

光谱成像技术在海域目标探测中的应用

梅风华^{1*}, 李超¹, 张玉鑫^{2,3}

(1. 海军装备研究院, 上海 200436;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:近年来,随着光谱成像技术的发展,机载成像光谱仪在海域军事目标的侦察中得到了新的应用。基于此,本文首先从高光谱成像仪的基本原理及特性出发,介绍了高光谱成像仪在海洋军事目标探测方面的应用现状。其次,分别从水面目标探测和 underwater 目标探测两方面综合分析了光谱成像技术在海域目标探测中的应用。对于海面目标探测,多项关键技术获得突破,但当前算法仍然难以解决实时性问题;对于水下目标探测,本文主要以水下潜艇探测为例探讨了利用高光谱成像仪对水下目标进行探测的关键技术及相关可行性方案。分析可知,光谱成像技术用于海洋军事探测从技术上具有可行性且前景广阔,但仍需解决相关算法的效率及精度等关键问题,这对推动光谱成像技术在海域目标探测中的应用具有重要意义。

关键词:光谱成像;目标探测;水下目标;高光谱

中图分类号:E933.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20171006.0708

Application of spectral imaging technology in maritime target detection

MEI Feng-hua^{1*}, LI Chao¹, ZHANG Yu-xin^{2,3}

(1. *Naval Academy of Armament, Shanghai 200436, China;*

2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: mei_fh@21cn.com*

Abstract: In recent years, with the development of spectral imaging technology, airborne imaging spectrometer has been applied in the military target reconnaissance. Firstly, based on the basic principle and characteristics of hyperspectral imager, this paper introduces the application of hyperspectral imager in marine military target detection. Secondly, the application of spectral imaging technology in maritime target detection is analyzed from both the water surface target detection and the underwater target detection. For surface target detection, many key technologies have made breakthroughs, while the current algorithms are still difficult to solve the real-time problems; for underwater target detection, this paper takes the underwater detection as an

收稿日期:2017-09-11;修订日期:2017-10-13

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新资助项目(No. Y3CX1SS14C)

Supported by Major Innovative Funding Projects of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences(No. Y3CX1SS14C)

example to discuss the key technology and feasibility of the underwater target detection based on hyperspectral imager. The analysis shows that the application of spectral imaging technology to military detection is technically feasible and promising. However, the key issues such as the efficiency and accuracy of the algorithm still need to be solved, which is of great significance for the application of spectral imaging in maritime target detection.

Key words: spectral imaging; target detection; underwater target; hyperspectral

1 引言

在现代战争中,信息对抗已经成为决定战争胜负的关键,而基于航空平台获取军事信息具有时效性强,侦查范围广等特点,是重要的侦察手段之一。在诸多航空平台的信息获取技术中,高光谱成像技术可在获取目标二维图像信息的基础上,同时获取目标的一维光谱信息,能够反映出被观测对象的外形影像以及理化特征,从而达到对目标的探测与识别。利用高光谱成像技术对地、对海进行侦察将获取更丰富的目标信息,极大地提高了航空侦察能力,相对于其他侦察方式具有一定的优越性。

与传统的遥感数据源相比,高光谱数据具有光谱范围宽、波段多、光谱分辨率高的特点,高光谱成像仪的工作波长覆盖太阳反射光谱区,波段宽度达到纳米量级,波段数急剧增多,从可见光到近红外光谱区间的波段数可达几十个乃至几百个。如今波段宽度越来越窄,波段数目越来越多,在多项应用中都提供了更加丰富的数据和研究方法^[1]。

2 高光谱成像仪在军事上的应用

20世纪70年代末,美国加州理工学院的相关学者首先提出了光谱成像仪的研究计划,开展了 32×32 碲镉汞面阵探测器推扫式(Pushbroom)光谱成像仪(AIS)机载试验样机的研制工作,并获得了NASA的支持,其中AIS系统的工作原理如图1所示^[1]。1982年,该光谱成像仪首次进行了机载飞行试验,成功获取了可见光以及短波红外区域的32个谱段的图像,但AIS获得数据的幅宽只有32像元,信噪比低,导致数据应用受到限

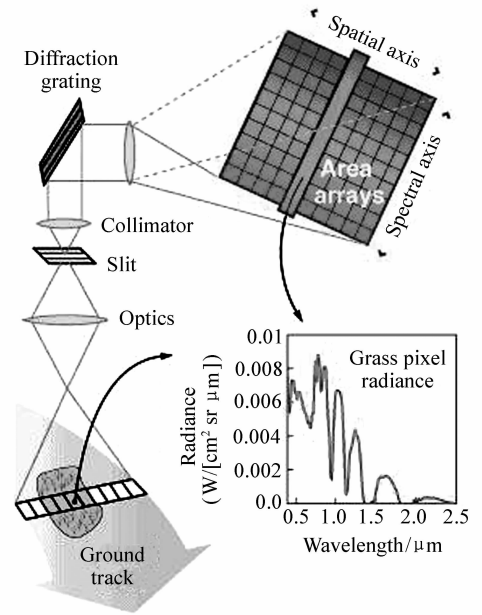


图1 AIS系统工作原理示意图

Fig. 1 Working principle diagram of AIS system

制。而第二代成像光谱仪 AIS-2,则将32元探测器拓展到64像元,数据得以扩展,但其获取的高光谱影像宽度仍然非常有限,难以满足应用需求。

20世纪80年代,美国加州理工学院喷气推进实验室的学者们研制了摆扫式(Whiskbroom)光谱成像仪 AVIRIS^[2],其光机结构及机载平台如图2所示,其采用线阵探测器加光机扫描的工作方式,该仪器进一步扩大了空间覆盖范围。在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的光谱范围内可获取224个波段的光谱信息,空间分辨率为20 m,穿轨方向的像元数达到了600,是目前最常用的机载光谱仪之一。

