

开放式相控阵概念与系统架构

胡明春*

(南京电子技术研究所 南京 210039)

摘要: 该文首次全面系统地阐述开放式相控阵的具体概念内涵和系统架构, 开放式相控阵具有资源虚拟化、应用软件化和硬件积木化特征, 能够适应当前和未来不断变化的作战任务、工作环境、适装平台等需求, 将成为下一代相控阵系统发展的主流, 在探测、通信、电子战等方向具有广阔的应用前景。该文详细阐述了开放式相控阵的发展需求、发展历程及其具体概念内涵, 系统描述了开放式相控阵系统层次化架构, 从硬件层、资源层、应用层等方面对开放式相控阵设计理念、设计方法进行了全面介绍, 重点介绍了开放式相控阵的核心特征, 资源虚拟化和处理流程重构, 提出支撑开放式相控阵实现的核心技术, 探索引领新一代射频系统形态发展。

关键词: 开放式相控阵; 应用软件化; 资源虚拟化; 硬件积木化; 处理流程重构; 规模可扩展

中图分类号: TN801

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2023)04-0684-12

DOI: 10.12000/JR23103

引用格式: 胡明春. 开放式相控阵概念与系统架构[J]. 雷达学报, 2023, 12(4): 684–695. doi: 10.12000/JR23103.

Reference format: HU Mingchun. Concept and system architecture of open phased array[J]. *Journal of Radars*, 2023, 12(4): 684–695. doi: 10.12000/JR23103.

Concept and System Architecture of Open Phased Array

HU Mingchun*

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: In the article, the concept and system architecture of open phased array is elaborated systematically and comprehensively for the first time. Open phased array has the characteristics of virtualized resources, software-defined applications, and modular hardware architecture. Furthermore, it can adapt to current and future rapidly evolving operating tasks, operating environments, and bearing platforms. The open phased array will dominate the mainstream of the next-generation phased array system, with broad application prospects in radar, communication, electronic warfare, and other fields. This article presents the development requirements and concept of open phased array systems and summarizes their development history. The hierarchical architecture of an open phased array system is depicted in detail, and the design concept and method are comprehensively introduced in terms of hardware, resource, and application layers. Furthermore, key features of resource virtualization and processing reconfiguration of open phased array systems are introduced, and key technologies supporting open phased array realization are enumerated, which will help to develop a new generation of radio frequency systems.

Key words: Open phased array; Software-defined applications; Virtualized resource; Modular hardware architecture; Processing reconfiguration; System scalability

1 引言

现代战场中, 为完成不同类型的作战任务、适

应复杂多变的环境、适配不同的作战平台, 电子信息系统需满足积木化、可重构、轻量化、共形化、网络化、智能化、多功能一体化等要求^[1–5]。相控阵系统作为电子信息系统的重要组成部分, 经历了无源相控阵、有源相控阵和数字相控阵等发展阶段, 系统自由度显著增加, 作用距离、抗干扰能力、可靠性等性能不断提升^[6]。

然而, 在相控阵不断演进的过程中, 战争形态、作战任务、工作环境、搭载平台也发生了翻天

收稿日期: 2023-06-07; 改回日期: 2023-07-12; 网络出版: 2023-07-26

*通信作者: 胡明春 13951004670@139.com

*Corresponding Author: HU Mingchun, 13951004670@139.com

基金项目: 国家部委基金

Foundation Item: The National Ministries Foundation

责任编辑: 汤俊 Corresponding Editor: TANG Jun

覆地的变化,单纯靠射频前端从无源到有源,再到数字化的演进路径无法适应这些变化,相控阵整体架构亟需进行一场全面深刻的变革。开放式系统软硬件分层解耦、模块化、标准化、互操作等特点,恰好满足了相控阵的上述需求,对相控阵技术的发展产生了深远的影响。

2 开放式相控阵概念

2.1 发展需求

开放式相控阵是电子信息系统适应新型作战形态、完成多样化作战任务、适应复杂工作环境、适装多域作战平台的必然需求,同时新兴技术的发展也给开放式相控阵提供了有力支撑。

2.1.1 适应新型战争形态的需要

信息化战争时代,开放式相控阵满足了“看得远、反应快、打得准”,实现了以信息化战争实现对机械化战争的降维压制。在智能化战争时代,开放式相控阵将发挥系统架构和软硬件开放的特点,广泛吸收智能硬件、智能模型和智能算法等方面的前沿成果,博采众长,支持技术更新换代,不断改进扩展功能^[7,8]。

2.1.2 完成不同作战任务的需要

现代战争中,开放式相控阵面对的目标在距离、高度、速度、机动性、数量、信号特征等维度具有较大的差异性^[9-12]。开放式相控阵可发挥硬件积木化可扩展、资源灵活调度、功能可重构的特点,将可重构贯穿于探测、通信、对抗等不同的功能域,适应目标在不同维度的变化。

2.1.3 适应复杂工作环境的需要

电子信息装备面临的工作环境多种多样,不同的工作环境下面临的杂波、干扰、气象、海情等差异巨大^[13,14]。开放式相控阵通过环境感知、射频重构、处理重构、闭环控制和迭代反馈来优化调度策略,提升对时变任务和环境的自适应能力,实现对环境的实时最优匹配。

2.1.4 适装多域作战平台的需要

开放式相控阵采用模块化组件,标准化、通用化、互操作性好,功能软件与硬件解耦,不同平台可采用相同的模块和结构,公用性好。开放式相控阵可以利用天线和微系统在轻薄化、共形化、柔性化、高功率、高效率、大带宽、智能化等领域不断开发的最新成果,满足无人预警机、下一代战斗机、无人机蜂群、微纳卫星、高超声速飞行器、平流层飞艇等新型平台的应用需求^[15-17]。

2.1.5 新兴技术为开放式相控阵赋能

微系统技术通过在微纳尺度上采用异构、异质方法集成,在满足系统功能的前提下成数量级地降低整机体积重量,实现更高集成度、更高性能和更高工作频率^[18];人工智能、大数据、并行计算、自适应处理等技术的发展,大幅提升了电子系统的智能化水平和处理能力^[19-22];软件无线电等开放式系统的出现,展现了开放式、可扩展、可重构架构的巨大优势,极大地支撑了开放式相控阵的实现^[23]。

2.2 概念内涵

美国国防部和软件工程协会对开放式系统的定义是:“一个开放系统由交互软件、硬件与人员组成,其设计要满足规定的需求,其组件级接口规范完整定义,并且可从商业渠道得到,其组件设计遵守给定的规范,可以批量升级和维护”。尽管不同机构对开放式系统的定义略有不同,但总体来说开放式系统设计采用模块化、软硬解耦、标准接口,具有规模可裁剪、硬件可重组、软件可重配、功能可重构、应用互操作等特征^[24,25]。

计算机系统是一个典型的开放式系统,它由不同的硬件模块如硬盘、显示器、CPU、内存等组装而成,各模块提供标准的硬盘接口、显示接口、CPU接口、内存接口和其他的外设器件接口。通过聚焦接口,个人计算机可以采用不同配置的模块进行最新的高性价比的组件升级和维护。同时,计算机采用资源虚拟化设计,通过中间虚拟层对计算机硬件和处理等资源进行虚拟化,解除应用层与资源层之间紧耦合的关系,允许多个应用程序同时共享系统资源,用户可以根据需求,通过虚拟环境实现对资源的调度,同时运行多个不同的功能^[26,27]。

