

文章编号: 2095-4980(2024)02-0181-05

静止轨道微波辐射计多反射面天线容差测试

李向芹, 谢振超, 于 雨, 李贝贝, 吴 涛, 钱志鹏

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 静止轨道微波辐射计天线由 3 个大口径反射面组成, 天线在轨外热流复杂, 反射面及其支撑结构因温度剧烈变化会发生大尺度变形, 导致天线主波束效率下降, 波束指向偏差。本文开展天线反射面单自由度容差分析, 基于全自动多自由度载荷容差分析系统, 获取反射面形位误差与主波束效率、波束指向之间的关系, 并基于蒙特卡洛容差分析方法对各自由度容差值的正确性进行验证。最后采用近场测试系统测试天线容差状态下的主波束效率和波束指向, 并将容差实测值与半物理仿真值和设计值进行对比分析, 验证了容差分析的正确性。

关键词: 静止轨道天线; 形位容差; 主波束效率; 近场测试

中图分类号: TN828.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022026

Tolerance testing of multi-reflector antennas for geostationary orbit microwave radiometers

LI Xiangqin, XIE Zhenchao, YU Yu, LI Beibei, WU Tao, QIAN Zhipeng

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: The geostationary orbit microwave radiometer antenna is composed of three large diameter reflectors. The orbit heat flow is complex. The reflector and its supporting structure will undergo large-scale deformation due to severe temperature changes. This leads to a decrease in the efficiency of the main beam and a deviation of the beam pointing. The single-freedom tolerance analysis of the antenna reflector is carried out. Based on the fully automatic multi-freedom tolerance analysis system, the relationship between antenna mechanical error and electrical performance is obtained. And the correctness of the tolerance value of each freedom is verified based on the Monte Carlo tolerance analysis method. Finally, the near-field test system is employed to test the main beam efficiency and beam pointing under the antenna tolerance state. Comparing and analyzing the measured tolerance value with the semi-physical simulation value and design value verifies the correctness of the tolerance analysis.

Keywords: Geostationary Orbit Antenna(GOA); geometric tolerance; main beam efficiency; near field testing

静止轨道微波辐射计是一种工作于毫米波亚毫米波波段的实孔径微波辐射计, 采用偏馈卡塞格伦式三反射面天线接收波束扫描区域内大气辐射的电磁能量。天线主波束效率和波束指向直接影响辐射计在轨定标精确度和定位精确度, 关系到辐射计探测数据的准确度和应用价值。

目前国际上尚无在轨运行的静止轨道微波辐射计, 国外对静止轨道微波辐射计研究也处于探索阶段。已有的星载对地遥感微波辐射计均工作于太阳同步轨道, 其周期为 98 min, 即 98 min 经历一个冷热循环, 未经历冷透和热透, 因此温度变化范围小, 天线温度变化范围约为 $-90\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。地球静止轨道周期为 24 h, 受微波辐射计任务自身特点影响, 天线正面必须完全暴露在外太空环境中, 持续受太阳光的周期性照射。天线外热流环境复杂, 温度变化范围为 $-150\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$, 天线表面温差超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。天线反射面位置因温度剧烈变化会发生大尺度变形, 严重影响天线电性能。为保证天线在轨电性能, 开展多反射面天线容差分析及测试是一项关键工作。

对于大口径高精度反射面天线容差的研究, 国内外已开展了大量工作。M Whale 和 Arvid Hammar 等分别于 2011 年和 2014 年开展了法国 STEAMR 载荷天线光路设计与反射面容差分析^[1-2], 主要基于物理光学法和射线

