光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022032901

基于特征显著性融合的红外小目标检测

张传聪[1,2,3]，李范鸣[1*]，饶俊民[1,2]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 上海科技大学 信息科学与技术学院，上海 201210）

摘　要： 复杂背景下的红外图像通常存在信噪比低、邻近像素灰度变化不明显以及易被杂波信号和噪声干扰的特点，导致红外小目标检测困难。为解决上述问题，提出一种基于特征显著性融合的红外小目标检测算法。首先，在空间域中利用目标与其局部背景灰度差异来计算得到灰度显著图，在频域中结合谱残差计算得到背景抑制后的频域显著图；其次，将灰度显著图和频域显著图归一化后通过哈达玛乘积相互融合；最后，通过自适应阈值分割并使用 Unger 滤波器剔除较小的噪声点，从而提取出目标区域。实验结果表明，所提算法对图像的信噪比有了数十倍的提升，对背景抑制效果显著，并有着检测率高和虚警率低的优点，是一种有效的小目标检测算法。

关键词： 图像处理；背景抑制；显著性；红外小目标；目标检测

中图分类号： TP391.4　**文章编号：** 1001－5868(2022)04－0828－07

Infrared Small Target Detection Based on Feature Saliency Fusion

ZHANG Chuancong[1,2,3], LI Fanming[1], RAO Junmin[1,2]

(1. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 3. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, CHN)

Abstract: Infrared images with complex background are usually characterized by low signal-to-noise ratio (SNR), insignificant grayscale changes of adjacent pixels, and easy interference by clutter signal and noise, which makes detection of small infrared targets difficult. In order to solve the above problems, an infrared small target detection algorithm based on feature saliency fusion was proposed. Firstly, in the spatial domain, the grayscale difference between the target and its local background was used to calculate the grayscale saliency map, and in the frequency domain, the background suppressed frequency domain saliency map was calculated by combining the spectral residuals. Secondly, the grayscale significance map and frequency domain significance map were normalized and fused with each other by Hadamard product. Finally, the target region was extracted by adaptive threshold segmentation and Unger filter to eliminate small noise points. Experimental results show that the proposed algorithm can improve the image SNR by tens of times, and has a significant effect on background suppression, and has the advantages of high detection rate and low false alarm rate, which is an effective small target detection algorithm.

Key words: image processing; background suppression; saliency; infrared small target; target detection

收稿日期：2022－03－29.
基金项目：中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金项目(CX-267).
* **通信作者：**李范鸣　**E-mail:** lfmjws@163.com

0　引言

红外小目标检测技术是红外搜索与跟踪系统中的核心技术，其性能直接影响后续对远距离目标执行精确的搜索、跟踪等任务。目前，红外小目标检测难点主要有：(1)此类目标尺寸通常较小且缺乏形状和纹理信息；(2)红外图像中存在较为严重的背景噪声和杂波，导致目标的信噪比(SNR)低且易淹没在复杂的背景中；(3)由于红外图像背景复杂多变，根据以往经验很难获取大量的目标样本用于提取有效特征。

近年来国内外学者提出了诸多关于红外小目标的检测算法：基于空域滤波的检测算法[1-2]，这类算法计算效率高，在单帧图像的目标检测算法中得到了广泛的应用，但此类算法对严重的背景杂波和目标变化较为敏感，鲁棒性较差；通过小目标的时域信息[3-5]和信息熵[6-8]等实现的检测算法，这类算法虽然在检测精度上有所提高，但是算法复杂度较高，不适合用于对实时性有较高要求的系统；基于深度学习的小目标检测算法[9-10]，这类算法一方面需要足够的像素来提取目标的语义信息，另一方面需要大量样本的支撑，因此不适合样本少且像素点少的红外小目标检测；基于人类视觉机制的红外小目标检测算法[11-14]，该类算法在单帧图像检测中展现出巨大的潜力，利用目标和目标邻域的对比度差异来增强目标，适用于对信噪比较高的目标检测，在一定程度上提升了目标的检测率，但较小的噪声点对其检测性能影响大，导致虚警率高。

