

国外中长波双波段红外成像技术的发展及应用

赵志刚¹, 王鑫², 彭廷海², 赵灿兵², 夏丽昆³, 周游²

(1. 中国人民解放军32381部队, 北京100020; 2. 昆明物理研究所, 云南昆明650223;

3. 陆军装备部驻重庆地区军事代表局驻昆明地区第一军事代表室, 云南昆明650032)

摘要: 中长波双波段红外成像技术能同时获得中波、长波两个大气窗口的红外辐射信息, 同时具有两种单波段成像技术的优点。通过优势互补, 中长波双波段红外成像技术能够提高装备对各种复杂环境条件的适应能力, 提高各类作战任务的成功率。在过去二十几年中, 欧美主要国家实现了从双探测器双波段成像到单探测器双波段成像的发展及批量装备, 目前正向更高分辨率、更远作用距离的方向发展。中长波双波段红外成像技术主要用于提高各类主战装备对不同的作战环境的适应能力以及各类搜索跟踪识别系统对目标的探测识别成功率。此外, 可以通过中长波双波段红外成像技术获取目标的温度、光谱特性等特征信息, 可用于反干扰、反伪装。

关键词: 双波段红外成像技术; 红外探测器; 双波段光学系统; 图像融合; 复杂环境适应性; 探测识别成功率; 目标温度

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2020)04-0312-08

Status Quo and Application of Middle and Long Wave Dual-band Infrared Imaging Technologies in Occident

ZHAO Zhigang¹, WANG Xin², PENG Tinghai², ZHAO Canbing², XIA Likun³, ZHOU You²

(1. PLA 32381 Troops, Beijing 100020, China; 2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

3. The First Military Representative Office of Army in Kunming District in Chongqing District, Kunming 650032, China)

Abstract: Depending on the capability of detecting scene radiance in both MWIR(middle wave infrared radiation) and LWIR(long wave infrared radiation) spectral bands, the dual-band IR(infrared radiation) technology ensures the use of two single-band sensors. Using the spectral advantages associated with the use of two single-band sensors, the dual-band IR technology can improve all-weather performance and the probability of mission success in almost all cases. Over the past 20 years, main occident have developed from dual-camera dual-band to single-camera dual-band infrared camera systems and equipped military, with higher resolution and greater range being the current requirements. At present, the dual-band IR technology mainly has three different applications. First, it improves the adaptability to different operational environments. Second, it improves the target detection and recognition probability of automatic systems. Third, through deep data processing, it is used to obtain more information about the target such as temperature and spectral feature, which helps prevent jammer and camouflage.

Key words: dual-band infrared technology, infrared detector, dual-band optical system, image fusion, environment adaptability, detection and recognition probability, target temperature

0 引言

根据大气对红外辐射的吸收情况, 红外成像系统设计时通常分为5个光谱波段, 分别是近红外波段、短波红外波段、中波红外波段、长波红外波段和甚长波红外波段, 根据目标的红外辐射特性, 用

于观瞄系统的红外成像设备通常工作中波或者长波波段。在很长一段时间里, 受到红外探测器材料及器件的制造工艺和成本的限制, 以及红外热成像系统相关技术不够成熟, 红外热成像系统只能工作在某一个单一波段。

随着应用任务的复杂化、应用环境的扩展以及红

外隐身和干扰技术的进步，单波段红外热成像系统在很多应用场景下存在对目标的探测识别能力较差、自动预警系统虚警率高以及动态范围不足等缺陷。如果能在热成像系统中利用目标在不同红外波段图像里固有的、较强的差异性和互补性，获取目标更多的有效信息，通过图像融合技术，就能有效地提高系统的效能。本文综述了几种国外中长波双波段红外成像技术的发展情况，以及这些技术目前的应用情况。

1 中长波双波段红外成像技术的发展

从现有公开的文献资料来看，国外对红外双波段成像从20世纪中期开始就有所讨论，到90年代末开始出现较多的成果。纵观这些文献资料，国外中长波双波段红外成像技术目前主要有3种类型：双探测器双波段成像技术、双线列双波段成像技术以及单探测器双波段成像技术。

1.1 双探测器双波段成像技术

在早期，由于能够同时响应两个波段的探测器尚未面世，以及相应的光学系统材料和镀膜技术的限制，只能采用两个不同波段的探测器，分离的光学系统来构建双波段成像系统，然后通过图像的配准和融合技术来获得双波段图像。美国、德国、意大利、加拿大等国家都开发出了相应的系统，并且有的已经实现装备。表1所示是目前公开报道的国外典型双探测器中长波双波段红外成像系统简介^[1-4]。

德国 Thermosensorik、FGAN-FOM 等公司在2003报道了他们采用两个探测器研制的双波段红外成像系统“CLEMENTINE”的情况，该系统采用了两个探测器，配合两个焦距为100 mm的光学系统，保证两个波段视场一致，并在后端进行图像配准和融合。研制方进行了大量的数据采集试验，获得了大量640×512分辨率的图像。图1^[1]所示为用该系统采集的图像数据，从左到右依次为中波、长波和融合图像。

