

# 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\*

朱磊<sup>1)2)†</sup> 韩天琪<sup>1)</sup> 水鹏朗<sup>2)</sup> 卫建华<sup>1)</sup> 顾梅花<sup>1)</sup>

1)(西安工程大学电子信息学院, 西安 710048)

2)(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071)

(2014年2月11日收到; 2014年5月11日收到修改稿)

本文提出了一种抑制合成孔径雷达图像乘性相干斑噪声的各向异性扩散滤波新方法. 该方法将受自适应耦合函数控制的平均曲率运动嵌入到传统相干斑抑制的各向异性扩散方程中, 形成了一种可有效抑制边缘区域相干斑与同质区块效应现象的各向异性扩散新方程, 同时在新建的扩散方程中, 引入了由改进Frost滤波与局部方向比率联合构建的一种带方向约束的新扩散函数, 进一步削弱了块效应现象且明显改善了抑斑图像的边缘抖动扭曲问题. 实验结果表明该方法在有效保护图像边缘的同时, 能充分平滑同质区与边缘区域的相干斑, 明显削弱块效应现象, 有效改善抑斑图像边缘抖动扭曲问题, 而抑斑图像无论视觉效果还是参数指标均比多种传统抑斑方法更具优势.

**关键词:** 相干斑抑制, 各向异性扩散, 方向约束, 平均曲率运动

**PACS:** 95.75.Mn, 42.30.Va, 42.30.Sy

**DOI:** 10.7498/aps.63.179502

## 1 引言

可全天候全天候进行远距离成像的合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR), 与医学领域广泛应用的光学相干断层成像系统和超声波成像系统一样<sup>[1,2]</sup>, 是典型的相干成像系统, 因此, SAR图像中不可避免地存在一种称为相干斑的随机乘性噪声. 相干斑的存在严重妨碍了SAR图像解译处理技术的有效性与可靠性, 因此, 与SAR图像成像方法研究一样<sup>[3]</sup>, 相干斑抑制方法研究也是SAR图像领域的重要研究方向.

当前, SAR图像抑斑方法主要有三类: 空域滤波方法<sup>[4-12]</sup>、变换域滤波方法<sup>[13-20]</sup>与偏微分各向异性扩散滤波方法<sup>[21-28]</sup>, 其中各向异性扩散作为一种自适应迭代滤波过程, 可以较好地兼顾SAR图像的相干斑抑制与边缘保护, 同时偏微分方程完善的理论与数值求解方法, 还使得各向异性扩散抑

斑方法的推演与计算处理更具理论性与实用性.

1990年, Perona与Malik<sup>[29]</sup>首次提出利用基于偏微分方程的各向异性扩散(常被称为P-M扩散)来抑制光学图像中的加性噪声并取得了不错的效果, 从而为图像噪声抑制研究开辟了一个新方向. 然而, P-M扩散直接用于抑制SAR图像中的乘性相干斑, 效果却并不理想. 2002年, Yu等<sup>[21]</sup>首次揭示了经典的Lee滤波<sup>[4]</sup>与Frost滤波<sup>[6]</sup>同P-M扩散<sup>[29]</sup>之间的内在联系, 并在SAR图像乘性相干斑模型基础上, 发展了相干斑抑制的各向异性扩散 (speckle reducing anisotropic diffusion, SRAD). SRAD可以理解为一种受瞬时变差系数 (instantaneous coefficients of variation, ICV) 控制的迭代Lee滤波, 具有良好的相干斑抑制效果与边缘敏感性. 此后, 一系列以SRAD为基础的改进抑斑方法<sup>[22-28]</sup>先后被提出. Aja-Fernandez等<sup>[22]</sup>利用Kuan滤波代替Lee滤波并用更大尺度的局域窗来改进SRAD扩散的ICV估计方法, 提出了具有

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61271295) 和陕西省教育厅自然科学基金 (批准号: 14JK1303) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhulei791014@163.com

更好抑斑性能的细节保持的各向异性扩散 (detail preserving anisotropic diffusion, DPAD). Krissian 等 [23] 通过将 SRAD 扩散嵌入矢量扩散方程中, 发展了一种具有方向性的各向异性扩散. 韦海军等 [24] 提出利用 Turkey's Biweight 范数来改进边界停止函数, 可使各向异性扩散能较好地保持边缘并有利于扩散的自动中止. Liu 等 [25] 提出利用自适应变化的局域窗来改进 ICV 的估计方法, 获得了更精确的边缘定位信息. Yu 等 [26] 提出利用邻域相似性判别将边缘检测方法与各向异性扩散结合, 可在抑斑的同时较好的保护边缘. 张琼等 [27] 提出了欧拉弹性能量的扩散模型与自适应变步长去噪算法, 可在抑斑时保护图像细节并减少迭代时间. 李金才等 [28] 提出利用图像熵来改进边缘检测算子, 提高了各向异性扩散对图像结构的保持能力.

以 SRAD 与 DPAD 为代表的各向异性扩散抑斑方法在相干斑抑制与边缘保护上均表现出了好的性能, 但还存在下列不足: 不能在保护边缘的同时有效抑制边缘区域相干斑噪声, 容易在同质区产生块效应现象, 边缘容易出现扭曲变形问题. 为此, 本文提出了一种基于平均曲率运动 (mean curvature motion, MCM) [30] 与方向约束的各向异性扩散抑斑新方法. 该方法的主要改进如下: 其一, 提出了一种自适应耦合函数并将受该函数控制的 MCM 嵌入到传统各向异性扩散方程中, 形成了一种可有效抑制边缘区域相干斑与同质区块效应现象的各向异性扩散新方程; 其二, 对传统各向异性扩散中无方向性的静态自适应扩散函数进行了改进, 提出利用改进 Frost 滤波与局部方向比率联合构建一种带方向约束的新扩散函数, 从而进一步削弱块效应现象并明显改善抑斑图像的边缘扭曲变形问题.

## 2 经典的 SRAD 与 DPAD 及其抑斑性能分析

### 2.1 SRAD 与 DPAD

设空域  $\mathbf{n} = (x, y)$  位置处 SAR 图像的乘性观测模型为  $I(\mathbf{n}) = s(\mathbf{n})w(\mathbf{n})$ , 其中,  $I(\mathbf{n})$  表示 SAR 图像观测值,  $s(\mathbf{n})$  表示场景信号,  $w(\mathbf{n})$  表示相干斑噪声. 若用  $t$  表示时间参量. 那么 SRAD 的扩散方程可描述为 [21]

$$\frac{\partial I(\mathbf{n}, t)}{\partial t} = \text{div}[\mu(\mathbf{n}, t)\nabla I(\mathbf{n}, t)],$$

$$I(\mathbf{n}, 0) = I(\mathbf{n}), \quad (1)$$

其中,  $\text{div}$  为散度算子,  $\nabla$  为梯度算子,  $\mu(\mathbf{n}, t)$  为扩散函数. SRAD 的扩散函数由 Lee 滤波系数估计 [21]:

$$\mu_{\text{Lee}}(\mathbf{n}, t) = \frac{C_w^4(\mathbf{n}, t) + C_w^2(\mathbf{n}, t)}{C_w^4(\mathbf{n}, t) + C_I^2(\mathbf{n}, t)}, \quad (2)$$

