

基于小波变换和 PCA 的 SAR 图像相干斑抑制

王瑞霞, 林伟, 毛军

(西北工业大学理学院数学系, 西安 710072)

摘要: 提出一种 SAR 图像相干斑噪声抑制新的滤波方法。该方法利用小波变换结合主分量分析(PCA)对 SAR 图像进行去噪。小波变换可以很好地保持边缘细节信息, 主分量分析(PCA)能从混合信号中提取出主分量即信号的主要特征, 将小波变换结合 PCA 用于图像处理, 能在有效消除噪声的同时保持边缘信息。与 Kirsch 模板加权平滑滤波和结合小波变换的 Kirsch 模板加权平滑滤波去噪方法进行比较, 实验结果表明, 该方法具有良好的抑制相干斑噪声效果和较强的边缘保持能力。

关键词: SAR 图像; 主分量分析; 相干斑抑制; 小波变换

Speckle Suppression for SAR Image Based on Wavelet Transform and PCA

WANG Rui-xia, LIN Wei, MAO Jun

(Department of Mathematics, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

【Abstract】 This paper puts forward a new method of speckle suppression in SAR image. The method gets rid of noises using of wavelet transform joining into Principal Components Analysis(PCA) processing for SAR image. Wavelet transform may keep the edges' information of image better, and PCA can draw out of PCs which are the primary characteristics of signals from the mixed signals. Togethering wavelet transform with the PCA can eliminate noises efficiently in image processing. Simultaneously, it can keep edge. Compared with Kirsch template weighted smoothing filtering and Kirsch template weighted smoothing filtering of adding into wavelet transform, the result shows this method has the better advantage in speckle suppression and stronger edge keeping.

【Key words】 SAR image; Principal Components Analysis(PCA); speckle suppression; wavelet transform

1 概述

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨率成像雷达, 具有全视角、多极化、多视角、多俯角数据获取能力及对一些地物的穿透性能, 在军事侦察及民用遥感探测方面具有重大应用价值。由于成像雷达发射的是纯相干波, 用此相干波信号照射目标时会使 SAR 图像上产生相干斑噪声。这种相干斑噪声严重影响了 SAR 图像的质量, 降低了图像的空间分辨率, 噪声严重时, 甚至可导致地物特征消失。因此, 消除相干斑噪声对 SAR 图像的有效使用有着重要意义, 构造一种既能有效消除相干斑噪声, 同时又能保持图像细节的降噪方法是当前 SAR 图像处理的研究目标。相干斑噪声的存在会降低 SAR 图像的分辨率, 影响 SAR 图像的后续处理, 如目标检测、图像分割等。近 20 多年来, 人们先后提出许多抑制相干斑噪声的滤波方法, 如传统的 Lee 滤波器^[1]、Kuan 滤波器^[2]、Frost 滤波器^[3]及小波的软硬阈值^[4-5]处理, 这些方法能不同程度地滤除相干斑噪声, 但至今还没有一种既能很好滤除相干斑噪声又能很好保留图像边缘特征的方法。Kirsch 模板加权平滑滤波^[6]虽然在一定程度上保持了 SAR 图像的边缘特征, 但滤波效果并不是很好。小波变换是一种强有力的数学分析工具, 其应用已遍及信号和图像分析的多个研究领域。由于小波变换可以很好地保持图像边缘细节信息, 基于边缘特征对图像的影响, 本文在 Kirsch 模板加权平滑滤波的基础上, 对小波变换后的图像进行 Kirsch 模板加权平滑滤波, 从数据和视觉上都可以看出比直接用 Kirsch 模板

加权平滑滤波方法处理要好很多。在此基础上, 提出了一种基于小波变换 PCA 处理的 SAR 图像相干斑抑制新方法, 具有良好的去除噪声保持边缘特征的效果。从实验结果中可得: 匀质区域大幅度减小了方差, 提高了等效视数, 很好地滤除了斑点噪声。从视觉上也可以看出其边缘特征保持良好, 图像的斑点噪声大量减少, 提高了图像的可读性。

2 基本原理

2.1 Kirsch 方向模板

在图像边缘检测中常用到 Kirsch 方向算子, 它利用一组方向模板分别计算不同方向上的差分。常用的 3×3 的 8 个 Kirsch 方向模板的定义如图 1 所示。

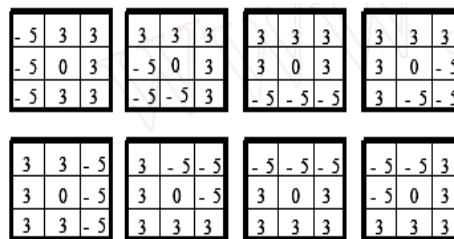


图 1 8 个 3×3 的 Kirsch 方向模板

设图像矩阵为 T , 方向模板为 $W_k = (1, 2, \dots, 8)$, 则图像中

作者简介: 王瑞霞(1984-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 合成孔径雷达图像处理; 林伟, 副教授、博士; 毛军, 在职硕士研究生
收稿日期: 2007-11-12 **E-mail:** wangruixia921@163.com

