

文章编号: 1672-8785(2021)11-0015-10

红外焦平面阵列及星载红外 成像系统的发展

刘 炜 牛誉霏 肖龙龙* 王煜博

(航天工程大学, 北京 101406)

摘 要: 简要介绍了红外焦平面阵列的原理、分类及特点。从制冷型与非制冷型两方面, 并按照材料和技术参数的主线, 分析了红外焦平面阵列的发展现状, 列举了各型红外焦平面探测器产品及其技术特点, 预测了红外焦平面阵列的发展趋势。最后归纳总结了红外成像技术在环境探测、成像侦察、导弹预警等航天遥感领域的应用, 并对其前景进行了展望。

关键词: 红外焦平面阵列; 发展现状; 红外成像; 航天遥感

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.11.003

Development of Infrared Focal Plane Array and Spaceborne Infrared Imaging System

LIU Wei, NIU Yu-fei, XIAO Long-long*, WANG Yu-bo

(Space Engineering University, Beijing 101406, China)

Abstract: The principle, classification and characteristics of infrared focal plane array are briefly introduced in this paper. From the two aspects of cooled and uncooled, and according to the mainline of materials and technical parameters, the development status of IRFPA is analyzed, the products and technical characteristics of various types of IRFPA are listed, and its development trend is predicted. Finally, the applications of infrared imaging technology in space remote sensing fields such as environmental detection, imaging reconnaissance and missile warning are summarized, and its application prospect is forecasted.

Key words: IRFPA; development status; infrared imaging; space remote sensing

0 引言

任何温度高于绝对零度的物体都会以红外辐射的方式与环境进行能量交换。作为一种“不可见光”, 红外辐射包含可见光波段所没有的客观信息, 因此在军民领域得到了广泛应

用。特别是在成像方面, 红外热成像系统具备全天时工作的独特优势, 在遥感应用上得到了各国的高度重视。作为红外热成像系统的核心组成部分, 红外焦平面探测器的发展水平决定了该系统的技术指标。因此, 它一直都是红外

收稿日期: 2021-07-07

作者简介: 刘炜(2000-), 女, 江苏新沂人, 本科生, 主要从事红外遥感及应用方面的研究。

*通讯作者: E-mail: longnuidt@126.com

技术发展的重中之重。

红外焦平面探测器最早出现于 20 世纪 40 年代。近年来,随着材料与技术的发展,由 HgCdTe、InSb 等材料制成的制冷型红外焦平面探测器在高端军事领域得到了广泛应用;由 VO_x、 α -Si 等材料制成的非制冷型红外焦平面探测器凭借价格与体积上的优势迅速占领了民用市场。在航天遥感领域,红外成像在环境探测、成像侦察和导弹预警等方面都发挥了至关重要的作用。本文主要介绍红外焦平面阵列的发展现状,并分析红外成像在航天遥感中的应用现状及前景^[1]。

1 红外焦平面阵列的原理及分类

1.1 基本原理

红外焦平面阵列集光电转换和信号读取处理于一体,由按一定规则排列的红外感光元件和信号处理单元组成。入射的红外光经光学系统聚焦在感光元件上。感光元件通过光电转换作用将接收到的红外辐射能量变为电信号。信号处理单元负责对电信号进行积分放大、采样保持,最终通过输出缓冲和多路传输系统将其送达监视系统,从而显示形成与实际景物相对应的红外图像。

1.2 分类及特点

自 20 世纪 60 年代发展至今,红外焦平面阵列已形成较为成熟的产品体系。由于分类方法多样,为了更好地了解红外焦平面阵列的工作机理,本文主要从辐射转换机理、制冷方式和扫描方式三个方面进行分类及特点分析。

1.2.1 热敏型与光敏型

红外焦平面阵列可按照辐射转换机理分为热敏型与光敏型。其中,热敏型红外焦平面阵列(比如热释电探测器、微测辐射热计、微测辐射热电堆等)在吸收红外辐射后会升温,其某些物理参数也会随之发生变化。这类探测器的响应波段宽,但响应时间较长、探测率低,因此目前主要应用于民用领域^[2]。光敏型红外焦平面阵列利用光电效应原理制成,将红外辐射能量转换为电信号后将其输出并加以处理,

具有灵敏度高、响应快速等优点。它是当今发展最快、应用最普遍的红外焦平面阵列,在军民领域都有广泛的应用。特别是在航天遥感应用中,它已与可见光、高光谱技术一样,成为光学遥感的主要手段之一。

1.2.2 制冷型与非制冷型

红外焦平面阵列可根据制冷方式分为制冷型与非制冷型。其中,制冷型红外焦平面阵列基于低温制冷技术以及光子探测原理,具有灵敏度高、探测距离远等特点,主要应用于高端军事装备。但当工作温度过高时,焦平面材料固有的热激发迅速增强。受噪声和暗电流增大的影响,探测器的性能明显降低,甚至无法正常工作,因此它一般工作在 77 K 温度下。受制冷设备及材料的限制,制冷型红外焦平面阵列的成本和功耗较高。它由热释电探测器或微测辐射热计以及相应的电路与系统组成,可在室温下工作(无需制冷)^[3];能够与大规模集成电路工艺兼容,且均匀性好、图像清晰。相较于制冷型红外焦平面,非制冷型红外焦平面的设备具有体积小、成本低、寿命长的特点,因此在民用领域有着更为广阔的应用前景^[4-5]。