其中,  $C_I(\mathbf{n}, t)$  与  $C_w(\mathbf{n}, t)$  分别为  $I$  与  $w$  的 ICV, 而

$$C_I^2(\mathbf{n}, t) = \text{Var}(I(\mathbf{n}, t))/E^2(I(\mathbf{n}, t)), \quad (3)$$

$$C_w^2(\mathbf{n}, t) = \text{Var}(w(\mathbf{n}, t))/E^2(w(\mathbf{n}, t)), \quad (4)$$

其中,  $E$  与  $\text{Var}$  分别表示均值与方差算子. 由于边缘区域像素相对于同质区像素具有更大的局域方差, 故边缘区域像素常具有更高的 ICV 值, 因此 ICV 常被用于度量局域窗内中心像素与边缘的距离. 另外, 考虑到在每次迭代滤波中, 相干斑  $w$  的 ICV 常被假设为与位置  $\mathbf{n}$  无关的固定常量 [21], 即满足  $C_w(\mathbf{n}, t) = C_w(t)$ , 故 (2) 式可简化为

$$\mu_{\text{Lee}}(\mathbf{n}, t) = \frac{C_w^4(t) + C_w^2(t)}{C_w^4(t) + C_I^2(\mathbf{n}, t)}. \quad (5)$$

DPAD 采用了与 SRAD 相同的扩散方程, 但其扩散函数由 Kuan 滤波系数估计 [22]:

$$\begin{aligned} \mu_{\text{Kuan}}(\mathbf{n}, t) &= \frac{1 + 1/C_I^2(\mathbf{n}, t)}{1 + 1/C_w^2(\mathbf{n}, t)} \\ &= \frac{1 + 1/C_I^2(\mathbf{n}, t)}{1 + 1/C_w^2(t)}. \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.2 SRAD 与 DPAD 的抑斑性能分析

SRAD 与 DPAD 扩散都是边缘敏感的, 能在抑斑时较好的保护边缘, 图 1 可解释 SRAD 与 DPAD 所具有的这种特性. 由图 1 可知: 在 SRAD 与 DPAD 的一次迭代扩散过程中, 对于每一个给定的  $C_w$ , 当  $C_I$  从 0 开始逐渐增大时,  $\mu$  的取值则由最大值开始减小并迅速趋近于 0. 由于边缘区域像素较大的 ICV 数值会造成  $\mu$  取值较小甚至趋近于 0, 因此, SRAD 与 DPAD 对高 ICV 数值的边缘区域总是具有较小的扩散强度, 甚至不扩散, 从而可以有效保护 SAR 图像的边缘不会被过度平滑. 另外, 由于 DPAD 的扩散函数  $\mu$  随  $C_I$  增大而减小的速度远快于 SRAD, 因此, DPAD 具有比 SRAD 更好的边缘保护性能.

然而, SRAD 与 DPAD 扩散函数  $\mu$  的分布特性与估计方法也导致了三个不足. 其一, 由于边缘区域像素具有较高的  $C_I$  值, 故这些像素的  $\mu$  通常较小, 甚至趋近于 0, 从而导致扩散滤波在这些像素上趋于停止. 因此, 传统 SRAD 与 DPAD 扩散难以抑

制边缘区域相干斑. 其二, 由图 1 容易发现, SRAD 与 DPAD 的扩散函数  $\mu$  随  $C_I$  值变化呈现出过于敏感的非均匀陡峭变化, 造成同质区内不同  $C_I$  值的局部邻域的扩散强度呈现出明显的差异, 而这种差异会由于扩散的迭代积累效应而被持续放大增强, 并最终导致同质区高  $C_I$  值的局部邻域出现严重的块效应现象. 其三, SRAD 与 DPAD 分别采用 Lee 滤波与 Kuan 滤波系数估计扩散函数, 而由局域窗估计生成的 Lee 滤波与 Kuan 滤波系数本身是一种没有方向性的静态自适应参量, 从而导致 SRAD 与 DPAD 的扩散滤波过程也缺乏方向性, 不能很好地匹配 SAR 图像的局部几何特征, 并容易引起抑斑图像边缘出现扭曲变形问题.

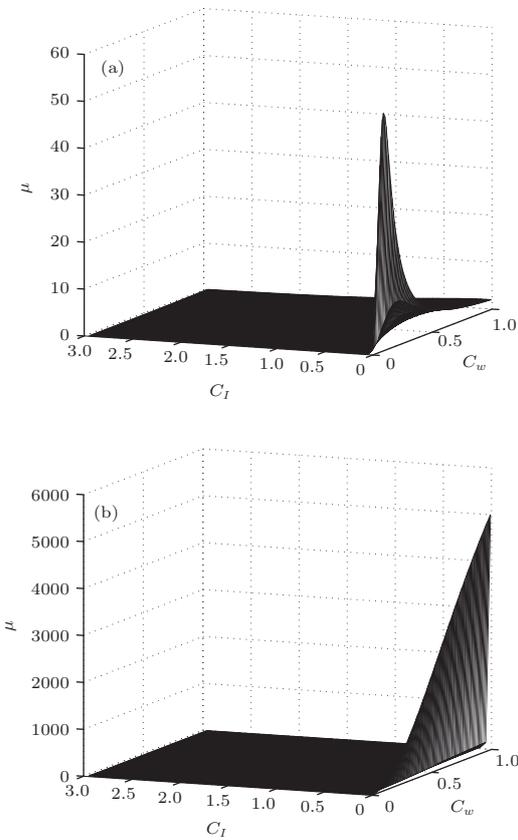


图 1 SRAD 与 DPAD 扩散函数  $\mu$  的波形图 (a) SRAD 扩散函数  $\mu$  的波形图; (b) DPAD 扩散函数  $\mu$  的波形图

### 3 基于 MCM 与方向约束的各向异性扩散抑斑新方法

针对传统 SRAD 与 DPAD 存在的上述三点不足, 本文提出了一种基于 MCM 与方向约束的各向异性扩散新方法.

#### 3.1 耦合 MCM 的各向异性扩散新方程

为了在保护 SAR 图像边缘的基础上, 改善传统各向异性扩散方法难以抑制边缘区域相干斑与同质区高  $C_I$  值局部邻域的块效应现象的不足, 一个自然的想法是: 在原有各向异性扩散基础上, 沿边缘方向加强对边缘区域与高  $C_I$  值局部邻域的扩散强度.

经典的 MCM 能仅沿图像边缘扩散滤波<sup>[30]</sup>, 若设  $\xi$  为垂直于图像  $I(\mathbf{n}, t)$  梯度方向的单位矢量 (即与边缘方向平行的矢量), 则 MCM 可表示为<sup>[30]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(\mathbf{n}, t)}{\partial t} &= \frac{\partial^2 I(\mathbf{n}, t)}{\partial \xi^2} \\ &= \operatorname{div} \left( \frac{\nabla I(\mathbf{n}, t)}{|\nabla I(\mathbf{n}, t)|} \right) |\nabla I(\mathbf{n}, t)|. \end{aligned} \quad (7)$$

可见, MCM 可在保护边缘条件下, 加强 SAR 图像边缘区域与高  $C_I$  值局部邻域的扩散强度. 于是本文提出将 MCM 耦合入 (1) 式所示的传统各向异性扩散方程, 形成如 (8) 式所示的各向异性扩散新方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(\mathbf{n}, t)}{\partial t} &= \operatorname{div}[\mu(\mathbf{n}, t)\nabla I(\mathbf{n}, t)] \\ &\quad + \beta(\mathbf{n}, t)\operatorname{div} \left( \frac{\nabla I(\mathbf{n}, t)}{|\nabla I(\mathbf{n}, t)|} \right) \\ &\quad \times |\nabla I(\mathbf{n}, t)|, \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\beta(\mathbf{n}, t)$  是耦合函数, 用于控制 MCM 在整个扩散方程中的扩散强度. 为避免手动设置  $\beta(\mathbf{n}, t)$  给抑斑性能带来不利影响, 本文提出了一种自适应于  $C_I$  参量的  $\beta(\mathbf{n}, t)$  设置方法.

