

基于拉普拉斯算子的综合孔径辐射计成像算法

杨晓城¹, 杨真乙¹, 阎敬业², 武 林², 蒋明峰¹

(1. 浙江理工大学信息学院, 浙江杭州 310018; 2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘 要: 成像反演是综合孔径辐射计的一项关键内容. 然而, 综合孔径辐射计成像反演是病态的反问题. 虽然传统的正则化方法能有效克服其病态性, 但依然存在较大的重构误差. 为了进一步降低重构误差, 提出一种基于拉普拉斯算子的综合孔径辐射计成像算法. 与传统的单参数正则化不同, 该算法通过引入拉普拉斯算子项, 对差分亮温构造拉普拉斯混合正则化, 并利用多维扩展的广义交叉验证准则选取2个正则化参数. 基于L波段的FPIR样机进行了仿真分析, 仿真结果表明: 与改进的最小范数正则化和带限正则化相比, 该算法均方根误差平均降低了30%, 峰值信噪比平均提高了3 dB, 证明了其有效性.

关键词: 被动微波遥感; 综合孔径辐射计; 正则化; 重构误差; 拉普拉斯算子

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)02-0339-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201283

Imaging Algorithm of Synthetic Aperture Interferometric Radiometers Based on Laplace Operator

YANG Xiao-cheng¹, YANG Zhen-yi¹, YAN Jing-ye², WU Lin², JIANG Ming-feng¹

(1. School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

2. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The imaging inversion is a key content of synthetic aperture interferometric radiometers (SAIRs). However, the imaging inversion in SAIRs is an ill-posed inverse problem. Although the traditional regularization methods can effectively overcome the ill-conditioned property, there is still a large reconstruction error. In order to further reduce the reconstruction error, an imaging algorithm of SAIRs based on Laplace operator is proposed. Different from traditional single-parameter regularization, the proposed algorithm constructs the Laplace hybrid regularization for differential brightness temperature by introducing a new term of Laplace operator. Moreover, two regularization parameters are selected by use of multi-dimensional extended generalized cross-validation criterion. The simulation is based on the prototype of full polarization interferometric radiometer (FPIR). The simulation results show that compared with improved minimum norm regularization and band-limited regularization, the root mean square error for the proposed algorithm has reduced by 30%, and the peak signal to noise ratio has increased by 3 dB, proving its effectiveness.

Key words: passive microwave remote sensing; synthetic aperture interferometric radiometer; regularization; reconstruction error; Laplace operator

1 引言

作为被动微波遥感领域的一项新技术, 综合孔径微波辐射计利用小口径天线干涉合成大口径天线的方法, 有效提高了对地观测的空间分辨率, 同时避免了大口径天线带来的折叠、机械扫描和重量等方面的困难. 目前, 综合孔径微波辐射计逐渐成熟, 被应用于陆

地、海洋和大气遥感以及人体安检等领域^[1,2].

成像反演是综合孔径微波辐射计的一项关键内容^[3,4]. 然而, 综合孔径辐射计成像反演在数学上是病态的反问题, 需要进行正则化处理以获得稳定的唯一解. 目前常用的正则化方法可归为2类: 第一类是采用数学的手段进行约束, 如Tikhonov正则化、最小范数正

收稿日期: 2020-11-16; 修回日期: 2021-07-30; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金(No.61672466, No.620115300130); 浙江省自然科学基金(No.LY18D060009); 浙江省自然科学基金-数理医学学会联合基金重点项目(No.LSZ19F010001); 浙江省科技厅重点研发项目(No.2020C03060)

则化、共轭梯度最小二乘 (Conjugate Gradients Least Squares, CGLS) 等^[5-7]; 第二类方法是通过综合孔径辐射计自身的物理特性进行约束, 即带限正则化法^[8]. 虽然上述正则化方法能够有效克服其病态性, 但依然存在较大的重构误差^[9].

值得注意的是, 传统的 Tikhonov 正则化和最小范数正则化方法, 将固定的约束信息添加到了所有的频带上, 这会导致重构得到的亮温解过于平滑, 从而无法保留原始亮温分布的所有特征. 因此, 借鉴双参数正则化^[10]的思想, 本文通过在正则化过程中引入一项新的拉普拉斯算子项, 提出了一种拉普拉斯混合正则化方法, 并基于研制的 L 波段 FPIR 样机进行了仿真验证.

