

文章编号: 2095-4980(2016)04-0508-05

基于参数化控制的亚毫米波辐射计天线容差分析

李向芹, 谢振超

(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 基于 Matlab 参数化控制 GRASP9 天线仿真模型, 通过 Matlab 程序调用 GRASP9 仿真界面, 批量化计算毫米波、亚毫米波辐射计天线电性能。以 FY4 系统方案验证样机准光馈电网络椭球镜的安装误差为例, 分析椭球镜在球坐标系中的位移和转角偏差对天线电性能影响。当位移和角度偏差分别控制在 0.5 mm 和 0.4° 以内, 主波束效率可达到指标要求的 90% 以上。理论计算结果与测试结果吻合良好, 验证了参数化控制法对多变量容差分析的有效性, 为后续工程装配提供技术基础。

关键词: Matlab 平台; GRASP9 软件; 参数控制; 多变量; 容差分析

中图分类号: TN62

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0508

Tolerance analysis of sub-millimeter wave radiometer antenna based on parametric control method

LI Xiangqin, XIE Zhenchao

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

Abstract: A parametric control method based on Matlab is studied. GRASP9 simulation interface is called by Matlab program, and the antenna electric performances of millimeter and sub-millimeter wave radiometer are batch processed. Taking the installation error of quasi optical feed network in principled sample machine as an example, the main beam efficiency is analyzed by the displacement and angle deviation of ellipsoidal mirror. Under the displacement deviation within 0.5 mm and angular deviation within 0.4°, the main efficiency can meet 90% of the indicators requirements or more. The theoretical calculation results are in good agreement to the test results, which verifies the effectiveness of the parameters control.

Key words: Matlab; GRASP9; parametric control; multivariable; tolerance analysis

辐射计^[1]是一种用于测量大气、地物和海洋目标辐射能量的被动遥感仪器, 主要凭借辐射计天线接收各种微波辐射能量。随着空间技术迅猛发展, 辐射计工作频率已扩展到毫米波、亚毫米波段, 甚至太赫兹波段^[2], 不仅在大气探测^[3]方面有重要应用, 还可用于接收宇宙目标电磁辐射进行天文观测^[4]。瑞典在 1996 年发射 Odin 卫星, 搭载了毫米波、亚毫米波辐射计用来进行天文和大气观测, 其工作频率为 119 GHz, 422 GHz, 488 GHz, 553 GHz 和 575 GHz。美国在 1998 年发射 SWAS 卫星用来研究星际间的化学成分和恒星系统, 其搭载的辐射计工作频段为 487 GHz, 492 GHz, 548 GHz, 551 GHz 和 557 GHz。NASA 在 2004 年发射的 Aura 卫星, 搭载的 MLS 载荷^[5]频率扩展到亚毫米波段, 用来探测大气中的臭氧变化, 工作频率由 118 GHz, 190 GHz, 240 GHz 扩展到 640 GHz, 2.5 THz。

随着辐射计的快速发展, 其前端天线也朝着大口径、高频段方向发展, 同时对结构和工艺设计也提出了较高要求。为设计满足性能要求的天线产品, 必须考虑加工和安装因素带来的影响, 在这方面, 国内外做了一些相关工作^[6]。Ruze 采用概率论方法分析反射面随机误差与增益损失之间的关系, 但不能分析除增益以外其他电性能参数。Tripp 在 1984 年也提出了一种计算反射面含随机误差的平均功率方向函数方法, 对于反射面表面随机误差对电性能的影响分析尚有欠缺。反射面天线误差主要包括反射面表面误差与馈源误差, 对于传统的安装误差分析是将反射面安装误差等效成馈源的偏焦, 它不能分析馈源在空间三维坐标下精确的误差位置对电性能的影响。Kim Joo-Wan 在 1996 年提出在 3 个方向上描述馈源偏差的思想, 但没有对反射面安装误差和馈源的偏焦等效关

收稿日期: 2015-01-26; 修回日期: 2015-04-26

系进行仿真分析。以上的分析方法并不全面和彻底,很难预测最坏情况,因此对天线的容差分析工作有待深入研究。本文提出了一种基于 Matlab 的参数控制方法,能完成多变量容差分析,使电性能与结构性能达到最优。

