

大型宽频固定式电子系统结构总体设计

谭贵红, 李潇峰, 洪大良, 林 泉

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088)

摘要:不同于一般机动式雷达,某固定式电子系统频段更宽,天线口径更大,天线内设备日常维护量、维护范围更大,设备抗风指标要求更高;后端电子设备综合布置在若干大型机柜中,热流密度大,需考虑大型液冷机柜结构设计问题和机柜内部设备散热问题;设备工作在海边,需采取有效措施实现全机防护要求;系统要经历多阶段测试,需频繁转场至各工作场所工作,宜采取有效技术手段实现多阵地灵活架设。本文根据某类大型产品的研制经验,讨论了该类产品结构总体设计方法。

关键词:宽频固定式电子系统;结构总体设计;抗风设计;机柜设计;散热设计;防护设计;架设设计

中图分类号:TN957.8 文献标志码:A 文章编号:1672-2337(2021)05-0565-06

Structural Design for Large-Sized Multi-Band Fixed Electronic Equipment

TAN Guihong, LI Xiaofeng, HONG Daliang, LIN Quan

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract: Different from normal movable radar, a multi-band fixed electronic equipment has larger antenna aperture wide-range frequency antennas resulting in large dimension and heavy maintenance tasks for devices in the antenna. Meanwhile, the requirement for anti-wind capability of this equipment is much higher than that of conventional radar. The back-end electronic devices are arranged in several water cooling cabinets. So the structure of cabinets should be designed especially to solve the heat dissipation problem of the devices with high heat flux. Furthermore, effective technical means should be used for protecting equipment from corrosion considering seaside circumstance. At last, a variety of tests will be carried out for the equipment, which means it needs to be transported to different sites, so effective technical means should be used in erection. This paper discusses the method of structural design above according to the experiences from some products.

Key words: multi-band fixed electronic equipment; general structure design; anti-wind design; cabinet design; thermal design; protection design; erection design

0 引言

某大型多频段固定式电子系统每个天线覆盖多频段,单个天线口径约 40 m^2 平面阵。根据指标分析,系统没有转台,由多个天线实现方位探测性能。单个天线阵面口径较大。按相关国军标要求,设备需抵抗17级大风。相比单频段设备,天线内部电子设备需维护的数量更多、维护空间范围更大;集中布置在机柜内接收系统、信号处理等系统板卡热流密度更大,需采取有效散热措施将机柜内、天线内电子设备产生的热量带走。系统工作在海边,高热高潮湿高盐雾环境对设备三防设计提出了严格的要求;虽然为固定站,但天线需在

微波暗室对波瓣进行测试,需在外场利用标准信号源对设备调试和检验,存在频繁对多部天线设备、机柜设备、冷却设备进行转场架设需求。固定站设备没有配置机动底盘,野外转场架设需考虑设备运输过程安全性问题、工作时抗风安全性问题、设备转场架设技术措施经济性问题,本文根据某大型多频段电子装备研制中主要技术问题进行探讨,给出较好的解决思路。

1 国内相关技术研究现状

项目初期调研了国内相关领域资料,天线为该类产品结构设计重点之一,某些固定站产品宽频天线布局相对简单,将各种频段天线机械拼装

在一起,同一个阵面上天线单元有单罩封装,有整罩封装,骨架传力途径不够清晰,拼装和拆卸阵面比较困难,阵面显得比较凌乱,产品的美观性亦有待提高。如果将机动雷达设计思路引入,能有效提高结构设计质量。在阵面设计质量要求越来越高的前提下,随着相关电子设备性能指标的不断提高,其热流密度也不断提高,需要采用液冷技术解决其散热问题^[1],对于热流密度进一步增高的电子设备,需要考虑微通道强化散热技术^[2]和均温板^[3]等新型散热技术解决其散热问题。

