文章编号：1672-8785(2019)05-0010-08

基于 Facet 模型与方向相对极差的红外小目标检测方法

吴志佳 陈小林 王雨青 李荅群
（中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
精密仪器与装备研发中心，吉林 长春 130033）

摘 要：在对 Facet 模型的方向导数特征进行研究的基础上，针对红外弱小目标提出了一种利用局部方向相对极差计算显著性的方法，以快速有效地提取复杂背景下的红外弱小目标。基于弱小目标单帧检测理论，首先计算原始图像的 Facet 方向导数特征，然后在 Facet 方向导数特征图的局部内，沿着导数方向计算相对极差对比度显著图。通过对各个方向上的相对极差对比度显著图进行融合得到最终的显著性图像。最后，采用适当的阈值分割从该图像中提取目标。实验结果表明，本文算法对复杂红外弱小目标图像具有很高的信杂比增益和背景抑制因子。另外，该算法的计算复杂度低且可利用二维卷积加速计算，具有良好的算法实时性，适用于各种处理器平台的工程实现。

关键词：红外弱小目标检测；相对极差；局部对比度；方向导数特征；算法加速

中图分类号：TP391.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1672-8785.2019.05.002

Detection of Infrared Small-Target Based on Facet Model and Extreme Differential Value in Line Direction

WU Zhi-jia, CHEN Xiao-lin, WANG Yu-qing, LI Da-qun
(*Research and Development Center for Precision Instrument and Equipment, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: Based on the study of directional derivative characteristics of Facet model, a detection method for infrared weak targets is proposed. This detection method uses local relative extreme differential value at the multi-directional lines to calculate the significance of small target, which is very effective for fast extraction of targets under complexbackground. This method is based on the theory of single frame detection of weak target. Firstly, the Facet wizard number characteristics of the original image are calculated. Secondly, in the local part of the Facet wizard number feature graph, the relative extreme difference contrast is calculated along the current direction. Then the relative extreme difference contrast in each direction is fused to obtain the final significant image. Finally, the target is extracted with appropriate threshold segmentation for the final significant image. The experiment result shows that the proposed algorithm has high signal-clutter gain and background

收稿日期：2019-05-05

作者简介：吴志佳(1990-)，男，吉林松原人，硕士生，主要研究方向为目标跟踪与检测。
E-mail：1132087611@qq.com

inhibitor for complex infrared weak target images. In addition, the computational complexity of the algorithm is low and can be calculated by using two-dimensional convolution acceleration. As a good real-time algorithm, it is beneficial to the engineering implementation of various processor platforms.

Key words: infrared weak target detection; extreme differential value; local contrast; directional derivative feature; algorithm acceleration

0 引言

随着红外探测技术的不断发展，复杂背景下的红外弱小目标检测技术在军事和民用领域都变得越来越重要。因此，如何快速、准确地发现目标已经成为军事预警跟踪和海事搜索等系统的关键所在。然而红外弱小目标检测目前仍存在诸多难点，例如待探测目标没有明显的形状或纹理信息，以及由环境因素造成图像信杂比低或背景复杂等。这些问题都会严重影响红外弱小目标的检测准确度与提取精度[1-2]。

近年来，国内外都针对红外弱小目标的图像特点进行了广泛研究。Wang C 等人[3]利用图像序列的时间及空间关联性，在图像信杂比极低的场景下获得了很好的效果。但该算法需要利用连续图像序列进行目标确认，导致算法实时性较差。Zhao K 等人[4]提出了一种空间域高通滤波方法，即通过高通模板卷积来抑制背景并增强目标，其速度很快但效果一般。Arce G R 等人[5]提出了一种最大中值滤波方法，即通过多方向信息融合来计算中值。该方法减小了边缘背景的影响，但信杂比增益不高。Bai X 等人[6]提出了一种基于导数熵对比度的方法，即通过计算图像局部对比度来提取弱小目标。该方法充分利用图像的位置信息与灰度信息，可有效增强目标并抑制背景噪声干扰，但其熵对比度计算复杂。Yang C 等人[7]利用 Facet 模型推导出了一个二阶导数滤波器。他们将原始图像分解为不同方向的子带，并结合多尺度面模型进行目标检测。结果表明，该算法可以很好地抑制背景杂波，但是其模型相对比较复杂。

