

〈综述与评论〉

红外成像技术中的9个问题

蔡毅^{1,2}, 王岭雪²

(1.中国兵器科学研究院, 北京 100089;

2.北京理工大学光电学院, “光电成像技术与系统”教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要: 讨论了与红外成像技术密切相关的9个问题: 红外/热成像仪工作波段的选择、三代红外/热成像技术的一般性区别、5种扫描成像模式的比较、国外第二代红外成像技术的特点、长波红外扫描型与中波红外凝视型焦平面探测器综合性能的比较、制冷和非制冷热成像技术的比较、非制冷红外焦平面探测器技术的比较、探测元尺寸与探测器规模、红外成像技术发展“代”的双重含义。

关键词: 红外成像; 热成像; 红外焦平面探测器; 扫描成像; 凝视成像

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2013)11-0671-12

Nine Issues Associated with Infrared Imaging Technology

CAI Yi^{1,2}, WANG Ling-xue²

(1.Academy of ordnance science, Beijing 100089, China;

2.Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Nine fundamental issues associated with infrared imaging technology were discussed: choice of work waveband of infrared/thermal imager, common differences of three generation infrared/thermal imaging, five scanning imaging patterns, characteristics of the second generation infrared imaging, LWIR scanning imaging and MWIR staring imaging, cooled and uncooled infrared imaging, comparison of uncooled FPA detectors, detector element size and detector array format, double meaning of the generation of infrared imaging.

Key words: infrared imaging, thermal imaging, infrared focal plane array detector, scanning imaging, staring imaging

0 引言

迄今为止国际上已经发展了三代红外探测器和红外成像技术。红外焦平面探测器的发展极大丰富了红外成像技术的内容, 包括扫描/凝视/微扫描红外成像、中波/长波/短波红外成像、制冷/非制冷红外成像等。本文讨论了红外/热成像仪工作波段的选择、三代红外/热成像技术的一般性区别、5种扫描成像模式的比较、国外第二代红外成像技术的特点、长波红外扫描型与中波红外凝视型焦平面探测器综合性能的比较、制冷和非制冷热成像技术的比较、非制冷红外焦平面探测器技术的比较、探测元尺寸与探测器规模、红外成像技术发展“代”的双重含义9个问题。

1 红外/热成像仪工作波段的选择

历史上, 红外光谱的发现^[1-2]是从近红外(0.78~1 μm)、短波红外(1~2.5 μm)逐步扩展到中波红外(3~5 μm)、长波红外(8~14 μm), 制作出红外探测器的响应波段与该过程一致, 图1^[3]是红外探测探测器的发展历程, 最先制作出短波红外的硫化铅(PbS)探测器, 之后才制作出中波红外的碲化铟(InSb)探测器和长波红外的碲镉汞(HgCdTe)探测器。

红外成像技术的发展却是先从“大气窗口”的长波红外开始, 之后才逐步扩展到中波红外和短波红外。

在选择红外/热成像仪工作波段时, 最多利用红外辐射能量, 利用大气红外透射窗口, 红外探测器响应

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-11-06.

作者简介: 蔡毅(1959-), 男, 云南昆明人, 研究员, 主要从事红外技术、光电系统总体的研究。E-mail: caiy69@163.com.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金, 编号: 20131101110024.

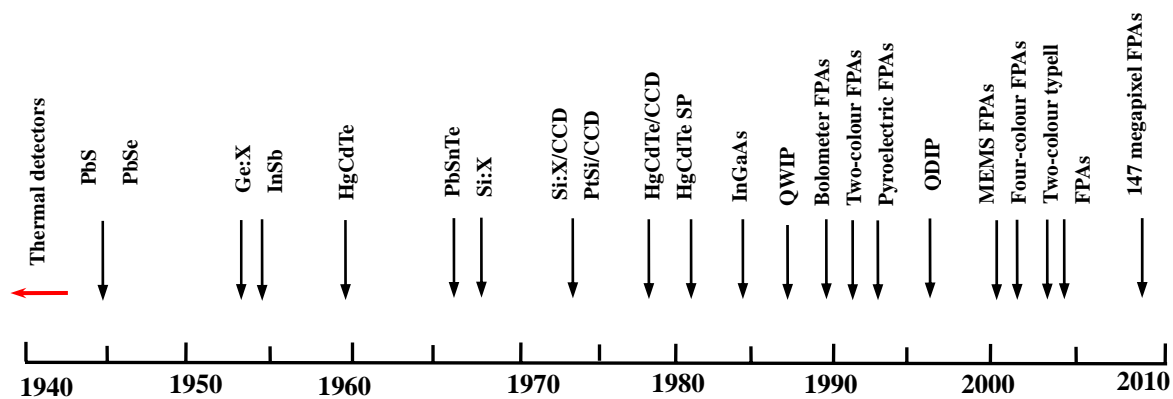


图 1 红外探测器发展路径图

Fig.1 Detector roadmap

光谱匹配。

1) 最多利用红外辐射能量

假设目标为黑体且为一个热点时,红外/热成像仪的响应波长应选择在目标温度对应的峰值辐射波长,因对应该波长的光谱辐射出射度最大;当目标为扩展源目标时,响应波长宜选择在目标温度变化产生辐射出射度最大变化量对应的波长,如图 2 中峰值波长左侧变化率最大处。

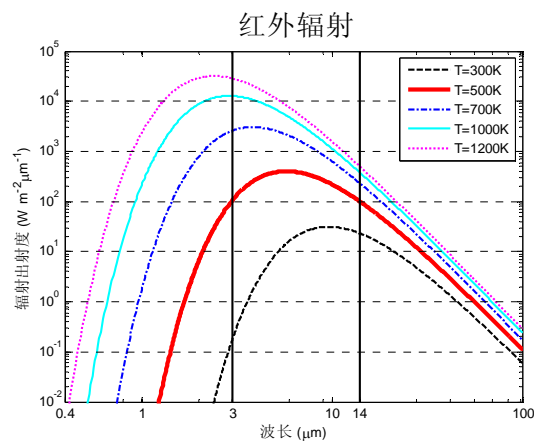


图 2 5 种不同温度的黑体的辐射出射度与波长的关系

Fig.2 The radiance of a blackbody as a function of wavelength for five different temperatures

