

基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的 合成孔径雷达图像联合降斑算法*

孙增国^{1)2)†} 韩崇昭¹⁾

1) (西安交通大学电子与信息工程学院, 西安 710049)

2) (西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 7 月 19 日收到; 2009 年 8 月 23 日收到修改稿)

为了克服传统的基于合成孔径雷达(SAR)图像局部统计特性的降斑算法的缺点,提出了基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法. 首先,联合降斑算法对当前区域进行区域分类,并直接保留强边缘结构和点目标. 接着,联合降斑算法对均匀区域和弱边缘结构区域进行滑动窗的自适应增长,从而获得合适的滤波窗口. 最后,联合降斑算法对新的滤波窗口使用区域分类. 如果滤波窗口属于均匀区域,则直接使用均值滤波;如果滤波窗口属于边缘结构区域,则进一步使用结构检测,并且选择窗口内的均匀子区域作为最终的滤波区域. 降斑实验表明,联合降斑算法可以有效滤除均匀区域和边缘区域的斑点,同时对强边缘结构信息和点目标有较好的保留作用.

关键词: 区域分类, 自适应滑动窗, 结构检测, 联合降斑算法

PACC: 4230V, 4240F

1. 引 言

作为主动成像雷达,合成孔径雷达(SAR)能够穿透云雾雨雪,具有全天时全天候的工作能力,因此广泛应用于国民经济的各个方面^[1]. 但是,由于采用相干成像方式,SAR图像上出现了亮暗相间的颗粒状斑点,严重影响图像的解译. 因此,SAR图像斑点抑制算法的研究是SAR图像处理的重要内容^[2-7]. 早期的SAR图像主要采用多视处理来抑制斑点,但这是以图像空间分辨率的损失为代价的,往往会对图像的边缘结构信息造成严重的模糊. 后来,人们又使用光学图像处理中的均值滤波和中值滤波来对SAR图像降斑. 均值滤波可以有效地平滑斑点,但它没有考虑到边缘结构信息的保留. 中值滤波对边缘结构的保留强于均值滤波,但它又不能有效地抑制斑点. 均值滤波和中值滤波均没有考虑SAR图像的统计特性,也没有兼顾斑点的抑制与边缘结构信息的保留,因此它们不是SAR图像降斑的有效方法. 常用于SAR图像降斑的是基于图像局部

统计特性的自适应算法,包括以Lee滤波为代表的基于最小均方误差(MMSE)准则的线性降斑方法^[8,9],和以Gamma MAP滤波为代表的基于最大后验概率(MAP)准则的降斑方法^[10,11]. 基于图像局部统计特性的降斑算法建立在斑点的乘性模型的基础之上,它们根据当前区域的统计特性自适应的决定滤波输出,并尽量保持斑点抑制和边缘结构保留的平衡.

传统的基于SAR图像局部统计特性的降斑算法没有考虑当前区域的均匀程度,直接使用固定滑动窗内的所有像元计算统计特性,这样实现起来固然简单,但是还不能取得较为理想的降斑效果,即它们还不能较为彻底地平滑均匀区域的斑点,不能有效抑制边缘区域的斑点,也不能更好的保留较强的边缘结构信息和点目标^[12,13]. 要克服这些缺点,就要涉及到区域分类、自适应滑动窗技术以及结构检测,而这三种方法的实现,都直接依赖于区域均匀程度的描述. 本文首先简要回顾了传统的基于SAR图像局部统计特性的降斑算法,其次给出了描述区域均匀程度的统计量——变异系数,接着分别

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2007CB311006),国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号:2006AA01Z126),国家自然科学基金(批准号:60602026)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20070698002)资助的课题.

† E-mail: duffer2000@163.com

介绍了区域分类、自适应滑动窗技术以及结构检测,包括它们的基本思想和实现方法.最后,针对这三种方法本身的不足,为了获得较为理想的降斑结果,本文提出了同时使用区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法,着重说明联合降斑的必要性和实现步骤,并通过不同类型 SAR 图像的降斑实验验证了联合降斑算法的有效性.

2. 基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法

如果 SAR 图像的分辨单元内存在大量散射体,所有的散射体独立同分布,并且没有占主导地位的散射体,则此时可以认为斑点充分发育^[1,2].一般认为,充分发育的斑点服从如下的乘性模型^[13,14]:

$$Y = FX, \quad (1)$$

其中, Y 为观察图像, X 为真实图像, F 为斑点,假定它和 X 相独立.对于强度图像, F 服从单位均值的 Gamma 分布.由此,真实图像和观察图像的统计特性存在如下关系^[12,14]:

$$\mu_X = \mu_Y, \quad C_X^2 = \frac{C_Y^2 - C_F^2}{1 + C_F^2}, \quad (2)$$

其中, μ_X 和 μ_Y 分别是真实图像和观察图像的均值, C_X , C_Y 和 C_F 分别是真实图像、观察图像和斑点的变异系数,它们分别定义为相应标准差与其均值的比值,即 $C_X = \frac{\sigma_X}{\mu_X}$, $C_Y = \frac{\sigma_Y}{\mu_Y}$, $C_F = \frac{\sigma_F}{\mu_F}$, σ_X , σ_Y 和 σ_F 分别是真实图像、观察图像和斑点的标准差, μ_F 是斑点的均值.对于强度图像, $C_F = \frac{1}{L}$, L 是图像的视数^[13].

传统的基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法就建立在斑点的乘性模型的基础之上,其中,基于 MMSE 的线性降斑方法总是把当前区域的局部均值和中心像元灰度值的线性加权作为滤波输出,加权因子由区域的统计特性决定;基于 MAP 的降斑方法则往往对应一个非线性方程,方程的系数由区域的统计特性决定,并在一定条件下把该方程的解作为滤波输出.在基于 MMSE 的线性降斑方法中,最具代表性的是 Lee 滤波,其滤波公式如下^[1,9]:

$$\hat{X} = (1 - K)\mu_Y + KY, \quad (3)$$

$$K = 1 - \frac{C_F^2}{C_Y^2}, \quad (4)$$

其中, \hat{X} 是真实图像的估计,即降斑后的图像, K 是滤波加权因子,它由观察图像的变异系数 C_Y 决定.对于当前区域,计算其变异系数,形成滤波加权因子,并把局部均值和中心像元灰度值的线性加权作为滤波输出,这就是 Lee 滤波的实现步骤.

