

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013 5
Vol.18 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013 年 5 月 第 18 卷 第 5 期(总第 205 期)

目 次

综述

- 中国图像工程:2012 章毓晋(483)
动态场景下的交通标识检测与识别研究进展 刘华平, 李建民, 胡晓林, 孙富春(493)

图像处理与编码

- 基于 PCA 硬阈值收缩的平滑投影 Landweber 图像压缩感知重构 李然, 干宗良, 朱秀昌(504)

图像分析和识别

- 利用视觉显著性和粒子滤波的运动目标跟踪 张巧荣, 冯新扬(515)
融合边缘测度的自然场景彩色图像区域分割 代沁伶, 王雷光, 洪亮(523)
场景语义树图像标注方法 刘咏梅, 杨帆, 于林森(529)
基于视锥细胞色适应生理机制的颜色恒常性计算 袁兴生, 王正志, 项凤涛(537)

医学图像处理

- 改进 FCM 和 LFP 相结合的白细胞图像分类 庞春颖, 刘记奎, 韩立喜(545)
局部高斯分布拟合的脑 MR 图像分割及有偏场校正 崔文超, 王毅, 樊养余, 冯燕, 郝重阳(552)

遥感图像处理

- 局部投影可分离的高光谱图像异常检测 刘明, 杜小平, 夏鲁瑞(558)
基于结构特征的遥感影像匹配 寇媛, 徐景中(565)

“第 9 届中国计算机图形学大会”专栏

- 结合浅景深与构图的图像质量评价 顾婷婷, 郭延文, 殷昆燕(574)
结合精确大气散射图计算的图像快速去雾 甘佳佳, 肖春霞(583)
多特征综合的视频拷贝检测 林莹, 杨扬, 凌康, 肖金伟, 武港山(591)
真实感雨线绘制 江隆盛, 吴恩华(600)
误差云映射的深度融合 3 维重建 陈亚当, 蔡仲谋, 吴恩华(607)

- “第八届中国系统建模与仿真技术高层论坛”征文通知 封 3

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 5 May 2013

Contents

Review

- Image engineering in China: 2012 Zhang Yujin(483)
- Recent progress in detection and recognition of the traffic signs in dynamic scenes
..... Liu Huaping, Li Jianmin, Hu Xiaolin, Sun Fuchun(493)

Image Processing and Coding

- Smoothed projected Landweber image compressed sensing reconstruction using hard thresholding based on principal components analysis
..... Li Ran, Gan Zongliang, Zhu Xiuchang(504)

Image Analysis and Recognition

- Object tracking based on visual saliency and particle filter Zhang Qiaorong, Feng Xinyang(515)
- Regional segmentation of natural scene color images by integrating edge cues Dai Qinling, Wang Leiguang, Hong Liang(523)
- Automatic image annotation based on scene semantic trees Liu Yongmei, Yang Fan, Yu Linsen(529)
- Color constancy algorithm based on biological mechanism; color adaptation of cone cells
..... Yuan Xingsheng, Wang Zhengzhi, Xiang Fengtao(537)

Medical Image Processing

- White blood cells image classification based on improving the connection of FCM and LFP
..... Pang Chunying, Liu Jikui, Han Lixi(545)
- Multiphase level set method for segmentation and bias correction of brain MR images
..... Cui Wenchao, Wang Yi, Fan Yangyu, Feng Yan, Hao Chongyang(552)

Remote Sensing Image Processing

- Anomaly detection method based on separable local projection in hyperspectral imagery ... Liu Ming, Du Xiaoping, Xia Lurui(558)
- Algorithm for remote sensing images matching based on the structure characteristics Kou Yuan, Xu Jingzhong(565)

Issum of the Chinagraph '2012

- Image quality assessment combining low DoF and composition Gu Tingting, Guo Yanwen, Yin Kunyan(574)
- Fast image dehazing based on accurate scattering map Gan Jiajia, Xiao Chunxia(583)
- Video copy detection based on multiple visual features synthesizing
..... Lin Ying, Yang Yang, Ling Kang, Xiao Jinwei, Wu Gangshan(591)
- Photorealistic rendering of rain streaks Jiang Longsheng, Wu Enhua(600)
- Three dimensional reconstructions based on error clouds mapping Chen Yadang, Cai Zhongmou, Wu Enhua(607)

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: 文章编号: 1006-8961(2013)05-0558-07

论文引用格式: 刘明, 杜小平, 夏鲁瑞. 局部投影可分离的高光谱图像异常检测[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(5): 558-564.

