

doi:10.3788/gzxb20184710.1010001

# 基于曲率的近地面红外小目标检测算法

朱国强<sup>1</sup>, 孟祥勇<sup>2</sup>, 钱惟贤<sup>1</sup>

(1 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2 齐齐哈尔北方华安集团试验场, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

**摘要:**针对在近地面场景下, 红外图像的背景杂波较难抑制、红外小目标检测率较低的问题, 提出了一种基于曲率的近地面红外小目标检测算法。将图像看作一张三维曲面, 分析目标与背景在曲面形状上的差异, 并使用曲率表征这种差异; 利用 Facet 模型计算图像四个方向的一阶与二阶方向导数, 对于一阶方向导数搜索其过零点区域, 并利用过零点区域的二阶方向导数构建方向曲率图; 融合四个方向的方向曲率图, 得到最终的曲率图并进行自适应阈值分割实现目标检测。利用四组不同场景下的红外序列图像对算法进行验证, 实验结果表明, 本文提出的算法在信杂比与背景抑制因子方面都大于 10, 均高于其他算法, 同时在低于  $6 \times 10^{-4}$  的虚警率下就能达到 100% 的探测率, 明显优于其他算法。

**关键词:**小目标探测; 红外图像; 图像曲率; 一阶方向导数; 二阶方向导数

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)10-1010001-12

## Infrared Small Target Detection Method Based on Curvature near the Ground

ZHU Guo-qiang<sup>1</sup>, MENG Xiang-yong<sup>2</sup>, QIAN Wei-xian<sup>1</sup>

(1 School of Electric & Optic, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2 Qiqihar North Hua'an Group Test Site, Qiqihar, Heilongjiang 161006, China)

**Abstract:** For the detection rate is low and clutter is difficult to suppress under the complex scenes, a novel method for infrared small target detection based on curvature near the ground was proposed. The infrared image was regarded as a three-dimensional surface, and the differences between the target and the background in the shape of the surface was analyzed which was represented by curvature in this paper. Then the Facet model is used to calculate the first-order and second-order directional derivatives of the four directions of the image. Search for the zero-crossing area of the first-order directional derivatives, and construct the directional curvature map by using the second-order directional derivatives of the zero-crossing areas. Finally, the directional curvature map in four directions are fused to obtain the final curvature map and the real target was achieved by an adaptive threshold segmentation directly. The algorithm is validated by infrared sequence images in four different scenes. The experimental results show that the algorithm proposed in this paper is greater than 10 in terms of signal-to-clutter ratio and background suppression factor, which are higher than other algorithms. And the detection rate of 100% can be achieved under the false alarm rate below  $6 \times 10^{-4}$ , which is obviously superior to other algorithms.

**Key words:** Small target detection; Infrared image; Image curvature; First-order directional derivative; Second-order directional derivative

**OCIS Codes:** 100.2000; 110.3080; 040.6808

## 0 引言

红外小目标检测技术是红外搜索与跟踪系统、红外预警系统、卫星遥感系统与精确制导系统等系统中的

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61675099)资助

第一作者: 朱国强(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为红外图像处理与目标探测等。Email: 956325973@qq.com

导师(通讯作者): 钱惟贤(1980-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为红外成像系统。Email: developer\_plus@163.com

收稿日期: 2018-05-29; 录用日期: 2018-07-17

<http://www.photon.ac.cn>

核心技术<sup>[1]</sup>。目前红外成像系统的作用距离可达几十公里甚至上百公里,并且由于目前红外探测器的像元尺寸比较大,不足以产生高分辨率的红外图像,导致红外图像整体上呈现模糊的状态,难以获得细节信息。近些年来,随着红外小目标探测技术的应用越来越广阔,应用场景的背景复杂度进一步提升,特别是对于近地面场景中的复杂背景,缺乏有效的背景抑制与目标探测算法。

传统的红外小目标检测算法,主要可以分为:基于空域滤波的算法,例如最大中值/均值滤波器(Max-Median/Max-Mean)<sup>[2]</sup>、二维最小均方差滤波器<sup>[3]</sup>和利用数学形态学操作的 Top-hat 滤波器<sup>[4]</sup>,这些方法计算较为简单,但是对于复杂背景,其检测结果往往难以满足要求<sup>[5]</sup>;另一种是基于变换域的算法,包括小波变换法<sup>[6]</sup>、频域滤波算法(High-Pass)<sup>[7]</sup>等,这些方法先将图像转换到变换域,然后利用小目标在图像中呈现的高频特性区分背景与目标,这类算法需要目标与背景对比度为强烈,在强起伏的干扰背景下虚警率较高<sup>[8]</sup>。近年来,受人类视觉机制(Human Vision System, HVS)的启发,视觉显著性与尺度空间理论引起了人们的广泛关注,利用了人类视觉系统特性和衍生核模型,CHEN 等<sup>[9]</sup>提出了一种基于局部对比度策略(Local Contrast Method, LCM)的检测算法,随后 HAN 等<sup>[10]</sup>提出了改进的 LCM 算法,用于提高检测率并减少虚警率,取得了较好的检测结果,另外为了提高该算法的实时性,WANG 等<sup>[11]</sup>通过计算图像显著性区域的局部对比度方式提高了运算速度。随后,WEI 等<sup>[12]</sup>提出了一种称为多尺度斑块对比度测量(Multiscale Patch-Based Contrast Measure, MPCM)的新方法,该方法也被用来检测重杂波中的小红外目标,但它不能处理像素大小的噪声。2015年,ZHAO 等<sup>[13]</sup>将主曲率引入红外小目标检测中来,提出了主曲率函数滤波的检测算法,但是该算法对于复杂背景下目标的检测效果有待进一步提高。由于在近地面场景下背景的复杂度较高,以上算法的背景抑制效果并不明显。

针对以上的问题,本文提出了一种基于曲率的近地面红外小目标检测方法。该方法将图像三维响应图看成空间曲面,从目标与背景的空间曲率差异角度进行分析,并利用图像一阶与二阶方向导数构建了方向曲率图,进一步融合得到图像的空间曲率图,然后对曲率图进行自适应阈值分割以获得目标,实现了恒虚警率下的检测结果。

## 1 红外图像表示方法

### 1.1 红外图像特性分析

对于近地面场景下包含小目标的红外图像  $f(x, y, k)$  可以通过式(1)来描述。

$$f(x, y, k) = f_t(x, y, k) + f_b(x, y, k) + n(x, y, k) \quad (1)$$

式中,  $f_t(x, y, k)$  表述小目标的图像灰度;  $f_b(x, y, k)$  表示复杂背景图像灰度;  $n(x, y, k)$  表述图像噪声;  $k$  表示图像的帧序号。

图 1(a) 为一张包含目标的近地面场景红外图像,图中方框标志为目标,圆圈标志为四个容易产生虚警的背景区域。图 1(b) 为这张图像的三维响应图,图 1(c)~(g) 分别为目标与四个虚警点的局部放大图及其三维响应图。