(x, y) 处的边缘强度为 $e(x, y) = \max\{W_k T\}$ ，它相当于用方向模板分别与图像进行卷积运算，然后取最大值作为窗口中心像素的边缘强度，最大值的方向作为边缘的方向^[6]。

2.2 小波变换的软硬阈值处理

一个源信号 $x(t_i)$ 被一加性噪声污染，则污染后的信号为

$$y_i = x(t_i) + e_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中， e_i 是独立同分布 $N(0, \sigma^2)$ ，要测量一个估计值 $\hat{x}(\cdot)$ 。令 $c_0 = y_i$ 表示初始信号序列，利用正交小波变换按式(1)对 c_0 进行多级分解，得到平滑信号 c_j 和多级细节信号 d_1, d_2, \dots, d_j ，令 \hat{d}_j 为 d_j 的估计值：

$$\hat{d}_j = \begin{cases} \bar{d}_j & |d_j| \geq j_0 \\ d_j & |d_j| < j_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中， j_0 为低分辨率截断参数； \bar{d}_j 可由阈值门限给出，阈值门限选取为 T ，对 d_j 的阈值处理可分为硬阈值和软阈值 2 种方式，硬阈值处理为

$$\bar{d}_j = \begin{cases} d_j & |d_j| \geq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

软阈值处理为

$$\bar{d}_j = \begin{cases} \text{sgn}(d_j)(|d_j| - T) & |d_j| \geq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

阈值 T 的大小与噪声的均方差 σ 有关。Donoho 等人提出了对一维信号的小波阈值去噪方法，给出了通用阈值 T 选取方法，阈值为 $\sigma\sqrt{2\ln n}$ ^[4]。

2.3 主分量分析的基本原理与求法

主分量分析方法利用信号的二阶统计量，得到的是输入和输出的线性映射关系，这与利用二阶统计量的一些盲处理方法得到的映射关系是一致的。主分量被认为是输入数据中能量最大的成分，通常认为是重要的分量，它往往与传感器检测的主要物理量相对应，提取或分离主分量就相当于盲抽取主要成分。

基本原理：设 $x = s + n$ ，则 $\hat{s} = y = V^T x$ 。其中， $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)^T$ 是未知源信号向量； $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 是混合信号向量； $n = (n_1, n_2, \dots, n_n)^T$ 是噪声信号向量； $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T$ ($m < n$) 是分离出的信号向量即源信号 s 的估计信号， $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$ 是分离矩阵。其结构示意图如图 2 所示。

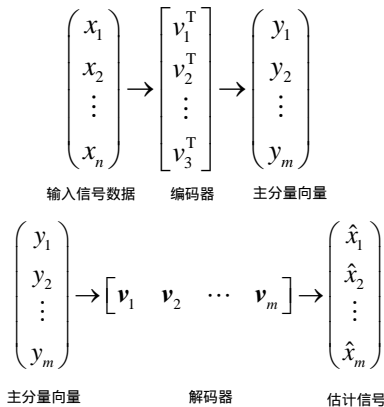


图 2 主分量分析的原理示意图

主分量的求法：主分量满足线性、不相关、方差最大 3 个条件。其线性条件反映特征信号之间的关系简单、便于计算；不相关条件使每个特征信号都有着独立的作用；方差

最大在一定意义上反映了它所包含的信息量大。主分量分析的关键是求协方差矩阵 R_{xx} 的特征值和特征向量。主分量分析的计算步骤如下：

(1) 求取数据 x 的协方差矩阵 R_{xx} ；其中： $R_{xx} = E(xx^T)$ 。

用任意计算方法求出 R_{xx} 的全部特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 和对应的特征向量 v_1, v_2, \dots, v_m ；并将各特征值按从大到小的顺序排列，即 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$ ，这时可以选取 m 个特征信号 y_1, y_2, \dots, y_m 它们满足：

$$y = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T = V^T x$$

其中， $V = [v_1, v_2, \dots, v_m]$ ，且 $V^T R_{xx} V = \Lambda, \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$ 。

