

基于背景最佳滤波尺度的红外图像复杂度评价准则

侯旺 梅风华 陈国军 邓喜文

An evaluation criterion of infrared image complexity based on background optimal filter scale

Hou Wang Mei Feng-Hua Cheng Guo-Jun Deng Xi-Wen

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 234202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用液芯柱透镜快速测量液相扩散系数-折射率空间分布瞬态测量法

Rapid measurement of the diffusion coefficient of liquids using a liquid-core cylindrical lens: a method for analysing an instantaneous diffusive picture

物理学报.2015, 64(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114205>

基于太赫兹时域光谱技术的伪色彩太赫兹成像的实验研究

False-color terahertz imaging system based on terahertz time domain spectroscopy

物理学报.2015, 64(11): 114206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114206>

可见光域多波长叠层衍射成像的实验研究

Experimental study on multi-wavelength ptychographic imaging in visible light band

物理学报.2015, 64(8): 084203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084203>

基于分块速度域改进迭代运动目标检测算法的红外弱小目标检测

A block-based improved recursive moving-target-indication algorithm

物理学报.2014, 63(7): 074208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.074208>

基于数字全息及复用技术的全场偏振态测试方法

Full-field detection of polarization state based on multiplexing digital holography

物理学报.2013, 62(22): 224204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224204>

基于背景最佳滤波尺度的红外图像复杂度 评价准则*

侯旺[†] 梅风华 陈国军 邓喜文

(海军装备研究院, 上海 200436)

(2015年6月11日收到; 2015年7月18日收到修改稿)

提出一种基于背景最佳滤波尺度的红外图像复杂度评价准则来解决传统方法评价背景效果较差的问题. 同时, 这种方法还可以为红外图像滤波提供最佳高通滤波尺度信息, 从而对红外图像进行性能最佳滤波. 首先, 生成高斯仿真目标并与红外图像进行融合, 获得包含仿真目标及真实红外背景的图像. 然后, 在不同高通滤波尺度下对图像滤波, 并计算滤波后仿真目标的信噪比. 最后, 取滤波后目标信噪比最大时的滤波尺度作为背景最佳滤波尺度, 使用该尺度可评价红外图像的复杂度. 另外, 本文还使用数学模型推导了红外图像最佳滤波尺度, 得出最佳滤波尺度的数学表达式. 大量实验表明: 1) 本文推导的最佳滤波尺度数学表达式与实验曲线吻合. 2) 这种方法在评价红外图像复杂度方面比传统的基于信息熵的方法效果要好很多. 并且这种方法获取的红外背景复杂度为滤波最佳尺度, 可以直接利用这项指标对图像进行最佳滤波从而更好地检测弱小目标. 3) 仿真目标尺度越大, 最佳滤波尺度也会相应增大. 因此, 在评价图像复杂度时, 应使用相同尺度的仿真目标, 不同图像之间才具备可比性. 同时, 最佳滤波尺度与仿真目标的强度无关. 4) 本文算法使用的滤波器宜用高斯及 Butterworth 高通滤波器实现. 5) 本文提出的方法不仅可以有效分析红外视频的复杂度, 并且可以通过复杂度的变化分析图像内容的突变.

关键词: 弱小目标检测, 背景复杂度, 最佳高通滤波尺度**PACS:** 42.30.-d, 42.30.Sy**DOI:** 10.7498/aps.64.234202

1 引言

在军事领域, 红外图像弱小目标检测在预警系统、精确打击武器和防空系统等领域发挥重要作用^[1]. 在民用领域, 这项技术的应用有: 科学成像、安全警戒、刑侦、森林防火和消防、交通管理、医学成像、遥感、机器人、自动驾驶、航天、搜索或跟踪天空中的流星、卫星或其他运动目标、城市红外污染分析、海面人员搜救和卫星大气红外云图分析等^[2-4]. 弱小目标检测技术是近年来信息处理技术中的研究热点之一^[5-7]. 但是, 实时、鲁棒、通用的弱小目标检测算法还尚未出现^[8-10]. 对军事领域

而言, 进行弱小目标检测和跟踪技术的研究对于提高预警能力, 反击能力以及在未来战争中的制空能力都有很高的军事价值^[11,12].

弱小目标检测前首先要进行图像预处理, 预处理算法不仅可以有效减少干扰源, 而且可以有效降低后续弱小目标检测的难度. 但是, 对于不同背景类型的图像而言, 使用相同的滤波器效果差异很大. 比如, 适用于海面背景的高通滤波器用于天空背景下效果不一定好^[12-14]. 对于不同背景的红外图像, 需要获取依赖背景的最佳滤波器, 滤波效果才比较理想. 综上所述, 确定一种依赖背景复杂度的自适应高通滤波方法非常重要^[15-17].

红外背景预处理方法一般而言可以分为: 空域

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2013CB733100)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: Simon_Zero@126.com

滤波及频域滤波两大类^[6,7]. 传统的空域滤波方法有高通模板预测方法、中值滤波方法、基于形态学的方法等.

频域滤波方法包括理想高通滤波、高斯高通滤波、Butterworth高通滤波方法及一些基于小波的高通滤波方法等. 这些方法原理都是对图像进行高通滤波, 所不同的是滤波算法是在空域还是频域进行^[18,19].

香农提出的基于信息熵的方法可用于描述红外图像复杂度^[20,25], 从而设计自适应高通滤波器对图像进行滤波. 虽然这种方法可以有效表示图像中平均信息量, 但是这种方法没有突出灰度值在评价图像复杂度时的重要性. 为克服信息熵方法的缺点, 杨磊提出了灰度加权信息熵、方差加权信息熵及局部方差加权信息熵^[21]等三种红外图像复杂度描述方法评价图像, 比信息熵方法描述图像复杂度效果要好. 但是, 在很多情况下, 这几种方法都存在各自的问题, 不能有效区分差异较大的背景^[26].

