SAR图像各向异性扩散滤波算法*

李 倩 朱 磊 邵文权
(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘 要：为了抑制SAR图像中固有的乘性相干斑噪声，本文提出了一种基于各向异性扩散滤波的新算法。该算法首先将自蛇扩散引入经典的SRAD与DPAD算法各向异性扩散方程中，形成了一种带边缘增强功能的各向异性扩散新方程；然后利用改进Frost滤波系数作为扩散方程的新扩散函数，形成了一种既能有效抑制相干斑，又能较好保护边缘、抑制块效应现象的新扩散函数。实验表明，新扩散滤波算法在相干斑抑制、边缘保护、块效应抑制方面均比传统各向异性扩散滤波算法更优异。

关键词：SAR图像；相干斑抑制；各向异性扩散滤波；自蛇扩散滤波；改进Frost滤波
中图分类号：TN957.52 **文献标识码**：A **国家标准学科分类代码**：510.4050

Anisotropic diffusion filtering algorithm for SAR images

Li Qian Zhu Lei Shao Wenquan
(Electronics and Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A new anisotropic diffusion filtering algorithm is proposed to reduce multiplicative speckle noise in SAR images. A new anisotropic diffusion equation that can strengthen edge is established by introducing the self-snake diffusion into the diffusion equation of the classic SRAD and DPAD algorithms. Then, a new diffusion function that is estimated by improved Frost filtering coefficients is introduced into the new anisotropic diffusion equation, and it can effectively smooth speckle noise, preserve edges, and reduce blocking artifacts. The experimental results show that the proposed algorithm can outperform classic anisotropic diffusion equation in despeckling, preserving edges and reducing blocking artifacts.

Keywords: SAR image; speckle reduction; anisotropic diffusion filtering; self-snake diffusion filtering; improved Frost filtering

1 引 言

SAR是一种利用与目标的相对运动把较小尺寸的真实天线孔径用数据处理方法合成较大等效天线孔径的雷达。由于SAR的相干成像特性，使得SAR图像存在一种固有的称为相干斑的乘性噪声[1]。相干斑噪声极大地降低了解译处理系统对SAR图像的解译处理应用效果[2-6]，因此，SAR图像相干斑抑制研究具有重要意义。

SAR图像相干斑抑制的目的是在保护边缘等有用细节信息的同时，有效平滑相干斑噪声。各向异性扩散滤波由于借助局部统计量估计的图像局部结构特征来灵活的约束每个像素扩散滤波的方向与强度，从而可以较好的兼顾噪声抑制与边缘保护，因此，各向异性扩散滤波继空域滤波与变换域滤波之后，成为了第三类重要的SAR图像相干斑平滑滤波方法。

各向异性扩散首次应用于图像噪声抑制是以Perona和Mailik[7]提出著名的P-M扩散为标志。虽然P-M扩散在抑制普通光学图像中的加性噪声时表现出了较为优异的性能，但其对SAR图像的乘性相干斑噪声抑制却难以达到令人满意的效果。为此，Yu等人[8]通过揭示经典的Lee滤波[9]、Frost滤波[10]与P-M扩散[7]之间的内在联系，基于SAR图像乘性相干模型提出了著名的相干斑抑制的各向异性扩散(speckle reducing anisotropic diffusion，SRAD)，从而首次将各向异性扩散引入到SAR图像乘性相干斑噪声的抑制中，并获得了较好的抑斑效果。进而，Aja-Femandez等[11]改进了SRAD的瞬时变差系数估计方法，发展了细节

收稿日期：2015-09
* 基金项目：国家自然科学基金(61401347)、陕西省教育厅自然科学基金(14JK1303)、西安工程大学博士科研启动基金(BS1410)、西安工程大学研究生创新基金(CX2015018)项目

保持的各向异性扩散(detail preserving anisotropic diffusion, DPAD),较好的提升了 SRAD 算法对边缘细节信息的保护性能。此后,众多学者以 SRAD 与 DPAD 扩散为基础,提出了多种改进的各向异性扩散滤波算法[12-19]。

