

基于逐像素递归处理的高光谱实时亚像元目标检测

林伟俊¹ 赵辽英¹ 厉小润²

(杭州电子科技大学计算机学院 杭州 310018)¹ (浙江大学电气工程学院 杭州 310027)²

摘要 亚像元目标检测是高光谱图像应用的关键技术。由于高光谱数据的高维度增加了存储空间和数据处理的复杂度,实时处理成为了目标检测面临的重要问题。自适应匹配滤波算法(AMF)是一种有效的亚像元目标检测算法。在基于 Woodbury 引理实现以逐像素排列格式传输和存储的高光谱数据协方差矩阵实时求逆的基础上,以 AMF 为高光谱图像亚像元目标检测算法,推导出了基于逐像素递归处理的高光谱图像实时 AMF 目标检测流程。通过仿真数据和真实高光谱图像实验证明,相比于非实时 AMF,实时 AMF 只需少量的存储空间便可得到同样甚至更高的检测精度。

关键词 高光谱图像处理,逐像素排列,亚像元目标检测,实时检测,自适应匹配滤波

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.06.046

Real-time Sub-pixel Object Detection for Hyperspectral Image Based on Pixel-by-pixel Processing

LIN Wei-jun¹ ZHAO Liao-ying¹ LI Xiao-run²

(School of Computer Science and Technology, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)¹

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)²

Abstract Sub-pixel target detection is one of the key technologies in the applications of hyperspectral images. Since the high dimensions of hyperspectral data increase apparently the storage space and complexity of data processing, real-time processing has become a crucial problem for target detection. Adaptive matched filter (AMF) is an effective algorithm for sub-pixel target detection. This paper derived the real-time AMF target detection procedure of hyperspectral images by using AMF as the sub-pixel target detection algorithm, based on the realization of real-time inverting of hyperspectral data's covariance matrix with the pixel-by-pixel format transmission and storage by using Woodbury lemma. Experiments were conducted on synthetic data and real hyperspectral images. The results demonstrate that compared with non-real time AMF, real-time AMF needs less storage space and can achieve the same or slightly better detection accuracy.

Keywords Hyperspectral image processing, Pixel-by-pixel processing, Sub-pixel target detection, Causal processing, Adaptive matched filter

1 概述

随着高光谱遥感的迅速发展,卫星重访周期缩短,海量的数据给卫星的传输和存储系统带来了沉重的负担。由于在不同应用场合用户关心的目标不同,在实际应用中可以在传输的过程中对感兴趣的特定目标进行实时检测,以减少数据存储空间和工作量。

高光谱遥感图像数据的存储和传输格式一般分为 BIP (Band Interleaved by Pixel) 格式、BIL (Band Interleaved by Line) 格式和 BSQ (Band Sequential) 格式 3 种,不同格式的实时处理过程不同。近年来,美国马里兰大学遥感信息和图像处理实验室的 Chang 小组采用 Woodbury 引理^[1]作为数学基础,对 3 种格式的实时约束能量最小化法(Constrained Energy

Minimization, CEM)^[2-4]进行了研究,提出了一系列实时目标检测算法。国内关于实时目标检测的研究也有少量成果,赵春晖等提出了基于 BIP 格式的实时 RX 异常检测^[5]和多项式递归核的实时异常检测^[6]; Yang 等基于 FPGA 设计了 BIP 格式的实时 CEM 和实时 RX^[7]。目前大多数文献只针对 RX 和 CEM 两种算法进行了实时目标检测的研究,但其设计思想可以用于其他实时目标检测算法的设计。

高光谱目标探测可以分为目标光谱未知的异常目标探测和目标光谱已知的目标检测^[8]。本文主要研究目标光谱已知的目标检测方法,其中 CEM^[3]是以自相关矩阵求逆为基础的实时目标检测算法。不同于 CEM,自适应匹配滤波(Adaptive Matched Filter, AMF)^[9-10]是以协方差矩阵求逆为基础的高光谱图像亚像元目标检测算法,对于一些真实高光谱图像,其

收稿日期:2017-04-12 返修日期:2017-09-11 本文受国家自然科学基金资助项目(61571170),教育部联合基金项目(6141A02022314),上海航天科技创新基金资助项目(SAST2015033)资助。

林伟俊(1993—),男,硕士生,主要研究方向为高光谱图像目标检测,E-mail:jum05768@foxmail.com;赵辽英(1970—),女,博士,教授,主要研究方向为图像处理与模式识别,E-mail:zhaoly@hdu.edu.cn(通信作者);厉小润(1970—),男,博士,研究员,主要研究方向为图像处理与模式识别、嵌入式控制与信息系统,E-mail:605641977@qq.com。

