DOI:10.13203/j.whugis1999.04.006

第24卷第4期 武汉测绘科技大学学报 Vol.24 No.4
1999年12月 Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Dec. 1999

单视数SAR图像Speckle滤波方法的研究*

徐 新 廖明生 朱 攀 卜方玲

(武汉测绘科技大学光电工程学院,武汉市珞喻路129号,430079)

摘 要 在分析单视数SAR影像的Speckle局部统计特性和现有的空间滤波算法的基础上,提出了一种新的Speckle滤波方法,该方法采用特殊的滤波窗口邻域划分方法,根据窗口相对标准差自适应地调整窗口尺寸和窗口内的滤波区域。该方法被用于多幅单视数ERS-1/2 SAR图像去Speckle处理,并与以往的典型算法进行了比较,取得了较好的实验结果。

关键词 合成孔径雷达;斑点噪声;相对标准差;单视数;有效视数

分类号 TP751

单视数合成孔径雷达(single-look synthetic aperture radar)影像在干涉雷达等许多重要领域有着广泛的应用。然而,SAR所采用的相干波成像方式使影像受到斑点噪声(speckle)的干扰,斑点噪声给图像分类带来较大困难,并使SAR影像的可解译性变差。因此,对斑点噪声抑制技术的研究一直是SAR成像技术的重要课题之一。

斑点噪声的抑制技术可分为两大类,即成像之前的多视处理技术和成像后的滤波技术。前者用多视平均的方法,以空间分辨率降低N倍为代价获得$\sqrt{N}$倍的Speckle抑制[1,10];后者可分为空间滤波技术和频域滤波技术两个分支,其中,以空间滤波技术为基础的Speckle抑制算法大量出现,成为SAR图像Speckle抑制技术的主流。在众多空间滤波算法中,通常采用统计学方法利用局部统计信息对去除Speckle后的数据进行估计,不同的估计准则如最小均方误差准则(MMSE)、极大似然法(ML)和最大后验概率(MAP)等得到广泛的使用[3]。由于SAR观测数据在多视数条件下(视数大于等于4)可近似认为服从高斯分布,故后两者多用于多视数的SAR影像去Speckle处理。而以Lee算法[6]、Kuan算法[4]、增强Lee算法[5]为代表的基于MMSE的滤波算法具有较其他方法更好的滤波性能[3,7],且更适用于单视数SAR数据。该类算法多以局部相对标准差(relative standard deviation)为主要线索实现滤波处理。

本文在分析常用的Speckle滤波方法的基础上,采用特殊的窗口邻域划分,提出了一种新的单视数SAR影像自适应Speckle滤波算法。实验结果表明,该算法在单视数条件下不仅具有较强的Speckle抑制能力,而且较好地保持了图像的细节信息。

1 常用的Speckle滤波算法

单视数SAR观测数据通常为复数形式,可表示为:

$$A = A_I + jA_Q \tag{1}$$

式中,A_I和A_Q分别为回波信号的同相分量和正交分量[1],由其生成的SAR影像(亮度图像)通常表示为:

$$DN = \sqrt{A_I^2 + A_Q^2} \tag{2}$$

其亮度数据DN服从瑞利分布。

Speckle噪声通常表示为非相关的乘性噪声模型[1~3,7],因此SAR观测数据可表示为:

$$G = F \times U \tag{3}$$

式中,G是观测数据;F是去除Speckle后的数据;U是与F相对独立的Speckle噪声随机变量。由于Speckle噪声由回波信号中均值为0、标准差与图像场景无关的随机相位干扰产生,该噪声服从均值μ为1、方差为σ_u^2的指数分布[1]。在单视数时,可计算出其标准差σ_u的理论值约为0.522 7,相对标准差的理论值$C_u = \sigma_u/\mu = 0.522\ 7$。

