

花形仿生拓扑在天线液冷系统中的应用研究

吕远征, 杨志甫, 姜智楠, 赵思澄
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 本文通过计算流体力学数值仿真和实验, 研究了花形仿生拓扑在相控阵天线液冷系统中的传热特性。相控阵天线共有 1 个矩形发射终端, 4 个 L 形接收终端和 12 个矩形接收终端, 为此设计了三种不同散热能力的液冷板, 并分别组成花形仿生拓扑阵面和传统的全并联拓扑阵面。研究表明: 在相同热环境和运行条件下, 花形仿生拓扑阵面传热特性全面优于传统的全并联拓扑阵面, 花形仿生拓扑阵面温度均匀性更好, 不仅 TR 组件壳温均匀性优于 $\pm 3^\circ\text{C}$, 所有终端之间的最大温差也下降了 8%~15%, 证明花形仿生拓扑阵面是一种传热效率更高的热控方案。

关键词: 相控阵天线; 热仿真; 液冷; 仿生

中图分类号: TN821+.5; TN03 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2025)02-0129-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250114001

引用格式: 吕远征, 杨志甫, 姜智楠, 等. 花形仿生拓扑在天线液冷系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2025, 46(2): 129-136.

The Application Research on Flower-Shaped Bionic Topology in the Liquid Cooling System of Phased Array Antenna

LYU Yuanzheng, YANG Zhifu, JIANG Zhinan, ZHAO Sicheng
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: This study investigates the application of flower-shaped bionic topology in phased array antenna liquid cooling systems through computational fluid dynamics (CFD) simulations and experimental validation. The phased array antenna comprises a rectangular transmitting module, 4 L-shaped receiving modules and 12 rectangular receiving modules. All these three types of liquid cooling plates are designed to form either a flower-shaped bionic topology or a fully parallel topology. Comparative analysis reveals that the flower-shaped bionic topology offers a highly efficient thermal control solution. The temperature gradient of the antenna employing flower-shaped bionic topology is significantly smaller than that of the fully parallel topology. The temperature difference between modules is controlled to $\pm 3^\circ\text{C}$, representing an 8%~15% improvement over the fully parallel topology.

Keywords: Phased array antenna; Thermal simulation; Liquid cooling; Bionics

Citation: LYU Yuanzheng, YANG Zhifu, JIANG Zhinan, et al. The Application Research on Flower-Shaped Bionic Topology in the Liquid Cooling System of Phased Array Antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(2): 129-136.

0 引言

随着现代通信与雷达技术的飞速发展, 相控阵天线凭借其小型化和高度集成化的技术优势, 迎来了迅猛的发展。在相控阵天线的阵面内部排列着较大数量的 T/R 组件, 这些组件总热耗较高并且热流密度分布不均, 而组件中高功率放大器等

电子元器件对温度敏感, 阵面温度分布不均会导致 T/R 组件的相位不一致^[1], 从而影响天线的波束合成、增益和可靠性等重要指标^[2], 因此, 如何有效控制阵面最高温度和提高阵面温度均匀性指标已成为相控阵天线设计的关键^[3]。电子设备热控措施取决于热源具体特征, 比如, 热流密度小于 0.31 W/cm^2 的微电子器件可采用强迫风冷或自然冷

却, 而大于 0.31 W/cm^2 的高性能相控阵天线则必须依靠热管、均温板、相变热沉和液冷等手段散热^[4-6]。当相控阵天线总功耗达到千瓦级甚至更高, 液冷散热则几乎成为了保障系统正常运行的唯一解决方案, 因此其应用研究已成为当前该领域的热点。

梳理近年来国内外相控阵天线液冷系统研究进展发现, 合理的阵面流道拓扑结构是保证阵面温度均匀性的重要基础之一^[7]。当前, 全并联的 U 形结构和 Z 形结构是在使用的最广泛的阵面流道拓扑结构, 热设计人员可根据热源特征和热控目标^[8], 利用伯努利方程和 CFD(计算流体力学)确定任一支路管路流动参数。胡家渝等^[9]以此编制了适用于 U 型分流、汇流管道压力分布、流量分布迭代计算程序, 实现了相控阵天线面管路流阻的精确预计。陈学永等^[10]提出了一种以理论计算和一维流体仿真相结合的方式优化 Z 形多支路管网流阻的方法, 通过实验结果比对, 验证了方法的准确性和便捷性。但是大口径相控阵天线除自身热源以外, 还必须承受太阳随机热辐射和其他种类环境漏热^[11], 辐射口面越大, 阵面温度失控风险越严峻^[12]。传统阵面拓扑不具备自调节能力, 只能通过增大总流量和降低供液温度的方式实施整阵面温度调控, 这无疑又增加热控成本和凝露等风险, 因此, 阵面热控的拓扑优化势在必行^[13]。近年来, 仿生学为传热传质学科提供的新思路解决了大量实际散热难题^[14], 比如仿树形拓扑^[15]显著改善了液冷系统泵功消耗和散热效果, 仿叶脉型拓扑^[16]有效降低了蛇形流道冷板阻力损失, 仿四叶草形拓扑^[17]使流体在不同 Reynolds number(雷诺数)条件下都具有较高的 Nusselt number(努塞尔数)和温度一致性, 仿剑麻形拓扑^[18]同样也被证明具备一定的改善液冷板温度一致性的能力。显然, 流道的仿生优化设计的实质就是模仿生物某一方面特征, 把载冷工质更合理地分配到串、并联多分支液冷管路当中^[19], 以获得近似生物的能力。经广泛调研, 在众多生物学结构中, 花朵可依靠其独特的花维管束分布和气孔蒸腾组成一个精密高效的液冷系统^[20], 无论阳光如何照射, 花冠的各个花瓣都能作为一个有机整体共同承担环境输入热量, 温度均匀性极佳^[21]。要提高相控阵天线阵面温度场对太阳热辐射的抵抗能力, 则非常有必要借鉴花朵特征展开仿生学阵面流道拓扑设计。

