

# 基于背景匀质性双边滤波的SAR图像斑点噪声抑制算法

艾加秋<sup>1,2</sup>, 王非凡<sup>1</sup>, 杨兴明<sup>1</sup>, 史骏<sup>3</sup>, 刘凡<sup>4</sup>

1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230009;

2. 合肥工业大学 智能互联系统安徽省实验室, 合肥 230009;

3. 合肥工业大学 软件学院, 合肥 230009;

4. 中国航天系统科学与工程研究院 中国航天科技集团12院, 北京 100048

**摘要:** 针对双边滤波在抑制SAR图像相干斑噪声的不足, 本文提出了一种基于背景匀质性的改进双边滤波算法BH-IBF (Improved Bilateral Filtering algorithm based on Background Homogeneity), 并将其应用于SAR图像斑点噪声抑制。BH-IBF以传统双边滤波作为基本框架, 并利用了双边滤波器中的双边核函数描述像素灰度值之间的相似性以及相邻像素间的几何空间信息。然而, 传统双边滤波存在不能有效地滤除强斑点噪声的缺点, 并且SAR图像又因成像原理的缺陷导致强斑点噪声普遍存在。针对这些问题, BH-IBF设计了一种根据背景窗口的匀质性进行自适应样本截断的方法, 并根据描述背景匀质性的指标自动获取样本截断的截断深度。此外, 本文将自适应滤波窗口尺寸以及权重核修改的方案应用到BH-IBF中, 以增强匀质区域的斑点噪声平滑强度以及异质区域的边缘信息效果。最后, 使用自适应截断后的样本作为已调整权重核的双边滤波器的输入。实验数据显示, BH-IBF能够在有效保留SAR图像纹理信息的同时, 获取较好的斑点噪声平滑性能。

**关键词:** SAR图像斑点噪声抑制, 改进双边滤波算法, 自适应样本截断, 背景匀质性, 自适应滤波窗口尺寸

**引用格式:** 艾加秋, 王非凡, 杨兴明, 史骏, 刘凡. 2021. 基于背景匀质性双边滤波的SAR图像斑点噪声抑制算法. 遥感学报, 25(5): 1071-1084

Ai J Q, Wang F F, Yang X M, Shi J and Liu F. 2021. SAR image speckle noise suppression algorithm based on background homogeneity and bilateral filtering. National Remote Sensing Bulletin, 25(5): 1071-1084 [DOI: 10.11834/jrs.20210212]

## 1 引言

合成孔径雷达SAR (Synthetic Aperture Radar) 作为利用合成孔径原理实现微波成像的相干微波系统, 因其具备高分辨、大幅宽、全天时等特点, 常被用于遥感领域的探测 (刘高峰, 2014)。但由于其相干成像原理的根本性问题, 大量的相干斑噪声出现在SAR图像中, 而相干斑噪声的存在严重影响SAR图像数据质量并对后续的解译以及分类操作造成了很大程度上的难度。因而, 对SAR图像进行相干斑噪声的滤除是进行后续操作的关键步骤。而进行图像滤波的过程既是尽量滤除图像因噪声信号造成的图像凸起, 使处理所得的图

像观感上更加平滑的过程; 也是保持目标图像中的边缘部分, 凸显图像纹理的过程。因而, 如何较好的进行两者之间的均衡处理, 也是近些年SAR图像处理的研究热点。

早期常见的SAR图像相干斑抑制算法有Lee滤波算法 (Lee, 1981)、Frost滤波算法 (Frost等, 1982)、Gamma MAP滤波算法 (Lopes等, 1990)等, 这类滤波算法虽然能够较好地抑制斑点噪声以及平滑图像, 但会引入通道串扰丢失信息, 从而导致边缘纹理区域出现细节模糊的现象 (肖世忱等, 2015)。Refined Lee (Lee等, 1999)、基于区域增长技术的IDAN滤波 (Vasile等, 2006)以

收稿日期: 2020-06-18; 预印本: 2020-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号:62071164, 61701157); 中国博士后科学基金(编号:2020T130165, 2018M640581); 中央高校基本科研业务费专项(编号:JZ2020HGTB0012); 安徽省自然科学基金(编号:1808085QF206)

第一作者简介: 艾加秋, 1985年生, 男, 副教授, 研究方向为人工智能与雷达图像处理。E-mail: aijiaqiu@aliyun.com

及改进 Sigma 滤波 (Lee 等, 2009) 等空域滤波算法虽然一定程度上弥补了上述算法的缺陷, 但这些算法对于 SAR 图像中的结构信息应用程度较低, 尤其在异质区域结构信息缺失容易造成纹理信息的大量丢失。针对纹理信息丢失的问题, 研究者提出了诸多新型算法及其相应改进算法。如基于各向异性扩散的斑点滤除算法 SRAD 算法 (Yu 和 Acton, 2002)、基于非局部均值的 NLM 算法 (Buades 等, 2008; 赵忠民等, 2013; 刘留等, 2017)、三维块匹配算法 BM3D 算法 (Dabov 等, 2007) 以及传统双边滤波算法 (Tomasi 和 Manduchi, 1998; Alonso-González 等, 2013)。其中, SRAD 算法没有充分利用边缘特征, 从而导致图像过于平滑以及图像中包含虚假边缘。NLM 算法需要逐个像素计算像素块相似性, 这也造成该方法计算量过大, 难以满足实时处理的要求。BM3D 算法因其设计目的是恢复加性高斯噪声干扰的图像, 因而不能直接应用到 SAR 相干斑滤除。而双边滤波算法则因其核函数内的参数难以选取合适的数值, 从而影响滤波效果。但不可否认的是, 这些算法的设计思路为后续的算法改进提供了基本的方向以及框架。如, 杨学志等 (2015) 基于同质像素预先选择的方法提出了一种改进非局部均值滤波。Sica 等 (2018) 基于 BM3D 应用到 SAR 图像的理论 (Parrilli 等, 2012), 提出了一种用于 SAR 图像相位恢复的非局部滤波器。行晓黎 (2018) 根据图像块中隐含的结构信息, 将变异系数以及极化 SAR 图像的极化特征引入到非局部均值滤波算法中, 实验结果表明改进算法的滤波效果得到改善。胡晓 (2019) 针对滤波过程中容易出现的过滤波以及欠滤波状况, 采用经典 Lee 滤波算法控制 Frost 的滤波强度, 实现了不同场景下的 SAR 图像噪声抑制。刘子豪等 (2019) 基于 Canny 边缘检测算子提取图像的边缘信息, 然后利用小波变换对去除边缘的 SAR 图像进行相干斑抑制, 最后再与边缘信息相结合, 实现了平滑噪声的同时保护了图像的边缘信息。冯建德 (2019) 基于最大比值距离与边缘相似距离提出了一种改进非局部均值 SAR 图像相干斑噪声抑制算法。贾锐 (2019) 针对 PolSAR 图像在经过滤波处理后存在结构信息缺失以及极化散射特性难以保持的问题, 提出了双尺度的 SAR 图像非局部均值滤波算法, 并采用变异系数提高算法的自适应程度。

相较于其他算法, 双边滤波具有非迭代、局部以及结构简单等特性 (Zhang 和 Gunturk, 2008; Han 等, 2010), 而这也是双边滤波便于改进的基础。双边滤波器作为包含两个高斯基核函数的非线性滤波器, 既考虑到了各像素值在几何上的邻近关系, 也考虑到了各像素值在灰度值上的相似性, 从而可以很好的实现相干噪声的滤除以及边缘纹理信息的保持。针对双边滤波的优良性能, 众多相关的延伸算法层出不穷。李光廷和禹卫东 (2012) 针对双边滤波进行斑点噪声抑制时存在几何空间方差选择困难, 设计了一种基于图像的局部变差系数动态调整参数的改进双边滤波算法。D'Hondt 等 (2013) 采用黎曼距离对双边滤波中的像素空间进行度量, 从而实现极化 SAR 相干斑抑制, 但该算法存在的问题是算法假设 SAR 图像数据的统计分布是符合高斯分布。王爽等 (2014) 将根据 SAR 图像噪声模型推导出的相似性衡量指标引入到双边滤波中, 以此实现斑点噪声的抑制。Ai 等 (2019) 结合传统双边滤波算法和中值滤波器的优点, 提出一种基于截断统计特性的改进双边滤波算法。刘晓阳等 (2017) 针对传统双边滤波算法难以有效保护图像细节的缺点及 Retinex 算法在光照剧烈变化时易出现光晕伪影现象的缺点, 提出了一种基于双边滤波和多尺度 Retinex 算法的图像增强方法。喻恒等 (2019) 提出了图像梯度引导的窗口自适应双边滤波算法, 该算法通过使用边缘梯度确定图像中像素的边缘方向, 以此实现沿边缘平滑噪声, 并实现的边缘信息的较好表现。张宸枫 (2019) 将小波自适应阈值函数与双边滤波相互结合, 改善滤波效果并且提升了图像质量。在针对 SAR 图像中相干斑噪声滤除算法的不断发展中, 不断有新颖的研究方向和算法出现, 但新增的滤波算法不可避免仍有部分问题亟待解决。牛林 (2019) 针对舰船 SAR 图像中受噪声影响的尾迹信号检测, 并针对小波阈值滤波算法存在的问题, 提出了基于双边滤波与小波多模阈值的 SAR 图像去噪算法。