开放式相控阵的核心是功能可重构,以适应不同的任务、目标、环境和平台,这包含两层含义,从实时或准实时功能重构的角度来说,开放式相控阵的功能可软件化加载,多种功能共享资源并且可以同时运行;从系统设计制造的非实时重构的角度来说,开放式相控阵可以根据设计需要进行模块化拼装,以形成不同功能和规模的系统。这两点同时要求开放式相控阵的软硬件是解耦的。因此,开放式相控阵具备3大技术特征:资源虚拟化、应用软件化和硬件积木化。应用软件化主要是指用户可通过软件加载所需功能,如探测、通信、电子战等,不同功能可同时运行,共享系统资源;资源虚拟化是实现功能重构、软硬件解耦的核心,通过对物理资源的数字化表征和实时自适应优化,形成虚拟化组合配置支持应用实现,同时通过虚拟资源与物理

硬件之间的映射对硬件实体实施调度控制；硬件积木化是指硬件由标准化、积木化的模块构成，横向解耦、纵向分层、接口标准，可根据不同的应用场景进行组合和裁剪，并且硬件资源完备，支持各种潜在的应用功能实现。

2.3 发展历程

开放式相控阵技术随着相控阵技术的应用推广而不断扩展，至今经历了概念萌芽、概念形成、创新发展3个阶段。

2000年之前，是开放式相控阵概念萌芽阶段。该阶段出现模块化、标准化等概念，为开放式相控阵概念的形成奠定了基础。1962年美国管理专家H.A.Simon首次提出“模块化”(modularity)概念，从20世纪70年代起开展了天线模块化研究；20世纪90年代，相控阵天线架构、硬件、软件的模块化和标准化技术发展起来。美国国防部开展模块化开放式系统架构(Modular Open System Approach, MOSA)的标准研究，林肯实验室也提出雷达开放式系统架构(Radar Open Systems Architecture, ROSA)标准^[28-31]。林肯实验室以模块化组件完成对里根试验场和空间目标监视复合体雷达的现代化改造^[32]。

2000—2020年，是开放式相控阵概念形成阶段。2008年，胡明春^[33]在《现代雷达》上发表的《开放式有源相控阵天线系统》中，首次将相控阵与开放式系统相结合，正式提出“开放式相控阵”概念，但尚未演绎出具体概念内涵和详细系统架构，直至近期撰写的《开放式相控阵概念与系统架构》一文，标志着开放式相控阵概念发展成熟。此阶段美国研制的SPY-6防空反导雷达、FSY-3太空监视雷达、SABR战斗机火控雷达等，采用了积木化、标准化、软件化等技术，与开放式相控阵的部分理念相吻合^[34,35]。

2020年后，是开放式相控阵创新发展阶段。开放式相控阵正向一体化、智能化、网络化以及频段扩展等更高阶段发展。国际开放式组织2021年发布开放式体系架构军用传感器和电子战系统标准——SOSATM参考架构技术标准1.0版，该标准或成为美军在信号情报、电子战和通信系统的标准，确保与传感器开放式体系架构(Sensor Open Systems Architecture, SOSA)相一致的技术具有互操作性，为实现传感器“即插即用”铺平道路^[36]。美空军AN/TPY-4软件化雷达经过15年发展已经定型，计划2023年开始批量生产并于2025年列装形成作战能力^[37]，其设计理念与开放式相控阵不谋而合，但距离开放式相控阵概念内涵的完全实践还有一定的差距。

3 系统架构

开放式相控阵系统采用分层架构，自下而上分为硬件层、资源层和应用层，分别具有应用软件化、资源虚拟化和硬件积木化的特点，如图1所示。

开放式相控阵系统架构如图2所示。应用层为资源层提供任务输入，而资源层通过对资源的优化调度形成虚拟系统，支持应用层的功能实现。硬件层中的物理硬件资源经过数字表征后形成虚拟资源池参与到资源调度中，反过来资源层通过映射关系对硬件层实施控制调度。

3.1 应用层架构

开放式相控阵应用层是实现具体功能应用的平台，面向用户以类似APP的形式提供服务，支持功能的扩展和升级。自上而下包含工作任务、应用功能和算法构件3层架构。应用层本身具有开放式架构，功能相互独立，纵向分层，互相之间以标准接口连接，并且功能完备，可完成各种任务应用。如图3所示。

工作任务由一个或多个应用功能模块组成，例如探测任务由目标搜索、目标跟踪、信号侦收等功能组成；应用功能由多个算法构件组装形成，例如目标搜索功能由数字波束形成、信号处理、数据处理等基础算法构件组成，通过算法流程及参数配置实现某一应用功能；算法构件则是应用层的最小单元模块，是用于实现系统某功能的具体算法，接口标准、功能独立、内部封装，通过接口对外提供服务。

