

文章编号 1004-924X(2015)05-1424-10

## 采用图像块对比特性的红外弱小目标检测

王 刚<sup>1</sup>, 陈永光<sup>2</sup>, 杨锁昌<sup>1</sup>, 高 敏<sup>1\*</sup>, 戴亚平<sup>3</sup>

(1. 军械工程学院 精确制导技术研究所, 河北 石家庄 050003;

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

3. 北京理工大学 自动化学院, 北京 100081)

**摘要:**对红外图像小目标与背景的特性进行了分析,提出一种基于图像块邻域对比特性的红外弱小目标检测算法用于有效检测低信噪比条件下的红外弱小目标。该方法利用大尺度图像块邻域最大对比特性(IPMCM)获得图像显著图并自适应分割感兴趣区域;然后计算多尺度图像块邻域最小对比度并进行最大值合并操作;最后以自适应阈值精确检测目标位置。文中从理论上分析了红外目标图像测试算法的有效性,使用该检测算法检测了弱小目标的性能,并与其它检测方法进行了对比。实验结果显示,提出的方法能够在低信噪比条件下有效地检测出红外弱小目标,在参与实验的 8 幅图片中均见实效。与局部概率分析、中值滤波和 Top-Hat 等方法相比,本文方法在目标检测性能对比试验中的检测率最高,虚警率最低。

**关键词:**目标检测;红外弱小目标;图像块;对比检测;感兴趣区域

**中图分类号:**TN216;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1424

## Detection of infrared dim small target based on image patch contrast

WANG Gang<sup>1</sup>, CHEN Yong-guang<sup>2</sup>, YANG Suo-chang<sup>1</sup>, GAO Min<sup>1\*</sup>, DAI Ya-ping<sup>3</sup>

(1. Shijiazhuang Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;

3. School of Automation, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

\* Corresponding author, E-mail: gaomin1964@yeah.net

**Abstract:** The characteristics of dim small targets and backgrounds were analyzed and a target detection algorithm based on image patch contrast measurement was proposed to detect infrared targets efficaciously. The Image Patch Maximum Contrast Measurement (IPMCM) at a large scale was used to obtain a saliency map and the region of interest was segmented by an adaptive threshold. Then, the image patch least-contrast measurement maps at the multiscale were computed and the maximum pooling operation was operated. Finally, the target position was detected by the adaptive threshold accurately. The detection algorithm for small infrared targets was presented and its efficacy was analyzed theoretically. The verification and contrast experiments were conducted. The results shows that the proposed method detects the dim small infrared targets at low signal-to-noise ratio and

收稿日期:2015-01-16;修订日期:2015-02-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51177174);武器装备预研重点基金资助项目(No. 9140A05040114JB34015);武器装备预研基金资助项目(No. 9140A0505313JB34001)

the effectiveness is validated from all 8 frame images involved in the experiment. As compared with the local probability analysis, median filtering, and Top-Hat method, the proposed method in the target detection performance contrast test shows the highest detection rate and the lowest false alarm rate.

**Key words:** target detection; infrared dim small target; image patch; contrast measurement; region of interest

## 1 引言

红外成像自动目标检测技术是自动目标识别的关键技术,其在精确制导、防空预警、安全监控等领域获得了广泛应用<sup>[1]</sup>。长期以来低信噪比条件下的红外弱小目标检测一直都是国内外研究的热点。红外弱小目标尺寸非常小,没有明显的纹理特征和形状信息,同时由于受噪声、背景物体辐射等因素的影响,红外图像中通常包含有严重的起伏背景,目标常表现为淹没在复杂背景中的若干像素点,这使得红外弱小目标检测非常困难。

上世纪80年代以来,人们研究了很多红外弱小目标检测算法,如空域滤波<sup>[2-3]</sup>、小波变换<sup>[4]</sup>、Contourlet变换<sup>[5]</sup>、Top-Hat变换<sup>[6-7]</sup>、马尔科夫随机场(MRF)法<sup>[8-9]</sup>、机器学习法<sup>[10]</sup>、主成分分析法<sup>[11]</sup>等,但是多数方法仍然存在先验条件要求过多、虚警率高、计算复杂等问题。文献[3]提出了一种基于自适应噪声平滑和Robinson Guard空间滤波器的背景抑制算法,这种方法对单像素进行模板操作,滤波器模板尺寸固定,需要提前设定。文献[6]使用的Top-Hat法检测算法计算速度快,但需要事先确定结构元素尺寸,且当虚警和目标的灰度值相等时不能很好地对目标进行检测。文献[9]利用目标与背景的空间差异,并定义新的MRF函数来检测小目标,但固定的检测门限使得背景起伏较大时易出现虚警或漏检。文献[12]提出一种基于局部灰度均值确定红外小目标位置信息的算法,但其计算复杂,检测速度有待提高。文献[13]提出了基于拉普拉斯-高斯尺度空间的红外小目标检测方法,但计算过于复杂。不难看出,复杂背景下的红外弱小目标检测仍然是一个具有挑战性的课题。

近年来,受到人类视觉机制的启发,基于视觉显著特性<sup>[9,15-17]</sup>和尺度空间<sup>[13,15,18]</sup>的算法引起了学者的广泛注意。分析红外弱小目标特性可知,

其背景区域主要是平缓区域,伴有部分起伏杂波,目标区域通常与相邻区域不连续且相对集中,因而可以利用显著性提取红外弱小目标的感兴趣区域(Region of Interest, ROI),再利用多尺度对比特性实现弱小目标的精确检测和定位。

