基于方向一致性特征的漂移扫描小目标检测

林建粦1 平西建1 马德宝2

摘 要 提出一种基于方向一致性特征的小目标检测方法,对漂移扫描星图中的小目标进行检测.首先,根据小目标的一般描述,建立特征模型对小目标区域进行表示;其次,分析 Gabor 滤波器工作机理,构造了主次两组四个方向通道的滤波器,对研究对象进行特征提取,并以一致性描述指标对目标特征定量刻画;最后,依据特征描述模型,给出了小目标的检测算子及相应 参数的选择依据.对实际星图的实验结果表明,本文方法在小目标检测和高频干扰目标抑制上具有很好的效果,验证了本文所 建模型的合理性.

关键词 信号处理,目标检测算子,特征模型,方向一致性,漂移扫描

引用格式 林建粦, 平西建, 马德宝. 基于方向一致性特征的漂移扫描小目标检测. 自动化学报, 2013, **39**(6): 875-882 **DOI** 10.3724/SP.J.1004.2013.00875

Orientation-coherence-feature-based Method to Detect Small Target in Drift-scanning Image

 ${\rm LIN}~{\rm Jian\text{-}{\rm Lin}^1} \qquad {\rm PING}~{\rm Xi\text{-}{\rm Jian}^1} \qquad {\rm MA}~{\rm De\text{-}{\rm Bao}^2}$

Abstract In order to detect the small target in the drift-scanning image, this paper proposes a method based on orientation coherence features. According to the general description about small target, a feature model is established to represent the region of small target firstly. By the analysis of Gabor filter, the primary and secondary filter groups with four orientation channels are then constructed to extract the features of objects. And a consistency description indicator is used for measuring the feature quantitatively. Finally, the small target detection operator and the corresponding parameter selection principle are given by the feature description model. Experiments on an actual image have shown that the method proposed in this paper has good performance on target detection and high-frequency interference suppression. And the model proposed is testified to be reasonable.

Key words Signal processing, target detection operator, feature model, orientation coherence, drift-scanning

Citation Lin Jian-Lin, Ping Xi-Jian, Ma De-Bao. Orientation-coherence-feature-based method to detect small target in drift-scanning image. Acta Automatica Sinica, 2013, **39**(6): 875–882

CCD 漂移扫描技术,也称为 TDI (Time-delay integration) 读出技术,通过时延积分的方法对同一目标多次曝光,大大增加了传感器对光子的收集,在 微光环境下也能输出一定信噪比的信号,可以使地基光电望远镜系统获取的空间目标数据质量明显改善,提高对空间暗弱目标的观测能力,已被陆续应用于天文和空间人造目标观测的研究中^[1-2].弱小目标检测技术的研究,除了通过系统上的设计来提高检测能力外,利用图像处理手段对处于杂乱背景和 强噪声环境中的目标进行自动检测,从而实现系统

性能的最大程度发挥也是另一个重要方向.

与传统凝视观测得到的星图不同,漂移扫描星 图中的恒星星像产生近似直线的拖影, 使得小目标 检测中不仅考虑低频缓慢背景的抑制,还要考虑高 频高亮干扰目标的剔除. 传统的基于空域处理的小 目标检测方法^[3], 对处理具有边缘纹理等复杂背景 的抑制能力不强. 近年来, 国内外学者围绕复杂背景 下的小目标检测展开广泛研究. 文献 [4] 提出了一种 基于曲面拟合的正则化双向扩散背景杂波抑制算法, 利用 Facet 小面图像模型得到方向梯度, 以规整化 处理为框架^[5],构造双向滤波器进行非线性扩散^[6], 来实现目标增强和背景抑制. 文献 [7] 针对非平稳复 杂背景下的小目标检测率低,提出了一种基于残差 修正的迭代 M 估计背景预测方法,利用基于残差的 分段校正来调整对不同对象的迭代处理,来实现目 标检测和背景滤除. 文献 [8] 提出基于尺度空间扩散 理论的小目标检测,并利用恒虚警检测理论剔除背 景点. 文献 [9] 采用基于结构张量的方法, 构造对应

收稿日期 2012-03-16 录用日期 2012-08-14

Manuscript received March 16, 2012; accepted August 14, 2012 国家自然科学基金 (60970142, 60903221) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (60970142, 60903221)

本文责任编委 韩崇昭

Recommended by Associate Editor HAN Chong-Zhao

^{1.} 信息工程大学信息系统工程学院 郑州 450002 2. 武汉理工大学 华夏学院 武汉 430223

^{1.} Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002 2. Huaxia College, Wuhan University of Technology, Wuhan 430223

