

星载一维综合孔径微波辐射计抛物柱形反射面天线热致变形影响分析

阚培源^{1,2} 刘明月¹ 李炳旭^{1,3} 张成¹ 陈雪¹ 刘浩¹
范文杰¹

1(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

3(中国科学院大学电子电气与通讯工程学院 北京 100049)

摘要 针对主被动联合探测微波成像仪在轨热致变形所引发的天线方向图偏移与亮温重建误差问题, 本文提出一种适用于抛物柱面反射面天线的刚体位移等效建模算法。该算法以典型工况下的反射面变形为输入, 将其等效为若干关键刚体自由度的变化, 从而快速更新天线方向图及系统响应矩阵。将其应用于载荷 L 波段综合孔径辐射计的亮温重建, 可实现从热载荷、结构变形、电磁响应到亮温重建的端到端快速评估。进一步选取两个关键自由度进行灵敏度分析, 定量考察其对重建精度的影响。结果表明, 该方法在降低热-结构-电磁耦合计算开销的同时, 保持了误差传递过程的可解释性, 可为星载综合孔径辐射计的在轨性能评估与误差控制提供一种高效分析手段。

关键词 一维综合孔径辐射计, 热致变形, 天线方向图, 刚体位移等效算法, 亮温重建
中图分类号 V524

Effects of Thermal Deformation on a Parabolic Cylindrical Reflector Antenna for a Spaceborne One-Dimensional Synthetic Aperture Microwave Radiometer

KAN Peiyuan^{1,2} LIU Mingyue¹ LI Bingxu^{1,3} ZHANG Cheng¹ CHEN
Xue¹ LIU Hao¹ FAN Wenjie¹

1(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

2(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049)

3(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049)

Abstract The Microwave Imager Combined Active and Passive (MICAP) is the primary payload onboard the HY-4A ocean salinity observation satellite. MICAP integrates L-, C-, and K-band synthetic aperture microwave radiometers with an L-band microwave scatterometer to enable high-precision observations of sea surface salinity, sea surface temperature, and sea

surface wind fields. The active and passive subsystems share a parabolic cylindrical reflector antenna, and the geometric fidelity and stability of its radiation pattern are critical to the imaging performance of the synthetic aperture radiometer. During in-orbit operation, thermally induced structural deformation may cause the antenna radiation pattern to deviate from its ground-measured state. These discrepancies propagate into brightness temperature (BT) retrieval through the system response matrix, thereby introducing systematic errors. Conventional thermo-structural-electromagnetic coupled modeling requires high-fidelity finite-element analysis of the deformed reflector surface, followed by electromagnetic simulation. This process is computationally expensive and unsuitable for rapid end-to-end performance evaluation. To address this limitation, this study proposes a rigid-body displacement equivalence algorithm for modeling thermally induced reflector deformation and applies it to the MICAP one-dimensional interferometric radiometer. The proposed method approximates the thermally deformed reflector surface by applying rigid-body translations and rotations to the nominal reflector surface. The equivalent model is considered acceptable when the root-mean-square (RMS) residual between the equivalent and deformed reflector surfaces is less than 0.001 times the operating wavelength. Based on the equivalent reflector model, the antenna radiation pattern is calculated and incorporated into forward radiometer simulation and subsequent BT retrieval. This enables rapid end-to-end evaluation from thermal loading to BT retrieval performance. A sensitivity analysis is further performed for two critical degrees of freedom to quantify their effects on BT retrieval accuracy. The results show that the proposed method substantially reduces computational cost while maintaining sufficient modeling accuracy. The method therefore provides an efficient and practical framework for on-orbit performance assessment and error compensation in spaceborne synthetic aperture radiometers.

Key words 1-D Interferometric radiometer, Thermal deformation, Antenna radiation pattern, Rigid-body displacement equivalence algorithm, Brightness temperature retrieval

0 引言

被动微波遥感技术是海洋观测的重要手段之一^[1]。近年来微波辐射计观测技术的不断进步推动了微波观测模式由早期的离散采样向连续化、广覆盖与高分辨率的转变^[2,3]，对推动气象、海洋环境研究具有重要的现实意义。其中，综合孔径微波辐射计通过空间干涉测量突破了传统微波辐射计受天线口径限制所导致的空间分辨率瓶颈；并凭借全天时、全天候的观测特性发展为海洋遥感领域的关键技术方向^[4]。作为我国海洋盐度探测卫星的主载荷之一，MICAP (Microwave Imager Combined Active and Passive) 采用在轨展开尺寸约为 3×5 m 的抛物柱面反射面天线^[5,6]，对海洋盐度等参数进行高精度探测^[7]。然而卫星在轨运行过程中，空间外热流及其他温度载荷会引起天线结构产生热致变形^[8-10]。该变形会导致天线方向图在轨状态与地面实验实测状态之间产生偏差，并通过影响系统响应矩阵在亮温重建中引入系统误差。传统的高精度建模分析方法由于建模与计算过程复杂，往往耗时长、计算开销大^[11,12]。以 MICAP 为例，对三波段辐射计进行一个极端工况下的完整方向图分析与亮温重建仿真通常需要数月才能完成。考虑到在轨外热流与温度场分布的持续变化，传统方法难以满足时效性需求。因此，亟需一种能够对抛物柱面反射面热致变形进行快速等效拟合的方法，以支持天线方向图与亮温重建的及时端对端评估。

目前，反射面天线热致变形的等效拟合算法大致可分为三类：第一类通过最小化拟合面与变

形面之间的法向偏差，实现对抛物面的拟合^[13-15]；第二类在曲面方程中引入抛物面约束，或对二次曲面方程进行简化以实现拟合^[16,17]；第三类将旋转抛物面视为刚体，通过刚体位移与旋转实现曲面拟合^[18]。Wang 等^[14]基于法向偏差优化，求解了旋转抛物面的参数变化：包括旋转角、平移量以及焦距变化；Dai 等^[16]通过引入与二次曲面不变量相关的变量并采用间接求解策略，将传统仅适用于中心二次曲面的拟合机制扩展到椭圆抛物面的参数恢复；Ma 等^[18]将旋转抛物面视为刚体，并用刚体位移来表征其结构变形。

上述三类方法虽可在不同条件下实现抛物面拟合，但各自仍存在局限：第一类方法仅适用于变形与转角较小的情况；第二类方法精度较高，但难以完全满足原始约束方程；第三类方法目前主要适用于旋转抛物面，不适用于抛物柱面反射面天线的拟合，且尚未用于天线方向图与亮温重建的快速评估。为此，本文提出一种基于刚体位移的拟合方法，用于等效卫星在轨运行期间抛物柱面反射面天线的热致变形。该方法通过快速求解刚体位移参数，评估其对天线方向图与亮温重建的影响，并针对特定自由度参数开展灵敏度分析。

