

〈综述与评论〉

从可见光到热红外全谱段探测的星载 多光谱成像仪器技术发展概述

戴立群, 唐绍凡, 徐丽娜, 孙启扬, 杨晓博, 王智谋, 金占雷, 赵艳华
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 从可见光到热红外的全谱段探测的多光谱成像仪器能够同时对可见光、近红外、短波红外、中波红外、长波红外光谱范围内的多个谱段进行探测, 是目前得到广泛研究及应用的成像光谱仪器。这类仪器在国土资源、环境监测、城市遥感、海洋监管等方面均有较高的应用价值。本文概述了此类仪器的国内外研究发展现状, 对国外 Landsat 系列载荷、MODIS、国内的资源系列载荷、高分五号全谱段光谱成像仪等代表性仪器的技术指标和特点进行了总结。通过分析认为更加全面和精细的光谱覆盖、成像方式的改进与技术指标提高、定标手段和定量化水平提高、数据的持续性及稳定性是未来发展的趋势。

关键词: 可见光; 红外; 星载; 多光谱成像; 全谱段光谱成像仪

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2019)02-0107-11

Development Overview of Space-borne Multi-spectral Imager with Band Range from Visible to Thermal Infrared

DAI Liqun, TANG Shaofan, XU Lina, SUN Qiyang, YANG Xiaobo, WANG Zhimou, JIN Zhanlei, ZHAO Yanhua
(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: A multi-spectral imager with a band range from visible to thermal infrared is a type of imaging spectrometry instrument that can detect multi bands of VIS, NIR, SWIR, MWIR, and LWIR radiation, and it attracts extensive study and has wide applications. It is highly valuable in many applications such as land resources surveys, environmental monitoring, urban remote sensing, and marine supervision. The domestic and international development of such an instrument is outlined in this paper. This paper also summarizes the technical parameters and characteristics of representative instruments including Landsat series, MODIS, CBERS series, and VIMI. Data continuity and stability, increased specification, wide spectral coverage, and improved quantitative applications are the future trends of such technology.

Key words: visible, infrared, space-borne, multi-spectral image, VIMI

0 引言

成像光谱技术 (Imaging Spectrometry) 就是一类将成像技术和光谱技术相结合的新型多维信息获取技术, 它能够得到被探测目标的两维空间信息和光谱信息。通常使用的成像光谱仪主要探测目标的两维空间信息与一维光谱信息, 形成数据立方体 (Datacube)^[1]。

根据光谱分辨率不同, 成像光谱仪可分为多光谱 (Multi-spectral) 型, 其光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda \sim 10$, 可以获

取几十个光谱通道的图像; 高光谱 (Hyper-spectral) 型, 其光谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda \sim 100$, 可以获取几百个光谱通道的图像^[2]。

高光谱成像由于受低温光学、红外焦平面探测器等技术条件限制, 探测谱段多集中在可见光、近红外及短波红外。本文研究工作谱段覆盖可见光到热红外的全谱段探测光谱成像仪器, 属于多光谱型。其工作谱段的数目、中心波长和谱段宽度都经过优化选择, 能够满足多个用户的不同需求, 与高光谱仪器相比容

收稿日期: 2018-06-28; 修订日期: 2018-08-13.

作者简介: 戴立群 (1983-), 男, 黑龙江绥化人, 工程师, 硕士。研究方向是空间红外光学传感器电子学总体设计、红外焦平面探测器技术研究等。
E-mail: dailiqun508@sina.com.

易达到更高的信噪比，数据存储与处理的要求较低。综合考虑技术实现难度、经济成本、使用成本等因素，此类多光谱仪器是一种较好的选择。

覆盖可见光到热红外光谱范围的多光谱仪器具有昼夜观测的技术优势，可以在研究地质演化、评价区域资源潜力、评价地表污染、监测土地退化与规划土地复垦、城市规划、农作物长势分析、土地开发利用、突发事件监测等方面发挥重要作用。

世界上先后已有美国、法国、俄罗斯、日本、印度等国家研制和发射了覆盖可见光到热红外光谱范围的多光谱成像卫星。得到广泛关注的仪器主要有 Landsat 系列卫星上的 TM (TM, Thematic Mapper)、ETM+ (ETM+, Enhanced Thematic Mapper)、OLI (OLI, The Operational Land Imager) 和 TIRS (TIRS, The Thermal Infrared Sensor), 以及 MODIS (MODIS, The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、MTI (MTI, Multispectral Thermal Imager)、HypIRI (HypIRI, Hyperspectral Infrared Imager)、ASTER (ASTER, The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)。

国内已经发射的覆盖可见光到热红外光谱范围的多光谱成像仪器主要包括有资源卫星系列上的红外多光谱扫描仪以及环境卫星上的光学载荷、海洋系列卫星上光学载荷、高分五号全谱段光谱成像仪等。

为了实现跨越可见光到热红外的宽光谱覆盖范围以及定量化探测，仪器在设计时需要采用多种关键技术，主要包括：宽光谱光学系统及分光装置、高性能可见/红外探测器、焦平面制冷装置、扫描装置、星上定标装置等。高性能仪器研制难度很大，目前世界上大部分由美国研制，以 Landsat 系列、MODIS 为主要代表。从实现方式分类，有单台仪器实现（这也是技术难度最高的一种）和整星配置 2~3 台仪器实现；从扫描方式分类，有沿垂直轨道方向扫描和推扫方式；从工作谱段覆盖分类，有全谱段覆盖、可见近红外/短波/长波覆盖、可见近红外/长波覆盖等；从分光方式分类，有光栅分光、棱镜分光和滤光片方式。早期仪器一般采用沿垂直轨道方向扫描+多元并扫的技术方案，ETM+和 MODIS 是此类方案的代表仪器。后续随着大规模红外焦平面技术和大功率机械制冷技术的发展 and 推动，较新的仪器开始采用沿轨道方向推扫方案，比如 MTI、OLI/TIRS、全谱段光谱成像仪等。

