

阵列天线电磁-结构-热耦合理论:现在与未来

徐鹏颖¹, 蔺卡宾¹, 韩宝庆¹, 王志海², 于坤鹏², 尹奎英³, 冷国俊⁴,
王 艳⁵, 李 智⁶, 马小飞⁷, 王从思¹

(1. 西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230088; 3. 中国电子科技集团公司第十四研究所, 江苏南京 210039; 4. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 四川成都 610036; 5. 西安建筑科技大学信息与控制工程学院, 陕西西安 710055; 6. 西安电子工程研究所, 陕西西安 710100; 7. 西安空间无线电技术研究所, 陕西西安 710000)

摘要: 有源相控阵雷达作为支撑国家战略安全的核心装备, 承担着国家战略反导、超视距探测、反隐身侦查、远程引导打击等重大任务, 维护着我国的国土安全, 更是我国大国地位的战略支柱. 有源相控阵技术诞生于 20 世纪 60 年代的战火之中, 军事上的迫切需要使其一经问世就引起了世界的轰动, 它的出现甚至影响了世界军事的变革. 相比于传统的单脉冲、脉冲多普勒等技术, 它使雷达迈入了一个新时代, 对雷达发展产生了深远和广泛的影响. 有源相控阵雷达中每个天线单元都连接有对应的发射/接收组件, 通过控制移相器改变天线孔径上的相位分布, 实现天线不做机械转动而天线波束在空间进行快速电扫描. 因此, 相比于传统机械扫描雷达扫描惯性大、数据率有限、信息通道数少、不易满足自适应和多功能需求等缺点, 有源相控阵雷达具备微秒时间内灵活且无惯性扫描、功能多、可靠性高、数据率大、雷达反射面积低、自适应能力强、不易受到干扰等无可比拟的优势. 随着现代国防的重大需求, 雷达装备向着超视距、精准探测、极度隐身等方向持续发展, 有源相控阵天线向着高频段、高增益、高指向精度、低副瓣电平方向不断迈进, 天线的高电磁指标对结构的刚度、轻量化、高效散热等设计参数提出了严苛的要求, 天线内部各参数呈现高维度多场耦合关系, 更容易受到战场恶劣环境的干扰而恶化天线的电性能, 降低雷达的探测威力、制导精度与战场生存能力等. 有源相控阵天线被誉为“三军之眼”, 是涉及多学科交叉的典型装备, 其结构、热、电磁之间存在的相互影响、相互制约的耦合关系定义为有源相控阵天线的机电热耦合问题. 主要耦合问题有四点. 其一, 馈电误差影响天线电磁性能: 有源相控阵天线馈电网络误差、辐射单元失效、热敏电子元器件(如发射/接收组件中的移相器)性能温漂、天线单元互耦等都会引起馈电电流的幅相误差, 导致天线电磁性能恶化. 其二, 结构误差影响天线电磁性能: 有源相控阵天线制造、装配存在随机误差, 服役中振动、冲击、热功耗等导致阵面变形, 最终引起辐射单元位置偏移, 天线阵面电磁幅相分布发生变化, 导致发射波束变化, 最终使天线电性能受到严重影响. 其三, 热影响天线电磁性能: 有源相控阵天线阵面上安装有成千上万的发射/接收组件, 热功耗巨大, 一方面会导致天线阵面的结构热变形, 另一方面也会引起器件的性能下降, 最终导致天线电磁性能的恶化. 其四, 结构、热与电磁性能耦合: 三者中任一变化, 都会引起其他两个的变化. 有源相控阵雷达在不同占空比工作模式下, 其天线阵面电磁幅相会做出相应分布, 导致热功耗随之变化, 从而引起温度分布发生变化, 进而影响天线阵面的结构热变形. 因此有源相控阵天线的机电热耦合问题已成为制约其稳健发展, 进一步提升性能的瓶颈问题. 本文梳理了陆基、舰载、机载、弹载、星载不同平台上有源相控阵天线的发展动态, 分析了各武器平台上有源相控阵天线的结构特点, 归纳了“陆、海、空、天”不同战场环境的服役载荷对有源相控阵天线的影响, 然后总结了天线结构误差、天线罩高温烧蚀、T/R 组件馈电误差、天线单元失效等多重因素影响下有源相控阵天线机电热耦合机理分析与建模方法, 机电热耦合技术在有源相控阵天线制造精度、高效散热以及轻量化综合优化、稀疏阵设计等领域的应用, 以及服役环境下有源相控阵天线状态监测、位移场重构、电性能补偿等关键保障技术, 最后探讨了机电热耦合技术的未来研究方向以及在不同研究领域的应用前景.

关键词: 有源相控阵天线; 机电热耦合; 结构变形; 性能调控; 设计制造; 高效散热

中图分类号: TN821+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2022)12-2817-37

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20220414

收稿日期: 2022-04-18; 修回日期: 2022-06-29; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金(No.51975447, No.52105272); 国防基础科研计划(No.JCKY2021210B007); 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(No.2022JQ329); 西安电子科技大学新教师创新基金(No.XJS220402)

Electromagnetic-Structural-Thermal Coupling Theory for Array Antenna: Present and Future

XU Peng-ying¹, LIN Ka-bin¹, HAN Bao-qing¹, WANG Zhi-hai², YU Kun-peng², YIN Kui-ying³,
LENG Guo-jun⁴, WANG Yan⁵, LI Zhi⁶, MA Xiao-fei⁷, WANG Cong-si¹

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

2. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei, Anhui 230088, China;

3. The 14th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing, Jiangsu 210039, China;

4. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China;

5. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;

6. Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710100, China;

7. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: Active phased array radar (APAR) services play a key role in national strategic security equipment and directly support essential tasks such as the national strategic missile defense, over-the-horizon detection, anti-stealth detection, and remote guided attack. APAR technology was used during war in the 1960s and became very popular worldwide because of the emergence of urgent military needs. This technology has essentially affected the world military. Compared with traditional single pulse and pulse Doppler radar technology, APAR has helped to advance radar technologies and had a profound and wide influence on the development of radar. Each antenna element in an APAR is connected with corresponding transmission/reception (T/R) modules. By controlling the phase shifter to change the phase distribution on the antenna aperture, the antenna can be electronically scanned without any mechanical rotations while still covering the whole airspace. Therefore, compared with the disadvantages of traditional mechanical scanning radar, such as a large scanning inertia, limited data rates, a small number of information channels, and difficulty meeting the requirements of adaptation and multifunctionality, APAR has unparalleled advantages such as flexible and non-inertial scanning completed within microseconds, multifunctionality, high reliability, large data rates, low radar cross-sections of radar reflection, strong adaptability and less affected by electromagnetic interference. With the significant demand of modern national defense, radar equipment is continuously being developed with over-the-horizon techniques, accurate detections, strong stealth capabilities, etc. APAR research is advancing toward high-frequency bands, high gains, high pointing accuracies and low sidelobe levels. The high electromagnetic performance of antennas is achieved through strict design parameter requirements such as rigidity, quality of being lightweight and high efficiency heat dissipation of structures. Moreover, various parameters of antennas show high-dimensional and multi-field coupling relationships. It is more sensitive to interference from harsh battlefield environments, which deteriorates the electric performance of antennas and reduces the detection power, guidance accuracy and battlefield survival ability of radars. APAR, known as the eye of the three armies, is a piece of typical equipment involving interdisciplinary disciplines. Its structure, thermal and electromagnetic interactions and mutual restriction coupling relationship are defined as the structural-electromagnetic-thermal (SET) coupling problem of APARs. The main coupling problems include the following. (1) Feed errors affect the antenna electromagnetic performance, including the amplitude and phase errors of the feed network of APARs; failure of the radiation element, temperature drifts of the thermal sensitive electronic components (such as phase shifter in T/R module) and mutual coupling of the antenna elements will cause the amplitude and phase errors of the feed current, which will lead to the deterioration of antenna electromagnetic performance. (2) The structure errors affect the antenna electromagnetic performance, and there are random errors in the manufacturing and assembly of APARs. Vibrations, shocks and thermal power consumptions during service cause deformations of the antenna array, which eventually results in position offsets of the radiation element and changes of the electromagnetic amplitude and phase distribution on the antenna array. Moreover, this results in the change of the transmitted beam and finally, seriously affects the antenna electrical performance. (3) Thermal issues affect the antenna electromagnetic performance, and thousands of T/R modules, which consume large amounts of thermal power, are installed on APARs. On the one hand, it will cause thermal deformation of the antenna array structure; on the other hand, it will also cause performance degradation of the device and finally lead to the deterioration of antenna electromagnetic performance. (4) Changes in the coupling of structural, thermal performance and electromagnetic performance will cause deterioration. In APARs, the electromagnetic amplitude and phase of the antenna array will distribute correspondingly under different duty cycle operating modes, which results in a change in the thermal

power consumption and temperature distribution. Thus, the thermal deformation of the antenna array structure is affected. Therefore, the structural-electromagnetic-thermal coupling problem of APARs has become a bottleneck issue that hinders their steady development and further enhancements of their performance. In this paper, the development of APARs on different ground-based, shipborne, airborne, missile-borne and spaceborne platforms has been sorted, and the structural characteristics of APARs on each weapon platform have been analyzed. The influence of service loads on APARs in different battlefield environments of land, ocean, air and space has been summarized. Then, the mechanism analysis and modeling method of SET coupling of APARs affected by antenna structure errors, high-temperature ablations of the radome, feed errors of T/R modules and failures of antenna elements are discussed. Moreover, the application of SET coupling technologies in the fields of APAR manufacturing accuracy, high-efficiency heat dissipation, lightweight integrated optimization, sparse array design, etc., as well as the key guarantee technologies in service environments such as APAR condition monitoring, displacement field reconstruction, electrical performance compensation, are summarized. Finally, future research on SET coupling technologies and their application prospects in different research fields are discussed.

Key words: active phased array radar; structural-electromagnetic-thermal coupling; structural deformation; performance adjustment; design and manufacture; efficiency radiating

1 引言

20世纪60年代,有源相控阵技术的问世,彻底改变了各国观察世界的方式,先进的有源相控阵雷达(Active Phased Array Radar, APAR)成为世界的主流^[1-3]. APAR具备扫描速度快、多功能、多目标跟踪、可靠性高、抗干扰能力强等优势,已经成为战机预警和火控、卫星成像、战略导弹预警等国防领域中的核心装备^[4-7]. 然而,复杂的服役环境载荷会导致有源相控阵天线(Active Phased Array Antenna, APAA)整体性能下降,同时,随着APAA向高性能、高频段、高集成化等方向发展,其结构设计、器件热功耗与电磁性能之间的耦合关系更为紧密,机电热多场耦合问题已成为制约APAA发展的关键问题之一^[8-11].

在APAA中,普遍存在着电磁场、结构位移场及温度场之间的相互作用与影响(图1):①天线承力框架、射频组件等结构设计参数的变化影响结构位移场与电磁场;②服役环境影响会引起天线位移场、温度场的变化,制约着天线结构轻量化、散热等设计优化;③温度场变化直接影响T/R组件等电子器件的性能进而影响天线电磁场;④成千上万的T/R组件产生的高热功耗会引起温度场的变化,导致天线结构的位移场改变,进而影响电磁场;⑤位移场作为边界条件,其变化直接影响温度场与电磁场;⑥高功率电磁场会影响温度场,也会通过电磁感应影响信号传输性能. 上述耦合关系都将影响APAA的服役性能,并且随着军事需求的不断提升,对APAA的探测威力的要求也不断提高,对机电热耦合问题的研究变得极为必要.

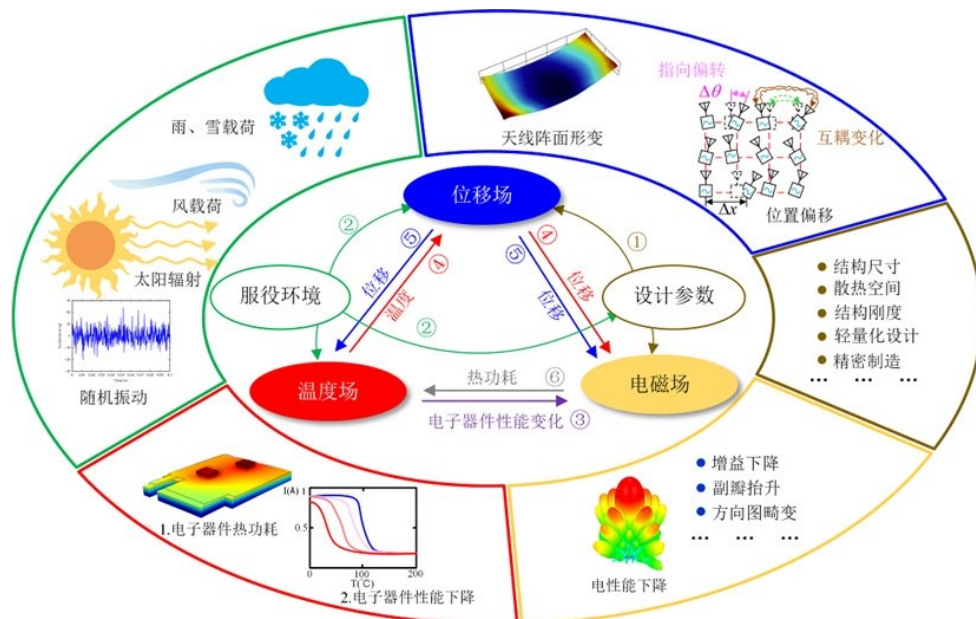


图1 有源相控阵天线机电热耦合关系

已有学者对服役载荷下各平台 APAA 的性能保障做了大量的研究工作^[12-16],并进行了相关的实验验证,取得了显著的成果,同时也有学者对不同平台 APAA 的研究进展作了很好的总结.但是,不同军事电子装备的应用领域有很大的差异,对其所搭载的 APAA 提出了不同的需求,亟需围绕不同平台的 APAA 的特点,开展对比分析^[17-21].因此本文首先阐述了不同载体平台上世界上先进 APAA 的主要性能指标与技术特点,然后分析了不同平台服役环境载荷的特点及造成的影响,之后介绍了机电热耦合理论及其在 APAA 设计制造与服役性能调控技术的应用,最后探讨了 APAA 的技术发展趋势与机电热耦合技术的未来研究目标.

2 有源相控阵天线发展动态

相控阵技术最早出现在 20 世纪 30 年代后期,美国率先开始了这项研究工作.20 世纪 60 年代,美国和苏联相继研制和装备了多部相控阵雷达,多用于弹道导弹防御系统.20 世纪 70 年代,相控阵雷达得到了迅速发展,除美苏两国外,又有很多国家研制和装备了相控

阵雷达,如中、英、法、日、意、德等.这一时期的相控阵雷达具有机动性高、天线小型化、天线扫描体制多样化、应用范围广等特点.20 世纪 80 年代,相控阵雷达因其具备的很多独特优点,得到了更进一步的应用.在已装备和正在研制的新一代中、远程防空导弹武器系统中多采用多功能相控阵雷达,它已成为第三代中、远程防空导弹武器系统的一个重要标志.20 世纪 90 年代至今,世界各国不断加深对 APAA 的研究,其在战斗机、军舰、导弹、卫星等平台不断发展,满足了现代战争对武器系统“态势感知、远程打击、精细打击”等需求.如图 2 所示,高技术的 APAA 在海陆空天电五维现代战争中发挥了巨大的作用,时至今日,世界各国都在不断发展新技术来提升雷达的探测威力与战场生存和适应能力^[12].

2.1 陆基

作为反导系统的重要组成部分,陆基战略预警雷达是不折不扣的国之重器,其造价高昂,且对机械、电子、材料等领域的综合能力有极高的要求.图 3 所示为世界上先进的战略预警雷达以及车载反隐身雷达.

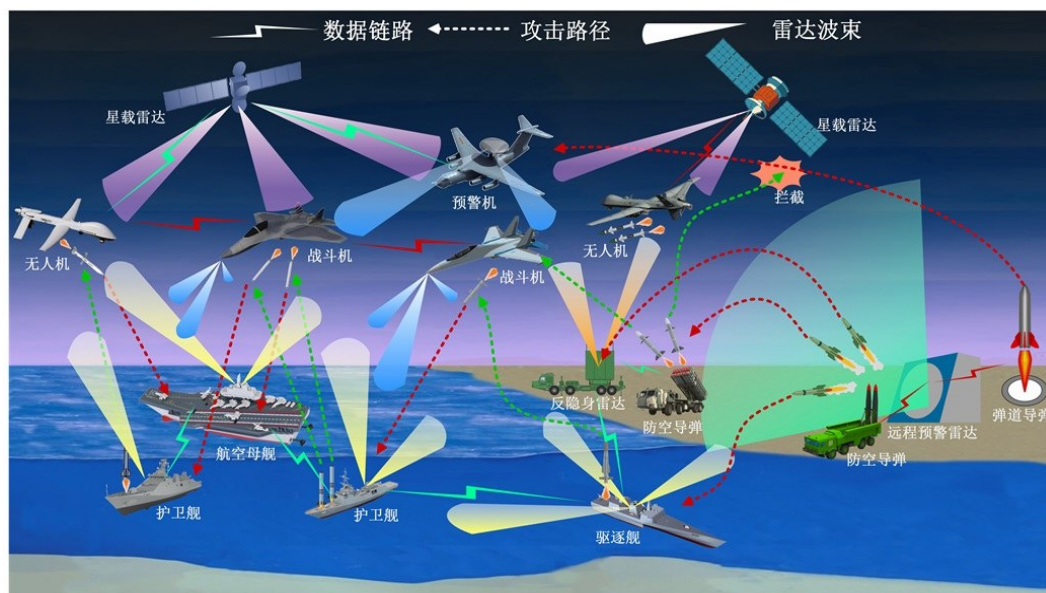


图2 海陆空天电五维现代战争

AN/FPS-85^[22]是世界上第一台大型相控阵雷达,20 世纪 60 年代建造于埃格林空军基地,主要用于太空监视.工作频段为 UHF 波段,雷达包含 5 134 个发射器和 4 660 个接收器,总输出功率为 32 MW,是唯一能够跟踪深空轨道卫星的相控阵雷达,可以同时检测、跟踪和识别多达 200 颗卫星.雷达阵面总长度 97 m,总高度 43.5 m,总建筑面积 23 225.76 m²,钢结构重量达 1 250 t. AN/FPS-108^[22]大型固定相控阵直径约为 30 m,工作频段为 L 波段,由 34 768 个天线单元组成,其中 15 360 个

是有源元件,峰值功率可达 920 kW. AN/FPS-115 是 Raytheon 公司于 20 世纪 80 年代首次部署,该雷达用于海基发射弹道导弹、探测和预警以及卫星跟踪系统,工作频率为 420~450 MHz,探测距离可达 4 800 km.由两面直径约 30 m 的圆形平面相控阵组成,安装在高约 32 m 建筑物的相邻侧面,阵面倾角 20°.每个面有 1 792 个 T/R 组件,两个阵列的波束组合覆盖范围为俯仰角 85°和方位角 240°,每个阵面的峰值功率为 580 kW^[22]. AN/TPY-2^[23]雷达被称为目前世界功能最强的陆基 X 波段



图3 世界典型战略预警雷达与反隐身雷达

APAR. 它作为“萨德之眼”在整个THAAD系统中处于相当关键的地位. AN/TPY-2 APAA面积为 9.2 m^2 ,拥有25 334个T/R组件,单个阵元峰值功率可达16 W,雷达平均功率为60~80 kW. 该雷达的探测距离最远可达2 300 km,对 1 m^2 雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的目标探测距离达1 700 km. 高分辨率和超远的探测距离使AN/TPY-2雷达成为世界上性能最强的陆基移动弹道导弹预警雷达.

Dunay-3U雷达^[24]建于1978年,工作波段为UHF,发射器有30个波导,每个波导由100 kW的发射器激发. Dunay-3U雷达连续运行了三十多年,仍然是俄罗斯海军最重要的信息设施之一. Voronezh-DM Radar是俄罗斯最新一代的预警雷达,可对空域远程监控,防止弹道导弹攻击和飞机监控,于2009年投入使用. 它由NPK NIIDAR设计,工作于UHF频段,它的射程可达10 000 km,能够同时跟踪500个目标^[24].

中国在2017年首次公开了一个P波段远程预警相控阵雷达,探测距离500 km,由于隐身战机使用的隐身涂层吸收的电磁波段大都在0.3~29 GHz范围,米波雷达正好避开了隐身战机的隐身波段,因此米波雷达具有“天然”发现隐身战机的特长. 2018年中国首次曝光巨型X波段有源相控阵多目标测量雷达系统,该款巨型雷达系统可通过机械旋转实现全空域覆盖探测. 该款雷达对 10 m^2 的目标探测距离在4 000 km左右,其信息通过指控系统提供给红旗-19拦截系统,导弹即可发射和摧毁来袭目标.

日本J/FPS-5^[25]雷达由三菱电机制造,用于探知与追踪飞机、巡航导弹、弹道导弹. 其外观为高度约34 m的六角形建筑,其中面积较大的三面上装备了APAA,3个包覆体中最大的一面内为直径约18 m的雷达,工作

在S波段. 此面APAA的主要功能为对飞机以及弹道导弹的警戒与情报处理,通常面向需要高度警戒的目标. 剩余的两面雷达直径约12 m,工作在L波段,主要任务是警戒各式飞机以作情报处理与应对. 建筑物本体可以旋转,可以视情况需要让雷达指向高威胁性的方向.

EL/M-2080^[26]是Elta公司生产的以色列陆基导弹防御雷达,工作在UHF波段,包含2 000~2 300个T/R组件,重约60 t,能同时在搜索、探测、跟踪和导弹制导模式下工作,探测范围约500 km,并且能够以3 000 m/s的速度跟踪30多个目标,并将导弹引导至距离目标4 m的范围内. YLC-8B^[27]机动式预警相控阵雷达是中国自行研制的第4代防空预警探测雷达. YLC-8B工作在UHF波段,在研制过程中重点考虑了现代战场中隐身飞机威胁. JY-27雷达是中国的VHF波段远程监视雷达,能够发现美国隐形战机,其探测空中目标距离为500 km.

2.2 舰载

现代海上战争中,舰艇所面临的主要威胁是来自空中各种兵器的攻击. 为了有效地解决水面舰艇编队在复杂电磁干扰环境下遭受的来自空中、海上,多方向、多批次饱和攻击的威胁,世界各国海军相继发展了舰载相控阵雷达(图4).

美国海军隶下的尼米兹级航空母舰(Nimitz Class)与美国号航空母舰(USS America)都装备了AN/SPS-48E^[28],它是一种大型远程三坐标防空雷达,具有强大的对空搜索及追踪能力,可以应付可能面对的空中威胁. 该雷达由ITT Exelis公司制造. APAA工作于S波段或E/F波段,峰值功率2.4 MW,天线尺寸为 $5.48\times 5.33\text{ m}^2$. 最大探测距离426 km. 天线由95个直线阵列单元排列而成,重量约2 578 kg,能在极端恶劣的环境中工作.