Lee滤波算法由简单线性模型导出,滤波器表示为:

$$G_{xy} = F_{xy} \times K + M(1-K) \tag{4}$$

式中,F_{xy}、G_{xy}为处理前和处理后窗口中心像素灰度值;M为窗口内所有像素的均值;K为权重函数,且$K = 1 - C_u^2/C_x^2$;C_x为窗口相对标准差σ_x/M。

增强的Lee滤波算法以相对标准差为依据将

收稿日期:1999-04-13.徐 新,男,32岁,博士生,讲师,现主要从事雷达影像处理等研究。
*国家自然科学基金和测绘遥感信息工程国家重点实验室开放研究基金资助项目,编号69782001及WKL(98)2108。

图像分为均匀、非均匀和点状目标 3 类区域,分别进行均值滤波、Lee 滤波或保持不变,具体为:

$$G_{xy}=\begin{cases}M & C_x\leqslant C_u\\ F_{xy}\times K+M(1-K) & C_u\leqslant C_x\leqslant C_{\max}\\ f_{xy} & C_x>C_{\max}\end{cases}\tag{5}$$

式中,$K=\exp[-(C_x-C_u)/(C_{\max}-C_x)]$;$C_{\max}=\sqrt{3}C_u$。

该方法滤波及保持边缘和细节信息的能力均较强,但低视数时由于窗口中相对较细的边缘或纹理上的斑点噪声使 C_u 呈现较大值,该类噪声将被当作点状目标基本上未被处理。

Kuan 滤波算法滤波器的形式与 Lee 滤波相同,但权重函数如下式所示:

$$K=[1-(C_u^2/C_x^2)]/(1+C_u^2)\tag{6}$$

其滤波效果优于 Lee 滤波,但由于该算法的导出主要基于均匀场景[4,8],故对纹理信息较丰富或灰度分布有较明显跳变的边缘区域而言,去 Speckle 的效果不理想。如能在滤波窗口中选取包括中心像素在内的相对均匀区域作为滤波区域,则更符合该算法初衷。

针对以上对 Speckle 噪声统计特性和不同滤波方法的讨论,本文提出了一种改进的新算法,该算法以相对标准差的理论值为主要依据,可实现滤波窗口和窗口内参加滤波像素自适应选择,以保证对单视数 SAR 影像滤波处理在均匀区域内进行。

2　本文提出的单视数 Speckle 滤波算法

由于 Kuan 算法是以均匀场景为前提得到的,因此滤波应在相对均匀的区域进行。判别滤波窗口中哪些像素与中心像素同属均匀区域,可以根据相对于滤波窗口中心像素的相对标准差(即假定中心像素灰度值为窗口均值所求取的相对标准差)进行,如局部相对标准差 C_x 小于或等于斑点噪声相对标准差的理论值 C_u,则可认为该区域属均匀区域。

本文提出的算法采用 $N\times N$ 移动窗口处理图像的每一像素,并将窗口内像素围绕中心像素按米字型等分为 8 个互不重叠的邻域,如图 1 所示。该邻域划分方法可方便实现在中心像素的任何方向上搜寻存在较多细节或边缘的区域(表现为邻域相对标准差较大),以便在进行滤波处理时予以剔除。$N\times N$ 的窗口每邻域像素个数均为 $(N^2-1)/8+1$,N 为奇数。

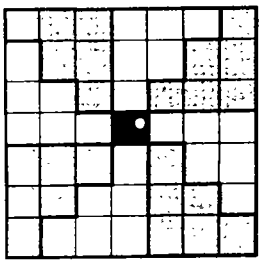


图 1　滤波窗口的邻域划分

Fig. 1　The Neighborhood Model of Filtering Window

实现本算法的具体操作流程为:

(1)对移动窗口进行米字型邻域划分,分别计算窗口内 8 个邻域相对于中心像素灰度值的相对标准差 $C_i(i=1,2,\cdots,8)$,假设整个窗口属均匀区域;

(2)计算窗口内均匀区域的均值、标准差和相对标准差 C_x;

