

# 周视红外成像搜索系统中的实时目标检测方法

孙 刚, 郭仕剑, 陈曾平

(国防科技大学 自动目标识别重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 在周视红外成像的预警搜索系统中, 大视场下红外图像的背景成分十分复杂; 与此同时, 高分辨成像使得图像数据量也急剧增加。针对周视成像系统中红外图像的特点, 提出了一种基于分块图像加权熵值矩阵的快速目标提取算法: 首先根据大视场下红外图像的空间分布特性, 对原始图像建立子图像块矩阵; 然后提出一种加权熵的特征判别函数, 建立子图像块的加权熵值矩阵; 最后分析了基于加权熵矩阵自适应阈值选取方法, 对背景进行分类并快速提取目标兴趣区。实测数据结果表明: 该算法流程是一种适合大视场条件下的有效目标检测算法, 且具备良好的工程应用性。

**关键词:** 周视成像; 分块红外图像; 加权局部熵; 实时目标检测

**中图分类号:** TP391.4    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2152-07

## Real-time target detection algorithm of infrared imaging alarm system in panoramic field-of-view

Sun Gang, Guo Shijian, Chen Zengping

(Automatic Target Recognition Laboratory, National University of Defense Technology,  
Changsha 410073, China)

**Abstract:** In the panoramic field-of-view (FOV) infrared imaging search system (PIRSS), the infrared image background was especially complicated, along with rapidly increasing of the data quantity. According to the infrared image's characteristics in the PIRSS, a flow of detecting algorithm based on the weighted local entropy (WLE) matrix of image blocks was proposed. Firstly, it established the image blocks matrix for the entire image, which was based on the spatial distributing characteristics of the panoramic image. Then a new characteristic function called weighted local entropy was presented, and calculated the WLE matrix for the image blocks. Finally, an appropriate adaptive threshold method based on the analysis of WLE matrix was adopted, which implemented the region separation of candidate targets from background and obtained the ROI. Experimental results demonstrated that the proposed algorithm was effective and befitting for the infrared target detection in large FOV. It also has good performance for real-time processing and engineering realization.

**Key words:** panoramic imaging; infrared image blocks; weighted local entropy;  
real-time target detection

收稿日期: 2013-11-05; 修订日期: 2013-12-03

基金项目: 国防科技大学博士生跨学科联合培养计划(kxk130405)

作者简介: 孙 刚(1986-), 男, 博士生, 主要从事精确制导及自动目标识别方面的研究。Email: sg1032@163.com

导师简介: 陈曾平(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事雷达信号处理、目标识别等方面的研究。Email: atrchen@163.com

## 0 引言

随着红外成像技术在空间遥感、多目标监视,卫星飞机对地侦察等领域的应用,为满足大范围的搜索视场,远距离探测的需求,红外探测系统正朝着高分辨率、多像元、超大视场成像的方向发展。而大视场复杂背景下的红外目标检测,则是红外预警系统中最关键的技术难题。具体到文中研制的能够全方位 $360^\circ$ 周视红外成像的搜索系统,具有 $360^\circ \times 4^\circ$ 的全景视场,输出图像的分辨率为 $288 \times 50\,000$ ,或更高的 $576 \times 50\,000$ 像素数。由于视场的增大,红外图像的背景成分极其复杂。除了空域范围如云层等的干扰,更棘手的是来自地面建筑物、地杂波等的干扰,导致红外图像目标的对比度较低。由于具备较高的分辨率,单帧红外图像的数据量也急剧增加。这使得传统的基于像素级运算的滤波算法在应对大视场下的红外图像处理时,实时性难以保证。

现阶段,有关于高分辨率、大规模象元的高性能红外探测系统,国外由于军事涉密的原因较少报道,而国内的技术还不够成熟,能应用于大视场下的目标检测算法则是更少。杨磊等<sup>[1]</sup>采用像素数为行列的大视场红外图像,提出一种由粗到精的红外小目标检测算法,但是该算法没有涉及到复杂地面背景下的处理,具有一定的局限。文中针对周视红外图像的特点,基于图像信息熵<sup>[2-6]</sup>的概念,采用一种由粗到精分阶段处理的策略,来研究适用于这种超大视场下的目标检测算法。