因此，针对弱小目标检测算法难以同时满足有效性与实时性的问题，本文结合 Facet 模型和局部对比度测量方法，在 Facet 方向导数特征图的基础上，提出了一种通过沿方向计算局部相对极差来表征对比度的方法，然后利用多方向融合的对比度进一步抑制背景噪声干扰，从而凸显并准确分离弱小目标。

1 Facet 模型与方向梯度特征计算

Haralick R M 等人[8]提出，对于一幅图像中的任意一个像素点而言，其某个邻域所有像素点的灰度值所形成的灰度强度表面，均可以用一个空间的二元多项式进行拟合，即通常所说的 Facet 模型[9]。假定该拟合多项式为 f，为了求解此拟合，我们可以先忽略高于三次的多项式。基于该模型，如果在原图的 5×5 邻域内，其灰度强度曲面即可被拟合成一个二元三次多项式：

$$\begin{aligned} f(r,c) &= K_1 + K_2 r + K_3 c + K_4 (r^2 - 2) \\ &+ K_5 rc + K_6 (c^2 - 2) + K_7 (r^3 - \frac{17}{5} r) \\ &+ K_8 (r^2 - 2) c + K_9 r (c^2 - 2) + K_{10} (c^3 - \frac{17}{5} c) \end{aligned} \tag{1}$$

式中，r 和 c 为 5×5 邻域内的行列坐标，$r \in \{-2,-1,0,1,2\}$，$c \in \{-2,-1,0,1,2\}$；K_i 为拟合系数。根据 5×5 邻域模型，其一阶方向导数特征只与 K_2、K_3、K_7、K_8、K_9、K_{10} 有关，相关计算如下：

$$w_2 = \frac{1}{50} \begin{bmatrix} -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix},$$

$$w_7 = \frac{1}{60} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$w_8=\frac{1}{140}\begin{bmatrix}-4 & -2 & 0 & 2 & 4\\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2\\ 4 & 2 & 0 & -2 & -4\\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2\\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4\end{bmatrix}$$

$$w_3=w_2^T, w_9=w_8^T, w_{10}=w_7^T, K_i=I\mathrm{e}w_i \quad (2)$$

式中，I 为红外图像；符号 e 表示二维图像卷积[6]。那么 Facet 模型中 0°和 90°方向上的一阶方向导数可通过对式(1)求偏导数得到：

$$f'_0=K_3-2K_8-\frac{17}{5}K_{10} \quad (3)$$

$$f'_{90}=K_2-2K_9-\frac{17}{5}K_7 \quad (4)$$

此后，任意方向(α)上的一阶方向导数可由式(5)求得：

$$f'_\alpha=f'_0\cdot\cos(\alpha)+f'_{90}\cdot\sin(\alpha) \quad (5)$$

图 1 所示为高斯模型建模的小目标及其四个归一化后的方向梯度特征图像。

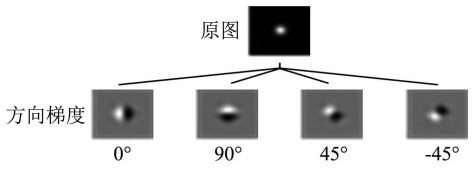


图 1 高斯模型小目标及一阶方向导数特征

2 基于 Facet 梯度与方向相对极差的弱小目标检测

本文提出的基于上述 Facet 模型的弱小目标检测方法可以分为四个步骤：第一步，计算 Facet 方向导数特征；第二步，计算方向极差对比度；第三步，融合多方向的极差对比度，计算目标显著度；第四步，通过阈值分割分离目标与背景。图 2 为该算法的具体流程框图。

2.1 局部方向相对极差对比度

通过研究高斯模型小目标的归一化方向梯度图像发现，在小目标的局部邻域内，若顺着对应的方向沿直线遍历梯度值，其最大值应该出现在前半线性邻域，而最小值则会出现在后半线性邻域，且该线性邻域的均值较小。因此，如果计算该直线遍历到的梯度值集合的相对极差值，即可很好地表征小目标的显著度值。为了更好地凸显显著度，本文算法又对上述相对极差值进行了指数拉伸。图 3 所示为沿 45°方向的示例计算过程。

