

# 一种面向海上目标跟踪性能的红外图像预处理方法

李金旺<sup>1\*</sup>, 宋延嵩<sup>2\*\*</sup>, 刘天赐<sup>1</sup>, 赵馨<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 长春理工大学研究生学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup> 长春理工大学空地激光通信国防重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对海上目标红外图像采集工作中硬件噪声与海面背景杂波带来的影响,以海上无人船视频导航避障系统为背景,对海上红外目标跟踪工作系统噪声进行分析,设计了一种相关去噪算法,完成了系统建模,并对参数进行了改进。然后对海上红外视频进行逐帧采样,对采样所得红外图像序列进行滤波,将滤波前后跟踪位置与目标真实位置的中心坐标进行对比,最后将本文算法处理结果与其他类似算法进行对比。实验结果表明,本文算法滤波后跟踪位置与真实位置基本重合,捕获率高于 98%,跟踪误差小于 1 mrad,相对于类似滤波算法,信噪比提升了 10 dB。

**关键词** 图像处理; 红外图像; 海上目标; 引导滤波; 细节增强

**中图分类号** TP751 **文献标志码** A

**doi:** 10.3788/LOP57.101023

## A Preprocessing Method for Infrared Image Based on Maritime Target Tracking Performance

Li Jinwang<sup>1\*</sup>, Song Yansong<sup>2\*\*</sup>, Liu Tianci<sup>1</sup>, Zhao Xin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduate School, Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** Aiming at the influence of hardware noise and sea background clutter in the infrared images of marine targets, we analyze the noise of offshore infrared target tracking working systems based on the background of an offshore unmanned vehicle video navigation obstacle avoidance system, and design a related denoising algorithm. This algorithm completes the system modeling and improves the parameters. Then, the infrared video at sea is sampled frame by frame, and the sampled infrared image sequence is filtered. The tracking position before and after filtering is compared with the central coordinate of the target real position. Finally, the processing result of this algorithm is compared with other similar algorithms. Experimental results show that using the proposed algorithm, the tracking position after filtering basically coincides with the real position, the capture rate is higher than 98%, and the tracking error is less than 1 mrad. Compared with similar filtering algorithms, the signal-to-noise ratio is improved by 10 dB.

**Key words** image processing; infrared image; maritime target; guided filtering; detail boosting

**OCIS codes** 100.3080; 100.0110; 030.4280; 110.4280

## 1 引言

在当下,海上资源的受重视程度日益升高,海上作业的需求也与日俱增。因为红外成像技术在外界杂波干扰较大的情况下对弱小目标的检测识别、跟

踪制导效果极好,与其他跟踪系统相比不易受到干扰,且具有工作持续性好、体积小、配置灵活等优点,所以目前海上红外目标识别与无人船避障技术已经成为各国研究的热点。

红外成像技术优势明显,但海上红外目标跟踪

收稿日期: 2019-10-28; 修回日期: 2019-12-07; 录用日期: 2020-01-10

基金项目: 吉林省产业技术研究与开发专项基金(2019C040)

\* E-mail: 15424443090@qq.com; \*\* E-mail: songyansong2012@126.com

工作中普遍存在系统自身噪声复杂、受海面背景强杂波干扰、目标特征弱容易淹没在噪声中等问题。近几年针对海上红外图像的各种噪声处理相关研究很多,例如空域高斯滤波<sup>[1]</sup>、基于区域分割滤波算法<sup>[2]</sup>、均值滤波<sup>[3]</sup>已经被广泛应用于海上红外图像的降噪与杂波抑制工作。针对上述算法造成图像模糊的问题,保护边缘的降噪滤波算法的相关研究也有很多,Tomasi等<sup>[4]</sup>提出了针对像素强度相似性的双边滤波,也被广泛用于红外图像使用<sup>[5]</sup>; Aurich等<sup>[6]</sup>提出了用于边缘保护的非线性高斯滤波;Paris等<sup>[7-10]</sup>先后提出了多种双边滤波器的快速实施方法。尽管以上算法在多数情况下有效,但在边缘附近产生不需要的反转伪像,且依靠量化加速的算法会影响到准确性。2010年,He等<sup>[11]</sup>提出引导滤波算法,具有良好的边缘保持平滑特性,不会受到梯度翻转伪影的影响,且能写出复杂度与窗口大小无关的算法,实现每百万像素执行灰度滤波速度达到40 ms,是目前最快的边缘保持滤波器之一。因为海面背景比较复杂,并非以上某种算法可以独立处理,所以本文以引导滤波为核心,针对海上红外图像的特性设计了一种联合滤波算法,提高了图像的信噪比,降低了工作系统误差,实验结果表明跟踪效果良好。