1.2.3 扫描型与凝视型

红外焦平面阵列可根据扫描方式分为扫描型与凝视型。其中,扫描型红外焦平面阵列采用时间延迟积分技术,以串行方式读取信号,在探测元较少时可以获得更多像素的图像,从而降低了红外焦平面探测器的制造难度。但是目前使用的扫描成像方法并不适用于更高级的红外成像系统,即使一维线阵探测器也受到限制。凝视型焦平面阵列无需延迟积分,以并行方式读取信号,因此具有比扫描型焦平面更快的速度。它采用较长的积分时间,因而有更高的灵敏度,可使凝视型中波红外焦平面探测器获得的图像与扫描型长波红外焦平面探测器的图像相媲美。但是,它的成本更高,电路也更加复杂。

2 红外焦平面阵列的发展现状

自 20 世纪 50 年代以来,半导体物理技术

飞速发展。人们在 60 年代初就成功研制了针对 $1\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 三个大气窗口的高性能红外探测器, 形成了以多元线阵或小面阵为代表的第一代红外焦平面探测器^[6]。到 20 世纪 70 年代末, 英、美、法等西方国家开始了新一代器件的研制, 并在 80 年代取得重大突破, 形成了以长线阵或凝视型阵列为代表的第二代红外焦平面探测器。20 世纪 90 年代, 先进材料和超大规模集成电路的应用促成了以大面阵、高性能为代表的第三代红外焦平面探测器, 该领域也由此进入了新的技术探索期^[7-8]。本文将从制冷与非制冷型的角度来分析红外焦平面阵列的发展现状与趋势。

2.1 制冷型红外焦平面阵列

制冷型红外焦平面阵列主要由以 HgCdTe 和 InSb 为代表的两类材料制成。HgCdTe 由于具有响应波段宽、集成度高以及在空间光学遥感中应用广泛等特点而成为目前最重要的红外探测器材料。InSb 焦平面通常采用倒装互连技术, 其载流子迁移率较高, 非常容易实现对 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外辐射的探测, 因此在先进军事领域具有广泛的应用。制冷型红外焦平面阵列的发展大致可分为三个阶段: 一是以单片式电荷注入器件为代表的探索期; 二是以探测器阵列与硅集成信号处理电路互连成式结构为代表的发展期; 三是以超大规模集成电路应用一体化结构为代表的成熟期。

2.1.1 HgCdTe 制冷型红外焦平面阵列

20 世纪 70 年代, 英国最早用 HgCdTe 材质成功研制了扫描积分型红外探测器, 并据此开发出了各种红外热成像仪器。目前, 美、法、英等发达国家的单色 HgCdTe 红外焦平面技术已基本成熟。随着红外焦平面探测器芯片小像素加工技术取得突破性进展, HgCdTe 红外焦平面在超大规模、双色、长波及高工作温度等技术领域的理论研究日趋成熟, 制作工艺也在不断完善^[9-11]。

以美国洛克威尔(Rockwell)研究中心研制的短波 HgCdTe 焦平面阵列为代表, 探测器规格目前已经达到 2048×2048 元。此外, 他们还研制出 4096×4096 元 H4RG 型 HgCdTe 红外焦平面探测器(包括 $10\ \mu\text{m}$ 与 $15\ \mu\text{m}$ 两种像元尺寸)^[12]。图 1 为像元尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ 与 $15\ \mu\text{m}$ 的 H4RG 型 HgCdTe 红外焦平面探测器的实物图^[12]。

法国 LYNRYD 公司研发的 2048×2048 元低噪声近红外探测器的暗电流小于 $0.5\text{e}^-/\text{s}/\text{像元}$ ^[13], 量子效率高于 70%。最具代表性的产品是目前在售的中波红外焦平面阵列 DAPHNIS-HD MW 与 SCORPIO MW, 属于高端系列产品, 性能尤为突出(见表 1)。其中, DAPHNIS-HD MW 的像元尺寸为 $10\ \mu\text{m}$, 保证了高分辨率、宽视场的优势, 使其广泛应用于航空、舰艇以及地面车辆载荷。而 SCORPIO MW 作为标准的 $15\ \mu\text{m}$ 像元 MWIR VGA 产

