

全极化合成孔径雷达图像极化白化滤波 参数估计方法的改进研究

刘秀清^{1,2}, 杨 震^{1,2}, 杨汝良²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 2. 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

摘 要: 本文介绍了全极化 SAR 图像相干斑抑制的极化白化滤波, 及其参数估计的传统方法. 针对传统参数估计方法的缺陷, 提出了增强的自适应边缘检测参数估计方法. 由于以上方法无法检测点、线目标, 本文提出了一种新的参数估计方法. 将这些方法应用到 NASA JPL 实验室的全极化 SAR 图像数据中, 得到了相干斑抑制图像. 对这些图像进行详细的分析、比较, 结果证明参数估计新方法具有强的适应性和有效性.

关键词: 全极化合成孔径雷达 (SAR); 极化白化滤波; 相干斑抑制; 边缘检测; 协方差矩阵

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2003) 12-1792-05

Improvement Research of Parameter Estimation in Polarimetric Whitening Filter of Full Polarization SAR Image

LIU Xiuqing^{1,2}, YANG Zhen^{1,2}, YANG Ruiliang²

(1. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: Polarimetric whitening filter (PWF) method for speckle reduction in polarimetric synthetic aperture radar (SAR) is stated here, with some traditional covariance matrix parameter estimate method. Aimed at their defects in parameter estimation, an enhanced adaptive edge detection method for parameter estimating is presented firstly. For the lack of point target and line detection in the above-mentioned methods, a new parameter estimation method is then introduced. At last, results of above-mentioned methods applied in PWF are submitted. Detailed analyses and comparisons are also presented. It is proved that the new parameter estimation method is the most robust.

Key words: polarimetric synthetic aperture radar; polarimetric whitening filter; speckle reduction; edge detection; covariance matrix

1 引言

全极化合成孔径雷达(SAR)提供了比单极化 SAR 更多的地物目标信息. 由于 SAR 的相干成像机理, SAR 图像中存在着严重的相干斑噪声. 这不仅使图像质量下降, 而且给 SAR 图像的描述和分类等工作带来困难. 为了更好地获取目标散射信息, 通常要对 SAR 图像进行相干斑抑制处理. 传统的相干斑抑制采用多视平均的方法. 该方法可以抑制相干斑, 但降低了图像分辨率. 1990 年, Novak 和 Burl 等人提出了针对全极化 SAR 图像相干斑抑制的极化白化滤波(PWF)方法^[1,2]. 它通过对极化散射矢量中三个复元素 S_{hh} 、 S_{hv} 和 S_{vv} 的最优加权来降低全极化 SAR 图像的相干斑. 该法在不降低图像分辨率的同时, 达到相当于 3 视平均的相干斑抑制效果, 是全极化 SAR 图像相干斑抑制的新途径^[1~3].

PWF 方法对全极化 SAR 图像相干斑的抑制效果, 与目标散射矢量协方差矩阵参数估计的准确程度有直接关系. 起初, 有些学者将图像中某一区域的这些参数值应用到整幅图像的相干斑抑制处理中. 显然, 这种方法对整个图像的处理误差较大. 后来, 又有学者采用了矩形滑动窗, Prewitt 边缘算子等协方差矩阵参数估计方法^[2,3]. 在很多情况下, 这两种参数估计方法对协方差矩阵参数估计的误差仍很大. 这使 PWF 相干斑抑制效果不好, 有时甚至导致局部图像质量变差. 针对这种情况, 本文给出散射矢量协方差矩阵参数估计的改进方法和参数估计的新方法. 实验结果证明, 本文提出的方法是有效的.

