

基于边缘强度映射的 SAR 图像等效视数非监督估计方法

朱磊^{*①②} 水鹏朗^①

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

摘要: 该文结合边缘强度映射(Edge Strength Map, ESM)对 SAR 图像等效视数(Equivalent Number of Looks, ENL), 提出一种自适应非监督估计方法。该方法先利用各向异性高斯核平行窗通过比率运算生成 ESM, 进而在简单的图像分块处理基础上, 利用一种有效的非监督估计方法分别估计各分块图像在比率 ESM 下的区域阈值, 并由各分块图像的阈值化 ESM 操作完成对 SAR 图像的区域划分, 然后对非边缘区域中的所有像素在 ESM 的两次约束下, 通过施加大尺度不规则窗完成局部 ENL 估计, 最后通过直方图统计方法从局部 ENL 中获得全局 ENL 估计。实验表明: 该文方法可有效克服传统空域估计方法 ENL 估计值受局域统计方法选择影响大的不足, 同时也可避免基于统计模型的估计方法需要相干斑先验信息且对抑斑后 SAR 图像估计失效的弊端。

关键词: 合成孔径雷达图像; 等效视数; 边缘强度映射; 非监督估计

中图分类号: TN751

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)05-1170-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.01069

Unsupervised Estimation of the Equivalent Number of Looks Based on Edge Strength Map in SAR Images

Zhu Lei^{①②} Shui Peng-lang^①

^①(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Electronics and Information College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Combining with Edge Strength Map (ESM), an unsupervised estimation of the Equivalent Number of Looks (ENL) in SAR images is proposed. First, ESM is produced by ratio operation of anisotropic Gaussian kernel parallel windows. On the basis of simple image partition processing, the local ESM thresholds for image blocks are obtained by an effective unsupervised estimation method, and SAR image is divided into homogeneous regions and edge regions by shrinkage ESM. Under twice restrictions based on ESM, each local ENL of all pixels in homogeneous regions is estimated by irregular window with large scale. Then global ENL of SAR image is acquired by histogram statistical method for all local ENL values. Experimental results show that the proposed method can get over serious adverse effects to estimation value by the selection of local statistics methods in estimation methods based on spatial statics, and can avoid the need for apriority information on speckle and being an ineffective estimation for despeckling SAR images in estimation methods based on statistical model.

Key words: SAR image; Equivalent Number of Looks (ENL); Edge Strength Map (ESM); Unsupervised estimation

1 引言

具有乘性噪声特性的相干斑是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)利用回波相干叠加成像的固有产物, 其存在严重影响了 SAR 图像的视觉质量与后续解译处理技术的有效性^[1]。等效视数(Equivalent Number of Looks, ENL)是一种评

估 SAR 图像相干斑强度与分析相干斑模型的重要实验指标^[2-4], 同时也是评价 SAR 图像抑斑算法性能^[5-7]与众多后续解译处理技术需要利用的重要参量^[8,9]。因此, 合理有效的估计 ENL 参数, 对于 SAR 图像相干斑的建模及相关应用均具有重要意义。目前, SAR 图像 ENL 估计方法主要有 3 类: 第 1 类, ENL 监督估计方法^[5-8], 通过人为选择 SAR 图像一块或多块同质区来估计全局 ENL, 这类方法的优点是简单容易实现, 常用于评估抑斑算法对 SAR 图像相干斑的抑制性能, 但由于将 SAR 图像局部

2012-08-21 收到, 2012-11-19 改回

国家自然科学基金(60872139)和陕西省教育厅自然科学基金项目(11JK0983)资助课题

*通信作者: 朱磊 zhulei791014@163.com

窗口内的局部 ENL 统计作为整个 SAR 图像 ENL 的近似估计, 因此存在估计值不稳定, 受窗尺度与估计区域改变影响大, 需要人为参与选择估计区等缺陷; 第 2 类, ENL 空域非监督估计方法^[2-4], 以文献[4]中提出的非监督估计方法为代表, 通过对 SAR 图像各像素分别施加小尺度窗分别估计各像素局部 ENL, 然后再利用 hough 变换从众多局部 ENL 估计中获取全局 ENL 估计, 有效解决了第 1 类估计方法需要人为参与选择估计区域且估计值受估计区域改变影响大的问题, 但这类方法的估计值仍然受局域统计方法选择(例如: 局域窗的尺度与形状等)影响大。第 3 类, 基于相干斑统计模型的 ENL 估计方法^[10-12], 直接从 SAR 图像相干斑与等效视数的统计模型入手获得 ENL 估计, 克服了第 2 类估计方法受局域统计方法选择影响大的不足, 获得了与理论值接近的估计精度, 但这类方法需要相干斑先验信息, 估计精度受建立的相干斑统计模型与 SAR 图像相干斑实际分布情况的差异程度影响大, 且不能用于抑斑 SAR 图像的 ENL 估计。

