仅可以更准确地分类识别地物, 同时也大大推进了遥感从定性向定量化发展的速度. 在地表参数反演过程中, 高光谱遥感技术可以使模型更具鲁棒性, 很多多光谱遥感数据无法反演的参数, 在高光谱遥感中可以获得. 高光谱数据获取是高光谱遥感从理论到应用的关键, 有效的数据获取手段是高光谱遥感技术的基础. 因此, 高光谱遥感数据的获取工具, 即高光谱成像仪技术的发展一直广受关注. 近 40 年来, 随着探测器工艺、电子科学技术、光学技术及遥感科学的发展, 高光谱成像技术得到了快速发展. 进入 21 世纪, 在工作平台方面, 除了传统的机载、星载平台外, 还出现了适用于地基近景、低空轻小型无人机、微纳卫星及 GEO 轨道等多种遥感平台. 在谱段覆盖方面, 从传统的可见近红外谱段拓展到短波红外、中波红外、热红外以及紫外的全谱段高光谱遥感技术. 在技术体制方面, 从传统的色散型分光和傅里叶分光, 逐步发展了凝视型声光可调谐滤光片 AOTF 分光、基于孔径编码的计算光谱分光以及基于集成滤光片的快照式视频分光等新型技术体制. 高光谱成像技术被广泛应用于农业监测、林业监测、矿产资源勘察、数字城市、海洋监测、生态环境监测、防灾减灾、军事侦察、深空探测等领域. 作为一种新技术, 高光谱成像技术在国民经济发展中显现出日益重要的作用.

1 国内外高光谱成像仪现状

高光谱成像与激光雷达、合成孔径雷达技术被并列为三大对地观测信息获取的核心技术. 高光谱成像起步研究产生于 20 世纪 80 年代美国加州理工学院喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL)[1]. 1983 年在美国国家航空航天局 (NASA) 的支持下, JPL 研制出国际上第一台机载航空成像光谱仪 (Airborne Imaging Spectrometer, AIS), 称为 AIS-1 号 [2]. 随着光学、计算机和焦平面探测器等基础科学的不断发展, 成像光谱技术的研究取得巨大进步, 各国均加大了对高光谱成像光谱仪研究的资金投入, 目前国内外比较有代表性的高光谱成像仪基本信息列于表 1.

1.1 国外高光谱成像仪现状

目前, 高光谱成像技术已经逐步商业化, 生产高光谱成像仪的厂家很多, 特别是机载成像光谱仪已到了商业运营阶段. 典型产品包括美国 JPL 实验室的全称机载可见近红外成像光谱仪 (Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer, AVIRIS)[3], 美国 HeadWall 公司 G 系列成像光谱仪 [4], 芬兰 Specim 公司的 AISA Eagle[5] 以及加拿大 Itres 公司的 CASI/SASI/MASI/TASI[6,7]. AVIRIS 采用摇扫成像方式, 光谱采样间隔约 9.6 nm, 可在 0.4~2.45 μm 的波长范围内获取 224 个连续的光谱波段数据, 采用制冷型 32 元线列硅光电二极管和 64 元线列锑化铟探测器. AVIRIS 于 1987 年安装在 NASA ER-2 飞行平台上, 飞行高度 20 km, 垂直航迹扫描仪的刈副约为 10 km, 地面分辨率为 20 m, 首次飞行获得了巨大成功, 后续 NASA 发展了其升级版本 AVIRIS-NG[8], 光谱采样间隔为 5 nm. 美国 HeadWall 公司在军民两用机载成像光谱仪, 特别是无人机机载成像光谱仪研发和市场推广方面取得了成功, 其机载成像光谱设备已形成系列, HeadWall 公司高光谱成像仪的技术特点是凸面光栅分光, 其中 G 系列的可见光波段成像光谱仪的光谱波段数达到 325. 芬兰 Specim 公司高光谱成像的技术特点是采用透射式光栅分光, 利用棱镜进行光谱弯曲矫正, 并研制了多款各具特色的成像光谱仪. Aisa Egle 仪器的波段范围 0.4~0.97 μm, 光谱分辨率为 3.3 nm.

表 1 国内外典型的高光谱成像仪载荷

Table 1 Features of typical hyperspectral imagers

领域	名称	国家/地区	年份	光谱范围	波段数	分光方式
航空	AVIRIS	美国	1987	0.4~2.45 μm	224	平面光栅
	HYMAP	澳大利亚	1997	0.45~2.48 μm	128	平面光栅
	AHI[14]	美国	1998	7.5~12.5 μm	32, 128	平面光栅
	OMIS[15]	中国	2000	0.4~12.5 μm	128	平面光栅
	PHI[16]	中国	2001	0.4~2.5 μm	256	平面光栅
	CASI	加拿大	2007	380~1050 nm	288	棱镜–光栅–棱镜
	SASI			950~2450 nm	100	
	MASI			3000~5000 nm	64	
	TASI			8000~11500 nm	64	
	Hyper-Cam[17]	加拿大	2009	热红外	256	干涉型
	MAKO[18]	美国	2010	热红外	256	凹面光栅
	MAGI[19]	美国	2011	7.1~12.7 μm	32	凹面光栅
	SIELETERS[20]	法国	2013	8~11.5 μm	38	干涉型
	HyTES	美国	2016	7.5~12.0 μm	256	凹面光栅
	AISA-OWL	芬兰	2014	7.7~12.3 μm	96	干涉型
	ATHIS[21]	中国	2016	0.2~0.5 μm	512	凹面光栅
				0.4~0.95 μm	256	平面光栅
				0.95~2.5 μm	512	
				8~12.5 μm	140	
航天	Hyperion	美国	2001	0.4~2.5 mm	220	光栅分光
	CHRIS[22]	欧洲	2001	0.41~1.05 mm	18/63	干涉型
	MERIS[23]	欧洲	2002	0.39~1.04 μm	576	棱镜–光栅–棱镜
	CRISM[24]	美国	2005	383~3960 nm	544	平面光栅
	HJ-1A[25]	中国	2008	450~950 nm	115	干涉型
	Tacsat-3[26]	美国	2009	400~2500 nm	>400	光栅分光
	天宫一号	中国	2011	400~2500 nm	130	棱镜
	天宫二号	中国	2016	可见–热红外	19	棱镜–光栅–棱镜
	珠海一号 OHS	中国	2017	400~1000 nm	256	光栅分光
	GF-5[27]	中国	2018	0.4~2.5 μm	330	凸面光栅
	PRISMA[28]	意大利	2019	400~2500 nm	250	光栅分光
	吉林一号光谱星	中国	2019	400~900 nm	26	平面光栅
	TW-1[29]	中国	2020	450~3400 nm	378	平面光栅
	HyspIRI	美国	研制中	380~2500 nm	220	平面光栅
	ENMAP[30]	德国	研制中	420~2450 nm	244	平面光栅

加拿大 Itres 公司的成像光谱仪设备包括可见近红外 (CASI)、短波 (SASI)、中波 (MASI)、热红外 (TASI) 等型号, 覆盖各个谱段, 其中 CASI 是第一台商业使用的机载高光谱扫描仪, 该系统空间采样间隔为 1.8 km, 波段范围 0.4~0.9 μm, 波段数为 288, 瞬时视场达到 1.2 mrad, 使用 512×288 元的面阵 CCD 探测器, 该仪器的光谱波段数、位置和宽度在飞行中均可编程, 还可以结合陀螺仪和 GPS 对图像数据进行几何校正, 在商业上取得了较大成功.

