

doi: 10.3788/gzxb20134202.0228

基于局部峰值的红外弱小目标快速检测

薛松^{1,2}, 韩广良¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 针对红外图像的小目标检测问题, 提出了一种基于局部尖峰特性的检测方法. 首先分析红外弱小目标的局部灰度特性, 提出了一种红外目标的峰值特性判据; 然后依据目标的峰值特性判据和时域特性, 设计了一种目标检测的快速算法, 算法先基于子块预选出局部极大值点, 把后续运算限于各极大值点处以减少运算量, 再根据极大点值在各方向上的灰度下降判断其尖峰特性; 最后利用帧间的连续性滤去噪音引起的伪目标. 实验表明本文的算法具有很快的处理速度, 且能有效滤去图像中的随机噪音.

关键词: 小目标检测; 红外图像; 局部梯度; 帧间连续性

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0228-6

Infrared Small Target Fast Detection Based on Local Saliency

XUE Song^{1,2}, HAN Guang-liang¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the problem of small target detection in infrared image, a method based on the local saliency is proposed. The feature on the local gray-scale of small targets in infrared image is analyzed, and a criterion is proposed to check the feature of peak value. Based on the criterion to check peak value and the characteristic of small target on time domain, a fast algorithm is designed. Firstly, local max points are selected and the follow-up computing is limited to these points to reduce the computation. Then peak values are checked based on the decline of gray-scale. Finally, false targets caused by noise are removed based on the continuity between frames. Experiments show that this algorithm has a high processing speed, and can effectively filter out the random noise in the image.

Key words: Small target detection; Infrared image; Local gradient; Continuity between frames

0 引言

红外弱小目标的检测在成像制导、红外遥感、红外报警等领域中均有应用. 在实际应用中, 由于目标往往距离成像系统很远, 目标在红外图像上通常呈点状, 大小一般只有几个像素, 无法通过形状、纹理等信息进行检测. 许多专家学者在此方面做了很多研究. 常用的方法是形态学中的顶帽运算^[1-2], 但这种方法对于含有亮线或纹理背景的图片适应性不

好. 另一种方法是利用目标在局部灰度值上呈尖峰状的特点进行检测, 文献[3-4]根据像素值在四个方向上的变化量判断像素点是否属于目标, 运算量小, 但这种运算方向性较强, 无法滤除非水平竖直的亮线. 文献[5]在局部滑窗内用一个固定的小于 1 的系数乘以滑窗内的极大值作为局部阈值, 如果滑窗内大于阈值的像素个数较少, 则认为大于阈值的像素属于目标. 这种方法可靠性较好, 但由于对每个像素都要做比较复杂的处理, 运算量较大.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61172111)资助

第一作者: 薛松(1988—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字图像处理. Email: sxuemail@foxmail.com

导师: 韩广良(1968—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为机器视觉及视频目标识别跟踪. Email: hangl@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2012-08-15; 录用日期: 2012-11-08

本文提出一种基于局部峰值的目标检测方法. 首先将图像分为小子块, 剔除非局部极大值的像素以减少运算量, 然后对于每个极大值点, 根据其是否具有尖峰特性以判断其是否为目标. 最后在序列图像上利用帧间的相关性滤除噪点造成的伪目标.

1 目标的灰度和时域特性分析

由于目标较小, 而且经常较弱, 仅从空间和灰度特性上难以将其与噪音区分开, 故需要结合空间域和时域的特性联合分析才能找到真正的目标.

1.1 目标的局部峰值特性判据

空间域上, 红外目标在局部通常表现为一个亮点, 其亮点在局部呈现为峰值, 但在全局不一定为最大. 所以, 空间域上, 利用此特性, 可以找到一种判据以区分目标和背景.

含有目标的红外图像可以表示为^[5]

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

式中 $F(x, y)$ 为图像在 (x, y) 处的灰度值, $f_b(x, y)$ 为背景分量, $f_t(x, y)$ 为目标分量, $n(x, y)$ 为噪音.

