

文章编号 :1001-2486(2001)04-0107-06

基于迭代结构滤波器的 SAR 图像去噪方法研究*

郦苏丹,张翠,王正志

(国防科技大学自动控制系,湖南长沙 410073)

摘要 通过比较各种合成孔径雷达(SAR)图像的滤波方法,指出他们存在的不足。然后提出基于模拟退火的迭代滤波器的 SAR 图像滤波方法。这种方法通过引入相关邻域模型,描述图像的局部特性。首先建立一系列反映方向信息的模板,每一个模板代表了一种邻域结构。然后在 SAR 图像的统计性质基础上,对于每个邻域结构,利用 Bayes 方法,根据图像的观测值,获得强度真实值的最大后验概率(MAP)估计。然后运用模拟退火算法,根据每个结构的概率随机选取一个邻域结构作为最适合结构,它所对应的估计值作为图像真实强度的估计。模拟退火保证随着温度逐步趋向于 0,算法可以获得估计的全局最优解。

关键词 SAR 滤波 相关邻域模型 模拟退火

中图分类号:TP722.6 文献标识码:A

SAR Image Speckle Reduction Using Iterated Structure Filters

LI Su-dan, ZHANG Cui, WANG Zheng-zhi

(Department of Automatic Control, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Kinds of synthetic aperture radar(SAR) image filter methods are studied first, their faults being pointed out. Then a kind of SAR image filter method based on annealing and iterated filter is proposed, which describes image local property by correlated neighbourhood model. At first, a series of templates reflecting direction informatio are established and every template is present for a kind of neighbour structure. Then on the basis of SAR image statistical property, the MAP estimate of the real intensity under observation image values for every structure is got by Bayes formulation. Simulated annealing algorithm is used to get proper structure from the candidate structure according their probability, the estimate value corresponding to this structure is the estimate of the underlying cross-section. Simulated annealing algorithm makes sure that the best global result can be obtained when the temperature is reduced to zero.

Key words SAR; filter; correlated neighbourhoodmodel; simulated anneal

合成孔径雷达(SAR)可以全天候和全天时成像,且具有高分辨率和穿透性的优势,在军事和民用方面发挥越来越巨大作用。但是它受到其自身固有的相干斑点噪声的影响,使得它的可视性大大降低,并且低信噪比使得图像的自动处理非常困难。通常人们在成像前通过多视处理来降低噪声的影响,但是多视处理同时降低了图像的空间分辨率,因此人们研究了大量的成像后斑点噪声去除方法,其中 Frost, Lee, Kuan 滤波器是比较出色和实用的 SAR 图像滤波器,他们都是建立在 SAR 图像的乘法噪声模型基础上的。本文通过引入相关邻域模型,考虑目标像素点周围的细节结构,可以更加准确地对目标像素点进行估计。

1 SAR 图像统计模型与滤波方法简介

1.1 SAR 图像统计特性

在斑点噪声为充分发展的假设下,均匀区域的单视雷达图像强度概率密度函数(PDF)为:

$$f(I) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{I}{\mu}} \quad (1)$$

其中 μ 代表区域的期望强度。

L -视雷达强度图由一个视景的 L 个不相关的单视强度图平均而成,其 PDF 为 L 个单视 PDF 的卷积^[1],得

* 收稿日期 2001-02-23
作者简介 郦苏丹(1973-)男,博士生。

$$p(I) = \left(\frac{1}{\mu}\right)^L \frac{\mu^{L-1}}{\Gamma(L)} \exp\left[-\frac{LI}{\mu}\right] \quad (2)$$

其中

$$\Gamma(L) = (L-1)!$$

通过上述的 PDF 可以推得强度图像的乘法模型: $I = \mu \frac{z}{2N}$ (3)