应用层将系统模块化设计思想与开放式系统结合，按照自顶向下的方法对系统进行模块化分解，

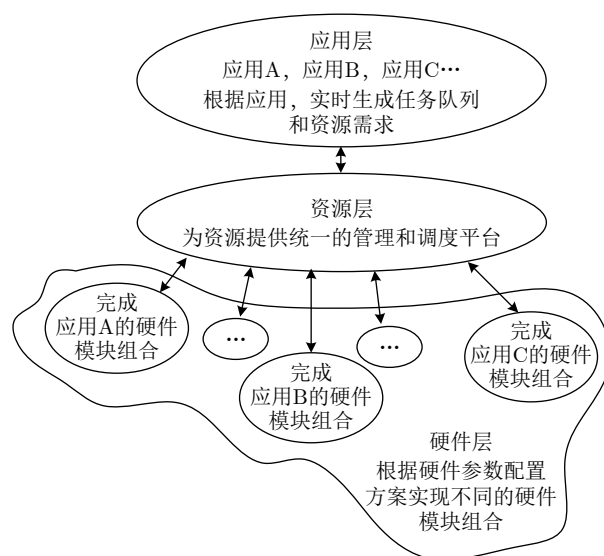


图1 开放式相控阵系统概念

Fig. 1 Schematic diagram of concept of open phased array system

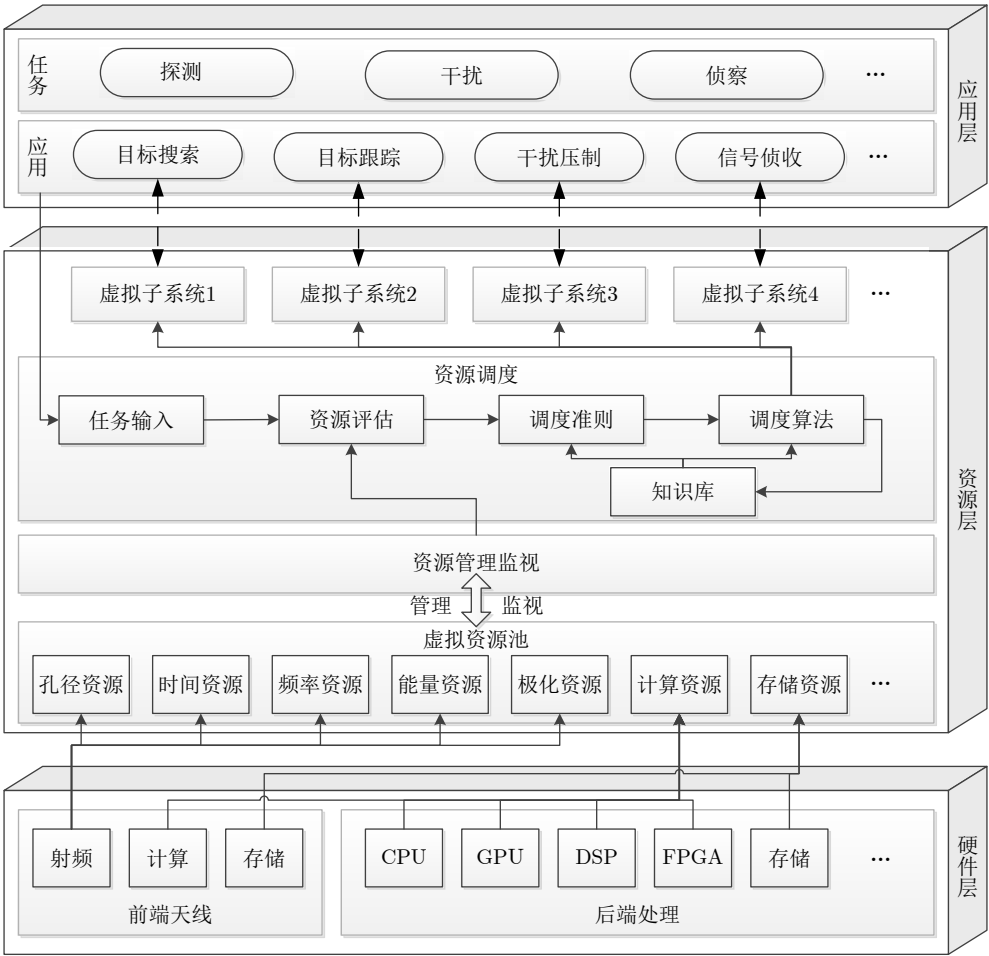


图 2 开放式相控阵系统架构

Fig. 2 Schematic diagram of systematic architecture of open phased array system



图 3 开放式相控阵系统应用层架构示意

Fig. 3 Schematic diagram of appliance layer architecture of open phased array system

模块间相互独立，纵向分层，互相之间以标准接口连接，并且功能完备，可完成各种任务应用，并通过对功能模块参数化配置，工作流程重组，实现系统功能软件定义，便于升级。

3.2 硬件层

3.2.1 硬件层架构

开放式相控阵系统的硬件层是具体实现开放式

相控阵功能的硬件实体，满足多功能多任务的需求，完成电磁信号的发射、接收和处理等功能。硬件层由标准化、模块化、多类型的单元构成，可根据不同的应用场景，进行组合和裁剪，各单元间采取标准化接口，系统内部单元可替换。硬件层的资源可通过软件编程完成数字化表征，空、时、频和极化等资源可自适应优化配置，以适应复杂的电磁环境。

开放式相控阵的硬件层主要由前端和后端组成，其架构如图4所示。

3.2.2 前端

硬件层前端的典型组成包括4个部分：(1)具备独立收发功能的高集成有源子阵，(2)基于通用传输协议和标准化接口的大容量、高效率、高可靠的高速交互总线，(3)具备数据交互、处理、控制的后端智能控制模块，(4)供电模块。

积木化有源子阵是硬件层前端功能和性能实现的核心单元，实现对电磁信号的发射、接收和处理，支持分布式控制、分布式存储和分布式处理，

通过标准化接口总线实现积木化有源子阵间的协同。有源子阵采用“功能独立、分层设计”的思想,从功能构成要素上可分为天线辐射层、射频收发层、综合网络层、数字处理层以及电源管理层等5个主要功能层,不同功能层独立设计,如图5所示。

天线辐射层主要完成电磁信号的发射、接收,包括双极化辐射阵列、等相馈电、滤波和用于状态监测的耦合电路等;射频收发层完成发射信号上变

频和功率放大以及回波信号的放大和下变频,包括环形器或开关电路、功率放大器、低噪声放大器、调制控制和上下变频电路等;综合网络层为各种信号的传输组合,具有多功能、高集成的核心纽带作用,包括光纤传输、射频功分、电源分配、控制电路和高低频连接网络等;电源管理层包括功率变换、稳压整流、控制保护、滤波等功能;数字处理层是有源子阵的核心,主要负责信号拟合、频率综合、空间拟合、极化拟合、数字采样、数字下变频、

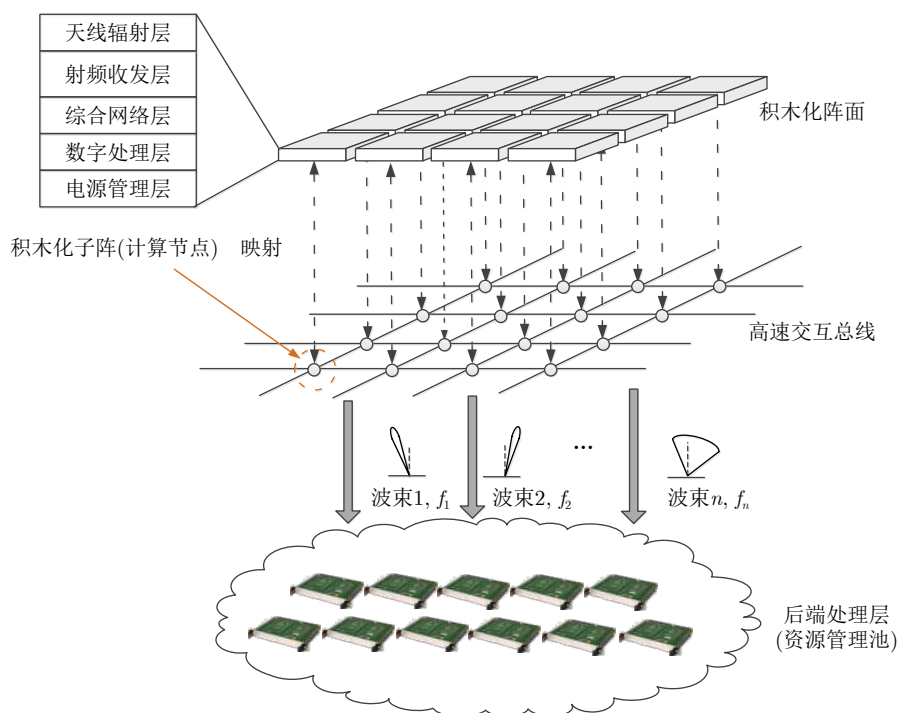


图4 开放式相控阵系统硬件层架构

Fig. 4 Schematic diagram of hardware layer architecture of open phased array system



图5 有源子阵各功能分层的构成要素

Fig. 5 Constituent components of multiple functional layers of active sub-array

时序控制、优化计算等功能。不同功能层级之间可根据应用需求的不同,优化调整叠层结构布局。

通过不同数量的积木化有源子阵相互拼接可实现阵面孔径的横向扩展,子阵通过具有标准化接口的高速交互总线实现互联,从而构成整个阵面系统。有源子阵既可以独立使用,也可以在两维方向积木化扩展,实现了阵面规模的灵活可裁剪;通过软件配置不同的有源子阵的组合形式,实现天线孔径、波束、波形、极化等资源的重构。

3.2.3 后端

硬件层后端由计算、存储、交换、管理等子功能模块以及数据、管理、监测等连接总线组成,实现后端的处理、存储、管理等功能,其中计算硬件模块包括FPGA, DSP, CPU, GPU等,存储硬件模块包括片内快速存储和专用存储,见图6。