1 毫米波、亚毫米波辐射计天馈系统容差分析

1.1 毫米波、亚毫米波辐射计天馈系统构成

静止轨道毫米波、亚毫米波探测仪^[7]是国际上难度较大的载荷之一,具有探测频段高、天线口径大的特点,其探测频段为 23 GHz~425 GHz,目前已经突破了多频段准光馈电网络、亚毫米波高灵敏接收机、宽频段毫米波、亚毫米波定标等关键技术^[8],在此基础上研制了亚毫米波探测仪方案验证样机,其天馈子系统组成结构如图 1 所示。采用真实孔径偏馈式反射面天线,主反射面为偏馈抛物面,用于定向接收地面及大气电磁辐射,第一副反射面为旋转双曲面,主反射面和第一副反射面组成偏馈卡塞格伦天线,形成笔形波束观测。由于工作频段较多,采用准光学馈电网络将观测场景辐射信号分极化、分频段馈送至各对应通道接收机输入端口。准光馈电网络由一系列双曲镜、椭球镜和平面镜组成,用于改变波束传播方向,完成波束汇聚与扩散以及波束与馈源喇叭匹配的功能。整个天馈子系统有 10 个以上反射面,每个反射面的安装误差都会对天线电性能产生影响,而且每个反射面又有位移和角度影响参数,如果采用现有的天线仿真软件分析安装容差,工作量巨大。

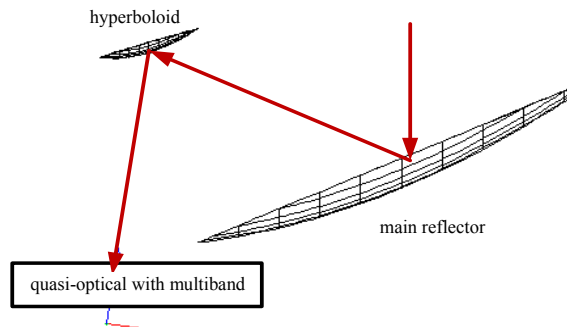


Fig.1 Diagram of antenna subsystem
图 1 天馈子系统结构示意图

1.2 天馈系统安装误差的影响分析

毫米波、亚毫米波天线安装误差是指天线在安装过程中产生的与设计位置偏离的误差,包括反射面安装误差和馈源安装误差。反射面及馈源位置偏差引起电磁波传播路程差,天线口径面不再是等相位面,从而使方向图主瓣变宽,副瓣电平升高,主波束效率下降。

对于多频段偏馈反射面天线系统,其馈电部分不再是单个馈源喇叭,馈电网络中每个反射镜的安装都会对天线电性能产生影响。本文以 89 GHz 验证样机为例,分析系统安装误差影响因素,如表 1 所示,它主要由天线子系统和准光馈电网络组成,天线子系统由 1 个抛物主反射面和 1 个双曲面组成,准光馈电网络由 1 个椭球镜、1 个双曲镜、1 个平面镜和 1 个馈源组成。

根据表 1 所示的要因分析表可知 89 GHz 原理样机椭球镜安装容差,即椭球镜坐标系相对于焦点坐标系的位移和转角偏差。假设椭球镜中心偏移量为(x,y,z),转角偏差为(θ,Φ),通过仿真分析 5 个变量独立变化对电性能的影响,找出关键尺寸安装精确度,各自自由度安装精确度对电性能影响分析如图 2 所示。

表1 系统安装误差影响因素分析表
Table1 Influence factors analysis of system installation error

component	antenna subsystem		89 GHz quasi optical feed network			
	main reflector	hyperboloid	ellipsoid	plane	hyperboloid	feed
influence factor	displacement and angle	displacement and angle	displacement and angle	angle	displacement and angle	displacement and angle

由图 2 和表 2 可知,天线主波束效率随位移量 x 和转角量 θ 的变化较敏感。通过安装因素影响分析,只是得到单个部件的单个变量安装精确度,如何得到单个部件的多变量同时变化对天线性能影响,继而得到天馈子系统所有部件共同变化对系统性能的影响,是本文所要研究的主要问题。

表 2 独立参数变化对电性能的影响
Table2 Effect of independent parameters on performance

x/mm	Δη/%	y/mm	Δη/%	z/mm	Δη/%	θ(°)	Δη/%	φ(°)	Δη/%
-4.00	0.92	-4.00	0.04	-4.00	0.06	-2.00	14.65	-2.00	0.12
-2.00	0.36	-2.00	0.01	-2.00	0.03	-1.00	3.71	-1.00	0.04
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.00	-0.17	2.00	0.02	2.00	-0.02	1.00	-0.46	1.00	0.04
4.00	-0.04	4.00	0.04	4.00	-0.05	2.00	0.05	2.00	0.12

