

星载有源多波束相控阵关键技术研究

崔子卿, 韩国栋, 齐宏业

中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄

收稿日期: 2022年7月23日; 录用日期: 2022年8月23日; 发布日期: 2022年9月1日

摘要

本文就制约星载有源多波束相控阵天线工程化应用的有源相控阵多波束收发隔离问题提出了增加扼流结构改善收发隔离度的方法, 对多波束射频通道高密度集成技术提出了多通道芯片与化合物芯片的混合集成的方式, 对星载高效热控问题提出了主辅散热面相结合、预埋槽道热管的方式, 各项技术均经过了仿真验证和工程应用, 相关方法可显著提升星载多波束相控阵天线的电气性能和环境适应性, 实现天线系统的小型化、高集成度设计。

关键词

相控阵天线, 收发隔离度, 多通道集成, 高效热控

Research on Key Technologies of Satellite-Borne Muti-Beam Phased Array Antenna

Ziqing Cui, Guodong Han, Hongye Qi

China Electronics Technology Group Corporation No. 54 Research Institute, Shijiazhuang Hebei

Received: Jul. 23rd, 2022; accepted: Aug. 23rd, 2022; published: Sep. 1st, 2022

Abstract

In this paper, we propose a method of using the choke structure to improve the transmittance isolation of active multi-beam phased array antenna, which restricts the application of satellite-borne multi-beam phased array antenna, and propose a hybrid integration method of multi-channel chip and compound chip for the high-density integration technology of multi-beam radio frequency channel. The method of combining main and auxiliary heat dissipation surfaces and pre-embedded heat pipe in the side panel is proposed for efficient space-borne thermal control. All the technologies

have been verified by simulation and engineering applications. This method can significantly improve the electrical performance and environmental adaptability of space-borne multi-beam phased array antenna, and realize the miniaturization and high integration design of antenna system.

Keywords

Phased Array Antenna, Transmittance Isolation, Multichannel Integration, Efficient Thermal Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,以一网星座、星链星座为代表的低轨通信星座和以鸽群星座为代表的低轨遥感星座带动了全球低轨卫星星座的建设热潮。低轨卫星通信星座通信系统以其覆盖范围广、传输延时低、抗风险能力强等特点,成为了继 5G 之后下一代移动通信系统的发展方向。同时低轨卫星星座在应用服务、批量研制、快速部署等方面显示出诸多具有颠覆性的特点,将极大革新与重新塑造卫星通信与遥感等领域的整体格局[1] [2] [3] [4] [5]。

当前的低轨卫星星座系统由于轨道高度低,单颗卫星的覆盖范围受限,因此,低轨星座计划一般都由数以千计的卫星构成,单颗卫星均是体积小、重量轻的小型化卫星。同时为了适应多用户的高速率通信需求,单波束的通信天线在提供通信服务时越来越显得捉襟见肘,通信天线在波束数量、通信带宽、波束切换速度等方面提出了更高的要求,因此,有源多波束相控阵天线由于其小型化、轻质化、多波束、波束捷变的优点,成为了低轨卫星通信天线的宠儿。考虑到低轨卫星及低轨空间的使用环境,又有一些技术瓶颈制约着有源多波束相控阵天线的工程化应用[6] [7] [8]。

本文从当前制约多波束相控阵天线工程化应用的有源相控阵多波束收发隔离问题、多波束射频通道高密度集成问题和星载高效热控问题出发,对工程化实践中的设计难点进行分析,并给出相应的解决措施,为有源多波束相控阵天线的工程化应用提供了解决方案。

2. 有源相控阵多波束收发隔离

当前的低轨卫星平台正朝着扁平化、小型化、轻量化的趋势发展,作为对地通信的重要载荷星载相控阵天线也需要具备多波束、高密度集成、轻量化的特点。为了实现系统架构的高密度集成,收、发天线共孔径设计,共用波束解算、电源转换等资源,也成为了减轻平台负担、紧凑型布局的首选。但是,伴随而来的问题是如何保证通信收发天线间的隔离度,保证正常通信成为了需要重点考虑的问题。