其中 z 服从自由度为 $2L$ 的 χ^2 分布

$$f(z) = \frac{z^{L-1} e^{-\frac{z}{2}}}{2^L \Gamma(L)} \quad (4)$$

z 的均值为 $2L$, 方差为 $4L$ 。即方程 (2) 与方程 (3) \ (4) 是等价的。

1.2 SAR 图像常用滤波方法

根据 (3) 式可以建立 SAR 回波产生的数字图像的乘法噪声模型

$$K(t) = R(t)u(t) \quad (5)$$

其中 $t = (x, y)$ 为图像的空间坐标, 表示实际地面的一个分辨率单元, $K(t)$ 是在 $t = (x, y)$ 的图像观测强度, $R(t)$ 表示 t 分辨率单元的期望反射强度, 理解为信号, $u(t)$ 表示乘法噪声, 与 $R(t)$ 独立, 其均值为 \bar{u} , 方差为 σ_u^2 , 诸如 Frost、Lee、Kuan 等经典滤波器都是基于这个乘法模型建立的。Lee 滤波器^[3, 4]为

$$R(t) = K(t)W(t) + \bar{K}(t)(1 - W(t)) \quad (6)$$

其中加权系数

$$W(t) = 1 - C_u^2 / C_K^2(t), C_u = \frac{\sigma_u}{\bar{u}}, C_K(t) = \frac{\sigma_K(t)}{\bar{K}(t)} \quad (7)$$

Kuan^[5]首先将 (5) 中的乘法噪声转换为与信号无关的加法噪声, 然后运用最小方差估计 (MMSE) 获得与 (6) 式有相同形式的滤波器, 只是加权系数不同, 为

$$W(t) = \frac{1 - C_u^2 / C_K^2(t)}{1 + C_u^2} \quad (8)$$

Frost 滤波器^[2]不同于 Lee 和 Kuan 滤波器, 它通过观测图像与 SAR 系统的冲击响应的卷积来估计期望反射强度。SAR 系统的冲击响应通过对下式的 MMSE 获得

$$\epsilon^2 = E[(R(t) - K(t)) * m(t)]^2 \quad (9)$$

其中 $m(t)$ 为 SAR 系统的冲击响应, $R(t)$ 建模为自回归过程, 它的自相关函数为

$$R_R(\tau) = \sigma_R^2 \exp(-\alpha |\tau|) + \bar{R}^2 \quad (10)$$

其中 \bar{R} 是信号的局部均值, σ_R^2 为局部方差, α 为自相关系数。对于不同的地面状况, 这三个参数有不同的值。在这种情况下可以获得,

$$m(t) = K_2 \alpha \exp(-\alpha |t|) \quad (11)$$

其中 α 是衰减常数, K_2 是归一化常数。通过简化, 获得衰减常数为 $\alpha = K(\sigma_I / \bar{I})^2 = KC_I^2$, 此时的 Frost 滤波器形式为

$$m(t) = K_1 \exp(-KC_I^2 |t - t_0|) \quad (12)$$

其中 K_1 是归一化常数。

2 迭代结构滤波器

上述滤波器有一个共同特点, 即都通过一个固定的窗口来对图像进行操作, 因此难以解决平滑和保持细节这一对矛盾。例如对于均匀区域, 需要大的窗口通过平均来提高斑点消除的效果, 而对于存在目标的区域, 大的窗口就会使得目标产生模糊, 因此一个固定的窗口难以完全满足要求。

本文通过引入相关邻域模型来解决这些问题。对于每个目标像素点, 考虑它的 8 邻域范围内的像素, 我们将该邻域范围内的像素点进行任意组合, 每一种组合体现了一种邻域结构。在其中选择与目标像素点最接近的一组组合构成目标像素点的邻域, 在此基础上对目标像素点的强度进行估计。因此, 也

可以把这种相关邻域模型看成自适应邻域模型。这个滤波器仅在相邻像素范围内操作,因此可以保证图像细节。Crimmins^[8]提出了一种基于迭代方法的几何滤波器。它并没有考虑任何斑点的统计模型,而是依赖于场景的形状特征。它利用一些小模版对图像进行几何处理,这些模版对场景中的特定结构响应。这些模版可以在相邻像素中平滑噪声,通过迭代可以将局部信息向全局范围传递,使得通过一定次数的迭代后,均匀区域得到平滑,同时细节部分得到保留。因此我们在此基础上提出迭代结构滤波器,利用相关邻域模型来描述场景的局部不均匀和平滑效果,然后使用迭代方法,将局部邻域范围内的特性传递到大范围的区域,增加平滑的程度。因此这种滤波方法能够适应场景的波动,保持图像细节,并能获得很大程度的平滑效果。

2.1 结构邻域模型

在 SAR 图像中,对于每个像素点来说,相邻的像素中必然存在部分像素与之属性相近,这些相近的像素在一起体现了图像的局部结构。如果不考虑图像的局部结构,像前述方法那样将所有相邻像素点一视同仁,这种滤波虽然使图像得到平滑,但必然会使得图像的细节得到模糊。我们可以通过引入关于结构的先验知识来改进这种重构方法。

