

不同小波基下的 SAR 图像相干斑抑制性能分析*

韩春林** 赵志钦 王建国

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】 分析了合成孔径雷达(SAR)图像中相干斑(Speckle)的统计特性。基于小波变换(WT),给出了一种多尺度的 Speckle 滤波方法,该方法利用小波分解后的 HH 分量(低频分量)作 Speckle 抑制,得到图像 Speckle 的相当大的改进。文中还对不同的小波基进行了理论分析,并利用实验数据,从等效视数(ENL)角度进行了比较,证实了不同小波基下该方法对 Speckle 具有较好的抑制性能。

关键词 合成孔径雷达; 相干斑; 滤波; 小波变换; 等效视数
中图分类号: TN959.1

合成孔径雷达(SAR——Synthetic Aperture Radar)具有高分辨力、全天候、强投射等优点,已被广泛地应用于军事和民用领域。但由于 SAR 是一种相干成像系统,其固有的相干斑(Speckle)噪声严重影响了 SAR 图像的应用。由 Speckle 的理论知,Speckle 的产生是由一个分辨单元内大量散射体回波的空间干涉而形成,对它的抑制技术一直是 SAR 成像和应用领域的重要课题。

目前已有大量的 Speckle 抑制技术,这些技术可以划分为多视技术和对 SAR 图像的空间滤波技术两大类。多视技术在早期的 SAR 处理中经常采用,该技术以牺牲 SAR 图像的空间分辨力来换取 Speckle 的抑制,通常为获取 \sqrt{N} 倍的 Speckle 抑制,空间分辨力将降低 N 倍^[1]。90年代初期,A. Moreira 提出了改进的多视处理技术,在保持适当的空间分辨力的前提下,对 Speckle 有较好的抑制效果,但是却增加了 SAR 成像系统结构的复杂度^[2]。更多的 Speckle 抑制算法则是围绕空间滤波技术,在基本不降低 SAR 图像空间分辨力的情况下,尽可能抑制 Speckle。空间滤波的方法较多,目前用得比较广泛的是 Lee 滤波^[3,4],它利用了 SAR 图像的局部统计特性,具有较好的 Speckle 抑制效果。

本文在分析相干斑统计特性基础上,基于小波变换(WT),给出了一种多尺度的 Speckle 滤波方法,该方法利用多层分解后的 HH 分量(低频分量)作 Speckle 抑制,得到图像的相干斑有相当大的改进。本文还对不同的小波基进行了理论分析,并从等效视数角度进行了比较。

1 Speckle 的统计特性分析

SAR 是一种相干体制的雷达,不可避免地会受到 Speckle 的影响,通常 Speckle 被认为是一种乘性噪声,有时甚至被认为是卷性噪声(本文假设 Speckle 是一种非相关的乘性噪声)。单视 SAR 图像的 Speckle 的概率密度函数是一瑞利分布,随着独立视数的增加,Speckle 趋于高斯分布,可将 Speckle 看成均值为1的高斯随机场。SAR 图像可表示为

$$I = SN \quad (1)$$

式中 I 为观测到的图像的幅度; S 为无 Speckle 时图像的真实值; N 为 Speckle 的值。 S 和 N 可看成相互独立的随机过程,抑制 Speckle 的目标就是将 S 从 I 中分离出来。

将式(1)稍作变换得

$$I = SN = S + S(N - 1) \quad (2)$$

2000年11月9日收稿

* 电子部预研基金资助项目

** 男 38岁 在职博士生 教授

式中 S 为需要的信号; $(N-1)$ 可看成均值为0的随机场; $S(N-1)$ 是与 S 有关的噪声, 故 Speckle 又可看作一种与信号有关的加性噪声。

由于地形总是具有一定的连续性, Speckle 也具有较大的随机性, 特别在均匀区域, S 的大小变化很小, 而 N 变化很大, 结果是 $S(N-1)$ 的频谱变化远大于 S 的频谱, 本文给出了基于小波变换的多尺度的 Speckle 抑制方法。

2 基于小波变换的多尺度 Speckle 滤波算法

小波变换具有多尺度分析等优点, 特别在给出小波的 Mallat 塔式算法后, WT 在信号处理领域占据了很重要的位置^[5-9]。

如果信号 $f \in L^2(R)$, 则信号 f 的连续小波变换 $W_f(a,b)$ 定义为

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中 ψ 是基本小波, 在实际工程中用得最为广泛的是离散的二进制小波。