经典的 SRAD 和 DPAD 扩散滤波算法及其现有多种改进算法表现出来了非常优异的相干斑抑制性能,但是还存在一些不足,主要表现为:同质区存在块效应现象,边缘区域附近有较多相干斑残留。为此,将改进 Frost 滤波与自蛇扩散[20]引入传统 SRAD 与 DPAD 扩散中,提出了一种新的各向异性扩散滤波算法。该算法主要进行了如下改进:1)首次提出将自蛇扩散引入经典的 SRAD 与 DPAD 算法各向异性扩散方程中,形成了一种相干斑抑制能力更强且对边缘具有增强作用的各向异性扩散新方程;2)利用改进 Frost 滤波系数替代传统 Lee 滤波与 Kuan 滤波系数作为扩散方程的新扩散函数,形成了一种既能有效抑制相干斑,又能较好保护边缘、抑制块效应现象的新扩散函数。

2 经典的 SARD 与 DPAD 扩散及自蛇扩散

2.1 SRAD 扩散与 DPAD 扩散

Yu[8]等人根据传统 Lee 滤波、Frost 滤波同 P-M 扩散之间的内在关系,发展了经典的 SRAD 扩散。若假设 SAR 图像的乘性相干斑模型为:

$$I(m,n)=s(m,n)w(m,n) \tag{1}$$

式中:$I(m,n)$、$s(m,n)$、$w(m,n)$ 分别表示 SAR 图像 (m,n) 位置的场景观测值、场景参量有效值及相干斑噪声。那么,SARD 的扩散方程可表示为[8]:

$$\frac{\partial I(m,n,t)}{\partial t}=\mathrm{div}\left[\mu(m,n,t)\nabla I(m,n,t)\right] \tag{2}$$

式中:$I(m,n,t)$ 表示 t 时刻 (m,n) 位置的SAR图像像素,div 表示散度算子,∇ 表示梯度算子,$\mu(m,n,t)$ 表示瞬时扩散函数。

SRAD 的扩散函数 $\mu(m,n,t)$ 由 Lee 滤波系数估计,可描述为[9]:

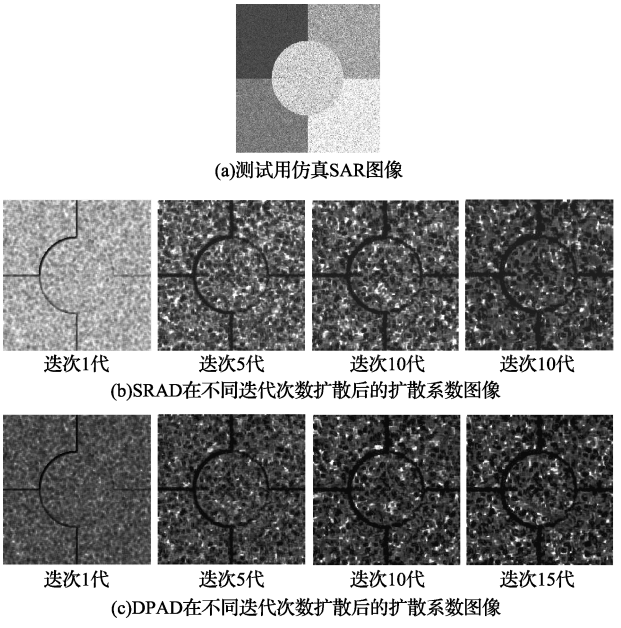
$$\mu_{Lee}(m,n,t)=\frac{C_w^4(m,n,t)+C_w^2(m,n,t)}{C_w^4(m,n,t)+C_I^2(m,n,t)} \tag{3}$$

式中:$C_W(m,n,t)$ 与 $C_I(m,n,t)$ 分别表示相干斑 w 与场景观测值 I 的瞬时变差系数。

经典的 DPAD 通过利用 Kuan 滤波[21]系数代替 Lee 滤波系数作为扩散函数来改善 SRAD 的细节保持性能,其用 Kuan 滤波系数估计的扩散函数可表示为:

$$\mu_{Kuan}(m,n,t)=\frac{1+\dfrac{1}{C_I^2(m,n,t)}}{1+\dfrac{1}{C_w^2(m,n,t)}} \tag{4}$$

