

基于自适应 Bilateral 滤波的 SAR 图像相干斑抑制

李光廷^{*①②} 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: SAR 图像的相干斑抑制一直是 SAR 图像预处理的关键步骤。Bilateral 滤波器是一类可以同时利用像素间的空间相似性与灰度相似性进行图像去噪的算法。针对直接用 Bilateral 滤波器进行相干斑抑制时存在空间方差系数选择困难及灰度相似性模型不合理的问题, 该文提出一种自适应 Bilateral 滤波算法, 该算法根据图像的局域方差系数自动调整空间方差系数, 利用 SAR 图像的似然概率函数代替高斯函数来进行灰度相似性度量。理论分析及实验表明, 提出方法较相关算法有更强的噪声平滑能力和更好的细节保持能力。

关键词: SAR 图像; 相干斑抑制; Bilateral 滤波; 似然概率函数

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)05-1076-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00921

SAR Image Despeckling Based on Adaptive Bilateral Filter

Li Guang-ting^{①②} Yu Wei-dong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

Abstract: SAR image despeckling is always a key and indispensable step in SAR image preprocessing. The Bilateral Filtering (BF), which combines grey similarity and spatial closeness to reduce noise, is introduced to SAR image despeckling recently. However, when BF is directly used for SAR image despeckling, it is hard to select the optimal spatial closeness variance and imprecise to measure the grey similarity by Gaussian function, so an Adaptive Bilateral Filter (ABF) is proposed. The ABF adjusts spatial closeness variance to the local coefficient of variation and calculates the grey similarity of SAR image by the likelihood probability function instead of the Gaussian function. The tests on synthesized and real SAR images show that the ABF can notably smooth speckles with imperceptible details pollution, which achieves better performance than that of the other related methods.

Key words: SAR image; Despeckling; Bilateral Filter (BF); Likelihood probability function

1 引言

SAR 图像相干斑的存在给 SAR 图像的理解与解译带来了极大的困难, 相干斑抑制研究也一直是 SAR 图像处理领域的重要课题。研究 SAR 图像相干斑抑制的目的是在平滑斑点噪声的同时较好地保持图像的细节信息, 至今已有许多经典算法取得了较好的滤波效果^[1]。在实际中常用的滤波算法有 Lee 滤波, Kuan 滤波, Frost 滤波, Gamma MAP 滤波及其它们的改进算法等的空域滤波, 还有以小波变换为主的变换域滤波。空域滤波通常对图像中的同质区域有着较好的去斑效果, 而边缘等细节区域的保持则不够理想。在小波域滤波中, 多种具有良好 2 维线奇异性刻画能力的二代小波备受关注, 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, 其中一类非下采样 Contourlet 变换 (NonSubsampled Contourlet Transform, NSCT) 近几年比较受重视, 由于它具有平移不变性可以大大降低伪吉布斯效应在相干斑抑制方面已经得到了应用^[2,3]。由上面分析可见, 相干斑抑制研究的关键在于如何充分利用像元周围的结构信息, 从而在平滑噪声的同时来保持图像细节。

本文研究的 Bilateral 滤波器^[4]是由 Tomasi 和 Manducci 从直觉意义上提出一类空域滤波器, 自提出以来许多学者对它进行了理论研究, 完善了它的数学基础^[5,6]。由于 Bilateral 滤波器在滤波过程中同时利用中心像素与邻域像素的空间相似性与灰度相似性来计算邻域像素的权值, 可以在平滑噪声的同时较好地保持图像细节, 因此在图像处理方面得到了越来越广泛应用^[7-9]。近年来, 该算法被引入到