收稿日期: 2022-01-22; 修回日期: 2022-04-07

追踪法量化分析各反射镜单自由度安装误差引起的天线波束畸变, 并采用蒙特卡洛法分析得出反射镜总安装精确度指标为 0.1 倍波长。M Whale 和 M Candotti 等于 2008 年基于物理光学法开展了 ALMA 望远镜天线反射面设计及容差分析^[3-4], 计算安装误差与天线波束指向、孔径效率的关系, 通过比较射线追踪最坏情况法、射线追踪均方根法和蒙特卡洛法的容差分析值, 得出均方根法比蒙特卡洛的计算结果更精确。Mikko Kotiranta 等于 2018 年基于高斯波束模式法和物理光学法, 完成欧洲木星探测器 JUICE 天线容差分析^[5], 主要研究天线加工、安装和热变形误差引起的电性能变化。西安电子科技大学 Binbin Xiang 等于 2020 年研究了副反射面位移误差对口径 26 m 天线电性能的影响^[6], 给出了天线增益随副反射面位移和转角误差曲线函数, 研究结果表明, 副反射面轴向误差对天线增益影响较大, 副反射面横向位移误差和角度误差主要影响天线波束指向。

国内外对大口径反射面天线容差分析做了很多工作, 但大部分工作关注于容差仿真计算, 对容差分析与测试验证方面的研究较少。本文在文献[7-8]的基础上, 进一步基于蒙特卡洛法分析天线容差, 并根据天线容差分析数据, 开展天线实物的容差测试工作。通过比对容差测试值与仿真值, 验证了容差分析数据的正确性, 可为天线在轨变形控制提供基础数据。

1 容差仿真计算

在天线结构设计时, 机械制造、安装误差和在轨热变形误差将导致反射面位置产生偏差, 影响天线主波束效率和波束指向。采用容差分析技术将天线容差与电性能相关联, 容差分析方法有多种, 其中极值法与均方根法为最基础、最常用的两种容差分析方法。极值法考虑每个自由度的误差都处于极值时的累积效果, 通过对容差链上每个环节的容差绝对值进行求和, 计算出整个容差链的容差值。该方法简单、直观, 但分析结果偏于保守, 对部分自由度要求过于严格, 工程实现困难。均方根法通过对容差链上每个自由度容差的平方和开根号计算整个容差链的容差。它基于以下假设: a) 容差链上的每个自由度误差按正态分布随机出现; b) 正态分布的均值与容差要求的中心值一致, 二者之间没有偏移; c) 容差链中每个自由度的偏差是独立的、互不影响; d) 各自由度的容差代表 $\pm 3\sigma$ 水平, 3σ 水平表示容差值指标要求的比率不低于 99.73。均方根法考虑了误差的统计特性, 接近工程实现。蒙特卡洛容差分析法: 所有误差均以概率分布为特征, 该概率分布给出了某个变量在定义范围内取值的概率。每种情况都是对可能的实际安装误差进行仿真, 通过收集多个仿真结果, 可以创建某些输出变量的统计分布。

本文先基于均方根法确定主波束效率和波束指向均满足指标要求的单自由度容差值, 再基于极值法将所有自由度容差值叠加, 获取最恶劣情况下的主波束效率和波束指向。若主波束效率和波束指向有超差, 对容差要求较低、工程较易实现的指标适当收紧, 确保在最坏情况下的天线电性能满足指标要求。基于以上方法确定的容差值, 采用蒙特卡洛容差分析方法获取大量容差分析结果, 统计所有计算结果, 比对分析所有误差值是否均优于最坏情况下的电性能。

1.1 单自由度容差分析

考虑到天线反射面集成装配过程, 图 1 坐标系(X,Y,Z)为容差分析基准坐标系。天线主反射面、第一副反射面、第二副反射面和馈电部件的每个自由度主波束效率容差指标为 0.04%, 波束指向误差为 0.002°(对于静止轨道高度 35 800 km, 星下点波束指向偏差为 1.24 km)。

根据天线主波束效率和波束指向容差指标分配值, 开展天线单自由度容差分析。主波束效率和波束指向均满足容差分配值的天线 3 个反射面单自由度位移要求小于 0.75 mm, 角度要求小于 0.01°; 馈电部件位移要求小于 2 mm, 角度要求小于 0.1°。