收发天线间的隔离度是相控阵天线的系统性问题,具体表现为发射天线对接收通道的阻塞和发射天线对接收信号的底噪抬升。当前,对于空间隔离问题主要的解决手段有发射功率控制、对消隔离、空间隔离、极化隔离和时间隔离等手段[9]。

针对于低轨卫星平台的收发隔离问题,首先应考虑从平台布局的角度去解决,充分增加收发天线间的物理间距将有助于提升天线间的隔离度;其次,应从通信规划的角度去考虑,将收发天线的极化规划为左/右旋极化或正交线极化方式,可提升约 20 dB 以上的隔离度。为了适应下一代低轨卫星一箭多星的需求,卫星平台的空间将进一步缩减,收发天线间的大间距将难以保证,在此情况下通过收发天线间增加扼流结构改善收发天线间的隔离度,将成为小间距天线布局情境下提高隔离度的有效手段。

增加扼流结构的实质是对结构共地的天线单元间增加表面滤波，充分阻断表面波耦合，达到增强隔离度的效果。为了验证扼流结构对于收发隔离度的改善情况，在 HFSS 中建立如图 1 所示的仿真模型。接收天线单元的工作频段为 28.5 GHz~31.0 GHz，天线旋向为左旋圆极化，发射天线的工作频段为 18.7 GHz~21.2 GHz，天线旋向为右旋圆极化，天线阵列的间距为接收高频段的 4 倍波长，约 40 mm。

从图 2 和图 3 的仿真结果可以看出，在无扼流结构的情况下，收发阵列在接收频段的隔离度为 39.77 dB，在发射频段的隔离度为 48.97 dB。在收发天线阵列之间增加扼流结构，如图 4 所示，再次进行隔离度仿真。

从图 5 和图 6 的仿真结果可以看出，在增加了扼流结构之后，收发阵列在接收频段的空间隔离度为 60.29 dB，在发射频段的空间隔离度为 60.5 dB。对比两次情况下的隔离度仿真结果，增加扼流结构之后，在接收频段的隔离度改善了 20.52 dB，在发射频段内的隔离度改善了 11.53 dB。同时，扼流结构的加工相对简单，通过螺链即可完成结构安装，几乎不增加机构组装的复杂度，因此，通过增加扼流结构改善收发天线间的隔离度是一种适用于工程化应用的技术手段。

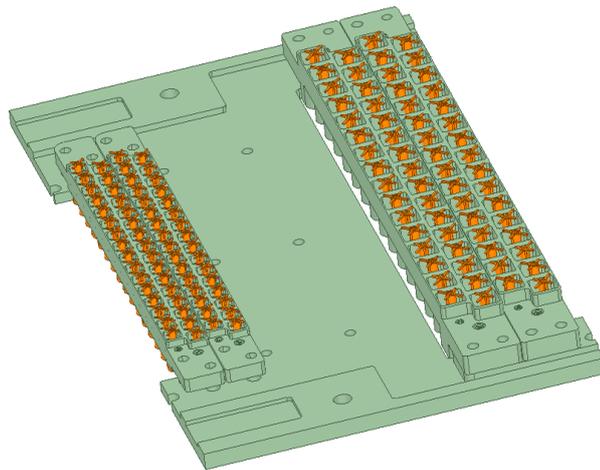


Figure 1. Simulation model without choke structure of receiving and transmitting antenna arrays
图 1. 收发天线阵列无扼流结构仿真模型

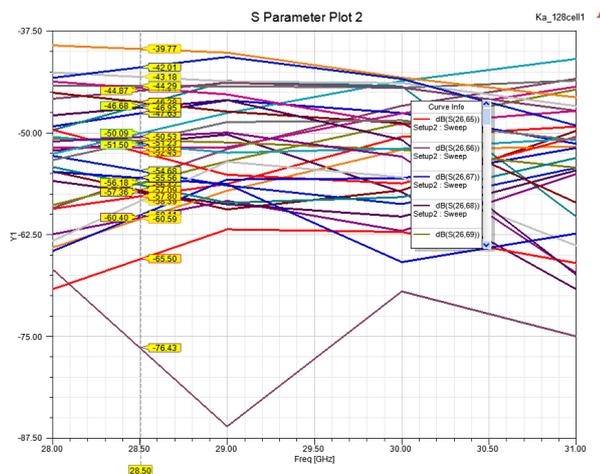


Figure 2. Simulation of spatial isolation in the receiving frequency band (without choke structure)
图 2. 在接收频段的空间隔离度仿真(无扼流结构)