为此, 本文以文献[4]提出的 ENL 空域估计方法为基础, 提出了一种利用 SAR 图像边缘强度映射(Edge Strength Map, ESM)的 ENL 空域非监督估计方法。

2 SAR 图像的等效视数 ENL

设空域强度格式下 L 视 SAR 图像 A 的平均强度为 σ , 则 A 服从式(1)所示的 gamma 分布

$$p_A(A; \sigma, L) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{\sigma}\right)^L A^{L-1} e^{-LA/\sigma} \quad (1)$$

那么 A 的 k 阶矩可表示为 $E(A^k) = \frac{\Gamma(L+k)}{\Gamma(L)} \left(\frac{\sigma}{L}\right)^k$ 。

显然, $E(A) = \sigma$ 和 $\text{Var}(A) = E(A^2) - E^2(A) = \sigma^2 / L$, 那么 SAR 图像 A 的视数 L 可表示为 $L = [E(A)]^2 / \text{Var}(A)$ 。因此, SAR 图像视数 L 的实验估计值, 即等效视数 ENL 可按式(2)估计

$$\text{ENL} = \lambda \langle A \rangle / [\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2] \quad (2)$$

其中, $\langle \bullet \rangle$ 为平均算子, 对于强度格式 SAR 图像 $\lambda = 1$, 幅度格式 $\lambda = 4 / \pi - 1$ 。

3 SAR 图像的边缘强度映射 ESM

利用梯度信息对具有乘性相干斑噪声的 SAR 图像进行区域划分存在对噪声敏感与边缘检测非恒虚警等问题^[13]。为此, 文献[13]提出利用带方向平行窗通过比率运算获取 ESM, 实现对具有较强鲁棒性的边缘恒虚警检测, 具体计算过程如下: 在图 1 所示的 θ 方向矩形平行窗内, 先计算窗中心像素

$C(x, y)$ 两侧平行窗内的局部均值估计 $m_1(x, y | \theta)$ 与 $m_2(x, y | \theta)$, 然后通过比较全部 θ 方向局部均值估计的比率值获得像素 $C(x, y)$ 的 ESM 估计。

$$\text{ESM}_C(x, y) = \min_{\theta \in [0, \pi]} \left[\min \left(\frac{m_1(x, y | \theta)}{m_2(x, y | \theta)}, \frac{m_2(x, y | \theta)}{m_1(x, y | \theta)} \right) \right] \quad (3)$$

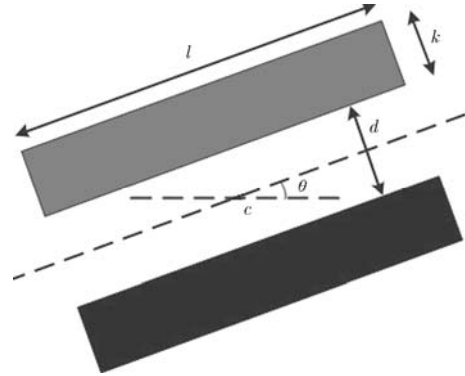


图 1 θ 方向矩形平行窗

4 基于 ESM 的 SAR 图像的 ENL 非监督估计方法

本文方法分 4 步实施: (1)利用各向异性高斯核平行窗, 通过比率运算生成 ESM; (2)先对 SAR 图像进行分块处理, 再利用一种巧妙的非监督估计方法分别估计各分块图像的区域 ESM 阈值, 并由各分块图像的阈值化 ESM 操作完成对 SAR 图像的区域划分; (3)对非边缘区域中的所有像素施加由 ESM 约束形成的不规则窗, 并分别估计各像素在不规则窗下的局部 ENL 估计值; (4)利用直方图方法统计各像素局部 ENL 获得全局 ENL 估计。

4.1 各向异性高斯核平行窗下比率 ESM 的计算

比率 ESM 可用式(3)计算。由于文献[13]给出的如图 1 所示的矩形平行窗, 在进行窗内像素平均时, 仅采用了简单的算术平均, 而文献[14]指出采用指数型平行窗可以为 SAR 图像区域划分与边缘检测带来比传统矩形窗更有利的结果。为此, 本文方法则采用如图 2 所示的各向异性高斯核平行窗, 将窗内各像素与待估计中心像素的距离作为权重分配的依据, 实现加权平均, 可以获得更好的 SAR 图像 ESM 估计与区域划分性能。带方向各向异性高斯核平行窗计算公式为

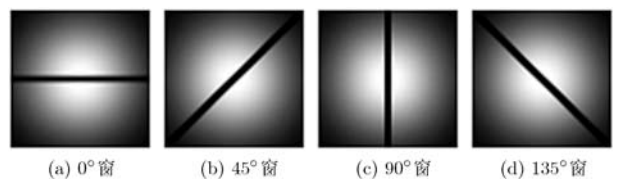


图 2 一种 4 方向各向异性高斯核平行窗

$$g(x, y, \theta, k) = \begin{cases} \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{(rx)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(ry)^2}{2\sigma_y^2}\right\}, & |ry| \geq k/2 \\ 0, & |ry| < k/2 \end{cases} \quad (4)$$

