

G矩阵修正法在一维综合孔径微波辐射计成像中的应用

张爱丽^{①②} 刘浩^{*①} 武林^① 牛立杰^① 张成^① 陈雪^① 吴季^{①②}

^①(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 1维综合孔径微波辐射计通常会采用G矩阵模型法来实现亮温图像的重建。对于1维辐射计系统,成像过程主要包含:辐射计仪器观测2维全视场的目标场景亮温,得到1维的可见度函数采样值,再通过对系统参数矩阵G求逆来实现目标场景的1维图像重建。由于1维辐射计系统的采样基线只分布在空间频率域的1个维度上,所以在图像重建过程中,需要实现矩阵G从2维到1维的转换。对此,该文提出了两种适用于1维综合孔径微波辐射计成像的G矩阵修正方法。并针对目前已经完成的8单元辐射计地面样机系统和目前正在研制的10单元盐度计样机系统,通过理论分析和仿真实验,验证了G矩阵修正法对1维综合孔径微波辐射计成像结果的改善效果,以及对天线方向图旁瓣恶化所引入成像误差的有效抑制。

关键词: 综合孔径辐射计; 成像算法; G矩阵; 旁瓣恶化

中图分类号: TM931

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)11-2632-07

DOI: 10.11999/JEIT181067

The Application of the G-matrix Modification Methods to the Imaging of the 1-D Synthetic Aperture Microwave Radiometer

ZHANG Aili^{①②} LIU Hao^① WU Lin^① NIU Lijie^① ZHANG Cheng^①

CHEN Xue^① WU Ji^{①②}

^①(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The G-matrix model method is usually used to achieve the brightness temperature reconstruction for the one-Dimensional (1-D) synthetic aperture microwave radiometer system. For the 1-D radiometer system, the imaging process mainly includes: the radiometer instrument observes the full field of view of the 2-D target scene maps, and obtains the 1-D samples of the visibility, and then inverts the system parameter matrix G to realize the reconstruction of the 1-D image of the target scene. Since the system sampling baselines are only distributed in the 1-D of the spatial frequency domain, in the process of the brightness temperature image reconstruction, the matrix G needs to realize 2-D to 1-D conversion. Therefore, two G-matrix modification methods are proposed to improve the imaging quality for the 1-D synthetic aperture microwave radiometer. For the 8-element ground radiometer prototype system and the 10-element salinity radiometer system, theoretical analysis and simulation experiments have verified that the G-matrix modification methods proposed in this paper can effectively improve the imaging results, and can effectively suppress the imaging error caused by the side-lobed degradation of the antenna patterns.

Key words: Synthetic aperture radiometer; Imaging algorithm; G-matrix; Side-lobed degradation

1 引言

L波段微波辐射计是对地观测土壤湿度和海水

收稿日期: 2018-11-22; 改回日期: 2019-03-11; 网络出版: 2019-04-12

*通信作者: 刘浩 liuhao@mirslab.cn

基金项目: 国家自然科学基金(41675035), 北京市科技计划课题(Z161100002616033)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41675035), Beijing Science and Technology Plan (Z161100002616033)

盐度等参数的有效工具。目前,已经在轨工作的L波段辐射计包括欧空局在2009年发射的2维综合孔径辐射计SMOS/MIRAS^[1,2]和美国NASA分别在2011年和2015年发射的真实孔径微波辐射计Aquarius^[3]与SMAP^[4,5]。在国内,2012—2015年期间,我国国家空间科学中心也已经成功研制完成了1台8单元L波段1维综合孔径微波成像仪地面样机^[6],并完成了高灵敏度、高稳定度辐射计技术的实验验证^[7]。在此研究经验基础上,空间中心目前又提出

盐度计1维综合孔径辐射计样机系统的研制。本文针对8单元地面辐射计样机和正在研制的10单元盐度计系统的两套1维综合孔径微波辐射计系统,研究了 G 矩阵模型法在亮温图像重建过程中的应用。

