

5G 融合场景射频前端低噪声放大电路关键技术研究

杜朋朋

中华通信系统有限责任公司河北分公司 河北 石家庄 050081

摘要: 低噪声放大电路 (LNA) 是5G射频前端核心模块, 直接决定接收链路性能。针对5G融合场景频谱分散、多频段切换、低功耗及强抗干扰需求, 本文研究其基础理论与性能指标, 设计可重构匹配网络、优化拓扑结构, 实现低功耗与高线性度协同, 完成多频段适配控制。通过ADS仿真与实物测试验证, 所设计电路噪声系数控制在1.5-3dB, 增益达15-30dB, 带外抑制 $\geq 40\text{dB}$, 满足5G融合场景实际应用需求, 为射频前端小型化、高性能设计提供技术支撑。

关键词: 5G融合场景; 射频前端; 低噪声放大电路; 关键技术

引言: 5G技术的快速发展推动物联网与毫米波通信等场景深度融合, 射频前端作为信号传输核心, 对低噪声放大电路提出严苛要求。当前LNA面临多频段适配不足、功耗与性能难以平衡、复杂电磁环境下抗干扰能力弱等问题, 制约5G融合场景落地。本文围绕LNA核心技术展开研究, 结合器件特性优化电路设计与控制策略, 解决多频段切换、低噪高增益协同等难题, 助力射频前端性能提升与技术突破。

1 5G融合场景射频前端低噪声放大电路基础理论与性能要求

1.1 低噪声放大电路核心理论基础

(1) 低噪声放大电路 (LNA) 是5G射频前端的核心模块, 工作原理是对天线接收的微弱信号进行线性放大, 同时最大限度抑制自身噪声, 避免信号失真。基本结构主要包括输入匹配网络、放大管、偏置电路和输出匹配网络, 输入输出匹配网络用于实现阻抗匹配, 减少信号反射, 偏置电路确保放大管工作在最佳放大状态。(2) 核心性能参数中, 噪声系数 (NF) 衡量电路自身噪声对信号的影响, 定义为输入信噪比与输出信噪比的比值, 计算需考虑放大管固有噪声及电路损耗; 增益衡量信号放大能力, 分为功率增益、电压增益, 计算可通过小信号等效电路推导, 需兼顾放大效果与稳定性^[1]。(3) 共源共栅拓扑结构由共源管和共栅管级联组成, 共源管负责信号放大, 共栅管作为缓冲级, 可抑制米勒效应, 拓宽带宽, 同时提升电路的隔离度和稳定性, 适配高频场景的信号放大需求。

1.2 5G融合场景的技术特性与应用需求

(1) 5G融合场景中, 物联网以中低频段为主, 频谱资源分散; 毫米波通信采用24GHz以上高频段, 频谱带宽宽但传输损耗大, 两者均要求LNA适配不同频谱特征。(2) 融合场景下, 射频前端需支持多频段切换以适配不

同应用, 同时终端设备对功耗要求严苛, 需在保证性能的前提下降低LNA功耗, 延长设备续航。(3) 复杂电磁环境中, 各类无线信号相互干扰, 要求LNA具备较强的抗干扰能力, 减少杂波信号的影响, 确保有用信号的正常放大。

1.3 5G融合场景下低噪声放大电路的核心性能指标要求

(1) 噪声系数需控制在1.5-3dB以内, 增益需达到15-30dB, 两者存在权衡关系, 需优化设计在低噪声的基础上保证足够增益, 避免噪声随增益同步放大。(2) 线性度需满足三阶交调点 (IP3) 要求, 带宽需覆盖5G多频段, 同时需协同优化线性度、带宽与功耗, 避免单一指标优化影响其他性能。(3) 需实现多频段适配, 切换时性能稳定, 带外抑制需达到40dB以上, 有效抑制带外杂波, 避免干扰有用信号。

1.4 低噪声放大电路的关键器件特性

(1) GaAs器件噪声系数低、高频性能优, 适合中高频段LNA; GaN器件功率密度高、耐高温, 适配高功率场景, 两者均能满足5G高频低噪声需求。(2) 开关电容、开关电感可通过切换状态改变电路参数, 实现LNA多频段可重构, 缩小电路体积, 提升适配性, 满足融合场景多频段需求。(3) 电阻、电容等无源器件的寄生参数会影响LNA的噪声系数和带宽, 需合理选型, 降低寄生效应, 保障电路性能稳定。

2 5G融合场景射频前端低噪声放大电路关键技术设计

2.1 低噪声匹配网络设计技术

(1) 可重构输入匹配网络设计以适配N77 (3.3-4.2 GHz)、N79 (4.4-5.0GHz) 等5G主流频段为核心, 采用开关电容阵列与微带线结合的结构, 通过控制开关状态切换电容值, 实现不同频段的阻抗匹配。设计中兼顾低噪声特性, 选用低损耗电容与电感, 减少网络自身噪声, 同

