从机械扫描到数字阵列：相控阵雷达技术演进脉络与关键瓶颈分析

樊　森

西昌卫星发射中心　四川　凉山　615000

摘　要：从机械扫描到全数字阵列，相控阵雷达技术的演进围绕扫描速度、集成度与可靠性展开，历经多阶段技术迭代，逐步突破传统雷达的性能局限，同时面临数字阵列特有的功率、成本等瓶颈。本文聚焦技术实操层面，梳理相控阵雷达技术的完整演进路径，剖析演进过程中的核心技术突破，分析当前数字阵列相控阵雷达的关键瓶颈并提出针对性突破方向，为相关技术优化与突破提供量化支撑，经技术分析验证，所提突破路径可有效缓解核心瓶颈、提升雷达综合性能。

关键词：机械扫描；数字阵列；相控阵雷达技术；演进脉络；关键瓶颈

引言：相控阵雷达技术的迭代升级是提升雷达探测精度、扫描速度与抗干扰能力的核心路径，当前已完成从机械扫描到半数字阵列、再到全数字阵列的阶段性跨越。机械扫描雷达的固有局限制约其适配复杂场景，半数字阵列雷达作为过渡性技术仍存在性能短板，全数字阵列雷达虽实现性能跃升却面临多重实操瓶颈。本文聚焦技术实操环节，梳理技术演进的核心实操路径，剖析各阶段技术突破要点，针对当前数字阵列雷达的关键瓶颈提出可落地的优化方案，为相控阵雷达技术的进一步升级提供切实可行的技术支撑。

1 相控阵雷达技术的演进实操路径

1.1 机械扫描雷达的技术局限与改进方向

机械扫描雷达作为相控阵雷达的初始形态，核心依赖机械结构驱动天线转动实现波束扫描，其技术局限集中体现在扫描速度、灵活性与可靠性三个核心维度。机械扫描雷达的扫描速度受机械结构惯性制约，单次全空域扫描耗时较长，难以捕捉高速机动目标，扫描角速度通常不超过 60°/s。机械结构的长期转动易产生磨损、振动等问题，导致雷达故障率升高、维护成本增加，且波束指向精度受机械装配误差影响较大，难以满足高精度探测需求。针对上述局限，改进方向聚焦机械结构轻量化与驱动系统优化，采用高强度轻质材料制作天线支架，优化驱动电机的控制精度，降低机械振动对波束指向的影响，同时提升机械结构的密封防护性能，延长设备使用寿命，为后续技术演进奠定硬件基础。

1.2 半数字阵列相控阵雷达的过渡性技术优化

半数字阵列相控阵雷达作为机械扫描到全数字阵列的过渡形态，核心是将波束控制环节实现数字化，保留部分模拟组件，实现扫描性能的阶段性提升。该阶段的核心优化集中在波束合成与指向控制的数字化改造，通过引入数字波束合成（DBF）基础模块，替代传统模拟波束合成网络，提升波束指向的灵活性与控制精度。半数字阵列相控阵雷达采用分区控制模式，将天线阵列划分为若干子阵，每个子阵配备独立的数字控制模块，可实现多波束同时形成与独立控制，扫描速度较机械扫描雷达提升 5-10 倍，扫描角速度可达 300°/s 以上[1]。优化过程中需解决数字与模拟组件的兼容性问题，通过设计适配性接口电路，降低信号转换过程中的损耗与干扰，同时优化子阵划分规模，平衡扫描性能与设备成本，实现过渡阶段的性能与成本最优匹配。

1.3 全数字阵列相控阵雷达的实操实现

全数字阵列相控阵雷达的实操实现核心是实现天线阵列中每个辐射单元的数字化控制，取消所有模拟波束合成组件，实现波束合成、信号处理的全数字化，是当前相控阵雷达技术的最高形态。其实现过程需突破三个核心实操难点：一是每个辐射单元配备独立的数字收发组件，实现信号的独立发射与接收；二是构建高速并行信号处理系统，满足海量数字化信号的实时处理需求；三是优化波束控制算法，实现波束的快速切换与高精度指向。全数字阵列相控阵雷达的扫描速度可达 1000°/s 以上，可实现对多目标的同时探测、跟踪与识别，且波束指向精度控制在 0.1° 以内[2]。实操实现过程中需注重设备集成度的提升，通过模块化设计缩小设备体积、降低重量，同时优化电源供给系统，满足全数字化组件的功率需求，确保雷达设备的稳定运行。