对于局部亮点状的目标, 它在局部的灰度值应该呈尖峰状特性, 大致为二维高斯分布, 即目标分量 $f_t(x, y)$ 可以近似描述为

$$f_t(x, y) = \begin{cases} I_i \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x-x_{oi})^2}{\delta_{1i}^2} + \frac{(y-y_{oi})^2}{\delta_{2i}^2} \right] \right\}, & (x, y) \in \Omega_i \\ 0, & (x, y) \notin \Omega_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, Ω_i 为第 i 个目标区域, n 为目标区域数, I_i 为第 i 个目标的强度.

对于小目标, 其尺寸较小的特性可以表达为

任意 $\Delta x^2 + \Delta y^2 = \omega^2$, 满足

$$(x_{oi} + \Delta x, y_{oi} + \Delta y) \notin \Omega_i$$

式中 ω 为一个比目标尺寸稍大的值, 结合式(2)有

$$\begin{aligned} F(x_{oi}, y_{oi}) - F(x_{oi} + \Delta x, y_{oi} + \Delta y) = & f_t(x_{oi}, y_{oi}) + [f_b(x_{oi}, y_{oi}) - f_b(x_{oi} + \\ & \Delta x, y_{oi} + \Delta y)] + [n(x_{oi}, y_{oi}) - n(x_{oi} + \\ & \Delta x, y_{oi} + \Delta y)], \Delta x^2 + \Delta y^2 = \omega^2 \end{aligned} \quad (3)$$

当背景变化比较平缓, 噪音强度远小于目标强度时, 式(3)右侧后两项可忽略, 即

$$\begin{aligned} F(x_{oi}, y_{oi}) - F(x_{oi} + \Delta x, y_{oi} + \Delta y) = & f_t(x_{oi}, y_{oi}) = I_i \end{aligned} \quad (4)$$

注意要满足式(4), 要求噪音的强度小于目标. 实际应用中若存在椒盐噪音, 需要做一些特殊处理才能应用上式, 具体做法在后面叙述.

目标应具有一定的强度, 即 $I_i > T$, T 为一固定

阈值. 实际判别峰值时, 为了加快运算速度, 可以近似用棋盘距离代替欧氏距离, 即取

$$\max(|\Delta x|, |\Delta y|) = \omega$$

故取峰值特性的判别式为

$$F(x_{oi}, y_{oi}) - F(x_{oi} + \Delta x, y_{oi} + \Delta y) > T \quad (\max(|\Delta x|, |\Delta y|) = \omega) \quad (5)$$

图1为以极大值为中心的 11×11 像素窗口中的局部图像. (a)为目标, (b)为背景中的平坦区域, (c)为背景中的边缘, (d)为背景中的亮线. 可以看出, 取 $\omega = 6$ 时, 只有(a)满足式(5).

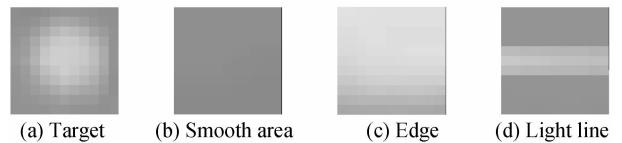


图1 图像中不同区域的特性

Fig. 1 Features of different areas in the image

故以式(5)作为目标峰值判据, 即可将目标与背景中的平坦区域、边缘和亮线区分开, 得到初步的目标位置. 但是由于式(5)忽略了噪音的影响, 故可能会将椒盐噪音造成的较强的局部峰值误判为目标, 这一误判将在时域中滤除.

1.2 基于帧间连续性的时域判据

由于图像中存在噪音, 椒盐噪音造成的孤立亮点可能被误判为目标点, 也可能使真正的目标成为非局部极大值, 导致目标的漏检. 处理椒盐噪音的一种方法是对图像做预处理, 中值滤波是一种常用的方法, 但在弱小目标的检测中, 目标的亮点本身尺寸较小, 可能会在预处理时被一同滤除或被减弱. 实际上, 在单帧中经常有和小目标特性非常类似的噪音造成的峰值, 只有在时域上才能将其滤除.

时域上, 椒盐噪音与真正的目标点的主要区别在于: 椒盐噪音是随机出现的, 不稳定的, 而真正的目标是稳定的, 如果目标在两帧间的移动距离足够小(应用中通常满足这一条件), 则只要目标在一帧中出现, 它就有很大的概率在下一帧中的附近位置出现.