1 MICAP 天线的热载荷与结构力学分析

1.1 天线结构与馈源阵列介绍

MICAP 载荷采用一体化系统设计，创新性地集成了 L、C、K 三波段微波辐射计与 L 波段散射计。主被动探测设备共用一副抛物柱面反射面天线，其结构概念图如图 1 所示。该天线由三块反射面、两个侧铰机构、一个根铰机构及一个馈源舱构成。其中，左、右反射面通过侧铰机构与中间反射面连接，中间反射面则通过根铰机构与馈源舱固定。载荷坐标系定义亦如图 1 所示：其中 z 轴指向地心， x 轴与卫星飞行方向一致， y 轴用于表征馈源阵列的排布方向。

本文针对 L 波段辐射计进行天线方向图与亮温重建的分析。L 波段辐射计工作频率为 1.414 GHz，共包含 12 个馈源单元。馈源阵列沿载荷的 $+y$ 至 $-y$ 方向排布。如图 2 所示，以第一个馈源为坐标原点，各馈源之间的间距依次为 [0,1,2,7,8,12,17,19,21,22,24,25] du，其中 $du = 0.618 \times \lambda_L$ 。

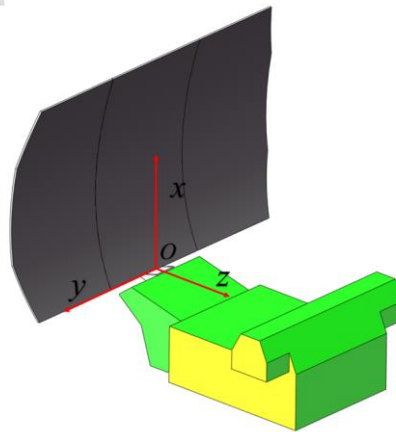


图 1 天线结构示意图

Fig.1 Conceptual diagram of the MICAP antenna structure

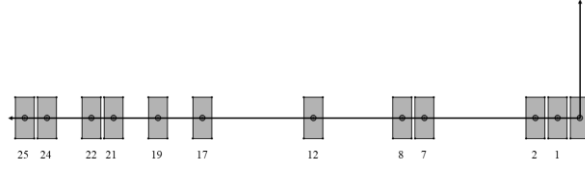


图2 馈源阵列示意图

Fig.2 Schematic diagram of the feed array

1.2 空间外热流与反射面温度场仿真

在轨运行期间，天线反射面的温度场分布会随时间不断变化。不同的温度场分布将导致反射面产生不同程度的热致变形，进而影响天线的电性能及后续的亮温重建精度。为此，本文针对MICAP反射面天线所处环境的空间外热流与典型工况温度场进行建模与仿真。

卫星在轨运行过程中的整体热平衡方程及其离散化表达式如下：

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6$$

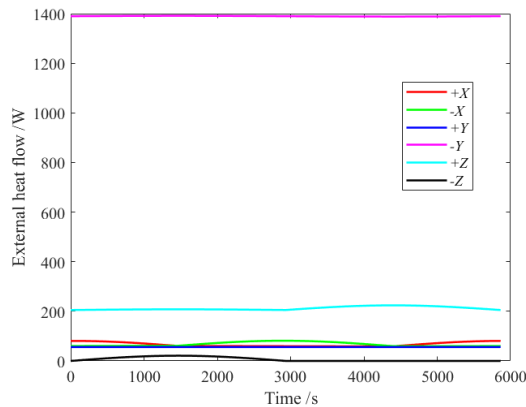
该公式将天线视作一个整体，其中 Q_1 、 Q_2 和 Q_3 分别表示天线从太阳辐射、地球反射的太阳辐射和地球自身的红外辐射中吸收到的热量。 Q_4 表示天线在轨运行期间自身产生的热量。 Q_5 表示天线向太空辐射的热量。 Q_6 表示天线自身内部的热量变化。

$$m_i c_i \frac{dT_i}{dt} = Q_{external,i} + q_i + \sum_{j=1}^N E_{ji}(T_j - T_i) + \sum_{j=1}^N G_{ji}(T_j^4 - T_i^4)$$

当将天线离散化时，天线内部不同节点之间的温度差异决定了节点之间的换热情况，公式中 i 和 j 表示不同节点； m 表示质量； c 代表材料的热容； $Q_{external}$ 表示作用在节点上的外部环境热输入功率； q 是天线内部热源的功率； E_{ji} 和 G_{ji} 分别代表节点之间线性热传递系数和辐射系数。

太阳与轨道平面之间的夹角 β 是天线受照情况的主要决定因素。根据卫星的轨道参数， β 角全年的变化范围为 $58.58^\circ \sim 86.92^\circ$ 。因此取 β 的最大和最小值计算低温工况和高温工况下到达卫星的外热流情况，如图3所示。

(a)



(b)

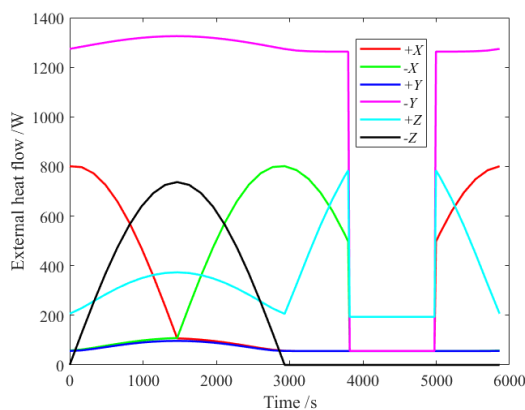


图 3 (a) 低温工况外热流情况; (b) 高温工况外热流情况

Fig.3 (a) External Heat Flux under Low-Temperature Condition; (b) External Heat Flux under High-Temperature Condition

图 3 中纵轴的外热流密度由太阳辐射、地球反射太阳辐射以及地球红外辐射共同组成，横轴为载荷运行一轨的时间。由于载荷在轨运行过程中其 $-Y$ 向表面朝向太阳，因此该表面所接收的外热流密度应在六个方向中最高，图 3 结果验证了这一特征。

基于外热流密度数据，建立天线的有限元模型，并分别获取低温工况下的最低温时刻与高温工况下的最高温时刻的温度场分布，如图 4 所示。

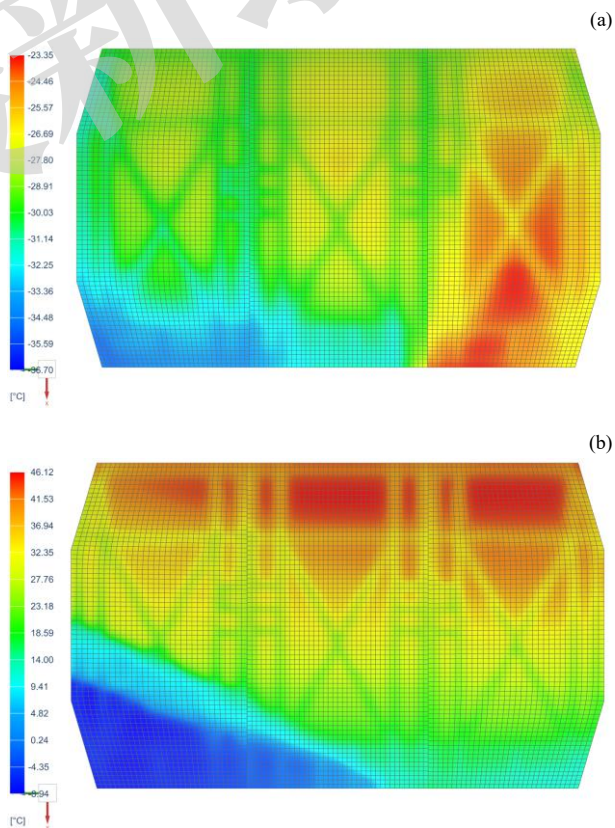


图 4 (a) 低温工况最低温时刻温度场分布; (b) 高温工况最高温时刻温度场分布

Fig.4 (a)Temperature Field Distribution at the Lowest Temperature Moment under Low-Temperature Condition; (b)
Temperature Field Distribution at the Highest Temperature Moment under High-Temperature Condition

