

〈综述与评论〉

从单波段到超光谱 ——面向多维信息感知的红外光谱成像技术

张若岚, 陈洁

(昆明物理研究所, 昆明 650223)

摘要: 从单一波段红外成像探测的截止波长及单波段探测的局限性讨论开始, 介绍了红外光谱成像的基本概念, 阐述了多色、多光谱、高光谱、超光谱成像在军事应用领域的用途和意义, 并介绍了多通道、多色传感器及分光等实现光谱成像的技术手段以及国外发展情况, 讨论了该领域的未来发展趋势。

关键词: 红外成像; 光谱成像; 多光谱; 高光谱; 超光谱

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)04-0257-08

From Single-Band to Ultraspectral——Infrared Spectral Imaging Technology Oriented to Multi-Dimension Information Awareness

ZHANG Ruo-lan, CHEN Jie

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: In this paper, it begins with discussion about cutoff wavelength of thermal imaging detection and limitation of single-band detection. Fundamental concepts of infrared spectral imaging are introduced. The importance of multicolor, multispectral, hyperspectral and ultraspectral imaging applied in military range is described. Technology and international developing status of spectral imaging are introduced as well, including multi-channel, multicolor sensor and beam splitting etc. In the end, the future developing trend is discussed.

Key words: infrared imaging, spectral imaging, multispectral, hyperspectral, ultraspectral

0 引言

红外成像探测在军事领域应用十分广泛, 其中大多数的常规应用基本上都是基于某红外波段的信号强度来建立的图像输出, 而忽略了电磁波信号除振幅之外的其他参数所包含的大量信息(如波长、偏振态等), 利用光谱成像技术把这些信息加以综合利用可以大幅增强图像的可读性, 从而有效提高对目标的辨识能力及作用距离。

本文主要讨论军用红外成像应用中的多色、多光谱、高光谱及超光谱成像概念、军事应用、成像方式、发展情况和未来发展趋势等^[1]。

1 谱与谱成像

1.1 从单波段说起

经常耳闻从事光电成像应用领域的技术人员有类似的如下认识: 红外探测器的响应波段应该越宽越好, 因为进入光学系统的能量会越多, 探测距离也就越远。这一认知乍听上去很有道理, 但实际上远不是这么回事。对于红外成像应用, 不止要关心接收到的辐射强度, 最重要的一点是对目标的辨识是通过目标与背景的对比度来实现的(比较优势), 响应带宽设置比较宽的话, 目标的能量是增多了, 但有可能背景增加的能量更多, 反而导致对比度下降而不容易识别目标。简单举个例子, 假如存在一个全谱探测器, 可以响应所有波长的信号, 且不同波长的响应率都相同, 那该探测器输出的图像会是什么样子? 恐怕即便能分辨出目标, 也是淹没在

一片噪声当中,全谱也就变成了“没谱”。

不少人都以为很多红外探测器之所以不能在更宽的波段上响应(如法国 Sofradir 公司的长波探测器的响应波段是 $7.7\sim10.3\text{ }\mu\text{m}$)是因为探测器的性能做不上去,其实如军事应用较多的碲镉汞探测器,其后截止波长在一定范围内可根据需要调整材料组分来进行相应的设定(暂不讨论因此而带来的工艺上的难度差别),其前截止波长是由杜瓦滤光片限制的,器件到底工作在哪一个具体响应波段,更重要的决定因素是要根据应用所针对的目标和背景的红外辐射特性以及大气传输特性来确定,而不是越宽越好。波段过窄确实会带来能量减少的问题,但波段过宽有可能会让不必要的背景杂波进入画面,反而导致图像杂乱,对比度下降,更不容易识别目标。

图 1 是 $280\sim320\text{ K}$ 温度的全辐射曲线,假设目标温度为 310 K ,背景温度为 300 K ,单从目标背景对比度计算,全频段的对比度为: $C_{0\sim\infty}\approx0.0065$;中波波段的对比度为: $C_{3\sim5}\approx0.17413$;长波波段的对比度为: $C_{8\sim12}\approx0.07911$ 。由此可看出,即便仅从能量的角度来看,全频段的对比度反而更差,而真实场景的红外辐射情况会更复杂^[1]。

