

DOI: 10.7652/xjtuxb201804014

SAR 图像相干斑的非局部平均滤波算法

朱磊, 蔡飞飞, 王延年, 郭林源

(西安工程大学电子信息学院, 710048, 西安)

摘要: 为了加强对 SAR 图像乘性相干斑噪声的抑制,并在相干斑抑制的同时有效提升对边缘的保护性能,提出了一种以均值比与变差系数联合构建的非局部平均(NLM)滤波(MR-NLM)算法。首先以搜索窗内各像素与中心像素在相似窗中的局部均值比替代传统高斯加权欧氏距离,构建对乘性相干斑噪声具有恒虚警边缘检测的相似性测量参量;然后以变差系数替代传统常数系数,构建对同质区与边缘区具有较好检测能力的自适应衰减因子;最后利用新构建的相似性测量参量和衰减因子联合形成负指数加权系数,实现对 SAR 图像的非局部加权滤波。实验结果表明:MR-NLM 算法与多种传统算法相比,具有更好的抑斑图像视觉效果及相干斑抑制与边缘保护性能,其等效视数提高 10% 以上,边缘保持指数提高 1% 以上。

关键词: SAR 图像;相干斑抑制;非局部平均;均值比;变差系数

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)04-0098-07

A Non-Local Means Filtering Algorithm for Despeckling of SAR Images

ZHU Lei, CAI Feifei, WANG Yannian, GUO Linyuan

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new non-local means (NLM) filtering algorithm (MR-NLM) based on the mean ratio (MR) and the variation coefficient is proposed to reduce multiplicative speckle noise of SAR images and to improve the edge preservation performance effectively. First, the local MR of each pixel to the center pixel in a search window is estimated by the similarity window, and the similarity measure parameter with constant false-alarm edge detection for the multiplicative speckle noise is constructed by using the MR to replace the traditional Gaussian weighted Euclidean distance. Secondly, an adaptive decay factor with good performance in detecting homogeneous and edge regions is constructed by using the variation coefficient to replace the traditional constant coefficient. Finally, negative exponential weighted coefficients are formed by combining the newly constructed similarity measure parameter with the decay factor, and then used to realize the non-local weighted filtering for SAR images. Experimental results and comparisons with several traditional filtering algorithms show that the MR-NLM algorithm has better visual effect for despeckled SAR images, better speckle suppression and edge preservation performance, and that the equivalent number of looks increases by more than 10%, and the edge preservation index improves by more than 1%.

Keywords: SAR image; speckle reduction; non-local means; mean ratio; variation coefficient

收稿日期: 2017-08-15。 作者简介: 朱磊(1979—),男,教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61401347);陕西省科技厅工业科技攻关资助项目(2016GY-101);陕西省教育厅自然科学基金资助项目(17JK0343);西安工程大学博士科研启动基金资助项目(BS1410)。

网络出版时间: 2018-02-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180226.1949.014.html>

SAR 图像中大量随机散布着一种被称为相干斑的固有乘性噪声。相干斑的存在不仅严重影响了 SAR 图像的视觉质量,而且对 SAR 图像后续解译处理技术的有效性与可靠性也造成了明显干扰^[1-2],因此,相干斑抑制算法研究一直是 SAR 图像处理研究领域的一项重要内容。

SAR 图像抑斑算法可大致分为 3 类:空域滤波^[3-5]、偏微分各向异性扩散滤波^[6-8]及变换域滤波^[9-11]。空域滤波出现最早,以经典 LEE 滤波^[3]及其改进算法^[4-5]等为代表。该类算法利用滑动窗口估计的局部统计量,自适应地控制对相干斑的平滑滤波,具有算法相对简单、实时性好等优点,但这类算法普遍存在抑斑性能受局域窗尺度选择影响大且噪声抑制不充分等问题。以经典各向异性(SRAD)扩散滤波^[6]及其改进算法^[7-8]等为代表的各向异性扩散滤波,可视为一种迭代运行的特殊空域滤波。该类算法大多利用滑动窗口估计的局部统计量来自适应控制扩散滤波的方向与强度,能在相干斑抑制与边缘细节保护上实现较好的平衡,同时也便于在扩散滤波中融入增强、腐蚀等其他处理。然而,这类算法往往至少需要经过数十次迭代运算,存在计算量较大,迭代运算次数难以准确预判及图像动态范围收缩明显等问题。近年来,具有多尺度分解、稀疏表示等优势的小波变换、轮廓波变换、二维 S 变换等采用阈值收缩的变换域抑斑算法^[9-11],在相干斑抑制与细节保持方面展现了较为优异的性能,然而这类算法容易在抑斑图像中产生伪吉布斯条纹。大部分空域滤波或各向异性扩散滤波均属于局部加权平均,存在局域窗尺度过大容易导致图像细节损失,而窗尺度过小则易导致抑斑不彻底等问题。2005 年, Buades 等针对图像加性噪声抑制问题,提出了著名的非局部平均(NLM)滤波^[12],从而为提升图像噪声抑制性能提供了一种新思路,而 Sara、Chen、Delledalle 等先后从变换域、空域等不同角度,将 NLM 思想应用于 SAR 图像乘性相干斑抑制领域并取得了令人鼓舞的抑斑效果^[13-15]。