由图 4 可知，低温工况下反射面节点的最低温度为 -36.70°C ，高温工况下反射面的最高温度为 46.12°C 。此外，高温工况下的温度梯度显著大于低温工况，且其分布受背筋结构影响明显。

1.3 基于温度场分布的结构力学仿真

将低温与高温工况下的温度场数据映射至结构力学模型，得到反射面在两种工况下的变形云图，如图 5 所示。在力学分析中，反射面的固定约束施加于反射面底座与馈源舱的螺栓连接处；两侧反射面与中间反射面之间的铰链连接则简化为 RBE2 刚性连接单元。

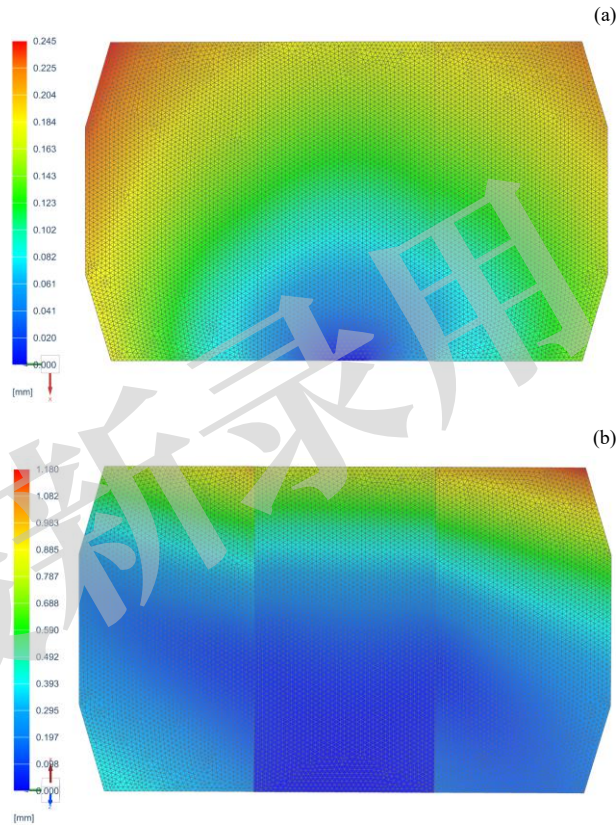


图 5 (a) 低温工况最低温时刻变形云图；(b) 高温工况最高温时刻变形云图

Fig.5 (a) Deformation Contour Map of the Reflector at the Lowest Temperature Moment under Low-Temperature Condition; (b) Deformation Contour Map of the Reflector at the Highest Temperature Moment under High-Temperature Condition

由图 5 结果可知，反射面的热致变形特征依赖于温度场的分布特性。当施加于反射面的温度梯度较小时，变形保持相对对称；随着温度梯度增大，变形依据温度分布的不同呈现出明显的非对称特征。其中低温工况下的最大变形为 0.245 mm ，高温工况下最大变形可达 1.180 mm 。

为对反射面热致变形进行系统量化评估，引入形面均方根误差（Surface Root Mean Square Error, RMS），用以衡量实际形面偏离理想设计形面的程度。该指标通过统计反射面所有离散节点相对于理想形面的位置偏差并计算其均方根值，实现对整体形面精度的科学评价。其数学定义

如下：

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |r_n|^2}$$

其中， r_n 表示相应工况下该节点的位移。

$$r_n = \sqrt{(x'_n - x_n)^2 + (y'_n - y_n)^2 + (z'_n - z_n)^2}$$

式中， (x_n, y_n, z_n) 与 (x'_n, y'_n, z'_n) 分别为该节点在变形前、后的坐标。

根据上述形面 RMS 的定义，提取反射面在低温与高温工况下各节点（涵盖反射面有限元模型中所有网格节点）的位移信息。结果表明，反射面在低温工况下的形面 RMS 为 0.1469 mm，在高温工况下为 0.5160 mm。

2 天线热致变形的刚体位移等效算法及分析

2.1 刚体位移等效算法

刚体位移等效算法在拟合过程中将理论反射面视为刚体，即结构上任意两点之间的相对位置在拟合过程中保持不变，仅允许整体发生旋转与平移。具体而言，该算法对反射面在空间中的六个自由度（绕 X、Y、Z 轴的旋转及沿 X、Y、Z 轴的平移）进行调整，以最小化变换后理论反射面与实际变形反射面之间的形面残差 RMS。形面残差 RMS 定义为两者表面差值的均方根值，用于表征拟合精度。实际应用中通常设置误差阈值以评价拟合效果：当形面残差 RMS 小于天线工作波段波长的千分之一时，视为拟合成功，即变换后的理论反射面可有效替代实际变形反射面。算法的示意图如图 6 所示。

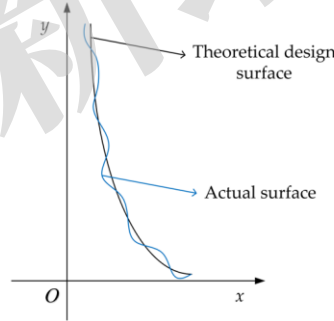


图 6 刚体位移拟合算法示意图

Fig.6 Schematic of Rigid Body Displacement Equivalent Fitting

该算法的数学模型如下：以单个节点为例， (x_0, y_0, z_0) 表示其在理论反射面上的点坐标； (x'_n, y'_n, z'_n) 表示同一节点在理论反射面经过六自由度变换后的坐标； (x_n, y_n, z_n) 为该节点发生变形后的坐标，由仿真软件直接输出。六个自由度定义为 $R_x=\theta, R_y=\varphi, R_z=\alpha, D_x=dx, D_y=dy, D_z=dz$ 。在施加六自由度变换后，节点坐标可表示为：

$$x'_n = ((x_0 \cos \varphi - (z_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \sin \varphi) \cos \alpha - (y_0 \cos \theta - z_0 \sin \theta) \sin \alpha) + dx$$

$$y'_n = ((y_0 \cos \theta - z_0 \sin \theta) \cos \alpha + (x_0 \cos \varphi - (z_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \sin \varphi) \sin \alpha) + dy$$

$$z'_n = ((z_0 \cos \theta + y_0 \sin \theta) \cos \varphi + x_0 \sin \varphi) + dz$$

