

文章编号:1001-9014(2009)03-0212-06

基于自适应窗和形状自适应小波变换的 SAR 图像相干斑抑制

凤宏晓, 侯彪, 王爽, 焦李成

(西安电子科技大学 智能信息处理研究所和智能感知与图像理解教育部重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:结合 SAR 图像空域的先验知识和小波域系数的特性,提出了一种新的 SAR 图像相干斑抑制算法.使用最近提出的局部多项式近似-置信区间交叉(local polynomial approximation-intersection of confidence intervals(LPA-ICI))构造自适应窗,寻找到与 SAR 图像中每个像素点相对应的同质区域,在每个同质区域内利用本文给出的快速形状自适应小波变换进行硬阈值收缩抑斑,最后根据本文提出的稀疏加权方法融合多个估计样本获得最终抑斑图像.实验结果表明本文提出的算法有着很好的抑斑性能,尤其是在去除重构图像中的“振铃”效应以及有效保留原始 SAR 图像中的点目标方面性能更突出.

关键词:SAR 图像相干斑抑制;自适应窗;形状自适应小波变换;局部多项式近似-置信区间交叉;基于稀疏性的权值

中图分类号:TN957 文献标识码:A

SAR IMAGE DESPECKLING BASED ON ADAPTIVE WINDOW AND SHAPE ADAPTIVE-DISCRETE WAVELET TRANSFORM

FENG Hong-Xiao, HOU Biao, WANG Shuang, JIAO Li-Cheng

(Institute of Intelligent Information Processing and Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: By considering the prior knowledge of SAR image in spatial domain and the property of coefficients in wavelet domain, a novel algorithm of SAR image despeckling was presented. An adaptive window was constructed and a uniform region for every pixel of SAR image was found by using local polynomial approximation-intersection of confidence intervals (LPA-ICI). Hard-threshold shrinkage despeckling was implemented with fast shape adaptive discrete wavelet transform proposed in this paper. At last, many despeckled samples were fused into a final despeckled SAR image according to the sparsity of regions. Experiments show that the algorithm proposed here has advanced despeckling performance. Especially, reconstructed image has no unpleasant ringing artifacts, and it efficiently reserves point targets of original SAR image.

Key words: SAR image despeckling; adaptive window; shape adaptive-discrete wavelet transform(SA-DWT); local polynomial approximation-intersection of confidence intervals; weighting according to sparsity

引言

合成孔径雷达(SAR)由于具有全天候、全天时成像和穿透性强等诸多优点,在军用和民用领域有着广泛的应用.然而由于其自身成像机理的原因,SAR图像中总是存在相干斑,这直接影响了SAR图像的理解与解译.通常SAR图像由真实后向散射强度和相干斑噪声两部分组成.一个“好”的SAR图像

抑斑算法要做到以下四点^[1]:(1)有效去除均匀场景中的斑点噪声;(2)保留图像中边缘和纹理特征;(3)不产生伪吉布斯效应;(4)保持图像的雷达辐射特性.

目前SAR图像抑斑方法主要分为空域和频域两类.常见的空域抑斑方法有:Lee滤波^[2]、Kuan滤波^[3]和Gamma-MAP滤波^[4]等.空域的这些方法对噪声的静态假设与信号的实际情况不完全相符,在

收稿日期:2008-04-17,修回日期:2008-12-16

基金项目:国家自然科学基金(60672126,60673097,60702062)、“863计划”项目(2007AA12Z136)和科技部“973计划”重点项目(2006CB705707)

作者简介:凤宏晓(1983-),男,陕西岐山县人,博士,主要研究方向为自然、SAR图像处理与多尺度几何分析.

Received date: 2008-04-17, revised date: 2008-12-16

抑斑的同时很难较好地保留边缘和纹理细节. 频域滤波主要是利用多分辨分析的方法, 常见的有基于小波(DWT)^[5]、平稳小波(SWT)^[6]的方法, 以及基于最近几年广泛研究的 Contourlet (CT)^[7]和非下采样 Contourlet (NSCT)^[8]的方法. 与空域抑斑方法相比, 频域的方法有着非常明显的优势. 除了上述两类方法外, 最近也有学者把偏微分方程引入 SAR 图像抑斑^[9,10]中, 取得了一定的抑斑效果.

SAR 图像可以看成是由一个个大小和形状不一的同质区域组成. 如果能成功找到这些区域, 那么将能获得图像的一个稀疏表示, 这对在频域去除斑点噪声十分有利. 然而, 由于受斑点噪声的影响, 要获得精确、鲁棒的 SAR 图像的同质区域边界是一项非常复杂的工作, 许多经典的方法当遇到相干斑噪声时都是无效的. LPA-ICI^[11]是一种新方法, 它能有效地找到同质区域的边界, 尤其对含有斑点噪声的 SAR 图像更为有效.

