

doi: 10.3788/gzxb20134202.0241

基于多分辨率双边滤波的红外场景杂波抑制

宗靖国, 秦翰林, 刘德连, 袁胜春, 赵小明

(西安电子科技大学 技术物理学院, 西安 710071)

摘要:背景杂波是影响红外搜索跟踪系统探测性能的主要因素, 针对这一问题, 根据红外场景中目标和背景特性, 提出了一种基于多分辨率双边滤波的红外场景杂波抑制新方法. 首先采用非下采样轮廓波对红外场景图像进行多尺度、多方向分解, 提取红外原始场景图像在不同尺度和方向上的细节特征, 然后, 根据目标和背景信号子带分布特性之差异, 通过应用双边滤波调整分解后的各子带系数, 最后重构各子带就可将红外场景中目标信号和背景杂波分离, 可有效地将背景杂波剔除掉. 将本文提出的方法应用于实际的红外场景, 实验结果显示, 与经典的二维最小均方误差方法相比较, 该方法具有更好的杂波抑制能力.

关键词:目标检测; 杂波抑制; 非下采样轮廓波变换; 双边滤波

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0241-4

Multiple Resolution Bilateral Filter for Infrared Clutter Suppression

ZONG Jing-guo, QIN Han-lin, LIU De-lian, YUAN Sheng-chun, ZHAO Xiao-ming

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Complex background is a major factor in the performance of the infrared search and tracking system. In this paper, an infrared clutter suppression method based on multi-resolution bilateral filter is proposed to solve the problem. Firstly, nonsubsampling contourlet transform is adopted to decompose the input infrared scene images, which extracts multi-scale and directional detail features of the image. Then, according to the difference between target and background clutter signal, bilateral filter is introduced to suppress background details and enhance target information for suppression background. Several groups of experimental results demonstrate that the proposed method can detect the infrared target image effectively, compared with classical infrared scene background suppression methods, such as two-dimensional least means square.

Key words: Target detection; Clutter suppression; Nonsubsampling contourlet transform; Bilateral filter

0 引言

红外搜索跟踪系统是指一类基于红外辐射的被动式的探测系统, 具有被动成像、隐蔽性好、角分辨率高、能全天时工作、并能提供目标热图像等特点. 但强杂波环境中红外弱运动目标的检测问题一直是被动红外探测技术研究领域的难点. 对于淹没在强起伏背景杂波中的弱目标, 基于灰度门限分割的方

法几乎失效. 为此, 如果要可靠、稳定、准确地检测并跟踪这类目标, 则必须对红外场景图像进行预处理, 抑制起伏的背景杂波, 以提高信杂比. 因此高性能的杂波抑制是此系统中重要而关键的一项核心技术.

近年来, 红外场景杂波抑制方法得到较大的发展, 主要有时空域融合^[1-4]、小波变换^[5]和偏微分方程^[6-7]等滤波方法. 这些方法在滤波性能、杂波自适应性和可实现性方面各有千秋, 其中二维最小均方

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61107007)和中央高校基本科研业务费(Nos. K50511050003, 72005623, K50510050003)资助

第一作者: 宗靖国(1979-), 讲师, 博士, 主要研究方向为红外成像光谱系统和红外目标检测. Email: zongjg@126.com

收稿日期: 2012-06-28; 录用日期: 2012-09-28

误差滤波 (Two-dimensional Least Mean Square, TDLMS) 在可实现性方面具有一定的优势, 因而在很多场合得到了实际的应用. 但是, 当红外场景具有复杂的结构化背景时, 上述滤波方法不能完全平滑边缘, 从而导致检测概率降低, 虚警率增大.

为了解决红外场景杂波抑制的任务, 本文将多分辨率分析和双边滤波相结合, 提出了一种新的多分辨率双边滤波模型. 能适应不同对比度、边缘、几何和纹理信息的复杂场景, 增强其突变部分, 即目标信号. 采用真实的红外场景图像进行试验, 证明了本文方法的有效性.