## 2 图像预处理算法建模

### 2.1 红外图像特性

对海上红外图像特性进行分析,进而对背景与噪声的关系进行建模是进行海上红外图像预处理必不可少的步骤。红外图像与可见光图像相比,普遍存在着信噪比、对比度较低的特性。文献表明,根据国际光学工程学会(SPIE)对红外弱小目标的定义,对于大小为256 pixel×256 pixel的图像,成像尺寸小于总像素的0.12%(即小于81 pixel)的目标为弱小目标。而海上红外图像中的目标普遍满足弱小目标的定义,且通常存在着外界环境与内部物理量随机变化的两方面干扰,目标极易淹没在噪声中,从噪声建模角度而言存在着一定的复杂性,本章将从随机噪声与固定图案噪声两方面对红外图像特性进行分析建模<sup>[12]</sup>,最后从目标、背景与噪声角度进行总结。

#### 2.1.1 红外图像随机噪声建模

在海上红外图像中,随机噪声表现为随机闪烁的颗粒,主要由海面背景的光子起伏、信号读出与处理电路的附加噪声与光电转换噪声引起。现将海上红外图像中的随机噪声分为高斯噪声和泊松噪声。

#### 1) 泊松噪声

在红外辐射光电转换过程中,入射光子数及手机在探测元中的电荷数(量子效率为1)都可视为服从泊松分布,其概率分布函数(PDF)表示为

$$P(x=m) = \frac{\lambda^m \exp(-\lambda)}{m!}, (m=0,1,2,\dots, \lambda > 0). \quad (1)$$

前端光电转换的入射光子噪声和信号读出电路中的弹散噪声、转移(损失)噪声都可以映射为海上红外图像的泊松噪声。在多数应用场合泊松分布往往不是主要噪声,但它确立了图像传感器的噪声最小极限值。

#### 2) 高斯噪声

图像的高斯噪声是一种概率密度函数服从高斯分布(即正态分布)的一类噪声,其PDF表示为

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-(x-\mu)^2/2\sigma^2], \quad (2)$$

式中: $x$ 表示成像噪声的灰度值; $\mu$ 为 $x$ 的均值; $\sigma$ 为 $x$ 的方差。

探测器中的热噪声、探测器相关处理电路中的放大器噪声、模拟/数字(A/D)变换引入的量化噪声和输出噪声都是独立分布的噪声。若将这些噪声叠加起来,根据中心极限定理,它们的振幅分布必然符合高斯分布,因此,以上这些噪声都可综合映射为海上红外图像中的高斯噪声。

#### 2.1.2 红外图像固定图案噪声建模

固定图案噪声(FPN)是由红外探测器本身响应率的不均匀、成像缺陷和杂波干扰所导致的,会在多帧图像同一位置“固定”出现的噪声。海上红外图像的固定图案主要表现为图像的非均匀性和盲元,往往体现为椒盐噪声。凝视型焦平面阵列探测器成像的非均匀性使图像模糊不清、畸变,盲元造成了图像中的椒盐颗粒。

比利时IMEC实验室的Dierickx等<sup>[13]</sup>对凝视型阵列盲元修正时,采用的理论基础认为盲元在图像中的表现与图像椒盐噪声相同。凝视型红外成像中的盲元映射为红外图像的椒盐噪声,其PDF表示为

$$P(z) = \begin{cases} P_a, & z=a \\ P_b, & z=b \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (3)$$

若 $b > a$ ,则灰度值 $b$ 在图像中将显示为一个亮点,相反, $a$ 的值将显示为一个暗点。通常设 $a$ 和 $b$ 为饱和值,即在图像中为灰度的最大值或最小值。