表 1 比较了 27℃ 黑体 (约 300 K) 在长波、中波、短波红外的辐射通量,可以看出,8~12 μm 长波红外辐射通量比 3~5 μm 中波红外的大 29 倍,比 1~2.5 μm 短波红外的大 63914 倍;3~5 μm 中波红外辐射通量比 1~2.5 μm 短波红外的大 2170 倍。

图 3 比较了物体温度为 -73℃~349℃ (约为 200~622 K) 时的长波、中波和短波红外辐射通量比值,计算有如下结果:

①当物体温度升高至 349℃ (约 622 K) 时,中波红外辐射通量才等于长波红外,即 349℃ 是 8~12

表 1 300 K 黑体在长波、中波和短波红外的辐射通量密度

波段/(μm)	Radiation flux density of 300 K blackbody in the wavelength band of LWIR, MWIR and SWIR		
	8~12 (LWIR)	3~5 (MWIR)	1~2.5 (SWIR)
红外辐射通量 密度/(W/m ²)	172.5672	5.8611	0.0027

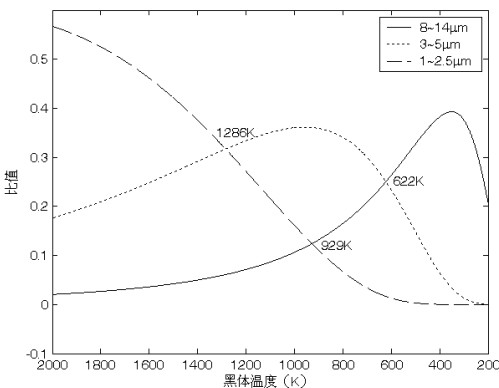


图 3 黑体长波、中波和短波红外辐射通量比值与温度的关系

Fig.3 The radiation flux ratio between LWIR, MWIR and SWIR as a function of temperature

μm 长波红外辐射通量与 3~5 μm 中波红外辐射通量的等值温度,因此,探测 -73℃~+349℃ 温度范围的物体,以选择长波红外有利。

②656℃ (约 929 K) 是 8~12 μm 长波红外辐射通量与 1~2.5 μm 短波红外辐射通量的等值温度,1013℃ (约 1286 K) 是 3~5 μm 中波红外辐射通量与 1~2.5 μm 短波红外辐射通量的等值温度。

③当物体温度在 349~1013℃ (约为 622~1286 K) 时,中波红外辐射通量均比长波、短波红外的大,因此探测该温度范围的物体以选择中波红外有利。这一温度正好是战斗机涡扇喷气发动机尾喷管的温度,所以第三代及其以后的被动红外寻的制导空空导弹

首选中波红外波段。

④当物体温度超过 1013℃ (约 1268 K) 时, 短波红外辐射通量超过长波、中波红外的, 可以实现利用短波红外辐射进行红外成像。这是战斗机涡轮喷气发动机尾喷管的温度, 所以第一代、第二代被动红外寻的制导空空导弹选用的短波红外波段。

表 2 列出昼、夜天空背景长波红外和中波红外辐射亮度的值。热成像仪观察的景物一般处于室温状态 (典型值为 300 K), 即使长波红外只计算 8.0~10.5 μm 范围内的能量, 其红外辐射亮度仍然比中波红外的大 1 个数量级。

表 2 昼、夜天空背景中波红外和长波红外辐射亮度

Table 2 Radiance of day-time and night-time sky background in MWIR and LWIR wavelength bands

辐射亮度/ ($\text{W}/\text{cm}^2\text{sr}$)	MWIR (3.6~5.0 μm)	LWIR (8.0~10.5 μm)
昼	1.4×10^{-4}	2.2×10^{-3}
夜	9.3×10^{-5}	1.8×10^{-3}

第一代热成像仪均工作在长波红外, 并非在当时不能制造出性能达到背景限的中波红外探测器。利用室温目标的长波红外辐射能量远多于中波红外辐射且在 8~14 μm 有大气透射窗口, 即可用数量不多的探测元 (不超过 200 元) 和光机扫描技术制造满足战术应用要求的长波红外成像仪。

面阵型红外焦平面探测器技术出现以后, 因将探测元对信号的积分时间提高 3 个数量级 (从 μs 提高到 ms) 而极大地提高了热灵敏度, 使得红外/热成像仪即使工作在红外辐射能量较长波红外波段少得多的中波、甚至短波红外也能获得画质优良的红外/热图像, 这是第二代红外/热成像技术将工作波段扩展至中波和短波红外的根本原因。

采用相同参数的红外光学望远镜、相同规模 (320 \times 240) 的短波、中波和长波红外焦平面探测器的红外/热成像仪, 在相同的时间拍摄了相同的空中目标红外/热图像 (图 4(a)~4(c))。其中, 短波红外图像很接近可见光图像, 长波红外图像反映的目标与热相关的信息最为丰富, 中波红外图像则可以更好的反映发动机的细节。具体分析 3 幅图像:

①图 4(a)的短波红外图像利用客机反射大气背景中的短波红外辐射, 不反映客机与热相关的信息。

②图 4(b)的中波红外图像利用客机自身发射的中波红外辐射, 可以看清整架飞机的轮廓, 反映了翼下喷气发动机的热信息。发动机进气道内的叶片很热, 发动机后半部分也很热以至于没有细节, 尾喷管与喷出的热气流连成一体, 发动机挂架和相应机翼部分被

加热, 机翼前缘襟翼与机翼之间有缝隙, 空气从中流过而被冷却而呈黑色。

③图 4(c)的长波红外图像利用客机自身发射的长波红外辐射, 因机身蒙皮有较强的辐射而得以清楚的看到整架飞机, 并更多地反映了飞机的热信息。由于辐射能量多, 发动机已经没有细节, 除喷气发动机的热信息外, 水平尾翼因喷射的热气流也被加热, 飞机收起的起落架也很热, 将机身下方均加热了, 机翼前缘襟翼与机翼之间有缝隙, 空气从中流过而被冷却而呈黑色, 机翼后缘翼面的动作机构运动产生的热将其整流罩也加热了。