(3)若 $C_x\leqslant C_u$,可认为假设成立,进行 Kuan 滤波;否则,剔除窗口内 C_i 最大的那个邻域,并假设窗口中剩下的所有邻域为均匀区域,返回(2);

(4)若窗口内邻域均被剔除,则缩小窗口尺寸 $(N=N-2)$并返回(1);

(5)如窗口尺寸已缩小到 3×3,则认为该中心像素为点状目标,采用中心像素直接 4 邻接点灰度平均的形式对中心像素灰度加以适当调整,防止在相对平滑背景下出现影响视觉效果的奇异点。

3　实验结果及分析

实验选取一幅原始的单视数 ERS-1/2 SAR 图像,如图 2(a)所示,实际参与滤波的图像数据每像素 16bit,图像大小为 1 024×1 024 像素。实验分别采用 Kuan 算法、增强的 Lee 滤波算法和本文提出的滤波算法对原始图像进行了处理。由于本算法对窗口尺寸进行的自适应调整采取缩小窗口尺寸的方式,故滤波窗口初始尺寸不宜太小。但是,如果滤波窗口初始尺寸选择太大,则会使 Speckle 与图像场景中的有用细节因其统计特性相近而混淆,难以达到预期效果。经实验比较,处理均采用 11×11 的初始滤波窗口,处理后的图像依次为图 2(b)、图 2(c)、图 2(d)(图 2 中所有图像为同一局部,尺寸为 256 像素×256 像素)。

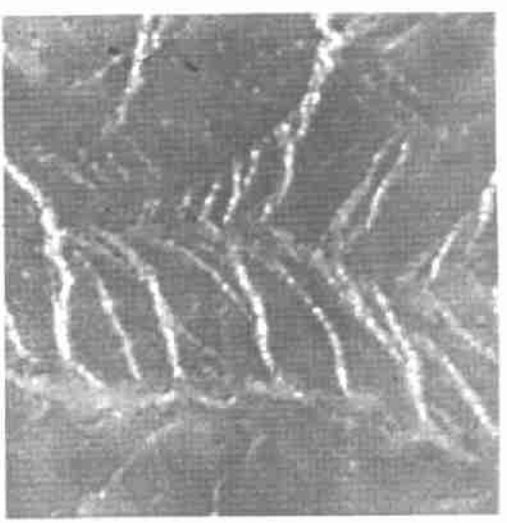
评价 Speckle 滤波效果主要从目视效果、去 Speckle 能力和保持边缘和细节能力等 3 个方面进行。

1)从目视效果来看,Kuan 滤波对相对均匀的区域平滑效果较强,使相对均匀区域灰度层次基本丧失,而含边缘的区域滤波效果不佳,两者反差较大;经增强的 Lee 滤波后图像亮纹理上斑点噪声基本未被处理,影响了视觉效果;而采用本文滤波算法处理后的图像无论亮区、暗区均无明显斑点,细节、边缘和灰度层次与原始图像最接近,且具有较好的视觉效果。

(a)原始图像

(b)Kuan 滤波结果

(c)增强 Lee 滤波结果



(d)本文算法滤波结果

图 2 不同滤波算法处理单视数 SAR 图像的结果

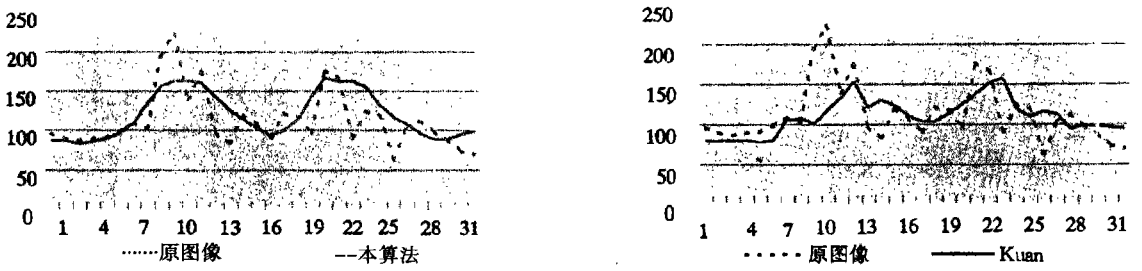
Fig.2 The Filtering Results of Different Algorithms for Single-look SAR Image

