

文章编号:1001-5078(2024)04-0569-05

· 红外材料与器件 ·

拼接红外探测器技术研究

闫继伟¹,袁羽辉²,王冠²

(1. 空装驻北京地区第七军事代表室,北京 100015;2. 华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:红外探测器作为空间红外预警卫星的核心部件,随着红外探测器性能的不不断提升,采用更大规模,更多谱段的红外探测器焦平面阵列是未来预警用红外探测器的发展趋势。通过多芯片,多谱段集成拼接制备出线列规模更长的红外探测器,以满足红外预警卫星大视场、高分辨率以及多光谱探测的能力。本文对国内外多芯片,多谱段拼接红外探测器组件发展现状以及技术路线进行对比,对小型化拼接探测器在其他领域的使用前景展望,最后点出大尺寸拼接红外探测器研制目前存在的主要问题。

关键词:拼接技术;多谱段拼接红外探测器;大面阵拼接红外探测器

中图分类号:TN215;TP73 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.013

Research on splicing infrared detector

YAN Ji-wei¹, YUAN Yu-hui², WANG Guan²

(1. The Seventh Military Representative Office of Air Force Equipment in Beijing, Beijing 100015, China;

2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Infrared detectors are the core components of space infrared early warning satellites. With the continuous improvement of infrared detector performance, the use of larger and more spectral infrared detector focal plane array is the development trend of infrared detectors for early warning in the future. The infrared detector with longer line scale is prepared by multi-chip and multi-spectrum integration splicing to meet the large market, high resolution and multi-spectral detection capability of infrared early warning satellites. In this paper, the development status and technical route of multi-chip and multi-spectrum splicing infrared detector components at home and abroad are compared, and the application prospects of miniaturized splicing detectors in other fields are prospected. Finally, the main problems existing in the development of large-size splicing infrared detectors are pointed out.

Keywords: splicing technology; multispectral splicing infrared detector; large array splicing infrared detector

1 引言

拼接红外探测器作为空间预警卫星的核心部件,红外探测预警与可见光预警相比,有以下优势:

①红外探测器具备全天候能力,可以满足夜间观测预警的需求;②红外探测器可以穿过云烟等阻碍可见光探测的物体③红外预警是被动观测,只被动接受红外信号,隐蔽性好,不易发现;④可通过多颗预

警卫星协同观测单一目标,提高定位精度。因此,星载红外探测器在预警、跟踪、定位等军事领域与可见光探测器相比有较大的优势,可以通过追踪导弹或其他飞行器发动机向后喷射的尾焰,对其进行连续观测,通过计算得出其飞行速度、飞行方向等位置信息,并预测目标位置。

随着所需观测面积加大以及预警卫星平台的

作者简介:闫继伟(1980-),男,本科,研究方向为武器装备质量监督建设和合同监管。E-mail:dongrilin@126.com

收稿日期:2023-10-26;修订日期:2023-11-25

发展,空间预警应用对于大观测范围、高分辨率、多波段集成的需求日益增加,这就对星载红外探测器阵列规格和尺寸提出了较高的要求。由于受到红外探测器材料、工艺等因素,无法无限制的增加单片探测器的像元数量及尺寸。所以就需要通过多芯片拼接的方式,将多片探测器集成在同一光路内,实现大观测范围、高分辨率、多波段集成探测能力^[1-3]。

大规模拼接红外探测器可以分为两种:一种为大面阵拼接探测器组件,由多个大面阵探测器芯片组成;一种为线列拼接探测器,由多个线列探测器芯片组成,长线列拼接探测器可以集成多个红外波段,光谱方向与飞行器飞行方向一致,从而实现二维几何成像和光谱信息的同时获得,提高目标探测预警能力。

2 大面阵拼接探测器国外研究现状

根据可查询到的资料,美国、法国等红外探测器技术先进国家已经对拼接探测器进行了二十余年的研究,取得了较大的进展,已经在军事预警,航天民用遥感等领域广泛使用。

2.1 大面阵拼接探测器国外研究现状

美国 Raytheon 公司将4个单一波段的 $2\text{ k} \times 2\text{ k}$ 红外探测器模块编为1组,并制备4组外形尺寸相同,但波段不同的红外探测器模块。将上述16个红外探测器模块在同一基板上按照固定间距拼接,形成 4×4 红外探测器组件,实现了单个大面阵拼接探测器组件多波段集成的探测器。



