

文章编号: 1007-4619 (2002)04-0266-06

# 利用经验模态分解方法抑制 SAR 斑点噪声

韩春明, 郭华东, 王长林

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

**摘 要:** 提出了一种利用经验模态分解(EMD)方法抑制 SAR 斑点噪声的方法。利用经验模态分解方法, 可以将 SAR 图像分解为一系列的以空间周期尺度不同为特征的模态, 定义空间特征周期尺度不大于 4 的为噪声。通过从图像中减掉噪声成分使 SAR 斑点噪声得以抑制。用这种方法处理 SAR 图像在斑点抑制和纹理信息保持两方面取得了令人满意的结果。

**关键词:** SAR; EMD; 斑点噪声; 空间特征周期尺度

**中图分类号:** TP722.6/TP391 **文献标识码:** A

## 1 引 言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率主动式微波成像装置。它向地物辐射微波频段的电磁波, 接收并记录回波的幅度和相位, 经过一系列的数据处理, 生成地物的微波图像。由于 SAR 发射出去的是相干电磁波, 接收的回波因相干作用, 而使 SAR 图像出现了大量的斑点噪声(Speckle)<sup>[1]</sup>。斑点噪声的存在, 阻碍了 SAR 图像的校正、真实性检验、解译与应用, 所以抑制斑点噪声一直是合成孔径雷达技术研究的重要内容之一。

在理论上, SAR 单视图像上的斑点噪声服从负指数分布, 可表示为非相关相乘模型<sup>[1]</sup>。斑点噪声抑制技术可分为两大类: 成像之前的多视处理和成像之后的滤波技术。成像之后的滤波技术又可分为空域滤波技术和频域滤波技术。空域滤波技术如局域平均法、SIGMA 滤波、Kuan 滤波、增强 Lee 滤波等方法, 都是取一定大小的窗口, 譬如  $3 \times 3$  个像元, 按照某一原则, 利用窗口内所有像元重构中心像元, 由于窗口大小和所采用的原则不同, 因而各有优缺点<sup>[2]</sup>。频域滤波技术是基于傅里叶变换的技术, 斑点噪声和数据为相加的关系, 对于雷达图像, 是一种近似的关系<sup>[3]</sup>, 也能较好地去除斑点噪声。Dong 等人利用小波技术去除斑点噪声, 也取得了较好的

平滑效果, 但纹理等细节信息保持不够<sup>[3,4]</sup>。

SAR 图像斑点噪声去除技术中, 空域滤波技术和频率域滤波技术的基本思想是不同的。空域滤波技术的基本根据是 SAR 的随机斑点噪声在足够小的范围内可以通过该范围内所有像元平均去除, 在频率域中人们将图像分解成频率不同的成分, 认为高频成分是噪声, 在频率域中去除高频成分, 就认为将噪声去除了。这两类方法, 空域滤波技术的具体方法数目比频域滤波的方法多, 这可能是由于在空域滤波技术中还没有像频率域技术那样以频率不同来区分噪声和数据的原则。要找到这样的原则, 我们首先要能在空域中将数据分解成不同的成分, 根据成分不同定义噪声和有用数据。实质上也就是要找到能在空域中分解数据的方法, 本文利用 The empirical mode decomposition (EMD) 方法在空域中根据尺度不同抑制 SAR 单视图像斑点噪声。

## 2 EMD 方法简介<sup>[5]</sup>

EMD 方法是由 Nordon Huang 在 1988 年提出的。在线性时不变系统中, 人们处理数据主要基于傅里叶变换。在随机信号处理中, 不论是维纳滤波还是自适应滤波, 都是基于最小二乘法原理。EMD 是基于数据本身, 它处理非线性、非平稳的数据比较有效, 并且能在空域中将数据进行分解, 与小波方法比

收稿日期: 2001-01-15; 修订日期: 2001-03-12

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(49989001), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-312)的支持。

作者简介: 韩春明(1971—), 男, 现在中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室攻读博士学位, 主要研究方向为雷达图像处理。