表1 国外典型双探测器中长波双波段红外成像系统

Table 1 Dual-detector middle and long wave dual-band infrared imaging systems in occident

System	Organization	Fov/Foal length	F-number	Band/ μm	Array	Pixel/ μm	Year
MDSS Test	US Army	-	-	3.7-4.8	-	-	1998
	Lockheed-Martin			7.5-9.2			
CLEMENTINE	Thermosensorik	100 mm	-	3.0-5.0	640×512	25	2003
	FGAN-FOM			7.5-9.2			
SASS	Italy Navy	IFOV:0.16 mrad	-	4.7-5.4	288×6	-	2008
	Selex Galileo			8.4-9.0			
MR-i	US NAVAIR ABB	IFOV: 3.5 mrad; 1.2 mrad; 0.13 mrad	-	0.7-20.0	$\geq 320 \times 256$	-	2011

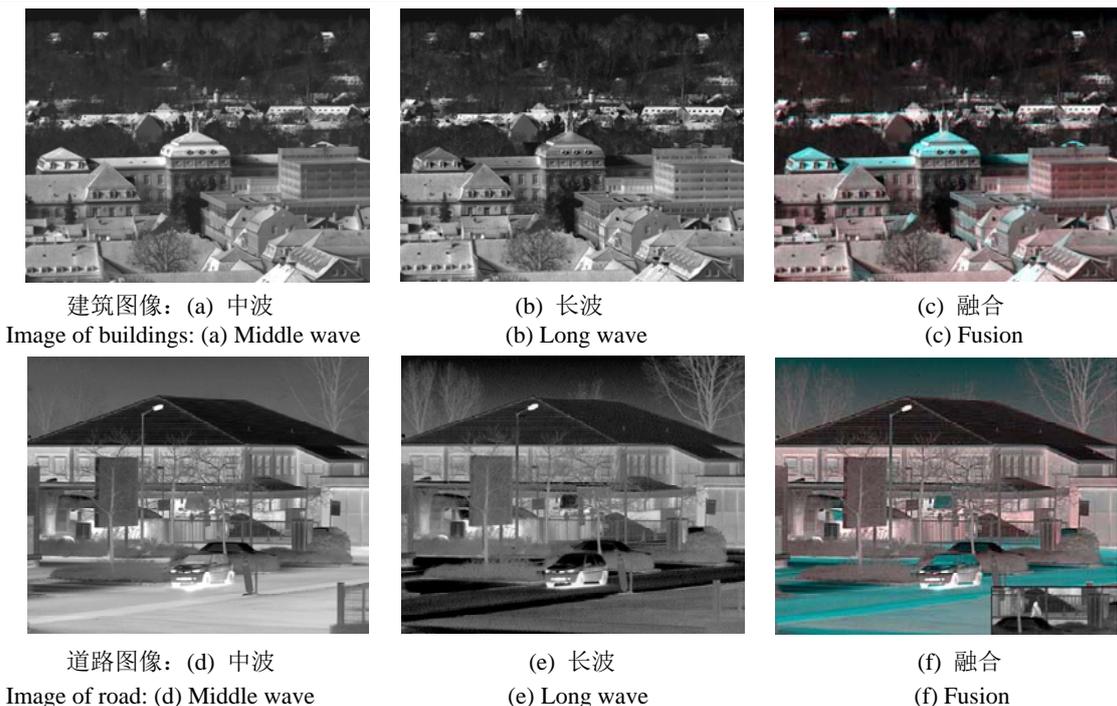
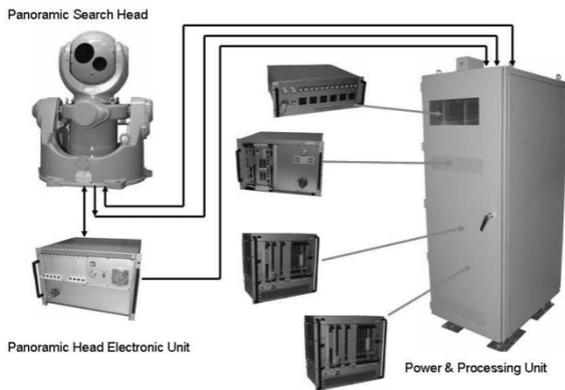


