

基于复图像的稀疏SAR成像方法在高分三号数据上的验证

毕 辉*^① 张冰尘^② 洪 文^② 吴一戎^②

^①(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 211106)

^②(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘 要: 基于稀疏信号处理的合成孔径雷达(SAR)成像(稀疏SAR成像)是稀疏微波成像的一个重要研究方向,相较于经典SAR,稀疏SAR成像在提升成像性能等方面具有重要优势。然而,受困于较大计算代价,其难以用于大观测场景的稀疏恢复,这极大限制了其应用范围。此外,无论军用还是民用,各国星载SAR系统的技术性能指标均是保密的,因此相较于原始回波,通常的公开数据都是经匹配滤波算法重构的SAR复图像。因而如何基于复图像数据进行稀疏成像,对提升现有SAR图像质量、降低稀疏成像计算代价具有重要意义。高分三号是我国首颗1 m分辨率C波段多极化SAR卫星,它具有成像分辨率高、幅宽大等优势,对提升我国灾害监测、海洋监视等能力具有重要作用。该文将一种基于复图像数据的稀疏SAR成像技术引入到高分三号SAR复图像的性能提升当中。实验结果表明,经稀疏处理后的图像拥有更低的旁瓣、更高的信杂噪比以及更优的目标可分辨率能力。且类似于匹配滤波算法重建图像,稀疏恢复结果也可以很好地保持图像统计分布及相位信息,使得稀疏重构的高分三号SAR图像仍适用于干涉、恒虚警率检测等应用。

关键词: 合成孔径雷达; 稀疏成像; 高分三号; 正则化

中图分类号: TN957.5

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2020)01-0123-08

DOI: 10.12000/JR19092

引用格式: 毕辉, 张冰尘, 洪文, 等. 基于复图像的稀疏SAR成像方法在高分三号数据上的验证[J]. 雷达学报, 2020, 9(1): 123-130. doi: 10.12000/JR19092.

Reference format: BI Hui, ZHANG Bingchen, HONG Wen, *et al.* Verification of complex image based sparse SAR imaging method on GaoFen-3 dataset[J]. *Journal of Radars*, 2020, 9(1): 123-130. doi: 10.12000/JR19092.

Verification of Complex Image Based Sparse SAR Imaging Method on GaoFen-3 Dataset

BI Hui*^① ZHANG Bingchen^② HONG Wen^② WU Yirong^②

^①(College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

^②(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Sparse signal processing-based Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging, also known as sparse SAR imaging, is the main research direction of sparse microwave imaging theory. Compared with a conventional SAR system, sparse SAR imaging radar has significant potential to improve imaging performance. However, because it requires heavy computations, the application of sparse SAR imaging in large-scene recovery has become difficult, which restricts its further applications. Additionally, complex SAR images, rather than raw data, are usually used for data archiving due to a number of reasons such as data copyright and system confidentiality. Therefore, it is worthwhile to study how sparse imaging can be achieved using only Matched Filtering (MF) recovered complex images with less computational cost. GaoFen-3 is China's first 1-m resolution

收稿日期: 2019-10-15; 改回日期: 2020-01-12; 网络出版: 2020-01-30

*通信作者: 毕辉 bihui@nuaa.edu.cn *Corresponding Author: BI Hui, bihui@nuaa.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61901213), 江苏省自然科学基金(BK20190397), 江苏省科协青年科技人才托举工程

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61901213), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20190397), The Young Science and Technology Talent Support Project of Jiangsu Science and Technology Association

责任编辑: 张增辉 Corresponding Editor: ZHANG Zenghui

multi-polarization C-band satellite. It has a high-resolution, wide swath imaging ability and hence plays an important role in disaster monitoring and ocean surveillance applications. In this paper, we introduce a complex image-based sparse SAR imaging method to process GaoFen-3 complex image data and improve image performance. Experimental results show that the sparse imaging results have lower sidelobes, higher signal-to-clutter and noise ratio, and better target distinguishing ability compared with inputted images. Additionally, sparse imaging can effectively preserve the statistical distribution and phase information of images that makes the recovered GaoFen-3 sparse image-based applications such as interferometric synthetic aperture radar and constant false alarm ratio detection possible.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Sparse imaging; GaoFen-3; Regularization

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种通过发射和接收电磁波来对目标进行成像的主动遥感技术。相比于传统的光学成像技术,它具有全天时、全天候的工作能力^[1,2]。目前已在军事侦察、国土资源勘测、自然灾害监测等领域得到了广泛应用。稀疏SAR成像是SAR成像理论的一个重要发展^[3,4],它将稀疏信号处理技术,包含压缩感知(Compressive Sensing, CS)^[5,6],用于SAR数据处理,在观测场景稀疏且测量矩阵满足一定条件的情况下,可利用低于香农-奈奎斯特采样定理所需的回波数据^[7,8],实现对场景的高分辨率成像。相较于经典SAR系统,稀疏SAR成像在降低系统复杂度、减小数据传输与存储压力、提升成像性能等方面具有重要优势,因而在未来高分辨率、宽测绘带对地观测中具有广阔的应用前景^[3,4]。