1 基于多分辨率双边滤波的红外场景杂波抑制

1.1 非下采样轮廓波变换

非下采样轮廓波变换^[8] (Nonsampled Contourlet Transform, NSCT) 将尺度分解与方向分解分开进行, 如图 1 所示. 首先采用非下采样塔式滤波器组获得图像的多尺度分解, 然后采用非下采样方向滤波器组对获得的各个尺度子带系数图像进行多方向分解, 从而得到不同尺度和方向的子带系数图像. 与轮廓波变换^[9]不同的是, NSCT 在对红外图像的分解和重建的过程中, 没有对原始图像进行下采样和上采样等操作, 从而使得 NSCT 不仅保持了其它多尺度几何分析方法具有的多尺度、多方向以及良好的空域和频域局部特性, 而且还具有平移不变特性以及各子带图像之间具有相同尺寸等优良的特性.

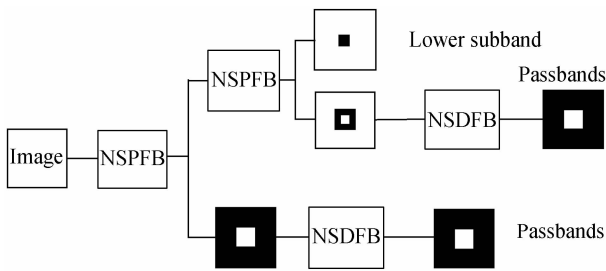


图 1 NSCT 分解结构示意图

Fig. 1 Scheme of NSCT decomposition structure

NSCT 分解结构如图 1 所示, NSCT 是由两个双通道非下采样滤波器组相结合来实现的, 这两个滤波器组分别是非下采样塔式滤波器组 (Nonsampled Pyramid Filter Bank, NSPFB) 和非下采样方向滤波器组 (Nonsampled Directional Filter Bank, NSDFB). 将原始图像经 NSPFB 分解后得到的带通子带图像再输入到 NSDFB 中可获得图像的带通方向信息, 从而可快速实现对图像的多尺度和多方向分解.

1.2 双边滤波

与传统滤波方法不同的是, Tomasi 和 Manduchi 提出的双边滤波^[10]在较大邻域中同时考虑邻域像素与中心像素间的灰度相似性度量和几何距离两种度量方式 (在实际使用中两种度量方式均采用高斯核函数表达). 它的基本原理是对邻域中距离接近和灰度相似的像素赋予较大权重, 反之则赋予其较小的权重. 因此, 这种距离各势异性与灰度各向异性的双重异性加权机制保证了双边滤波方法在保存图像边缘的同时获得平滑的图像.

由于双边滤波^[8]集成了几何、光度和局部结构相似性等信息的优势, 以非迭代和局部操作的方式来抑制背景图像, 其表达式为

$$\text{BLF}(m)(p) = \int_{\Omega} \omega(p, q) I(q) dq \quad (1)$$

式中, I 为原图, p 和 q 为图像中像素位置, Ω 代表二维图像中以 p 为中心的某邻域区间, $\text{BLF}(p)$ 为经过双边滤波后图像, 其加权系数由 $\omega(p, q) = \omega_d(p, q) \omega_r(p, q)$ 来确定, ω_d 用来表达像素 p 和 q 之间在欧式距离上的相近程度, ω_r 表示了 p 和 q 位置像素灰度值的相关性. ω_d 和 ω_r 的选取方式为

$$\omega_d(p, q) = \frac{1}{Z_d(p, q)} e^{-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_d^2}} \quad (2)$$

$$\omega_r(p, q) = \frac{1}{Z_r(p, q)} e^{-\frac{\|I(p)-I(q)\|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (3)$$

式中, $Z_d(p, q) = \int_{\Omega} e^{-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_d^2}} dq$, $Z_r(p, q) = \int_{\Omega} e^{-\frac{\|I(p)-I(q)\|^2}{2\sigma_r^2}} dq$. σ_r 和 σ_d 控制灰度和空间上的权值自由度, 其和像素间的灰度值和距离相对应, $\text{lm}(P)$ 为位置 $I(P)$ 的邻域空间.