本文的 I 是可测的且具有有限能量, $I \in L^2(R)$, 故 I 可看作二维的离散信号 $I(m,n)$, 在适当的选择一组小波基下, 可以对 $I(m,n)$ 进行多尺度的二维离散小波分解。由于不可分离的二维小波变换还不够成熟, 目前图像处理用的最多的是可分离的二维离散小波变换。设二维小波的镜像滤波器为 $h(m,n)$ 和 $g(m,n)$, m 表示行, n 表示列, 二维可分离时, 有

$$\begin{cases} h(m,n) = h(m)h(n) \\ g(m,n) = g(m)g(n) \end{cases} \quad (4)$$

令

$$\begin{cases} g^1(m,n) = h(m)g(n) \\ g^2(m,n) = g(m)h(n) \\ g^3(m,n) = g(m)g(n) \\ h_j(m,n) = 2^j h(2^j m, 2^j n) \\ g_j^k(m,n) = 2^j g^k(2^j m, 2^j n) \quad k=1,2,3 \end{cases} \quad (5)$$

所以, 对信号空间的分解可表示为

$$V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1}^1 \oplus W_{j+1}^2 \oplus W_{j+1}^3 \quad (6)$$

式中

$$\begin{cases} V_j[I(m,n)] = \langle I(m,n), h_j(m,n) \rangle \\ W_j^1[I(m,n)] = \langle I(m,n), g_j^1(m,n) \rangle \\ W_j^2[I(m,n)] = \langle I(m,n), g_j^2(m,n) \rangle \\ W_j^3[I(m,n)] = \langle I(m,n), g_j^3(m,n) \rangle \end{cases} \quad (7)$$

根据以上各式, 可以对信号进行多层分解, $W_j^1[I(m,n)]$ 、 $W_j^2[I(m,n)]$ 、 $W_j^3[I(m,n)]$ 分别对应二维信号 $I(m,n)$ 的离散小波变换, 这三个分量称为 HG 、 GH 和 GG 分量; $V_j[I(m,n)]$ 则称为 HH 分量, HH 代表 $I(m,n)$ 的低频分量的小波分解系数; HG 代表 $I(m,n)$ 垂直方向的高频分量的小波分解系数; GH 代表 $I(m,n)$ 水平方向的高频分量的小波分解系数; GG 代表 $I(m,n)$ 对角线的高频分量的小波分解系数。

HH 包含了 $I(m,n)$ 中的大部分的信号 S (低频信息部分), 特别是地物信息 (因地物具有一定的缓变特点, 以低频为主), 因此 HH 是应当保留下来的。噪声 N 则主要包含在 HG 、 GH 和 GG 中, 因此保留多次分解后的 HH , 而丢掉

HG 、 GH 和 GG , 相当于将大部分的 Speckle 进行了抑制。图 1 为这种滤波方法的结构框图。图中 $I_{HH}^k(m,n)$ 表示第 k 次分解后的 HH 分量。满足允许条件的小波很多, 不同的小波在分解和重构时会有不同的误差, 分解的效果差别也很大, 因此, 小波的选择将严重影响这种滤波方法对 Speckle 的抑制性能。下面先对几种常见的小波从理论上进行分析, 然后再从实验

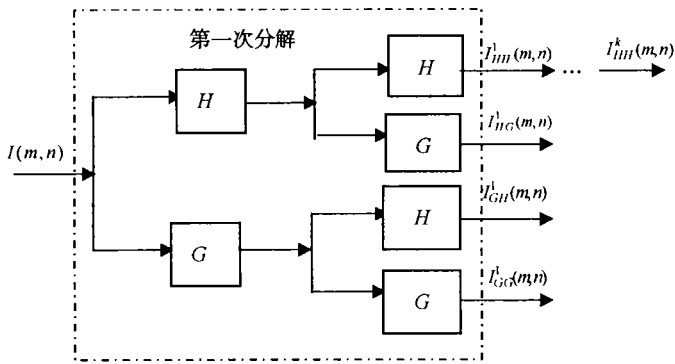


图 1 基于小波变换的多尺度的 Speckle 抑制方法框图

研究的角度加以比较。

3 几种小波基的理论分析和比较

本文对常用的 Haar 小波基、Bubble 小波基、Daubechies 小波基、B 样条小波基及线性相位有限长脉冲响应的 QMF 进行分析。

1) 支撑性 支撑性将决定是否能提供有限的更实际和具体的滤波器, 它将影响分解和重构时带来的误差。Haar 小波基和 Daubechies 小波基是紧支撑的, 这几种小波基在分解和重构一般不会带来误差。B 样条小波基不是紧支撑的, 但有迅速衰减的支撑, Bubble 小波基不具备紧支撑性。

