

基于各向异性双边滤波红外背景抑制方法研究^{*}

王涛^{1,2}, 陈凡胜^{1†}, 苏晓锋¹

(1. 中国科学院 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 红外复杂背景抑制作为红外弱小目标检测的重要环节, 直接影响着后续算法的目标检测概率和虚警率. 针对各向同性双边滤波背景抑制方法因无法改变背景预测方向, 在方向性的结构化云边缘存在较大预测残差的问题, 本文设计了一种利用原始图像邻域统计信息自适应更新滤波尺度、掩模尺寸和滤波方向的各向异性双边滤波背景预测器, 以最大限度地分离目标和背景. 仿真实验表明该方法对输入信杂比为4的目标的信杂比增益大于4和对原始图像邻域杂波的背景抑制算子大于4.

关键词: 弱小目标检测; 双边滤波; 自适应滤波; 背景抑制; 各向异性滤波

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Research of Infrared Background Suppression
Method Based on Anisotropic Bilateral Filtering

WANG Tao^{1,2}, CHEN Fansheng^{1†}, SU Xiaofeng¹

(1. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Infrared complex background suppression is an important part of infrared dim target detection, which directly affects the target detection probability and false alarm rate of subsequent algorithms. As the isotropic bilateral filtering background suppression method can not change the background prediction direction and remain a large residual in the direction of the structured cloud edge, in this paper, an anisotropic bilateral filter which adapts the filter parameters including filter scale, mask size and filter direction by using the local characteristics of the image was designed. It separates the target from background more precisely. The test results show that the proposed method has a signal to clutter ratio gain for target and a background suppression operator for clutter, and both are up to 4 with the input signal to clutter ratio of 4.

Key words: dim target detection; bilateral filter; adaptive filter; background suppression; anisotropic filter

红外目标检测是红外告警系统的重要研究内容, 当目标成像距离较远时, 目标在探测器上的成像

尺寸较小, 极易淹没在复杂背景之中, 使得其检测与追踪变得非常困难. 红外背景抑制利用图像的空域

^{*} 收稿日期: 2017-02-28

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所创新基金项目(CX-60), Shanghai Institute of Technical Physics of Chinese Academy of Sciences Innovation Fund (CX-60)

作者简介: 王 涛(1990—), 男, 安徽合肥人, 中国科学院上海技术物理研究所博士研究生

[†] 通讯联系人, E-mail: cfs@mail. sitp. ac. cn

和时域相关性,以适当的预测模型估计背景,增强目标,提高红外告警系统的目标检测性能.

传统的红外背景抑制方法有空域背景抑制方法和时域背景抑制方法.空域背景抑制方法基于图像的空间邻域相关性,容易在图像边缘等弱相关性区域残留大量的背景,主要有各向异性扩散^[1]、小波变换^[2]、数学形态学^[3]、自适应局部统计信息^[4]、多尺度分割^[5-10]等.以时域剖面^[11]、时空域最小均方误差^[12]为代表的时域背景抑制方法虽然背景抑制效果要优于空域法,但算法性能受制于卫星平台的稳定性,当卫星平台抖动量较大时,帧间图像的相关性降低,时域背景抑制方法难以应用.

双边滤波是一种兼顾图像空间邻近度和灰度相似性的非线性滤波方法,相对于传统的边缘抑制方法,具有更好的边缘抑制性能.李凡等人^[13]将双边滤波运用在红外图像背景抑制之中,取得了信噪比增益大于2的良好效果,曹瑛等人^[14]采用模糊分类方法自适应的选取像素双边滤波邻域,降低了算法的复杂度.然而,传统的双边滤波方法并没有考虑到图像边缘的方向性,本文提出的各向异性双边滤波背景抑制方法,使滤波方向平行于边缘方向,并通过图像的局部统计信息自适应地调节滤波尺度,仿真实验验证了各向异性双边滤波背景抑制算法的有效性,背景抑制后的信杂比增益可以达到4.

