

基于相似像素选择的非局域 SAR 图像相干斑抑制

李光廷^{*①②} 黄平平^③ 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

^③(内蒙古工业大学信息工程学院 呼和浩特 010051)

摘要: 该文提出了一种比值距离像素相关性模型与相似像素选择的非局域 SAR 图像相干斑抑制算法。首先由两像素的联合概率密度函数得出了比值距离像素相关性模型,并按错误概率最小准则训练生成了不同情况下的像素相似性阈值表,然后进行非局域窗中像素的相似性计算,并用查表所得的像素相似性阈值进行非局域窗中相似像素的选择,最后用选中的像素进行当前像素真实后向散射系数的估计。对仿真与实测 SAR 图像的相干斑抑制实验显示,与其它现有非局域抑斑算法相比,该文方法不仅能最大程度地去除同质区域的噪声,而且可以对边缘纹理等细节区域进行很好地重构,滤波结果显示了很好的视觉效果,并且具有较低的计算复杂度。

关键词: SAR 图像; 相干斑抑制; 像素相似性; 像素相关性; 阈值; 非局域

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)02-0171-11

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20034

Non-local SAR Image Despeckling Based on Similar Pixels Selected

Li Guang-ting^{①②} Huang Ping-ping^③ Yu Wei-dong^①

^①(Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Based on the ratio distance pixel-relativity and thresholding pixel-similarity, a modified non-local filter is proposed for SAR image despeckling in this paper. Firstly, the ratio distance pixel-relativity is obtained by transforming the joint probability density function of two pixels. Then, a table of pixel-similarity threshold, as a function of the SAR image look number and neighboring reflectivity ratio, is trained according to the minimum error probability. Finally, the pixel-similarity threshold is applied to select similar pixels from the searching window for the real reflectivity estimation. The proposed approach was verified by synthetic and real SAR images, and was compared with the PPB and LHRS-PRM filters. The visual quality and the quantification comparison show that the proposed approach is excellent not only in the reconstruction of the uniform area, the character of edges, texture, and details, but also with the lower computation complexity.

Key words: SAR image; Despeckling; Pixel similarity; Pixel relativity; Threshold; Non-local

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式雷达,它的强穿透性使其具有了全天时、全天候成像的特点。随着 SAR 技术的发展,SAR 图像的应用也得到了极大的扩展^[1]。然而 SAR 系统的工作机理使 SAR 图像呈现出了相干斑现象,这严

重影响了 SAR 图像的理解与解译,因此在 SAR 图像应用过程中进行相干斑抑制处理是很有必要的。

SAR 图像的相干斑抑制可以分为空域滤波与变换域滤波两大类^[2]。经典的空域滤波算法^[3]有 Lee 滤波, Frost 滤波, Gamma MAP 滤波及它们的改进算法等。这类算法均建立在图像局域平稳的假设上,而这种假设在边缘纹理等区域往往是不成立的,因此这些滤波算法容易引起细节区域的模糊。大多数的变换域抑斑算法是基于小波变换的^[1],但小波域滤波普遍存在伪吉布斯效应明显、阈值选择困难等问题。另外值得注意的是,现有算法对图像中细节区

2012-05-16 收到, 2012-05-21 改回; 2012-05-28 网络优先出版
内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目(NJZZ11069)和内蒙古自治区自然科学基金项目(2011BS0904)资助课题

*通信作者: 李光廷 li_gt@yahoo.cn

域均倾向于保持细节区域的像素值不变, 而由于细节区域同样存在相干斑现象, 因此细节保持的策略在一定程度上降低了滤波结果的视觉效果。

近年来, Buades 等人^[4]提出了一种非局域均值算法并设计了非局域滤波器。该滤波器通过衡量两窗口的结构相似性来衡量两像素的相似性, 并用该像素相似性来作为该邻域像素的权重用于进行当前像素的真值估计。非局域滤波器是针对加性噪声而提出的, 由于它具有很强的结构发现能力, 近年来被引入到了乘性相干斑噪声的抑制中^[5], 特别是 SAR 图像的相干斑抑制^[6,7]。Deledalle 等人^[6]提出了一种迭代的像素相似性测量方法, 同时推导了 SAR 图像中具有相同后向散射系数的两像素的联合概率密度函数(Probability Density Function, PDF)。Feng 等人^[7]证明了比值距离是一种鲁棒的 SAR 图像像素相关性特征, 并用比值距离的 PDF 来分割 SAR 图像中同质区域用于真实后向散射系数的估计。上面两种非局域滤波器^[6,7]都取得了很好的相干斑抑制效果, 显示了非局域滤波器在相干斑抑制中的优越性。

原始非局域滤波器具有较高的计算复杂度, 成为限制其广泛应用的主要问题。文献[6]中提出的新的像素相似性测量方法增加了一倍的运算量; 文献[7]中提出的方法用迭代对 8 个方向进行自适应形状同质区域分割, 运算量也增加了近一倍, 这进一步加剧了非局域滤波计算复杂度高的问题。另外, 文献[7]中用比值距离的 PDF 来进行像素相关性的测量, 而该像素相关性模型的最大值位置偏离其理想位值, 这也在一定程度上影响了像素相关性的测量精度。针对以上问题, 我们将 Deledalle 等人^[6]推导的两像素的联合 PDF 与 Feng 等人^[7]证明的比值距离特征相结合, 得出了新的像素相关性测量模型, 并根据训练所得的像素相似性阈值表进行相似像素的选择, 提出了基于相似像素选择的非局域相干斑抑制算法(Non-Local despeckling approach based on Similar Pixels Selected, NL-SPS)。

本文首先简单介绍了非局域滤波器进行相干斑抑制的基本原理, 引出本文的 NL-SPS 滤波器, 在对 NL-SPS 滤波器进行详细研究后, 用仿真与实验 SAR 图像对算法进行了验证, 最后进行了总结。

2 基于非局域滤波的相干斑抑制

SAR 图像的相干斑通常由乘性噪声来描述, 对于 L 视的幅度 SAR 图像, 它的观测值通常被认为服从均方根伽马分布^[8] (又称 Nakagami-Rayleigh 分布^[6,7])。

$$p(A_s | R_s^*) = \frac{2}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{R_s^*} \right)^L A_s^{2L-1} \exp \left(-L \frac{A_s^2}{R_s^*} \right) \quad (1)$$

其中, A_s 是像素 s 的观测值, R_s^* 是待估计的真实后向散射强度, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数。

给定一幅度 SAR 图像 $A = \{A_s | s = (s_{\text{row}}, s_{\text{col}})\}$, 这里以图 1 中像素 s 的估计为例, 介绍非局域滤波器进行相干斑抑制的基本流程。传统非局域滤波器实现的基本步骤为:

(1) 选定当前像素 s 的非局域窗 W_s , 如图 1 中最大的矩形窗, 该非局域窗可扩大到整个图像。

(2) 计算非局域窗内所有像素与当前像素 s 的相似性, 如图 1 中像素 t_1 与像素 s 的相似性(Pixel Similarity, $P_s(s, t_1)$), 该相似性计算又分以下两步。

