

一种基于 PGF、BEMD 和局部逆熵的 新型红外小目标检测方法

解 婷, 陈 忠, 马荣毅
(华中科技大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:对比红外小目标检测方法和其它目标检测方法,由于低信噪比、低对比度、小尺寸、缺乏目标的形状和纹理信息等多种因素,尤其是在复杂背景条件下,红外小目标的检测会更加困难。在实践中,一种基于同组过滤器(Peer Group Filter, PGF),二维经验模式分解(Bidimensional Empirical Mode Decomposition, BEMD)和局部逆熵(Local Inverse Entropy, LIE)的新型红外小目标检测方法被提出来,以解决前面所提到的问题。其中 PGF 被用来消除噪声和改善初始图像的信噪比;BEMD 算法可以有效地估计背景并将背景从原始图像中移除;而 LIE 的主要作用是分解本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)。实验结果表明,新的方法可以有效且准确地提取小目标。

关键词:红外小目标;目标检测;局部逆熵;BEMD

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

A novel method for infrared small target detection based on PGF, BEMD and LIE

XIE Ting, CHEN Zhong, MA Rong-Yi
(School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Compared with other targets, it is more difficult to detect infrared small targets due to several aspects such as the low signal to noise ratio, low contrast, small size, the lack of shape and texture information of the targets, especially under complex background. A novel infrared small target detection method based on peer group filter (PGF), bi-dimensional empirical mode decomposition (BEMD) and local inverse entropy (LIE) was proposed to overcome these difficulties. The PGF is implemented to remove noise and improve signal-to-noise ratio of the initial image. The proposed BEMD algorithm is able to estimate background effectively, which gets target image by removing background from original image and segmenting the Intrinsic Mode Functions (IMFs) by local inverse entropy. Experimental results demonstrated that the novel method can extract the small targets validly and accurately.

Key words: Infrared small target, local inverse entropy, target detection, BEMD

PACS: 07.57.Kp

引言

红外小目标识别技术在军事领域和民用领域均有非常广泛的应用。然而,由于低像素,目标和背景之间相对的低对比度,模糊的目标边缘,缺少目标的纹理信息等因素,导致很难有效地区分红外小目标

和其所处的背景。在现有的检测和跟踪系统中丢失红外小目标或者跟踪错误是常见的,这极大地限制了红外小目标检测和跟踪技术发展,也使得相关的跟踪距离和光学跟踪系统的发展也受到影响^[1]。

目前国内外在红外小目标的检测、识别和跟踪等方面进行了很多研究,提出了数学形态学、小波变

换、二维熵、阈值分割、高阶相关、动态编程、粒子滤波等方法.通常这些方法可以分为两类:一类是基于图像滤波,另一类是基于机器学习.第一类方法使用滤波算法来估计背景和前景目标,前景目标可以通过从初始图像中减去背景图像得到,其主要算法有 max-mean 滤波器^[2],形态学 top-hat 滤波器^[3]和高通滤波器^[4].虽然这些算法在基于简单的非线性灰度计算时可以有效地保留结构化背景的边缘,但在低信噪比条件下正确率不高^[5-6].另一类方法是基于模式识别和分类算法,这些方法的基础是特征选择和机器学习,例如目标显著性指标,非线性 PCA,概率 PCA^[7]和费什尔线性判别^[8],而这些方法都需要复杂的训练和计算过程.

红外小目标识别技术在军事领域和民用领域均有非常广泛的应用.然而,由于低像素,目标和背景之间相对的低对比度,模糊的目标边缘,缺少目标的纹理信息等因素,导致很难有效地区分红外小目标和其所处的背景.在现有的检测和跟踪系统中丢失红外小目标或者跟踪错误是常见的,这极大地限制了红外小目标检测和跟踪技术发展,也使得相关的跟踪距离和光学跟踪系统的发展也受到限制^[1].

目前国内外在红外小目标的检测、识别和跟踪等方面进行了很多研究,提出了数学形态学、小波变换、二维熵、阈值分割、高阶相关、动态编程、粒子滤波等方法.通常这些方法可以分为两类:一类是基于图像滤波,另一类是基于机器学习.第一类方法使用滤波算法来估计背景和前景目标,前景目标可以通过从初始图像中减去背景图像得到,其主要算法有 max-mean 滤波器^[2],形态学 top-hat 滤波器^[3]和高通滤波器^[4].虽然这些算法在基于简单的非线性灰度计算时可以有效地保留结构化背景的边缘,但在低信噪比条件下正确率不高^[5,6].另一类方法是基于模式识别和分类算法,这些方法的基础是特征选择和机器学习,例如目标显著性指标,非线性 PCA,概率 PCA^[7]和费什尔线性判别^[8],而这些方法都需要复杂的训练和计算过程.

本文中已经介绍了一些算法,但是这些算在不同的应用领域存在一些局限性,例如较高的错误率,算法较为复杂以及应用场景较为狭窄^[9-10].

EMD 算法在 1998 年首次被提出^[11],该算法可以通过分解与信号自身的本征时域相关的局部能量来提取本征模态函数(IMF).虽然本文提出的方法与小波变换类似,但与小波变换的区别是该方法可以自适应地描绘信号的时域和频域特征.

为了克服上文所提到的难点,并改善测试效果,本文提出一种基于同组过滤器(PGF),二维经验模式分解(BEMD)和局部逆熵(LIE)的新方法来实现红外小目标检测.本文的结构是:第一部分是背景介绍;第二部分详细介绍红外小目标识别方法;第三部分分析实验数据;第四部分就本文的研究内容做一个总结.

1 基于 PGF、BEMD 和局部逆熵的方法

可以将包含模糊小目标的随机红外图像建模为:

$$F(x, y) = T(x, y) + B(x, y) + N(x, y), \quad (1)$$

其中 $T(x, y)$ 是目标亮度; $B(x, y)$ 是外部杂波背景; $N(x, y)$ 图像的噪声.

红外小目标识别通常使用目标检测、背景抑制和去噪滤波器等算法.本文所提出新的红外小目标检测方法将使用高频信息目标分割以及低频信息的背景抑制算法.这些算法充分利用高频和低频信息,使小目标检测更加准确和有效.

本文中,红外小目标检测的过程可以分为以下几个步骤:

第一步:利用 PGF 来消除噪声和改善原始图像的信噪比.