本文提出了基于传统双边滤波算法框架, 并在其基础上进行算法改进。针对图像匀质性所展示的图像光滑性与异质性的特点, 对双边滤波算法进行改进处理, 其中, 采用变异系数作为描述 SAR 图像匀质性的指标。本文提出的改进双边滤波算法所涉及的创新点有:

(1) 在以变异系数作为描述图像局部区域匀质性的指标的基础上, 将该指标应用到双边滤波算法权重核的扩展与调整;

(2) 根据变异系数所表征的匀质性关系, 当背景区域样本像素值较集中时, 以适当的策略进行背景窗口大小的扩张;

(3) 根据截断处理对背景区域所对应的变异系数的影响, 反向推导变异系数与截断深度之间的函数关系, 并以此实现截断深度的自适应处理, 从而更好的实现图像滤波。

本文提出的 BH-IBF 与传统的滤波算法相比拥有更加优良的效果, 不仅能有效地抑制匀质区域的相干斑噪声, 还能够较好对异质区域的边缘纹理信息进行保护, 即该算法能够更好的保障 SAR 数据的后续处理以及应用。

## 2 研究方法或原理

### 2.1 双边滤波基本原理

双边滤波算法作为一种同时考虑到中心像元与周围像元在几何空间上的邻近关系以及在灰度空间上像素灰度值之间的差异性的非线性滤波器, 实际上是根据两个高斯基函数作为描述图像中空间邻近度和灰度相似度的载体。其数学模型可用式 (1) 表示:

$$\hat{I}(y) = \frac{1}{W} \sum_{x \in \Omega} I(x) W_d(x, y) W_r(I(x), I(y)) \quad (1)$$

式中,  $\Omega$  为滤波过程中邻域窗口中的像素集合,  $y$  为集合  $\Omega$  中的目标像元位置,  $I(x)$  是集合  $\Omega$  中对应各个像素值,  $I(y)$  是经过滤波处理后获取对应于目标像元位置的像素值, 而  $W_d(*)$  和  $W_r(*)$  对应的是双边滤波中用于衡量像素几何空间以及灰度空间中样本距离的参数,  $W$  则是用于对两种度量参数进行归一化操作。上述参数相应的数学公式如式 (2) 所示:

$$\begin{cases} W_d = \exp(-\|x - y\|^2 / 2\sigma_d^2) \\ W_r = \exp(-\|I(x) - I(y)\|^2 / 2\sigma_r^2) \\ W = \sum_{x \in \Omega} W_d \cdot W_r \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_d$ 、 $\sigma_r$  表征的分别是图像在几何空间以及灰度空间下的方差系数。对空间相似性来说, 由式 (2) 可知,  $\sigma_d$  越大, 则  $W_d(*)$  随着空间距离增加而衰减的速度越慢, 相反则越快。换言之, 若

$\sigma_d$  较大, 则邻域像素权值较大容易带来细节的模糊; 若  $\sigma_d$  较小, 则邻域像素的权值较小使得匀质区域的去噪能力又太差。

传统双边滤波器要求对目标像元贡献大的邻域像元既要在空间距离上靠近还要在灰度值上接近中心像元。当目标像元位于匀质区域时, 邻域像元同目标像元的灰度值差异小, 灰度值相似性高, 这时权重核发挥的作用是平滑图像。当目标像元位于边缘处时, 因边缘两侧的像元在灰度值上往往差异较大, 这会使边缘同侧的像元具有很大的权重, 而异侧权重很小, 此时权重核的主要作用是保留边缘信息。正是由于双边滤波考虑到了像元灰度值间的相似性, 使滤波模板在边缘处出现陡峭变化而使图像的边缘信息得到很好的保留。而这也是目前双边滤波仍然能够在 SAR 图像去噪领域占据一席之地原因。

### 2.2 BH-IBF 算法的改进步骤

对于双边滤波算法 BF (Bilateral Filtering) 而言, 尽管该算法能够有效滤除高斯噪声, 但其滤除脉冲噪声的效果较差, 特别是强斑点噪声。而对中心含有脉冲噪声的图像进行 BF 滤波时, 具体的权重情况如图 1 所示。

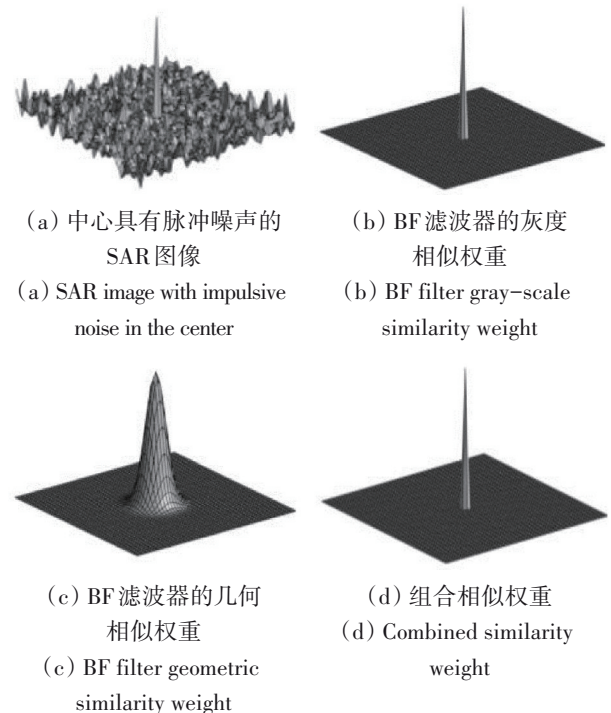


图 1 脉冲噪声的滤波权重

Fig.1 Impulse noise filter weight

然而SAR图像中的斑点噪声往往以脉冲噪声形式存在,且受相干斑噪声的影响,SAR图像中的像素值经常出现剧烈变化的现象,而这将很大可能导致SAR图像中斑点噪声被双边滤波器误认为是边缘特征而得到保留。虽然实际的边缘特征区域得到了较好保持,但无法达到滤除斑点噪声、平滑图像的目的。因而参考Sigma滤波器的方法,本文将截断操作引入滤波算法中。

BF滤波器权重核中采用单一像素灰度值描述灰度空间的相似性,但单一像素灰度值不能有效

反映图像包含的结构信息,从而造成图像结构信息丢失。针对该问题,本文将能够描述图像匀质性的指标应用到滤波器的权重核中,以此将图像的结构信息应用到实际滤波中。

本文针对传统双边滤波算法在SAR图像降噪领域存在的不足,设计了一种自适应于背景窗口匀质性动态调节相关参数的策略。算法的改进措施是调整权重核、自适应截断深度的取值以及自适应背景窗口的半宽等方面。具体的流程图如图2所示。

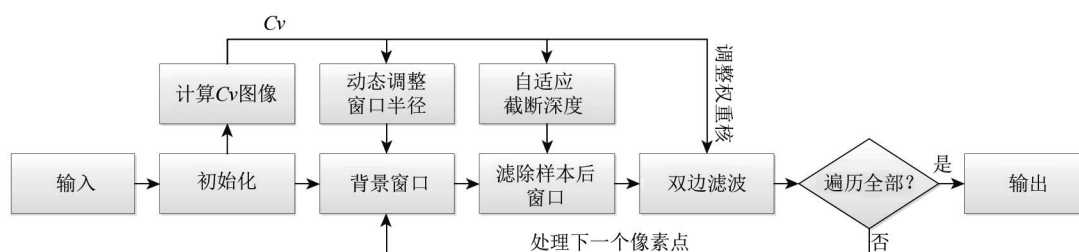


图2 改进算法BH-IBF的整体流程图

Fig.2 Overall flowchart of improved algorithm BH-IBF

### 2.2.1 调整权重核

考虑到SAR图像中匀质性一定程度上反映着图像的结构信息,以及噪声对图像中结构信息的影响较小等因素。因而在滤波处理前,根据图像局部区域像素来获取可以表征图像匀质性的指标,而本文采用的参数指标是由Lopes提出的能够描述图像匀质性的参数——变异系数 $C_v$ ,初始的局部窗口大小为 $7 \times 7$ 。其中,变异系数的表达式如式(3):

$$C_v = \frac{\sqrt{\text{var}(I(x))}}{E(I(x))} \quad (3)$$

根据式(3)预先计算待滤波图像的变异系数,从而获取 $C_v$ 图像,而考虑到不同图像获取 $C_v$ 图像的变化域差异较大,因而对其进行预处理得到相应的灰度图,该灰度图同样能够表征图像背景区域匀质性的变化状况。调整权重核的具体方法为:在实际进行滤波时,将 $C_v$ 图像中邻近像素与目标像素所对应的数值之间的差异添加到权重核中。此时对应的数学模型如式(4):

$$\begin{cases} \hat{I}(y) = \frac{1}{W} \sum_{x \in \Omega} I(x) \cdot W_d \cdot W_r \cdot W_{Cv} \\ W_{Cv} = \exp(-\|C_v^x - C_v^y\|^2 / 2\sigma_{Cv}^2) \\ W = \sum_{x \in \Omega} W_d \cdot W_r \cdot W_{Cv} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $C_v^x$ 、 $C_v^y$ 为邻近像素点 $x$ 以及目标像素点 $y$ 对应 $C_v$ 图像中数值,而权重核 $W_{Cv}$ 的变化标准差 $\sigma_{Cv}$ 的取值则与双边滤波中像素域权重和的变化标准差 $\sigma_d$ 保持一致。