检测性能优于 CEM^[11]。本文基于 Woodbury 引理,设计了以 BIP 格式存储和传输的实时 AMF 检测流程。

2 AMF 算法原理

AMF 算法是基于非结构背景建模而提出的。设待观测数据 r 要么存在目标 d , 要么只属于背景, 其二元假设为:

$$\begin{cases} H_0: r = \epsilon, & \text{目标不存在} \\ H_1: r = d\alpha + \epsilon, & \text{目标存在} \end{cases} \quad (1)$$

其中, ϵ 表示背景噪声向量。根据二元假设, 在 H_0 中 $r \sim N(0, \Sigma)$, 在 H_1 中 $r \sim N(d\alpha, \Sigma)$, Σ 表示背景协方差矩阵。基于多元正态分布, 用广义似然比方法得到^[10]:

$$D(r) = \frac{(d^T \Sigma^{-1} r)^2}{(d^T \Sigma^{-1} d)(r^T \Sigma^{-1} r)} \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{<}} \eta \quad (2)$$

由于 Σ 表示协方差矩阵, 光谱向量 r 和目标向量 d 需要减去背景均值 μ ^[12], 从而得到:

$$D^{AMF}(r) = \frac{((d-\mu)^T K^{-1}(r-\mu))^2}{((d-\mu)^T K^{-1}(d-\mu))} \underset{H_1}{\overset{H_0}{>}} \underset{H_0}{\overset{H_1}{<}} \eta_{AMF} \quad (3)$$

3 BIP 格式高光谱数据的协方差矩阵实时求逆

AMF 算法实时处理的关键是协方差矩阵 K 的逆矩阵的实时求解, 其理论基础是 Woodbury 引理。

$$K^{-1}(n) = [(1 - \frac{1}{n})K(n-1)]^{-1} - \frac{(1 - \frac{1}{n})^{-2} (\frac{\sqrt{n-1}}{n})^2 [K^{-1}(n-1)(r_n - \mu(n-1))] [(r_n - \mu(n-1))^T K^{-1}(n-1)]}{1 + (1 - \frac{1}{n})^{-1} (\frac{\sqrt{n-1}}{n})^2 [(r_n - \mu(n-1))^T \{K(n-1)\}^{-1} (r_n - \mu(n-1))]} \quad (7)$$

4 BIP 格式高光谱数据的实时 AMF 检测流程

记 $\tilde{K}^{-1}(n-1) = (1 - \frac{1}{n})K^{-1}(n-1)$, $\tilde{r}_n = \frac{\sqrt{n-1}}{n}(r_n - \mu(n-1))$ 。根据式(5)和式(7)设计 BIP 格式的实时 AMF 检测流程, 如图 1 所示, 其中 D 表示一个单位的延时, 虚线框内对应的是协方差矩阵求逆的实时更新过程。从图 1 可以看出, 只要已知前 $n-1$ 个数据的均值 $\mu(n-1)$ 、协方差矩阵的逆 $K^{-1}(n-1)$ 、目标光谱 d 和接收到的第 n 个数据 r_n , 就可以递归得到前 n 个数据的均值 $\mu(n)$ 和协方差矩阵的逆 $K^{-1}(n)$, 从而得到第 n 个数据的检测值。

由于在计算 $K^{-1}(n)$ 时需要用到前一时刻的逆矩阵 $K^{-1}(n-1)$, 因此需要给定一个初始的协方差矩阵的逆矩阵。为

首先给出 Woodbury 引理^[1]。

引理 1 设 A 是 $n \times n$ 的矩阵, u 是 $n \times 1$ 的向量, v 是 $1 \times n$ 的向量, 则有:

$$[A + uv^T]^{-1} = A^{-1} - \frac{[A^{-1}u][v^T A^{-1}]}{1 + v^T A^{-1}u} \quad (4)$$

BIP 格式的高光谱遥感图像数据是逐像素传输和接收的, 每接收一个像元就可以完成相应的实时处理。假设 r_n 为当前待检测的像元, $\{r_i\}_{i=1}^{n-1}$ 表示已经被检测过的像元, $\mu(n)$ 为前 n 个样本的均值, 则有:

$$\mu(n) = (\frac{1}{n}) \sum_{i=1}^n r_i = (1 - \frac{1}{n})\mu(n-1) + (\frac{1}{n}) r_n \quad (5)$$