鉴于光谱成像技术在伪装识别等军事领域的独特优势,美国军方从20世纪90年代初开始进行机载光谱成像技术验证工作,主要有美国海军在1995年支持研制的超光谱数字图像收集试验仪(HYDICE)和美国空军在1995年支持研制的

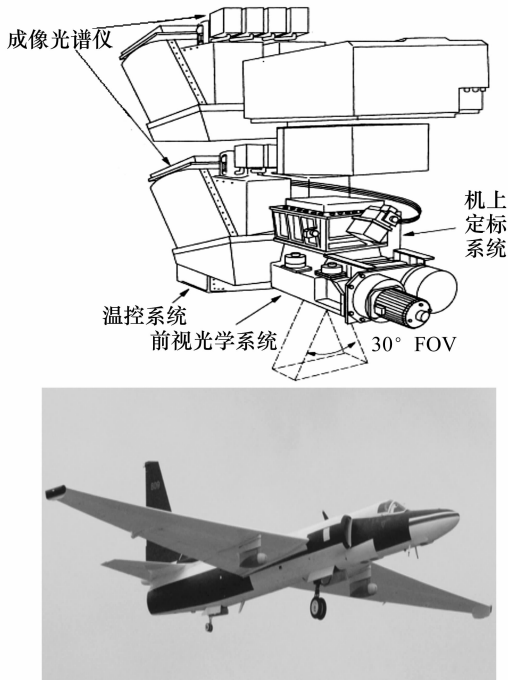


图 2 AVIRIS 系统光机结构及 ER-2 机载平台

Fig. 2 Optical-mechanical of AVIRIS and ER-2 airborne platform

机载傅里叶变换超光谱成像仪 (FTVHSI) 等^[2-3]。

美国海军为了验证光谱成像技术在军事应用中的可行性, 针对海军的应用需求, 对原有光谱成像仪器进行分析, 经充分的指标论证, 研制了一种经过完善定标的新型超光谱数字图像收集试验仪 (HYDICE)。HYDICE 系统及 CV-580 机载平台如图 3 所示, HYDICE 的工作高度为 2 000 ~ 7 500 m, 视场为 8.94°, 系统采用棱镜分光的方式, 在 400 ~ 2 500 nm 的光谱范围内获取了 210 个波段的光谱信息, 平均光谱分辨率为 10 nm^[1]。精细的光谱分辨率可以反映出地物所属光谱的细致特征, 有利于在光谱层面对地物的化学成分进行遥感定量分析。

此外, 鉴于无人机在军事侦察中生存能力强, 无人员伤亡风险, 机动性能好等特点, 美军加强了高光谱成像仪搭载无人机的研究工作。2000 年, 美国空军制定了针对无人机平台的高光谱技术发展计划——大范围侦察高光谱高空实时监控试验 (WAR HORSE)。WAR HORSE 计划采用“捕食者”无人机平台, 搭载可见光、近红外高光谱载荷及线阵高分辨率相机进行试验, 重点验证高光谱

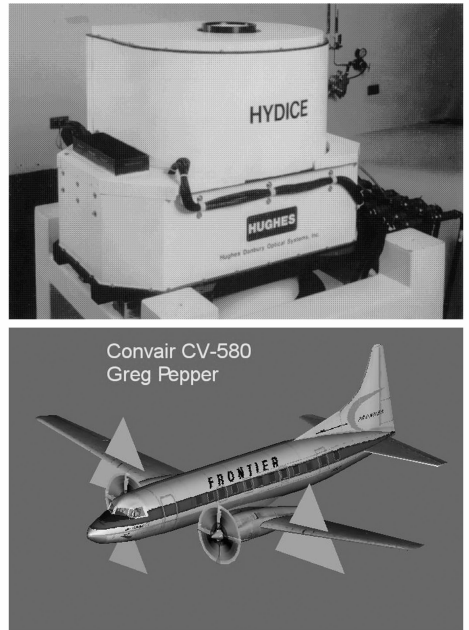


图 3 HYDICE 系统及 CV-580 机载平台

Fig. 3 HYDICE system and CV-580 airborne platform

载荷的相关算法和处理能力, 其中高光谱成像仪 (HSI) 在可见和近红外部分 (450 ~ 900 nm) 可覆盖 64 个谱段, 视场角为 9.3°, 在典型飞行高度 3 km 时像元分辨率为 1 m。HSI 系统及在“捕食者”无人机安装位置如图 4 所示。