其中 $rx = x \cos \theta - y \sin \theta$, $ry = x \sin \theta + y \cos \theta$, $\sigma_x \neq \sigma_y$ 。

下面由一个简单的实验说明采用不同类型的平行窗对 ESM 估计与区域划分的影响。图 3(a)是由一幅 256×256 的卡通图像, 通过添加 Speckle 乘性噪声, 形成的一幅 5 视幅度格式仿真 SAR 图像, 图 3(b)与图 3(d)是对图 3(a)所示的仿真 SAR 图像在相同窗尺度条件下, 分别采用矩形与各向异性高斯核平行窗获得的 ESM 图, 而对图 3(b)与图 3(d)采用相同的阈值化处理可获得阈值化的 ESM 图像图 3(c)与图 3(e), 明显: 图 3(d)所示 ESM 图像的边缘区域比图 3(b)更清晰光滑, 聚集性更好, 而图 3(e)获得的阈值化 ESM 图像边缘区域也远比图 3(c)光滑且边缘区域断裂现象更少, 从而说明利用各向异性高斯核平行窗可以获得比传统矩形平行窗更好的 SAR 图像 ESM 估计与区域划分性能。另外, 大量实验表明: 对一般 SAR 图像, 当 $N \times N$ 大小的各向异性高斯核平行窗, N 的取值范围为 $9 \sim 13$ 时 (N 的取值一般随 SAR 图像视数的降低而增大), $\sigma_x = (N - 1)/2$, $\sigma_y = N$, 可以获得较好的 SAR 图像区域划分性能。

4.2 ESM 的阈值估计与 SAR 图像的区域划分

利用阈值化 ESM 将 SAR 图像划分为不同区域, 并在进行各像素局部 ENL 估计时, 直接剔除灰度值起伏较大的边缘区域像素, 这是基于 ESM 的第 1 次约束。ESM 阈值化可表示为

$$\text{REG}(x, y) = \begin{cases} \text{ESM}_c(x, y), & \text{ESM}_c(x, y) \leq T \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

其中 T 为阈值, REG 非零的区域为边缘区域, 而 REG=0 的区域为同质区。在传统 SAR 图像区域划分或边缘检测算法中, 阈值 T 一般是通过人为设置的单一固定阈值^[13], 这种阈值设置方法虽然简单,

但却不能反映出大尺度图像 ESM 分布在各区域内的相似性以及各区域之间的差异性, 同时, 人为设置阈值不仅麻烦而且受人的主观经验影响较大。为此, 本文提出对大尺度 SAR 图像先进行分块处理, 再分别估计各分块图像的局部 ESM 阈值, 从而用简单的图像分块方法实现对大尺度 SAR 图像 ESM 阈值的局域化与多值化估计。另外, 分块大小以中等尺度为宜(如 128×128 像素), 因为较小的分块尺度, 会导致分块过多, 容易造成大量分块之间具有相似的局部统计特性而产生相近的阈值, 同时众多分块的局部阈值估计还会造成计算量显著增大; 而较大的分块尺度又将使分块过少, 而每一分块图像尺度偏大, 造成每一分块图像的局部相似性大为下降, 从而不利于获得具有较好局部区分度的局部阈值估计。在对分块图像进行局部 ESM 阈值估计时, 本文又提出了一种简单有效的非监督估计方法。

在大量实验中发现: 对 ESM 图像(如图 3(d))利用较大阈值 T 进行阈值化处理时, ESM 图像的均匀区域中由于相干斑引起的众多条纹开始相互断裂形成众多互不连通的独立条纹, 进而造成阈值化 ESM 图中连通像素点集合个数突然增大(如图 4(a)), 而当阈值 T 继续减小时, ESM 图像中众多互不连通的独立条纹开始迅速消失, 进而造成阈值化 ESM 图中连通像素点集合个数迅速减少(如图 4(b))。上述过程中, 由于边缘区域绝大部分像素的 ESM 值小于均匀区域像素的 ESM 值, 因此绝大部分边缘区域像素的 ESM 值在阈值化中被保留下来。当阈值 T 进一步减小时, 部分边缘区域像素 ESM 值开始出现大于阈值 T 的情况, 进而造成阈值化 ESM 图开始出现边缘断裂现象(如图 4(d)), 但由于 ESM 图像边缘区域像素相对于整个 SAR 图像属于稀疏量且 ESM 图像中均匀区域独立条纹基本消失, 因此, 此时若阈值 T 继续减小, 阈值化后的 ESM 图中连通像素点集合个数将开始缓慢震荡减小。针对 ESM 图像阈值 T 与阈值化 ESM 图中连通像素点集合个数之间的上述对应关系, 可以找到一种阈

