

Noise(噪声)

运算放大器电路表现出随机的内部噪声有两个原因:

- 由于半导体中电子空穴对的随机产生和重组
- 电阻器中电子的热搅动(thermal/Johnson noise)

Signal-to-noise ratio(SNR, 信噪比)

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{\text{rms of signal } V_s}{\text{rms of noise } E_n} \right)$$

rms:均方根

运放噪声模型

一般是用一个无噪声的运放输入端加上相等的噪声噪声源来建模,分为电压噪声 e_n 和 i_n .

- 电压噪声在(+/-非反相输入端)端加一个, 一个具有频谱密度的量(单位: $V/\sqrt{\text{HZ}}$)
- 电流噪声作用在两个输入端(分别流入),单位是 $A/\sqrt{\text{HZ}}$

电阻的热噪声

$$E_r = \sqrt{4RkT\Delta f}$$

- k:玻尔兹曼常数
- T:热力学温度
- Δf :噪声的带宽(决定了观测噪声的频率范围,带宽越宽,观测到的总噪声越大.)
- R:电阻值

关于带宽

- 白噪声:在频谱上对于所有频率具有相同的幅度

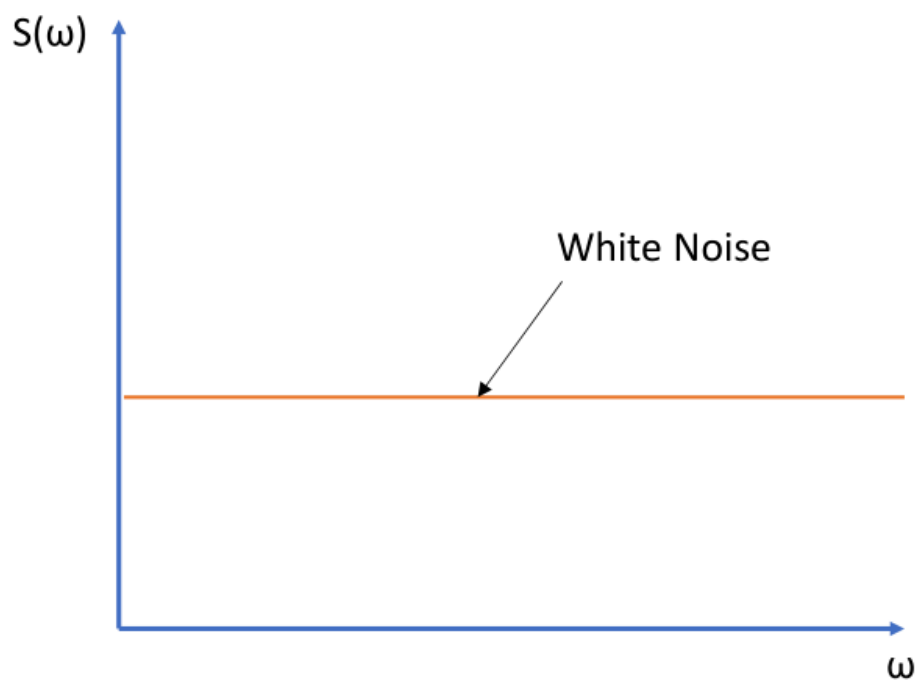


Figure 1: 白噪声频谱图

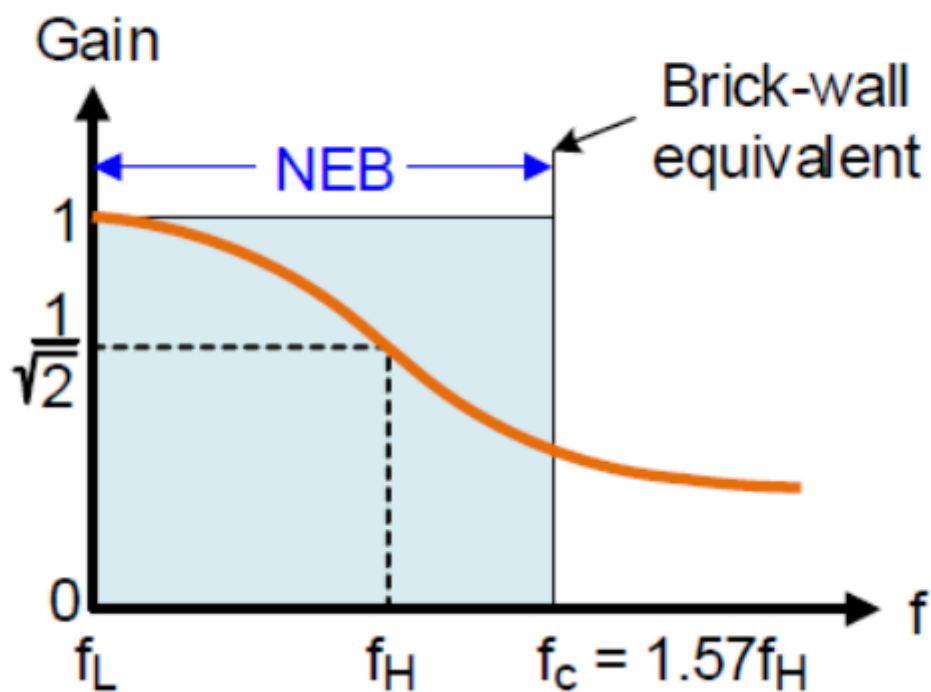


Figure 2: 白噪声通过低通滤波器的结果, 以及 NEB(Noise Equivalent Bandwidth)的定义

运放的 NEB:

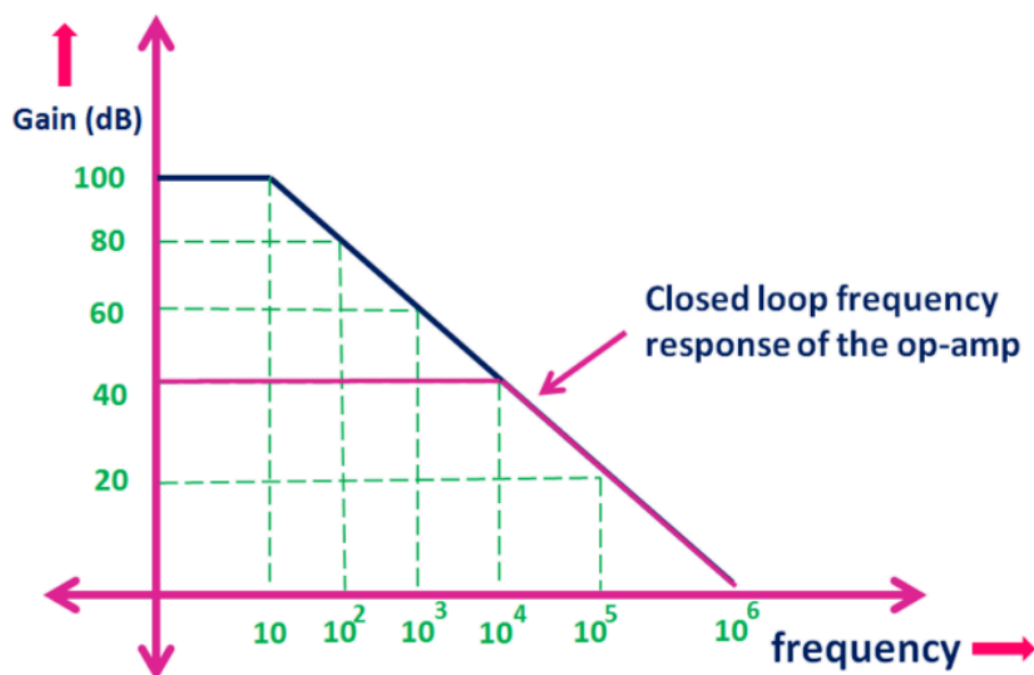


Figure 3: 闭环频率响应

下降了 3dB 就是 cut-off frequency. 这段内容描述了运算放大器 (Op-Amp) 的闭环频率响应以及增益带宽积 (Gain-Bandwidth Product, GBW) 和噪声等效带宽 (Noise Equivalent Bandwidth, NEB) 的相关概念。以下是详细解释:

1. 理想运放 vs 实际运放

• 理想运放:

- ▶ 增益无限大。
- ▶ 带宽无限宽。
- ▶ 对输入信号没有限制, 能够放大所有频率的信号。

• 实际运放:

- ▶ 增益有限, 且带宽有限。
- ▶ 增益会随频率增加而减小, 这是由于运放的内部补偿 (例如 Miller 补偿) 等电路特性决定的。

- ▶ 实际运放的频率响应通常表现为：在低频时增益为常数（高增益），而在超过某个截止频率后，增益每增加一个频率十倍（一个“十年”）下降约 20 dB。
-

2. 闭环频率响应

增益与频率的关系：

- 图中显示了一个运放的典型闭环频率响应：
 - ▶ 低频段：增益是恒定的，例如 100 dB（开环增益）或闭环配置下的 40 dB（例如 $\times 100$ 放大）。
 - ▶ 截止频率 (f_c)：增益下降到峰值增益的 -3 dB 处的频率称为截止频率。此时，信号功率减小了一半。
 - ▶ 高频段：增益以 20 dB/十年的速率下降，呈现一阶低通滤波器特性，直到单位增益点（增益为 0 dB）。

图解说明：

- 蓝线表示开环增益响应（未使用反馈）。
 - 紫线表示闭环增益响应。例如，一个运放在闭环增益为 $\times 100$ (40 dB) 时，带宽为 10 kHz。
-

3. 增益带宽积 (GBW, Gain-Bandwidth Product)

- 增益带宽积是一个运放的关键参数，定义为： $GBW = \text{增益} \times \text{带宽}$
- 对于一个运放，**GBW** 是恒定的，这意味着增益和带宽成反比：
 - ▶ 当闭环增益提高时，带宽会减小。
 - ▶ 当闭环增益降低时，带宽会增大。

例子：

- 图中运放的 GBW 为 1 MHz（单位增益频率）。
 - ▶ 当闭环增益为 $\times 1$ (0 dB) 时，带宽为 1 MHz。
 - ▶ 当闭环增益为 $\times 100$ (40 dB) 时，带宽缩小到 10 kHz。
-

4. 噪声等效带宽 (NEB, Noise Equivalent Bandwidth)

- 定义：噪声等效带宽是指一个假想的矩形带宽（即理想带宽）与实际频率响应曲线下的面积相等时的带宽值。

NEB 的计算公式为：
$$\text{NEB} = 1.57 \times \frac{\text{GBW}}{\text{Noise Gain}}$$

- ▶ **Noise Gain** 是运放的闭环增益（通常为 $(1 + R_f/R_g)$ ）。
- ▶ 常数 1.57 来自于实际频率响应曲线与矩形带宽的积分关系（将实际响应转化为等效带宽）。
- 意义：NEB 用于估计运放在工作范围内产生的噪声大小。它考虑了带宽内噪声的分布和增益的影响。

例子：

- 如果 GBW 为 1 MHz，Noise Gain 为 $(\times 100)$ ：
$$\text{NEB} = 1.57 \times \frac{1 \text{ MHz}}{100} = 15.7 \text{ kHz}$$
-

5. 单位增益频率

- 单位增益频率（Unitarity Gain Frequency）是运放在增益为 1（0 dB）时的截止频率。
 - 在此频率下，运放的增益等于 1，也就是信号既没有放大也没有衰减。
 - 对于大多数运放，单位增益频率与 GBW 是等价的，因为 GBW 是恒定的。
-

6. 工程意义

- 选择运放：
 - ▶ 如果需要更宽的带宽，必须选择更高 GBW 的运放。
 - ▶ 设计闭环系统时需要权衡增益与带宽的关系。
- 带宽限制：
 - ▶ 在高增益配置下，运放的带宽会显著缩小，因此不能用于处理高频信号。
- 噪声分析：
 - ▶ NEB 用于量化运放噪声性能。NEB 越小，运放的噪声性能越好。

7. 总结

- 闭环频率响应描述了运放在闭环配置下增益随频率变化的特性。
- **GBW** 是运放的核心参数，增益和带宽呈反比。
- **NEB** 用于估计带宽内的噪声影响，帮助评估系统的信噪比。

通过这些分析，设计人员可以根据需要调整运放的增益、选择合适的 GBW，以及预测噪声性能。

$$NEB = n \times \frac{GBW}{\text{Noise Gain}}$$

n 由于不同的运放级别有不同的值

Order	n
1	1.57
2	1.22
3	1.16
4	1.13
5	1.12

Total RMS input noise