2) 大气红外透射窗口的利用

在只考虑大气分子吸收时, 大气在近红外 (0.78~1.0 μm)、短波红外 (1.0~2.5 μm)、中波红外 (3~5 μm) 和长波红外 (8~14 μm) 有 4 个大气红外“透射窗口”, 如图 5^[4]所示。一般来说, 波长越长, 透射能力越好。除平均透射率高以外, 长波红外的透射波段范围最宽 ($\Delta\lambda \approx 6 \mu\text{m}$), 因此在长波红外工作可以获得室温目标最多的辐射能量, 而中波红外即使不扣除 4.3 μm 波长的吸收, 其透射波段范围也只有 2 μm 。但是在高温、潮湿的气象条件下 (例如热带海洋气候条件), 中波红外辐射在大气中的透射率比长波红外辐射的大。只考虑大气中存在颗粒物时, 影响红外辐射传播的因素为颗粒物的散射和反射, 长波红外辐射对颗粒物的透射性能最优。

受重力作用, 大气分子和悬浮粒子的密度随高度按指数分布, 越接近地面, 气体分子和悬浮粒子的密度越大, 对红外辐射的吸收、散射和反射越大。而在高空 (例如 20 km), 气体分子和悬浮粒子的密度较小, 对红外辐射的吸收、散射和反射也较小。显然, 红外辐射在空-地之间斜路径上的传播要比地-地之间水平路径的传播更容易。

实际大气环境对红外辐射传播的影响很复杂, 既有大气中各种成份分子的吸收, 又有悬浮在大气中的颗粒物 (如雨、雪、沙尘等) 散射和反射的影响, 这是热成像仪不能全天候工作的根本原因。

3) 红外探测器响应光谱匹配

热成像仪使用的红外探测器的响应光谱只要与中波和长波红外大气窗口匹配即可 (图 6^[5]), 满足该要求的有碲镉汞、铟化铟、硒化铅、硫化铅、锗掺金/汞、硅掺镓、测辐射热计、热释电探测器等。碲镉汞、铟化铟红外探测器制冷至液氮温度时性能可达到背景限, 因此成为制冷型热成像仪使用的主流探测器。测辐射热计和热释电探测器在室温下具有良好的性能且稳定性好, 是非制冷热成像仪使用的主流探测器。



(a) 短波红外图像 (a) SWIR image (b) 中波红外图像 (b) MWIR image (c) 长波红外图像 (c) LWIR image

图4 一架正在飞行的客机的短波、中波和长波红外图像 Fig.4 The SWIR, MWIR and LWIR images of a flying aircraft

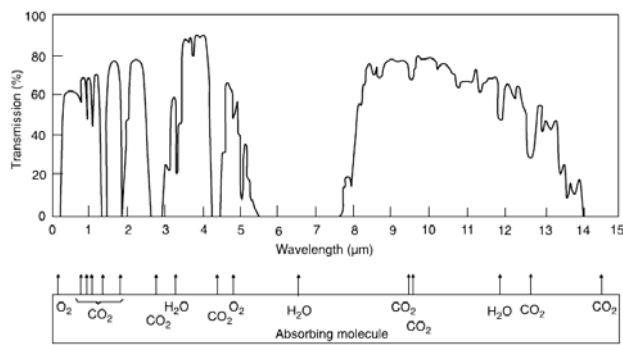


图5 红外辐射在大气中的传输

Fig.5 Transmission of infrared radiation in atmosphere

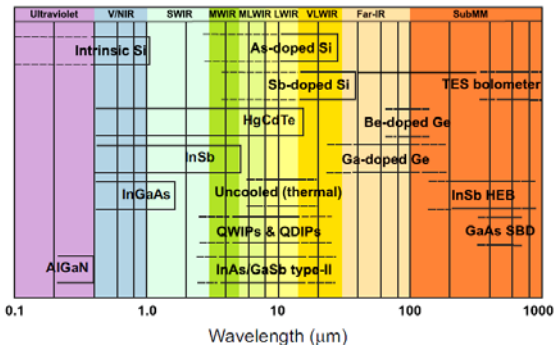


图6 红外探测器光谱响应范围与大气窗口

Fig.6 Infrared detector spectral response range and atmospheric window

2 三代红外/热成像技术的一般性区别

可从总体、光学、光机扫描器、探测器组件、电子学、非均匀性校正等方面,分析三代红外/热成像技术的现状和发展趋势,将其一般性区别列于表3中。

3 5种扫描成像模式的比较

常用的成像模式有串扫、并扫、串-并扫(包括光机串扫-电子并扫)、凝视(电子扫描)、微扫描(光学机械-电子扫描)等5种。表4比较了5种扫描成像模式。

在实际工程实践中,实现并扫或串-并扫型热成像仪的技术条件和基础有较大差别。光电子和微电子技术基础较差时,采用串扫成像或串-并扫成像模式方案的技术门槛较低。当串-并扫成像模式发展成电子学串扫和光学机械并扫相结合的成像时,就成为第二代TDI红外焦平面探测器。

4 国外第二代红外成像技术的特点

第二代红外成像技术的应用面极大地拓宽了,其特点是:

1) 搜索、观瞄、火控系统应用的热成像仪以扫

描型为主

长波红外焦平面探测器的价格随探测元的数量增加而迅速增加,取消光机扫描器远远补偿不了为获得相同画质所需要增加探测元数量的代价。其次,扫描型热成像仪有更高的空间分辨力。美国的第二代红外探测器通用组件(Standard Advanced Dewar Assembly)全部是扫描型碲镉汞长波红外焦平面探测器,用于坦克、装甲车的火控系统;法国利用扫描型碲镉汞长波红外焦平面探测器,研制和生产了火控系统专用热像仪——“凯瑟琳”-FC(Catherine Fire Control),大量装备各型坦克、装甲车;英国的高端扫描型碲镉汞长波红外焦平面探测器用于EF2000战斗机的红外搜索跟踪系统。

