文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-13

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. XXXX. XX. 001

基于星载高光谱图像的飞行器尾迹检测

谢书馨[1,2]， 李鹏飞[1]， 赵思维[1]， 廉小颖[1,2]， 孙德新[1,2*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外科学与技术全国重点实验室,上海 200083；
2. 中国科学院大学,北京 100049）

摘要:飞行器尾迹的检测对维护空域安全以及应对航空业产生的温室效应具有至关重要的作用。现有飞行器尾迹的检测方法多基于多光谱图像中特定通道之间的辐亮度差或温差进行,对光谱特征的利用不足。国内外星载高光谱成像技术的发展,为利用星载高光谱图像数据进行飞行器尾迹的可识别性检测提供了新的数据基础。然而,仅依赖图像的空间或光谱单一维度进行检测的方法,难以在星载高光谱图像飞行器尾迹检测任务中取得理想效果。因此,针对高分五号可见短波红外高光谱相机(GF-5 AHSI)采集的短波红外高光谱图像,开展了潜在飞行器尾迹的检测算法研究。提出了一种空间-光谱特征提取方法,充分利用了高光谱图像空间与光谱信息的互补特性。在高分五号高光谱图像数据上实现了97%以上的准确率,2%以下的虚警率。不仅为飞行器尾迹检测提供了一种创新性的技术手段,也为后续研究者提供了有价值的参考思路,推动了高光谱图像在实际应用中的进一步发展。

关 键 词:高光谱图像；飞行器尾迹；目标检测；短波红外

中图分类号:P407.6　　**文献标识码**：A

Aircraft contrail detection based on satellite-borne hyperspectral images

XIE Shu-Xin[1,2]， LI Peng-Fei[1]， ZHAO Si-Wei[1]， LIAN Xiao-Ying[1,2]， SUN De-Xin[1,2*]

（1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China；
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract: Aircraft contrail detection remains crucial for maintaining airspace safety and addressing the greenhouse effects caused by the aviation industry. Existing methods for detecting aircraft contrails primarily relied on the radiance or temperature differences between specific channels in multispectral images. But they did not fully exploit the potential of spectral features. The advancement of satellite-borne hyperspectral imaging technology has provided a new data foundation for aircraft contrail detection. However, methods that rely solely on either the spatial or spectral dimension of the image are unlikely to achieve satisfactory results in the task of aircraft contrail detection using satellite-based hyperspectral imagery. Therefore, a detection algorithm for potential aircraft contrails was explored using shortwave infrared hyperspectral images from the GF-5 AHSI. A spatial-spectral feature extraction method was proposed, which utilized the complementary nature of spatial and spectral information in hyperspectral images. The method achieved an accuracy of over 97% and a false alarm rate of less than 2% on GF-5 hyperspectral image data. It not only provides an innovative technical approach for aircraft contrail detection, but also offers valuable insights for future researchers and promotes further development of hyperspectral imaging in practical applications.

Key words: hyperspectral image, aircraft contrails, objection detection, short wavelength infrared

收稿日期:2025-01-17,**修回日期**:2025-03-06　　**Received date**:2025-01-17,**Revised date**:2025-03-06

基金项目:国家自然科学基金重大项目(42192582)；中国科学院战略性先导科技专项(XDB0580000)；国家重点研发计划(2022YFB3902000)；上海市2023年度“科技创新行动计划”技术标准项目(23DZ2201400)；中国科学院青年创新促进会(2020242,2023246)

Foundation items: Supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (42192582); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences(XDB0580000); National Key Research and Development Program of China (2022YFB3902000); Shanghai 2023 "Science and Technology Innovation Action Plan" Technical Standard Project (23DZ2201400); The Youth Innovation Promotion Association CAS (2020242,2023246)

作者简介(Biography):谢书馨(1999—),女,山东微山人,学生,硕士,主要研究领域为图像处理、目标检测. E-mail: shxxie@163. com

[*] **通讯作者**(Corresponding author): E-mail: sundexin@mail. sitp. ac. cn

引言

飞行器尾迹的检测对研究气候变化和维护国土安全至关重要。长期的监测记录显示，飞行器尾迹主导了全球航空业的温室效应，贡献率超过50%[1]。同时，长期的真实实验表明，尾迹是新兴飞行器（高超音速飞行器、隐身飞行器等）最重要的追踪痕迹之一[1]。因此，欧美等国家开展了长期大量的工作，力图在检测和识别飞行器尾迹技术方面获得突破。

自20世纪40年代开始，科学家开始研究飞行器尾迹的基础特征，相继开展了大量的工作，包括PMS（1971）、CIRRUS（1992 和 1994）、SULFUR（1994-1996）、SUCCESS[2]（1996）、CRYSTAL-FACE（2002）、CONCERT（2008）、COSIC（2011）、CODEX（2024）等。截至目前，在飞行器尾迹所具有的基础特征方面达成共识：1、飞行器尾迹的时空跨度大，空间尺度从米级至数十公里级不等，生命周期从秒级至数十小时级不等[2, 3]。2、飞行器尾迹的化学成分复杂，不仅包括二氧化碳、氮氧化物、一氧化碳、甲烷等气态物质，还包括颗粒物、气溶胶等混合物质[3]。3、飞行器尾迹的物理形态异常复杂，不仅包括气体、液体、固体等不同相态，而且涉及气溶胶和云相互作用等复杂过程[3]。

自20世纪70年代，基于卫星监测数据识别飞行器尾迹的研究得到广泛开展。代表成果通过ERTS（Landsat前身）、GOES、Metop、SDGSAT-1等卫星搭载的多光谱传感器（AVHRR、TIS等）获得，但仍面临巨大科技挑战。1、受载荷空间分辨率的限制，难以实现对宽度未达公里级别的飞行器尾迹进行检测。2、载荷的光谱范围和谱段数有限，难以检测飞行器尾迹的化学特征。同时，基于卫星监测的飞行器尾迹识别基本沿袭了异常检测的识别框架，主要分为统计、表示和分解三类框架[5]。从空间角度看，基于统计和表示模型的识别框架聚焦像素特征，基于分解模型的识别框架依赖全局特征，从而忽视了飞行器尾迹的空间特征。从光谱角度看，基于统计的识别框架以RX算法及其改进算法为代表，假设环境背景服从多元高斯分布，而实际图像中包含复杂的地物类型，简单的多元高斯分布难以对复杂多样的背景光谱向量进行准确的统计建模，基于表示模式的识别框架基于背景字典的代表能力，基于分解模型的识别框架依赖稀疏假设，均难以适应飞行器尾迹的光谱特征。

近年来，星载高光谱成像技术的发展为飞行器尾迹的检测与识别提供了全新机会，中国、美国、德国、欧盟等航天大国和组织相继研发了系列星载高光谱成像载荷。其中，中国研制的高分五号可见短波红外高光谱相机，成为了最重要的代表之一，在光谱范围（0.4~2.5 μm）、光谱分辨率（10 nm）、空间范围（60 km）、空间分辨率（30 m）等关键指标方面取得了革命性的进步[6]，从根本上适应了飞行器尾迹的空间、物理和化学特征。鉴于传统尾迹检测方法在复杂环境中精度不足和受干扰较大的局限性，结合高光谱技术的发展，本研究利用高光谱数据的图谱合一优势，探索其在飞行器尾迹检测中的应用。高光谱数据提供的丰富光谱信息，使得尾迹检测在不同环境条件下具有更高的准确性和可靠性。因此，本研究旨在基于高光谱数据的特点，克服传统方法的缺陷，提升飞行器尾迹检测的精度，为航空安全和环境监测提供更有效的技术支持。具体来说，联合空间信息和光谱信息有望提供识别飞行器尾迹的基本途径。首先，飞行器尾迹空间特征和光谱特征具有独特性，呈现全局直线和局部过渡的双重特征。其次，飞行器尾迹空间特征和光谱特征具有互补性，两者呈现显著的相关性，具有相互验证的可靠性。最后，飞行器尾迹空间特征和光谱特征的联合识别具有通用性，基本遵循提取—融合—验证的识别框架，空间信息侧重边缘提取，光谱信息聚焦特征增强，融合两者催生双向验证，从而支撑识别具有不同时空尺度、不同理化特征的飞行器尾迹。