对于图 1(c) 中的小目标,大部分学者认为,其可以用二维高斯函数来模拟<sup>[14]</sup>,用公式表示为

$$I(x, y) = I_{\max} e^{-\frac{1}{2} \left( \left( \frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right)} \quad (2)$$

式中,  $I_{\max}$  表示目标灰度值的峰值,  $\sigma_x$  与  $\sigma_y$  分别代表图像水平方向与垂直方向的方差。

在近地面的场景下,红外图像的背景主要包括建筑物、道路、树木、部分天空等多种成分,这些成分的红外辐射各不相同,但是均可能对目标检测造成影响。例如,在红外图像中建筑物的边缘强度可能接近于目标的强度,而树林可能遮挡住小目标,在天空中,移动的云层可能也会对目标检测造成影响。图 1(d)~(g) 为四个典型的容易产生虚警的背景区域,这四个区域均有部分像素的灰度值大于目标的灰度值,同时在局部区域内具有较强的对比度。

本文将红外图像看成空间曲面进行分析,如图 1(b) 所示,令图像的行方向为  $x$  轴,列方向为  $y$  轴,则图像的灰度值能构成一个三维曲面。图 1(a) 的红外图像构成的曲面在  $y$  轴上总体呈现出增大的趋势,天空部分较为平坦,但是在目标位置,曲面在  $z$  轴上出现明显的凸起,在地面场景部分,由于背景的复杂度较高,整体的灰度值更高且呈现出的凹凸不平的形状。对比图 1(c)~(g) 目标与虚警点在三维响应图上的差异,

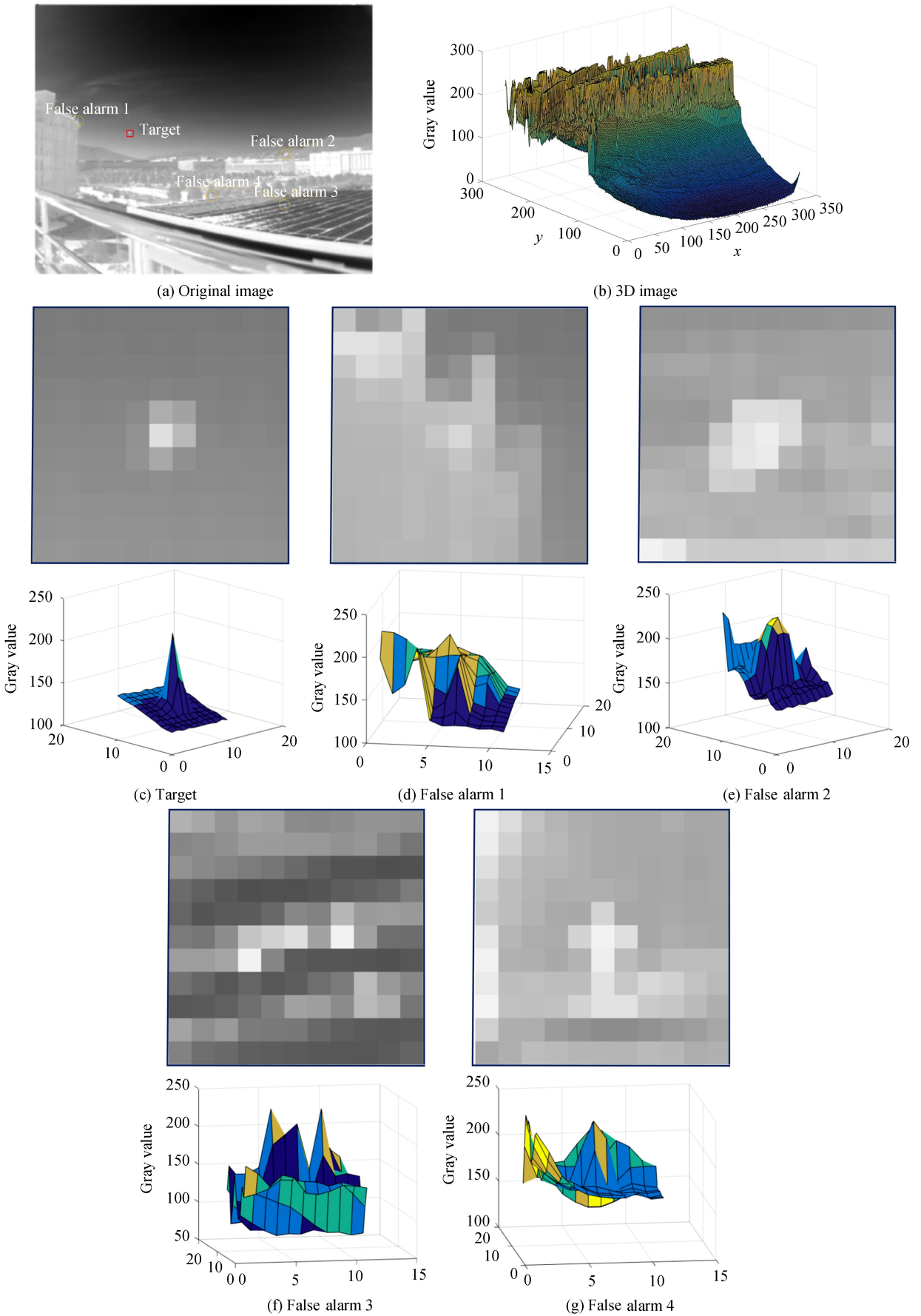


图1 近地面场景下的红外原图及其三维响应  
Fig.1 Original image and 3D image near the ground

由于地面场景之间存在的关联性使得其总是在某些方向上具有较平滑的形状,如图 1(d)为建筑物的边缘区域,在其构成的曲面中呈现左下高,右上低的形状,图 1(e)为被树木遮挡住部分的建筑物,其构成的曲面在中心区域形状的变化较为平缓,图 1(f)与(g)分别在行和列方向上存在着相关性,使得它们各自在相应方向上的曲面形状较为平滑,而对于目标,不存在变化平缓的方向,在曲面中目标总是有明显的凸起.

根据以上的分析,本文利用微分几何中的曲率来表征曲面的凹凸变化的程度.在几何上,曲率的大小反映的是曲线在某一点的弯曲程度<sup>[16]</sup>.对于曲线  $y$  上的一点  $M$ ,若点  $M$  具有二阶导数,则其曲率的计算公式为

$$\kappa = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

式中, $y''$ 表示曲线的二阶导数, $y'$ 表示曲线的一阶导数, $|\cdot|$ 为取绝对值符号, $\kappa$ 表示在点  $M$  处的曲率.