在图像压缩中, 为了对感兴趣区域 (Regions of Interest: ROI) 进行编码, 提出了许多形状自适应离散小波变换 (Shape Adaptive-Discrete Wavelet Transform: SA-DWT) 算法, 当前应用最广泛的是由 Li^[12]等人提出的 SA-DWT. 这种变换在保证分解稀疏性的前提下保留了小波变换的系数和位置特征. 由于这些特性的存在, SA-DWT 也可以有效地应用到图像去噪中.

利用多个估计值融合得到最终估计值是本文算法的关键一步. 传统的方法常以均值作为最终估计值, 这在多数情况下并不很有效. 近年来的研究表明变换域系数的稀疏性和它的重要性有着非常密切的联系, Guleryuz^[13]提出了一种根据稀疏性融合估计的新思想, 在本文中基于这种思想提出了一种方法来解估计值融合问题.

目前常见的 SAR 抑斑方法都只仅仅利用空域或频域的信息, 并未将二者有机地结合起来. 本文提出了一种新的抑斑算法, 将空域得到的同质区域边界信息作为先验知识, 有效地结合形状自适应小波变换, 并对获得的多个估计值进行合理的融合得到最终的抑斑结果. 实验证明, 无论从视觉角度还是客观评价指标, 本文抑斑算法的性能都优于许多现存的抑斑算法.

1 局部多项式近似和置信区间交叉^[11]

1.1 局部多项式近似

SAR 图像的斑点噪声模型为^[14]:

$$\begin{aligned} Z(x) &= n(x) \cdot y(x) = y(x) + [n(x) - 1] \cdot y(x) \\ &= y(x) + \varepsilon(x) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $x(s)$ 是由分量 $x_1(s)$ 和 $x_2(s)$ 组成二维矢量, 参数 s 表示图像中对应的第 s 个像素点, $n(x)$ 表示相关斑, $y(x)$ 表示真实的后向散射强度, $\varepsilon(x)$ 表示和真实信号相关的噪声信号. 相干斑抑制可看成是根据点态均方误差 (MSE) 从 $\{z(x)\}$ 中估计 $y(x)$, 并且这个均方误差越小越好.

在一个相对较小的区域内, 使用截断的泰勒级数近似后向散射强度 $y(x)$, 这样就得到了 $y(x)$ 的局部多项式展开. 实际应用中, 局部展开式可被用于估计单个“中心”像素点, 它可以被表示成线性变换 (滤波器) 的形式:

$$\hat{y}(x, h) = \sum_x g_1(x, x(s), h) z(x(s)) \quad (2)$$

式中, h 代表截断时选择的窗口大小. 当 h 相对较小时, LPA 给出了 $y(x)$ 的一个很好的近似, 但是较少的数据会使估计不稳定并对噪声敏感. 当 h 较大时, 估计区域变大, 会使估计的精确性降低. 因此, h 的最佳值应该是一个兼顾估计的精确性和对噪声敏感性的折中值.

估计误差可以表示成下面的形式:

$$\begin{aligned} e(x, h) &= y(x) - \hat{y}(x, h) \\ &= y(x) - \sum_x g_1(x, x(s), h) z(x(s)) \\ &= E(e(x, h)) + e^0(x, h) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $E(e(x, h))$ 表示估计偏差.

1.2 置信区间交叉

LPA 均方误差估计可以表示成如下形式:

$$|e(x, h)| = |y(x) - \hat{y}(x, h)| \leq \bar{\omega}(x, h) + |e^0(x, h)| \quad (4)$$

这里, $\bar{\omega}(x, h)$ 是估计偏差的上界, $e^0(x, h)$ 是概率密度为 $N(0, \text{std}^2(x, h))$ 的随机误差. 其中 $|e^0(x, h)| \leq \chi_{1-\alpha/2} \cdot \text{std}(x, h)$ 以概率 $p = 1 - \alpha$ 成立, 这里 $\chi_{1-\alpha/2}$ 是概率为 $1 - \alpha/2$ 的标准正态分布的分位数, 同样下面的式子也以此概率成立:

$$|e(x, h)| \leq \bar{\omega}(x, h) + \chi_{1-\alpha/2} \cdot \text{std}(x, h) \quad (5)$$

引入一个 h 的有限集合 $H = \{h_1 < h_2 < \dots < h_j\}$, 从相当小的 h_1 开始, 根据式(5), 得到一个有偏估计置信区间序列 $D(j)$:

$$D(j) = [\hat{y}(x, h_j) - \Gamma \cdot \text{std}(x, h_j), \hat{y}(x, h_j) + \Gamma \cdot \text{std}(x, h_j)] \quad (6)$$

这里, Γ 是置信区间的门限: $\Gamma = 1 / \sqrt{m+1} + \chi_{1-\alpha/2}$.