2 综合孔径辐射计成像原理

与真实孔径辐射计不同, 综合孔径辐射计干涉测量结果是观测场景亮温分布在频率域上的可见度函数采样. 可见度函数 $V(\mathbf{u})$ 与观测场景亮温分布 $T_B(\xi)$ 之间的关系可以表示为^[11,12]

$$V(\mathbf{u}_{kl}) \propto \frac{1}{\sqrt{\Omega_k \Omega_l}} \iint_{|\xi| \leq 1} F_k(\xi) \bar{F}_l(\xi) \times \frac{T_B(\xi) - T_r}{\sqrt{1 - \|\xi\|^2}} \tilde{r}_{kl} \left(\frac{-\mathbf{u}_{kl} \xi}{f_0} \right) e^{-2j\pi \mathbf{u}_{kl} \xi} d\xi \quad (1)$$

其中, $\xi = (\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi)$ 为在笛卡尔坐标系下方向余弦矢量, \mathbf{u}_{kl} 为与天线 k 和 l 对应的基线矢量; Ω_k 和 Ω_l 分别为天线 k 和 l 的等效立体角, F_k 和 F_l 分别为天线 k 和 l 归一化电压方向图 (\bar{F}_l 表示 F_l 的复共轭); T_r 为接收机的物理温度, $\tilde{r}_{kl}(\tau)$ 为 fringe washing 函数, $\tau = -\mathbf{u}_{kl} \xi / f_0$ 为时间延迟, f_0 为中心频率.

将式(1)进行离散化, 并考虑实际测量过程中可见度函数测量误差和噪声的影响^[13-15], 可得

$$\mathbf{V}_{N \times 1} = \mathbf{G}_{N \times M} \mathbf{T}_{M \times 1} + \mathbf{n}_{N \times 1} \quad (2)$$

其中, \mathbf{G} 为系统调制矩阵, \mathbf{V} 为可见度函数向量, \mathbf{T} 为观测亮温向量, \mathbf{n} 为噪声向量. 由于亮温采样点数 M 一般大于可见度函数采样点数 N , 因此式(2)是欠定的. 同时由于 \mathbf{G} 矩阵的不适定性, 噪声 \mathbf{n} 的微小变化都会使得反问题解产生很大的扰动, 因此矩阵方程是病态的, 其解既不唯一也不稳定.

对于病态的线性方程, 通常是进行正则化处理. 正则化的作用是通过增加有关解空间的附加信息, 并利用约束泛函获得稳定可行解, 从而缓解反问题的病态性. 目前, 综合孔径辐射计中广泛使用的是最小范数正则化和带限正则化方法.

最小范数正则化是指求解式(2)的最小范数解, 即

$$\min_{\mathbf{T}} \|\mathbf{T}\|_2 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{G}\mathbf{T} = \mathbf{V} \quad (3)$$

为了求解式(3), 先对矩阵 \mathbf{G} 进行奇异值分解, 即

$$\mathbf{G} = \sum_{i=1}^N \alpha_i s_i \beta_i^T \quad (4)$$

其中, $s_i \geq 0$ 为 \mathbf{G} 矩阵按降序排列的奇异值, 向量 \mathbf{u}_i 和 \mathbf{v}_i 分别为 s_i 的左奇异向量和右奇异向量. 然后, 通过抛弃那些对误差传递影响很大的较小奇异值来缓解矩阵 \mathbf{G} 的病态性, 即采用一个秩亏缺的良态矩阵 $\mathbf{G}_k = \sum_{i=1}^k \alpha_i s_i \beta_i^T$

来代替矩阵 \mathbf{G} . 因此, 反演亮温 $\hat{\mathbf{T}}$ 为

$$\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{G}_k^+ \mathbf{V} = \sum_{i=1}^k \frac{1}{s_i} \beta_i \alpha_i^T \mathbf{V} \quad (5)$$

其中, k 为正则化参数.