## 1 基于长行列探测器的周视成像系统概述

文中所使用的周视红外探测器,是采用国内某研究所研制的长行列长波红外探测器组件<sup>[7]</sup>,通过安装在伺服驱动电机上旋转运动完成红外成像。系统俯仰方向的步进搜索由俯仰控制机构调节主反射镜来完成;方位方向由内部的伺服电机驱动以1周/s的速度匀速旋转,以达到水平方向接近 $360^\circ$ 的搜索范围,产生的探测信号按照行列顺序排布,扫描一圈具有50000列数据,从而实现周视成像,能提供红外预警系统足够大视场的高分辨率、高清晰的全景图像。

周视成像系统获取的全景红外图像单帧不仅像

素数多,数据量巨大,且视场中的背景成分极为复杂。大量的地面建筑、起伏的山体等均进入了探测的视场,且由于太阳光的大面积照射作用,使得这些背景呈现出强辐射特性,局部灰度值甚至高于实际的红外目标,灰度和纹理特征也较差。图1为探测器实际获取的一帧全景图像,由于图像尺寸较大,为便于显示在方位方向即图像的水平方向上分成了4块并进行压缩,每块覆盖约 $90^\circ$ 范围。

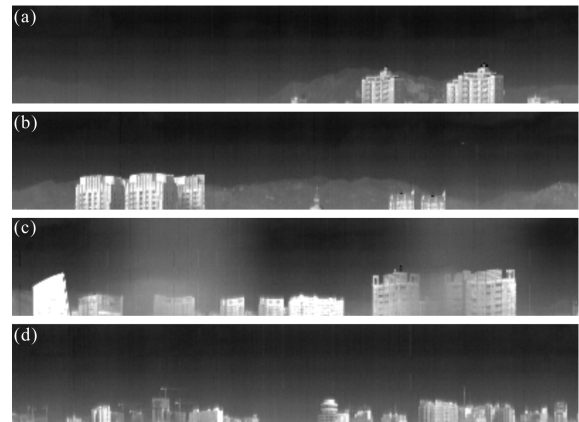


图1 周视成像的单帧全景红外图像

Fig.1 Single frame of panoramic infrared image

图2给出了全景图像的部分灰度分布三维图。可以直观的看到,高灰度部分基本集中在靠近地面的区域,而天空背景区域则相对比较平缓。实际情况是,大部分低空飞行的目标,处于较为平缓的空域背景中,极端条件下可能出现在建筑物附近的临近空域。通过分析得知目标检测算法必须解决两个难题:(一)是周视红外图像中复杂的背景,特别是地杂物等区域背景灰度高于目标的这种对比度反差,使得传统的形态学、空域滤波等基于目标高辐射特性的背景抑制算法作用有限;(二)是大尺寸全景图像的实时处理要求。

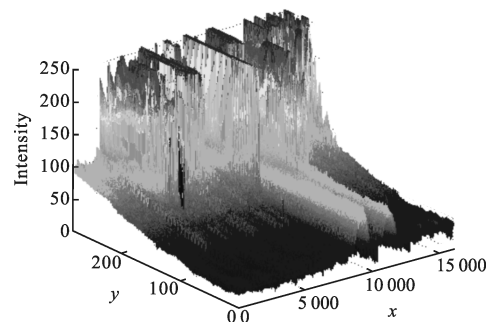


图2 全景红外图像的灰度分布三维图

Fig.2 Three dimensional mesh of panoramic image

## 2 周视成像的红外目标检测算法

文中提出算法流程如图3所示。通过图像分块,在局部范围内研究目标和背景的可分离性,并新提出一种基于分块图像加权局部熵的度量函数,实现不同背景区域的分类;然后根据加权局部熵矩阵的特性,运用自适应阈值选取快速剔除地面背景区域,实现大视场中目标兴趣区提取。