稀疏SAR成像的开端可追溯到2001年,美国Boston大学的Cetin等人^[9]首先开展了基于正则化技术的聚束SAR成像方法的研究工作,该技术的重建结果相比于匹配滤波算法,具有更高的分辨率、更低的旁瓣,显著提升了SAR图像性能,为后续稀疏SAR成像的研究奠定了基础。2007年,Bhattacharya等人^[10]利用小波变换对观测场景进行稀疏表征后,通过正交匹配追踪算法对频域降采样数据进行了CS重建,实现了对SAR原始数据的压缩。2010年,西班牙的Alonso等人^[11]提出了一种全新的基于CS的SAR成像方法,该方法首先利用传统匹配滤波算法对原始回波数据进行距离压缩与距离徙动校正,然后在方位向上使用CS技术进行1维成像,实现了基于方位向50%随机降采样数据的场景稀疏重建。然而该方法虽有效,但其只进行了方位向上的降采样,并未考虑距离向上冗余信息的存在。2010年,美国马里兰大学的Patel等人^[12]以聚束SAR模式为例,根据发射脉冲信号形式及SAR成像几何关系构建精确的观测矩阵,直接使用CS技术对观测场景进行稀疏恢复。随后,这种基于精确观测矩阵

的稀疏成像思想在SAR成像领域得到了广泛应用,并逐步发展成为稀疏SAR成像的经典方法^[3,13,14]。然而,上述基于精确观测矩阵的稀疏SAR成像方法虽可有效提升重建图像质量、降低成像所需数据量,但其存在一个显著问题,即在2维SAR成像中,由于原始数据存在的方位距离耦合现象,该方法需根据成像几何将2维原始回波数据和观测场景分别写成1维向量形式,再基于逐点构建的观测矩阵对场景进行恢复,这一过程将带来很大的计算量和内存存储需求,在现有硬件条件下,很难实现对大观测场景的稀疏重建,严重制约了稀疏信号处理技术在SAR成像中的应用前景。为解决稀疏SAR成像方法计算代价大的问题,Yang等人^[15]提出了一种分割重建的办法。该方法首先对经过距离向脉压后的数据进行子带划分,最后将不同子带恢复结果拼接起来,获取大场景稀疏图像。虽然该方法可有效降低稀疏成像所需要的计算复杂度和内存需求,但其对每个子带内的场景均要求稀疏且拼接后的图像会有明显的幅度误差,因此并不太适用于大观测场景的快速高分辨率重建。2012年,Zhang等人^[16]提出了基于回波模拟算子的方位距离解耦稀疏SAR成像思想,该方法通过构建一个近似算子来替代精确观测矩阵,以实现SAR原始回波的解耦和,并利用正则化技术实现了任意场景的高质量稀疏恢复。该方法有效解决了基于精确观测矩阵的稀疏SAR成像方法计算代价大这一关键性问题,使得任意大场景的稀疏重建成为可能。目前该方法已被成功用于机载、星载SAR数据的处理当中,获取了多幅观测场景的高分辨稀疏图像,并被成功应用于条带^[17]、扫描^[18]、TOPS^[19]等成像模式中。然而,无论军用还是民用,各国星载SAR系统的技术性能指标均是保密的,因此采集到的SAR原始回波极大概率不会公开。那么能否基于公开的现有SAR卫星的复图像数据是实现稀疏成像、并获得与基于原始回波相同的稀疏成像结果,将是一个值得研究的问题。2016年,Bi等人^[20,21]提出了基于复图像数据的

稀疏SAR成像方法，该方法在不需了解系统任何参数的情况下，能够获得与基于原始回波数据的稀疏成像方法完全相同的成像结果，使用极小的计算代价即可实现对任意场景的快速高分辨稀疏SAR成像。

高分三号于2016年8月10日在太原卫星发射中心发射升空，是我国首颗1 m分辨率的C波段多极化SAR卫星，在我国星载SAR卫星发展史上具有里程碑意义。它包含了条带、聚束、扫描等12种成像模式，具有高分辨率、大测绘带宽等特点，在高精度测绘、灾害与环境监测、国土安全预警等领域具有重要的应用价值^[22]。

目前，高分三号SAR图像主要由经典匹配滤波算法处理获得。为进一步提升其图像质量，本文将基于复图像数据的稀疏SAR成像方法引入进来。针对已有的高分三号SAR复图像数据进行稀疏处理。所获得的成像结果相比于已有的SAR图像将拥有更低的旁瓣、更高的信杂噪比、以及更优的目标可分辨率能力。此外，在提升图像质量的同时，稀疏重构结果可以很好地保持图像统计分布及相位信息，这为后续基于高分三号稀疏SAR图像的干涉、恒虚警率检测等应用提供了技术保障。需要说明的是，由于现有SAR系统均满足采样定理要求，而非欠采样稀疏系统，其采集、处理的数据均为满采样的，因此本文将基于满采样数据聚焦后的图像进行稀疏处理。

本文的后续结构如下。第2节简要介绍了基于复图像数据的稀疏SAR成像原理，给出了实现场景稀疏重建的正则化重构模型及一种改进的阈值迭代算法实现过程，并将其用于观测场景的稀疏恢复。第3节将基于复图像数据的稀疏SAR成像方法用于高分三号SAR复图像处理中，以提升高分三号SAR图像性能，说明算法的有效性。第4节给出结论。