2 系统结构总体设计

系统设备主要包含多部大型天线、多个大型设备机柜、电源机柜、液冷机组、阵地地球形天线罩等,固定站设备不配置机动车和电子设备舱。

2.1 天线设计

2.1.1 子阵面空间布局设计

各频段天线多,单元间距不同,后端处理设备不同,首要考虑的是总体布局设计,实现设备功能前提下,兼顾工业设计美观性要求。根据总天线口径是否超过国军标单车可以运输的最大尺寸来决定天线是否需分成若干个子阵面,即天线功能性设计和运输性设计相协调,避免发运设备存在大量零碎部件。推荐大块分割整个阵面为子阵面。各子阵面彼此相对位置依据设备量大小、天线波瓣对离地高度要求、与天线单元连接内部器件维护的需求性和可达性要求、天线骨架传力安全性和可靠性要求统筹考虑。大块分割的天线既可采用整罩防护,也可采用单罩防护,具体看罩体封装可靠性来决定。从工业设计美观性角度,推荐使用整体罩封装各个子阵面。高频段天线种类较多,单元间距小,设计多个子阵面骨架,单元和子阵面骨架安装成一体后整体安装到上级阵面骨架中;中低频段天线单元直接布置在子阵面骨架反射板上。天线单元虽然种类多,单元间距各不相同,但布局要整而不零,便于天线骨架布局和传力。反复权衡考虑,最终将整个天线分成 3 个子阵面,彼此成 T 型连接,即低频段天线子阵面水平布置在最高处,L 频段天线子阵面和其他频段天线组成的子阵面并列布置在下部,其中 L 子阵面在左,

其他频段子阵面在右。3 个子阵面通过定位销和螺栓定位并连接。考虑到子阵离地高度要求,所有子阵面安装在 T 型基座上,基座固定在阵地地基上,布局关系如图 1 天线正视图所示。

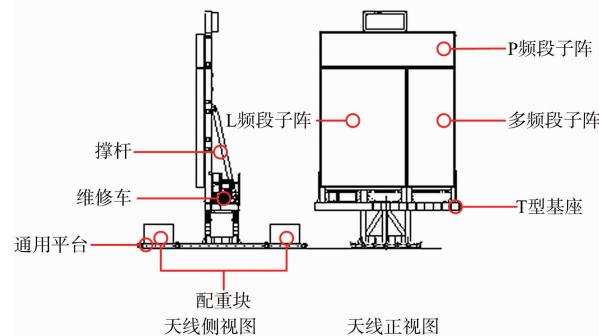


图 1 某多频段电子设备天线布局图(仅示意单个阵面)

2.1.2 天线抗风安全性考虑和天线构型设计

按指标要求,固定站电子系统抗风等级远高于机动雷达,需考虑天线结构刚度和强度设计、与天线工作距离有要求的机柜(考虑损耗,不能移动到远处固定建筑物内)等设备抗风能力设计。本系统生存抗风指标为 67 m/s,而大型机动雷达的不倒伏天线抗风指标一般为 30 m/s,正常工作抗风指标为 25 m/s^[4]。根据雷达设计规范^[5],固定式雷达在大风地区抗风指标为 25 m/s,机动式雷达抗风指标为 20 m/s,本系统生存风速下对应单位面积的风压是固定雷达同类型天线的 7.1 倍。如果按照指标直接设计,天线阵面法向尺寸将极大,或者天线构件将非常笨重。机柜等设备为实现抗风要求,设计成中间为设备间的大型承力结构形式,不能借用商业化型材单独设计本项目机柜,影响设备操作便捷及美观性。这些笨重的结构将导致设备转场的困难及研制费用的大幅增加。可以考虑另外一种设计思路,即分级抗风的设计思路,按大风地区固定雷达抗风指标 25 m/s 来设计天线抗风能力,系统抗风指标由阵地天线罩抗风实现,可以极大降低天线骨架承受风荷载。查全国各地区 50 年一遇的大风数据可知,25 m/s 的大风基本可以覆盖除海岛以外全国内陆具备基础设施地区大风数据,满足研制中野外安全工作要求。根据相关规范,一般天线罩可以抗击 67 m/s 大风不破坏。在孤岛地区天线罩可以抗击 76 m/s 大风,分级抗风设计思路可以满足设备指标要求。抗风设计思路一旦确定,接下来开展天线骨架的刚强度常规设计工作。

确定天线阵面设计风速之后,考虑阵面构形设计,借用机动雷达设计思想,拟采用平面阵骨架与后部多撑杆组合抗风设计方式。考虑固定站架设性,子阵面设计多个立柱连接T型基座平台,只需动用单台吊车架设天线,后部撑杆通过支耳与子阵面、基座连接。考虑制造误差,撑杆长度可以调节并锁定。如图1天线侧视图,阵面布局设计为三角形结构,利于以较小重量代价实现天线阵面法向较大刚度。骨架强度按25 m/s大风设计,骨架刚度按20 m/s大风设计,并考虑安全系数。天线基座刚性较大,T型基座悬翼构型减少材料使用,减少罩内拥挤感,阵地天线球罩截圆位置较低,罩内地面空间有限,该部分亦可作为人员行走通道。

