

文章编号:1001-9014(2005)06-0467-05

基于正则化变分模型的 SAR 图像增强方法

谢美华, 王正明

(国防科技大学·理学院数学系, 湖南长沙 410073)

摘要: 讨论合成孔径雷达(SAR)图像的噪声抑制与分辨率增强问题. 建立偏微分方程抑噪方法与正则化点增强方法相结合的正则化变分模型, 该模型同时具有偏微分方程模型的抑噪优势和正则化模型的分辨率增强优势. 在图像的背景区域采用偏微分方程模型进行噪声抑制, 而在图像的目标区域, 先采用后向扩散方程进行锐化, 然后再采用正则化模型进行分辨率增强, 使整幅图像的处理结果均得到优化. 此外, 在偏微分方程抑噪模型的构造上, 结合 SAR 成像的工程背景, 提出了基于 SAR 图像幅度信息的前向-后向扩散方程, 使方程能有效抑制图像背景区域的噪声并锐化目标边缘. 大量的试验结果表明该方法能有效增强目标的强散射点, 显著抑制噪杂波区的噪声.

关键词: SAR 图像; 图像增强; 前向-后向扩散方程; 正则化

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

SAR IMAGE ENHANCEMENT BASED ON REGULARIZATION VARIATION MODEL

XIE Mei-Hua, WANG Zheng-Ming

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The problem of noise reducing and resolution enhancement of SAR image was discussed. A unified regularization variation model of partial differential equation (PDE) was established, which has the noise reducing merit of PDE model and the resolution enhancement merit of regularization model. On the background of the image, the PDE model was used to reduce the noise of background, and at the targets region of the image, a background equation was used to sharp the targets firstly, then the regularization model was used to enhance the resolution of the targets. Hence, the new model can get better result on the whole image. The diffusivity based on the background of SAR was also constructed, and a forward and backward diffusion equation based on the amplitude of SAR image was obtained, which could reduce the noise of background and sharp the edges of targets. Experimental results show that the new model can enhance the strong scatter points and suppress the speckle of the image effectively.

Key words: SAR image; image enhancement; forward and backward diffusion equation; regularization

引言

超分辨的成像方法一直是合成孔径雷达(SAR)追求的目标. 常用的快速傅里叶变换(FFT)成像算法运算量小, 缺点是高旁瓣. 加窗可有效降低旁瓣, 但须付出展宽主瓣的代价, 加上成像过程中由于回波相互干涉所形成的相干斑的影响, 均导致 SAR 图像质量的降低. 因此如何有效的抑制噪声与旁瓣, 提高 SAR 图像分辨率, 一直以来都是研究的重点.

现代谱技术和带宽外推技术实现 SAR 图像分辨率增强^[1], 主要是基于成像模型参数化谱估计方法, 其效果取决于参数估计的精度. 2001 年 M. Cetin 工作组从 SAR 成像的频域模型出发, 借鉴正则化方法的思想, 对 SAR 图像特征增强^[2], 取得了较好的效果, 但在背景相干斑抑制上存在不足. 近年来, 偏微分方程(PDE)在光学图像去噪和增强方面取得了很好的效果^[3-5]. 2002 年 Yongjian Yu 等人^[6]提出了一种相干斑抑制的 PDE 方法, 能有效抑制相干斑, 但常造成对目标的模糊.

收稿日期: 2004-12-10, 修回日期: 2005-06-15

Received date: 2004-12-10, revised date: 2005-06-15

基金项目: 全国优秀博士学位论文作者专项基金(200140)和国家自然科学基金(6272013)资助项目

作者简介: 谢美华(1976-), 女, 湖南宁乡人, 讲师, 博士, 研究方向为图像处理、试验数据处理.

本文直接在 SAR 图像域进行处理. 通过建立一个正则化变分模型将正则化方法点增强方法与 PDE 抑噪方法相结合, 并通过分步实现的方法对模型进行求解, 同时在 PDE 模型的建立上采用了基于图像幅度信息的前向-后向扩散模型. 模型最终的作用效果是, 在图像的背景处利用正向扩散方程对噪声进行抑制, 在图像的目标点处先用后向扩散方程对目标进行锐化, 然后再用正则化点增强方法进行分辨率增强. 试验结果证明, 本文方法不但能有效地提高图像在目标点处的分辨率(比原始图像提高 100%, 比正则化方法提高 50%), 还能有效地抑制背景区域噪声, 显著提高图像的目标杂波比.

