

# 机载对海探测雷达发展趋势

贺丰收, 张涛, 芦达

中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所, 航空电子系统射频综合仿真航空科技重点实验室, 无锡 214063

**摘要** 机载雷达体制经历了从单脉冲、脉冲多普勒, 到相控阵的技术飞跃, 机载雷达对海探测的综合功能和性能也伴随着每一代海军航空兵装备的更新不断取得突破。本文在综合分析机载雷达内在演进规律和雷达形态发展变化的基础上, 梳理了机载雷达对海探测的技术发展趋势, 总结了机载对海探测雷达未来主要能力特征、系统架构和发展方向, 结合近年来微波光子学、人工智能、超材料、量子雷达等新兴前沿学科的发展成果, 展望了未来机载对海探测雷达的发展趋势。

**关键词** 脉冲多普勒; 相控阵; 海军航空兵; 系统架构

制海权是大国实力象征, 海上作战能力建设受到了各国的重视。广域的海上作战首先需要解决目标探测问题。机载平台具有机动、快速、灵活等特点, 能够突破舰船等海面平台的视距限制, 提供远距离态势感知能力和精确的目标运动信息获取能力。因此, 机载对海探测能力在海上作战体系中占有重要地位。机载雷达作为一种全天时、全天候、远距离的可靠探测装备, 其技术发展很大程度上决定了战斗力的水平。随着当前信息技术的快速发展和各种军事理论的创新, 机载雷达技术也得到了飞速的发展。相控阵技术的成熟, 很大程度上缓解了困扰雷达界多年的探测距离问题和发射机可靠性问题。但是新的作战需求牵引和新技术发展的推动, 将促进雷达技术继续向前发展。从需求、技术、产品等几个维度分析未来的机载对海探测雷达值得关注的因素, 未来的雷达产品的具体形态。

## 1 机载对海探测雷达发展历程

从第二次世界大战尤其是太平洋战争开始, “海空一体”成为海军作战的主要模式, 依托航母战斗群、岛基和岸基机场的作战飞机, 控制区域制空权和制海权。海军航空兵作为实施依空制海战略的核心力量, 在现代海战中担负了实施区域侦察、监视、火控打击和指挥中枢的作用, 其中机载雷达作为海军各类型作战飞机获取战场态势、引导火力打击、保障飞行安全的重要机载传感器发挥了举足轻重的作用。世界上第一部机载雷达于1937年诞生在英国, 此后的70多年间, 机载对海探测雷达技术经历了各种改进与变化, 大体上可以

分为脉冲雷达、脉冲多普勒雷达、相控阵雷达3个阶段<sup>[1]</sup>。

### 1.1 机载单脉冲雷达

早期的机载雷达为脉冲雷达, 主要应用于20世纪50~60年代的全天候截击机、预警监视机。脉冲雷达能够实现自动搜索、单目标跟踪以及实波束地图测绘等功能, 发展到后期也具备了初步的下视能力。脉冲雷达成功地装备在米格-21、F-104G等战斗机, TBM-3W等预警监视机上。虽然早期的脉冲雷达初步具备了下视能力, 但由于相继发射的脉冲是相关的, 因此不容易区分空中目标与地/海杂波, 其下视能力只能算是勉强合格。典型机载对海脉冲雷达有美国装载于预警监视机的AN/APS-3、AN/APS-6、AN/APS-20预警搜索雷达等, 以下主要介绍AN/APS-20雷达。

AN/APS-20是美国最早的预警搜索雷达, 工作于S波段, 雷达由天线、发射机、接收机、电子控制放大器、方位距离显示器、雷达控制盒及2个陀螺仪组成<sup>[2]</sup>。AN/APS-20功能相对简单, 最早装载于TBM-3W飞机(图1), 并于1945年4月开始进行飞行试验, TBM-3W飞机受技术条件和载机的限制, 还需将雷达信号在处理后再发回水面舰艇的战斗信息中心进一步处理。此后为了弥补此短板, 又在B17轰炸机上进行试验, 使之不但可以进行雷达搜索, 还可以起到一个空中指挥所的作用。后续美国海军相继将此套雷达系统装在AF-2S反潜机、AF-2W空中早期预警机、P2V-7巡逻机甚至ZPG-2W/ZPG-3W飞艇上, 并由AF-2W和AF-2S这2种机型共同参与航母猎潜作战, 由AF-2W探测水面航行的敌潜艇, 由反潜型的AF-2S执行攻击。

收稿日期: 2017-09-25; 修回日期: 2017-10-10

基金项目: 航空科学基金项目(2015ZC07003, 2016ZC07004)

作者简介: 贺丰收, 高级工程师, 研究方向为雷达总体设计、资源管理, 电子邮箱: hefengshou1979@163.com

引用格式: 贺丰收, 张涛, 芦达. 机载对海探测雷达发展趋势[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 28-35; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.003

早期的 APS-20 雷达没有动态图形显示、没有高度信息、没有目标自动跟踪能力,系统粗糙、笨重、使用不便,需要大量的电子辅助设备、冷却系统和维护设施,而且受海杂波影响,其对水面舰艇的探测能力不佳,在近岸搜索以及多目标跟踪等任务能力上存在极大不足。