本文研究对象为某相控阵天线阵面液冷系统, 利用三维热流体仿真和实物热实验, 比较和分析了花形仿生拓扑阵面与全并联阵面在不同太阳辐射角度下的阵面温度场。分析结果表明: 由于花形仿生拓扑流道增加了对角花瓣热量输送通路, 无论太阳辐射方向如何改变, 所有花瓣均会分担部分热量, 有效强化了阵面对太阳热辐射的抵抗能力, 改善了阵面温度均匀性。

1 热环境与天线热耗评估

某相控阵天线的一种典型热环境如图 1 所示, 该天线通常在海拔 4 000 米左右展开, 大气压不高于 0.6 个标准大气压, 稀薄的空气抑制了天线的自然对流换热, 还显著提高了太阳辐射作用。天线工作时, X 轴与地面保持水平, 俯仰角和旋转角则会一直变化, 以确保 +Z 轴持续指向深空移动目标, 因此阵面 +Z 轴与太阳辐照的夹角(下文简称辐射角)是时刻发生变化的, 高透波天线罩的复杂曲面造型具有一定的能量汇聚作用, 终端与终端之间的遮挡也在时刻发生变化, 使热辐射吸收情况更加复杂, 若热控措施不到位, 辐射角越接近 90° 越容易导致阵面温度均匀性恶化。

相控阵天线基本结构如图 2 所示, 其主要由高透天线罩、发射终端、接收终端和轻量化天线框

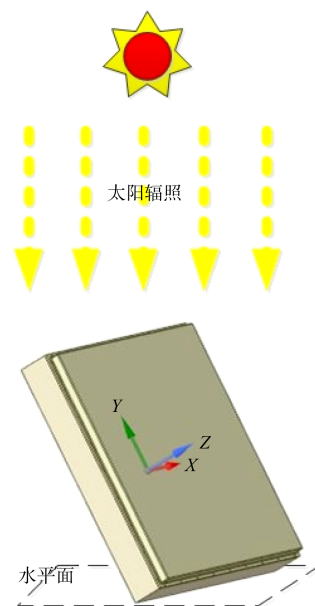


图 1 天线热环境

Fig. 1 The thermal environment of antenna

架组成,热耗分布见图2(a);发射(接收)终端为模块化多层结构,从上到下分别是天线单元、滤波器、T组件(或R组件)、液冷板和波控器组成,热耗分布见图2(b)。

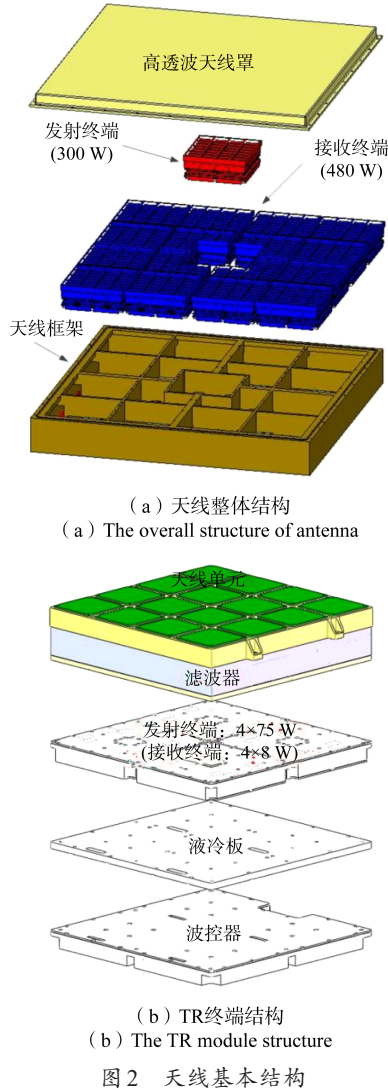


图2 天线基本结构

Fig. 2 The fundamental structure of antenna

所有天线单元的大小相同, T组件盒体和R组件盒体外形也相同,故每四个天线单元可以共用一个T组件(或R组件),而每3~4个T组件(或R组件)又可共用一块液冷板。由图2(a)可知,尽管发射终端热耗与接收终端热耗量级基本相当,但平均热流密度相差悬殊,所以为避免出现局部过热,则一共需要设计三款6061铝合金材质冷板,分别是:1块300 W散热量的矩形发射终端冷板,12块32 W散热量的矩形接收终端冷板和4块24 W散热量的L形接收终端冷板。