2 基于复图像数据的稀疏SAR成像

2.1 模型

相较于匹配滤波算法重建图像，稀疏SAR成像结果可有效降低旁瓣、噪声、杂波等，从而显著提升图像质量。因此，可将匹配滤波算法恢复的复图像数据与稀疏重建SAR图像之间的关系表示为

$$\mathbf{X}_{\text{MF}} = \mathbf{X} + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{X}_{\text{MF}} \in \mathbb{C}^{N_p \times N_q}$ 表示已知的基于匹配滤波算法重建的SAR复图像数据， $\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N_p \times N_q}$ 表示观测场景的散射分布，而 $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{N_p \times N_q}$ 表征基于匹配滤波算法重建SAR图像与场景散射分布之间的差别，这差别包含了噪声、杂波、旁瓣等拟在重建结果中抑制掉的部分。针对式(1)中的模型，可以通过求

解式(2)的 L_q ($0 < q \leq 1$)范数正则化问题实现对观测场景的稀疏恢复，即

$$\hat{\mathbf{X}} = \min_{\mathbf{X}} \left\{ \|\mathbf{X}_{\text{MF}} - \mathbf{X}\|_{\text{F}} + \lambda \|\mathbf{X}\|_q^q \right\} \quad (2)$$

其中， $\hat{\mathbf{X}}$ 表示重构的稀疏SAR图像， λ 为正则化参数， $\|\cdot\|_{\text{F}}$ 符号表征矩阵的斐波那契范数。

2.2 迭代实现

针对式(2)中的正则化模型，以 $q = 1$ 为例，介绍该最优化问题的实现算法。2016年，一种迭代软阈值算法被用于求解式(2)中的 L_1 范数正则化问题。实验结果表明，该算法可以有效抑制图像噪声、旁瓣、模糊，显著提升了SAR图像质量^[20]。然而，该方法存在一个比较明显的问题，即其稀疏成像结果在突出目标的同时，破坏了图像的统计分布及相位信息，从而使得许多SAR图像应用都无法基于稀疏成像结果而实现。2017年，复近似信息传递算法被引入式(2)的求解当中^[17]。相比于迭代软阈值算法，该方法不仅可以输出场景的稀疏解，还可以得到场景的非稀疏估计。不同于已有的稀疏SAR成像结果，该非稀疏估计可在突出目标的同时，很好地保持图像的统计分布，使得基于稀疏SAR成像结果的恒虚警率检测得以实现。然而，该方法仍无法准确恢复目标的相位信息，使得其恢复的图像依然无法用于干涉SAR等应用。2019年，Bi等人^[23]提出了一种改进的迭代软阈值算法，类似于复近似信息传递方法，该算法仍然可以输出场景的非稀疏解，只是该非稀疏解可很好地获得图像的相位信息。这使得该算法成为求解式(2)中最优化问题的理想技术。其具体实现过程概括如下。

输入：配滤波算法重建的SAR复图像 \mathbf{X}_{MF} 。

初始化：稀疏图像 $\mathbf{X}^{(0)} = \mathbf{0}$ ，残余图像 $\mathbf{W}^{(0)} = \mathbf{X}_{\text{MF}}$ ，迭代参数 μ ，误差参数。

在第 i ($1 \leq i \leq I_{\text{max}}$)步迭代中：

步骤 1 计算观测场景的非稀疏解

$$\tilde{\mathbf{X}}^{(i)} = \mathbf{W}^{(i-1)} + \mathbf{X}^{(i-1)} \quad (3)$$

步骤 2 更新残余图像

$$\mathbf{W}^{(i)} = \mathbf{X}_{\text{MF}} - \mathbf{X}^{(i-1)} \quad (4)$$

步骤 3 计算观测场景的稀疏解

$$\mathbf{X}^{(i)} = \text{sign}(\tilde{\mathbf{X}}^{(i)}) \cdot \max\left(|\tilde{\mathbf{X}}^{(i)}| - \mu\beta^{(i)}, 0\right) \quad (5)$$

其中，复数符号算子 $\text{sign}(a + jb)$ 为

$$\text{sign}(a + jb) = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{sgn}(a) + \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \text{sgn}(b) \quad (6)$$

其中， $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号算子， β 表征控制着算法恢复的

正则化参数。在算法实现过程中, 正则化参数的值在每步迭代中是自适应设定的, 即

$$\beta^{(i)} = \left| \tilde{\mathbf{X}}^{(i)} \right|_{K+1} / \mu \quad (7)$$

$K = \|\mathbf{X}\|_0$ 表征观测场景的稀疏度。 $\left| \tilde{\mathbf{X}}^{(i)} \right|_{K+1}$ 表征 $\left| \tilde{\mathbf{X}}^{(i)} \right|$ 按幅值降序排列后第 $K+1$ 个幅值的大小。

步骤 4 计算残差

$$\text{Resi} = \left\| \mathbf{X}^{(i)} - \mathbf{X}^{(i-1)} \right\|_F \quad (8)$$

当迭代步数 i 小于最大迭代次数 I_{\max} , 且 $\text{Resi} > \varepsilon$ 时, 令 $i = i + 1$, 继续执行迭代运算。否则, 结束循环, 输出场景的稀疏解 $\hat{\mathbf{X}}$ 与非稀疏解 $\tilde{\mathbf{X}}$ 。

