

基于波段选择的 RX 改进算法

彭 娜

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对高光谱检测亚像元飞机的问题, 提出基于大气吸收谱段的改进 RX 异常检测算法, 实现亚像元检测能力和检测效率的提升。阐述了改进算法的基本原理, 对比了 10 km 高度和地面大气吸收系数的曲线差异, 建立了改进算法的检测模型, 采用仿真的客用飞机可见-短波高光谱数据和海水背景高光谱数据, 获得了信噪比 10 dB 的高光谱仿真图像。采用经典 RX 算法和基于 4 个大气吸收波段的改进 RX 算法, 对 150 个谱段仿真图像进行检测, 获得了 2 种算法亚像元的检测能力和受试者工作特征(ROC)曲线。结果显示, 改进 RX 算法能够有效提升亚像元检测能力, 缩短检测时间。

关键词: 高光谱; 检测; 异常检测; RX 算法; 大气吸收

中图分类号: V 19 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.02.011

Improved RX Algorithm Based on Band Selection

PENG Na

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to solve the problem of hyper-spectral detection of sub-pixel aircrafts, an improved RX anomaly detection algorithm based on atmospheric absorption spectra is proposed to improve the detection capability and detection time efficiency of the sub-pixels. The basic principle of the improved algorithm is expounded, and the difference curve of the atmospheric absorption coefficient between the 10 km altitude and the ground is research. The detection model of the improved algorithm is established. A hyper-spectral simulation image of a signal-to-noise ratio of 10 dB is obtained with the visible-short wave infrared hyper-spectral data of passenger aircrafts and the sea water hyper-spectral data by simulation. The classical RX algorithm and the improved RX algorithm based on 4 atmospheric absorption bands are used to detect 150 spectrum simulation images, and the detection capability and receiver operating characteristic (ROC) curves of the sub-pixels are obtained with the classical and improved algorithms. The results show that improved RX algorithm can effectively improve the detection capability of the sub-pixels and shorten detection time.

Key words: hyper-spectrum; detection; anomaly detection; RX algorithm; atmospheric absorption

0 引言

高光谱图像目标检测按照目标光谱是否可知可分为目标检测和异常检测^[1]。高光谱图像的异常检测方法因为不需要先验信息, 在实际中获得了广泛的应用^[2-3]。提升高光谱图像异常像元的检测效率和亚像元的检测能力是异常检测的重要方向^[4-5]。KWON 等^[6]提出的基于广义似然比检验的恒虚警

RX 检测器(RXD), 是异常检测的经典算法。蒲晓丰等^[7]提出了一种改进的 RX(I-RX)异常检测算法, 该算法利用噪声背景集, 估计背景的协方差矩阵, 潜在异常集作为测试样本进行异常检测, 能够避免出现 RX 算法中背景估计存在的问题。

随着高光谱应用范围的拓展, 机场、政府等重要区域的无人机监测、客用飞机的安全追踪等也可

收稿日期: 2020-05-24; 修回日期: 2020-06-23

基金项目: 装备预研基金(9140A21010114HT90065)

作者简介: 彭 娜(1981—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为图像处理与模式识别。

以使用高光谱遥感数据,但是传统算法往往是针对地物目标,对飞机等具有一定高度的物体没有针对性的检测算法。由于飞机具有高度信息实时性的要求,有针对性的异常检测算法成为重要的研究方向^[8]。本文针对飞机飞行过程中,其大气衰减特性与地物目标的大气衰减特性存在差异,提出了基于大气吸收谱段的改进 RX 异常检测算法,提升了检测效率和检测概率。

1 模型建立

经典的异常检测 RX 算法,其检测窗口包括目标窗口和背景窗口, RX 算法假设数据空间白化而且符合高斯分布,在此基础上通过分析窗口的均值与方差,并与设定的阈值比较判断是否为异常值从而判断异常像元。设高光谱图像数据谱段数为 k , 每个谱段高光谱图像的像素数为 $M \times N$, 则每个像素点的数据可以表示为

$$\mathbf{X}_b = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{M \times N}] \quad (1)$$

式中: \mathbf{X}_b 为图像像素点矩阵; x_i 为每个像素点的光谱, $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}]$, x_{ki} 为第 i 个像素点第 k 个谱段的光谱。

设 H_0 为目标不存在, H_1 为目标存在, 则待检测点的存在判断表示为^[8]

$$\begin{cases} H_0: \mathbf{x} = \mathbf{n} \\ H_1: \mathbf{x} = \mathbf{a} + \mathbf{n} \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{x} 为待检测向量; \mathbf{n} 为背景光谱向量; \mathbf{a} 为目标光谱向量。

RX 算法表示为

$$RX(\mathbf{r}_x) = (\mathbf{r}_x - \mu_b)^T \mathbf{C}_b^{-1} (\mathbf{r}_x - \mu_b) \quad (3)$$

