

吴传庆◎著

环境一号卫星数据 的 水环境遥感应用

HUANJING YIHAO
WEIXING SHUJU DE SHUIHUANJING
YAOGAN YINGYONG

中国环境出版社

环境一号卫星数据的水环境 遥感应用

吴传庆 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

环境一号卫星数据的水环境遥感应用/吴传庆著.
—北京:中国环境出版社,2014.5
ISBN 978-7-5111-1823-3

I. ①环… II. ①吴… III. ①遥感技术—应用—
水环境—环境监测 IV. ①X832

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第079157号



出版人 王新程
责任编辑 连斌 赵楠健
责任校对 尹芳
封面设计 金喆

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街16号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 编辑管理部
010-67121726 生态(水利水电)图书出版中心
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2014年8月第1版
印 次 2014年8月第1次印刷
开 本 787×960 1/16
印 张 11.75 彩插 52
字 数 282千字
定 价 45.00元

【版权所有。未经许可,请勿翻印、转载,违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题,请寄回本社更换

前 言

随着遥感技术的不断发展，利用遥感数据对生态环境进行实时、动态、准确的监测和分析，为生态破坏、污染防治监控预警提供新的手段，这方面工作已经在我国环保工作中逐步得到应用。为形成对我国生态环境和灾害遥感监测的能力，为我国环境保护与防灾减灾提供遥感信息与技术支撑，我国研制发射了“环境与灾害监测预报小卫星星座”命名为“环境一号卫星”(代号 HJ-1)。遥感技术具有快速、连续、大范围、可视化程度高等特点，对大尺度水环境状况和非点源污染监测方面具有明显的优势，遥感信息已经成为水环境保护具有最重要和核心价值的信息资源类别。

随着全世界各国政府和公众对水环境问题的日益关注，随着遥感技术和传感器的发展，水环境遥感科学也进入一个新的发展时期。在理论研究上正从定性向半定量、定量研究发展，从分散向集成方向发展；在技术上已由可见光发展到红外、微波，从单一波段发展到多波段、多极化、多角度，从单一传感器发展到多传感器相结合。但是由于水体的反射信号弱，水环境遥感一直是环境遥感中的难点。如何基于环境一号卫星数据实现在水环境监测方面的应用，对大多数环境保护、监测工作人员而言都难以下手。常规水环境参数监测是基于地面布点采样的物理或化学分析测量方法进行的，缺乏空间连续性且费用较高；而遥感技术能够更好地，全面、及时和准确地监测水体的整体环境状况。做好水环境遥感监测，实现水环境监测工作的天地一体化，将会为水环境监测、管理和保护带来变革。

正因为如此，我们将近年的研究成果整理归纳，对多年来的技术研究和业务运行工作进行经验总结，编著成了《环境一号卫星数据的水环境遥感应

用》。以期为相关工作和研究提供参考，为刚刚接触水环境遥感的同仁和环保工作人员引路。

本书面向直接应用，介绍了环境一号卫星概况、其多个传感器数据的预处理方法、水质参数的遥感反演方法和水环境具体问题的实际应用。全书共包括5章，第1章介绍环境一号卫星星座情况，其中包括环境一号卫星星座的组成，传感器的具体参数和光学辐射特性；第2章介绍环境一号卫星数据面向水环境遥感的预处理方法，包括多种遥感数据的场地辐射定标和交叉辐射定标方法、图像条带去除、大气校正方法等；第3章介绍基于环境一号卫星数据的多种水质参数的遥感反演模型方法，主要包括叶绿素a、悬浮物、总磷、总氮浓度、透明度、温度和富营养化程度遥感反演模型的构建原理和思路等；第4章介绍了水环境遥感监测业务应用平台软件情况，以期通过对此软件的简单介绍，供有需求的读者在设计相关软件开发工作中进行参考；第5章具体介绍了水环境遥感工作中的部分业务应用，主要包括蓝藻水华遥感监测、富营养化水质指标遥感监测、核电站温排水遥感监测、农业面源遥感估算、饮用水水源地生态安全遥感监测，以及湖泛、赤潮、溢油和海冰等方面的应急监测等。

