

## 环境一号 C 星 SAR 天线设计与分析

郑士昆\* 冀有志 崔兆云 方永刚 周丽萍  
(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

**摘要:** 环境一号 C 星 SAR 天线采用了构架式可展开网状抛物面反射器, 天线构型复杂, 在轨展开步骤多, 天线展开可靠性及在轨电气性能等都是设计难点。该文阐述了天线总体、结构和电气方面的设计研究, 并从力学和热角度进行了实际工况的分析。环境一号 C 星在轨成功展开及良好的 SAR 成像质量表明了天线在机电热及可靠性设计方面满足型号工程的使用要求, 为集中式网状抛物面 SAR 天线的设计研究提供了宝贵经验。

**关键词:** SAR 天线; 构架式可展开反射器; 结构设计; 力学分析; 热分析

中图分类号: V44; TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2014)03-0266-08

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.14040

## Design and Analysis of HJ-1-C Satellite SAR Antenna

Zheng Shi-kun Ji You-zhi Cui Zhao-yun Fang Yong-gang Zhou Li-ping  
(China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China)

**Abstract:** With truss deployable mesh parabolic reflector, the HJ-1-C SAR antenna has complex structure and multiple steps during the deployed processing. The design of the antenna is difficult in terms of deployed reliability and electrical performance. This paper makes intensive research on system, structure and electrical design, and the analysis of mechanical and thermal performance in the actual space conditions is also presented. The successful deploying in orbit and high image quality of the HJ-1-C satellite indicate that the mechanical, electronic, thermal and reliability design of the antenna satisfy the project requirement, and these research provides valuable experience for the design of the centralized mesh parabolic SAR antenna.

**Key words:** SAR antenna; Truss deployable reflector; Structural design; Mechanical analysis; Thermal analysis

### 1 引言

环境一号 C 星是我国环境与灾害监测小卫星星座的一颗雷达星, 具有全天候、全天时观测能力, 对我国大尺度水环境、生态环境、环境监管以及突发环境事件应急响应的监测发挥了重要作用, 是我国第 1 颗集中式 SAR 体制卫星, 对我国微波遥感应用总体技术水平的提升起到重要的推动作用。

环境一号 C 星采用的 SAR 天线是网状抛物面天线, 是国际上主要 3 种星载 SAR 天线形式之一, 相对微带平面天线阵和波导缝隙阵天线具有收拢体积小、重量轻、容易实现多波束、多极化的特点<sup>[1,2]</sup>。天线采用了构架式可展开抛物面天线和多波束馈源技术方案, 是我国首个在轨飞行验证的构架式可展开天线, 也是目前我国在轨最大的网状抛物面天线。

本文介绍了环境一号 C 星 SAR 天线的总体设

计、结构设计、电性能仿真分析、力学分析及热分析内容。

### 2 SAR 天线总体设计

环境一号 C 星 SAR 天线安装于卫星平台顶部, 主要包括反射器组件、馈源组件、展开组件(展开臂、转动机构、馈源展开机构、压紧释放装置、第 4 支撑结构)组成。卫星进入预定轨道后, 第 4 支撑、馈源解锁机构、反射器底部解锁机构以及反射器包带分别解锁, 天线按照预定展开动作实现展开, 天线星上收拢和展开状态如图 1 所示。

SAR 天线在轨通过多波束馈源辐射抛物面形成 9 个条带波束, 多波束馈源由辐射馈源阵、高频电缆组件、大功率电子开关、功分网络、波导组件、旋转关节组成, 通过大功率电子开关电控切换还可以形成 SanSAR 波束, 满足卫星宽幅测绘的需求。相邻 4 个馈源形成 1 个波束, 12 个馈源由下而上依次共形成 9 个波束, 通过大功率电子开关进行切换实现, 其系统原理及天线波束工作模式如图 2 所示。

