

# 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展

刘银年

中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083

**摘要:** 高光谱成像技术可同时获取地物的几何、辐射和光谱信息, 集相机、辐射计和光谱仪能力于一体, 相比光学空间二维成像, 可对地物进行空间和光谱三维成像, 在一定的空间分辨率下, 获取宽波段范围内地物独特的连续特征光谱, 对地物的精细分类和识别具有突出的优势, 目前已成为对地遥感的重要前沿技术手段, 在自然资源调查、生态环境监测、农林牧渔、海洋与海岸带监测等领域发挥着越来越重要的作用。随着高光谱遥感应用的深入研究, 对高光谱成像遥感仪器的光谱范围、幅宽、光谱分辨率、空间分辨率、时间分辨率与定标精度等指标提出了新的要求。同时满足这些相互制约的参数指标, 是国内外高光谱载荷研制中一直难以突破的技术难点。本文主要对国内外的高光谱成像遥感载荷技术进行了综述, 介绍了国内外典型的机载、星载高光谱成像遥感仪器, 以及近年来发射、正在研制和计划发展的星载高光谱成像载荷, 并分析了这些载荷的技术方案、性能指标和应用效果; 介绍了声光调谐 (AOTF)、液晶调谐 (LCTF)、法布里-珀罗调谐 (FPTF), 渐变式 (LVF) 和阶跃式 (ISF) 光楔滤光片, 压缩感知光谱成像等新型分光技术, 并分析了它们各自的技术优缺点以及应用于高光谱成像的可行性和现状; 最后展望了高光谱成像载荷技术的发展趋势。

**关键词:** 遥感, 高光谱成像, 遥感载荷技术, 宽谱, 宽幅, 高分辨率

**引用格式:** 刘银年. 2021. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展. 遥感学报, 25(1): 439-459

Liu Y N. 2021. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology. National Remote Sensing Bulletin, 25(1): 439-459 [DOI: 10.11834/jrs.20210283]

## 1 引言

人类第一次认识到光的光谱特征是 1665 年牛顿进行的太阳光实验, 他通过棱镜把太阳光分解成按一定顺序排列的不同颜色光, 了解到白光其实是由多种单色光组合而成的。真正意义上的光谱和图像结合为一体的成像光谱仪器, 是 1983 年美国喷气式实验室研制的第一台航空成像光谱仪 AIS-1。随后的数十年, 光谱成像技术得到了快速发展, 包括中国在内的许多国家都成功研制了一系列成像光谱仪 (王建宇等, 1992; 刘银年等, 2002; Tong 等, 2014; Transon 等, 2018)。

高光谱成像技术是指可在宽波段范围内获取目标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, 形成图像立方体, 实现地物的“指纹”识别。与传统的全色及多光谱遥感技术相比, 高光谱遥感技术主要有如下特点:

(1) 光谱分辨率高, 成像波段多; 高光谱成像光谱仪的光谱通道按波长连续分布在较宽的光谱范围内, 其光谱分辨率一般在  $\lambda/100$  左右。高光谱成像仪的光谱采样间隔越小, 光谱分辨率越高, 获取的光谱信息越精细, 更能反映出地物光谱的细微特征。

(2) “图谱合一”的成像技术; 可同时采集地物的几何、辐射及光谱信息, 集相机、辐射计和光谱仪能力于一体, 形成图像数据立方体, 通过目标的光谱特征曲线, 实现目标的“指纹”识别。

(3) 具有突出的地物识别和分类能力; 相比光学空间二维成像, 可对地物进行空间和光谱三维成像, 在一定的空间分辨率下, 获取宽波段范围内地物独特的连续特征光谱, 对地物的精细分类和识别具有突出的优势。

由于高光谱成像技术具有“谱像融合”的特点, 既能成像又能测谱, 能够获取地物的光谱

收稿日期: 2020-07-15; 预印本: 2020-09-25

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2016YFB0500400); 国家高分辨率对地观测系统重大专项 (编号: A0106/1112); 国家 863 计划 (编号: 2008AA121101)

第一作者简介: 刘银年, 1971 年生, 男, 研究员, 研究方向为高光谱遥感成像技术。E-mail: ynlIU@mail.sitp.ac.cn

“指纹”信息，在地物精确分类和识别等应用方面有巨大的优势，因此，高光谱成像技术被广泛应用于卫星遥感、地质勘测、海洋研究、植被研究、大气探测和生物医学等领域（马国欣等，2008；Li等，2012；童庆禧等，2016；刘银年等，2019），并已成为遥感领域持续的研究热点。

## 2 机载高光谱成像仪器的发展

自20世纪80年代初期，美国NASA JPL成功研制出第一台机载成像光谱仪AIS（Airborne Imaging Spectrometer）（Vane等，1984），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，高光谱成像技术得到了快速发展（季艳，2006；Michael，2006；袁孝康，2004；麻永平等，2012；王捷等，2012；单月晖等，2006）。

1987年，为了获取光谱和空间覆盖范围更广的数据，美国JPL开发了机载可见光/红外成像光谱仪AVIRIS（Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer）（Vane，1987），安装在ER-2飞机上，成为第1台被用于民用领域的机载高光谱传感器，采用线列探测器和摆扫的方式，具有224个谱段，光谱范围为0.41—2.45  $\mu\text{m}$ ，光谱分辨率为10 nm。AVIRIS仪器进行了持续的改进提升，因其优越的性能，被作为各类应用评价的标准（崔廷伟等，2003；Asner和Heidebrecht，2003；van Wagendonk等，2004；Cheng等，2006a，b；Veraverbeke等，2014；Seidel等，2018）。最新一代AVIRIS-NG具有425个通道，光谱分辨率提高至5 nm，光谱范围0.38—2.51  $\mu\text{m}$ ，目前仍被认为是全世界最先进的机载高光谱成像仪之一（Tripathi和Govil，2019）。

1989年，加拿大的ITRES Research公司推出了小型机载成像光谱仪CASI（Compact Airborne Spectrographic Imager）。CASI（Babey和Anger，1993）的波段数量、位置和高度都可在飞行中编程，还可以结合陀螺仪和GPS对图像数据进行几何校正。1993年，芬兰Specim公司制造了推扫式成像系统AISA（Makisara等，1993），该系统由高光谱成像仪、微型GPS/INS传感器和PC数据获取单元组成。装载在飞机上，是既能对地面目标成像又可以测量目标光谱特性的光学探测器。

1997年，澳大利亚集成光电公司ISPL研制生产了机载扫描成像光谱仪HyMap（Cocks等，1998），并开始应用于商业勘探，在地质勘探领域

特别是矿物填图方面得到了广泛应用（Hörig等，2001）。该仪器配有导航定位系统（GPS）、定位和姿态参数记录设备（IMU）、三轴稳定陀螺平台以及先进的数据预处理系统，可根据飞行获取的姿态参数和大气参数，对图像进行几何和大气校正。经过多年的发展，HyMap已成为新一代实用型机载高光谱成像仪的代表之一。

2003年，慕尼黑大学研制出一款机载可见、红外成像光谱仪AVIS-2（Mauser，2003），研制过程中对体积、重量进行了优化以保证其可在超轻型飞机中的应用。2004年，美国斯登尼斯空间中心研制出海岸研究成像光谱仪CRIS（Williams，2003），这是一台用来研究近海水的物理、化学和生物特性的推帚式机载光谱仪。CRIS由可见光高光谱成像和红外成像两个分系统组成。可见光高光谱成像分系统由光栅光谱仪和CCD探测器组成，用于测量水色，以获取水中的生物群、泥沙和营养含量等信息；红外成像分系统工作波段的波长为8.0—10.0  $\mu\text{m}$ ，用于获取水温信息。将可见光和红外信息相结合，便可研究由陆地通向海洋的天然和人工水流，包括含生物、化学污染物质的分散型和点源型水流的生物效应。2005年，欧洲瑞士和比利时共同研制出机载成像光谱仪APEX（Airborne PRISM experiment）。该仪器1997年开始设计，目的是为了模拟欧洲宇航局ESA的PRODEX计划中的星载光谱成像仪，并可作为辐射传递标准为星载光谱成像仪提供依据和定标（Itten等，2008；Schaepman等，2015）。

随着探测材料、器件工艺和电子信息获取及处理技术的发展，机载光谱成像技术日渐成熟，很多国家都研制出了各自的特色光谱成像仪器，目前机载光谱成像仪已发展到商业运营阶段。国际上研发生产机载光谱成像仪的公司主要有美国的Spectra Vista Corporation（SVC），芬兰的Specim，加拿大的ITRES Research等，其中Specim的AISA和ITRES的CASI是目前商业化程度较好的机载光谱成像系统。表1、2列出了典型的系统指标。

中国从20世纪80年代就开始机载成像光谱仪的研制，研究发展基本与国际同步，由中国科学院上海技术物理研究所（以下简称中科院上海技物所）研制的MAIS，OMIS，PHI等机载成像光谱仪（Wang和Xue，1998；刘银年等，2002），性能指标（表3）达到了国际先进水平。

表1 国外典型机载成像光谱仪技术指标  
Table 1 Parameters of typical abroad airborne imaging spectrometers

型号	AIS-1	AVIRIS	AVIRIS-NG	HyMap	AVIS-2	APEX
光谱范围/ $\mu\text{m}$	0.44—2.4	0.38—2.5	0.38—2.51	0.45—2.48	0.4—0.85	0.4—2.5
光谱通道数	128	224	425	100~200	64	300
波段带宽/nm	9.3	9.7—12.0	8.1	10—20	7.0	5—10
瞬时视场/mrad	1.91	1.0	1.0	2.0	2.2	0.48
总视场/ $^\circ$	3.7	30	34.4	60	55	14
扫描方式	推扫式	推扫式	推扫式	摆扫式	摆扫式	推扫式
分光方式	光栅	光栅	光栅	光栅	光栅	棱镜
公司/机构	NASA/JPL	JPL	NASA/JPL	ISPL	慕尼黑大学	瑞士—比利时
年份	1982	1987	2012	1997	2003	2005

表2 国外典型商业化机载成像光谱仪指标参数  
Table 2 Parameters of typical abroad commercial airborne imaging spectrometers

型号	CASI-1500	SASI-1000A	MASI-600	TASI-600	AISA FENIX	AISA KESTREL 16	AISA IBIS	AISA OWL
光谱范围/ $\mu\text{m}$	0.38—1.05	0.95—2.45	3.0—5.0	8.0—11.5	0.38—2.5	0.6—1.64	0.67—0.78	7.7—12.3
光谱通道数	288	200	64	32	361/448/622	378/189	1000/500	100
空间像元	1500	1000	600	600	384	640	384/768	384
视场角/ $^\circ$	40	40	40	40	32.3	40	32.3	24/32.3
F数	3.5—18	2.4	2	2	2.4	2.4	1.7	2
光谱分辨率/nm	3.5	7.5	32	110	1.7/3.4/6.8,5.7	2.75/5.5	0.11/0.22	48
分光方式	光栅	光栅	光栅	光栅	P-G-P	P-G-P	P-G-P	P-G-P

注：P-G-P：棱镜+光栅+棱镜。

表3 国内典型机载成像光谱仪指标参数  
Table 3 Parameters of typical domestic airborne imaging spectrometers

型号	OMIS	PHI	JVNIR/ SWIR	JLWIR
光谱范围/ $\mu\text{m}$	0.4—12.5	0.4—0.85	0.39—2.50	8—12.5
光谱通道数	128	244	490	75
空间像元	512	367	2048/2048	320
视场角/ $^\circ$	73	42	61	60.5
光谱分辨率/nm	10	5	2.2—8.6	60
分光方式	光栅	光栅	光栅	光栅

1990年，中科院上海技物所研制出中国第一台机载高光谱成像仪MAIS (Modular Airborne Imaging Spectrometer) (Tong等, 2014)，由可见/近红外(0.44—1.08  $\mu\text{m}$ )、短波红外(0.5—2.45  $\mu\text{m}$ )和热红外(8—11.6  $\mu\text{m}$ ) 3个独立的光谱仪组成，光谱通道数分别为32、32、7，光谱分辨率为20 nm、25 nm、450 nm，并进行了航空试验。1998年，中科院上海技物所研制出实用型模块化成像光谱仪OMIS

(Operational Module Imaging Spectrometer)，其使用平面光栅结合线列探测器通过光机扫描，波段包含可见光、近红外、短波红外、中波红外和长波红外(0.4—12.5  $\mu\text{m}$ )，可获取128个通道的光谱图像数据，总视场角 $70^\circ$ ，瞬时视场角3.0 mrad。之后又成功研制出使用面阵CCD的推帚式高光谱成像仪PHI (Pushbroom Hyperspectral Imagers)，在0.4—0.85  $\mu\text{m}$ 光谱范围内分辨率优于5 nm，共244个光谱通道数，总视场角 $21^\circ$ ，瞬时视场角1.5 mrad，重量仅9 kg。并进一步研制出宽视场面阵CCD高光谱成像仪WHI (Wide angle Pushbroom Hyperspectral Imager)，行像元数增加到1304个，瞬时视场角0.6 mrad，总视场角扩展到 $42^\circ$ 。

MAIS、OMIS、PHI等成像光谱仪在国内地质找矿、环境监测、城市规划、土地分类、精细农业遥感等方面进行了大量的遥感飞行试验及应用，体现了高光谱成像技术重要的应用价值(Tong等, 2014)。2005年中国科学院上海技术物理研究所向马来西亚出口了机载成像光谱仪(OMIS-II)，实现了中国机载遥感仪器出口零的突破，并先后在



美国、法国、澳大利亚和日本等国进行了遥感飞行作业。高光谱载荷不仅可以清楚地将不同的农作物做精细分类,而且可以判断农作物的长势阶段,此外,还可以识别屋顶上不同钢材的来源(图1),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。