1 各向异性双边滤波

1.1 双边滤波

双边滤波最早可以追溯到 Aurich 和 Weule^[15]的非线性高斯滤波研究中,也曾出现在 Smith 和 Brady^[16]的 SUSAN 框架中,最终由 Tomasi 以及

Manduchi^[17]正式提出.其定义可由式(1)概括表示:

I^{filter}(x,y)=\sum_{(x_i,y_i)}I(x_i,y_i)*W_{ij}(I) \tag{1}

式中: $I(x,y)$ 为输入的滤波图像; $I^{filter}(x,y)$ 为滤波输出; (x_i,y_i) 是像元坐标; $W_{ij}(I)$ 是双边滤波的滤波权值,该权值由像元间距离邻近关系和像元灰度值相似性共同确定:

W_{ij}(I)=\frac{1}{W_p(x_i,y_i)}\sum f_{\sigma_s}(\|I(x_i,y_i)-I(x,y)\|)\times g_{\sigma_r}(\|(x_i,y_i)-(x,y)\|) \tag{2}

式中: W_p 为归一化权值, f_{σ_s} 及 g_{σ_r} 均为高斯核函数.

1.2 各向异性双边滤波

双边滤波虽然能很好地保持图像的边缘,但传统的双边滤波并没有考虑到图像边缘的方向性信息,最差的情况是当滤波方向与边缘方向垂直时,会存在较大的边缘背景残留,Geusebroek 等人^[18]提出的各向异性快速高斯滤波器将边缘方向投影到高斯滤波方向,使滤波器方向平行于边缘方向.

各向异性高斯滤波数学表达式如下所示:

g_{\theta}(u,v;\sigma_u,\sigma_v,\theta)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u}\exp(-\frac{1}{2}\frac{u^2}{\sigma_u^2})\times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_v}\exp(-\frac{1}{2}\frac{v^2}{\sigma_v^2}) \tag{3}

\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}=\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \tag{4}

式中: u,v 分别表示图像的边缘方向和边缘垂线方向, θ 是图像边缘的方向角.两种不同高斯核的投影如图1所示,其中(a)是各向同性高斯核的投影,(b)和(c)是各向异性及其旋转的投影.

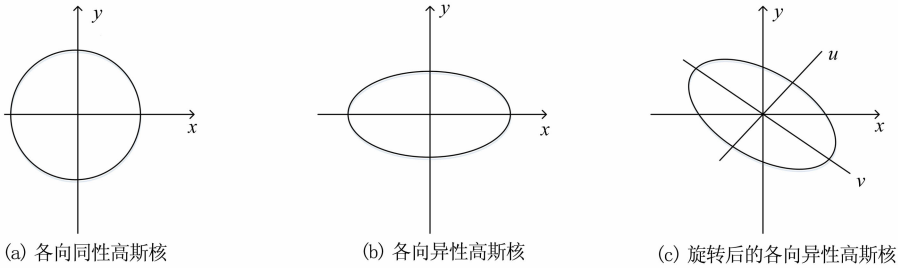


图1 两种高斯核的投影
Fig.1 Projection of different Gauss kernel

为了在背景抑制后残存更小的边缘信息,本文采用各向异性的高斯核函数 g_{σ_r} 对各向同性双边滤

波器进行了改进,使滤波器的滤波方向与边缘方向保持一致.

公式(4)中的图像边缘的方向角 θ 可以采用高效率的 sobel 算子进行梯度估算.

$$E_x = x_mask * I \quad (5)$$

$$E_y = y_mask * I \quad (6)$$

$$x_mask = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$y_mask = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\theta_{\perp} = \arctg \left[\frac{E_x}{E_y} \right] \quad (9)$$

式中: $*$ 表示卷积; $\theta_{\perp}$ 为图像边缘的法线方向, $\theta = \theta_{\perp} + 90^{\circ}$.

1.3 滤波尺度

各向异性双边滤波中,不同的滤波尺度对于滤波效果的影响依然很大,Kugu^[19]采用 MSE (Mean Square Error)、Entropy、SSIM (Structural Similarity Based Image Quality Assessment)、Second Derivative 度量不同滤波尺度对双边滤波遥感图像处理的影响,Peng 和 Rao^[20]采用信噪比最大化准则推导出最优的滤波尺度为: $\sigma_r = 1.5\sigma_i$, $\sigma_s = 2.5\sigma_i$, σ_i 是图像的噪声标准差.

王怀野等人^[21]充分分析了各向异性高斯滤波器 σ_u 和 σ_v 和滤波尺度设定问题,对于图像局部区域方差较小的平缓区域, σ_u 和 σ_v 的比例应该尽可能地接近 1,在图像局部区域方差较大区域,滤波器退化为沿着图像边缘切线方向的线状滤波器, σ_u 和 σ_v 的比例接近为 0.