一些学者提出基于灰度统计、边缘、纹理和变换域的方法评价红外图像复杂度^[27]. 其中, 1983年, Schmieder等提出的红外背景杂波量化尺度方法是一种经典的基于灰度统计的方法. 但是, 该方法不适用于椒盐噪声情况, 而且不能描述图像内部信息, 对于非分形特征的背景杂波描述不准确. 而本文提出的方法没有这些问题, 对不同噪声都可适应. Aviram等提出利用图像的边缘点数目描述杂波. 但该方法受人工设定的阈值影响较大, 算法鲁棒性较差. 还有一些学者提出基于变换域的描述方式, 但当背景中存在周期噪声时, 对参数估计影响较大. 综合上述红外图像复杂度描述方式, 一些学者提出综合利用提出的复杂度描述方式以替代单一描述模式, 有线性组合、多元统计分析、支持向量机等多种方式. 但是, 基于复合度量的方法受内部算法的影响较大, 当其中一种算法效果较差时, 红外图像的背景复杂度依然很难准确描述.

针对这些问题, 本文提出一种基于背景最佳滤波尺度的红外背景复杂度计算方法, 是一种基于灰度统计的方法. 首先在待评价图像上融合某尺度和强度的二维高斯仿真目标. 然后使用不同尺度的高通滤波器对图像进行滤波, 获取滤波后目标的信噪比. 最后计算背景最佳滤波尺度. 实验结果表明,

该最佳滤波尺度在评价红外图像复杂度方面比传统的基于信息熵的方法效果好很多. 而且该尺度为依赖背景的自适应高通滤波尺度, 对弱小目标检测而言, 可实现最佳滤波.

2 基于背景最佳滤波尺度的红外图像复杂度评价准则

2.1 几种典型的背景复杂度计算方法^[21]

先介绍一种简单的背景复杂度计算方法: 信息熵

$$F_1(S) = - \sum_{s=0}^{255} p_s \log p_s, \quad (1)$$

其中, S 为红外图像直方图中灰度自变量, p_s 为灰度值 S 出现的概率. 采用信息熵可以有效表示图像中包含信息量的程度. 一般而言, 图像的灰度离散程度越大, 信息熵越大; 离散程度越小, 信息熵越低. 但是, 该变化量只能反映灰度离散程度, 不能反映灰度强弱对复杂度的影响. 为克服此问题, 杨磊^[21]提出计算背景复杂度的第二种方法,

$$F_2(S) = - \sum_{s=0}^{255} s \cdot p_s \log p_s. \quad (2)$$

可知, 越高的灰度值, 在计算复杂度时, 权重越大. 由于红外图像中待检测目标的温度一般情况下都比背景高, 灰度比周围环境的大, 因此改进的计算复杂度方法有一定的合理性.

为进一步准确计算红外图像复杂度, 将图像的方差信息融入复杂度的计算公式中,

$$F_3(S) = - \sum_{s=0}^{255} (s - \bar{s})^2 \cdot p_s \log p_s, \quad (3)$$

其中, \bar{s} 为红外图像的灰度平均值.

以上三种方法都使用整幅图像进行解算, 而没有考虑图像的局部复杂度, 因此, 提出最后一种复杂度计算方法,

$$F_4(S) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n F_3(S_{U_k}). \quad (4)$$

将图像分为 n 块, 每块表示为 S_{U_k} . 分别计算每块图像的复杂度然后求平均值, 得到第四种图像复杂度计算方法.

2.2 不同尺度的高通滤波器对目标全局信噪比的影响

一般情况下, 红外弱小目标在图像上的数学模型可写为^[22]

$$f_T(r) = \lambda \exp\left(-\frac{\|r - r_0\|^2}{2\sigma_T^2}\right), \quad (5)$$

其中, σ_T 为红外弱小目标的尺度, r_0 为红外弱小目标的中心位置, r 为二维自变量函数, λ 为红外弱小目标的强度系数, $f_T(r)$ 为红外目标的数学函数表达式.

存在红外弱小目标的复杂背景数学模型可以表示为^[23]

$$f(r) = f_T(r) + f_B(r), \quad (6)$$

其中, $f(r)$, $f_T(r)$, $f_B(r)$ 分别为红外图像函数、红外目标函数、背景函数表达式.

对上述函数进行傅里叶变换, 得

$$F(\omega) = F_T(\omega) + F_B(\omega), \quad (7)$$

其中, $F(\omega)$, $F_T(\omega)$, $F_B(\omega)$ 分别为红外图像函数、红外目标函数、背景函数频谱表达式.

对红外图像进行高通滤波^[23,24](举高通滤波为例, 下文有其余滤波方式的分析), 可得

$$f_F(r) = \Im^{-1}[F(\omega)H(\omega)], \quad (8)$$

其中, \Im 表示傅里叶变换, $H(\omega)$ 表示高通滤波器, 表达式为

$$H(\omega) = 1 - e^{-(u^2+v^2)/2\sigma^2}, \quad (9)$$

其中, u, v 分别为频谱两个方向的自变量, σ 为滤波器的截止频率(cutoff frequency).

(8) 式写为

$$f_F(r) = \varsigma^{-1}[F_T(\omega)H(\omega)] + \varsigma^{-1}[F_B(\omega)H(\omega)]. \quad (10)$$

进一步写为

$$f_F(r) = f_T(r) \oplus h(r) + f_B(r) \oplus h(r), \quad (11)$$

其中, \oplus 表示卷积, σ_{noise} 表示滤波后 $f_F(r)$ 函数的标准差(设目标对于图像而言非常微弱, 计算红外图像标准差时, 可直接使用原始图像标准差代替全图标准差, 在一般情况下, 该假设成立), $h(r)$ 表示

高通滤波器的逆傅里叶变换, 经推导, 离散傅里叶变换下的 $h(r)$ 可表示为

$$h(r) = \delta(r) - \frac{2\pi\sigma^2}{HW} e^{-2\pi^2\sigma^2\|r\|^2}, \quad (12)$$

其中, H 和 W 分别表示图像的长度和宽度, 单位为像素. 定义目标全局峰值信噪比 PSNR_g 为

$$\text{PSNR}_g = (s_{\text{peak}} - \bar{s})/\sigma_f, \quad (13)$$

s_{peak} 为滤波后目标的峰值, 为目标周围背景强度均值, σ_f 为滤波后图像的标准差.