美国海军宙斯盾系统是当今世界上最先进的舰载



图4 世界典型航空母舰及驱逐舰

作战系统之一。宙斯盾系统的核心,是它强大的雷达系统 AN/SPY-1^[29]。AN/SPY-1 工作于 S 波段,由 4 个分别覆盖 90° 的天线阵面组成,每个阵面大小约为 $3.65 \times 3.65 \text{ m}^2$,总发射功率为 $4 \sim 6 \text{ MW}$,空域探测距离为 $320 \sim 480 \text{ km}$ 。目前,韩国研发的世宗大王级大型驱逐舰 (Sejong the Great-class)、日本海上自卫队隶下的爱宕级 (Atago class) 重型防空导弹驱逐舰以及皇家澳大利亚海军的第一种霍巴特级 (Hobart class) 专用防空驱逐舰均装备了宙斯盾系统。

美国 Raytheon 公司设计的 AN/SPY-3 是美国海军首部舰载多功能 APAR^[30]。AN/SPY-3 是一种先进的 X 波段雷达,包含 3 部天线,每面天线尺寸为 $2.72 \times 2.08 \text{ m}^2$,厚度 0.635 m ,3 部天线总重 2.5 t ,每部天线阵列由 5 000 个 T/R 组件构成,最大搜索距离约 320 km 。朱姆沃尔特级驱逐舰 (DDG1000) 是美国海军新一代多用途对地打击宙斯盾舰,装备了 AN/SPY-3,其采用先进而全面的隐身设计,使其拥有潜艇般的隐身性——在海上作业时被发现的概率远低于 10% 。AN/SPY-4 是 Raytheon 公司设计的另一部 APAR^[31],由 3 个天线阵面构成,每面阵列天线尺寸为 $4.06 \times 3.86 \text{ m}^2$,厚度 0.76 m ,3 具天线总重 10.215 t ,有效侦测距离大于 463 km 。福特级航空母舰 (Gerald R Ford Class) 由纽波特纽斯造船公司设计和建造,并于 2017 年正式服役,同时装备了 AN/SPY-3 与 AN/SPY-4 两种雷达,提高了它的海洋中的生存与打击能力。AN/SPY-6^[32] 跟 AN/SPY-3/4 一样,由多个 T/R 组件组成一个雷达模块组件 (Radar Module Assembly, RMA),通过增加 RMA,组成各种不同尺寸、不同功率的雷达。阿利·伯克级驱逐舰 (Arleigh Burke class) 装备的 AN/SPY-6 工作于 S 波段,共有 4 个天线阵面,每面阵列由 37 个雷达模块构成,T/R 组件大于 5 000 个,采用了 GaN 材料,价格和尺寸重量都比目前的 GaAs 更低,而且能承受高数倍的击穿电压,这意味着每个 T/R 组件的功

率都能得到大幅提升,雷达的探测威力更强。

库兹涅佐夫号航空母舰 (Admiral Kuznetsov) 是俄罗斯海军隶下的一艘常规动力航空母舰,是俄罗斯海军主力舰艇,于 1989 年进行海上试验^[33]。主力雷达为 1 部 4 面“Sky Watch”多功能相控阵雷达,工作频率为 $0.20 \sim 4 \text{ GHz}$,从 UHF 波段一直跨到 S 波段,每个阵面有 5 100 个 T/R 组件,具有很强的探测能力。

欧洲主流护卫舰上装备的远程搜索雷达为 SMART-L^[34],由 Thales 公司研制,已经成为欧洲北约国家海基反导的“眼睛”。该雷达安装于一个长度为 8 m 的大型框架,共有 24 个天线阵列,工作频段为 L 波段,峰值功率 132 kW ,能够在 400 km 范围内全自动检测、跟踪启动和跟踪多达 1 000 个目标。英国皇家海军最新型的伊丽莎白女王级航空母舰 (Queen Elizabeth class)、法国的地平线级大型驱逐舰 (Horizon class) 以及英国的 45 型驱逐舰 (Type-45 Daring class) 均搭载了 SMART-L 雷达。

辽宁号航空母舰是中国第一艘服役的航空母舰,搭载了 346 型“海之星”APAA^[35],该雷达是一款高度数字化的多功能 APAR,其大型 S 波段的主力天线阵列夹在两排 C 波段阵列之间,利用空气冷却系统散热。该雷达每一面安装有 5 000 个 T/R 组件,探测距离超过了 450 km ,能够探测跟踪约 100 个目标。052C 驱逐舰是中国海军中第一艘装备四面阵相控阵雷达的国产舰艇,装备 346 型 APAR,在舰桥上有 4 面弧形雷达天线阵面。346 型雷达总共诞生了 4 种改型,分别为原型、第一海基版本、346A 与 346B。其中,346A 采用了更高效的液冷方式,雷达的探测距离、抗干扰与功率得到大幅加强。目前,346A 主要安装在中国的主力军舰 052D 上。346B 则是 346A 的放大版本,主要安装在最新列装的 055 驱逐舰上,搭载了该型雷达后,055 驱逐舰探测距离跃升到了 400 多千米,整体作战能力上升了一个大

台阶。

2.3 机载

先进战斗机具有飞行性能优良、机动灵活、火力强大等优势,对于国家的领空防御具有重大意义^[36]。机载 APAR 作为战斗机的“千里眼”,是其夺取空中优势的关键。本文列举了现役世界十大最先进的战斗机,以及其匹配的先进 APAR,如图 5 所示。

F-35^[37]是一款由 C 设计及生产的单座单发战斗机,装备有 AN/APG-81 APAA。F-35 主要用于前线支援、目标轰炸、防空截击等多种任务,属于第五代战斗机,具备较高的隐身能力以及一定的超音速巡航能力。LMT

和 Boeing 联合开发的 F-22^[37]是一种极其先进的第五代单座双发战斗机,装备有 AN/APG-77 APAA。F-22 的隐身性能、灵活性、精确性和态势感知能力的结合,使得它成为当今世界综合性能最佳的战斗机。F/A-18E/F 是 Boeing 为美国海军研制的舰载单座双发超音速多用途战斗机,装备有 AN/APG-79 APAA,它主要用于海上防空,也可用于对地攻击。拥有新一代电子对抗设备,以及先进的设计使得其无论在航空母舰的飞行甲板上还是在陆地上都能较好地遂行攻击任务。F-15E^[37]是 McDonnell Douglas 以对地攻击为主要任务的双座双发超音速战斗轰炸机,装备有 AN/APG-63(V3) APAA,兼具对地攻击和空中优势能力,被称为双重任务战斗机。

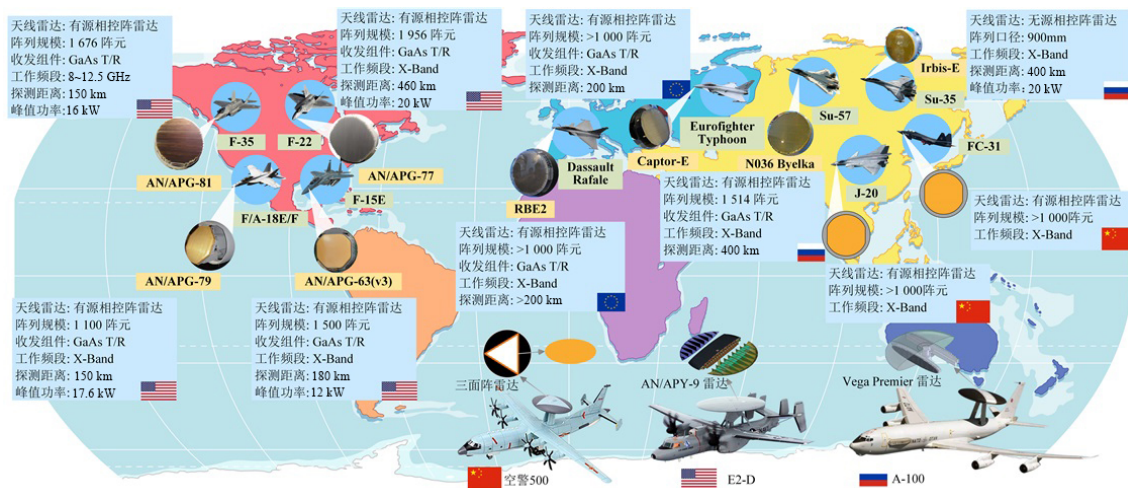


图 5 世界典型战斗机、预警机及其装备的有源相控阵天线

Eurofighter Typhoon^[38]是由 Eurofighter GmbH 设计的双发、三角翼、鸭式布局、高机动性的多用途第四代半战斗机,装备有 Captor-E APAA。灵活电子波束扫描与优异的雷达资源管理相结合,确保其能同时进行多目标跟踪、导弹制导和态势感知。Rafale^[38]是法国的一型双发、三角翼、高机动性、多用途第四代半战斗机,装备有 RBE-2 APAR,可同时跟踪 8 个目标,能自动评估目标威胁程度,排定优先顺序。

Su-57^[39]是俄罗斯空军单座双发隐形多功能重型战斗机。Su-57 的航电设备有了质的改善,不再是俄制战斗机的“软肋”。Su-57 的主力雷达为 N036 Byelka,能发现 400 km 以外的目标,同时跟踪 30 个空中目标并向其中 8 个发起攻击。Su-35^[39]是采用第五代技术的 4 代飞机,装备有 Irbis-E 无源相控阵雷达,它能够探测最远 400 km 的空中目标;此外,多功能雷达能够使用合成孔径模式提供高分辨率的地面图像。

成都 J-20^[40]是中国成都飞机工业集团制造的第五代单座双发隐形战斗机,装备有先进的 APAR,具备高隐身性、高态势感知、高机动性等能力。FC-31^[40]是中国

航空工业集团公司沈阳飞机工业集团公司研制的第五代单座双发隐形战斗机。其具有高生存力(低 RCS、低红外辐射特性、优异的电子对抗性能、低易损性设计),多任务能力(强大的目标探测和外部信息综合能力、优异的态势感知和信息共享能力、超视距多目标攻击和大离轴角全向攻击格斗空战能力、对地和海面目标精确打击能力、适应复杂气象条件和广地域使用能力),以及优异的综合保障能力。

现在战争是信息化战争,制信息权对掌握战时先机、先发制敌具有至关重要的作用。预警机被称为信息化战争空中帅府,是空中力量倍增器。预警机弥补了地面雷达网的低空探测盲区,具有低空性能好、监视范围大、生存能力强、指挥控制能力强和灵活机动等特点。其主要用于远距离探测、跟踪与识别敌方空中、地面及海面目标。发现敌情后,它会及时将情报分发给己方地面、海面指挥机构或其他作战单元。它可以独立指挥或按上级指挥机构分配任务,遂行对航空兵指挥引导,指挥其他军兵种的作战协同任务。

我国自主研发的空警-500^[41],是以运输机为载体,

集空中预警和指挥控制于一体的全天候预警机,承担空中巡逻警戒及指挥控制任务.采用数字阵列三面阵有源相控阵雷达,每一个阵面覆盖 120° 的范围,三个阵面实现了全向覆盖,由于在各个方向都实现了电子扫描,目标数据更新速率高,探测性能好,尤其对抗隐身、饱和攻击、高超声速和高机动目标性能更好.在全球各类预警机中,空警-500预警机在探测精度、同等载机平台与天线尺寸中的探测距离最远,对RCS为 1 m^2 目标的探测距离达到了480 km,能配合我军战机在远距离上以高隐身前突、抢占发射阵位;在中距离上以中隐身接敌,先敌开火、多重打击.

E-2D预警机^[42]是美国海军的一种新型舰载预警机,执行预警指挥、作战管理、战区一体化防空反导、信息分发等任务.E-2D预警机装备了新型有源相控阵AN/APY-9预警雷达系统,该雷达采用了机械扫描和电子扫描共同工作的体制,大大提高了对小型高机动目标的探测跟踪能力,增强了在濒海地区、陆地上空和电子干扰环境中的探测威力.AN/APY-9雷达采用了低频UHF波段,强化了对隐身战机的探测能力,同时采用了碳化硅技术和数字接收机技术,单一发射模块的功率从原先的800 W提高到1 350 W,还大大提高了雷达的

可靠性、灵活性和通用性.其对RCS在 $3\sim 5\text{ m}^2$ 的目标探测距离可达500 km.

A-100预警机^[43]是俄罗斯研制的新一代预警机,主要用于对空中、陆基和海基目标进行远程监视和探测,在军事行动中,为战斗机和攻击机提供空中情报、监视、侦察以及指挥和控制.其搭载的Vega Premier有源相控阵雷达采用了独特的双面阵列设计:其中一面为S波段,主要用于远距离的搜索预警和目标跟踪锁定;另一面则为专门优化过的UHF波段反隐身雷达,主要用于在高科技战争中探测诸如F22等五代战机以及B2等隐身战机.雷达每5 s旋转一周,提高了跟踪快速移动目标的能力,对小型空中目标的探测距离达到600 km,对海探测距离达到40 km,能够同时跟踪300个目标,并对其中50个目标进行中继攻击.

2.4 弹载

主动雷达是现代战术导弹雷达导引头的主流,使导弹在飞行的过程当中不需要依赖外界的导引讯号,以最有效的路线运用能量,达到更远的射程或者是在撞击目标前有更高的运动性.世界各国在20世纪末就开始了弹载APAA的工程研究.世界典型弹载有源相控阵天线如图6所示.



图6 世界典型弹载有源相控阵天线

俄罗斯的R-77^[44]空空导弹是俄罗斯的一型主动雷达制导全向全天候中距空空导弹,最大飞行速度4马赫,可打击战斗机、轰炸机、直升机、运输机和巡航导弹等各种空中目标,R-77导弹的主动雷达导引头9B-1103M-350,工作于X/Ku双波段,天线阵面直径为350 mm,对 5 m^2 RCS目标探测距离为15~20 km.R-27EA空空导弹,装备有9B-1103K的主动制导雷达,工作于Ku波段,最大飞行速度4.5马赫,最大射程130 km.R-27ER^[44]是R27中程空空导弹的变体,搭载了9b-1101k双平面单脉冲半主动雷达导引头,最大射程同样为130 km.Kh-25MAE^[45]是俄罗斯的一种轻型空对地导弹,由俄罗斯最大导弹制造商Zvezda-Strela公司生产,

采用惯性导航系统和Phazotron PSM-E主动雷达导引头,用于在白天、夜间和夜间攻击各种地面目标.Phazotron PSM-E^[45]主动导引头工作于Ka波段,扫描角度:方位角 $\pm 30^\circ$,俯仰角 $\pm 20^\circ$.导弹的射程为2.5~40 km,最高飞行速度2.4马赫.K-37是俄罗斯高超音速空对空导弹,最大飞行速度可达5~6马赫,直接攻击时射程为148 km,以巡航滑行剖面飞行时射程为398 km,装备有9B-1103M-350主动雷达导引头,该雷达工作于X/Ku双波段,天线阵面直径为350 mm,对于 5 m^2 RCS的目标,探测距离大于40 km.Kh-31A是一种俄罗斯超音速反舰导弹^[45],由MiG-29或Su-27等飞机携带,飞行速度为3.5马赫,是第一款可由战术飞机发射的超音速反

舰导弹,用于对付高达4 500 t的舰船.该导弹的最小射程为7.5 km,最大射程为70 km.搭载了Avtomatika L-112E反辐射主动制导雷达,雷达直径约为360 mm,工作波段为D~F,该天线是典型的框架式多基线干涉设计,由7个宽带半球螺旋天线组成,用于导弹俯仰/方位角的测量.由Hughes Aircraft公司研制的AIM-4 Falcon^[45]是美国研制的第一种雷达制导空空导弹,也是世界上第一种正式服役的空空导弹.该导弹于1956年在美国空军服役,飞行速度3马赫,射程为9.7 km.雷达导引头工作频段为X波段,天线阵面直径40 cm,采用双极化的工作方式.Meteor^[45]是欧洲跨国导弹开发制造商MBDA开发的一种主动雷达制导超视距空空导弹(BVRAAM),它拥有150 km的有效射程,能够以4马赫的飞行速度接近目标并将其摧毁.雷达导引头工作于Ku波段,能够在高度的电子干扰下,对远距离目标发起精准的打击.Akash-NG^[46]是由美国国防研究与发展组织参与研制的中程地对空导弹,该导弹使用Ku波段有源雷达导引头,跟踪误差小于0.1°,对0.1 m² RCS目标探测距离为10 km,最大飞行速度为2.5马赫,总射程为70 km,拦截范围为25 km.此外俄罗斯的R-27EA空空导弹装备有9B-1103K主动雷达导引头;R-27ER空空导弹装备有9B-1101K主动雷达导引头;R-77-1空空导弹,装备有9B-1348E;RVV-BD空空导弹装备有9B-1103M-350.中国的DF-21空空导弹、DF-25空空导弹、

DF-26空空导弹、PL-12空空导弹、PL-15空空导弹、HQ-9防空导弹均采用主动雷达导引头.Boeing Harpoon反舰导弹、LMT AGM-114L Hellfire Longbow空对地导弹、MIM-104 Patriot地对空导弹、Raytheon AIM-54 Phoenix远程空空导弹也均采用了主动雷达导引头.相控阵雷达导引头的出现,是制衡隐身技术的主要技术途径,重新定义了隐身时代的战场“游戏”.当前国际上主要军事强国相继突破了相控阵雷达导引头的关键技术,争先应用在精确制导武器上,相控阵雷达导引头正处于快速发展的阶段,后续发展方向拥有巨大的潜力和广阔的应用前景.

2.5 星载

星载相控阵雷达系统监视范围大,观察目标种类多,RCS小,能在空中及空间对地面及海面战场进行大范围的高分辨率的监视侦查,可用于支持战斗机的空地、空海精确识别与瞄准,故在现代战争中发挥了重要的作用.APAA因其出色的性能在合成孔径雷达上取得了成功的应用.合成孔径雷达的首次使用是在20世纪50年代后期,装载在RB-47A和RB-57D战略侦察飞机上.经过近60年发展,合成孔径雷达技术已经比较成熟,各国都建立了自己的合成孔径雷达发展计划,各种新型体制合成孔径雷达应运而生,在民用与军用领域发挥重要作用.世界各国典型合成孔径雷达如图7所示.

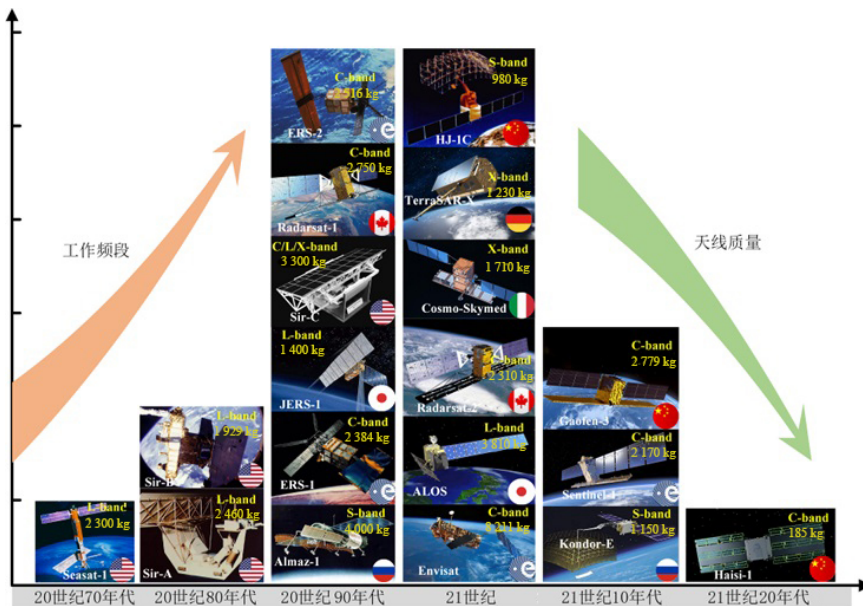


图7 世界各国典型合成孔径雷达

1978年,美国宇航局发射了世界上第一颗SAR卫星Seasat-A^[47],这标志着合成孔径雷达进入了对地观测的时代.在此之后,美国宇航局利用航天飞机分别于1981年、1984年和1994年将SIR-A、SIR-B、SIR-C成像

雷达送入太空.合成孔径雷达由最初的HH单极化、L波段SAR卫星,逐渐发展到具有4种极化方式(HH、HV、VV、VH)、多波段(L、C、X)的雷达系统.1991年,俄罗斯发射了Almaz-1卫星^[47],用于提供地球物理、农业、

地质和环境应用的雷达成像,主力雷达是一个S波段合成孔径雷达,分辨率为10~15 m.在雷达成像侦察卫星方面,俄罗斯于2013年发射了新型SAR卫星Kondor-E:聚束模式分辨率1 m,幅宽10~20 km;条带模式分辨率1~3 m,幅宽10~20 km;扫描SAR模式分辨率5~30 m,幅宽20~150 km,并具备一定的立体观测和干涉测量能力.1991年和1995年,欧空局分别发射了欧洲遥感卫星系列民用雷达成像卫星ERS-1和ERS-2^[47],主要用于对陆地、海洋、冰川、海岸线等成像,该系列卫星采用了C波段、VV极化的工作方式,可以获得30 m空间分辨率和100 km观测带宽的高质量图像. Envisat^[47]卫星是欧空局的对地观测卫星系列之一,于2002年发射升空.该卫星是欧洲迄今建造的最大的环境卫星,所载最大设备是先进的合成孔径雷达,可生成海洋、海岸、极地冰冠和陆地的高质量高分辨率图像. Envisat-1主要用于监视环境,可对地球表面和大气层进行连续的观测. Sentinel-1^[48]地球监测卫星在2014年发射,携带一个12 m长的C波段合成孔径雷达天线,其可以进行长达400 km的扫描. RadarSat-1^[48]是加拿大的第1颗商业对地观测卫星,主要监测地球环境和自然资源变化.其工作在C波段(5.3 GHz),采用HH极化方式,具有7种波束模式、25种成像方式,首次采用了可变视角的ScanSAR工作模式. RadarSat-2^[48]是加拿大继RadarSat-1之后的新一代商用合成孔径雷达卫星,它继承了RadarSat-1所有的工作模式,并在原有的基础上增加了多极化成像,3 m分辨率成像,但是比RadarSat-1滞后30 min,缩短了对同一地区的重复观测周期,提高了动态信息的获取能力. JERS-1^[48]卫星于1992年在Tanegashima空间中心被发射升空,主要用于地质研究、农林业应用、海洋观测、地理测绘、环境灾害监测等.该卫星载有源SAR,入射角固定,单一极化(HH),工作在L波段,分辨率为18 m. ALOS^[48]于2006年被送入准太阳同步回归轨道.其采用高分辨率和微波扫描,主要用于陆地测图、区域性观测、灾害监测、资源调查等.该卫星携带相控阵型L波段合成孔径雷达.其具有多入射角、多极化、多工作模式及多种分辨率的特性,最高分辨率能达到7 m.