### 1.2 基于 facet 模型的图像导数计算方法

根据上一节的分析,计算图像的曲率成为目标检测的关键,根据式(3),曲线的曲率是通过曲线的一阶导数与二阶导数进行计算的.由于图像构成的三维曲面实质上为一个离散的曲面,不能直接套用式(3)进行计算,但是仍然能用一阶导数与二阶导数的特性进行图像的曲率分析.在离散的情况下,只需要计算与  $y$  轴夹角为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  四个方向曲线的曲率,就能够表征该点的空间曲率的大小,所以本文只计算这四个方向的一阶与二阶导数.

本文利用 Haralick 提出的 facet 模型<sup>[16]</sup>对图像进行描述.假设  $R$  和  $C$  是对称邻域内的索引集,其中  $R = \{-2, -1, 0, 1, 2\}, C = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ ,则以  $(0, 0)$  为中心的像素值可以用其  $5 \times 5$  邻域内的像素值来表示为

$$f(r, c) = \sum_{i=1}^{10} K_i \cdot P_i(r, c) \quad (4)$$

式中, $\{P_i(r, c)\} = \{1, r, c, r^2 - 2, rc, c^2 - 2, r^3 - (17/5)r, (r^2 - 2)c, r(c^2 - 2), c^3 - (17/5)c\}$  为离散正交多项式基底,并且满足  $(r, c) \in R \times C, K_i$  为组合系数.

进一步,由于图像中各个像素  $(x, y)$  位置的  $K_i$  值不同,根据式(4),利用最小二乘拟合多项式正交特性,可以得到

$$K_i(x, y) = \sum_r \sum_c \frac{f(x+r, y+c) \cdot P_i(r, c)}{\sum_r \sum_c P_i^2(r, c)} \quad (5)$$

若令  $W_i = \frac{P_i(r, c)}{\sum_r \sum_c P_i^2(r, c)}$ , 则式(5)可以写成

$$K_i(x, y) = f(x+r, y+c) * W_i \quad (6)$$

式中, $*$ 表示卷积运算.则求取参数  $K_i$  的过程变成了一个核函数  $W_i$  与图像作卷积的过程,将  $\{P_i(r, c)\}$  带入,便可以得到相应的卷积核为

$$W_2 = \frac{1}{50} \begin{bmatrix} -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}, W_4 = \frac{1}{70} \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix},$$

$$W_5 = \frac{1}{100} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 0 & -2 & -4 \\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 1 & 2 \\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \end{bmatrix}, W_7 = \frac{1}{60} \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{W}_8 = \frac{1}{140} \begin{bmatrix} -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \\ 2 & 1 & 0 & 1 & 2 \\ 4 & 2 & 0 & -2 & -4 \\ 2 & 1 & 0 & -1 & -2 \\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \end{bmatrix}, \begin{cases} \mathbf{W}_3 = \mathbf{W}_2^T \\ \mathbf{W}_6 = \mathbf{W}_4^T \\ \mathbf{W}_9 = \mathbf{W}_8^T \\ \mathbf{W}_{10} = \mathbf{W}_7^T \end{cases}$$

得到参数  $K_i$  之后,结合方向导数的计算原理,则像素  $(x_0, y_0)$  沿着方向向量  $\mathbf{l}$  的一阶方向导数(First-Order Directional Derivative, FODD)与二阶方向导数(Second-Order Directional Derivatives, SODD)为

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial \mathbf{l}} \Big|_{(x_0, y_0)} = (K_2 - \frac{17}{5}K_7 - 2K_9) \sin \beta + (K_3 - \frac{17}{5}K_{10} - 2K_8) \cos \beta \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial \mathbf{l}^2} \Big|_{(x_0, y_0)} = 2K_4 \sin^2 \beta + 2K_5 \sin \beta \cos \beta + 2K_6 \cos^2 \beta \quad (8)$$

式中,  $\beta$  代表方向向量  $\mathbf{l}$  与图像列方向的夹角。

## 2 基于曲率的红外小目标检测算法

由于图像构成曲面的离散性质,并不能直接使用式(3)进行曲率的计算,但是,在获得一阶与二阶方向导数后,本文用其计算图像的方向曲率。图 2(a) 为一个 2D 的原始信号,其中高斯隆起与斜坡分别代表了目标与背景杂波。本节就是利用这个信号作为对象进行图像方向曲率的分析。

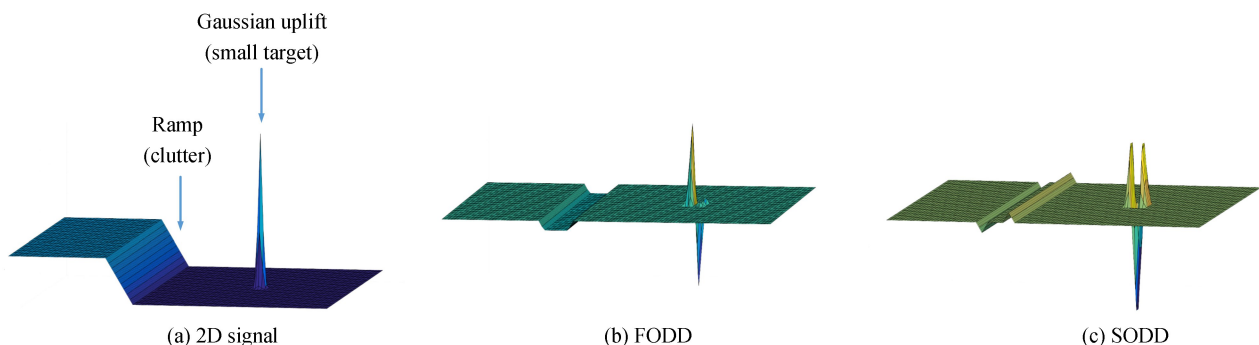


图 2 2D 信号及其一阶方向导数与二阶方向导数滤波结果

Fig.2 Filtering process of a 2D signal by using a FODD filter and a SODD filter

### 2.1 红外图像预处理

因为目标具有明显的凸起形状,因此在目标附近的曲率具有较大的值,因此可以利用这个特性区分目标和背景,但是对于噪声像素,其附近的曲率也将具有一个较大的值,这会导致目标与噪声点难以区分。为了降低噪声对于检测结果的影响,同时增强红外图像中目标的显著性,本文采用二维高斯差分滤波器(2D DoG)对红外图像进行预处理。两个具有不同标准差的高斯函数的差分定义为

$$\text{DoG}(x, y, \sigma_1, \sigma_2) = G(x, y, \sigma_1) - G(x, y, \sigma_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma_1^2} - \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma_2^2} \quad (9)$$

式中,  $\sigma_1, \sigma_2$  分别表示二维高斯函数的方差。参照文献[13]中,对噪声与目标的假设,为了达到抑制噪声同时增强目标,本文令  $\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 2$ 。

