

层次优化目标与背景的匹配滤波高光谱目标探测研究

张世瑞¹, 樊彦国¹, 张汉德^{1,2}, 禹定峰³

(1. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 2. 海警总队第六支队, 山东 青岛 266012;
3. 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 匹配滤波(MF)算法通过比较待探测像元到目标类和背景类中心的马氏距离来判断目标和背景,但是无法知道高光谱图像背景和目标的相关统计信息,只能做一些假设,导致探测结果不准确。本文在MF探测完成后,设定阈值进行分割,对背景和目标进行重新划分,获取背景和目标的相关统计信息。为了更好地获得两类的统计信息,我们利用迭代的方法逐层次获得两类的统计信息,最后利用MF算法来进行目标探测。在运算过程中为了扩大目标和背景的差异,增加目标与背景的可分性,向像素中添加零向量来调整像素值。利用两组真实高光谱数据来进行目标探测实验,本文提出的算法与MF算法和一些传统目标探测算法相比,ROC曲线和曲线下方面积AUC的值都得到提高,能够更好地抑制背景和突出目标,表明本文提出的算法能够提高高光谱目标探测的效果和精度。

关键词: 匹配滤波;层次结构;阈值分割;目标探测

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.06.019

Research on detection of hierarchical optimization target and background matched filter hyperspectral target

ZHANG Shi-rui¹, FAN Yan-guo¹, ZHANG Han-de^{1,2}, YU Ding-feng³

(1. College of Marine and Spatial Information, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. the Sixth Branch of the Coast Guard, Qingdao 266012, China; 3. Institute of Oceanographic Instrumentation,
Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Qingdao 266061, China)

Abstract: The matched filter (MF) algorithm can judge the target and background by comparing the Marmanian distance between the pixels to be detected and the center of the target class and the background class, but it cannot know the relevant statistical information of the background and target of hyperspectral image, so it can only make some assumptions, leading to inaccurate detection results. In this paper, after MF detection is completed, threshold is set for segmentation, background and target are reclassified, and relevant statistical information of background and target is obtained. In order to better obtain the two types of statistics, we use the iterative method to obtain the two types of statistics level by level, and finally use the MF algorithm to carry out target detection. In order to enlarge the difference between the target and the background and increase the separability of the target and the background, zero vector is added to the pixel to adjust the pixel value. Two groups of real hyperspectral data were used to conduct target detection experiments. By comparing the value of ROC curve and AUC of the area under the curve, it was found that the algorithm proposed in this paper could improve the accuracy of hyperspectral target detection compared with MF algorithm and some traditional target detection algorithms.

Keywords: matched filtering; hierarchical structure; threshold segmentation; target detection

基金项目: 面向沿海水色环境监测的机载高光谱成像探测仪研究项目(No. 2019GHY112017)资助。

作者简介: 张世瑞(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高光谱目标探测。E-mail: zshirui3315@163.com

收稿日期: 2020-08-20; 修订日期: 2020-09-05

1 引言

高光谱数据具有很高的光谱分辨率,在可见光—近红外区域光谱分辨率可以达到纳米级,能够获得地物详细而精确的光谱信息^[1]。高光谱影像除了二维的空间数据,它还包含丰富的光谱数据,拥有一百乃至几百个波段。高光谱的特点,使得它在目标探测领域具有独特的优势,近年来,高光谱目标探测越来越受到重视,相关的文章也逐渐增多。高光谱目标探测有众多的算法。常见的有 SAM(Spectral Angle Mapper)光谱角制图法^[2]、MF(Matched Filter)匹配滤波方法^[3]、CEM(Constrained Energy Minimization)约束能量最小化探测方法^[4]。SAM 应用在高光谱分类上较为广泛,在目标探测上也有广泛的应用,通过比较需检测像元与目标像元的光谱角大小来进行目标探测。MF 是根据马氏距离来进行判别,假设目标与背景都服从多元正态分布,判断需检测像元到目标与背景中心之间的距离来进行目标探测。CEM 通过设置探测器,使得目标信号通过后为定值,整体信号输出后总的输出能量最小,起到抑制背景的作用。已知目标光谱信息时,现有的目标探测方法建立在像元光谱表示模型的基础上,通过概率密度模型、子空间模型、光谱混合模型等表征像元光谱,采用光谱分解、信号匹配、特征空间投影、假设检验等方法增强目标和背景可分性^[5]。CEM 可以归为基于光谱信号匹配的目标探测方法,而 MF 可以归为假设检验的方法。耿修瑞^[6]在理论层次证明 MF 是优于 CEM 的,他还证明随着波段数目的增多,CEM 的总体输出能量越来越小,能达到最佳的探测效果,不过前提假设是目标光谱没有变化或变化较小。核函数与 MF 变换相结合^[7]能够提高匹配滤波的效果。郝晓惠^[8]将垂直于目标光谱的向量分层次引入 SAM,取得了较好的高光谱目标探测效果。