SRAD 与 DPAD 在相干斑抑制的同时可有效保护边缘,这一点可借助图 1 进行佐证。如图 1 所示为 SRAD 与 DPAD 的扩散函数对仿真 SAR 图像在不同次数迭代扩散后的扩散系数图,图中像素灰度值越小表明该像素处的扩散滤波强度越小。图 1 中,SRAD 与 DPAD 经过仅仅数次迭代滤波后,图像边缘附近的扩散系数就明显减小并趋近于 0。因此,随着扩散迭代滤波的进行,图像边缘附近的扩散滤波强度明显减弱甚至停止扩散,从而有效的保护了边缘区域不被过度平滑,而对比图 1(b)与图 1(c)容易发现,DPAD 比 SRAD 能更快使得图像边缘区域的扩散强度迅速减弱并趋于停止。因此,DPAD 具有比 SRAD 更强的边缘保护性能。



(a)测试用仿真SAR图像

(b)SRAD在不同迭代次数扩散后的扩散系数图像

(c)DPAD在不同迭代次数扩散后的扩散系数图像

图 1 SRAD 与 DPAD 在不同次数迭代扩散后的扩散系数图像

然而,从图 1 中也可发现 SRAD 与 DPAD 前述两点不足的原因。图 1 显示:仅仅数次迭代滤波后,图像边缘附近的扩散系数就迅速减小并趋近于 0,因此,边缘区域附近势必存在大量残留的相干斑得不到有效抑制,另外,同一块同质区内幅度稍有起伏的邻近像素之间的扩散系数差异过大,从而导致这些邻近像素之间的扩散强度差异巨大,再加上多次迭代扩散滤波的积累效应,从而容易在这些像素之间产生块效应现象。

2.2 自蛇扩散

假设水平集作测地线活动轮廓模型运动,即可导出自蛇扩散模型[20],其扩散方法可表示为:

$$\frac{\partial I}{\partial t}=\mathrm{div}\left(g(|\nabla I|)\frac{\nabla I}{|\nabla I|}\right)|\nabla I|=$$

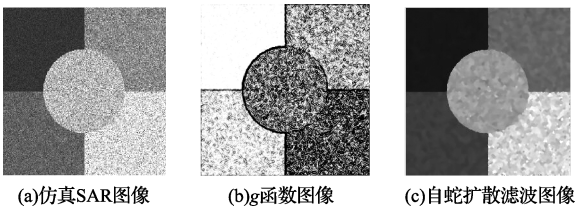
$$g(|\nabla I|)|\nabla I|\,\mathrm{div}\left(\frac{\nabla I}{|\nabla I|}\right)+\nabla g(|\nabla I|)|\nabla I| \tag{5}$$

式中:g 为边缘检测函数,其带为反差系数 K 的最常用的一种表达式可表示为:

$$g(r)=\frac{1}{1+\left(\dfrac{r}{K}\right)^2} \tag{6}$$

容易发现,式(5)等式右边第 2 行第 1 项为带有边缘停止的方向扩散滤波,而第 2 项为带有边缘增强的冲击扩

散滤波。由于自蛇扩散只沿边缘方向扩散且带边缘增强功能，因此其能较好的保护边缘并增强边缘锐度，但相比于可沿梯度与垂直于梯度两个方向做各向异性扩散的P-M，自蛇扩散由于只能沿垂直于梯度的方向扩散滤波，因此，其相干斑抑制能力弱于P-M扩散。如图2所示为对仿真SAR图像进行50次自蛇迭代扩散滤波的一个实例，从自蛇扩散滤波获得的抑斑图像图2(c)容易发现：1)其同质区仍然残留有较多的相干斑，特别是在图像中央及右下角高灰度值同质区；2)边缘则保护得完整且清晰，同时有较为明显的增强锐化迹象。这一结果可从图2(b)所示边缘检测函数 g 的映射图像中找到解释。明显，图2(b)所示迭代扩散中的 g 函数图像灰度值在边缘区域表现出了接近0的灰度值，说明其在边缘区域几乎停止进行方向扩散，而带增强作用的冲击扩散则能继续进行，因此，边缘保护与锐化得以有效开展，然而图中央及右下角等高灰度值同质区 g 函数图像灰度值也呈现大面积的低灰度值。因此，这些区域的方向扩散强度也非常微弱，进而导致这些区域会残留大量相干斑。可见，自蛇扩散直接用于SAR图像想干斑抑制，其抑斑能力稍显不足，但其具有较好的边缘保持性能，还能增强边缘锐度。