### 2.2 构建一阶方向导数的过零点图

从图 2(b)中可以看到,在某一方向上,对于目标其一阶导数先呈现出为正的峰值再转变为负的峰值,这符合实际规律。因为亮目标呈现出明显的凸起形状,即从任意一个方向上,目标邻域内的变化都满足先低后高再低的变化趋势,从低到高的过程,对应于斜率为正的过程,即一阶导数出现正的峰值;从高到低的过程,对应于斜率为负的过程,即一阶导数出现负的峰值。对于背景杂波,其一阶方向导数的值远小于目标附近的一阶方向导数值。在连续曲线中,极值点处的一阶导数应为零,但由于图像是离散的,目标处的一阶导数很难正好为零,因此,本文利用在目标附近的正负峰值,计算一阶导数是否具备经过零点的特性,来确定小目标的候选区域。



考虑目标与背景在一阶方向导数上的差异,目标在局部区域内一阶方向导数具有正的峰值和负的峰值,而大部分的背景区域其一阶方向导数是一个很小的数值,这些区域是本文不关心的区域,因此本文先利用阈值筛选的方式,剔除平缓背景的干扰,然后再进一步获得目标的过零点区域。

利用一个阈值剔除背景区域较小的一阶方向导数,表示为

$$F(x, y) = \begin{cases} 0, & |I'(x, y)| < \text{Th} \\ I'(x, y), & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $F(x, y)$  表示经过阈值处理之后的图像,  $I'$  表示图像的一阶导数,  $\text{Th}$  为阈值。

对于一副图像而言,只有在目标处或者背景的边缘处,才有可能产生较大的一阶导数,对于大部分的平缓背景区域,一阶导数值将很小,阈值  $\text{Th}$  就是用于剔除这些平缓的背景区域,保留目标区域与背景边缘区域。由于随着图像对比度的不同,图像整体的一阶导数有较大的变化,然而在目标处,其一阶导数一般都为整张图像的最大值,或略小于最大值,因此,为了保留目标处的一阶导数同时应对不同场景的变化,本文利用式(11)计算该阈值。

$$\text{Th} = \gamma_1 \cdot \max(|I'(x, y)|) \quad (11)$$

式中,  $\max(\cdot)$  为取最大值操作,  $\gamma_1$  为调节系数,其值的大小与图像方差有关,方差越大,表示图像在背景区域的起伏越大。为了达到更好的剔除缓变背景的效果,应提高  $\gamma_1$  值,反之,方差越小,  $\gamma_1$  值应越小,根据工程经验,一般取  $0.3 \leq \gamma_1 \leq 0.5$ 。

在亮目标邻域内,一阶方向导数值沿着求导方向总是具有先正后负的属性,因此本文根据这个属性,确定过零点的区域。首先,以  $F(x, y)$  中具有正数的点作为起始点,然后沿着求导方向计算使用  $N$  个点确定该部分是否过零点,  $N$  的大小由目标大小确定,一般取  $3 \leq N \leq 5$ 。搜索方式为

$$F(\text{data}) \cdot F(\text{data} + i) < 0, (i = N, N-1, \dots, 1) \quad (12)$$

式中,  $F(\text{data})$  表示一阶导数值,  $F(\text{data} + i)$  表示沿着求导方向之后点的一阶方向导数值。

若满足式(10)、(11)与式(12)的判定条件,则表示该点处具备过零点的性质,那么满足条件的这两点及两点之间包含的区域,就为目标的候选区域。

### 2.3 建立曲率图

根据式(3),当一阶导数为零时,曲率就等于二阶导数。因此,在获取一阶方向导数的过零点图之后,只要计算这些具备过零点性质区域的二阶方向导数,就能够得到图像在该方向的曲率图,进而分割出目标区域。

图 2(c) 原始 2D 信号的二阶导数图,可以看到对于亮目标处其二阶方向导数值为一个负峰值,这也是目标呈现出明显的凸起形状决定的,对于暗目标,其二阶导数为正的峰值,可以对图像取反便可将暗目标变成亮目标。为了便于后续的处理,本文对二阶方向导数做如下处理:

- 1) 只取二阶方向导数值为负数的值,即将滤波结果大于 0 的值全部置为 0;
- 2) 对上一步处理之后的结果取绝对值,并将所有的值归一化映射到  $(0, 1)$  区间上;
- 3) 使用  $3 \times 3$  的平滑模板进行滤波,减轻复杂背景边缘区域的干扰。

这样,就利用一阶方向导数与二阶方向导数建立起了方向曲率图。

进一步,考虑到目标与复杂背景在各方向曲率上的区别,目标在空间上的任意方向的曲率均较大,但是复杂背景必然存在特定方向的曲率值较小甚至趋近于零,为了抑制这些背景,本文对四个方向的曲率,取其正交方向两两融合,即

$$C_1 = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial I^2} \Big|_{(x_0, y_0)}^{\beta=0^\circ} \cdot \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial I^2} \Big|_{(x_0, y_0)}^{\beta=90^\circ}, C_2 = \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial I^2} \Big|_{(x_0, y_0)}^{\beta=45^\circ} \cdot \frac{\partial^2 f(x, y)}{\partial I^2} \Big|_{(x_0, y_0)}^{\beta=135^\circ} \quad (13)$$

式中,  $C_1$  表示  $\beta=0^\circ, \beta=90^\circ$  的融合结果,  $C_2$  表示  $\beta=45^\circ, \beta=135^\circ$  的融合结果。

最后根据四个方向的曲线曲率得到的曲率图定义为  $C_1$  与  $C_2$  的加权融合结果,即

$$C(x, y) = aC_1(x, y) + bC_2(x, y) \quad (14)$$

式中,  $C(x, y)$  表示最后的加权曲率结果,  $a, b$  分别代表权值,本文令  $a = b = 0.5$ 。

为了获取最终的目标区域,采用自适应阈值的方式进行图像分割,自适应阈值的求取公式为

$$T = \mu + k\sigma \quad (15)$$

式中,  $T$  表示阈值,  $\mu$  为曲率图的均值,  $\sigma$  为曲率图的方差,  $k$  为系数。

## 2.4 算法步骤

本文将图像看成三维的空间曲面,利用目标与背景在方向曲率上的差异进行目标检测.首先,利用 facet 模型计算图像的一阶与二阶方向导数,并进一步利用四个角度的方向导数构建图像曲率图,具体为先计算一阶方向导数的过零点图,然后根据过零点图与二阶方向导数获得图像的方向曲率图,再对方向曲率图进行融合得到最终的图像曲率图.最后,根据自适应阈值分割,获得目标区域.整体算法的步骤为:

- 1) 根据式(9)利用二维高斯差分滤波器对图像进行预处理;
- 2) 根据 facet 模型计算卷积模板  $W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8, W_9, W_{10}$ ;
- 3) 利用卷积模板与预处理之后的图像作卷积运算,获得组合系数  $K_i$ ;
- 4) 利用式(7)和(8)获得图像在四个方向的一阶方向导数与二阶方向导数;
- 5) 利用式(10)、(11)和(12)搜索一阶方向导数的过零点图;
- 6) 根据过零点图以及二阶方向导数获得方向曲率图;
- 7) 利用式(13)和(14)获得融合后的曲率图;
- 8) 利用式(15)计算曲率图的自适应阈值分割图像以获得目标.