目标函数为：

$$Objective = \min(RMS_{residual})$$

其中：

$$RMS_{residual} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left| \sqrt{(x'_n - x_n)^2 + (y'_n - y_n)^2 + (z'_n - z_n)^2} \right|^2}$$

对目标函数分别关于六个未知量求偏导，可得到六自由度参数：

$$\frac{\partial f}{\partial R_x} = 0; \frac{\partial f}{\partial R_y} = 0; \frac{\partial f}{\partial R_z} = 0; \frac{\partial f}{\partial D_x} = 0; \frac{\partial f}{\partial D_y} = 0; \frac{\partial f}{\partial D_z} = 0$$

算法的验证流程如下：首先构建尺寸为 3×5 m 的抛物柱面模型。随后在理想模型各节点坐标上引入三维随机偏差，各方向偏差量随机分布于-0.1 mm 至 0.1 mm 区间。该操作用于模拟由热致翘曲、制造公差及有限元离散误差等因素导致的非刚体变形成分，代表了刚体等效模型与实际形面之间的固有残差。在此基础上，对该面型进一步施加一组预设的六自由度刚体位移，以模拟综合热载荷工况下的整体位姿变化：其中绕 X, Y, Z 三轴分别旋转 45°, 5°和 0.5°，并沿 X, Y, Z 三轴平移 1 mm, 0.5 mm 和 0.03 mm。该参数组合用于模拟热载荷工况下的整体角度变化与位置偏移，同时保留局部非刚体误差的影响。

基于提出的刚体位移等效算法，对施加偏差后的节点坐标数据进行了拟合重构，并求解得到拟合结果如表 1 所示。

表 1 拟合结果

Table.1 Fitting Results

参数	设置值	拟合值
$R_x/(^{\circ})$	45	45
$R_y/(^{\circ})$	5	5.0002
$R_z/(^{\circ})$	0.5	0.4999
$D_x/(\text{mm})$	1	0.9973
$D_y/(\text{mm})$	0.5	0.2127
$D_z/(\text{mm})$	0.03	0.0142

根据公式计算得到形面残差 RMS 为 0.0094 mm。结果表明，所提出的刚体位移等效拟合算法在空间精度控制方面具备较高的几何保真性，能够精确描述结构热变形后的整体位姿特征。

2.2 高温工况下等效建模算法与方向图等效性验证

与低温工况相比，高温工况下天线的结构变形更为显著且复杂，由此导致的天线方向图偏移与亮温重建误差也更大。为定量评估温度变化对天线性能及亮温重建精度的影响，本文采用刚体位移等效算法，对高温工况下方向图与亮温重建的相应变化进行仿真与分析。

从高温工况有限元模型中均匀选取分布于三块反射面板上的 45 个特征点，并提取其在变形前后的坐标。以未变形模型中的坐标系为参考，对特征点集施加六自由度参数变换以重构变形后的点位，拟合结果如表 2 所示。需说明的是，在特征节点拟合过程中，拟合前后所用参考坐标系相较于飞行坐标系具有如下关系：X 轴方向保持不变，Y 轴方向与飞行坐标系相反，Z 轴满足右手定则。

表 2 高温工况拟合结果

Table.2 Fitting Results of High Temperature Condition

参数	拟合值
$R_x/(^{\circ})$	0.0040
$R_y/(^{\circ})$	-0.0161
$R_z/(^{\circ})$	-0.0010
$D_x/(mm)$	0.0916
$D_y/(mm)$	-0.0471
$D_z/(mm)$	-0.6663
形面残差 RMS/(mm)	0.1251

如表 2 所示, 经刚体位移等效后的理论反射面与实际变形反射面之间的形面残差 RMS 为 0.1251 mm, 小于 L 波段波长的千分之一。因此, 可认为刚体位移后的天线反射面与实际变形反射面在几何上可以等效。

对拟合所得的六自由度参数进一步分析可知, 模型绕 Y 轴的旋转角度 (R_y) 与沿 Z 轴的平移量 (dz) 为该工况下的主导运动分量, 其余自由度上的运动幅度相对较小。这一现象与实际有限元云图及物理解释高度一致。当高温工况下, 非均匀热载荷作用使反射面结构产生自由热膨胀变形; 然而, 由于底座及馈源舱连接处存在固支边界条件, 该约束效应显著改变了结构的热应变场分布, 使得原本以伸缩为主的变形能部分转化为整体结构的刚体位姿变化。具体而言, 反射面上的温度场使反射面呈现受热膨胀趋势, 该趋势受到中板底座与馈源舱之间固定连接的限制, 导致反射面整体向后仰, 即绕 Y 轴发生转动。而沿 Z 轴的平移则来源于约束反力对膨胀变形的等效折算。

随后, 将所得六自由度参数施加于理论模型以生成等效天线方向图, 并与实际热致变形反射面计算得到的方向图进行对比。采用三项关键指标开展对比分析: 波束指向、增益差以及半功率波束宽度。1, 7 和 12 号天线的对比结果见表 3。

表 3 方向图对比结果

Table.3 Comparison Results of Antenna Pattern

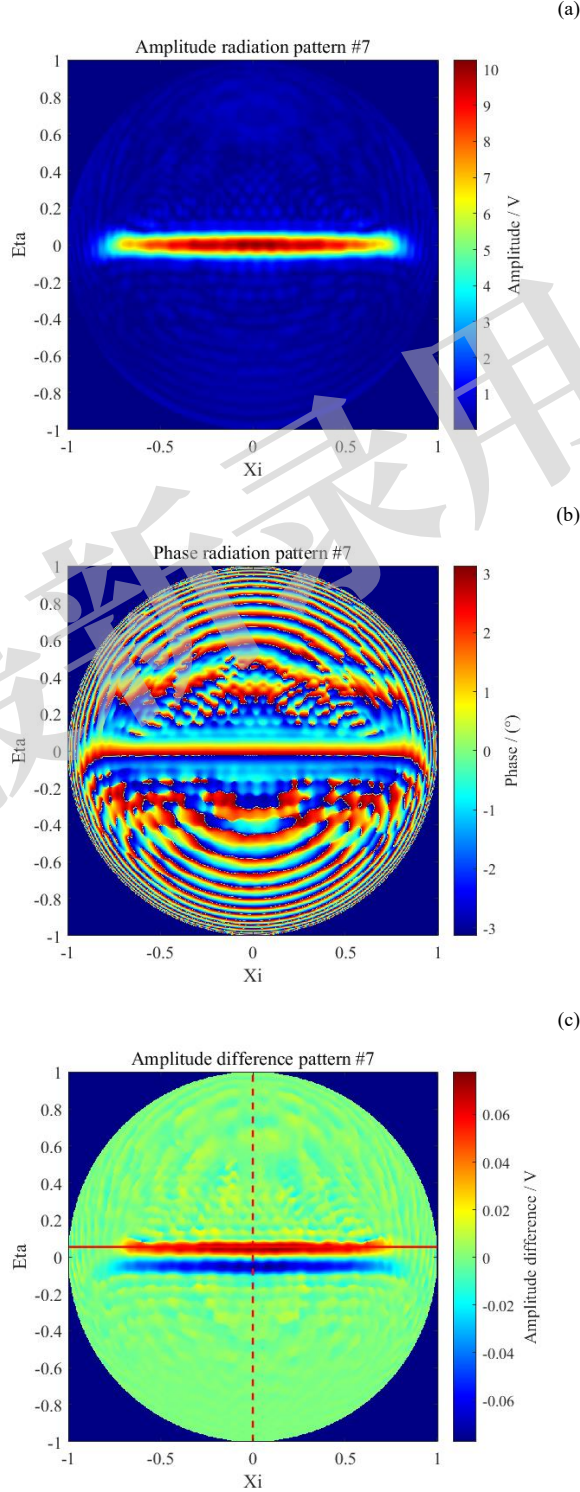
指标	#1	#7	#12
波束指向(ξ)	0	0	0
波束指向(η)	0.0033	0.0033	0
最大增益差值/(dB)	-0.008	0.004	-0.006
半功率波束宽度/ $(^{\circ})$	0.01	0.01	0.01

