

SAR 图像幅度域增强的正则化方法*

周宏潮,朱炬波,王正明

(国防科技大学 系统工程研究所,湖南 长沙 410073)

摘要:正则化方法通过增加先验信息约束,达到增强 SAR 图像特征的目的。在分析现有先验信息约束条件的基础上,提出 SAR 图像幅度域上的正则化增强方法,从理论上证明了 SAR 图像复数域上正则化方法和幅度域上正则化方法的等价性,进一步解释了正则化方法的相位保持特性,提高了计算效率。通过参数变换,结合先验信息,给出正则化参数的选取方法,该方法操作简单,能有效地抑制噪声,保护目标。最后利用仿真图像和 MSTAR 图像验证了该方法的有效性。

关键词:合成孔径雷达; 特征增强; 幅度域; 正则化

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)03-0333-04

Regularization method for SAR image enhancement in amplitude domain*

ZHOU Hong-chao, ZHU Ju-bo, WANG Zheng-ming

(Institute of System Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Regularization technique could enhance SAR(Synthetic Aperture Radar) image by imposing prior information. In this paper, firstly, the prior information in existence is analyzed, a feature-enhanced SAR image formation technique based on regularization in amplitude domain is proposed, it is proved that the results are equivalent in the complex data domain and in the amplitude domain, further the phase holding property is explained, and the efficiency of the algorithm is improved. Secondly, an easily realized technique to determine parameter is described, which can effectively suppress the noise and protect the object. Finally, the experimental results of the simulation and MSTAR (Moving and Stationary Target Acquisition and Recognition) images show that the algorithm is effective.

Key words: SAR image; Feature-enhanced; Amplitude domain; Regularization

0 引言

超分辨的成像方法一直是雷达成像技术追求的

目标^[1]。2001年, M.Cetin 工作组从合成孔径雷达(SAR)成像的频域模型出发,借鉴正则化方法的思想,利用共轭梯度算法求解,从复数域进行 SAR 图像特征增

收稿日期:2004-07-20; 修订日期:2004-08-09

* 基金项目:全国优秀博士论文作者专项基金资助项目(200140);国家自然科学基金资助项目(60272013)

作者简介:周宏潮(1976-),女,江苏徐州人,博士生,主要从事图像增强处理、SAR 图像处理的研究。

强^[2]。参考文献[3]基于图像幅度的对数变换对其进行改进,取得了较好的效果。参考文献[4]通过对 SAR 成像特点的分析,提出了一种在图像域进行正则化特征增强的成像方法,有效提高了计算效率,但该方法均是在复数域上进行的。

基于 SAR 图像幅度的先验信息,研究 SAR 图像增强的正则化方法。在 M.Cetin 工作组和参考文献[4]研究工作的基础上,从理论上证明 SAR 图像复数域上正则化方法和幅度域上正则化方法的等价性,并给出了正则化参数的一种合理选取方法。此方法进一步提高了计算效率,解释了正则化方法的相位保持特性。

1 复数域正则化方法

假设雷达在飞行中向地面发射线性调频脉冲信号(LFM),对回波数据进行初步处理(混频等)后,SAR 频域成像模型为^[2,5]:

$$f = Tg + \zeta \quad (1)$$

式中 T 为复值的 SAR 成像投影算子; f 为频域复回波数据(相位历史数据); g 是场景散射系数; ζ 表示噪声。该模型描述了场景后向散射系数与回波数据的直接关系。根据公式(1)及成像算子 T 的可逆性可得:

$$T^{-1}f = g + T^{-1}\zeta \quad (2)$$

式中 $T^{-1}f$ 是图像域复数据。一般假设 SAR 图像域噪声服从复高斯分布,SAR 图像域的成像模型为^[4]:

$$I = g + \varepsilon \quad (3)$$

式中 I 为图像域复数矩阵; g 为场景真实散射系数矩阵; ε 为噪声矩阵。

复数域上的正则化方法是关于

$$J(g) = \|I - g\|_{2+\lambda_1}^2 \|g\|_{k_1+\lambda_2}^{k_1} \|D|g|\|_{k_2}^{k_2} \quad (4)$$

的最优化问题,式中 $\|\cdot\|_{k_1}$ 和 $\|\cdot\|_{k_2}$ 分别表示 l_{k_1} 和 l_{k_2} 范数; λ_1 和 λ_2 为对应项的权值系数。