图 1 AN/APS-20 雷达

Fig. 1 AN/APS-20

## 1.2 机载脉冲多普勒雷达

脉冲多普勒(PD)雷达的出现有效地避开了地/海杂波抑制问题。脉冲多普勒雷达普遍应用于当代常规战斗机、监视机和预警机,具备远距离小目标探测、海面/地面运动目标探测与跟踪、地/海杂波抑制与下视等功能。脉冲多普勒雷达装备的典型战机包括米格-29、F-15、F-16、F-14 与 F/A-18A/B 等。F-14 战机装备的 AWG-9 雷达真正标志着机载雷达完全具备对海探测能力,可作为远距和中距脉冲多普勒探测器使用,能从地面或海面杂波干扰背景中检测和跟踪低空飞行目标。F-14 战机之后美军新一代舰载机 F/A-18AB 装备的 AN/APG-65 雷达则代表了 20 世纪 80 年代机载 PD 火控雷达的最高水平,具备海面目标搜索与跟踪能力,其后续改进型 AN/APG-73 雷达在对海探测方面的杂波抑制能力更强。典型的机载对海探测脉冲多普勒雷达还有安装于巡逻机 P-3C 上的 AN/APS-137、P-8A 上的 AN/APY-10 搜索雷达、安装于预警监视机 E-2C 上的 AN/APS-145 预警雷达<sup>[3]</sup>。

### 1) AWG-9。

AWG-9 为机载武器控制雷达(图 2)。最初是 1968 年由休斯飞机公司(hughes aircraft company)为美国海军的 F-111B 飞机研制。F-111B 取消后,AWG-9 雷达及其火控系统的研制并没有停止,而是加以修改和进一步扩大其使用范围,从而用于新研制的“空中优势”战斗机 F-14A。F-14A 主

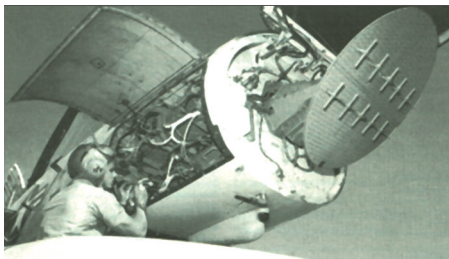


图 2 AWG-9 雷达

Fig. 2 AWG-9

要用于舰队防御,其近战能力和机动性比 F-111B 均有改善,1973 年正式装备部队使用。AWG-9 还具有边搜索边跟踪的能力,能同时跟踪 24 个分散的目标。

### 2) AN/APY-10。

Raytheon 公司以 AN/APS-137 雷达为基础,为美国海军(USN)P-8A 海神海上巡逻与监视飞机研制了 AN/APY-10 海上与地面监视雷达(图 3)。AN/APY-10 由天线控制电子部件、雷达数据中心、发射机、接收机/激励器/处理机及天线 5 个武器可更换组件(WRA)构成<sup>[4]</sup>。相比 AN/APS-137 雷达,新雷达体积小,质量轻,所需功率低,并提高了平均故障间隔时间(MTBF)、增加了目标跟踪和彩色气象回避能力。在 P-8A 武器系统中,实现了系统控制、显示和数据分配、AN/APY-10 与飞机任务控制和显示系统(MCDS)的完全集成。AN/APY-10 的海面、沿海地区及地面监视功能得到优化,问世之初被视为唯一具有海上及地面监视“超高分辨率”成像模式的系统。

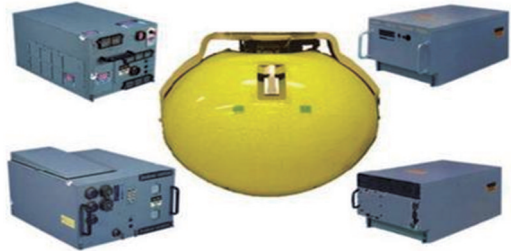


图 3 AN/APY-10 雷达

Fig. 3 AN/APY-10

### 3) AN/APS-145。

AN/APS-145 装载于美国 E-2C 预警机,是专为工作在海面上空和沿海陆地上空而设计的,可提供 2400 万 km<sup>3</sup> 的空间监视并能同时监测和跟踪 2000 个目标以及同时探测和跟踪来自海面、空中、地面和海陆交界处的威胁(图 4)。AN/APS-145 在海面上空时能够跟踪运动和静止的海面与空中目标;在地面、海面和超视距(OTH)交界处,随着搜索环境的变化,雷达的环境管理系统(EMS)能自动修正信号处理和跟踪算法以适应环境的变化。配有 EMS 的 APS-145 雷达成功地集综合性、高性能和高可靠性于一体。据 E-2C 的制造商 Northrop Grumman 公司称,与 APS-138 和 APS-139 相比,APS-145 的作用距离和识别能力增加了 40%,搜索范围扩展



图 4 装有 AN/APS-145 雷达的 E-2C 预警机

Fig. 4 E-2C EWA equipped with AN/APS-145

了60%,跟踪目标能力提高了4倍,显示目标数增加了9.6倍<sup>[5]</sup>。

### 1.3 机载有源相控阵雷达

随着对高灵敏波束天线需求的日益迫切,电子扫描阵列天线(ESA)的重要性逐渐凸显。世界各军事大国相继开展了机载ESA的研究,机载雷达开始从机械扫描的PD体制向电子扫描的相控阵体制发展。相控阵雷达拥有较远的作用距离、较高的波束灵敏度、较好的低截获性能、更高的可靠性、更好的支持多目标跟踪和同时多功能。目前,典型的机载对海相控阵雷达包括美国F-35联合攻击战斗机上的AN/APG-81火控雷达、美国固定翼巡逻机P-8A上的AN/APS-154搜索雷达、日本固定翼巡逻机P1的HPS-106搜索雷达。