的模板对圆形目标进行映射检测^[10]. 文献 [11] 在文 献 [9] 研究的基础上,应用结构张量检测理论实现了 复杂天空背景下的小目标检测. 还有基于压缩感知 等通过特征匹配来实现目标检测的方法研究. 从近 年来的研究来看,基于滤波理论的方法有较完善的 边缘增强理论基础,实时性好,但滤波器参数的选择 需要进一步自适应,以增强方法的鲁棒性;基于特征 匹配的方法稳健性和抗噪性能好,但样本训练库的 完整性对最终的检测结果有较大影响,并且计算量 较大;基于模型的检测理论方法,利用先验假设的知 识,通过对感兴趣目标特征的增强,在目标描述和理 解方面有其优势,但模型不准确易产生大量的虚假 目标.

上述方法所处理的复杂背景基本上呈缓慢变化, 高频边缘纹理梯度较小,均能获得良好的性能.而漂 移扫描星图中的高频高亮干扰目标,边缘梯度大,不 易于抑制.本文在综合考虑不同方法优劣的基础上, 提出一种基于方向一致性特征描述的小目标检测方 法 (Orientation-coherence-features-based method, OCFBM),用以实现对漂移扫描星图中恒星星像的 抑制和小目标的检测.方法主要分为以下 3 个方面: 1) 建立小目标局部区域的数学描述模型,对感兴趣 的检测目标进行数学描述和理解; 2) 通过 Gabor 滤 波器来构造特征提取算子,进行特征提取; 3) 根据 描述模型,构造小目标检测算子,结合提取特征对目 标进行检测.

1 小目标数学描述模型

由于小目标成像像素少,基本上无形状及纹理 信息,可以提取的结构特征极其有限,曲面拟合的难 度也较大. 若目标暗弱, 则灰度特征的可靠性也较 差. 大部分小目标检测方法, 依赖于像素点灰度和 梯度上的差异来实现对目标在图像中的剥离. 这种 方式一是不利于低信噪比情况下的目标检测, 二是 不利于对图像中边缘及纹理区域等复杂背景的剔除. 主要应用于边缘检测的方向梯度信息的引入,使得 对目标的刻画更为细致,并且相关方法得到了实验 验证^[4,12].因此,本文试图从小目标的描述入手,从 方向信息上进一步把握小目标的特征. 小目标目前 还未有确切的定义, 一般认为小目标是几何尺寸小 到几乎没有形状信息的目标. 虽然小目标无形状信 息可以描述,但从另一方面讲,若以不同的方向去分 析小目标所在的局部区域特征,其应表现出很高的 相似性.如图1(a)所示,其中方框里圆圈表示为小 目标所处局部区域, 4 个粗箭头表示从 4 个不同的 视角去看小目标,图中4个坐标轴里的波形表示所 看结果,可见若小目标小到几乎没有形状信息,则说 明小目标的形状在各视角里表现很一致.





Fig. 1 Sketch map of image local region with different visual angle

漂移扫描星图中的对象组成大致可以分为以下 三种情况:

1) 噪声区域: $S_N = N + B$; 2) 干扰目标区域: $S_I = I + N + B$; 3) 小目标区域: $S_T = T + N + B$. 式中, S_T 表示小目标所在局部区域, S_N 表示没有 任何目标的噪声区域, S_I 表示干扰目标所在区域, T表示小目标, I 表示为干扰目标, N 表示噪声, B 表 示局部区域背景. 从不同的方向去看以上三种不同 区域,则将表现为以下不同的特性:

1) 噪声区域: 根据分形理论, 噪声与背景构成的 自然纹理具有自相似特性, 同时, 非平稳缓变背景在 局部观测中可近似为不变. 因此, 噪声区域在各方向 窗里表现均衡, 没有明显的突起存在, 并在不同方向 窗中表现相似. 如图 1 (b) 所示; 2) 小目标区域:小目标的存在,作为额外的确定 性信号叠加在均衡的噪声区域,使所在局部区域能 产生明显突起.但尺寸较小,无形状信息,在不同方 向窗中表现相似.如图1(a)中示意图所示;

3) 干扰目标区域: 图像中存在的边缘纹理及其 他具有高频特征的对象, 如漂移扫描星图中存在的 恒星星像拖影, 都可归为干扰目标. 由于额外高频能 量的存在, 影响了原有噪声区域的均衡性. 同时, 由 于边缘及形状信息明显, 在不同方向窗中并不相似. 如图 1 (c) 所示.