2 极化白化滤波及其传统的参数估计方法^[1~3]

2.1 极化白化滤波

对满足互易定理的各向同性散射媒质, 在后向散射坐标

系中目标的散射复矢量可以表示为:

$$X = [S_{hh} \ S_{vh} \ S_w]^T \quad (1)$$

协方差矩阵为:

$$C = E[X X^H] = R_{HH} \begin{bmatrix} 1 & 0 & Q\sqrt{C} \\ 0 & E & 0 \\ Q^* \sqrt{C} & 0 & C \end{bmatrix} \quad (2)$$

$E[\]$ 表示集合平均, 上标 T 表转置, H 表示共轭转置. 其中的极化参量如下:

$$R_{HH} = E \left\{ \begin{array}{l} |S_{hh}|^2 \\ |S_{vh}|^2 \\ |S_w|^2 \end{array} \right\}, E = \frac{E \left\{ \begin{array}{l} |S_{hv}|^2 \\ |S_{hh}|^2 \end{array} \right\}}{E \left\{ |S_{hh}|^2 \right\}}, \quad (3)$$

$$C = \frac{E \left\{ \begin{array}{l} |S_w|^2 \\ |S_{hh}|^2 \end{array} \right\}}{E \left\{ |S_{hh}|^2 \right\}}, Q = \frac{E \left\{ \begin{array}{l} S_{hh}^* S_w \\ |S_{hh}|^2 \end{array} \right\}}{[E \left\{ |S_{hh}|^2 \right\} + E \left\{ |S_w|^2 \right\}]^{1/2}}$$

假设相干斑噪声是乘性的, 其模型为:

$$Y = \sqrt{g}X \quad (4)$$

g 为空间纹理变量. 它表征地表的辐射特征, 与场景自然起伏和均匀性有关. g 服从 Gamma 分布. 通常采用图像象素强度的标准差与平均值之比作为相干斑度量因子 (s/m), 如式 (5). 等效视数定义如式 (6). 减小 (s/m) 等效于提高图像的等效视数.

$$s/m = \sqrt{\text{var}\{y\}} / \text{mean}\{y\} \quad (5)$$

$$\text{ENL} = 1 / (s/m)^2 \quad (6)$$

PWF 算法是在成像处理前对测量矢量 Y 进行白化处理, 将有色噪声转换为白噪声. 白化加权矢量 W 形式如下:

$$W = \sqrt{g} [HH \ HV \ \sqrt{E} \ (W \cdot Q^* \sqrt{CH}) \ \sqrt{C(1 - |Q|^2)}]^T \quad (7)$$

图像强度为:

$$y = |HH|^2 + |HV\sqrt{E}|^2 + \left| (W \cdot Q^* \sqrt{CH}) \ \sqrt{C(1 - |Q|^2)} \right|^2 \quad (8)$$

可见, 在目标散射矩阵已知的情况下, PWF 方法关键是对参数 Q, E, C 的估计. 传统的 Q, E, C 估计方法有: 基于矩形滑动窗的参数估计法和基于 Prewitt 算子边缘检测的参数估计法^[2, 3].

2.1.2 基于矩形滑动窗的参数估计

该方法比较简单. 它采用一个矩形 (如 7@7, 9@9 等) 的平滑窗在极化 SAR 测量矩阵上依次滑过, 用此滑动窗口中的所有数据对中心象素点进行 Q, E, C 参数估计. 再将这些参数应用到 PWF 算法中. 此方法只能对窗口内的有限采样数据统计平均, 是一种粗糙的近似法.

2.1.3 基于 Prewitt 算子边缘检测的参数估计

基于 Prewitt 算子边缘检测的参数估计法, 首先判断滑动窗口内中心象素与哪一区域象素属于同一种散射机理, 然后选择与其属于同种散射机理区域的数据对中心象素点进行 Q, E, C 参数估计.

该方法的检测模板如图 1 所示 (以 9@9 模板为例): (a) ~ (d) 分别给出一组边缘检测模板及其掩模结构. 每组最右边的是掩模, 它是大小与检测模板相同的矩阵. / 空格 0, + 0, - 0 分别代表掩模矩阵相应处的元素值为 0, +1 和 -1.