对于综合孔径辐射计, 由于天线单元数量是有限的, 因此测量的可见度函数采样值被限制在有限的带宽 H 内. 带限正则化是指求解下列约束最小二乘问题:

$$\min_{\mathbf{T}} \|\mathbf{V} - \mathbf{G}\mathbf{T}\|_2^2 \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{T}' = 0 \text{ outside } H \quad (6)$$

其中, $\mathbf{T}' = \mathbf{U}\mathbf{T}$ 为 \mathbf{T} 的傅里叶变换, \mathbf{U} 是离散傅里叶变换运算符. 因此, 反演亮温为

$$\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \mathbf{J}^+ \mathbf{V} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{J}^+ = (\mathbf{J}^* \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^*$ 是矩阵 $\mathbf{J} = \mathbf{G}\mathbf{U}^* \mathbf{Z}$ 的广义逆矩阵, \mathbf{Z} 是补零运算符, $*$ 表示共轭转置.

由于综合孔径辐射计覆盖的基线范围有限, 无法获取观测目标亮温的高频分量, 因此存在固有的系统误差. 为了降低系统误差, 引入一个先验亮温分布 $\tilde{\mathbf{T}}$, 对差分可见度函数 $\Delta \mathbf{V} = \mathbf{V} - \mathbf{G}\tilde{\mathbf{T}}$ 进行反演成像, 即求解最小二乘问题:

$$\min_{\Delta \mathbf{T}} \|\Delta \mathbf{V} - \mathbf{G}\Delta \mathbf{T}\|_2^2 \quad (8)$$

其中, $\Delta \mathbf{T} = \mathbf{T} - \tilde{\mathbf{T}}$. 为了获得先验亮温分布 $\tilde{\mathbf{T}}$, 首先利用陆地与海洋分界的先验信息, 将观测场景划分为陆地区域和海洋区域, 并将每个区域的亮温设为恒定值, 然后根据最小二乘准则求出每个区域的亮温值, 详见文献[16]. 因此, 对于最小范数正则化, 其反演亮温变为

$$\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{G}_k^+ (\mathbf{V} - \mathbf{G}\tilde{\mathbf{T}}) + \tilde{\mathbf{T}} \quad (9)$$

对于带限正则化, 其反演亮温变为

$$\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{U}^* \mathbf{Z} \mathbf{J}^+ (\mathbf{V} - \mathbf{G}\tilde{\mathbf{T}}) + \tilde{\mathbf{T}} \quad (10)$$

为了方便区分, 式(9)的方法称为改进的最小范数正则化, 式(10)的方法称为改进的带限正则化.

3 拉普拉斯混合正则化

对于双参数混合正则化方法, 王文娟等将其应用于电导率的反演成像中, 得到了更为精确稳定的解^[17]; 刘婷等将其应用于脑磁时序信号的逆问题求解中, 重构出更为准确且时域平滑的脑内神经信号^[18]. 受此启

$0.589\lambda_0$, 6根观测天线 a_1, a_2, \dots, a_6 稀疏地排列在不同的位置, 其间隔依次序分别为 $d, d, 2d, 5d, d$, 所以可得最长基线为 $10d$.

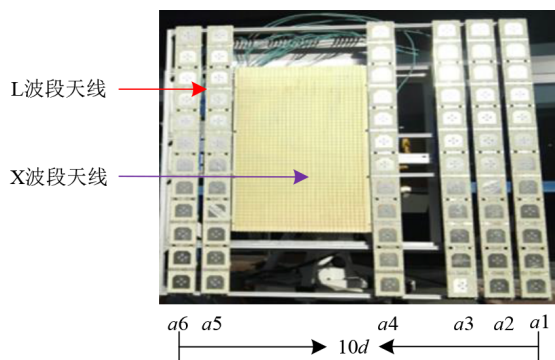


图1 FPIR双频天线阵列布局

仿真系统其他参数如下: 带宽为 $B=20$ MHz, fringe washing 函数设为 $\text{sinc}(B\tau)$, 积分时间为 1 s. 包含零基线并考虑共轭对称性后, 总共可获得 31 个可见度函数采样点. 在天线暗室中, 对 L 波段的阵列中 6 根观测天线的方向图进行测量, 综合孔径方向上测量的归一化天线电压方向图如图 2 所示.