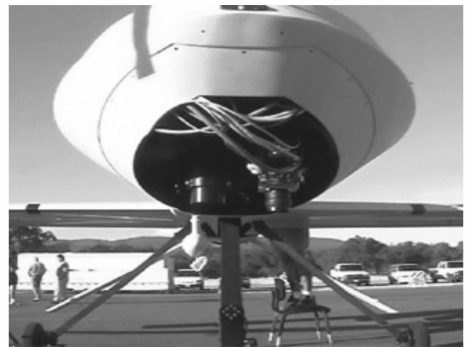


图 4 HSI 系统及在“捕食者”无人机安装位置

Fig. 4 HSI system and the installation site in Predator drone

为了进一步提升对伪装材料的探测能力, 2001 年, 美国空军实验室针对高空无人机制定了红外波段光谱遥感成像孵化平台计划 (SPIR-ITT), 并研制了高光谱成像仪原理样机。初步采用“全球鹰”无人机平台进行验证, 并可兼容“捕

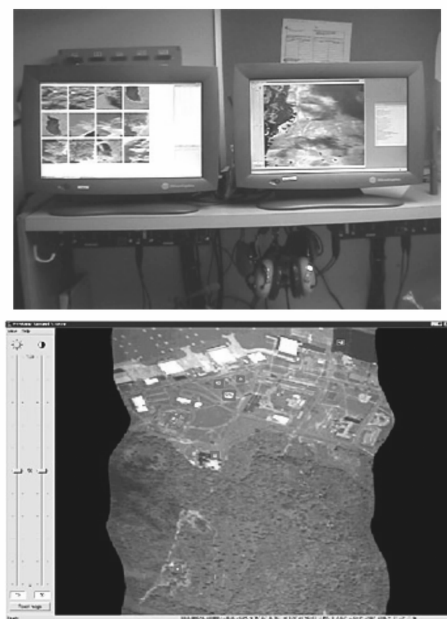


图5 HSI地面处理系统及获得的高光谱数据

Fig.5 HSI ground processing system and the obtained hyperspectral data

食者”无人机平台,目前该计划仍在实施过程中。此外,美国空军实验室正在进行无人机电载可见光波段高光谱的验证工作,重点解决“树下坦克”(tanks-under-trees)探测问题。

2006年,美国海军“守护者格里芬”无人机试飞成功,该无人机上搭载了高光谱相机。高光谱相机的波段为400~1 000 nm,采用了1 024×1 024大小的CMOS探测器,光谱分辨率达到2.35 nm。2007年,美国空军向Headwall Photonics公司采购了一批微型高光谱成像仪(Micro-Hyperspectral Imaging Spectrometer, MHIS),用于装载“捕食者”无人机。MHIS谱段范围覆盖可见近红外波段(400~1 000 nm)以及近红外波段(900~1 700 nm),光谱分辨率为3.5 nm。

3 基于高光谱技术的海面目标探测

高光谱数据具有多通道、谱段窄、准确度高、信息量大等特点,与单一波段的目标识别方式相比具有较大优势^[4-6],因此被广泛应用于海面军事目标探测的研究中,主要包括海岛伪装军事目标的探测、海面舰船目标探测、导弹预警等^[7-8]。

3.1 基于高光谱数据海面目标探测的物理基础

高光谱数据具有图谱合一的特点,因此在提取舰船目标时,可以同时利用图像特征及光谱特征进行目标信息的提取。随着技术的进步,高光谱设备的几何分辨率及光谱分辨率不断提升。例如美国战术卫星-3上搭载的高光谱成像仪,其几何分辨率已经达到5 m,机载的高光谱成像仪分辨率可达10 m。而海面的军事舰艇目标,其长度基本都在百米以上、宽度在数十米。因此,利用高光谱成像仪探测目标时,基本上可以探测出目标的外形轮廓。

另外,由于舰船等目标一般为金属结构,而海洋背景为海水,根据近海岸海洋环境污染物和海洋水包信息的多样性,一般认为沿海海洋的光谱信号主要位于0.9 μm以下^[9]。背景与目标的辐射、散射特性存在明显的差异,光谱图像也有所不同,因此利用高光谱数据可以有效地区分水面上的目标和背景。另外对于一些隐形的水面舰艇,考虑到发动机及螺旋桨产生的温度差异,利用高光谱获取这些特征波段可以有效提取出舰船目标。对于海岛上的伪装军事目标,由于当前伪装技术很难做到谱线与真实环境谱线一致,因此从高光谱数据中选择特征波段,在光谱图像中可以看出真实材料与伪装材料之间的明显差异,即利用高光谱目标探测技术来实现对伪装目标的探测。图6为美军利用超光谱探测的伪装目标,左图为传统的彩色图像,右图为获取伪装目标的伪彩图像,此伪彩图像是通过选取特定波段的光谱图像进一步合成的,可以明显探测出伪装坦克所在位置。

目前,新一代反舰导弹普遍具备超视距攻击、超音速突防、超低空飞行、隐身设计、复合末制导、多变弹道等性能,并已成为现代海战的主要攻击性武器,对水面舰艇的生存造成了极大的威胁^[8]。研究表明这些导弹的尾焰在0.4~1.7 μm的可见光/近红外波段、3~5 μm中波红外波段、8~12 μm长波红外波段具有明显的光谱特征。因此为了提高对导弹的侦察能力,及时发现目标,降低舰艇被攻击的风险,可以将被检测目标的光谱特性与超光谱数据库中的标准光谱进行匹配,