2 天线流道设计

2.1 管网拓扑结构

对液冷系统中所有过流部件展开仿真设计时,应首先假设工质流动严格服从连续介质定律,质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x U) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y U) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z U) = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

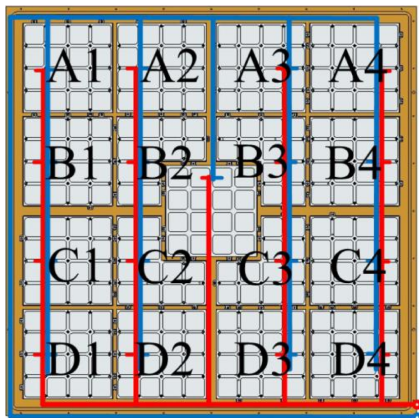
能量守恒方程为:

$$\frac{\partial(\rho T_f)}{\partial t} + \text{div}(\rho U T_f) = \text{div}\left(\frac{\lambda_f}{c_p} \text{grad} T_f\right) + S_r \quad (5)$$

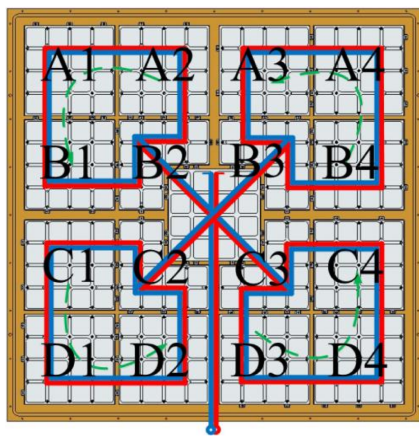
式中, U 为流体的速度矢量; u_x , u_y , u_z 为控制体分别在 x , y , z 三个方向上的速度分量,单位为m/s; t 为时间,单位为s; ρ 为密度,单位为 kg/m^3 ; p 为控制体微元的压强,单位为Pa;式(1)中粘性力 τ 的分量分别为 τ_{xx} , τ_{xy} 和 τ_{xz} ,式(2)(3)同理; f_x , f_y 和 f_z 为微元受力在三个方向上的分量; T_f 为流体温度; λ_f 为流体的热导率; c_p 为流体的定压热容; S_r 为粘性散耗项目。

对于占据整阵面积93.75%的接收终端而言,其平均热流密度不足发射终端的1/9,则接收终端冷板结构不需要过于复杂。但为了消除复杂环境热输入产生的影响,热设计人员必须综合考虑冷板和阵面管路拓扑结构来开展流道设计,确保阵面温度均匀性优于任务书要求。在大框架内空间较为宽裕的情况下,首选方案通常是成熟可靠的U形或Z形全并联结构。Z形全并联方案如图3(a)所示,几乎所有不同类型的终端冷板都能获得理想的供液流量和供液温度,但这种方案非常依赖高性能分水板,其尺寸、重量、设计难度和制造成本都相对较高。当面临随机方向阳光暴晒问题时,也只能通过超量供液和提高流道复杂度的方式来解决,这无疑进一步增加了冷板和冷源研制难度。

图3(b)所示是一种模仿花朵结构的花形仿生拓扑阵面管网结构(以下简称花形仿生拓扑),该方案将16个终端分为四组花瓣,将阵面中心的分集水器和发射终端冷板作为花托。由于这种结构和花朵一样具有中心对称特征,无论大框架哪一侧遭受阳光暴晒都只会引起相似的温度升扰动,另一方面,工质的分流、汇流全在阵面中心分集水器中完成,但该分集水器并不完全隔绝对角花瓣的能量交换,即某一花瓣过高的回液温度会提高对角花瓣的供液温度,使尽可能多的终端来分担环境热输入。