8单元地面样机和10单元盐度计系统的L波段1维综合孔径微波辐射计都采用的是抛物柱面反射面天线加1维稀疏排布的线性馈源阵。在这类天线的应用中,由于阵列中各馈源相对于反射面的位置不同,会在单元方向图数据之间引入明显的不一致性。另一方面,为了获得更好的系统测量精度和灵敏度,通常1维综合孔径辐射计会采用大小馈源混合阵^[8],馈源尺寸的不同也会引入方向图之间的一致性。单元方向图的不一致会导致傅里叶逆变算法不能有效实现亮温图像重建,因此成像算法通常采用 G 矩阵模型法^[9]。尤其是对于天线单元数较少的1维辐射计系统, G 矩阵的Moor-Penrouse广义逆算法被广泛应用在亮温重建中^[10]。

1维辐射计在轨观测过程中,目标场景全视场图像是2维的,单元天线方向图是2维的,所以系统参数矩阵 G 是2维的。但是,在亮温图像重建过程中,由于1维辐射计天线单元对儿构成的采样基线只分布在空间频率域上的1个维度上,即综合孔径方向上,因此系统参数矩阵 G 需要实现由2维数据向1维的转换,才能重建出目标场景的1维图像。该过程涉及到2维天线方向图到1维天线方向图的转换,鉴于ESTAR1维辐射计的研究经验,会采用在真实孔径方向上取最大值的近似方法来实现方向图数据由2维向1维的转换^[11],但此方法的成像结果会存在明显误差。对此,本文提出两种 G 矩阵修正法,来提高辐射计系统的成像精度,以及用于校正天线方向图旁瓣恶化所引入的成像误差。

2 成像原理

干涉式综合孔径辐射计测量目标场景的基本单元是2元干涉仪。系统每条基线上的两个天线单元的接收信号进行复相关运算得到可见度函数采样值^[12]。可见度函数与观测场景亮温之间存在类傅里叶变换的关系,如式(1)所示,被称为经典方程^[13]。

$$V_{ij}(u, v) = \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} \frac{\text{TB}(\xi, \eta)}{W_{\text{eq}} \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} \times F_i(\xi, \eta) F_j^*(\xi, \eta) \times \tilde{r}(\tau) \times e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta \quad (1)$$

其中, $V_{ij}(u, v)$ 表示可见度函数采样值; $\text{TB}(\xi, \eta)$ 表示观测目标场景亮温; $F(\xi, \eta)$ 表示单元天线方向

图; $\xi = \cos\varphi \sin\theta$; $\eta = \sin\varphi \sin\theta$ 是方向余弦坐标。 \tilde{r} 是消条纹函数,这里设为理想情况,取值1。

带有抛物柱面反射面天线的1维综合孔径辐射计系统成像过程中馈源单元方向图之间存在不一致性,这导致式(1)所表示的可见度函数与亮温之间的关系不是完全的傅里叶变换关系,直接采用傅里叶逆变算法会导致重建亮温图像出现较大的成像误差。因此,1维综合孔径辐射计亮温图像的重建采用 G 矩阵算法^[14]。在成像过程中,采样基线只分布在空间频率域(u, v)中的1个维度方向上,即 $v = 0$ 。将式(1)的可见度函数离散为一组线性方程^[9],即

$$V(u) = G(u, \xi, \eta) \times \text{TB}(\xi, \eta) \quad (2)$$

其中,系统参数矩阵 G 是由每条基线上的两个天线单元方向图的共轭乘积以及辐射计在空间频率域的采样因子组成,如式(3)所示

$$G_{ij}(u, \xi, \eta) = \text{AP}_{ij} \times e^{-j2\pi u\xi} = F_i(\xi, \eta) F_j^*(\xi, \eta) \times e^{-j2\pi u\xi} \quad (3)$$