在基于 MAP 的降斑算法中,最具代表性的是 Gamma MAP 滤波,它假定真实图像和斑点同时服从 Gamma 分布,从而符合观察图像的统计分布. Gamma MAP 滤波公式如下^[11]:

$$\hat{X} = \frac{(\alpha - L - 1)\mu_Y + \sqrt{\mu_Y^2(\alpha - L - 1)^2 + 4\alpha LY\mu_Y}}{2\alpha}, \quad (5)$$

其中, α ($\alpha = \frac{1}{C_X^2}$) 是异质参数,它描述真实图像的不均匀程度.对于当前区域,计算真实图像的异质参数,并把局部均值和中心像元灰度值的非线性组合作为滤波输出,这就是 Gamma MAP 滤波的实现步骤.

传统的基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法,包括以 Lee 滤波为代表的基于 MMSE 的线性降斑,以及以 Gamma MAP 滤波为代表的 MAP 降斑,都力求达到斑点抑制和边缘结构保留的平衡.但是,它们均没有区分当前区域的不同种类,既不能较为彻底地平滑均匀区域的斑点,也不能有效保留强边缘结构和点目标;它们均使用固定的滑动窗,既不能有效滤除均匀区域的斑点,又不能减轻对边缘结构信息的模糊;它们均使用整个滑动窗作为滤波区域,而没有考虑滑动窗的内部结构,因此不能有效平滑边缘区域的斑点.要解决上述三个问题,就要分别使用区域分类、自适应滑动窗以及结构检测,而这三种方法的实现,都直接依赖于区域均匀程度的描述.

3. 区域均匀程度的描述

对于当前区域,选择合适的统计量来描述区域的均匀程度,并根据该统计量的大小,或者决定当前区域属于何种类型,或者决定当前滑动窗的增减,或者决定滑动窗内的均匀子区域.可见,描述区域均匀程度的统计量的选择,是实现区域分类、滑动窗自适应增长以及结构检测的先决条件. Li 使用真实图像和观察图像的区域方差的比值来描述区域的均匀程度^[14], Wu 等人直接使用区域方差来描

述区域的均匀程度^[15]. 但是,这两种方法均没有理论上的阈值,这就给区域均匀程度的判别带来很大的随意性. 我们使用区域的变异系数 C_Y 来描述区域的均匀程度^[9],基于斑点的乘性模型,对于 SAR 图像的均匀区域,可以证明^[16]

$$C_Y = C_F, \quad (6)$$

可见,斑点的变异系数 C_F 可以作为观察图像变异系数 C_Y 的阈值. 对于 SAR 图像的某一区域,计算该区域的变异系数 C_Y , 如果 $C_Y > C_F$, 就说明该区域出现边缘结构信息,并且 C_Y 越大,出现的边缘结构就越强烈,甚至有可能出现点目标;如果 $C_Y \leq C_F$, 说明该区域均匀一致,不包含任何边缘结构信息. 可见,当前区域的变异系数 C_Y 可以较为方便和精确的描述区域的均匀程度.

4. 区域分类、自适应滑动窗和结构检测简介

使用变异系数描述区域的均匀程度,我们就可以判断当前区域的类别,决定当前滑动窗的增大或减小,选择滑动窗内的均匀子区域. 本节分别对区域分类、自适应滑动窗技术以及结构检测作简要介绍,侧重它们的基本思想和实现方法,并且使用 SAR 图像的降斑实验来验证它们的有效性.

4.1. 区域分类

传统的基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法力求做到斑点抑制和边缘结构保留的平衡,但是,它们不能较为彻底的滤除均匀区域的斑点,也不能有效保留较强的边缘结构信息和点目标. 比如,基于 MMSE 的线性降斑算法总是以当前滑动窗的像元灰度均值和中心像元灰度值的线性加权作为滤波输出,加权因子由滑动窗的局部统计特性决

定. 对于均匀区域,虽然会给局部均值以较大加权,但是仍有可能给中心像元灰度值以一定加权,这样就不能较为彻底的平滑均匀区域的斑点;对于边缘结构区域和点目标,虽然会给中心像元灰度值以较大加权,但是仍然会给局部均值以一定加权,这样就会对边缘结构信息和点目标造成一定的模糊. 我们希望,在均匀区域,直接使用局部均值作为滤波输出,从而彻底的抑制斑点;在较强的边缘结构区域和点目标区,直接使用中心像元灰度值作为滤波输出,从而完全保留边缘结构信息和点目标. 要实现这一目的,就要使用区域分类的思想.

计算当前区域的变异系数 C_Y , 并和斑点的变异系数 C_F 比较,如果 $C_Y \leq C_F$, 说明当前区域为均匀区域,此时直接使用区域均值作为滤波输出;如果 $C_Y \geq C_{\max}$, 说明当前区域出现较强的边缘结构信息或点目标,此时直接把中心像元灰度值作为滤波输出;如果 $C_F < C_Y < C_{\max}$, 说明当前区域出现较弱的边缘结构信息,此时使用基于图像局部统计特性的降斑算法(如基于 MMSE 的线性降斑算法或基于 MAP 的降斑算法)对图像滤波,这就是区域分类的实现步骤. 需要注意的是, C_{\max} 的取值和真实图像的性质、图像视数以及空间分辨率等多种因素有关^[9]. 针对强度图像, Touzi 等使用似然比对 SAR 图像进行边缘检测时,提出 $C_{\max} = \sqrt{1 + 2/L}$ ^[17]. 我们当然也可以使用滑动窗在图像均匀区域的局部变异系数的最大值作为 C_{\max} , 此时,边缘结构信息以及点目标会得到更好的保留^[9]. 图 1 给出了 SAR 图像区域分类的流程图,可见,区域分类的实质就是根据变异系数的大小,判断当前区域的种类,并且选择相应的滤波处理.