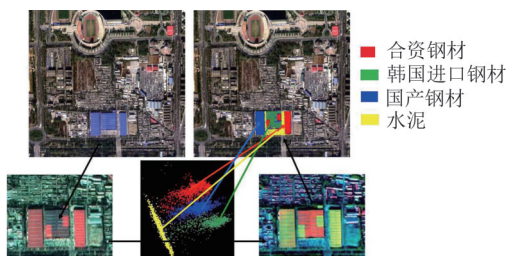


图1 OMIS-II获取的屋顶不同钢材光谱图(Tong等,2014)

Fig.1 Identification the different roof steel by OMIS-II (Tong et al., 2014)

在“十二五”国家高技术研究发展计划中,中科院上海技物所承担了覆盖从可见到长波红外波段的机载标准载荷的研制。研制的机载宽幅高光谱红外成像测试标准载荷具有自定标系统,用于开展实验室、测试外场、星载高光谱红外成像一致性传递定标验证试验,支撑高光谱成像技术定量化应用。所研发的JV NIR/JSWIR机载可见近红外短波高光谱成像载荷,平均光谱分辨率达到4.3 nm、总视场角达到61°、空间分辨率达到0.5 m@1 km,主要性能指标(表2)高于国外最新的AVIRIS-NG (Tripathi和Govil, 2019),研发的JLWIR机载热红外成像光谱仪,光谱分辨率达

到60 nm、总视场角达到60.5°、空间分辨率达到0.5 m@1 km km,主要性能指标(表3)高于国外先进典型仪器TASI-600 (Achal等, 2007)。

### 3 星载高光谱成像仪器的发展

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研究。表4、5列出国外已发射及在研的典型星载高光谱成像仪。根据不同的工作原理,主要可将其分成色散型(色散棱镜和衍射光栅型)和干涉型。典型代表仪器如下:

(1) MightySatII.1/FTHSI: 2000-07-19,美国空军研究实验室(AFRL)发射的MightySatII.1卫星搭载的FTHSI是第一台星载的基于傅立叶干涉分光技术的高光谱成像仪(Yarbrough等, 2002)。轨道高度547 km,每次成像可以获取地面15 km×20 km的高光谱图像。该仪器可以在0.47—1.05 μm光谱范围提供146个光谱通道,光谱分辨率1.9—9.3 nm,地面分辨率30 m,视场3°。

(2) EO-1/Hyperion: 2000-11-21,美国发射了地球观测卫星1号(EO-1),其上搭载的Hyperion高光谱成像仪(Pearlman等, 2003)采用了Offner凸面光栅分光技术。Hyperion的刈幅宽度7.5 km,空间分辨率30 m,光谱范围0.4—2.5 μm,光学口径125 mm,共有220个谱段,光谱分辨率10 nm。Hyperion是民用航天遥感领域第一台色散型星载高光谱成像仪,卫星发射入轨后,在采矿、地质、森林、农业以及环境保护领域得到了广泛的应用。

表4 国外已发射的经典星载高光谱遥感仪器参数

Table 4 Parameters of typical abroad spaceborne hyperspectral remote sensing satellites

仪器名称	EO-1 /Hyperion	PROBA-1 /CHRIS	Mighty Sat II /FTHSI	MRO /CRISM	Chandrayaan-1 /M3	IMS-1 /HYSI	HTV/HREP-HICO	Resurs-P3 /GSA
国家	美国	ESA	美国	美国	美国	印度	美国	俄罗斯
发射时间	2000	2001	2000	2005	2008	2008	2009	2016
轨道高度/km	705	550—670	547	325	100	—	350—460	477
波段范围/μm	0.4—2.5	0.4—1.05	0.47—1.05	0.4—4.05	0.42—3	0.4—0.95	0.35—1.08	0.4—1.1
光谱通道数	220	62	146	558	260	64	128	216
光谱分辨率/nm	10	1.25—11	1.9—9.3	7/8	10	10	5.7	5—10
空间分辨率/m	30	17/34	30	<50	100	506	90	25—30
幅宽/km	7.5	13—15	30	>10	40	129.5	42	30
分光方式	光栅	棱镜	傅立叶干涉	光栅	光栅	—	—	—

表5 国外现阶段已发射及在研星载高光谱遥感仪器参数

Table 5 Parameters of present (launched/in study) abroad spaceborne hyperspectral remote sensing satellites

仪器名称	DESI	HySIS	PRISMA	HISUI	EnMAP	HYPXIM CA	SHALOM	MSMI	HSK
国家	德国	印度	意大利	日本	德国	法国	意大利/以色列	南非	土耳其
发射时间	2018	2018	2019	~2020	~2020	~2020	~2021	—	—
轨道高度/km	400	630	615	410	652	650	600	660	700
波段范围/ $\mu\text{m}$	0.4—1.0	0.4—2.4	0.4—2.5	0.4—2.5	0.42—2.45	0.4—2.5	0.4—2.7	0.44—2.35	0.4—2.5
光谱通道数	235	70+256	238	185	228	>200	241	200	>210
光谱分辨率/nm	2.55	<10	12	10/12.5	6.5—10	10	~10	10	—
空间分辨率/m	30	30	30	31	30	10—15	10	15	<30
幅宽/km	30	30	30	20	30	30	10	15	>30
分光方式	光栅	—	棱镜	光栅	棱镜	棱镜	光栅	—	棱镜

(3) PROBA-1/CHRIS: 2001-10-22, 欧空局发射了PROBA-1 (Barnsley等, 2004) 卫星, 其上搭载了一个紧凑式高分辨率成像仪 (CHRIS), 采用离轴三反望远镜加曲面棱镜分光光谱仪和 CCD探测器的总体技术方案, CCD探测器上 150 行光敏阵列用来进行光谱成像, 其余的阵用来进行图像校正。以推扫的方式获取可见-近红外光谱数据, 成像光谱范围 0.4—1.05  $\mu\text{m}$ , 光谱分辨率 1.25—11 nm, 光谱波段数最高可达 150 个, 空间分辨率 34 m, 在轨可配置为 63 个光谱谱段, 具有成像模式多、光谱范围宽、分辨率高等特点。CHRIS 可以获取多角度数据, 对同一地点在 2.5 min 内可形成 5 个不同角度成像, 分别为  $-55^\circ$ 、 $-36^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $36^\circ$  和  $55^\circ$ , 它也是目前世界上唯一可以同时获取高光谱和多角度数据的星载高光谱成像仪。

此后, 美国、印度、俄罗斯等国家陆续发射了一些针对不同应用领域的高光谱成像仪, 多数为光栅衍射型, 主要包括:

(1) MRO/CRISM: MRO (Mars Reconnaissance Orbit) 是由 JPL 于 2005-08-12 发射的多功能火星探测卫星, 星上搭载了紧凑探测成像火星光谱仪 (CRISM) (Murchie等, 2007), 目的是为了观测火星表面矿物水残留的痕迹, 从而寻找火星远古水的踪迹。该光谱仪覆盖的光谱范围为 0.4—4.05  $\mu\text{m}$ , 光谱通道数达 544 个, 光谱分辨率达 7—8 nm, 空间分辨率 15.7—19.7 m。

(2) Chandrayaan-1 (月船 1 号) /M3 和 HySI: Chandrayaan-1 是印度第一颗探月卫星, 在 2008-10-22 发射。星上搭载了月球矿物制图仪 M3 (Green等, 2011), 由美国布朗大学和 JPL 研制。和其他月球

光谱探测仪不同, 其光谱范围扩展到了 2.5—3  $\mu\text{m}$  的波段, 以探测少量 OH 和  $\text{H}_2\text{O}$  成分的存在。M3 采用多闪耀凸面光栅分光, 具有两个工作模式, 在目标模式中, 它的光谱通道数可以达到 260 个, 在低分辨率全域模式中, 它的光谱通道数减少到 85 个, 且探测范围可以覆盖月球表面 95%。M3 的空间分辨率在目标模式中达到 70 m, 在低分辨率全域模式中减少到 140 m。该卫星上还搭载了同年的 IMS-1 实验卫星中搭载过的 HySI (Hyper Spectral Imager) 高光谱成像仪, 由印度自主研制, 采用线性渐变滤光片分光, 在 0.4—0.9  $\mu\text{m}$  波段内空间分辨率 80 m, 光谱分辨率达到 15 nm, 光谱通道数 64 个。

(3) H2-TransferVehicle (HTV) /HREP-HICO: HREP-HICO (Hyperspectral Imager for the Costal and Ocean) 是 NASA 一个实验项目, 该载荷于 2009-10-09 通过日本货运飞船 H2-TransferVehicle (日语别称 Kounotori) 运输到国际空间站 (Corson等, 2008)。该载荷的设计目的是探测海岸带和陆地地球物理特征, 轨道高度 350—400 km, 有效波段范围是在 0.4—0.9  $\mu\text{m}$ , 光谱通道数有数百个, 刈幅宽为 48 km。分光方式采用了 Offner 型光谱仪, 光谱分辨率为 5.7 nm。

(4) 俄罗斯资源卫星星座 Resurs-P1/P2/P3/P4/P5 ([https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/resurs-p.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/resurs-p.htm) [2020-07-15]): Resurs-P1/P2/P3 分别于 2013-06-25、2014-12-26 和 2016-03-13 发射, Resurs-P1/P2/P3 上均搭载了一个高光谱载荷 (GSA)。Resurs-P3 上的 GSA 载荷地面分辨率 25—30 m, 幅宽 30 km。同时, 比 Resurs-P3 卫星具备更高分辨能力的后续卫

星 Resurs-P4、P5 也在规划中, 预计将于 2020 年发射。该系列卫星可为俄罗斯自然资源与环境、应急、农业、渔业、水利气象机构等服务。

以 EO-1/Hyperion 为代表的上述高光谱成像仪取得了广泛的应用, 证明了高光谱成像技术在遥感领域应用的可行性和潜力, 但受限于幅宽较小、光谱通道数较少、信噪比较低等问题, 获取的数据数量和质量仍无法满足高光谱技术的应用需求 (Krishna 等, 2018; Nink 等, 2015; Peón 等, 2017)。因此, 为更好地挖掘光谱成像技术的潜在应用, 德国、日本、意大利、印度、法国在内的很多国家和机构均制定了性能更为先进的高光谱卫星发展规划, 且均为色散型, 分光方式选用棱镜或 Offner 类光栅。典型仪器如下:

(1) 德国 EnMAP (The Environmental Mapping and Analysis Program) 和 DESIS (DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer): 2006 年, 德国航空署批准了 EnMAP 计划 (Hofer 等, 2007), 并计划于 2012 年发射。不过, 后期因技术问题, 该计划多次推迟, 目前预计于 2020 年发射。EnMAP 卫星轨道高度 652 km, 它采用基于棱镜的双光谱仪设计, 光谱范围覆盖 0.42—2.45  $\mu\text{m}$ , 光谱通道数为 230 个, 可见光—近红外的光谱分辨率为 6.5 nm, 短波红外的光谱分辨率为 10 nm, 空间分辨率 30 m, 幅宽 30 km。此外, 该卫星的侧视指向能力高达 30°, 这将保证其目标的重访周期为 4 d, 其光路图如图 2 所示 (Sang 等, 2008)。2018-09, 由德国航空航天中心 (DLR) 负责研制, 美国特利丹公司 (TBE) 负责运营的 DESIS 高光谱成像仪 (Krutz 等, 2018) 被发射至国际空间站 (ISS), 其波长覆盖范围 0.4—1.0  $\mu\text{m}$ , 光谱通道数 235 个, 地面分辨率 30 m, 光谱分辨率 2.55 nm, 幅宽 30 km。其光谱仪结构如图 3 所示 (Krutz 等, 2018), 采用 Offner 二元平面光栅进行分光, 以提高衍射效率, 进而提高信噪比。

(2) 日本 ALOS-3/HISUI (Hyperspectral Imager SUite): HISUI 是日本发展的第 4 代高光谱载荷 (Tanii 等, 2016), 其波段范围覆盖 0.4—2.5  $\mu\text{m}$ , 具有 185 个波段, 空间分辨率 30 m, 刈幅宽 30 km。该载荷由一个反射望远镜和两个光栅分光的光谱仪组成, 载荷为了实现高信噪比 (可见近红外波段 450, 短波红外 300), 设计的望远镜 F 数为 2.2,

同时采用了反射式光栅结构以减小杂光的影响。HISUI 最初计划于 2014 年发射, 后期也因技术问题推迟, 目前预计于 2020 年由 SpaceX 的 Falcon-9 火箭发射到国际空间站进行为期三年的工作。其光学和定标组件示意图如图 4 所示 (Tanii 等, 2012)。

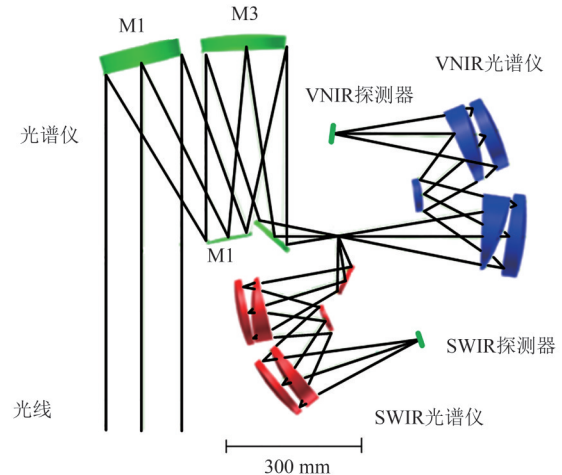


图2 EnMAP 光路图 (Sang 等, 2008)

Fig.2 Optical pathway of EnMAP (Sang et al., 2008)

