

运算放大器噪声关系：1/f噪声、均方根(RMS)噪声与等效噪声带宽

“1/f”噪声

运算放大器电流或电压噪声的一般特性如下图1所示。

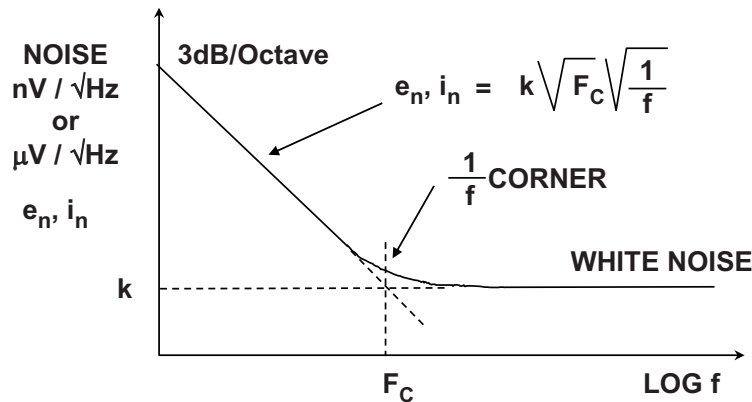


图1：运算放大器噪声的频率特性

高频下的噪声为白噪声(即其频谱密度不会随频率而变化)。这种情况适用于运算放大器的大部分频率范围，但在低频率条件下，噪声频谱密度会以3 dB/倍频程上升，如上图1所示。功率频谱密度在此区域内与频率成反比，所以电压噪声频谱密度与频率的平方根成反比。因此，这种噪声通常称为“1/f噪声”。但应注意，有些教材中仍旧使用“闪烁噪声”这个旧术语。

这种噪声开始增加时的频率称为“1/f转折频率”(F_C)，也是品质因数之一——该频率越小越好。对于特定放大器，电压噪声和电流噪声的1/f转折频率并不一定相同，有的电流反馈运算放大器可能具有三个1/f转折频率：一个针对其电压噪声，另一个针对其反相输入电流噪声，还有一个则针对其同相输入电流噪声。

用来描述1/f区域内电压或电流噪声频谱密度的通用计算公式如下

$$e_n, i_n = k\sqrt{F_C}\sqrt{\frac{1}{f}}, \quad \text{公式1}$$

其中，k表示“白”电流或电压噪声电平，而F_C表示1/f转折频率。

最佳低频率、低噪声放大器的转折频率位于1-10 Hz范围内，而JFET器件和更为通用的运算放大器则位于1-100 Hz范围内。不过，超高速放大器可能会在处理能力上做出让步以便实现高速性能，从而导致1/f转折频率特性相当差，高达数百Hz，甚至1-2 kHz。对于此类器件所针对的宽带应用，这点通常并不是很重要，但可能会影响其在音频条件下使用，尤其是在均衡电路中。

均方根噪声考虑

如上所述，噪声频谱密度与频率成函数关系。为了获得均方根噪声，噪声频谱密度曲线必须在整个目标带宽上积分。

在1/f区域中，带宽 F_L 至 F_C 内的均方根噪声由下式给出

$$v_{n,rms}(F_L, F_C) = v_{nw} \sqrt{F_C} \sqrt{\int_{F_L}^{F_C} \frac{1}{f} df} = v_{nw} \sqrt{F_C \ln \left[\frac{F_C}{F_L} \right]} \quad \text{公式2}$$

其中， v_{nw} 表示“白”区域内的电压噪声频谱密度， F_L 表示1/f区域中的最低目标频率，而 F_C 表示1/f转折频率。

下一目标区域是从 F_C 至 F_H 的“白”噪声区。该带宽内的均方根噪声由下式给出

$$v_{n,rms}(F_C, F_H) = v_{nw} \sqrt{F_H - F_C} \quad \text{公式3}$$

公式2和3可以合并，得出 F_L 至 F_H 的总均方根噪声：

$$v_{n,rms}(F_L, F_H) = v_{nw} \sqrt{F_C \ln \left[\frac{F_C}{F_L} \right] + (F_H - F_C)} \quad \text{公式4}$$

许多情况下，低频峰峰值噪声是0.1 Hz至10 Hz带宽内的额定值，采用运算放大器与测量器件之间的0.1至10 Hz带通滤波器测得。测量结果通常表示为示波图，时间刻度为1s/div，如下图所示(针对OP213)。

