文章编号：1672-8785(2026)01-0001-16

观点 Opinion

红外感知的前沿热点：从深空探测极限到数字地球新范式

刘银年[1,2,3*]

(1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；
2. 红外科学与技术全国重点实验室，上海 200083；
3. 中国科学院大学，北京 100049)

摘　要： 本文介绍了红外感知技术在“向上看”的深空探测与“向下看”的对地观测两大领域的发展脉络和前沿挑战。在深空探测方面，以詹姆斯·韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope，JWST)为代表，该技术正通过超大口径、甚长波段和超低温制冷等手段，不断逼近观测的物理极限，并致力于揭示宇宙早期的历史奥秘。阐述了对地观测领域不同时期搭载于各类卫星的红外探测载荷的主要发展过程及其代表性和特色。红外对地观测技术从过去宽幅下的低空间分辨率和少量波段，向着空谱大范围下的时-空-谱-辐分辨率提升迈进。大口径低背景光学、长波长高灵敏度探测器、片上智能感知、大数据孪生系统等新型技术，以及通导遥一体的“即时遥感”和商业航天的大规模发展，将助力构建“红外数字地球”底座，增强人类对地球多圈层异常事件以及各种复杂循环过程演变的实时认知和精准预测，推动红外对地观测技术走向大众化应用。

关键词： 红外前沿；深空探测；对地观测；卫星载荷；数字地球

中图分类号： TN214；O433.1　　**文献标志码：** A

DOI： 10.11972/j.issn.1672-8785.2026.01.001

收稿日期： 2026-01-22

基金项目(Foundation Items)：国家重点研发计划项目(2022YFB3902000)；国家自然科学基金重大项目(42192582)；中国科学院战略性先导科技专项(XDB0580000)

作者简介(Biography)：刘银年(1971-)，男，甘肃武威人，研究员，博士，主要从事高光谱与红外遥感技术方面的研究。

*通讯作者(Corresponding Author)：E-mail：ynliu@mail.sitp.ac.cn

Frontier Hotspots in Infrared Sensing: From Deep Space Exploration Limits to the New Paradigm of Digital Earth

LIU Yin-nian[1,2,3*]

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. National Key Laboratory of Infrared Science and Technology, Shanghai 200083, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This article reviews the development and frontier challenges of infrared sensing technology in two major domains: "looking upward" for deep space exploration and "looking downward" for Earth observation. In deep space exploration, represented by the James Webb Space Telescope (JWST), this technology is constantly approaching the physical limits of observation through methods such as ultra-large apertures, very long wavelength band, and ultra-low temperature cooling, aiming to reveal the mysteries of the early universe. The article also elucidates the primary evolution of infrared detection payloads aboard various satellites across different eras, highlighting their representativeness and characteristics. Infrared Earth observation technology has progressed from low spatial resolution and a limited number of bands over a wide swath to improved temporal, spatial, spectral, and radiometric resolution over broad spatial and spectral ranges. New technologies such as large-aperture low-background optics, long-wavelength high-sensitivity detectors, on-chip intelligent sensing, and big data twin systems, as well as the large-scale development of "real-time remote sensing" integrating communication, navigation, and remote sensing, and commercial aerospace, will help build the foundation of "Infrared Digital Earth", enhance human beings' real-time understanding and accurate prediction of the evolution of anomalous events in the Earth's multi-spheres and various complex cyclic processes, promoting the popularization of infrared Earth observation technology.

Key words: infrared frontier; deep space exploration; earth observation; satellite payload; digital Earth

0 引言

本研究关注的红外波段范围为 1.0～1000 μm。红外光谱探测技术通过红外光传递出的独特“分子指纹”信息分析物质成分与结构，能够远距离探测物体在不同波长的反射-发射特性，已成为人类突破观测边界、拓展认知疆域的核心手段。

在“向上看”的深空探测中，由于宇宙持续膨胀，早期宇宙的光子被拉伸至红外波段[1]，使红外技术具备追溯宇宙起源、探索古老星系和各类冷天体的能力。人类已构建起从行星探测器(如“朱诺号”(Juno)[2]、“新地平线号”(New Horizons)[3])、星际飞行器(如“旅行者号”(Voyager)系列[4])，到地基大型干涉仪(如甚大望远镜干涉阵(Very Large Telescope Interferometer，VLTI)[5])与空间望远镜(如赫歇尔空间天文台(Herschel Space Observatory，HSO)[6]、JWST[7])的多元观测体系。

为了探索宇宙大爆炸后天体红移的极微弱信号，极低温、超大口径、高灵敏度红外探测等成为红外深空探测的关键前沿技术。JWST 代表了当前最高成就，但如何在光年尺度上界定红外观测的物理与技术极限，进而清晰揭示宇宙最早期的演化过程，仍是关乎人类认知边界的前沿科学问题。

在“向下看”的对地观测领域，早期以可见光波段的全色或 RGB 宽波段相机为代表，技术发展主要聚焦于提升空间分辨率，以满足对地表形态的精细化观测需求。红外光谱探测技术通过捕捉地表与大气辐射的独特信息，揭示出可见光无法感知的热结构与能量平衡状态，其探测波段从早期的近红外波段，逐步拓展至短波、中波乃至长波/甚长波红外波段。由于红外光的波长远大于可见光，其空间分辨率一直较低，主要应用于大幅宽或者多谱段载荷，比

如美国的 NOAA[8]、EOS[9]、Landsat[10]系列卫星，欧洲的 Meteosat[11]系列卫星，以及我国的风云[12]、海洋[13]和环境减灾[14]系列卫星等。

受限于技术难度和更大口径带来的超大规模等因素，高空间分辨率红外观测发展比较缓慢，数量也甚少。较低空间分辨率以及大幅宽下超高光谱分辨率的红外探测，因其应用价值和适合红外自身特性的原因等，更为人们所关注，并取得了大的技术突破。美国 Aqua 卫星上装载的大气红外探测器（Atmospheric Infrared Sounder，AIRS）[15]和我国风云四号（FY-4）卫星上装载的静止轨道干涉式红外探测仪（Geostationary Interferometric Infrared Sounder，GIIRS）是主要代表。

然而，兼具高空间分辨率与高光谱分辨率的红外高光谱成像地表观测载荷，因其要同时兼顾空-谱维度上的大范围和高分辨率，发展得最为缓慢。2018 年，美国国家科学院在《未来十年地球观测计划》中将星载高光谱成像称为“天基识别地物成分和量化生化属性的唯一方法”[16]。2018 年 5 月，我国高分五号高光谱卫星成功发射，国际首台宽谱宽幅高光谱相机——先进高光谱成像仪（Advanced Hyperspectral Imager，AHSI）入轨工作[17]，之后装载同类相机的意大利 PRISMA（2019 年）[18]、德国 EnMap（2022 年）[19]和美国 Tanager-1（2024 年）[20]卫星发射入轨，高光谱成像技术进入新的发展阶段。到目前为止，国际上公开报道的星载对地观测高光谱相机的工作波段只到 2.5 μm。

