

文章编号: 1672-8785(2009)09-0001-05

复杂背景下小目标恒虚警检测技术研究

崔金辉 孙 慧

(哈尔滨工业大学航天学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 为了实现复杂背景下的弱小目标恒虚警检测, 提出了一种基于 CEM 算法的恒虚警探测算法。在分析 CEM 算法滤波处理结果分布规律的基础上, 采用 TM-CFAR 方法选择恒虚警探测门限, 并结合形态学方法克服了背景虚警概率曲线中的拖尾现象。以 ETM 数据为例进行了计算机模拟。结果表明, 该方法在信干比为 -5dB 和虚警率为 10^{-4} 的条件下, 可以有效地检测出被探测目标。

关键词: 目标探测; 恒虚警; CEM 算法; 形态学方法

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Constant False Alarm Rate Detection of Small Targets in Clutter Background

CUI Jin-hui, SUN Hui

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To detect a small dim target in the clutter background, a CFAR method based on the CEM algorithm is described. The output distribution of a CEM detector is given and the TM-CFAR method is adopted to get CFAR thresholds. There is extended tail probability in actual detector distribution. This problem is solved by combining the CEM algorithm with the morphology method. The method is tested with the ETM Satellite data. Computer simulation shows that the method is robust. At the desired probability of false alarm $PFA < 10^{-4}$, it can effectively detect the dim target even at the condition of $SCR < -5\text{dB}$.

Key words: target detection; CFAR; CEM algorithm; morphology method

1 引言

复杂背景条件下的红外弱小目标检测, 是红外探测领域中一个既热门又困难的课题。在目标距离比较远时, 由于其信号强度很小, 目标经常会被淹没在起伏的背景杂波中。这时采用传统的单帧检测方法很难有效地检测出目标。目前国内外已有人提出了背景预测、帧间差分、多帧处理等探测方法, 这些方法有时可以在负 dB 信干比条件下探测出目标, 满足了该领域的

一些需求。但是这些方法存在着可靠性低、目标运动速度必须符合一定要求等缺点。

近年来, 采用多波段图像进行弱小目标检测的技术受到了人们的重视。它主要利用目标的光谱特性与背景光谱信息的差异来检测目标。它们可以在目标信号强度与背景强度相差不多时实现点目标甚至是亚像素目标的检测。目前人们已经报道过 RX 算法、OSP 方法、CEM 方法等小目标探测算法, 但是讨论探测结果中的虚

收稿日期: 2009-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (60878016/F050604) 以及国防科工委一些项目的资助

作者简介: 崔金辉 (1972-), 男, 黑龙江宁安人, 副教授, 博士, 现从事红外技术、空间光学等方面的研究。E-mail: cuijinhui@hrbeu.edu.cn

警问题的文献却不多。文献 [1] 介绍了主成分分析方法, 认为用该方法处理后的背景服从 Weibull 分布。然而它对背景光谱信息的计算比较复杂, 很难实现目标的实时探测。文献 [2] 对 RX 算法进行了讨论, 认为该算法的处理结果理论上服从 χ^2 分布。但是实际的概率曲线中存在拖尾现象, 在低虚警概率时偏差很大。文献 [3] 考虑了拖尾问题, 但是该方法选择的门限值比较高, 会降低微弱目标的探测概率。

CEM 算法不需要已知背景的光谱信息, 具有模型简单、探测效果理想、线性运算和便于硬件实现等优点。本文利用 CEM 算法对多波段图像进行了处理, 并给出了相应的恒虚警探测方案。

2 CEM 算法的背景分布模型

与采用传统的单帧或多帧检测方法不同, 多波段图像目标探测方法主要利用目标和背景光谱信息的差异来实现目标检测。它包含了丰富的空间、辐射和光谱三重信息, 因此可以获得更理想的探测效果。