(a) 全并联拓扑
(a) The fully parallel topology



(b) 花形仿生拓扑
(b) The flower-shaped bionic topology

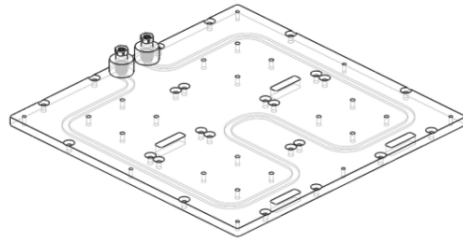
图3 阵面管网拓扑方案

Fig. 3 The pipe network topology of antenna

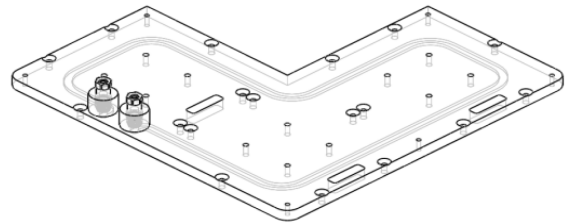
2.2 液冷板设计

① 接收终端冷板流道设计。以 A1A2B1B2 花瓣为例,其主要由矩形接收终端冷板和 L 形接收终端冷板组成,散热量分别是 32 W 和 24 W,根据文

献[22]所推荐的强迫对流换热系数关联式可设计蛇形流道冷板,具体参数如下:冷板平均厚度 8 mm,流道宽度 6 mm,深度 2 mm,流道结构如图 4 所示。



(a) 矩形接收终端冷板
(a) The liquid cooling plate for rectangle receiving modules



(b) L形接收终端冷板
(b) The liquid cooling plate for L-shaped receiving modules

图4 冷板流道形式

Fig. 4 The flow channels of liquid cooling plates

利用 Simcenter STAR-CCM+ 对接收冷板进行单相流动热仿真计算,载冷工质选用乙二醇浓度 66% 的某型耐低温防冻液,在供液流量为 0.4 L/min、供液温度为 25 °C 时的热仿真结果如图 5~图 6 所示。

② 发射终端冷板的流道设计。由于发射终端位于阵面中心,受四周接收终端遮挡,太阳辐射对其温度均匀性的影响比较有限,因此若要满足所有 T 组件温度梯度优于 ±3 °C,由能量和质量守恒公式可知,保证发射冷板的供液流量不低于 1 L/min 即可,根据文献[22]所推荐的强迫对流换热系数关联式,再综合考虑终端内热耗分布特点,确定发射阵冷板采用 4 区串并联的微小流道,主要特征参数如下:冷板平均厚度 8 mm,单根流道最小宽度 3 mm,最大宽度 6 mm,平均深度 2 mm,流道具体形式及供液流量 1 L/min 且供液温度为 25 °C 时热仿真结果如图 7 所示。

结合分析图 4~图 7 的热仿真结果可知,蛇形流道和微小流道完全满足接收终端和发射终端的散热需求,在设计流量条件下,工质流速分布比较合理,TR 组件壳温均匀性优于 ±3 °C,满足任务书要求。