2014-03-03 收到, 2014-06-09 改回; 2014-06-18 网络优先出版

国家重大专项资助课题

\*通信作者: 郑士昆 zhengshk504@126.com

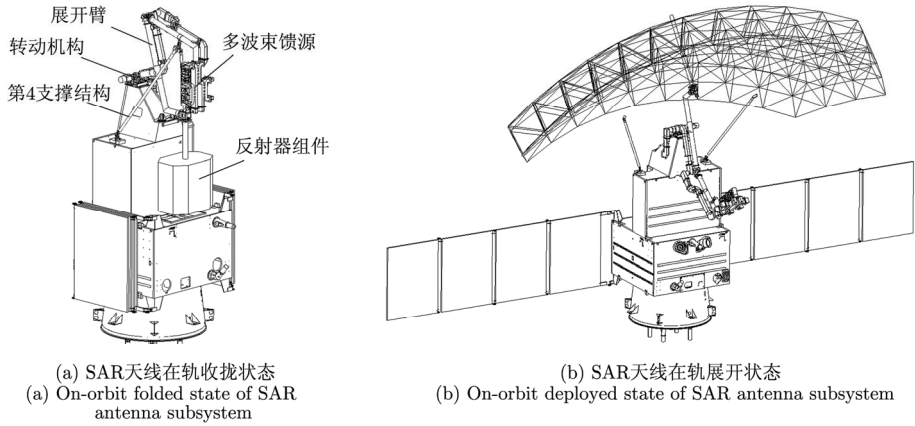


图 1 SAR 天线子系统在轨收拢和展开状态

Fig. 1 On-orbit folded and deployed states of SAR antenna subsystem

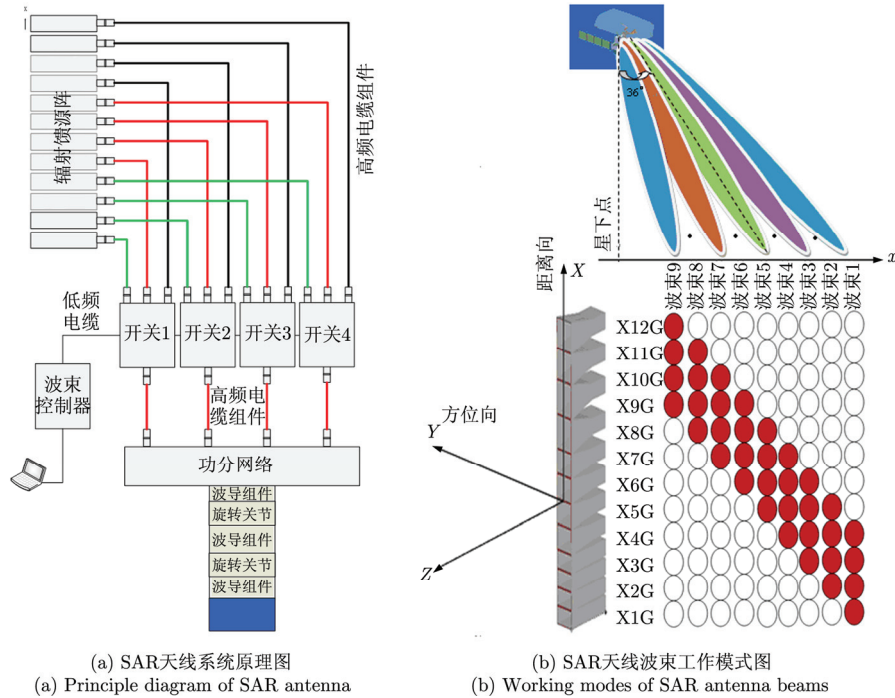


图 2 SAR 天线波束形成原理示意图

Fig. 2 Forming principle diagram of SAR antenna beam

### 3 SAR 天线结构设计

环境一号 C 星 SAR 天线是一个复杂的结构产品，在轨展开步骤多，空间运动复杂，按照天线在轨展开顺序包括 4 步展开动作：第 4 支撑杆展开锁定、馈源展开锁定、天线展开臂展开、构架反射器展开，各个展开过程如图 3 所示。

第 4 支撑展开和馈源展开是天线在轨展开序列的前两步，采用弹簧展开铰链进行驱动。弹簧展开铰链由单个涡卷弹簧便可实现展开功能，但采用冗余备份设计，在每个铰链安装了两个涡卷弹簧；此

