

文章编号: 2095-4980(2024)07-0764-04

准光学馈电网络高精度度镜体结构热变形仿真分析

李贝贝, 葛如飞, 龙 澄, 于 雨, 吴 涛

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘 要: 毫米波亚毫米波探测器在静止轨道运行时, 其各子系统性能受环境热辐射影响。根据在轨温度场数据, 采用有限元分析法对准光学馈电网络热变形情况进行仿真; 采用 GRASP 软件将器件热变形后的形位、形面参数进行拟合, 仿真分析当准光学馈电网络受在轨环境热辐射时电性能变化情况。结果表明, 环境热辐射对准光学馈电网络的电性能有一定影响, 采用温控措施后, 可避免在轨温度变化引起的性能变化。

关键词: 准光学馈电网络; 热变形分析; 有限元分析; 静止轨道; 辐射场分析

中图分类号: TN015

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022175

Thermal deformation simulation of high precision mirror structure in quasi-optical feed network

LI Beibei, GE Rufe, LONG Deng, YU Yu, WU Tao

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

Abstract: Millimeter-wave and sub-millimeter-wave detectors, when operating in geostationary orbit, are influenced by environmental thermal radiation in the performance of their subsystems. Based on in-orbit temperature field data, finite element analysis is employed to simulate the thermal deformation of the quasi-optical feed network; the GRASP software is adopted to fit the positional and surface parameters after the device's thermal deformation, and to simulate the changes in electrical performance when the quasi-optical feed network is subjected to on-orbit environmental thermal radiation. The results show that environmental thermal radiation has a certain impact on the electrical performance of the quasi-optical feed network, and by adopting temperature control measures, it is possible to avoid performance changes caused by temperature variations in orbit.

Keywords: quasi-optical feed network; thermal deformation analysis; finite element analysis; geostationary orbit; radiation field analysis

毫米波亚毫米波探测器工作于静止轨道, 能够接收大气微波辐射信号, 对快速变化的台风、暴雨等灾害性天气系统具备全天候、全天时的定量监测预警能力。准光学馈电网络是其重要组成部分, 可将接收到的信号按频率、极化分离, 实现多通道的信号接收^[1-2]。准光学馈电网络由椭球镜、平面镜、极化栅网、频率选择表面等按照设计的光路布局组合而成^[3]。卫星在轨期间周期性进入阴影区与光照区, 准光底板及单机温度会随之变化, 这将导致部件形面、形位发生变化, 进而导致系统出射波束变化, 影响探测器探测精确度。需分析在轨环境温度对准光学馈电网络的影响, 通过实施热控保证准光部件的安装精确度^[4]。

1 准光学馈电网络

毫米波亚毫米波探测器准光学馈电网络由 10 个椭球镜、3 个平面镜、3 个极化栅网、6 个频率选择表面、10 个馈源喇叭、器件支架及系统框架组成。准光部件分布于安装底板的两侧, 通过单板双面方式进行安装, 准光学馈电网络的结构形式见图 1。准光学馈电网络工作于 23 GHz、31 GHz、54 GHz、89 GHz、118 GHz、166 GHz、183 GHz、229 GHz、380 GHz 和 425 GHz, 共 10 个工作频段。各通道波束均由束腰口面出射, 出射波束宽度指

收稿日期: 2022-09-16; 修回日期: 2022-10-19

标要求 $\leq 2\text{ mm}$ ，出射波束指向指标要求 $\leq 0.1^\circ$ 。

准光学馈电网络中各通道光路不同，历经多种器件。准光部件在轨应用过程中，在轨温度变化造成的热变形可能会造成各准光部件形位发生变化，进而影响准光学馈电网络的出射波束宽度、波束指向、波束中心位置等指标^[5-6]。

2 准光部件拟合与热变形分析方法

2.1 准光学馈电网络热学仿真方法

准光学馈电网络热变形分析可通过 NASTRAN 软件建立载荷准光学馈电网络有限元模型^[7]，NASTRAN 是具有高准确度的结构有限元分析软件，可以在限定温度场下进行系统热变形仿真；然后将轨热仿真得到的温度场数据映射至有限元模型中，底板上各组件均建立实体单元，对准光学馈电网络进行网格划分。为考察各反射镜、极化栅网和频率选择表面等组件变形后的面形精确度对电性能的影响，对这些部位的网格进行加密处理，整个模型初始温度设置为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ (无应力状态)，通过热变形仿真后，可得到在基准坐标系下各个器件镜面热变形前后的网格数据。