了 SAR 图像相干斑抑制的研究中^[10]。由于 Bilateral 滤波器在计算图像空间相似性与灰度相似性时均采用高斯函数, 而高斯函数的方差系数选择比较困难, 文献[9,10]对这一问题进行了研究。文献[9]发现最优的距离方差系数与图像的噪声标准差呈正比, 而最优灰度方差系数对图像噪声并不敏感; 文献[10]提出了一种利用等效视数及边缘保持指数分两步进行两个方差系数选择的方法。文献[10]的方法取得了较好的相干斑抑制效果, 但在进行方差系数选择时计算量大, 且最终选用恒定的方差系数。

由于相干斑的乘性特性, 分析发现进行 SAR 图像滤波时两个方差系数设为定值是不合理的。针对这个问题, 本文提出了一种自适应 Bilateral 滤波器; 在进行空间相似性度量时, 根据图像的局域变差系数来选择局域方差系数; 在进行灰度相似性度量时, 利用 SAR 图像的似然概率函数作为度量模型; 分别从两方面解决了两个方差系数选择困难的问题。

2 Bilateral 滤波器

Bilateral 滤波器通过对窗口内不同像素设定不同的权重来进行中心像素值的估计, 不同像素的权重由像素间的空间距离与灰度距离共同决定。给定输入图像 f , 则输出 h 为

$$h(x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(\xi)c(\xi, x)s(f(\xi), f(x))d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} c(\xi, x)s(f(\xi), f(x))d\xi} \quad (1)$$

式中分母为归一化系数。其中 $x = (x_1, x_2)$ 代表中心像素的坐标, $\xi = (\xi_1, \xi_2)$ 是像素 x 的一个相邻像素, $c(\xi, x)$ 和 $s(f(\xi), f(x))$ 为两像素的空间相似性与灰度相似性, 两个常用的相似性度量模型均为高斯函数

$$c(\xi, x) = \exp(-1/2 \cdot (\|\xi - x\|/\sigma_d)^2) \quad (2)$$

$$s(f(\xi), f(x)) = \exp(-1/2 \cdot (\|f(\xi) - f(x)\|/\sigma_r)^2) \quad (3)$$

σ_d, σ_r 分别为空间方差系数与灰度方差系数。

方差系数是高斯函数的形状参数。对空间相似性来说, 由式(2)可知, σ_d 越大, 则 $c(\xi, x)$ 随着空间距离增加而衰减的速度越慢, 相反则越快。传统的 Bilateral 算法在滤波过程中采用恒定的 σ_d , 这存在如下问题: 若 σ_d 较大, 则邻域像素权值较大容易带来细节的模糊; 若 σ_d 较小, 则邻域像素的权值较小使得同质区域的去噪能力又太差。因此, 最优 σ_d 的选择与区域的同质性有关, 对同质性较强的区域应该选择较大的 σ_d 来增强算法的噪声平滑能力, 对边缘等同质性较弱的区域则应该选择较小的 σ_d 来进行细节的保持。

对 SAR 图像的灰度相似性来说, 用高斯函数作为度量模型是不合理的。具体分析如下: 多视 SAR

幅度图像的相干斑通常用均值为 1 且服从均方根伽玛分布的乘性噪声来建模^[11], 设 g 为真实灰度值, n 为噪声, 则 $f = gn$ 。对 L 视幅度 SAR 图像, 噪声的概率模型为

$$p(n) = \frac{2L^L}{\Gamma(L)} n^{2L-1} \exp(-Ln^2) \quad (4)$$

用高斯函数度量两像素的灰度相似性时, 相似性仅由像素的灰度差决定。以灰度差为 50 的两组像素来说, 由式(3)得 $s(60, 10) = s(60, 110)$, 而由式(4)得 $p(60/10) \ll p(60/110)$, 因此, 用高斯函数来度量 SAR 图像的灰度相似性是不合理的。分析还发现, 若通过对数变换将乘性噪声变为加性噪声, 由于变换后的噪声仍然是非高斯的, 所以用高斯函数来度量对数变换后 SAR 图像的灰度相似性也是不精确的。

