

改进相似性度量准则的 SAR-BM3D 相干斑抑制算法

鲁自立¹ 贾鑫² 曾创展¹

(1. 装备学院研究生管理大队 北京 101416; 2. 装备学院光电装备系 北京 101416)

摘要:针对三维块匹配(BM3D)算法在合成孔径雷达(SAR)图像相干斑抑制时存在块相似性度量不准确的问题,提出一种改进广义似然比准则(GLR)的 SAR-BM3D 相干斑抑制算法。该算法根据在光学图像去噪效果良好的 BM3D 算法,以变换域方法和非局部思想为基础,考虑 SAR 图像相干斑特性,采用概率相似性度量方法用于块匹配步骤,从而达到较好的相干斑抑制效果。实验证明,提出的算法对 SAR 图像的相干斑抑制可以获得更高的信噪比和更好的视觉效果。

关键词:合成孔径雷达; SAR 图像相干斑抑制; 三维块匹配; 广义似然比; 非局部; 概率相似性

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Improved similarity measure criterion of SAR-BM3D despeckling algorithm

Lu Zili¹ Jia Xin² Zeng Chuangzhan¹

(1. Department of Graduate Management, Academy of Equipment of PLA, Beijing 101416, China;

2. Department of Optical and Electronic Equipment, Academy of Equipment of PLA, Beijing 101416, China)

Abstract: Aimed at the inaccurate problem of block similarity metric for synthetic aperture radar (SAR) image despeckling using Block-matching and 3D filtering (BM3D) algorithm, a new SAR-BM3D despeckling algorithm is proposed based on generalized likelihood ratio criterion (GLR). According to the good results of BM3D algorithm in optical image denoising, based on the transform domain method and nonlocal mind, considering SAR image speckle character, probability similarity measure method is used to block matching thus to achieve better results. The experiment results show that the new algorithm has advantages in the SAR image despeckling performance with higher PSNR and better visual results.

Keywords: synthetic aperture radar; SAR image despeckling; BM3D; GLR; nonlocal; probability similarity

0 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)由于其特殊的相干成像机制,导致图像具有斑点噪声,虽然相干斑本身携带着地面目标的反射信息,但是给后续 SAR 图像处理,如图像分割、图像分类和目标识别等方面带来了理解和解译的困难^[1]。因此,为了解决相干斑对 SAR 图像的影响,国外国内学者一直在研究相关算法,取得了一定的研究成果。

目前,SAR 图像的相干斑抑制方法主要分为空域和变换域两类。空域滤波的基本思想是假定相干斑模型,基于局部统计特性进行的滤波处理。常见的空域降斑方法有 Lee 滤波、Kuan 滤波以及 Gamma-MAP 滤波^[2]和 Perona-Malik 各向异性扩散方程的方法^[3]。变换域滤波的基本思想是小波变换可以从不同分辨空间描述图像的局部

特征,使得信号和斑点噪声在小波变换域中表现出不同的特征,从而较易区分信号和斑点噪声,用于 SAR 图像的相干斑抑制。常用的变换域方法有小波收缩抑制方法、小波马尔可夫模型和多尺度几何滤波方法等。上述方法中,传统的空域滤波在抑斑的同时会出现结构边缘信息模糊以及小目标损失的问题,同时空域和变换域滤波的方法均是基于局部计算方案的,仅考虑图像的局部信息,而没有充分考虑图像的结构信息、模式冗余。

为了克服上述的缺陷,近些年发展的三维块匹配(block-matching and 3D filtering, BM3D)算法是一个很好的突破。该算法是由 Dabov^[4]等人在 2007 年提出的,既包含非局部去噪的思想,又用到了变换域滤波的方法,对光学图像的去噪效果不仅在客观评价标准中表现优异,在主观的人眼看来也是非常出色,被认为是当前最好的光学图像去噪方法之一^[5-6]。相比较由相干斑模型发展而来