综合考虑结果,如图1侧视图和正视图,整个阵面由P频段子阵、L频段子阵、多频段子阵、T型基座、连接彼此双撑杆组成。阵地架设时T型基座与预设地基上的锚栓连接,天线不会倾覆。

2.1.3 天线骨架刚强度设计及有限元分析结果

天线采用整体罩封装,风阻系数参照同类型天线,C_x取1.4^[6],天线载荷按理论公式计算。采用有限元分析软件对天线在各工况下进行分析,主要梁采用壳单元,T型平台下法兰固定作为边界条件。

天线有限元分析工况见表1,各频段天线结构变形典型工况(40℃+自重+20 m/s风载)分析结果见图2,该工况变形最大,但均小于指标最大变形要求。

表1 天线刚强度有限元分析工况

状态	工况编号	载荷类别	工况组合	适用对象
工作	1	自重	自重	刚度 计算
	2	温度	0℃	
	3		40℃	
	4	风载	20 m/s风载	
	5	外场调试	0℃+自重+20 m/s风载	
	6	综合状态	40℃+自重+20 m/s风载	
	7		自重+0℃	
	8	罩内工作	自重+40℃	
运输状态	9		纵向 2.0 g	强度 计算
	10	运输状态	侧向 1.27 g	
	11		垂向 2.8 g	
极限状态	12		自重+25 m/s风载	强度 计算
	13	综合状态	0℃+自重+25 m/s风载	
	14		40℃+自重+25 m/s风载	

天线典型工况(0℃+自重+25 m/s风载)应力计算结果见图3,该工况应力最大,为210.7 MPa,小于天线Q345钢材的屈服强度,强度设计满足要求。

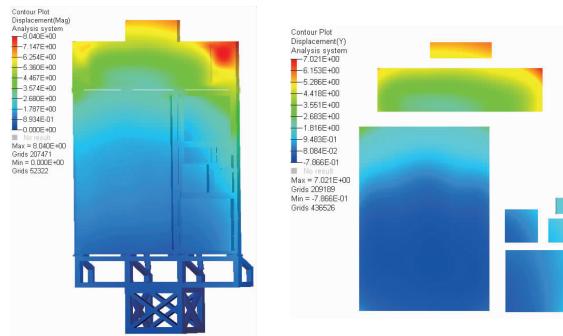


图2 典型工况天线阵面变形分析结果

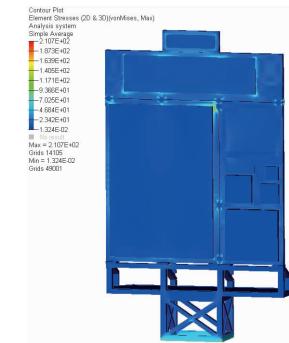


图3 典型工况结构强度分析结果

2.2 天线子阵面间定位和机械连接设计

天线左右子阵面间采用多个定位装置,后通过螺栓或快锁连接,左右子阵面下部立柱与T型基座同时机械连接。多处机械连接,属于过约束问题,需要合理分配螺栓连接处的配合间隙,否则可能导致孔位对不上的情况。子阵面间设计长定位孔,满足天线法向定位要求即可。阵面上部低频段子阵面与左右子阵面连接,无需很精确定位。建议设计时留足各子阵面间距离,考虑用定位销和快锁连接大块子阵面,提高架设速度。

2.3 天线子阵面防水密封设计

阵面调试过程无球形天线罩防护,部分子阵面内部还布置了下级子阵面。考虑密封设计时,3个大型子阵面分别用整体平面罩封装,子阵面后部设计大量的密封维修门。子阵面和外部设备走线主要通过转接板实现,避免了穿墙式走线方式导致雨水从电缆处进入阵面内部。系列设计思路

保证天线所有设备处于有效密封防护。需要关注的是子阵面间螺栓连接处密封处理采取单边盲螺纹,电缆过境其他子阵面时虽然采取套筒方式可避免水沿重力相反方向进入子阵面,但在雨天转场架设时需要保护套筒,不推荐使用。

2.4 天线电缆走线设计

天线电缆走线分为子阵面内部电缆走线、阵面间电缆走线、阵面与机柜间电缆走线等。本系统天线电缆非常多,子阵面为封闭结构,内部骨架设计预留大量走线孔,用于内部成束电缆的捆扎。上部子阵面电缆需要从下部子阵面过境,设置转接板转接。阵面与机柜间电缆走线亦通过转接板,按此原则走线,有利于阵面的密封设计。