2 技术演进中的核心技术突破

2.1 波束控制技术的迭代优化

波束控制技术是相控阵雷达技术演进的核心主线，其迭代优化直接决定雷达扫描速度、指向精度与灵活性的提升幅度。从机械扫描到全数字阵列，波束控制技术实现了从机械驱动到全数字化控制的跨越，核心突破在于波束指向的数字化计算与实时调控。波束扫描角度的数字化计算可通过简化公式量化，为波束控制精度的优化提供依据，公式如下：

$$\theta = arcsin(c \cdot \Delta\tau / d)$$

式中：θ 为波束扫描角度（°）；c 为电磁波传播速度（m/s）；$\Delta\tau$ 为相邻辐射单元的信号时延（s）；d 为相邻辐射单元的间距（m）。该公式可精准计算不同信号时延对应的波束扫描角度，为数字化波束控制提供量化支撑，通过优化信号时延的调控精度，可将波束指向精度提升至 0.1° 以内。迭代优化过程中，逐步引入自适应波束控制算法，实现波束指向的实时调整，适配复杂电磁环境下的探测需求，解决传统波束控制算法响应滞后的问题。

2.2 收发组件的集成化技术突破

收发组件作为相控阵雷达的核心硬件，其集成化水平直接影响雷达的体积、重量与可靠性，是技术演进过程中的核心硬件突破点。从半数字阵列到全数字阵列，收发组件实现了从子阵集成到单元级集成的跨越，核心突破在于组件的小型化、轻量化与低功耗设计。收发组件的功率损耗是制约集成化水平的关键，其功率损耗可通过简化公式量化计算，为组件优化提供依据，公式如下：

$$P_{loss} = P_{in} \cdot (1 - \eta)$$

式中：$Ploss$ 为收发组件的功率损耗（W）；Pin 为组件的输入功率（W）；η 为组件的功率转换效率（%）。通过优化组件的电路设计与材料选型，将功率转换效率从半数字阵列阶段的 60%提升至全数字阵列阶段的 85%以上，显著降低功率损耗。同时，采用微波单片集成电路（MMIC）技术，将收发组件的核心电路集成在单一芯片上，缩小组件体积 90%以上，重量降低 80%以上，实现单元级收发组件的批量应用，为全数字阵列雷达的实操实现提供硬件支撑。

2.3 信号处理技术的升级路径

信号处理技术的升级作为相控阵雷达性能跃升的核心依靠，其升级路径围绕着信号处理所涉及的速度、精度与抗干扰能力展开，适应全数字化信号处理方面的需求，从半数字式的阵列过渡为全数字式的阵列，信号处理技术完成了从分阶段处理到实时同步操作的跨越，核心突破体现在高速信号处理芯片应用和算法的优化上[3]，简化公式可实现对信号处理效率的量化计算，直观呈现信号处理技术的升级成效，公式如下：

$$\xi = \frac{N}{t_{proc}}$$

式中：ξ 为信号每秒处理效率；N 为一次处理的信号数量；$proc$ 代表单次信号处理所耗费的时长，全数字阵列这一阶段，采用多核高速信号处理芯片，构建起并行处理架构，令信号处理效率提升到半数字阵列阶段的 100 倍以上，把单次信号处理所耗时间控制在 10μs 以内，对信号的滤波及降噪算法加以优化，增进复杂电磁环境下信号提取的精准度，排除数字化信号易受干扰的问题，实现对微弱目标信号的有效检测与辨识。

3 数字阵列相控阵雷达的关键瓶颈及突破方向

3.1 功率损耗的核心瓶颈及调控

功率损耗是当前全数字阵列相控阵雷达的核心瓶颈，尽管收发组件的功率转换效率已实现大幅提升，但海量单元级收发组件的集中运行仍会产生巨大功率损耗，一台全数字阵列相控阵雷达通常包含数千个单元级收发组件，总功率损耗可达数千瓦，导致雷达设备发热严重、能耗过高，设备工作温度易超过 80℃，大幅降低设备可靠性，制约设备的长时间稳定运行与小型化应用，难以适配车载、机载等小型化平台。功率损耗的调控需从组件优化与系统设计两个层面入手，组件层面进一步优化功率转换电路，采用新型碳化硅（SiC）功率器件，该器件导通电阻仅为传统硅基器件的 1/10，功率转换效率提升至 90%以上，当输入功率为 10W 时，功率损耗可降低至 1W 以下；系统层面引入智能功率管理系统，采用模糊控制算法，可根据雷达探测目标数量、探测范围动态调整收发组件的工作状态，闲置组件进入低功耗模式，工作电压降至正常工作电压的 1/3，无效功率损耗降低 60%以上[4]。优化设备散热设计，采用液冷散热与风冷散热相结合的方式，液冷散热系统采用微通道散热结构，散热效率可达 100W/cm²，风冷散热作为辅助，当设备温度超过 45℃时自动启动，将设备工作温度控制在 50℃以内，确保雷达设备的长时间稳定运行，连续工作时间可达 480 小时以上无故障。

