



## 第2章 高频电路基础

---

➤2.1 LC 谐振回路

➤2.2 电子噪声

➤2.3 噪声系数和噪声温度



### 2.3 噪声系数和噪声温度

#### 一、噪声系数

在一些部件和系统中，噪声对他们性能的影响主要表现在信号与噪声的相对大小，即信号噪声功率比上。一般希望有这样的电路或系统，当有用信号和输入端的噪声通过他们时，此系统不引入附加噪声。这意味着输入端和输出端具有相同的信噪比。但实际中，由于电路或系统内部总有附加噪声，输出端信噪比会下降。因此我们希望输出端信噪比下降尽可能小。噪声系数就是基于该想法定义的。



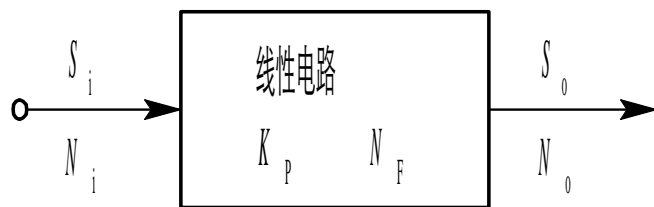
## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 一、噪声系数

线性四端网络噪声系数的定义：

**噪声系数**——输入端的信号噪声功率比 $(S/N)_i$ 与输出端的信号噪声功率比 $(S/N)_o$ 的比值，即：

$$N_F = \frac{(\frac{S}{N})_i}{(\frac{S}{N})_o} = \frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S_o}{N_o}} \quad (1)$$



$K_p$  电路的功率传输系数（功率放大倍数）； $N_a$  表示内部噪声功率在输出端的输出

$$\because K_p = S_o / S_i$$

$$N_F = \frac{N_o}{N_i K_p} = \frac{N_o / K_p}{N_i} \quad (2) \quad \Rightarrow \quad N_F = \frac{\frac{N_i K_p + N_a}{K_p}}{N_i} = 1 + \frac{N_a}{N_i} \quad (3)$$



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 一、噪声系数

说明：（2）式表示噪声系数等于归于输入端的总输出噪声与输入噪声之比；

（3）式则用归于输入端的附加噪声表示噪声系数。

$$N_F = \frac{N_o}{N_i K_p} = \frac{N_o / K_p}{N_i} \quad (2)$$

$$N_F = \frac{\frac{N_i K_p + N_a}{K_p}}{N_i} = 1 + \frac{N_a}{N_i} \quad (3)$$

说明：1. 噪声功率与带宽  $B$  相联系。国际上， $N_F$  定义式中，噪声功率是按每单位频带内的噪声功率定义的。即按输入输出**功率谱密度**定义的，但是如果引入等效噪声带宽，则可以用整个频带内的噪声功率，这时噪声系数具有平均意义。

2. 噪声系数与输入信号大小无关，但与输入噪声功率  $N_i$  有关，这里规定  $N_i$  为信号源内阻  $R_s$  的**最大输出噪声功率  $kTB$** ，与  $R_s$  无关。



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 一、噪声系数

3. 输出端阻抗匹配与否并不影响噪声系数的大小，即噪声系数的大小与输出端所接负载无关，故噪声系数也可表示成输出端开路时的两均方电压之比或输出端短路时的两均方电流之比，即

$$N_F = \frac{U_{no}^2}{U_{nio}^2} \quad \text{开路电压法}$$

$$N_F = \frac{I_{no}^2}{I_{nio}^2} \quad \text{短路电流法}$$

$U_{no}^2$  和  $I_{no}^2$  分别是网络输出端开路和短路时总的输出均方噪声电压和电流；

$U_{nio}^2$  和  $I_{nio}^2$  则分别是网络输出端开路和短路时理想网络的输出均方噪声电压和电流。

4. 噪声系数的定义只适用于线性或准线性电路。

对于非线性电路，由于信号与噪声，噪声与噪声之间的相互作用，将会使输出端的信噪比更加恶化。因此噪声系数的概念不再适用。



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 二、噪声温度

将线性电路的内部附加噪声折算到输入端，此附加噪声可以用提高信号源内阻上的温度来等效，这就是噪声温度。

等效到输入端的附加噪声为  $N_a/K_p$ ，令增加的温度为  $T_e$ ，即噪声温度，则

$$\frac{N_a}{K_p} = kT_e B$$

$$\text{则：} N_F = 1 + \frac{kT_e B}{N_i} = 1 + \frac{kT_e B}{kT B} = 1 + \frac{T_e}{T} \Rightarrow T_e = (N_F - 1)T$$