一套多波段图像是一个图像立方体, 可视为一组经过配准的多源图像。根据线性混合光谱模型^[4], 多波段图像的各个像素可以表示为被探测目标光谱、背景成分光谱和噪声的线性叠加。波段为 l 的多波段图像的某一像素可采用以下形式表示:

$$r_i = da_i + UB_i + n_i \quad (1)$$

式中, r_i 是一个 $l \times 1$ 向量, 表示第 i 个像素的各个波段探测接收到的信号。 D 是一个 $l \times 1$ 向量, 表示目标的单位范数成分光谱, a_i 是目标的丰度。 U 是一个 $l \times (p-1)$ 矩阵, 表示背景的单位范数成分光谱, 其中 $(p-1)$ 表示图像中包含的不同类型背景的数目。 B_i 是一个 $(p-1) \times 1$ 向量, 是背景的丰度矩阵。 n_i 是一个 $l \times 1$ 向量, 表示各个波段中由于模型不完善、大气影响等原因形成的噪声。

本文是采用 CEM 算法对目标进行探测的, 即利用一个适当的 $1 \times L$ 维权值向量 W 对多波段

图像进行滤波处理, 使滤波输出能量在 $W^T d = 1$ 约束条件下的均值达到最小。

根据文献 [4], 可以得到 CEM 算法的权值向量 W 为

$$W = \frac{R^{-1}d}{d^T R^{-1}d} \quad (2)$$

式中, d 为目标成分光谱向量, R 为相关矩阵。

滤波后的输出为

$$y_i = W^T r_i = \frac{d^T R^{-1} r_i}{d^T R^{-1} d} = a_i + \frac{d^T R^{-1} U}{d^T R^{-1} d} B + W^T n_i \quad (3)$$

式中, $\frac{d^T R^{-1} U}{d^T R^{-1} d} = \frac{d^T V \Lambda^{-1} V^T U}{d^T V \Lambda^{-1} V^T d}$ 。这里, V 和 Λ 是相关矩阵 R 的特征向量矩阵和特征值矩阵。一般情况下, 目标和背景成分的分量小于探测器所用的波段数 (即 $p < l$)。根据主成分分析 (PCA) 理论, U 绝大部分可以压缩到以少数几个互不相关的主分量为基底的背景子空间上, 它们对应的特征值比较大。而目标的数目比较少, 则 d 对应于小信号及噪声子空间, 它对应的特征值相对要小得多。由此可知: $\frac{d^T R^{-1} U}{d^T R^{-1} d} \ll 1$ 。 B_i 是一个 $(p-1) \times 1$ 向量, 是背景的丰度矩阵, 同时我们设 B 约为 1, 从而有:

$$y_i \approx a_i + W^T n_i \quad (4)$$

当图像内存在诱饵等干扰时, 采用 TCIMF 滤波方法进行处理^[5], 也可以得到相同的结果。

从式 (4) 可以看出, 采用权值 W 对多波段图像进行滤波处理, 可以消除背景成分的影响, 从而获得很高的图像信噪比增益。

3 恒虚警处理

自适应恒虚警率 (CFAR) 检测是自动目标检测的一个重要组成部分。它针对不同的背景模型, 通过估计背景参数来调整检测阈值, 在虚警概率保持某一恒定值的条件下, 最大可能地探测到目标。

在研究背景分布模型的基础上, 自适应选取检测阈值是恒虚警率检测技术的关键。式 (4) 中, n_i 是某个波段中由于模型不完善、大气影响等原因形成的噪声, 这里假设背景经过白化处理, n_i 服从同一均值为零的高斯分布。 y_i 是 n_i 的线性处理, 它在复杂的背景条件下也近似服从高斯分布。

为了避免目标等异常小信号成分对参数估计的影响, 本文是通过采用 TM-CFAR 方法选择门限 r_0 , 从而实现恒虚警检测的。具体步骤如下:

1. 对用 CEM 算法进行滤波处理后的数据进行排序;
2. 从最小采样值起削减一些较小的数据, 从最大采样值起削减一些较大的采样数据;
3. 利用剩余的数据对背景分布参数进行估计;
4. 根据高斯分布特征, 选取适当的虚警率计算门限。

