

宽幅高分辨热红外遥感成像技术研究

陈凡胜^{1,2*}, 胡瑛悦^{1,3}, 李潇雁^{1,3}, 杨林¹, 胡兴健¹, 张勇¹¹中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;²国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024;³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 热红外成像技术在对地观测及空天敏感目标探测等领域有着广泛的应用,常用的线阵探测器成像方式有短线列摆扫、长线列推扫两种,其幅宽与分辨率的比值通常小于 3000。我国“地球大数据科学工程”专项提出基于遥感数据对人类活动痕迹及近海生态进行精细刻画的需求,并通过以热红外、微光为主的方式实现对城市热岛、人类经济活动及极地环境变化的短时相定量观测,其对热红外载荷空间分辨率和时间分辨率提出了更高的要求。针对以上需求,提出一种三谱段多模块拼接的长线列摆扫式热红外探测方式,在 505 km 轨道高度处实现了 300 km 幅宽、30 m 分辨率(星下点)的宽幅高分辨对地成像。该载荷采用全光路低温光学系统以降低仪器自身热辐射,并在后透镜组与杜瓦中间、杜瓦内部均设置挡光环,进而提高系统视场外的消光能力,该研究可为全球精细遥感及高精度量化应用提供技术参考。

关键词 热成像; 热红外; 长线列; 摆扫; 宽幅高分辨
中图分类号 TP732.2 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL202148.1210002

1 引言

红外遥感相机、热成像仪等空间载荷常选用热红外波段探测目标的热辐射,其波长范围主要有 3~5 μm 和 8~14 μm 两个波段,其中前者主要用于导弹、临近高超飞行器等高温、高动态目标的探测,后者主要用于接收自然场景等常温目标的热辐射^[1-2]。与可见光影像相比,热红外影像由于依靠地物的热辐射(温度)成像,可实现夜间观测且对烟、雾及霾等有一定的透过性^[3-4],已广泛应用于陆地及海洋温度反演、地表资源勘查、生态环境监视、灾害应急响应和目标监视等领域^[1,5-11]。目前,国内外许多对地观测卫星均搭载了相关的热红外相机,目前主要高分辨率热红外载荷参数对比结果如表 1 所示,包括 Landsat 8 热红外传感器(TIRS)、委内瑞拉 2 号(VRSS-2)长波红外相机(IRC)、高分 5 号(GF-5)全谱段光谱成像仪(VIRMI)、ASTER 热红外传感器(TIR)、HJ-1B 红外传感器(IRS)和 CASEarth 红外热像仪(TIRI)。由表可知,幅宽较大的载荷其空

间分辨率相对较低,如 HJ-1B IRS 等,而空间分辨率较高的载荷其幅宽往往较小,如 VRSS-2 IRC,GF-5 VIRMI 等。2018 年 1 月 1 日,中国科学院正式成立“地球大数据科学工程”A 类战略性先导科技专项,旨在为人类痕迹、近海生态、城市热岛效应、及极地环境的精细刻画提供短时相、高分辨、高精度的影像数据,其对相应载荷的空间分辨率及幅宽提出了更高的要求。如何在保证高分辨率的同时提高成像幅宽已成为近年来全球航天遥感技术研究的热点之一。

目前,工程上常用的宽幅高分辨成像技术主要包括以下四种^[12]: 1) 多模块拼接增大视场范围;将多个探测器模块按“品”字型交错拼接进而增大线列方向相机视场,如美国的 QuickBird、Worldview-2 及我国资源 1 号 02C(ZY-1 02C)等卫星所搭载的全色/多光谱相机^[13-15]。但受探测器物理结构及拼接水平等因素影响,探测器模块在焦平面上的排列位置往往存在系统误差,常采用光学拼接的方式通过分光棱镜将多片探测器首尾搭接形成连续的扫描阵列,如资源 3 号及 Pleiades 等卫星上的高分辨率相

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-08; 录用日期: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金(61975222)、地球大数据科学工程 CASEarth 卫星热像仪项目(XDA19010102)

* E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

机^[16-17]。2)多相机多视场交叠成像;在同一个卫星平台上搭载多个视场交叠的相机以增大成像幅宽,如北京 1 号(BJ-1)多光谱成像时每个波段由两台相机同时对地观测,幅宽可达 600 km^[18],此外,高分 1 号、高分 2 号等卫星均采用多视场交叠方式以增加成像幅宽^[19-20]。3)敏捷成像;该方式通过卫星的姿态机动实现多条带拼幅成像以增大观测幅宽,对卫星姿态机动及控制稳定能力要求较高,法国 Pleiades、美国 WorldView-3、我国吉林 1 号(Jilin-1)和高景 1 号(SuperView-1)均可实现在轨敏捷成像^[17,21-24]。4)多星组网协同观测;通过多颗卫星形成虚拟星座,增大成像幅宽,提高对地观测的时间分辨率。目前,美国 WorldView 系列、QuickBird、GeoEye-1 构成高分辨率卫星星座,可实现一天对同一地区的 4 次观测。此外,法国 Pleiades-1A、Pleiades-1B 与 SPOT-6/7,印度 Cartosat1/2/2A/2B,以及国内的风云 1 号(FY-1)系列和风云 3 号(FY-3)系列极轨卫星、风云 2 号(FY-2)系列和风云