本书由水专项课题“国家水环境遥感技术体系研究与示范”（2009ZX07527-6）和国家自然科学基金项目“基于光谱识别和元胞自动机的水华亚像元级遥感定位研究”（41001245）支持完成。部分编写素材来自江苏省环境监测中心、中科院遥感与数字地球研究所、南京师范大学和中城泰信信息技术有限公司所提供的素材；同时也感谢环境保护部卫星环境应用中心水环境遥感部的同事们对本书出版的大力支持，此外，核电站温排水素材由朱利博士提供、农业面源素材由王雪蕾博士提供、饮用水水源地素材由姚艳娟博士提供、近岸海域素材由马万栋博士提供，对以上素材提供者表示感谢。值得提出的是，在项目研究以及本书的写作过程中，许多专家学者提出了良好的建议，在此一并致谢。

目 录

第 1 章	环境一号卫星星座概述	1
1.1	环境一号卫星传感器简况.....	4
1.2	环境一号卫星光学载荷辐射特性.....	11
第 2 章	环境一号卫星数据预处理	20
2.1	环境一号卫星遥感数据的辐射定标.....	20
2.2	图像条带去除	32
2.3	环境一号卫星遥感数据的大气校正.....	36
2.4	几何校正及拼接处理.....	48
第 3 章	水质参数的遥感反演模型方法.....	50
3.1	叶绿素 a 浓度反演模型集.....	50
3.2	悬浮物浓度反演模型集.....	58
3.3	透明度反演模型	63
3.4	TN、TP 反演模型.....	64
3.5	水环境遥感综合评价技术.....	68
3.6	水表温度模型	74
第 4 章	水环境遥感监测业务应用平台介绍.....	76
4.1	水环境遥感监测业务应用平台设计.....	76
4.2	软件关键技术研发.....	83
4.3	软件特点及功能实现.....	95
第 5 章	水环境遥感应用	110
5.1	蓝藻水华遥感监测.....	110
5.2	富营养化水质指标浓度遥感反演.....	116

5.3 核电站温排水遥感监测.....	122
5.4 水环境应急遥感监测.....	128
5.5 农业面源遥感监测.....	146
5.6 饮用水水源地监测.....	162
5.7 近岸海域遥感监测.....	171
参考文献	175
彩图	181

第 1 章 环境一号卫星星座概述

为实现对我国生态破坏、环境污染、自然灾害进行大范围、全天候、全天时动态监测，全面反映生态环境质量变化的过程和趋势。并对其进行预测，1998 年中国环境保护部与国家减灾委员会共同提出“环境与灾害监测预报小卫星星座系统”建设方案，2002 年原国防科工委正式将“环境与灾害监测预报小卫星星座”命名为“环境一号卫星”（代号 HJ-1），并列入民用航天“十五”计划和《中国航天白皮书》民用卫星发展重点。

环境一号卫星系统建设的主要任务是利用我国自主小卫星星座，形成对我国生态环境和灾害遥感监测的能力，为我国环境保护与防灾减灾提供遥感信息与技术支撑，全面提高我国环境和灾害信息的获取、处理和应用的水平。考虑到我国现有的技术基础、未来的技术发展及财政支撑能力，该星座采用分步实施战略进行建设，即先期发射两颗光学小卫星和一颗合成孔径雷达小卫星（HJ-1A、HJ-1B、HJ-1C），组成“2+1”星座，初步形成对我国环境与灾害监测能力，然后再建立由四颗光学小卫星和四颗合成孔径雷达小卫星组成的“4+4”星座，实现对我国及周边国家、地区的环境与灾害的动态监测。