为此,本文尝试利用 NLM 滤波思想来提升 SAR 图像的抑斑性能,提出了一种以均值比与变差系数联合构建的 NLM 滤波算法(MR-NLM)。该算法主要有以下改进:①首次提出利用对乘性相干斑噪声具有恒虚警边缘检测性能的均值比,替代传统 NLM 滤波中的高斯加权欧氏距离来构建相似性测量参量,从而使得 NLM 滤波对 SAR 图像不同灰度值区域均具有程度相似的边缘保持能力与相干斑

抑制水平;②利用能较好检测 SAR 图像同质区与边缘区的变差系数,替代传统 NLM 滤波中的变系数来构建衰减因子,从而使得 NLM 滤波能自适应控制在同质区和边缘区的平滑强度,确保在抑斑的同时,进一步保护边缘。实验结果表明,本文算法能有效提升 SAR 图像相干斑抑制与边缘保护性能。

1 经典 NLM 滤波

经典 NLM 滤波^[12]在对加性噪声图像滤波时,通过估计非局部的大尺度搜索窗内每个像素与中心像素在小尺度相似窗下的高斯加权欧氏距离,来测量搜索窗内每个像素与中心像素之间的相似性程度,并以此作为确定每个像素加权系数大小的主要参量。

设位置 i 处观测值为 $X(i)$,有用信号为 $S(i)$,则噪声为 $N(i)$ 的加性噪声图像模型为

$$X(i) = S(i) + N(i) \quad (1)$$

那么,经典 NLM 滤波算法对图像 i 位置像素进行非局部加权平均滤波,可描述为

$$\bar{X}_{\text{NLM}}(i) = \sum_{j \in \Omega(i)} w(i, j) X(j) \quad (2)$$

式中: $\Omega(i)$ 表示以 i 为中心的大尺度搜索窗; $w(i, j)$ 表示搜索窗内 j 像素对 i 像素的加权系数。加权系数 $w(i, j)$ 的计算可表示为

$$w(i, j) = \frac{1}{B(i)} \exp\left(-\frac{D_{\text{GWED}}(i, j)}{h^2}\right) \quad (3)$$

式中: h 为控制负指数衰减速度的衰减常数; $B(i)$ 为正则化因子,可表示为

$$B(i) = \sum_{j \in \Omega(i)} \exp\left(-\frac{D_{\text{GWED}}(i, j)}{h^2}\right) \quad (4)$$

其中 $D_{\text{GWED}}(i, j)$ 表示在搜索窗 $\Omega(i)$ 内 i 像素与 j 像素之间的高斯加权欧氏距离,可表示为

$$D_{\text{GWED}}(i, j) = \|\mathbf{Y}(\boldsymbol{\psi}(i)) - \mathbf{Y}(\boldsymbol{\psi}(j))\|_{2, \sigma}^2 \quad (5)$$

其中, $\boldsymbol{\psi}(i)$ 与 $\boldsymbol{\psi}(j)$ 分别表示以 i, j 为中心的小尺度相似窗, $\mathbf{Y}(\boldsymbol{\psi}(i))$ 与 $\mathbf{Y}(\boldsymbol{\psi}(j))$ 分别表示在相似窗 $\boldsymbol{\psi}(i)$ 与 $\boldsymbol{\psi}(j)$ 处的图像观测值矩阵, $\|\cdot\|_{2, \sigma}$ 表示计算标准差为 σ 的高斯加权 2-范数。

经典 NLM 算法由于采用了非局部的大尺度搜索窗来实施加权滤波,从而让更多的有效像素可以参与到滤波参数估计与噪声平滑处理中,使得提升噪声抑制与边缘保护性能成为了可能,而将高斯加权欧氏距离 D_{GWED} 作为相似性测量参量,则让经典 NLM 滤波算法与传统局部平均算法不同,不会因加权窗尺度过大而导致滤波图像模糊。正是因为经典 NLM 滤波的上述优势,文献[14]将 NLM 滤波