$P_a$  和  $P_b$  为“椒”或“盐”的密度分布。由此可知,红外图像中存在着会对目标跟踪产生干扰的椒盐噪声,处理椒盐噪声是红外目标预处理的必要工作。

### 2.1.3 红外图像目标、背景与噪声关系建模

远距离成像时,目标的红外图像为弱小目标,目标淹没在背景杂波中,信噪比较低,目标图像携带的信息量少,给目标的探测与跟踪带来了很大的困难。利用红外成像传感器获取的小目标图像数据主要由目标、背景及噪声三部分组成,图像数据可以描述为  $f(x, y, t) = f_s(x, y, t) + f_b(x, y, t) + n(x, y, t)$ ,

(4)

式中: $f(x, y, t)$ 是  $t$  时刻点  $(x, y)$  的灰度值; $f_s(x, y, t)$ 、 $f_b(x, y, t)$  是  $t$  时刻点  $(x, y)$  的目标灰度与背景灰度; $n(x, y, t)$  为图像噪声。由红外图像建模

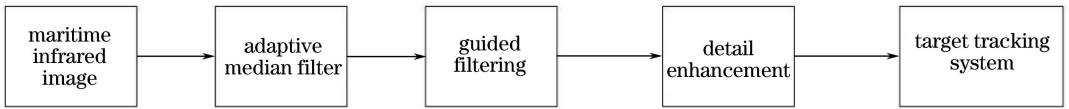


图1 联合滤波算法示意图

Fig. 1 Schematic of joint filtering algorithm

#### 2.2.1 自适应中值滤波

在海上目标探测过程中,经常存在信号较弱的情况,此时由于红外探测器成像机理,相机自身的噪声会对图像造成严重的椒盐噪声干扰。文献表明,引导滤波对高斯噪声处理效果较好,对椒盐噪声的滤除功能则不够完善。为防止之后部分有遗留的椒盐噪声与目标一起被增强,本文先引入自适应中值滤波对图像进行处理。

使用自适应中值滤波器的目的为动态地改变中值滤波器的窗口尺寸,在噪声密度很大的情况下,相应地增加滤波器的窗口尺寸。传统中值滤波通常只能处理噪声强度约为 0.2 的椒盐噪声,而该方法可处理更为严重的椒盐噪声。

#### 2.2.2 引导滤波

由噪声建模可知,海上红外图像最主要的噪声是高斯噪声,当前处理高斯噪声的保边算法中双边滤波是最为流行的算法,但因其产生梯度翻转伪影的特性衍生出了引导滤波,在这里本文选用引导滤波。

采用局部线性模型的思想来定义引导滤波,在本思想中,可以认为函数上一点与邻近点呈线性关系。这样的话,就可以将任何复杂函数分段,将其看作多个局部线性函数的组合。在引导滤波的定义中,命名输入待滤波原图像  $p$ 、输入引导图像  $I$  与输出图像  $q$ ,根据局部线性模型思想,假设  $q$  是以像素

可知,图像数据由目标、背景与噪声三方面共同构成,在复杂噪声干扰的图像中,需要对噪声进行针对性滤波,进而提高图像质量。

## 2.2 算法设计

本文基于引导滤波,针对海上红外图像中的噪声特性与实际跟踪需要设计了一种联合算法(多种滤波组合算法)。如图 1 所示,海上红外图像先由自适应中值滤波算法进行处理,继而进行引导滤波,最后用多尺度目标增强算法进行细节增强,锐化图像边缘之后将处理后的图像输出至跟踪系统供其使用。该算法对海上红外图像中的高斯噪声有效,且能处理探测器产生的椒盐噪声等脉冲噪声,在平滑噪声的同时保护了图像边缘,扩展了图像的动态范围,增强了图像细节质量。

$k$  为中心的窗口  $\omega_k$  中  $I$  的线性变换,假设线性关系为

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall I_i \in \omega_k, \quad (5)$$

式中: $a_k$ 、 $b_k$  是假设的线性系数。对(5)式两边做梯度计算得到:

$$\nabla q = a \nabla I. \quad (6)$$

由于图像边缘检测普遍通过对图片进行梯度计算来实现,由(6)式可知,输入引导图像  $I$  与输出图像  $q$  的梯度类似,继而可知,算法并未对图像边缘进行改变,从而达到边缘保护效果。