(a)仿真SAR图像　(b)g函数图像　(c)自蛇扩散滤波图像

图2　自蛇扩散抑制SAR图像相干斑效果

3　各向异性扩散滤波新算法

针对SRAD和DPAD扩散滤波算法及其现有多种改进算法所存在的同质区块效应现象和边缘区域相干斑残留问题，提出了一种新的各向异性扩散滤波算法。该算法首先将自蛇扩散引入SRAD与DPAD算法各向异性扩散方程中，形成了一种带边缘增强功能的各向异性扩散新方程；然后利用改进Frost滤波形成了一种既能有效抑制相干斑，又能较好保护边缘、抑制块效应现象的新扩散函数。

3.1　融合自蛇扩散的新扩散方程

SRAD与DPAD扩散共同采用的扩散方程式(2)，在迭代扩散抑制相干斑的同时，可有效保护边缘不被过度平滑，但在边缘附近扩散趋于停止，故相干斑残留较多。如果能在式(2)所示的扩散方程中引入可沿边缘进行扩散滤波的扩散项，则当扩散方程中原来的扩散项在边缘附近停止扩散滤波时，新加入的扩散项还能继续沿边缘方向扩散滤波，那么就能有效解决式(2)所示的扩散方程不能有效抑制边缘区域相干斑的问题。考虑到自蛇扩散方程具有方向扩散项与冲击扩散项，可实现沿边缘方向的扩散滤波并能同时增强边缘锐度，因此，提出将自蛇扩散方程引入式(2)所示的SRAD与DPAD扩散方程中，构建新的能有效抑制边缘区域相干斑且能同时增强边缘的各向异性扩散新方程。

融入自蛇扩散的新扩散方程定义为：

$$\frac{\partial I}{\partial t}=\alpha\times\mathrm{div}[\mu(m,n,t)\nabla I]+(1-\alpha)\times\mathrm{div}\left(g(|\nabla I|)\frac{\nabla I}{|\nabla I|}\right)|\nabla I| \tag{7}$$

式中：$\alpha\in(0,1)$ 为耦合系数，用于平衡方程右边两个扩散项在整个扩散滤波中所起的作用，其取值范围为变化对扩散滤波的影响将在3.3节讨论。

3.2　基于改进Frost滤波的新扩散函数

2.1节的分析说明了SRAD与DPAD两种扩散滤波的扩散函数分别由Lee滤波与Kuan滤波系数形成，而这两种扩散的不足也主要是由其扩散函数的取值分布特点所确定的。因此，要改善SRAD与DPAD的不足，势必要从改进扩散函数入手。

文献[8]说明了空域Lee滤波与Frost滤波同P-M扩散的内在联系，并通过将Lee滤波系数作为扩散函数获得了著名的相干斑抑制的SRAD扩散。若将传统4-邻域的Frost滤波系数作为扩散函数(扩散一般在4-邻域进行，邻域像素与中心像素距离均为1)，则有：

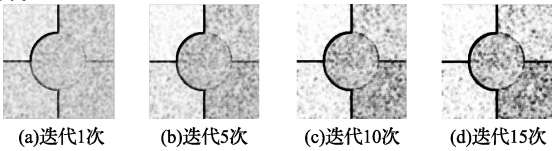
$$\mu_{Frost}(m,n,t)=\exp(-\beta C_I(m,n,t)) \tag{8}$$

