

一种基于相干系数的复数图像滤波方法

赵珊¹, 杨桃丽²

(1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430000;
2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要:复数数据类型的图像具有较强的条纹性, 其中最具代表性的是干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)图像。以复数图像处理为研究课题, 针对现有滤波算法自适应性差, 不适应复数数据处理, 条纹连贯性低的缺点, 提出了一种新的基于相干系数的滤波方法。从相干系数的选择和区域生长方法两个方面进行了改进。相干系数是复数图像对相似度的重要度量指标, 该算法以相干系数作为滤波窗口选择的指标, 并通过设定一定的阈值作为生长条件, 形成滤波模板。由此得到的滤波窗口的形状、大小更为灵活, 和实际条纹的相似度达到89%以上。经过该方法处理后的图像的边缘保持指数和等效视数均优于圆周期均值滤波、中值滤波, 最小均方差滤波等指标。可知相干系数滤波算法的滤波效果最好, 图像条纹的连贯性得到有效的补偿。文中实现了复数图像中同质像素的选择, 复数数据的处理以及相位保真的优化。

关键词:相干系数; 复数域滤波; 干涉合成孔径雷达; 区域生长; 自适应

中图分类号: TP301

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2020)02-0007-05

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2020.02.002

A Coherent Coefficient Based Filter of Complex Number Images

ZHAO Shan¹, YANG Tao-li²

(1. School of Remote Sensing Information and Engineering, Wuhan University, Wuhan 430000, China;
2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The complex number images have strong fringe, among which the most representative one is interferometric synthetic aperture radar (InSAR) image. Taking complex image processing as the research subject, we present a new filtering method based on coherence coefficients to overcome the disadvantages of existing filtering algorithms, such as poor self-adaptability, unadaptability to complex number processing and low stripe coherence. This method is improved from coherence coefficient selection and region growth method. Coherence coefficient is an important measure index of similarity of complex image. This algorithm takes coherence coefficient as the index of filter window selection and forms filter template by setting a certain threshold as the growth condition. The result shows that the shape and size of the filter window are more flexible, and the similarity with the actual fringes is up to 89%. The edge preservation index and equivalent view number of the image processed by this method are better than those of the circular mean filter, the median filter, and the minimum mean square filter, etc. It can be seen that the coherence coefficient filtering algorithm is satisfactory and the coherence of image fringes is effectively preserved. The selection of homogeneous pixels, the processing of complex number and the optimization of phase fidelity in complex number images are realized.

Key words: coherence coefficient; complex number; interferometric synthetic aperture radar (InSAR); region growth; self-adaptation

0 引言

复数图像的数据类型相较于实数图像不同, 代表性的复数数据图像有干涉合成孔径雷达图像等。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种高分辨率成像雷达, 可以在能见度极低的气象条件下得到类似光学照相的高分辨雷达图像^[1]。是利用雷达与目标的相

对运动把尺寸较小的真实天线孔径用数据处理的方法合成较大的等效天线孔径的雷达。干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)以合成孔径雷达复数数据提取的相位信息为信息源, 获取地表的三维信息和信息变化^[2-3]。

由于大量的散射单元反射波的相干叠加, 干涉纹图

中会引入相位噪声,降低干涉纹图的质量^[4]。为了提高 InSAR 图像质量,便于后续地面信息的准确得出,需要对图像进行降噪滤波。常用的经典滤波器有 Lee 滤波、中值滤波、均值滤波等,但这些方法得到的滤波模板固定,不易实现自适应处理^[5];且由于 InSAR 的数据类型为复数数据,而复数的平均不能降斑^[6],因此常用的数字噪声滤波技术并不适用,尤其是均值滤波器,会发生相位跳变失真的情况。因此需要一些改进来弥补这些不足。针对 InSAR 独特的条纹特征和相干斑的统计特性,文中提出了一种基于相干系数的滤波算法,该算法得到的滤波窗口较好地模拟了条纹的实际走向,使窗口内的像素特征最大程度保持一致,得到的滤波后图像质量得到增强。

1 干涉合成孔径雷达图像滤波特点

1.1 空间滤波原理

空间滤波的原理是用空间平均来代替样本平均。理想的滤波要求对同一点进行连续多次观测,并以此作为样本,进行平均以确定该点的实际情况。而现实中连续的若干次观测是不现实的^[7],因此实际工程中通常采用空间平均代替集平均,即假设空间位置相近的区域的噪声的分布情况类似;对于 InSAR 图像来说,相干性高的区域的噪声分布的相似性高,因此同质像素的选择成为 InSAR 滤波的关键。