根据三种不同区域在不同方向窗下表现的特性, 本文建立一种基于特征描述的小目标检测模型,所 描述的特征应当满足:1)提取的特征能有效描述 噪声区域的均衡性,能够初步实现小目标与噪声的 分离;2)提取的特征能够用来构造不同方向窗间 的相似性程度,实现小目标与干扰目标的分离.用 数学模型刻画三者不同特征,则本文的特征描述可 表示为 { $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K$ }.其中,1)噪声区域:存在 $i \in \{1, 2, \dots, K\}, \alpha_i = 0; 2)$ 小目标区域:存在 $i \in \{1, 2, \dots, K\}, \alpha_i = 0; 2)$ 小目标区域:存在 $i \in \{1, 2, \dots, K\}, \alpha_i = A(A \neq 0); 3)$ 干扰目标区 域:存在 $i, j \in \{1, 2, \dots, K\}, \alpha_i \neq \alpha_j$.模型中 α_K 表示第K个方向窗中的提取特征.基于原始数据的 特征描述,有利于保留小目标的原始信息.本文将利 用上述模型对不同研究对象进行描述,并实现对漂 移扫描星图中的小目标检测.

2 特征的提取和描述

基于 Blob 特征^[13] 的图像中孤立点描述, 有着 成熟的理论和应用研究. 文献 [14] 对 Harris 检测 子、SUSAN 检测子、Hessian 检测子及 Laplace 检 测子等 9 种文献中常用的 Blob 特征检测子对复 杂透明的图像处理进行了比较,认为基于高斯核的 Laplace 检测子的鲁棒性最好. 文献 [15] 对局部不 变特征的描述子进行了分析. 重点对尺度不变特征 转换 (Scale-invariant feature transform, SIFT)、矩 不变量及互相关等9种不同的局部区域描述子进行 了性能评估, 其中基于 SIFT 的方法性能最好, 通过 统计不同方向邻域梯度直方图的方法形成描述子, 但是特征维数较大. 在低维要求情况下, 矩特征有着 较好的表现, 而基于相关的方法稳定性较差. 基于 高斯核的二维 Gabor 滤波器以其在空频域的良好分 辨特性,并且符合人类视觉感知机能的多通道多分 辨率特性,在纹理等图像特征提取上有广泛的应用 前景^[16-17],然而所提取的特征维数较大,对于内容 简单的图像描述较为冗余. 在总结前人研究和分析 的基础上,根据第1节小目标的特征描述模型,本文 利用 Gabor 滤波器的多通道性质来构造特征提取算 子.

在不同方向通道下的图像表现形式,实际上就 是一种不同方向窗下的图像观测结果.利用不同方 向通道的 Gabor 滤波器对图像进行滤波,就是其中 一种观测手段.针对小目标的各向相似描述,二维 Gabor 滤波器的形式选择圆对称型,如式 (1) 所示:

$$g(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta} = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\delta^2}} e^{j\left(\frac{\pi}{\delta}x\cos\theta + \frac{\pi}{\delta}y\sin\theta\right)}$$
(1)

式中, δ , π/δ 和 θ 分别表示滤波器的径向宽度、径 向中心频率和旋转角度.在二维图像空间采样中,主 要有4方向和8方向二者表述关系.由于对称性,选 择弧角为0, $\pi/4$, $\pi/2$ 和3 $\pi/4$ 四个方向,便可代表 8个方向上的一种空间关系,并且与视皮层细胞的 中值方向带宽相一致,不会产生过多冗余.

Gabor 滤波器的实部表示为

$$g_{r}(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta} = \frac{1}{2\pi\delta^{2}}e^{-\frac{x^{2}+y^{2}}{2\delta^{2}}}\cos\left(\frac{\pi}{\delta}x\cos\theta + \frac{\pi}{\delta}y\sin\theta\right)$$
(2)

实部为沿方向 θ 的偶对称函数. 由于函数的对称可分离特性,为简化分析,考虑一维形式的 Gabor 滤波器:

$$g_r(x)|_{\delta,w,0} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{x^2}{2\delta^2}} \cos(wx)$$
 (3)

当 $w = \pi/\delta$, 有:

$$g_r(x)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},0} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{x^2}{2\delta^2}} \left(1 - \frac{\pi^2}{2} \frac{x^2}{\delta^2}\right) \qquad (4)$$

同时,一维高斯二阶偏导数表示为

$$\frac{\partial^2 f_g(x)}{\partial x^2} = -\frac{1}{\delta^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{x^2}{2\delta^2}} \left(1 - \frac{x^2}{\delta^2}\right) \tag{5}$$

高斯二阶偏导数是构成 Laplace 检测子的重要 部分,在图像中常用于孤立点目标的检测.对比式 (4)和式 (5),Gabor 滤波器实部与高斯二阶偏导数 形式相似,不仅具有高斯的平滑特性,加强了抗噪性 能,而且具有 Laplace 检测子特性,可用以构造小目 标的特征提取算子.当 $w = \sqrt{2}/\delta$ 时,Gabor 滤波 器实部与 Laplace 检测子最为相近,但此径向中心 频率过小,不利于区分高频小目标和高频纹理.因 此,本文选择径向中心频率较大的滤波器来构造特 征提取算子.

