

文章编号: 1001 - 9014(2008)01 - 0077 - 04

# SAR 图像提高分辨率的主要方法间的联系

谢美华<sup>1</sup>, 邓立新<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 理学院数学与系统科学系, 湖南 长沙 410073;

2 昆明陆军学院文化教研室, 云南 昆明 650207)

**摘要:** SAR 图像提高分辨率的几种典型方法有谱估计、正则化、基追踪及偏微分方程方法. 讨论这几种方法之间的联系, 为其综合应用提供参考. 首先, 揭示不同方法在先验信息利用、建模及参数估计等方面的异同. 其次, 给出不同方法使用的边界条件和工程应用过程中的优选方法. 最后, 给出了几种综合模型的构造思路, 计算结果验证了综合方法的优势.

**关键词:** SAR; 超分辨率; 关系; 综合应用

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A

## RELATIONSHIP OF TYPICAL METHODS FOR IMPROVING RESOLUTION OF SAR IMAGE

XIE Mei-Hua<sup>1</sup>, DENG Li-Xin<sup>2</sup>

(1. Department of Math, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Culture Staffroom, Land Army College of Kunming, Kunming 650207, China)

**Abstract:** There are several typical methods for SAR image superresolution, such as spectrum estimation, regularization, basis pursuit and partial differential equation methods. The relationship of these methods was discussed to provide reference for their synthetic application. First, the sameness and difference of different methods in prior utilizing, problem modeling, and parameters estimating were discussed. Second, the application bound of each method and the selection of methods in engineering application was given. Last, several thoughts for synthetic model were given. The simulation results confirm the merit of synthetic method.

**Key words:** SAR; superresolution; relationship; synthetic application

## 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. 除加窗傅里叶变换和带宽外推等传统超分辨成像算法外, SAR 图像提高分辨率的方法主要有现代谱估计、正则化、偏微分方程以及基追踪等<sup>[1]</sup>. 这些典型方法从形式上看差别很大, 适应的场合也不相同, 但是相互之间却存在很深的联系. 将这些方法融会贯通后, 就可综合其优点, 构造更合理的提高分辨率模型. 本文将讨论这些典型的 SAR 图像超分辨方法之间的区别与联系, 并给出综合优选方法.

### 1 各方法与稀疏先验的联系

考虑如下观测模型

$$g = Tf + n, \quad (1)$$

其中  $T$  为已知的降质算子,  $g$  为观测图像,  $f$  为待求的高分辨率图像,  $n$  表示噪声.

由于算子  $T$  的病态性, 利用常规的广义最小二乘求解方程 (1) 时遇到了困难, 必须引入新的先验约束来限定解的范围<sup>[2]</sup>. 谱估计、基追踪、正则化以及偏微分方程方法, 分别针对不同的数据形式开发了多种先验信息来改善问题的病态性. 主要可利用的先验信息包括:

(i) SAR 图像相位历史域的目标先验

由于 SAR 图像主要敏感人造目标, 因此它所含的散射中心个数有限, 可通过特定的散射模型来描

收稿日期: 2007 - 03 - 21, 修回日期: 2007 - 12 - 18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60572136)

作者简介: 谢美华 (1976-), 女, 湖南宁乡人, 讲师, 博士, 主要研究方向: SAR 图像超分辨处理.

Received date: 2007 - 03 - 21, revised date: 2007 - 12 - 18

述<sup>[3]</sup>,满足相位历史域目标稀疏先验.在合理估计出这些目标点的参数后,就可确定目标的位置和散射强度,实现从背景中分离目标的目的,谱估计和基追踪利用此先验信息来实现超分辨.

### (ii) 幅度分布的稀疏先验

SAR图像的幅度通常服从广义高斯分布,呈现尖峰和胖尾特性,其分布函数为

$$P(g) = \exp\{- (b/|g - \bar{g}|)^r\} \quad (2)$$

其中 $\bar{g}$ 为幅度均值, $r$ 为形状参数,一般小于2, $a$ 、 $b$ 为常数,由稀疏分布的定义<sup>[4]</sup>,该分布为稀疏分布.

幅度分布的稀疏先验说明,个数有限的目标的幅度值明显大于背景的幅度值,将图像的能量投影到这些有限的目标点后,可有效地抑制背景杂波,提高分辨率.正则化利用的是此先验信息<sup>[2]</sup>.

