

## 运算放大器噪声指数：不要被误导

### 简介

运算放大器噪声一般表示为输入电流和电压噪声，就如以前在[MT-047](#)、[MT-048](#)、[MT-049](#)、[MT-050](#)和[MT-051](#)所讨论的那样。但在通信系统中，噪声一般表示为噪声系数(NF)——见下面的图1。这会导致误解，尤其是当运算放大器被用作增益模块且运算放大器的噪声系数并非针对具体的电路条件时。为了了解如何在运算放大器上运用噪声系数，我们将首先回顾一下噪声系数的基本原理。

- ◆ **NF is usually specified for matched input/output conditions, but this is not always a system requirement**
- ◆ **Noise Figure is a popular figure of merit in RF applications: LNAs, Mixers, etc.**
- ◆ **Difficulties arise when applying NF to op amps. NF is dependent on**
  - Impedance levels
  - Feedback network
  - Closed loop gain
- ◆ **Other difficulties arise due to different definitions of NF as found in various textbooks**
- ◆ **We will start with the basics and work up to the op amp issues**

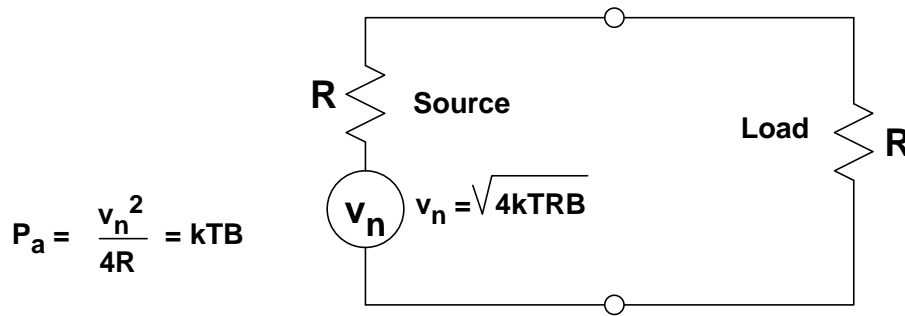
**图1：通信应用中的噪声系数(NF)**

### 有效噪声功率

第一个概念是源的有效功率。源的有效功率是可以从源中得到的最大功率。在下面的图2，值为R的电阻即为噪声源。该噪声源的热噪声为 $\sqrt{4kTB}$ 。当负载电阻也等于R时，会出现可以传输到理想无噪声负载的最大噪声。

在这些条件下，噪声源的最大有效噪声功率降至 $kTB$ ，其中，k为玻尔兹曼常数，T为绝对温度，B为噪声带宽。请注意，该功率独立于源电阻R的值。

The available power,  $P_a$ , of a source is the maximum power that can be drawn from the source. This occurs when the load resistance is equal to the source resistance.



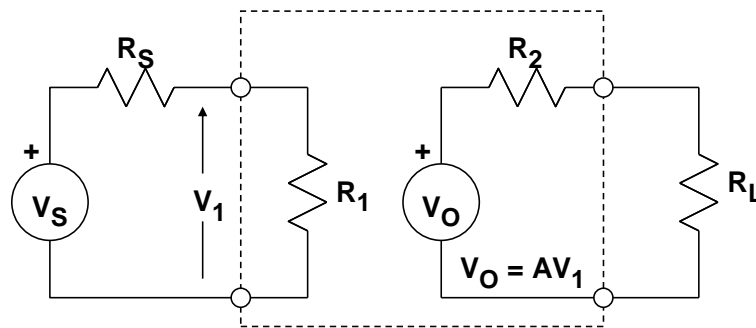
$k = 1.38 \times 10^{-23}$  Joules / K (Boltzman's Constant)  
 $T =$  Temperature (assume 300K, room temperature)  
 $B =$  Noise bandwidth (Hz)

$$P_a \text{ (dBm)} = -174\text{dBm} + 10 \log B$$

图2: 来自源的有效噪声功率

**有效功率增益**

第二个重要概念是双端口网络的有效功率增益，如下面的图3所示。双端口网络由阻抗为  $R_s$  的信号源驱动。等式展示了来自源的有效信号功率，以及来自网络输出端的有效信号功率。简单来说，有效功率增益就是有效输出功率与源的有效功率之比。