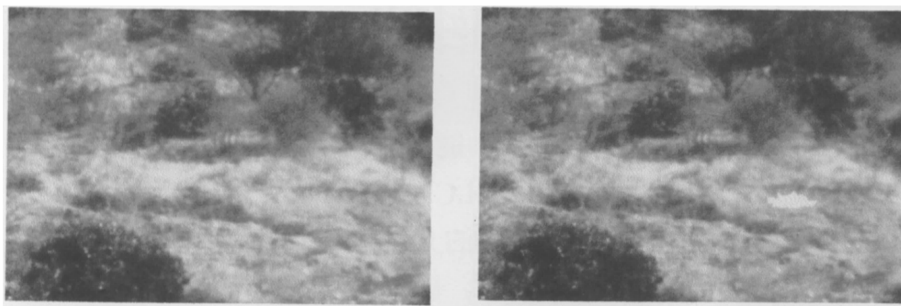


图 6 美军超光谱探测坦克试验

Fig. 6 Tank exploration test of ultra spectrum by US army

以获取目标的类型、属性等参数,并可采取针对性的措施对其进行跟踪、激光测距,为战争中指挥决策提供更可靠的依据。

3.2 基于高光谱数据目标检测算法的研究进展

利用高光谱数据进行目标检测时,主要存在以下三个方面的优势:一是利用光谱特征进行目标检测,对所获取的图像空间分辨率要求不高;二是高光谱数据具有丰富的光谱信息,可以有效辨别目标真伪;三是基于光谱特性,可以有效地从复杂背景中凸显出探测目标^[10]。

从 20 世纪 90 年代开始,国内外学者对高光谱图像目标检测算法展开了研究,比较有代表性的学者有美国马里兰大学的 C. I. Chang、美国麻省理工学院 D. Manolakis、中国科学院遥感与数字地球研究所的张兵研究员等^[11-12]。他们的研究成果推动了异常目标检测算法及快速目标检测算法等的快速发展,经现有算法处理后的图像目标与背景的差别得到显著增强。

3.2.1 异常目标检测算法现状

根据是否具有先验知识,将基于高光谱数据的目标探测方法分为两类:一是先验信息的监督目标检测;二是无需任何先验信息的非监督目标检测。前者是通常意义上的目标检测,而后者则是异常目标检测。异常目标检测主要分为两类:一是基于统计特性直接进行异常目标检测;二是首先提取目标、背景光谱特征,然后利用监督法进行目标检测。

直接基于图像统计特性的异常目标探测的代表性算法为 RX 算法,该算法由 I. S. Reed 和 X.

Yu 在 1990 年提出,被看做是异常检测领域的基础算法而得到广泛的学习^[13-14]。但是该算法存在以下不足:(1)背景需要服从正态分布,与真实场景存在较大差异;(2)背景要求单一,在复杂背景环境下提取效果不明显;(3)背景模型建立的复杂度随着波段的增加而增加,效率较低。因此,很多研究者对此算法进行了改进。C. I. Chang 等人提出了一系列的改进算子,如 R-RX 算子、低概率目标检测算法和均衡目标探测算法等。2012 年, E. Lo 提出最大化子空间的 RX 异常检测,2014 年,提出一种基于数值优化的变量因子分解模型的异常检测算子,优化了 RX 算子的检测结果。

为了改善 RX 算子在复杂背景环境下检测效果不佳的现象, S. Matteoli 等人提出一种局部自适应背景密度估计的 RX 异常检测,明显提高了 RX 算子的检测性能,另外他们还提出了一种基于背景非参数估计的检测算法,也对检测性能有所改善。

针对 RX 算法虚警率较高的缺点, Yver 等人提出了基于最大后验概率的异常检测算法,利用马尔科夫规则消除了虚假目标^[15]。

针对 RX 算子中协方差矩阵求逆运算量大的缺点, Schweizer 等人利用三维马尔科夫随机场直接估计协方差矩阵的逆矩阵,减弱了求逆过程中的计算复杂度。

随着机器学习理论的广泛应用, K. Heesung 等人将核机器学习方法引入到高光谱图像处理领域,利用核映射和核函数提高背景和目标的分离

能力,取得了很好的目标检测效果^[16]。随后,S. Khazai 将其扩展为修正核 RX 异常检测算子,进一步提高了 RX 算法的检测能力。一些研究者将基于向量数据描述的 SVDD 算法引入到异常目标检测算法中,有效地提高了目标检测的精度及效率。但是基于 SVDD 的目标异常检测算子在核函数选择及参数确定上存在困难,因此很多研究者在此基础上提出了一系列的 SVDD 目标异常检测改进算子,从多角度对此算法进行改进,并取得了较好的效果^[17-18]。

监督目标检测法一类为已知目标光谱。已知目标光谱的监督目标检测法中有代表性的算子是约束能量最小化算子(CEM)。该算子由 C-I Chang 等人提出,该算法是在仅知目标地物光谱情况下,通过简化 LCMV 算法得出的,其利用目标光谱进行匹配滤波来实现亚像元的检测。CEM 作为已知目标光谱情况下异常目标检测的代表,已成为亚像元目标检测算法的基准。另外,还有一些其他学者对此类算法进行了深入研究,Manolakis 等人提出了自适应匹配滤波算法(AMTF)。该算法利用目标光谱获得一致最大化的目标似然,然后将其代入广义似然比来构造目标检测算子。在此基础上,他们通过提高匹配精度等来提高算法的目标检测性能。考虑到背景光谱的缺失将导致难以有效抑制背景对目标提取精度的影响,他们通过端元提取方法来获取背景的光谱信息,最后将此算法转化为已知目标和背景光谱信息的目标检测算法,提高了目标检测算法的性能。

