

航管雷达信号干扰成因分析及抗干扰优化技术研究

邓 斌

四川九洲电器集团有限责任公司 四川 绵阳 621000

摘要: 复杂空域电磁环境极易扰乱航管雷达信号传输秩序, 诱发信号失真、目标识别失效等问题。结合航管雷达信号传输特性与设备运行规律, 本文系统梳理电磁干扰的作用机制与设备易受干扰的先天特性, 全面剖析内外两类干扰的生成诱因与传播路径。从设备接收端口、传输链路、硬件结构、处理算法及环境适配多个维度, 构建全方位的抗干扰优化体系, 能够有效削弱各类电磁扰动带来的负面影响, 提升航管雷达空域探测的稳定性与精准度。

关键词: 航管雷达; 电磁干扰; 信号传输; 成因机理; 抗干扰技术

引言: 现代航空运输体系持续扩容, 空域电磁环境愈发繁杂, 给航管雷达的稳定运行带来诸多挑战。航管雷达依托电磁波传输实现空域目标监测, 信号传输的纯净度与稳定性, 直接关乎空域管控的运行质量。各类内外电磁扰动会侵入雷达信号传输与处理流程, 破坏信号完整形态, 造成探测精度下降。厘清各类干扰的形成原理, 搭建科学的抗干扰优化体系, 可有效改善雷达设备运行状态, 保障空域探测工作稳定有序开展。

1 航管雷达信号传输体系与干扰运行机理

1.1 航管雷达信号基本传输特性

航管雷达依靠电磁波辐射完成空域目标探测与信息采集, 电磁能量通过自由空间完成传播与传递。电磁波在空气中传播会产生固有衰减, 传输距离每递增10km, 信号能量会产生3~5dB的固有衰减, 传播距离的变化直接改变信号能量强弱。雷达信号拥有专属的频段区间与脉冲发射模式, 常规航管雷达工作频段集中在1~10GHz区间, 独特的波形参数可以区别于环境中其他电磁信号^[1]。大气介质的温度、湿度及气流变化, 都会扰动电磁波传播的稳定状态, 高湿云雨天气可使电磁波传输损耗增加6~12dB。信号传播具备固定的方向与覆盖范围, 空域内产生的电磁扰动都会干预传输过程。稳定的传输状态是雷达持续精准探测空域目标的基础条件。

1.2 航管雷达系统工作运行机制

航管雷达正常运行依靠发射、接收、信号处理三大硬件单元配合运作。发射单元生成标准电磁脉冲, 脉冲重复频率通常维持在200~1000Hz, 朝着指定空域辐射定向电磁波束。波束接触飞行目标及空域障碍物后形成反射回波, 接收模块捕捉这类回波信号并完成原始采集。采集后的原始信号输送至后端设备, 由处理单元完成解析、筛选与信息提取。整套设备依照固定时序循环完成信号发射、回波采集与数据解析工作, 单组探测循环周

期通常不超过5ms。硬件模块的运行状态直接影响信号传输质量, 设备运行参数出现5%以上波动时, 会直接改变信号传输的完整程度。

1.3 雷达信号干扰通用作用机理

电磁干扰的核心原理为异常电磁信号侵入雷达接收体系, 破坏有效信号的识别解析流程。环境中衍生的杂散电磁信号, 会进入雷达信号的传播空域。杂散信号会和有效回波信号相互叠加, 损毁原始信号的完整波形与能量特征。电磁扰动会改变接收设备的信号拾取状态, 造成目标信号特征模糊、信息失真。持续的电磁侵扰会打乱设备的信号解析节奏, 导致雷达无法分辨有效目标信号与杂散干扰信号, 扰乱空域探测的正常流程。

1.4 航管雷达受干扰内在薄弱特性

航管雷达为满足大范围空域探测需求, 单站探测覆盖半径可达80~150km, 接收频段设置具备一定包容性, 开放的频段结构容易接入各类杂散电磁信号。接收设备采用高灵敏度设计, 信号接收灵敏度可达-110dBm, 可捕捉远距离微弱目标回波, 也会收录空域内低强度的干扰电磁信号。信号处理系统的解析逻辑针对常规标准回波搭建, 对非常规杂散信号缺少有效的甄别能力。雷达探测空域覆盖面广, 空间屏蔽性能较弱, 外界电磁信号能够轻易侵入信号传输链路。这类先天设计特点, 让航管雷达在复杂电磁环境中容易出现信号异常问题。

2 航管雷达信号外部干扰成因分析

2.1 同类雷达设备信号干扰成因

空域内部署的各类同体制航管雷达, 普遍采用相近的工作频段与脉冲发射制式。不同站点雷达设备的电磁波束会产生空域重叠覆盖的情况。发射的电磁脉冲会进入邻近雷达的接收通道, 形成无关信号输入。同源制式的信号波形高度相似, 雷达系统难以区分探测回波与外来雷达脉冲。持续的信号侵入会占用设备接收通道资