则前 n 个样本构成的协方差矩阵可以表示为:

$$\begin{aligned} K(n) &= (\frac{1}{n}) \sum_{i=1}^n r_i r_i^T - \mu(n)\mu^T(n) \\ &= (1 - \frac{1}{n})K(n-1) + (\frac{n-1}{n^2})[(r_n - \mu(n-1))(r_n - \mu(n-1))^T] \end{aligned} \quad (6)$$

令 $A = (1 - \frac{1}{n})K(n-1)$, $u = v = (\frac{\sqrt{n-1}}{n})(r_n - \mu(n-1))$, 根据 Woodbury 引理, 得到协方差矩阵 K 的逆矩阵实时更新算子为:

防止出现病态矩阵, 用于计算初始协方差矩阵的像元数必须大于高光谱数据的波段总数 L 。最后, 对于初始像元用最后的协方差矩阵重新求解检测值, 以提高初始像元的检测精度。

本文设计的 AMF 检测流程的优点如下:

- 1) 在卫星遥感数据下行传输的同时进行数据处理, 实现了实时处理。
- 2) 不需要对采样数据的协方差矩阵 $K(n)$ 重复求逆, 只需对当前存储的 $K^{-1}(n-1)$ 进行递归更新, 因此能够减少数据处理的时间, 提高检测效率。
- 3) 只需要记录当前像元信息、 $K^{-1}(n-1)$ 以及前 $n-1$ 个样本的均值 $\mu(n-1)$, 无需存储完整的高光谱数据, 相比传统方法, 其能够有效减少数据处理过程中所需的存储空间。

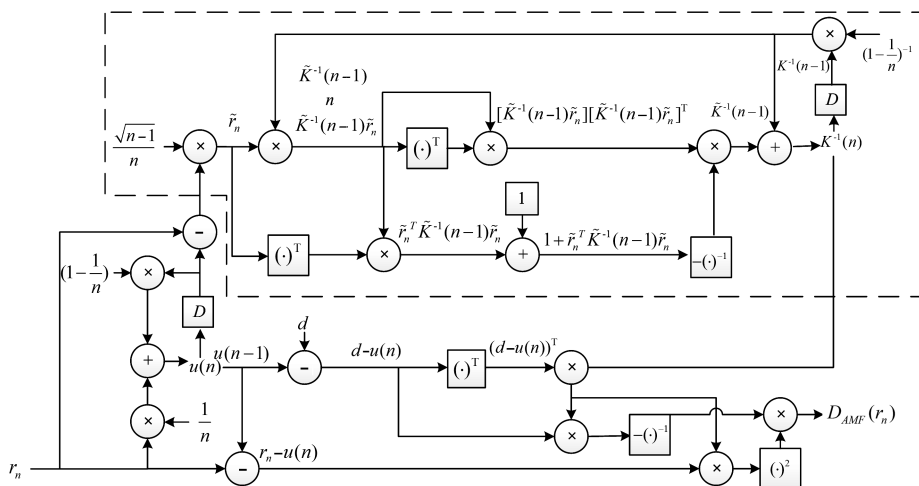


图 1 BIP 格式的实时 AMF 检测
Fig. 1 RT-AMF detection in BIP format

5 实验

为了验证本文提出的实时 AMF 检测方法的有效性,分别用仿真合成数据和真实高光谱图像对实时 AMF 检测方法、非实时 AMF 检测方法和其他典型亚像元目标检测方法进行实验比较。

5.1 仿真数据实验

5.1.1 实时 AMF 与非实时 AMF 的实验比较

使用高光谱数据文件¹⁾的 f090819t01p00r06rdn_b_sc01_ort_img 提供的图像,其空间分辨率为 20 m,图像大小为 781×6955,每个像元光谱包括 224 个波长,波长范围为 369.9298~2496.236 nm。从起始坐标(210,4477)中截取一个 64×64 的小区域,如图 2 所示。

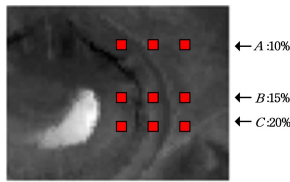


图 2 真实背景仿真目标的图像

Fig. 2 Real background simulation image

将加利福尼亚州-圣地亚哥地区某海军机场的 AVIRIS 高光谱图像^[13]中的飞机光谱按波长信息进行拟合并作为目标光谱 d ,将其与图 2 中坐标 (m, n) 处的像元 $r(m, n)$ 基于线性混合模型进行混合,产生仿真亚像元目标点。具体的混合公式为:

$$r(m, n) = (1-s) * r(m, n) + s * d \tag{8}$$

其中, s 为混合比例。

图 2 中的方框标出了仿真的 9 个亚像元目标点,3 行目标的坐标分别为: $A_1(10, 32), A_2(10, 42), A_3(10, 52)$; $B_1(32, 32), B_2(32, 42), B_3(32, 52)$; $C_1(42, 32), C_2(42, 42), C_3(42, 52)$, 混合比例分别为 10%, 15%, 20%。图 3 给出了拟合后的目标光谱及 9 个目标点的混合光谱。