### (iii) 梯度分布的稀疏先验

与幅度分布一样,SAR图像的梯度通常也服从广义高斯分布,其分布函数为

$$P(u) = \exp\{- (b/|u - \bar{u}|)^r\} \quad (3)$$

其中 $\bar{u}$ 为梯度均值, $r$ 为形状参数,一般小于2, $a$ 、 $b$ 为常数.显然梯度分布也为稀疏分布.偏微分方程方法利用的就是这种先验<sup>[5,6]</sup>.

## 2 各方法间的异同点

### 2.1 各方法间的相同点

#### (i) 提高分辨率的实质相同

各方法提高分辨率的实质均是利用稀疏先验进行超分辨建模.

#### (ii) 提高分辨率处理的流程相同

各方法的处理流程均为:

首先,开发相应数据域的先验信息;

其次,利用先验信息建立超分辨模型;

再次,对模型中的参数进行估计;

最后,根据参数估计结果,重构高分辨图像.

### 2.2 各方法间的差别

#### (i) 开发先验信息的域不同

SAR图像通常包括相位历史域、图像域等多种数据形式,数据形式不同,采用的处理方法也不同.

谱估计方法在相位历史域进行处理.

基追踪方法在相位历史域和图像域均可以处理<sup>[7,8]</sup>.但是,在相位历史域的处理效果更好<sup>[1]</sup>.

正则化方法在相位历史域和图像域均可处理,但在图像域处理效果更好<sup>[1]</sup>.

偏微分方程在图像域进行处理<sup>[5]</sup>.

#### (ii) 建立的模型不同

谱估计方法将观测到的相位历史域数据排成列向量 $Y$ ,将所有待估参数排成列向量 $\phi$ ,得到如下非线性参数估计模型<sup>[1]</sup>

$$Y = f(\phi) + \epsilon \quad (4)$$

基追踪方法所求解的模型为:

$$\min \frac{1}{2} \|Y - \phi\|_2^2 + \lambda \|\phi\|_1 \quad (5)$$

其中 $Y$ 为观测到的相位历史域数据向量, $\phi$ 为待估计的参数向量, $\phi$ 为设计出来的字典所构成的矩阵, $\lambda$ 为正则参数<sup>[7]</sup>, $\epsilon$ 表示范数.

正则化方法为最小化下述目标函数<sup>[1]</sup>

$$J(f) = \|g - Tf\|_2^2 + \frac{\lambda}{2} \|f\|_k^k + \frac{\lambda}{2} \mathbf{D} \|f\|_k^k \quad (6)$$

其中 $\mathbf{D}$ 为二维微分算子的离散近似, $f$ 、 $T$ 、 $g$ 的含义与式(1)同, $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 为正则化参数.

偏微分方程方法为最小化下述目标函数

$$J(f) = \|g - Tf\|_2^2 + \lambda \|\nabla f\|_2^2 \quad (7)$$

其中各符号含义同式(6), $\Omega$ 为图像的支撑区域.

$\|\nabla f\|_2$ 的构造见文[5].

#### (iii) 参数估计方法不同

谱估计方法采用Relax算法、非线性回归分析法、极大似然估计法等进行参数估计.

基追踪方法通过对非线性方程求导,得到一种解方程的线性方程形式,并采用共轭梯度法等对参数进行估计.

正则化方法采用拟牛顿迭代法等进行求解.在点增强模型中,可化成列向量的形式快速求解.但在区域增强中,不能化成列向量形式处理,此时处理速度很慢<sup>[1]</sup>.

偏微分方程方法采用Euler方程将变分问题转化成椭圆方程,并用最速下降法求解,大大地降低了区域增强中所需的运算量.

## 3 各方法的边界条件与优选方法

模型的不同决定了各方法的应用范围不同,下面分析各方法的边界条件,根据边界条件给出工程应用中的优选方法.

### 3.1 谱估计方法

参数化的现代谱估计方法的主要限制是其对信号模型的依赖性很大,当信号模型存在误差时,算法的稳健性就将大受影响.对理想点散射模型,现代谱估计方法效果很好.但是,对分布式散射模型的处理

很差. 因此, 其边界条件之一是待处理的图像中主要包含点散射目标. 另外它所估计的参数个数与散射点数目直接相关, 因此图像中的散射点不宜过多.

### 3.2 正则化方法

正则化方法将给定的能量投影到反映目标后向散射场的少数散射中心上, 从而实现提高分辨率. 因此, 对于目标密集、分布面广且目标强度较小的图像而言, 正则化方法的效果将会受到限制.

此外, 正则化方法主要用于提高点目标分辨率, 对背景特征而言处理效果差, 常常会降低边缘等处的分辨率, 甚至使整个背景呈现出“全黑”的现象, 而丢失边缘.