任意方向相对极差对比度的计算过程如下：在 α 方向特征图像中，过待计算点 p，沿 α 方向遍历半径为δ的直线邻域(一般选取$\delta=4$)；

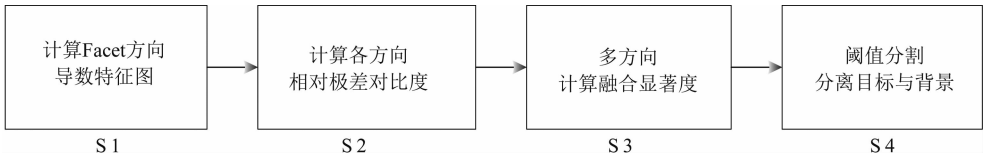


图 2 算法流程框图

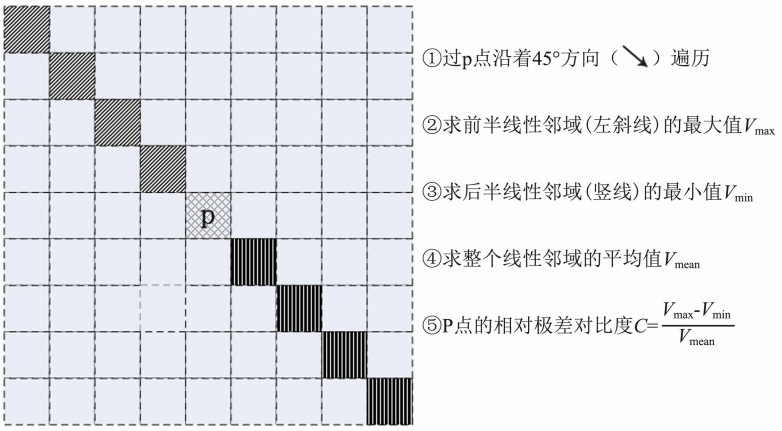


图 3 位置 p 沿 45°方向的相对极差对比度的计算过程(邻域半径 $\delta=4$)

设 D_f 和 D_b 分别为前半线性邻域和后半线性邻域的梯度值所构成的集合，D_δ 为整个线性邻域的梯度值所构成的集合，则可将 D_δ 上的相对极差定义为

$$RR(D_\delta)=\frac{\mathrm{Max}[D_f]-\mathrm{Min}[D_b]}{\mathrm{Mean}[D_\delta]} \tag{6}$$

进而定义 p 点沿 a 方向的相对极差对比度 $C(p,a,D_\delta)$：

$$C(p,a,D_\delta)=\mathrm{e}^{RR(D_a)} \tag{7}$$

式中，e 为自然对数的底。图 4 为高斯模型小目标归一化后的方向梯度特征图像和方向对比度图像。

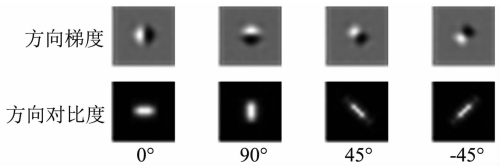


图 4 高斯模型小目标的方向相对极差对比度

2.2 局部方向相对极差对比度的快速算法

从上面任意方向相对极差对比度的计算中发现需要求解最大值与最小值，所以必然会涉及反复的排序操作，从而影响算法实时性。为了更加快速地计算位置点 p 的方向对比度值，可以根据图像局部具有空间连续性这一性质，对式(6)进行近似处理，即用前半线性邻域与后半线性邻域的均值分别代替待求解的最大值与最小值，则相对极差可近似为

$$RR(D_\delta)\approx\frac{\mathrm{Mean}[D_f]-\mathrm{Mean}[D_b]}{\mathrm{Mean}[D_\delta]} \tag{8}$$