为了更好地增强目标、抑制图像背景，并在高检测率下保证较低的虚警率，本文提出的算法在空间域中根据红外小目标的信号强度呈现出从中间向四周逐渐递减的特性，利用目标与其局部背景的灰度差异来增强图像，计算得到红外图像的灰度显著图。首先，在频域中通过谱残差计算，抑制图像背景部分，获得红外图像的频域显著图。然后，将灰度显著图和频域显著图归一化后通过哈达玛乘积相互融合。最后，通过自适应阈值分割将得到的融合图像二值化并使用 Unger 滤波器剔除较小的噪声点，最终得到的像素值非零的区域即为小目标区域。通过对比实验，论证了该算法对目标的增强和背景的抑制的有效性，并且有检测率高和虚警率低的优点。

1　算法描述

本文算法主要分为灰度显著性检测、频域显著性检测、图像融合、自适应阈值分割以及 Unger 滤波，具体流程如图 1 所示。

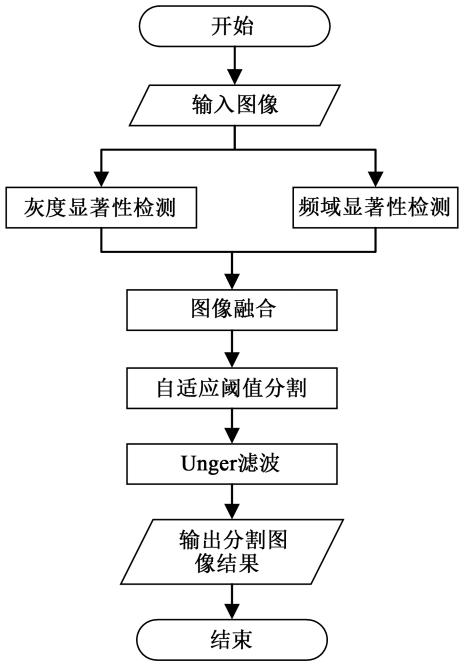


图 1　算法流程图

1.1　灰度显著性检测

通常包含小目标的红外图像 I 可以看作由目标图像 I_{t}、背景图像 I_{b} 以及噪声图像 I_{n} 三部分组成，如公式(1)所示：

$$I = I_{\mathrm{t}} + I_{\mathrm{b}} + I_{\mathrm{n}} \tag{1}$$

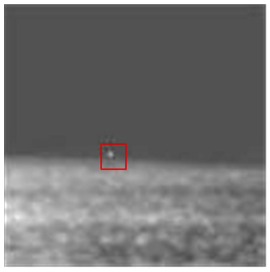
红外图像中的小目标的成像面积小于 81 个像素，目标尺寸小于 9×9，在图像中表现为孤立的亮斑，其典型特征为以目标为中心的局部区域的亮度由中间向四周逐渐变暗。因此，可以通过对比目标与局部灰度差异来增强目标的相对强度。基于该思想，首先以图像在点(x,y)为中心，根据公式(2)计算窗口大小为 $a\times a$ 和$(a+1)\times(a+1)$的边界之间形成的方形环带内所有像素点的灰度均值 m_{a+1}。通过将点(x,y)的像素值 $I(x,y)$与其局部背景区域环带的均值的差值平方后来增强红外图像，得到灰度显著图 I_{GE}，如公式(3)所示。

$$m_{a+1} = \frac{\sum_{i=-a/2}^{a/2}\sum_{j=-a/2}^{a/2} I(i,j) - \sum_{i=1-a/2}^{a/2-1}\sum_{j=1-a/2}^{a/2-1} I(i,j)}{(a+1)^2 - a^2} \tag{2}$$

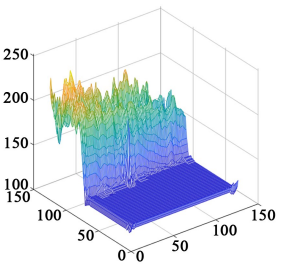
$$I_{\mathrm{GE}}(x,y) = (I(x,y) - V_{\min})^2 \tag{3}$$