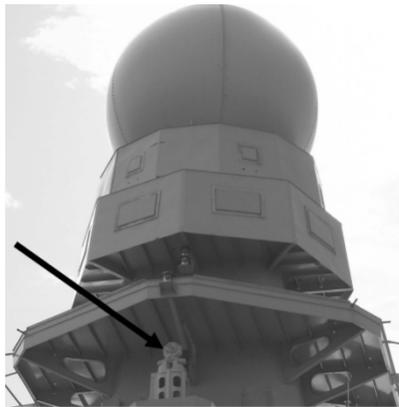
图1 德国“CLEMENTINE”系统采集的双波段图像

Fig.1 Dual-band images from “CLEMENTINE” system of Germany

意大利军用技术研究中心和 SELEX GALILEO 公司在 2010 年报道了他们为意大利海军研制的静默发现和监控系统,该系统用于装备意大利海军的新航母加富尔号 (Camillo Cavour)。该系统采用一个中波 (3.7~5 μm) 和一个长波 (7.75~10.25 μm) 两个扫描型热像仪构成,探测器规格为 288×6, 瞬时视场为 0.16 mrad(H)×0.32 mrad(V), 可以实现 360°搜索。图 2^[2]所示为该系统集成以及实际装备实物图。



(a) 系统 (a) The system



(b) 装载平台 (b) The carrier

图 2 静默发现和监控系统及其装备平台

Fig.2 Silent acquisition and surveillance system and its carrier

此外,美国军方在 1998 年组织的多光谱传感器的测试试验用一个中波红外热像仪和一个长波红外热像仪采集了两个波段的图像信息,加拿大 ABB 公司在 2011 年报道了他们和美国海军合作开发的傅里叶变换光谱辐射探测设备。

基于双探测器的中长波双波段红外成像技术是一个过渡阶段的技术,欧美主要国家都研制出了相应的系统,并验证了双波段图像融合、基于双波段图像的搜索跟踪等技术,进一步探索并验证了双波段成像技术在实际应用中的相关理论和技术。这使得相关国家在双波段红外成像方面积累了一定的领先优势。

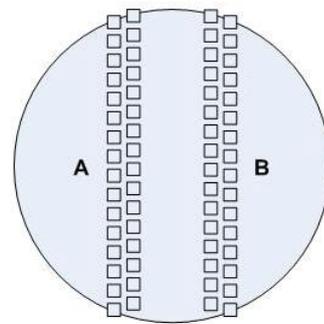
1.2 双线列双波段成像技术

由于基于叠层材料的双波段探测器无论是材料

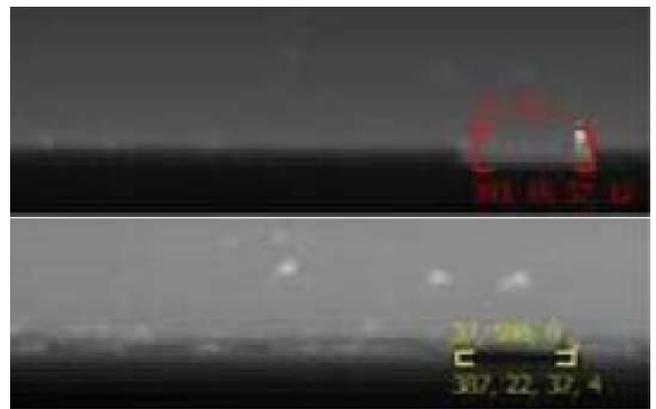
制备还是器件制造的难度都远超过单波段探测器,而基于线列探测器成熟的制造技术,在同一个焦面上并列放置两个波段的探测线列,以获得可以探测双波段辐射的线列探测器不失为一种降低成本和难度的方案。

在目前的公开文献中,只有美国海军研究实验室报道了双线列双波段成像系统的研究成果^[5]。该系统所采用的双波段线列探测器的构成示意图如图 3(a)^[5]所示,将中波和长波两种探测器线列封装在一起,配合共光路双波段光学系统和扫描机构,可以获得 30°×1.5°的视场。通过信息融合的方式,可以有效提高探测率并降低虚警率,图 3(b)^[5]所示为该系

IR imager



(a) 线列结构 (a) Linear array



(b) 双波段图像 (b) Images of dual-band

图 3 双线列双波段成像系统

Fig.3 Dual-linear arrays dual-band imaging system

1.3 单探测器双波段成像技术

随着双波段材料制备和器件制造技术的进步,欧美主要国家都研制出了双波段探测器。由于量子阱材料波长控制灵活、制备相对容易,所以各个国家最早研发出来的都是基于量子阱材料的双波段探测器。由于量子阱材料存在量子效率低、暗电流大等缺点,各国随后都把重点转移到基于碲镉汞材料的双波段探测器的研发并取得了快速进展,表 2 所示是美国 RVS、

德国 AIM、法国 Sofradir、英国 SELEX 等公司的碲镉汞双波段探测器，目前碲镉汞已经成为双波段探测器的主流材料^[6-10]。此外，随着二类超晶格材料制备技术的进步，其优点逐步显现，也成为了双波段探测器材料的一个重要发展方向。根据最新的报道美国已经研制出面阵规格 1280×720、像元大小 12 μm 的二类超晶格中长波探测器，其性能已经大致达到了碲镉汞探测器的水平^[11-12]。

随着探测器技术的进步，各个国家都基于单探测器开发了双波段红外成像系统，表 3 所示是公开报道的国外典型单探测器中长波双波段红外成像系统。可以看到大多数报道都是美国和德国，这也反映出他们该技术领域的领先地位^[13-20]。