1.2 基于蒙特卡洛方法的多自由容差分析

基于天线主反射面、第一副反射面、第二副反射面和馈电部件的单自由度容差分析, 采用 Matlab 调用反射面天线专用仿真软件 GRASP, 实现多自由度容差多状态分析。在 Matlab 中对天线方向图进行计算处理, 并判断处理结果是否满足阈值, 建立循环仿真系统, 实现多自由度载荷系统全自动容差分析。多自由度容差分析结果表明, 最坏情况下的主波束效率下降 1.24%, 波束指向偏差为 42 km。

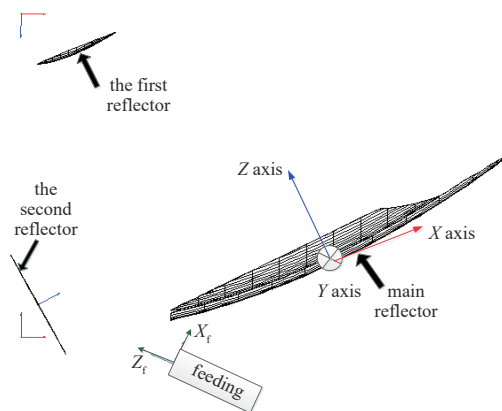


Fig.1 Tolerance analysis model
图 1 容差分析模型

基于蒙特卡罗容差分析方法开展3 000组样本容差分析,如图2所示主波束效率下降值和波束指向偏差值均优于上述极端容差情况下的1.24%和42 km,验证了容差指标分配的正确性。

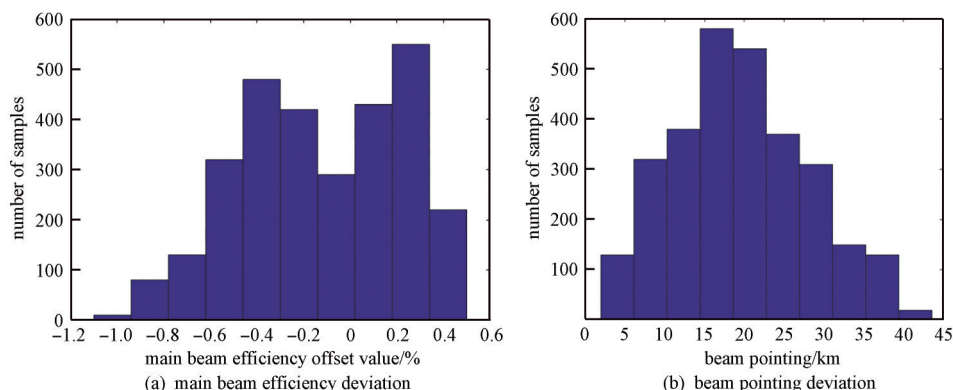


Fig.2 Distribution of antenna electrical performance based on Monte Carlo tolerance analysis

图2 基于蒙特卡罗容差分析的天线电性能分布图

2 天线容差测试

采用近场测试系统开展天线容差测试,天线3个反射面型面精确度分别为 $37.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 $18\text{ }\mu\text{m}$ 、 $32\text{ }\mu\text{m}$,满足5 mm波长工作时的型面精确度要求。测试过程中实时监测反射面型面精确度,型面精确度未变化。在天线容差测试前,对近场测试系统的重复测试精确度进行模拟测试,近场测试系统7 h内主波束效率重复测试精确度为0.01%,波束指向重复测试精确度为 0.005° ,测试数据显示该近场测试系统可用于天线容差测试。

天线容差实测时,若将反射面安装精确度调整到0.75 mm、 0.01° 范围内进行测试验证,受机械测试设备精确度影响,会导致一定误差,因此将容差值进行放大测试验证。选取天线主反射面转角和位移进行容差测试验证,天线容差测试分为两组:主反射面单自由度转角容差(绕Y轴转角分别为 0.27° 、 0.54°)、位移+角度容差(X轴平移8 mm+绕Y轴转角 0.27°)。