对于式(6)若有 $h = h_j$, 则: $y(x) \in D(j)$, 当 $h_j < h^*$ (最优窗口) 时, 对于 $h = h_j, 1 \leq j \leq i$ 的所有区间 $D(j), 1 \leq j \leq i$ 有一个公共点, 也就是 $y(x)$.

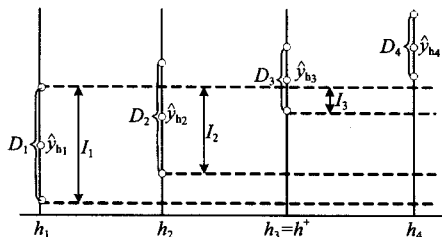


图1 置信区间交叉规则示意图

Fig. 1 The rule of intersection of confidence intervals

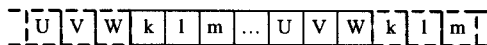


图2 一维信号的周期延拓示意图

Fig. 2 The periodic extension of one-dimensional signal

考虑到区间 $D(j), 1 \leq j \leq i$ 相交, 当 i 增长, 在满足区间 $D(j), 1 \leq j \leq i$ 有一个公共点的同时, 以 i^+ 表示 i 变化所达到的最大值. 自适应 LPA 估计和自适应窗口的尺寸可定义如下:

$$\hat{y}^+(x) = \hat{y}^+(x, h^+(x)), h^+(x) = h_{i^+} \quad (7)$$

置信区间交叉规则由图 1 给出. 假设第四个置信区间(对应 $h = h_4$) 的交叉是空的, 得到最优的自适应窗口大小 $h^+ = h_3$.

2 快速形状自适应离散小波变换 (SA-DWT)

Li^[12] 提出的 SA-DWT 虽然有许多优势, 但它针对图像压缩这个特定的应用, 在处理不同位置和长度的信号时需要使用复杂的边界扩展, 为了获得高的压缩比而制定非常复杂的变换规则. 考虑到本文中的 SA-DWT 是为相干斑抑制提供一个可靠的变换, 原来针对压缩提出的有些 SA-DWT 规则已经不再适用. 为了提高编码效率, Li 考虑正交和双正交分解两种情况以及使用很复杂的掩码规则. 在本文中只需考虑正交分解, 考虑到去噪与压缩的不同, 只需保证稀疏分解即可, 本文给出一种简单的掩码新规则. 在实现精确重构的前提下, 这些简化和新规则有效地提高了 SA-DWT 的变换速度, 下面给出具体的变换规则.

2.1 任意长度的一维正交小波分解

设信号的长度为 N , 滤波器的长度为 L , 信号的边缘延拓方式采用周期延拓法(如图 2 所示).

当采用正交小波分解时, 滤波器的长度必须为偶数. 由于小波基滤波器对后续去噪的影响不是很大, 在本文中选用最为常见的 db 系列小波基滤波

器, 记该滤波器为 $g(i), i = 1, \dots, L$, 则分解低通滤波器就为 $g(i)$, 高通滤波器: $H_i(i) = (-1)^{L-i+1} g(L-i+1)$. 相应的重构低通 $e(i)$ 和高通滤波器 $f(i)$ 可表示为:

$$e(i) = g(L-i+1), f(i) = H_i(L-i+1), i = 1, \dots, L \quad (8)$$

任意长度一维正交小波变换规则如下:

(1) 若 $N = 1$, 这个孤立的样本点被重复地延拓, 并用低通滤波器 $g(i)$ 获得一个单点的低频小波系数(这相当于使用因子 $\sum_{i=1}^L g(i)$ 放缩这个孤立的系数, 对于正交小波变换而言就相当于给这个系数乘以 $\sqrt{2}$).

(2) 若 $N > 1$ 且为偶数, 采用周期延拓, 并使分解后的低频和高频小波系数的长度都为 $N/2$.

(3) 如果 $N > 1$ 且为奇数. 首先用小波滤波器卷积前 $N-1$ (偶数) 个信号点. 并在处理前对这 $N-1$ 个信号点进行周期延拓, 产生的低频和高频小波系数的长度均为 $(N-1)/2$. 剩余的一个信号点按照规则(1)处理, 并把它加到低频小波系数的后面, 使低频系数的总长度为 $(N+1)/2$.

2.2 快速二维形状自适应离散小波变换

基于前面的任意长度的一维正交小波变换, 本文的快速二维 SA-DWT 规则如下:

(1) 把任意形状的图像块放到一个 $M \times N$ 大小的矩形边界框 B 中, 记录每一行和每一列数据在框 B 中的起始位置 a .