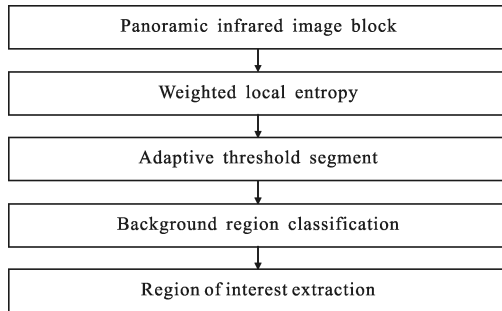


图3 基于分块图像的目标兴趣区提取流程

Fig.3 Image blocks-based target ROI extraction flow

### 2.1 分块图像的局部信息熵描述

全景红外图像的尺寸较大,利用图像分块机制提取感兴趣区域,可最大限度的剔除大面积的背景,从而降低目标检测的虚警概率,节约计算资源。具体过程为:将  $M \times N$  的整幅红外图像  $f(i, j)$  无重叠的等分成大小为  $m \times n$  的图像块矩阵  $c(x, y)$ , 其中  $x$  的取值范围是  $1 \leq x \leq M/m$ ,  $y$  的取值范围是  $1 \leq y \leq N/n$ 。每一图像块的均值和方差计算公式分别为:

$$\mu(x, y) = \frac{\sum_{i=xm}^{(x+1)m} \sum_{j=yn}^{(y+1)n} f(i, j)}{m \times n} \quad (1)$$

$$\sigma^2(x, y) = \frac{\sum_{i=xm}^{(x+1)m} \sum_{j=yn}^{(y+1)n} [f(i, j) - \mu(x, y)]^2}{m \times n} \quad (2)$$

经测试发现,图像块的面积大约是目标的 3~5 倍时,可取得较好的效果。实际测试中,将  $288 \times 50\,000$  大小的全景图像(有效利用的图像  $280 \times 50\,000$ ,剔除图像边框),分成  $7 \times 500$  个面积大小为  $40 \times 100$  的图像块进行分析。对于分块后的图像块矩阵  $c(x, y)$ ,引入 Pun 图像熵的概念<sup>[8]</sup>。假设一幅大小为  $M \times N$  的红外图像,用随机变量  $r_k (k=1, 2, \dots, L)$  表示该灰度图像的  $L$  级灰度级,  $n_k (k=1, 2, \dots, L)$  表示图像中出现的第  $k$  级灰度的像素数目,  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_L$  为图像总像素数。则第  $k$  级灰度的像素在图像中出现的概率为:

$$p(r_k) = \frac{n_k}{n} \quad (3)$$

式中:  $0 \leq p(r_k) \leq 1 (k=1, 2, \dots, L)$  且  $\sum_{k=1}^L p(r_k) = 1$ 。图像信息熵可表示为:

$$H = - \sum_{k=1}^L p(r_k) \log p(r_k) \quad (4)$$

更进一步,如果上式中  $M \times N$  表示图像中的一个局部窗口,则代表了图像的局部熵。图像的信息熵能有效地表达出图像中所包含的平均信息量,反映了图像各个灰度级像素分布的离散程度。根据定义,对于固定窗口,局部熵越大,灰度级的概率分布就相对一致;相反,局部熵越小,则各种灰度级的概率分布差异就越大。因此,图像局部熵一定程度上反映了图像中信息量的丰富程度。由于是所有像素共同作用的结果,局部熵在小窗口范围内更能表征各像素灰度的空间分布差异。

局部熵的以上特性,对于分析包含了各种复杂背景成分的周视红外图像,提供了有力的帮助。可预测,具有复杂灰度级和局部高灰度成分的建筑物背景,必将表现出与较平稳天空背景不一致的局部熵特性。然而,局部熵只取决于窗口中各像素的灰度值的概率分布,针对周视图像存在两方面局限:

(1) 忽视了红外图像中最重要的特征即灰度值本身的作用,和像素本身的空间位置;

(2) 无法体现区域内灰度值的起伏程度,即图像中整体像素与其均值的偏离程度。

而在周视图像中,笔者最关注的是如何尽可能的消除高亮度的地面建筑区域和强起伏的地杂波的影响,降低检测真实目标的虚警概率。

### 2.2 一种新的加权局部熵的提出

为克服局部熵描述周视红外图像背景区域特性的局限,文中对其进行加权改进。一方面,希望局部熵在表达分块图像像素灰度空间分布离散度的同时,也能反映出灰度值本身造成的背景特性差异。对于全景图像来说,就是能有效区分背景的整体亮度水平,实现对高亮度建筑物区域的分离。另一方面,又能反映出图像块内灰度值整体的变化程度,有利于良好的体现地物背景的边缘特性。很自然地,笔者想到了图像块矩阵  $c(x, y)$  的两种统计特性:均值矩阵  $\mu(x, y)$  可直接反映图像块整体灰度水平,而方差矩阵  $\sigma^2(x, y)$  则是体现图像块内灰度变化程度的重要指标。如果把图像块的均值信息和方差信息融合到图像块的局部熵中,对准确分离周视红外图像中的地物背景将大为改善。对公式(4)的局部熵进行加权,

做如下改进:

$$H_{lc} = -[\mu(x, y) + \alpha \sigma^2(x, y)] \sum_{k=1}^L p(r_k) \log p(r_k) \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  作为调节因子, 取决于图像块均值和方差的比例, 必然有  $\alpha > 0$ 。下面笔者将具体论述改进的加权局部熵最大时图像窗口中各个灰度级的概率分布关系。

假设一幅用随机变量  $r_k (k=1, 2, \dots, L)$  表示灰度级的  $L$  级红外图像, 第  $k$  级灰度的像素在图像中出现的概率构成概率矢量  $\mathbf{P} = (p(r_1), p(r_1), \dots, p(r_L))$ , 且满足  $\sum_{k=0}^{L-1} p(r_k) = 1$ 。求解改进局部熵函数  $H_{lc}$  在此条件下的极值, 令  $\lambda$  为一待定常数,  $\lambda > 0$ , 作辅助函数:

$$\phi(P) = H(P) + \lambda(1 - \sum_{k=1}^L p(r_k)) \quad (6)$$

求取辅助函数  $\phi(P)$  关于  $p(r_k), k=1, 2, \dots, L$  的一阶偏导数, 得:

$$\frac{\partial \phi(P)}{\partial p(r_k)} = \frac{\partial \phi(p(r_1), p(r_2), \dots, p(r_L))}{\partial p(r_k)} =$$

$$\frac{\partial \{-[\mu(x, y) + \alpha \sigma^2(x, y)] \sum_{k=1}^L p(r_k) \log p(r_k) + \lambda(1 - \sum_{k=1}^L p(r_k))\}}{\partial p(r_k)} =$$

$$-[\mu(x, y) + \alpha \sigma^2(x, y)](1 + \log p(r_k)) - \lambda$$

令上式等于 0, 可得到:

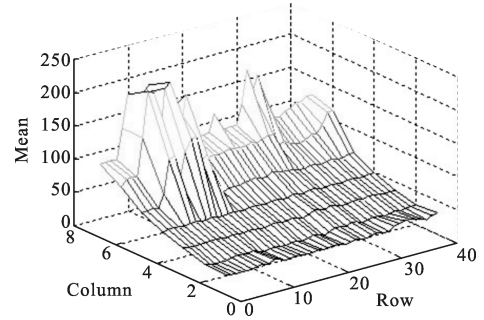
$$\begin{cases} -[\mu(x, y) + \alpha \sigma^2(x, y)](1 + \log p(r_k)) - \lambda = 0 \\ k=1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (7)$$

