

doi:10.3788/gzxb20154402.0210002

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

荣生辉¹, 刘刚², 周慧鑫¹, 秦翰林¹, 钱琨¹, 延翔¹, 赵东¹

(1 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 西安 710071)

(2 上海卫星工程研究所, 上海 200240)

摘要: 由于传统的背景抑制方法没有充分利用信号的方向信息, 使其不能有效区分背景边缘和红外弱小目标, 从而造成背景抑制结果中有较多的背景泄露。针对上述问题, 本文利用改进的剪切波变换和引导滤波, 提出了一种新的背景抑制方法。首先, 采用改进的剪切波变换对红外弱小目标图像进行多尺度和多方向分解, 将图像分解得到不同的高频子带系数和低频子带系数; 其次, 利用目标信号与边缘在方向上的差异, 采用自适应引导滤波对高频子带系数进行处理; 再次, 对分解后的低频子带系数和处理后的高频子带系数进行改进的剪切波逆变换, 得到预测的背景图像; 最后, 将原图像与背景预测图像相减获得背景抑制且目标增强的红外图像。为了验证本文方法的有效性, 采用多组实验对其进行验证, 并与经典的 Max-Median、TDLMS 和 Top-hat 等方法作比较。多组实验结果均表明本文方法在主观视觉和客观评价指标方面均优于其它三种经典方法, 可有效提高红外搜索跟踪系统对红外弱小目标的探测概率。

关键词: 红外与夜视技术; 图像处理; 红外弱小目标; 目标检测; 背景抑制; 剪切波; 引导滤波

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)02-0210002-6

Infrared Dim and Small Target Background Suppression Based on the Improved Shearlet Transform and the Guide Filter

RONG Sheng-hui¹, LIU Gang², ZHOU Hui-xin¹, QIN Han-lin¹, QIAN Kun¹,
YAN Xiang¹, ZHAO Dong¹

(1 School of Technical Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China)

Abstract: Because traditional background suppression methods don't take full advantage of direction information, small target and edges can't be distinguished effectively and some background may expose. A new method based on improved shearlet transform and image guide filter was proposed. Firstly, nonsampled wavelet transform and shear directional filter bank is adopted to decompose the infrared image into multi-scale and multi-direction to obtain high frequency and low frequency coefficients. Then the image guide filter is used to adjust the high frequency coefficients of each sub-bands to suppress the dim and small target signal and predict the background. Then the estimated background is obtained by the inverse transformation. At last, the suppression result is obtained by subtracting the estimated background from the original image. Several group of experimental results demonstrate that the presented method can suppress the background and enhance the small target signal effectively, compared with several classical methods, such as Max-Median, TDLMS and Top-hat. The proposed method can effectively improve the detection probability of infrared search and tracking system for infrared dim and

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61107007, 61401343)、陕西省自然科学基金基础研究计划(No. 2011JQ8012)、航空基金(No. 20120181005)、中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. JDZD140202, JDFB140105, JDYB141011, JDYB142115, WRYB142312)资助

第一作者: 荣生辉(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为红外图像处理技术。Email: rongsh@stu.xidian.edu.cn

导师(通讯作者): 周慧鑫(1975-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光电成像与图像处理等。Email: hxzhou@mail.xidian.edu.cn

收稿日期: 2014-07-23; 录用日期: 2014-09-12

<http://www.photon.ac.cn>

small target.

Key words: Infrared and night vision technology; Image processing; Infrared dim and small target; Target detection; Background suppression; Shearlet transform; Guide filter

OCIS Codes: 100.4999; 260.3060; 110.3080

0 引言

红外成像系统具有隐蔽性好、可全天时工作、抗干扰能力强等诸多优点,在侦察告警系统中发挥着重要作用。为了尽早发现来袭目标,在目标距离很远时,就应该对其进行准确检测跟踪。但此时目标成像面积非常小,在图像上表现为淹没在复杂背景中的几个像点,且与背景的对比较低,即红外弱小目标。为对目标进行精确检测跟踪,必须使用背景抑制的方法来减小背景杂波干扰、突出目标信号。