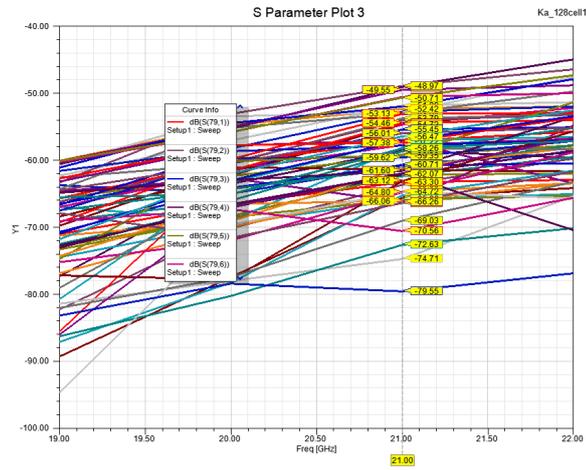


Figure 3. Simulation of spatial isolation in the transmitting frequency band (without choke structure)

图 3. 在发射频段的空间隔离度仿真(无扼流结构)

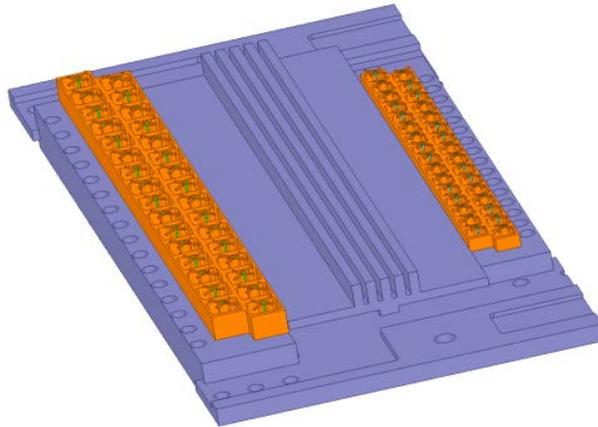


Figure 4. Simulation model with choke structure of receiving and transmitting antenna arrays

图 4. 收发天线阵列有扼流结构仿真模型

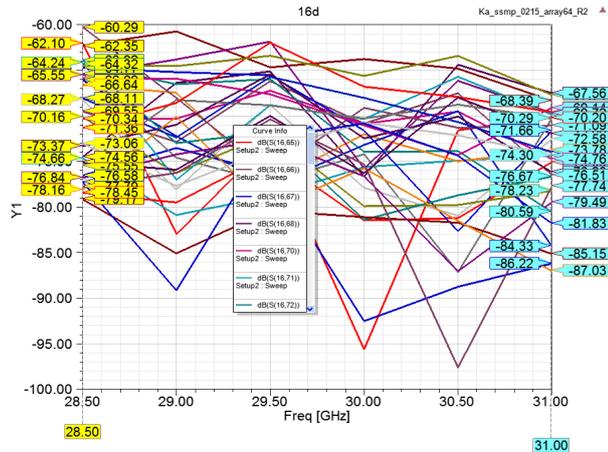


Figure 5. Simulation of spatial isolation in the receiving frequency band (with choke structure)

图 5. 在接收频段的空间隔离度仿真(有扼流结构)

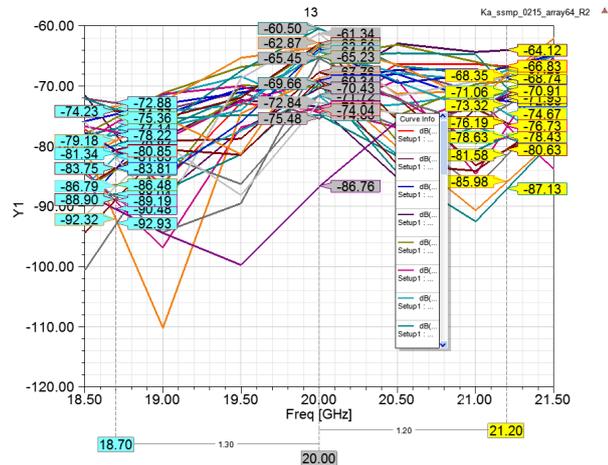


Figure 6. Simulation of spatial isolation in the transmitting frequency band (with choke structure)