(a) 计算局域块结构 s 与局域块结构 t_1 所有对应像素的相关性, 如图 1 中相似块 s 与相似块 t_1 的第 k_1 对像素 A_{s,k_1} 与像素 A_{t_1,k_1} 的相关性(Pixel Relativity, $P_R(A_{s,k_1}, A_{t_1,k_1})$), 则两相似块所有对应像素的相关性构成块相似性矩阵。

(b) 结合块相似性矩阵内的所有元素, 计算像素 t_1 与 s 的相似性。

(3) 像素 t_1 与像素 s 的相似性 $P_s(s, t_1)$ 作为像素 t_1 的权重, 用于进行当前像素 s 的真实散射强度 R_s^* 的估计。根据文献[6], R_s^* 的计算公式为

$$\hat{R}_s^* = \frac{\sum_{t \in W_s} P_s(s, t) A_{s,t}^2}{\sum_{t \in W_s} P_s(s, t)} \quad (2)$$

由上面分析可知, 非局域滤波器进行相干斑抑制主要分为 3 个计算过程: 局域块内对应像素的相关性计算, 基于块相似矩阵的像素相似性计算与基于像素相似性的真实散射强度的权重估计。然而直

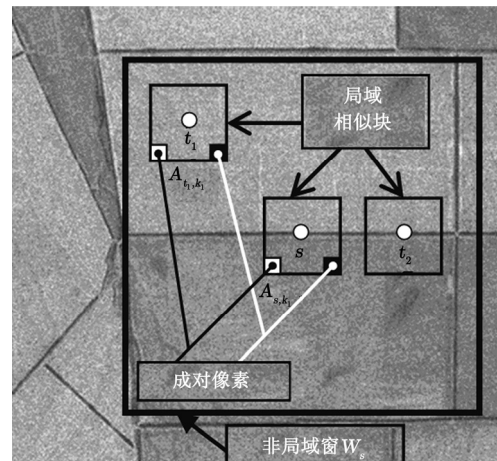


图 1 非局域滤波器原理示意图

接用非局域窗中所有像素的相似性进行相干斑抑制容易引起细节区域的严重模糊，因此有人提出了改进的非局域抑斑算法^[6,7]，针对现有非局域抑斑算法中存在计算复杂^[6]与像素相关性模型不精确^[7]的问题，本文提出了NL-SPS相干斑抑制算法，所提出方法主要有两个创新点：

(1) 在计算像素相似性时，本文推导了基于归一化比值距离的像素相关性模型；

(2) 训练了像素相似性阈值表格，并用阈值进行相似像素的选择用于进行当前像素的权重估计。

下面分3部分来介绍本文提出的NL-SPS相干斑抑制算法：首先推导新的像素相关性模型，然后训练生成像素相似性阈值表格，最后给出本文算法的整体流程图，并具体介绍本文算法的实现步骤。

3 基于相似像素选择的非局域相干斑抑制算法

3.1 基于归一化比值距离的像素相关性模型

设视数为 L 的幅度SAR图像 A 中具有相同散射强度的任意两像素为 A_1, A_2 ，文献[6]中推导了由这两个像素的联合PDF来测量两像素相关性 $P_R(A_1, A_2)$ 的模型。

$$P_R(A_1, A_2) = 4L \frac{\Gamma(2L-1)}{\Gamma(L)^2} \left(\frac{A_1 A_2}{A_1^2 + A_2^2} \right)^{2L-1} \quad (3)$$

Feng等人^[7]证明比值距离是一种鲁棒的SAR图像像素相关性特征。设比值距离为 $r=A_1/A_2$ 并代入式(3)可得到用两像素的联合PDF进行像素相关性测量的比值距离模型为

$$P_R(r) = P_R(A_1/A_2) = 4L \frac{\Gamma(2L-1)}{\Gamma(L)^2} \left(\frac{1}{r+1/r} \right)^{2L-1} \quad (4)$$

分析式(4)知 $P_R(r)$ 在 $r=1$ 处取得其最大值。由于像素的相关性与信号的相关系数有相似的意义，并且相关系数最大值为1，因此我们对式(4)进行最大值归一化，由此得到新的比值距离像素相关性模型为

$$P_R(A_1, A_2) = P_R(r) = \left(\frac{2}{r+1/r} \right)^{2L-1} \quad (5)$$

与式(3)及文献[7]中的比值距离PDF的像素相关性模型相比，式(5)的像素相关性模型有以下优点：

(1) 新的像素相关性模型在 $r=1$ 处取得最大值1。即两像素相等时，像素的相关性为1，这使得像素相关性具有了明确的物理意义。式(3)的最大值不为1，而文献[7]中模型的最大值位置不为1。

(2) 式(5)中， $P_R(A_1, A_2) = P_R(A_2, A_1)$ 成立，即进行相关性计算的两像素具有可互换性。文献[7]中

像素相关性模型不具有像素可互换性。

(3) 在视数已知的前提下，式(5)相比于式(3)更容易实现。如可以预先训练表格，用查表的方式实现，而不用重复计算。

3.2 像素相似性阈值表格的生成及使用

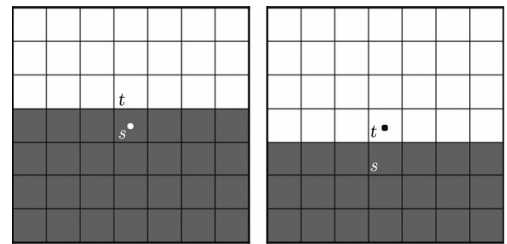
由前面对非局域滤波算法的原理介绍知，像素相似性是基于两局域块的相似性来计算的，因此本小节首先介绍像素相似性的计算，再介绍像素相似性阈值表格的生成及使用。

3.2.1 基于块相似矩阵的像素相似性计算 设像素 t 为像素 s 的非局域窗内的像素，并且 $A_{s,k}$ 与 $A_{t,k}$ 为局域相似块 s 与局域相似块 t 的第 k 个对应的像素对，令 $r_k=A_{s,k}/A_{t,k}$ ，记像素 $A_{s,k}$ 与 $A_{t,k}$ 的相关性为 $P_R(r_k)$ 。则所有局域块 s 与局域块 t 中对应像素的相关性组成了块相似矩阵。设相似块的大小为 $W \times W$ ，根据局域块内像素独立的假设，则像素 t 与像素 s 的相似性 $P_s(s, t)$ 可以用块相似矩阵中所有元素的积来计算^[6]，然而由于像素的相关性 $P_R(r_k)$ 的数值可能非常小，为了避免微小数值引起的计算误差，本文用块相似矩阵所有元素的几何均值代替所有元素的积来计算两像素的相似性，并且在对数域实现该计算。则得基于块相似矩阵的像素相似性计算公式为

$$P_s(s, t) = \left(\prod_k P_R(r_k) \right)^{1/W^2} = \exp \left(\frac{1}{W^2} \sum_k \log(P_R(r_k)) \right) \quad (6)$$