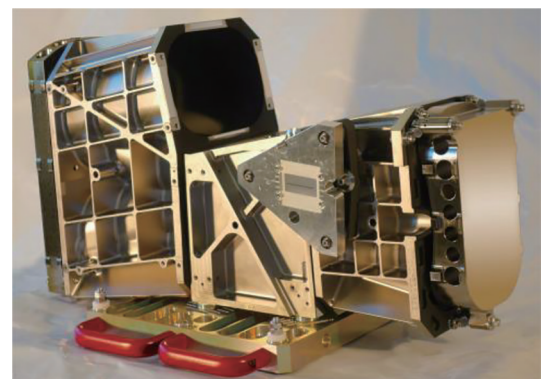


图3 DESIS 光谱仪结构图 (Krutz 等, 2018)

Fig.3 Spectrometer structure of DESIS (Krutz et al., 2018)

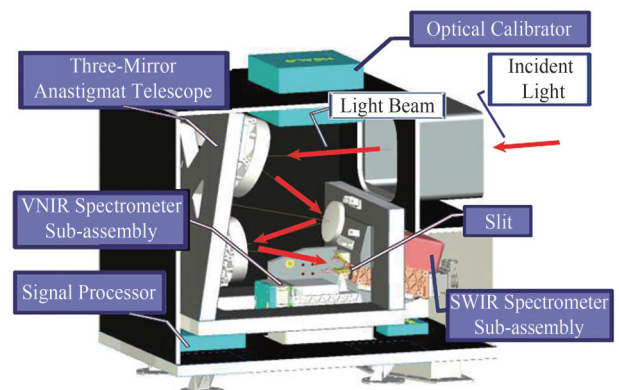


图4 HISUI 光学和定标组件示意图 (Tanii 等, 2012)

Fig.4 Optics and calibration structure of HISUI (Tanii et al., 2012)



(3) 意大利 PRISMA (PRecursore IperSpettrale della Missione Applicativa) 和 Shalom (Space-borne Hyperspectral Applicative Land and Ocean Mission): PRISMA (Loizzo 等, 2018) 于 2019-03 发射, 用于获取土地覆盖、农业、污染、内陆水质等信息, 其高光谱成像仪在 0.4—2.5  $\mu\text{m}$  的光谱范围内共有 249 个光谱通道, 空间分辨率为 30 m, 幅宽为 30 km, 同时还配备了一个分辨率为 5 m 的可见光全色通道, 其离轴三反望远镜光学口径为 210 mm, 光谱仪采用棱镜在准直后的光路中进行分光, 光路图如图 5 所示 (Labate 等, 2009)。Shalom (Natale 等, 2013) 是意大利和以色列共同研制的“增强型 PRISMA”, 该载荷设计目的为提供高空间分辨率和高光谱分辨率的对地民用及科学遥感业务, 目前尚未有相关发射情况的报道。Shalom 上同时装载了一台全色相机, 可以通过超分辨率达到 2.5 m 的空间分辨率。Shalom 的高光谱成像仪有 241 个波段并覆盖了 0.4—2.5  $\mu\text{m}$ , 空间分辨率达到 10 m, 光谱分辨率达到 10 nm, 刈幅宽为 10 km, 采用 Offner 类光栅分光。

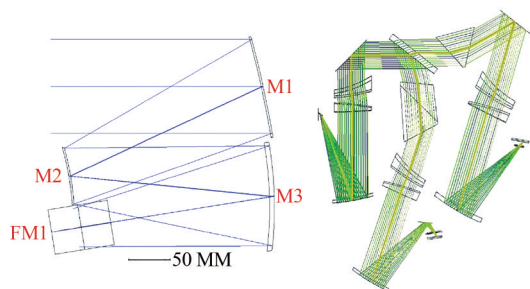


图 5 PRISMA 光路图 (Labate 等, 2009)

Fig.5 Optical pathway of PRISMA (Labate et al., 2009)

(4) 印度的 ResourceSat-3/3A/3B、Cartosat-3/3A/3B 和 HySIS: IMS ResourceSat-3 是印度的新一代资源卫星 ([https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/resourcesat-3.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/resourcesat-3.htm) [2020-07-15]), 预计 2020 年以后发射, 将搭载一台空间分辨率 25 m, 幅宽 25 km, 在 0.4—2.4  $\mu\text{m}$  之间拥有约 200 个光谱通道的高光谱成像仪, 通过离轴三反望远镜获取地面图像, 采用 Offner 凸面光栅光谱仪精细分光成像。此外, 印度 ISRO 正在研制甚高分辨率多光谱/高光谱地球观测卫星 Cartosat-3/3A/3B ([https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/cartosat-3.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/cartosat-3.htm) [2020-07-15]), 预计于 2020 年发射, 其中高光谱载荷光谱分辨率

12 nm, 幅宽 5 km, 地面分辨率 30 m, 共 200 个谱段, 相机结构采用同轴 R-C 结构, 相机主镜口径 1.2 m。HySIS ([https://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/hysis.htm](https://space.skyrocket.de/doc_sdat/hysis.htm) [2020-07-15]) 也由印度 ISRO 研制, 于 2018-11 发射, 其光谱分辨率 10 nm, 空间分辨率 30 m, 幅宽 30 km。

(5) 法国 HYPXIM-CA: HYPXIM-CA 是法国 CNES 资助的 HYPXIM 任务 (Michel 等, 2011) 中的其中一颗卫星, 预计将于 2020 年发射。该任务中, HYPXIM-CA 和 HYPXIM-CB 以小卫星平台为架构。HYPXIM-CA 星采用了 TMA 望远镜, 口径为 175 mm, 分光方式为棱镜。探测器像元为 2000×360, 重量为 65 kg, 功耗为 55 W, 设计寿命为 5 年。HYPXIM-CB 与 HYPXIM-CA 采用了同类型的望远镜, 但是口径为 150 mm, 并且配置了全色波段, 分光方式也为棱镜。探测器像元为 1000×256, 重量为 70 kg, 功耗为 110 W, 设计寿命也为 5 年。后续还将发展一颗 HYPXIM-Performance 星, 其采用 Korsch 望远镜, 口径为 430 mm。同样采用了棱镜的分光方式, 可见近红外和短波红外的探测器像元为 2000×360, 空间分辨率为 8 m, 幅宽为 16 km, 光谱分辨率为 10 nm。长波红外使用的望远镜口径仅为 60 mm, 探测器像元为 160×35, 对地分辨率和刈幅宽分别为 100 m 和 16 km, 光谱分辨率为 100—150 nm。整个载荷重量小于 150 kg, 功耗小于 350 W, 设计寿命为 10 年。

综上, 可以看出, 星载高光谱成像技术受到了国外遥感界的普遍关注, 但由于星载高光谱载荷的研制面临的技术挑战大、难度高, 难以兼顾宽的谱段覆盖范围、大的幅宽、高的光谱分辨率和高的探测灵敏度, 比如, PROBA-1/CHRIS 谱段覆盖范围只到近红外波段 (1.0  $\mu\text{m}$ ); EO-1/Hyperion 幅宽仅 7.5 km, 短波红外波段信噪比低于 50; 新近发射和当前在研的德国 DESIS 和 EnMAP、日本 HISUI、意大利 PRISMA 和 Shalom、印度 HySIS 等也未能有效解决上述问题。

国内第一个星载光谱成像仪是中国科学院上海技物所研制的神舟 3 号飞船 (SZ-3) 上装载的中分辨率光谱成像仪 (郑亲波和危峻, 2004), 于 2002 年发射, 其分光方式为凹面光栅, 光谱范围覆盖 0.403—1.023  $\mu\text{m}$ , 空间分辨率为 500 m, 光谱通道数为 30 个。此后, 国内星载高光谱成像仪器

的发展也十分迅速,如2008-09发射的HJ-1-A卫星(Zhao等,2010)上装载了一台中国科学院西光所研制的傅里叶干涉高光谱成像仪,谱段范围0.45—1.05  $\mu\text{m}$ ,光谱通道数105个,光谱分辨率2—9 nm,空间分辨率100 m,幅宽50 km。2011年发射的天宫一号(颜昌翔,2013)装载了一台中国科学院长春光学精密机械与物理研究所(以下简称中科院长光所)和中科院上海技物所联合研制的基于棱镜分光的高光谱成像仪,轨道高度400 km,空间分辨率10—20 m,幅宽10 km,光谱覆盖0.4—2.5  $\mu\text{m}$ ,共128个谱段。环境减灾后续卫星HJ-2A/B装载了中科院西光所研制的高光谱成像仪。此外,2013年、2018年发射的探月卫星“嫦娥三号”、“嫦娥四号”上,也都分别搭载了中科院上海技物所研制的高光谱载荷(王跃明等,2016),将于2020年发射的中国首次火星探测任务“天问一号”上也将搭载中科院上海技物所研制的高光谱载荷。此外,商业卫星高光谱已开始兴起。2018-04,珠海一号发射成功(李先怡等,2019),其上装载的高光谱成像仪具有32个波段,空间分辨率10 m,

幅宽150 km,谱段范围0.4—1.0  $\mu\text{m}$ 。如何在成本和数据质量之间找到平衡点,是商业卫星需要重点考虑的一个问题。

自2008年起,中国科学院上海技物所面向中国矿产、能源探测和生态环境监测的重大战略需求,开展了宽谱宽幅星载高光谱成像载荷关键技术研究。通过十多年的研究,解决了宽谱宽幅相关的大相对口径超大焦面低畸变望远镜、光谱仪和大规模红外焦平面探测器等核心关键技术,克服了高光谱分辨率高探测灵敏度相关的高精度装调检测、低噪声高响应探测和Etalon干涉效应校正等技术难题(刘银年等,2015,2020a,2020b;Liu Y N等,2019b;Hu等,2018a,2018b;Xu等,2020),研制了国际首台星载宽谱宽幅可见短波红外高光谱相机,首次应用于中国高分辨率对地观测重大专项的第一颗高光谱观测卫星(高分五号)和资源探测业务卫星(资源一号02D),分别于2018-05-09和2019-09-12发射。同时,后续的高分五号02星和资源一号02E星也正在研制中。相关仪器参数列于表6。

表6 国内已发射或预计发射的星载高光谱遥感仪器

Table 6 Parameters of domestic spaceborne hyperspectral remote sensing satellites that has been or expected to launch

仪器名称	HJ-1-A 高光谱 成像仪	TG-1 超光谱 成像仪	GF-5 高光谱 相机	GF-5-02 高光谱相机	ZY-1-02D 高光谱相机	HJ-2 高光谱 成像仪	ZY-1-02E 高光谱相机
发射时间	2008	2011	2018.5	~2020	2019.9	~2020	~2021
轨道高度/km	540	400	705	705	778	644.5	778
波段范围/ $\mu\text{m}$	0.45—1.05	0.4—2.5	0.45—2.5	0.45—2.5	0.4—2.5	0.45—2.5	0.4—2.5
光谱通道数	105	128	330	330	166	215	166
光谱分辨率/nm	2—9	10/23	5/10	5/10	10/20	4.5/14	10/20
空间分辨率/m	100	10/20	30	30	30	48/96	30
幅宽/km	50	10	60	60	60	96	60
分光方式	傅里叶干涉	棱镜	光栅	光栅	光栅	傅里叶干涉	光栅

高分五号卫星高光谱载荷(AHSI)光路图如图6所示,采用离轴三反望远镜和新型超大平场度分光光谱仪以及“品字形”拼接超大规模探测器(2048×512),实现了光谱范围0.4—2.5  $\mu\text{m}$ ,幅宽60 km,可见近红外波段(VNIR)光谱分辨率优于5 nm,短波红外波段(SWIR)光谱分辨率优于10 nm,光谱通道数330个的性能指标。AHSI是目前性能指标最先进的载荷之一,具有独特的优势,

其高光谱数据在各个领域的应用上已取得了重要突破,体现出了重要的应用价值。例如,经甘甫平研究员等(董新丰等,2020)计算,AHSI相较于HyMap和AVIRIS机载数据矿物识别平均正确率为90.32%;张鸿生等(Wan等,2020)的研究表明,AHSI数据在红树林树种分类等方面较Landsat 8和Hyperion具有优势;南京大学杜培军教授等(祝伟等,2020)研究表明,高分五号数据的解混精



度 SAD 最低可达 0.0951，整体精度和机载的 AVIRIS 标准数据解混精度（最低值 0.0982）相当；武汉大学张良培教授等（袁静文等，2020）研究表明高分五号数据对武汉市江北核心区 11 类景物分类平均精度超过 90%，单类景物最高分类精度达到 96.31%；中科院遥感和数字地球研究所张霞研究员等（Qi 等，2019）研究表明高分五号数据作为分类算法网络的验证数据集，总体分类精度可达 99.37%，与机载 AVIRIS 高空间分辨率高光谱数据集处理精度相当（97.70%）。

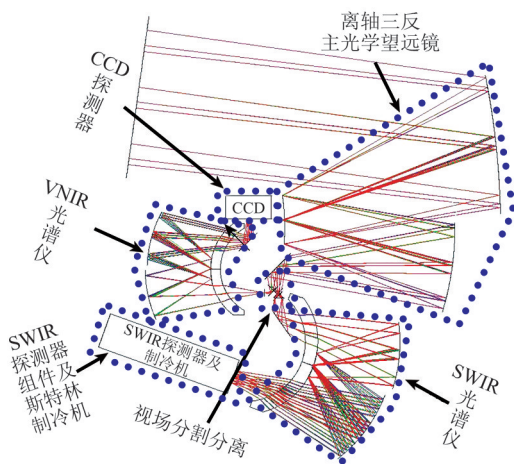


图6 GF-5可见短波红外高光谱相机光路图  
Fig.6 Optics of GF-5 AHSI

星载高光谱成像技术至今已经迅速地发展了近 20 年，通过对比国内外已发射具有代表性的星载高光谱成像载荷的性能，可以更清晰地了解到星载高光谱成像遥感技术的发展现状。如图 7 所示，列出了 14 颗国内外具有代表性的高光谱成像卫星载荷的光谱分辨率、空间分辨率、幅宽和波段数等性能指标。可以看出，高光谱成像遥感仪器往更高光谱分辨率、空间分辨率、更大幅宽和更宽谱段发展。高分五号 AHSI 卫星的光谱分辨率比 EO-1/Hyperion、HySIS、PRISMA 以及将于 2020 年发射的 HISUI、ENMAP 等载荷的光谱分辨率高出近 50%。德国 2018 年发射的 DESIS 光谱分辨率较高，为 AHSI 的 2 倍，但是它只覆盖可见近红外波段，且幅宽仅为 AHSI 的一半。同时，AHSI 幅宽领先国外现行载荷 2—4 倍，谱段数比国外现行载荷多出近 100 个，空间分辨率跟其他卫星的空间分辨率相当，综合来看，中国高光谱成像载荷的性能已走到了世界前列。