OSMO-SkyMed^[49]卫星是意大利航天局和意大利国防部共同研发的COSMO-SkyMed高分辨率雷达卫星星座的第二颗卫星,其分辨率为1 m,扫描带宽为10 km,具有雷达干涉测量地形的能力. COSMO-SkyMed系统是一个可服务于民间、公共机构、军事和商业的两用对地观测系统,其目的是提供民防、战略用途、科学与商业用途. TerraSAR-X^[49]雷达卫星是德国第一颗卫星,由德国政府和工业界共同研制,工作于X波段,中心频率为9.6 GHz. TerraSAR-X可在514 km高的极轨道上环绕

地球,利用有源天线昼夜搜集雷达数据,无论是气象环境还是云层覆盖的分辨率精度均可达到1 m. HJ-1C^[50]卫星是环境与灾害监测预报小卫星的1颗雷达卫星,于2008年发射,也是中国首颗S波段合成孔径雷达卫星,质量890 kg,将与已经发射的HJ-1A卫星、HJ-1B卫星形成第一阶段的卫星星座.2016年, Gaofen-3^[50]在太原卫星发射中心用长征四号丙运载火箭成功发射升空. Gaofen-3是中国高分专项工程的一颗遥感卫星,为1 m分辨率雷达遥感卫星,也是中国首颗分辨率达到1 m的C频段多极化合成孔径雷达成像卫星. Gaofen-3有12种工作模式,是世界上工作模式最多的合成孔径雷达卫星.它不但能够大范围地扫描,也能够对特定的目标进行仔细勘测,具有全天候、全天时、全方位的特点.2020年,中国发射了Haisi-1,这是中国首颗对标国际先进指标的、基于APAA的百公斤级(整星小于185 kg)、1 m分辨率、C波段商业SAR遥感卫星,可以穿透云层,不受时间和恶劣条件限制,获取全天时、全天候的二维高分辨率雷达数据,将为海洋动力环境参数的遥感反演、海洋灾害监测、洪水监测和地表形变分析等提供支持.

2.6 不同平台有源相控阵天线的主要特点对比

陆基APAR属于远距离目标搜索雷达,一般都采用数MW的超高发射功率、孔径巨大的电扫描天线阵列,作用距离可达几千千米.这类雷达一般依附于高大的建筑物,阵元数量多,阵面刚度强,且内部有专门的温度控制系统,环境适应能力最强.但是地震、冰雪载荷及太阳辐射也会对其探测威力造成一定的影响.另一种比较常见的陆基APAR以车载的形式出现,这种雷达探测距离为几百至上千千米,主要用于隐身目标的识别,所面临的最大的问题是阵面刚度不足,并且其多部署于沿海或者戈壁地区,最大风速可达30 m/s,高强度的风载荷会让天线阵面末端产生较大的变形,严重制约其探测性能.各平台有源相控阵雷达特点如图8所示.

舰载APAR尺寸比陆基要小,安装于舰艇的“舰岛”,天线单元数量多,排列比陆基的更加紧密,通常装备有较好的液冷散热装置,并且安装有保护罩,防潮、防霉菌、防盐雾是其主要面临的挑战.

机载APAR,主要面临的挑战是高热功率.由于战斗机的气动性要求,APAA的尺寸受限于前部“鼻锥”尺寸,天线阵元数量多且排列紧密,工作会产生大量的热能,虽然机载雷达一般会装备液冷设备,但是其产生的高温仍会使天线阵面产生轻微变形,并且会使天线电子器件性能下降,影响雷达的探测性能.

制约弹载APAA辐射性能的主要原因是高温烧蚀.弹载天线在高速飞行过程中,周围空气受到弓形激

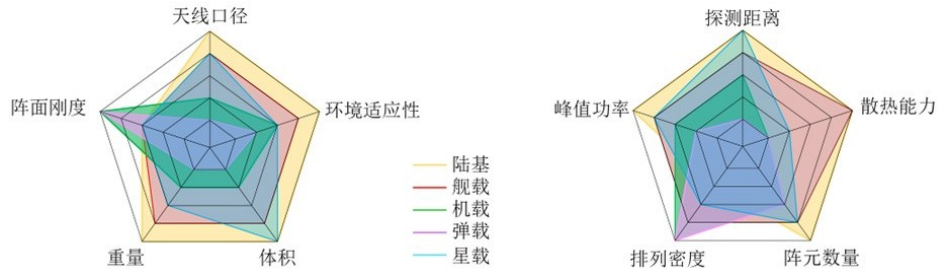


图8 各平台有源相控阵雷达特点

波的强烈压缩,与天线罩表面产生剧烈摩擦,使天线罩表面温度急剧上升,可达几千摄氏度.超高的温度会导致罩体的材料属性和厚度发生严重变化,由于热辐射和热传导作用,天线罩的剧烈升温也会导致内部天线阵面温度升高,加上紧密排列的天线阵面自己产生的大量热能,最终导致天线阵面产生变形.天线的辐射性能严重恶化,导致制导精度严重降低.

星载 APAA 主要面临太空复杂热环境的影响.在进出地球阴影区域时,天线阵面上会存在很大的温度梯度,这会导致星载天线的结构发生热颤,产生严重的动态结构形变,降低星载 APAA 的辐射性能,导致星载 APAA 的分辨率、成像精度等被严重影响.

3 有源相控阵天线机电热耦合理论

APAA 作为高度集成化的电子装备,其机械结构和馈电网络异常复杂,结构、热、电磁等方面都会存在众

多的误差.在讨论 APAA 的机电热耦合内涵之前,先对其存在的各种误差进行归类.

(1)按误差来源可分为馈电误差和结构误差.馈电误差包括辐射单元失效、激励电流幅度和相位误差、器件性能温漂、辐射单元互耦、数字移相器相位量化误差等.结构误差包括两方面:一是天线在制造和安装过程中存在的误差,二是天线服役中环境载荷和温度分布导致的结构变形.需要指出的是,实际应用中结构误差也会引起馈电误差,如馈电阻抗变化、极化方向不一致等.

(2)按误差类型可分为随机误差和系统误差.随机误差无法事先预测,如激励电流的幅度和相位随机误差、天线单元的失效率、天线阵面制造时产生的误差、阵元安装中存在的位置误差等.系统误差可以事先预计并严格控制,如辐射单元互耦、数字移相器相位量化误差、载荷下的天线阵面结构变形等,主要误差归类见表 1.

表 1 有源相控阵天线的误差归类

误差来源	误差类型	
	随机误差	系统误差
结构误差	天线制造、安装误差	载荷变形(自重、风、振动、热等)
馈电误差	激励电流幅相误差、辐射单元失效	辐射单元互耦、T/R 组件性能温漂、数字移相器相位量化误差

3.1 天线阵面结构误差影响

APAA 服役中环境载荷会导致阵面变形,天线制造、装配过程中也会产生随机误差,最终影响阵元的位置,使其在天线口面产生新的相位差分布,甚至引起阵元的最大辐射方向发生偏移,如振子单元、印制偶极子等阵元将随着反射板的变形,不再有规律地平行排列,

导致阵元互耦合方向图发生改变.这些因素都会直接影响天线的电性能,因此必须建立机电热耦合公式快速评估天线性能的影响程度,为后续补偿提供有力的支撑.对 APAA 阵面结构误差造成影响的问题,可以归纳为三类:天线阵面位置偏移、天线单元互耦影响、天线单元局部变形(图 9).

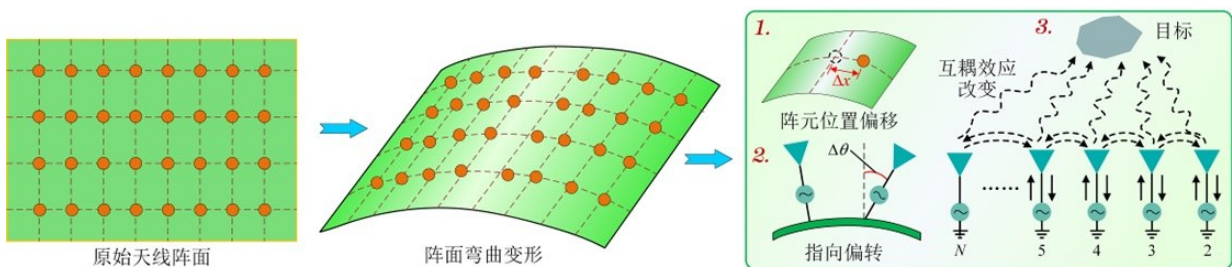


图9 有源相控阵天线机电热耦合关系

(1)阵列天线位置偏移对电性能影响分析. Arnold 等人^[51]分析了安装在机翼上的阵列天线,飞行过程中气流载荷导致的结构弯曲变形对天线探测性能的影响;Takahshi 等人^[52]指出太空环境中温度变化会导致星载相控阵天线热变形,严重影响天线的辐射性能. 以上研究表明,服役环境载荷会导致天线结构变形,恶化天线辐射性能,包括增益,指向精度和副瓣电平. 目前,在研究结构变形对天线辐射性能影响方面,Wang^[53]将阵面变形假设为两种典型的变形形式,即碗状变形和弯曲变形,分析辐射性能在不同变形下的变化,结果表明只有将阵面结构误差控制在1%波长范围内,才能获得-10 dBi的平均副瓣电平;Ossowska 等人^[54]分析了随机变形、对称变形和非对称变形三种变形对 SAR 天线辐射性能的影响.

(2)天线阵元互耦影响分析. APAA 阵元间的互耦与激励电流幅相误差不同的是,互耦影响还不能随意减小,只能通过某种方法加以补偿. 当阵元数减少或要求的副瓣电平较低时,特别是在波束扫描情况下,互耦对阵列天线有较大的影响,必须进行补偿. 例如,Anselmi 等人^[55]以及 Rocca 等人^[56]研究了相控阵天线阵元间电磁互耦问题的建模,以及互耦的削弱或补偿问题;张玉洪等人^[57]在考虑阵元互耦的情况下,推导了线阵激励电流幅相随机误差与平均功率方向图之间的关系式,并分析了不同阵元数和不同幅度加权时的误差影响情况.

(3)天线单元局部变形对电性能影响分析. 阵面发生结构变形不但会导致天线单元发生位置偏移,单元形貌往往也会发生变化. Bai 等人^[58]研究了微带天线沿不同方向弯曲变形对辐射方向图的影响;Geng 等人^[59]以具有缺陷的结构的微带天线为研究对象,分析了天线单元弯曲程度对电性能的影响,结果表明通过对结构参数的改变,变形后的天线可在各个频段正常工作,

为实现微带天线多频段设计提供了思路;Wu 等人^[60]针对非平面的微带阵列天线展开了研究,并指出非平面结构对微带天线电性能影响很大,但是可以通过调整激励幅相的方式对提升天线的电性能;韩如冰^[61]对星载阵列天线在环境载荷下微带单元弯曲变形问题进行了研究,并提出了运用等效尺寸模型法,来对变形单元进行数学表征,且通过仿真实验验证了该方法在一定变形程度下具有很好的准确性.

西安电子科技大学电子装备结构设计重点实验室自 20 世纪 90 年代以来,一直致力于研究天线结构位移场、温度场与电磁场之间的耦合影响关系,分析了机械振动、风荷、太阳照射等导致的结构变形对天线电性能的影响,王从思、康明魁、王艳等人^[62-64]针对 APAA,深入研究了天线的机电热耦合问题,建立了结构-热-电磁三场耦合模型,可以用于定量分析结构变形、温度变化对 APAA 电性能的影响.

3.2 天线罩结构与物性参数影响

天线罩位于弹载 APAA 的前端,保障弹载天线在超声速、高超声速飞行时可靠工作. 为了实现精确制导,弹载天线的电性能要求极高^[65]. 然而,在高速飞行过程中,天线罩表面与气流因摩擦阻滞产生气动加热现象,导致罩体表面温度急剧升高,在罩体外表面以及法向厚度上产生极大的温差,最终导致天线罩发生高温烧蚀,随着飞行速度的增加,该现象会更为严重,如图 10 所示. 高温烧蚀对弹载天线的影 响 主 要 包 括:(1)高温改变天线罩的材料参数,如相对介电常数和损耗角正切;(2)高温导致天线罩表面发生烧蚀,使罩体厚度改变;(3)天线罩高温会通过辐射和传导使罩内天线温度升高,导致阵元产生馈电误差,最终弹载天线的电性能发生恶化. 在高温烧蚀影响下,天线罩的材料参数和厚度均会发生改变.

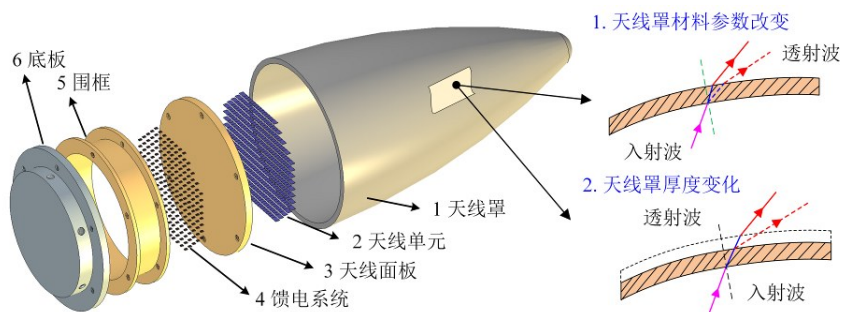


图 10 天线罩材料参数与厚度变化影响示意图

Husain 等人^[66]将天线罩结构简化为二维剖面结构,仿真分析气动热影响下天线罩表面温度分布. 然而随着飞行高度和攻角的变化,天线罩会产生非对称的温度分布,因此应以三维罩体结构为对象进行热分析. 此外,当罩体温度升高至接近材料的熔点,天线罩

表面会开始熔化产生烧蚀,应在分析罩体温度场的同时增加考虑天线罩表面的烧蚀形貌. Qin 等人^[67]提出高速飞行中天线罩会产生烧蚀层,严重影响天线电性能,然而他们仅假设了该烧蚀层具有固定厚度和材料参数,并未分析实际烧蚀情况下天线罩的表面形貌.

Weckesser^[68]研究了某飞行器天线罩在自动寻的阶段某时刻下,罩体表面温度变化引起的材料参数变化,及其对扫描过程中天线罩指向误差的影响. Nair 等人^[69]以平板罩体为例,根据罩体法向温度梯度在 25~1 200 °C 之间材料参数的变化,利用非均匀平面层模型,研究了天线罩插入相位移、透射系数和反射系数的变化. Nair 等人^[70]根据天线罩物性参数随温度变化的测试数据,分析了天线扫描过程中天线罩温度变化时透射系数、指向误差以及交叉极化电平的变化规律. 当同时考虑天线罩温度变化与烧蚀影响时,目前工作仅研究了天线罩在固定的烧蚀厚度与材料参数影响下天线的辐射性能变化^[67].

3.3 天阵元馈电误差影响

馈电误差对天线电性能的影响主要分为 3 个方面.

(1) T/R 组件性能温漂

APAA 的 T/R 组件越多,频率越高,组件排列越紧密,天线阵面的热功率密度越大. 温度会导致天线器件性能的恶化,改变激励电流的幅度和相位,进而影响天线电性能. 目前研究温度变化对 T/R 组件馈电电流的影响,主要是从对电路模型进行热-电磁分析以及采用实验测试两方面进行. Zhong 等人^[71]研究了温度对雷达 T/R 组件的影响,搭建了 T/R 组件的简化电路模型,给出了电路性能随温度的变化. 屈扬^[72]建立了 S 频段移相器的电路模型,仿真分析了不同温度下电路模型输出的激励电流幅度和相位变化. 以上工作为研究热对 T/R 组件性能的影响提供了理论基础,然而 T/R 组件内部电路繁杂且互相关联,为获得温度的准确影响,需进一步进行深入研究. 采用实验测试并结合工程经验给出温度影响下 T/R 组件输出激励电流的幅度和相位误差^[64],也是目前常用的方法. 段宝岩等人^[73]将工程中 T/R 组件输出激励电流的测量数据和相关组件研制经验进行结合,获得了温度对 T/R 组件激励电流幅度和相位的影响关系. 根据工程中某型号 T/R 组件的测试结果与数据分析,在一定的温度范围内,温度对激励电流归一化幅度的影响为

$$1 + \Delta I_n(T) = \begin{cases} 0.99, & 25 \leq T < 30 \\ -0.00179T + 1.0536, & 30 \leq T < 86 \\ 0.5 \frac{T-86}{6} - 0.15, & 86 \leq T \leq 100 \end{cases} \quad (1)$$

同时,基于大量工程测试结果与数据统计分析,在一定温度变化范围内,激励电流的相位误差(单位:°)与温度的关系为

$$\Delta \varphi_n(T) = \begin{cases} -1/130T + 2.5, & 25 \leq T < 30 \\ 2.3, & 30 \leq T < 50 \\ 0.03T + 0.8, & 50 \leq T < 70 \\ 2.9, & 70 \leq T \leq 100 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 阵面电源纹波

阵面电源纹波指其输出直流电压上叠加的交流波动分量. 阵面电源纹波系数是指输出纹波电压的峰峰值与输出直流电压的比值,它是衡量阵面电源性能的关键指标之一. 当阵面电源为 T/R 组件供电时,阵面电源纹波会对 T/R 组件中的激励电流产生幅度调制和相位调制,导致电流产生幅相误差^[74]. 当阵面温度升高时,阵面电源内部电子器件的性能温漂会改变电源纹波,致使 T/R 组件输出的激励电流也随之改变. Wong 等人^[75]研究了不同级别的偏置电源纹波电压对雷达中大功率放大器输出频谱的影响. Abe 等人^[76]分析了在高功率应用中电源纹波的变化对多波束速调管输出相位的影响. 杨昆^[77]从统计学原理出发,研究了电源纹波对低噪声放大器噪声性能的影响机理. 魏智^[78]研究了高压电源纹波导致的射频放大器幅度和相位失真,对 MTI 雷达发射机质量的影响. 张薇^[79]分析了行波管放大器中电源纹波对该放大器输出性能的影响. 谭贤四等人^[80]研究了电源纹波对线性调频脉冲雷达性能的影响,并指出发射机放大链路供电的电源纹波会导致信号的幅相失真. 王从思、王艳等人^[63]认为,阵面电源纹波是随时间周期变化的函数,其导致的 T/R 组件输出激励幅度和相位变化量也会随时间发生改变. 用阵面电源纹波系数 $\gamma(T)$ 表征了纹波电压为峰峰值时与输出直流电压的比值,阵面电源纹波导致的激励幅度变化范围为 $[-0.5I_n\gamma(t, T), 0.5I_n\gamma(t, T)]$, 导致的电流相位变化范围为 $[-50S_a\gamma(t, T), 50S_a\gamma(t, T)]$. 为了定量分析在一个纹波周期 T_γ 内,阵面电源纹波导致的激励电流幅度和相位误差对天线电性能的影响,在以上电流幅度和相位的变化范围内分别选取均匀分布的幅度误差和相位误差,计算在其影响下的平均电性能作为阵面电源纹波对机载天线电性能的影响. 因此,阵面热功耗环境下,阵面电源纹波对激励电流调制后,激励幅度变为

$$I'_n[\gamma(t, T)] = I_n + \Delta I_{nr}[\gamma(t, T)] \quad (3)$$

其中, $\Delta I_{nr}[\gamma(t, T)] \in [-0.5I_n\gamma(t, T), 0.5I_n\gamma(t, T)]$ 表示激励幅度变化范围内的幅度误差.

阵面高热功耗影响下,阵面电源纹波导致的激励电流相位变为

$$\varphi'_n[\gamma(t, T)] = \varphi_n + \Delta \varphi_{nr}[\gamma(t, T)] \quad (4)$$

其中, $\Delta \varphi_{nr}[\gamma(t, T)] \in [-50S_a\gamma(t, T), 50S_a\gamma(t, T)]$ 表示激励相位变化范围内的相位误差.

(3) 移相器量化误差

数字移相器结构简单,移相值稳定,APAAT/R 组件中通常使用数字移相器. 但是,数字移相器的移相值并不连续,只能以某个最小相位的整数倍进行移相,这样

天线所获得的相位称为量化。因此, APAA 中产生了一类新的特殊问题, 尤其是低副瓣或超低副瓣 APAA, 数字移相器相位量化误差导致天线波瓣中出现一系列的寄生副瓣, 最终使整个天线的副瓣电平抬升^[81]。高铁等人^[82]采用概率统计方法, 给出了数字移相器相位量化误差与天线最大副瓣电平抬升量之间的估算公式, 将最大副瓣电平抬升量表达为天线的口径效率、辐射单元数、理想情况下的副瓣电平和数字移相器位数的函数。在工程应用中, 通常采用四舍五入法、舍位法、进位法等随机馈电方法来减少相位量化误差的影响。张光义等人^[83]研究了随机馈电法对相位量化误差影响的抑制。杨洲等人^[84]运用蒙特卡洛方法在求解非线性方程组的基础上, 分析了天线的波束在一定偏移下各个移相器取值的误差, 并计算了在移相器误差正态分布的情况下天线方向图的角度偏移概率。

(4) 馈电误差对天线电性能影响分析方法

日益复杂多变的现代战场环境对雷达装备的搜索精度、跟踪精度和武器精确制导以及雷达的隐身性能、电子对抗性能提出了更加严苛的要求。为了确保雷达天线在现代战争中夺取制空权的优势, 馈电误差对有源相控阵天线造成的指向精度降低、旁瓣电平恶化, 抗干扰能力降低等影响已成为不可忽视的关键问题。国内外大量学者对分析馈电误差对 APAA 电性能的影响的方法进行了长期和深入的研究, 相应的研究方法主要分为 3 类。

(a) 基于区间理论的分析方法。Rocca 等人^[85]于 2013 年首先引用区间算法来评价区间激励幅度对有源相控阵天线电性能的影响。同年, Anselmi 等人^[86]首先采用区间算法来评估区间激励相位的影响。在这两位的启发下, 区间分析方法在天线设计领域的应用受到广泛的关注。但是, 其本质的区间扩张效应阻碍了区间分析方法的广泛应用。为了解决这个问题, He 等人^[87]提出了一种基于矩阵的区间法, 对激励幅值误差进行阵列天线方向图的容差分析, 取得了较好的效果。Tenuti 等人^[88]提出了一种基于闵可夫斯基和算法的天线电性能区间确定方法, 从算法的角度准确地评估了区间误差对有源相控阵天线电性能的影响。Peng 等人^[89]假设相控阵天线单元上存在不相关的随机相移误差, 并使用泰勒级数展开式推导出相控阵相移误差对天线方向性的影响关系。Kim 等人^[90]假设激励电流幅度比和相位差的不稳定性服从均值为零的均值高斯随机变量, 基于一阶和二阶泰勒展开式定量分析了幅度比不稳定性与相位差不稳定性对交叉眼天线增益下降以及天线性能退化的影响。Du 等人^[91]建立了基于混沌多项式展开法的代理模型来快速预测随机干扰下天线的辐射远场辐射性能, 并对随机变形下的偶极子天线

进行了验证, 结果表明与有限元仿真相比, 使用代理模型在保证计算精度的同时, 时间成本大大降低。吴琦等人^[92, 93]采用混沌多项式方法构造实验设计, 获得了随机相位误差下天线阵列因子和最大波束方向的代理模型。为了量化随机馈电相位误差对阵列天线电性能的影响, 他们利用插值的方法建立了混沌多项式系数与天线观测角之间的关系, 从而显著降低了混沌多项式的计算成本。王从思、袁帅等人^[94]建立了简洁的 APAA 电性能区间与阵元位置/激励相位区间误差间的积分泰勒代理模型, 并提出了基于积分泰勒代理模型的 APAA 电性能区间确定方法。与当前流行的区间算法相比, 当输入区间参数的区间宽度相同时, 他们提出的方法能够大幅提高 APAA 功率方向图函数区间的计算精度。他们基于先验知识提出了同时存在阵元位置、激励幅度和相位区间误差时 APAA 电性能区间的高效确定算法。

(b) 基于概率统计的分析方法。早在 1952 年, Ruze^[95]便率先利用概率统计方法研究了孔径误差对天线方向图的影响, 同时研究了激励电流幅相误差对天线副瓣电平的影响。Elliott^[96]推导了天线副瓣电平误差的表达式, 建立了幅相随机误差方差与天线副瓣电平的关系式, 探索了空间馈电相控阵天线的远区副瓣电平的抬高原因。Rondinelli^[97]研究了幅相随机误差影响下的天线副瓣电平和波束指向的变化情况。Kaplan^[98]研究了幅相随机误差对线性阵列天线的副瓣电平、方向性和波束宽度的影响, 并给出了误差与副瓣电平的关系曲线。Hsiao^[99]将最大副瓣电平作为阵元不确定性参数的函数, 然后利用概率统计方法研制出设计曲线, 使得设计者可以选择一个预期的最大副瓣电平, 以确定相应的参数容差。

(c) 基于数值仿真的分析方法。Lange^[100]在分析馈电幅相随机误差影响时对比了统计抽样方法和线性分析方法的差异。Lee 等人^[101]采用蒙特卡洛方法确定了激励电流幅度和相位误差的公差。Sascha 等人^[102]利用软件分析了激励电流的相位误差对天线方向图的影响。张士选等人^[103]结合计算机程序模拟了激励电流的分布误差, 并计算了天线的远场方向图。周强峰等人^[104]结合粒子群算法和混沌技术, 建立了阵列天线电性能处于最坏情况下的容差分析数学模型, 取得了良好的效果。

3.4 机电热耦合模型

APAA 服役过程中的环境载荷会导致阵面结构变形, 使阵元发生偏转和位置偏移。同时, 温度也会导致天线中器件性能下降, 引起天线电性能恶化。反之, 天线的高性能指标又会对结构和散热提出更苛刻的要求。因此, 天线结构、热与电性能之间存在相互制约、相

互影响的机电热耦合问题,而研究 APAA 机电热耦合问题的关键是找到结构、热与电磁之间相互影响的数学

关系式,建立机电热耦合模型.图 11 所示为弹载有源相控阵的机电热耦合示意图.