2.2 节的分析指出, 对高  $C_I$  值的边缘区域与同质区局部邻域, SRAD 与 DPAD 存在难以抑制边缘区域相干斑与同质区块效应现象的问题, 但在低  $C_I$  值区域则表现出了良好的抑斑性能, 因此,  $\beta(\mathbf{n}, t)$  只需控制 MCM 加强对高  $C_I$  值区域的扩散强度. 基于这个思路, 本文提出了一种自适应于  $C_I$  的  $\beta(\mathbf{n}, t)$  设置方法:

$$\beta(\mathbf{n}, t) = \exp(-\mu(\mathbf{n}, t)). \quad (9)$$

由 (9) 式易知: 当扩散处于高  $C_I$  值的局部邻域或边缘区域时, 由于  $\mu(\mathbf{n}, t)$  趋近于 0,  $\beta(\mathbf{n}, t)$  会趋近于最大值 1; 而当扩散处于低  $C_I$  值区域时, 由于  $\mu(\mathbf{n}, t)$  远大于 1, 耦合函数  $\beta(\mathbf{n}, t)$  会趋近于最小值 0. 可见, 当传统各向异性扩散方程在高  $C_I$  值局部邻域或边缘区域趋向于停止扩散滤波时, 本文提出

的各向异性扩散新方程, 由于MCM的引入, 会继续沿边缘方向扩散滤波. 因此, 耦合MCM的扩散新方程能在保护边缘的同时, 克服传统各向异性扩散方程不能有效抑制边缘区域相干斑的不足, 同时可缓解同质区块效应现象.

### 3.2 构建带方向约束的新扩散函数

2.2节的分析指出, SRAD与DPAD利用Lee滤波与Kuan滤波系数来估计扩散函数 $\mu$ , 会由于 $\mu$ 呈现非均衡的陡峭衰减分布, 而导致同质区块效应现象; 同时, 由于 $\mu$ 是没有方向性的静态自适应参量, 不能很好地匹配SAR图像局部几何特征, 因此, 容易导致边缘扭曲变形. 为此, 本文提出利用改进Frost滤波与局部方向比率来联合估计带方向约束的新扩散函数, 以有效改善采用传统方法估计扩散函数 $\mu$ 而导致的上述不足.

#### 3.2.1 改进的Frost滤波

文献[21]指出Lee滤波与Frost滤波均可用于估计扩散函数 $\mu$ . 利用传统Frost滤波系数估计扩散函数 $\mu$ 可表示为[21]

$$\mu_{\text{Frost}}(\mathbf{n}, t) = \exp(-\alpha(\mathbf{n}, t)C_I(\mathbf{n}, t)), \quad (10)$$

其中,  $\alpha(\mathbf{n}, t)$ 为调节衰减速度的固定常数,  $C_I(\mathbf{n}, t)$ 为SAR图像 $I$ 的ICV.

然而, 传统Frost滤波系数直接用于估计扩散函数 $\mu$ 既有好处也有明显弊端. 图2(a)展示了 $\alpha(\mathbf{n}, t) = 2$ 的传统Frost滤波系数估计的扩散函数 $\mu$ 的波形图. 将图2(a)与图1对比容易发现, 传统Frost滤波系数估计的扩散函数 $\mu$ , 其值仅随 $C_I$ 值变化在(0, 1]区间呈现连续且光滑的衰减, 而 $\mu$ 这种连续光滑的衰减分布特点, 将有利于消除同质区各邻域之间由于相干斑随机起伏而产生扩散强度的巨大反差, 并促进迭代扩散滤波过程对块效应现象的抑制. 但图2(a)所展示的扩散函数 $\mu$ 的波形也存在两个明显不足. 其一, 随着 $C_I$ 值从0开始增大,  $\mu$ 的衰减虽然足够连续光滑但下降速度缓慢, 从而导致扩散滤波过程对边缘的敏感度下降, 并容易引起边缘细节损失. 其二,  $\mu$ 的衰减与 $C_w$ 无关, 而这容易在扩散迭代滤波的中后期, 造成大量边缘细节被持续平滑. 在一般情况下, 随着扩散迭代滤波的进行, SAR图像大部分相干斑被反复平滑,  $C_w$ 值会迅速减小, 此时, 常常需要扩散函数 $\mu$ 随 $C_w$ 值减小而整体降低, 以避免边缘等细节被过度平滑. 显然, 传统Frost滤波系数不宜直接用于估计扩散

函数, 需进行改良, 即加快扩散函数 $\mu$ 随 $C_I$ 值增大的衰减速度, 同时建立 $\mu$ 随 $C_w$ 值减小而降低的有效关联.

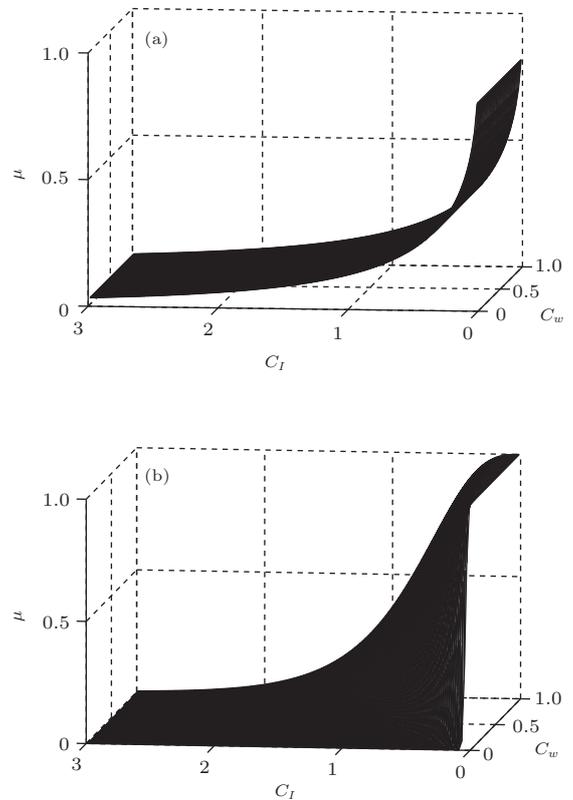


图2 Frost滤波系数估计的 $\mu$ 波形图 (a)传统Frost滤波系数( $\alpha(\mathbf{n}, t) = 2$ )估计的 $\mu$ 波形图; (b)改进Frost滤波系数估计的 $\mu$ 波形图

为此, 本文提出了一种改进的Frost滤波, 其主要改进是利用Kuan滤波系数来估计 $\alpha(\mathbf{n}, t)$ , 即令 $\alpha(\mathbf{n}, t) = (1 + 1/C_w^2(\mathbf{n}, t))/(1 + 1/C_I^2(\mathbf{n}, t))$ , 则由(10)式容易得出由改进Frost滤波估计扩散函数 $\mu$ 的表达式:

$$\mu_{\text{iFrost}}(\mathbf{n}, t) = \exp\left(-\frac{(1 + 1/C_w^2(\mathbf{n}, t))C_I(\mathbf{n}, t)}{1 + 1/C_I^2(\mathbf{n}, t)}\right). \quad (11)$$

图2(b)展示的由改进Frost滤波系数估计的扩散函数 $\mu$ 波形, 不仅具有图2(a)波形所呈现的连续光滑的衰减分布特点, 而且随 $C_I$ 值增大时的衰减速度较图2(a)明显加快, 同时, 建立了 $\mu$ 随 $C_w$ 值减小而降低的直接关联.