局部投影可分离的高光谱图像异常检测

刘明, 杜小平, 夏鲁瑞

装备学院, 北京 101416

摘要: 针对高光谱异常检测中临近异常像素相互干扰和背景地物复杂的问题, 提出基于局部投影可分离的高光谱图像异常检测算法。在归一化的数据中, 将待测像素光谱作为参考光谱, 构造目标子空间, 然后把邻域背景像素投影到该子空间, 用投影后向量模值构造异常度计算式。最后将检测到的异常与全局主要背景地物进行比对, 消除部分虚警。利用 HyMap 高光谱数据进行仿真实验结果表明, 本文算法具有克服背景复杂性和干扰点的影响, 尤其对异类干扰点的抑制效果更佳。

关键词: 高光谱图像; 异常检测; 局部投影; 归一化处理

Anomaly detection method based on separable local projection in hyperspectral imagery

Liu Ming, Du Xiaoping, Xia Lurui

Academy of Equipment, Beijing 101416, China

Abstract: Aiming at the interference of close outliers and the complexity of background features, a new anomaly detection method based on separable local projection in hyperspectral imagery is proposed. After normalizing the data, the test pixel spectrum is selected as the reference spectrum to build the target subspace. Then, the background pixels in close areas are projected onto this subspace and the formula of the abnormal degree is acquired through the modulus of the projection vectors. Finally, comparing the anomalies with the main surface features, parts of the false alarms are eliminated. The experiments were conducted on HyMap hyperspectral data and the results show that the proposed algorithm overcomes the impact of background complexity and interference pixels, especially in situations where the interference pixels and test pixel are in different classes.

Key words: hyperspectral images; anomaly detection; local projection; normalized process

0 引言

高光谱图像具有很高的光谱分辨率, 能够提供地物的光谱维精细描述, 在目标探测中具有独特的优势。由于实际应用中难以获得目标的先验光谱信息, 以光谱差异为依据的异常检测引起了各应用领域的广泛关注。异常检测不需要目标先验信息, 可以在无监督模式下进行, 且不需要大气校正和辐射

校正等数据的预处理。异常检测结果中包含潜在目标, 可以作为目标检测和识别的输入。

高光谱图像异常检测的目的是检测出与周围背景地物光谱存在明显差异的像素点, 根据背景采样范围的不同, 又可分为局部异常和全局异常。现有的异常检测算法可分为以下几类: 1) 基于统计模型的检测算法, 典型的如 Reed 等人提出的 RX 检测算法^[1], 假设背景服从高斯分布, 目标与背景具有相同的协方差, 通过似然比构造检测算子找出偏离背

收稿日期: 2012-07-20; 修回日期: 2012-10-29

第一作者简介: 刘明 (1987—), 男, 装备学院兵器科学与技术专业在读硕士研究生, 主要研究方向为光学检测。E-mail: 270887961

@qq.com

景分布的点作为异常。但实际数据中背景通常偏离高斯分布,算法性能受到影响。2) 基于子空间模型的异常检测算法,具有代表性的为 Harsanyi 等人提出的 LPD(low probability detection)算法^[2],用背景协方差矩阵的特征向量构造背景子空间,向背景子空间的正交子空间投影来抑制背景,然后在投影后的数据上进行异常检测。但如果背景地物类别较多,投影后的数据中背景抑制不完全会使算法性能下降。3) 基于支持向量的异常检测算法,如 Banerjee 等人提出的支持向量数据描述(SVDD)的异常检测算法^[3],用背景数据构造高维空间的背景点区域边界,通过考察待测像素与边界的关系确定异常。但背景采样窗口设置不恰当或者背景样本中存在异常像素则会造成漏警,而且此算法耗时较多。

以上算法的性能对背景的估计依赖程度比较高,一般背景信息获得较困难,且存在误差。为此提出局部投影可分离的异常检测算法,在局部检测区域内,将背景点向待测点光谱张成的子空间投影,在投影后的数据上,计算待测点向量与背景点向量模值的均值之比,以此度量待测像素的异常程度。由于检测区域内除待测像素外可能存在其他异常像素,这些异常像素会干扰待测像素属性的判断,因此在计算背景向量模的均值时选择受极端值影响小的几何均值与算数均值结合的方法,并在计算异常度之前进行归一化处理,消除由于阴影与光照度等使光谱产生的畸变和平移影响。为抑制异常检测中产生的虚警,将检测出的异常与全局背景比对,局部表现为异常且不属于全局背景类别的像素才是真正的异常目标点。