的空域滤波, BM3D 的去噪方法是基于加性高斯白噪声 (AWGN) 模型, 不适用于 SAR 图像的相干斑噪声模型, 使得 BM3D 去噪方法受限, 因此针对 SAR 图像的特点, 本文采用改进的广义似然比准则 (generalized likelihood ratio criterion, GLR) 进行块相似性度量, 从而获得改进的 SAR-BM3D 相干斑抑制方法。

1 BM3D 算法及存在的问题

1.1 BM3D 算法介绍

BM3D 算法的基本思想是: 通过非局部方法寻找图像的相似块进行匹配, 得到三维图像块矩阵, 随后使用维纳滤波对其进行滤波, 再将得到的数据进行逆变换, 从而达到降噪性效果。其具体步骤主要分为两步: 1) 使用硬阈值得到相对干净的图像用于统计数据; 2) 在变换域中通过经验维纳滤波对图像的信号进行去噪。然而, 在这两个步骤中, 都不是在局部邻域内操作的, 而是根据图像块的相似性, 从图像的不同位置进行块匹配。因此, 得到的三维 (3-D) 数据阵列高度冗余, 具有稀疏性, 就可以通过小波变换来表示, 这样在第一步中就可以通过硬阈值来完成有效的信噪分离; 作为下一步的结果, 统计数据能够更可靠地被估计, 同时 2) 中的经验维纳滤波是非常有效的去噪方法。下面对 BM3D 算法的处理过程进行总结。

1) 对噪声图像处理, 分 3 个步骤:

(1) 分组: 对于图像块, 根据最小欧式距离准则确定与其最相似的图像块。

(2) 协同滤波: 每个 3-D 群组进行小波变换 (WT), 硬阈值和小波逆变换。

(3) 聚合: 经协同滤波之后的图像块重新回到原来的位置, 然后根据其所在三维阵列的权值, 对图像进行基本估计。

2) 包含 3 个相同步骤, 具体如下:

(1) 分组: 对第一步中基本估计得到的图像块进行相似分组。

(2) 协同滤波: 每个 3-D 群组进行 WT, 维纳滤波和反变换。

(3) 聚合: 对块估计值进行加权平均得到最终估计值。

1.2 存在的问题

在 BM3D 算法中, 对于每个参考图像块, 需要根据欧式距离度量准则, 寻找与参考图像块最相似的图像块。在 AWGN 条件下, 当两个信号块相似时, 两者之间的欧式距离越小, 这个准则越有效。然而, 对于 SAR 图像来说, 一旦噪声的统计信息改变, 欧式距离就会失去其意义。虽然可以通过同态的方法, 把乘性噪声转化为加性噪声, 使用 BM3D 对转换后的数据进行计算, 文献 [7] 将 BM3D 用于海洋 SAR 图像相干斑抑制, 得到较好的效果, 但是由于海洋是一种同质较均匀场景, 此时对数变换方法是可行的, 而对于动态数据的对数转换, 如相干斑干扰较强烈的图像时, 这种方法不但会产生很大的雷达反射系数估计偏差 (甚至达到 -2.507 dB), 对于减弱相干斑的方差也是次优的, 还

会引入不想要的伪影, 特别在单视情况下, 变换后的噪声明显仍是非高斯分布的, 这样必然会损失算法的去噪性能。

通过上面的小结, 明确了 BM3D 算法的基本思想、步骤和存在的相似性度量问题, 为下面改进 BM3D 算法来适用 SAR 图像奠定理论基础。

2 改进相似性度量准则

在非 AWGN 的情况下, BM3D 算法中使用欧式距离度量块相似性的方法不再适用, 尽管变换后的 SAR 图像的噪声已经是加性噪声, 但并不严格服从高斯分布, 依然存在误差, 这里采用基于广义似然比的相似性度量准则^[8]来对 BM3D 算法改进。