(2) 应用一维任意长度正交小波变换, 先对每一行进行分解, 分解后变为低频和高频两部分数据. 创建两个新的边界框 B_L 和 B_H , 大小为 $M \times (N/2)$. 分解得到的每一行的低频和高频系数在新框 B_L 和 B_H 中存放时的起始位置可按以下公式计算: 当 a 为奇数时(即原来信号的起始位置是奇位置), 新的存放起始位置为 $a' = (a+1)/2$; 当 a 为偶数时(即原来信号的起始位置是偶位置), 新的存放起始位置为 $a' = a/2 + 1$.

(3) 应用一维任意长度正交小波变换对框 B_L 和 B_H 中的每一列数据进行分解, 分解后得到四部分数据, 它们分别被存放到新建框 B_{LL}, B_{LH}, B_{HL} 和 B_{HH} 中, 存放时起始位置的计算按照步骤(2)中给出的方法计算.

(4) 若达到分解层数, 停止分解. 否则, 以 B_{LL} 框中的数据作为新的图像块回到步骤(1)重复上面的过程.

3 基于自适应窗和 SA-DWT 的 SAR 图像相干斑抑制

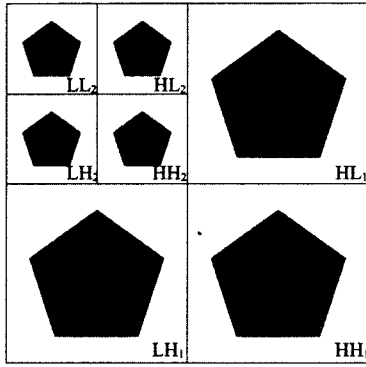


图3 二维形状自适应正交小波分解示意图

Fig.3 The sketch of the two-dimensional shape adaptive orthogonal wavelet decomposition

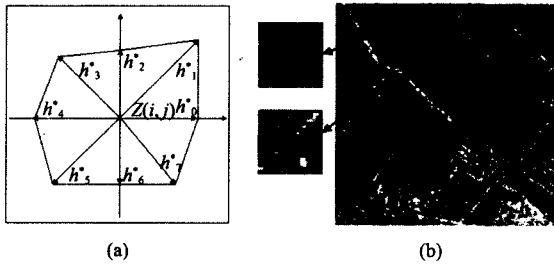


图4 (a)8 方向自适应窗 (b)真实 SAR 图像中的自适应窗示例

Fig.4 (a) An adaptive window with 8 directions (b) examples of adaptive windows in real SAR image

基于自适应窗和 SA-DWT 的 SAR 图像相干斑抑制算法主要包含 3 个部分:(1)使用 LPA-ICI 寻找同质区域;(2)在同质区域内使用小波域硬门限收缩;(3)根据收缩后小波系数的稀疏性加权融合获得最终抑斑结果。

3.1 寻找自适应窗口

定义方向集合: $\{\theta_k \mid \theta_k = 2k\pi/D, k = 0, \dots, D-1\}$, $Z(i,j)$ 是原始图像的当前点. 对每个 $Z(i,j)$, 都有一个方向集合, 使用 LPA-ICI 沿着方向 θ_k 找到一个最优尺度 h_k^* , 得到一个最优尺度集合 $\{h_k^*, k = 0, \dots, D-1\}$, D 为 4, 8 或 16, 在实际中, 通常选 $D = 8$. 图 4(a) 为 8 方向最优尺度构成的自适应窗, 当前点 $Z(i,j)$ 位于窗的中心. 图 4(b) 为真实 SAR 图像使用 LPA-ICI 寻找适应窗的结果.

3.2 小波域硬门限收缩

小波阈值去噪是在噪声为加性高斯零均值白噪声的模型下推导得到的. SAR 图像的斑点噪声是乘性的, 不能直接应用小波阈值收缩处理. 对式(1)两边取对数^[1]:

$$\ln Z = \ln y + \ln n \quad (9)$$

得到 SAR 图像斑点噪声的另一种描述模型: 对数正态分布.

SAR 图像中的每个点 $Z(i,j)$, 都对应一个同质区域 $R_{Z(i,j)}$. 对每个 $R_{Z(i,j)}$ 内的像素值按照式(9)两边取对数, 之后区域内每个像素点都减去区域的均值, 此时区域内的像素值满足小波阈值收缩的模型框架, 再进行快速 SA-DWT, 之后用硬门限对小波系数收缩处理. 最后采用快速 SA-DWT 逆变换重构, 加上区域的均值, 进行指数变换即可得到区域 $R_{Z(i,j)}$ 抑斑后的结果 $R_{\hat{Y}(i,j)}$. 这个过程可由下面的公式表示:

$$R_{\hat{Y}(i,j)}(m) = \exp(WT_{SA}^{-1}(HT(WT_{SA}(\ln(R_{Z(i,j)}(m)) - \text{mean}(\ln R_{Z(i,j)})))) + \text{mean}(\ln R_{Z(i,j)})) \quad (10)$$