较,有更好的时频特性<sup>[5]</sup>。

EMD 方法认为每组数据可以分解为 Intrinsic mode function(IMF)函数和趋势项。IMF 函数的主要特征是它的上下包络对称。上包络的定义是把极大值点利用三次样条函数连接起来得到的,下包络同理。IMF 定义为:(1)在一段数据中极值点数目等于数据过零点数目或者最多相差为一;(2)在任何一点由极大值点和极小值点定义的包络的平均值为零。

EMD 方法是基于以下 3 个假设:

(1)数据中至少要有两个极值点一个最小值、一个最大值;

(2)特征时间尺度是由两个相邻极值点的时间间隔所决定;

(3)如果数据没有极值点,而只有拐点,那么可以通过一次或几次微分得到极值点,最后可以把各模态积分得到各成分。

分解是通过上下包络来完成的。如果极值点已被找到,所有的上极值点可以通过三次样条函数连接成上包络,同样可以得到下包络。上下包络的均值记为  $m_1$ ,数据和  $m_1$  之间的差记为  $h_1$ 。

$$X(t) - m_1 = h_1 \quad (1)$$

理想情况下  $h_1$  即为 IMF 函数,实际上  $h_1$  一般都不是 IMF 函数,所以要把  $h_1$  作为数据,继续进行如上过程

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad (2)$$

重复以上过程  $k$  次,直到  $h_{1k}$  为 IMF 函数。

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k} \quad (3)$$

得到第一个 IMF 函数,记为  $c_1$ 。把  $c_1$  从数据中分离出来

$$X(t) - c_1 = r_1 \quad (4)$$

由于余数  $r_1$  一般还包含 IMF 函数。我们把  $r_1$  作为新数据进行如上处理,直到  $r_n$  不包含 IMF 函数

$$r_1 - c_2 = r_2, \dots, r_{n-1} - c_n = r_n \quad (5)$$

就得到

$$X(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (6)$$

至此,得到  $n$  个模态和一个趋势项。

### 3 基于 EMD 方法的 SAR 图像的 Speckle 抑制方法

图 1(a)是某 SAR 图像中某行 255 个像元灰度值的序列,利用 EMD 方法可以将其分解为 7 个模态(图 1 中的(b)~(h)和一个趋势项(图 1(i)))。

首先分析模态图 1(b)~(h)及趋势项的物理意

义。将图 1 中的(a)和(b)~(h)相比较并分析(b)~(h)的周期,将会发现(b),(c),(d)周期不大于 4,它们对 SAR 图像的贡献就是使图像的灰度剧烈变化,根据采样定理,离散化的数据(图 1 中的数据)可充分描述的最高频率成分的周期为 3(每一个数据点为一个单位),事实上采样定理是在带通信号的情况下推导出来的,对雷达图像,能够准确记录的周期应该比由采样定理计算出的大一些才可信。从数值实验,我们发现周期取得过大,将图像细节信息都平滑掉了,经过比较我们认为周期 4 以下的成分为噪声,一方面能够有效去除斑点噪声,另一方面又能保持图像的主要信息。图 1 中的(e),(f),(g),(h),(i)代表灰度变化较缓的成分和趋势。去斑的目的就是去除噪声成分,将代表噪声成分(b),(c),(d)从(a)中减掉,结果如图 2。

从图 2 中可以看出实线比虚线光滑得多并且是这个序列的主要成分,代表这个序列的有效信息。由此我们可以在空域中定义噪声,即利用 EMD 方法分解图像数据,将其中空间特征周期尺度不大于 4 为噪声。Dong<sup>[3]</sup>等人证明可以近似认为 SAR 图像噪声为相加模型。由此可以得到空域按尺度抑制斑点噪声的方法即:将图像中代表噪声的成分从原始图像中减去。

具体技术路线如下:

(a)将图像按行剖分;

(b)利用 EMD 方法去除每一行中的噪声成分;

(c)将图像按列剖分;

