

# 耐高温相控阵天线关键技术研究

崔子卿, 齐宏业, 刘松涛

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: 2023年9月2日; 录用日期: 2023年10月2日; 发布日期: 2023年10月11日

## 摘要

本文就制约高机动平台相控阵天线工程化应用的外表温度过高的问题提出了表面进行隔热设计、内部进行高效热控的设计思路, 提出了一种可应用于隔离300°C~400°C高温的天线隔热罩设计方法, 并对天线隔热罩对相控阵天线辐射特性的影响进行了仿真和分析, 得出了较厚的隔热罩对天线波束指向、天线增益均存在较大影响, 在实际工程应用中, 需进行修正和补偿的结论。上述的设计思路和方法均经过了仿真和工程应用, 相关方法可显著提升相控阵天线在高机动平台下的电气性能和环境适应性, 为研制高性能耐高温相控阵天线样机提供了技术基础。

## 关键词

高机动平台, 耐高温相控阵天线, 隔热罩设计, 隔热罩影响

# Research on Key Technologies of High Temperature Resistant Phased Array Antenna

Ziqing Cui, Hongye Qi, Songtao Liu

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

Received: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Oct. 2<sup>nd</sup>, 2023; published: Oct. 11<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to solve the problem of high surface temperature, which restricts the engineering application of phased array antenna on high mobile platform, this paper puts forward a design idea of surface heat insulation design and internal high efficiency thermal control, and puts forward an antenna heat shield design method which can be applied to isolate the high temperature of 300°C~400°C. The influence of antenna heat shield on the radiation characteristics of phased array an-

tenna is simulated and analyzed. It is concluded that thicker heat shield has great influence on antenna beam direction and antenna gain, and it needs to be corrected and compensated in practical engineering application. The above design ideas and methods have been simulated and applied in engineering, and the relevant methods can significantly improve the electrical performance and environmental adaptability of phased array antenna under high mobility platform, and provide a technical basis for the development of high-performance and high-temperature resistant phased array antenna prototype.

## Keywords

High Mobility Platform, High Temperature Resistant Phased Array Antenna, Heat Shield Design, Heat Shield Influence

Copyright © 2023 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

随着电子科学技术的飞速发展，特别是微波集成电路集成技术的突破，武器装备不断更新换代。作为通信链路的最前端，天线正在经历着由传统反射面天线等无源天线向有源相控阵天线革新的过程。有源相控阵天线由于其紧凑的集成架构、扁平化、小型化的安装结构，使之更加容易与载体共形设计；通过集成化的电控调相通道应用，使得波束控制更加灵活、迅速，可完成微秒级的波束切换，对于高机动、高动态的移动载体平台，相控阵天线的应用成为了首选[1]-[6]。

相控阵天线带来优良电气性能的同时，对天线安装位置的环境也提出了较高的要求。大量有源器件的应用，内部会产生大量的热耗，再加上当前卫星通信频段普遍使用 Ku、Ka 等高频段导致单元排布间距较小，热积聚现象严重，如果热量得不到有效的疏散，将导致有源器件的温度过高，进而导致功率放大芯片的效率下降、放大器增益下降、幅相不稳定等问题，更严重的可能导致芯片的损坏，造成天线的失效，从而影响设备可靠性，因此，相控阵天线的热防护问题一直是相控阵天线设计中需要重点考虑的问题。

当前，各类移动载体平台的运动速度越来越快，特别是机载平台，高机动性成为了当前的主流需求，飞机的飞行速度一般设计为 1.8 马赫到 4 马赫之间，超高的飞行速度带来了机体表面与空气的剧烈摩擦，产生了 300℃~400℃ 的表面高温，在此情况下，当前的相控阵天线产品无法使用，恶劣的安装环境限制了相控阵天线在高机动平台的应用。因此，开展耐高温相控阵天线关键技术研究，将为未来研制适应于高速平台应用的高性能相控阵天线奠定技术基础。

本文从制约相控阵天线在高速移动平台应用的热控问题出发，讨论了耐高温相控阵天线的设计思路、耐高温相控阵天线隔热罩设计、多层隔热罩对天线性能的影响分析，并给出相应的分析结果，为耐高温相控阵天线的工程化应用提供了解决方案。

## 2. 耐高温相控阵天线设计思路

针对于高速移动平台，由于空气摩擦的原因导致的外表温度较高的问题，结合当前的热控技术、材料科学等方面的技术水平，耐高温相控阵天线采用了“外隔内控”的设计思路，即外部采用隔热材料，尽量降低表面传递到内部的热量；对于内部采用高效热传递的设计思路，两种设计方法相结合，实现整机的稳定热控。