2 幅度域正则化方法

幅度域上的正则化方法是关于

$$J(g_A) = \|I_A - g_A\|_{2+\lambda_1}^2 \|g_A\|_{k_1+\lambda_2}^{k_1} \|Dg_A\|_{k_2}^{k_2} \quad (5)$$

的最优化问题。

2.1 复数域与幅度域正则化方法的等价性

复数域上正则化方法在求解过程中,首先将 g (大小为 $M \times N$) 表示为列向量的形式 p (大小为 $MN \times 1$),并采用拟牛顿迭代算法求解公式(4):

$$H(\hat{p}^{(n)})\hat{p}^{(n+1)} = (1-\gamma)H(\hat{p}^{(n)})\hat{p}^{(n)} + \gamma 2p \quad (6)$$

式中 $H(p) = 2E + k_1 \lambda_1^2 \Lambda_1(p) + k_2 \lambda_2^2 \Phi^H(p) D^T \Lambda_2(p) D \Phi(p)$; E 为恒等矩阵; γ 为步长。

$$\begin{aligned} \Lambda_1(p) &= \text{diag} \left\{ \frac{1}{(|(p)_i|^2 + \varepsilon)^{1-\frac{k_1}{2}}} \right\} \\ \Lambda_2(p) &= \text{diag} \left\{ \frac{1}{(|(D|p|)_i|^2 + \varepsilon)^{1-\frac{k_2}{2}}} \right\} \\ \Phi(p) &= \text{diag} \{ \exp(-j\phi[(p)_i]) \} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $(p)_i$ 为向量 p 的第 i 个元素; $\phi[(p)_i]$ 为复数 $(p)_i$ 的相位; D 为二维微分算子(梯度)的离散近似矩阵; $(\cdot)^T$ 为矩阵的转置矩阵; $(\cdot)^H$ 为矩阵的厄密共轭; $\text{diag}\{\cdot\}$ 是一个对角矩阵,其对角线上第 i 个元素由括号中的表达式给出。

第 $n+1$ 次迭代时,公式(6)未知数为 $\hat{p}^{(n+1)}$,求解 $\hat{p}^{(n+1)}$ 相当于求解线性方程组(6):

$$H(\hat{p}^{(n)})\hat{p}^{(n+1)} = v$$

式中 $v = (1-\gamma)H(\hat{p}^{(n)})\hat{p}^{(n)} + \gamma 2p$,迭代初值为 I ,对应的列向量形式 p^0 。

对于幅度域上正则化方法来说,公式(6)中 $H(p)$ 变为:

$$H(p) = 2E + k_1 \lambda_1^2 \Lambda_1(p_A) + k_2 \lambda_2^2 D^T \Lambda_2(p_A) D \stackrel{\Delta}{=} H_A(p_A)$$

未知数为 $\hat{p}_A^{(n+1)}$,求解 $\hat{p}_A^{(n+1)}$ 相当于求解线性方程组:

$$H_A(\hat{p}_A^{(n)})\hat{p}_A^{(n+1)} = v_A \quad (8)$$

式中 $v_A = (1-\gamma)H(\hat{p}_A^{(n)})\hat{p}_A^{(n)} + \gamma 2p_A$,迭代初值为 I_A 对

应的列向量形式 p_A^0 。

注意到 $\Phi^H(p)\Phi(p)=E$, 当 $n=1$ 时, 由公式(6)得:

$$H(p^0)=2\Phi^H(p^0)\Phi(p^0)+k_1\lambda_1^2\Phi^H(p^0)\Lambda_1(p^0)\Phi(p^0)+k_2\lambda_2^2\Phi^H(p^0)D^T\Lambda_2(p^0)D\Phi(p^0)=\Phi^H(p^0)\times(2E+k_1\lambda_1^2\Lambda_1(p^0)+k_2\lambda_2^2D^T\Lambda_2(p^0)D)\Phi(p^0)=\Phi^H(p^0)H_A(p_A^0)\Phi(p^0)$$

$$v=(1-\gamma)H(\hat{p}^{(n)})\hat{p}^{(n)}+\gamma 2p=\Phi^H(p^0)((1-\gamma)\times H_A(p_A^0)\Phi(p^0)p^0+2\gamma\Phi(p^0)p^0)$$

注意到 $\Phi(p^0)p^0=p_A^0$, 则此时公式(6)等价于:

$$H_A(p_A^0)\Phi(p^0)\hat{p}^{(1)}=(1-\gamma)H_A(p_A^0)p_A^0+2\gamma p_A^0 \quad (9)$$