σ_u 和 σ_v 方向上的比例因子:

$$R = \frac{k}{k + \sigma} \quad (10)$$

式中: σ 为图像区域标准差,最优 k 值为 20.

1.4 掩模尺寸

为了提高双边滤波的背景抑制效果,Bae 等人^[22]介绍了一种基于边缘滤波的掩模尺寸自适应调节方法.该方法首先累积目标像元邻域内水平、垂直和对角线方向上的灰度变化,并依据灰度变化的大小选择合适的掩模尺寸.具体的掩模尺寸选择方法如公式(11)所示:

$$M = \begin{cases} N+2 & E(i,j) > \alpha \times E_{\max} \\ N+1 & E(i,j) > \beta \times E_{\max} \\ N & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

掩模尺寸为 $(2M+1) \times (2M+1)$,式中 $E(i,j)$ 表示像元 (i,j) 处的边缘滤波输出, $E_{\max}$ 是图像边缘滤波输出的最大值.文献[20]中建议采用 $N =$

1、 $\alpha = 0.75$ 、 $\beta = 0.5$ 的参数设置.

2 实验

2.1 性能评价标准

为了衡量背景抑制效果,评价算法性能,我们采用信杂比(SCR)、信杂比增益(GSCR)、背景抑制算子(BSF)指标对算法进行评价,各评价指标定义如下:

$$SCR = \frac{e_{\text{target}} - e_{\text{background}}}{c_{\text{clutter}}} \quad (12)$$

$$GSCR = \frac{SCR_{\text{out}}}{SCR_{\text{in}}} \quad (13)$$

$$BSF = \frac{c_{\text{in}}}{c_{\text{out}}} \quad (14)$$

式中: e_{target} 为目标区域峰值; $e_{\text{background}}$ 为背景区域均值; c_{clutter} 为背景区域标准差; SCR_{out} 为背景抑制以后的信杂比; SCR_{in} 为原始图像的信杂比; c_{in} 是原始图像的背景区域标准差; c_{out} 是背景抑制后背景区域的标准差.

依据弱小目标的定义,本文将目标区域尺寸设定为 3×3 ,以 7×7 区域估算背景能量,考虑到目标能量扩散对背景抑制的影响,设定 5×5 区域为目标与背景的过渡区,如图 2 所示.

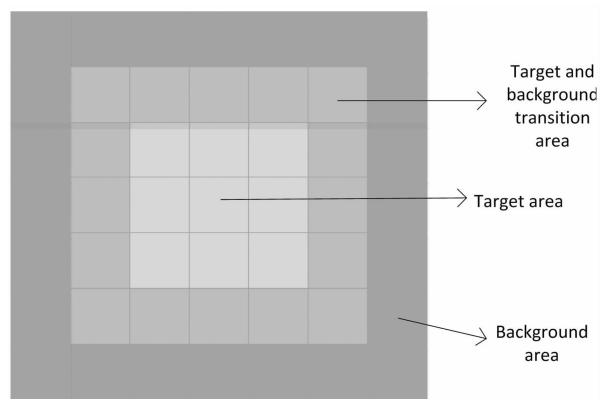


图 2 目标统计量信息像元分布

Fig. 2 Pixels used for statistics estimation for a target

2.2 实验分析

为了验证本文背景抑制算法的有效性,在实际拍摄得到的红外场景 1、红外场景 2、红外场景 3 和红外场景 4 中添加仿真设计的弱小目标得到实验输入,同时对比各向异性双边滤波、各向同性双边滤波、R-NLM^[23]以及改进的 2DLMS^[24]的背景抑制效果,以验证本文滤波算法的先进性.

实验中以图 2 所示的背景区域设定方法统计图

像中所有像元邻域的标准差,取 k 个最小标准差的均值作为最终的图像噪声标准差 σ_i . $\sigma_s = 2.5\sigma_i$, $\sigma_u = 1.5\sigma_i$, $\sigma_v = R \times \sigma_v$, 本文所提各向异性双边滤波掩模的具体计算过程如图 3 所示.