在此基础上,本文提出一种基于图像块邻域对比特性的红外弱小目标检测算法。首先运用大尺度图像块最大对比特性(Image Patch Maximum Contrast Measurement, IPMCM)获得图像显著图并自适应分割感兴趣区域;然后在感兴趣区域计算各尺度图像块的最小对比特性(Multiscale Image Patch Least-Contrast Measurement, MIPLCM),并进行最大值合并操作;最后再以自适应阈值检测目标位置。文中详细给出了目标检测算法,从理论上分析了检测算法的有效性,接着使用红外弱小目标图像对检测性能进行了实验,并与其它检测方法进行了对比。

## 2 红外弱小目标图像若干特征

很多学者将红外弱小目标定义为红外图像中所占像素不超过图像总像素0.15%的目标<sup>[12,14,18-19]</sup>。例如对于尺寸为128 pixel × 128 pixel的红外图像,小目标的尺寸大小不超过5 pixel × 5 pixel。

信噪比低、背景复杂的红外目标与局部背景的灰度值相差不大,其灰度值在整幅图像中不一定是最高的,但是通常红外弱小目标自身的红外辐射强度还是会一定程度上高于其局部背景,两者之间存在一定的差异。例如坦克在行进作战的过程中,发动机或者炮管的温度往往较高,在远距离观测时该部分灰度值高于局部周边背景环境,因而目标斑点区一般有一个灰度极大值,显著度较高;同时目标区域的周围存在环绕的低灰度区,因此具有孤立性。背景中平缓区域的灰度起伏变化小,没有极大值,显著度较小;云层、天际线

作为背景时灰度起伏较大,显著度较高,可能出现灰度极大值,但与周边邻域相容,不存在环绕的低灰度区域,没有孤立的特性。

### 3 基于 IPMCM 显著图的 ROI 提取

#### 3.1 视觉显著特性

人类视觉系统具有选择性注意的特性,视觉注意机制能高效地将复杂场景中的众多视觉数据按重要性进行优先选择<sup>[20]</sup>,在缺少先验知识的情况下迅速地将注意力选择性地集中在显著区域<sup>[21]</sup>。相对于局部背景,显著区域通常具有较强的对比度。人眼能够区分灰度图像中的目标主要是因为目标区的灰度分布与背景有差异,即目标的灰度较周围背景显著<sup>[9]</sup>。这种视觉特性有助于剔除冗余信息,将计算资源更多地用于感兴趣区域,能有效提高信息处理效率<sup>[15]</sup>。目前显著性的计算方法主要有 Itti-Koch 视觉注意法、频谱残差法、高斯差分法<sup>[22]</sup>等。

生物学研究证实,灵长类动物的初级视觉皮层含有大量简单细胞和复杂细胞<sup>[23]</sup>。其中简单细胞只感受视野中的局部区域;复杂细胞是简单细胞集群的一种非线性时空整合,将局部单元信息汇集成具有全局意义的特征后,视觉系统便能感知显著区域。因此本文将图像块邻域间的最大对比特性作为局部特征,模拟简单细胞获取的局部信息,再将所有局部信息汇聚成显著性图,构成复杂细胞获取的全局信息。

#### 3.2 IPMCM 显著图

为了研究图像区域特征,研究者们引入了图像块概念<sup>[24]</sup>,使用局部图像块信息代替原始图像的像素信息。本文将尺度为  $s$  的图像块定义为  $s \times s$  ( $s=1,3,5,\dots$ ) 个像素的正方形区域,并通过类似滑窗的方法在每个像素位置生成相应的图像块。如图 1 所示,参照像素邻域概念,将图像块在水平、垂直方向相邻的图像块 N1, N2, N3, N4 和对角方向相邻的图像块 N5, N6, N7, N8 定义为图像块  $P$  的 8 邻域。由于图像块占有多个像素,后续计算时可能会忽略图像边缘区域。为了避免漏检图像边缘区域的小目标,需要根据图像块尺寸对原始图像进行扩展。

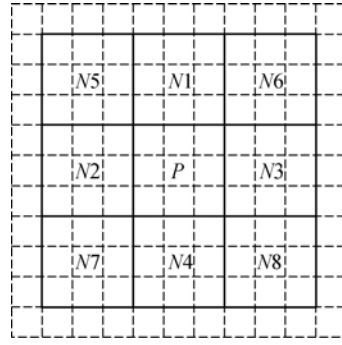


图 1 图像块及其 8 邻域

Fig. 1 Image patch and its 8-neighborhood

定义图像空间为  $\mathbf{R}^2$ , 原始红外图像为  $\mathbf{I}_I \subset \mathbf{R}^2$ ,  $\mathbf{I}_I$  的元素为  $f$ ; 扩展后的红外图像为  $\mathbf{I}_E \subset \mathbf{R}^2$ ,  $\mathbf{I}_E$  的元素为  $f_E$ ; 中心位置位于  $(i, j)$  的图像块  $\mathbf{I}_P^{(i,j)} \subset \mathbf{I}_E$ , 其元素为  $f_P^{(i,j)}$ ; 该图像块的邻域  $\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h) \subset \mathbf{I}_E$  ( $h=1,2,3,\dots,8$ ), 其元素为  $f_N^{(i,j)}(h)$ 。定义  $\mathbf{F}_E$  为扩展图像算子,  $\mathbf{F}_P$  为图像块生成算子,  $\mathbf{F}_N$  为图像块邻域生成算子, 则  $\mathbf{I}_E = \mathbf{F}_E(\mathbf{I}_I)$ ,  $\mathbf{I}_P^{(i,j)} = \mathbf{F}_P(\mathbf{I}_E, i, j)$ ,  $\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h) = \mathbf{F}_N^{(h)}[\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}]$ 。