在航空航天领域, 自 20 世纪 90 年代开始, 国际上已广泛开展了星载成像光谱仪研究. 第一颗载有高光谱成像仪的卫星是 NASA 的 Lewis, 该卫星于 1997 年发射, 装有两台高光谱成像仪 HIS[9] 和 LEISA[10], 分别采用光栅和楔形滤光片分光技术. HIS 由美国 TRW 公司研制, 光谱范围为 0.4~2.5 μm, 包含 384 个通道. 在航天高光谱成像仪发展过程中, 最为成功的是搭载于地球观测 1 号 (EO-1) 上的 Hyperion 可见短波推扫高光谱成像仪, 该仪器光谱范围为 0.4~1.0 μm 和 0.9~2.5 μm, 是一个典型的色散型高光谱仪, 采用光栅分光, 设计刈幅为 7.5 km, 空间分辨率达到 20 m, 包括 220 个成像波段, 光谱分辨率达到 10 nm. Hyperion 能够提供经过定标的高质量对地观测高光谱数据立方体, 利用这些数据可进行高光谱对地观测技术的应用效果评估, 该项目为发展空间高光谱成像技术打下了坚实基础.

美国军方在 NEMO 卫星上搭载了一台高性能的高光谱成像仪 COIS 进行环境监测, 重点包括海岸带海水监测、农业遥感、资源调查和灾害评估等. 为实现较高的空间分辨率, COIS 采用了像移补偿技术, 刈幅设计为 30 km, 光谱范围为 0.4~2.5 μm, 具有 210 个通道, 光谱分辨率为 10 nm. 美国空军研究实验室 (AFRL) 的 MightySatII.1 卫星上搭载的 FTHSI 是国际上第一台基于傅里叶干涉分光的高光谱成像仪 [11], 轨道高度为 547 km, 每次成像可以获取地面 15 km×20 km 范围的高光谱图像, 在 0.45~1.05 μm 的光谱范围内提供 150 个光谱通道, 光谱分辨率约为 4 nm.

欧空局 (ESA) 研制的中分辨率成像光谱仪 MERIS 的光谱范围为 0.39~1.04 μm, 光谱位置和分辨率在轨可编程, 最高可达 576 个光谱通道, 光谱分辨率最高达 1.8 nm, 信噪比高达 1500. ESA 资助的高分辨率成像光谱仪 (CHRIS) 是为 Envisat 卫星设计的, 由德国负责研制, 主要目的是配合全球观测系统中的 MERIS 和 MODIS 等中等分辨率仪器, 以高地面分辨率精细采样, 重点研究对全球具有重要影响的地表过程、能量和水流通量、碳循环、气流对流踪迹、植被覆盖、土地利用、岩矿分布等. CHRIS 覆盖 0.45~2.35 μm 光谱范围, 具有 205 个光谱通道数, 轨道高度为 600 km, 空间分辨率为 30 m.

NASA 下一代陆地观测高光谱卫星 (尚在研制进行中) 设计有一台包含中长波红外的光谱成像仪 HyspIRI[12], 该仪器在可见短波区设置为高光谱相机模式, 中长波红外区设置为多光谱观测模式, 空间分辨率为 60 m, 刈幅宽度达到 150 km. 由于在中长波红外区的高光谱成像应用效果尚未明确, 目前 NASA 正利用其研制的机载热红外高光谱成像仪 HyTES[13] 开展飞行, 验证热红外光谱成像的应用前景, 为未来的空间任务波段选择奠定基础. 总体而言, 近年来国外新发射的高光谱卫星不多, 但是在航空领域, 特别是无人机领域, 高光谱成像技术发展迅速, 以 AISA 和 HeadWall 为代表的一大批无人机高光谱成像仪商用设备相继推出, 其中 HeadWall 覆盖可见–短波红外谱段的无人机高光谱成像仪质量仅为 10 kg. 在深空探测领域, 高光谱成像技术也发展较快, 几乎每个深空探测任务均会装载高光谱成像仪, 主要用于天地表面的物质成分探测, 其中最为著名的是美国为火星探测而研发的小型侦察影像频谱仪 (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars, CRISM).

1.2 中国高光谱成像仪现状

中国的高光谱成像技术发展起步于 20 世纪 90 年代初, 研制单位主要包括中国科学院和航天科技集团的相关研究所. 中国科学院上海技术物理研究所是国内最早开展高光谱成像仪研究的单位, 其技术方向主要为基于光栅分光的色散体制, 特点体现为仪器谱段全 (可见–热红外全覆盖), 成像方式广泛 (包括光机扫描、推帚、面阵凝视等); 中国科学院西安光学精密机械研究所主要集中于干涉式成像光谱仪研究, 发展了系列化的机载、星载干涉型高光谱成像仪. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所以棱镜分光技术为代表, 近年也开始研究光栅分光成像光谱仪, 中国科学院安徽光学精密机械研究所主要研究覆盖紫外谱段的大气探测成像光谱和空间外差干涉成像光谱仪.

上海技术物理研究所最先研制成功机载成像光谱仪 OMIS[14] 和宽视场推帚式高光谱成像仪 PHI[15]. 其中, 实用性模块化成像光谱仪 OMIS-I 使用平面光栅分光, 结合线列探测器通过光机扫描实现了光谱范围覆盖 0.4~12.5 μm, 获得可见近红外到长波红外波段共 128 个通道的光谱图像数据, 成为中国高光谱成像技术发展的代表性仪器, 被写入多本教科书. PHI 则采用了推帚成像方式, 谱段覆盖 0.4~0.85 μm, 光谱分辨率优于 5 nm. 在星载仪器方面, 上海技术物理研究所于 2002 年成功研制中分辨率成像光谱仪并搭载在神舟三号飞船上, 实现了中国高光谱成像的首次空间应用. 2018 年发射的高分五号卫星搭载了该单位研制的可见短波高光谱相机 [26], 谱段覆盖波长 0.4~2.5 μm, 空间分辨率为 30 m, 刈幅宽度达到 60 km, 波段数达到 330 个, 具有极高的探测灵敏度, 该仪器是目前国际上综合水平最高的在轨运行的空间高光谱成像仪.