首先, 对 SAR 图像进行预处理, 将相干斑转化为乘性噪声模型。在完全发展的相干斑假定下, 相干斑是乘性噪声模型, 对数变换后观察到的目标散射信号为

$$y = \log(Y) = \log(F) + \log(S) = f + s \quad (1)$$

式中: y 表示含有相干斑的图像, f 表示待恢复的真实图像, s 表示噪声分量。由于 F 与 S 是相互独立的, 对数变换后的 f 和 s 依然是相互独立的。根据实际的相干斑分布, 按照相似性度量方法的设计思路, 选择 GLR 准则来推导出相似度量公式。

首先, 对于幅度格式 SAR 图像的像素, 由于其服从 Nakagami-Rayleigh 分布, 所以可得概率分布密度函数为:

$$p_z(z/R) = \frac{2}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{R}\right)^L \exp\left(-\frac{Lz^2}{R}\right) z^{2L-1} \quad (2)$$

式中: z 表示幅度格式单视 SAR 图像的像素值, L 为视数, R 为雷达的真实后向散射系数。由对数变换前后的关系:

$$p_y(y/r) = p_z(\exp(y)/r) \exp(y) \quad (3)$$

其概率密度函数为:

$$p(y/R) = \frac{2}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{R}\right)^L \exp\left(-\frac{L \exp(2y)}{R}\right) \exp(2Ly) \quad (4)$$

GLR 的定义如下:

$$W_{\text{GLR}}(Y_x, Y_x) = \frac{\sup_r p(Y_x, Y_x; R_x = R_x = r)}{\sup_{r_x, r_x'} p(Y_x, Y_x; R_x = r_x, R_x = r_x, r_x \neq r_x')} \quad (5)$$

式中: x 表示图像块左上角的坐标, Y_x 表示在 x 处的参考图像块, Y_x 表示在 y 的 x 处的待匹配图像块, \sup_r 表示变量的上界。假设 Y_x 和 Y_x 不相关, 图像块中的像素点各自独立, 计算位于相同位置像素的 GLR 乘积, 得到图像块 Y_x 和 Y_x 之间的相似性度量为:

$$W_{\text{GLR}}(Y_x, Y_x) = \prod_{i=1}^I w_G(y_{x_i}, y_{x_i'}) \quad (6)$$

式中: I 表示子图像块的像素总数, $w_G(y_{x_i}, y_{x_i'})$ 的表达式如下:

$$w_G(y_{x_i}, y_{x_i'}) = \frac{\sup_{r_i} p(y_{x_i}, y_{x_i'}; R_{x_i} = R_{x_i'} = r_i)}{\sup_{r_{x_i}, r_{x_i'}} p(y_{x_i}, y_{x_i'}; R_{x_i} = r_{x_i}, R_{x_i'} = r_{x_i'}, r_{x_i} \neq r_{x_i'})} =$$

$$\frac{\sup_{r_i} \{p(y_{x'_k}; R_{x'_k} = r_i) p(y_{x'}; R_{x'} = r_i)\}}{\sup_{r_i} p(y_{x'_k}; R_{x'_k} = r_i) \cdot \sup_{r_i} p(y_{x'}; R_{x'} = r_i)} \quad (7)$$

式中: $y_{x'_k}$ 与 $y_{x'}$ 分别表示参考图像块 $Y_{x'_k}$ 和待匹配图像块 $Y_{x'}$ 的第 i 个像素值, $R_{x'_k}$ 和 $R_{x'}$ 为对应的雷达表面反射系数。要求该散射系数, 根据 $\sup_{r_i} p(y_{x'_k}, y_{x'}; R_{x'_k} = R_{x'} = r_i)$ 的值, 需先求得联合概率分布函数:

$$\begin{aligned} p(y_{x'_k}, y_{x'}; R_{x'_k} = R_{x'} = r_i) &= \\ p(y_{x'_k}; R_{x'_k} = r_i) p(y_{x'}; R_{x'} = r_i) &= \\ \frac{4L^{2L} \exp(2L(y_{x'_k} + y_{x'})) - \frac{L}{r_i} (\exp(2y_{x'_k}) + \exp(2y_{x'}))}{\Gamma^2(L) r_i^{2L}} \end{aligned} \quad (8)$$