2) 碲镉汞技术仍是主流的探测器技术

从进入型号应用的热成像仪看,地面应用量最大,且大多数采用碲镉汞红外探测器,但在空基、舰载热成像系统中,中波红外的碲化铟焦平面探测器可与碲镉汞红外探测器竞争。

3) 红外成像制导系统以凝视型为主

凝视型中等规模中波红外焦平面探测器的红外成像制导应用是第二代红外成像技术的一个亮点。

表3 三代红外/热成像技术的一般性区别对照表

Table 3 Common comparison of three generation infrared/thermal imaging technologies			
对比项目	第一代热成像技术	第二代红外/热成像技术	第三代红外/热成像技术
波段	长波红外	长波红外;中波红外;短波红外; 偏振红外(在系统级实现)	长波红外;中波红外;短波红外;在芯 片级实现:偏振红外;双波段红外;双 色红外;多波段红外;多色红外
成像仪总体	长波红外成像;复杂光机扫 描;线列红外探测器;模拟信 号处理;PAL;NTSC	简单光机扫描;凝视;微扫描; 数字信号处理;PAL;NTSC; VGA;HVGA;QQVGA;SVGA	简单光机扫描;凝视;微扫描;HDTV; SXGA;XGA;QVGA
光学	基于球面光学元件的设计	球面、非球面、衍射光学元件相 结合的设计	球面、非球面、自由曲面、衍射、微光 学元件相结合的设计
光机扫描器	复杂的光机扫描	简单的光机扫描	
探测器组件	多元线列探测器;小面阵探测 器;玻璃-金属杜瓦;节流制 冷;分置式斯特林制冷机	线列焦平面探测器;面阵焦平面 探测器;全金属杜瓦;整体集成 斯特林制冷机;分置式斯特林制 冷机	大/超大面阵焦平面探测器;长/超长 TDI线列;双波段/双色焦平面探测器; 多波段/多色焦平面探测器;偏振焦平 面探测器。部分第三代红外探测器采用 脉冲管制冷机制冷
电子学	模拟信号处理	数字信号处理	复杂数字信号处理片上模-数转换;采 用SOC技术
非均匀校正	基于机内黑体的两点非均匀 性校正	参考机内黑体的非均匀性校正; 基于场景的非均匀性校正	参考机内黑体的非均匀性校正;基于场 景的非均匀性校正;基于SOC的非均 匀性校正;基于区域的非均匀性校正

4) 非制冷红外焦平面探测器出现和大规模应用是第二代红外成像技术的一个亮点。

5 长波红外扫描型与中波红外凝视型焦平面探测器综合性能的比较

扫描型和凝视型的成像方式各有优缺点,物理、技术和经济上等原因使扫描型和凝视型焦平面探测器今后仍将并行发展。

5.1 长波红外扫描型焦平面探测器的优缺点

1) 热灵敏度和空间截止频率高

当热成像系统的光学部分达到衍射限后,其空间截止频率就由探测器决定,而探测元的中心距离又决定了探测器的空间截止频率。由于扫描型焦平面探测器行与行探测元的中心距离,可以通过错开排列而连续减小直至到零,所以有足够高的空间截止频率。通过增加参加时间延迟积分(TDI)的探测元数量,可提高线列焦平面探测器的热灵敏度,因此扫描型焦平面探测器的热灵敏度和空间分辨力得以很好的平衡。

通过缩小(但不可能至零)探测元的中心距离,可以提高凝视型焦平面探测器的空间截止频率,在缩小探测元中心距离的同时也需要缩小探测元面积,因此会降低探测器的热灵敏度。

长波红外 288×4、480×6 等规格的线列焦平面探测器在每 1 行设置 4 或 6 个探测元,以时间延迟积分(TDI)模式工作,使热灵敏度比第一代 HgCdTe 多元线列探测器提高 1 倍。又因其探测元尺寸比第一代 HgCdTe 多元线列探测器小一半,在同样的光学条件下,瞬时视场也减小一半,并因为将探测元错位排列,提高了空间分辨力。288 或 480 行的探测元采用简单的摆镜扫描,也可有足够多的扫描线获得电视图像画质的热图像,既满足了第二代热成像技术对热灵敏度和空间分辨力的要求,又具有经济上可以承受的成本,成为第二代热成像技术中性能价格比高、使用量最大的长波红外焦平面探测器。

凝视型焦平面探测器探测元的中心距离必须大于少数载流子横向扩散长度,否则在相邻探测元之间会产生串音,降低空间分辨力。另外,凝视型焦平面探测器的探测元不能在平面上错开排列,所以探测元的中心间距必定大于扫描型焦平面探测器的。换言之,与凝视型焦平面探测器相比,扫描型焦平面探测器具有更好的调制传递函数。在实际应用中,中等规模(254×254、320×240、384×288)的凝视型焦平面探测器成像仍有比较明显的马赛克效应。为提高凝视型焦平面探测器的空间分辨力,消除马赛克效应,需

表 4 5 种扫描成像模式的比较表
Table 4 Comparison of five scanning imaging patterns

比较内容	扫描模式					
	串扫	并扫	串-并扫	凝视	微扫描	备注
光机扫描器	需要行扫描和帧扫描	需要行扫描和帧扫描； 当探测元数量与扫描行 相同时，则只需要一维 扫描	需要行扫描和帧扫描	不需要光机扫描	需要光机扫描，但扫描 范围只有一个探测元的 尺寸	
光机扫描器的复杂性	复杂	较复杂	介于串扫和并扫之间	无	较复杂	
光机扫描速度与控制 复杂性	扫描速度高 控制较简单	扫描速度低 控制要求高	扫描速度低于串扫但高 于并扫串-并扫；控制较 简单	无	复杂	
探测器非均匀性校正 装置	简单	复杂	复杂	简单 复杂	用于低端热成像仪的简 单 用于高端热成像仪的复 杂	
探测器布局	探测元的排列方向与行 扫描方向一致	探测元的排列方向与行 扫描方向垂直	探测元排列成一个二维 面阵	探测元排列成一个二维 列阵，一个探测元对应 一个像素，因而探测元 数量越多越好	探测元排列成一个二维 列阵，探测器的规格、 元数比所成热图像低一 个等级，但依然很多	
探测元数量	较少	多	较多（第一代热成像技 术） 很多（第二代热成像技 术）	极多	探测元数量比所成热图 像低一个等级，但仅比 凝视成像模式的少	
探测器封装与制冷	探测元列阵较短，可以 选择小冷指杜瓦封装和 小功率制冷机，探测器 封装、制冷成本较低	探测元列阵长，需选择 大冷指杜瓦封装和大功 率制冷机，探测器封装、 制冷成本高	探测元列阵长，需选择 大冷指杜瓦封装和大功 率制冷机，探测器封装、 制冷成本高	探测元列阵有大尺寸和 面积，需选择大冷指杜 瓦封装和大功率制冷 机，探测器封装、制冷 成本高	探测元列阵长，需选择 大冷指杜瓦封装和大功 率制冷机，探测器封装、 制冷成本高	