## 3 实验与分析

为了验证文中提出的算法,本文选取了四组不同复杂场景下的红外图像序列做仿真实验分析,四组序列的详细信息如表 1 所示,所有的红外目标的尺寸均小于  $5 \times 5$ . 本文所有的仿真实验都是使用 1.80GHz Intel Corei3 PC 上的 MATLAB R2016b 软件进行的.同时,将本文提出的算法与 LCM 算法、主曲率滤波算法(Principal Curvature)、MPCM 算法和 Top-hat 算法进行比较.

表 1 四组不同场景的红外图像序列详情  
Table 1 Detailed information about datasets

Dataset	Background	Image size	Frame number	Number of target
Sep 1	Mountain	$648 \times 488$	200	200
Sep 2	City-double target	$320 \times 256$	220	383
Sep 3	City-single target	$320 \times 256$	100	100
Sep 4	City-weak and bright target	$320 \times 256$	220	440

为了充分体现文中提出的基于曲率的近地面红外小目标检测方法在信杂比提升方面的优势,首先直观地给出本文算法处理后与对比算法处理后的三维响应图.

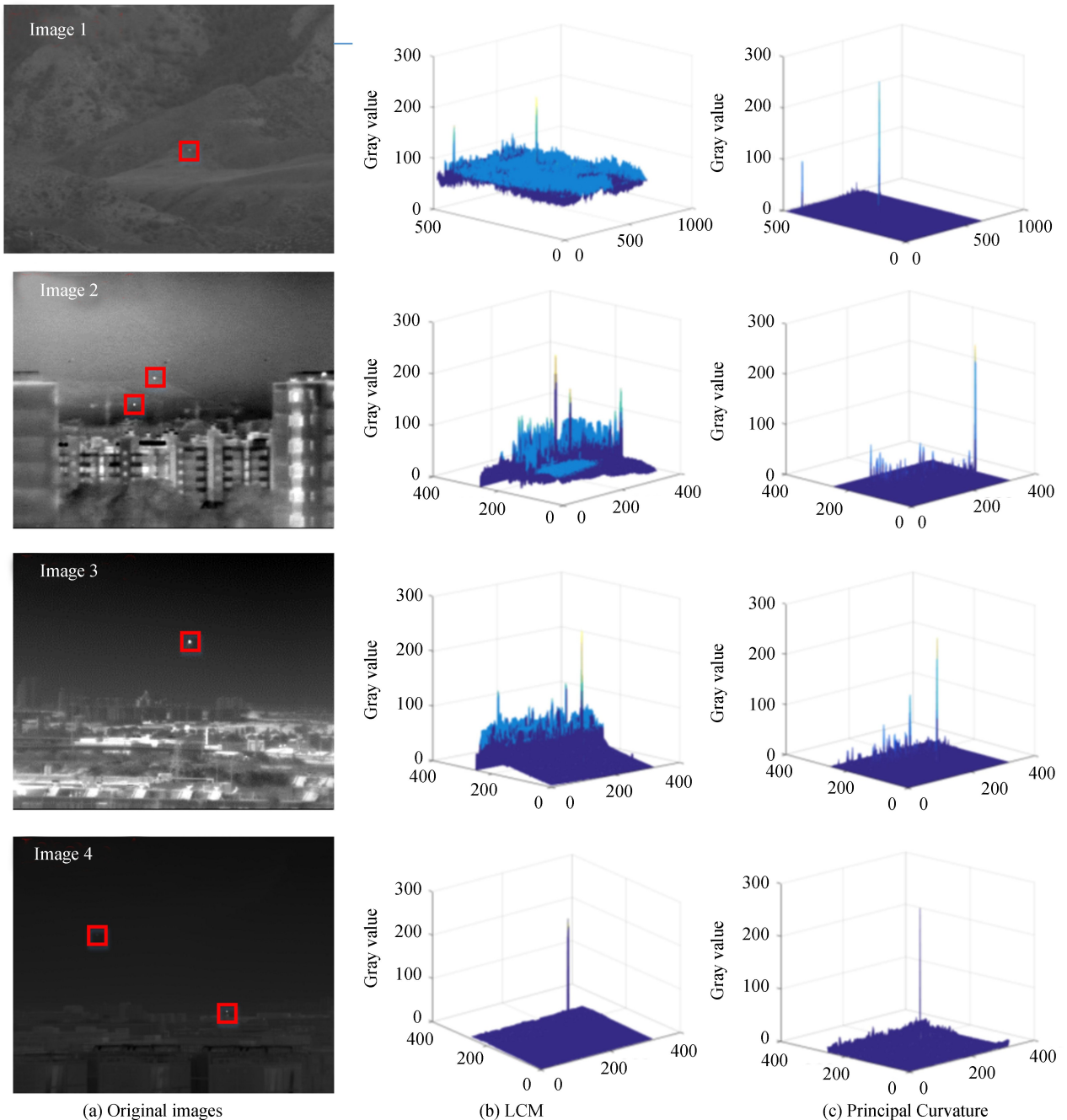
图 3(a)表示红外图片原图,图 3(b)~(f)为不同算法处理之后的三维响应图.图中  $z$  轴均为映射  $[0, 255]$  区间的灰度值.可以明显看出,本文提出的算法能够在很大程度上抑制复杂场景的灰度值,同时增强目标的灰度值.对于 Image1,背景为山林,图像整体的起伏较大,LCM 算法与 Top-hat 算法对于山林中起伏状的背景抑制能力有限,处理之后,背景的灰度值依旧较高,这容易产生虚警.主曲率滤波算法、MPCM 算法与本文提出的算法均能较好地抑制起伏的山林背景,虽然图像左下角的一个小区域也得到了增强,然而本文的算法处理之后目标的强度与这个虚警点的强度依旧有较大的差距,因此不容易影响最终的阈值分割结果;对于 Image2 与 Image3,都为城市背景,目标位于城市上方的空中区域,目标强度与地面背景很多区域的强度相同,本文算法、主曲率滤波算法与 MPCM 算法均很好地抑制了城市地面的背景杂波,但是主曲率滤波算法与 MPCM 算法在 Image2 的图像中均形成了一个强烈的虚警点,这将直接影响检测结果,而其他算法处理之后,地面背景的灰度值还是比较强,这将大大提高虚警率;对于 Image4,依旧是城市背景,一个目标强度较高,紧贴着城市边缘,另一个目标位于空中,强度很弱,肉眼几乎难以分辨.虽然所有的算法都能检测出城市边缘的强目标,但是对于空中的弱目标,除了本文的算法能够对其增强,其他算法均丢失了这个目标.