扩展图像算子  $\mathbf{F}_E$  包括两部分, 首先计算图像上、下、左、右边缘对应尺度  $s$  的灰度平均值, 然后以该平均灰度值将图像向 4 个方向扩展  $s$  行(或列)。对于原始尺寸为  $m_1 \times n_1$  的图像, 边缘灰度值的计算方法是:

$$\begin{aligned} M_{\text{left}}(p) &= \frac{1}{s} \sum_{j=1}^s f(p, j), p = 1, 2, 3, \dots, m_1 \\ M_{\text{right}}(p) &= \frac{1}{s} \sum_{j=n_1-s+1}^{n_1} f(p, j), p = 1, 2, 3, \dots, m_1 \\ M_{\text{top}}(p) &= \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s f(i, p), p = 1, 2, 3, \dots, n_1 \\ M_{\text{bottom}}(p) &= \frac{1}{s} \sum_{i=m_1-s+1}^{m_1} f(i, p), p = 1, 2, 3, \dots, n_1. \end{aligned} \quad (1)$$

其中:  $M_{\text{left}}(p)$ ,  $M_{\text{right}}(p)$ ,  $M_{\text{top}}(p)$  和  $M_{\text{bottom}}(p)$  分别是对应尺度  $s$  的左、右、上和下边缘的第  $p$  个平均灰度值。扩展图像时可将边缘灰度复制  $s$  行(或列), 并按方向拼接在原始图像上。原始图像 4 个角方向也需分别扩展  $s \times s$  的图像矩阵, 其灰度值可以使用最临近的边缘灰度值求平均。扩展后的图像  $\mathbf{I}_E$  分辨率为  $m_2 \times n_2 = (m_1 + 2s) \times (n_1 + 2s)$ 。

在扩展图像  $\mathbf{I}_E$  的  $(i, j)$  上生成  $s$  尺度图像块的方法为:

$$\mathbf{I}_P^{(i,j)} = \mathbf{F}_P(\mathbf{I}_E, i, j) = \mathbf{I}_E((s+i):(2s+i-1), (s+j):(2s+j-1)), \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{I}(i_1:i_2, j_1:j_2)$  表示选择图像  $\mathbf{I}$  的  $i_1$  至  $i_2$  行,  $j_1$  至  $j_2$  列的元素生成新的图像矩阵。特别

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_N^{(i,j)}(1) &= \mathbf{F}_N^{(1)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E(i:(s+i-1), (s+j):(2s+j-1)) \\ \mathbf{I}_N^{(i,j)}(2) &= \mathbf{F}_N^{(2)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E((s+i):(2s+i-1), j:(s+j-1)) \\ \mathbf{I}_N^{(i,j)}(3) &= \mathbf{F}_N^{(3)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E((s+i):(2s+i-1), (2s+j):(3s+j-1)) \\ \mathbf{I}_N^{(i,j)}(4) &= \mathbf{F}_N^{(4)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E((2s+i):(3s+i-1), (s+j):(2s+j-1)) \\ \mathbf{I}_N^{(i,j)}(5) &= \mathbf{F}_N^{(5)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E(i:(s+i-1), j:(s+j-1)) \\ \mathbf{I}_N^{(i,j)}(6) &= \mathbf{F}_N^{(6)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E(i:(s+i-1), (2s+j):(3s+j-1)) \\ \mathbf{I}_N^{(i,j)}(7) &= \mathbf{F}_N^{(7)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E((2s+i):(3s+i-1), j:(s+j-1)) \\ \mathbf{I}_N^{(i,j)}(8) &= \mathbf{F}_N^{(8)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)}) = \mathbf{I}_E((2s+i):(3s+i-1), (2s+j):(3s+j-1)), \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $(i, j)$  为图像块  $\mathbf{I}_P^{(i,j)}$  的中心像素位置,  $\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h)$  表示  $\mathbf{I}_P^{(i,j)}$  的第  $h$  个邻域。

生物视觉科学研究表明,对比度是视觉系统编码最重要的部分<sup>[13,18]</sup>,传统上使用图像局部均值的二阶矩作为局部对比度的度量,主要用于描述纹理等特性。本文将中心像素位于  $(i, j)$  的图像块与第  $h$  个邻域的对比度定义为:

$$C_h^{(i,j)} = \frac{(\max(\mathbf{I}_P^{(i,j)}))^2}{\text{mean}(\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h))}, \quad (4)$$

其中:  $\max(\mathbf{I}_P^{(i,j)})$  是中心像素位于  $(i, j)$  的图像块中的最大灰度值;  $\text{mean}(\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h))$  表示第  $h$  个邻域内的灰度均值。定义  $(i, j)$  处图像块邻域最大对比度  $C_{\max}^{(i,j)}$  为:

$$C_{\max}^{(i,j)} = \max_{h=1,2,\dots,8} \left[ \frac{(\max(\mathbf{I}_P^{(i,j)}))^2}{\text{mean}(\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h))} \right] = \frac{(\max(\mathbf{I}_P^{(i,j)}))^2}{\min_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h)))}, \quad (5)$$

其中  $(i, j)$  为图像块中心像素所在的位置。

由图像块邻域最大对比度定义可知,只要在图像块中含有局部灰度极大值点,它与邻域的最大对比度就会比较大,所以该度量能够表征图像的局部显著度,可用来筛选出目标可能存在的感兴趣区域。在进行检测前目标在图像中的尺寸通常是未知的,但是可以根据实际成像系统大致确定一个范围<sup>[12]</sup>,一般将图像块的最大尺度  $s_{\max}$  设为 9~11。

在图像空间  $\mathbf{R}^2$  定义图像块邻域最大对比特性显著图为  $\mathbf{I}_{\max C}$ , 其元素为  $f_{\max C}(i, j) = C_{\max}^{(i,j)}$ 。生成尺度  $s_{\max}$  的显著图的算法为:

地,当  $s=1$  时,图像块  $\mathbf{I}_P^{(i,j)} = \mathbf{F}_P(\mathbf{I}_E, i, j) = f_E(i, j)$ 。