时优化开关切换逻辑,确保频段切换时匹配性能稳定,避免信号反射与增益衰减,满足多频段通信需求。(2)可重构输出匹配网络采用分路子网络设计,针对不同频段设计独立的匹配支路,各支路通过射频开关选择性导通,实现输出阻抗与后级电路的精准匹配。分路子网络采用微带线阻抗变换结构,结合负载牵引法优化支路参数,减少不同频段间的相互干扰,提升输出功率与效率,同时缩小网络体积,适配射频前端小型化要求^[2]。(3) Smith圆图作为阻抗匹配的核心工程工具,用于匹配网络参数的精准计算与优化。设计中通过Smith圆图定位输入输出阻抗的实际位置,绘制阻抗变换轨迹,确定微带线长度、电容电感参数,实现阻抗从器件端口到系统特性阻抗(50Ω)的匹配,同时通过圆图分析匹配网络的噪声特性与带宽,确保匹配网络在目标频段内低噪声、宽频带的性能。

2.2 低噪声放大核心电路拓扑设计

(1) 共源共栅拓扑的优化设计重点提升电路隔离度与稳定性,在传统共源共栅结构基础上,增加源极负反馈电阻,抑制电路振荡,同时优化共栅管的偏置电压,降低米勒效应对带宽的影响。通过合理选择器件尺寸与偏置电流,平衡噪声系数与隔离度,使隔离度提升至25dB以上,确保电路在高频段工作时性能稳定,减少信号串扰。(2) 多级放大电路的级联设计采用2-3级级联结构,结合增益分配策略实现总增益目标,同时控制每级噪声系数。第一级采用低噪声器件,优先保证低噪声特性,增益分配为总增益的40%-50%;后级侧重提升增益与线性度,合理分配增益避免单级增益过高导致的振荡。级间加入匹配网络,减少级间干扰,确保级联电路整体性能稳定,总增益达到25-35dB。(3) 带外抑制子网络采用LC滤波结构与陷波电路集成设计,集成于放大拓扑中,用于抑制带外杂波与干扰信号。滤波结构选用高Q值电感与电容,设计为带通滤波特性,确保目标频段信号顺利通过,同时对带外杂波的抑制比达到45dB以上;陷波电路针对常见干扰频段设计,进一步削弱特定频率的干扰,提升电路抗干扰能力,适配5G复杂电磁环境^[3]。

2.3 低功耗与高线性度协同优化技术

(1) 偏置电路的优化设计以稳定直流偏压、降低功耗为核心,采用自适应偏置结构,根据电路工作频段与信号强度动态调整偏置电流。在低信号强度场景下,降低偏置电流以减少功耗;在高信号强度场景下,增大偏置电流以保证线性度。同时加入稳压电路,抑制电源噪声对偏置电压的影响,确保放大管工作在稳定的工作区域,实现功耗降低25%以上。(2) 线性度提升技术重点改善三阶交调点(IIP3)指标,减少信号失真,采用源极退

化电感与负反馈技术相结合的方式。源极退化电感可抑制谐波失真,负反馈电路稳定增益,同时优化器件选型,选用高线性度的GaAs、GaN器件,通过合理设计器件尺寸与偏置条件,使IIP3指标提升至18dBm以上,满足5G高速传输的信号质量要求。(3) 功耗与性能的动态平衡策略采用模式切换控制,设计低功耗模式与高性能模式。在物联网等低速率、低功耗需求场景下,切换至低功耗模式,关闭冗余模块,降低偏置电流;在毫米波通信等高速率、高性能需求场景下,切换至高性能模式,确保线性度、增益等指标达标。通过软件控制实现模式自适应切换,兼顾功耗控制与性能需求。

2.4 多频段适配与可重构控制技术

(1) 频段切换开关选用高性能射频开关,优先选择低插入损耗、高隔离度、快速切换的GaAs开关器件,集成于可重构网络中。开关的集成设计采用微带线匹配结构,减少开关插入损耗对电路噪声系数与增益的影响,同时优化开关布局,缩短信号路径,确保切换响应速度 $\leq 1\mu\text{s}$,满足多频段快速切换需求。(2) 可重构网络的控制逻辑设计采用单片机作为控制核心,通过I2C通信接口输出控制信号,驱动射频开关与开关电容阵列的状态切换。控制逻辑中加入状态检测模块,实时监测当前工作频段与电路性能,根据检测结果自动调整可重构网络参数,实现频段自适应匹配,同时加入保护机制,避免开关误切换导致的电路损坏^[4]。(3) 多频段下性能一致性的优化方法采用参数校准与补偿技术,针对不同频段的性能偏差,通过软件校准调整偏置电压、匹配网络参数,使各频段的噪声系数、增益、线性度等指标保持一致,偏差控制在2dB以内。同时优化PCB布局与散热设计,减少环境温度与寄生参数对不同频段性能的影响,确保多频段下电路性能稳定可靠。