#### 3.2.2 基于三矩形平行窗的局部方向比率

下面, 先以图3为例, 简单分析当待扩散像素处于边缘区域的不同位置时, 怎样扩散才能既防止边缘细节损失又能最大限度地抑制相干斑. 图3是一幅具有A与B两个同质区及一个垂直边缘的

仿真SAR图像,其阶跃型边缘的灰度值与A区域像素一致,而在a—e五个圆圈所表示的4-邻域像素结构中,a像素为待扩散像素.4-邻域像素结构在SAR图像边缘区域附近存在三种可能的位置分布,分别如图3(a)—(c)所示.在保护边缘的前提下,对图3中的像素a进行扩散滤波最理想的情况是:图3(a)中沿b—d像素方向的扩散系数较大,而沿e像素方向的扩散系数较小;图3(b)中沿b—e像素方向的扩散系数均较大;图3(c)中沿b,d,e像素方向的扩散系数较大,而沿c像素方向的扩散系数较小.但在实际扩散滤波时,由于利用矩形窗估计的b—e像素的变差系数 $C_I$ 没有任何方向性,且四个像素位置邻近,故其 $C_I$ 估计值也常常十分接近,从而无论a像素处于边缘区域的哪个位置,都容易造成沿4-邻域各个方向的扩散系数要么一样大,要么一样小.显然,在对边缘区域像素进行扩散滤波时,若沿各个方向的扩散系数都较大,则容易导致边缘的过度平滑,而沿各个方向的扩散系数都较小,则

容易造成边缘区域相干斑抑制不彻底.为此,需要对传统扩散函数施加方向约束,以使得与像素a处于相同同质区的像素方向获得较大扩散系数,而与像素a处于不同同质区的像素方向获得较小扩散系数.

Jesper等[31]提出利用带方向双矩形平行窗通过比率运算估计边缘强度映射(edge strength map, ESM),以获取SAR图像局部几何结构与方向信息,实现对乘性相干斑具有较强鲁棒性的恒虚警边缘检测.然而,文献[31]中提出的双矩形平行窗所估计的局部比率ESM,只能获得一个像素方向的ESM数值,从而造成在扩散时无法对四邻域像素分别独立地进行扩散强度约束.为此,本文提出利用如图4所示的三矩形平行窗估计局部方向比率,并由局部方向比率最终形成局部方向约束函数.下面,先给出局部方向比率的估计方法,然后分析说明该局部方向比率能匹配SAR图像的局部几何结构.

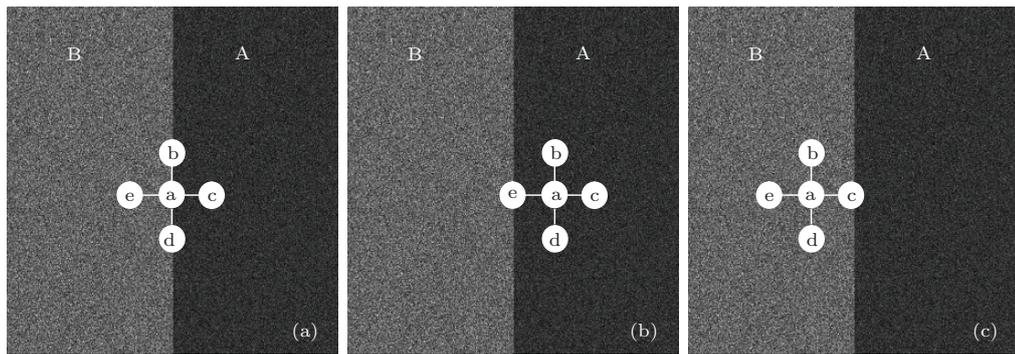


图3 各向异性扩散4-邻域像素结构在边缘区域位置关系示意图 (a)a像素位于边缘上; (b)a像素位于A同质区; (c)a像素位于B同质区

利用图4所示的三矩形平行窗估计中心像素a沿b—e四个像素方向的局部方向比率的步骤如下:先分别估计图4中 $A_1—C_2$ 六个矩形窗内像素的局部均值(假设 $\bar{A}_1—\bar{C}_2$ 分别表示 $A_1—C_2$ 矩形窗的局部均值估计),然后利用(12)式估计图4中的a像素沿b—e四个像素方向的局部方向比率.

$$\begin{aligned}
 ESM_{ab} &= \frac{1}{\Sigma} \min \left( \frac{\bar{A}_2}{\bar{B}_2}, \frac{\bar{B}_2}{\bar{A}_2} \right), \\
 ESM_{ac} &= \frac{1}{\Sigma} \min \left( \frac{\bar{A}_1}{\bar{C}_1}, \frac{\bar{C}_1}{\bar{A}_1} \right), \\
 ESM_{ad} &= \frac{1}{\Sigma} \min \left( \frac{\bar{A}_2}{\bar{C}_2}, \frac{\bar{C}_2}{\bar{A}_2} \right), \\
 ESM_{ae} &= \frac{1}{\Sigma} \min \left( \frac{\bar{A}_1}{\bar{B}_1}, \frac{\bar{B}_1}{\bar{A}_1} \right), \quad (12)
 \end{aligned}$$

其中, $ESM_{ab}—ESM_{ae}$ 分别表示中心像素a沿b—e四个像素方向的局部方向比率, $\Sigma$ 为归一化参量,

可用公式表示为

$$\begin{aligned}
 \Sigma &= \min \left( \frac{\bar{A}_2}{\bar{B}_2}, \frac{\bar{B}_2}{\bar{A}_2} \right) + \min \left( \frac{\bar{A}_1}{\bar{C}_1}, \frac{\bar{C}_1}{\bar{A}_1} \right) \\
 &+ \min \left( \frac{\bar{A}_2}{\bar{C}_2}, \frac{\bar{C}_2}{\bar{A}_2} \right) + \min \left( \frac{\bar{A}_1}{\bar{B}_1}, \frac{\bar{B}_1}{\bar{A}_1} \right). \quad (13)
 \end{aligned}$$

可见,与传统比率ESM估计方法a像素只对应一个ESM值不同,由(12)式估计的局部方向比率,可获得a像素沿4个不同像素方向的比率ESM值.

下面,再以图3(a)为例,简要说明上述局部方向比率如何匹配SAR图像的局部几何结构.若用图4所示的水平与垂直两个方向的三矩形平行窗分别估计图3(a)中a像素的局部方向比率,那么显然可以得到 $ESM_{ab}—ESM_{ad}$ 值较大,而 $ESM_{ae}$ 值较小的结论.若将局部方向比 $ESM_{ab}—ESM_{ae}$ 直接与各方向对应像素原有的扩散函数直接相乘,那

么显然可以实现: b—d 像素扩散系数较大而 e 像素扩散系数较小的最优化扩散系数配置. 从上述示例可以看出, 用图 4 所示的三矩形平行窗估计形成的局部方向比率, 来约束待扩散像素 a 沿 b—e 四个像素方向的扩散函数, 可实现各向异性扩散函数的方向性, 从而可有效防止传统各向异性扩散容易出现的边缘抖动变形问题.