1 目标子空间投影算法

目标子空间投影算法^[4-5],将待测像素向目标信号张成的子空间投影,在投影后的数据上以目标光谱作为匹配信号检测出目标。该投影方向能够分离目标与背景,投影后目标向量保留了最大的长度,背景信号和噪声受到一定的抑制。

设目标信号矩阵为 $S = (s_1, s_2, \dots, s_T)$, T 为目标端元个数。在线性混合模型^[6]中,像素的光谱向量可以用端元的线性组合表示,即

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^T \alpha_k \mathbf{s}_k + \mathbf{w} = S\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{w} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为混合像素光谱向量, $\boldsymbol{\alpha} = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_T]$ 为

混合系数向量。

用最小二乘误差作为优化准则推出 $\boldsymbol{\alpha}$ 的最小二乘估计

$$\hat{\boldsymbol{\alpha}} = (S^T S)^{-1} S^T \mathbf{x} \quad (2)$$

代入式(1)得

$$\hat{\mathbf{x}} = S(S^T S)^{-1} S^T \mathbf{x} + \mathbf{w} \quad (3)$$

用 $P_s = S(S^T S)^{-1} S^T$ 代表信号子空间投影算子, P_s 将 $\mathbf{x}$ 投影到目标子空间所得目标估计值的误差最小。

当感兴趣的目标只有一种端元时,用 $\mathbf{d}$ 代替 P_s 中的 S ,得到目标子空间投影算子

$$P_d = \mathbf{d}(\mathbf{d}^T \mathbf{d})^{-1} \mathbf{d}^T \quad (4)$$

2 局部投影可分离的异常检测算法

2.1 算法的提出

目标子空间投影算法只需要目标光谱的先验知识,对背景的依赖较低。而异常检测中主要关注目标光谱与背景光谱之间的差异,不需要了解背景的构成和背景类别之间的关系。因此,根据目标子空间投影算法的思想,提出基于局部投影可分离的异常检测算法。

在高光谱图像上取局部检测窗口,将检测区域中心像素作为待测像素,光谱向量为 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_L]^T$,检测区域内其余像素作为背景,背景的观测数据为 $\mathbf{U} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N)$, N 为像素总数。以 $\mathbf{x}$ 作为参考向量,产生投影方向 $P_x = \mathbf{x}(\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^T$,将检测区域内的所有像素向此方向投影,然后计算出每个向量的长度

$$y_x = \|P_x \mathbf{x}\| \quad (5)$$

$$y_U = \|P_x \mathbf{U}\| \quad (6)$$

投影后原来与待测像素光谱向量夹角小的向量保留较大的长度,而待测像素光谱向量夹角较大的向量受到较大的抑制。即投影后与参考像素相似的像素具有较大的模值,与参考像素相异的像素具有较小的值,差异越大模值越小。因此可以用 y_x 与 y_U 的均值之比表征待测像素的异常度。用 u_{y_U} 表示背景投影向量模值的均值,待测像素的异常度可以表示为

$$\delta = \frac{y_x}{u_{y_U}} \quad (7)$$

为了抑制极端模值的影响,使用中位数与算术

均值比较的方法选择式(7)中 u_{y_U} 的计算式,即

$$u_{y_U} = \begin{cases} \frac{y_{U1} + y_{U2} + \cdots + y_{UN}}{N} & M > \frac{y_{U1} + y_{U2} + \cdots + y_{UN}}{N} \\ \sqrt[N]{y_{U1} \times y_{U2} \times \cdots \times y_{UN}} & M < \frac{y_{U1} + y_{U2} + \cdots + y_{UN}}{N} \end{cases} \quad (8)$$

式中, M 为背景光谱向量投影后模值的中位数, N 为背景像素总数。

式(7)为局部窗口中心点的异常度,将窗口在全幅图像上滑动,得到每个像素的异常度,从而得到包含异常度信息和空间位置信息的 2 维数据。然后设定合理的阈值将异常度大于设定值的像素判为异常。