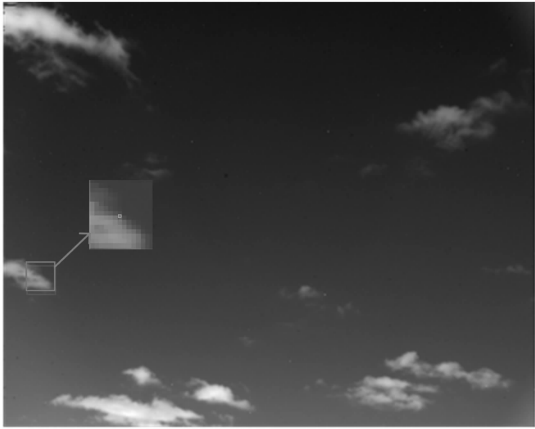


图 3 像元权值计算过程
Fig. 3 The process of pixel weights calculation

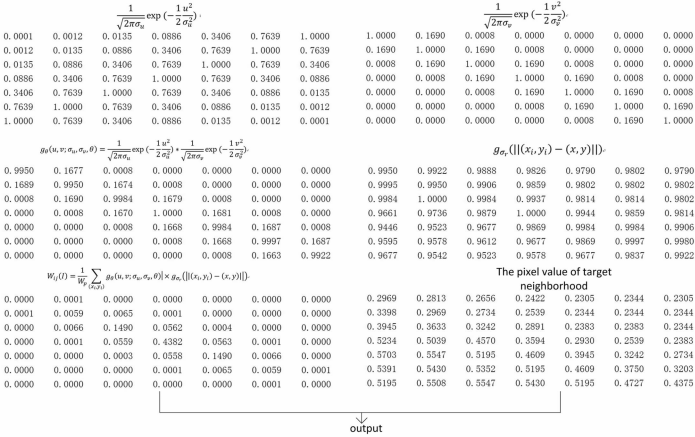
图 3 以红外场景 2 中的云层边缘区域的中心像元为目标像元,如左图放大区域的中心点. 红外场景 2 中统计的 σ_i 约为 0.25, 目标像元邻域的标准差约为 30, $R = 0.3892$, $M = 3$, sobel 算子估算的边缘方向角为 135° . 双边滤波中输入图像的动态范围为 $[0, 1]$, 故图中显示的目标邻域像素灰度值已归一化到 $[0, 1]$.

完整的实验结果如图 4 和图 5 所示, 其中(a)是原始红外场景, (b), (c), (d), (e)分别是各向同性双边滤波、改进的 2DLMS、NI-means 和各向异性双边滤波的背景残擦 mesh 图. 对比图 4(b)、图 5(b)与图 4(e)、图 5(e), 采用各向同性的双边滤波背景抑制算法, 滤波方向始终沿着图像的水平 and 垂直方向, 背景抑制后, 在图像的边缘区域存在较强的背景残留, 采用各向异性双边滤波的背景抑制算法能够根据图像中的区域统计量和方向信息自适应调节滤波器的滤波尺度和滤波方向, 滤波后边缘残留较少, 对依然存在的强边缘残留, 可以通过后续多帧确认的

方法剔除这些虚警.

图 4(c)、图 5(c)和图 4(d)、图 5(d)是 2DLMS、R-NLM 滤波背景抑制输出, 相对于各向异性双边滤波, 利用预测像元邻域方差信息自适应调节滤波尺寸的 2DLMS 和利用时域灰度值相似性的 R-NLM 算法同样能够较好地抑制边缘, 但是上述滤波算法在进行背景抑制的同时对目标能量也产生了一定的削弱作用.

表 1 列出了各向异性双边滤波、各向同性双边滤波、改进的 2DLMS 滤波、NL-means 滤波在四种场景下输出的目标区域局部统计量, 各向异性双边滤波、改进的 2DLMS 滤波、NL-means 滤波红外背景抑制后的图像的信杂比增益和背景抑制算子都要高于各向同性双边滤波, 且三种滤波算法输出的目标区域的背景抑制算子相差不大, 但由于改进的 2DLMS 滤波、NL-means 滤波保留的目标能量要弱于各向异性双边滤波算法, 两种滤波算法背景抑制后的信杂比增益要低于各向异性双边滤波.