为了克服实际图像中概率曲线的拖尾现象, 本文采用形态学方法对 CFAR 检测后的结果进行了处理, 有效地保证了恒虚警检测的性能。

4 实验结果

利用基于 CEM 算法的小目标恒虚警检测算法对 ETM 卫星 TM1、TM2、TM3、TM4、TM5 五个波段的图像数据进行了处理 (数据来源于马里兰州大学全球观测实验室与地理科学与资源研究所的联合实验室, 模拟采用了天津部分地区的图像)。图 1 和图 2 给出了不同波段的图像及其数据, 其中目标信号的强度为背景的 $1/2$ 。可以看到, 该地物的各个波段的背景分布

比较复杂。目标淹没在背景中很难被探测到。从 CEM 算法处理的结果中可以看到, 多波段图像经 CEM 算法滤波处理后, 背景成分明显减少。由于采用 $W^T d = 1$ 的约束条件, 目标成分没有变化。这时再采用适当的门限滤波, 就容易把目标信号从处理后的图像中提取出来。

图 3 是小目标恒虚警检测算法的检测性能曲线。图中给出了虚警概率 $P_{fa} = 10^{-3}$ 和 $= 10^{-4}$ 条件下的小目标检测概率曲线。这里, 信干比简单地定义为目标信号在所有波段中的最大值与背景在所有波段中的平均值之比。可以看出, 在虚警率 $P_{fa} = 10^{-4}$ 、信号辐射为背景辐射 $1/2$ 的情况下, 目标检出概率接近 100%。在信干比为 $1/3$ 的情况下, 目标检出概率约为 99%。

图 4(a) 给出了自适应门限取不同值时, 对十幅不同背景的多波段图像进行处理后得到的虚警概率曲线。图中较粗的点划线为假设 CEM 算法处理结果服从高斯分布的条件下, 对滤波结果进行参数估计得到的检测性能理论曲线。左面那些曲线表示各幅图像的实际检测结果。从图中可以看出, 在恒虚警概率比较高时, 各幅图像的结果都与理论结果符合得很好。这时可以直接应用根据参数估计得到的理论值来选择检测门限。然而当恒虚警检测概率 $P_{fa} < 10^{-2}$ 时,