由于实部偶数模板积分并不为零,对小目标区 域的滤波表示为

$$g_r * S_T = g_r * (T+N) + g_r * B$$
 (6)

式中, "*"表示卷积操作符, 若 $B \neq 0$, 即便在平坦 背景下, 对目标所在区域滤波, 会造成式 (6) 中第二 项值的放大, 使得处理结果不能合理地对小目标特 征进行表示.因此,需要对滤波器进行调整,尽可能 减少背景的影响,令

$$g_p = \frac{1}{2\pi\delta^2} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2\delta^2}} \cos\left(\frac{\pi}{\delta}x\cos\theta + \frac{\pi}{\delta}y\sin\theta\right) - C$$
(7)

C 为调整项, 使得:

$$\iint_{x,y\in\Omega} g_p \mathrm{d}x\mathrm{d}y = 0 \tag{8}$$

式中, Ω 为模板积分域.由于滤波器的积分具有旋转 不变特性, 将式 (7) 代入式 (8) 有:

$$\iint_{x,y\in\Omega} C \mathrm{d}x \mathrm{d}y = \mathrm{e}^{-\frac{\pi^2}{2}} \tag{9}$$

至此,本文采用的4个方向通道的滤波器构成 主滤波器组,并选择C为常数项,其构造如下:

$$g_{p}(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta} = g_{r}(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta} - \frac{\mathrm{e}^{-\frac{\pi^{2}}{2}}}{\iint\limits_{x,y\in\Omega} 1\mathrm{d}x\mathrm{d}y}$$
(10)

滤波器满足良好的局部性,使得缓变的背景在 进行局部处理时可近似为常数,当利用调整项对原 Gabor 的实部滤波器进行调整后,构造的主滤波器 更有利于对背景的滤除.由于奇对称特性,Gabor 虚 部滤波器常用于边缘检测,在点检测中用处不广,其 表示为

$$g_{i}(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta} = \frac{1}{2\pi\delta^{2}} e^{-\frac{x^{2}+y^{2}}{2\delta^{2}}} \sin\left(\frac{\pi}{\delta}x\cos\theta + \frac{\pi}{\delta}y\sin\theta\right)$$
(11)

虚部为沿方向 θ 的奇对称函数. 虽然 Gabor 滤 波器的虚部奇对称特性不适合产生小目标检测的响 应, 但是作为约束项的引入可以提高目标检测方法 的鲁棒性, 可以优化候选小目标的检测, 减少误检 率. 因此, 引入次滤波器对主滤波器进行约束, 所构 造的 4 个次滤波器如下:

$$g_{s}(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta} = g_{p}(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta} - g_{i}(x,y)|_{\delta,\frac{\pi}{\delta},\theta}$$
(12)

噪声在主滤波器中虽然响应值较弱,但仍满足 较强的一致性.由于噪声的随机性,引入虚部滤波器 作为约束项,若噪声为白噪声,则噪声在两种滤波器 中具有相同的扰动幅度,使其一致性在次滤波器中 得到弱化.对于干扰目标区域,引入约束项同样能加 大对其一致性的扰动,使之在次滤波器响应中得到 进一步的筛选.而小目标在其中心点处周边满足局 部区域对称性,相比于小目标在主滤波器中的较强 响应,次滤波器产生的一致性对主滤波器产生的一 致性影响不大. 一个好的检测方法应能够对结果进行合理的解释,初始化参数并能预测结果^[12].因此,本文根据均 值不等式,构造以下一致性描述指标,减少对参数的 依赖,提高描述的客观性: mc =

$$\frac{4^4 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot (C_1 + C_2 + C_3 + C_4)}{\left(|C_1| + |C_2| + |C_3| + |C_4|\right)^5} \quad (13)$$

式中, $C_1 \neq 0, C_2 \neq 0, C_3 \neq 0, C_4 \neq 0$ 表示对图 像区域不同方向的特征提取, 且 C_1, C_2, C_3, C_4 不具 备旋转不变性, 当且仅当 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4$, 且 $C_1 > 0, C_2 > 0, C_3 > 0, C_4 > 0, mc$ 可得到最大值 1. 一致性描述指标使得噪声与小目标将能得到较高 值, 而干扰目标由于非一致性将获得较低值. 采用一 致性的描述, 能够客观定量自适应地分析和刻画不 同量之间的关系, 减少对参数或门限设置的依赖, 提 高方法的鲁棒性.