目前,红外弱小目标背景抑制方法大致可以分为三类:1)基于空域的方法,主要有 Top-hat 变换^[1]、TDLMS^[2]、Max-Median^[3]、基于匹配算法^[4]等。该类方法在平稳背景下有较好的效果,且有着较小的运算量。但其往往不能根据图像背景自适应地调整参量,以至无法在复杂背景下,将目标信号与图像边缘等细节加以区分,使得背景抑制结果存在较多的背景泄露,导致漏检和虚警。2)基于时域的方法,主要有帧间差法^[5]、多帧累积法^[6]和时域轮廓线^[7]等。但该类方法不仅需要多帧数据,而且还要求有连续平稳背景和相对运动的目标,大大限制了其应用范围。3)基于变换域的方法,主要有基于小波的^[8-9]、基于轮廓波的方法^[10]等。该类方法通过将图像分解在不同的子带系数中,再根据实际需要对各子带系数分别进行处理,是一类灵活有效的背景抑制方法。

基于变换域方法的思想,本文提出了改进的剪切波变换(Improved Shearlet Transform, IST)和引导滤波(Guided Image Filter, GIF)相结合的背景抑制新方法。与小波、轮廓波等其他多尺度变换相比,剪切波变换(ST)有着更灵活的方向选择性,这使其更加便于对弱小目标分解和表示,且有着较低的运算复杂度^[11-13]。经典 ST 变换的尺度分解采用拉普拉斯金字塔变换(Laplacian Pyramid Transform, LPT),方向分解采用 shear 方向滤波器组。但是 LPT 没有方向性,不擅于对弱小目标进行精细表示,往往需要较多的分解层数才能有效从背景中分离弱小目标。为改进 LPT 的上述缺点,本文采用兼有尺度和方向分解的非下采样小波变换(Non-subsample Wavelet Transform, NSWT)对红外图像的尺度分解,以此充分提取弱小目标信号。这使得在进行 shear 方向滤波之后,对弱小目标信号分解得更为精细,从而更加利于 GIF 对弱小目标信号进行剔除。

本文方法充分利用了信号的方向特性,可以有效

地抑制云层、地面以及海面场景中的复杂背景干扰,提高目标信杂比,增强弱小目标信号。

1 改进的剪切波变换

1.1 剪切波变换

ST 由 K. Guo 和 G. Easley 通过合成膨胀的仿射系统构造,对于函数 $f(x)$,其连续剪切波变换定义为

$$SH_{\psi}f(a, s, t) = \langle f, \psi_{ast} \rangle \quad (1)$$

式中

$$\psi_{ast}(x) = a^{-3/4} \psi(A^{-1}B^{-1}(x-t)) \quad (2)$$

为剪切波母函数, $a \in R^+$ 为尺度参量, $s \in R$ 为剪切参量, $t \in R^2$ 为平移参量, $A = (a, 0; 0, a^{1/2})$ 为各向异性膨胀矩阵, $B = (1, s; 0, 1)$ 是剪切矩阵。对任意 $\xi = (\xi_1, \xi_2) \in R^2, \xi_2 \neq 0$, 令 ψ 满足

$$\hat{\psi}(\xi) = \hat{\psi}(\xi_1, \xi_2) = \hat{\psi}_1(\xi_1) \hat{\psi}_2\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right) \quad (3)$$

式中, $\hat{\psi}$ 为 ψ_{ast} 的傅里叶变换, $\hat{\psi}_1, \hat{\psi}_2$ 为连续小波函数, $\hat{\psi}_1 \in C^\infty(R), \text{supp } \hat{\psi}_1 \in [-5/4, -1/4] \cup [1/4, 5/4], \hat{\psi}_2 \in C^\infty(R), \text{supp } \hat{\psi}_2 \in [-1, 1]$ 。

1.2 改进的剪切波变换

在 ST 中,首先对图像进行 LPT,将图像在各个频带上进行尺度分解。但 LPT 子带分解程度不够精细且没有方向信息,所以使得 LPT 的系数不能对类似弱小目标这样的点状奇异信号进行有效的表示,分离弱小目标时需要较多的分解层数。为克服 LPT 分解不精细缺点,本文将 NSWT 引入到剪切波变换中来。NSWT 在尺度变换的同时,也在一定程度上利用了图像的方向信息,这使其对弱小目标信号的表示又精确了一步,并可以在较小的分解层数下达到与 LPT 相同的分解效果。IST 示意图如图 1。