本文首先利用传统 MF 算法对高光谱数据进行目标探测,探测完成后,选定一定的阈值进行阈值分割,分割为目标和背景两部分,计算目标类和背景类的均值。为了增大目标类和背景类的可分性,引入零向量,改变像素值。然后再次进行 MF 算法实验,进行阈值分割,逐层次计算,设定迭代停止条件,完成目标探测。本文实验利用圣地亚哥飞机场数据和 Cri 数据进行实验验证,通过比较 ROC 曲线、AUC 的值和探测效果图,结果表明,本文的方法能够提高高光谱目标探测效果。

2 MF 目标探测方法

MF 方法假设目标类和背景类均服从多元正态分布,通过比较待探测像元到两类中心的马氏距离,判断待探测像元更有可能属于哪一类^[5]。MF 原理如图 1 所示。

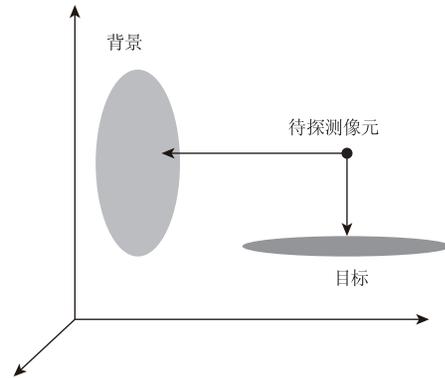


图 1 MF 原理图

Fig. 1 MF schematic diagram

MF 方法基于假设检验的方法,假设模型如下:

$$\begin{cases} H_0: x \sim N(\mu_0, \Gamma_0) \\ H_1: x \sim N(\mu_1, \Gamma_1) \end{cases} \quad (1)$$

其中, H_0 假设目标存在; H_1 假设目标不存在,在两种假设下,均值 μ 和协方差 Γ 均不相同,当两种假设下均值和协方差矩阵都已知时,可以构建目标探测器:

$$D(x) = (x - \mu_1)^T \Gamma_1^{-1} (x - \mu_1) - (x - \mu_0)^T \Gamma_0^{-1} (x - \mu_0) \quad (2)$$

式中, x 表示待探测像元。当 $\Gamma_0 = \Gamma_1 = \Gamma$ 时,式(2)可以转化为:

$$D(x) = w_{MF}^T x \quad (3)$$

$$w_{MF} = \frac{\Gamma^{-1}(\mu_0 - \mu_1)}{(\mu_0 - \mu_1)^T \Gamma^{-1}(\mu_0 - \mu_1)} \quad (4)$$

在真实的高光谱影像中,无法获得 μ_0 和 μ_1 的实际值,故用目标光谱 d 代替 μ_0 ,用整幅影像像元均值 M 代替 μ_1 , $M = \sum_{i=1}^m r_i$, m 为总像元个数,每个 r_i 为 $n \times 1$ 的向量, n 为高光谱影像波段数目。 Γ 为整幅影像数据的协方差矩阵。故式(4)可以变为:

$$w_{MF} = \frac{\Gamma^{-1}(d - M)}{(d - M)^T \Gamma^{-1}(d - M)} \quad (5)$$

将高光谱数据经过 w_{MF} 滤波器处理后,进行阈值分割,来判别目标和背景。

3 层次优化目标与背景

由式(5)得到了 MF 探测器,但是对于 μ_0 和 μ_1 的估计是不准确的,因此对两个均值进行重新估计。

MF 探测器进行目标和背景判别后,得到了高光谱影像的目标与背景。利用得到的目标与背景重新计算 μ_0 和 μ_1 ,得到新的 MF 探测器,进行阈值分割重新对影像进行目标与背景的判别。利用此方法,逐层次运算,进行迭代,直至达到最优的效果。

