

低噪声放大器设计指南

1. 低噪声放大器在通讯系统中的作用

随着通讯工业的飞速发展，人们对各种无线通讯工具的要求也越来越高，功率辐射小、作用距离远、覆盖范围大已成为各运营商乃至无线通讯设备制造商的普遍追求，这就对系统的接收灵敏度提出了更高的要求，我们知道，系统接收灵敏度的计算公式如下：

$$S_{\min} = -174 + NF + 10 \log BW + S/N \dots \dots \dots (1)$$

由上式可见，在各种特定（带宽、解调 S/N 已定）的无线通讯系统中，能有效提高灵敏度的关键因素就是降低接收机的噪声系数 NF，而决定接收机的噪声系数的关键部件就是处于接收机最前端的低噪声放大器。低噪声放大器的主要作用是放大天线从空中接收到的微弱信号，降低噪声干扰，以供系统解调出所需的信息数据，所以低噪声放大器的设计对整个接收机来说是至关重要的。

2. 低噪声放大器的主要技术指标：

2.1 噪声系数 NF

噪声系数的定义为放大器输入信噪比与输出信噪比的比值，即：

$$NF = \frac{S_{in} / N_{in}}{S_{out} / N_{out}} \quad (2)$$

对单级放大器而言，其噪声系数的计算为：

$$NF = NF_{\min} + 4R_n \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{opt}|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2) |1 - \Gamma_{opt}|^2} \quad (3)$$

其中 F_{\min} 为晶体管最小噪声系数，是由放大器的管子本身决定的， Γ_{opt} 、 R_n 和 Γ_s 分别为获得 F_{\min} 时的最佳源反射系数、晶体管等效噪声电阻、以及晶体管输入端的源反射系数。

对多级放大器而言，其噪声系数的计算为：

$$NF = NF_1 + (NF_2 - 1) / G_1 + (NF_3 - 1) / G_1 G_2 + \dots \dots \quad (4)$$

其中 NF_n 为第 n 级放大器的噪声系数， G_n 为第 n 级放大器的增益。

在某些噪声系数要求非常高的系统，由于噪声系数很小，用噪声系数表示很不方便，常常用噪声温度来表示，噪声温度与噪声系数的换算关系为：

$$T_e = T_0 (NF - 1) \quad (5)$$

其中 T_e 为放大器的噪声温度， $T_0 = 290^{\circ} K$ ，NF 为放大器的噪声系数。

$$NF (dB) = 10 \lg NF \quad (6)$$

2.2 放大器增益 G:

放大器的增益定义为放大器输出功率与输入功率的比值：

$$G = P_{out} / P_{in} \quad (7)$$

从式 (4) 中可见，提高低噪声放大器的增益对降低整机的噪声系数非常有利，但低噪声放大器的增益过高会影响整个接收机的动态范围。所以，一般来说低噪声放大器的增益确定应与系统的整机噪声系数、接收机动态范围等结合起来考虑。

2. 3 输入输出的驻波比:

低噪声放大器的输入输出驻波比表征了其输入输出回路的匹配情况，我们在设计低噪声放大器的匹配电路时，输入匹配网络一般为获得最小噪声而设计为接近最佳噪声匹配网络而不是最佳功率匹配网络，而输出匹配网络一般是为获得最大功率和最低驻波比而设计，所以，低噪声放大器的输入端总是存在某种失配。这种失配在某些情况下会使系统不稳定，一般情况下，为了减小放大器输入端失配所引起的端口反射对系统的影响，可用插损很小的隔离器等其他措施来解决。

2. 4 反射系数:

由式 3 可知，当 $\Gamma_s = \Gamma_{opt}$ 时，放大器的噪声系数最小， $NF = NF_{min}$ ，但此时从功率传输的角度来看，输入端是失配的，所以放大器的功率增益会降低，但有些时候为了获得最小噪声，适当的牺牲一些增益也低噪声放大器设计中经常采用的一种办法。