(a1)原始红外场景 1



(a2)原始红外场景 2

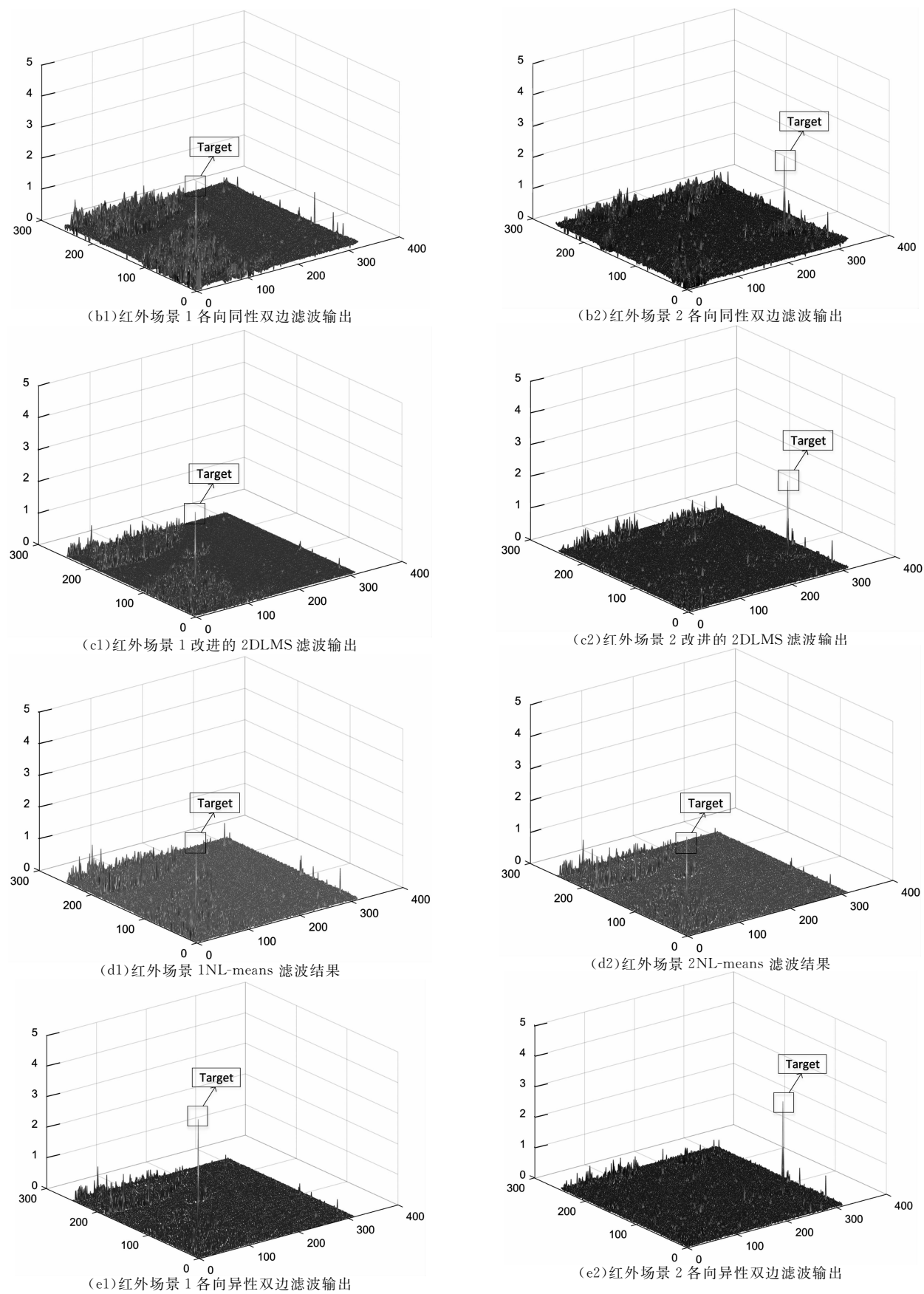


图 4 红外场景 1 和红外场景 2 滤波输出

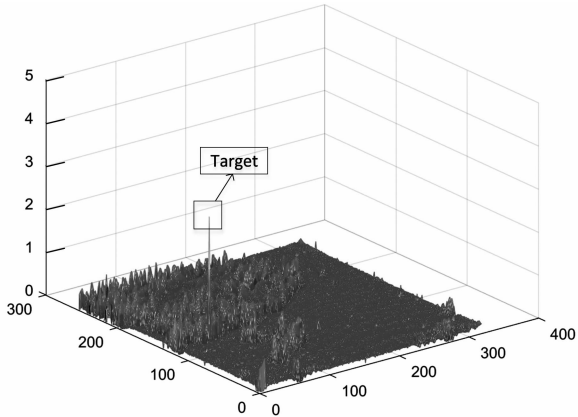
Fig. 4 Filter result of IR Sequence1 and IR Sequence2



