

小型化 S 波段瓦式有源相控阵天线系统的设计研究

侯雪风, 林昱兵, 宋 硕, 李 刚, 李志强
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 基于运载火箭天基遥测传输的需求和箭载平台对重量、空间及能量消耗的严格限制, 本文设计了一种小型轻量化、高集成、低能耗的 S 波段瓦式有源相控阵天线系统。该系统包括天线阵列模块、发射组件阵列模块、功分网络模块、波束控制器及电源单元模块。本文阐述了该系统的工作原理、组成架构, 并根据要求设计了天线阵列、发射组件、高可靠电源单元以及波束控制器等几种关键电路。经暗室实测, 本系统中所研制的天线系统样机其波束宽度、轴比、方位面俯仰面 $\pm 60^\circ$ 波束扫描范围内的 ERIP 等指标达到设计要求, 与目前市场上同频段功能相似的砖式相控阵天线系统相比, 其体积减小 45%, 重量缩减 25%, 能耗降低 15%, 更贴合箭载相控阵天线从体积、重量、经济上的应用需求, 同时也为相关领域的相控阵天线系统研制提供了指导。

关键词: 有源相控阵天线; 瓦式; 垂直互联; SIP; 故障单元定位

中图分类号: TN82 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2024)04-0057-09

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240202001

引用格式: 侯雪风, 林昱兵, 宋硕, 等. 小型化 S 波段瓦式有源相控阵天线系统的设计研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(4): 57-65.

Design and Research on Miniaturized S-band Tile Type Active Phased-array Antenna System

HOU Xuefeng, LIN Yubing, SONG Shuo, LI Gang, LI Zhiqiang
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Based on the requirements of space-based telemetry transmission of launch vehicle and the strict limitations of weight, space, and energy consumption on the vehicle platform, this paper designs a miniaturized, lightweight, highly integrated and low-power consumption S-band tile type active phased-array antenna system. The system includes antenna array module, T-module array module, power divider network module, beam controller and power unit module. The article elaborates on the working principle and integrated architecture of the system, and designs several key circuits such as antenna array, T-module, highly reliable power supply unit and beam controller, etc, according to the requirements. The developed antenna system prototype has been tested in a darkroom, and its major indexes such as beam width, axial ratio, ERIP within the beam scanning range of $\pm 60^\circ$ in the azimuth and elevation plane all meet the design requirements. Compared with brick phased array antenna systems with similar functions in the same frequency band currently on the market, its volume is reduced by 45%, weight is reduced by 25%, and the energy consumption is reduced by 15%, which is more in line with the phased array antenna from the arrow-carrying size, weight, and economic application demand. It also provides guidance for the development of phased array antenna in related fields.

Keywords: Active phased-array antenna; Tile type structure; Vertical interconnection; SIP; Fault unit localization

Citation: HOU Xuefeng, LIN Yubing, SONG Shuo, et al. Design and Research on Miniaturized S-band Tile Type Active Phased-array Antenna System[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(4): 57-65.

0 引言

航天技术的蓬勃发展, 对运载火箭的测量、

测控、通信等技术提出了更高的要求, 依靠传统的地基测控技术已无法满足测控覆盖率和数据传输实时性等要求。我国中继卫星系统的建成与使

用,为运载火箭采用天基测控技术奠定了坚实的基础,使其具备了全程测控的条件,利用中继星进行火箭测控已成为今后国内外航天测控领域研究与发展的重要方向^[1-6]。

有源相控阵天线以其波束的快速扫描能力、波束形状的快速变化能力、空间定向及空间大功率合成能力、低副瓣高可靠等特点在各通信领域得到青睐并被广泛应用,也成为运载火箭天基测控系统的重要组成部分^[7-11]。随着我国航天发射任务的急剧增加,尤其是商业航天活动的迅猛发展,低成本高可靠的箭载相控阵天线发展需求潜力巨大。目前,我国中继卫星系统为运载火箭天基测控提供S频段和Ka频段两种返向链路。Ka频段数据传输速率高,但天线波束相对较窄,Ka频段的移相器、放大器等微波器件也更为昂贵。我国新一代中继卫星系统正在发展S频段相控阵多址(SMA)技术,以满足日益增长的利用中继卫星进行测控数传的需要^[12-16]。美国中继卫星系统配置运载火箭天基测控的传输链路也主要集中在S频段。综上分析,S频段相控阵天线有着广阔的市场化应用前景。

除了满足必须的波束扫描范围、波束宽度、发射功率以实现与中继星进行遥测数据传输之外,箭载相控阵天线在实际应用中还会面临一系列技术难点:搭载平台对重量、空间及能量消耗的严格限制,要求天线设计必须轻量化、小型化、低功耗,相控阵天线固定在火箭的外壁,飞行过程中的气动性及温度的骤变都迫使产品必须保持稳定性及可靠性。此外,模块化设计、低成本设计、故障快速诊断设计等等,这些既是技术挑战也是未来相控阵天线的技术发展趋势。

本文所述的研究设计了一种箭载S波段有源相控阵天线系统,它接收来自中继测控终端的射频激励信号和波束角度控制信息,将角度控制信息实时解算形成相应的波控码,使相控阵天线的波束主瓣始终指向中继星^[17],通过天线单元、发射组件等关键电路的设计优化,使其在方位面和俯仰面这两个面的 $\pm 60^\circ$ 扫描范围内的ERIP(等效全向辐射功率)和波束宽度达到与中继星稳定可靠通信的要求,同时实现设备小型轻量化、低功耗低成本、故障单元快速定位的设计目标。