式中: $RX(\mathbf{r}_x)$ 为 RX 算子; \mathbf{r}_x 为待检测像素光谱向量; μ_b 为背景窗口均值; \mathbf{C}_b 为背景窗口协方差。

RX 算子的检测结果往往只有 2 种结果, 要么是背景, 要么是异常值^[9]。结合式(2)和式(3), RX 异常检测结果判定表示为^[10]

$$H_X = \begin{cases} RX(\mathbf{r}_x) < \lambda \\ RX(\mathbf{r}_x) > \lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ 为检测阈值。

上述经典的 RX 算法应用于飞机目标检测时, 由于高光谱的谱段往往在 200 个以上, 进行背景窗口协方差矩阵 \mathbf{C}_b 及其逆矩阵计算时, 计算量较大, 计算时间较长^[9], 针对传统的地面静止目标检测时,

算法对时间的要求往往不大。但是对于飞行的飞机来说, 异常检测的时间效率越高越好, 因此, 提出基于大气吸收波段选择的 RX 异常改进算法。该算法的基本思想是飞行的飞机与传统的地物目标不同, 飞机在一定高度时, 地物目标辐射的大气吸收系数和飞机的大气吸收系数存在差异^[10], 导致其可见-近红外谱段的反射到达传感器时, 其衰减的程度是不同的, 如图 1 所示。在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 波段下, 高度 0.1 km 和 10 km 大气吸收系数的差异, 在 $0.70 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 、 $1.32 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 、 $1.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 共 4 个典型的大气吸收谱段, 飞机与地物的吸收系数差异极为明显。而 RX 算法是寻找目标信号与背景信号的能量差异化算法, 寻找增强目标能量的谱段或者背景噪声抑制的谱段组合, 可以在亚像元检测中更好地表征飞机与背景的差异。

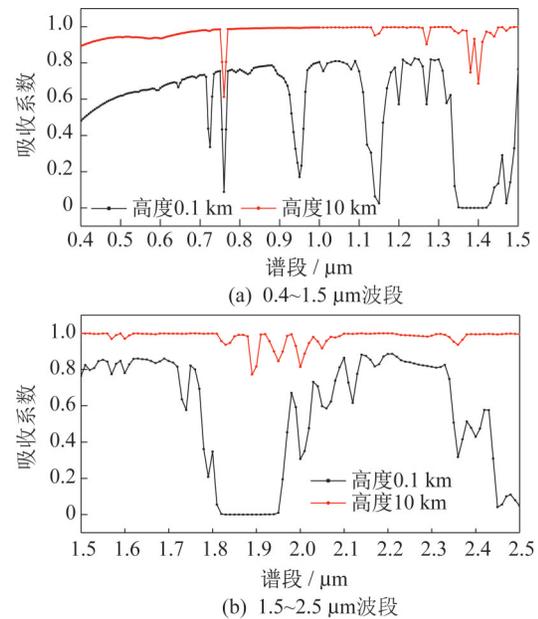


图 1 高度 0.1 km 和 10 km 大气系数的差异

Fig.1 Difference of atmospheric absorption coefficient between the 0.1 km altitude and the 10 km altitude

本文提出基于大气吸收谱段的改进 RX 异常检测算法, 首先进行大气吸收谱段的选择, 优选的谱段重新组合形成高光谱图像; 然后再进行 RX 异常检测, 表示为

$$\begin{cases} \mathbf{r}_i = d_{\max 1} \cup d_{\max 2} \cup \dots \cup d_{\max N} \\ RX(\mathbf{r}_x) = (\mathbf{r}_x - \mu_b)^T \mathbf{C}_b^{-1} (\mathbf{r}_x - \mu_b) \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{r}_i 为第 i 个像素点的光谱向量; d_i 为飞机与背景的光谱差异距离。

2 仿真模型

飞机目标的模拟分几何特征的模拟和红外辐射特征的模拟部分来完成。红外辐射特征的模拟主要考虑了飞机的蒙皮辐射和发动机尾焰辐射部分,均采用普朗克公式计算求得^[11-13]。采用在轨卫星实际获取的海背景图像作为背景起伏数据,采用仿真的某客用飞机可见-短波红外高光谱数据和海背景的可见-短波红外高光谱数据为输入,模拟获得海背景下该客用飞机在不同亚像元丰度下的高光谱图像,以0.4为亚像元飞机丰度起点,依次序列形成0.1~0.4的丰度图像,仿真参数见表1。

表1 图像仿真参数

Tab.1 Parameters of the image simulation

参数	数值
遥感器空间分辨率/m	40
遥感器光谱分辨率/nm	5
遥感器相对定标误差系数	0.96~1.04
初始像元丰度	0.4
噪声类型	高斯白噪声
高光谱波段/ μm	0.4~2.5
信噪比/dB	10
吸收波段数	4