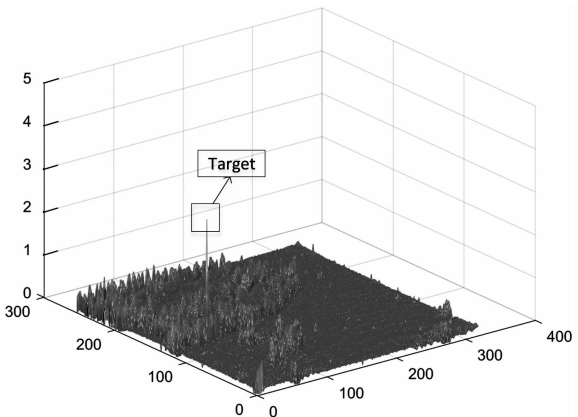
(a1)原始红外场景 3



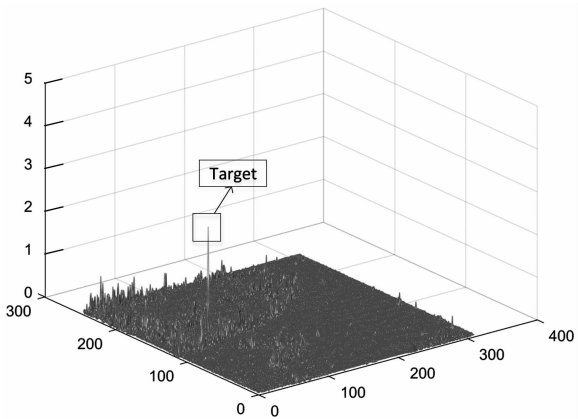
(a2)原始红外场景 4



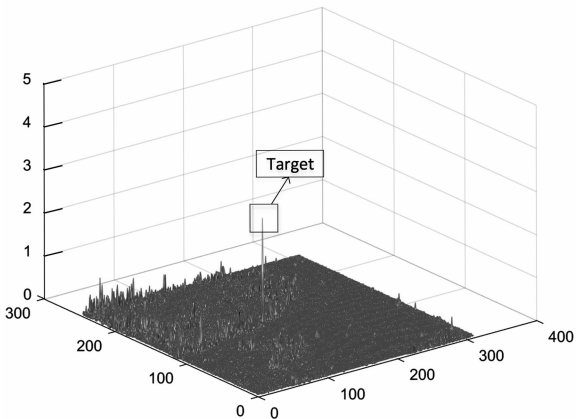
(b1)红外场景 3 各向同性双边滤波输出



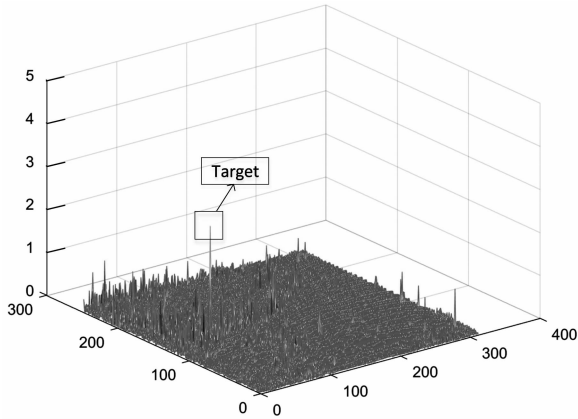
(b2)红外场景 4 各向同性双边滤波输出



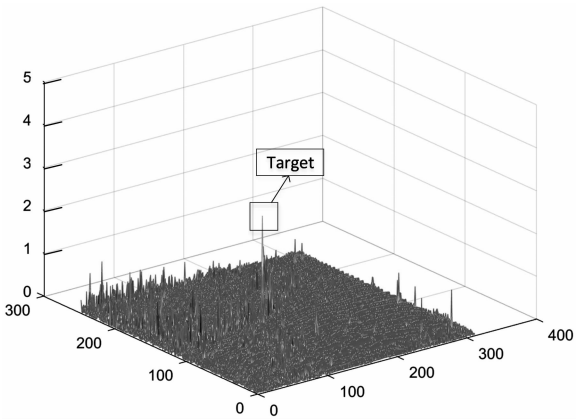
(c1)红外场景 3 改进的 2DLMS 滤波输出



(c2)红外场景 4 改进的 2DLMS 滤波输出



(d1)红外场景 3NL-means 滤波结果



(d2)红外场景 4NL-means 滤波结果

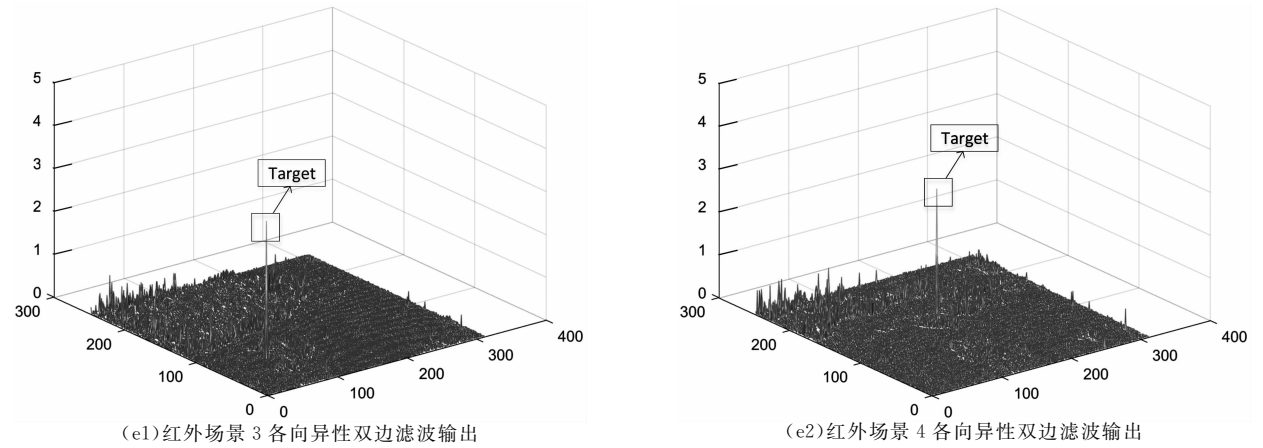


图 5 红外场景 3 和红外场景 4 滤波输出
Fig. 5 Filter result of IR Sequence3 and IR Sequence4

表 1 不同方法性能测试比较
Tab. 1 Performance comparison of different methods

Sequence	SCR _{in}	GSCR _{BF}	BSF _{BF}	GSCR _{2DLMS}	BSF _{2DLMS}	GSCR _{NL-means}	BSF _{NL-means}	GSCR _{Ani-BF}	BSF _{Ani-BF}
Sequence 1	4.58	1.47	2.13	3.54	4.55	3.79	4.31	4.18	4.41
Sequence 2	4.07	1.14	2.11	3.71	4.49	3.45	4.42	4.02	4.39
Sequence 3	4.33	1.31	1.98	3.41	4.82	3.52	4.59	4.22	4.68
Sequence 4	3.91	1.39	2.04	3.69	4.93	3.75	4.61	4.16	4.53

3 总 结

本文基于遥感图像的局部统计信息和云层边缘的方向性特征设计的各向异性双边滤波背景抑制算法能够自适应地调节滤波尺度和滤波方向。仿真实验结果表明,该方法可以在尽可能保留目标能量的同时更好地抑制背景边缘,背景抑制后的目标局部信杂比增益大于 4。

参考文献

[1] 孙海江,王延杰,陈小林. 基于自适应梯度阈值各向异性滤波抑制红外复杂背景[J]. 光学精密工程,2014,22(1):146—151.
SUN H J, WANG Y J, CHEN X L. Suppression of infrared complex background based on adaptive gradient threshold anisotropic filtering[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1):146—151. (In Chinese)