综上所述, 当直接用 Bilateral 滤波器进行 SAR 图像相干斑抑制时存在空间方差系数选择困难和灰度相似性模型不合理的问题。针对这两个问题, 本文提出了一种自适应 Bilateral 滤波算法。

3 自适应 Bilateral 滤波器

3.1 基于 SAR 图像变差系数的空间方差系数选择

如上一节分析, 用 Bilateral 滤波器进行 SAR 图像相干斑抑制时, 空间方差系数 σ_d 的选择应该与区域的同质性有关。因此, 我们可以建立 σ_d 与区域同质性的对应关系, 从而根据区域的同质性来选择 σ_d 。变差系数是 SAR 图像同质性测量最常用的指标, 本文仍然用变差系数来进行区域的同质性测量。变差系数 C_V 的计算公式为

$$C_V(x) = \sqrt{\text{var}(f(x))}/E[f(x)] \quad (5)$$

式中 $\text{var}(f(x)), E[f(x)]$ 是窗口内像素的方差和均值。

Lopes 等人^[12]根据两个标准差 C_u 与 C_{\max} 将图像分为 3 类区域: 第 1 类满足 $C_V \leq C_u$, 为均匀区域, 是滤波过程中需要平滑的区域; 第 2 类满足 $C_u < C_V < C_{\max}$, 为含有一定纹理信息的区域, 是过度区域; 第 3 类满足 $C_V \geq C_{\max}$, 为非均匀区域, 大多为图像的细节, 是需要保持的区域。其中 $C_u = \sqrt{(4/\pi - 1)/L}$, $C_{\max} = \sqrt{3}C_u$ 。

由对方差系数的分析知, 方差系数 σ_d 与变差系数 C_V 应成反比关系, 本文所选的模型为

$$\sigma_d(C_V) = \frac{A}{1 + \exp(k_d(C_V - C_d))} \quad (6)$$

式中 A, k_d 与 C_d 为待定参数, 以滤波窗长 $N = 7$ 为例, 参数确定过程如图 1 所示。

由式(2)知, $c(\xi, x)$ 随着两像素空间距离的增加而减小, 以 0.5 作为 $c(\xi, x)$ 的阈值, 3 个未知参数按如下思路来确定: 对第 1 类区域, 当 $\|\xi - x\| \leq (N - 1)$

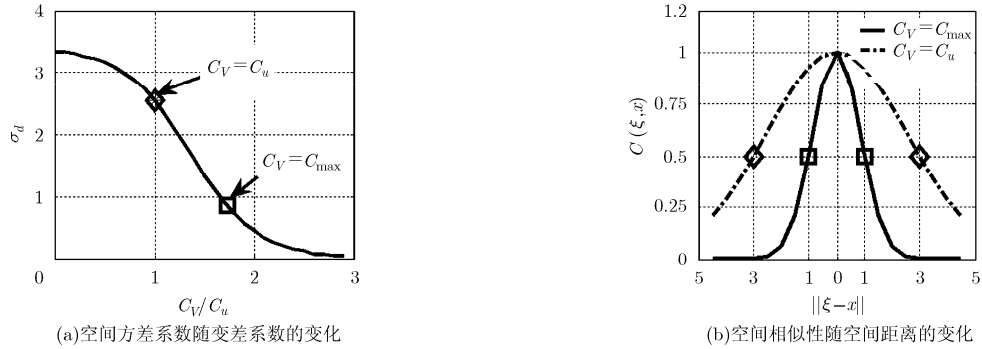


图 1 模型参数的确定

/2 时, $c(\xi, x) \geq 0.5$, 并且当 $C_V = C_u$ 时等号成立, 如图 1(a), 1(b) 中菱形所注; 对第 3 类区域, 当 $\|\xi - x\| \geq 1$ 时, $c(\xi, x) \leq 0.5$, 并且当 $C_V = C_{\max}$ 时等号成立, 如图 1(a), 1(b) 中方形所注。将上述等式成立时的条件代入式(2)得

$$\left. \begin{aligned} \exp(-((N-1)/2)^2 / (2\sigma_d^2(C_u))) &= 0.5 \\ \exp(-1 / (2\sigma_d^2(C_{\max}))) &= 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