3 小目标检测算子

通过第2节对特征提取算子的分析,主次滤波器的响应值可以作为小目标、噪声及干扰目标区域 三者特征参数值. 令

$$C_{l}(x_{0}, y_{0})|_{\delta, \frac{\pi}{\delta}, \theta} = \iint_{x, y \in \Omega} g_{l}(x, y)|_{\delta, \frac{\pi}{\delta}, \theta} S(x_{0} - x, y_{0} - y) \, \mathrm{d}x \mathrm{d}y$$

$$(14)$$

式中, *S* 表示所处理的图像, 坐标点 (*x*₀, *y*₀) 处由滤 波器构成的一致性描述指标为

$$mc\left(C_{l}\left(x_{0}, y_{0}\right)|_{\delta, \frac{\pi}{\delta}}\right) = \frac{4^{4} \prod_{\theta=1}^{4} \left[C_{l}\left(x_{0}, y_{0}\right)|_{\delta, \frac{\pi}{\delta}, \theta}\right] \left(\sum_{\theta=1}^{4} \left[C_{l}\left(x_{0}, y_{0}\right)|_{\delta, \frac{\pi}{\delta}, \theta}\right]\right)}{\left(\sum_{\theta=1}^{4} \left|C_{l}\left(x_{0}, y_{0}\right)|_{\delta, \frac{\pi}{\delta}, \theta}\right|\right)^{5}}$$

$$(15)$$

式中, *l* 为主次滤波器符号的统一表示.为了更为有效地描述和增强小目标特性,本文所构造的检测子基于以下两个假设: 1)由第1节描述模型可知,小目标区域在各个方向通道滤波的响应值具有一致性,那么其响应最小值基本上与最大值相等.干扰目标区域响应值间差别较大,其最大响应值往往远大于小目标区域的响应值,若采用各响应值加权累加的处理方式^[4,7],而对加权方案缺乏有效的自适应性,则不利于小目标的检测.考虑对小目标特性的增强表示,以各对象响应值的最小值作为检测值.2)结合一致性描述指标,构成惩罚项,对检测值进行惩罚.惩罚项应具有这样的性质: 当一致性较强时,惩罚力

度小; 当一致性弱时, 能够迅速加大惩罚力度, 使小 目标区域的检测值能得到良好的保持,而干扰目标 及噪声区域的检测值得到更有效的抑制.

基于以上假设,本文构造的检测算子如式 (16) 所示:

$$\min_{\theta} \left\{ C_p\left(x_0, y_0\right) |_{\delta, \frac{\pi}{\delta}, \theta} \right\} \times e^{-\frac{\left[mc\left(C_p\left(x_0, y_0\right) |_{\delta, \frac{\pi}{\delta}}\right) - 1\right]^2}{2\lambda_1^2}} \times e^{-\frac{\left[mc\left(C_s\left(x_0, y_0\right) |_{\delta, \frac{\pi}{\delta}}\right) - 1\right]^2}{2\lambda_2^2}} \tag{16}$$

式(16)中,检测输出结果由三部分组成:第1部分 为检测值, (x₀, y₀) 位于噪声区域时值最小, 位于小 目标和干扰目标区域有较高值.式(16)中第2和第 3 部分分别是主次滤波器一致性描述指标构成的惩 罚项, λ_1 和 λ_2 为控制惩罚特性的参数, (x_0, y_0) 位 于干扰目标区域时,惩罚力度最大,位于小目标和噪 声区域时,力度较小.

实验结果及分析 4

本文的实验平台基于 Dual-Core 3.2 GHz 处理 器, 2 GB 内存的 PC 机, 编程环境为 Matlab 7.0. 采 用本文所提方法对实际观测采集的大小均为1528 × 1528 的漂移扫描数据进行处理,其中,信杂比

(Signal to clutter ratio, SCR)^[8] 为 4 的一帧星图 如图 2 (b) 所示. 本文中 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.2, \delta = 4$, 则滤 波器模板大小为 25 × 25, 对星图进行处理. 并选择 4 个抽样点对处理过程进行比对: 1) 小目标中心点 Target, 如图 2(b) 中小框所围区域, 其高分辨显示 结果如图 2(a) 所示; 2) 干扰目标的中心点 I₁ 和端 点 I₂, 如图 2(b) 中大框所围区域, 其高分辨显示结 果如图 2(c) 所示; 3) 背景杂波点 Clutter, 所在局 部区域高频成分主要为噪声,如图 2(c) 中所示. 各 抽样点的主次滤波器响应值及检测输出值如表1所 示.