马尔可夫随机场(MRF)利用先验知识对像素点的邻域结构进行建模,在图像恢复和分割中获得成功的应用。但是,它通常是把图像中的每个像素归类到预先定义的几类状态中去,一般来说小于6类。这种方法在很多情况下有局限性,状态过少会降低内容丰富的遥感图像的细节,而状态增加会使得计算量巨大。因此,我们不使用离散的状态值,而是从固定的邻域结构集合中选择合适的结构来描述像素的状态,然后针对该邻域结构,运用最大后验概率(MAP)估计,可以获得目标像素的连续估计值。

在理论情况下,目标像素点的邻域中的每个组合可以包含1—8个像素个数,每一种组合体现了一种图像的局部结构。前述的几种 SAR 滤波方法仅考虑邻域像素全部包括的情况。全部的组合数目为 $N = C_8^1 + C_8^2 + C_8^3 + C_8^4 + C_8^5 + C_8^6 + C_8^7 + C_8^8$,数目过于庞大,并且由于各组合中包含的像素数目不同,为选择最合适的邻域结构造成困难。为了简化邻域结构,同时考虑像素点周围的细节信息,将邻域分割成一系列考虑方向信息的模版,引入结构敏感性。如图1所示,把获得的12个邻域结构的集合定义为 N 。我们把中间的像素定义为0,相邻的两个像素分别定义为1和2。

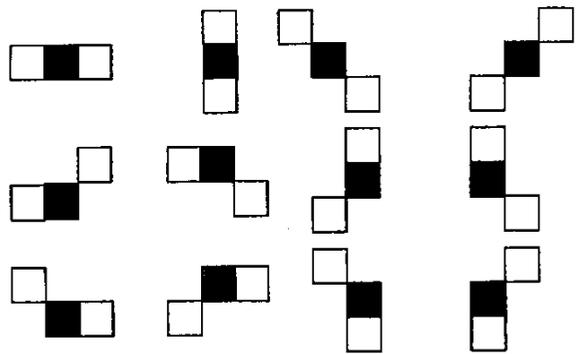


图1 邻域结构
Fig.1 Neighbour structures

2.2 邻域结构中雷达反射截面的 MAP 估计

前述的 SAR 滤波方法采用了最小方差估计(MMSE)估计的方法来获得像素点的强度估计,本文采用 MAP 方法,斑点消除的问题可以看成已知观测强度 I ,在 Bayes 准则下求期望反射强度的最大概率估计。这里我们将期望反射强度理解为反射截面,如果某成像分辨率单元的期望反射强度大,则认为它的反射截面大,将反射截面用 σ 表示,则

$$P(\sigma | I_0) = \frac{P_{speckle}(I_0 | \sigma)P_{\sigma}(\sigma)}{P(I_0)} \tag{13}$$

$P(\sigma | I_0)$ 为从观测强度 I_0 获得反射截面的后验概率。 $P_{speckle}(I_0 | \sigma)$ 为似然函数,描述在已知反射截面的情况下强度的分布,根据 SAR 的成像原理可由下式给出

$$P_{speckle}(I_0 | \sigma) = \left(\frac{L}{\sigma}\right)^L \frac{I_0^{L-1}}{\Gamma(L)} \exp\left[-\frac{LI_0}{\sigma}\right] \tag{14}$$

其中 L 为 SAR 图像的视数。

在一般的 MRF 中,将先验概率建模为高斯函数的形式,对于 SAR 图像,由于其具有 gamma 分布的特

性,因此我们用另一种方式来对先验概率建模。我们假设中心像素与两个相邻的像素具有相同的反射截面,因此先验概率 $p_\sigma(\sigma)$ 可以通过下式来表示,

$$p_\sigma(\sigma) = \left(\frac{v}{\sigma}\right)^v \frac{I_1^{v-1}}{\Gamma(v)} \exp\left(-\frac{I_1 v}{\sigma}\right) \left(\frac{v}{\sigma}\right)^v \frac{I_2^{v-1}}{\Gamma(v)} \exp\left(-\frac{I_2 v}{\sigma}\right) \quad (15)$$