为了验证区域分类的有效性,图 2 给出了基于区域分类的 Lee 滤波的降斑结果. 可见,和传统的

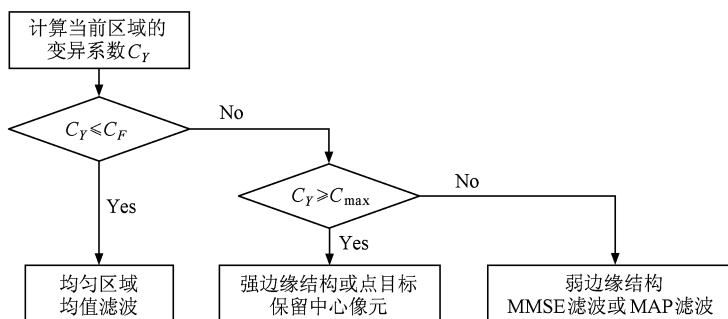


图 1 区域分类的流程图

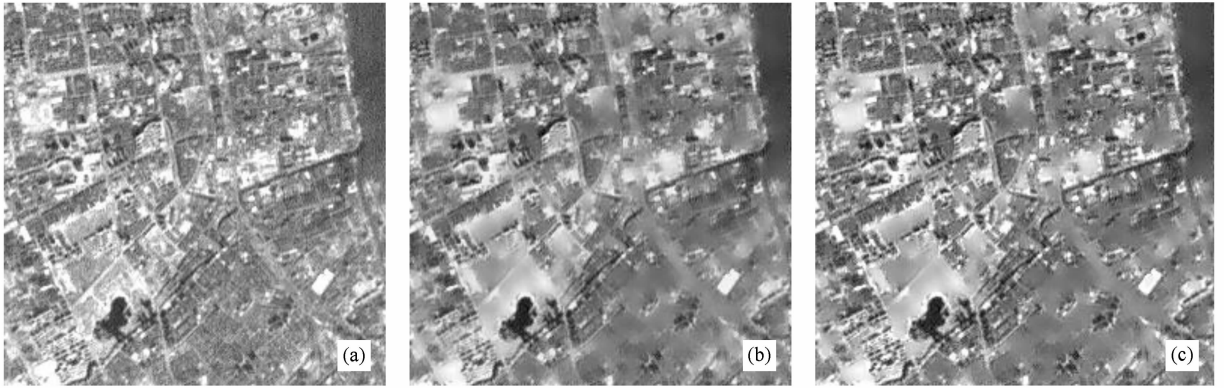


图2 区域分类的降斑结果(滑动窗大小为9) (a) SAR 图像;(b) 传统的 Lee 滤波;(c) 基于区域分类的 Lee 滤波

Lee 滤波相比,基于区域分类的 Lee 滤波可以有效滤除均匀区域的斑点,并且能够更好的保留图像的边缘结构信息和点目标,而传统的 Lee 滤波则会严重模糊图像的边缘结构信息. 总之,使用区域分类,就可以解决传统的基于图像局部统计特性的降斑算法不能有效滤除均匀区域的斑点以及不能有效保留强边缘结构信息和点目标这两个问题.

4.2. 自适应滑动窗

传统的基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法不能解决滑动窗的选择问题,如果滑动窗过大,虽然对斑点有较强的抑制作用,但会严重模糊图像的边缘结构信息;如果滑动窗过小,虽然可以较好的保留边缘结构,但却不能有效的滤除斑点. 我们希望,滑动窗可以自适应的改变,在均匀区域,使用较大的滑动窗,从而较为彻底的平滑斑点;在边缘结构区域,使用较小的滑动窗,从而尽量减少对边缘结构信息的模糊. 要实现这一目的,就要使用自适应滑动窗技术^[12,13,18].

计算当前区域的变异系数 C_Y , 如果 C_Y 小于某一阈值,说明当前区域比较均匀,则增大滑动窗;如果 C_Y 大于某一阈值,说明当前区域包含边缘结构信息,则减小滑动窗,这就是自适应滑动窗技术的基本思想. 为了减少计算量,我们可以仅使用当前滑动窗的边界像元计算变异系数. 为了体现阈值随滑动窗大小的变化,我们使用如下的自适应阈值公式^[18]:

$$T = \eta \left(1 + \sqrt{\frac{1 + 2\sigma_F^2}{8(w-1)}} \right) \sigma_F, \quad (7)$$

其中, T 是阈值,通过它和变异系数 C_Y 的比较,决定当前滑动窗的增大或减小; η 是平滑因子,它决定对

斑点的平滑程度,其值越大,对斑点的平滑能力越强, Park 等人推荐 η 在 1 附近取值^[18]; σ_F^2 和 w 分别是斑点的方差和当前滑动窗的大小. 可见,当滑动窗较小时,阈值 T 较大,即有利于滑动窗的增大,从而可以较为彻底的平滑斑点;当滑动窗较大时,阈值 T 较小,即不利于滑动窗的增大,从而尽量降低对边缘结构信息的模糊. 在实际应用中,滑动窗可以从最小值开始变动(比如滑动窗的最小值取为 3),图 3 给出了滑动窗自适应改变的流程图, w_{\max} 是滑动窗的最大值. 可见,自适应滑动窗技术的实质就是根据变异系数和阈值的比较,自适应的调整滑动窗的大小,从而在均匀区域获得较大的滑动窗,而在边缘结构区域获得较小的滑动窗.