利用上面的近似是因为计算式(8)的分子值和分母值时，可通过设计相应的卷积核与方向梯度特征图像进行二维卷积整体求解，从而大大提高算法的执行速度。用于求解式(8)分子值的卷积核由沿方向直线、中心点前半线性邻域为 1、后半线性邻域为−1、其余部分为 0 的矩阵构成，记为 k_a。用于求解式(8)分母值的卷积核由沿 a 方向直线、整个线性邻域为 1、其余部分为 0 的矩阵构成，记为 z_a。例如，7×7 大小的 α=45°方向的 k_a 和 z_a 分别为

$$k_a=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&-1&0&0\\0&0&0&0&0&-1&0\\0&0&0&0&0&0&-1\end{bmatrix},$$

$$z_a=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0&0\\0&0&0&0&1&0&0\\0&0&0&0&0&1&0\\0&0&0&0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{9}$$

其他尺寸和方向的卷积核以此类推。

沿方向相对极差对比度的卷积法的计算公式如下：

$$C(a)=\mathrm{e}^{k_a\mathrm{ef}_a/(z_a\mathrm{ef}_a)} \tag{10}$$

$C(a)$即为整幅图像各个位置的 α 方向相对极差对比度。

上述二维卷积操作一般可以利用处理器的硬件单元进行加速计算，并且可以将多个方向的相对极差对比度求解置于图像的多通道上进行整体计算。在充分运用处理器硬件加速单元及并行加速机制的基础上，上述加速算法具有良好的实时性，且步骤简单，十分利于工程实现。图 5 为采用多通道技术后的算法加速示意图。

2.3 目标显著度与阈值分割

根据高斯小目标模型的中心对称性，上述沿方向相对极差对比度值会在小目标所在的区域内得到较高的响应，且不受方向限制。因此，如果对多方向上的对比度值进行融合操作，就可以显著地增强目标并抑制背景，然后通过适当的阈值分割即可彻底分离小目标。由上分析，可将融合多方向的目标显著度 S 定义为

$$S=\prod_{a}C(a) \tag{11}$$

阈值计算如下：

$$thr=\kappa\cdot\max(S);\quad T=\begin{cases}1, S>thr\\0, S<thr\end{cases} \tag{12}$$

式中，κ 为限定因子；thr 为分割阈值；T 为分割图像，其中 1 代表小目标所在像素的区域，0 代表背景区域。

对于梯度变化较大的边沿区，会因边沿的法向方向上出现很低的极差对比度而被抑制；而谷状分布的暗色小目标的一阶方向导数特性与高斯小目标模型的一阶方向导数特征恰好相反，导致当沿着方向求取相对极差时，其相对极差为负值而被明显抑制。图 6 所示为本文算法对大梯度边沿区和谷状暗色小目标等干扰的抑制效果。