未来，对地观测的智能化发展趋势日益明确。天空地协同从星群到地面大众终端服务的智能化发展成为必然趋势[21]。为实现对地球系统的实时精细化感知，仍需在多维极限探测、智能终端、片上系统与全域数字孪生平台等关键方向实现突破。商业航天的崛起为天空地协同应用发展注入了强劲动能。自国务院发布《2016 中国的航天》白皮书以来，我国商业航天蓬勃发展，以商业遥感星座等为代表的新兴力量迅速成长[22-23]。《2021 中国的航天》白皮书进一步确立了支持政策。商业遥感的核心在于普及化、大规模与泛在应用。这对于红外光谱技术对地观测的发展将会产生极大的推动作用。

本文针对上述红外感知技术的前沿发展，围绕“向上看”的深空探测极限与“向下看”的数字地球新范式提出当前及未来需突破的关键科学问题和技术挑战，并展望推动其大规模普及与应用的前沿研究方向。

1 红外天文观测发展及前沿问题

我国首个国家空间科学规划——《国家空间科学中长期发展规划（2024—2050 年）》中提到了探索宇宙的起源与演化等优先发展方向以及空间高精度红外观测等任务方向。红外天文观测的极限是什么？为了看得更远更清，克服地球大气与仪器自身探测限制的技术需要不断取得进步，主要表现为观测平台从地面向太空跨越、观测仪器口径持续增大，探测波长、探测暗电流以及制冷技术优化推动探测灵敏度迈向极限。

红外天文学的发展历程呈现为从地面迈向太空的持续突破。自 20 世纪 60 年代以来，地面红外观测已取得诸多重要成果。地基望远镜收集并聚焦星光至探测器，其口径增大不仅提升集光能力，也有助于在衍射极限内获得更高空间分辨率的图像。建造更大型望远镜，在工程上面临物理规律、大气条件、技术瓶颈和资源限制等多重挑战。即使在地面，更大尺寸望远镜的建造仍存在重大的技术难题[24]。此外，地基望远镜虽利用高山台站避开部分大气干扰，但地球大气自身的吸收与辐射限制了观测。早期为突破残余大气吸收的限制，美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）发展了柯伊伯机载天文台（1974～1995 年）[25]和索菲亚平流层红外天文台（2010～2022 年）[26]。

真正的革命性进展来自于空间红外望远

镜。由于具有地面较难实现的远红外观测能力以及免受大气影响等优势，它是获取高精度、高品质天体光谱数据的必然选择[27]。空间红外望远镜的口径在逐步增大，探测能力也在不断提升。表 1 和表 2 分别列出了国内外典型大口径望远镜的主要指标数据。当前，以 2021 年发射的 JWST 为代表的空间红外观测正在开启一个新纪元。它被部署于远离地球热源的日地拉格朗日 L2 点，凭借 6.5 m 口径的拼接镜面以及深度制冷至 7 K（约−266 ℃）以下的技术，首次在 0.6～28.3 μm 近红外与红外波段实现了前所未有的灵敏度和分辨率。目前，JSWT 能达到的人类探测极限是 138 亿光年。丹麦哥本哈根大学玻尔研究所的科学家们利用 JSWT 上的近红外和中波红外相机，发现最早再电离（早期宇宙发生的重要转变）星系或许在大爆炸后 3.3 亿年产生，相关成果发表于《自然》[28]。然而，天文学家推测的宇宙可观测直径约为 930 亿光年[29-30]。

人类对宇宙观测极限的探究揭示了红外观测的几大核心挑战（见图 1）。一是超大口径：为捕捉近千亿光年距离的极微弱信号，未来需发展 10 m 乃至 100 m 级的可展开/在轨拼接技术。中国科学院上海技术物理研究所已开展了 6 m 口径非球面拼接主镜技术研发。二是极低温环境：为探测宇宙背景（约 3 K）下的天体辐射，光机系统关键部分和探测器自身需被冷却至极低温度（如 4 K 以下）。三是红移驱动下的探测波段远红外化：甚长波红外探测需求急剧上升，需要搭载甚长波红外载荷卫星，利用甚长波红外成像进行光年尺度深空探测。四是智能处理：需借助超大规模的算力和超大智能模型算法从复杂宇宙信号与噪声中提取极其遥远和极其微弱的近边缘天体信号。

表 1 国内典型大口径望远镜的主要指标

Table 1 Key Indicators of Typical Large-Aperture Telescopes in China

名称	郭守敬望远镜	巡天空间望远镜	全谱段高光谱载荷	大型光学/红外望远镜
类型	地面望远镜	空间望远镜	空间望远镜	地面望远镜
国家/组织	中国	中国	中国	中国
完成时间	2009	～2026	2022（预研）	在研
口径/m	4.0	2.0	6.0	12
成像方式	同轴反射	同轴反射	同轴反射	同轴反射
工作波段/μm	0.36～0.92	0.1～2.5	0.3～12.5	0.1～2.5
主镜结构	主镜为单块式	主镜为单块式	非球面拼接主镜	主镜拟采用拼接式
镜坯材料	超低膨胀玻璃	轻质化玻璃	超低膨胀玻璃	拟采用轻质化材料

表 2 国外典型大口径望远镜的主要指标

Table 2 Key Indicators of Typical Large-Aperture Telescopes Abroad

名称	哈勃望远镜	凯克望远镜	斯巴鲁望远镜	JWST	欧洲极大望远镜	三十米望远镜
类型	空间望远镜	地面望远镜	地面望远镜	空间望远镜	地面望远镜	地面望远镜
国家或组织	NASA	美国	日本	NASA	欧洲南方天文台	多国联合
时间	1990	1993/1996	1999	2021	在建	在建
口径/m	2.4	10	8.2	6.5	39	30
成像方式	同轴反射	同轴反射	同轴反射	同轴反射	同轴反射	同轴反射
工作波段/μm	0.2～1.7	0.3～25	0.3～25	0.6～28	0.4～25	0.4～25
主镜结构	主镜为单块式	主镜由 36 块子镜拼接，可展开	主镜为单块式	主镜由 18 块子镜拼接，可展开	主镜由 800 块子镜拼接，可展开	主镜由 492 块子镜拼接，可展开
镜坯材料	融石英	硼硅玻璃	超低膨胀玻璃	铍材	超低膨胀玻璃	超低膨胀玻璃