### 3.3 基追踪方法

基追踪方法主要利用相位历史域目标散射模型先验和场景散射幅度稀疏先验. 因此, 对于模型的依赖性较大, 同时, 所处理的图像必须满足稀疏性条件. 当图像中目标数目过多时, 即使采用紧致字典<sup>[7]</sup>, 字典的维数仍然很高, 处理速度难以承受. 另外, 由于字典维数直接与图像尺寸相关, 大尺寸图像将带来大的计算量, 因此, 处理大尺寸图像时必须研究新的快速算法.

### 3.4 偏微分方程方法

偏微分方程方法要求背景具有较好的均匀性, 这种均匀性对大部分 SAR 图像而言均是成立的, 但是对于部分图像, 如山区背景、城镇背景这些图像而言就不再成立.

### 3.5 优选方案

实际应用中方法的优选需要根据所给图像的数据形式、目标稀疏性、背景与阴影特征进行. 具体优选流程见图 1. 图中、表示有多选时的优先级别, 的优先级别最高.

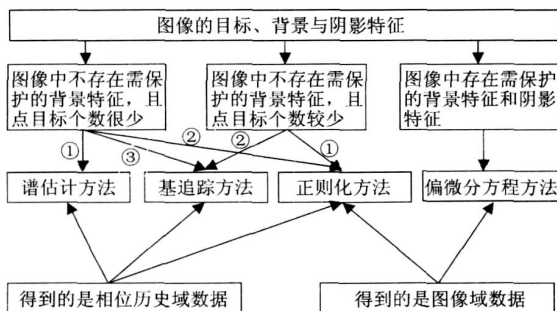


图 1 主要提高分辨率方法在工程应用中的优选方法  
Fig 1 The selection of typical superresolution methods in engineering application

## 4 各方法的综合运用及应用实例

上述分析表明, 现有典型 SAR 图像超分辨方法在先验信息的利用上各有特点, 也各有不足, 因此, 可在先验信息的利用上相互借鉴, 得到更全面的、应用效果更好的模型. 例如, 将正则化方法的幅度先验借鉴到偏微分方程模型中, 就可得到如下综合考虑点增强与区域增强的正则化变分模型

$$J(f) = (g - Tf)^2 d + \lambda_1 |f|_k^k + \lambda_2 (|\nabla f|)^2 d, \quad (8)$$

其中约束  $|f|_k^k$  取自正则化模型 (6), 约束  $(|\nabla f|)^2 d$  则取自偏微分方程模型 (7).

模型 (8) 中约束  $|f|_k^k$  看成是一个函数  $f$  的  $k$  范数, 即  $|f|_k^k = \int |f|^k d$ , 于是模型 (8) 转化为

$$J(f) = (g - Tf)^2 d + \lambda_1 \int |f|^k d + \lambda_2 (|\nabla f|)^2 d. \quad (9)$$

模型 (9) 可采用与偏微分方程模型完全相似的方式求解, 从而解决正则化区域增强模型的求解速度问题<sup>[5]</sup>.

同样, 谱估计方法与基追踪方法也可综合, 即通过利用谱估计方法初步确定基追踪方法的字典, 得到基于紧致字典的基追踪方法, 可大大减少基追踪模型的待估参数, 提高基追踪方法的计算效率<sup>[7]</sup>.

图 2 为某实测 MSTAR 图像利用偏微分方程、正则化和二者的综合方法处理后的结果图. 表 1 为利用综合方法处理后分辨率的提高程度. 图表结果表明, 单独使用正则化和偏微分方程方法的处理结果分辨率显然没有得到很大改善, 而综合方法处理后的图像方位向分辨率平均提高了 77%, 距离向分辨率平均提高了 90%.

表 1 提高分辨率前后的分辨率值

Table 1 The resolution of original image and superresolved image

image		1	2	3	平均
方位向分辨率	点目标位置	1	2	3	平均
	初始	3.17	3.46	2.31	2.98
	处理后	1.44	2.02	1.59	1.68
提高程度	120.00%	71.10%	45.10%	76.90%	
距离向分辨率	初始	3.63	4.32	3.35	3.77
	处理后	1.58	2.77	1.60	1.98
	提高程度	129.90%	55.90%	109.30%	89.90%