本研究基于高分五号卫星可见短波红外高光谱相机，从光谱范围、光谱分辨率、空间分辨率、辐射分辨率等关键维度，定量揭示飞行器尾迹的基础特征。在此基础上，首次全面考虑空间和光谱的关键特征，构建提取—融合—验证的基本识别框架。最后，引入以往的观测资料和检测依据，论证飞行器尾迹的可识别性是否具备了全新的理论和方法基础。总的来说，本研究围绕光谱范围、光谱分辨率、空间分辨率、辐射分辨率等关键维度，探讨了飞行器尾迹的可识别性，并重点研究了飞行器尾迹识别的理论与方法依据。基于高光谱数据的图谱合一优势，提出了一种新的飞行器尾迹检测方法。相比传统方法，利用高光谱数据提供的丰富光谱信息能够显著提高尾迹检测的准确性和可靠性。通过这一方法，本研究有效克服了传统方法的局限性，

为飞行器尾迹检测提供了一种更加高效、精确的技术途径,具有一定的应用前景和理论价值。

1　国内外研究现状综述

1.1　基于多光谱数据的尾迹识别方法

早期利用卫星图像进行飞行器尾迹的识别以人工视检的方法为主,依据尾迹云与自然形成的卷云在空间形态上的不同,Joseph 等人[7]采用空间分辨率 90 m 的卫星图像分析尾迹像素,计算其辐射强迫。Bakan 等人[8]采用空间分辨率 1.1 km 的 AVHRR 卫星图像人工统计尾迹云。人工解译的方法受卫星图像分辨率的限制,无法对早期形成的、没有达到相机空间分辨率的尾迹云进行有效检测。且由于飞行器尾迹的成分构成复杂,尾迹扩散至可目视解译的空间尺寸时,时空的改变对光学厚度与粒子数密度的计算产生影响,导致最终计算结果有较大的误差。

随着热红外遥感研究的广泛开展,有研究者将飞行器尾迹检测的研究重点转向卫星图像在光谱维度上的特征信息,利用尾迹云在热红外图像不同波段间的辐射亮度差异推算尾迹云。虽然原始数据仍需部分目视解译的辅助,但光谱特征的利用极大地提高了卫星图像的利用效率。Lee 等人[4, 9]最早从 AVHRR 图像观察到新形成的尾迹在通道 4(10.3 μm)比在通道 5(11.5 μm)中更亮,这说明凝结尾迹在热红外图像不同通道间的亮度温度差异较大,而具有较大冰晶或水汽的天然卷云与混合相云在这两个通道中具有相同的亮度。因此,在热红外图像尾迹检测的研究中,基于亮度温度差的原理,采用波段范围在 10.8~12.0 μm 的两个通道图像作差,产生的温度差图像可以在增强尾迹亮度的同时大幅削弱背景云,达到突出尾迹目标的目的。综合尾迹的空间形态,许多研究者利用不同波段通道的尾迹亮度温度差,结合 Hough 变换的脊检测来识别尾迹[4, 9, 10]。Joe 等人[11]基于 GOES-16 ABI 数据建立了人工标记数据集 OpenContrails,提出了一种结合时间上下文的尾迹检测模型,但受限于 2 km 的空间分辨率,需要等待尾迹扩散至足够可见的程度才能进行人工标记。Li 等人[12]采用 SDGSAT-1 TIS 数据对尾迹红外特性进行分析,采用渐进概率霍夫变换的方法对热红外图像中的潜在尾迹进行筛选与标注,分析其红外特征,利用航空尾迹与自然卷云在热红外光谱上的亮温差异对二者进行区分。Dekoutsidis 等人[13]根据尾迹的物理特性和形态来识别尾迹,利用 SEVIRI 得到的红外图像数据统计出的凝结尾迹长度在 225~292.5 km 之间,空间轨迹覆盖达到场景的 0.085%。Yu 等人[14]利用 SDGSAT-1 的热红外图像数据,对新形成的尾迹按照长度划分为“无尾迹”、“短尾迹”和“长尾迹”,统计结果显示:长尾迹所占的比例略小于短尾迹,短尾迹的形成更具有随机性,而长尾迹的形成条件更严苛。因此,采用分辨率不高的多光谱数据进行尾迹的检测时,不可避免地会出现“漏检”的现象。

1.2　基于高光谱数据的检测方法

高光谱异常检测方法中,基于统计理论的方法发展最早,其中最为经典的是 RX(Reed-Xiaoli algorithm)[15]算法,它是一种基于广义似然比的恒虚警率检测器,假设背景服从多元高斯分布,通过估计所有背景样本的协方差和均值向量来估计概率密度函数,测试像元的异常程度由测试像元偏离背景杂波统计分布的程度衡量,RX 检测器可以表示为:

$$D_{RX}=\left(x-\mu\right)^{T}\Sigma^{-1}\left(x-\mu\right) \quad , \quad (1)$$

但实际成像中,全局背景不符合单一多元高斯分布,因此许多研究者从改善背景分布估计的思路出发,产出了一系列基于 RX 算法的改进算法。Kwon 等人[16]提出的 LRX 算法使用滑动窗口将背景范围大幅缩小,采用双窗口模型作为局部区域,内外窗口中间的像素作为背景样本,内窗起到隔离异常像元与背景像元的作用,计算背景分布时采用双窗口限制的范围使用多元高斯分布的假设,一定程度上提升了检测效果。

基于表示模型的方法从单个像元出发考虑异常检测。其基本思路为:从图像中选择一组具有代表性的背景光谱作为背景字典,背景字典中的这些光谱又称为原子,基于背景像元可以被背景字典中的原子较好地表示而异常像元则不能的假设进行图像重构。基于这种思想,Li 等人[17]提出一种背景联合稀疏表示模型(Background Joint SR, BJSR)来对异常检测器建模。Li 等人[18, 19]提出一种基于核隔离森林的高光谱异常检测方法(Kernel Isolation Forest-based hyperspectral anomaly Detection, KIFD),采用递归检测框架充分利用 HSI 的局部和全局信息,采用随机选取 HSI 样本构建隔离森林(iForest),将核特征空间中容易被隔离的像素点作为异常点进行检测。

基于分解模型的方法则是侧重于从全局的视角描述图像总体特征并依此进行异常检测。背景

像元在空间和光谱上均存在一定程度的相关性，体现在数据上就是低秩特性，而异常目标与背景的相似度低，表现出稀疏特性。与低秩表示（Low-rank representation，LRR）结合的凸规划可以恢复被任意离群点污染的原始数据，即分离出稀疏分布的异常。Xu等人[19]提出了一种基于低秩稀疏表示的异常检测方法（Low-Rank and Sparse Representation，LRASR），该方法首次将LRR应用到HSI进行异常检测，并且在模型中加入稀疏诱导正则化项更好地描述每个像元的局部结构。

2 方法

2.1 方法提出

本文从高光谱图像特点与飞行器尾迹空间、光谱特征出发，基于提取-融合-验证的框架，提出一种基于空谱信息联合的飞行器尾迹检测算法，大致分为三个模块：空间特征提取模块，光谱特征提取模块，和空间-光谱特征双向验证模块。所提方法流程图如图1所示。

空间上，飞行器尾迹目标在宽幅卫星图像全局视角下接近直线形态，放大至局部视角观察时目标边缘模糊，且尾迹内部没有可供识别的纹理信息，目标边界呈现出在较大范围中扩散、直至与背景完全融合的形态，如图2(a)所示。光谱上，飞行器尾迹的成分未知，且受到辐射强度、目标背景等因素的影响，目标光谱与背景光谱均未知。