外，在加工生产方面对涡卷弹簧进行了严格的质量控制，对涡卷弹簧的表面质量、物理外观尺寸、力矩特性等进行强制检验，以保证涡卷弹簧的加工制造精度；同时，涡卷弹簧表面喷涂 MoS<sub>2</sub> 固体涂层，防止涡卷弹簧空间冷焊。

天线展开臂展开是天线在轨展开的第 3 步，依靠电动展开机构实现驱动。电动展开机构主要由电机、角度传感器、谐波减速器及机构支架等组成，电机采用绕组备份的形式实现冗余设计，提高了部件可靠性。空间电动展开可靠性同样受加工及装配精度影响，此外，机构的零部件尺寸精度及装配精

度还决定了机构的展开精度及重复精度，故对电机传动轴系尺寸进行了强制检验，并要求控制关键装配环节的装配间隙，要求在机构装配完毕后经过跑合、精度测试及环境试验后才能装入天线分系统。

构架反射器展开是天线在轨展开序列的第4步动作，而构架展开结构的设计更是SAR天线的设计难点。构架可展开结构有多种单元形式<sup>[3-5]</sup>，环境一号C星SAR天线反射器采用四面体构架单元的结构形式，每个单元由3根腹杆、3根折叠杆、节点及扭簧驱动部件组成，依靠自身弹簧部件驱动展开，其工作原理如图4所示。通过四面体构架单元几何拓扑设计形成SAR天线需要的反射器型面，构架反射器安装表面铺设金属网实现微波信号的反射传输。

构架反射器的几何拓扑设计采用了以型面精度为优化目标的优化设计方法<sup>[6,7]</sup>，通过天线6×2.8 m展开口径和优于3 mm型面精度的设计要求，首先可确定构架反射器正面杆件的初始拓扑长度。根据构架天线型面精度控制的近似公式：

$$\delta_{rms} = \frac{L^2}{8\sqrt{15} \left( 2F + \frac{D^2}{32F} \right)} \quad (1)$$

求解估算杆件长度为：

$$L = \sqrt{\delta_{rms} \times 8\sqrt{15} \left( 2F + \frac{D^2}{32F} \right)} \quad (2)$$

将构架单元节点  $a, b, c, d, e$  坐标与目标反射器抛物面方程联立可得：

$$\left. \begin{aligned} x_i^2 + y_i^2 &= 4fz_i \\ L_{oa} &= L_{ab} = L_{bc} = L_{cd} = L_{de} \\ y_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $i = a, b, c, d, e$ 。由  $x_e^2 = 4fz_e, x_e = D/2$ ，得

$$\left\{ \begin{aligned} x_e &= D/2 \\ z_e &= D^2/(16f) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