图 6. 在发射频段的空间隔离度仿真(有扼流结构)

3. 多波束射频通道高密度集成技术

对于星载相控阵天线而言，星载有源射频组件是整个相控阵天线最重要的部件。有源射频模块中集成了功放芯片、低噪声放大器芯片、射频开关、移相器以及控制电路等，芯片数量多，互连工序多且复杂，是射频信号处理的核心部件。针对当前主流的 Ka 频段星地通信微波链路，该频段波长短、布阵间距小、结构工艺复杂，元器件寄生参数影响大，工艺实现难度大，因此其对集成设计和工艺要求很高。为了实现多波束的天线应用，多波束射频通道的高密度集成技术是必须解决的系统集成问题。

有源射频模块架构设计主要分为瓦片式和砖块式。多通道瓦片式组件架构主要以毫米波相控阵天线为契机，逐渐发展起来的一种集成化高、工艺复杂的集天线、微波、散热、控制于一体的天线结构功能复合件。采用该技术的收发组件在剖面方向上的高度取决于级联器件的物理尺寸，可充分实现低剖面设计，可通过优化天线与射频通道的间的互联结构，采用毛纽扣、探针等形式，实现射频与天线的一体化设计，形成“片上天线”。图 7 为采用三维集成技术的瓦片式片上天线。但是该技术也存在明显的弊端：如果多通道幅相芯片的尺寸超出单元间距，则无法采用此种架构。



Figure 7. Multichannel tile-type on-chip antenna

图 7. 多通道瓦片式片上天线

采用多通道集成芯片的砖块式组件是当前多波束射频组件的主流设计。在砖块式有源射频模块中，元器件放置方向垂直于相控阵天线孔径平面，功能芯片依次互连，其电路与结构设计遵循传统的分系统概念。伴随着硅基封装集成工艺逐步成熟，采用高介电常数的硅基底进行多波束移相通道的集成，将多个波束通道集成到一块晶圆级芯片上，如图 8 所示，相较于多个单通道的移相器芯片搭建电路来比，减少了芯片互联数量，简化了互连工序，实现了砖块式组件的小型化设计。当前，已经工程化应用的 Ka 频段 4 波束射频组件的剖面高度仅为 68 mm，该组件采用了 2 通道的幅相多功能芯片配合基于砷化镓的低噪声放大器、功率放大器混合搭建的射频链路，既兼顾了射频性能，又提升了系统集成度，减少了芯片互连，达到了小型化的目的，如图 9 所示。