2.1 主反射面绕Y轴转角容差测试

开展天线主反射面绕Y轴转角的两组单自由度容差测试,如图3所示,测试结果见表1。绕Y轴旋转 0.27° 时,主波束效率下降0.54%,波束指向变化 0.17° ;将绕Y轴转角误差增加至 0.5° 时,主波束效率下降1.19%,波束指向变化 0.32° 。即对应角度误差 0.01° 的主波束效率下降0.006%,波束指向偏差 0.01° 。容差前后的天线方向图如图4所示,图中蓝色为无误差,红色为有误差。

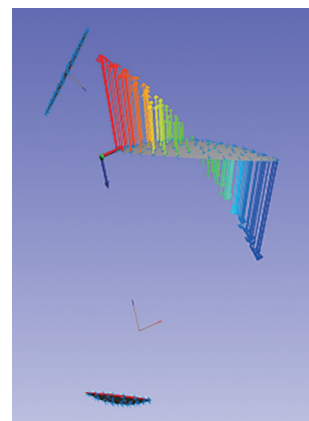


Fig.3 Mechanical test diagram of the angle error for the main reflector of the antenna around the Y-axis

图3 天线主反射面绕Y轴转角误差机械测试图

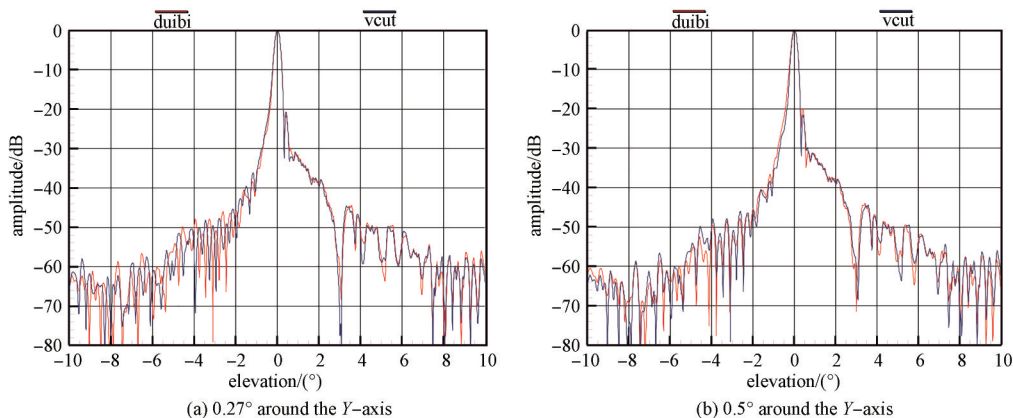


Fig.4 Comparison of test patterns with and without error(blue shows no error, red shows error)

图4 有误差与无误差的测试方向图对比

2.2 主反射面沿 X 轴平移和绕 Y 轴转角容差测试

开展天线主反射面 X 轴平移和绕 Y 轴转角容差测试。先沿 X 轴平移 8 mm 测试天线辐射性能, 如图 5 所示, 并在此基础上绕 Y 轴转角 0.27° , 获取平移和转角误差同时存在时的容差值, 测试结果见表 2。沿 X 轴平移 8 mm 后的主波束效率下降 0.66%, 波束指向变化 0.15° ; 在此基础上绕 Y 轴旋转 0.27° , 主波束效率下降 1.02%, 波束指向下降 0.28° 。即对应位移误差 0.75 mm 的主波束效率下降值为 0.06%, 波束指向偏差 0.014° 。容差前后的天线方向图如图 6 所示, 图中蓝色为无误差, 红色为有误差。

表 1 主反射面绕 Y 轴转角容差测试值

Table1 Tolerance test values of the main reflective surface around the Y -axis

tolerance state	beam direction change/($^\circ$)	main beam efficiency drop/%
0.27 $^\circ$ around the Y -axis	0.17	0.54
0.5 $^\circ$ around the Y -axis	0.32	1.19