3 基于小波变换的 SAR 图像滤波算法

3.1 SAR 图像相干斑噪声的数学模型

由于相干斑噪声是一种乘性噪声，因此其数学模型可表示为 $y = xe$ 。其中， y 为观测到的图像灰度电平； x 为不含相干斑噪声的图像灰度电平； e 为相干斑噪声的灰度电平。而线性 PCA 一般更适用于加性噪声，所以在对图像处理前，对 SAR 原始数据采用对数量化的方法。使相干斑乘性噪声转化为加性噪声，同时可使噪声近似服从高斯分布，即

$$\bar{y} = \bar{x} + \bar{e}, \bar{y} = \ln(|y|), \bar{x} = \ln(|x|), \bar{e} = \ln(|e|)$$

3.2 小波变换的 Kirsch 模板加权平滑滤波

基于小波变换的软硬阈值处理的噪声抑制方法对小波分解各个方向的高频系数采用了 Kirsch 模板加权平滑滤波。由于小波变换的高频系数包含很多边缘特征，因此结合了小波变换的 Kirsch 模板加权平滑滤波能在抑制相干斑的同时有效地保持边界。其算法流程如图 3 所示。

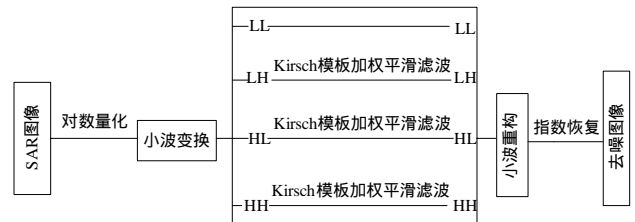


图 3 小波变换的 Kirsch 模板加权平滑滤波流程

3.3 小波变换的 PCA 处理相干斑抑制算法

主分量分析是数据分析中的一种有效手段，主分量分析可用于减少特征空间维数，确定变量的线性组合，选择最有用的变量、变量识别、识别目标或异常值分组等。主分量分析被广泛用于信号处理数据压缩特征提取计算机视觉噪声过滤信号的恢复和分类模式识别数据挖掘图像处理等。PCA 是盲信号处理的有效预处理方法，而且在一些特殊情况下也可以实现盲信号分离，特别是非线性 PCA 方法使其适合处理非高斯分布信号，成为有效的盲分离方法。

SAR 图像数据经对数量化后，满足 PCA 算法的应用条件，可以利用 PCA 算法对 SAR 图像提取主成分，从而得到对其进行相干斑抑制的效果。小波变换可以使边缘细节保持良好，基于小波变换软硬阈值的算法原理，对图像进行二维离散小波变换，再对其分解的高频系数进行 PCA 处理。只是在对图像进行小波重构时，由于对小波分解的高频系数进行了主分量提取即降维处理，直接重构会遇到一些问题。为了使得重构时保持维数一致，需要对重构图像的白化矩阵进行处理。另外在提取主分量时对于阈值的选择也要适当，太大或太小都会影响最后的重构图像。其整个处理过程示意图如图 4 所示。

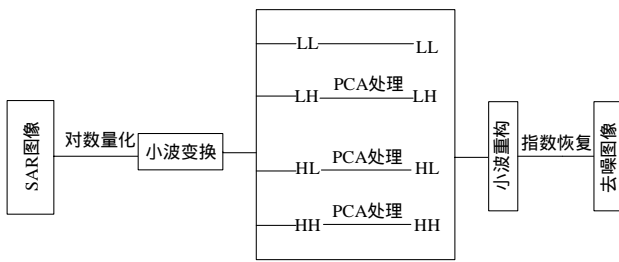


图4 小波变换的PCA处理流程

4 实验结果

本文采用 2 幅 SAR 图像进行实验，与 Kirsch 模板加权平滑滤波算法比较，结合小波变换的 Kirsch 模板加权平滑滤波和基于小波变换的 PCA 处理的相干斑抑制算法，从实验数据上看，不仅在一定程度上抑制了相干斑噪声，均值基本保持不变，方差很大程度上减小，等效视数大幅度提高；而且从视觉上看，边缘特征保持良好。实验结果如图 5，数据如表 1 所示。