2) 对称性及线性相位性 对称性要影响分解后的信号是否发生一定的形变和重影, 对称滤波器具有线性相移特性。Haar 小波基、Bubble 小波基、B 样条小波基和线性相位有限长脉冲响应的 QMF 都具有良好的对称性; Daubechies 小波基本身是不对称的, 随着支集长度 N 的增加, 对称性变好。在实验中取 $N=5$ 时, 显示出有较好的对称性。

3) 连续性及光滑度 小波基的连续性对减小量化误差较为重要, 一般情况下, 紧支撑的小波基的光滑性较差, Bubble 函数具有无穷光滑。从理论上来看, 光滑性越好, 平滑效果就越好, 但对细节的损失也就越大。从下面的实验结果可以看出, Bubble 小波的滤波效果是最好的, 但细节损失也是最大的。

4) 正交性 正交性将影响重构的难易程度, Haar 小波基及 Daubechies 小波基具有正交性, 线性相位有限长脉冲响应的 QMF 具有一定的正则性, B 样条小波基可通过正交化得到正交小波基。

4 实验结果及分析

为了验证多层分解对 Speckle 抑制能力及小波的选择对性能的影响, 本文利用 SAR 图像数据进行了实验研究, 其中小波分解所得的实验结果都进行过两层分解。

Speckle 的研制结果如图 2 所示, 其中图 2a 为原始的 SAR 图像, 有较为严重的 Speckle; 图 2b 是通常采用的经典 Lee 滤波之后的结果; 图 2c 是利用 Haar 小波的结果; 图 2d 是利用 Bubble 小波的结果; 图 2e 是利用 Daubechies 小波的结果; 图 2f 是利用 B 样条小波的结果; 图 2g 是利用线性相位有限长脉冲响应的 QMF 的结果。从图 2 中可以看出, 利用这些小波基对 Speckle 都有一定程度的抑制, 除 Bubble 小波外, 其他的结果都较好地保留了图像原有的细节。

为了定量分析不同小波基下的 Speckle 抑制性能, 我们利用 SAR 图像处理中通常采用的参数 ENL 来比较。在较均匀的区域, ENL 的定义为该区域的均值除以该区域的均方差。表1为等效视数的比较结果, 本文选了5个不同的较均匀的区域进行了统计比较。