式中：$\beta C_I(m,n,t)$ 称为衰减因子，β 为衰减因子调节常数，$C_I(m,n,t)$ 为场景观测值 I 的瞬时变差系数。

由于文献[8]指出Lee滤波系数与Frost滤波系数作为扩散函数的扩散滤波具有大致相当的抑斑性能。因此，直接用传统Frost滤波来形成扩散函数对改善SRAD与DPAD扩散滤波的不足帮助并不大。然而，文献[22]提出的改进Frost滤波算法，利用Lee滤波系数代替传统Frost滤波中衰减因子调节常数 β 来形成衰减因子，使得 β 无需人为手动设置且由一个固定常数变成了与图像局部结构特征自适应参量，因此，获得了比传统Lee滤波与Frost滤波更好的抑斑性能。为此，本文提出利用改进Frost滤波系数来形成新的扩散函数，则新扩散函数可定义为：

$$\mu_{iFrost}(m,n,t)=\exp\left(-\frac{C_I(m,n,t)}{\mu_{Lee}(m,n,t)}\right)=\exp\left(-\frac{C_W^4(m,n,t)+C_I^2(m,n,t)}{C_W^4(m,n,t)+C_W^2(m,n,t)}C_I(m,n,t)\right) \tag{9}$$

为了说明基于改进Frost滤波的新扩散函数的特点，这里与2.1节一样，利用新扩散函数对图1(a)所示仿真SAR图像进行不同次迭代扩散后的扩散系数图像图3进行说明。



(a)迭代1次　(b)迭代5次　(c)迭代10次　(d)迭代15次

图3　新扩散函数在不同迭代次数下的扩散系数图像

对比图1与图3容易发现：

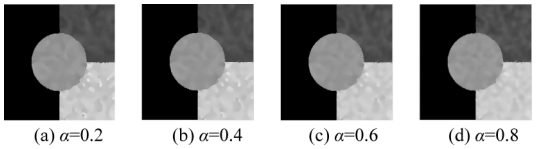
1)基于改进Frost滤波的新扩散函数经过不同次迭代扩散后，其同质区扩散系数仍然保持了较大的灰度值且邻近像素之间的扩散系数灰度值具有较好的平滑性，因此，在迭代扩散滤波中可以较好的抑制相干斑，明显减弱块效应现象；

2)边缘区域扩散系数的灰度值随着迭代扩散的进行表现出了越来越小的取值，因此，这种扩散系数的分布特点可以使得扩散滤波在迭代扩散前期可对边缘区域相干斑进行有效抑制，而在迭代扩散后期则趋于停滞扩散，从而保护边缘不被过度平滑。

3.3 新建扩散方程中的耦合系数

在融合自蛇扩散的新扩散方程式(7)中，耦合系数α用于调节方程右边两个扩散项在整个扩散滤波中所起的作用，其取值变化对扩散滤波的影响可用如图4所示的实例来说明。图4是利用新扩散方程式(7)和新扩散函数式(9)在耦合系数α取值不同的情况下分别对图1(a)所示仿真SAR图像进行扩散滤波获得的抑斑SAR图像。

如图4所示，随着α取值由小到大变化，各幅扩散抑斑图像的相干斑平滑与边缘保护效果总体上十分接近，大致呈现如下规律：α取值越小，新扩散方程式(7)中的自蛇扩散项对整个扩散滤波的贡献越大，对应抑斑图像边缘保持与增强效果越明显，但同质区高灰度值区域块效应现象也越明显，反之则相反。可见，新抑斑算法中α设置的自由度较大，若α取值适中，则扩散抑斑图像可以在边缘保持与块效应现象抑制之间达到较好的平衡。