联立式(2)-式(4)，可得非线性方程组：

$$F(X) = 0$$

即

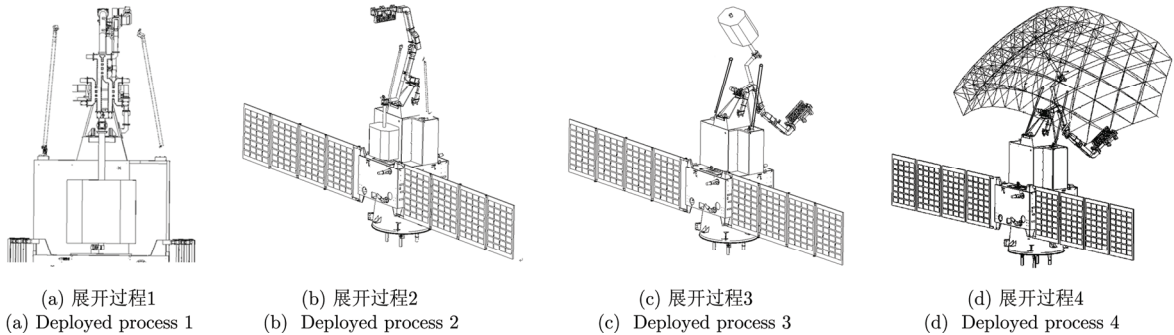


图3 SAR 天线在轨展开过程

Fig. 3 SAR antenna on-orbit deployed process

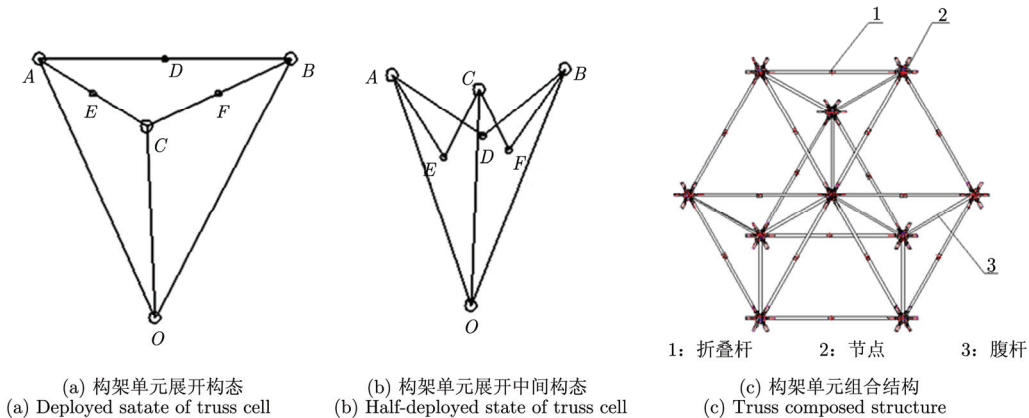


图4 构架单元工作原理及组成

Fig. 4 Working principle and composition of truss unit

$$\left. \begin{aligned}
 f_1(x) &= x_a^2 + z_a^2 - L^2 = 0 \\
 f_2(x) &= x_a^2 - 4fz_a = 0 \\
 f_3(x) &= (x_b - x_a)^2 + (z_b - z_a)^2 - L^2 = 0 \\
 f_4(x) &= x_b^2 - 4fz_b = 0 \\
 f_5(x) &= (x_c - x_b)^2 + (z_c - z_b)^2 - L^2 = 0 \\
 f_6(x) &= x_c^2 - 4fz_c = 0 \\
 f_7(x) &= (x_d - x_c)^2 + (z_d - z_c)^2 - L^2 = 0 \\
 f_8(x) &= x_d^2 - 4fz_d = 0 \\
 f_9(x) &= (x_d - x_e)^2 + (z_d - z_e)^2 - L^2 = 0
 \end{aligned} \right\} (5)$$

通过求解上述非线性方程组可以得到构架反射器正面节点的空间坐标及腹杆长度。进一步，通过正四面体单元设计原理，可以解算出反射器背面节点的空间位置，最终确定整个构架反射器的空间几何位置，其结构拓扑如图 5 所示。

#### 4 SAR 天线电性能仿真

构架式反射器由多个三角形近似拟合抛物面形成反射器网面，若以标准抛物面进行设计仿真，其仿真结果与实际天线性能差别较大<sup>[8]</sup>，因此仿真过程中要对构架反射器的实际三角形单元进行网格划分处理，同时还需考虑天线展开臂、卫星平台结构对天线视场内的遮挡，图 6 给出了反射器仿真模型及