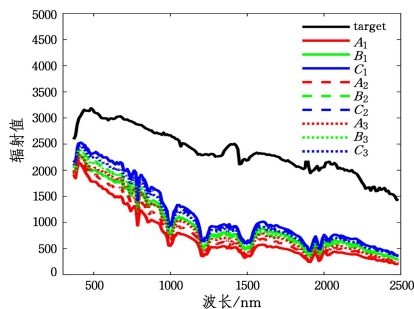


图 3 目标光谱和混合光谱

Fig. 3 Target spectrum and mixed spectrum

为防止出现病态矩阵,前 225 个像元用于计算初始逆矩阵,从第 226 行像元开始逐像元检测,用最后得到的全局协方差矩阵的逆求得前 300 个像元的检测值。图 4 给出了检测结果的分时显示图和二值图,其中第一行为非实时 AMF 检测结果,第二行为实时 AMF(从第 226 个像元开始)检测结果,

图 4(a)~图 4(e)分别为检测到的第 12, 24, 36, 48, 64 行时的分时检测结果,图 4(f)为二值化结果,其中灰色区域表示没有目标,白点位置表示有目标,亮度越高对应目标的比例越高。

从图 4 可以看出,在非实时 AMF 检测结果中,当检测到第 10 行 10%混合比例的像元时,目标点被检测到并且因为高强度值作为亮点被突出,如图 4(a)和图 4(b)所示;当检测到第 32 行 15%混合比例的像元时,第 32 行的目标点因为目标信号占比更高而作为更纯净的亮点被突出,而第 10 行的目标点变为普通亮点,如图 4(c)所示;同样的情况出现在图 4(d)和图 4(e)中,因为第 42 行存在混有 20%目标信号的目标点,信号强度更高的目标点作为更纯净的亮点被突出,之前检测到的目标点变为普通亮点,第 10 行的亮度更接近背景亮度。在实时 AMF 检测结果中,之前检测到的目标点并不会因为待检测像元数据的读入而被掩盖掉,在图 4(a)~图 4(e)的分时图中,混有不同比例的目标信号均以高亮度值突出在检测背景中。

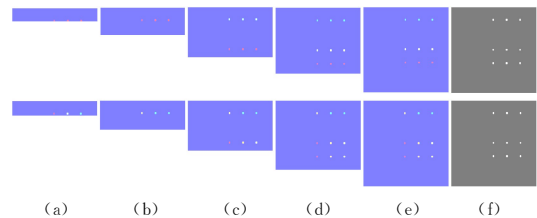


图 4 合成数据的检测结果的分时显示图和二值图

Fig. 4 Time-sharing display of synthetic data test results and binary results

由实验结果可以看出,本文提出的实时 AMF 检测方法能够达到与非实时 AMF 检测方法相同的检测效果。

图 5 给出了真实背景下实时检测方法和非实时检测方法的检测结果 ROC(Receiver Operating Characteristic)曲线。该曲线是根据不同阈值条件下的虚警率和检测率进行绘制的,因此能够为检测效果提供一套定量评估的标准。算法的性能较好时,ROC 曲线一般贴近左上角;曲线下的面积 AUC(Area Under Curve)数值越大,表明该方法越能够同时保持高检测率和虚警率。从图 5 的结果可以看出, AUC 达到了 1,这说明实时 AMF 检测方法和非实时 AMF 检测方法具有相同的检测结果,且具有较高的准确性。

