

## 高频信号放大电路噪声抑制关键技术实践研究

王 玺

邢台市财政干部教育中心, 河北 邢台 054000

[摘要]文中聚焦于高频信号放大电路噪声抑制的关键技术展开研究。主要针对高频放大电路里的器件噪声、阻抗失配、寄生参数、电源纹波、布局耦合、外部电磁干扰等诸多因素,对信号质量造成的影响展开分析,同时还要探讨低噪声器件选型、偏置优化、阻抗匹配、滤波去耦、接地屏蔽、测试调试等一系列技术路径。文章运用文献归纳、机理分析、工程实践总结这三种方法相结合的方式,从噪声来源、抑制原则、电路优化、版图设计、测试验证等多个方面展开论述。研究表明,高频信号放大电路噪声抑制不能单单依赖单一的滤波器件,而是应当贯穿电路拓扑、元器件参数、传输路径、PCB布局、系统屏蔽的整个过程。合理地把控噪声系数、增益分配、带宽范围、阻抗连续性,能够提高信噪比、系统稳定性。结论提出,高频放大电路噪声抑制应该秉持源头降低、路径隔离、终端优化、测试闭环的原则,从而达到高灵敏度、高稳定性、高可靠性的信号处理目标。

[关键词]高频信号;放大电路;噪声抑制;阻抗匹配;低噪声设计

DOI: 10.33142/sca.v9i8.20192

中图分类号: TN722

文献标识码: A

## Practical Research on Key Technologies for Noise Suppression in High Frequency Signal Amplification Circuits

WANG Xi

Xingtai Financial Cadre Education Center, Xingtai, Hebei, 054000, China

**Abstract:** This article focuses on the key technologies of noise suppression in high-frequency signal amplification circuits. Mainly analyze the impact of various factors such as device noise, impedance mismatch, parasitic parameters, power ripple, layout coupling, external electromagnetic interference, etc. in high-frequency amplification circuits on signal quality. At the same time, explore a series of technical paths such as low-noise device selection, bias optimization, impedance matching, filtering decoupling, grounding shielding, testing and debugging. The article combines literature review, mechanism analysis, and engineering practice summary to discuss noise sources, suppression principles, circuit optimization, layout design, testing and verification from multiple aspects. Research has shown that noise suppression in high-frequency signal amplification circuits cannot rely solely on a single filtering device, but should run through the entire process of circuit topology, component parameters, transmission paths, PCB layout, and system shielding. Reasonably controlling noise coefficient, gain allocation, bandwidth range, and impedance continuity can improve signal-to-noise ratio and system stability. The conclusion suggests that noise suppression in high-frequency amplification circuits should adhere to the principles of source reduction, path isolation, terminal optimization, and closed-loop testing, in order to achieve the signal processing goals of high sensitivity, high stability, and high reliability.

**Keywords:** high frequency signal; amplification circuit; noise suppression; impedance matching; low noise design

### 引言

高频信号放大电路在通信接收、射频识别、雷达探测、传感检测、高速电子系统里有着广泛应用,它的性能会直接对信号接收灵敏度、传输质量、系统稳定性产生影响。高频信号具有幅度较小、频率较高的特点,由此使得电路

中器件热噪声、散粒噪声、闪烁噪声、寄生耦合还有电源干扰等问题更为突出。要是噪声抑制不够充分,就容易致使信噪比下降、波形失真、误判增多。对高频信号放大电路噪声抑制关键技术展开研究,对于提高电子系统性能有着重要作用。

## 1 高频信号放大电路噪声来源及影响机理

### 1.1 器件本征噪声对放大性能的影响

高频信号放大电路里的噪声，首先源自元器件本身。电阻会因为载流子热运动而产生热噪声，半导体器件中载流子随机通过结区会生成散粒噪声，在低频区域还会受到闪烁噪声的作用。对于高频放大电路来讲，晶体管、场效应管、运算放大器、低噪声放大器的噪声系数、跨导、输入电容还有工作偏置状态，都会对最终输出信号质量产生影响。第一级放大电路直接面对微弱输入信号，其噪声贡献通常是最为关键的。要是第一级器件噪声比较高，就算后级增益比较大，也很难恢复原始信号质量。