美国陆军研究实验室和洛克希德马丁公司早在 2001 年就报道了他们单探测器双波段成像验证样机的研究成果。该样机采用洛克希德马丁公司研制的中

长波量子阱探测器，配合一个 100 mm 焦距的双波段光学系统，并采用在双探测器双波段成像技术中验证过的彩色融合算法。美国陆军和洛马公司组织了大量图像采集试验，对坦克、卡车、直升机等陆军主要军用目标进行了双波段图像采集。如图 4^[13]所示，从左到右依次为中波、长波和融合图像。

美国陆军夜视和电子传感委员会、RVS（雷神视觉系统）公司和 OASYS 公司等 2008 年报道了他们第三代热像仪验证样机的成果。样机采用 RVS 公司研制的 640×512 碲镉汞中长波双波段探测器，该探测器采用了最新的可变冷屏光阑杜瓦，并结合 OASYS 公司研制的变 F 数双波段光学系统。基于该验证样机，美国军方对中长双波段红外成像的优点、变 F 数光学结合双波段的优势以及中长波如何实现优势互补等方面的问题进行了研究和验证。图 5^[14]所示是用该样机采集的图像，左侧为中波，右侧为长波。

表 2 国外各机构中长波双波段探测器

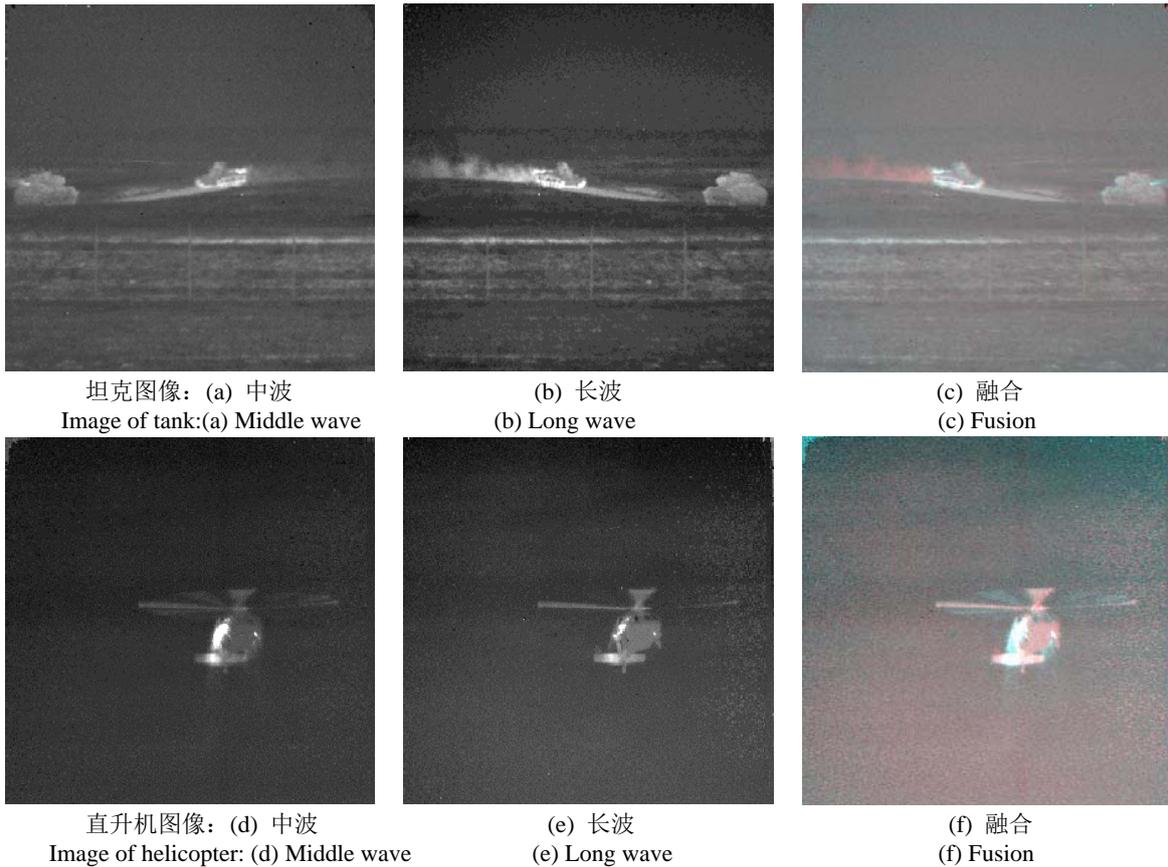
Organization	Array	Pixel/μm	Band	Readout mode	NETD/mK
RVS	1280×720	20	MW/LW	division	MW:27 LW:39
	640×512	40	MW/LW	division	MW:18 LW:27
Sofradir	640×512	20/24	MW/LW	synchronize	MW:18 LW:25
AIM	640×512	20	MW/LW	synchronize	MW:18 LW:25
SELEX	860×480	20	MW/LW	division	MW:24 LW:33