表 1 中 1 号、7 号和 12 号馈源单元的对比结果表明, 本文提出的刚体位移等效算法在天线方向图层面具有较高的等效精度。三个馈源单元在方向余弦坐标上的波束指向偏移量均不超过 0.0033, 其中 12 号单元无偏移, 说明等效模型准确复现了实际变形模型的辐射主瓣指向。增益差值最大仅为 -0.008 dB, 远低于典型系统误差容限, 表明等效模型在主瓣增益这一关键指标上与实际模型高度一致。所有单元的半功率波束宽度差异均稳定在 0.01° 以内, 进一步验证了等效模型在波束宽度特性方面的保真能力。

3 MICAP 天线方向图及亮温重建误差分析

3.1 天线方向图误差分析

将高温工况热致变形的等效模型引入天线有限元仿真后，可获得 $\xi - \eta$ 域内的二维幅度和相位方向图（主极化）。选取第 7 号阵元作为代表，用于说明相应的对比结果。图 7(a)和(b)给出了阵列中第 7 号天线的幅度与相位方向图。为进一步定量分析六自由度变化所引起的方向图响应偏差，构建在 $\xi - \eta$ 内的幅度与相位差值方向图，结果如图 7(c)和(d)所示。



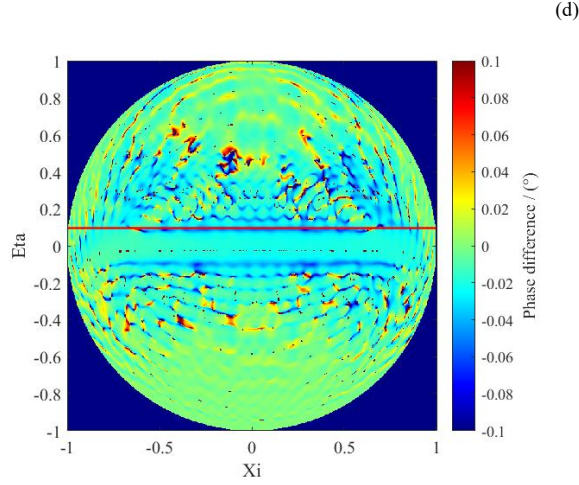
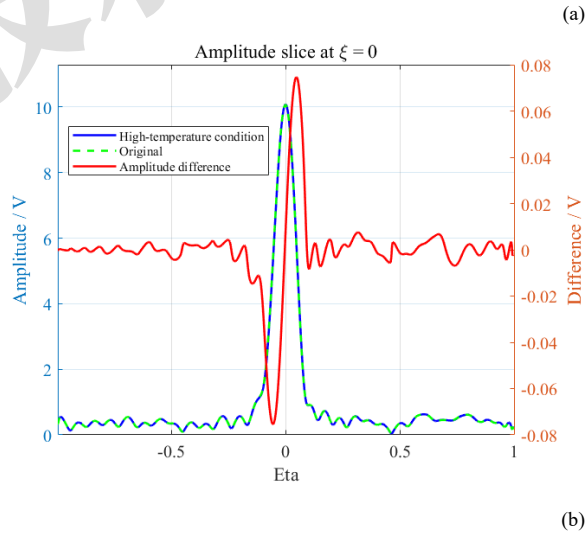


图 7 (a) 7 号天线幅度方向图 (主极化); (b) 7 号天线相位方向图 (主极化); (c) 7 号天线幅度差值方向图 (主极化); (d) 7 号天线相位差值方向图 (主极化)

Fig.7 (a) The amplitude radiation pattern of the No. 7 antenna's main polarization; (b) The phase radiation pattern of the No. 7 antenna's main polarization; (c) The differential amplitude radiation pattern of the No. 7 antenna's main polarization; (d) The phase radiation pattern of the No. 7 antenna's main polarization

为进一步分析方向图变化在关键区域的具体特征, 分别在幅度与相位差值图中选取了变化显著的区域进行一维剖面提取。其中, 幅度方向图在 $\xi = 0$ 与 $\eta = 0.053$ 处取样, 相位方向图则在 $\eta = 0.096$ 处取样, 以揭示主视方向附近方向图的细节变化趋势。考虑到综合孔径辐射计系统主要依赖交轨方向进行干涉观测, 其成像性能对该方向的相位稳定性尤为敏感, 故未在顺轨方向展开相应的一维剖面分析。



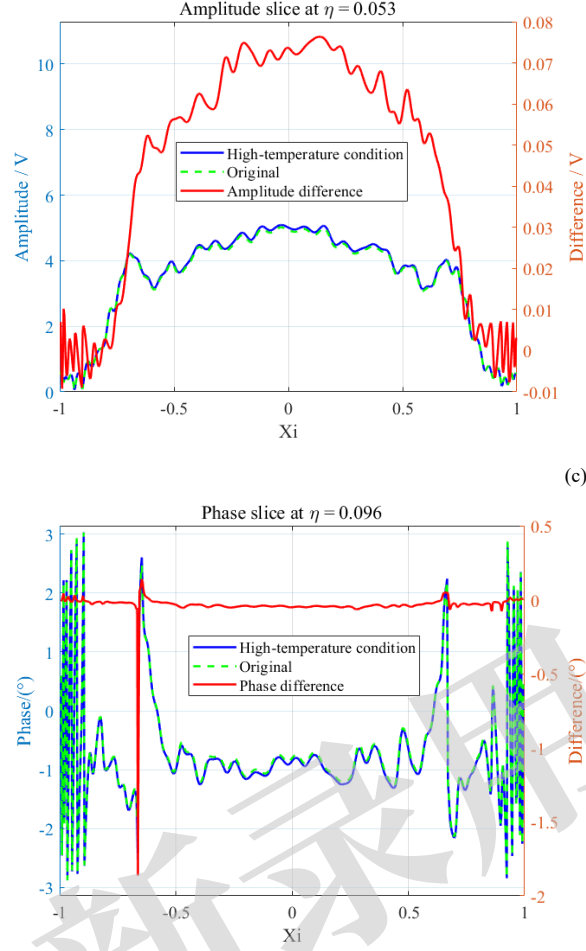


图 8 (a) 7 号天线沿 ξ 方向的幅度方向图（一维剖面）；(b) 7 号天线沿 η 方向的幅度方向图（一维剖面）；(c) 7 号天线沿 η 方向的相位方向图（一维剖面）