式中，a 为正整数，$I(i,j)$表示位置(i,j)处的像素值，$V_{\min}$ 表示背景区域环带均值的最小值，由于目标像素一般在几个到几十个之间，因而本文实验中只需要取得当 a 的取值为 3，5，7 和 9 得到的 m_5，m_7，m_9 和 m_{11} 的最小值即为 $V_{\min}$。

将图 2(a)(方形框出部分为目标所在区域)进行灰度显著性检测，结果如图 2(c)和(d)所示，此时目标虽然增强了也增强了背景中的噪声部分，故而需要在频域中对背景部分进行抑制。



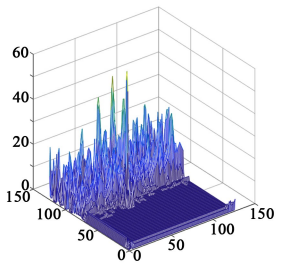
(a) 原图



(b) 图(a)的三维图



(c) 灰度显著图



(d) 图(c)的三维图

图 2 灰度显著性检测结果

1.2 频域显著性检测

从信息论的角度，图像信息可以分为显著性信息和冗余信息。谱残差算法[15]就是在频域中将图像中的冗余部分去除，从而获得图像的显著信息，然后通过傅里叶逆变换获得图像的显著性部分。在包含小目标的红外图像中，背景部分通常为冗余信息，而目标部分则是显著性信息，通过谱残差计算来获取红外图像显著性部分的具体步骤如下：

(1)对原始红外图像进行傅里叶变换，获取振幅谱 $A(f)$以及相位谱 $P(f)$作为先验信息，计算如下：

$$A(f)=R\{\mathcal{F}[I(x)]\} \tag{4}$$

$$P(f)=S\{\mathcal{F}[I(x)]\} \tag{5}$$

式中，$\mathcal{F}$表示傅里叶变换。

(2)对振幅谱 $A(f)$取对数得到振幅对数谱 $L(f)$，接着使用均值滤波器对 $L(f)$进行平滑处理获得背景部分的振幅对数信息，然后从振幅对数信息除去背景部分的振幅对数信息即可获得目标部分的振幅对数信息即图像的残差谱 $R(f)$，计算步骤如下：

$$L(f)=\ln(A(f)) \tag{6}$$

$$h_n(f)=\frac{1}{n^2}\begin{vmatrix}1 & 1 & \cdots & 1\\ 1 & 1 & \cdots & 1\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & 1 & \cdots & 1\end{vmatrix} \tag{7}$$

$$R(f)=L(f)-h_n(f)\otimes L(f) \tag{8}$$

式中，n 表示滤波器 $h_n(f)$的尺寸大小(本文实验中 $n=3$)，“$\otimes$”代表卷积符号。

(3)最后，将残差谱 $R(f)$与相位谱 $P(f)$叠加进行傅里叶逆变换，在经高斯滤波后得到红外图像的频域显著图 $S(x)$，如公式(9)所示：

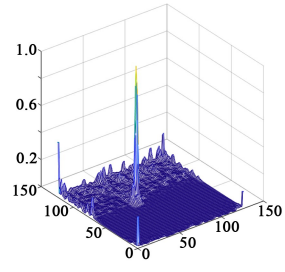
$$S(x)=g(x)\otimes\mathcal{F}^{-1}[\exp(R(f)+P(f))]^2 \tag{9}$$

式中，$\mathcal{F}^{-1}$ 表示傅里叶逆变换，$g(x)$为高斯滤波器(本文实验中参数设置为标准差为 5，尺寸大小为 3×3)。

经过谱残差计算后可以得到包含小目标的红外图像的频域显著图 $S(x)$，对图 2(a)中的红外图像进行频域显著性检测，结果如图 3 所示，可见背景部分得到了有效抑制。但是红外图像的边缘信息在频域显著图中得到了放大，不利于目标精准检测，故而下面将频域显著图与灰度显著图相融合，达到增强目标的同时也能有效抑制背景的目的。



