

多极化 SAR 图像的降斑研究

胡艳芬, 王宝发

(北京航空航天大学电子工程系 205 教研室, 北京 100083)

摘 要: 对于多极化 SAR 图像, 可以利用其同极化和交叉极化图像的相关性来进行降斑处理. 本文对常用的几种基于多极化 SAR 图像的降斑方法进行了分析, 重点研究了最优加权法 (the optimal weighting algorithm), 在其基础上改进提出了分块加权法, 取得了明显的降斑效果, 并较大地减少了运算量. 最后利用实测的 SAR 数据进行了验证.

关键词: 多极化 SAR 图像; 图像降斑; 最优加权法; 分块加权法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 02-0207-04

Speckle Reduction in Multipolarization SAR Imagery

HU Yan-fen, WANG Bao-fa

(Group 205, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The availability of fully polarimetric SAR data makes it possible to utilize the co-polarized and cross-polarized images for speckle reduction. In this paper, many of the despeckling processing methods is introduced in detail. The part weighting algorithm is proposed. With minimum resolution broadening and coupling between polarimetric and frequency channels, a series of experimental results about image speckle reduction demonstrate the effectiveness and less computational load.

Key words: multipolarization SAR imagery; speckle reduction; the optimal weighting algorithm; the part weighting algorithm

1 概述

当 SAR 发射的相干电磁波照射目标时, SAR 图像上会产生相干斑噪声, 引起图像质量的恶化, 使得 SAR 图像的自动解译和自动分类工作产生困难. 在早期的 SAR 成像处理中, 采用多视处理以减少斑点噪声, 即: 在方位向或距离向上将 SAR 系统带分割成 N 个部分, 并将这 N 个部分作为独立图像分别合成, 利用这 N 个部分的非相干性, 将 N 个图像叠加取平均值, 使得图像的斑点噪声降低了 N 倍, 但图像的分辨率也相应地降低了 N 倍, 损失了图像中大量的纹理和边缘信息, 使图像模糊.

对于多极化 SAR 数据, 由于各种极化组合图像间的相关性, 可用极化信息来取得降斑的效果. 多极化 SAR 数据是由雷达发射和接收的水平极化和垂直极化的四种组合 (HH, HV, VH, VV) 组成. 在理想情况下, 这四种极化所成的图像上的斑点是非相关的, 进行简单的平均就能使斑点噪声减少一半. 但实际情况是, 由于天线的互易性, 两种交叉极化 HV 和 VH 所成的图像是相同的, 而两种同极化 HH 和 VV 所成的图像是相关的, 并且同一目标在同极化和交叉极化中的散射也不相同, 使用简单叠加方法的降斑效果并不明显. 利用极化图像间的相关性, Novak 和 Bun^[1] 提出了极化白化滤波器法, 就是假设已知 HH, HV, VV 图像间的强度比和相关系数, 利用单视多极化的复数据进行运算来实现降斑. 在文 [1] 中还提出了

一种改进的极化白化滤波器法, 直接用图像的强度值计算像素点间的强度比, 而相关系数仍然需要用复数据计算得到. 以上方法都是将多极化图像合成一幅图像, 损失了极化信息, 极化白化滤波器法还需要复数据, 限制了其应用的范围.

Lee 等人^[2] 提出了另一种方法: 最优加权法. 这种方法不是把得到的 HH, HV, VV 三种极化图像合成为一幅图像, 而是通过运算分别得到降斑后的 HH, HV, VV 极化图像, 这样既对每一种极化图像进行了降斑, 又能更好将极化信息用于后续的目标识别. 最优加权法是基于乘性噪声模型建立的, 其最大的优点在于能直接利用多极化 SAR 图像的强度或幅度值, 而不需要复极化散射矩阵. 单视多极化 SAR 图像经过处理后, 其降斑的效果等同于用二到三视处理后的效果. 但是这种方法计算量较大, 适合于一些对实时性要求不高的精细图像分析, 对于那些对快速性要求较高或是粗判读的场合, 这种方法的时效性差.

随着 SAR 技术的发展, 不断获得大量有效的多极化 SAR 数据, 要求提高 SAR 图像的解译和分类速度, 更快地获得更多的信息, 因而对算法的时效性要求越来越高. 本文在研究了最优加权法原理的基础上, 对其进行了改进, 提出了分块加权法. 分块加权法不是对 SAR 图像上每一像素点进行加权, 而是对 SAR 图像分区加权. 与最优加权法相比, 它显著降低了运算量, 提高了 SAR 图像的分析处理速度, 而且并没有

收稿日期: 2001-08-02; 修回日期: 2002-12-16

基金项目: 国防科技重点实验室基金 (No. 00JS67. 1. 1. HK0101)

降低降斑的效果,在一些场合反而使降斑效果得到改善.本文利用实测单视多极化 SAR 图像数据,验证了分块加权法的降斑效果,并与最优加权法的处理效果进行比较,分析得出了几条有用的结论.