中国、美国、欧洲、日本等国，先后发展了

静止轨道气象观测卫星，如表 7 所示。其特点是光谱通道数为数十个、空间分辨率为公里级，或光谱分辨率纳米级、空间分辨率为数公里，主要用于云和大气的探测。例如，美国 2016 年发射的新一代静止环境观测卫星 GOES-R (Schmit 等，2017)，波段范围 0.47—13.3 nm，与现有在轨气象卫星相比，它的空间分辨率提高了 4 倍，扫描速度提高了 5 倍；日本于 2016 年发射的气象卫星 Himawari-9 (Bessho 等，2016)，波段范围 0.455—13.3 μm。随着技术进步，发展同时具有较高空间分辨率和光谱分辨率的静止轨道高光谱成像仪器已成为可能。目前，发展中的静止轨道高光谱卫星有欧空局 ESA 的 MTG-S (Stuhlmann 等，2009) 以及印度的 GISAT、韩国的 COMS 卫星等。就中国而言，2016 年发射了静止轨道气象卫星风云四号 (陈仁等，2019)，其上搭载的干涉式大气垂直探测仪是国际上第一台在静止轨道上以红外高光谱干涉分光方式探测大气垂直结构的高光谱遥感仪器，成功获取了世界上第一幅静止轨道大气高光谱图像。同时，2016 年国家重点研发计划支持了静止轨道全谱段高光谱成像技术的研发工作，针对全天时大范围连续监测、精细识别和分类的应用需求，在静止轨道上，实现紫外 25 m 到红外 100 m、幅宽 400 km 的静止轨道全谱段高光谱成像观测。

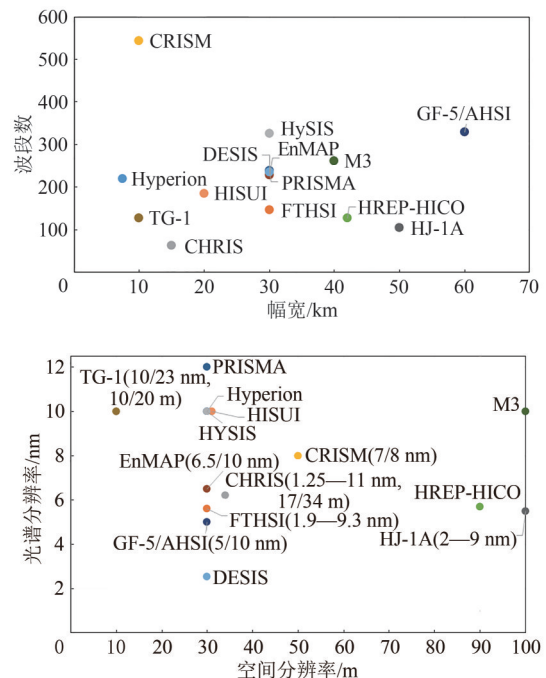


图7 世界各国典型高光谱卫星性能比较  
Fig.7 Performance comparison of typical hyperspectral satellites

表7 国内外已发射或预计发射的静止轨道高光谱遥感仪器参数  
Table 7 Parameters of hyperspectral remote sensing satellites on geostationary orbit

仪器名称	GOES-R	AHI	FY-4 高光谱 探测器	GISATHyS- SWIR/VNIR	MTG-SIRS/UVN	科技部重点研 发计划项目
国家	美国	日本	中国	印度	ESA	中国
发射时间	2016年	2016年	2016年	~2020年	~2018年	待定
轨道高度/km	静止轨道	静止轨道	静止轨道	静止轨道	静止轨道	静止轨道
波段范围/ $\mu\text{m}$	0.47—13.3	0.455—13.3	0.45—13.8	0.9—2.5	4.6—6.2/8.26—14.29	0.3—12.5
光谱通道数	16	16	14	150	920/510	>600
光谱分辨率/nm	—	—	—	<10	1.32—2.44/4.27—12.74	3—100
空间分辨率/m	500—2000	500—2000	500—4000	500	4000	25—100
幅宽/km	—	—	1000	—	640	400

#### 4 可调谐高光谱成像技术

成像光谱仪是成像技术和光谱技术的有机结合，一般由望远镜和光谱仪共同组成，分光技术直接影响着整个成像光谱仪的性能、复杂度、重量和体积等。在几十年的研究中，干涉分光及棱镜和光栅色散分光技术取得了长足的发展，并在工程中得到了广泛应用，同时，可调谐分光方式也不断涌现（李东泽，2014；Graff和Love，2014；Love和Graff，2014）。目前光谱载荷分光方式多种多样，主要有时间型的可调谐分光、滤光片分光、时空联合调制傅立叶干涉分光，空间型的棱镜色散分光、光栅衍射分光、空间调制傅里叶干涉分光、计算光学分光等。色散型的光栅和棱镜分光，同一时间获取观测对象所有的光谱通道，覆盖了其完整的工作波长范围。时间型可调谐分光方式同一时间只获取观测对象的一个光谱通道，其所有工作波长范围内的光谱通道要分时获取，需要较长的观测时间，对于相对运动的观测对象，得到的光谱特征曲线完全是不同地物的光谱，会造成严重的光谱失配。时间型的分光方式主要用于静态测量的场合。

随着光谱仪的轻小型化，研究学者们在分光的基础上引入调谐分光的概念（Love，2009），借助电控方式、温控方式、机械控制方式等手段，实现光波长的分离和选择，如基于声光衍射原理制成的电控声光可调谐滤波片 AOTF（Acousto-optic Tunable Filter）、基于双折射效应的电控液晶可调谐滤波片 LCTF（Liquid Crystal Tunable Filter）及光谱随楔形空腔厚度变化的光楔滤光片等分光器件。

AOTF是利用超声波与特定晶体作用而产生分光的光电器件，原理如图8所示。当输入一定频率的射频信号时，AOTF会对入射光进行衍射，从中选出波长为 $\lambda$ 的单色光。单色光的波长 $\lambda$ 与射频频率 $f$ 有一一对应的关系，只要通过电信号的调谐即可快速、随机改变输出光的波长。采用AOTF分光方式的成像光谱仪结构简单，且无运动部件。AOTF成像光谱仪主要由前置光学望远镜成像模块、前置光学准直模块、AOTF模块、后置光学成像模块及探测器接收模块组成。为保证入射到晶体上的光束满足角孔径要求，同时要保证衍射光束和入射光束的空间分离，要求准直系统的光束发散角要小于 $3^\circ$ （ $\text{TeO}_2$ 晶体尺寸限制了孔径光阑的尺寸，晶体可接收的角度决定了系统的视场角），因此，基于AOTF器件的高光谱成像仪的视场一般较小，需通过扫描机构实现大视场成像（Gupta等，1999；Korablev等，2006，2012）。

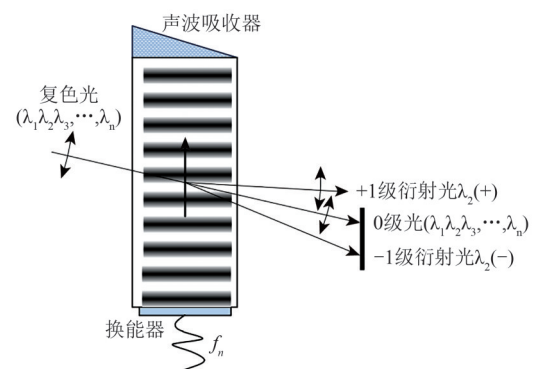


图8 AOTF分光技术(Gupta, 2003)

Fig.8 AOTF spectroscopic techniques (Gupta, 2003)

程序化的波长控制使得仪器的输出波长可以进行灵活切换，加之全固态集成设计产生优异的

避震性能,使得基于这种方式分光的光谱仪近年来在现场就位检测和分析中得到了广泛的应用。ESA发射的火星快车(Gendrin等,2005)及金星快车(Svedhem等,2007)上均装载了AOTF光谱仪器,NASA也一直致力于基于AOTF的成像/非成像光谱仪深空探测研究,如针对火星探测应用研制的AIMS及IPS等(Accettura等,2004)。国内中科院上海技物所自2006年起,就针对深空光谱探测应用,开展基于AOTF成像光谱技术的研究。2013年发射的嫦娥三号巡视器上就搭载了中科院上海技物所研制的基于AOTF分光的红外成像光谱仪(王跃明等,2016),目前该仪器已成功应用于月面就位探测及分析。这种分光方式的不足之处就是有效视场小,衍射光偏转角会随着波长的改变而发生偏移。同时这种分光技术大多用于可见近红外到短波红外波段,中波红外波段也有一些应用。主要应用场合是实验室、固定式或车载静态测量。

LCTF是将液晶材料与双折射滤光片结合在一起形成的可调谐滤光器,它是通过施加不同的电压调节双折射液晶实现特定波长光的选择性透过,原理如图9所示(张营,2016)。目前,Meadowlark Optics公司制造的三级液晶可调谐滤光片,光谱范围 $0.4\text{--}2.5\ \mu\text{m}$ ,光谱分辨率 $10\ \text{nm}$ 。由于使用偏振片,液晶可调谐滤光片透过率的理论最大值为50%,现在最高可达到40%。基于LCTF分光的光谱成像仪(Chrien等,1993;Shingu等,2003),主要优点是体积小、重量轻、功耗低、无运动部件,特别适合搭载在微纳卫星上。日本2014年发射的Rising-2微纳卫星(Sakamoto等,2016)以及菲律宾在2016年和2018年分别发射的PHL-Microsat-1、PHL-Microsat-2卫星(Maestro等,2016)上的载荷都使用LCTF技术。但液晶的折射率受温度影响较大,中心波长随温度变化漂移显著,对光谱测量精度会产生较大影响。

随着先进薄膜研制技术水平的提高,滤光片轮分时光谱分光技术向静态连续滤光片分光技术改进,最典型的是基于线性渐变滤光片LVF(Linear Variable Filter)分光技术,核心分光器件是一种特殊的带通滤光片,起初由美国JDSU公司设计和制造,根据需要向特定方向形成楔形镀层,由于通带的中心波长与镀层的厚度有关,这就相当于沿特定方向滤光片的透过波长在线性变化,

从而起到分光的作用。基于线性渐变滤光片分光的高光谱成像仪系统光路图如图10所示(王颖,2015),目标经成像镜头成像于光谱探测器上,然后通过相机整体扫描获取目标全谱段高光谱数据(Mahmoud等,2018)。

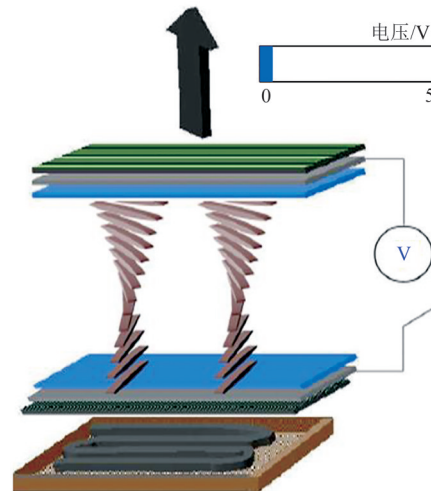


图9 液晶可调谐滤光片(张营,2016)

Fig.9 Liquid Crystal Tunable Filter(Zhang, 2016)

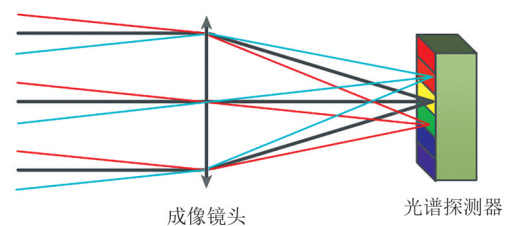


图10 基于LVF光谱探测器的高光谱相机光路示意图

Fig.10 Optical path of hyperspectral camera based on gradient linear filter spectral detector

渐变式(LVF)和阶跃式(ISF)光楔滤光片(Wei等,2017;肖喜中,2015)分光示意图如图11所示,在制作滤光片时根据需要向特定方向形成楔形镀层,由于通带的中心波长与镀层的厚度有关,这就相当于沿特定方向滤光片的透过波长在相应变化,从而起到分光的作用。基于光楔滤光片分光的光谱仪结构十分简单,只需将光楔滤光片安装在面阵探测器的前方,使探测器的每一行只接收对应通带的光谱能量,但其光谱性能难以保证,光谱混叠现象严重。

早期的干涉型成像光谱仪大多是基于迈克尔逊干涉仪为原形发展起来的,通过一套动镜驱动系统,在不同的时间反演出目标在不同波长的光谱图样,属于时间扫描型。20世纪90年代以来,



随着面阵探测器的发展,国际上出现了空间扫描型干涉成像光谱技术,其代表性方案有两类:一类是无狭缝的全通量空间调制型;另一类是有狭缝的Sagnac空间调制型(Lucey等,1993)(图12)。美国强力星Mighty Sat II-FTHSI,中国的HJ-1-A星高光谱成像仪等均采用这种分光方式。后来科学家们结合空间调制产生光程差、时间调制获得干涉信息的特点,通过推扫全部视场的方式获得完整干涉图像,实现了时空联合调制干涉光谱成像技术的研制(Graff和Love,2014)。

