

## 基于局部平移瑞利分布模型的 SAR 图像相干斑抑制

凤宏晓 焦李成 侯彪

(西安电子科技大学智能信息处理研究所及智能感知与图像理解教育部重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 该文提出了一种基于平稳小波域统计模型的 SAR 图像抑斑算法。首先对 SAR 图像应用非对数加性模型,接着针对该模型中的噪声在空域提出一种统计分布模型——局部平移瑞利分布模型。最后基于该分布,在平稳小波域应用最大后验(MAP)方法获得真实信号平稳小波系数的解。实验表明,该文提出的局部平移瑞利分布模型是有效的,同时也表明该文给出的一种基于此分布模型的抑斑算法有很强的鲁棒性,抑斑性能优于许多现存的算法。

**关键词:** SAR 图像抑斑; 局部平移瑞利分布; 非对数加性模型; 平稳小波变换; 最大后验

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0925-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00512

## SAR Image Despeckling Based on Local Translation-Rayleigh Distribution Model

Feng Hong-xiao Jiao Li-cheng Hou Biao

(Institute of Intelligent Information Processing and Key Laboratory of Intelligent Perception and Image Understanding of Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Based on the statistical model in stationary wavelet domain, an algorithm of SAR image despeckling is developed. Firstly, nonlogarithmic additive model is applied to SAR image, and then a statistical distribution—Local Translation-Rayleigh Distribution Model (LTRDM) is proposed for the noise within nonlogarithmic additive model in the image domain. Finally, based on this model and in the stationary wavelet domain, the solution of real signal coefficients are given by using Maximum *A Posteriori*(MAP). Experiments show that local translation-Rayleigh distribution model is effective, and also indicate that a despeckling algorithm based on LTRDM proposed in this paper is robust, and possess high performance over many traditional algorithms.

**Key words:** SAR image despeckling; Local translation-Rayleigh distribution model; Nonlogarithmic additive model; Stationary wavelet transform; Maximum *A Posteriori* (MAP)

### 1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像在国民经济和军事领域中有十分重要的应用。由于自身成像机理的原因, SAR 图像总是受到相干斑噪声的影响。相干斑使图像的质量退化,影响 SAR 图像的理解与解译。SAR 图像可认为是由实际后向散射强度(Backscatter)和相干斑(Speckle)两部分组成。SAR 图像抑斑就是要尽可能抑制相干斑而最大限度的还原地物的实际后向散射强度。Oliver 和 Quegan<sup>[1]</sup>指出,一个“好”的相干斑抑制算法应该做到:(1)有效去除均匀场景中的斑点噪声;(2)保留图像中散射强度变化的场景;(3)抑斑后不产生伪吉布斯效应;(4)保持图像的辐射特性。

传统的 SAR 图像抑斑方法主要集中在空域(图像域),常见的方法有: Lee 滤波<sup>[2]</sup>、增强 Lee 滤波<sup>[3]</sup>和 Gamma-MAP 滤波<sup>[4]</sup>等。这些方法利用 SAR 图像空域的统计特征,能取得相对比较好的抑斑效果。但是它们对图像局部区域的假设有时与实际情况不完全相符,很难在抑斑的同时较好地保留边缘和纹理细节。近些年,基于小波等新的信号处理工具的 SAR 图像抑斑方法层出不穷,例如:基于正交小波变换(Wavelet Transform)<sup>[5,6]</sup>、平稳小波变换(Stationary Wavelet Transform)<sup>[7,8]</sup>和非下采样 Contourlet<sup>[9]</sup>的抑斑方法等。这些抑斑方法能根据频域的子带系数特征设计策略,相比传统空域的方法而言,能比较好地实现区域平滑和纹理保留的折中。

SAR 图像的斑点噪声是乘性的,常见的处理思路是:先对图像进行同态变换转换为加性模型,再假设加性对数噪声为零均值高斯白噪声进行去噪处理。文献[10]指出, SAR 图像经同态变换后的斑点噪声并不是零均值的,这导致抑斑图像的均值偏离了原始图像的均值,使图像在视觉上变暗,不能很

2009-04-10 收到, 2009-09-28 改回

国家自然科学基金(60672126, 60673097, 60702062), 国家 863 计划项目(2007AA12Z136, 2009AA12Z210)和科技部“973 计划”重点项目(2006CB705707)资助课题