(a) α=0.2　(b) α=0.4　(c) α=0.6　(d) α=0.8

图4　新扩散算法在不同α下获得的抑斑图像

4 实　验

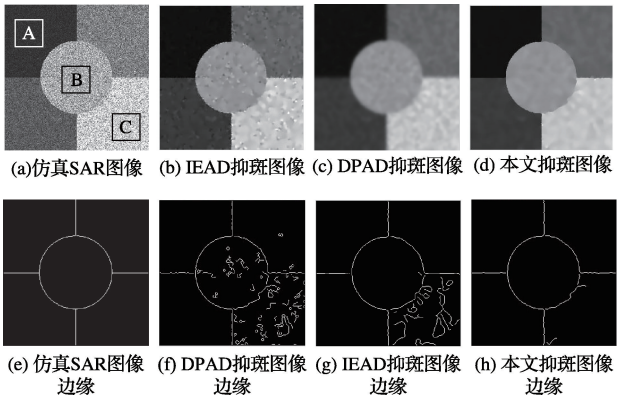
为了验证新扩散滤波算法的抑斑性能，设计了分别针对仿真SAR图像与真实SAR图像的2个扩散滤波抑斑对比实验，实验结果如图5和6与表1和2所示。在两个实验中，参与对比实验的扩散算法分别为：DPAD扩散[11]、IEAD扩散[18]与本文扩散算法，而实验中各扩散算法参数设置为：

1)DPAD扩散采用5×5的局域窗，迭代70次；

2)IEAD扩散采用5×5的矩形窗，迭代70次；

3)本文扩散算法采用5×5的矩形窗，迭代70次，耦合系数α = 0.6，反差系数K = 10。

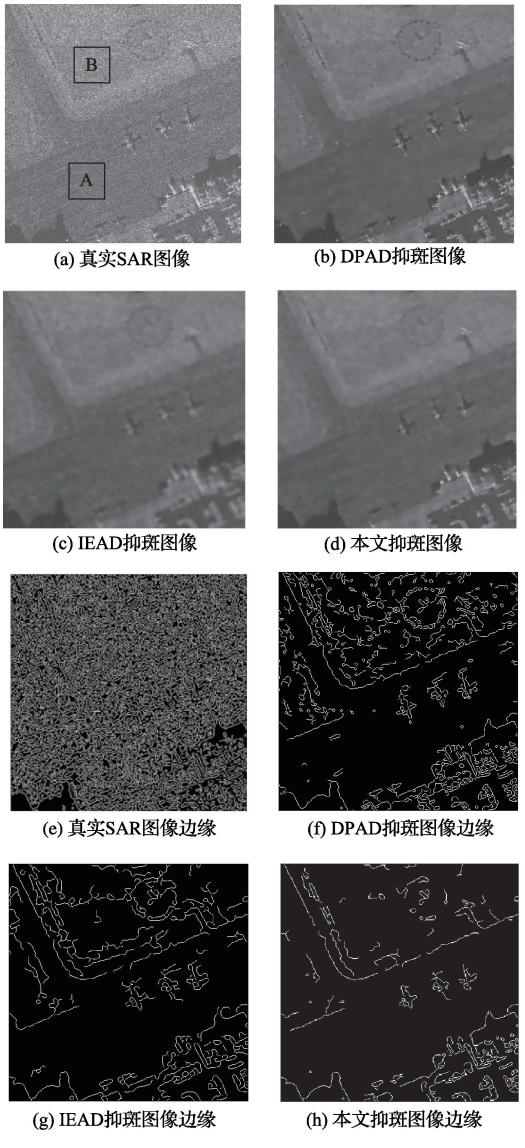
两个实验首先利用各个扩散滤波算法对所选SAR图像按设定参数进行扩散滤波，然后对抑斑图像运用相同参数的Canny算子进行边缘检测，最后利用效视数、边缘保持指数、抑斑前后SAR图像比值图像的方差与均值4类参数对每个扩散算法抑斑图像进行参数评估与比较。下面，对使用的性能评估参数进行简单介绍。