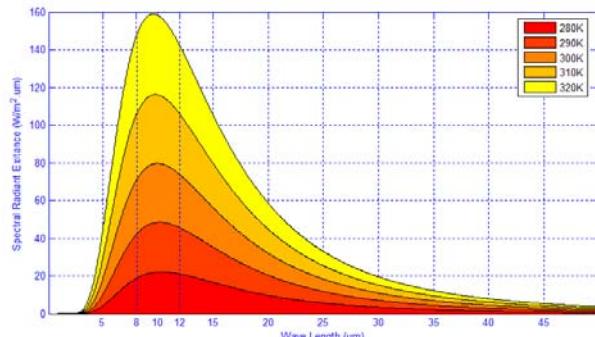


图 1 全辐射曲线

Fig.1 Curves of Total Radiation

法国 Sofradir 公司可以提供的货架产品中有超长波制冷器件 MARS VLW (器件后截止到 $11.5\text{ }\mu\text{m}$ 以上),并且目前正在研发可以响应从可见光到红外波段的宽波段碲镉汞器件,这类探测器多是提供多光谱或超光谱应用的,如果将其应用于单一波段成像,其效果可能反倒不如窄波段器件,但通过适当的技术手段将单一波段细分成若干个子波段进行多光谱成像,就会极大的提高对目标的探测、识别效率。

由上述分析可以看出,对于特定的应用领域,在某些细分的窄光谱带内,也许目标背景的对比度反而比宽光谱带下更好。

1.2 光谱成像概念

光谱成像是将成像技术和光谱技术相结合的多

维信息获取技术^[2],其实质是将电磁波进行波长细分,在不同的波长段进行成像,可同时探测目标的二维几何空间与一维光谱信息。不同波长的电磁波如图 2 所示,严格来说只要有合适的探测手段,任何波长的电磁波都可以被成像,但通常意义上说的光电成像主要包括可见光波段和红外波段。

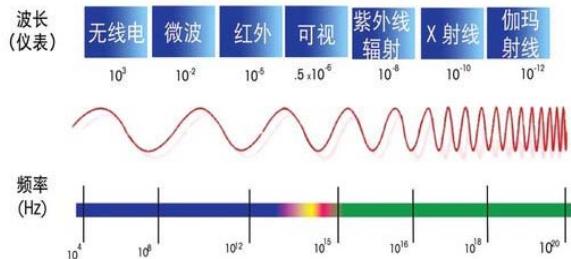


图 2 不同波长的电磁波
Fig.2 Electromagnetic wave with different wavelengths

广义上讲,单波段红外成像也可以称为光谱成像,它是在该红外谱段上的成像。再细分下去,如果在目前军事应用较广的短波、中波或长波中的两个以上波段同时成像,可叫多色或多波段成像,在上述波段内再持续细分成像。通常根据传感器的光谱分辨率对光谱成像技术进行分类,一般分为 3 类,分别是:多光谱成像、高光谱成像和超光谱成像技术。定义如下:

- 1) 多光谱 multispectral——光谱分辨率 $\Delta\lambda/\lambda=0.1$ 左右;
- 2) 高光谱 hyperspectral—— $\Delta\lambda/\lambda=0.01$ 左右;
- 3) 超光谱成像 ultraspectral—— $\Delta\lambda/\lambda=0.001$ 左右。

可简单地将光谱成像理解为对景物的反射、发射出的电磁波按光谱切片成像。多光谱、高光谱和超光谱成像技术不同于传统的单一的宽波段成像技术的地方在于,它将成像技术和光谱测量技术相结合,获取的信息不仅包括二维空间信息,还包含随波长分布的光谱辐射信息,形成所谓的“数据立方”,如图 3 所示^[3]。

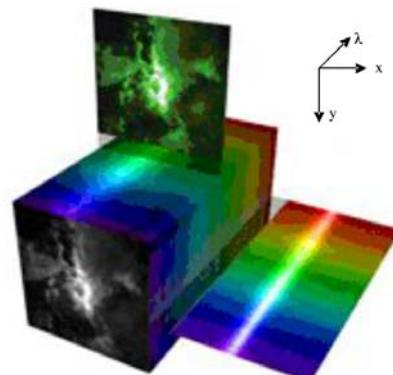


图 3 光谱成像示意图
Fig.3 Diagram of spectral imaging

表1分析比较了高光谱和超光谱成像与传统光谱的区别,可以看出,前者具有波段数更多,光谱分辨率更高,图谱合一,通道连续等特点,丰富的目标光谱信息结合目标空间影像极大提高了目标探测的准确性,扩展了传统红外成像探测技术的信息量和功能。

表1 传统光谱与高、超光谱成像比较

Table 1 Comparison between traditional spectrum and hyperspectral, ultraspectral imaging

	传统光谱	高、超光谱
波段数	少	非常多
光谱分辨率	>100 nm	10 nm 或 1 nm 量级
图谱	分离	合一
通道连续性	不连续	连续性

为阐述方便,本文将多色、多光谱、高光谱和超光谱成像一并统称为光谱成像。

1.3 光谱成像的意义与用途

图4是一个简单的例子,左图是4个不同颜色的长方块(代表了不同的波长),如果转换成右图的灰度图(只有幅度信息,没有波长信息),由于没有反映颜色特征,所以基本无法分辨出4个方块之间的区别。