2.2 准光学馈电网络热变形机电参数转换

根据准光部件外形结构特性，可将准光部件分为两类：一类为圆形平面镜，可用于表征极化栅网、频率选择表面、馈源喇叭口面；另一类为椭球镜，见图 2。每个准光部件有 6 个自由度形位变化，即 3 个位移自由度 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 以及 3 个转角自由度 $\text{Rot}X$ 、 $\text{Rot}Y$ 、 $\text{Rot}Z$ 。同时，每个准光的形面精确度也受在轨环境温度影响，会产生不同程度的变化。通过 NASTRAN 软件仿真得到准光学馈电网络热变形后各个部件在基准坐标系下的离散点数据，将离散点代入准光学馈电网络电性能仿真软件 GRASP 中，通过 TRIANGULATION 及五阶插值方法进行平滑拟合处理，赋予各个镜面热变形后的 SURFACE 形面参数，见图 3。同时，在 GRASP 中设置各镜面的边缘轮廓参数为：镜面热变形后的边缘离散点，用于表征准光部件的形位变化。

在理想模型中，以理想镜面离散点进行拟合方法验证，分别拟合 425 GHz 和 118 GHz 通道的准光部件并进行仿真分析，与理想建模仿真结果进行对比。对比分析结果见表 1，由表 1 可知：对于 425 GHz 通道，拟合部件离散点数为 280 个时，出射波束宽度误差为 $-0.030\text{ }7\%$ ，出射波束指向偏差为 0.003° ；对于 118 GHz 通道，拟合部件离散点数为 439 个时，出射波束宽度误差为 $0.002\text{ }8\%$ ，出射波束指向偏差为 0.001° 。同时，在 GRASP 镜面拟合中，镜面尺寸、椭球镜焦径比、镜面工作频点均对拟合仿真精确度有影响，在进行热变形仿真时，应合理选择拟合点数，避免拟合仿真带来的误差。

表 1 GRASP 镜面拟合仿真比对

Table1 Simulation comparison using mirror fitting in GRASP

channel/GHz	simulation status	-15 dB half beamwidth/(°)	beamwidth change compared to direct modeling/%	pointing compared to direct modeling/(°)
425	ideal	1.642 2	—	—
	140 points	1.642 7	0.048 4	0.022
	280 points	1.642 2	-0.030 7	0.003
118	ideal	3.044 8	—	—
	219 points	3.038 9	-0.195 3	0.014
	439 points	3.044 9	0.002 8	0.001