设集合 A_k 为第 k 帧中检测出的目标的坐标集合,

$$(x_{k,i}, y_{k,i}) \in A_k$$

$$B_{k,i} = \{(x, y) \mid \max(|x_{k,i} - x|, |y_{k,i} - y|) < T_m\}$$

式中 T_m 为目标在两帧间移动的最大距离. 记

$$C_{k,i} = A_k \cap B_{k-1,i}$$

若 $(x_{k,i}, y_{k,i})$ 为真目标, 则有很大的概率满足 $C_{k,i} \neq \varnothing$, 否则 $C_{k,i} \neq \varnothing$ 的概率很小.

故将连续满足 $C_{k,i} \neq \varnothing$ 的帧数作为判据即可区分真目标和椒盐噪音造成的伪目标.

2 基于子块预选的快速峰值检测算法

若直接根据式(5),对每个像素点判断其峰值特性,计算量比较大.故本文提出一种基于子块预选的快速峰值检测算法,通过对极大值位置的预选,减少后续的运算量.其具体实现可分为极大值预选和峰值判断两步.

2.1 极大值预选

算法首先将图像分成小子块,并预选极大值,具体步骤如下:记图像大小为 m 列 n 行,左上角的坐标为 $(0,0)$. x 轴正方向向右, y 轴正方向向下.

STEP1 数据结构初始化:把图像分成 $w \times w$ 像素的子块, w 略大于目标的大小.如图2,在图像的四条边上,留出大于 w 像素的空隙.即,设子块的行数为 n_b ,列数为 m_b ,则 $n_b = \text{floor}(n/w) - 2$, $m_b = \text{floor}(m/w) - 2$ ($\text{floor}(x)$ 表示小于 x 的最大整数).初始化一个 n_b 行 m_b 列的子块数组,对于每个元素,包含4个数据:块内最大值 I_{\max} ,块内最大值的 x 坐标 x_b , y 坐标 y_b ,峰值特性标记 h_b ,将所有元素的 h_b 置为1.

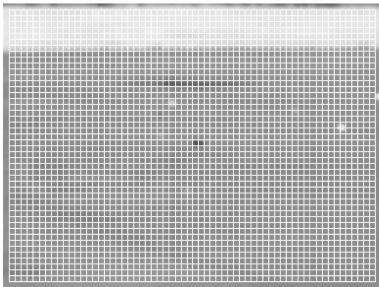


图2 图像的子块分割

Fig. 2 Sub-blocks of the image

STEP2 极大值初选:求出每个子块中最大像素的值和最大像素在原图像中的坐标,分别保存在对应子块数组元素的 I_{\max} , x_b , y_b 中.

STEP3 非极大值抑制:遍历所有子块,对于每个子块,对它的左,左上,上,右上方的子块做如下检查:记当前子块的数据为 I_{\max_1} , x_{b_1} , y_{b_1} , h_{b_1} ,被检查的子块的元素为 I_{\max_2} , x_{b_2} , y_{b_2} , h_{b_2} ,如果 $|x_{b_1} - x_{b_2}| < w$ 且 $|y_{b_1} - y_{b_2}| < w$,则再比较 I_{\max_1} 和 I_{\max_2} ,如果 $I_{\max_1} > I_{\max_2}$,则把 h_{b_2} 置为0,否则把 h_{b_1} 置为0.这一步中需要注意的是,对于左侧的子块, $|y_{b_1} - y_{b_2}| < w$ 必然成立,可以不做检查以减少运算量,同样的,对于上方的子块,可以不检查 $|x_{b_1} - x_{b_2}| < w$ 是否成立.

经过上述步骤,局部极大值被初选了出来,对应的子块元素中的 h_b 值为1.后续的判断只需要在这些初选出的点处进行,大大减小了后续运算量.

2.2 峰值特性判断

完成极大值预选后,既可根据(5)式的判据判断峰值特性.但为了防止椒盐噪点被误判为目标,具体实现时,在目标宽度大于1像素的情况下,本文采用在局部极大值的八邻域中取值的方法对孤立的噪点进行抑制.

具体算法如下:根据实际应用中目标的最小强度设置固定阈值 T .

遍历子块数组中的所有元素,对于每一个元素,做如下操作.

STEP1 求出坐标 (x_b, y_b) 的八邻域中第3大的像素值,记为 I_3 .