1、对于相控阵天线外部隔热天线罩设计来说,天线罩作为用来保护天线系统免受各种环境条件下影响的重要部件,需要在电气性能上满足良好的透波性能,在结构设计上能满足物理使用要求,因此在设计天线罩时必须综合考虑结构型式、构件尺寸、材料选择以等方面进行设计[7]。

按结构型式分类,天线罩可分为空间桁架式和薄壳式两类。空间桁架式天线罩主要包括两部分:坚固的刚性骨架和骨架上蒙着的蒙皮。刚性骨架多为金属或介质材料,其选择主要取决于天线的工作频段。蒙皮能够透波,一般由厚度为0.5~1.0 mm的介质薄膜制成。

按罩壁横截面分类,天线罩可分为均匀单层、A夹层、B夹层、C夹层和多层结构,如图1所示。

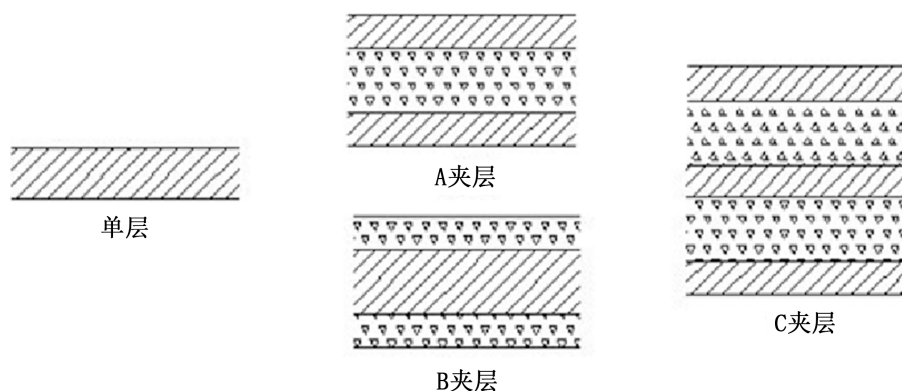


Figure 1. Schematic diagram of the structure of the radome  
图1. 天线罩截面结构型式示意图

单层罩又可分为薄壁式和半波长壁式。薄壁是指壁厚远小于介质波长,通常为波长的1/20~1/10。半波长壁是指壁厚接近于波长一半的整数倍。该种结构对频带较窄的天线具有较好的透波性能,在宽频带范围内的透波性能不够均衡。

夹层天线罩结构是指由两层比较致密的、薄的蒙皮和一层较厚的、低介电常数、低介电损耗、低密度的芯子组成的结构。A夹层结构具有较高的比强度,在宽频范围内具有较好的传输性能。其表皮一般为树脂基纤维增强复合材料,而芯子多采用泡沫或纸蜂窝。

B夹层结构与A夹层结构相反,它是由两层低介电常数、低介电损耗、低密度表面层和一层致密的中间层组成的结构,可用于双波段天线罩的设计。

C夹层结构是由两个A夹层结构层叠而成,共为5层。其在大入射角下具有优良的电性能,传输性能和频带宽度尤为突出。

天线罩材料的选择需从材料特点、使用温度、结构型式以及成型工艺性能等多方面考虑。往往需要材料具有低介电常数、低损耗、高强度、高模量、成型简单以及耐环境性能好等特点。目前天线罩设计时,其蒙皮通常选用复合材料,主要选材包括:二氧化硅基复合材料、氮化硼复合材料以及硅铝氧氮陶瓷基复合材料;对于一般用天线罩,多选用树脂基纤维增强复合材料,树脂种类包括聚酰亚胺树脂、环氧树脂以及氰酸酯树脂,纤维增强材料则主要为D玻璃纤维、石英纤维以及高硅氧纤维。其中,氰酸酯基石英纤维增强复合材料具有优良的力学性能、耐热和耐湿热性能、极低的介电损耗、低的介电常数以及稳定性好等优点,应用得最为广泛[8]。

2、对于相控阵天线内部热控设计来说,主要从相控阵天线内部高热器件的散热路径考虑,通常的高热器件为射频组件、电源转换、波束控制板等等。相控阵天线内部的热主要通过传导的方式传递至天线外部,在进行热控设计时,需要从缩短模块的散热路径设计、提高路径上导热材料的导热系数来开展,让天线系统与外界的热交换面产生高效的热量交换,以达到降低天线内部温度,提升系统可靠度的目的[9]。