4 号(FY-4)系列静止卫星、资源 3 号(ZY-3)系列和天绘一号(TH-1)系列卫星均已实现多星在轨组网观测^[12,17,21,25-27]。由以上分析可知,由于安装工艺及探测器规模受限,多模块拼接方式增大成像幅宽效果有限,而多相机视场拼接对平台要求较高且大角度成像容易引起影像复杂的几何变形,从而会增加地面数据处理难度。敏捷卫星条带拼幅成像方式灵活,但对卫星姿态机动及控制稳定能力要求较高,当前多数卫星难以实现。多星组网可在保证空间分辨率的同时提高时间分辨率,但系统复杂且不同卫星数据间存在时相差异。

针对以上宽幅高分辨成像技术存在的问题及 CASEarth 小卫星 TIRI 的项目需求,本文提出了一种基于多模块拼接的长线列摆扫式 TIRI 设计方法,并采用全光路低温光学系统和 195 K 的低温光机设计以降低仪器自身热辐射,实现了 505 km 轨道高度下 300 km 幅宽、30 m 分辨率(星下点)的宽幅高分辨对地成像。

表 1 国内外主要热红外载荷参数对比

Table 1 Parameters comparison of main thermal infrared payloads at home and abroad

Index	Landsat 8 TIRS	VRSS-2 IRC	GF-5 VIRMI	ASTER TIR	HJ-1B IRS	CASEarth TIRI
Orbit /km	705	645	705	702	650	505
Width /km	185	30	60	60	720	300
Resolution /m	100	60	40	90	300	30
Width/Resolution	1850	500	1500	666	2400	10000
Spectrum / μm	10.6-11.19 11.5-12.51	10.3-11.3 11.5-12.5	10.3-11.3 11.4-12.5	8.125-8.475	10.5-12.5	10.3-11.3
				8.475-8.825		11.5-12.5
				8.925-9.275		8.0-10.5
				10.25-10.95		
				10.95-11.65		
Noise-equivalent temperature difference /K	0.4 (at 300 K)	/	/	0.3 (at 300 K)	/	0.2 (at 300 K)
Calibration accuracy /K	1.67 (at 300 K)	1.5 (at 280 K)	1 (at 300 K)	1 (at 300 K)	1 (at 300 K)	1 (at 300 K)
	(B11: thermal infrared band of Landsat 8 TIRS)					
Detector /pixel	1860	512	1500	700	400	2000

2 系统设计

2.1 总体设计方案

CASEarth 小卫星运行在轨道高度为 505 km 的太阳同步轨道上,TIRI 是其主要光学载荷之一。TIRI 的空间分辨率为 30 m,幅宽为 300 km,幅宽与分辨率之比高达 10000:1,是目前国内幅宽/分辨率最高的长波红外仪器。此外,TIRI 可实现 220~340 K 的大动态探测范围,为极地降雪和冰雪转换的探测提供有效数据,其结构布局如图 1 所示。

TIRI 系统包括一维扫描机构、透镜系统、黑体、散热面、地球屏、探测器制冷机组件、电箱和冷箱等子系统。通过调整一维扫描机构和卫星姿态,可以观测黑体、冷空和地球场景,实现定标光路和地球观测光路的转换。黑体和冷空是 TIRI 在轨的主要定标源,通过改变黑体温度来调节入瞳处的辐亮度,进而更新在轨定标系数。为了实现光学组件 195 K 的低温工作条件,TIRI 采用了地球屏的设计阻挡地球的红外辐射。TIRI 相关设计指标如表 2 所示。

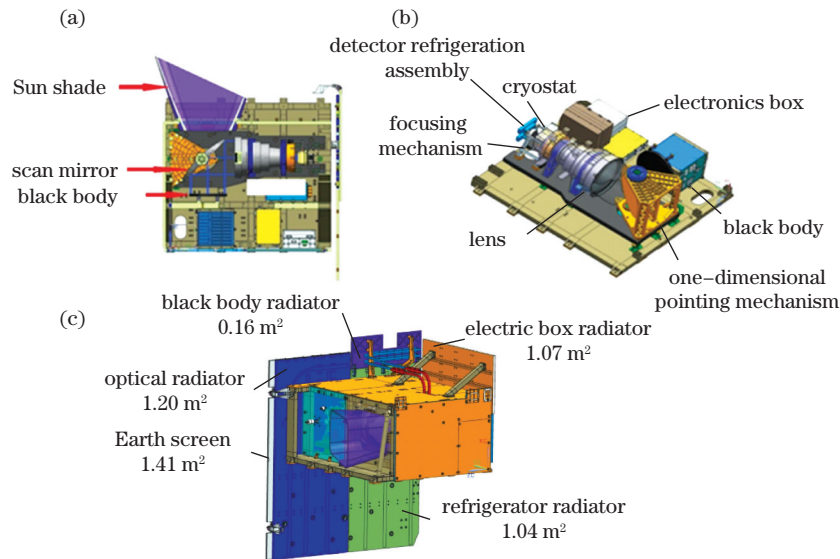


图 1 TIRI 的布局。(a) TIRI 整体结构图；(b) TIRI 内部结构图；(c) TIRI 外部结构图

Fig. 1 Layout of TIRI. (a) Overall structure of TIRI; (b) internal structure of TIRI; (c) external structure of TIRI