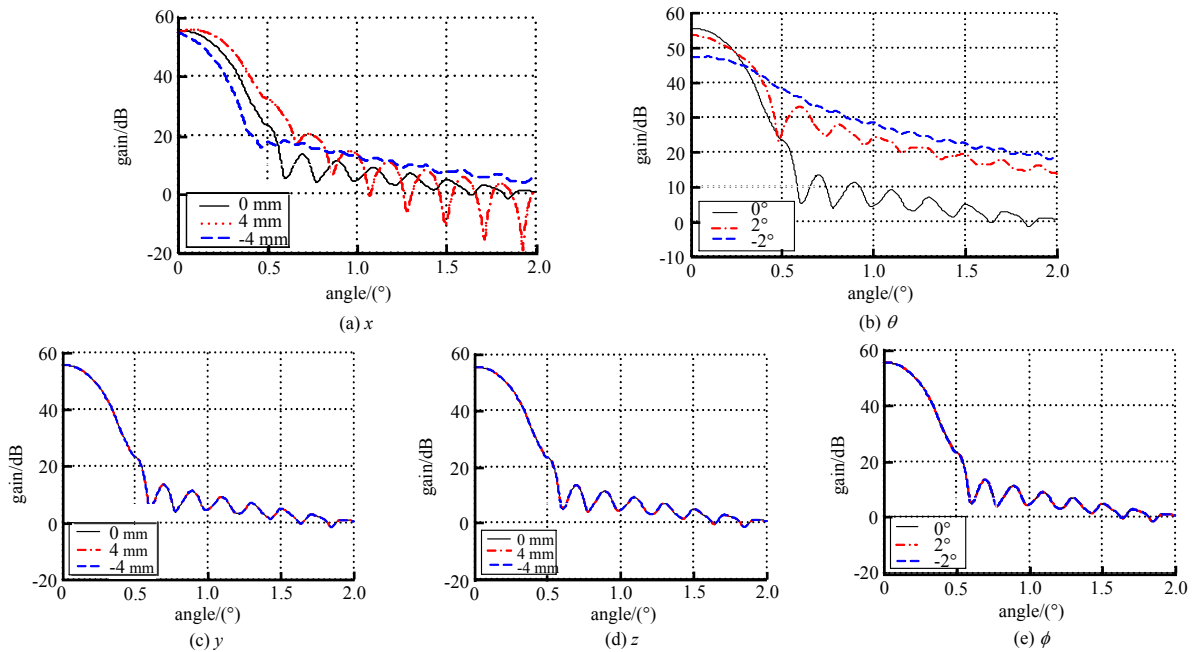


Fig.2 Influence of independent parameter changes on the pattern
图 2 独立参数变化对方向图的影响

2 协同仿真及参数化控制环境的建立

2.1 参数化控制天线仿真模型

GRASP9 采用高频近似方法,集几何光学、几何绕射理论、物理光学法、物理绕射理论于一体,同时加入矩量法分析电小尺寸结构,是反射面天线最为高效和准确的分析软件。虽然 GRASP9 是目前世界上最为优秀的通用反射面天线及天线辐射场分析软件,但是此软件没有参数扫描功能,在做高频大口径反射面天线多变量容差分析时,需要手动逐一修改模型参数,不仅工作量大,出错率也极高。通过研究 GRASP9 软件脚本文件.tor 和.tci,采用 Matlab 参数化控制 GRASP9 模型参数,批量化计算天线电性能参数。

参数化控制天线仿真模型的实施方案如下:

Step 1: 天线建模。根据任务需求,设定反射面口径、焦距和偏置高度等参数,在 GRASP9 中初步完成天线仿真模型。仿真模型中的各反射面和馈电网络都是根据各自坐标系建立的,每个坐标系都有 3 个独立的位移值(x, y, z)和 2 个转角值(θ, ϕ)。

Step 2: 重新生成 GRASP9 的脚本文件。根据第 1 步的仿真模型得到初始的“.tor”,“.tci”和“.g9p”文件,在 Matlab 中编写程序,重新生成以上 3 个文件。

Step 3: 多变量分析。在多变量容差分析过程中,通过循环改变坐标系参量,得到不同位移或转角同时改变时对电性能影响。根据安装因素影响分析,假定 3 个位移偏差均为 Δ , 2 个转角偏差均为 δ , 建立 5 个嵌套循环,得到 $2^5=32$ 个仿真结果,分析位移和转角同时变化时,天线电性能变化,其中这 32 个仿真结果包括了位移分别为 $\pm\Delta$ 和转角分别为 $\pm\delta$ 2 种极限情况,涵盖了所有位移和角度在极限情况下的组合状态。