基于以上分析，所提方法的空间特征提取模块采取基于改进的霍夫直线检测的方法对特征波段的潜在尾迹边缘进行检测。在算法模块设计时考虑到探测器拼接造成的影响，结合对实际成像尾迹偏转角度的观测经验，对霍夫变换检测的角度进行了限制，排除了水平方向与垂直方向各10°范围，排除拼接处干扰的同时还可有效抑制条带噪声。在沿垂直尾迹方向由尾迹内部指向背景的方向上，尾迹与背景间的差异在小范围内逐渐过渡，动态范围大而梯度差异小，导致尾迹边缘的检测结果不连续，表现为相同参数的直线以多条短线段的形式出现。如图2所示，(a)为1 506 nm波段原图，(b)为直接使用Hough变换对该波段进行尾迹边缘检测的结果，检测结果中每个边缘的端点以黑色突出，蓝色线为检测结果中的最大值。针对分布在相同参数直线的尾迹检测结果不连续的情况，采取Bresenham算法[20]进行单像素合并连接，连接结果如图2(c)所示，而后进行全特征波段的统计合并，采取像素投票机制的思想进行阈值处理，最终得到空间模块检测结果，命名为矩阵A，尺寸与原图像空间尺寸相同。A中的每个像元都是经由单像素宽边缘精度与多波段响应投票筛选的结果，保证检测结果的物理意义的同时起到抑制背景噪声的作用。像素投票结果与阈值过滤结果对比热图如图3所示。

在光谱特征提取模块中，通过对待检测图像进行PCA分解，发现尾迹目标与典型异常目标存在空间分布范围上的较大差异：典型异常目标在30 m分辨率下往往只占据数个像素乃至亚像素级别。除此之外，尾迹目标内部的分布趋于接近，因此，采用特征值分解重构的方法，保留前十位左右大特征值对应的特征向量对图像进行重构，对重构图像采用RX检测器进行异常值评估，对异常值评估的结果

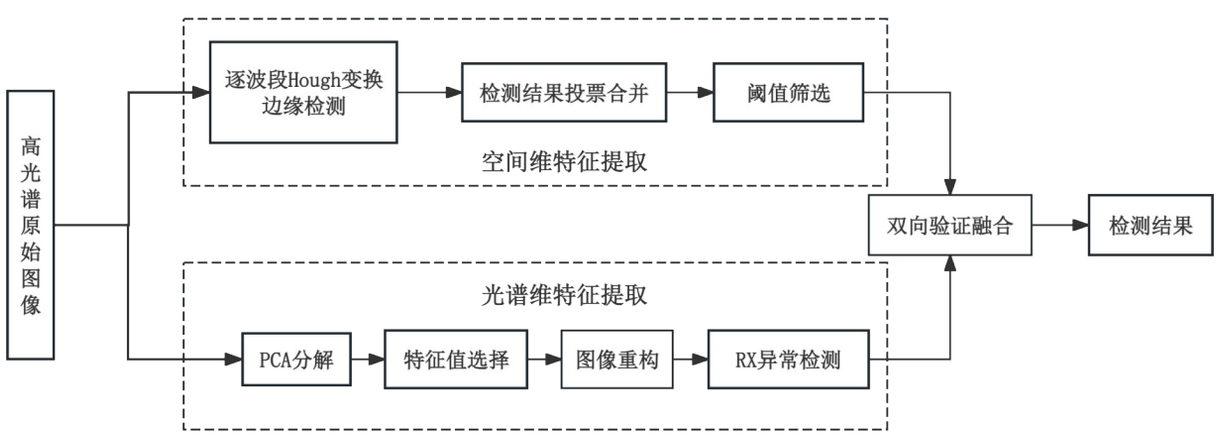
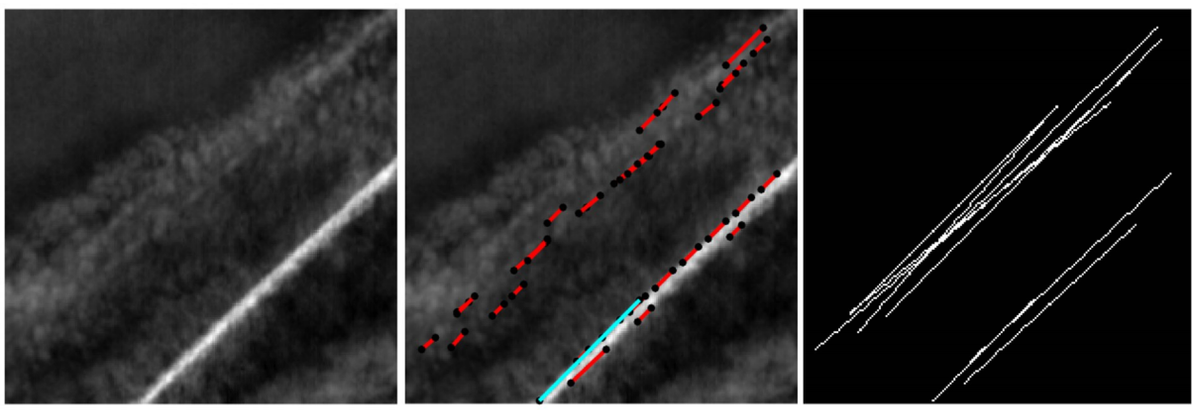


图1 所提方法流程图

Fig. 1 Flowchart of proposed method



(a)　　(b)　　(c)

图 2　(a) 原图;(b) 检测边缘不连续现象;(c) 合并相同参数的检测边缘

Fig. 2　(a) original image;(b) Detected edge discontinuity;(c) merge detected edges with the same parameters

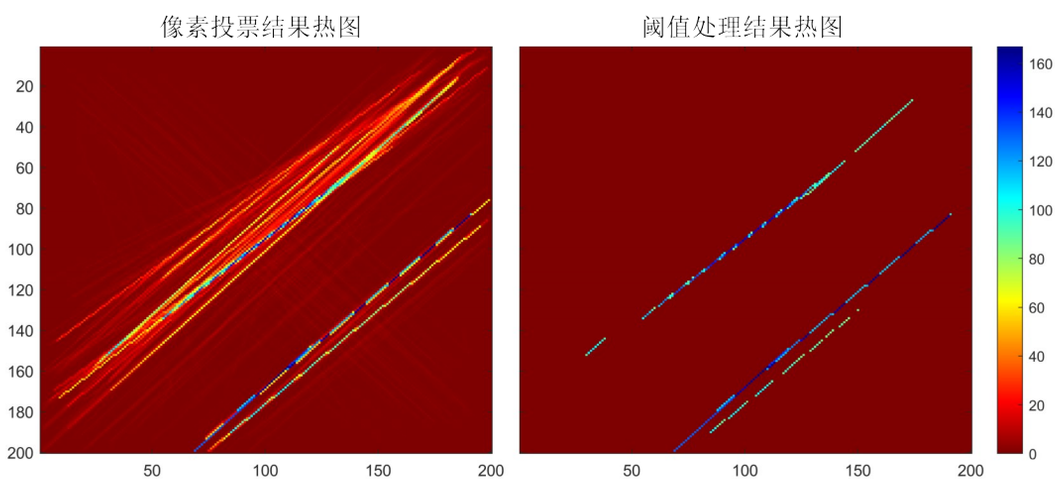


图 3　像素投票与阈值处理

Fig. 3　Pixels voting and filtering

进行阈值滤波,起到抑制背景、增强目标的作用。光谱特征提取模块最终输出异常值矩阵B,B与原图像空间尺寸相同。

最后,采用双向验证模型对上述两个模块得到的结果进行选择性融合。在得到空间、光谱两个特征提取模块的特征描述矩阵后,基于羽流侧的异常值得分比背景侧更高的假设,依据导向滤波[21]的思想,利用一个滑动窗口,窗口中心沿空间维特征提取结果的目标位置移动,过程中动态地比较对应位置的局部范围在光谱维检测结果中的异常程度。非羽流的情况下两侧异常值不存在梯度趋势,而存在羽流的情况下两侧局部区域必然存在梯度趋势,双向验证的设计提高定位精度的同时解决了羽流侧的方向性判定问题。