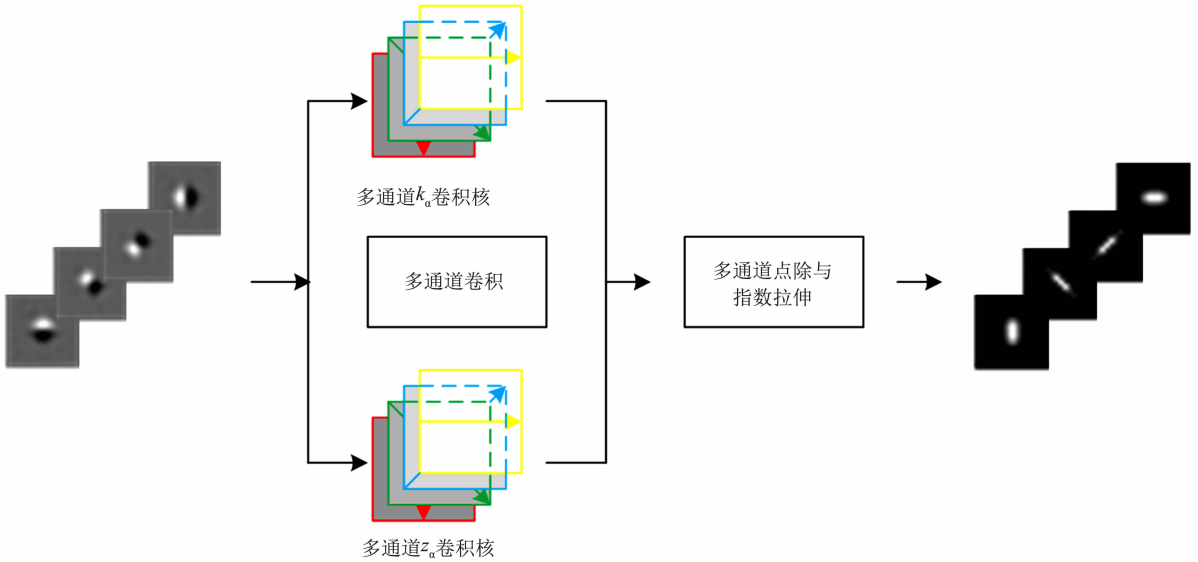


图 5 多通道算法加速示意图

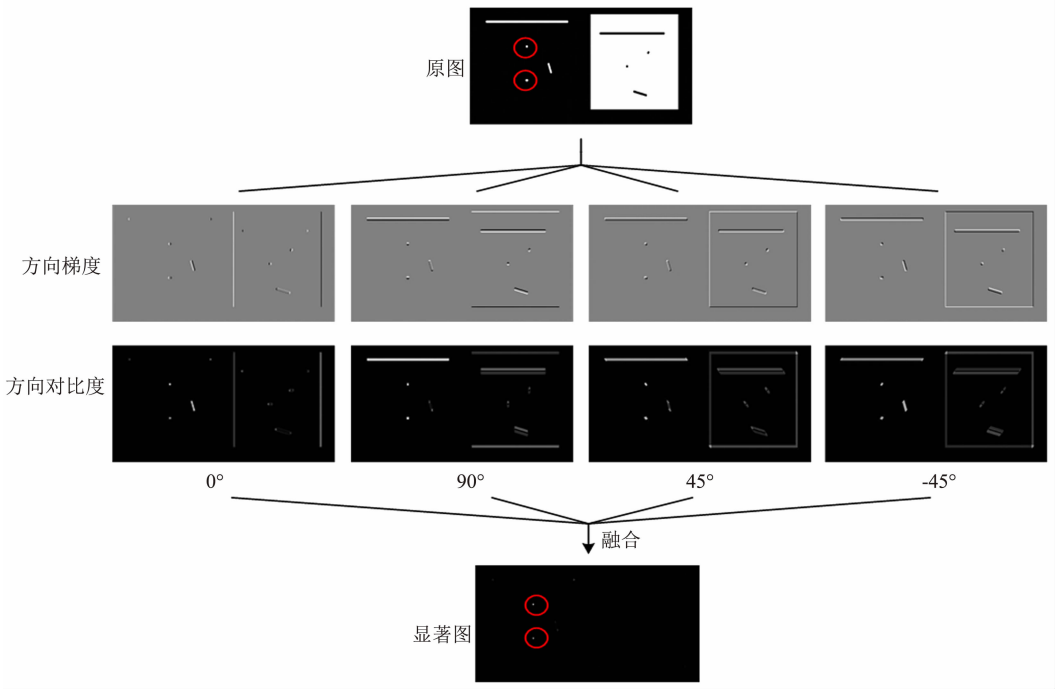


图 6 本文算法对干扰目标的抑制效果图

3 评价指标与实验对比

3.1 常用的算法评价指标

在评价红外弱小目标算法的性能时，最常用的指标有信杂比增益、背景抑制因子以及算法实时性[10]。其中，信杂比增益是处理前后所得图像信杂比的商。信杂比 S_{CR} 及信杂比增益 G_{SCR} 的定义表达式为

$$S_{CR}=\frac{\mu_t-\mu_b}{\sigma_b} \tag{13}$$

$$G_{SCR}=\frac{S_{CRout}}{S_{CRin}} \tag{14}$$

式中，μ_t 和 μ_b 分别为目标区域和整幅图像的平均灰度值；σ_b 为整幅图像的标准差。

将背景抑制因子 B_{SF} 定义为处理前后所得整幅图像标准差的商：

$$B_{SF}=\frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \tag{15}$$

式中，σ_{in} 和 σ_{out} 分别表示整幅图像的标准差。

算法实时性可以通过在连续图像序列检测后求取每帧图像平均耗时的对比方法测得。本文算法运行的硬件环境为采用 Intel Core(TM) i5-7500 CPU 3.40 GHz 处理器以及 4 GB 内存的台式机。