1 SAR 图像域的成像模型

SAR 图像域的成像模型为^[7]

$$g_0 = g + \varepsilon. \quad (1)$$

其中 g_0 表示复图像数据, g 为真实散射数据, ε 为噪声. 对于高频 SAR, 需考虑乘性相干斑噪声.

本文以图像域模型(1)为基础, 研究 SAR 图像噪声抑制和分辨率增强问题.

2 正则化与偏微分方程图像增强技术

2.1 相干斑噪声抑制的偏微分方程模型

Yongjian Yu^[6]等在建立各向异性扩散和 Lee 滤波、Frost 滤波之间联系的基础上, 提出了基于各向异性扩散方程的相干斑抑制方法(SRAD). 该方法对含噪图像 $g_0(x, y)$, 采用下述方程抑制相干斑

$$\begin{cases} \partial g(x, y; t) / \partial t = \text{div}[c(q) \nabla g(x, y; t)], \\ g(x, y; 0) = g_0(x, y), \\ (\partial g(x, y; t) / \partial \vec{n})|_{\partial \Omega} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中扩散系数为

$$c(q) = \frac{1}{1 + [q^2(x, y; t) - q_0^2(t)] / [q_0^2(t)(1 + q_0^2(t))]} \quad (3)$$

这里 $q_0(t) \approx q_0 \exp(-\rho t)$ 为图像 $g(x, y, t)$ 的等效视数的倒数, q_0 为初始等效视数的倒数, 由初始图像中尽可能大的均匀区域计算得到, ρ 为常数. $q(x, y; t)$ 称为局部方差系数, 定义见文献[6]. 式(3)的含义是在 q^2 接近 q_0^2 处多平滑, 远离 q_0^2 处少平滑, 在去除相干斑的同时保护图像细节.

2.2 正则化图像增强技术

SAR 图像的重建问题是一个典型的“逆问题”, 表现出严重的“病态性”. 正则化方法利用解的先验知识构造约束条件, 使“逆问题”的解变得确定和稳

定, 其在图像域的基本模型为^[7]

$$J(g) = \|g - g_0\|_2^2 + \Psi(g) \quad (4)$$

其中第一项表示估计值与实际数据的差别, 第二项约束解的性质. 点增强模型中, 第二项定义为 $\Psi(g) = \lambda_1^2 \|g\|_k^k$, 此时, 式(4)没有利用像素点间的相互关系, 因此不能有效抑制噪声, 且会导致大量 g 值为 0, 出现图像的背景特征被损失掉的问题. 点增强与区域增强模型中, 第二项定义为 $\Psi(g) = \lambda_1^2 \|g\|_k^k + \lambda_2^2 \|D|g|\|_k^k$, 此时可抑制噪声, 并保持背景边缘特征, 但矩阵 D 的维数为 $N \times N$, 其中 N 为图像中像元的个数, 造成计算量非常大.

3 基于正则化变分模型的图像增强方法

3.1 先验信息的开采

先验信息的合理利用是 SAR 图像实现分辨率增强的本质所在, 这里先对 SAR 图像背景及幅值分布等先验信息建模.

(1) 图像幅值分布的先验模型

由几何绕射理论, 若入射激励波波长小于目标尺寸, 则目标处的后向散射场可认为是由多个孤立散射中心组成. 假定在频率 f 和方位角 ϕ 观测下, 含有 p 个点散射中心的目标后向散射场表示为

$$E(f, \phi) = \sum_{k=1}^p A_k \exp\left(j \frac{4\pi f}{c} (x_k \cos \phi + y_k \sin \phi)\right) \quad (5)$$

其中 x_k, y_k ($k=1, \dots, p$) 为散射中心的位置坐标, A_k 为复散射幅度. 频率域 SAR 目标属性散射模型(5)在图像域的含义是, 在图像中存在点目标的位置具有较强的散射幅度值, 而在图像的背景处幅度值则很小. 因而有如下关于图像幅值的先验模型

$$\begin{cases} g(x) \gg 0, & x \in T \\ g(x) \approx 0, & x \notin T \end{cases} \quad (6)$$

其中 T 为图像中目标点的集合.