双向验证模型的数学描述如下:假设最终结果矩阵为M,$M_{i,j}^{k}$表示以坐标(i,j)为中心,以奇数k为维度的窗口所分割出的子矩阵,矩阵A为空间维特征提取模块得到的边界响应矩阵,矩阵B为光谱维特征提取模块得到的异常值矩阵,A、B均与原三维高光谱图像空间维尺寸相同。当矩阵A中位置(i,j)处元素$a_{i,j}>0$时进行计算,双向验证模型可用矩阵运算表示如下:

$$M_{ij}^{k}=\left(J_{k,k}-I_{k}+G_{k}\right)*\left(\sigma T_{k}*B_{ij}^{k}+(1-\sigma)T_{k}^{T}*B_{i,j}^{k}\right),\quad a_{ij}>0 \tag{2}$$

$$\sigma=\begin{cases}1 & sum\left(B_{i,j}^{k}*T_{k}\right)-sum\left(B_{i,j}^{k}*T_{k}^{T}\right)>0\\ 0 & otherwise\end{cases} \tag{3}$$

其中,式(2)中的*运算为矩阵的Hadamard积,是两个同样大小的矩阵对应位置元素相乘的结果;$J_{k,k}$为k阶全1矩阵;I_{k}为单位矩阵;G_{k}为仅在中心位置为

1,其余位置均为0的k阶矩阵;T_k为k阶上三角矩阵,取值均为1,T_k^T为T_k的转置矩阵;σ为常数,起选择作用,由式(3)计算得到,其中$sum(\cdot)$操作对矩阵进行求和,假设X为$m \times n$的矩阵,$x_{i,j}$为对应(i,j)位置上的元素,则$sum(X)=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}x_{i,j}$,$\sigma$控制保留滑动窗口沿对角线划分后的两侧中异常值较大的一侧。

双向验证过程将原来的高维检测问题大幅降维,计算量减少的同时提高了准确率、降低了虚警率,检测结果近似真值图的蒙板效果。

2.2 评价指标

选择准确率(Accuracy,简写为Acc)、F1值、虚警率(False Alarm,简写为FA)作为定量评价指标。准确率反映模型正确判断的样本占样本总数的比例,准确率越高模型性能越好;F1度量是基于查准率(Precision,简写为Prec)与查全率(Recall)的调和平均,反映模型准确全面判断样本的能力,F1值越高模型性能越好;虚警率反映的是模型对负样本的判断能力。

将图像中的像元分为目标与背景两类,TP表示模型将目标像元正确判断为目标的像元个数,FN表示模型将目标像元错误判断为背景的像元个数,FP表示模型将背景像元错误判断为目标的像元个数,TN表示模型将背景像元正确判断为背景的像元个数。上述指标可以表示为:

$$Acc=\frac{TP+TN}{TP+FN+FP+TN} \quad , \quad (4)$$

式(4)为准确率的计算公式,分子代表模型所有正确判断的像元个数,分母则是判断的像元总数。准确率反映了模型整体"正确判断"的能力。

$$Prec=\frac{TP}{TP+FP} \quad , \quad (5)$$

$$Recall=\frac{TP}{TP+FN} \quad , \quad (6)$$

式(5)(6)是定义F1值时涉及到的查准率与查全率两个指标,式(5)为查准率,反映模型预测目标时的准确程度,式(6)为查全率,反映模型预测背景时的准确程度。

$$F1=\frac{2}{\frac{1}{Prec}+\frac{1}{Recall}}=\frac{2*Prec*Recall}{Prec+Recall} \quad , \quad (7)$$

式(7)为F1值的计算公式,综合了模型对正例与反例的预测能力,可以规避模型将全部像元预测为目标或预测为背景的极端情况造成的指标虚高。

$$FA=\frac{FP}{TP+FP} \quad , \quad (8)$$

式(8)为虚警率的计算公式,反映模型预测背景像元的准确程度。在异常检测中,图像背景像元所占比例往往超过总像素的95%,因此,模型对负样本的判断能力对于模型性能的评估也非常重要,虚警率越低说明模型的性能越好。

3 结果

3.1 识别飞行器尾迹的理论依据

尾迹在全局视角下具有线性特征,如图2(a)所示,但由于尾迹的成分易扩散,放大至局部视角观察时目标边缘模糊,尾迹内部没有可供识别的纹理信息。

尾迹的光谱特征,可从沿尾迹方向及垂直尾迹方向进行讨论。首先是沿尾迹方向。高分5号于不同时间地理位置拍摄到的A-F六景含飞行器的尾迹目标如图4所示。对图4中的6个目标(目标区域放大见图4中每景图下的(1)图),沿飞行器-尾迹方向对飞行器、飞行器与尾迹间区域、尾迹区域三部分取点(见图4中每景图下的(2)图),拉取对应位置经过辐射校正与大气校正的反射率光谱曲线。

图5为A-F各景的光谱曲线图,其中,A、B、C、E、F五景的(a)图为靠近飞行器端的信号变化情况,标记与曲线颜色由深红到浅红对应其图上位置沿飞行器-尾迹方向远离飞行器,b图为远离飞行器端的信号变化情况,标记与曲线颜色由深蓝到浅蓝对应其图上位置沿飞行器-尾迹方向远离飞行器;D景中沿飞行器-尾迹方向远离飞行器的变化过程中,信号变化呈现一致性规律,标记与曲线颜色由深红到浅红对应其图上位置沿飞行器-尾迹方向远离飞行器,D-(a)图为D-(b)图中的局部波段展示。

由图5分析可得,在沿飞行器-尾迹方向远离飞行器的尾迹处,反射率变化呈现明显规律性,随着距离的增大反射率逐渐下降。如图5(b)所示,除信号较弱、无确切规律变化的F景外,A-D四景均符合上述规律,且在1 500~1 700 nm波段与2 000~2 400 nm波段尤为清晰。近飞行器端规律变化一致性尚不清晰,推测可能与该范围内尾迹成分尚未稳定有关,而远飞行器端温度变化与化学反应则趋于稳定[3, 22]。