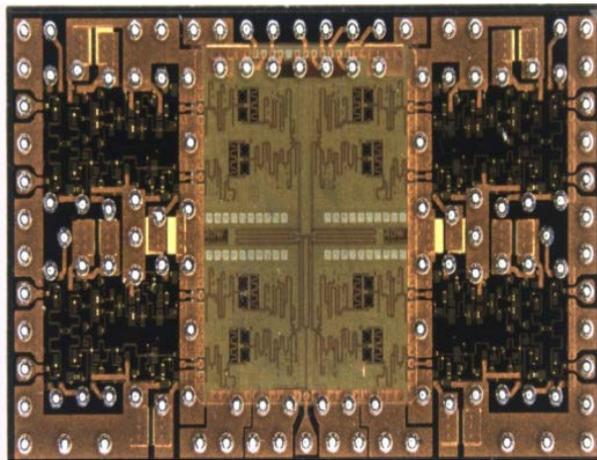


Figure 8. Circuit diagram of multichannel phase shift chip
图 8. 多通道移相芯片电路图

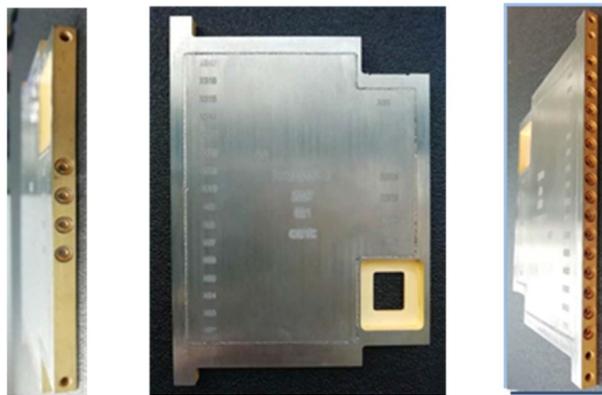


Figure 9. Miniaturized Ka band four beam receiving radio frequency module
图 9. 小型化 Ka 频段 4 波束接收射频组件

当前，我国互联网卫星系统建设工作的逐步推进，对于相控阵天线扁平化、低成本的设计需求将会日益强烈，因此，未来的射频通道的设计将从当前化合物的多通道芯片逐步向低成本多通道硅基 CMOS 幅相芯片的过渡，组件的集成架构将完成从砖块式向瓦片式的过渡。

4. 星载高效热控技术

星载相控阵天线安装在卫星对地面上，需要直面低轨空间真空、太阳热流辐射等环境，再加上相控

阵天线自身功耗较大、热密度较高，无法采用空气对流、液冷等常规的散热方式，只能依靠被动传导散热的方式。因此，为了保证星载相控阵天线稳定、高可靠工作，需对相控阵天线的热控设计进行针对性优化设计[10]。

为了实现较好的传热效率，需要从两个方面进行考虑：一是设计最优的散热路径，二是提升散热路径上的导热系数。

针对于导热路径方面，结合当前星载相控阵天线的集成架构，热量集中点为射频有源组件的功放芯片、低噪声放大器芯片附近，该部分为整机结构的上部，而卫星的热交换面一般为安装地面，因此，导热路径的选择需要具备两个特点：一是热源位置与热交换面的最短路径，二是避免与平台的联合设计，提升对平台的试装性。因此，基于此考虑，设计了如下图 10 所示的导热路径。该散热路径的优点有以下两点：一是热量由热积聚的中心分两侧到达交换面，路径短；二是充分利用了相控阵天线的裸露空间，设计了多个散热面，减轻单个面进行热交换的压力；三是天线与平台的解耦合设计，具备不同平台的适装性。