其中, $F(\xi, \eta)$ 表示2维的天线单元方向图数据。 AP_{ij} 表示第 i 个馈源和第 j 个馈源的天线方向图的共轭乘积。

根据式(2),亮温图像的重建可以通过 G 矩阵求逆来实现

$$\widehat{\text{TB}}(\xi) = G^+(u, \xi) V(u) \quad (4)$$

其中, G_i^+ 表示 G 的伪逆矩阵。在实际应用中, G 矩阵通常不是方阵,不可逆。对于单元数不多的1维综合孔径辐射计系统的成像,可以通过采用Moore-penrose伪逆算法来实现 G 矩阵求逆^[15]。对于天线单元较多的辐射计, G 矩阵维度较大,求逆过程容易出现条件数过大带来的病态求解误差,此时,需要采用合适的正则化算法来修正。针对本文提到的8单元辐射计地面样机系统和10单元盐度计系统,成像算法并不会在求逆过程引入误差,所以本文中亮温图像的重建过程直接采用Moore-penrose伪逆算法,如式(5)所示

$$G^+ = G^H (G G^H)^{-1} \quad (5)$$

在亮温图像重建过程中, G 矩阵需要实现由2维数据向1维转换,即

$$G(u, \xi, \eta) \rightarrow G_i(u, \xi) \quad (6)$$

式(6)表示天线方向图由2维数据向1维的转换过程。本文的主要内容就是针对这个转换过程,提出和研究两种不同的 G 矩阵修正方法,并分析了它们对系统成像结果的影响。

3 G矩阵模型法

接下来通过理论分析和仿真实验两方面,来评估系统成像算法。仿真实验是利用1维综合孔径微波辐射计仿真系统模拟L波段辐射计在轨观测海洋场景^[16]。观测目标场景的2维全视场图像如图1所示,由于盐度计载荷轨道高度定为600 km,且前倾角为30°,这导致仪器对地观测过程中,目标视场包含两部分,分别记为:地球视场 TB_{earth} 和冷空视场 TB_{sky} 。图2表示辐射计观测目标场景时加权的1个天线单元在真实孔径方向上的方向图数据。根据辐射计成像原理,仿真实验采用G矩阵模型法来重建亮温图像。2维天线方向图向1维天线方向图的转换采用的是取最大值的方法。具体过程如式(7)和图3