垂直尾迹方向的光谱曲线变化情况见图6。根据垂线与飞行器的距离远近选取a、b、c三个位置分析垂直尾迹方向上光谱曲线的变化。为近飞行器

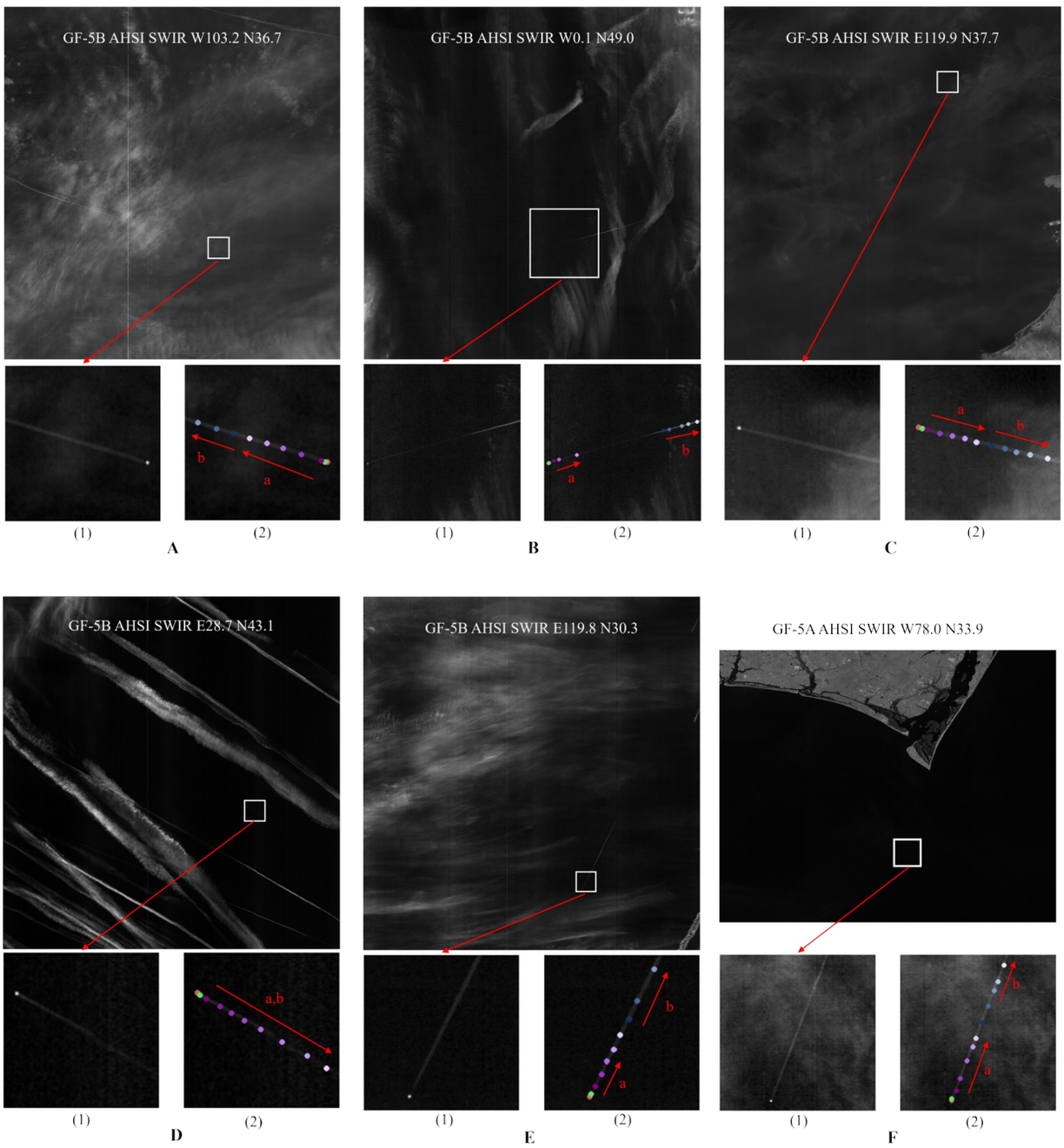


图 4　高分五号拍摄图像.（1）飞行器尾迹目标局部放大图像;（2）图 5（a）（b）中光谱曲线的取点位置

Fig. 4　Gaofen-5 satellite imagery.（1）Zoomed-in image of the aircraft-contrail target;（2）Sampling point locations of the spectral curve in Fig. 5（a）and（b）

附近的尾迹垂线,距离飞行器约 540 m,图 6-(b)为飞行器附近的尾迹垂线,距离飞行器约 1 660 m,为远飞行器端的尾迹垂线,距离飞行器约 5 690 m。以尾迹为中心,沿垂线远离尾迹有两个方向,以颜色区分,沿垂线向上远离尾迹为蓝色系曲线,沿垂线向下远离尾迹为紫红色系曲线,颜色随距离尾迹的距离变大而变浅,取点位置以尾迹中轴为中线呈对称分布,按照距离由近及远依次为 n 线(near,60 m),m 线(middle,180 m),f 线(far,300 m)。

在垂线距离飞行器较近的 a、b 两个位置,反射率整体强于距离飞行器较远的 c 位置,b 位置相较于 a 位置最大值下降 10%,c 位置相较 a 位置最大值下降 30%;随着垂线距离飞行器的距离增大,在图 6-(a)中:n 线全波段的反射率都低于 m 线,n 线在 1 000~1 400 nm 小于等于 f 线,n 线在 1 500~2 500 nm 与 f 线较为接近;在图 6-(b)中:n 线全波段的反射

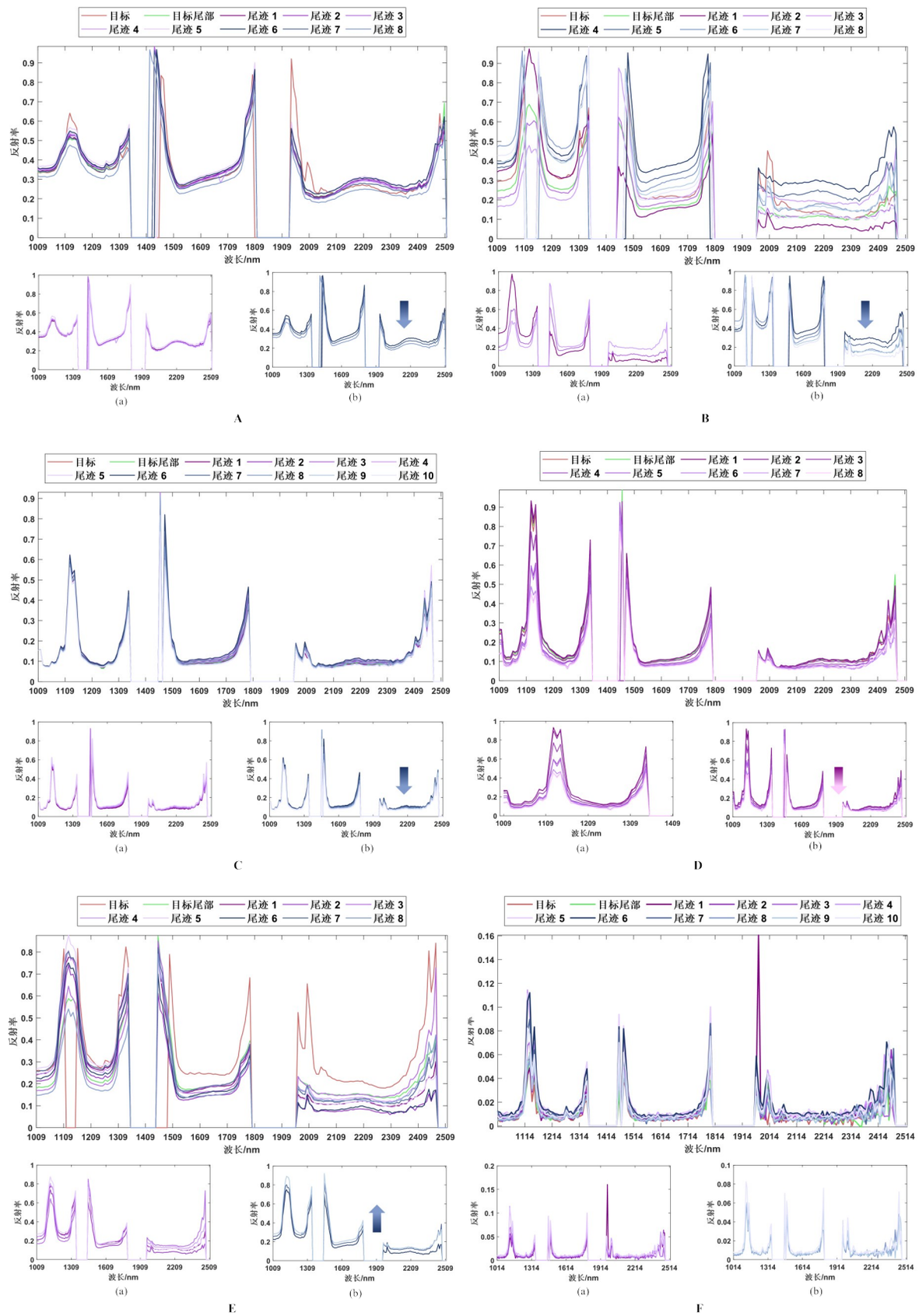


图 5 沿尾迹远离飞行器方向的光谱曲线.（a）近飞行器端；(b)远飞行器端

Fig. 5 Spectral curves along the contrails，away from the direction of the aircraft.（a）points close to aircraft；(b) points away from aircraft

率依然低于m线,但n线在全波段的信号大于等于f线;在图 6-(c)中:n线在2 000~2 500 nm波段反射率高于m、f线。由此可推测,在沿尾迹远离飞行器方向上,距离越大,同一垂线上近尾迹位置的反射率在1 400~2 500 nm波段内将逐渐高于远尾迹位置。

综合以上分析,结合飞行器尾迹的形成机理[22],猜测在沿飞行器-尾迹方向上靠后的位置,尾迹的成分趋于稳定,信号受背景的影响逐渐减弱,尾迹成分的光谱特征更为突出。除此之外,垂直尾迹方向上的信号强度梯度差异对于尾迹与背景的区分具有重要作用。