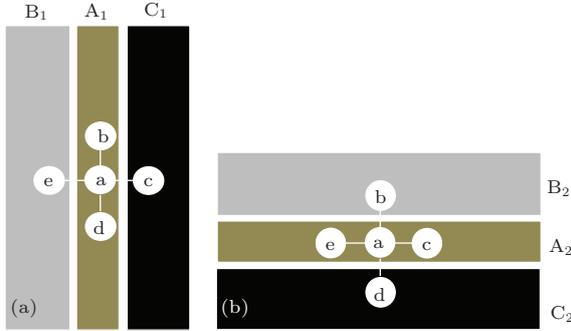


图 4 用于估计局部方向比率的三矩形平行窗示意图 (a) 垂直方向三矩形平行窗; (b) 水平方向三矩形平行窗

### 3.2.3 带方向约束的新扩散函数

根据前面两节的讨论, 本文提出将 (12) 式估计的局部方向比率作为方向约束函数  $ESM(\mathbf{n}, t)$ , 并通过同 (11) 式估计的改进 Frost 滤波系数  $\mu_{iFrost}(\mathbf{n}, t)$  直接相乘, 形成带方向约束的新扩散函数:

$$\mu(\mathbf{n}, t) = ESM(\mathbf{n}, t)\mu_{iFrost}(\mathbf{n}, t). \quad (14)$$

### 3.3 基于 MCM 与方向约束的各向异性扩散抑斑新方法

基于 (8) 式所示的耦合 MCM 的各向异性扩散新方程与 (14) 式所示的带方向约束的新扩散函数, 本文抑斑方法完整的扩散方程定义如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I(\mathbf{n}, t)}{\partial t} = & \operatorname{div}(ESM(\mathbf{n}, t)\mu_{iFrost}(\mathbf{n}, t)\nabla I(\mathbf{n}, t)) \\ & + \beta(\mathbf{n}, t)\operatorname{div}\frac{\nabla I(\mathbf{n}, t)}{|\nabla I(\mathbf{n}, t)|} \\ & \times |\nabla I(\mathbf{n}, t)|. \end{aligned} \quad (15)$$

#### 3.3.1 各向异性扩散抑斑新方法的数值计算

下面, 利用偏微分方程常用的显示求解方案来实现 (15) 式的数值计算.

为简化描述, 先将 (15) 式右边第一项简记为  $D_{(\mathbf{n})}^t$  且将  $ESM(\mathbf{n}, t)\mu_{iFrost}(\mathbf{n}, t)$  简记为  $C_{(\mathbf{n})}^t$ , 再将 (15) 式右边第二项简记为  $F_{(\mathbf{n})}^t$ , 同时, 设  $x$  与  $y$  分别

表示水平与垂直方向的距离参量,  $t$  时刻 SAR 图像 4-邻域中心像素  $I(\mathbf{n}, t) = I(x, y, t)$  为当前待扩散像素且简记为  $I_{(x,y)}^t$ , 时间参量  $t$  离散化为  $t = m\Delta t$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\Delta t$  为时间步长, 那么, 对 (15) 式左边项采用前向差分离散化可到

$$\left( I_{(x,y)}^{(m+1)\Delta t} - I_{(x,y)}^{m\Delta t} \right) / \Delta t. \quad (16)$$

由于 (15) 式右边第一项与 SRAD 的扩散方程式上完全一致, 则按文献 [21] 中 (5), (8) 式所给出的 SRAD 的数值计算方法来计算 (15) 式右边第一项, 可得

$$\begin{aligned} D_{(x,y)}^{m\Delta t} = & C_{(x+1,y)}^{m\Delta t} \left[ I_{(x+1,y)}^{m\Delta t} - I_{(x,y)}^{m\Delta t} \right] \\ & + C_{(x,y)}^{m\Delta t} \left[ I_{(x-1,y)}^{m\Delta t} - I_{(x,y)}^{m\Delta t} \right] \\ & + C_{(x,y+1)}^{m\Delta t} \left[ I_{(x,y+1)}^{m\Delta t} - I_{(x,y)}^{m\Delta t} \right] \\ & + C_{(x,y)}^{m\Delta t} \left[ I_{(x,y-1)}^{m\Delta t} - I_{(x,y)}^{m\Delta t} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

(15) 式右边第二项为经典的 MCM 扩散, 对其采用中心差分离散化可得

$$\begin{aligned} F_{(x,y)}^{m\Delta t} = & \beta_{(x,y)}^{m\Delta t} \left[ \frac{\partial^2 I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial x^2} \left( \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial y} \right)^2 \right. \\ & - 2 \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial x} \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial y} \frac{\partial^2 I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial xy} \\ & \left. + \frac{\partial^2 I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial y^2} \left( \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial x} \right)^2 \right] \\ & \times \left[ \left( \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial x} \right)^2 \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (18)$$

其中,

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial x} &= \left( I_{(x+1,y)}^{m\Delta t} - I_{(x-1,y)}^{m\Delta t} \right) / 2, \\ \frac{\partial I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial y} &= \left( I_{(x,y+1)}^{m\Delta t} - I_{(x,y-1)}^{m\Delta t} \right) / 2, \\ \frac{\partial^2 I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial x^2} &= I_{(x+1,y)}^{m\Delta t} + I_{(x-1,y)}^{m\Delta t} - 2I_{(x,y)}^{m\Delta t}, \\ \frac{\partial^2 I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial y^2} &= I_{(x,y+1)}^{m\Delta t} + I_{(x,y-1)}^{m\Delta t} - 2I_{(x,y)}^{m\Delta t}, \\ \frac{\partial^2 I_{(x,y)}^{m\Delta t}}{\partial xy} &= \left( I_{(x+1,y+1)}^{m\Delta t} + I_{(x-1,y-1)}^{m\Delta t} \right. \\ & \left. - I_{(x+1,y-1)}^{m\Delta t} - I_{(x-1,y+1)}^{m\Delta t} \right) / 4. \end{aligned}$$

利用 (16) 式—(18) 式即可获得对 (15) 式进行数值计算的迭代更新方程:

$$I_{(x,y)}^{(m+1)\Delta t} = I_{(x,y)}^{m\Delta t} + \Delta t D_{(x,y)}^{m\Delta t} + \Delta t F_{(x,y)}^{m\Delta t}. \quad (19)$$

### 3.3.2 各向异性扩散抑斑新方法的计算量分析

下面,通过对一个像素的一次扩散计算量分析,来对比说明本文扩散方法与DPAD方法的计算效率.

由于DPAD扩散方程的求解形式与本文方法求解需要用到的(16)式和(17)式完全一致,在暂不考虑DPAD方法与本文方法扩散函数计算量的条件下,由(16)式和(17)式易知,DPAD方法计算一个像素的一次扩散需8次加法与5次乘法,而由(16)式—(19)式易知,本文方法需19次加法与15次乘法.可见,在不考虑扩散函数计算量的条件下,本文方法计算量接近DPAD扩散的3倍.另外,考虑到本文方法扩散函数在传统局部统计量估计基础上又引入了基于三矩形平行窗的局部方向比率,因此,本文方法计算量大约是DPAD方法的3倍以上.本文方法虽然计算量相比DPAD扩散有了较大增长,但仍优于变换域滤波方法且相干斑抑制与边缘保护效果却有了较为明显的提升,而这一点可从本文实验部分表1和表2中各抑斑方法运算时间、等效视数与边缘保持指数等指标的对比实验得到验证.