### 3. 耐高温相控阵天线隔热罩设计

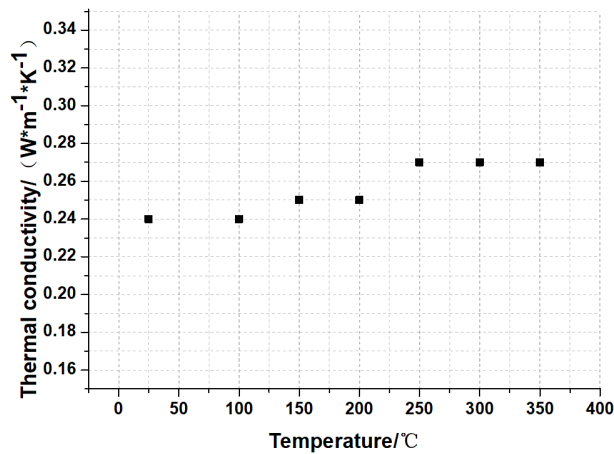
根据耐高温相控阵天线的具体使用环境，天线罩所处的环境温度为 300℃~400℃之间，为了保证相控阵天线的稳定工作，需将天线罩内的温度控制在 70℃之内。因此，本文选用了石英纤维聚酰亚胺树脂预浸料(BMP420 型)作为隔热罩的组成材料，该材料的电气参数如表 1。天线罩设计采用单层天线罩结构，厚度 5 mm。

**Table 1.** Dielectric constant and loss angle tangent of material

**表 1.** 材料介电常数和损耗角正切

材料名称	介电常数	损耗角正切
石英纤维聚酰亚胺树脂预浸料(BMP420)	3.19	2.99e <sup>-3</sup>

该材料可耐 420℃的高温，适用于 3~5 马赫飞行的高速飞机使用，其热导率如图 2 所示。



**Figure 2.** The thermal conductivity varies with temperature

**图 2.** 热导率随温度变化

对于单层结构，可采用经典传热学公式计算：

$$q = \frac{\lambda \times (t_1 - t_2)}{\delta}$$

其中，q 为热流密度，λ 为导热系数，ti 为表面温差。

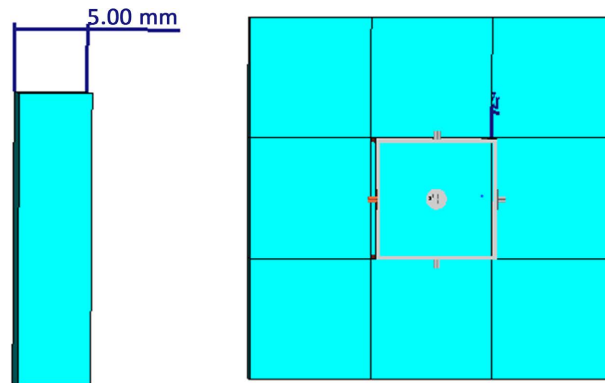
其中，热流密度根据 Eckert 的“参考焓”及相应的空气热力学参数与输运参数进行修正，如公式所示：

$$q = 0.332 \times \rho_e \times u_e \times Pr^{\frac{2}{3}} \times Re_x^{-0.5} \sqrt{\frac{\rho^* \mu^*}{\rho_e \mu_e}} (h_{aw} - h_w)$$

Pr 为普朗特数，Rex 为当地雷诺数，pe 为来流密度，ue 为来流速度。haw 为绝热壁焓，hw 为壁面焓，μ 为粘度。其中，ρ\*μ\*/ρeμe 一般取 0.17~1.0，Pr = 0.71。

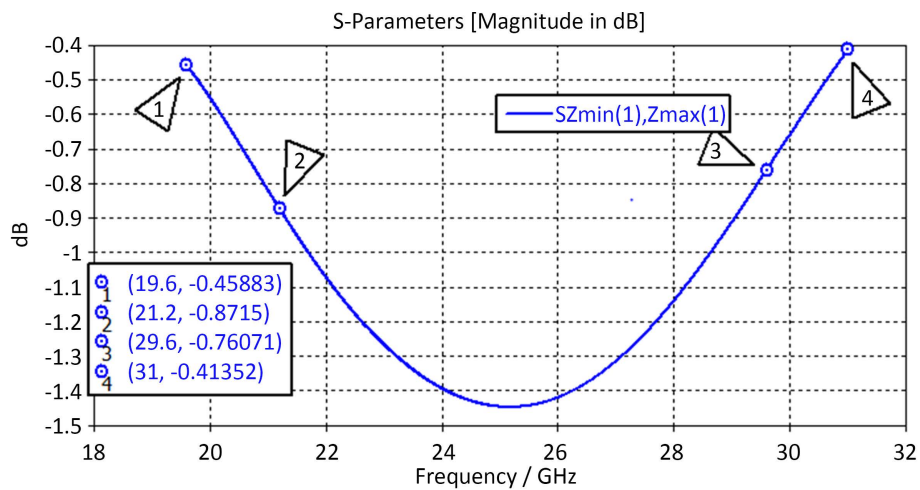
本项目参考欧洲航天工业“ARD”计划，该飞行速度约为 3 马赫，其热流密度 q 实际测试为 30 kw/m<sup>2</sup>。另外，t1 取 400℃，t2 取 70℃，计算获得厚度 δ ≥ 2.3 mm，本次选用的天线罩厚度为 5 mm，满足计算要求。