第二步:为了得到多层 BEMD 分解,把原始图像输入函数分解成为二维本征模态函数(Bidimensional IMF, BIMF),残余图像使用 BEMD 算法继续分解得到新的 BIMF 图和残差图.

第三步:通过微分获取原图像和残余图像之间的差.

第四步:通过自适应阈值分割算法来分割图像,从而获得背景抑制图像.该自适应阈值分割算法基于本文提到的局部逆熵(LIE).

第五步:通过 LIE 分割 IMF(表示图像的高频信息)来获取每个 IMF 的小目标分割结果.

第六步:使用一个综合方法来获取潜在的目标信息.

图 1 以流程图的方式对以上几个步骤进行了详细描述:

本小节详细介绍了为实现红外小目标检测而使用的图像预处理(PGF)、BEMD、LIE 以及综合方法.

1.1 噪声消除

图像噪声是导致红外小目标检测率降低的一个主要原因,因此噪声滤波是图像预处理的一个重要

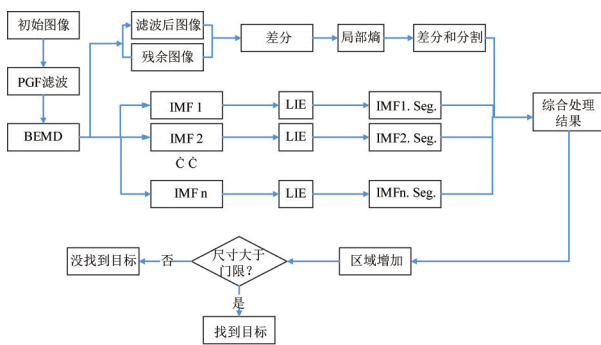


图1 本文所介绍的方法流程图
Fig.1 The flow chat of the method

步骤. 传统滤波器 (例如: 高斯滤波器和中值滤波器) 的一个缺陷是它们通常会改变那些没有被噪声污染的像素, 进而导致结果出现错误. 为了避免这个问题, 本文使用一个非线性的“同组滤波器”^[12-13] 来实现噪声滤波, 其主要步骤如下所述.

1.1.1 同组大小选择

如果 $x_0(n)$ 表示以一个尺寸为 w 的方形窗口为中心的像素 n 的像素值, 根据窗口中所有像素点 (同组成员) 到 $x_0(n)$ 的欧几里得距离 d_i 的升序排列对像素点进行排序, 并将排列结果表示为 $x_i(n)$, $i = 0, \dots, k = w^2 - 1$. 同组的大小是用于平滑像素 $x_0(n)$ 的同组成员数目. 以 $x_0(n)$ 为中心, 大小 $m(n)$ 为的同组 $P(n)$ 的定义为:

$$P(n) = \{x_i(n), i = 0, \dots, m(n) - 1\}, \quad (2)$$

使用同组成员的均值来代替整个局部窗口的目的是为了避免图像边缘和细节的模糊. 根据局部统计值来选择一个同组大小 $m(n)$ 是 PGF 算法的关键步骤. 利用距离 d_i , 费适尔判别式可以通过最大化 $J(i)$ 来估计同组大小 $m(n)$ ^[6], 实际上是对窗口区域内的像素进行二分得出窗口区域内的像素属于背景噪声还是前景图像, 其通过类间均值差最大, 类内方差最小来实现, 公式如下所示:

$$J(i) = \frac{|a_1(i) - a_2(i)|^2}{s_1^2(i) + s_2^2(i)}, i = 0, \dots, w^2 - 1, \quad (3)$$

其中

$$a_1(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=0}^{i-1} d_j \text{ 和 } a_2(i) = \frac{1}{i} \sum_{j=1}^k d_j, \quad (4)$$

其中 $a_1(i)$ 和 $a_2(i)$ 用于表述窗口中像素的两个子集的距离的均值, 以及

$$s_1^2(i) = \sum_{j=0}^{i-1} |d_j - a_1(i)|^2 \text{ 和 } s_2^2(i) = \sum_{j=1}^k |d_j - a_2(i)|^2, \quad (5)$$

其中 $s_1^2(i)$ 和 $s_2^2(i)$ 是用于表述窗口中像素的两个子集的距离的变化值. 这个算法为当前窗口中的每个 i 计算 $J(i)$ 并且找到当 $J(i)$ 是最大化时 $x_i(n)$ 的截止位置, 例如:

$$m(n) = \arg \max (J(i)) \quad (6)$$

上述方程表明, 只有当 $J(i)$ 获得最大值, 当前对应 i 的值是同组尺寸 $m(n)$.

1.1.2 同组分类

当 $x_0(n)$ 为脉冲噪声时, 不能划分为同组, 因此同组分类之前需要计算距离 d_i 的一阶差分, 如下所示:

$$f_i = d_{i+1} - d_i \leq \alpha, \quad (7)$$

其中 α 是一个人工设定的门限值. 当处理高度腐蚀图像时 α 被设置得较大, 当处理轻度腐蚀图像时 α 被设置得较小.

如果 f_i 不满足被等式 (7) 所定义的条件, 那么最后的那个点将被认为是脉冲噪声并被消除, 而 d_i 被保留用于估计同组大小.

1.1.3 像素替换

在消除脉冲噪声之后, 同组分类步骤完成, 像素 $x_0(n)$ 被它的同组元素 $p_i(n)$ 的加权均值替换, 其公式如下^[14]:

$$x_{\text{new}}(n) = \frac{\sum_{i=0}^{m(n)-1} g_i p_i(n)}{\sum_{i=0}^{m(n)-1} g_i}, p_i(n) \in P(n), \quad (8)$$

其中 g_i 是标准高斯权重, 其定义依据 $p_i(n)$ 到 $x_0(n)$ 的相对位置. 此 $m(n)$ 个像素即为在尺寸为 w 的方形窗口中的图像像素, 参与高斯平滑; 而剩余的 $w^2-1-m(n)$ 个像素即为噪声, 不参与高斯平滑. 而参与高斯平滑的各个像素根据像素在窗口中的位置进行加权平滑, 各像素点相应位置的权值下表所示, 本文采用的是窗口:

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

1.2 BEMD

信号分解技术, 例如傅里叶分解和小波分解已经广泛用于分析各种信号. 这些方法的不足之处是基本功能固定, 无法满足信号性质不断变化的需要. 最近, EMD 方法作为一种新的数据分析工具被提出, 其是一种适用于非线性和非静态序列的信号处理技术^[14,16].