### 1.2 阻抗失配与频率响应引起的噪声放大

在高频电路里信号传输并非仅仅是单纯的电压传递问题，阻抗匹配、反射损耗、频率响应这些因素，都会对噪声表现产生影响。要是输入端阻抗和信号源阻抗不匹配，那么有效信号的传输就会不足，与此同时还会引入反射、驻波现象，进而让电路局部的电压、电流分布出现异常。输出端阻抗不连续同样有可能致使能量反射，对后级电路的稳定性产生影响。当带宽设计得比较宽时，会有更多无用的频率成分、宽带噪声进入放大链路，而带宽过窄时，又或许会造成信号失真、群时延变化。所以可以知道，噪声抑制并非简单地降低所有频率成分，而是要在信号带宽、增益平坦度、噪声控制这几个方面达成平衡。

### 1.3 寄生参数与外部耦合导致的附加噪声

在高频环境下，器件引脚、电路走线、焊盘、过孔、连接器都会呈现出寄生电感、寄生电容与寄生电阻。这些寄生参数会建立起非预期的耦合通道，致使噪声借助容性耦合、感性耦合或者空间辐射的方式进入敏感节点。电源线上的纹波、数字电路开关噪声、时钟信号边沿、外部电磁场，同样有可能经由地线、电源线或者空间路径耦合至放大电路当中。特别是在高增益放大的情形下，微小的耦合噪声经过多级放大之后可能会变得比较显著，甚至引发自激振荡。所以，高频信号放大电路的噪声问题具备系统性，需要同时对器件、电路、布局、环境因素展开分析。

## 2 高频信号放大电路噪声抑制的基本原则

### 2.1 以信噪比和噪声系数为核心指标

要评价高频信号放大电路的噪声性能，不能仅仅看输出幅值够不够，还得关注信噪比、噪声系数、增益、带宽、线性度、动态范围等指标。信噪比体现的是有效信号和噪声之间的相对关系，而噪声系数是用于衡量放大电路让输入信号噪声性能变差的程度。对于接收前端电路来讲，低噪声并不意味着盲目提高增益，过高增益会致使后级饱和、

出现非线性失真、稳定性降低。合理设计要在满足信号放大需求的前提下，尽可能降低输入级噪声的贡献，还要确保带内信号有足够裕量。只有建立清晰的指标模式，噪声抑制措施才能有明确方向。

### 2.2 坚持前级优先与系统分配原则

在多级高频放大电路里面，各级噪声对于系统总噪声所产生的影响并非一样的。一般情况下，前级电路的噪声贡献对整体性能有着比较大的影响，所以要优先对输入级低噪声性能予以优化。前级应当选用具备低噪声系数、高跨导、适宜的输入阻抗、稳定频率特性的器件，并借助理的偏置从而获得较好的工作状态。而后级电路更多的是承担增益补偿、驱动输出、带宽限制、线性扩展这些功能。要是系统增益分配不恰当，有可能出现前级增益不足致使后级噪声被放大的情况，或者是前级增益过大而造成互调失真。系统分配原则是要依据总增益、目标带宽、输入信号幅度、后级负载特性，对各级放大任务进行合理的划分。

### 2.3 兼顾低噪声、稳定性与可实现性

高频信号放大电路的设计常常会遇到多目标约束的情况。要是想降低噪声，也许就得提高器件的工作电流，然而这样做会加大功耗，还会使热噪声变化的风险增加，要是增大带宽，虽说有利于信号完整地传输，可也会引入更多的宽带噪声，要是增强反馈，固然能提高稳定性和线性度，不过也有可能降低增益，并且改变输入阻抗。在工程实践里，低噪声设计没办法脱离稳定性、成本、功耗、尺寸、工艺可实现性这些因素。尤其是在高频段，理论参数跟实际焊接、封装、PCB 材料特性之间存在着差异，所以设计方案必须要留出调试的空间。噪声抑制应以实现整体性能最优作为目标，而不是只片面地追求某一项单一指标。