对于公式(8), 当 $n=1$, 有:

$$H_A(p_A^0)\hat{p}_A^{(1)}=(1-\gamma)H_A(p_A^0)p_A^0+2\gamma p_A^0 \quad (10)$$

由公式(9)和(10),

$$\begin{aligned} \Phi(p^0)\hat{p}^{(1)} &= \hat{p}_A^{(1)} \\ \hat{p}^{(1)} &= \Phi^H(p^0)\hat{p}_A^{(1)} \end{aligned} \quad (11)$$

根据公式(11), 依此类推, 第 n 次迭代后,

$$\hat{p}^{(n)}=\Phi^H(p^0)\hat{p}_A^{(n)} \quad (12)$$

公式(12)说明:复数域上的正则化方法的迭代值等于幅度域上正则化方法的迭代值与原信号相位的乘积。因此得出结论:对正则化方法而言,基于 SAR 图像域的成像模型公式(3)和公式(4)的约束条件,利用复数矩阵进行处理与利用对应的幅度矩阵进行处理效果是等价的。公式(12)进一步说明正则化方法可以保留图像的相位信息。

2.2 正则化参数的选取

正则化参数 $k_1, k_2, \lambda_1, \lambda_2$ 的选取对计算结果有着很重要的影响。目前关于参数 k_1, k_2 , 根据信号的稀疏特性, 取 $0 < k_1, k_2 < 1$; 而参数 λ_1, λ_2 一般根据处理结果的主观质量的好坏进行选取^[2,4]。从抑制噪声, 保护目标这一目的出发, 给出参数的一种简单取法。

首先记参数 $k_i \lambda_i^2$ 为 ω_i , 则:

$$H(p)=2E+\omega_1\Lambda_1(p)+\omega_2\Phi^H(p)D^T\Lambda_2(p)D\Phi(p)$$

注意到此时参数 k_1, k_2 与 ω_1, ω_2 独立影响 $H(p)$ 。

参数 k_1, k_2 在计算过程中的作用体现在公式(7)的 $\Lambda_1(p)$ 和 $\Lambda_2(p)$ 中, 其作用是对信号加以惩罚, 当 k_1, k_2 越小, 相应数值较大的点处(对于 $\Lambda_1(p)$ 而言是幅度值大的点, 对于 $\Lambda_2(p)$ 而言是梯度大的点)的惩罚越小, 因此有助于保护和增强场景中的强散射点, 同时抑制噪声, 据此取参数 $k_1, k_2=0$ 。

下面分析参数 ω_1, ω_2 对处理结果的影响。对于正则化点增强的情形, 参数 $\omega_2=0$, 此时

$$H(p)=2E+\omega_1\Lambda_1(p)$$

根据公式(10),

$$\hat{p}_A^{(1)}=\text{diag}(d_i)((1-\gamma)H_A(p_A^0)p_A^0+2\gamma p_A^0)$$

$$\text{式中 } d_i = \frac{1}{2 + \frac{\omega_1}{|p_i|^2 + \varepsilon}}$$

ω_1 取值较大或较小时, 噪声和目标的区别均较小, 且目标区域之间的差别也较小。为了保护弱目标和抑制噪声, 需要选取合理的参数。

记 $m_1 = \max_i(|p_i|)$; $m_2 = \text{mean}(|p|)$; $q_i = 2 + \frac{\omega_1}{|m_i|^2 + \varepsilon}$, $i=1, 2$, 满足 $q_1=lq_2$ 的 ω_1 即为所求。对于

ω_2, m_1 和 m_2 变为针对 $D|p|$ 即可。

若直接对参数 λ_1, λ_2 进行选取, 由于其变化范围较大, 而且依赖于参数 k_1, k_2 的选取, 寻找最优参数需要花费的时间较长, 通过将其转化为参数 ω_1, ω_2 , 可以方便地给出 ω_1, ω_2 的参考值。

3 计算结果

下面通过正则化点增强试验来说明 SAR 图像幅度域正则化增强方法的效果, 取 $l=0.125$ 。

模拟生成三个点目标的频域回波数据加入复高斯白噪声, 信噪比为 -6 dB(见图 1), 然后利用幅度域正则化点增强方法对含噪图像进行处理($\omega_1=0.08$)。结果表明:该方法能很好地保护目标, 抑制噪声。