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}^{(i)} \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{X}} = \tilde{\mathbf{X}}^{(i)} \quad (10)$$

3 基于高分三号SAR复图像数据的稀疏成像

为说明本文所使用的稀疏SAR成像方法的可行

性与有效性, 本节将使用匹配滤波方法重构的星载高分三号复图像数据进行实验验证。所用数据均为聚束模式下采集得到, 理论分辨率可以达到1 m。观测场景包含各种类型的区域, 例如, 城市、海岸线、海面舰船、岛屿。

3.1 噪声、杂波抑制

图1与图2为匹配滤波方法和稀疏SAR成像方法的高分三号复图像数据处理结果, 关注区域为海岸沿线(场景大小2000(方位向) \times 2000(距离向))及海面舰船目标(场景大小5000(方位向) \times 5000(距离向))。结果表明, 相比于匹配滤波算法的恢复图像, 如图1与图2所示, 无论是基于复图像数据的稀疏SAR成像方法的稀疏解还是非稀疏解, 均对旁瓣、噪声和杂波具有很好的抑制效果, 使得输出图像的信杂噪比得以提高, 显著提升了成像性能。这意味着在以舰船等稀疏目标为监视对象的SAR应用领域, 如军事监控、目标识别, 经稀疏成像方法处理后图像将会具有更大的应用潜力。此外, 由图1、图2中的

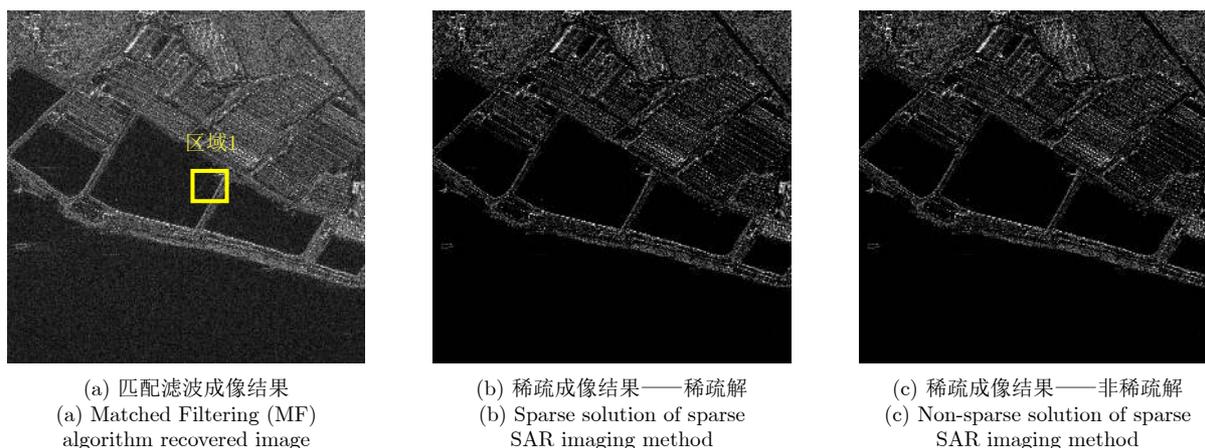


图 1 不同方法的海岸线区域重建结果

Fig. 1 The reconstructed images of coastal area by different methods

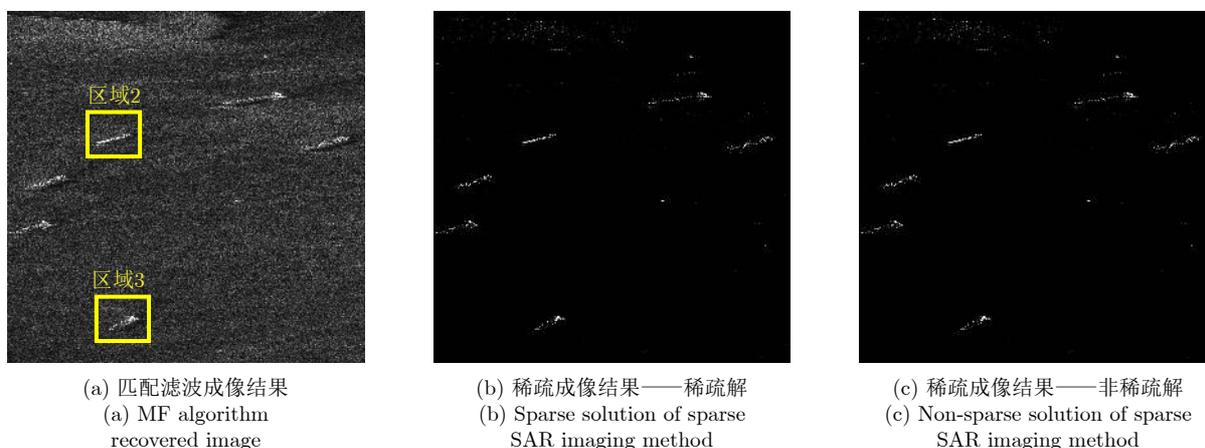


图 2 不同方法的海面舰船重建结果

Fig. 2 The reconstructed images of ships on the sea surface by different methods

结果可看出，稀疏SAR成像方法输出的稀疏解与非稀疏解的幅度图像几乎完全相同，即二者均可有效抑制噪声和杂波，突出目标区域。但其实二者是有较大区别的，非稀疏解相比于稀疏解可很好的保持图像背景区域统计特性。只是由于将背景区域幅值较匹配滤波结果压低了近80 dB^[23]，在图1(c)、图2(c)中的幅度图像中无法显示出来。而就稀疏SAR成像方法的非稀疏解这一性质，本章后续实验中将会着重讨论。