长春光学精密机械与物理研究所先后承担多项高光谱成像光谱仪的研发工作, 包括了以棱镜分光技术为基础的海洋水色 CCD 相机机载原型样机, 在 0.43~1.0 μm 的谱段内实现光谱分辨率 10 nm 的 64 个光谱通道图像获取, 在 1.0~2.4 μm 的短波红外谱段内实现了光谱分辨率 20 nm 的 64 个光谱通道图像获取. 值得一提的是, 由长春光学精密机械与物理研究所牵头研制的天宫一号飞行器高光谱成像仪于 2009 年成功发射, 这是中国空间高光谱发展的标志性产品.

西安光学精密机械研究所主要研究傅里叶变换型高光谱成像仪, 其典型研究成果包括基于 Sagnac 干涉仪基本结构的空间调制型超光谱成像仪, 能够实现优于 5 nm 的光谱分辨率. 2008 年发射的嫦娥一号和环境一号卫星中均搭载有该单位研制的干涉型成像光谱仪. 目前环境二号高光谱成像仪载荷也采用了该技术路线.

近年来, 国内的高光谱成像仪研究不断向中长波红外谱段拓展. 例如首台机载热红外高光谱成像仪 ATHIS 和全谱段多模态成像光谱仪均可实现热红外谱段的高光谱成像观测. 同时, 商业化运营的高光谱微小卫星星座组网也在全面开展, 例如 Spark、珠海一号 OHS、吉林一号光谱 01/02 星等. 以小卫星星座组网的形式可以克服高光谱卫星幅宽小、重放周期长的缺点, 而又可实现较低成本商业运营. 除此之外, 向以行星和月球探测为主的深空探测领域拓展也是中国高光谱遥感技术发展的又一大亮点, 在已经发射的天问一号火星探测器和未来的小行星探测任务中都将搭载高光谱成像仪载荷.

2 高光谱成像仪的关键技术

高光谱成像仪是涵盖光、机、电、半导体器件等多专业方向的系统技术, 不同应用领域对空间分辨率、光谱分辨率、灵敏度有不同的要求, 涉及的关键技术也各有侧重. 高光谱成像技术如果要获得显著提升, 实现更高光谱分辨率、空间分辨率、大观测幅宽、波段拓展 (中长波) 和星上实时处理, 必须在诸如精细分光、高帧频探测器、运动补偿、宽幅大视场和低温光学等关键技术上有所突破.

2.1 精细分光技术

精细分光技术是高光谱成像的关键, 也是区别于单波段、多光谱成像遥感的核心. 经过多年的发展, 高光谱成像的分光技术已从 nm 级逐步向亚 nm 级发展, 常规的分光方式包括色散型分光 (光栅、棱镜) 和干涉型 (傅里叶变换) 分光两种, 目前国际上在轨运行的空间高光谱成像仪基本以这两种分光方式为主. 不同的分光技术具有不同的特点, 其应用场景也各不相同. 其中, 最常用的分光方式主要有棱-栅精细分光、基于声光调制滤波器面阵凝视分光、平面/球面棱镜分光、自准直三反分光、集成滤光片分光术以及傅里叶分光等. 除以上分光技术外, 一些新兴的分光技术不断出现, 例如微型集成渐变滤光片、薄膜光学、二元光学、MEMS 技术等. 针对无人机载平台或深空探测平台对于轻量化指标的追求, 很多仪器部件在研制时进行了质量、体积的缩减, 尤其是作为主体的分光部件, 这进而催生了光谱分光方式的变革. 随着微机械和微电子的发展, 未来高光谱成像仪的分光部件将不断朝向微型化和集成化方向发展.

2.2 高帧频探测器技术

高帧频面阵探测器是高光谱相机的核心器件, 直接约束了系统的空间分辨率和灵敏度指标, 特别是红外探测器, 欧美国家曾对中国实施严格禁运. 中国早期的空间高光谱相机 (环境一号、天宫一号等) 探测器主要依靠引进, 例如天宫一号高光谱成像仪上使用了法国 Sofradir 公司的 500×256 规模的宇航级短波红外焦平面组件, 近期发射的高光谱相机 (高分五

号、火星探测器) 在关键器件上已逐渐自主可控, 其中高分五号可见短波高光谱相机使用了中国自主研制的 2000×512 规模的超大短波红外焦平面组件, 如图 1 所示, 该组件最高运行帧频超过 250 Hz, 组件的成功在轨运行显示出中国在基础元部件领域的国产化能力得到跨越式提升, 天宫二号多角度宽波段高光谱成像仪也使用了自行研制的短波红外 InGaAs 面阵组件. 在可见光波段, 近年来高帧频 CMOS 探测器的工艺越来越成熟, 其中由长光辰芯光电技术有限公司研制的系列化产品已逐步应用于部分空间载荷, 未来将应用到更多空间高光谱成像载荷中.

2.3 运动补偿技术

运动补偿技术是实现高分辨率空间高光谱应用的核心关键技术之一, 其主要目的是降低高分辨率对应的成像高帧频速率对面阵探测器的要求, 同时增加曝光时间, 提高探测灵敏度. 运动补偿的实现方式包括指向镜补偿和整星补偿, 目前最为常用的是指向镜补偿, 图 2 为指向镜运动补偿示意. 运动补偿技术最早用于美国 NEMO 卫星上的高光谱载荷, 后来在天宫一号高光谱成像仪和高分五号可见短波高光谱相机上均得到使用, 并取得了较好效果. 随着未来空间高光谱成像仪的空间分辨率进一步向米级发展, 运动补偿技术的精度指标需求将进一步提升.