Step 4: 批处理文件。通过运行 Matlab 中的 dos 命令,调用 GRASP9 仿真界面进行批量化仿真计算,生成不同参数所对应的输出文件“.log”,“.out”,“.grd”和“.cut”。

根据以上步骤建立图 3 所示的流程图。

2.2 协同仿真

基于 Matlab 参数化调用天线仿真软件,分析原理样机中椭球镜 5 个参数同时变化对天线性能的影响。根据主波束效率指标要求,其安装误差对主波束效率影响值小于 1%,首先采用均匀误差分析法,假设位移容差值均为 1 mm,转角容差值均为 0.5° ,找出主波束效率最差值。如果最坏主波束效率不能满足指标要求,则需选择一个更苛刻的安装精确度,对位移和转角值同时加上或者减去一个相同变量,完成多变量容差分析,安装精确度对远场方向图的影响如图 4 所示,仿真结果如表 3 所示。

根据图 3 和表 3 结果可知,当位移偏差为 1 mm,角度偏差为 0.5°时,主波束效率指标不能满足要求。根据现行的安装能力,对位移和角度偏差进行适当的调整,得到位移误差小于 0.5 mm,角度误差小于 0.4°时,主波束效率值满足指标要求。根据此方法得到天馈系统各部件的安装容差,分析各部件各参数同时变化对系统性能的影响,继而得到整个系统的安装容差。

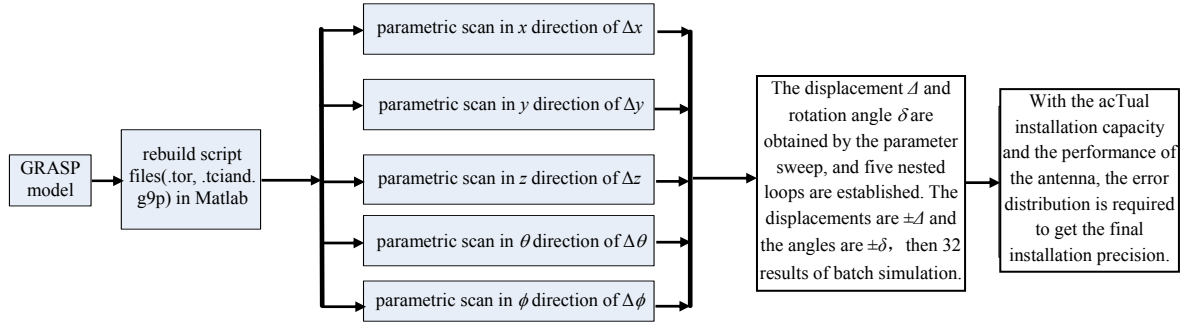


Fig.3 Flow chart of parameterized control antenna simulation model
图 3 参数化控制天线仿真模型流程图

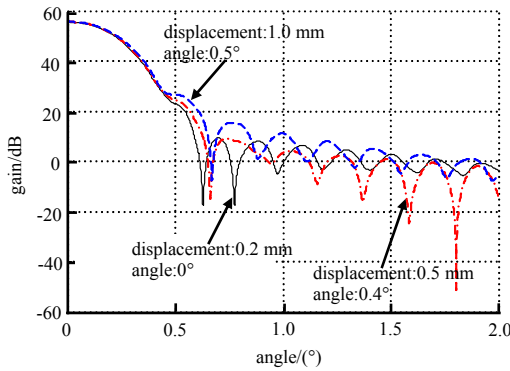


Fig.4 Multivariable tolerance influence on far field pattern
图 4 多变量容差对远场方向图的影响

表 3 多变量安装精确度对主波束效率的影响

Table3 Multivariable tolerance on the main beam efficiency

displacement/mm	angle/(°)	beamwidth error/(°)	main beam efficiency error/%
1.000	0.500	0.009	-1.540
0.500	0.500	0.009	-1.380
0.500	0.400	0.007	-1.000
0.500	0.300	0.005	-0.750
0.500	0.200	0.003	-0.510
0.200	0.200	0.003	-0.440