为量化说明基于复图像数据的稀疏SAR成像方法相比于经典匹配滤波技术在图像噪声及杂波抑制方面的作用，本文使用目标背景比(Target-to-Background Ratio, TBR)这一指标进行评估^[24]，定义为

$$\text{TBR}(\mathbf{X}) = 20 \lg \left(\frac{\max_{(np,nq) \in \mathbf{T}} |(\mathbf{X})|_{(np,nq)}}{(1/N_{\mathbf{B}}) \sum_{(np,nq) \in \mathbf{B}} |(\mathbf{X})|_{(np,nq)}} \right) \quad (11)$$

其中， (np, nq) 表征观测场景的像素点，且 $1 \leq np \leq N_p$ ， $1 \leq nq \leq N_q$ ， \mathbf{T} 表示被背景区域 \mathbf{B} 所环绕的目标区域， $N_{\mathbf{B}}$ 为背景区域 \mathbf{B} 中的像素点个数。TBR的值越大，说明目标越突出，噪声和杂波的抑制效果越明显。

以图1，图2中的3块区域(黄色矩形框内部分)为例，讨论稀疏SAR成像方法的噪声与杂波抑制效果。表1给出了3个区域内匹配滤波算法的重构图像与基于复图像数据的稀疏SAR成像方法稀疏解与非稀疏解的TBR值。表1中的量化结果清晰地反映出，相比于输入的匹配滤波图像，无论稀疏SAR成像方法的稀疏解还是非稀疏解均可有效抑制噪声和杂波，相应TBR值至少提升10 dB，显著提升了重建图像质量，大大降低了噪声和杂波对目标

检测与识别的影响，为后续基于重构SAR图像的应用打下了基础。

3.2 可分辨能力提升

图3中给出了基于高分三号复图像数据的城市区域成像结果。可以看出，受噪声与杂波的影响，如图3(a)中黄色框标记的区域所示，匹配滤波图像无法清晰地观测到目标，尤其是强度相对较弱的部分。而基于图3(a)中所示的匹配滤波复图像数据的稀疏SAR成像方法实现了对噪声和杂波的有效抑制，如图3(b)、图3(c)所示，准确恢复出了被噪声与杂波干扰的目标，显著提升了目标的可分辨能力。但需要说明的是，基于复图像数据的稀疏SAR成像方法无法提升图像分辨率，即所用方法只能提升目标识别和检测概率，无法实现超分辨成像。

3.3 图像统计分布保持

为说明所介绍的稀疏SAR成像方法在图像统计分布保持方面的有效性，实验中选择如图4(a)所示的海岛区域，并分别给出匹配滤波算法和基于复图像数据的稀疏SAR成像方法的重构结果，如图4所示。由图4(b)可以看出，基于复图像数据的稀疏SAR成像方法的非稀疏解可对噪声和杂波进行有效抑制，进而准确重建出所关注的目标区域。更重要的是，不同于其他稀疏SAR成像方法直接将图像的非目标区域的幅度值置零，导致图像的统计特性被破坏。

表 1 不同方法重建结果的目标背景比TBR(dB)

Tab. 1 TBR values of the recovered images by different methods (dB)

| 区域/方法 | 匹配滤波重构图像 | 稀疏解 | 非稀疏解 |
|-------|----------|---------|---------|
| 区域1 | 30.2835 | 41.8379 | 41.8346 |
| 区域2 | 34.2496 | 44.3981 | 44.3956 |
| 区域3 | 39.9948 | 50.9537 | 50.9509 |