在不同尺度的高通滤波器下, 求取滤波后目标信噪比最大时的滤波尺度值, 即以下函数取最大值时, 滤波尺度 σ_b :

$$\max_{\sigma=\sigma_b}(\text{PSNR}_g). \quad (14)$$

为求该最大值, 重写目标函数

$$\begin{aligned} \text{PSNR}_g &= \left[\max_r [f_F(r) \oplus h(r)] - \bar{s}\right]/\sigma_f \\ &= \max_r [f_T(r) \oplus h(r)]/\sigma_f \\ &= G_1(\sigma)/G_2(\sigma). \end{aligned} \quad (15)$$

下面分别推导上式的分子和分母, 分子 $G_1(\sigma)$ 的推导过程如下:

$$\begin{aligned} f_T(r) \oplus h(r) &= \iint_{-\infty}^{\infty} f_T^*(u) h(r-u) du \\ &= \iint_{-\infty}^{\infty} \left[\lambda \exp\left(-\frac{\|u-r_0\|^2}{2\sigma_T^2}\right)\right] \\ &\quad \times \left[\delta(r-u) - 2\pi\sigma^2 e^{-2\pi^2\sigma^2\|r-u\|^2}\right] du \\ &= \lambda \exp\left(-\frac{\|r-r_0\|^2}{2\sigma_T^2}\right) \\ &\quad - \frac{2\pi\sigma^2\lambda}{HW} \iint_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2\pi^2\sigma^2}{HW}\|r-u\|^2\right) \\ &\quad - \frac{\|u-r_0\|^2}{2\sigma_T^2}\right) du \\ &= \lambda \exp\left(-\frac{\|r-r_0\|^2}{2\sigma_T^2}\right) \\ &\quad - \frac{4\pi^2\sigma^2\sigma_T^2}{4\pi^2\sigma^2\sigma_T^2 + HW} \lambda \\ &\quad \times \exp\left(-\frac{2\pi\sigma^2}{4\pi^2\sigma^2\sigma_T^2 + HW}\|r-r_0\|^2\right), \end{aligned} \quad (16)$$

得

$$G_1(\sigma) = \frac{HW}{4\pi^2\sigma^2\sigma_T^2 + HW} \lambda. \quad (17)$$

分析上式可知, 分子 $G_1(\sigma)$ 部分随着 σ 的增加单调递减.

另外, σ_f 可写为

$$\begin{aligned} \sigma_f &= \sqrt{(f_F - \bar{f}_F)^2} = \sqrt{f_F^2 - \bar{f}_F^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{HW} \sum_H \sum_W f_F^2 - \left(\frac{1}{HW} \sum_H \sum_W f_F\right)^2} \\ &= \frac{1}{HW} \sqrt{\sum_H \sum_W |F_F|^2 - F_F^2(0,0)} \\ &= \frac{1}{HW} \sqrt{\sum_H \sum_W |FG|^2 - F^2(0,0)G^2(0,0)} \\ &= \frac{1}{HW} \sqrt{\sum_H \sum_W \left|F(h,w)(1 - e^{-(h^2+w^2)/2\sigma^2})\right|^2}. \end{aligned} \tag{18}$$

同样分析可知, 分母 $G_2(\sigma)$ 随着 σ 的增加也单调递减.

综合 (17) 式和 (18) 式, $PSNR_g$ 可写为

$$\begin{aligned} PSNR_g(\sigma) &= \frac{HW\lambda}{4\pi^2\sigma^2\sigma_1^2 + HW} \\ &\times \left\{ \frac{1}{HW} \left(\sum_H \sum_W \left|F(h,w)\right. \right. \right. \\ &\times \left. \left. \left. \left(1 - e^{-(h^2+w^2)/2\sigma^2}\right)\right|^2 - F^2(0,0) \right) \right\}^{-1/2}. \end{aligned} \tag{19}$$

由于图像的频谱函数 F 不确定, 因此上式无解析表达式. 通过大量的实验可知, $PSNR_g$ 随着 σ 的增加先增加后减小, 在 σ_b 处存在唯一的峰值.

对不同的图像加入相同的仿真目标, 由 (17) 式可知, $G_1(\sigma)$ 的变化规律相同. 但 $G_2(\sigma)$ 的变化规律与图像的频谱分布相关.

图像越复杂, 图像的高频成分越多, 随着 σ 的增加, $G_2(\sigma)$ 下降的越缓慢, $PSNR_g$ 函数的峰值对应的自变量 σ_b 越大, 即需要设计尺度更大的高通滤波器进行滤波. 符合实际情况. 由于高通滤波器尺度为 σ_b 时, 目标的全局信噪比最大, 因此定义 σ_b 为背景最佳滤波尺度.

2.3 基于背景最佳滤波尺度的背景复杂度计算方法

本节给出基于最佳滤波尺度的背景复杂度计算方法的流程, 流程图如图 1 所示.

具体步骤如下:

- 1) 输入单帧红外图像;
- 2) 将一定尺度 σ 和强度 λ 的二维高斯形状的仿真目标融合在该图像上;
- 3) 使用不同尺度的高通滤波器对图像进行滤波, 并计算滤波后目标的全局信噪比;
- 4) 计算背景最佳滤波尺度.