图1 Raytheon $2\text{ k} \times 2\text{ k}$ 大面阵拼接探测器

Fig. 1 Raytheon $2\text{ k} \times 2\text{ k}$ large array splicing detector

2.2 线列拼接探测器国外研究现状

美国 Raytheon 公司研制的 WFOV FPS 多波段焦平面探测器,从可见光到红外短波波段,探测器集成10个波段。最终应用的探测器组件由5个多波段芯片模块拼接而成,WFOV FPS 探测器结构如图3所

示,单个多波段芯片模块由四片探测器芯片组成,其中红外短波波段探测器采用碲镉汞材料制备,单个芯片细分为3个波段,红外波段分布覆盖 $1.2 \sim 2.35\ \mu\text{m}$,与可见光芯片共同形成多波段探测器组件。

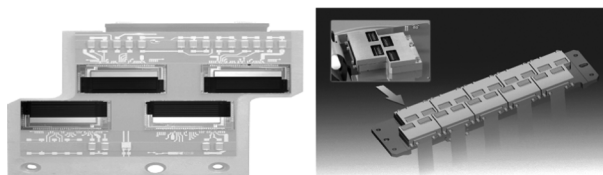


图2 WFOV FPS 探测器

Fig. 2 WFOV FPS detector

美国 Raytheon 公司研制的 MTI 多光谱成像仪红外探测器组件,探测器采用碲镉汞制备,探测器组件红外光谱覆盖范围 $1.36 \sim 10.7\ \mu\text{m}$,波段细分为短波3个波段、中波2个波段、长波3个波段共8个红外波段如表2所示。

表1 MTI 成像器红外探测器组件光谱分布

Tab. 1 Spectral distribution of MTI imager infrared detector components

波段	波长范围/ μm	红外波段
1	1.36 ~ 1.39	短波
2	1.55 ~ 1.75	短波
3	2.08 ~ 2.35	短波
4	3.50 ~ 4.10	中波
5	4.87 ~ 5.07	中波
6	8.00 ~ 8.40	长波
7	8.40 ~ 8.85	长波
8	10.20 ~ 10.70	长波

法国 Sofradir 公司研制了短波多波段探测器。每个探测器芯片集成3个短波波段,探测器波段分布如表2所示,每个多波段探测器芯片像元排布如图3所示,图4展示了将该多波段芯片进行单模块封装后的实物图,图5为利用12个上述单模块探测器长线列拼接方案示意图。

表2 Sofradir 公司红外探测器组件光谱分布

Tab. 2 Spectral distribution of infrared detector components from Sofradir company

波段	波长范围/ μm
1	1.360 ~ 1.390
2	1.565 ~ 1.655
3	2.100 ~ 2.280

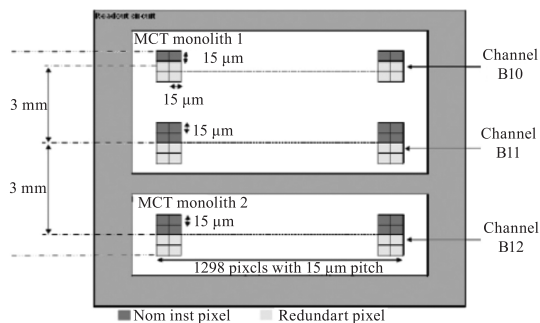


图3 芯片像元排布

Fig. 3 Chip pixel layout

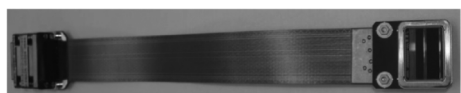


图4 单模块封装实物图

Fig. 4 Physical diagram of single module packaging

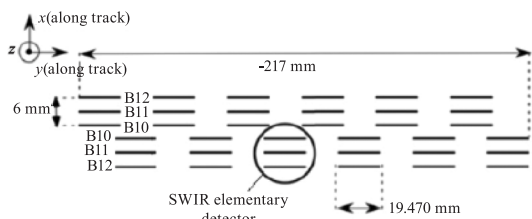


图5 拼接方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of splicing scheme

3 国内研究现状

国内开展红外探测器拼接技术较晚,主要进行拼接工艺研究的单位有两家,分别为中国电子科技集团公司第十一研究所(后文简称中国电科 11 所)与中国科学院上海技术物理研究所(后文简称技物所),以上两家单位均有拼接红外探测器组件相关报道。