(2) 背景的先验模型

对大多数含稀疏目标的 SAR 图像而言, 其背景杂波多满足均匀性假设, 其中起伏的成分为相干斑, 且由于 SAR 图像处理主要关心的是目标特征, 对背景部分只需保留其阴影和边缘特征, 因此在图像的非边缘及非目标点处, 近似满足 $|\nabla g| = 0$, 即

$$\int_{\Omega} |\nabla g| \, d\Omega = 0 \quad (7)$$

更一般的约束形式为

$$\int_{\Omega} \Psi(|\nabla g|, |g|) \, d\Omega = 0 \quad (8)$$

其中 Ψ 的作用是加大约束条件中背景等处的权值,

而减小边缘点、目标点等处的权值。

3.2 模型的建立

SAR 图像一般存在三个特征区域:目标区、阴影区和背景区;其中表现为强散射点的目标区域应增强,阴影应得到有效保护,而背景的噪声,应尽可能抑制。典型的 SAR 图像的三种特征分布见图 1。

从图中可以看出阴影区对应的幅度值最小,背景区其次,目标区最大,阴影区与背景区之间存在一个明显的分界点,背景区与目标区之间也存在一个明显的分界点,因此利用图像的幅度信息可以很好的标记图像的各种不同特征。

下面按照图像阴影、背景、目标来建立综合偏微分方程区域增强与正则化点增强的特征增强模型。式(8)给出了背景区域的光滑约束,能有效利用各点之间的关系,起到抑制背景噪声的作用。而式(4)给出了单点像素值的约束,能有效增强目标与背景区域的对比度,减小目标的 3dB 主瓣宽度,起到分辨率增强的作用。综合这两个先验信息,即可建立图像噪声抑制与分辨率增强的正则化变分模型

$$J(g) = \int_{\Omega} (g - g_0)^2 d\Omega + \int_{\Omega} (\lambda_1^2 F_1(|g|) + \lambda_2^2 F_2(|\nabla |g||)) d\Omega \quad (9)$$

其中 Ω 为图像的支撑域。式中的第一项表示增强图像与原始图像之间的相似性,第二项用以实现正则

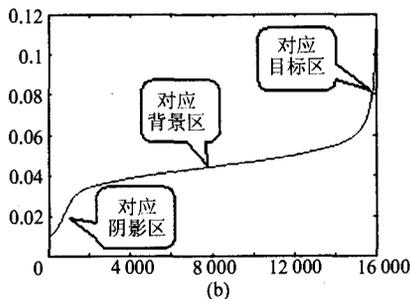
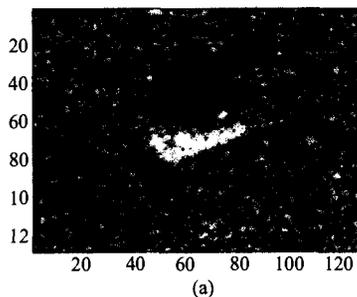


图 1 某 MSTAR 图像的幅度分布示意图 (a) MSTAR 图像的原始图 (b) 幅度排序后对应的曲线图

Fig. 1 The sketch map of a MSTAR image's amplitude distribution (a) the MSTAR image (b) the curve figure of the sorted amplitude

化点增强,第三项用来去噪与区域增强。

式(9)中第二项可按正则化点增强方法取为 $\|g\|_k^k$ 。下面讨论第三项的构造,其意义同偏微分方程抑噪模型(2),但模型(2)是抛物方程,为便于比较,这里也考虑式(9)的抛物方程形式。式(9)对应的 Euler 方程为

$$2(g - g_0) + \lambda_1^2 c_1(|g|)g - \lambda_2^2 \Phi^H \nabla \cdot (C_2(|\nabla |g||) \nabla |g|) = 0 \quad (10)$$

其中, $c_i(s) = F'_i(s)/s, i = 1, 2, \Phi g = |g|, \Phi^H \Phi = 1$ 为全 1 矩阵,矩阵相乘为点乘运算。利用最速下降法求解式(10),得到式(9)的抛物方程形式

$$\begin{cases} g_t = 2(g_0 - g) - \lambda_1^2 c_1(|g|)g + \lambda_2^2 \Phi^H \nabla \cdot (C_2(|\nabla |g||) \nabla |g|), \\ g(x, y, 0) = g_0(x, y). \end{cases} \quad (11)$$