鉴于仪器的技术特点多样且分类方法众多，其中扫描方式相对反应了仪器的技术发展阶段，故本文按扫描方式将各台仪器分为两大类，并加以叙述和分析。

1 垂直轨道扫描+多元并扫方案

1.1 Landsat4~7 系列载荷

美国陆地卫星系列载荷到目前为止经历了四代发展，从 Landsat1~3 的 MSS，到 Landsat4~5 的 TM，再到 Landsat 7 的 ETM+，最后是 Landsat 8 的 OLI 和 TIRS。MSS 的光谱范围为 0.5~1.1 μm，后文还会提及，但不属于本文的主要讨论对象。

TM 拥有 7 个工作波段，包括可见光、近红外、短波红外、热红外，覆盖 0.45~12.5 μm 的光谱范围，采用摆动镜双向扫描的方式工作，幅宽为 185 km。可见光到短波谱段 B1~B5 及 B7 为 16 元并扫，像元分辨率 30 m；热红外谱段 B6 为 4 元并扫，像元分辨率 120 m。所有谱段均为 8 bit 量化。

ETM+ 是一种穿越卫星轨道扫描的多光谱成像仪器，它的幅宽为 185 km，全球覆盖周期为 16 d。ETM+ 望远镜的光学系统类型为 R-C (Ritchey-Chretien) 系统，入瞳孔径为 406 mm，质量 407 kg，功耗大约 600 W。ETM+ 与 TM 的主要区别在于它增加了一个 15 m 分辨率的全色谱段 (Pan) 和一个 60 m 分辨率的热红外谱段，取代了 TM 120 m 分辨率的热红外谱段。ETM+ 的辐射测量精度提高，绝对辐射测量不确定度小于 5%。ETM+ 增加了两个定标装置：全口径定标装置 (FASC) 和部分口径定标装置 (PASC)。Landsat-7 ETM+ 的主要指标如表 1 所示。

表 1 Landsat-7 ETM+ 的主要指标

Table 1 Key technical parameters of Landsat-7 ETM+

Band no.	Spectral range/μm	Ground resolution/m
PAN(8)	0.50~0.90	15
1	0.45~0.52	30
2	0.52~0.60	30
3	0.63~0.69	30
4	0.76~0.90	30
5	1.55~1.75	30
7	2.08~2.35	30
6	10.4~12.5	60

1.2 EOS-MODIS

中分辨率成像光谱辐射计是美国 NASA 地球观测系统 (EOS, Earth Observing System) 的关键仪器之一，运行在 TERRA 和 AQUA 卫星上。相比于之前的各种仪器，MODIS 在光谱分辨率、空间分辨率、时间分辨率方面均取得了巨大的进步。

MODIS 是一台宽视场的穿轨扫描辐射计，具有不到 2 d 完成全球覆盖的能力。它由穿越轨迹扫描的扫描镜、光学系统和位于 4 个焦面的一组线阵探测器

和干涉滤光片组成,能够在 0.4~14.5 μm 范围内的 36 个谱段 (21 个谱段位于 0.4~3.0 μm 范围, 15 个谱段位于 3~14.5 μm 范围) 获取图像, 轨道高度 705 km, 幅宽为 2330 km。MODIS 的空间分辨率为 250 m (谱段 1~2)、500 m (谱段 3~7) 和 1000 m (谱段 8~36)。质量为 250 kg, 功耗 225 W (轨道平均), 数据率 11 Mbps, 设计寿命为 5 年^[3-6]。

MODIS 不同谱段的用途和技术参数如表 2 所示。

表 2 MODIS 技术参数

Table 2 Technical parameters of MODIS

Primary use	Band	Bandwidth	
		Bands 1-19 /nm	Ground resolution/m
		Bands 20-36 /μm	
Land/cloud/aerosols boundaries	1	620-670	250
	2	841-876	
Land/cloud/aerosols properties	3	459-479	500
	4	545-565	
	5	1230-1250	
	6	1628-1652	
	7	2105-2155	
Ocean color/phytoplankton/biogeochemistry	8	405-420	1000
	9	438-448	
	10	483-493	
	11	526-536	
	12	546-556	
	13	662-672	
	14	673-683	
	15	743-753	
Atmospheric water vapor	16	862-877	1000
	17	890-920	
	18	931-941	
Surface/cloud temperature	19	915-965	1000
	20	3.660-3.840	
	21	3.929-3.989	
	22	3.929-3.989	
Atmospheric temperature	23	4.020-4.080	1000
	24	4.433-4.498	
	25	4.482-4.549	
Cirrus clouds/water vapor	26	1.360-1.390	1000
	27	6.535-6.895	
	28	7.175-7.475	
	29	8.400-8.700	
Ozone	30	9.580-9.880	1000
Surface/cloud temperature	31	10.780-11.280	1000
	32	11.770-12.270	
Cloud top altitude	33	13.185-13.485	1000
	34	13.485-13.785	
	35	13.785-14.085	
	36	14.085-14.385	

第一台 TERRA 卫星上的 MODIS 与 Landsat 7 的 ETM+ 同年发射, 他们属于同一时期的多光谱仪器, 因此也采用了近似的设计方案, 即扫描镜垂轨扫描+多元并扫方案。但是 MODIS 更关注对地球环境及气候变化的短期和长期观测, 因此除了对谱段设置进行增强外, MODIS 大幅提高了幅宽(但同时也降低了地面分辨率), 达到了小于 2 d 的重访周期, 通过 AQUA 卫星上的另一台 MODIS 进行双星工作, 甚至可以对地表大部分区域每天完成 4~5 次覆盖, 实现对关注区域的无云观测和连续监视。

1.3 资源系列载荷

中巴地球资源一号卫星 (CBERS-1) 是我国第一代传输型地球资源卫星, 资源一号卫星 (CBERS-1) 多光谱 CCD 相机和红外多光谱扫描仪的成功发射和在轨运行, 填补了我国在地球资源卫星多光谱 CCD 相机和红外遥感器方面的空白, 使我国拥有了自己的地球资源卫星遥感图像^[7]。