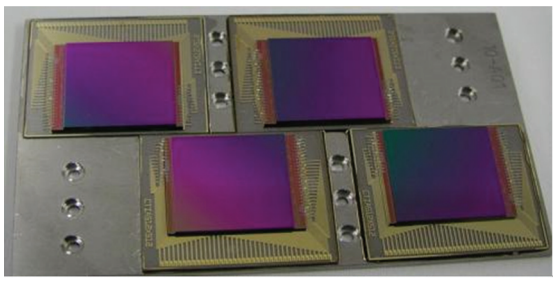

图 1 2000×512 规模短波红外组件芯片

Fig. 1 Shortwave infrared module chip of 2000×512

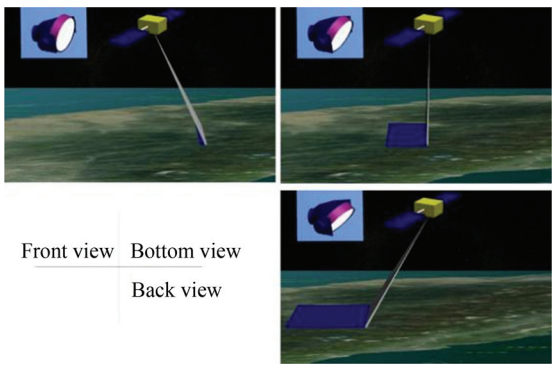

图 2 指向镜运动补偿

Fig. 2 Motion compensation of pointing mirror

2.4 宽幅/大视场技术

宽幅与大视场技术相辅相成, 可提升仪器的观测效能, 提高作业效率. 机载全谱段多模态成像光谱仪设计观测视场达到 40°, 在星载应用方面, 高分五号可见短波高光谱相机设计幅宽达到 60 km, 规划中的空间高光谱载荷 HyspIRI 更是设计为 150 km 幅宽. 一般而言, 可采用外视场或内视场拼接技术实现宽幅覆盖. 外视场拼接是多台仪器并排放置拓展观测视场, 原理较为简单, 但是涉及的谱段间拼接、像元级配准等关键技术仍在研究中. 全谱段多模态成像光谱仪即通过三台 14° 视场的仪器外视场拼接实现了 40° 的观测视场. 德国的 EnMap 高光谱成像仪则设计为经典的内视场拼接, 技术上共用大望远镜, 在一次焦面处的狭缝分视场, 用两台各自覆盖 15 km 幅宽的光谱仪拼接实现 30 km 幅宽, 这种设计在星载高分辨率系统中尤为重要, 因为望远镜口径较大, 外视场拼接所附带的多台望远镜会使得卫星资源无法承受.

2.5 低温光学系统技术

低温光学技术是随着高光谱成像波段向中长波红外拓展而引入的, 其核心是通过低温制冷压制光谱仪自身的热辐射背景. 特别是在热红外谱段, 仪器自身的热辐射峰值波长与探测目标波长重合, 目标的窄光谱信号与光谱仪自身背景宽光谱信号导致目标信号难以探测, 必须将光谱仪制冷到一定程度. 机载热红外高光谱成像仪 HyTES 甚至将光谱仪制冷到 40 K 温度 [13]; 在空间应用方面, 美国 1983 年发射的红外天文卫星成功将口径约 600 m 的红外相机冷却到 4 K 左右. 中国 “十二五” 期间研制的热红外高光谱成像仪将光谱仪制冷到 100 K, 全谱段多模态成像光谱仪的热红外通道将这种 100 K 量级的低温制冷技术逐步工程化; 在空间应用方面, 2009 年发射的实践九号 B 星中红外相机被制冷到 −30°C 左右. 在该领域中国与欧美等国显然仍存在较大差距, 主要体现在基础材料和核心组部件方面, 这也是中国未来发展空间高光谱成像需要突破的关键技术.

3 典型高光谱成像仪及其应用

截至目前, 国际上先后研制了 100 多台不同平

台和用途 (科研、军用和商用) 的高光谱成像仪. 这些高光谱成像仪获得了广泛应用, 也取得令人瞩目的成果. 这里选择国内一些典型的应用进行介绍, 涵盖了航空、卫星及深空探测平台.

3.1 天宫二号多角度宽波段高光谱成像仪

天宫二号飞行器于 2016 年 9 月 15 日成功发射, 搭载一台多角度宽波段成像仪, 其具有多波段、宽覆盖、高辐射灵敏度等特点, 这是国内首次在单台仪器上实现可见近红外、短波红外及热红外多谱段同时推扫方式成像的光学遥感器. 图 3 所示为该仪器的结构, 包括 15 个可编程的可见近红外通道、2 个短波红外通道和 2 个热红外通道, 对应的地面分辨率分别为 100, 200 和 400 m. 由于仪器设计的空间分辨率不高, 望远镜口径不大, 仪器采用视场外多模块拼接实现了 42° 的总观测视场, 达到 300 km 的刈幅宽度. 目前该仪器已按预期获取大量对地观测影像数据, 在国土资源、海洋、湖泊、生态环境、农业、林业等多个领域进行了数据应用. 图 4 为利用该仪器数据分析得到的雄安新区典型土地分类.

3.2 碳卫星 TanSat

TanSat [31] 是中国首颗碳卫星的英文简称, 由“十二五”期间科技部重大项目“全球二氧化碳监测科学实验卫星与应用示范”项目支持研究. TanSat 卫星于 2016 年 12 月 22 日发射入轨, 主要开展星载高光谱分辨率 CO_2 探测仪、云与气溶胶成像仪、全球 CO_2 浓度监测、CO_2 反演与验证系统四方面技术研究. 表 2 和图 5 分别给出了 TanSat 的主要技术指标和结构. 2017 年 1 月 13 日 TanSat 首次发布了完整的三谱段大气 O_2 和 CO_2 精细吸收光谱数据, 获得超高光谱分辨率太阳光谱, 测定了太阳夫琅和费线 (与理论值偏差小于 0.002 nm), 表明碳卫星 TanSat 取得圆满成功.