在层次化迭代运算过程中,一个重要的问题是阈值分割,阈值的选择决定了探测目标的准确程度。合适的阈值,能够将目标与背景最大程度分离开,提高高光谱目标探测的探测率,降低虚警率。随着层次化,阈值的选择也要顺应输出结果进行变换。高光谱数据经过 MF 探测器后,得到探测结果 Y_i , ($i = 1, 2, \dots, m$), m 为总像元数目。本文为了较好地进行阈值选择,根据每个层次 Y_i 平均值的结果进行相应阈值的调整。经过多次实验发现, Y_i 的平均值逐渐变小。故本文随着迭代的次数,阈值逐渐降低。

$$TH = b - 0.01 \times j \tag{6}$$

式中, b 为初始阈值,一个常数; j 为迭代次数。本文将 MF 探测器结果值进行归一化处理,结果在 0 ~ 1 的范围内。

在层次化运算过程中,为了增大目标与背景的区别性,增大两者之间的马氏距离,引入零向量 a ,通过零向量来改变原像素值。为了控制像素值更改速度,引入指数函数。

$$r_i^{k+1} = a \cdot \exp(-\lambda Y_i^k) + r_i^k \cdot (1 - \exp(-\lambda Y_i^k)) \tag{7}$$

式中, r_i^{k+1} 为第 $(k + 1)$ 层次的像素值; a 为零向量; λ 为参数; r_i^k 为第 k 层的像素值; Y_i^k 为第 k 层次的 MF 探测器结果值。为了控制迭代次数,设置 $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i^2$ 的迭代停止数值。

高光谱数据 X , $X \in R^{n \times m}$, m 个总像元, n 个波段,探测目标光谱 d , $d \in R^{n \times 1}$ 。

具体过程如下:

- ①高光谱数据 X 经 MF 探测器处理后,得到探测结果 Y^k ;
- ②对探测结果 Y^k 进行阈值分割,确定目标与背景;
- ③利用上式(7),对高光谱数据的像素值进行优化;
- ④根据第二步得到的目标和背景,根据上式(4)重新计算 μ_0 和 μ_1 ;
- ⑤利用计算的 μ_0 和 μ_1 ,得到新的 MF 探测器,

优化的高光谱数据经探测器处理后,得到探测结果 Y^{k+1} ;

- ⑥判断 $\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_i^2$ 是否小于临界值 η_0 , 否则进行步骤 2;

⑦对探测结果 Y 进行阈值分割,得到目标与背景。

4 实验分析

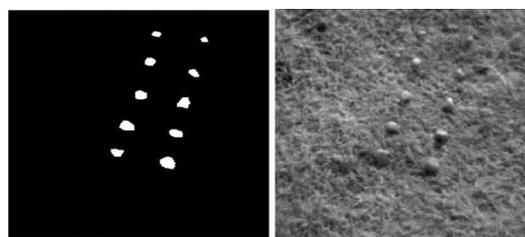
本次目标探测数据利用 AVIRIS 数据和 Cri 数据。AVIRIS 在圣地亚哥飞机场收集影像,在丢弃吸水率和低信噪比的一些波段后,保留下 189 个波段。影像上包含三架飞机,真实飞机分布情况如图 2(a) 所示,飞机场彩色图像如图 2(b) 所示。Cri 数据由人为摆放的 10 颗石头组成,包含 46 个波段。Cri 数据石头真实分布情况如图 3(a) 所示,灰度图像如图 3(b) 所示。



(a)飞机场数据真实目标分布 (b)飞机场数据彩色影像

图2 飞机场数据真实目标分布和飞机场数据彩色影像

Fig. 2 True target distribution of airport data and color image of airport data



(a)Cri数据真实目标分布 (b) Cri数据灰度图像

图3 Cri数据真实目标分布和 Cri数据灰度图像

Fig. 3 Real target distribution of Cri data and Gray-scale image of Cri data

为了证明本文提出的层次优化目标与背景的匹配滤波算法(HO-MF)的有效性,用另外三组算法作对比,两组实验数据经过 MF、CEM、MNF-MF、HO-MF 四种探测器处理后,绘制 ROC 曲线并计算曲线下面面积 AUC 的值。ROC 曲线是目前高光谱目标探测中最常用的评价指标,它以探测率为纵轴,以虚警率为横轴。ROC 曲线越靠左上角,AUC 的面积越大,说明高光谱目标探测效果越好。飞机场数据的四种算法实验的 ROC 曲线如图 4 所示,Cri 数据的四种算法实验的 ROC 曲线如图 5 所示。

