

相控阵雷达波束扫描精度影响因素分析

杨骑骏

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘要】：相控阵雷达凭借波束快速扫描、多目标跟踪等优势，广泛应用于国防、航空航天等领域。波束扫描精度作为衡量相控阵雷达性能的核心指标，直接决定其探测目标的准确性。本文从相控阵雷达的工作原理出发，系统分析阵元误差、波束控制算法、环境干扰、结构形变及温度变化等关键因素对波束扫描精度的影响机制，结合实例与数据量化各因素的影响程度，并提出针对性的误差抑制建议，为相控阵雷达精度优化设计提供理论支撑与技术参考。

【关键词】：相控阵雷达；波束扫描精度；阵元误差；环境干扰；误差抑制

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.014

1 引言

相控阵雷达通过控制阵列天线中各阵元的幅相特性，实现波束的电扫描，无需机械转动即可完成对空域的快速覆盖。相较于传统机械扫描雷达，其在扫描速度、多任务能力、可靠性等方面具有显著优势，已成为现代雷达技术的发展主流。波束扫描精度是指实际波束指向与理论指向的偏差，该指标直接影响雷达对目标的探测距离、跟踪精度及抗干扰能力。在高精度制导、深空探测等场景中，毫米级甚至亚毫米级的波束指向偏差都可能导致任务失败。近年来，随着雷达工作频段向毫米波、太赫兹等高频段拓展，阵列规模不断扩大，波束扫描精度的影响因素更趋复杂。国内外学者针对该问题开展了大量研究，重点聚焦于阵元误差校准、算法优化等方面，但缺乏对各影响因素的系统性梳理与综合分析。本文基于相控阵雷达的波束形成原理，全面剖析各类因素的作用机制，构建影响因素与精度偏差的关联模型，为雷达系统的高精度设计与调试提供依据。

2 相控阵雷达波束形成基本原理

波束成形算法是相控阵雷达工作和探测的基础，其本质是通过波束控制器为雷达阵面内各阵元分配不同的幅相权重，使阵元辐射的电磁波在空间特定方向上干涉叠加，形成指向精准的主波束，同时抑制副瓣电平。假设阵列天线由 N 个均匀排列的阵元组成，相邻阵元间距为 d ，工作波长为 λ 。当波束理论指向角为 θ_0 时，为补偿相邻阵元间的波程差，需为第 i 个阵元施加的相位差为 $\Delta\phi = 2\pi d \sin(\theta_0) / \lambda$ 。

通过精确控制各阵元的相位与幅度，可使电磁波在 θ_0 方向形成最大辐射，实现波束的定向扫描。波束扫描精度主要通过指向偏差 $\Delta\theta$ 衡量，即实际波束峰值指向与理论指向的差值。其数学表达式为 $\Delta\theta = |\theta_a - \theta_0|$ ，其中 θ_a 为实际波束指向角。当 $\Delta\theta$ 超过允许范围时，会导致目标脱锁、定位偏差增大等问题。接下来从多个维度分析导致 $\Delta\theta$ 产生的关键因素。

3 相控阵雷达波束扫描精度主要影响因素分析

3.1 阵元误差

阵元作为阵列天线的基本单元，其性能参数的一致性直接

决定波束形成精度。阵元误差主要包括幅度误差、相位误差、位置误差及阵元间互耦效应，是产生波束指向偏差的核心因素之一。

3.1.1 幅度与相位误差

理想情况下，各阵元的幅度与相位应严格遵循波束控制器的指令分配。但实际生产中，阵元器件的参数离散性、馈电网络的损耗差异等会导致幅度误差 ΔA_i 与相位误差 $\Delta\phi_i'$ 。幅度误差会降低主波束增益、抬高副瓣电平，相位误差则直接改变波束指向。设各阵元的幅度误差服从正态分布 $N(0, \sigma_A^2)$ ，相位误差服从均匀分布 $U(-\sigma_\phi, \sigma_\phi)$ 。通过仿真分析不同误差标准差下的波束指向偏差，结果如下表所示。

表 1 不同误差标准差下的波束指向偏差

幅度误差标准差 σ_A (dB)	相位误差标准差 σ_ϕ (°)	波束指向偏差 $\Delta\theta$ (mrad)	主瓣增益损失 (dB)
0.1	0.5	0.32	0.08
0.3	1.0	0.75	0.21
0.5	2.0	1.58	0.45
1.0	5.0	4.21	1.23