### 2.2.2 截断深度的动态调整

参考Sigma滤波算法,本文通过设置自适应截断阈值实现样本滤除,并且当背景窗口中各个样本像素满足式(5)的条件时,对其进行滤除操作。

$$I(x) \in \psi, |I(x) - \mu_w| > \gamma \cdot \sigma_w \quad (5)$$

式中, $\sigma_w$ 、 $\mu_w$ 为对背景窗口样本集合 $\psi$ 求取相应的标准差以及均值,而 $\gamma$ 对应截断深度。在实际滤波操作中,当背景窗口区域中样本像素越匀质,对应图像越光滑时,此时可以适当增加滤除样本的强度,即保持上式中 $\gamma$ 值越小,条件成立越苛刻;而当背景窗口中样本包含较多边缘信息时,图像属于非匀质区域,此时将尽可能保留样本,即适量增大 $\gamma$ 值,放松上式成立的条件。为了更好的确定 $\gamma$ 值,需要定量评定图像中背景区域的匀质性。

为了根据变异系数描述图像的匀质性状况,参考Lopes等(1990)对图像中的各类匀质性进行

分类的方法, 设置  $C_1$ 、 $C_2$  作为分类的阈值:

(1)  $C_v < C_1$  时, 属于匀质区域, 是需要完全平滑的区域, 此时选取  $\gamma = 1$  作为截断深度;

(2)  $C_1 \leq C_v \leq C_2$  时, 为含有一定纹理信息的区域, 此时采用自适应截断, 而自适应的截断取值由后续推导所示;

(3)  $C_v > C_2$  时, 属于异质区域, 大多为图像的细节, 是需要保留的纹理信息区域, 不进行截断操作。

对于视数为  $L$  的幅度 SAR 图像, 根据文献 (Lopes 等, 1990), 阈值  $C_1$ 、 $C_2$  设置如下:

$$\begin{cases} C_1 = \sqrt{(4/\pi - 1)/L} \\ C_2 = C_1 \cdot \sqrt{1.5 + 0.2/L} \end{cases} \quad (6)$$

而面对视数  $L$  未知的 SAR 图像, 在进行后续滤波处理时, 需要预先估计视数, 常见的估计方法是根据图像匀质区域  $I_h$  计算等效视数以此来进行视数估计 (Lee 等, 1992), 具体的公式如式 (7) 所示:

$$L' = \frac{E^2(I_h)}{\text{var}(I_h)} \quad (7)$$

而考虑到部分 SAR 图像中匀质区域分散, 因而需要对区域选择以及计算公式进行一定调整。采用从含噪 SAR 图像中截取得到包含大面积匀质区域以及小面积边缘信息的若干图像块, 其中,  $i$  对应图像块的数目  $I_h^i$ 。此时估计视数的表达式如式 (8) 所示。

$$L' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E^2(I_h^i)}{\text{var}(I_h^i)} \quad (8)$$

因预先获取的  $C_v$  图像经过处理后转换为灰度图, 因而, 相应的分类阈值  $C_i$  ( $i = 1, 2$ ) 也需要进行处理获取  $C'_i$  ( $i = 1, 2$ )。处理的措施如式 (9) 所示:

$$C'_i = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \cdot C_{\max} \quad (9)$$

式中,  $C_{\min}$ 、 $C_{\max}$  为  $C_v$  图像的两个极值。对双边截断后的样本采用参数估计的方法进行均值和方差估计, 具体的推导过程见附录。推导结果所得的统计量  $\hat{\mu}$ 、 $\hat{\sigma}$  如式 (10):

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \mu \\ \hat{\sigma} = \left( 1 - \frac{\exp(-\gamma^2/2) \cdot 2\gamma}{\sqrt{2\pi} \cdot (2\phi(\gamma) - 1)} \right) \cdot \sigma^2 \end{cases} \quad (10)$$

根据式 (10) 中所得的截断后的均值以及方

差求取变异系数可得式 (11):

$$\begin{cases} C_v^T = \frac{\hat{\sigma}}{\hat{\mu}} = \beta \cdot \frac{\sigma}{\mu} = \beta \cdot C_v \\ \beta = \sqrt{1 - \frac{\exp(-\gamma^2/2) \cdot 2\gamma}{\sqrt{2\pi} \cdot (2\phi(\gamma) - 1)}} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $C_v$ 、 $C_v^T$  分别对应截断前后的参量。而截断前后样本的均值变化不大, 但样本像素值更加集中, 方差变小, 此时变异系数变小。因而截断后图像所对应的匀质性有所提高, 相应的变异系数有所下降。而针对预期截断后的变异系数  $C_v^T$  的取值, 本文采取的策略为: 通过以目标像素对应  $C_v$  图像中的位置为中心, 获取邻近像素对应的  $C_v$  值, 然后考虑到  $C_v^T < C_v$ , 将大于目标像素相应  $C_v^s$  的  $C_v^s$  剔除, 最后根据剩余值  $C_v^s$  对应的均值来获取相应  $C_v^T$ 。如图 (3) 为实际操作的结果:

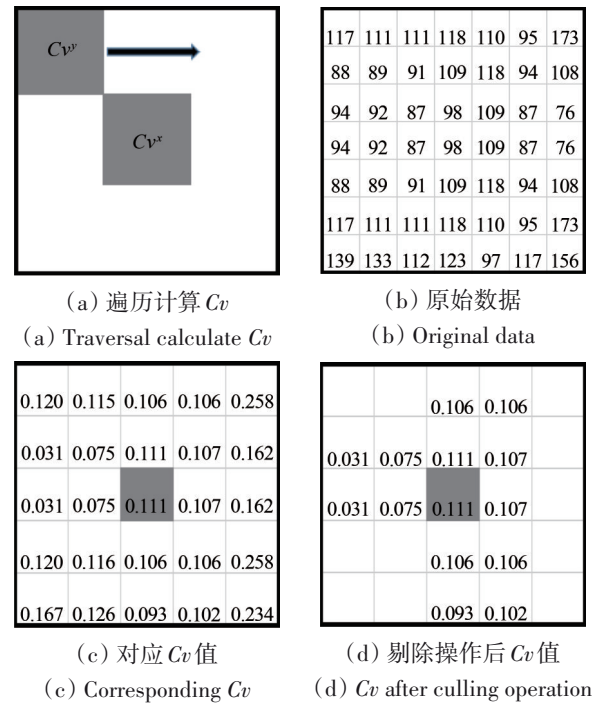


图3 获取  $C_v^T$  的具体步骤

Fig.3 Specific steps to obtain  $C_v^T$

根据式 (11) 和图3所示的获取  $C_v^T$  措施相综合, 可以进行截断深度  $\gamma$  的自动获取。另外考虑到实际公式中积分符号等导致的计算复杂性, 采用辛普生公式作为近似求解的方法 (邢诚 等, 2010; 夏军剑 等, 2014)。

### 2.2.3 动态调整窗口半宽

背景窗口大小包含着用于确定目标像素所需

的像素值, 而变异系数的大小反映着图像中像素的相似程度。当图像像素值比较集中, 实际有效的像素值就较少, 此时可以相对的增加整体像素值, 即增大背景窗口的半宽。相应的判定条件为:

$$Cv' < C_1 \quad (12)$$

当扩展后对应的变异系数  $Cv'$  满足上述条件时, 进行背景窗口的扩展。而扩展的步长为

$$r' = r + \left\lceil \Delta r_{\max} \cdot \frac{C_1 - Cv'}{C_1 - C_{\min}} \right\rceil \quad (13)$$

式中,  $\lceil * \rceil$  表示采用向上取整符号,  $\Delta r_{\max}$  作为扩展的最大值, 本文采用  $\Delta r_{\max} = 8$ 。考虑到扩展后  $r'$  可能出现背景窗口选取时超出图像边界或者背景窗口对应的判定条件不再成立。因而, 针对该状况添加修剪操作, 即逐步减小  $r'$ , 直至该状况消失。

### 3 数据结果处理与分析

#### 3.1 评价指标

针对算法的运行效率, 本文将运行时间作为一个指标。而本文中进行的所有实验均在同一台计算机上进行, 实验采用的机器配置为 Inter (R) core (TM) i7-4790 CPU @3.60GHZ、Win10 操作系统。针对定量的评估图像的滤波效果, 本文采取的指标有等效视数 ENL (Lee 等, 1992)、边缘保持系数 ESI (Zhang 等, 2009)、峰值信噪比 PSNR 以及结构相似性 SSIM (佟雨兵 等, 2006), 而定性的评估则是采用噪声信号与滤波图像之间的比值噪声图像 RNF (Radio of noise image to filtered image)。