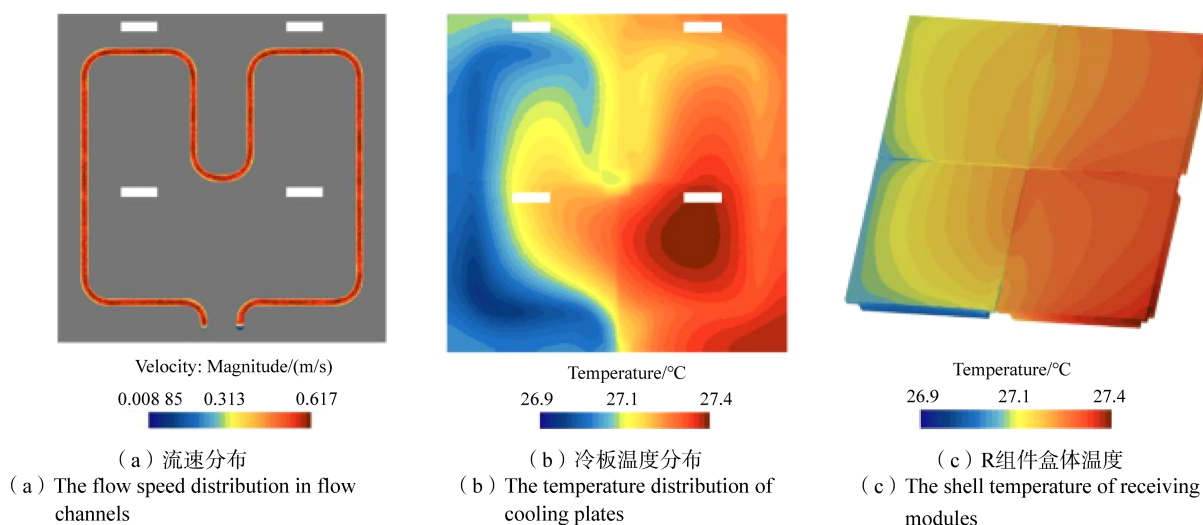


图 5 矩形终端热仿真结果

Fig. 5 The thermal simulation results of rectangle receiving modules

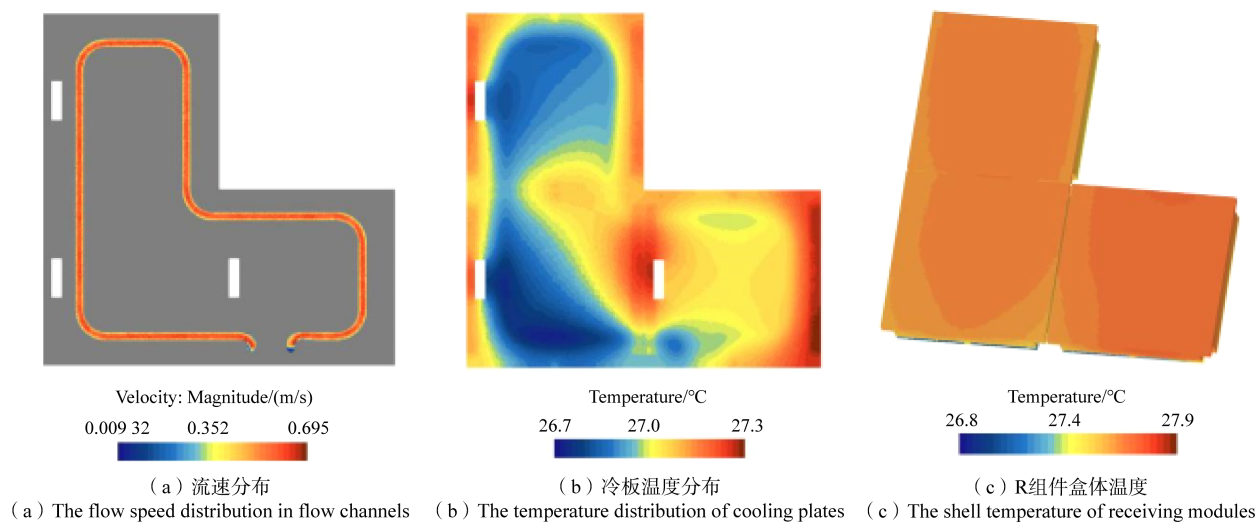


图 6 L形冷板热仿真结果

Fig. 6 The thermal simulation results of L-shaped receiving module

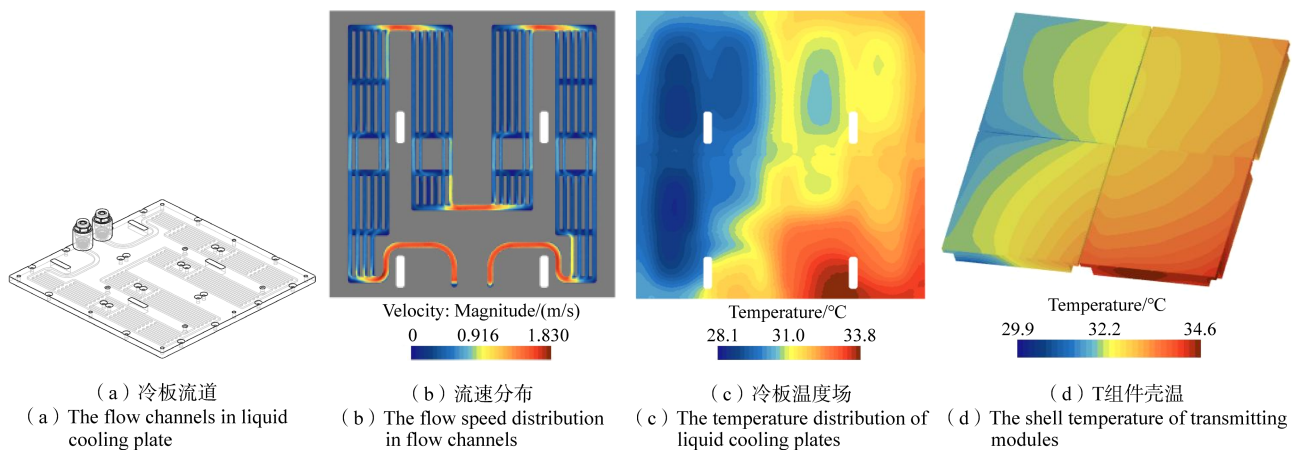


图 7 发射终端冷板热仿真结果

Fig. 7 The thermal simulation result of the cooling modules of the transmitting modules

3 整阵热仿真与分析

在已有冷板及 TR 数模的基础上开展花形仿生拓扑的整阵联合热仿真, 并实施相同条件热实验以进行比对验证。仿真软件为 Simcenter FLOEFD, 仿真及实验条件如下: 环境和背景辐射温度 26 °C, 热辐射强度 1 200 W/m², 辐射源在阵面 YZ 平面上, 热辐射方向与阵面+Z轴保持 60°夹角, 大气压强为 0.6 atm, 最终得到花形仿生拓扑阵面的仿真和实验结果如图 8 所示。