(d)利用 EMD 方法去除每一列中的噪声成分。

图 3、图 5、图 7 为原始图像和图 4、图 6、图 8 为处理后的图像。

从目视角度看,原始中的斑点噪声在处理后的图像中得到了有效抑制的同时纹理等细节信息也得到了保持,这从图 2 也可以看出这种方法在平滑数据的同时也可以保持部分纹理信息。图 3 为北京某处的 SAR 图像,图 4 为图 3 处理后的图像,图 4 与图 3 相比,图 3 中的斑点噪声得到了明显抑制,街道、河岸等纹理信息得到了较好的保持。图 5、图 7 为平原地区的影像,通过图 5 与图 6、图 7 与图 8 的比较,会发现原始图像中纹理等细节信息,在处理后的图像中都得到了很好保存。这一点从图 7 与图 8 的比较更容易看出,图 7 中黑色部分为水体,中间分布一些堤岸,在图 8 中都得到了保持,甚至水体中一些小的亮点也得到了保持,在图 7 右上角的圆形地物边界非常模糊,在图 8 中变得很清楚了。为了更容易从目视角度比较抑制效果,从图 7、图 8 中取出 50

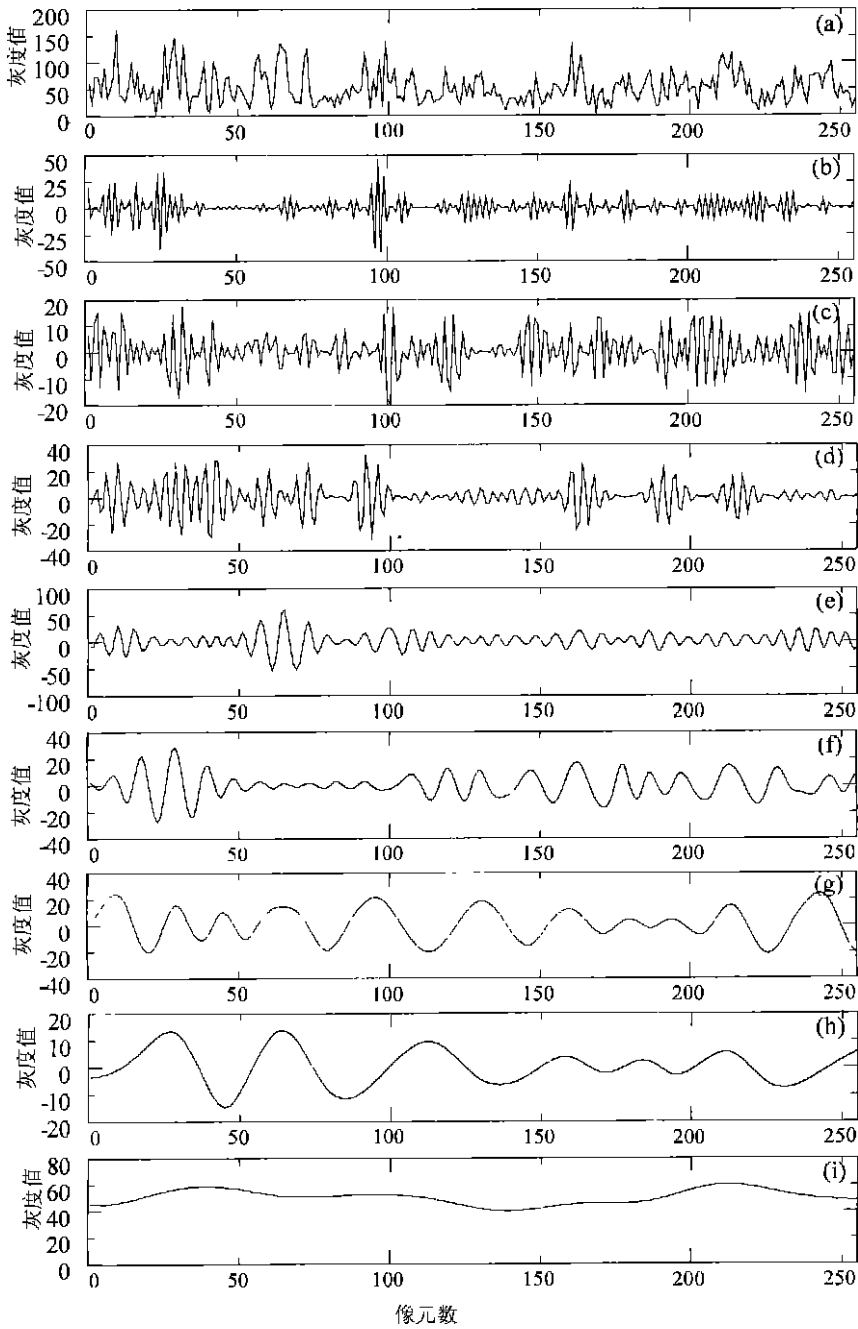
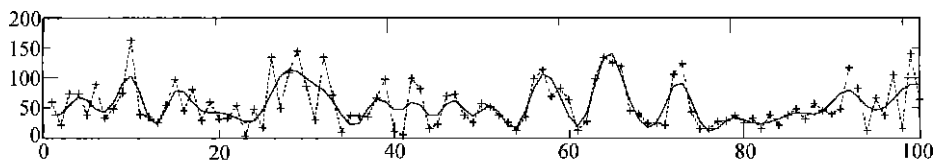