##### 3.1.1 等效视数 (ENL)

ENL 是用于描述 SAR 图像中相干斑点噪声平滑的指标, 其数学模型与式 (7) 类似, 具体如式 (14) 所示。

$$ENL = \left( \frac{\mu(I)}{\sigma(I)} \right)^2 \quad (14)$$

式中,  $\mu(I)$ 、 $\sigma(I)$  对应 SAR 图像的均值以及标准差。等效视数 ENL 参数表征的是图像的光滑性能, 当 ENL 数值越大时, 表示该处区域越均匀, 即图像越光滑, 匀质区域的滤波性能越好。

##### 3.1.2 边缘保持系数 (ESI)

ESI 是用于描述 SAR 图像中边缘纹理信息保留

情况的指标, 其数学模型是:

$$ESI = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} |I_F^{ij+1} - I_F^{ij}| + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} |I_F^{i+1j} - I_F^{ij}|}{\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} |I^{ij+1} - I^{ij}| + \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} |I^{i+1j} - I^{ij}|} \quad (15)$$

式中,  $I$ 、 $I_F$  分别为理想图像以及滤波后图像, 而  $m$ 、 $n$  对应图像的尺寸。边缘保持系数 ESI 表征的是图像的细节信息的保持程度, ESI 越大, 对应异质区域中纹理细节保持效果越好。

##### 3.1.3 峰值信噪比 (PSNR)

PSNR 是常用的衡量信号失真的指标, 其定义为图像中最大像素值与噪声信号的比值, 对应的数学模型是:

$$\begin{cases} PSNR = 10 \lg \left( \frac{I_{\max}^2}{MSE} \right) \\ MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |I_F^{ij} - I^{ij}|^2 \end{cases} \quad (16)$$

式中,  $I_{\max}$  对应 SAR 图像最大像素值, MSE 是均方误差。当 PSNR 数值越大时, 反映滤波算法的效果越好。

##### 3.1.4 结构相似性 (SSIM)

SSIM 是用于描述滤波前后 SAR 图像之间相似性的指标 (张晶晶, 2014; 易子麟 等, 2012), 对应的 SSIM 的数学模型是:

$$SSIM = \frac{(2\mu_x \mu_y + k_1) \cdot (2\sigma_x \sigma_y + k_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + k_1) \cdot (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + k_2)} \quad (17)$$

式中,  $\mu_x$ 、 $\sigma_x$  对应理想无噪声 SAR 图像的统计量,  $\mu_y$ 、 $\sigma_y$  对应滤波后 SAR 图像的统计量, 而  $k_1$ 、 $k_2$  为常数。当 SSIM 值越大时, 反映滤波后图像与参考无噪声图像之间的结构越相似。另外, 本文则是根据上文划分的 3 类区域作为参考指标, 考虑到第一类区域中包含的结构信息较少, 因而以第 2 类以及第 3 类区域作为评价的对象。

##### 3.1.5 比值噪声图像 (RNF)

考虑到 SAR 图像中的相干斑噪声属于乘性噪声的范畴, 因而指标定义为噪声图像与滤波图像的比值图像。对于 SAR 图像而言, 图像中的相干斑噪声的分布状况遵从乘性模型如式 (18)。

$$I = X \cdot N \quad (18)$$

式中,  $I$ 、 $X$  分别对应原始含噪声图像以及真实无噪声图像, 而  $N$  对应斑点噪声。而滤波算法则是

为了去除噪声  $N$ , 以此得到趋近于真实图像  $X$  的滤波后图像。为了衡量滤波算法的优良性, 可以假设  $X = I_F$ , 以此来判断滤波算法实际滤除信息是否趋近噪声。

对于 RNF 图像而言, 更适宜于评价纹理信息丰富的图像的滤波结果。评价规则为: 当 RNF 图中残留的纹理信息与周围的纯噪声之间的变化幅度小, 且纹理边缘之间的匀质区域的滤波效果不受影响, 便可以一定程度的反映原始 SAR 图像中噪声抑制以及纹理保持的优良性。

### 3.2 实验结果与分析

本文通过传统算法作为 BH-IBF 算法滤波效果的对比目标, 采用的对照实验滤波算法有: Sigma 滤波 (Sigma)、双边滤波 BF (Bilateral Filtering)、非局部均值滤波 NLM (Non-local Mean filtering)、基于各向异性扩散的斑点滤除算法 SRAD (Speckle Reducing Anisotropic Diffusion)、增强型 Lee 滤波 En-Lee (Enhanced Lee filtering)、基于截断统计特性的改进双边滤波算法 (Truncated statistics based bilateral filter) TS-BF (Ai 等, 2019)。而上述传统算法相应的参数设置如下:

(1) 各滤波算法的初始窗口尺寸均设置为  $7 \times 7$ ;

(2) Sigma 滤波参数的取值基于高斯分布的  $2\sigma$  的概率, 即在背景窗口中保留 95.5% 的像素用于滤波操作;

(3) 对于 SRAD 滤波算法, 本文参考 Yu 和 Acton (2002) 对于该算法的参数选取方法。其中, 时间步长设置为 0.08, 比例因子设置为 3, 迭代次数设置为 5;

(4) 而 NLM 滤波算法的参数设置为: 邻域窗口半径  $d_s = 3$ , 搜索窗口半径  $D_s = 10$ , 衰减因子  $h = 10$ ;

(5) 对于传统双边滤波 BF 算法的空间方差系数  $\sigma_r$  以及灰度方差系数  $\sigma_d$  的取值, 本文参考肖世忱等人的论文设置数据为  $\sigma_r = r/2$ , 其中  $r$  为滤波过程中遍历窗口的半径, 而灰度方差系数  $\sigma_d = 30$ 。对于 TS-BF 滤波算法中方差系数的设置则是保持与论文 (Ai 等, 2019) 中一致。

而对于本文提出的改进双边滤波 BH-IBF 的参数设置如表 1 所示。

本文后续的实验滤波算法的参数设置按照

上述所示。而实验对象为仿真 SAR 图像以及真实 TerraSAR-X 数据。

表 1 BH-IBF 算法参数设置

Table 1 BH-IBF algorithm parameter settings

| BH-IBF 算法参数              | 参数设置                     |
|--------------------------|--------------------------|
| 半径扩展极值 $\Delta r_{\max}$ | 8                        |
| 空间方差系数 $\sigma_r$        | $r/2$                    |
| 灰度方差系数 $\sigma_d$        | 30                       |
| Cv 方差系数 $\sigma_{Cv}$    | $\sigma_{Cv} = \sigma_d$ |

#### 3.2.1 仿真 SAR 图像滤波实验

为了评估 BH-IBF 算法的滤波性能, 本文将对图 4 (a) 图像中展示的标准参考图像用于实验, 并将图中白色块选中区域用于后续评判图像的噪声抑制效果, 图 4 (b) 为通过对参考图像添加乘性斑点噪声后获取的斑点噪声污染后的仿真 SAR 图像, 图 4 (c) —图 4 (i) 展示了使用不同滤波算法的斑点噪声抑制结果, 表 2 为不同滤波算法相对应的 ENL、ESI、PSNR、SSIM 值以及运行时间 Time。

根据图 4 图像可以看出, Sigma 算法、En-Lee 算法以及 SRAD 算法虽然拥有较好的斑点噪声抑制能力, 但在异质区域存在明显的细节缺失; 而 BF 算法则是能够较好的保护纹理信息, 但平滑噪声的性能较差。拥有较好的斑点抑制和边缘保留性能的主要为 NLM 算法、TS-BF 算法以及 BH-IBF 算法。通过对表 2 实验结果的分析, TS-BF 算法与 BH-IBF 算法在边缘信息保持上效果相近, 但前者平滑噪声的能力要弱于后者; 而 NLM 算法则是在平滑性上强于 BH-IBF 算法, 但根据其余参数指标反映的边缘保持性能来看, BH-IBF 算法的边缘保持能力要强于 NLM 算法。因而综合考量后得出, 本文提出的 BH-IBF 算法在平滑噪声以及纹理细节保护方面存在较好的效果, 即对仿真 SAR 噪声图像表现出较好的斑点抑制和边缘保留性能。

#### 3.2.2 TerraSAR-X 图像滤波实验

如图 5 所示的 3 幅图像均来自于同一幅 SAR 图像, 而该 SAR 图像的来源则是于 2007-06-19 在俄罗斯南部伏尔加地区获取的 TerraSAR-X SAR 数据。该数据通过 X 波段 TerraSAR-X 的 Strip-Map 成像模式获取, 对应极化方式为 HH, 分辨率为  $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。而图 5 (a)、图 5 (b) 中通过白色则是用于研究算法斑点噪声平滑的性能。其中, 白色框选