3.3 高分五号可见短波高光谱相机

高分五号卫星是中国高分辨率对地观测天基系统的组成部分, 于 2018 年 5 月发射, 搭载了 1 台可见短波红外高光谱相机, 这是典型的对地观测高光谱成像载荷, 表 3 列出了该载荷的主要技术指标. 可见短波红外高光谱相机基于的是凸面光栅分光技术, 具有幅宽大 (60 km)、波段多 (约 330 个)、灵敏度高的特点. 通过采用 2 个超大面阵焦平面视场内拼接实现宽幅探测, 仪器具备运动凝视补偿能力. 针对大幅宽技术特点, 仪器在传统的凸面光栅光谱仪结构基础上增加校正透镜, 进一步改善了像质, 通过特定的焦平面设计使得系统在灵敏度方面具有突出优势. 仪器

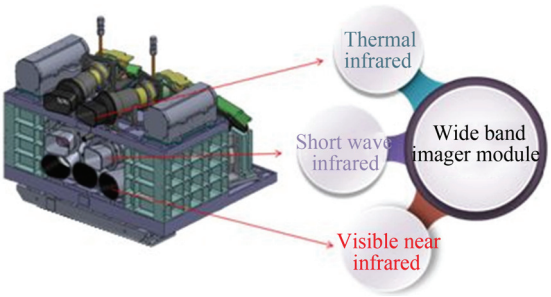

图 3 多角度宽波段高光谱成像仪结构

Fig. 3 Structure of multi-angle wide band hyperspectral imager

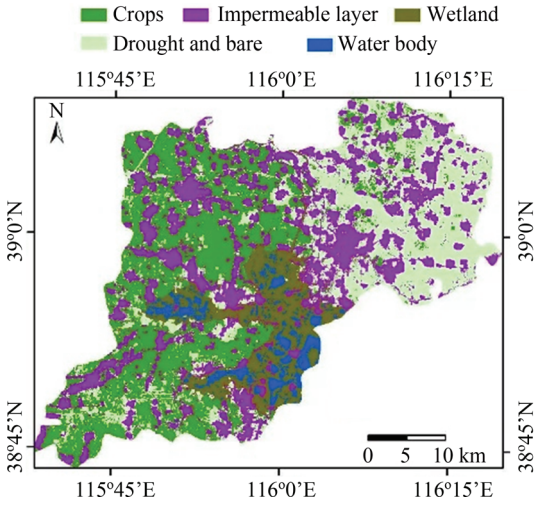

图 4 雄安新区典型土地分类应用

Fig. 4 Application of typical land classification in Xiong'an New District

表 2 碳卫星 TanSat 的主要技术指标

Table 2 Technical specifications of carbon satellite TanSat

名称	参数
波段/μm	2.06, 1.6, 0.76
光谱分辨率/nm	0.16, 0.12, 0.04
空间分辨率/km	2×2
信噪比 (平均)	445, 267, 185
定标精度	优于 5% (绝对), 3% (相对)
定标模式	星上太阳、定标灯定标
观测模式	天底、耀斑、目标和掩星等

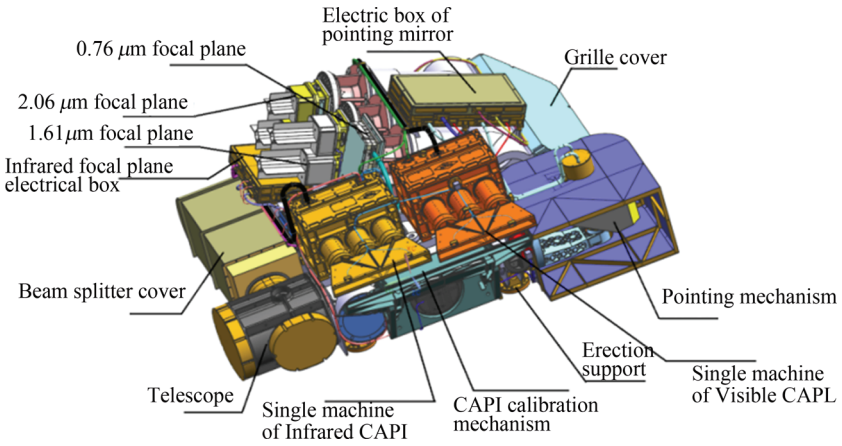

图 5 碳卫星 TanSat 结构

Fig. 5 Structure of carbon satellite TanSat

表 3 高分五号可见短波高光谱相机技术指标

Table 3 Technical specifications of GF-5 visible/short-wave infrared hyperspectral imager

参数	设计指标	正样实测指标
光谱范围	0.4~2.5 μm	395.9~2501.9 nm
光谱分辨率 [1]	VNIR: ⩽ 5 nm SWIR: ⩽ 10 nm	VNIR: 4.22~4.95 nm SWIR: 8.63~8.98 nm
空间分辨率	±1%	VNIR: 29.76 m. SWIR: 29.95 m
幅宽	60±1 km	VNIR: 60.77 km. SWIR: 59.96 km
绝对辐射定标精度	⩽ 5%	VNIR: 4.14%. SWIR: 5.00%
相对辐射定标精度	⩽ 3%	VNIR: 1.24%. SWIR: 1.35%
光谱定标精度	VNIR: ⩽ 0.5 nm. SWIR: ⩽1.0 nm	VNIR: 0.39 nm. SWIR: 0.65 nm
信噪比 [2]	⩾ 200@0.4~0.9 μm ⩾ 150@0.9~1.75 μm ⩾100@1.75~2.5 μm	355@500 nm, 493@600 nm 363@900 nm, 473@1100 nm 349@1700 nm, 248@2100 nm 188@2300 nm, 167@2400 nm

设计有基于大气轮廓线的中心波长和带宽在轨定标, 具有定量化程度高的优势. 利用线性光谱匹配法, 计算得到特征的光谱偏差在 760 nm 处达到 0.24 nm. 图 6 为可见短波高光谱相机正样产品, 图 7 为利用该仪器在轨数据实现的德国埃姆登港口高光谱数据地物分类.

3.4 航空全谱段多模态成像光谱仪

全谱段多模态成像光谱仪是中国高分辨率对地观测航空平台安排的高光谱载荷, 2016 年完成研制, 是目前国际上实现观测谱段最全的高光谱载荷. 全谱段多模态成像光谱仪包含 12 台独立单机, 均采用平面光栅色散分光路线, 具有覆盖谱段全、分辨率高、观测视场大的特点. 表 4 列出了仪器的主要技术指标, 其主要特色是通过多台仪器视场外拼接实现 40° 的观测视场, 为满足热红外高光谱的背景辐射抑制需求, 采用 100 K 制冷的低温光谱仪系统设计, 这是国内首次工程实现的热红外高光谱成像仪. 仪器研制完成后在国家相关业务部门得到广泛应用, 图 8 给出了该仪器的热红外模块在浙江横店飞行得到的辐亮度、发射率和温度结果, 这有别于可见短波红外高光谱的影响, 为高光谱遥感数据处理和应用研究提供了全新的数据源.

