

一种双模高隔离共形耐高温天线

王超, 董妮妮, 万聪, 贾智旗

西安航天天绘数据技术有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2024年5月21日; 录用日期: 2024年6月21日; 发布日期: 2024年6月29日

摘要

为了确保飞行器在高速飞行过程中产生的高热量, 不在飞行器规定的飞行时间内传递到内部的天线单元表面, 造成天线温度过高, 引起天线失效等问题的发生, 设计了一款共形耐高温天线。该天线可同时工作在L/S/C频段, 具有双模、高隔离、低剖面、小型化、与弹体共形, 能耐受飞行器高速飞行过程产生高热等特点。仿真结果与试验结果表明, 该天线在高温情况下达到了良好的性能指标。

关键词

双模, 高隔离, 共形, 耐高温天线

Research on a Dual-Mode Highly Isolated Conformal Thermo Stability Antenna

Chao Wang, Nini Dong, Cong Wan, Zhiqi Jia

Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Co. Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: May 21st, 2024; accepted: Jun. 21st, 2024; published: Jun. 29th, 2024

Abstract

In order to ensure that the high heat generated by the aircraft during high-speed flight is not transmitted to the internal antenna unit surface within the specified flight time of the aircraft, causing high antenna temperature and antenna failure, a conformal thermo stability antenna has been designed. This antenna operates in the L/S/C frequency band simultaneously, with characteristics such as dual-mode, highly isolation, lowly profile, miniaturization, conformal to the projectile, and the ability to withstand high heat generated by high-speed flight of aircraft. Simulation experiments have shown that the antenna has achieved good performance indicators.

Keywords

Dual-Mode, High Isolation, Conformal, Thermo stability Antenna

Copyright © 2024 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,随着无线电通信技术的快速发展,工作在多种频段的多模天线以其良好的隔离性能、较高的信号稳定性能、较强的抗干扰能力等突出特性,受到越来越多工程师和研究者的关注。在高速飞行器和综合孔径合成雷达等诸多应用领域,需要将工作在多个频段下的多种工作模式的的天线实现共口径设计,以达到降低天线剖面高度和包络尺寸的目的[1][2]。多模共口径天线能够在同一口径约束下实现不同极化形式不同频段的的天线安装。在相同口径约束下,每个工作频段单独设计,在辐射方向图和阻抗匹配上都容易控制,同时,能够有效的减小天线的尺寸和体积[3][4][5]。但共口径会增强多个频段天线之间的互耦,影响各自的辐射特性,甚至会造成天线性能的恶化。如何充分利用飞行器载体的有限空间,在保证天线高增益和高隔离的条件下,实现双模三频天线的共口径,成为突破的关键与难点[6][7][8][9]。高超声速飞行器需要将天线模块与飞行器载体共形设计,以保证天线的覆盖范围,同时,由于飞行器高速飞行时会产生高热,故天线的共形耐高温设计至关重要。

2. 双模天线设计

微带天线具有体积小、重量轻、低剖面、易于载体共形等特点,因此,为了降低天线的高度,共形耐高温双模天线采用微带天线形式。双模三频天线每个频段使用一层微带天线,三层微带天线采用堆叠形式构成,各层天线单元采用矩形微带贴片作为三个频段的辐射贴片,并在辐射贴片四周添加调试枝节,利于阻抗调节将低频辐射贴片作为高频天线的地[2][3][4][5]。在天线相邻工作频段的辐射贴片之间引入中和线,用以降低天线高低频之间的耦合。矩形微带贴片的经验公式如式(1)和式(2)所示, L 表示微带天线长, W 表示微带天线宽, h 表示天线介质基片的高度, ΔL 表示微带天线辐射缝的宽度, f_r 表示天线谐振频率; ε_r 表示天线介质基片的介电常数, ε_e 表示等效介电常数,根据以上参数可初步确定微带天线工作频段内对应的辐射贴片尺寸。

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\varepsilon_e}} - 2\Delta L \quad (1)$$

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\varepsilon_r + 1}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left(1 + 10 \frac{h}{W} \right)^{\frac{1}{2}}$; $\Delta L = 0.412h \frac{(\varepsilon_r + 0.3)(W/h + 0.264)}{(\varepsilon_r - 0.258)(W/h + 0.8)}$ 。微带天线通常采用增大天线