Table 2 Dual-band detectors in occident

表 3 国外典型单探测器中长波双波段红外成像系统

Table 3 Single-detector middle and long wave dual-band infrared imaging systems in occident

System	Organization	Fov /Focal length	F number	Band/ μm	Array	Pixel/ μm	Year
Dual-band imager with a QWIP array	US Army	5.86°	F3	4.7-5.4	256×256	40	2001
	Lockheed-Martin			8.4-9.0			
Dual-band radiometer for temperature measure	US Air Force	0.72°	F7	4.4-5.1	320×240	40	2006
	Voxtel			8.0-9.1			
Dual-band camera with advanced image process	IRCAM	50 mm/86 mm	F2	4.3-5.0	384×288	40	2007
	AIM	100mm/390 mm		7.5-9.3			
3rd Generation FLIR demonstrator	US Army	13.8°,6.6°	F3/F6	3.6-5.3	1280×720	20	2008
	RVS	2.5°,1.2°		7.8-9.4	640×512		
	OASYS						
Dual-band camera with QWIP dual-band array	Thales	-	-	4.3-5.0	384×288	25	2012
	Sofradir			8.0-8.7			
Robust dual-band infrared target tracking with a dual-band camera	US Army	50 mm	F2.3	4.7-5.4	256×256	-	2014
	University of Oklahoma			8.4-9.0			
Comparative performance of middle and long wave infrared system	Aviation and	234 mm	F2.3	3.6-5.3	1280×720	12	2015
	Missile Research Engineering Center			7.8-9.4			



坦克图像: (a) 中波
Image of tank: (a) Middle wave

(b) 长波
(b) Long wave

(c) 融合
(c) Fusion

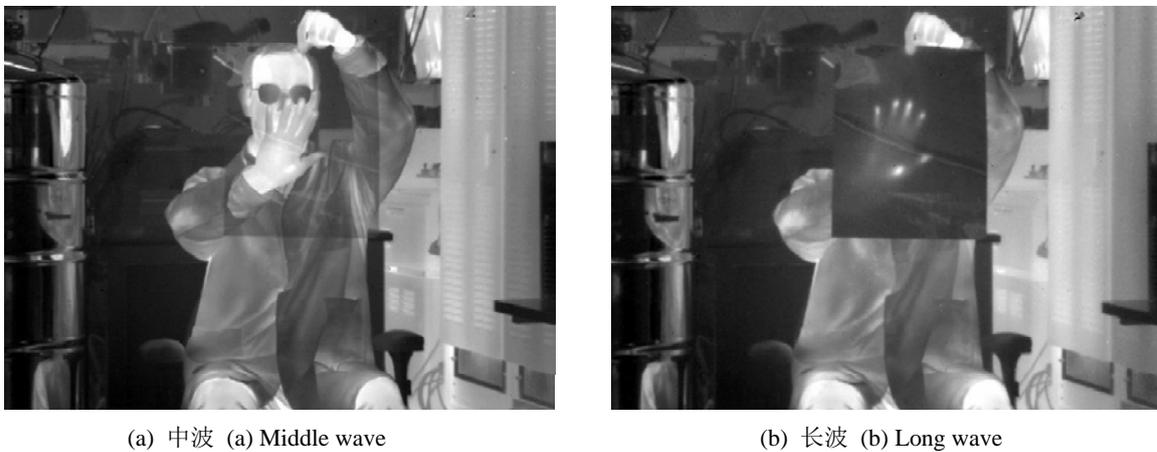
直升机图像: (d) 中波
Image of helicopter: (d) Middle wave

(e) 长波
(e) Long wave

(f) 融合
(f) Fusion

图 4 单探测器双波段红外成像设备采集的军用目标双波段图像

Fig.4 Dual-band images of military targets using a single-detector imaging system



(a) 中波 (a) Middle wave

(b) 长波 (b) Long wave

图 5 美国第三代热像仪样机采集的双波段图像

Fig.5 Dual-band images using the 3rd generation FLIR demonstrator of America

此外,美国的 FLIR、Voxtel、QmagiQ 等公司以及一些大学和研究所也都在军方的支持下开发了相关的系统和应用技术。德国 IRCAM 公司、AIM 公司在 2008 年报道了他们的双波段成像系统及先进的双波段图像处理技术,该系统采用了图像细节动态增强、彩色融合以及拼接技术对双波段图像进行处理,获得了高分辨率的彩色图像,具有出色的视觉效果。

1.4 三种中长双波段成像技术的比较

双探测器双波段成像技术通常采用两个单波段

探测器,配合两个分离的光学系统或者一个共口径分光路光学系统实现双波段成像。在双波段探测器技术尚不够成熟的时期,是双波段成像的重要技术方向,可以利用单波段探测器分辨率较高、灵敏度较强的优点,获得较高质量的图像。这种方案很大程度上相当于采用了两个单波段的成像系统,存在体积重量比较大,总体成本也比较高的缺点。同时由于采用分离光学系统或者分光路的形式,所获取的成像场景不能完全一致,所以必须先进行图像配准再进行图像融合,