仿真模拟 10 km 高度下,飞机亚像元不同丰度下的图像,将目标规则分布在图像上的 130×150 像素空间内,共 75 个目标点,亚像元丰度以 0.000 4 为梯度设置,空间相对位置排序如图 2(a)所示,用于图像仿真的客用飞机及海水仿真辐射亮度如图 2(b)和图 2(c)所示。

3 仿真试验及结果分析

通过 Landsat 卫星观测背景图像作为背景起伏数据,与背景辐射特性仿真数据和目标光谱辐射仿真数据构建高光谱仿真图像。高光谱图像仿真获得的含飞机不同亚像元丰度的高光谱三维数据,如图 3 所示。图 3(a)为 150 个谱段数据,图 3(b)为 4 个吸收谱段重组后的新高光谱三维数据序列。

采用经典 RX 算法和本文提出的基于大气吸收谱段的改进 RX 异常检测算法,对上述图像数据进行异常检测研究。RX 算法检测以 150 个谱段为输入,改进的 RX 算法以 $0.70 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 、 $1.32 \sim 1.44 \mu\text{m}$ 、 $1.8 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 共 4 个谱段为输入,获得 75 个不同丰度飞机的检测结果,见表 2 和表 3。

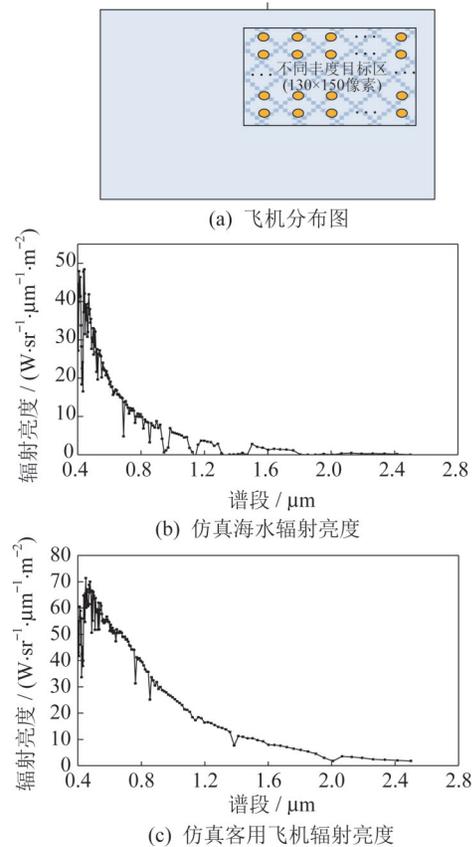
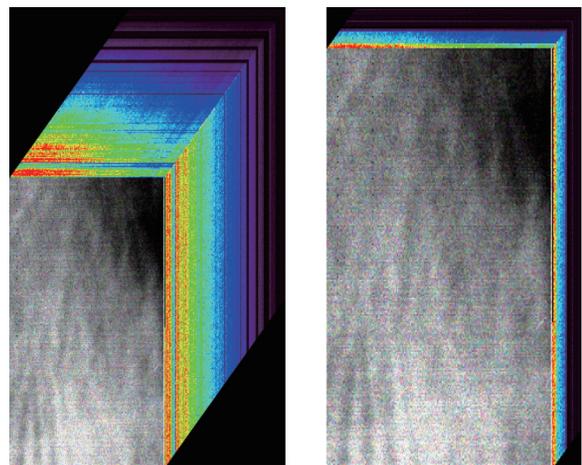


图2 飞机在图像中的空间分布及海水背景、客用飞机辐射特性曲线

Fig.2 Spatial distribution of the aircraft in the image and radiation characteristic curves of the seawater background and the simulated passenger aircraft



(a) 高光谱仿真数据集 (b) 吸收谱段重组形成的高光谱数

图3 高光谱图像仿真结果

Fig.3 Simulation results of the hyper-spectral image

对比表 2 和表 3 中的检测结果可以看出,随着亚像元丰度的减小,目标的检测概率不断降低。对

表 2 不同丰度下的RX检测结果

Tab. 2 Detection results of the RX algorithm under different abundances

虚警率	检测概率				
	0.40~0.34	0.34~0.28	0.28~0.22	0.22~0.16	0.16~0.10
10^{-2}	6.67%	—	—	—	—

表 3 不同丰度下的改进RX算法检测结果

Tab. 3 Detection results of the improved RX algorithm under different abundances

虚警率	检测概率				
	0.40~0.34	0.34~0.28	0.28~0.22	0.22~0.16	0.16~0.10
10^{-5}	6.67%	—	—	—	—
10^{-4}	33.50%	46.70%	—	—	—
10^{-3}	100%	100%	40.00%	—	—
10^{-2}	100%	100%	100%	40.00%	—