2 多极化 SAR 图像降斑算法的原理

多极化 SAR 数据可用复散射矩阵来表示:

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于天线的互易性,有 $S_{hv} = S_{vh}$,因而也可以定义一个复矢量来表示多极化 SAR 数据:

$$U = \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Lee 等人^[2]提出的最优加权法,是直接利用多极化 SAR 图像的强度或幅度实数值进行运算的,不要求多极化 SAR 的复数据.利用三种极化图像间的相关性,在同质区域内,选择适合的加权运算得到保持了原有电磁特性的降斑后的 HH、HV 和 VV 极化图像.

假定斑点噪声可以表示为乘性噪声,即:

$$Z(k, l) = X(k, l) V(k, l) \quad (3)$$

$Z(k, l)$ 是 SAR 图像上位于 (k, l) 的像素点的强度或幅度值(有斑点的辐射), $X(k, l)$ 是照射区域对雷达波的随机反射过程(无斑点的辐射), $V(k, l)$ 是斑点噪声,服从均值为 1, 标准偏差为 v 的分布. $X(k, l)$ 和 $V(k, l)$ 统计独立.

文[4]中认为在同质区域中:

$$v = \sqrt{\text{Var}(z) / E(z)} \quad (4)$$

其中 v 表示图像上斑点的强度值,又称为变异系数.单视强度图像中的同质区域有 $v = 1$.

对于多极化 SAR 图像而言,方程式(3)可以写成

$$z_i = x_i v_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

其中 $i = 1, 2, 3$ 分别对应于 HH, HV, VV 三种极化 SAR 图像.

多极化图像间对应斑点的相关系数 $\rho_{12}, \rho_{13}, \rho_{23}$ 定义为:

$$\rho_{ij} = E[(v_i - 1)(v_j - 1)] / v_i v_j \quad (6)$$

v_i, v_j 是斑点 v_i, v_j 的变异系数,图像等视数时, $v_i = v_j$.

多极化图像间对应像素点 Z_i, Z_j 之间的相关系数定义为:

$$\rho(z_i, z_j) = \frac{E[(z_i - \bar{z}_i)(z_j - \bar{z}_j)]}{\sqrt{E[(z_i - \bar{z}_i)^2] E[(z_j - \bar{z}_j)^2]}} \quad (7)$$

且在同质区域中有: $x_i = \bar{z}_i$ 或者 $z_i - \bar{z}_i = x_i(v_i - 1)$.

故 $\rho(z_i, z_j) = \frac{x_i x_j E[(v_i - 1)(v_j - 1)]}{x_i x_j v_i v_j} = \rho_{ij}$, 这说明在同质

区域中,多极化图像间对应斑点的相关系数 ρ_{ij} 等于多极化图像间对应像素点的相关系数,且均为实数值.

定义强度比的计算公式为: $\alpha_1 = \frac{E[z_2]}{E[z_1]}$ 和 $\alpha_2 = \frac{E[z_3]}{E[z_1]}$ (8)

可得出 HH, HV, VV 三种极化图像的线性组合为:

$$\hat{x}_1 = (z_1 + \alpha_2 z_2 + \alpha_3 z_3) / (1 + a + b) \quad (9)$$

$$\hat{x}_2 = \hat{x}_1 \quad \text{和} \quad \hat{x}_3 = \hat{x}_1$$

z_1, z_2, z_3 是 HH, HV, VV 三种极化图像对应像素点, x_1, x_2, x_3 是无斑点噪声的 HH, HV, VV 三种极化图像的对应像素点, $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 分别是 x_1, x_2, x_3 的估计值,也就是降斑后的 HH、HV 和 VV 三种极化图像对应像素点. a, b 是加权值,通过选择加权值 a, b 使得均方差 $J = E[(\hat{x}_1 - x_1)^2]$ 最小,来实现 x_1 的无偏估计.

因为在同质区域中有: $x_i = E[x_i]$, 所以 $\hat{x}_1 = (x_1 v_1 + \alpha_1 x_1 v_2 + b x_1 v_3) / (1 + a + b)$.