采用归一化方法,在投影之前对原始数据进行处理,消除光照度的影响,从而保证投影后数据是可分离的。 $\mathbf{r}_i = (r_{i1}, r_{i2}, \cdots, r_{in})$ 代表高光谱图像中的像素,归一化算子为

$$\lambda_i = \frac{1}{\|\mathbf{r}_i\|} = (r_{i1}^2 + r_{i2}^2 + \cdots + r_{in}^2)^{-1/2} \quad (9)$$

归一化处理后,各像素的光谱向量具有单位长度,分布在以原点为中心,半径为 1 的高维超球面内,为了便于理解,用 3 维的光谱向量进行说明,3 组 3 维向量经归一化处理后的空间分布如图 1 所示。此时,以任意一点作为参考点构造子空间进行投影,投影后的向量中参考点不会与异类点混在一起,从而使参考点与异类点分离。

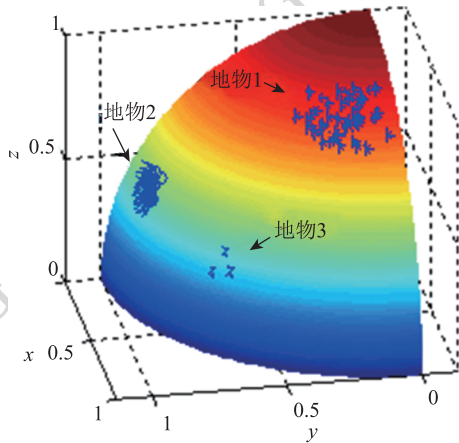


图 1 3 维向量经归一化处理后的空间分布
Fig. 1 The distribution of 3 dimensional vector after normalized process

2.2 高光谱数据的预处理

由于光照度变化的影响,同类地物光谱向量长度波动较大,在目标子空间方向上的投影模值波动范围也较大。图 2 为 3 种地物光谱曲线在 3 维空间

中的向量表示(x, y, z 分别为第 30、60 和 90 波段的亮度值,下同),可见不同地物光谱向量除具有较大夹角外,通常还表现为向量长度差异。如果在异常检测中,高光谱数据未经预处理,直接向目标子空间投影,可能使背景点与待测点混在一起,致使可分离性变差。

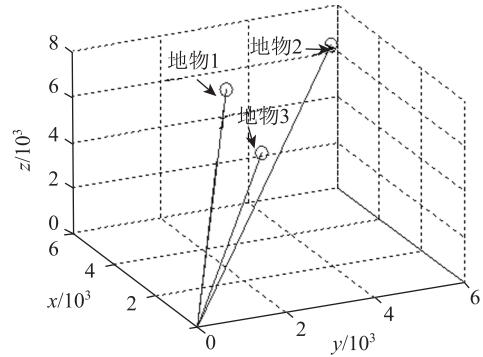


图 2 3 种地物光谱在 3 维空间中的向量表示
Fig. 2 The vector of the spectrum of three features in the three dimensional space

2.3 投影后数据中极端模值的抑制

异常检测滑动窗口中背景像素中的离群像素对检测结果有较大的影响,会造成待测像素异常度值偏低,此外背景中含有多类地物时也会对检测结果产生干扰。异常检测中通常遇到以下两类情况:1)待测像素是异常点,检测区域中的背景可以分为单一类别、多种类别和含干扰点的情况;2)待测像素是背景点,检测区域中的背景同样可以分为单一类别、多种类别和含干扰点的情况,其中多类背景时,待测像素可能是主要背景,也可能是次要背景。以下分别讨论各种情况下本文算法的有效性。

为了便于研究,取大小为 15×15 像素的窗口作为检测区域,检测区域中心点作为待测像素,其余点作为背景像素。

图 3(a)~(c)为待测像素为异常点时的 3 种情况。图 3(a)中背景为单一地物,此时向待测像素光谱向量方向投影,待测点与背景完全分离(图 4(a)),用式(7)计算的异常度较大;图 3(b)中背景为单一地物,但背景中存在与异常点同类像素的干扰,投影后的空间分布见图 4(b),干扰点与待测点距离很近,投影后都具有较大的模值,此时用背景向量模值的算数平均值代表背景,会产生较大的误差。而几何均值具有受极端大数值影响小的特点,因此

用背景向量模值的几何平均值代替背景,在一定程度上减小了同类异常点的影响。图3(b)中异常点光谱向量投影后的模值为0.97,而背景投影后的模值集中在0.3附近,此时背景和干扰点的算数均值为0.321,而几何均值为0.301,本文所用两类地物光谱向量之间的夹角比较小,随着两类地物的差异