2. 5 放大器的动态范围 (IIP3):

在低噪声放大器的设计中，应充分考虑整个接收机的动态范围，以免在接收机后级造成严重的非线性失真，一般应选择低噪声放大器的输入三阶交调点 IIP3 较高一点，至少比最大输入信号高 30dB，以免大信号输入时产生非线性失真。

除以上各项外，低噪声放大器的工作频率、工作带宽及通带内的增益平坦度等指标也很重要，设计时要认真考虑。

3. 低噪声放大器的设计方法:

3.1 低噪声放大管的选择原则

对微波电路中应用的低噪声放大管的主要要求是高增益和低噪声以及足够的动态范围，目前双极型低噪声管的工作频率可以达到几个千兆噪声系数为几个分贝，而砷化镓小信号的场效应管的工作频率更高，噪声系数可在 1 分贝以下。

我们在选取低噪声放大器管通常可以从以下几个方面进行考虑:

1) 微波低噪声管的噪声系数足够小工作频段足够高，晶体管的 f_T 一般要比工作频率高 4 倍以上，现在 PHEMT 场效应管的噪声系数在 2GHz 可在 0.5dB 左右，工作频率高端可达到 6GHz。

2) 微波低噪声管要有足够高的增益和高的动态范围，一般要求放大器工作增益大于 10dB 以上，当输入信号达到系统最大值时由放大器非线性引起的交调产物小于系统本底噪声，对于 ZXPCS 大基站项目由于最大输入信号小于 -44dBm，考虑到放大器 13dB 左右增益，我们选取了 ATF34143 场效应管它的增益可达 15dB，OIP3 为 30dBm 左右。

3.2 输入输出匹配电路的设计原则

对于单级晶体管放大器的噪声系数，如上式 (3) 所示，式 (3) 可以化成一个圆的表达式，即等噪声系数圆。圆上每一点代表一个能产生恒定噪声系数 NF 的源反射系数。如要获得需要的噪声系数，只要在圆图上画出对应于这个噪声系数的圆，然后将源阻抗匹配到这个

圆上的一个点就行了。实际设计中由于要兼顾到放大器的增益，通常我们不取最小噪声系数。在对放大器进行单项化设计时（假定 $S_{12}=0$ ），转移功率增益 G_T 可以由如下公式表示：

$$G_T = G_0 G_1 G_2 \quad \text{其中} \quad G_0 = |S_{21}|^2$$

$$G_1 = \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|1 - \Gamma_1 S_{11}|^2}, \quad G_2 = \frac{1 - |\Gamma_2|^2}{|1 - \Gamma_2 S_{22}|^2} \quad \text{对于特定的晶体管 } S_{11}、S_{22} \text{ 是确定的，}$$

不同的源反射系数 Γ_1 和负载反射系数 Γ_2 ，可以构成恒定增益圆，设计时只须将源和负载反射系数分别匹配到相应的圆上，便能得到相应的增益。将恒定增益圆与等噪声系数圆结合起来设计，便能得到比较理想的结果。另外设计中还要注意增益平坦设计主要是高端共轭匹配，低端校正，一般还需在多个中间频率上进行增益规定性校验，在高频应用时由于微波晶体管本身的增益一般随着频率的升高而降低，为了保证电路在低频率段的增益恒定和稳定性可以考虑在输入输出端采用高通匹配方式。

在以上的讨论中我们忽略了晶体的反向传输系数，实际中微波场效应晶体管和双极性晶体管都存在内部反馈，微波管的 S_{12} 就表示内部反馈量，它是电压波的反向传输系数。 S_{12} 越大，内部反馈越强，反馈量达到一定强度时，将会引起放大器稳定性变坏，甚至产生自激振荡。微波管的 S_{21} 代表电压波的正向传输系数，也就是放大倍数。 S_{21} 越大，则放大以后的功率越强。在同样的反馈系数 S_{12} 的情况下， S_{21} 越大当然反馈的功率也越强，因此 S_{21} 也影响放大器的稳定性。