注：噪声温度这一概念可以推广到系统内有多个独立噪声源的情形，利用噪声均方相加的原则，可以用电路中某一点的各噪声温度相加来表示总的噪声温度和噪声系数。

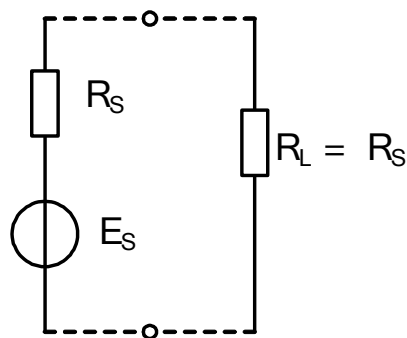


## 2.3 噪声系数和噪声温度

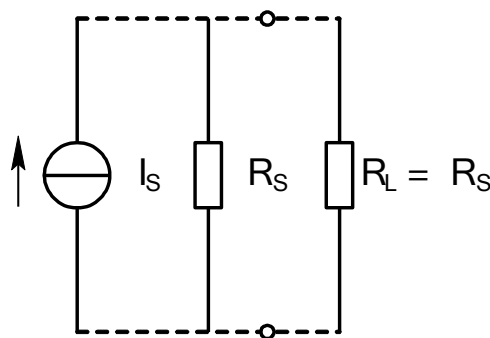
### 三、噪声系数的计算

#### 1. 额定功率法

**额定功率**，—— 又称资用功率或可用功率，是指信号源所能输出的最大功率，它只取决于信号源本身的参数：内阻和电动势，与输入电阻和负载无关。



(A)电压源



(b)电流源

要使信号源输出最大功率，要求  $R_s = R_L$ ，此时额定功率为：

$$P_{sm} = \frac{E_s^2}{4R_s} \quad \text{或} \quad P_{sm} = \frac{1}{4} I_s^2 R_s$$



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 1. 额定功率法

额定功率增益  $K_{Pm}$  是指四端网络的输出额定功率  $P_{smo}$  和输入额定功率  $P_{smi}$  之比，即

$$K_{Pm} = \frac{P_{smo}}{P_{smi}}$$

根据噪声系数的定义，分子和分母都是同一点上的功率比，因此可将实际功率改为额定功率，则：

$$N_F = \frac{\frac{P_{smi}}{N_{mi}}}{\frac{P_{smo}}{N_{mo}}} = \frac{N_{mo}}{K_{pm} N_{mi}}$$

式中， $P_{smi}$  和  $P_{smo}$  分别为输入和输出的信号额定功率； $N_{mi}$  和  $N_{mo}$  分别为输入和输出的噪声额定功率；





## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 1. 额定功率法

因为  $N_{mi} = kTB$ ,  $N_{mo} = K_{pm}N_{mi} + N_{mn}$ ,  $N_{mn}$  为网络内部的最大输出噪声功率。所以

$$N_F = \frac{N_{mo}}{K_{pm}kTB} = 1 + \frac{N_{mn}}{K_{pm}kTB}$$

或者等效到输入端，有：
$$N_F = \frac{N_{moi}}{kTB}$$

式中， $N_{moi} = N_{mo}/K_{pm}$  是网络额定输出噪声功率等效到输入端的数

值。对于无源四端网络，在输出端匹配时（噪声系数与输出端的匹配与否无关，考虑匹配时较为简单），输出端的额定噪声功率为

$N_{mo} = kTB$ ，故

$$N_F = \frac{1}{K_{pm}} = L$$

$L$  为网络的衰减系数

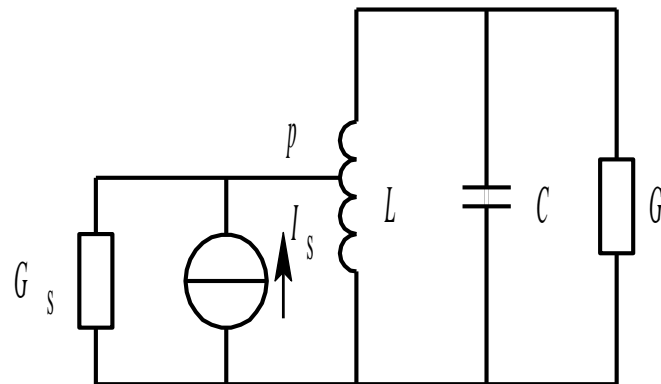


## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 1. 额定功率法

将信号源电导等效到回路两端，为  $p^2 G_S$ ，等效到回路两端的信号源电流为  $pI_S$ ，输出端匹配时的最大输出功率为  $P_{mo} = \frac{p^2 I_S^2}{4(G + p^2 G_S)}$