的最大似然值得到, 这里要求出 r_i 的最大似然估计值 \hat{r}_i 。构造的最大似然函数为:

$$\begin{aligned} L(r_i) &= \prod_{j=1}^J p(y_{x'_k}^j; R_{x'_k} = r_i) p(y_{x'}^j; R_{x'} = r_i) = \\ \left(\frac{4L^{2L}}{\Gamma^2(L)}\right) \exp(2L \sum_{j=1}^J (y_{x'_k}^j + y_{x'}^j)) \cdot \\ \exp\left(-\frac{L}{r_i} \sum_{j=1}^J (\exp(2y_{x'_k}^j) + \exp(2y_{x'}^j))\right) r_i^{-2JL} \end{aligned} \quad (9)$$

对 $L(r_i)$ 取对数并求偏导得:

$$\frac{\partial(\ln L(r_i))}{\partial r_i} \triangleq \frac{\partial\left(-\frac{L}{r_i} \sum_{j=1}^J (\exp(2y_{x'_k}^j) + \exp(2y_{x'}^j)) - 2JL \cdot \ln r_i\right)}{\partial r_i} =$$

$$\frac{L}{r_i^2} \sum_{j=1}^J (\exp(2y_{x'_k}^j) + \exp(2y_{x'}^j)) - \frac{2JL}{r_i} \quad (10)$$

令上式等于 0, 得到

$$r_i = \frac{1}{2J} \sum_{j=1}^J (\exp(2y_{x'_k}^j) + \exp(2y_{x'}^j)) \quad (11)$$

由于子图像块的每个位置的像素值只有一个可用的观测值, 取 $J=1$, 得

$$\hat{r}_i = \frac{1}{2} (\exp(2y_{x'_k}^i) + \exp(2y_{x'}^i)) \quad (12)$$

通过求 $p(y_{x'_k}; R_{x'_k} = r_{x'_k})$ 的最大似然值, 分母中的 $\sup_{r_i} p(y_{x'_k}; R_{x'_k} = r_{x'_k})$ 同样也可以得到相应的值。先求 $r_{x'_k}$ 最大似然估计值, 构造出的最大似然函数如下:

$$\begin{aligned} L_{x'_k}(r_{x'_k}) &= \prod_{j=1}^J p(y_{x'_k}^j; R_{x'_k} = r_{x'_k}) = \\ \left(\frac{2L^L}{\Gamma(L)}\right)^J \exp(2L \sum_{j=1}^J y_{x'_k}^j) \cdot \\ \exp\left(-\frac{L}{r_{x'_k}} \sum_{j=1}^J \exp(2y_{x'_k}^j)\right) (r_{x'_k})^{-JL} \end{aligned} \quad (13)$$

对上式 $L_{x'_k}(r_{x'_k})$ 取对数并求偏导得到:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\ln L_{x'_k}(r_{x'_k}))}{\partial r_{x'_k}} &= \\ \frac{\partial\left(-\frac{L}{r_{x'_k}} \sum_{j=1}^J \exp(2y_{x'_k}^j) - JL \cdot \ln r_{x'_k}\right)}{\partial r_{x'_k}} &= \\ \frac{L}{r_{x'_k}^2} \sum_{j=1}^J \exp(2y_{x'_k}^j) - \frac{JL}{r_{x'_k}} \end{aligned} \quad (14)$$

令上式等于 0, 得到:

$$r_{x'_k} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \exp(2y_{x'_k}^j) \quad (15)$$

令 $J=1$, 得到 $\hat{r}_{x'_k} = \exp(2y_{x'_k}^i)$, 同理可以得到 $r_{x'}$ 的最大似然估计值 $\hat{r}_{x'} = \exp(2y_{x'}^i)$ 。