需要更复杂的图像处理架构，而且由于配准精度的限制，往往存在由于图像失配导致的景物重影。

双线列双波段成像技术利用线列探测器的制造技术，避免了生长叠层材料的困难，可以采用共光路双波段光学系统，能够同时获得几乎完全相同视场的双波段图像，具有单探测器体积、重量小的特点，相对成本更低。由于采用光机扫描成像技术，这种方案具有可以通过机械扫描提高图像分辨率的优点，同时也存在光机稳定性相对较差、扫描机构驱动控制较复杂的缺点。

单探测器双波段成像技术，基于能够同时响应两个波段辐射的双波段探测器，配合能够同时透过两个波段辐射的共光路光学系统实现双波段成像。这种方案对探测器相关的材料制备、器件设计、读出电路等技术以及光学系统相关的像差优化、加工镀膜等技术都有更高的要求，其具有的优势也是显而易见的，更简单的构成带来更小的体积、更低的成本和更高的稳定性，同时不需要额外的图像配准和扫描机构控制技术。此外，由于探测器材料响应特性，一般会存在少量的光谱串音。

从发展历史和趋势来看，尽管各国双波段成像技术进展各有不同，以至于同一时期3种成像技术都有相关文献报道，但是3种技术的发展存在一定的先后顺序。早期由于双波段探测器尚未研制出来，最先出现的是双探测器双波段成像技术。随着双波段探测器的面世，单探测器双波段成像技术发展迅速，同时限于双波段探测器面阵不够成熟，存在3种技术共同发展的局面。目前，随着大面阵、小像元双波段探测器发展和成熟，双探测器双波段成像技术和双线列双波段成像技术的优势逐渐被抵消，单探测器双波段成像技术成为双波段成像技术的主流方向，其他两种技术则在一些特别的应用场景中存在。

2 中长波双波段红外成像技术的应用

在进行中长波双波段红外成像技术开发的同时，国外主要国家也对其应用进行了不同程度的研究。目

前，该技术的应用主要有3个方向：一是利用中长波优势互补，提高各类主战装备对不同的作战环境的适应能力，提高装备面对各种不同作战任务的成功率；二是利用各类目标在两个波段不同的辐射信息，提高各类搜索跟踪识别系统对目标的探测识别成功率；三是通过中长波双波段红外成像技术获取目标的温度、光谱特性等特征信息，可用于反诱饵、反干扰、反伪装。

2.1 提高对复杂环境的适应能力

美国相关机构在其关于第三代热像仪验证样机的报道中，对双波段成像技术的特点以及如何发挥其优势进行了分析论证。双波段成像技术最大的优势在于能够同时获得两个波段的辐射信息，这带来的最大效益在于提升装备的全天候适应性以及面对战场伪装的操作灵活性。双波段成像技术带来的效能增加通常不是来源于灵敏度的简单提升，而是由双波段探测带来的适应性和灵活性进一步提升作战任务的整体成功率，充分发挥其优势的关键在于将双波段焦平面与先进的光学技术和信号处理技术结合。而随着长波像元接近并超过衍射极限，可以利用中波来弥补长波分辨能力不足的双波段成像技术，在地面应用中将体现出相比长波单波段更大的优势。

国外对双波段成像技术的应用，最主要的方向就是依据上述思路，根据不同的作战环境和作战任务，合理利用中波分辨率高和长波探测灵敏度高的特点，发挥最大效能。此外，采用彩色图像融合技术，获取视觉效果更佳、信息更丰富、更适于人眼观看的彩色图像用于目视观察和瞄准，图6所示是德国采用先进双波段图像处理技术获取的彩色融合图像^[21-22]。

2.2 提高搜索跟踪系统对目标的探测识别成功率

利用双波段成像技术，能够采集到关于目标更多的红外图像信息。更多的信息必然能够提高目标探测识别算法的成功率。这是国外双波段成像技术针对目标自动识别的重要应用方向，随着未来装备进一步自动化和智能化，将更加体现该技术的优势。



图6 先进双波段图像处理技术采集的图像

Fig.6 Dual-band IR image from camera with advanced image process ability

美国陆军早在1999年以前就采集了大量的主要军事目标的中长波图像，基于主流的自动识别算法，对中波、长波、中长波简单叠加以及中长波特殊融合几种情况，进行了识别成功率的对比研究。结果表明，采用中长波特殊融合的图像进行自动识别，可以在更少的样本数据、更短的时间内，让识别成功率有显著的提升。美国海军基于所开发的双线列双波段成像系统，采用目标信息融合的方法，有效地提高了探测识别的成功率^[23-25]。