表 2 TIRI 的技术指标

Table 2 Technical specifications of TIRI

Item	Design index
Orbit /km	505
Imaging width /km	300
Resolution /m	30
Bands / μm	8–10.5
	10.3–11.3 11.5–12.5
Pixel size / μm	30
Dynamic range /K	220–340
Scanning accuracy / $''$	≤ 6 (object space, 3σ)
Sensitivity /K	< 0.1 (at 300 K)
Field of view (FOV) / $^\circ$	7.0
Scanning FOV / $^\circ$	≥ 33.1
Dynamic modulation transfer function	≥ 0.1
F #	1.94
Focal length /mm	$505 \times (1 \pm 5\%)$

2.2 光学系统设计

TIRI 的光学系统采用四块折射式透镜,实现了高分辨率和大视场的成像要求。基于长波红外的衍射极限,将光学系统的口径设定为 260 mm,对应的光学衍射极限为 $58.6 \mu\text{rad}$,凝视视场约为 7.0° 。扫描镜放置在光学透镜前,通过摆扫的方式实现 33.1° 的大视场观测。为了降低仪器自身辐射,提升相机的探测能力,采用深低温的光机系统设计,TIRI 的光学结构如图 2 所示。

由于相机在地面与在轨工作时温差大,而光学系统对结构尺寸稳定性和热稳定性有很高的要求,同时考虑结构轻量化要求,相机主体应尽量选用低膨胀的材料。TIRI 相机主框架系统包括连接管接头全部采

用碳纤维复合材料结构,并在各分系统的安装接口预埋铝合金或钛合金接头。相对于金属材料而言,碳纤维复合材料具有较高的比刚度、较强的可设计性、低线膨胀系数。透射式光学系统工作于 195 K 环境温度下,低温环境引起的应力和变形较大,综合考虑结构的应力变形和重量,透射式光学系统镜筒采用钛合金材料,透镜支撑采用柔性化设计。镜筒外置冷箱采用铝合金材料,可更好地满足热控要求。同时,TIRI 扫描机构支架采用铝基碳化硅材料。

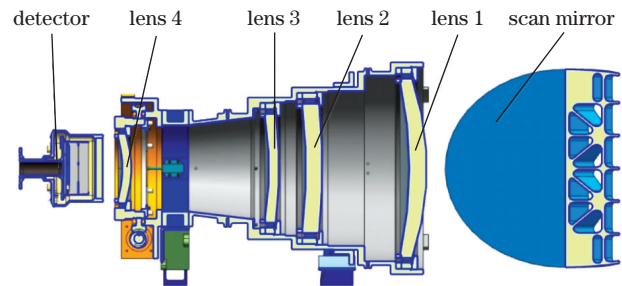


图 2 TIRI 光学系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of TIRI optical system

如图 2 所示,为了满足系统的低温成像需求,提出以调焦镜(镜 4)为主,镜筒变温为辅的调焦方案。该方案具备 $\pm 2.67 \text{ mm}$ 的焦距调整能力,其中调焦镜(镜 4)贡献 $\pm 2.22 \text{ mm}$,变温贡献 $\pm 0.45 \text{ mm}$ 。TIRI 设计有调焦机构(镜 4),具备 $\pm 3 \text{ mm}$ 的沿轴调节能力,定位精度达 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。镜筒内其他单镜的定位精度为 $\pm 25 \mu\text{m}$,满足公差要求。TIRI 的透镜材料包括锗和硒化锌,其折射率与温度相关,可实现在轨变温调焦。在轨变温调焦是通过改变镜组的工作温度,使得携带有各类公差的红外光学系统具有

最佳的焦面位置。变温调焦的温度范围为 $(195 \pm 10) \text{K}$, 可以大概率满足系统的调焦要求。此外, TIRI 在火箭发射过程中会遭受剧烈冲击和随机振动, 有可能造成像面离焦, 也可采用在轨变温调焦的方法进行补偿。

外部杂散光会对成像质量和遥感数据的定量化产生影响, 是光学设计中不可忽略的问题。TIRI 针对外部杂散光问题, 在遮光罩和光学设计上都采取了相应措施。为了提高系统视场外的消光能力, 遮光罩采用方形结构设计, 针对太阳角做两个方向的 20° 斜切, 避免太阳光直射遮光罩内部。在设计光学系统时采用镜筒内壁涂黑、台阶等微结构、在四块镜片上附着圆形挡光环(斜边)、镜 3 与镜 4 之间附着椭圆挡光环(斜边)以及杜瓦内部的两级冷光阑等方案对视场外光线进行遮挡, 进而提高系统视场外的消光能力。

2.3 长线列探测器组件设计方案

CASEarth TIRI 采用 2000 元长线列探测器, 采用集成滤光片对 $8 \sim 12.5 \mu\text{m}$ 的波长范围进行三波段分光。为了减小边缘效应和波段间的光学串扰, 每个波段的光敏元周围用 26 个哑像元隔离。在实验室条件下, 对探测器三个波段的光谱响应曲线