通信作者: 凤宏晓 fenghongxiao1008@yahoo.com.cn

好地保持原始图像的辐射特性,影响了后期对图像的自动解译。对 SAR 图像的乘性模型进行简单的公式推导,使之成为一种非对数加性模型<sup>[7]</sup>,结合该模型的抑斑方法就避免了同态变换所带来的各种问题。目前,对这种加性模型的研究都是围绕传统的信号恢复方法,还未公开见到对模型中噪声部分的统计分布研究成果。本文根据 SAR 图像原始数据的特征,研究了非对数加性模型中噪声的统计分布,提出一种局部平移瑞利模型,对非对数加性模型中的噪声建模。

相比正交小波而言,平稳小波能很好避免正交小波由于缺乏平移不变性而带来的伪吉布斯效应。本文基于平稳小波域的统计分布模型提出一种 SAR 图像抑斑算法,应用最大后验方法求得平稳小波域的抑斑结果。实验结果表明,无论从视觉角度还是客观评价指标,本文抑斑算法的性能都优于许多现存的抑斑算法。

## 2 SAR 图像相干斑模型和统计特性

### 2.1 乘性模型

SAR 图像的相干斑是乘性的,可表示为

$$I = RX \quad (1)$$

$I$  代表观测信号的强度,  $R$  代表相干斑,其均值为 1, 方差  $\sigma_R^2$ , 当为强度图像时其值为  $1/L$ , 幅度图像时其值为  $(4/\pi - 1)/L$  ( $L$  代表图像的视数)。  $X$  代表地物的实际后向散射强度。通常,  $R$  和  $X$  在统计上是相互独立的两个随机过程。因此,可得到  $X$  的均值和方差:

$$m_X = E(X) = E(I)/E(R) = E(I) = m_I \quad (2)$$

$$\sigma_X^2 = (\sigma_I^2 - \sigma_R^2 m_I^2)/(\sigma_R^2 + 1) \quad (3)$$

### 2.2 非对数加性模型<sup>[7]</sup>

根据式(1),进行以下推导:

$$I = RX = X + (R-1)X = X + N \quad (4)$$

原来的乘性模型就转变为非对数加性模型,  $N$  可认为是和真实信号相关的噪声。  $N$  的均值和方差由下面的公式给出:

$$m_N = E[(R-1)X] = E(R-1)E(X) = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_N^2 &= D[(R-1)X] = E[X^2(R-1)^2] \\ &\quad - E^2(X)E^2(R-1) = [\sigma_X^2 + E^2(X)] \\ &\quad \cdot [\sigma_{R-1}^2 + E^2(R-1)] - E^2(X)E^2(R-1) \end{aligned}$$

考虑到  $\sigma_{R-1}^2 = \sigma_R^2$ ,  $E(R-1) = 0$  以及式(3)可得到

$$\sigma_N^2 = \sigma_R^2[\sigma_X^2 + m_I^2] = \sigma_R^2(\sigma_I^2 + m_I^2)/(\sigma_R^2 + 1) \quad (6)$$

### 2.3 完全发展的相干斑 (Fully Developmental Speckle)

在形成可视的图像之前, SAR 图像的数据为复

数形式

$$Z = a + jb = Ae^{j\phi} \quad (7)$$

$a$  和  $b$  是相互独立的, 均值都为 0, 方差都为  $\sigma^2$ 。若假设:

(1) SAR 的空间分辨率比辐射电磁波的波长大的多, 或者在一个空间分辨单元内有足够多的散射元出现, 每个分辨单元都是多个电磁波散射元之间的充分相干的结果;

(2) 这些相干的散射元之间是相互独立的;

(3) 每个分辨单元内不存在占支配地位的单独散射元。

在上面的假设下形成的相干斑称之为完全发展的相干斑。通常 SAR 图像中的同质区域 (Homogeneous Region) 内的相干斑满足完全发展的特性。在完全发展相干斑的假设下, 根据中心极限定理, 可知  $a$  和  $b$  都满足高斯分布。

## 3 局部平移瑞利模型

通常为了得到可视的图像数据对复数  $Z$  取模:

$$I = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (8)$$

这里  $I$  表示常见的幅度格式的 SAR 图像, 如果取  $I^2$  就变成强度格式的。(本文将只讨论幅度格式的 SAR 图像。)

假设相干斑是完全发展的, 则  $a$  和  $b$  满足相互独立同方差、零均值高斯分布。易知, 此时式(8)中的  $I$  满足瑞利 (Rayleigh) 分布:

$$f_I(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, & x \geq 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