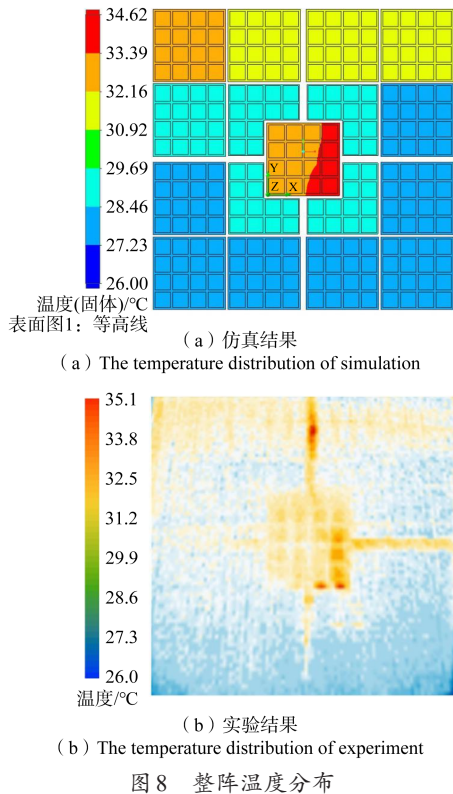


Fig. 8 The temperature distribution of antenna

图 8(b)为花形仿生阵面的实测温度分布, 该图由 Fluke Tis 55+红外热像仪拍摄得到, 与图 8(a)对比可知, 两者温度分布一致, 仿真模型的合理性得到初步验证。就阵面温度分布规律来看, 阵面在热仿真和实验里均会出现两个高温区域。首先, 是阵面中心由发射组件工作热耗造成的高温区域。其仿真结果为 34.6 °C, 实验结果为 35.2 °C, 相差仅 0.6 °C。然后, 是由热辐射和接收终端工作热耗共同造成的 A 行接收终端高温区。其仿真结果为 33.3 °C, 实验结果为 32.5 °C, 相差仅 0.8 °C。由于花形拓扑的互联特性, 实验中, A1A2A3A4 温度升高也导致了 B1B2B3 和 C2C3 接收终端温度升高,

整阵的接收终端的温度一致性约在±2.65 °C。热仿真同样复现上述现象, 证明热仿真模型设置合理, 传热过程符合实际, 且计算精度较高。

为了进一步研究花形仿生拓扑阵面在不同辐射角度下的传热特性, 本文以相同方法建立了全并联拓扑阵面的热仿真模型, 开展两者在更多辐射角度条件下的比对研究。在比对时, 仍然保持环境和背景的辐射温度为 26 °C, 热辐射强度为 1 200 W/m², 大气压强为 0.6 atm, 辐射源在阵面 YZ 平面上, +Z轴与热辐射方向夹角为 0~90 °C。TR 组件温度场对比结果如图 9、图 10 所示。