3.2.2 非局域滤波器边界区分能力的研究 由式(2)可知，像素 s 与像素 t 的相似性 $P_s(s, t)$ 直接作为像素 t 的权重用于进行 R_s^* 的估计，而边缘模糊是相干斑抑制过程中的常见问题，因此我们有必要对非局域滤波器的边界像素区分能力进行研究。如图2所示，设像素 s 与像素 t 分别位于某一边界结构的两侧，设图中两区域的真实散射强度比值满足 $\mu^2=R_s^*/R_t^*$ ，根据式(5)及文献[6]的附录B得真实后向散射强度比值为 μ^2 的两像素的相关性 $P_{R\mu}(A_s, A_t)$ 为

$$P_{R\mu}(A_s, A_t) = P_{R\mu}(r) = P_R \left(\frac{r}{\mu} \right) = \left(\frac{2}{r/\mu + \mu/r} \right)^{2L-1} \quad (7)$$



(a) 像素 s 的非局域块

(b) 像素 t 的非局域块

图2 像素 s 与像素 t 的非局域相似块

在非局域滤波器中,常用的局域相似块大小为 7×7 ,非局域窗大小为 21×21 。本文也采用这个窗口设置。设 $W=7$,接下来以4视幅度SAR图像为例进行非局域滤波器边界区分能力的研究,仍以图2中所示两像素的区分为例,即研究非局域滤波器对图2(a)中第4行像素与第3行像素的区分能力,第4行像素的局域结构均与图2(a)相同,第3行像素的局域结构如图2(b)所示。

如图2(a)与图2(b)所示,局域块 s 与局域块 t 共有7对不同的像素具有不同的真实散射强度,此时两像素的相似性 $P_{s\mu 7}(s, t)$ 的计算公式为

$$P_{s\mu 7}(s, t) = \exp\left\{\frac{1}{7^2}\left(\sum_{k=1}^{6 \times 7} \log(P_R(r_k)) + \sum_{k=1}^7 \log(P_{R\mu}(r_k))\right)\right\} \quad (8)$$

设 $\mu=2$,我们对图2(a)中第3行像素与像素 s 的相似性 $P_{s\mu 7}(s, t)$ 的概率密度分布进行了统计,如图3(a)中虚线所示。同时我们还统计了第4行像素与像素 s 的相似性 $P_s(s, t)$,它的概率密度分布如图3(a)中实线所示。观察图3(a)中的两曲线可以发现, $P_s(s, t)$ 与 $P_{s\mu 7}(s, t)$ 的分布之间有明显的距离,因此通过设定一个阈值来对非局域窗中与当前中心像素有相同结构和不同结构的像素进行区分是可行的。接下来本文将像素相似性阈值的计算方式进行研究。

3.2.3 像素相似性阈值的计算及阈值表格的使用

记图3(a)中 P_s 与 $P_{s\mu 7}$ 的PDF分别为 $\text{PDF}_{P_s}(u)$ 与 $\text{PDF}_{P_{s\mu 7}}(u)$,其中 $u \in [0, 1]$ 对应图3(a)的横坐标,即像素相似性系数。设某一给定的像素相似性阈值为 th ,则根据该阈值进行像素分类所得的错误分类概率 Pe 为

$$\begin{aligned} \text{Pe}(\text{th}) &= \int_0^{\text{th}} \text{PDF}_{P_s}(u) du + \int_{\text{th}}^1 \text{PDF}_{P_{s\mu 7}}(u) du \\ &= \int_0^{\text{th}} \text{PDF}_{P_s}(u) du + 1 - \int_0^{\text{th}} \text{PDF}_{P_{s\mu 7}}(u) du \quad (9) \end{aligned}$$

图3(b)给出了不同情况下错误分类概率随阈值的变化,根据错误分类概率最小准则来确定阈值,即 $T = \arg \min_{\text{th}} \{\text{Pe}(\text{th})\}$ 如图中三角形标注的横坐标位置。观察图3(b)中不同情况确定的阈值可以发现:
(1) 视数 L 相同时, μ 越大,则所确定的阈值 T 对应的错误分类概率越小;
(2) μ 相同时,视数越大,则所确定的阈值 T 对应的错误分类概率越小。

由上面分析可以发现,阈值的确定与图像的视数及所选的真实散射强度比有关,然而阈值的解析表达式获得并不容易。为了方便滤波过程中阈值的

确定,我们利用统计的方法训练了不同视数(L : 1~150),不同散射系数比(μ : 1.1~3)的情况下对应的阈值,并以表格的形式存储。图4(a)给出了视数在1~40之间,散射系数比不同时确定的阈值。设给定 $\mu=2$ 且 $L=4$,相似性阈值表按如下两步使用,如图4(b)所示。

(1) 根据给定的散射系数比 μ 的值,查表得到 μ 为该值时阈值随视数变化的函数 $T_\mu(L)$ 。

(2) 根据计算所得的图像视数 L ,由 T_μ 得到阈值 T 。如图4(b)所示,所确定阈值为 $T = T_\mu(4)$ 。若计算所得视数 L 不为整数,通过对临近整视数阈值的线性插值来确定;若 $L \geq 150$,令 $T = T_\mu(150)$ 。

3.3 本文提出的NL-SPS相干斑抑制算法

在推导了新的像素相关性模型与训练生成了像素相似性阈值表格之后,结合前面对非局域滤波器基本原理的介绍,下面给出本文提出的NL-SPS相干斑抑制算法的整体流程图,如图5所示。

下面以图1中像素 s 的估计为例,详细说明本文算法的实现流程。

(1) 设 $\mu=2$;图1的等效视数^[7]由计算得 $L=6.3$,按图4(b)所示步骤查像素相似性阈值表得 $T=0.5368$ 。

(2) 非局域窗通常选为 21×21 ,为说明方便,这里像素 s 的非局域窗选为整体图像,即图1整体。

(3) 利用局域块的相似性计算所有像素与像素 s 的相似性,以图1中像素 t_1 与像素 s 的相似性计算步骤为:

(a) 选定像素 t_1 与像素 s 对应的局域块结构,图1中包围 s 与 t_1 的两个小矩形框所示的两像素 7×7 局域块结构如图6(a),6(b)所示;

(b) 利用式(5)进行两局域块结构对应像素的相关性计算,计算结果构成块相似矩阵,计算所得局域块 s 与局域块 t_1 的块相似矩阵如图6(d)所示;

(c) 用式(6)与计算所得的块相似矩阵进行像素 t_1 与像素 s 的相似性计算得 $P_s(s, t_1)=0.1163$ 。

图6(c)给出了图1中像素 t_2 的局域块 t_2 ,按上述步骤计算得局域块 s 与局域块 t_2 的块相似矩阵如图6(e)所示,计算得像素 t_2 与 s 的相似性 $P_s(s, t_2)=0.6185$ 。由式(2)可知, $P_s(s, t_1)$ 与 $P_s(s, t_2)$ 即为像素 t_1 与 t_2 的权重。