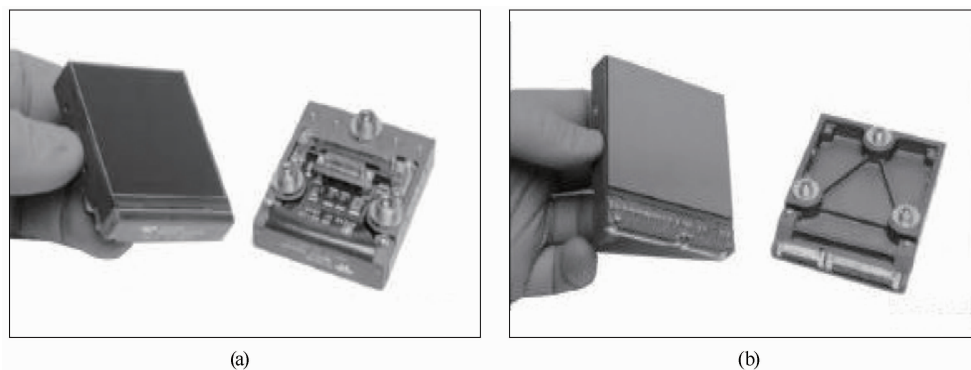


图 1 4096×4096 元 H4RG 型 HgCdTe 红外焦平面探测器: (a) $10\ \mu\text{m}$ 像元; (b) $15\ \mu\text{m}$ 像元

品,可实现 640×512 、 640×480 、 512×512 三种分辨率,也可通过编程自定义分辨率。凭借卓越的性能,该探测器能够适应恶劣的环境,因此在军事系统中得到了广泛应用^[14]。

表 1 LYNRYD 公司探测器芯片的性能参数

参数	DAPHNIS-HD MW	SCORPIO MW
光敏元	1280×720	640×512/640×480/ 512×512
像元尺寸	10 μm	15 μm
响应波段	3.7~4.8 μm	3.7~4.8 μm
最高工作温度	120 K	90 K
输出帧率	85 Hz	120 Hz

2.1.2 InSb 制冷型红外焦平面阵列

InSb 红外焦平面阵列在中波红外波段具有卓越的性能。与 HgCdTe 红外焦平面相比,该探测器的暗电流低、器件响应线性度好,适用于 F 数较大的红外探测系统,主要应用于高背景工作条件探测和低背景天文学观测(包括红外搜索跟踪、红外制导、热成像、地基或天基红外天文学观测等领域)^[15-16]。

自 1952 年 InSb 材料独有的半导体性质得到广泛关注至今,美、英、俄、以色列等主要发达国家已经掌握了成熟的 InSb 红外焦平面生产技术。探测器规模实现了从 128×128 元到 $4k \times 4k$ 元全覆盖,最高工作温度也得到了显著提升^[17]。作为全球最大的 InSb 红外焦平面探测器制造商,以色列的 SCD 公司目前已开发出各种规格的红外焦平面探测器产品,其产品线中的最小规格为 320×256 元,最大规格为 1920×1536 元^[18]。近年来,该公司通过用分子束外延技术(Molecular Beam Epitaxy, MBE)制备 InSb,减小了红外焦平面探测器工作时产生的暗电流,使其能够在 100 K 温度下稳定工作^[19]。

2.2 非制冷型红外焦平面阵列

非制冷型红外焦平面阵列不需要制冷装置,可在室温下工作,大大减少了系统复杂

度。它的整体性能略逊于制冷型红外焦平面探测器,但仍可满足大部分的军事和民用需求。近年来,随着制造工艺的进步和性价比的提高,它将会有一个更广阔的应用前景。非制冷型红外焦平面的研制以 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的长波波段为主流,其性能主要取决于热敏材料的选择。目前,常用的热敏材料以氧化钒(VO_x)和多晶硅($\alpha\text{-Si}$)为主。氧化钒材料在测温精度与灵敏度等方面表现较好,而多晶硅材料则易于实现大规模生产。

2.2.1 VO_x 红外焦平面阵列

作为最早投入生产使用的非制冷型焦平面材料, VO_x 的生产工艺经过多年发展后已经较为成熟。 VO_x 有多种复合形态,如 VO_2 、 V_2O_5 、 V_2O_3 等。其中, V_2O_3 的制备技术较其他复合形态更为简单且成像效果更好,现已成为主要研究方向。表 2 列出了目前比较有代表性的 VO_x 红外焦平面阵列产品。

美国 FLIR 公司是全球技术水平最高、出货量最大的红外焦平面制造商,其产品代表了目前行业的最高水平。作为世界上主要的 VO_x 红外焦平面制造厂商,美国 DRS 公司通常采用金属封装和陶瓷封装两种形式,生产的探测器主要供应美国军方^[20-21]。英国 BAE 公司能够将 1024×768 阵列的像元尺寸做到 $17 \mu\text{m}$,处于该阵列规模的领先水平。中国北方广微科技有限公司的阵列规模也能达到 640×512 ,其国内市场占有率稳步提升。近年来,艾睿光电公司发展迅速,成功推出了 S121 型 $1024 \times 768/12 \mu\text{m}$ 大规格红外焦平面探测器。该探测器在国内具有最大的面阵和最小的像元。目前,该公司已研发出像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$ 的探测器,成功领跑国内红外焦平面探测器行业。综上所述, VO_x 红外焦平面阵列主要工作在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 长波红外波段。以 FLIR 为代表的欧美公司一直处于领先地位,国内公司虽然在阵列规模和像元尺寸上有所突破,但在性能上还处于追赶阶段。

表 2 国内外主要公司的 VO_x 焦平面产品

公司名称	阵列规模	像元尺寸/ μm	响应波段/ μm	噪声等效温差/mK
美国 FLIR 公司	640×512	17	7.5~13.5	<35
美国 DRS 公司	640×480	17	8~14	35~40
英国 BAE 公司	1024×768	17	8~14	<50
中国北方广微公司	640×512	17	8~14	<50
中国艾睿光电公司	1024×768	12	8~14	<50