思想及 D_{GWED} 应用到 SAR 图像相干斑抑制中并取得了不错的抑斑效果。然而,直接将 D_{GWED} 应用到 SAR 图像中,会由于相干斑的乘性噪声属性,导致滤波算法抑斑强度在不同灰度值同质区大小差异明显,同时,也容易引起不同区域边缘检测的非恒虚警等问题。为此,本文提出利用对 SAR 图像乘性相干斑具有恒虚警边缘检测性能的均值比,替代 D_{GWED} 构建相似性测量参量,并在下文分析了采用均值比与 D_{GWED} 作为相似性测量参量的差异。

2 利用均值比与变差系数的 NLM 滤波新算法

本文提出了一种利用均值比与变差系数联合构建的 NLM 滤波算法(MR-NLM),该算法需先利用均值比估计相似性测量参量,再利用变差系数估计自适应衰减因子,然后利用相似性测量参量与自适应衰减因子联合估计负指数加权系数,最后对 SAR 图像实施非局部加权滤波,算法流程如图 1 所示。

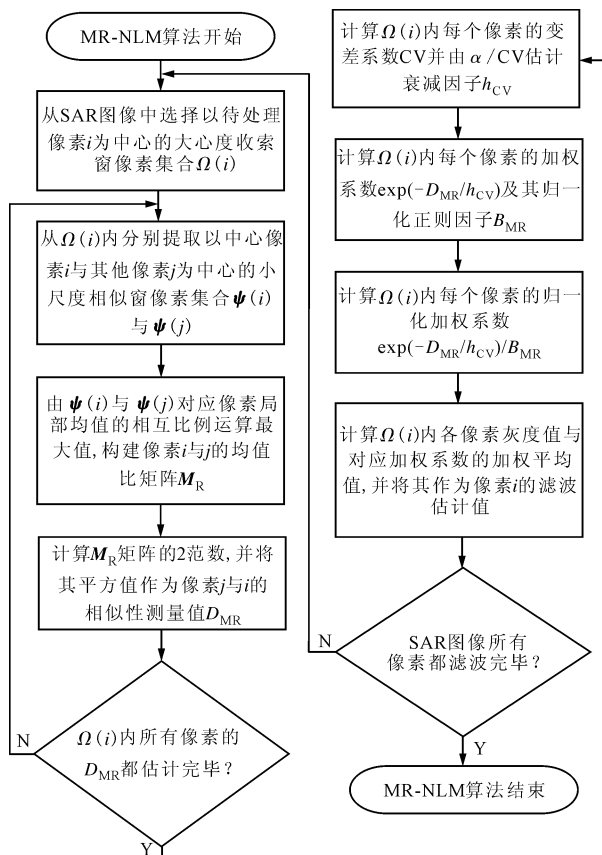


图 1 本文 MR-NLM 算法流程图

2.1 利用均值比构建相似性测量参量

设位置 i 处观测值为 $X(i)$, 回波信号为 $S(i)$, 相干斑为 $N(i)$ 的 SAR 图像乘性模型为

$$X(i) = S(i)N(i) \quad (6)$$

由式(6)易知,信号 $S(i)$ 的值越大,则相干斑 $N(i)$ 引起观测值 $X(i)$ 偏离信号 $S(i)$ 的程度也越剧烈。文献[16]已证明,与应用于加性噪声图像模型的梯度等差分运算不同,比率运算可实现对 SAR 图像乘性相干斑模型的恒虚警边缘检测。为此,本文提出利用均值比来构建相似性测量参量,从而使得 NLM 滤波对 SAR 图像不同灰度值区域均具有相似程度的相干斑抑制性能。

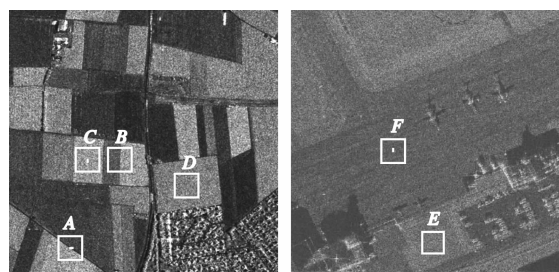
利用均值比构建的相似性测量参量可描述为

$$D_{\text{MR}}(i, j) = \left\| \max \left\{ \frac{\bar{X}(\psi(i))}{\bar{X}(\psi(j))}, \frac{\bar{X}(\psi(j))}{\bar{X}(\psi(i))} \right\} \right\|_2^2 \quad (7)$$

式中: $\| \cdot \|_2$ 表示 2 范数; $\bar{X}(\psi(i))$ 与 $\bar{X}(\psi(j))$ 分别表示在相似窗 $\psi(i)$ 与 $\psi(j)$ 处图像观测值的均值矩阵。若 $z \in \psi(i)$ 且相似窗尺度为 $b \times b$, 则有