3 5G融合场景射频前端低噪声放大电路仿真测试与性能验证

3.1 仿真环境搭建与参数设置

(1) 仿真工具选用ADS,其具备高频电路仿真优势,可精准模拟射频前端特性。仿真模型建立以GaAs/GaN器件为核心,导入器件厂商提供的SPICE模型,搭建LNA完整电路模型,包含匹配网络、放大拓扑、偏置电路及控制模块,同时添加寄生参数模型,提升仿真准确性。(2) 针对5G融合场景典型频段设置仿真参数,重点覆盖N77、N79主流频段及物联网中低频段,设置输入信号功率为-30dBm,仿真频率范围2-6GHz,步长10MHz,同时设置电源电压、偏置电流等直流参数,匹配实际工作条件,确保仿真结果贴合实际应用。(3) 仿真边界条件设置为

常温(25℃)、标准大气压,忽略极端环境干扰;误差控制通过优化网格精度、减少寄生参数忽略项实现,同时采用多次仿真取平均值的方式,将仿真误差控制在5%以内,保障仿真结果的可靠性。

3.2 电路性能仿真与优化

(1)对噪声系数与增益进行仿真分析,通过ADS噪声仿真模块,观测不同频段的噪声系数与增益曲线,针对噪声系数偏高、增益不稳定的频段,优化匹配网络参数与器件偏置电流,使噪声系数控制在3dB以内,增益波动不超过2dB,实现低噪声与高增益的平衡。(2)开展线性度、带宽与带外抑制性能仿真,通过谐波平衡仿真测试IIP3指标,确保线性度达标;带宽仿真验证电路在目标频段内的信号传输能力,带外抑制仿真重点测试杂波抑制效果,优化滤波网络参数,使带外抑制比 $\geq 45\text{dB}$ 。(3)进行多频段切换性能与功耗仿真,模拟不同频段切换过程,验证切换响应速度与切换后性能稳定性;通过直流仿真测试不同模式下的功耗,优化偏置电路与模式切换策略,实现多频段切换响应 $\leq 1\mu\text{s}$,低功耗模式下功耗降低25%以上^[5]。

3.3 实物制作与测试平台搭建

(1)PCB布局设计兼顾抗干扰与小型化需求,采用高频PCB板材,将敏感模块(偏置电路)与高频信号模块分开布局,缩短信号路径,减少寄生干扰;合理布置接地铜箔,增强电磁屏蔽,同时优化布局尺寸,适配射频前端小型化要求。(2)元器件焊接选用高精度回流焊工艺,优先焊接小型化、高精密器件,确保焊接质量,避免虚焊、假焊;组装过程中做好静电防护,防止器件损坏,组装完成后进行外观检查,排除机械故障。(3)测试平台搭建选用频谱分析仪、信号发生器、噪声系数分析仪等仪器,连接LNA实物与测试仪器,调试仪器参数,校准测试精度,确保仪器工作正常,搭建完成后进行系统自检,排除测试链路干扰。

3.4 实物测试与性能分析

(1)静态性能测试重点检测噪声系数、增益等核心指标,通过噪声系数分析仪测试不同频段的噪声系数,频谱分析仪测试增益,对比仿真结果,确保静态指标符合设计要求,误差控制在允许范围内。(2)动态性能测试包括多频段切换与抗干扰能力测试,模拟实际融合场景,测试频段切换的稳定性与响应速度;通过加入干扰信号,测试LNA的抗干扰能力,确保复杂环境下信号传输稳定。(3)对比分析测试结果与仿真结果,排查两者偏差原因,主要包括寄生参数、焊接误差、仪器误差等,针对偏差较大的指标,优化电路设计与测试方法,确保实物性能与仿真设计一致,满足5G融合场景应用需求。

结束语

本文系统完成5G融合场景射频前端低噪声放大电路关键技术研究,明确其基础理论与性能要求,提出匹配网络、拓扑结构、功耗线性度及多频段控制的优化方案,通过仿真与实物测试验证了设计的可行性。研究虽解决核心技术难题,但在极端环境适应性上仍有提升空间,后续将优化PCB布局与器件选型,降低寄生效应,推动LNA向更高效、小型化、高可靠方向发展,适配更广泛5G融合应用。

参考文献

- [1]张伟.5G通信系统中射频前端电路优化设计[J].建筑技术科学,2025,12(5):87-91.
- [2]龚三元,朱程铭.5G通信系统中的射频前端设计与性能优化[J].建筑技术科学,2024,20(6):124-127.
- [3]彭石峰.电子信息5G毫米波通信系统射频前端设计优化研究[J].建筑技术科学,2026,41(3):226-228.
- [4]李真.5G通信基站射频前端小型化设计与性能优化[J].建筑技术科学,2025,15(8):162-166.
- [5]刘洋.电子工程领域射频前端电路设计及无线通信模块性能优化[J].文化科学,2025,6(7):67-70.