

相控阵雷达通道一致性校正方法及距离分辨性能改善

张栋栋 李浩然

上海航天电子技术研究所 上海 201109

摘要: 随着相控阵雷达技术迭代, 通道一致性校正与距离分辨性能优化成关键。本文聚焦相控阵雷达, 深入探讨其通道一致性校正方法与距离分辨性能改善策略。首先阐述通道一致性校正的必要性, 剖析通道不一致性的产生原因及对雷达性能的不良影响。接着详细介绍多种校正方法, 涵盖工厂校正、现场校正等。同时, 为提升雷达距离分辨性能, 提出采用宽带信号、脉冲压缩技术、匹配滤波技术、应用线性调频脉冲信号以及优化雷达系统设计等方法。通过这些研究, 旨在为提高相控阵雷达的整体性能提供理论支持与实践指导。

关键词: 相控阵雷达; 通道一致性校正; 距离分辨性能

引言: 相控阵雷达凭借其独特的优势, 在军事、民用等诸多领域发挥着关键作用。然而, 在实际应用中, 相控阵雷达面临着通道不一致性的问题, 这严重影响其性能表现, 尤其是距离分辨性能。通道不一致性可能源于多种因素, 从硬件制造偏差到工作环境变化等。这种不一致性会导致雷达信号处理出现误差, 降低目标检测与识别的准确性。因此, 对相控阵雷达通道一致性进行校正, 并改善其距离分辨性能, 成为提升雷达性能、确保其可靠运行的关键课题, 具有十分重要的研究价值与现实意义。

1 相控阵雷达通道一致性校正的必要性

1.1 通道不一致性的产生原因

相控阵雷达通道不一致性的产生原因是多方面的。从硬件层面来看, 雷达各通道中的发射/接收组件, 由于制造工艺的局限性, 其性能参数存在一定差异, 如增益、相位等, 这会导致信号在传输过程中出现幅度和相位的不一致。此外, 天线阵元之间的互耦效应也会使各通道的输入输出特性发生变化, 进一步加剧通道不一致性。在软件方面, 信号处理算法的近似处理以及参数设置得不准确, 同样会引入通道误差。同时, 环境因素也不容忽视, 温度、湿度等环境条件的变化会引起电子元件性能的漂移, 使得通道特性随时间发生改变。而且, 雷达在长期使用过程中, 部件的老化和磨损也会逐渐影响通道的一致性, 这些因素相互交织, 共同导致了相控阵雷达通道不一致性的产生^[1]。

1.2 通道不一致性对雷达性能的影响

通道不一致性会对相控阵雷达的多种性能指标产生负面影响。在目标检测方面, 通道不一致性会破坏雷达信号的相干性, 降低信号的信噪比, 使得雷达对弱目标的检测能力下降, 增加漏检概率。在波束形成方面, 不

一致性会导致波束指向出现偏差, 旁瓣电平升高, 这不仅会降低雷达的分辨率, 还会使雷达更容易受到旁瓣干扰, 影响目标的准确识别和跟踪。在多目标处理能力上, 通道不一致性会使不同目标的信号相互干扰, 增加目标分辨的难度, 降低雷达对多目标的跟踪精度和稳定性。

2 相控阵雷达通道一致性校正方法

2.1 工厂校正

工厂校正是相控阵雷达在生产制造阶段确保通道一致性的关键初始步骤。在高度专业化的测试环境中, 利用高精度的矢量网络分析仪等先进设备, 对每个收发通道的幅度和相位特性展开全面且细致的测量。依据测量所获取的精确数据, 对通道内的移相器、衰减器等核心部件进行精细调整。通过这种调整, 使各个通道的初始性能尽可能地趋近于设计所要求的理想状态, 最大程度消除因制造工艺偏差而导致的通道不一致性问题。工厂校正的优势在于能够从源头上为雷达的性能稳定奠定坚实基础, 为后续的使用和维护提供良好的初始条件。然而, 它也存在一定的局限性。由于工厂环境与雷达实际工作环境存在差异, 无法考虑到温度、湿度等环境因素对通道性能的动态影响, 以及雷达长时间运行后部件老化所引发的性能漂移。因此, 工厂校正通常需要与其他校正方法相结合, 共同保障相控阵雷达在各种复杂环境下都能保持良好的通道一致性。

2.2 现场校正

现场校正是相控阵雷达投入实际使用后, 保障通道一致性的重要手段。当雷达安装到具体工作场地, 其所处环境复杂多样, 与工厂环境大不相同。温度、湿度、电磁干扰等环境因素, 会使雷达通道产生温变特性和时变特性, 导致通道幅度和相位出现偏差, 影响雷达性能。现场校正针对这些动态误差展开。通过在现场搭建专门