#### 1) APG-81。

AN/APG-81是为F-35联合攻击战斗机研制的一部有源相控阵多功能火控雷达。APG-81充分借鉴了F/A-22飞机雷达AN/APG-77的研制经验与成熟技术,淘汰了机械传动部件,可靠性显著提高;系统采用“可更换组件”,使得软硬件模块的维修和升级换代更加简易快速(图5)。APG-81雷达除了能够在全天候对空、海、地目标进行探测和攻击之外,继承了新型有源相控阵雷达在探测性能、射频隐身、雷电一体的优点,甚至经济性方面,均达到了目前海军战斗机机载火控雷达的新高度。目前,美国海军F/A-18E/F和F-35战斗机已经装备有源相控阵雷达并投入使用。

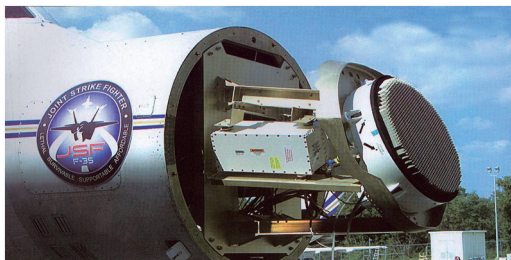


图5 AN/APG-81雷达  
Fig. 5 AN/APG-81

#### 2) AN/APS-154。

APS-154是APS-149的升级,具备了很强的陆地、濒海、海洋成像能力,以及陆/海目标检测与识别能力<sup>[6]</sup>。2015年5月,P-8A搭载先进机载传感器(advanced airborne sensor, AAS)即APS-154进行了首飞(图6),报道称APS-154作为海



图6 装有AN/APS-154雷达的P-8A巡逻机  
Fig. 6 P-8A equipped with AN/APS-154

面情报、监视、侦察以及目标攻击一体化传感器,将为指挥员提供高置信度战场感知能力。APS-154外形与APS-149略有差别,APS-149是一个倾斜方形,而APS-154是长方体形。目前,关于APS-154具体功能、能力的报道非常少。通过对一些国外为数不多的报道资料进行分析,可以推测,APS-154在潜望镜探测能力以及对地/对海成像能力方面,具有较大的改进。

#### 3) HPS-106。

P-1配备比较先进、齐全的探测系统,包括HPS-106主动有源相控阵对海搜索雷达,该雷达不仅在机首整流罩内安装有天线,还在前起落架舱门附近安装有侧视天线,具备探测距离远、分辨能力高的优点(图7)。该雷达不仅有对海搜索、导航、气象和对空警戒等工作模式,还具备合成孔径工作模式,可在高空发现潜艇的潜望镜。其搜索距离虽然尚未公布,但考虑到预计与美军P-8A巡逻机联合作战,P-8A所用的APY-10雷达数据可供参照:最大对海搜索距离为200海里(1海里=1.8521 km),对潜望镜搜索距离32海里,可同时搜索跟踪256个目标。



图7 装载于P1的HPS-106雷达  
Fig. 7 HPS-106 equipped by P1

综上所述,目前世界各国的空军和海军装备的主要机载雷达都已经迈入了有源相控阵时代。在有源相控阵雷达大量装备的基础上,需要重点思考有源相控阵之后机载雷达的发展方向,尤其是新体制雷达和处理技术在未来机载雷达对海探测上的发展趋势,支持未来海军航空兵核心装备的发展分析(图8)。

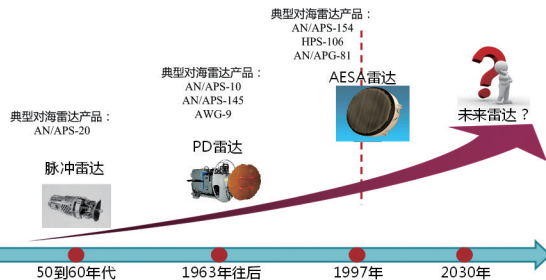


图8 机载对海探测雷达基本发展历程  
Fig. 8 Development of airborne maritime detection radar

## 2 机载对海探测雷达发展需求

机载雷达的发展受其载体平台发展及作战定位的牵引,世界各国根据各自海军承担的任务角色对其战斗机、监视机

及预警机的对海探测雷达功能和性能都有着各自的规划。但就一般性规律而言,平台的打击目标、作战环境和作战任务,是促成对海探测雷达系统发展演变的主要外部因素。因此,目前对机载雷达系统发展最重要的推动因素是打击对象的多样化、作战环境的复杂化和使命任务的多元化<sup>[7]</sup>。以下分别从机载对海探测雷达的作战需求和能力发展进行分析。

## 2.1 对海探测作战需求

### 1) 目标多样化。

对海探测雷达面临的目标种类多,动态范围大,目标散射强度差异大。通常大型舰船、货轮、航母等回波强度极大(雷达散射截面 RCS 约为  $3000 \text{ m}^2$ ),要比潜望镜、通气管等目标信号(RCS 约为  $1\sim 10 \text{ m}^2$ )强 35 dB 左右。此外,随着隐身技术的发展与广泛应用,各军事大国都极力发展隐身舰艇,美国新一代 DDG 1000 驱逐舰及濒海战斗舰具有优越的隐身性能,据称它们的 RCS 与渔船相当。俄罗斯最新的“波基”隐身护卫舰也采用隐身设计,据称他们的隐身性能接近美国 DDG 1000 驱逐舰。典型隐身目标的 RCS 普遍缩减了 1~2 个数量级,这给未来对海探测雷达带来了极大挑战。