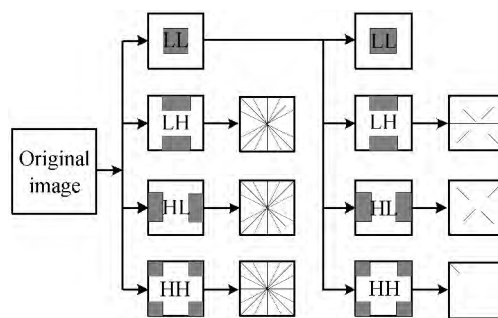


图 1 改进的剪切波分解示意图

Fig. 1 The diagram of improved shearlet transform

该方法首先通过对图像进行 NSWT,把图像分解到 LL、LH、HL、HH 这四个子带上,其中 LL 为水平和

垂直方向低频子带,反映图像的整体轮廓;LH为水平低频和垂直高频子带,HL为水平高频和垂直低频子带,HH为水平高频和垂直高频子带,后三个子带反映了图像的细节部分.之后通过 shear 方向滤波器组对各个高频子带进行更为精细的多方向的分解,而对低频子带则重复上述过程,如此处理就可以达到多尺度性和多方向性分解的目的.并且由于引入了非下采样的操作,使得该变换有着平移不变性和稳定性等优点.特别是对于弱小目标检测来说,不会因为下采样操作而引起目标信息丢失.

为说明 IST 多尺度和多方向精细分解的特点,本文使用如图 2(a)所示的仿真图进行实验,图中包含一个边缘明显的矩形区域和一个 3×3 大小呈高斯分布的点状目标.对原图进行 IST 分解,取其中一个竖直方向的子带,其系数如图 2(c).

背景抑制思路的关键是有效区分背景边缘等与小目标有着相似梯度阶跃特性的区域,在保留背景的同时对小目标信号进行有效剔除获得准确背景图.通过上述 IST 变换后,反映弱小目标和背景边缘等细节系数主要集中在高频子带中,如图 2(c).如对其采用统一阈值或线性滤波处理,则一部分背景系数也会被削弱甚至被剔除,难以有效起到抑制背景的作用.因此必须针对边缘与目标在不同系数上的分布特点,有针对性的进行处理,所以本文通过具有自适应特性的 GIF 进行子带系数的调整.

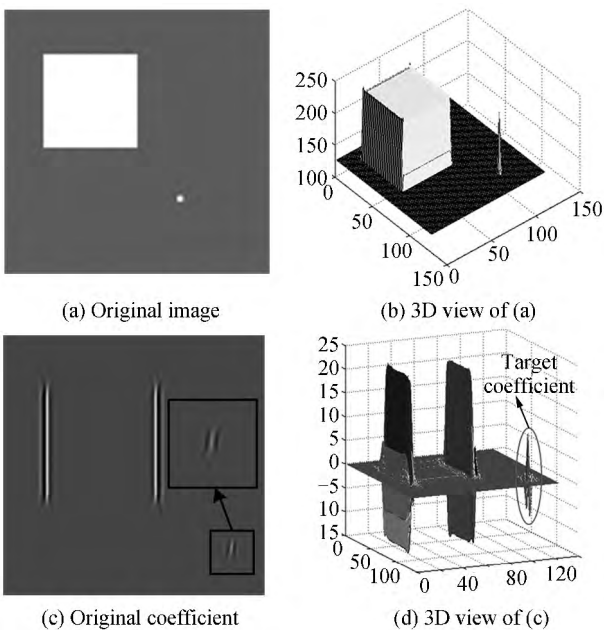


图 2 IST 分解示意
Fig. 2 IST decomposition results

2 基于引导滤波的背景抑制

图像引导滤波器^[14]是一种局部线性可变的自适应滤波器.对第 l 尺度,第 d 方向的子带系数 $C_{(l,d)}(i)$

的 GIF 滤波结果 $S_{(l,d)}(i)$ 满足

$$S_{(l,d)}(i) = a_k I_{(l,d)}(i) + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (4)$$

式中, a_k 和 b_k 是在 ω_k 中的线性系数, $I_{(l,d)}(i)$ 为引导系数, i 为系数坐标. 定义代价函数为

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k I_{(l,d)}(i) + b_k - C_{(l,d)}(i))^2 + \epsilon a_k^2) \quad (5)$$