2)保持边缘和细节能力。实验从图像任取一行像素的灰度数据进行比较,图 3 给出了该行数据灰度变化的局部情况,其中图 3(a)显示了经本算法滤波后数据与原始数据的对照;图 3(b)显示了经 Kuan 滤波后数据与原始数据的对照。从图中可看出,经本算法滤波后,灰度变化比传统算法更好地保持了原始数据灰度变化的趋势和幅度、并在不同灰度水平上均体现出较强的平滑效果。

3)去 Speckle 能力。定量地评价去 Speckle 滤波效果的参数主要有图像的相对标准差和有效视数(effective number of looks,ENI)等指标,有效视数的计算方法参见文献[2]。其中,相对标准差越小,表明图像越平滑,而有效视数则反映了图像滤除 Speckle 的效果。表 1 给出了不同滤波器滤波效果的定量比较,其中,由图 3 中灰度跳变的峰

点和谷点灰度差可计算保持边缘指数,该指数相对于原始数据进行了归一化处理。

从表中可知,本文提出的滤波算法结果相对标准差最小,表现出较好的平滑能力,有效视数与边缘保持指数均为最高,显示了本算法与 Kuan 滤波和增强Lee滤波相比,在去Speckle能力及保持边缘和细节方面都具有更好的效果。该算法已用来处理了多幅 ERS-1/2 SAR 图像,结果表明,在处理单视数 SAR 图像时优于其他两种算法。



(a)　　(b)

图 3　滤波前后图像边缘和细节灰度变化比较

Fig. 3　The Grayscale Comparison Plot of Different Filtering Methods

表 1　不同方法滤波效果的比较

Tab. 1　The Comparison of Different Filtering Methods

	原始图像	Kuan 滤波	增强 Lee 滤波	本文滤波方法
有效视数	0.79	1.49	1.25	1.72
相对标准差	1.12	0.81	0.89	0.76
边缘保持指数	1.00	0.38	0.50	0.59

参　考　文　献

1　乌拉比 F T,穆尔 R K,冯健超.微波遥感.黄培康,汪一飞译.北京:科学出版社,1987

2　Wakabayshi H, Arai K. A Method of Speckle Noise Reduction for SAR Data. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(10): 1 837～1 850

3　Bruniquel J, Lopes A. Multi-variate Optical Speckle Reduction in SAR Imagery. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(3): 603～627

4　Kuan D T. Adaptive Noise Smoothing Filter for Imageswith Signal-dependent Noise. IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1985, 7(2): 165～177

5　Lopes A, Tonzi R, Nezry E. Adaptive Speckle Filters and Sense Heterogeneity. IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(6): 992～1 000

6　Shi Z H, Fung K B. A Comparison of Digital Speckle Filters. In: Proc. IGARSS'94, 2 129～2 131

7　Gebhardt M, Horrell M J, Inggs R M. Comparison of Speckle Reduction Techniques Applied To Airborne SAR Imagery. In: Proc. IGARSS'95, 172～174

8　王建国,杨晋浩,黄顺吉.一种新的 SAR 图像 Speckle 滤波算法.成都电子科技大学学报,1995,24(5):460～466

9　Hagg W, Sties M. Efficient Speckle Filtering of SAR Image. In: Proc. IGARSS'99. 4, 2. 140～2 142

10　廖明生,郭华东.SAR 数据的多视处理与视数选择的探讨.定量化遥感技术.国家高技术信息获取与处理技术专家组,1995

Research on Speckle Filtering of Single-look SAR Image

Xu Xin　Liao Mingsheng　Zhu Pan　Pu Fangling

(School of Photoelectric Engineering, WTUSM, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract　Sinçe synthetic aperture radar (SAR) is a coherent system, images acquired by SAR are accompanied with speckle noise which disturbs image interpretation and target classification. This noise is conspicuous in single-look SAR images. Based on the analysis of the local speclke statistics characteristics of single-look SAR image and algorithms of spatial filtering, an adaptive speckle filtering method is presented in this paper . The Kuan filter which is based on MMSE criterion is