这一步是为了抗椒盐噪音.因为对于宽度大于等于2像素的目标,目标极大值处的邻域像素也应有较大的值,而孤立的噪点则不然.如果实际应用的图像中椒盐噪音很弱,可以用 I_{\max} 代替 I_3 以减少计算量.如果应用中要求捕获宽度为单像素的目标,则必须用 I_{\max} 代替 I_3 .噪音只能依靠下节所述的时域方法滤除.

之所以取第3大的像素值而非其它,是为了防止滤去2像素宽度的目标.对于一个 2×2 像素的目标,其极大值像素的八邻域中仅有3个像素属于目标.

STEP2 求出 $s_{\max} = I_3 - T$.如果 $s_{\max} < 0$,置 h_b 为0,结束.

STEP3 在原图像中,依次检查所有坐标 (x, y) 满足 $\max(|x_b - x|, |y_b - y|) = w - 1$ 的像素的值 $I(x, y)$.即在以 (x_b, y_b) 为中心,边长为 $2w - 1$ 的窗口的四条边上搜索.

如果发现其中任意一个像素值满足 $I(x, y) > s_{\max}$,则把 h_b 置为0,结束.

经过上述步骤,子块数组中每一个 h_b 值为1的元素对应一个局部尖峰,尖峰的位置即为该子块元素中 x_b 和 y_b 的值.即 (x_b, y_b) 处有一个疑似目标.

3 基于时域连续性的伪目标过滤算法

为了跟踪目标并判断其为真目标还是随机出现的噪点,下面建立一个记录目标信息的数据结构 Tracker.其中包含上一帧目标的位置 (x_1, y_1) ,一个跟踪帧数计数器 c_t 和一个丢失帧数计数器 c_l .

算法具体步骤如下.记目标在两帧间的最大移动距离为 T_m 像素

STEP1 建立一个 Tracker 列表,置其为空.

STEP2 读取图像的下一帧,完成前两节中所述的步骤.

STEP3 遍历 Tracker 中的每个元素,求出其坐标 (x_1, y_1) 对应的子块的位置,根据 T_m 的值,在该子

块和其临近子块中搜索,如果有一个子块满足 $h_b = 1$ 且 $|x_b - x_1| < \omega$ 且 $|y_b - y_1| < \omega$, 则置 (x_1, y_1) 为 (x_b, y_b) , 置该子块的 h_b 为 0. 将 c_t 加 1, c_l 置 0. 如果 c_t 大于一个定值 C_{tmax} , 则置 c_t 为 C_{tmax} ; 如果没有, 则将 c_t 减 1, c_l 加 1. 如果 c_l 大于一个定值 C_{lmax} , 则删除该元素.

STEP4 遍历子块数组, 对于每个元素, 如果 h_b 值为 1, 则在 Tracker 列表中添加一个元素, 并把 (x_1, y_1) 置为 (x_b, y_b) , c_t 置为 1, c_l 置为 0. 返回 STEP2.

在实时图像序列处理时, 上述步骤维护了一个实时的 Tracker 列表, 对于列表中的每个元素, 如果 c_t 大于一个阈值, 则可认为它是真目标.

4 算法运算量分析

局部极大值点分离过程中, 子块数量为 $b = \text{floor}((m-2\omega)/\omega) \times \text{floor}((n-2\omega)/\omega)$, 当 $m \gg \omega$ 且 $n \gg \omega$ 时, 可认为子块数量约为 mn/ω^2 .

算法的主要运算量在于比较运算, 局部极大值分离中, STEP2 对每个子块需要 ω^2 次, 共需要 mn 次, STEP3 需要 $10mn/\omega^2$ 次, 局部尖峰特性判断中, STEP1 使用选择排序, 只需选出最大的 3 个值, 需要 $(7+6+5)mn/\omega^2 = 18mn/\omega^2$ 次. STEP2 需要 mn/ω^2 次, STEP3 最多需要 $8(\omega-1)mn/\omega^2$ 次, 实际上在一个子块只要发现一次 $I(x, y) > s_{max}$, 对该子块的后续比较运算就不需要了. 时域处理中, 由于目标和伪目标的数量一般很少, STEP3 中比较运算的计算量可以忽略. 将各步骤中的次数相加, 总共的比较运算次数约为 $[(8\omega+21)/\omega^2+1]mn$ 次.