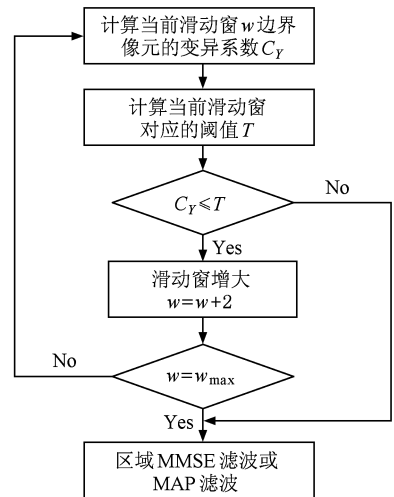


图3 自适应滑动窗技术的流程图

为了验证自适应滑动窗的有效性,图 4 给出了基于自适应滑动窗技术的 Lee 滤波的降斑结果,其中的 SAR 图像由加拿大航天局(Canadian Space

Agency) 获得. 可见, 固定滑动窗的 Lee 滤波不能有效滤除均匀区域的斑点, 并且当滑动窗较大时会严重模糊图像的边缘结构信息. 基于自适应滑动窗的 Lee 滤波在均匀区域使用较大的滑动窗, 因此可以

较为彻底的平滑均匀区域的斑点; 同时, 在边缘结构区域使用较小的滑动窗, 因此明显减轻了对边缘结构信息的模糊. 总之, 使用自适应滑动窗技术, 可以有效解决滑动窗的选择这一问题.



图4 自适应滑动窗的降斑结果 (a) SAR 图像; (b) 固定滑动窗的 Lee 滤波(滑动窗大小为 5); (c) 基于自适应滑动窗的 Lee 滤波(滑动窗最小为 3, 最大为 13, 平滑因子为 1)

4.3. 结构检测

传统的基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法不能有效滤除边缘结构区域的斑点. 比如, 基于 MMSE 的线性降斑算法总是以当前滑动窗的局部均值和中心像素灰度值的线性加权作为滤波输出, 当前区域越均匀, 给局部均值的加权就越大, 即对斑点的抑制能力就越强. 如果滑动窗内出现边缘结构信息, 就会给局部均值以较小的加权, 这样虽然可以减轻对边缘结构的模糊, 但却不能有效滤除边缘结构区域的斑点. 滑动窗内的边缘结构信息越明显, 给局部均值的加权就越小, 即对边缘结构区域的斑点的滤除就越弱. 我们希望, 找到滑动窗内中心像素所在的某个均匀子窗口, 代替整个滑动窗作

为最终的滤波区域. 由于子窗口内的区域比较均匀, 因此会给局部均值以较大的加权, 从而有效滤除边缘结构区域的斑点. 要实现这一目的, 就要使用结构检测的思想^[12,13,19,20].

Lee 使用梯度模板检测滑动窗内的均匀子区域, 但梯度计算对乘性的斑点过于敏感^[21]. Wu 等人使用局部标准差及其增量检测滑动窗内的均匀子区域, 但却没有理论上的阈值, 这使得子区域的确定带有较大的随意性^[15]. Lopes 等人使用两条带比值模板和三条带比值模板检测边缘特征和线状特征, 并且存在理论上的阈值公式. 但此阈值公式是在图像的 Gamma 分布假定下, 针对特定形状的结构特征而推导得出的, 不便于任意形状均匀子区域的判定^[11]. 我们直接使用不同方向的子窗口来选择均

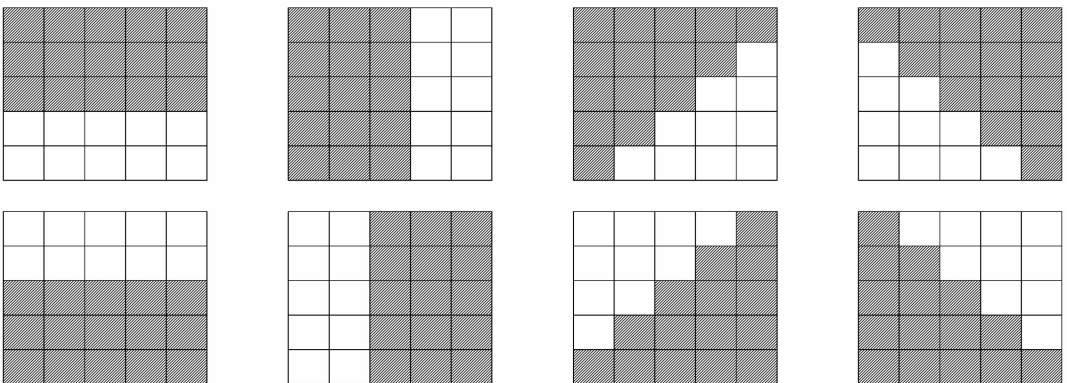


图5 不同方向的子窗口(阴影部分)

匀的滤波区域,以大小为 5 的滑动窗为例,不同方向的子窗口如图 5 所示. 对于当前滑动窗,分别计算不同方向子窗口的变异系数,选择变异系数最小的子窗口作为最终的滤波区域,这就是结构检测的实现步骤. 可见,结构检测的实质就是通过不同方向子窗口的变异系数的比较,选择最为均匀的子窗口作为滤波区域.