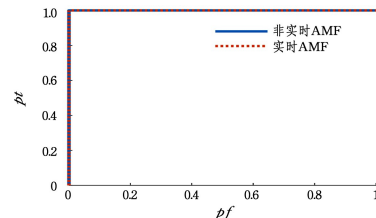


图 5 合成数据检测结果的 ROC 曲线

Fig. 5 ROC curves of simulation image detection results

5.1.2 不同亚像元目标检测方法的实验比较

以加利福尼亚州 Salinas 峡谷的高光谱图像²⁾为背景,该

¹⁾ http://aviris.jpl.nasa.gov/html/aviris_freedata.html

²⁾ http://www.ehu.es/ccwintco/index.php/Hyperspectral_Remote_Sensing_Scenes

图的空间分辨率为3.7 m,光谱分辨率为 10 nm,图像大小为 170×72,从原 224 个波段中去除 20 个波段(108—112,154—167,224)后剩余 204 个波段。将美国 Cook City 图像中的雪弗兰汽车光谱和斯巴鲁 GL 汽车光谱按波长信息拟合后分别作为目标光谱 V_1 和 V_3 。将一辆汽车分布于 4 个混合像元中,目标比例分别为 0.05,0.15,0.25 和 0.35。如图 6 所示,在休耕地、芹菜区和椰菜绿杂草区分别仿真两辆汽车,其中 * 表示目标 V_1 ,°表示目标 V_3 。将近红外波长范围(0.37~1 μm)的数据用于目标检测实验,图 7 给出了背景和目标的的光谱曲线。

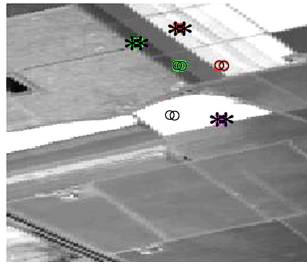


图 6 Salinas 背景下的仿真图像

Fig. 6 Simulation image under Salinas background

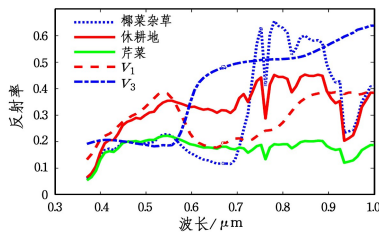
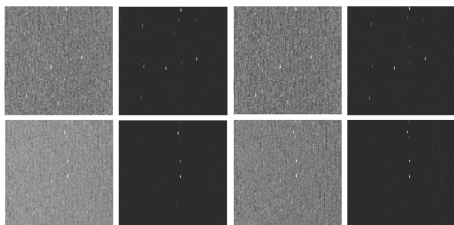


图 7 Salinas 背景下背景和目标的的光谱曲线

Fig. 7 Background and target spectral curves under Salinas background

图 8 给出了本文提出的实时 AMF 检测方法与其他几种典型亚像元目标检测方法的检测结果灰度图。图中第一行为对 V_1 的检测结果,第二行为对 V_3 的检测结果。图 8(a) — 图 8(d) 分别表示 CEM 方法、AMF 方法、实时 CEM 方法和实时 AMF 方法的检测结果。从图 8 可以看出,AMF 方法对背景的抑制效果更为明显;对于合成数据,本文提出的方法与其他 3 种方法均能够有效地检测到目标信号。

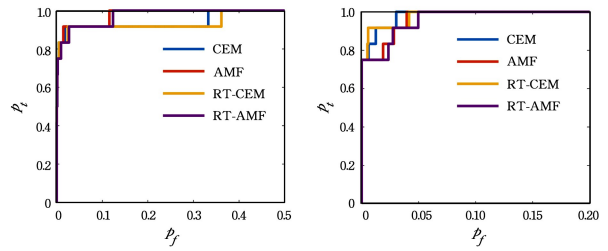


(a)CEM (b)AMF (c)RT_CEM (d)RT-AMF

图 8 Salinas 背景下合成数据的检测结果

Fig. 8 Detection results of synthetic data under Salinas background

图 9 为 Salinas 背景下 4 种方法检测结果的 ROC 曲线。通过 ROC 曲线可以计算曲线下的面积,以对检测性能进行定量分析。表 1 列出了 4 种方法 ROC 曲线下的面积数值。从图 9 和表 1 可以看出,对于目标 V_1 ,AMF 检测性能略优于 CEM,而对于目标 V_3 ,CEM 检测性能略优于 AMF,并且两种实时检测方法都能够达到与相应非实时检测方法近似的检测效果。4 种方法的 AUC 数值相近,均接近于 1,这说明本文方法与其他 3 种方法一样,能够达到目标检测的准确度要求。



(a)目标光谱为 V_1

(b)目标光谱为 V_3

图 9 Salinas 背景下合成数据检测结果的 ROC 曲线

Fig. 9 ROC curves of synthetic data under Salinas background

表 1 4 种方法检测结果的 AUC 数值的对比

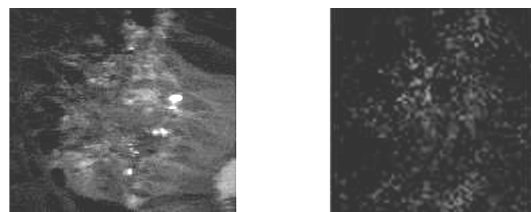
Table 1 Comparison of AUC values of four methods