减法和绝对值运算仅存在于第一节 STEP3 中, 共需要 $6mn/\omega^2$ 次减法和绝对值运算.

算法的其它耗时在数据的读取和存储上, 这里只做粗略分析. 局部极大值点分离过程中, STEP1 需要遍历 1 次子块, STEP2 需要遍历 1 次图像, 遍历 1 次子块, STEP3 遍历 1 次子块, 对于每个子块的运算中, 又需要读取另 4 个子块. 所以认为遍历了 5 次子块. 局部尖峰特性判断中, STEP1 遍历了 1 次子块, 读取了 $8mn/\omega^2$ 个像素, 可以认为大致相当于 $8/\omega^2$ 次图像遍历, STEP2 和 STEP3 不需额外遍历子块. STEP3 读取了 $8(\omega-1)mn/\omega^2$ 个像素值, 大致相当于 $8(\omega-1)/\omega^2$ 次图像遍历. 时域处理中, STEP4 遍历了 1 次子块. 综上, 读取和存储的耗时大致相当于 $1+8/\omega$ 次图像遍历和 7 次子块遍历. 而子块的数量一般要远小于像素数.

综上, 算法总的计算量大致为 $[(8\omega+21)/\omega^2+1]mn$ 次比较, $6mn/\omega^2$ 次减法和绝对值, $1+8/\omega$ 次

图像遍历和 7 次子块遍历. 当 $\omega=6$ 时, 大致为 2.9mn 次比较, 0.17mn 次减法和绝对值, 2.3 次图像遍历和 7 次子块遍历. 运算量很小.

5 实验结果和分析

本节中使用模拟真实空对地观测的小目标测试图像. 图像大小为 384×288 . 首先测试单帧图像的检测效果. 取子块尺寸 $\omega=6$, 目标强度阈值 $T=15$. 如图 3(a) 为原始图像, 可以看见图像上有若干个强弱不同的小目标, 一个较大的亮物体和一个亮区域. 其中较弱的小目标亮度甚至小于亮区域, 但在局部存在峰值特性. (b) 为标出的目标. 可以看到目标被正确地标出. (c) 为把原始图像用 6×6 矩形核做顶帽运算后, 经灰度拉伸后的图像. 可以看到目标被加强, 但同时图像上侧含有纹理的部分也被加强, 且其中有些部分的强度甚至大于较弱的目标. (d) 为文献 [4] 所述的梯度方法在步长 6 像素, 阈值 20 时的结果, 可以看到右上角亮块处有三处虚警, 这些虚警主要是由于算法具有方向性, 无法滤除非水平或竖直的亮线.

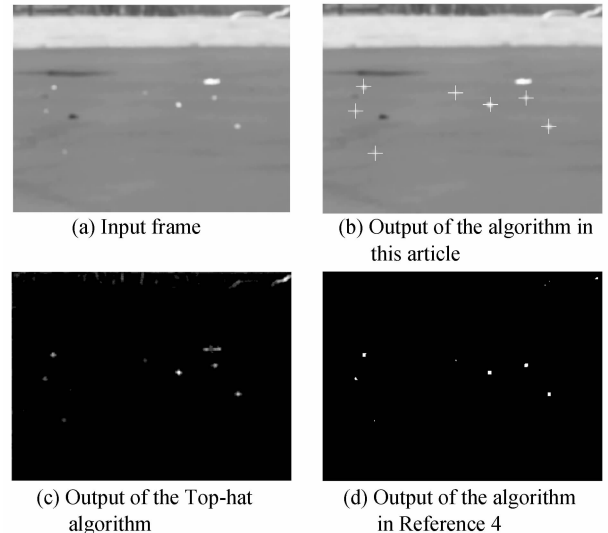


图 3 单帧目标检测结果

Fig. 3 Result of target detection on single frame

然后测试图像序列上的目标跟踪. 使用的是模拟真实环境中空对地观测的红外视频. 单帧图像上参量取值同上. T_m 取 15. 连续跟踪帧数 c_t 大于等于 5 时确认为目标. 如图 4, (a) 为第 4 帧图像的 Tracker 列表情况. 其中圆表示已经连续跟踪了若干帧, Tracker 的 c_t 值越大, 圆越大. 矩形表示已经连续丢失了若干帧, Tracker 的 c_l 值越大, 矩形越大. 可以看到由于噪音影响, 其中一个很弱的目标在此时丢失了一帧. (b) 为稳定跟踪时的结果, 打叉的地方表示确定为目标, 可以看到目标已被正确地标出.