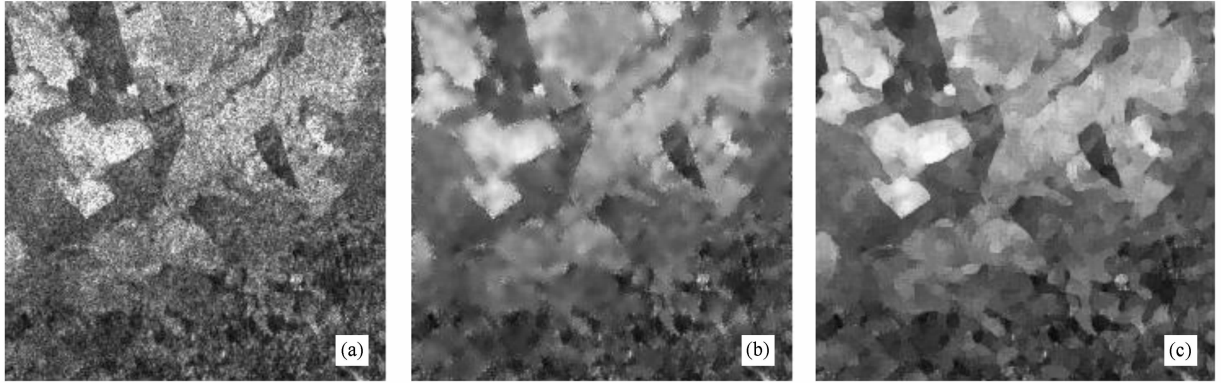


图6 结构检测的降斑结果(滑动窗大小为7) (a) SAR 图像;(b) 传统的 Lee 滤波;(c) 基于结构检测的 Lee 滤波

5. 基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法

区域分类区分当前区域的不同种类,对于均匀区域,直接使用均值滤波;对于强边缘结构和点目标,直接保留中心像元灰度值. 自适应滑动窗技术通过滑动窗的自适应改变,在均匀区域使用较大的滑动窗,而在边缘结构区域使用较小的滑动窗;结构检测考虑滑动窗的内部结构,选取最为均匀的子窗口作为滤波区域. 但是,区域分类还是没有解决滑动窗的选择问题,自适应滑动窗技术还是不能有效滤除边缘区域的斑点,而结构检测同样没有解决滑动窗的选择问题. 可见,为了获得较为理想的降斑结果,就应该同时考虑区域分类、自适应滑动窗和结构检测. 本节详细介绍了基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法,包括联合降斑的必要性和实现步骤,最后通过 SAR 图像的降斑实验验证了联合降斑算法的有效性.

5.1. 联合降斑的必要性

理想的降斑算法,应该能够彻底的滤除均匀区域的斑点,有效抑制边缘结构区域的斑点,并且对较强的边缘结构信息和点目标进行有效的保

为了验证结构检测的有效性,图 6 给出了基于结构检测的 Lee 滤波的降斑结果. 可见,和传统的 Lee 滤波相比,基于结构检测的 Lee 滤波使用滑动窗内的均匀子窗口作为滤波区域,因此能够有效的平滑边缘区域的斑点. 总之,使用结构检测,就可以解决传统的基于图像局部统计特性的降斑方法不能有效抑制边缘区域的斑点这一问题.

留^[12,13]. 对当前滑动窗使用区域分类,如果出现较强的边缘结构特别是点目标,则直接输出中心像元的灰度值,从而有效保留边缘结构信息和点目标;如果出现均匀区域,则继续使用自适应滑动窗技术获得较大的均匀区域,并且使用区域均值作为中心像元的滤波输出,从而较为彻底的平滑均匀区域的斑点. 自适应滑动窗技术根据边界像元的变异系数决定滑动窗的改变,因此,在滑动窗增大之前,应该首先进行区域分类,对出现的强边缘结构和点目标进行有效的保留. 由(7)式可知,自适应滑动窗技术倾向于获得较大的滑动窗^[18],边缘结构信息出现的可能性随之增大,因此,应该对获得的滑动窗继续进行结构检测,选择最为均匀的子窗口作为最终的滤波区域,从而有效抑制边缘结构区域的斑点. 总之,基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑,可以尽量满足理想降斑算法的要求,从而获得满意的滤波结果.

传统的基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法,都建立在斑点的乘性模型的基础之上^[9-11]. 如果当前滑动窗出现变化剧烈的边缘结构或者点目标,此时分辨单元内出现占主导地位的散射体,因此,斑点发育不充分,斑点的乘性模型不再成立,传统的基于局部统计特性的降斑算法也就失效^[1,9]. 此时,我们可以直接把中心像元的灰度值作为滤波

输出,从而有效保留边缘结构信息和点目标,这就涉及到区域分类;我们也可以自适应的改变滑动窗的大小,在边缘结构区域使用较小的滑动窗,并且尽量保证滑动窗内的区域均匀一致,这就涉及到自适应滑动窗技术;我们还可以对当前滑动窗进行适当的划分,选择不包含边缘结构的子区域作为滤波区域,这就涉及到结构检测. 总之,基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑,可以保证在滤波区域上斑点乘性模型的成立,从而能够使用基于局部统计特性的降斑算法对图像滤波,同时也能有效处理剧烈变化的边缘结构以及点目标这类特殊情况.

在斑点乘性模型成立的条件下,真实图像的统计特性可以由观察图像获得,因此,基于局部统计特性的降斑算法的实现,总要归结到观察图像统计特性的计算上,这就必然涉及到观察图像滤波区域的选择. 如果要使统计量的计算具有足够高的精度,就要保证滤波区域的均匀一致,并且滤波区域包含足够多的像元^[15]. 由于剧烈变化的边缘结构特别是点目标会严重破坏滤波区域的均匀性,此时,我们可以直接把滑动窗的中心像元作为滤波输出,而不再计算区域的统计特性,这就涉及到区域分类;为了使滤波区域具有较多的像元,我们希望滑动窗能够自适应的改变,这就涉及到自适应滑动窗技术;为了保证滤波区域的均匀性,我们可以使用滑动窗内的均匀子区域作为滤波区域,这就涉及到结构检测. 总之,基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑,可以获得均匀一致并且较大的滤波区域,从而保证观察图像统计量的计算精度.

5.2. 联合降斑的实现步骤

图 7 给出了基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑的结构框图. 对于当前滑动窗(滑动窗一般从最小值开始),首先进行区域分类,如果出现强边缘结构或点目标,则直接输出中心像元的灰度值,从而有效保留强边缘结构信息和点目标;如果出现均匀区域或弱边缘结构区域,则使用自适应滑动窗技术,从而获得较大的滤波窗口. 对于新的滤波窗口再次使用区域分类,如果滤波窗口属于均匀区域,则直接把区域均值作为滤波输出,从而较为彻底的平滑均匀区域的斑点;如果滤波窗口属于边缘结构区域,则接着使用结构检测,并把滤波窗口内的均匀子区域作为最终的滤波区域,从

而有效抑制边缘区域的斑点,这就是联合降斑的一般步骤. 可见,联合降斑的目的,就是要尽量保证斑点乘性模型的成立,尽量获得均匀并且较大的滤波区域,最终获得较为理想的滤波效果.