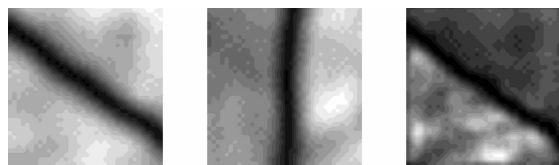
$$\bar{X}(\psi(i)) = \left\{ \bar{X}(z) = \frac{1}{b^2} \sum_{k \in \psi(z)} X(k), z \in \psi(i) \right\} \quad (8)$$

图 2 以一个简单实例显示了 D_{MR} 与 D_{GWED} 分别作为相似性测量参量所表现出的差异。在图 2a、2b



(a) 5 视真实 SAR 图像

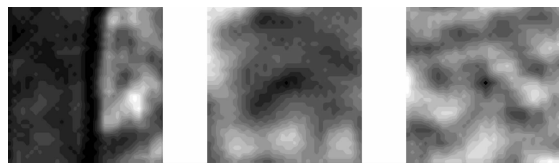
(b) 8 视真实 SAR 图像



(c) A 窗 D_{MR} 矩阵

(d) B 窗 D_{MR} 矩阵

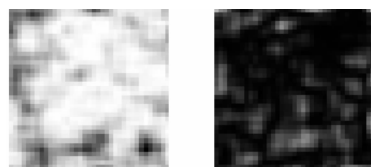
(e) A 窗 D_{GWED} 矩阵



(f) B 窗 D_{GWED} 矩阵

(g) E 窗 D_{MR} 矩阵

(h) F 窗 D_{MR} 矩阵



(i) E 窗 D_{GWED} 矩阵

(j) F 窗 D_{GWED} 矩阵

图 2 利用 D_{MR} 与 D_{GWED} 构建的相似性测量矩阵图像对比

两幅真实 SAR 图像中,分别在边缘与同质区选取 A、B、E、F 4 处区域,然后利用 D_{MR} 与 D_{GWED} 计算各窗对应的相似性测量矩阵,并将相似性测量矩阵以图像形式展示在图 2c~2j 中。

根据相似性测量的要求,搜索窗内的像素与中心像素的相似程度越高,则其被分配的相似性测量值越小(因采用负指数衰减加权)。图 2 中,A 与 B 窗的中心像素均刚好位于边缘上,因此,A 与 B 窗内仅边缘附近像素与中心像素相似度高。由图 2c~2f 可见,利用 D_{MR} 获得的测量矩阵图像,其边缘附近测量值明显低于两侧同质区且测量值比较平滑,展现了较好的边缘与同质区分度,而利用 D_{GWED} 获得的测量矩阵图像,虽也能区分边缘与同质区,但边缘两侧同质区测量值起伏较大,同质区部分像素测量值甚至与边缘区像素相近。因此, D_{MR} 能对 A 与 B 窗形成更好的相似性测量,这将使得采用 D_{MR} 的本文算法能更好的保护边缘。由图 2g 与 2h 可见,高灰度值同质区的 E 窗与低灰度值同质区的 F 窗像素分配的 D_{MR} 测量值差异小。由图 2i 与 2j 可见,高灰度值的 E 窗分配的 D_{GWED} 测量值平均水平要明显高于低灰度值的 F 窗,这将导致采用 D_{GWED} 的 NLM 滤波算法,在低灰度值区域的抑斑能力较强,而高灰度值区域较弱,造成不同区域相干斑抑制程度差异明显,而采用 D_{MR} 的本文算法则可确保各区域之间具有相近的抑斑强度。

2.2 利用变差系数构建自适应衰减因子

传统 NLM 滤波算法在对图像平滑去噪时,采用单一常数作为衰减因子,显然存在弊端。当衰减因子取值较小时,NLM 滤波算法对边缘细节保护较好,但噪声残留较多;当衰减因子取值较大时,噪声抑制较彻底,但容易导致边缘模糊。因此,只有 NLM 滤波算法对 SAR 图像同质区与边缘区域采用不同的衰减因子,方能兼顾相干斑抑制与边缘保护。

变差系数是一种能较好评估 SAR 图像局部起伏程度的参量,考虑到 SAR 图像大部分边缘引起的起伏一般较同质区相干斑引起的起伏更剧烈,因此,变差系数常被抑斑算法^[3-4,6-8]用作检测边缘区与同质区的有效参量,其检测准确度随相干斑强度减弱而提高。变差系数的定义为

$$V_{CV}(i) = \frac{\sigma_X(i)}{\bar{X}(i)} \quad (9)$$

式中: $\sigma_X(i)$ 、 $\bar{X}(i)$ 分别表示观测值 X 在以 i 为中心的相似窗内的标准差与均值。图 3 显示了图 2a 真实 SAR 图像对应的变差系数矩阵图像。



