

综合射频桅杆——

新一代舰艇的标志性设计

■于 斌

近日,日本与印度签署防务合作协议,其中一项重要内容是联合建造舰载天线系统,核心设备是NORA-50综合射频桅杆。这是一种将雷达、通信、电子等多组天线设备集成在一起,能够通过软件控制大幅降低电磁互扰和雷达反射截面的综合性军工技术。日本首次向外转移该技术,引发外界高度关注。

综合射频桅杆是现代海军舰艇设计中的一项重要技术,它标志着舰艇上层建筑设计从“物理堆叠”向“系统融合”的转变,是军舰适应信息化、隐身化战场的一项重要变化。

解决传统桅杆“顽疾”

在综合射频桅杆出现前,各国海军舰艇普遍采用烟囱林立、天线密布的布局,这在海战中构成致命缺陷。随着雷达、通信、电子战设备数量激增,数十根天线布置在有限的甲板空间,彼此间距较近,大功率雷达工作时极易干扰甚至烧毁邻近的通信接收机。另外,传统的圆柱形天线、桁架结构和复杂的缆线是极端的雷达反射源,即便舰体采用隐身外形,这些杂乱的上层建筑也会使全舰雷达散射截面增大,让隐身效果变差。此外,大量的外挂设备增加了上层建筑的重量和风阻,影响舰艇稳定性。而暴露在海上盐雾环境中的机械旋转结构和线缆接口的故障率较高,维护成本更高。

为解决电磁兼容、雷达隐身和结构优化等制约现代化舰艇战斗力提升的“顽疾”,综合射频桅杆应运而生。

变“物理堆叠”为“系统融合”

综合射频桅杆不是简单地将多组天线放置在一个整体外壳下,让外观变得简洁流畅。其核心是一个高度集成的多功能系统。

综合射频桅杆将原本独立的搜索、火控、敌我识别、通信导航和电子侦察等十余种功能,通过宽带共形天线阵列集成在同一套辐射孔径中,一块平板天线可同时承担S波段对空搜索和X波段火控任务。在外形上,综合射频桅杆采用多面体棱柱形或倾斜锥台形设计,表面平整光滑,无外露旋转结构或突出物。所有天线均嵌入复合材料蒙皮内部,通过频率选择技术实现特定频段的透波与屏蔽,大幅降低雷达反射截面。

在运行上,综合射频桅杆实现软件控制和电磁自扰消除。硬件上采用标准化有源相控阵天线模块,功能上依赖



后端数字信号处理,这意味着无需更换硬件,仅通过升级软件即可增加新波形、新协议或提升抗干扰能力。由舰载中央计算机系统统一管理射频资源,根据战场态势动态分配功率、频段和波束,解决了设备间的互扰问题。

提升舰艇实战能力

综合射频桅杆是各国在发展新一代水面作战舰艇时努力攻克的新技术,其实战价值体现在以下方面。

舰艇生存能力提升。综合射频桅杆优异的隐身性能使反舰导弹的探测距离大幅缩短,配合电子战系统,可大幅提升舰艇在高威胁环境中的生存能力。

作战效能倍增。由于消除了电磁

自扰,全舰传感器可以同时满功率工作;资源动态调度实现了“一部设备顶多部用”的效果,反应时间从秒级提升至毫秒级。

全寿命周期成本下降。虽然初期研发投入巨大,但由于减少了设备数量、降低了机械磨损和维护工时,长期运营成本反而下降,维护工作量也大幅减少。腾出的甲板空间与重量余量还可用于加装更多武器或新型载荷,使舰艇不断升级,从而适应变化的外部威胁,避免技术落伍。

目前,美国朱姆沃尔特级驱逐舰、英国45型驱逐舰、法国阿基坦级护卫舰、日本最上级护卫舰和德国F125型护卫舰等均采用综合射频桅杆。这些舰艇凭借高度集成的射频系统与隐身外形,实现高效天线协同,在复杂电磁环境下保