表1为星图中4个抽样点的响应值及检测输出 值,数值在 0.001 以下则近似为 0. 表 1 中, Target 在两组滤波器 4 个不同方向的响应值能保持较高的 一致性,相应指标值最大. I1 处于干扰目标的中心位 置, 在 $\theta = \pi/2$ 的方向上响应最大, 具有最明显的方 向特征,因此,其一致性特征就表现得最弱. 与 I1 相 比, I2 处于干扰目标的端点, 在三个方向上相对有较 为一致的响应,因此,指标值要高于 I1, 且与小目标 的特性最为相近. 在实验中发现, 此类点为多数小目 标检测方法中虚假目标的主要来源. Clutter 为背景 杂波点,由于不具备能量紧凑性,使得滤波器的响应 值存在负值,且在主次滤波器中响应相对变化较大.

根据式 (16) 所得 Target 检测输出值约为 0.77,



(a) 小目标区域 (a) Region of small target

(b) 原始星图

(b) Original image



(d) 检测结果 (d) Detection result

图 2 抽样点位置标记及处理结果图 Fig. 2 Sampling point position marking and processing result

Table 1	Response and	detection y	values of	f sampling	points on the	e primary	v and second:	ary filter groups
Table T	response and	actoconon	varues of	r sompning	pointes on une	/ printer y	y and become	i v inter groups

抽样点	C_1	C_2	E滤波器 C_3	C_4	mc	C_1	C_2	次滤波器 C_3	C_4	mc	输出值
Target	1.2	1.3	0.9	1.1	0.97	1.5	1.4	0.8	1.4	0.86	0.77
I_1	0.6	3.3	26.8	4.6	0.04	0.5	4.3	29.9	3.4	0.02	0
I_2	2.1	5.4	21.7	5.1	0.24	2.3	9.6	19.8	10.6	0.37	0
Clutter	-0.02	-0.001	-0.18	0.01	0.02	0.02	-0.002	-0.14	0.04	-0.02	0

为进一步分析本文所提方法性能,本文同时给出了基于滤波的双向滤波方法 (Regularizing bidirectional diffusion filter based on surface fitting, RBDFSF)^[4] 基于模板匹配的结构张量方法 (Generalized structure tensor, GST)^[11] 以及基于背景 抑制的形态学 Top-hat 算法^[18] 的实验结果. 以最大 检测值的 0.7 为门限进行目标检测,若像素点检测 值超过门限,则判定此像素点为目标点. 若目标点由 原图中小目标生成,则表示成功检测; 否则,表示产 生虚警. 定义检测率 (Detection rate, DR) 和平均 虚警数 (False alarms per image, FAR) 两个指标对 检测结果进行评估: DR = 成功检测个数/真实目标 点个数 \times 100%, FAR = 虚警总个数/图像帧数.

对不同成像背景和信杂比的两帧星图处理结果 如图 3 (a) 和 (c) 所示. 图 3 (a) 中恒星星像拖影较 短,拖影方向基本上与水平方向平行,小目标信杂比 约为 10. 图 3 (c) 中恒星星像拖影较长,拖影方向与 水平方向有夹角,小目标信杂比约为 4. 小目标中心 点坐标位置标识在 Matlab 中,分别如图 3 (a) 和 (c) 所示,三维图分别如图 3 (b) 和 (d) 所示. 4 种方法 的处理结果分别如图 3 (e) ~ (l) 所示. 在处理结果 中,判定为目标点的像素点位置用圆形虚框标记;若 目标点坐标与图 3 (a) 中小目标中心点坐标相一致, 则用十字形标记,表示为检测成功的目标点,并将其 放大显示于对应图像的左下角处.