用最大似然估计值对 $r_i, r_{x'_k}$ 和 $r_{x'}$ 进行替换, 然后代入 $L_G(y_{x'_k}, y_{x'})$ 得到如下两个像素间的相似性度量方法:

$$\begin{aligned} \omega_G(y_{x'_k}, y_{x'}) &= \frac{p(y_{x'_k}; R_{x'_k} = \hat{r}_i) p(y_{x'}; R_{x'} = \hat{r}_i)}{p(y_{x'_k}; R_{x'_k} = \hat{r}_{x'_k}) \cdot p(y_{x'}; R_{x'} = \hat{r}_{x'})} = \\ \left(\frac{2 \exp(y_{x'_k} + y_{x'})}{\exp(2y_{x'_k}) + \exp(2y_{x'})}\right)^{2L} \end{aligned} \quad (16)$$

相似性度量准则的三维图形仿真如图 1 所示, 可以看出两个子图像块中的对应像素点的值越接近, 其相似度量值越大。

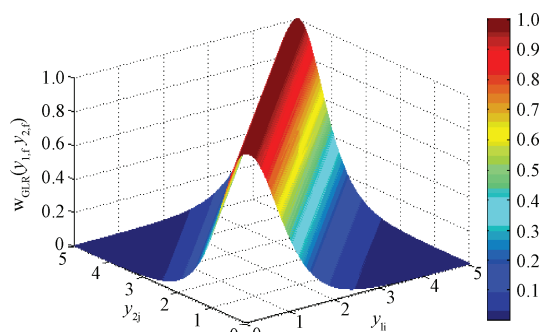


图 1 相似性度量准则

从而得到两个子图像块的相似性度量准则如下

$$\begin{aligned} W_{GLR_1}(y_1, y_2) &= \prod_{i=1}^I \omega_G(y_{1,i}, y_{2,i}) = \\ \left(\frac{2^I \exp(\sum_{i=1}^I (y_{1,i} + y_{2,i}))}{\prod_{i=1}^I (\exp(2y_{1,i}) + \exp(2y_{2,i}))}\right)^{2L} \end{aligned} \quad (17)$$

这个准则将使用在 SAR-BM3D 算法的第一个估计步骤中。

对于 SAR-BM3D 算法的第二个估计步骤, 相似性度量需要考虑在第一步获得 \hat{r}_i 的相似性度量信息(对 \hat{r}_i 的粗估计信息)。因此, 根据 BM3D 算法的分步处理思想, 改写第二步的相似性度量准则为:

$$\begin{aligned} W_{GLR_2}(y_1, y_2) &= \\ \left(\frac{2^I \exp(\sum_{i=1}^I (y_{1,i} + y_{2,i}))}{(1-\gamma) \prod_{i=1}^I (\exp(2y_{1,i}) + \exp(2y_{2,i}))}\right)^{2L} \end{aligned} \quad (18)$$

式中: γ 为衡量前一步数据信息的权重, 通过前一步图像块的相似性程度来确定取值。

3 仿真校验

对于 SAR 图像相干斑抑制的仿真校验, 由于无法获得没有相干斑干扰的图像信号, 所以其性能评估是比较困难的。遵循评估 SAR 图像质量的普遍方法^[9-11], 分为模拟 SAR 图像相干斑抑制仿真实验及结果分析和真实 SAR 图像相干斑抑制测试及实验结果分析。通过对被模拟相干斑破坏的光学图像进行研究, 获得相对客观的相干斑

理论与方法

抑制方法对比结果,最后对实际的 SAR 图像校验得出结论。

实验中分别将 Lee 滤波、Forst 滤波、Kuan 滤波、Gamma MAP 滤波和本文提出的算法进行比较。算法的评价指标主要为峰值信噪比(PSNR)、等效视数(ENL)、均值、标准差。相干斑抑制后的噪声图像与原始图像的峰值信噪比(PSNR)表示如下:

$$PSNR = 20\log \left(\frac{255}{M \cdot N \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [R(i,j) - I(i,j)]^2} \right) \quad (19)$$