2008 年 9 月 6 日，环境一号卫星“2+1”星座中的两颗光学小卫星（HJ-1A 和 HJ-1B，见彩图 1-1）“一箭双星”发射成功；2009 年完成在轨测试，2009 年 3 月 30 日正式交付卫星用户使用。2012 年 11 月 19 日，我国在太原卫星发射中心用“长征二号丙”运载火箭，将环境一号卫星 C 星（HJ-1C，见彩图 1-2）成功送入太空。目前“2+1”星座已组建完成。

“环境一号卫星”工程由卫星系统、运载系统、发射场系统、测控系统、地面系统 and 应用系统六大系统组成。卫星由中国航天科技集团公司东方红卫星公司研制，中国科学院参加了有效载荷的研究任务。运载火箭由中国航天科技集团公司运载火箭技术研究院研制，太原卫星发射中心负责卫星火箭发射。西安卫星测控中心负责测控任务和长期管理。地面系统由数据接收、地面数据处理、分发服务系统组成，中国科学院遥感地面站负责卫星数据的接收，中国资源卫星数据中心负责数据处理、分发。应用系统由环境应用系统和减灾应用系统组成，国家减灾

委和环境保护部共同负责卫星的业务运行管理。

环境一号卫星（HJ-1A、HJ-1B、HJ-1C）总体构成包括卫星平台和有效载荷两部分。每颗卫星的平台包括 8 个分系统：结构、测控、星务管理、姿轨控、电源、总体电路、热控和天线；有效载荷包括数传、宽覆盖多光谱 CCD 相机（A、B 星都有）、超光谱成像仪（仅 A 星有）、Ka 通信试验分系统（仅 A 星有）、红外相机（仅 B 星有）和 S 波段合成孔径雷达（C 星有）。其中，HJ-1A、HJ-1B 是中国新一代民用光学对地遥感小卫星，它具有中高空间分辨率、高时间分辨率、超光谱分辨率、宽观测带宽性能，能综合运用可见光、红外、超光谱等观测手段对生态环境的变化实施大范围的动态监测。HJ-1A、HJ-1B 卫星（图 1-1）主要参数如表 1-1 所示。具有严格的成像视场匹配要求，两颗卫星运行在同一个轨道面内，呈 180°相位差，通过严格的轨道构型控制，可形成两星地面图像的搭接，共同实现 48 h 内对中国及周边地区的覆盖观测（见彩图 1-3）。宽覆盖多光谱 CCD 相机形成对大型水体环境、区域空气环境、宏观生态环境的大范围、动态监测；超光谱成像仪满足对环境地物高光谱成像的要求；红外扫描仪形成对秸秆焚烧、城市热岛、水体热污染、辐射污染、土壤污染等监测能力；S 波段合成孔径雷达形成生态环境全天候、全天时成像的能力。