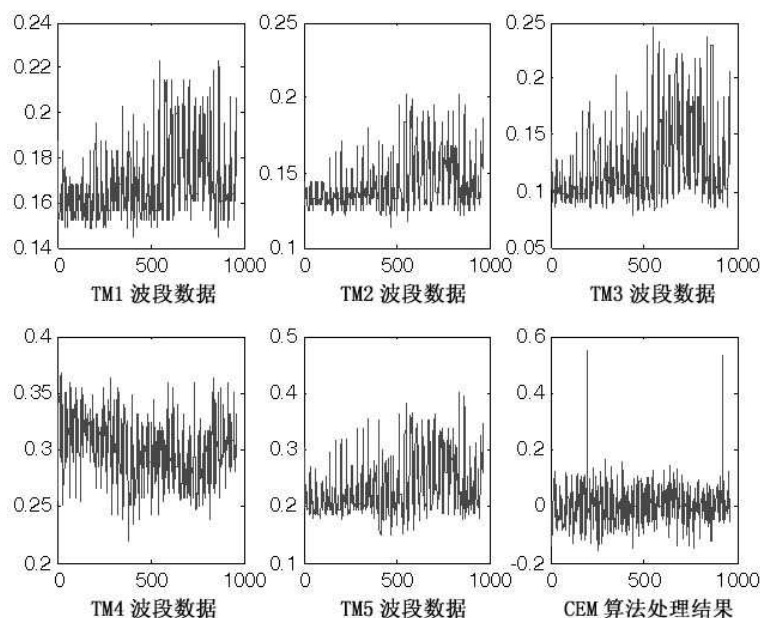


图 1 各波段图像数据及 CEM 算法处理后的结果

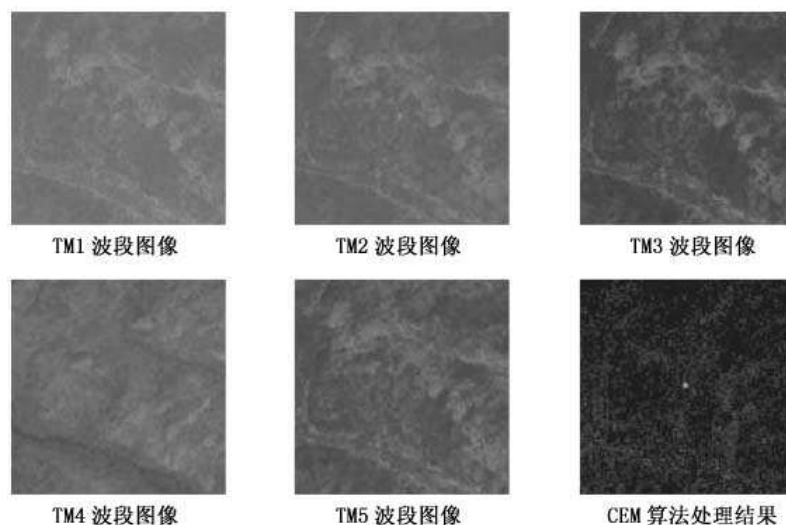


图 2 ETM 卫星各波段图像及 CEM 算法的处理结果

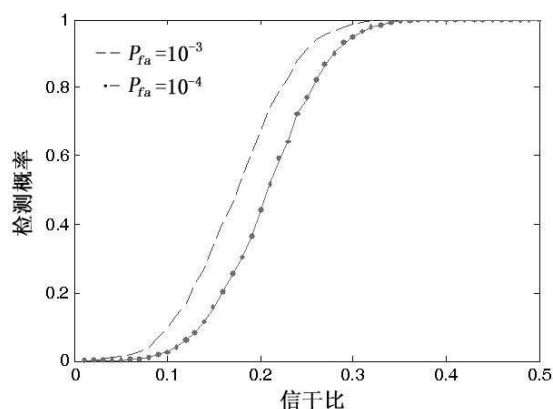
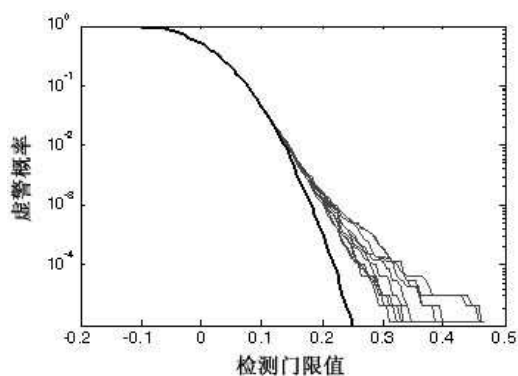


图 3 CEM 算法的检测性能曲线

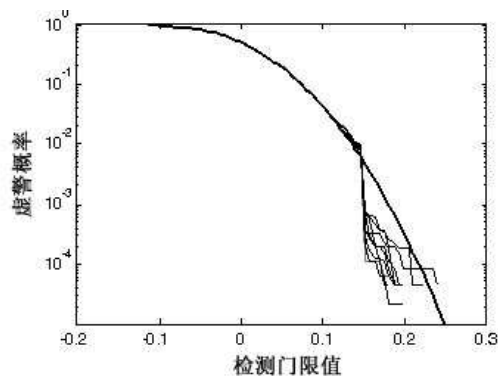
实验结果与理论结果开始出现偏差。虚警概率越低，检测门限的偏差越大。而且对于不同的背景图像，这种偏差也各有不同，这给恒虚警检测

门限的选择带来了困难。同样，RX 等算法的处理结果也存在类似的现象。分析其原因，作者认为主要是由于背景场景中存在着异常小的成分或者部分像素的实际光谱情况与多波段图像的线性混合光谱理论模型有些不匹配等原因造成的。

由于实际图像的概率曲线存在着拖尾现象，对同一虚警概率，检测门限的实际值与理论值存在比较大的偏差，这就大大地降低了对微弱目标的检测概率。对 ETM 卫星数据进行的模拟发现，在虚警检测概率 $P_{fa} < 10^{-3}$ 的条件下，由背景引起的虚警近似呈孤立点分布。这样，在检测小目标时，就可以利用图像的空域信息来抑制虚警概率。图 4(b) 给出了 CEM 检测方



(a)



(b)

图 4 背景虚警概率曲线

法结合形态学方法得到的实验结果。从图中可以看到, 实际的检测门限几乎都低于理论值。在虚警率要求高于 $P_{fa} > 10^{-4}$ 的场合, 可以有效地克服由拖尾现象带来的影响。