1.2.1 一维经验模态分解 (EMD)

经验模态分解(EMD)首次被提出时,其主要用于处理非静态函数^[11],同时也提出一个被称为“过滤”的算法用于将原始信号分解为若干本征模函数(IMF)和残余信号.

$$f(x) = \sum_{i=0}^n imf_i(x) + r_n(x) \quad , \quad (9)$$

其中 $f(x)$ 是原始信号, n 是层数的分解, $imf_i(x)$ 是IMF, $i=0, \dots, n$,而 $r_n(x)$ 是残余信号.该工具在满足以下两个条件时将信号分解为IMF:

(1) 极值和过零点的数目要么相同,要么最多为一个.

(2) 在任何一个点,局部最大值的包络的均值和局部最小值的包络均值为0.

1.2.2 二维经验模态分解(BEMD)

二维EMD(BEMD)主要应用于在图像信号处理中处理二维数据,特别是在纹理分析中^[14-16].

BEMD的过程和一维EMD是相同的,其差别是一维EMD的最大值和最小值包络是曲线拟合,而BEMD的最大值和最小值包络是面的拟合,并且考虑到点的连接,局部极值需要在空间领域中确认.

BEMD的主要过程如下描述:

(1) 根据图像的灰度值确定极大值点和极小值点.本文中,像素点需要与其相邻的所有像素点比较灰度值.如果该点的灰度值比其相邻的所有像素点的灰度值大,则它是极大值点;如果该点的灰度值小于其相邻的所有像素点,则它是极小值点.图2示出了图10(a)中的极大值和极小值点.

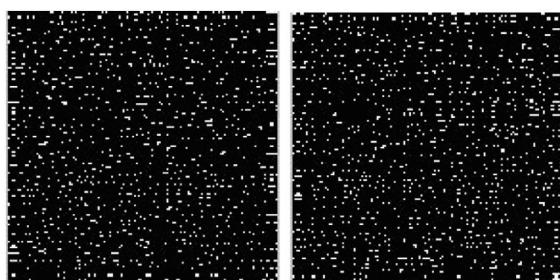


图2 图10(a)的极大值和极小值点(左边为极大值点图,右边为极小值点图)

Fig. 2 The maxima and minima points of the image in Fig. 10(a) (The left and the right figure are the maxima and minima points of the image in Fig. 10(a), respectively)

(2) 通过插入极值构建极大值和极小值平面,从原始图像中减去极大值和极小值平面的均值,其结果是中值图像,定义为 h .常见插值方法包含Delaunay三角算法和径向基函数(RBF).本文使用

Delaunay三角算法,因为其计算速度快,便于理解,能够满足要求.

Delaunay三角算法主要有以下步骤组成:

步骤1:在离散点集中寻找一个纵坐标最小的点A;

步骤2:以这个纵坐标最小的点为起点,寻找两个点B、D,使得向量AB与横坐标的夹角最小,向量AD与横坐标的夹角最大.若A、B、D共线,则将B点标记为A,寻找点D,使得向量AD和直线AB夹角最大;寻找点C使得向量BC与线段AB夹角最小.否则,若A、B、D不共线,则寻找点C使得向量BC与线段AB夹角最小.

步骤3:上一步生成的点C、D如果为同一点,则三角形ABC即为包含所有不规则点的Delaunay三角形,否则继续第四步;

步骤4:寻找一个距离直线AB最远的点E,过E做直线AB的平行线,与射线AD、BC分别交于点D'和C',将点D'、C'分别重新标记为D、C,则凸四边形DABC包含所有不规则点;

步骤5:判断 $\triangle ABC$ 的外接圆是否包含点D,若是则求 $\triangle ABC$ 的外接圆半径R,在射线BC上距离点C2半径R远处取一点D',并将D'重新标记为D,则凸四边形DCBA即为所求得的初始凸包.若 $\triangle ABC$ 的外接圆不包含点D,则凸四边形DCBA即为所求得的初始凸包.

步骤6:不规则点内插.在原有的Delaunay三角网的基础上,将其余离散点一次内插,形成全部Delaunay三角网.

针对极大值点和极小值点的Delaunay三角测量的结果在图3示出.针对极大值点和极小值点Delaunay三角测量的内插值如图4所示,图5和图6分别展示2维和3维结果.

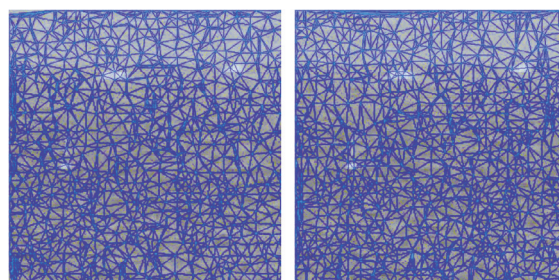


图3 Delaunay三角测量的极大值和极小值

Fig. 3 The results of Delaunay triangulation for the maxima and minima points

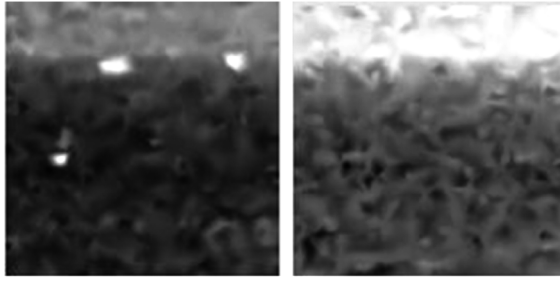


图4 最大值点和最小值的插值结果
Fig. 4 The interpolation results for maxima and minima points

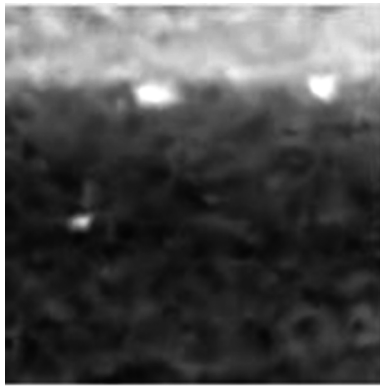


图5 均值图像的结果
Fig. 5 The results of the median image

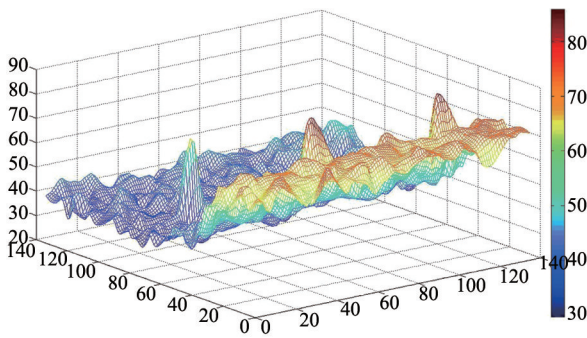


图6 图像均值的3D 包络
Fig. 6 The 3D enveloping surface diagram of the median image

(3) 如果中值图像 h 是一个 IMF, 则直接跳到 (4). 否则, 把看作为原始图像并跳到 (1). 其标准基于如下所述的 SD :