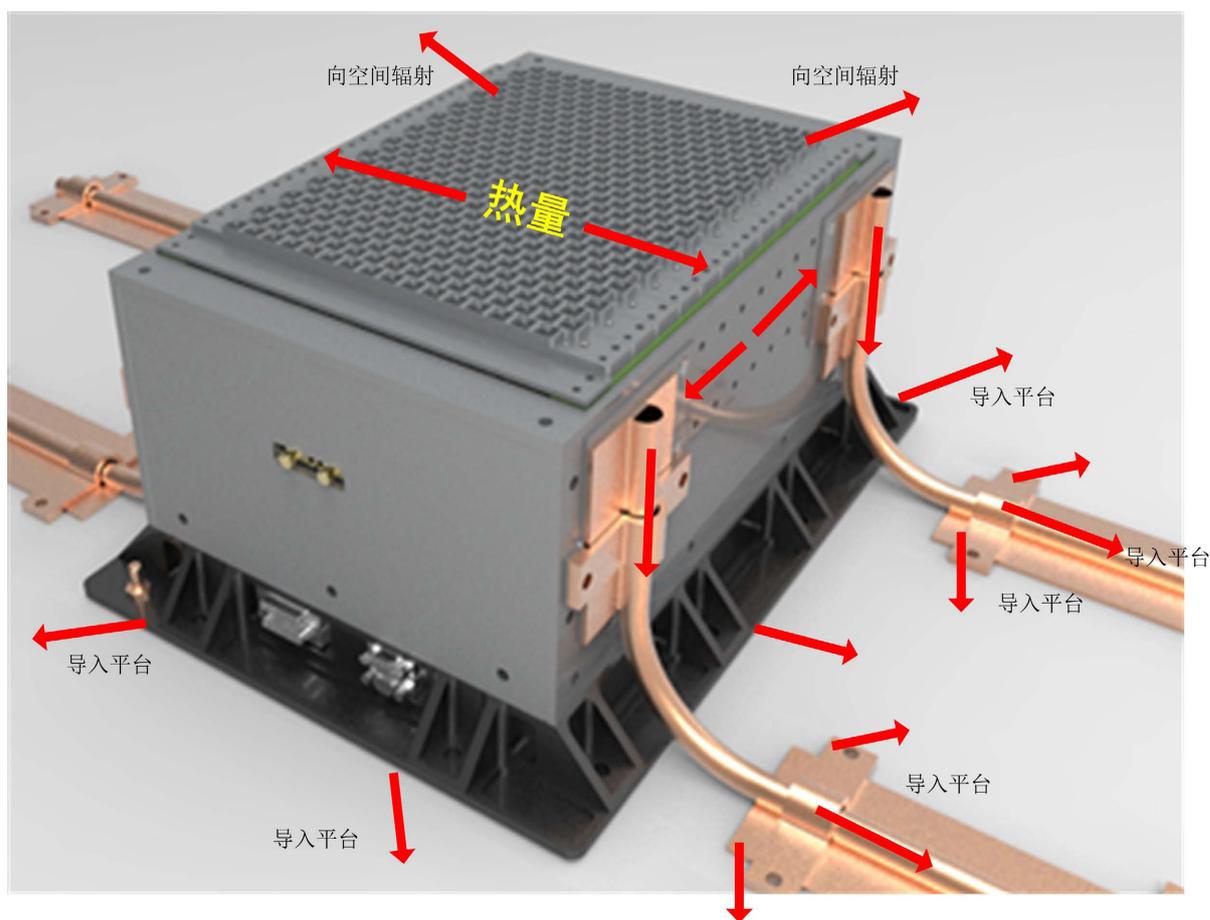


Figure 10. Schematic diagram of heat conduction path of spaceborne antenna
图 10. 星载天线导热路径示意图

针对于提升散热路径上的导热系数方面，热管网络是目前最成熟的相控阵天线散热方案，热管网络中目前应用最多的是槽道热管如图 11 所示。槽道热管不仅可以解决引出热量的问题，还可以解决热量平衡的问题，使得天线的温度梯度满足使用要求。



Figure 11. Schematic diagram of flat channel heat pipe
图 11. 扁平化槽道热管示意图

在相控阵天线结构件设计时,采用预埋槽道热管的结构件设计,如图 12 所示,可实现结构体导热系数的显著提升。从图 13 的仿真结果可以看出,预埋热管位置的结构体具备均温的导热特性,能够有效的传导热量。这样的设计方式既保证了结构件具备足够的力学强度,又提升了结构件的导热效果。将结构件的功能由单一的支撑功能拓展为兼顾导热和力学强度的结合体。

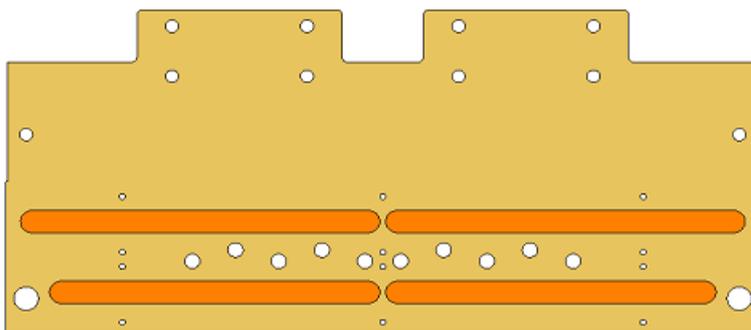


Figure 12. Schematic diagram of embedded channel heat pipe structure
图 12. 预埋槽道热管结构件示意图