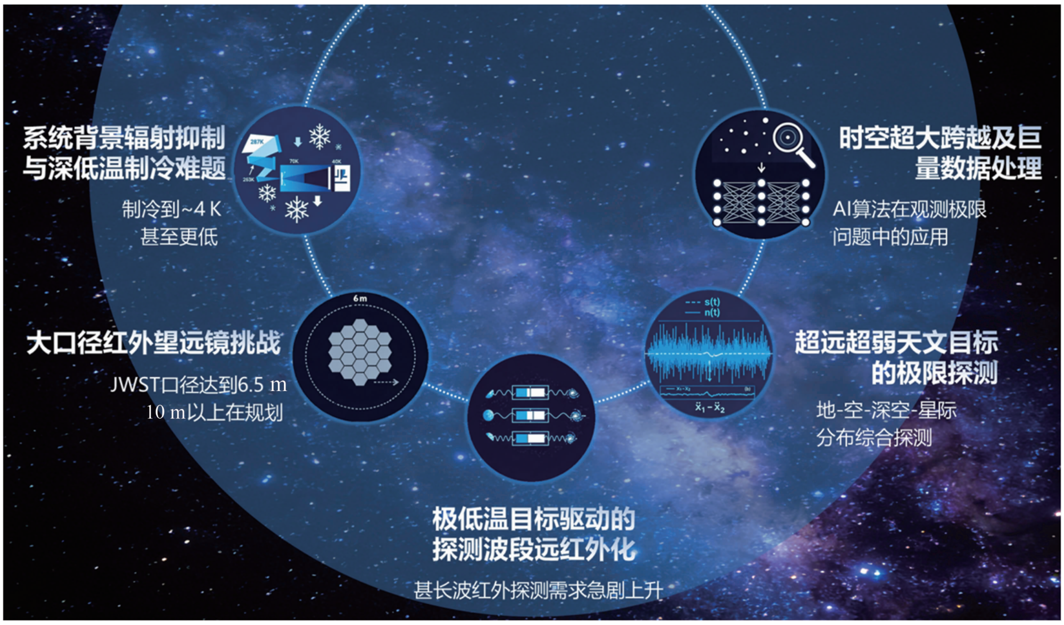

图 1 红外天文极限探测的主要挑战

Fig. 1 Main Challenges for Infrared Astronomical Ultimate Detection

未来，天文学研究视野将拓展至更宏大的观测体系架构。前沿构想包括国际月球科研站，即利用其无大气干扰的绝佳环境，部署超大口径望远镜阵列；或将观测平台延伸至更远的日心轨道或火星基地，以获取更长的干涉基线，从而实现“合成孔径”般的超高分辨率成像。一个从近地轨道、地月空间到星际空间的分布式“天文观测网”正在从构想走向规划。

2 红外对地观测发展及前沿问题

由于红外波长较长，为达到与可见光相当的空间分辨率，红外系统需要口径更大、背景辐射抑制能力强的光学设备，导致载荷规模庞大且复杂。同时，地球本身是一个巨大的红外辐射源，使目标信号易被高背景噪声淹没，也不利于前置光学系统制冷，对探测器的灵敏度与抗干扰能力提出了苛刻要求。这些因素导致红外遥感技术发展和可见光遥感比相对缓慢。

红外遥感的起源可追溯至 1960 年美国“泰罗斯二号”卫星上搭载的红外地平线传感器，实现了首次太空红外试验。1970 年，由中国科学院上海技术物理研究所匡定波等人研制的圆锥扫描红外地平仪探头，随中国第一颗人造地球卫星——“东方红一号”升空，标志着我国第一代红外空间遥感探测的正式启动。最早红外技术仅用于简单观测，比如红外地平仪用来提供卫星对地姿态偏差的感知。

此后数十年，红外遥感技术逐步发展，尤其在气象与海洋领域取得重要进展。其载荷多为空间分辨率较低、通道数有限的大幅宽或多光谱成像仪(见表 3)。比如，欧洲 Meteosat 系列静止轨道气象卫星自 1977 年发展近 50 年，从第一代仅含有 1 个红外通道的气象卫星可见光红外成像仪(Meteosat Visible and Infrared Imager，MVIRI)、第二代含有 5 个红外通道的自旋增强可见光红外成像仪(Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager，SEVIRI)，发展到第三代含有 8 个红外通道的灵活组合成像仪(Flexible Combined Imager，FCI)。美国 NOAA 系列气象卫星上搭载的先进甚高分辨率辐射计(Advanced Very High Resolution Radiometer，AVHRR)自 1979 年升空以来，一共经历了三代更新：红外通道从 3 个增加到 5 个，空间分辨率从 4 km 提升至 1.1 km。

我国 1997 年发射的 FY-2A 卫星上搭载的可见光红外自旋扫描辐射计(Visible and Infrared Spin Scan Radiometer，VISSR)含有 2 个红

外通道(空间分辨率为 5 km)，到了第二代增加为 4 个红外通道。2021 年发射的 FY-4A 卫星上搭载的先进静止轨道辐射成像仪(Advanced Geostationary Radiation Imager，AGRI)具有 11 个红外通道，空间分辨率最高达 2 km。在海洋观测方面，我国的海洋一号系列卫星也采用了适于海洋探测的大幅宽载荷。比如，新一代水色水温扫描仪的幅宽大于 3000 km，具有 5 个红外通道[31]。搭载于美国 Terra 卫星(1999 年发射)和 Aqua 卫星(2002 年发射)的中分辨率成像光谱辐射计(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer，MODIS)拥有 32 个红外通道，短波红外波段的空间分辨率为 0.5 km，中波红外和热红外波段的空间分辨率为 1 km。

随着空间分辨率等指标的不断提升，红外对地观测逐步拓展至陆地应用。美国 1984 年发射的 Landsat-5 陆地卫星上装载的专题制图仪(Thematic Mapper，TM)只有 1 个热红外通道(空间分辨率为 120 m，幅宽为 185 km)，1999 年发射的 Terra 卫星上装载的先进星载热辐射与反射辐射计(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer，ASTER)有 5 个热红外通道(空间分辨率为 90 m，幅宽为 60 km)。分别于 2015 年和 2018 年发射的欧洲 Sentinel-2A/B 卫星上搭载的多光谱成像仪(Multi-Spectral Imager，MSI)均有 3 个短波红外通道，最高可提供 20 m 空间分辨率的多光谱影像。我国 2020 年发射的环境减灾二号 A/B 卫星上搭载的红外相机具有 9 个(3 个热红外)波段、720 km 幅宽以及 48 m/96 m 空间分辨率。2021 年搭载于可持续发展 1 号卫星的红外相机有 3 个热红外波段(空间分辨率为 30 m，幅宽为 300 km)。2022 年搭载于高分五号 01A 卫星的宽幅热红外成像仪(Wide-swath Thermal Infrared Imager，WTI)有 4 个热红外波段，其空间分辨率为 100 m，幅宽达到 1500 km。