空间滤波器是由一个邻域(典型的是一个较小的矩形)以及对该邻域包围的图像像素执行的预定义操作组成^[8]。滤波产生一个新像素,新像素的坐标等于邻域中心的坐标,像素的值是滤波操作的结果。滤波的中心访问输入图像中的每个像素,就生成了处理(滤波)后的图像。

1.2 相干系数

相差条纹的一个重要特点是各像素点上相位的值的可信度不同,即空间位置相似的区域的噪声分布不一定类似。由干涉得到的各点的相位值,其准确程度取决于成像系统及成像过程中的许多参数。其中两幅

SAR 图像的相干性的好坏起着重要作用,一般来讲,一点的相干系数越大,统计污染越少,其准确度越高,置信度越大。

因此以相干系数代替空间位置作为预定义操作指标。相干系数的计算如下^[9]:

$$\rho_c = \frac{E[S_i S_j^*]}{\sqrt{E[|S_j|^2]E[|S_j|^2]}} = |\rho_c| e^{j\theta} \quad (1)$$

由于是复相关的模,相干系数的取值范围为 $[0, 1]$ 。从几何意义上讲, ρ_c 的含义为两像素间的夹角。相干系数越接近于 1,图像的相干性越好,即二者的相似度越高。

多视 SAR 的相位概率密度分布函数为^[10]:

$$p_{\varphi}^{(n)}(\varphi) = \frac{\Gamma\left(n + \frac{1}{2}\right) (1 - |\rho_c|^2)^n \beta}{2\sqrt{\pi} \Gamma(n) (1 - \beta^2)^{n+\frac{1}{2}}} + \frac{(1 - |\rho_c|^2)^n}{2\pi} \times F\left(n, 1; \frac{1}{2}; \beta^2\right) \quad (2)$$

从图 1 可以看出,相干系数和标准差呈负相关,并且随着视数的增加,相位误差明显减小。由此论证了相干系数应用于 InSAR 图像处理中的可行性。

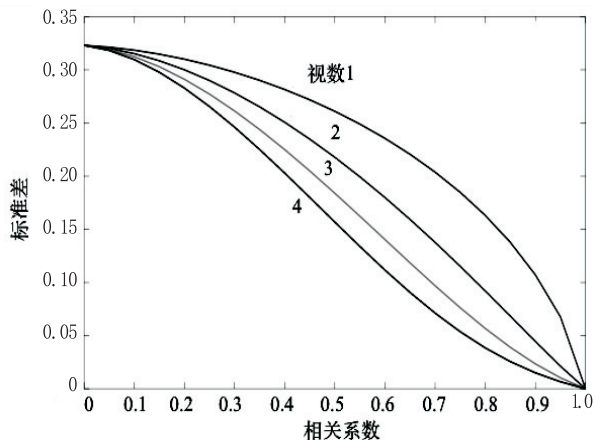


图 1 多视相位差的标准差与 $|\rho_c|$ 的关系

1.3 质量评价指标

边缘保持指数(EPI)刻画了图像细节的保留能力。EPI 越接近于 1,滤波后的图像的边缘信息越接近原始图像^[11]。

边缘保持指数的计算公式为^[12]:

$$EPI = \frac{\sum |\varphi_s(m, n) - (\varphi_s(m+1, n))| + |\varphi_s(m, n) - \varphi_s(m, n+1)|}{\sum |\varphi_0(m, n) - (\varphi_0(m+1, n))| + |\varphi_0(m, n) - \varphi_0(m, n+1)|} \quad (3)$$

相干斑噪声程度可以利用标准差与均值的比值进行有效衡量。又由于该比值与视数直接相关,因此视数是评价图像质量的重要指标。因此为了准确衡量 SAR 图像相干斑的噪声水平,引入等效视数(equivalent number of looks, ENL)的概念。针对 SAR 图像中大片均匀区域,定义标准差与均值的比值为^[13]:

$$\beta = \frac{\sqrt{E[(x - \bar{x})^2]}}{\bar{x}} \quad (4)$$

2 基于相干系数的滤波算法

2.1 算法特点

文中算法从邻域的选择以及对该邻域的预处理操

作两个方面进行了改进,以适应 InSAR 图像的条纹特点。首先,该算法采用区域生长的方式^[14],通过设定阈值,在每一次循环中判断滤波窗口是否继续生长,根据不同的场景可以产生方向、大小不同的滤波模板,而不必受限于固定的形状;其次,以相干系数为核心的预定义操作可以最大程度保留图像条纹的连贯性,使得权重的分配总是沿着相位误差最小的方向进行,从而进行二次筛选,加强模板内的像素的同质性。即该方法从空间滤波器的两个角度同时保证了滤波操作的有效性。