选择合适的加权值 a, b 使 J 最小. 则有

$$\frac{\partial J}{\partial a} = 0 \quad \text{和} \quad \frac{\partial J}{\partial b} = 0$$

代入推导可以得出结论:

$$a = \frac{(1 - \rho_{13})(1 - \rho_{23} + \rho_{13} - \rho_{12})}{(1 - \rho_{23})(1 + \rho_{23} - \rho_{13} - \rho_{12})} \quad (10)$$

$$b = \frac{(1 - \rho_{12})(1 - \rho_{23} - \rho_{13} + \rho_{12})}{(1 - \rho_{23})(1 + \rho_{23} - \rho_{13} - \rho_{12})} \quad (11)$$

最优加权法充分考虑了多极化 SAR 图像上各像素点处强度比和相关系数的不同,因而以图像上每一像素点为窗口中心,选用适合的 $5 \times 5, 7 \times 7, 9 \times 9$ 窗口来计算该像素点的相关系数和强度比,进而得到降斑后的 HH, HV, VV 极化图像. Lee 等人^[2]分析认为,选用较大的窗口可以增加估算相关系数的准确性,而选用较小的窗口可以保持较好的边缘特征并减少边缘部分的耦合.且给出了最优加权法的最适合的窗口,即:用 5×5 窗口计算中心像素的强度比,用 7×7 窗口计算中心像素点的相关系数,中心像素点的均值则由其的 3×3 邻域的来计算.经验证,这样处理的降斑效果并无明显提高,只是较好地保持了边缘特征.由于对每一像素点,都要分别选择以其为中心的上述三种窗口进行运算,因而运算量是仅选用 7×7 的固定窗口处理的十几倍.最优加权法对窗口选择和何种窗口下计算哪些参数,是一种经验选择,存在一定的适用范围.本文所用的最优加权法均选用 7×7 的固定窗口.

本文对 Lee^[2]等人提出的最优加权法进行了改进.由于实际目标可以看成是由许多理想点目标组成的.当相干电磁波照射实际目标时,其散射回波不完全由地物目标的散射系数决定,而是围绕这些散射系数有很大的随机起伏.这种起伏在图像上的反映就是相干斑噪声,因而,相干斑噪声在很大程度上是 SAR 图像的一种固有特性.考察实际的 SAR 图像可以发现,大部分无特征变化的区域都可视为同质区域.因此,按照最优加权法逐点选择以其为中心的窗口来计算强度比、相关系数和均值没有必要.选定一个窗口(例如 7×7),如果是在同质区域,式(9) — (11)也适用.以该窗口计算得到强度比、相关系数和均值,来对该窗口内每一点进行降斑处理,降斑效果会更好.如果该窗口内不是同质区域,由于相干斑噪声是 SAR 图像的一种固有特性,利用式(9) — (11)对窗口内的每一点进行降斑处理,也有较好的降斑效果.这样,依次挪动一个窗口的距离进行运算,就能得到整幅降斑后对应的极化图像.由于这种方法将图像分割成窗口大小的许多块,因而称为分块加权法.其原理与许多基于轮廓线的分块处理方法是类似

的,只是这里是分成窗口大小的块.分块加权法与最优加权法相比,由于对同一窗口内的像素点,只计算一次参数,因而在保持了多极化 SAR 图像原有的电磁特性和分辨率的情况下,既使运算量减小了几十倍以上,又使降斑的效果得到改善.

如图 1 所示,假定白色区域是同质区域,黑色区域是另外一个同质区域(目标区).如果窗口选择位于同质区域,如图中的左上角和右上角的窗口(1)、(2),显然可以利用

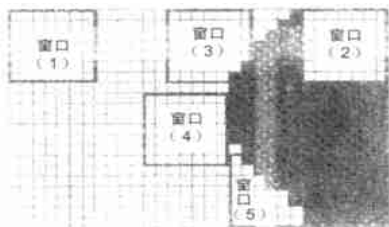


图 1

该窗口得到的强度比、相关系数和均值对该窗口内的每一点进行降斑计算.如果窗口中大部分区域为无目标的目标区域,少部分为目标区域,如图中窗口(3),则用分块加权法计算强度比、相关系数和均值时,窗口内区域的非均匀带来的影响很小.如果窗口中两个同质区域所占比例相当,那么计算强度比、相关系数和均值时,窗口内区域的非均匀带来的影响较大.但利用最优加权法进行降斑处理时,至少有一点的计算与此相同,而且图像上受影响较大的点多.