该像素相似性的计算结果很好地反应了像素所在局域结构的相似性,局域块 t_2 与局域块 s 的结构相似,而局域块 t_1 与局域块 s 的结构不同,因此像素 t_2 与像素 s 的相似性要大于像素 t_1 与像素 s 的相似性。

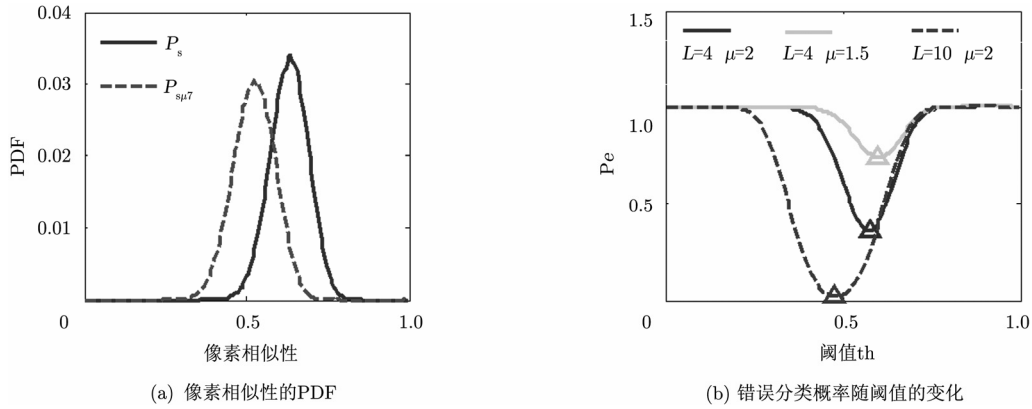


图3 像素相似性阈值的设定

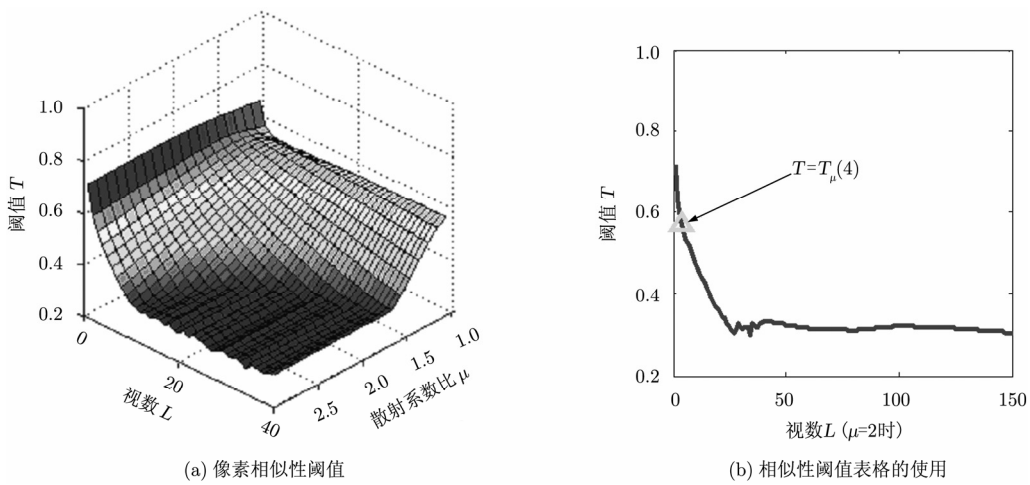


图4 像素相似性阈值表格及其使用

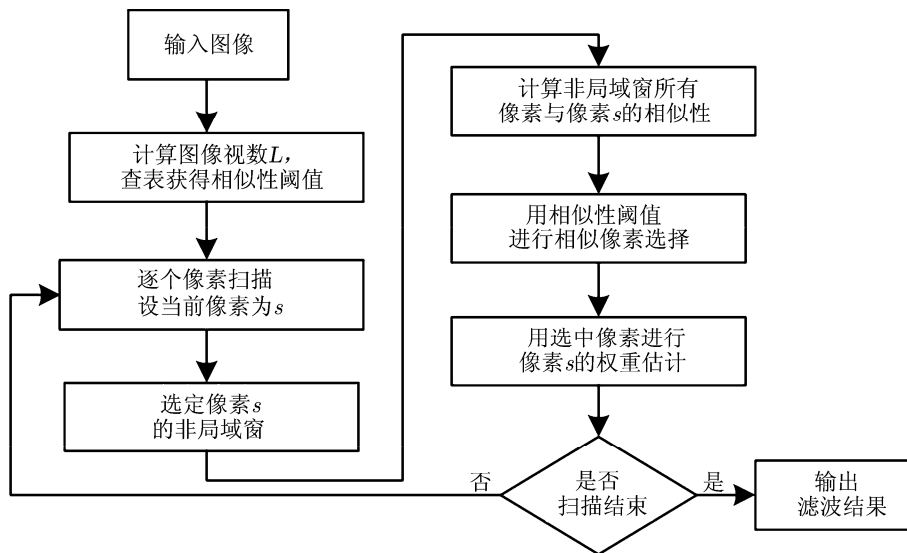


图5 NL-SPS 的整体流程图

图1中所有像素与像素s的相似性计算结果如图7(a)所示, 图中与局域块s具有相同局域结构的像素明显具有较高的像素相似性, 由此也说明了非

局域滤波器具有很强的结构发现能力。

(4) 用查表所得的阈值T对图7(a)所示的像素相似进行相似像素选择的结果如图7(b)。如图所示,

由于只有与像素 s 有相同结构的像素被选中, 如像素 t_2 被选中而像素 t_1 未被选中。

(5) 用图 7(b)中所示的被选中的像素根据式(2)进行像素 s 的估计。

由于只有与当前像素有相同结构的像素被选中并用于进行当前像素真实散射强度的估计, 因此提出的 NL-SPS 滤波器可以在很大程度上减少边缘的模糊, 并且均匀区域会有尽可能多的像素被选中, 均匀区域的相干斑也可以得到很好的抑制。本文方法对图 1 的相干斑抑制结果如图 7(c)所示, 视觉上看, 图中的线条结构得到了很好恢复, 同质区域的噪声得到了很好地平滑。

根据图 5 所示本文算法的流程图可以发现, 相似性阈值表格是预先训练并存储的, 一次滤波过程只需要一次查表操作, 相似像素的选择是简单的逻辑操作, 故所提出算法与原始的非局域滤波算法有相近的计算量, 因此本文方法比文献[6]的 PPB 与文献[7]的 LHRS-PRM 等改进非局域相干斑抑制算法具有更低的计算复杂度。