1 有源相控阵天线系统设计

箭载相控阵天线与中继星的遥测数据传输为

单向发射链路。为了减少馈电网络的损耗,同时使移相等元器件处于低功率工作状态,本设计采用了功率分布式合成技术,一方面可以灵活增加总的发射功率,另一方面多个中小功率放大器并联,单个器件的失效不会影响产品的整体性能,提高了发射系统的可靠性。

相控阵天线系统由四大模块组成,分别是天线阵列模块、发射组件阵列模块、功分网络模块、波束控制器及电源单元模块,其组成框图如图1所示。电源单元将火箭上电池提供的电压处理后转换为相控阵天线需要的电压。波束控制器接收中继测控终端发来的角度控制信息,完成相控阵天线单元的相位计算,形成波控码传输给发射组件。功分网络将中继测控终端提供的射频信号按需求分配给各个发射组件。发射组件按波控码执行射频信号的幅相控制,并将功率放大后的射频信号传输给天线单元,由天线单元辐射出去。根据方位面 $\pm 60^\circ$,俯仰面 $30^\circ \sim 150^\circ$ 扫描范围内需满足有效覆盖性的要求,本相控阵天线采用了 6×6 阵列形式,共36个辐射单元。

如图2所示,结构布局上采用瓦式架构^[18]的分层模块化设计,上面第一层为背靠背形式的天线阵列模块和发射组件阵列模块。第二层是功分网络模块,采用Wilkinson微带结构形式实现36路等幅同相信号输出。第三层包含波束控制器和电源单元模块。各层之间的射频和低频信号均通过板间插座进行垂直互联^[19]传输。瓦式架构是未来发展的重要方向,相比砖式结构能大幅度降低产品的厚度,减小体积和重量。

2 关键电路设计

2.1 天线阵列的小型化轻量化设计

相控阵天线单元是采用中央馈点设计的单层微带贴片天线,辐射层结构简单,易于制造,其外形原理图如图3所示。该天线选用厚度为0.79 mm、介电常数为2.55、铜厚为0.5 oz的Taconic单面芯板,平面尺寸为45 mm $\times$ 45 mm,具有低剖面易共形、小型化轻量化、成本低廉的特点。图4为方向图仿真结果,其中心频率处的法向增益为4.5 dB,满足组阵要求。