[2] 朱斌,樊祥,马东辉,等. 天空红外图像非平稳背景的小波域抑制[J]. 红外与激光工程,2008,(S2):634—637.
ZHU B, FAN X, MA D H, *et al.* Non-stable background suppress in wavelet domain of infrared image of sky[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, (S2):634—637. (In Chinese)

[3] 程攀,郭雷,韩军伟,等. 基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测[J]. 光学学报,2012,32(10):152—159.
CHENG G, GUO L, HAN J W, *et al.* Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filtering and scale space theory[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10):152—159. (In Chinese)

[4] 孙立辉,王永仲,周冰. 基于局部统计特征的自适应红外背景抑制算法[J]. 红外与激光工程,2008,37(1):177—180.
SUN L H, WANG Y Z, ZHOU B. Self-adaptive infrared image background suppressed algorithm based on local statistical character[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1):177—180. (In Chinese)

[5] 周慧鑫,秦翰林,赖睿,等. 基于多尺度截断的弱小目标复杂背景抑制[J]. 光学学报,2010,30(10):2812—2816.
ZHOU H X, QIN H L, LAI R, *et al.* Multiscale truncation for dim and small target background suppression[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10):2812—2816. (In Chinese)

[6] HAN Q. Infrared dim and small target background suppression using shearlettransform[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30 (2) :162—166.