介质基片的高度 h 和降低天线介质基片的介电常数 r 来增加天线的带宽,微带天线展宽带宽的经验公式如式(3)所示。

$$W_b = \frac{8}{3\sqrt{2}\epsilon_r} \frac{h}{\lambda_0} \quad (3)$$

为了增大天线的口径利用率，将三个不同频段的天线堆叠设计在一起，可覆盖北斗短报文通信工作模式和测控工作模式的双模三频天线，按照 L/S/C 三个频率从低至高的顺序自下而上将三个频段的微带天线堆叠固定在金属结构件上。天线各层之间利用同轴探针贯穿低频辐射天线形成过孔来给高频辐射天线馈电。但探针的引入会极大的增加天线高频和低频之间的耦合，本设计中采用中和线的方法，引入与原电流相反的电流来减少各工作频率之间的互耦。同时使用正交馈电的方式，增大了各端口之间的隔离。

(图 1)

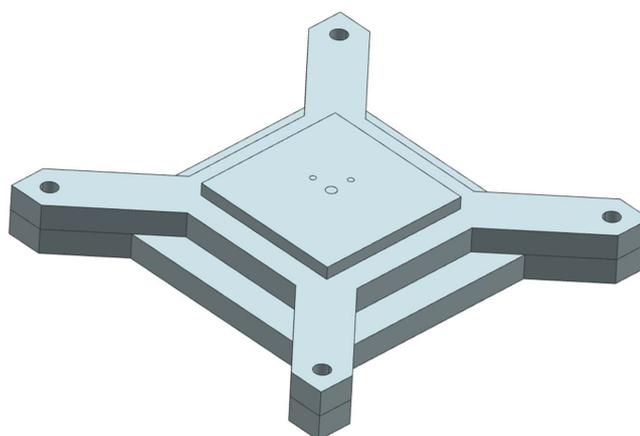
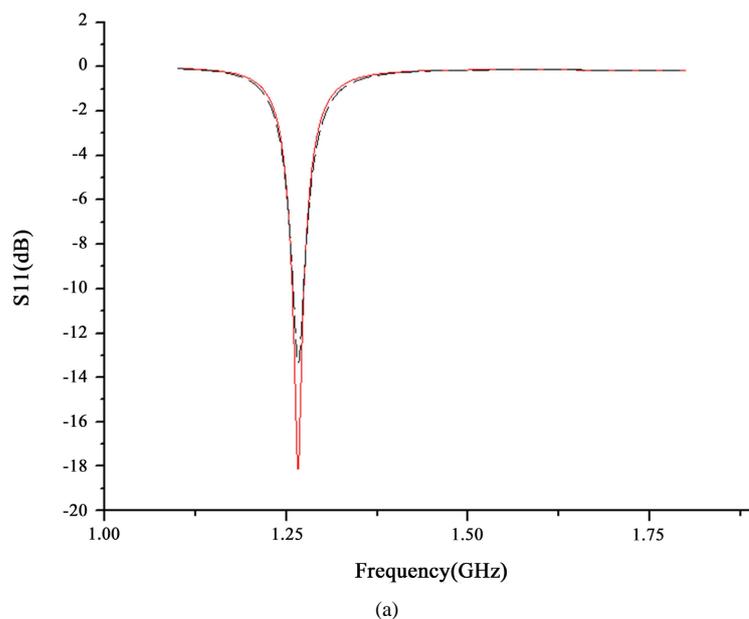


Figure 1. Dual mode three band antenna model

图 1. 双模三频天线模型

利用三维电磁仿真软件对双模三频天线模型的辐射特性进行了仿真及优化，并制作实物，使用矢量网络分析仪对天线进行 S 参数的测量，双模三频天线仿真和实测如图 2 所示。