图像块  $\mathbf{I}_P^{(i,j)}$  的 8 邻域生成算法为:

Step1: 计算  $\mathbf{I}_1$  分辨率  $m_1 \times n_1$  和  $s_{\max}$ ;

Step2:  $\mathbf{I}_E = \mathbf{F}_E(\mathbf{I}_I)$ ;

Step3: for  $i=1:m_1$

for  $j=1:n_1$

$$\mathbf{I}_P^{(i,j)} = \mathbf{F}_P(\mathbf{I}_E, i, j)$$

$$\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h) = \mathbf{F}_N^{(h)}(\mathbf{I}_E, \mathbf{I}_P^{(i,j)})$$

$$C_{\max}^{(i,j)} = \frac{(\max(\mathbf{I}_P^{(i,j)}))^2}{\min_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(\mathbf{I}_N^{(i,j)}(h)))}$$

end

end

Step4:  $f_{\max C}(i, j) = C_{\max}^{(i,j)}$ , 生成  $\mathbf{I}_{\max C}$ 。

### 3.3 图像 ROI 提取

对显著图进行自适应阈值分割,可得到二值化的显著图  $\mathbf{I}_{\text{BW}} \subset \mathbf{R}^2$ 。二值化自适应分割阈值计算公式为:

$$Th_1 = M_{\mathbf{I}_{\max C}} + r_1 \times \sigma_{\mathbf{I}_{\max C}}, \quad (6)$$

其中:  $M_{\mathbf{I}_{\max C}}$  和  $\sigma_{\mathbf{I}_{\max C}}$  表示  $\mathbf{I}_{\max C}$  的均值和标准差;  $r_1$  为常数,一般取 2~5,其值越小,感兴趣区域会越大,后期计算量越大,目标检测率和虚警率可能越高;反之则后续计算量少,检测率和虚警率可能越低。

将二值图像与原始图像相乘即可获得 ROI。定义  $\mathbf{I}_{\text{ROI}} \subset \mathbf{R}^2$  为感兴趣区域,  $\mathbf{F}_{\text{ROI}}$  为获取感兴趣区域的算子,则  $\mathbf{I}_{\text{ROI}} = \mathbf{F}_{\text{ROI}}(\mathbf{I}_I, \mathbf{I}_{\text{BW}}) = \mathbf{I}_I * \mathbf{I}_{\text{BW}}$ 。

基于 IPMCM 显著图提取 ROI 的算法如下:

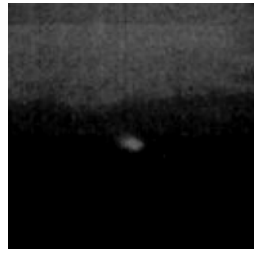
Step1: 生成  $\mathbf{I}_{\max C}$ ;

Step2: 计算分割阈值  $Th_1$ ;

Step3: 生成  $\mathbf{I}_{\text{BW}}$ ;

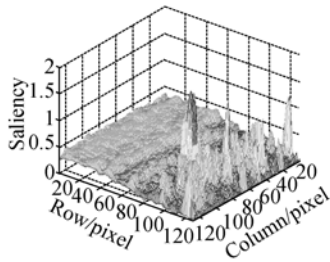
Step4:  $\mathbf{I}_{ROI} = \mathbf{F}_{ROI}(\mathbf{I}_I, \mathbf{I}_{BW})$ 。

如图 2 所示,图 2(a)为分辨率为  $128 \times 128$  的红外目标原始图像,图 2(b)为 IPMCM 三维立体图,图 2(c)为相应的显著性图,图 2(d)为自适应阈值分割得到的 ROI。图 2 表明,IPMCM 能够很好地表征显著性,所提方法能够有效分割红外目标 ROI。



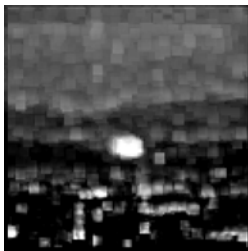
(a)原始红外图像

(a)Original infrared image



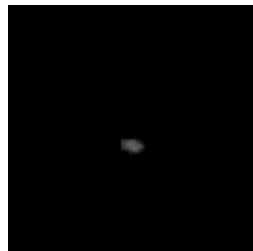
(b)IPMCM 三维图

(b) Three-dimensional projections of IPMCM



(c)显著图

(c)Saliency map



(d)检测出的 ROI

(d)Detection result of ROI

图 2 红外目标 ROI 分割过程

Fig. 2 ROI extraction processing of infrared target

## 4 基于 MIPLCM 的目标检测

### 4.1 基于 MIPLCM 的目标检测算法

由于图像中的噪声、杂波等灰度剧烈起伏区域也是显著的,因此显著性是检测红外小目标的必要不充分条件,需要对 ROI 进行进一步精细检测。由第 2 节分析可知,目标的一个重要特征是

在斑点区周围存在环绕的低灰度区。根据图像块邻域对比度定义可知,若图像块包含完整目标,其周围环绕低灰度区,图像块存在孤立性,它的 8 向对比度都会比较大;如果图像块被完全包含于目标内部或者位于平缓背景,则其 8 向邻域对比度都会较小;如果图像块为目标局部或者背景中起伏区域,由于不存在孤立性,它与邻域中相容背景处的对比度比较小,与不相容背景处的邻域对比度比较大。因此能检测出目标的一个充要条件是它的图像块最小对比度比较大。

类似式(5),定义  $(i, j)$  处图像块邻域最小对比度  $C_{\min}^{(i, j)}$ :

$$C_{\min}^{(i, j)} = \min_{h=1,2,\dots,8} \left[ \frac{(\max(\mathbf{I}_p^{(i, j)}))^2}{\text{mean}(\mathbf{I}_N^{(i, j)}(h))} \right] = \frac{(\max(\mathbf{I}_p^{(i, j)}))^2}{\max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(\mathbf{I}_N^{(i, j)}(h)))}. \quad (7)$$