表 2 主反射面 X 轴平移、绕 Y 轴转角容差测试值

Table2 The test values of the X -axis translation and the rotation angle around the Y -axis of the main reflecting surface

tolerance state	beam direction change/($^\circ$)	main beam efficiency drop/%
X -axis translation 8 mm	0.15	0.66
X -axis translation 8 mm+0.27 $^\circ$ around the Y -axis	0.28	1.02

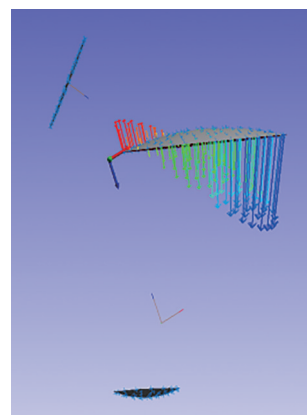


Fig.5 Mechanical test diagram of the translation error for the main reflector of the antenna along the X -axis

图 5 天线主反射面沿 X 轴平移误差机械测试图

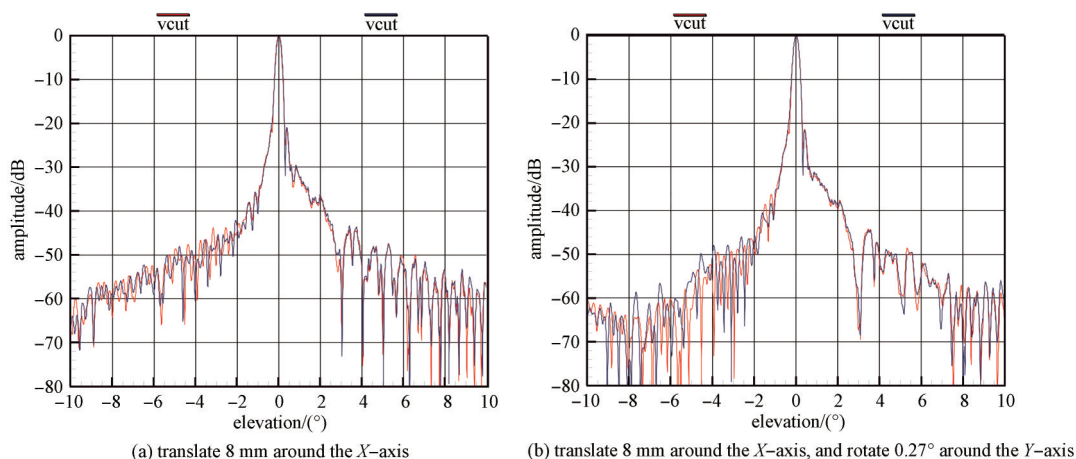


Fig.6 Comparison of test patterns with and without error(blue shows no error, red shows error)

图 6 有误差与无误差的测试方向图对比

3 天线容差分析

天线容差测试时, 同步开展天线反射面型面、形位机械精确度测试。基于馈电口面近场测试数据, 结合天线型面、形位机械精确度测试数据开展天线半物理仿真分析。并将天线容差实测值、半物理仿真值和设计值进行比对分析, 结果如表 3~4 所示。

- 1) 天线容差状态下的主波束效率下降值与波束指向变化值的实测数据、半物理仿真值和设计值基本一致;
- 2) 半物理仿真的主波束效率下降值与波束指向变化值略大于设计值和实测值, 可能是天线机械性能测试精确度, 以及型面、形位测试点数不够密, 导致半物理仿真值存在一定误差;
- 3) 在主反射面容差测试时, 其他反射面无法装配到绝对理想状态, 存在一定误差, 导致测试数据与设计值有微小差距;
- 4) 主反射面沿 X 轴平移叠加、绕 Y 轴转角容差测试数据的主波束效率下降值、波束指向偏差与设计值稍有差距, 主要是因为平移叠加转角误差下的机械性能测试数据, 在分解位移和转角时存在一定误差, 导致设计仿真值与实测值稍有差距。