式中: I 、 R 分别为去噪前后图像,大小为 $M \times N$ 。 $PSNR$ 反映了图像处理前后的失真程度,其值越大,表明去噪前后图像的灰度值差异越小,一定程度上表明去噪效果好。等效视数(ENL)表示图像的平滑程度,ENL 值越大^[12-16],平滑程度越高,表示如下:

$$ENL = U \times [P/Q]^2 \quad (20)$$

式中: P 和 Q 分别为图像设定的同质区域的均值和标准差。对于强度和幅度图像, U 分别等于 1 和 $4/\pi - 1$ 。在计算 ENL 时,应该尽可能选择大尺寸的同质区作为测试数据。因此,好的相干斑抑制结果应具备如下特征:结果图的均值与原图更接近^[17-19];结果图的标准差尽可能小;结果图的 ENL 尽可能大。实验选取 512×512 的真实 SAR 图像、原始光学图像和 50×50 的同质区域 A 和 B 来计算评价指标,实验结果图如图 2~3 所示,并且各实验的评价指标对比如表 1、表 2 所示。

表 1 模拟图像的 PSNR 结果

	$L=1$	$L=2$	$L=4$	$L=16$
相干斑图像	12.12	14.88	17.80	23.76
改进的 SAR-BM3D	27.79	29.52	31.12	34.10
Lee	16.18	20.58	25.65	29.92
Frost	17.40	20.32	23.19	28.34
Kuan	21.55	24.77	27.03	30.67
Gamma MAP	21.44	24.53	26.81	30.32

表 2 SAR 图像的降斑性能指标对比

	PSNR	均值	标准差	A 区 ENL	B 区 ENL
原图	/	38.52	25.06	3.98	4.35
改进的 SAR-BM3D	24.09	41.53	18.20	43.91	48.73
Lee	20.27	45.68	21.87	18.51	19.64
Frost	21.07	38.64	19.66	16.21	17.52
Kuan	22.51	38.50	20.81	30.42	31.61
Gamma MAP	22.16	38.44	18.32	32.57	34.77



图 2 单视模拟图像的降斑结果

在表 1 中,对模拟图像进行视数 $L=1 \sim 16$ 的相干斑抑制实验,从中可以看出改进的 SAR-BM3D 算法的 PSNR 值明显大于其他算法,随着视数 L 的增加,所有算法的 PSNR 都会增大,上述结果说明改进的 SAR-BM3D 对相干斑抑制具有明显效果,基于 BM3D 算法发展而来的改进 SAR-BM3D 算法优于传统相干斑抑制算法。在表 2 中,对真实 SAR 图像进行了算法测试,选取的是单视 512×512 的机场 SAR 图像,改进的 SAR-BM3D 算法的 PSNR 值相对优于其它算法,虽然其均值与原图相比略高,但是其同时具有相对较低标准差值,说明回波的平均幅度特征保持得较好,但是整体像素值比原图较高。进一步,对比真实 SAR 图像同质区域 A 和 B 的 ENL 值,可以看出本文提出算法的值明显大于其他算法,表明抑斑后图像的平滑程度较高,抑斑视觉效果更好。综上所述,本文提出的算法能够应用于 SAR 图像的相干斑抑制,并获得较好的相干斑抑制效果。