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|(h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t))|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (10)$$

(4) 其中 $h_{1(k-1)}(t)$ 和 $h_{1k}(t)$ 是在迭代过程中分别获得的第一个和第二个中值图像. 如果 SD 的值

大于 0.3, 通常 h 是一个 IMF.

(5) 从原始图像中减去 IMF, 把残余图像作为初始图像跳到 (1), 进而创建下一个 IMF 直到我们获取足够的 IMF. 该结果在第 3 部分中示出.

只要所有的 IMF 模块都被创建, 剩下的就是残留图像.

1.2.3 边界效应

在计算 BEMD 的过程中, 必须使用插值算法, 但其带来的问题是极值点的插值并不能代表整个图像, 而且因为在计算最外围的极值点时其边缘之外的点被排除, 所以已有的插值算法不能解决该问题. 而在 IMF 的创建过程中, 原始图像将在每次迭代过程中慢慢地被腐蚀. 图像将被裁减直到没有足够的数用于分解. 我们把该问题定义为边界影响, 如图 7 所示.

其中 (a) 是原始图像, (b) 和 (c) 是 IMF 的分量. 在分解过程中, IMF 将会被黑色部分腐蚀.

由于插值算法带来的影响, 腐蚀仅能减小但是不能被完全消除. 一般方法应用是, 从四个边扩展原始图像 n 个像素, 扩展像素的像素值为以原始图像的各基于图像数据的镜面反射边缘为对称轴取对称位置的原始图像中的像素值. 在这种方法下原始图像的边界得到延展. 所以被腐蚀部分是延展的边界, 并非图像本身, 进而确保数据的完整性. 这种延展下, 分解结果在图 8 可以看到.

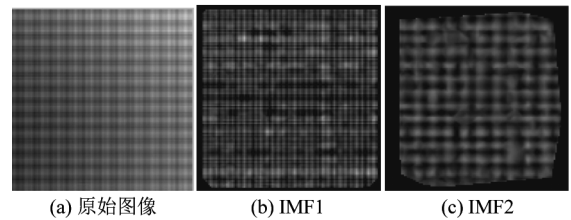


图7 BEMD 的边界效应
Fig. 7 Boundary effect in BEMD

对比图 7, 主图像的特征在边界扩展后的分解过程中保持不变. 根据测试结果分析, 该方法可以有效处理边界效应.

1.3 局部逆熵

一个图像的统一部分越大, 其局部熵也就越大. 这可能会导致较亮区域的熵值小于较暗区域的熵值. 根据这种逆熵观点^[17], 图像中的灰度值变化越大, 逆熵值也将越大. 所以, 在本文中提出了局部逆熵的概念, 以便从 IMF 中分割出感兴趣的部分 (ROI).

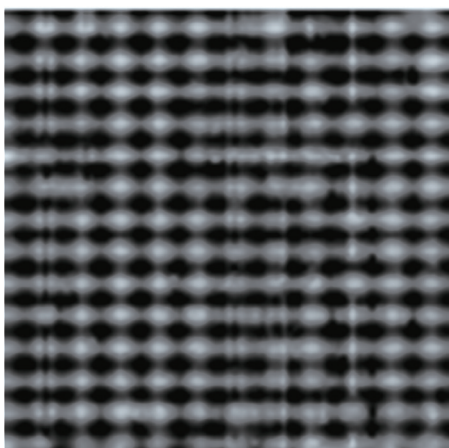


图 8 基于镜面反射延展的 IMF2 组件
Fig. 8 IMF2 component based on mirror reflection extending

1.3.1 局部熵

局部熵需要考虑一幅图像的局部窗口中像素的局部空间分布信息^[18]. 使 $F = |f(x, y)|_{W \times H}$ 为一个尺寸 $W \times H$ 为的图像, 其中 $f(x, y)$ 是点 (x, y) 的灰度值. 图像中的局部窗口尺寸为 $M \times N (M < W, N < H)$, 局部熵的定义被表述为:

$$\begin{cases} H = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_{ij} \log p_{ij} \\ p_{ij} = f(i, j) / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j) \end{cases}, \quad (11)$$

其中 H 是局部熵, 并且 p_{ij} 是局部窗口的灰度分布.

1.3.2 局部逆熵 (LIE)

由于相对较亮的均匀区域的灰度值计算出的熵要小于相对较暗的均匀区域的灰度值计算出的熵. 这种情况不利于将弱信号小目标从复杂背景中分割出来. 根据逆熵的观点, 越均匀的灰度分布, 其逆熵将会越小. 因此, 提出局部逆熵的概念用以分割 IMF, 以便得到小目标检测结果. 关于局部逆熵的描述如下:

$$\begin{cases} LIE = - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_{ij} \log(1 - p_{ij} + \varepsilon) \\ p_{ij} = f(i, j) / \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j) \end{cases}, \quad (12)$$

其中 ε 是一个小的常数, 用于确保等式(4)中的算法的有效性. 局部熵和局部逆熵的差别如图 9 所示.

左边是局部熵的计算结果, 右边是局部逆熵的计算结果. 其中 X 坐标表示灰度值, Y 坐标示出局

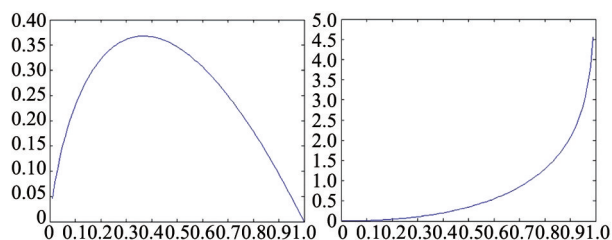


图 9 局部熵和局部逆熵的比较
Fig. 9 The computation comparison between local entropy and local inverse entropy

部熵和局部逆熵的相对值. 从图 1 可以看出, 局部逆熵是单调性增加, 其有利于弱小目标从复杂背景中被分割出来. 所以, LIE 不仅仅被认为是图像的光学分布信息, 而且与原始的视觉效果一致.