公式(7)代表了一组由  $L$  个方程组成的方程组, 求解即可得到加权熵函数取得极值时各灰度级的概率分布, 即

$$\begin{cases} p(r_k) = \exp\left(-\frac{\lambda}{\mu(x, y) + \alpha \sigma^2(x, y)} - 1\right) \\ k=1, 2, \dots, L \end{cases} \quad (8)$$

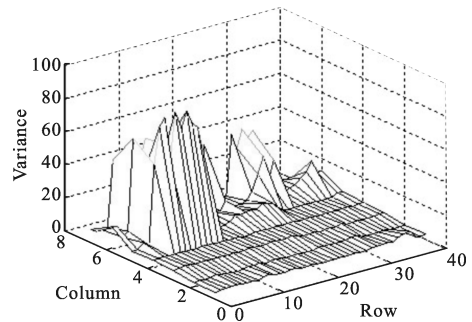
对于固定窗口的图像块来说, 公式(5)所描述的改进局部熵可看作是熵函数的线性加权, 根据熵函数的上凸性可知, 当其极值存在时, 必定为最大值。由此, 公式(8)即为加权局部熵取得极大值时各灰度级的概率分布。分析  $p(r_k)$  的表达式可知,  $\mu(x, y) + \alpha \sigma^2(x, y)$  的整体值越大, 则  $p(r_k)$  越大, 也就是说, 最大的加权局部熵必定出现在图像块具有高灰度均值和高方差的概率最大时。这一结论证实, 笔者通过加权熵来区分具有高亮度成分和强起伏特性的建筑物背景区域是可行的。下面选取前文给出的全景图像中第二段区域进行测试。

图 4 给出了实际录取的全景红外图像分块



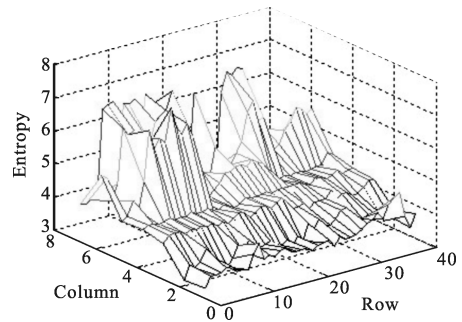
(a) 均值矩阵三维图

(a) Mean matrix distribution



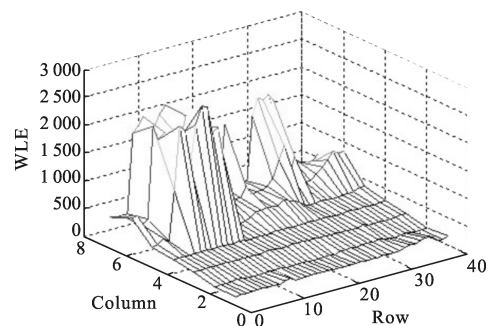
(b) 方差矩阵三维图

(b) Variance matrix distribution



(c) 原始局部熵三维图

(c) Original local entropy distribution



(d) 改进的加权局部熵三维图

(d) Modified WLE distribution

图 4 全景红外图像分块矩阵的特性对比

Fig.4 Image block matrix feature of PIR

后的各种特性对比。从图中可以看出,融合了均值和方差信息的加权局部熵,在分块图像矩阵的分布上,有以下优势:

(1) 有效保持地面高灰度区域的较大熵值;(2) 加剧了起伏区域的图像块的熵值差异;(3) 抑制平缓天空区域的起伏。

需要说明的是,尽管从直观上加权局部熵矩阵所表现出来的整体分布情况与方差矩阵类似,但是二者有着本质的区别。局部熵是从灰度级的概率分布上,描述这种分布的离散性,体现了图像信息的丰富程度;而方差则是从灰度值本身偏离整体均值的程度,来表达这种起伏的剧烈程度。加权局部熵相对于方差,能够更加合理和鲁棒的选择背景分类的阈值。