(a) 频域显著性



(b) 图(a)的三维图

图 3 频域显著性检测结果

1.3 图像融合

在对图像进行融合前，通过公式(10)和(11)分别对灰度显著图和频率显著图进行归一化处理，获得图 I_{GSM} 和图 I_{FSM}。

$$I_{\mathrm{GSM}}(x,y)=\frac{I_{\mathrm{GE}}(x,y)}{I_{\mathrm{gmax}}} \tag{10}$$

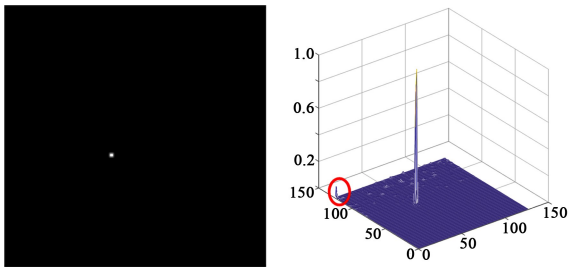
$$I_{\mathrm{FSM}}(x,y)=\frac{S(x,y)}{S_{\mathrm{fmax}}} \tag{11}$$

式中，I_{gmax} 表示图像 I_{GE} 中最大灰度值，S_{fmax} 表示

频域显著图中最大灰度值，$S(x,y)$表示增强后的图像 S 在位置(x,y)处的像素值。然后将 I_{GSM} 和 I_{FSM} 通过哈达玛乘积计算获得融合后的显著图，计算如下：

$$I_{SM}=I_{GSM}\circ I_{FSM} \tag{12}$$

式中，“∘”表示哈达玛乘积，I_{SM} 表示融合后的显著图。



(a)　图像融合后的显著性　　(b)　图(a)的三维图

图 4　图像融合效果

图 4 给出了图 2(c)和图 3(a)融合后的结果，可见目标区域不仅极大地得到增强，同时背景也得到有效的抑制。但是对于灰度显著图和频域显著图都没能抑制较小的噪声点(如图 4(b)中圆圈标记部分)，因此，需要对融合后的显著图中的噪声点继续进行抑制。

1.4　Unger 滤波

Unger 滤波器是一种基于 8 邻域的非线性滤波算法，算法复杂度低，运行速度快，其结构模板如图 5 所示，图中 Y 是检测点，$N_0\sim N_7$ 表示检测点的 8 邻域。通过公式(13)可以计算出 Unger 滤波后检测点 Y 处的数值 Y_{out}。

N_0	N_1	N_2
N_7	Y	N_3
N_6	N_5	N_4

图 5　Unger 平滑滤波结构模板

$$Y_{out}=\begin{cases}(N_0+N_1+N_7)\cdot(N_4+N_5+N_6)+(N_1+N_2+N_3)\cdot(N_7+N_5+N_6), & \text{if}\quad Y=1\\ N_1\cdot N_5\cdot(N_3+N_7)+N_3\cdot N_7\cdot(N_1+N_5), & \text{if}\quad Y=0\end{cases} \tag{13}$$

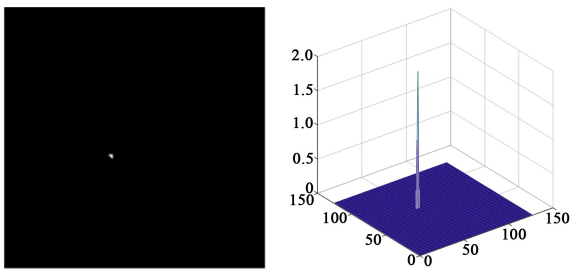
对融合后的显著图 I_{SM} 进行 Unger 滤波前需要先通过自适应阈值分割来获取二值图像 I_{BW}，然后利用 Unger 平滑处理除去图像中较小的噪声点。计算步骤如下：

$$T=\mu+k\sigma \tag{14}$$

$$I_{BW}(x,y)=\begin{cases}1, & \text{if}\quad S(x,y)>T\\ 0, & \text{if}\quad S(x,y)\leqslant T\end{cases} \tag{15}$$