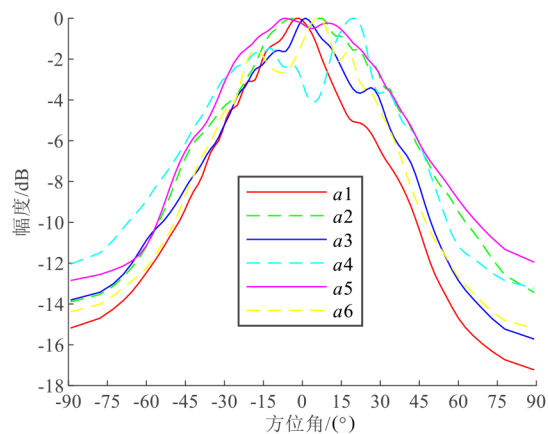
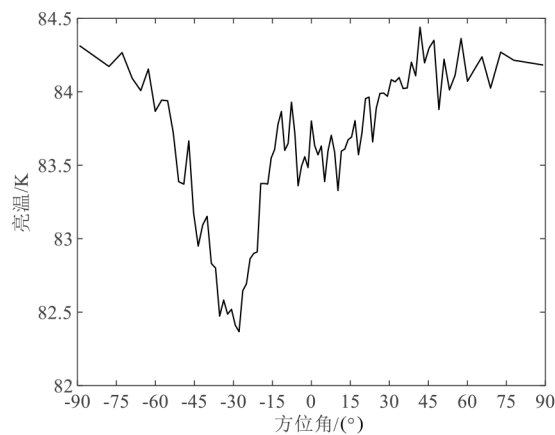


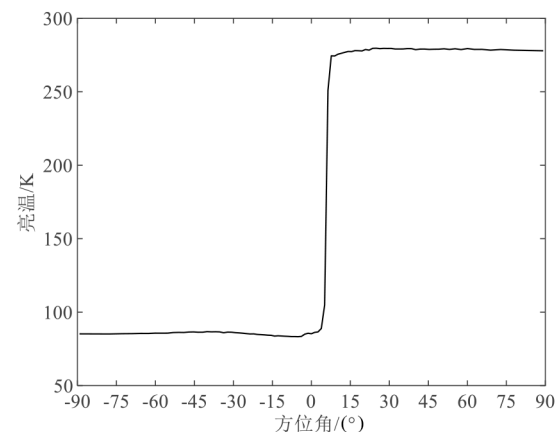
图2 综合孔径方向归一化天线方向图

原始亮温分布如图 3 所示, 包括 2 种典型的观测目标区域, 其中图 3(a) 为纯海洋区域, 图 3(b) 为海洋陆地交界区域. 原始亮温分布来源于 Aquarius 卫星 2013 年 8 月 19 日观测的某区域 L 波段 H 极化辐射亮温数据. 作为一维综合孔径辐射计, FPIR 系统单次测量只能获取一个条带的亮温数据, 通过载荷平台的移动进行推扫成像, 以获取二维亮温图像.

基于上述仿真系统, 利用式(1)可仿真得到可见度函数. 在实际测量过程中, 不可避免地存在测量噪声, 所以利用均值为零方差为 $0.01 \times \max(V_i)$ 的高斯白噪声来模拟测量误差或者噪声. 然后, 分别利用改进的最小