图4 彩图与灰度图的对比

Fig.4 Contrast between colorful and grey picture

在20世纪90年代初的第一次海湾战争中,美军发现很难探测到处于沙漠热背景中伪装的“飞毛腿”导弹发射车、坦克等军事目标。工作于单一宽波段的红外探测器经常会受到背景的热杂波信号干扰,并且在昼夜、夜昼交替的两个温度变化的时刻,目标和背景的宽波段辐射探测信号差异基本为零,处于不可用状态。

针对此类问题,美军提出了热红外($3\sim12\mu\text{m}$)波段多光谱探测的概念,由空军、海军、陆军和国防部高级计划署等部门联合启动了“联合多光谱计划(JMSP)”,随后展开了一系列试验研究,通过对目标、背景的光谱特征数据的综合分析,确定中心波长为 $8.7\mu\text{m}$ 、 $9.15\mu\text{m}$ 、 $9.35\mu\text{m}$,具有 $200\mu\text{m}$ 带宽的3个波段为热红外探测的最佳组合波段。在这

几个波段探测,可以将绝大多数目标正确区分。这3个波段已成为推荐的机载前视红外(FLIR)系统的探测波段^[4]。

上述试验推动了多波段、多光谱成像研究,既包括拓宽光谱波段,也包括把光谱波段划分为更细致的波段,以获得目标的“彩色”热图像,从而更精确和更可靠地获取目标更丰富的图谱信息。

红外光谱成像在军事上主要有两大用途:一类应用是图为主,谱为辅,另一类是谱为主,图为辅。

第一类应用是通过细分的每个谱图的空间二维信息进行图像解读,如用于侦查,可识别伪装;用于探测、瞄准,可提高识别概率;用于制导,可提高抗干扰性;用于光电对抗,可降低虚警率。这类用途的重点在图,以谱帮助对图的判别,主要是针对目标和背景的辐射对比度来进行目标探测和识别的,利用不同波段间背景的高相关性来抑制杂波、提高信噪比,因此需要针对特定的目标进行谱段的划分和带宽的选择。美国就曾经因为作战环境从主要以植被为背景转为中东的沙漠背景,专门做过典型目标在沙漠中的红外辐射特性试验,并将其实验数据补充到专门的辐射特性库中,作为选择红外热像仪配置的依据^[5]。这类成像设备,既可以作为研究典型目标背景红外辐射特性的工具,也可以作为装备应用于侦查、瞄准、制导、光电对抗等军事应用领域。

下面是几个典型的多波段或多光谱实际比对例子,图5将中波红外细分两个波段分别成像^[6],可以看到两幅图像在背景及目标细节方面有很大差别,双色成像有利于对目标的识别;图6所示为对同一景物分别用微光、短波红外、中波红外、长波红外成像,最后通过彩色图像融合的图像,可以看出上述4个波段的图像有很大差别,通过将图像进行一定策略的融合后,整幅图像的信息量有很大提高;图7是一个多光谱例子,在 $2\sim5.5\mu\text{m}$ 的波长范围内细分了11个子带,并同时对打火机火焰进行成像($G_1\sim G_{11}$),左上角是对整个响应频段成的像,从图中可以看出打火机火焰的红外辐射主要是由 G_8 频段贡献的,类似试验可确定导弹尾焰的红外辐射特征,从而将光谱成像应用于天基导弹告警^[7]。

光谱成像的另一个用途是对目标的连续谱进行谱分析,从而对目标的性质甚至是成分进行分析(可用于遥感、遥测、探雷以及化学毒剂的非接触性探测等),其重点在谱,对图里目标的谱进行分析判别,如图7所示,这一类用途由于要进行固体或气体的发射或吸收光谱的谱分析和特征鉴别,所以要求的

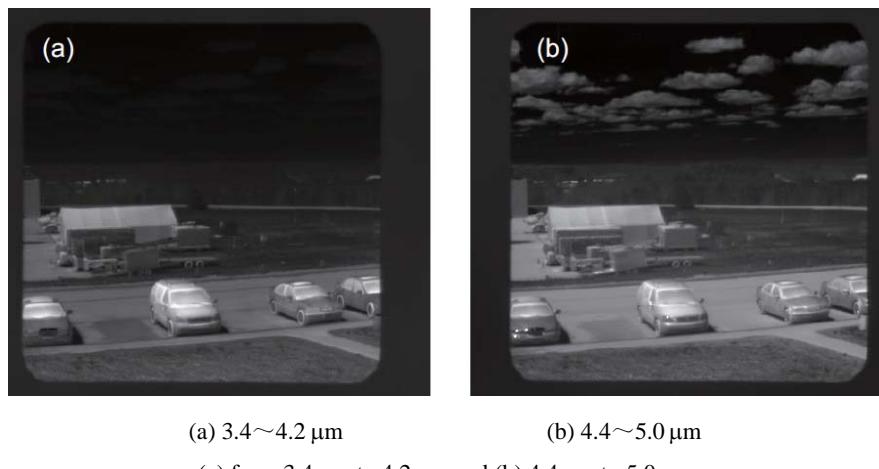


图5 中波的红外细分比对

Fig.5 Spectral images emulating a dual band staring camera, obtained by summing spectral channel images