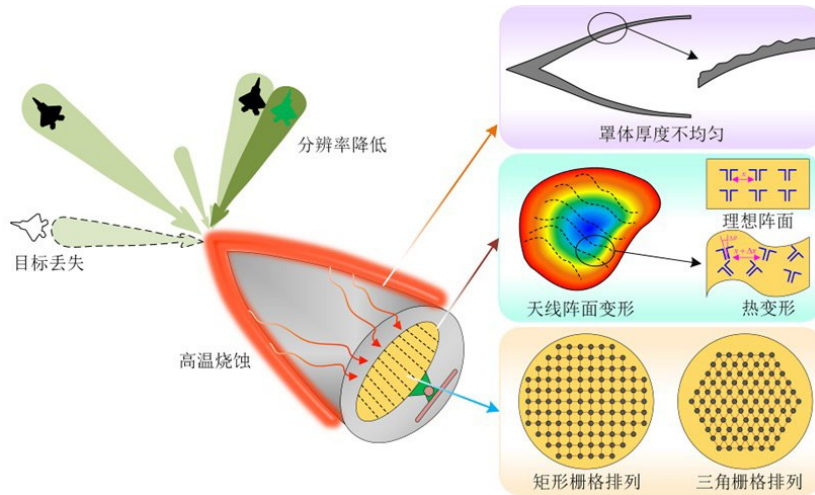


图 11 机电热耦合模型示意图

(1) 机电耦合模型建立

针对 APAA 中结构、热、电磁之间存在的相互影响、相互制约的关系,西安电子科技大学电子装备机电耦合实验室的王从思、王艳、康明魁^[62,63]等研究并建立了矩形栅格、三角栅格、带罩天线以及雷达探测的机电耦

合模型,并分别考虑了阵元位置误差和指向偏转、阵元互耦以及器件性能温漂等重要因素,为 APAA 的机电热耦合研究做出了突出的贡献.下面以高温烧蚀影响下天线罩和天线性能的影响为例,建立弹载 APAA 的机电热耦合模型.

$$E_s(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N f_n(\theta, \phi) [A_n + \Delta A_m(T) + \Delta A_{np}(T)] \exp \left\{ j [\varphi_n + \Delta \varphi_m(T) + \Delta \varphi_{np}(T)] \right\} \times \exp \left\{ jkr_n \hat{r}_0 \right\} \left[T_H'^2 \cos^4 \phi_M + T_V'^2 \sin^4 \phi_M + 2T_H'T_V' \cos^2 \phi_M \sin^2 \phi_M \cos \delta \right]^{1/2} \exp \left[-j(\eta'_H - \phi'_M) \right] \quad (5)$$

其中, $f_n(\theta, \phi)$ 为天线阵元方向图, $I_n = A_n \exp \{ j\varphi_n \}$ 为天线阵元激励电流, A_n 和 φ_n 分别为其幅度和相位; T/R 组件中, 电子器件性能温漂导致的馈电幅相误差分别为 $\Delta A_m(T)$ 和 $\Delta \varphi_m(T)$, 阵面电源纹波导致的幅相误差分别为 $\Delta A_{np}(T)$ 和 $\Delta \varphi_{np}(T)$; T_H' 和 T_V' 分别为在高温烧蚀影响下, 入射电磁波水平极化场和垂直极化场透射系数的幅值; ϕ_M 为电磁波的极化角; $\phi'_M = \arctan \left[T_V' \sin^2 \beta \sin \delta_i / (T_H' \cos^2 \beta + T_V' \sin^2 \beta \cos \delta_i) \right]$, 其中 $\delta_i = \eta'_H - \eta'_V$, η'_H 是水平极化场的插入相位移; η'_V 是垂直极化场的插入相位值.

(2) 雷达探测模型

雷达通信的概念约在 21 世纪初被提出来^[105]. Hall 等人研究了损耗因子对雷达探测性能的影响, 深入讨论了雷达虚警概率、脉冲积累与雷达探测性能的关系. Blake^[106]研究了关于雷达作用距离方程估算的问题. 该方程总结了之前雷达方程的优点, 并引入了很多外界因素诸如噪声温度、多路径干涉等, 给出了较准确的雷达距离方程. Skolnik^[107]完善了雷达探测距离方程, 主要讨论了雷达环境因素对雷达探测距离的影响. Brenna 等人^[108]分析了雷达探测精度的方法, 针对信号

样本提出了很好的方法. Nester 等人^[109]推导出了天线幅相误差和雷达波束指向精度的定量关系. Hsiao^[110]提出了波束指向和 3 dB 波瓣宽度对雷达探测性能的影响, 指出了低副瓣会有较好的容差.

以机载 APAR 天线为例, 其中影响机载雷达探测性能的主要性能指标包括雷达最大探测距离、雷达分辨特性以及雷达探测精度等. 西安电子科技大学团队建立了从阵列天线结构形变到天线的电性能指标再到雷达的主要探测性能的联系, 即通过阵列天线阵元位置误差, 以达到快速预测雷达的探测性能的目的^[111]. 他们主要开展了以下三方面的研究: ① 雷达最远探测距离与天线结构形变的耦合模型; ② 雷达距离分辨率及雷达速度分辨率与天线阵面变形量的耦合模型; ③ 雷达测距精度及雷达测角精度与天线阵面结构变形的机电热耦合模型.

(3) 面向散射的机电耦合模型

服役环境导致天线结构变形时, 在天线阵元位置误差降低天线辐射性能的同时, 阵元反射出的散射波在空间的相位分布也会发生变化, 从而使天线的散射性能也发生改变. 目前的研究主要集中在对天线辐射性能的分析与综合^[112], 对散射性能的研究较少. APAA

的散射场具有结构模式和天线模式两种类型,两者的矢量叠加构成了 APAA 的 RCS,天线结构模式项、天线模式项以及两者之间的相位差解析计算通常十分复杂. Lu 等人^[113]将 RWG 基函数的矩量法和天线电场积分方程结合研究了阵列天线的散射场. Yuan 等人^[114]为计算任意形状微带贴片天线的散射性能,给出了一种综合预修正快速傅里叶变化和离散复镜像的方法. Tanaka 等人^[115]基于矩量法,分析了锥形缝隙阵列天线的散射场,并与测量结果进行了对比. 池越等人^[116]在忽略天线阵元互耦合边缘效应的情况下,将阵列天线的散射场表示为天线阵元因子和阵列散射因子的乘积. 以上研究工作为天线散射场的计算和分析提供了一定的基础,然而,并未考虑天线结构存在结构误差影

响时,天线散射场的变化情况. 西安电子科技大学团队建立了 APAA 的结构与散射阵因子耦合模型,研究了天线单元位置误差对增益及 RCS 的综合影响,并在以上基础上应用粒子群优化算法,优化了阵面所有辐射单元的安装高度,在保证 APAA 辐射性能的同时,有效缩减了 RCS^[117].

4 机电热耦合技术在有源相控阵天线设计制造阶段的应用

4.1 环境载荷影响分析

不同环境载荷对 APAA 电性能的影响机理不同(图 12),因此,本文从不同的影响机理以及载体平台出发,归纳总结服役环境载荷对 APAA 电性能的影响(表 2).



图 12 有源相控阵天线在各平台所受到的服役载荷

表 2 不同载体平台 APAA 服役环境载荷

载体	服役环境载荷	
	主要环境载荷	其他环境载荷
陆基平台	太阳照射(阴阳面温度梯度)、风荷	冰雪、地震
舰载平台	湿度、盐雾、霉菌	颠簸、太阳照射、风荷
机载平台	阵面高热功耗、振动	冲击
弹载平台	高温烧蚀	阵面热功耗
星载平台	进出阴影区温度梯度、太空热辐射	阵面热功耗

4.2 天线阵面制造精度分析

天线的制造精度对天线辐射性能有较大的影响. 近年来,有很多学者针对机构精度与天线电性能之间的耦合关系展开了研究. 苏力争等人^[118]从随机误差与系统误差两方面分析了结构精度对天线极化特性的影响. 胡雪梅等人^[119]通过建立天线阵面结构误差与天线电性能之间的结构-电磁耦合模型,给出了天线平面度和阵元安装精度与天线电性能之间的关联关系. Wang^[120]分析了机械误差和结构变形对平面天线性能

的影响,并详细计算了二种变形模式对相控阵天线法向和扫描副瓣性能的影响. Zaitsev 等人^[121]量化了 Z 向起伏对天线波束指向、副瓣电平、增益等性能的影响. 刘炳辉等人^[122]结合雷达结构中与时空高度关联的阵面表面精度、天线座轴系精度、阵面位置精度和标校精度,逐个分析了各误差影响因素对结构精度的影响.

在天线阵面公差设计中,基于 Monte Carlo 方法,建立天线阵面的制造精度与电性能之间的结构-电磁耦合模型是非常常见的. Mobrem^[123]基于 Monte Carlo 方法,评估了平面天线与周边桁架式网状天线的型面精度误差. Cui 等人^[124]采用 Monte Carlo 方法,研究了一种反射面天线的铰链重复精度及型面加工精度对整体型面精度误差的作用. 何海丹等人^[125]认为在采用 Monte Carlo 法分析平板裂缝天线辐射缝加工误差与相对电性能关系时,可以将波导的尺寸误差、缝隙的尺寸误差及其偏置的误差一并考虑,能有效提高矩量法结合计算速度. 刘芑^[126]应用了优化拉丁算法、遗传算法、蒙特卡洛算法三种方法对星载天线反射面结构进行系统化设计,

得到了全局最优的设计结果,提高了设计效率。

可以通过调整天线结构和阵元位置实现阵列天线辐射和散射性能的综合最优。张帅等人^[127]通过调整阵元间距优化了阵列天线的辐射和散射特性。仿真结果表明,辐射方向图峰值副瓣电平降低,单站 RCS 的栅瓣得到了有效抑制。Wang 等人^[128]将电场积分方程及 RWG 基函数的矩量法结合对天线几何参数进行优化,在满足阵列天线的辐射性能的同时,降低了 RCS。丛丽丽^[129]将具有各向异性的超表面单元在传统金属接地板周围交错布阵,同时采用 mushroom 结构作为天线辐射口径,在提升天线辐射性能的同时,实现了宽带带内、带外 RCS 减缩。以上都为传统优化方式,一般只能对 RCS 散射峰值进行缩减,存在 RCS 主瓣优化效果不佳、机械结构设计与制造加工困难等问题。王伟锋等人^[117]提出了一种简单、有效、快速的兼顾辐射和散射性能的 APAA 综合设计方法,通过建立 APAA 散射因子 RCS 结构与电磁耦合模型,并利用 PSO 优化算法对辐射单元安装高度进行优化调整,结果表明可以在满足辐射性能要求同时大幅缩减 RCS。康明魁等人^[62]从机电热耦合的角度去研究阵元位置安装随机误差的影响机理,利用三角形栅格平面阵的结构-电磁耦合模型,通过大量数据计算,得到了不同尺寸的阵面在不同工况(平面度标准差 σ_z 和安装精度标准差 σ_{xy} 的不同组合)下,天线的增益损失、最大副瓣电平、波束宽度和波束指向偏差,并给出了它们随阵元数的变化曲线。其中,工况 1~9 分别为

$$\begin{aligned}
 (\sigma_z, \sigma_{xy}) = & (\lambda/20, \lambda/20), (\lambda/20, \lambda/30), \\
 & (\lambda/20, \lambda/40), (\lambda/30, \lambda/20), \\
 & (\lambda/30, \lambda/30), (\lambda/30, \lambda/40), \\
 & (\lambda/40, \lambda/40), (\lambda/40, \lambda/80), \\
 & (\lambda/80, \lambda/80).
 \end{aligned}$$

图 13 为增益与阵面大小、安装精度和平面度的关系。

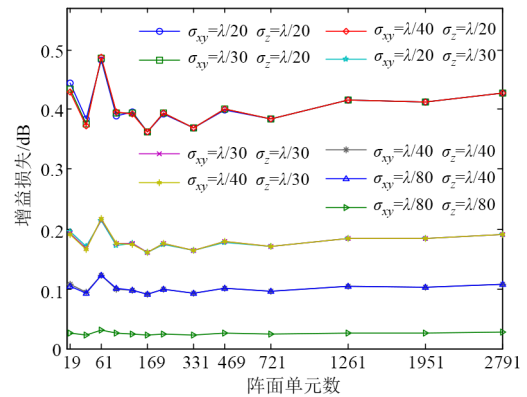


图 13 增益与阵面大小、安装精度和平面度的关系

分析图 13 可知:

(1) 阵元安装平面度主要影响天线的增益,阵元安装精度作用下天线增益下降很少。因此,在工程应用中对高增益的有源相控阵天线,阵元安装平面度的要求必须比阵元安装精度严格。

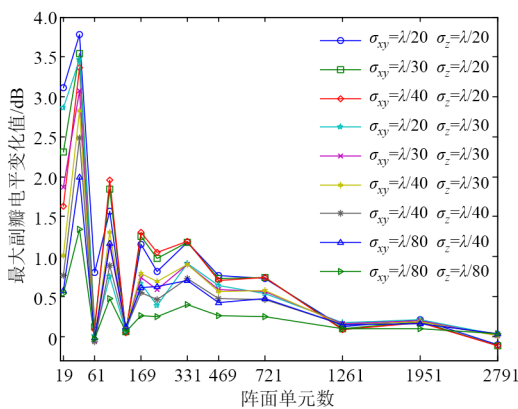
(2) 对于阵面尺寸较小的天线,随机误差影响下增益变化较大,增益损失与随机误差的关系曲线波动大。当阵面尺寸变大时,天线增益下降减少,增益损失与随机误差的关系曲线趋向于直线,说明阵元安装精度和安装平面度的影响在不断减小。

(3) 当阵面尺寸超过 469 (25x25) 时,同等量级的阵元位置安装随机误差导致的增益下降不明显,但随机误差的量级增大,大型阵面尺寸的阵列天线增益下降也越大。

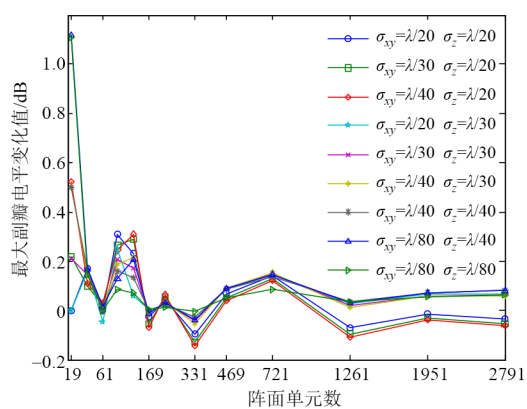
(4) 实际工程应用中,一般要求天线增益损失不能大于 0.5 dB。因此,天线的阵面尺寸越大,同一量级的阵元安装精度和安装平面度越容易满足要求。

图 14 为最大副瓣电平与阵面大小、安装精度和平面度的关系。

从图 14 可知:



(a) $\phi = 0^\circ$ 平面



(b) $\phi = 90^\circ$ 平面

图 14 最大副瓣电平与阵面大小、安装精度和平面度的关系

(1)随着阵面尺寸的增大,天线的最大副瓣电平抬升量波动较明显,但纵观整个副瓣电平的变化曲线,在阵元安装平面度和安装精度变差的情况下,天线最大副瓣电平随着阵面尺寸的增大而逐渐减小。

(2)在阵元安装精度或安装平面度作用下,天线的副瓣性能恶化很明显.在阵元安装精度和安装平面度共同作用下,不管是阵元安装平面度变差,还是安装精度恶化,都会使得天线的副瓣电平抬升。

图 15 为波束宽度与阵面大小、安装精度和平面度的关系。

分析图 15 可知:

(1)对于小阵面的三角栅格平面阵,阵元安装平面度和安装精度共同影响下的天线波束宽度变化非常微弱,可以不用考虑。

(2)由于阵元安装精度和安装平面度是随机误差,因此天线波束宽度变化值有正有负,这与阵元位置误差的具体分布特征有关。

图 16 为波束指向偏差与阵面大小、安装精度和平面度的关系。

分析图 16 可知:

(1)当三角形栅格平面阵的阵面尺寸超过 331(21×21)时,九种工况下的阵元安装精度和安装平面度几乎不会改变天线的波束指向.而当阵面尺寸小于 331(21×21)时,在阵元安装精度和安装平面度影响下,天线的波束指向变化较大。

(2)波束指向的偏转方向与阵元位置误差的分布形式有关。

4.3 高效散热设计

散热技术的发展可以概括为三代过程,如图 17 所示.第一代主要采用空气冷却,但其热控制能力有限.第二代利用高效热封装材料和微通道技术来提高冷板的传热能力,增强“远程”散热能力.第三代是嵌入式散热技术,该技术将冷却介质直接引入芯片封装,以降低组件的热阻,其重点是高功率芯片内部和之间的微流

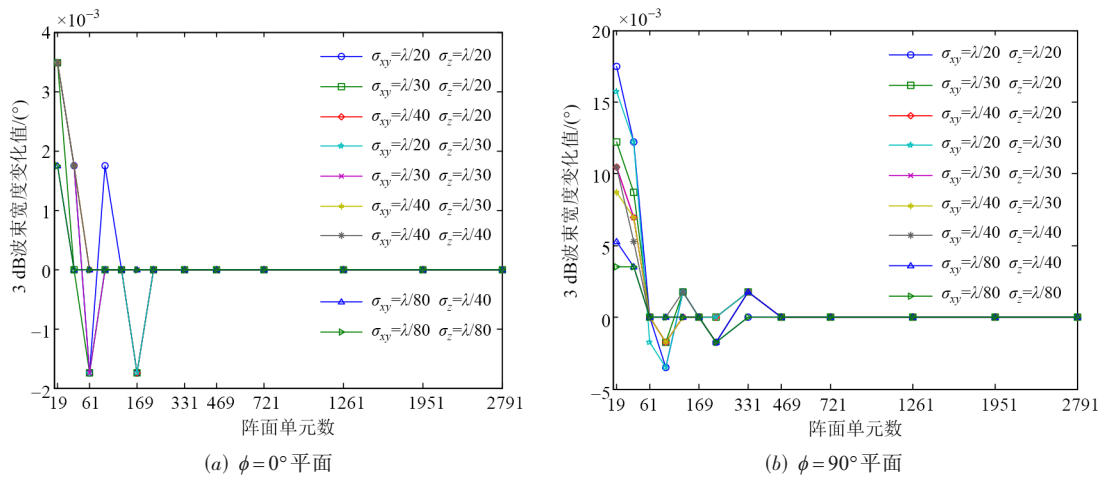


图 15 波束宽度与阵面大小、安装精度和平面度的关系

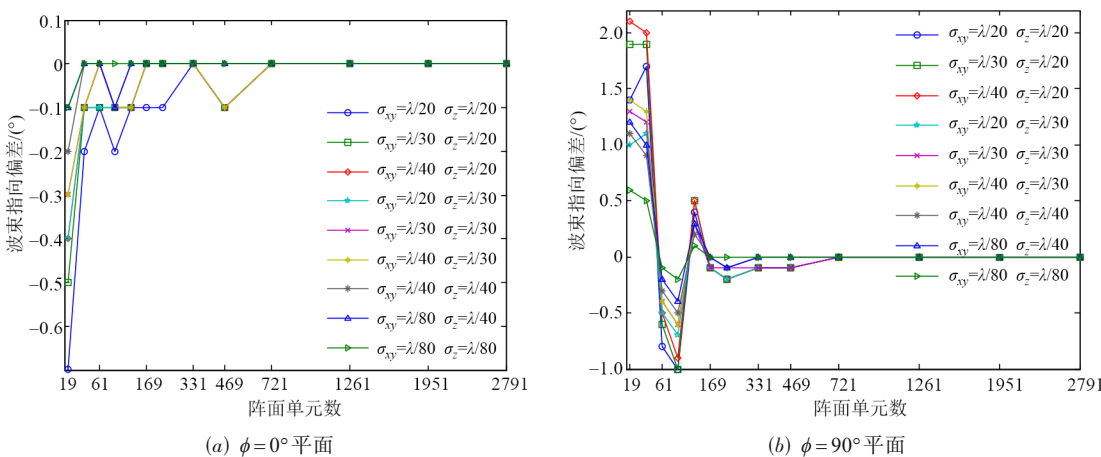


图 16 波束指向偏差与阵面大小、安装精度和平面度的关系

量控制冷却技术. 目前的嵌入式散热技术具有很大的发展潜力, 其散热能力可达 $1\ 700\ \text{W}/\text{cm}^2$.