解式(7)可得 $\sigma_d(C_u)$ 与 $\sigma_d(C_{\max})$ 。结合式(6)所示模型的对称性得

$$\sigma_d(C_u) + \sigma_d(C_{\max}) = A \quad (8)$$

将 $\sigma_d(C_u)$ 与 $\sigma_d(C_{\max})$ 代入式(6)并结合式(8)可求解 3 个未知参数, 从而便确定了式(6)。

3.2 基于 SAR 图像似然概率函数的灰度相似性度量

如第 2 节分析, 用高斯函数作为 SAR 图像的灰度相似性模型是不合理的。根据式(4)及相干斑的乘性模型可以得到 f 对 g 的似然概率函数^[13]。本文用该似然函数进行邻域像素与中心像素的灰度相似性度量, 由此得到新的灰度相似性模型为

$$s(f(\xi), f(x)) = p(f(\xi)|f(x)) = \frac{2L^L}{f(x) \cdot \Gamma(L)} \cdot \left(\frac{f(\xi)}{f(x)}\right)^{2L-1} \exp\left(-L\left(\frac{f(\xi)}{f(x)}\right)^2\right) \quad (9)$$

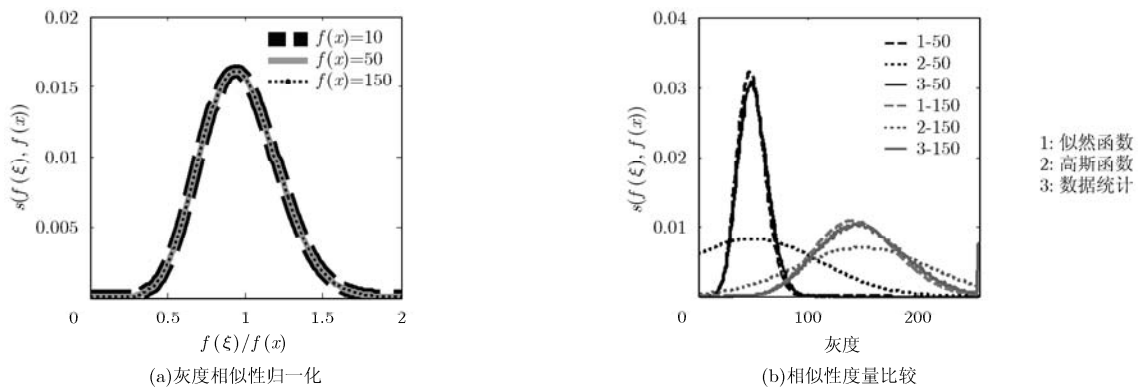


图 2 似然函数进行灰度相似性度量结果

对于 L 视幅度 SAR 图像, 分析式(9)可以发现, $s(f(\xi), f(x))$ 由 $f(x)$ 和 $f(\xi)/f(x)$ 共同决定。但对当前像素 x 来说, $f(x)$ 是定值, 式(1)中分母的归一化操作消除了 $f(x)$ 对 $s(f(\xi), f(x))$ 的影响, 如图 2(a) 所示。因此, $s(f(\xi), f(x))$ 只与 $f(\xi)/f(x)$ 有关, 这与相干斑的乘性性质是一致的。

为了说明用似然函数来度量 SAR 图像灰度相似性的合理性, 仿真产生了灰度值为 50 和 150 的两幅 4 视幅度 SAR 图像, 并分别对它们的概率密度进行了统计, 如图 2(b) 中 ‘3- *’ 所示; 分别用似然函数与高斯函数 ($\sigma_r = 60$) 来度量图像的灰度相似性, 如图 2(b) 中 ‘1- *’, ‘2- *’ 所示。由图可以看出, 用似然函数度量的图像灰度相似性更接近仿真图像的概率密度分布, 因此用似然函数作为 SAR 图像的灰度相似性模型更合理。