Fig.8 (a) Amplitude radiation pattern (1D) of antenna No. 7 along the ξ direction (b) Amplitude radiation pattern (1D) of antenna No. 7 along the η direction; (c) Phase radiation pattern (1D) of antenna No. 7 along the η direction

图 8 给出了在高温工况与未变形工况下，沿宽波束方向与窄波束方向提取的一维幅度与相位方向图剖面。横轴为对应剖面上的 ξ 或 η 坐标；左纵轴表示幅度或相位的数值，右纵轴表示高温工况相对未变形工况的差值。蓝色与绿色曲线分别对应高温工况与未变形工况下的方向图响应，红色曲线表示两者之差。图 8(a)给出了沿 $\xi = 0$ 方向的幅度剖面，高温工况下主瓣位置保持一致，表明热致变形未引起波束指向偏移。图 8(b)展示了沿 $\eta = 0.053$ 处的幅度剖面，在无混叠视场范围内，幅度相较未变形工况的平均变化为 1.51%，最大偏差为 1.72%。图 8(c)给出了沿 $\eta = 0.096$ 处的相位响应。在相同无混叠范围内，相位误差的均方根（RMS）为 2.44° ，最大相位误差达到 -3.69° 。

尽管在当前 L 波段应用背景下，反射面在高温工况下的热致变形所导致的天线方向图畸变在绝对量值上较为有限，但其在亮温反演过程中可能引入的系统性误差仍不可忽视。并且在更高频段（如 C 波段、K 波段等）或热载荷更为极端的在轨场景中，波长缩短将导致天线方向图对形

变敏感度急剧升高，上述误差效应会被显著放大。

3.2 亮温重建理论模型

远场条件下的可见度函数表现形式为：

$$V_{ij} = \iint_{\xi^2 + \eta^2} T_B(\xi, \eta) \frac{F_{ni}(\xi, \eta) F_{nj}^*(\xi, \eta)}{\sqrt{\Omega_i \Omega_j} \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} d\xi d\eta$$

其中， $\xi = \sin \theta \cos \varphi$ 与 $\eta = \sin \theta \sin \varphi$ 为方向余弦， (θ, φ) 表示入射角； $T_B(\xi, \eta)$ 为观测目标的亮温。 $F_{ni}(\xi, \eta) F_{nj}^*(\xi, \eta)$ 为两天线的功率辐射方向图。 Ω_i 与 Ω_j 分别为对应天线的等效立体角。

$u = \frac{x_j - x_i}{\lambda}$ 与 $v = \frac{y_j - y_i}{\lambda}$ 表示两天线单元在波长归一化下的位置差。

在理想条件下，可见度函数与校正后亮温之间满足傅里叶变换对：

$$T_{mod}(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(u, v) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} du dv$$

然而在实际情况下，各天线之间的方向图误差不可忽略，因此引入 G 矩阵方法。

$$V(u, v) = \iint G(u, v, \xi, \eta) T_B(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad T_{mod}(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} V(u, v) e^{-j2\pi(u\xi + v\eta)} du dv$$

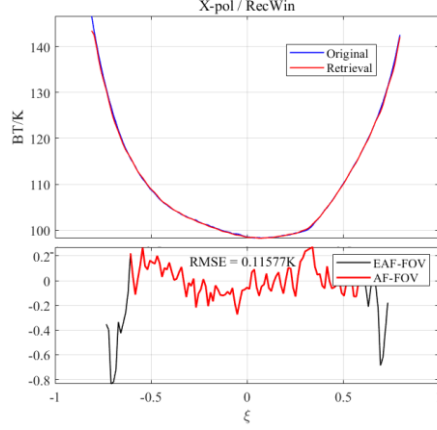
在此情况下，亮温重建过程可分为前向仿真与后向仿真两个阶段。在前向仿真阶段，基于已知的亮温分布并结合 G 矩阵计算辐射计的可见度函数，以模拟辐射计的理论响应；在后向仿真阶段，则将观测得到的实际可见度函数与 G 矩阵的逆相结合，重构观测目标的实际亮温分布。

3.3 高温工况下亮温重建及分析

在完成高温工况下各阵元天线幅度与相位方向图的分析后，进一步对热致变形在亮温重建全流程中的总体影响进行定量评估。为此设计了两组对比仿真实验：第一组实验用于建立理论最优性能的参考基准，前向建模与反演重建均使用理想方向图生成的 G 矩阵，模拟在无扰动条件下系统的亮温反演性能。第二组实验用于模拟热致变形工况下的误差积累过程：前向建模阶段采用基于六自由度变换后的方向图构建 G 矩阵，反映结构变形下的真实系统响应；反演阶段仍使用理想方向图生成的 G 矩阵，模拟在实际在轨处理中因未能及时更新方向图模型而引发的系统性误差。为确保仿真流程与实际在轨数据处理流程保持一致，上述两组仿真实验均引入了海洋-目标变换（Sea-Target Transformation, STT）校正模块。

两组仿真均采用平静海面亮温模型来生成用于亮温反演的辐射计成像数据。基于上述仿真设置，图 9 展示了在前向建模与反演重建阶段均采用未变形天线方向图所构建 G 矩阵时所获得的亮温重建结果。

(a)



(b)

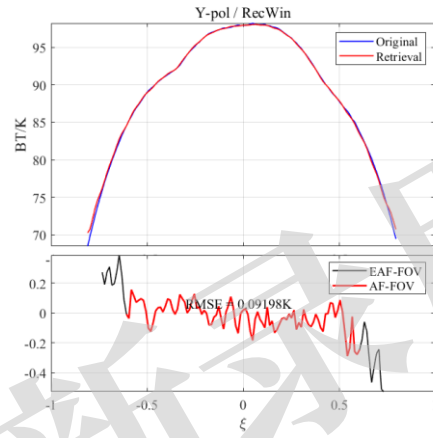


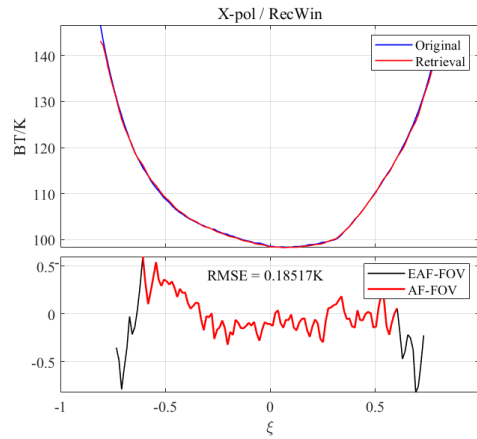
图 9 (a) 前后均使用原始天线方向图的 X 极化亮温重建图; (b)前后均使用原始天线方向图的 Y 极化亮温重建图

Fig.9 (a) X-polarization BT inversion diagram based on the original (undeformed) antenna radiation pattern; (b) Y-polarization BT inversion diagram based on the original (undeformed) antenna radiation pattern