表 3 主要 $\alpha\text{-Si}$ 焦平面产品的性能参数

公司名称	最大阵列规模	最小像元尺寸	热响应时间	噪声等效温差
法国 ULIS 公司	640×480	12 μm	6.6 ms	53 mK
美国 L-3 公司	1024×768	17 μm	10 ms	35 mK

2.2.2 $\alpha\text{-Si}$ 红外焦平面阵列

由于具有无定形结构, $\alpha\text{-Si}$ 对温度的变化相对不敏感。 $\alpha\text{-Si}$ 红外焦平面阵列的噪声等效温差通常为 50~60 mK, 且残余固定图像噪声大, 比 VO_x 高一个数量级。它的优点是可与标准硅工艺兼容、制备过程简单、价格便宜。表 3 列出了目前比较有代表性的 $\alpha\text{-Si}$ 红外焦平面阵列产品^[22]。

作为世界上最主要的非制冷多晶硅红外焦平面制造商, 法国 ULIS 公司已研制出像元尺寸为 12 μm 的 640×480 元多晶硅探测器。在热响应时间只有 6.6 ms 的情况下, 该探测器的噪声等效温差可达到 53 mK。作为出货量仅次于 ULIS 公司的非制冷多晶硅红外焦平面制造商, 美国 L-3 公司的产品阵列规模覆盖了 320×240、640×480 与 1024×768, 像元尺寸最小可达到 17 μm 。在热响应时间为 10 ms 的情况下, 噪声等效温差可达到 35 mK。

2.3 制冷型与非制冷型红外焦平面阵列对比

制冷型与非制冷型红外焦平面阵列采用不同的材料与工艺, 各有优缺点, 适用范围也不尽相同, 主要表现在以下几个方面: (1) 灵敏度。制冷型红外焦平面可通过制冷装置降低自身温度, 从而提高灵敏度、减小误差、扩大检测范围; 而非制冷型红外焦平面由于工作在室温下, 灵敏度较低, 可靠性相对也会差一些。(2) 价格。由于制冷型红外焦平面对材料的要求十分苛刻且成品率低, 价格相对昂贵; 而非制冷型红外焦平面阵列无需制冷装置且体积较

小, 因此价格相对较低, 性价比较高。(3) 使用寿命。制冷型红外焦平面的使用寿命受制冷机工作状态的影响较大, 比非制冷型红外焦平面短。但非制冷型红外焦平面的灵敏度随着部件老化也会降低。

2.4 未来发展趋势预测

红外探测器随着制备及配套技术的成熟和应用范围的不断扩大而飞速发展, 其发展趋势主要有以下几个方面: (1) 集成小型化。半导体工艺技术、微机械加工技术和大规模集成电路技术的最新成果将有利于简化红外探测器的系统结构、缩小体积、减轻重量^[1]。(2) 高速智能化。为了更快地获取红外图像, 必然要求探测器阵列在具有高采样速率和高灵敏度的同时, 还具有自身非均匀性校正、自适应探测等图像智能处理能力。(3) 大阵列多色化。随着用户对红外系统性能需求的日益增长和相关技术的不断进步, 红外探测器将向大面阵和长线阵方向发展。此外, 单一波长的红外焦平面探测器一旦受到同波段其他信号的干扰, 就容易丧失其原有功能。而采用多波段红外焦平面探测器则可减小外界因素的影响, 从而获取不同红外波段更加丰富的信息并有效提高图像获取效率。

3 红外成像在航天遥感中的应用

搭载红外成像系统的遥感卫星可从地球表面之外利用空间位置优势进行对地观测, 获取有关地球表面的红外信息, 从而满足环境探

测、军事侦察和导弹预警等方面的需求。目前,它已成为红外应用的热门方向。

3.1 环境探测

传统的地面环境观测具有较高的精度。但受地形环境与观测能力的限制,它无法实时获得覆盖全球的观测数据。而利用卫星遥感则可实现大范围、高效率且不受地理空间限制的全域探测。下面将从气象预报和资源遥感两方面简要介绍红外遥感在环境探测方面的应用。

3.1.1 气象预报

搭载在气象卫星上的红外成像器件通过拍摄大气层红外云图等方式进行对地成像,可全天候工作,使人们能准确获得连续的、全球范围内的大气运动规律。因此,它被广泛应用于日常气象业务。红外光学成像遥感仪器是气象卫星发展最早、最重要的对地观测仪器之一。

20 世纪 60 年代,美国发射了 TIROS-1 红外观测卫星。它首次成功拍摄到了气旋、多种云层等大气物理气象。随着红外技术的发展,进入 20 世纪 70 年代后,美国的太阳同步轨道气象卫星开始搭载高分辨率红外探测器。目前,美国民用气象卫星和地球静止轨道环境观测卫星(GOES)都搭载了高分辨率红外辐射探测器。该载荷用于探测晴空或少云天气时的大气温湿度垂直廓线(分辨率可达 17.4 km),可提供灾害性天气短期警报^[23]。美国 DMSP 军用气象卫星搭载的红外线性扫描业务系统配有一套光学望远镜头,其扫描宽度为 3000 km,垂直精度有 0.55 km 和 2.7 km 两种,每天可两次观测全球云分布图及云顶温度,从而满足全球范围的环境观测。