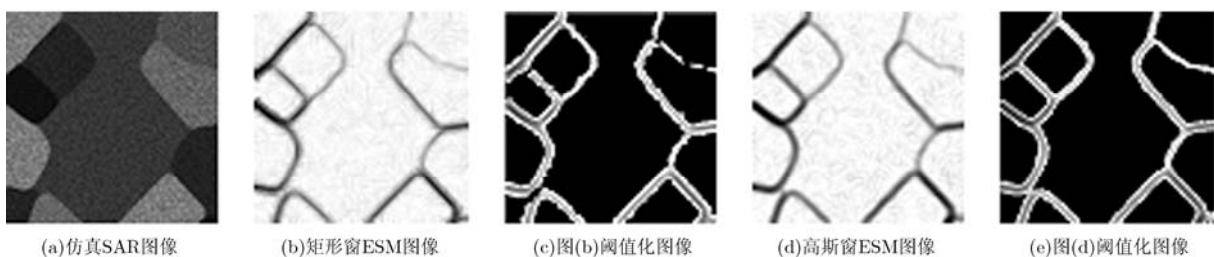


图 3 5 视仿真 SAR 图像在不同平行窗下的 ESM 图像与阈值化 ESM 图像

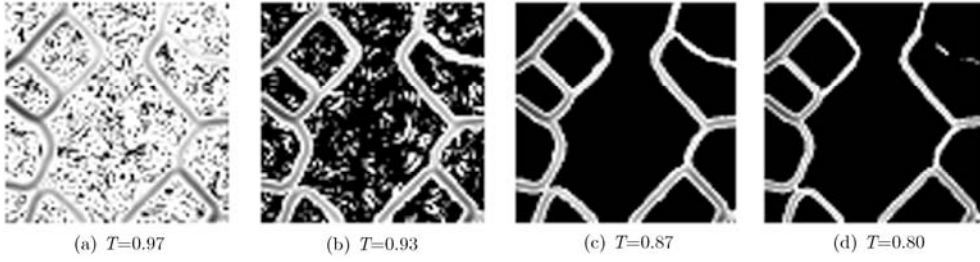


图4 不同阈值下阈值化 ESM 图像

值 T 的有效估计方法。该方法先对 ESM 图像进行多次重复的但阈值递减的阈值化处理(阈值 T 从最大值 1 开始, 到 0.01 为止, 每次减少 0.01), 然后在每次阈值处理后, 统计阈值处理后的 ESM 图像中连通像素点集合的个数, 获得不同阈值 T 下阈值化 ESM 图中连通像素点集合个数曲线(如图 5)。当 ESM 图中连通像素点集合个数曲线由最大值迅速降低直到出现第 1 次极小值时(如图 5 中 $T=0.87$ 时), 该阈值化 ESM 图像虚假边缘与边缘断裂现象都最少, 具有最好的图像区域划分性能(如图 4(c))。

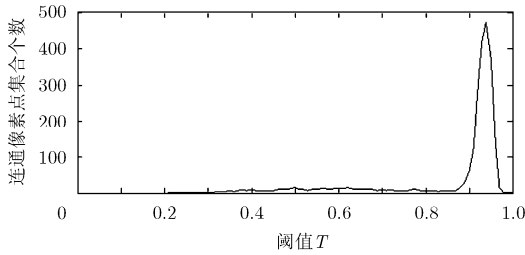


图5 不同阈值下阈值化 ESM 图中连通像素点集合数目曲线

4.3 基于 ESM 约束的大尺度不规则窗下的局部 ENL 估计

SAR 图像区域划分完成后, 需对非边缘区域内的所有像素通过加窗分别计算局部 ENL 值。若对像素 $C(m,n)$ 施尺度为 N 的窗 R , 在采用式(2)计算像素 C 的局部 ENL 时, 像素 C 在窗内的局部均值 E_C 可表示为

$$E_C(m,n) = \frac{1}{N} \sum_{(i,j) \in R} A(m+i,n+j) \quad (6)$$

而窗内局部方差 V_C 可表示为

$$V_C(m,n) = \frac{1}{N-1} \sum_{(i,j) \in R} [A(m+i,n+j) - E(m,n)]^2 \quad (7)$$

由于 ENL 的估计需在 SAR 图像同质区进行, 若窗 R 为传统矩形窗, 则当窗内中心像素 C 靠近图像边缘区域时, 窗 R 势必会包含边缘区域像素并覆盖不同灰度值水平的两块或多块同质区, 从而造成由式(6)与式(7)估计的局部统计量 E_C 与 V_C 出现较大偏差, 进而使得局部 ENL 估计失效。对 SAR 图