其中 v 是局部阶次参数,可以从 I_0 的邻域中估计出来。因此有

$$p(\sigma | I_0) \propto p_{\text{speckle}}(I_0 | \sigma) p_\sigma(\sigma) \quad (16)$$

对应于每一种结构 $i \in N$, 都可以获得反射截面的最大似然估计:

$$\sigma_i = \frac{I_0 + \frac{v}{L}(I_1 + I_2)}{1 + 2\frac{v}{L}} \quad (17)$$

我们可以获得 12 个不同的估计值相应于每一种邻域结构。由于图像的视数是固定的,新值 σ_i 仅依赖于 v 的值,当 v 值较小时,即图像在目标像素点变化较大, σ_i 倾向于原始图像值 I_0 ; v 值较大时,即图像在目标像素点变化较小, σ_i 则倾向于 $(I_1 + I_2)/2$, 因此图像可以得到平滑。我们需要在 12 个邻域结构中选择最可能的结构,通过该邻域结构估计出来的反射截面使得图像在保持细节的基础上得到最大可能的平滑。这是一个优化问题,在应用中可能会遇到收敛到局部最小的问题,在此我们通过模拟退火方法来解决这一问题。

上面的先验概率分布是建立在邻域结构的恒定反射截面基础上的,我们还可以对它进行改进,建立斜面模型,这时假设相邻的两个像素的反射截面的估计分别为 σ_α 和 σ/α , 因此先验概率为

$$p_\sigma(\sigma) = \left(\frac{v}{\sigma_\alpha}\right)^v \frac{I_1^{v-1}}{\Gamma(v)} \exp\left(-\frac{I_1 v}{\sigma_\alpha}\right) \left(\frac{v}{\sigma/\alpha}\right)^v \frac{I_2^{v-1}}{\Gamma(v)} \exp\left(-\frac{I_2 v}{\sigma/\alpha}\right) \quad (18)$$

根据这个先验概率获得的 MAP 估计为

$$\sigma_i = \frac{I_0 + 2\frac{v}{L}\sqrt{I_1 I_2}}{1 + 2\frac{v}{L}} \quad (19)$$

同时,还可以建立加法的斜面模型,相邻的两个像素的反射截面分别为 $\sigma + \alpha$ 和 $\sigma - \alpha$, 可以获得相似的结果。

2.3 模拟退火

退火是一种物理过程,一种金属物体在加热到一定的温度后,它的所有分子在状态空间 D 中自由运动,随着温度的下降,这些分子逐渐停留在不同的状态。统计学的研究表明,在温度 T , 分子停留在状态 r 的概率满足波尔兹曼分布,

$$p(E_r) = \frac{1}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_r}{k_B T}\right) \quad (20)$$

其中, E_r 为状态 r 的能量, k_B 为波尔兹曼常数, $Z(T)$ 为归一化因子。在同一温度,分子停留在能量小的状态的概率比停留在能量大的状态的概率要大。当温度较高时,每个状态的概率基本相同,接近 $1/|D|$, $|D|$ 为状态空间中状态的个数。当温度较低时,能量小的状态的概率与能量大的状态的概率差别变得明显,随着温度的不断降低,停留在能量小的状态的概率逐渐占主导地位,并最终停留在能量最低点。

为了使用模拟退火算法,需要构造能量函数,在本文情况下,我们的目的是为了获得

$$\sigma_{MAP} = \max_{\sigma_i, i \in N} (p_{\text{speckle}}(I_0 | \sigma_i) p_\sigma(\sigma_i))$$

相应于使得能量函数 $E = -[\log p_{\text{speckle}}(I_0 | \sigma) + \log p_\sigma(\sigma)]$ 最小。对于每一个邻域结构 i ,

$$\log p_{\text{speckle}}(I_0 | \sigma_i) = L \log\left(\frac{L}{\sigma_i}\right) - \log \Gamma(L) + (L-1) \log(I_0) - \frac{L I_0}{\sigma_i}$$

$$\log p_\sigma(\sigma_i) = \mathcal{A} v \log\left(\frac{v}{\sigma_i}\right) - \log \Gamma(v) + (v-1) \mathcal{Y} (\log I_1 + \log I_2) - \frac{(I_1 + I_2)v}{\sigma_i}$$