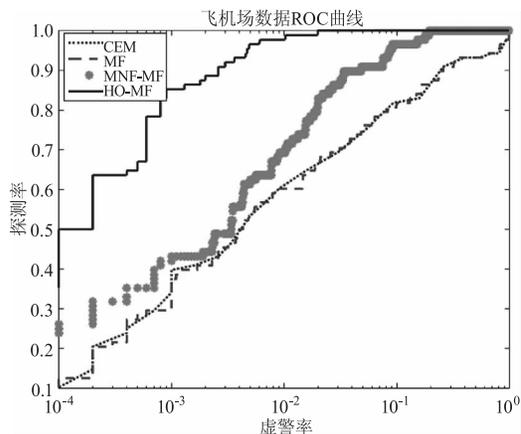


图 4 飞机场数据 ROC 曲线

Fig. 4 ROC curve of airport data

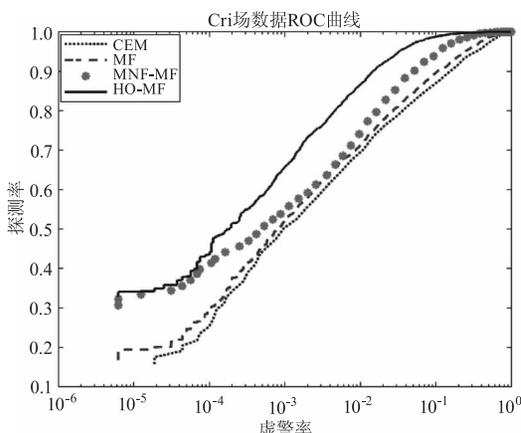


图 5 Cri 数据 ROC 曲线

Fig. 5 ROC curve of Cri data

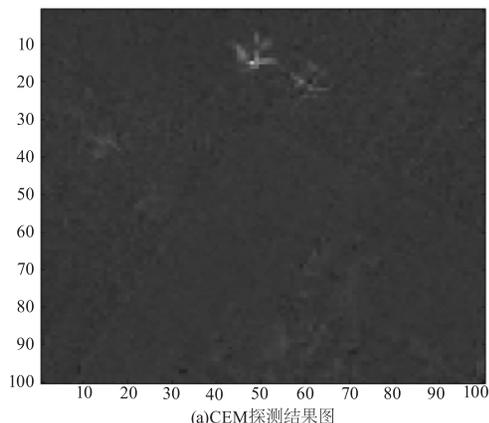
飞机场数据的四种算法实验的结果图如图 6 所示,Cri 数据的四种算法实验的结果图如图 7 所示,两组数据八次实验的 AUC 值如表 1 所示。

表 1 AUC 的值

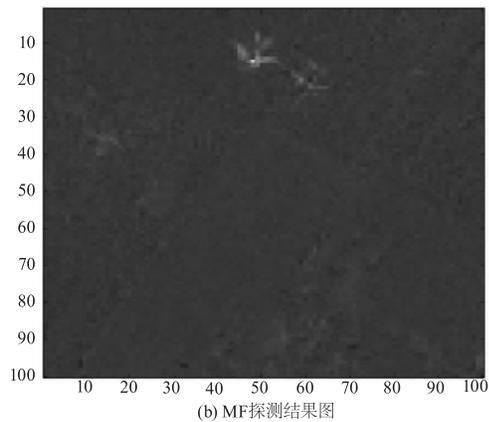
Tab. 1 Values of AUC

AUC	CEM	MF	MNF-MF	HO-MF
飞机场数据	0. 8968	0. 8982	0. 9746	0. 9903
Cri 数据	0. 9359	0. 9477	0. 9668	0. 9794