通常图像可看成是由一个个小的同质区域组成, 这种小区域的极限情况就是单个像素。 Lopes 等指出<sup>[3]</sup>同质区域内的地物实际后向散射强度是一个常数。对于任意一个同质区域  $\Omega$  下面给出式(4)的一种特殊形式:

$$I_\Omega = X_C + N \quad (10)$$

$X_C$  是一个未知常数, 表示该同质区域内的真实后向散射强度。由于同质区域内的相干斑满足完全发展特性, 则  $I_\Omega$  满足瑞利分布。根据式(5)  $N$  的均值为 0, 则有  $X_C = m_I$ 。那么  $N$  的分布函数则可以写成:

$$f_N(n) = \begin{cases} \frac{n + m_I}{\sigma^2} e^{-\frac{(n+m_I)^2}{2\sigma^2}}, & n \geq -m_I \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)可以看成是瑞利分布平移的结果, 所以称这种分布为——平移瑞利 (Translation-Rayleigh) 分布。

## 4 基于平稳小波域局部平移瑞利模型的相干斑抑制

### 4.1 平稳小波变换

小波变换可以对一个信号  $f(x)$  向  $L^2(R)$  上的尺度空间  $V_j$  和一系列的小波空间  $W_j$  投影, 从而得到不同分辨率的信号  $f_j(x)$ 。若用  $a_j$  和  $d_j$  表示第  $j$  层的近似和细节信号,  $\phi_{j,k}$  和  $\psi_{j,k}$  表示尺度函数和小波函数, 并假设分解的总层数为  $J$ , 则信号  $f(x)$  可以展开为

$$f(x) = \sum_k a_j[k] \phi_{j,k}(x) + \sum_{j \leq J} \sum_k d_j[k] \psi_{j,k}(x) \quad (12)$$

小波变换由于在分解进行了下采样从而不具备平移不变性, 容易导致重构图像中出现伪吉布斯效应。为了克服这个不足, Nason和Silverman提出了平稳小波变换<sup>[1]</sup>。在分解策略上平稳小波变换同于小波变换, 唯一的区别在于: 在分解的过程不进行下二采样, 从而具备了平移不变性。此外, 在分解过程中为了满足奈奎斯特采样定理, 需要对滤波器在奇位置或偶位置进行插零上采样。

### 4.2 平稳小波域的局部平移瑞利模型

在平稳小波域式(4)可表示为

$$S_I^k = S_X^k + S_N^k, \quad k = 1, 2, 3 \quad (13)$$

$k = 1, 2, 3$  分别表示当前层的LH, HL和HH子带。  $S_I^k$  表示观测信号的平稳小波域系数,  $S_X^k$  表示真实信号的平稳小波域系数,  $S_N^k$  表示和真实信号相关的噪声在平稳小波域的系数。

和空域相类似, 图像在平稳小波域的高频子带 LH、HL和HH中的系数也可以看成是由一个个小区域组成, 这些小区域与原始图像的同质区域一一对应。在每个子带内假设一个窗  $W$ , 当  $W$  的尺寸比较小时, 窗口内的系数就可以被近似认为是平稳的, 这和空域图像的同质区域相对应。为了表示方便起见省略子带标志  $k$ , 在局部区域窗  $W$  内式(13)被重新写为

$$S_I^W = S_X^W + S_N^W \quad (14)$$

由于小波变换是一种线性变换, 所以  $S_N^W$  的统计分布和式(10)中的  $N$  一致, 满足平移瑞利分布, 其概率密度函数可以写为

$$f_{S_N}(S_N) = \begin{cases} \frac{S_N + m_I}{\sigma^2} e^{-\frac{(S_N + m_I)^2}{2\sigma^2}}, & S_N \geq -m_I \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中的  $m_I$  表示原始图像的均值。在整个高频子带内通常真实信号系数  $S_X^W$  近似满足零均值高斯分布, 本文中, 假设  $S_X^W$  满足零均值高斯分布。在后面的内容中, 为了表示方便也将略去上标  $W$ 。

### 4.3 $S_X$ 的最大后验 (Maximum A Posteriori, MAP)解

SAR图像抑斑的目标就是从  $S_I$  中恢复  $S_X$ 。假设  $\hat{S}_X$  表示对真实  $S_X$  的估计, 根据最大后验的求解方法有

$$\hat{S}_X = \arg \max [f_{S_X|S_I}(S_X | S_I)] \quad (16)$$

根据贝叶斯公式, 可得到

$$\begin{aligned} \hat{S}_X &= \arg \max [f_{S_X|S_I}(S_X | S_I)] \\ &= \arg \max [f_{S_I|S_X}(S_I | S_X) f(S_X)] \\ &= \arg \max [f(S_N) f(S_X)] \\ &= \arg \max [\ln f(S_N) + \ln f(S_X)] \end{aligned} \quad (17)$$