的测试系统,模拟雷达实际工作场景,对各通道的幅度和相位进行再次测量。依据测量结果,利用校正算法对通道参数进行调整,补偿因环境变化引起的不一致性。这种方法能让雷达快速适应实际工作环境,有效提升其在复杂条件下的工作稳定性和可靠性。无论是军事领域的防空反导,还是民用方面的气象观测、航空管制,现场校正都能确保相控阵雷达准确获取目标信息,精准执行任务,为各类应用场景提供可靠的技术支撑^[2]。

2.3 内监测校正

内监测校正是一种依托相控阵雷达自身内部资源来实现通道一致性校正的有效方法。它无需额外搭建复杂的外场测试环境,主要借助雷达内部的频率综合器产生特定的测试信号,以此作为校正的基准。在监测过程中,信号处理机发挥着关键作用,它会对各个通道接收到的信号幅度和相位信息进行实时采集与精确计算。通过对比各通道信号的幅相特性,能够及时发现通道间存在的的不同情况。一旦检测到偏差,系统会根据预设的校正策略,对相应通道的移相器、衰减器等部件进行自动调整,从而纠正通道的不一致性。内监测校正具有实时性强、操作简便的优点,能够在雷达运行过程中持续对通道性能进行监测和校正,有效应对因环境变化、部件老化等因素导致的通道性能漂移,保障雷达始终保持良好的工作状态,提高雷达的可靠性和稳定性,确保其能够准确、高效地完成各项任务。

2.4 双音测试技术校正

双音测试技术校正为相控阵雷达通道一致性校正提供了精准且高效的方式。在相控阵雷达系统里,变频模块的性能对通道一致性影响显著,而双音测试技术正是针对变频模块及通道群时延测试的关键手段。该技术运用两个不同频率的激励信号输入待测通道。借助专业的测试设备,对输入侧和输出侧的相位差差异以及双音频率间隔进行精确测量与计算,进而获取群时延、相位以及变频损耗等关键信息。通过对这些信息的深入分析,能够准确评估通道间的幅相一致性状况。一旦发现通道间存在幅度或相位的不一致,可依据测试结果对通道参数进行针对性调整。双音测试技术校正具有测试连接简便、校准流程简易的优点,同时测试速度较快且精度颇高。尤其适用于含有多个变频级的复杂通道测试场景,能有效提升校正的效率和准确性,保障相控阵雷达各通道性能的一致性,确保雷达系统稳定可靠运行。

2.5 实时校准方法

实时校准方法是保障相控阵雷达通道一致性的关键技术,能随雷达运行动态调整通道性能。在大型相控阵

天线测试及实际工作场景中,各测试通道因环境、部件等因素,幅度和相位易出现偏差,影响雷达探测精度。实时校准通过在雷达系统中集成专门的校准模块实现。该模块能持续产生校准信号,并将其注入各通道。信号处理单元实时采集各通道对校准信号的响应数据,运用先进的算法快速分析通道间的幅度和相位差异。依据分析结果,自动调整各通道的移相器、衰减器等部件参数,实现通道性能的实时补偿与校正。这种方法优势显著,可实时监测并修正通道性能变化,有效应对环境干扰、部件老化等问题,确保雷达在复杂环境下始终维持良好的通道一致性,提高雷达的目标探测、跟踪能力,为军事防御、气象监测、航空管制等领域提供可靠的技术支持。

3 相控阵雷达距离分辨性能改善方法

3.1 采用宽带信号

宽带信号通过扩展频谱宽度显著提升距离分辨率。根据雷达距离分辨率公式 $\Delta R = c/(2B)$,带宽B的增加直接压缩距离单元尺寸。例如,当带宽从100MHz扩展至1GHz时,理论分辨率从1.5米优化至0.15米。宽带信号的频谱扩展可通过两种方式实现:一是发射瞬时宽带信号,如线性调频(LFM)或相位编码信号;二是通过多频段合成技术,将多个窄带信号拼接为宽带信号。前者需解决大带宽下的信号失真问题,需采用高速采样与数字信号处理技术;后者则需精确校准各频段间的相位一致性,避免合成后信号畸变。此外,宽带信号对天线孔径渡越时间补偿提出更高要求,需在子天线阵级部署时间延迟单元(TDU),或采用光子辅助技术实现宽带信号的实时传输与处理。宽带信号的应用还面临电磁兼容性挑战,需通过频谱规划与抗干扰设计确保系统在复杂电磁环境中的稳定性^[3]。

3.2 脉冲压缩技术

脉冲压缩技术通过发射大时宽宽带宽积信号,在接收端压缩为窄脉冲,突破传统雷达“发射功率-距离分辨率”的矛盾。其核心原理是利用信号的时频耦合特性,在保持峰值功率的同时延长脉冲宽度,从而增加信号能量。线性调频(LFM)信号是脉冲压缩的典型代表,其调频率 $\gamma = B/T_p$ (B为带宽, T_p 为脉冲宽度)决定了压缩后脉冲宽度 $\tau = 1/B$ 。相位编码技术(如巴克码、M序列)则通过非线性相位调制实现脉冲压缩,具有更高的多普勒容限。脉冲压缩技术的实现需要依赖匹配滤波器,其输出信噪比仅与信号能量和噪声功率谱密度相关,与波形无关。为抑制距离旁瓣,常采用加权窗函数(如汉明窗、泰勒窗)对滤波器系数进行修正,但会牺牲主瓣宽度。现代雷达系统通过数字脉冲压缩技术,结合FPGA