### 2.3 基于加权局部熵的目标兴趣区提取

基于文中提出的分块图像的加权局部熵,可通过选择合适的判决阈值来区分周视红外图像中的疑似地面建筑区域和天空背景区域,分离出包含目标的兴趣背景区域。

#### (1) 基于加权熵矩阵的自适应阈值选取

考虑到实际的全景图像背景成分的复杂度,图像尺寸也较大,拟采用局部阈值判别法,确保分类的准确率。结合第 2 节对全景图像的特性分析,注意到这样的先验知识:即具有强起伏特性的建筑区域基本是从图像的某一侧开始扩展,且具有几何连通性。

图 5 给出了加权局部熵矩阵的行均值分布特性。图(a)可看出矩阵的行均值基本呈现逐行增加的趋势,且在某一行处有剧烈变化。这一特性在相邻行的比值上,会导致局部的极值出现,即图(b)所示的行均值比最小值处,假设为第  $k$  行。图 5 的实际意义可解释为:对于含有复杂地物背景周视红外图像,分块图像的加权局部熵矩阵呈现出从天空区域地面区域到递增的趋势;在相衔接的区域,呈现出剧烈变化,即对应于建筑物的上边缘区。因此,采取以下的阈值判决:

$$G(x,y)=\begin{cases} 1 & H_e(x,y)>Th(x) \\ 0 & H_e(x,y)\leq Th(x) \end{cases} \quad (9)$$

式中:阈值  $Th(x)=\frac{\mu_{H_e}(x)}{\mu_{H_e}(x+1)}\mu_{H_e}$ ,  $\mu_{H_e}$  为熵值矩阵的整体均值,  $\mu_{H_e}(x)$  为第  $x$  行的均值。对于过门限的图像块,如果行坐标处于第  $k$  行以上,可直接判决为地面

建筑区予以剔除;否则判决为天空背景区。定义集合  $I=\{(z|lx,y)|1\leq x<M/m,1\leq y\leq N/n\}$ ,表示图像块的标记类型。

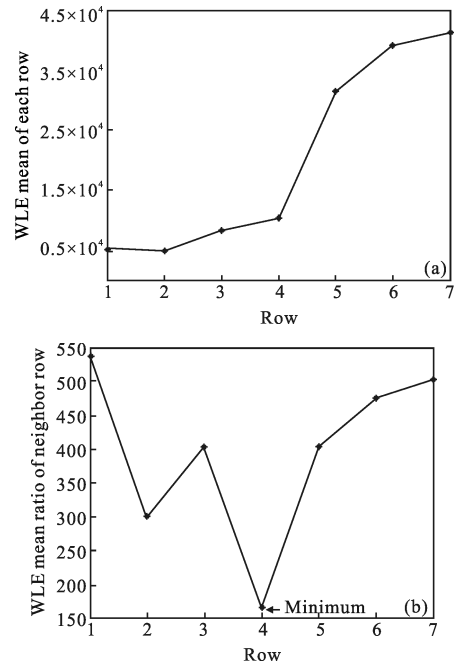


图 5 加权熵矩阵的行均值分布特性

Fig.5 Rows average distribution of WLE matrix

#### (2) 目标兴趣区 ROI 提取

集合  $I$  中标记值为 0 的图像块,代表了可近似认为静止或缓动的空域背景,也是目标极有可能出现的区域。可基于目标的运动特性,采取帧间背景对消的方法分割出运动目标的兴趣区。具体实现过程如下。

Step1:集合  $I$  中标记值为 0 的图像块每帧  $f(i,j,k)$  做均值平滑滤波,得到平滑后的图像  $f'(i,j,k)$ ;

Step2:对于当前第  $k$  帧图像,与其前一帧做平滑后帧间差分并取绝对值得到差分图像  $d(i,j,k)=|f'(i,j,k)-f(i,j,k)|$ ;