为了评估天线罩的电气性能，构建如图 3 所示的隔热天线罩仿真单元，天线罩采用 A 型天线罩，厚度为 5 mm。

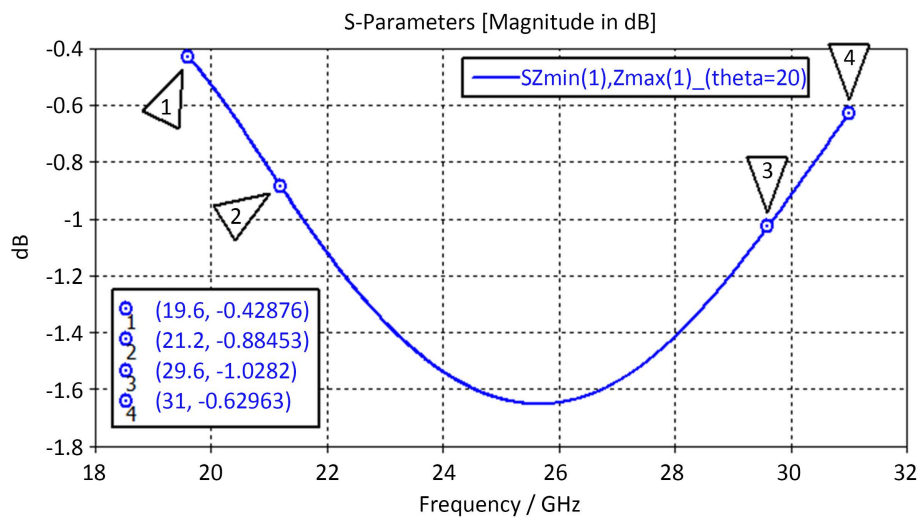


**Figure 3.** Simulation model of heat insulation radome  
**图 3.** 隔热天线罩仿真模型

对天线罩进行全波仿真，透波率如图 4~图 6 所示。



**Figure 4.** Insertion loss when electromagnetic waves normally incident on radome  
**图 4.** 当电磁波法向入射天线罩时的插入损耗



**Figure 5.** Insertion loss when departure from normal 20° incidence radome  
**图 5.** 当偏离法向 20° 入射天线罩时的插入损耗

从仿真结果可以看出，天线罩在 Ka 工作频段内，最大的插损为当入射角度  $\leq 40^\circ$  时，插损  $\leq 2$  dB。

#### 4. 隔热罩对天线的影响分析

为了进一步验证隔热天线罩对阵列天线的影响，将隔热天线罩与相控阵天线阵列进行了联合仿真，通过商用电磁学仿真软件 Ansoft HFSS，对天线阵列和天线隔热罩的联合结构进行模拟，进行精确的全波仿真，根据仿真结果对隔热天线罩对天线阵列性能的影响进行分析。

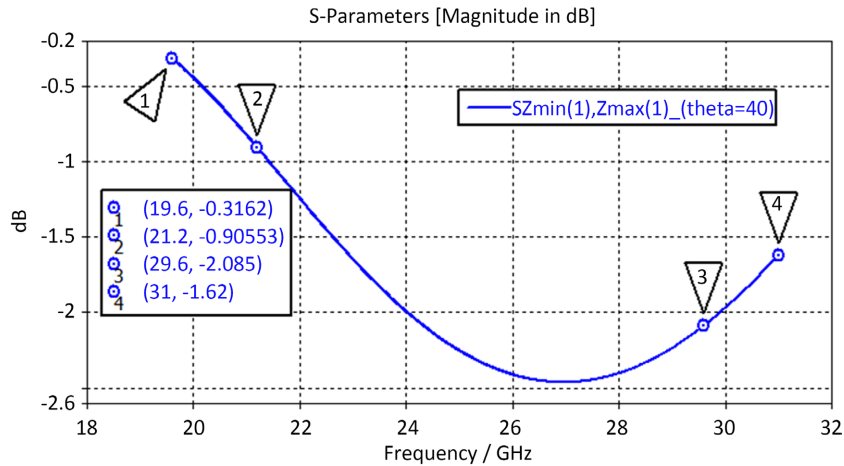


Figure 6. Insertion loss when departure from normal  $40^\circ$  incidence radome  
 图 6. 当偏离法向  $40^\circ$  入射天线罩时的插入损耗