式中，T 为自适应阈值，μ 为显著图像的像素平均值，k 是一个平衡参数(本文实验中 $k=10$)，σ 是显著图像 I_{SM} 的标准差。

图 6 给出对图 4(a)进行自适应阈值分割后的结果，可以看出，进行 Unger 滤波后噪声点被有效除去。



(a)　Unger 滤波后的显著性　　(b)　图(a)的三维图

图 6　Unger 滤波效果

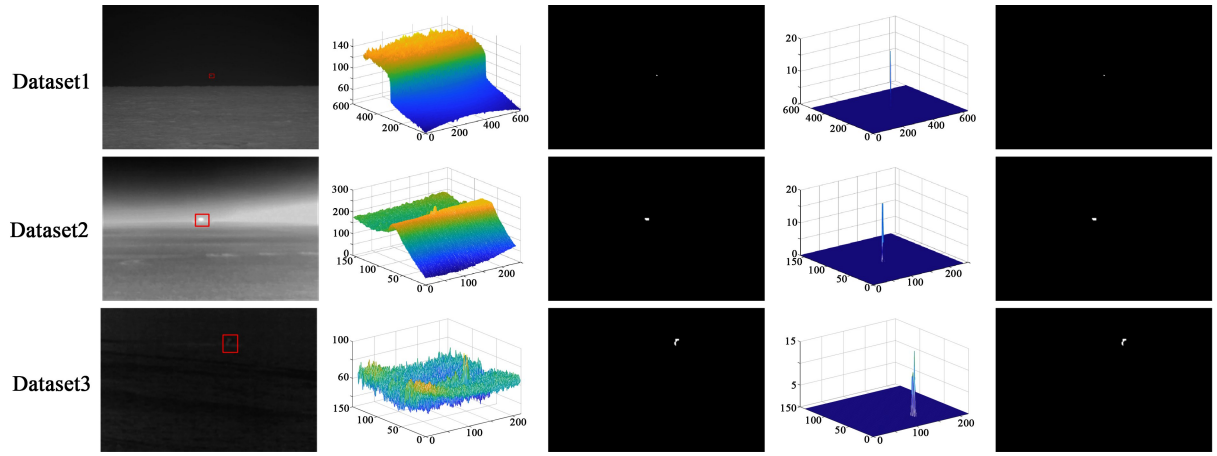
2　实验与结果分析

2.1　实验平台与仿真结果

本文实验在硬件配置为 Intel(R) Core(TM) i7-8700K@3.70 GHz 处理器、16 GB 的台式机上的 MATLAB R2018a 进行仿真实验。选用的 3 组数据集如下：Dataset1 为海空背景下目标一直处在海天线上方，共 110 张图像包含 110 个目标，目标约占 10 个像素点；Dataset2 为海空背景下目标在海天线附近，共 50 张图像包含 50 个目标，目标约占 20 个像素点；Dataset3 为海面背景下目标在海面之中，共 13 张图像包含 16 个目标，目标约占 20 个像素点。

图 7(a)是本文算法对 3 组数据集中各随机抽取单帧图像，图中方形框出部分是目标所在区域。从图中可以看出：Dataset1 中目标区域变换平缓，信号微弱；Dataset2 中目标虽然信号能量较强，但是局部背景区域的能量也比较强，同时还存在大量杂波的干扰；Dataset3 中目标信号微弱，同时在海面上容易受到海杂波的干扰。从图 7(c)和(d)可以看出，本文算法能够将背景部分有效抑制并增强目标信号。图 7(e)给出了通过本文算法对目标区域进行分割的结果，可以发现在不同数据集中均能很好地