中的 A1、B1 区域均属于匀质区域用于评估滤波算法的斑点噪声平滑性能。而图 5 中白色圆圈选中的异质区域用于评估滤波算法的边缘保持能力，后续将针对该区域对滤波后图像进行一定评估。

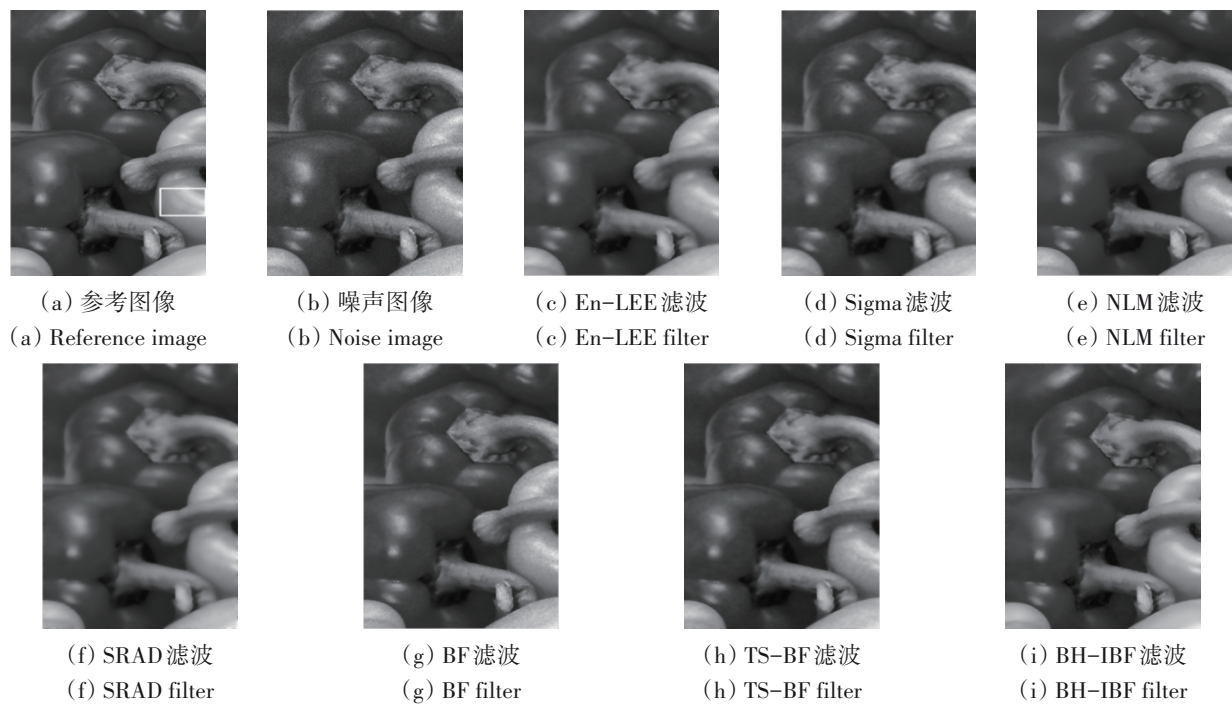


图 4 参考图像的不同滤波算法的比较

Fig.4 Comparison of different filtering algorithms for reference image

表 2 不同滤波算法的客观评价

Table 2 Objective evaluation of different filtering algorithms

|      | En-Lee | Sigma  | NLM    | SRAD   | BF     | TS-BF  | BH-IBF |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ENL  | 36.45  | 36.15  | 37.34  | 37.47  | 32.82  | 35.73  | 37.19  |
| ESI  | 0.756  | 0.614  | 0.751  | 0.667  | 0.757  | 0.744  | 0.795  |
| PSNR | 30.103 | 31.339 | 33.801 | 31.380 | 32.090 | 32.845 | 33.954 |
| SSIM | 0.819  | 0.812  | 0.827  | 0.796  | 0.831  | 0.859  | 0.834  |
| 用时/s | 7.237  | 5.896  | 168.00 | 0.182  | 1.317  | 4.712  | 15.531 |

为了验证传统算法以及本文提出的 BH-IBF 算法在 SAR 图像斑点噪声平滑方面的性能，本文根据图 5 中选取的匀质区域 A1、B1 区域作为实验的对象。图 6 为图 5（a）所示的原始 SAR 图像所对应的滤波结果，白色圆圈区域用于评估算法的边缘保持性，表 3 所示为不同滤波算法在两处区域上获取的 ENL 数据。

针对各个滤波算法对 SAR 图像的边缘细节保持效果的验证，本文利用包含丰富边缘细节的图 5（b）作为研究图像边缘保持性能的实验对象，实际的滤波效果图像如图 7 所示。

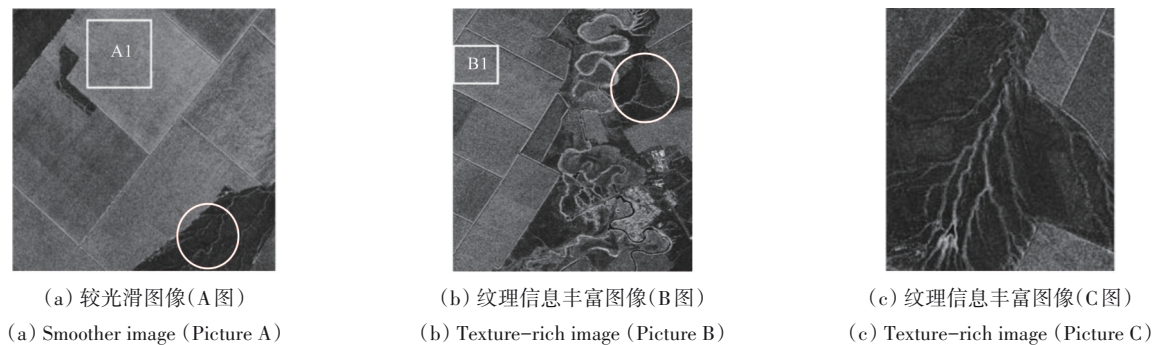


图 5 本文中使用的测试图像(白色框中区域用于评估算法的边缘保持性)

Fig.5 Test images used in this paper (The area in the red box is used to evaluate the edge retention of the algorithm)