图3 图2a 真实 SAR 图像的 V_{CV} 矩阵图像

图 3 表明, V_{CV} 值在边缘区域偏高而同质区偏低,可见 V_{CV} 对 SAR 图像不同区域具有较好的检测与区分能力。为此,本文提出利用 V_{CV} 代替传统 NLM 滤波算法中的常数衰减因子,在 NLM 滤波中形成一种随 SAR 图像区域变化而自适应变化的衰减因子。同时,考虑到衰减因子在同质区应取较大值,以加大 NLM 滤波算法对同质区相干斑的抑制强度;而在边缘区域应取较小值,以减弱对边缘的过度平滑,因此本文提出的由 V_{CV} 估计的自适应衰减因子定义为

$$h_{CV}(i) = \frac{1}{\alpha V_{CV}(i)} \quad (10)$$

式中: α 为整体调节算法抑斑强度的衰减常数。

2.3 基于 NLM 滤波的非局部加权平均滤波

由式(7)构建的相似性测量参量与式(10)构建的自适应衰减因子,容易得出本文 MR-NLM 算法的加权系数为

$$w_{MR}(i,j) = \frac{1}{B_{MR}(i)} \exp\left(-\frac{D_{MR}(i,j)}{h_{CV}(i)}\right) \quad (11)$$

式中: $B_{MR}(i)$ 为正则化因子,可表示为

$$B_{MR}(i) = \sum_{j \in \Omega(i)} \exp\left(-\frac{D_{MR}(i,j)}{h_{CV}(i)}\right) \quad (12)$$

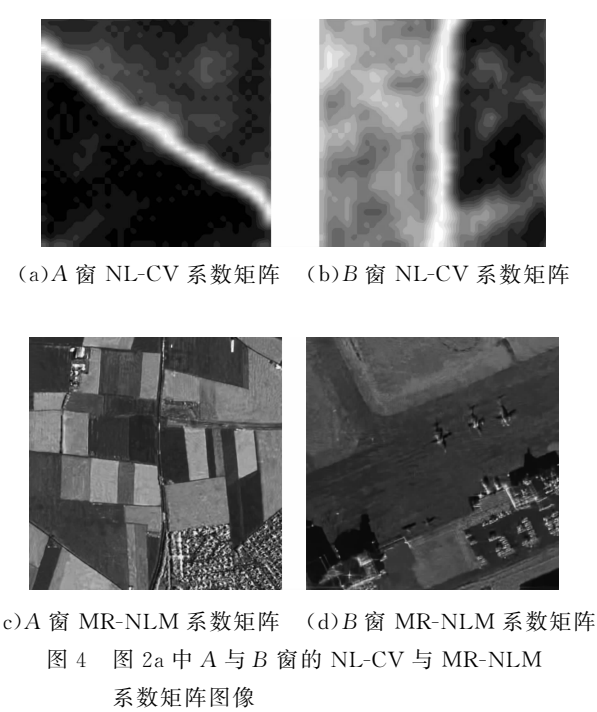
本文算法的非局部加权滤波运算可表示为

$$\bar{X}_{MR-NLM}(i) = \sum_{j \in \Omega(i)} w_{MR}(i,j) X(j) \quad (13)$$

为验证本文 MR-NLM 算法的加权系数对边缘的有效保护,图 4 比较了 MR-NLM 算法与 NL-CV 算法^[14]对图 2a 真实 SAR 图像边缘区域 A 与 B 窗的加权系数矩阵图像。显然,与 NL-CV 算法相比,本文 MR-NLM 算法仅对边缘附近像素分配了较大权值,而对边缘两侧同质区分配的权值较小且更均匀、起伏更小,因此,MR-NLM 算法加权系数更有利于保护边缘。

3 实验与结果

为了检验滤波算法的抑斑性能,分别采用本文 MR-NLM 算法、各向异性扩散 IDPAD 算法^[7]、变



换域 SAR-BM3D 算法^[13]及空域 NLM 滤波算法(NL-CV)^[14],对图 2a 与 2b 两幅真实 SAR 图像进行抑斑处理,并对抑斑性能进行视觉效果评估与参数性能比较,视觉效果比较包括抑斑图像的视觉效果比较以及抑斑图像的 Canny 边缘检测图像比较,实验结果如图 5 与图 6 所示。参数性能比较采用了文献[4]中使用的两个参数:等效视数 V_{ENL} 与边缘保持指数 V_{EPI} 。 V_{ENL} 常用于评估抑斑能力强弱,其值越大说明抑斑算法的相干斑抑制能力越强; V_{EPI} 常用于评估边缘保持能力强弱,其值越接近于 1 表明抑斑算法的边缘保持性能越强。实验中 V_{ENL} 参数评估区域选择了图 2a 中的 C 区与 D 区以及图 2b 中的 E 区与 F 区,实验结果如表 1 所示。