鉴于国内用户对资源后继卫星光学有效载荷的空间分辨率、系统辐射灵敏度和图像质量的更高要求, 我国开展了资源 03/04 星的研制工作。03/04 星上的红外多光谱扫描仪的地面像元分辨率已从 01/02 星的 78 m (近红外和短波红外谱段)、156 m (热红外) 提高到 40 m 和 80 m, 谱段配置和 01/02 星相同。因此热红外波段的分辨率已经优于 Landsat 8。资源卫星 01/02、03/04 红外相机的主要性能指标如表 3 所示^[8-9]。

红外多光谱扫描仪的技术方案与 ETM+ 比较接近, 属于早期仪器的经典设计。工作谱段与 ETM+ 8

个谱段中的 4 个相同。技术指标方面, 03/04 星的空间分辨率提高到 40 m/80 m 后, 与 ETM+ 的 30 m/60 m 接近, 但幅宽还存在差距。

1.4 环境系列光学载荷

为进一步推动环境保护、灾害预防与减灾工作, 中国政府在 2005 年批准了环境与灾害监测及预报小卫星星座工程, 即环境一号卫星 (HJ-1 星)。主要任务是使用中国自己的生态环境监测与灾害遥感监测小卫星星座对中国环境与灾害遥感信息的收集、处理及应用进行改进。HJ-1A/B 于 2008 年 9 月 6 日发射, 经过在轨测试后, 于 2009 年 3 月交付用户使用。

HJ-1A/B 是中国新一代的民用地球观测光学遥感小卫星。它们有中高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率及大幅宽。它们使用可见光、红外、高光谱观测模式在比较大的波长范围内动态监测生态环境变化。HJ-1A/B 能够在 48 h 内覆盖中国及周边地区。

HJ-1A/B 卫星上均装有宽覆盖多光谱 CCD 相机, HJ-1A 上装有一台高光谱成像仪, HJ-1B 上装有一台红外相机。

宽覆盖多光谱 CCD 相机有 4 个波段, 分别是蓝、绿、红和近红外 (B1: 0.43~0.52 μm , B2: 0.52~0.60 μm , B3: 0.63~0.69 μm , B4: 0.76~0.90 μm)。CCD 相机星下点分辨率为 30 m, 幅宽为 360 km, 中心像元配准精度为 0.3 像元。为实现 720 km 的覆盖宽度, 使用 2 台 CCD 相机进行视场分割。

表3 ZY-1 01/02、ZY-1 03/04 红外相机技术指标

Table 3 Technical parameters of ZY-1 01/02 IRMSS and ZY-1 03/04 IRS		
Specifications	01/02 IRMSS	03/04 IRS
Spectral range	B6: 0.50-0.90 μm	B9: 0.50-0.90 μm
	B7: 1.55-1.75 μm	B10: 1.55-1.75 μm
	B8: 2.08-2.35 μm	B11: 2.08-2.35 μm
	B9: 10.4-12.5 μm	B12: 10.4-12.5 μm
FOV/(°)	8.8	8.8
Swath/km	120	120
Ground resolution/m	78(B6, B7, B8), 156 (B9)	40(B9, B10, B11), 80(B12)
Revisit/d	26	26
MTF	0.4	0.35
SNR	B6: 300	B9: 300
	B7: 100	B10: 100
	B8: 50	B11: 50
NE Δ T/ K	B9: 1.2	B12: 1.2

红外相机有4个波段,分别是近红外、短波红外、中波红外和热红外(B1: 0.75~1.10 μm, B2: 1.55~1.75 μm, B3: 3.50~3.90 μm, B4: 10.5~12.5 μm)。红外相机星下点分辨率为150 m,幅宽为360 km。

CCD相机及红外相机的波段设置与美国 Landsat 系列及 MODIS、中巴资源卫星 CBERS 等部分波段类似,能够对内陆水体进行监测,提供水质分布及分类信息,区分水华高低区域,提取叶绿素 A 及悬浮物分布,提供水透明度和温度信息。能够对火点等温度异常点进行监测,通过与 MODIS 数据对比,验证了热红外波段是一个有效的监测源^[10-11]。

HJ-1A/B 通过双星座组合工作,结合了 CCD 相机和红外相机的优点,弥补了各自的不足。但是总体来说,单台相机的空间分辨率较低,成像波段数少。

1.5 海洋系列载荷

“海洋一号”(HY-1)卫星于2002年5月15日发射入轨,是一颗海洋水色卫星,用于获取叶绿素浓度、悬浮物浓度、可溶有机物、污染物、海洋表面温度等海洋环境参数。它的业务运行能极大帮助提高海洋环境监测、港口管理、海洋污染监测、海洋生物资源利用的可行性,同时也有助于全球变化的研究。

HY-1A 是一颗小卫星,重量367 kg,功耗350 W,重访周期3 d。星上装有2台载荷:海洋水色及温度扫描仪(COCTS)和 CCD 成像仪。COCTS 有8个可见光近红外波段和2个热红外波段,空间分辨率1.1 km,采用10 bits 量化等级,主要用于探测海洋水色及海洋表面温度。CCD 成像仪是一台光学遥感器,在

0.42~0.89 μm 谱段范围内有4个波段,空间分辨率250 m,主要用于观测海洋水色、测绘海岸带区域海水成分、监测海岸污染等^[12-13]。

HY-1A 卫星的主要技术参数见表4所示。

1.6 风云系列载荷

我国已成功发射了包括风云一号、风云三号极轨气象卫星、风云二号、风云四号静止轨道气象卫星在内的多颗风云系列气象卫星,风云系列气象卫星在我国国民经济建设和防灾减灾中发挥了重要作用。

风云二号卫星上的主载荷多通道扫描辐射计运行在地球同步轨道,利用卫星自旋和望远镜步进实现对地球的二维扫描,成像方式与多元并扫类似,因此也归在这一分类中。

多通道扫描辐射计覆盖可见到长波红外谱段,采用扫描成像方式进行成像,具体波段是:可见波段0.55~0.9 μm; 探火波段3.5~4.0 μm; 水汽波段6.3~7.6 μm; 热红外分裂窗10.3~11.3 μm; 热红外分裂窗11.5~12.5 μm。地面分辨率为0.25~4 km^[14]。