若假设  $S_X$  的方差为  $\sigma_{S_X}^2$ ,  $S_N$  的方差为  $\sigma_{S_N}^2$ , 式(17)可转化为

$$\begin{aligned} \hat{S}_X &= \arg \max \left[ \ln \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{S_X}} e^{-S_X^2/(2\sigma_{S_X}^2)} \right) \right. \\ &\quad \left. + \ln \left( \frac{S_N + m_I}{\sigma_{S_N}^2} e^{-(S_N + m_I)^2/(2\sigma_{S_N}^2)} \right) \right] \\ &= \arg \max \left[ -\frac{S_X^2}{2\sigma_{S_X}^2} - \frac{(S_N + m_I)^2}{2\sigma_{S_N}^2} + \ln(S_N + m_I) \right] \\ &= \arg \min \left[ \frac{S_X^2}{2\sigma_{S_X}^2} + \frac{(S_N + m_I)^2}{2\sigma_{S_N}^2} - \ln(S_N + m_I) \right] \\ &= \arg \min \left[ \frac{S_X^2}{2\sigma_{S_X}^2} + \frac{(S_I - S_X + m_I)^2}{2\sigma_{S_N}^2} \right. \\ &\quad \left. - \ln(S_I - S_X + m_I) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

设  $f(S_X) = \frac{S_X^2}{2\sigma_{S_X}^2} + \frac{(S_I - S_X + m_I)^2}{2\sigma_{S_N}^2} - \ln(S_I - S_X + m_I)$ , 令  $\frac{df(S_X)}{dS_X} = 0$  求得

$$\hat{S}_X = \frac{A(p + 2q) \pm \sqrt{p^2 A^2 + 4(p + q)}}{2(p + q)} \quad (19)$$

其中  $p = 1/\sigma_{S_X}^2, q = 1/\sigma_{S_N}^2$ ,  $A = S_I + m_I$ ,  $A \geq 0$  时取  $-$ ,  $A < 0$  取  $+$ 。

在平稳小波域, 式(19)所得的结果是在局部窗口  $W$  (设窗口大小为  $M \times M$ ) 中求得的, 所以  $\sigma_{S_X}^2$  可以使用下面的估计获得

$$\sigma_{S_X}^2 = \max \left[ 0, \frac{1}{M^2} \sum_{i,j \in W} (S_I^2(i,j) - \sigma_{S_N}^2) \right] \quad (20)$$

在实际中, 随着平稳小波分解层数的增加  $\sigma_{S_N}^2$  的值会发生一定的变化, 此时使用式(6)求得的方差过于粗糙, 在本文中, 为了提高噪声标准差的估计精度,

对第  $j$  层的每个子带  $S_j^k$  都采用中值估计法估计, 记第  $j$  层, 第  $k$  子带 ( $k=1,2,3$  分别表示 LH, HL 和 HH 子带)  $S_N$  的标准差为  $\sigma_{S_N}^{j,k}$ :

$$\sigma_{S_N}^{j,k} = \frac{\text{median}(S_j^k)}{0.6745}, j=1, \dots, J, k=1,2,3 \quad (21)$$

在实际计算中,  $\sigma_{S_X}^2$  和  $\sigma_{S_N}^2$  的值都相对比较大, 此时  $p$  和  $q$  的值都很小, 在一定的近似下满足  $p+q \approx 0$ , 那么  $\sqrt{p^2(S_I + m_I)^2 + 4(p+q)} \approx p|S_I + m_I|$ , 此时可得到式(19)的一个近似表达:

$$\hat{S}_X \approx \frac{q}{(p+q)}(S_I + m_I) = \frac{\sigma_{S_X}^2}{\sigma_{S_X}^2 + \sigma_{S_N}^2}(S_I + m_I) \quad (22)$$

#### 4.4 算法步骤

步骤1 输入原始 SAR 图像  $I$ , 设其尺寸为  $m \times n$ ;

步骤2 计算图像的均值  $m_I$ ;

步骤3 对  $I$  使用平稳小波分解, 设分解层数为  $J$ , 得到分解系数  $S_j^k$  ( $j$  表示层数,  $k$  表示子带方向,  $k=1,2,3$ , 分别代表 LH, HL 和 HH 方向子带), 其大小为  $m \times n$ ;

步骤4 初始化  $j=1$ ;

步骤5 初始化  $k=1$ ;

步骤6 使用式(21)计算当前子带噪声系数的标准差  $\sigma_{S_N}^{j,k}$ 。根据式(20), 使用滑动窗  $W$  (设窗口大

小为  $M \times M$ ) 计算当前子带内每个系数的信号标准差  $\sigma_{S_X}^{j,k}(a,b)$ , ( $1 \leq a \leq m, 1 \leq b \leq n$ )。根据式(22)计算当前真实信号平稳小波系数的估计值  $\hat{S}_X^{j,k}(a,b)$ ;

