

一种 SAR 图像空间域自适应滤波算法

张绍明¹, 林 怡¹, 邱振戈², 陈映鹰¹

(1. 同济大学遥感与空间信息技术研究中心, 上海 200092; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100854)

摘要: 针对合成孔径雷达(SAR)图像相干斑噪声抑制问题, 提出了一种基于支持向量回归(SVR)分析的空间域自适应滤波方法. 将 SAR 图像看作连续二维函数, 利用 SVR 方法对其进行逼近. 基于图像的逼近结果描述像素关联性, 并基于关联性破坏程度对噪声进行类型分析, 对不同类型的噪声采取确定性的抑制算法. 为了保证精度, 选择小波核函数构建支持向量回归机. 实验结果表明该方法是有效的并对经典方法进行了改进.

关键词: 合成孔径雷达; 自适应滤波; 支持向量回归; 小波核函数

中图分类号: TP 751

文献标识码: A

A SAR Speckle Adaptive Filtering Algorithm in Spatial Domain

ZHANG Shaoming¹, LIN Yi¹, QIU Zhengge², CHEN Yingying¹

(1. Research Center of Remote Sensing and Spatial Informatics Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100854, China)

Abstract: To suppress the speckle in Synthetic Aperture Radar (SAR) images, a novel adaptive algorithm based on SVR is proposed. A SAR image is regarded as a 2-D continuous function and is approximated by support vector regression (SVR). The regression result is used to describe the relationship among pixels. Based on the relationship, the noise is classified and suppressed. In the procedure of regression, the wavelet kernel function is used to improve the accuracy. The experiment results show that this method is effective.

Key words: synthetic aperture radar; adaptive filter; support vector regression; wavelet kernel function

合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)具有全天时、全天候、远距离和高分辨成像的特点,

在国防建设和经济建设上发挥着巨大的作用. 但 SAR 图像存在严重的相干斑噪声, 给 SAR 图像的应用带来了较大困难. 如何降低 SAR 图像相干斑一直是 SAR 图像处理领域的重点研究内容.

多视处理方法是最早的 SAR 图像降噪方法, 但由于该方法会降低图像空间分辨率, 目前使用较少. 基于图像空间域和多分辨率变换域分析的方法是目前的主流研究方向. 该类方法的核心思想是在空间域或变换域对数据进行建模, 然后在给定的最优准则下基于数据模型进行滤波, 常用的滤波准则有最小均方误差、最大后验概率等. Lee 和 Kuan 分别提出了基于乘性和加性噪声模型的 SAR 图像滤波方法^[1-2], 两种方法成为空间域自适应滤波方法的典型代表. Kuruoglu 等人研究了基于 Rayleigh 分布的 SAR 图像滤波方法^[3]. Achim 等人利用 Heavy-tail 模型对图像小波变换系数进行建模, 并基于该模型研究了 SAR 图像降噪方法^[4-5]. Argenti 等人提出了基于局部自适应通用高斯模型的 SAR 图像滤波方法^[6]. Amirmazlaghani 等提出的方法基于 2-D GARCH 模型对图像小波变换系数进行建模, 并在最大后验概率框架内解决问题^[7]. 文献[8]研究了复数域的 SAR 图像降噪方法和特征提取. 文献[9]和[10]分别研究了基于各向异性扩散和小波域混合高斯建模的降噪方法. 虽然多种分布模型在 SAR 图像滤波中得到了应用, 但由于 SAR 图像的噪声特性十分复杂, 目前的方法仍面临两个主要问题: 现有 SAR 图像分布模型的推广能力不足; SAR 图像的边缘保持能力有待进一步增强.

由于 SAR 图像的分布模型的建立和应用具有较大的局限性, 本文提出了一种不对 SAR 图像分布特性做确定性描述, 而是基于噪声的类型分析进行自适应滤波的方法. 该方法基于支持向量回归(Support vector regression, SVR)和小波核函数. SAR 图像被看作空间

收稿日期: 2009-03-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863)(2006AA12Z134)

作者简介: 张绍明(1979—), 男, 讲师, 工学博士. 主要研究方向为 SAR 图像处理、模式识别、嵌入式地理信息系统.

E-mail: sheva2003@gmail.com

域二维连续函数,而 SVR 能够在低维空间对复杂函数完成高精度逼近.利用 SAR 图像的对数域 SVR 结果描述像素空间域关联性,基于关联性破坏程度对噪声进行分类,对不同类型的噪声进行自适应滤波.为了保证 SAR 图像拟合的精度,选择了小波核函数构建支持向量回归机.利用一维仿真信号验证了方法的可行性,然后利用真实 SAR 图像进行了实验,并在均匀区域降噪和边缘保持方面与若干经典算法进行了对比.实验结果表明本文方法有效,并在细节保护方面进行了改进.