(续表4)

比较内容	扫描模式					
	串扫	并扫	串-并扫	凝视	微扫描	备注
探测器的非均匀性	要求低	要求高	介于串扫和并扫之间	要求高	要求高	
电子学频带与范围	很宽 对 $1/f$ 噪声不敏感	窄 对 $1/f$ 噪声敏感	中等 对 $1/f$ 噪声敏感程度介 于串扫和并扫之间	很窄 对 $1/f$ 噪声敏感	较窄 对 $1/f$ 噪声敏感	
电子学电路特点	探测器信号需要进行 TDI 处理, 电路相对简 单	需要为每一个探测器配 前置放大器, 对放大器 的均匀性要求很高, 电 路很复杂	探测器信号既需要进行 TDI 处理, 又需要为每 一行探测器配一个前置 放大器, 电路的复杂程 度高于串扫	需要制作专用的读出电 路芯片和驱动电路, 将 探测器并行的输出信号 转换成串行数字信号, 电路很复杂	需要制作红外探测器的 专用驱动电路, 将帧频 提高 1~4 倍, 把并行的 输出信号转换成串行输 出信号, 电路很复杂	
图像信号显示处理	直接处理少数通道的串 行视频信号	需要将多路输出信号进 行读出和转换才能形成 串行的视频信号	需要将多路输出信号进 行读出和转换才能形成 串行的视频信号, 但复 杂程度低于并扫	直接处理少数通道的串 行视频信号	直接处理少数通道的串 行视频信号, 需要增加 微扫描图像的合成	
图像画质	热图像的均匀性极好, 对非均匀性校正要求低	热图像的均匀性较好, 对非均匀性校正要求高	热图像的均匀性好, 对 非均匀性校正要求介于 串扫和并扫之间	对非均匀性校正要求 高, 热图像的均匀性可 以很好	对非均匀性校正要求 高, 热图像的均匀性很 好	
适合红外成像整机	红外行扫仪 热成像仪	红外搜索跟踪系统 热成像仪 红外成像制导 红外相机	热成像仪 红外成像制导 红外搜索跟踪系统 红外行扫仪	热成像仪 红外成像制导 红外行扫仪 红外相机	热成像仪 红外跟踪系统 红外相机	排在第一位的为最合 适, 依次类推
红外成像仪制造技 术、工艺的综合复杂 程度	低	高	较高	极高	很高	包括红外探测器组件 和其中所需的主要光 电子器件

要采用微扫描技术,如法国萨吉姆公司的“玛提丝”远程型(MATIS LR)热成像仪、英国宇航系统公司的“丽奥”(LION)非制冷手持热成像仪。

2) 采用数量较少的探测元通过扫描可以获得高分辨力的热图像

从探测器材料与制备技术看,面阵探测器任意方向的尺寸达到一定程度时(例如100 mm),制备将变得很困难。在热成像系统设计中,当要求某一个方向(例如水平方向)有极大的视场且空间分辨力必须很高时,采用线列焦平面探测器进行光机扫描是一个很好的选择。采用多个(例如16个)线列焦平面探测器更便于在一个方向(例如水平方向)进行“无缝”拼接,图7^[6]给出一种“无缝”拼接方式,探测元通过列阵错位精确对准,因而直接扫描出无缝隙的图像。采用凝视型焦平面探测器则不能做到“无缝”拼接,图8^[7]给出由42个大面阵CCD探测器阵列拼接而成的开普勒(Kepler)卫星的焦平面探测器阵列,总像素9500万个,为适应大口径光学系统,焦平面略有弯曲,探测器阵列也在相应弯曲的基面上拼接,探测器阵列之间有明显的缝隙,需要在后期进行图像处理才能消除图像的缝隙。

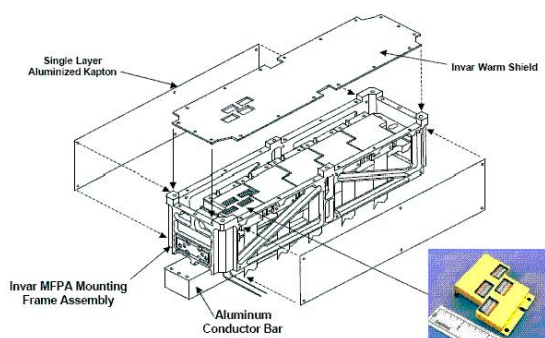


图7 线列焦平面探测器芯片“无缝”拼接的示意图

Fig.7 Seamless stitching of linear array FPAs



图8 凝视型焦平面探测器拼接示意图

Fig.8 Stitching of staring FPAs

3) 经济性好

以时间延迟积分模式工作的扫描型长波红外焦平面探测器已将光机扫描器简化到最简单的程度,只需要用 10^3 个探测元就能获得画质很好的热图像,而

为达到相同画质,凝视型焦平面探测器的探测元数量需要增加2个数量级即 10^5 个。对红外波段的成像而言,取消一维光机扫描器所降低的成本可能补偿不了因增加探测器探测元数量增加的成本,所以对量大面广的热成像仪,扫描型的经济性相对较好。

4) 容易实现双波段扫描成像

扫描型红外焦平面探测器芯片便于在杜瓦的冷装载面上进行高精度的拼接,在一个封装中实现双波段或双色探测,例如可以用探测元尺寸和拓扑结构相同的长波和中波红外 288×4 焦平面探测器芯片拼接成芯片组件,封装在一个杜瓦中使用一个制冷机制冷,在简化热成像仪系统总体结构(例如采用共光学设计、不需要进行光路分光等)的同时,自然实现长波和中波红外热图像在像素级的对准(图9^[8])。