(a)仿真SAR图像　(b) IEAD抑斑图像　(c) DPAD抑斑图像　(d) 本文抑斑图像

(e) 仿真SAR图像边缘　(f) DPAD抑斑图像边缘　(g) IEAD抑斑图像边缘　(h) 本文抑斑图像边缘

图5　各扩散算法对仿真SAR图像的抑斑图像及边缘检测



(a) 真实SAR图像　(b) DPAD抑斑图像

(c) IEAD抑斑图像　(d) 本文抑斑图像

(e) 真实SAR图像边缘　(f) DPAD抑斑图像边缘

(g) IEAD抑斑图像边缘　(h) 本文抑斑图像边缘

图6　各扩散算法对真实SAR图像的抑斑图像及边缘检测

1)等效视数(记为 K_{ENL}):计算公式为 $K_{ENL}=\frac{E^2}{\sigma}$,其中 E 与 σ 分别为抑斑图像选中同质区的均值与标准差,该参量用来表征相干斑平滑能力,其值越大表明相干斑抑制程度越高,两个实验中分别对图 5(a)与图 6(a)白色方框选中的同质区计算该参量。

2)边缘保持指数(记为 K_{EKI}):设 n 属于图像边缘像素位置集合 Ω,$P(n)$ 和 $Q(n)$ 分别表示在抑斑图像与原始图像中,与边缘像素位置 n 垂直的两侧像素梯度模值,则 $K_{EKI}=\sum_{n\in\Omega}P(n)/\sum_{n\in\Omega}Q(n)$,该参量用于表征对图像边缘的保护能力,其理想值为 1,两个实验中利用文献[22]中的 SAR 图像边缘检测算法获取实验 SAR 图像的边缘像素 n 及其位置集合 Ω。

3)抑斑前后 SAR 图像比值图像的均值(记为 K_E)与方差(记为 K_V):K_E 表征了对相干斑的抑制程度,对 L 视幅度格式 SAR 图像其理想值为 $(\frac{4}{\pi}-1)/L$,K_V 表征对原始 SAR 图像辐射性能的保持程度,其值越接近 1 说明保持程度越好,两个实验中上述两个参量的计算均需整幅 SAR 图像的所有像素参与。

由图 5 与图 6 所示的抑斑结果对比容易发现:本文扩散算法抑斑图像边缘保持性能最好,边缘清晰可辨没有模糊迹象,同质区相干斑抑制最彻底,块效应现象得到了很好的抑制,边缘区域几乎没有相干斑残留,抑斑图像边缘检测出的虚假边缘最少。

由表 1 与表 2 所示的性能参数对比同样可以获得上述结论:扩散算法抑斑图像的 K_{ENL} 值最高,K_E、K_V 与 K_{EKI} 3 个参量与理想值最接近,这些参量充分表明:相对其他 3 种扩散算法,本文扩散算法不仅有更好的想干斑平滑效果,而且边缘保护性能也有优势。

表 1 各扩散算法对仿真 SAR 图像的抑斑参数对比

扩散算法	K_{ENL}			K_E	K_V	K_{EKI}
	A 区	B 区	C 区			
仿真 SAR 图像	1.9	2.0	2.1	—	—	—
理想值	—	—	—	1.000	0.137	1.000
DPAD	379.7	312.2	265.8	0.993	0.140	0.656
IEAD	130.1	54.4	78.2	1.004	0.106	0.686
本文算法	1 320.9	614.9	392.5	1.003	0.135	0.889

表 2 各扩散算法对真实 SAR 图像的抑斑参数对比

扩散算法	K_{ENL}		K_E	K_V	K_{EKI}
	A 区	B 区			
仿真 SAR 图像	44.8	26.5	—	—	—
理想值	—	—	1.000	0.022	1.000
DPAD	512.5	147.3	0.999	0.057	0.594
IEAD	477.0	240.1	0.998	0.030	0.613
本文算法	902.2	493.1	1.001	0.029	0.818

5 结 论

针对经典的 SRAD 和 DPAD 扩散滤波算法及其现有多种改进算法存在的同质区块效应现象与边缘区域相干斑残留问题,提出了一种新的各向异性扩散滤波算法。该算法将自蛇扩散融入 SRAD 与 DPAD 各向异性扩散方程中,并利用改进 Frost 滤波形成了一种新的扩散函数。实验结果表明,本文算法有效的改善了 SRAD 和 DPAD 等扩散滤波算法存在的同质区块效应现象与边缘区域相干斑残留问题,同时对边缘还有一定程度的增强作用。

参 考 文 献

[1] 朱磊, 水鹏朗, 章为川.利用区域划分的合成孔径雷达图像相干斑抵制算法[J].西安交通大学学报,2014,46(10):83-88.