开放式相控阵硬件层后端的计算模块、交换模块、存储模块等均采用统一的硬件标准规范,支持不同厂商采用相同标准的商用货架产品,通用性强,可扩展性好,支持即插即用。

3.2.4 多层次分布式处理

开放式相控阵充分利用分布在硬件层前端和后端的计算资源,形成多层次分布式处理能力。一般情况下与部分阵面相关的优化计算由子阵级处理资源承担,而与整个阵面相关的优化计算由后端处理资源承担。每个子阵节点既可以处理该子阵内的数据,也可以多节点协同处理阵面级的数据,这些数据在高速交互总线内完成快速交换,最终通过总线

向处理后端输出,从而可实现面向任务需求的大规模波束实时综合及频率、极化、波形等资源的实时重构,大幅提升了系统的实时响应能力,并大幅降低宽带采样后的数据传输压力和后端处理难度。

阵面主要完成和自身相关的,能够自主闭环的子阵级或者部分阵面级的处理任务,分为以下几类:

(1) 波束综合。主要指的是阵面数字波束形成(Digital Beamforming, DBF)或自适应数字波束形成(Adaptive Digital Beamforming, ADBF)、电扫波控码计算、抗干扰或者收发同时的空域对消等;

(2) 波形/频率/极化综合。不同子阵或单元根据环境和目标的不同产生和发射不同的波形/频率/极化等;

(3) 链路。主要包括收发通道幅相误差校准、子阵内的射频链路控制,包括模拟和数字滤波、延时、均衡、带宽选择、动态范围扩展、复杂波形计算、子阵间宽带同步和校准、子阵内脉压、射频和数字对消等;

(4) 调度。主要包括同时多任务下的阵面资源管理和优化分配等;

(5) 大数据。主要包括实时记录阵面子阵及子阵内部各模块状态,通过大数据分析,实现阵面智能健康管理和性能预测。

对于需要大系统闭环的处理,则根据需要由处理后端完成,包括全阵级的抗干扰、目标检测、目标识别、航迹处理和系统决策等。

3.3 资源层架构

开放式相控阵的资源层是实现资源数字表征、

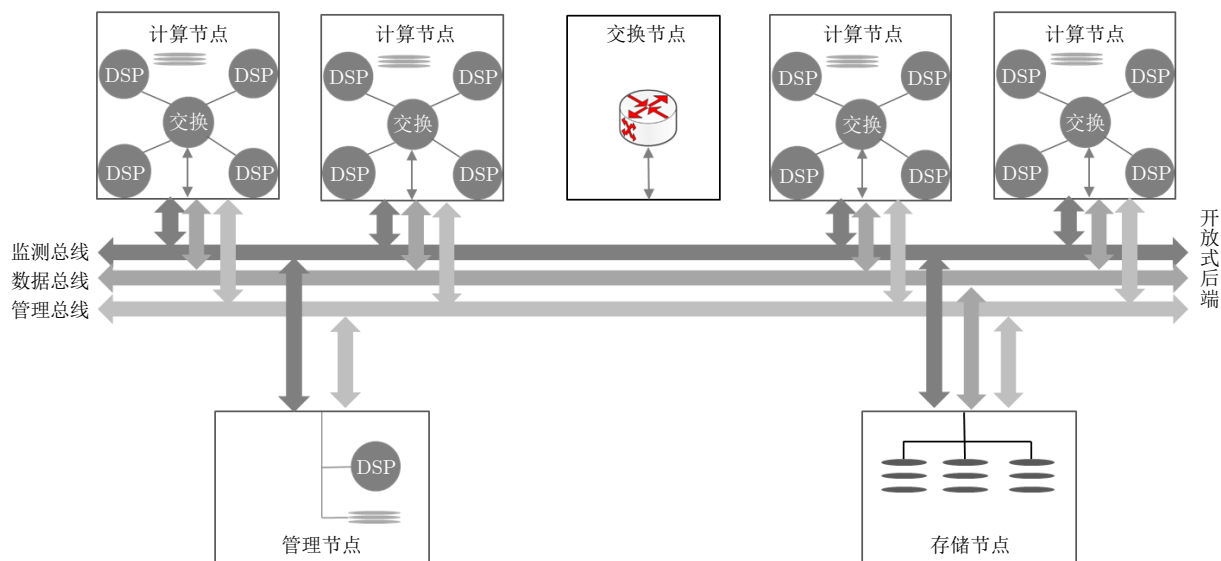


图6 开放式全互联后端架构

Fig. 6 Schematic diagram of open and interconnected back end

管理监视、优化调度和虚拟化的重要平台,通过对相控阵系统中的空、时、频、能、极化等实体资源进行虚拟化的数字表征,实现对虚拟化资源的任意灵活调度,并将调度的虚拟资源组合形成具备不同

能力的多个虚拟子系统,高效灵活地实现系统的多功能,贴合资源虚拟化的设计理念。资源层架构如图7所示,主要包括虚拟资源池、资源管理监视、资源调度和虚拟系统。

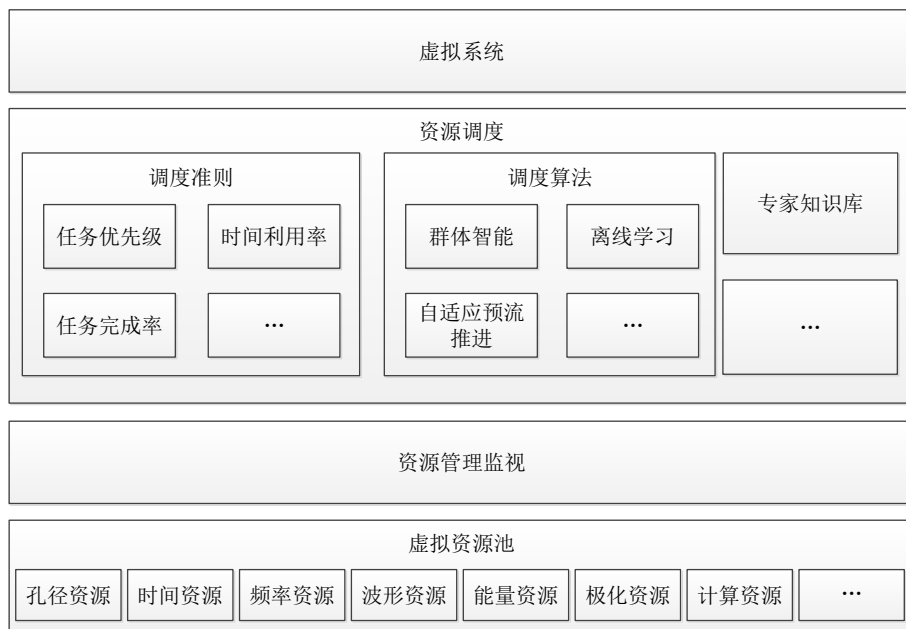


图 7 开放式相控阵系统资源层架构

Fig. 7 Schematic diagram of resource layer architecture of open phased array system

虚拟资源池是将开放式相控阵系统前/后端射频、计算、存储等资源进行数字表征后形成的虚拟资源集合,除表征后的资源本身外还包含与物理硬件之间的映射关系,从而可以根据资源调度方案自上而下地利用虚拟资源池和物理硬件资源之间的映射关系,对具体的物理硬件进行调度配置,支撑具体功能的实现。