同时,为了客观体现本文算法在信杂比提升方面的优势,采用信杂比(Signal-to-Clutter Ratio, SCR)与背景抑制因子(Background Suppression Factor, BSF)两项指标对文中算法进行评估,这两项指标为

$$\begin{cases} \text{SCR} = \frac{f_T - f_c}{\sigma_c} \\ \text{BSF} = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $f_T$  表示目标的平均灰度值,  $f_c, \sigma_c$  分别表示目标领域内背景的平均灰度值和标准差;  $\sigma_{in}, \sigma_{out}$  分别表示原始图像与算法处理之后图像的标准差.

表 2 为不同算法处理后四组序列的信杂比与背景抑制因子, 对比发现, 无论是 SCR 还是 BSF, 相较于其他算法, 本文提出的算法均有更高的数值, 特别是对于 Sep\_4, 本文算法的 SCR 增益远远大于其他算法, 这主要是由于本文算法能够对空中的弱目标也进行增强, 同时对地面的背景杂波进行了有效抑制. 除了本文的算法之外, MPCM 算法也能获得性能较好的 SCR 增益以及 BSF 结果, 这主要是因为该算法能够对目标进行大幅度地增强从而提高了 SCR 值, 这种结果与图 3 所显示的三维响应图正好对应. 主曲率滤波算法在 BSF 上表现优异, 但在 SCR 值上的表现并不是很好, 这主要是由于该算法能够较好地抑制缓变区域的杂波, 但是在复杂背景下较易产生虚警, 对目标的增强不够显著. 表 2 的结果说明本文提出的算法对近地面场景下图像的背景抑制效果更好, 目标与背景的灰度值差距更大, 通过阈值分割, 更容易获取正确的目标, 也就是说目标更容易被检测到.





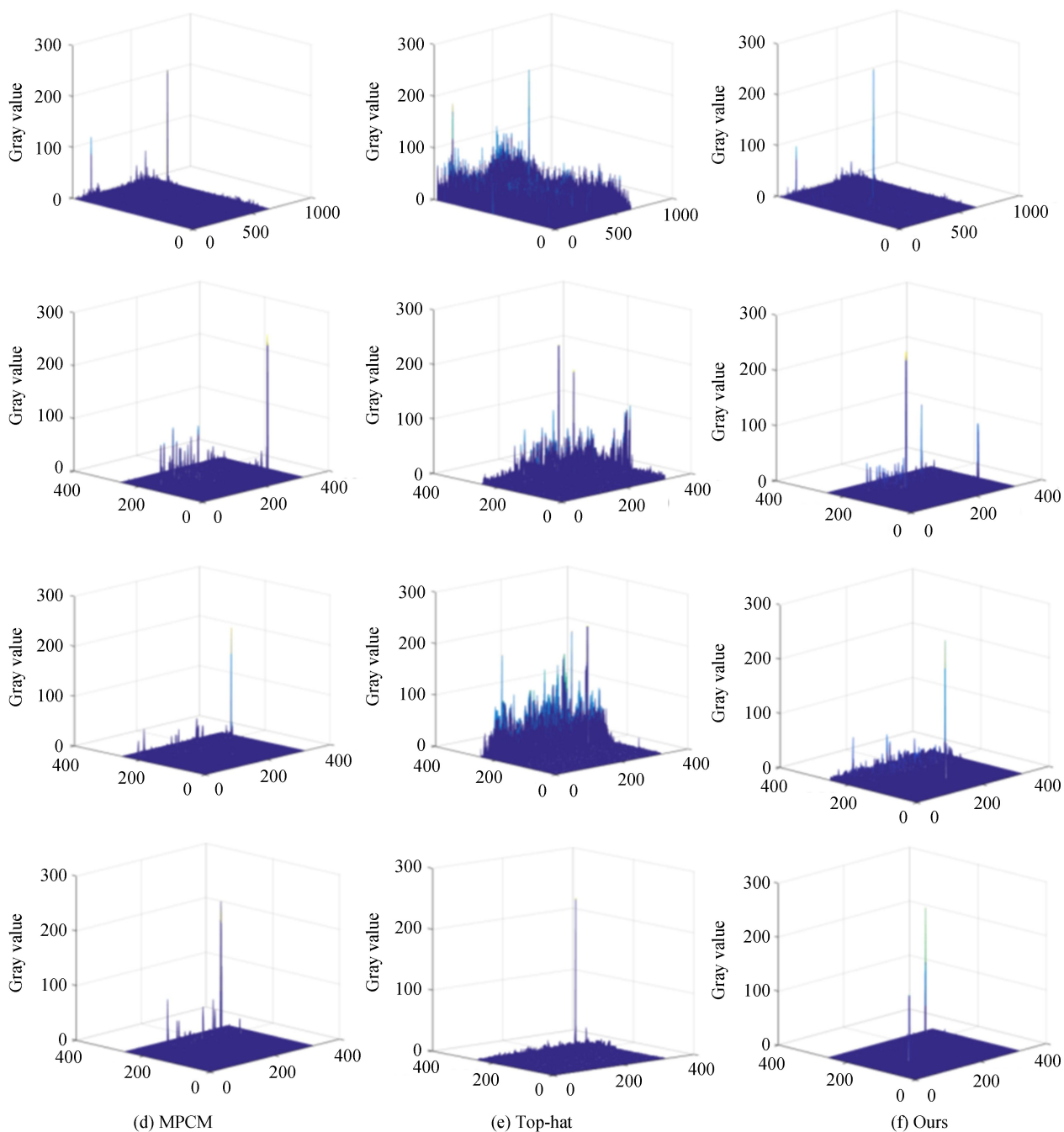


图3 不同算法的三维响应图

Fig.3 3D map of different algorithm

表2 不同场景下图像的SCR与BSF

Table 2 SCR and BSF of different scenes

Method	Evaluation indexes	Sep_1	Sep_2	Sep_3	Sep_4
LCM	SCR	3.9141	5.5791	5.5059	4.0032
	BSF	6.1673	2.3706	2.9427	3.0561
Principal curvature	SCR	6.456	2.3847	2.2931	8.0502
	BSF	8.2088	8.933	10.4648	4.2319
MPCM	SCR	5.1724	6.4921	5.182	9.3275
	BSF	8.6802	10.3241	12.705	4.4683
Top-hat	SCR	6.3494	3.7436	4.1868	8.2393
	BSF	5.7869	0.9712	0.7165	3.2712
Ours	SCR	<b>18.4385</b>	<b>16.7425</b>	<b>23.0627</b>	<b>40.5125</b>
	BSF	<b>22.3682</b>	<b>14.642</b>	<b>18.3851</b>	<b>16.5315</b>