像非边缘区域各像素加窗时, 窗内像素应与窗中心像素 C 处于一个同质区内, 显然传统矩形窗不能实现这一要求。另外, 在进行局部 ENL 估计时, 窗尺度越大将会有更多像素参与到局部 ENL 估计中, 从而使得局部 ENL 估计更加平稳有效; 但另一方面, 直接对各像素施加大尺度窗又使得窗内容易包含不同区域的像素, 造成局部 ENL 统计的较大偏差。为此, 本文对各像素施加阈值化 ESM 约束下的大尺度不规则窗, 从窗内参与局部 ENL 估计运算的各像素中, 剔除灰度值起伏较大的像素, 避免这些像素参与窗内统计运算, 从而既可以增加窗内参与局部 ENL 估计的像素个数, 同时又避免了不同区域像素的引入而降低局部统计的偏差, 这是基于 ESM 的第 2 次约束。在具体实现时, 本文利用由阈值化 ESM 生成的区域划分信息 REG, 对传统矩形窗内各像素施加约束, 从而巧妙地将传统矩形窗中与窗中心像素 C 不同质的像素剔除, 进而形成不规则窗, 另外为避免直接利用不规则窗而给后续运算带来不便, 又通过给传统矩形窗内各元素加权的方法间接实现不规则加窗运算。对于传统矩形窗 R , 设窗中心像素 C 属于同质区 Ω , 则像素 $A(i,j) \in R$ 对应的权值 $\delta(i,j)$ 可表示为

$$\delta(i,j) = \begin{cases} 1, & A(i,j) \notin \{\text{REG} > 0\} \text{ 且 } A(i,j) \text{ 能在 } R \\ & \text{内不通过 } \{\text{REG} > 0\} \text{ 与 } C \text{ 点连通} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

这样计算均值 E_C 的式(6)应调整为

$$E_C(m,n) = \frac{1}{N'} \sum_{(i,j) \in R} A(m+i,n+j) \delta(m+i,n+j) \quad (9)$$

而计算方差 V_C 的式(7)应调整为

$$V_C(m,n) = \frac{1}{N'-1} \sum_{(i,j) \in R} [A(m+i,n+j) - E(m,n)]^2 \delta(m+i,n+j) \quad (10)$$

其中 $N' = \sum_{(i,j) \in R} \delta(i,j)$ 。

4.4 基于直方图统计的全局 ENL 估计

利用局部 ENL 估计全局 ENL 时, 为改善 SAR 图像全局 ENL 估计性能, 需要将导致局部 ENL 估

计失效的非边缘区域像素剔除, 这些像素包括: SAR 图像区域划分出现的漏检或错检像素, 以及处于复杂边缘或纹理附近的像素, 但识别并剔除这些像素却比较困难。由于一般 SAR 图像边缘区域像素相对于同质区像素是稀疏量, 因此, 可巧妙地利用直方图统计方法绕开失效局部 ENL 估计值的识别与剔除问题, 直接将直方图中所占比例最大的局部 ENL 作为 SAR 图像全局的 ENL 估计。具体处理过程是: 获取所有局部 ENL 的归一化值 \overline{ENL}_C

$$\overline{ENL}_C(m, n) = \frac{ENL_C(m, n) - ENL_{\min}}{ENL_{\max} - ENL_{\min}} \quad (11)$$

然后在 $[0, 1]$ 区间上以间隔 Δ 对 \overline{ENL}_C 值进行直方图统计。若直方图第 $h (h \geq 1)$ 段间隔中 \overline{ENL}_C 值最集中, 则 SAR 图像的全局 ENL 估计值 ENL_G 可表示为

$$ENL_G = ENL_{\min} + (h - 1/2)\Delta(ENL_{\max} - ENL_{\min}) \quad (12)$$

5 仿真实验

仿真实验采用传统监督估计方法^[5](记为 TSE 方法)、基于空域统计的非监督估计方法^[3](记为 Lee 方法)、基于统计模型的非监督估计方法^[11](记为 Anfinssen 方法)及本文方法(图像分块大小为 128×128 像素)分别对图 6 中的 4 幅不同视数 SAR 图像(尺度均为 512×512 像素), 在 11 种不同窗尺度下分别计算 ENL 估计值, 实验结果如表 1 与表 2 及图 7 所示, 其中: 图 6(d)是对图 6(b)进行经典 Lee 滤波后的抑斑 SAR 图像; 图 6 中 1~3 的数字编号分别对应平均灰度值从小到大的 3 块局部区域。另外, 图 7 中 TSE 方法在不同窗尺度下的单一 ENL 估计值由 3 个区域的局部 ENL 估计值的均值构成。

从表 1 与图 7 所示的 ENL 参数估计实验结果可以发现以下几点规律: (1)Anfinssen 方法与本文方法获得的 ENL 估计值均小于 SAR 图像的实际视数, 而这一实验结果与文献[1]的理论相符, 而其它方法却存在相当部分估计值大于 SAR 图像实际视数的情况, 这说明 Anfinssen 方法与本文方法获得的