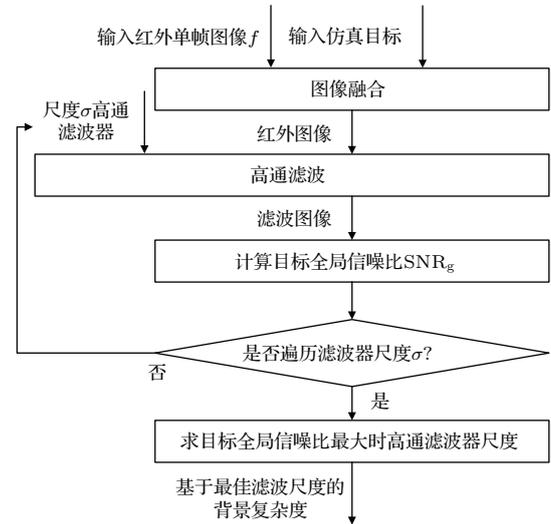


图 1 本文算法流程图

Fig. 1. The flow diagram of the proposed algorithm.

3 实验

3.1 理论公式有效性分析

利用仿真实验进行速度域 RMTI 算法有效性的验证, 基于 CPU 为酷睿 2.20 GHz, 内存为 2 GB 的笔记本电脑, 基于 Matlab 2010 软件平台完成仿真实验. 首先引入一副 1024 像素 \times 768 像素的真实红外图像. 在此图像中加入弱小目标, 弱小目标的位置坐标为 (250, 250), 单位为像素, 该弱小目标的尺度 σ 为变量, 目标的灰度峰值为 50. 然后, 在这些序列图像上加入高斯白噪声, 此噪声的均值为 0, 标准差 σ_E 为 5. 如图 2 所示, (a) 为原始图像, (b) 为 (a) 图加入仿真目标后的图像. 加入的目标使用二维高斯函数模拟. 在加入目标后的图像上计算目标峰值信噪比.

如图 3 所示, 为峰值信噪比随滤波尺度 σ 变化的曲线, 实心曲线为 PSNR 的理论曲线 (由 (19) 式计算), 三角形为 PSNR 的实验值. 可知, 理论值和实验值高度吻合, 公式推导正确. 另外, 由 PSNR

曲线可知, PSNR 存在单峰值, 当滤波尺度达到最佳时, 目标的信噪比达到最大.

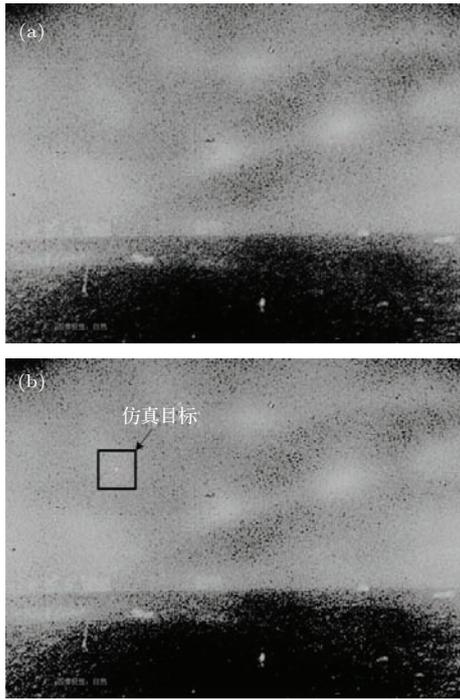


图2 第一组原始图像及加入仿真目标后的图像
Fig. 2. The first original image and this image with simulated target.

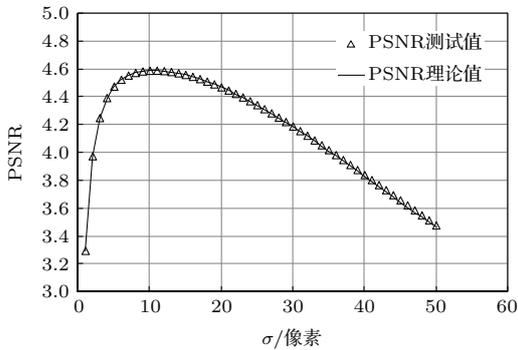


图3 PSNR 实验曲线

Fig. 3. The experimental curve of PSNR.

3.2 仿真目标的尺度和强度对计算最佳滤波尺度的影响

为测试最佳滤波尺度随着仿真目标参数的变化情况, 进行实验. 影响仿真目标的参数有两个: 尺度及强度. 进行两组实验, 测试最佳滤波尺度分别随着仿真目标强度及尺度的变化情况. 第一组实验图像如图2所示, 第二组实验如图4所示.

在此实验中, 在两组红外图像中加入强度为50的目标, 调节目标尺度大小, 通过实验输出对应每

个仿真目标尺度的最佳滤波尺度. 如图5所示, 为两组图像的最佳滤波尺度随着仿真目标尺度变化的曲线. 可知, 随着仿真目标尺度的增加, 最佳滤波尺度逐渐变小. 可见, 最佳滤波尺度与仿真目标的尺度呈负相关. 意味着对于不同的目标, 滤波效果不一致. 原因是: 越小的目标, 在频谱中处在越高频的部分, 要提取出来, 需要的滤波尺度越大. 反之, 越大的目标, 需要的滤波尺度越小. 观察曲线可知, 对尺度越小的目标, 最佳滤波尺度的差异越大, 因此, 一般情况下, 取较小的仿真目标来评价图像复杂度.

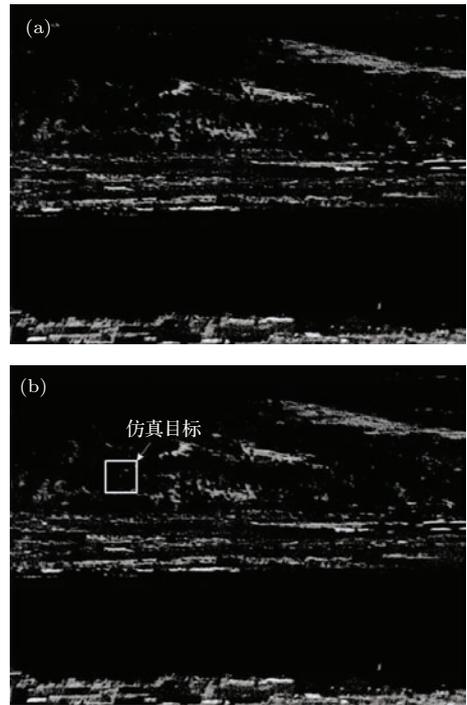


图4 第二组原始图像及加入仿真目标后的图像
Fig. 4. The second original image and this image with simulated target.