另外一类监督目标检测算法为已知目标光谱和背景光谱的检测方法。该类算法的基本思想是在抑制背景信息的基础上通过匹配滤波算法来对目标进行检测。这类代表性算法为 1994 年由 Harsanyi 和 Chang 提出的正交子空间投影算法(OSP),该算法通过向背景空间的正交补空间投影来实现背景的抑制,然后再对目标光谱进行匹配滤波以达到突出检测目标的目的。在 OSP 算法的基础上,出现了一系列改进算法:由 Chang 提出的噪声子空间投影算法(NSP),该算法可以进行亚像元的检测;广义正交子空间投影算子(GOSP)利用非监督法对波段维数扩展后再利用

OSP 算子检测;特征子空间投影算法(SSP)利用向量量化来获取背景特征,然后再进行投影及光谱匹配;斜子空间投影算子(OBSP)将投影的正交子空间扩展为斜子空间,另外将该算子和广义似然比检测相结合,利用 OBSP 的特性解决广义似然比检测对背景信息精度过于依赖的问题,在背景信息模糊情况下利用最大似然比方法依然能获得较好的检测效果。除了 OSP 及其改进算法外,目标约束干扰最小化滤波算法(TCIMF)也属于目标和背景已知的异常目标检测算法。该算法假定目标、背景及噪声可分离,寻找能同时约束目标和背景的约束向量,使得算子在检测出目标的同时滤除背景信息。与第一类检测方法类似,一些研究者将核空间算法引入到第二类算法中,利用机器学习的方法提高这类算法的性能,具有代表性的如 KOSP 和 KTCIMF 等算子,这些算子都是通过非线性映射的手段来提高算子的检测性能的。

3.2.2 快速目标检测算法研究现状

目标检测的实时性是考察高光谱仪器军事性能的一个重要指标。然而随着成像光谱技术的发展,高光谱图像的数据量逐渐增大,制约了目标检测的实时性^[19]。目前大多数异常目标检测算法是利用高光谱数据的全局或局部信息来统计背景与目标相关信息,算法重点在于提高算法的检测性能,而忽视了算法的实效性要求。但是针对军事目标检测应用来说,提高检测算法的实时性是一个亟待解决的问题。为了满足军用需求,需要提出新的算法或对目前提出的目标检测算法进行改进^[20]。

2005 年,D. Qian 等人提出了一种实时约束线性判别分析(CLDA)方法,在满足约束条件下最大化的类内类间距离的比值,随后将其扩展为非监督的实时约束线性判别分析(UCLDA),并于 2009 年提出了基于高光谱数据存储形式的目标检测快速算法,接近实时处理;2013 年,N. Acito 等人提出了一种实时架构的 RX 局部异常检测算法,通过计算两个缓冲数据(缓冲区内的均值与方差),有效提高了 RX 算法的计算效率;2014 年,A. Rossi 等人提出了一种 RX 结构的快速目标检测算法,利用线性代数更新协方差矩阵,

但并没有从根本上解决复杂计算带来的计算延迟;同年,J. M. Molero 等人提出了基于 GPU 多核处理器的 RX 异常检测,通过利用 GPU 多核处理器的并行计算能力来提高基于滑动窗口的局部 RX 算子的计算效率;E. Torti 等人提出了一种实时高光谱子空间的识别算法,并将其用于不同类型的高性能计算架构,包括通用多核图形处理单元(GPU)和数字信号处理器(DSP),实现快速目标检测。

国内,张兵等人从 DSP 实现的角度设计了高光谱目标检测算法,完成了基于推扫型成像光谱仪的高光谱实时检测系统,得到了较好的成像效果^[21];W. Guo 等人提出了一种基于多核 DSP 并行处理的 RX 异常检测,一定程度上提高了 RX 算子的效率和检测性能。在舰船目标检测方法方面,徐芳等人提出一种无监督海面舰船目标自动检测方法。该方法以视觉显著性为依据,结合多显著性检测模型快速搜索海面目标,生成显著图后对其进行粗分割,对提取的目标切片做标记并进行精细分割,对可能检测到的厚重云层和岛屿等伪目标使用梯度方向特征进行鉴别,确度舰船目标及去除伪目标^[22]。

总之,目前的一些实时处理算法主要从提高算法计算效率和采用高性能的处理器出发,一定程度上达到目标检测的实时性,提高了检测效率,但是这些算法中仍然存在大量复杂的矩阵运算和求逆运算,这对处理硬件提出了较高的要求,使得机上实时处理存在一定困难。

4 基于高光谱技术的水下目标探测

水下目标以其极强的隐蔽性,对船舶的航行安全造成了重大威胁,其中,潜艇作为海军实施战略战术的杀手锏,已经成为各国的重要军事装备。声纳是目前用于探测水下目标的常见工具,但是随着降噪技术的发展,水下目标产生的噪声越来越低,低速巡航时潜艇的噪声已经接近于海洋背景的噪声,因此利用声纳技术来探测水下军事目标变得愈加困难。目前,世界各国正在积极研究利用非声纳技术对水下目标探测的手段。非声纳水下目标探测技术主要包含以下几种方式:激光、红外、磁异常探测、高光谱等。其中,利用高光谱技术进行水下目标探测是未来研究的一个重要方向^[12]。