3.5 天问一号火星矿物光谱分析仪

中国首次火星探测任务天问一号上搭载了 1 台

环绕器矿物光谱分析仪, 该仪器也是经典的色散型光谱成像仪, 仪器光谱范围为 0.45~3.40 μm, 光谱分辨率在可见近红外区优于 7.5 nm, 近中红外区优于 15 nm, 观测视场达到 12°, 为保证中红外谱段仍可获得较高的灵敏度, 将整机采用辐射制冷的方案制冷到 −20°C 附近. 图 9 为火星矿物光谱分析仪照片, 由于仪器的空间分辨率不高, 整个仪器设计质量小于 8 kg, 按计划该载荷将于 2021 年 2 月抵达火星轨道, 开展相关探测任务, 预期能够对火星表面的矿物成分实现精细探测. 相比以往的对地球观测载荷, 火星矿物光谱分析仪波段覆盖了 2.5~3.4 μm 的中红外谱段, 这也是深空探测类仪器的特有之处.

3.6 珠海一号商业高光谱卫星

随着高光谱成像技术的日益成熟, 越来越多的商业遥感卫星开始搭载高光谱成像载荷, 较有名的包括珠海一号、嘉定一号以及吉林一号等, 商业卫星的特点是体积小、成本低、面向特定应用而开展. 珠海一号卫星上搭载有高光谱成像仪 OHS, 其空间分辨率为 10 m, 单次成像范围为 150 km×2500 km, 光谱范

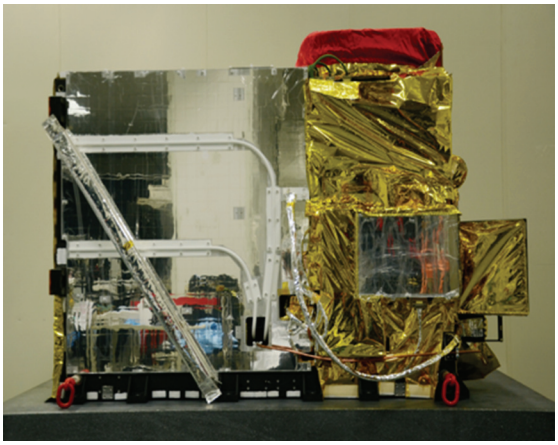

图 6 可见短波高光谱相机正样

Fig. 6 Calibration of visible shortwave hyperspectral camera

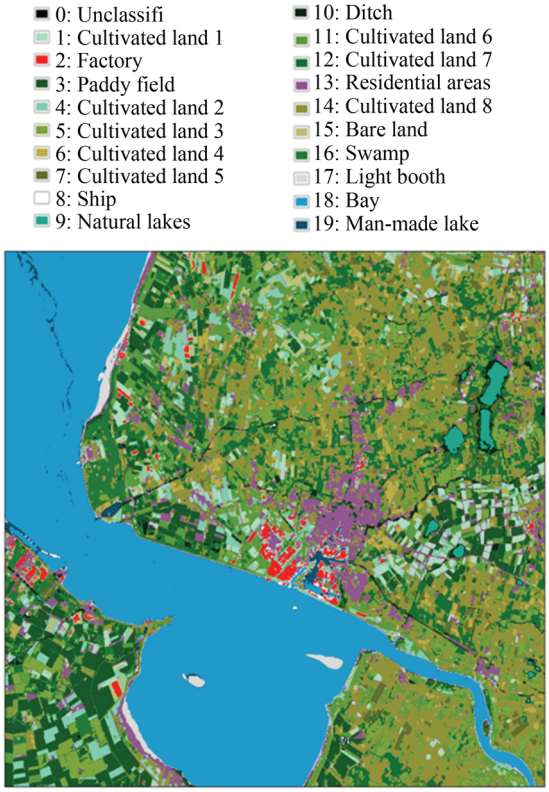

图 7 德国埃姆登港口高光谱数据地物分类

Fig. 7 Classification of hyperspectral data of Emden port, Germany

表 4 全谱段多模态成像光谱仪主要技术指标

Table 4 Main technical indices of full spectrum multimode imaging spectrometer

指标内容	谱段			
	可见近红外		短波红外	热红外
光谱范围	0.4~1.0 μm		1.0~2.5 μm	8~12.5 μm
瞬时视场	0.125 mrad	0.25 mrad	0.5 mard	1 mrad
波段数	64	256	512	140
静态 MTF	$\geqslant$ 0.3	$\geqslant$ 0.4	$\geqslant$ 0.3	$\geqslant$ 0.25
光谱 FWHM	10	5	5	40
信噪比	$\geqslant$ 500		$\geqslant$ 300	NEdT$\leqslant$ 0.2 K

注 光谱仪视场角均 $\geqslant$ 40°; 反射率精度优于 10%; 地物分类精度优于 95%; 图像的相对几何精度优于 1 像元, 绝对几何精度优于 3 像元; 载机平台主要为运 12、运 5、塞斯纳 208、彩虹 4 等飞机平台.

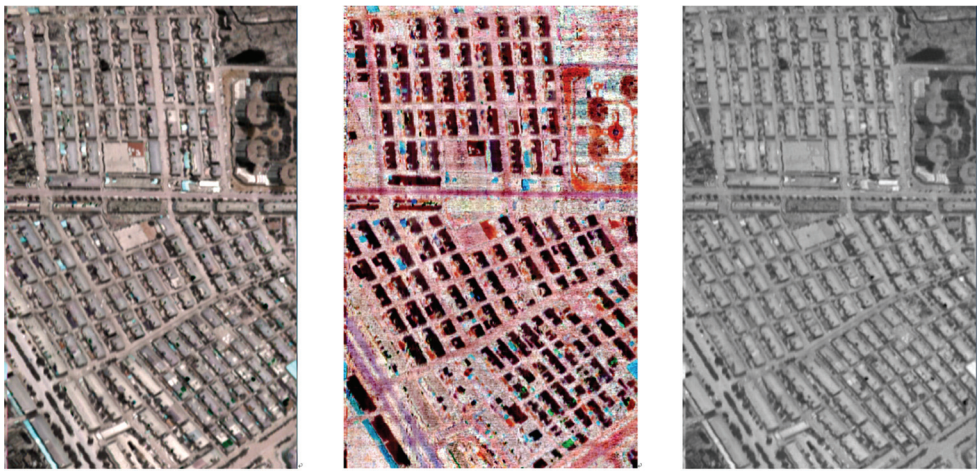

图 8 热红外模块浙江横店飞行得到的辐亮度、发射率和温度

Fig. 8 Radiance, emissivity and temperature maps of thermal infrared module flying in Hengdian, Zhejiang Province