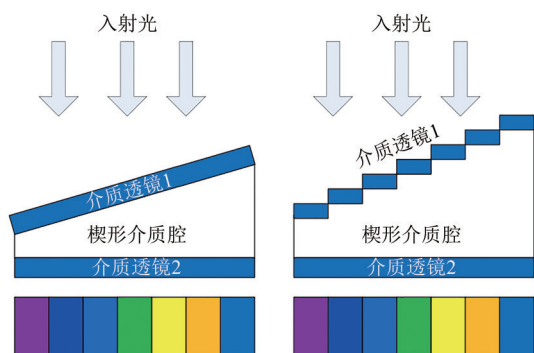


图11 LVF和ISF分光示意图(肖喜中,2015)

Fig.11 Optical diagram of Linear Variable Filter (LVF) and Integrated Stepwise Filter (ISF) (Xiao, 2015)

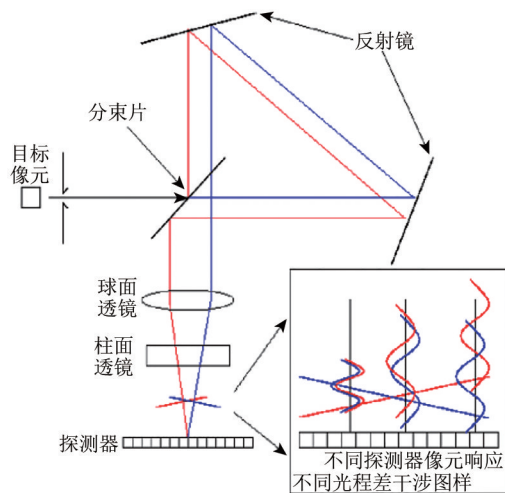


图12 Sagnac干涉型成像光谱仪

Fig.12 Sagnac interferometric imaging spectrometer

法布里—珀罗干涉仪FPI(Fabry-Perot Interferometer)是法国科学家Fabry和Perot(1897)研发的利用多光束干涉原理进行光谱选择的分光器件。为适应不同应用需求,人们提出了可调谐F-P腔,被用作可调谐F-P滤波器,利用FPI的通带波长可随F-P腔的腔长变化的特点,采用时间

调制方法进行光谱调控,实现不同光谱通道的选择。F-P可调谐滤波器主要由平行放置的内表面镀有高反射率膜层的两块透明平板组成,其构型扁平,结构紧凑,体积小,重量轻,光谱分辨率高,通带切换速度快,成像视场不受滤波器本身尺寸限制,在光谱成像系统中使用时可以直接放置在探测器前或者平行光路里(丛蕊等,2019)。基于可调谐F-P滤波器的典型高光谱成像仪光学系统如图13所示,代表仪器如2013年Fu等(2013)提出的可调谐液晶法布里—珀罗高光谱成像干涉仪等。F-P可调谐滤波器用于高光谱成像时,需要在某一特定较宽的工作光谱范围内每个腔长只对应一个通带波长,并在需要的工作光谱范围内消除多级透射峰的影响(丛蕊等,2019)。另一方面,为了提高成像仪器的光谱分辨率同时解决F-P自由光谱范围窄的缺点,人们也提出了将F-P腔作为前置滤波器件串接色散型光谱仪的思想(柳文娟等,2015)。例如,2013年,中科院成都光电所的石振东、周崇喜等(Shi等,2014)研制的将可调谐F-P滤波器和光栅结合作为色散元件的小型光谱仪等。这类方法研制的光谱仪器,分辨率取决于可调谐F-P滤波器,而自由光谱范围由色散光谱仪系统决定,可使原本不可分辨的波长通过光谱扫描,在时域中得以分辨,解决了色散型光谱仪自由光谱范围与光谱分辨率相互制约的矛盾,适用于各类光谱分辨率不高的小型色散型光谱仪,具有结构简单、兼容性好的特点(Lu等,2018)。

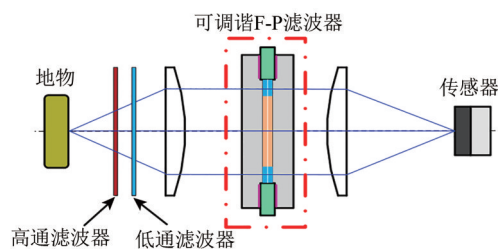


图13 基于TFPF(Tunable Fabry-Perot filter)的高光谱成像仪的光学系统示意图

Fig.13 Optical system of hyperspectral imager based on TFPF (Tunable Fabry-Perot filter)

Candès和Tao(2006)基于信号的稀疏性本质,提出压缩感知采样理论,此后,基于压缩感知的光谱成像技术取得了蓬勃发展(Duarte等,2008;Liu等,2019a;Tao等,2020)。美国杜克大

学Brady和Gehm (2006) 将传统的色散型光谱成像技术中的狭缝更换为特殊形式的二维编码模板, 通过计算机仿真, 获取目标光谱图像的压缩感知图像, 并利用压缩感知理论进行图谱复原, 取得了较好的结果, 从而提出编码孔径光谱成像技术的思想, 也称为压缩感知光谱成像技术, 原理示意如图 14 所示。压缩感知计算光谱成像是将信息矩阵  $A$  进行信息混叠压缩, 再用较低规模探测器获取具有一定压缩比的图谱混叠数据, 通过算法重构空间元的图谱, 最终实现地物图谱特性测量。压缩感知理论主要研究内容有 3 个: 信号的稀疏表示, 信号的压缩测量和信号的重构算法。由于其通过计算方法改变传统光谱成像的方式, 并通过光路变换方法实现计算方法的硬件化, 最终通过计算反演方法得到图谱数据, 因此也称为计算光谱成像技术。Brady 教授团队成功研制了基于编码孔径的光谱成像系统 CASSI (Wagadarikar 等, 2008; Kittle 等, 2010), 包括单色散、双色散和多曝光单色散系统, 图 15 给出了 CASSI 多曝光单色散系统的实验样机。

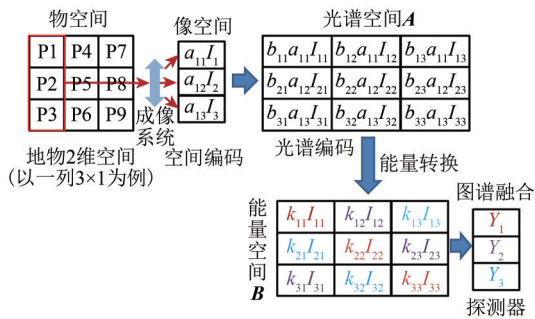


图 14 压缩感知计算光学成像图谱关系示意图

Fig.14 Schematic diagram of the relationship of the optical imaging map of compressed sensing computation

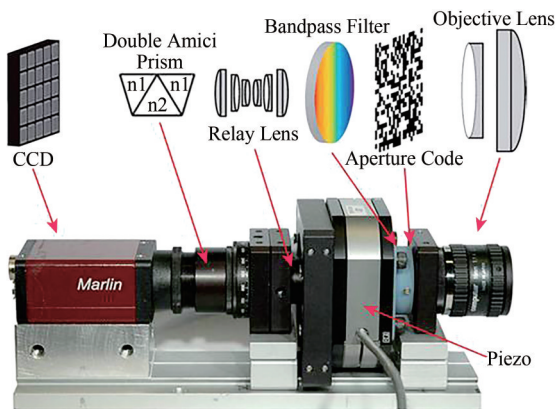


图 15 多曝光单色散 CASSI 样机 (Kittle 等, 2010)

Fig.15 Multi\_SD\_CASSI prototype (Kittle et al., 2010)

2007 年, 美国 Rice 大学成功研制出单像素成像系统, 该系统通过光学系统将目标投影至数字微镜器件 (DMD) 上, DMD 是一种可以实现“0”、“1”二值编码功能的空间光调制器, 反射信号聚焦到单元探测器上, 经过多次测量获得重构图像所需的编码数据 (Duarte 等, 2008)。图 16 为 DMD 作为光空间调制器的光谱维编码孔径成像光谱仪原理光路图。Sun 和 Kelly (2009) 在单像素系统上增加了分光器件, 由单点探测变为线列探测, 增加了光谱信息, 实现了光谱成像系统 (CHSI)。August 等 (2013) 提出 CHSISS 系统, 实现了对场景信息进行空间信息和光谱信息同时压缩测量, 更是将压缩感知理论加以充分利用, 图 17 给出了从单像素成像系统到空间-谱间同时压缩的光谱成像系统的示意图。

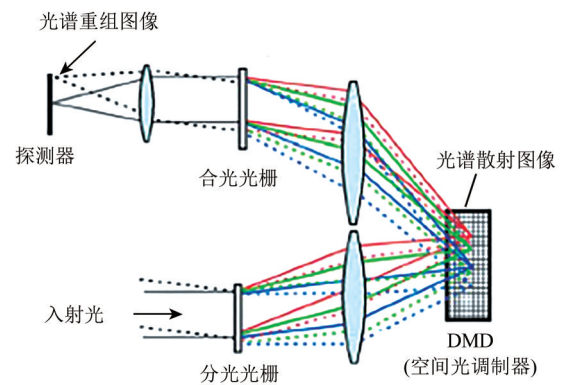


图 16 基于 DMD 光谱维编码孔径成像光谱仪原理图 (Love 和 Graff, 2014)

Fig.16 Schematic diagram of imaging spectrometer based on the DMD spectrum code aperture (Graff & Love, 2014)

基于压缩感知的计算光谱成像系统是压缩感知应用的一个非常巨大的突破, 具有巨大的潜力, 为目前高光谱成像系统面临的数据量巨大等问题的解决提供了很好的理论支撑。但是, 计算光谱成像系统稳定性较差, 影响因素太多, 不同恢复算法恢复差别大, 1 个像元光谱偏移可造成 20% 以上光谱偏差, 且存在不可恢复性。另外, 计算光谱成像所依赖的编码器需要在上百万个微米尺度的空间上形成不同光学调制特性的随机码, 工程上还有很大差距。此外, 该方法过于依赖先验的知识, 要求被观测的对象稀疏性好。目前该方法尚处于实验室研究阶段, 在实验室获得精细高质量的光谱图像尚有较大差距, 工程应用还有一定距离。



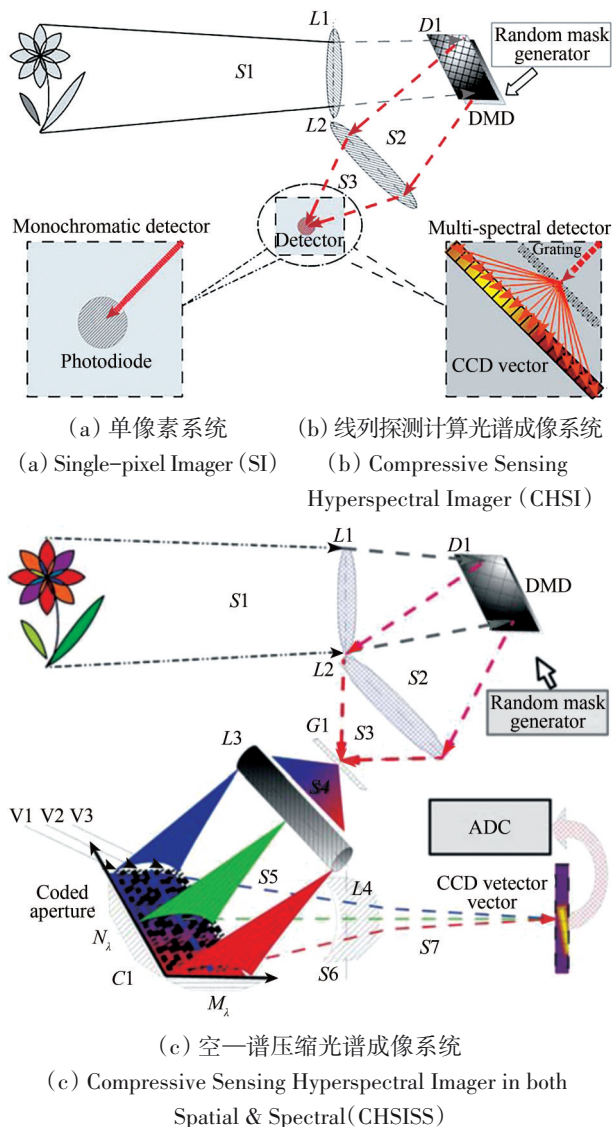


图 17 基于压缩感知的计算光谱成像系统原理示意图 (August 等, 2013)

Fig.17 Computational spectral imaging diagram based on compressed sensing (August et al., 2013)

## 5 结 语

高光谱成像遥感载荷技术体现出了如下的发展趋势。

(1) 探测波段进一步拓宽至长波红外, 时间、空间、光谱分辨率进一步提高, 定量化精细化要求越来越高。高光谱成像遥感技术在早期发展阶段, 主要发展目标为提高光谱分辨率, 以提取地物丰富的光谱特征。而随着大规模面阵探测器技术、光机加工检测技术和信号处理等技术的进步, 高光谱遥感技术在提高光谱分辨率的同时, 开始向着高空间分辨率和更大幅宽方向发展。为了获

取地物更丰富的光谱信息, 获取全天时的地物反射和发射光谱特征, 高光谱遥感载荷谱段范围将覆盖从紫外到长波红外。为保证更高指标下高光谱的应用效能, 实验室、在轨仪器内部及其对地、对日、对月、对冷空和恒星的综合定标手段也日益丰富和朝着更精细化的方向发展。此外, 发展超大幅宽和更高分辨率的高光谱遥感技术, 对于进一步发展宽工作波段范围的大规模探测器和大大口径光学也提出了更高的要求。