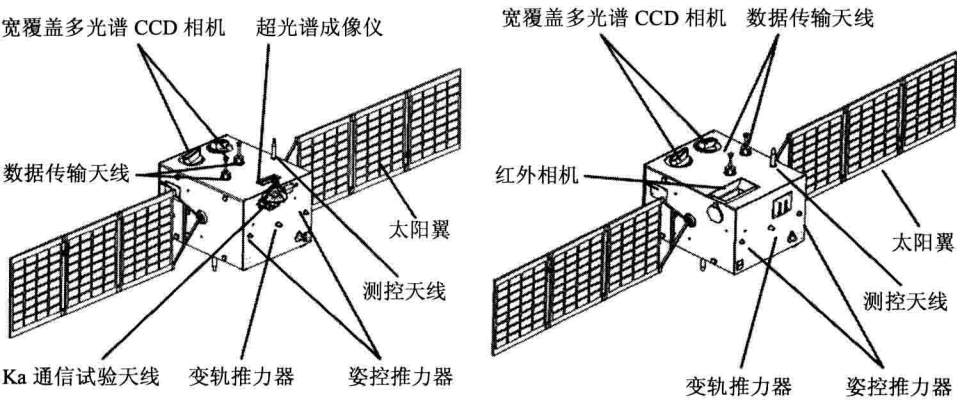


图 1-1 HJ-1A（左）、HJ-1B（右）组成

表 1-1 HJ-1A、HJ-1B 卫星主要参数

项目	子项目	A 星	B 星
轨道	类型	太阳同步	
	高度	649.093 km	
	交点地方时	降交点地方时 10:30AM±30 min	

项目	子项目	A 星	B 星
重量/kg	整星	473	496
	平台干重	286.27	286.90
	有效载荷	167.88	186.37
尺寸/m ³	本体	1.432×1.100×0.953	
	包络	Φ2.0×1.545	
	展开后跨度	7.44	
数传	发射频率	X 波段	X 波段
	码速率	120 Mbit/s	60 Mbit/s
	压缩比	CCD 4：1；超光谱仪 1.64：1	CCD 4：1
	存储器容量	16 GB	16 GB
姿轨控	模式	对地三轴姿态稳定	
	指向精度	俯仰、滚动≤0.4° 偏航≤0.5°	
	指向稳定度	三轴≤0.01°/s	
	探测精度	俯仰、滚动≤0.2° 偏航≤0.3°	
测控	体制	USB+GPS	
	上行码速率	2 kbit/s	
	下行码速率	4 096 bit/s	
	GPS 定位精度	20 m（1σ）（三轴）	
	GPS 时间精度	优于 1 μs	
星务管理	指令条数	直接指令 46 条 间接指令多于 100 条	
	遥测路数	多于 1 000 路	
电源	电池阵面积	±Y 两翼 6 块板，5.661 m ²	
	输出功率	初期 580W/末期 510W	
	蓄电池	33 Ah 镍镉蓄电池	
	母线电压	28.5V±1V	
热控	舱内一般仪器工作温度	-10~45℃	
	舱外一般仪器工作温度	-90~70℃	
设计寿命	3 年		

表 1-2 HJ-1C 卫星主要参数

项目	参数
轨道	太阳同步圆轨道
高度	499 km
倾角	97.37°
回归周期	31 d
降交点地方时	6:00AM
轨道保持精度	星下点漂移 $\leq \pm 20$ km
极化方式	垂直发射—垂直接收 (VV)
谱段	S 波段
分辨率/幅宽	Scan 模式: 15~25 m/95~105 km 条带模式: 4~6 m/35~40 km
辐射分辨率	3 dB [dB=10 lg()]
整星重量	850 kg
设计寿命	大于 3 年

1.1 环境一号卫星传感器简况

1.1.1 宽覆盖多光谱 CCD 相机

宽覆盖多光谱 CCD 相机 (以下简称 CCD 相机) 利用光电转换进行环境地物目标探测, 并将 CCD 探测器输出的地物模拟信号处理形成数字信号, 其同一谱段图像数据按照约定格式编排送数传分系统处理和下传。相机分系统结构组件主要由遮光罩、镜头组件、自补偿支架、焦面机构、基座组件等零部件、电控箱体结构组成。HJ-1A、HJ-1B 中的单台相机主体结构组件如彩图 1-4 所示。

CCD 相机的光学系统由主光学系统和分光系统组成。主光学系统采用像方远心光路形式, 是由窗口和 11 片光学玻璃组成的复杂光学系统, 具有大视场特宽谱段超复消色差的特点; 镜头分前后两组, 相机接收地面景物反射的光线, 经过相机镜头和分光棱镜后, 入射光分成蓝 (B1 谱段)、绿 (B2 谱段)、红 (B3 谱段) 及红外 (B4 谱段) 4 谱段分别成像在 4 片 CCD 探测器线阵上。在积分时间内, CCD 探测器完成光电转换, 进行视频处理后, 再输出给数传分系统。由于卫星连续飞行, 相机就能连续拍摄地面图像, 通过线阵连续推扫成像。

环境一号卫星上的 CCD 相机设置有 4 个谱段具体为 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 相机的星下点像