4 实验与结果分析

这一节, 我们用提出的 NL-SPS 算法对仿真与实测 SAR 图像进行了相干斑抑制实验, 并与现有的非局域相干斑抑制算法 PPB 滤波器^[6]与 LHRS-

PRM 滤波器^[7]进行了比较。具体参数参照文献[6,7]对各自滤波器的设置, 分别为: NL-PST 取 $\mu=1.5$, 迭代 3 次; PPB 进行 5 次迭代; LHRS-PRM 不迭代。3 个滤波器均选 21×21 的非局域搜索窗, 7×7 的局域相似窗。本实验的电脑配置为 Pentium(R) 4 CPU 2.9 G; 1 G 内存; C 语言环境。为方便对滤波效果进行量化评价, 我们对 3 幅仿真 SAR 图像进行了相干斑抑制实验; 同时为了进行滤波结果视觉效果的评价, 我们又进行了实测 SAR 图像的相干斑抑制实验。下面我们首先介绍本文用到的相干斑抑制效果评价的量化指标。

4.1 评价指标

本文从以下 4 个方面对相干斑抑制效果进行了量化评价, 并在表 1 与表 2 中给出了相应的比较结果。

(1) MSE(Mean Square Error): 该指标只用于仿真 SAR 图像整体抑斑效果的评价, 是滤波结果与无噪声图像之间的均方误差^[1]。

(2) D-MSE(Mean Square Error in the Detail area): 该指标只用于仿真 SAR 图像细节恢复效果的评价, 是细节区域滤波结果与无噪声图像间的均方误差, 其中细节区域可通过无噪图像的方差来获得^[9]。

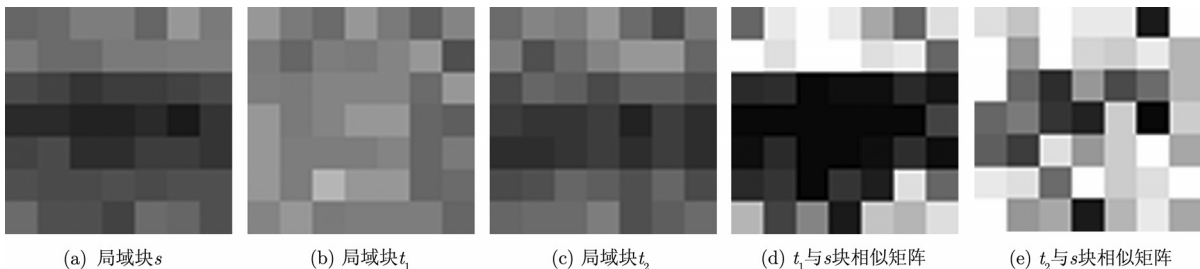


图 6 局域块与块相似矩阵

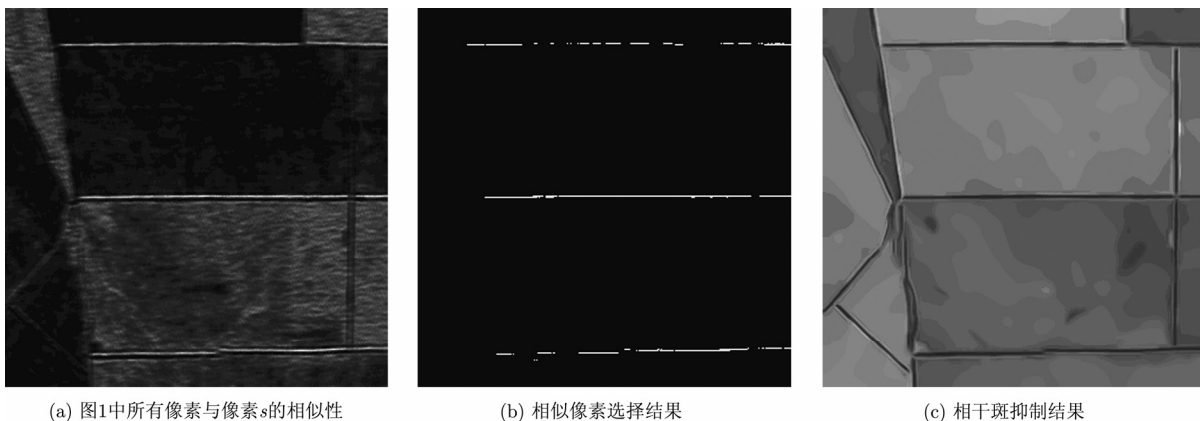


图 7 像素相似性及相似像素选择结果

(3) ENL(Equivalent Number of image Looks): 该指标用于进行图像同质区域噪声平滑效果的评价。各实验图像中矩形框出的区域用于进行滤波前后图像 ENL 的计算^[9]。

(4) Mean(A/A^*): 该指标是滤波前图像 A 与滤波结果 A^* 之间比值图的均值, 用于进行滤波过程中辐射保持性能的评价, 它的理想值为幅度相干斑噪声的一阶矩, 计算公式为^[8]

$$E[\text{Mean}(A/A^*)] = \frac{\Gamma(L+1/2)}{\Gamma(L)\sqrt{L}} \quad (10)$$

(5) Speckle: 该指标为比值图像(A/A^*)的等效视数, 用于评价整体的相干斑抑制效果, 它的理想值应为滤波前图像的视数^[1]。当边界纹理区域的模糊较严重时, 该指标的值小于滤波前图像的视数; 而当均匀区域含有较多未完全抑制的相干斑时, 该指标的值大于滤波前图像的视数。

4.2 仿真 SAR 图像相干斑抑制实验

为使评价结果更客观, 本文仿真产生了两幅含不同内容的 SAR 图像: 为了评估提出算法的噪声平滑能力与边界保持能力, 将光学图像与仿真的 4 视相干斑噪声相乘产生了受污染的房子(House); 为评估算法对纹理区域去噪性能, 将用 Photoshop 合成的纹理图像与 4 视相干斑噪声相乘产生了受污染的纹理图像(Texture)。仿真 SAR 图像实验结果如图 8 所示。

如图 8 所示, 这 3 种滤波器均显示了较好的噪声平滑能力与细节保持能力, 这显示了非局域滤波器的相干斑抑制方法的优越性。对比不同算法的滤波结果可以发现:

(1) 本文算法与 PPB, LHRs-PRM 相比具有更强的噪声平滑能力。本文算法的滤波结果中, 不仅同质区域的噪声得到了很好的平滑, 纹理细节区域的噪声也得到了很好的去除, 如图 8(c) Texture 中的 Brodatz 纹理得到了很好地复原。

(2) LHRs-PRM 的滤波结果中的细节区域存在模糊, 这在一定程度上降低了滤波结果的视觉效果, 如图 8(e)中 House 的边缘。

(3) 对比图 8(c)与图 8(d)可以发现, 本文算法与 PPB 滤波器有相似的细节保持能力。

另外, 为了说明本文算法的优点, 在图 9(a)与图 9(b)中给出了图 8(b)中两个仿真图像中 5 个点在各自 21×21 非局域窗中进行相似像素选择的结果。由图 9(a)与图 9(b)可以发现, 当前像素位于细节区域时, 只有与当前像素具有相同结构的像素被选中; 而当前像素处理同质区域时, 则有大量像素被选中;