在图像空间  $\mathbf{R}^2$  定义  $s$  尺度图像块最小对比特性图为  $\mathbf{I}_{\min C}^s$ ,其元素为  $f_{\min C}^s(i, j)$ 。根据尺度空间思想计算从 1 到  $s_{\max}$  的 MIPLCM 图。生成尺度为  $s$  的图像块对比特性图的步骤同第 2 节。

研究显示,视觉皮层中简单细胞和复杂细胞的沟通桥梁是计算池模型<sup>[20]</sup>,最大化计算池模型是简单细胞向复杂细胞汇集的方式。又由于多尺度最大值合并操作的结果具有尺度不变性<sup>[25]</sup>,因此在感兴趣区域  $\mathbf{I}_{ROI}$  计算多尺度图像块对比特性后,将各尺度最小对比特性图进行最大值合并操作可得到全局图像块最小对比特性图  $\mathbf{I}_{\min C}$ ,其元素为  $f_{\min C}(i, j)$ ,其方法为:

$$f_{\min C}(i, j) = \min_{s=1,2,\dots,s_{\max}} (f_{\min C}^s(i, j)). \quad (8)$$

最后再用自适应阈值  $Th_2$  检测目标,  $Th_2$  的计算公式为:

$$Th_2 = M_{\mathbf{I}_{\min C}} + r_2 \times \sigma_{\mathbf{I}_{\min C}}, \quad (9)$$

其中:  $M_{\mathbf{I}_{\min C}}$  和  $\sigma_{\mathbf{I}_{\min C}}$  表示  $\mathbf{I}_{\min C}$  的均值和标准差;  $r_2$  为常数,一般取 2~5。其值越小,目标检测率和虚警率可能越高,反之则检测率和虚警率越低。

本文目标检测算法如下:

Step1:提取  $\mathbf{I}_{ROI}$ ;

Step2:在 ROI 中计算  $\mathbf{I}_{\min C}^s$ ;

Step3:最大值合并操作获得  $\mathbf{I}_{\min C}$ ;

Step4:计算  $Th_2$ ;

Step5:检测目标位置。

### 4.2 检测算法有效性分析

(1)当图像块包含目标时,如图 3(a)中 A 类

区域和图 3(b),因为目标灰度值具有局部极大特性,图像块中最大灰度值高于邻域中背景的平均灰度值,即

$$\max(I_p^{(i,j)}) > \max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(I_N^{(i,j)}(h))),$$

因此  $\frac{\max(I_p^{(i,j)})}{\max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(I_N^{(i,j)}(h)))} > 1$ 。由式(7)可知,对所有  $h (h=1,2,3,\dots,8)$  图像块邻域,都有

$$C_{\min}^{(i,j)} = \frac{\max(I_p^{(i,j)})}{\max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(I_N^{(i,j)}(h)))} \times \max(I_p^{(i,j)}) > \max(I_p^{(i,j)}). \quad (10)$$

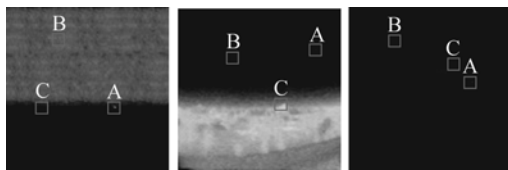
(2)当图像块位于平滑的背景区时,如图3(a)中 B 类区域和图 3(c),此时,通常图像块中最大灰度值小于或约等于邻域中背景的平均灰度值,即  $\max(I_p^{(i,j)}) < \max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(I_N^{(i,j)}(h)))$  或  $\max(I_p^{(i,j)}) \approx \max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(I_N^{(i,j)}(h)))$ ,因而

$$C_{\min}^{(i,j)} < \max(I_p^{(i,j)}) \text{ or } C_{\min}^{(i,j)} \approx \max(I_p^{(i,j)}). \quad (11)$$

(3)当图像块位于云层、天际线、杂波类背景区时,如图 3(a)中 C 类区域和图 3(d),由于该类背景总有区域与背景相容,即  $\max(I_p^{(i,j)}) < \max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(I_N^{(i,j)}(h)))$  或  $\max(I_p^{(i,j)}) \approx \max_{h=1,2,\dots,8} (\text{mean}(I_N^{(i,j)}(h)))$ ,因此

$$C_{\min}^{(i,j)} < \max(I_p^{(i,j)}) \text{ or } C_{\min}^{(i,j)} \approx \max(I_p^{(i,j)}). \quad (12)$$

由以上分析可知,图像块最小邻域对比度会增强目标区,但不会增强背景,甚至可以抑制背景。因此,使用该方法能够有效检测弱小目标。



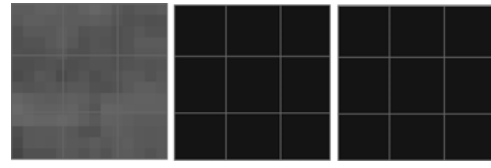
(a)原始红外图像

(a)Original infrared images



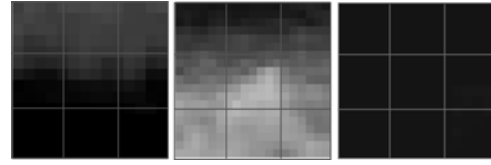
(b)目标区域图像块及其邻域

(b)Target image patches and their neighborhoods



(c)平缓背景区域图像块及其邻域

(c)Smooth background image patches and their neighborhoods



(d)起伏背景区域图像块及其邻域

(d)Fluctuant background image patches and their neighborhoods

图 3 红外图像中图像块邻域对比特性

Fig. 3 Contrast characteristics of image patches neighborhoods in infrared image

## 5 实验结果与分析

本文实验硬件平台基于 3.00GHz Intel Core i5 CPU, 4GB RAM 计算机;软件平台基于 Windows<sup>®</sup>7 操作系统和 MATLAB<sup>®</sup>R2011b。