### 2) 环境复杂化。

电磁干扰环境对雷达的性能发挥着举足轻重的作用,未来对海探测雷达面临的复杂环境主要表现有:来自陆、海、空全方位干扰的数量越来越多,各种舰载、机载和岸基电子战装备在区域海空战场中密集分布;海上作战气象和水文条件变化多端,机载雷达需要适应不同的海洋环境,在不同的海况下具备稳定的目标探测与跟踪能力。

### 3) 任务多元化。

舰载战斗机或海军侦察机等不仅需要执行对海监视与打击任务,还需要担负远洋区域防空、支援对地打击作战、对敌近海进行封锁等任务,并且随着海上分布式作战概念的推广,以空空联合或空海联合为主要作战形式的空海打击作战体系的建立,各类型的平台需要根据不同的作战需求,灵活编队。多样化的任务需求对机载雷达的体制、工作模式及系统架构产生复杂的设计需求。

## 2.2 对海探测能力需求

通过对海探测作战需求分析,为适应目标、环境、任务变化,未来对海探测雷达能力需求体系<sup>[8]</sup>主要有以下能力要素。

### 1) 复杂海战场条件下微弱目标探测能力。

随着现代科技发展,对海搜索雷达探测环境愈加苛刻复杂。首先,对海搜索雷达面临种类繁多的海面、空中目标,包括动态范围极大的各类海面舰船、出水时间极短的潜望镜的目标、低空快速掠海飞行导弹等。这些目标特性迥异,RCS 从  $0.1\sim 10000 \text{ m}^2$  量级不等,速度范围亦跨越多个量级。其次,对海搜索雷达面对复杂的背景杂波环境。海杂波为动态杂波,不仅回波强度与雷达工作频率、极化方式、海况、风向等物理因素相关,且回波特征复杂,表现出很强的非高斯性、复杂的时域相关性和多普勒特性;同时,来自濒海陆地(岛屿)的地杂波与海杂波特性差异极大<sup>[9]</sup>,海面目标特性表现不明

显<sup>[10-11]</sup>。此外,对海搜索雷达面临来自海面、空中、地基的各种有意无意的干扰,干扰域几乎覆盖全维空域、时域、频域、极化域。为了克服复杂目标、杂波、电磁环境对雷达探测带来的挑战,未来对海探测雷达需要具备智能化信号处理能力,通过实时感知战场环境,实现系统资源自优化、处理自匹配,提高雷达复杂环境下的微弱目标探测能力。

### 2) 复杂海上目标远程识别能力。

海上目标分布密集、数量众多、种类繁多、运动状态多样多变,需要对海上复杂目标进行探测识别以检测高价值军事目标并筛选高优先级目标,借此保障战场态势显示的完整和高价值目标的精确跟踪。机载雷达具备复杂海面目标探测识别能力可大幅提升海战场态势感知深度,有效区分民用货轮、渔船及军舰以避免误伤,精确识别航母、驱护舰、导弹艇等高价值目标以准确评估目标威胁等级。

### 3) 广域海量目标信息处理能力。

海面目标具有广域、海量与特定区域密集的特点,且种类多样,如有渔船、大型舰艇、小型潜艇、导弹快艇等各种运动目标,高/低速目标,大型/小型目标,机动/非机动目标混杂,特征差异大,造成对这些目标的检测、跟踪及识别过程非常复杂,给雷达的信息处理带来了巨大挑战。机载雷达通过海量信息处理技术,降低雷达系统处理冗余,优化机载对海探测雷达的资源管理策略,可大幅度提升广域海战场上海量目标的处理能力,提升重点目标的发现概率与跟踪精度,满足海战场对雷达精确感知能力的需求。

### 4) 海空分布式协同探测能力。

为了应对周边日益增长的海上威胁,对海探测与打击能力急需提高。由于受到传感器探测原理、波段、视角及目标特性的约束,单一传感器在探测范围、稳定性、可靠性及反应速度上都有所限制,无法适应复杂的海战场环境。因此需发展海空协同探测技术<sup>[12]</sup>。海空分布式探测能力依靠舰载多波段雷达和机载雷达的组网,充分发挥多平台视角优势、异类传感器的探测体制及广域覆盖优势,同时对网络的资源进行统一调度,并通过信息共享,获得互补增益,提升对海作战探测系统的反隐身、抗干扰能力及作用范围,大幅度增强海战场感知能力。同时海空分布式协同还可以形成飞机突前探测—舰船发射—飞机制导的模式,进行防区外打击,大大拓宽海面舰船的打击范围。

## 3 机载对海探测雷达产品与技术发展

美国哈佛商学院教授克莱顿·克里斯坦森在《创新者的窘境》<sup>[13]</sup>一书中将工业产品的发展分为持续性发展和颠覆式发展 2 种方式。而复杂海战场条件下微弱目标探测能力、复杂海上目标远程识别能力、广域海量目标信息处理能力、海空分布式协同探测能力是牵引机载对海探测雷达总体能力需求。以下按照克里斯坦森对工业产品发展规律总结的 2 条主线,分别从一般性发展和颠覆性发展 2 个角度分析机载对海探测雷达的产品和技术发展规律。

### 3.1 对海探测雷达产品发展的一般性规律

前述从机载对海探测雷达的技术发展规律上对其发展历程做了分析。机载对海探测雷达作为一种高度精密的工业产品也满足工业产品竞争的一般性规律,以下在技术分析之外,从市场竞争的角度探讨机载对海探测产品形态的发展规律。