由于细节区域中仍有一定的像素被选中, 因此本文方法可以实现细节区域噪声的去除, 而同质区域有大量像素被选中, 因此本文方法同样具有很好的同质区域噪声平滑效果。

表 1 给出了仿真图像相干斑抑制结果的量化评价, 其中根据方差提取的用于计算 D-MSE 的图像细节区域如图 9(c)与图 9(d)所示。如表 1 所示, 本文算法滤波结果评价指标中的 MSE, ENL 和 Speckle 均比 PPB 和 LHRs-PRM 的评价指标更接近各自的理想值, 因此可以说本文算法整体上具有更强的噪声平滑和图像复原能力。虽然本文算法的 Mean(A/A^*)略差于 PPB 滤波器, 但对仿真图像来说, MSE 是一种比 Mean(A/A^*)更有效的评价图像整体去噪效果的指标, 同时 D-MSE 表明本文方法比 PPB 和 LHRs-PRM 具有更强的细节区域重构能力。

4.3 实测 SAR 图像相干斑抑制实验

本节给出了 3 种非局域滤波器(本文算法, PPB 与 LHRs-PRM)对 3 幅实测幅度 SAR 图像的相干斑抑制结果。3 幅实测 SAR 图像分别为: (1) 英国 Bedfordshire 地区的一幅含有农田的 X-SAR 图像(Field, 3 视); (2) 华盛顿地区一小型建筑的 MiniSAR 图像(Building, 3 视); (3) 加拿大 Vancouver 地区呈现一定纹理结构区域的 Radarsat-1 图像(Structure, 单视)。图 10 给出了不同滤波算法对 Field 的滤波结果及相应的比值图^[10], 图 11 给出了 Building 和 Structure 的不同算法的滤波结果, 表 2 为相应的量化评价。

如图 10、图 11 所示, 本文算法的滤波结果显示了很好的视觉效果: 均匀区域的噪声得到了很好的平滑, 边界与纹理细节清晰。比较图 10 中不同算法滤波结果的比值图可以发现, 本文滤波结果比值图最平滑, 而 PPB 滤波结果比值图中的细节区域明显, LHRs-PRM 滤波结果比值图中则含有一定的边缘信息; 这是因为本文算法通过相似像素的选择实现了细节区域噪声的去除, 而 PPB 采用细节区域保持的方法, LHRs-PRM 滤波引起了边缘的模糊。表 2 中的 ENL 显示了本文算法很强的噪声平滑能力, Speckle 显示了本文算法较强的整体相干斑抑制能力, 值得注意的是 Mean(A/A^*)显示本文算法在对实测 SAR 图像相干斑抑制过程中较强的辐射保持能力。对 Structure 滤波结果显示: 即使对单视图, 本文算法仍然可取得很好的相干斑抑制效果, 而 LHRs-PRM 则如文献[7]所述, 对单视图的滤波效果不理想。

观察图 10(b)可以发现,本文算法会引起孤立点目标的发散,如图中左下角两个点目标,因此为了观察不同算法对细节区域的滤波效果,在图 12 中给出了图 10(a)所示 3 个细节区域的放大图。

由图 12 可以发现,本文算法对较大的结构具有很好的噪声去除能力,且抑斑效果均优于 PPB 与 LHRs-PRM,如图 12 中区域 a 与区域 c 所示;但

是本文算法对孤立点目标的保持效果要差于 PPB 的保持效果,如图 12 中区域 b 所示。这是由于本文算法是针对边界长度大于 7 个像素的结构保持而设计的(如图 2 所示),该问题可以通过对特定结构训练新的相似性阈值表格来解决。尽管如此,孤立点目标发散后在图中仍得到了体现,而在 LHRs-PRM 的滤波结果中,孤立点目标完全消失。

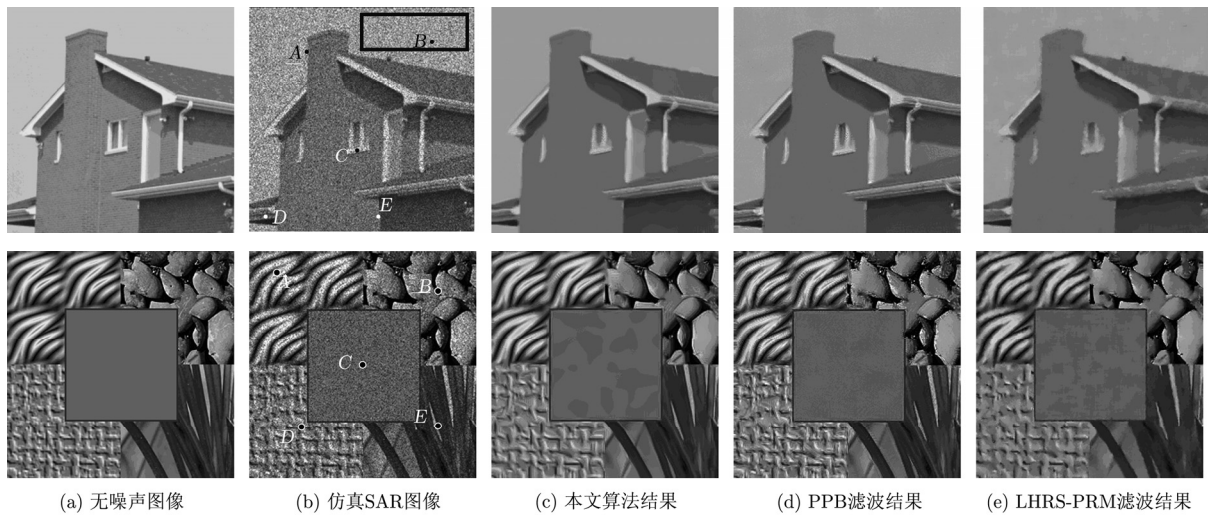


图 8 仿真 SAR 图像的滤波结果(由上到下: House, Texture)

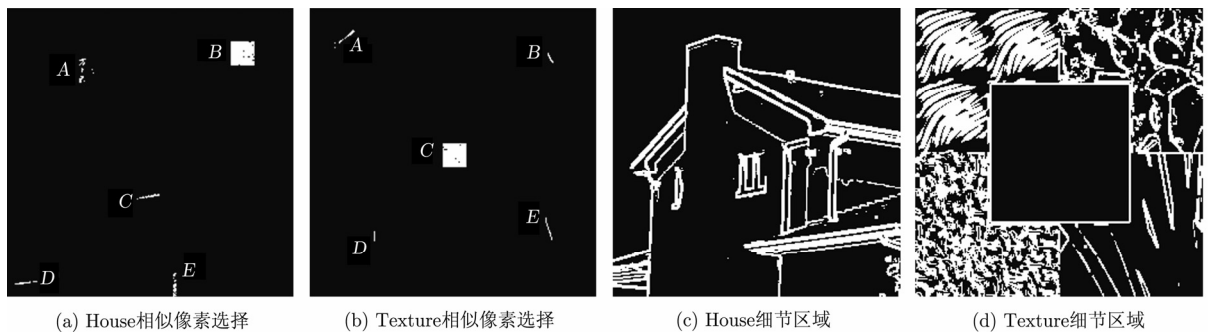


图 9 仿真实验的相似像素选择与细节区域提取

表 1 仿真 SAR 图像的相干斑抑制效果评价

图像	指标	理想值	本文算法	PPB	LHRs-PRM
House	MSE	0	48.1	65.3	85.6
	D-MSE	0	122.4	177.5	373.8
	ENL	∞	405.7	189.3	149.1
	Mean(A/A^*)	0.9714	0.9629	0.9636	0.9810
	Speckle	4.30	4.17	4.84	3.99
Texture	MSE	0	202.4	321.6	362.5
	D-MSE	0	337.8	521.2	662.1
	ENL	∞	463.2	204.8	154.6
	Mean(A/A^*)	0.9714	0.9651	0.9694	0.9772
	Speckle	4.29	4.10	3.52	3.44