### 5.1 本文检测算法效果

为验证本文算法的有效性,采用 5 幅分辨率为  $128 \times 128$  且含有红外弱小目标的红外图像(见图 4)对算法有效性进行验证,其中第 3 幅来自俄亥俄州立大学(OSU)红外图库,第 4 幅和第 5 幅由文献[12]提供。最大图像块尺度为 9,自适应阈值中  $r_1$  和  $r_2$  均取 3。

红外图像工程中常用全局信噪比 GSNR 和局部信噪比 LSNR<sup>[9]</sup>评价红外图像的质量和复杂程度,其计算公式分别为:

$$GSNR = \frac{|\mu_t - \mu_g|}{\sigma_g}, \quad (13)$$

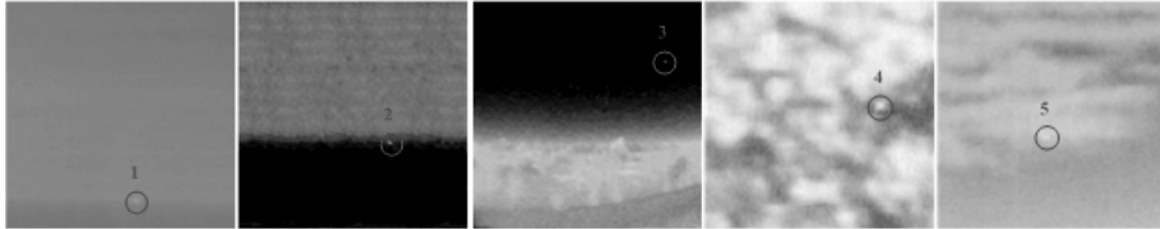
$$LSNR = \frac{|\mu_t - \mu_b|}{\sigma_l}, \quad (14)$$

式中:  $\mu_t$  表示目标区的灰度均值;  $\mu_g$  表示全局图像的灰度均值;  $\mu_b$  表示目标所在局部区域背景的灰度均值;  $\sigma_g$  表示整幅图像的标准差;  $\sigma_l$  为目标所在局部区域的标准差。表 1 列出了图 4 中 5 幅目标图像的全局信噪比、局部信噪比、目标位置坐标和检测耗时,其中检测耗时为检测 10 次的平均值。

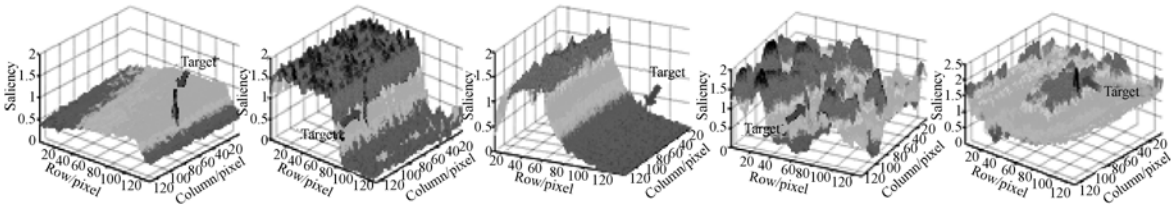
如图 4 所示,图 4(a)中第 1 幅和第 2 幅为空天交接背景中的地面目标,第 3 幅为地空复杂背景中的飞机目标,第 4 幅和第 5 幅为云层背景中

的飞机目标;图 4(b)为红外图像的三维显示图;图 4(c)为图像的显著性图;图 4(d)为 ROI 提取结果;图 4(e)为最终目标检测结果。从表 1 和图 3 中可以看出,这 5 幅图像共包含 5 个弱小目标,它们几乎都被背景杂波所淹没,目标几乎成点状,

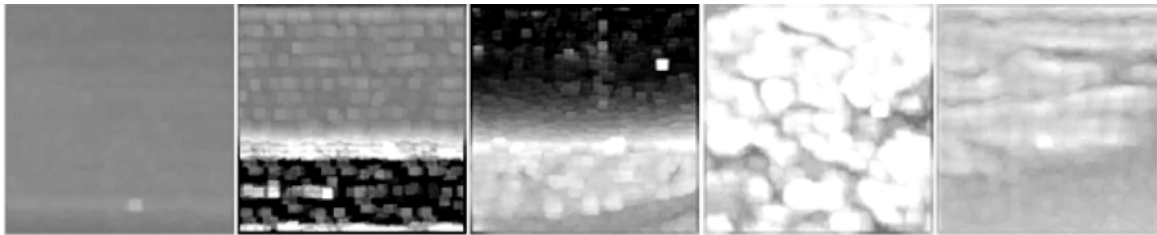
目标信噪比很低,其中第 2 幅的 GSNR 与 LSNR 非常小,第 3、4 幅的 GSNR 非常小,第 5 幅 LSNR 非常小。图 4(e)显示本文方法将目标全部检出,无一漏检。因此,实验表明本文方法能够在低信噪比条件下低虚警率地有效检测红外弱小目标。



(a)原始红外图像  
(a)Original infrared images



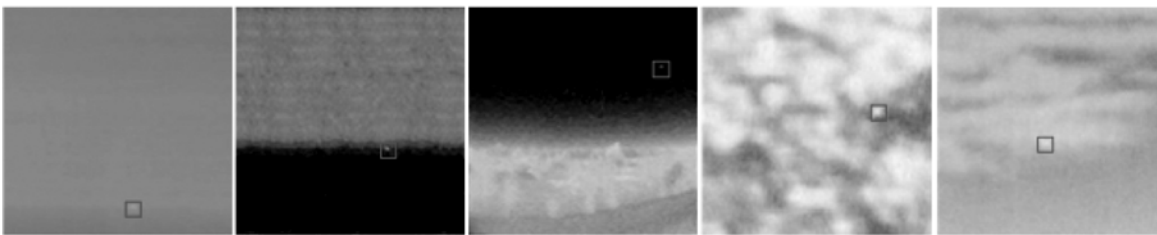
(b)目标图像三维立体图  
(b)Three-dimensional projections for target