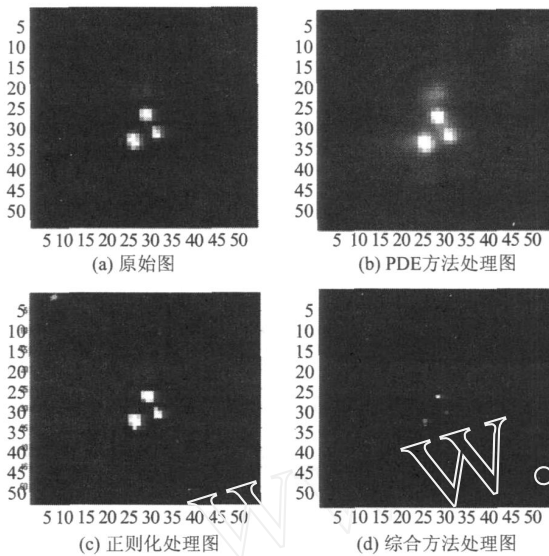


图 2 实测 MSTAR 图像超分辨结果 (a)原始图 (b) PDE 方法处理图 (c)正则化处理图 (d)综合方法处理图

Fig 2 The superresolution results forMSTAR image (a) original image; (b) superresolved by PDE; (c) superresolved by regularization; (d) superresolved by synthetic method

致谢 感谢国防科技大学数学系图像处理课题组老师和同学在本文研究过程中所给予的帮助。

## REFERENCES

- [1] Wang Zhengming, Zhu Jubo. *The Technique for SAR Image Superresolution* [M]. Beijing: Science press (王正明, 朱炬波). SAR 图像提高分辨率技术. 北京: 科学出版社, 2006
- [2] Karl W C. Regularization in image restoration and reconstruction [C]. In A. Bovik, editor, *Handbook of Image and Video Processing Academic Press*, 2000, 141-160.
- [3] Akyildiz Y, Moses R L. A scattering center model for SAR imagery [C]. *SPIE*, 1999, **3869**, 76-85.
- [4] Zhou Hongchao, Wang Zhengning. Unified frame based on sparse prior for optical and SAR image resolution enhancement [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics* (周宏潮, 王正明. 基于稀疏先验的光学及 SAR 图像的分辨率增强的统一框架. *量子电子学报*), 2006, **23**(2): 135-140.
- [5] XIE Mei-Hua, WANG Zheng-Ming. SAR image enhancement based on regularization variation model [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (谢美华, 王正明. 基于正则化变分模型的 SAR 图像增强方法. *红外与毫米波学报*), 2005, **35**(6): 467-471.
- [6] ZHAO Xia, WANG Zheng-Ming. A adaptive regularization variation method for SAR image feature-enhancement and speckle-removal [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵侠, 王正明. SAR 图像相干斑抑制和特征增强的自适应正则化变分方法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 112-116.
- [7] WANG Xiong-Liang, RAN Cheng-Qi, WANG Zheng-Ming. Superresolution Processing of SAR Images by Basis Pursuit Method Based on Compacted Dictionary [J]. *Acta Electronic Sinica* (汪雄良, 冉承其, 王正明. 基于紧致字典的基追踪方法在 SAR 图像超分辨中的应用. *电子学报*), 2006, **34**(6): 996-1001.
- [8] WANG Xiong-Liang, WANG Zheng-Ming. Super-resolution processing of SAR images by basis pursuit method based on fourier atom [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (汪雄良, 王正明. 基于 Fourier 原子的基追踪方法在 SAR 超分辨成像中的应用. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(3): 196-200.
- [9] Li Jun, Yang Xin, Shi Pengfei. A fast level set approach to image segmentation based on Mumford-Shah model [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, **25**(11): 1175-1183.
- [7] Hall L O, Kandel A. Studies in possibilistic recognition [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1985, **17**(2): 167-179.
- [8] Caselles V, Kimmel R, Sapiro G. Geodesic active contours [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **22**(1): 61-79.
- [9] Li Jun, Yang Xin, Shi Pengfei. A fast level set approach to image segmentation based on Mumford-Shah model [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, **25**(11): 1175-1183.

(上接 76页)

Fast recursive algorithm for infrared ship image segmentation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 赵广州, 王飞, 等. 一种快速递归红外舰船图像分割新算法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 295-300.

- [6] LI Qing-Li, XUE Yong-Qi, WANG Jian-Yu, et al. Automated tongue segmentation algorithm based hyperspectral image [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李庆利, 薛永祺, 王建宇, 等. 基于超光谱图像的舌体分割算法. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 77-80.

- [7] Hall L O, Kandel A. Studies in possibilistic recognition [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1985, **17**(2): 167-179.
- [8] Caselles V, Kimmel R, Sapiro G. Geodesic active contours [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1997, **22**(1): 61-79.
- [9] Li Jun, Yang Xin, Shi Pengfei. A fast level set approach to image segmentation based on Mumford-Shah model [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, **25**(11): 1175-1183.