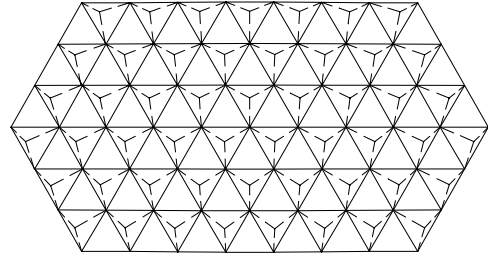


图 5 构架反射器几何拓扑结构

Fig. 5 Geometry topology of truss deployable reflector

SAR 天线 9 个波束方位向方向图，中心波束距离向方向图及方位向、距离向交叉极化仿真结果。

通过 SAR 天线电气仿真结果可见，天线波束设计的增益、波束宽度、夹角、距离向副瓣电平、极化纯度均满足设计要求，如表 1 所示，且与国外同类型产品技术水平相当。

#### 5 SAR 天线力学性能分析

环境一号 C 星 SAR 天线采用了构架式可展开网状天线，构型复杂，机构类运动部件多，在天线力学分析方面的难点如下：

(1) 构架式可展开反射器由上千个活动部件组成，反射器局部模态低，如何设置合理的弹簧单元阻尼对天线整体模态分析至关重要；

表 1 天线电气性能符合表

Tab. 1 Antenna electrical properties table

性能参数	指标	设计值	符合性	
中心频率	3200 MHz	3200 MHz	满足	
带宽	80 MHz	80 MHz	满足	
极化纯度	≥ 20 dB	≥ 30 dB	满足	
波束数目	9 个	9 个	满足	
天线增益	最大	≥ 36.7 dB	≥ 37.2 dB	满足
	最小	≥ 34.7 dB	≥ 35.1 dB	满足
波束宽度	方位向(-3 dB)	≤ 1.0°	0.96°~0.98°	满足
距离向(-3 dB)	方位向	2.0°, 2.1°, 2.2°, 2.3°, 2.4°, 2.6°, 2.9°, 3.4°, 3.5°(±0.2°)	2.1°, 2.1°, 2.2°, 2.35°, 2.45°, 2.55°, 2.95°, 3.45°, 3.6°	满足
	距离向	0.7°, 0.8°, 0.8°, 0.9°, 1.0°, 1.0°, 1.2°, 1.2°(±0.1°)	0.75°, 0.75°, 0.85°, 0.9°, 1.0°, 1.0°, 1.25°, 1.3°	满足
旁瓣电平	方位向	≤ -13 dB	-13.0~-14.5 dB	满足
	距离向	≤ -18 dB	≤ -18.15 dB	满足
	星下点	≤ -25 dB	≤ -45 dB	满足
电压驻波比	≤ -1.5	≤ -1.5	满足	