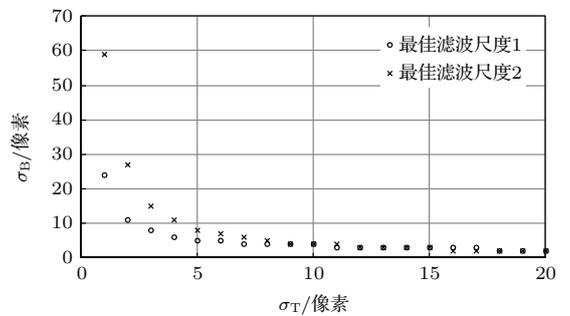


图5 最佳滤波尺度随着仿真目标尺度增加的变化曲线
Fig. 5. The experimental curve of optimal filtering scale as simulated target scale increases.

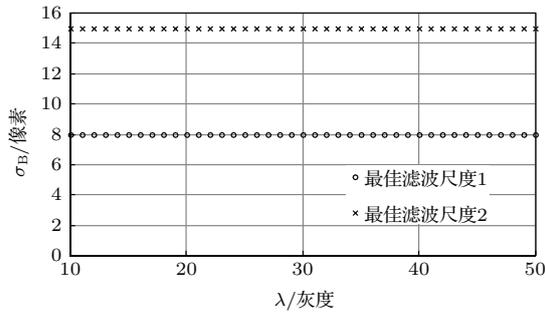


图6 最佳滤波尺度随着仿真目标强度增加的变化曲线
Fig. 6. The experimental curve of optimal filtering scale as simulated target intensity increases.

在接下来的实验中, 同样选取这两组红外背景图像, 加入尺度为3的目标, 调节目标强度大小, 输出最佳滤波尺度. 如图6所示, 为两组图像的最佳滤波尺度随着仿真目标强度变化的曲线. 可知, 随着仿真目标强度的增加, 最佳滤波尺度不变. 可见, 最佳滤波尺度与仿真目标的强度无关.

通过本节的实验, 得出结论: 最佳滤波尺度与

仿真目标的尺度负相关, 与强度无关. 测试不同红外图像的背景复杂度时, 需设计相同尺度的仿真目标进行实验.

3.3 不同类型的高通滤波器计算背景复杂度的性能分析

本节实验测试不同类型的高通滤波器(高斯高通、理想高通、Butterworth高通)下提出算法的性能.

如图7所示, 分别为目标的尺度在3, 4, 5, 6下的PSNR随着滤波尺度增加的变化曲线. 其中, 实线为高斯高通滤波器下的算法性能曲线, 另外, 点线和虚线分别为理想高通滤波及Butterworth滤波($n = 2$)算法性能曲线. 分析实验曲线可知, 在理想高通滤波器下的算法实验曲线有较大波动, 不平滑. 而其余两种滤波器下实验曲线相似, 同时曲线较平滑, 可求解出精度较高的最佳滤波尺度.

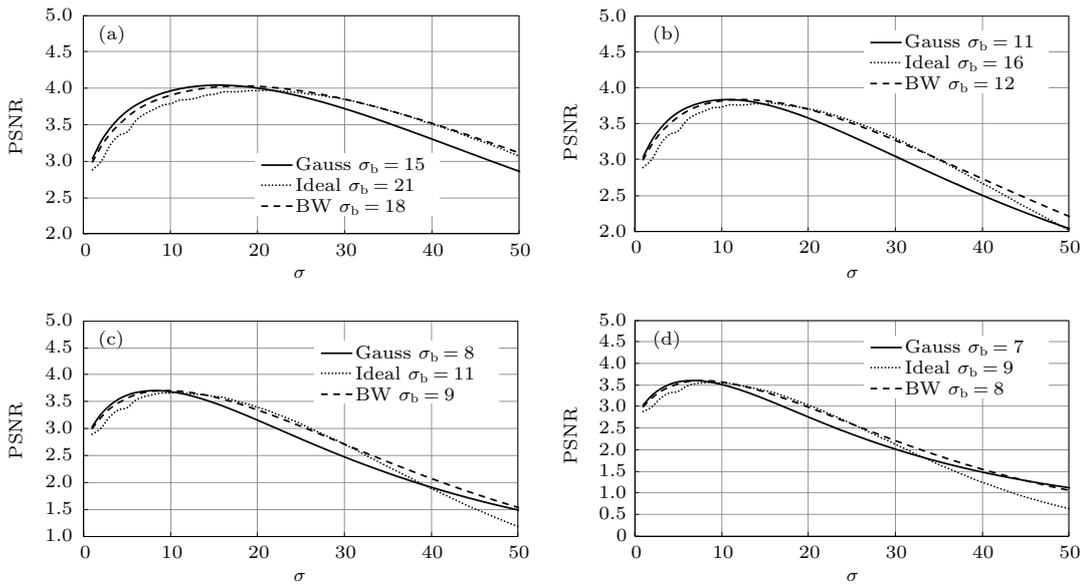


图7 提出方法在不同高通滤波算法性能的实验曲线

Fig. 7. The experimental curves of the proposed method under various high pass filtering.

3.4 基于实际视频序列的有效性实验及分析

分别对两组序列图像计算背景复杂度. 如图2所示为第一组序列图像中的一帧, 如图4所示为第二组序列图像中的一帧. 很明显, 第一组序列图像的复杂度要小于第二组序列图像. 如果用最佳高通滤波器的尺度来描述两组序列图像的背景复杂度, 经过分析可知:

1) 第一组序列图像的最佳滤波尺度要小于第二组的最佳滤波尺度.