1.4 小目标检测

IMF 和残余图像可以通过 BEMD 获得, 其中 IMF 包含图像的详细的高频信息, 残留图像包含低频信息和被认为是背景的图像.

在本文中, 4 个 IMF 图像和一个残余图像可以通过从原始图像进行 4 层 BEMD 分解得到. 所以, 为了通过 BEMD 来提取目标, 本文提出了高频信息和低频信息展开两个方法.

1. 通过原始图像和残余图像间的差分操作以及分割差分图像来获得以局部逆熵表示的小目标信息可以实现背景抑制.

2. 通过使用 LIE 分割相应的 IMF 可以获取小目标, 该方法使用原始图像的高频信息.

根据上述步骤, 将获得 4 个 IMF 的分割结果和一个差分图像的分割结果. 但它们并非最终结果, 因此需要使用一个综合方法来分析 5 个分割结果, 进而得到最终结果.

2 实验结果

为了验证本文提出的方法的有效性, 采用 VS2012 C++ 编制了相关实验软件平台并使用了一些小目标图像. 实验软件图如下 10 所示.

为了展示本文所提出算法的有效性, 选取了其中有代表性图像, 其原始图像如图 10 所示. 其中图 (a) 为复杂海天背景弱小目标, 图 (b) 为机场天空点目标, 图 (c) 为复杂云层点目标, 图 (d), (e) 为复杂云天弱小目标.

执行小目标检测程序, 对现有的 20 幅“海天背景图像”、70 幅“复杂云层点到面目标图像”、100 幅“机场天空图像”及 100 幅“复杂云层点目标”进行

小目标检测,统计检测结果汇总为表 1,统计平均运行时间汇总为表 2.

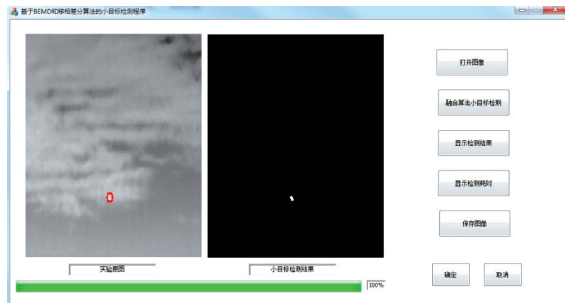


图 10 实验软件平台
Fig. 10 Experimental software platform

表 1 小目标检测结果统计

Table 1 Statistical results of small target detection

测试图像	总数量	正确数量	虚警数量	正确率	虚警率
复杂云层点目标	100	100	0	100%	0
机场天空点目标	100	100	0	100%	0
复杂云天弱小目标	70	67	3	95.71%	4.47%
海天背景弱小目标	20	20	0	100%	0
综合结果	290	287	3	98.96%	1.03%

表 2 测试小目标检测平均用时

Table 2 The average time used by the small target detection

测试图像	图像大小	平均用时(s)
复杂云层点目标	620 * 460	54.91
机场天空点目标	315 * 230	12.95
复杂云天弱小目标	256 * 200	11.81
海天背景弱小目标	135 * 135	6.41

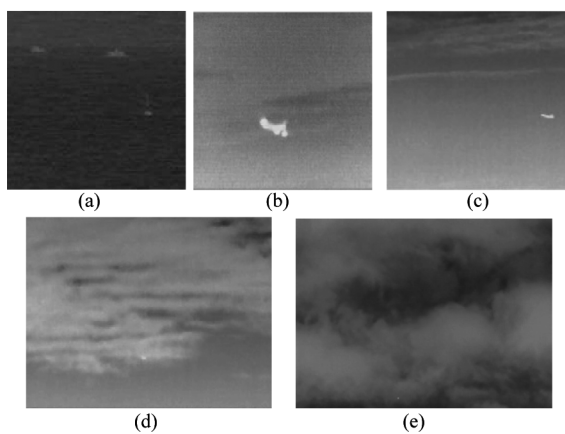


图 11 原始图像
Fig. 11 The initial images

从上面的初始图像看,图像可以分为以下两类:(1)包含小目标的波动的天空背景;(2)海空背景,包含

噪声和三个目标,其信噪比分别为 3.938 5,3.813 7,3.308 8,3.136 和 2.878 2.

使用 PGF 后的每幅图像的滤波结果为图 12.

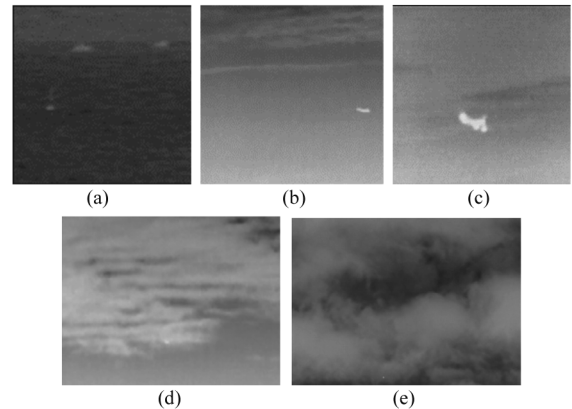


图 12 初始化图像
Fig. 12 The filtered images

通过 PGF 滤波处理后,本文所采用的算法能一定程度上提高图像的信噪比,依次 4.235 6,4.141 6,3.685 6,3.484 2,3.219 5.

使用 BEMD 分解后的 3 层 IMF 结果如图 13 所示.

使用 LIE 来分割每幅图像的 IMF 结果如图 14 所示.

在图 14 中,(a1-c1),..., (a5-c5)是通过 BEMD 和 LIE 获得的 4 个 IMF 的分解结果.小目标可能会出现在任意一个 IMF 中.例如,小目标主要出现在图中的 IMF2-IMF4,而没有出现在 IMF1 中;或者小目标出现在 IMF1 中,而并没有在其他 IMF 中出现.因此为了从 IMF 中提取小目标,分割结果需要整合,在本文中通过将图像叠加来实现.此外,如果分割结果如图 12 中的(a3)所示那样边缘具有噪声,那么需要通过区域提取和区域清除来消除边缘噪声.通过 IMF 检测得到的结果如图 15 所示.