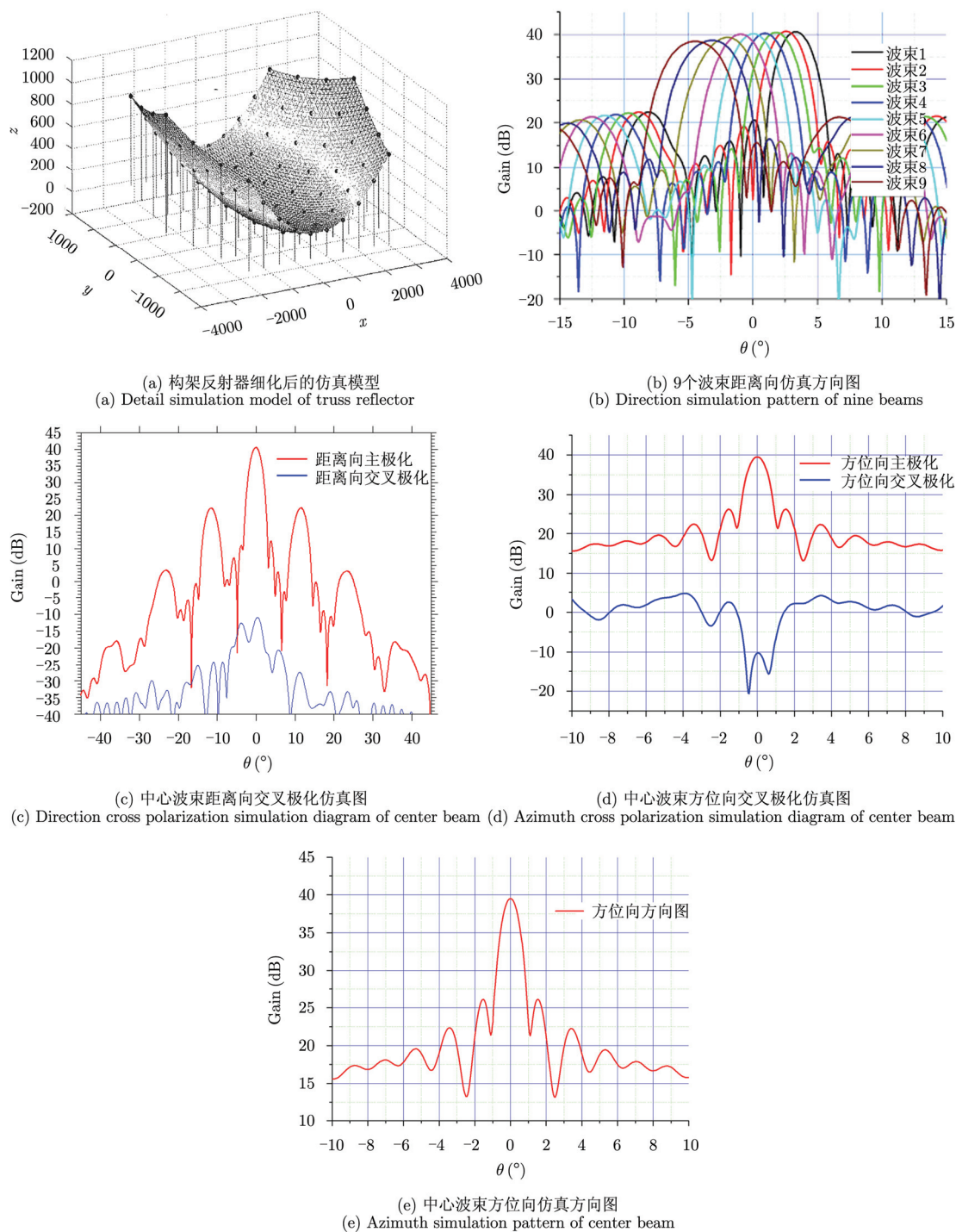


图6 SAR 天线电气性能仿真结果

Fig. 6 Electrical performance simulation results of SAR antenna

(2) SAR 天线安装于卫星平台顶部, 力学环境相对苛刻, 天线  $X$  向频率与卫星接近, 因此, 需优化第 4 支撑结构方案, 避免天线与卫星频率耦合;

(3) SAR 天线构架反射器展开状态与卫星太阳帆板的动力学耦合分析。

结合 SAR 天线工程研制情况, 根据实测的构架反射器的收拢、展开刚度, 通过调整各活动部件的

连接刚度, 实现有限元模型的简化及修整, 在天线第 4 支撑刚度强度分析及展开状态反射器与卫星太阳帆板动力学耦合分析过程中考虑了大型柔性可展开几何非线性问题。

根据仿真计算, 可获得 HJ-1-C 卫星 SAR 天线主要模态及振型, 如表 2 和图 7 所示, 分析确定, 最终设计方案可满足系统要求。

表 2 SAR 天线主要模态固有频率及振型描述

Tab. 2 Main modal natural frequency and vibration mode of SAR antenna

频率(Hz)	振型描述	实测结果(Hz)
4.11	反射器组件局部模态	3.2
21.14	整体沿 X 向变形, 绕 Z 向变形(X 向 1 阶模态)	24.5
36.49	整体沿 Y 向变形, 绕 X 向变形(Y 向 1 阶模态)	40.1
47.08	整体沿 Z 向变形(Z 向 1 阶模态)	47.6