modified in the method. One of the focal points of the algorithm is to find the set of pixels which belong to the same homogeneous area within filtering windows adaptively. The local relative standard deviation within filtering windows is used as the crucial parameter while a special neighborhood model is used in the filtering windows in order to choose the largest homogeneous area within filtering windows. Firstly the local relative standard deviation C_x of filtering window is calculated. Then the filtering window is divided into eight mutually exclusive sub-windows and the central pixel is the only repetitious pixel in each sub-window. For every sub-window, the local relative standard deviation C_i is calculated. If C_x is larger than a threshold C_u, the sub-window with the greatest C_i is removed from filtering window and C_x of remaining pixels in filtering window is recalculated. Repeat the procedure until $C_x < C_u$. The remaining sub-windows are merged as filtering area. The selected filtering area is the largest homogeneous area in filtering window and the Kuan filtering algorithm is adopted within the filtering area. If all sub-windows within filtering window are removed, reduce the size of window for the determination of homogeneous area. If the size of window is 3 by 3 pixels, replace the central pixel with the average of the nearest four pixels around it. The method is applied to several single-look ERS-1/2 SAR images. The results show that the performance of the approach presented is satisfactory in both speckle filtering and the preservation of image details, and in generating visually-natural images as well.

Key words synthetic aperture radar; speckle; relative standard deviation; single-look; effective number of looks

《武汉测绘科技大学学报》征稿简则

《武汉测绘科技大学学报》是由武汉测绘科技大学主办、国内外公开发行的测绘专业学术期刊，SCI、EI、PЖ等国际著名检索系统均收录本刊发表的论文。为进一步提高刊登论文的代表性，发挥本刊在国内外测量界的学术辐射优势，特面向国内外公开征稿。

1. 稿件内容：本刊主要刊登有关摄影测量、遥感、大地测量、工程测量、地图学、物理大地测量、地球动力学、图形图像学、地理信息系统、测绘仪器、计算机应用等测绘及相关学科的学术论文，稿件要求具有较高的学术水平或重大应用价值。所有来稿文责自负。

2. 稿件要求：来稿应符合科技论文著作要求，论点正确，论证严谨，数据可靠，方法科学，文字通达、简洁，字数一般在7 000字以内。来稿应采用法定计量单位，采用国家有关出版标准，附300字以内的中文摘要和1 000字左右的英文摘要，并附有中英文关键词。作者署名应符合著作权法规定，并附第一作者简介。基金资助论文应注明基金名称、项目编号。

3. 投稿要求：所有来稿应书写工整，交磁盘者（应转为纯文本格式）同时附打印稿；图表公式应清楚，易混淆的字符应注明；所附照片应符合制版要求；参考文献著录内容齐全，格式符合有关标准；不准一稿两投。一经投稿，视为作者授权编辑部可作不影响作者论点的必要文字加工。

4. 鉴于本刊已整体加入《中国学术期刊(光盘版)》及入网"万方数据（ChinaInfo）系统科技期刊群"，若无特别声明，所有投稿视为作者同意在本刊出版印刷版的同时授权出版光盘版及进入因特网。

5. 来稿经审查同意刊登后，将酌收版面费。一经刊用，即付稿酬。来稿一般不退。对于投稿三个月后无答复的稿件，作者可以查询。

6. 本刊编辑部地址：武汉市珞喻路129号，武汉测绘科技大学期刊社(1号楼407室)，邮编430079，电话(027) 87885922转2465。

E-mail: journal@wtusm.edu.cn, http://www.wtusm.edu.cn, http://chinainfo.gov.cn/periodical