工业产品竞争阶段的演变有其客观规律,克里斯坦森将工业产品的竞争阶段概括为功能性、可靠性、便捷性和价格4个竞争阶段<sup>[13]</sup>。机载对海探测雷达系统的发展也符合这一规律。

#### 1) 机载对海探测雷达“功能性”竞争阶段。

最初竞争阶段,客户更关注机载对海探测的功能性,以有源相控阵技术为依托,雷达探测威力、探测精度、多功能多目标处理等相关性能得到实现,并逐步完善。这一阶段最典型机载对海探测的产品是美军研制装备F-35的APG-81雷达。总体来说,目前机载对海探测已基本完成“功能性”阶段,逐步过渡到可靠性竞争阶段。

#### 2) 机载对海探测雷达“可靠性”竞争阶段。

未来,随着机载对海探测雷达逐渐满足上述“功能性”能力需求,市场开始转入“可靠性”竞争阶段。雷达系统的“可靠性”主要是指在复杂目标环境、电磁环境、海洋与气象环境以及多样化舰载机平台上的高可靠性工作能力。

目前,机载对海探测雷达所面临的复杂目标环境主要包括海面密集目标、高空高速目标、隐身目标、低空低小慢目标等,构成复杂电磁环境的主要因素有敌我双方的电子对抗,各种武器装备所释放的高密度、高强度、宽频谱的电磁波,民用电磁设备的辐射和自然界产生的电磁波。同时,在恶劣气象环境(雷暴、闪电、冰雹、突变气流)、低能见度环境(尘迷、雨、雪、云、雾、夜间)、复杂海洋环境等复杂环境中机载对海探测雷达系统的可靠性工作能力也是“可靠性”竞争的重要内容。

#### 3) 机载对海探测雷达“便捷性”竞争。

对于机载对海探测雷达来说,尤其是舰载机等平台的苛刻起飞和工作环境,雷达系统体积、质量和可靠性等“便捷性”竞争在后期显的尤为重要。更为重要的包括良好的“可维护性”、“可扩展性”、“可操作性”也是雷达“便捷性”竞争的重要内容。

#### 4) 机载对海探测雷达“价格”竞争。

机载对海探测雷达的“价格”竞争主要体现在成本控制,包括研发、维护、升级成本等,如个人计算机、家用电器甚至汽车等目前已经逐步或者完全陷入价格竞争阶段,任何行业,如果一旦进入价格竞争阶段,只能说明其已经是“夕阳产业”,穷途末路。但是,考虑到外部作战环境和军方作战需求在不断演进和博弈,目前看来机载对海探测雷达行业仍然会保持不断的蓬勃发态势。

综上所述,机载对海探测雷达演变模式分为功能性、可靠性、便捷性、价格4个阶段。“功能性”阶段用户关注雷达的

探测距离、探测精度、多功能与同时多目标处理等基本功能,而“可靠性”阶段雷达系统在复杂环境以及多样化平台的可靠探测更为重要,之后,用户会对雷达的小型化、轻量化、可扩展、可维护、软硬件通用化等“便捷性”性能提出要求。在不同阶段,用户对产品的关注点不同,只有当1个因素被市场基本满足的时候,用户的关注点才会向下1个因素转移。

总体来说,目前机载对海探测雷达已基本完成“功能性”阶段,逐步过渡到可靠性竞争阶段。在此阶段,雷达需要具备复杂目标环境、电磁环境、海洋与气象环境以及多样化舰载机平台上的高可靠性工作能力。为此,射频微系统、智能蒙皮<sup>[14]</sup>、射频综合和对海协同探测等是需要重点关注的技术方向。这些技术方向与现有的有源相控阵架构联系较为紧密,技术上存在一定的同源性,在相当长的一段时间内将是机载对海探测雷达的重点攻关技术方向。

### 3.2 对海探测雷达的颠覆性技术方向

雷达的颠覆性技术是指以意想不到的方式取代现有雷达主流技术的技术,是潜在颠覆雷达行业主流产品 and 市场格局的创新技术<sup>[15]</sup>。以下通过梳理近年来主要前沿技术发展成果,分析在机载对海探测雷达领域具有重大应用潜力,具备颠覆现有对海探测雷达体制和工作方式的技术方向。

#### 3.2.1 微波光子学

微波光子技术在电子系统中的最初应用形式为光模拟信号传输,即将单个或多个模拟微波信号加载到光载波上并通过光纤进行远距离传输。近年来,微波光子逐渐从模拟光传输功能演变为包括微波光子滤波、变频、光子波束形成等多种信号处理功能的综合能力(图9)<sup>[16]</sup>。



图9 微波光子雷达ISAR舰船目标高分辨成像示意  
Fig. 9 ISAR ship image of microwave photonic radar

微波光子学在雷达系统的研究领域内具有广泛的应用前景,能够大幅提升雷达系统的工作带宽、数字化程度及抗干扰能力等,实现超宽带对海探测。其中微波光子链路的技术成熟度、光子集成化程度和系统的一体化设计是制约其实用化的关键因素,这三者也构成了未来微波光子雷达研究和发展的主旋律。

#### 3.2.2 人工智能

人工智能技术作为未来IT产业的战略性和前瞻性新兴产业方向,其实质是把人的某些神经生理智能赋予机器,使机器能像人类那样进行学习、联想、判断、推理乃至行动<sup>[17]</sup>。它经过信息采集、处理和反馈3个核心环节,综合表现出智能感知、智能处理、智能反馈3个层层递进的特征(图10)<sup>[18]</sup>。由