2.2 算法步骤

通过选取同质像素,可以最大程度地保留 InSAR 图像条纹的连贯性^[15],从而在降噪的基础上不破坏图像含有的高程等信息。为了最大程度地模拟所有可能存在的方向,采取以下区域生长的办法模拟条纹。干涉条纹在某个像素的一定邻域的数值是连续变化的,当相角发生跳变时,表现在二维图像上是新的条纹的产生。对于相干系数,当其值大于 0 时,两向量间的夹角小于 90 度,此时没有相位跳变,无新条纹的产生。因此可以判定两向量位于同一相干条纹的范围内,对其连贯性需要予以保留。基于相干系数的滤波算法具体步骤如下:

- (1)选择 10×10 的窗口为滤波模板,中心像素作为“种子”;
- (2)以该种子为中心,计算其周围的像素和种子像素之间的夹角。若夹角小于 90 度,则认为该像素位于种子所在条纹的范围,该像素生长指标 w_i 记为 1,否则记为 0;
- (3)以新的记为 1 的像素作为生长起点,按照步骤 2 中的条件判断条纹是否生长;记作 0 的像素停止

- 0.964	0.999	0.042	0.637	- 0.952	0.613	0.907	0.231	0.467
- 0.841	0.756	0.989	0.918	- 0.400	0.723	- 0.951	0.346	0.923
0.874	- 0.991	0.996	- 0.546	- 0.407	- 0.910	- 0.870	- 0.582	0.852
- 0.994	0.974	0.091	0.865	- 1.00	- 0.749	0.273	0.978	- 0.128
- 0.899	0.960	0.988	- 0.094	1.00	- 0.901	- 0.328	0.195	- 0.993
- 0.193	- 0.633	0.701	- 0.817	- 0.999	0.812	- 0.305	0.158	0.624
0.819	- 0.776	0.975	0.196	0.967	0.998	- 0.133	0.050	0.540
0.196	- 0.467	- 0.202	0.928	0.014	1.000	0.380	0.456	- 0.872

该系数矩阵对应的二维灰度图像见图 3。

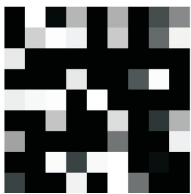


图 3 相干系数矩阵对应的二维灰度图像
由其模拟生成的条纹如图 4 所示。

- 生长。直至处理完整个图像;
 - (4)以之前标记的 1 组成的矩阵作为条纹方向,设定滤波窗口;
 - (5)以相干系数 ρ_i 作为权值,进行滤波窗口内的加权平均。
- 基于相干系数的滤波算法流程如图 2 所示。

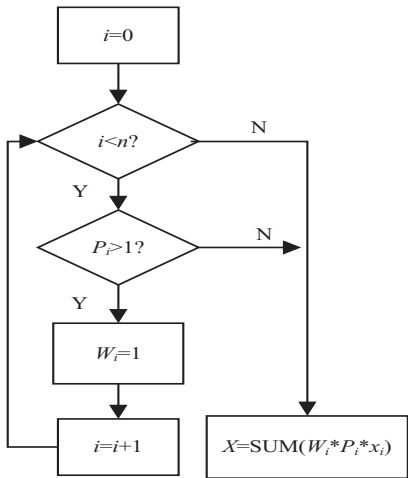
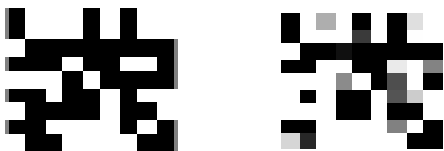


图 2 基于相干系数的滤波算法流程

该方法得到的权重模板在二维方向上较好地符合了整幅图像的条纹走向。虽然该方法在条纹的宽度和方向上的选择更为自由,但是对窗口的大小有较为严格的要求。从统计学的角度,窗口大小的选择直接影响相干性结果。窗口太小时,涨落太大;窗口太大时,局域性较差,一般情况下,选择窗口像元总数在 100 个左右。

2.3 条纹的生成

以本实验中 InSAR 图像 X_1 、 X_2 中第 100 行,第 500 列的数据为“种子”,举例说明中间过程。由该算法得到的相干系数数据矩阵为:



(a)根据相干系数模拟生成的条纹 (b)由原图截取生成的相位角信息

图 4 相干系数矩阵对应的二维灰度图像
为了更好地展示原图中的条纹走势信息,对原图

的像素值取反,展示效果更符合人的视觉习惯。通过统计两图像中对应位置像素值相同的像素个数在总像素个数中的占比,可以得到该滤波方法生成的模板和实际纹理的相似程度。以参数 α 作为模板和实际情况的相似性度量,由下式可以计算得出:

$$\alpha = \frac{n}{N} \times 100\%$$

(6)

其中, n 为两模板中像素值相同的像素个数; N 为模板总的像素个数,通常设置为 100。

对于不同的区域,以相干系数为权重的种子生长法得到的条纹宽度、方向也不同,该方法不仅灵活度高,而且更好地符合了实际的条纹走向。当完成对该区域的模板的生长后,进行邻近区域的像素处理,直至依次处理完整幅图像。该算法的优点是所选取的像素并不需要像圆周期均值^[16]、中值滤波器、最小均方差滤波器等方法那样位于一个固定的窗口内。即其窗口的大小和形状灵活,因此降噪能力更强。

3 实验结果及分析

3.1 滤波结果

选取了十对 InSAR 图像进行实验,该滤波方法为普适性滤波,针对所有通道适用。原始的复 SAR 图像对 X_1 、 X_2 如图 5 (a)、(b) 所示, (c) 为含有噪声的 InSAR 图像,基于相干系数的滤波得到的结果如图 5 所示。

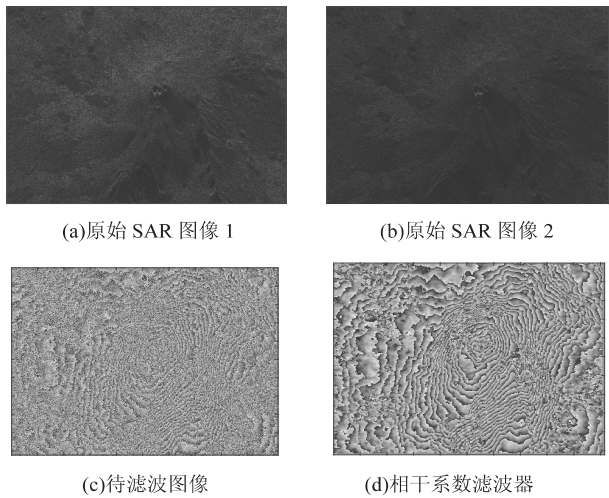


图 5 滤波结果(1)

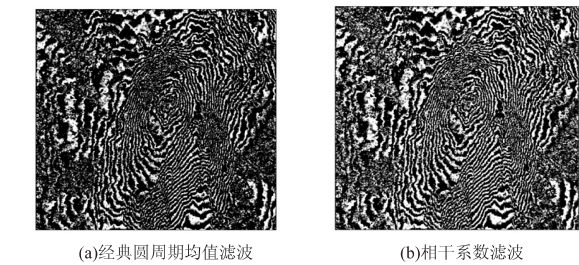


图 6 滤波结果(2)

图 6 展示了文中提出的滤波算法和普通滤波算法的效果对比。以相干系数为指标,经区域生长形成滤波窗口,得到的滤波后图像的条纹连续性得到了有效补偿,图像边缘清晰。

3.2 质量评价

表 1 展示了上述几种滤波算法的质量评价指标。

表 1 质量评价指标

指标	序号	圆周期均值	圆周期中值	最小均方差	相干系数
EPI	1	0.141 0	0.165 3	0.529 1	0.871 5
	2	0.283 2	0.284 5	0.703 2	0.910 3
	3	0.372 4	0.375 2	0.435 1	0.623 9
	4	0.466 2	0.530 9	0.849 3	0.934 8
	5	0.358 3	0.436 0	0.689 3	0.693 2
	6	0.103 5	0.132 8	0.450 3	0.349 5
	7	0.393 8	0.403 5	0.894 0	0.998 3
	8	0.340 3	0.378 4	0.469 9	0.598 4
ENL / * e-05	1	12.029 + 1.548i	3.408	5.780 + 7.514i	8.392+ 4.583i
	2	17.625 + 1.652i	7.634	7.899 + 5.044i	10.392+ 3.11i
	3	8.094+ 3.548i	2.392	2.955 + 6.345i	7.431+ 5.130i
	4	6.474 + 7.457i	1.563	4.874 + 4.198i	6.329+ 3.183i
	5	10.029 + 5.539i	4.580	7.756 + 3.721i	9.295+ 11.312i
	6	4.469 + 6.743i	0.473	1.893 + 0.463i	1.712+ 2.343i
	7	6.340 + 1.028i	2.083	2.780 + 6.304i	6.259+ 7.083i
	8	11.935 + 2.378i	3.089	1.837 + 4.572i	10.423+ 6.510i