1.3 多尺度双边滤波

令 $\{C_{j_0}^f(p), C_{j,l}^f(p) (j_0 \geq j \geq 1, l_j \geq l \geq 1)\}$ 表示采用非下采样轮廓波变换分解后各个子带系数, 其中 $C_{j_0}^f(p)$ 为低频子带系数, $C_{j,l}^f(p)$ 为各个带通子带系数, j 和 l 分别为第 j 尺度和第 l 方向的子带系数标号, p 为子带系数的位置. 因此, 自适应背景估计可表达为

$$C_{j,l}^B(m, n) = \sum_{(p,q) \in \Omega} \omega(p, q) C_{j,l}^f(m-p, n-q) = W^T S \quad (4)$$

式中, $W = \{\omega(p, q)\}$ 为加权系数, S 代表子带, Ω 为带通区域 (m, n) 的邻域. 其加权系数 ω 为

$$\omega(p, q) = \frac{1}{N_r} e^{-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_d^2}} e^{-\frac{\|N(p)-N(q)\|^2}{2\sigma_r^2}} \quad (5)$$

式中, $N_r = \sum_{q \in N(p)} e^{-\frac{\|p-q\|^2}{2\sigma_d^2}} e^{-\frac{\|N(p)-N(q)\|^2}{2\sigma_r^2}}$, σ_r 和 σ_d 分别控制子带域和空间的权值相关性, 分别与子带系数值及其距离相对应, $N(p)$ 定义为以系数 $C_{j,l}^f(p)$ 为中心的邻域空间, N_r 是归一化常量. 因此, 可将式(4)

估计的背景子带 $C_{j,l}^B$ 与原始子带相减,如式(6)所示,即可得仅包含目标的残差子带系数 $C_{j,l}^E(m,n)$.

$$C_{j,l}^E(m,n) = C_{j,l}^I(m,n) - C_{j,l}^B(m,n) \quad (6)$$

因为双边滤波技术较好地将空间和灰度域两种滤波技术相结合,其权值 w 不仅和空间距离有关,而且还和灰度值大小相关,故其能适应背景杂波系数变化比较复杂的场景,特别是对各子带中复杂的云层边缘背景分量具有更好的剔除能力.

2 试验结果与分析

为了测试本文给出方法的杂波抑制性能,将本文提出的方法应用于实际的红外场景的杂波抑制.测试图像为两组对空拍摄的大小为 128×128 的红外图像序列,原图中目标与其所在局部邻域相比,对比度不大于 10%,信杂比为 2 左右.为了进一步比较本文算法的杂波抑制性能,NSCT 分解层数为 2, σ_r 和 σ_d 分别取 0.2 和 0.5. 选取经典的二维最小均方差方法作为参考.图 2(a)分别对应两个序列中的一帧原图,图 2(b)为本文方法的处理效果,图 2(c)为对本文方法进行简单阈值分割后的结果,图 2(d)为采用二维最小均方差方法的处理结果.

由图 2 可以看出,原图中存在复杂的结构化云层,目标完全淹没在杂波中.采用二维最小均方差方法处理后,目标虽然得到了增强,但是云层的边缘并没有被有效地消除,相反有些强边缘反而还被增强了(图 2(d)),这样势必会影响搜索跟踪系统后续的检测跟踪等环节.

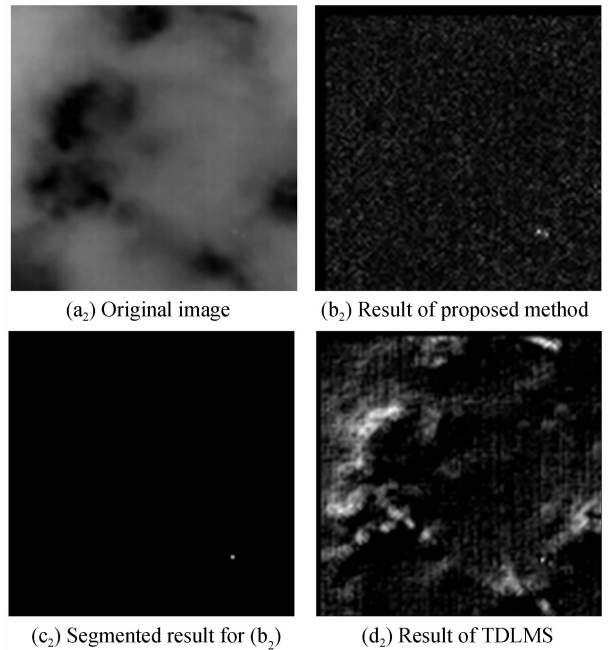
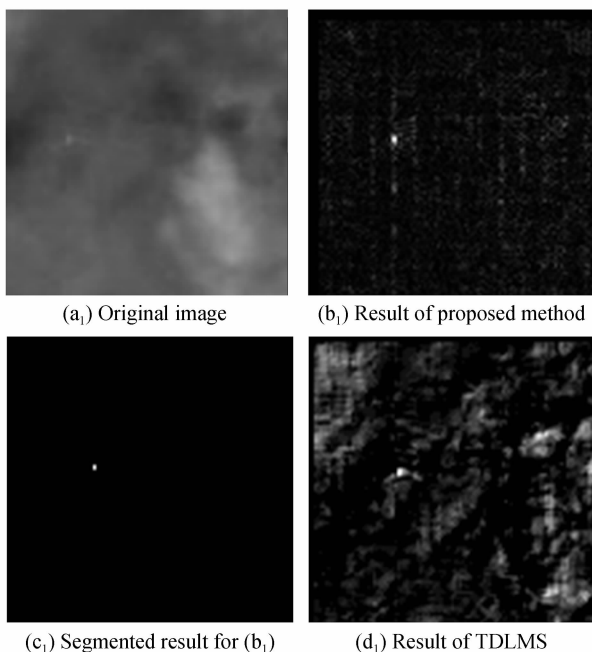