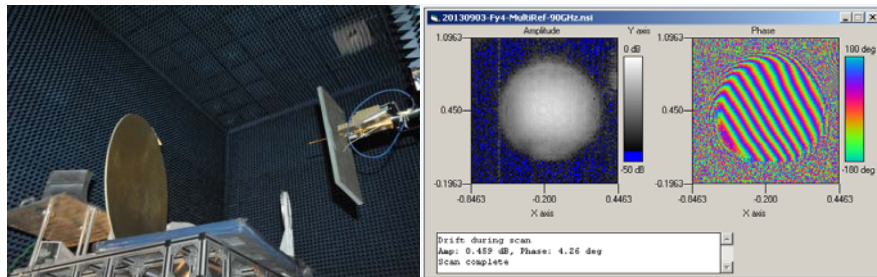


Fig.5 Near field test pattern
图 5 近场测试图

3 安装测试与调试结果分析

根据上述仿真结果,通过三坐标测量仪测量椭球镜的安装容差,使其位移偏差在 0.5 mm 以内,角度偏差在 0.4°以内,使用毫米波天线实验室对原理样机的电性能进行测试,并将测试结果与仿真结果进行分析比较,如图 5 和图 6 所示。

根据样机指标要求,得到测试结果:天线波束宽度均小于 0.4°,主波束效率均大于 90%,并且主波束效率测试值与仿真值差异小于 0.64%,满足指标要求。

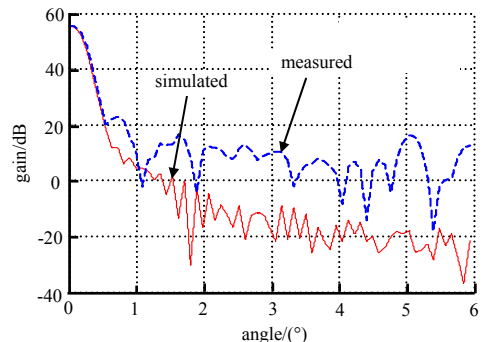


Fig.6 Measured and simulated far-field patterns
图 6 实测与仿真远场方向图

4 结论

本文介绍了一种基于 Matlab 参数化控制 GRASP9 的多变量容差分析法,此方法不仅可以优化天线结构设计,在高频大口径展开天线中,还可用于反射面展开精确度分析。这种通过 Matlab 程序调用 GRASP9 仿真界面的方法,弥补了 GRASP9 仿真软件无法参数扫描的缺陷,大大提高了工作效率。最后通过原理样机的仿真与测试结果对比分析,验证了基于 Matlab 参数化控制 GRASP9 仿真软件的有效性。

参考文献:

- [1] GONG B, LOU G, LI X, et al. Research on the distance equation of the submillimeter radiometer via Lambert W function[C]// International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. 2008:627-629.
- [2] 王瀚卿, 黄理勇, 苏兴华. 星载高灵敏度太赫兹遥感接收技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3):340-345. (WANG Hanqing, HUANG Liyong, SU Xinghua. Discussion on terahertz techniques in remote sensing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3):340-345.)
- [3] 江文华, 马建中, 颜鹏, 等. 利用 GOME 卫星资料分析北京大气 NO₂ 污染变化[J]. 应用气象学报, 2006, 17(1):67-72. (JIANG Wenhua, MA Jianzhong, YAN Peng, et al. Characterization of NO₂ pollution changes in Beijing using GOME satellite data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(1):67-72.)
- [4] VYSTAVKIN A N, SHITOV S V, BANKOV S E, et al. High sensitive 0.13-0.38 THz TES array radiometer for the big telescope azimuthal of Special Astrophysical Observatory of Russian Academy of Sciences[C]// International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. 2007, 54(4):133-140.
- [5] PICKETT H M. Microwave limb sounder THz module on aura[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2006, 44(5):1122-1130.
- [6] 万继响, 钟鹰, 王五兔. 星载天线馈电部件的容差分析[C]// 2009 年全国天线年会. 成都, 四川, 中国:[s.n.], 2009:1403-1406. (WAN Jixiang, ZHONG Ying, WANG Wutu. Tolerance analysis of the feed components for the satellite antenna[C]// 2009 National Antenna Workshop. Chengdu, Sichuan, China:[s.n.], 2009:1403-1406.)
- [7] BIZZARRI B. Requirements and perspectives for MW/sub-mm sounding from geostationary satellite[C]// EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Dublin, Ireland:[s.n.], 2002:97-105.
- [8] 赵锋, 姚崇斌, 吕利清. FY-4 毫米波亚毫米波探测仪及地面成像试验[C]// 2015 年全国遥感遥测遥控学术年会论文集, 2015:250-254. (ZHAO Feng, YAO Chongbin, LV Liqing. The submillimeter wave detector and ground imaging experiment [C]// Academic Annual Meeting of Remote Sensing, Remote Measurement and Remote Control. 2015:250-254.)

作者简介:



李向芹(1986-), 女, 安徽省宣城市人, 工程师, 主要研究方向为天线设计. email: xxiahuarrong@126.com.

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