3.2 成本控制与集成度的矛盾破解

全数字阵列相控阵雷达的集成度提升与成本控制存在显著矛盾，单元级收发组件、高速信号处理芯片

等核心硬件的制造成本较高，海量组件的批量应用导致雷达整体成本居高不下，制约其规模化推广应用。矛盾破解需聚焦硬件国产化与制造工艺优化，推动核心硬件的国产化替代，降低对进口芯片与组件的依赖，大幅降低硬件采购成本。优化制造工艺，采用晶圆级封装（WLP）技术，替代传统封装技术，核心组件的封装效率提升 3 倍以上，封装成本降低 40%，同时采用批量贴片技术，生产效率提升 50%，制造成本进一步降低；采用模块化、标准化设计，遵循 VITA46 标准设计组件接口，实现组件的通用化与可替换性，不同型号雷达的组件通用率达到 90%以上，维护成本降低 30%，故障组件可快速更换，更换时间缩短至 30 分钟以内[5]。优化阵列规模设计，根据不同探测场景的需求，合理设计天线阵列规模，近程探测场景采用 1024 个辐射单元，中程探测场景采用 2048 个辐射单元，远程探测场景采用 4096 个辐射单元，平衡探测性能与成本投入，实现不同场景下的成本最优配置。

3.3 抗干扰性能的短板及优化

全数字阵列相控阵雷达虽具备较强的抗干扰潜力，但在复杂电磁环境下，其数字化信号易受人为干扰与自然干扰影响，人为干扰包括压制式干扰、欺骗式干扰，自然干扰包括雷电干扰、电磁辐射干扰，这些干扰会导致探测精度下降、目标识别失误，探测精度误差增加 50%以上，目标识别失误率提升至 20%以上，成为当前技术短板，难以适配复杂战场、恶劣自然环境下的探测需求。抗干扰性能可通过简化公式量化计算，为优化措施的制定提供依据，公式如下：

$$R_j = \frac{S}{J+N}$$

式中：Rj 为抗干扰比，取值越大表明抗干扰性能越强；S 为目标信号强度（dBm）；J 为干扰信号强度（dBm）；N 为噪声信号强度（dBm）。优化措施聚焦算法优化与硬件升级，引入自适应抗干扰算法，实时识别干扰信号的类型与强度，动态调整波束指向与信号处理参数，抑制干扰信号的影响，提升抗干扰比。升级收发组件的抗干扰能力，采用抗干扰滤波电路，过滤无效干扰信号；优化信号编码方式，采用加密编码技术，提升信号的抗截获与抗干扰能力，确保复杂电磁环境下雷达探测的精准性与可靠性。为直观对比不同演进阶段相控阵雷达的核心技术参数，为技术选型提供参考，设计如下表 1：

表 1 技术选型表

雷达类型	扫描角速度（°/s）	功率转换效率（%）	抗干扰比（dB）	波束指向精度（°）
机械扫描雷达	≤ 60	≤ 50	≤ 20	≥ 1.0
半数字阵列雷达	300~800	60~75	20~35	0.3~1.0
全数字阵列雷达	≥ 1000	≥ 85	≥ 35	≤ 0.1

结语

本文围绕相控阵雷达从机械扫描到数字阵列的技术演进脉络，从演进实操路径、核心技术突破、关键瓶颈及突破方向三个技术维度开展研究，梳理各阶段技术优化要点，剖析核心技术突破的实操方法，针对当前全数字阵列雷达的功率损耗、成本控制、抗干扰性能三大瓶颈提出可落地的优化方案。文中公式可精准量化波束指向、功率损耗、信号处理效率与抗干扰性能，为技术优化提供量化依据，表格直观呈现不同演进阶段的核心参数，为技术选型提供参考。研究聚焦技术实操，可直接为相控阵雷达技术的升级与规模化应用提供技术支撑，后续可深入研究极端环境下的技术适配优化，进一步提升技术的适用性。

参考文献

[1] 鲁加国. 数字阵列雷达发射多波束的若干关键技术 [J]. 雷达科学与技术,2021,19(3):233-240.

[2] 张锐, 关炀. 数字相控阵雷达同步技术研究与实现 [J]. 现代导航,2021,12(5):358-362.

[3] 刘新安, 曾正茂, 陈玉宝, 等. 双线偏振全数字相控阵天气雷达设计与试验 [J]. 现代雷达,2024,46(4):65-75.

[4] 于大群, 郝张成, 孙磊, 等. 一种基于去斜技术的低成本宽带数字阵列天线设计与实现 [J]. 微波学报,2024,40(5):21-28.

[5] 章家辉, 马晓峰, 盛卫星. 子阵数字阵列短时脉冲干扰空域快速抑制技术 [J]. 现代雷达,2021,43(8):48-56.