此可以看出,人工智能技术的这些特点与未来机载雷达的发展需求高度吻合;而且,从新一轮的产业革命来看,正在兴起的物联网、机器人等产业无一不以人工智能技术为支柱。可以判断,人工智能技术作为一项引领产业变革的新技术,将为机载雷达的设计和性能提升提供更多的选择和可能。

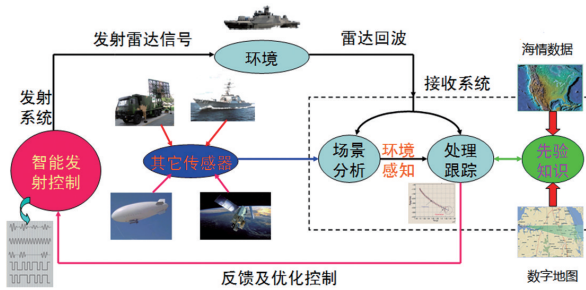


图 10 认知雷达对海探测示意

Fig. 10 Schematic diagram of cognitive maritime detection radar

空海一体化打击时,要求传感器具备自主决策能力。利用人工智能技术,对海探测雷达能够连续不断感知、学习和适应战场环境,自主分析处理并做出正确反应。自主/人工智能技术被视为“改变未来战争规则”的颠覆性技术,随着人工智能与大数据技术日趋运用到现代战争的方方面面,战争形态将由信息化向智能化加速转变。然而,目前人工智能面临训练数据缺乏、硬件计算能力瓶颈和理论算法不成熟等问题,这些问题的解决将推动雷达智能化发展。

### 3.2.3 超材料

超材料的一般定义为具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料,是将人造单元结构以特定方式排列形成的具有特殊电磁特征的人造结构材料。典型的超材料包括左手材料、光子晶体、超磁性材料等。超材料作为一种拥有独特结构和优异性能的新型材料,近几年来其理论研究、制备方法及功能化应用等都已成为国内外学者研究的热点<sup>[19]</sup>。

在机载雷达领域,对包括半导体器件、天线、隐身材料(图 11)、T/R 组件、三防设计等方面都有广泛的应用前景,相关的研究成果已经有很多被公开发表。超材料的发展给雷达技术发展带来机遇的同时也带来了挑战,先进吸波材料的诞生能够调整抑制目标电磁波的频率范围,实现在更宽频段内、全方位抑制电磁波散射,引导电磁波螺旋式行进,直至被“黑洞”吸收,舰船涂覆先进吸波材料将对海探测提出新的考验。“一代材料,一代装备”,新兴材料的诞生必将颠覆现有对海探测雷达形态。

### 3.2.4 量子雷达

量子雷达将量子信息技术与雷达技术相结合,采用微波光子进行远程探测,利用光子的量子态提高雷达的探测、识别和分辨目标的能力,其在工作原理、收发、检测、核心器件

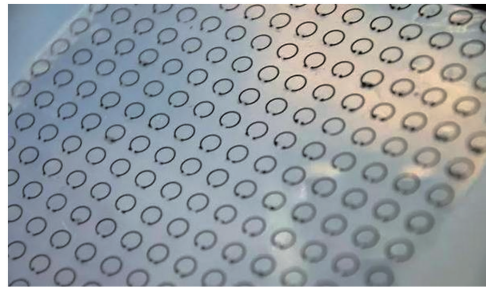


图 11 “隐身斗篷”频选柔性超材料示意

Fig. 11 “Stealth meta-skin”, a frequency selective flexible meta-material

等方面与传统雷达系统大为不同(图 12)。量子雷达通过对目标反射回来的光子态识别与处理,能够突破传统雷达接收机灵敏度极限,极大增强雷达系统对微弱目标,甚至隐身目标的探测能力。同时,由于量子雷达是对光子的量子态进行调制,可以增加信息处理的维度,具有比传统雷达更强的抗干扰和低截获能力<sup>[20]</sup>。

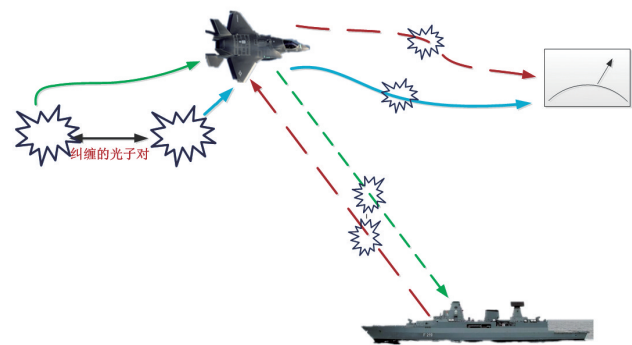


图 12 量子雷达对海探测示意

Fig. 12 Schematic diagram of quantum radar maritime detection

利用量子雷达的探测特性,可以在远距离探测海面隐身目标、综合抗干扰、海面目标高精度成像等方面发挥优势,目前量子雷达的研究还处于理论研究及验证阶段,国内外众多科研院所和高校投入了相当大的研究精力。作为射频探测领域重要的发展方向,应该得到足够的重视,该项技术一旦获得突破并逐步成熟,将是一次颠覆性的技术飞跃。