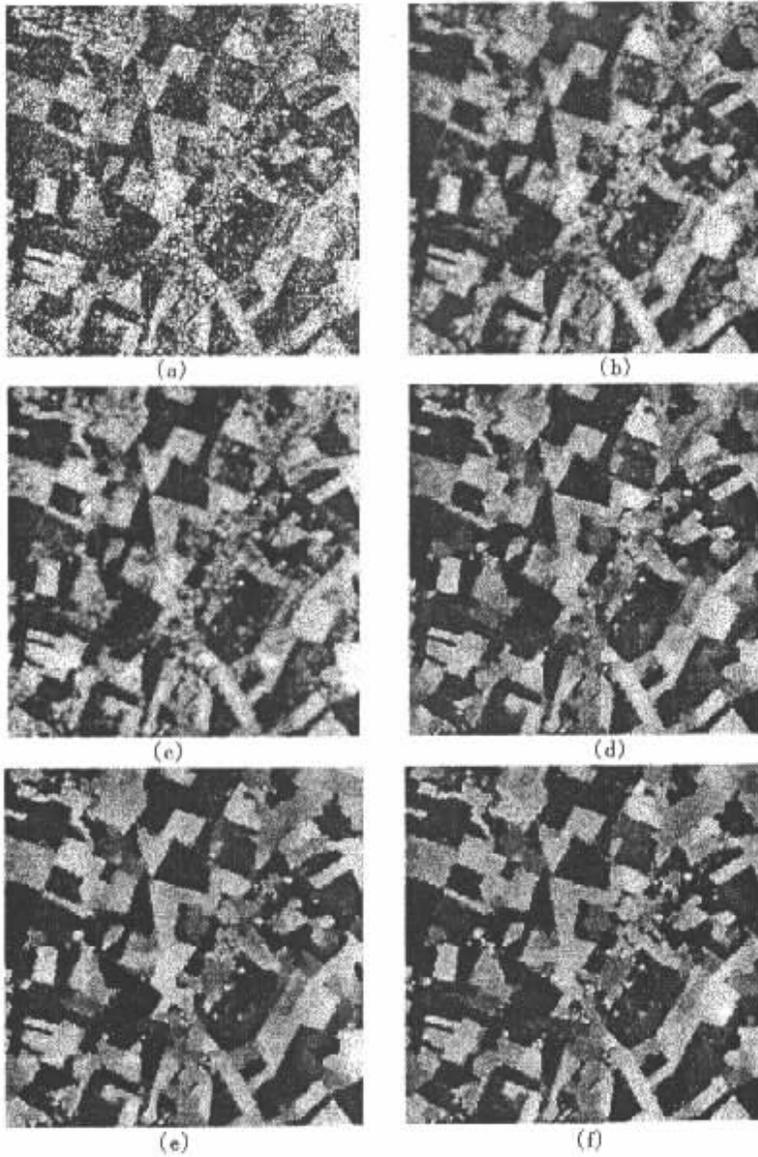


图2 各种算法结果比较

- (a)原图 (b)Lee 滤波器结果 (c) Frost 滤波器结果
 (d)本文方法结果(迭代 30 次) (e)迭代 100 次 (f)迭代 400 次

Fig.2 Comparison of different algorithms results

- (a)Original image (b)Result of Lee filter (c)Result of Frost filter
 (d)Result of algorithm of this paper(30 iterations) (e)100 iterations (f)400 iterations

设 $E_{\min} = \min_{i \in N} E_i$, 则 $\Delta E_i = E - E_{\min}$, 每一个结构的概率为 $P_i = \frac{\exp(-\Delta E_i/T)}{\sum_{i=1}^N \exp(-\Delta E_i/T)}$ 。按照每个结构的概率随机选取一个邻域结构, 通过该邻域结构获得 σ 的 MAP 估计做为反射截面的估计, 模拟退火算法保证当 $T \rightarrow 0$ 时, 算法收敛到全局最优解。

应该注意, 使用模拟退火算法通过迭代来获得最优解, 每一次迭代都会获得新的强度估计值。如果每次迭代都重新估计视数 L , 则图像的改变可能会导致视数估计的无效, 从而影响到滤波效果。因此在每次迭代过程中保持视数 L 为原始数据的视数, 并且在 (17) 式反射截面的估计中使用中心像素的初始强度 I_0 , 而不是上一次迭代的强度估计值, 强度估计值用于局部阶次参数的估计。尽管这将导致较慢的收敛速度, 但是保证估计更可靠。