2) 这两组图像的背景复杂度相差较大.

分别用2.1节中提出的四种复杂度计算方法及本文提出的方法计算这两组序列图像中的每一帧, 并将计算结果作为函数, 将帧数作为自变量绘图, 得图8. 五种方法的实验曲线分别如(a) (b) (c) (d) (e)所示.

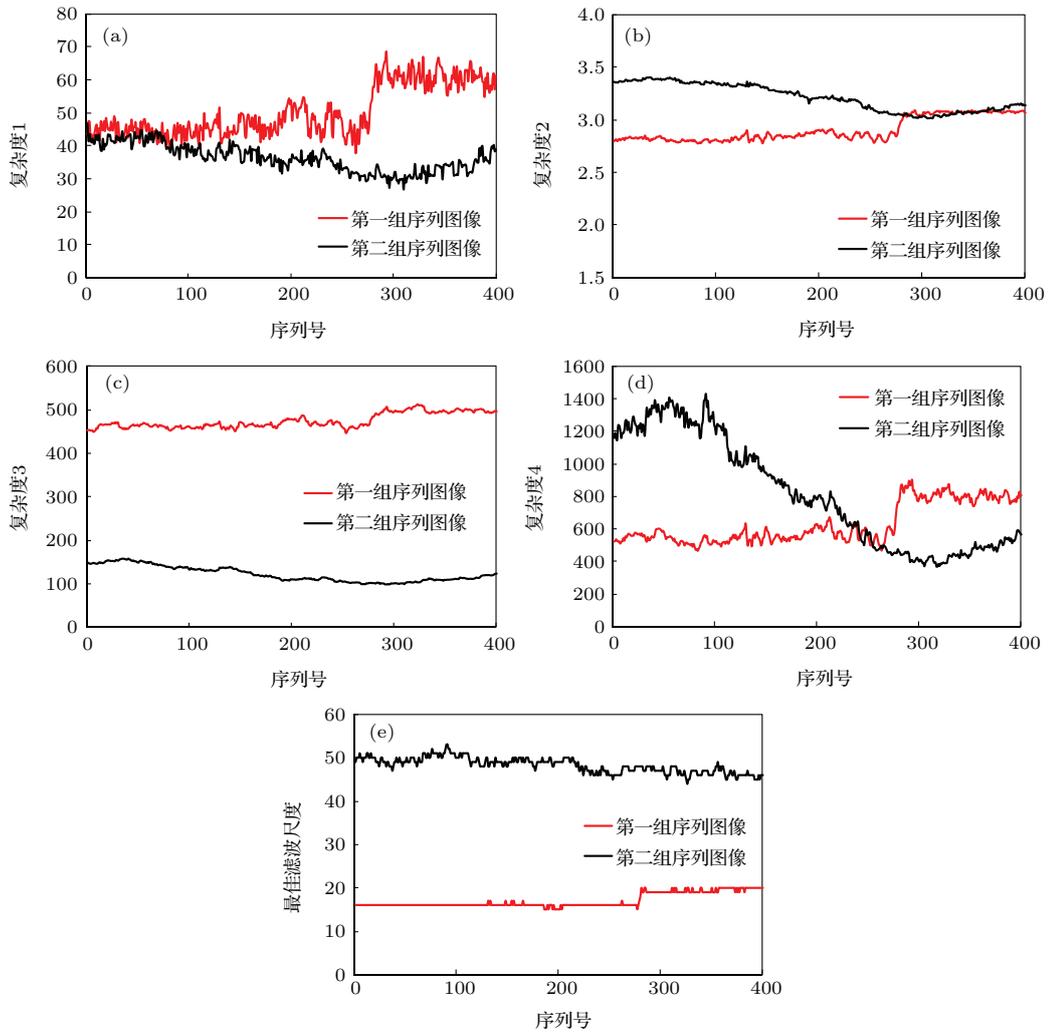


图 8 不同背景复杂度计算方法的实验曲线

Fig. 8. The experimental curves under various algorithms.

可见, 通过 (a), (b), (d) 方法计算出的两组序列图像的背景复杂度相差不大, 与实际情况不符. 虽然 (c) 方法计算出的背景复杂度差距较大, 但观察实验曲线可知, (c) 方法结果表明第一组图像的复杂度要高于第二组图像, 与事实不符; 并且实验曲线表明这种方法的计算结果并不稳定, 复杂度曲线波动较大, 而事实上第一组视频中不同帧之间复杂度变化较小.

本文方法得出的实验曲线如图 8(e) 所示, 不仅两组序列图像背景复杂度的计算结果差异较小, 而且可以正确揭示出第一组图像的复杂度要低于第二组图像. 另外, 这种方法可以准确计算出最佳高通滤波尺度的大小, 为红外图像的预处理提供理论指导.

下面分析图 8(e) 中第一组序列图像曲线中跳变的原因.

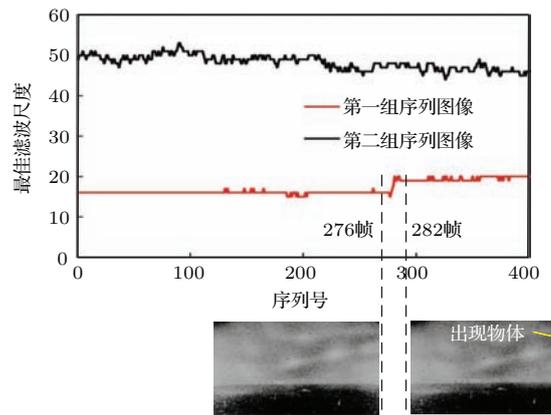


图 9 第一组序列图像中实验曲线跳变原因分析图

Fig. 9. The analysis of experimental curve change in first image sequences.