这里, m 表示区域 $R_{Z(i,j)}$ 内的第 m 个像素, WT_{SA} 代表形状自适应小波变换, HT 代表用硬门限处理

$$HT(x) = \begin{cases} 0 & |x| < th \\ x & |x| \geq th \end{cases}, th = \sigma \sqrt{2 \ln(N)} \quad (11)$$

N 表示当前区域内像素点的个数, σ 为标准差, 可用中值估计法根据下式得到:

$$\sigma = \text{median}(WT_{HH}(\ln Z))/0.6745 \quad (12)$$

$WT_{HH}(\ln Z)$ 表示原始图像对数化后, 经过小波分解, 取其系数最细尺度的 HH 部分.

3.3 加权融合

在一幅 SAR 图像中, 使用 LPA-ICI 找到的区域是相互重叠的, 同一像素可能属于多个同质区域, 经硬阈值收缩后, 对同一个真实信号 $y(i,j)$ 存在多个估计值 $\hat{y}_k(i,j)$. 因此需要融合估计值 $\hat{y}_k(i,j)$, 以得到最终的估计值 $\hat{y}(i,j)$.

Donoho 等在文献[15]中指出, 一幅图像经小波分解后稀疏性越强的系数, 对重构图像的重要性就越大. Guleryuz^[13] 提出, 当出现多个估计样本时, 使用样本点的稀疏性作为权重. 本文根据文献[13]中给出的稀疏加权思想, 提出一种加权融合方法. 通常, 一幅图像经小波分解后的大系数越少, 分解的稀疏性就越强, 所以分解后大系数的个数可以反映其稀疏性. 在 3.2 中, 大系数经过阈值收缩后得到了保留. 因此, 硬阈值处理后非零系数个数的倒数可作为该区域内所有系数的权重. 融合过程如下:

$$\hat{y}(i,j) = \left(\sum_{k=1}^L w_k \hat{y}_k(i,j) \right) / \left(\sum_{k=1}^L w_k \right) \quad (13)$$

这里假设当前点属于 L 个不同的同质区域, w_k 是权重, 根据下式计算:

$$w_k = 1/N_k^{\text{hard}} \quad (14)$$

N_k^{hard} 表示在第 k 个区域内,应用式(10)去噪时,经过式(11)门限化处理后非零系数的个数.

3.4 算法步骤

Step1: 输入原始 SAR 图像,设 $Z(i, j)$ 为当前点.

Step2: 使用 LPA-ICI 确定同质区域 $R_{Z(i, j)}$.

Step3: 应用式(10)获得 $R_{\hat{Y}(i, j)}$.

Step4: 应用式(14)计算当前区域 $R_{\hat{Y}(i, j)}$ 的权值 $w_{i, j}$.

Step5: 当前点后移,是否到达图像边缘? 若否,转到 Step2,若是, $i=1, j=1$ 转到 Step6.

Step6: 搜索包含 $Z(i, j)$ 所有各向同性区域,假设当前点包含在区域: $R_1 \cdots R_L$ 中.

Step7: 应用式(13)计算当前点的估计值 $\hat{y}(i, j)$. 当前点后移,若到达图像边缘算法结束,否则转到 Step6.

3.5 算法复杂度分析

本文算法的复杂度主要由 Step2 和 Step3 决定, Step2 中 LPA-ICI 的计算复杂度为^[16] $O(M \log N)$, 本文给出的快速 SA-DWT 的计算复杂度为 $O(N)$, 当在 Step3 中对所有区域都进行快速 SA-DWT 变换后计算复杂度为 $O(N^2)$, 所以本文算法的总体计算复杂度为 $O(N^2)$. 传统的基于小波等变换的抑斑算法其计算复杂度主要由变换本身决定,小波和平稳小波变换的计算复杂度分别为 $O(M \log N)$ 和 $O(N^2)$. 因此,本文算法在计算复杂度上与传统算法是相当的.

4 实验结果及其评价

为了验证本文提出的算法的有效性,在实验中选用两幅具有代表性的 SAR 图像:(1)图 5(a)英国 Bedfordshire 地区,分辨率为 3m, X 波段 2 视幅度 SAR 图像(简称:Field);(2)图 5(b)美国新墨西哥州 Albuquerque 地区,分辨率为 1m, ku 波段 4 视强度 SAR 图像(简称:Horse Track). 实验中,本文算法分别与增强 Lee 滤波、基于小波(DWT)阈值收缩、平稳小波(SWT)阈值收缩、基于 Contourlet(CT)阈值收缩和基于非下采样 Contourlet(NSCT)的 SAR 图像抑斑^[8]进行了比较.