表 3 早期和当前代表性对地观测红外载荷的主要指标

Table 3 Key Indicators of Early and Current Representative Earth-Observation Infrared Payloads

载荷名称	平台/卫星	国家/机构	发射时间	光谱范围(红外)/μm	光谱通道数(红外)	空间分辨率(红外)/m	幅宽/km	主要特点与意义
MRIR	TIROS-2	美国	1960	0.2～4.0 5～30 6.4～6.9 10～11 14～16	5	55000	3000	首次太空红外试验[35]
MVIRI	Meteosat-1	欧洲	1977	5.7～7.1 10.5～12.5	2	5000	30 min 全圆盘扫描	开创了欧洲静止轨道气象卫星全天时遥感的新纪元[36]
AVHRR/1	TIROS-N 和 NOAA-6/8/10	美国	1978/1979/1983/1986	10.3～11.3	1	4000	2600	作为第一代甚高分辨率扫描辐射计，开展了业务化全球气象与环境监测，奠定了全球气象卫星宽幅多光谱观测技术基础[37]

续表 3 早期和当前代表性对地观测红外载荷的主要指标

Table 3 (Continued) Key Indicators of Early and Current Representative Earth-Observation Infrared Payloads

载荷名称	平台/卫星	国家/机构	发射时间	光谱范围（红外）/μm	光谱通道数（红外）	空间分辨率（红外）/m	幅宽/km	主要特点与意义
TM	Landsat-5	美国/NASA	1984	10.4～12.5	1	120	185	作为首个业务化热红外载荷，开启了卫星热红外定量遥感时代[38]
MVISR	FY-1 A/B/C/D	中国	1988/1990/1999/2002	10.5～12.5	1	1100	2800	中国自行研制和发射的第一代极地轨道气象卫星[39]
VISSR-I	FY-2 A/2B	中国	1997/2000	6.2～7.6 10.5～12.5	2	5000	30 min 全圆盘扫描	中国首颗地球静止轨道气象卫星[40]
IRMSS	CBERS-01/02	中国	1999/2003	1.55～1.75 2.08～2.35 10.4～12.5	3	78/156	119.5	作为中国第一代传输型对地观测资源卫星，开创了我国陆地观测卫星搭载热红外相机的先河[41]
ASTER	Terra	日本/美国	1999	8.125～8.475 8.475～8.825 8.925～9.275 10.25～10.95 10.95～11.65	5	90	60	首个星载多光谱热红外成像仪[42]
COCTS	HY-1A	中国	2002	10.3～11.4 11.4～12.5	2	1100	1800	作为中国首颗太阳极地同步轨道海洋水色卫星，其水色仪的热红外谱段设置与AVHRR 基本一致[43]
AIRS	Aqua	美国	2002	3.7～15.4	2378	13500	1650	光谱分辨率是之前红外探测仪的100 多倍，可提供更准确的大气温度与湿度垂直剖面信息[44]
MERSI-I	FY-3 A/B/C	中国	2008/2010/2013	10～12.5 1.02～1.04 1.615～1.665 2.105～2.155	4	250/1000	2900	填补了中国极地轨道气象卫星中高分辨率多光谱观测的空白[45]

续表 3 早期和当前代表性对地观测红外载荷的主要指标

Table 3 (Continued) Key Indicators of Early and Current Representative Earth-Observation Infrared Payloads

载荷名称	平台/卫星	国家/机构	发射时间	光谱范围（红外）/μm	光谱通道数（红外）	空间分辨率（红外）/m	幅宽/km	主要特点与意义
IRS	HJ-1B	中国	2008	1.5～1.75 3.5～3.9 10.5～12.5	3	150/300	720	可实现幅宽超过720 km的可见光短波红外至长波红外宽谱段信息获取，在灾害监测中发挥重要作用[46]
VIIRS	Suomi NPP /NOAA-20 /NOAA-21	美国	2011 /2017 /2022	—	12	400	3000	作为AVHRR系列仪器的下一代升级产品，具有高分辨率、多通道、宽幅覆盖的全球综合观测能力[47]
OLI &TIRS	Lanssat-8/9	美国	2013 /2021	1.56～1.66 1.36～1.39 10.4～12.5	3	30	185	两个载荷协同工作，实现了从可见光到热红外的全谱段对地观测[48]
GIIRS	FY-4A	中国	2016	约4.44～6.06 约8.85～14.29	1650	16000	5000	首台在静止轨道上以红外高光谱干涉分光方式探测三维大气垂直结构的精密遥感仪器[49]
AGRI	FY-4A	中国	2016	1.371～1.386 1.58～1.64 2.1～2.35 3.5～4.0（高） 3.5～4.0（低） 5.8～6.7 6.9～7.3 8.0～9.0 10.3～11.3 11.5～12.5 13.2～13.8	11	2000/4000	15 min 全圆盘 扫描	中国静止气象卫星载荷的里程碑产品[50]

续表 3 早期和当前代表性对地观测红外载荷的主要指标

Table 3 (Continued) Key Indicators of Early and Current Representative Earth-Observation Infrared Payloads

载荷名称	平台/卫星	国家/机构	发射时间	光谱范围（红外）/μm	光谱通道数（红外）	空间分辨率（红外）/m	幅宽/km	主要特点与意义
COCTS	HY-1 C/D	中国	2018/2020	10.3～11.3 11.5～12.5	2	1100	2900	作为中国海洋水色遥感载荷的重要突破，其成功应用使我国海洋水色观测实现业务化与全球覆盖[51]
IRS	HJ-2 A/B	中国	2020	0.63～0.69 0.73～0.77 0.78～0.9 1.19～1.29 1.55～1.68 2.08～2.35 3.5～4.8 10.5～11.4 11.5～12.5	9	48/96	720	大幅宽陆地观测卫星[52]
IRS	ZY-1 02E	中国	2021	8～10	1	16	115	双向加密采样/超分辨率、全天时、大幅宽[53]
MERSI-LL	FY-3E	中国	2021	3.8±0.09 4.05±0.0775 7.2±0.25 8.55±0.15 10.8±0.5 12±0.5	6	250/1000	2500	全球首颗民用晨昏轨道气象卫星[54]
TIS	SDGSAT-1	中国	2021	8～10.5 10.3～11.3 11.5～12.5	3	30	300	全球首颗专门服务《联合国 2030 年可持续发展议程》的科学卫星，也是中国科学院首颗地球科学卫星[55]
FCI	Meteosat-12/14	欧洲	2022/2025	3.6～4.0 5.8～6.8 7.1～7.6 8.5～8.9 9.51～9.81 10.15～10.85 12.05～12.55 13～13.6	8	2000	10 min 全圆盘扫描	新一代欧洲静止轨道气象卫星[56]