4.1 基于高光谱成像技术的水下目标探测现状

基于高光谱成像技术的水下目标探测研究开始于上世纪 90 年代,研究主要集中在对接收到的潜艇反射光形成的高光谱图像进行分析,其探测结果依赖于反射光在水中的透射深度^[23]。

1996 年,由科学与技术公司(Science and Technology International)研制的先进机载高光谱成像系统(AAHIS)被应用于航空平台上,借助于 AAHIS 光谱分辨能力,该系统可以很容易地探测出隐藏在海面下的暗礁、鱼雷、潜艇、鲸鱼等水下目标。

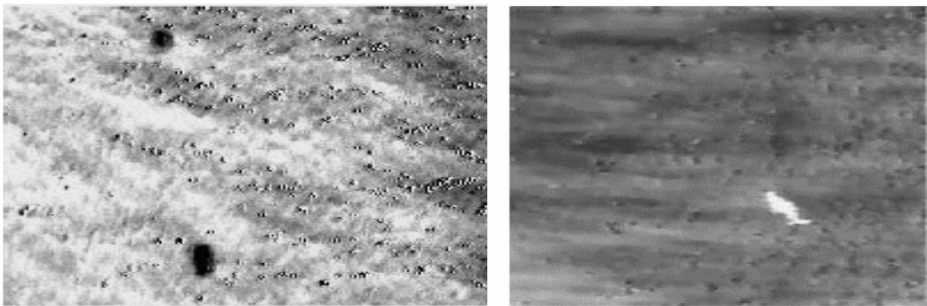


图 7 美国海军利用高光谱成像仪进行水雷及潜艇探测实验

Fig. 7 Mine and submarine detection experiment using hyperspectral imager by US army

2003 年,美国海军利用机载的超光谱传感器

系统(LASH)进行了浅海潜艇的探测实验,试图

克服浅海区域复杂背景杂波给声纳探测带来的困难。该系统安装在机载综合光电吊舱中,通过选择特殊的波段进行潜艇自动探测,实现复杂背景下目标检测,可用于发现水下潜艇、水雷等,对于区分水下目标具有重要的军事意义。

虽然通过试验表明采用光谱成像技术可实现最小地元分辨率米级或更小、水深 30 m 内的潜艇探测。但在实战情况下,潜艇的下潜深度往往超过这一水深,因此,通过直接接收潜艇反射出来的光信号进行潜艇目标探测难以满足深海区域的实战要求。

由于高光谱设备探测深度有限,为了探测更深的水下潜艇目标,考虑采用间接探测方式。已知潜艇在水下航行的过程中会产生尾流并扩展到海面,通过检测海面尾流来探测水下潜艇。

根据尾流的产生机理,可将其分为四类,分别是由内波、湍流和 kelvin 尾迹与海洋环境互相作用形成的航迹尾流;由螺旋桨推进器或者泵喷推进器在运转时使海水空化产生的气泡尾流;由潜艇航行时与海水摩擦及潜艇冷却排放的热量形成的热尾流,以及由潜艇在航行时干扰海水各层的生物场,从而形成的生物光尾流。

针对不同类型的尾流,可采用不同类型的探测手段进行检测。目前,国内外对尾流气泡的研究主要基于 SAR 成像技术和激光雷达技术,本文在此基础上就高光谱成像技术在热尾流和生物光尾流探测上的应用进行初步的探讨。

4.2 基于潜艇热尾流目标探测现状及基于高光谱温度反演的目标探测方法探讨

核潜艇航行过程中,海水冷却核装置排放出大量的温热尾流,而螺旋桨在运转过程中也会产生大量热流,热水质量较轻将上浮到海面,在海面形成连续或断续的轨迹,这些轨迹的特征与海水的性质相关。目前的研究工作主要集中在尾流中各干扰项的分布规律、尾流尺度的计算、尾流产生的机理等^[24]。我国学者也相继展开了相关的研究工作,包括:机载热红外尾流探测水下目标的可行性;垂直温度分层海水中水下航行体热尾流自由表面的温度、密度和速度等参数的变化规律;温度均匀海水和温度分层海水中水下运动体冷热尾

流浮升扩散规律及水面冷热特性的差异等等。其中对潜艇冷热尾流的传统传质特性的研究表明:高速旋转螺旋桨促使热尾流后向延迟距离增大、海表温差减小,水下航行潜艇扰动温度密度分层,海水浮升形成冷尾流温差信号,与温度密度均匀海水相比,海表温变区域显著增大、尾流温差由 6.13 mK 增大到 84 mK;通过海表上游冷尾流特征判断是否存在水下航行潜艇^[25]。众多研究表明,红外成像系统能够捕获到潜艇尾流与周围海水温度差,但必须在有限的范围内,选择 8 ~ 12 μm 波段进行探测的效果较好。

美国在 1976 年发射了装有红外探测传感器的卫星,其利用热尾流进行潜艇探测。但是该技术对红外探测器的灵敏度要求较高,在实际使用时噪声较大,因此通常需要对红外图像进行增强后才能进行目标检测,然而这些图像增强方法往往会带来信息损失等一系列问题,使得基于红外传感器的潜艇探测方法难以有效地应用于实战中^[26]。