3 热变形分析

根据准光部件拟合与热变形分析方法，选取准光学馈电网络在轨温度场结果，映射到有限元模型中进行热

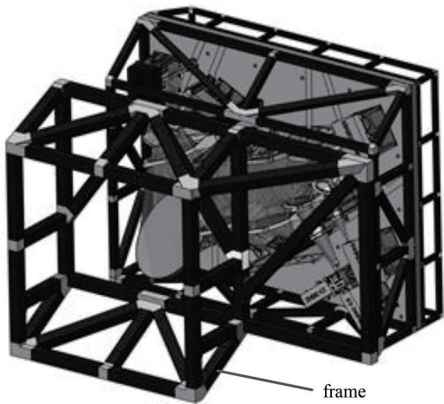


Fig.1 Quasi-optical network structure
图 1 准光学馈电网络结构

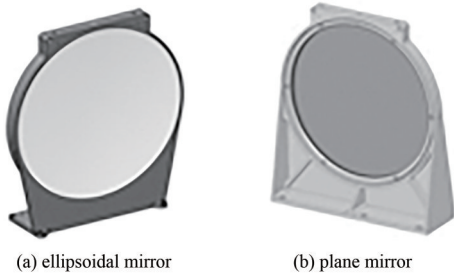


Fig.2 Quasi-optical network structure
图 2 准光学馈电网络结构

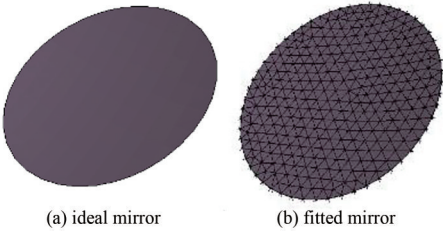


Fig.3 Mirror fitting in GRASP
图 3 GRASP 镜面拟合示意

变形仿真，准光学馈电网络有限元建模见图 4。

结果显示，在春分工况 3 600 s 时，准光学馈电网络的温度范围为 8.7~21.6 °C。由仿真结果可知，准光底板上无源器件所在区域热变形较小，直接安装在准光底板上的单机温度造成的变形较大。为避免单机温度变化造成底板热变形，准光底板上的单机与底板进行隔热安装，同时设计外贴热管进行散热；此外在准光框架上包覆多层隔热组件，减小外热流对准光底板影响，保持底板温度均匀性。采用 NASTRAN 软件分析该在轨工况下，未采取热控措施，与采取热控措施的准光学馈电网络部件形位、形面变化情况，仿真时仅考虑热变形引起的部件变化，仿真结果见图 5。

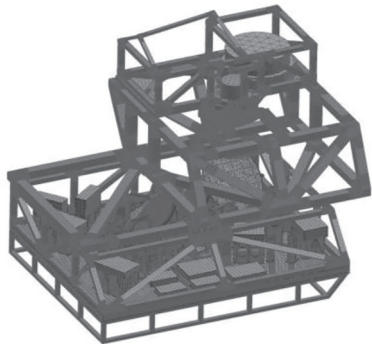


Fig.4 Finite element modeling of quasi-optical system
图4 准光学馈电网络有限元建模

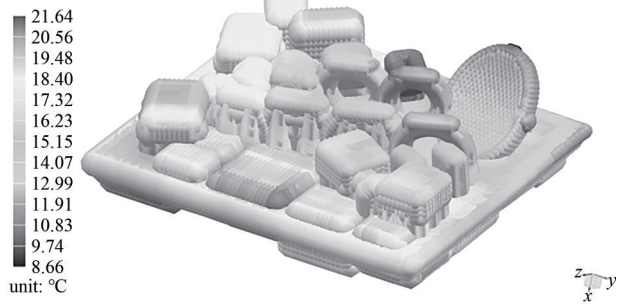


Fig.5 Thermal deformation simulation of quasi-optical system
图5 准光学馈电网络热变形仿真

采用 GRASP 软件进行镜面拟合，并进行仿真分析，结果见表 2。分析可知，采取热控措施后，54 GHz 通道波束宽度变化由 1.41% 下降到 0.02%，波束指向偏差由 0.029° 下降到 0.012°。425 GHz 通道波束宽度变化由 1.1% 下降到 0.12%，波束指向偏差由 0.033° 下降到 0.011°。准光部件热变形、准光学馈电网络出射波束的变化得到了有效控制。

表2 准光学馈电网络热变形仿真比对

Table2 Thermal deformation simulation comparison for quasi-optical system

channel/GHz	simulation status	-15 dB half beamwidth/(°)	beamwidth change compared to direct modeling/%	pointing compared to direct modeling/(°)
54	ideal	4.050 9	—	—
	thermal uncontrolled	4.108 0	1.41	0.029
	thermal control	4.051 7	0.02	0.012
425	ideal	1.642 2	—	—
	thermal uncontrolled	1.660 3	1.10	0.033
	thermal control	1.644 5	0.12	0.011

4 结论

本文对准光学馈电网络进行了热变形拟合分析，根据在轨环境温度工况对准光学馈电网络进行了仿真分析。分析结果表明，采用在轨热控措施后，可以有效控制准光各部件的形位、形面误差，对后续高精度度装调、在轨热控具有重要意义。

参考文献：

- [1] 窦文斌. 毫米波准光理论与技术[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2006. (DOU Wenbin. Millimeter wave quasioptical theory and techniques[M]. 2nd ed. Beijing:Higher Education Press, 2006.)
- [2] 俞俊生,陈晓东. 毫米波与亚毫米波准光技术[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2010. (YU Junsheng,CHEN Xiaodong. Millimeter wave and submillimeter wave quasi-optical technology[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2010.)
- [3] GOLDSMITH P F. Quasioptical systems:Gaussian beam quasioptical propagation and applications[M]. New York:IEEE Press, 1998.
- [4] 葛如飞,李孚嘉,钱志鹏,等. 太赫兹冰云成像仪结构设计及耦合分析[J]. 电子机械工程, 2022,38(3):18–21. (GE Rufe,LI Fujia, QIAN Zhipeng, et al. Structure design and coupling analysis of terahertz ice–cloud imager[J]. Electro–Mechanical Engineering, 2022,38(3):18–21.) doi:10.19659/j.issn.1008 – 5300.2022.03.004.