下面分析最优加权法和分块加权法的边缘模糊问题.用最优加权法处理,每一像素点降斑处理所用的相关系数、均值、强度比,是以其为中心的窗口中所有的像素点值来计算的,由于是逐点移动窗口进行运算,因而受影响的区域大小比较固定(为一个窗口大小),边缘的平滑扩张是固定的,受影响的程度也是连续的、固定的.而用分块加权法处理,由于是依次以一个窗口的距离移动窗口,如果窗口内有目标区域和非目标区域,如窗口(3),目标区域所占比例较小,则整个窗口内每一点都受影响,但受影响的程度不严重,而且下一个窗口已挪至以目标为主的区域中(另一同质区域);如果窗口刚好选择合适,如窗口(4),正好在目标的边缘,则某处边缘特征保持完好,边缘得到锐化;如果窗口刚好选择不适合,如窗口(5),窗口内一半是非目标区域,一半是目标区域,则该窗口中目标边缘的平滑扩张较大.总的分析看来,用分块加权法处理,受影响的区域和程度都较小而且不固定.

3 利用多极化 SAR 图像数据的验证结果

为了评判分块加权法和最优加权法的降斑效果和对边缘特征的影响,我们利用实测的单视多极化数据进行了验证.

(1) 分别用总能量检测法($= |S_{hh}|^2 + 2|S_{hv}|^2 + |S_{vv}|^2$)、最优加权法和分块加权法对实测的单视多极化 SAR 图像进行处理,以 7×7 窗口为例,得到的降斑后的 HH 图像如图 2 所示.

图 2(a) 为原始的 HH 极化的图像的变异系数是 1.04,而图 2(b)~(d) 的变异系数是 0.95, 0.76, 0.73. 四种极化组合的能量总和不能达到降斑的目的.最优加权法和分块加权法处理后的图像降斑效果明显,且后者比前者的效果更好些.

(2) 三种极化 HH、HV、VV 的图像都可以应用分块加权法

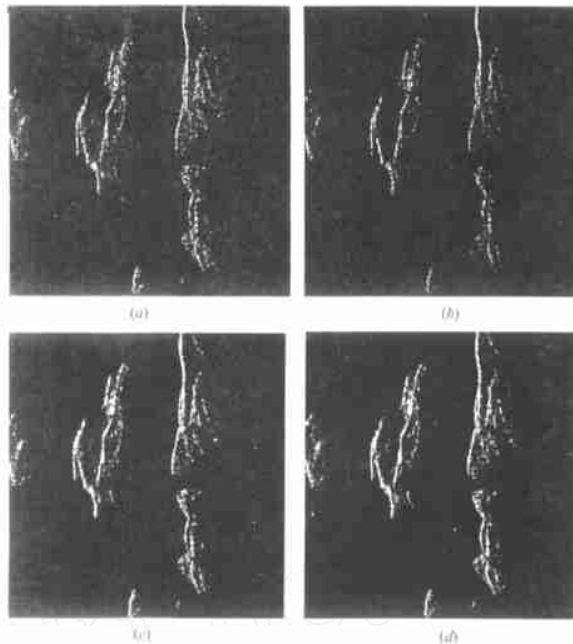


图 2 单视 C 波段极化 SAR 图像(海岛). (a) 原始的 HH 图像; (b) 总能量图像; (c) 用最优加权法处理降斑后的 HH 图像; (d) 用分块加权法处理降斑后的 HH 图像

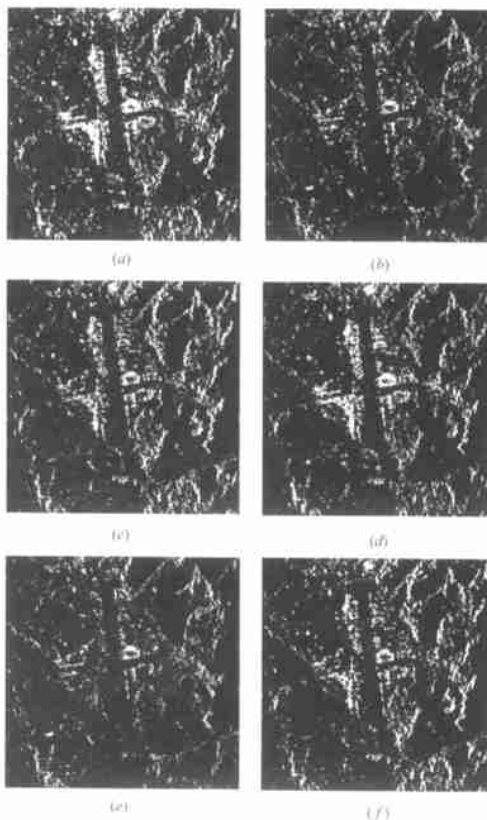


图 3 单视 L 波段极化 SAR 图像(河流). (a)~(c) 分别是原始的 HH、HV、VV 图像; (d)~(f) 分别是分块加权法处理降斑后对应的 HH、HV、VV 图像

处理得到降斑后的图像,如图 3 所示.