接下来,为求线性回归系数,通过找到合适的  $a_k$ 、 $b_k$  使下式为最小值。

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2], \quad (7)$$

式中: $\epsilon$  为用于防止  $a_k$  过大的惩罚值。关于  $a_k$ 、 $b_k$  的解法由线性回归方程给出,

$$\begin{cases} a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \overline{p_k}}{\sigma_k^2 + \epsilon} \\ b_k = \overline{p_k} - a_k \mu_k \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $\mu_k$  与  $\sigma_k^2$  是  $I$  在窗口  $\omega_k$  中的均值与方差; $|\omega|$  是窗口  $\omega_k$  中像素的数量; $\overline{p_k}$  是待滤波图像  $p$  在窗口  $\omega_k$  中的均值,其定义为

$$\bar{p}_k = \frac{1}{|\omega_k|} \sum_{i \in \omega_k} p_i. \quad (9)$$

在计算每个窗口的线性系数时,像素  $i$  将涉及覆盖  $i$  的所有重叠窗口  $\omega_k$ ,在不同的窗口计算中,线性系数不同导致结果  $q_i$  的值也不相同。因此,将所有  $q_i$  的可能值取均值,

$$q_i = \frac{1}{|\omega_k|} \sum_{k, i \in \omega_k} (a_k I_i + b_k), \quad (10)$$

式中: $\omega_k$  是所有包含像素  $i$  的窗口, $k$  是其中心位置; $q_i$  为结果图像。

### 2.2.3 多尺度图像细节增强算法

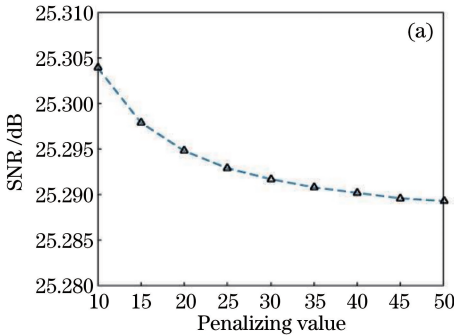
作为一种全局方法,此前的变换函数增强了整个图像,但它在提升局部细节方面依然存在局限性。因为海上红外目标普遍具有目标占用像素点少、提供信息量少等特点,所以在跟踪过程中极易与背景混淆,因此,通过向图像添加高频分量来扩展动态范围以提高目标局部可见性。

本文采用一种核心思想类似于 Retinex 的多尺度方法<sup>[14]</sup>,使用三个尺度的高斯模糊,再逐次相减。首先,使用三个不同的高斯核来处理全局增强图像  $I$ ,继而获得三个不同的模糊图像,分别表示为

$$I_1 = G_1 \times I, \quad I_2 = G_2 \times I, \quad I_3 = G_3 \times I, \quad (11)$$

式中: $G_1, G_2, G_3$  为高斯核,其标准差  $\sigma_1 = 1.0, \sigma_2 = 2.0, \sigma_3 = 4.0$ 。然后,提取精细节  $D_1$ 、中值细节  $D_2$  和粗细节  $D_3$ ,分别表示为

$$D_1 = I - I_1, \quad D_2 = I_1 - I_2, \quad D_3 = I_2 - I_3. \quad (12)$$



再通过合并三个图层来生成整体细节图像,

$$D = [1 - \omega_1 \times \text{sgn}(D_1)] \times D_1 + \omega_2 \times D_2 + \omega_3 \times D_3, \quad (13)$$

式中: $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  分别为 0.5、0.5 和 0.25。精细节  $D_1$  扩大了边缘附近的灰度级差异,但可能会因为过量的超调导致灰度级别饱和。为解决这个问题,需要减少  $D_1$  的正组分,同时增大  $D_1$  的负组分。最后,将整体细节  $D$  添加到全局增强图像  $I$  中。该方法可提高图像动态范围,增强目标细节。

## 3 实验结果

### 3.1 算法参数分析结果

由以上算法介绍可知,引导滤波的两个重要参数为窗口  $\omega_k$  与惩罚值  $\epsilon$ 。通常用图像信噪比(SNR)来定量评价各种算法的背景抑制能力,表示为

$$R_{\text{SNR}} = \frac{g_{\text{target}} - \bar{g}}{\sigma}, \quad (14)$$

式中: $g_{\text{target}}$  为目标的灰度; $\bar{g}$  为整个图像的均值; $\sigma$  为图像的标准差。SNR 值越大,则图像质量越好,目标更容易被检测到。