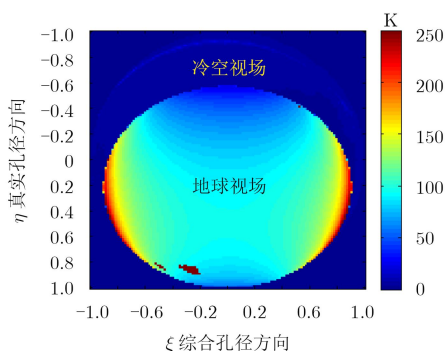


图1 仿真辐射计在轨观测的海洋目标场景的亮温图像

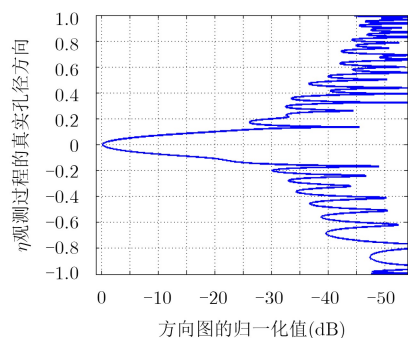


图2 样机系统单元天线在真实孔径方向上的方向图

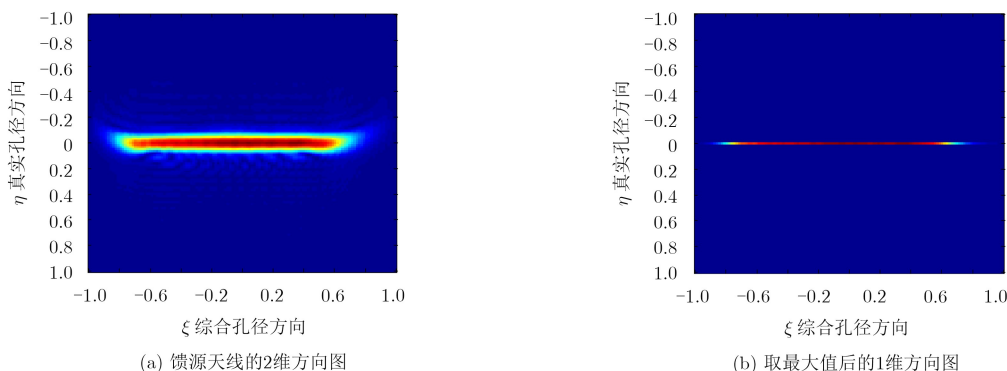


图3 天线方向图采用取最大值方法实现2维向1维的转换

所示,天线方向图通过在 η (真实孔径方向)维度上取的最大值来实现方向图由2维数据向1维的转换,即

$$G_i(u, \xi) = G(u, \xi, \eta_{F=F_{\max}}) \quad (7)$$

8单元辐射计地面样机系统模拟观测海洋目标场景得到的仿真成像结果如图4所示。该仿真实验直接采用的是G矩阵模型法实现亮温图像的重建,即方向图通过取最大值的方法来实现2维数据向1维的转换。成像误差的统计参数列在表1,包括误差均方根(RMSE),标准差(STD)和均值(MEAN)。误差单位为亮度温度,符号为K。本文提到的仿真实验以H极化为例。

从图4的仿真结果可以看出,G矩阵模型法成像算法中,若天线方向图直接采用取最大值的方法实现2维数据向1维的转换,会在成像结果中引入明显误差。接下来,提出了基于G矩阵模型法的两种修正算法,用于实现对该成像误差项的抑制。

4 G矩阵修正算法

4.1 修正算法1

4.1.1 理论分析

将式(2)展开,第 k 条基线测量得到的可见度函数为式(8),即

$$V_k = \left[\left(AP_k(\xi_1, \eta_1) e^{-j2\pi u_k \xi_1} \right) \left(AP_k(\xi_2, \eta_1) e^{-j2\pi u_k \xi_2} \right) \right. \\ \left. \dots \left(AP_k(\xi_n, \eta_n) e^{-j2\pi u_k \xi_n} \right) \right] \times \begin{bmatrix} TB(\xi_1, \eta_1) \\ TB(\xi_2, \eta_1) \\ \vdots \\ TB(\xi_n, \eta_1) \\ TB(\xi_1, \eta_2) \\ \vdots \\ TB(\xi_n, \eta_m) \end{bmatrix} \\ \times \Delta u \quad (8)$$

式(8)显示可见度函数的测量过程其实是每对基线上两个天线单元方向图共轭相乘,再对场景亮温做加权的过程。又因为辐射计馈源天线方向图在

表1 针对地面样机系统和盐度计辐射计系统, 仿真G矩阵模型法、修正算法1和修正算法2的成像结果(K)

成像误差统计参数单位	8单元辐射计地面样机系统		10单元盐度计系统	
	G矩阵模型法	修正算法1	修正算法1	修正算法2
RMSE	1.5553	0.1382	1.9834	0.1625
STD	1.5692	0.1387	0.3538	0.0696
MEAN	0.0058	0.0141	1.9521	0.1471

真实孔径方向上的3 dB波束宽度小, 且旁瓣低于30 dB, 所以旁瓣映射到的亮温的加权因子低于3 dB波束内场景亮温的加权因子的0.1%。因此提出G矩阵修正算法1, 忽略目标场景亮温在真实孔径方向上的变化, 即

$$\begin{aligned}
 & AP_k(\xi, \eta_1) \times TB_k(\xi, \eta_1) + AP_k(\xi, \eta_2) \times \\
 & TB_k(\xi, \eta_2) + \dots + AP_k(\xi, \eta_n) \times TB_k(\xi, \eta_n) \\
 & \approx AP_k(\xi, \eta_1) \times TB_k(\xi, \eta_0) + AP_k(\xi, \eta_2) \times \\
 & TB_k(\xi, \eta_0) + \dots + AP_k(\xi, \eta_n) \times TB_k(\xi, \eta_0) \\
 & = \left[\sum_{i=1}^n AP_k(\xi, \eta_i) \right] \times TB_k(\xi, \eta_0) \tag{9}
 \end{aligned}$$

