

# 射频通信电路EMI干扰产生机理与抑制措施

莫世波

成都天奥测控技术有限公司 四川 成都 610036

**摘要:** 射频通信电路运行于高频区间,分布参数效应深度介入信号传输全流程,电磁干扰的生成与传播机制呈现高度复杂的动态特征。本文结合射频电路的高频工作特性,从器件内源辐射、传输链路耦合、电源系统扰动、布局布线偏差四个维度拆解EMI干扰的生成逻辑,梳理传导、辐射、模块串扰、外部侵入四类干扰的传播耦合规律,从器件选型、布线优化、滤波屏蔽、接地匹配层面提出可落地的分层抑制方案,为射频通信电路电磁兼容性能的实际优化提供实操参考。

**关键词:** 射频通信电路; EMI干扰; 耦合机理; 电磁屏蔽; 电磁兼容

**引言:** 射频通信系统依托高频电磁波实现高速信息交互,电路内部高频交变信号催生的各类电磁扰动,已成为制约通信稳定性的核心因素。随着通信频段持续向高频段延伸,传统低频电路的抗干扰设计思路已难以适配当前的高频工况需求,内源辐射与外部侵入的干扰相互叠加,进一步放大了信号传输的失真风险。厘清射频场景下电磁干扰的生成逻辑与传播规律,落地适配性强的抑制优化方案,是保障射频通信系统可靠运行的核心前提。

## 1 射频通信电路与 EMI 干扰基础特性

### 1.1 射频电路工作特性与信号传输特征

射频电路主要依托高频电磁波完成信息传递,工作频率覆盖特定高频区间,电路内部电信号具备高频交变的运行特征。电路运行过程中,电荷的快速运动会催生高频电磁场,电磁场的空间分布状态会随信号频率产生动态变化<sup>[1]</sup>。高频信号在传输线路中行进时,传输路径的物理参数会对信号波形产生直接影响,线路阻抗的动态变化会改变信号的传输状态。高频工况下的电路不再遵循低频电路的运行规律,分布参数会深度介入电路工作过程,各类电气参数的耦合变化会持续影响信号传输的完整过程。微弱的电气参数波动,都会引发高频信号的状态偏移,形成区别于常规低频电路的运行特征。

### 1.2 射频频段电磁干扰基本属性与分类

射频频段内的电磁干扰具备高频动态变化的固有属性,能量分布覆盖连续的高频频谱区间,频谱分布状态具备不均匀的分布特点。干扰能量能够依托电气路径与空间介质完成扩散,能量扩散的范围会随频段升高产生延伸变化。结合电磁干扰的存在形式与传播形态,可将干扰类型划分为多种固定类别,不同类别干扰的能量载体与作用形式存在明显区分。部分干扰依托电路导体完成能量传递,

部分干扰依托空间电磁场实现能量辐射。各类射频电磁干扰均具备高频能量波动的核心特征,能量强度的波动变化会对电路正常工作状态产生负面作用。

### 1.3 射频电路电磁兼容基础特征

射频电路的电磁兼容性能体现电路在复杂高频电磁环境中的适配能力,电路结构与器件性能直接决定电磁兼容的基础水平。高频工作环境下的电路器件会产生电磁能量的交互作用,电路内部各功能模块之间存在电磁能量的相互影响。优质的电磁兼容状态可以保障电路在外部电磁环境作用下维持稳定运行,也可以约束电路自身产生的电磁能量无序外泄。射频电路的电磁兼容特性贯穿信号收发、传输、处理的全部工作流程,电路结构布局与器件参数选型都会改变电磁兼容的整体表现。

### 1.4 电磁干扰传播基本模式

电磁干扰在射频电路系统中存在多种固定传播模式,不同传播模式依托不同的能量载体实现能量转移。导体介质可以为干扰能量提供传导通道,让干扰能量沿电路线路完成跨模块传递。空间电磁场可以作为传播媒介,让干扰能量以辐射形式在空间中扩散蔓延。电路模块之间的电气耦合结构,会催生近距离的干扰能量传递,各类耦合结构会搭建对应的干扰传播路径。不同传播模式会独立存在,也会形成多元叠加的传播状态,构成射频电路系统中电磁干扰的主要传播形式。

## 2 射频通信电路 EMI 干扰产生机理

### 2.1 电路器件固有电磁辐射机理

射频通信电路所用有源与无源器件在高频工作状态下会激发电磁辐射现象。半导体类有源器件工作时会承载高频交变电流,载流子的高速运动引发电场与磁场的动态交替变化,持续向外辐射电磁能量。电阻电容等无源器件在高频工况中会脱离低频稳态电气特性,高频交

变电流流经器件本体时会激发周期性波动的电磁场<sup>[2]</sup>。器件内部电气损耗带来的参数波动会加剧电磁场的无序变化,电磁辐射的强度与频谱分布会随工作频率的提升出现增量变化。各类器件集成于电路系统中,单体辐射能量会形成叠加效应,成为电路电磁干扰的内源诱因。