图 1 利用经模态分解方法处理数据得到的结果  
 原始数据(a), 各个模态及趋势(b), (c), (d), (e), (f), (g), (h)为第 1 至第 7 模态, (i)为趋势  
 Fig. 1 Show the seven intrinsic mode functions which are extracted from the original data.



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
 图 2 原始数据和平滑结果  
 虚线为原始灰度值, 十字号为每个数据点, 实线为减掉(b), (c), (d)所得的结果  
 Fig. 2 The original data and smoothed data



图 3 原始图像  
Fig.3 Original



图 4 处理后的图像  
Fig.4 Smoothed image

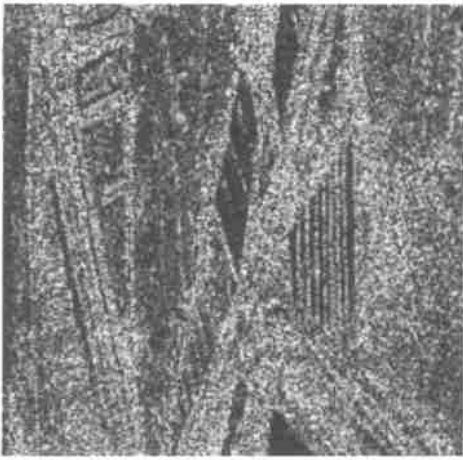


图 5 原始图像  
Fig.5 Original

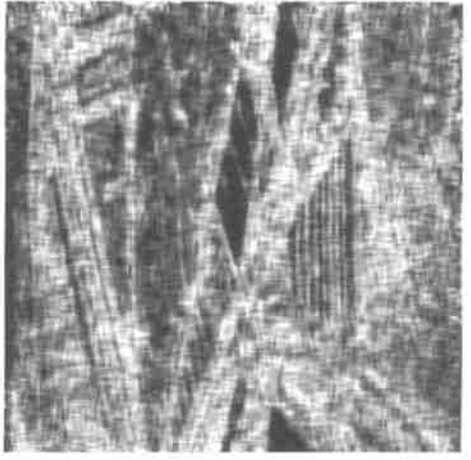


图 6 处理后的图像  
Fig.6 Smoothed image



图 7 原始图像  
Fig.7 Original

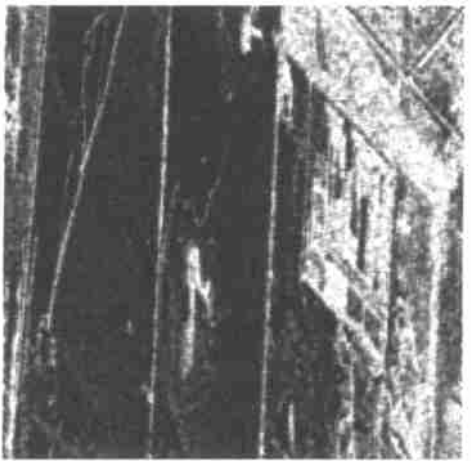


图 8 处理后的图像  
Fig.8 Smoothed image

×50 大小数据, 数据中心位置为 220(行)和 175(列), 图 9 为三维原始图像, 图 10 为平滑后的图像。

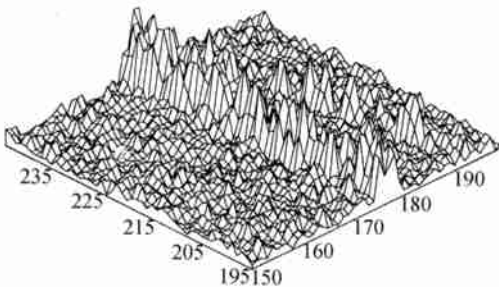


图 9 原始图像三维图

Fig.9 Three-dimensional view of original image

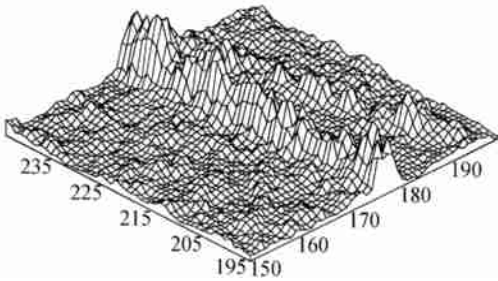