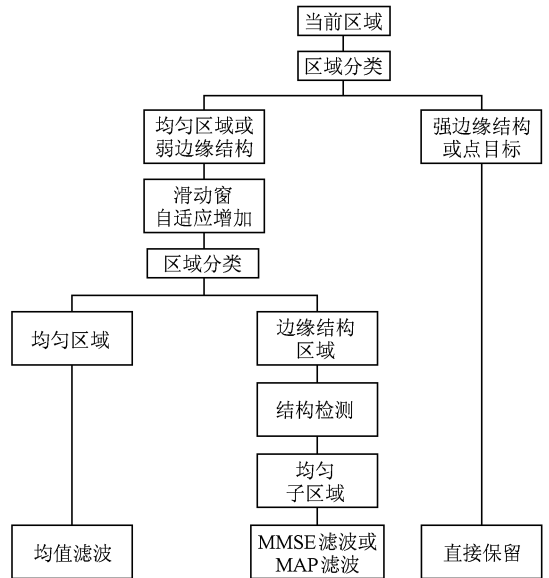


图 7 联合降斑的结构框图

5.3. 联合降斑的实验结果

图 8 给出了联合降斑的实验结果,其中的 SAR 图像由加拿大航天局获得,并且在滤波区域上使用 Lee 滤波,它是基于 MMSE 的线性降斑算法的典型代表. 为了便于比较,同时给出了传统的 Lee 滤波、仅使用区域分类的 Lee 滤波、仅使用自适应滑动窗的 Lee 滤波以及仅使用结构检测的 Lee 滤波的降斑结果. 可见,传统的 Lee 滤波既不能较为彻底的平滑均匀区域的斑点,又不能有效抑制边缘区域的斑点,同时还会对边缘结构信息和点目标造成严重的模糊. 仅使用区域分类的 Lee 滤波可以有效保留较强的边缘结构和点目标,但仍然不能有效滤除均匀区域和边缘区域的斑点. 仅使用自适应滑动窗技术的 Lee 滤波在均匀区域选择较大的滑动窗,在边缘结构区域选择较小的滑动窗,因此它既可以较为彻底的抑制均匀区域的斑点,又在很大程度上减轻了对边缘结构信息的模糊,但是它仍然不能有效滤除边缘区域的斑点. 仅使用结构检测的 Lee 滤波选择滑动窗内的均匀子区域作为滤波区域,因此它能够有效抑制边缘结构区域的斑点,但是,由于它使用固定滑动窗,因此仍然不能较为彻底的平滑均匀区

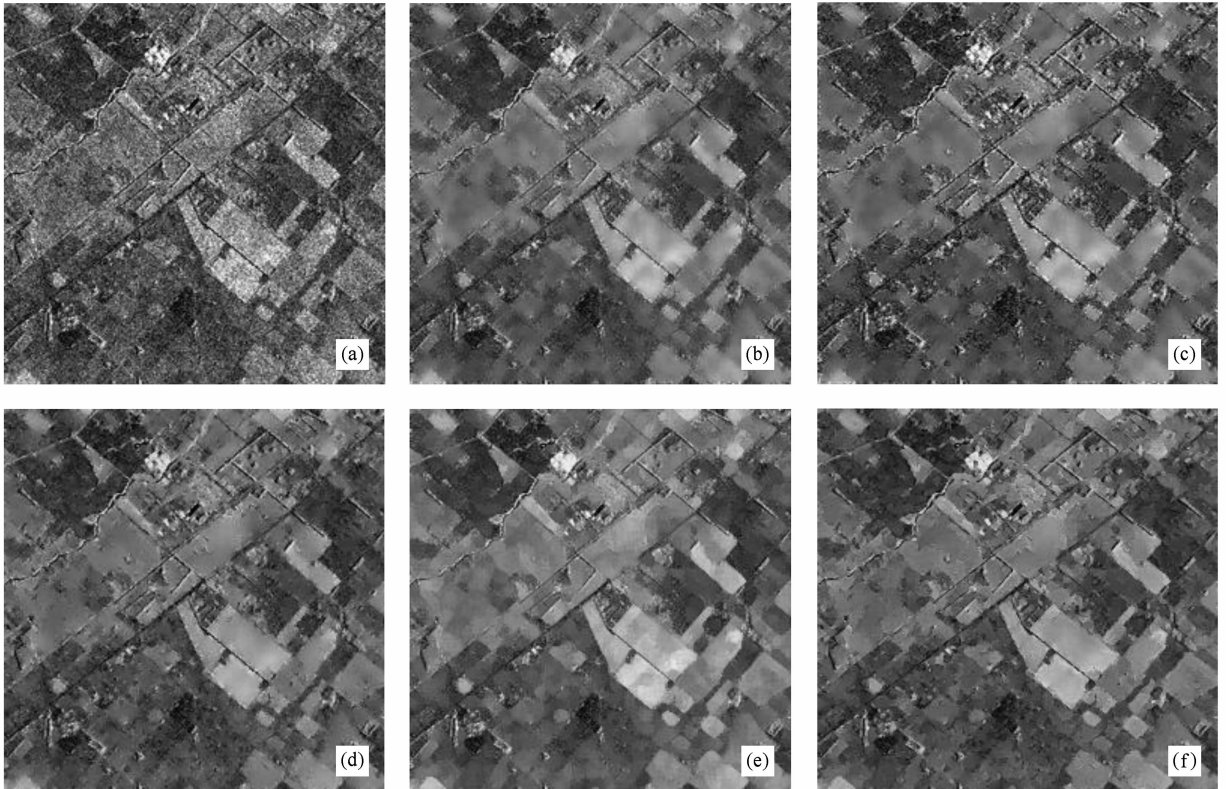


图8 联合降斑结果(在滤波区域上使用 Lee 滤波) (a) SAR 图像(乡村);(b) 传统的 Lee 滤波(滑动窗大小为 7);(c) 仅使用区域分类的 Lee 滤波(滑动窗大小为 7);(d) 仅使用自适应滑动窗技术的 Lee 滤波(滑动窗最小为 3,最大为 13,平滑因子为 1);(e) 仅使用结构检测的 Lee 滤波(滑动窗大小为 7);(f) 基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑(滑动窗最小为 3,最大为 13,平滑因子为 1)

域的斑点. 联合降斑算法同时考虑区域分类、自适应滑动窗和结构检测,因此它既能较为彻底的滤除均匀区域的斑点,又能有效抑制边缘区域的斑点,同时还对边缘结构信息和点目标有较强的保留作用.

