

基于小波系数统计特征的 SAR 图像恢复

徐 新¹ 王 雁¹ 陈嘉宇¹ 孙 洪¹

(1 武汉大学电子信息学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 基于小波系数统计特征, 提出了一种 SAR 图像恢复方法。首先将对数变换后的 SAR 图像进行平稳小波分解, 基于小波系数统计特征, 用 α -stable 分布分别对纯净信号和噪声建模, 估计出各部分模型参数后, 用 MAP 估计器对处理后的 SAR 图像进行非线性处理来恢复出纯净图像。实验结果表明, 该方法能在抑制噪声的同时最大程度地保持纹理细节。

关键词: 合成孔径雷达; α -stable 分布; 小波变换; 相干斑

中图法分类号: TP751.1; P237.3

经典的滤波方法包括平滑效果较好的 Kuan 滤波、Gamma-MAP 滤波、细节保持较好的 Lee 滤波、Epos 滤波和目视效果较好的小波阈值滤波等^[1]。文献[2]中引入 α -stable 分布对图像建模, 在超声图像恢复上取得了一定的效果。相对于文献[2], 本文使用能够提供信号多尺度间更多相关信息的平稳小波变换^[3], 根据各层小波系数不同的统计特征分别对噪声和信号准确建模, 引入噪声和信号之间的影响来准确估计各部分的模型参数。

1 基于小波系数统计特征的 SAR 图像恢复

1.1 模型分析

根据 SAR 图像乘性噪声模型的假设^[4], SAR 图像可以等效为原始纯净信号 R 和与之不相关的固有的乘性噪声 U 相乘的结果:

$$I = RU \tag{1}$$

对观测数据 I 进行对数变换得:

$$\lg I = \lg R + \lg U \tag{2}$$

对 SAR 图像进行解译, 就是要区分噪声和纯净信号, 提取信号的有用信息。 U 在不同的情况下有不同的分布, 这就使得观测数据 I 的分布模型存在多样性。在原始图像上对信号建模, 会增加分析处理的复杂程度, 因此, 本文在变换域中分

别对纯净信号和噪声建模。

将乘性组合变为加性组合后, 纯净信号 R 和噪声 U 的统计特征已经改变^[3], 对对数变换后的 I 进行平稳小波变换, 定位放大各点的统计信息:

$$d_I = d_R + d_U \tag{3}$$

式中, d 表示小波系数, d_I 是 d_R 和 d_U 的混合, 其概率密度函数关系为:

$$f_{d_I} = f_{d_R} * f_{d_U} \tag{4}$$

则特征函数的关系是:

$$\phi_{d_I} = \phi_{d_R} \times \phi_{d_U} \tag{5}$$

由前面的分析可知, 无论原始 SAR 图像上信号的分布模型是什么, 小波系数都能较好地服从对称 α -stable 分布(S α S 分布), 只要估计各部分模型的参数, 利用式(5)即能进行后续处理。乘性噪声 U 经过对数变换后, 能够近似服从 α -stable 分布中的零均值高斯分布^[3], 经过平稳小波变换, 由中心极限定理可知, 其小波系数更加趋于零均值高斯分布, 则 d_I 、 d_R 服从 S α S 分布, d_U 服从零均值高斯分布, 它们的特征函数见文献[2]。

1.2 小波系数参数估计

1.2.1 噪声模型参数估计

由于在最小尺度的 HH 子带系数能量很小, 所以 HH 子带通常被认为主要由噪声组成。由于噪声服从零均值高斯分布, 因此, 采用 3 个混合高斯模型的 EM 迭代算法对分解的 HH 部分进行估计, 取 3 个高斯函数中方差最小的作为 σ^2 , 这

样就可以得到 $\phi_{d_U}(t)$ 的参数。其步骤如下。

1) 设定初值: $m = 0, \eta^{(0)} = \{\omega_1^{(0)}, \omega_2^{(0)}, \omega_3^{(0)}, \alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \alpha_3^{(0)}\}, \varepsilon > 0$, 其中, $\{\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \alpha_3^{(0)}\}$ 为任意一组正实数, $\{\omega_1^{(0)}, \omega_2^{(0)}, \omega_3^{(0)}\}$ 为一组和为 1 的非负实数。