本文的算法建立在多元同分布的假设前提之下, 而实际数据有时并不完全符合这些假设。这时, 其滤波结果的概率密度曲线 (pdf) 并不服从高斯分布。不过, 本文的恒虚警方法的处理结果与理想结果相差不大。

5 结论

本文从多光谱线性混合光谱模型出发, 根据主成分分析理论, 对 CEM 算法的滤波结果进行了分析, 得到了一个很容易进行实时处理的简便形式。并通过结合 TM-CFAR 方法选择门限 r_0 , 实现了恒虚警探测。对 ETM 卫星数据的计算模拟结果表明, 该方法在信干比为 1/3 的情况下的目标检出概率约为 99%。实际图像中的虚警概率曲线存在着拖尾现象, 本文又采用形态学方法对 CEM 算法的检测结果进行了处理, 在

虚警率要求高于 $P_{fa} > 10^{-4}$ 的场合, 可以有效地克服由拖尾现象带来的影响。

参考文献

- [1] M Di Bisceglie, R Episcopo, R Galdi, et al. Multi-band CFAR detection of Thermal Anomalies Using Principal Component Analysis [J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE*, 2007, **23-28**: 4822-4825.
- [2] I S Reed, X Yu. Adaptive multiple-band CFAR detection of an optical pattern with unknown spectral distribution [J]. *IEEE Trans on Acoust Speech Signal Process*, 1990, **38**: 1760-1770.
- [3] Eskandar Ensafi, Alan D Stocker. An adaptive CFAR algorithm for real-time hyperspectral target detection [J]. *SPIE*, 2008, **6966**: 696605 1-15.
- [4] C-I Chang, H Ren. Generalized constrained energy minimization approach to subpixel target detection for multispectral imagery [J]. *Optical Engineering*, 2000, **39**(5): 1275-1281.
- [5] Qian Du, Hsuan Ren. On the Performance of CEM and TCIMF [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, **5806**: 861-868.

专利 Patent

用于定向红外对抗系统的激光束偏转系统与方法

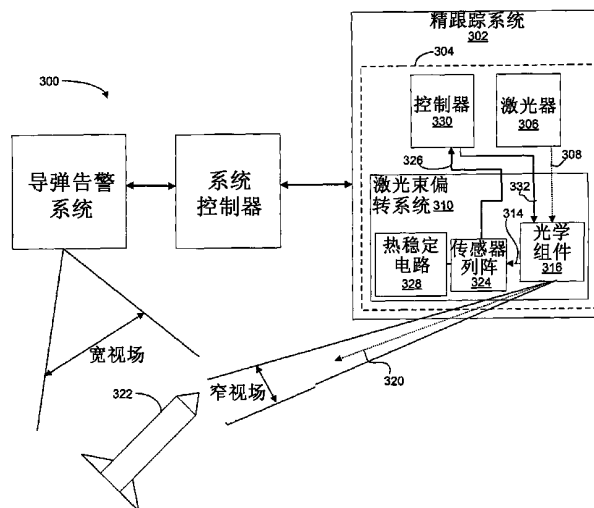
美国专利 US7569524

(2009 年 8 月 4 日授权)

本发明提供一种激光束偏转系统, 它是用于军用对抗系统的, 更确切地说, 它是用来控制军用定向红外对抗系统中的激光束的。该激光束偏转系统包括一个光学组件、一个传感器阵列和一个热稳定电路。其中, 光学组件用以将激光束的第一部分对准输出孔径和将激光束的第二部分对准传感通路, 另外, 它还可以根据位置控制信号调整激光束通过输出孔径和传感通路的位置; 传感器阵列位于传感通路中, 它是用来接收激光束的第二部分, 然后产生表示激光束通过输出孔径的位置的电信号的。该电信号的值随传感器阵列的温度而变, 可用来

产生位置控制信号, 以调整随上述电信号值而变的激光束的位置; 热稳定电路则用以根据热控制信号稳定传感器阵列的温度。

本专利说明书共 11 页, 其中有 4 张插图。



高编译