如图 9 所示, 将第一组序列图像的第 276 帧和 282 帧提取出来, 可见, 第 282 帧有物体从右上角飞入视场, 而第 276 帧无. 通过观察视频可知, 物体大

致在 280 帧飞入视场, 450 帧左右飞出视场, 其余背景无变化. 该物体对背景有细微的影响, 会增加背景的高频成分, 背景复杂度会增加. 通过分析可知, 背景的最佳滤波尺度也会随之相应增加. 从图中可知, 该细微变化被算法准确敏感到, 并显示在实验曲线上, 表现为最佳滤波尺度的跳变.

3.5 算法运算效率分析

下面对算法运算效率进行理论分析, 设图像的长度和宽度分别为 H 和 W . 对单片机以及数字信号处理芯片等而言, 乘法和加法计算消耗时间相同.

本文算法首先对图像进行融合, 消耗的计算量为 HW 次加法运算. 然后进行 $\text{floor}[(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/d\sigma + 1]$ 次高通滤波并求全局信噪比, 高通滤波消耗的计算量为 $O(\text{floor}[(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/d\sigma + 1]HWH_GW_G)$. 计算全局信噪比进行一次求标准差运算, 再进行一次除法运算, 与高通滤波比起来, 运算量可以忽略. 最后, 寻找全局信噪比最大时的 σ , 运算量也可忽略. 其中, σ_{\max} , σ_{\min} 分别为滤波尺度的上限及下限, $d\sigma$ 为滤波尺度的步长. H_G , W_G 分别为滤波模板的长度和宽度.

综上所述, 本文提出算法的运算量为

$$O(\text{floor}[(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/d\sigma + 1]HWH_GW_G) + HW \approx O((\sigma_{\max} - \sigma_{\min})HWH_GW_G/d\sigma).$$

又由于傅利叶滤波算法可在一些特殊的硬件上实现, 可以获得更短的计算时间及更高的计算效率.

4 结 论

本文提出一种红外图像复杂度评价方法, 该方法以背景滤波尺度作为评价准则. 除了评价红外图像, 该方法还可以提供图像的最佳高通滤波尺度信息, 指导我们对红外图像进行滤波. 通过严密的数学推导, 得出最佳滤波尺度的数学表示. 大量的实验表明: 1) 在红外图像复杂度评价方面, 该方法比传统方法效果好很多. 2) 本文推导的理论公式与实验相吻合. 3) 最佳滤波尺度与仿真目标的尺度负相关, 与强度无关. 4) 对比理想高通滤波器, 本文提出的方法宜用高斯及 Butterworth 高通滤波器实现. 5) 提出的方法不仅可以有效分析红外视频的复

杂度, 并且可以通过复杂度的变化分析图像内容的突变.

附录

$f_{\Gamma}(r) \oplus h(r)$ 函数解析表达式部分推导过程主要推导 (17) 式中第 3 步到第 4 步的过程:

$$f_{\Gamma}(r) \oplus h(r) = \lambda \exp\left(-\frac{\|r - r_0\|^2}{2\sigma_{\Gamma}^2}\right) - \frac{2\pi\sigma^2\lambda}{HW} \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2\pi^2\sigma^2}{HW} \|r - u\|^2 - \frac{\|u - r_0\|^2}{2\sigma_{\Gamma}^2}\right) du.$$

主要推导上式第二部分, 令

$$B = \frac{2\pi\sigma^2\lambda}{HW} \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2\pi^2\sigma^2}{HW} \|r - u\|^2 - \frac{\|u - r_0\|^2}{2\sigma_{\Gamma}^2}\right) du.$$

设 $p = r - u$, 得

$$B = \frac{2\pi\sigma^2\lambda}{HW} \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2\pi^2\sigma^2}{HW} \|p\|^2 - \frac{\|r - r_0 - p\|^2}{2\sigma_{\Gamma}^2}\right) dp.$$

令 $p = (x, y)$ 且 $r - r_0 = (r_x, r_y)$, 可得

$$B = \frac{2\pi\sigma^2\lambda}{HW} \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{2\pi^2\sigma^2}{HW} (x^2 + y^2) - \frac{[(x - r_x)^2 + (y - r_y)^2]}{2\sigma_{\Gamma}^2}\right\} dx dy = \frac{2\pi\sigma^2\lambda}{HW} \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_{\Gamma}^2} \left(\frac{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2}{HW} (x^2 + y^2) + (x - r_x)^2 + (y - r_y)^2\right)\right) dx dy = \frac{2\pi\sigma^2\lambda}{HW} \int \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2 + HW}{2\sigma_{\Gamma}^2 HW} (x^2 + y^2) - \frac{2\pi\sigma^2}{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2 + HW} (r_x^2 + r_y^2)\right) dx dy = \frac{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2}{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2 + HW} \times \lambda \exp\left(-\frac{2\pi\sigma^2}{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2 + HW} \|r - r_0\|^2\right),$$

得

$$f_{\Gamma}(r) \oplus h(r) = \lambda \exp\left(-\frac{\|r - r_0\|^2}{2\sigma_{\Gamma}^2}\right) - \frac{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2}{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2 + HW} \lambda \times \exp\left(-\frac{2\pi\sigma^2}{4\pi^2\sigma^2\sigma_{\Gamma}^2 + HW} \|r - r_0\|^2\right).$$