其中式(9)中的第三项就对应式(11)中右边的第三项。比较式(2)与(11)可知,式(2)中的扩散系数 c 依赖于图像局部方差系数,而式(11)中的扩散系数 c_2 依赖于图像的梯度,但事实却表明,无论是局部方差系数还是梯度都不能很好地区分 SAR 图像的目标和背景,这是因为,对于 SAR 图像,目标常表现为“亮点”,因此合理的表征参数应该是图像的散射强度,即图像的幅度值,而图 1 也很好的说明了这一点。于是,式(11)应更新为

$$\begin{cases} g_t = 2(g_0 - g) - \lambda_1^2 c_1(|g|)g + \lambda_2^2 \Phi^H \nabla \cdot (C_2(|g|) \nabla |g|), \\ g(x, y, 0) = g_0(x, y). \end{cases} \quad (12)$$

为有效发挥偏微分方程去噪与增强的作用,扩散系数应在背景区域取正值以抑制噪声,而在目标区域应取负值以锐化目标边缘^[8],因此可将 c_2 取为下述前向-后向扩散模型

$$c_2(|g(i, j)|) = 1 - (|g(i, j)|/g_0)^2 \quad (13)$$

其中, $g_0 = gg(i_0), gg$ 为 $|g(i, j)|$ 按从小到大排序后的数列, $i_0 = \text{floor}(M * r), M$ 为图像的像素点个数, r 为目标点在图像中所占的比例,一般可预先获得。

3.3 求解

式(12)可直接采用迭代过程求解,但是实际计算却表明,直接求解时,会遇到这样一个问题:同时确定参数 λ_1 和 λ_2 很困难。这里,通过分步实施的方法来分别实现式(12)中的第二个约束项与第三个约束项,具体的计算步骤为

Step1: 先对初始图像利用偏微分方程区域增强项进行背景噪声抑制和目标锐化,求解下述变分方程

$$J(g) = \int_{\Omega} (g - g_0)^2 d\Omega + \int_{\Omega} \lambda_2^2 F_2(|\nabla|g||) d\Omega. \quad (14)$$

对式(14)利用 Euler 方程求解,得到解变分方程的椭圆方程

$$2(g - g_0) - \lambda_2^2 \Phi^H \nabla \cdot (C_2(|g|) \nabla |g|) = 0. \quad (15)$$

利用最速下降法解式(15),得到解变分方程的抛物方程

$$\begin{cases} g_t = \lambda_2^2 \Phi^H \nabla \cdot (C_2(|g|) \nabla |g|), \\ g(x, y, 0) = g_0(x, y), \\ c_2(g(i, j)) = 1 - (g(i, j)/g_0)^2. \end{cases} \quad (16)$$

得到原始图像 $g_0(x, y)$ 经偏微分方程区域增强以后的图像 v , 此时图像背景区域的噪声已得到充分抑制, 目标边缘也得到一定程度的锐化.

Step2: 对图像 v 考虑其正则化点增强处理

$$J(g) = \|g - v\|_2^2 + \lambda_1^2 \|g\|_k^k. \quad (17)$$

这里 λ_1^2 对应正则化点增强中的正则化参数. 此时对式(17)的求解可以采用文献[2]中的快速算法, 得到图像经过正则化点增强后的图像 v' .

Step3: 受正则化点增强的影响, v' 中背景区域的特征常常被抹掉, 变成近零值, 为区分图像的背景与阴影, 必须将 v 中的背景与阴影特征与 v' 中的目标特征结合起来, 最直观的方法就是采用加权方法组合. 考虑到图像背景与阴影的差别体现在图像的幅度值上, 因此可将权函数定义为 $\lambda(v) = 1 - e^{-\frac{v^2}{k}}$, 得到超分辨后的图像

$$u = (1 - \lambda(v))v + \lambda(v)v' \quad (18)$$

3.4 算法复杂性分析

相比文献[2]中的点增强与区域增强方法, 这种利用 Euler 方程进行求解的方法能避免大型矩阵的存储与运算问题, 能大幅度的提高计算速度和求解的稳定性. 这是因为:

利用直接方法求解文献[2]中的点增强与区域增强模型时, 必须将图像按列排成一个向量, 将问题转化为一个二次型, 这样矩阵 D 的维数就随着图像尺寸的增大而异常增大, 从而出现了大型矩阵的求逆问题. 譬如, 对一个 128×128 的图像而言, 就必须求一个 16384×16384 的矩阵的逆, 其中的计算量是可想而知的.