意大利海军和SELEX公司在2008年对静默发现和监控系统的报道文章中，通过理论推导，证明了采用双波段图像能够提高探测率，且使跟踪精度翻倍。相关机构组织了对各种海事目标的测试试验，以验证该系统所采用图像融合技术和基于双波段图像的搜索跟踪算法的效果。试验结果表明采用该双波段成像系统能够有效提高探测率，降低虚警率和建立跟踪的时间。图7^[2]所示为意大利海军用静默发现和监控系统进行识别跟踪试验的图像，上面是中波，下面是长波。

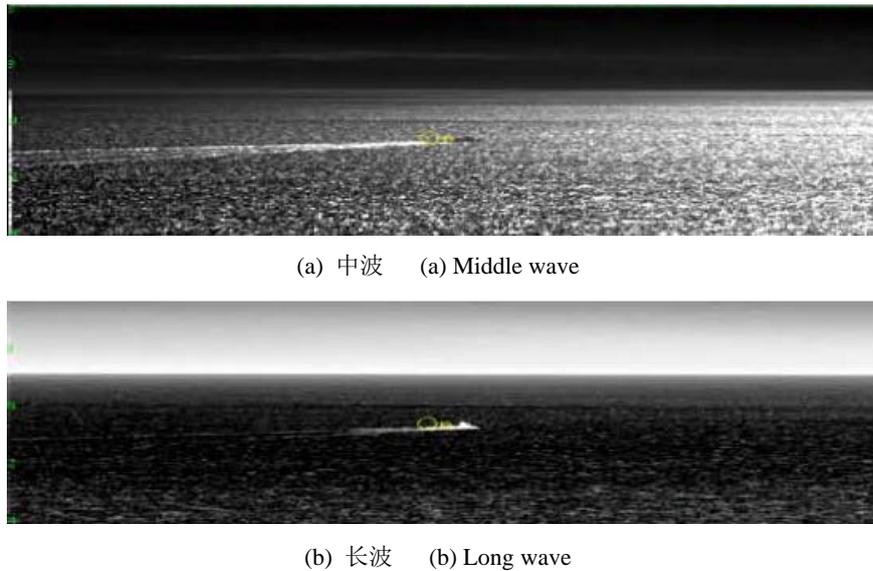


图7 静默发现和监控系统进行识别跟踪试验的图像

Fig.7 Images from target track test of the silent acquisition and surveillance system

2.3 获取目标温度、光谱特性等特征信息

从目前的公开文献来看，大多涉及双波段成像技术应用方面的报道都跟美国有关，这也反应出美国在相关技术领域的领先优势。除了上述应用，双波段成像技术的另一个重要应用方向就是对双波段图像信息进行深度提取，进一步获取关于目标的温度、发射率、光谱特性等方面的特征信息。这些信息有助于进一步判别目标的类型、材料等等，在反伪装、反干扰、反诱饵等方面有重要的应用潜力^[26-28]。

美国空军研究实验室基于中长波双波段成像设备开发了一种绝对温度测量技术，测温精度达到1℃，所用热像仪采用320×240量子阱中长波探测器，像元大小40μm。美国海军和加拿大ABB公司联合开发的图像傅里叶变换光谱辐射探测设备，采用两个不同波段的传感器获取图像，并进行光谱信息分析。可以用于分析气体、物质的光谱信息，对物体进行初步的分辨。

3 结束语

从目前的公开文献可以看到，在研制出双波段

探测器之前，国外通过采用双探测器或者双线列探测器的方案，对中长波双波段红外成像技术进行了研究，在双波段图像融合、双波段图像跟踪等方面进行了验证。

美国、德国、法国、英国等国家都相继研制出了双波段探测器，结合前期积累的技术基础，很快就开发出双波段成像系统，进一步支撑了双波段成像应用技术的研究。近年来，双波段成像技术领域的文献逐渐减少，且主要集中在小像元、大面阵、新材料双波段探测器方面。这也说明国外相关机构在之前就对相关的整机系统技术、应用技术进行了较充分的研究。可以预见，未来双波段成像技术也将走上和单波段类似的更高分辨率、更灵敏、更低的成本和功耗、更小体积、更强大的图像处理能力的发展路径。

参考文献：

- [1] Schreer O, López Sáenz M, Peppermüller Ch, et al. Helicopter-borne dual-band dual-FPA system[C]//Proceedings of SPIE, 2003, 5074: 637-647.
- [2] De Ceglie S U, Moro M Lo, Vita R, et al. SASS a bi-spectral panoramic