## 4 实验结果

为评估本文方法在SAR图像相干斑抑制与边缘保护方面的性能,分别利用基于区域划分的空域滤波<sup>[9]</sup>(简记为DABRS)、非下采样Contourlet变换滤波<sup>[19]</sup>(简记为NSCT)、DPAD扩散<sup>[22]</sup>(简记为DPAD)、基于图像熵的各向异性扩散<sup>[28]</sup>(简记为IEAD)及本文方法对幅度格式的2视仿真SAR图

像与5视真实SAR图像进行抑斑处理,然后再利用Canny算子<sup>[32]</sup>对各方法抑斑图像进行边缘检测,实验结果如表1和表2及图5和图6所示.实验中使用的评价指标如下:1)等效视数(记为 $V_{ENL}$ ):用于反映抑斑方法对相干斑的抑制程度,若用 $E$ 和 $D$ 分别表示抑斑图像选定均匀场景的均值和方差,则 $V_{ENL} = E^2/D$ , $V_{ENL}$ 值越大表明抑斑效果越好.2)由原始SAR图像与其对应的抑斑图像形成的比值图像的均值与方差(记为 $V_E$ 与 $V_V$ ):分别反映了抑斑方法对原始图像辐射特性的保持程度(理想值为1)与对相干斑的抑制程度(对 $L$ 视幅度格式SAR图像其理想值为 $(4-\pi)/L$ ).3)边缘保持指数(记为 $V_{EKI}$ ):用于衡量抑斑方法对图像边缘的保持能力,若 $l$ 属于图像边缘像素位置集合 $\Omega$ , $P(l)$ 和 $Q(l)$ 分别表示在抑斑图像与原始图像中,与边缘像素位置 $l$ 垂直的两侧像素的梯度模值,则 $V_{EKI} = \sum_{l \in \Omega} P(l) / \sum_{l \in \Omega} Q(l)$ ,其理想值为1.4)算法运算时间(记为 $T$ ):用于衡量抑斑方法的计算量(CPU: 2.4 GHz, 单位: s),其值越小说明算法计算量越低,时间效率越高.实验中各算法主要参数设置如下:1) DABRS迭代3次,边缘区域滤波采用 $5 \times 5$ 的局域窗;2) DPAD与IEAD均采用 $5 \times 5$ 的局域窗,时间步长0.1,迭代扩散70次;3) NSCT抑斑方法采用3级分解,各层子带数为3, 3, 4;4) 本文方法采用 $5 \times 5$ 的局域窗,时间步长1,迭代扩散70次,三矩形平行窗中,矩形窗 $A_1$ 与 $A_2$ 的尺度为 $1 \times 5$ ,矩形窗 $B_1, B_2, C_1$ 与 $C_2$ 的尺度为 $2 \times 5$ ;5) Canny边缘检测算子的阈值为0.1;6)  $V_{ENL}$ 的计算区域为白色虚线框选定的3块同质区,而 $R_E$ 与 $R_V$ 的计算区域为整个图像; $V_{EKI}$ 计算需要用到的边缘与方向信息由文献<sup>[31]</sup>中的检测算法提取.

表1 各抑斑方法对仿真SAR图像的抑斑参数对比

输入图像抑斑方法	$V_{ENL}$			$V_E$	$V_V$	$V_{EKI}$	$T$
	1区	2区	3区				
仿真SAR图像	1.9	2.0	2.1	—	—	—	—
理想值	—	—	—	1.000	0.137	1.000	—
DABRS	2345.4	1409.4	1033.1	0.996	0.134	0.727	0.3
NSCT	205.1	128.9	107.7	1.076	0.154	0.662	112.3
DPAD	398.3	137.6	204.2	0.997	0.131	0.771	3.2
IEAD	185.7	130.0	174.6	0.994	0.134	0.605	24.1
本文方法	3327.4	2726.9	1460.4	0.999	0.137	0.794	10.5

表2 各抑斑方法对真实 SAR 图像的抑斑参数对比

输入图像抑斑方法	$V_{ENL}$			$V_E$	$V_V$	$V_{EKI}$	$T$
	1区	2区	3区				
真实 SAR 图像	5.5	4.7	5.4	—	—	—	—
理想值	—	—	—	1.000	0.055	1.000	—
DABRS	227.1	284.1	404.9	0.996	0.053	0.835	0.5
NSCT	148.0	123.7	180.0	1.026	0.054	0.780	149.5
DPAD	240.4	153.1	305.7	0.994	0.045	0.842	4.4
IEAD	164.4	158.1	297.3	0.991	0.055	0.652	35.3
本文方法	299.9	349.9	595.7	0.998	0.055	0.876	15.7

从表1与表2所示的参数对比实验结果可以看出: 与其他抑斑方法相比, 本文方法对于仿真 SAR 图像与真实 SAR 图像, 无论是在表征相干斑抑制能力的  $V_{ENL}$  与  $V_V$  指标上, 还是在表征边缘细节保持的  $V_E$  与  $V_{EKI}$  指标上均有更好的表现. 特别地, 与 SRAD 与 IEAD 方法相比, 本文方法不仅保持了其良好的边缘保持性能, 而且在相干斑抑制性能上还有较大提高. 然而, 从算法运算时间  $T$  参量角度衡量, 本文方法的运算时间指标虽优于 NSCT 与 IEAD, 但却明显高于 DABRS 与 DPAD 方法, 因此, 本文方法优异抑斑性能的取得是以算法计算量增大为代价的.

DABRS 抑斑图像同质区相干斑抑制比较彻底, 但边缘区域与同质区过度不平滑, 视觉效果不自然; NSCT 抑斑图像存在明显的虚假条纹; DPAD 抑斑图像边缘区域残留着大量相干斑噪声, 局部同质区的块效应现象明显; IEAD 抑斑图像整体结构保持较好, 同质区与边缘区域抑斑均衡, 但相干斑整体抑制不充分; 本文方法抑斑图像边缘区域相干斑抑制比较彻底, 同质区更平滑, 块效应现象得到更好抑制. 从图5与图6所示的抑斑图像边缘检测检测结果对比可以发现: 在本文方法抑斑图像的边缘检测图中, 边缘区域与同质区检测出的虚假边缘最少, 边缘扭曲变形少, 连续性与光滑性最好, 与 SAR 图像的真实边缘最接近.