目前, 相控阵天线的散热技术多采用自然风冷和强迫液冷. 自然风冷优势为热控组件简单、造价低廉、易改良等, 不足为散热效率低、可靠性低; 强迫液冷优势为散热效率高, 结构紧凑等, 不足为热控组件复杂, 成本较高. 在实际应用中应该结合情况合理使用. 早在 20 世纪 60 年代后期, 国外就提出了对天线阵面功放组件冷却设计的思想^[130]. 美国首次采用水冷的方法对雷达阵面进行散热, 散热能力达到了 $64\ \text{kW}/\text{m}^2$ ^[131]. 但受限于当时的工艺技术, 无法将水冷系统做得精小, 没

有在机载雷达上实际应用. 20 世纪 80 年代, 英国在 SAMPSON APAR 上采用闭环强迫风冷和强迫液冷结合的高效方式对雷达阵面上 128 组功率放大组件进行散热, 实现了持续高效的散热能力^[132]. 之后随着相控阵雷达天线单元的不断增多, 辐射功率不断增大, 阵面发热量越来越大, 出现了热管散热、热电制冷技术、射流冲击技术等. ETS 卫星上采用了环路热管进行散热, 实现了最大传热能力为 $1\ 000\ \text{W}$ 、寿命超过 10 年的设计目标^[133]. 俄罗斯的米格战斗机配备的 AA-8 和 AA-11 系列导弹, 红外探测系统利用了热电制冷技术对其进行温控^[134].

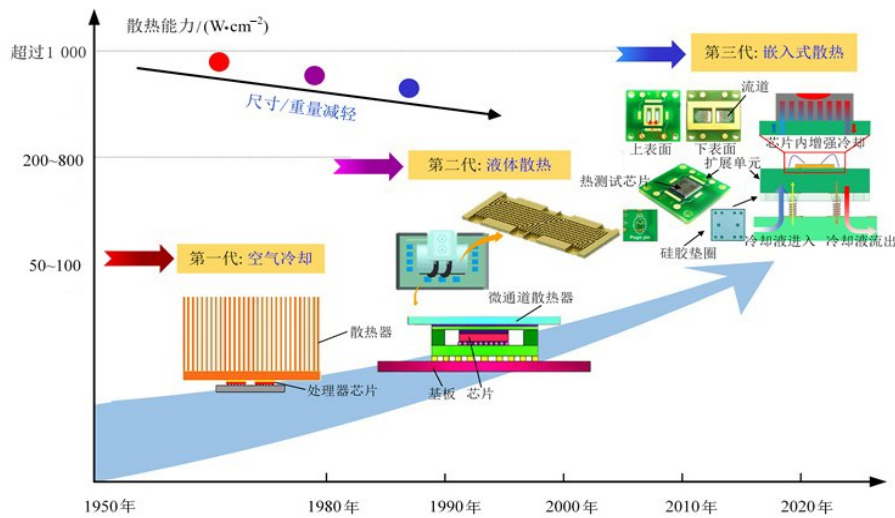


图 17 散热技术的发展

随着天线微型化和微加工技术的发展, 微通道冷板为相控阵天线的热控提供了新的解决方法. 因为较大的散热表面积, 微通道相对于传统通道冷却效果可以倍数提高. 于惠^[135]对常规流道和微通道结构的冷板散热性能进行了模拟, 发现后者的散热能力将近提高了一倍, 这说明微通道冷板具有很好的散热效果. 王从思等人^[136]研究了相控阵天线的微通道冷却技术, 总结了矩形微通道冷板的结构尺寸参数、热边界条件对其散热性能的影响, 通过选择合理的边界条件和最优的通道尺寸参数来强化散热. 卢婷^[137]从等效建模的角度研究了相控阵天线微通道的热流特性, 极大增强了热仿真的计算效率. 这些研究证实了微通道散热相对于传统散热方式的优越性.

随着相控阵天线向着更高热流密度方向发展, 微通道冷板在散热能力和温度均匀性上也开始表现出不足, 嵌入式微通道散热的出现为高热流密度电器件散热提供了一个解决方向. DARPA 在 2012 年开展 ICECool 计划, 在芯片内部/层间设计冷却模块, 以处理 $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的热流密度为目标. 之后 LMT 公司展示了消除 $1.1\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 芯片级热通量和 $30\ \text{kW}/\text{cm}^2$ 晶体管级热通量的能力, 并

将其应用于 HEMT 漏极和栅极^[138]. 2020 年, 有研究者通过在同一半导体基板内共同设计微流体和电子设备, 生产出了效率超过当前可用效率的单片集成歧管微通道冷却结构, 实验证明了当泵送功率为 $0.57\ \text{W}/\text{cm}^2$ 时, 可以提取超过 $1\ 700\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的热通量^[139]. 西安电子科技大学团队提出了面向电性能的星载相控阵天线机电热集成优化方法, 该方法综合考虑了天线热控结构的质量、芯片最高温与温度一致性、天线电性能等因素之间相互制约的关系^[140], 其目的在于, 在更轻量的热控结构与更方便的加工方式下实现更高效的天线温度控制, 从而实现更佳的天线电性能. 星载相控阵天线机电热集成优化方法流程图如图 18 所示.

4.4 轻量化综合优化

进入 21 世纪, 基于星载平台的星载有源相控阵雷达已成为军事侦察和战略预警的重要手段. 考虑到卫星发射载重和空间环境受限的影响, 星载 APAR 在提高分辨率、工作模式以及部署轨道高度方面都有更严苛的要求, 这就需要精准地控制雷达载荷重量. 星载 APAR 的轻量化主要集中于对 APAA 的轻量化, 其重量

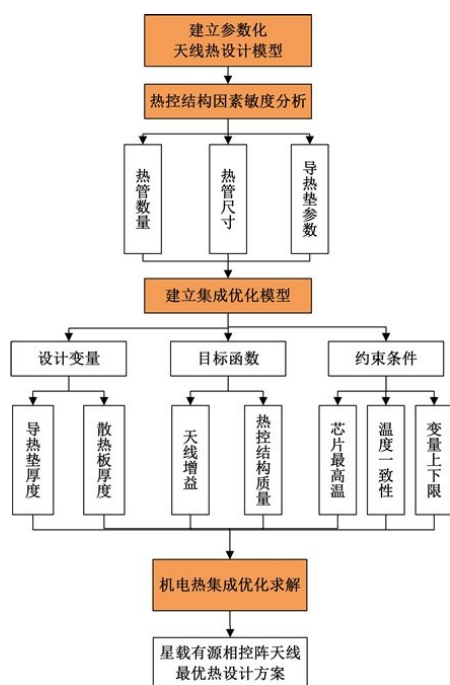


图 18 星载相控阵天线机电热集成优化方法

也通常占到整个雷达载荷重量的 80% 以上。

对星载相控阵天线进行整体架构优化,可以应用由单机分层布局结合盲插互连的轻型低剖面方案^[141]代替传统的单机独立设计并通过电缆连接的方式,实现 T/R 组件的小型化及对功分网络和电缆的进一步减重。各型单机均设计为片式结构,且实现了无电缆式的相控阵天线模块设计,满足天线轻量化的要求。薄膜 APAA 是一种通过小型化 T/R 组件与柔性薄膜天线集成的相控阵天线,该天线具有重量轻、收拢体积小、口径大和波束扫描等诸多优点,将用于满足未来星载雷达天线的轻型、可展开应用需求,被 NASA 及 DARPA 等部门视为突破大型星载天线发展瓶颈的核心技术手段^[142]。天线辐射阵面采用薄膜材料,展开框架则采用充气式柔性或刚柔结合支撑结构^[143],有效减轻天线重量和减小天线折叠体积,有望把天线平均重量降到 10 kg/m^2 以下。星载相控阵天线在新的天线架构设计方案的基础上,完成设备功能一体化及集成化设计,以满足新型设计方案的应用需求。分别对综合馈电网络、T/R 组件、电源与波控进行一体化、集成化设计,减轻阵面重量。有源相控阵天线阵面中的电源、波控、馈电网络采用综合电路技术一体化设计,可以极大地提高阵面的可靠性,还能够减小阵面重量、缩小体积。新型三维架构片式 T/R 组件利用集成电路技术将众多有源器件集成在一块衬底上,从而省掉组件之间的电气连接,一方面可降低损耗和噪声,提高可靠性,另一方面也可以使组件结构更为紧凑、重量更轻^[144]。这种片式高集成 T/R 组件与当前 T/R 组件的重量相比,可减轻 1/3 以上。采

用分布式的电源和波束控制方案有利于提高天线的可靠性,降低设计的复杂度,从而有利于简化设计,满足天线轻量化的设计需求。

4.5 稀疏阵设计

稀疏阵的设计方法是按某一规则在满阵的辐射单元位置保留或去掉辐射单元。安装阵列单元激励方式的不一致,可分为均匀激励和非均匀激励。一般在稀疏阵设计中,为简化馈电网络,阵列单元大都采用均匀激励的方式。但因为均匀激励的方式较难获得超低副瓣的阵列,因此在超低副瓣阵列的设计中,大多又采用单元非均匀馈电的方案,典型的有切比雪夫阵列、泰勒阵列等^[145]。稀疏阵列主要有两点优势:在相同阵列孔径的情况下,稀疏阵列需要的阵元个数更少,可以降低天线成本以及系统复杂度;在相同天线数目的情况下,稀疏阵的阵列孔径更大,可以提高 DOA 估计性能^[146]。稀疏阵设计的原则为:根据给定期望方向图,求解稀疏阵列的阵元位置和相应激励,利用尽可能少的阵元个数逼近期望方向图^[147]。

目前有很多学者选择了多种方式进行了稀疏阵的设计。Khan 等人^[148]通过子孔径天线划分的方法,在满足全向辐射单元假设的前提下,实现了线阵的稀疏优化布阵。杨志伟等人^[149]利用最小二乘方法拟合不同多普勒通道主特征矢量的绝对相位特征来获得相位中心的估计,从而实现机翼共形阵列的阵元位置估计。遗传算法和粒子群算法在稀疏阵列设计中也得到了广泛的应用^[150]。李龙军等人^[151]将共形阵列天线稀疏优化问题转换为稀疏矩阵的线性回归问题。通过欧拉旋转定理,建立共形阵列天线导向矢量模型,以同一平面上阵元天线的方向图作为目标任务进行稀疏学习,建立了基于多任务学习的共形阵列天线稀疏优化模型。西安电子科技大学团队为了提高雷达的隐身性能,建立了稀疏阵天线辐射和散射性能机电耦合模型^[117],并在此基础上开展了稀疏阵天线的阵元排布方式、位置误差分析、低副瓣实现以及公差设计的研究。

5 服役环境下有源相控阵天线结构服役性能调控技术

APAA 在服役过程中会受到外部环境载荷的影响,导致天线阵面产生不同形式的局部变形和整体变形,其天线的电性能下降,无法完成探测任务。因此很有必要建立阵面监测系统,对天线阵面的状态进行实时感知与性能调控(图 19),以保证天线处于高性能工作状态。

5.1 应变传感器优化布局

APAA 正朝着多功能、长寿命、复杂化方向发展。天线在复杂的服役中将面临结构功能状态改变以及损

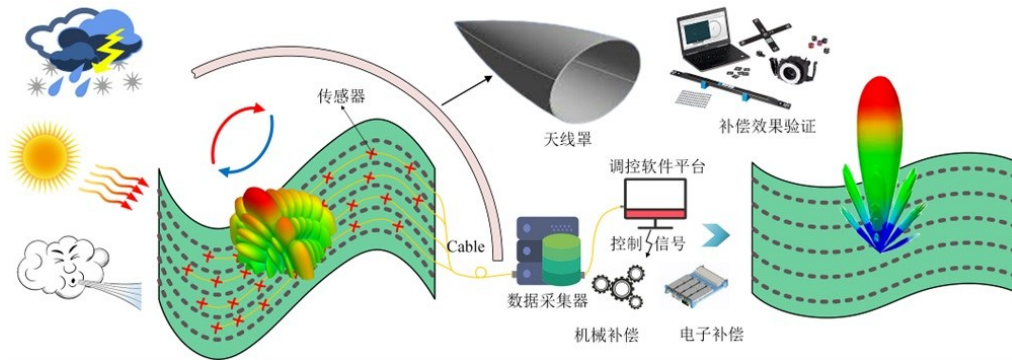


图 19 服役环境下有源相控阵天线阵面监测与性能调控示意图

伤积累问题,进而威胁服役安全.传感器布局是天线健康状态监测的首要问题,直接影响阵面信息采集的准确度.目前主流的传感器布局方法主要分为以结构模态信息为优化依据的经典方法、克服单一方法缺点的联合算法、引入生物学的智能布局优化算法,以及考虑不确定性的传感器方法.

(1)经典方法^[152].有效独立法是一种倒序删除法,其首先被应用于大型空间结构的在轨模态分析中.有效独立法由Kammer最先提出,是影响最广泛、使用最成熟的一种方法.最小模态置信准则法MinMAC是一种典型的正序添加法,它的主要思想是,尽可能使实际动力学采集识别的结构模态振型与理论参考的有限元法计算的结构模态振型相匹配.模态矩阵求和法与求积法通过计算模态矩阵中各元素绝对值的和与积,按照从大至小的排序,将行向量的较大值作为传感器布置的位置.这两种方法最大的优点就是可以有效避免传感器布置于结构各阶模态振型的节点以及模态动能较小的自由度上,是典型的模态动能法.原点留数法、模态矩阵的QR分解法、奇异值分解法、Guyan缩减法及其改进与等效方法等也较为常用.

(2)联合方法^[153].将各种经典方法进行有效的联合,能较好地实现传感器优化布置的综合能力.由于有效独立法仅能体现模态独立性能而没有考虑结构中的模态能量参数,测量信息极易被噪声淹没,因此近些年针对该方法的不足,众多学者提出了基于有效独立的联合模态能量的倒序删除方法,如基于有效独立法与其他四项指标的四项组合方法(基于能量系数与有效独立算法的组合算法,基于有效独立法和模态能量的组合算法,基于MAC、QR分解与有效独立法的组合算法等).这些传感器优化布置的组合方法可以兼顾模态独立性和抗噪能力,在很大程度上提高了传感器采样的信噪比,实现了较好的传感器优化布置性能.但是,这些方法仅适用于自由度较少的结构模型中.

(3)优化方法^[154].随着智能优化算法的不断发展,大型结构的传感器优化布置问题逐步摆脱了仅依靠一

定顺序逐个筛选的传统迭代算法,向全局优化算法深入发展,逐渐在大型结构传感器优化布置中发挥了重要作用.以遗传优化算法、粒子群优化算法、猴群优化算法、狼群优化算法等为代表的智能优化算法直接推动了传感器优化布置在桥梁、水坝、大跨度柔性结构等具有超大尺度、超多自由度等特征的应用.绝大多数智能优化算法解决传感器优化布置问题时,所采用的优化目标通常从经典理论中衍生而出,如Fisher信息矩阵行列式与MAC矩阵非对角元素的均方根误差等基本指标,均是来源于经典的有效独立法与模态置信准则法.

(4)不确定方法.受加工工艺、仪器设备、测量技术的限制,待监测结构中的不确定性以及数据采集过程中的未确知性难以避免且不可消除.为反应二者对传感器优化布置的影响,学者们在灵敏度与鲁棒性等不确定性领域也进行了广泛的传感器优化布置的研究^[155].Castro-Triguero等人^[156]利用概率统计方法研究了木质结构的传感器优化布置方案,同时针对桁架结构传感器布置的不确定性优化问题,也指出了无论不确定性参数存在与否、大小与否,总有部分确定性传感器布置位置将会在不确定性工况下得以最终保留.基于信息熵理论,Vincenzi等人^[157]在结构健康监测与模态测试中实现了结构不确定性与噪声共同存在时传感器最优或次优布置结果.为改善有效独立法中未考虑不确定性的不足,Kim等人^[158]通过保留确定性部分与推演附加随机项提出一种新的随机有效独立法,该方法可以较好地实现在平均效应下模态矩阵的线性独立.此外,Papadimitriou等人^[159]利用误差相关性预测理论建立了传感器优化布置方法.针对结构动力学参数中不确定性难以度量的不足,利用非概率方法仅需获取不确定性参数边界的优势,杨辰等人^[160]建立了含区间不确定性参数的传感器数量确定方法、布置可能性分析与鲁棒优化模型,分别用区间数关系以及遗传优化算法对离散型不确定性问题进行了分析与优化求解,获得了更具稳健性的传感器布置方案.

5.2 天线阵面高精度形貌重构

随着 APAR 的发展,大口径、高频段化成为 APAR 天线的发展趋势,天线口径的增大、频段的提高,对天线阵面精度的要求随之提高.相控阵雷达服役过程中,容易受外界环境载的影响,天线阵面发生结构变形,天线阵元间产生相位误差,偏离设计形态,严重影响相控阵天线的电性能指标.因此,需要准确测量相控阵雷达阵面的姿态偏离信息,并以此为依据对天线的电性能进行补偿^[161].

在天线形变重构领域,常用的方法有模态法、逆有限元方法、Ko 位移理论以及神经网络法等.Zhou 等人^[162]基于模态法的应变位移转换关系,通过嵌入到蒙皮天线中的光纤 Bragg 光栅传感器测量的应变数据得到了天线变量,并建立了天线的电磁-应变耦合模型,对蒙皮天线由于变形引起的相位误差进行补偿,验证了模态法的可行性.袁慎芳等人^[163]基于 Ko 位移理论,对强度相等的梁和机翼进行了仿真、实验研究,结果验证了方法的有效性.Ko 位移理论的提出主要基于欧拉-伯努利梁的受力模型,适用于典型的梁结构的重构,不适用于结构复杂的对象.Alioli 等人^[164]基于逆有限元法,通过膜单元的构造实现了膜状翼的变形场与压力场重构,并且证明其具有较好的实时性.逆有限元法不需要事先分析对象的材料属性、模态等,只需要通过构造相应的逆向单元并结合应变数据即可实现变形场的求解,便于实现,但仅适用于典型梁结构,受测量误差影响较大.Bruno 等人^[165]基于模拟退火与神经网络相结合的方法,通过训练实验样本构建目标结构应变与位移关系,再通过少量测量应变推断出结构的变形情况.神经网络法通常需要采集大量的目标结构样本数据,受样本数据误差影响大.西安电子科技大学团队分析了建模噪声和测量噪声的随机性,提出了基于卡尔曼滤波的阵面形貌重构方法^[166].根据极大似然准则,将建模和测量噪声方差矩阵也纳入滤波迭代过程中,使方差实时更新,以此来准确反映出此时噪声的特性,同时降低迭代过程中误差的累积,使其更加适用于工程应用.

5.3 数字器件量化误差及 T/R 组件失效影响补偿

为改善不同工作环境下天线电性能的恶化情况,保障天线在工作时的性能,可以通过给数字衰减器和数字移相器输入计算得到的相应补偿量来修正天线方向图,从而实现对天线电性能进行补偿.数字器件虽然具有结构简单、能耗低、运算速度快、控制电压低、易于计算机控制等优点,但受限于其固有的量化属性,衰减器和移相器都只能输入离散的数值,无法根据天线电性能补偿法得到的补偿量实现幅相数值的连续变化,这就存在幅相量化问题,由此产生幅相量化误差^[167].例如 m 位的移相器的相位值,是将 360° 分为 2^m 个标称

值,相位值不是连续变化的.移相器的相位值就只能取接近所需相位值的标称值,造成移相器产生相位量化误差^[168].相位量化误差一方面会导致主瓣波束展宽、增益下降、副瓣电平升高,另一方面会使得天线的波束指向精度变差,最终降低天线电性能.为了达到更好的天线电性能补偿效果,一种考虑数字衰减器和移相器量化误差的相控阵天线补偿量计算方法^[169]应时而生.首先根据衰减器和移相器的步进值和位数,确定最小衰减量和最小相移量;再基于 APAA 的机电耦合补偿模型,计算补偿变形天线电性能的阵元幅相,通过比较阵元幅相与最小衰减量、最小相移量的大小,确定天线阵元量化幅度补偿量和量化误差补偿量,从而保证天线电性能最优.基于上述考虑数字器件量化误差的相控阵天线补偿量计算方法,周云霄^[170]开发了考虑数字器件量化误差的 APAA 电性能补偿量计算软件,其能够在降低量化误差对补偿效果的影响情况下,快速计算天线的幅相补偿量,达到修正 APAA 补偿量的目的,还可以通过比较量化误差前后的两种幅相补偿量,对量化误差的修正效果进行评估.杨东萍等人^[171]为了改善移相器的相位量化误差对相控阵天线波束指向精度和天线波束性能的影响,提出采用递推比较补偿馈相法代替传统的确定性馈相法,并证明了递推比较补偿馈相法能够减少相位量化误差的影响,降低天线波束指向误差的极大值和均方差,提高相控阵天线的波束指向精度.

面对日益复杂的战场环境,有源相控阵天线在服役时会遭受强风、极端温度、雨雪等载荷,T/R 组件作为天线的核心部件在天线的服役过程中不可避免存在失效的情况.据统计,拥有 8 000 个 T/R 组件的大型有源相控阵天线中,平均每 25 个小时就有 1 个组件失效.连续工作一年后,将有 350 个 T/R 组件(约为总数的 4.4%)完全失效^[172].T/R 组件失效会造成天线方向图畸变,如副瓣电平抬高、增益下降等,严重降低雷达天线的服役性能.随着有源相控阵天线在军事领域的广泛应用,阵列规模不断扩大,对天线的可靠性的要求日趋严苛,T/R 组件失效问题已成为制约相控阵雷达保持良好工作状态的关键问题.

Singh 等人^[173]针对有源相控阵天线 T/R 组件失效导致的副瓣电平抬升的问题,提出了一种改进的 bat 算法,通过仅重新优化剩余非缺陷单元的激励电流振幅来重构天线的原始方向图.Khan 等人^[174]提出了一种布谷鸟搜索算法,通过调整阵元的间距来矫正因 T/R 组件失效导致的天线方向图畸变,并对 21 个阵元的切比雪夫天线阵进行了仿真,结果表明了该方法的有效性.牛传峰等人^[175]基于 10×10 平面阵列,分析了 T/R 组件损坏数量对天线电性能的影响,结果表明当 T/R 组件损坏

数量达到 10% 时,在扫描 0° 时,增益下降 0.46 dB,副瓣抬升 0.76 dB,且当波束扫描角改变时,电性能会进一步恶化.潘超等人^[176]重点研究了 T/R 组件失效对相控阵天线低副瓣的影响,研究表明:当失效 T/R 组件位于阵列两端位置时,低副瓣电平恶化较轻;而当失效 T/R 组件位于阵列中间位置时,低副瓣电平恶化较严重;对于预先设计 -30 dB 均匀副瓣电平的 24 阵元均匀直线阵,当失效 T/R 组件超过 2 个,最大副瓣电平大于 -20 dB 的概率超过 0.9.汪一心等人^[177]认为 T/R 组件失效将使低副瓣阵列天线方向图的副瓣特性严重恶化,在一个 N 元均匀照射的天线阵中,一个失效 T/R 组件就会使残余副瓣电平上升 $(1/N)^2$,多个失效 T/R 组件尤其当这些失效 T/R 组件具有某种相关性(如列相关)时,其影响更加严重,他们采用 BFGS 算法通过调整失效单元附近部分 T/R 组件的幅相分布,获得了一定的补偿效果.李新建等人^[178]推导了当同时存在 T/R 组件失效和幅相误差时场强波瓣均值与方差的公式,并推导出天线最高副瓣和增益损失的计算估计公式.