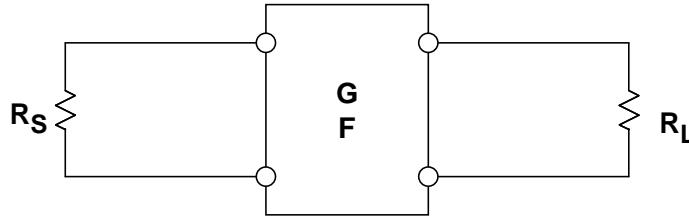


- Available signal power from source =  $P_{as} = \frac{V_S^2}{4R_S}$
- Available signal power at output =  $P_{ao} = \frac{V_O^2}{4R_2}$
- Available power gain =  $G_a = \frac{P_{ao}}{P_{as}} = \frac{V_O^2 R_S}{V_S^2 R_2}$

图3: 双端口网络的有效功率增益

### 噪声因数和噪声系数的定义

双端口网络的增益和噪声可以用有效功率增益 $G$ 和噪声因数 $F$ 来定义，如下面的图4所示。噪声因数 $F$ 定义为总有效输出噪声功率与来自源的有效输出噪声功率之比。对于阻性源，来自源的有效噪声功率即为 $kTB$ ，仅由源导致的输出噪声功率为 $G \cdot kTB$ 。



$G$  = Available Power Gain of Network

$$F = \text{Noise Factor} = \frac{\text{Total Available Output Noise Power}}{\text{Available Output Noise Power Due to Source Only}}$$

$$= \frac{\text{Total Available Output Noise Power}}{G \cdot kTB}$$

$$NF = \text{Noise Figure} = 10 \log_{10} F$$

**图4：双端口噪声网络的噪声因数和噪声系数的定义。**

请注意，噪声因数 $F$ 表示为一个比值，而噪声系数 $NF$ 则是以 $dB$ 为单位的比值 $F$ 。因而，一个理想的无噪声双端口网络的噪声因数为 $F = 1$ ，噪声系数为 $NF = 0 \text{ dB}$ 。我们可以用相同的定义来计算运算放大器电路的 $NF$ ，但是，用电压噪声频谱密度和电流噪声频谱密度的平方则会简化计算，而不是使用功率或功率频谱密度(见下面的图5)。另外，用这种方法来处理不匹配条件要容易些。

简单而言，运算放大器的噪声因数 $F$ 就是总输出噪声频谱密度的平方与仅来自于源的输出噪声频谱密度的平方之比。噪声系数 $NF = 10 \cdot \log F$ 。

- ◆ With op amps, it is easier to work with voltage and current noise spectral density, rather than power or power spectral density.
- ◆ Unmatched conditions are more easily dealt with using voltage noise spectral density analysis.
- ◆ Voltage noise spectral densities add using root-sum-squares (RSS).
- ◆ A 1000Ω resistor has a voltage noise spectral density of 4nV/√Hz @ 25°C (300K). (This is good to remember!)
- ◆ The basic definition of Noise Factor and Noise Figure in terms of voltage noise spectral density becomes:

$$\text{Noise Factor} = F = \frac{(\text{Total Output Voltage Noise Spectral Density})^2}{(\text{Output Voltage Noise Spectral Density Due to Source Only})^2}$$

$$\text{Noise Figure} = \text{NF} = 10 \log_{10} F$$

图5: 运算放大器的噪声系数

在RF或IF增益模块中，需要定义输入阻抗。然而，在将运算放大器在同相模式下用作增益模块时，输入阻抗较高(相对于传输线路阻抗)，对于会影响噪声系数的输入终端则有数种选项。这些选项被推广到带有可选输入终端的任何双端口网络中，如下面的图6所示。