元分辨率为 30 m，中心像元配准精度为 0.3 像元；幅宽为 360 km。为满足单星 720 km 观测幅宽的要求，设计上采用了两台 CCD 相机进行视场拼接（图 1-2）。能够实现对大气、水体和陆面的多种遥感参数的综合探测。对于陆地，主要用于土地覆被、城市环境、植被和土壤、草地和农田、荒漠化、冰雪覆盖等探测；对于水体，主要用于水体识别、藻类、悬浮物和水生植物监测等探测；对于大气，主要用于水汽、云雾覆盖、云和沙层、气溶胶等探测。环境一号卫星 CCD 相机技术性能指标如表 1-3 所示。

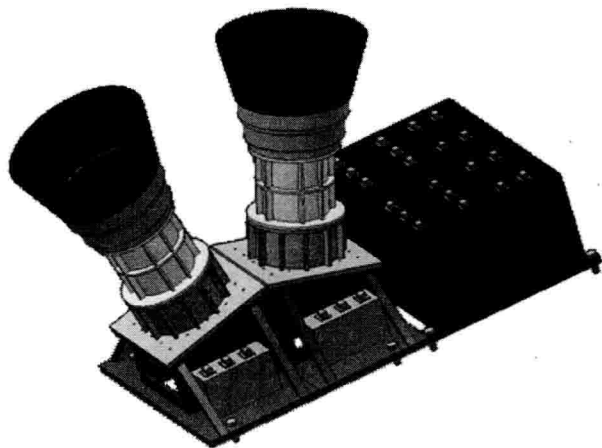


图 1-2 CCD 相机拼接

表 1-3 宽覆盖多光谱 CCD 相机技术性能指标

项目	性能			
星下点像元分辨率/m	30			
幅宽/km	360（2 台组合 ≥ 700 km）			
谱段号	B1	B2	B3	B4
谱段设置/ μm	0.43~0.52	0.52~0.60	0.63~0.69	0.76~0.90
系统各谱段 MTF	≥ 0.20	≥ 0.20	≥ 0.20	≥ 0.14
动态范围/ $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \mu\text{m})]$	316/197	334/195	246/145	246/163
增益控制	每个谱段设置一档增益控制，各谱段分别可调			
信噪比（S/N）	≥ 48 dB，最小值应大于门限 6 dB			
中心像元配准精度	0.3 像元			
有效视场角（ 2ω ）	31°			
焦面像元数	$\geq 12\ 000$			
CCD 原始数据输出数据率/（Mbit/s）	约 90（2 台同时上传约 180 Mbit/s）			
量化值/bit	8			
定标精度	相对定标精度 5%，绝对定标精度 10%			

1.1.2 红外相机

红外相机将来自地球表面环境地物的红外反射及辐射信号，经光学系统会聚成像到线列探测器上，完成光电信号的转换。探测器输出的电信号进行数字处理形成数字信号，并进行均匀性校正，形成红外图像数据。

HJ-1B 上的红外相机有近红外、短波红外、中波红外和长波红外四个红外通道，波段跨越 $0.75\sim 12.5\ \mu\text{m}$ ，光学口径 200 mm。红外相机的光路结构如图 1-3 所示，环境目标信号经双面旋转扫描反射镜反射，进入同轴光学系统，以准平行光出射。分色片 1 反射中波红外波段，透射近红外短波红外波段；分色片 2 反射近红外波段，透射短波红外波段。由各通道透镜组将信号会聚成像于各自对应的探测器组件上。各探测器焦平面组件均由探测器线列镶嵌以滤光片构成，以响应各光谱波段的信号，并形成 4 个光谱通道。中红外、长波红外两个线列探测器集成到同一个焦平面上，由一台斯特林制冷机进行制冷，制冷温度 95 K。