源,扰乱正常的目标信号采集过程^[2]。空域雷达站点布局密度提升,会进一步加重这类信号侵扰问题,影响雷达探测的稳定性。

2.2 民用射频设备辐射干扰成因

城市空域周边部署大量民用射频设备,涵盖通信传输、广播发射以及各类移动终端基站。这类设备运行过程中会持续向外辐射射频电磁波,部分辐射频段会落入航管雷达接收范围。设备工作产生的杂散辐射与谐波辐射,会渗透至雷达信号传输空域。辐射信号具备无序性与持续性,会对雷达有效回波形成压制。民用射频设备部署范围广泛,辐射来源分散,对雷达信号接收形成持续性的负面作用。设备高频工作状态下,辐射能量会进一步提升,加剧信号干扰程度。

2.3 空域电磁环境杂波干扰成因

航管雷达探测空域内存在大量地面、空中静止及慢速移动障碍物。地面建筑、山体地貌以及空中云层都会对雷达发射的电磁波形成反射散射。反射形成的杂波信号会传回雷达接收系统,构成空域杂波干扰。杂波信号能量分布无序,波形特征杂乱,无法反映真实飞行目标信息。复杂地貌与气象条件会增加电磁波散射路径,衍生更多无序杂波。杂波信号会覆盖微弱的目标回波,挤占信号解析通道,影响雷达对空域目标的有效识别。

2.4 自然环境电磁辐射干扰成因

自然空域环境本身存在固有电磁辐射,辐射来源源于大气电离层活动与天体电磁辐射。电离层发生动态变化时,会产生不稳定的电磁辐射信号,渗透雷达探测空域。雷电、极端天气活动会激发大范围电磁脉冲,形成高强度瞬时电磁扰动。这类自然电磁信号无固定规律,波形与能量特征随机多变。雷达接收系统无法对自然电磁辐射进行自主过滤,无序辐射信号会混入有效信号链路,破坏原始信号纯度,引发雷达信号接收异常。

3 航管雷达信号内部干扰成因分析

3.1 雷达硬件设备自身耦合干扰成因

航管雷达整机由大量精密电子元器件与功能硬件模块构成,各类硬件单元集成排布于设备内部。元器件通电运行过程中会自主产生电磁能量,形成微弱的电磁辐射场。相邻硬件模块的电磁辐射会相互交织叠加,形成内部电磁耦合现象^[3]。耦合产生的电磁信号不属于有效探测信号,会对雷达接收通道产生干扰。精密芯片、功率放大器等核心器件长期运行,电磁辐射强度会出现小幅波动。不稳定的耦合信号会持续作用于信号接收链路,破坏原始回波信号的纯净度。

3.2 雷达系统线路串扰干扰成因

雷达设备内部布设密集的信号传输线路与供电线路,各类线路集中排布于有限设备空间。线路通电传输信号或电能的过程中,会在周边空间生成感应电磁场。临近线路会感应产生无用电信号,引发线路之间的相互串扰。高频信号线路的电磁感应效应更为明显,衍生的串扰信号波动幅度更强。串扰生成的杂散信号会混入正规传输信号中,造成信号波形畸变。传输链路的信号质量遭到破坏,直接影响后端模块对探测信号的精准处理。

3.3 信号处理模块匹配失调干扰成因

航管雷达信号处理体系由多级功能模块衔接组成,各模块承担信号筛选、转换、解析的不同职能。模块之间的参数适配状态直接决定信号传输与处理的流畅度。模块参数出现偏差或硬件适配偏差时,信号传输会出现阻抗不匹配的问题。信号在模块衔接位置出现反射、衰减或畸变,生成异常杂散信号。模块适配失衡引发的信号异常会留存于处理链路中,持续干扰有效信号的解析进程,造成雷达探测信息出现失真。

3.4 系统工作状态偏移引发干扰成因

雷达设备长期连续运行会出现工作参数的细微偏移,运行工况逐步偏离标准工况。硬件器件老化、内部温度变化都会改变设备的运行参数与工作性能。设备发射功率、接收灵敏度等关键参数出现波动,会打乱系统内部信号运行秩序。参数波动会催生各类无序杂电信号,渗透信号传输与处理流程。工况偏移带来的信号异常具备隐蔽性,无法通过常规信号过滤方式剔除,持续影响航管雷达的正常探测工作。

4 航管雷达抗干扰优化技术体系与优化路径

4.1 雷达信号接收端抗干扰优化技术

航管雷达接收端是信号采集的首要端口,也是各类干扰信号侵入系统的主要通道。针对接收端开展专项优化,可从信号入口层面阻断杂散电磁信号的侵入路径^[4]。频段筛选优化可重构接收端口的频段响应范围,精准锁定航管雷达专属工作频段,阻断频段外的无序电磁干扰信号输入。接收端口的阻抗参数可做精细化调校,弱化外来电磁信号在端口位置的反射与叠加现象,提升有效回波信号的采集完整度。前端滤波结构可进行迭代改良,优化滤波单元的频段截止特性,剔除频段内混杂的无序杂波信号。低噪放大器件可完成性能升级,降低端口采集过程中产生的固有噪声,强化微弱目标回波的识别能力。接收端硬件结构的精细化调校,能够从信号采集源头提升雷达系统的抗干扰能力,减少无效信号进入后续处理链路。