式中, ϵ 为正则化参量. 通过线性脊回归模型,可求得使代价函数最小的 a_k 和 b_k , 即

$$a_k = \frac{1}{|\omega|} \frac{\sum_{i \in \omega_k} I_{(l,d)}(i) C_{(l,d)}(i) - \mu_k \bar{C}_{(l,d)}(i)}{\sigma^2 + \epsilon} \quad (6)$$

$$b_k = \bar{C}_{(l,d)}(i) - a_k \mu_k \quad (7)$$

式中, μ_k 和 σ^2 为 $I_{(l,d)}(i)$ 在的 ω_k 中的均值和方差, $|\omega|$ 为 ω_k 中的系数数目, $\bar{C}_{(l,d)}(i)$ 是系数 $C_{(l,d)}(i)$ 在 ω_k 中的均值, ϵ 决定了滤波器的平滑程度. 可见,随着 ω_k 的不断变化,线性系数 a_k 和 b_k 也将不断变化来输出最优的滤波结果. 所以,本文利用引导滤波的自适应特性,对 shear 滤波器分解的不同方向的子带系数进行滤波,剔除弱小目标的系数分量.

为进一步说明 GIF 的自适应特性,对图 2 的分解系数进行 GIF 处理. 并将原始系数作为引导系数,即 $C_{(l,d)}(i) = I_{(l,d)}(i)$, 则有 $a_k = \sigma_k^2 / (\sigma_k^2 + \epsilon)$, $b_k = (1 - a_k) \mu_k$. 滤波结果为图 3(a), 其三维显示为图 3(b).

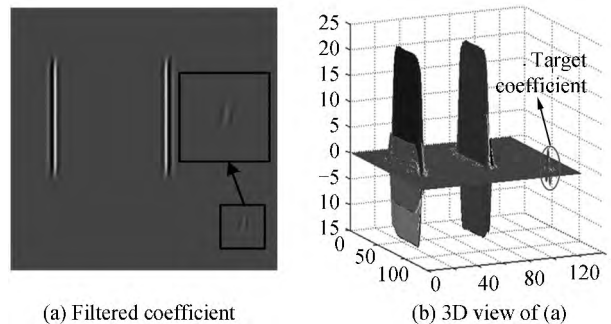


图 3 GIF 效果示意
Fig. 3 GIF results

结果可见, GIF 对弱小目标信号的系数抑制效果明显,但对边缘系数的改变较小. 这主要因为小目标信号表现出各向同性的特点,经过 shear 滤波器多方向分解之后,其系数均衡分布于各个方向的子带系数中,其每个子带中的幅度较小,从而局部方差也较小 $\sigma_k^2 \ll \epsilon$. 此时 $a_k \approx 0, b_k \approx \mu_k$, 故此处 GIF 主要起到了平滑的作用. 但图像中边缘表现为各向异性,在 shear 方向分解之后,不同走向的边缘主要存在于几个特定的方向子带中,在这几个子带里其系数幅度较大,所以其局部方差也较大 $\sigma_k^2 \gg \epsilon$. 此时 $a_k \approx 1, b_k \approx 0$. 故此处 GIF 主要起到了保持边缘的作用.

所以本文采用 GIF 对各个高频子带系数进行处理,在保持背景细节分量的同时尽可能地剔除弱小目标的系数分量,最后通过 IST 逆变换,有效完成对图像背景的预测.

综上,基于 IST 的红外弱小目标图像背景抑制方法的具体步骤为:

1)对输入的红外图像进行 IST 变换,得到不同尺度、不同方向下的高频、低频子带系数,即提取图像的多尺度和多方向细节特征.

2)利用 GIF 对所得到的高频子带进行处理,得到弱小目标信号被抑制后的子带系数.

3)将步骤 2)所得到处理后的子带系数进行逆变换,即可获得预测的红外背景图像.

4)最后将原图像与预测的红外背景图做差求得目标残差图,即可获得背景被消除同时目标信号得到增强的红外图像,即背景抑制的结果.

本文方法的流程图如图 4.