环境、海洋、风云系列的多光谱仪器针对特定用户的要求,在工作谱段和空间分辨率等技术指标上进行了优化,满足了用户的应用需求,但是相对国外 Landsat 系列还存在差距。

2 沿轨道方向推扫方案

2.1 Landsat8 载荷

美国于2013年2月11日发射了 Landsat 8 卫星,系统性地收集多光谱图像用于探测及定量分析地球

表4 HY-1A 卫星载荷主要性能

Table 4 Key technical parameters of HY-1A payload			
Payload	COCTS		CCD
Revisit/d	3		7
FOV/(°)	90		34.78
No. of scan lines	1024		2048
Quantization/bit	10		12
Ground resolution/m	1100		250
Swath/km	1400		500
Spectral range/μm	0.402-0.442	0.66-0.68	0.42-0.50
	0.433-0.453	0.73-0.77	0.52-0.60
	0.48-0.50	0.845-0.885	0.61-0.69
	0.51-0.53	10.3-11.3	0.76-0.89
	0.555-0.575	11.5-12.5	

表面的变化。作为陆地卫星系列的后续项目，Landsat 8 卫星的主载荷为业务陆地成像仪 OLI，其工作谱段为可见/短波红外谱段，另外增加了热红外成像仪 TIRS。

Landsat 8 卫星的科学目标及任务使命包括：

- ①确保陆地卫星系列数据的连续性；
- ②季度性地实现地球陆地表面的全球覆盖；
- ③能以足够的空间/光谱/时间分辨率探测到可能发生的变化，而且能够描述和理解这种变化的原因和由此带来的后果；
- ④数据有效、共享。

OLI 采用推扫方式成像，幅宽为 185 km，谱段设置及分辨率如表 5 所示。TIRS 的工作谱段为 10.6~11.2 μm 和 11.5~12.5 μm，空间分辨率为 100 m，成像方式和幅宽与 OLI 相同。

与 ETM+相比，OLI/TIRS 增加了一个海岸带/气溶胶波段（B1，0.433~0.453 μm），用于浅水及海洋水色普查、追踪大气微小粒子如灰尘及烟雾；增加了一个卷云短波波段（B9，1.36~1.39 μm），用于探测可能污染其他可见光波段的高空薄卷云；将之前的一个热红外波段拆分为 B10、B11 两个波段^[15-22]。

Landsat 系列载荷工作谱段对比见图 1^[16]。

从 Landsat 系列载荷的不断进步可以看出：①载荷的技术方案从垂轨扫描+多元并扫向沿轨推扫转变；②工作谱段的覆盖在继承原有基础之上更加精细，并有一定补充；③保持幅宽不变、空间分辨率相对稳定。

2.2 多光谱红外成像仪 MTI

MTI 是由美国能源部下属的防止核扩散和国家安全办公室发起、并由 Sandia 国家实验室、洛杉矶国家实验室以及 Savannah River 技术中心负责的研究与发展（R&D）项目。研制 MTI 最主要的目的在于研究和评估多光谱成像技术、热成像技术图像处理和评估技术在探测和辨别大规模杀伤性武器设施等方面的能力。

该卫星于 2000 年 3 月 12 日发射，具有 15 个成像通道，光谱覆盖范围为 0.45~10.70 μm。

MTI 的主要系统性能指标：

- ①光谱波段：可见光、短波红外、中波及长波红外；
- ②地面采样间距：见表 6；

表 5 OLI/TIRS 谱段及分辨率设置
Table 5 Bands and GSD of Landsat 8 OLI/TIRS

Sensor	Spectral range/μm	Ground resolution/m	Name
OLI	0.500-0.680	15	Pan
	0.433-0.453	30	Coastal/Aerosol
	0.450-0.515	30	Blue
	0.525-0.600	30	Green
	0.630-0.680	30	Red
	0.845-0.885	30	Near-IR
	1.360-1.390	30	Cirrus
	1.560-1.660	30	SWIR-1
	2.100-2.300	30	SWIR-2
TIRS	10.60-11.20	100	LWIR-1
	11.50-12.50		LWIR-2

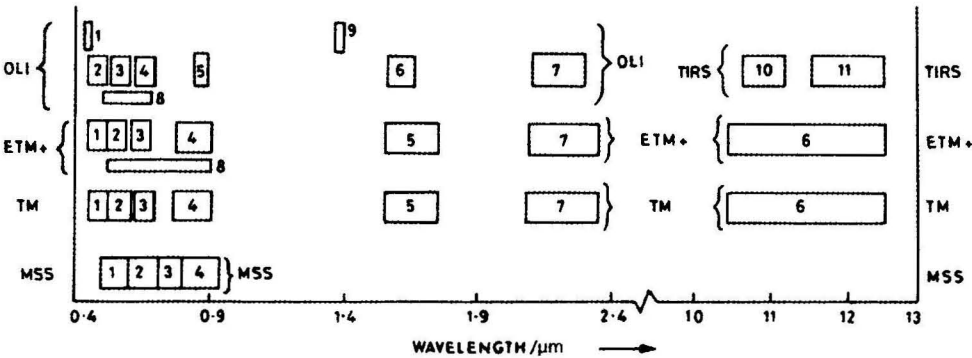


图 1 Landsat 系列载荷工作谱段对比 Fig. 1 Comparative spectral distribution of Landsat sensors

表 6 MTI 光谱波段及各个波段的技术指标

Table 6 Technical parameters of MTI		
Band no.	Spectral range/ μm	GSD/m
A	0.45-0.52	5
B	0.52-0.60	5
C	0.62-0.68	5
D	0.76-0.86	5
E	0.86-0.90	20
F	0.91-0.97	20
G	0.99-1.04	20
H	1.36-1.39	20
I	1.55-1.75	20
J	3.50-4.10	20
K	4.87-5.07	20
L	8.00-8.40	20
M	8.40-8.85	20
N	10.20-10.70	20
O	2.08-2.35	20