可以看到处理后目标周围斑点减少了,图像纹理显得更清晰,而且不同极化图像中的一些细小的目标,例如(HH 极化图像上河流中的船只),在降斑后的极化图像中也保持了原有的特点.这说明经分块加权法处理降斑后的极化图像,其极化信息都得到了保持.

(3) 针对同一目标,分别选用 3×3 , 5×5 , 7×7 , 11×11 的窗口,以分块加权法进行运算处理,得到的降斑后的图像如图 4 所示.

图 4(a)~(d) 对应的斑点的变异系数分别为 0.79, 0.74, 0.73, 0.71. 可见窗口越大,降斑越明显,而大的窗口可能会导致边缘模糊.这就需要在降斑效果和保持图像目标边缘特征两方面取折衷.一般窗口大小取 7×7 为宜.

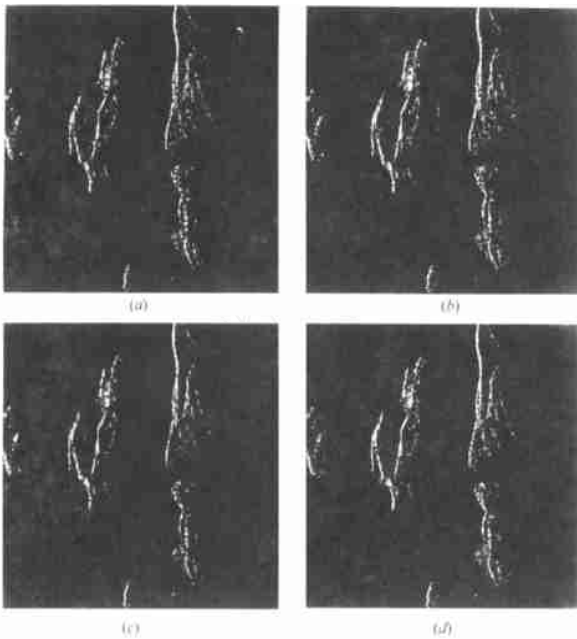


图 4 单视 C 波段 HH 极化 SAR 图像(海岛). (a)~(d) 分别选取 3×3 窗, 5×5 窗, 7×7 窗, 11×11 窗运用分块加权法处理降斑后对应的的 HH 极化图像

4 结论

(1) 分块加权法是对最优加权法的推广,适用于更广泛的多极化 SAR 图像降斑处理.最优加权法是逐点移动窗口来计算均值、强度比和相关系数的,而分块加权法是逐个移动窗口来计算的,并以同一参数对窗口内每一点进行降斑处理.方法更为简单,尤其是计算量有很大减少,以 7×7 的窗口而言,计算量减少 49 倍以上,因而分块加权法更为实用.

(2) 对于无特征变化的同质区域,分块加权法的降斑效果更好.对一般的 SAR 图像,分析与利用实测多极化 SAR 数据验证表明,用分块加权法处理降斑的效果不仅较好,而且还保持了原有图像的电磁特性、极化信息.

(3) 在保持目标边缘特征方面,最优加权法对目标边缘特征的影响是固定的,而分块加权法提供了随机锐化边缘的可能,从实际结果看,对变化丰富的 SAR 图像,其影响程度不大.

(4) 从降斑和保持目标边缘特征两方面综合权衡,对多极化 SAR 数据,一般可选择 7×7 窗口进行运算处理.

参考文献:

- [1] L M Novak, M C Burl. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(2): 293 - 305.
- [2] J S Lee, M R Grunes, S A Mango. Speckle reduction in multipolarization, multifrequency SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1991, 29(4): 535 - 544.
- [3] Chris Oliver, Shaun Quegan. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Norwood MA USA: Artech House, 1998.
- [4] J S Lee. Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images[J]. Opt. Eng., 1986, 25(5): 636 - 643.
- [5] Howard A Zerker, Jakob J van Zyl. Imaging radar polarimetry: A review [J]. Proceedings of The IEEE, 1991, 79(11): 1583 - 1606.

作者简介:



胡艳芬 女, 1970 年生于湖北孝感, 1991 年毕业于解放军信息工程大学并获学士学位, 现为北京航空航天大学电子工程系硕士研究生, 主要从事多极化 SAR 图像的目标识别方面的研究.



王宝发 男, 1939 年生于天津市, 北京航空航天大学教授, 电子工程系博士生导师, 主要研究领域为电磁散射与逆散射, 天线理论, 电磁兼容及雷达目标识别等.