天线阵列采用了等间距平面设计方案,这种布阵可以使得天线之间的占用空间最优化,从而在有限的空间内安装更多的天线数量,增大阵列

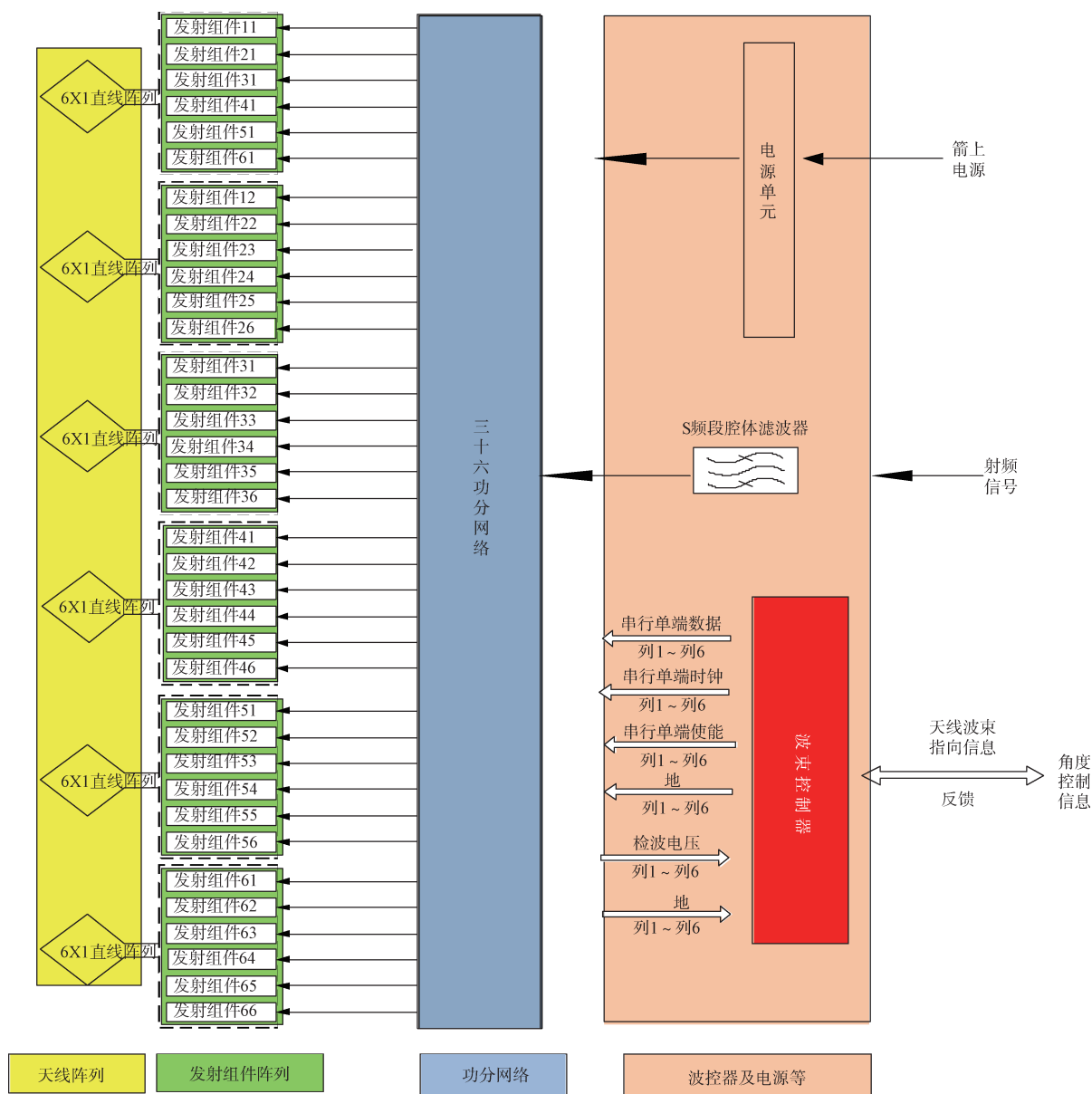


Fig. 1 The block diagram of phased-array antenna system

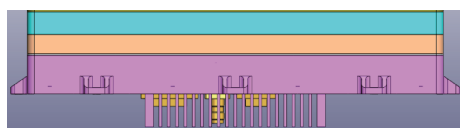


图 2 相控阵天线结构

Fig. 2 The structure of of phased-array antenna

的增益。单元等距分布的平面阵列如图 5 所示。

X 轴方向的间距为 d_x ，相邻单元之间的相差为 ϕ_x ， X 方向的单元数为 M 。 Y 轴方向的间距为 d_y ，相邻单元之间的相差为 ϕ_y ， Y 轴方向的单元数为 N 。

$$S_a = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(\alpha_x, \alpha_y) |I_{mn}| \times \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} (md_x \cos \alpha_x + nd_y \cos \alpha_y) - m\phi_x - n\phi_y \right]$$

显然，假定扫描采用平面相位面时，原点的相位为零，则 X 轴方向第 m 单元的相位为 $m\phi_x$ ， Y 轴方向第 n 个单元的相位为 $n\phi_y$ 。如果单元坐标为 (md_x, nd_y) ，则它的相位为 $m\phi_x + n\phi_y$ 。为求得波瓣，先求参考单元的程差。

在等距面阵的基础上，通过坐标变换，将阵列的各个单元空间坐标分别表示出来。

令其每个有源单元所辐射的阵波瓣为 $f(\alpha_x, \alpha_y)$ ，并应用叠加原理求出阵列的波瓣为：

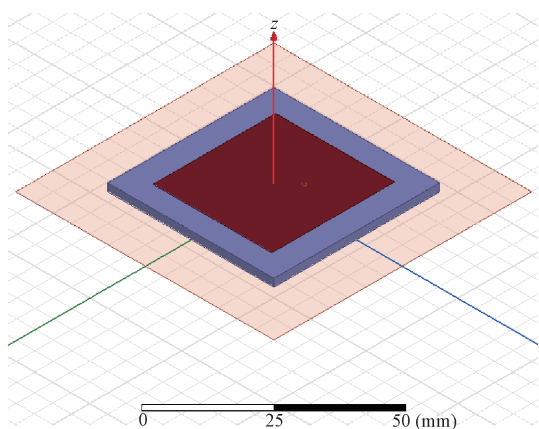


图3 微带天线单元外形原理图

Fig. 3 The outline schematic diagram of micro-strip antenna

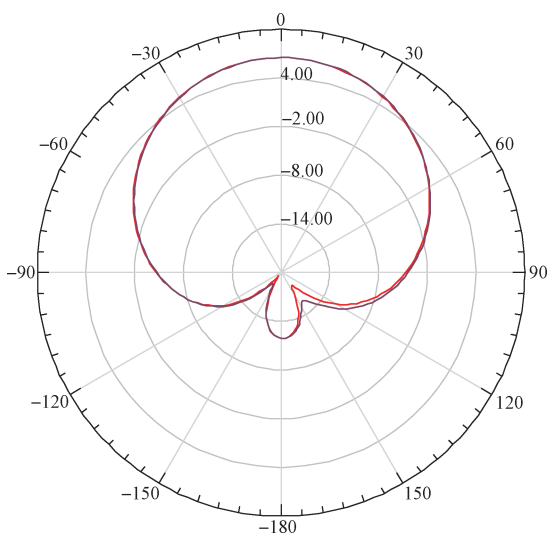


图4 天线单元的方向图仿真曲线

Fig. 4 The simulation curve of micro-strip antenna pattern

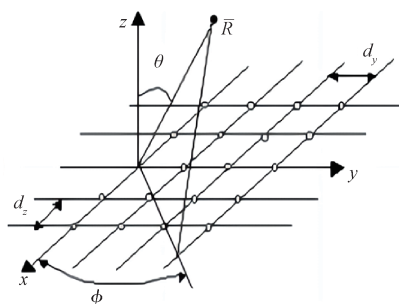


图5 等距面阵列示意图

Fig. 5 The diagrammatic sketch of equidistant surface array

在满足系统增益和天线波束扫描范围的前提下, 本系统采用了 6×6 阵列形式, 如图6所示。从图7天线阵列仿真结果看, 在工作带宽内增益大于14.5 dB, 能够满足系统的中继星测控要求。