分割出目标区域。



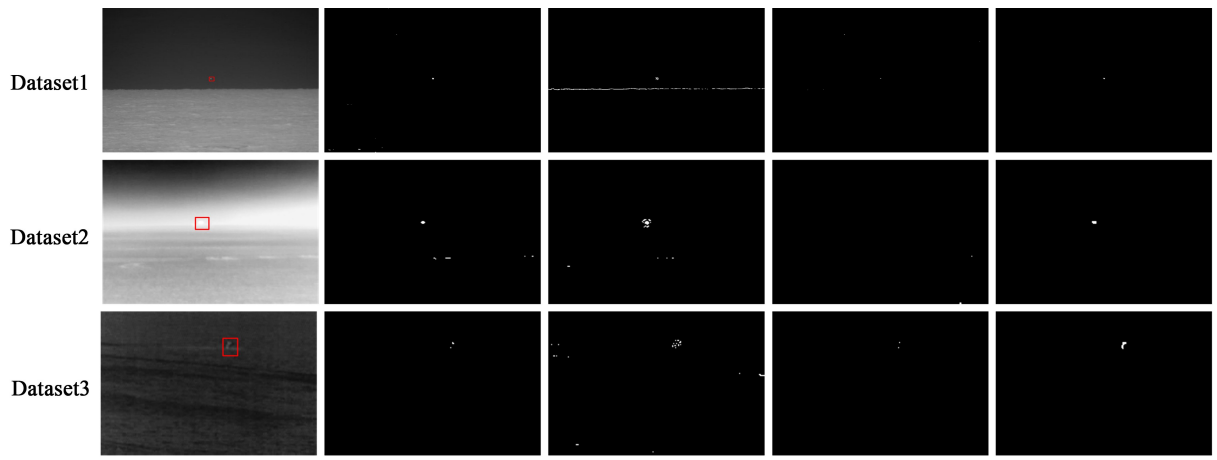
（a） 原图 （b） 图(a)三维图 （c） 滤波后的显著图 （d） 图(c)三维图 （e） 分割结果

图 7 检测结果

2.2 对比实验

为了验证本文算法的性能，此部分将本文算法与 Top-Hat[1]，LRE[6] 和 WLCM[13] 在 3 组数据集中进行了对比实验。图 8 给出了本文算法与其他算法对每个数据集中单帧图像的检测结果。

从图 8 中可以看出，在对 Dataset1 的检测中，目标及其局部背景区域的能量较弱，此时 Top-Hat 和 WLCM 对背景区域中的杂波有不同程度的放大，而 LRE 在海天交界处有较大的干扰，导致检测结果中存在多个伪目标。在对 Dataset2 的检测中，目标及其局部背景区域的能量较强，背景中也存在能量相对较强的杂波信号，Top-Hat，LRE 和 WLCM 对这些杂波信号有较大的放大效果，检测结果中存在多个伪目标，WLCM 甚至由于杂波信号过大增强导致真实目标丢失。在对 Dataset3 的检测中，本文算法和其他 3 种算法均能检测出真实目标，但是 LRE 在背景中强度波动较大的部分有能量放大的效果，导致检测结果中出现多个伪目标。



（a） 原图 （b） Top-Hat （c） LRE （d） WLCM （e） 本文算法

图 8 本文算法与其他 3 种算法检测结果

为了定量分析本文算法与其他算法的目标增强和背景抑制效果，将各个算法处理后的 SNR、信噪比增益(GSNR)和背景抑制因子(BSF)作为定量分析的评估指标。SNR 反映目标的增强能力，其数值越高表示增强能力越强。BSF 反映对背景的抑制效果，其数值越高表示抑制效果越好。计算公式如下：

$$R_{\mathrm{SN}}=\frac{|\mu_{\mathrm{t}}-\mu_{\mathrm{b}}|}{\sigma_{\mathrm{b}}} \tag{16}$$

$$G_{\mathrm{RSN}}=\frac{R_{\mathrm{SNin}}}{R_{\mathrm{SNout}}} \tag{17}$$

$$F_{BS}=\frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \tag{18}$$

式中，R_{SN}，μ_t，μ_b 和 σ_b 依次代表图像的信噪比、目标的均值、图像的均值和图像的标准差；G_{RSN}，R_{SNin} 和 R_{SNout} 分别代表图像的信噪比增益、输入图像的信噪比和处理后输出图像的信噪比；F_{BS}，σ_{in} 和 σ_{out} 分别代表背景抑制因子、输入图像的标准差和处理后输出图像的标准差。