表 3 主反射面绕 Y 轴转角容差测试与仿真数据比对分析表

Table3 Comparison and analysis of the tolerance test and simulation data for the main reflector around the Y-axis

state	main beam efficiency drop/%			beam direction change/(°)		
	design	semi-physical simulation	measurement	design	semi-physical simulation	measurement
0.27° around the Y-axis	0.54	0.55	0.54	0.15	0.19	0.17
0.5° around the Y-axis	1.09	1.26	1.19	0.31	0.38	0.32

表 4 主反射面 X 轴平移、绕 Y 轴转角容差测试与仿真数据比对分析表

Table4 Comparison and analysis of X-axis translation and Y-axis angle tolerance test and simulation data for the main reflecting surface

state	main beam efficiency drop/%			beam direction change/(°)		
	design	semi-physical simulation	measurement	design	semi-physical simulation	measurement
X axis translation 8 mm	0.51	0.49	0.66	0.08	0.23	0.15
X axis translation 8 mm+0.27° around the Y-axis	0.76	0.88	1.02	0.15	0.34	0.28

4 结论

本文根据天线主波束效率和波束指向容差分配值获取天线反射面和馈电部件单自由度容差值，基于全自由度载荷容差分析系统，开展多自由度容差分析，获取最恶劣情况下的主波束效率和波束指向值。基于蒙特卡洛容差分析方法开展 3 000 组样本容差分析，验证了容差指标分配的正确性。采用近场测试系统开展天线主反射面容差测试，根据天线容差实测值、半物理仿真值和设计值进行比对分析，验证了容差分析的正确性。后续将进一步开展天线反射面其他自由度的容差测试验证工作，并优化机械精确度测试方案，提高机械测试设备精确度，降低容差测试误差。

参考文献：

[1] WHALE M,RENKER M,MURK A,et al. Optical design of the stratosphere-troposphere exchange and climate monitor radiometer (STEAMR) instrument[C]// Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation. Rome,Italy:IEEE, 2011: 275-279.

[2] HAMMAR A,WHALE M,FORSBERG P,et al. Optical tolerance analysis of the multi-beam limb viewing instrument STEAMR[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014,4(6):714-721. doi:10.1109/TTHZ.2014.2361616.

[3] WHALE M,TRAPPE N,BELITSKY V. Physical optics analysis of the ALMA band 5 front end optics[C]// The 19th International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen,Holand:[s.n.], 2008:368-372.

[4] CANDOTTI M,UZAWA Y,SHITOV S V,et al. ALMA band 10 optics tolerance analysis[C]// The 19th International Symposium on Space Terahertz Technology. Groningen,Holand:[s.n.], 2008:521-527.

[5] KOTIRANTA M,JACOB K,KIM H,et al. Optical design and analysis of the submillimeter-wave instrument on JUICE[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2018,8(6):588-595.

[6] XIANG Binbin, LIAN Peiyuan,WANG Wei,et al. Effect of subreflector displacement induced aberrations for dual-reflector antenna[C]// 2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference(CSQRWC). Taiyuan,China: IEEE, 2019.

[7] 李向芹,谢振超. 基于参数化控制的亚毫米波辐射计天线容差分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):508-512. (LI Xiangqin,XIE Zhenchao. Tolerance analysis of sub-millimeter wave radiometer antenna based on parametric control method[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):508-512.)

[8] 李向芹,谢振超,赵锋,等. 微波辐射计天线形面误差对主波束效率的影响研究[J]. 微波学报, 2018(S1):189-192. (LI Xiangqin,XIE Zhenchao,ZHAO Feng,et al. Study on the effects of RMS on beam efficiency of microwave radiometer antenna[J]. Journal of Microwaves, 2018(S1):189-192.)

作者简介：

李向芹(1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为微波辐射计及天馈系统.email:xxiahhuarrong@126.com.

谢振超(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为辐射计系统及天馈总体.

于 雨(1992-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为天馈仿真技术.

李贝贝(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为准光学馈电网络.

吴 涛(1995-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为天线技术.

钱志鹏(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为卫星载荷结构设计.