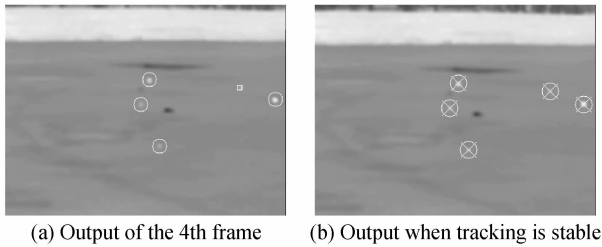


图4 时域过滤结果

Fig. 4 Result of filter on time domain

在 CPU 为 Intel i3-2102, 内存 2Gb 的 PC 机上, 使用单线程处理. 使用 VC2010 编译 C++ 程序, 测试视频尺寸为 384×288 , 共 536 帧. 测试不同子块尺寸下图像处理所需的时间. 除子块尺寸之外, 其它参量取值和上述视频处理实验相同. 表 1 为测试结果, 表中的时间不计视频解码和图像显示的耗时.

表 1 算法处理时间

Table 1 Time consumption of the algorithm

Block size/pixel	Average time for processing/(ms · frame ⁻¹)
2	1.14
4	0.46
6	0.39
8	0.22
10	0.19
15	0.14

在同样的平台下使用 6×6 的矩形核对相同的视频做 Top-Hat 操作. 程序使用 OpenCV2.3.1 中的形态学函数, 平均每帧的处理时间为 0.97ms, 是本文算法使用 6×6 子块时的 2.5 倍. 需要指出的是, OpenCV 针对 Intel CPU 做了深度的代码优化, 有很大的速度提升, 而本文算法在实验中未针对特定平台优化. 而且经过 Top-Hat 操作的图像还要再经过处理才能得到目标的坐标, 还需要更多的时间.

可以看到本文的算法具有相当快的处理速度. 可以满足对实时性要求较高的应用.

6 结论

本文提出了一种基于局部尖峰特征的红外图像弱小目标检测方法. 首先提取图像中的局部极大点, 再利用每个极大点在各方向上的梯度判断其是否具有尖峰特性以判定其是否为目标. 最后利用帧间相关性滤去噪音造成的伪目标. 实验验证了本文算法的可行性. 相对于传统算法, 本文的算法的运算量很小, 能够满足实时性要求很高的应用, 且能够通过时域方法有效地滤去椒盐噪音造成的伪目标.

不足之处在于, 本文的算法需要人为选定目标强度阈值. 后续需要研究自适应的阈值选取方法.