图 10 平滑后图像三维图

Fig.10 Three-dimensional view of smoothed image

比较图 9 与图 10, 我们可以很容易发现图 10 较图 9 光滑, 从图 7 可以看出, 图 9 为水塘中堤岸和附近水体, 水体呈黑色, 堤岸呈灰白色并形成线状, 图 9 中隆起部分为堤岸。仔细比较图 9 与图 10, 利用 EMD 方法拟制斑点噪声是拟制尺度较小的突变像元, 稍大一点的趋势都得以保留。从量化指标如均值、标准差、有效视数(计算公式见文献[3])、相对标准差来看, 这种方法改善了图像的质量。

由表 1 可以看出处理前和处理后的图像的均值几乎没变, 说明处理后的图像和原始图像主要部分非常接近, 这对 SAR 图像的校正和真实性检验非常重要, 处理后图像的标准差较原始图像明显减少, 说明图像中剧烈变化的成分得到了有效抑制, 处理后的有效视数变大, 说明图像中的斑点噪声得到了抑制。

## 4 讨 论

一般来说地物分布是随机分布的, 没有斑点噪声及其它噪声的合成孔径雷达图像数据也是随机数据, 也可能是非平稳的。真实的合成孔径雷达图像数据  $z$  被认为是没有噪声的数据  $d$  和随机噪声  $s$  非相关相乘的结果<sup>[1]</sup>。

表 1 滤波前后的比较

Table 1 Comparison of original and smoothed image

图像	均值	标准差	有效视数(NEL)	相对标准差
原始图像 3	166.76	57.4354	2.07536	0.344419
处理后图像图 4	166.335	26.0383	3.5476	0.212853
原始图像图 5	67.5984	38.6539	1.01976	0.571817
处理后图像图 6	67.6249	22.1211	2.86553	0.327115
原始图像图 7	38.989	34.9559	0.34392	0.896657
处理后图像图 8	39.1703	26.8785	0.607833	0.68619