1988 年 9 月,我国首次发射太阳同步轨道气象卫星——“风云一号”。该卫星搭载了热扫描辐射计,可以日夜观测云层、陆地和海面温度等。之后发射的“风云二号”和“风云三号”卫星也都搭载了红外传感器。我国的新一代地球静止轨道气象卫星——“风云四号”搭载了多通道扫描成像辐射仪与干涉式大气垂直探测仪,进入了气象卫星对地观测的三维立体阶段。

干涉式大气垂直探测仪实现了成像功能与傅里叶光谱仪的结合,在中波红外与长波红外波段可实现 1500 个以上细分光谱的探测,光谱分辨率达 0.625 cm^{-1} ,红外波段的空分辨率达 16 km。红外扫描成像辐射计的指标与欧美第三代地球静止轨道气象卫星相当,可高频次获取观测地区的大气温湿度廓线和衡量气体含量,从而完成大气温湿度参数的垂直结构观测,实现了我国卫星遥感红外探测的一大突破。图 2 为“利奇马”登陆时“风云四号”遥感成像的增强云图及大气辐射温度垂直分布图^[23]。

3.1.2 资源遥感

资源卫星是专门用于探测和研究地球资源的卫星,可分为陆地资源卫星和海洋资源卫星,一般都采用太阳同步轨道。它利用星载多光谱遥感设备来感知地面物体辐射或反射的多种波段的电磁信息,从而获得各类资源的特征、分布和状态等详细资料。该卫星可以掌握迅速变化的自然现象,并能预报森林火灾、管理水利资源、绘制地理图形、估计农作物产量、测量冰河移动以及大气与海洋污染等,在人们的生活中发挥着日益重要的作用。下面主要从各国典型的资源遥感卫星出发,分析红外成像技术在资源遥感中的主要应用。

美国国家航空航天局(NASA)从 1967 年开始规划地球资源技术卫星(Earth Resource Technology Satellite, ERTS)系列,后来将其改名为大家熟知的“陆地卫星”(Landsat)计划。Landsat 卫星载有多光谱扫描仪(Multi Spectral Scanner, MSS)、专题成像仪(Thematic Mapper, TM)、增强型专题成像仪(Enhanced Thematic Mapper, ETM)和 ETM+。这些探测载荷的工作波段都包含红外波段,其短波红外成像的空间分辨率在 30 m 左右。该波段对植物中的水分含量敏感,可反映影像中的植被生物量,主要用于作物旱灾研究和植物健康分析,也能用于区分云、雪、冰等;长波红外成像的空间分辨率在 100 m 左右,主要用于植被和作物状况调查,也可用于定位热污染和地热活动。

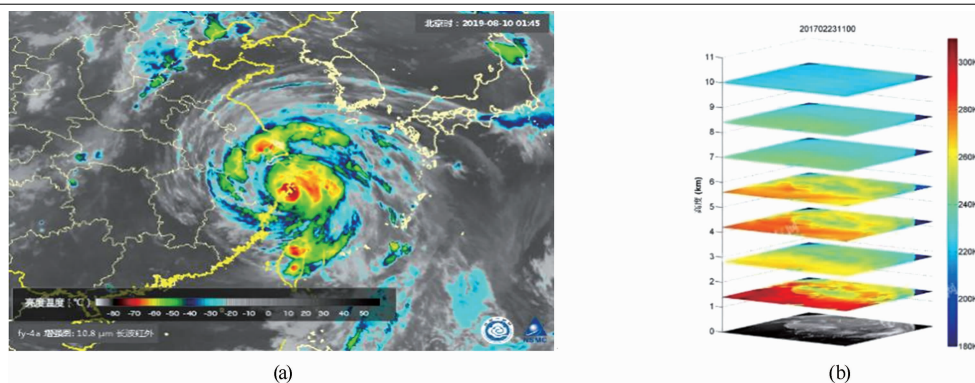


图 2 “利奇马”登陆时“风云四号”遥感成像的示意图: (a)红外增强云图; (b)大气辐射亮温垂直分布图

SPOT 系列卫星是法国空间研究中心 (CNES) 研制的一种地球观测卫星系统。它们搭载了高分辨率可见光/红外 (High Resolution Visible and Infrared, HRVIR) 传感器、高分辨率几何成像 (High Resolution Geometric, HRG) 装置、高分辨率立体成像 (High Resolution Stereoscopic, HRS) 装置和植被 (Vegetation, VEG) 传感器。其中, HRVIR 传感器和 HRG 装置在短波红外波段的空间分辨率为 20 m 左右, VEG 传感器在短波红外波段的空间分辨率为 1000 m 左右。与 Landsat 卫星相比, SPOT 卫星的优越之处在于它可以拍摄立体像对, 便于进行立体测图。因此, 该卫星在绘制基本地形图和专题图方面具有更加广泛的应用。