(c)图像显著图  
(c)Saliency maps



(d)ROI 检测结果  
(d)Detection results of ROI



(e)目标检测结果  
(e)Target detection results

图 4 目标检测性能实验结果

Fig. 4 Results of target detection experiments for proposed method

表 1 图 4 中目标相关参数

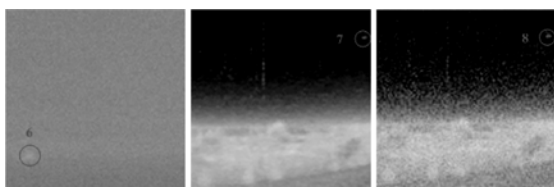
Tab. 1 Related parameters of targets in figure 4

目标序号	1	2	3	4	5
GSNR	3.645 4	0.767 1	0.495 1	0.094 9	2.832 9
LSNR	2.141 3	1.993 2	3.701 1	1.900 2	1.377 6
目标位置	(74,112)	(85,79)	(108,33)	(98,58)	(61,76)
检测耗时/s	2.27	2.28	2.23	2.24	2.23

### 5.2 与其他方法的对比

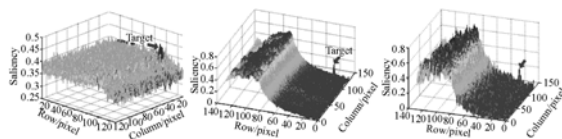
为了进一步衡量算法的有效性,将本文算法与基于局域灰度概率分析(LGPA)的小目标检测方法<sup>[26]</sup>、基于中值滤波(MF)的检测方法和基于 Top-Hat 变换的检测方法进行了对比。如图 5 所示,实验采用分辨率为  $128 \times 128$  的 3 幅红外弱小目标图像,其中第 2 幅来自 OSU 红外图库,第 3 幅由第 2 幅叠加标准差为 0.002 的高斯白噪声生成。最大图像块尺度为 9,自适应阈值中  $r_1$  和  $r_2$  均取 3。表 2 列出了图 5 中 3 幅目标图像的 GSNR、LSNR、峰值信噪比和目标位置坐标。

在图 5 中,图 5(a)中第 1 幅为地面目标,第 2 幅和第 3 幅为地空背景中的空中目标;图 5(b)为目标图像的三维立体图;图 5(c)为 LGPA 检测结果,图 5(d)为 MF 检测结果,图 5(e)为 Top-Hat 检测结果,图 5(f)为本文算法检测结果。由表 2 中目标信噪比可知,由于第 1 幅图像信噪比较高,4 种方法均取得了较好的检测结果;第 2 幅图像 GSNR 较低,LPGA 和 MF 方法均出现了虚警,Top-Hat 和本文方法均无虚警地检测出目标;第 3 幅目标图像信噪比非常低,采用 LPGA、Top-Hat 方法的检测结果中虚警较多,MF 法未能检测出目标,本文方法仍然能够有效地检测出目标。实验结果表明,本文方法在检测性能上优于基于 LPGA、MF 和 Top-Hat 的检测方法。



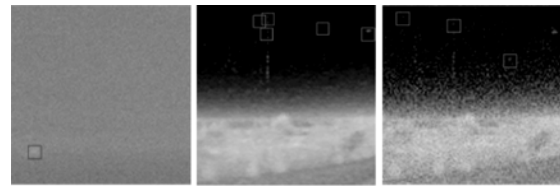
(a)原始红外图像

(a)Original infrared images



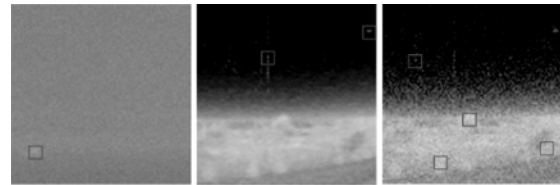
(b)目标图像三维立体图

(b)Three-dimensional projections for target



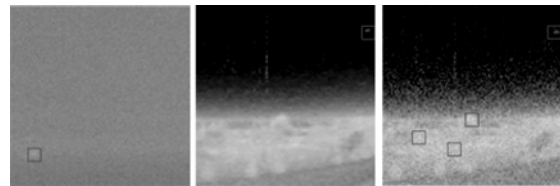
(c)LGPA 检测结果

(c)Detection results using LGPA



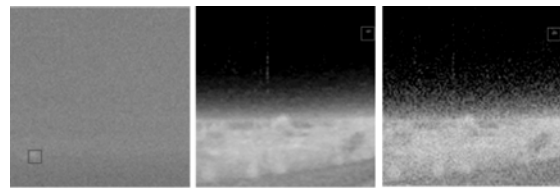
(d)MF 检测结果

(d)Detection results using MF



(e)Top-Hat 检测结果

(e)Detection results using Top-Hat



(f)本文方法检测结果

(f)Detection results using proposed method

图 5 目标检测性能对比实验结果

Fig. 5 Contrast experiments results of target detection

表 2 图 5 中目标相关参数

Tab. 2 Related parameters of targets in figure 5

目标序号	6	7	8
GSNR	3.817 5	0.588 3	0.381 2
LSNR	2.350 2	5.256 8	2.598 5
目标位置	(17,104)	(123,19)	(123,19)