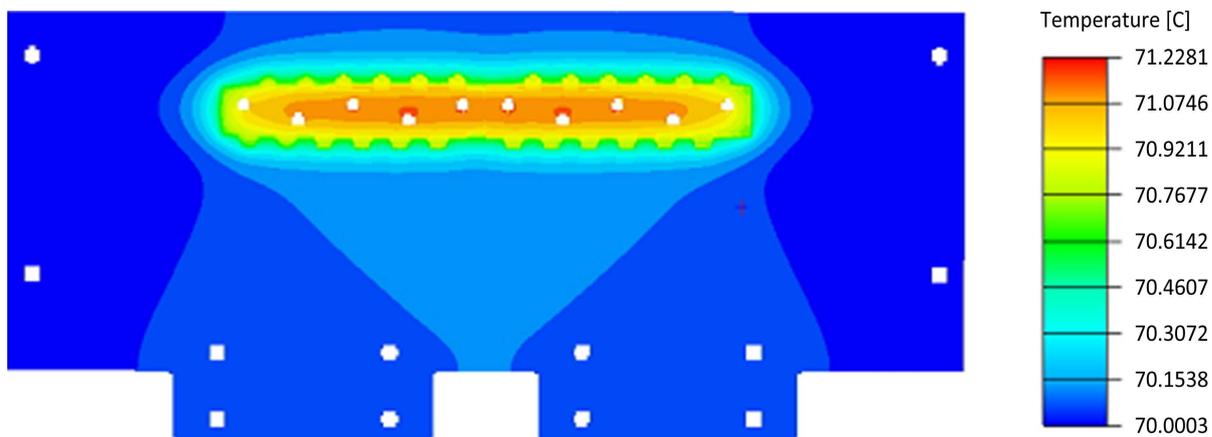


Figure 13. Thermal simulation results of structural parts embedded channel heat pipe
图 13. 预埋槽道热管的结构件热仿真结果图

在当前阶段,高效的热控问题还可以从新型材料的应用、相控阵集成架构等角度进行考虑,寻找结构强度大、热导率高的新型复合材料,提升热交换的效率;改变相控阵的集成形式,将安装面设计为主

散热面。伴随着通信能力需求的不断上升,未来的星载相控阵天线的体系架构将发生较大的变化,但是高效热控问题将始终是天线稳定工作的前提,需要不断的进行尝试和优化。

5. 结论

本文就当前阶段制约星载有源多波束相控阵天线应用的有源相控阵多波束收发隔离提出了增加扼流结构改善隔离度的方法,能有效提升 10 dB 的收发隔离度;对多波束射频通道高密度集成技术提出了采用多通道集成芯片和化合物芯片的混合集成,兼顾性能的同时降低组件的剖面高度;对于星载高效热控技术提出了利用主辅散热面相结合、槽道热管改善导热率的设计方法,实现天线的稳定热控。相关设计方法均经过了试验验证,对于星载有源多波束相控阵天线的设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 韩国栋, 杜彪, 陈如山. 卫星移动通信相控阵天线研究现状与技术展望[J]. 无线电通信技术, 2013, 39(4): 1-6.
- [2] 孙晨华, 章劲松, 赵伟松, 等. 高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 505-510.
- [3] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
- [4] 尚勇, 梁广, 余金培, 等. 星载多波束相控阵天线设计与综合优化技术研究[J]. 遥测遥控, 2012, 33(4): 37-41.
- [5] 李靖, 王金海, 刘彦刚, 等. 卫星通信中相控阵天线的应用及展望[J]. 无线电工程, 2019, 49(12): 1076-1084.
- [6] 阎鲁滨. 星载相控阵天线的技术现状及发展趋势[J]. 航天器工程, 2012, 21(3): 11-17.
- [7] Ojaroudiparchin, N., Shen, M. and Pedersen, G.F. (2016) 8×8 Planar Phased Array Antenna with High Efficiency and Insensitivity Properties for 5G Mobile Base Stations. 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation, Davos, 10-15 April 2016, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2016.7481323>
- [8] Telikepalli, R., Strickland, P.C., McKay, K.R., et al. (1995) Wide Band Microstrip Phased Array for Mobile Satellite Communications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **43**, 1758-1763. <https://doi.org/10.1109/22.392950>
- [9] 谢旻睿. 有源干扰的收发隔离技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学电路与系统, 2012.
- [10] 张彬. 基于机电热耦合的星载有源相控阵天线热设计方法[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.