比表 3 中 10^{-4} 和 10^{-3} 虚警率, 丰度 0.40~0.34 的亚像元检测概率, 由于 10^{-4} 虚警率要设置较大的检测阈值, 导致部分亚像元目标没有检出, 因此出现表中 10^{-4} 下目标检测概率仅为 33.5%。对比两种方法在 10^{-2} ~ 10^{-5} 的虚警率区间的目标检测概率结果可以看出, 由于本文使用的图像信噪比为 10 dB, 噪声相对较大, 传统 RX 检测算法仅能在高虚警率的情况下检测出部分异常, 而改进 RX 检测算法可在较优的虚警率下检测出更多的亚像元丰度异常像素, 对于亚像元目标的检测能力提升较为明显。

从两种方法计算需要的时间来看, 采用 i5-1.6 GHz 处理器, 经典 RX 算法的计算用时为 0.508 4 s, 而改进的 RX 算法计算用时缩短至 0.148 1 s。

经典 RX 算法和改进 RX 算法的受试者工作特征 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 曲线如图 4 所示^[14], 可以明显看出低信噪比高光谱图像, 改进 RX 算法在性能上有所提升。

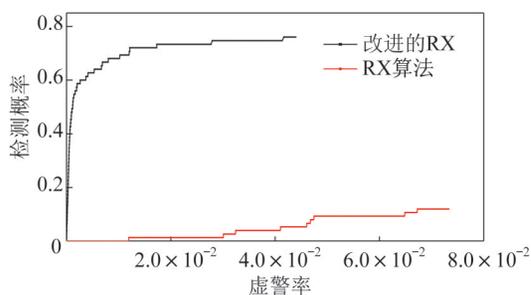


图 4 ROC 曲线对比

Fig. 4 Comparison of the ROC curves

4 结束语

本文提出了基于大气吸收谱段的改进RX异常检测算法, 基于海背景下仿真的高光谱亚像元图像完成了算法检测性能对比验证。结果显示, 改进的RX算法有助于检测更小丰度的异常亚像元, 同时提升检测的时间效率。但本文仅考虑了水背景的检测场景, 后续将研究在多种背景下算法的可用性, 并进一步结合基于空谱融合特征主动学习的高光谱图像分类算法^[15], 开展目标分类识别方法研究。

参考文献

- [1] 张宁, 陈嘉杰, 伍伟, 等. 基于增量学习的高光谱图像目标检测[J]. 上海航天, 2019, 36(5): 44-49.
- [2] ZHANG B, YANG W, GAO L R, et al. Real-time target detection in hyperspectral images based on spatial-spectral information extraction [J]. Journal on Advances in Signal Processing, 2012(1): 1-15.
- [3] 童庆禧, 张兵, 郑兰芬. 高光谱遥感: 原理、技术与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [4] 吴玲达, 姚中华, 任智伟. 面向战场环境感知的高光谱图像处理技术综述[J]. 装备学院学报, 2017, 28(3): 1-7.
- [5] 贺霖, 潘泉, 邸章华, 等. 高光谱图像目标检测研究进展 [J]. 电子学报, 2009, 37(9): 2016-2024.
- [6] 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.
- [7] 蒲晓丰, 雷武虎, 张林虎, 等. 基于改进RX算法的高光谱异常检测[J]. 中国图象图形学报, 2011(9): 78-82.
- [8] 谌德荣, 宫久路, 何光林, 等. 高光谱图像全局异常检测RFS-SVDD算法[J]. 宇航学报, 2010(1): 234-238.
- [9] 孙源张, 永锋. 高光谱图像RX异常检测系统设计[J]. 中国集成电路, 2018(10): 58-65.
- [10] 邓贤明, 苗放, 翟涌光, 等. 基于形态学的两种高光谱目标探测改进算法[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2017, 56(1): 151-160.
- [11] 章永杰, 徐振亚, 李建勋. 飞机红外高光谱图像仿真模型研究[J]. 航空兵器, 2020, 27(4): 6.
- [12] 余红伟, 张艳宁, 袁和金, 等. 一种无监督高光谱图像分类算法[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(6): 1123-1127.
- [13] 刘辉, 白峰杉. 基于混合高斯过程模型的高光谱图像分类算法[J]. 高校应用数学学报, 2010(4): 5-11.
- [14] 刘嘉诚, 王爽, 刘伟华, 等. 显著性权重RX高光谱异常点检测[J]. 遥感学报, 2019(3): 418-430.
- [15] 王琰, 刘丽芹, 沈霞宏, 等. 基于空谱融合特征主动学习的高光谱图像分类[J]. 上海航天, 2019, 36(5): 50-56.