接下来,引入背景抑制因子<sup>[15]</sup>(BSF),表示为

$$F_{\text{BSF}} = \frac{k_{\text{in}}}{k_{\text{out}}}, \quad (15)$$

式中: $k_{\text{in}}, k_{\text{out}}$  分别为图像处理前后杂波的标准差。BSF 值越大,表示算法的处理性能越好。

本文采用海上红外图像进行仿真,经过调研,以 SNR 与 BSF 为参数来评价窗口  $\omega_k$  与惩罚值  $\epsilon$  对海面背景的红外图像的去噪效果影响,如图 2、3 所示。

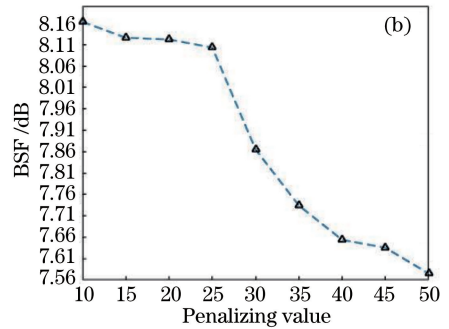


图 2 惩罚值对去噪性能的影响。(a) SNR;(b) BSF

Fig. 2 Influence of penalizing value on denoising performance. (a) SNR;(b) BSF

由图 2 可知,当窗口  $\omega_k$  大小不变时,随着惩罚值  $\epsilon$  的递增,信噪比与背景抑制因子逐渐降低,证明该值越小,去噪效果越好。

令  $r$  为窗口半径长度,由图 3 可知,当  $r > 5$

时,随着窗口半径增加,信噪比与背景抑制因子逐渐降低。因此对  $r < 5$  的情况进行逐个测试,结果显示,针对海面背景的红外图像,当  $r = 3$  时效果最好。

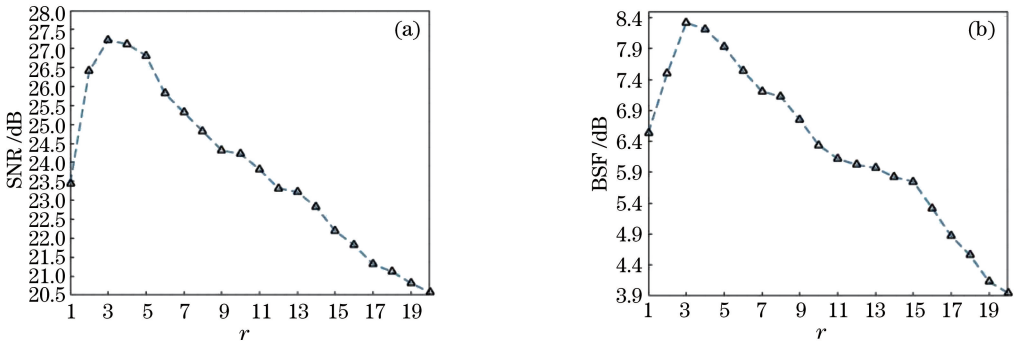


图3 窗口半径  $r$  对去噪性能的影响。(a) SNR; (b) BSF

Fig. 3 Influence of window radius  $r$  on denoising performance. (a) SNR; (b) BSF

### 3.2 海上红外目标跟踪结果

根据以上算法理论,基于与上海航天科技集团有限公司第八研究院合作横向项目,以海上无人船为实验平台进行实验,实验平台如图4所示。而后选取海上红外图像序列作为样本,完成仿真实验,并对实验结果进行了分析。红外跟踪设备主要由光学单元、红外探测器单元、红外图像处理单元、像移补偿器、电源管理单元组成,如图5所示。其中光学单元中包含镜头模块和振镜模块。红外探测器部分,采用BUIR MCore系列非制冷红外机芯组件;图像处理部分,采用Nvidia公司的TX2图像处理开发

