

基于阵列天线的超短波快速测向技术优化设计

白金龙

中国电子科技集团公司第五十四研究所 河北 石家庄 050001

摘要: 在超短波通信领域,对目标信号进行快速且精准的测向具有至关重要的意义,本文基于阵列天线开展超短波快速测向技术优化设计。从阵列天线结构、超短波信号预处理、快速测向算法、系统集成及抗干扰等多方面优化。包括拓扑结构选型、单元参数与间距优化,信号降噪、同步及预处理电路优化,传统与阵列信号处理算法改进,以及系统集成接口适配、抗干扰和稳定性优化等,提升超短波快速测向性能。

关键词: 阵列天线;超短波;快速测向;算法优化;抗干扰设计

引言: 超短波通信在诸多领域广泛应用,快速测向技术对保障通信安全与稳定意义重大。阵列天线凭借多通道接收优势,成为超短波测向关键手段。但超短波频段信号传播环境复杂,存在多径效应、干扰等问题,影响测向精度与速度。因此,开展基于阵列天线的超短波快速测向技术优化设计研究,对提升测向系统性能,适应复杂电磁环境,具有重要现实意义。

1 阵列天线结构优化设计

1.1 阵列拓扑结构选型优化

阵列单元排布方式的优化需从空间几何布局与信号处理需求两方面综合考量。在超短波频段,均匀圆阵因其360度全向覆盖特性,在动态测向场景中展现出快速响应优势,这种优势使得它能够迅速捕捉到各个方向出现的目标信号,无需进行复杂的波束切换操作来覆盖不同方位,大大提高了测向的初始响应速度^[1]。而平面阵通过二维空间采样可实现更高级别的方向图合成,但需权衡计算复杂度与实时性需求。拓扑结构对测向速度的影响机制主要体现在波束扫描效率上,例如螺旋形排布通过非均匀相位分布可减少波束切换次数,从而缩短目标捕获时间。针对超短波频段特性,不仅要考虑测向速度,还需重点优化拓扑结构对多径效应的抑制能力,通过调整单元分布密度实现空间滤波效果,使阵列在复杂电磁环境中仍能保持方向图稳定性,进而提升测向的准确性与可靠性。

1.2 阵列单元参数优化

阵列单元是信号接收的基础载体,其参数匹配度直接影响信号捕获质量与后续处理效果。需围绕极化、增益、尺寸三大核心参数,结合超短波频段电磁特性精准优化,保障单元性能稳定。单元极化方式的选择直接影响多径干扰抑制效果。由于超短波频段信号传播环境复杂,多径效应显著,双极化单元通过同时接收垂直与水

平极化信号,可有效分离反射波与直射波,提升测向信噪比。在增益特性调整方面,需平衡方向性与波束宽度,超短波频段因波长较短,可通过微带贴片单元的叠层设计实现增益提升,同时采用寄生单元扩展频带宽度。单元尺寸优化同样不容忽视,需严格遵循超短波频段的电磁约束条件,当工作频率确定时,单元边长通常取半波长的整数分之一,通过引入缝隙加载技术可进一步压缩物理尺寸,满足紧凑型阵列设计需求,同时避免因尺寸失配导致的阻抗失配问题,确保单元性能的稳定发挥。

1.3 阵列间距优化配置

阵列单元间距与空间采样率、栅瓣抑制及互耦干扰密切相关,是平衡测向分辨率与稳定性的关键。需结合拓扑结构与频段范围,通过动态配置实现全频段性能均衡。间距参数与测向分辨率存在非线性映射关系,这种关系使得间距的微小变化都可能对测向性能产生显著影响,当单元间距小于半波长时,虽能避免栅瓣出现但会降低空间采样率,反之则可能引发方向图模糊。多信号分辨能力优化需通过间距调整改变阵列流形矩阵的条件数,使不同入射方向的信号在空间谱中形成可区分的峰值。在超短波频段,合理间距取值范围需综合考虑频带边缘效应,通常采用动态间距设计,在阵列中心区域采用密集排布提升低频性能,边缘区域适当增大间距以扩展高频覆盖,通过非均匀间距分布实现全频段测向精度均衡。同时需结合阵列拓扑结构统筹设计间距,通过电磁仿真迭代优化,消除单元间互耦干扰,确保间距配置既满足性能需求,又适配整体结构布局,实现阵列性能的最优化。