美国对地观测系统 (Earth Observing System, EOS) 计划中的 Terra 卫星是第一颗对地球进行整体观测的卫星, 可以得到实时的地球观测和灾害监测数据。它搭载了云与地球辐射能量系统 (Clouds and Earths Radiant Energy System, CERES)、中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)、多角度成像光谱辐射计 (Multi-angle Imaging SpectroRadiometer, MISR)、先进星载热辐射与反射辐射计 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER) 和对流层污染测量仪 (Measurements of Pollution In The Troposphere, MOPITT)。其中, MODIS 的近红外波段的空间分辨率为

250 m, 远红外波段的空间分辨率为 500 m, 可以获得云层覆盖及其属性。MOPITT 采用三个近红外扫描仪, 能够测量整个大气柱中的一氧化碳和甲烷含量^[24]。

我国目前发射的陆地遥感卫星“高分四号”、“环境一号”B星、“实践九号”卫星以及“资源一号”04星上都装有红外载荷。其中, 静止轨道上的“高分四号”卫星的红外谱段分辨率优于 400 m, “环境一号”B星在短、长波红外的空间分辨率分别为 150 m 和 300 m, “实践九号”卫星上的长波红外焦平面组件试验装置的空间分辨率为 73 m, “资源一号”04星搭载的短、长波红外多光谱扫描仪的空间分辨率分别为 40 m 和 80 m。我国红外成像载荷在资源遥感上的应用起步较晚, 但在整体性能上达到了国际先进水平^[25]。图 3 为国内外四种主要资源遥感卫星——Landsat 卫星、SPOT 系列卫星、Terra 卫星以及“资源一号”04星的影像图^[24]。

3.2 成像侦察

红外成像技术在军事侦察中有着极为广泛的应用, 更是航天侦察不可或缺的一种手段。对地侦察时, 红外成像具有一定的穿透能力, 在识别伪装方面的能力优于可见光手段, 并且具有较好的环境适应性。它能有效穿透地表和森林内部的伪装, 还可探测到地下、水下的目标。在海洋侦察时, 该技术可以探测和监视海洋上的舰船, 并能够通过水下潜艇航迹与周围海水温差对其进行跟踪定位^[26-27]。