为了客观体现各算法相干斑抑制与边缘保护的最好性能,各算法在对图 2a 与 2b 两幅 SAR 图像抑斑时,分别采用了各自最好的抑斑性能参数。各算法对图 2a 抑斑时采用的参数为:SAR-BM3D 算法的视数 L 设置为 5;IDPAD 算法的局域窗尺度为 5

$\times 5$ 像素,时间步长为 0.05,迭代运算 20 次;NL-CV 算法搜索窗尺度为 21×21 像素,相似窗尺度为 7×7 像素,衰减常数为 85,高斯核标准差为 8;本文

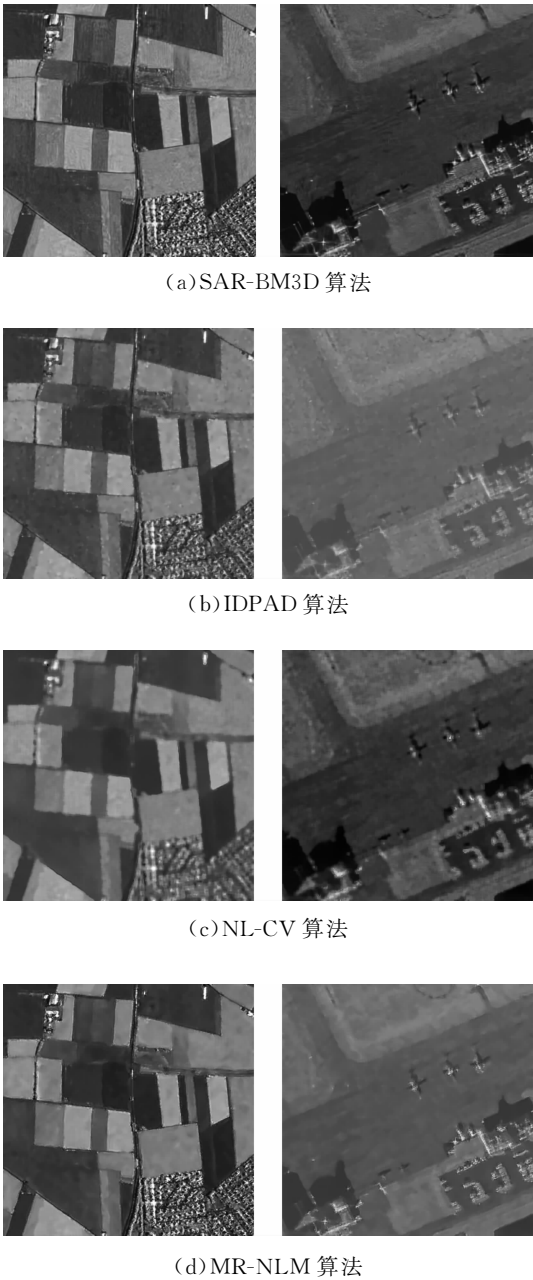
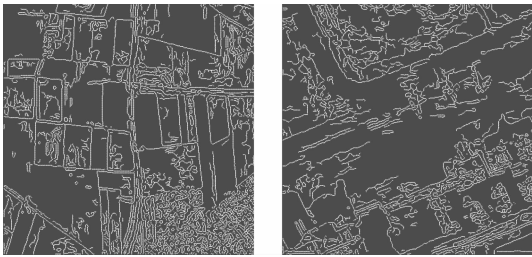