通过统计相同像素在总像素中的占比可知,实际条纹和该算法得到的模板的纹理的相似度 α 高达 89%。实验结果表明,相干系数滤波后得到的图像噪声得到了明显的抑制,条纹的连贯性增强,尤其是左上和右下区域的相干斑较多的部分得到了有效的补充。基于相干系数滤波得到的图像的边缘保持指数和等效视数均优于其他三种滤波器,针对大部分图像,在不影响降噪效果的情况下,边缘保持指数得到了较大的改善。说明基于相干系数的滤波得到的图像的滤波效果增强,边缘细节保持良好,条纹连贯性得到补偿。

4 结束语

针对复数图像的条纹特点,提出了一种自适应的基于相干系数的滤波算法。该算法从相干系数的选择

和自适应的生长方式的设计两方面进行改进。相干系数可以有效地衡量两个向量间的相似性度的高低。从几何意义上讲,相干系数代表两向量间的夹角的大小,夹角越小,像素间的相似度越高。以夹角小于 90° 作为是否生长的判断准则,最大程度地保留了复数图像的相干性;由一个种子像素出发,通过区域生长,得到的滤波模板的大小、方向更加灵活,模板和实际纹理的相似度能够达到89%。最后以相干系数作为权值进行加权平均,满足不同的场景需求。通过边缘保持指数和等效视数的比较,可以看出尤其在边缘细节的保持上,该算法优于圆周期均值滤波器、圆周期中值滤波器和最小均方差滤波器。但缺点是在进行各个像素的邻域生长时,需要依次考察相邻像素是否满足生长条件,计算量较大。总的来说,该算法降噪效果良好,细节保持能力强,滤波后图像条纹的连贯性得到了有效补充,为后续的图像处理奠定了基础。

参考文献:

[1] 宋 芳. 合成孔径雷达干涉测量中的相位展开[D]. 成都: 四川大学,2005.

[2] COLESANTI C, WASOWSKI J. Investigating landslides with space-borne synthetic aperture radar (SAR) interferometry [J]. Engineering Geology,2006,88(3):173-199.

[3] KLEIN E, VIGNY C, FLEITOUT L, et al. A comprehensive analysis of the Illapel 2015 Mw8.3 earthquake from GPS and InSAR data[J]. Earth and Planetary Science Letters,2017, 469:123-134.

[4] 丁赤飏. 机载干涉合成孔径雷达数据处理技术[M]. 北京:

科学出版社,2017.

[5] 穆 冬. 干涉合成孔径雷达成像技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2001.

[6] LEE Jong-Sen, POTTIER E. Polarimetric radar imaging: from basis to application [M]. France: Taylor& Francis Group,2013:5-6.

[7] 李 卓,张提升,严昆仑,等. 一种改善 GPS 接收机载波相位连续性的相位预测方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2018,38(12):1280-1284.

[8] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 3rd ed. America: Pearson Education,2010:88-89.

[9] WALPOLE R E, MYERS R H, MYERS S L. Essentials of probability & statistics for engineers & scientists. 9th ed[M]. Beijing: China Machine Press,2016.

[10] JUST D, BAMLER R. Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar[J]. Applied Optics, 1994,33(20):4361-4369.

[11] 龚 胡,石 强. 基于平均梯度的边缘保持指数的图像质量评价[C]//2011 年信息技术、服务科学与工程国际学术会议. 北京:Scientific Research Publishing,2011:1436-1441.

[12] 徐 勇. 边缘结构保持型的图像滤波算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学,2011.

[13] 赵 诣,蒋 弥,杨 川,等. InSAR 干涉图滤波方法对比 [J]. 测绘科学,2017,42(6):149-154.

[14] 谢理训,杨宜民. 基于改进区域生长算法的彩色图像分割 [J]. 微计算机信息,2009(18):311-312.

[15] 郎丰铠,杨 杰,李德仁. 极化 SAR 图像自适应增强 Lee 滤波算法[J]. 测绘学报,2014,43(7):690-697.