## 3 高频信号放大电路噪声抑制关键技术

### 3.1 低噪声器件选型与偏置优化

器件选型乃是噪声抑制的根基所在。高频放大电路需要依据工作频率、输入信号幅度、源阻抗、增益要求、供电条件来挑选适宜的器件。低噪声晶体管、低噪声运算放大器或者射频低噪声放大器应当具备较低的噪声系数、充足的增益带宽积、良好的线性度、稳定的封装特性。偏置电路对器件的跨导、输入阻抗、输出阻抗、噪声水平有着直接的影响。要是偏置电流过小，就会致使跨导不足，等效输入噪声升高，要是偏置电流过大，就会增加功耗、温升、器件应力。在实践过程中，应当借助仿真、数据手册参数、实测结果综合起来确定工作点，从而让器件在目标

频段内维持较低的噪声、稳定的增益。

### 3.2 阻抗匹配与带宽控制技术

阻抗匹配在高频放大电路噪声抑制里有着关键作用。输入匹配网络对信号传输效率有影响,同时也会影响噪声匹配的状况。有些情形下,最大功率传输匹配和最低噪声匹配并不一样,在噪声系数、增益、反射损耗之间要进行权衡。常见的匹配网络有 LC 匹配、变压器匹配、微带线匹配、有源反馈匹配等。带宽控制能够借助输入滤波、级间选频、输出滤波和反馈网络来达成。把目标频段以外的噪声衰减掉,有利于提高有效信号的质量。设计的时候要避免匹配网络 Q 值过高致使带宽过窄,还需防止寄生参数让匹配点偏离目标频率。

### 3.3 滤波去耦与反馈补偿技术

滤波、去耦属于抑制电源噪声、宽带噪声还有高频杂散的重要举措。电源端要依据频率范围来配置不同容量、不同介质的旁路电容,如此一来低频纹波、中频扰动、高频尖峰便能够分别获得有效的泄放路径。模拟电源和数字电源应当进行适当隔离,要是有必要的话还需增加磁珠、低噪声稳压器或者 LC 滤波网络。信号通道之中能够设置带通、低通或者陷波滤波器,以此来限制没用的频率成分进入放大链路。反馈补偿可以改善增益平坦度与稳定性,然而反馈路径自身也有可能引入噪声,所以反馈电阻、电容、走线路径都需要精心设计。合理的滤波去耦与反馈补偿能够在抑制噪声的同时维持电路动态性能。

## 4 高频放大电路 PCB 布局与结构降噪实践

### 4.1 关键节点布局与高频回路控制

高频放大电路 PCB 布局会对噪声性能产生较大影响。输入端属于最为敏感的区域,应当尽量靠近信号接口、第一级放大器,以此来减小走线长度、寄生耦合。高增益节点、高阻抗节点和反馈节点需要远离时钟线、开关电源、电感器还有数字总线。高频电流回路应该让面积维持在最小状态,信号走线要保证阻抗连续,防止出现急剧转角、过多过孔、不必要的分支。多级放大电路要依据信号流向顺序来进行布置,输入和输出之间要存有足够的隔离,避免输出信号反馈到输入端从而形成自激。布局设计并非只是简单地摆放元件,而是对高频能量路径、噪声耦合路径的控制。

### 4.2 接地设计与屏蔽隔离措施

高频噪声抑制方面,接地设计占据重点地位。理想状况下的接地,应当能够给予低阻抗的回流路径,然而事实上,在实际的 PCB 里,地平面、过孔、连接点均会产生一定的阻抗。模拟地、数字地、电源地需要依据系统结构

进行合理规划,防止大电流回流经过低噪声输入区域。连续的地平面有助于减小回流面积、辐射,不过在混合信号系统中,还得防止噪声电流穿敏感区域。对于极低噪声或者高增益放大电路而言,可以运用屏蔽罩、接地护环、过孔围栏、隔离腔体等措施来降低外部电磁耦合。屏蔽结构必须与地实现可靠连接,不然的话,有可能成为悬浮导体进而引入新的噪声。接地、屏蔽应当结合信号回流路径进行统一设计。