目标光谱	CEM	AMF	RT-CEM	RT-AMF
V_1	0.9703	0.9883	0.9672	0.9862
V_3	0.9959	0.9928	0.9956	0.9916

5.2 真实高光谱图像实验

5.2.1 Cuprite 图像

实验数据为高光谱数据 Cuprite¹⁾,图 10(a)给出了波段 1 的灰度图,截取大小为 250×191 的子图,从 224 个原始波段中去除水吸收波段和低信噪比波段之后保留 189 个波段。以光谱库²⁾中的 Kaolinite KGa-2 (pxyl)为目标,图 10(b)给出了文献[14]中关于 Kaolinite KGa-2 (pxyl)的丰度分布图。



(a)Cuprite(波段 1)

(b)Kaolinite KGa-2 (pxyl) 丰度分布图

图 10 真实图像及目标光谱

Fig. 10 Real image and target spectrum

图 11 给出了检测结果的分时显示图和二值图,其中第一行为非实时 AMF 检测结果,第二行为实时 AMF(从第 225 个像元开始)检测结果,图 11(a) — 图 11(e) 分别为检测到第 50,100,150,200,250 行时的分时检测结果,图 11(f)为二值化结果,其中灰色区域表示没有目标,白色亮点位置表示有目标。

¹⁾ <http://aviris.jpl.nasa.gov>

²⁾ <http://speclab.cr.usgs.gov>

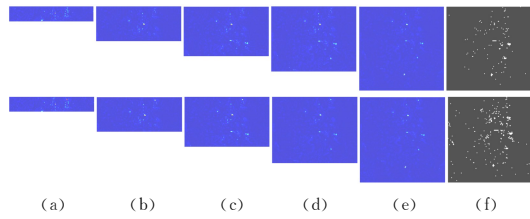


图 11 真实图检测结果分时显示图和二值图

Fig. 11 Time-sharing display of real-time test results and binary results

如图 11(a)~图 11(e)所示,RT-AMF 对背景有与 AMF 相同的抑制效果,目标 pxyl 的分布情况在 RT-AMF 的检测结果中也能够清晰显示,并且保留了在非实时 AMF 检测过程中被检测到但因为目标信号强度低未能在最后结果中显示的目标点。

5.2.2 CookCity 图像

图 12 给出了一幅真实高光谱图像数据,其来源于美国 Motana 州 Cook City 数据,包含 $0.4 \sim 2.4 \mu\text{m}$ 共计 126 个波段,大小为 280×800 像元,地物分辨率约为 3m。这幅图包含准确的地物位置信息,每个目标的光谱信息包含在 SPL 文件中,因此可以用于评估本文提出的目标检测方法的准确性。如图 12 所示,方框标出的是一块以草地为主要背景、有 4 种织物目标分布的区域,织物目标特征如表 2 所列。

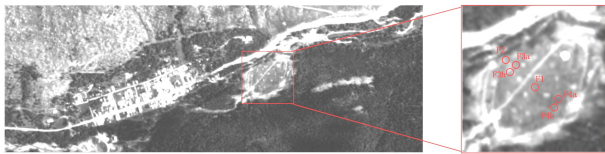


图 12 Motana 州的 Cook City 数据

Fig. 12 Cook City in Motan

表 2 真实地物信息

Table 2 Real object information

目标点	大小	种类
F_1	3×3	红棉
F_2	3×3	黄色尼龙
F_{3a}	2×2	蓝棉
F_{3b}	1×1	蓝棉
F_{4a}	2×2	红色尼龙
F_{4b}	1×1	红色尼龙

将数据集提供的目标光谱信息作为先验信息,对 Cook City 高光谱图进行实验,图 13 给出了两种方法对 F_1, F_2, F_3, F_4 类目标点的检测结果,灰色区域表示没有目标,白色亮点位置表示有目标,其中第一行为非实时 AMF 检测结果,第二行为实时 AMF(从第 127 个像元开始)检测结果。