5) 光机扫描器增加热成像仪的体积和重量

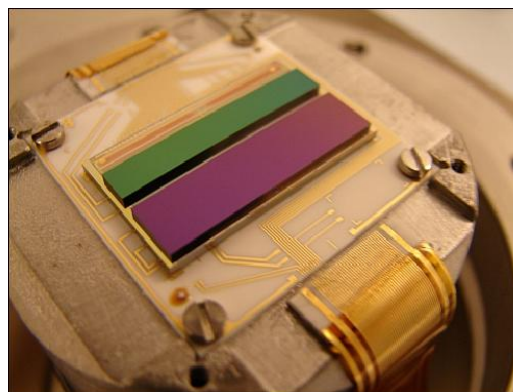


图9 并排拼接的双波段红外焦平面探测器芯片组件

Fig.9 Dual-band infrared FPA detector chips stitching side by side

5.2 凝视型红外焦平面探测器的优缺点

1) 热灵敏度高

凝视红外焦平面探测器通过提高积分时间可获得画质优良的热或红外图像。以凝视型中波红外 384×288 焦平面探测器为例,其积分时间等于帧时间减去探测器复位时间,当帧频25 Hz时,帧时间为40 ms,复位时间为 μs 量级。对应20~30℃的红外背景辐射,凝视型中波红外焦平面探测器积分时间达到2.5~5 ms时即进入饱和,探测器工作时积分时间取最长积分时间的一半。长波红外 288×4 焦平面探测器采用一维摆镜扫描时,同样取帧频为25 Hz,扫描获得一帧图像所需的时间为40 ms。设光机扫描效率为80%,此时有效采样时间为32 ms。设水平采样点为768个, 288×4 焦平面探测器可以利用最长积分时间只有41.6 μs ,工作时积分时间为仅20 μs ,比中波红外 384×288 焦平面探测器的1.25 ms积分时间小62.5倍。 288×4 焦平面探测器之所以能获得画质优良的热图像,是因为室温目标的长波红外(8~14 μm)辐射

能量比中波红外($3\sim 5\mu\text{m}$)辐射能量大46倍(黑体辐射的计算值),弥补了 288×4 焦平面探测器积分时间短的不足。

2) 帧频高

凝视红外焦平面探测器采用电子扫描读出信号,速度比光机扫描快。在高速成像应用中,凝视红外焦平面探测器具有绝对优势。

3) 体积小、重量轻

采用凝视红外焦平面探测器的热成像仪取消光机扫描装置,在体积和质量方面具有绝对优势。

4) 制造成本较高

凝视红外焦平面探测器的制造比扫描型的复杂,因而制造成本较高。

5.3 长波红外 288×4 与中波红外 $320\times 240/384\times 288$ 焦平面探测器的比较

碲镉汞 288×4 长波红外焦平面探测器和 $320\times 240/384\times 288$ 中波红外焦平面探测器是第二代红外探测器中的2个典型代表。

长波红外 288×4 焦平面探测器扫描后可获得 768×576 的图像分辨力,以凝视成像模式工作的中波红外 $320\times 240/384\times 288$ 焦平面探测器热成像仪,需要进行 2×2 的微光机扫描,才能获得分辨力相当的图像($640\times 480/768\times 576$)。

在高温潮湿的气象条件下或探测喷气飞机尾喷管类的高温目标时,中波红外 $320\times 240/384\times 288$ 焦平面探测器热成像仪对信号的积分时间长,其热灵敏度优于长波红外 288×4 焦平面探测器热成像仪。

比较采用长波红外 $480\times 6\sim 768\times 8$ 焦平面探测器和光机扫描器的热成像仪和采用中波红外 $640\times 480\sim 1024\times 768$ 焦平面探测器的热成像仪,两者综合性能相当,均可获得室温景物高画质的热图像(图10、图11^[9])。图10是采用碲镉汞 480×6 TDI长波红外扫描型热成像仪获得的热图像,较好表现了树

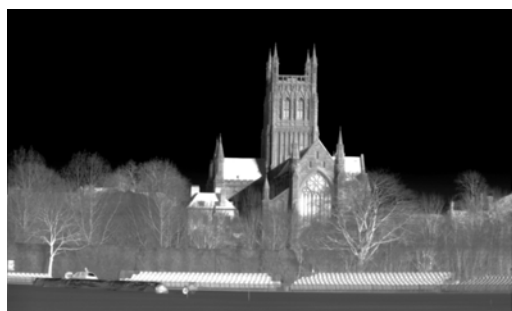


图10 采用碲镉汞 480×6 TDI 线列长波红外焦平面探测器和光机扫描器热成像仪获得的图像

Fig.10 Image of a scanning thermal imager using LWIR HgCdTe 480×6 TDI linear array FPA and opto-mechanical scanner



图11 采用碲化铟 1024×768 中波红外焦平面探测器的凝视热成像仪获得的图像

Fig.11 Image of a staring thermal imager using MWIR InSb 1024×768 FPA

的细节;图11^[9]是碲化铟 1024×768 中波红外凝视热成像仪获得的热图像,图像中有丰富的云层,树的细节较少。

6 制冷和非制冷热成像技术的比较

非制冷红外焦平面探测器降低了热成像仪的使用门槛。比较制冷和非制冷热成像仪时,需要注意相对孔径(F数)和使用条件。

1) 相对孔径(F数)

热成像仪的相对孔径由红外焦平面探测器的F数确定。制冷型焦平面探测器相对孔径数的典型值为1~4,而非制冷焦平面探测器F数的典型值为1。换言之,需要大孔径的红外望远镜汇聚更多的红外辐射能量到探测器上。

2) 响应速度

制冷型焦平面探测器是光子探测器,响应速度快(10^{-6} s数量级),一般非制冷红外焦平面探测器是热探测器,响应速度慢(10^{-3} s数量级)。制冷型焦平面探测器的性能随帧频提高而降低的速率小,例如帧频达到200 Hz时性能的降低不明显,而非制冷焦平面探测器的性能随帧频提高而迅速降低,帧频100 Hz时探测器的热灵敏度下降很多。