图 2 算法处理性能比较

Fig. 2 Performance comparison

采用基于多分辨率双边滤波的杂波抑制方法处理结果如图 2(b)所示,从中可以看出,目标信号被很好地增强,同时结构化云层的杂波也被很好地抑制,运算时间(Elapsed Time, EST)如表 1 所示.在消耗时间不足 TDLMS 方法 1 倍的条件,获得了比其更优的效果,并使得图像信杂比增益达 5 倍以上,杂波抑制因子也达到 3 倍以上.特别在目标受到大面积云层杂波干扰的情况下,与二维最小均方差方法结果相比较,基于多分辨率双边滤波的杂波抑制方法不但平滑了云层内部的高亮区域,而且将云层的强边缘部分也平滑掉,使得图像整体对比度和信杂比得到了很大的提高.

表 1 不同方法消耗时间比较

Table 1 The EST of different methods		
Index	TDLMS/s	Proposed method/s
a ₁	0.59	0.71
a ₂	0.58	0.73

3 结论

针对红外场景目标检测过程中的强杂波干扰问题,本文给出一种基于多分辨率双边滤波的红外场景杂波抑制方法,该方法依据 NSCT 分解后各子带目标和背景杂波系数表达的不同特性,利用双边滤波对杂波进行去除.为验证本文方法的杂波抑制性能,分别选取了两类典型场景的红外序列图像对本文算法与 TDLMS 算法进行了测试,实验结果表明

了本方法对包含弱目标的红外复杂场景杂波具有很好的抑制效果,与 TDLMS 相比具有更好的性能,杂波抑制效果更好,并能较精确地检测出目标的位置.从表 1 可以看出算法运行时间仍然较大,下一步进行算法优化,在现有图像处理软硬件平台上加强实时化研究.

参考文献

- [1] ZHANG Yuan, XIN Yun-hong, ZHANG Chun-qin. Algorithm based on temporal and spatial filters for infrared weak slow moving point target detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2049-2054.
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.
- [2] LI Hong, WEI Yan-tao, LI Luo-qing. Infrared moving target detection and tracking based on tensor locality preserving projection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, **53**(2): 77-83.
- [3] 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.
- [4] BAE Tae-Wuk. Small target detection using bilateral filter and temporal cross product in infrared images [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(5): 403-411.
- [5] DAVIDSON G, GRIFFITHS H D. Wavelet detection scheme for small target in sea clutter[J]. *IEEE Electronics Letters*, 2002, **38**(19): 1128-1130.
- [6] ZHANG Bi-yin, ZHANG Tian-xu, CAO Zhi-guo, *et al.* Fast new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter [J]. *SPIE Optical Engineering*, 2007, **46**(10): 106401-1-6.
- [7] LI Meng, HE Chuan-jiang, ZHAN Yi. Tensor diffusion level set method for infrared targets contours extraction [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, **55**(1): 19-25.
- [8] DA CUNHA A L, ZHOU Jian-ping. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089-3101.
- [9] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091-2106.
- [10] BARASH D. A Fundamental relationship between bilateral filtering, adaptive smoothing and the nonlinear diffusion equation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **24**(6): 844-847.