估计值与理论值最接近, 而其它方法估计值则存在较大偏差; (2)Lee 方法、Anfinssen 方法与本文方法同为非监督估计方法, 无需人为选择估计区域, 不受局域窗所在区域的选择影响, 而 TSE 方法在同一窗尺度下, 不同区域的 ENL 估计值差异较大, 平稳性较差; (3)Anfinssen 方法获得的 ENL 估计值与窗尺度选择无关, 为一常数, 而其它方法则均受窗尺度变化的影响, 但本文方法随窗尺度的增加先缓慢震荡下降, 当选择较大尺度窗时(如窗尺度大于 9×9 时), ENL 估计值基本保持常数不变且与 Anfinssen 方法估计值出现逼近趋势, 而其它方法的 ENL 估计值随窗尺度的增加, 虽总体上也呈下降趋势, 但下降过程伴随较为明显的波动, 且部分区域甚至出现较为明显的上升现象, 特别是 TSE 方法, 在图 7 中, 虽然 TSE 方法不同窗尺度下的 ENL 估计值已由 3 个区域局部 ENL 估计值的均值代替, 但其 ENL 估计值仍然是各方法中波动最明显的。造成上述实验结果的原因是: 由于 TSE 方法需要人为设置估计区, 所以局部 ENL 估计区域个数必然有限, 利用有限的局部 ENL 估计值作为全局 ENL 估计, 必然导致 ENL 估计值相比其它方法最大的波动; Lee 方法由于将 SAR 图像所有像素均纳入到局部 ENL 估计中, 形成了较为充足的局部估计值样本, 因此, 其估计值的平稳性相对于 TSE 方法有了较大改善, 但由于这种方法不加区别地将起伏较大的边缘或复杂纹理区域像素也纳入局部 ENL 估计, 而这些像素的局部 ENL 估计值波动非常剧烈, 从而导致 Lee 方法 ENL 估计值不可避免地会受到这些像素的影响, 出现较为明显的波动; 本文方法, 在进行局部 ENL 估计前, 先利用 ESM 对 SAR 图像进行区域划分, 将绝大部分不适合局部 ENL 统计的像素排除在外, 因此, ENL 估计值比 Lee 方法更加平稳, 同时, 在对各有效像素进行局部 ENL 估计时, 利用 ESM 两次约束, 对各有效像素施加大尺度不规则窗, 从而不仅使得窗内参与统计运算的像素大大增加, 而且还将窗内大部分起伏较大的