3 结果分析

图 2(a) 为一幅航空 SAR 的 256×256 灰度图像, 原图受到很强的斑点噪声的影响。图 2(b) 是用 Lee 滤波器对原图进行 8 次迭代滤波处理的结果, 处理窗口为 3×3 , 可以看出它在对噪声进行抑制的同时也模糊了区域的边界, 并且区域的内部并不很平坦。图 2(c) 是用 Frost 滤波器对原图进行处理的结果, 其中 $K=8$, 窗口大小为 5×5 。减小 K 值将增加平滑效果, 而增大 K 值将减小平滑效果, 保持图像细节。本文对不同的 K 值进行了实验, 发现 $K=8$ 时效果较好。图 2(d) 是用模拟退火算法实现的结构滤波器处理的结果, 迭代次数为 30 次。可以看出这种方法对均匀区域的平滑效果非常好, 并且区域之间的边界非常清晰, 图像的细节特征也得到保留。通过增加迭代次数, 可以进一步提高区域内的平滑效果, 而且边界更加清晰, 细节仍然保持得很好。图 2(e) 和图 2(f) 分别为迭代 100 次和迭代 400 次的处理结果, 通过比较可以验证上面的结论。模拟退火是一种全局寻优的算法, 随着迭代次数的增加, 算法将收敛到全局最优解, 因此可以得到稳健的滤波效果。

图 3(a) 是另一幅航空 SAR 图像, 图 3(b) 是利用迭代结构滤波器 200 次迭代的输出结果, 可以看出, 均匀区域得到很好的平滑, 同时区域之间的边界特征也得到很好的保留。



图 3 迭代结构滤波器处理结果

(a) 原图 (b) 滤波之后的结果

Fig. 3 Process result of iterate structure filter

(a) Original image (b) Filter process result

4 结论

本文引入相关邻域模型对 SAR 图像建模, 获得一种迭代结构滤波器, 使得在给定先验概率条件下的后验概率最大, 并通过模拟退火算法得到实现。通过与 Lee, Frost 滤波器的实验结果比较可以发现, 迭代结构滤波器可以在保持 SAR 图像细节的基础上最大限度地对图像进行平滑, 取得满意的效果。这说明采用自适应邻域结构和引入图像统计特性是具有实际意义的。另外, 这种方法对于光学遥感图像的滤波也有效, 所不同的是调整图像强度的概率密度分布函数, 这里不做展开说明。

(下转第 119 页)

参考文献：

- [1] F.T.Ulaby , F.Kouyate. Texture information in SAR images [J]. IEEE Trans. Geosc. and Remote Sensing , 1986 , 24(2).
- [2] Victor S.Frost , Josephine Abbott Stiles. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise [J]. IEEE Trans. PAMI , 1982 , 4(2).
- [3] Jong-Sen Lee. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics [J]. IEEE Trans. PAMI , 1980 , 2(2).
- [4] Jong-Sen Lee. A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images [J]. IEEE Trans. System , Man , and Cybernetics , 1983 , 13(1).
- [5] D.T.Kuan , A.A.Sawchuk. Adaptive noise smoothing filter for signal-dependent noise [J]. IEEE Trans. PAMI , 1985 , 7(2).
- [6] Zhenghao Shi , Ko B Fung. A comparison of digital speckle filters [C]. IGARSS '94 21 29-2134.
- [7] A.Lopes , E.Nezry , R.Touzi. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images [J]. Int. J. Remote Sensing , 1993 , 14(9).
- [8] T.R.Crimmins. Geometric filter for reducing speckle [J]. Appl. Opt , 1985 , 24 :1438-1443.
- [9] S.Geman , D.Geman. Stochastic relaxation , Gibbs distributions , and Bayesian restoration of images [J]. IEEE Trans. PAMI , 1984 , 6(6).
- [10] A.Lopes , R.Touzi. Adaptive speckle filters and scene heterogeneity [J]. IEEE Trans. Geosc.and Remote Sensing , 1990 , 28(6).
- [11] R.G.White. A simulated annealing algorithm for SAR and MTI image cross-section estimation [C], SPIE 2316 , 1994.
- [12] C. Kervrann , F. Heitz. A Markov random field model based approach. to unsupervised texture segmentation using local and global spatial statistics [J]. IEEE Trans. Image Processing , 1995 , 4(6).
- [13] 邢文训 , 谢金星. 现代优化计算方法 [M]. 北京 清华大学出版社 , 1999.