1 支持向量回归

支持向量回归问题^[11]可描述为:对于给定的训练数据集

$$T = \{(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2) \cdots (\mathbf{x}_N, y_N)\} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^m$, $y_i \in \mathbb{R}$, $i = 1, 2, \dots, N$. 在给定损失函数 $L(\mathbf{x}, y, f)$ 的情况下,用函数逼近训练数据集 T . 如

$$f(\mathbf{x}) = \langle \mathbf{w}, \varphi(\mathbf{x}) \rangle + b \quad (2)$$

其中, $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^h$, $b \in \mathbb{R}$, $\varphi(\mathbf{x}): m \rightarrow h$ 为低维空间到高维空间的映射. 回归函数的最优化模型如

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, b} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} L(\mathbf{x}_i, y_i, f) \leq \xi_i \\ L(\mathbf{x}_i, y_i, f) \leq \xi_i^* \quad i = 1, \dots, N \\ \xi_i, \xi_i^* \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)的意义是在保证回归的精度满足约束的条件下,使回归结果函数最光滑.其中 C 是预先给定的惩罚项的系数,用来平衡逼近精度和结果平滑度; ξ^* , ξ 是对回归结果进行约束的松弛变量.如果 $\varphi(\mathbf{x}) = \mathbf{x}$,则为线性回归,否则为非线性回归,映射后的空间称为特征空间.

当使用 ϵ -不敏感损失函数,并引入拉格朗日乘子 α 和 α^* 后,式(3)所示的最优化问题可描述为

$$\begin{aligned} \min_{\alpha, \alpha^*} \quad & \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N (\alpha_i^* - \alpha_i)(\alpha_j^* - \alpha_j) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) + \\ & \epsilon \sum_{i=1}^N (\alpha_i^* + \alpha_i) - \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^N y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \\ & 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq \frac{C}{N}, i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \langle \varphi(\mathbf{x}_i), \varphi(\mathbf{x}_j) \rangle$ 为核函数,能够隐式计算高维空间内积.求解式(4),得到最优解 $\bar{\alpha} =$

$(\bar{\alpha}_1^*, \bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2^*, \bar{\alpha}_2, \dots, \bar{\alpha}_N^*, \bar{\alpha}_N)$, 由该最优解可构造支持向量回归机的决策函数为

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) + \bar{b} \quad (5)$$

其中,

$$\bar{b} = y_j - \sum_{i=1}^N (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_i) K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \epsilon \quad (6)$$

2 基于 SVR 的自适应 SAR 图像滤波器

图像是一种特殊的二维信号,各个像素之间具有较强的连续性,而噪声往往会对这种连续性造成破坏.如果能够建立像素的关联性模型,能够对降噪进行有效地指引.例如,基于马尔科夫随机场 (Markov Random Field, MRF) 的方法利用 MRF 描述像素全局关联性,并利用其显示表达式在最大后验概率框架内解决问题.

对含噪声图像进行逼近,可看作图像函数的大尺度平滑,近似描述了真实函数在空间域的走势.支持向量回归利用核函数隐式计算高维空间的内积,能够对复杂函数进行高精度的逼近.对于无噪声图像,其 SVR 结果与训练数据的拟合误差很小.而噪声大大增加了图像函数的复杂度,使 SVR 不能很好的对含噪数据进行拟合.噪声的幅度越强,拟合误差越大,即噪声破坏了图像本身固有的空间连续性.利用拟合误差可对噪声进行分类并采取不同的方法进行自适应滤波.本文阐述的 SAR 图像降噪方法正式基于这种思想而提出的.

2.1 基于回归距分析的对数域 SAR 图像降噪滤波器

文献[12]指出对 SAR 图像采用乘性噪声模型是合理的,模型如

$$I = \sigma n \quad (7)$$

其中: I 为 SAR 图像强度观测值; σ 为未受噪声污染的强度真实值; n 为乘性噪声.对 SAR 图像进行对数变换,能够将乘性模型变为加性模型.对数变换的图像噪声加性噪声,完全发育(均质区和弱纹理区)的噪声近似服从高斯分布^[13],点目标和强纹理区的噪声大多属于灰度的突变,概率分布很难准确描述.本文采用椒盐噪声和高斯噪声混合模型对 SAR 图像噪声进行描述.基于高斯和椒盐噪声描述对数变换图像模型,则

$$I_L = \sigma_L + n_G + n_P \quad (8)$$

其中: I_L 为对数图像观测值; σ_L 为对数图像的真实值; n_G 和 n_P 分别为高斯噪声和椒盐噪声.