红外高光谱传感器通过获取 8 ~ 12 μm 的高光谱图像,经波段选择和特征变换后,可以反演出海水的发射率,而基于热尾流探测潜艇时,其主要依据是海水发射温度的高低。反演海水温度发射率时,假设某个波段上发射率取最大值 ε_{\max} ,采用 ε_{\max} 的灰体辐射亮度做包络线,得到

$$T_{\lambda} = B^{-1} \left[\frac{L(\lambda) - (1 - \varepsilon_{\max}) L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})}{\varepsilon_{\max}} \right], \quad (1)$$

$$T = \max(T_{\lambda}), \quad (2)$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L(\lambda) - L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})}{B(\lambda, T) - L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})}, \quad (3)$$

式中, $L_{\text{atm}\downarrow}$ 为大气下行辐射, B 为描述黑体辐射的普朗克函数, ε_{\max} 为事先已知地物在热红外波段的最大发射率, $L(\lambda)$ 为传感器所接收到的辐射亮度, T_{λ} 为所计算的各个波段的黑体温度, λ 为波长。通过上式,可以精确计算出海水在各个波段上的温度及发射率。

为了进一步突出海面与尾流之间的温度差异,可以利用先验知识对这些提取出来的发射率图像进行变换,使得海洋背景与尾流之间的差别

加大,提高潜艇的探测效率及精度。

4.3 基于潜艇光尾流的潜艇探测机理及基于线性解混的探测方法探讨

潜艇在航行过程中会引起周围海域电磁场的变化,磁场的变化导致发光细菌发光强度发生改变,从而产生了生物光尾流。在正常条件下,这些细菌的发光强度恒定,而在外界电磁场的刺激下,其发光强度将增大。潜艇航行时,其周围的电磁辐射波动将使轨迹上的细菌发光强度发生变化从而留下明显的荧光带^[27]。由此可以通过传感器检测这些荧光信号来探测潜艇。

高光谱探测器检测到的荧光信号包含发光细菌产生的 450 nm 到 490 nm 的可见光(包含潜艇信息)以及背景干扰光(海水表层的发光细菌在海水背景下和风浪刺激下,产生的 450 nm 到 490 nm 的光),可以通过滤光器将变化规律与背景噪声特性相同的背景干扰光滤除,从而进行潜艇目标检测。

通过上述的基于光尾流的潜艇检测方法可以归纳出,有效剔除背景光是目标探测成功的关键之一。考虑到在不同的声波、电磁波刺激下,海洋发光细菌发射光谱不同,借助光谱库和线性解混法,解算出由于潜艇电磁波、声波刺激产生的光谱丰度,从而突出检测目标。

$$x_i = \sum_{j=1}^m a_{i,j} e_j + \varepsilon_i, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m a_{i,j} = 1, \quad (5)$$

$$a_{i,j} \geq 0, \quad (6)$$

式中, ε_i 为第 i 个像元的误差项, e_j 为端元光谱。

参考文献:

- [1] 郑玉权,王慧,王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程,2009,17(11):2630-2631. ZHENG Y Q, WANG H, WANG Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2630-2631. (in Chinese)
- [2] LABAW C. Airborne imaging spectrometer; an advanced concept instrument[J]. *SPIE*, 1983, 430: 68-73.
- [3] GREEN R O, EASTWOOD M L, SARTURE C M, et al. Imaging spectroscopy and the airborne visible/infrared imaging spectrometer(AVIRIS)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 65(3): 227-248.
- [4] 李越强,李庶中,贾宇. 光谱成像技术在海上目标探测识别中的应用探讨[J]. 光学与光电技术, 2015, 13(1): 79-86. LI Y Q, LI S Z, JIA Y. Application of spectral imaging technology in detection and recognition of marine targets[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2015, 13(1): 79-86. (in Chinese)
- [5] 张达,郑玉权. 高光谱遥感的发展与应用[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(3): 67-73. ZHANG D, ZHENG Y Q. Hyperspectral remote sensing and its development and application review[J]. *Optics & Optoe-*

经线性解混后,可以很好地分离出背景光及目标光谱,进而通过丰度值的大小确定像元上是否存在由潜艇激发出来的光谱。从而在获得潜艇激发光谱的丰度图后,结合尾流的形状信息,提取出潜艇的航行轨迹。

5 结束语

本文概述了高光谱成像仪在海军军事目标探测中的应用,总结了光谱成像技术在海域目标探测中的应用现状,对基于高光谱数据进行海面军事目标探测和水下目标探测的分析方法进行了探讨。研究表明,用于海面军事目标探测的高光谱成像仪在光谱分辨率、谱段范围以及空间分辨率等方面的指标不断提升,并且在搭载于无人机平台的目标探测中表现优异。在基于高光谱数据的海面目标及水下目标探测中,研究人员提出了多种数据处理算法,处理后的图像目标与背景之间的差别显著增强,但实时处理的问题仍难以保证。此外,本文介绍了运用高光谱技术进行潜艇尾流探测的机理,基于此提出了一种计算海面温度发射率以及线性解混的水下目标探测的方法,为利用高光谱技术进行水下目标探测提供了一条可行路径。综上所述,光谱成像技术在海域目标探测中具有独特的优势,光谱成像设备将在海军的各武器装备体系中发挥重要作用,成为支撑军事力量变革和新质战斗力生成的重要技术途径。