2.5 子阵面维护设计

仔细策划阵面的维护问题,联合电讯总体将需要维护的设备尽量布局于下部两个子阵面中下部,在 T 型基座上设置手动或自动举升维修平台将人员举高,对维修门内设备进行维护。考虑阵面左右范围比较大,设计导轨大范围水平移动维修平台解决维修覆盖问题。为避免在左右平移中与天线撑杆干涉,采取技术措施将维修栏折叠压缩。产品使用表明,这种设计思路可行。

2.6 电子设备液冷机柜的结构设计

各频段天线的接收、信号处理、供电等插件布置于若干个大型机柜插箱内,电源机柜对各设备机柜供电。36u 设备机柜高约 2 m,重达 1 t 左右。对机柜的设计主要有几点要求:借用某机柜型材和机柜面板重新设计机柜,保证机柜具备大承载能力,兼顾美观性;机柜内主设备为单层或双层液冷插箱,插箱内安装模块形式插件,通过液冷系统对机柜内各插箱供液,为避免插箱受力变形漏液,单独设置托盘托住插箱;考虑可靠性要求,插箱电、液插头分开布置在插箱背板左右,模块内部不通液。机柜内安装分水管网,设置接水盘,接水盘设置引流管,对每个插箱保护,提高可靠性;采用双层面板机柜,全密封形式,电缆均通过转接板与外部连接;机柜前后开门,带密封和屏蔽措施,便于设备安装和维护,后面及侧面设置转接板,侧面转接板与外界电缆连接;典型机柜如图 4 所示。典

型插件如图 5 所示,与插箱由锁紧条锁紧。外界电缆通过转接板进出机柜,是保证机柜密封性能的重要手段^[7]。

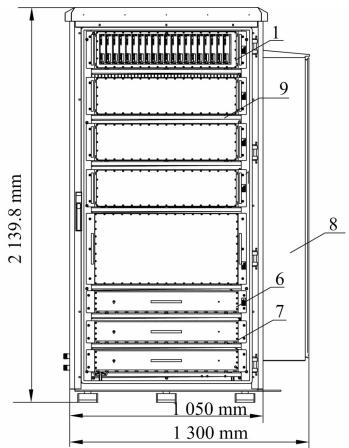


图 4 液冷设备机柜正视图



图 5 插箱内散热插件结构形式

2.7 设备散热设计和系统三防设计

系统计算表明,单个多频段天线阵面热量 800 W,电源机柜热量 3 kW,14 个液冷插箱合计热量 26.6 kW,单个插箱最大热耗 3.2 kW,单个插件最大热量 140 W,天线电扫描不同时进行,计算设备热耗时不重复计算,总热耗约 31 kW,天线罩换热量约 6.9 kW。

插件热流密度很大,插件之间间隙很小,分析表明,需要采用液冷方式将热量带走。设备将工作在沿海地区,会面临潮湿和高盐雾腐蚀气体侵蚀,整个系统的防护设计亦是重点解决的技术问题。总体设计阶段,将系统散热设计和三防设计统筹考虑。即要求系统所有设备机柜、电源机柜都设计成密闭柜体,机柜前后设置密闭门,内部电缆通过带防护罩转接板与其他设备连接。密闭机柜及密闭天线阵面内部热量由液冷系统带走。这样即便没有球形天线罩,整个系统可以在野外环境中工作;而在沿海潮湿盐雾环境下,用球形天线

罩将多个天线阵面、所有机柜封闭起来,通过液冷机组带走机柜和天线阵面的热量,同步控制罩内的温度和湿度,并防止凝露,能有效对系统进行防护。液冷机组能提供较低供液温度的压缩式制冷机组。对设备和除湿机的供液温度分开设置,高低温制冷量各不相同。

液冷机组工作在球形罩外直接面对大气环境,考虑海边防护问题,将需要与大气热交换部分,含风机、散热板等设计成开放式结构,将压缩机、水箱、水泵、大部分管路、各种指示表、传感器、人机操作屏等设计带密封检修门的全封闭式结构,有效提高液冷机组在海边的三防性能。