将对数图像像素 I_L^{ij} 作为样本数据,输入为像素坐标,输出为像素灰度 I .由式(4)可得到图像的回归结果.基于图像回归结果定义下式所示的回归距,用来对噪声进行分类,即

$$D_r = |I_L - \bar{I}_L| \quad (9)$$

其中: D_r 为回归距; \bar{I}_L 为回归结果.由于椒盐噪声会引起像素灰度的剧烈突变,因而在受到椒盐噪声污染的噪声点 D_r 明显大于其他数据点.与椒盐噪声相比高斯噪声属于缓变噪声,其引起的 D_r 较小.根据上述特点,可设定回归距阈值对噪声进行分类,并分别采用高斯滤波和中值滤波进行处理.图像滤波结果如

$$\hat{I}_L = \begin{cases} \hat{I}_L^m & D_r > T_D \\ \hat{I}_L^g & D_r \leq T_D \end{cases} \quad (10)$$

其中: \hat{I}_L 为 I_L 的滤波结果; \hat{I}_L^m 为 I_L 对中值滤波器的响应; \hat{I}_L^g 为 I_L 对高斯滤波器的响应; T_D 为回归距阈值.

2.2 小波核函数

为了保证噪声分类的精度,需要支持向量机对复杂函数具有良好的逼近能力.而支持向量机的函数逼近能力与核函数的性能有直接关系.小波核函数秉承了小波函数对信号细节的良好刻画能力,与其他核函数相比更适合对图像进行拟合^[14].

根据 Mercer 条件^[15],如果

$$\iint_{L_2 \otimes L_2} K(x, x') f(x) f(x') dx dx' \geq 0 \quad (11)$$

对于所有的 $f(x) \in L_2(R^d)$ 成立($L_2(R^d)$ 为 d 维平方可积空间),就可将 $K(x, x')$ 写成特征空间中的内积形式,即

$$K(x, x') = K(\langle x, x' \rangle) \quad (12)$$

此外,还存在平移不变核函数,即

$$K(x, x') = K(x - x') \quad (13)$$

一个平移不变核函数是容许的 SVM 核,当且仅当其傅立叶变换

$$F[K](\omega) = (2\pi)^{\frac{d}{2}} \int_{R^d} \exp(-i\omega x) K(x) dx \geq 0 \quad (14)$$

由上述两个定理可构造小波核函数.本文使用式(15)所示的 Morlet 小波核函数构建小波支持向量机,用于数据拟合.

$$K(x - x') = \prod_{i=1}^d \left[\left(\frac{\cos(1.75(x_i - x'_i))}{a_i} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\|x_i - x'_i\|^2}{2a_i^2}\right) \right] \quad (15)$$

2.3 算法步骤和流程图

算法的流程和计算步骤如图 1 所示:

- (1) SAR 图像对数变换,得到变换图像;
- (2) 基于小波支持向量回归方法对变换图像进行拟合;
- (3) 计算回归距 D_r ,统计所有回归矩的最大值 D_{\max} ,如果 D_r 大于 λD_{\max} 则进行中值滤波,如果小于 λD_{\max} 则进行高斯滤波.实验表明 λ 的取值为 $[0.5, 1)$ 时效果较好.在本文的实验中,该值取为 0.8;
- (4) 指数变换,得到滤波结果.

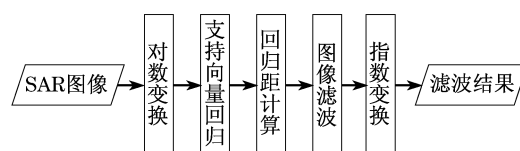


图1 基于 SVR 的 SAR 图像自适应滤波算法流程图

Fig.1 Flow chart of the adaptive SAR image filtering algorithm based on SVR

3 实验结果与分析

本文选取的 SAR 图像实验数据如图 2 所示.图像大小为 256×256 .图 3 给出了本文方法、Lee 滤波、Kuan 滤波和小波软阈值滤波的结果.本文使用等效视数增益、标准差增益、边缘增强指数和比值均值四个量化指标评价滤波效果.

等效视数增益定义为滤波后图像的等效视数与滤波前等效视数之比.标准差增益定义为滤波后图像的标准差与滤波前标准差之比.这两个指标用来评价均匀区域的降噪程度,增益越大表明相干斑抑制越充分.