图 9 展示了基于原始（未变形）天线方向图的亮温重建结果，分别对应 X 极化与 Y 极化通道。在两个子图中，“Original”表示由理想辐射传输模型生成的标准亮温分布，用作重建的参考基准；“Retrieval”表示采用 G 矩阵伪逆算法重建的亮温结果。图中标注的 AF-FOV (Aliasing-Free Field of View) 与 EAF-FOV (Extended Aliasing-Free Field of View) 分别对应无混叠视场范围与扩展视场范围，用以评估重建质量的空间一致性。每幅图均给出了均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 指标，定量反映反演亮温与参考亮温之间的整体误差水平。其中，X 极化通道的 RMSE 为 0.11577 K，Y 极化通道的 RMSE 为 0.09198 K，表明在理想方向图条件下系统具有良好的重建精度与极化一致性。

图 10 展示了前向建模采用基于六自由度等效后的天线方向图，反演阶段使用未变形天线方向图所构建 G 矩阵的亮温重建结果。

(a)



(b)

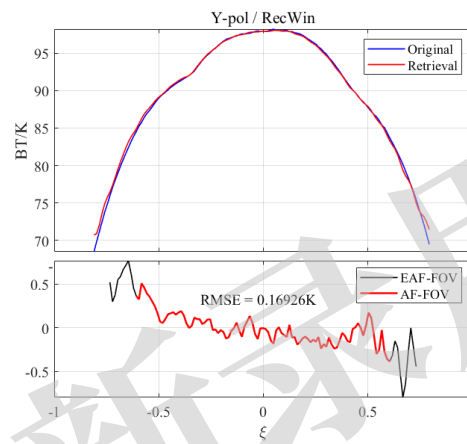


图 10 (a) 第二组仿真实验的 X 极化亮温重建图; (b) 第二组仿真实验的 Y 极化亮温重建图

Fig.10 (a) X-polarization BT inversion diagram based on the antenna radiation pattern after deformation equivalence;

(b) Y-polarization BT inversion diagram based on the antenna radiation pattern after deformation equivalence

由图 9 与图 10 可知, 天线方向图的变化在亮温反演流程中引入了系统性误差。当采用基于六自由度等效热变形的方向图进行前向建模时, X 极化与 Y 极化通道的亮温重建误差分别达到 0.0694 K 和 0.07728 K, 表明热致变形已在可见度函数构建及成像反演中产生了显著影响。需要指出的是, 当前分析波段为 L 波段且模拟所采用的热载荷边界条件和结构参数仍为较理想化场景, 整体变形幅度受到一定限制。因此, 方向图偏移和重建误差虽未达到极端工况下的最大可能值, 但已揭示了结构扰动对亮温重建结果的敏感性与传递路径。

3.4 关键自由度对亮温重建影响的灵敏度分析

为识别对辐射性能影响最为显著的主导变形模式, 并在保证工程可实现性的前提下开展系统的误差建模与灵敏度评估, 需在六个刚体自由度中选取具有代表性的参数进行分析。本文选取绕 Y 轴旋转与沿 Z 轴平移作为主要热致变形参数。绕 Y 轴的旋转(俯仰方向上的姿态变化)与沿 Z 轴的平移(焦向方向上的整体位移)是当前热工况下变形幅值最显著的两个自由度, 其变化量远高于其他方向的旋转和平移分量。该结果不仅体现了这两个自由度在空间热变形响应

中的主导地位，也为后续构建简化且具代表性的误差模型提供了充分依据。因此，本节将围绕这两个自由度展开专门的亮温重建灵敏度分析，以评估其对系统性能的影响程度。具体而言，反射面绕 Y 轴的旋转主要由太阳照射不对称、根部铰链受限或展开偏差等因素诱发，该变形将引起天线主瓣在俯仰方向上的偏移，从而改变视场中目标投影位置，直接影响亮温重建中可见度函数的构建与成像精度。相比之下，沿 Z 轴的平移通常源于热膨胀或收缩导致的焦向变形，虽不会显著改变天线指向，但会影响辐射口径的相位中心位置及幅度分布特性，进而引发系统响应矩阵中的相位偏差与幅度扰动。

需要指出的是，真实在轨热环境通常比仿真设置更为复杂：温度分布呈现非均匀特征，结构响应亦具有较强的不确定性。为提高灵敏度分析的工程相关性与鲁棒性，本文在仿真中扩展变形参数的取值范围以覆盖上述复杂性。具体而言，天线绕 Y 轴旋转角度在 -1° 至 1° 之间变化，步长为 0.2° ；沿 Z 轴平移量在 -10 mm 至 10 mm 之间变化，步长为 2 mm 。在每个旋转与平移步进点上，分别对反射面在该步进变化上的 12 个天线方向图进行电磁仿真（包含 X, Y 极化），获得对应的幅度与相位方向图，并将其代入亮温重建流程，与第一组仿真结果进行对比（与 3.3 节的分析流程一致）。计算得到两种极化下亮温重建误差的均方根值，结果分别如图 11 和图 12 所示。

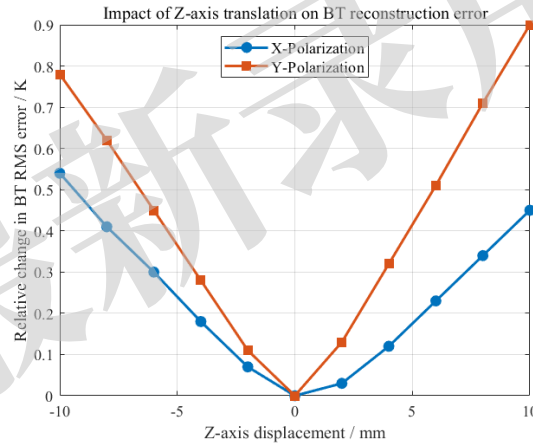


图 11 沿 Z 轴平移条件下亮温重建误差的均方根值 (RMS)

Fig.11 Root Mean Square (RMS) of BT error during Translation along the Z-axis

图 11 展示了沿 Z 轴平移对亮温重建误差的影响。如图所示，X, Y 两种极化的亮温重建误差均方根值均随轴向位移幅值的增大而显著上升，且整体呈对称变化趋势。当反射面沿 Z 轴平移 $\pm 10\text{ mm}$ 时，X 极化的最大 RMS 误差达到 0.5482 K ，Y 极化的最大 RMS 误差达到 0.9016 K 。且结果表明，在当前天线构型下，Y 极化通道对轴向结构形变更为敏感。

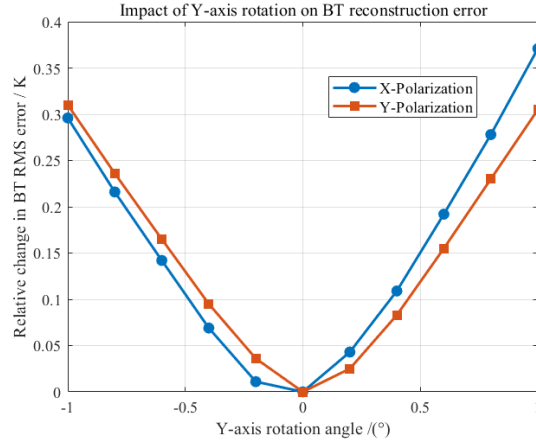


图 12 绕 Y 轴旋转条件下亮温重建误差的均方根 (RMS)