续表 3 早期和当前代表性对地观测红外载荷的主要指标

Table 3 (Continued) Key Indicators of Early and Current Representative Earth-Observation Infrared Payloads

载荷名称	平台/卫星	国家/机构	发射时间	光谱范围（红外）/μm	光谱通道数（红外）	空间分辨率（红外）/m	幅宽/km	主要特点与意义
WTI	GF-5 01A	中国	2022	8.01～8.39 8.421～8.831 10.31～11.31 11.51～12.51	4	100	1500	具备国际综合性能领先的大幅宽中高空间分辨率长波红外探测能力[57]
COCTS2	HY-1E	中国	2023	1.225～1.265 1.60～1.68 3.645～3.835 10.3～11.3 11.5～12.5	5	500	3000	作为中国新一代海洋水色载荷（国内海洋水色遥感卫星中波段范围最宽、光谱数量最多的载荷），可有效提高夜间云检测及海表温度反演精度[58]
MERSI-III	FY-3 F/H	中国	2023 /2025	1.38±0.015 1.64±0.025 2.13±0.025 1.03±0.01 3.8±0.09 4.05±0.0775 7.2±0.25 8.55±0.15 10.8±0.5 12±0.5	10	250/1000	2900	中国极地轨道气象卫星最新的中分辨率光谱成像仪[59]

注：表中载荷指标只列出了与红外相关的部分

与此同时，红外探测也一直朝着高光谱分辨率方向发展，但其空间分辨率依然较低，主要用于红外大气垂直探测。比如，美国 2002 年发射的 Aqua 卫星上搭载了首个高光谱分辨率红外探测仪——大气红外探测仪（Atmospheric Infrared Sounder，AIRS），其红外通道数由传统的几个增加到 2378 个。我国 2021 年发射的 FY-4B 卫星上搭载的 GIIRS 是全球首个实现业务化运行的静止轨道高光谱红外探测仪。

2000 年，美国 EO-1 卫星上搭载了兼具高空间分辨率与高光谱分辨率的红外高光谱成像对地观测载荷 Hyperion，其波长覆盖 0.4～2.5 μm 范围，幅宽仅有 7.5 km，短波红外波段的信噪比较低。此后国内外发展的星载高光谱相机的工作波段只到近红外 1.0 μm 附近。我国 2018 年发射的高分五号（GF-5）卫星上搭载了国际首台星载宽谱宽幅高光谱相机——AHSI（工作波段为 0.4～2.5 μm，幅宽为 60 km），之后欧洲和美国陆续发射了谱段同样覆盖 0.4～2.5 μm 范围的星载高光谱相机（30 m 空间分辨率下的幅宽小于等于 30 km）。2023 年，我国发射了国际首个谱段覆盖 0.4～12.5 μm 范围的高光谱相机（空间分辨率为 10 m/40 m）。表 4 和表 5 分

表 4 国内早期和当前代表性近红外/红外高光谱对地成像载荷的主要指标

Table 4 Key Indicators of Early and Current Representative Earth-Observation Near-Infrared/Infrared Hyperspectral Payloads in China

卫星/仪器	HJ-1A/HSI	TG-1/HSI	GF-5(01)/AHSI	ZY-1-02D/AHSI	HJ-2/HSI	GF-5(02)/AHSI	ZY-1-02E/AHSI	GF5(01A)/AHSI	FSHSI
国家	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国	中国
发射时间	2008	2011	2018	2019	2020	2021	2021	2022	2023
波段范围/μm	0.45～1.05	0.4～2.5	0.4～2.5	0.4～2.5	0.45～2.5	0.4～2.5	0.4～2.5	0.4～2.5	0.4～12.5
光谱通道数	105	128	330	166	215	330	242	480	488
空间分辨率/m	100	10/20	30	30	48/96	30	30	30	10～40
幅宽/km	50	10	60	60	96	60	60	60	12.8
分光方式	傅里叶干涉	棱镜	光栅	光栅	傅里叶干涉	光栅	光栅	光栅	光栅

表 5 国外早期和当前代表性近红外/红外高光谱对地成像载荷的主要指标

Table 5 Key Indicators of Early and Current Representative Earth-Observation Near-Infrared/Infrared Hyperspectral Payloads Abroad

卫星/仪器	EO-1/Hyperion	PROBA-1/CHRIS	Mighty Sat II/FTHSI	ISS/DESIS	PRISMA	ISS/HISUI	EnMAP	ISS/EMIT	GHOSt	Tanager-1
国家/机构	美国	ESA	美国	德国	意大利	日本	德国	美国	美国	美国
发射时间	2000	2001	2000	2018	2019	2019	2022	2022	2023	2024
波段范围/μm	0.4～2.5	0.4～1.05	0.47～1.05	0.4～1.0	0.4～2.5	0.4～2.5	0.42～2.45	0.41～2.45	0.4～2.5	0.4～2.5
光谱通道数	220	62	146	235	238	185	228	～285	472	420
空间分辨率/m	30	17/34	30	30	30	31	30	60	8	30
幅宽/km	7.5	13～15	30	30	30	20	30	72	—	18
分光方式	光栅	棱镜	傅里叶干涉	光栅	棱镜	光栅	棱镜	光栅	光栅	光栅

别列出了国内外早期和当前代表性近红外/红外高光谱对地成像载荷的主要指标数据。

随着红外技术的长足发展，以及人类社会活动对地球生态、环境、气候、资源等影响的加剧，人们对冰–雪–岩–土–植–水–气等多圈层相互作用和气–温–碳–水循环等复杂过程演变的认知需求变得更加迫切。红外对地观测技术正经历一场从传统成像向多维精准感知的深刻范式跃迁。这一转变的核心在于构建一条全新的技术发展路径，其关键科学问题与前沿方向如下：探索时空、光谱与辐射强度等多维信息耦合的新型探测机制，以协同实现宽覆盖、高分辨率与高定量精度的观测目标；突破对全球多圈层关键要素物理参量的极限探测能力；破解高动态范围、多要素协同观测所带来的复杂系统难题；最终发展基于多源数据智能学习的红外虚拟地球系统。在此框架下，所构建的“多维多圈层红外数字地球”，将成为实现全数字化地球感知的重大基础设施，为精准模拟和预测地球系统的演变规律与循环过程，推动人类对地球“无所不在、无时不在”全数字化感知提供重要支撑。实现分钟级、亚米级、纳米级、毫开级时–空–谱–辐多维度红外极限探测和构建地球红外数字化基座，成为红外对地观