5.4 基于机电热耦合的激励电流补偿量计算

目前,APAA 的电性能补偿方法主要有两种——结构补偿方法和电子补偿方法.结构补偿主要是指从自身的机械结构出发,采用控制变形或增加主动调节装置的方法进行补偿;电子补偿法是指通过修正天线单元的激励电流幅相进行补偿.

APAA 的结构补偿方法有如下三种:

(1) 阵面结构主动调整,即采用作动器或调整机构来控制天线阵面结构精度,降低天线阵面结构变形.胡乃岗等人^[179]针对某相控阵天线因自重导致的阵面精度下降,采用调整机构对子阵进行调控,以提高阵面平面度.该方法可主动补偿结构误差的影响,在相控阵和反射面天线性能补偿中均有应用,其实现的前提条件是天线系统中需要能够安装结构调整装置.

(2) 有源器件结构尺寸调控.在 APAA 系统中,有源器件的结构尺寸与天线电性能相互影响,通过控制有源器件的结构参数,可补偿天线的电性能.Son 等人^[180]通过调整移相器缆线的长度来补偿相位误差影响.这种方法适用于在天线加工制造阶段对其进行测试校准,通过调整有源器件的结构,来补偿天线的相位误差等,然而在天线服役阶段并不可行.

(3) 形状记忆材料以及自校准装置的应用,自动补偿天线的电性能.Song 等人^[181]在蜂窝结构体中嵌入形状记忆合金丝,用于补偿天线结构热变形的影响,该方法可应用到星载 APAA 中.

综上所述,结构补偿方法可对天线的结构变形影响进行补偿,尤其对于包含子阵的相控阵天线,可通过调控子阵结构,保证阵面的结构精度,但由于结构补偿

方法中需要额外增加调整装置,这样会使天线系统的复杂度提高.

APAA 的电子补偿方法有如下几种:

(1) 基于“相扫”原理^[182]的相位修正,即通过控制阵元之间的相位差,修正波束指向,使其指向目标方向.Takano 等人^[183]针对可折叠的相控阵天线阵面,由于其天线自身结构形式导致最大波束指向偏离目标方向,通过控制阵元的馈电相位,使指向回调至目标方向,实现了对波束指向误差的修正,但该方法对副瓣电平补偿效果有限.

(2) 激励电流相位或幅相优化,补偿天线的综合电性能,包括指向精度、增益及副瓣电平等.Son 等人^[184]采用遗传算法(GA)优化阵元激励电流的相位,以天线接收功率最大为目标,实现对天线相位误差的补偿.优化方法通常需大量迭代过程,计算耗时,无法实现快速实时补偿.

(3) 构造方向图修正系数,重构天线方向图,补偿阵元失效、阵元之间互耦等对阵列天线电性能的影响.Steyskal 等人^[185]在补偿阵列天线阵元失效影响时,调整了未失效阵元的权重系数,重构出天线方向图,实现了对失效阵元影响的补偿.

(4) 结合数值方法,计算激励电流的相位或者幅相补偿量.该方法综合考虑了数值计算方法的特点和天线电性能的要求,构建激励电流相位或幅相调整量计算模型,相比于优化方法,可快速确定出激励电流的补偿量^[186].

(5) 阵内相位差实时监测,补偿天线的辐射性能.Schippers 等人^[187]通过对每个阵元安装模拟集成电路,实时监测阵元之间的相位差,从而调控阵元的相位补偿天线辐射性能,该方法仅对天线阵元之间的阵内相位差可有效补偿.

综上所述,相比于结构补偿方法,电子补偿方法可在不增加天线结构重量的情况下,补偿阵元结构变形、馈电误差等对天线辐射性能的影响,并可为天线辐射性能的实时补偿提供基础.

西安电子科技大学团队针对大口径陆基 APAA 提出了基于结构-电磁耦合模型与最小平方误差的幅相补偿以及基于结构-电磁耦合模型与 FFT 的幅相补偿,并将这两种幅相补偿方法与相位补偿方法进行了对比分析^[63].考虑机载 APAA 的辐射性能和散射性能,该研究建立了包含随机结构误差统计特性的散射性能计算模型,解决了结构误差对天线散射性能影响难以定量评估的问题.针对超声速、高超声速飞行的弹载 APAA,采用提出的两种幅相补偿方法,可在多频点、多扫描角下对天线增益、副瓣电平、波束指向进行有效补偿.针对太空热环境导致星载 APAA 阵面热变形的问

了 APAA 应变-电磁耦合模型^[64],提出了基于应变-电磁耦合模型的相位补偿和幅相补偿,最后,搭建了阵面变形应变信息测量系统,通过实验验证了应变-电磁耦合模型和补偿方法的有效性.

5.5 带罩天线的补偿方法

目前研究高温烧蚀的影响主要集中在分析高温引起的罩体材料参数变化对天线罩电参数的影响.如 Weckesser^[68]研究了某飞行器天线罩在自动寻的阶段某时刻下,罩体表面温度变化引起的材料参数变化,以及其对扫描过程中天线罩指向误差的影响;Nair 等人^[69]以平板罩体为例,根据罩体法向温度梯度在 25 °C 到 1 200 °C 之间材料参数的变化,利用非均匀平面层模型,研究了天线罩插入相位移、透射系数和反射系数的变化;Nair 等人^[70]根据天线罩物性参数随温度变化的测试数据,分析了天线扫描过程中天线罩温度变化时透射系数、指向误差以及交叉极化电平的变化规律. Qin 等人^[188]指出,高速飞行中的天线罩会产生烧蚀层严重影响天线电性能,然而仅假设了该烧蚀层具有固定厚度和材料参数,并未分析实际烧蚀情况下天线罩的表面形貌.针对高温烧蚀导致的弹载 APAA 辐射性能恶化的问题,目前的解决方法主要包括:①烧蚀型热防护,在罩体外表面涂覆烧蚀材料,利用材料的受热烧蚀来降低罩体的温度^[189,190];②新增强复合材料,研究具有高熔点和低温度敏感性的新材料^[191-193],然而当飞行速度升高时,天线罩材料参数仍然存在明显变化,且新材料会带来成本的增加;③优化天线罩结构设计^[194-195],如对天线罩采用变厚度设计等,这会增加天线罩的加工难度,且难以保证飞行过程中天线罩电性能始终最优.此外,有研究指出,针对相控阵导引头,可通过调整内部天线阵元的激励电流,改善天线罩的指向误差^[196,197].该方法为天线罩性能补偿提供了一种有

效途径,但高速飞行器的飞行过程中,高温烧蚀对天线罩和天线结构会同时产生影响.因此,调整激励电流需对天线罩和天线影响同时进行补偿.然而,目前缺少高温烧蚀影响下天线罩物性和结构参数变化以及天线激励电流误差对弹载天线电性能的定量影响,由此也难以给出激励电流调整量和天线罩参数以及天线激励电流误差之间的对应关系模型.

为了降低高温烧蚀对弹载 APAA 辐射性能的影响,西安电子科技大学团队以某高超声速弹载 APAA 为对象采用气动热分析获得高温烧蚀影响下天线罩热流密度,通过综合瞬态热分析和“生死单元”方法获得天线罩和罩内天线的实时温度分布与烧蚀形貌,并在多个频点和多个扫描角下分析并补偿了弹载 APAA 的电性能^[63],结果表明在不同扫描角和频率下高温烧蚀均会严重降低弹载 APAA 的电性能,尤其当扫描方向上罩体的厚度因烧蚀发生改变时.当天线工作频率上升时,高温烧蚀对弹载 APAA 的影响更为严重.此外,通过调整天线阵元的激励电流幅相,对高温烧蚀影响下天线的辐射性能进行补偿,可使天线的主要电参数如增益、波束指向精度、副瓣电平等基本实现完全补偿,有效确保了弹载 APAA 在飞行过程中具备可靠工作性能.下面分别给出了两种激励幅相补偿量计算方法,以保证弹载 APAA 的可靠辐射性能.

(1) 基于带罩天线单个阵元辐射性能变化的幅相补偿^[64]

根据弹载天线机电耦合模型可以得到高温烧蚀影响下,弹载天线电性能的幅度变化率和相位变化量,通过调整天线阵元激励电流的幅度和相位,补偿弹载天线电性能的幅度变化率和相位变化量,使补偿后系统的电性能接近理想电性能.建立的阵元激励电流幅度和相位补偿量计算模型可表示为

$$\begin{cases} \Delta A_{nc} = \frac{1}{\left[1 + \frac{\Delta A_m(T)}{A_n} + \frac{\Delta A_{np}(T)}{A_n}\right] \cdot [1 + \Delta A_{T_n}(\Delta \epsilon, \Delta \tan \delta, \Delta d)]} \\ \Delta \phi_{nc} = -\left[\Delta \phi_m(T) + \Delta \phi_{np}(T) + \Delta \phi_{T_n}(\Delta \epsilon, \Delta \tan \delta, \Delta d)\right] \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\Delta A_m(T)$ 和 $\Delta \phi_m(T)$ 分别为 T/R 组件中电子器件性能温漂导致的馈电幅相误差; $\Delta A_{np}(T)$ 和 $\Delta \phi_{np}(T)$ 分别为阵面电源纹波导致的幅相误差; $\Delta A_{T_n}(\Delta \epsilon, \Delta \tan \delta, \Delta d)$ 和 $\Delta \phi_{T_n}(\Delta \epsilon, \Delta \tan \delta, \Delta d)$ 分别为天线罩材料参数与厚度变化导致的透射系数幅度变化率与相位变化量.

(2) 基于带罩天线整体电性能最小平方误差的幅相补偿^[198]

为了补偿弹载天线在某一扫描范围或频带内的电性能,提出了基于罩体天线整体电性能最小平方误差的补偿方法.即为了减少高温烧蚀对弹载 APAA 在特

定扫描范围或扫描频带内电性能的影响,必须在该扫描范围或频带内使补偿后的 APAA 电性能与理想电性能之间平方误差最小,计算方法如下:

$$\text{Min} \left[\left| E_c(\alpha, \lambda, \theta, \phi) - E_0(\alpha, \lambda, \theta, \phi) \right| w(\theta, \phi) \right]^2 \quad (7)$$

其中, $w(\theta, \phi)$ 是与观测角度有关的权重系数; $E_c(\alpha, \lambda, \theta, \phi)$ 是补偿后弹载天线辐射性能; $E_0(\alpha, \lambda, \theta, \phi)$ 是弹载天线理想电性能.

5.6 有源相控阵天线性能补偿软件工具

传统方法在评估结构误差对有源相控阵电性能的

影响时,必须先对 APAA 模型进行仿真计算. 而现有通用的商业电磁仿真分析软件(HFSS^[199]、CST^[200]和 ADS^[201])在前期建模时会带来巨大的工作量,并且需要施加复杂的载荷和约束及边界条件设置,求解过程也需要漫长的等待,无法满足快速对天线电性能进行预测的需求^[202-204]. APAA 受服役环境载荷的影响会明显恶化天线的电性能,因此需要采用合适的电补偿方法,通过对天线单元激励电流的幅度和相位的补偿来改善天线的电性能. 目前为止还没有一款成熟的商业软件来对在结构误差影响下的天线电性能进行补偿,来抵消 APAA 在产生结构误差后产生的天线增益下降、副瓣

抬升以及指向偏转的影响.

西安电子科技大学的研究团队设计开发了 APAA 变形后的电性能和补偿量计算软件,包括 APAA 变形后的电性能计算软件、APAA 变形后的补偿量计算软件和考虑量化误差的 APAA 变形后的补偿量计算软件,并且开发了 APAA 机电热集成设计软件,可以对天线结构进行力学、热仿真分析,并能快速计算并显示结果. 软件操作的便捷性可以减少天线设计人员的工作量,从而明显提高工作效率,为科研和工程提供参考和借鉴的作用^[63,170,205]. 基于机电热耦合的有源相控阵天线性能补偿软件架构如图 20 所示.

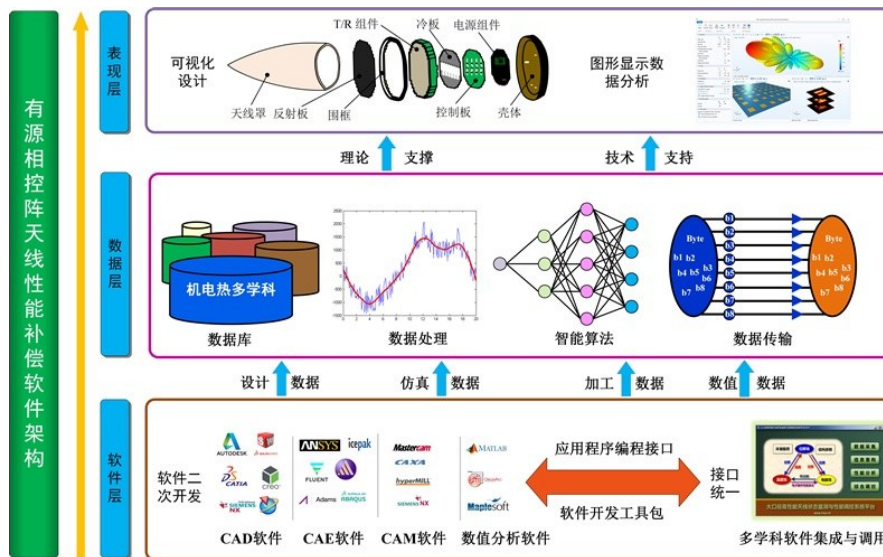


图 20 服役环境下有源相控阵天线阵面监测与性能调控示意图

软件架构总体分为 3 层:软件层、数据层和表现层. 软件层的主要功能是基于应用程序编程接口 (Application Programming Interface, API)^[206]和软件开发工具包 (Software Development Kit, SDK)^[207]将现有的 CAD、CAE、CAM 软件以及数值分析软件柔性结合,通过软件调用来实现 APAA 的结构设计、力学性能分析、电性能分析、变形信息提取等操作^[208]. 数据层作为中间层是整个软件的核心,软件层通过数据传输将天线结构设计、有限元仿真数据、加工数据等向上传递至 SQL (Structured Query Language)数据库^[209]. 多学科数据库保存了最全面的海量原始数据,当需要对 APAA 的单一性能进行分析或者对多参数关联关系进行挖掘时,首先需要利用软件的数据处理模块对数据进行数据滤波、数据增强等预处理,提高数据的可用性,然后调用嵌入的智能算法,如机器学习、深度学习、支持向量机等,挖掘数据中隐藏的关联机理、单一参数的敏感度分析. 为了提高对天线性能的评估与补偿效率, Wang 等人^[210]建立了多参数与电性能的映射关系,构建了代理

模型,实现了对天线电性能的快速评估与补偿. 表现层为软件的上层显示功能,包括天线结构的可视化参数化建模、有限元云图显示、天线变形规律与区间的图表显示等. 下面介绍一些软件开发具体的关键共性技术.

(1)数值计算软件接口技术. 通过 MATLAB engine 的引擎函数实现 C++ Builder 和 MATLAB 混合编程,就可以实现快速计算 APAA 电性能的任务.

(2)CAX 软件接口技术. ① APAA 模型参数化需要使用 Pro/E 二次开发技术,通过 Pro/Toolkit 开发工具可以实现与 Pro/E 基本无缝连接. ②在力学仿真方面, ANSYS 强大的功能、使用率以及开放性,天线结构力学分析中通常选择 ANSYS 作为力学仿真分析软件,通过 ANSYS 批处理文件,自动实现 ANSYS 执行 APDL 文件,实现对天线模型自动分析,显示并提取计算结果. ③在热分析方面,软件采用 Flotherm 对模型进行热仿真,采用 VBA 语言编写成 XML 文件,并启动 Flotherm 批处理文件,自动打开 Flotherm 软件,利用 Flotherm 调用 XML 文件完成热分析的求解过程.

(3)数据处理技术. 在软件开发阶段涉及数据库的操作,需要对数据库进行连接并且对数据库中数据信息进行增加、修改或删除等基本操作. C++ Builder提供了BDE(Borland Database Engine)和ADO(ActiveX Data Object)等数据库连接技术,为了更加高效地操作数据库,选择ADO技术作为软件与数据库连接方式.

6 未来技术发展趋势

随着新材料、新技术和新工艺的提升,APAA向着更高频段发展,太赫兹APAA可探测比微波天线更小的目标和实现更精确的定位,具有更高的分辨率和更强的抗干扰能力,是未来高精度探测和成像的重要发展方向;此外太赫兹APAA能够穿透沙尘、烟雾,可实现全天候工作^[211,212]. 近年来,新一代飞行器对机载装备平台中天线的智能化和结构功能一体化程度提出了更高的要求. 因此迫切需要既能与装备平台高度集成和融合,又能在恶劣服役环境下具有优良力学和电磁性能的天线. 当前主要采用具备共形和承载能力的蒙皮天线. 为了适应不同的载体平台,蒙皮天线一般采用共形承载天线的形式^[213-215],并通过阵列排布满足高增益、低副瓣、窄波束以及波束扫描等要求. 随着工艺水平的不断提升,30 GHz以上的毫米波相控阵天线的形态将发生很大变化,即通过大量使用先进的异质异构封装技术和微系统集成工艺,相控阵天线乃至后端射频、数字处理部分将以一个完整的系统级封装(SiP)和系统级芯片(SoC)出现,并可能与声、光、磁等其他类型传感器进行再次集成,通常称为封装天线(AiP)和片上天线(AoC)^[216-218]. 为了满足未来有源相控阵的高频段、高集成、共形承载等方面的要求,机电热耦合技术将朝着以下几个方面发展:

(1)不确定性参数影响下APAA的电性能补偿. APAA的结构复杂,服役环境恶劣且时变. 服役环境、材料力学性能、结构几何尺寸、承受载荷等方面普遍存在着多种不确定性,再者移相器、衰减器等重要电子元件也会因外载荷的作用存在性能降低或者失效的可能性,也需要考虑到电补偿的不确定性. 因此,考虑系统的复杂性及其中蕴含的不确定性是机电耦合亟须发展和解决的关键.

(2)高频领域电路模型建立及传输性能预测. 随着微波产品向着宽频带、小型化以及轻量化发展,在高频段,微波电路中不同传输线间转换互联工艺形态对传输性能的耦合影响愈加突出. 传输线的电长度与波长接近,互联点形态的寄生效应将严重引起信号幅度和相位的改变,从而导致信号在互联线上的传输将产生时延、幅度衰减、信号反射与串扰等电磁场微波效应.

目前基于电阻、电容和电感的电路等效模型存在精度不足等问题,而利用有限元软件分析往往非常耗时,且其性能分析结果受模型准确度的影响巨大. 在高频领域的电路分析一直是电子制造的难点,利用机电热耦合模型,可以建立电路结构与其对于电性能的映射关系,提高电路模型性能预测的精度和效率.

(3)APAA全生命周期的保障和维护. APAA具有结构复杂、服役周期长、工作环境恶劣等特点. 实现复杂机电装备的失效预测、故障诊断、维修维护,保证APAA的高效、可靠、安全服役极为重要. 基于数字孪生技术可利用有源相控阵的几何模型、有限元模型、材料属性、各类传感器的采集数据以及生产、检测、维护等数据建立APAA的数字孪生模型,对相控阵的状态监测、故障预测、维修决策等进行综合考虑与集成,从而提升天线的使用寿命与可靠性. 可利用机电耦合的理论,发展机电准备的模型修正技术、面向状态检测的传感器布局算法以及天线性能的实时调控方法,来更好地提高孪生模型的精度,保障APAA的全生命周期可靠服役.

(4)在未来机电耦合模型还可以发展并应用到其他领域,例如风速的预测. 风载荷作为一种常见的载荷对高大的电子装备——大型反射面天线、大型陆基雷达等,都产生了较大的影响,因此必须解决风引起的问题. 同时,电子装备的集成度越来越高,也为散热性能带来了巨大的挑战. 基于机电耦合模型可以结合电子装备的结构特性与其工作性能的关系,给出最佳的散热方案,在节省成本、提高产能方面有巨大的应用前景. 在另一个领域,新复合材料由于其优良的机械性能被大量应用于航空航天等领域,但其材料及制作工艺复杂,存在失效形式、寿命预测等方面的经验知识,可以利用基于机电耦合的思想,直接建立材料应力、应变等监测数据与装备性能、结构疲劳度等的映射关系,发掘新材料的隐藏特性.