可见光波段获取的图像成像背景较为复杂,如图7所示,在陆地背景下进行成像时,部分可见光波段(如图7中746 nm、750 nm、827 nm、832 nm波段)不可见的尾迹目标,在短波红外波段仍可清晰成像(如图7中1 405 nm、1 413 nm、1 834 nm、1 910 nm波段),且与背景具有较高的区分度。因此,本文主要对GF-5 AHSI的短波红外波段图像进行尾迹检测。

3.2　飞行器尾迹的可识别性

2018年5月9日发射的高分五号卫星(GF-5)是世界上第一颗同时对陆地和大气进行综合观测的卫星,其上搭载的由中国科学院上海技术物理研究所研制的可见短波红外高光谱相机AHSI(the Advanced Hyperspectral Imager)是国际上首台同时兼顾宽覆盖和宽谱段的高光谱分辨率成像遥感仪器[6]。GF-5 AHSI覆盖400~2 500 nm的光谱谱段,330个光谱颜色通道,其中可见近红外光谱分辨率为5 nm、短波红外光谱分辨率为10 nm,幅宽60 km,空间分辨率30 m[6]。GF-5 AHSI宽覆盖与宽谱段的优势使其成为中国星载高光谱成像技术赶超国际

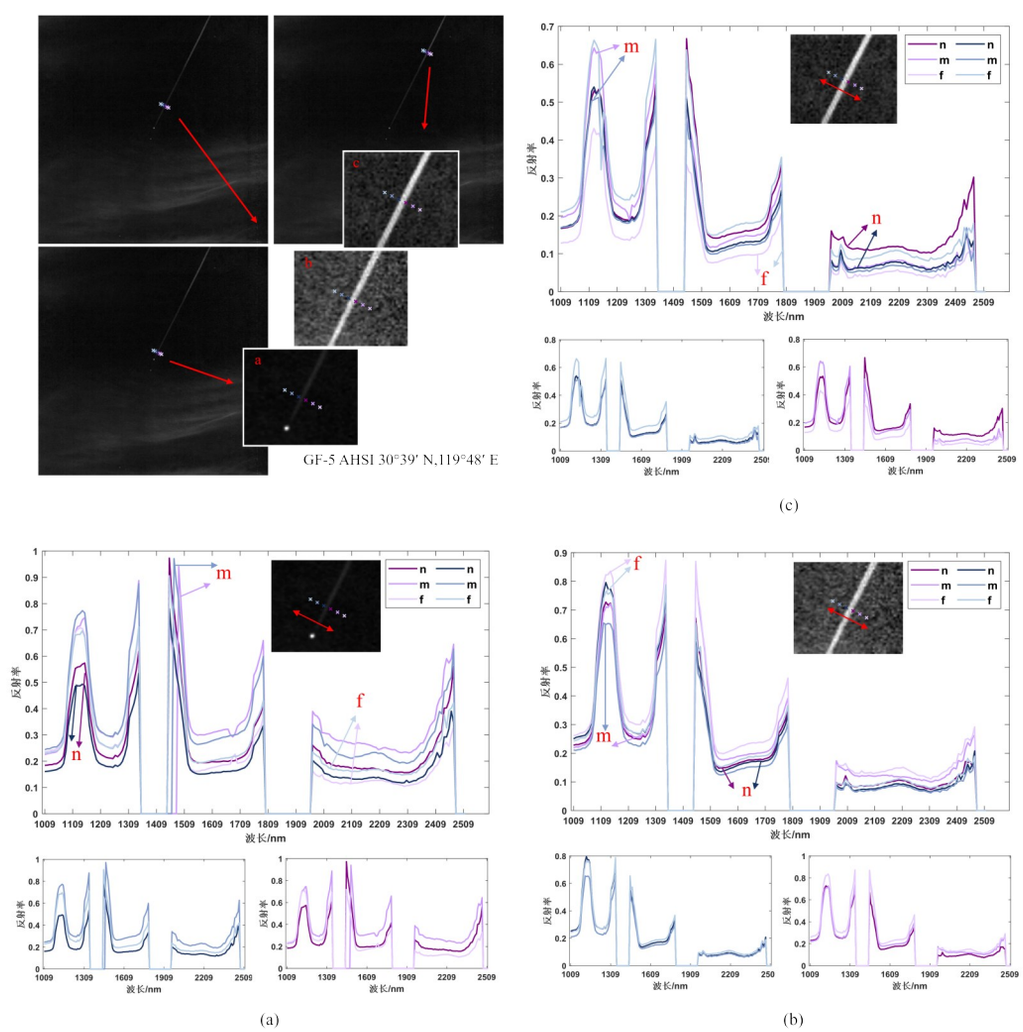


图6　垂直尾迹方向光谱变化:(a)近飞行器端;(b)尾迹中段;(c)远飞行器端

Fig. 6　Spectral variation along the vertical wake direction: (a) near the aircraft; (b) in the middle of contrails; (c) far from the aircraft

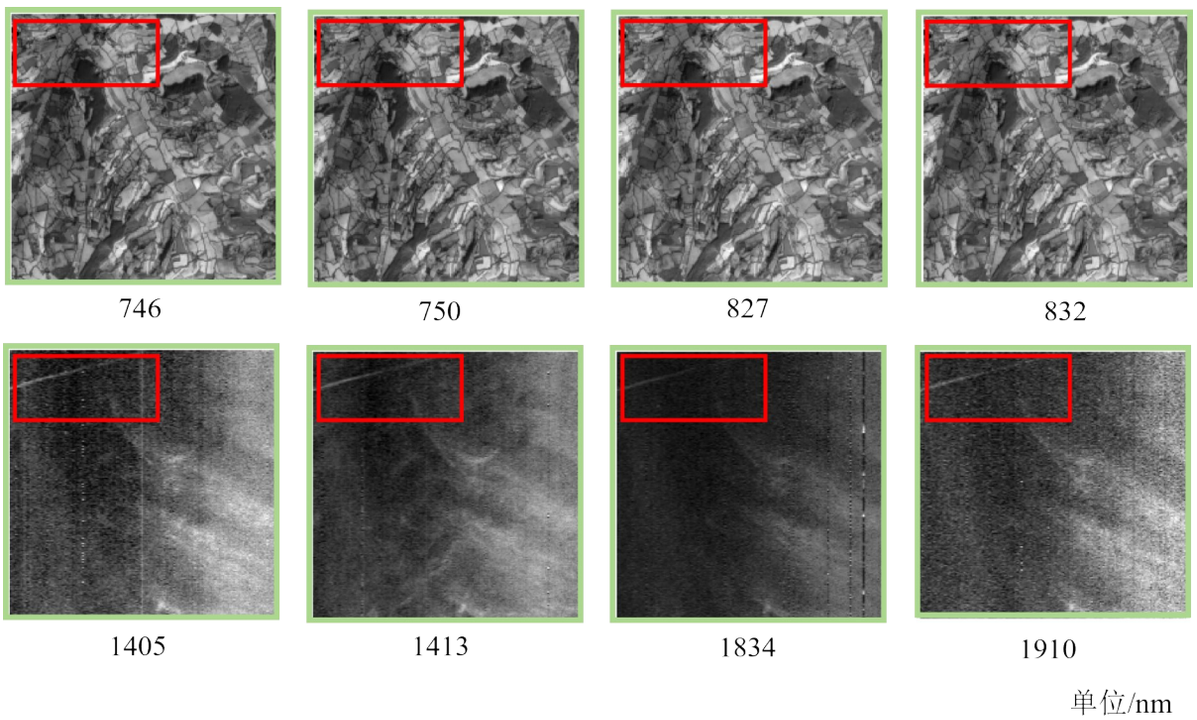


图7 GF-5可见波段(第一行)与短波红外(第二行)成像对比

Fig. 7 Comparison of GF-5 visible band (first row) and shortwave infrared (second row) imaging

的代表性载荷,为环境监测、资源勘探、防灾减灾等领域提供了优质的高光谱数据[6]。

基于3.1节中给出的识别飞行器尾迹的理论依据,采用2.1节所提出的方法对GF-5 AHSI短波红外图像进行实验验证,实验结果如图8所示。

图8(a)中原场景分布有薄云,图8(b)中原图像具有非均匀性,图8(c)中为海背景,图8(d)中原场景分布有厚云,所提方法在多种复杂背景分布下均能有效检测出羽流。