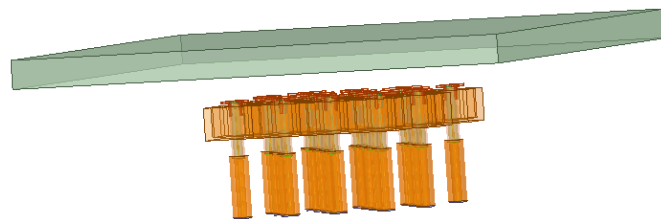


Figure 7. Simulation model of antenna array and heat shield  
 图 7. 天线阵列与隔热罩仿真模型

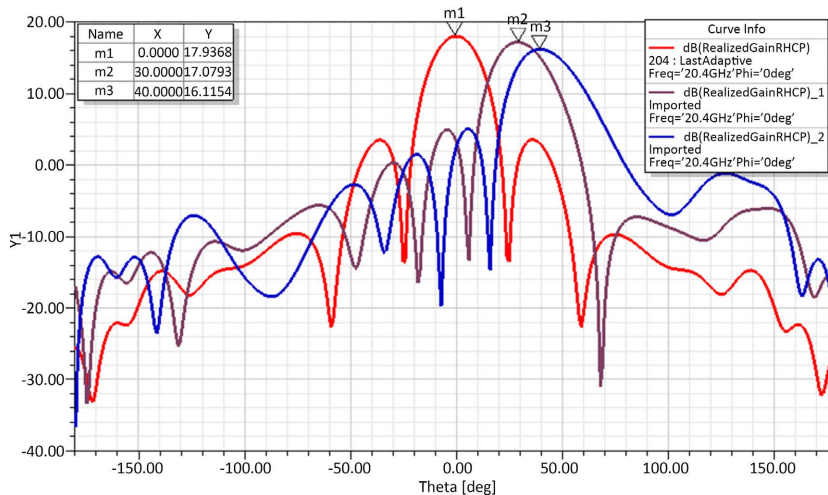
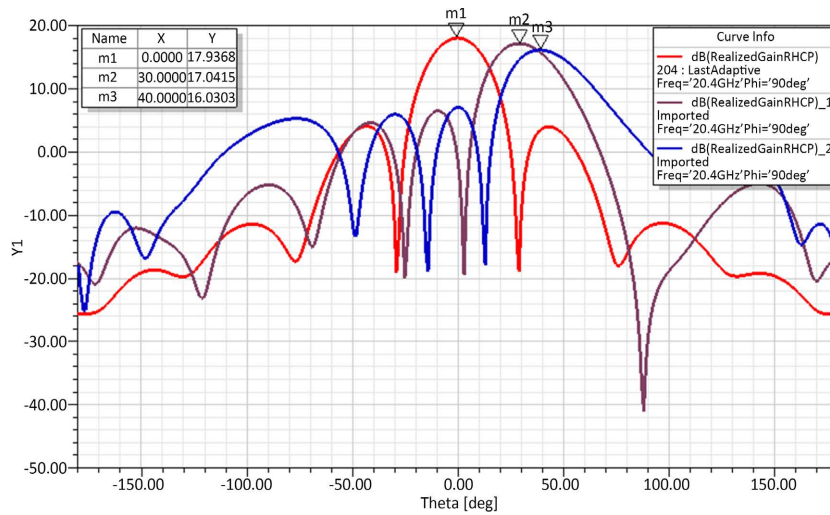
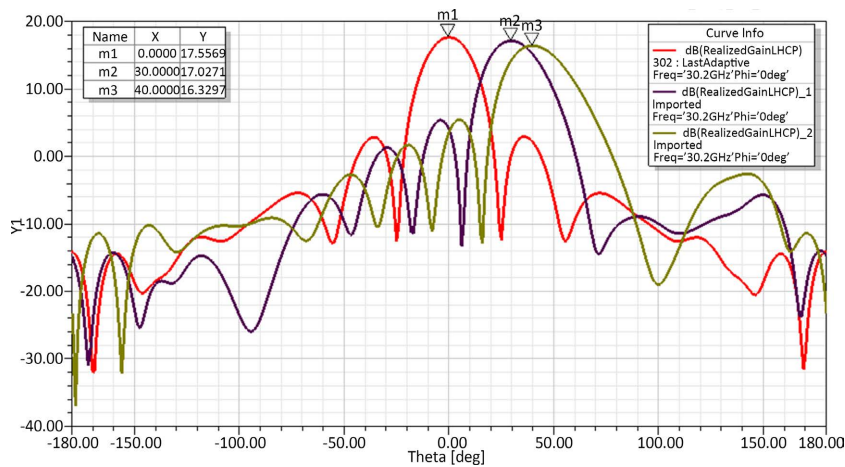