其中, $TB(\xi, \eta_0)$ 表示目标场景亮温在3 dB波束宽度内的亮温值。将式(9)代入式(8), 即可实现天线方向图2维数据向1维的转换, 如式(10)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_k = & \begin{bmatrix} \left(\sum_{\eta=-1:\dots:1} AP_k(\xi_1, \eta) e^{-j2\pi u_k \xi_1} \right) \\ \left(\sum_{\eta=-1:\dots:1} AP_k(\xi_2, \eta) e^{-j2\pi u_k \xi_2} \right) \\ \vdots \\ \left(\sum_{\eta=-1:\dots:1} AP_k(\xi_n, \eta) e^{-j2\pi u_k \xi_n} \right) \end{bmatrix}^T \\
 & \times \begin{bmatrix} TB(\xi_1, \eta) \\ TB(\xi_2, \eta) \\ \vdots \\ TB(\xi_n, \eta) \end{bmatrix} \times \Delta u \tag{10}
 \end{aligned}$$

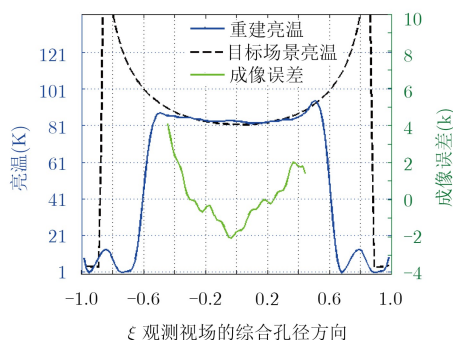


图4 样机辐射计采用G矩阵模型法的成像仿真结果

在式(8)到式(10)的转换过程中, 亮温数据前面的加权因子的变化可以简化表示为如下的G矩阵形式

$$\mathbf{G}_i(u, \xi) = \sum_{\eta=-1:\dots:1} \mathbf{G}(u, \xi, \eta) \tag{11}$$

式(11)是G矩阵修正算法1的表达式, 通过在真实孔径方向上对方向图数据做累积求和, 来实现图像重建过程方向图从2维数据向1维的转换。

4.1.2 仿真实验

将G矩阵修正算法1应用到8单元辐射计地面样机系统仿真成像实验中, 得到成像结果如图5所示, 对应的成像误差统计参数列在表1。

对比图4与图5中的仿真实验结果可知, 在采用G矩阵模型法来做1维综合孔径辐射计系统成像算法的时候, 天线方向图由2维数据向1维的转换可以通过在真实孔径方向上做累积求和来实现。这样处理的成像误差要明显小于图4中采用取最大值方法的成像误差。

4.2 修正算法2

目前, G矩阵修正算法1已经成功应用到8单元辐射计地面样机系统的仿真实验和实际样机观测冷空及建筑物的成像中。

然而, 随着盐度计系统的研制, 由于应用需求和系统设计参数的限制, 目前设计的L波段1维综合孔径辐射计系统采用的是10单元1维稀疏馈源阵的抛物柱面反射面天线。在设计过程中, 经过对天线各参数权衡, 得到的10个馈源单元的方向图数据在真实孔径方向上的 $-90^\circ (\eta = -1)$ 视场边缘处出现了