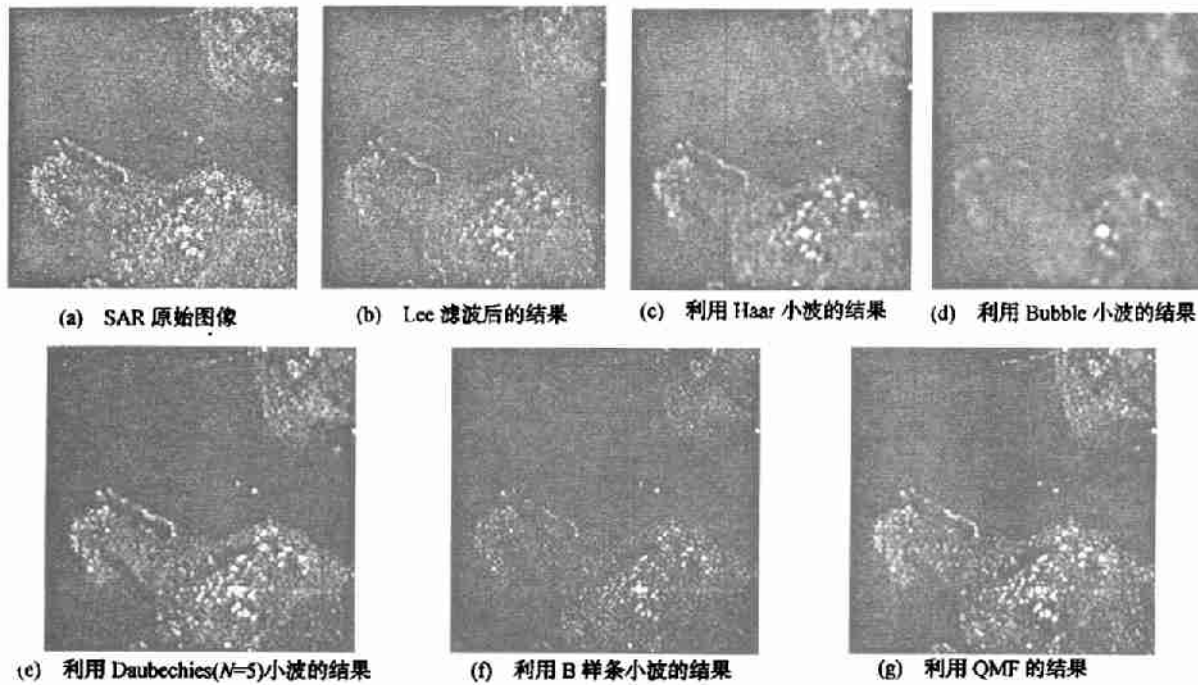


图2 相干斑的研制结果

表1 ENL 的比较结果

区域	原始图像		Lee 滤波		Haar		Bubble		Daubechies(N=5)		B-2		QMF	
	均值	ENL	均值	ENL	均值	ENL	均值	ENL	均值	ENL	均值	ENL	均值	ENL
1	13.498	1.608	9.757	2.104	12.732	5.854	10.789	10.641	12.731	3.033	10.908	1.671	12.828	2.791
2	13.787	1.587	10.012	2.128	13.205	5.194	10.902	8.798	13.441	2.880	11.130	1.676	13.146	2.689
3	13.888	1.429	10.333	1.846	13.379	4.984	11.298	7.545	13.370	2.875	11.340	1.748	13.458	2.750
4	13.371	1.507	9.808	2.011	12.917	4.987	10.676	7.102	13.186	2.855	10.731	1.623	12.717	2.649
5	16.634	1.601	12.038	2.164	16.096	4.899	13.488	8.154	16.212	2.831	13.394	1.750	15.943	2.744
平均		1.546		2.051		5.184		8.448		2.895		1.694		2.725

由表1可见, 原始图像的平均等效视数为1.546, 经 Lee 滤波之后的图像的平均 ENL 为2.051, 采用 Haar、Bubble、Daubechies、B 样条及线性相位有限长脉冲响应的 QMF 后的 ENL 分别为5.184、8.449、2.895、1.694、2.725。除 B 样条以外, 其他的都较经典的 Lee 算法在 ENL 上有所提高。

5 结束语

本文在分析了 SAR 图像中的 Speckle 统计特性的基础上, 基于小波变换, 给出了一种多尺度多层分解的 Speckle 滤波方法, 使图像的 Speckle 得到了较好的抑制。本文还对不同的小波基进行了理论分析, 并利用实验数据, 对各种滤波器的滤波效果进行了比较, 证实了 Haar、Daubechies 和线性相位有限长脉冲响应的 QMF 同时具有较好的 Speckle 抑制和边沿保持的能力。

参 考 文 献

- 1 刘国庆、黄顺吉. 多频率多视极化 SAR 图像的相干斑抑制. 电子科技大学学报, 1997, 26(增): 82~85
- 2 Moreira Alberto. Improved multilook techniques applied to SAR and SCANSAR images. IEEE Trans on GRS, 1991, 23(4): 529~534
- 3 Lee J S. A simple smoothing algorithm for synthetic aperture radar images. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1983, SMC-13(1): 85~89
- 4 Lee J S. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images. Opt Eng, 1986, 25(5): 636~643
- 5 Yang Jinhao, Wang Jianguo, Huang Shunji. Speckle filtering for SAR images based on orthonormal wavelet transform. EUSAR, Germany, 1996:151~154
- 6 Zaitsev Valentin V. Analysis of the Speckle suppression algorithms based on the MAP approach. EUSAR, Germany, 1996: 159~162
- 7 李建平. 小波分析与信号处理. 重庆: 重庆出版社, 1997
- 8 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994
- 9 崔锦泰. 小波分析导论. 西安: 西安交通大学出版社, 1995

Analysis of SAR Speckle Filtering with Different Wavelets

Han Chunlin Zhao Zhiqin Wang Jianguo

(Dept. of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper analyzes the statistics of speckle. Based on Wavelet transform, this paper gives a method for speckle suppression based on multiscale decomposition. The method uses the low frequency part HH in speckle filtering. The results show the effectiveness of the method. This paper also analyzes the performance of different wavelets. According to ENL, the results obtained by using different wavelets are compared. Some beneficial conclusions are given.

Key words synthetic aperture radar; speckle; filtering; wavelet transform; equivalent looks