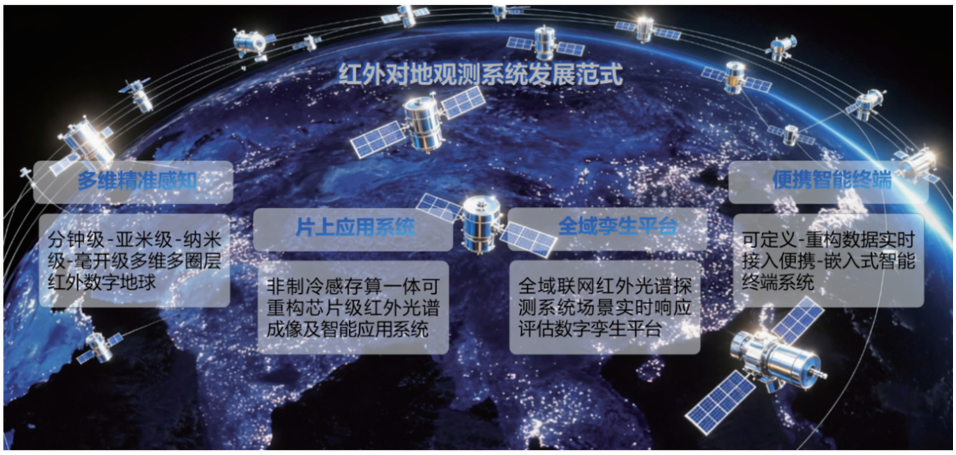

图 2 红外对地观测系统发展范式

Fig. 2 Development Paradigm of Infrared Earth Observation Systems

测的主要发展趋势(见图 2)。

红外技术在时-空-谱-辐多维度极限探测方面的发展将会产生海量数据，同时面临智能化处理能力弱、系统响应迟缓、应用服务链长等突出问题，进一步导致红外信息系统耗时耗能。这跟实时化、大众化是对立的。因此，需要构建基于卫星平台的可定义-可重构数据实时接入的嵌入式智能终端，实现从复杂感知到实时服务，即终端用户可从地面远程按需定义观测参数(如波段、分辨率、目标类型)，并实时下传数据。其中星载红外光谱仪可编程化、神经网络模型轻量部署、高能效边缘人工智能(Artificial Intelligence，AI)芯片星上运行等问题均为目前尚未解决且具有挑战性的研究内容。

近年来，以超高分辨率、超高灵敏度和超快响应为技术特征的高端第三代红外及光电探测器件，在国内外均取得重大突破。其在空间、能量、时间与光谱等多维特性方面的探测能力持续提升，正逐步逼近理论极限[32]。然而，高性能的红外探测要依赖于极低的工作环境。探测器甚至光机系统需要在几十开尔文的低温下运行，以抑制探测器暗电流和光机背景辐射。这导致了庞大且昂贵的冷却系统，进而造成整个设备在体积、成本和功耗上的居高不下，严重制约了其普及与应用。因此，如何通过新型材料与结构体制的创新，提高探测器和光机系统的工作温度，已成为推动该领域走向低成本、小型化以及大规模制造的重要途径。

在新的物理机制驱动下，我国红外探测技术正朝着多维感知、片上集成、仿生探测和感算一体的方向演进。其中，数字孪生技术与红外光谱探测技术的深度融合正成为前沿趋势，通过构建物理实体的虚拟映射，为全球网络化红外遥感实现了实时监测、模拟预测与优化控制的新范式[33]。已有研究通过集成多源数据与游戏引擎，成功构建了如鄱阳湖湿地的高精度动态场景，验证了其在提升场景还原度与交互体验方面的潜力[34]。从数字孪生到数字样机，再到数字应用场景，红外探测技术将由“系统论证-设计-研发-应用”发展成为“现实与虚拟完全实时无缝衔接和无间融合”的新范式。

商业航天的快速发展为构建天空地协同观测体系注入了新动力。例如，以“星链”(Starlink)为代表的低轨通信星座不仅提升了全球数据传输能力，其卫星平台也可用作遥感载荷的新型载体。此外，Planet、Maxar 等公司已通过高重访频率、高分辨率的微小卫星星座，显著提升了红外及其他波段遥感数据的获取效率与时空覆盖能力。商业模式的创新也推动了数据服务的低成本化、大众化与产业化，加速了遥感技术从专业领域向大众服务扩展。我国当前已开始广泛应用的北斗导航卫星，以

及正在发展的“星网”和“千帆”等规模将达到成千上万颗的低轨通信卫星星座，结合当前商业遥感卫星不可阻挡的发展趋势，将促使形成通导遥一体、星间互联、星地互通的即时遥感，大幅提升对地表突发异常事件的监测能力，实现红外遥感技术服务大众应用，掀开红外一体化发展的新篇章。

3 结论

红外技术在人类“向上看”太空宇宙起源与“向下看”地球系统多圈层演化等方面发挥着不可替代的作用，正朝着探测极限的突破以及感知体系的智能化、泛在化等维度快速发展，同时也面临着来自物理规律、技术瓶颈与应用需求的系统性挑战。

在“向上看”的空间探测领域，红外技术的演进体现为观测平台从地基向空基跨越、望远镜口径持续增大、制冷技术向极低温迈进、探测波长拓展到更长的甚长波红外波段。未来前沿已指向构建分布式天文观测网，通过发展超大口径在轨拼接，甚长波红外、极低温探测以及地月空间乃至星际基站干涉阵列，更好了解宇宙最早期的历史，不断拓展人类认知的时空边界。

在“向下看”的对地观测领域，红外技术已从早期的低空间分辨率和少量波段，向着更宽波段范围、更大幅宽下同时提升光谱分辨率和空间分辨率迈进，并通过静止轨道或星座星群等提升红外观测的时间分辨率。实现分钟级、亚米级、纳米级、毫开级时-空-谱-辐多维度红外极限探测和构建地球红外数字化基座已成为红外对地观测的主要发展趋势。而数字孪生、人工智能、大数据处理和商业航天等的兴起，正共同推动红外对地观测走向天空地协同与通导遥一体的实时化、普及化和大众化服务应用，为精准模拟和预测地球系统的演变规律与循环过程，推动人类对地球“无所不在、无时不在”全数字化感知提供重要支撑。

本文主要围绕空间红外技术的前沿做了一些展望，目的是为红外技术发展提供一种脉络和参考。由于篇幅所限，红外技术发展的内涵和外延远不止于此，迫切需要红外研究领域更多的学者专家进行总结和分享，共同推动红外技术的不断进步。

参考文献

[1] Neugebauer G, Beichman C A, Soifer B T, et al. Early results from the infrared astronomical satellite [J]. *Science*, 1984, **224**(4644): 14–21.

[2] Bolton S J, Lunine J, Stevenson D, et al. The Juno Mission [J]. *Space Science Reviews*, 2017, **213**(1): 5–37.

[3] Stern S A, Weaver H A, Spencer J R, et al. The New Horizons Kuiper Belt Extended Mission [J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(4): 77.