其中资源主要包括:(1)孔径资源。分为单阵的子阵划分与多阵的孔径合成两个方面,体现在阵面的分配、波束的形成和控制等;(2)时间资源。包含脉冲内的快时间、脉冲间的慢时间,也包括任务时间等;(3)频率资源。主要包含中心频点和带宽的选择;(4)波形资源。可视为一种特殊的时频资源,既包括时间、频率等资源的独立配置,也包括更复杂的时频联合资源配置;(5)能量资源。主要指相控阵系统工作时选择的阵面能量;(6)极化资源。指系统可选择的不同极化方式,例如线极化、圆极化等;(7)其他资源。包括计算、存储、传输资源等。

资源管理监视资源池进行实时监控、管理和评估,为资源调度提供可行域和边界条件输入。

资源调度以应用需求为输入,选择合适的调度准则,与资源状态约束共同构建优化问题,基于调

度算法和专家知识库辅助,求解生成资源调度方案,如图8所示。

虚拟系统是一系列虚拟子系统的集合,后者是根据资源调度方案所形成的资源配置组合,用于支持具体的应用功能实现,也是资源虚拟化的具体体现。

4 虚拟化与流程重构

4.1 资源虚拟化

资源虚拟化是开放式相控阵的核心之一,为实现具体的功能应用,资源层需要为其分配虚拟资源,形成虚拟子系统。一个典型的开放式相控阵系统资源虚拟化流程如图9所示。具体来说,基于资源调度形成的调度方案,将虚拟资源池中的各类虚拟资源进行灵活组合,形成多个虚拟子系统,分别

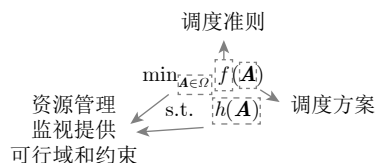


图 8 资源调度的数学过程

Fig. 8 Mathematical process of resource scheduling of open phased array system

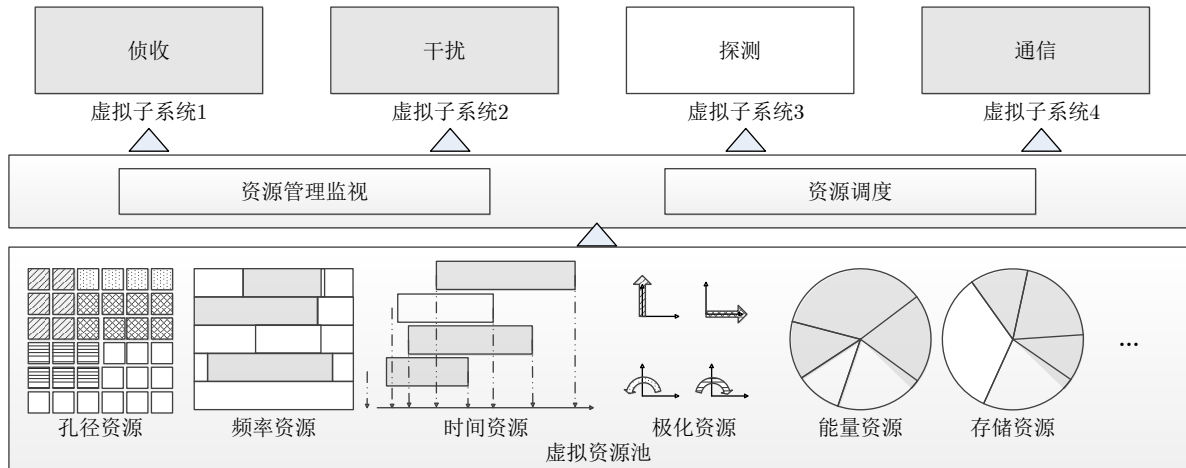


图9 资源虚拟化流程示例

Fig. 9 Instance of resource virtualization process of open phased array system

完成不同应用功能，从而实现整个开放式相控阵系统多功能的高效实现。不同维度的资源既可隔离配置，用于不同功能，例如对孔径资源进行划分，不同功能使用物理隔离的孔径资源；也可复用配置，用于不同功能，例如对时间资源进行划分，不同功能可使用相同的时间资源。通过对虚拟资源的灵活配置重组，形成了具备侦查、干扰、探测、通信等不同功能的虚拟子系统，以实现相控阵系统前端“利用任何孔径、在任何时间、在任何波段，执行任何功能”。

不同的应用功能作为资源调度优化的输入^[38-42]。例如，在同时对两个目标进行高精度跟踪的场景中，以孔径、频率等资源最少为优化目标，以目标数量、跟踪精度、数据率以及当前资源状态等建立约束，从而形成具体的优化问题。经过优化求解后，得到利用同一整孔径形成两个不同频率的窄波束分别对两个目标进行跟踪的配置方案，如图10所示。

4.2 处理流程重构

为支撑具体应用的实现，除了分配所需资源，还需要对具体的处理流程进行重构。开放式相控阵

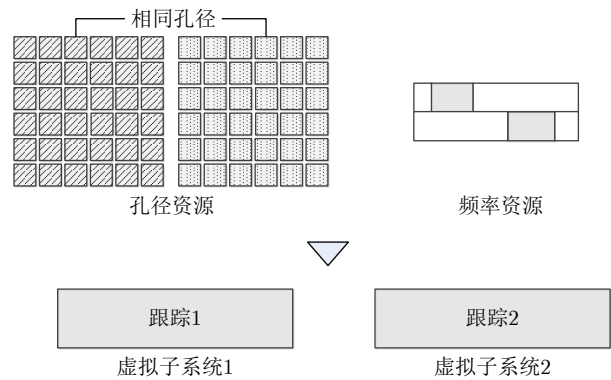


图10 典型场景下的资源虚拟化示意

Fig. 10 Instance of resource virtualization in typical operating scenario

的处理流程从逻辑上可以用矩阵表示，矩阵可以是一维，也可以是二维甚至更高维，矩阵的元素是处理节点，相互之间通过传输链路相连接，处理节点可以是某一处理策略或算法，也可以是融合、判决、传输等。处理流程重构的过程就是根据应用需求对处理节点进行实时选择、配置和联结的优化过程，同时资源调度分配相应的硬件资源予以实现。如图11所示。

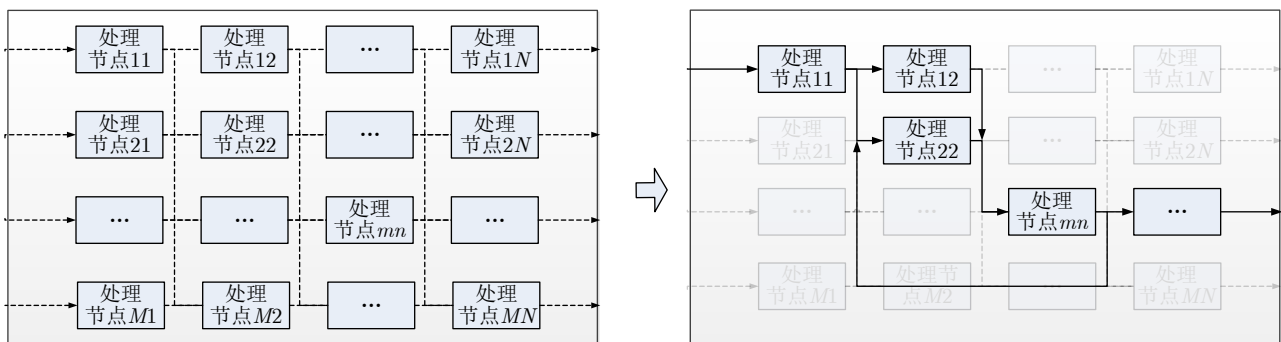


图11 二维处理流程重构示意

Fig. 11 Schematic diagram of 2D processing reconfiguration of open phased array system