(a) 纯海洋区域



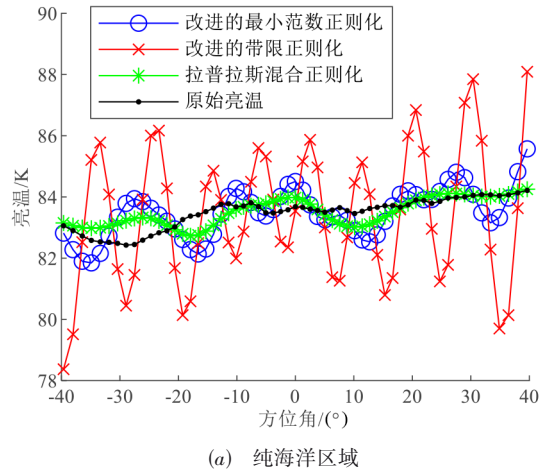
(b) 海陆交界区域

图3 原始亮温分布

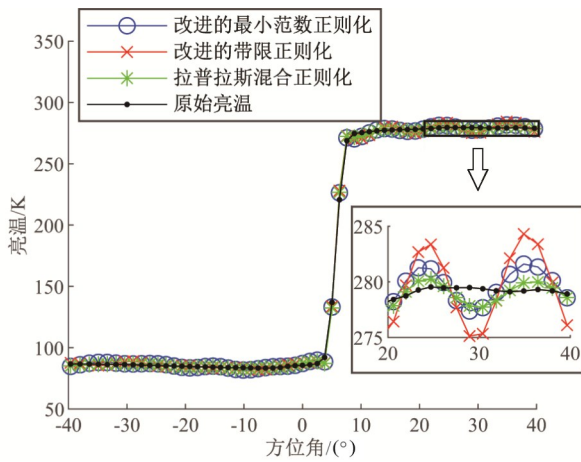
范数正则化、改进的带限正则化和拉普拉斯混合正则化对含噪声的可见度函数进行重构, 得到无混叠视场内重构结果, 如图 4 所示, 其中图 4(a) 为纯海洋区域重构结果, 图 4(b) 为海陆交界区域重构结果. 在图 4 中使用的窗函数为汉宁窗, 原始亮温分布也进行了加窗处理以便于比较. 从图 4 中可以看出, 与改进的最小范数正则化和带限正则化相比, 拉普拉斯混合正则化重构误差明显降低, 更加接近于真实亮温分布.

此外, 计算了重构结果与原始图像之间的 RMSE 和 PSNR. 表 1 为图 4 中纯海洋区域和海陆交界区域亮温分布经过不同成像算法后重构误差对比结果.

为了进一步验证拉普拉斯混合正则化的鲁棒性, 分析了噪声对重构结果的影响. 在式(1)可见度函数基础上加入不同方差的高斯白噪声, 然后分别利用改进的最小范数正则化、改进的带限正则化和拉普拉斯混合正则化进行成像反演. 图 5 所示为不同噪声情况下纯海洋区域重构结果性能. 在图 5 中, 当噪声为零时,



(a) 纯海洋区域



(b) 海陆交界区域

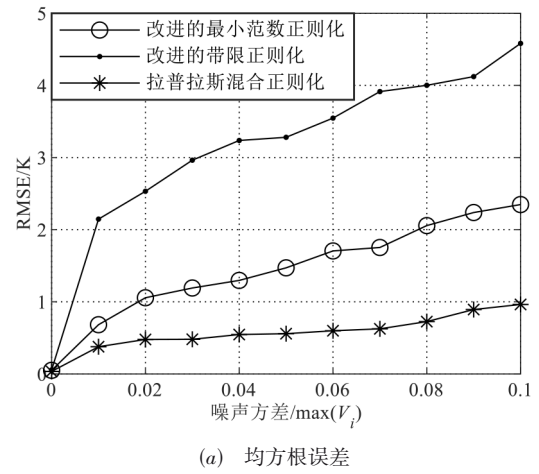
图4 重构结果

表1 不同成像算法的重构误差

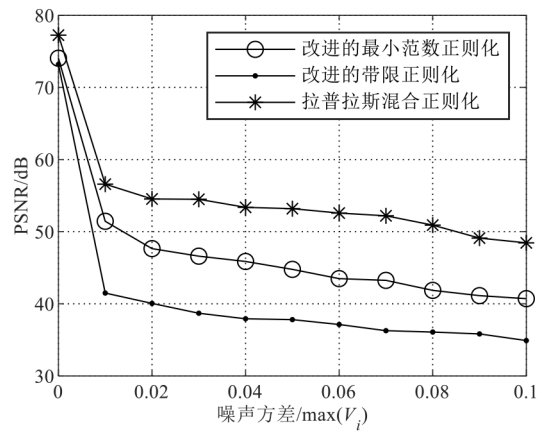
成像算法	海洋区域		海陆交界	
	RMSE	PSNR	RMSE	PSNR
改进的最小范数正则化	0.68 K	51.44 dB	1.77 K	43.19 dB
改进的带限正则化	2.15 K	41.50 dB	2.46 K	40.30 dB
拉普拉斯混合正则化	0.38 K	56.59 dB	1.58 K	44.18 dB