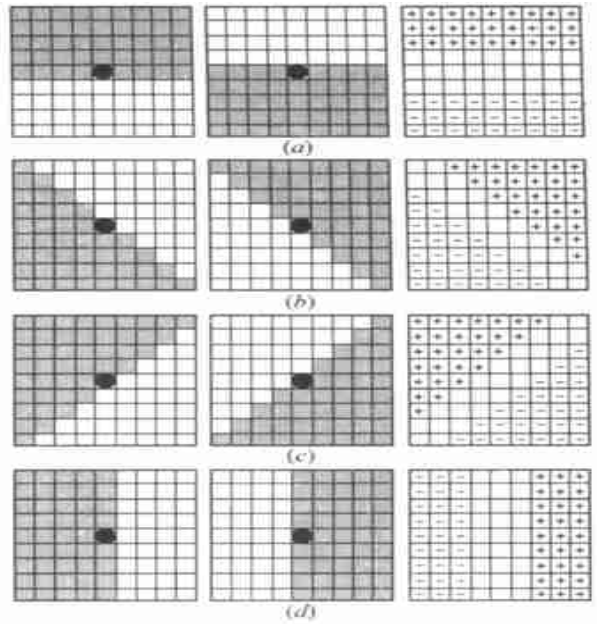


图 1 基于 Prewitt 算子的参数估计法的检测模板及其掩模

3 参数估计方法的改进

上面的检测模板过于粗糙, 当被处理地域的地形地貌纹理结构比较复杂时, 上面的方法将不能满足参数估计的精度要求.

3.1 增强的自适应边缘检测参数估计法

在图 1 检测模板的基础上, 增加检测模板的边缘检测种类, 使边缘检测种类更加细化, 同时改进中心待处理象素点所属纹理区域的判别方法, 得到了增强的自适应边缘检测参数估计法. 增加的检测模板如图 2 所示. 图中仅给出图 1(c) 到 (d) 的渐变过程, 掩模矩阵和其他模板可类推得到.

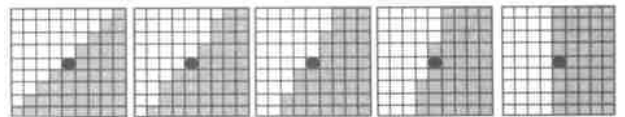


图 2 增强的自适应边缘检测参数估计方法的增加的模板示例

2.3 节的方法很好地确定了待处理窗口内数据图像的纹理结构方向. 但对中心象素点所属区域的判别不是很准确. 这里提出通过变化系数 $f^{[4]}$ 来判别中心点的所属区域. 该方法对中心象素点所属区域的鉴别更科学、准确. 变化系数定义为:

$$\text{变化系数 } f = \text{标准偏差}(d) / \text{均值}(m) \quad (9)$$

这种方法的参数估计过程如下:

(1) 确定模板中心象素点所在区域的纹理方向: 将各种掩模分别与窗口中图像数据的幅度值相乘 (结果用矩阵 M 表示), 然后求矩阵 M 和值的绝对值. 绝对值最大的掩模所对应检测模板方向就是中心象素点所属区域的纹理方向;

(2) 假如判断边缘为如图 1(d) 所示的结构, 则对模板中的左边两个图的阴影部分采用式 (9) 分别计算 f_1, f_2 ;

(3) 取 f_1 和 f_2 中较小者所对应的阴影区域为与中心像素点相同散射机理的区域;

(4) 用该区域的数据对中心像素点进行 Q, E, C 参数估计, 应用于 PWF 算法中。

3.1.2 参数估计新方法

当窗口中存在强点目标, 或者窗口中存在一条线, 中心像素属于这条线时, 以上的检测方法无法对其进行检测和判断。这时参数估计误差增大, 图像的相干斑抑制效果下降。本文将 Lopes 等人应用于单极化 SAR 相干斑抑制的 Gamma Map 算法^[4, 5]的结构检测模型进一步细化, 并改进窗口中图像的纹理结构检测方法, 提出了全极化 SAR PWF 参数估计的新方法。