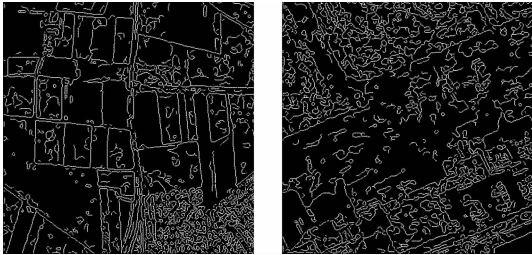
图 5 4 种算法对图 2a、2b 两幅真实 SAR 图像的抑斑效果对比

表 1 4 算法对图 2 两幅 SAR 图像的抑斑能力和边缘保持能力对比

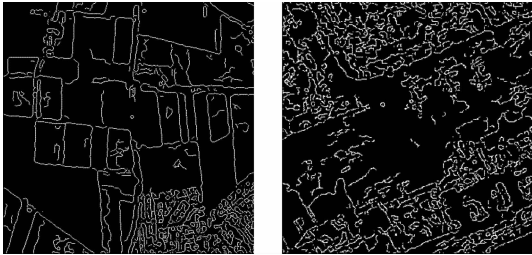
滤波算法	V_{ENL}				V_{EPI}	
	C 区	D 区	E 区	F 区	图 2a	图 2b
IDPAD	600.9	346.4	702.8	1 934.6	0.766	0.632
SAR-BM3D	755.8	332.0	1 610.8	1 703.1	0.944	0.771
NL-CV	2 070.0	788.9	1 001.1	3 171.9	0.449	0.400
MR-NLM	2 485.4	826.1	1 774.1	4 100.4	0.958	0.780



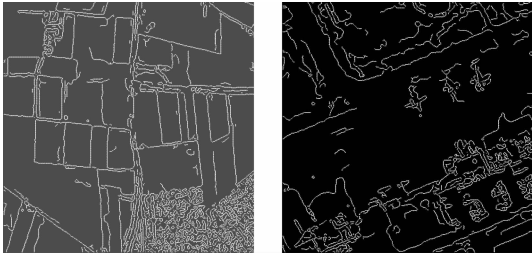
(a)图 5a 对应的边缘检测图像



(b)图 5b 对应的边缘检测图像



(c)图 5c 对应的边缘检测图像



(d)图 5d 对应的边缘检测图像

图 6 4 种算法的抑斑图像对应的边缘检测图像对比

NL-CV 算法抑斑图像高灰度值与低灰度值区域的明显差异。从图 6 所示的抑斑图像边缘检测图像对比可以发现:SAR-BM3D、IDPAD 与 NL-CV 算法的边缘检测图像在高灰度值区域虚假边缘较多,本文算法边缘检测图像边缘平滑度更好,高灰度值区域虚假边缘更少。

由表 1 所示的抑斑性能参数比较容易发现:在表征相干斑抑制能力的 V_{ENL} 参数方面,本文 MR-NLM 算法在 $C \sim F$ 4 个同质区都展现了较其他 3 种算法更明显的优势,而这一结论与图 5 中本文算法抑斑图像所展示的更平滑的同质区,以及与图 6 中本文算法同质区边缘检测图像虚假边缘残留最少结果一致;在表征边缘保持性能的 V_{EPI} 参数方面,本文 MR-NLM 算法略优于边缘保持性能优异的 SAR-BM3D 算法,但明显优于 IDPAD 与 NL-CV 算法,而这一结论与图 5 中本文算法抑斑图像所保留的更清晰的边缘,以及与图 6 中本文算法边缘检测图像边缘保持更完整结果一致。

4 结 论

本文将 NLM 滤波思路应用于 SAR 图像乘性相干斑噪声的抑制中,提出了一种以均值比与变差系数联合构建的 NLM 滤波新算法。该算法首次提出利用对乘性相干斑噪声具有恒虚警检测性能的局部均值比来构建 NLM 滤波的相似性测量参量,从而改良了传统相似性测量参量对边缘检测非恒虚警以及对不同灰度值同质区域相干斑抑制程度不均衡问题。同时,利用对 SAR 图像同质区与边缘区具有较好检测性能的变差系数来构建自适应的衰减因子,从而在抑斑的同时,进一步保护图像边缘。上述改进使得本文算法在抑斑图像视觉效果、相干斑抑制及边缘保护方面均优于多种传统算法。

参考文献:

[1] FELIX B, GERALDINE Q, THIMM Z, et al. Comparative analysis of edge detection techniques for SAR images [J]. European Journal of Remote Sensing, 2016, 49(1): 205-224.

[2] MORANDEIRA N S, GRIMSON R, KANDUS P. Assessment of SAR speckle filters in the context of object-based image analysis [J]. Remote Sensing Letters, 2016, 7(2): 150-159.