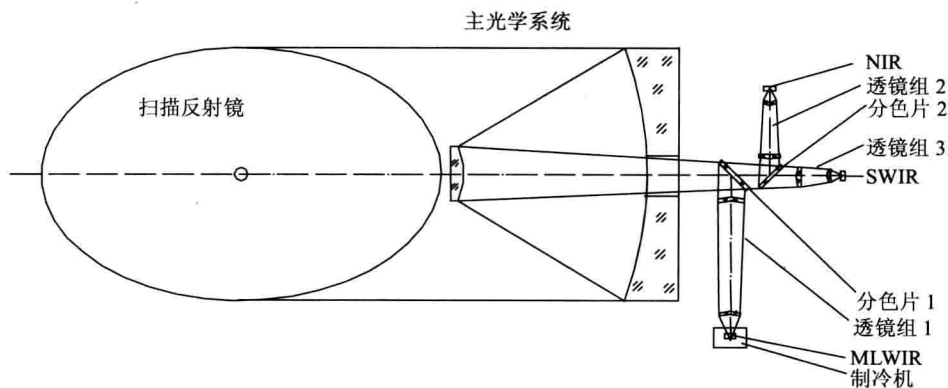


图 1-3 红外相机光学系统光路

红外相机主要包括 1 台红外相机光机扫描头部、1 台红外相机信息处理箱和 1 台斯特林制冷机控制箱（图 1-4）。

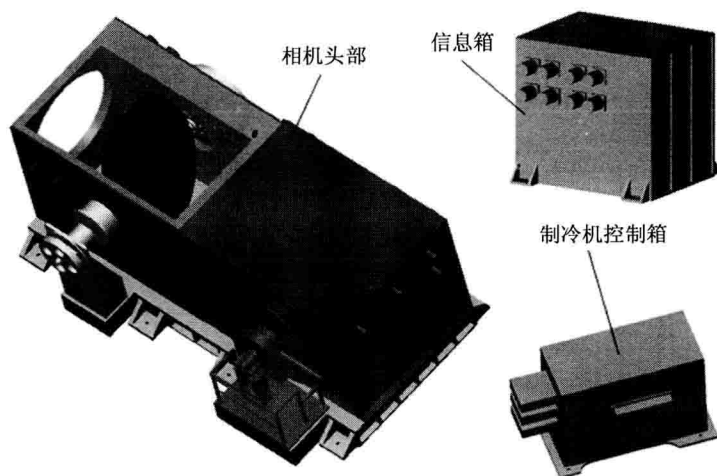


图 1-4 红外相机外形

考虑到滤光片与探测器组合的分光方式在结构上比较紧凑，光学效率高，因此采用分光片先把近红外、短波红外、中红外、长波红外波段分离开，再通过各自的后光学系统会聚到滤光片-探测器组件上，形成红外相机所需要的 4 个探测波段。红外相机设置有 4 个谱段，分别为近红外、短波红外、中波红外、长波红外，具体为 B1: $0.75\sim 1.10\ \mu\text{m}$; B2: $1.55\sim 1.75\ \mu\text{m}$; B3: $3.50\sim 3.90\ \mu\text{m}$; B4: $10.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$ 。红外相机星下点像元分辨率为 $150\ \text{m}$ ，幅宽为 $360\ \text{km}$ 。红外相机 4 个波段均采用自制的线列探测器，并采用校正黑体来代替冷空间，利用相机底板上参考黑体和侧壁上校正黑体两点，同时实现星上辐射基准和相机在轨的辐射校正。根据卫星系统要求，主要利用红外相机所获得的红外谱段的辐射信息探测陆面、水体和大气的热状况。红外相机具体技术性能和指标如表 1-4 所示。

表 1-4 红外相机技术性能和指标

项目	指标			
星下点像元分辨率	150 m (B1、B2、B3); 300 m (B4)			
刈宽/km	720			
扫描视场角	$\pm 29^\circ$			
谱段/ μm	0.75~1.10	1.55~1.75	3.50~3.90	10.5~12.5
MTF	0.28	0.27	0.26	0.25
辐射分辨率 ($N_e\Delta\rho$ 或 $N_e\Delta T$)	0.5%	0.5%	$\leq 1\ \text{K}$ (@400 K)	$\leq 1\ \text{K}$ (@300 K)