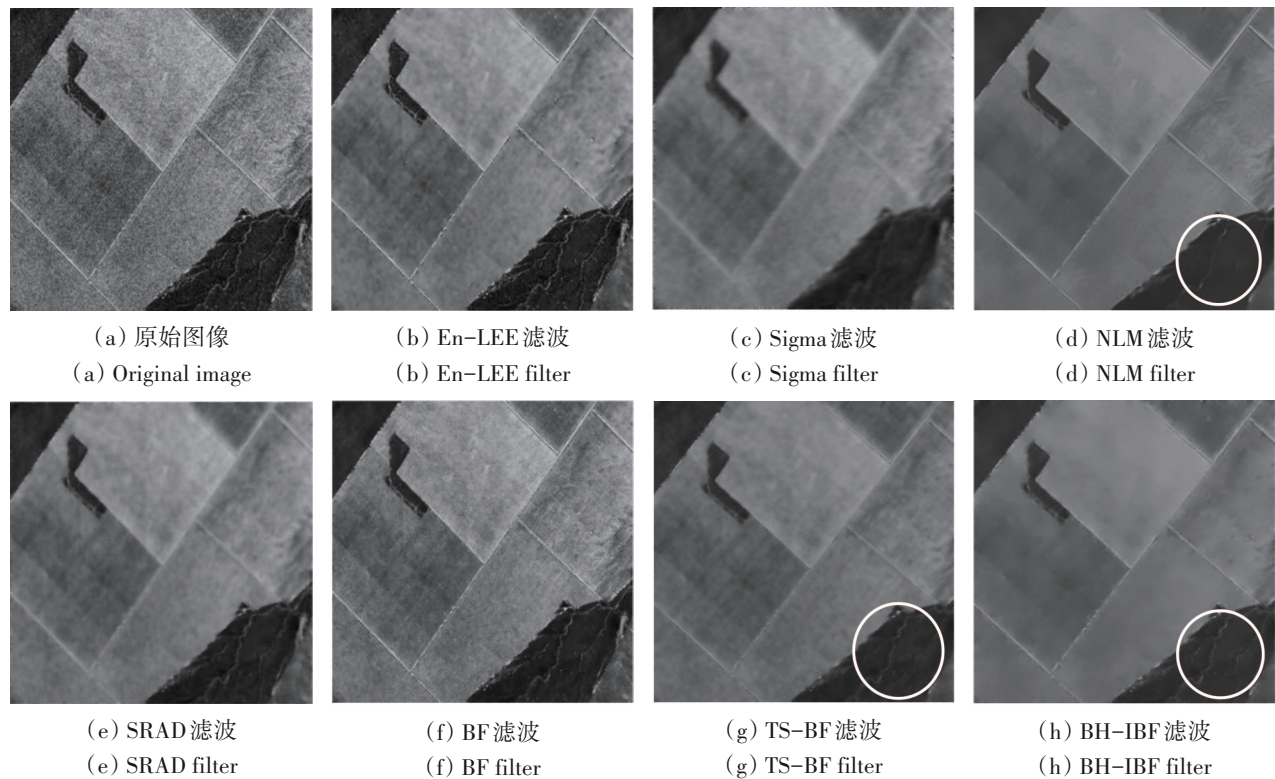


图6 不同滤波算法处理后的SAR图像

Fig.6 SAR images processed by different filtering algorithms

表3 由ENL评估匀质区域的斑点平滑性能

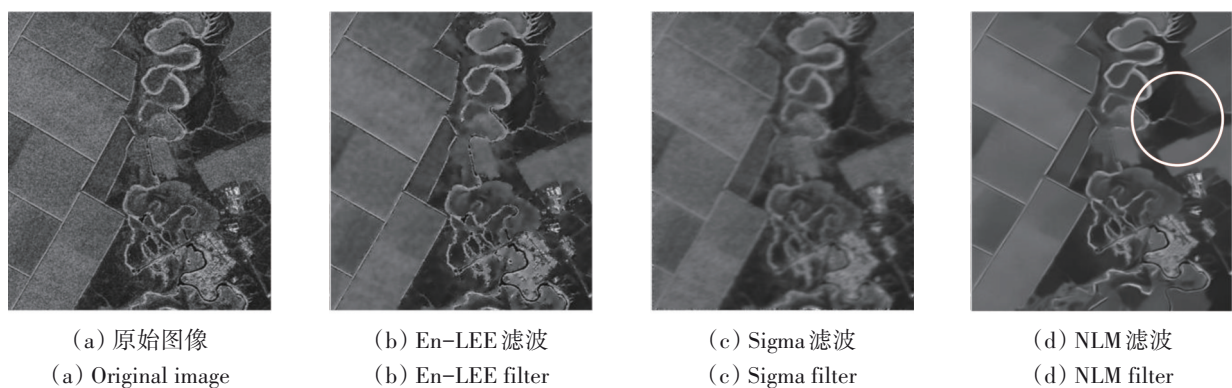
Table 3 Speck smoothing performance of homogeneous area evaluated by ENL

| 匀质<br>区域 | En-Lee | Sigma  | NLM    | SRAD   | BF     | TS-BF  | BH-IBF |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A1       | 258.62 | 172.16 | 396.11 | 271.53 | 178.26 | 295.33 | 464.16 |
| B1       | 357.58 | 382.33 | 539.62 | 349.83 | 284.66 | 392.97 | 498.04 |

观察图6以及图7中图像可得, 经过各种滤波算法处理得到的SAR图像与原始SAR图像相比较, 滤波后图像中相干斑噪声都有不同程度的减少, 根据表3的ENL数值可以看出在相干斑噪声抑制的

效能上, TS-BF算法、NLM算法以及BH-IBF算法相比于其他算法要更加优良。通过观察图6以及图7中的白色圈中的纹理细节区域, 可以看出TS-BF算法以及NLM算法均存在不同程度的细节丢失现象, 而BH-IBF算法更好的保护了边缘纹理的信息。

而为了更好的观察图像的纹理信息保护效果, 仅选取前文测试中纹理信息保持较好的算法NLM算法、En-Lee算法、BF算法、TS-BF算法以及BH-IBF算法, 实验图像如图5(c)所示, 具体的滤波图像以及RNF图像如图8以及图9所示。



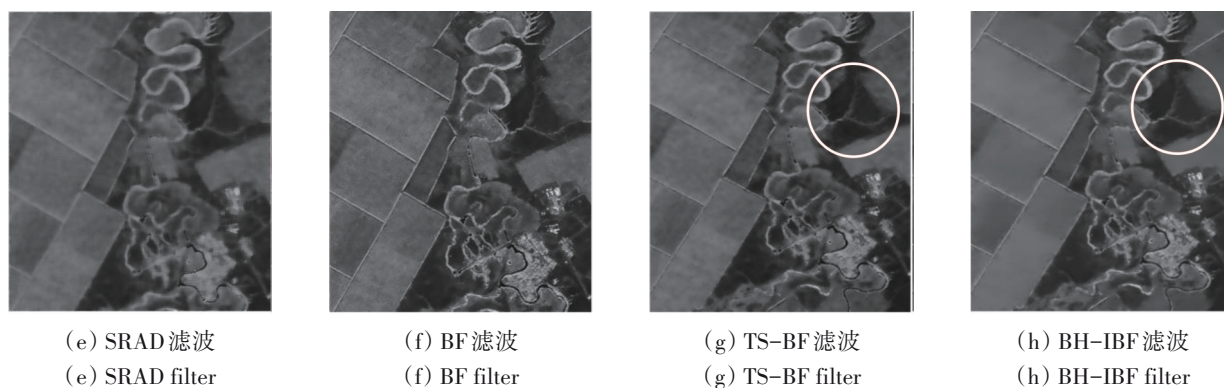


图7 不同滤波算法处理后的B图对应的SAR图像

Fig.7 SAR image corresponding to B image processed by different filtering algorithms

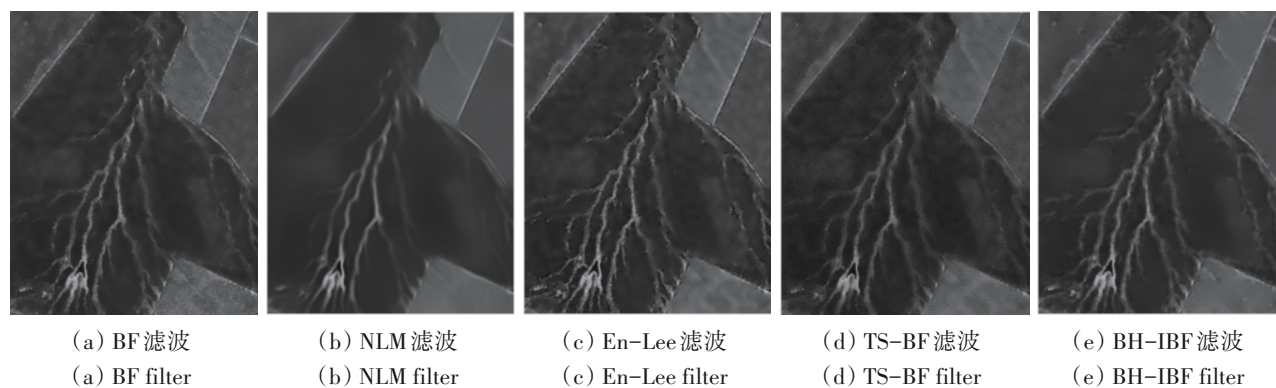


图8 C图对应的SAR滤波图像

Fig.8 The SAR filtered image corresponding to Figure C

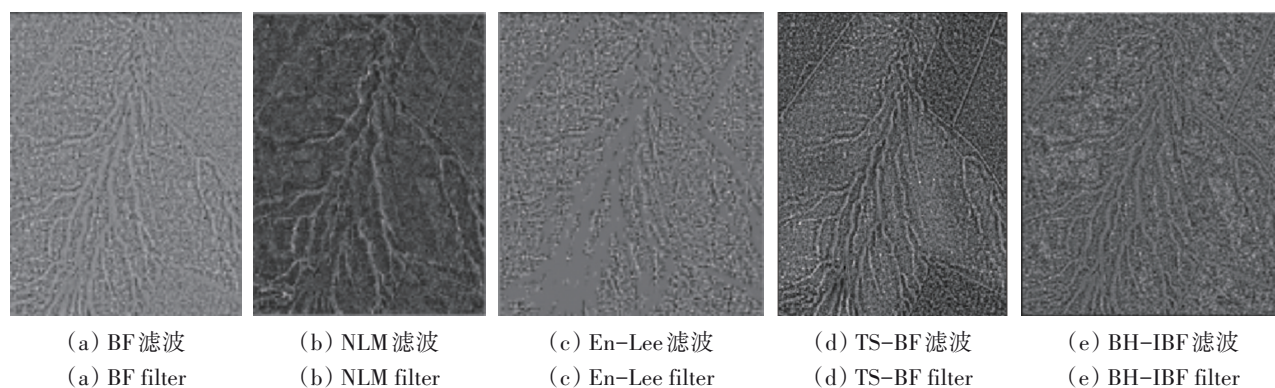


图9 C图对应的噪声比值图像RNF

Fig.9 The RNF of the noise ratio image corresponding to Figure C

根据图9中的RNF图像可以看出,滤波算法对SAR图像的处理存在纹理信息以及纹理区域中夹杂的匀质区域信息被过度滤除的现象。根据纹理区域与周围区域的像素值变化程度可以看出,NLM算法虽然在匀质区域上较好的平滑了相干斑噪声,但对于SAR图像上纹理区域的处理效果并不理想,存在细节信息大量丢失的状况。而En-Lee滤波算法以及传统双边滤波算法BF对应的RNF图像中纹理区域的块状表现则表明,在进行