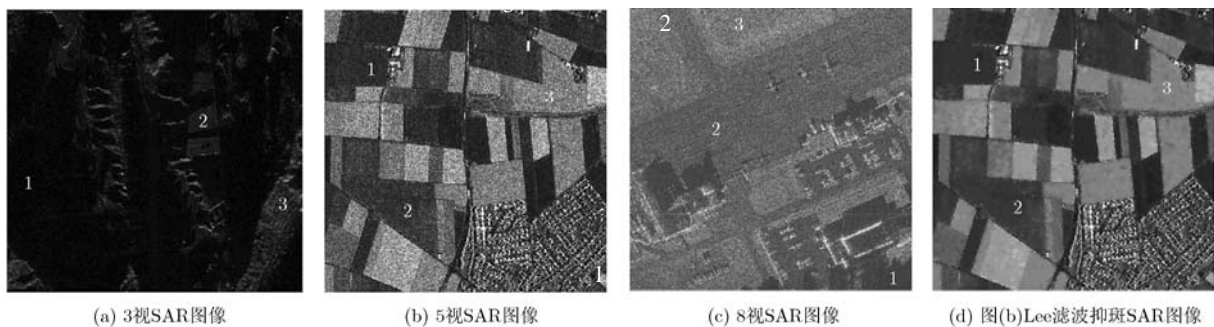


图 6 不同视数的 4 幅实验用 SAR 图像

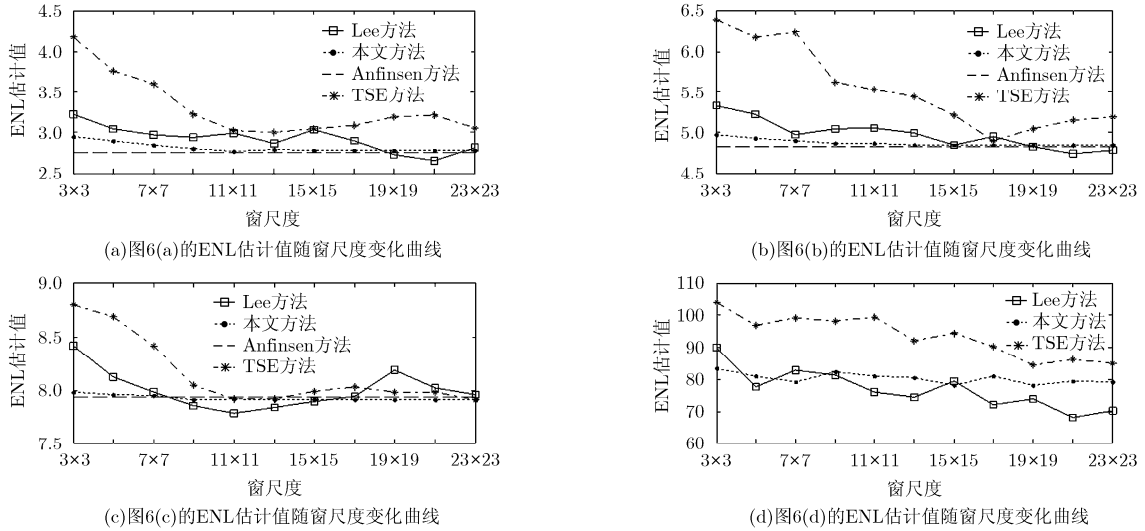


图7 各估计方法对4幅SAR图像的ENL估计值随窗尺度变化曲线

表1 各方法对图6(a)~图6(c)3幅SAR图像ENL参数估计结果

窗尺度	图6(a)3视SAR图像ENL估计值				图6(b)5视SAR图像ENL估计值				图6(c)8视SAR图像ENL估计值							
	TSE方法			Lee方法	TSE方法			Lee方法	TSE方法			Lee方法				
	1区	2区	3区		1区	2区	3区		1区	2区	3区					
3×3	4.57	4.31	3.65	3.23	2.95	6.77	6.72	5.69	5.33	4.97	9.31	8.79	8.30	8.42	7.98	
5×5	3.98	4.07	3.23	3.04	2.90	6.67	6.51	5.36	5.23	4.93	9.38	8.51	8.19	8.12	7.96	
7×7	4.11	3.43	3.28	2.97	2.84	6.41	6.58	5.74	4.97	4.90	9.04	8.23	7.99	7.98	7.95	
9×9	3.60	3.17	2.89	2.94	2.80	6.16	5.39	5.36	5.04	4.86	8.37	7.84	7.90	7.85	7.91	
11×11	3.23	2.89	2.93	2.99	2.77	6.11	5.87	4.62	5.06	4.87	8.05	7.93	7.78	7.78	7.93	
13×13	3.01	2.99	2.99	2.87	2.75	2.79	6.12	5.45	4.78	4.99	4.82	8.11	7.90	7.74	7.84	7.91
15×15	2.97	3.11	3.07	3.03	2.78	6.07	5.17	4.38	4.84	4.84	8.07	8.10	7.80	7.89	7.91	
17×17	3.08	3.21	2.97	2.90	2.78	6.03	4.55	4.22	4.95	4.84	8.14	8.12	7.84	7.94	7.91	
19×19	3.35	3.17	3.05	2.73	2.78	6.30	4.63	4.21	4.82	4.84	7.97	8.04	7.92	8.19	7.91	
21×21	3.37	3.30	2.96	2.65	2.78	6.33	4.72	4.40	4.74	4.84	8.05	8.01	7.87	8.02	7.91	
23×23	3.04	3.11	3.02	2.81	2.78	6.17	4.94	4.45	4.78	4.84	7.99	7.93	7.80	7.96	7.91	

边缘像素得到有效剔除，进而进一步提高了本文方法ENL估计值的平稳性与准确性。

从表2与图7(d)所示的抑斑SAR图像ENL参数估计实验结果可以发现以下几点规律：(1) Anfinfen方法无法估计抑斑SAR图像的ENL，这是因为抑斑后SAR图像中残留的相干斑已丧失原有的统计特性，因此无法利用基于统计模型的方法估计抑斑SAR图像的ENL；(2)传统监督估计方法、Lee方法与本文方法均可用于抑斑SAR图像的ENL估计，但传统监督估计方法受窗尺度与区域位置改变影响较大，估计值波动明显，而Lee方法与本文方法的估计值则不受窗的区域位置影响，另外，这两种方法仍然受窗尺度改变影响，但估计值波动均小于传统监督估计方法，而本文方法估计值波动则较Lee方法更小。另外需要说明的是，对于抑斑SAR图像的ENL估计，传统监督估计方法估计的是人为选定区域的局部ENL值，而Lee方法与本

文方法估计的ENL则体现了抑斑SAR图像中所占比重最集中的局部ENL估计值。

表2 各方法对图6(d)抑斑SAR图像ENL参数估计结果

窗尺度	图6(d)抑斑SAR图像ENL估计值					
	TSE方法			Lee方法	Anfinfen方法	本文方法
	1区	2区	3区			
3×3	111.8	108.9	91.2	89.9		83.5
5×5	98.3	97.1	95.7	77.6		81.1
7×7	100.3	117.9	79.9	82.9		79.2
9×9	108.9	100.3	85.5	81.3		82.3
11×11	110.2	105.4	83.4	76.1		80.9
13×13	99.7	96.5	80.1	74.5	无法估计	80.5
15×15	105.3	97.1	81.2	79.4		78.2
17×17	100.3	94.3	76.5	72.1		80.9
19×19	102.7	92.3	70.2	73.8		78.1
21×21	97.9	89.8	71.3	68.2		79.5
23×23	97.4	89.4	68.4	70.1		79.1