3.1 中国电科 11 所

中国电科 11 所自主研发的全谱段光谱红外探测器,全谱段光谱成像仪红外探测器组件光谱覆盖范围为 1.55 ~ 12.5 μm,共计 8 个谱段,采用了 2 个红外探测器组件,完成 8 个谱段的集成。短中波探测器芯片集成了短波 2 个谱段、中波 2 个谱段,共 4 个谱段(SW1, SW2, MW1, MW2),短波每个谱段探测器像元规模为 3072 × 3 元、中波每个谱段像元规模 1536 × 3 元;长波探测器芯片集成了 4 个谱段(LW1, LW2, LW3, LW4),每个谱段像元规模为 1536 × 3 元。由两款组件组成,每款组件分别覆盖 4 种不同谱段,达到单片集成 4 谱段的效果,最终通过拼接形成探测器组件,探测器采用

TDI 扫描成像方式进行成像,该探测器已被某型号卫星搭载实现在轨正常工作^[4-6],图 6 为短波谱段地面成像效果图。



图6 短波谱段地面成像图

Fig. 6 Ground image of short spectrum section

中国电科 11 所采用混成芯片子模块单边品字形交错拼接方式,解决了单模块芯片像素级拼接难度较高的问题,获得了高精度探测器单模块芯片的精密拼接技术,应用于空间级红外相机,可以实现无缝成像,芯片间位置拼接精度优于 7 μm,芯片间共面度优于 13 μm。基于此拼接技术,探测器拼接阵列可以从 1024 元扩展至 8000 元,甚至像元数量更大规模红外拼接探测器组件,该拼接技术已经在某型号在轨卫星,全谱段稳定成像验证,成像质量好,满足技术指标要求。

3.2 技物所

上海技术物理所在多个项目中所配套的红外探测器,其中长波探测器用于某型号高光谱卫星,长波探测器芯片拼接方式如图 7 所示,采用品字形拼接方式,芯片与芯片间重叠四个有效像元,可保证在成像过程中图像连续,消除芯片与芯片之间,由于位置交错导致成像时出现芯片间图像未重叠的缝隙,影响图像质量。

中波探测器用于某型号卫星,采用 33 片线列红外探测器拼接而成,共同组成 33000 元拼接红外探测器,拼接方式如图 8 所示,此款拼接探测器由 5 个拼接子模块组件,模块 1 和模块 5 由 6 片红外探测器拼接组成,其余模块由 7 片红外探测器组成,此种拼接方式可以通过保证将 33 片芯片共面度以及位置公差要求分解到 5 个小模块上,5 个小模块在将共面度以及位置公差要求分解至单个芯片,大大降低了单一模块的共面度以及位置公差要求。使其共面度以及位置公差在要求范围内的同时,降低工艺

难度。

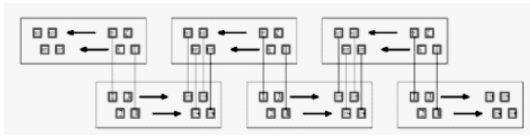


图7 某型号高光谱卫星红外探测器

Fig. 7 A certain model of hyperspectral satellite infrared detector

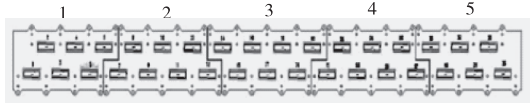


图8 33000 像元中波红外探测器

Fig. 8 33000 pixel medium wave infrared detector

4 其他领域使用情况

拼接红外探测器由于其本身探测器模块尺寸的原因,整个拼接红外探测器体积和质量均过于庞大,拼接红外探测器基本使用领域为星载。为了提高卫星的可靠性,降低卫星整体的体积,质量以及功耗,同时也要求拼接红外探测器减小体积以及质量。故拼接红外探测器小型化、轻量化以及低功耗成为了发展趋势^[7]。

预警机或者无人机平台空间、重量等物理尺寸上的限制,使得现有机载红外探测器尺寸较小,一般为单片红外探测器封装在微杜瓦中与成像系统配合形成红外相机。随着技术的发展机载的红外探测器像元面阵尺寸也在从起初的 320×256 ,增加到现在的 640×512 ,未来也会增加到 1280×1024 甚至更大尺寸的面阵尺寸。但由于均为单片探测器芯片(如图9所示),仅可观测单一谱段信号,视场范围同样较小,对未来需要观测多个光谱信号以及大视场观测范围的需求相差较远。