改进的最小范数、改进的带限正则化和拉普拉斯混合正则化的 RMSE 分别为 0.05 K, 0.06 K 和 0.03 K. 从图 5 中可以看出, 虽然测量噪声大小不同, 但是拉普拉斯混合正则化比改进的最小范数和带限正则化重构结果 RMSE 降低了 40% 以上, PSNR 提高了 5 dB 以上. 值得注意的是, 仿真中带限正则化的性能明显差于最小范数正则化, 这是由于 FPIR 样机天线单元数量仅有 6 根, 导致频率上覆盖的基线范围很小, 从而导致带宽受限的约束性能不佳.

类似地, 不同噪声情况下海陆交界区域重构结果性能如图 6 所示. 从图 6 中可以看出, 与改进的最小范



(a) 均方根误差



(b) 峰值信噪比

图5 不同噪声情况下纯海洋区域重构结果性能

数和带限正则化相比, 在不同噪声情况下, 拉普拉斯混合正则化重构结果 RMSE 有效降低, PSNR 明显上升. 此外, 在图 6 中, 当噪声为零时, 改进的最小范数和带限正则化以及拉普拉斯混合正则化的 RMSE 分别为 1.46 K, 1.64 K 和 1.18 K. 对于海陆交界区域, 由于观测亮温分布跨度大, 其吉布斯振荡现象更加明显, 残留的重构误差较大. 因此, 对于海陆交界等亮温变化剧烈的场景, 拉普拉斯混合正则化性能比改进的最小范数和带限正则化有一定的提升.

综上所述, 本文提出的拉普拉斯混合正则化方法对于测量误差或者噪声干扰具有良好的鲁棒性, 对于不同的观测场景都能有效地降低其重构误差, 尤其是对于纯海洋区域.

拉普拉斯混合正则化的计算时间与矩阵 G 的大小密切相关. 当矩阵 G 大小为 31×91 时, 在 2.4 GHz Intel i5-4210U 处理器和 12 GB 内存的笔记本电脑上, 改进的最小范数正则化、改进的带限正则化和混合正则化的

Matlab 计算时间分别为 0.159 6 s, 0.112 6 s 和 0.318 3 s. 结果表明, 虽然拉普拉斯混合正则化能有效地提高反演的精度, 但是需要花费更长的计算时间, 其计算时间大约是改进的最小范数正则化的两倍. 对于大型的综合孔径天线阵列, 可利用 GPU 平台来计算拉普拉斯混合正则化反演结果以加快计算速度.

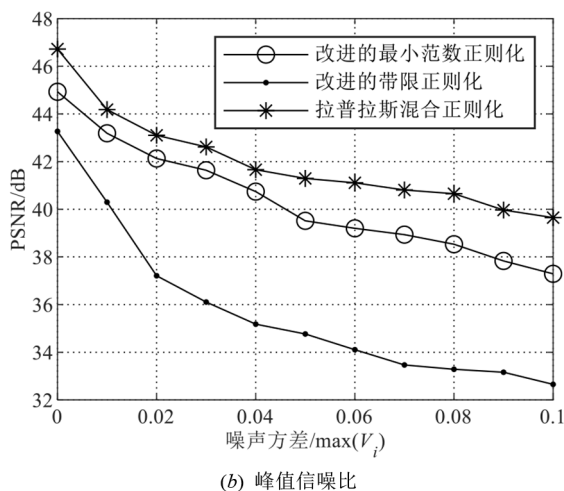
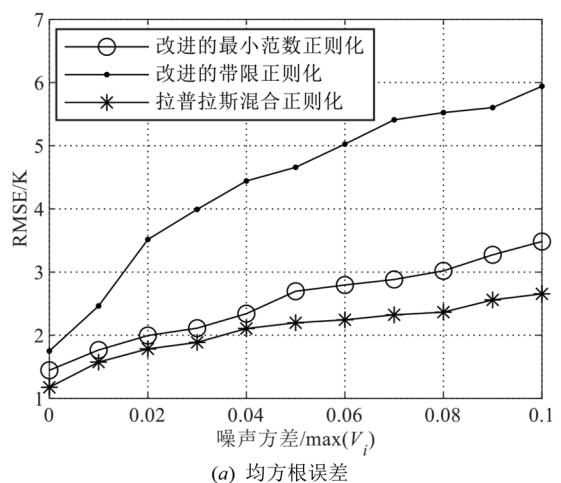