增大,投影后两类地物光谱向量模值的差异也会增大,几何均值抑制同类干扰点影响的效果更加明显。图3(c)为背景是多类地物的情况,不论背景复杂度怎样,只要与待测像素存在差异,向目标子空间投影后都受到抑制(图4(c)),即用本文算法计算待测像素的异常度能够克服背景的复杂性影响。

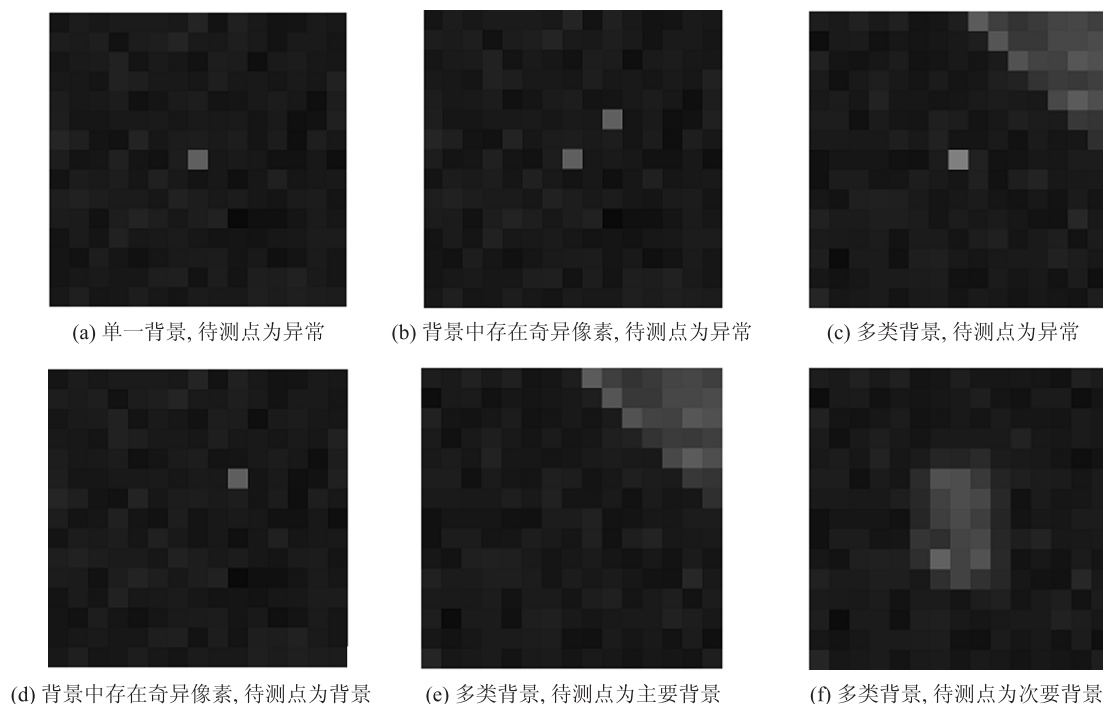


图3 待测像素与背景2维空间分布情况

Fig. 3 The distribution of the test pixel and the background in the two-dimensional space