项目		指标			
谱段辐射景	最大值	9.32 mW/ (cm ² ·Sr)	0.89 mW/ (cm ² ·Sr)	500 K	340 K
	最小值	—	—	300 K	200 K
中长波红外星上定标精度		—	—	2 K	2 K
近短波红外地面定标精度		相对定标精度 5%； 绝对定标精度 10%		—	—
配准精度		0.3 IFOV			
量化比特数/bit		10			
数据率/ (Mbit/s)		7.5 (四谱段下传)			
制冷温度		85 K			

1.1.3 超光谱成像仪

HJ-1A 上的超光谱成像仪采用静态干涉型成像光谱技术原理进行成像，探测谱段从可见光到近红外，工作谱段为 0.45~0.95 μm，谱段数 110，平均光谱分辨率为 5 nm。超光谱成像仪星下点像元分辨率为 100 m，幅宽为 50 km。

超光谱成像仪采用“空间调制干涉型超光谱成像仪 SMIFTS”技术方案，选择先进的推扫方式，利用光电转换进行环境地物目标探测，在面阵 CCD 传感器上得到一维干涉图和一维空间图像，通过推扫可得到另一维空间图像（图 1-5），再将干涉条纹与图像加入工程应用参数一起进行格式编排，按照约定格式送数传分系统。

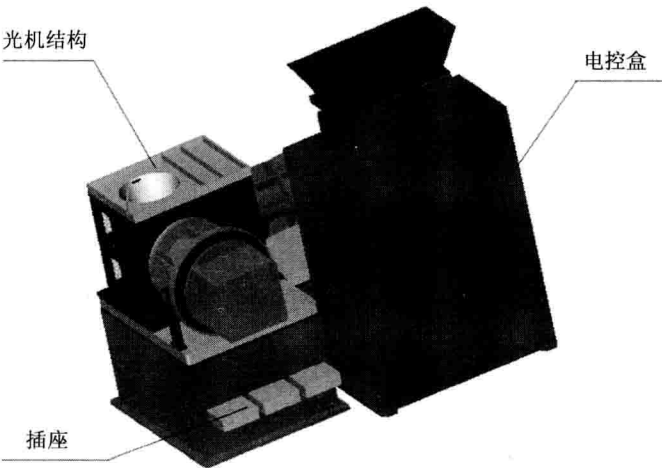


图 1-5 HJ-1A 超光谱成像仪三维模型

超光谱成像仪主要由光谱成像仪和定标部件两部分组成。光谱成像仪由窗口玻璃、摆镜、前置镜、狭缝、干涉仪、傅立叶变换镜、柱面镜和传感器等组成（图 1-6），在 CCD 传感器上得到一维干涉图和一维空间图像，通过推扫可得另一维空间图像。