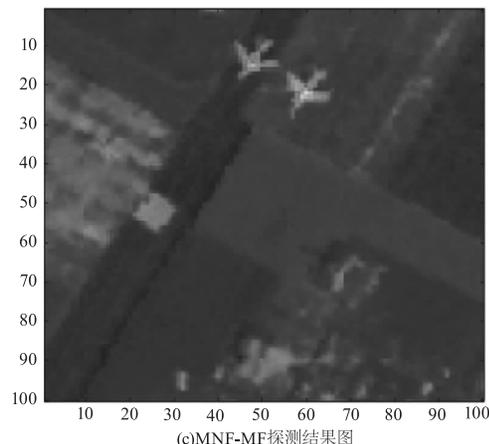
通过两组数据的 ROC 曲线和曲线下方面积 AUC 的值可以看出,本文提出的层次优化匹配滤波 (HO-MF)算法与另外三种探测方法相比,本文算法 AUC 的值更加接近 1,ROC 曲线更加趋向左上角。从两组数据的最终结果图上也可以看出,本文算法对高光谱图像的背景抑制更强,更能够突出目标,优于另外三种探测方法。对于 Cri 数据,MNF-MF 算法与 HO-MF 算法相比,在同等探测率情况下,MNF-MF 算法虚警率较高。从探测结果图上也能够看出,MNF-MF 算法探测结果图中周围背景与目标相差较小,对背景的抑制能力较弱,容易造成误判。以



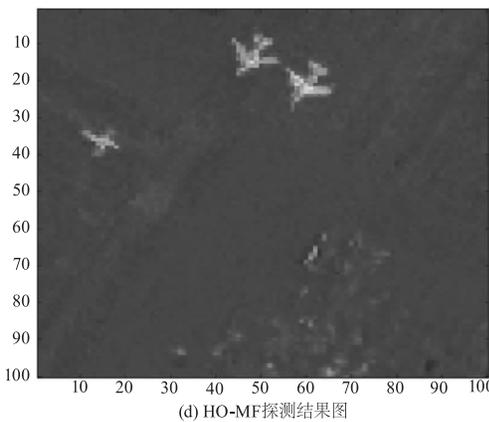
(a)CEM探测结果图



(b)MF探测结果图



(c)MNF-MF探测结果图



(d)HO-MF探测结果图

图 6 飞机场数据

FIG. 6 Airport data



(a)CEM探测结果图



(b) MF探测结果图



(c)MNF-MF探测结果图



(d) HO-MF探测结果图

图7 Cri 数据

Fig.7 Cri data

上实验结果和数据表明,本文的层次优化目标与背景的匹配滤波算法,要优于一些传统目标探测算法,能够提高高光谱目标探测的效果和精度。

5 结 语

本文将零向量和阈值分割迭代引入 MF 算法,通过改变原像素值来扩大目标类和背景类之间的马氏距离,分层次计算目标和背景。最后通过设置阈值来停止迭代,得到目标探测结果。本文在分割目标与背景选择阈值时,通过探测结果平均值做了简单的拟合,但是不能够完全符合阈值的变化,如何准确地选择阈值是一个重点的问题。本文实验数据是全像元级别的,CEM 和 MF 也主要对应于全像元级别的目标探测,在亚像元级别的目标探测^[9],是一个重点的研究方向。

参考文献:

- [1] Gao Xiaohui. Research on hyperspectral data processing technology[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
高晓惠. 高光谱数据处理技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学, 2013.
- [2] F A Kruse, et al. The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data [J]. Remote Sens. Environ, 1993, 44 (2/3): 145 - 163.
- [3] D Manolakis, R Lockwood, T Cooley, et al. Is there a best hyperspectral detection algorithm? [J]. Proc SPIE, 2009, 7334: 733402.
- [4] Harsanyi J C. Detection and classification of subpixel spectral signatures in hyperspectral image sequences[D]. University of Maryland Baltimore County, 1993.
- [5] Zhang Yuxiang. Small target detection based on hyperspectral remote sensing Image sparsity[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016. (in Chinese)
张玉香. 基于高光谱遥感影像稀疏性的小目标探测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [6] Geng X, Yang W, Ji L, et al. The match filter (MF) is always superior to constrained energy minimization (CEM) [J]. Remote Sensing Letters, 2017, 8(7): 696 - 702.
- [7] H Kwon, N M Nasrabadi. Kernel spectral matched filter for hyperspectral imagery [J]. Int. J. Comput. Vis, 2007, 71(2): 127 - 141.
- [8] Xiaohui Hao, Yiquan Wu, Peng Wang. Angle distance-based hierarchical background separation method for hyperspectral imagery target Detection [J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 697.
- [9] Yang X, Dong M, Wang Z, et al. Data-augmented matched subspace detector for hyperspectral subpixel target detection [J]. Pattern Recognition, 2020, 106: 107464.