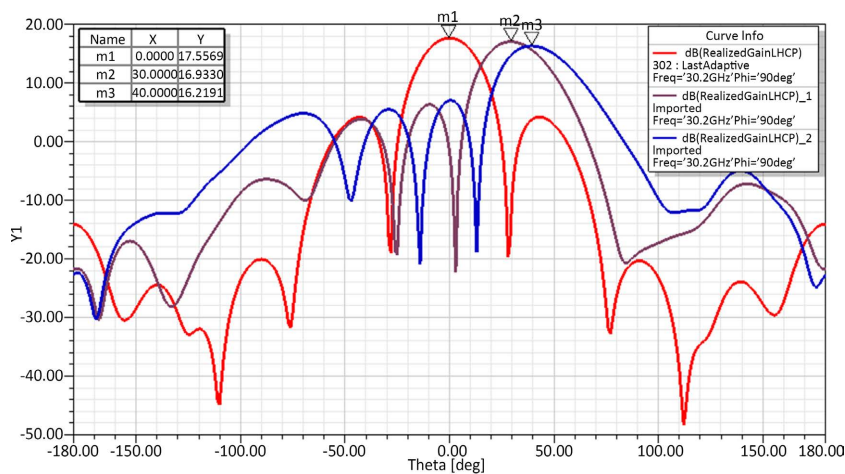
Figure 8. Orientation diagram of the receiving antenna array with the radome not loaded @20.4GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )  
 图 8. 接收天线阵列在未加载天线罩时的方向图@20.4GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )



**Figure 9.** Orientation diagram of the receiving antenna array with the radome not loaded @20.4GHz ( $\Phi = 90^\circ$ )  
**图 9.** 接收天线阵列在未加载天线罩时的方向图@20.4GHz ( $\Phi = 90^\circ$ )



**Figure 10.** Orientation diagram of the transmitting antenna array with the radome not loaded @30.2GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )  
**图 10.** 发射天线阵列在未加载天线罩时的方向图@30.2GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )



**Figure 11.** Orientation diagram of the transmitting antenna array with the radome not loaded @30.2GHz ( $\Phi = 90^\circ$ )  
**图 11.** 发射天线阵列在未加载天线罩时的方向图@30.2GHz ( $\Phi = 90^\circ$ )

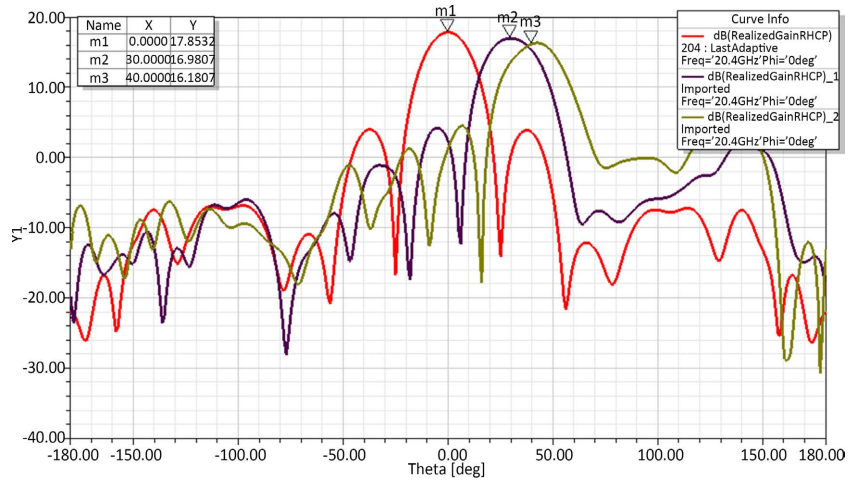


Figure 12. Orientation diagram of the receiving antenna array when the radome is loaded @20.4GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )  
 图 12. 接收天线阵列在加载天线罩时的方向图@20.4GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )

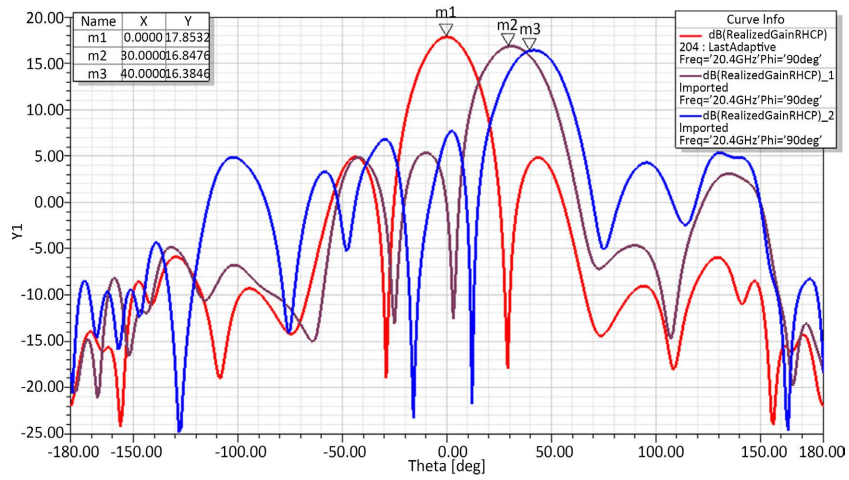


Figure 13. Orientation diagram of the receiving antenna array when the radome is loaded @20.4GHz ( $\Phi = 90^\circ$ )  
 图 13. 接收天线阵列在加载天线罩时的方向图@20.4GHz ( $\Phi = 90^\circ$ )

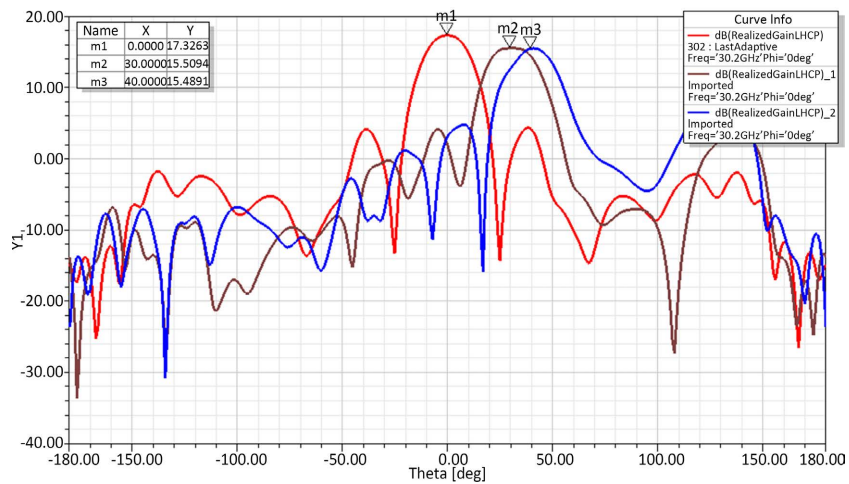
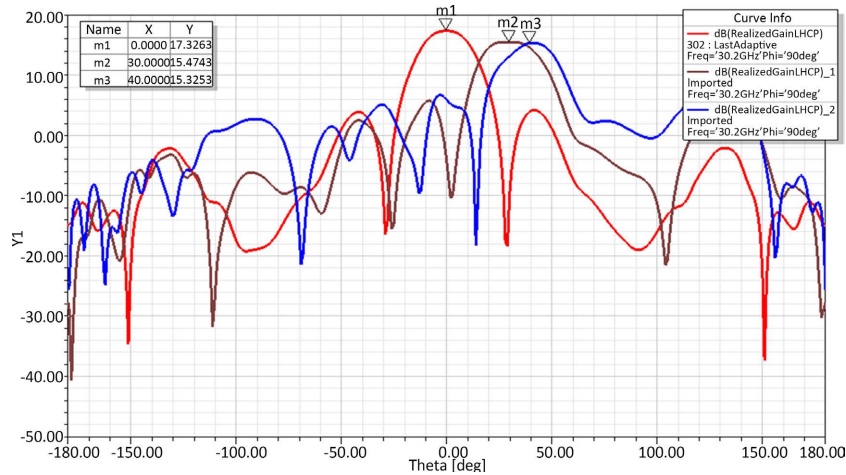


Figure 14. Orientation diagram of the transmitting antenna array when the radome is loaded @30.2GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )  
 图 14. 发射天线阵列在加载天线罩时的方向图@30.2GHz ( $\Phi = 0^\circ$ )





**Figure 15.** Orientation diagram of the transmitting antenna array when the radome is loaded @30.2GHz (Phi = 90°)  
**图 15.** 发射天线阵列在加载天线罩时的方向图@30.2GHz (Phi = 90°)