进行了测试, 测试结果如图 3 所示。

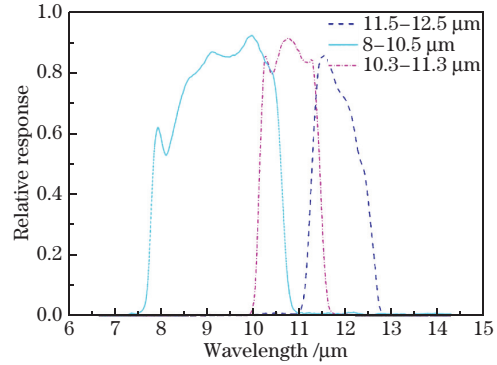


图 3 TIRI 的光谱响应曲线

Fig. 3 Spectral response curve of TIRI

长线列探测器由 4 个 $512 \times 4 \times 3$ 碲镉汞红外焦平面探测器模块拼接而成, 4 个模块分别记为 M1、M2、M3、M4, 单个像元尺寸为 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 。4 个探测器模块按照“品”字型拼接在一块基板上, 每两个模块间重叠 25 pixel。红外焦平面探测器的四个模块排布如图 4 所示。M1 和 M2 模块及 M3 和 M4 模块内侧相邻波段间距为 100 pixel, 单模块窄边尺寸为 70 pixel。由以上几何尺寸关系可知, TIRI 长波时间延迟积分 (TDI) 探测器像元边界范围为 $1973 \text{ pixel} \times 234 \text{ pixel}$ 。

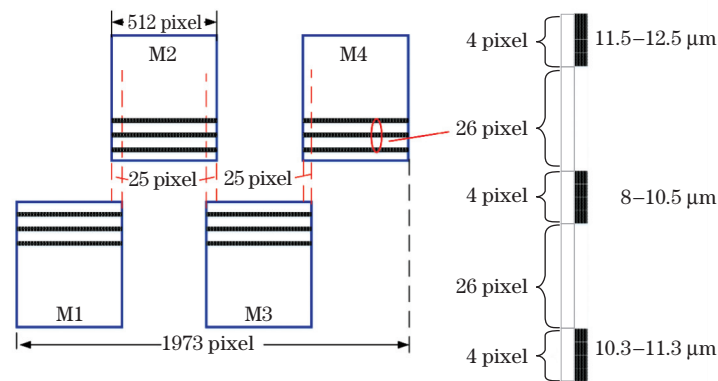


图 4 TIRI 的焦平面的布局

Fig. 4 Layout of TIRI focal plane

红外探测器工作在低温下, 杜瓦是其封装和保护装置。杜瓦通过与脉管制冷机耦合获得焦平面探测器工作所需的冷量, 并实现与外界环境的隔热。如图 5 所示, 杜瓦组件包括红外窗口、杜瓦外壳、两级冷光阑、滤光片、焦平面探测器等部分, 为探测器的低温工作提供了光学、热学、电学和机械接口。为了进一步抑制杂散信号, 在杜瓦中设计了两级冷光阑, 冷光阑的外表面采用抛光工艺以降低辐射, 内表面采用镀黑镍工艺以抑制杂散光。

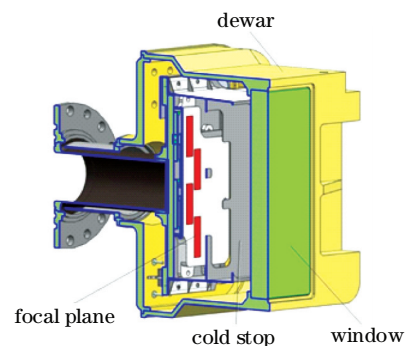


图 5 杜瓦的设计结构

Fig. 5 Structure design of dewar

如图 6 所示, TIRI 制冷机方案采用线性压缩机驱动同轴型脉管冷指, 压缩机与脉管冷指分开放置, 中间以柔性金属连气管连接, 脉管本体部分通过惯性管和气库连接。其中, 压缩机采用直线电机驱动双活塞对置方案, 压缩机是由电机、板簧、活塞等部件组成, 其作用是将电能转化为活塞的动能, 给冷指提供往复振荡气流。脉管冷指舍弃了运动部件, 进

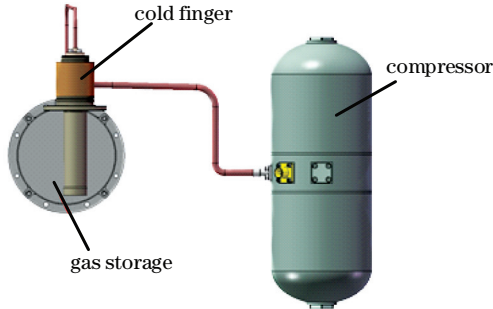


图 6 同轴型脉管制冷机

Fig. 6 Coaxial pulse tube refrigerator

而为完全被动体, 从而最大限度地减小了振动和电磁干扰以及运动磨损。脉管冷指由蓄冷器、脉管、换热器等部件组成, 其作用是将进入冷指的声功转化为冷量。脉管制冷机取消了冷端排出器, 只有膨胀腔(空的脉冲管)而没有实际的膨胀活塞。调相结构主要是由惯性管和气库组成, 其作用是让系统中氦气工质的质量流与压力波的相位达到某个确定的角度, 进而提高制冷机效率。