步骤7  $k=k+1$ , 若  $k \leq 3$  转到步骤6;

步骤8  $j=j+1$ , 若  $j \leq J$  转到步骤5;

步骤9 对真实信号的平稳小波估计系数  $\hat{S}_X^{j,k}$  进行平稳小波逆变换, 获得地物实际后向散射系数的估计  $\hat{X}$ , 即为抑斑图像, 算法结束。

#### 5 实验结果及其评价

为了验证本文算法的有效性, 实验中用两幅 SAR 图像进行测试: (1)图 1(a), 英国 Bedfordshire 地区, 3 m 分辨率, 2 视幅度机载 SAR 图像 ( $256 \times 256$ , 简称: Field); (2)图 2(a), 国内某机场, 1 m 分辨率, 2 视幅度机载 SAR 图像 ( $512 \times 512$ , 简称: Airport)。实验中, 本文算法分别与增强 Lee 滤波、正交小波(DWT)软阈值收缩、平稳小波(SWT)软阈值收缩和基于非下采样 Contourlet(NSCT)的 SAR 图像抑斑<sup>[9]</sup>进行了比较, 其中基于 DWT 和 SWT 的阈值收缩以及基于 NSCT 的抑斑方法均对原始图像进行了同态变换。

对抑斑效果进行评价时, 本文采用以下客观评价指标:

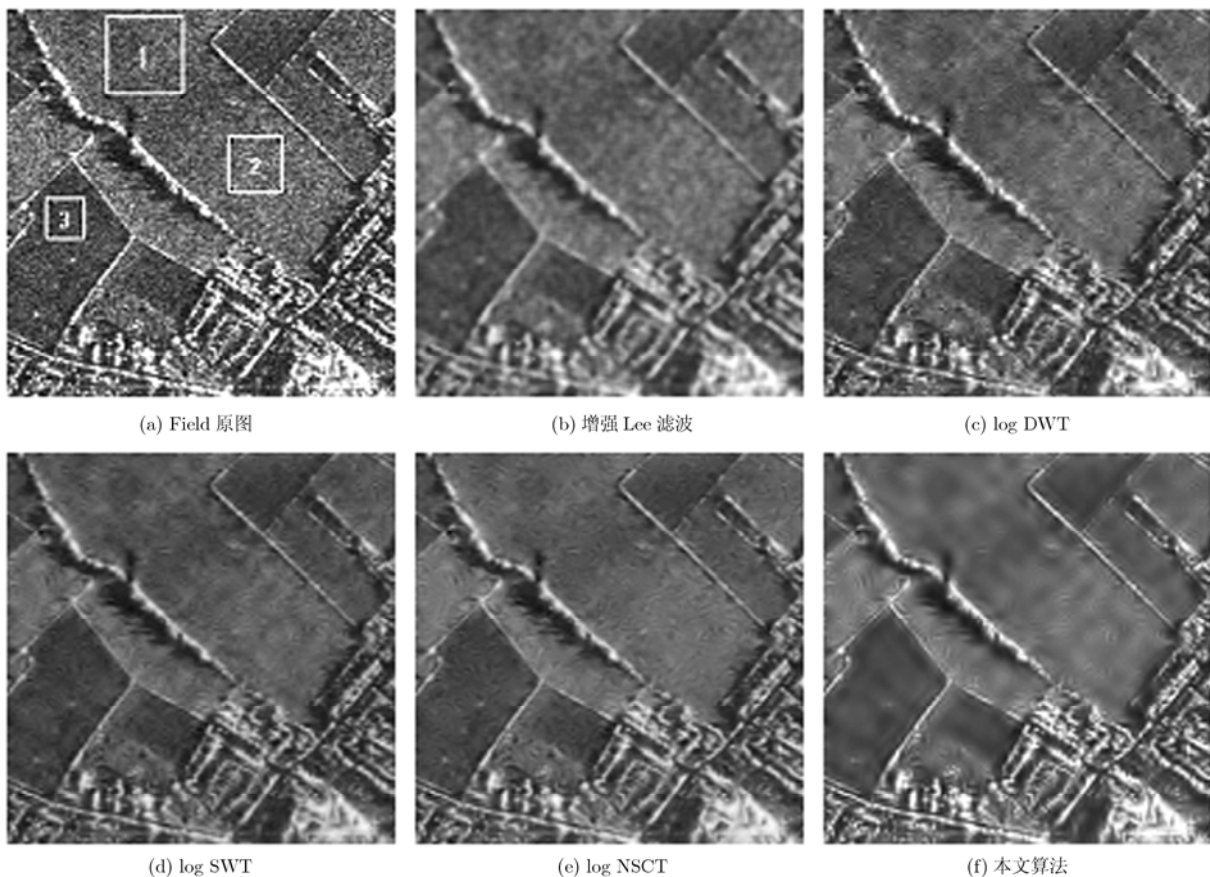


图 1

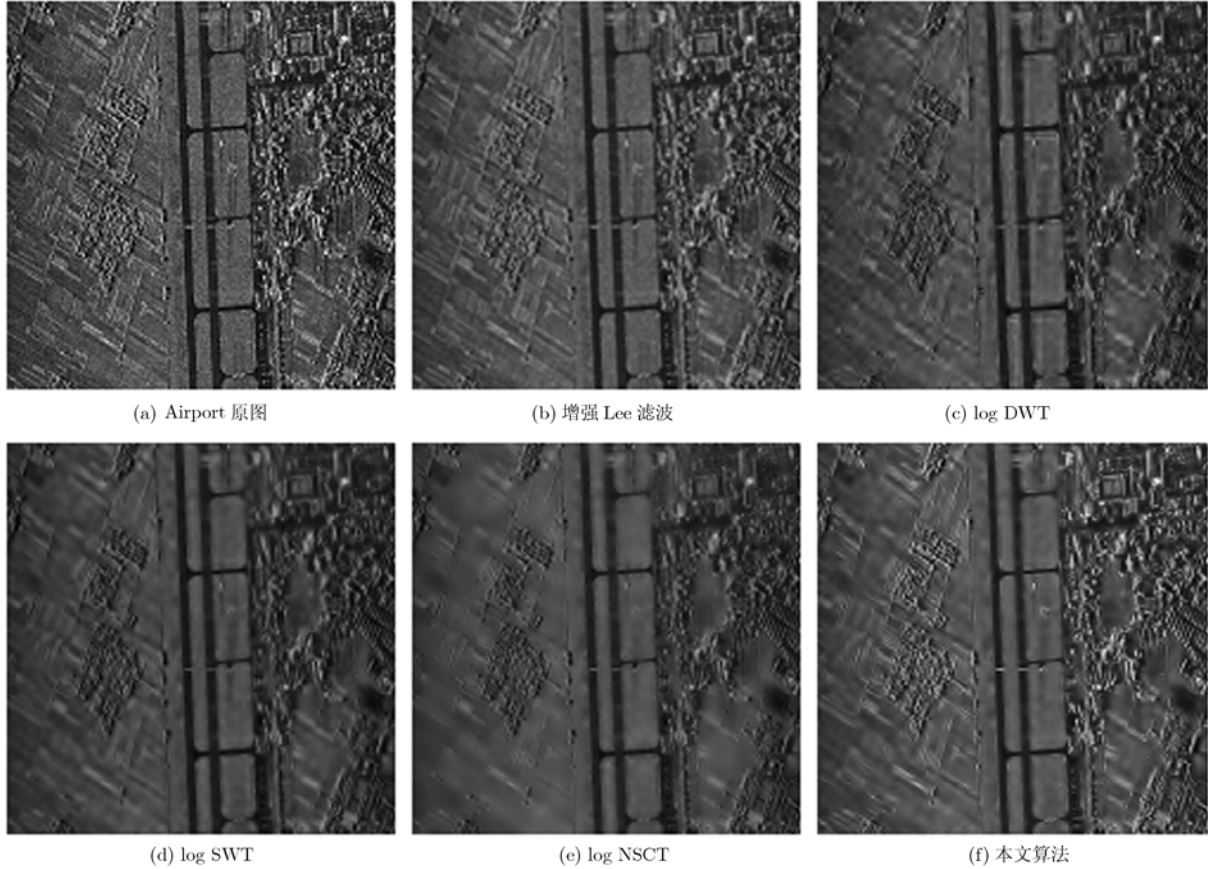


图 2

(1) 等效视数 (Equivalent Number of looks, ENL): 表示抑斑后对图像的平滑程度, ENL 值越大, 平滑程度越高, 其表达式为<sup>[12]</sup>

$$ENL = A \left( M_{\text{hom}} / S_{\text{hom}} \right)^2 \quad (23)$$

$M_{\text{hom}}$  和  $S_{\text{hom}}$  分别为降斑图像均匀场景的均值和标准差, 对于强度图像  $A = 1$ , 幅度图像  $A = 4 / \pi - 1$ 。

(2) 比值图像: 在理想情况下, 原始图像与抑斑后图像的比值即为斑点噪声图像, 对比值图像通常采用下面两种评价指标:

(a) 比值图像的均值: 均值反映抑斑算法对原始图像的辐射特性保持程度, 其理想值为 1。

(b) 比值图像的方差: 方差反映对相干斑的抑制程度, 与理想值越接近越好, 其理想值为

$$\sigma_n^2 = \begin{cases} 1/L, & \text{幅度SAR图像} \\ (4/\pi - 1)/L, & \text{强度SAR图像} \end{cases} \quad (24)$$

式(24)中  $L$  代表 SAR 图像的视数。

为了对比各个算法的抑斑平滑效果, 在图 1(a) 选择 3 个同质区域, 计算这些区域的 ENL, 结果由表 1 给出。比值图像的评价结果由表 2 给出。图 1(b)-1(f) 和 2(b)-2(f) 展示了各种算法的抑斑结果。需要说明的是图 1(a)Field 在名义上的视数为 2 视, 而其有效视数大约为 3 视, 在 SAR 图像评价时, 方差的计算要依据其有效视数<sup>[1]</sup>。

根据表 1 可知, 本文算法能有效地抑制同质区域的噪声, 通过对比图 1(b)-1(f) 可以看到本文算法在同质区域的伪吉布斯效应也是最弱的。由于对图像未进行同态变换, 本文算法能非常好地保持图像

表1 等效视数比较

	原图	增强 Lee	log DWT	log SWT	log NSCT	本文算法
区域 1(50×50)	2.8941	20.1788	15.1022	19.0447	27.4785	<b>34.3527</b>
区域 2(35×35)	3.1279	31.8188	26.3991	33.8281	59.9703	<b>74.1941</b>
区域 3(25×25)	2.7441	46.1399	17.2662	27.2574	35.0529	<b>94.2481</b>

表2 比值图像的均值和方差比较

	增强 Lee	log DWT	log SWT	log NSCT	本文算法	理想值
图 1(a)均值	1.0044	1.0596	1.1586	1.0344	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>
图 1(a)方差	0.1005	0.0734	0.0799	0.0695	<b>0.0892</b>	<b>0.0911</b>
图 2(a)均值	1.0048	1.1348	1.2618	1.1568	<b>1.0000</b>	<b>1.0000</b>
图 2(a)方差	0.1630	0.2523	0.2734	0.2196	<b>0.1150</b>	<b>0.1366</b>

说明的是表 2 中本文算法的均值是一定精度下的结果,所以在形式上和理想值一致。图 2(a)的左侧和右侧有大量的城镇区域,表现为图像的纹理,通过对比图 2(b)-2(f)可以看出本文算法能很好地保留这些区域的纹理,特别在图像亮度上本文算法结果的优势是非常明显的。由于受到实际地物背景和成像系统的影响,实际 SAR 图像某些大同质区域内的局部区域并不完全符合完全发展的相干斑模型,所以在同质区域内出现了少量的“划痕”效应。

在前面的实验中测试图像均为机载幅度图像,为了检验本文算法的鲁棒性,图 3(a)给出一幅星载幅度 SAR 图像(256×256, 1 m 分辨率, 德国某城

镇,图像来源于德国空间中心)。由于本文算法只针对幅度 SAR 图像,当处理强度 SAR 图像时,可对其开方转化成幅度格式处理,处理后再平方得到抑斑结果。图 4(a)给出了一幅强度格式的 SAR 图像(256×256, 英国 Bedford 附近,3m 分辨率)。图 3(b)和 4(b)给出了使用本文算法的抑斑结果。图 3(b)和 4(b)证明本文提出的抑斑算法对星载以及强度 SAR 图像也是很有有效的,图像中同质区域的斑点噪声被有效的去除,图 3(b)中上部的强目标保留很好,图 4(b)中左下部的纹理清晰,这说明本文算法拥有比较强的鲁棒性。