[2] 查正兴,鲁昌华,陶志颖,等. 增强型 Shearlet 域 SAR 图像去噪[J].电子测量与仪器学报,2014,28(6):644-649.

[3] 范宗杰,徐向辉,周晓丽. 一种基于 SIFT 算法的 SAR 图像配准方法[J]. 电子测量技术,2014,37(8):70-74.

[4] 杨学志,桂志强,郑鑫,等. 采用自适应块拼接的北极海冰 SAR 图像合成[J].仪器仪表学报,2014,35(9):2070-2077.

[5] 陈刚,王峰,尤红建,等. 基于光学 GCP 图像切片的 SAR 图像自动匹配方法[J].国外电子测量技术,2013,32(12):41-45.

[6] FENG D CH, QIN H Y, ZENG Y. Study on straw incineration monitoring based on the combination of remote sensing image[J]. Instrumenttation, 2014, 1(3):25-42.

[7] PERONA P, MALIK J. Scale space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE PAMI, 1990(12):629-639.

[8] YU Y, ACTON S. Speckle reducing anisotropic diffusion [J]. IEEE Transactions on Image Proceeding, 2002,11(11):1260-1270.

[9] LEE J S. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images [J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1983,13(1):85-89.

[10] FROST V, STILES J, SHANMUGAN K, et al. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1982,4(2):157-166.

[11] AJA-FERNANDEZ S, ALBEROLA-LOPEZ C. On the estimation of the coefficient of variation for anisotropic diffusion speckle filtering [J]. IEEE Transactions on Image Proceeding, 2006, 12(9):

2694-2701.
[12] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI Y Y. Image enhancement and denoising by complex diffiision processes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004,26(8):1020-1036.
[13] VOCI F, EIHO S, SUGIMOTO N, et al. Estimating the gradient in the Perona-Malik equation[J]. Signal Proceeding Magazine,2004,21(3):39-65.
[14] 张良培,王毅,李平湘.基于各向异性扩散的SAR图像斑点噪声滤波算法[J].电子学报,2006,34(12):2250-2254.
[15] BAI J, FENG X C. Fractional-order anisotropic diffusion for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Proceeding, 2007,16(10): 2492-2502.
[16] 朱磊,程冬. SAR图像相干斑噪声的各向异性扩散滤波算法[J].电子测量与仪器学报,2011,25(10):857-863.
[17] LI H C,FAN P Z,KHAN M K. Context-adaptive anisotropic diffusion for image denoising[J]. Electronics Letters,2012,48(14):827-829.
[18] 李金才, 马自辉, 彭宇行, 等. 基于图像熵的各向异性扩散相干斑噪声抑制[J].物理学报,2013,62(9):574-583.
[19] 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法[J].物理学报,2014,63(17): 179502-1-179502-11.
[20] KASS M, WITKIN A, TERZOPOLOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision,1988,1(4):321-331.
[21] KUAN D T, SAWCHUK A A, STRAND T C, et al. Adaptive restauration of images with speckle[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Proceeding,1987,35(3):373-383.
[22] 朱磊,霍小波,吴江勇. 一种抑制SAR图像相干斑的空域滤波算法[J].计算机工程与应用,2013,49(13):165-169.
[23] SHUI P L,CHEN D. Edge detector of SAR images using Gaussian-Gamma-shaped bi-windows[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2012,9(5):846-850.

作 者 简 介

李倩,1990年出生,硕士研究生。主要研究方向为SAR图像处理与应用。

朱磊(通讯作者),1979年出生,副教授,博士,硕士生导师。主要研究方向为信号与信息处理及嵌入式系统应用。

E-mail:zhulei791014@163.com

邵文权,1978年出生,副教授,博士,硕士生导师。主要研究方向为电力系统及自动化。