参考文献

- [1] BROOKNER E. Advances and breakthroughs in radars and phased-arrays[C]//2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology(PAST). Waltham: IEEE, 2016: 1-9.
- [2] OBUKHOVETS V. Some new trends in phased antenna array designing[C]//2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves(RSEM). Divnomorskoe: IEEE, 2019: 20-23.
- [3] HERD J S, CONWAY M D. The evolution to modern phased array architectures[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(3): 519-529.
- [4] PARKER D, ZIMMERMANN D C. Phased arrays - Part

- 1: Theory and architectures[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 678-687.
- [5] 王从思, 康明魁, 王伟. 基于阵面变形误差的有源相控阵天线电性能分析[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2520-2526. WANG C S, KANG M K, WANG W. On coupled structural-electromagnetic model of active phased array antennas with array plane structural distortion errors[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(12): 2520-2526. (in Chinese)
- [6] KOZAKOFF D J. Analysis of Radome-Enclosed Antennas [M]. 2nd Edition. Boston: Artech House, 2010.
- [7] ROCK J C, MULLINS J H, BOOTH J P, et al. The past, present, and future of electronically-steerable phased arrays in defense applications[C]//2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2008: 1-7.
- [8] WANG C S, DUAN B Y, ZHANG F S, et al. Analysis of performance of active phased array antennas with distorted plane error[J]. International Journal of Electronics, 2009, 96(5): 549-559.
- [9] 段宝岩, 王猛. 微波天线多场耦合理论模型与多学科优化设计的研究[J]. 电子学报, 2013, 41(10): 2051-2060. DUAN B Y, WANG M. Research of the theoretical model of multi-field coupling and multidisciplinary optimization design on microwave antennas[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(10): 2051-2060. (in Chinese)
- [10] ARNOLD E J, YAN J B, HALE R D, et al. Effects of vibration on a wing-mounted ice-sounding antenna array[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2014, 56(6): 41-52.
- [11] KANG M K, WANG C S, YIN L, et al. Performance prediction for array antennas with element position error based on coupled structural-electromagnetic model[C]//Fifth Asia International Symposium on Mechatronics (AISM 2015). Guilin: Institution of Engineering and Technology, 2015: 34-38.
- [12] QUAN S J, QIAN W P, GU Q J, et al. Radar-communication integration: An overview[C]//The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology. Fuzhou: IEEE, 2014: 98-103.
- [13] WANG C S, WANG Y, YUAN S, et al. A compensation method for active phased array antennas: Using a strain-electromagnetic coupling model[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2021, 63(4): 78-88.
- [14] WEI X Y, MIAO E M, WANG W, et al. Real-time thermal deformation compensation method for active phased array antenna panels[J]. Precision Engineering, 2019, 60: 121-129.
- [15] LU G Y, ZHOU J Y, CAI G P, et al. Studies of thermal deformation and shape control of a space planar phased array antenna[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 93: 105311.
- [16] AMIR Z, BIJAN A A. GA-based approach to phase compensation of large phased array antennas[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2018, 29(4): 723-730.
- [17] ENDER J H G, WILDEN H, NICKEL U, et al. Progress in phased-array radar applications[C]//First European Radar Conference (2004 EURAD). Amsterdam: IEEE, 2004: 113-116.
- [18] WANG C S, WANG Y, LIAN P Y, et al. Space phased array antenna developments: A perspective on structural design[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(7): 44-63.
- [19] LUDWIG M, BUCK C H, COROMINA F, et al. Status and trends for space-borne phased array radar[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Long Beach: IEEE, 2005: 1619-1622.
- [20] HOMMEL H, FELDLER H P. Current status of airborne active phased array(AESA) radar systems and future trends[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Long Beach: IEEE, 2005: 1449-1452.
- [21] FELDLER H P. State of the active phased array technology [C]//2007 2nd International ITG Conference on Antennas. Munich: IEEE, 2007: 241-245.
- [22] JOHNSON N L. U.S. space surveillance[J]. Advances in Space Research, 1993, 13(8): 5-20.
- [23] CUI R, PAN J F, ZHU J. Research on jamming effect evaluation method of AN/TPY-2 radar using set pair approach degree[C]//Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, Information Processing and Cloud Computing. Sanya: ACM, 2019: 1-5.
- [24] PODVIG P. History and the current status of the Russian early-warning system[J]. Science & Global Security, 2002, 10(1): 21-60.
- [25] OTANI Y, KOHTAKE N, OHKAMI Y. Dual-use system architecture for a space situational awareness system in Japan[C]//2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2013: 1-8.
- [26] DRYER S, LEVINE E, PELEG M, et al. EL/M 2080 AT-BM early warning and fire control radar system[C]//Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston: IEEE, 1996: 11-16.
- [27] ZHANG Z, WU J, DAI J Y, et al. Optimal path planning with modified A-Star algorithm for stealth unmanned aerial vehicles in 3D network radar environment[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2022, 236(1): 72-81.

- [28] ROULETTE J F, SKRIVSETH K A. Coherent data collection and analysis capability for the AN/SPS-48E radar[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 1997, 18(3): 389.
- [29] STIGLITZ M R, BLANCHARD C. Practical phased-array antenna systems[J]. Microwave Journal, 1992, 35(3): 168-169.
- [30] FONTANA W J, KRUEGER K H. AN/SPY-3: The navy's next-generation force protection radar system[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston: IEEE, 2003: 594-603.
- [31] O'HAVER K W, BARKER C K, DOCKERY G D, et al. Radar development for air and missile defense[J]. Johns Hopkins APL Technology Digest, 2018, 34(2): 140-153.
- [32] MACHI V. 3D modeling could speed procurement of navy destroyer[J]. National Defense, 2018, 102(773): 25-27.
- [33] CHERNEYAK V S, IMMORIEV I Y, VOVSHIN B M. Radar in the Soviet Union and Russia: A brief historical outline[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2003, 18(12): 8-12.
- [34] DEDDEN G. SMART-L multibeam radar[C]//First European Radar Conference. Amsterdam: IEEE, 2004: 17-20.
- [35] KIRCHBERGER S. The PLA Navy's Capability Profile[M]//Global Power Shift. Berlin: Springer, 2015: 171-254.
- [36] HOMMEL H, FELDLE H P. Current status of airborne active phased array (AESA) radar systems and future trends[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Amsterdam: IEEE, 2004: 1449-1452.
- [37] GAO T H, WEI Q, WANG P D, et al. The development status and trend of airborne multifunctional radar[C]//2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Design. Guangzhou: IEEE, 2021: 327-330.
- [38] REEH D. Flying combat in the 21st century[J]. Aviation Week & Space Technology, 2000, 152(1): 57-57.
- [39] MYERS N. The Russian aerospace force[J]. Security Forum Wydawnictwo Naukowe Akademii WSB, 2018, 2(1): 91-103.
- [40] GUY M. Fifth-generation fighter options[J]. Defence Review Asia, 2020, 14(2): 12-18.
- [41] CHHATWAL R S. "Far Vision" for the dragon: China's indigenous AWACS projects[J]. Vayu Aerospace and Defence Review, 2018(5): 53-57.
- [42] PENG Z. Avionics system of E-2D and its roles in future network-centric operation[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5): 689-694.
- [43] WEAVER J M. E3A/D Airborne Warning and Control Systems(AWACS) Component[M]//NATO in Contemporary Times. Cham: Springer International Publishing, 2021: 101-111.
- [44] MOISEEV G V, POLUBOYARINOV P S. Multicriteria choice of a carrier aircraft and main design parameters of an air launcher decoy[J]. Russian Aeronautics(Iz VUZ), 2011, 54(1): 1-8.
- [45] MATHESWARAN V. New generation air-to-air missiles (AAMs)[J]. Vayu Aerospace and Defence Review, 2015, 1(1): 78.
- [46] KUMAR A. Indigenous missiles augment Indian army firepower[J]. Vayu Aerospace and Defence Review, 2020, 1(1): 67-69.
- [47] FRANCESCHETTI G, LANARI R. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [48] NG A H M, GE L L, DU Z Y, et al. Satellite radar interferometry for monitoring subsidence induced by longwall mining activity using Radarsat-2, Sentinel-1 and ALOS-2 data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 61: 92-103.
- [49] FORNARO G, SERAFINO F, REALE D. SAR tomography: Application examples[C]//8th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Aachen: VDE, 2010: 1-2.
- [50] LI L, ZHANG F, SHAO Y, et al. Airborne SAR radiometric calibration based on improved sliding window integral method[J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2022, 22(1): 320.
- [51] ARNOLD E J, YAN J B, HALE R D, et al. Identifying and compensating for phase center errors in wing-mounted phased arrays for ice sheet sounding[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(6): 3416-3421.
- [52] TAKAHASHI T, NAKAMOTO N, OHTSUKA M, et al. A simple on-board calibration method and its accuracy for mechanical distortions of satellite phased array antennas[C]//3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin: IEEE, 2009: 1573-1577.
- [53] WANG H S C. Performance of phased-array antennas with mechanical errors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 535-545.
- [54] OSSOWSKA A, KIM J H, WIESBECK W. Influence of mechanical antenna distortions on the performance of the HRWS SAR system[C]//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE, 2007: 2152-2155.
- [55] ANSELMINI N, SALUCCI M, ROCCA P, et al. Power pattern sensitivity to calibration errors and mutual coupling in linear arrays through circular interval arithmetics[J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2016, 16(6): E791.
- [56] ROCCA P, POLI L, ANSELMINI N, et al. Predicting antenna

- pattern degradations in microstrip reflectarrays through interval arithmetic[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, 10(8): 817-826.
- [57] 张玉洪, 张林让. 最佳稀布阵列的容差分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 1992, 19(1): 30-40.
ZHANG Y H, ZHANG L R. Tolerances of optimum thinning linear arrays[J]. *Journal of Xidian University*, 1992, 19(1): 30-40. (in Chinese)
- [58] BAI Q, LEE H J, FORD K L, et al. Switchable textile microstrip antenna for on/off-body communications and shape distortion study[C]//2012 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation. Singapore: IEEE, 2012: 114-115.
- [59] GENG J P, LI J J, JIN R H, et al. The development of curved microstrip antenna with defected ground structure [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, 98: 53-73.
- [60] WU B I, EHRENBERG I. Ultra conformal patch antenna array on a doubly curved surface[C]//2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham: IEEE, 2013: 792-798.
- [61] 韩如冰. 星载微带阵列天线结构热变形对电性能的影响分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
HAN R B. Analysis of Electronical Performances of Spaceborne Microstrip Array Antenna with Thermal Deformation[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [62] 康明魁. 有源相控阵天线机电热耦合建模、误差分析与优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
KANG M K. Coupled Structural-Electromagnetic-Thermal Modelling, Error Analysis and Optimization Design of Active Phased Array Antennas[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [63] 王艳. 服役环境下有源相控阵天线机电耦合分析与电性能补偿方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
WANG Y. Electromechanical Coupling Analysis and Performance Compensation of Active Phased Array Antennas in Operating Environment[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [64] 王从思. 有源相控阵天线机电热耦合分析、设计与补偿[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
WANG C S. Analysis, Design and Compensation of Electromechanical Thermal Coupling of Active Phased Array Antenna[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [65] GURFIL P, KASDIN N J. Improving missile guidance performance by in-flight two-step nonlinear estimation of radome aberration[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(4): 532-541.
- [66] HUSAIN M, JAMSHED S, QURESHI N. Transient aerothermal analysis of high speed vehicles using CFD[C]//Proceedings of 2012 9th International Bhurban Conference on Applied Sciences & Technology(IBCASC). Islamabad: IEEE, 2012: 171-175.
- [67] QIN Y J, HE J G. Analysis of tangent oval radome based on Matlab[C]//2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. Suzhou: IEEE, 2005: 3-6.
- [68] WECKESSER L B. Radome aerodynamic heating effects on boresight error[C]//Proceedings of 15th Symposium on Electromagnetic Windows. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1980: 97-101.
- [69] NAIR P R U, JHA R M. Temperature dependent EM performance predictions of dielectric slab based on inhomogeneous planar layer model[C]//Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Chicago: IEEE, 2012: 1-2.
- [70] NAIR R U, JHA R M. Electromagnetic design and performance analysis of airborne radomes: Trends and perspectives[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2014, 56(4): 276-298.
- [71] ZHONG L, FU G C, LU J L. A research for influence of temperature on T/R module in radar[C]//2015 Prognostics and System Health Management Conference(PHM). Beijing: IEEE, 2015: 1-9.
- [72] 屈扬. 温度对微波T/R组件中关键器件电性能的影响分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
QU Y. Analysis on the Effect of Temperature on Electrical Properties of Microwave Transmit/Receive Modules' Key Components[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [73] 段宝岩. 电子装备机电耦合理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
DUAN B Y. Theory, Methods and Applications on Electromechanical Coupling of Electronic Equipment[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [74] 汪培进. 电源波纹对PD雷达性能的影响[J]. *现代雷达*, 1997, 19(4): 79-87.
WANG P J. The effects of power supply ripple on PD radar performance[J]. *Modern Radar*, 1997, 19(4): 79-87. (in Chinese)
- [75] WONG K S, RICCIARDI G F. Characterization of amplitude modulation bias coupling for solid-state high-power amplifiers[C]//2013 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham: IEEE, 2013: 64-68.
- [76] ABE D K, PERSHING D E, NGUYEN K T, et al. Experimental study of phase pushing in a fundamental-mode

- multiple-beam klystron[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2007, 54(5): 1253-1258.
- [77] 杨昆. 电源纹波对低噪声放大器噪声性能的影响[J]. 微波与卫星通信, 1997, 6(1): 45-47.
YANG K. Influence of power supply ripple on noise performance of low noise amplifier[J]. Wireless Communication Technology, 1997, 6(1): 45-47. (in Chinese)
- [78] 魏智. 脉冲调制波形畸变和电源纹波对雷达发射机质量的影响[J]. 现代雷达, 1992, 14(3): 81-91.
WEI Z. The effects of the pulse modulation shape distortion and the power supply ripple on the radar transmitter performance[J]. Modern Radar, 1992, 14(3): 81-91. (in Chinese)
- [79] 张薇. 电源纹波对行波管放大器性能影响的研究[J]. 真空电子技术, 2014(4): 58-61.
ZHANG W. Research into power-supply ripple affects TWT amplifier[J]. Vacuum Electronics, 2014(4): 58-61. (in Chinese)
- [80] 谭贤四, 武文, 孙合敏. 分析电源纹波对线性调频脉冲雷达的性能影响[J]. 无线电工程, 2001, 31(S1): 75-77.
TAN X S, WU W, SUN H M. Analyze the influence of power ripple on the performance of LFM pulse radar[J]. Radio Engineering of China, 2001, 31(S1): 75-77. (in Chinese)
- [81] KAMODA H, TSUMOCHI J, KUKI T, et al. A study on antenna gain degradation due to digital phase shifter in phased array antennas[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(8): 1743-1746.
- [82] 高铁, 李建新, 郭燕昌. 相位量化对相控阵天线峰值副瓣电平影响的研究[J]. 中国空间科学技术, 1994, 14(1): 14-19.
GAO T, LI J X, GUO Y C. On effect of phase quantization upon peak sidelobe level in phasedarray antennas[J]. Chinese Space Science and Technology, 1994, 14(1): 14-19. (in Chinese)
- [83] 刘兆磊, 郭燕昌, 张光义. 相控阵天线适当随机馈相法对相位量化副瓣的抑制[J]. 微波学报, 2008, 24(4): 53-55.
LIU Z L, GUO Y C, ZHANG G Y. Appropriate random phasing techniques to reduce phase quantization sidelobes in phased array antennas[J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(4): 53-55. (in Chinese)
- [84] 杨洲, 王积勤. 蒙特卡罗方法分析方向图的偏移[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(S7): 353-354, 357.
YANG Z, WANG J Q. The analysis in offset of antenna pattern with Monte-Carlo method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(S7): 353-354, 357. (in Chinese)
- [85] ROCCA P, MANICA L, ANSELMINI N, et al. Analysis of the pattern tolerances in linear arrays with arbitrary amplitude errors[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12: 639-642.
- [86] ANSELMINI N, MANICA L, ROCCA P, et al. Tolerance analysis of antenna arrays through interval arithmetic[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(11): 5496-5507.
- [87] HE G L, GAO X, ZHOU H. Matrix-based interval arithmetic for linear array tolerance analysis with excitation amplitude errors[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(5): 3516-3520.
- [88] TENUTI L, ANSELMINI N, ROCCA P, et al. Minkowski sum method for planar arrays sensitivity analysis with uncertain-but-bounded excitation tolerances[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(1): 167-177.
- [89] PENG B L, PRIEBE S, KÜRNER T. Effects of phase shift errors on the antenna directivity of phased arrays in indoor terahertz communications[C]//2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS). Barcelona: IEEE, 2014: 355-359.
- [90] KIM J A, LEE J H. Performance degradation in cross-eye jamming due to amplitude/phase instability between jammer antennas[J]. Sensors, 2021, 21(15): 5027.
- [91] DU J X, ROBLIN C. Statistical modeling of disturbed antennas based on the polynomial chaos expansion[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1843-1846.
- [92] ZHU J, WU Q. Modeling two-element antenna array with random phase errors using analytic, Monte Carlo and polynomial chaos expansion methods[C]//2019 IEEE 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Nanjing: IEEE, 2019: 1-3.
- [93] ZHU J, WU Q. Analysis of planar antenna arrays with random feeding phase errors using hybrid polynomial chaos expansion and interpolation methods[C]//2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Nanjing: IEEE, 2021: 1-3.
- [94] 袁帅. 考虑参数不确定性的有源相控阵天线机电耦合建模与稳健设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
YUAN S. Coupled Structural-Electromagnetic Modeling and Robust Design of Active Phased Array Antennas Considering Parameter Uncertainty[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [95] RUZE J. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern[J]. Il Nuovo Cimento(1943-1954), 1952, 9(3): 364-380.
- [96] ELLIOTT R. Mechanical and electrical tolerances for

- two-dimensional scanning antenna arrays[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1958, 6(1): 114-120.
- [97] RONDINELLI L. Effects of random errors on the performance of antenna arrays of many elements[C]//1958 IRE International Convention Record. New York: IEEE, 1966: 174-189.
- [98] KAPLAN P. Predicting antenna sidelobe performance[J]. Microwave Journal, 1986, 29(9): 201-204, 206.
- [99] HSIAO J. Array Sidelobes, Error Tolerance, Gain, and Beamwidth[R]. Washington: Naval Research Lab, 1984.
- [100] LANGE M. Impact of statistical errors on active phased-array antenna performance[C]//MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference. Orlando: IEEE, 2007: 1-5.
- [101] LEE J, LEE Y, KIM H. Decision of error tolerance in array element by the Monte Carlo method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(4): 1325-1331.
- [102] SCHEDIWIY S W, PRICE D, DULWICH F, et al. A quantitative analysis of how phase errors affect the beam quality of phased arrays[C]//2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham: IEEE, 2010: 256-260.
- [103] 张士选, 郑会利, 傅德民, 等. 阵列天线口径幅相误差分析[J]. 西安电子科技大学学报, 1998, 25(4): 525-528. ZHANG S X, ZHENG H L, FU D M, et al. Aperture amplitude and phase error analysis of the antenna array[J]. Journal of Xidian University, 1998, 25(4): 525-528. (in Chinese)
- [104] 周强锋, 赵书敏, 安宁, 等. 基于混沌粒子群算法的阵列天线容差分析[J]. 计算机仿真, 2011, 28(9): 211-214. ZHOU Q F, ZHAO S M, AN N, et al. Tolerance analysis of array antennas by chaos-particle swarm optimization[J]. Computer Simulation, 2011, 28(9): 211-214. (in Chinese)
- [105] FENG Z Y, FANG Z X, WEI Z Q, et al. Joint radar and communication: A survey[J]. China Communications, 2020, 17(1): 1-27.
- [106] BLAKE L V. Recent advancements in basic radar range calculation technique[J]. IRE Transactions on Military Electronics, 1961, MIL-5(2): 154-164.
- [107] SKOLNIK M. An Introduction to Impulse Radar[R]. Washington DC: Naval Research Lab, 1990.
- [108] BRENNAN L E, REED I S. Optimum processing of unequally spaced radar pulse trains for clutter rejection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1968, AES-4(3): 474-477.
- [109] NESTER W. A study of tracking accuracy in monopulse phased arrays[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1962, 10(3): 237-246.
- [110] HSIAO J K. Design of error tolerance of a phased array[J]. Electronics Letters, 1985, 21(19): 834-836.
- [111] 修建雨. 雷达结构变形与探测性能的机电耦合建模与优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019. XIU J Y. Mechanical-Electromagnetic Coupling Modeling and Optimization Design of Radar Structural Deformation and Detection Performance[D]. Xi'an: Xidian University, 2019. (in Chinese)
- [112] ELDEK A A. Ultrawideband double rhombus antenna with stable radiation patterns for phased array applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(1): 84-91.
- [113] LU B, GONG S X, ZHANG S, et al. Optimum spatial arrangement of array elements for suppression of grating lobes of radar cross section[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 114-117.
- [114] YUAN N, YEO T S, NIE X C, et al. A fast analysis of scattering and radiation of large microstrip antenna arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(9): 2218-2226.
- [115] TANAKA T, NISHIOKA Y, INASAWA Y, et al. MoM analysis of radiation and scattering of broadband array Antenna[C]//2013 International Symposium on Electromagnetic Theory. Hiroshima: IEEE, 2013: 804-807.
- [116] 池越, 张鹏垒, 陈国鹰, 等. 基于免疫克隆选择算法的天线方向图综合技术研究[J]. 通信技术, 2009, 42(5): 71-73, 134. CHI Y, ZHANG P L, CHEN G Y, et al. Pattern synthesis based on immune clone selection algorithm[J]. Communications Technology, 2009, 42(5): 71-73, 134. (in Chinese)
- [117] 王伟锋. 阵列天线结构变形与 RCS 耦合建模及综合性能分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014. WANG W F. Coupling Structural-RCS Modeling and Integration Performance Analysis for Array Antennas with Mechanical Distortion[D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [118] 苏力争, 李智, 刘继鹏, 等. 大型相控阵雷达天线阵面结构精度分析及控制[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(2): 75-79. SU L Z, LI Z, LIU J P, et al. Analysis and control of large phased-array radar antenna array structure precision[J]. Fire Control Radar Technology, 2017, 46(2): 75-79. (in Chinese)
- [119] 胡雪梅, 康明魁, 王伟, 等. 六边形相控阵天线阵面误差的影响分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39