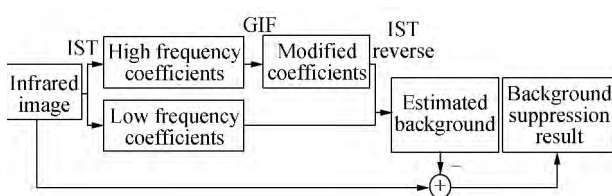


图 4 本文方法的结构流程图 4

Fig. 4 The flow chart of presented method

3 实验结果与分析

如图 5(a)列所示,本节通过三组不同背景下的红外弱小目标图像来验证本文方法的性能,并与 Max-

Median、TDLMS、Top-hat 方法进行了比较.其中,Max-Median 滤波窗大小为 5×5 ,结果为图 5(c)列;TDLMS 滤波窗大小为 5×5 ,步长为 0.000 1,结果为图 5(d)列;Top-hat 取大小为 3×3 的方形结构元,结果为图 5(e)列;本文方法取 3 层尺度分解, shear 滤波为 8 个方向,结果为图 5(b)列.使用 PC 的 CPU 为 i3-2120,3.30G Hz;内存为 4GB;基于 Matlab R2013a 软件平台完成仿真实验.

如图 5(a)列中黑框所示,不同场景下的弱小目标无明显形状和结构特征,且强度较弱.并且目标所处环境也较为复杂,如原图白色框中所示,背景主要包括天空中的云层边缘和絮状薄云,地面中起伏的山地和道路,以及海面中的海天相接处和海面杂波.经 Max-Median、TDLMS、Top-hat 方法进行背景抑制之后,目标都得到了不同程度的保留,但对背景边缘的抑制效果和整体信噪比的处理上还不尽人意.

这主要因为 Max-Median 滤波窗只有 4 个方向,其取中值的策略也决定了其对图像信息利用较少;TDLMS 重在利用图像局部的相关性来预测背景,进而在残差图中突出目标信号.其具有一定的自适应性,但其没有利用信号的方向信息使得其无法区分边缘与目标点;而 Top-hat 的滤波效果主要依赖于结构元,但对于不同的红外场景,结构元通常没有普适性.而通过本文方法处理之后,目标残差图中很好地保留弱小目