(2) 新型分光方式不断提出, 技术种类进一步丰富。随着信息技术、成像技术及光学加工工艺的发展与进步, 各类新型分光技术层出不穷, 其核心分光元件开始由成熟的色散型及干涉型向多元化方向发展。目前已经出现了旋转滤光片、声光可调谐滤光片、液晶可调谐滤光片、F-P 可调谐滤波器、压缩感知分光等多种分光技术方案。目前, 这类分光方式仍然处于原理研究及实验室验证阶段, 也是高光谱遥感未来发展的一种趋势。此外, 将分光过程跟光电转换过程相结合的芯片级高光谱分光方式也越来越得到人们的关注和研究。

(3) 星载高光谱遥感数据处理智能化、自动化。伴随着“人工智能”时代的来临, 将神经网络、深度学习等数据处理技术与高光谱遥感技术深度结合, 构建具有星上载荷参数自动优化、星上数据自动实时处理与产品生成能力的“智能”高光谱遥感卫星系统成为了未来发展趋势。同时, 随着高光谱成像遥感仪器的分辨率越来越高, 获取信息维度越来越多的同时, 获取的遥感数据量也是呈现爆炸式的增长, “大数据”特征十分显著。如何有效地实现高光谱遥感有效数据挖掘, 信息提取, 提高数据压缩及数据传输效率, 是未来高光谱遥感需要解决的重要难题。

(4) 高光谱遥感载荷的轻量化、集成化、系统化。随着轻小型无人机遥感技术及微纳卫星技术的发展, 高光谱遥感也正在向着低成本、灵活机动、集成化等方向发展。目前, 基于小型无人机的轻小型高光谱遥感技术在农林病虫害检测、目标搜寻及抢险救灾等领域隐藏着巨大的应用需求和价值。而微纳卫星则具有成本低、开发周期短等优势, 能够开展更为复杂的空间遥感任务。高光谱遥感技术与微纳卫星技术的结合, 将促进一体化多功能结构、系统集成化空间探测载荷的创新发展, 对未来高光谱遥感轻量化、集成化、



系统化, 实现空间组网、全天时探测具有重要的推动作用, 也为高光谱遥感卫星进入商用领域提供了可能。

可以看出, 高光谱遥感领域中, 许多新原理、新方案、新技术正在得到实施与应用, 多元信息一体化获取与处理能力也大为增强, 高光谱载荷逐步向大视场、大相对孔径、高分辨率、高定量化的方向发展。同时, 随着高光谱遥感技术的不断发展成熟, 其成本也将大大降低, 其商业化应用也将是未来发展的重要方向。

## 参考文献(References)

- Accettura A G, Bruno C, Casotto S and Marzari F. 2004. Mission to mars using integrated propulsion concepts: considerations, opportunities, and strategies. *Acta Astronautica*, 54(7): 471-486 [DOI: 10.1016/S0094-5765(03)00208-X]
- Achal S, McFee J E, Ivanco T and Anger C. 2007. A thermal infrared hyperspectral imager (tasi) for buried landmine detection//Proceedings Volume 6553, Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets XII. Orlando, Florida, United States: SPIE: 655316 [DOI: 10.1117/12.720453]
- Asner G P and Heidebrecht K B. 2003. Imaging spectroscopy for desertification studies: comparing AVIRIS and EO-1 Hyperion in Argentina drylands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1283-1296 [DOI: 10.1109/TGRS. 2003. 812903]
- August Y, Vachman C, Rivenson Y and Stern A. 2013. Compressive hyperspectral imaging by random separable projections in both the spatial and the spectral domains. *Applied Optics*, 52(10): D46-D54 [DOI: 10.1364/ao.52.000d46]
- Babey S K and Anger C D. 1993. Compact airborne spectrographic imager (CASI): a progress review//Proceedings Volume 1937, Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment. Orlando, FL, United States: SPIE: 152-163 [DOI: 10.1117/12.157052]
- Barnsley M J, Settle J J, Cutter M A, Lobb D R and Teston F. 2004. The PROBA/CHRIS mission: a low-cost smallsat for hyperspectral multiangle observations of the Earth surface and atmosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7): 1512-1520 [DOI: 10.1109/TGRS.2004.827260]
- Bessho K, Date K, Hayashi M, Ikeda A, Imai T, Inoue H, Kumagai Y, Miyakawa T, Murata H, Ohno T, Okuyama A, Oyama R, Sasaki Y, Shimazu Y, Shimoji K, Sumida Y, Suzuki M, Taniguchi H, Tsuchiyama H, Uesawa D, Yokota H and Yoshida R. 2016. An introduction to Himawari-8/9—Japan's new-generation geostationary meteorological satellites. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 94(2): 151-183 [DOI: 10.2151/jmsj.2016-009]
- Brady D J and Gehm M E. 2006. Compressive imaging spectrometers using coded apertures//Proceedings Volume 6246, Visual Information Processing XV. Orlando (Kissimmee), Florida, United States: SPIE: 62460A [DOI: 10.1117/12.667605]
- Candes E J and Tao T. 2006. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? *IEEE Transactions on Information Theory*, 52(12): 5406-5425 [DOI: 10.1109/tit.2006.885507]
- Chen R, Gao C, Wu X W, Zhou S Y, Hua J F and Ding L. 2019. Application of FY-4 atmospheric vertical sounder in weather forecast. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 38(3): 285-289 [DOI: 10.11972/j.issn.1001-9014.2019.03.005]
- Cheng Y B, Zarco-Tejada P J, Riaño D, Rueda C A and Ustin S L. 2006a. Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: relationships between AVIRIS and MODIS indexes. *Remote Sensing of Environment*, 105(4): 354-366 [DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.005]
- Cheng Y F, Gamon J A, Fuentes D A, Mao Z Y, Sims D A, Qiu H L, Claudio H, Huete A and Rahman A F. 2006b. A multi-scale analysis of dynamic optical signals in a Southern California chaparral ecosystem: a comparison of field, AVIRIS and MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 103(3): 369-378 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.06.013]
- Chrien T G, Chovit C and Miller, P J. 1993. Imaging spectrometer using a liquid crystal tunable filter//Proceedings Volume 1937, Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment. Orlando, FL, United States: SPIE: 256-261 [DOI: 10.1117/12.157062]
- Cocks T, Janssen R, Stewart A, Wilson I and Shields T. 1998. The HyMap™ airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance//Presented at 1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy. Zurich: [s.n.]
- Cong R, Wang Y K, Chen G, Cai Q Y, Zhou S, Jiang L, Liu D Q and Xu B Z. 2019. Methods for suppressing multi-order transmission peaks of tunable Fabry-Perot filter. *Acta Optica Sinica*, 39(3): 0323003 (丛蕊, 王义坤, 陈刚, 蔡清元, 周晟, 蒋林, 刘定权, 徐宝帧. 2019. Fabry-Perot可调谐滤波器多级透射峰的抑制方法. *光学学报*, 39(3): 0323003) [DOI: 10.3788/AOS201939.0323003]
- Corson M R, Korwan D R, Lucke R L, Snyder W A and Davis C O. 2008. The hyperspectral imager for the coastal ocean (HICO) on the international space station//Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Boston, MA: IEEE: IV-101-IV-104 [DOI: 10.1109/IGARSS. 2008. 4779666]
- Cui T W, Ma Y and Zhang J. 2003. The development and applications of the airborne hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing Technology and Application*, 18(2): 118-122 (崔廷伟, 马毅, 张杰. 2003. 航空高光谱遥感的发展与应用. *遥感技术与应用*, 18(2): 118-122) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2003.2.118]
- Dong X F, Gan F P, Li N, Yan B K, Zhang L, Zhao J Q, Yu J C, Liu R Y and Ma Y N. 2020. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 454-464 (董新

- 丰, 甘甫平, 李娜, 闫柏琨, 张磊, 赵佳琪, 于峻川, 刘镛源, 马燕妮. 2020. 高分五号高光谱影像矿物精细识别. 遥感学报, 24(4): 454-464 [DOI: 10.11834/jrs.20209194]
- Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, Laska J N, Sun T, Kelly K F and Baraniuk R G. 2008. Single-pixel imaging via compressive sampling. *IEEE Signal Processing Magazine*, 25(2): 83-91 [DOI: 10.1364/cosi.2014.ctu2c.2]
- Fabry C and Perot A. 1897. Sur les franges des lames minces argentées et leur application à la mesure de petites épaisseurs d'air. *Ann. Chim. Phys.*, 12: 459-501.
- Fu A, Zhang H D, Zhang X Y, Sang H S, Zhang T Y and Xie C S. 2013. A tunable liquid crystal Fabry-Perot hyperspectral imaging device in mid-infrared wavelength range//*Proceedings Volume 8917, MIPPR 2013: Multispectral Image Acquisition, Processing, and Analysis*. Wuhan, China: SPIE: 891704 [DOI: 10.1117/12.2032159]
- Gendrin A, Mangold N, Bibring J-P, Langevin Y, Gondet B, Poulet F, Bonello G, Quantin C, Mustard J, Arvidson R and LeMouélic S. 2005. Sulfates in Martian layered terrains: the OMEGA/mars express view. *Science*, 307(5715): 1587-1591 [DOI: 10.1126/science.1109087]
- Graff D L and Love S P. 2014. Adaptive hyperspectral imaging with a MEMS-based full-frame programmable spectral filter//*Proceedings Volume 9101, Next-Generation Spectroscopic Technologies VII*. Baltimore, Maryland, United States: SPIE: 910111 [DOI: 10.1117/12.2051436]
- Green R O, Pieters C, Mouroullis P, Eastwood M, Boardman J, Glavich T, Isaacson P, Annadurai M, Besse S, Barr D, Buratti B, Cate D, Chatterjee A, Clark R, Cheek L, Combe J, Dhingra D, Essandoh V, Geier S, Goswami J N, Green R, Haemmerle V, Head J, Hovland L, Hyman S, Klima R, Koch T, Kramer G, Kumar A S K, Lee K, Lundeen S, Malaret E, McCord T, McLaughlin S, Mustard J, Nettles J, Petro N, Plourde K, Racho C, Rodriguez J, Runyon C, Sellar G, Smith C, Sobel H, Staid M, Sunshine J, Taylor L, Thaisen K, Tompkins S, Tseng H, Vane G, Varanasi P, White M and Wilson D. 2011. The Moon Mineralogy Mapper (M<sup>3</sup>) imaging spectrometer for lunar science: instrument description, calibration, on-orbit measurements, science data calibration and on-orbit validation. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 116(E10): E00G19 [DOI: 10.1029/2011JE003797]
- Gupta N. 2003. *Hyperspectral and Polarization Imaging Applications of Acousto-Optic Tunable Filters*. Paris: WCU: 345-348.
- Gupta N, Dahmani R, Gottlieb M S, Denes L J, Kaminsky B and Metes P. 1999. Hyperspectral imaging using acousto-optic tunable filters//*Proceedings Volume 3718, Automatic Target Recognition IX*. Orlando, FL, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.359988]
- Hofer S, Kaufmann H J, Stuffer t, Penné B, Schreier G, Müller A, Eckardt A, Bach H, Benz U C and Haydn R. 2007. EnMAP Hyperspectral Imager: an advanced optical payload for future applications in Earth observation programs//*Proceedings Volume 6366, Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VI*. Stockholm, Sweden: SPIE: 115-120 [DOI: 10.1117/12.690608]
- Hörig B, Kühn F, Oschütz F and Lehmann F. 2001. Hymap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. *International Journal of Remote Sensing*, 22(8): 1413-1422 [DOI: 10.1080/01431160010013450]
- Hu B L, Sun D X and Liu Y N. 2018a. A novel method to remove fringes for dispersive hyperspectral VNIR imagers using back-illuminated CCDs. *Remote Sensing*, 10(1): 79 [DOI: 10.3390/rs10010079]
- Hu B L, Zhang J, Cao K Q, Hao S J, Sun D X and Liu Y N. 2018b. Research on the etalon effect in dispersive hyperspectral VNIR imagers using back-illuminated CCDs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(9): 5481-5494 [DOI: 10.1109/tgrs.2018.2818258]
- Itten K I, Dell'Endice F, Hueni A, Kneubühler M, Schläpfer D, Odermatt D, Seidel F, Huber S, Schopfer J, Kellenberger T, Bühler Y, D'Odorico P, Nieke J, Alberti E and Meuleman K. 2008. APEX - the hyperspectral ESA airborne prism experiment. *Sensors*, 8(10): 6235-6259 [DOI: 10.3390/s8106235]
- Ji Y. 2006. Development of near space vehicle. *International Aviation*, (9): 84-85 (季艳). 2006. 国外临近空间飞行器技术发展概述. *国际航空*, (9): 84-85)
- Kittle D, Choi K, Wagadarikar A and Brady D J. 2010. Multiframe image estimation for coded aperture snapshot spectral imagers. *Applied Optics*, 49(36): 6824-6833 [DOI: 10.1364/ao.49.006824]
- Korablev O, Bertaux J L, Fedorova A, Fonteyn D, Stepanov A, Kalinikov Y, Kiselev A, Grigoriev A, Jegoulev V, Perrier S, Dimarellis E, Dubois J P, Reberac A, Van Ransbeeck E, Gondet B, Montmessin F and Rodin A. 2006. SPICAM IR acousto-optic spectrometer experiment on Mars Express. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 111(E9): E09S03 [DOI: 10.1029/2006JE002696]
- Korablev O, Fedorova A, Bertaux J L, Stepanov A V, Kiselev A, Kalinikov Y K, Titov A Y, Montmessin F, Dubois J P, Villard E, Sarago V, Belyaev D, Reberac A and Neefs E. 2012. SPICAV IR acousto-optic spectrometer experiment on Venus Express. *Planetary and Space Science*, 65(1): 38-57 [DOI: 10.1016/j.pss.2012.01.002]
- Krishna G, Sahoo R N, Pradhan S, Ahmad T and Sahoo P M. 2018. Hyperspectral satellite data analysis for pure pixels extraction and evaluation of advanced classifier algorithms for LULC classification. *Earth Science Informatics*, 11(2): 159-170 [DOI: 10.1007/s12145-017-0324-4]
- Krutz D, Venus H, Eckardt A, Walter I, Sebastian I, Reulke R, Günther B, Zender B, Arloth S, Williges C, Lieder M, Neidhardt M, Grote U, Schrandt F and Wojtkowiak A. 2018. DESIS - DLR earth sensing imaging spectrometer//Satoh S, eds. *Image and Video Technology*. Wuhan: Springer: 356-368 [DOI: 10.1007/978-3-319-92753-4\_28]