图 8(a)中 3 张图像从上至下信噪比分别是 0.21，1.95 和 3.13，本文算法和 Top-Hat，LRE，WLCM 对不同图片处理后的 SNR，GSNR 和 BSF 如表 1 和表 2 所示。

从表 1 中可以看出，本文算法对 SNR 提升效果明显优于 Top-Hat，LRE 和 WLCM，可以达到 Top-Hat 提升效果的 3 倍左右，能够达到 WLCM 提升效果的 10 倍甚至更高，表明本文算法对目标有很好的增强效果。从表 2 中可以看出，本文算法对背景抑制的效果优于其他算法数倍甚至数十倍，特别是在 Dataset1 和 Dataset2 中本文算法对背景的抑制能力分别是 LRE 的 33.41 和 18.34 倍。

表 1　经不同算法处理后的 SNR 和 GSNR

图 8(a)所在数据集	Top-Hat		LRE		WLCM		本文算法	
	SNR	GSNR	SNR	GSNR	SNR	GSNR	SNR	GSNR
Dataset1	23.03	109.67	28.64	136.38	7.00	33.33	74.24	353.52
Dataset2	7.85	4.03	17.47	8.96	0.54	0.28	28.41	14.57
Dataset3	9.23	2.95	5.16	1.65	4.02	1.28	38.36	12.26

表 2　经不同算法的 BSF

图 8(a)所在数据集	Top-Hat	LRE	WLCM	本文算法
Dataset1	1 753.94	311.41	1 095.59	10 403.44
Dataset2	637.61	180.18	565.07	3 305.37
Dataset3	123.62	198.22	113.70	805.84

另外，通过计算本文算法在各个数据集中对目标的检测率 P_d 和虚警率 P_f，定量分析了算法对红外小目标的检测准确率，其定义如下：

$$P_d=\frac{N_r}{N_a} \tag{19}$$

$$P_f=\frac{N_f}{N_{im}} \tag{20}$$

式中，N_r，N_a，N_f 和 N_{im} 分别是指在数据集中检测到的正确目标、实际目标总数、虚警目标以及图像的数量。本文实验对 3 个数据集的测试结果如表 3 所示，可见本文算法的虚警率是最低的，证明本文算法对噪声的处理具有很好的鲁棒性。在检测率方面，本文算法的检测率在 3 个数据集中分别达到了 0.98，1.00 和 0.94，可见本文算法对目标有较高的检测率，虽然在 Dataset1 和 Dataset3 中检测率略低于 LRE，但是虚警率和 LRE 相比有着一个甚至多个数量级的优势。

表 3　不同算法的检测率和虚警率

算法	Dataset1		Dataset2		Dataset3	
	P_d	P_f	P_d	P_f	P_d	P_f
Top-Hat	0.98	9.65	0.98	4.00	0.94	0.62
LRE	0.99	28.73	1.00	1.70	1.00	4.38
WLCM	0.97	3.28	0.88	0.18	0.81	2.23
本文算法	0.98	0.02	1.00	0.00	0.94	0.23

3　结论

本文提出一种基于特征显著性融合的红外小目标检测算法，不仅在空间域中对图像实现增强，同时在频域中通过谱残差计算有效抑制了杂波信号。将灰度显著图和频域显著图归一化后通过哈达玛乘积相互融合，获得信噪比更高的特征融合显著图，解决目标图像信噪比低所导致红外小目标检测困难的问题。然后通过对融合图像进行自适应阈值分割，并对分割后得到的二值图像使用 Unger 滤波器剔除较小的噪声点，从而有效地降低虚警率。对比实验表明，本文算法有着目标增强效果强、背景抑制能力强、检测率高和虚警率低的优点，能够有效地从低信噪比的红外图像中提取出小目标。

参考文献：

[1] Zeng M，Li J X，Peng Z. The design of Top-Hat morphological filter and application to infrared target detection [J]. Infrared Phys. & Technol.，2006，48(1)：67-76.