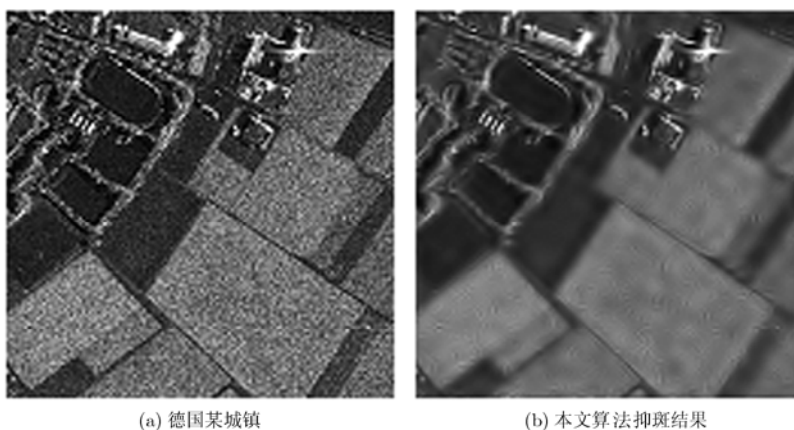


图 3

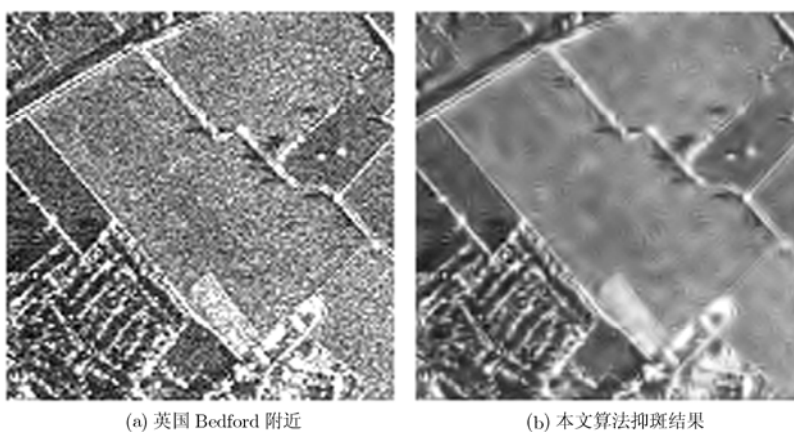


图 4

## 6 结束语

本文提出了一种新的SAR抑斑方法, 它不同于传统的在抑斑之前进行同态变换的抑斑思路, 直接应用非对数加性模型, 采用局部平移瑞利分布对该模型中的噪声部分统计建模, 基于该分布模型使用MAP获得平稳小波域真实信号系数的解。实验证明, 本文提出的分布模型以及在该模型下给出的算法的有效性。目前, 还未公开见到在图像域对非对数加性模型中噪声的统计分布建模的研究成果, 本文的统计分布模型在一定假设下提出的, 可以认为是一种近似模型, 更精确的分布模型还需要进一步的研究。

### 参考文献

- [1] Oliver C and Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Boston MA: Artech House, 1998: 158-187.
- [2] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, PAMI-2(2): 165-168.
- [3] Lopes A, Touzi R, and Nezry E. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(6): 992-1000.
- [4] Lopes A, Nezry E, and Touzi R, *et al.* Maximum a posteriori filtering and first order texture models in SAR images. Proc. IGARSS'90, Washington, D.C., May 20-24, 1990: 2409-2412.
- [5] Bhuiyanr M I H, Ahmad M O, and Swamy M N S. Spatially adaptive wavelet- based method using the cauchy prior for denoising the SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 17(4): 500-507.
- [6] 卢晓光, 韩萍, 吴仁彪等. 基于二维小波变换和独立分量分析的 SAR 图像去噪方法. *电子与信息学报*, 2008, 30(5): 1052-1055.
- Lu X G, Han P, and Wu R B, *et al.* An approach for SAR image despeckling based on 2D-Wavelet transform and ICA. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1052-1055.
- [7] Bianchi T, Argenti F, and Alparone L. Segmentation-based MAP despeckling of SAR images in the undecimated Wavelet domain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2728-2742.
- [8] Stian S and Torbjørn E. A stationary wavelet-domain wiener filter for correlated speckle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(4): 1219-1230.
- [9] 郭旭静, 王祖林. SAR 图像的非下采样 Contourlet 噪声抑制算法. *北京航空航天大学学报*, 2007, 33(8): 894-897.
- Guo X J and Wang Z L. Nonsubsampled Contourlet speckle reduction algorithm for SAR images. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 33(8): 894-897.
- [10] Xie H, Pierce L E, and Ulaby F T. Statistical properties of logarithmically transformed speckle. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(3): 721-727.
- [11] Nason G P and Silverman B W. The stationary wavelet transform and some statistical applications in wavelet and statistics. Lecture notes in statistics, Berlin: Spinger Verlag, 1995: 281-299.
- [12] Xie H, Pierce L E, and Ulaby F T. SAR speckle reduction using wavelet denoising and Markov random field modeling. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2196-2212.

风宏晓: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为自然、SAR 图像后处理和尺度几何分析。

焦李成: 男, 1959年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能算法、机器学习、非线性科学、智能信号处理、小波理论及应用。

侯彪: 男, 1974年生, 副教授, 研究方向为多尺度几何分析、小波分析、数字图像处理、SAR 图像理解与解译等。