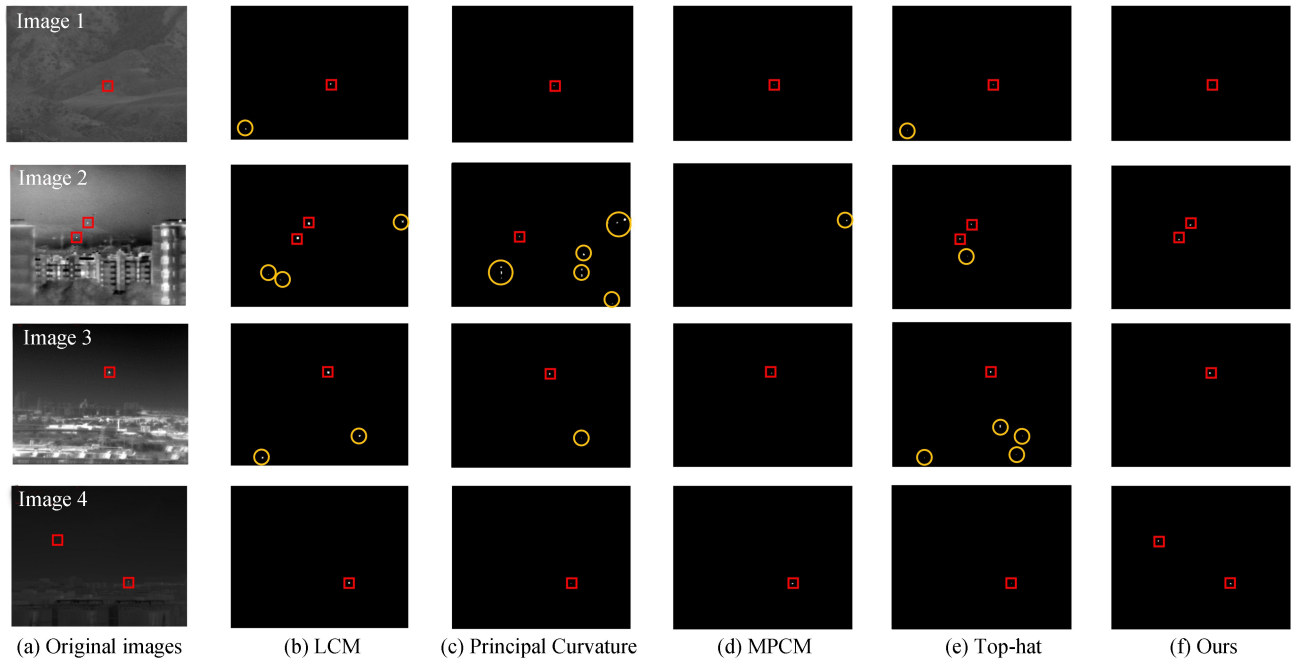


图4 不同算法阈值分割结果

Fig.4 Binarized results of different algorithm

进一步,本文对算法处理之后的结果进行自适应阈值分割获取二值化的目标图像,处理结果如图4所示.图中,方框标记为正确检测到的目标,圆圈标记表示产生了虚警点.从二值化的图像中可以看出,不同的算法对各场景的检测结果很不相同,LCM算法在Image1、Image2与Image3中都正确检测到了目标,但是均产生了至少一个虚警点,在Image4中虽然没有虚警点,但丢失了空中较弱的目标;主曲率滤波算法在Image1与Image3中检测效果较好,但在Image2中,产生了大量的虚警点并且还漏检了一个目标,在Image4中,漏检了空中较弱的目标;MPCM算法产生的虚警点数很少,但是在Image2和Image4中均漏检了目标;Top-hat算法抑制复杂背景的能力有限,因此在Image1、Image2与Image3中的地面场景里产生了较多的虚警点,在Image4里也漏检了空中的弱目标;本文提出的算法不仅能够全部检测到场景中的目标,且未产生虚警点.总的来说,LCM算法与Top-hat算法对近地面场景下的复杂背景杂波抑制能力不足,容易产生虚警点,而MPCM算法与主曲率滤波算法容易受到场景中类点目标的干扰,从而对真实目标漏检,本文所提算法在不同的复杂场景下均能达到较好的增强目标并抑制背景杂波的效果,这说明该算法具有良好的鲁棒性.

最后,本文使用ROC(Receive Operating Characteristic)曲线来衡量算法的最终检测性能.在ROC曲线中,横坐标表示虚警率( $P_f$ ),纵坐标表示探测率( $P_d$ ),表示为

$$\begin{cases} P_d = \frac{N_c}{N_T} \times 100\% \\ P_f = \frac{N_1}{N_p} \times 100\% \end{cases} \quad (17)$$

式中, $N_T$ 表示实际存在的目标区域个数, $N_p$ 表示可能存在目标的区域个数, $N_c$ 表示每帧检测到的正确目标数量, $N_1$ 表示每帧检测到的错误目标数量.

在ROC曲线中,曲线与横坐标轴所围成的面积越大,表示算法的性能越优越.图5表示的是不同序列下各种算法的ROC曲线,可以明显地看到本文算法在四组场景下均优越于其他算法.MPCM在序列与序列3中,其性能与本文的算法较为相近,但是在序列2与序列4中,表现差劲,而且其性能更是低于其他算法,这说明MPCM算法对复杂场景的鲁棒性不强;而LCM算法与Top-hat算法对于近地面场景下的背景杂波抑制能力有限,需要达到较高的虚警率才能对目标实现令人满意的探测率;主曲率滤波算法也利用曲率作为特征进行红外目标检测,但是其利用二阶微分算子构建主曲率滤波器,而本文的算法利用四个方向的一阶与二

阶导数求取曲率,计算方法完全不同.从 ROC 的结果中可以看到主曲率滤波算法在复杂场景下的表现并不突出,虽然在序列 1 与序列 3 中的性能表现还不错,但是对于序列 2 与序列 4,其检测率不高,这说明主曲率滤波算法对复杂场景的抑制能力不高,同时对类似于序列 4 空中弱点目标的探测能力不够强.本文的算法在序列 1、序列 2 与序列 4 中,均表现出非常优异的性能,能够在虚警率为  $1e-4$  左右,实现对目标的准确探测,在序列 3 中,虽然达到 100% 探测率时,虚警率上升到了  $6e-4$ ,但是这样的虚警率依旧在能够接受的范围之内.