4.2 雷达信号传输链路抗干扰优化技术

雷达信号传输链路承载信号传递的全过程,链路运行状态直接决定信号传输的纯净度与稳定性。传输链路优化可针对线路布局、屏蔽结构与传输参数开展全方位改良。重新规划设备内部线路排布方式,区分高频信号线路与供电线路的布设区域,削弱线路之间电磁感应带来的串扰问题。为传输线路加装高性能电磁屏蔽层,阻隔外部杂散电磁场与内部线路的电磁耦合作用,杜绝杂散信号混入传输链路。调校线路传输阻抗参数,保证链路各节点参数统一,规避信号传输过程中的反射与畸变问题。优化链路信号传输制式,规整信号传输波形,减少传输过程中衍生的杂散电信号。链路整体运行环境的改良,可持续保障信号传输的稳定性,为后端信号处理提供纯净的原始信号数据。

4.3 雷达系统硬件结构抗干扰优化技术

雷达硬件设备的集成结构与器件性能,是诱发内部耦合干扰的核心因素,硬件结构优化可从根源弱化内部干扰问题。对设备内部集成模块进行分区布局优化,拆分高辐射器件与高灵敏接收器件的安装区域,拉大功能模块的空间间距,减弱器件间的电磁耦合强度。更换性能更稳定的新型电子元器件,弱化器件长期运行产生的电磁辐射波动,降低固有电磁噪声的生成量。优化设备内部散热结构,控制设备运行过程中的温度波动,规避温度异常引发的器件参数偏移问题。加固设备硬件密封与屏蔽结构,阻断内部电磁辐射的无序扩散,限制杂散电磁信号的传播范围。硬件结构的系统性改良,可稳定设备运行工况,消除硬件层面衍生的各类内源干扰。

4.4 雷达信号处理算法抗干扰优化技术

信号处理算法承担信号甄别、筛选与净化的核心职能,算法性能升级可有效剔除链路中残留的干扰信号。优化信号甄别算法逻辑,重构信号特征识别模型,精准区分目标回波信号与杂散干扰信号的波形、能量差异。升级杂波抑制算法,针对空域静态杂波、动态杂波的生成规律,设置针对性的信号剔除逻辑,滤除无序散射杂波。优化信号补偿算法,对传输过程中出现衰减、畸变的有效信号进行修复,还原原始信号完整特征。调整算

法处理阈值参数,适配复杂电磁环境下的信号处理需求,提升微弱有效信号的提取能力。算法体系的迭代升级,可弥补硬件过滤的局限性,进一步净化雷达探测信号,保障信号解析的精准度。

4.5 空域电磁适配性抗干扰优化技术

空域电磁环境的复杂性决定外部干扰的侵入强度,提升雷达系统与空域电磁环境的适配性,可长效弱化外源干扰的影响。优化雷达波束调控机制,调整电磁波束的辐射角度与覆盖范围,规避电磁杂波集中的空域区域,减少无效散射信号的接收量。自适应调校雷达工作频段,根据空域电磁环境的动态变化微调频段参数,避开周边射频设备的干扰频段^[5]。优化雷达探测时序机制,规整信号发射与采集的时间节律,错开外部电磁信号的辐射周期。提升系统空域电磁感知能力,捕捉空域电磁环境的动态变化特征,适配环境变化调整设备运行状态。

结束语

电磁干扰是制约航管雷达高精度探测的核心因素,内源设备故障、线路串扰与外源电磁辐射、环境杂波,共同构成雷达信号异常的主要诱因。依托信号传输、硬件架构、算法处理及环境适配的多维度优化手段,可系统性化解各类干扰问题。完善的抗干扰优化体系能够有效净化雷达信号传输链路,强化设备复杂环境适应能力,为空域雷达设备稳定运行提供可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]程舰,李坤,潘孟冠,等.船用导航雷达信号处理机设计与实现[J].舰船电子工程,2026,46(2):92-97.
- [2]应士君,张东阳.航海雷达通信一体化信号峰均比抑制[J].上海海事大学学报,2023,44(2):25-29.
- [3]杨喜旺,黄晋英.基于激光雷达回波信号的雾天船舶航线快速辨识[J].舰船科学技术,2024,46(6):135-139.
- [4]曹琪,柯旭,蔡里军,等.航空通信导航雷达叠加导频信道串扰抑制系统设计[J].计算机测量与控制,2026,34(7):180-189.
- [5]常乐.船舶导航雷达数字信号处理机的FPGA电路设计与优化[J].舰船科学技术,2022,44(6):125-128.