纹理区域细节保护时,纹理区域周边的匀质区域未能得到有效的噪声抑制。而TS-BF算法虽然尽可能的避免了上述的状况,但在RNF图像中可以明显看出直线型纹理保护效果较差。BH-IBF算法对应的RNF图像虽然也存在纹理细节的丢失,但整体图像的灰度变化较小,纹理区域的滤波并未影响到匀质区域,且滤除的噪声更加趋向于噪声的信号。

在根据仿真SAR图像以及真实SAR图像作为

实验对象的情况下, 辅以评价指标进行滤波效果定量分析。最终实验结果表明: BH-IBF算法与其余传统滤波器相比, 在有效抑制原数据中相干斑噪声的同时, 也提高了对边缘细节信息的保留, 故实验结果验证了本文的BH-IBF算法的性能。

## 4 结 论

本文针对双边滤波算法对SAR图像结构信息应用不足以及难以有效地滤除强斑点噪声等问题, 提出了一种基于背景匀质性的改进双边滤波算法BH-IBF。算法的创新之处包含: 将变异系数引进到双边滤波算法的权重核改进上, 进而对双边滤波器忽略SAR图像结构信息的问题进行一定程度的弥补; 引进样本截断操作抑制了相干斑噪声的影响, 从而有效解决了双边滤波难以滤除强斑点噪声的问题; 自适应扩展背景区域的半宽, 则更进一步的提高了图像的平滑性。最终实验结果显示, BH-IBF既能够有效的抑制SAR图像中的斑点噪声, 也可以很好的减少图像中的纹理信息的丢失。

此外, 本文在推导截断深度自适应公式时, 存在样本服从的概率模型过于单一的不足, 这可能导致BH-IBF算法的应用领域有所减少, 后续或将针对不同概率模型进行相应的公式推导及算法研究。

## 参考文献(References)

- Ai J Q, Yang H, Yang X Z, Liu R M, Luo Q W and Zhang X H. 2019. Truncated-statistics-based bilateral filter for speckle reduction in synthetic aperture radar imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(2): 026505 [DOI: 10.1117/1.JRS.13.026505]
- Alonso-González A, López-Martínez C, Salembier P and Deng X P. 2013. Bilateral distance based filtering for polarimetric SAR data. *Remote Sensing*, 5(11): 5620-5641 [DOI: 10.3390/rs5115620]
- Buades A, Coll B and Morel J M. 2008. Nonlocal image and movie denoising. *International Journal of Computer Vision*, 76(2): 123-139 [DOI: 10.1007/s11263-007-0052-1]
- Dabov K, Foi A, Katkovnik V and Egiazarian K. 2007. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering. *IEEE Transactions on Image Processing*, 16(8): 2080-2095 [DOI: 10.1109/TIP.2007.901238]
- D'Hondt O, Guillaso S and Hellwich O. 2013. Iterative bilateral filtering of polarimetric SAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(3): 1628-1639 [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2256881]
- Feng J D. 2019. Speckle Reduction Algorithms Based on Non-local Means for SAR Images. Dalian: Dalian Maritime University (冯建德). 2019. 基于非局部均值的SAR图像相干斑抑制算法. 大连: 大连海事大学 [DOI: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2019.001532]
- Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S and Holtzman J C. 1982. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4(2): 157-166 [DOI: 10.1109/TPAMI.1982.4767223]
- Han J W, Kim J H, Cheon S H, Kim J O and Ko S J. 2010. A novel image interpolation method using the bilateral filter. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 56(1): 175-181 [DOI: 10.1109/TCE.2010.5439142]
- Hu X. 2019. Despeckling and Segmentation Methods for Synthetic Aperture Radar Images. Xi'an: Xi'an Polytechnic University(胡晓). 2019. SAR图像相干斑抑制与分割方法研究. 西安: 西安工程大学 [DOI: 10.27390/d.cnki.gxbfc.2019.000228]
- Jia K. 2019. Research on Nonlocal Mean Filtering Algorithm for PolSAR Image. Tianjin: Civil Aviation University of China(贾锐). 2019. PolSAR图像的非局部均值去噪算法研究. 天津: 中国民航大学 [DOI: 10.27627/d.cnki.gzmhy.2019.000180]
- Lee J S. 1981. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer Graphics and Image Processing*, 17(1): 24-32 [DOI: 10.1016/s0146-664x(81)80005-6]
- Lee J S, Grunes M R and de Grandi G. 1999. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5): 2363-2373 [DOI: 10.1109/36.789635]
- Lee J S, Hoppel K and Mango S A. 1992. Unsupervised estimation of speckle noise in radar images. *International Journal of Imaging System and Technology*, 4(4): 298-305 [DOI: 10.1002/ima.1850040409]
- Lee J S, Wen J H, Ainsworth T L, Chen K S and Chen A J. 2009. Improved sigma filter for speckle filtering of SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1): 202-213 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.2002881]
- Li G T and Yu W D. 2012. SAR image despeckling based on adaptive bilateral filter. *Journal of Electronics and Information Technology*, 34(5): 1076-1081 (李光廷, 禹卫东). 2012. 基于自适应Bilateral滤波的SAR图像相干斑抑制. *电子与信息学报*, 34(5): 1076-1081 [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.0092]
- Liu G F. 2014. Feature Extraction and Classification of PolSAR Image. Xi'an: Xidian University (刘高峰). 2014. 极化SAR图像特征提取与分类方法研究. 西安: 西安电子科技大学
- Liu L, Yang X Z, Zhou F and Lang W H. 2017. Non-local filtering for polarimetric SAR data based on three dimensional patch matching wavelet transform. *Journal of Remote Sensing*, 21(2): 218-227 (刘留, 杨学志, 周芳, 郎文辉). 2017. 3维块匹配小波变换的极化SAR非局部均值滤波. *遥感学报*, 21(2): 218-227 [DOI: 10.11834/jrs.20176257]
- Liu X Y, Qiao T and Qiao Z. 2017. Image enhancement method of mine based on bilateral filtering and Retinex algorithm. *Industry and Mine Automation*, 43(2): 49-54 (刘晓阳, 乔通, 乔智). 2017.