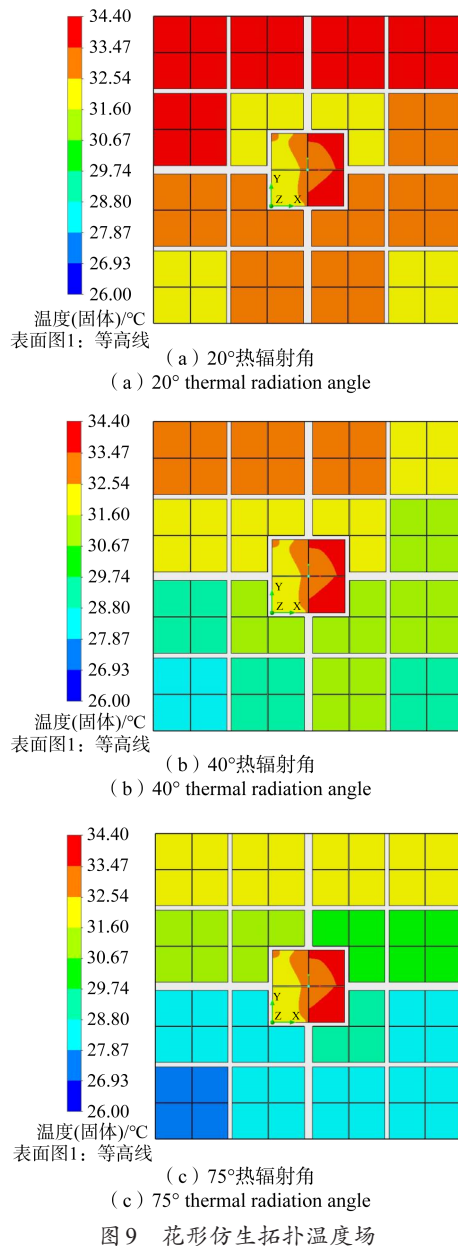


Fig. 9 The temperature distribution of flower-shaped bionic topology

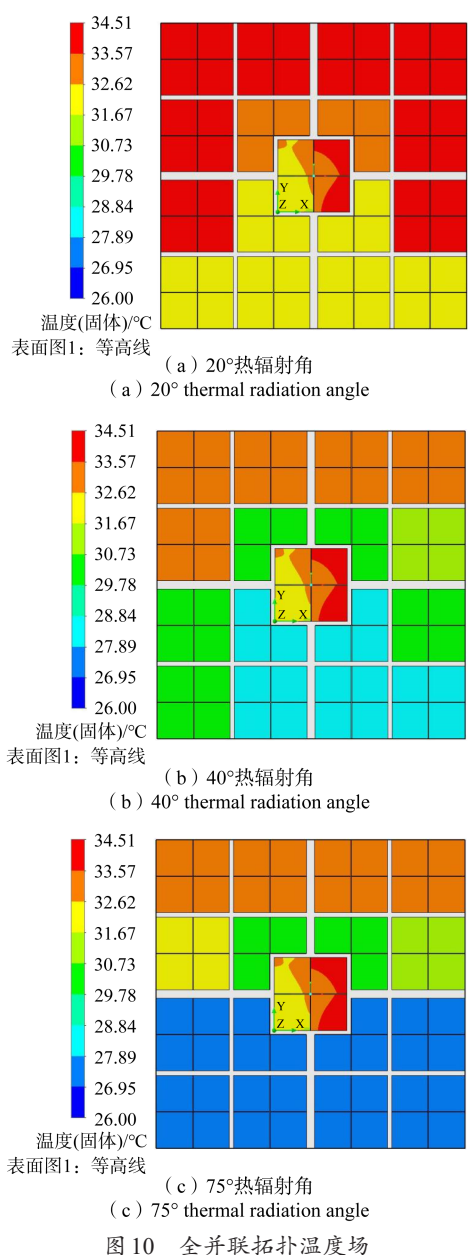


Fig. 10 The temperature distribution of fully parallel topology

对图9、图10的数据进行进一步整理以分析接收终端的最大温差变化, 可得到的曲线见图11。

总的来说, 接收终端的最大温差会随着热辐射角度增加而增加。当辐射角小于30°时, 两种拓扑其实并无太大差异。当辐射角超过30°, 由于阵面承受的热辐射严重不平衡, 接收终端间的最大温差才开始陡然升高。即便如此, 无论何种辐射角度, 花形仿生阵面中剧烈温升的接收终端数量始终更少, 证明仿生流道成功地模仿和实现了花朵花维管束的功能和作用, 使对角花瓣可以进行一定程度的能量交换, 促使所有终端都尽量承担

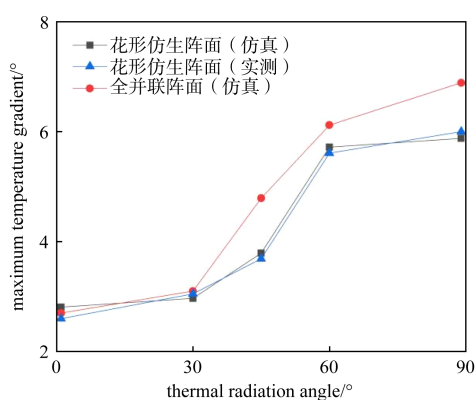


图11 接收终端最大温差变化

Fig. 11 The maximum temperature difference of receiving modules

部分热辐射。经过统计后可知, 花形仿生阵面的温差平均会比全并联阵面小0.5°C~1.7°C, 约8%~15%, 进一步证明花形仿生管网拓扑结构能够有效改善相控阵天线阵面的温度均匀性, 是一种行之有效的热控方案。

4 结束语

为了解决相控阵天线随机单侧暴晒导致的阵面温度均匀性恶化问题, 本文提出了一种花形仿生拓扑阵面液冷系统, 旨在利用流道中心对称的特点, 增加了对角花瓣能量交换通路, 让所有子阵终端共同承担太阳热辐射。为了验证新型阵面拓扑的合理性, 以仿真和实验相结合的方法, 比较分析了花形仿生阵面与传统全并联阵面的热控性能, 最终得到结论如下:

① 蛇形常规尺度流道冷板可以解决低热流密度接收终端的散热问题, 结构简单, 冷板无散热盲点, 成功消除了R组件壳温热区;

② 四区串并联微小流道冷板可以解决高热流密度发射终端的散热问题, 依靠微小流道的高流动换热系数和较大的换热面积, 使4个T组件壳温一致性优于±3°C, 满足使用要求;

③ 在高热辐射夹角工况下, 采用花形仿生拓扑的天线阵面可以显著减小最大温差, 减少异常温升终端数量, 比如, 当供液条件相同并且热辐射角超过30°时, 花形仿生阵面的最大温差会比全并联阵面小8%~15%。

参考文献

- [1] 平丽浩. 雷达热控技术现状及发展方向[J]. 现代雷达, 2009, 31(5): 1-6.
PING Lihao. Current status and development trends of thermal control technology for phased array radar system[J]. Modern Radar, 2009, 31(5): 1-6.