- (12): 1629-1632, 1664.
HU X M, KANG M K, WANG W, et al. On influence of structural errors for hexagonal phased array antennas [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1629-1632, 1664. (in Chinese)
- [120] WANG H S C. Performance of phased-array antennas with mechanical errors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 535-545.
- [121] ZAITSEV E, HOFFMAN J. Phased array flatness effects on antenna system performance[C]//2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham: IEEE, 2010: 121-125.
- [122] 刘炳辉, 程春红, 袁海平. 雷达结构精度影响因素与测量的分析研究[J]. 电子机械工程, 2019, 35(1): 5-10, 28.
LIU B H, CHENG C H, YUAN H P. Analysis and research of effect factor and measurement of radar structure precision[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2019, 35(1): 5-10, 28. (in Chinese)
- [123] MOBREM M. Methods of analyzing surface accuracy of large antenna structures due to manufacturing tolerances[C]//44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston: AIAA, 2003: 1453.
- [124] CUI Q F, LI M, PENG Z L, et al. Configuration Optimization and Surface Accuracy Investigation of Solid Surface Deployable Reflector[M]//Theory, Methodology, Tools and Applications for Modeling and Simulation of Complex Systems. Singapore: Springer, 2016: 672-684.
- [125] 何海丹, 魏旭, 杨顺平, 等. Monte Carlo法在平板裂缝天线辐射缝导纳误差分析中的应用[J]. 电波科学学报, 2009, 24(2): 365-368.
HE H D, WEI X, YANG S P, et al. Error analysis of admittance of radiating slot in planar slotted-waveguide array antennas with Monte Carlo method[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(2): 365-368. (in Chinese)
- [126] 刘芃. 星载天线反射面结构多目标优化设计方法[C]//第二十一届全国复合材料学术会议(NCCM-21)论文集. 呼和浩特: 中国航空学会, 2020: 116-122.
LIU P. Multi-objective optimization design method of satellite antenna reflector[C]//Proceedings of the 21st National Composite Materials Academic Conference (NCCM-21). Hohhot: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2020: 116-122. (in Chinese)
- [127] 张帅, 龚书喜, 路宝, 等. 利用 PSO 同时优化阵列天线的辐射和散射特性[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(4): 726-730.
ZHANG S, GONG S X, LU B, et al. Optimizing both radiation and scattering characteristics of the array antenna utilizing PSO[J]. Journal of Xidian University, 2010, 37(4): 726-730. (in Chinese)
- [128] WANG W T, GONG S X, WANG X, et al. Differential evolution algorithm and method of moments for the design of low-RCS antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 295-298.
- [129] 丛丽丽. 基于各向异性超表面的宽带高增益低 RCS mushroom 天线[C]//2018 年全国微波毫米波会议论文集(上册). 北京: 电子工业出版社, 2018: 350-353.
CONG L L. A broadband high-gain low-RCS mushroom antenna using anisotropic metasurface[C]//Proceedings of the 2018 National Microwave and Millimeter Wave Conference (Volume 1). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 350-353. (in Chinese)
- [130] 张光义. 空间探测相控阵雷达[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
ZHANG G Y. Space Detection Phased Array Radar[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [131] 张晓飞. LTCC 多芯片功放组件微流道设计及散热特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
ZHANG X F. Design and Heat Dissipation Characteristics Study of LTCC Microchannels Served to Power Amplifier Chip Modules[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [132] SCOTT M. SAMPSON MFR active phased array antenna[C]//IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston: IEEE, 2003: 119-123.
- [133] KAWASAKI H, NODA H, YABE T, et al. Characteristics of reservoir embedded loop heat pipe in deployable radiator on ETS-VIII at beginning of the experiment under orbital environment[C]//40th Thermophysics Conference. Reston: AIAA, 2008: 119-123.
- [134] 祝薇, 陈新, 祝志祥, 等. 基于热电效应的新型制冷器件研究[J]. 智能电网, 2015, 3(9): 823-828.
ZHU W, CHEN X, ZHU Z X, et al. Research on new type refrigeration device based on thermoelectric effect [J]. Smart Grid, 2015, 3(9): 823-828. (in Chinese)
- [135] 于惠. 基于微通道结构的间接液冷散热技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
YU H. Research on the Indirect Liquid Cooling Technique Based on Microchannels[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [136] 王从思, 宋正梅, 康明魁, 等. 微通道冷板在有源相控阵天线上的应用[J]. 电子机械工程, 2013, 29(1): 1-4, 13.
WANG C S, SONG Z M, KANG M K, et al. Application of micro-channel cold plate to active phased array antenna[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2013, 29

- (1): 1-4, 13. (in Chinese)
- [137] 卢婷. 相控阵天线微小流道热流特性等效建模方法研究与热设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
LU T. Research on Equivalent Modeling Method of Heat Flow Characteristics of Microchannel of Phased Array Antenna and Thermal Design[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. (in Chinese)
- [138] MATIN K, BAR-COHEN A, MAURER J J. Modeling and simulation challenges in embedded two phase cooling: DARPA's ICECool program[C]//ASME 2015 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems Collocated with the ASME 2015 13th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. San Francisco: ASME, 2015: V003T10 A024.
- [139] VAN ERP R, SOLEIMANZADEH R, NELA L, et al. Co-designing electronics with microfluidics for more sustainable cooling[J]. *Nature*, 2020, 585(7824): 211-216.
- [140] 张彬. 基于机电热耦合的星载有源相控阵天线热设计方法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
ZHANG B. Thermal Design of Spaceborne Active Phased Array Antenna Based Structural-Electromagnetic-Thermal Coupling[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [141] 张金平, 李建新. 星载雷达有源相控阵天线轻量化技术[C]//2009年全国天线年会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2009: 709-713.
ZHANG J P, LI J X. Light-weighting technologies for the active phased array of spaceborne radar[C]//Proceedings of the China Antenna Annual Conference. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009: 709-713. (in Chinese)
- [142] 徐明明, 刘嘉山, 蔺祥宇, 等. 薄膜有源相控阵天线的设计与实现[C]//2017年全国天线年会论文集(上册). 北京: 电子工业出版社, 2017: 580-582.
XU M M, LIU J S, LIN X Y, et al. Design and fabrication of membrane active phased-array antennas[C]//Proceedings of the China Antenna Annual Conference(Volume 1). Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 580-582. (in Chinese)
- [143] HUANG J. The development of inflatable array antennas[J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2001, 43(4): 44-50.
- [144] HAUHE M S, WOOLDRIDGE J J. High density packaging of X-band active array modules[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B*, 1997, 20(3): 279-291.
- [145] 王新宽, 蒋媛, 熊召新. 基于时间调制的稀疏直线阵方向图综合[J]. *陕西理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(6): 51-58.
WANG X K, JIANG Y, XIONG Z X. Pattern synthesis of thinned linear arrays based on time modulated technique[J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 34(6): 51-58. (in Chinese)
- [146] 任刚强. 杂波环境中稀疏MIMO雷达宽带DOA估计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
REN G Q. Wideband DOA Estimation Under Clutter Using MIMO Radar with Sparse Array[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [147] 唐思晴. 结合场景需求的雷达阵列与方向图优化设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
TANG S Q. Radar Array and Pattern Optimization Design Based on Scene Requirements[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [148] KHAN A A, BROWN A K. Null steering in irregularly spaced sparse antenna arrays using aperture distributed subarrays and hybrid optimiser[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2014, 8(2): 86-92.
- [149] 杨志伟, 贺顺, 廖桂生, 等. 机翼共形阵列的阵元位置估计方法[J]. *电子学报*, 2013, 41(10): 1969-1974.
YANG Z W, HE S, LIAO G S, et al. Sensor position estimation for wing conformal antenna array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(10): 1969-1974. (in Chinese)
- [150] OLIVERI G, MASSA A. Genetic algorithm(GA)-enhanced almost difference set(ADS)-based approach for array thinning[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011, 5(3): 305-315.
- [151] 李龙军, 王布宏, 夏春和. 稀疏共形阵列天线方向图综合[J]. *电子学报*, 2017, 45(1): 104-111.
LI L J, WANG B H, XIA C H. Synthesis of sparse conformal array antennas pattern[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(1): 104-111. (in Chinese)
- [152] LEE E T, EUN H C. Optimal sensor placement in reduced-order models using modal constraint conditions[J]. *Sensors*, 2022, 22(2): 589.
- [153] HE C, XING J C, LI J L, et al. A combined optimal sensor placement strategy for the structural health monitoring of bridge structures[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013, 9(11): 820694.
- [154] YI T H, LI H N. Methodology developments in sensor placement for health monitoring of civil infrastructures

- [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 8(8): 612726.
- [155] LI B B, DER KIUREGHIAN A. Robust optimal sensor placement for operational modal analysis based on maximum expected utility[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 75: 155-175.
- [156] CASTRO-TRIGUERO R, SAAVEDRA FLORES E I, DIAZDELAO F A, et al. Optimal sensor placement in timber structures by means of a multi-scale approach with material uncertainty[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(12): 1437-1452.
- [157] VINCENZI L, SIMONINI L. Influence of model errors in optimal sensor placement[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 389: 119-133.
- [158] KIM T, YOUN B D, OH H. Development of a stochastic effective independence(SEFI) method for optimal sensor placement under uncertainty[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 111: 615-627.
- [159] PAPANITRIOU C, LOMBAERT G. The effect of prediction error correlation on optimal sensor placement in structural dynamics[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 28: 105-127.
- [160] YANG C, LIANG K, ZHANG X P. Strategy for sensor number determination and placement optimization with incomplete information based on interval possibility model and clustering avoidance distribution index[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 366: 113042.
- [161] WANG H S C. Performance of phased-array antennas with mechanical errors[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(2): 535-545.
- [162] ZHOU J Z, KANG L, TANG B F, et al. Adaptive compensation of flexible skin antenna with embedded fiber Bragg grating[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4385-4396.
- [163] 袁慎芳, 闫美佳, 张巾巾, 等. 一种适用于梁式机翼的变形重构方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(6): 825-830.
YUAN S F, YAN M J, ZHANG J J, et al. Shape reconstruction method of spar wing structure[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(6): 825-830. (in Chinese)
- [164] ALIOLI M, MASARATI P, MORANDINI M, et al. Membrane shape and load reconstruction from measurements using inverse finite element analysis[J]. AIAA Journal, 2016, 55(1): 297-308.
- [165] BRUNO R, TOOMARIAN N, SALAMA M. Shape estimation from incomplete measurements: A neural-net approach[J]. Smart Materials and Structures, 1994, 3(2): 92-97.
- [166] 李飞. 有源相控阵天线结构响应重构方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LI F. Research on Structural Response Reconstruction Method of Active Phased Array Antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [167] 翟孟云, 严育林. 阵列天线理论导引[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
ZHAI M Y, YAN Y L. Array Antenna Theory Guide [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980. (in Chinese)
- [168] 张祖伦. 相控阵雷达中相位误差分析及补偿方法[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(2): 95-100.
ZHANG Z L. Phase error analysis and compensation in airborne phased-array radar[J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(2): 95-100. (in Chinese)
- [169] 王从思, 毛静, 周金柱, 等. 面向数字器件量化的变形有源相控阵天线幅相补偿量确定方法: CN106991211 A[P]. 2017-07-28.
WANG C S, MAO J, ZHOU J Z, et al. A Method for Determining Amplitude and Phase Compensation Quantities for Deformed Active Phased Array Antennas for Digital Device Quantification: CN106991211A[P]. 2017-07-28. (in Chinese).
- [170] 周云霄. 面向机电耦合的有源相控阵天线电性能计算、补偿和集成设计软件[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
ZHOU Y X. Software of Electrical Performance Calculation, Compensation and Integrated Design of Active Phased Array Antenna Orientated Structural-Electromagnetic Coupling[D]. Xi'an: Xidian University, 2018. (in Chinese)
- [171] 杨东萍, 未连保, 衣尚军. 相位误差对相控阵天线影响分析与改进[J]. 无线电工程, 2013, 43(3): 24-26.
YANG D P, WEI L B, YI S J. Analysis and improvement of phase error effect on phase array antenna[J]. Radio Engineering, 2013, 43(3): 24-26. (in Chinese)
- [172] AGRAWAL A K, HOLZMAN E L. Active phased array design for high reliability[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(4): 1204-1211.
- [173] SINGH GREWAL N, RATTAN M, SINGH PATTERN M. A linear antenna array failure correction using improved bat algorithm[J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2017, 27(7): e21119.
- [174] KHAN S U, QURESHI I M, SHOAI B, et al. Correc-

- tion of faulty pattern using cuckoo search algorithm and symmetrical element failure technique along with distance adjustment between the antenna array[C]//2015 12th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). Islamabad: IEEE, 2015: 633-636.
- [175] 牛传峰, 吴旭, 赵东贺. 相控阵天线阵元失效的影响分析及补偿[J]. 无线电通信技术, 2013, 39(5): 44-46, 77.
NIU C F, WU X, ZHAO D H. Influence of failed elements on phased array antenna and its compensation[J]. Radio Communications Technology, 2013, 39(5): 44-46, 77. (in Chinese)
- [176] 潘超, 张任, 李瑞. 阵元失效对相控阵天线低副瓣的影响分析[J]. 舰船电子工程, 2016, 36(4): 83-85, 103.
PAN C, ZHANG R, LI R. Effects of element failure on side-lobe level of phased array antenna[J]. Ship Electronic Engineering, 2016, 36(4): 83-85, 103. (in Chinese)
- [177] 汪一心, 朱桓, 徐晓文, 等. 阵列有源天线单元失效的影响与补偿[J]. 现代雷达, 1998, 20(4): 58-62.
WANG Y X, ZHU H, XU X W, et al. Influence of failed elements on active array antenna and its compensation [J]. Modern Radar, 1998, 20(4): 58-62. (in Chinese)
- [178] 李建新, 高铁. 固态有源相控阵天线中的单元失效与容差分析[J]. 现代雷达, 1992, 14(6): 37-44.
LI J X, GAO T. Analysis of element failure and tolerance in solid-state active phased array[J]. Modern Radar, 1992, 14(6): 37-44. (in Chinese)
- [179] 胡乃岗, 保宏, 连培园, 等. 大型相控阵天线结构与调整机构一体化设计[J]. 机械工程学报, 2015, 51(1): 196-202.
HU N G, BAO H, LIAN P Y, et al. Synthetic design of structure and adjustment mechanism of large phased array antennas[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(1): 196-202. (in Chinese)
- [180] SON S H, YUN J S, PARK U H, et al. Theoretical analysis for beam pointing accuracy of stair-planar phased array antenna with tracking beam[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Columbus: IEEE, 2003: 204-207.
- [181] SONG G, KELLY B, AGRAWAL B N. Active position control of a shape memory alloy wire actuated composite beam[J]. Smart Materials and Structures, 2000, 9(5): 711-716.
- [182] MAILLOUX R J. 相控阵天线手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [183] TAKANO T, HOSONO H, SAEGUSA K, et al. Proposal of a multiple folding phased array antenna and phase compensation for panel steps[C]//2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. Spokane: IEEE, 2011: 1557-1559.
- [184] SON S H, EOM S Y, JEON S I, et al. Automatic phase correction of phased array antennas by a genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(8): 2751-2754.
- [185] STEYSKAL M, MAILLOUX R J. Generalization of a phased array error correction method[C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Baltimore: IEEE, 1996: 506-509.
- [186] LESUEUR G, CAER D, MERLET T, et al. Active compensation techniques for deformable phased array antenna[C]//2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin: IEEE, 2009: 1578-1581.
- [187] SCHIPPERS H, VAN TONGEREN J H, KNOTT P, et al. Vibrating antennas and compensation techniques Research in NATO/RTO/SET 087/RTG 50[C]//2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2007: 1-13.
- [188] QIN Y J, HE J G. Analysis of tangent oval radome based on Matlab[C]//2005 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings. Suzhou: IEEE, 2005. DOI:10.1109/APMC.2005.1607107.
- [189] 程传兵, 王重海, 王洪升, 等. 陶瓷天线罩无机涂层的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(5): 1161-1164, 1169.
CHENG C B, WANG C H, WANG H S, et al. Research progress of ceramic radome inorganic coating[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(5): 1161-1164, 1169. (in Chinese)
- [190] ROCK J C, MULLINS J H, BOOTH J P, et al. The past, present, and future of electronically-steerable phased arrays in defense applications[C]//2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2008: 1-7.
- [191] JIN X C, FAN X L, LU C S, et al. Advances in oxidation and ablation resistance of high and ultra-high temperature ceramics modified or coated carbon/carbon composites[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38(1): 1-28.
- [192] TANG S F, HU C L. Design, preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites for aerospace applications: A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(2): 117-130.
- [193] CHERUKATTU GOPINATHAPANICKER J, INAMDAR A, ANAND A, et al. Radar transparent, impact-resistant, and high-temperature capable radome composites using polyetherimide-toughened cyanate ester resins for high-speed aircrafts through resin film infusion[J].

- Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59 (16): 7502-7511.
- [194] XU W Y, DUAN B Y, LI P, et al. Multiobjective particle swarm optimization of boresight error and transmission loss for airborne radomes[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(11): 5880-5885.
- [195] YUE S, LI X, QI X B, et al. Design of double-layer transmission structure of radome[C]//2019 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference(CSQRWC). Taiyuan: IEEE, 2019: 1-3.
- [196] HUANG F S, CHEN M, WANG K. Research on optimization of radome based on phased array radar-seeker[C]// International Conference on Artificial Intelligence for Communications and Networks. Xining: Springer, 2021: 423-432.
- [197] ZHOU P Y, ZHANG Z, HE M. Radiation pattern recovery of the impaired-radome-enclosed antenna array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(9): 1639-1643.
- [198] WANG C S, WANG Y, CHEN Y K, et al. Coupling model and electronic compensation of antenna-radome system for hypersonic vehicle with effect of high-temperature ablation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 68(3): 2340-2355.
- [199] APPANNAGARRI N, BARDI I, EDLINGER R, et al. Modeling phased array antennas in Ansoft HFSS[C]// Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology(Cat. No.00TH85 10). Dana Point: IEEE, 2000: 323-326.
- [200] RÜTSCHLIN, WITTIG T. State of the art antenna simulation with CST STUDIO SUITE[C]//2015 9th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP). Lisbon: IEEE, 2015: 1-5.
- [201] WEI C N, WU K L. Array-antenna decoupling surfaces for quasi-yagi antenna arrays[C]//2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. San Diego: IEEE, 2017: 2103-2104.
- [202] BLAIR C, LÓPEZ RUIZ S, MORALES M. 5G, A MultiPhysics simulation vision from antenna element design to systems link analysis[C]//2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Granada: IEEE, 2019: 1420-1422.
- [203] KEDAR A, BISHT A S, SREENIVASULU K, et al. GaN based wide band C-band active phased array antenna design with wide scan volume[C]//2020 IEEE International Radar Conference. Washington: IEEE, 2020: 88-93.
- [204] LUO Y, LIU K, GAO Q, et al. Research on conformal phased array T/R module based on LCP substrate[C]// 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology(ICEPT). Xiamen: IEEE, 2021: 1-5.
- [205] 陈金虎. 基于机电耦合的车载有源相控阵雷达服役载荷结构分析与优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- CHEN J H. Structural Analysis and Optimization Design of In-Service Load of Vehicle-Mounted Active Phased Array Radar Based on electromechanical Coupling[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [206] GALWAY L, MCCULLAGH P, LIGHTBODY G, et al. The potential of the brain-computer interface for learning: A technology review[C]//2015 IEEE International Conference on Computer and Information Technology; Ubiquitous Computing and Communications; Dependable, Autonomic and Secure Computing; Pervasive Intelligence and Computing. Liverpool: IEEE, 2015: 1554-1559.
- [207] FRANTZ R Z, CORCHUELO R, ROOS-FRANTZ F. On the design of a maintainable software development kit to implement integration solutions[J]. Journal of Systems and Software, 2016, 111: 89-104.
- [208] GROUT V, AKINSOLU M O, LIU B, et al. Software solutions for antenna design exploration: A comparison of packages, tools, techniques, and algorithms for various design challenges[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2019, 61(3): 48-59.
- [209] SILVA Y N, ALMEIDA I, QUEIROZ M. SQL: From traditional databases to big data[C]//Proceedings of the 47th ACM Technical Symposium on Computing Science Education. New York: ACM, 2016: 413-418.
- [210] WANG C S, YUAN S, GAO W, et al. A Taylor-surrogate-model-based method for the electrical performance of array antennas under interval position errors[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(7): 1221-1225.
- [211] DANYLOV A A, GOYETTE T M, WALDMAN J, et al. Terahertz inverse synthetic aperture radar(ISAR) imaging with a quantum cascade laser transmitter[J]. Optics Express, 2010, 18(15): 16264-16272.
- [212] KAPILEVICH B, PINHASI Y, ARUSI R, et al. 330 GHz FMCW image sensor for homeland security applications[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2010, 31(11): 1370-1381.
- [213] BISWAS D, SELVANAYAKI K, PATEL N, et al. An airborne antenna system for broadside coverage with varying roll and pitch angles[C]//2007 IEEE Applied Electromagnetics Conference. Kolkata: IEEE, 2007: 1-4.
- [214] URCIA M, BANKS D. Structurally integrated phased ar-

rays[C]//2011 Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2011: 1-8.

- [215] BAEK S M, KO M G, KIM M S, et al. Structural design of conformal load-bearing array antenna structure (CLAAS)[J]. *Advanced Composite Materials*, 2017, 26 (sup1): 29-42.
- [216] JAVID B, HEYDARI P. Design and implementation of a CMOS 4-bit 12-GS/s data acquisition system-on-chip [J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2014, 22(10): 2164-2175.
- [217] IMTIAZ S A, JIANG Z, RODRIGUEZ-VILLEGAS E. An ultralow power system on chip for automatic sleep staging[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2017, 52(3): 822-833.
- [218] CAO C H, DING Y P, YANG X G, et al. A 24-GHz transmitter with on-chip dipole antenna in 0.13- μm CMOS[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2008, 43(6): 1394-1402.

作者简介



徐鹏颖 男,1993年3月出生于山西省朔州市。现为西安电子科技大学博士研究生。主要研究方向为有源相控阵天线性能调控方法、电子装备结构健康监测、传感器布局优化方法及结构变形重构算法。
E-mail: xupengying1993@163.com



蔺卡宾 男,1990年8月出生于甘肃省天水市。西安电子科技大学机电工程学院华山准聘副教授。主要研究方向为微纳机电系统、天线结构与散热设计、电子制造与集成测试。在 *JACS*、*ACS Nano*、*Nanoscale* 等杂志共发表SCI论文19篇,Google学术检索引用213次。
E-mail: linkabin@xidian.edu.cn



韩宝庆 男,1988年11月出生于陕西省咸阳市。博士毕业于西安交通大学机械工程专业。西安电子科技大学华山学者,机电工程学院准聘副教授。主要研究方向为微纳传感器、气体检测、机电系统、疾病诊断、天线结构设计、多物理场耦合等。
E-mail: hanbaoqing18@163.com



王志海 男,1981年生。博士,中国电子科技集团公司第三十八研究所研究员。主要研究方向为有源相控阵天线结构分析、多学科耦合仿真设计、封装工艺可靠性设计等。
E-mail: ericwang@ustc.edu.cn



于坤鹏 男,1987年1月出生于安徽省临泉县。博士,中国电子科技集团公司第三十八研究所高级工程师。主要研究方向为电子装备多学科耦合优化设计、振动与噪声控制、可靠性设计等。
E-mail: xspace105@126.com



尹奎英 女,1977年出生于山东省潍坊市。博士,研究员,中国电子科技集团公司第十四研究所人脑机实验室首席专家。主要研究方向为SAR图像处理、SAR目标识别、脑机接口等。
E-mail: yin_kuiying@sina.cn



冷国俊 男,1983年出生于江苏省镇江市。博士,中国电子科技集团公司第二十九研究所高级工程师。主要研究方向为天线结构优化及保型设计。
E-mail: guojun.leng@gmail.com



王艳 女,1988年出生于陕西省西安市。博士,西安建筑科技大学副教授。2022年入选西安市科协青年人才托举计划项目。主要研究方向为阵列天线机电耦合理论与性能保障方法。目前在IEEE TAP等高水平期刊发表SCI论文10篇。
E-mail: wangyan5169@163.com



李智 男,1980年生。西安电子工程研究所研究员。主要研究方向为雷达总体结构设计、雷达武器系统结构分析、相控阵雷达阵面结构精度及控制技术。
E-mail: zhili206@hotmail.com



马小飞 男,1980年4月出生于甘肃省甘谷县。教授,博士生导师,西安空间无线电技术研究所首席研究员,中国航天科技集团学术带头人。主要研究方向为空间可展开结构和星载产品结构设计与分析技术。
E-mail: maxf041600@sina.com



王从思(通讯作者) 男,1980年10月出生于安徽省凤阳县。二级教授,博士生导师,“万人计划”领军人才,国家科技进步奖一等奖获得者。近年来发表SCI论文100余篇,提出的多项机电耦合理论创新成果应用于四代机J20、中国天眼FAST等多个国家重大工程。主要研究方向为电子装备的机电耦合领域。
E-mail: congsiwang@xidian.edu.cn