

某星载 Ka 频段相控阵天线结构设计与分析

刘绍武 贺奎尚 李东颖 匡全进 赵平
(上海航天电子技术研究所, 上海 201109)



摘要: 针对某星载 Ka 频段相控阵天线高热流密度、小体积、轻质量的结构设计要求, 提出一种无缆化盲插互连结构一体化设计方案。采用多种热环控措施, 并运用数值分析软件对相控阵天线温度场进行分析, 解决相控阵天线高热流密度导致的散热难题。最后, 通过热平衡实验验证, 该结构设计方案组件安装表面最高温度小于 55℃, 且满足天线单轨工作 28min 的使用性能要求。

关键词: 相控阵天线; 盲插互连; 一体化设计; 热设计; 仿真分析

中图分类号: V19 文献标识码: A

Structure Design and Analysis of A Ka-band Phased Array Antenna for Spaceborne

Liu Shaowu He Kuishang Li Dongying Kuang Quanjin Zhao Ping
(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109)

Abstract: In view of the problem of small space volume and light weight of spaceborne phased array antenna, a variety of thermal control measures are adopted to solve the problems of high heat flux and difficult heat dissipation, and the temperature distribution of antenna array is analyzed by numerical analysis software. Finally, the experimental results show that the structure can effectively reduce the maximum temperature of the module to below 55℃, and meet the performance requirements of the antenna monorail operation for 28min. It is verified that the structure design of the antenna is reasonable.

Key words: phased array antenna; blind-mating interconnect; integrated design; thermal design; simulation analysis

1 引言

目前, 星载 Ka 频段相控阵天线技术在国际各大航天航空公司仍处于研发阶段, 宇航产品要求质量轻、空间体积小、性能负载比高, 星载 Ka 频段有源相控阵天线逐渐往高集成性、高节能性、空间环境通用性方向发展。但因有源相控阵天线极具集成化, 导致天线单位面积、体积的热耗不断增加, 如果不能将不断增加的热耗传导至外部热沉, 或将影响组件工作性能, 甚至导致功能彻底失效, 进而影响天线阵面电性能和天线阵面可靠性^[1, 2]。

目前已知文献中关于 Ka 频段相控阵天线的内容较少, 但是涉及相控天线部分模块结构设计方法较多。本文以某星载 Ka 频段相控阵天线为研究对象, 开展天

线系统架构设计、盲插互连、结构一体化设计、热设计等结构设计与分析。

2 天线系统功能及组成

Ka 频段相控阵天线的主要功能是飞行器在轨期间, 处于境内时, 通信分系统与地面站建立数据传输通道, 将数传数据下传地面站接收; 处于境外时, 为增加境外图像传输功能, 在通信分系统增加 Ka 频段中继数传模式, 满足对中继星的数据传输需求。

Ka 频段相控阵天线由天线阵面、八通道 T 组件、多层综合网络、前级功放、天线单元、天线热控等组成。

作者简介: 刘绍武 (1983), 硕士, 机械设计及理论专业; 研究方向: 相控阵天线结构及热设计。

收稿日期: 2022-03-12

3 结构设计

3.1 系统架构设计

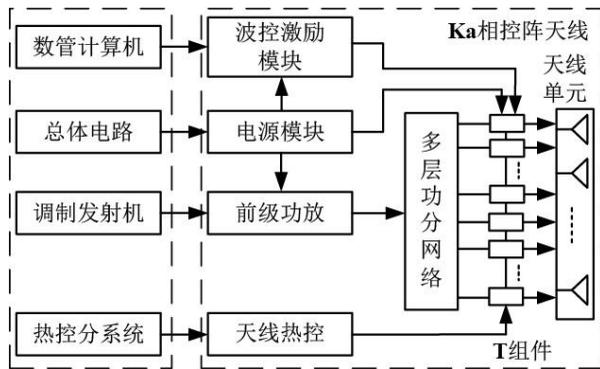


图1 Ka相控阵天线系统架构

Ka频段相控阵天线系统架构如图1所示，天线系统工作原理：前级功放接收调制发射机的射频信号，经射频多层功分网络、T组件放大后，由天线单元辐射；天线阵面波控激励模块接收数管计算机的角度信息，解算移相码，通过控制T组件相位，改变天线波