### 4.3 器件封装、走线材料与热噪声管理

在高频放大电路里,器件封装、PCB 材料会对寄生参数和损耗造成影响。要是封装引脚比较长,那么寄生电感就会比较突出,要是焊盘尺寸不太合理,同样有可能形成额外的电容。对于射频或者高速高频电路而言,应当优先挑选契合目标频段的封装形式,并且依据器件推荐版图来设计焊盘、接地过孔。PCB 材料的介电常数、损耗角正切还有厚度会对传输线阻抗、信号衰减产生作用。温度产生变化也会对器件噪声、偏置稳定性、增益特性产生影响,所以热设计不可以被忽略。合理安排散热铜皮、热过孔、温度敏感元件的位置,能够帮助降低因温漂引发的噪声和增益波动。

## 5 高频信号放大电路噪声抑制测试与优化路径

### 5.1 噪声测试与性能评估方法

调试高频信号放大电路时必须依靠规范测试。常见的测试指标有增益、带宽、噪声系数、输入输出驻波比、信噪比、谐波失真、互调失真、输出噪声谱密度。测试设备能有频谱分析仪、矢量网络分析仪、噪声系数分析仪、示波器和信号源。测试期间需要留意屏蔽环境、线缆质量、接头匹配、仪器底噪,不然测量结果可能会被外部因素干扰。对于微弱信号放大电路而言,测试夹具和供电电源也会对结果产生影响。科学评估不光要看单点频率性能,还得观察全频段噪声分布、温度变化、不同输入幅度下的稳定性。

### 5.2 仿真分析与实测调试结合

高频电路设计一般都要借助仿真工具来进行前期分析工作,像小信号参数仿真、噪声仿真、稳定性分析、阻抗匹配仿真、电磁场仿真等。仿真能够协助设计者预先察觉增益不足、匹配偏差、潜在振荡问题,然而仿真模型常常很难全面涵盖焊接误差、器件批次差异、环境耦合。所以,实测调试依旧是不可或缺的。在实际操作中,可以通过更换匹配电容、电感,调整偏置电阻,改变去耦位置,增添隔离措施等办法逐渐进行优化。每次调试都要记录下参数变化、测试结果,防止出现无序修改的情况。仿真与

实测相结合能够缩短研发的周期,提高噪声抑制措施的有效性。

### 5.3 面向可靠性的长期优化方向

高频信号放大电路噪声抑制需要满足样机阶段指标,同时要确保批量生产时、长期运行过程中保持稳定。器件容差、焊接工艺、温湿度变化、机械振动还有电源波动,这些因素都会对最终的噪声表现产生影响。所以,在设计阶段要预留参数裕量,并且进行温度循环、老化测试、电源扰动测试。对于关键产品,还需建立噪声指标测试流程、失效分析机制。未来,高频放大电路噪声抑制会更看重低噪声集成芯片、高精度仿真建模、自动化测试、智能调参技术。伴随高频通信和精密检测需求的提高,噪声抑制会从经验设计逐渐朝着模型化、数字化、系统化转变。

## 6 结论

高频信号放大电路的噪声抑制属于系统工程,涉及器件选择、电路设计、版图布局、结构屏蔽、测试验证等多个环节。研究指出,器件本征噪声、阻抗失配、带宽过宽、寄生参数耦合、电源纹波、外部电磁干扰,是影响高频放大电路信噪比与稳定性的关键要素。有效的噪声抑制需遵循前端优先、源头控制、路径隔离、系统优化的原则。在

电路方面要合理挑选低噪声器件,优化偏置工作点,设计匹配网络与滤波去耦结构,在 PCB 方面要控制高频回路面积,确保阻抗连续,优化接地与屏蔽,在测试方面要通过噪声系数、频谱、增益、驻波比、稳定性测试建立闭环验证。本文研究贡献在于从实践方面梳理了高频信号放大电路噪声抑制的关键技术链条,强调噪声控制不应局限于单点整改,而应与系统设计同步推进。未来需进一步强化高频噪声模型、低噪声材料、智能测试、集成化设计研究,以契合通信、检测、智能电子系统对高灵敏度信号处理的需求。

### [参考文献]

- [1]康华光.电子技术基础:模拟部分[M].北京:高等教育出版社,2013.
- [2]谢奎.电子线路:线性部分[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [3]童诗白,华成英.模拟电子技术基础[M].北京:高等教育出版社,2015.

作者简介:王玺(1989—),男,汉族,河北邢台人,工程师,河北科技师范学院毕业,现就职于邢台市财政干部教育中心,从事财政科研工作。