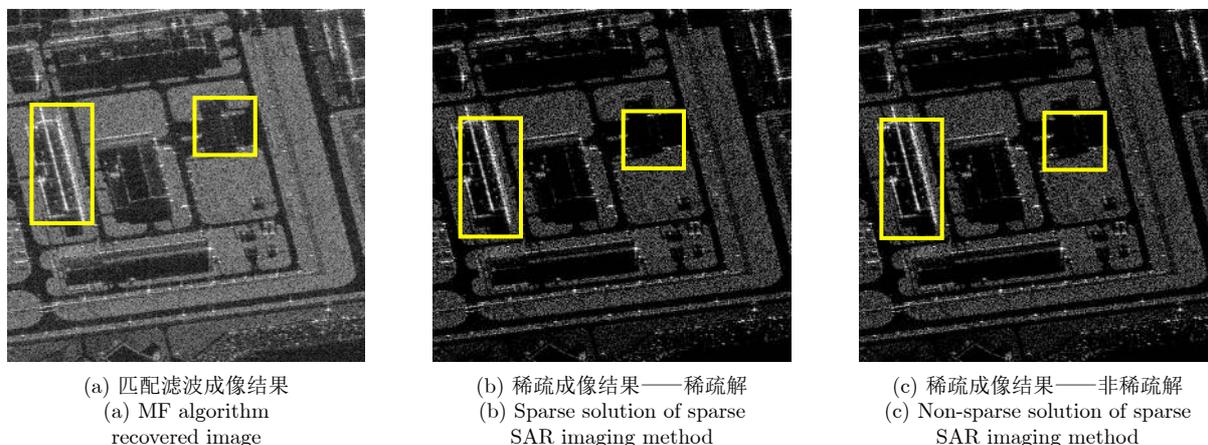


图 3 不同方法的城市区域重建结果

Fig. 3 The reconstructed images of city by different methods

图4(c)所示的稀疏方法的非稀疏解在突出目标的同时,可以很好地保持图像非目标区域的统计特性,只是将非目标区域的幅值压低了十几dB^[23]。这使得基于图像统计分布的SAR图像后处理操作得以实现,如计算目标的检测概率和虚警概率。同时由于该非稀疏解相比于匹配滤波重构结果压低了非目标

区域的幅度值,使其相比于匹配滤波重构结果在SAR图像的应用中将具有更优的性能。

3.4 相位信息保持

为介绍稀疏SAR成像方法在图像相位保持方面的有效性,图5分别给出了图4中所示目标场景的匹配滤波算法重构结果、本文中基于复图像数据的稀

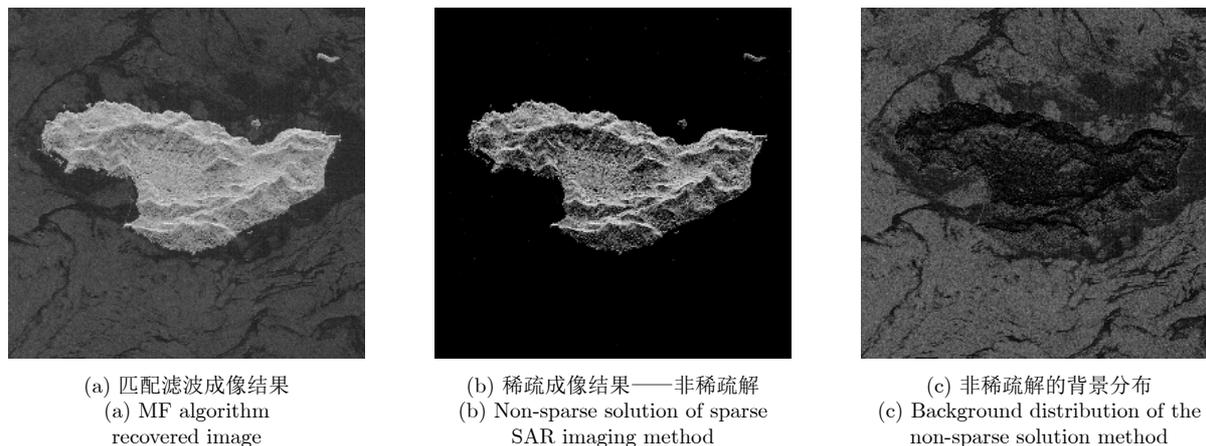


图 4 稀疏SAR成像方法重构图像背景统计分布保持

Fig. 4 Background distribution preservation of sparse SAR imaging method recovered image