本系统中, 天线单元采用方形微带贴片技术,

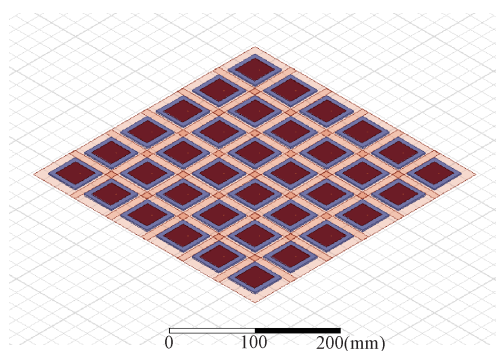


图6 天线阵列仿真原理图

Fig. 6 The simulation schematic of the antenna array

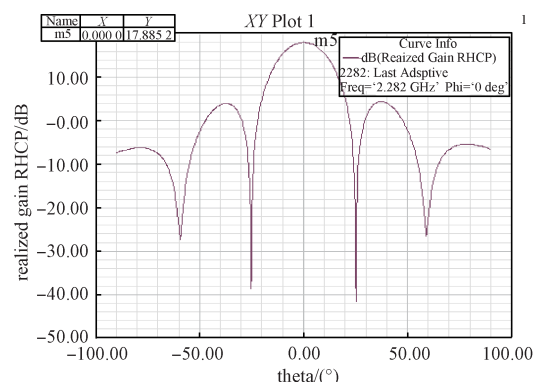
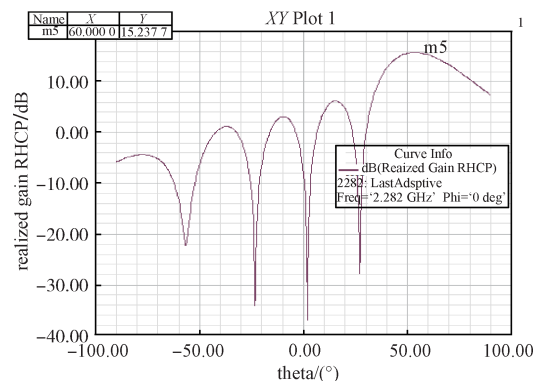
(a) $X=0^\circ$, $Y=0^\circ$ (b) $X=60^\circ$, $Y=60^\circ$

图7 天线阵列仿真方向图

Fig. 7 The simulation directional pattern of the antenna array

具有低剖面轻量化、易于加工安装的优点。同时, 天线单元的馈点设计在微带印制板的中央, 印制板可以任意角度旋转, 4个同样结构的单元围成一周, 固定在金属结构表面, 如图8所示, 可以显著提升天线的轴比指标。该旋转排列布局的轴比仿真曲线见图9, 可以看到, 中心处轴向轴比仿真值为0.027 dB, $\pm 22.5^\circ$ 角度范围内曲线平滑且小于2 dB, 与未旋转布局下轴向轴比的仿真值3.75 dB相比较, 圆极化性能得到大幅提升。以上仿真分析证明在满足系统增益、扫描范围、轴比

指标等条件下,采用6×6旋转等间距阵列形式,整体尺寸最小,满足箭载天线小型化轻量化的设计要求。

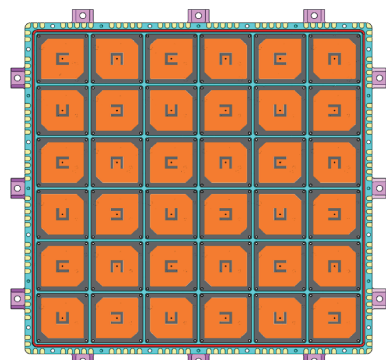


图8 微带天线阵列

Fig. 8 The micro-strip antenna array

2.2 发射组件的高集成低能耗设计

发射组件是有源相控阵天线的核心部件,其电性能、体积、重量直接关系整个系统的指标。本系统中发射组件包含数字处理和射频处理两部分,这两部分电路分别采用系统级封装SIP技术高

度集成,其原理框图见图10所示,上方是射频电路,下方是数字电路。数字控制电路接收波控传来的包含幅相控制、开关控制等代码的串行数据流,然后进行串并转换,为发射组件提供正确的逻辑控制信号;射频处理电路对S频段信号进行幅相控制,信号放大,功率检测,滤波后输出给天线。

本设计中每一个发射组件都具备独立开断功能,控制信号通过对各级功率放大器的供电电路进行电源管理来实现通断,在发射组件关断时功率放大器没有能量消耗,区别于一般电路在射频链路中串联开关的设计,降低了能量消耗。耦合信号的检波电压随火箭其他遥测数据一起实时反馈给地面控制中心,作为每一个发射组件是否正常工作的判据。图11是关闭四个角落发射组件时地面控制中心显示的发射组件阵列工作状态截图,指示灯绿色表示发射功率正常,红色则表示发射组件关闭或者出现了故障,解决了箭上单机的快速测试和故障定位问题。