束；天线电源模块将总体电路电压转换后向T组件、前级功放和波控激励模块供电；热控分系统根据天线阵面在星体上的安装位置和天线系统本身的组成，设计经济有效的热控方案，满足天线阵面中各个模块特别是T组件的温度指标要求。波控激励模块、电源模块、前级功放、热控均设计了主备两个模块，避免系统故障导致整个天线功能丧失或基本功能丧失。

3.2 盲插互连设计

天线系统结构盲插互连技术是近几年使用的一种信号集成传输技术，以相控阵阵面的射频信号、控制信号、供电信号等多种信号传输链路为对象，实现射频信号、控制信号、供电信号等功能系统集成化^[3, 4]。由于该相控阵天线为星载产品，对其重量、体积、可靠性提出严苛指标要求，若按传统方法采用电缆连接射频、供电和控制链路，将产生大量电缆，增加研制成本、增加重量且降低产品可靠性。为此，研制了一种多功能综合背板和信号转接板，实现了高低频信号全盲插互连的无缆化链路传输，天线系统盲插互连结构如图2所示。

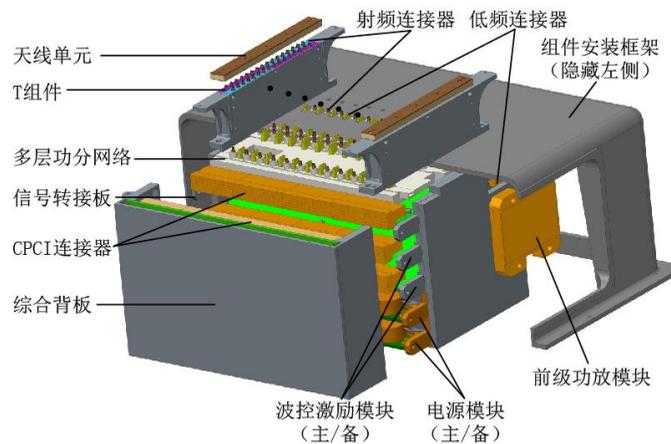


图2 天线系统盲插互连结构示意图

a. 综合背板与电源模块、波控激励模块和信号转接板之间通过H2系列CPCI连接器连接，连通电源模块的供电信号与波控激励模块的控制信号，同时可将供电信号和控制信号传输至信号转接板模块上。

b. 前级功放模块安装在信号转接板侧面，使用J30J低频连接器与信号转接板盲插连接，实现供电信号、控制信号与前级功放模块连通。

c. 将多层功分网络安装至信号转接板上，组件安装框架设计射频、低频连接器避让槽，将4个T组件模块同时与信号转接板垂直盲插，将射频、控制、供电信号传输给T组件，其中多层功分网络与T组件通

过KK射频连接器连接，信号转接板与T组件通过J30J低频连接器连接。该连接方式创新性实现的多组高低频电连接器同时垂直盲插互连，特别是低频电连接器垂直硬连接。

d. 天线单元与T组件之间设计长条状的天线单元安装板，将4个T组件共32个射频通道与天线阵面采用KK射频连接器盲插互连，实现射频信号传输。

3.3 结构一体化设计

Ku频段天线阵面口径采用6mm×6mm单元间距，因此需设计一体化结构固定组件模块与天线单元模块，满足阵面单元的力学性能与热学性能要求。

如图3所示,4个T组件采用背靠背方式固定在组件安装板上构成组件模块,组件安装板之间设计导向卡槽与导向凸台,便于相邻组件模块定位装配,同时天线单元也安装在相对应的组件模块上,便于测试和维修。在12个组件模块安装完成后,横穿3根钛合金螺杆增强组件模块结构刚度。由于T组件焊接封盖

后,组件底板易产生形变,背对背安装之前,需修搓组件底部平面度,可减小组件盲配难度,同时更有利于组件的散热。采用结构一体化设计后,在150mm×134mm阵面内排布了384个辐射单元,阵面阵面总重量仅为8.9kg。