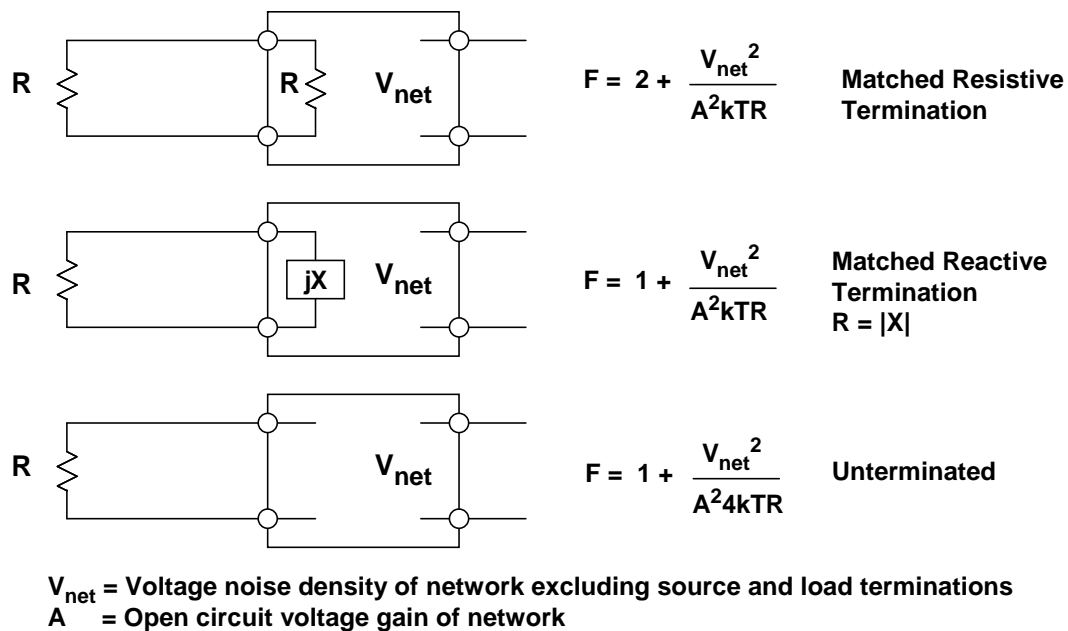


图6: 阻性、抗性和无端接条件下的噪声因数

设网络的开路电压增益为 $A$ ，且总输出噪声频谱密度(不包括源电阻和输入终端所导致的)等于 $V_{net}$ 。

图6中，顶部示意图展示的是传统的匹配情况，其中，输入以阻性方式端接，以匹配源阻抗。这种情况下，输入终端电阻不但会使源的电压噪声衰减2倍，同时其热阻会导致噪声增加。

图6中部示意图展示的是一种抗性匹配终端的情况。当带宽有限但以高频载波为中心时，往往要使用抗性终端。这种情况下，源电压噪声被衰减2倍，但抗性终端不会给总输入噪声带来更多的噪声。

图6底部示意图展示的是一种不匹配、未端接输入的情况。这种情况下，源的电压噪声不发生衰减，由于不存在输入终端，显然不会有输入终端导致的额外噪声！虽然这种情况不大可能出现在采用RF/IF增益模块(这些模块一般要求所有接口处的阻抗都能匹配)的系统中，但是，在把运算放大器用作增益模块时，这还是有可能的，因为同相配置输入阻抗相对较高。

如果假设网络的噪声 $V_{net}$ 与源噪声相比是极小的，则显而易见的是，输入终端电阻会使总噪声系数增加3 dB，同时使总电压增益下降2倍。将这种情况与不存在输入终端的最低噪声情况进行比较。事实上，对于只有输入阻性匹配终端的无噪声网络来说，最低噪声系数是3 dB。只有使用匹配抗性终端才有可能得到更低的噪声系数。

另一方面，如果网络的噪声 $V_{net}$ 相对于源噪声显得非常大，则增加阻性终端会使总噪声系数比不匹配、无终端情况增加6 dB。

总之，使用大的源电阻会导致噪声系数下降，但会增加总电路噪声，这一点非常有趣。这展现了以下重要事实：噪声系数只有在标称阻抗等级相同时才具有可比性。下面的图7总结了放大器输入终端对总电路噪声和噪声系数的影响。

- ◆ For a low noise network, adding the matching input termination resistor makes the noise figure 3dB worse. The voltage gain is also reduced by a factor of 2.
- ◆ For a high noise network, adding the matching termination resistor makes the noise figure 6dB worse.
- ◆ Reactive matched terminations are often used at fixed IF/RF frequencies in LNAs, mixers, etc.
- ◆ Using large source and termination resistors decreases noise figure but increases overall circuit noise.
- ◆ Noise figures should only be compared at the same impedance level.

图7： 输入终端对噪声系数的影响

### 参考文献

1. Hank Zumbahlen, *Basic Linear Design*, Analog Devices, 2006, ISBN: 0-915550-28-1. Also available as [Linear Circuit Design Handbook](#), Elsevier-Newnes, 2008, ISBN-10: 0750687037, ISBN-13: 978-0750687034. Chapter 1.
2. Walter G. Jung, [Op Amp Applications](#), Analog Devices, 2002, ISBN 0-916550-26-5, Also available as [Op Amp Applications Handbook](#), Elsevier/Newnes, 2005, ISBN 0-7506-7844-5. Chapter 1.

Copyright 2009, Analog Devices, Inc. All rights reserved. Analog Devices assumes no responsibility for customer product design or the use or application of customers' products or for any infringements of patents or rights of others which may result from Analog Devices assistance. All trademarks and logos are property of their respective holders. Information furnished by Analog Devices applications and development tools engineers is believed to be accurate and reliable, however no responsibility is assumed by Analog Devices regarding technical accuracy and topicality of the content provided in Analog Devices Tutorials.