③绝对辐射定标精度：反射谱段为 3%，热发射谱段为 1%；

④视场：12 km×12 km（标称）；

⑤时间覆盖率：平均位置重访时间为 7 d，时间在 13:00 或 01:00±1 h；

⑥成像能力：每天 6 幅、成像两次、15 波段图像^[23-25]。

尽管 MTI 的发射时间仅比 ETM+ 和 MODIS 晚了一年，但它的设计方案在当时极为先进。MTI 采用了沿轨方向推扫的成像方式。焦面组件由 3 片探测器芯片成品字形拼接而成，每片探测器芯片集成了硅二极管、铟化铟、碲镉汞探测器用于可见光（A-D 每谱段 828 元）、近红外及中波红外（E-K、O 每谱段 207 元）、长波红外探测（L-N 每谱段 207 元），之上覆盖组合滤光片实现 15 个谱段的光谱细分。整个焦面组件由机械制冷机制冷到 75 K 工作。从技术指标看，MTI 的光谱覆盖范围比较全面，地面分辨率与 ETM+ 和 MODIS 相比具有明显优势，但在幅宽方面存在差距。

2.3 ASTER

先进空间热发射和反射辐射计（ASTER）是日本研制的遥感仪器，它于 1999 年搭载 NASA 的地球观测系统早期平台（EOS AM-1，后改名为 TERRA）上

发射。ASTER 主要科学目标是增进对地球表面或近地球表面和低层大气的了解，包括陆地表面和大气层的交界面局部规模和全地区规模的动态过程检测。ASTER 可在 3 个可见红外（VNIR）的谱段、6 个短波红外（SWIR）谱段和 5 个热红外（TIR）的谱段成像，可见红外（VNIR）的谱段和短波红外（SWIR）谱段采用推扫成像模式，热红外（TIR）的谱段采用摆扫成像模式。

ASTER 仪器系统设计的基本思想是，将整个系统划分成可见光和近红外（VNIR）、短波红外（SWIR）和热红外（TIR）3 个相对独立的子系统。每个子系统单独制造，通过机械安装，配准摄取地面图像。VNIR 和 SWIR 分别采用线列阵焦平面探测器件，按推扫式扫描方法成像。通过望远镜倾斜，实现穿轨迹方向瞄准。TIR 采用 10 元线列阵探测器的机械行扫描成像方法获取热红外图像。3 个光学子系统均由光学系统、分光装置、焦平面探测组件、定标组件、电源与信号处理电路等部分组成。SWIR 和 TIR 子系统还包括为探测器制冷的斯特林制冷机，TIR 子系统采用扫描反射镜在光学系统前面进行行扫描。

ASTER 的工作谱段参数见表 7。ASTER 幅宽 60 km，质量 406 kg，峰值功耗 726 W^[26]。

表 7 ASTER 谱段参数 Table 7 ASTER bands and GSD

Subsystem	Band no.	Spectral range/ μm	Spatial resolution/m
VNIR	1	0.52-0.60	15
	2	0.63-0.69	
	3	0.76-0.86	
SWIR	4	1.600-1.700	30
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
	9	2.360-2.430	
	10	8.125-8.475	
TIR	11	8.475-8.825	90
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

ASTER 将整个光谱覆盖范围分解到 3 个仪器（子系统）实现，达到了比较精细的工作谱段，降低了系统的研制难度，但是也带来了谱段之间配准的问题需要解决。ASTER 在 VNIR 和 SWIR 子系统采用了比较先进的长线列推扫方案，在 TIR 子系统则变为扫描镜垂轨扫描方案。ASTER 的空间分辨率优于同一卫星

的 MODIS，与 Landsat 系列相当，幅宽低于 MODIS 和 Landsat 系列。

2.4 HypsIRI 任务

高光谱红外成像仪（HypsIRI，Hyperspectral InfraRed Imager）任务是 NASA 于 2007 年提出的，目前正在研制之中。HypsIRI 由可见光短波红外成像光谱仪（VSWIR）和热红外成像仪（TIR）组成。可见光短波红外成像光谱仪主要用于海面成像应用，空间分辨率 30 m（@626 km 轨道），幅宽 185 km。采用 Offner 分光设计，谱段范围覆盖 380~2510 nm，谱段间隔小于 10 nm，光谱重叠和光谱弯曲大于 95%，通过月球定标和地面周期定标实现绝对辐射定标精度优于 5%。

热红外成像仪设置 8 个谱段，1 个中波位于 4 μm 处、7 个长波位于 7~13 μm 之间，具体见表 8。HypsIRI 的工作谱段与 Landsat 7/8 对比见图 2^[27]。与 ASTER 和 MODIS 类似，中波谱段最高可探测 1200 K，长波探测范围在 400~500 K，可用于火灾、火山及其它热源探测，测量精度分别为 0.5 K 和 0.2 K，所有谱段 14 bits 量化，60 m 空间分辨率，幅宽 600 km，重访周期为 5 d，具有在轨黑体标定和通过摆镜对冷空标定^[27-29]。

表 8 HypsIRI-TIR 探测谱段及范围

Table 8 HypsIRI bands and dynamic range

Band no.	Bands /μm	Bandwidth /μm
T1	3.98	0.08
T2	7.35	0.32
T3	8.28	0.34
T4	8.63	0.35
T5	9.07	0.36
T6	10.53	0.54
T7	11.33	0.54
T8	12.05	0.52