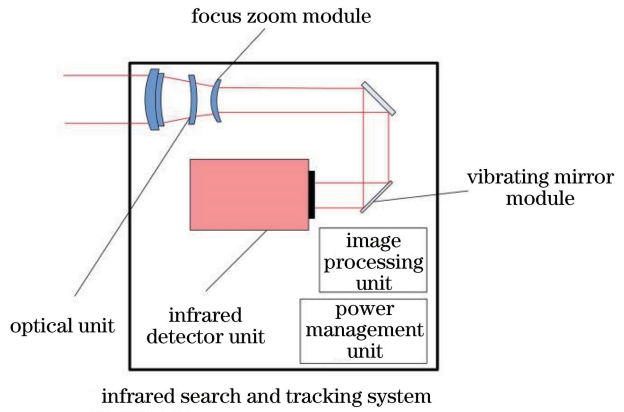


图5 红外搜索跟踪系统示意图

Fig. 5 Schematic of infrared search and tracking system

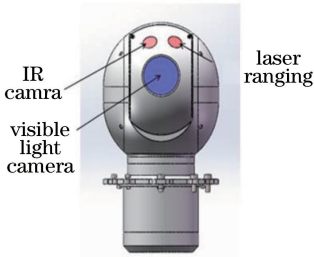


图4 海上红外目标跟踪测距实验平台

Fig. 4 Marine infrared target tracking and ranging experiment platform

板对图像数据进行处理。

实验在海上无人船平台上,以海面舰船为目标,采用目标匹配算法进行跟踪,由于天气原因,存在着较大太阳光杂波以及相似特征背景干扰,跟踪结果如图6所示,红色波门无法成功框选目标,出现不同位置的错误跟踪。可见在噪声干扰下,普通的跟踪算法已经无法对图像中的目标进行跟踪,需要进行图像预处理来降低噪声。

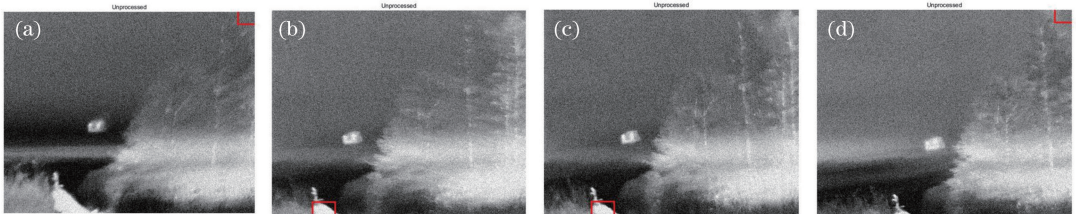


图6 处理前目标丢失情况

Fig. 6 Target tracking failure before processing

采用实验设计的图像处理系统,设置  $\epsilon = 10$ , 窗口半径为3,对图像进行预处理,再次采用相同的目标匹配算法进行跟踪。如图7所示,滤波处理之后,目标始终位于红色波门中心,跟踪成功完

成。实验结果表明,该系统可对大于  $3 \times 3$  像素的目标完成探测,系统跟踪精度低于  $1 \text{ mrad}$  ( $20^\circ$  幅值,  $0.5 \text{ Hz}$  等效正弦条件下),目标捕获成功率高于  $98\%$ 。

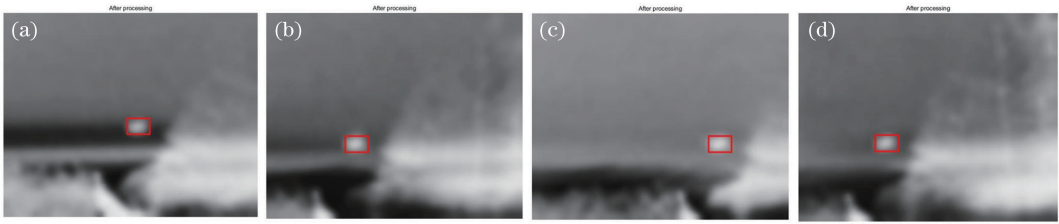


图 7 处理后跟踪情况

Fig. 7 Target tracking after processing

### 3.3 位置坐标对比图

为了更加直观地展示跟踪效果,采用一组共 258 帧的海上红外图像序列,逐帧框选出目标所在位置,在 Matlab 上完成算法仿真,分别将处理前后跟踪位置与目标真实位置求取中心坐标,作坐标图进行对比,并且分别用滤波前后跟踪位置与真实位置求取误差作图。如图 8 所示,其横纵坐标