从图5与图6所示的抑斑图像对比可以发现:

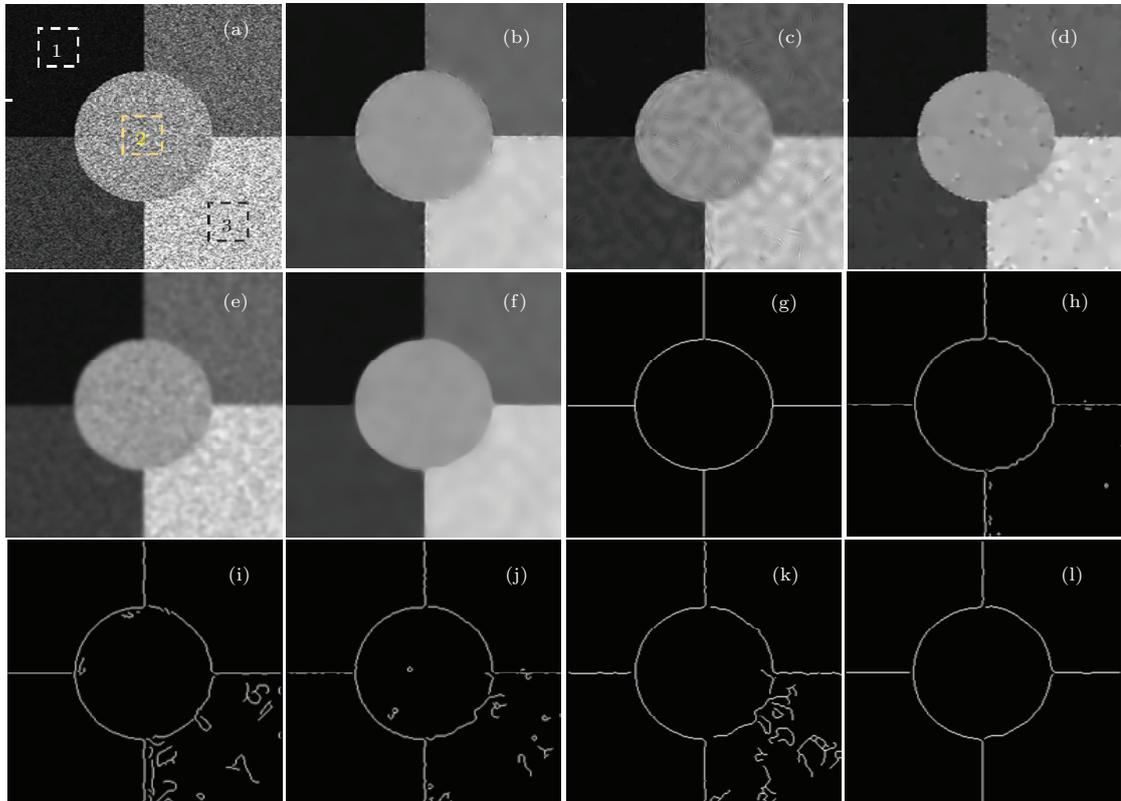


图5 (网刊色彩) 各抑斑方法对2视仿真 SAR 图像的抑斑图像及其边缘检测图 (a) 仿真 SAR 图像; (b) DABRS 抑斑图像; (c) NSCT 抑斑图像; (d) DPAD 抑斑图像; (e) IEAD 抑斑图像; (f) 本文方法抑斑图像; (g) 仿真 SAR 图像真实边缘; (h) DABRS 边缘检测图; (i) NSCT 边缘检测图; (j) DPAD 边缘检测图; (k) IEAD 边缘检测图; (l) 本文方法边缘检测图

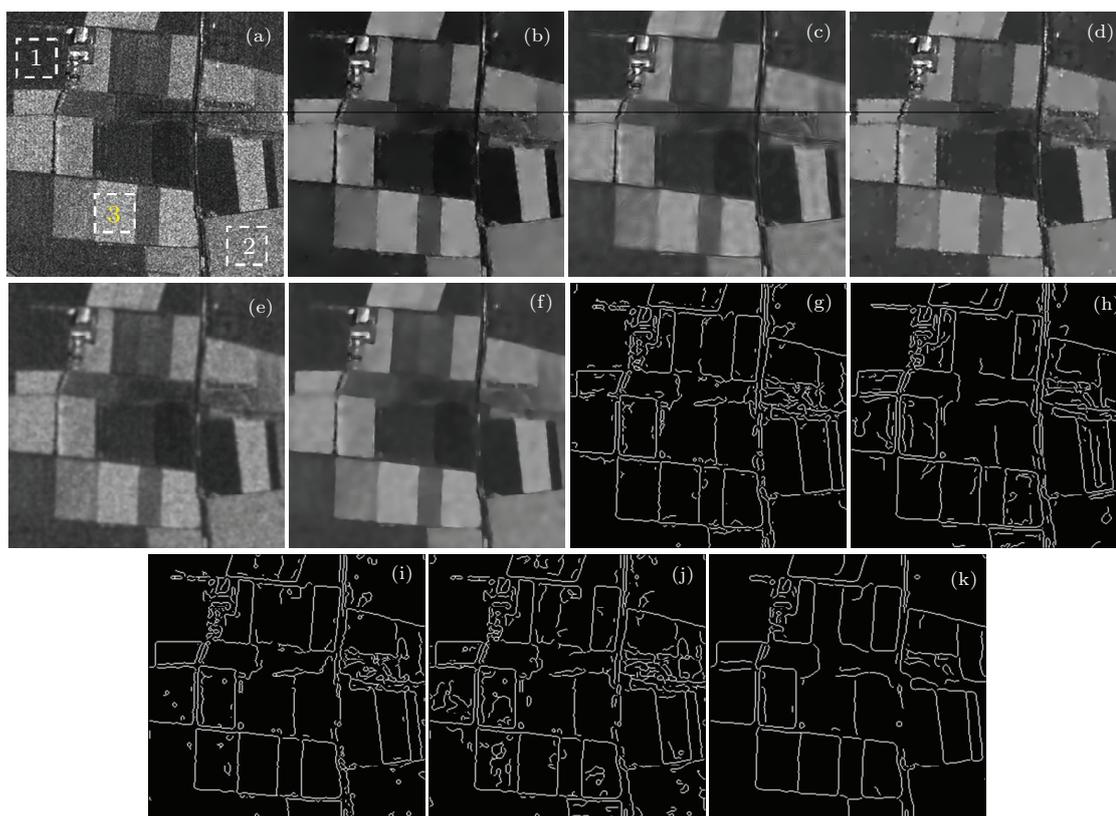


图6 各抑斑方法对5视真实SAR图像的抑斑图像及其边缘检测图 (a) 真实SAR图像; (b)DABRS抑斑图像; (c) NSCT抑斑图像; (d)DPAD抑斑图像; (e)IEAD抑斑图像; (f) 本文方法抑斑图像; (g)DABRS边缘检测图; (h)NSCT边缘检测图; (i)DPAD边缘检测图; (j)IEAD边缘检测图; (k) 本文方法边缘检测图

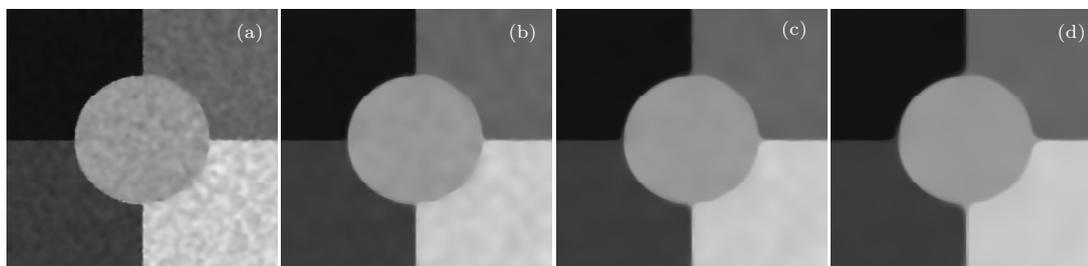


图7 本文方法对图5(a) SAR图像采用不同迭代次数抑斑处理获得的抑斑图像 (a) 20次迭代; (b)50次迭代; (c)100次迭代; (d)200次迭代

下面, 评估扩散迭代次数设置对本文方法抑斑效果产生的影响利用本文方法(局域窗为 $5 \times 5$ 与时间步长为1)分别对图5(a)仿真SAR图像进行20—200次不等的迭代扩散, 获得的抑斑图像如图7所示. 图7中, 本文方法在不同迭代次数下获得的抑斑图像均展示出了较好的抑斑效果, 特别是当迭代次数在50—100次之间时(如图7(b)与(c)), 相干斑抑制与边缘保护效果均获得最佳, 但当迭代次数偏少时(如图7(a)), 虽实时性高且边缘保持较好, 但图像仍残留较为明显的噪声, 而当迭代次数偏多时(如图7(d)), 虽然相干斑抑制更彻底, 但实时性差且会出现一定程度的边缘收缩现象.