处理流程局部多个处理节点按照一定的逻辑架构形成基本处理模块执行子任务,例如信号处理、数据处理等。处理模块的拓扑结构各异,串并行的顺序、规模以及前馈/反馈闭环的方式、位置等都可以实时灵活优化。

以雷达抗干扰为例,多种处理策略、判决、评估以及特征提取、干扰分类等算法作为不同的处理节点,按照一定的逻辑连接。部分节点形成干扰感知、信号处理、数据处理以及效能评估等4个基础处理模块,模块内部和模块间存在反馈闭环。如图12所示。

5 支撑技术

开放式相控阵的硬件实现和具体应用需要微系统、智能化、分布式计算等技术支撑。

(1) 微系统技术。一方面,通过集成宽带射

频、优化计算等多功能芯片,形成功能完备的组件模块,使开放式相控阵具备极高的功能重构灵活性;另一方面,利用微纳尺度集成工艺实现组件模块的高度集成化,大幅降低体积、重量、功耗和成本,提升性能一致性和可靠性,实现开放式相控阵的标准化、模块化,支持规模扩展。晶圆级微系统集成见图13。

(2) 智能化技术。融合人工智能、大数据等技术,提升开放式相控阵从感知、分析到决策、处理的OODA全流程的智能化水平,构建多通道多闭环的并行智能处理架构,增强感知、对抗和环境适应能力。智能化处理见图14。

(3) 分布式计算技术。基于开放式相控阵的模块化架构,充分利用其前/后端分层分布式计算资源,同时并行完成计算任务,大幅提升开放式相控阵的处理能力。分布式分层分级并行计算见图15。

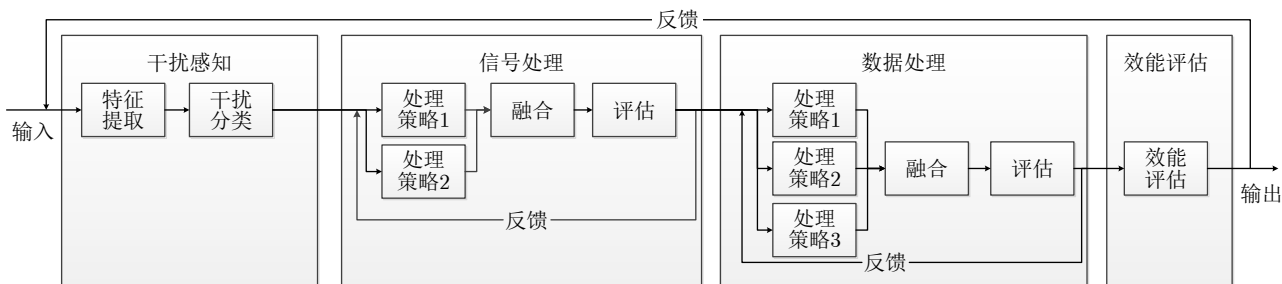


图 12 雷达抗干扰流程重构示例

Fig. 12 Instance of processing reconfiguration for radar ECCM

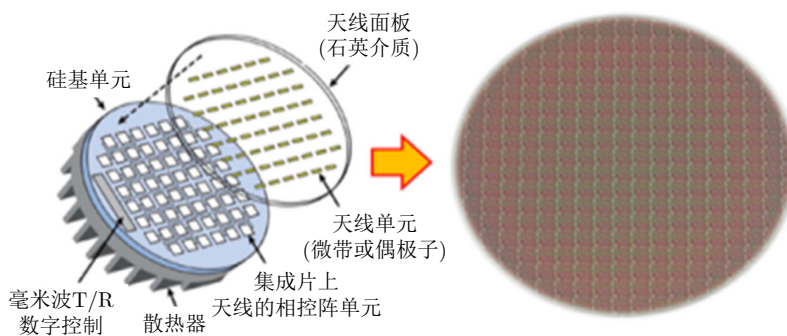


图 13 晶圆级微系统集成

Fig. 13 Integration of microsystem in wafer level

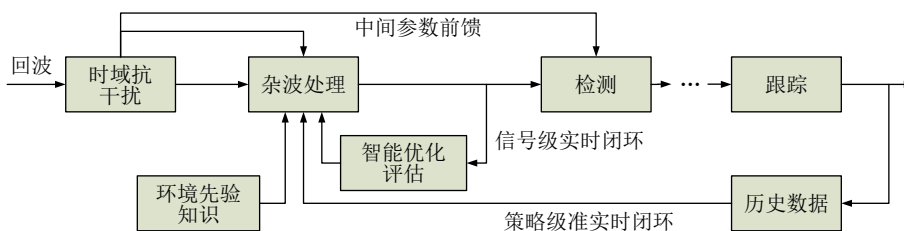


图 14 智能化处理

Fig. 14 Schematic diagram of intelligent processing

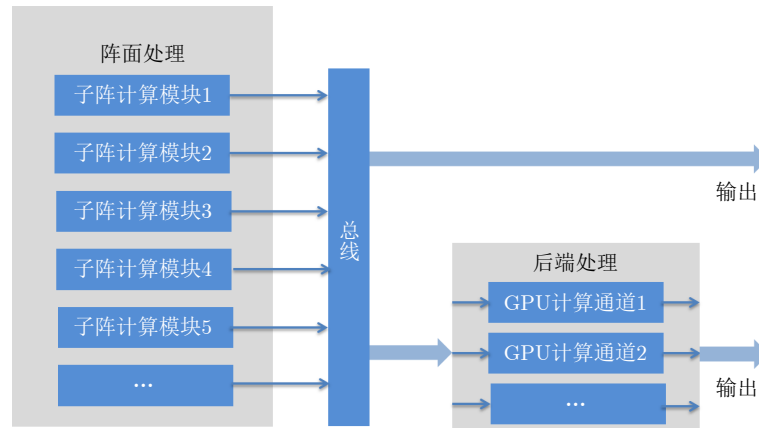


图 15 分布式分层分级并行计算

Fig. 15 Schematic diagram of parallel computing in multiple layers and priorities

6 结语

开放式相控阵是相控阵系统发展到一定阶段形成的全新概念，具有“应用软件化、资源虚拟化、硬件积木化”的典型特征，并与智能化、软件化、一体化、网络化等概念不断融合，内涵不断拓展，满足功能重构、规模扩展、环境适应的发展需求。为进一步推动开放式相控阵发展，还需在3个方面重点发力，一是进一步开展开放式相控阵顶层架构研究，厘清能力边界和约束条件；二是形成和制定开放式相控阵标准，包括软/硬纵向分层、横向解耦、相互连接规范；三是开展底层设计研究，支撑开放式架构构建。