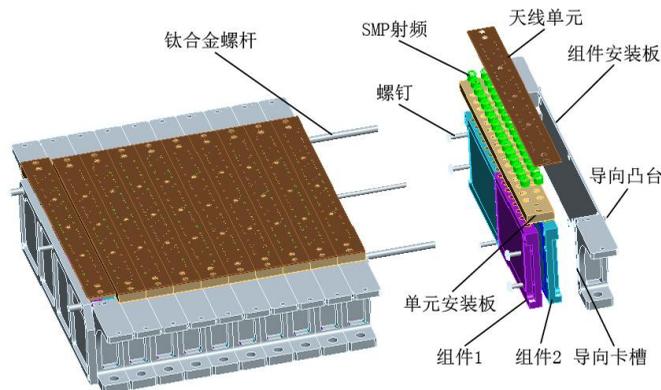


图3 结构一体化设计示意图

4 热设计与分析

4.1 天线热环境及温度指标

该相控阵天线工作在距离地球600km高度降交点,地方时为6点钟的SSO轨道,轨道倾角98°,在空间环境中,天线阵面内各个功耗模块的热量通过天线阵面内各个结构件进行相互热辐射和导热,天线阵面与外部空间环境仅采用热辐射的方式进行热量交换。天线阵面外表面热流主要为太阳辐射、太阳自地球的反照和地球的红外辐射,在热设计中要求考虑太阳外辐射热流,根据文献[5],到达天线面上的太阳辐射热流为:

$$Q = \frac{q \cos \beta_s A}{4\pi d^2} \quad (1)$$

式中: A 为天线外热流的接受面; $q=3.826 \times 10^{26} \text{W}$; d 为太阳至天线阵面的距离; β_s 为太阳光和天线法向方向的夹角, $\cos \beta_s$ 就是太阳辐射角系数,天线处于不同工况下的 β_s 是不同的。该天线安装于背阳面,地球挡住了太阳辐射热流,天线又处于空间低温环境,天线本体能量将被空间吸收,这时天线的热控需采取措施以保证天线处于正常的工作温度。

天线设计要求T组件工作温度和存储温度指标为-40~+55℃,天线每轨工作时间不小于25min。

4.2 热控方案

根据天线在星体上的安装位置和天线本身的组

成,制定了如下热控方案:

a. 天线与星体之间进行隔热安装,结构安装壳体与星体之间垫装不小于10mm的玻璃钢隔热垫,减少星体对天线的影,组件模块四周包覆多层隔热组件,减少空间环境对T组件影响;

b. 在天线的结构安装壳体外侧设置加热器,加热器阈值设置为[-37,-32]℃,保证天线整体处于低温时,内部器件处于可工作温度;

c. 天线结构安装壳体内部均做黑色阳极氧化处理,增加壳体内部与壳体之间的辐射热耦合;组件安装板与天线安装壳体外侧均喷涂白漆热控处理,作为天线散热面;

d. T组件与安装板之间垫装铝箔,确保T组件下表面与安装板具有良好的接触。将固定T组件(四个一组)的安装板两边各伸出25mm的翅片,在翅片上部增加一块面积为250mm×250mm×3mm扩热板,在翅片与扩热板之间垫装铝箔,确保翅片与扩热板之间具有良好的导热,同时在T组件与组件安装板接触面垫装铝箔,确保T组件与组件安装板导热良好,扩热板除安装面外两边均喷涂白漆,作为散热面。