- [5] 苏晟,钱巧元,吕利清,等. 辐射计反射面天线面形精度对其主波束效率影响研究[J]. 上海航天, 2018,35(2):121-125. (SU Sheng,QIAN Qiaoyuan,LYU Liqing,et al. Study on effects of surface error on beam efficiency for radiometer reflector antenna[J]. Aerospace Shanghai, 2018,5(2):121-125.) doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.015.
- [6] 李贝贝,谢振超,李向芹,等. 基于毫米波亚毫米波探测仪准光学馈电网络子系统的容差分析研究[C]// 2021年全国天线年会. 宁波,浙江:中国电子学会天线分会, 2021:1349-1352. (LI Beibei,XIE Zhenchao,LI Xiangqin,et al. Research on tolerance analysis of quasi-optical feeding network subsystem based on millimeter wave and submillimeter wave detectors[C]// Proceedings of the 2021 National Antenna Annual Conference. Ningbo,Zhejiang,China:Antenna Branch of China Electronics Society, 2021: 1349-1352.) doi:10.26914/c.cnkihy.2021.067692.
- [7] 侯增祺,胡金刚. 航天器热控制技术:原理及其应用[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2007. (HOU Zengqi,HU Jingang. Thermal control technology for spacecraft: principles and applications[M]. Beijing:China Science and Technology Press, 2007.)

作者简介:

李贝贝(1990-),女,硕士,工程师,主要研究方向为准光学馈电网络.email:libeibei1990@163.com.

于雨(1992-),女,硕士,工程师,主要研究方向为天馈仿真技术.

葛如飞(1995-),男,硕士,工程师,主要研究方向为载荷系统热设计.

吴涛(1995-),男,硕士,工程师,主要研究方向为天线技术.

龙澄(1995-),男,硕士,助理工程师,主要研究方向为载荷结构机构.

(上接第763页)

- [10] 陈柏桑,唐杨,岳海昆,等. 基于LGA工艺的D波段微带线-波导过渡结构[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(5):735-738. (CHEN Baishen,TANG Yang,YUE Haikun,et al. A D-band transition from microstrip to waveguide based on LGA technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(5): 735-738.) doi: 10.11805/TKYDA201905.0735.
- [11] 汪粲星,张浩,刘海涛. 三维系统级封装中垂直互联结构的设计[J]. 微处理机, 2018,39(4):10-13. (WANG Canxing,ZHANG Hao,LIU Haitao. Design of a vertical interconnection structure used in 3D system-in-package[J]. Microprocessors, 2018,39(4): 10-13.) doi:10.3969/j.issn.1002-2279.2018.04.003.
- [12] ZHAO Yongzhi,WANG Shaodong,WU Hongjiang. A novel dual channel receive front-end module with MEMS technology[C]// 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. Suntec City,Singapore:IEEE, 2018:674-677. doi:10.1109/ISEMC.2018.8393866.
- [13] 张先荣. 毫米波硅基SiP模块设计[J]. 电讯技术, 2023,63(5):741-747. (ZHANG Xianrong. Design of a millimeter-wave SiP module based on silicon interposer[J]. Telecommunication Engineering, 2023,63(5):741-747.) doi:10.20079/j.issn.1001-893x.220422002.
- [14] 王蕴玉,刘勇,赵丁雷,等. 基于硅基异构集成的T/R组件设计[J]. 科学技术创新, 2022(20):165-168. (WANG Yunnyu,LIU Yong,ZHAO Dinglei,et al. Design of T/R module based on silicon heterogeneous integration[J]. Scientific and Technological Innovation, 2022(20):165-168.) doi:10.3969/j.issn.1673-1328.2022.20.042.

作者简介:

李晓林(1989-),男,硕士,工程师,主要研究方向为三维异构射频微系统集成技术.email:cetclxl@163.com.

高艳红(1985-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为毫米波电路与技术.

刘星(1980-),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为射频微系统集成技术.

赵宇(1984-),男,硕士,研究员,主要研究方向为射频微系统集成技术.

许春良(1979-),男,硕士,研究员,主要从事微波毫米波射频芯片、模块、微系统等电路的研究.