单极化 SAR Gamma Map 算法采用变化系数和强度对比系数对窗口中数据图像的纹理结构进行检测^[4, 5]。假如图 1 中左右两个阴影部分分别各代表一种纹理, 以 I_1 和 I_2 分别表示每种纹理像素的平均强度。强度对比系数定义为:

$$r = \max\left[\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \left(\frac{I_2}{I_1}\right)\right] \quad (10)$$

单极化 SAR Gamma Map 算法是以空间滤波技术为基础的空域自适应的滤波器。它是对单极化 SAR 图像的一种平滑, 在相干斑抑制的同时不可避免带来图像空间分辨率的损失。全极化 SAR PWF 算法在降低图像相干斑的同时, 不降低图像的分辨率。

我们先对边缘、线、点结构的检测模板进行细化, 然后改进窗口中图像纹理的检测方法。增加的模板如图 3 所示。图中也仅给出其中一个中间渐变过程。这样就得到由图 1~3 以及类推出的检测模板构成的参数估计新方法。的检测模板。图 1、2 检测边缘的存在及其方向; 图 3 的前五个模板检测线结构的存在及其方向, 最后一个模板检测强点目标的存在。在进行点目标检测时, 点目标模板不应过大, 否则会出现错误结果。在检测出点目标后, 考虑旁瓣效应, 进行参数估计时, 可适当增加点目标的旁瓣数据。对线目标应如此处理。

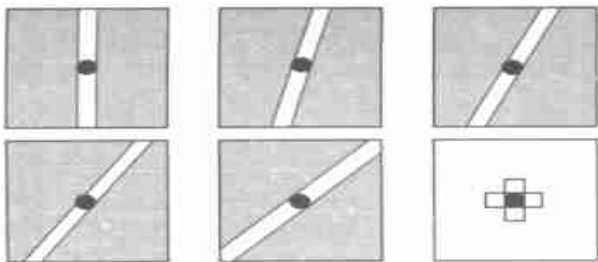


图 3 参数估计新方法增加的模板示例

将全极化 SAR 散射矢量元素强度均匀加权, 得到全极化 SAR 的总功率(Span)图, 如式(11)所示。它是散射矢量的均匀加权, 因而具有一定的相干斑抑制效果。采用总功率图像数据进行窗口结构检测将进一步增加窗口检测的准确性。

$$P_{\text{span}} = |S_{\text{hh}}|^2 + 2|S_{\text{hv}}|^2 + |S_{\text{ww}}|^2 \quad (11)$$

参数估计新方法步骤如下:

(1) 利用式(11)计算全极化 SAR 的总功率图像像素值;

(2) 利用式(9)计算窗口总功率图像的变化系数 f 。当 $f < f_{\text{max}}$ 时(f_{max} 为门限), 窗口内数据属于非纹理结构。取窗口内的

所有数据对中心像素点进行 Q, E, C 参数估计; 否则, 窗口内数据属于纹理结构, 继续对窗口内图像纹理进行检测。

对于单极化 SAR 图像 $f_{\text{max}} = 1/\sqrt{2@ENL+1}$ 。设全极化总功率图像的相干斑抑制因子为 $(s/m)_{\text{span}}$, 等效视数为 $(ENL)_{\text{span}} = 1/\left((s/m)_{\text{span}}\right)^2$ 。因此对于全极化 SAR 总功率图像变化系数的检测门限为

$$f_{\text{max}} = 1/\sqrt{2@ENL@(ENL)_{\text{span}}+1};$$

(3) 根据图 3 的线检测模板, 利用式(10)计算 Span 图像中每种方向线结构的强度对比系数 r , 取其最大值记为 r_{line} , 记下最大值对应的线方向; 根据点目标检测模板, 计算点目标的强度对比系数 r_{point} ;

(4) 如果 $r_{\text{line}} > r_l$, 判定窗口中心像素属于 r_{line} 对应的线结构。采用该线上白色区域的数据对中心像素点进行 Q, E, C 参数估计。如果 $r_{\text{point}} > r_p$, 判定窗口中心像素属于强点结构。采用中心像素及其旁瓣区域的数据对中心像素点进行 Q, E, C 参数估计。其中 r_l, r_p 为线和点检测门限;