[7] 秦翰林,李佳,周慧鑫,等. 采用剪切波变换的红外弱小目标背景抑制[J]. 红外与毫米波学报,2011,30(2):162—166.
QIN H L, LI J, ZHOU H X, *et al.* Infrared dim and small target background suppression using shearlettransform[J]. J Infrared Millim Waves, 2011, 30(2):162—166. (In Chinese)

- [8] 荣生辉, 刘刚, 周慧鑫, 等. 基于改进的剪切波变换和引导滤波的红外弱小目标背景抑制方法[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 68—73.
RONG S H, LIU G, ZHOU H X, *et al.* Infrared dim and small target background suppression based on the improved shearlet transformed the guide filter[J]. Acta Photonic Sincia, 2015, 44(2): 68—73. (In Chinese)
- [9] 秦翰林, 周慧鑫, 刘上乾, 等. 一种基于非下采样 Contourlet 变换的运动点目标背景抑制算法[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3318—3321.
QIN H L, ZHOU H X, LIU S Q, *et al.* An algorithm for moving point target background suppression based on NSCT[J]. Acta Photonic Sincia, 2009, 38(12): 3318—3321. (In Chinese)
- [10] QIN H, HAN J, YAN X, *et al.* Multiscale random projection based background suppression of infrared small target image [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73: 255—262.
- [11] GONG J, ZHANG Y, HOU Q, *et al.* Background suppression for cloud clutter using temporal difference projection[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 64: 66—72.
- [12] 张媛, 辛云宏, 张春琴. 基于时空联合滤波技术的缓慢运动红外弱小目标检测算法[J]. 光子学报, 2010, 39(11): 2049—2054.
ZHANG Y, XIN Y H, ZHANG C Q. An algorithm based on temporal and spatial filters for infrared weak slow moving point target detection [J]. Acta Photonic Sincia, 2010, 39(11): 2049—2054. (In Chinese)
- [13] 李凡, 刘上乾, 秦翰林, 等. 自适应双边滤波红外弱小目标检测方法[J]. 光子学报, 2010, 39(6): 1129—1131.
LI F, LIU S Q, QIN H L, *et al.* Dim infrared targets detection based on adaptive bilateral filter[J]. Acta Photonic Sincia, 2010, 39(6): 1129—1131. (In Chinese)
- [14] 曹瑛, 李志永, 卢晓鹏, 等. 基于自适应邻域双边滤波的点目标检测预处理算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 1909—1912.
CAO Y, LI Z Y, LU X P, *et al.* A preprocessing algorithm of point target detection based on temporal-spatial bilateral filter using adaptive neighborhoods[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(8): 1909—1912. (In Chinese)
- [15] AURICH V, WEULE J. Non-linear gaussian filters performing edge preserving discussion[C]// Proceedings of the DAGM Symposium. 1995: 538—545.
- [16] SMITH S M, BRADY J M. SUSAN — A new approach to low level image processing[J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45—78.
- [17] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. 1998: 839—846.
- [18] GEUSEBROEK J, SMEULDERS A W, De WEIJER J V, *et al.* Fast anisotropic Gauss filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 938—943.
- [19] KUGU E. Satellite image denoising using bilateral filter with SPEA2 optimized parameters[C]// Recent Advances in Space Technologies (RAST), 6th International Conference on. 2013: 217—223.
- [20] PENG H, RAO R. Bilateral kernel parameter optimization by risk minimization[C]// International Conference on Image Processing. 2010: 3293—3296.
- [21] 王怀野, 张科, 李言俊, 等. 各向异性滤波在红外图像处理中的应用[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(2): 109—113.
WANG H Y, ZHANG K, LI Y J, *et al.* Anisotropic Gaussian filtering for infrared image [J]. J Infrared Millim Waves, 2005, 24(2): 109—113. (In Chinese)
- [22] BAE T, SOHNG K. Small target detection using bilateral filter based on edge component[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010, 31(6): 735—743.
- [23] HU J, YU Y, LIU F, *et al.* Small and dim target detection by background estimation[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 73(73): 141—148.
- [24] BAE T W, ZHANG F, KWEON I S, *et al.* Edge directional 2D LMS filter for infrared small target detection[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(1): 137—145.