3.3 自适应 Bilateral 滤波器的实现

根据前面的分析, 自适应 Bilateral 滤波器的实现步骤可总结为

- 步骤 1 输入图像, 设置窗长 N 。
- 步骤 2 若图像视数 L 未知, 计算等效视数 ENL 代替视数 L 。
- 步骤 3 计算局域变差系数 C_V , 结合式(6)~式

(8)确定 σ_d 与 C_V 对应关系。

步骤 4 执行滤波，逐像素窗口操作，得到像素估计值。

(1)根据式(6)，由 $C_V(x)$ 确定 $\sigma_d(x)$ ；

(2)将 $\sigma_d(x)$ 代入式(2)求得各像素空间相似性，由式(9)求得像素灰度相似性；

(3)将式(2)，式(9)计算结果代入式(1)，求得像素估计值。

步骤 5 将步骤 2~步骤 4 重复 3~5 次，得到最终滤波结果。

4 实验与结果分析

4.1 评价指标

在实验结果的评价方面，这里用以下两个指标进行评价：

(1)等效视数 ENL 反映图像的噪声平滑能力，在同质区域中，ENL 越大，则相干斑抑制效果越好。设所选图像的同质区域为 I_{hom} ，则 ENL 计算公式为^[10]

$$\text{ENL} = \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) \frac{E^2[I_{\text{hom}}]}{\text{var}(I_{\text{hom}})} \quad (10)$$

(2)在细节保持评价方面，这里引入一新指标：细节保持系数(Detail-Preservation Index, DPI)，计算如下：

$$\text{DPI}_M = \text{mean} \left(\frac{f(D)}{h(D)} \right); \quad \text{DPI}_V = \text{var} \left(\frac{f(D)}{h(D)} \right) \quad (11)$$

其中 D 为图像的第 3 类区域，即满足 $C_V \geq C_{\text{max}}$ 的区域， f 与 h 分别为滤波前后图像。 DPI_M 越接近 1， DPI_V 越小，则细节保持越好。

4.2 实验结果

为了验证提出方法的有效性，实验用 3 幅 SAR 图像作为测试图像：(1)图 3(a)，仿真 4 视 SAR 图像；(2)图 4(a)是 Volgograd 地区一幅 6 视 TerraSAR-X 幅度图像；(3)图 5(a)，Flevoland 地区的一幅 4 视 AirSAR 幅度图像，3 个图像大小均为 256×256 。在实验中，本文方法分别与精致 Lee 滤波(RE_Lee)，文献[10]中的基本 Bilateral 滤波(BF)，基于 NSCT 局域高斯模型的 MAP 滤波^[2](NSCT_GMAP)和基于 NSCT 双变量模型的滤波算法^[3](SNSCTBI)进行了比较。在参数设置方面，本文选用 5×5 窗长迭代 5 次，比较算法各参数设置为：RE_Lee 选用 7×7 的窗，BF 选用 11×11 的窗，NSCT_GMAP 与 SNSCTBI 均采用 ‘cd 9-7’ 小波 5 层分解，高频方向数均为 [4 8 8 16]。各方法的滤波结果如图 3~图 5 所示，滤波效果的评价如表 1 所示，各图(a)中矩形框区域为选定用于进行 ENL 计算的区域。

观察图 3 中各方法的滤波结果可以看出：RE_Lee 滤波相比 BF 的噪声平滑能力更强，但同质区域呈现出了具有一定方向性的斑块，这是由滤波过程中的方向计算不准确引起的；NSCT_GMAP 滤波与 SNSCTBI 滤波相比 RE_Lee 滤波具有更强的噪