图9 单芯片微杜瓦实物图

Fig. 9 Physical image of single chip micro dewar

随着小型化、轻量化以及低功耗为目标的拼接红外探测器的研发,使以预警机或者无人机作为使

用的平台成为可能。将2至3片线列或面阵红外探测器进行品字形或一字形拼接,将多个谱段的红外探测器芯片集成同一探测器组件中,并改变真空以及制冷降温方式,减小制冷机的质量和体积。使用环境从真空下的宇宙环境变为大气环境,需要修改真空结构,从活真空结构即内外联通结构更改为杜瓦结构内真空密闭结构,从而形成小型多芯片拼接微杜瓦结构,缩小整个拼接探测器的尺寸以及质量,实现拼接探测器的小型化和轻量化。同时通过降低探测器芯片功耗以及优化杜瓦结构,实现红外探测器热耗降低,从而实现制冷机降温峰值功耗的减小,进而降低整个探测器组件功耗,实现拼接探测器低功耗的指标。通过多个红外探测器拼接集成,使得单一红外相机系统实现同时观测多个光谱谱段信号,扩大预警机或者无人机观测预警距离,增加可接收红外信号的谱段数量,扩大视场范围,解决单一芯片所带来的视场范围相对较窄的情况。

5 总结

目前,预警红外相机系统对大视场、高空间分辨率及高时间分辨率等需求的不断提高,单个探测器模块像元规模的发展已不能满足指标要求,将几个甚至是几十个探测器模块线列拼接而成的超大规模红外焦平面探测器需保证一定范围内的位置精度,随着探测器模块的增加,保证所有拼接探测器的位置精度愈发困难,就需要再开发新的拼接技术,以保证模块间的位置精度。随着现有国内的拼接技术水平相距国外技术水平仍然有一定距离,希望在应用及需求的牵引下,相信我国大规模拼接红外探测器技术一定会发展的越来越好。

参考文献:

- [1] Lü Weidong, Deng Xuguang, Wang Qianwei, et al. Infrared detector butted technology for space [J]. Infrared Technology, 2022, 44(10): 999 - 1008. (in Chinese)
吕玮东, 邓旭光, 王乾威, 等. 空间用红外探测器拼接技术研究[J]. 红外技术, 2022, 44(10): 999 - 1008.
- [2] Lei Ping, Xing Hui, Wang Juanfeng, et al. Research on early warning and detection capability of scanning camera of space - based infrared system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(9): 20210977. (in Chinese)
雷萍, 邢晖, 王娟锋, 等. 天基红外预警系统扫描相机

- 预警探测能力研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 20210977.
- [3] Bing Qijun, Feng Shuxing. Working mechanism of space-based infrared detector for early warning and its combat modes [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(921): 111-115. (in Chinese)
邴启军, 冯书兴. 星载红外预警探测器工作机制和对抗方式[J]. 科技导报, 2009, 27(921): 111-115.
- [4] Wang Chenggang, Dong Haijie, Liu Zewei, et al. Multi-spectral band integrated TDI linear infrared detector for GF-5 satellite [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(3): 80-84. (in Chinese)
王成刚, 东海杰, 刘泽巍, 等. “高分五号”卫星多谱段集成 TDI 线列红外探测器 [J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 80-84.
- [5] Meng Lingwei, Dong Haijie, Zhang Yi. Research progress of multispectral long linear infrared detector [J]. Laser & Infrared, 2020, 50(6): 697-702. (in Chinese)
孟令伟, 东海杰, 张懿. 多谱段集成长线列红外探测器研究进展 [J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 697-702.
- [6] Xu Lina, Dong Haijie, Zhao Yanhua, et al. Multi-spectral intergraded long-line splicing TDI infrared detector technology [J]. Aerospace Shanghai, 2019, (S2): 6. (in Chinese)
徐丽娜, 东海杰, 赵艳华, 等. 多谱段集成长线列拼接 TDI 红外探测器技术 [J]. 上海航天, 2019, (S2): 6.
- [7] Xu Xinhang, Chen Ning, Wang Bing, et al. Design of compact middle-wave infrared camera used on airborne platform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0816002. (in Chinese)
徐新行, 陈宁, 王兵, 等. 机载紧凑型中波红外相机的设计 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0816002.