2.4 大幅宽摆扫成像方式

TIRI 采用摆扫方式实现星下点垂轨方向观测区域热辐射信息的采集, 按反扫阶段是否成像将 TIRI 成像模式分为单向摆扫成像和双向摆扫成像。图 7(a) 为单向摆扫成像过程示意图, 图 7(b) 为单向摆扫时摆镜角速度变化曲线, 由图可知, 单向摆扫成像过程的一个扫描周期内, 摆镜经过正向加速、匀速成像、正向减速、反向加速、反向减速五个运动过程实现垂轨方向的一次扫描。

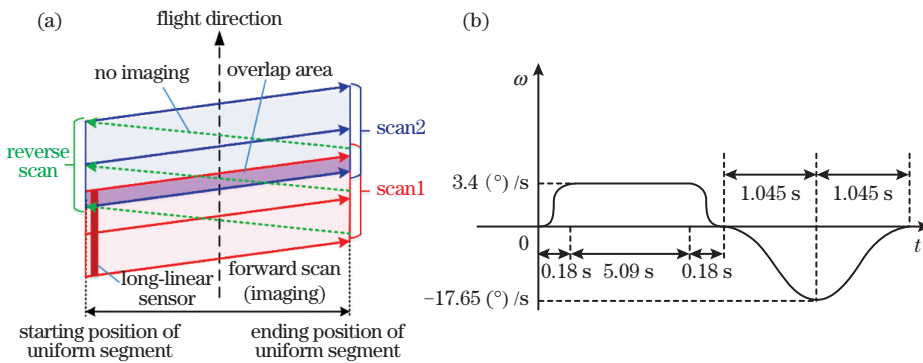


图 7 单向摆扫成像示意图。(a) 单向摆扫成像过程示意图; (b) 单向摆扫时摆镜角速度曲线

Fig. 7 Diagram of forward whisk-broom imaging. (a) Diagram of forward whisk-broom imaging process; (b) angular velocity curve of swinging mirror during forward whisk-brooming

图 8 所示为双向摆扫成像过程, 图 8(a) 为双向摆扫成像过程示意图, 图 8(b) 为双向摆扫时摆镜角速度变化曲线, 由图可知, 双向摆扫成像的一个扫描

周期内, 摆镜通过正向加速、正向匀速成像、正向减速、反向加速、反向匀速成像、反向减速六个运动过程可实现垂轨方向的两次扫描, 成像效率相对较高。

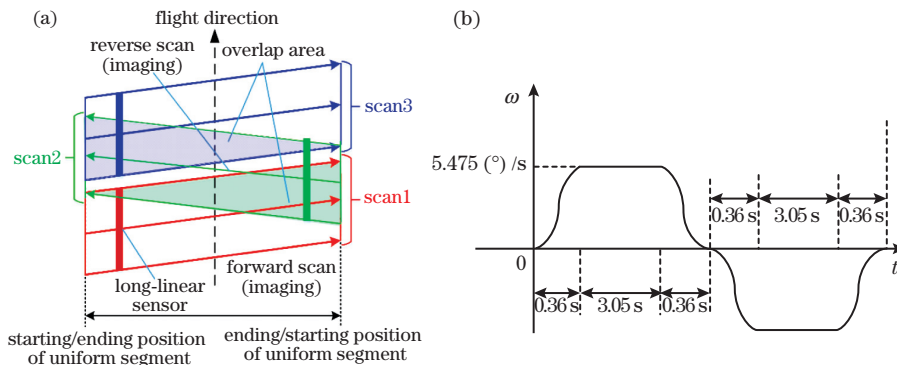


图 8 双向摆扫成像示意图。(a) 双向摆扫成像过程示意图; (b) 双向摆扫摆镜角速度曲线

Fig. 8 Diagram of forward and backward whisk-broom imaging. (a) Diagram of forward and backward whisk-broom imaging process; (b) angular velocity curve of swinging mirror during forward and backward whisk-brooming

由摆扫成像过程可知,单向摆扫成像过程时间较长,像元驻留时间增加,有利于提升系统信噪比,提高图像质量,同时单向摆扫相邻扫描周期方向一致,重叠率易于保障,有利于后续图像几何处理。相对单向摆扫成像而言,双向摆扫成像扫描效率更高,且摆镜最大角速度和角加速度均较低,易于实现对摆镜运动的高精度测量和控制。但双向摆扫的成像过程摆镜角速度较大,一定程度上减小了像元驻留时间,进而影响系统信噪比,不利于高质量遥感影像的获取。

3 测试结果

3.1 发射前辐射定标

TIRI 单个模块中每个波段的探测器规模为 512×4 pixel,采用 4 级 TDI 的信号处理方式提升图像的信噪比。探测器的原始图像依次进行非均匀校正、盲元、饱和像元的替换,然后对 4 行图像进行累加求平均输出校正后的图像,利用校正后的图像进行定标计算。