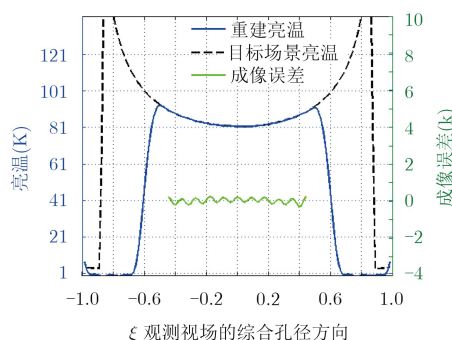


图5 样机辐射计采用G矩阵修正算法一得到的成像仿真结果

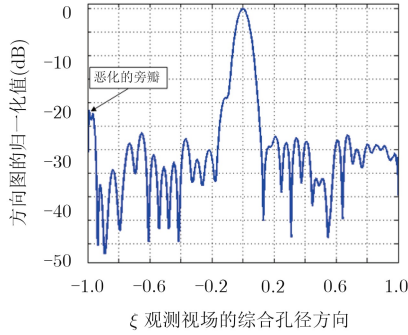


图 6 10单元盐度计一个馈源天线在真实孔径方向上的方向图

明显的旁瓣恶化。以其中1个馈源天线为例，分析其方向图数据如图6所示。这部分恶化旁瓣会映射到仪器在轨观测全视场中的冷空视场范围，若亮温图像重建过程仍直接使用G矩阵修正算法1会在成像结果中引入明显的误差，如图7(a)所示的仿真成像结果。

本文针对该天线旁瓣恶化带来的成像误差，提出了G矩阵修正算法2。

4.2.1 理论分析

如图1所示，辐射计仪器在轨观测目标场景可以记为两部分：地球视场 TB_{earth} 和冷空视场 TB_{sky} 。按照不同的观测视场范围，将10单元盐度计系统参数矩阵G对应记作： G_{earth} 和 G_{sky} ^[17]。

所以可见度函数采样值表示为

$$V = G_{earth} \times TB_{earth} + G_{sky} \times TB_{sky} \quad (12)$$

亮温图像重建由式(4)更改为式(13)

$$\widehat{TB} = (G_{earth} + G_{sky})^+ \times V \quad (13)$$

在海洋目标观测场景中，冷空场景亮温约2.7 K^[18]，海洋场景亮温值约100 K，所以有 $TB_{earth} \gg TB_{sky}$ 。

如果天线方向图旁瓣足够低，即 $G_{sky} \approx 0$ ，通过式(13)重建亮温，不会引入明显的成像误差。

但是，10单元盐度计的馈源天线方向图在对应的冷空视场范围内存在较大的旁瓣，即 $G_{sky} \neq 0$ 。根据式(12)和式(13)：

(1) 若 $TB_{earth} = TB_{sky}$ ，则重建亮温就是对地观测目标亮温， $\widehat{TB} = TB_{earth}$ 。

(2) 但实际情况下，冷空亮温远小于地球场景的亮温值： $TB_{earth} \gg TB_{sky}$ ^[18]。所以利用式(12)和式(13)得到的重建亮温要小于对地观测的目标亮温： $\widehat{TB} < TB_{earth}$ 。

针对10单元盐度计辐射计系统，仿真G矩阵修正算法1的成像结果如图7(a)所示，存在明显的偏置误差。为了校正该误差项，本文提出了G矩阵修正算法2。

由于 $TB_{earth} \gg TB_{sky}$ ，所以在修正算法2中，选择将冷空场景所对应的可见度函数测量值 V_{sky} 忽略。但同时图像重建过程中，对用于计算伪逆的系统矩阵G做修正，使其在窄波束方向上的累积求和范围减小，从而去除天线方向图恶化旁瓣的影响。天线方向图从2维数据向1维转换的过程的公式表达式也由式(11)更改为式(14)

$$G_i(u, \xi) = \sum_{\eta=-0.6:\dots:1} G(u, \xi, \eta) \quad (14)$$

重建的亮温图像为：

$$\widehat{TB} = (G_i)^+ \times V \quad (15)$$

注意，以上对G矩阵修正算法2的分析中将辐射计系统矩阵记为 G_{earth} 和 G_{sky} ，这仅是为了方便理解和分析，系统响应矩阵G不可根据观测目标场景范围实现分解，它表征的是仪器响应特性。