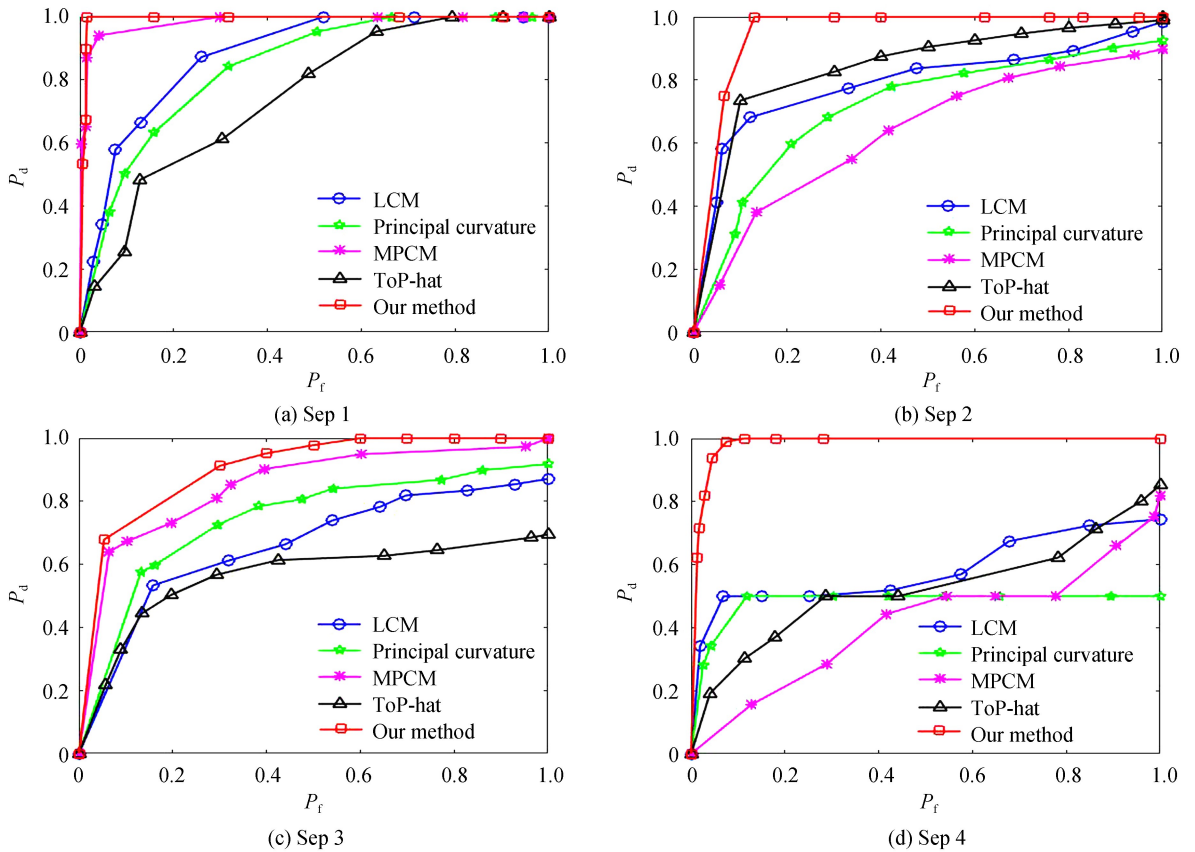


图 5 不同序列的 ROC 曲线

Fig.5 ROC curves of the different sequences

通过以上的性能比较,可以得出结论,本文提出的算法对于近地面场景具有良好的鲁棒性,能够很好地抑制地面背景杂波,提高信杂比,相较于其他算法,本文的算法能够达到更好的目标检测性能.

## 4 结论

在近地面场景下,由于红外图像的背景杂波种类较多,目标很容易被淹没在复杂背景中,因此传统的红外小目标检测算法往往难以达到较好的效果.本文提出了一种基于曲率的近地面红外小目标检测算法,利用一阶方向导数与二阶方向导数构建了方向曲率图,进一步对方向曲率图进行融合获得最终的图像曲率图,然后对曲率图进行自适应阈值分割获得目标区域.实验结果表明,与其他算法相比,本文提出的算法拥有更高的信杂比增益,能够在更低的虚警率下达到更高的探测率,同时算法鲁棒性更强,在不同的复杂场景下都能达到更好的检测结果.当然,本文方法仍然存在进一步提升的空间,例如算法在实时性方面还需要进一步的优化.

### 参考文献

- [1] KHAN J F, ALAM M S. Target detection in cluttered forward-looking infrared imagery[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(7): 076404.
- [2] VENKATESWARLU R. Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C]. SPIE, 1999, **3809**: 74-83.
- [3] BAE T W, KIM Y C, AHN S H, *et al.* An efficient two dimensional least mean square (TDLMS) based on block statistics for small target detection[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2009, **30**(10): 1092-1101.

- [4] BAI X, ZHOU F. Infrared small target enhancement and detection based on modified top-hat transformations[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2010, **36**: 1193-1201.
- [5] YI Xiang, WANG Bin-jian. Fast infrared and dim target algorithm based on Mutil-feature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6): 0610002.  
易翔, 王炳健. 基于多特征的快速红外弱小目标检测算法[J]. 光子学报, 2017, **46**(6):0610002.
- [6] TIAN J, LIU J, ZHENG S. Small infrared target fusion detection based on support vector machines in the wavelet domain [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(7): 076401.
- [7] YANG L, YANG J, YANG K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(17): 1083-1085.
- [8] SHANG Y. Small infrared target detection using frequency-spatial cues in a single image[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2014, **23**(4): 043003.
- [9] CHEN C L P, Li H, WEI Y, *et al.* A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, **52**(1): 574-581.
- [10] HAN J, MA Y, ZHOU B, *et al.* A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2014, **11**(12): 2168-2172.
- [11] WANG Xiao-yang, PENG Zhen-ming, ZHANG Ping, *et al.* Infrared small dim target detection based on local contrast combined with region saliency[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(9): 091005.  
王晓阳, 彭真明, 张萍, 等. 局部对比度结合区域显著性红外弱小目标检测[J]. 强激光与粒子束, 2015, **27**(9):32-38.
- [12] WEI Y, YOU X, Li H. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection[J]. *Pattern Recognition*, 2016, **58**(C): 216-226.
- [13] ZHAO Y, PAN H, DU C, *et al.* Principal curvature for infrared small target detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, **69**: 36-43.
- [14] WAN M, GU G, QIAN W, *et al.* Robust infrared small target detection via non-negativity constraint-based sparse representation[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(27): 7604.
- [15] JALBA A C, WILKINSON M H F, ROERDINK J B T M. Shape representation and recognition through morphological curvature scale spaces[J]. *IEEE Transactions on Image Processing A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2006, **15**(2): 331-41.
- [16] 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.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No.61675099)

引用格式: ZHU Guo-qiang, MENG Xiang-yong, QIAN Wei-xian, *et al.* Infrared Small Target Detection Method Based on Curvature near the Ground[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(10): 1010001

朱国强, 孟祥勇, 钱惟贤, 等. 基于曲率的近地面红外弱小目标检测算法[J]. 光子学报, 2018, **47**(10):1010001