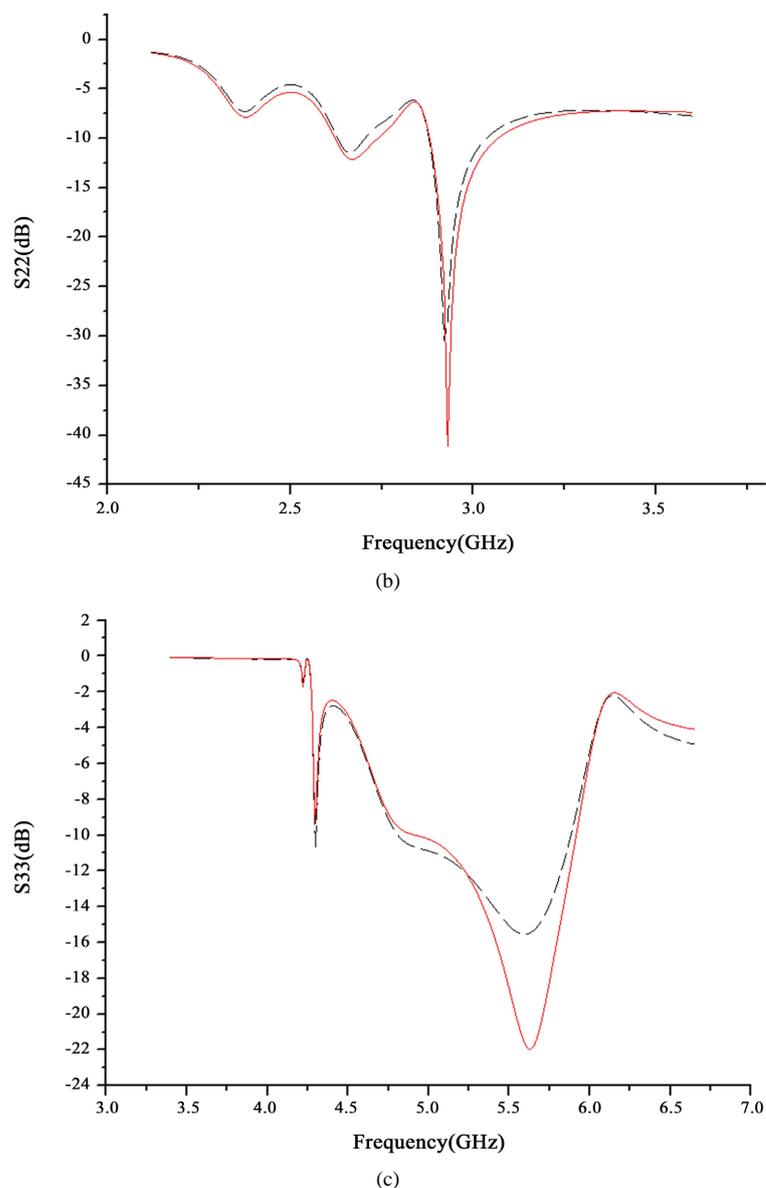


Figure 2. S-parameter simulation test results. (a) Simulation and measurement of S-parameters in the L-band; (b) Simulation and measurement of S-band S-parameters; (c) Simulation and measurement of S-parameters in the C-band
图 2. S 参数仿真测试结果。(a) L 频段 S 参数仿真与实测；(b) S 频段 S 参数仿真与实测；(c) C 频段 S 参数仿真与实测

同时，对双模三频天线各个端口之间的隔离度进行了仿真和测试，仿真与实测结果如图 3 所示。从图中可以看出，天线各个端口之间隔离均大于 30 dB。

3. 共形耐高温设计

飞行器在高马赫数飞行过程中，飞行器表面与高速气流会产生剧烈摩擦，在边界层内，高速气流损失的动能将转换为内能，使得飞行器表面及内部温度急剧上升。高温会引发飞行器材料性能下降，飞行器结构变形，使得飞行器内外部设备无法正常工作，威胁飞行器的安全飞行，这就需要结合飞行器飞行工况开展热防护设计[6] [7] [8]。