- IRST-results from measurement campaigns with the Italian navy[C]//*Proceedings of SPIE*, 2010, **7660**: 1-13.
- [3] Pollehn H, Ahearn J. Multi-Domain Smart Sensors[C]//*Proceedings of the SPIE*, 1999, **3698**: 420-426.
- [4] Florent Prel, Louis Moreau, Hugo Lavoie, et al. Infrared signature measurements with the ABB dual-band hyperspectral imager[C]//*Proceedings of SPIE*, 2012, **8355**: 83550W.
- [5] Michael Michelizzi, Kevin Cox. Image fusion with multiband linear arrays[C]//2008 37th IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2008: 1-8(DOI:10.1109/AIPR.2008.4906454).
- [6] Wilson J A, Patten B A, Chapman G R, et al. Integrated two-color detection for advanced FPA applications[C]//*Proceedings of SPIE*, 1994, **2274**: 117-125.
- [7] King D F, Radford W A, Patten E A, et al. 3(rd)-generation 1280x720 FPA development status at Raytheon Vision Systems[C]//*Proceedings of SPIE*, 2006, **6206**: 1-15.
- [8] Abbott P, Thorne P M, Arthurs C P, et al. Latest detector developments with HgCdTe grown by MOVPE on GaAs substrates[C]//*Proceedings of SPIE*, 2011, **8012**: 1-11.
- [9] Figgemeier H, Wenisch J, Eich D, et al. MCT by MBE on GaAs at AIM state of the art and roadmap[C]//*Proceedings of SPIE*, 2015, **9451**: 1-10.
- [10] Boulard F, Marmonier F, Grangier C, et al. General review of multispectral cooled IR development at CEA-Leti, France latest improvements on long wave p on n HgCdTe technology at Sofradir[C]//*Proceedings of SPIE*, 2017, **10177**: 1-8.
- [11] Rogalski A. Next decade in infrared detectors[C]//*Proceedings of SPIE*, 2017, **10433**: 1-25.
- [12] Pierre-Yves Delaunay, Brett Z. Nosh, Alexander R, et al. Advances in III-V based dual-band MWIR/LWIR FPAs at HRL[C]//*Proceedings of SPIE*, 2017, **10177**: 1-12.
- [13] Goldberg A, Fischer T, Kennerly S. Dual-Band Imaging of Military Targets Using a QWIP Focal Plane Array[R/OL]. [2001-01-01]. <https://www.ixueshu.com/document/6305108bbce466d4318947a18e7f9386.html>.
- [14] Donald F King, Jason S Graham, Adam M Kennedy, et al. 3rd-generation MW/LWIR sensor engine for advanced tactical systems[C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, **6940**: 1-12.
- [15] Jay Vizgaitis, Jason Miller, John Hallb, et al. 3rd Generation FLIR demonstrator[C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, **6940**: 1-10.
- [16] Münzberg M, Breiter R, Cabanski W, et al. Dual color IR detection modules, trends and applications[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, **6542**: 1-8.
- [17] Oliver Schreer, Mónica López Sáenz, Christian Peppermüller, et al. Dual-band camera system with advanced image processing capability[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, **6542**: 1-7.
- [18] Markus Müller, Oliver Schreer, Mónica López Sáenz, et al. Real-time image processing and fusion for a new high-speed dual-band infrared camera[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, **6543**: 1-9.
- [19] Adomeit U, Ebert R. IR-dual-band-camera demonstrator experimental assessment-practical applications[C]//*Proceedings of SPIE*, 2007, **6737**: 1-11.
- [20] Bois P, Guériaux V, Brière de l'Isle N, et al. QWIP status and future trends at Thales[C]//*Proceedings of SPIE*, 2012, **8268**: 1-11.
- [21] Adomeit U, Ebert R. Improved target detection by IR dual-band image fusion[C]//*Proceedings of SPIE*, 2009, **7481**: 1-8.
- [22] Edward M Burdette, James R Teague, Christopher L Dobbins, et al. Comparative performance of large-format MWIR and LWIR systems in NV-IPM[C]//*Proceedings of SPIE*, 2015, **9452**: 1-9.
- [23] Breiter R, Cabanski W, Mauk K H, et al. Multicolor and dual-band IR camera for missile warning and automatic target recognition[C]//*Proceedings of SPIE*, 2002, **4718**: 280-288.
- [24] Lipchen Alex Chan, Sandor Z. Der, Nasser M. Nasrabadi, et al. Dual-band FLIR fusion for target detection[C]//*Proceedings of SPIE*, 2002, **4668**: 108-118.
- [25] Chuong T. Nguyen, Joseph P. Havlicek, Fan Guoliang, et al. Robust dual-band MWIR/LWIR infrared target tracking[C]//*Proceedings of IEEE*, 2014: DOI: 10.1109/ACSSC.2014.7094401.
- [26] George M W, Archie B. Dual-Band MWIR/LWIR Radiometer for absolute temperature measurements[C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, **6205**: 1-13.
- [27] Brian P Beecken, Paul D LeVan, Cory Lindh, et al. Progress on characterization of a dualband IR imaging spectrometer[C]//*Proceedings of SPIE*, 2008, **6940**: 1-9.
- [28] Florent Prel, Louis Moreau, Stéphane Lantagne, et al. MR-i dual band MWIR imaging FTS[C]//*Proceedings of SPIE*, 2011, **8014**: 1-10.