输入端信号源的最大输出功率为  $P_{sm} = \frac{I_S^2}{4G_S}$

因此，网络的噪声系数为  $N_F = \frac{1}{K_{pm}} = \frac{P_{sm}}{P_{mo}} = \frac{G + p^2 G_S}{p^2 G_S} = 1 + \frac{G}{p^2 G_S}$



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 2. 级联网络的噪声系数

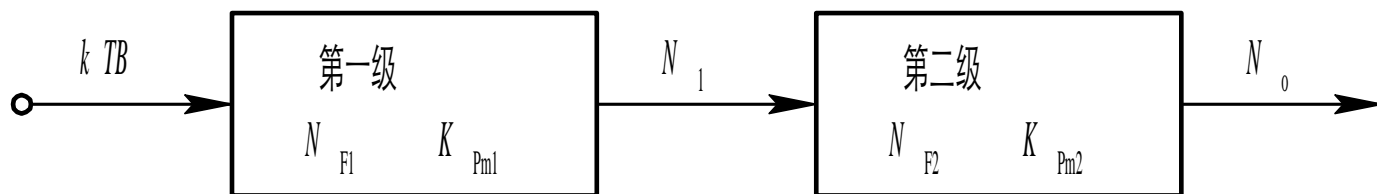


图 2—36 级联网络噪声系数

根据定义，级联后总的噪声系数为 
$$N_F = \frac{N_o}{K_{Pm} kTB} \quad K_{Pm} = K_{Pm1} K_{Pm2}$$

式中， $N_o$  为总输出额定噪声功率，它由三部分组成：经两级放大的输入信号源内阻的热噪声；经第二级放大的第一级网络内部的附加噪声；第二级网络内部的附加噪声，即

$$N_o = K_{pm} kTB + K_{pm2} N_{a1} + N_{a2} \quad (2)$$



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 2. 级联网络的噪声系数

根据噪声系数的表达式： $N_F = 1 + N_a / (K_{pm} kTB)$ ,  $N_{a1}$  和  $N_{a2}$  可分别表示为

$$N_{a1} = (N_{F1} - 1)K_{pm1}kTB$$

$$N_{a2} = (N_{F2} - 1)K_{pm2}kTB$$

$$\begin{aligned} \text{则 } N_o &= K_{pm}kTB + K_{pm1}K_{pm2}(N_{F1} - 1)kTB + K_{pm2}(N_{F2} - 1)kTB \\ &= [K_{pm}N_{F1} + (N_{F2} - 1)K_{pm2}]kTB \end{aligned}$$

$$\text{将上式代入式 } N_F = \frac{N_o}{K_{pm}kTB}, \text{ 得 } N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{K_{pm1}}$$

推广： $N$  级网络总的噪声系数为：

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{K_{pm1}} + \frac{N_{F3} - 1}{K_{pm1}K_{pm2}} + \cdots + \frac{N_{FN} - 1}{K_{pm1}K_{pm2} \cdots K_{pm(N-1)}}$$



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 2. 级联网络的噪声系数

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{K_{Pm1}} + \frac{N_{F3} - 1}{K_{Pm1}K_{Pm2}} + \dots + \frac{N_{FN} - 1}{K_{Pm1}K_{Pm2} \cdots K_{PmN}}$$

**结论：**从上式可以看出，当网络的额定功率增益远大于1时，系统的总噪声系数主要取决于第一级的噪声系数。越是后面的网络，对噪声系数的影响就越小，这是因为越到后级信号的功率越大，后面网络内部噪声对信噪比的影响就不大了。因此，对第一级来说，不但希望噪声系数小，也希望增益大，以便减小后级噪声的影响。