图6 不同噪声情况下海陆交界区域重构结果性能

5 结论

高效的成像反演算法是综合孔径辐射计的关键技术之一. 综合孔径辐射计干涉输出的是可见度函数, 成像反演算法的目的是将可见度函数重构为精确的辐射亮温图像. 然而, 综合孔径辐射计成像反问题是病态的, 虽然传统的正则化方法能有效克服其病态性, 但依然存在较大的重构误差. 针对上述问题, 提出了一种基于拉普拉斯算子的综合孔径辐射计成像算法. 该方法通过引入新的拉普拉斯算子项, 对差分亮温构造拉普拉斯混合正则化, 并利用多维扩展的广义交叉验证准则选取 2 个正则化参数. 与传统的单一正则化相比, 其

优点在于通过添加 2 个约束项来构造拉普拉斯混合正则化, 以反映原始亮温分布的多尺度特征, 从而得到更精确的反演亮温结果. 利用研制的 L 波段 FPIR 样机进行了仿真分析, 仿真结果表明: 与改进的最小范数正则化和带限正则化相比, 本文方法重构结果更加接近真实亮温分布, 能明显降低重构误差, 并且具有良好的鲁棒性.

参考文献

- [1] MARTÀN-NEIRA M, LEVINE D M, KERR Y, et al. Microwave interferometric radiometry in remote sensing: An invited historical review[J]. *Radio Science*, 2014, 49(6): 415-449.
- [2] 苗俊刚, 郑成, 胡岸勇, 等. 被动毫米波实时成像技术[J]. *微波学报*, 2013, 29(S1): 100-112.
MIAO J G, ZHENG C, HU A Y, et al. Real-time passive millimeter wave imaging technology[J]. *Journal of Microwaves*, 2013, 29(S1): 100-112. (in Chinese)
- [3] 黄永辉, 吴季. 二维综合孔径微波辐射计成像理论与方法研究[J]. *电子学报*, 2002, 30(5): 697-701.
HUANG Y H, WU J. Study on image theory of high resolution two-dimensional synthetic aperture microwave radiometer[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(5): 697-701. (in Chinese)
- [4] 黄永辉, 吴季, 董晓龙. 综合孔径微波辐射计顺轨方向亮温反演算法的研究[J]. *电子学报*, 2000, 28(12): 108-110.
HUANG Y H, WU J, DONG X L. Brightness temperature reconstruction in the along-track direction of a synthetic aperture microwave radiometer[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, 28(12): 108-110. (in Chinese)
- [5] PICARD B, ANTERRIEU E. Comparison of regularized inversion methods in synthetic aperture imaging radiometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(2): 218-224.
- [6] 何方敏, 李青侠, 赵治华, 等. 一种基于稀疏先验的综合孔径展源辐射成像统计反演方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(3): 417-423.
HE F M, LI Q X, ZHAO Z H, et al. A sparse prior based statistical inversion approach for aperture synthesis radiometric imaging of extended source[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(3): 417-423. (in Chinese)
- [7] 杨晓城, 阎敬业, 武林, 等. CGLS 算法在综合孔径微波辐射计中的应用[J]. *微波学报*, 2017, 33(4): 90-93, 96.
YANG X C, YAN J Y, WU L, et al. Application of conjugate gradient least squares algorithm in synthetic aperture microwave radiometer[J]. *Journal of Microwaves*, 2017, 33(4): 90-93, 96. (in Chinese)