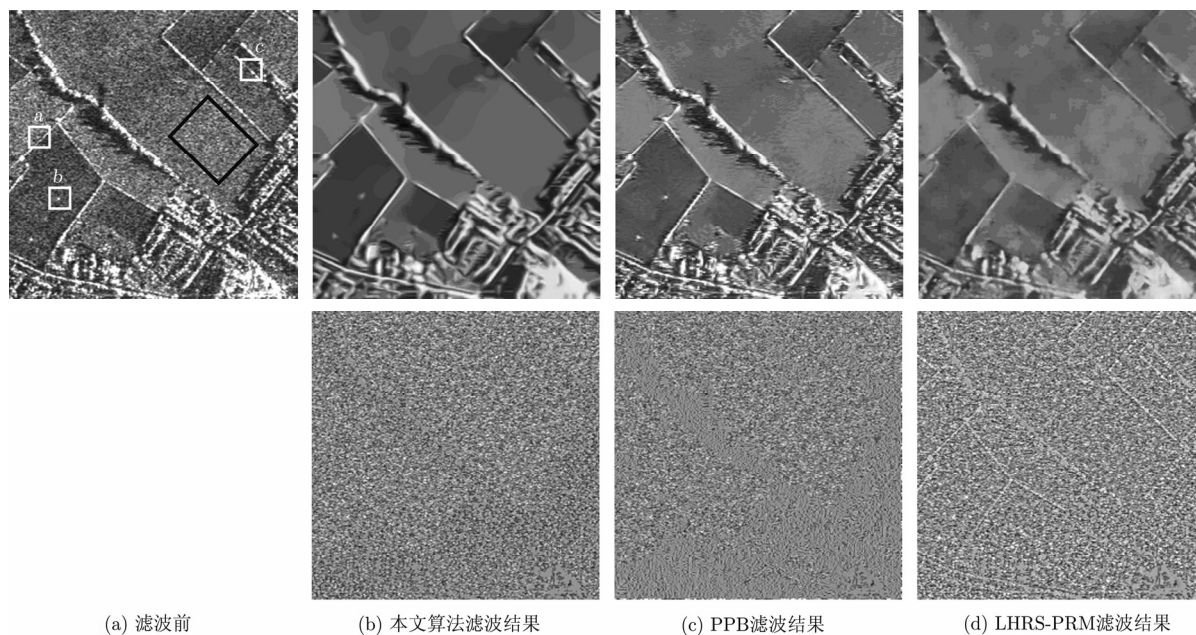


图 10 实测 SAR 图像(Field)的滤波结果(上)及其相应的比值图(下)

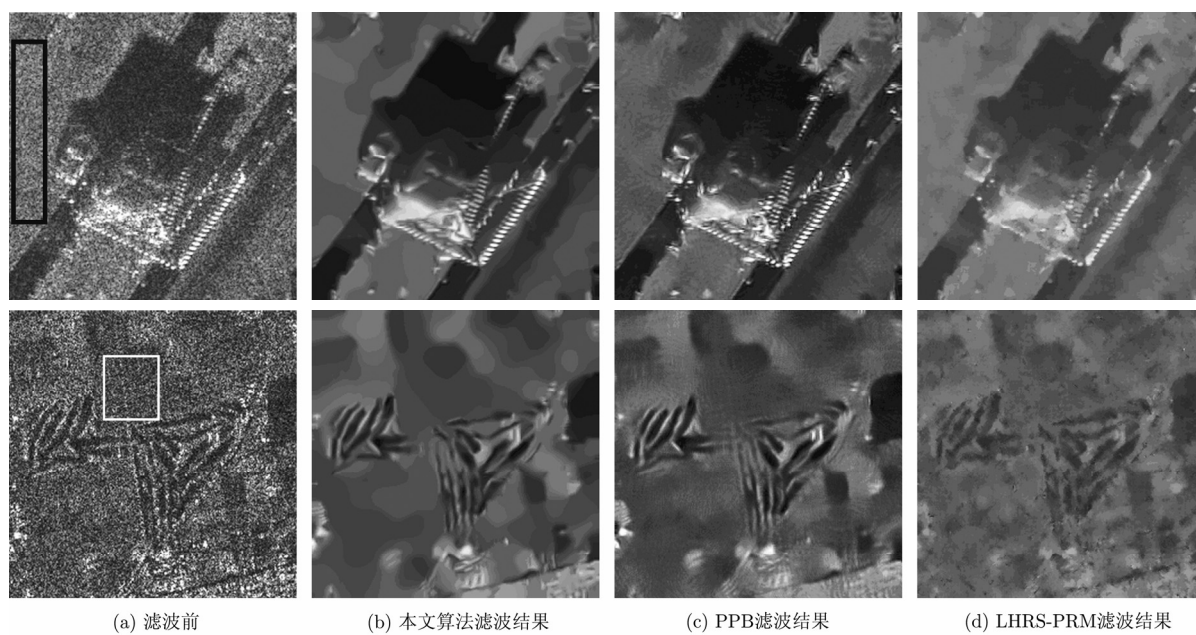


图 11 实测 SAR 图像的滤波结果(上: Building, 下: Structure)

表 2 实测 SAR 图像的相干斑抑制效果评价

图像	指标	理想值	本文算法	PPB	LHRS-PRM
Field	ENL	∞	408.4	186.9	153.5
	Mean(A/A^*)	0.9619	0.9463	0.9525	0.9786
	Speckle	3.20	3.01	4.80	3.06
Building	ENL	∞	375.8	130.9	117.1
	Mean(A/A^*)	0.9633	0.9581	0.9695	0.9763
	Speckle	3.34	3.42	2.81	2.78
Structure	ENL	∞	149.7	73.2	36.8
	Mean(A/A^*)	0.8833	0.8705	0.8591	0.8605
	Speckle	0.97	0.99	1.06	1.07