国外公共数据库 MSTAR 是公开评价 SAR 算法性能的标准数据^[6,7]。图 2 为采用 MSTAR 数据进行试

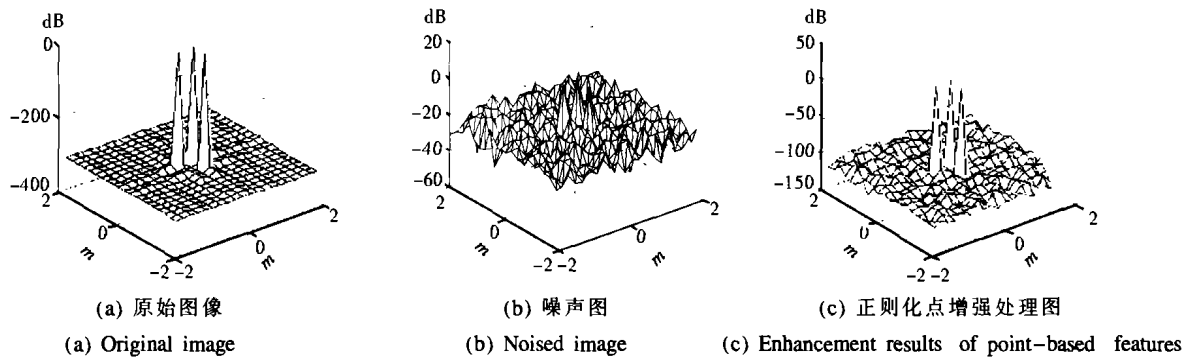


图 1 仿真点目标的正则化增强处理结果

Fig.2 Enhancemet resuts of simulation point target

验的结果, (a)为原始图像, (b)为对应的幅度域正则化点增强结果, 对应的 ω_1 分别为 0.09, 0.08, 0.08。结果表明: 仅利用幅度域数据同样可有效增强 SAR 图像, 且第 2.2 节给出的正则化参数选取方法是有效的。

目标杂波比 (TCR) 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。表 1 为图 2 对应三幅 MSTAR 图像对应的目标杂波比。从目标杂波比来看, 幅度域正则化点增强方法确实可以很好地保护目标, 抑制噪声。

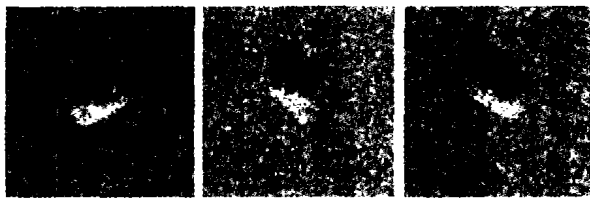
表 1 目标杂波比

Tab.1 Target clutter ratio dB

| Original image | Enhancement of point-based features |
|----------------|-------------------------------------|
| 30.88 | 107.47 |
| 25.29 | 101.04 |
| 26.33 | 102.25 |

参考文献:

- [1] 董臻, 朱国富, 梁甸农. 基于外推的 SAR 图像分辨率增强算法 [J]. 电子学报, 2002, 30(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: 623-631.
- [3] 王岩, 梁甸农, 郭汉伟. 基于改进正则化方法的 SAR 图像增强技术 [J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1307-1309.
- [4] 赵侠, 朱炬波, 王正明, 等. 图像域正则化特征增强 SAR 成像方法 [A]. 2003 年中国合成孔径雷达会议文集 [C]. 2003. 409-413.
- [5] Frank M Candocia, Jose C Principe. A method using models to superresolve SAR imagery [A]. Proceedings of SPIE: Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery V [C]. 1998, 3370. 197-207.
- [6] Mossing J C, Ross T D. Evaluation of SAR ATR algorithm performance sensitivity to MSTAR extended operating conditions [A]. Proceedings of SPIE: Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery V [C]. 1998, 3370. 554-565.
- [7] Ross T D, Worrel S W, Velten V J, et al. Standard SAR ATR evaluation experiments using the MSTAR public release data set [A]. Proceedings of SPIE: Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery V [C]. 1998, 3370. 566-575.



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) 正则化点增强效果
(b) Enhancemet results of point-based features

图 2 幅度域 MSTAR 正则化点增强效果

Fig.2 Enhancement of point-based features for MSTAR data in amplitude domain

由于本文方法直接在 SAR 图像的幅度域上进行处理, 有效地减少了计算量和存储量。给出的正则化参数选取方法简单、易操作, 还可应用于医学 CT 图像增强、目标识别等领域。