- Labate D, Ceccherini M, Cisbani A, De Cosmo V, Galeazzi C, Giunti L, Melozzi M, Pieraccini S and Stagi M. 2009. The PRISMA payload optomechanical design, a high performance instrument for a new hyperspectral mission. *Acta Astronautica*, 65(9/10): 1429-1436 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.077]
- Li D Z. 2014. Radar Coincidence Imaging Technique Research. Changsha: National University of Defense Technology. (李东泽. 2014. 雷达关联成像技术研究. 长沙: 国防科学技术大学)
- Li X Y, Fan H S, Pan S L, Jiang X H and Wu J Q. 2019. Zhuhai-1 Hyperspectral satellite data and applications. *Satellite Application*, (8): 12-18 (李先怡, 范海生, 潘申林, 蒋晓华, 吴佳奇. 2019. 珠海一号高光谱卫星数据及应用概况. *卫星应用*, (8): 12-18)
- Li Z Z, Yang R H, Dang F X, Du P J, Zhang X F, Tan B X, Zhao H J and Su H J. 2012. A review on the geological applications of hyperspectral remote sensing technology//Proceedings of the 4th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Shanghai: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/whispers.2012.6874235]
- Liu W J, Hu C Z, Jiang P P, Wu B and Shen Y H. 2015. Ultra-high-resolution spectrometry incorporating two-dimension dispersing spectrometer and tunable fabry-perot filter. *Acta Optica Sinica*, 35(6): 063007 (柳文娟, 胡澄之, 姜培培, 吴波, 沈永行. 2015. 结合二维分光光谱仪与可调谐法布里—珀罗干涉仪的超高分辨率光谱测量技术研究. *光学学报*, 35(6): 063007) [DOI: 10.3788/AOS201535.063007]
- Liu Y, Yuan X, Suo J L, Brady D J and Dai Q H. 2019a. Rank minimization for snapshot compressive imaging. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 41(12): 2990-3006 [DOI: 10.1109/tpami.2018.2873587]
- Liu Y N, Ding X Z and Li Z Z. 2015. Specification design of hyperspectral imaging remote sensor used in geosciences. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 40(8): 1295-1300 (刘银年, 丁学专, 李志忠. 2015. 面向地学应用的高光谱遥感传感器指标体系设计. *地球科学-中国地质大学学报*, 40(8): 1295-1300) [DOI: 10.3799/dqkx.2015.109]
- Liu Y N, Sun D X, Cao K Q, Liu S F, Chai M Y, Liang J and Yuan J. 2020a. Evaluation of GF-5 AHSI on-orbit instrument radiometric performance. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 352-359 (刘银年, 孙德新, 曹开钦, 刘书锋, 柴孟阳, 梁建, 原娟. 2020a. 高分五号可见短波红外高光谱相机在轨辐射性能评估. *遥感学报*, 24(4): 352-359) [DOI: 10.11834/jrs.20209258]
- Liu Y N, Sun D X, Hu X N, Liu S F, Cao K Q, Chai M Y, Liao Q J, Zuo Z Q, Hao Z Y, Duan W B, Zhou W Y N, Zhang J and Zhang Y. 2020b. Development of visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 333-344 (刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 刘书锋, 曹开钦, 柴孟阳, 廖清君, 左志强, 郝振贻, 段微波, 周魏乙诺, 张静, 张营. 2020b. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制. *遥感学报*, 24(4): 333-344) [DOI: 10.11834/jrs.20209196]
- Liu Y N, Sun D X, Hu X N, Liu S H, Gan F P and Ge S L. 2019. Observation capability and application prospect of the advanced hyperspectral imager. *Areospace Shanghai*, 36(S2): 99-105 (刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 刘思含, 甘甫平, 葛曙乐. 2019. 可见短波红外高光谱相机有效载荷观测能力及应用前景. *上海航天*, 36(S2): 99-105) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.016]
- Liu Y N, Sun D X, Hu X N, Ye X, Li Y D, Liu S F, Cao K Q, Chai M Y, Zhou W Y N, Zhang J, Zhang Y, Sun W W and Jiao L L. 2019b. The advanced hyperspectral imager: aboard China's gaofen-5 satellite. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(4): 23-32 [DOI: 10.1109/MGRS.2019.2927687]
- Liu Y N, Xue Y Q, Wang J Y and Shen M M. 2002. Operational modular imaging spectrometer. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 21(1): 9-13 (刘银年, 薛永祺, 王建宇, 沈鸣明. 2002. 实用型模块化成像光谱仪. *红外与毫米波学报*, 21(1): 9-13) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-9014.2002.01.003]
- Loizzo R, Guarini R, Longo F, Scopa T, Formaro R, Facchinetti C and Varacalli G. 2018. Prisma: the Italian hyperspectral mission//Proceedings of 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE: 175-178 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.077]
- Love S P. 2009. Programmable matched filter and Hadamard transform hyperspectral imagers based on micromirror arrays. *Proc//Proceedings Volume 7210, Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications*. San Jose, California, United States: SPIE: 721007 [DOI: 10.1117/12.808060]
- Love S P and Graff D L. 2014. Full-frame programmable spectral filters based on micromirror arrays. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(1): 011108 [DOI: 10.1117/1.JMM.13.1.011108]
- Lu Y F, Cai Z J, Guo P L, Su Y F and Wu J H. 2018. An automatic cavity-length stabilizing and monitoring system for tunable Fabry-Pérot filter//Proceedings Volume 10827, Sixth International Conference on Optical and Photonic Engineering (icOPEN 2018). Shanghai, China: SPIE: 108270I [DOI: 10.1117/12.2501033]
- Lucey P G, Horton K A, Williams T J, Hinck K, Budney C, Rafert B and Rusk T B. 1993. SMIFTS: a cryogenically cooled, spatially modulated imaging infrared interferometer spectrometer//Proceedings Volume 1937, Imaging Spectrometry of the Terrestrial Environment. Orlando, FL, United States: SPIE: 129-141 [DOI: 10.1117/12.157050]
- Ma G X, Xue Y Q and Li G F. 2008. Satellite remote sensing for haze monitoring in Pearl River delta region. *Science and Technology Review*, 26(16): 72-76 (马国欣, 薛永祺, 李高丰. 2008. 珠江三角洲地区的灰霾监控与卫星遥感. *科技导报*, 26(16): 72-76) [DOI: 10.3321/j.issn:1000-7857.2008.16.016]
- Ma Y P, Zhang W and Liu D X. 2012. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets. *Aerospace Shanghai*, 29(1): 37-40, 59 (麻永平, 张炜, 刘东旭. 2012. 高光谱侦察技术特点及其对地面军事目标威胁分析. *上海航天*, 29(1): 37-40, 59) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-1630.2012.01.008]



- Maestro M M, Paringit E C, Viray F A, Calvo J S, Ishida T, Takahashi Y, Kurihara J, Vergel K and Magallon B P. 2016. Determination of the pre-launch image-processing techniques for Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF) for PHL-Microsat DIWATA-1//Proceedings of the 37th Asian Conference on Remote Sensing. Colombo, Sri Lanka
- Mahmoud K, Park S and Lee D H. 2018. Development of a new linearly variable edge filter (LVEF)-based compact slit-less mini-spectrometer. *Journal of Physics: Conference Series*, 972: 012026 [DOI: 10.1088/1742-6596/972/1/012026]
- Makisara K, Meinander M, Rantasuo M, Okkonen J, Aikio M and Sipilä K. 1993. Airborne imaging spectrometer for applications (AISA)//Proceedings of IGARSS '93-IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Tokyo: IEEE: 479-481 [DOI: 10.1109/IGARSS.1993.322291]
- Mausner W. 2003. The airborne visible/infrared imaging spectrometer AVIS-2-multiangular und hyperspectral data for environmental analysis//Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse: IEEE: 2020-2022 [DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1294326]
- Michael S. 2006. Fixed-wing unmanned aircraft are air force's best near-space option. *Defense Daily*, 229(30)
- Michel S, Gamet P and Lefevre-Fonollosa M J. 2011. HYPXIM — A hyperspectral satellite defined for science, security and defence users//Proceedings of the 3rd Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Lisbon, Portugal: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/whispers.2011.6080864]
- Murchie S, Arvidson R, Bedini P, Beisser K, Bibring J P, Bishop J, Boldt J, Cavender P, Choo T, Clancy R T, Darlington E H, Des Marais D, Espiritu R, Fort D, Green R, Guinness E, Hayes J, Hash C, Heffernan K, Hemmler J, Heyler G, Humm D, Hutcheson J, Izenberg N, Lee R, Lees J, Lohr D, Malaret E, Martin T, McGovern J A, McGuire P, Morris R, Mustard J, Pelkey S, Rhodes E, Robinson M, Roush T, Schaefer E, Seagrave G, Seelos F, Silverglate P, Slavney S, Smith M, Shyong W J, Strohhorn K, Taylor H, Thompson P, Tossman B, Wirzburger M and Wolff M. 2007. Compact reconnaissance imaging spectrometer for mars (CRISM) on mars reconnaissance orbiter (MRO). *Journal of Geophysical Research: Planets*, 112(E5): E05S03 [DOI: 10.1029/2006JE002682]
- Natale V G, Kafri A, Tidhar G A, Chen M, Feingersh T, Sagi E, Cisbani A, Baroni M, Labate D, Nadler R, Leizer A, Signorile S, Tempesta P, Magliozzi M L, Catallo C and Pietropaolo A. 2013. SHALOM — Space-borne hyperspectral applicative land and ocean mission//Proceedings of the 5th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). Gainesville, FL: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/WHISPERS.2013.8080667]
- Nink S, Hill J, Buddenbaum H, Stoffels J, Sachtleber T and Langshausen J. 2015. Assessing the suitability of future multi- and hyperspectral satellite systems for mapping the spatial distribution of norway spruce timber volume. *Remote Sensing*, 7(9): 12009-12040 [DOI: 10.3390/rs70912009]
- Peón J, Recondo C, Fernández S, Calleja F, De Miguel E and Carretero L. 2017. Prediction of topsoil organic carbon using airborne and satellite hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 9(12): 1211 [DOI: 10.3390/rs9121211]
- Pearlman J S, Barry P S, Segal C C, Shepanski J, Beiso D and Carman S L. 2003. Hyperion, a space-based imaging spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6): 1160-1173 [DOI: 10.1109/TGRS.2003.815018]
- Qi W C, Zhang X, Wang N, Zhang M and Cen Y. 2019. A spectral-spatial cascaded 3d convolutional neural network with a convolutional long short-term memory network for hyperspectral image classification. *Remote Sensing*, 11(20): 2363 [DOI: 10.3390/rs11202363]
- Sakamoto Y, Sugimura N, Fukuda K, Kuwahara T, Yoshida K, Kurihara J, Fukuhara T and Takahashi Y. 2016. Development and flight results of microsatellite bus system for RISING-2. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 14(30): Pf\_89-Pf\_96 [DOI: 10.2322/tastj.14.pf\_89]
- Sang B, Schubert J, Kaiser S, Mogulsky V, Neumann C, Förster K P, Hofer S, Stuffer T, Kaufmann H, Müller A, Eversberg T and Chlebek C. 2008. The EnMAP hyperspectral imaging spectrometer: instrument concept, calibration, and technologies//Proceedings Volume 7086, Imaging Spectrometry XIII. San Diego, California, United States: SPIE: 708605 [DOI: 10.1117/12.794870]
- Schaepman M E, Jehle M, Hueni A, D'Odorico P, Damm A, Weyeremann J, Schneider F D, Laurent V, Popp C, Seidel F C, Lenhard K, Gege P, Küchler C, Brazile J, Kohler P, De Vos L, Meuleman K, Meynart R, Schläpfer D, Kneubühler M and Itten K I. 2015. Advanced radiometry measurements and Earth science applications with the Airborne Prism Experiment (APEX). *Remote Sensing of Environment*, 158: 207-219 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.014]
- Schmit T J, Griffith P, Gunshor M M, Daniels J M, Goodman S J and Lebar W J. 2017. A closer look at the ABI on the GOES-R series. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(4): 681-698 [DOI: 10.1175/bams-d-15-00230.1]
- Seidel F C, Stavros E N, Cable M L, Green R and Freeman A. 2018. Imaging spectrometer emulates Landsat: a case study with Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and Operational Land Imager (OLI) data. *Remote Sensing of Environment*, 215: 157-169 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.05.030]
- Shan Y H, Peng L and Sun Z H. 2006. Research of U. S. intelligence, surveillance and reconnaissance systems. *Journal of the National Defence University*, (5): 91-92. (单月晖, 彭莉, 孙振华. 2006. 美军情报监视侦察系统发展研究. *国防大学学报(外军研究)*, (5): 91-92)
- Shi Z D, Fang L and Zhou C X. 2014. Dispersive element based on