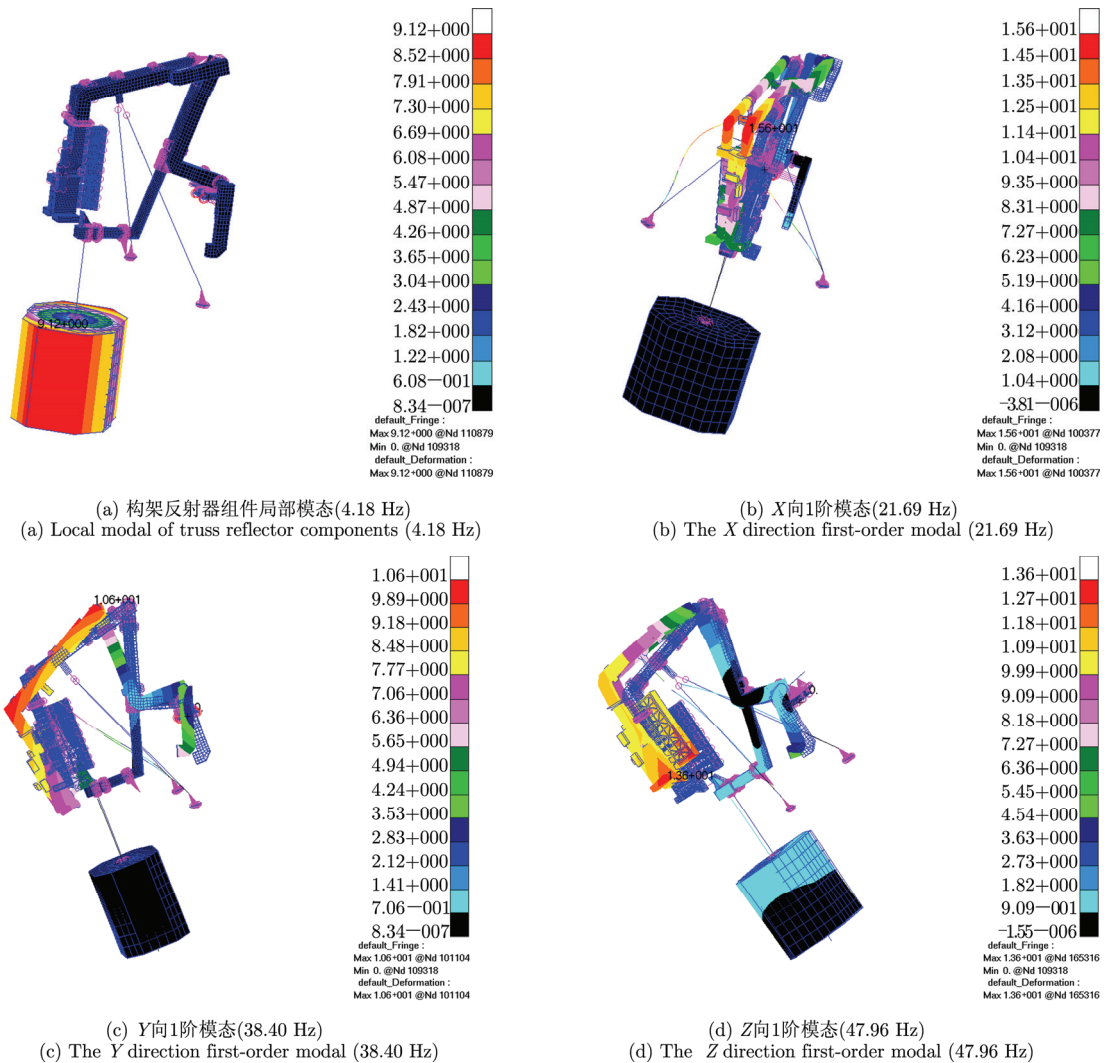


图 7 SAR 天线主要模态振型

Fig. 7 Main modal vibration mode of SAR antenna

## 6 SAR 天线热分析

环境一号 C 星是太阳同步轨道卫星, 在卫星寿命期内, 轨道 $\beta$ 角变化范围大, 天线表面外热流复杂, 又由于 SAR 天线采用的构架式可展反射器结构复杂, 运动关节的有限元处理增加了 SAR 天线极端工况选取的难度。针对 SAR 天线热分析的技术难点, 建立了热分析模型如图 8 所示, 结合工程实际工作