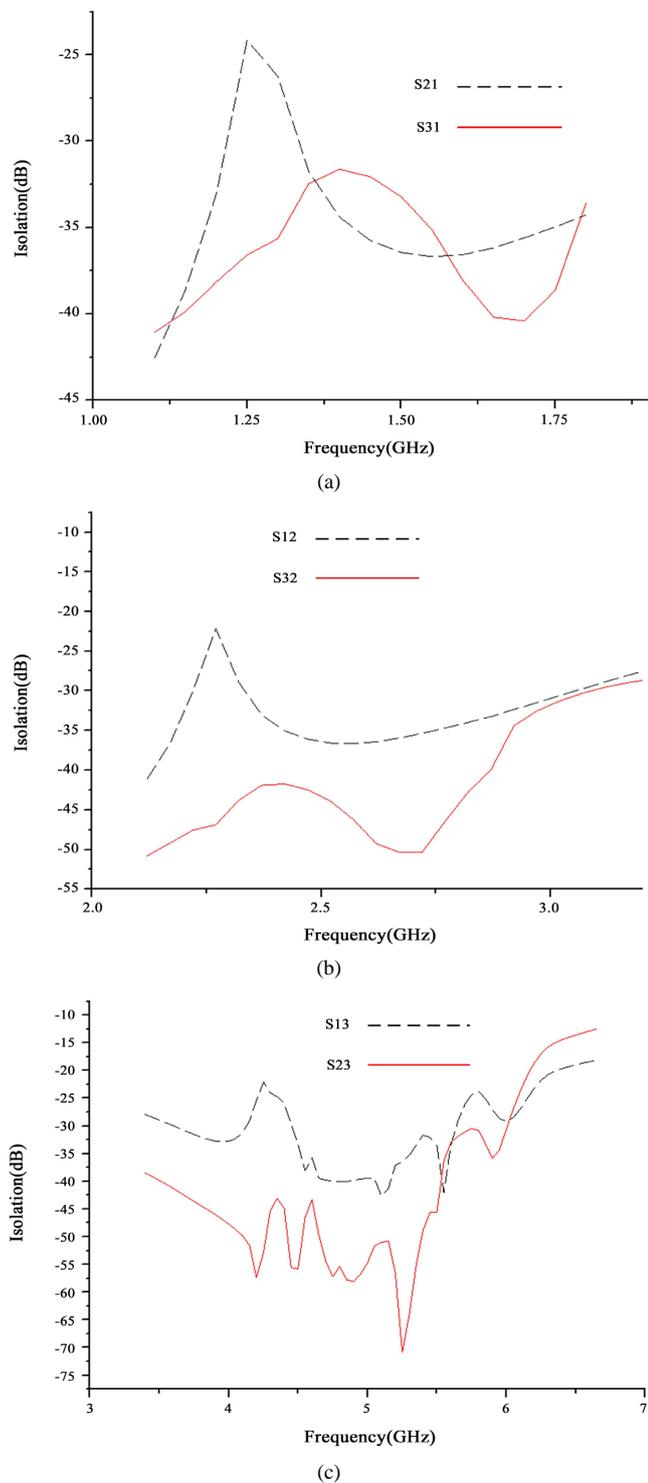


Figure 3. The isolation between the antenna ports. (a) Isolation between L-band ports and S-band and C-band ports; (b) Isolation between S-band ports and L-band and C-band ports; (c) Isolation between C-band ports and S-band and L-band ports

图 3. 天线各端口之间的隔离度。(a) L 频段端口与 S 频段和 C 频段端口隔离度；(b) S 频段端口与 L 频段和 C 频段端口隔离度；(c) C 频段端口与 S 频段和 L 频段端口隔离度

目前工程上常用的气动热加热工程计算方法主要为平板热流密度参考焓法。参考焓法是将飞行器表面设定为恒定温度，根据飞行器外形、飞行环境等计算获得冷壁热流密度，同时，为了减小该误差，需要将冷壁热流密度转换为热壁热流密度。所谓冷壁热流密度是假设弹体结构表面在受气动加热时表面温度恒定于热力学温度零度不变，而单纯依靠气动计算得到的热流。所谓热壁热流密度是指考虑了结构热响应的结构净吸收热流。热壁热流和表面温度是两个相关参数，通过气动加热与结构有限元分析耦合计算得出，在实际工程中，热壁热流与冷壁热流的转换关系式为：

$$q_n = q_c \left(1 - \frac{h_w}{h_r} \right) - \sigma \varepsilon T_w^4 \quad (5)$$

式中： q_n 为从飞行器表面传入天线罩的净热流密度，即热壁热流；

q_c 为冷壁热流；

h_w 为表面壁温下的气体焓值；

h_r 为气体恢复温度下的恢复焓；

ε 为天线罩表面发射率；

σ 为斯忒潘 - 玻尔兹曼常数；

T_w 为天线罩外壁面温度。

为确保飞行器在高速飞行过程中产生的高热量，不在飞行器规定的飞行时间内传递到天线内部的天线单元表面，造成天线温度过高，引起天线失效等问题的发生，设计的共形耐高温天线采取天线罩与高速飞行器载体共形的安装结构形式，该结构设计的优点在于天线单元不直接与外部的高速气流接触，利用天线罩与天线单元之间的空间隔离，减缓了天线单元的升温速度。