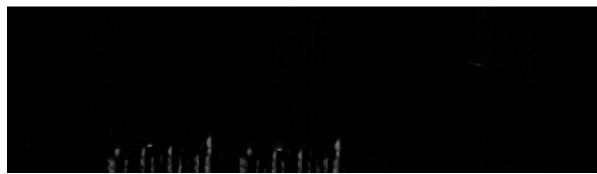
Step3:对差分后的结果图像  $d(i,j,k)$  进行门限分割,灰度值小于  $Th$  的值设为 0,得到的结果与平滑后的图像  $f'(i,j,k)$  对应像素点相乘融合,最终得到运动区域的图像  $g(i,j,k)$  即 ROI 兴趣区。阈值  $Th$  定义为:  $Th=\mu(f)+\alpha\cdot\delta(f)$ ,其中  $\mu(f)$  为图像均值,  $\delta(f)$  为图像方差,  $\alpha$  为调节系数,可根据图像的方差与均值的比值确定。

经过上述目标运动区域的提取,得到大致包含目标的图像 ROI 区域,可只针对这些区域进行目标分割检测,限于文中的篇幅,不再做详细讨论。

### 2.4 实验结果

为验证文中算法的有效性,使用周视成像系统录制的真实数据,进行实验测试。对于图 2 中给出的全景图像,根据文中提出的基于加权局部熵判决法,快速提取周视红外图像中复杂背景下的飞机目标兴趣区。

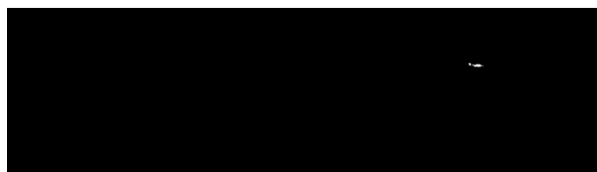
考虑到实际的图像尺寸太大,文中只显示了部分处理结果。图 6(a)是原始图像帧间背景对消的结果,由于实际成像系统的周扫运动存在一定的系统误差,导致帧间差分的结果残留大量的地物边缘;且真实的目标亮度远低于残存的建筑物边缘。通过基于加权局部熵的背景判决分类,如图 6(b)所示,地面杂波区域基本被剔除。最后采用自适应门限的方法进行分割,提取到了周视图像中运动目标感兴趣区域,图 6(c)和 6(d)分别为其处理结果。与图 6 的处理过程相对应,目标区域的局部放大图在图 7 中给出。



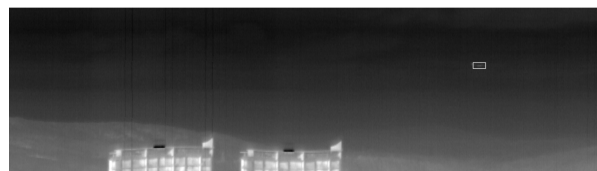
(a) 原始图像帧间差分  
(a) Original image difference