发射组件阵列和天线阵列采用背靠背一体化

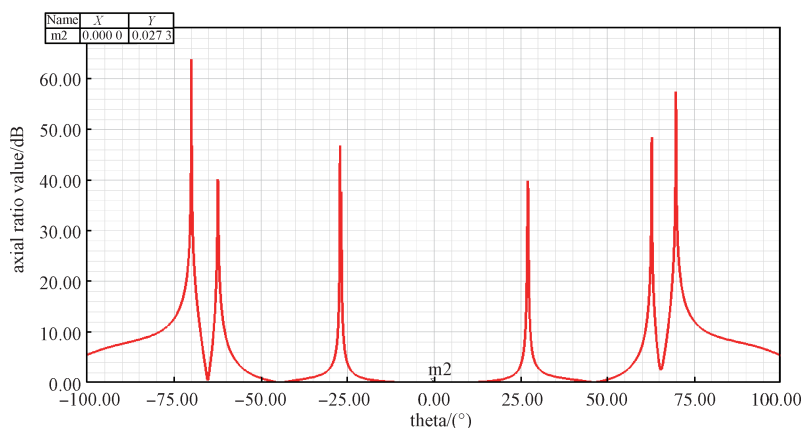


图9 微带天线阵列轴比仿真曲线

Fig. 9 The axial ratio simulation curve of micro-strip antenna array

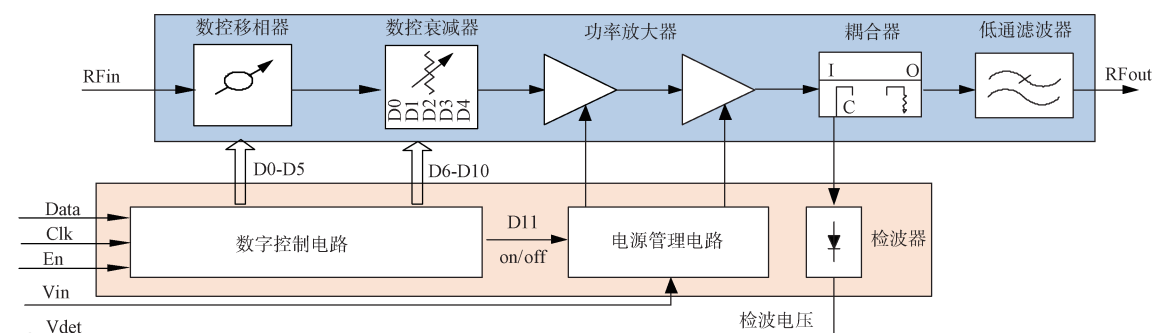


图10 发射组件原理框图

Fig. 10 The block diagram of T module



图 11 发射组件阵列工作状态

Fig. 11 The working status of T-module array

结构设计, 一侧安装天线单元, 另一侧结构分割出

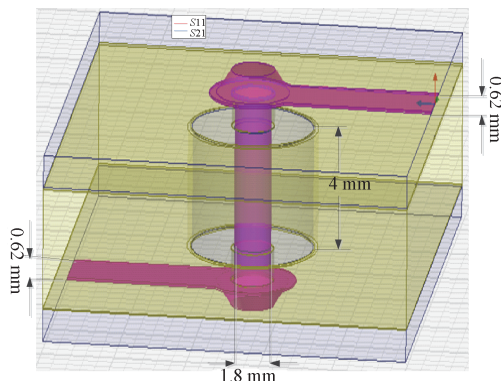


图 13 垂直互连结构仿真模型和仿真结果

Fig. 13 The simulation model and results of vertical interconnection

本设计中发射组件模块具有独立的通道, 可以单独自动化标校测试, 降低人工成本; 在满足信号放大、幅相控制等基本功能的基础上, 通过电源管理实现单独开关通断的功能使得地面联试时可以根据所需辐射功率的大小自由选择发射组件的个数, 减少能耗的同时降低产品的温升, 提高产品的可靠性; 反馈的检波信号能实时检测整个发射组件阵列的工作状态, 尤其是火箭飞行状态时能对故障通道进行快速判断和定位, 末级低通滤波器解决了高功率电磁干扰的问题, SIP技术的应用大大减小了产品的体积和重量, 因此本发射组件具有高集成、低能耗的特点。

36个独立小腔体安装发射组件模块, 每个腔体尺寸为43 mm×43 mm×8 mm, 发射组件间彼此隔离, 如图12所示。每个发射组件通过一个板间垂直插座实现独立的供电数据接口, 方便调试和拆卸。一个发射组件背面安装一个天线辐射单元, 两者之间选用嵌在结构体内的射频绝缘子来实现信号的高性能高可靠的垂直互联, 应用HFSS软件对绝缘子在工作频段内的传输性能进行了仿真, 图13为建立的仿真模型和优化结果^[20], 满足设计要求。

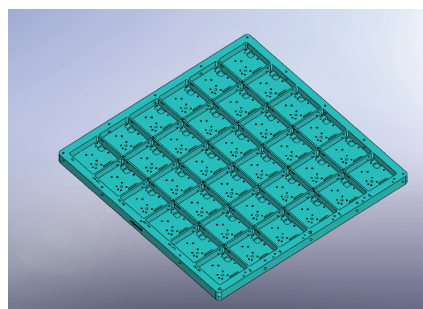
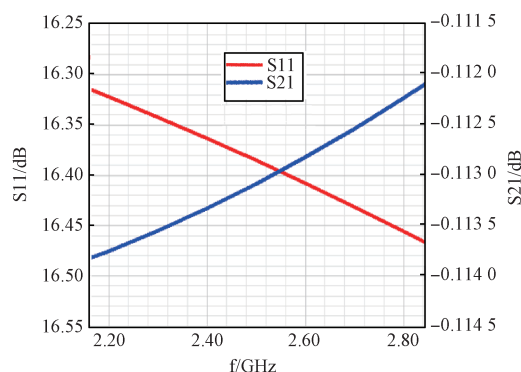


图 12 发射组件阵列结构图

Fig. 12 The structure diagram of T-module array



2.3 电源单元的可靠性设计

电源单元为相控阵天线内各有源电路提供工作电压, 若出现故障将会导致整个产品加电失败, 故设计重点在于可靠性。电源单元安装在相控阵天线的第三层, 其原理图见图14所示, 电路设计上采取了二极管防负压保护, TVS抗瞬态电压冲击, 钽电容抗外电源瞬态跌落, EMI滤波器防浪涌, 双向抑制电源母线上的干扰等措施, 保证了其工作状态的可靠性和稳定性。