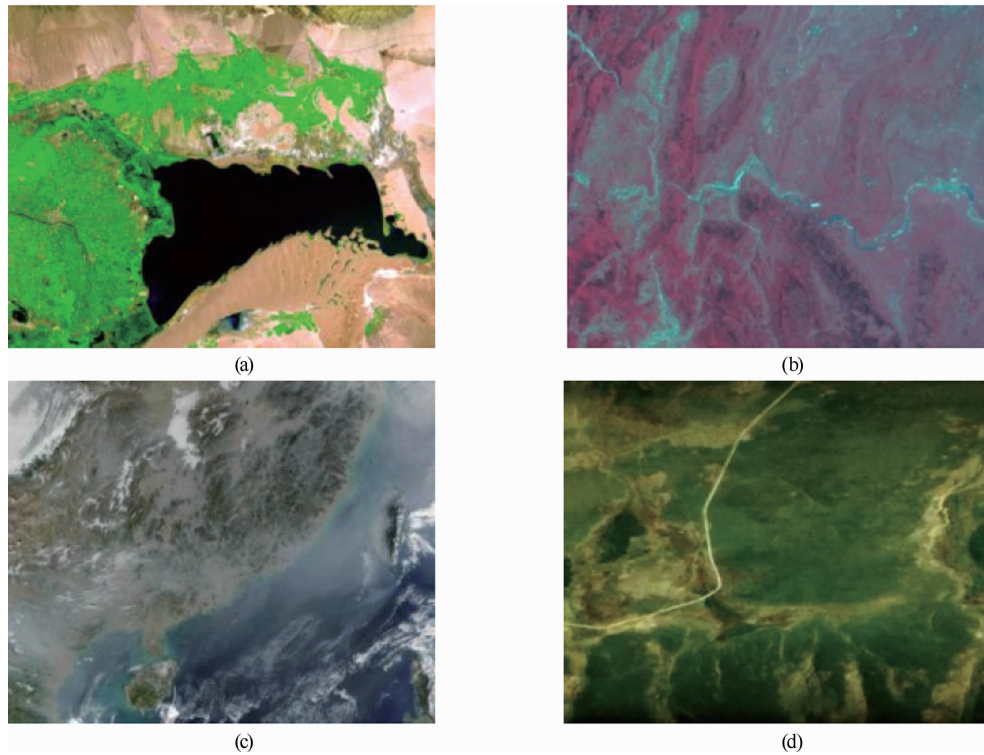


图 3 资源遥感卫星的影像图：(a) Landsat 卫星；(b) SPOT 卫星；(c) Terra 卫星；(d) “资源一号”04 星

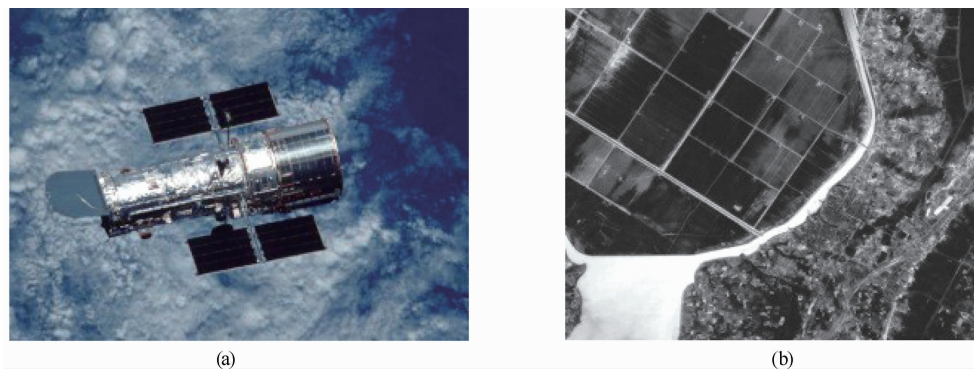


图 4 锁眼卫星：(a)实物图；(b)影像图

目前最先进的在轨光学成像侦察卫星是美国的 KH-12 锁眼卫星，其搭载的可见光相机的空间分辨率已达 0.1 m，红外成像仪的空间分辨率可达 1 m 左右。这意味着它能够侦察导弹发射，并可识别基于树林和灌木丛等的伪装。我国的部分侦察卫星上也搭载了红外载荷，其空间分辨率与 KH-12 还有一定差距，但与可见光侦察配合使用时能够有效提高对特定目标的侦察能力。锁眼卫星的实物图及所获影像如图 4 所示^[26]。

3.3 导弹预警

导弹预警卫星是专门对付一种特定武器而研制的卫星。目前，世界上所有的导弹预警卫星都通过用星载红外焦平面探测器探测导弹发动机尾焰的红外辐射来获取弹道参数，进而对弹着点进行预判并对威胁进行早期预警与评估。

美国的现役国防支援计划 (Defense Support Program, DSP) 卫星采用由 HgCdTe 和 PbS 制成的 6000 元红外焦平面探测器。它工

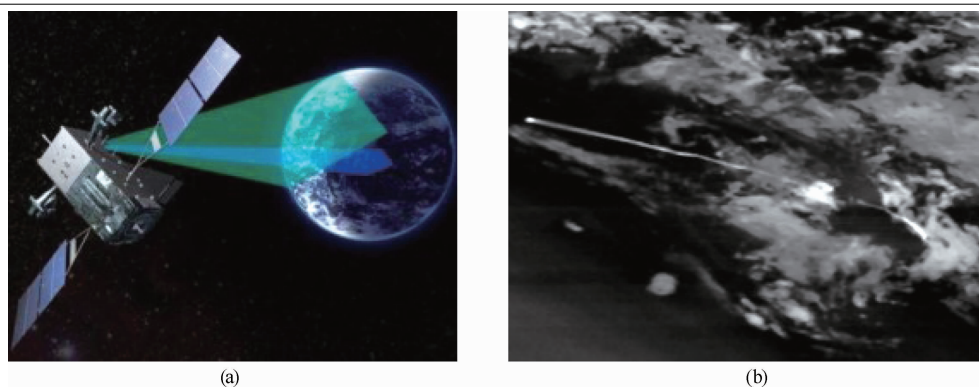


图 5 SBIRS-High 卫星: (a)实物图; (b)拍摄的导弹发射红外影像

作在 $2.7\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 的中短波红外波段, 采用地平线下覆盖工作模式, 具有优于 $1\ \text{km}$ 的地面分辨率; 以大约每分钟 6 圈的转动速度对覆盖区域进行扫描, 通过搜集红外辐射来监视导弹发射。

为了弥补 DSP 卫星扫描速度慢以及虚警等不足, 美国于 1997 年开始研制天基红外系统 (Space-Based Infrared System, SBIRS)。该系统由高轨天基红外系统 (SBIRS-High) 与太空跟踪与监视系统 (Space Tracking and Surveillance System, STSS) 两部分组成。与 DSP 卫星相比, 每颗 SBIRS-High 卫星都搭载了 1 台扫描型短波红外焦平面探测器和 1 台凝视型多波段跟踪探测器。该卫星的扫描速度与灵敏度比 DSP 卫星高出十倍, 可在导弹点火瞬间将其捕获, 并可在导弹发射后 $10\sim 20\ \text{s}$ 内将预警信息传回地面。图 5 为 SBIRS-High 卫星的实物图及所获红外影像^[28]。低轨的 STSS 系统采用地平线上扫描方式, 并将空天作为背景, 即使在导弹发动机关机的飞行中段, 也能利用红外探测器识别目标。因此它可以配合高轨卫星进行全程观测, 从而提供精确的发射位置和落点预报, 大大提高了导弹预警能力。

目前, 美国正在规划的下一代过顶持续红外 (Next-Generation Overhead Persistent Infrared, Next-Gen OPIR) 系统将采用超大面阵、多波段红外焦平面探测器。该探测器不仅能够预警大型导弹发射, 而且还支持对小型地空导弹、高超声速武器甚至于空空导弹的探测。其中, 作为 OPIR 系统组成部分的天基高超声速