参考文献

- [1] 伍光新, 李归. 综合射频一体化系统技术发展综述[J]. 现代雷达, 2023, 45(5): 1–14. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001).
WU Guangxin and LI Gui. Overview of technological development of integrated RF system[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(5): 1–14. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.001).
- [2] MOO P W and DIFILIPPO D J. Multifunction RF systems for naval platforms[J]. *Sensors*, 2018, 18(7): 2076. doi: [10.3390/s18072076](https://doi.org/10.3390/s18072076).
- [3] 刘宏伟, 严峻坤, 周生华. 网络化雷达协同探测技术[J]. 现代雷达, 2020, 42(12): 7–12. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.002](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.002).
LIU Hongwei, YAN Junkun, and ZHOU Shenghua. Collaborative detection technology of netted radar[J]. *Modern Radar*, 2020, 42(12): 7–12. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.002](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2020.12.002).
- [4] 刘泉华, 张凯翔, 梁振楠, 等. 地基分布式相参雷达技术研究综述[J]. 信号处理, 2022, 38(12): 2443–2459. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.001](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.001).
LIU Quanhua, ZHANG Kaixiang, LIANG Zhennan, et al. Research overview of ground-based distributed coherent aperture radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(12): 2443–2459. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.001](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.12.001).
- [5] 韩长喜, 邓大松, 王虎, 等. 2022年雷达技术发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(2): 108–112. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2023.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2023.02.002).
HAN Changxi, DENG Dasong, WANG Hu, et al. Development of radar technology in 2022[J]. *Journal of CAEIT*, 2023, 18(2): 108–112. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2023.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2023.02.002).
- [6] BROOKNER E. Advances and breakthroughs in radars and phased-arrays[C]. 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), Guangzhou, China, 2016: 1–9. doi: [10.1109/RADAR.2016.8059284](https://doi.org/10.1109/RADAR.2016.8059284).
- [7] 汤俊, 吴洪, 魏鲲鹏. 软件化雷达技术研究[J]. 雷达学报, 2015, 4(4): 481–489. doi: [10.12000/JR15012](https://doi.org/10.12000/JR15012).
TANG Jun, WU Hong, and WEI Kunpeng. Software radar technology[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(4): 481–489. doi: [10.12000/JR15012](https://doi.org/10.12000/JR15012).
- [8] KLEIN M, CARPENTIER T, JEANCLAUDE E, et al. Ai-augmented multi function radar engineering with digital twin: Towards proactivity[C]. 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20), Florence, Italy, 2020: 1–6. doi: [10.1109/RadarConf2043947.2020.9266455](https://doi.org/10.1109/RadarConf2043947.2020.9266455).
- [9] 马咏雪, 邢文革, 沈学勇, 等. 海上反突防作战中雷达应用模式研究[J]. 现代雷达, 2023, 45(4): 66–74. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.010](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.010).
MA Yongxue, XING Wenge, SHEN Xueyong, et al. A study on radar operating mode for marine anti-penetration battle[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(4): 66–74. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.010](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.04.010).
- [10] 赵保军, 陈士涛, 李大喜, 等. 国外六代机发展及作战概念分析[J]. 现代防御技术, 2022, 50(6): 19–25. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2022.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2022.06.003).
ZHAO Baojun, CHEN Shitao, LI Daxi, et al. Analysis of the

- sixth generation fighter development and operational concept[J]. *Modern Defense Technology*, 2022, 50(6): 19–25. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2022.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2022.06.003).
- [11] 王冠, 尹童, 曹颖. 国外高超声速武器攻防发展态势研究[J]. 现代防御技术, 2022, 50(2): 26–32. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2022.02.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2022.02.004).
- WANG Guan, YIN Tong, and CAO Ying. Research on the development of foreign hypersonic offensive and defensive weapons[J]. *Modern Defence Technology*, 2022, 50(2): 26–32. doi: [10.3969/j.issn.1009-086x.2022.02.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-086x.2022.02.004).
- [12] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术[C]. 第十九届中国科协年会——分4信息新技术 东北新工业论坛论文集, 长春, 2017: 169–174.
- CHEN Xiaolong, GUAN Jian, HUANG Yong, *et al.* Radar Low-observable target detection[C]. 19th Annual Conference of CAST—Selected Papers of the Northeast New Industry Forum on Information New Technology, Changchun, China, 2017: 169–174.
- [13] 王峰, 李培, 徐锋. 新一代雷达电磁空间深蓝博弈技术需求分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2021, 16(12): 1195–1200, 1223. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2021.12.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2021.12.003).
- WANG Feng, LI Pei, and XU Feng. Demand analysis of deep blue game in electromagnetic space for new generation radar[J]. *Journal of CAEIT*, 2021, 16(12): 1195–1200, 1223. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2021.12.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2021.12.003).
- [14] 宫尚玉, 陈亮, 王月悦. 外军机载干扰吊舱发展研究[J]. 舰船电子对抗, 2022, 45(6): 8–14. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2022.06.003](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2022.06.003).
- GONG Shangyu, CHEN Liang, and WANG Yueyue. Research into the development of airborne jamming pods in foreign military[J]. *Shipboard Electronic Countermeasure*, 2022, 45(6): 8–14. doi: [10.16426/j.cnki.jcdzdk.2022.06.003](https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2022.06.003).
- [15] 王昊, 肖慧鑫. 一种小型无人机载雷达伺服系统设计[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9): 159–162, 168. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2018.09.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2018.09.033).
- WANG Hao and XIAO Huixin. Design of a small radar servo system for UAV[J]. *Fire Control & Command Control*, 2018, 43(9): 159–162, 168. doi: [10.3969/j.issn.1002-0640.2018.09.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2018.09.033).
- [16] 李龙, 刘峥, 陈熠, 等. 高超声速平台雷达杂波特性研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(11): 80–83. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.019).
- LI Long, LIU Zheng, CHEN Yi, *et al.* Research of radar clutter characteristics on hypersonic vehicle[J]. *Modern Radar*, 2013, 35(11): 80–83. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2013.11.019).
- [17] 叶海军, 潘舟浩, 秦国杰, 等. 无人预警机系统架构及关键技术分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(5): 411–415. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2022.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2022.05.001).
- YE Haijun, PAN Zhouhao, QIN Guojie, *et al.* The system architecture and key technologies analyses of unmanned early warning aircraft[J]. *Journal of CAEIT*, 2022, 17(5): 411–415. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2022.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2022.05.001).
- [18] 赵正平. Chiplet基三维集成技术与集成微系统的新进展(续)[J]. 微纳电子技术, 2023, 60(5): 641–657. doi: [10.13250/j.cnki.wndz.2023.05.001](https://doi.org/10.13250/j.cnki.wndz.2023.05.001).
- ZHAO Zhengping. New advances in Chiplet-based 3D integration technology and integrated microsystems (continued)[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2023, 60(5): 641–657. doi: [10.13250/j.cnki.wndz.2023.05.001](https://doi.org/10.13250/j.cnki.wndz.2023.05.001).
- [19] 李康, 纠博, 赵宇, 等. 雷达智能博弈抗干扰技术综述与展望[J]. 现代雷达, 2023, 45(5): 15–26. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.002](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.002).
- LI Kang, JIU Bo, ZHAO Yu, *et al.* Overview and prospects of radar intelligent game-based anti-jamming technology[J]. *Modern Radar*, 2023, 45(5): 15–26. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.002](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2023.05.002).
- [20] HAIGH K and ANDRUSENKO J. Cognitive Electronic Warfare: An Artificial Intelligence Approach[M]. Norwood: Artech House, 2021: 1–288.
- [21] LECUN Y, BENGIO Y, and HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436–444. doi: [10.1038/nature14539](https://doi.org/10.1038/nature14539).
- [22] 刘洋, 黄志, 徐娟, 等. 并行算法在气象数据处理中的研究与应用[J]. 电子设计工程, 2023, 31(11): 152–156, 162. doi: [10.14022/j.issn1674-6236.2023.11.033](https://doi.org/10.14022/j.issn1674-6236.2023.11.033).
- LIU Yang, HUANG Zhi, XU Juan, *et al.* Research and application of the parallel algorithm in meteorological data processing[J]. *Electronic Design Engineering*, 2023, 31(11): 152–156, 162. doi: [10.14022/j.issn1674-6236.2023.11.033](https://doi.org/10.14022/j.issn1674-6236.2023.11.033).
- [23] 杨小牛. 从软件无线电到认知无线电, 走向终极无线电——无线通信发展展望[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(1): 1–7. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2008.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2008.01.001).
- YANG Xiaoniu. Software radio, cognitive radio and ultimate radio—a prospect of wireless communication[J]. *Journal of CAEIT*, 2008, 3(1): 1–7. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2008.01.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2008.01.001).
- [24] DoD Open Systems Architecture Data Rights Team. DoD open systems architecture contract guidebook for program managers v. 1.1[EB/OL]. [https://www.acqnotes.com/Attachments/Open System Architecture \(OSA\) Contract Guidebook for Program Managers](https://www.acqnotes.com/Attachments/Open%20System%20Architecture%20(OSA)%20Contract%20Guidebook%20for%20Program%20Managers), 2013.
- [25] Tech Target Contributor. Open system[EB/OL]. <https://www.techtarget.com/whatis/definition/open-system>, 2005.
- [26] 崔林海, 张子迎, 姜占鹏, 等. 计算机组成原理与结构[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2015: 1–233.
- CUI Linhai, ZHANG Ziyang, JIANG Zhanpeng, *et al.* Computer Organization and Architecture[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015: 1–233.
- [27] 唐朔飞. 计算机组成原理[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 1–400.
- TANG Shuofei. Principles of Computer Composition[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2008: 1–400.
- [28] 张荣涛, 杨润亭, 王兴家, 等. 软件化雷达系统技术综述[J]. 现代雷达, 2016, 38(10): 1–3. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859).