Fig.12 Root Mean Square (RMS) of BT error during Rotation along the Y-axis

图 12 给出了绕 Y 轴旋转对亮温重建误差的影响。如图所示, X, Y 两种极化通道的亮温重建误差均方根 (RMS) 均随旋转角幅值的增大而逐渐上升, 并呈现出明显的对称变化趋势。当旋转角达到 $\pm 1^\circ$ 时, X 极化的最大 RMS 误差为 0.3688 K, Y 极化的最大 RMS 误差为 0.3160 K。然而, 与沿 Z 轴平移的情形不同, 两种极化对俯仰 (Y 轴) 方向指向偏差的敏感性差异并不显著。

绕 Y 轴旋转与沿 Z 轴平移的仿真结果表明, 即使仅考虑单一自由度的变化, 在 L 波段也可能在亮温重建中引入不可忽略的误差。这意味着若缺乏有效补偿或方向图更新, 即便是孤立的刚体位移亦足以导致明显的重建误差。

4 总结

本文面向大型抛物柱面反射面天线在轨热致变形引起的方向图变化与亮温重建误差问题, 提出了一种基于刚体位移等效算法的热致变形快速拟合方法。该等效算法以刚体自由度参数对热致变形进行表征, 目的在于快速、准确地评估热致变形对天线方向图和辐射计亮温重建精度的影响。与传统方法相比, 该方法在保持较高拟合精度的同时显著降低了计算复杂度, 拟合残差可控制在 L 波段波长的千分之一以内, 满足热致变形误差传播分析对模型精度与计算效率的综合要求。

在此基础上, 本文进一步开展了针对关键等效自由度的灵敏度分析, 定量评估了绕 Y 轴旋转 (俯仰误差) 与沿 Z 轴平移 (轴向位移) 对亮温重建精度的影响规律。结果表明, 上述两类几何偏差会在极端热变形情形下引入显著的亮温重建误差, 属于辐射计在轨成像中需要重点关注的误差源。因此, 本文结论可为大口径被动微波载荷的热控方案优化、姿态/指向稳定性指标分解, 以及在轨定标提供工程参考。

需要说明的是, 本文提出的刚体位移等效算法主要针对在轨热环境驱动的准静态、低频系统性误差, 未包含在轨动态结构扰动 (例如微振动、热颤振等) 对反射面形面的时变影响。动态扰动可能导致其对亮温重建的影响机制与准静态热变形存在差异, 往往需要结合载荷工作模式、积分时间等进行联合分析。后续工作将考虑将微振动与热颤振等动态扰动引入误差模型, 通过结构力学与电磁响应的耦合仿真与在轨数据反演, 进一步评估其对方向图稳定性与亮温重建精度的影响, 从而构建更为全面的在轨误差评估框架。

参考文献

- [1] TJIPUTRA J F, COUESPEL D, SANDERS R. Marine ecosystem role in setting up preindustrial and future climate[J]. *Nature Communications*, 2025, **16**(1): 2206
- [2] WANG J J, ZHANG F, XUE Z Y, *et al.* Ultrahigh resolution portable dual-channel laser heterodyne radiometer[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, **73**: 7007609
- [3] RAHMAT-SAMII Y, WANG J B, ZAMORA J, *et al.* A 7 m $\times$ 1.5 m aperture parabolic cylinder deployable mesh reflector antenna for next-generation satellite synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, **71**(8): 6378-6389
- [4] ESMAIL B A F, ISLEIFSON D, SHAFI L. A Ku-band compact offset cylindrical reflector antenna with high gain for low-earth orbit sensing applications[J]. *Sensors*, 2024, **24**(23): 7535
- [5] LIU H, ZHU D, NIU L J, *et al.* MICAP (microwave imager combined active and passive): a new instrument for Chinese ocean salinity satellite[C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Milan: IEEE, 2015: 184-187
- [6] ZHANG L J, YIN X B, WANG Z Z, *et al.* Preliminary analysis of the potential and limitations of MICAP for the retrieval of sea surface salinity[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, **11**(9): 2979-2990
- [7] GUO T S, GUO X, LIU H, *et al.* Study of the real-time onboard radio frequency interference detection and mitigation strategy for MICAP L-band radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**: 5304914
- [8] GUARRIELLO A, LOISON R, BRESCIANI D, *et al.* Structural and radio frequency co-design and optimization of large deployable reflectarrays for space missions[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2023, **71**(5): 3916-3927
- [9] SON M Y, CHAE B G, SUNG H M, *et al.* Numerical investigation on the thermal characteristics of lightweight metal mesh-based reflector antenna with various knitting conditions[J]. *Aerospace*, 2024, **11**(9): 780
- [10] DUAN Baoyan, WANG Meng. Research of the theoretical model of multi-field coupling and multidisciplinary optimization design on microwave antennas[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, **41**(10): 2051-2060 (段宝岩, 王猛. 微波天线多场耦合理论模型与多学科优化设计的研究[J]. *电子学报*, 2013, **41**(10): 2051-2060)
- [11] XU P Y, WANG Y, XU X X, *et al.* Structural-electromagnetic-thermal coupling technology for active phased array antenna[J]. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2023, **2023**: 2843443
- [12] HU N G, BAO H, DUAN B Y, *et al.* Topology optimization of reflector antennas based on integrated thermal-structural-electromagnetic analysis[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, **55**(2): 715-722
- [13] CHANG W W, YUSUP A L, XIANG B B. A new best-fit method for distorted reflector antenna surface[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **336-338**: 1857-1862
- [14] WANG Congsi, DUAN Baoyan, QIU Yuanying. Fitting of distorted reflector antenna surface based on least square method[J]. *Modern Radar*, 2004, **26**(10): 52-55 (王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 基于最小二乘法的天线变形反射面的拟合[J]. *现代雷达*, 2004, **26**(10): 52-55)
- [15] BAN Y, FENG S F, VANDENBOSCH G A E, *et al.* Calculation of the best fit subreflector and its application in eliminating the harmless error of deformed large subreflectors[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, **68**(8): 5855-5863
- [16] DAI M, NEWMAN T S, CAO C G. Least-squares-based fitting of paraboloids[J]. *Pattern Recognition*, 2007, **40**(2): 504-515
- [17] ANDREWS J, SÉQUIN C H. Type-constrained direct fitting of quadric surfaces[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2014, **11**(1): 107-119
- [18] MA Z X. Antenna reflector surface fitting algorithm based on rigid body displacement principle[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(18): 29-35



刘浩（通信作者）男，1978 年 11 月出生于江西省九江市，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要研究方向为干涉式被动微波、毫米波/太赫兹成像技术及其在定量遥感、目标探测与环境感知等方面的应用。



阚培源（第一作者）男，1997 年 4 月出生于河北省石家庄市，现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生，主要研究方向为综合孔径微波辐射计可展开固面天线机电热耦合研究。

最新录用