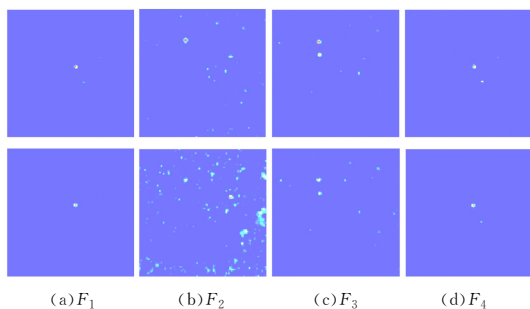


图 13 两种方法对 Montana 高光谱图像的目标检测结果

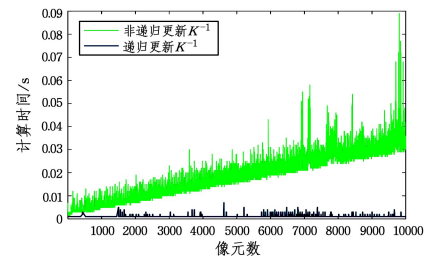
Fig. 13 Detection results of two methods for Montana image

如图 13(a)所示,实时 AMF 检测方法与非实时 AMF 方法均能检测到目标信号,将目标所在像元位置作为亮点突出在背景中。值得注意的是,实时 AMF 能够在结果中显示非实时 AMF 检测过程中由于目标信号强度低而被抑制的目标点,这种情况在对 $F_2 - F_4$ 的检测结果中也被观测到,这说明实时 AMF 在目标检测过程中与非实时 AMF 方法有相同甚至更优的性能。

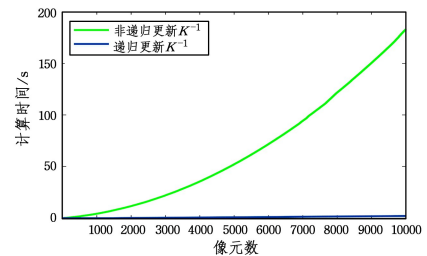
5.3 算法时效性分析

实时检测的目的是,在接收数据的同时对其进行快速处理以减少存储空间并保持甚至提高检测精度。根据 AMF 算法的原理,每接收一个像元,就需要实时更新均值和协方差矩阵及其逆矩阵。下面通过对 Woodbury 引理递归更新实时算子和直接进行计算的非递归更新实时算子的处理时间进行统计,来验证本文算法的时效性。

分别用递归更新的实时 AMF 算子和非递归更新的实时 AMF 算子对 Cook City 高光谱图像进行实时检测,检测时间与像元数的关系比较如图 14 所示。



(a) 计算单个像元所需时间



(b) 计算至当前像元的累计时间

图 14 AMF 实时检测中计算时间与像元数的关系

Fig. 14 Relationship between computing time(CPT) and processed pixels number in RT-AMF detection

从图 14(a)可以看出,非递归更新的实时 AMF 方法对单个像元的检测时间随着像元数的增加几乎呈线性增加,递归更新的实时 AMF 方法检测单个像元的时间只缓慢增加了一点;从图 14(b)中对累计检测时间的统计结果来看,采用递归更新的方法能够显著缩短检测时间。这说明本文方法能够保证时间复杂度的稳定,并且具有很好的时效性。这是因为非递归更新的实时 AMF 方法在计算每个像元的检测值时都需要重新对当前样本数据的协方差矩阵求逆,并且随着样本数据的增多,协方差矩阵求逆所花费的时间会逐渐增多。

表 3 列出了分别用递归更新和非递归更新两种实时 AMF 算子检测时,每个像元的平均检测时间的比较。仿真实验使用的计算机的 CPU 为 Intel core i5-4590,主频为 3.3 GHz,系统内存为 8GB,系统为 64 位的操作系统,仿真软件为 MATLAB 2015 版本。为减少硬件因素对实验结果造成的误差,表 3 中的数据采用 5 次实验的平均值。从表中的数据可

以看出,两种情况下初始化的时间差不多,但对于每个像元的平均检测时间,递归更新用时明显小于非递归更新用时。对于合成数据、Cook City 图像和 Cuprite 图像,非递归更新用时与递归更新用时的比值分别约为 16,14 和 100,这说明图像越大,本文算法的时效性越高。

表 3 递归更新和非递归更新的实时 AMF 检测时间比较
Table 3 CPT comparison of recursive and non-recursive AMF

(单位:s)

实时 AMF 算子	递归更新		非递归更新	
	初始化	平均每个像元	初始化	平均每个像元
合成数据	0.030	0.0012	0.033	0.0190
Cuprite 图	0.041	0.0011	0.042	0.1094
Cook City 图	0.105	0.0011	0.130	0.0184

结束语 本文提出了一种基于 AMF 的实时检测算法,通过引入一种因果算子来完成逐像素排列格式传输和存储的高光谱图像的实时 AMF 检测方法的推导,通过合成数据和真实高光谱图像实验验证了所提算法的性能。结果表明,相比于非实时的 AMF 方法,实时 AMF 方法能有效检测由于目标信号强度低而被抑制的目标点,在保持较高的目标探测性能的同时能够有效减少数据存储空间,提高效率,因此本文方法具有较好的应用前景。目前,关于实时目标检测的研究越来越深入,下一步工作将尝试针对 BIL 格式存储的高光谱图像进行逐行递归处理。