分别代表像素点坐标,圆圈位置代表目标真实位置坐标,星点代表经滤波前跟踪结果坐标;如图 9 所示,圆圈位置代表目标真实位置坐标,三角代表经滤波后跟踪结果坐标。由图可知,滤波处理前,有大量目标点丢失,波门错误跟踪;滤波处理后,跟踪位置与目标真实位置基本完全重合,证明成功完成目标跟踪。

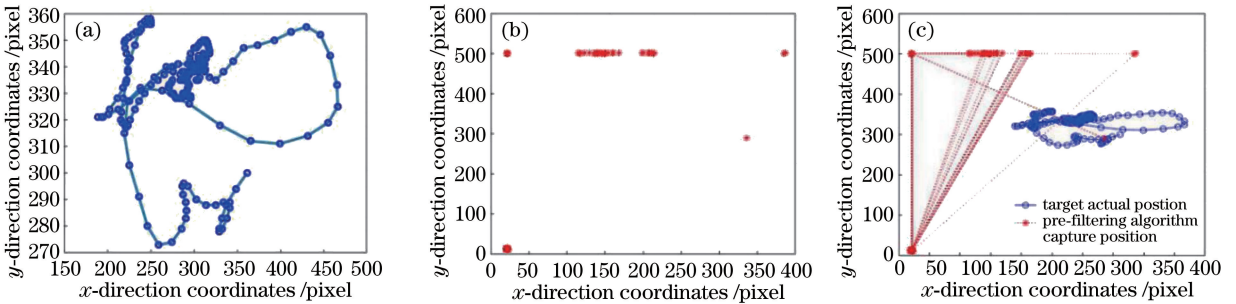


图 8 滤波前跟踪情况。(a) 目标实际位置;(b) 预滤波算法捕获的位置;(c) 位置比较

Fig. 8 Target tracking before filtering. (a) Target actual position; (b) pre-filtering algorithm capture position; (c) position comparison

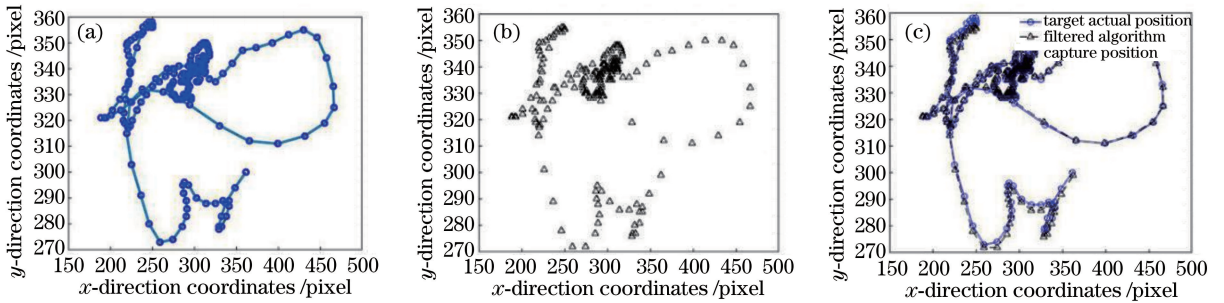


图 9 滤波后跟踪情况。(a) 目标实际位置;(b) 滤波算法捕获的位置;(c) 位置比较

Fig. 9 Target tracking after filtering. (a) Target actual position; (b) after filtering algorithm capture position; (c) position comparison

如图 10 所示,其横坐标代表图像在图像序列中所属帧数,纵坐标代表跟踪位置与目标真实位置坐标差。由图可知,滤波处理之前,有多个跟踪点误差极大,而滤波处理之后误差大大降低。

### 3.4 处理图像信噪比对比

为进一步体现出本文算法对海上红外图像的处理能力,对之前跟踪所使用图像序列分别使用双边

滤波、引导滤波、改进高斯滤波以及本文算法进行处理,对处理后图像结果以 SNR 与峰值信噪比 (PSNR) 为指标进行对比,对比结果如表 1 所示。实验结果表明,由于算法针对性较强,对海上红外图像中最具典型性的高斯噪声与椒盐噪声进行抑制,图像质量大大提高。相对于其他算法,本文算法对图像信噪比都有明显提升,特别是相比双边滤波和