对抑斑效果进行评价时,本文采用以下客观评价指标:

(1) 等效视数(Equivalent Number of looks-ENL):表示抑斑后对图像的平滑程度,ENL 值越大,平滑程度越高,其表达式为

$$ENL = A(M_{\text{hom}}/S_{\text{hom}})^2, \quad (15)$$

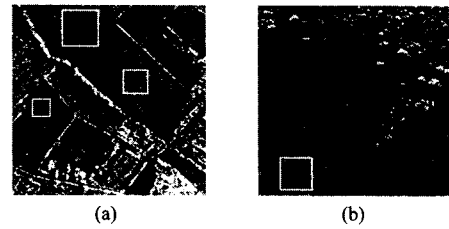


图5 (a)Field (b)Horse Track
Fig.5 (a)Field (b)Horse Track

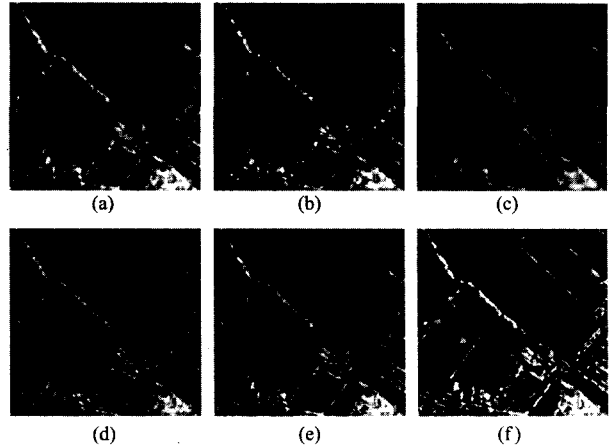


图6 Field 抑斑效果比较 (a)增强 Lee 滤波 (b)DWT 阈值收缩 (c)SWT 阈值收缩 (d)CT 阈值收缩 (e)NSCT^[8] (f) 本文算法

Fig.6 The comparison of despeckled results for Field (a)enhanced Lee filter (b)threshold shrinkage based on DWT (c)threshold shrinkage based on SWT (d)threshold shrinkage based on CT (e)NSCT^[8] (f)our algorithm

M_{hom} 和 S_{hom} 分别为降斑图像均匀场景的均值和标准差,对于强度图像 $A=1$, 幅度图像 $A=4/\pi-1$.

(2) 比值图像的评价:在理想情况下,原始图像与抑斑后图像的比值即为斑点噪声图像,对比值图像通常采用下面两种评价指标:

① 比值图像的均值:均值反映抑斑算法对原始图像的辐射特性保持程度,其理想值为 1,实际中越接近 1 越好.

② 比值图像的方差:方差反映对相干斑的抑制程度,与理想值越接近越好,其理想值为:

$$\sigma_n^2 = \begin{cases} 1/L, & \text{幅度 SAR 图像} \\ (4/\pi-1)/L, & \text{强度 SAR 图像} \end{cases}, \quad (16)$$

式中, L 代表 SAR 图像的视数.

为了对比各个算法的抑斑平滑效果,在图 5(a)中选择三个均匀场景,在图 5(b)中选择一个均匀场景,测试 ENL,测试结果由表 1 给出. 比值图像的评价结果由表 2 给出. 图 6(a)~(f)和图 7(a)~(f)展示了各种算法的抑斑结果.

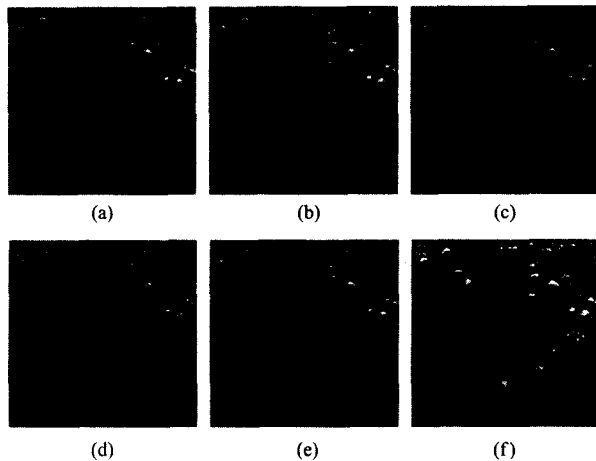


图7 Horse Track 抑斑效果比较 (a)增强 Lee 滤波 (b) DWT 阈值收缩 (c)SWT 阈值收缩 (d) CT 阈值收缩 (e) NSCT^[8] (f)本文算法

Fig. 7 The comparison of despeckled results for Horse Track (a)enhanced Lee filter (b)threshold shrinkage based on DWT (c)threshold shrinkage based on SWT (d)threshold shrinkage based on CT (e)NSCT^[8] (f)our algorithm