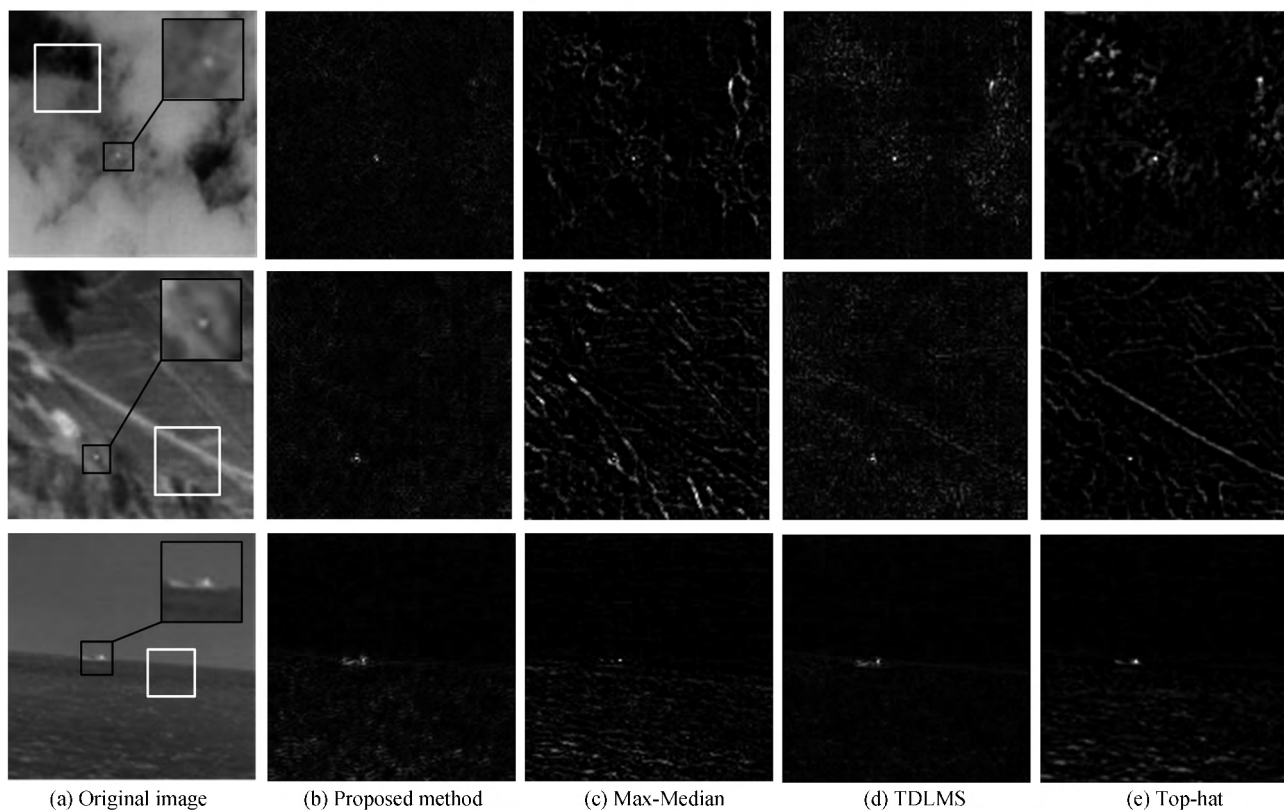


图 5 各方法性能比较

Fig. 5 Comparison of several methods for background suppression

标信号,同时较好地抑制了背景杂波,使背景中的强边缘都被很好地滤除掉,特别是对于云层的边缘和道路有着良好的抑制效果.采用文献[10]中的背景抑制评价参量进行对比试验,结果见表1.其中SNR表示原图的信

噪比,ISNR表示背景抑制图像的信噪比增益;SCR表示信号对比度,ICR表示背景抑制图像对比度增益;BSF表示背景抑制因子,其定义如式(8).

表1 不同方法性能比较

Table 1 Performance comparison of different methods

	Original		Proposed method			MaxMedian			TDLMS			Top-hat		
	SNR	CR	ISNR	ICR	BSF	ISNR	ICR	BSF	ISNR	ICR	BSF	ISNR	ICR	BSF
a_1	2.37	3.93	7.12	7.59	6.79	4.08	6.30	6.73	6.54	4.33	7.80	4.80	4.39	4.83
a_2	2.06	6.72	8.04	6.16	9.53	3.27	4.33	7.37	3.01	3.01	8.17	4.07	3.07	4.93
a_3	5.62	7.11	6.21	5.27	8.14	3.50	3.05	7.45	4.98	3.96	9.35	4.14	4.17	4.49

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{SNR} = |I_t - \mu_b| / \sigma_c \\ \text{SCR} = |I_t - \mu_b| / |I_t + \mu_b| \\ \text{ISNR} = \text{SNR}_{\text{out}} / \text{SNR}_{\text{in}} \\ \text{ICR} = \text{SCR}_{\text{out}} / \text{SCR}_{\text{in}} \\ \text{BSF} = \sigma_{\text{in}} / \sigma_{\text{out}} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中, I_t, μ_b 分别是目标和背景灰度均值; σ_c 是背景方差; $\text{SNR}_{\text{in}}, \text{SNR}_{\text{out}}$ 分别代表原图和背景抑制图像的信噪比; $\text{SCR}_{\text{in}}, \text{SCR}_{\text{out}}$ 分别代表原图和背景抑制图像的对比度; $\sigma_{\text{in}}, \sigma_{\text{out}}$ 分别代表原图和背景抑制图像的背景方差; 并选择目标周围 31×31 大小的邻域作为目标的背景区域. 从表1可见, 本文方法处理后的ISNR和ICR都有不同程度的提高, 特别是ISNR相较其他算法有约两倍的提升.

综上所述, 在客观评价指标和主观视觉两方面本文方法都表现出更好的效果, 表明本文方法能够更好地抑制复杂背景, 增强目标信号. 但与经典方法相比, 本文方法的运算量较大, 在Matlab R2013a软件平台下仿真时, 对 128×128 大小图像处理所需时间约为0.37s. 在实际应用中, 对IST分解后各细节子带的处理上, 可考虑采用FPGA或GPU等并行运算能力强的处理器并行对各子带进行滤波处理, 以提高算法的执行效率和实时性.