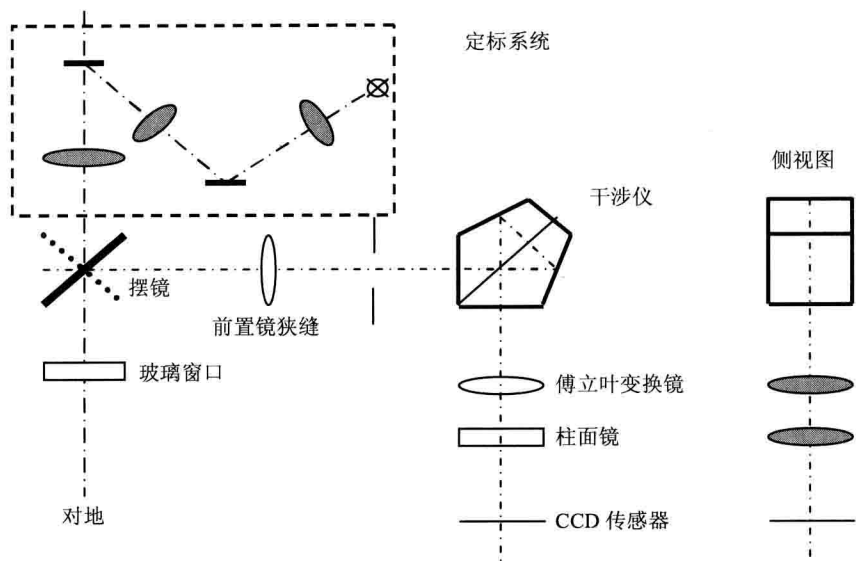


图 1-6 HJ-1A 超光谱成像仪光学系统组成

超光谱成像仪主要利用超光谱相机获得的可见光和近红外谱段的辐射信息实现环境地物高光谱成像，并发挥其具有波段多而窄的特点对生态环境监测目标进行高精度分类，利用其能够获得较完整的光谱曲线，有利于从波形上进行匹配，从而提高其在成分分析中的能力的特点，对环境污染信息进行精细探测。超光谱仪技术性能和指标如表 1-5 所示。

表 1-5 超光谱成像仪技术性能指标

项目	指标
星下点像元分辨率/m	100
幅宽/km	≥50
工作谱段/μm	0.45~0.95
平均光谱分辨率/nm	5
侧向可视视场角	±30°

项目	指标
谱段数	110~128
输出信号量化/bit	12
系统信噪比 (S/N)	0.45~0.95 μm 波段间, 系统 S/N 为 50~100
动态范围/[W/($\text{m}^2\cdot\text{Sr}\cdot\mu\text{m}$)]	134
系统 MTF	≥ 0.2
谱段混迭率	≤ 10
辐射定标精度	相对定标精度 5%, 绝对定标精度 10%
原始数据数据率/(Mbit/s)	107 (全部谱段下传)

1.1.4 S 波段合成孔径雷达

HJ-1C 卫星是中国首颗民用合成孔径雷达 (SAR) 卫星, 质量 890 kg, 轨道为高度 500 km、降交点地方时上午 6 时的太阳同步轨道, 与已经发射的 HJ-1A 卫星、HJ-1B 卫星形成第一阶段的卫星星座 (摘自环境保护部网站环境遥感专栏)。

HJ-1C 卫星使用 $6\text{m}\times 2.8\text{m}$ 的可折叠式网状抛物面天线, 天线在卫星入轨后展开。S 波段合成孔径雷达具有条带和扫描两种工作模式, 成像带宽度分别为 40 km 和 100 km。HJ-1C 的 SAR 雷达单视模式空间分辨率可达 5 m, 距离向四视时分辨率为 20 m, 提供的 SAR 图像以多视模式为主 (图 1-7, 表 1-6)。

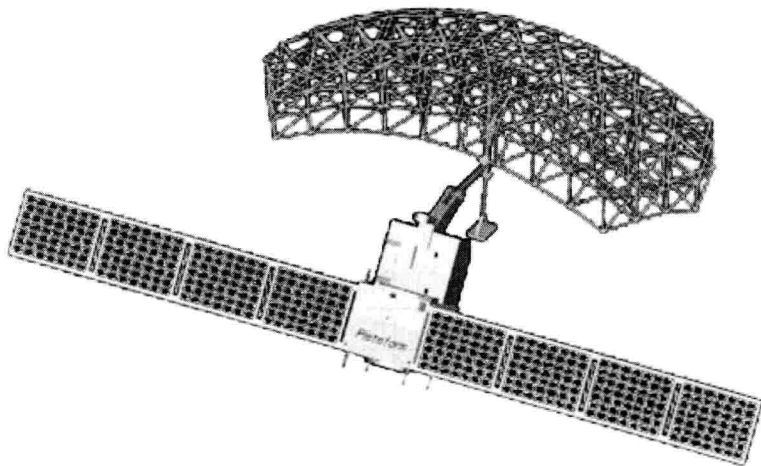


图 1-7 HJ-1C II 卫星 S 波段合成孔径雷达