表1 同质区域等效视数比较

Table 1 The ENL comparison of isotropic regions

	图 5(a) 区域 1	图 5(a) 区域 2	图 5(a) 区域 3	图 5(b)
原图	2.8941	3.1279	2.7441	16.8830
增强 Lee	20.1788	31.8188	46.1399	196.5606
DWT	23.2810	52.5752	39.2861	325.2497
SWT	29.3935	66.9067	76.9120	435.4771
CT	35.2973	89.6519	38.6466	180.9568
NSCT	27.4785	59.9703	35.0529	559.3266
本文算法	43.6670	99.5750	284.5933	565.2252

表2 比值图像评价比较

Table 2 The evaluation comparison of ratio images

	图 5(a) 比值 图像均值	图 5(a) 比值 图像方差	图 5(b) 比值 图像均值	图 5(b) 比值 图像方差
增强 Lee	0.9866	0.1005	0.9755	0.1374
DWT	1.0532	0.1135	1.0760	0.1536
SWT	1.1586	0.1272	1.1783	0.1605
CT	1.0527	0.1111	1.0798	0.1538
NSCT	1.0344	0.0695	1.0436	0.0842
本文算法	1.0110	0.0940	1.0172	0.1655
理想值	1.0000	0.1366	1.0000	0.2500

由于自适应的选择窗口和根据系数的稀疏性加权融合,本文算法能有效地去除均匀场景的斑点噪声,抑斑图像的边缘和纹理保留良好.这从表 1、2 的数据比较以及图 6(a)~(f)和图 7(a)~(f)的比较中都得到证实.特别地,与其它几种基于频域的抑斑方法相比,本文算法有效地消除了其它几种算法中出现的“振铃”效应,并且有效地保留了原图中的点状目标(图 6(f)和图 7(f)箭头所示).

5 结论

本文提出了一种新的 SAR 图像抑斑算法,其主要包含 3 部分:寻找自适应窗、硬门限收缩和加权融合.与常见的空域和频域的几种抑斑方法相比,本文算法有着很好的性能,尤其在去除重构图像的“振铃”效应以及对点状目标的保留方面性能更出众.实验结果证明了本文算法的有效性.在本文中使用的融合系数只是稀疏性的一个粗略描述,还需要进一步选择能准确描述稀疏性的参量.此外,SAR 图像抑斑效果的客观评价指标还有待改进,设计更合理的评价指标也将是一项重要工作.

REFERENCES

- [1] Oliver C, Quegan S. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*[M]. MA: Artech House, 1998.
- [2] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, PAMI-20: 165—168.
- [3] Kuan D T, Sawchuk A A. Adaptive noise smoothing filter for signal- dependent noise[J]. *IEEE Transactions on Pattern, Analysis and Machine Intelligence*, 1985, 7(2): 165—177.
- [4] Lopes A, Nezry E, Touzi R. Maximum a posteriori speckle filtering and first order texture model in SAR images[C]. In: *Proc. IGARSS'90*, 1990: 2409—2412.
- [5] Sveinsson J R, Benediktsson J A. Speckle reduction and enhancement of SAR images in the wavelet domain[C]. In: *Proc. IGARSS'96*, 1996: 63—66.
- [6] Argenti F, Alparone L. Speckle removal from SAR images in the undecimated wavelet domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2363—2374.
- [7] ZHANG Hui, ZHANG Gong, GUO Qi-Nan. Speckle denoising algorithm of SAR image based on SOT structure in Contourlet domain[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics* (张绘, 张弓, 郭琦南. 基于 Contourlet 域 SOT 结构的 SAR 图像相干斑抑制算法. *南京航空航天大学学报*), 2006, 38(6): 743—748.
- [8] GUO Xu-Jing, WANG Zu-Lin. Nonsubsampled Contourlet speckle reduction algorithm for SAR images[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics* (郭旭静, 王祖林. SAR 图像的非下采样 Contourlet 噪声抑制算法. *北京航空航天大学学报*), 2007, 33(8): 894—897.
- [9] ZHAO Xia, WANG Zheng-Ming. Adaptive regularization variation method for SAR image feature-enhancement and speckle-removal[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵霞, 王正明. SAR 图像相干斑抑制和特征增强的自适应正则化变化方法. *红外与毫米波学报*), 2007, 26(2): 112—116.
- [10] XIE Mei-Hua, DENG Li-Xin. Relationship of typical methods for improving resolution of SAR image[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢美华, 邓立新. SAR 图像提高分辨率的主要方法间的联系. *红外与毫米波学报*), 2008, 27(1): 77—80.