(b) 基于 WLE 的地面背景区域剔除  
(b) WLE-based ground clutter rejection

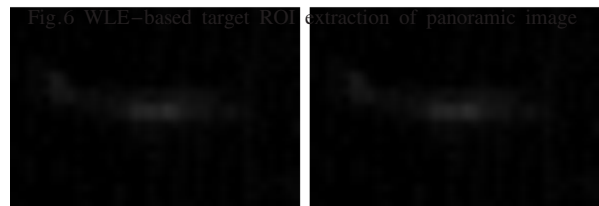


(c) 自适应门限分割  
(c) Adaptive threshold segmentation



(d) 目标兴趣区提取结果  
(d) Extraction result of target ROI

图 6 基于 WLE 的全景图像目标兴趣区提取结果



(a) 帧间差分结果 (b) 地面背景区域剔除的结果  
(a) Inter-frame difference (b) Clutter rejection



(c) 二值化的结果 (d) 原始图像中提取的目标区  
(c) Result of binary (d) Extracted target region

图 7 相应的目标区域局部放大图

Fig.7 Corresponding close-up view of target region

在高性能 DSP 信息处理机上对算法进行验证,处理机采用 TI 公司两片基于 C64+TM 核的定点 DSP 并行互联,工作主频高达 1.2 GHz。在工程实现中,用乘加运算来近似替代对数运算,并采用双 DSP 流水式并行处理。经测试,每个分块图像计算加权熵只需要大约 16000 个时钟周期,整幅全景图像求局部熵矩阵大约总耗时 500~560 ms。在经过地面建筑区域的剔除后,要处理的图像块下降到大约 3×400~4×450 块,运算量下降到原来的 1/3,同时由另一片 DSP 流水式并行提取目标运动区域,最终满足每秒一帧的实时处理需求。

### 3 结 论

测试结果表明,文中的算法流程能有效实现周视成像系统中复杂背景下低对比度的目标检测。总结起来,主要创新是:在使用图像分块技术研究较大尺寸周视图像特性的基础上,提出了一种新的加权局部熵的特征表达函数,并论证其描述含有复杂背景成分大视场图像的有效性;研究一种有效的局部阈值判别法,实现对地面背景区域的准确剔除,最终实现对含有复杂地物干扰环境中的低对比度目标兴趣区提取。

算法实际意义在于,解决了超大视场中低对比度条件下的目标提取,快速剔除复杂的地面强起伏

干扰,满足高分辨、多像元红外探测系统的实时目标检测处理。然而,文中仍存在改进之处:加权局部熵能准确的表述强起伏地面建筑,自然也能表述目标对比度较强的情形,这种情况下需进一步考虑判决的条件;对于目标出现在距建筑物较近的情形,即文中加权熵矩阵行均值比最小值的位置,应当做特殊处理。

#### 参考文献:

- [1] Yang Lei, Yang Jie, Ling Jianguo, et al. Real-time method for detecting multi-small targets in infrared large sight field [J]. *Infrared Millimeter Waves*, 2006, 25(4): 377-381. (in Chinese)  
杨磊, 杨杰, 凌建国, 等. 一种红外大视场下的多目标实时检测方法[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 377-381.
- [2] Wang Guangjun, Tian Jinwen, Liu Jian. Infrared small objects detection based on local entropy method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2000, 29(4): 26-29. (in Chinese)  
王广君, 田金文, 柳健. 基于局部熵的红外图像小目标检测[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(4): 26-29.
- [3] Wu Zepeng, Guo Lingling, Zhu Mingchao, et al. Improved image registration using feature points combined with image entropy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 42(10): 2846-2852. (in Chinese)  
吴泽鹏, 郭玲玲, 朱明超, 等. 结合图像信息熵和特征点的图像配准方法 [J]. 红外与激光工程, 2010, 42 (10):2846-2852.
- [4] Seok Pil Yoon, Taek Lyul, Song Tae Han Kim. Automatic target recognition and tracking in forward-looking infrared image sequences with a complex background [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2013, 11(1):21-32.
- [5] Qiao Liyong, Xu Lixin, Gao Min. Fast maximum entropy thresholding based on two-dimensional histogram oblique segmentation in infrared imaging guidance [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(7): 1691-1699. (in Chinese)  
乔立永, 徐立新, 高敏. 红外成像制导二维斜分最大熵分割的快速实现[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1691-1699.
- [6] Deng He, Liu Jianguo, Cheng Zhong. Infrared small target detection based on modified local entropy and EMD [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 24-28.
- [7] Fan Hongbo. A high performance IRST system based on 1152×6 LWIR detectors[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(1): 20-24. (in Chinese)  
范宏波. 基于 1152×6 长波线列探测器的高性能红外搜索预警系统[J]. 红外技术, 2010, 32(1): 20-24.
- [8] Pun T. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram[J]. *Signal Process*, 1980, (2): 223-237.