而利用本文方法计算时, 计算量主要体现在两个方面, 第一是对初始图像采用模型(16)进行处理, 此时可通过有限差分方法进行求解, 不涉及矩阵

求逆问题, 而梯度的计算也采用固定的数据宽度, 计算复杂度为 $O(N)$, 不会随着图像尺寸的增大而出现指数级的增长. 第二主要体现在利用点增强模型(17)对第一步处理后的图像进行处理, 此时主要通过单点的计算实现, 不涉及点与点之间的牵连问题, 因此计算复杂度同样为 $O(N)$.

4 计算实例

国外公共数据库 MSTAR 是公开评价 SAR 算法性能的标准数据. 下面我们利用 MSTAR 数据来验证方法噪声抑制和分辨率增强的效果.

4.1 评价指标

利用平均 3dB 主瓣宽度和目标杂波比来评价处理结果的好坏.

平均 3dB 主瓣宽度是 SAR 图像的有效分辨率的评价标准^[2]. 对目标区域图像的每行每列, 寻找峰值点; 从峰值点出发, 寻找与峰值点的差大于 3dB 的最近点; 再通过这两点之间作线性插值, 得到与峰值的差恰等于 3dB 对应的宽度; 最后对每行每列 3dB 宽度取平均, 得到整幅图像的平均 3dB 主瓣宽度. 3dB 主瓣宽度值越小表明图像的分辨率越高.

目标杂波比^[9]是定量度量图像目标和背景杂波对比度、背景抑制的一个指标, 它定义为图像中目标区域内幅度最强的像素幅度和其周围杂波强度之比, 具体如下:

$$TCR = 20 \log_{10} \left(\frac{\max_{(i,j) \in T} |\hat{f}(i,j)|}{\frac{1}{N_c} \sum_{(i,j) \in C} |\hat{f}(i,j)|} \right).$$

其中 C 为杂波区域, T 为目标区域. N_c 为杂波区域的像素点数. 设图像为 I , 如果 $I(i, j) > th$, 则 $(i, j) \in T$, 其中 $th = mean + k * std$ (k 取 2 ~ 3), $mean$ 为图像均值, std 为图像根方差. 目标杂波比的值越大表明目标对背景杂波的对比如越强、背景抑制越充分.

4.2 计算结果及分析

图 2 为实测 MSTAR T72 目标 SAR 图像的处理结果, 正则化点增强处理(图 2 左下)虽然增强了目标, 但噪声没有得到有效抑制. 本文设计的前向-后向扩散方程方法, 见式(16)的处理结果(图 2 右下)抑制了背景区域的噪声, 并锐化了点目标, 但目标强度没有得到有效增强. 而本文方法最终获得的图像(图 2 右上)则既有效地增强了目标, 又充分抑制了背景区域噪声.

在计算时间的比较上, 正则化点增强与区域增强的总耗时长达 24 156s, 利用本文方法进行处理时

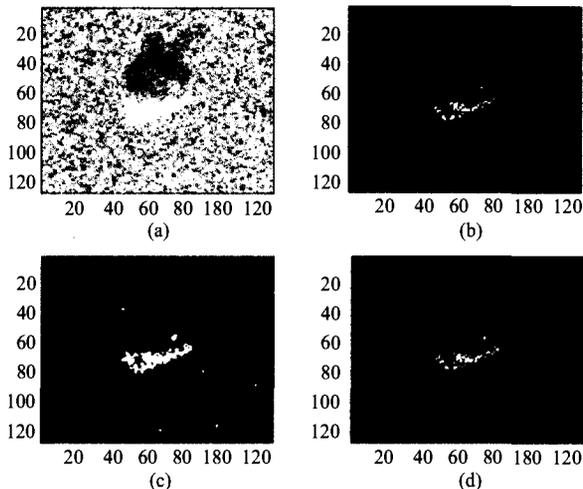


图2 各方法增强后的某 MSTAR 图像 (a) 原始图像 (b) 本文方法增强后的图像 (c) 正则化方法增强后的图像 (d) 本文模型(16)增强后的图像

Fig.2 The MASTAR images enhanced by different methods (a) the original image (b) the image enhanced by our new method (c) the image enhanced by regularization method (d) The image enhanced by model (16)