Fig. 3 Star image and its processing results with different methods

由图 3 (f) 和 (j) 中结果可知, RBDFSF 双向滤 波使图像背景均衡化,保留高频目标上比较有效.当 存在高亮度高频干扰目标时,基于小目标高频特性 的滤波参数,仍能产生大量的虚假目标,不能够有效 地实现对漂移扫描星图中小目标的突显. 基于背景 抑制的形态学 Top-hat 的处理结果, 通过对与结构 元素相似目标的筛选,当恒星星像相对平稳时,能够 实现小目标的保留和恒星星像的滤除,如图 3(h) 所 示,但对起伏较大的恒星星像及较小的目标能量,该 方法的处理性能下降较大,如图3(l)中存在大量的 虚假目标点. GST 方法通过对基于小目标的形状特 征进行圆形模板映射,在映射域中对峰值点进行检 测,能够有效地实现对小目标的检测,如图 3(g) 所 示,但是对于信杂比较小的情况,模板的匹配度及目 标的局部对比度影响着性能的发挥,使得目标不能 得到可靠的检测,结果如图 3(k) 所示. 本文所提基 于特征描述的小目标检测方法,将研究对象进行建 模分为三类处理,从图3(e)和(j)处理结果可见,高 频干扰目标得到了有效的抑制.本文方法在这4种 方法中对恒星星像抑制效果最好,实验结果与理论 上的分析相符,很好地反映了所描述模型对感兴趣 目标点的预测结果.同时,不同信杂比条件下的检测 结果表明了本文方法的可靠性. 由于 GST 方法比 其他两种方法处理效果更好,在90%检测率下,比 较本文方法与 GST 方法在不同信杂比下的平均虚 警数. 对信杂比分别为 1、4、7 和 10 的 4 组各 100 帧采集数据进行实验,统计结果如图4所示.





Fig. 4 Comparison of FAR under different SCR between method proposed and GST

由图 4 可见,随着信杂比的减少,GST 方法产 生的平均虚警数迅速增加.信杂比为 7 时,平均虚警 数为 51,信杂比为 4 时,达到了 330 左右.在信杂比 为1时,因为虚假目标过多,已经无法实现对小目标 进行有效检测,统计数据没有意义,为了方便显示, 在图 4 中设置为最大虚警数 500. 随着信杂比减少, 本文方法的平均虚警数同样有所增加,但是其增加 幅度远小于 GST 方法, 信杂比为 4 时, 平均虚警数 约为3,信杂比为1时,达到了55左右,在信杂比为 4 以上时, 虚警率变化不大, 表现出了较好的稳健性. 分析信杂比为1的处理结果,产生虚假目标的原因 主要有:1) 各高亮恒星星像的端点,由于灰度值大, 式 (16) 中第1项值远大于小目标相应值,惩罚项的 作用也不能阻止其总体具有相对较高的输出值,是 形成虚假目标点的主要因素. 2) 当小目标与干扰目 标相邻时,滤波器响应值不能够对小目标的特性进 行良好表示,降低了小目标的检测门限,使得虚假目 标个数增多. 尽管如此, 相比于 GST 方法, 在信杂 比低的情况下,本文方法仍然具有较好的检测能力.

5 结束语

针对漂移扫描星图中的小目标检测问题,本文 提出一种基于特征描述的小目标检测方法. 从小目 标的定义出发,通过建立小目标的特征描述模型对 所感兴趣的目标进行表示.利用 Gabor 滤波器构造 特征提取算子,并以一致性描述指标衡量不同方向 特征的相似程度. 然后, 以描述模型为参照, 给出了 小目标的检测算子和相应参数的设定依据. 最后, 通 过对漂移扫描星图的小目标检测分析,并与近年来 较具代表性的基于复杂背景条件下的小目标检测方 法作比较. 结果表明本文方法在抑制缓变背景的条 件下,同样对剔除高频干扰目标有很好的效果,不需 要对星图进行预处理,即可直接实现小目标的检测, 相关实验验证了本文所提小目标检测算子的可靠性. 当小目标信杂比低,且靠近干扰目标时,所提取的特 征不能对小目标进行良好的描述,产生了较多的虚 假点,如何确定合理的检测策略是需要进一步考虑 的问题.同时,为下一步推广方法在其他复杂背景下 的应用,需要做更为深入的研究工作.

References

- 1 Castander F J, Ballester O, Cardiel L, Carretero J, Casas R, Castilla J, Crocce M, de Vicente J, Delfino M, Fernández E, Fosalba P, García-Bellido J, Gaztañaga E, Grańena F, Madrid F, Martí P, Miquel R, Neissner C, Sánchez E, Serrano S, Sevilla I, Troyano I. The PAU camera. In: Proceedings of the 2011 IX Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society (SEA). Madrid, Spain: Springer-Verlag, 2011. 674-679
- 2 Karbovs'ky V L, Lazorenko P F, Andruk V N, Kleshchenok V V, Litvin M O, Bogatyrev K O, Denisyuk E V. Kyiv meridian axial circle with a new CCD camera. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2011, **27**(4): 204–210
- 3 Ramirez J M, Flores E M, Martinez-Carballido J, Enriquez R, Alarcon-Aquino V, Baez-Lopez D. An FPGA-based ar-

chitecture for linear and morphological image filtering. In: Proceedings of the 20th International Conference on Electronics, Communications, and Computers. Cholula, Mexico: IEEE, 2012. 90-95