一个微波管的射频绝对稳定条件是

$$K = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |D|^2}{2|S_{11}S_{22}|} > 1$$

$$|S_{11}|^2 < 1 - |S_{12}S_{21}|$$

$$|S_{22}|^2 < 1 - |S_{12}S_{21}|$$

其中 $D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$

K 称为稳定性判别系数， K 大于 1 是稳定状态，只有当式（2-4）中的三个条件都满足时，才能保证放大器是绝对稳定的。

实际设计时为了保证低噪声放大器稳定工作还要注意使放大器避开潜在不稳定区。

为改善微波管自身稳定性，有以下几种方式：

- 1) 串接阻抗负反馈

在 MES FET 的源极和地之间串接一个阻抗元件，从而构成负反馈电路。对于双极晶体管则是在发射极经反馈元件接地。在实际的微波放大器电路中，电路尺寸很小，外接阻抗元件难以实现，因此反馈元件常用一段微带线来代替，它相当于电感性元件的负反馈。

2) 用铁氧体隔离器

铁氧体隔离器应该加在天线与放大器之间，假定铁氧体隔离器的正向功率衰减微为 α ，

反向功率衰减为 β ，且 $\alpha \geq 1$ ， $\beta > 1$ 。则 $\Gamma = \frac{\Gamma_0}{\sqrt{\alpha\beta}}$

Γ_0 为加隔离器前的反射系数， Γ 为加隔离器后的反射系数。

用以改善稳定性的隔离器应该具有的特性是：

- (1) 频带必须很宽，要能够覆盖低噪声放大器不稳定频率范围；
- (2) 反向隔离度并不要求太高；
- (3) 正向衰减只需保证工作频带之内有较小衰减，以免影响整机噪声系数，而工作频带外，则没有要求。
- (4) 隔离器本身端口驻波比要小。

3) 稳定衰减器

Π 型阻性衰减器是一种简易可行的改善放大器稳定性的措施，通常接在低噪声放大器末级输出口，有时也可以加在低噪声放大器内的级间，由于衰减器是阻型衰减，不能加在输入或前级的级间，以免影响噪声系数。在不少情况下，放大器输出口潜在不稳定区较大，在输出端加 Π 型阻性衰减器，对改善稳定性相当有效。

3.3 电路中需要注意的一些问题

一般对于低噪声放大器采用高 Q 值的电感完成偏置和匹配功能，由于电阻会产生附加的热噪声，放大器的输入端应尽量避免直接连接到偏置电阻上。

用于低噪声放大器的印制板应具有损耗小，易于加工，性质稳定的特点，材料的物理和电气性能均匀（特别是介电常数和厚度），同时对材料的表面光洁度有一定要求，通常我们可以采用以 FR-4（介电常数 4~5 之间），为基片的 板材，如电路要求较高可采用以氧化铝陶瓷等材料为基片的微波板材，在 PCB 布板中则要考虑到邻近相关电路的影响，注意滤波、接地和外电路干扰问题设计中要满足电磁兼容设计原则。

4. 目前低噪声放大器方面的设计手段。

目前低噪声放大器的设计普遍采用 CAD 的方法进行仿真，国内较流行的有 EESOF、MWOffice、ADS 等软件。相对而言 Agilent 公司的 ADS 功能强大、简明直观应用范围较广，

我公司的 LNA 基本上都采用了 ADS 进行了仿真效果良好。

5. 目前同行业低噪放的发展水平

随着半导体器件的发展，低噪声放大器的性能不断提高，采用 PHEMT 场效应晶体管的低噪声放大器的在 800MHz 频段噪声系数可达到 0.4dB, 增益约 17dB 左右，1900MHz 频段噪声系数可达到 0.6 增益为 15dB 左右。