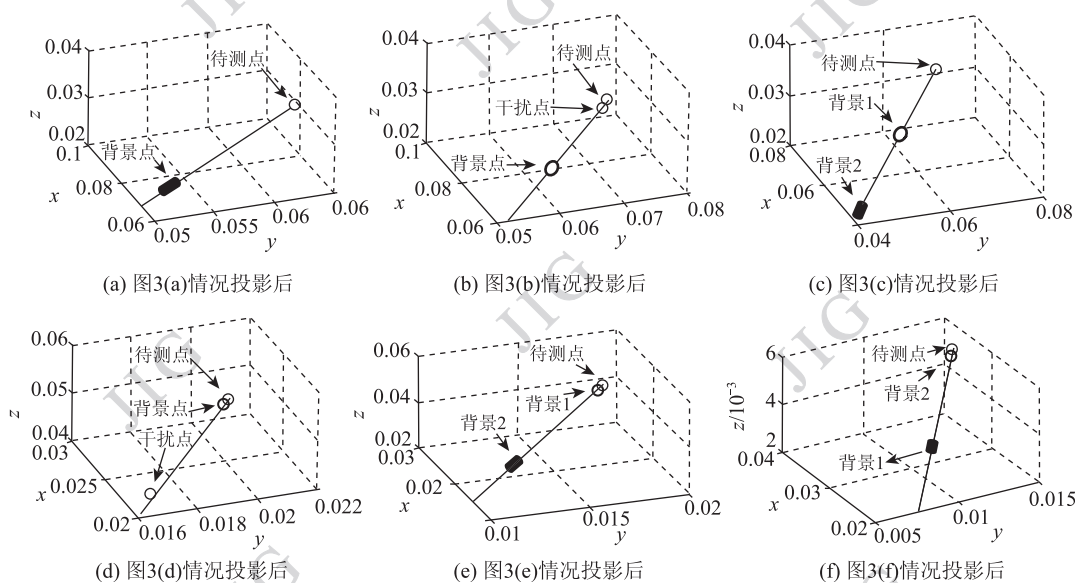


图4 向目标子空间投影后待测像素与背景3维空间分布情况

Fig. 4 The distribution of the test pixel and the background after projection onto the target subspace in the three-dimensional space

图 3(d)~(f) 为待测像素为背景点的情况。图 3(d) 中检测区域内存在异常点,此异常点在待测像素向量方向上投影被抑制,根据式(9),用算数均值代表背景,能够抑制极端小值的影响。图 3(e)~(f) 中背景为多类地物,待测像素都为背景点。不同的是图 3(e) 中待测像素所在背景 1 为主要背景,图 3(f) 与图 3(e) 刚好相反。两种情况下背景在待测像素子空间投影如图 4(e)~(f) 所示。使用本文算法计算得到图 3(e) 中待测像素异常度大于图 3(f) 中待测像素的异常度,但二者都比图 3(a)~(c) 中待测像素的异常度小,可见图 3(e) 中少量存在的地物表现出一定的异常度是合理的。

通过以上分析可知本文设计的平均值选择算法能够抑制背景数据中的干扰像素,即投影后的极端模值。本文算法对检测区域内地物分布的各种情况都比较有效。

2.4 主要地物比对法去除异常中的虚警

由于异常检测算法使用局部滑动窗口选取参考背景像素,因此所检测出异常中虚警的存在难以避免。整幅图像的背景地物局部孤立的存在,在本文算法中会表现为异常,但这种异常往往是不感兴趣的异常,即虚警。首先收集地物端元,然后使用大量地物对应的端元光谱与异常像素光谱进行比对,在检测出的异常中去除全局背景像素。去除虚警方法的具体步骤如下:

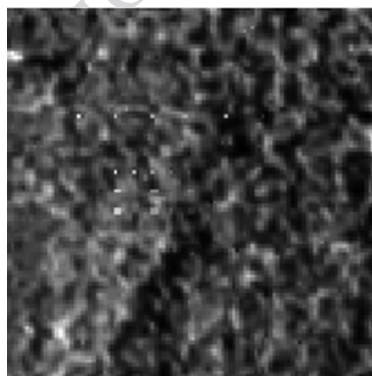
1) 地物端元收集。使用像元纯净指数(PPI)方法^[7]在全局图像范围内收集地物端元,并记录图像中与端元对应的像素数。

2) 提取主要背景地物光谱。将每个端元对应的像素数从大到小排列,依次累加每个端元对应的像素数,选择占总像素数 80% 的端元用作去除虚警。

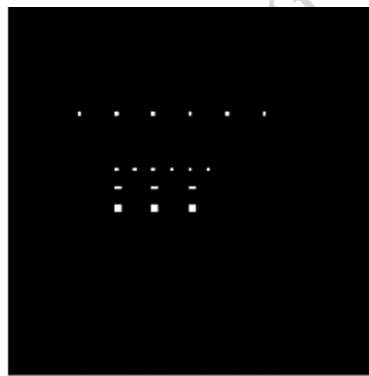
3) 用光谱角匹配方法^[8]将检测出异常的光谱与步骤 2) 中得到的端元光谱进行比对,将异常中属主要地物类别的像素去除。