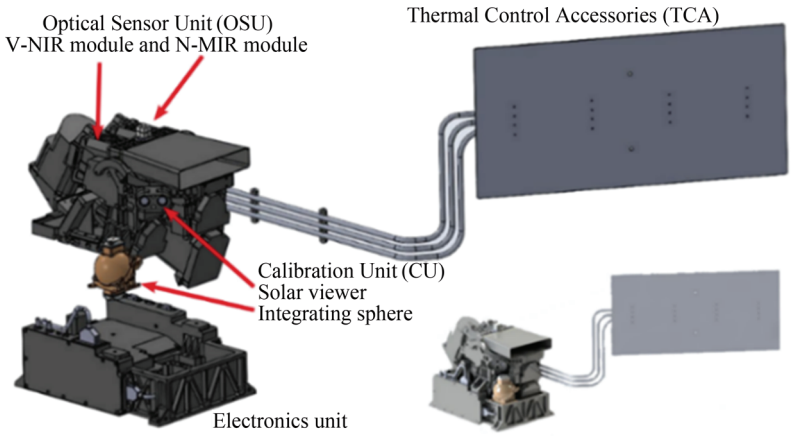

图 9 火星矿物光谱分析仪结构

Fig. 9 Structure of Mars mineral spectrum analyzer

围为 400~1000 nm, 光谱分辨率 2.5 nm, 共 256 个波段, 可任选 32 波段数据下传至地面. 2017 年 6 月珠海一号完成首发, 2019 年 9 月完成 8 颗高光谱卫星组网. 图 10 为高光谱成像仪 OHS 的实物. 珠海一号卫星星座具备强大的高光谱数据获取能力, 基于组网设计, 可实现 2 天半时间覆盖全球并且对特定区域实现重访周期 1 天, 大幅提高了星座采集遥感数据的能力. 目前该卫星是国际上幅宽最大的高光谱卫星, 具备对植被、水体、海洋等地物进行精准定量分析的能力, 图 11 为利用 OHS 在轨数据实现的植被覆盖度反演结果.

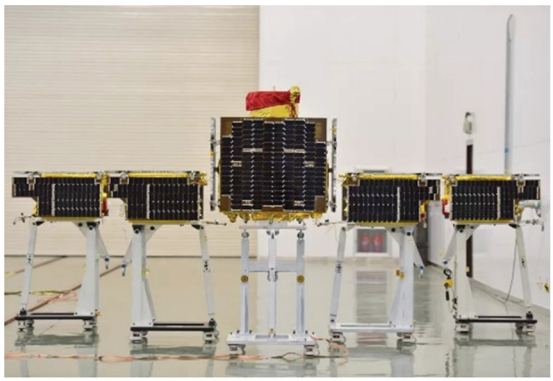

图 10 高光谱成像仪 OHS 实物

Fig. 10 Object of hyperspectral imager OHS

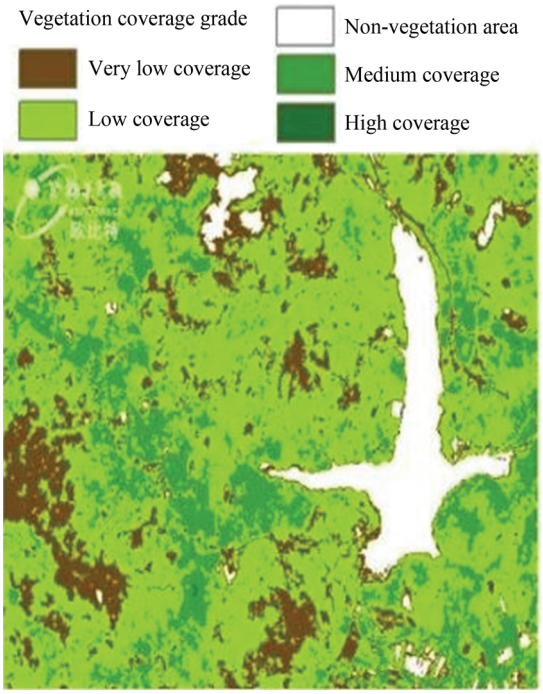

图 11 OHS 数据实现的植被覆盖度反演

Fig. 11 Inversion of vegetation coverage based on OHS data

4 结论与展望

高光谱、高空间、高时间、高辐射分辨率的同时兼顾是高光谱成像技术发展的主流趋势. 在高光谱分辨率方面, 光谱分段将越来越精细, 达到 nm 甚至是亚 nm 级, 特别是大气观测领域, 谱段数将增至数百甚至上千个, 信息获取能力越来越强. 在高空间分辨率方面, 随着大面阵高分辨率探测器技术的进步, 空间分辨率将越来越高, 某些特定领域要求星载仪器分辨率达到米级水平. 在高时间分辨率方面, 通过加大幅宽和多卫星组网等技术的发展, 将使得时间分辨率越来越高, 提高作业效率. 在高辐射分辨率方面, 仪器的灵敏度水平将越来越高, 由此会引入一些应用水平的提升. 随着应用的深入, 高光谱仪器的定量化水平将对应用效果起到更强的决定作用. 在高精度定量化方面, 将通过加大实时的星上和机上定标以及实时数据处理能力, 提高高光谱数据定量化精度, 达到与实验室和地面光谱测量相当的水平, 提升应用效果. 在宽谱段覆盖方面, 技术需求将推动精密光机加工、深低温空间制冷、高性能红外探测器等基础学科的发展, 谱段覆盖范围逐步从可见光向全谱段 ($0.4\sim12.5\,\mu$m) 发展, 实现光学全谱段数据的同步获取, 在完成机载全谱段高光谱成像载荷的基础上, “十三五” 期间科技部设立了重点研发专项—静止轨道全谱段高光谱探测技术, 开展空间平台的全谱段高光谱载荷研究工作, 推进空间仪器的研制进程.

在很长一段时间内高光谱成像仍将是研究热点, 其应用更近于实用, 目前中国的风云、资源及环境系列卫星均安排有业务化运行的空间高光谱成像载荷. 根据国家科技规划, 在未来的重大科技专项中, 高光谱成像技术是重点支持方向之一, 目前中国的空间站 “大光学” 计划、嫦娥系列探月卫星、小行星探测卫星等任务中均安排有高光谱成像载荷. 作为一项实用遥感技术, 其应用效果得到更多行业部门认可, 未来会有更多高光谱载荷在轨运行, 高光谱成像技术有望与可见光成像、红外成像并列为三大基本光学技术手段.