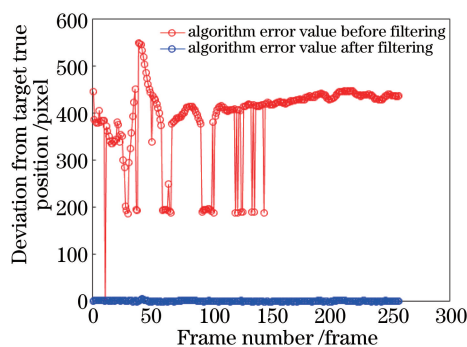


图 10 滤波前后跟踪误差对比

Fig. 10 Comparison of tracking error before and after filtering

表 1 图像信噪比对比

Table 1 Comparison of image SNR

Using algorithm	SNR /dB	PSNR /dB
Bilateral filtering	13.6737	66.5825
Improving Gaussian filtering	15.5988	68.5770
Guided filtering	24.3432	77.4681
Proposed algorithm	25.2339	78.3023

改进高斯滤波的信噪比提升了 10 dB 以上。

## 4 结 论

本文设计了一种针对海上红外图像的预处理方案,在实验中对其效果进行了验证。针对海上目标所处背景复杂,形态特征弱等特点,所设计算法对海面背景噪声进行了滤波,对弱小目标细节进行了增强。实验结果表明,本文算法提高了目标跟踪精度,降低了系统跟踪误差,跟踪精度高于 98%,提升了 10 dB 以上的信噪比,对海上红外目标捕获系统完成工作起到了重要作用。为海上红外目标跟踪、海上红外图像处理工作提供指导与参考。

## 参 考 文 献

- [1] Wang H X, Dong H, Zhou Z Q. Review on dim small target detection technologies in infrared single frame images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 080001.  
王好贤,董衡,周志权. 红外单帧图像弱小目标检测技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 080001.
- [2] Zhu J W, Liu W H, Yin J F, et al. Infrared small target regions detection based on improved image complexity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 101006.  
朱婧文,刘文好,印剑飞,等. 基于改进复杂度的红外弱小目标区域检测算法[J]. 激光与光电子学进

展, 2018, 55(10): 101006.

- [3] Toet A. Detection of dim point targets in cluttered maritime backgrounds through multisensor image fusion [C] // AeroSense 2002. Proc SPIE 4718, Targets and Backgrounds VIII: Characterization and Representation, Orlando, FL, USA, 2002: 118-129.
- [4] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images [C] // International Conference on Computer Vision. IEEE, 1998.
- [5] Sun G. Research on key technology of infrared target detection in large field of view system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.  
孙刚. 大视场红外搜索系统目标检测关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [6] Aurich V, Weule J. Non-linear Gaussian filters performing edge preserving diffusion [M] // Informatik aktuell. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995: 538-545.
- [7] Paris S, Durand F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [M] // Computer Vision-ECCV 2006. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 568-580.
- [8] Porikli F. Constant time  $O(1)$  bilateral filtering [C] // 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008. Anchorage, AK, USA. IEEE, 2008.
- [9] Yang Q X, Tan K H, Ahuja N. Real-time  $O(1)$  bilateral filtering [C] // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 20-25, 2009. Miami, FL. IEEE, 2009.
- [10] Adams A, Baek J, Davis M A. Fast high-dimensional filtering using the permutohedral lattice [J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(2): 753-762.
- [11] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [12] Tang L, Liu L, Su J H. Modeling and simulation research of infrared image noise [J]. Infrared Technology, 2014, 36(7): 542-548.  
唐麟,刘琳,苏君红. 红外图像噪声建模及仿真研究 [J]. 红外技术, 2014, 36(7): 542-548.
- [13] Dierickx B, Meynants G. Missing pixel correction algorithm for image sensors [J]. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 1999, 3410: 200203.

- [14] Kim Y , Koh Y J , Lee C , et al. Dark image enhancement based on pairwise target contrast and multi-scale detail boosting [C] // IEEE International Conference on Image Processing. IEEE, 2015:1404-1408.
- [15] Yao C Q, Chen W. Infrared dim target detection based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111101.
- 姚成乾, 陈伟. 基于改进粒子算法的红外弱小目标检测研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 111101.