6 结束语

针对 SAR 图像的 ENL 参数估计, 本文提出了一种全程自适应非监督的有效估计方法。该方法利用各项异性高斯核平行窗代替矩形窗生成更有益于 SAR 图像区域划分的比率 ESM, 在估计 ESM 阈值时, 先对大尺度 SAR 图像进行简单分块处理, 然后再分别估计各分块图像的区域 ESM 阈值, 从而用简单的方法实现了 ESM 阈值的区域化与多值化估计, 可有效降低单一阈值估计方法给大尺度图像区域划分带来的性能损失, 而在对各分块 SAR 图像进行区域阈值估计时, 一种非监督 ESM 阈值估计方法的引入不仅使得本文方法实现了 ENL 估计的全过程非监督化, 而且通过阈值化 ESM 有效剔除了 SAR 图像中不适合进行局部 ENL 估计的大部分边缘区域像素, 进而对 SAR 图像非边缘区各像素进行局部 ENL 估计时, 采用了 ESM 两次约束下生成的大尺度不规则窗, 使得各像素局域窗统计范围扩大的同时, 还有效剔除局域窗中灰度值起伏较大的边缘或复杂纹理区域像素, 从而获得了更加平稳有效的各像素局部 ENL 统计, 最后利用简单的直方图统计方法有效降低了大部分失效的局部 ENL 估计值对全局 ENL 估计产生的不利影响。实验表明本文方法有效克服了传统估计方法 ENL 估计值受局域统计方法选择影响大的问题, 同时无需相干斑先验信息, 对抑斑前后 SAR 图像均适用, 真正实现了 ENL 估计的全程自适应非监督化, 而这些优势使得本文方法更接近工程实际。

参 考 文 献

- [1] Henri M. Processing of Synthetic Aperture Radar Images[M]. London: ISTE Ltd and John Wiley & Sons., Inc., 2008: 87-142.
- [2] Yamaguchi Y, Moriyama T, Ishido M, et al. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(8): 1699-1706.
- [3] Lee J S, Hoppel K, and Mango S A. Unsupervised estimation of speckle noise in radar images[J]. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1992, 4(4): 298-305.
- [4] Lee J S, Schuler D L, Grunes M R, et al. Scattering model based speckle filtering of polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(1): 176-187.
- [5] 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抑制算法[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(10): 83-89.
- [6] Zhu Lei, Shui Peng-lang, and Zhang Wei-chuan. A despeckling algorithm for synthetic aperture radar images using region subdivision[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(10): 83-89.
- [7] 李光廷, 禹卫东. 基于自适应 Bilateral 滤波的 SAR 图像相干斑抑制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1076-1081.
- [8] Li Guang-ting and Yu Wei-dong. SAR image despeckling based on adaptive bilateral filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1076-1081.
- [9] 朱磊, 水鹏朗, 程冬. 基于混合迭代滤波的 SAR 图像相干斑抑制[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1038-1044.
- [10] Zhu Lei, Shui Peng-lang, and Cheng Dong. SAR image despeckling based on mixed iteration filtering[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(5): 1038-1044.
- [11] 崔瑞, 薛磊, 汪波. 基于等效视数的 ISAR 干扰效果评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(5): 887-888.
- [12] Cui Rui, Xue Lei, and Wang Bo. Evaluation method of jamming effect on ISAR based on equivalent number of looks[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(5): 887-888.
- [13] Sun Y, Liu Z, Todorovic S, et al. Adaptive boosting for SAR automatic target recognition[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(1): 112-125.
- [14] Anfinsen S N, Doulgeris A P, and Eltoft T. Estimation of the equivalent number of looks in polarimetric SAR imagery[C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, 2008, IV, 487-490.
- [15] Anfinsen S N, Doulgeris A P, and Eltoft T. Estimation of the equivalent number of looks in polarimetric synthetic aperture radar imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(11): 3795-3809.
- [16] Cui Y, Zhou G Y, Yang J, et al. Unsupervised estimation of the equivalent number of looks in SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(4): 710-714.
- [17] Jesper S, Henning S, Allan A, et al. CFAR edge detection for polarimetric SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(1): 20-32.
- [18] Shui Peng-lang and Chen Dong. Edge detector of SAR images using Gaussian-Gamma-shaped Bi-windows[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(5): 846-850.

朱磊: 男, 1979 年生, 博士生, 研究方向为数字信号处理。

水鹏朗: 男, 1967 年生, 教授, 博士生导师, 从事子波理论、图像处理与目标检测等研究。