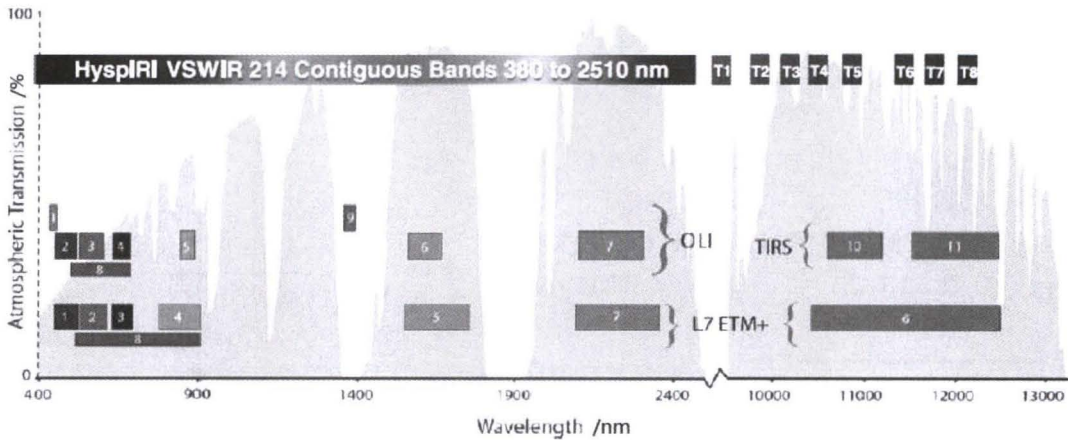


图 2 HypsIRI 探测谱段以及 Landsat 7、Landsat 8 的对比

Fig. 2 HypsIRI bands compared to Landsat 7, Landsat 8

HypsIRI 主要用于一些科学问题的研究，希望针对 Landsat 和 ASTER 业务运行上的不足，在热红外多光谱数据和全球覆盖方面进行改进。例如 Landsat 的热红外谱段只有一个，不是多光谱的（指 Landsat 8 之前），而 ASTER 不能提供系统性的全球覆盖。在载荷与谱段的搭配方面，HypsIRI 采用了与 Landsat 8 相似的设计思路，将可见、短波红外与热红外谱段的探测分开，各自由一台仪器实现。HypsIRI 采用了扫描镜垂轨扫描+多元并扫方案，每谱段并扫元数多达 256 像元。在技术指标方面，空间分辨率和幅宽与 Landsat 系列相比存在差距。HypsIRI 的技术方案相对保守，这可能与它的经费预算限制有关。

2.5 高分五号全谱段光谱成像仪

高分五号卫星于 2018 年 5 月 9 日发射入轨，全谱段光谱成像仪（VIMI，Visible and Infrared Multispectral Imager）作为星上的主载荷之一，可以获取地物从可见到长波红外的 12 个谱段的光谱信息，可见光、近红外、短波红外波段的空间分辨率为 20 m，中波、长波红外波段的空间分辨率为 40 m，幅宽为 60 km。特别是中、长波红外谱段可以实现对地表的昼夜连续观测，同时通过分裂窗谱段提高探测精度，全谱段光谱成像仪将在我国环境监测及资源调查等应用领域发挥重要作用，对水体、生态环境、国土资源进行综合监测，以满足环境保护、监测、监管、应急、评价、规划和资源调查等方面的需求^[30]。

在设计之初，全谱段光谱成像仪瞄准了国际上先进的 Landsat 8、MTI 等卫星载荷。从设计指标来看，全谱段光谱成像仪与资源一号卫星 01/02、03/04 星红外相机一脉相承，在谱段数量、空间分辨率、信噪比等重要指标上有了多项提升，可以说是 03/04 星红外相机的“升级版”。全谱段光谱成像仪主要技术参数见表 9，三维模型见图 3。

表9 全谱段光谱成像仪主要技术参数
Table 9 Key technical parameters of VIMI

Parameters	Specifications
Spectral range	B1:450-520 nm
	B2: 520-600 nm
	B3: 620-680 nm
	B4: 760-860 nm
	B5:1.55-1.75 μm
	B6:2.08-2.35 μm
	B7:3.50-3.90 μm
	B8:4.85-5.05 μm
	B9:8.01-8.39 μm
	B10:8.42-8.83 μm
	B11:10.3-11.3 μm
	B12:11.4-12.5 μm
Spatial resolution/m	≤20(0.45-2.35 μm)
	≤40(3.50-12.5 μm)
Swath/km	60
Quantization/bit	12

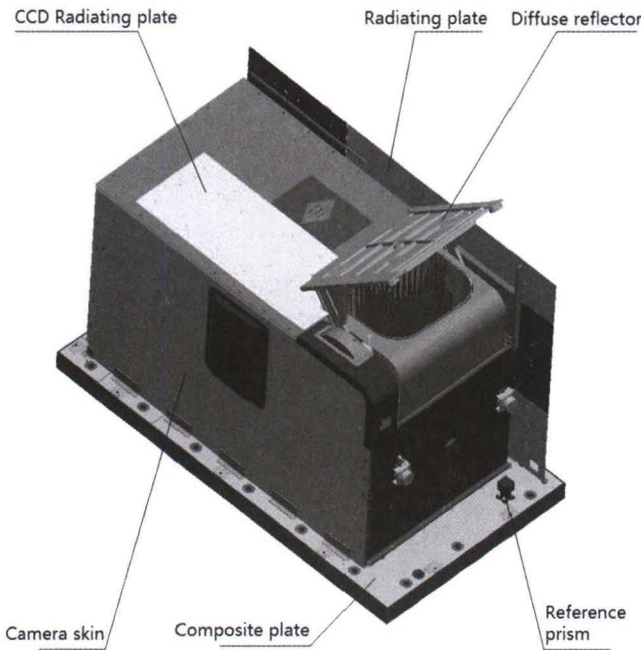


图3 全谱段光谱成像仪三维模型图
Fig.3 VIMI 3D model diagram

3 星载全谱段多光谱成像仪器的发展趋势

纵观国内外相关光学载荷的发展可以看出，随着遥感技术的不断发展，以陆地资源遥感卫星载荷为代表的全谱段多光谱成像仪器的性能和功能有明显提高和增强。经过近 30 年来的不懈努力，一个在全时空尺度上的空间对地观测系统和一个庞大的空间遥