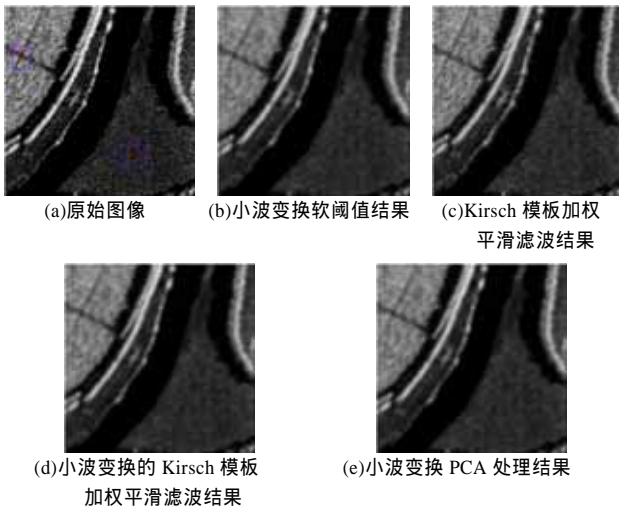


图5 SAR 图像去噪算法结果

表1 图5所示图像的区域去噪效果比较分析

图像	均值		标准差		等效视数	
	区域 1	区域 2	区域 1	区域 2	区域 1	区域 2
(a)	42.671 8	117.647 6	26.145 6	44.830 8	2.663 7	6.886 7
(b)	42.515 7	117.650 1	20.942 1	36.108 5	4.121 5	10.616 1
(c)	43.684 0	118.260 9	15.786 5	27.446 7	7.657 2	18.565 3
(d)	42.518 7	117.630 6	14.490 6	25.652 8	8.609 7	21.026 8
(e)	42.519 7	117.633 5	13.430 3	24.286 8	10.023 2	23.459 7

5 结束语

利用本文提出的算法对 SAR 图像处理时，也对极化 SAR 图像做了实验，其结果也较好。实验结果可以说明针对 SAR 图像自身的特点，在对其进行相干斑抑制的同时如何能使得边缘特征损失最少，利用小波变换可以同时兼顾这 2 项要求，达到较好的相干斑抑制和保持边缘特征的效果。不管从数据上，还是从视觉上比较，图像的质量都得到很好的提高。只是用小波变换的 PCA 处理时，对于特征值的筛选涉及到阈值的选择，如何选择阈值能使得信息损失最少，而且还能有效地滤除噪声有待更进一步研究。

参考文献

- [1] Lee J S. Speckle Suppression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Image[J]. Optical Engineering, 1986, 25(5): 636-643.
- [2] Kuan D T, Sawchuk A A. Adaptive Restoration of Image with Speckle[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1987, 35(3): 373-383.
- [3] Frost V S, Stiles J A, Shanmugan K S, et al. A Mode for Radar Image and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(4): 157-165.
- [4] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81(3): 613-627.
- [5] Donoho D L. Denoising by Softthresholding[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 1995, 41(3): 425-455.
- [6] 柏正尧, 何佩琨, 刘洲峰. 基于 Kirsch 方向模板的 SAR 相干斑噪声抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(7): 881-882.

(上接第 234 页)

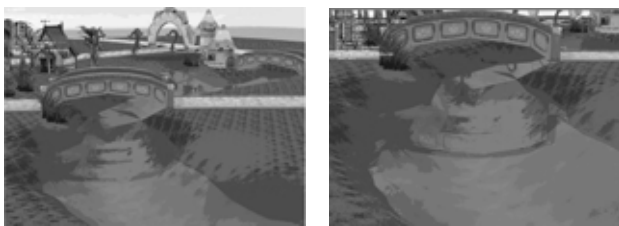


图4 水面模拟效果 1

图5 水面模拟效果 2

该算法在多边形数为 3.2×10^5 左右的场景中可以达到平均每秒 30 帧的渲染速度，能够满足实时生成的需要。

6 结束语

本文基于可编程图形硬件的水面实时渲染算法，利用 GPU 对 Vertex Shader 和 Pixel Shader 的可编程技术，通过正弦波叠加对水波的建模和 Bump mapping 的替换实现水波的动画效果。该算法可以很好地模拟水面的实际效果，特别适用于网络游戏和虚拟现实等产品的开发。把该算法在 GPU 中运行的部分代码以 fx 文件格式封装起来作为虚拟现实平台的一个特效模块，可以加快开发流程。

参考文献

- [1] Yang Xudong, Pi Xuexian. GPU-based Real-time Simulation and Rendering of Unbounded Ocean Surface[C]//Proc. of Conf. on Computer Aided Design and Computer Graphics. Hongkong, China: [s. n.], 2005: 283-286.
- [2] Liu Daozhi. Computational Fluid Dynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 1989.
- [3] Enright D, Marschner S, Fedkiw R. Animation and Rendering of Complex Water Surfaces[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 736-744.
- [4] Tessendorf J. Simulating Ocean Water[C]//Proc. of SIGGRAPH'01. [S. l.]: ACM Press, 2001.
- [5] Wang Changbo, Wang Zhangye, Jin Jianqiu, et al. Real-time Simulation of Ocean Wave Based on Cellular Automata[C]//Proc. of CAD/Graphics. Macao, China: [s. n.], 2003: 320-326.
- [6] Cabral B, Olan M, Neme P. Reflection Space and Image-based Rendering[C]//Proceedings of SIGGRAPH'99. Los Angeles, CA, USA: ACM Press, 1999: 165-170.