[4] Stone E C, Miner E D. The Voyager 2 encounter with the Neptunian system [J]. *Science*, 1989, **246**(4936): 1417–1421.

[5] Segransan D, Kervella P, Forveille T, et al. First radius measurements of very low mass stars with the VLTI [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2003, **397**(3): L5–L8.

[6] Pilbratt G. FIRST — Far Infrared and Submillimetre Space Telescope [J]. *Advances in Space Research*, 1993, **13**(12): 545–548.

[7] Casey C M, Kartaltepe J S, Drakos N E, et al. COSMOS-Web: An overview of the JWST Cosmic Origins Survey [J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **954**(1): 31.

[8] Kalluri S, Cao C, Iturbide-Sanchez F, et al. NOAA's Joint Polar Satellite System and the Near-Earth Observation Network [C]. *SPIE*, 2024, **13192**: 1319206.

[9] Zhao Q, Yu L, Du Z, et al. An Overview of the Applications of Earth Observation Satellite Data: Impacts and Future Trends [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(8): 1863.

[10] Wulder M A, Roy D P, Radeloff V C, et al. Fifty years of Landsat science and impacts [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **280**: 113195.

[11] Holmlund K, Grandell J, Schmetz J, et al. Meteosat Third Generation (MTG): Continuation and innovation of observations from geostationary orbit [J]. *Bulletin of the American Meteorologi-*

cal Society, 2021, **102**(5): E990–E1015.

[12] Lu F, Shou Y. Channel simulation for FY-4 AGRI [C]. Vancouver: 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.

[13] 宋庆君, 马超飞, 林明森, 等. 海洋水色卫星技术进展 [J]. **遥感学报**, 2025, **29**(6): 1399–1425.
Song Q J, Ma C F, Lin M S, et al. Advances in Ocean Color Observation Satellite Technology [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, **29**(6): 1399–1425.

[14] 白照广, 董筠, 朱军, 等. 环境减灾二号 A/B 卫星系统设计与技术创新 [J]. **航天器工程**, 2022, **31**(3): 1–8.
Bai Z G, Dong Y, Zhu J, et al. System Design and Technology Innovation of HJ-2A/B Satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, **31**(3): 1–8.

[15] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(2): 253–264.

[16] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Thriving on Our Changing Planet: A Decadal Strategy for Earth Observation from Space [R]. Washington, DC: The National Academies Press, 2018.

[17] Liu Y N, Sun D X, Hu X N, et al. The advanced hyperspectral imager: Aboard China's GaoFen-5 satellite [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2019, **7**(4): 23–32.

[18] Cogliati S, Sarti F, Chiarantini L, et al. The PRISMA imaging spectroscopy mission: Overview and first performance analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, **262**(20): 112499.

[19] Baur S, Wachter R, Basili P, et al. Calibration and characterization of the EnMAP hyperspectral imager [C]. *SPIE*, 2019, **11151**: 111511B.

[20] Joshua M, Salvaggio K, Keremedjiev M, et al. Planet's upcoming VIS-SWIR hyperspectral satellites [C]. Long Beach: 2025 Hyperspectral/Multispectral Imaging and Sounding of the Environment (HISE) Meeting, 2025.

[21] 李德仁, 王密, 肖晶, 等. 论无所不在的时空智能 [J]. **遥感学报**, 2025, **29**(6): 1388–1398.
Li D R, Wang M, Xiao J, et al. On Ubiquitous Spatio-Temporal Intelligence [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, **29**(6): 1388–1398.

[22] 李德仁, 王珈樱, 王密. 我国商业遥感卫星系统发展建议 [J]. **卫星应用**, 2024, **12**(5): 6–10.
Li D R, Wang J Y, Wang M. Recommendations for the Development of China's Commercial Remote Sensing Satellite System [J]. *Satellite Application*, 2024, **12**(5): 6–10.

[23] 卫征. 关于我国商业航天高质量发展的若干思考 [J]. **卫星应用**, 2022, **10**(5): 8–11.
Wei Z. Some Thoughts on the High-Quality Development of China's Commercial Aerospace [J]. *Satellite Application*, 2022, **10**(5): 8–11.

[24] Tokunaga A T. *Encyclopedia of Geology (3rd Edition)* [M]. Oxford: Elsevier Academic Press, 2014.

[25] Harvey P M. A far-infrared photometer for the Kuiper Airborne Observatory [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1979, **91**(539): 143.

[26] Young E T, Becklin E E, Marcum P M, et al. Early science with SOFIA, the stratospheric observatory for infrared astronomy [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2012, **749**(2): L17.

[27] 李佳席, 邓劲松, 许春, 等. 红外空间天文发展 [J]. **天文学进展**, 2016, **34**(3): 327–340.
Li J X, Deng J S, Xu C, et al. Development of the Infrared Space Astronomical Observatory [J]. *Progress in Astronomy*, 2016, **34**(3): 327–340.

[28] Witstok J, Jakobsen P, Maiolino R, et al. Witnessing the onset of reionization through Lyman-α emission at redshift 13 [J]. *Nature*, 2025, **639**(8056): 897–901.

[29] Aghanim N. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters [J]. *Astron Astrophys*, 2020, **641**: A6.

[30] Ryden B. *Introduction to Cosmology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

[31] 杨亭, 徐彭梅, 付智红, 等. 新一代海洋水色水温扫描仪系统设计 [J]. **航天返回与遥感**, 2025, **46**(2): 49–62.
Yang T, Xu P M, Fu Z H, et al. Design and Im-

plementation of New Generation Ocean Color and Temperature Scanner System [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2025, **46**(2): 49-62.

[32] 叶振华，李辉豪，王进东，等. 红外光电探测器的前沿热点与变革趋势 [J]. **红外与毫米波学报**, 2022, **41**(1): 15-39.
Ye Z H, Li H H, Wang J D, et al. Recent Hotspots and Innovative Trends of Infrared Photon Detectors [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, **41**(1): 15-39.

[33] 李亚冉，保昊辰，孙胜利. 透视空天红外遥感探测技术:演进规律与发展趋势 [J]. **上海航天(中英文)**, 2024, **41**(3): 25-36.
Li Y R, Bao H C, Sun S L. Peering into Aerospace Infrared Remote Sensing Detection Technology: Evolutionary Patterns and Development Trends [J]. *Aerospace Shanghai*, 2024, **41**(3): 25-36.

[34] Lu S, Fang C, Xiao X. Virtual Scene Construction of Wetlands: A Case Study of Poyang Lake, China [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2023, **12**(2): 49.

[35] Sternberg S, Schnapf A. Performance and Evaluation of Satellites Tiros I and Tiros II [J]. *ARS Journal*, 1961, **31**(11): 1495-1505.