共形耐高温天线主要由天线罩、天线罩压板、气凝胶、支撑结构等组成。天线罩在高速飞行器飞行过程中为内部天线提供热防护，采取“隔热 + 隔热”措施，选择耐高温、低热传导率、高透波性能的石英纤维增强石英复合材料作为天线隔热窗。由于石英纤维增强石英复合材料的特殊性，不适合在此材料上打孔直接固定在飞行器载体结构上，为确保飞行器在高速飞行过程中天线能够正常工作，采用耐高温的纤维增强酚醛树脂作为天线罩压板，将石英纤维增强石英复合材料天线罩进行支撑固定，解决了石英纤维增强石英复合材料天线罩不易打孔安装于飞行器载体外表面的难题。同时，为了减缓飞行器高速飞行产生的热量从天线罩正面传递至天线表面，选用热传导系数较低的气凝胶复合材料作为天线罩和天线之间的隔热材料，该材料优异的隔热性能，有效减缓了外部热量传递至天线表面的速度。为了防止天线罩表面的热量从天线支撑结构传递至天线安装金属表面，选用聚酰亚胺树脂复合材料作为天线罩的支撑结构，一方面可将天线罩及其天线罩压板支撑，另一方面可用于固定安装天线的金属底板，将天线罩和天线等零组件构成一个整体。共形耐高温天线剖视图如图 4 所示。

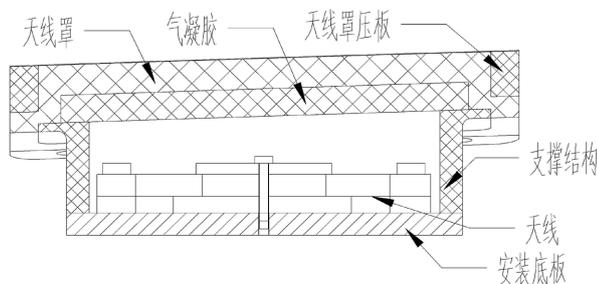


Figure 4. Section view of conformal high temperature resistant antenna
图 4. 共形耐高温天线剖视图

基于某高超音速飞行器的冷壁热流和恢复焓等数据,根据前述热天线罩材料选型及结构方案,将冷壁热流转换为热壁热流和壁温,以热壁热流为天线罩外壁面热载荷输入,利用机电热仿真软件对双模共形耐高温天线进行了热仿真分析,分别给出了天线罩和天线在飞行过程中的温度变化曲线,温度变化曲线如图5和图6所示。

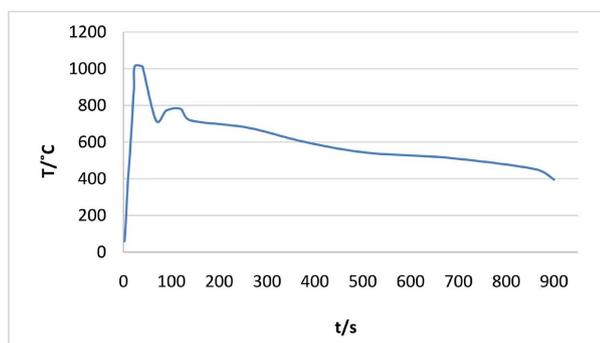


Figure 5. The maximum temperature of the outer surface of the radome changes with time during the whole flight

图5. 整个飞行过程天线罩外表面最高温度随时间变化

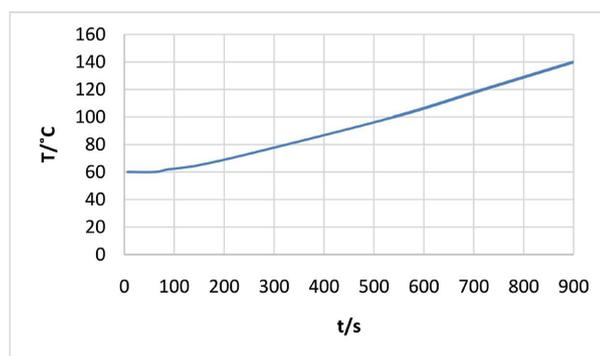


Figure 6. The maximum temperature curve of the antenna surface during the whole flight

图6. 整个飞行过程中天线表面最高温度变化曲线

从上述仿真结果可以看出,飞行器飞行过程中,天线罩表面受到气动加热后表面温度迅速上升,天线罩表面最高温度出现了一个峰值,达到了1088°C,未超过石英纤维增强石英复合材料天线罩的许用温度,后由于热负荷降低,天线罩表面温度有所降低。而对于天线来说,温度的变化规律则有所不同,在飞行过程中缓慢上升直至飞行结束,在前100s内,飞行器外部热量没有传递进来,因而天线表面温度没有发生变化,当热量传递到天线时,由于其热扩散率较低,所以温度缓慢上升,且天线罩表面温度有所降低时,天线表面因热累积而导致温度持续上升,在飞行结束时,天线表面温度未超过天线材料及焊点的许用温度值。