上图:美国圣安东尼奥级船坞登陆舰的综合射频桅杆组装特写。

左图:日本最上级护卫舰的综合射频桅杆。

持稳定的态势感知能力。

高门槛下的技术挑战

虽然综合射频桅杆优势明显,但目前全球仅有少数国家掌握这一技术,这主要受制于其较高的技术壁垒,包括电磁兼容设计、热管理与散热问题、结构设计材料与材料、系统集成与算法设计复杂等。比如,在热管理与散热问题上,有源相控阵天线模块集成在桅杆内,热流密度极大,传统风冷方式失效,需采用复杂的液冷技术,同时需开发高温宽禁带半导体器件。再比如,在系统集成与算法设计层面,不同传感器数据融合困难,实时资源调度算法的复杂度呈指数级增长,需构建开放式架构,引入人工智能辅助管理,建立完善的仿真验证平台。

综合射频桅杆是衡量一国海军装备现代化水平的关键标尺,拥有该技术,意味着该国具备独立建造一流主力战舰的能力,不再受制于外部技术限制。这正是印度不惜重金寻求日本技术转让的主要原因——获取的不仅是硬件技术,更是通向舰艇自主研发的“入场券”。

S-400反导系统、“铠甲”系统和其他空中指挥节点提供引导,再借助机载相控阵雷达、101KS-N型瞄准吊舱和红外搜索跟踪系统完成拦截作战。在这一任务中,它更像一架高端机动防空节点,而非一款隐身战机。

导弹组合也支持这一判断。R-77系列是俄罗斯主要的主动雷达制导中距导弹,出口型的公开射程达110千米,具备惯性制导、无线电修正和末端主动雷达制导能力。R-73/R-74系列则适合近距拦截,其中R-73E最大射程30千米,具备±45度离轴发射能力。对低空无人机、巡航导弹、直升机和低空突防目标而言,近距拦截和吊舱识别能力比隐身外形更重要。

此外,报道还提出一个值得关注的载弹量说法。如果苏-57的内部弹舱可以携带最多6枚R-77M中距空空导弹,再增加4枚外挂中距空空导弹,理论上可将中距空空导弹携带量提高到10枚。虽然这一数字基于公开图像和配置推断,不能视作已确认的实战载荷,但足以表明苏-57正在被用作“导弹卡车”的防御性制空平台,能以更大的导弹齐射密度提升拦截作战能力。

这种做法也有代价。用苏-57和高价值空空导弹拦截低成本无人机等目标的做法在成本交换上并不理想,同时外挂武器还会削弱苏-57的隐身性能。然而,对于防空作战,成本并非优先考虑。保护机场、能源设施和战略纵深,避免被对方毁掉,才是俄罗斯的首要目的。

苏-57的外挂导弹似乎表明,俄罗斯五代机可能正在从“隐身优先”转向“任务适配优先”。在无人机、巡航导弹和纵深打击威胁上升的背景下,先进战斗机而言,单靠地面防空体系难以覆盖辽阔的后方。苏-57若在俄罗斯控制空域内执行防御性制空任务,可由地面雷达、

为应对太空威胁,美军认为未来太空作战将不仅是被动监测,还要强调主动作战与机动能力。近期,美军太空司令部司令公开呼吁,美军必须将太空作战从“静态轨道”转向“机动战”,并借鉴美国海军陆战队“迅速且灵活”的战术思维,让卫星具备机动变轨、补给和快速重启能力。

美军太空司令部司令称,目前的卫星一旦发射升空,其空间位置相对固定,缺乏机动生存能力,而太空部队应像地面部队一样能够灵活机动。为此,美军将发展“轨道后勤”技术,包括在太空中为卫星加注燃料和进行维修,让卫星能随时变换轨道,以规避反卫星武器的攻击。