2) 按式(6)和式(7)计算 $\eta^{(m+1)}$ [5]:

$$\omega_i^{(m+1)} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N d_k^2 \frac{\omega_i^{(m)} P_i(d_k | \alpha_i^{(m)})}{P_d(d_k | \eta^{(m)})} \quad (6)$$

$$(\alpha_i^{(m+1)})^2 = \frac{\sum_{k=1}^N d_k^2 \frac{\omega_i^{(m)} P_i(d_k | \alpha_i^{(m)})}{P_d(d_k | \eta^{(m)})}}{\sum_{k=1}^N \frac{\omega_i^{(m)} P_i(d_k | \alpha_i^{(m)})}{P_d(d_k | \eta^{(m)})}} \quad (7)$$

式中, $P_i(d | \alpha_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{d^2}{2\sigma_i^2}\right]; P_d(d | \eta)$
 $= \sum_{i=1}^3 \omega_i \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left[-\frac{d^2}{2\sigma_i^2}\right]; d$ 是小波系数; N 是小波系数的总个数。

3) 如果 $\|\eta^{(m+1)} - \eta^{(m)}\| < \varepsilon$ 迭代结束; 否则, $\eta^{(m)} = \eta^{(m+1)}$, 重复步骤 2)。迭代结束后, 得到的最小 σ_i^2 作为噪声的方差。

1.2.2 信号模型参数估计

对小波系数 d_i 数据采用极值理论^[6], 粗略估计得到参数值 α_1, γ_1 , 此时得到的参数值受噪声的影响较大。由于 d_i 可以分解为高斯分布和 SαS 分布, 在一定的区间内, 得方程:

$$\exp(-\gamma_1 |t|^{a_1}) \approx \exp(-\gamma |t|^a) \cdot \exp\left[-\frac{\sigma^2}{2} |t|^2\right] \quad (8)$$

引入噪声影响, 取 $t_1 = 0.2, t_2 = 0.8$, 解方程(8)得到初步估计 d_R 的参数 α, γ 。

得到 α, γ 的初步估计值后, 应用线性回归的方法迭代估计出精确参数值。由 SαS 分布的特征函数可以推出:

$$\lg(-\lg|\phi_{d_R}(t)|^2) = \lg(2c^a) + a\lg|t| \quad (9)$$

令 $y_k = \lg(-\lg|\phi_{d_R}(t_k)|^2), a = \lg(2c^a), w_k = \lg|t_k|, c = \gamma^{\frac{1}{a}}$, 所以,

$$y_k = a + aw_k + \varepsilon_k, k = 1, 2, \dots, K \quad (10)$$

t_k 一般取 $k\pi/25, k = 1, 2, \dots, K$ 。 K 根据不同的先验 α 和样本大小取值^[7]。

根据线性回归的方法迭代估计参数值, 直到满足收敛准则。每次回归估计参数为:

$$\hat{\alpha} = \frac{\sum_{k=1}^K (w_k - \bar{w})(y_k - \bar{y})}{\sum_{k=1}^K (w_k - \bar{w})^2}, \hat{a} = \bar{y} - \hat{\alpha}\bar{w} \quad (11)$$

利用线性回归方法迭代算出精确参数值。先设定前后两次的估计误差 ε , 根据上一次的估计值

$\hat{\alpha}_0$ 查表更新 K , 对采样值进行标准化($t_k = t_k/\hat{c}_0$), 由式(11)计算当前线性回归的估计值, 更新上一次的先验值, $\hat{\alpha}_0 = \hat{\alpha}, \hat{c}_0 = \hat{c}_0\hat{c}$, 判断是否满足终止准则, 若不满足, 则继续迭代, 从而得到 α, γ 的精确值。

1.3 Bayesian 准则恢复 SAR 图像

得到各部分模型参数后, 基于 Bayesian 最小风险准则恢复出纯净信号小波系数 d_R , 也等效于使用 MAP 估计器进行非线性处理:

$$d_R = \operatorname{argmax}_{d_R} (f_{d_R} \times f_{d_U}) \quad (12)$$

式中, f_{d_R} 和 f_{d_U} 的参数已知, f_{d_R} 为 SαS 分布函数, f_{d_U} 为高斯分布函数。由于 $(\lg f_{d_R} + \lg f_{d_U})$ 也是高度非线性模型, 则式(12)可以改写为:

$$d_R = \operatorname{argmax}_{d_R} (\lg f_{d_R} + \lg f_{d_U}) \quad (13)$$

利用数值计算方法求解最大 $(\lg f_{d_R} + \lg f_{d_U})$ 所对应的 d_R 即可分离纯净信号和噪声, 达到恢复 SAR 图像的目的。根据以上分析, 给出如图 1 所示的算法流程图。由于对数变换会带来均值偏移^[3], 因此, 必须在小波逆变换和指数变换之间加入均值调整。