TIRI 采用全口径多温度点的黑体定标方法。发射前定标实验时,在 220~340 K 的动态范围内共设置 10 个黑体定标温度点进行成像。每次观测黑体后,通过旋转扫描镜对冷屏观测以去除背景响应。由于探测器响应的非线性,拟采用非线性定标方程对定标数据拟合,计算公式为

$$L_{BB} = a \cdot d_{DN}^2 + b \cdot d_{DN} + c,$$

式中, L_{BB} 为黑体辐亮度, d_{DN} 为去除背景后的探测器响应输出值, a 为非线性定标系数, b 为线性定标系数, c 为截距。

噪声等效温差是常用的衡量热红外仪器灵敏度的指标。探测器的噪声包括由于目标信号和自身热辐射信号产生的散粒噪声以及探测器的基础噪声,且散粒噪声随信号电子数的增加而增加。因此,降低仪器自身热辐射可降低仪器的噪声等效温差,进而提升灵敏度。结合工程约束条件和仪器的灵敏度的指标要求,TIRI 的温度场最终设计如表 3 所示。在该温度场设计下,背景响应与 300 K 目标的比例与 Landsat 8 TIRS 两个波段的比值相当。在黑体温度为 300 K 时,噪声等效温差优于 0.1 K。

表 3 TIRI 的温度场设计

Table 3 Temperature field design of TIRI

Item	CASEarth TIRI
Optic lens	195 K
Scan mirror	270 K

3.2 在轨辐射定标方案

TIRI 采用长线列摆扫的成像方式,在轨运行时需要卫星侧摆才能实现冷空观测。此外,黑体升降温需要一定的时间,高频次的冷空和多温度黑体观测会减少卫星可用的观测时间。因此,在轨辐射定标的初步方案为每两周对冷空观测一次。单次扫描结束后观测固定温度黑体,更新线性定标系数,TIRI 辐射定标光路设计如图 9 所示。为了降低在低频次冷空观测下背景响应变化对辐射定标和目标反演的影响,拟采用基于温度场的背景响应预测方法,实现高频次的背景响应更新。在轨定标除了对黑体和冷空的定期观测外,拟采用月球、青海湖等地物场景作为外部定标源进行交叉验证,并对探测器长时间的响应特性进行监测,为 TIRI 的成像性能、寿命的预测提供基础。

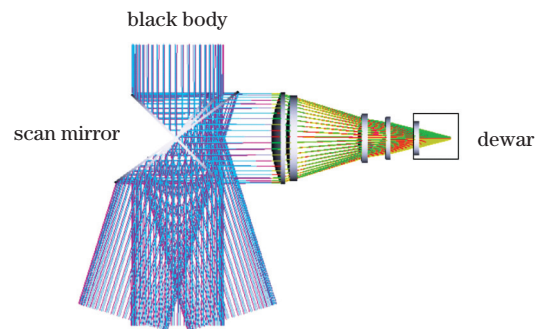


图 9 辐射定标光路设计

Fig. 9 Design of light path for radiation calibration

4 结 论

详细介绍了一种多模块拼接的长线列摆扫式 TIRI 设计方法,重点讨论了 TIRI 的整体光机结构布局、低温光学系统、长线列探测器及大幅宽摆扫的成像方式。TIRI 采用深低温分级的光机系统设计,在 195 K 的光学系统温度下,仪器背景响应与 300 K 目标的比例与 Landsat 8 TIRS 相当。TIRI 辐射定标精度的设计指标为优于 1 K,噪声等效温差的实测值优于 0.1 K(at 300 K)。

参 考 文 献

- [1] Huang Y F, Xu J, Bai S J, et al. Satellite infrared remote sensing technology and its application in disaster prevention and relief[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(5): 118-126.
黄宇飞, 徐嘉, 白绍竣, 等. 卫星红外遥感技术及其在防灾救灾中的应用研究[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(5): 118-126.
- [2] Wang J Y, Li C L, Ji H Z, et al. Status and prospect