- [8] ANTERRIEU E. A resolving matrix approach for synthetic aperture imaging radiometers[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1649-1656.
- [9] KHAZÂAL A, RICHAUME P, CABOT F, et al. Improving the spatial bias correction algorithm in SMOS image reconstruction processor: Validation of soil moisture retrievals with in situ data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(1): 277-290.
- [10] 李招文, 李景, 刘振海. 非线性不适定问题的双参数正则化[J]. 中国科学(A辑: 数学), 2007, 37(9): 1117-1124.
LI Z W, LI J, LIU Z H. Two-parameter regularization for nonlinear ill-posed problems[J]. Science in China(Series A: Mathematics), 2007, 37(9): 1117-1124. (in Chinese)
- [11] 董晓龙, 张升伟, 吴季, 等. 综合孔径微波辐射计天线单元互耦的影响及其校正[J]. 电子学报, 2001, 29(9): 1280-1282.
DONG X L, ZHANG S W, WU J, et al. Effect of mutual coupling between antenna elements on the imaging of synthetic aperture radiometer and its calibration[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(9): 1280-1282. (in Chinese)
- [12] CORBELLA I, DUFFO N, VALL-LLOSSERA M, et al. The visibility function in interferometric aperture synthesis radiometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(8): 1677-1682.
- [13] 董晓龙, 吴季, 姜景山. 信道互耦和不平衡度对综合孔径微波辐射计复相关干涉测量的影响分析及其校准[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 947-949.
DONG X L, WU J, JIANG J S. Analysis and calibration of effects on complex correlations from mutual coupling and imbalance between channels[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 947-949. (in Chinese)
- [14] 王飞鹏, 吴季. 综合孔径微波辐射计二阶量化数字相关器研究[J]. 电子学报, 2002, 30(3): 450-453.
WANG F P, WU J. 1-bit digital correlator for synthetic aperture microwave radiometer[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(3): 450-453. (in Chinese)
- [15] 刘浩, 吴季, 吴琼. 综合孔径微波辐射计信道误差分析与标定[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 402-406.
LIU H, WU J, WU Q. Analysis and calibration of the channels error of synthetic aperture radiometer[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(3): 402-406. (in Chinese)
- [16] 杨晓城, 阎敬业, 吴季. 改进的 G 矩阵模型法在全极化综合孔径辐射计中的应用[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(7): 750-754.
YANG X C, YAN J Y, WU J. Application of improved G matrix model in full polarization interferometric radiometer[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(7): 750-754. (in Chinese)
- [17] 王文娟, FARMER C, OCKENDON J, 等. 双参数混合正则化方法及在电导率反演成像中的应用[J]. 地球物理学报, 2011, 54(8): 2154-2159.
WANG W J, FARMER C, OCKENDON J, et al. A dual-parameter regularization method for electrical conductivity imaging[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(8): 2154-2159. (in Chinese)
- [18] 刘婷, 戴亚康, 杨莹雪, 等. 基于时域平滑约束的脑磁时序信号逆问题求解方法[J]. 电子学报, 2016, 44(12): 2823-2828.
LIU T, DAI Y K, YANG Y X, et al. An MEG inverse solver by imposition of temporal smoothness constraint[J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(12): 2823-2828. (in Chinese)
- [19] GOLUB G H, VON MATT U. Generalized cross-validation for large-scale problems[J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 1997, 6(1): 1-34.
- [20] BREZINSKI C, REDIVO-ZAGLIA M, RODRIGUEZ G, et al. Multi-parameter regularization techniques for ill-conditioned linear systems[J]. Numerische Mathematik, 2003, 94(2): 203-228.
- [21] WU L, YAN J Y, ZHAO F, et al. Fpir: Demonstrator integration and ground-based salinity observation experiment [C]//IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain: IEEE, 2018: 1021-1023.

作者简介



杨晓城 男, 1988 年 12 月出生于江西九江. 浙江理工大学信息学院讲师. 研究方向为综合孔径辐射计、图像处理.
E-mail: yangxiaoch209@163.com



杨真乙 男, 1996 年 12 月出生于浙江台州. 浙江理工大学信息学院硕士研究生. 研究方向为综合孔径辐射计、图像处理.