2 超短波信号预处理技术优化

2.1 信号降噪算法优化

超短波信号在传播过程中易受环境噪声与多径干扰影响,这些干扰因素会严重降低信号质量,影响后续测

向精度, 降噪算法需针对频段特性进行适应性设计。传统时域滤波方法在处理非平稳噪声时易导致信号失真, 而基于小波变换的降噪方案通过多尺度分解可有效分离噪声与有用信号, 但需优化阈值函数以避免过度平滑, 小波变换的分解层数一般选择3-5层。频域降噪算法也需平衡噪声抑制与频谱完整性, 自适应谱线增强技术通过动态调整滤波系数, 可在保留信号相位特征的同时降低宽带噪声, 滤波系数调整的迭代次数可设置为10-20次。针对测向实时性需求, 降噪处理需与后续信号处理流程深度耦合, 通过流水线架构实现降噪与特征提取的并行执行, 确保测向效率不受降噪复杂度影响, 流水线架构的级数可根据实际处理能力设置为4-6级^[2]。可引入混合降噪策略, 结合时域与频域算法优势, 针对不同干扰类型自适应切换模式, 在复杂噪声环境中仍能高效保留信号关键特征, 进一步提升信号质量。

2.2 信号同步技术优化

阵列接收信号的时序同步是测向精度的基础保障。在超短波频段, 信号传播速度快, 时延差异对测向的影响更为突出, 在超短波频段, 信号传播时延的微小差异会导致相位测量误差累积, 需通过高精度时钟分配网络实现各通道时间基准统一。相位同步精度提升需从硬件与算法两方面协同优化, 硬件层面采用温度补偿晶体振荡器降低时钟漂移, 算法层面引入闭环反馈机制动态校正残余相位误差。同步延迟对测向速度的影响体现在目标跟踪能力上, 当延迟超过信号相干时间时, 方向估计结果会出现跳变, 需通过预测补偿算法对延迟进行实时修正, 确保测向系统在高速运动场景下仍能保持连续稳定输出, 提高系统的实时性与可靠性。

2.3 信号预处理电路优化

预处理电路的带宽适配性直接影响信号保真度。超短波频段信号带宽宽、变化快, 对预处理电路提出了更高要求, 超短波频段信号带宽通常较宽, 需设计宽频带低噪声放大器以避免信号截断, 通过阻抗匹配网络降低反射损耗。电路响应速度优化需兼顾高频特性与功耗限制, 采用高速运算放大器与分布式参数传输线可缩短信号上升时间, 但需通过电磁兼容设计抑制高速开关噪声。低损耗信号传输路径设计需从材料选择与布局优化两方面入手, 选用低介电常数基板材料可减少传输线损耗, 而差分信号传输技术通过抑制共模噪声进一步提升信噪比, 为后续测向算法提供高质量输入信号。电路设计需采用模块化架构, 兼顾可扩展性与兼容性, 通过仿真优化布局布线, 减少电磁耦合干扰, 在满足带宽与速度需求的同时控制功耗, 确保电路性能的稳定与可靠。

3 快速测向算法优化设计

3.1 传统测向算法改进优化

传统测向算法在超短波场景中需突破计算效率与信号特性适配的双重约束。超短波频段信号特性复杂, 对算法的适应性和效率提出了挑战, 针对计算复杂度简化, 可通过矩阵降维技术压缩协方差矩阵维度, 在保留关键特征的同时减少特征值分解运算量^[3]。极化特性适配需重构算法模型, 将极化参数嵌入方向估计方程, 通过联合优化方位角与极化状态提升测向鲁棒性。收敛速度提升方案可引入动态步长调整机制, 根据残差能量自适应调整迭代参数, 使算法在初始阶段快速逼近真实方向, 后期通过精细搜索确保精度, 避免陷入局部最优解。同时需加入异常值检测机制, 剔除干扰信号导致的异常数据, 优化算法收敛条件, 在复杂信号环境中仍能保持高效收敛性能, 提高算法的实用性与可靠性。

3.2 阵列信号处理算法优化

波束形成算法与快速测向的融合需突破传统串行处理框架, 通过融合处理可充分发挥两种算法的优势, 提高测向性能, 通过构建波束空间与信号空间的联合映射关系, 实现波束扫描与方向估计的并行执行。空间谱估计算法优化可聚焦于协方差矩阵构造环节, 采用滑动窗口技术降低数据存储需求, 通过频域平滑抑制噪声对谱峰的干扰。多通道信号融合处理策略需解决异步采样问题, 通过时间对齐算法补偿各通道时延差异, 再利用加权融合技术提升信噪比, 权重系数根据各通道噪声水平动态分配, 确保融合结果始终指向最优方向。可引入智能波束赋形技术, 结合空间谱估计结果动态调整波束方向, 在提升测向速度的同时增强对弱信号的捕获能力, 进一步提升阵列信号处理算法的性能与效果。

3.3 算法与硬件的协同优化

算法运算逻辑与硬件算力的适配需从数据流优化入手, 合理的适配设计能充分发挥硬件性能, 提高算法执行效率, 将矩阵运算拆解为适合硬件并行执行的子任务, 通过流水线架构实现数据连续处理。分步执行流程优化可针对硬件资源瓶颈进行针对性调整, 例如将复杂浮点运算拆分为定点运算与查表操作组合, 在保证精度的前提下减少计算周期。硬件资源占用最小化需通过算法压缩技术实现, 采用稀疏化处理降低矩阵存储需求, 利用硬件特有的乘法累加单元优化核心运算, 通过存储器分区管理减少数据搬运开销, 使算法在有限资源下仍能维持实时测向能力。基于硬件架构特性定制算法逻辑, 通过仿真验证软硬件适配效果, 迭代优化运算流程, 最大化发挥硬件算力优势, 平衡实时性与资源占用, 实现算