## 6 结 论

本文对红外图像弱小目标特性进行了分析,提出一种基于图像块邻域对比特性的红外弱小目标检测算法。方法利用图像块最大对比特性获得显著图并自适应分割感兴趣区域,利用多尺度图像块邻域最小对比特性实现目标的精确检测。使

用了红外弱小目标图像对检测性能进行了实验,并与其它检测方法进行了对比。实验结果表明:(1)所提出的方法能够在复杂背景和低信噪比条件下有效地检测红外弱小目标,在实验的 8 幅图

片中均有效地检测出红外弱小目标;(2)本文方法目标检测性能优于基于局部概率分析、中值滤波和 Top-Hat 的方法,在对比试验中本文方法的检测率最高,虚警率最低。

#### 参考文献:

- [1] LIU L, HUANG ZH J. Infrared dim target detection technology based on background estimate [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 62: 59-64.
- [2] 崔璇, 辛云宏. 一种有效的红外小目标检测方法[J]. *光子学报*, 2014, 43(2): 02100031-02100035.
- [3] 罗军辉, 姬红兵, 刘靳. 一种基于空间滤波的红外小目标检测算法及其应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2007, 26(3): 209-212.
- [4] 王文龙, 韩保君, 张红萍. 一种海空背景下红外小目标检测新算法[J]. *光子学报*, 2009, 38(3): 725-728.
- [5] 马科, 彭真明, 何艳敏, 等. 改进的非下采样 Contourlet 变换红外弱小目标检测方法[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(11): 2811-2815.
- [6] TOM V, PELI T, LEUNG M, *et al.*. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [C]. *Proc. SPIE.*, 1993, 1954: 2-11.
- [7] BAI X Z, ZHOU F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(6): 2145-2156.
- [8] 薛永宏, 饶鹏, 樊士伟, 等. 基于生成 MRF 和局部统计特性的红外弱小目标检测算法[J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(5): 431-436.
- [9] SUN X D, FANG G ZH. Infrared small targets detection based on MRF model [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 29: 420-424.
- [10] 李一芒, 何昕, 魏仲慧, 等. 采用降维技术的红外目标检测与识别[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1297-1303.
- [11] 胡瞰, 赵佳佳, 曹原, 等. 基于显著性及主成分分析的红外小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(4): 303-306.
- [12] 刘运龙, 薛雨丽, 袁素真, 等. 基于局部均值的红外小目标检测算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 814-822.
- [13] KIM S, LEE J. Scale invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track [J]. *Pattern Recognition*, 2012, 45(1): 393-406.
- [14] XIA M, BIAO W H. Criterion to evaluate the quality of infrared small target images [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 30(1): 1866-6892.
- [15] 李德仁, 胡晓光, 朱欣焰. 基于视觉反差的显著图生成与目标检测[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2012, 37(4): 379-383.
- XUE Y H, RAO P, FAN SH W, *et al.*. Infrared dim small target detection algorithm based on generative Markov random field and local statistic characteristic [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(5): 431-436. (in Chinese)
- LI Y M, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Infrared target detection and recognition using dimension reduction technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1297-1303. (in Chinese)
- HU T, ZHAO J J, CAO Y, *et al.*. Infrared small target detection based on saliency and principle component analysis [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(4): 303-306. (in Chinese)
- LIU Y L, XUE Y L, YUAN S ZH, *et al.*. Infrared small targets detection using local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 814-822. (in Chinese)

- [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4): 379-383. (in Chinese)
- [16] DONG X B, HUANG X SH, ZHENG Y B, *et al.*. Infrared dim and small target detecting and tracking method inspired by Human Visual System [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 62: 100-109.
- [17] 赵宏伟,陈霄,刘萍萍,等. 视觉显著目标的自适应分割[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 531-548. ZHAO H W, CHEN X, LIU P P, *et al.*. Adaptive segmentation for visual salient object [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 531-548. (in Chinese)
- [18] 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*, 2014, 52(1): 574-581.
- [19] BAE T W, KIM B, ZHANG F, *et al.*. Recursive multi-SEs NWTN method for small target detection in infrared images [J]. *IEICE Electronics Express*, 2011, 8(19): 1576-1582.
- [20] FRINTROP S, ROME E, CHRISTENSEN H I. Computational visual attention systems and their cognitive foundations: a survey[J]. *ACM Trans. on Applied Perception*, 2010, 7(1): 1-39.
- [21] FRINTROP S. *Computational Visual Attention* [M]. London: Springer; Computer Analysis of Human Behavior, 2011.
- [22] WANG X, LV G F, XU L ZH. Infrared dim target detection based on visual attention [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55: 513-521.
- [23] SAKAI K, TANAKA S. Spatial pooling in the second order spatial structure of cortical complex cells [J]. *Vision Research*, 2000, 40 (7): 855-871.
- [24] ANTONI B, BARTOMEU C, MOREL M. A non-local algorithm for image denoising [C]. *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR)*, 2005, 2: 60-65.
- [25] SERRE T, WOLF L, BILESCHI S, *et al.*. Robust object recognition with cortex-like mechanisms [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(3): 411-426.
- [26] 许彬,郑链,王克勇,等. 基于局域灰度概率分布的小目标检测方法[J]. *红外与激光*, 2005, 35(3): 187-189. XU B, ZHENG L, WANG K Y, *et al.*. Dim targets detection based on local gray probability analysis [J]. *Infrared & Laser*, 2005, 35(3): 187-189. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 刚(1988—),男,山东日照人,博士研究生,主要从事精确制导技术、图像目标识别及机器学习等方面的研究。  
E-mail: g\_wang@foxmail.com

#### 导师简介:



陈永光(1962—),男,安徽合肥人,教授,博士生导师,研究方向为电子装备试验理论与技术,电子战作战效能分析与评估技术等。

(版权所有 未经许可 不得转载)