- [2] 赵军忠, 刘越东, 刘晓勇. 某星载天线热变形对跟踪指向精度的影响仿真分析[J]. 遥测遥控, 2013, 34(5): 1-4. ZHAO Junzhong, LIU Yuedong, LIU Xiaoyong. Analysis of influences of thermal distortion on track pointing precision of a kind of satellite antenna[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2013, 34(5): 1-4.
- [3] 司俊珊, 刘兵, 冯志新. 某相控阵面热设计及流量分配研究[J]. 电子机械工程, 2021, 37(3): 35-38. SI Junshan, LIU Bing, FENG Zhixin. Research on phased array thermal design and liquid cooling system flow distribution[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2021, 37(3): 35-38.
- [4] 聂泽森, 杨志甫, 张威, 等. 某车载机箱的散热设计及优化[J]. 遥测遥控, 2019, 40(5): 47-55. NIE Zeseng, YANG Zhifu, ZHANG Wei, et al. Thermal design and optimization for a vehicle-mounted chassis[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(5): 47-55.
- [5] 崔冠宇, 王宇, 郭益, 等. 基于石墨板的电子设备大功率器件散热方法研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(4): 89-94. CUI Guanyu, WANG Yu, GUO Yi, et al. Research on heat dissipation method of high power components in electronic equipment based on graphite sheet[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(4): 89-94.
- [6] 艾平贵, 王宇. 某高码率通信终端处理机热设计与仿真分析[J]. 遥测遥控, 2020, 41(1): 52-65. AI Pinggui, WANG Yu. Thermal design and simulation analysis of high-rate communication terminal processor[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(1): 52-65.
- [7] NAKAGAWA M, MORIKAWA E, KOYAMA Y, et al. Development of thermal control for phased array antenna [C]//21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. Yokohama, Japan, 2003. Arlington: AIAA, 2003.
- [8] QIAN S, WANG W, GE C, et al. Topology optimization of fluid flow channel in cold plate for active phased array antenna[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2223-2232.
- [9] 胡家渝, 吕倩. 液冷系统流道分流解析模型研究[J]. 电子机械工程, 2011, 27(1): 19-38. HU Jiayu, LYU Qian. Research on manifold analytic model of liquid cooling system[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2011, 27(1): 19-38.
- [10] 陈学永, 蔡艳召, 黄胜利, 等. 基于仿真的多分支液冷管路网络流量分配研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(5): 45-49. CHEN Xueyong, CAI Yanzhao, HUANG Shengli, et al. Research on flow distribution of multi-branch liquid cooling pipeline network based on simulation[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2019, 35(5): 45-49.
- [11] 张尧. 某相控阵天线抗太阳辐射热设计及研究[J]. 机械, 2012, 39(6): 4-6. ZHANG Yao. The thermal design and research of radiation hardening for a phased array antenna[J]. Machinery, 2012, 39(6): 4-6.
- [12] 常文文, 艾力, 玉苏甫, 等. 基于有限元方法的 25 m 天线座架结构热特性分析[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(5): 812-816. CHANG Wenwen, AI Li, YUSupu, et al. Thermal characteristics analysis of 25 m antenna mounts based on the finite element method[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2015, 34(5): 812-816.
- [13] ALEXANDERSEN J, SIGMUND O, AAGE N. Large scale three-dimensional topology optimisation of heat sinks cooled by natural convection[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 100: 876-891.
- [14] TAN Hui, DU Pingan, ZONG Kuan. Temperature uniformity in convective leaf vein-shaped fluid microchannels for phased array antenna cooling[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 150(1): 106224.
- [15] 刘欢欢, 任晓龙, 张泽斌. 锂离子电池仿生树状通道液冷板数值优化[J]. 包装工程, 2023, 44(19): 273-282. LIU Huanhuan, REN Xiaolong, ZHANG Zebin. Numerical optimization of bionic tree-like channel liquid cold plate on lithium-ion battery[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(19): 273-282.
- [16] 李志强, 孙广强, 巴义春, 等. 锂离子电池仿生叶脉流道冷板散热研究[J]. 低温与超导, 2023, 51(8): 69-75. LI Zhiqiang, SUN Guangqiang, BA Yichun, et al. Research on heat dissipation of lithium-ion battery pack based on bionic leaf vein channel cold plate[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2023, 51(8): 69-75.
- [17] 赵浩东, 张甫仁, 路兴隆, 等. 仿生四叶草型翅片液冷板与传热特性[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(5): 637-647. ZHAO Haodong, ZHANG Furen, LU Xinglong, et al. Bionic four-leaf clover fin liquid cooling plate and heat transfer characteristics[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2023, 14(5): 637-647.
- [18] 韦士腾, 徐尚龙, 赵新年. LED 液冷设计及其小型化控制系统研究[J]. 电子机械工程, 2022, 38(1): 35-44. WEI Shiteng, XU Shanglong, ZHAO Xinnian. Research on LED liquid cooling design and its miniaturization control system[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2022, 38(1): 35-44.
- [19] ESCHER W, MICHEL B, POULIKAKOS D. Efficiency of optimized bifurcating tree-like and parallel microchannel networks in the cooling of electronics[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(5-6): 1421-1430.
- [20] 李祖任, 胡楠, 杨吉刚, 等. 繁缕和鹅肠菜的花维管束系统比较解剖学研究及其系统学意义[J]. 植物科学学报, 2013, 31(6): 525-532. LI Zuren, HU Nan, YANG Jigang, et al. Floral vascular comparative anatomy of stellaria media and myosoton aquaticum and its systematic significance[J]. Plant Science Journal, 2013, 31(6): 525-532.
- [21] 钟涛, 段旭宇, 姜银银, 等. 全缘叶绿绒蒿的花内热量来源和温度调节功能[J]. 广西植物, 2020, 40(9): 1315-1322. ZHONG Tao, DUAN Xuyu, JIANG Yinyin, et al. Floral heat source and temperature regulation function in Meconopsis integrifolia[J]. Guihaia, 2020, 40(9): 1315-1322.
- [22] XIA G, LV Y, CHENG L, et al. Experimental study and dynamic simulation of the continuous two-phase instable boiling in multiple parallel microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 138: 961-984.

[作者简介]

- 吕远征 1991 年生, 博士, 高级工程师。
 杨志甫 1981 年生, 硕士, 研究员。
 姜智楠 1992 年生, 硕士, 工程师。
 赵思澄 2000 年生, 学士, 工程师。

(本文编辑: 潘三英)