(下转 223 页)

组并进行组跟踪(Group Tracking),监视各目标组的质心和形状轮廓变化。一旦有目标从目标组中分离出来,可在维持组跟踪的同时对分离出的目标进行简化的单目标跟踪;随着目标组的进一步扩散,更多的目标得以分辨,此时可转为以单目标跟踪为主,组跟踪为辅助以对单目标跟踪提供信息支持的组合跟踪方式。一旦目标得到彻底分辨,摒弃组跟踪,维持对各分辨出的目标的单目标跟踪。

5 结论

弹道导弹在其弹道中段释放多个不同类型目标,构成目标群,挑战弹道导弹防御系统的红外目标探测、跟踪和识别能力。本文搭建了天基红外传感器对中段弹道目标群的成像仿真框架,建立了简化的目标红外辐射模型和较为真实的焦平面模型,可快速方便地仿真中段弹道目标群的红外成像。对仿真结果进行了详尽的分析,指出中段弹道目标群的存在对天基红外传感器的目标探测、跟踪提出了新的要求,并给出解决途径。

利用本文仿真方法生成的仿真数据可直接运用于 CSOs 超分辨、目标群跟踪算法的研究;搭建的仿真框架可灵活嵌入各种目标辐射模型、运动模型和焦平面模型。其中,对于所建立的简化目标红外辐射模型的验证及建立基于辐射物理特性并考虑目标姿态变化的目标红外辐射模型将是下一步的研究工作。

REFERENCES

- [1] Gadaleta S, Poore A B, Slocumb B J. Pixel-cluster decomposition tracking for multiple IR-sensor surveillance [J]. *Proc. of SPIE*, 2003, **5204**: 270—282.
- [2] Rago C, Landau H. Stereo spatial super-resolution technique for multiple reentry vehicles [J]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, 1834—1841.
- [3] Macumner D, Gadaleta S, Floyd A, et al. Hierarchical
- closely-spaced objects (CSO) resolution for IR sensor surveillance [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, **5913**, 591304.
- [4] Korn J, Holtz H, Farber M S. Trajectory estimation of closely spaced objects (CSO) using infrared focal plane data of an STSS (space tracking and surveillance system) platform [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5428**: 387—399.
- [5] Kerekes John P. Parametric analysis of target/decoy performance [J]. *Proc. of SPIE*, 1991, 1483: 155—166.
- [6] Perrella Albert J. Cluster dynamics and object resolution [J]. *Proc. of SPIE*, 1992, **1698**: 248—267.
- [7] LI Su-Dan, REN Xuan. Research of releasing decoy outside atmosphere [J]. *Journal of Astronautics*. (郇苏丹,任萱. 大气层外诱饵释放研究. *宇航学报*), 2001, **22** (2): 100—105.
- [8] LaCroix LEN, Kurzius S. Peeling the onion: an heuristic overview of hill-to-kill missile defense in the 21st century [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, **5732**: 225—249.
- [9] Oswald M, Wiedemann C. Program for radar and optical observation forecasting [R]. Technical University of Braunschweig, Germany, 2006.
- [10] Reagan J T, Abatzoglou T J. Model-based superresolution CSO processing [J]. *Proc. of SPIE*, 1993, **1952**: 204—218.
- [11] Lomheim T S, Milne E L. Performance/sizing relationships for a short-wave/mid-wave infrared scanning point-source detection space sensor [J]. *IEEE Aerospace Conference*, 1999, **4**: 113—138.
- [12] Waxman M J, Orummond O E. A bibliography of cluster (group) tracking [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5428**: 551—560.
- [13] WANG Li-Hui, YU Yun-Jian, LU Duan-Jun. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王立辉,郁蕴健,陆段军. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (1): 39—41.
- [14] ZHANG Bi-Yin, ZHANG Tian-Xu, SANG Nong, et al. Novel regularizing filtering method for realtime detecting IR dim small moving target [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张必银,张天序,桑农,等. 红外弱小运动目标实时检测的规整化滤波方法. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (2): 95—100.
- [15] Gray R L. A pure-cartesian formulation for tracking filters [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, **29** (3): 749—754.
- [11] Katkovnik V, Egiazarian K, Astola J. Adaptive window size image de-noising based on intersection of confidence intervals (ICI) rule [J]. *J. of Math. Imaging and Vision*, 2002, **16** (3): 223—235.
- [12] Li Shi-Peng, Li Wei-Ping. Shape-adaptive discrete wavelet transforms for arbitrarily shaped visual object coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2000, **10** (5): 725—743.
- [13] Guleryuz O G. Weighted averaging for denoising with over-complete dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16** (12): 3020—3034.
- [14] Gleich D, Datcu M. Wavelet-based despeckling of SAR images using Gauss-Markov random fields [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45** (12): 4127—4143.
- [15] Donoho D, Johnstone I. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. *Biometrika*, 1994, **81**: 425—455.
- [16] Foi A, Katkovnik V, Egiazarian K, et al. Inverse half-toning based on the anisotropic LPA-ICI deconvolution [C]. In: *Proc. SMMSP 2004*, 2004: 49—56.

(上接 217 页)