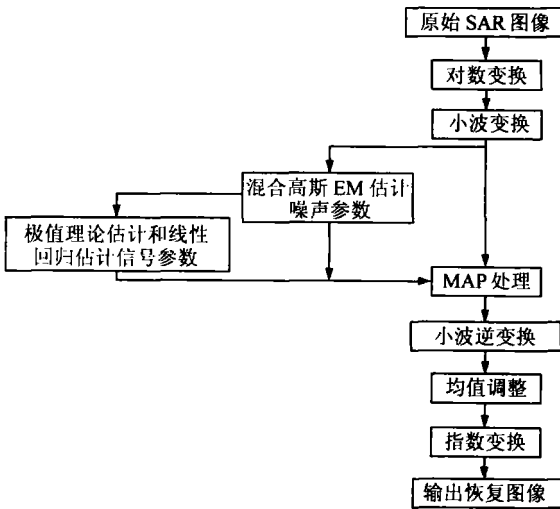


图 1 基于小波系数统计特征的 SAR 图像恢复流程图
Fig. 1 SAR Image Restoration Based on Statistic Characteristics of Wavelet Coefficients

2 实验结果及分析

本文以一幅 3 视模拟 SAR 图像作为滤波的实验数据, 对观测数据分别用小波阈值滤波、Gamma-MAP 滤波、Epos 滤波和本文提出的算法进行处理, 并将各种算法处理的结果进行比较。原始图像和处理结果如图 2 所示。

从目视效果来看, 本文提出的算法对均匀区域的斑点噪声有很好的滤除效果, 同时较好地保

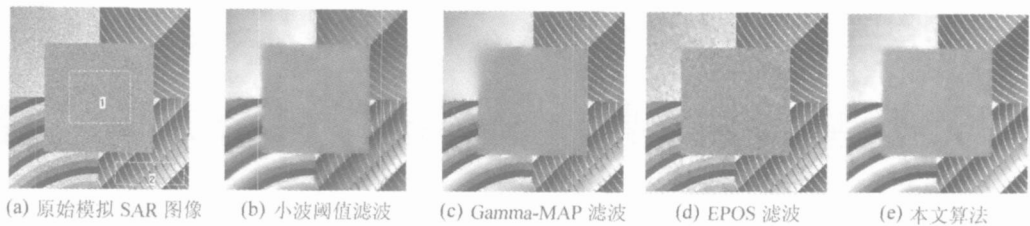


图 2 不同算法的滤波结果

Fig. 2 Results of Various Speckle Suppressing Methods

持了孤立点、边缘信息和局部的细节信息,有效地提高了 SAR 图像的质量。

定量评价斑点噪声滤波效果的指标主要有噪声抑制指数 (SSI)、边缘增强指数 (EEI) 和有效视数^[1]。其中,有效视数和噪声抑制指数反映了抑制斑点噪声的效果,噪声抑制指数值越小,表示 Speckle 抑制程度越大。边缘增强指数反映了细节保持的能力,值越大,细节保持的效果越好。

取原始 SAR 图像中的均匀区 (区域 1) 和细节区域 (区域 2) 各一块作评价,评价结果如表 1 所示。

表 1 各种滤波算法评价结果比较

Tab. 1 Comparison of Evaluation Results of SAR Image

	区域 1		区域 2		
	有效视数	SSI	有效视数	SSI	EEI
原始图像	2. 02		0. 25		
小波阈值	15. 28	0. 392 5	0. 28	0. 367 1	0. 324 6
Gamma-MAP	225. 7	0. 262 4	0. 32	0. 299 5	0. 302 2
EPOS	17. 42	0. 396 9	0. 29	0. 354 8	0. 351 6
本文算法	213. 8	0. 285 2	0. 39	0. 227 3	0. 829 8

对比表 1 中传统方法和本文算法的数据可以发现,本文算法结果中的有效视数明显提高,噪声抑制指数较小,且非均匀区 (区域 2) 的边缘增强指数较大,因此,本文算法不但有很强的抑制噪声的能力,同时边缘信息和局部细节信息的保持能力尤为突出。图 3 是一幅真实 3 视 SAR 图像用本文算法处理的结果。