4 结论

本文提出了一种改进相似性度量准则的 SAR-BM3D 相干斑抑制算法。该算法利用 BM3D 算法在光学图像去

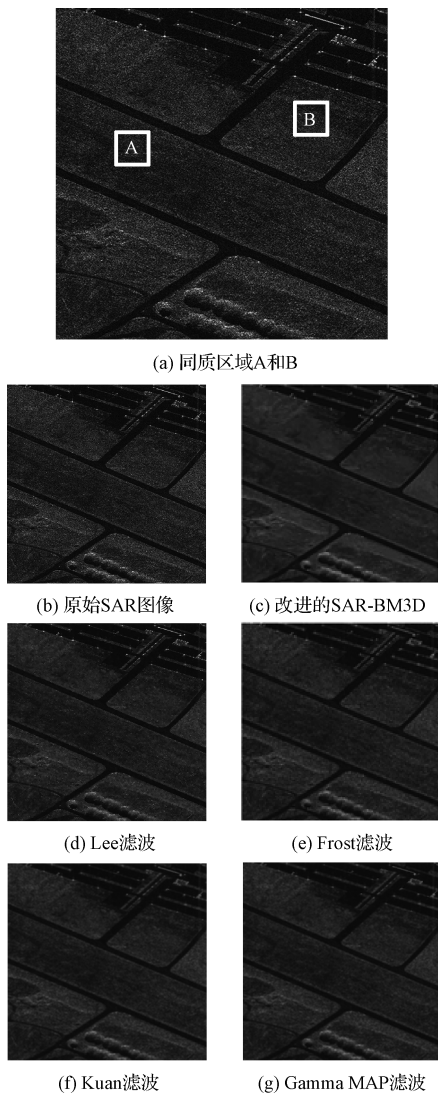


图3 SAR图像抑斑结果

噪的基础,引入改进的GLR准则来度量图像块的相似性,从而有效地应用于SAR图像。实验结果表明,本文提出的算法能够使BM3D较好地应用于SAR图像的相干斑抑制。在下一步中,将考虑如何提高改进的SAR-BM3D算法的效率,减少运算时间。

参考文献

[1] OLIVER C, QUEGAN S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Scitech Pub Inc,2004.

[2] VESPE M, GREIDANUS H. SAR Image Quality Assessment and Indicators for Vessel and Oil Spill Detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 50(11):4726-4734.

[3] GEUSEBROEK J, SMEULDERS A W M, VAN D W J. Fast anisotropic gauss filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003, 12(8): 938-943.

[4] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, et al. Image denoising by sparse 3-d transform-domain collaborative

filtering[J]. Image Processing, IEEE Transactions on, 2007, 1(8): 2080-2095.

[5] CHATTERJEE P, MILANFAR P. Is denoising dead? [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(4): 895-911.

[6] LANSEL S, DONOHO D, WEISSMAN T. DenoiseLab: A standard test set and evaluation method to compare denoising algorithms[J]. Benchmarks and Matlab Software Online, 2009.

[7] 石健, 汪洋, 黄海风, 等. BM3D算法在海洋SAR图像去噪中的应用[J]. 雷达科学与技术, 2016, 14(1): 24-32.

[8] 王成龙. 基于稀疏表示和非局部均值的SAR图像去噪算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.

[9] BHUIYAN M I H, AHMAD M O, SWAMY M N S. Spatially adaptive wavelet-based method using the cauchy prior for denoising the SAR images[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2007, 17(4): 500-507.

[10] ARGENTI F, ALPARONE L. Speckle removal from sar images in the undecimated wavelet domain [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(11): 2363-2374.

[11] BIANCHI T, ARGENTI F, ALPARONE L. Segmentation-based MAP despeckling of SAR images in the undecimated wavelet domain[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2008, 46(9): 2728-2742.

[12] 颜学颖, 焦李成. SURE准则的非局部SAR图像相干斑抑制[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(1): 42-48.

[13] 颜学颖. SAR图像相干斑抑制和分割方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.

[14] 贾承丽, 匡纲要. SAR图像去斑方法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(2): 135-141.

[15] 韩春明, 郭华东, 王长林, 等. 保持边缘的SAR图像滤波方法[J]. 高技术通讯, 2003, 13(7): 11-15.

[16] 柏延臣, 王劲峰, 朱彩英, 等. 基于小波分析的SAR图像斑点滤波及其性能比较评价[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 393-399.

[17] 贾宇申, 蔡振江, 程曼. 针对纵向纹理的图像自适应滤波算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(3): 443-447.

[18] 赵泉华, 高郡, 李玉. 基于区域划分的多特征纹理图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2519-2530.

[19] 张维坤, 叶伟, 劳国超. 基于SIFT特征的SAR图像飞机目标匹配分类方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(8): 19-21, 25.

作者简介

鲁自立, 1992年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为SAR图像处理。

贾鑫, 1958年出生, 硕士, 教授, 主要研究方向为军事信息处理。

E-mail: 13581542798@163.com