[3] LEE J S. Digital image enhancement and noise filtering by using local statistics [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1980, 2(2):

算法搜索窗尺度为 21×21 像素,相似窗尺度为 7×7 像素,衰减常数 α 为 1.5;Canny 算子的边缘检测阈值为 0.08。各算法对图 2b 抑斑时采用的与图 2a 不同的参数为:SAR-BM3D 算法的 L 为 8;IDPAD 算法迭代运算 30 次;NL-CV 算法衰减常数为 50;本文算法衰减常数 α 为 3.6。

从图 5 所示的各算法抑斑图像对比可以发现:本文 MR-NLM 算法抑斑图像自然清晰,同质区相干斑抑制彻底,边缘保持充分,不存在 SAR-BM3D 算法抑斑图像中的伪吉布斯条纹,不存在 IDPAD 算法抑斑图像同质区中散布的块状起伏,不存在

- 165-168.
- [4] 朱磊, 水鹏朗, 章为川, 等. 利用区域划分的合成孔径雷达图像相干斑抑制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(10): 83-88.
ZHU Lei, SHUI Penglang, ZHANG Weichuan, et al. A despeckling algorithm for synthetic aperture radar image using region subdivision [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(10): 83-88.
 - [5] 杨学志, 叶铭, 吴克伟, 等. 结构保持的双边滤波极化 SAR 图像降噪 [J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 268-275.
YANG Xuezhi, YE Ming, WU Kewei, et al. A despeckling algorithm for synthetic aperture radar image using region subdivision [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(2): 268-275.
 - [6] YU Y, ACTON S. Speckle reducing anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(11): 1260-1270.
 - [7] ZHU Lei, ZHAO Xiaotian, GU Meihua. SAR image despeckling using improved detail-preserving anisotropic diffusion [J]. Electronics Letters, 2014, 50(15): 1092-1093.
 - [8] 朱磊, 韩天琪, 水鹏朗, 等. 一种抑制合成孔径雷达图像相干斑的各向异性扩散滤波方 [J]. 物理学报, 2014, 63(17): 445-455.
ZHU Lei, HAN Tianqi, SHUI Penglang, et al. An anisotropic diffusion filtering method for speckle reduction of synthetic aperture radar images [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 445-455.
 - [9] BHUIYANR M, AHMAD M, SWAMY M. Spatially adaptive wavelet-based method using the Cauchy prior for denoising the SAR images [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(4): 500-507.
 - [10] XU Bin, CUI Yi, LI Zenghui, et al. Patch ordering based SAR image despeckling via transform-domain filtering [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2015, 8(4): 1682-1695.
 - [11] GAO Fei, XUE Xiangshang, SUN Jinping, et al. A SAR image despeckling method based on two-dimensional S transform shrinkage [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(5): 3025-3034.
 - [12] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising [C]// Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 60-65.
 - [13] SARA P, MARIANA P, CESARIO V A, et al. A nonlocal SAR image denoising algorithm based on LMMSE wavelet shrinkage [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(2): 606-616.
 - [14] CHEN Shaobo, HOU Jianhua, ZHANG Hua, et al. De-speckling method based on non-local means and co-efficient variation of SAR image [J]. Electronics Letters, 2014, 50(18): 1314-1316.
 - [15] DELEDALLE C A, DENIS L, TUPIN F, et al. NL-SAR: A unified nonlocal framework for resolution preserving (pol)(in) SAR denoising [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(4): 2021-2038.
 - [16] TOUZI R, LOPES A, BOUSQUET P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1988, 26(6): 764-773.

[本刊相关文献链接]

- 张欣, 黄普明, 文珺, 等. 一种适用于中高轨合成孔径雷达卫星的分辨率分析方法. 2016, 50(8): 70-76. [doi: 10.7652/xjtuxb201608012]
- 陈倩倩, 张磊, 徐刚, 等. 利用多通道联合稀疏重建的干涉逆合成孔径雷达三维成像算法. 2014, 48(12): 100-106. [doi: 10.7652/xjtuxb201412016]
- 董祺, 张磊, 徐刚, 等. 采用子孔径分割的逆合成孔径雷达成像包络对齐方法. 2014, 48(12): 107-112. [doi: 10.7652/xjtuxb201412017]
- 孟自强, 李亚超, 李浩林, 等. 双/多基地合成孔径雷达前视三维分辨力研究及运动参数设计. 2014, 48(8): 29-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201408006]
- 杨桃丽, 索志勇, 李真芳, 等. 地球同步轨道合成孔径雷达干涉测量模型. 2014, 48(4): 85-89. [doi: 10.7652/xjtuxb201404015]
- 侯兴松, 张兰, 肖琳. 合成孔径雷达图像的贝叶斯压缩感知重构算法. 2013, 47(8): 74-79. [doi: 10.7652/xjtuxb201308013]
- 朱磊, 水鹏朗, 章为川, 等. 利用区域划分的合成孔径雷达图像相干斑抑制算法. 2012, 46(10): 83-88. [doi: 10.7652/xjtuxb201210015]
- 陈士超, 武其松, 吴玉峰, 等. 一种大斜视双基地合成孔径雷达的频率变标成像算法. 2011, 45(10): 82-87. [doi: 10.7652/xjtuxb201110015]

(编辑 刘杨)