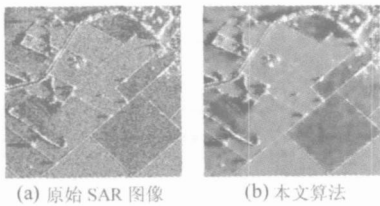


图 3 原始 SAR 图像滤波结果

Fig. 3 Results of Proposed Method

3 结 语

本文提出的 SAR 图像恢复算法基于各层小波系数分布的统计特征分别对信号和噪声建模,利用 Bayesian 准则恢复 SAR 图像。由上述实验结果及分析可以看出,该算法在抑制斑点噪声的同时,更好地保持了 SAR 图像的细节和边缘信息,恢复出的图像能够较好地用于后续解译。

参 考 文 献

[1] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000

[2] Achim A, Tsakalides P, Bezeri A. SAR Image Denoising via Bayesian Wavelet Shrinkage Based on Heavy-Tailed Modeling[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2003(41): 1 773-1 784

[3] Xie Hua, Pierce L E, Ulaby F T. Statistical Properties of Logarithmically Transformed Speckle[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2002, 40(3): 721-727

[4] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Norwood: Artech House Inc., 1998

[5] 林哲民, 康学雷, 张立民. 在小波域中进行图像噪声方差估计的 EM 方法[J]. 红外与毫米波学报, 2001 (3): 199-202

[6] Fama E F, Roll R. Parameter Estimates for Symmetric Stable Distributions[J]. Journal of the American Statistical Association, 1971, 66 (344): 331-338

[7] Koutrouvelis I A. Regression Type Estimation of the Parameters of Stable Laws[J]. J American Statistical Association, 1980, 75(4):918-928

第一作者简介: 徐新, 博士, 副教授。现主要从事 SAR 图像解译和统计信号处理方面的研究。
E-mail: xuxin@eis.whu.edu.cn

[6] William J S, Johntham A Z, William E L. Decimation of Triangle Meshes[J]. Computer Graphics, 1992, 26(2) : 65-70

[7] 李志林, 朱庆. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001

第一作者简介: 刘春, 副教授, 博士。主要研究方向为 GIS 空间数据不确定性理论、LIDAR 数据处理与分析 and 应用系统开发等。
E-mail: liuchun@mail.tongji.edu.cn

Compress Method for Three Dimension Laser Scanning Data Based on 3D Triangulated Irregular Network

LIU Chun^{1, 2} WU Hangbin¹

(1 Department of Survey and Geo-informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)
(2 Key Laboratory of Advanced Engineering Surveying of SBSM, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

Abstract: A data compress idea is put forward by considering the judge accordance of the angle between two normal lines of the triangular plane face. So that the corresponding algorithm of the data compress is given by calculating the angle between two normal lines. The acceptance or rejection of a point is determined according to the comparison between the biggest angle with the defined threshold. As a case study, the Kongzi portrait in Tongji University is scanned and the real three dimensional model is established. The data compression aim to the Kongzi portrait is conducted to achieve the realization of the given method. In order to prove the feasibility of the method and the quality of the compression, several evaluation results are then analyzed same with the case data.

Key words: laser scanning; 3D triangulation irregular network; data compress

About the first author: LIU Chun, associate professor, Ph.D, majors in the uncertainty theory of GIS spatial data, LIDAR data handing etc.
E-mail: liuchun@mail.tongji.edu.cn

(上接第 857 页)

SAR Image Restoration Based on Statistic Characteristics of Wavelet Coefficients

XU Xin¹ WANG Yan¹ CHEN Jiayu¹ SUN Hong¹

(1 School of Electronic Information, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: An algorithm within framework of wavelet analysis based on the statistic characteristics of wavelet coefficients is proposed. The wavelet decomposition of logarithmically transformed SAR images is accurately modeled by stable distributions. The result of experiment indicates that the proposed method reduces speckle in SAR images while preserving the structural feature and textural information of the scene.

Key words: synthetic aperture radar; stable distribution; wavelet decomposition; speckle

About the first author: XU Xin, Ph.D, associate professor . His research interests include SAR image understanding and statistical signal processing.

E-mail: xuxin@eis.whu.edu.cn