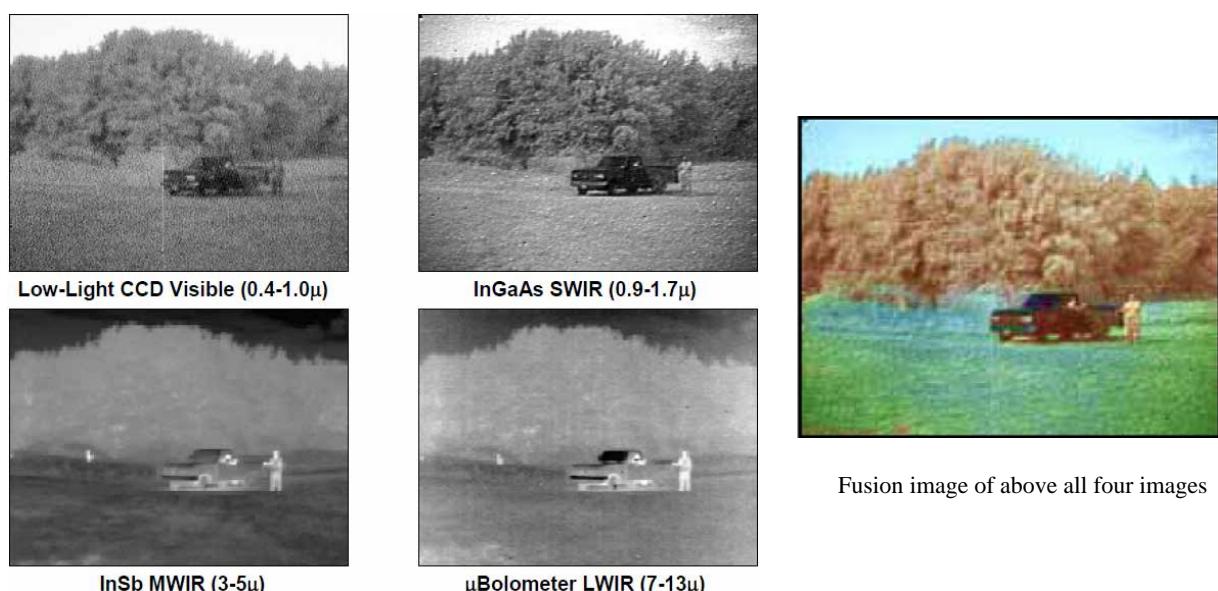


图6 不同波段成像

Fig.6 Different band imaging

光谱分辨率较高，在数微米的波段范围内通常需要细分几十甚至几百个波段来进行谱识别。

图8是一个光谱探雷的例子，通过大量试验和理论分析表明，松动的土壤（土壤松动的原因可能是因为埋雷）和未松动的土壤在其发射光谱的不同波段上有明显差别，通过光谱比对就可发现埋雷的地方^[8]。

很多气体都有典型的红外吸收和发射谱，通过将测量的实际光谱与参考光谱进行比对就能分析出是否含有典型气体成分。图9是加拿大Telops公司的红外成像光谱仪实拍的探测TEF气体的图片，谱的探测和气体特征识别基本是实时进行的^[9]。