电路里EMI滤波器为串联结构, 其内部核心器件为一个横截面较大的线绕电感, 电路里的四个钽电容, 两个二极管都是体积较大的立式插装

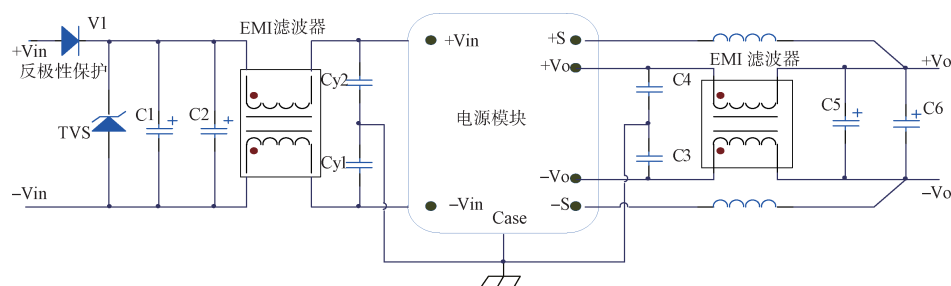


图 14 电源单元原理图

Fig. 14 The schematic diagram of power unit

焊接器件，总体抗振性较弱。相控阵天线悬挂在火箭外壁的支架上，振动量级较大。为增加产品的可靠性，本设计对电源板采取了增加减振垫、将电源板夹在两个减振垫之间不与壳体硬接触的抗振措施。图 15 是通过电源板上粘接传感器实测

的减振措施前后的振动响应曲线，图中绿色的“目标谱(f)”为输入的振动激励曲线，蓝色的“输入 3(f)”为电源板上测试点响应曲线，对比可见，电源板上的响应量级由减振前的 25.92 g 降到了减振后的 9.55 g，和输入量级几乎一致。

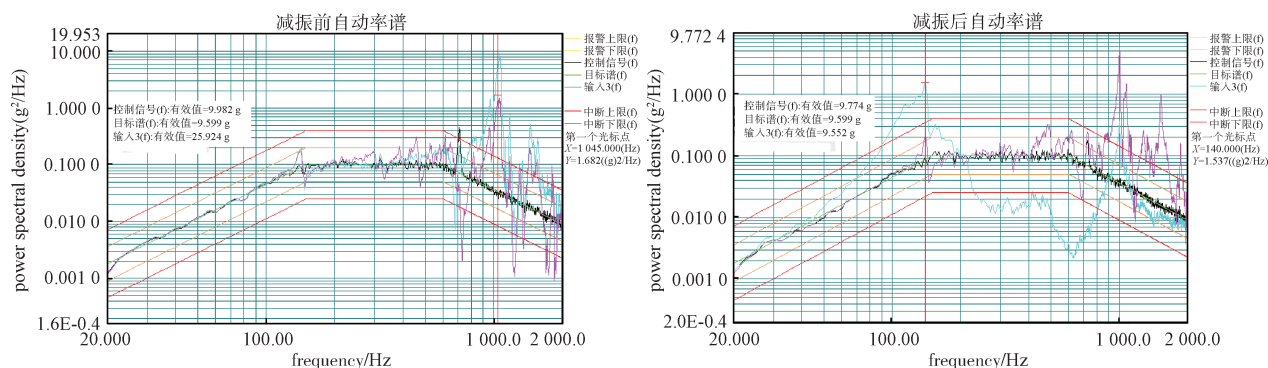


图 15 电源板加装橡胶垫前后振动响应图

Fig. 15 The vibration response curve of the power board before and after installing rubber pads

2.4 波束控制器的快速响应设计

波束控制器作为相控阵天线的关键电路之一，其快速响应能力直接影响相控阵天线电扫描特性的发挥，关系到火箭与中继星之间的快速捕获和跟踪。本系统中波束控制器安装在相控阵天线的第三层，通过外部接口接收箭载中继测控终端发送过来的天线波束角度控制信息，通过坐标换算，快速准确地形成相位控制码传送给发射组件，同时根据发射组件反馈的检波电压的大小形成幅度控制码传送给发射组件。此外还具有检测和上报自身及发射组件工作状态信息，利用 flash 存储波束修正码支持算法调用的功能。波束控制器主要由 FPGA、DSP、晶振及接口电路等组成，其对常规波束控制算法进行了分解和优化，提高了基于 FPGA 的移向码快速计算，具有集成度高、数据吞吐量大、运算速度快的特点，波束转换时间小于 0.5 ms。波束控制器原理框图见图 16。

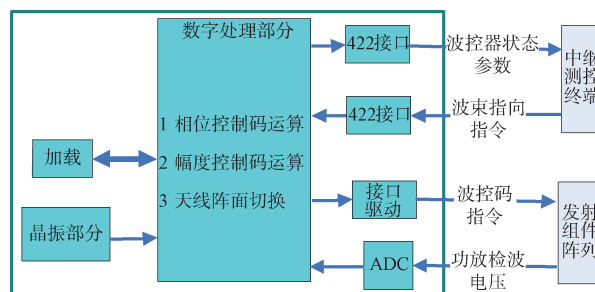


图 16 波束控制器原理框图

Fig. 16 The block diagram of the beam controller

3 实测结果

基于以上设计方案研制的 S 波段相控阵天线体积为 280 mm×280 mm×35 mm，质量为 4.5 kg，其驻波实测值如图 17，中心频点驻波比小于 1.3，整个工作带宽内驻波比最大值为 1.6，略高于仿真的驻波最大值 1.4，能满足使用要求。样机在暗室进