$$Z = d * s \quad (7)$$

也可以近似认为<sup>[3]</sup>

$$Z = d + s' \quad (8)$$

按照(7)式, 目前还没有能处理这数据的十分有效方法, 但在一定条件下是可以处理的, 这就产生了如局域平均法、SIGMA 滤波、Kuan 滤波、增加 Lee 滤波等方法。按照(8)式理解,  $s'$  和  $s$  是有很大的不同的, 从图 2 中的(b), (c), (d)它们的均值为零, 而  $s$  的均值为 1。通常处理(8)式这种数据的方法也有多种, 但这些随机数据处理方法如维纳滤波、卡漫滤波等方法的基本根据都是最小二乘法, 它们是强调整体或一定区间上的误差最小, 必然将局部变化较大的信息平均掉。小波变换处理这种数据时, 由于傅里叶变换固有局限性, 使得细节信息很难保持。本文采用的 EMD 的方法, 虽然它是一种经验方法, 但从处理过程可以看出它是根据数据本身的情况自适应调整, 使每一模态代表了特定变化尺度的绝大部分信息。其实这种方法可以从频率域和空域两个方向来理解, 以频率域的观点, 这种方法相当于将所谓的高频成分滤除掉, 从空域角度看, 相当于沿行和列方向开一个十字形的窗口进行局部平均, 并且窗口内所有像元因为平滑性的要求而互相关联。在某种程度上, 这种方法的技术思路和 Geometric filter 方法是基本相同的<sup>[6]</sup>, 但这方法更加考虑到了相邻像元相关性, 物理意义更加明晰。

## 5 结 论

在本文中提出利用 EMD 方法抑制 SAR 图像的斑点噪声的方法, 从目视角度和从均值、标准差、有效视数、相对标准差比较来看, 这种方法较大限度保持了原图像的主要信息, 同时较好地抑制了 SAR 图

像斑点噪声。这种方法的主要优点是可以在空域中将图像进行分解,从而可以区分噪声和有用数据,脉络清晰,并且 EMD 方法是根据数据本身,因而具有很好的自适应性,使纹理等细节信息得以保持。但由于 EMD 方法本身的不成熟,还需进一步的验证和研究,另外这种方法的计算量较大,也是值得改进的地方。

## 参考文献 (References)

- [1] Ulaby F T. Microwave Remote Sensing, Vol. 2 [M], Beijing: Science Press, 1987. [F. T. 乌拉比. 微波遥感(第二卷)[M]. 黄培康,汪一飞译. 北京: 科学出版社,1987.]
- [2] Wakabayashi H. A Method of Speckle Noise Reduction for SAR Data [J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1996, **17**(10): 1837—1849.
- [3] Dong, Y. *et al.* Speckle Suppression Using Recursive Wavelet Transforms [J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(2): 317—330.
- [4] Fukupa, S. Hirose, H. Suppression of Speckle in Synthetic Aperture Radar Images Using Wavelet [J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(3): 507—519.
- [5] Norden Huang *et al.* The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London SERIES A*, 1998, **454**: 903—995.
- [6] Thomas R. Crimmins Geometric Filter for Speckle Reduction [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(10): 1438—1443.

# Speckle Suppression Using the Empirical Mode Decomposition

HAN Chun-ming, GUO Hua-dong, WANG Chang-lin

(LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** An effective algorithm for suppressing speckle in synthetic aperture radar (SAR) images utilizing the empirical mode decomposition (EMD) method is presented in this paper. The EMD was proposed by Norden E Huang *et al.*, with which any complicated data set can be decomposed into a finite and often small number of intrinsic mode functions. Contrary to almost all previous methods, this new method is intuitive, direct, a posterior and adaptive, with the basis of the decomposition based on, and derived from, the data. So EMD is quite suitable for analyzing nonlinear and non-stationary data. A line of digital SAR images can be decomposed into a series of modes whose characteristic space scale defined by the space lapse between the extrema is different. The speckle noise is defined by the mode whose space scale is not more than  $\lambda/4$ . The SAR speckle suppression is implemented by smearing short space scale component in the spatial domain via the EMD. As the EMD is one-dimensional method, we use EMD in the following way. First we process each horizontal row of pixels, then process each column pixel of image. EMD is based on and derived from the data, thus it is adaptive and can preserve the edge information. Application to SAR images has shown that the performance of the algorithm is satisfactory in both smoothing and edge preservation.

**Key words:** SAR; EMD; speckle; space scale