参考文献

- [1] ZHOU Hong-wu, ZHU Zhao-da, WU Yi-quan, *et al.* Optimized design of improved TOP-HAT filter based on genetic algorithms of neural network[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2007, **39**(2): 213-217.
周洪武, 朱兆达, 吴一全, 等. 基于 TOP-HAT 滤波器算子的红外弱小目标检测算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, **39**(2): 213-217.
- [2] ZENG Ming, LI Jian-xun. The small target detection in infrared image based on adaptive morphological Top-Hat filter [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, **40**(1): 90-97.
曾明, 李建勋. 基于自适应形态学 Top-Hat 滤波器的红外弱小目标检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, **40**(1): 90-97.
- [3] ZHANG Qiang, CAI Jing-ju, ZHANG Qi-heng, *et al.* Dim infrared targets segmentation method based on local maximum [J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(1): 41-44.
张强, 蔡敬菊, 张启衡, 等. 基于局部极大值的红外弱小目标分割方法[J]. 红外技术, 2011, **33**(1): 41-44.
- [4] WAN Ming, ZHANG Feng-ming, LEI Hong-li, *et al.* A novel detection method of infrared dim and small target based on cross window[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(5): 764-768.
万明, 张凤鸣, 雷洪利, 等. 一种利用十字窗口识别红外弱小目标的新方法[J]. 光子学报, 2011, **40**(5): 764-768.
- [5] LIAN Ke, YAN Ming, LI Dan, *et al.* A novel infrared small and dim target detection method based on feature analysis of local grey level [J]. *Telecommunication Engineering*, 2001, **51**(1): 49-52.
连可, 严明, 李丹, 等. 利用局部灰度特征分析实现红外弱小目标检测[J]. 电讯技术, 2001, **51**(1): 49-52.
- [6] ZHOU Run-zhi, MA Liang-li, WANG Jiang-an, *et al.* New method for detecting and tracking small moving target based on target frame-correlation [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2010, **22**(1): 78-82.
周润芝, 马良荔, 王江安, 等. 一种基于帧间相关的红外弱小目标运动轨迹检测方法[J]. 海军工程大学学报, 2010, **22**(1): 78-82.
- [7] LIAN Ke, WANG Houjun, LI Dan. Pipeline filtering method based on feature analysis of local grey level of small infrared target [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, **31**(4): 200-206.
连可, 王厚军, 李丹. 基于红外目标局部灰度特性分析的管道滤波方法[J]. 弹箭与制导学报, 2011, **31**(4): 200-206.
- [8] HUANG He-wen, JIN Tao. Dim small targets detection with noise suppression utilizing adjacent relevant pixels information [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 596-601.
黄鹤汶, 金韬. 利用相邻相关像素进行噪音抑制的模糊弱小目标检测算法[J]. 光子学报, 2012, **41**(5): 596-601.
- [9] GUO Zhang-ting, XIN Yun-hong. Small IR target detection algorithm based on classified background prediction and image blocking [J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(5): 572-578.
郭张婷, 辛云宏. 红外小目标的分类背景预测与图像分块技术[J]. 激光与红外, 2012, **42**(5): 572-578.
- [10] YILMAZ A, SHAFIQUE K, SHAH M. Target tracking in airborne forward looking infrared imagery [J]. *Optical Engineering*, 2003, **42**(8): 2182-2189.
- [11] XIA Ren-bo, ZHAO Jin-bin, HUI Bin, *et al.* A simple and efficient saliency extraction method based on multi-scale horizon-directional filter for infrared dim small target detection [C]. *SPIE*, 2011, **8004**: 80041D-1.

- [12] MA Wen-wei, ZHAO Yong-qiang, ZHANG Guo-hua, *et al.* Infrared dim target detection based on multi-structural element morphological filter combined with adaptive threshold segmentation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1020-1024.
马文伟, 赵永强, 张国华, 等. 基于多结构元素形态滤波与自适应阈值分割相结合的红外弱小目标检测[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1020-1024.
- [13] LIU Guang, ZHANG Qian-qian, HUANG Tao. Detecting for the aerial small target in infrared image based on the correlation coefficients of nonsubsampling contourlet transform[C]. Zhengzhou, China: Proceeding of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2012: 363-367.
- [14] ZHANG Ying, WANG Min, NIU Shao-qiang. A novel small dim infrared target detecting method based on grayscale merging and connected components analysis[C]. Wuhan, China: Proceeding of International Conference on Modelling, Identification and Control, 2012: 454-459.

• 下期预告 •

不同收光方式下煤粉流的等离子体信号探测

陈世和¹, 陆继东², 钟子铭², 潘凤萍¹, 潘刚², 张曦¹, 姚顺春², 罗嘉¹, 李军¹

(1 广东电网公司电力科学研究院, 广州 510000)

(2 华南理工大学 电力学院, 广州 510640)

摘要:针对煤粉流组分分布的不均匀性, 研究不同收光方式对煤粉流的激光诱导等离子体的光谱信号收集效果的影响. 选用电厂常用燃煤神木混为实验对象, 利用自行搭建的气固两相流实验台架产生稳定煤粉流, 对比同向收光方式和侧向收光方式下煤的特征谱线信号探测的强度和稳定性. 研究表明, 相同实验条件下, 中间穿孔反射镜使同向收光方式下探测的光谱信号强度较弱, 而等离子体信号源位置沿激光束轴线的变化、等离子体信号本身沿空间分布的不均匀性及煤粉流的阻挡作用使侧向收光方式下探测的光谱信号稳定性较弱.

关键词:光谱学; 激光诱导击穿光谱; 收光方式; 煤粉流