法与硬件的高效协同工作。

4 系统集成及抗干扰优化设计

4.1 阵列天线与信号处理模块集成优化

模块间接口适配需兼顾信号完整性与硬件兼容性^[4]。良好的接口适配是系统稳定运行的基础，能减少信号传输过程中的干扰和损失，针对超短波频段的高速信号特性，接口设计需采用差分传输协议以抑制共模噪声，通过阻抗匹配网络减少信号反射。传输延迟控制需从物理路径与处理时序两方面协同优化，物理层选用低介电常数基板材料缩短传输线长度，逻辑层通过时钟偏移补偿技术消除各模块时钟差异，确保信号同步精度满足测向实时性要求。集成结构紧凑化设计需平衡散热需求与空间利用率，采用三维堆叠技术将射频前端与数字处理单元垂直集成，通过嵌入式散热通道实现高效热管理，在有限体积内实现功能密度最大化。集成过程中需进行全流程测试校准，优化模块间协同工作时序，消除接口冗余损耗，确保系统整体性能达到设计指标，实现阵列天线与信号处理模块的高效集成。

4.2 超短波频段抗干扰优化

超短波频段电磁环境复杂，干扰类型多样，需结合频段特性设计分层抗干扰策略，在抑制干扰的同时保障测向速度与精度。同频干扰抑制需突破传统滤波器带宽限制，超短波频段同频干扰严重，传统方法难以有效抑制，采用自适应陷波技术动态跟踪干扰频率，通过迭代更新滤波系数实现干扰信号深度衰减，同时保持有用信号频谱完整性。邻道干扰隔离优化可借助阵列空间滤波特性，通过波束赋形在干扰方向形成零陷，结合频域加窗处理进一步压缩带外泄漏。抗干扰能力与测向速度的平衡设计需建立干扰强度与算法复杂度的映射关系，在强干扰场景下启用高精度空间谱估计算法，弱干扰时切换至快速相位比较法，通过动态模式切换实现资源最优配置，确保系统在不同干扰环境下均能维持稳定测向性能。可引入智能干扰识别技术，精准判断干扰类型与强度，为抗干扰策略切换提供依据，进一步提升系统在复杂电磁环境中的适应性，有效应对各种干扰挑战。

4.3 系统稳定性优化设计

系统稳定性是长期可靠运行的核心保障，需抵御温度、振动等环境因素影响，通过补偿、冗余与自监测设计提升环境适应性。环境因素适应性优化需覆盖温度、振动、电磁辐射等多维度影响。超短波测向系统常在复杂环境下工作，环境因素对系统稳定性影响较大，温度变化对阵列相位一致性影响显著，需采用温度补偿材料构建天线单元，并在信号处理模块中嵌入实时相位校准算法，消除热胀冷缩导致的方向图畸变^[5]。功耗控制需从芯片选型与电源管理两方面入手，选用低功耗处理器并设计动态电压调节电路，根据处理负载实时调整供电电压，在满足性能需求前提下最小化能量消耗。长时间连续测向稳定性保障需建立自监测机制，通过内置测试模块定期检测关键参数漂移，当检测到性能下降时自动触发校准流程，同时采用冗余设计对关键信号路径进行备份，确保系统在极端工况下仍能维持可靠运行。通过环境模拟测试验证稳定性设计效果，迭代优化补偿算法与冗余机制，提升系统在恶劣工况下的持续工作能力，确保系统长期稳定运行。

结束语

通过对基于阵列天线的超短波快速测向技术多方面优化设计，在阵列天线结构、信号预处理、测向算法及系统集成抗干扰等方面取得进展。这些优化措施提升了测向精度、速度与稳定性，增强了系统在复杂电磁环境下的适应性。后续可进一步探索新技术，持续完善测向系统，以更好地满足实际应用需求。

参考文献

- [1]余通.基于相关干涉仪的超短波测向技术中有效频点比的研究[J].电子制作,2024,32(5):46-52.
- [2]龙小凤.超短波共用天线通信系统设计与应用效能分析[J].机电信息,2025(13):77-80.
- [3]唐金彪,李相强,崔玉国,等.一种分段的超短波对数周期天线设计与实验[J].现代电子技术,2024,47(3):12-17.
- [4]钟志浩,芮锡,李从周,等.机载垂尾超短波一体化天线的设计[J].电子技术应用,2022,48(10):103-107.
- [5]王颖.基于动态天线调度的机载超短波通信系统设计[J].舰船电子工程,2022,42(8):81-84,194.