4 Wang Da-Bao, Liu Shang-Qian, Zhang Feng. New adaptive infrared strong cluttered background suppression algorithm. Journal of Xidian University (Natural Science), 2010, 37(5): 928–933

(汪大宝,刘上乾,张峰.一种新的红外复杂背景自适应抑制算法.西 安电子科技大学学报 (自然科学版),2010,37(5):928-933)

- 5 Joshi S H, Marquina A, Osher S J, Dinov I, Horn J D, Toga A W. Edge-enhanced image reconstruction using (TV) total variation and bregman refinement. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Scale Space and Variational Methods in Computer Vision. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009. 389–400
- 6 Kim H S, Cho Y J. Anisotropic diffusion for preserving boundary-edge. In: Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Communication Technology. New York, USA: IEEE, 2010. 1693-1698
- 7 Liu J, Ji H B. An improved robust estimation algorithm for small IR target detection. In: Proceedings of the 2009 Symposium on Industrial Electronics & Applications. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2009. 394–398
- 8 Kim S, Lee J. Scale invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track. *Pattern Recognition*, 2012, 45(1): 393-406
- 9 Bigun J, Bigun T, Nilsson K. Recognition by symmetry derivatives and the generalized structure tensor. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(10): 1590-1605
- 10 Teferi D, Bigun J. Multi-view and multi-scale recognition of symmetric patterns. In: Proceedings of the 16th Scandinavian Conference on Image Analysis. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009. 657–666
- 11 Gao Chen-Qiang, Tian Jin-Wen, Wang Peng, Liu Wei. Detection of infrared spot small targets against complex sky background by using GST. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2009, (7): 10-13

(高陈强,田金文,王鹏,刘玮.复杂天空背景下基于 GST 的红 外斑点小目标检测. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2009, (7): 10-13)

- 12 Hinz S. Fast and subpixel precise blob detection and attribution. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Image Processing. Genova, Italy: IEEE, 2005. 457-460
- 13 Liu J M, White J M, Summers R M. Automated detection of blob structures by Hessian analysis and object scale. In: Proceedings of the 17th International Conference on Image Processing. Hong Kong, China: IEEE, 2010. 841–844
- 14 Papalazarou C, Rongen P M J, De With P H N. Evaluation of interest point detectors for non-planar, transparent scenes. In: Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009. 1–11

- 15 Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, **27**(10): 1615–1630
- 16 ElAlami M E. A novel image retrieval model based on the most relevant features. *Knowledge-Based Systems*, 2011, 24(1): 23-32
- 17 Liu Shuai-Shi, Tian Yan-Tao, Wan Chuan. Facial expression recognition method based on Gabor multi-orientation features fusion and block histogram. Acta Automatica Sinica, 2011, **37**(12): 1455-1463 (刘帅师, 田彦涛, 万川. 基于 Gabor 多方向特征融合与分块直方图 的人脸表情识别方法.自动化学报, 2011, **37**(12): 1455-1463)
- 18 Bai X Z, Zhou F G, Zhang S, Du B B, Xue B D, Liu Z Y, Jin T. Top-hat by the reconstruction operation-based infrared small target detection. In: Proceedings of the 2012 International Conference in Electrics, Communication and Automatic Control. Chongqing, China: Springer-Verlag, 2012. 867–873



林建粦 信息工程大学信息系统工程学 院博士研究生. 主要研究方向为空间小 目标检测, SAR 信号处理. 本文通信作 者. E-mail: ljl20070819@163.com (**LIN Jian-Lin** Ph.D. candidate at

the Institute of Information System Engineering, Information Engineering University. His research interest covers

small space target detection and SAR signal processing. Corresponding author of this paper.)



平西建 信息工程大学信息系统工程学院教授.主要研究方向为图像处理,计算机视觉,信息隐藏.

E-mail: pingxj@126.com

(**PING Xi-Jian** Professor at the Institute of Information System Engineering, Information Engineering University. His research interest covers image

processing, computer vision, and information hiding.)



马德宝 武汉理工大学华厦学院教授. 主要研究方向为 SAR 信号处理, 电子对 抗. E-mail: dbmmail@126.com

(**MA De-Bao** Professor at Huaxia College, Wuhan University of Technology. His research interest covers SAR signal processing and electronic warfare.)