- of thermal infrared hyperspectral imaging technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, 34(1): 51-59.
- 王建宇, 李春来, 姬弘植, 等. 热红外高光谱成像技术的研究现状与展望[J]. *红外与毫米波学报*, 2015, 34(1): 51-59.
- [3] Zhao H J, Gu J R, Ji Z, et al. Application of infrared multi-spectral technique in the diurnal cycle detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0201002.
- 赵慧洁, 谷建荣, 籍征, 等. 红外多光谱技术在昼夜交替时段探测的应用[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 0201002.
- [4] Sun Z L, Hui B, Qin M F, et al. Object detection method based on saliency measure for infrared radiation image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2633-2637.
- 孙照蕾, 惠斌, 秦莫凡, 等. 红外图像显著目标检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(9): 2633-2637.
- [5] Li Z L, Duan S B, Tang B H, et al. Review of methods for land surface temperature derived from thermal infrared remotely sensed data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 899-920.
- 李召良, 段四波, 唐伯惠, 等. 热红外地表温度遥感反演方法研究进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 899-920.
- [6] Zhang J Q, Li X Y, Li L Y, et al. Lightweight U-net for cloud detection of visible and thermal infrared remote sensing images [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(9): 1-14.
- [7] Niu J X, Zhang T. Analysis of stray radiation of infrared system to detect dim and small target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1665-1668.
- 牛金星, 张涛. 弱小目标红外探测系统的杂散辐射分析[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(7): 1665-1668.
- [8] Liu W B, Meng Q Y, Zhang J C, et al. Seismic thermal infrared anomaly extraction based on skewness [J]. *Seismology and Geology*, 2020, 42(6): 1509-1524.
- 刘文宝, 孟庆岩, 张继超, 等. 基于偏度的地震热红外异常提取 [J]. *地震地质*, 2020, 42(6): 1509-1524.
- [9] Han L, Cui S C, Yang S Z, et al. Inversion of land surface emissivity in China based on FY-2G infrared satellite data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1228003.
- 韩露, 崔生成, 杨世植, 等. 基于 FY-2G 红外卫星资料反演我国陆地区域的地表发射率[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1228003.
- [10] Zhang J Q, Li X Y, Li L Y, et al. Landsat 8 remote sensing image based on deep residual fully convolutional network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 102801.
- 张家强, 李潇雁, 李丽圆, 等. 基于深度残差全卷积网络的 Landsat 8 遥感影像云检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 102801.
- [11] Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G, et al. Advances with respect to the environmental spectroscopy monitoring technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0500001.
- 刘文清, 陈臻懿, 刘建国, 等. 环境监测领域中光谱学技术进展[J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0500001.
- [12] Hu F, Jin S Y. Study on the development of wide swath imaging technology about high resolution optical remote sensing satellites [J]. *Geomatics World*, 2017, 24(5): 45-50.
- 胡芬, 金淑英. 高分辨率光学遥感卫星宽幅成像技术发展浅析[J]. *地理信息世界*, 2017, 24(5): 45-50.
- [13] Tang X M, Hu F, Wang M, et al. Inner FoV stitching of spaceborne TDI CCD images based on sensor geometry and projection plane in object space [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(7): 6386-6406.
- [14] Pan J, Hu F, Wang M, et al. Inner FOV stitching of ZY-102C HR camera based on virtual CCD line [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(4): 436-443.
- 潘俊, 胡芬, 王密, 等. 基于虚拟线阵的 ZY-102C 卫星 HR 相机内视场拼接方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2015, 40(4): 436-443.
- [15] Yang B X. Characteristics and main specifications of IKONOS and QuickBird2 satellite camera: some points for developing such like satellite camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(4): 14-16.
- 杨秉新. 美国 IKONOS 和 QuickBird2 卫星相机的主要性能和特点分析及看法 [J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(4): 14-16.
- [16] Meng W C, Zhu S L, Cao W, et al. Establishment and optimization of rigorous geometric model of push-broom camera using TDI CCD arranged in an alternating pattern [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(12): 1340-1350.
- 孟伟灿, 朱述龙, 曹闻, 等. TDI CCD 交错拼接推扫相机严格几何模型构建与优化[J]. *测绘学报*, 2015, 44(12): 1340-1350.
- [17] Greslou D, de Lussy F, Delvit J M, et al. Pleiades-HR innovative techniques for geometric image quality commissioning [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B1: 543-547.
- [18] Chen Z C, Luo W F, Zhang H, et al. The geometric evaluation of Beijing-1 microsatellite multispectral

- images[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 690-696.
- 陈正超, 罗文斐, 张浩, 等. 北京一号小卫星多光谱图像波段配准和图像变形评价[J]. *遥感学报*, 2006, 10(5): 690-696.
- [19] Bai Z G. Technical characteristic of GF-1 satellite [J]. *Aerospace China*, 2013(8): 5-9.
- 白照广. 高分一号卫星的技术特点[J]. *中国航天*, 2013(8): 5-9.
- [20] Pan T, Guan H, He W. GF-2 satellite remote sensing technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, 36(4): 16-24.
- 潘腾, 关晖, 贺玮. “高分二号”卫星遥感技术[J]. *航天返回与遥感*, 2015, 36(4): 16-24.
- [21] de Lussy F, Greslou D, Dechoz C, et al. Pleiades HR in flight geometrical calibration: location and mapping of the focal plane [J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, XXXIX-B1: 519-523.
- [22] Li G Y, Hu F, Zhang C Y, et al. Introduction to imaging mode of WorldView-3 satellite and image quality preliminary evaluation [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(S2): 11-16.
- 李国元, 胡芬, 张重阳, 等. WorldView-3 卫星成像模式介绍及数据质量初步评价[J]. *测绘通报*, 2015(S2): 11-16.
- [23] Lu G, Gao L, Wang Y M. Evaluation and analysis on multiple fusion methods for GJ-1 satellite imagery [J]. *Remote Sensing Information*, 2018, 33(6): 124-131.
- 卢刚, 高磊, 王彦敏. 高景一号影像多方法融合效果评价分析[J]. *遥感信息*, 2018, 33(6): 124-131.
- [24] Jiang C S, Zhang X Q, Yang G D, et al. Experiment on geometric correction method of Jilin-1 satellite image [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(8): 208-211.
- 姜春山, 张旭晴, 杨国东, 等. 吉林一号卫星影像几何校正方法试验[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(8): 208-211.
- [25] Tang S H, Qiu H, Ma G. Review on progress of the Fengyun meteorological satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 842-849.
- 唐世浩, 邱红, 马刚. 风云气象卫星主要技术进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 842-849.
- [26] Zheng Y, Zhang H W, Du X, et al. Precision analysis of combined block adjustment without GCP for ZY-3 and TH-1 satellite images [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020, 0(7): 10-12, 28.
- 郑义, 张宏伟, 杜晓, 等. 资源三号 and 天绘一号卫星影像无控联合平差精度分析[J]. *测绘通报*, 2020, 0(7): 10-12, 28.
- [27] Rosak A, Latry C, Pascal V, et al. From SPOT 5 to Pleiades HR: evolution of the instrumental specifications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10568: 105680I.