行了性能测试, 见图18, 工作频段内36个发射组件辐射功率分别标校, 一致性在0.3 dB范围内, 保证了相控阵天线EIRP的稳定度和旁瓣的抑制量。天线带外谐波杂波抑制50 dBc, 轴向轴比通过测量的主极化和交叉极化电平值计算后小于2.9 dB, 波束宽度大于 30° 。在方位面(α 角平面) $\pm 60^\circ$ 、俯仰面(β 角平面) $30^\circ \sim 150^\circ$ 进行两维扫描的方向图见图19,

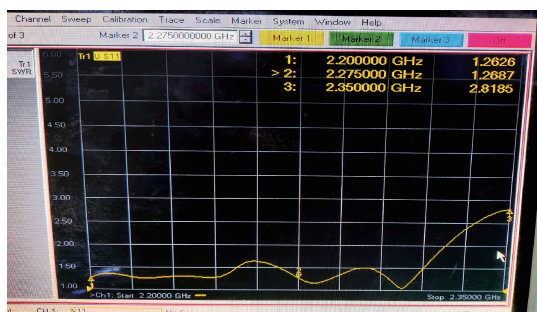


图17 相控阵天线驻波实测图

Fig. 17 The SWR measurement photo of phased-array antenna

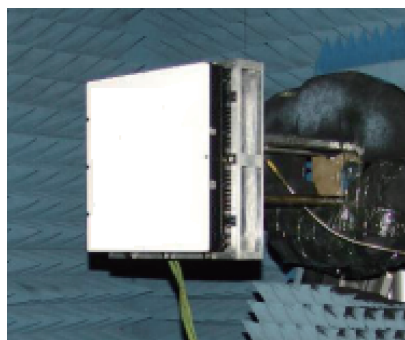


图18 相控阵天线实物测试图

Fig. 18 The photo of phased-array antenna in the darkroom

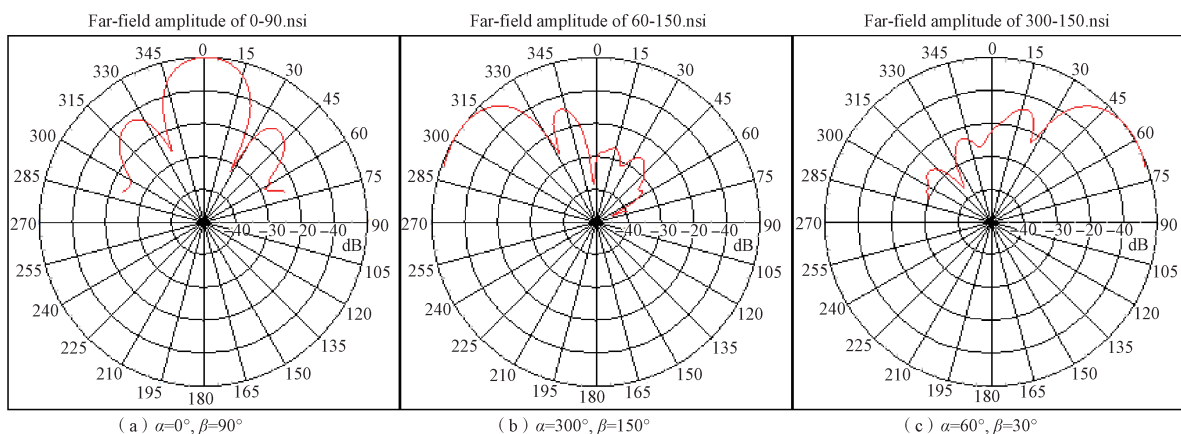


图19 相控阵天线不同扫描角度的方向图

Fig. 19 The directional patterns of phased-array antenna at different scanning angles

4 结束语

本相控阵天线系统具有天线阵列小型轻量化设计, 发射组件高集成低能耗设计, 电源单元可靠性设计, 波束控制器快速响应设计等关键技术, 样机实测指标与仿真结果吻合, 保证与中继星稳定可靠通信的基础上实现了产品的小型化低功耗; 结构上采用瓦片式模块化设计, 低频和射频信号均通过垂直对插插座替代电缆组件进行传输, 降低了整机的厚度, 减小了体积和重量, 相较于市场上的同频段功能相似的砖式相控阵天线, 其体积减小了45%, 重量缩减了25%, 能耗降低15%;

通过标校天线测试的轴向(0,90)角度EIRP为29.7 dBW, 波束两侧(60,30)、(300,150)角度EIRP超过26.9 dBW。由图7天线阵列仿真图可知, 天线阵列增益介于15.2 dB~17.7 dB之间, 加上后端发射组件阵列的总输出功率12 dBW, 此相控阵天线的EIRP实测值与仿真设计值吻合, 达到了设计要求。

各模块功能明确且相对独立, 便于快速组装批量生产。另外通过模块重组可使设备满足不同的应用需求, 易于升级优化, 降低了制造成本, 从体积, 重量, 经济等方面更加贴合箭载相控阵天线的应用需求, 同时对相关领域的相控阵天线系统研制也具有指导意义。

参考文献

- [1] 李松林, 伍浩文, 杨发亮. 联合仿真验证的多弹道天基天线覆盖性能研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(3): 21-23.
- LI Songlin, WU Haowen, YANG Faliang. Research on