为提高液冷设备机柜的散热设计可靠性,将机柜插箱内模块热量通过新型均温技术或导冷板导出至插箱壁板,插箱液冷水道进而将热量带走,电子模块内不通液体,最大限度避免漏液对电子设备的影响,极大提高系统可靠性。测试试验表明,宇航级的均温板最大可以带走单板 200 W 的热量,经历了加速老化试验的考核。图 6 表示液冷系统工作原理图。图 7 表示某热量 140 W 典型模块热仿真分析温度分布图,器件壳体最高温度约为 70 °C,小于指标 85 °C 要求。

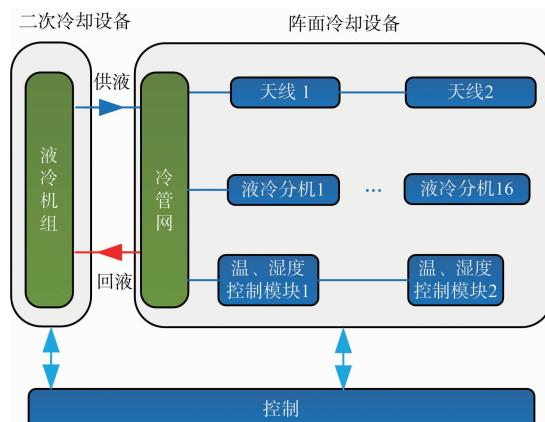


图 6 液冷系统原理图

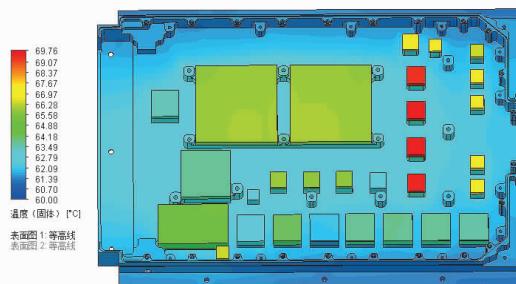


图 7 典型模块温度分布图

天线罩内温度和湿度通过罩内除湿机控制,制冷量(加热量)7 kW,指标工作环境温度-40~+55 °C范围内,控制罩内温度+10~+40 °C范围。控制湿度不大于 65%,可以有效防止凝露。环境温度 45 °C,对应罩内温度为 30 °C;罩外温度-40 °C时,罩内温度 0 °C,罩外温度-30 °C时,罩内可达 10 °C。可见在沿海各种实际环境温度下,罩内温度亦较适宜人员工作。

3 系统转场架设设计

本系统固定站天线包含多个大型阵面(每个天线由多个子阵面组成),需要经过所内总装、暗室架设调试、野外性能测试,单个天线口径大,设备最大离地高度超过 10 m,安装过程需要通过大型吊车辅助作业。调试中没有固定地基安装 T 型基座及之上大型阵面,架设危险程度高,因而需要考虑架设稳定性问题。技术上宜设计平台来解决天线架设稳定性问题,多部天线对平台需求量大,为避免造成浪费,设计一种通用平台,具有通用机械接口,满足各型固定站产品的架设所需,最大限度控制生产成本。考虑将来大量设备长途运输需要,该平台应具备货运托盘的功能,用于运输天线子阵面、液冷机组、各种机柜等,并能对运输设备进行机械保护,可加装篷布对设备进行有效防雨。该平台应能进行简单调平,满足设备架设基础水平要求。该平台宜设计集装箱通用吊装机械接口,便于长途公路运输加固和长途舰船运输加固。图 8 所示为该通用平台在室内无风环境架设示意图,考虑室内没有大风,将天线水平方向与平台长轴平行架设,可以满足室内总装及微波暗室波瓣测试架设安全要求,节省空间。图 1 天线侧视图所示,通用平台在野外有风环境下架设,将天线水平方向与平台长轴垂直架设,由于平台稳定半径超

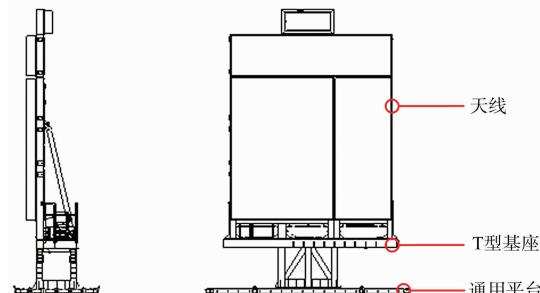


图 8 系统单台天线室内架设示意图

3 m, 计算表明, 本系统依靠设备自重及稳定半径产生的稳定力矩可以抵抗 25 m/s 大风产生的倾覆力矩。如果需要进一步提高防风等级, 可以在平台前后临时加装两块大型配重块(如图 1 侧视图), 满足 30 m/s 大风下安全工作要求。