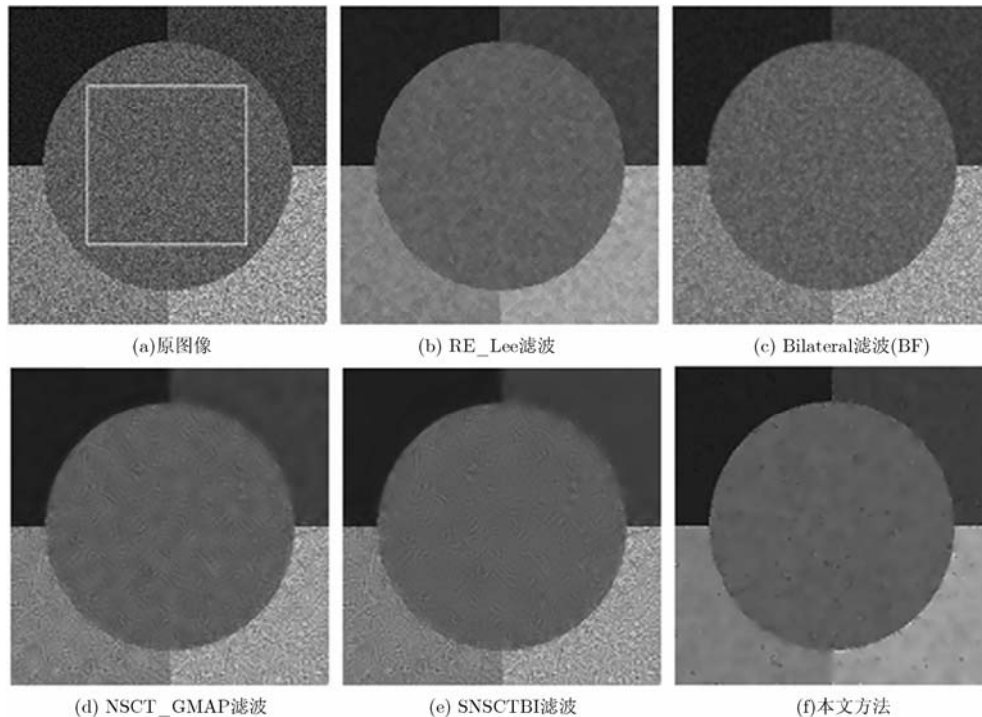


图 3 仿真 SAR 图像滤波前后比较

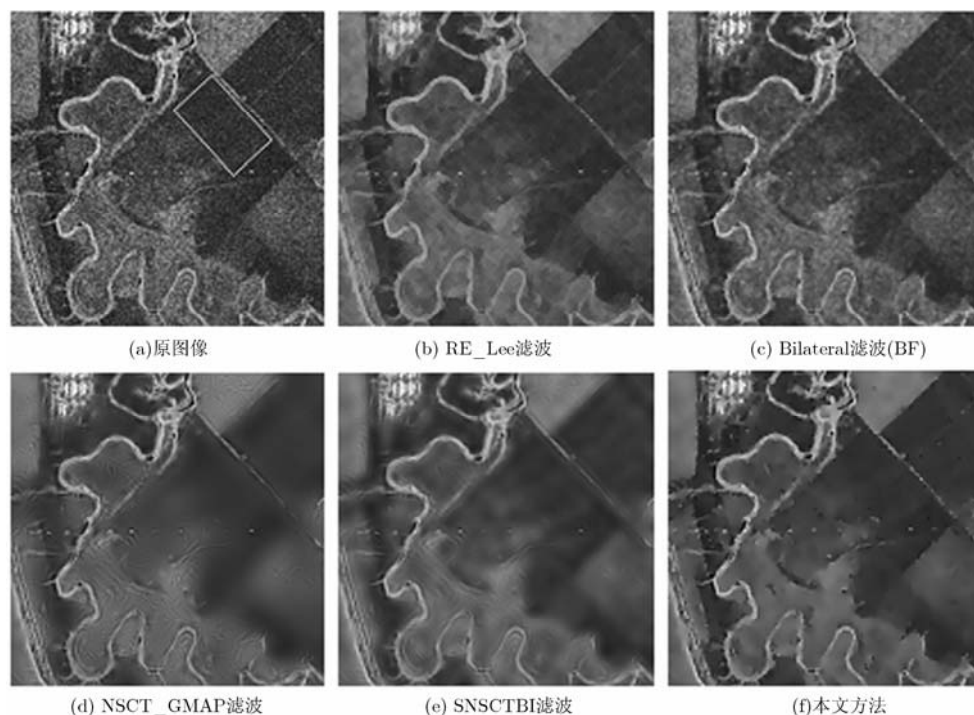


图 4 Volgograd 地区 SAR 图像滤波结果

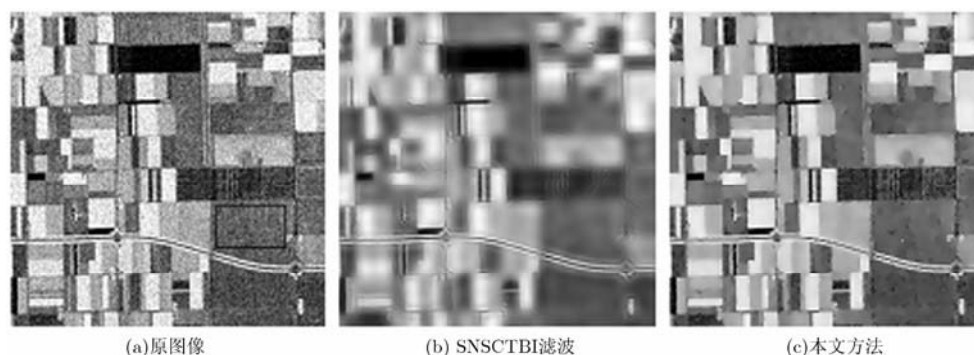


图 5 Flevoland 地区 SAR 图像滤波结果

平滑能力,但边缘细节出现了模糊,且在同质区域呈现了明显的伪吉布斯效应;本文方法在同质区最平滑,边界清晰。表 1 对各滤波结果与真值间的均方误差(MMSE)进行了比较,结果显示本文方法的处理结果具有最小的均方误差值,这说明本文方法的滤波结果更接近于加噪声前的真实图像。

观察图 4 中各方法的滤波结果,尤其注意图像中部的一系列点目标,本文方法的滤波结果中目标清晰,而其它方法均有一定程度的模糊,这是由于本文方法具有自动调节窗口大小的能力,在变系数大的区域窗长很小,可以起到细节保持的作用;观察图 5 的滤波结果可以发现,本文方法的滤波结果在接近区域交界线的地方,仍然具有很强的噪声平滑能力,这里因为本文方法可以根据像素的相关性对窗口内不同区域像素赋不同的权重,因此在接

近区域交界线的地方仍然有尽可能多的同质区域像素起到噪声平滑的作用。

实验发现本文方法的滤波结果会存在一定的暗点或者暗斑,这是由于以当前像素作为真值来计算灰度相似性引起的,本文对滤波结果用简单的排序滤波器去最小值解决了该问题。

比较表 1 中的各项指标我们可以发现:相比其它方法,本文方法的滤波结果在同质区域具有最大的等效视数,且衡量细节保持的 DPI_M 更接近于 1, DPI_V 更接近于 0;这一结果也证明本文方法在噪声平滑与细节保持上均优于其它同类算法。