## 2.2 高频信号传输耦合干扰机理

高频信号在电路传输通道中持续传播的过程中会催生耦合干扰现象。高频信号具备的快速交变特性会让传输线路周边形成动态电磁场,相邻传输线路与功能线路会在电磁场作用下产生能量交互。线路之间的电场与磁场相互作用会引发能量串扰,正常传输的信号波形会受到非正常能量的叠加影响。高频传输过程中形成的分布电容与分布电感会强化耦合作用强度,弱化线路之间的电气隔离效果。高频信号的波长特性会让耦合作用覆盖整个传输链路,干扰能量会沿传输路径持续蔓延,影响电路信号传输的纯净度。

## 2.3 电源系统电磁扰动生成机理

电源系统为射频电路供电过程中会持续产生电磁扰动,成为电磁干扰的重要诱因。供电电压与供电电流的瞬时波动会打破供电稳态,形成高频噪声信号并混入供电链路。电源稳压与变换环节的电气切换动作会引发电气参数的突变,催生高频电磁噪声并向电路主体扩散。供电链路中的线路阻抗会造成电压瞬态波动,波动过程会激发交变电磁场,向外释放电磁干扰能量。电源系统产生的电磁扰动会沿供电线路渗透至射频电路各个功能模块,对高频信号处理过程形成不良影响。

## 2.4 布线与结构布局引发干扰机理

电路布线方式与整体结构布局会直接诱发电磁干扰的生成。不合理的线路走向会延长高频信号传输路径,增大线路与空间电磁场的接触范围,提升电磁辐射与耦合串扰的发生概率。密集排布的线路会缩小电气间距,强化线路间的电磁耦合程度,加剧链路内部的干扰叠加。功能模块的无序摆放会破坏电路电磁分布的均衡性,高频工作模块与敏感信号模块的近距离排布会引发电磁能量的相互干扰。接地布线的不合理设计会造成电气回路失衡,催生回路类电磁扰动,持续引发各类电磁干扰问题。

## 3 射频通信电路 EMI 干扰传播与耦合规律

### 3.1 传导干扰的耦合传播规律

传导干扰依托电路导体介质完成能量传递,贯穿射频电路各类电气连接链路。高频噪声能量会依附电压电流载体在供电线路与信号线路中持续传输,顺着电气回路完成全域扩散。电气链路存在的阻抗特性会改变噪声

能量的传播状态,阻抗匹配失衡会提升噪声能量的留存效率,让干扰能量长期滞留于电路内部<sup>[3]</sup>。高频工况下的传导干扰会产生频谱偏移特性,不同频段的干扰能量会在传输过程中产生差异化的衰减变化。电气节点与转接位置会积累干扰能量,推动干扰在不同功能电路之间完成跨区域传递,持续影响电路电气运行状态。

### 3.2 辐射干扰的空间传播规律

辐射干扰以空间电磁场作为传播媒介,依托高频电磁波的辐射特性完成能量扩散。射频电路工作产生的交变电磁场会脱离器件与线路本体,在周边空间形成连续分布的电磁辐射场。电磁辐射能量会随空间距离延伸产生衰减变化,空间介质的电磁特性会改变辐射传播的速率与覆盖范围。高频电磁波具备的衍射与透射特性,可穿透常规隔离结构,覆盖电路周边各类物理空间。辐射传播过程会叠加空间环境的电磁波动,形成分布状态更为复杂的电磁干扰场,作用于射频电路各类敏感电气单元。

### 3.3 电路模块间串扰耦合机制

射频电路内部不同功能模块会通过电磁耦合作用产生信号串扰。高频工作模块运行生成的交变电磁场,会对邻近信号处理模块、低频控制模块形成能量渗透。模块之间的近距离电气排布会缩减电磁隔离空间,提升电场耦合与磁场耦合的作用强度。线路跨模块的连通结构会搭建隐性耦合通道,让干扰能量在模块之间实现双向传递。高频信号的快速交变会加剧耦合串扰的剧烈程度,正常工作信号与干扰能量会在模块链路中相互叠加,破坏信号传输的纯净度与稳定性。

### 3.4 外部电磁信号侵入耦合机制

外部空间存在的各类高频电磁信号可通过多重路径侵入射频电路系统。开放式的电路结构会直接接收空间辐射电磁能量,无序电磁信号会混入电路信号处理链路。电路外接传输线缆会充当接收天线的作用,捕捉空间高频电磁信号并转化为电气噪声导入电路内部。设备外壳的缝隙、接口开孔等结构缺陷,会拓宽电磁信号的侵入通道,提升外部干扰的耦合效率。侵入的外部电磁能量会与电路自身工作信号产生频谱叠加,扰乱射频信号的收发与处理流程,引发电路工作状态的异常波动。