正如克莱顿·克里斯坦森提到,这些处于初期的颠覆性技术目前在核心性能指标上暂时落后于现有雷达体制,并且这种落后将维持很长一段时间。然而上述颠覆性技术在某项非核心性能指标上具有刚性优势,这种优势可能颠覆雷达产业结构,应该得到雷达行业的广泛重视。

## 4 机载对海探测雷达产品形态预测

未来的海军作战飞机面临的使命、作战形式、作战环境日益复杂化,对机载雷达系统目标探测能力的要求更

高,整个机载对海探测雷达系统的总体系统架构和软硬件技术形态将发生深刻的变化。基于对机载对海探测雷达发展历程梳理、对海探测作战需求、雷达能力发展需求以及机载对海探测雷达一般性发展规律和颠覆性发展规律讨论的基础上,对未来10~30年,机载对海探测雷达的系统架构、软硬件特征以及能力状况进行预测与展望。

#### 4.1 阶段1:基于射频微系统的多孔径数字阵对海探测雷达

数字T/R组件是发展方向,并进一步向射频微系统的方向发展。将现有庞大的射频机架和模块进行芯片化设计,按频段和功能划分为多种类型的标准芯片组件,与轻薄相控阵天线进行高密度集成,形成标准的射频微系统子阵模块。可根据应用需求,组成软件可重构和功能可定义的射频传感器系统,在飞机上灵活布阵。射频微系统集成化、综合化程度更高,能够显著降低雷达系统的质量和体积,减轻平台的载荷负担,支撑战机对广域海面及空中目标的长时间监视和打击;微系统架构自由度高,支持更加灵活地在平台上构建多孔径的探测系统;可利用分布式多孔径全向感知的体制优势,提高全空域态势感知能力;具备更强的信息处理能力,可完成多机协同探测与攻击任务分配。未来该体制雷达在海上多用途监视飞机、舰载战斗机和预警机方面有着巨大的应用潜力,主要软硬件特征总结如下。

1) 硬件架构与特征。多孔径数字阵列、射频微系统、雷达与电子战实现孔径与通道复用、分布式处理架构。

2) 软件架构与能力特征。多核交换处理阵列与分布式并行处理,支持对海探测的海量信息处理;软件架构可重构、开放式,支持对海广域监视、区域重点监视、特定目标;初步建立目标识别数据库,进一步提高远距离目标类型识别能力;灵活的多维度射频资源管控架构,具备较强的海战场复杂电磁对抗环境适应能力;数据级协同技术成熟,往检测级协同方向发展;具备空海联合探测与打击能力。

#### 4.2 阶段2:多功能共形对海探测雷达

射频的频段范围和射频的功能集成化及综合化程度进一步提高。探测、侦察、干扰与通信等功能所需的射频资源会在统一的任务需求下进行管理和分配。共形化的系统架构,使得孔径布局更加自由。微波光子技术构建的全光网络,极大拓展雷达带宽和数据传输速率,可实现海量信息处理。构建目标特征大数据库,人工智能技术获得应用,支持系统智能化处理、决策与打击能力。该阶段雷达系统主要软硬件特征总结如下。

1) 硬件架构与特征。共形多孔径阵列;集成度更高的射频微系统;全光采集、全光传输、全光控制;雷达、电子战、通信实现孔径、通道高度共用。

2) 软件架构与能力特征。分布式相参处理,支持广域大威力对海探测;中间件技术成熟,射频功能实现软件化;面向作战任务和战场态势自主决策的射频资源管控能力;高动态环境下多机信号级协同探测与蜂群自组织协同探测能力;目标特征大数据库与人工智能算法结合,进一步提高精确目标

识别能力。

#### 4.3 阶段3:多功能智能蒙皮化对海探测雷达

在射频微系统的基础上,进一步研制“多功能智能蒙皮”系统,在不增加平台雷达散射截面积的前提下,提升雷达系统的探测能力。多功能智能化蒙皮雷达在物理形态上真正实现传感器架构与机身的物理融合,平台的属性更加趋近于真正意义上的“传感器飞机”,机载射频传感器实现真正的系统大综合,并能够根据作战环境和态势进行深度智能化处理与决策,真正解决飞行员“人在回路”对作战灵活性的束缚。多功能智能蒙皮化对海探测雷达除了支持单平台的对海探测与打击外,在未来还能够很好地融入海上分布式作战云体系,灵活综合各类型射频传感器,发挥多平台协同探测优势,并在云协同的支持下,开展海空一体化作战,此阶段雷达主要软硬件特征总结如下。

1) 硬件架构与特征。高端产品实现超轻薄的蒙皮式射频前端;雷达、电子战与通信实现高度综合;有可能采用量子计算技术;云协同作战体系的下开放式、即插即用的射频云端。

2) 软件架构与能力特征。开放式自学习的大数据库;个体具备自主学习与演进能力,具备个体至群体迁移的能力;强对抗条件下全频谱智能云掌控技术。基于仿生视觉感知与类脑深度学习的多模图像目标智能识别;高速高精度的态势生成与威胁估计能力用于辅助决策,决策准确性和决策速度优于资深雷达专家。

## 5 结论

要准确预测未来雷达的发展规律和趋势比较困难。雷达的具体形态发展受到各种需求因素的影响,技术的演进速度也往往远超人们的想象;而且雷达作为一种对抗性的装备,将始终在对抗和博弈中发展。结合具有颠覆性前景的热门新技术在雷达领域的应用,可预测机载对海探测雷达未来的3个典型发展阶段:基于射频微系统的多孔径数字阵对海探测雷达,多功能共性对海探测雷达,多功能智能蒙皮化对海探测雷达。