为此,美军太空司令部计划推出代号“阿波罗机动”的大规模演习,为潜在太空冲突进行模拟演练。演习内容包括大规模卫星变轨、快速补星发射和电磁攻防等,预计最快于2027年开展。除此之外,美军还计划近期启动一系列涉及商业合作伙伴的兵棋推演,首场推演聚焦的议题是“如果在太空遭遇大规模杀伤性武器该如何应对”。这一议题充分显示出美太空军已将太空核爆、电磁脉冲及其他毁灭性攻击列入现实威胁。

美军太空司令部发展“卫星机动战”能力,或将对未来战争形态和格局产生深刻影响。在作战样式上,传统太空资产“固定部署、被动防御”模式将被打破。当卫星具备在轨机动、主动避障甚至逼近侦察等能力,太空作战将从静态保障转向动态对抗,作战节奏大幅加快,战场态势更加复杂多变,他国在轨卫星随时可能面临被跟踪、干扰甚至捕获等风险,围绕太空“制天权”的争夺将变得更加激烈和不可预测。

在战略威慑层面上,“卫星机动战”能力将强化美军“一体化威慑”战略。太空力量与陆海空网电作战力量融合将更加紧密,具备机动能力的卫星星座可在危急时刻快速重构星座布局,确保关键通信、导航和侦察能力不中断。通过在轨服务延长卫星寿命,可缩短被摧毁后的战力真空期,大幅提升太空体系的生存韧性和持续作战能力。另外,对地面作战支援能力也将得到增强。机动卫星可动态调整轨道位置和覆盖范围,为地面作战提供实时情报、导航定位和通信中继服务,尤其是星座的快速重构,将弥补地面基础设施的不足。

不过,美军这一战略设想将给大

空安全带来严重挑战。大规模的卫星机动将大大增加碰撞风险,引发太空碎片灾难,威胁太空资产安全。另外,在轨服务、轨道机动技术竞争加剧,或将引发新一轮太空军备竞赛。此外,商业卫星的深度军事化也将使其成为潜在攻击目标,进而扩大战争波及范围。



卫星在轨机动示意图。

反无人机装置精准控制无人机降落



反无人机装置的平板操作界面。

据外媒报道,美国洛克希德·马丁公司将网络射频技术与反无人机平台结合,研发出一款特殊的反无人机装置。它不使用干扰或摧毁方式,而是直接接管无人机制控制权,引导其降落。

该装置采用的技术作用在通信协议层面,通过识别无人机控制链路,直接获取无人机制控制权,无需发射宽频干扰信号,避免了对周边友军通信和电子设备的附带影响,适用于军事基地、关键基础设施附近等应用场景。

这款反无人机装置采用模块化设计和开放式架构,融合多型传感器、指挥控制和对抗软件,具备探测、跟踪和应对无人机蜂群袭击能力。在实战中,操作员可根据威胁类型和交战规则,灵活选择软接管还是硬杀伤,标志着反无人机技术正从功率对抗走向精准控制。

新型电池或用核废料提供电力

据外媒报道,美国科研人员计划开发一种新型电池,可将核废料转化为高密度的持久电力。这项计划名为“辐射转电能”,由美国国防高等研究计划署主导。

“辐射转电能”计划的核心,是将锶-90等高能放射性同位素的衰变能量,通过超薄半导体层与放射性材料的精密配对,转化为高密度电能。该机制不依赖热转换或机械运动,具备体积小、抗辐射、环境适应性强等特点,适合为长期部署且难以得到后勤补给的设备提供稳定电源。

该项目由美国摩根州立大学牵头,联合诺斯罗普·格鲁曼公司、西北太平洋国家实验室及“欧米茄”项目共同推进。在获得首笔投资后,相关研究与概念测试已经展开。项目后续将聚焦器件工程优化、辐射加固封装和系统集成验证等,预计在未来数年内完成技术验证。

(宁国强)



前沿技术