## 4 射频通信电路 EMI 干扰抑制技术措施

### 4.1 器件选型与参数优化抑制方法

射频通信电路抗干扰性能的提升可通过器件选型与电气参数优化实现源头管控。适配高频工作工况的电子器件能够弱化高频交变工况催生的电磁辐射,削减电气参数动态波动引发的各类电磁噪声。器件选型工作需要深度贴合射频电路专属工作频段,严格筛选阻抗特性、

频率响应、传输损耗等核心电气指标,最大限度弱化器件运行阶段产生的电磁扰动<sup>[4]</sup>。高频低损耗器件可以有效压制电路内源干扰的产生,维持高频信号传输的稳定状态。对功率器件与信号器件进行分层选用,能够隔绝大功率电气波动对微弱信号传输链路的负面影响,从源头控制电磁干扰的生成规模。对各类电气参数进行精细化调试,适配电路动态运行的工作需求,缓解参数偏移造成的电磁耦合问题,全面夯实射频电路的电磁兼容基础性能。

#### 4.2 电路布线与结构优化抑制方法

电路布线规划与硬件结构优化是削弱电磁串扰与空间辐射的重要方式。高频信号传输线路采用短直布设方式可以压缩传输路径长度,降低线路分布参数带来的电磁场无序波动,减少杂散电磁能量的生成。按照功能差异对线路进行分区布设,可隔绝不同频段信号之间的相互串扰,削弱线路之间电磁耦合的作用强度。功率传输线路与射频信号线路保持合理间距,能够切断近距离电磁能量交互通道,规避大功率电气波动干扰微弱射频信号的正常传输。依据电磁特性对电路功能模块进行分区排布,可规整设备内部空间的电磁场分布,减少模块之间的电磁渗透现象。规整化的整体硬件结构能够消除电路内部电磁盲区与能量堆积区域,均衡电路整体电磁环境,规避无序电磁干扰的累积叠加。

#### 4.3 滤波与屏蔽抗干扰技术手段

滤波技术可精准滤除电路链路中混杂的高频杂波噪声,净化射频信号与供电信号的传输品质。将专用滤波组件接入电路核心链路,能够截断高频噪声的传播通道,吸纳电路运行过程中产生的无序电磁能量。适配多频段工况设计的滤波结构,可匹配不同频谱噪声的抑制需求,针对性压制宽频域电磁干扰的扩散与传递。屏蔽技术依托高性能电磁屏蔽介质构建独立隔离空间,阻断电路内外电磁能量的双向渗透。将屏蔽结构贴合高频辐射单元布设,可对辐射源形成完整包裹,限制内源电磁能量向外扩散传播。密闭式屏蔽结构可以抵御外界空间无序电磁波动的侵入,隔绝外部杂散电磁信号对射频信

号收发、传输及处理链路的不良影响。

#### 4.4 接地系统优化与阻抗匹配管控

科学完善的接地系统可以稳定电路基准电位,抑制电位浮动引发的各类电磁扰动。标准化接地布局能够压缩接地回路的物理长度,减小回路有效面积,降低回路感应效应催生的干扰信号。分区分立的接地设计可划分独立的信号接地路径与功率接地路径,阻隔大功率电气回路产生的噪声侵入射频信号回路。严格落实阻抗匹配相关管控工作,能够平衡整条电路链路的电气参数,弱化信号传输阶段的反射震荡,减少反射波形衍生的高频电磁噪声<sup>[5]</sup>。精准匹配的阻抗状态可以提升高频信号传输完整度,缓解阻抗失衡造成的波形畸变与频谱杂波问题,稳定射频电路高频运行状态,实现各类电磁干扰的高效抑制,保障电路长期稳定运行。

#### 结束语

射频通信电路的EMI干扰抑制是贯穿器件选型、布线设计、结构设计全流程的系统性工作,并非单一技术手段即可实现全面管控。从源头削减干扰生成、在传播路径切断能量耦合、通过系统优化稳定运行状态,多维度协同施策才能有效平衡高频信号传输需求与电磁兼容要求,切实提升射频通信电路在复杂电磁环境下的运行稳定性,保障各类通信业务的顺利开展。

#### 参考文献

- [1]卓蕊澈,石晶林,周一青,等.基于卫星通信多模切换的射频资源池FPGA虚拟化技术研究[J].高技术通讯,2026,36(2):137-146.
- [2]谢辉,肖爽,方怡,等.800MHz集群通信射频覆盖不足问题以及补盲策略[J].通信电源技术,2026,43(4):182-184.
- [3]武浩正,时晨光,周建江.面向射频隐身的FDA-MIMO雷达通信一体化发射接收波束联合设计方法[J].雷达学报,2025,14(4):867-895.
- [4]余超,郁煜铖,陈鹏,等.面向智能通信场景的射频功率放大器数字预失真技术[J].微波学报,2026,42(1):9-17.
- [5]邓国胜.通信智能化系统的射频信号调度与功率管理技术[J].江苏通信,2025,41(1):48-51.