和弹道跟踪传感器 (Hypersonic and Ballistic Tracking Space Sensor, HBTSS) 项目将采用持久红外传感器来探测与跟踪高超声速武器等新兴威胁^[28]。

4 总结

本文主要围绕红外焦平面阵列的发展现状及趋势, 在介绍其基本原理和分类特点的基础上, 总结分析了各类红外焦平面阵列的最新进展。制冷型红外焦平面性能不断优化, 非制冷型红外焦平面技术参数稳步提升。为满足用户更加多元化的需求, 红外焦平面阵列将在集成小型化、高速智能化、大阵列多色化等方面寻求新的突破。

在航天遥感中, 红外成像技术以其特有的优势得到广泛应用。在民用领域, 气象卫星上的红外成像设备是发展最早且最重要的对地观测仪器之一。资源卫星上的红外载荷配合可见光和多光谱遥感设备, 可以获取各类地球资源的详细资料, 成为探测和研究地球资源的主要信息来源。在军用领域, 红外成像凭借夜间侦照和识别伪装方面的能力而成为航天侦察不可或缺的一种手段。特别是在导弹预警卫星上, 红外探测器是目前唯一能够探测导弹发射及飞行的载荷。随着红外焦平面阵列技术的发展, 它必将在军民航天遥感领域中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] Gerald C H, Ronald G D. Small detectors in infra-

- red system design [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(9): 096401.
- [2] Martyniuk P, Rogalaki A. Hot infrared photodetectors [J]. *Opto-Electron Rev*, 2013, **21**: 240–258.
- [3] Battaglia J, Blessinger M, Enriquez M, et al. An uncooled 1280×1024 InGaAs focal plane array for small platform, shortwave infrared imaging [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 72983C.
- [4] 冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态 [J]. *红外技术*, 2015, **37**(3): 177–184.
- [5] 雷亚贵, 王戎瑞, 陈苗海. 国外非制冷红外焦平面阵列探测器进展 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(9): 801–805.
- [6] 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展趋势分析 [J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(12): 3145–3153.
- [7] 何力, 胡晓宁, 丁瑞军, 等. 第三代红外焦平面基础技术的研究进展. [J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3): 696–701.
- [8] 王岭雪, 蔡毅. 红外成像光学系统进展与展望 [J]. *红外技术*, 2019, **41**(1): 1–12.
- [9] 常本康, 蔡毅. *红外成像阵列与系统* [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 丁瑞军, 杨建荣, 何力, 等. 碲镉汞红外焦平面器件技术进展 [J]. *红外与激光工程*, 2020, **49**(1): 1–7.
- [11] 赵志刚, 王鑫, 彭廷海, 等. 国外中长波双波段红外成像技术的发展及应用 [J]. *红外技术*, 2020, **42**(4): 312–319.
- [12] 史曼丽, 凌龙. 大面阵碲镉汞红外焦平面阵列发展现状及趋势 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, **38**(6): 151–155.
- [13] Maimon S, Wicks G W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, **89**(15): 151109.
- [14] Itsuno A M, Phillips J D, Velicu S. Mid-wave infrared HgCdTe nBn photodetector [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, **100**(16): 161102.
- [15] 牟宏山. InSb 红外焦平面探测器现状与进展 [J]. *激光与红外*, 2016, **46**(4): 394–399.
- [16] 柏伟. 铟化钢红外焦平面探测器发展现状 [J]. *红外*, 2019, **40**(8): 1–14.
- [17] Hamidreza S. Optimization of Cooled InSb Detectors [J]. *III-Vs Review*, 2004, **17**(7): 27–31.
- [18] 李忠贺, 李海燕, 杜红燕, 等. 平面 PN 结 InSb 红外焦平面探测器的研究 [J]. *激光与红外*, 2015, **45**(7): 814–816.
- [19] 李俊斌, 李东升, 杨玉林, 等. 以色列 SCD 公司的 III-V 族红外探测器研究进展 [J]. *红外技术*, 2018, **40**(10): 936–945.
- [20] Kinch M A. HDVIP™ FPA technology at DRS [C]. *SPIE*, 2001, **4369**: 802–814.
- [21] DRS. Products—Thermal Detectors [EB/OL]. www.Drsinfrared.com/Products/ThermalDetectors.aspx, 2015.
- [22] Charles M H, Sameer K A, John B, et al. Small pixel α -Si/ α -SiGe bolometer focal plane array technology at L-3 communications [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76600R.
- [23] 杨忠东, 刘健. 气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革 [J]. *应用气象学报*, 2016, **27**(5): 592–603.
- [24] 孙伟伟, 杨刚, 陈超, 等. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析 [J]. *遥感学报*, 2020, **24**(5): 479–510.
- [25] 田国良. *热红外遥感* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [26] 李劲东. *卫星遥感技术(上册)* [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
- [27] 丁荣莉, 韩传钊, 谢宝蓉, 等. 红外遥感图像舰船目标检测 [J]. *红外技术*, 2019, **41**(2): 127–133.
- [28] 王云萍. 美国天基红外导弹预警技术分析 [J]. *光电技术应用*, 2019, **34**(3): 1–7.