4 结论

红外侦察告警系统中的弱小目标信号常受到复杂背景干扰, 影响系统探测能力. 本文所提出的背景抑制方法利用了多尺度分析的手段, 将红外图像分解到更多、更精细的尺度和方向上, 实现对弱小目标和复杂背景的有效表示, 并通过GIF对分解后的系数进行自适应调整. 实验结果表明, 本文方法取得了很好的背景抑制效果, 这为后续的目标检测、跟踪与识别处理奠定了良好的基础. 后续的研究重点是进一步优化算法及其执行方式, 使其适用于软硬件实时实现, 最终达到实用化、工程化的目的.

参考文献

[1] BAI X Z, ZHOU F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection[J].

Pattern Recognition, 2010, **43**(6): 2145-2156.

[2] BAE T W, KIM Y C, AHN S H, *et al.* An efficient two-dimensional least mean square (TDLMS) based on block statistics for small target detection[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Wave*, 2009, **30**: 1099-1101.

[3] DESHPANDE S D, ER M H, VENKATESWARLU R, *et al.* Max-mean and max-median filters for detection of small targets [C]. *SPIE*, 1999, **3809**: 71 - 83.

[4] GAO C, DEYU M, YANG Y, *et al.* Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, **22**(12): 4996-5009.

[5] WANG Wei-hua, NIU Zhao-dong, CHEN Zeng-ping. Temporal spatial filtering algorithm for small infrared moving target detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **34**(6): 714 -718.

王卫华, 牛照东, 陈曾平. 基于时空域融合滤波的红外运动小目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2006, **34**(6): 714-718.

[6] LIAO Bin, YANG Wei-ping, SHEN Zhen-kang. Dim target detection algorithm based on multi frame indexing accumulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(2): 150-153.

廖斌, 杨卫平. 基于多帧移位叠加的红外小目标检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(2): 150-153.

[7] BAE T W, KIM B I, KIM Y C, *et al.* Small target detection using cross product based on temporal profile in infrared image sequences[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2010, **36**(6): 1156-1164.

[8] DELMARCO S, AGAIAN S. The design of wavelets for image enhancement and target detection[C]. *SPIE*, 2009, **735103**: 1-12.

[9] CHEN Fang-han, WANG Wen-sheng, YANG Kun, *et al.* Detection and recognition of infrared target based on the multiwavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 295-298.

陈方涵, 王文生, 杨坤等. 基于多小波变换的红外目标探测与识别[J]. *光子学报*, 2011, **40**(2): 295-298.

[10] QIN Han-lin, LIU Shang-qian, ZHOU Hui-xin, *et al.* Background suppression for dim small target with Gabor kernel nonlocal means [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, **38**(4): 737-741.

秦翰林, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 采用Gabor核非局部均值的弱小目标背景抑制[J]. *红外与激光工程*, 2009, **38**(4): 737-741.

[11] GUO K, DEMETRIO L. Optimally sparse multidimensional representation using Shearlets [J]. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 2007, **39**(1): 298-318.

[12] LIMW Q. The discrete Shearlets transform; A new directional transform and compactly supported Shearlets frames[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, **19**(5): 1166-1180.

- [13] GLENN E, DEMETRIO L, LIM W Q. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform[J]. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, **25**(1): 25-46.
- [14] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, **35**(6): 1397-1409.
- [15] KIM S, LEE J. Scale invariant small target detection by optimizing signal-to-clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track[J]. *Pattern Recognition*, 2012, **45**(1): 393-406.
- [16] GAO C, ZHANG T, LI Q. Small infrared target detection using sparse ring representation[J]. *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2012, **27**(3): 21-30.
- [17] CUI Xuan, XIA Yun-hong. An effective method in the detection of infrared dim target[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2): 2100031-02100035.
崔璇, 辛云宏. 一种有效的红外小目标检测方法[J]. *光子学报*, 2014, **43**(2): 2100031-02100035.
- [18] XUE Song, HAN Guang-ling. Infrared small target fast detection based on local saliency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(2): 228-233.
薛松, 韩广良. 基于局部峰值的红外弱小目标快速检测[J]. *光子学报*, 2013, **42**(2): 228-233.
- [19] QIN Han-lin, WEI Gui-feng, ZHOU Hui-xin, *et al.* Vision cell response model for small target complex background suppression[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(9): 1423-1427.
秦翰林, 韦桂锋, 周慧鑫, 等. 采用视觉细胞响应模型的小目标复杂背景抑制[J]. *光子学报*, 2011, **40**(9): 1423-1427.