(5) 如果(4)中各项均不成立, 该窗口的属于边缘纹理结构, 利用 3.1 节的方法进行边缘检测和参数估计。

这种方法与 3.1 节方法相比, 增加了点、线目标的检测功能, 减少了窗口中强点、线结构对边缘检测的影响。从第 4 节的分析可以看出, 该方法对参数估计的精度很高, PWF 算法的相干斑抑制效果很好。在点、线结构已经被检测出后, 在以后结构检测时, 可通过屏蔽的方法将其屏蔽。这可最大限度的避免点、线结构对图像纹理结构检测的影响。当待处理区域结构比较简单时, 根据情况, 适当简化检测模板, 以节省计算时间和不必要的麻烦。

4 实验及结果分析

处理的原始图像数据是 NASA JPL 实验室的俄罗斯贝加尔湖附近某地的 SIR2C 全极化 SAR L 波段图像数据。应用文中提到的参数估计方法, 对该数据进行全极化 SAR PWF 处理, 得到全极化 SAR 的相干斑抑制图像。下面详细分析几种参数估计方法的相干斑抑制性能。

4.1 灰度图

图 4 是 PWF 处理前后图像的灰度图。图 4(a) 是原始数据 HH 极化灰度图, 图 4(b)~(d) 是不同的参数估计方法 PWF 处理后的灰度图。图像的左半部分结构比较简单, 图 4(b) 取得很好的滤波效果。相干斑明显比 HH 极化图像少, 并拥有很多 HH 图像没有的纹理细节。左下角 G 部分具有角型边界纹理边框的细节突出了。中间及右半部分, 地域纹理结构比较复杂, 尽管图像的相干斑得到一定程度的抑制, 有些细节比较突出, 但相干斑抑制后的图像比较杂乱, 图像质量变差。这是因为检测模板不够精细, 使参数估计误差过大, 导致局部图像 PWF 相干斑抑制效果变差。这与前面的分析相吻合。图 4(c) 从整体和局部来看, 都比图 4(b) 相干斑抑制效果好: 图像左半部分的相干斑更少, 图像更平滑, 细节更清晰; 右半部分细节及强目标突出, 图像纹理比 Prewitt 算子法清晰得多, 但纹理

的清晰度还不够好。图 4(d) 左侧的相干斑抑制效果略好于图

4(c); 中间以及右半部分的纹理相当清晰, D、E、F 处的强目标更加突出、明显, 图像效果好于图 4(c). 这是由于中间及右侧图像的纹理比较复杂. 点、线结构较多, 增强的自适应边缘

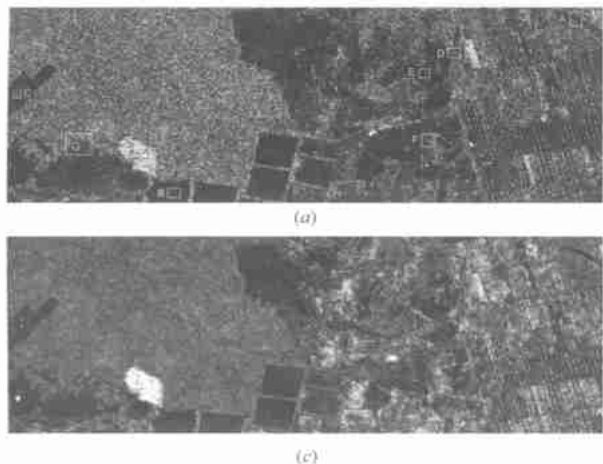
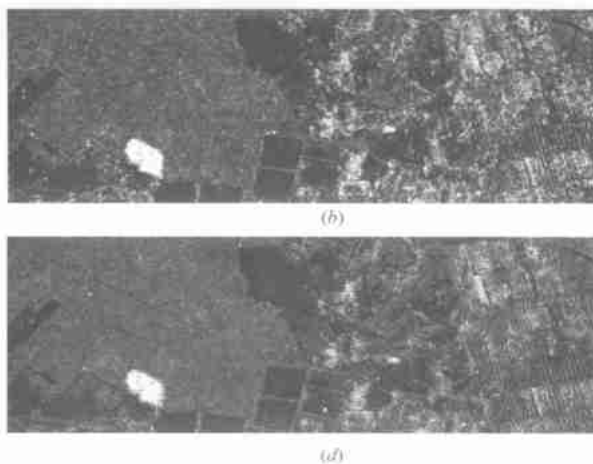