#### 参考文献(References)

- [1] 于明飞,陈孝君.机载雷达发展历程及未来趋势[J].航天制造技术,2007,30(6):49-56.  
Yu MingFei, Chen Xiaojun. Course and prospect for airborne radar[J]. Spaceflight Manufacture, 2007, 30(6): 49-56.
- [2] 中航工业雷达与电子设备研究院.机载雷达手册[M].北京:国防工业出版社,2012.  
AVIC Radar and Avionic Institute. Airborne radar handbook[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [3] E-2C Hawkeye 2000[EB/OL]. (2013-02-24)[2017-09-26]. <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/E-2CHawkeye2000/Pages/default.aspx>.
- [4] AN/APY-10 maritime, littoral and overland surveillance radar[EB/OL]. (2012-02-19)[2017-09-26]. <http://www.raytheon.com/capabilities/prod->

- ucts/apy10/.
- [5] E-2C/D hawkeye airborne early warning aircraft[EB/OL]. (2011-09-17) [2017-09-26]. <http://www.naval-technology.com/projects/e2-hawkeye/>.
- [6] US Navy successfully testing APS-154 on P-8A Poseidon aircraft[EB/OL]. (2016-01-09) [2017-09-26]. <http://www.naval-technology.com/news/news-navy-successfully-testing-aps-154-on-p-8a-poseidon-4769035>.
- [7] 杨建宇. 雷达技术发展规律和宏观趋势分析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 19-27.  
Yang Jianyu. Radar technology disciplinarian and development[J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 19-27.
- [8] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术[J]. 科技导报, 2017, 35(11): 20-38.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, Huang Yong, et al. Radar low-observable target detection[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(11): 20-38.
- [9] 陈小龙, 关键, 何友, 等. 高分辨稀疏表示及其在雷达动目标检测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(3): 239-251.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, He You, et al. High-resolution sparse representation and its applications in radar moving target detection[J]. Journal of Radars, 2017, 6(3): 239-251.
- [10] 陈小龙, 关键, 何友. 微多普勒理论在海面目标检测中的应用及展望[J]. 雷达学报, 2013, 2(1): 123-251.  
Chen Xiaolong, Guan Jian, He You. Applications and prospect of micro-motion theory in the detection of sea surface target[J]. Journal of Radars, 2013, 2(1): 123-251.
- [11] Chen X L, Guan J, Bao Z. Detection and extraction of target with micro-motion in spiky sea clutter via short-time fractional Fourier transform[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(2): 1002-1018.
- [12] 刘波, 沈齐. 空基预警探测系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.  
Liu Bo, Shen Qi. Airborne early warning system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [13] 克莱顿·克里斯坦森. 创新者的窘境[M]. 北京: 中信出版社, 2014.  
Clayton M C. The innovator's dilemma[M]. Beijing: China CITIC Press, 2014.
- [14] 郭先松, 孔令兵, 刘小飞. 机载预警雷达天线发展趋势及关键技术[J]. 现代雷达, 2015, 37(12): 19-24.  
Guo Xiansong, Kong Lingbin, Liu Xiaofei. Development trend and key technology of airborne early-warning radar antenna[J]. Modern Radar, 2015, 37(12): 19-24.
- [15] 沈雪石, 张爱军, 赵海洋. 颠覆性技术对武器装备发展的影响及思考[J]. 国防科技, 2015, 36(3): 18-22.  
Shen Xueshi, Zhang Aijun, Zhao Haiyang. The impact and thinking of disruptive technologies on armament development[J]. National Defense Science & Technology, 2015, 36(3): 18-22.
- [16] 李海鸥, 李思敏, 陈明. 微波光子技术的研究进展[J]. 光通信技术, 2011(8): 24-28.  
Li Haiou, Li Simin, Chen Ming. Research progresses on microwave photonics technologies[J]. Optical Communication Technology, 2011(8): 24-28.
- [17] 俞祝良. 人工智能技术发展概述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(3): 297-304.  
Yu Zhuliang. Review of progress on artificial intelligence[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition), 2017, 9(3): 297-304.
- [18] Simon H. Cognitive radar: A way of the future[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2006, 23(1): 30-40.
- [19] 于相龙, 周济. 智能超材料研究与进展[J]. 材料工程, 2016, 44(7): 119-128.  
Yu Xianglong, Zhou Ji. Research advance in smart metamaterials[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(7): 119-128.
- [20] 黄志洵, 姜荣. 从传统雷达到量子雷达[J]. 前沿科学, 2017, 41(11): 4-21.  
Huang Zhixun, Jiang Rong. From the classical radar to the quantum radar[J]. Frontier Science, 2017, 41(11): 4-21.

## Progress of airborne maritime detection radar

HE Fengshou, ZHANG Tao, LU Da

AVIC Leihua Electronic Technology Institute, Aviation Key Laboratory of Science and Technology on AISSS, Wuxi 214063, China

**Abstract** The airborne radar sees a technology leap forward from single pulse, pulse Doppler to phased array. The advancement of each generation of the naval aviation facility involves breakthroughs of functions and performances of the maritime detection radar. Based on the analysis of the airborne radar and the development of the radar form, the technological development of the airborne maritime detection radar is reviewed, including the main characteristics, the system architecture, and the development direction. The cutting-edge scientific achievements in recent years, with respect to the airborne maritime detection radar promote the technology of the naval aviation equipment.

**Keywords** pulse Doppler; phased array; naval aviator; system architecture

(责任编辑 傅雪)