感信息产业已在世界上构建起来。国际上基于卫星平台的全谱段多光谱成像仪器的发展具有如下特点：

1) 工作谱段覆盖越来越精细和全面

从国内外的技术发展现状来看，无论是日本的 ASTER 系列、还是美国的 Landsat 系列以及 MTI 等卫星，均具有覆盖可见光、近红外、短波红外、热红外的全谱段多光谱成像能力。从 Landsat 系列自身看，MSS 包括 4 个可见光近红外谱段；TM 包括 4 个可见光近红外谱段、2 个短波红外、1 个长波谱段；ETM+在 TM 的基础上增加了一个全色谱段；OLI/TIRS 包含 1 个全色谱段、5 个可见光近红外谱段、3 个短波红外、2 个长波谱段，与 ETM+相比增加了一个新的海岸带/气溶胶谱段和一个短波卷云谱段，将热红外谱段拆分为 2 个。四代多光谱仪器的工作谱段数量逐步增加，一些谱段的范围在原有基础之上进行细微调整和拆分。MODIS 的工作谱段多达 36 个，在范围广度上超越了 Landsat 系列，部分谱段与之相同或接近。ASTER、MTI 在谱段数量上都超过了 Landsat 系列，HyspIRI 更是在 380~2510 nm 范围具备高光谱成像能力。

2) 性能指标越来越高且逐渐采用推扫成像方式

人们对高分辨率遥感数据的需求推动着光学遥感技术不断进步，高分辨率不仅体现在高时间分辨率和高空间分辨率方面，对光谱分辨率、辐射分辨率以及定标精度等技术指标也提出了更高的要求^[31]。

本文讨论的多光谱仪器绝大多数运行在太阳同步轨道，除轨道外，时间分辨率还与仪器的幅宽和指向功能等因素有关。仅从设计指标看，Landsat 系列的重访周期为 16 d，ASTER 为 4~16 d，MODIS 为小于 2 d，MTI 为 7 d，HyspIRI 为 5 d，时间分辨率逐步提高。

空间分辨率方面，Landsat 8 和 ASTER 为 15 m/30 m/90 m，HyspIRI 为 60 m，MTI 为 5 m/20 m，全谱段光谱成像仪为 20 m/40 m，空间分辨率逐步提高。其他技术指标限于篇幅在本文不做讨论。

从国外先进全谱段成像仪器的发展可以看出，目前主要采用推扫成像的体制，同时大规模红外焦平面技术的发展和成熟使得采用上述成像体制成为了可能。采用推扫成像的方式不仅可以简化成像仪器的复杂程度，而且有利于提高成像仪的辐射分辨率和各谱段之间的几何配准精度。

以 Landsat 系列为例，MSS、TM、ETM+均为垂直轨道扫描成像，OLI/TIRS 发展为沿轨道长线列推扫成像。MTI 作为美国能源部的新技术展示项目，采用了多项先进技术，包括推扫成像、高度集成的大规模

焦平面探测器、机械制冷机等,堪称推扫型多光谱成像仪器的经典设计。

3) 定标手段越来越全、量化应用水平越来越高越来越多的遥感仪器不仅地面标定手段越来越多,定标精度也越来越高,在轨的定标措施也越来越多,对于可见近红外及短波红外,往往采用全口径太阳定标,对于红外定标也采用全口径多点定标。

Landsat 系列的辐射定标精度从 MSS 和 TM 的 10%到 ETM+的 5%再到 OLI 的 3%,稳步提高。

Landsat 系列的在轨定标手段越来越全面。MSS 的星上定标装置(IC, Internal Calibrator)由一对定标灯和旋转快门构成。TM 的星上定标装置(IC)由一个黑快门、3 个定标灯、一个腔式黑体及光学组件构成。ETM+增加了 2 个定标装置:全口径定标装置(FASC)和部分口径定标装置(PASC)。OLI 除了使用星上定标灯和 2 个全口径太阳漫反射板外,还会每月对月亮进行定标。丰富的定标手段也为仪器的量化应用提供了保障。

4) 注重空间对地观测数据的持续性和稳定性以美国陆地系列卫星为代表的遥感数据在国际市场上得到十分广泛的应用,成为全球最大量的资源卫星数据的提供者。

在陆地资源卫星几十年的发展过程中,评价其作用最重要的指标就是图像数据的持续性及稳定性。

这种连续性和稳定性体现在不片面的追求过高的空间分辨率,仪器指标的设置综合考虑应用需求以及指标的继承性。

Landsat 4~8 均具有相同的轨道,空间分辨率从 TM 的 30 m/120 m 到 ETM+的 15 m/30 m/60 m 再到 OLI/TIRS 的 15 m/30 m/90 m,工作谱段在继承原有基础之上进行拓展和细分,这样较好地保证了图像数据的持续性及稳定性,这一点从 Landsat 8 最早命名为 Landsat Data Continuity Mission(LDCM)也可见一斑。另外,ASTER 的空间分辨率同样为 15 m/30 m/90 m,在短波和长波谱段对 ETM+形成了细化和补充。

4 结束语

从可见光到热红外全谱段探测的多光谱成像仪器是目前得到广泛研究及应用的成像光谱仪器。这类仪器在国土资源、环境监测、城市遥感、海洋监管等方面均有较高的应用价值。本文概述了此类仪器的国内外研究发展现状,通过对一些代表性仪器的整理和分析,认为更加全面和精细的光谱覆盖、成像方式的改进与技术指标提高、定标手段和量化水平提高、数据的持续性及稳定性是未来发展的趋势。

参考文献:

[1] 苏丽娟. 成像光谱仪分光技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006: 1-2.
SU Lijuan. The Beam Splitting Technologies of Imaging Spectroscopy[D]. Xi'an: Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, 2006: 1-2.

[2] 李欢, 周峰. 星载超光谱成像技术发展展望[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(5): 38-44.
LI Huan, ZHOU Feng. Developments of spaceborne hyperspectral imaging technique[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(5): 38-44.

[3] Thomas S Pagano, Rodney M Durham. Moderate resolution imaging spectroradiometer(MODIS)[C]// SPIE, 1993, 1939: 2-17.

[4] Barnes W. An overview of MODIS radiometric calibration and characterization[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2006, 23(1): 69-79.

[5] XIONG X, Angal A, WU A, et al. Terra and Aqua MODIS instrument performance[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium Of IEEE, 2016: 7388-7391.