- grating and tunable Fabry-Perot filter in miniature spectrometer. *Applied Optics*, 53(1): 76-81 [DOI: 10.1364/AO.53.000076]
- Shingu H, Homma K, Kurosaki H, Suzuki T and Yamamoto H. 2003. Field observation of surface conditions using LCTF spectropolarimeter//Proceedings Volume 5017, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications IV. Santa Clara, CA, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.476782]
- Stuhlmann R, Rodriguez A, Tjemkes S, Aminou D M, Stark H and Schumann W. 2009. MTG-IRS: status, specifications and technical concept//Fourier Transform Spectroscopy 2009. Vancouver Canada: OSA [DOI: 10.1364/FTS.2009.FMC1]
- Sun T and Kelly K 2009. Compressive sensing hyperspectral imager//Computational Optical Sensing and Imaging. San Jose, California United States: OSA [DOI: 10.1364/COSI.2009.CTuA5]
- Svedhem H, Titov D V, McCoy D, Lebretton J P, Barabash S, Bertaux J L, Drossart P, Formisano V, Häusler B, Korablev O, Markiewicz W J, Nevejans D, Pätzold M, Piccioni G, Zhang T L, Taylor F W, Lellouch E, Koschny D, Witasse O, Eggel H, warhaut M, Accomazzo A, Rodriguez-Canabal J, Fabrega J, Schirmann T, Clochet A and Coradini M. 2007. Venus express—the first European mission to Venus. *Planetary and Space Science*, 55(12): 1636-1652 [DOI: 10.1016/j.pss.2007.01.013]
- Tanii J, Iwasaki A, Kawashima T and Inada H. 2012. Results of evaluation model of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)//Proceedings of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich: IEEE: 131-134 [DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351619]
- Tanii J, Kashimura O, Ito Y and Iwasaki A. 2016. Flight model performances of HISUI hyperspectral sensor onboard ISS (International Space Station)//Proceedings Volume 10000, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XX. Edinburgh, United Kingdom: SPIE: 100000A [DOI: 10.1117/12.2243846]
- Tao C N, Zhu H Z, Sun P, Wu R M and Zheng Z R. 2020. Hyperspectral image recovery based on fusion of coded aperture snapshot spectral imaging and RGB images by guided filtering. *Optics Communications*, 458: 124804 [DOI: 10.1016/j.optcom.2019.124804]
- Tong Q X, Xue Y Q and 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): 70-90 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2267204]
- Tong Q X, Zhang B and Zhang L F. 2016. Current progress of hyperspectral remote sensing in China. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 689-707 (童庆禧, 张兵, 张立福. 2016. 中国高光谱遥感的前沿进展. *遥感学报*, 20(5): 689-707) [DOI: 10.11834/JRS.20166264]
- Transon J, D'Andrimont R, Maignard A and Defourny P. 2018. Survey of hyperspectral earth observation applications from space in the sentinel-2 context. *Remote Sensing*, 10(2): 157 [DOI: 10.3390/rs10020157]
- Tripathi M K and Govil H. 2019. Evaluation of AVIRIS-NG hyperspectral images for mineral identification and mapping. *Heliyon*, 5(11): e02391 [DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02391]
- van Wageningen J W, Root R R and Key C H. 2004. Comparison of AVIRIS and Landsat ETM+ detection capabilities for burn severity. *Remote Sensing of Environment*, 92(3): 397-408 [DOI: 10.1016/j.rse.2003.12.015]
- Vane G. 1987. First results from the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)//Proceedings Volume 0834, Imaging Spectroscopy II. San Diego, CA, United States: SPIE: 127-143 [DOI: 10.1117/12.942296].
- Vane G, Goetz A F H and Wellman J B. 1984. Airborne imaging spectrometer: a new tool for remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22(6): 546-549 [DOI: 10.1109/TGRS.1984.6499168]
- Veraverbeke S, Stavros E N and Hook S J. 2014. Assessing fire severity using imaging spectroscopy data from the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) and comparison with multispectral capabilities. *Remote Sensing of Environment*, 154: 153-163 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.019]
- Wagadarikar A, John R, Willett R and Brady D. 2008. Single disperser design for coded aperture snapshot spectral imaging. *Applied Optics*, 47(10): B44-B51 [DOI: 10.1364/ao.47.000b44]
- Wan L M, Lin Y Y, Zhang H S, Wang F, Liu M F and Lin H. 2020. GF-5 hyperspectral data for species mapping of mangrove in Mai Po, Hong Kong. *Remote Sensing*, 12(4): 656 [DOI: 10.3390/rs12040656]
- Wang J, Zhou W and Yao L B. 2012. Review of current techniques and trends on foreign imaging reconnaissance. *Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University*, 27(2): 199-204 (王捷, 周伟, 姚力波. 2012. 国外成像侦察技术现状及发展趋势. *海军航空工程学院学报*, 27(2): 199-204) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1522.2012.02.019]
- Wang J Y and Xue Y Q. 1992. 64-Band airborne imaging spectrometer. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 11(3): 181-188 (王建宇, 薛永祺. 1992. 64波段机载成像光谱仪. *红外与毫米波学报*, 11(3): 181-188)
- Wang J Y and Xue Y Q. 1998. Airborne imaging spectrometers developed in China//Proceedings Volume 3502, Hyperspectral Remote Sensing and Application. Beijing, China: SPIE [DOI: 10.1117/12.317776]
- Wang Y. 2015. Study of spectral imaging system based on filter. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (王颖. 2015. 滤光片型光谱成像技术研究. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所))
- Wang Y M, Jia J X, He Z P and Wang J Y. 2016. Key technologies of advanced hyperspectral imaging system. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 850-857 (王跃明, 贾建鑫, 何志平, 王建宇. 2016. 若

- 干高光谱成像新技术及其应用研究. 遥感学报, 20(5): 850-857 [DOI: 10.11834/jrs.20166206]
- Wei L Q, Xiao X Z, Wang Y M, Zhuang X Q and Wang J Y. 2017. Research on the shortwave infrared hyperspectral imaging technology based on Integrated Stepwise filter. *Infrared Physics and Technology*, 86: 90-97 [DOI: 10.1016/j.infrared.2017.08.023]
- Williams F L. 2003. The spectral characterization of the Cross-track Infrared Sounder (CrIS) engineering model: updated methodology and initial test results//Proceedings Volume 5152, *Infrared Spaceborne Remote Sensing XI*. San Diego, California, United States: SPIE [DOI: 10.1117/12.508543]
- Xiao X Z. 2015. Research of Stepwise Integrated Filter Based Infrared Spectral Imaging. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (肖喜中. 2015. 基于阶跃集成滤光片分光的红外光谱成像技术研究. 上海: 中国科学院研究生院(中国科学院上海技术物理研究所))
- Xu Y, Xie S B, Liang J, Sun D X, Qi N M and Liu Y N. 2020. A novel method to remove interference fringes for hyperspectral SWIR imagers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(11): 7580-7588. [DOI: 10.1109/tgrs.2020.2981640]
- Yan C X. 2013. TG-1 hyperspectral imager. *China Science and Technology Achievements*, (11): 82-83 (颜昌翔. 2013. 天宫一号高光谱成像仪. 中国科技成果, (11): 82-83) [DOI: 10.3772/j.issn.1009-5659.2013.11.033]
- Yarbrough S, Caudill T R, Kouba E T, Osweiler V, Arnold J, Quarles R, Russell J, Otten III L J, Jones B A, Edwards A, Lane J, Meigs A D, Lockwood R B and Armstrong P. 2002. *MightySat II.1 hyperspectral imager: summary of on-orbit performance*//Proceedings Volume 4480, *Imaging Spectrometry VII*. San Diego, CA, United States: SPIE: 186-197 [DOI: 10.21236/ada430883]
- Yuan J W, Wu C, Du B, Zhang L P and Wang S G. 2020. Analysis of landscape pattern on urban land use based on GF-5 hyperspectral data. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 465-478 (袁静文, 武辰, 杜博, 张良培, 王树根. 2020. 高分五号高光谱遥感影像的城市土地利用景观格局分析. 遥感学报, 24(4): 465-478) [DOI: 10.11834/jrs.20209252]
- Yuan X K. 2004. Present and future status of space microwave imaging radar. *Space Electronic Technology*, (1): 1-6, 14 (袁孝康. 2004. 空间微波成像雷达的发展现状与未来. 空间电子技术, (1): 1-6, 14)
- Zhang Y. 2016. *Optical Technology of Long-wave Infrared Hyperspectral Imaging*. Shanghai: (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (张营. 2016. 长波红外高光谱成像仪光学技术研究. 上海: 中国科学院研究生院(中国科学院上海技术物理研究所))
- Zhao X, Xiao Z Q, Kang Q, Li Q and Fang L. 2010. Overview of the Fourier transform hyperspectral imager (HSI) boarded on HJ-1A satellite//Proceedings of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI: IEEE: 4272-4274 [DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5649250]
- Zheng Q B and Wei J. 2004. Medium Resolution Imaging Spectro-radiometer (MRIS) on SZ-3 Spacecraft. Hangzhou: Chinese Society of Optics, Zhejiang Optical Society, Zhejiang University. (郑亲波, 危峻. 2004. SZ-3中分辨率成像光谱仪//大珩先生九十华诞文集暨中国光学学会2004年学术大会论文集. 杭州: 中国光学学会, 浙江省光学学会, 浙江大学)
- Zhu W, Wang X, Huang Y, Du P J and Tan K. 2020. Reweighted sparsity regularized deep nonnegative matrix factorization with total variation toward hyperspectral unmixing. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 401-416 (祝伟, 王雪, 黄岩, 杜培军, 谭琨. 2020. 重加权稀疏和全变差约束下的深度非负矩阵分解高光谱解混. 遥感学报, 24(4): 401-416) [DOI: 10.11834/jrs.20209193]

## Development of hyperspectral imaging remote sensing technology

LIU Yinnian

*CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China*

**Abstract:** Hyperspectral remote sensing technology can acquire an object's geometric, radiation, and spectral information. This technology is an important technique in Earth observations and is increasingly becoming important in applications of natural resource survey, environment and disaster monitoring, precision agriculture, oceans and costal monitoring, and urban planning. In the past decades, several advanced hyperspectral imaging systems from airborne (e.g., AVIRIS, Hymap, OMIS, and PHI) to spaceborne (e.g., EO-1/Hyperion and PROBA/CHRIS) platforms have been designed, built, and operated globally. On the one hand, airborne hyperspectral imager has been developed into commercial operation stage. Examples of international companies that develop airborne systems are Spectra Vista Corporation of America, Specim of Finland, and ITRES Research of Canada. On the other hand, GF-5/AHSI, which is a pioneer in Chinese spaceborne hyperspectral imager, has first realized wide spectrum, wide swath width, and high detection sensitivity. It marks a new era ever since the appearance of EO-1/Hyperion in 2000.

In the future, the outlook for hyperspectral remote sensing technique is as follows:

(1) The development of large-scale plane array detector, optical machining detection, and signal processing has improved not only the



spectral resolution but also the spatial resolution and swath width of hyperspectral imaging. Hyperspectral imager's spectrum range will cover from UV to LWIR to obtain more abundant spectral information of ground objects, all-day reflectance, and emission spectral characteristics. In addition, the integrated calibration methods of laboratory, in-orbit, and the Earth, the Sun, the Moon, the cold air, and the stars are becoming increasingly abundant and refined to ensure the application efficiency of hyperspectral imager at higher performance. The hyperspectral imaging technology with super wide width and higher resolution also puts forward higher requirements for the further development of large-scale detectors and large-aperture optics with wide working band range.

(2) The development of information, imaging, and optical processing technology has introduced new beam splitting technologies and developed the core beam splitting elements from the mature dispersion and interference type to the diversified direction. Many novel optical splitting schemes, such as Acousto-optic Tunable Filter (AOTF), Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF), Linear Variable Filter (LVF), Integrated Stepwise Filter (ISF), Tunable Fabry-Perot Filter (TFPF) and computational spectral imaging system based on compressed sensing, are available at present. These spectroscopic image methods are still in the stage of laboratory experiments. An increasing attention has also been paid to the chip-level hyperspectral spectroscopy, which combines light splitting with photoelectric conversion.

(3) With the advances in the "artificial intelligence," machine learning data process, such as neural network and deep learning, has become a trend with hyperspectral imaging to construct an 'intelligent' hyperspectral remote sensing satellite system. This technology will integrate the ability of automatic optimization of onboard load parameters and automatic real-time processing of onboard data and product generation. Meanwhile, the amount of remote sensing data obtained is explosively growing with the increase in resolution and information dimensions of hyperspectral imaging instruments. "Big data" feature is significant. Data transmission is an important issue in successfully using the effective data mining and information extraction and improving the efficiency of data compression in the future.

(4) The development of small UAV and micro-nano satellite technology has developed hyperspectral imaging toward a low-cost, flexible, integrated, and real-time technology. At present, the light and small hyperspectral imaging technology based on small UAV is greatly demanded and valuable in the fields of agricultural, forestry diseases and insect pests' detection, target search, and rescue and relief. Micro-nano satellites have low cost and short development cycle and can conduct complex space remote sensing tasks. The combination of hyperspectral imaging and micro-nano satellite technologies will promote the integration of multi-functional structure and space exploration payload. Lightweight, integrated, and systematized hyperspectral remote sensing with space networking and all-time detection will play an important role in the future. It will provide the possibility for hyperspectral remote sensing satellites to enter the commercial field.

Many new principles, schemes, and technologies are being implemented and applied in hyperspectral imaging. The integrated acquisition and processing ability of multiple information is also greatly enhanced. The hyperspectral load is gradually developing in the direction of large field of view, large relative aperture, high resolution, and high quantification. The cost of hyperspectral remote sensing technology will be greatly reduced with its continuous development and maturity. The commercial application of this technology will also be an important direction of future development.

**Key words:** remote sensing, hyperspectral imaging, remote sensing payload, wide spectrum, wide swath width, high resolution

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0500400); Major Project of National High Resolution Earth Observation System of China (No.A0106/1112) ; National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2008AA121101)