3.3 对比实验结果

实验数据使用GF-5 AHSI获取的短波红外数据,空间像素尺寸200×200,每景图像有180个波段,覆盖1 000~2 500 nm的波段范围,光谱分辨率为10 nm。采用RX[15]、LRX[16]、LRASR[17]、KIFD[18]四种异常检测方法检测其中的飞行器尾迹并进行对比分析。选择准确率(Accuracy)、F1值、虚警率(False Alarm)作为评价指标。前节中所提方法所得到的实验结果是二值分类结果,可以直接和真值图进行比较计算上述指标,但对比算法的实验结果并非二值分类结果,为统一计算,对各异常检测算法的实验结果取ROC曲线的最优值对应的TP(True Positive Rate)与FP(False Positive Rate)取值对结果进行二值化处理,计算评价指标。图9为对比实验结果,图中第1行为目标标注波段图,第2行为真值图,后续各行分别为采用RX算法、LRX算法、LRASR算法、KIFD算法和本文提出方法的实验结果。表1为对应的评价指标。

如表1所示,准确率最高的为本文方法,平均准确率在97%以上,其次是KIFD方法,平均准确率在92%以上,随后是RX方法,平均准确率在90%以上,LRX与LRASR的平均准确率则远低于前3种方法;对于F1值,本文方法相比KIFD于RX算法在平均表现上更好,平均F1值在52%以上,高于KIFD的39%以上与RX的28%;对于虚警率指标,本文方法取得了最低的平均虚警,在0.8%以下,低于KIFD的7%与RX的9%。飞行器尾迹的全局空间形态是线性,尾迹像素的分布明显独立于背景分布,因此采用马氏距离度量偏移程度且从全局视角估计背景的RX检测效果较好,各项指标都优于从局部视角估计背景分布的LRX。KIFD方法基于异常更易从背景中被隔离的思想,在构建隔离森林前采用了OTSU方法进行阈值分割,构建局部iForest时考虑了局部的连通分量,因此获得了较好的检测效果。而LRASR方法侧重于通过设计稀疏性准则来刻画数据集的局部结构,不适合于尾迹目像素的检测。本文方法针对尾迹目标综合了空间线性与光谱异

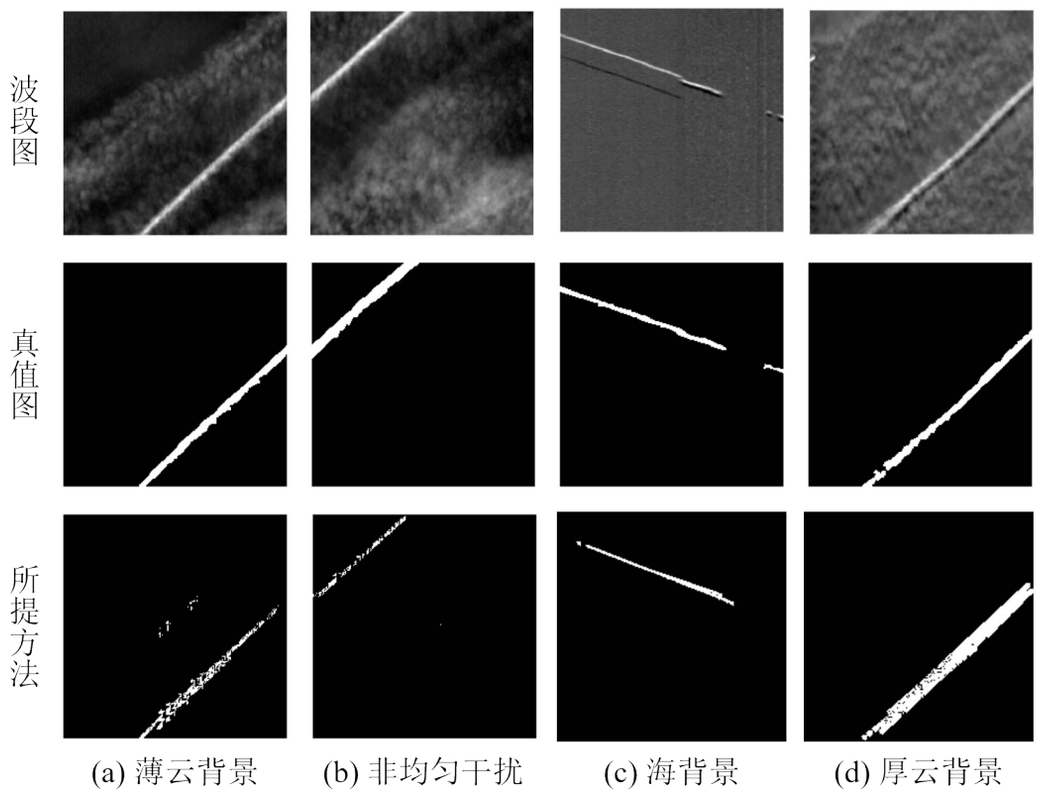


图 8　所提方法在GF-5 SWIR图像的实验结果：(a)Sence 1：GF-5 SWIR（薄云背景）.(b) Sence 2：GF-5 SWIR(非均匀性干扰).(c) Sence 3：GF-5 SWIR(海背景).(d) Sence 4：GF-5 SWIR(厚云背景)

Fig. 8　Experimental results of the proposed method on GF-5 SWIR images：(a) Scene 1：GF-5 SWIR (thin cloud background).(b) Scene 2：GF-5 SWIR (non-uniform interference).(c) Scene 3：GF-5 SWIR (sea background).(d) Scene 4：GF-5 SWIR (thick cloud background)

表 1　评价指标

Table 1　Evaluations note: the best result is displayed in bold, and the second-best result is underlined

	指标	RX	LRX	LRASR	KIFD	提出方法
Sence 1	Accuracy (↑)	0.9096	0.8025	0.8884	0.9392	**0.9804**
	F1 Score (↑)	0.3711	0.1981	0.3099	0.4741	**0.5751**
	False alarm (↓)	0.0908	0.1988	0.1110	0.0612	**0.0042**
Sence 2	Accuracy (↑)	0.8399	0.4500	0.6438	0.9278	**0.9787**
	F1 Score (↑)	0.2154	0.0624	0.1082	**0.4107**	0.3377
	False alarm (↓)	0.1598	0.5566	0.3609	0.0728	**0.0002**
Sence 3	Accuracy (↑)	0.9747	0.7669	0.8143	0.9201	**0.9864**
	F1 Score (↑)	0.4323	0.1009	0.1212	0.2891	**0.5310**
	False alarm (↓)	0.0173	0.2324	0.1838	0.0796	**0.0033**
Sence 4	Accuracy (↑)	0.8850	0.5736	0.9012	0.9128	**0.9732**
	F1 Score (↑)	0.1153	0.0721	0.3638	0.4063	**0.6755**
	False alarm (↓)	0.0942	0.4249	0.0988	0.0884	**0.0241**

注：最优结果加粗显示,次优结果标下划线

常的两个角度,比其它方法更适合于处理高光谱图像的飞行器尾迹检测任务。

需要说明的是,考虑到探测器拼接及条带噪声的影响,本文方法对霍夫变换检测的角度进行了限制,并且由于双向验证模型的优势,同时抑制了异常检测对条带噪声敏感的问题,降低了虚警。

4　结语

星载高光谱成像技术的高光谱分辨率为飞行器尾迹在短波红外波段的检测提供了新的识别框架,利用飞行器尾迹在短波红外波段呈现的光谱特征,可对后续航空对气候影响的物理化学分析与反隐身飞机等领域的研究提供新的思路。本文在分析对比了传统尾迹检测方法的特点后,提出了一种基于高光谱图像的飞行器尾迹检测方法,在GF-5数据上达到97%以上的准确率与2%以下的虚警率。尽管本文提供了一些有价值的分析,但由于时间和能力限制,未能对全球卫星数据进行系统研究,方法也存在局限性。然而,本文为后续研究奠定初步框架,提供了可借鉴的思路。