4 结束语

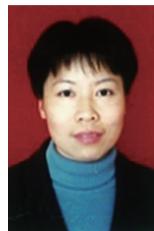
本系统虽然为固定站电子设备, 但设计中采用了大型机动雷达的设计思想, 最大限度实现单台产品中多部大型天线设备的快速转场架设, 设备各项结构性能一直稳定可靠, 研制的通用平台可以供各型号固定站产品使用, 该平台还可以通过多个平台级联扩展, 加大平台尺寸, 进一步提高产品抗风能力, 经济实用。目前产品已批量交付用户。采用同类设计思路的某海基产品大批物质经历了长途公路运输和长途过海运输的考验, 即将为该地区形成强大的战斗力。

致谢 项目研究得到 38 所张荣明、胡峰、王磊等同志大力帮助, 在此特别表示感谢。

参考文献:

- [1] 郑智潜, 杨志刚. VHF 波段宽带连续波大功率双通道功放组件的设计[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16(3):317-321.
- [2] 任恒, 房景仕, 张根烜. 微通道液冷冷板散热特性研究[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(3):343-348.
- (上接第 564 页)
- [18] LODHI M A, BAJWA W U. Union of Subspaces Signal Detection in Subspace Interference [C] // 2018 IEEE Workshop on Statistical Signal Processing (SSP), Freiburg im Breisgau, Germany: IEEE, 2018:548-552.
- [19] JONEIDI M, AHMADI P, SADEGHI M, et al. Union of Low-Rank Subspaces Detector[J]. IET Signal Processing, 2016, 10(1):55-62.
- [20] KELLY E J. An Adaptive Detection Algorithm[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1986, 20(2):115-127.
- [21] DE MAIO A. Rao Test for Adaptive Detection in Gaussian Interference with Unknown Covariance Matrix[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2007, 55(7):3577-3584.
- [22] DE MAIO A. A New Derivation of the Adaptive Matched Filter[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(10):792-793.
- [3] 莫冬传, 吕树申, 金积德. 高热流密度均温板的传热特性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(2):317-319.
- [4] 谭贵红, 吴影生, 张娜梅. 大型雷达结构的安全性设计[J]. 雷达科学与技术, 2011, 9(3):286-291.
- [5] 中国电子技术标准化研究所. 军用地面雷达通用规范: GJB74A—1998[S]. 北京: 国防科学技术委员会, 1998.
- [6] 叶尚辉, 李在贵. 天线结构设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1986:91-92.
- [7] 潘忠堂. 一种固定式荒漠型高对流层风廓线雷达结构总体设计[J]. 电子机械工程, 2019, 35(4):14-17.

作者简介:



谭贵红 女, 1970 年 1 月出生, 湖南长沙人, 合肥工业大学精密仪器系精密仪器及机械专业硕士研究生, 研究员, 长期从事大型雷达结构总体设计, 现主要从事大型侦测电子系统结构总体设计工作, 主持过多部大型雷达产品结构总体设计, 项目多次获国家级或省部级奖。

李潇峰 男, 1985 年出生, 吉林四平人, 中国科技大学近代力学系固体力学专业博士, 高级工程师, 目前从事电子设备天线和结构总体设计工作。

洪大良 男, 1985 年出生, 安徽东至县人, 高级工程师, 浙江大学制冷及低温工程专业博士, 目前从事电子设备热控结构设计工作。

林 泉 男, 1994 年 1 月出生, 工程师, 安徽安庆人, 合肥工业大学材料加工工程专业硕士研究生, 目前从事电子设备结构设计工作。

作者简介:



高永婵 女, 1985 年生, 贵州兴仁人, 工学博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达目标检测与杂波抑制、MIMO 雷达。

潘丽燕 女, 1997 年生, 山东菏泽人, 西安电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为阵列信号处理、雷达自适应目标检测。

王 扬 女, 1986 年生, 河北邯郸人, 工学硕士, 北京航天新立科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为机电设计和数据处理。

毛琳琳 女, 1991 年生, 山东泰安人, 工学博士, 中国科学院声学研究所助理研究员, 主要研究方向为阵列信号处理、信号检测与参数估计、水下无线传感器网络。