或ASIC实现实时处理，支持多通道并行运算，显著提升系统更新率。

3.3 匹配滤波技术

匹配滤波技术是脉冲压缩的核心支撑，其通过设计与发射信号共轭匹配的滤波器，实现输出信噪比最大化。数学上，匹配滤波器输出信噪比 $SNR = 2E/N_0$ ，其中 E 为信号能量， N_0 为噪声功率谱密度。该技术对信号形式无特殊要求，适用于线性调频、相位编码等多种调制方式。在相位编码信号处理中，匹配滤波器可抑制不完全接收导致的旁瓣抬升，但需精确补偿编码序列的相位误差。为进一步优化性能，常采用加权匹配滤波技术，通过引入窗函数（如余弦窗、凯撒窗）降低旁瓣电平，但会扩展主瓣宽度。现代雷达系统通过数字匹配滤波器实现灵活配置，支持动态调整滤波器系数以适应不同信号参数。此外，匹配滤波技术与动目标检测（MTD）技术结合，可有效补偿目标速度引起的多普勒频移，提升复杂环境下的目标分辨能力。其工程实现需权衡计算复杂度与实时性，通常采用专用数字信号处理器（DSP）或现场可编程门阵列（FPGA）完成。

3.4 线性调频脉冲信号应用

线性调频（LFM）信号因其时频耦合特性，成为相控阵雷达的主流调制方式。其调频率 $\gamma = B/T_p$ 决定了压缩后脉冲宽度 $\tau = 1/B$ ，从而直接关联距离分辨率。LFM信号的模糊函数呈倾斜脊状，在距离-速度平面形成“斜刀刃”分辨率特性，适合多目标分辨场景。其优势在于对多普勒频移不敏感，即使目标存在径向速度，压缩后脉冲宽度仍保持稳定，仅主瓣位置发生偏移。为提升系统性能，常采用分段线性调频（PLFM）信号，通过动态调整调频率跟踪目标加速度，避免高速目标导致的脉冲展宽。此外，LFM信号与脉冲压缩技术结合，可实现大时宽带宽积，显著增加信号能量。其工程实现需解决大带宽下的信号失真问题，需采用高速采样与数字信号处理技术，确保信号频谱完整性。

3.5 优化雷达系统设计

系统级优化是提升距离分辨性能的关键。首先，采用多波束形成技术可扩展空间采样率，通过同时形成多个独立波束覆盖空域，提升目标检测概率与分辨率。其次，空域滤波与自适应波束形成技术可抑制旁瓣杂波，通过动态调整波束权重，在目标方向形成高增益，在干扰方向形成零陷，从而提升信杂比。此外，优化雷达架构设计可降低系统损耗，如采用固态功率放大器（SSPA）替代行波管（TWT），提升发射效率；采用模块化设计支持灵活配置信号参数，适应不同任务需求。在信号处理层面，采用并行处理架构与高速数据总线，可缩短信号处理延迟，提升系统实时性。同时，通过优化天线布局与阵列设计，减小阵元间距以避免栅瓣效应，或采用稀疏阵列技术降低硬件成本^[4]。

结束语

相控阵雷达通道一致性校正通过精确测量与调整各通道幅度、相位特性，可有效补偿元件误差、互耦效应及环境因素引起的偏差，确保波束成形精度，为距离分辨性能提升奠定基础。结合宽带信号、线性调频脉冲压缩及匹配滤波技术，可进一步突破传统雷达“发射功率-分辨率”的矛盾，实现高分辨距离像（HRR）与逆合成孔径成像（ISAR）。系统级优化则通过多波束形成、自适应滤波及稳健算法设计，提升复杂环境下的目标分辨能力与抗干扰性，最终形成从硬件校正到信号处理的全链路距离分辨性能提升方案。

参考文献

- [1]魏洪峰.双线偏振多普勒天气雷达的双通道一致性[J].气象科技,2021,35(5):732-735.
- [2]张治国,张曼,仰美霖,等.X波段双线偏振天气雷达双通道一致性测试及分析[J].气象科技,2022,45(5):776-786
- [3]姜方达,曲绍君,赵雪明,等.CINRAD/CC-D双偏振天气雷达双通道一致性研究[J].长春工业大学学报,2022,43(1):91-96
- [4]李斐斐,邵楠,虞海锋,等.双偏振天气雷达双通道一致性分析与校准[J].科学技术与工程,2020,20(3):1076-1080.