3.2 实验对比

为了说明算法有效性，对本文算法与 Max-Mean、Max-Median、LCM 算法进行了指标对比实验。我们采用四组各 100 帧的图像尺寸为 324×284 像素的红外图像序列。其中，1 组场景为海空背景弱小目标；2 组场景为海面背景弱小目标；3 组和 4 组场景为天空背景弱小目标。表 1～表 3 分别列出了各种算法在信杂比增益、背景抑制因子和算法实时性方面的性能对比结果。

通过实验数据对比可知，本文算法在信杂比增益、背景抑制因子和实时性方面均明显优于 Max-Mean、Max-Median 和 LCM 算法。特别是在实时性方面的提升，将有利于该算法在实时性要求较高的场景中的应用。

图 7 所示为实验中第一帧图像的对比结果，包括原图、检测结果以及三维分布图的对比效果。其中，a1～d1 为原始图像；a2～d2 为 Max-Mean 算法对小目标的增强效果；a3～d3 为Max-Median算法对小目标的增强效果；a4

表 1 信杂比增益对比结果

序列组号	本文算法	Max-Mean	Max-Median	LCM
1	**112.37**	1.06	1.18	1.56
2	**121.64**	1.14	1.32	1.72
3	**133.16**	0.93	1.03	1.33
4	**131.53**	0.87	0.98	1.28

表 2 背景抑制因子对比结果

序列组号	本文算法	Max-Mean	Max-Median	LCM
1	**91.52**	10.53	10.14	0.99
2	**102.10**	12.20	11.51	0.98
3	**125.76**	13.49	13.60	1.00
4	**125.45**	11.88	10.68	1.01