参考文献

[1] GOETZ A F H, VANE G, SOLOMON J, *et al.* Imaging spectrometry for Earth remote sensing [J]. *Science*, 1985, **228**: 1147-1153

[2] VANE G, GOETZ A F H, WELLMAN J. Airborne imaging spectrometer: a new tool for remote sensing [J]. *IEEE Trans. Int. Geosci. Remote Sens.*, 1984, **22**(6): 546-549

[3] VANE G, GREEN R O, CHRIEN T G, *et al.* The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. *Remote Sens. Environ.*, 1993, **44**(2-3): 127-143

[4] YUEN P W T, RICHARDSON M. An introduction to hyperspectral imaging and its application for security, surveillance and target acquisition [J]. *Imag. Sci. J.*, 2010, **58**(5): 241-253

[5] JAN H, ZBYNEK M, LUCIE H, *et al.* Potentials of the VNIR airborne hyperspectral system AISA eagle [J]. *GIS Ostrava*, 2008, **27**: 1-6

[6] MCFEE J E, RIPLEY H T. Detection of buried land mines using a CASI hyperspectral imager [J]. *Proceed. SPIE Int. Soc. Opt. Photon.*, 1997, **3079**: 738-749

[7] ACHAL S, MCFEE J E, IVANCO T, *et al.* A thermal infrared hyperspectral imager (tasi) for buried landmine detection [J]. *Int. Soc. Opt. Photon.*, 2007, **6553**: 655316

[8] CHAPMAN J W, THOMPSON D R, HELMLINGER M C, *et al.* Spectral and radiometric calibration of the Next Generation Airborne Visible Infrared Spectrometer (AVIRIS-NG) [J]. *Remote Sens.*, 2019, **11**: 2129-1-2129-18

[9] MARMO J, FOLKMAN M A, KUWAHARA C Y, *et al.* Lewis hyperspectral imager payload development [J]. *Int. Soc. Opt. Photon.*, 1996, **2819**: 80-90

[10] WILLOUGHBY C T, MARMO J, FOLKMAN M A. Hyperspectral imaging payload for the NASA

small satellite technology initiative program [C]//1996 IEEE Aerospace Applications Conference. Proceedings. Aspen: IEEE, 1996: 67-79

[11] YARBROUGH S, CAUDILL T R, KOUBA E T, *et al*. MightySat II. 1 hyperspectral imager: summary of on-orbit performance [C]//Imaging Spectrometry VII. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2002: 186-197

[12] LEE C M, CABLE M L, HOOK S J, *et al*. An introduction to the NASA Hyperspectral InfraRed Imager (HyspIRI) mission and preparatory activities [J]. *Remote Sens. Environ.*, 2015, **167**: 6-19

[13] JOHNSON W R, HOOK S J, MOUROULIS P Z, *et al*. QWEST: quantum well infrared Earth science testbed [C]//Imaging Spectrometry XIII. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2008: 708606

[14] LUCEY P G, WILLIAMS T J, MIGNARD M, *et al*. AHI: an airborne long-wave infrared hyperspectral imager [C]//Airborne Reconnaissance XXII. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 1998: 36-43

[15] LIU Yinnian, XUE Yongqi, WANG Jianyu, *et al*. Operational modular imaging spectrometer [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, **21**(1): 9-13 (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): 9-13)

[16] DONG Guangjun, ZHANG Yongsheng, FAN Yonghong. Image fusion for hyperspectral date of PHI and high-resolution aerial image [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2006, **25**(2): 123-126 (董广军, 张永生, 范永弘. PHI 高光谱数据和高空间分辨率遥感图像融合技术研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2006, **25**(2): 123-126)

[17] PUCKRIN E, TURCOTTE C S, LAHAIE P, *et al*. Airborne measurements in the infrared using FTIR-based imaging hyperspectral sensors [C]//Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications III. Grenoble: International Society for Optics and Photonics, 2009: 74820S

[18] WARREN D W, BOUCHER R H, GUTIERREZ D J, *et al*. MAKO: a high-performance, airborne imaging spectrometer for the long-wave infrared [C]//Imaging Spectrometry XV. Grenoble: International Society for Optics and Photonics, 2010: 78120N

[19] JEFFREY L H, RICHARD H B, KERRY N B, *et al*. MAKO airborne thermal infrared imaging spectrometer: performance update [C]//Imaging Spectrometry XXI. San Diego: International Society for Optics and Photonics, 2016

[20] COUDRAIN C, BERNHARDT S, CAES M, *et al*. SIELETERS, an airborne infrared dual-band spectro-imaging system for measurement of scene spectral signatures [J]. *Opt. Express*, 2015, **23**(12): 16164-16176

[21] LIU C, XU R, XIE F, *et al*. New airborne thermal-infrared hyperspectral imager system: initial validation [J]. *IEEE J. Select. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens.*, 2020, **13**: 4149-4165

[22] BARNSLEY M J, SETTLE J J, CUTTER M A, *et al*. The PROBA/CHRIS MISSION: a low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the Earth surface and atmosphere [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2004, **42**(7): 1512-1520

[23] RAST M, BEZY J L, BRUZZI S. The ESA Medium resolution imaging spectrometer MERIS a review of the instrument and its mission [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 1999, **20**(9): 1681-1702

[24] MURCHIE S, ARVIDSON R, BEDINI P, *et al*. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) [J]. *J. Geophys. Res.: Planet.*, 2007, **112**(E5): DOI: 10.1029/2006-JE002682

[25] WANG Q, WU C Q, LI Q, *et al*. Chinese HJ-1A/B satellites and data characteristics [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 2010, **53**(1): 51-57

[26] STRAIGHT S, DOOLITTLE C, COOLEY T, *et al*. Tactical satellite-3 mission overview and initial lessons learned [C]//24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite. North Logan: AIAA, 2010

[27] YE B, TIAN S, CHENG Q, *et al*. Application of lithological mapping based on Advanced Hyperspectral Imager (AHSI) imagery onboard Gaofen-5 (GF-5) satellite [J]. *Remote Sens.*, 2020, **12**(23): 3990

[28] GALEAZZI C, SACCHETTI A, CISBANI A, *et al*. The PRISMA program [C]//IGARSS 2008—2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston: IEEE, 2008: IV-105-IV-108

[29] YE Peijian, SUN Zezhou, RAO Wei, *et al*. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China [J]. *Sci. China: Technol. Sci.*, 2017, **60**(5): 649-657

[30] GUANTER L, KAUFMANN H, SEGL K, *et al*. The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for Earth observation [J]. *Remote Sens.*, 2015, **7**(7): 8830-8857

[31] LIU Y, WANG J, YAO L, *et al*. The TanSat mission: preliminary global observations [J]. *Sci. Bull.*, 2018, **63**(18): 1200-1207

[32] NEUGEBAUERH G, HABING J, DUINEN R J, *et al*. The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission [J]. *Astrophys. J.*, 1984, **278**: 1-6