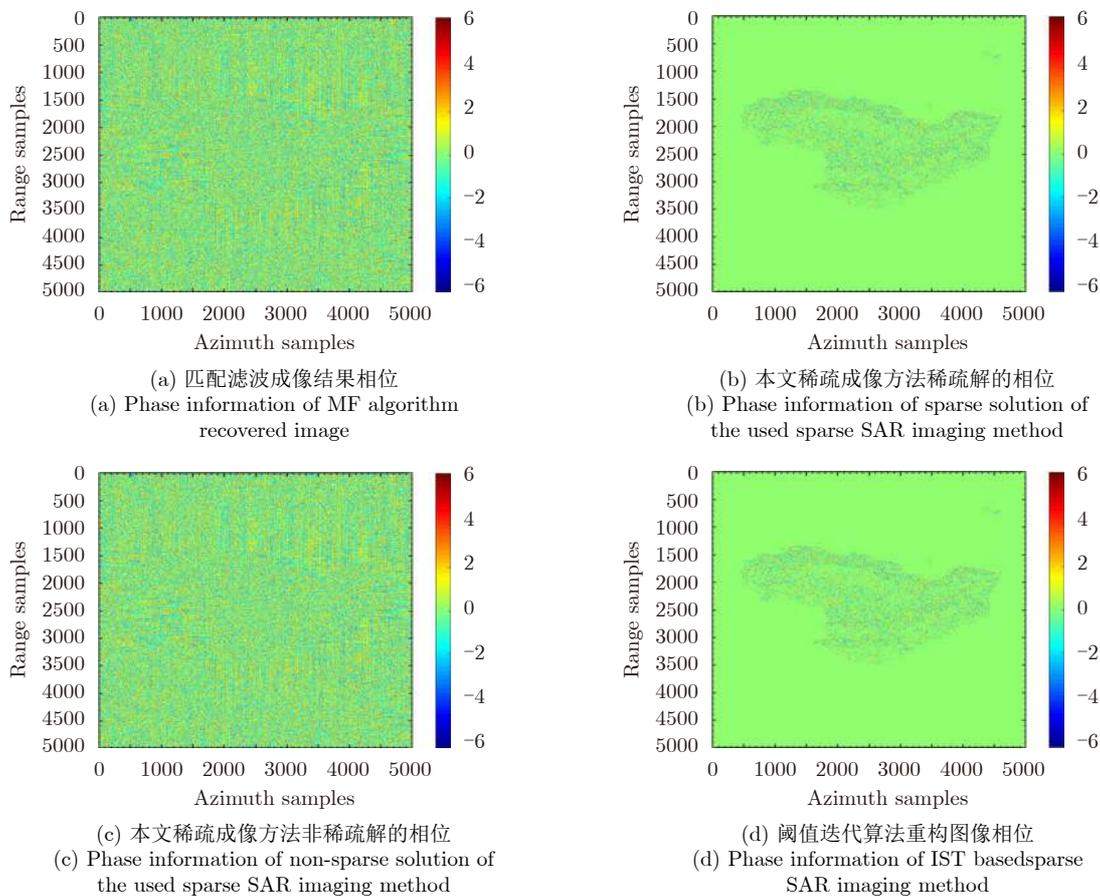


图 5 稀疏SAR成像方法重构图像相位信息保持

Fig. 5 Phase information preservation of sparse SAR imaging method recovered image

疏SAR成像方法的稀疏解及非稀疏解的相位信息。为使实验更具说服力，如图5(d)所示，本文同时给出了求解式(2)中正则化模型的经典阈值迭代算法的重构图像作为比较。可以看出，类似于经典阈值迭代算法的稀疏SAR成像结果图5(d)，所使用方法的稀疏解图5(b)完全破坏了图像相位，使得后续基于图像相位的诸多应用都无法使用该稀疏解来实现。而所使用的稀疏SAR成像方法的非稀疏解则很好地解决了相位保持的问题。如图6所示，稀疏成像非稀疏解(图5(c))与匹配滤波算法(图5(a))之间的相位差中各点值均为0。这意味着该非稀疏解准确恢复了目标场景的相位信息，其对于拓展稀疏SAR成像结果的应用范围具有重要意义。

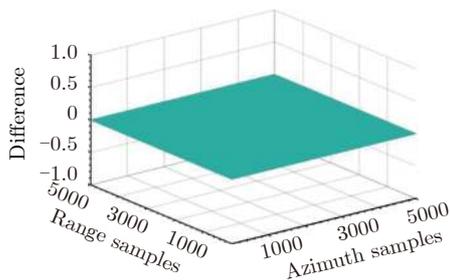


图6 匹配滤波图像与本文稀疏SAR成像方法非稀疏解之间的相位差

Fig. 6 Phase difference between the MF recovered image and the non-sparse solution of sparse SAR imaging method

4 结论

本文将基于复图像数据的稀疏SAR成像方法引入到了高分三号SAR数据处理当中。对已有的经传统匹配滤波算法恢复的高分三号SAR复图像进行稀疏处理。实验结果表明，经处理后的SAR图像质量得到了显著提升，体现在旁瓣的降低、图像信杂噪比的升高、以及目标可分辨率能力的提升方面。此外，在提升重构图像质量的同时，稀疏SAR成像结果很好地保持了图像的统计分布及相位信息，这为后续基于高分三号稀疏SAR图像的干涉、恒虚警率检测等应用提供了技术保障。

需要说明的是，本文中所介绍的基于复图像数据的稀疏成像方法不仅仅适用于SAR图像，还可以应用于包括雷达图像在内的各类微波图像的性能提升当中。

致谢 特别感谢中国科学院空天信息创新研究院仲利华博士、韩冰副研究员、仇晓兰研究员所提供的高分三号SAR复图像数据。

参考文献

- [1] CURLANDER J C and MCDONOUGH R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing[M]. New York, USA: Wiley-Interscience, 1991.
- [2] CUMMING I G and WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House, 2005.
- [3] ZHANG Bingchen, HONG Wen, and WU Yirong. Sparse microwave imaging: Principles and applications[J]. *Science China Information Sciences*, 2012, 55(7): 1722–1754.
- [4] 吴一戎, 洪文, 张冰尘, 等. 稀疏微波成像研究进展(科普类)[J]. *雷达学报*, 2014, 3(4): 383–395. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.14105.
- [5] WU Yirong, HONG Wen, ZHANG Bingchen, et al. Current developments of sparse microwave imaging[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(4): 383–395. doi: 10.3724/SP.J.1300.2014.14105.
- [6] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289–1306. doi: 10.1109/TIT.2006.871582.
- [7] CANDÈS E J, ROMBERG J K, and TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements[J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2006, 59(8): 1207–1223. doi: 10.1002/cpa.20124.
- [8] NYQUIST H. Certain topics in telegraph transmission theory[J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1928, 47(2): 617–644. doi: 10.1109/T-AIEE.1928.5055024.
- [9] SHANNON C E. Communication in the presence of noise[J]. *Proceedings of the IRE*, 1949, 37(1): 10–21.
- [10] ÇETIN M and KARL W C. Feature-enhanced synthetic aperture radar image formation based on nonquadratic regularization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(4): 623–631. doi: 10.1109/83.913596.
- [11] BHATTACHARYA S, BLUMENSATH T, MULGREW B, et al. Fast encoding of synthetic aperture radar raw data using compressed sensing[C]. The 2007 IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing, Madison, USA, 2007: 448–452.
- [12] ALONSO M T, LOPEZ-DEKKER P, and MALLORQUI J J. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(12): 4285–4295. doi: 10.1109/TGRS.2010.2051231.
- [13] PATEL V M, EASLEY G R, HEALY JR D M, et al. Compressed synthetic aperture radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(2): 244–254. doi: 10.1109/JSTSP.2009.2039181.
- [14] KELLY S I, DU C, RILLING G, et al. Advanced image formation and processing of partial synthetic aperture radar data[J]. *IET Signal Processing*, 2012, 6(5): 511–520. doi: 10.1049/iet-spr.2011.0073.
- [15] GÜVEN H E, GÜNGÖR A, and ÇETIN M. An augmented