表 3 算法单帧图像平均耗时对比结果

	本文算法	Max-Mean	Max-Median	LCM
平均耗时/ms	**7.7622**	34.0373	81.2503	49.2040

注：本文算法 $\delta=4$，Max-Mean、Max-Median 和 LCM 邻域半径为 3

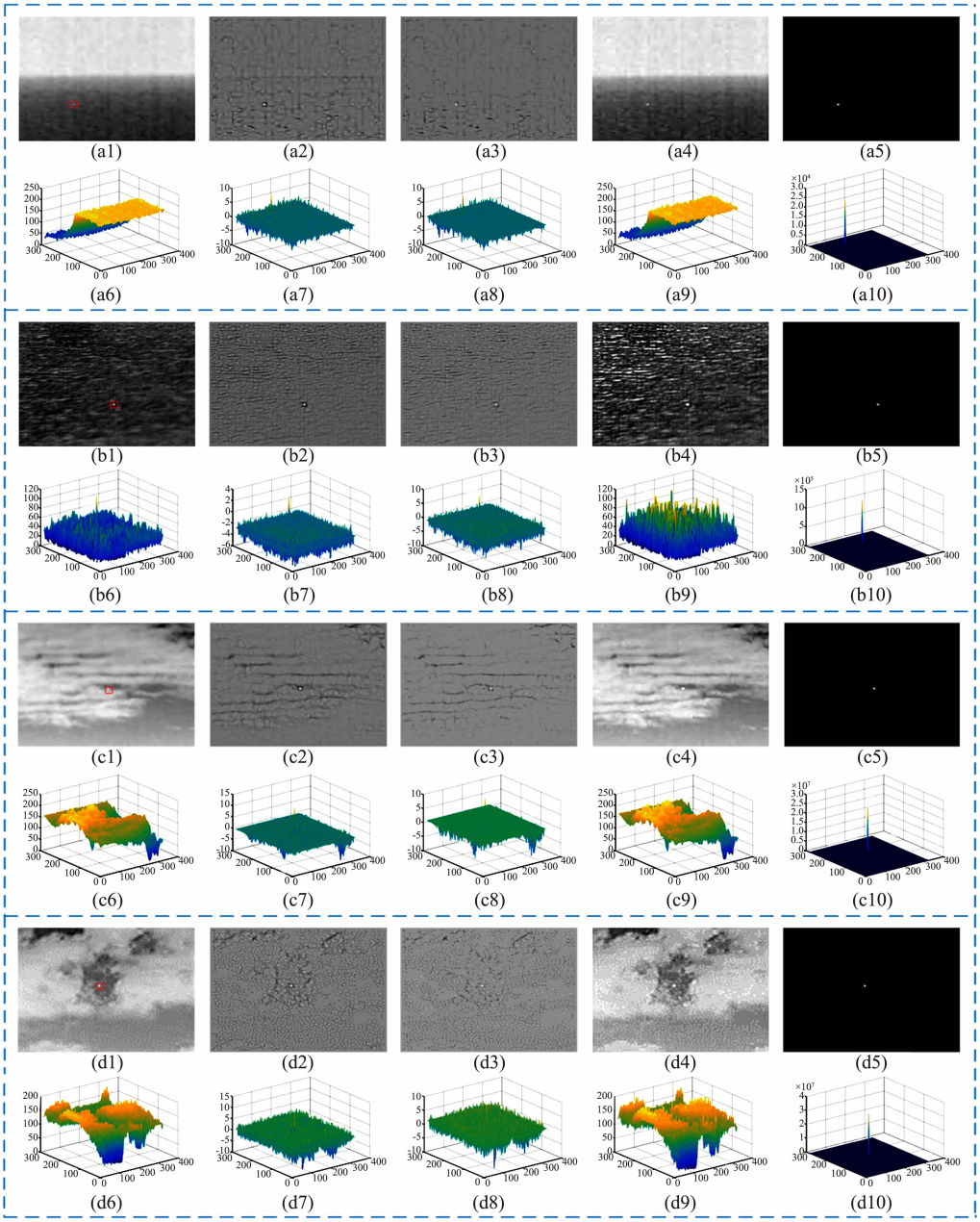


图 7 各算法的检测结果对比

d4 为 LCM 算法对小目标的增强效果；a5～d5 为本文算法对小目标的增强效果；a6～a10、b6～b10、c6～c10、d6～d10 分别为 a1～a5、b1～b5、c1～c5、d1～d5 所对应的灰度三维分布图。

4 结束语

本文算法结合 Facet 模型与局部对比度检测方法的相关理论，利用方向梯度特征图中弱小目标区域沿方向相对极差对比度较大的先验信息，提出了一种用方向相对极差表征局部对比度的方法，并给出了这种局部对比度计算的多通道卷积快速算法，进而通过融合多方向上的相对极差对比度图像得到目标的显著度图像。最后，通过适当的阈值分割精确分离弱小目标。实验结果表明，本文算法拥有优异的性能指标，对较复杂背景干扰具有较好的鲁棒性，且可快速有效地分离弱小目标。此外，该算法实现简单，具有很好的移植性和实时性，可在绝大多数嵌入式处理器上实现，因而能够应用于

一些计算资源受限制的嵌入式应用场景之中。

参考文献

[1] 汪国有，陈振学，李乔亮. 复杂背景下红外弱小目标检测的算法研究综述 [J]. **红外技术**，2006，**28**(5)：287-292.

[2] 侯旺，孙晓亮，尚洋，等. 红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势 [J]. **红外技术**，2015，**37**(1)：1-10.

[3] Wang C，Qin S. Adaptive Detection Method of Infrared Small Target Based on Target-background Separation via Robust Principal Component Analysis [J]. *Infrared Physics & Technology*，2015，**69**：123-135.

[4] Zhao K. Background Noise Suppression in Small Targets Infrared Images and Its Method Discussion [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*，2004，**2**(2)：9-12.

[5] Arce G R. Theoretical Analysis of the Max/Median [J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*，1987，**35**(1)：60-69.

[6] Bai X，Bi Y. Derivative Entropy-Based Contrast Measure for Infrared Small-Target Detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2018，**56**(4)：2452-2466.

[7] Yang C，Ma J，Zhang M，et al. Multiscale Facet Model for Infrared Small Target Detection [J]. *Infrared Physics & Technology*，2014，**67**：202-209.

[8] Haralick R M. Digital Step Edges from Zero Crossing of Second Directional Derivatives [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*，1984，**6**(1)：58-68.

[9] 荣楚君，曹晓光，白相志. Facet 方向导数特征与稀疏表示相结合的红外弱小目标检测算法 [J]. **中国图象图形学报**，2018，**23**(11)：156-164.

[10] Deng H，Sun X，Liu M，et al. Small Infrared Target Detection Based on Weighted Local Difference Measure [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*，2016，**54**(7)：4204-4214.