为了进一步说明联合降斑算法的滤波性能,特别是它对边缘结构信息的保留和对边缘区域斑点的抑制,图 9 给出了图 8 中使用传统的 Lee 滤波和联合降斑算法所产生的斑点图,它定义为观察图像与降斑后图像的比值^[2,12]. 理想的降斑算法,应该完全滤除斑点,包括均匀区域的斑点和边缘结构区域的斑点,并且能没有任何损失的保留所有的边缘结构信息,因此,理想降斑算法所产生的斑点图,应该不含任何边缘结构信息,而仅仅包含图像的斑点. 实际的降斑算法总要或多或少的模糊图像的边缘结构,因此对应的斑点图上总要或多或少的出现一些边缘结构信息. 但是,斑点图上出现的边缘结构信息越少,则说明该降斑算法对边缘结构的保留作用就越强. 在图 9 中,和传统的 Lee 滤波相比,联合

降斑算法所产生的斑点图中的边缘结构信息明显减少,并且传统 Lee 滤波斑点图中边缘区域的空白也明显的被颗粒状的斑点所替代,这说明联合降斑确实可以有效保留图像的边缘结构信息,同时能够有效抑制边缘结构区域的斑点. 总之,基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法可以取得较为理想的降斑结果.

为了说明联合降斑算法的一般性,图 10 给出了城市 SAR 图像的联合降斑结果,并且在滤波区域上使用 Gamma MAP 滤波,它是基于 MAP 的降斑算法的典型代表. 可见,和传统的 Gamma MAP 滤波相比,基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑既能较为彻底的滤除均匀区域的斑点,又能有效抑制边缘区域的斑点,同时对图像的边缘结构信息有明显的保留. 总之,不论是乡村图像还是城市图像,也不论在滤波区域上使用 Lee 滤波还是 Gamma MAP 滤波,基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法都可以取得较为理想的降斑效果.

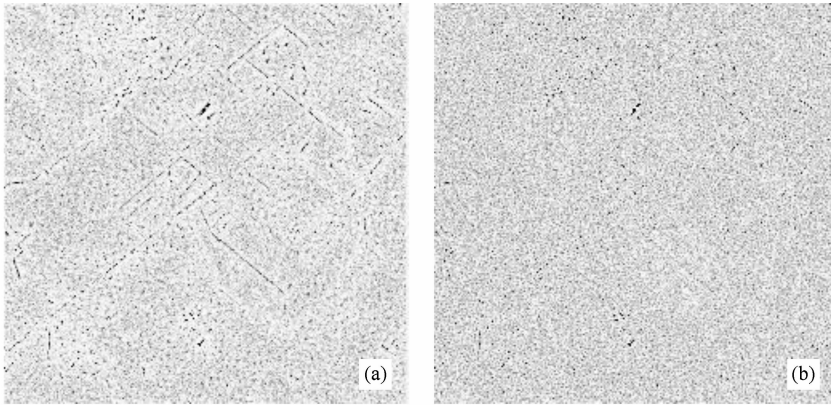


图9 斑点图 (a) 传统的 Lee 滤波;(b) 基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑 (在滤波区域上使用 Lee 滤波)

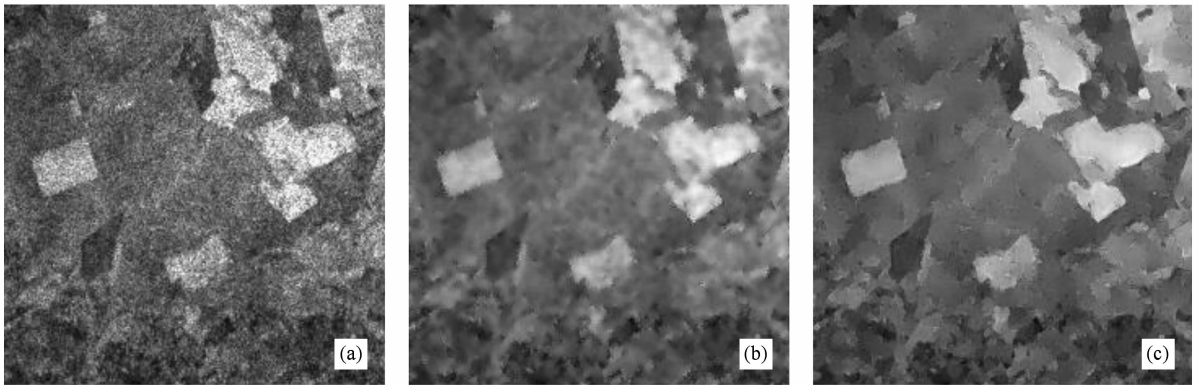


图10 联合降斑结果(在滤波区域上使用 Gamma MAP 滤波) (a) SAR 图像(巴西 Bebedouro 城);(b) 传统的 Gamma MAP 滤波(滑动窗大小为 5);(c) 基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑(滑动窗最小为 3,最大为 11,平滑因子为 1)

使用联合降斑算法,首先要根据当前区域的变异系数确定区域类型,其次要通过变异系数与自适应阈值的比较,确定合适的滑动窗,最后还要选择变异系数最小的滤波子区域,因此,有必要进一步讨论联合降斑算法的复杂度.表 1 给出了图 8 中传统的 Lee 滤波和联合降斑 Lee 滤波的运行时间,以及图 10 中传统的 Gamma MAP 滤波和联合降斑 Gamma MAP 滤波的运行时间,这些数据由 Intel1.86 GHz 的 CPU 和 256 MB 内存的个人电脑,在 Windows XP 的操作系统和 Matlab 6.5 的软件环境下获得.可见,由于联合降斑算法同时考虑区域分类、自适应滑动窗和结构检测,因此不论在滤波区域上使用 Lee 滤波还是 Gamma MAP 滤波,联合降斑算法的运行时间都要比传统算法长得多.在实际应用中,如果对执行速度没有特别的要求,就可以使用联合降斑算法,从而获得较为理想的滤波结果.