- 2016.10.001.
ZHANG Rongtao, YANG Runting, WANG Xingjia, *et al.* System technology of software defined radar[J]. *Modern Radar*, 2016, 38(10): 1–3. doi: [10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.001](https://doi.org/10.16592/j.cnki.1004-7859.2016.10.001).
- [29] 汤俊, 岑宗骏. 软件化雷达技术发展思考与展望[J]. 信号处理, 2022, 38(10): 1999–2008. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.10.001](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.10.001).
- TANG Jun and CEN Zongjun. Thinking of the prospect of software-based radar technology[J]. *Journal of Signal Processing*, 2022, 38(10): 1999–2008. doi: [10.16798/j.issn.1003-0530.2022.10.001](https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2022.10.001).
- [30] 井应忠, 陈晓东. 基于模块化开放式系统架构的复杂电磁环境建设[J]. 信息化研究, 2018, 44(3): 1–4.
- JING Yingzhong and CHEN Xiaodong. Complex electromagnetic environment building based on modular open system architecture[J]. *Informatization Research*, 2018, 44(3): 1–4.
- [31] 丁琳琳, 李路野. 可重构雷达架构研究[J]. 信息技术与信息化, 2017(7): 103–105. doi: [10.3969/j.issn.1672-9528.2017.07.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9528.2017.07.029).
- DING Linlin and LI Luye. Research on radar software architectur based software bus technology[J]. *Information Technology and Informatization*, 2017(7): 103–105. doi: [10.3969/j.issn.1672-9528.2017.07.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9528.2017.07.029).
- [32] ANDREWS S E, YOHO P K, BANNER G P, *et al.* Radar open system architecture for Lincoln space surveillance activities[R]. Lexington: MIT Lincoln Laboratory, 2010.
- [33] 胡明春. 开放式有源相控阵天线系统[J]. 现代雷达, 2008, 30(8): 1–4. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2008.08.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2008.08.001).
- HU Mingchun. Open active phased array system[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(8): 1–4. doi: [10.3969/j.issn.1004-7859.2008.08.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7859.2008.08.001).
- [34] 岳帅英, 彭芑, 任渊. 舰载多功能相控阵雷达发展现状与趋势[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(2): 141–147. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2023.02.025](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2023.02.025).
- YUE Shuaiying, PENG Peng, and REN Yuan. Development status and future trend of ship-based multi-functional phased array radar[J]. *Ship Science and Technology*, 2023, 45(2): 141–147. doi: [10.3404/j.issn.1672-7649.2023.02.025](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2023.02.025).
- [35] 刁华飞, 殷智勇, 张雅声, 等. 美国夸贾林“太空篱笆”系统概述与分析[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(2): 56–59. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2020.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2020.02.019).
- DIAO Huafei, YIN Zhiyong, ZHANG Yasheng, *et al.* Overview and analysis of the US Kwajalein “space fence” surveillance system[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2020, 36(2): 56–59. doi: [10.3969/j.issn.1673-2421.2020.02.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-2421.2020.02.019).
- [36] 郭敏洁. 2021年外军情报侦察领域发展综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(4): 324–328. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2022.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2022.04.003).
- GUO Minjie. Comprehensive analysis of annual development of the intelligence su surveillance and reconnaissance in 2021[J]. *Journal of CAEIT*, 2022, 17(4): 324–328. doi: [10.3969/j.issn.1673-5692.2022.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5692.2022.04.003).
- [37] ROZA D. The air force is moving forward with a replacement for its decades-old long-range radar[EB/OL]. <https://taskandpurpose.com/news/air-force-tpy-4-lockheed-radar/>, 2023.
- [38] ORMAN A J, POTTS C N, SHAHANI A K, *et al.* Scheduling for a multifunction phased array radar system[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 90(1): 13–25. doi: [10.1016/0377-2217\(95\)00307-X](https://doi.org/10.1016/0377-2217(95)00307-X).
- [39] HARITSA J R, LIVNY M, and CAREY M J. Earliest deadline scheduling for real-time database systems[C]. Twelfth Real-time Systems Symposium, San Antonio, USA, 1991: 232–242. doi: [10.1109/REAL.1991.160378](https://doi.org/10.1109/REAL.1991.160378).
- [40] MOO P W and DING Z. Adaptive Radar Resource Management[M]. Amsterdam: Elsevier, 2016: 1–50. doi: [10.1016/C2014-0-02505-1](https://doi.org/10.1016/C2014-0-02505-1).
- [41] HUIZING A G and BLOEMEN A A F. An efficient scheduling algorithm for a multifunction radar[C]. International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Boston, USA, 1996: 359–364. doi: [10.1109/PAST.1996.566115](https://doi.org/10.1109/PAST.1996.566115).
- [42] MIRANDA S L C, BAKER C J, WOODBRIDGE K, *et al.* Phased array radar resource management: A comparison of scheduling algorithms[C]. 2004 IEEE Radar Conference, Philadelphia, USA, 2004: 79–84. doi: [10.1109/NRC.2004.1316399](https://doi.org/10.1109/NRC.2004.1316399).

作者简介

胡明春, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为雷达系统总体工程研发和天线理论。

(责任编辑: 高华)