

做射频必须理解噪声

原创 皮诺曹 射频通信链 2025年12月19日 11:48 中国香港



射频通信链

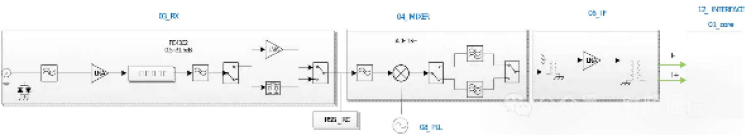
让射频学习不再困难，学射频，学通信，就看射频通信链。

418篇原创内容

公众号

射频设计的第一性原理：回归噪声本质

在射频电路设计领域，存在一个普遍误区：工程师们往往陷入匹配网络、线性度、驻波比等具体指标的追逐，将知识点越钻越深，却忘记了抬头审视整个系统的根基。这种割裂式的优化，本质上是用战术上的勤奋掩盖战略上的懒惰。



被忽视的真相：射频设计的"第一性原理"

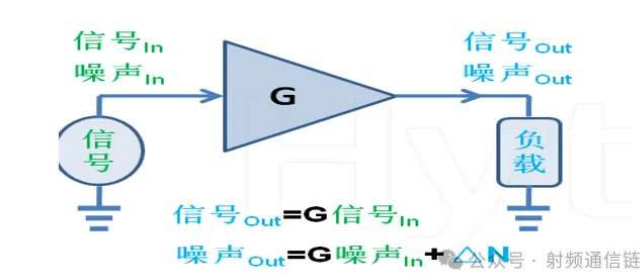
射频工程的根本目标是什么？不是实现完美的阻抗匹配，不是追求极致的功率效率，而是在噪声的底噪上提取有用信号。所有射频理论的基石，都建立在香农定理之上：

$C = B \times \log_2(1 + S/N)$

信道容量由带宽和信噪比共同决定。在带宽受限的无线通信中，信噪比就是一切。而信噪比的天花板，从信号进入射频前端的第一刻起，就被噪声系数（NF）永久性地焊死了。后续所有匹配、滤波、放大，都只是在这个被噪声诅咒的舞台上修修补补。

这就是射频设计的第一性原理：噪声，且只有噪声，是决定系统性能的根本因素。

一个残酷的物理事实：所有器件都是噪声源



典型教科书将噪声视为"被动"属性，仅在讨论LNA时才提及NF。这是致命的认知陷阱。射频链路中任何一个器件——无论是电容、电感、传输线，还是开关、滤波器、匹配网络——都会恶化系统的噪声系数。

根据Friis公式：

$NF_{total} = NF_1 + (NF_2 - 1)/G_1 + (NF_3 - 1)/(G_1 \times G_2) + \dots$

每一项都在提醒我们：

第一级后的每个器件都在放大前级的噪声

前级增益不足时，后级器件的噪声贡献会被放大暴露

不存在"噪声中性"的器件，只有噪声贡献大小的区别

当你精心优化匹配网络，却使用高损耗基板材料时；当你选择高Q值电感，却忽略其自谐振引入的相位噪声时；当你为成本妥协使用低成本电容，却承受其介质损耗带来的热噪声时——你都在违背第一性原理。

1. 噪声预算先行，指标分配后置

设计第一步不是打开仿真软件画匹配，而是建立噪声预算表：

系统要求NF < 3dB @ 25MHz BW

分配给LNA: $NF_1 = 1.5\text{dB}$, $G_1 = 15\text{dB}$

分配给滤波器: $IL < 2\text{dB} \rightarrow NF_2 = 2\text{dB}$

分配给Mixer: $NF_3 = 12\text{dB}$

反向计算验证: $(NF_2-1)/G_1 = 0.26\text{dB}$, $(NF_3-1)/(G_1 \times G_2) = 0.04\text{dB}$ 。可行。

若不可行，必须牺牲其他指标保噪声，而非相反。

2. 器件选型：用噪声系数倒推容忍损耗

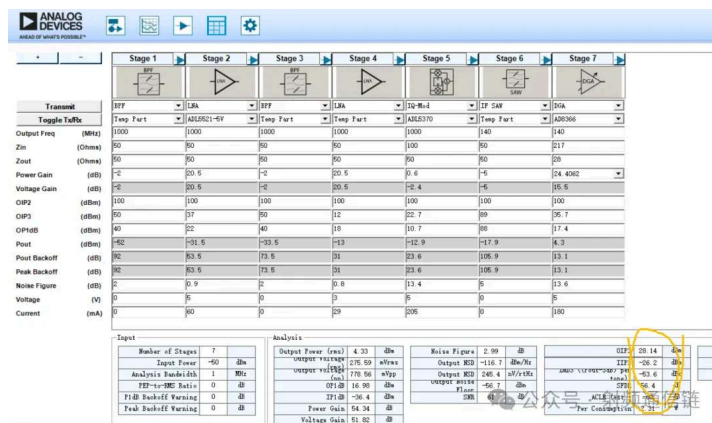
选择每个器件时，第一个问题应是："它的损耗/噪声对系统NF的影响多大？"

基板材料：罗杰斯4350B vs FR4，介质损耗角正切差异直接导致微带线插入损耗差0.5dB/m，在30mm路径上就是0.015dB NF恶化

开关器件： $R_{on} = 1\Omega$ vs 0.5Ω ，在 50Ω 系统就是0.17dB vs 0.09dB的插入损耗，直接叠加到NF

电容ESR：100pF 电容在2GHz的ESR 0.1Ω vs 0.3Ω ，导致匹配网络额外损耗0.1dB

这些在传统设计中"可接受"的参数差异，在噪声第一性视角下都是不可饶恕的罪行。



3. 布局即噪声设计

物理布局不是"走通就行"，每一步都在写入噪声：

传输线弯曲：90° 直角 vs 圆弧走线，辐射损耗差异导致NF恶化0.02dB（看似微小，但级联后不可忽略）

地过孔间距： $\lambda/20$ vs $\lambda/10$ ，回流路径阻抗差异引入的地弹噪声

屏蔽腔设计：谐振模式在带内引入的噪声耦合

布局阶段没有"可选项"，每个选择都在做噪声加法。

认知重构：从"匹配思维"到"噪声思维"

传统射频教育过度强调"共轭匹配"的执念，仿佛 $S_{11} = -20\text{dB}$ 就是终极目标。但在噪声第一性原理下，我们必要时会主动牺牲匹配保噪声：

LNA的 $\Gamma_{opt} \neq \Gamma_{match}$ 时，永远选择最小噪声系数而非最佳匹配

滤波器插入损耗 vs 带外抑制权衡时，带内插损优先（它直接加NF）

天线与LNA间加Buffer?

指标的优先级应由噪声决定，而非传统经验。

结语

回归噪声，就是回归物理本质；尊重噪声，才是射频设计的最高效路径。

■ 最后的话

射频的学习不再是孤立的器件调试，而是从整体的角度去理解系统，理解器件，理解指标。

射频收发系统的指标设计与分解已经300+人加入了，如果你也想提升射频能力，系统的学

习射频，学习射频通信，课程介绍 [戳链接](#) ，除了课程视频，还有课件PPT，一群一起学习的人，遇到问题解决不了，需要咨询，可以和群友一起讨论，也可以咨询我。

相信能帮助你走的更快、更稳、更远！

感兴趣扫码咨询。



皮诺曹

“ 射频工程师加油 ”

喜欢作者