## 5 结 论

以经典的SRAD与DPAD为代表的传统各向异性扩散抑斑方法都是边缘敏感的, 在抑制相干斑时可有效保护边缘, 然而却存在边缘区域相干斑抑制不彻底, 同质区存在块效应现象, 边缘容易出现抖动变形问题. 为此, 本文提出了一种基于MCM与方向约束的各向异性扩散抑斑新方法. 该方法提出了一种自适应耦合函数, 并将受该函数控制的MCM嵌入到传统各向异性扩散方程中, 形成了一种可有效抑制边缘区域相干斑与同质区块效应现

象的各向异性扩散新方程; 同时, 提出了一种改进的Frost滤波与基于三矩形平行窗的局部方向比率, 并利用改进Frost滤波系数与局部方向比率来联合形成新的扩散函数, 不仅进一步加强了对块效应现象的抑制, 而且还有效改善了抑斑图像的边缘扭曲变形问题. 通过抑斑对比实验, 显示了该方法能有效改善传统各向异性扩散抑斑方法存在的三点不足, 并可以获得比多种传统方法更好的相干斑抑制与边缘保护性能.

## 参考文献

- [1] Wang C, Mao Y X, Tang Z, Fang C, Yu Y J, Qi B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 332
- [2] Yuan Y, Yang S H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 287
- [3] Ji W J, Tong C M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 68
- [4] Lee J S 1980 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-2* 165
- [5] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, Chavel P 1985 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-7* 165
- [6] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, Holtzman J C 1982 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-4* 157
- [7] Touzi R 2002 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **40** 2392
- [8] Sun Z G, Han C Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3210 (in Chinese) [孙增国, 韩崇昭 2010 物理学报 **59** 3210]
- [9] Zhu L, Shui P L, Zhang W C 2012 *J. Xi'an Jiaotong Univ.* **46** 83 (in Chinese) [朱磊, 水鹏朗, 章为川 2012 西安交通大学学报 **46** 83]
- [10] Li J C, Huang S X, Peng Y H, Zhang W M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 119501 (in Chinese) [李金才, 黄思训, 彭宇行, 张卫民 2012 物理学报 **61** 119501]
- [11] Li J C, Huang B, Peng Y H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 189501 (in Chinese) [李金才, 黄斌, 彭宇行 2012 物理学报 **61** 189501]
- [12] Zhu L, Shui P L, Zhang W C 2014 *J. Electron. Inf. Tech.* **36** 220 (in Chinese) [朱磊, 水鹏朗, 章为川 2014 电子与信息学报 **36** 220]
- [13] Xie H, Pierce L E, Ulaby F T 2002 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **40** 2196
- [14] Achim A, Tsakalides P, Bezerianos A 2003 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **41** 1773
- [15] Argenti F, Bianchi T, Alparone L 2006 *IEEE Trans. Image Process* **15** 3385
- [16] Bhuiyan M, Ahmad M, Swamy M 2007 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **17** 500
- [17] Bianchi T, Argenti F, Alparone L 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **46** 2728
- [18] Argenti F, Bianchi T, Lapini A, Alparone L 2012 *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* **9** 13
- [19] Chang X, Jiao L C, Liu F, Sha Y H 2010 *Acta Electron. Sin.* **38** 1 (in Chinese) [常霞, 焦李成, 刘芳, 沙宇恒 2010 电子学报 **38** 1]
- [20] Jia J, Chen L 2011 *J. Electron. Inf. Tech.* **33** 1088 (in Chinese) [贾建, 陈莉 2011 电子与信息学报 **33** 1088]
- [21] Yu Y J, Acton S T 2002 *IEEE Trans. Image Process.* **11** 1260
- [22] Aja-Fernandez S, Alberola-Lopez C 2006 *IEEE Trans. Image Process* **15** 2694
- [23] Krissian K, Westin C F, Kikinis R, Vosburgh K G 2007 *IEEE Trans. Image Process* **16** 1412
- [24] Wei H J, Xie H Y, Zhu J B 2005 *Syst. Eng. Electr.* **27** 619 (in Chinese) [韦海军, 谢华英, 朱炬波 2005 系统工程与电子技术 **27** 619]
- [25] Liu G J, Zeng X P, Tian F C, Li Z Z, Chaibou K 2009 *Signal Process* **89** 2233
- [26] Yu J H, Tan J L, Wang Y Y 2010 *Pattern Recogn.* **43** 3083
- [27] Zhang Q, Shen M F, Chang C Q 2011 *Syst. Eng. Electr.* **33** 1420 (in Chinese) [张琼, 沈民奋, 常春起 2011 系统工程与电子技术 **33** 1420]
- [28] Li J C, Ma Z H, Peng Y H, Huang B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 099501 (in Chinese) [李金才, 马自辉, 彭宇行, 黄斌 2013 物理学报 **62** 099501]
- [29] Perona P, Malik J 1990 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* **12** 629
- [30] Alvarez L, Lions P L, Morel J M 1992 *SIAM J. Numer. Anal.* **29** 845
- [31] Jesper S, Henning S Allan A 2003 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **41** 20
- [32] Canny J 1986 *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI-8* 679

# An anisotropic diffusion filtering method for speckle reduction of synthetic aperture radar images\*

Zhu Lei<sup>1)2)†</sup> Han Tian-Qi<sup>1)</sup> Shui Peng-Lang<sup>2)</sup> Wei Jian-Hua<sup>1)</sup> Gu Mei-Hua<sup>1)</sup>

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

2) (*National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

( Received 11 February 2014; revised manuscript received 11 May 2014 )

## Abstract

An anisotropic diffusion filtering method is proposed to reduce multiplicative speckle noise in synthetic aperture radar images. A new anisotropic diffusion equation, which can effectively smooth speckles near the edges and reduce blocking artifacts in homogeneous regions, is established by embedding the mean curvature motion controlled by an adaptive coupling function into a traditional speckle reducing anisotropic diffusion equation. Moreover, a new direction-constrained diffusion function formed by combining the local directional ratios with the improved Frost filtering is introduced into the new anisotropic diffusion equation, so that it can further reduce blocking artifacts and obviously improve the edge distortion problem in the despeckled synthetic aperture radar images. Experimental results show that the proposed method can obviously reduce blocking artifacts, sufficiently smooth speckle noise in homogeneous regions and near the edges while preserving edges, and effectively improve the edge distortion problem. Visual quality and performance indexes of the despeckled images show that the proposed method outperforms several despeckling methods.

**Keywords:** speckle reduction, anisotropic diffusion, direction constraint, mean curvature motion

**PACS:** 95.75.Mn, 42.30.Va, 42.30.Sy

**DOI:** [10.7498/aps.63.179502](https://doi.org/10.7498/aps.63.179502)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 61271295), and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province Department of Education (Grand No. 14JK1303).

† Corresponding author. E-mail: [zhulei791014@163.com](mailto:zhulei791014@163.com)