- coverage performance of multi-ballistic space-based measurement and control antenna verified by co-simulation[J]. Industrial Control Computer, 2021, 34(3):21-23.
- [2] 王洋, 宫长辉, 张金刚, 等. 高码率全程天基测控关键技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(4):112-116.
WANG Yang, GONG Changhui, ZHANG Jingang, et al. Research on key technologies of high-speed TT&C based on TDRSS over vehicle's whole flight[J]. Missiles and Space Vehicles, 2020(4): 112-116.
- [3] 何巍, 刘伟, 龙乐豪. 重型运载火箭及其应用探讨[J]. 导弹与航天运载技术, 2011(1): 1-5.
HE Wei, LIU Wei, LONG Lehao, Heavy launch vehicle and its application[J]. Missiles and Space Vehicles, 2011(1): 1-5.
- [4] 张劲松, 刘靖, 高祥武. 基于中继卫星的运载火箭遥测传输技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(6): 11-15.
ZHANG Jinsong, LIU Jing, GAO Xiangwu. Telemetry transmission technology for Launch vehicle based on relay satellite system[J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(6): 11-15.
- [5] 刘婧, 宋岳鹏. 运载火箭天基测控天线覆盖性能分析[J]. 遥测遥控, 2012, 33(5): 51-52.
LIU Jing, SONG Yuepeng. Antenna cover performance analysis for space-based launch vehicle TT&C system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2012, 33(5): 51-52.
- [6] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006, 2-5.
- [7] GREDAL L A, DREHER A. Tx-terminal phased array for satellite communication at Ka-band[C]//The 37th European Microwave Conference, Munich. 2007: 266-269.
- [8] 田垒. 适应于小卫星的低成本相控阵天线技术研究[J]. 电子质量, 2021, 3(1): 7-10.
TIAN Lei. Research on low-cost phased array antenna technology suitable for small satellites[J]. Electronics Quality, 2021, 3(1): 7-10.
- [9] 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, 2021, 3(1): 1076-1084.
LI Jing, WANG Jinhai, LIU Yangang, et al. Application and prospects of phased array antennas in satellite communication[J]. Radio Engineering, 2021, 3(1):1076-1084.
- [10] BROOKNER E. Phased arrays and radar-past present and future[J]. Microwave Journal, 2006, 49(1): 1-3.
- [11] 刘婧, 宋岳鹏. 运载火箭天基测控 S 和 Ka 频道链路分析[J]. 计算机测量与控制, 2014(4): 37-39.
LIU Jing, SONG Yuepeng. Analysis of S-band and Ka-band links for space-based measurement and control of launch vehicles[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 4: 37-39.
- [12] 冯贵年, 于志坚. 跟踪与数据中继卫星系统的现状和发展[J]. 中国航天, 2004(1): 16-19.
FENG Guinian, YU Zhijian. Situation and development of TDRSS[J]. Aerospace China, 2004(1): 16-19.
- [13] 翟高伟, 梁晨光, 赵锦瑾, 等. 基于天链卫星的箭载 Ka 频段中继用户终端设计与实现[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(4): 7-12.
ZHAI Gaowei, LIANG Chenguang, ZHAO Jinjin, et al. The Design and implementation of general Ka-band terminal based on TDRSS[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(4): 7-12.
- [14] 王威, 高昕. 一种用于中继卫星 SMA 系统在轨标校的新方法[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(3): 327-322.
WANG Wei, GAO Xin. A novel in-orbit calibration method for SMA system of TDRSS[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(3): 327-332.
- [15] 刘靖, 黄玉龙. 运载火箭天基遥测技术[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(10): 2731-2734.
LIU Jing, HUANG Yulong. Space-telemetry of launch vehicle using relay satellite[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(10): 2731-2734.
- [16] 魏伟, 陈三楚, 敦怡, 等. 用于卫星入轨段测控的箭载天基测控中继系统[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(6): 64-70.
WEI Wei, CHEN Sanchu, DUN Yi, et al. Space-based TT&C relay system of launch vehicle during satellite orbit entry[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(6): 64-70.
- [17] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 109-116.
YANG Hongjun. Latest development progress and trends of foreign data relay satellite systems[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(1): 109-116.
- [18] 陈军全, 何海丹, 何庆强. 一种 Ka 频段"瓦式"有源相控阵天线设计[J]. 现代电子技术, 2017, 40(7): 43-47.
CHEN Junquan, HE Haidan, HE Qingqiang. Design of a tile-type active phased-array antenna in Ka-band[J]. Modern Electronics Technique, 2017, 40(7): 43-47.
- [19] 张慧锋, 季帅, 闫少敏. 小型化 Ku 波段瓦片式 TR 组件设计[J]. 中国西部科技, 2015, 14(5): 45-47.
ZHANG Huifeng, JI Shuai, YAN Shaomin. Design of a Ku-band tile type TR module[J]. Science and Technology of West China, 2015, 14(5): 45-47.
- [20] 侯雪风, 祝大龙, 刘德喜, 等. 用于星际数传的 S 波段四通道 T 组件[J]. 遥测遥控, 2018, 39(3): 43-47.
HOU Xuefeng, ZHU Dalong, LIU Dexi, et al. S band four-channel T module for data transmission of inter satellite links[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39(3): 43-47.

[作者简介]

- 侯雪风 1971 年生, 学士, 高级工程师。
林昱兵 1987 年生, 硕士, 高级工程师。
宋 硕 1991 年生, 学士, 工程师。
李 刚 1980 年生, 硕士, 高级工程师。
李志强 1971 年生, 硕士, 研究员。

(本文编辑: 潘三英)

(英文编辑: 赵尹默)