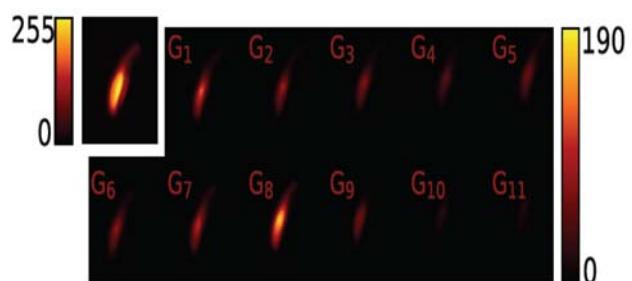


图7 多光谱图像比对

Fig.7 Contrast between multispectral images

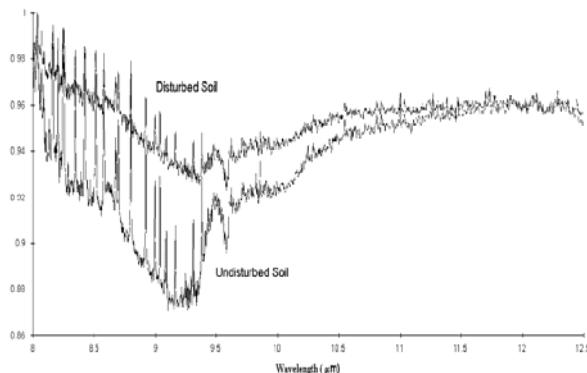


图 8 松动过的土壤和未松动过的土壤的红外发射谱

Fig.8 Infrared emission spectrum of loosened and not loosened soil

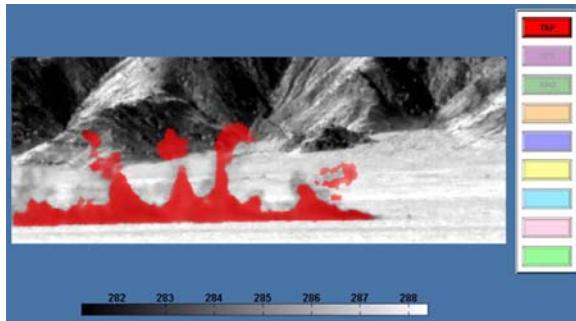


图 9 TEF 气体实时探测

Fig.9 Real-time detection of TEF gas

综上所述,光谱成像探测技术在军事上主要可应用于多光谱融合探测侦察、遥感防御告警、智能导弹导引、地雷探测、毁伤效果评估和弹道导弹助推段分辨等。

2 光谱成像实现

光谱成像的实现主要有3种方式:多通道、多色器件和分光方式。

2.1 多通道成像

多通道成像的本质其实就是通过多台不同波段的成像设备或共孔径分光路多探测器成像设备进行各波段分别成像,由于此方式实现成本比较高,设备体积较大,因此基本只能实现几个波段的成像。图10是一个四波段成像装置,图6中的图像就是采用该设备拍摄而得。由于多波段图像同时输出,如果用人眼判读反应时间较长,且短时间内很难把有些特征综合,因此通常选择在后期进行图像融合,关键点是不同图像间的像素空间配准和图像融合策略,如果融合的不好,反而会导致降低图像的分辨率和信息量^[10]。

2.2 多色器件成像

其实大家最熟悉也是最普通的光谱成像装置是

人的眼睛。人眼与普通的光电成像系统(摄像机或热像仪)在结构上大体相同,其基本组成如图11所示。图中括号内是光电成像系统与之相对应的部件名称^[11]。

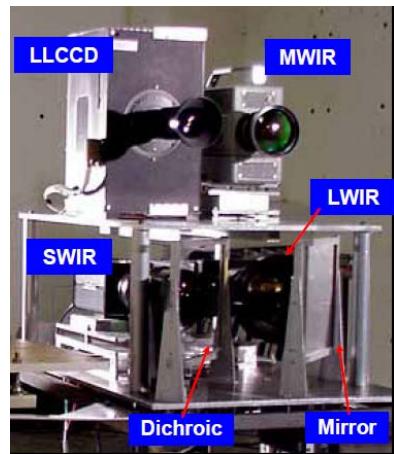


图 10 四波段成像装置

Fig.10 Imaging equipment with four bands

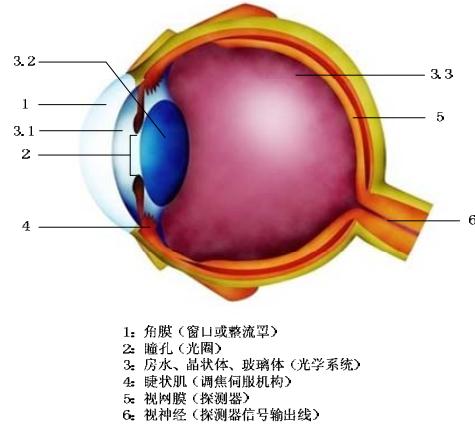


图 11 人眼基本组成示意图

Fig.11 Diagram of human eye structure

尽管从结构上看人眼与普通的热像仪大致相似,除了人眼敏感可见光而热像仪敏感红外信号外看上去两者并没有大的区别,但实质上两者有个重要区别在于人眼可同时对色度(即波长)和亮度(即振幅)敏感,而普通热像仪只对某个波段的红外信号幅度敏感,并不能进行颜色的细分,这其中源于人眼视网膜上有感受强光和颜色的视锥细胞,使得人脑可对不同波长的光线进行颜色合成,因此人眼实质上是一台光谱成像设备,真正实现了“图谱合一”,而普通热像仪只是对某一波段范围的红外辐射进行成像,两者之间差别很大。