- lectronic Technology*,2013,11(3):67-73. (in Chinese)
- [6] 高国龙. 高光谱成像仪寻求军事用途[J]. 红外,2004,4:48.
GAO G L. Hyperspectral imager for military use[J]. *Infrared*,2004,4:48. (in Chinese)
- [7] BORK E W,SU J G. Integrating LIDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation:a meta analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*,2007,111(1):11-24.
- [8] 麻永平,张炜,刘东旭. 高光谱侦察技术特点及其对地面军事目标威胁分析[J]. 上海航天,2012,29(1):37-40.
MA Y P,ZHANG W,LIU X D. Characteristics of hyperspectral reconnaissance and threat to ground military targets[J]. *Aerospace Shanghai*,2012,29(1):37-40. (in Chinese)
- [9] 曹佃生,石振华,林冠宇. 机载海洋改进型Dyson高光谱成像仪的研制[J]. 光学精密工程,2017,25(6):1404-1405.
CAO D SH,SHI ZH H,LIN G Y. Development of airborne ocean modified Dyson hyperspectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*,2017,25(6):1404-1405. (in Chinese)
- [10] HUANG Z W,SHI Z W,QIN Z. Convex relaxation based sparse algorithm for hyperspectral target detection[J]. *Optik*,2013,124(24):6594-6598.
- [11] 杜山山,李姝颖,曾朝阳. 背景不确定性对高光谱异常目标探测的影响[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2016,17(6):598-604.
DU SH SH,LI SH Y,ZENG CH Y. Influence of background uncertain target detection[J]. *J. PLA University of Science and Technology Natural Science Edition*,2016,17(6):598-604. (in Chinese)
- [12] 赵志勇,吕绪良,刘凯龙,等. 基于高光谱的目标探测方法分析[J]. 光电技术应用,2010,25(3):3-5.
ZHAO ZH Y,LV X L,LIU K L,*et al.*. Analysis of target detecting methods based on hyper-spectrum[J]. *Electro-optic Technology Application*,2010,25(3):3-5. (in Chinese)
- [13] KWON H,NASRABADI N M. Kernel RX-algorithm: A nonlinear anomaly detector for hyperspectral imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2005,43(2):388-397.
- [14] MOLERO J M,GARZON E M,GARCIA I,*et al.*. Analysis and optimizations of global and local versions of the RX algorithm for anomaly detection in hyperspectral data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*,2013,6(2):801-814.
- [15] ROSSI A,ACITO N,DIANI M,*et al.*. RX architectures for real-time anomaly detection in hyperspectral images[J]. *J. Real-Time Image Processing*,2014,9(3):503-517.
- [16] GUO W J,ZENG X R,ZHAO B W,*et al.*. Multi-DSP parallel processing technique of hyperspectral RX anomaly detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,2014,34(5):1383-1387.
- [17] KHAZAI S,MOJARADI B. A modified kernel-RX algorithm for anomaly detection in hyperspectral images[J]. *Arabian Journal of Geosciences*,2015,8(3):1487-1495.
- [18] 杜小平,刘明,夏鲁瑞,等. 基于光谱角累加的高光谱图像异常检测算法[J]. 中国光学,2013,6(3):327-328.
DU X P,LIU M,XIA L R,*et al.*. Anomaly detection algorithm for hyperspectral imagery based on summation of spectral angles[J]. *Chinese Optics*,2013,6(3):327-328. (in Chinese)
- [19] KHAZAI S,HOMAYOUNI S,SAFARI A,*et al.*. Anomaly detection in hyperspectral images based on an adaptive support vector method[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*,2011,8(4):646-650.
- [20] ZHANG L F,ZHANG L P,TAO D C,*et al.*. Hyperspectral remote sensing image subpixel target detection based on supervised metric learning[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2014,52(8):4955-4965.
- [21] ZHANG B,YANG W,GAO L R,*et al.*. Real-time target detection in hyperspectral images based on spatial-spectral information extraction[J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*,2012,142.
- [22] 徐芳,刘晶红,曾冬冬,等. 基于视觉显著性的无监督海面舰船检测与识别[J]. 光学精密工程,2017,25(5):1300-1310.
XU F,LIU J H,ZENG D D,*et al.*. Detection and identification of unsupervised ships and warships on sea surface based on visual saliency[J]. *Opt. Precision Eng.*,2017,25(5):1300-1310. (in Chinese)
- [23] CHEIN I C,SHAO-SHAN C. Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery[J]. *IEEE Transactions on*

Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(6): 1314-1325.

- [24] ZHAO R, DU B, ZHANG L P. A robust nonlinear hyperspectral anomaly detection approach[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(4): 1227-1234.
- [25] 张旭升, 郭亮, 胡日查, 等. 红外探测中潜艇冷热尾流的传热传质特性[J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(1): 107-114.
ZHANG X SH, GUO L, HU R CH, *et al.*. Heat and mass transfer characteristic of submarine cold - thermal wake in the infrared detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 107-114. (in Chinese)
- [26] DU B, ZHANG L P. Random-selection-based anomaly detector for hyperspectral imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(5): 1578-1589.
- [27] HUANG Z W, SHI Z W, QIN Z. Convex relaxation based sparse algorithm for hyperspectral target detection[J]. *Optik*, 2013, 124(24): 6594-6598.

作者简介:



梅风华(1973—),男,江苏江阴人,硕士研究生、高级工程师,现为海军装备研究院高级工程师,主要从事航空电子系统方面的研究。E-mail:mei_fh@21cn.com