- Lagrangian method for complex-valued compressed SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Computational Imaging*, 2016, 2(3): 235–250. doi: [10.1109/TCI.2016.2580498](https://doi.org/10.1109/TCI.2016.2580498).
- [15] YANG Jungang, THOMPSON J, HUANG Xiaotao, *et al.* Segmented reconstruction for compressed sensing SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4214–4225. doi: [10.1109/TGRS.2012.2227060](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2227060).
- [16] FANG Jian, XU Zongben, ZHANG Bingchen, *et al.* Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(1): 352–363. doi: [10.1109/JSTARS.2013.2263309](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2263309).
- [17] BI Hui, ZHANG Bingchen, ZHU Xiaoxiang, *et al.* L_1 -regularization-based SAR imaging and CFAR detection via complex approximated message passing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(6): 3426–3440. doi: [10.1109/TGRS.2017.2671519](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2671519).
- [18] BI Hui, ZHANG Bingchen, ZHU Xiaoxiang, *et al.* Azimuth-range decouple-based L_1 regularization method for wide ScanSAR imaging via extended chirp scaling[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2017, 11(1): 015007. doi: [10.1117/1.JRS.11.015007](https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.015007).
- [19] BI Hui, ZHANG Bingchen, ZHU Xiaoxiang, *et al.* Extended chirp scaling-baseband azimuth scaling-based azimuth-range decouple L_1 regularization for TOPS SAR imaging via CAMP[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3748–3763. doi: [10.1109/TGRS.2017.2679129](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2679129).
- [20] BI Hui, ZHANG Bingchen, WANG Zhengdao, *et al.* L_q regularisation-based synthetic aperture radar image feature enhancement via iterative thresholding algorithm[J]. *Electronics Letters*, 2016, 52(15): 1336–1338. doi: [10.1049/el.2016.1168](https://doi.org/10.1049/el.2016.1168).
- [21] BI Hui, BI Guoan, ZHANG Bingchen, *et al.* Complex-image-based sparse SAR imaging and its equivalence[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5006–5014. doi: [10.1109/TGRS.2018.2803802](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2803802).
- [22] 姚天宇. 长征四号丙运载火箭成功发射高分三号卫星[J]. 中国航天, 2016(8): 8.
YAO Tianyu. The ChangZheng-4C carrier rocket successfully launched the GaoFen-3 satellite[J]. *Aerospace China*, 2016(8): 8.
- [23] BI Hui and BI Guoan. A novel iterative soft thresholding algorithm for L_1 regularization based SAR image enhancement[J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(4): 49303. doi: [10.1007/s11432-018-9662-y](https://doi.org/10.1007/s11432-018-9662-y).
- [24] ÇETIN M, KARL W C, and CASTAÑÓN D A. Feature enhancement and ATR performance using nonquadratic optimization-based SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(4): 1375–1395. doi: [10.1109/TAES.2003.1261134](https://doi.org/10.1109/TAES.2003.1261134).

作者简介



毕辉(1991–), 男, 籍贯山东, 博士, 副研究员, 硕士生导师。2017年在中国科学院大学获得博士学位, 现担任南京航空航天大学副研究员。主要研究方向为稀疏微波成像、雷达信号处理、雷达成像等。



张冰尘(1973–), 男, 籍贯浙江, 博士, 研究员, 博士生导师。2017年在中国科学院大学获得博士学位, 现担任中国科学院空天信息研究院研究员。主要研究方向为微波遥感与雷达技术、稀疏信号处理等。



洪文(1968–), 女, 籍贯上海, 博士, 研究员, 博士生导师。1997年在北京航空航天大学获得博士学位, 现担任中国科学院空天信息创新研究院研究员。主要研究方向为合成孔径雷达成像与系统及其应用、极化/极化干涉合成孔径雷达数据处理及应用、3维微波成像新概念新体制新方法等。



吴一戎(1963–), 男, 籍贯安徽, 博士, 中国科学院院士, 研究员, 博士生导师。2001年在中国科学院电子学研究所获得博士学位, 现担任中国科学院空天信息创新研究院院长。主要研究方向为微波成像理论与技术、雷达信号处理与雷达系统等。