图 4 (a)原始数据 HH 极化图像的灰度图, 和(b)基于 Prewitt 算子的参数估计法, (c)增强的自适应边缘检测参数估计法, 和(d)参数估计新方法得到的参数进行 PWF 后得到的相干斑抑制图像

检测参数估计法对该区域的参数估计误差较大. 参数估计新方法可检测复杂的点和线结构, 因而参数估计较准确, PWF 的相干斑抑制效果更好.



4.1.2 幅度图

图 5 是图 4(a) 中 A 区域 PWF 处理前后的幅度图. 通常, 通过相干斑抑制指标和边缘增强指标来判断滤波器的好坏. 相干斑抑制指标用来鉴定滤波器对图像相干斑的抑制能, 边缘增强指标用来鉴定相干斑抑制的同时, 滤波器对边缘增强的能力. 好的滤波器应同时具有良好的相干斑抑制指标和边

缘增强指标.

从图 5 中能更清楚地看到 PWF 处理前后的相干斑抑制效果. 图 5(a) 中图像很杂乱. 图 5(b)、(c) 中噪声得到了抑制. 强目标更加突出, 中间和右半部分边缘更加突出. 图 5(c) 中右下角边界纹理比图 5(b) 更清晰.

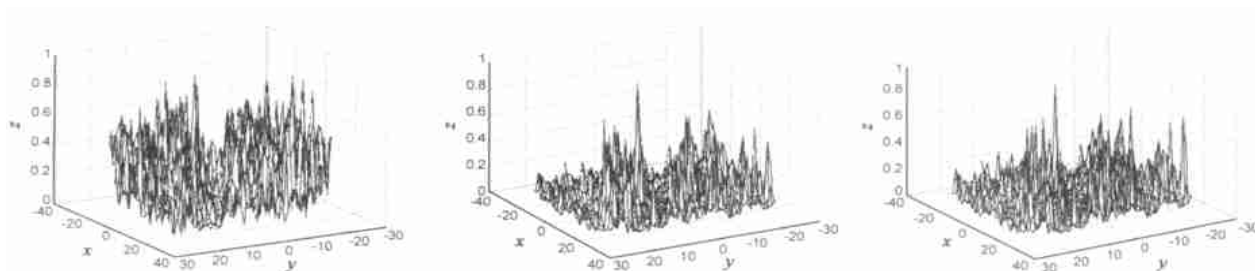


图 5 (a)是原始数据 HH 极化, (b)是由增强的自适应边缘检测参数估计方法和(c)由参数估计新方法得到的 A 区域的幅度图.

4.1.3 滤波性能评估

在进行 PWF 处理前, 对原始数据进行了 2 视平均处理, 根据相干斑度量因子 (s/m) 与等效视数 ENL 的关系, HH 极化图像 (s/m) 的理论值为:

$$(s/m)_{HH} = 1/\sqrt{2} = 0.7071 \quad (12)$$

由前可知, PWF 算法可以达到相当于 3 视平均的相干斑抑制效果, 因而对于进行了 PWF 处理后得到图像的 (s/m) 理论值为:

$$(s/m)_{PWF} = \left(1/\sqrt{3}\right) @ (s/m)_{HH} = 0.4082 \quad (13)$$

通常选择地域散射单一, 平稳的区域计算 (s/m) 值. 一般选择平缓的沙漠和平静的海面、湖面等回波信号较弱且恒定的地区. 我们选择图中 B 区域来评估 PWF 的滤波性能. 该区

域图像的相干斑度量因子如表 1.