[2] 刘　源，汤心溢，李　争. 基于新 Top Hat 变换局部对比度的红外小目标检测[J]. 红外技术，2015，37(7)：544-552.
Liu Yuan，Tang Xinyi，Li Zheng. A new Top Hat local contrast based algorithm for infrared small target detection[J]. Infrared Technol.，2015，37(7)：544-552.

[3] 李　佳，马静囡，李少娟，等. 基于时空域滤波的红外弱小目标背景抑制[J]. 半导体光电，2017，38(3)：396-400，444.
Li Jia，Ma Jingnan，Li Shaojuan，et al. Background suppression for infrared dim small target detection based on spatial-temporal filter [J]. Semiconductor Optoelectronics，2017，38(3)：396-400，444.

[4] 李　冰，李范鸣，谢江英，等. 基于帧差法和自适应阈值区域生长的红外运动目标检测[J]. 半导体光电，2017，38(1)：156-160.
Li Bing，Li Fanming，Xie Jiangying，et al. Infrared moving target detection based on frame difference method and adaptive threshold region growing[J]. Semiconductor Optoelectronics，2017，38(1)：156-160.

[5] Li Z Z, Chen C, Liu D P, et al. Infrared small target tracking algorithm based on temporal-spatial structure sparse bayesian estimation[J]. Infrared Phys. & Technol., 2020, 105: 103160.

[6] Shang K, Sun X, Tian J W, et al. Infrared small target detection via line-based reconstruction and entropy-induced suppression[J]. Infrared Phys. & Technol., 2016, 76: 75-81.

[7] 朱婧文，刘文好，印剑飞，等. 基于改进复杂度的红外弱小目标区域检测算法[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(10)：101006.
Zhu Jingwen, Liu Wenhao, Yin Jianfei, et al. Infrared small target regions detection based on improved image complexity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101006.

[8] 解 婷，陈 忠，马荣毅. 一种基于PGF、BEMD和局部逆熵的新型红外小目标检测方法[J]. 红外与毫米波学报，2017，36(1)：92-101.
Xie Ting, Chen Zhong, Ma Rongyi. A novel method for infrared small target detection based on PGF, BEMD and LIE [J]. J. of Infrared & Millimeter Waves, 2017, 36(1): 92-101.

[9] 吴天舒，张志佳，刘云鹏，等. 基于改进SSD的轻量化小目标检测算法[J]. 红外与激光工程，2018，47(7)：070305.
Wu Tianshu, Zhang Zhijia, Liu Yunpeng, et al. A lightweight small object detection algorithm based on improved SSD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7): 070305.

[10] 吴双枕，左峥嵘. 基于深度卷积神经网络的红外小目标检测[J]. 红外与毫米波学报，2019，38(3)：371-380.
Wu Shuangzhen, Zuo Zhengrong. Small target detection in infrared images using deep convolutional neural networks[J]. J. of Infrared & Millimeter Waves, 2019, 38(3): 371-380.

[11] Chen C L P, Li H, Wei Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(1): 574-581.

[12] Xia C Q, Li X R, Zhao L Y, et al. Infrared small target detection based on multiscale local contrast measure using local energy factor[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett., 2020, 17(1): 157-161.

[13] Liu J, He Z Q, Chen Z L, et al. Tiny and dim infrared target detection based on weighted local contrast [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett., 2018, 15(11): 1780-1784.

[14] Han J H, Ma Y, Fan F, et al. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 11(12): 2168-2172.

[15] Hou X D, Zhang L Q. Saliency detection: a spectral residual approach[C]// Proc. 2007 IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 1-8.

作者简介：

张传聪(1994—)，男，硕士，研究方向为红外图像处理及分析；

李范鸣(1969—)，男，博士，研究员，博士生导师，主要从事红外系统工程、红外成像技术、多维信息获取及微弱目标探测等方面的研究工作。