5 结论

SAR 图像的相干斑抑制一直是 SAR 图像处理方面的研究热点。由于 Bilateral 滤波器在进行图像

表 1 滤波效果比较

	方法	滤波前	RE_Lee	BF	NSCT_GMAP	SNSCTBI	本文方法
图 3 仿真 SAR 图像	ENL	4.1	67.5	39.4	79.8	77.0	117.9
	DPI_M	1	1.12	1.20	1.13	1.11	1.04
	DPI_V	0	0.09	0.17	0.14	0.13	0.04
	MMSE	684.6	42.0	45.4	162.5	135.8	23.6
图 4 Volgograd	ENL	5.95	47.8	71.5	193.7	134.9	207.3
	DPI_M	1	1.08	1.10	1.07	1.09	1.04
	DPI_V	0	0.91	0.65	0.17	0.12	0.16
图 5 Flevoland	ENL	4.3	66.0	23.5	84.8	88.96	126.4
	DPI_M	1	1.08	1.05	1.12	1.14	1.03
	DPI_V	0	0.10	0.05	0.14	0.16	0.04

去噪时可以同时利用像素间的空间相似性与灰度相似性, 近年来被引入到了 SAR 图像相干斑抑制中。分析发现, 用 Bilateral 滤波器进行相干斑抑制时存在空间方差系数选择困难与灰度相似性模型不合理的问题, 针对这两个问题, 本文提出了一种自适应 Bilateral 滤波器。该方法根据 SAR 图像的局域变差系数来确定空间方差系数, 从而调整高斯窗的形状, 起到自适应调节窗长的作用; 同时根据 SAR 图像的似然概率函数来度量窗内各像素与中心像素的灰度相似性, 并根据相似性调节各像素的权重, 起到方向选择的作用; 从这个意义上讲, 本文方法能够根据图像的结构信息自动调节滤波器的窗长与方向, 是一种具有自适应能力的 SAR 图像相干斑抑制算法。仿真与实测 SAR 图像的去斑实验表明, 自适应 Bilateral 滤波器在去噪能力与细节保持方面均优于其它同类算法, 是一种有效的相干斑抑制方法。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 凤宏晓, 侯彪, 焦李成, 等. 基于非下采样 Contourlet 域局部高斯模型和 MAP 的 SAR 图像相干斑抑制[J]. *电子学报*, 2010, 38(4): 811-816.
Feng Hong-xiao, Hou Biao, Jiao Li-cheng, et al. SAR image despeckling based on local Gaussian model and MAP in NSCT domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 811-816.
- [3] 贾建, 陈莉. 基于双变量模型和非下采样 Contourlet 变换的 SAR 图像相干斑抑制[J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(5): 1088-1094.
Jia Jian and Chen Li. SAR image despeckling based on bivariate threshold function in NSCT domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1088-1094.
- [4] Tomasi C and Manduchi R. Bilateral filtering for grey and color images[C]. *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, New Delhi, India, 1998: 839-846.
- [5] Barash D. A fundamental relationship between bilateral filtering, adaptive smoothing, and the nonlinear diffusion equation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent*, 2002, 24(6): 844-847.
- [6] Elad M. On the origin of the bilateral filter and ways to improve it[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(10): 1141-1151.
- [7] Han J W, Kim J H, Cheon S H, et al. A novel image interpolation method using the Bilateral filter[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2010, 56(1): 175-181.
- [8] Lin C H, Tsai J S, and Chiu C T. Switching Bilateral filter with a texture/noise detector for universal noise removal[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(9): 2307-2320.
- [9] Zhang M and Gunturk B K. Multiresolution bilateral filtering for image denoising[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(12): 2324-2333.
- [10] Zhang W G, Liu F, and Jiao L C. SAR image despeckling via bilateral filtering[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(15): 781-783.
- [11] Oliver C and Quegan S. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*[M]. Boston. Artech House, 1998: 75-120.
- [12] Lopes A, Touzi R, and Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1990, 28(6): 992-1000.
- [13] Molina D E, Gleich D, and Datcu M. Gibbs random field models for model-based despeckling of SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(1): 73-77.

李光廷: 男, 1983 年生, 博士, 研究方向为合成孔径雷达图像分割与分类。

禹卫东: 男, 1969 年生, 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。