4.3 热分析及验证

4.3.1 仿真分析

将相控阵天线结构模型按照热控输入条件采取等效简化,建立了如图4所示的数值分析模型。

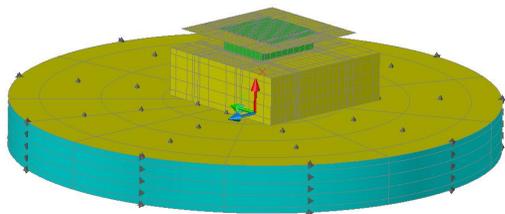


图 4 热分析计算模型图

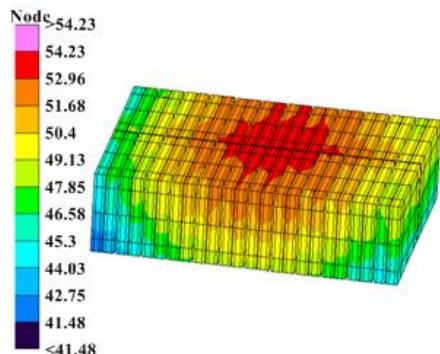


图 5 T 组件温度分布云图

对相控阵天线在轨工作时的温度水平进行分析计算，当相控阵天线每天工作 2 轨，每轨工作时间为 28min，每轨工作至少间隔 2 轨，此时 T 组件热耗为 4W，组件最高温度为 53.3℃，最低温度为-37℃，满足组件温度指标要求。T 组件仿真分布云图如 5 所示。

4.3.2 试验验证

将 Ka 频段相控阵天线水平放置在试验安装板上，相控阵天线在罐内的安装姿态如图 6 所示，吸波热沉与相控阵天线上部之间的距离为 300mm。由于 T 组件本体上温度测点粘贴位置位于 T 组件边缘，与组件热源位置（温度最高位置）有一定温差，考虑到单机的安全性，在试验中，当测点温度达到约 50℃时，天线关机。

在 KM1.5 真空罐内模拟空间外热流，验证产品温度可行性，同时根据热平衡试验结果，对仿真模型进行参数修正。

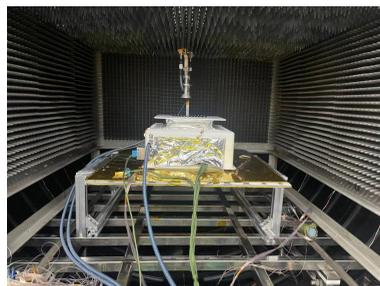
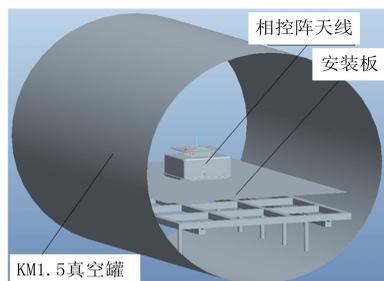


图 6 相控阵天线热平衡实验图

表 1 列出了相控阵天线热平衡试验各工况下各单机和部组件温度。低温工况时，控温加热器阈值设置为[-37, -32]℃，此时天线各单机温度均处于指标范围内，根据统计，加热器使用功耗为 22.9W，满足长期

平均功耗小于 30W 的要求。

当 T 组件起始温度在-35℃附近时，相控阵天线开机时长 32min；当 T 组件起始温度在 0℃附近时，相控阵天线开机时长 17min。

表 1 热平衡试验各工况结果统计

| 单机 | 低温工况 | | 组件起始温度-35℃ | | 组件起始温度 0℃ | |
|--------------------------|-------|-------|------------|------|-----------|------|
| | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| T 组件/℃ | -39.6 | -30.7 | -37.8 | 49.4 | -7.0 | 48.9 |
| T 组件本体测点与对应固定板测点之间最大温差/℃ | 0.8 | | 4.4 | | 4.2 | |
| 电源模块/℃ | -37.9 | -33.1 | -33.5 | 31.4 | 3.5 | 37.1 |
| 波控激励模块/℃ | -36.5 | -33.4 | -33.0 | 25.7 | 2.6 | 30.9 |
| 信号转接板/℃ | -34.5 | -31.2 | -31.4 | 31.9 | 2.6 | 34.3 |
| 前级功放/℃ | -35.1 | -32.6 | -31.5 | 28.8 | 3.8 | 32.6 |
| 框架结构板/℃ | -37.4 | -31.4 | -32.9 | 30.8 | 2.5 | 35.6 |
| 综合背板/℃ | -36.5 | -32.5 | -33.7 | 26.6 | 0.1 | 29.3 |
| 安装框架/℃ | -39.2 | -29.8 | -37.2 | 31.0 | -8.3 | 30.9 |
| 扩热板/℃ | -40.0 | -32.5 | -38.1 | 41.5 | -9.3 | 40.7 |
| 开机时长/min | / | | 32 | | 17 | |