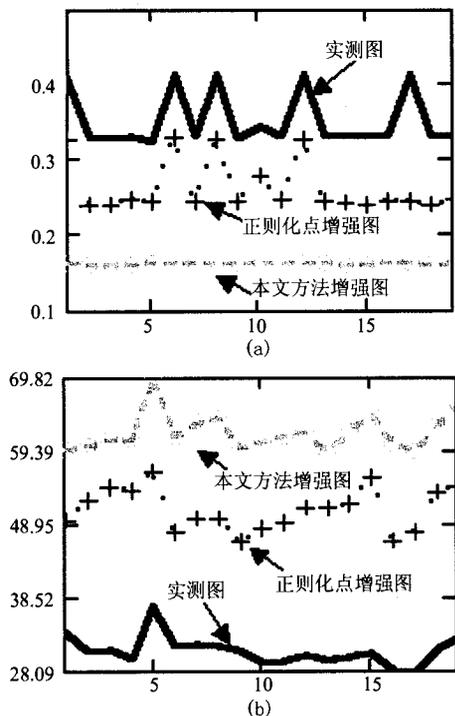


图3 20 幅 MSTAR 图像增强前后的 3dB 主瓣宽度及目标杂波比计算结果 (a) 3dB 主瓣宽度 (b) 目标杂波比

Fig.3 The 3dB main-lobe width and the target clutter ratio of 20 MSTAR images (a) the 3dB main-lobe width (b) the target clutter ratio

仅耗时 5s, 计算效率大大提高.

为进一步验证算法的有效性, 下面对 20 幅有不

同特征、不同方位角 of MSTAR 图像进行计算. 为节省篇幅, 这里只给出评价指标计算的结果, 见图 3, 其中图(a)为 3dB 主瓣宽度, 图(b)为目标杂波比. 从 3dB 主瓣宽度看, 原始图像的分辨率平均为 0.32, 正则化点增强处理后的图像的分辨率平均在 0.24 处, 而本文方法处理后的图像的分辨率平均在 0.16 处, 因此本文方法增强后的图像的分辨率比原始图像提高 100%, 比正则化方法提高 50%. 从目标杂波比看, 原始图像的目标杂波比平均在 30 附近, 正则化增强后的目标杂波比平均在 50 附近, 而本文方法的目标杂波比比原始图像有大幅度提高, 比正则化方法也有较大提高. 两个指标综合考虑, 新方法用于 SAR 图像增强处理, 效果是十分明显的.

REFERENCES

[1] DONG Zhen, ZHU Guo-Fu. Enhancing the resolution of SAR image by extrapolation [J]. *Acta Electronic Sinica* (董臻, 朱国富. 基于外推的 SAR 图像分辨率增强算法 [J]. *电子学报*), 2002, **130**(3): 359—362.

[2] Cetin M, Karl W C. Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2001, **10**(4): 623—631.

[3] Weickert J. A review of nonlinear diffusion filtering in scale-space theory in computer vision [R]. *Lecture notes in computer science 1252*, Berlin :Springer, 1997: 3—28.

[4] WANG Huai-Ye, ZHANG Ke, LI Yan-Jun. Anisotropic gaussian filtering for infrared image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (王怀野, 张科, 李言俊. 各向异性滤波在红外图像处理中的应用. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(2): 109—112.

[5] HONG Han-Yu, ZHANG Tian-Xu, YU Guo-Liang. Regularized restoration algorithm of astronautical turbulence-degraded images using maximum-likelihood estimation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (洪汉玉, 张天序, 余国亮. 航天湍流退化图像的极大似然估计规整化复原算法. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(2): 130—134.

[6] Yongjian Yu, Scot T Acton. Speckle reduction anisotropic diffusion [J]. *IEEE Trans on Image processing*, 2002, **11**(11): 1260—1269.

[7] ZHAO Xia, ZHU Ju-Bo, WANG Zheng-Ming, et al. Feature enhanced SAR imaging method based on regularization in image domain [J]. *Radar Science and Technology* (赵侠, 朱炬波, 王正明, 等. 图像域正则化特征增强 SAR 成像方法. *雷达科学与技术*), 2003, **1**(12): 237—241.

[8] Gilboa G, Sochen Nir A, Zeevi Y. Forward and backward diffusion processes for adaptive image enhancement and denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(7), 689—703.

[9] WEI Zhong-Qhuan. *Synthetic Aperture Radar Satellite* [M]. Beijing: Science press (魏钟铨. *合成孔径雷达卫星*. 北京: 科学出版社), 2001.