状态对有限元模型进行了假设简化, 给出了天线高温、低温工况下的计算结果(如表 3 所示), 分析结果对天线温控及馈源部件散热方案确定提供了有效保障。

进一步, 根据在轨温度, 可计算反射器桁架的热变形, 热变形分析结果见表 4。由分析可见, 反射器桁架热变形很小, 对天线波束指向影响可以忽略。

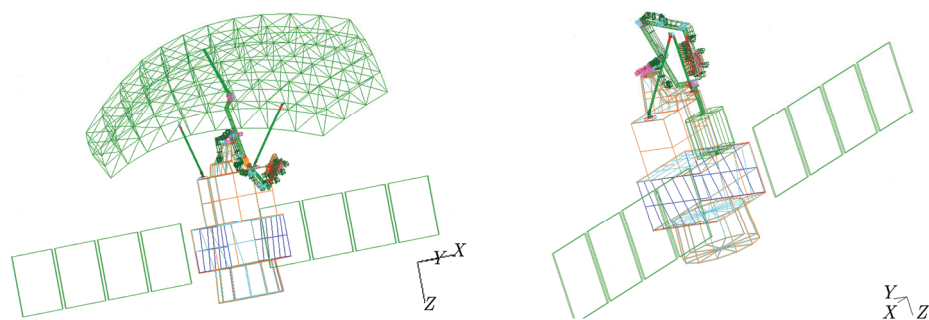


图8 SAR 天线热分析模型

Fig. 8 Thermal analysis model of SAR antenna

表3 SAR 天线在轨热分析结果

Tab. 3 On-orbit thermal analysis result of SAR antenna

部件名称	SAR 天线低温工况分析结果(3月3日)		SAR 天线高温工况分析结果(6月20日)	
	max (°C)	min (°C)	max (°C)	min (°C)
反射面桁架	99.1	-54.2	107.6	-40.3
馈源组件	-19.1	-30.9	12.9	-11.1
大功率电子开关	-30.9	-31.6	3.9	-11.3
第4支撑结构	15.8	1.2	22.5	-30.3
转动机构	-4.5	-10.4	-4.4	-10.2
展开臂	-13.3	-21.5	-12.2	-20.0

表4 反射器桁架热变形计算值

Tab. 4 Thermal deformation calculated results of reflector truss

杆件材料	热胀系数	X 向峰值(mm)	Y 向峰值(mm)	Z 向峰值(mm)	RMS 值(mm)
碳纤维 T300	2.70E-6	8.90E-2	9.20E-2	2.24E-1	0.10

## 参考文献

- [1] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.  
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Development laws and macro trends analysis of radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 19-27.
- [2] 覃正, 陈绍汀. 国外 SAR 天线的发展[J]. 工程力学(增刊), 1996, A02: 617-620.  
Tan Zheng and Chen Shao-ting. Development of foreign SAR antenna[J]. *Engineering Mechanics*, 1996, A02: 617-620.
- [3] Miura K and Furuya H. Adaptive structure concept for future space applications[J]. *AIAA Journal*, 1988, 26(8): 995-1002.
- [4] Gantes C, Logcher R D, Connor J J, et al. Geometric design of deployable structures with discrete joint size[J]. *International Journal of Space Structure*, 1993, 8(1): 107-117.
- [5] Kwan A S K, You Z, and Pellegrino S. Active and passive cable elements in deployable/retractable masts[J]. *International Journal Space Structures*, 1993, 8(1&2): 29-40.
- [6] 关富玲, 侯国勇, 赵孟良. 构架式可展开天线结构设计的程序实现[J]. 工程设计学报, 2006, 13(2): 108-113.  
Guan Fu-ling, Hou Guo-yong, and Zhao Meng-liang. Program implementation of structure design for deployable truss antenna[J]. *Journal of Engineering Design*, 2006, 13(2): 108-113.
- [7] 侯国勇, 关富玲, 赵孟良. 桁架式可展开天线精度计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(9): 1469-1473.  
Hou Guo-yong, Guan Fu-ling, and Zhao Meng-liang. Error computation method of deployable truss antenna[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(9): 1469-1473.

- [8] 崔兆云, 李荣军, 李正军, 等. 星载构架抛物面天线反射器形面电设计[C]. 2007 全国天线年会, 合肥, 2007: 793-798.  
Cui Zhao-yun, Li Rong-jun, Li Zheng-jun, *et al.*. Reflector

surface electrical design of spaceborne deployable truss antenna[C]. 2007 Nation Antenna Conference, Heifei, 2007: 793-798.

### 作者简介



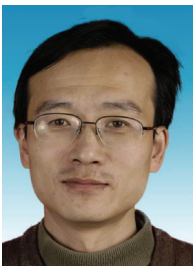
郑士昆(1978-), 男, 四川达州人, 于中国空间技术研究院获得硕士学位, 现为中国空间技术研究院西安分院高级工程师, 主要研究方向为星载天线结构技术。

E-mail: zhengshk504@126.com



崔兆云(1979-), 男, 江苏盐城人, 于西安电子科技大学获得硕士学位, 现为中国空间技术研究院西安分院高级工程师, 主要研究方向为空间电磁场应用技术。

E-mail: cuizhy504@126.com



冀有志(1969-), 男, 内蒙古卓资人, 于东南大学获得学士学位; 现为中国空间技术研究院西安分院研究员, 主要研究方向为空间结构与机构技术。

E-mail: jiyzh504@126.com