4. 试验验证

基于上述仿真设计并开展实物加工,依据某高超音速飞行器的冷壁热流和恢复焓等数据,开展了热流试验验证,试验过程中天线罩外表面加载热流监测情况及天线表面温度监测曲线如图7和图8所示。试验后,对天线进行了隔离度测试,测试结果与试验前图3测试结果基本一致。

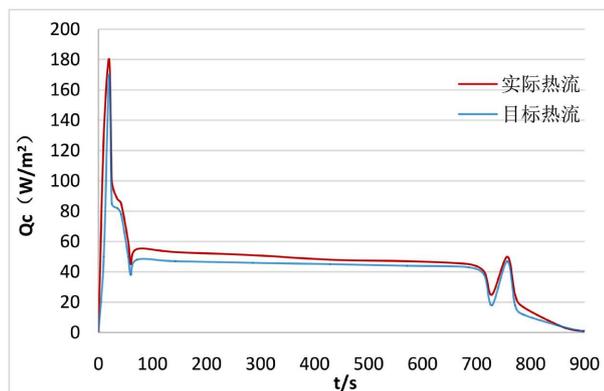


Figure 7. Heat flow monitoring curve of radome outer surface during heat flow test

图 7. 热流试过程中天线罩外表面热流监测曲线

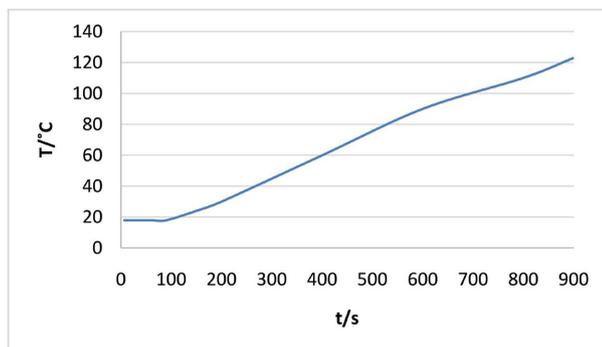


Figure 8. Antenna surface temperature monitoring curve during heat flow test

图 8. 热流试过程中天线表面温度监测曲线

从上述实物图及相关测试结果可知，天线高隔离测试结果与仿真结果吻合度较高。天线罩表面加载的实际热流与飞行器的目标热流结果基本一致，试验后天线外观基本良好，表明该耐高温天线罩满足使用要求。天线表面实际监测温度曲线与仿真设计结果基本吻合，但因在仿真设计过程中不能完全考虑实际环境，所以必然会产生误差，但该误差在允许范围内。上述试验结果表明，共形耐高温天线的仿真具有可行性，满足该飞行器使用的需求。

5. 结论

本文设计了一种能够同时工作在 L/S/C 的双模三频高隔离共形耐高温天线。双模三频天线采用中和线的方法，引入与原电流相反的电流来减少各工作频率之间的互耦，同时使用正交馈电的方式，实现各端口之间的高隔离。天线罩采用“隔热 + 隔热”的设计思路，通过对天线进行整体结构设计和材料选型，并基于一定的热仿真设计，达到了限定条件下天线共形耐高温的目的。通过试验验证表明，该天线具有双模、高隔离、与飞行器载体共形耐高温等特点，能够在高速飞行器、无人机等多频共形耐高温多重约束的场景下应用。

参考文献

- [1] 王树. 宽频带多频段天线设计[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

-
- [2] 西安航天天绘数据技术有限公司. 一种多频段高隔离共形耐高温天线[P]. 中国专利, CN202311577349.7. 2024-01-16.
 - [3] 王敬杰, 袁家德. 侧面加载金属带的宽频带卫星导航天线[J]. 电波科学学报, 2023, 38(2): 292-297.
 - [4] 黄鑫源, 蒋坤, 郭庆功. L/S/C/X 四频高隔离共口径微带天线设计[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(12): 89-95.
 - [5] 陈圳鹏, 袁家德. 一种小型化宽频带卫星导航终端天线的设计[J]. 微波学报, 2022, 38(1): 47-51.
 - [6] 于祥, 杨孝东, 李明珠. 用于卫星导航通信的多频共口径天线阵[J]. 通信技术, 2021, 54(9): 2253-2256.
 - [7] 殷建业. 高超声速机翼热结构设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
 - [8] 傅强之. 一种多频段共口径宽带天线的设计[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(3): 157-159.
 - [9] 李方. 一种双频共形耐高温导航天线[J]. 电子科技, 2014, 27(5): 65-67, 71.