针对于 Ka 频段通用的通信频率，对接收频段的典型频点 20.4 GHz 和发射频段典型的频点 30.2 GHz 进行仿真分析，在 HFSS 中构建了如图 7 所示的仿真模型，天线罩距离天线阵列的间隔约  $\lambda/2$ ，天线罩尺寸至少大于 0.85 倍低频波长，以满足在大角度扫描下的覆盖。在 HFSS 中对其进行了全波仿真，仿真结果如图 8~图 15 所示，仿真结果汇总于表 2。

**Table 2.** Summary of simulation results of antenna array and radome  
**表 2.** 天线阵列与天线罩仿真结果汇总表

天线切面	仿真角度	仿真频率					
		20.4			30.2		
		无天线罩	有天线罩	插损	无天线罩	有天线罩	插损
0	0	17.9	17.5	0.4	17.5	17.3	0.2
	30	17.1	17.0	0.1	17.0	15.5	1.5
	40	16.1	16.3	-0.2	16.2	15.4	0.8
90	0	17.9	17.5	0.4	17.5	17.3	0.2
	30	17.1	16.9	0.2	16.8	15.5	1.3
	40	16.1	16.2	-0.1	16.4	15.3	1.1

从上述仿真结果和电气指标汇总表中可以看出：

从天线阵列方向图上可以看出，增加天线隔热罩之后，天线方向图产生了形状的变化，波束指向产生了较大偏差，对于高频点、扫描大角度情况下尤其明显。造成该情况的原因为，在天线大角度斜入射天线罩时，电磁波穿过天线罩的路径变长，由于天线罩材质的非均匀性，导致方向图变形严重；同时相同的路径情况下，高频段的等效电长度更长，偏移的角度更大。

从天线增益汇总结果看，当增加天线罩之后，在法向情况下天线增益下降 0.2~0.4 dB，在大角度情况下，天线增益下降较为明显，约有 1.3~1.5 dB，与仿真设计的插损 2.0 dB 较为接近。从仿真结果可以看出，在中间角度上的插损比最大角度情况下的更大，造成该情况的原因为，在仿真中，采用了平面天线罩，当电磁波穿过天线罩的过程中，电磁波进入介质发生偏转后，中间角度的穿透路径长于大角度情况下的进过路径，该情况与光学折射类似。

在工程化应用过程中, 考虑到相控阵天线的整机性能, 需要对天线增益和波束指向偏差进行补偿。天线增益的掉落可通过增加天线阵列的规模, 弥补天线阵列的增益损失; 对于产生的波束指向偏差, 可通过多点测量, 采用中间角度进行校准, 矫正波束指向偏差, 达到工程化应用的要求。

## 5. 结论

本文就制约高机动平台相控阵天线应用的外表高温的问题进行了分析, 提出了利用“外隔内控”的思路进行耐高温相控阵天线的基本设计思路; 提出了一种适用于隔离 300℃~400℃高温的天线隔热罩设计方法; 对隔热罩和天线阵列进行了联合仿真, 分析了天线隔热罩对相控阵天线辐射特性的影响, 得出了天线隔热罩对天线方向图、波束指向和天线增益均存在影响, 在工程应用中需进行针对性的修正和补偿的结论, 并提出了初步的修正方法。相关的设计思路和设计方法对耐高温相控阵天线的设计具有一定的参考价值, 为未来高机动平台耐高温相控阵天线的研制奠定了技术基础。

## 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. 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] 李靖, 王金海, 刘彦刚. 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.
- [4] Liu, Y., Zhang, S. and Gao, Y. (2016) A High-Temperature Stable Antenna Array for the Satellite Navigation System. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, **16**, 1397-1400. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2639068>
- [5] Zhou, Y., Zhang, G., Wang, X., et al. (2019) A Novel High-Temperature Stable Antenna with Omnidirectional Radiation Pattern. 2019 *IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, Granada, 9-13 September 2019, 220-222. <https://doi.org/10.1109/APWC.2019.8870551>
- [6] Miyazaki, T., Sumantyo, J.T.S., Takahashi, A., et al. (2021) Development of Circularly Polarized Microstrip Antenna for High Temperature Environment Observation by Synthetic Aperture Radar. 2021 *7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Bali, 1-3 November 2021, 1-5. <https://doi.org/10.1109/APSAR52370.2021.9688451>
- [7] 张云祥. 天线罩平板宽带设计与电磁分析补偿[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [8] 陈玉峰, 洪长青, 胡成龙, 等. 空天飞行器用热防护陶瓷材料[J]. 现代技术陶瓷, 2017, 38(5): 1005-1198.
- [9] 杜泽晨. 高温可靠性试验对 SiC MOSFET 特性参数的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021.