为了利用低频信息,一个结合残余图像和原始图像的方法在第 1.4 节中提出,该分割结果如图 15 所示.

通过“或”逻辑操作,得到 BEMD 和 LIE 的检测结果,如图 17 和图 18 所示,其 IMF 值如表 3 所示.

在文中,使用 97 幅包含小目标的图像来检测本文提出的方法的准确性.其中 93 幅图可以成功地定位小目标,成功率达到 95.88%.4 幅图中没有检测到小目标,其原因是小目标的亮度较低并且小目标和背景之间的对比度差异较小,以至于小目标无法

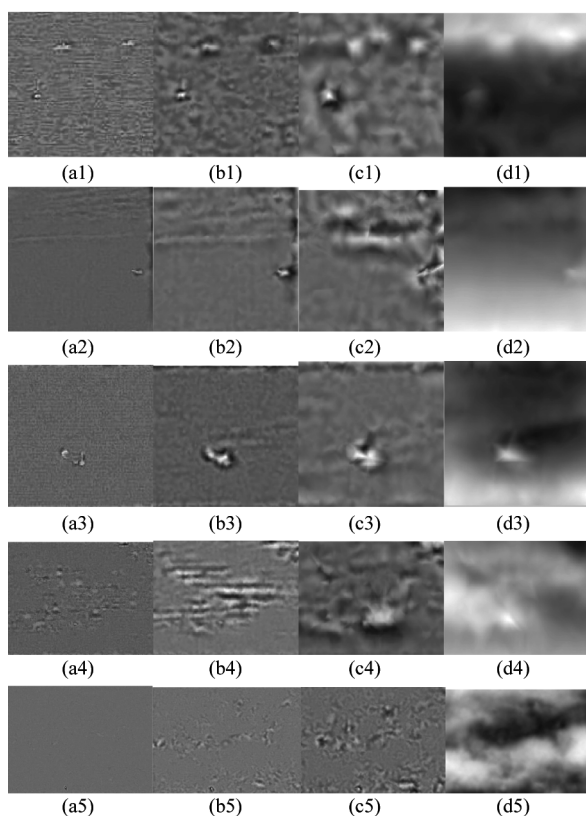


图 13 3 层 IMF 和一个 BEMD 的残余图像

Fig. 13 The three IMF and a residue of images by BEMD

表 3 检测小目标图像的信息熵

Table 3 Information entropy of small target image

测试图像	LIE					
	原图	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	IMF5
复杂云层点目标	4.641 4	2.887 7	3.431 3	3.910 5	4.373 9	5.428 6
机场天空点目标	5.225 1	2.154 1	2.703 5	4.194 8	4.865 5	5.454 7
复杂云天弱小目标	4.329 7	3.623 2	4.530 4	4.757 0	4.999 7	5.025 1
海天背景弱小目标	3.794 3	2.832 9	4.292 5	4.892 2	5.093 2	5.174 9

从背景中分割出来. 在图像测试中,并没有检测到错误的小目标,所以错误率为 0.

文中的数据包小目标序列图像和单个图像. 对于单个图形,为了获取足够多的测试数据,使用了仿射变换. 从小目标识别的检测结果来看,本文提出的方法不仅仅可以准确的提取小目标,而且可以同时提取多个小目标.

为了证实有效性,使用了对比测试. Top-hat 和 max-mean 算法被用于检测图 11 (d) 中的小目标,结果在图 19 显示.

从以上结果分析以及本文提出的方法所得到的实验结果,我们可以认为该方法在小目标识别上具有高准确率,并且没有发生错误识别. 因此,本文提出的方法可以压缩背景,并从复杂背景和低信噪比

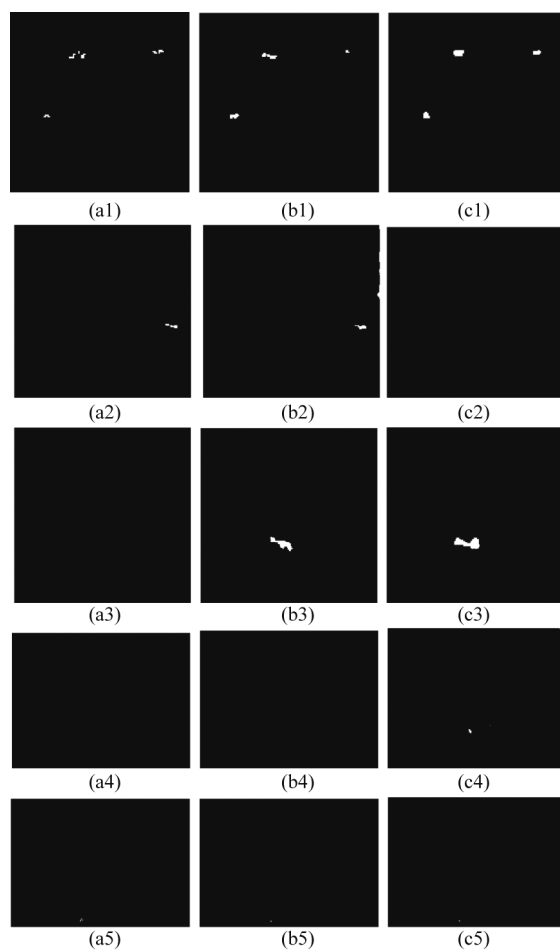


图 14 使用 LIE 的 IMF 分割结果

Fig. 14 Segmentation results of IMF using LIE

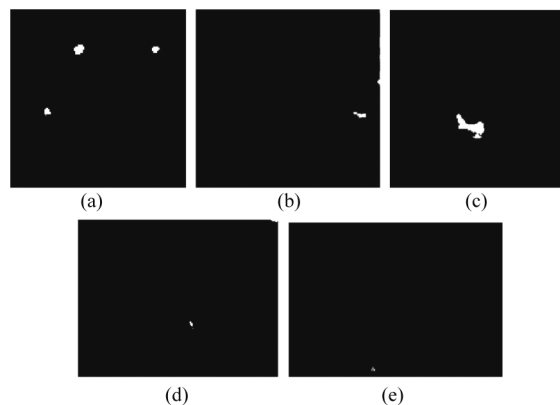


图 15 IMF 分割的综合结果

Fig. 15 The synthetical results of IMF segmentation

的背景中提取小目标.