3 实验结果与分析

为了验证本文算法的有效性,利用 HyMap 高光谱数据进行仿真实验。该图像覆盖了从短波到红外的光谱范围,剔除信噪比低的波段后,余下的 126 波段参与验证。从 HyMap 数据中截取大小为 80×80 像素的部分图像,截取图像的第 30 波段如图 5(a) 所示,在图像中人为插入待检测异常目标,异常目标光谱曲线从图像的其他区域典型目标上提取,然后以一定的比例与背景混合置换图像中的像素,目标分布如图 5(b) 所示,第 1 行为 1 像素目标,目标间隔为 10 像素,第 2 行为 1 像素目标,目标间隔为 5 像素,第 3 行为 2 像素目标,第 4 行为 4 像素目标。第 3、4 行的目标间隔为 4 像素,图像中共包含 18 个目标。



(a) 实验数据第30波段图像



(b) 实验数据目标分布图

图 5 实验数据第 30 波段图像和目标分布图

Fig. 5 The 30th band image of the experimental data and the target maps

RX 算法是异常检测领域的标准算法,得到广泛应用。在实验数据上分别执行 RX 算法和本文算法,根据图像的空间分辨率和异常的特点将局部滑动窗口设置为 15×15 像素。图 6 为 RX 算法和本文算法检测结果的异常特征图,RX 算法检测结果中部分异

常没有被检测出来,产生漏警,这是因为相距较近的异常之间互相干扰,而且 RX 算法检测结果虚警较多。可见,在使用 RX 算法进行异常检测中会遇到背景中异常点以及背景复杂性的影响,在地物种类较多或者异常点分布距离较近时,RX 算法性能明显下降。

本文算法检测出分布密集互相干扰的异常,而且虚警较低。可见,本文算法较好地克服了上述难点,能够抑制检测区域内干扰像素和多类背景的影响。

采用文献[9]中的方法计算分割阈值 η ,当异常特征图的直方图在 η 处的累积概率 $P(\eta)$ 等于预先

设定的置信系数 γ 时,即得到阈值 η 。然后使用 η 对异常特征图的所有像素进行判断,若异常度 $\delta_{i,j} > \eta$,则点 (i,j) 为异常,若异常度 $\delta_{i,j} < \eta$,则点 (i,j) 为背景。通过实验,最终得到 $\gamma = 0.9967$ 时的异常分布图,如图7所示。

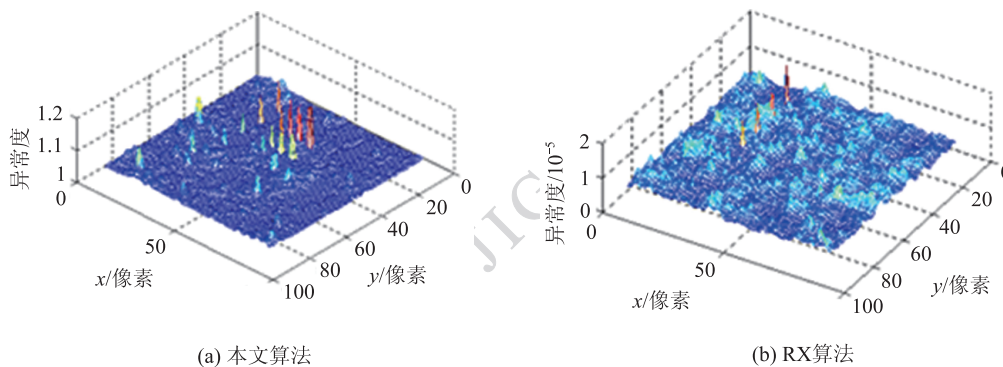


图6 RX算法和本文算法检测结果的异常特征图

Fig. 6 Abnormal characteristics diagram of the test results of the RX algorithm and the proposed algorithm

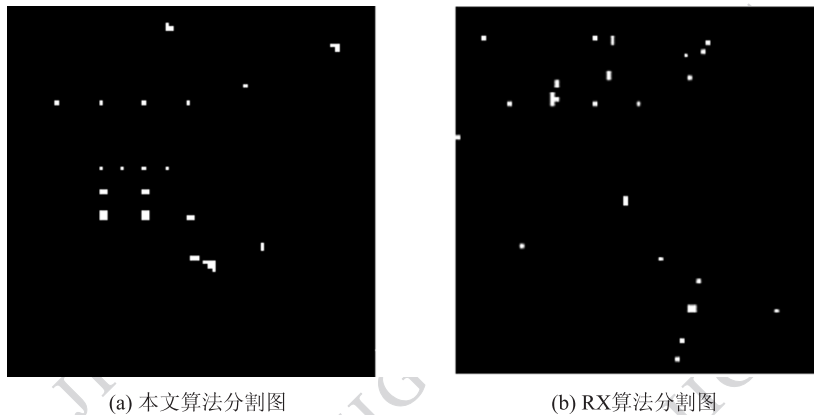


图7 RX算法和本文算法检测结果分割图

Fig. 7 The segmentation map of the test results of the RX algorithm and the proposed algorithm