从单一谱段的光电成像扩展到多谱段的光电成像有很大好处,同样可以拿人眼举例说明。人眼视网膜存在两种感光细胞:视锥细胞和视杆细胞,白天靠敏感强光和颜色的视锥细胞进行目标分辨,由

于白天工作在“图谱合一”的状态，可以分辨出五颜六色的各种物体，因此白天对景物的辨识能力非常强，而到了晚上主要靠视杆细胞进行目标分辨，该类细胞只对微弱光线敏感，没有色觉，因此人眼在夜间主要工作在类似普通热像仪的“灰度图”的状态下，对景物的辨识能力大大降低（当然也有视杆细胞空间分辨率差的原因，但不能敏感颜色是个很大因素）。

从人眼成像的原理可看出，实现光谱成像最简单的方法就是采用多色探测器。目前国内主要红外探测器研发单位均把多色器件作为研究重点，其中双色探测器已经投入实用，正在研发多色器件，美国 QWIPTECH 公司及 JPL 实验室已研发出四色量子阱器件^[12]，图 12 是该器件的内部结构示意图及成像输出的红外图像。

2.3 分光成像

分光光谱成像是多光谱、超光谱成像的主要方式，是通过各种分光手段将需要的光谱波段细分，分时或同时将入射的红外辐射信号投射到单个探测器上进行光谱成像，典型的分光手段有滤光片方式和干涉方式。

法国 LETI 实验室最近研发出一款紧凑型多光谱红外热像仪^[13]，其技术关键是基于微透镜阵列和

滤光片技术的红外探测器组件，通过 11 个不同谱带的光谱滤光片将入射光分成 11 个光谱通道，再通过微透镜阵列将相应的入射光汇聚到 320×240 面阵的碲镉汞探测器上，其各个子带的频谱分布及滤光片排列示意图如图 13 所示，其中滤光片阵列左下角第一个方块没有滤光片。这样的设计可以在一个红外探测器上实时的得到 12 幅不同谱段的红外图像，如之前图 7 所示。图 14 是多光谱探测器的示意图和实物图^[14]。

国内最新报道成果是据 OFweek 光学网 2014 年 3 月 6 日报道^[14]：日前，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所突破了航天高分辨率高光谱成像关键技术。该技术采用离轴三反非球面光学系统、单晶硅无基底狭缝的视场分离器和复合棱镜分光加非球面准直成像光谱仪的技术方案，实现了全色、可见近红外和短波红外三光路准确分离，保证了系统宽波长覆盖，并实现了高光谱和高空间分辨率、高信噪比，保证了光谱成像质量。同时采用指向镜运动补偿方案，建立了在轨实时计算指向镜运动补偿曲线的数学模型，实现了实时计算和控制，使探测器接收的光能量增加到 4~6 倍，显著提高信噪比，解决了高光谱和高空间分辨率成像的矛盾。

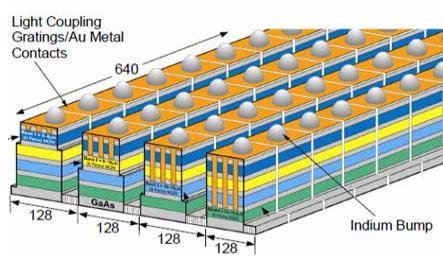
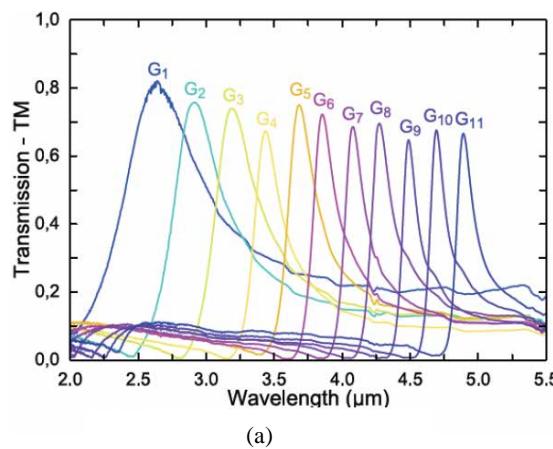
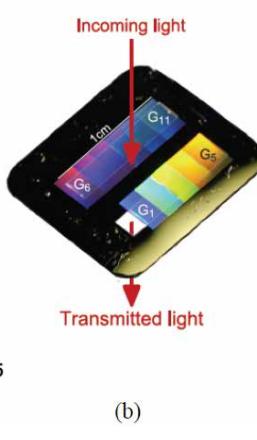