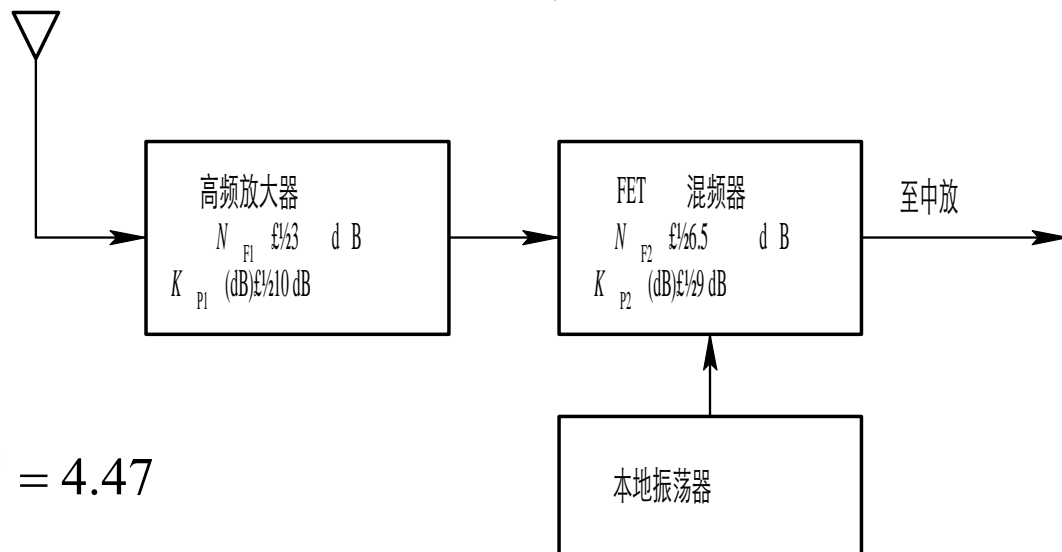
## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 2. 级联网络的噪声系数

**例** 下图 是一接收机的前端电路，高频放大器和场效应管混频器的噪声系数和功率增益如图所示。试求前端电路的噪声系数（设本振产生的噪声忽略不计）

**解** 将图中的噪声系数和增益化为倍数，有



$$K_{P1} = 10^1 = 10 \quad N_{F1} = 10^{0.3} = 2$$

$$K_{P2} = 10^{0.9} = 7.94 \quad N_{F2} = 10^{0.65} = 4.47$$

因此，前端电路的噪声系数为

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{K_{P1}} = 2 + 0.35 = 2.35(3.7dB)$$



# 2.3 噪声系数和噪声温度

## 三、噪声系数的计算

### 3. 噪声系数与灵敏度

噪声系数是用来衡量部件（如放大器）和系统（如接收机）噪声性能的重要参数。

而当信号一定时，噪声性能的好坏又决定输出端的信号噪声比。同时，当要求一定的输出信噪比时，它又决定放大或接收微弱信号的能力。这种能力可用灵敏度来衡量。

灵敏度就是保持接收机输出端信噪比一定时，接收机输入的最小信号电压或功率（设接收机有足够的增益）。



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 3. 噪声系数与灵敏度

例：某一电视接收机，正常接收时，所需最小信号噪声功率比为 20dB，电视机接收机带宽为 6MHz，接收机前端电路的噪声系数为 10dB，则接收机前端电路输入端的信号电平至少为多大？

解：依题意，要求的输出信噪比  $(S/N)_o = 20\text{dB} = 100$ ，噪声系数  $N_F = 10\text{dB} = 10$ ，根据噪声系数的定义有：

$$N_F = \frac{(S/N)_i}{(S/N)_o} \Rightarrow (S/N)_i = N_F \cdot (S/N)_o = 10 \cdot 10^2$$

因为：  $N_i = kTB$ ，故：

$$S_i = kTB \times 1000 = 1000 \times 1.37 \times 10^{-23} \times 290 \times 6 \times 10^6 = 23.8 \text{ pW}$$

即要求的输入信号功率为 23.8pW

假设信号源内阻为  $75\Omega$ ，则所需的最小信号电势为：

$$U_s = \sqrt{4R_s S_i} = \sqrt{4 \times 75 \times 23.8 \times 10^{-12}} = 84.5 \mu\text{V}$$





## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 3. 噪声系数与灵敏度

提高接收机灵敏度的途径：

- (1) 尽量降低接收机的噪声系数
- (2) 降低接收机前端设备的温度  $T$

注：并非  $N_F$  越小越好，要根据外部干扰和噪声的情况来考虑，当外部干扰和噪声电平很高时，接收机  $N_F \downarrow \downarrow$ ，灵敏度很高是没有必要的。?????

这是因为当噪声系数很小时，则输入信号电平很低，可能使得信号淹没在噪声中



## 2.3 噪声系数和噪声温度

### 三、噪声系数的计算

#### 3. 噪声系数与灵敏度

接收机线性动态范围 DR——它是指接收机在都不饱和情况下的最大输入信号功率  $S_{imax}$  与接收机灵敏度之比。

$$DR(dB) = S_{imax} + 114(dBm) - B(dBMHz) - N_F(dB)$$

$S_{imax}$ ——接收机在 1dB 压缩点时最大输出信号功率。

B——接收机带宽；  $N_F$ ——接收机总噪声系数