Research on Wide-Range and High-Resolution Thermal Infrared Remote Sensing Imaging Technology

Chen Fansheng^{1,2*}, Hu Zhuoyue^{1,3}, Li Xiaoyan^{1,3}, Yang Lin¹, Hu Xingjian¹, Zhang Yong¹

¹ Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

² Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou, Zhejiang 310024, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Objective High-temporal and high-resolution thermal infrared remote sensing images are important resources for researches of fine characterization of human traces, inversion of Earth surface features, resource exploration, and marine ecological monitoring. At present, different thermal infrared payloads (TIRPs) have been carried by the Earth remote sensing satellites at home and abroad. According to magnitudes of spatial resolution and imaging width, TIRPs can be divided into three kinds: 1) large width and low resolution, mainly including TIRPs with a width greater than 1000 km and resolution lower than 1 km, such as the moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and the infrared atmospheric sounder (IRAS) carried on Terra and FY-3D satellites, respectively; 2) medium width and medium resolution, including thermal infrared cameras with a width of 100–1000 km and a resolution of 100–1000 m, such as TM/ETM+/TIRS of Landsat 5/7/8; 3) narrow width and high resolution, generally referring to the width less than 100 km and the resolution better than 100 m, such as the visual and

infrared multispectral imager (VIMI) aboard GF-5 and the long-wave infrared camera of VRSS-2.

The special project of "Big Earth Data Science Engineering Project" proposes to make fine depictions of human activity traces and coastal ecology based on remote sensing data, and to realize real-time quantitative observation of urban heat island, human economic activities and polar environmental changes mainly by thermal infrared and low-light-level cameras, which puts forward higher requirements for the spatial and temporal resolutions of corresponding payloads. Generally, there are two types of data acquisition methods for remote sensing cameras with linear detectors including the push-broom with a long linear-array and the whisk-broom with a short linear-array. However, affected by engineering boundary constraint conditions such as structure size, weight, and power consumption of the satellite, the imaging method of push-broom with a long linear-array is difficult to meet the requirements of short-term, wide-range and high-resolution. Accordingly, the whisk-broom imaging with a long linear-array is an effective method for solving this contradiction.

Methods In view of the above requirements, this research proposes a whisk-broom imaging method based on a long multiple-modules-stitched linear-array thermal infrared sensor with three spectral segments, and realizes the wide-range and high-resolution ground imaging with a width of 300 km and a resolution of 30 m (sub-satellite point) at an orbital altitude of 505 km. On the one hand, in order to achieve a large range of coverage along the orbit, the thermal infrared imager (TIRI) detector is composed of four $512 \times 4 \times 3$ long-wave time delay integration focal plane modules which are cross stitched together (Fig. 4). Each detector module contains three bands including $8-10.5 \mu\text{m}$, $10.3-11.3 \mu\text{m}$, and $11.5-12.5 \mu\text{m}$. The effective pixel number of each band is 512×4 , and the pixel size is $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$. 25 pixels are overlaps between connected modules, and 26 dumb pixels are used to isolate different bands of single module to reduce the influence of edge effect. On the other hand, the system adopts all-optical path cryogenic optical system and deep cryogenic optical machine design to reduce thermal radiation of instruments, and sets blocking rings between the rear lens group and dewar, as well as inside dewar, to improve the extinction ability of the system outside the field of view (Fig. 2, Fig. 5, Fig. 6). Finally, in order to realize wide-range imaging, the TIRI is equipped with a high-precision one-dimensional scanning mechanism (Fig. 7, Fig. 8), which can achieve the wide-range imaging cross the flight direction while ensuring the ground spatial resolution, and greatly shorten revisit period of camera.

Results and Discussions Based on the analysis above, the innovative results of this research mainly include two aspects: 1) wide-range and high-resolution imaging technology; the TIRI of CASEarth small satellite adopts a multi-module splicing long-linear detector (Fig. 4), ensuring the ground spatial resolution and increasing the field of view along the orbit, and a high-precision one-dimensional scanning mechanism to realize the large depth whisk-broom imaging across the flight direction, which achieves the earth imaging with a width of 300 km and a resolution of 30 m at the orbit of 505 km (Fig. 7, Fig. 8). The efficiency of ground data acquisition is greatly improved and the revisit period of the camera is shortened. 2) Design of all-optical path cryogenic optical system; the temperature of optical lens is 195 K, which greatly reduces thermal radiation of the instrument, and the proportion of the background response to the 300 K target reaches the same level as that of Landsat 8 TIRS (Fig. 2, Fig. 5, Fig. 6).

Conclusions Aiming at the technological frontier of wide-range and high-resolution imaging, this research, guided by the project of CASEarth TIRI, conducts the researches including the designs of all-optical path cryogenic optical system and multi-module splicing long-linear detectors, the whisk-broom imaging with a long-linear detector array, and the radiation calibration methods (Fig. 9), and introduces the wide-range and high-resolution imaging technology of TIRI in detail, which provides a theoretical and technical reference for the actual in-orbit applications and the development of related optical payloads. Meanwhile, this research can provide the data and technical support for global fine remote sensing and associated high-precision quantitative applications.

Key words thermal imaging; thermal infrared; long linear-array; whisk-broom; wide-range and high-resolution

OCIS codes 110.6820; 120.0280; 040.6808