接收机工作特性(ROC)曲线用于描述不同检测阈值下检测概率 P_d 与虚警概率 P_f 之间的变化关系,提供算法检测性能的定量分析。将检测概率 P_d 定义为检测到的真实目标像素数目与地面真实目标像素数目的比值,虚警概率 P_f 定义为检测到的虚警像素数目与整幅图像像素数目总和的比值。利用不同的阈值得到不同条件下的 P_d 和 P_f ,从而绘制出算法的ROC曲线,如图8所示。图8中本文算法ROC曲线全部位于RX算法ROC曲线之上,通过ROC曲线进一步说明了本文算法有较好的性能。由于本文算法不需要高斯分布的假设,对于干扰点和多类背景地物的影响,具有较强的适应性。此外,从图8中可见,使用本文算法去除虚警后,算法性能明显改善。

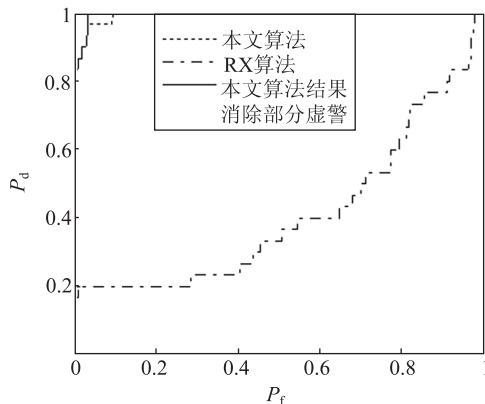


图8 RX算法、本文算法以及本文算法结果消除部分虚警后的ROC曲线

Fig. 8 The ROC curve of the RX algorithm, the proposed algorithm and the results after eliminating parts of the false alarms

4 结 论

利用局部投影实现异常与背景的分离,用归一化数据投影后的模值构造异常检测算子,在未知复杂的背景下能够有效检测出异常目标。本文算法不需要假设背景模型,不需要了解背景组成和背景类别之间的关系,能够克服背景复杂性影响;由于不受与异常异类的干扰点的影响,也一定程度上降低了虚警率;对于与异常同类的干扰点,使用均值选择的方法减小同类干扰点的影响;提出异常检测虚警消除方法,有效抑制背景地物在局部窗口中产生的虚警。经实验验证,本文算法具有较好的检测效果。

参考文献 (References)

- [1] 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. [DOI: 10.1109/ 29. 60107]
- [2] Harsanyi J C, Chang C I. Hyperspectral image classification and dimensionality reduction: an orthogonalsubspace projection approach [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(4): 779-785. [DOI: 10.1109/ 36. 298007]
- [3] Banerjee A, Burlina P, Diehl C. A support vector method for anomaly detection in hyperspectral imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2282-2291. [DOI: 10.1109/ TGRS. 2006. 873019]
- [4] Chang C I. Least squares subspace projection approach to mixed pixel classification for hyperspectral images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 898-912. [DOI: 10.1109/ 36. 673681]
- [5] Chang C I. Orthogonal subspace projection (OSP) revisited: a comprehensive study and analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(3): 502-518. [DOI: 10.1109/ TGRS. 2004. 839543]
- [6] Dobigeon N. Joint bayesian endmember extraction and linear unmixing for hyperspectral imagery [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(11): 4355-4368. [DOI: 10.1109/ TSP. 2009. 2025797]
- [7] Chang C I. A fast iterative algorithm for implementation of pixel purity index [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 63-67. [DOI: 10.1109/ LGRS. 2005. 856701]
- [8] Xu W D, Yin Q, Kuang D B, et al. Comparison of different spectral match models [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, 24(4): 296-300. [许卫东,尹球,匡定波,等. 地物光谱匹配模型比较研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 296-300.]
- [9] Chang C I, Chiang S S. Anomaly detection and classification for hyperspectral imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(6): 1314-1325. [DOI: 10.1109/ TGRS. 2002. 800280]