由表可知，相位误差对指向偏差的影响远大于幅度误差。当相位误差标准差从 0.5° 增至 5° 时，指向偏差从 0.32mrad 增至 4.21mrad ，增幅超过 12 倍；而幅度误差从 0.1dB 增至 1.0dB 时，主瓣增益损失仅 1.15dB ，对指向偏差的贡献较小。

3.1.2 阵元位置误差

阵元位置误差是指阵元实际安装位置与设计位置的偏差，包括横向偏差与纵向偏差。该误差会改变阵元间的相对间距与排列规律，导致波程差计算偏差，进而引发波束指向偏移。对

于 $N \times N$ 的平面阵列，当阵元位置误差的均方根值为 σ_{pos} 时，波束指向偏差的均方根值 $\sigma_{\theta} \approx 180 \times \sigma_{pos} / \lambda$ （单位：度）。以工作波长 $\lambda = 10\text{cm}$ 的 S 波段雷达为例，若阵元位置误差 $\sigma_{pos} = 0.1\text{mm}$ ，则 $\sigma_{\theta} \approx 0.18^\circ$ ；当 $\sigma_{pos} = 1\text{mm}$ 时， $\sigma_{\theta} \approx 1.8^\circ$ ，这一结果对大多数高精度雷达来说往往不可接受。在大规模阵列中，阵元位置误差的累积效应会进一步加剧精度恶化。

3.1.3 阵元互耦效应

阵元间的电磁耦合会导致各阵元的输入阻抗与辐射特性发生变化，破坏阵元性能的一致性。互耦效应的强度与阵元间距、排列方式及工作频段密切相关，间距越小、频段越高，互耦越显著。互耦会等效为额外的幅相误差，使波束形成的干涉叠加规律发生改变，不仅导致指向偏差，还会增大副瓣电平。

3.2 波束控制算法精度

波束控制算法是实现波束精准扫描的核心，其精度直接决定幅相权重分配的准确性。传统波束控制算法基于理想阵列模型设计，未充分考虑实际系统中的非线性因素，易产生指向偏差。

3.2.1 相位量化误差

相控阵雷达通常采用数字移相器实现相位控制，数字移相器的相位调节是离散的，存在量化误差。设移相器的位数为 b ，则最小相位步进为 $\Delta\varphi_q = 360^\circ / 2^b$ 。相位量化误差会导致实际相位与理论相位存在偏差，进而引发波束指向偏移与副瓣抬高。

3.2.2 算法模型误差

传统波束形成算法（如傅里叶波束形成、切比雪夫加权等）基于理想阵列假设，忽略了阵元互耦、通道非线性等实际因素，导致算法计算的幅相权重与实际需求存在偏差。例如，傅里叶波束形成算法虽计算简便，但在阵列规模较大或扫描角度较大时，会出现波束展宽与指向偏差；而自适应波束形成算法虽能抑制干扰，但计算复杂度高，实效性差，且在快变场景中易出现精度下降。

3.3 外部环境干扰

相控阵雷达的工作环境复杂多变，外部干扰会通过多种途径影响波束扫描精度，主要包括电磁干扰、大气折射与风载荷干扰。

3.3.1 电磁干扰

电磁干扰来源广泛，包括周边雷达、通信设备、电力线路等外部设备产生的电磁辐射干扰。干扰信号会侵入雷达接收通道，与目标回波信号叠加，导致波束形成的相位参考基准发生偏移，进而引发指向偏差。此外，强电磁干扰还会损坏雷达内

部移相器、波束控制器等核心器件，导致雷达永久性功能性能受损和精度下降。在密集电磁环境中，电磁干扰引发的指向偏差可达数毫弧度级，严重影响雷达性能。

3.3.2 大气折射

雷达电磁波在大气中传播时，会因大气折射率的垂直梯度变化发生折射，导致波束实际传播路径弯曲，形成表现指向偏差。大气折射率随高度、温度、湿度等参数变化，在标准大气条件下，电磁波每传播 100km，大气折射引发的指向偏差约为 0.1mrad；而在暴雨、大雾等恶劣天气下，偏差可超过 0.5mrad。

3.3.3 外力形变

对于舰载、车载等机动式相控阵雷达，其天线阵列展开后会受风力、平台颠簸等外力影响发生弹性形变，进而改变阵元的相对位置与姿态，引发波束指向偏差。

3.3.4 温度变化

温度变化会导致天线阵列与支撑结构发生热胀冷缩，改变阵元间距与排列角度。大多数金属材料的线膨胀系数约为 $10^{-5}/^\circ\text{C}$ ，若雷达工作环境温度变化范围为 -40°C 至 60°C ，则 1m 长的阵元间距变化量约为 0.1mm，对应的指向偏差约为 0.2mrad。在高精度雷达系统中，温度变化是导致波束精度漂移的主要因素之一。