[6] XIONG X, CHE N, Barnes W L. Terra MODIS on-orbit spectral characterization and performance[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006, 44(8): 2198-2206.

[7] 唐绍凡, 邓德斌, 王健. 资源后继星短波红外器件需求分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(z1): 137-140.
TANG Shaofan, DENG Debin, WANG Jian. Earth resources subsequence satellite short-wave infrared FPA speciality analysis[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(z1): 137-140.

[8] 张庆君, 马世俊. 中巴地球资源卫星成就与发展[J]. 航天器工程, 2009, 18(4): 1-8.
ZHANG Qingjun, MA Shijun. Achievements and progress of China-Brazil earth resource satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(4): 1-8.

[9] 马文坡. 红外多光谱扫描仪设计与评价[J]. 红外技术, 2002, 24(5): 1-4.
MA Wenpo. Design and evaluation of IRMSS[J]. Infrared Technology, 2002, 24(5): 1-4.

[10] 熊文成, 魏斌, 孙中平, 等. 基于环境一号卫星B星 CCD 与红外相机融合的澳洲火灾监测[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2): 178-182.
XIONG Wencheng, WEI Bin, SUN Zhongping, et al. Australian forest fire disaster monitoring based on CCD and IRS data of HJ-1-B[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(2): 178-182.

[11] QIAO W, WU C Q, LI Q, et al. Chinese HJ-1A/B satellites and data characteristics[J]. Science China Earth Sciences, 2010, 53(s1): 51-57.

[12] 白照广, 李一凡, 杨文涛. 中国海洋卫星技术成就与展望[J]. 航天器工程, 2008, 17(4): 17-23.

BAI Zhaoguang, LI Yifan, YANG Wentao. Achievements and prospect of China's ocean satellites[J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 17(4): 17-23.

[13] JIN Y Q, LU N, LIN M. Advancement of Chinese meteorological Feng-Yun (FY) and oceanic Hai-Yang (HY) satellite remote sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 844-861.

[14] 陈桂林, 栾炳辉. FY-2C 星多通道扫描辐射计及其在轨运行[J]. *上海航天*, 2005, 22(z1): 21-27.

CHEN Guilin, RUAN Binhui. Multichannel scanning radiometer of FY-2C meteorological satellite and its on-orbit operation[J]. *Aerospace Erospace Shanghai*, 2005, 22(z1): 21-27.

[15] Thome Kurtis, Tesfaye Zelalem, Smith Ramsey, et al. The operational land imager (OLI) and the thermal infrared sensor (TIRS) on the landsat data continuity mission (LDCM) [C]//*SPIE*, 2011, 8048: 1-12.

[16] Gupta R P. Important spaceborne missions and multispectral sensors[M]// *Remote Sensing Geology*, 2018.

[17] Kuenzer C, GUO H, Ottinger M, et al. Spaceborne thermal infrared observation – an overview of most frequently used sensors for applied research[M]//*Thermal Infrared Remote Sensing*, Springer Netherlands, 2013: 131-148.

[18] 赵秋艳. 几种新型的星载多光谱和成像光谱仪[J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(1): 36-41.

ZHAO Qiuyan. Introduction of several multi-spectral and imaging spectrometers for satellites[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(1): 36-41.

[19] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893-903.

[20] Markham B L, Knight E J, Canova B, et al. The Landsat data continuity mission operational land imager (OLI) sensor[C]//*Geoscience and Remote Sensing Symposium of IEEE*, 2012: 6995-6998.

[21] Markham B, Barsi J, Kvaran G, et al. Landsat-8 operational land imager radiometric calibration and stability[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(12): 12275-12308.

[22] Barsi J, Schott J, Hook S, et al. Landsat-8 thermal infrared sensor (TIRS) vicarious radiometric calibration[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 11607-11626.

[23] Rex R Kay, Brian C Brock, Tammy D Henson, et al. An introduction to the department of energy's multispectral thermal imager (MTI) project emphasizing the imaging and calibration subsystems[C/OL]//12th AIAA/USU Conference on Small Satellites, https://www.researchgate.net/publication/267419955_An_Introduction_to_the_Department_of_Energy%27s_Multispectral_Thermal_Imager_MTI_Project_Emphasizing_the_Imaging_and_Calibration_Subsystems.

[24] Weber P G. Multispectral thermal imager: overview[J]. *Proceedings of SPIE*, 2001, 4381:173-183.

[25] Szymanski J J, Weber P G. Multispectral thermal imager: mission and applications overview[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2005, 43(9): 1943-1949.

[26] Fujisada H, Sakuma F, Ono A, et al. Design and preflight performance of ASTER instrument protoflight model[C]//*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36: 1152-1160.

[27] Christine M Lee, Morgan L Cablea, Simon J Hooka, et al. An introduction to the NASA hyperspectral infrared imager (HyspIRI) mission and preparatory activities[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 167: 6-19.

[28] Bruno Jau, Bjorn T Eng, Marc Foote, et al. Infrared instrument support for HyspIRI-TIR[C]//*SPIE*, 2012, 8511: 1-7.

[29] Abrams M J, Hook S J. NASA's hyperspectral infrared imager (HyspIRI)[M]//*Thermal Infrared Remote Sensing*, Springer Netherlands, 2013:117-130.

[30] 赵艳华, 戴立群, 白绍竣, 等. 全谱段光谱成像仪集成设计技术先进性分析[C]//第四届高分辨率对地观测学术年会, 2017: 1-10.

ZHAO Yanhua, DAI Liqun, BAI Shaojun, et al. Analysis on the advancedness of integrated design technology of visual and infrared multispectral sensor[C]//*The 4th China high resolution earth observation conference*, 2017: 1-10.

[31] 武佳丽, 余涛, 顾行发, 等. 中国资源卫星现状与应用趋势概述[J]. *遥感信息*, 2008(6): 96-101.

WU Jiali, YU Tao, GU Xingfa, et al. Status and application trend of Chinese earth resources satellites[J]. *Remote Sensing Information*, 2008(6): 96-101.