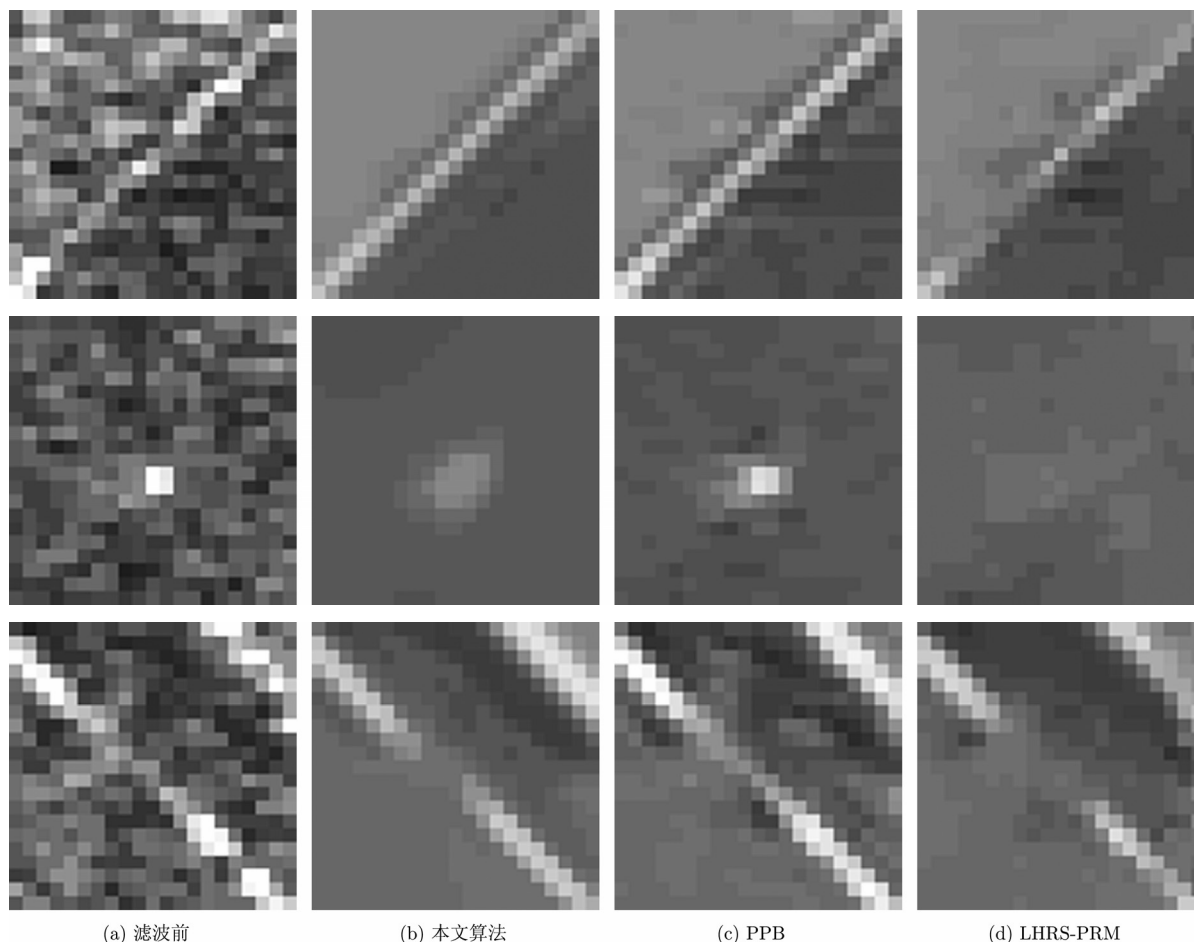


图 12 不同算法对 Field 细节区域的滤波结果(由上到下: 区域 a , 区域 b , 区域 c)

综上所述, 尽管本文算法容易引起孤立点目标的发散, 但是不同算法对仿真与实测 SAR 图像抑斑结果的视觉效果与量化评价均显示, 本文算法具有很好的结构保持能力和很强的噪声平滑能力, 不仅可以去除同质区域的噪声, 细节区域噪声也能得到很好地去掉。

5 结论

本文提出了一种基于相似像素选择的非局域相干斑抑制算法, 首先推导了新的比值距离像素相关性测量模型, 然后训练了用于不同情况下选择相似像素的阈值表, 最后用选中的相似像素进行真实散射强度的权重估计。训练所得的像素相似性阈值表可以根据不同的应用选择相应的参数, 如对于以粗分类为目的时可以选择相对较大的 μ 值, 而对于精细纹理提取的情况可以选择较小的 μ 值。仿真与实测 SAR 图像相干斑抑制的实验显示, 本文算法不仅具有很强的同质区域的噪声平滑能力, 并且可以很好去除纹理细节区域的噪声, 具有较强的细节重构能

力; 同时与现有的非局域相干斑抑制算法相比, 本文算法有较低的计算复杂度。

参考文献

- [1] Gleich D and Datcu M. Wavelet-based despeckling of SAR images using Gauss-Markov Random Fields[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2007, 45(12): 4127-4143.
- [2] Amirmazlaghani M and Amindavar H. Two novel Bayesian multiscale approaches for speckle suppression in SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2980-2993.
- [3] Lee J S and Jurkevich I. Speckle filtering of synthetic aperture radar images: a review[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 8(4): 313-340.
- [4] Buades A, Coll B, and Morel J. A non-local algorithm for image denoising[C]. *Proceeding Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'05)*, San Diego, CA, 2005, 2: 60-65.
- [5] Coupé P, Hellier P, and Kervrann C. Bayesian non-local means-based speckle filtering[C]. *IEEE International Symposia Biomedical Imaging: From Nano to Macro*, Paris,

- France, May 2008: 1291-1294.
- [6] Deledalle C, Denis L, and Tupin F. Iterative weighted maximum likelihood denoising with probabilistic patch-based weights[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(12): 2661-2672.
- [7] Feng H X, Hou B, and Gong M G. SAR image despeckling based on local homogeneous region segmentation by using pixel relativity measurement[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2724-2737.
- [8] Oliver C and Quegan S. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*[M]. Boston: Artech House, 1998: 75-120.
- [9] 李光廷, 禹卫东. 基于自适应 Bilateral 滤波的 SAR 图像相干斑抑制[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(5): 1076-1081.
Li Guang-ting, Yu Wei-dong. SAR image despeckling based on adaptive Bilateral filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1076-1081.
- [10] 易子麟, 尹东, 胡安洲, 等. 基于非局部均值滤波的 SAR 图像去噪[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(4): 950-955.
Yi Zi-lin, Yin Dong, Hu An-zhou, et al. SAR image despeckling based on non-local means filter [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 950-955.

作者简介



李光廷(1983-), 男, 山东泰安人, 2009年获郑州大学硕士学位, 同年进入中国科学院电子学研究所攻读博士学位, 研究方向为合成孔径雷达图像分割与分类。

E-mail: li_gt@yahoo.cn



禹卫东(1969-), 男, 1997年获南京航空航天大学博士学位, 现工作于中国科学院电子学研究所, 研究员, 博士生导师, 长期从事合成孔径雷达信号处理技术研究。

E-mail: ywdsar@yahoo.com.cn



黄平平(1978-), 男, 2007年获内蒙古工业大学硕士学位, 2010年获中国科学院电子学研究所博士学位, 现任教于内蒙古工业大学信息工程学院, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为合成孔径雷达信号处理与图像应用。

E-mail: hpp2304092@163.com