参考文献

- [1] 姜志侠,孟品超,李延忠. 矩阵分析[M]. 北京:清华大学出版社,2015.
- [2] CHEN S Y, WANG Y L, WU C C, et al. Real-Time Causal Processing of Anomaly Detection for Hyperspectral Imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2):1513-1534.
- [3] CHANG C I, LI H C, SONG M P, et al. Real-Time Constrained Energy Minimization for Subpixel Detection [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(6):2545-2559.
- [4] CHANG C I, SCHULTZ R C, HOBBS M C, et al. Progressive Band Processing of Constrained Energy Minimization for Subpixel Detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3):1626-1637.
- [5] ZHAO C H, WANG Y L, LI X H. A real-time anomaly detection algorithm for hyperspectral imagery based on causal processing [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(1):114-121. (in Chinese)
赵春晖,王玉磊,李晓慧.一种新型高光谱实时异常检测算法[J].红外与毫米波学报,2015,34(1):114-121.
- [6] ZHAO C H, YOU W. Real-Time Anomaly Detection Algorithm for Hyperspectral Remote Sensing by Using Recursive Polynomial Kernel Function [J]. Acta Optica Sinica, 2016(2):257-265. (in Chinese)
赵春晖,尤伟.采用多项式递归核的高光谱遥感异常实时检测算法[J].光学学报,2016(2):257-265.
- [7] YANG B M, PLAZA A, GAO L, et al. Dual-Mode FPGA Implementation of Target and Anomaly Detection Algorithms for Real-Time Hyperspectral Imaging [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(6):2950-2961.
- [8] ZHANG L P. Advance and Future Challenges in Hyperspectral Target Detection [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(12):1387-1394. (in Chinese)
张良培.高光谱目标探测的进展与前沿问题[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(12):1387-1394.
- [9] MANOLAKIS D, SHAW G. Detection algorithms for hyperspectral imaging applications [J]. IEEE Signal Process Magazine, 2002, 19(1):29-43.
- [10] ROBEY F C, FUHRMANN D R, KELLY E J, et al. CFAR adaptive matched filter detector [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(1):208-218.
- [11] GENG X R, JI L Y, SUN K. Clever eye algorithm for target detection of remote sensing imagery [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 114:32-39.
- [12] 张兵,高连如.高光谱图像分类与目标检测[M].北京:科学出版社,2011.
- [13] 赵文吉,段福州,刘晓萌,等. ENVI 遥感影像处理专题与实践 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2007.
- [14] CUI J T. Research on hyper spectral remote sensing image mixing technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
崔建涛.高光谱遥感图像解混技术研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [15] FRIEDMAN J H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine [J]. Annals of Statistics, 2000, 29(5):1189-1232.
- [16] FRIEDMAN J H. Stochastic gradient boosting [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2002, 38(4):367-378.
- [17] SHEN D M, QIAO D X, XU K, et al. Gradient Boosting Regression Tree Algorithm and Application of E-commerce Brand Recommendation [J]. Computer Systems & Applications, 2015, 24(6):114-120. (in Chinese)
申端明,乔德新,许琨,等.梯度渐进回归树算法在电子商务品牌推荐中的应用[J].计算机系统应用,2015,24(6):114-120.
- [18] BREIMAN L. Random Forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1):5-32.
- [19] 周英,卓金武,卞月青.大数据挖掘:系统方法与实例分析[M].北京:机械工业出版社,2016:25-260
- [20] Huber loss [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Huber_loss.

(上接第 227 页)

- [6] ZHANG Y, HAGHANI A. A gradient boosting method to improve travel time prediction [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2015, 58(3):308-324.
- [7] ZHANG F, ZHU X, HU T, et al. Urban Link Travel Time Prediction Based on a Gradient Boosting Method Considering Spatiotemporal Correlations [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5(11):201-204.
- [8] DING C, WANG D, MA X, et al. Predicting Short-Term Subway Ridership and Prioritizing Its Influential Factors Using Gradient Boosting Decision Trees [J]. Sustainability, 2016, 8(11):1100-1115.
- [9] BREIMAN L. Arcing the Edge: Technical Report 486 [R]. Berkeley: University of California, CA, USA, 1997.
- [10] Gradient boosting [EB/OL]. https://en.wikipedia.org/wiki/Gradient_boosting.