4 波束扫描精度优化建议

4.1 抑制阵元误差

采用高精度制造工艺提升阵元一致性，严格控制阵元器件的参数离散性，在晶体管、电容等核心器件选型时执行更严苛的标准化管，确保同批次器件参数偏差控制在极小范围。在阵列装配完成后，通过近场校准技术测量各阵元的幅相误差，建立误差补偿表，实时修正波束控制器的幅相权重，校准过程中可结合多次测量取平均值的方式降低随机误差影响。对于阵元互耦，可在阵元间增加隔离板，或采用自适应互耦校准算法，抵消互耦带来的负面影响，同时还可通过优化阵元排列间距与形状，从源头削弱互耦效应的强度。

4.2 优化波束控制算法

选用高位数移相器降低相位量化误差，结合插值算法提升相位控制的等效精度，比如采用 7 位及以上移相器配合线性插值技术，可将等效相位步进精度提升一个数量级。采用基于实际阵列模型的波束成形算法，引入阵元误差、阵元互耦等因素的补偿项，提升算法的适应性，同时可融入正则化处理避免算法过拟合，增强在复杂场景下的稳定性。在实时性要求较高的场景中，可采用并行计算架构设计，保障自适应算法的实时运行，搭配高速数据传输接口，实现幅相权重的毫秒级更新，满足动态扫描需求。

4.3 抗环境干扰设计

优化雷达天线的电磁屏蔽结构,采用屏蔽罩与滤波算法优化电磁兼容,屏蔽罩内部可增设吸波材料减少反射干扰,滤波电路选用高精度无源滤波器降低插入损耗。针对大气折射现象,可建立实时大气折射率监测模型,动态修正波束指向,模型可结合卫星遥感数据与地面传感器监测结果,提升折射率预测的准确性。对于风载荷与结构形变,采用高强度、低膨胀系数的复合材料制作支撑结构,增加加固部件提升结构刚度,同时设置缓冲减震装置,削弱动态载荷带来的瞬时形变。

4.4 温度控制与补偿

在天线阵列内部安装温度传感器,实时监测温度变化,传感器布局采用网格化设计,确保阵列各区域温度数据均能被精准采集。同时采用温控系统(如水冷系统、散热风扇)控制环境温度在合理范围内,同时搭配智能温控算法动态调节温控设备的工作功率,避免能源浪费。建立温度-形变映射模型,通过

机械补偿或电校准方式,抵消温度变化引发的指向偏差,模型可通过长期实测数据训练优化,提升不同温度区间的补偿精度。

5 结论

本文系统分析了阵元误差、波束控制算法、环境干扰、结构形变及温度变化对相控阵雷达波束扫描精度的影响机制,通过量化分析明确了各因素在不同工况下的影响权重。研究表明,阵元误差是相控阵雷达波束扫描精度的基础影响因素,环境干扰与温度变化在复杂工况下的影响不可忽视。通过采用高精度校准、算法优化、抗干扰设计及温度补偿等措施,可有效抑制各类误差,提升波束扫描精度。随着相控阵雷达向超大阵列、高频段、智能化方向发展,波束扫描精度的影响因素将更加复杂,需进一步开展多物理场耦合下的精度建模与优化研究。同时,结合人工智能与机器学习技术,开发自适应误差校准算法,实现波束精度的实时动态优化,将是后续研究的重点方向。

参考文献:

- [1] 朱家杉,刘黎平,吴翀,等.X波段相控阵天气雷达多波束扫描模式的观测偏差及订正[J].热带气象学报,2025,41(05):647-660.
- [2] 余英瑞,张欣尉,胡杰.一种基于相控阵雷达体制的高速微型破片测速方法[J].弹道学报,2025,37(03):43-48.
- [3] 郑东卫,白亚莉.二维相控阵雷达波束空间扫描计算与分析[J].火控雷达技术,2022,51(04):60-65.
- [4] 王磊,邹佳龙,贾文渊.低数据量的相控阵雷达多波束鉴角曲线生成方法[J].空天预警研究学报,2022,36(01):19-22.
- [5] 栾铸微,史厚宝.正弦空间在相控阵雷达设计中的应用[J].舰船电子对抗,2020,43(01):42-51.