参考文献

- [1] Zhou B, Wang Y Z, Ying J J 2007 *Infrared Technology* **25** 30 (in Chinese) [周冰, 王永仲, 应家驹 2007 红外技术 **25** 30]
- [2] Zhang H J, Liang Y, Cheng Y M, Pan Q, Zhang H C 2006 *Infrared Technology* **28** 423 (in Chinese) [张惠娟, 梁彦, 程咏梅, 潘泉, 张洪才 2006 红外技术 **28** 423]
- [3] Chen Y 1989 *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **25** 343
- [4] Reed I S, Gagliardi R M, Stotts L B 1990 *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **26** 434
- [5] Gao C Q, Zhan T Q, Li Q, Jing X R 2008 *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)* **37** 907 (in Chinese) [高陈强, 张天骐, 李强, 景小荣 2010 重庆邮电大学学报(自然科学版) **37** 907]
- [6] Xi X L, Zhou X D, Zhang J 2012 *System Engineering and Electronics* **34** 40 (in Chinese) [奚晓梁, 周晓东, 张健 2012 系统工程与电子技术 **34** 40]
- [7] Qin H L, Li J, Zhou H X, Lai R, Liu S Q 2011 *J. Infrared Millim Waves* **30** 162 (in Chinese) [秦翰林, 李佳, 周慧鑫, 赖睿, 刘上乾 2011 红外与毫米波学报 **30** 162]
- [8] Wang J, Fu Y Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 090206
- [9] Jiang B, Wang H Q, Li X, Guo G R 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3985 (in Chinese) [姜斌, 王宏强, 黎湘, 郭桂蓉 2006 物理学报 **55** 3985]
- [10] Zhang L, Yang Y, Wang J G, Zhao X, Fang Z L, Yuan X C 2013 *Chin. Phys. B* **22** 054202
- [11] Hou W, Yu Q F, Lei Z H, Liu X C 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 074211 (in Chinese) [侯旺, 于起峰, 雷志辉, 刘晓春 2014 物理学报 **63** 074211]
- [12] Zhang W Z, Cheng Z B, Xia B F, Ling B, Cao X Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044212
- [13] Wu Y R, Cheng Y M, Zhao Y Q, Gao S B 2011 *J. Infrared Millim Waves* **30** 142 (in Chinese) [吴燕茹, 程咏梅, 赵永强, 高仕博 2011 红外与毫米波学报 **30** 142]
- [14] Cao Y, Liu R, Yang J 2008 *Int J. Infrared Milli Waves* **29** 385
- [15] Cao Y, Yang J, Liu R M 2009 *J. Infrared Millim Waves* **28** 235 (in Chinese) [曹原, 杨杰, 刘瑞明 2009 红外与毫米波学报 **28** 235]
- [16] Gu Y, Wang C, Liu B, Zhang Y 2010 *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **7** 469
- [17] Zhao J J, Tang Z Y, Yang J, Liu E Q 2011 *J. Infrared Millim Waves* **30** 156 (in Chinese) [赵佳佳, 唐峥远, 杨杰, 刘尔琦, 周越 2011 红外与毫米波学报 **30** 156]
- [18] Hua L L, Xu N, Yang G 2014 *Chin. Phys. B* **23** 064201
- [19] Chen X, Zhang J S 2014 *Chin. Phys. B* **23** 096401
- [20] Jiang D 2001 *The Theory of Information and Coding* (Hefei: Publishing House of the University of Science and Technology of China) p126 (in Chinese) [姜丹 2001 信息论与编码(合肥: 中国科技大学出版社) 第126页]
- [21] Yang L 2006 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University) (in Chinese) [杨磊 2006 博士学位论文(上海: 上海交通大学)]
- [22] Kim S, Lee J 2011 *Pattern Anal. Applic.* **14** 57
- [23] Reed I S, Gagliardi R M, Shao H M 1983 *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **19** 898
- [24] Reed I, Gagliardi R, Stotts L 1988 *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **24** 327
- [25] Liang D C, Wei M G, Gu J Q, Ying Z P, Ou Y C M, Tian Z, He M X, Han J G, Zhang W L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 214102 (in Chinese) [梁达川, 魏明贵, 谷建强, 尹治平, 欧阳春梅, 田震, 何明霞, 韩家广, 张伟力 2014 物理学报 **63** 214102]
- [26] Dai Y, Zhang J X 2012 *Chin. Phys. B* **21** 104203
- [27] Qiao L Y, Xu L X, Gao M 2013 *Infrared Technology* **35** 88 (in Chinese) [乔立永, 徐立新, 高敏 2013 红外技术 **35** 88]

An evaluation criterion of infrared image complexity based on background optimal filter scale*

Hou Wang[†] Mei Feng-Hua Cheng Guo-Jun Deng Xi-Wen

(Naval Academy of Armament, Shanghai 200436, China)

(Received 11 June 2015; revised manuscript received 18 July 2015)

Abstract

An evaluation of infrared image complexity is proposed based on the background optimal filtering to solve the problem that the traditional methods have given poor results in the background evaluation. Meanwhile, the optimal filtering scale for infrared image filtering can be given by this method, it will provide a guidance for optimal infrared image filtering. First, we generate the Gaussian simulated target and fuse it to the infrared image to obtain the real infrared image with the simulated target. Then, this image is filtered in different scales and the signal-to-noise ratio of the target after filtering is calculated. Finally, the maximal value of signal-to-noise ratio of the target is used as the background optimal filter scale, to evaluate the infrared image complexity. Besides, the infrared filtering scale is deduced by establishing the mathematic model, and then the mathematical expression of optimal filtering scale is obtained. A lot of experiments indicate that: 1) The mathematical expression of optimal filtering scale agrees with the experimental results. 2) The result of our method is better than that of the traditional methods based on information entropy. Because the optimal filtering scale is obtained by using our method, we can use this scale to filter the infrared image to effectively detect a small target. 3) When the scale of simulated target increases, the optimal filtering scale increases accordingly. So, when we calculate the infrared image complexity, the scale of simulated target must be the same. We can compare the infrared image complexity between different images. Moreover, the optimal filtering scale is independent of the intensity of simulated target. 4) The effect of Gaussian and Butterworth high-pass filter is better than that of the ideal high-pass filter in the proposed method. 5) The infrared image complexity can be analyzed by the proposed method effectively. Moreover, changes of different image contents can be analyzed by using the optimal filtering scale.

Keywords: small target detection, background complexity, high-pass optimal filter scale

PACS: 42.30.-d, 42.30.Sy

DOI: 10.7498/aps.64.234202

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB733100).

[†] Corresponding author. E-mail: Simon_Zero@126.com