[36] Rüthrich F, John V O, Roebeling R A, et al. Climate Data Records from Meteosat First Generation Part III: Recalibration and Uncertainty Tracing of the Visible Channel on Meteosat-2-7 Using Reconstructed, Spectrally Changing Response Functions [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(10): 1165.

[37] Ehrlich D, Estes J E, Singh A. Applications of NOAA-AVHRR 1 km Data for Environmental Monitoring [J]. *Remote Sensing*, 1994, **15**(1): 145-161.

[38] Markham B L, Storey J C, Williams D L, et al. Landsat Sensor Performance: History and Current Status [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(12): 2691-2694.

[39] 谢小萍. 利用 FY-1D 全球数据监测北极冰雪覆盖 [D]. 南京：南京信息工程大学，2006.
Xie X P. Monitoring Arctic Ice and Snow Cover Using FY-1D Global Data [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2006.

[40] 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.
Tang S H, Qiu H, Ma G. Review on Progress of the Fengyun Meteorological Satellite [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2016, **20**(5): 842-849.

[41] 王怀义，马文坡. CBERS-1 卫星的红外多光谱扫描仪设计与在轨运行 [J]. **航天返回与遥感**, 2001, **22**(3): 16-20.
Wang H Y, Ma W P. Design and Operation of the Infrared Multi-spectral Scanner for CBERS-1 Satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2001, **22**(3): 16-20.

[42] Tsu H, Fujisada H, Yamaguchi Y, et al. Overview of ASTER instrument and ASTER data product [C]. *SPIE*, 2002, **4486**: 1-13.

[43] 张锷. “海洋一号”卫星 10 通道水色扫描仪光学系统的设计 [J]. **光学与光电技术**, 2004, **2**(4): 21-22.
Zhang E. Design of Optical System in 10-Band Radiometer for Chinese Ocean Color Satellite [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2004, **2**(4): 21-22.

[44] Pagano T S, Chahine M T, Fetzer E J. The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) on the NASA Aqua Spacecraft: A general remote sensing tool for understanding atmospheric structure, dynamics, and composition [C]. *SPIE*, 2010, **7827**: 162-169.

[45] Li Y, Liu T, Wang Z, et al. Arctic Sea Ice Surface Temperature Retrieval from FengYun-3A MERSI-I Data [J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(23): 4599.

[46] 孙德新，柴孟阳，刘银年，等. 环境减灾二号 A/B 卫星红外相机在轨性能测试与稳定性评估 [J]. **航天器工程**, 2022, **31**(3): 83-91.
Sun D X, Chai M Y, Liu Y N, et al. On-orbit Performance Tests and Stability Evaluation of Infrared Cameras on HJ-2A/B Satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, **31**(3): 83-91.

[47] Kalluri S, Cao C, Iturbide-Sanchez F, et al. NOAA's Joint Polar Satellite System and the Near-

Earth Observation Network [C]. *SPIE*, 2024, **13192**: 1319206.

[48] 曾成强, 王理根. 新一代 Landsat 卫星星座特征及应用前景 [J]. **城市勘测**, 2022, **32**(5): 78-85.

Zeng C Q, Wang L G. The Characteristics and Application Prospects of the New Generation Landsat Satellite Constellation [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2022, **32**(5): 78-85.

[49] 冯绚, 李利兵, 陈博洋, 等. 风云四号 A 星干涉式大气垂直探测仪在轨定标及性能评价 [J]. **红外与毫米波学报**, 2019, **38**(5): 648-654.

Feng X, Li L B, Chen B Y, et al. Post-launch calibration and validation of the Geostationary Interferometric Infrared Sounder (GIIRS) on FY-4A [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, **38**(5): 648-654.

[50] Lu F, Shou Y. Channel simulation for FY-4 AGRI [C]. Vancouver: 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.

[51] 刘建强, 叶小敏, 宋庆君, 等. HY-1C/D 海洋水色卫星产品体系及其典型应用 [J]. **遥感学报**, 2023, **27**(1): 1-13.

Liu J Q, Ye X M, Song Q J, et al. Products of HY-1C/D Ocean Color Satellites and Their Typical Applications [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, **27**(1): 1-13.

[52] 孙德新, 柴孟阳, 刘银年, 等. 环境减灾二号 A/B 卫星红外相机在轨性能测试与稳定性评估 [J]. **航天器工程**, 2022, **31**(3): 83-91.

Sun D X, Chai M Y, Liu Y N, et al. On-orbit Performance Tests and Stability Evaluation of Infrared Cameras on HJ-2A/B Satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, **31**(3): 83-91.

[53] 王密, 赵泉, 谢广奇. 资源一号 02E 热红外双向加密采样模式超分辨率方法 [J]. **遥感学报**, 2025, **29**(6): 1649-1658.

Wang M, Zhao Q, Xie G Q. A Super-Resolution Method for ZY-1 02E Thermal Infrared Bidirectional Sub-Pixel Shifted Sampling Mode [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, **29**(6): 1649-1658.

[54] 胡秀清, 徐寒列, 雷松涛, 等. 风云三号黎明星微光探测及应用综述 [J]. **光学学报**, 2022, **42**(12): 33-46.

Hu X Q, Xu H L, Lei S T, et al. Overview of Low Light Detection and Application of FY-3 Early Morning Satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, **42**(12): 33-46.

[55] Guo H, Dou C, Chen H, et al. SDGSAT-1: The World's First Scientific Satellite for Sustainable Development Goals [J]. *Science Bulletin*, 2023, **68**(1): 34-38.

[56] Holmlund K, Grandell J, Schmetz J, et al. Meteosat Third Generation (MTG): Continuation and Innovation of Observations from Geostationary Orbit [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, **102**(5): E990-E1015.

[57] 戴荣凡, 王密, 陈儒, 等. GF5A-WTI 超大幅宽摆扫序列影像物方几何拼接处理研究 [J]. **武汉大学学报(信息科学版)**, 2025, **50**(4): 767-781.

Dai R F, Wang M, Chen R, et al. Geometric Stitching Processing of GF5A-WTI Ultra-Width Whiskbroom Sequence Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, **50**(4): 767-781.

[58] 徐月海, 管磊, 曲利芹, 等. 新一代海洋水色观测卫星 COCTS2 热红外波段在轨定标 [J]. **航天返回与遥感**, 2025, **46**(2): 111-121.

Xu Y H, Guan L, Qu L Q, et al. Thermal Emissive Bands On-Orbit Calibration of COCTS2 Onboard the New Generation Ocean Color Observation Satellite [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2025, **46**(2): 111-121.

[59] 孙凌. 风云三号 F 星 [J]. **卫星应用**, 2023, **11**(9): 封四.

Sun L. Fengyun-3F Satellite [J]. *Satellite Application*, 2023, **11**(9): Back Cover.