4 结论

提出了一种基于 PGF、BEMD 和局部逆熵的从复杂背景和低信噪比背景图像中提取小目标的算法. 基于实验结果,该方法可以有效的检测红外小目

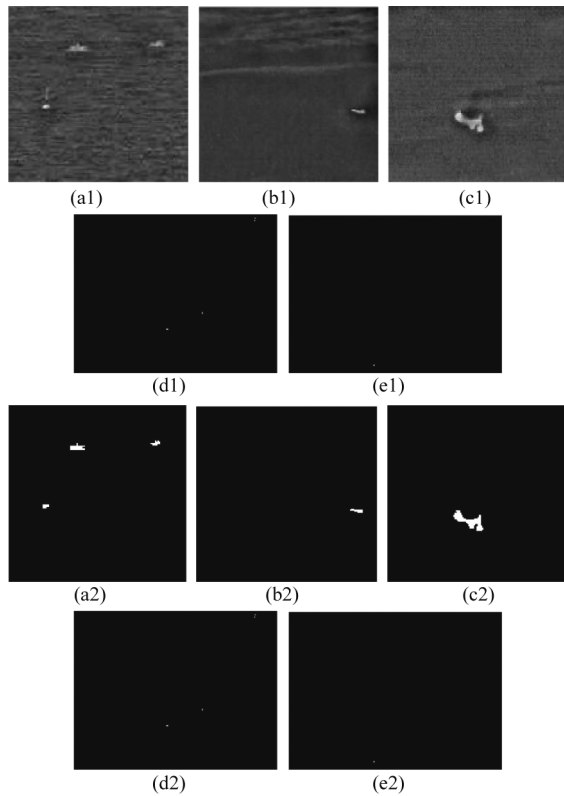


图 16 差分图像和检测结果
Fig. 16 The difference image and detection results

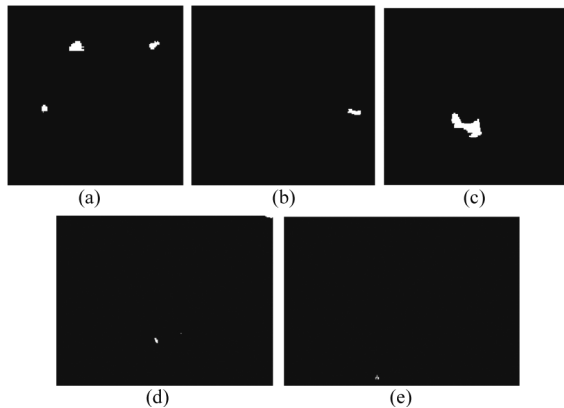


图 17 最后的分割结果
Fig. 17 The final segmentation results

标. 基于其自身数据的 BEMD 方法有较强的适应性. 局部逆熵反应了灰度密度的变化. 所以本文提出的方法可以有效地提取小目标.

提出的方法有着很强的自适应性和很高的检测正确率, 但是该方法距离实际的工程应用依然有着不小的距离. 主要体现在检测耗时上, 虽然经过不断优化和改进, 我们已经将 BEMD 从最初的 4 min 以上的运行时间降低到现在的 10s 级, 但是显然这样

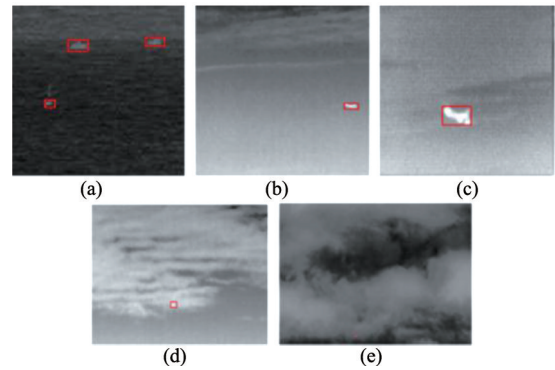


图 18 最终结果
Fig. 18 The final results



图 19 Top-hat 和 the max-mean 算法结果
Fig. 19 The results of the top-hat and the max-mean algorithm

的运行速度是无法适用于实时处理.

因此, 未来 BEMD 的研究将主要关注两个方向, 一个是推导、证明、建立严谨的 EMD 数学理论体系; 另一个重要方向就是算法的实时化研究. 虽然 BEMD 在极小范围内 (比如图像上相邻域内) 是算法强相关的, 但是在较远距离以及全局并不相关, 因此提高 BEMD 速度的一个可行的方向就是并行化处理.

References

- [1] Guan Z. Chen, Q, Gu G, *et al*, Dim target detection based on optical flow histogram in low frame frequency in clouds background[C], Acta Opt. Sin. 2008, **28**(8):1496-1500.
- [2] Deshpande S. D, Er, M. H. Ronda V, *et al*, Max-mean and max-median filters for detection of small targets[C], Proc. SPIE 1999, (3809): 74-83.
- [3] Bai X, Zhou F, Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J], Pattern Recognit 2010, **43**(6):2145-2156.
- [4] Wang P, Tian J. Gao, C, Infrared small target detection using directional highpass filters based on LS-SVM[J], Electron. Lett. 2009, **45**(3):156-158.
- [5] ZHAO Jia-Jia, TANG Zheng-Yuan, Infrared small target detection based on image sparse Representation[J]. J. Infrared Millim. Waves. (赵佳佳, 唐峥远. 基于图像稀疏表示