- 基于双边滤波和Retinex算法的矿井图像增强方法. 工矿自动化, 43(2): 49-54 [DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2017.02.011]
- Liu Z H, Miao X G and Tang B Y. 2019. Improvement of SAR image speckle noise suppression algorithm based on wavelet transform. Robotics and Applications, (4): 43-45 (刘子豪, 苗新刚, 唐伯雁. 2019. 基于小波变换SAR图像斑噪声抑制算法的改进. 机器人技术与应用, (4): 43-45) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-6437.2019.04.015]
- Lopes A, Touzi R and Nezry E. 1990. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28(6): 992-1000 [DOI: 10.1109/36.62623]
- Niu L. 2019. SAR Image Despeckling and Ship Wake Detection Methods. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University (牛林. 2019. SAR图像相干斑抑制及舰船尾迹检测方法研究. 上海: 上海交通大学) [DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtu.2019.001900]
- Parrilli S, Poderico M, Angelino C V and Verdoliva L. 2012. A non-local SAR image denoising algorithm based on LLMMSE wavelet shrinkage. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(2): 606-616 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2161586]
- Sica F, Cozzolino D, Zhu X X, Verdoliva L and Poggi G. 2018. In-SAR- BM3D: a nonlocal filter for SAR interferometric phase restoration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(6): 3456-3467 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2800087]
- Tomasi C and Manduchi R. 1998. Bilateral filtering for gray and color images//Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision. Bombay: IEEE: 839-846 [DOI: 10.1109/ICCV.1998.710815]
- Tong Y B, Zhang Q S and Qi Y P. 2006. Image quality assessing by combining PSNR with SSIM. Journal of Image and Graphics, 11(12): 1758-1763 (佟雨兵, 张其善, 祁云平. 2006. 基于PSNR与SSIM联合的图像质量评价模型. 中国图象图形学报, 11(12): 1758-1763) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8961.2006.12.003]
- Vasile G, Trouvé E, Lee J S and Buzuloiu V. 2006. Intensity-driven adaptive-neighborhood technique for polarimetric and interferometric SAR parameters estimation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(6): 1609-1621 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.864142]
- Wang S, Yu J P, Liu K, Hou B and Jiao L C. 2014. Polarimetric SAR speckle reduction based on bilateral filtering. Journal of Radars, 3(1): 35-44 (王爽, 于佳平, 刘坤, 侯彪, 焦李成. 2014. 基于双边滤波的极化SAR相干斑抑制. 雷达学报, 3(1): 35-44) [DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13133]
- Xia J J, Zhang X W and Li W W. 2014. Calculating the surface area of a surface using the simpson integral formula. Science and Technology Information, 12: 238-239 (夏军剑, 张新巍, 李维伟. 2014. 利用simpson积分公式计算曲面表面积. 科技资讯, 12(8): 238-239) [DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2014.08.002]
- Xiao S C, Liao J J and Shen G Z. 2015. Speckle filtering for polarimetric SAR data based on self-cross bilateral filter. Journal of Remote Sensing, 19(3): 400-408 (肖世忱, 廖静娟, 沈国状. 2015. 自交叉双边滤波的极化SAR数据相干斑抑制. 遥感学报, 19(3): 400-408) [DOI: 10.11834/jrs.20154117]
- Xing C, Wang J Q and Jia Z Q. 2010. Comparison and analysis of some numerical integration methods. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, (1): 104-106 (邢诚, 王建强, 贾志强. 2010. 多种数值积分方法比较分析. 城市勘测, (1): 104-106) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-8262.2010.01.031]
- Xing X L. 2018. Polarimetric SAR Image Speckle Filtering Based on Scene Heterogeneity. Wuhan: China University of Geosciences (行晓黎. 2018. 基于场景异质性的极化SAR相干斑滤波方法. 武汉: 中国地质大学)
- Yang X Z, Chen J, Zhou F, Lang W H, Zheng X and Li G Q. 2015. Polarimetric SAR image despeckling using non local means filter based on homogeneous pixels preselection. Journal of Electronics and Information Technology, 37(12): 2991-2999 (杨学志, 陈靖, 周芳, 郎文辉, 郑鑫, 李国强. 2015. 基于同质像素预选择的极化SAR图像非局部均值滤波. 电子与信息学报, 37(12): 2991-2999) [DOI: 10.11999/JEIT150314]
- Yi Z L, Yin D, Hu A Z and Zhang R. 2012. SAR image despeckling based on non-local means filter. Journal of Electronics and Information Technology, 34(4): 950-955 (易子麟, 尹东, 胡安洲, 张荣. 2012. 基于非局部均值滤波的SAR图像去噪. 电子与信息学报, 34(4): 950-955) [DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00918]
- Yu H, Hu H F and Geng Z X. 2019. Image gradient guided window shape adaptive bilateral filtering. Computer Applications and Software, 36(12): 201-208, 213 (喻恒, 胡海峰, 耿则勋. 2019. 图像梯度引导的窗口形状自适应双边滤波. 计算机应用与软件, 36(12): 201-208, 213) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2019.12.032]
- Yu Y J and Acton S T. 2002. Speckle reducing anisotropic diffusion. IEEE Transactions on Image Processing, 11(11): 1260-1270 [DOI: 10.1109/TIP.2002.804276]
- Zhang C F. 2019. Image Noise Reduction Based on Wavelet Adaptive Threshold Combined with Bilateral Filtering. Harbin: Harbin University of Science and Technology (张宸枫. 2019. 基于小波自适应阈值结合双边滤波的图像降噪. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学)
- Zhang J J. 2014. Polarimetric SAR Despeckling Research based on Hybrid Patch Similarity. Xi'an: Xidian University (张晶晶. 2014. 基于混合块相似性的极化SAR相干斑抑制研究. 西安: 西安电子科技大学)
- Zhang M and Gunturk B K. 2008. Multiresolution bilateral filtering for image denoising. IEEE Transactions on Image Processing, 17(12): 2324-2333 [DOI: 10.1109/TIP.2008.2006658]
- Zhang W G, Liu F and Jiao L C. 2009. SAR image despeckling via bilateral filtering. Electronics Letters, 45(15): 781-783 [DOI: 10.1049/el.2009.1591]
- Zhao Z M. 2013. Speckle Filtering for Polarimetric SAR Based on Non-local Means. Zhengzhou: Information Engineering University (赵忠民. 2013. 基于非局部均值的极化SAR相干斑抑制方法研究. 郑州: 解放军信息工程大学)

# SAR image speckle noise suppression algorithm based on background homogeneity and bilateral filtering

AI Jiaqiu<sup>1,2</sup>, WANG Feifan<sup>1</sup>, YANG Xingming<sup>1</sup>, SHI Jun<sup>3</sup>, LIU Fan<sup>4</sup>

1. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Intelligent Interconnected Systems Laboratory of Anhui Province (Hefei University of Technology), Hefei 230009, China;

3. School of Software, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

4. Chinese Academy of space systems science and Engineering, Beijing 100048, China

**Abstract:** As a kind of high-resolution imaging radar, Synthetic Aperture Radar (SAR) plays an important role in civil and military fields because it can realize all-weather and all-weather observation without the limitation of illumination and climate conditions. However, SAR also has limitations. For instance, the SAR image has many speckle noises, which is caused by the principle of coherent imaging that seriously affects the extraction and application of relevant information in the image. Therefore, to make better use of SAR image information, speckle noise reduction is a key step in SAR image processing. Among them, the bilateral filtering algorithm, which combines the geometric domain and the gray-scale domain information filter, is currently the best algorithm in the field of speckle noise removal. In this study, we take the bilateral filtering algorithm as the basic framework and then add corresponding improvement measures in view of the problems and shortcomings of the bilateral filtering algorithm, such as insufficient application of SAR image structure information and difficulty in effectively filtering out strong speckle noise. Finally, we propose an improved bilateral filtering algorithm based on background homogeneity (BH-IBF).

This algorithm aims to effectively remove the speckle noise in the SAR image while retaining the real texture information of the image to the maximum extent. (1) The coefficient of variation is introduced into the weight kernel improvement of the bilateral filtering algorithm, compensating for the problem of the bilateral filter ignoring the structural information of the SAR image to a certain extent; (2) the sample truncation operation is introduced to filter the strong speckle noise in the background area to a certain extent, suppressing the influence of speckle noise, thus effectively solving the bilateral filtering. Strong speckle noise is difficult to filter out; (3) the half width of the background region for the homogeneous region can further improve the smoothness of the image. Taking the simulated and real SAR images intercepted from TerraSAR-X as the experimental objects, the comparison of the filtering effects and evaluation indexes of different filtering algorithms shows the improved results obtained by BH-IBF algorithm, indicating that the proposed algorithm achieves the research objective.

The proposed BH-IBF has a better effect than the traditional filtering algorithm. BH-IBF can not only effectively suppress the speckle noise in the homogeneous region but also protect the edge texture information of the heterogeneous region better, that is, the algorithm can better guarantee the subsequent processing and application of SAR data.

**Key words:** SAR image speckle noise reduction, improve bilateral filtering, adaptive sample trimming, homogeneity index of the reference window, adaptive window size

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No.62071164, 61701157)

## 附录 A

在假设滤波过程中背景窗口中的样本服从高斯分布的情况下，概率密度函数以  $f_X(x)$  表示，累积分布函数以  $F_X(x)$  表示。在对样本  $X$  进行两端截断处理时，两端的截断阈值以  $T_l$ 、 $T_h$  表示，截断后样本以  $\tilde{X}$  表示，此时截断后样本对应的概率密度函数为：

$$f_{\tilde{X}}(x) = \begin{cases} \frac{f_X(x)}{F_X(T_h) - F_X(T_l)}, & T_l \leq x \leq T_h \\ 0, & \text{其他} \end{cases} = \begin{cases} \frac{\exp(-(x-\mu)^2/2\sigma^2)}{\sqrt{2\pi}\sigma(\Phi(\mu, \sigma, T_h) - \Phi(\mu, \sigma, T_l))}, & T_l \leq x \leq T_h \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式中， $\Phi(\mu, \sigma, T)$  为服从高斯分布的样本所对应的累积分布函数，表达式如下：

$$\Phi(\mu, \sigma, T) = 1 - \int_T^{+\infty} \frac{\exp(-(x-\mu)^2/2\sigma^2)}{\sqrt{2\pi}\sigma} dx \quad (\text{A2})$$

基于截断后样本，采用矩估计方法获取原点矩，并以此对统计量  $\mu$ 、 $\sigma$  进行估计：

$$\hat{\mu} = E(X) \quad (\text{A3})$$

$$\hat{\sigma}^2 = E(X^2) - E^2(X) \quad (\text{A4})$$

根据  $\Phi(\mu, \sigma, T)$ , 令  $y = \frac{x - \mu}{\sigma}$ , 可得简化表达式:

$$\Phi(\mu, \sigma, T) = \phi\left(\frac{T - \mu}{\sigma}\right) \quad (\text{A5})$$

考虑到实际截断的操作以及高斯分布的对称性, 本文  $T_l$ 、 $T_h$  的取值为

$$T_h = \mu + \gamma\sigma, \quad T_l = \mu - \gamma\sigma \quad (\text{A6})$$

根据对称性可得, 一阶矩为总体均值。此时, 相应的二阶原点矩计算如下:

$$E(X^2) = \int_{T_l}^{T_h} x^2 f_{\bar{X}}(x) dx = \int_{-\gamma}^{\gamma} \frac{(\mu + y\sigma)^2}{2\phi(\gamma) - 1} \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}} dy = \mu^2 + \sigma^2 \left(1 - \frac{\exp\left(-\frac{\gamma^2}{2}\right) \cdot 2\gamma}{\sqrt{2\pi} (2\phi(\gamma) - 1)}\right) \quad (\text{A7})$$

综上所述可得:

$$\begin{cases} \hat{\mu} = \mu \\ \hat{\sigma} = \left(1 - \frac{\exp(-\gamma^2/2) \cdot 2\gamma}{\sqrt{2\pi} \cdot (2\phi(\gamma) - 1)}\right) \cdot \sigma^2 \end{cases} \quad (\text{A8})$$