4.2.2 仿真实验

针对10单元盐度计系统，其天线方向图数据在映射到冷空视场的观测范围内存在旁瓣的恶化，仿真G矩阵修正算法2的成像结果，如图7(b)所示。

对比分析图7(a)图7(b)的仿真实验结果，以及表1中列出的成像误差在有效视场范围内的统计参数可知，G矩阵修正算法2可以有效校正盐度计系统中由于天线旁瓣恶化带来的成像误差。

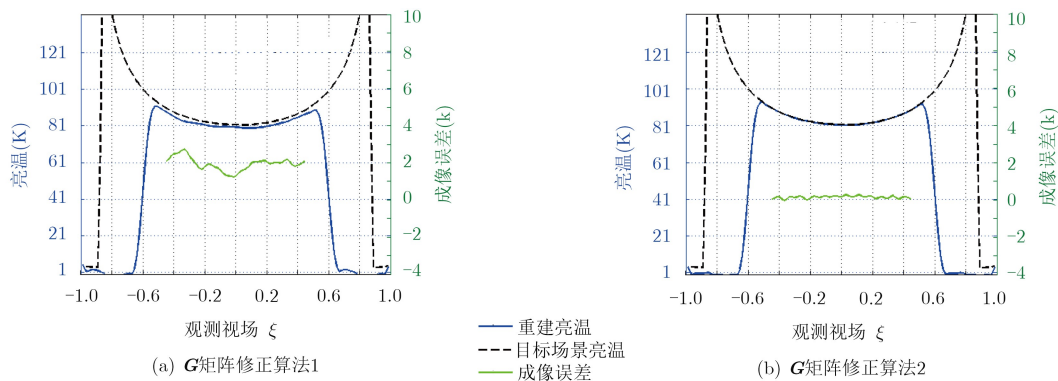


图 7 10单元盐度计辐射计系统分别采用G矩阵修正算法1和G矩阵修正算法2得到的成像仿真结果

5 结束语

L波段1维综合孔径辐射计系统通常采用 G 矩阵模型法来实现亮温图像的重建。重建过程中涉及到天线方向图数据由2维向1维的转换,直接采用在真实孔径方向上取最大值的方法会导致成像结果存在较大的偏置误差。对此,本文提出了 G 矩阵修正算法1,并通过仿真实验结果验证了该算法对成像偏置误差的校正效果。

针对10单元盐度计系统,天线方向图在映射到冷空观测视场的范围内出现了旁瓣恶化,若直接采用修正算法1,成像结果存在明显的误差。对此,本文提出了 G 矩阵修正算法2,通过修正亮温重建时 G 矩阵在真实孔径方向上累积求和的范围,从而实现天线旁瓣恶化带来成像误差的有效抑制。