表 1 不同降斑算法的运行时间

降斑算法	传统 Lee 滤波	联合降斑 Lee 滤波	传统 Gamma MAP 滤波	联合降斑 Gamma MAP 滤波
运行时间/s	0.7970	47.8440	0.6880	38.5780

6. 结 论

传统的基于 SAR 图像局部统计特性的降斑算法不能较为彻底的滤除均匀区域的斑点,不能有效抑制边缘结构区域的斑点,同时也不能有效保留强边缘结构信息和点目标.为了克服上述缺点,进而获得较为理想的降斑效果,本文提出了基于区域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法.联合降斑算法首先对当前区域进行区域分类,并直接保留强边缘结构信息和点目标.接着,联合降斑算法对均匀区域和弱边缘结构区域进行滑动窗的自适应增长,从而获得合适的滤波窗口.对新的滤波

窗口再次使用区域分类,如果滤波窗口属于均匀区域,则直接使用均值滤波,从而较为彻底的平滑均匀区域的斑点;如果滤波窗口属于边缘结构区域,则进一步使用结构检测,并且选择窗口内的均匀子区域作为最终的滤波区域,从而有效滤除边缘结构区域的斑点.为了验证联合降斑算法的一般性和有效性,我们对不同类型的 SAR 图像(乡村和城市)进行降斑实验,并在滤波区域上使用不同的降斑方法(Lee 滤波和 Gamma MAP 滤波).结果表明,基于区

域分类、自适应滑动窗和结构检测的联合降斑算法既能较为彻底的滤除均匀区域的斑点,又能有效抑制边缘区域的斑点,同时还对强边缘结构信息和点目标有较好的保留作用,因而可以获得较为理想的滤波效果.

本文进行降斑实验的部分 SAR 图像由加拿大航天局(Canadian Space Agency)获得,在此对加拿大航天局表示衷心的感谢.

-
- [1] Guo H D 2000 *Theory and Application of Radar Earth Observation* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [郭华东 2000 雷达对地观测理论与应用(北京:科学出版社)]
- [2] Oliver C, Quegan S 1998 *Understanding Synthetic Aperture Radar Images* (Boston: Artech House)
- [3] Hou W, Lian Y, Feng G L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 589 (in Chinese) [侯威、廉毅、封国林 2007 物理学报 **56** 589]
- [4] Zhong C X, Yang T G 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6157 (in Chinese) [仲崇霞、杨廷高 2007 物理学报 **56** 6157]
- [5] Wu Y G, Tao M D 2006 *Chin. Phys.* **15** 1137
- [6] Xie Z H, Xu L P, Ni G R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6683 (in Chinese) [谢振华、许录平、倪广仁 2008 物理学报 **57** 6683]
- [7] Teng S Y, Cheng C F, Liu M, Gui W L, Xu Z Z 2005 *Chin. Phys.* **14** 1990
- [8] Lee J S 1980 *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.* **2** 165
- [9] Lopes A, Touzi R, Nezry E 1990 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **28** 992
- [10] Kuan D T, Sawchuk A A, Strand T C, Chavel P 1987 *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing* **35** 373
- [11] Lopes A, Nezry E, Touzi R, Laur H 1993 *Int. J. Remote Sens.* **14** 1735
- [12] Touzi R 2002 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **40** 2392
- [13] Hervet E, Fjortoft R, Marthon P, Lopes A 1998 *SPIE Conference on SAR Image Analysis, Modeling and Techniques III* (Barcelona, Spain: SPIE) p43
- [14] Li C 1988 *Int. J. Remote Sens.* **9** 641
- [15] Wu Y, Maitre H 1992 *Opt. Eng.* **31** 1785
- [16] Lee J S 1986 *Opt. Eng.* **25** 636
- [17] Touzi R, Lopes A, Bousquet P 1988 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **26** 764
- [18] Park J M, Song W J, Pearlman W A 1999 *IEE Proc. -Vis. Image Signal Process* **146** 191
- [19] Bovik A C 1988 *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing* **36** 1618
- [20] Baraldi A, Parmiggiani F 1995 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **33** 1245
- [21] Lee J S 1981 *Comput. Graph. Image Process.* **15** 380

Combined despeckling algorithm of synthetic aperture radar images based on region classification, adaptive windowing and structure detection *

Sun Zeng-Guo^{1)2)†} Han Chong-Zhao¹⁾

1) (*School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

2) (*State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 19 July 2009; revised manuscript received 23 August 2009)

Abstract

In order to overcome the shortcomings of the conventional local statistical speckle filters for synthetic aperture radar (SAR) images, a combined despeckling algorithm is proposed based on region classification, adaptive windowing, and structure detection. Firstly, the combined despeckling algorithm classifies the local region and directly preserves the strong edges and structures as well as the point targets. Then, the homogeneous region and the weak edge and structure region grow adaptively to obtain appropriate filtering windows. Lastly, the new filtering windows are classified. For the homogeneous region, the averaged filter is directly used. For the edge and structure region, the structure information is detected and the homogeneous sub-window is selected as the final filtering region. Despeckling experiments demonstrate that, the combined despeckling algorithm effectively suppresses the speckles in homogeneous region and edge region, and well preserves the strong edge and structure information as well as the point targets.

Keywords: region classification, adaptive windowing, structure detection, combined despeckling algorithm

PACC: 4230V, 4240F

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB311006), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA01Z126), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60602026) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20070698002).

† E-mail: duffer2000@163.com