3) 使用条件

一般制冷型红外焦平面探测器探测元的探测率比非制冷红外焦平面探测器的高2个数量级。当探测元的性能达到一定值后,探测扩展源目标时主要是探测元数量起作用,而探测率的差别表现不明显。但探测点源目标时,目标汇聚在焦平面探测器上只是一个像点,此时探测率起决定性作用。

4) 体积、重量和成本问题

为探测远距离目标,需要采用长焦距的红外望远镜,例如150 mm,由于非制冷红外焦平面的相对孔

径的典型值为 1，见图 12，由昂贵锗单晶材料制造的红外望远镜物镜的孔径也将为 150 mm，所以，采用非制冷红外焦平面探测器减小的体积、重量和成本可能被红外望远镜体积、质量和成本的增加所抵消。



图 12 一种光学镜头焦距为 150 mm 的非制冷热成像仪
Fig.12 An uncooled thermal imager with 150 mm lens focal length

7 非制冷红外焦平面探测器技术的比较

非制冷红外焦平面探测器主要的技术路线有微热敏电阻模式和电容模式。微热敏电阻模式发展出氧化钒和非晶硅，微热敏电容模式（热释电/铁电）发展出锆钛酸铅(PZT)、钛酸锶钡(BST)和钽铌酸铅(PST)等，两种技术路线的简要比较见表 5。

微热敏电阻非制冷红外焦平面探测器成功的两个关键因素是热敏感的薄膜材料（主要是氧化钒和非晶硅）和微桥列阵，前者降低了探测元的热容，后者增大了探测元与基底（硅读出电路芯片）之间的热阻，因而获得了比采用混合式结构的铁电型非制冷红外焦平面探测器更高的热灵敏度。图 13^[5]是氧化钒微热敏电阻的探测元结构，红外辐射被由氮化硅微桥支撑的氧化钒微热敏电阻吸收，通过 X 和 Y 方向电极加偏置电流和取出信号，经单片双极型晶体管放大后即得到电信号。

表 5 微热敏电阻模式和电容模式非制冷红外焦平面探测器技术的比较
Table 5 Comparison of bolometer and pyroelectric uncooled infrared FPA detectors

比较项目	电容模式非制冷焦平面探测器	热敏电阻非制冷焦平面探测器
可动机械部件	斩波器（用于红外辐射调制） 优点： 1) 交流工作，交流耦合可滤去低频噪声 2) 可进行亮暗场信号差分处理，实现以下功能：消除固定图案噪声；减小热漂移，有利于恒温控制和器件封装；等效于低频滤波器，减小噪声带宽；消除拖尾，有利于运动目标成像	机械电子快门（用于均匀性校正） 优点： 1) 直流工作不用斩波器 2) 便于测量红外辐射的绝对值 3) 可完全利用红外辐射能量 4) 易于实现帧冻结、帧转移功能
微扫描	采用微扫描装置，分辨力提高近一倍；很容易与斩波器结合实现微扫描	采用微扫描装置，分辨力提高近一倍；需另设独立的微扫描装置
偏置功耗	电压偏置，几乎无功耗	电流偏置功耗较大；为降低功耗，采用脉冲电流偏置，但随着探测元数增多，要求提高采样脉冲精度和变窄偏置脉冲宽度，对偏置及采样技术要求更高
噪声带宽/Hz	10 ² 量级	10 ⁵ 量级
恒温控制精度要求/mK	—	10
封装	N ₂ 或 Xe 封装	真空封装
吸收率/%	95	80
填充因子/%	100	≥60
军事应用	已用	已用
与硅工艺兼容性	兼容性差	兼容好或较好

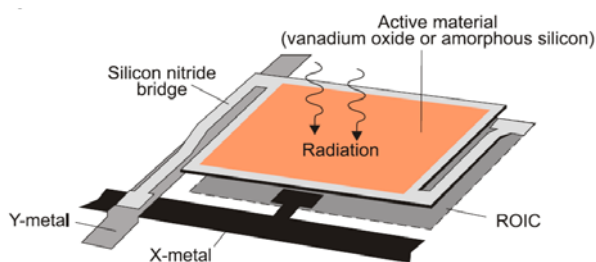


图 13 氧化钒微热敏电阻的探测元结构

Fig.13 Detector element architecture of vanadium oxide microbolometer

制约微热敏电阻模式非制冷红外焦平面探测器发展的另一个潜在因素就是热敏电阻工作时需要加偏置电流。为控制焦平面探测器的功耗,目前热敏电阻型非制冷红外焦平面探测器工作时采用行积分和加行脉冲偏置电流的模式,当探测器规模不断扩大时总会达到这种模式的极限。

以电容模式工作的热释电型非制冷红外焦平面探测器不需要加偏置电流或电压,铁电型非制冷红外焦平面探测器需要加偏置电压,因此均不存在制约限制探测器规模扩展的因素。已经量产的铁电型非制冷红外焦平面探测器采用体材料和倒装互连工艺,探测元热容较大,绝热结构热阻较小,其热灵敏度虽然与早期的热敏电阻型非制冷红外焦平面探测器的相当(噪声等效温差均为 100 mK),但不及新型热敏电阻型非制冷红外焦平面探测器的(噪声等效温差约为 30 mK)。尽管制约热释电/铁电型非制冷红外焦平面探测器发展的因素是热释电或铁电薄膜材料的制备困难,但已研制出铁电薄膜材料和微桥结构、噪声等效温差为 400 mK 的非制冷红外焦平面探测器,图 14^[10]为该探测器的一个探测元,作为热敏感材料的铁电层通过电极接触“脚”即顶电极和底电极构成电容型热敏感元,真空层减小空气的热传导以提高热敏感元的热灵敏度,由于铁电材料的热敏感性高且不需要加偏置电流,因而具有更高探测性能的潜力。