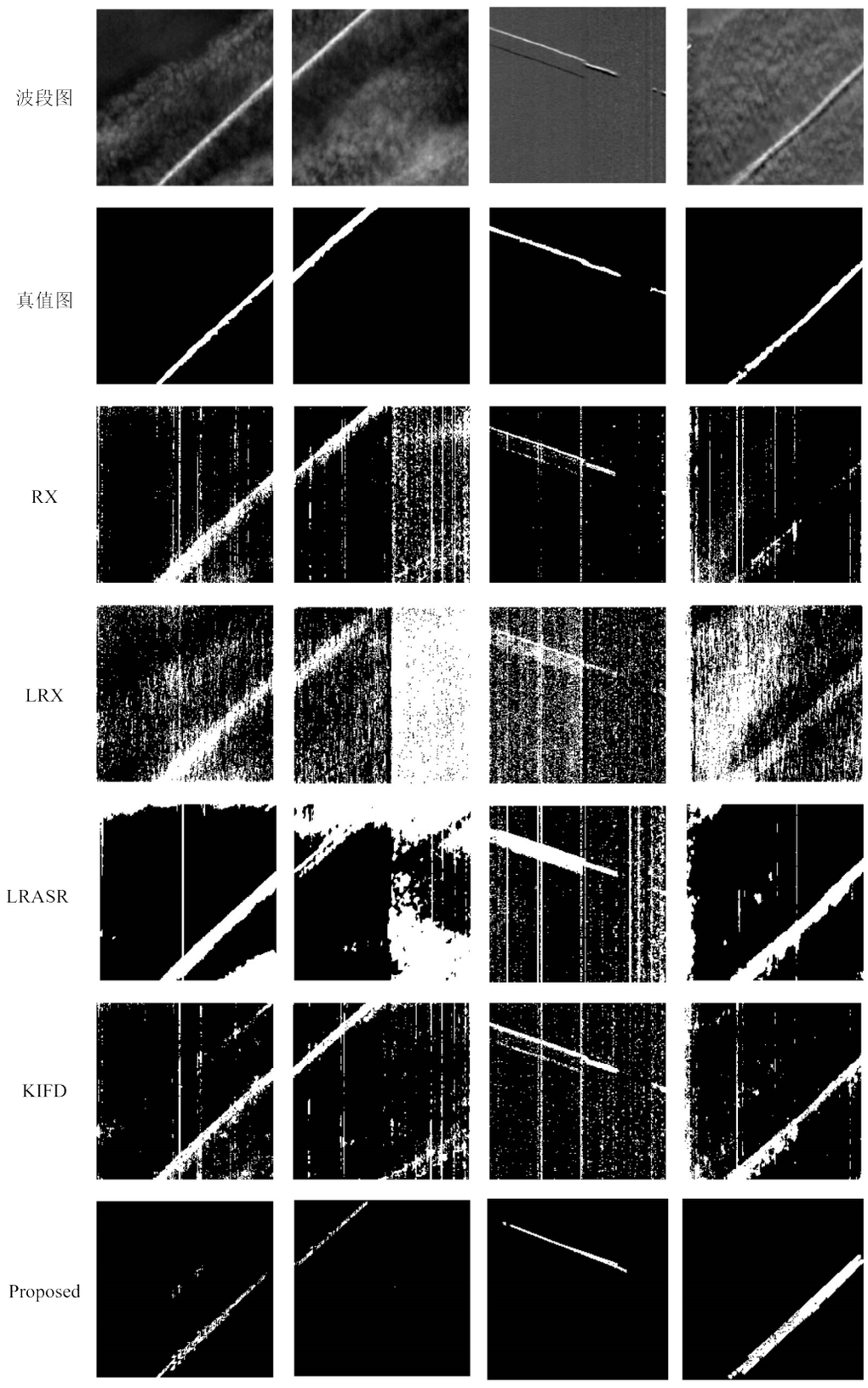


图 9 对比试验结果：(a)Sence 1：GF-5 SWIR（薄云背景）.(b) Sence 2：GF-5 SWIR(非均匀性干扰).(c) Sence 3：GF-5 SWIR(海背景).(d) Sence 4：GF-5 SWIR(厚云背景)

Fig. 9 Comparison of experimental results：(a) Scene 1：GF-5 SWIR (thin cloud background).(b) Scene 2：GF-5 SWIR (non-uniform interference).(c) Scene 3：GF-5 SWIR (sea background).(d) Scene 4：GF-5 SWIR (thick cloud background)

References

[1] Gryspeerdt E, Stettler M E, Teoh R, et al. Operational differences lead to longer lifetimes of satellite detectable contrails from more fuel efficient aircraft [J]. Environmental Research Letters, 2024, 19(8): 084059.

[2] Minnis P, Young D F, Garber D P, et al. Transformation of contrails into cirrus during SUCCESS [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(8): 1157-1160.

[3] Schumann U, Baumann R, Baumgardner D, et al. Properties of individual contrails: a compilation of observations and some comparisons [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(1): 403-438.

[4] Lee T F. Jet contrail identification using the AVHRR infrared split window [J]. Journal of Applied Meteorology (1988-2005), 1989: 993-995.

[5] Su H, Wu Z, Zhang H, et al. Hyperspectral anomaly detection: A survey [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2021, 10(1): 64-90.

[6] Liu Y-N, Sun D-X, Hu X-N, et al. The advanced hyperspectral imager: Aboard China's GaoFen-5 satellite [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2019, 7(4): 23-32.

[7] Joseph J, Levin Z, Mekler Y, et al. Study of contrails observed from the ERTS 1 satellite imagery [J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(3): 366-372.

[8] Bakan S, Betancor M, Gayler V, et al. Contrail frequency over Europe from NOAA satellite images[C]//Annales Geophysicae. Gauthier-Villars, 1994, 12: 962-968.

[9] Engelstad M, Sengupta S, Lee T, et al. Automated detection of jet contrails using the AVHRR split window [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(8): 1391-1412.

[10] Weiss J M, Christopher S A, Welch R M. Automatic contrail detection and segmentation [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1998, 36(5): 1609-1619.

[11] Ng J Y H, McCloskey K, Cui J, et al. Contrail detection on GOES-16 ABI with the OpenContrails dataset [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 62: 1-14.

[12] Li L, Zhou X, Hu Z, et al. On-orbit monitoring flying aircraft day and night based on SDGSAT-1 thermal infrared dataset [J]. Remote Sensing of Environment, 2023, 298: 113840.

[13] Dekoutsidis G, Feidas H, Bugliaro L. Contrail detection on SEVIRI images and 1-year study of their physical properties and the atmospheric conditions favoring their formation over Europe [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2023, 151(3): 1931-1948.

[14] Yu J, Zhou X, Li L, et al. High-resolution thermal infrared contrails images identification and classification method based on SDGSAT-1 [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 131: 103980.

[15] Reed I S, Yu X. Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution [J]. IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing, 1990, 38(10): 1760-1770.

[16] Kwon H, Der S Z, Nasrabadi N M. Adaptive anomaly detection using subspace separation for hyperspectral imagery [J]. Optical Engineering, 2003, 42(11): 3342-3351.

[17] Li J, Zhang H, Zhang L, et al. Hyperspectral anomaly detection by the use of background joint sparse representation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(6): 2523-2533.

[18] Li S, Zhang K, Duan P, et al. Hyperspectral anomaly detection with kernel isolation forest [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2019, 58(1): 319-329.

[19] Xu Y, Wu Z, Li J, et al. Anomaly detection in hyperspectral images based on low-rank and sparse representation [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2015, 54(4): 1990-2000.

[20] Bresenham J E. Algorithm for computer control of a digital plotter [M]//BRESENHAM J E. Seminal graphics: pioneering efforts that shaped the field, Volume 1. Association for Computing Machinery. 1998: 1-6.

[21] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2012, 35(6): 1397-1409.

[22] Kärcher B. Formation and radiative forcing of contrail cirrus[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 1824.