从表 1 可见, PWF 的几种参数估计法都得到了很好相干斑抑制效果. 相干斑抑制因子 (s/m) 与理论值 0.4082 都很接近. 最后两种方法的结果与理论值更加接近, 说明这两种参数估计方法更加准确, PWF 的相干斑抑制效果更好.

表 1 B 区域相干斑度量因子的统计表

	HH 图像	9@9 矩形窗法	Prewitt 算子法	增强的自适应方法	参数估计新方法
(s/m)	0.7083	0.4140	0.4116	0.4102	0.4089

4.1.4 极化白化滤波算法的分辨率

空间分辨率定义为冲击响应函数主瓣 3dB 带宽. 一般采用人工设计的点目标来计算空间分辨率, 在不能得到人工点

目标时,可以通过在图像中寻找合适的具有点目标特性的区域来计算.我们选择图 4(a)中 C 区点目标来计算图像的分辨率,结果如表 2 所示.原始数据的距离分辨率 15.3445m,方位向分辨率 20.21128m.从表 2 看,该点目标方位向尺寸接近与图像分辨率,具有点目标特性.方位向的结果说明 3.1 和 3.2 节的方法在进行相干斑抑制的同时,并没有降低图像的分辨率.

表 2 C 区点目标方位向和距离向 3dB 宽度

3dB 宽度	HH 图像	Prewitt 算法	增强的自适应方法	参数估计新方法
方位向(m)	14.424	14.432	14.422	14.270
距离向(m)	33.146	29.386	27.487	27.926

4.1.5 计算量的估计

对于参数估计新方法,当地域简单时,图像纹理检测在第 2 步结束.当地域复杂时,纹理检测在第 4 步结束.此时计算量与以前的方法相当.此外则需要进行第 5 步.此步的计算量与改进的方法相同,而纹理检测结束后的所有方法的计算量近似相等的.因而,新参数估计方法的计算量随着检测模板的复杂程度有一定的增加.

5 结论

图 4、5 给出了实测数据以及 PWF 后图像的灰度图和 A 区图像的幅度图.表 1 是 B 区域相干斑度量因子的统计表 2 是 C 区点目标方位向和距离向 3dB 宽度统计.从结果及分析可以看出,PWF 算法在不改变图像分辨率的同时,可以达到相当于 3 视平均的相干斑抑制效果.这可以从表 2 和表 1 中

得出.从图像的比较分析看,第 3 节中的两种方法的参数估计精度高于传统的方法;对于复杂的地表结构,参数估计新方法与传统方法和增强的自适应边缘检测参数估计法相比,有很强的适应性,是一种精度较高的参数估计方法.

参考文献:

- [1] Leslie M Novak, Michael C Burl. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery[J]. IEEE Trans, 1990, AES26(2):293-305.
- [2] L M Novak, M C Burl, W W Irving. Optimal polarimetric processing for enhanced target detection[J]. IEEE Trans, 1993, AES29(1):234-243.
- [3] 戴博伟. 全极化合成孔径雷达系统与极化信息处理研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2000.
- [4] A Lopes, E Nezry. Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR image[J]. INT J, Remote Sensing, 1993, 14(9):1735-1758.
- [5] 单冬梅, 万国龙. SAR 降斑中的一种改进的结构检测算法[J]. 空载雷达, 2001, (3):10-15.

作者简介:

刘秀清 女, 1974 年 4 月生于辽宁省大连市, 中国科学院电子学研究所博士, 主要研究方向是极化与极化信息处理.

杨震 女, 1976 年 11 月生于河北省石家庄市, 中国科学院电子学研究所博士, 主要研究方向为极化和极化干涉.

杨汝良 男, 1943 年 4 月生于云南省昆明市, 研究员, 博士生导师, 1965 年毕业于电子科技大学雷达系, 现从事机载, 星载合成孔径成像雷达系统研究工作.