热释电/铁电型非制冷红外焦平面探测器需要 1



图 15 热瞄准镜

Fig.15 Thermal weapon sight

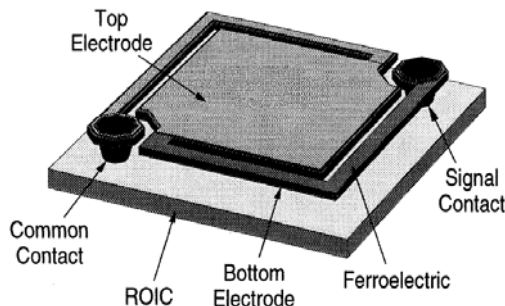


图 14 基于铁电薄膜材料和微桥结构的探测元

Fig.14 Detector element based on ferroelectric thin film and microbridge

个斩波器——通常采用阿基米德螺旋线形的斩波器实现斩波,将入射的直流红外辐射变成交流红外辐射,因减小了前置放大器电子学的带宽,提高了信噪比,但增加了热成像仪的径向尺寸、有机械运动部分(斩波器)。实际上,径向尺寸大只对身管武器(例如狙击步枪)热瞄镜一类应用有不良影响(图 15),而对单兵侦察应用的手持式热像仪反而有利(图 16^[11])。图 15 为热瞄镜,当其用于轻武器热瞄镜时要求径向尺寸较小,便于枪械的携带和使用,可以想象如果热瞄镜横向尺寸大,图中利用墙角掩护进行射击的士兵必定要暴露更多的身体;图 16^[11]是手持热像仪,侦察应用的单兵手持热像仪横向尺寸较大是有利因素,除减小纵向尺寸、控制重心、便于双手握持、操作和携带外,还为口径较大的红外物镜提供了空间,以使热像仪可以有较远的探测和识别距离,并且还能集成激光测距机、激光指示器等。

8 探测元尺寸与探测器规模

为控制探测器芯片的尺寸,扩大探测器规模的同时也在缩小探测元的尺寸。

表 6 比较了 3 种规格的焦平面探测器探测元尺寸。

探测元面积减小就是接收红外辐射的能量相应减小。如果探测器的热敏材料和读出电路没有采取相应的补偿措施,则焦平面探测器的热灵敏度必然降低。



图 16 手持热像仪

Fig.16 Hand-held thermal imager

表6 法国3种规模的非制冷红外焦平面探测器的探测元尺寸与探测器规模的数据
Table 6 Detector element size and array format of three uncooled infrared FPAs made in France

探测器规模	探测元尺寸/ μm	探测元面积/ μm^2	减小百分比	备注
320×240	45×45	2025		
640×480	25×25	625 (单层结构)	69.14%	以 320×240 为基准
		1250 (双层结构)	34.07%	
1024×768	17×17	289 (单层结构)	85.73%	以 320×240 为基准
		578 (双层结构)	42.86%	

换言之，提高探测器的规模（即热图像的空间分辨力）是以损失其热灵敏度为代价的。此外，探测器规模扩大，如果不增加输出端口，则必然降低积分时间，这也会影响探测器的热灵敏度。

探测元的尺寸还受红外望远镜的相对孔径（F/#）和工作波长的限制。在工作波长一定时，减小探测元的尺寸就需要增大红外望远镜的相对孔径，也就是增加焦平面上的照度。

在选择红外焦平面探测器时，要分析具体应用条件，未必是探测器的规模越大越好。

9 红外成像技术发展“代”的双重含义

追求技术的先进性和追求低成本，可以认为是“一代”产品中必须追求的两个方面。通常在技术变得越来越复杂时，相应成本就会上升。因此必然还需要降低成本的发展方向，即在保持规定性能的同时追求低成本，或是追求降低成本的技术。扩大生产规模只是摊薄成本的一种措施。

在红外成像技术的发展中，容易出现追求技术发展而忽略降低产品成本。如果不降低成本，将进入“因红外成像仪很贵，所以用户少；由于用户少，所以红外成像仪很贵”的怪圈。在多数红外成像仪中，红外探测器组件是其中最贵的。随着红外焦平面探测器功能的增加和性能提高，成本还将随之增加。非制冷红外焦平面探测器和红外成像仪的发展，反映了技术发展在追求成本方面的努力，通过省略杜瓦和制冷机降低了红外探测器的成本，而又保持了应用可以接受的性能。

制冷型红外成像仪是高端应用产品，非制冷型红外成像仪是低成本应用产品。但在具体产品上，制冷型红外成像仪有高、中、低端的产品。同理，在非制冷型红外成像仪中也有高端产品。

10 结语

红外成像技术的重要性是由其使用的广泛性和

重要性决定的，除继续应用于军事领域外，红外成像技术还将广泛地应用于国民经济各领域，如电力、交通、医学、能源、石油、化工、冶金、建筑、消防、公安等等，并必将产生巨大社会和经济效益。

致谢

昆明物理研究所王忆锋计算了图3的曲线，北京理工大学光电学院博士生罗秀丽和硕士生金真分别绘制了图2和图1，另外，对北方驰宏光电有限公司姜杰等提供图片的版权者，笔者一并表示感谢！

参考文献：

[1] 丹皮尔. 科学史[M]. 李珣, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
[2] 卡约里. 物理学史[M]. 戴念祖, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2010.
[3] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**: 136-154.
[4] Electro Optical Industries Inc. [EB/OL]. http://www.Electro-optical.com/eoi_page.asp?h=Atmospheric%20Absorption.
[5] Rogalski A. Progress in focal plane array technologies[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, **36**: 342-473.
[6] <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/eo-1>.
[7] Kepler spacecraft[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Kepler_spacecraft.
[8] Herbert J Kramer. Copernicus: Sentinel-2—the optical imaging mission for land services [EB/OL]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/c-opernicus-sentinel-2>.
[9] http://realvision.gr/index.php?cPath=26_97&language=en&osCsid=6f9edf02053d631187d597d1642e97ad.
[10] James F Beicher, Charles M Hanson, Howard R Beratan et al. Uncooled m-onolithic ferroelectric IRFPA technology[J]. *SPIE*, 1998, **3436**: 611-622.
[11] Sagem Défense Sécurité. Binoculars & multifunctions [EB/OL]. <http://www.sagem-ds.com/spip.php?rubrique121>.
[12] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. *红外技术*, 2013, **35**(1): 1-8.