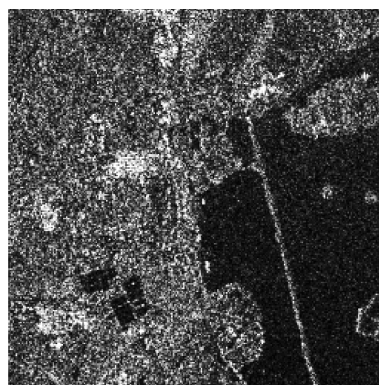


图2 本文实验使用的 SAR 图像

Fig.2 SAR image used in experiment

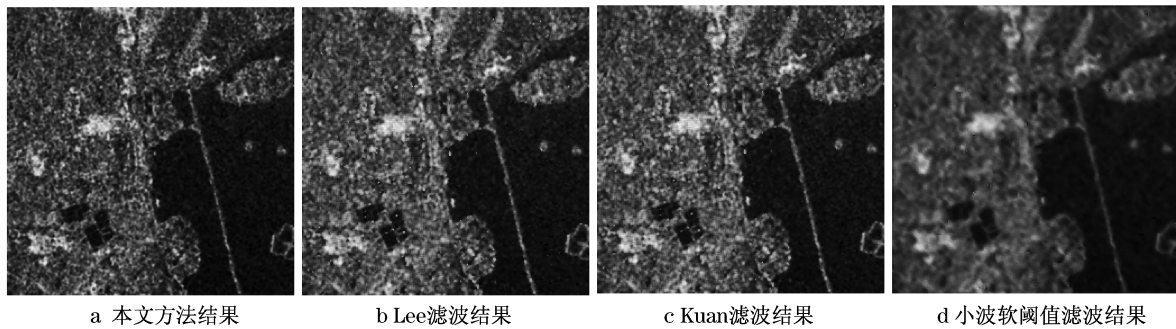


图 3 本文方法、Lee 算法、Kuan 算法和小波软阈值方法的结果

Fig.3 Results of proposed algorithm, Lee filter, Kuan filter and wavelet soft-threshold algorithm

边缘增强指数定义为滤波后图像和滤波前图像边缘像素邻域内的灰度标准差的比值,边缘增强指数越大表明算法的细节保护越好.

比值均值定义为滤波前后图像比值的均值,该值与 1 的比值越大说明图像的幅度失真越严重. SAR 图像的各滤波方法结果指标统计情况如表 1 所示.

表 1 SAR 图像滤波结果评价指标统计

Tab.1 Statistical chart of SAR image filtering evaluation indicator

滤波方法	等效视数增益	标准差增益	边缘增强指数	比值均值
本文算法	9.785 3	0.418 5	0.242 4	1.215 2
Lee	6.977 3	0.406 8	0.203 9	1.337 8
Kuan	9.208 8	0.358 2	0.185 1	1.352 9
小波软阈值	5.599 2	0.348 4	0.121 9	1.162 8

由表 1 可以看到:在均匀区域降噪指标方面,SVR 和 Kuan 算法的等效视数明显高于其他算法,SVR 和 Lee 算法的标准差增益高于其他算法;在边缘保持方面,SVR 算法的边缘增强指数高于其他算法;在幅度失真方面,本文方法与其他方法大致相当.

4 结语

本文在对 SAR 图像的灰度分布进行分析后,提出了利用对数域的高斯噪声和椒盐噪声混合模型对 SAR 图像进行描述,并利用对数域图像小波支持向量回归结果进行噪声分类,最后对不同噪声采用特定的方法进行抑制.仿真信号和真实 SAR 图像的滤波结果表明本文算法在边缘保持能力和均匀区域降噪能力方面具有优势.

参考文献:

[1] Lee J S. Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis

and Machine Intelligence,1980,2(2):165.

[2] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C. Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985,7(2):165.

[3] Ercan K, Josiane Z. Modeling SAR images with a generalization of the Rayleigh distribution[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2004,3(4):527.

[4] Alin A, Panagiotis T, Anastasios B. SAR image denoising via Bayesian wavelet shrinkage based on Heavy-Tailed modeling [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003,41(8):1773.

[5] Alin A, Ercan K, Josiane Z. SAR image filtering based on the heavy-tailed rayleigh model[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2006,15(9):2686.

[6] Fabrizio A, Tiziano B, Luciano A. Multiresolution MAP despeckling of SAR images based on locally adaptive generalized gaussian pdf modeling [J]. IEEE Transactions on Image Processing,2006,15(11):3385.

[7] Maryam A, Hamidreza A, Alireza M. Speckle suppression in SAR images using the 2-D GARCH model[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2009,18(2):250.

[8] 赵侠,王正明. SAR 复图像域上的噪声抑制和目标特征提取[J]. 电子学报,2005,33(12):2135.

[9] 张良培,王毅,李平湘. 基于各向异性扩散的 SAR 图像斑点噪声滤波算法[J]. 电子学报,2006,34(12):2250.

[10] 邵永社,陈鹰,林怡,等. 合成孔径雷达图像斑点噪声滤波方法研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2008,36(2):258.

[11] Cortes C, Vapnik V. Support vector networks [J]. Machine Learning,1995,20(3):273.

[12] Arseoaault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed[J]. Journal of the Optical Society of America,1976,66(11):1160.

[13] Lee J S. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images [J]. Computer Graphic and Image Processing, 1981,17:24.

[14] ZHANG Li, ZHOU Weida, JIAO Licheng. Wavelet support vector machine [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B,2004,34(1):34.

[15] Mercer J. Functions of positive and negative type and their connection with the theory of integral equations [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A209,1909,415.