图 12 四色器件及热图

Fig.12 Four-color detector and thermal image



(a) 11 个子带滤光片的透过率谱图



(b) 11 个光谱滤光片排列示意图

图 13 基于滤光片技术的光谱成像

Fig.13 Spectral imaging based on filter technique

另一种应用较广的多光谱成像手段是干涉光谱成像,如傅里叶变换光谱成像。基本原理是通过场景扫描和麦克尔逊干涉仪在红外探测器上形成场景的不同光程差的红外信号干涉图,再进行傅里叶变换既可将干涉图转变为光谱图,图15是干涉光谱成像原理示意图。这类光谱成像的光谱分辨率较高,可用于战场毒剂探测等应用^[15]。

目前,通行的成像光谱仪分类方法有:

- 1) 按成像原理:可分为棱镜/光栅色散型、干涉型、滤光片型、计算机层析、二元光学元件和三维成像等;
- 2) 按成像手段,有线列探测器加光机扫描型、凝视面阵探测器加空间扫描型、光谱扫描型和光谱与空间交叉扫描型等;
- 3) 按空间成像方式,一般分为摆扫型和推扫型。

3 关键技术和未来发展趋势

目前存在于光谱成像探测技术领域的几个关键技术问题和研究热点集中于:

- 1) 高光谱、超光谱成像光谱仪设计。这涵盖了光学、光谱学、精密机械、伺服控制、微电子技术及图像数据处理技术等领域,系统集成复杂;

如图16所示^[16],成像光谱仪较之传统热像仪

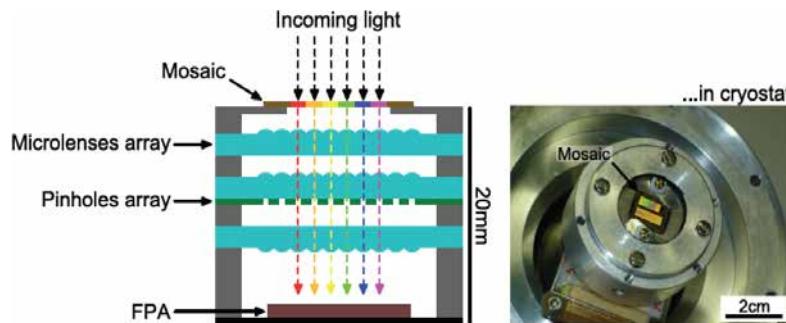


图14 多光谱探测器的示意图和实物图

Fig.14 Diagram and photo of a multi-spectral detector

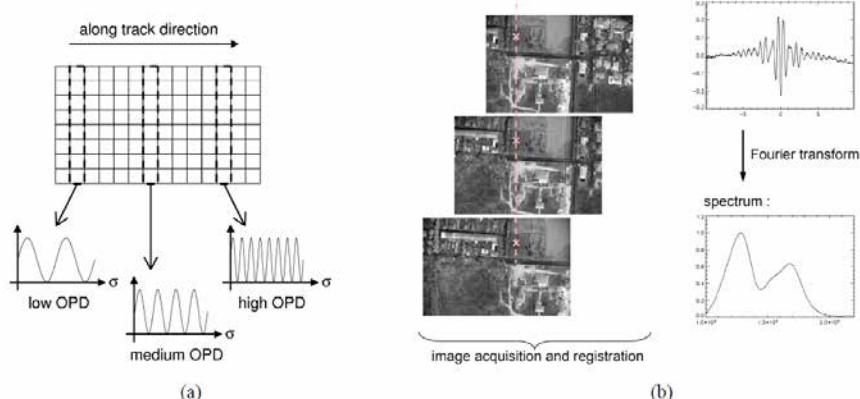


图15 干涉光谱成像原理示意图

Fig.15 Diagram of interference spectral imaging principle

增加了分光部件等,光机电设计复杂度均有提高;

2) 大气传输的校正。要得到真实的光谱辐射信息,必须研究对光谱细分的大气传输模型。目前国内在此领域的积累并不充分;

3) 光谱数据的分析处理。由于光谱细分,必然带来海量数据处理,对现有的信号处理系统的处理速度和数据存储能力都是一个挑战,同时要加强各种算法研究,如多元假设分类算法、相关分析、匹配滤波器、最佳波段选择、亚像素目标判别和神经网络分类等。与该领域的处理硬件发展速度相比,光谱数据软件处理技术略嫌滞后,需要大力加强;

4) 光谱数据库的建立。在有效地运用高光谱、超光谱成像技术探测目标之前,需要对各种特定目标进行光谱特征测定,建立标准目标光谱数据库,这是一个庞大而艰巨的任务。

光谱成像技术可预见的未来发展趋势如下:

- 1) 军事应用将越来越广;
- 2) 对典型目标/背景光谱特性的研究将越来越深入,逐步建立大量标准光谱特征数据库;
- 3) 军事需求和新材料、新技术的应用将促使成像光谱仪朝着高性能、小体积的方向发展;
- 4) 光谱、图像数据处理算法的高效优化、高度实时化将会是一个发展热点方向。

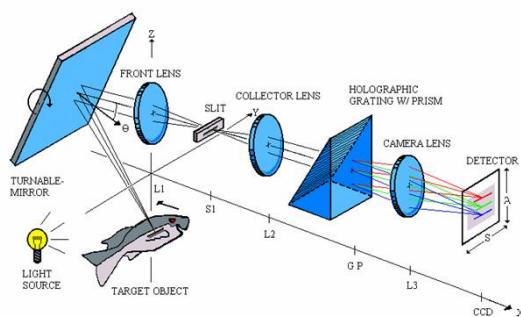


图 16 成像光谱仪组成示意图

Fig.16 Diagram of imaging spectrometer composition

4 结论

多色、多光谱、高光谱和超光谱红外成像将传统二维成像技术与光谱仪技术有机结合，能在获取二维空间几何信息的同时，以高光谱分辨率获取目标的光谱信息，具有超多波段、高光谱分辨率、高空间分辨率的特点^[16]，比多光谱图像包含更高的信息量，在军事应用领域越来越受到重视，不仅可以有效提高对目标的识别概率，降低虚警率，还可识别伪装，且可用于物质的成分分析，对其掌握和运用的程度直接决定战场信息主动权，具有重要的军事意义。

目前国内在典型军事目标及背景的红外辐射特性方面做的基础工作离国外差距较大，在具体装备应用上往往只讨论是单波段还是多波段，是长波还是中波，很少有人会关心到具体截止波长上。这种认识对于常规应用也许问题不大，但对于某些特殊应用，由于缺乏目标特性的相关数据，可能会导致波段选择错误，极大影响装备的使用效率。因此重视光谱成像的研究及应用意义重大。

参考文献：

- [1] 张兵, 高连如. 高光谱图像分类与目标探测[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [2] 许洪, 王向军. 多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1):13-19.
- [3] M T Eismann, J H Seldin. Target detection in desert backgrounds: infrared hyperspectral measurements and analysis [C] //Proc. of SPIE, 1995, 2561: 80-97.
- [4] S D Gunapala, S V Bandara, J K Liu, et al. Large format long-wavelength infrared narrow-band, multi-band, and broad-band QWIP focal plane arrays[C]//Proc. of SPIE, 2004, 5234: 272-286.
- [5] Shepherd F D, Mooney J M, Reeves T E, et al. Adaptive MWIR spectral imaging sensor[C]//Proc. of SPIE, 2008, 7055: 705506-1-705506-8.
- [6] Francesco Branchitta, Marco Romagnoli, Marco Diani, et al. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images[J]. Opt. Eng., 2009, 48(9): 565-70.
- [7] Liu Yuchi, Li Yipeng, Dai Qionghai . High dynamic range fusion for enhanced vision[C]//Proc. of SPIE on Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications IX, 2012, 8360: 83600S.
- [8] V P Shah, N H Younan, R L King. An efficient pansharpening method via a combined PCA approach and contourlets[J]. IEEE trans. Geosci. Rem. Sens., 2008, 46(5): 1323-1335.
- [9] Tony F Chan, Stanley Osher, Shen Jianhong. The Digital TV Filter and Nonlinear Denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 438-442.
- [10] L Rudin, S Osher, E Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. Phys. D, 1992, 60: 259-268.
- [11] Sun Jie, Zhang Qin, Wang Feng, et al. On the generalization of digital total variation filter[C]// Congress on Image and Signal Processing, 2008, 3: 384-388.
- [12] Liu Bin , Wang Xia , Jin Weiqi . Infrared image detail enhancement based on local adaptive gamma correction[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(2): 021002.
- [13] Zhou Jinsong , Wei Ruyi , Li Siyuan , et al., High resolution ultra-rapid-scanning Fourier transform spectrometry[C]//Proc. of Fourier Transform Spectroscopy, Vancouver, Canada: 2009, <http://dx.doi.org/10.1364/FTS.2009.FTuB5>.
- [14] OFweek 光学网. 长光所突破航天高分辨率高光谱成像关键技术 [EB/OL].[2014-03-06] <http://optic.ofweek.com>.
- [15] 许洪. 多光谱、超光谱成像探测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [16] 姚波, 袁立银, 亓洪兴, 等. 双通道成像光谱仪共用离轴三反射光学系统的设计[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 419-424.