- 的红外小目标检测算法. *红外与毫米波学报*, 2011, **30**(2), 156 - 162.
- [5] Jiajia Zhao, Zhengyuan Tang, Jie Yang, *et al* Infrared small target detection using sparse representation[J]. *Syst. Eng. Electron.* 2011, **22**(6):897 - 904.
- [7] Liu Z. Chen, C, Shen X, *et al* Detection of small objects in image data based on the nonlinear principal component analysis neural network. [J], *Opt. Eng.*, 2005, **44**(9):093 - 099.
- [8] Cao Y, Liu, R. Yang J, Infrared small target detection using PPCA[J], *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 2008, **29**(4):385 - 395.
- [9] Liu R, Zhi H, Infrared point target detection with Fisher linear discriminant and kernel Fisher linear discriminant [J]. *Infrared Millimeter Terahertz Waves*, 2010, **31**(12):1491 - 1502.
- [10] Yuan Hong-gang, Sun Wei dong, Weak and small target detection based on multi-threshold classification and backward verification for infrared image sequence[J], *Image Graphics*, **14**(8):1583 - 1589.
- [11] Zhao Jingjing, Chen Haixing, Liu Xingtong, Yang Chuan-dong, Preprocessing of infrared images with small target [J], *Signal Process*, 2009: **25**(7):1088 - 1091.
- [12] Huang N. E. Shen, Z, Long S. R, *et al* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [C], Royal Soc. London. 1998, **454**(1998) 903 - 1005.
- [13] Aberu E, Lightstone M, Mitra S. K, *et al* A new efficient approach for removal of impulse noise from highly corrupted images, *IEEE Trans. Image Process* [J], 1996, **5**(2):1012 - 1025.
- [14] Deng Y. Kenney, C, Moore M. S, Peer group filtering and perceptual color image quantization, Proc[C]. IEEE Int. Symp. Circuits Syst. New York. 1999, **4**(1999):21 - 24.
- [15] Nunes J. C. Bouaoune, Y. Delechelle, E, *et al* Image analysis by bidimensional empirical mode decomposition, *Image Vision Computer* [J]. 2003, **21**(2003):1019 - 1026.
- [16] Yang Z, Qi D., Yang L, Signal period analysis based on Hilbert-Huang transform and its application to texture analysis[C], Intl. Conf. Image Graphics, 2004, 30 - 433.
- [17] Hariharan H. Gribok, A, Abidi M, *et al* Image fusion and enhancement via empirical mode decomposition [J]. *Pattern Recognition. Res*, 2006, **1**(1):16 - 32.
- [18] Huang K. Mao, X, Detectability of small targets [J], *Phys. Technol.* 2009, **53**(09):208 - 217.
- [19] Shiozacki A, Edge extraction using entropy operator[J], *Computer. Vision Graphics Image Process.* 1986, **36**(1986):1 - 9.
- [20] He Deng, Jianguo Liu, Zhong Chen, Infrared small target detection based on modified local entropy and EMD[C], *Chin. Opt. Lett.* 2010, **8**(1):24 - 28.
- [21] Xu Rong-Ping, Yang Lei, Small Target Tracking Approach Combined The Merits Of Two Track I ING Frame Work Under Infrared Complex Background, [J], *J. Infrared Millim. Waves.* (徐蓉萍, 杨磊. 红外复杂背景中一种融合两类跟踪框架优点的小目标跟踪算法. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(5), 355 - 360.
- ~~~~~
- (上接第 68 页)
- [5] Nakayama K, Tazawa H, Okajima S, *et al.* High-power 47.6 and 57.2 μm CH_3OD lasers pumped by continuous-wave 9R(8) CO_2 laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(2):329 - 322.
- [6] Mueller E R, Henschke R, Robotham W E. Terahertz local oscillator for the microwave limb sounder on the aura satellite [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(22):4907 - 4915.
- [7] QIN J Y, HUANG X, LUO X Z, *et al.* Spectral characteristics comparison of pulsed optically pumped NH_3 and CH_3OH far-infrared laser [J]. *Int. J. Infrared Millimeter Waves*, 1999, **20**(8):1515 - 1524.
- [8] ZHANG Ping, ZHANG Xun, HUANG Xiao, *et al.* The study of two longitudinal mode optically pumped super radiant THz laser and cavity THz laser [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (张萍, 张迅, 黄晓, 等. 双纵模光泵超辐射式和腔式 THz 激光器的研究. *光电子·激光*), 2002, **13**(4):332 - 335.
- [9] BAO Yan-xian, HUANG Xiao, LUO Xi-zhang. Choice of three-energy-level groups on optically pumped sub-millimeter wave laser medium [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (保延翔, 黄晓, 罗锡璋. 参与光泵亚毫米波激光过程的介质三能级组的选取. *光电子·激光*), 2004, **15**(11):1320 - 1323.
- [10] QI Chun-chao, ZUO Du-Luo, LU Yan-zhao, *et al.* An efficient photon conversion efficiency ammonia terahertz cavity laser [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(12):124201.
- [11] HE Zhi-zhong, YAO Jian-quan, SHI Hua-feng, *et al.* Semiclassical theory of optically pumped D_2O gas terahertz laser [J]. *Acta Physica Sinica* (何志红, 姚建铨, 时华锋, 等. 光泵重水气体产生 THz 激光的半经典理论分析. *物理学报*), 2007, **56**(7):5802 - 5807.
- [12] Rolf Güstena, Paul Hartoghd, Heinz-Wilhelm Hübers, *et al.* GREAT: The German first light heterodyne instrumentation for SOFIA. Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV, San Diego, CA, 2007 [C].
- [13] Mueller E R. Optically pumped THz laser technology [J/OL]. <http://www.coherent.com/downloads/OpticallyPumpedLaser.pdf>.
- [14] TIAN Zhao-shuo, WANG Jing, FEI Fei, *et al.* Study of optically pumped all-metal terahertz laser [J]. *Chinese J. Laser* (田兆硕, 王静, 费非, 等. 光抽运全金属太赫兹激光器研究. *中国激光*), 2010, **37**(9):2323 - 2327.
- [15] GUO Xiao-yang, LI Ting, WANG Du, *et al.* Influence of frequency shift of pump laser on photoacoustic signal for frequency stabilization [J]. *Infrared and Laser Engineering* (郭晓阳, 李婷, 王度, 等. 泵浦激光频率漂移对光声稳频信号的影响. *红外与激光工程*), 2015, **44**(6):1746 - 1751.
- [16] KONG Wei-peng, WANG Du, GUO Chao, *et al.* A theoretical investigation and experiment of hybrid metal-mesh output coupler [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孔维鹏, 王度, 郭超, 等. 复合型金属网栅耦合输出镜. *红外与毫米波学报*), 2015, **34**(5):587 - 592.
- [17] Stellan Jacobsson. Optically pumped far infrared lasers [J]. *Infrared Phys.* 1989, (29)5:853 - 874.
- [18] Hodges D T, Hartwick T S. Waveguide laser for the far infrared (FIR) pumped by a CO_2 laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1973, **23**(5):252 - 253.