参 考 文 献

- [1] CORBELLA I, TORRES F, DUFFO N, *et al.* MIRAS calibration and performance: Results from the SMOS in-orbit commissioning phase[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3147–3155. doi: [10.1109/TGRS.2010.2102769](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2102769).
- [2] MARTÍN-NEIRA M, OLIVA R, CORBELLA I, *et al.* SMOS instrument performance and calibration after six years in orbit[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180: 19–39. doi: [10.1016/j.rse.2016.02.036](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.036).
- [3] LE VINE D M, LAGERLOEF G S E, COLOMB F R, *et al.* Aquarius: An instrument to monitor sea surface salinity from space[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2040–2050. doi: [10.1109/TGRS.2007.898092](https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.898092).
- [4] MCNAIRN H, JACKSON T J, WISEMAN G, *et al.* The soil moisture active passive validation experiment 2012(SMAPVEX12): Prelaunch calibration and validation of the SMAP soil moisture algorithms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(5): 2784–2801. doi: [10.1109/TGRS.2014.2364913](https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2364913).
- [5] PIEPMEIER J R, FOCARDI P, HORGAN K A, *et al.* SMAP l-band microwave radiometer: Instrument design and first year on orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 1954–1966. doi: [10.1109/TGRS.2016.2631978](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2631978).
- [6] NIU Lijie, LIU Hao, WU Lin, *et al.* Experimental study of an L-band synthetic aperture radiometer for ocean salinity measurement[C]. Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 418–421. doi: [10.1109/IGARSS.2016.7729103](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729103).
- [7] 牛立杰, 刘浩, 吴季. 高灵敏度、高稳定度微波辐射计技术研究及实验验证[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 2028–2032. doi: [10.11999/JEIT161112](https://doi.org/10.11999/JEIT161112).
- [8] LIU Hao, NIU Lijie, ZHANG Cheng, *et al.* System study and development of an L-band 1-D synthetic aperture radiometer for ocean salinity measurement[C]. Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013: 1916–1919. doi: [10.1109/IGARSS.2013.6723179](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2013.6723179).
- [9] TANNER A B and SWIFT C T. Calibration of a synthetic aperture radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1): 257–267. doi: [10.1109/36.210465](https://doi.org/10.1109/36.210465).
- [10] CORBELLA I, TORRES F, CAMPS A, *et al.* Brightness-temperature retrieval methods in synthetic aperture radiometers[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 285–294. doi: [10.1109/TGRS.2008.2002911](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2002911).
- [11] RUF C S, SWIFT C T, TANNER A B, *et al.* Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the Earth[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(5): 597–611. doi: [10.1109/36.7685](https://doi.org/10.1109/36.7685).
- [12] LE VINE D M, GRIFFIS A J, SWIFT C T, *et al.* ESTAR: A synthetic aperture microwave radiometer for remote sensing applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1994, 82(12): 1787–1801. doi: [10.1109/5.338071](https://doi.org/10.1109/5.338071).
- [13] CORBELLA I, CAMPS A, TORRES F, *et al.* Analysis of noise-injection networks for interferometric-radiometer calibration[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, 48(4): 545–552. doi: [10.1109/22.842026](https://doi.org/10.1109/22.842026).
- [14] 张成. 干涉式成像微波辐射计遥感图像的模拟与成像分析[D]. [博士论文], 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2007. ZHANG Cheng. Radiometric image simulation and imaging analysis for synthetic aperture interferometric radiometer[D]. [Ph.D. dissertation], Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Center for Space Science and Applied Research), 2007.
- [15] 杨晓城, 阎敬业, 吴季. 解析矩阵法在全极化综合孔径辐射计中的应用[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(6): 1201–1205. YANG Xiaocheng, YAN Jingye, and WU Ji. Application of a resolving matrix approach in full polarization interferometric radiometer[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(6): 1201–1205.
- [16] 金梦彤, 刘浩, 武林, 等. 星载一维综合孔径微波辐射计海洋盐

- 度探测任务仿真及外部误差源分析[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 346-355.
- JIN Mengtong, LIU Hao, WU Lin, *et al.* Task simulation and external error sources analysis for an ocean salinity mission with one-dimensional synthetic aperture microwave radiometer[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(2): 346-355.
- [17] DURAN I, WU Lin, CORBELLA I, *et al.* SMOS floor error impact and mitigation on ocean imaging[C]. Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy, 2015: 1437-1440. doi: 10.1109/IGARSS.2015.7326048.
- [18] LE VINE D M, DINNAT E P, ABRAHAM S, *et al.* The Aquarius simulator and cold-sky calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3198-3120. doi: 10.1109/TGRS.2011.2161481.
- 张爱丽: 女, 1991年生, 博士生, 研究方向为一维综合孔径微波辐射计高精度成像.
- 刘 浩: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为干涉式综合孔径辐射计的系统 and 信号处理.
- 武 林: 男, 1985年生, 副研究员, 研究方向是综合孔径辐射计理论与仪器研究.
- 牛立杰: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为辐射计系统及定标技术.
- 张 成: 男, 1978年生, 副研究员, 研究方向为综合孔径辐射计系统和数据处理.
- 陈 雪: 女, 1982年生, 助理研究员, 研究方向为天线仿真设计.
- 吴 季: 男, 1958年生, 研究员, 研究方向为微波遥感及空间探测.