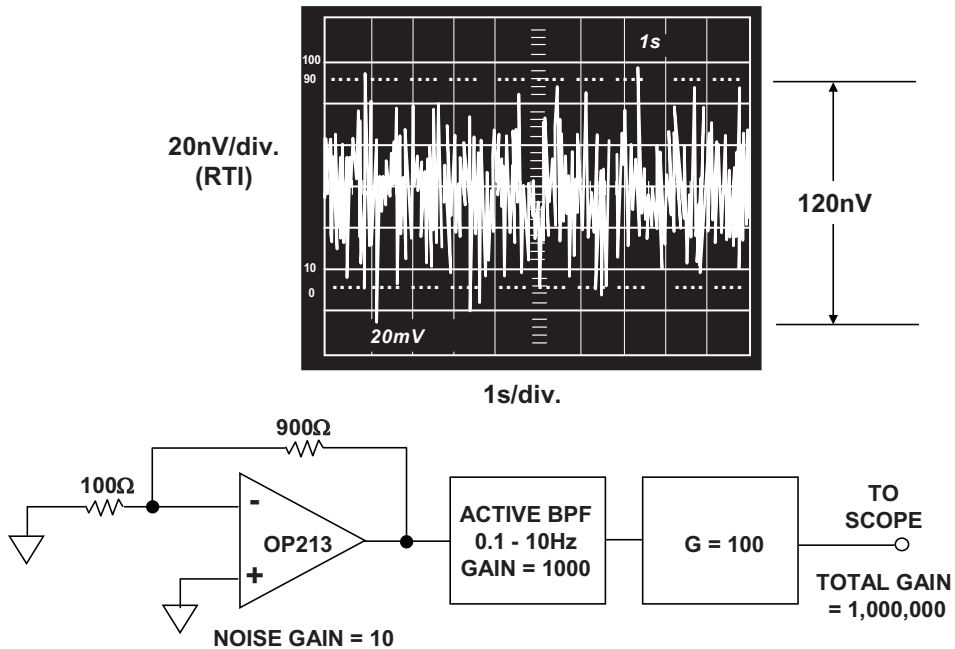
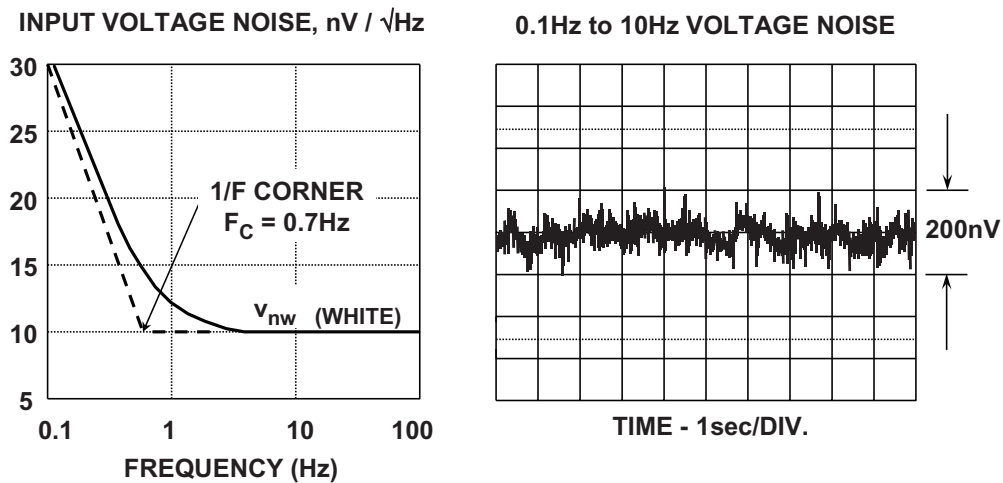


图2: OP213的0.1Hz至10 Hz输入电压噪声



- ◆ $V_{n,rms}(F_L, F_H) = v_{nw} \sqrt{F_C \ln \left[\frac{F_C}{F_L} \right] + (F_H - F_C)}$
- ◆ For $F_L = 0.1\text{Hz}$, $F_H = 10\text{Hz}$, $v_{nw} = 10\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, $F_C = 0.7\text{Hz}$:
 - ◆ $V_{n,rms} = 33\text{nV}$
 - ◆ $V_{n,pp} = 6.6 \times 33\text{nV} = 218\text{nV}$

图3: OP177的输入电压噪声

在0.1至10 Hz带宽内测量的1/f噪声可与电压噪声频谱密度相关。上图4的左侧显示了OP177输入电压噪声频谱密度，右侧显示了0.1至10 Hz峰峰值噪声示波图。令公式2的 $F_L = 0.1\text{ Hz}$ ， $F_H = 10\text{ Hz}$ ， $F_C = 0.7\text{ Hz}$ ， $v_{nw} = 10\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，可计算0.1至10 Hz带宽内的总均方根噪声值。所得值约为33 nV rms，或218 nV p-p(将均方根值乘以6.6得出——参见下文)。该值与从示波图测出的200 nV相当。

应注意，在较高频率下，包含自然对数的公式项变得微不足道，均方根噪声表达式变为

$$V_{n,rms}(F_H, F_L) \approx v_{nw} \sqrt{F_H - F_L} . \quad \text{公式5}$$

And, if $F_H \gg F_L$,

$$V_{n,rms}(F_H) \approx v_{nw} \sqrt{F_H} . \quad \text{公式6}$$

然而，某些运算放大器(例如OP07和OP27)具有在高频下略微增加的电压噪声特性。所以使用此近似值计算高频噪声时，应仔细检查运算放大器电压噪声与频率关系曲线的平坦度。

在极低频率下，当仅在1/f区域内工作时， $F_C \gg (F_H - F_L)$ ，均方根噪声表达式简化为

$$V_{n,rms}(F_H, F_L) \approx v_{nw} \sqrt{F_C \ln \left[\frac{F_H}{F_L} \right]} . \quad \text{公式7}$$

请注意，如果工作范围扩展至直流，则无法通过滤波减少该1/f噪声。令 $F_H = 0.1 \text{ Hz}$ ， $F_L = 0.001 \text{ Hz}$ ，仍可产生约18 nV rms或119 nV p-p的均方根1/f噪声。问题是，对长时间内的测量结果求平均值实际上对1/f噪声的均方根值无影响。进一步减少1/f噪声的方法是使用斩波稳定型运算放大器，从而消除低频噪声。

在实际操作中，几乎不可能在特定频率限值内测量噪声而不受限值外噪声的影响，因为实际滤波器的滚降特性有限。幸运的是，单极点低通滤波器引起的测量误差很容易计算。单极点低通滤波器截止频率 f_c 以上频谱内的噪声将转折频率扩展至 $1.57f_c$ 。同样，双极点滤波器的视在转折频率约为 $1.2f_c$ 。对具有两个以上极点的滤波器而言，误差校正因数通常可忽略。校正后的净带宽称为滤波器的“等效噪声带宽”(参见下图4)。

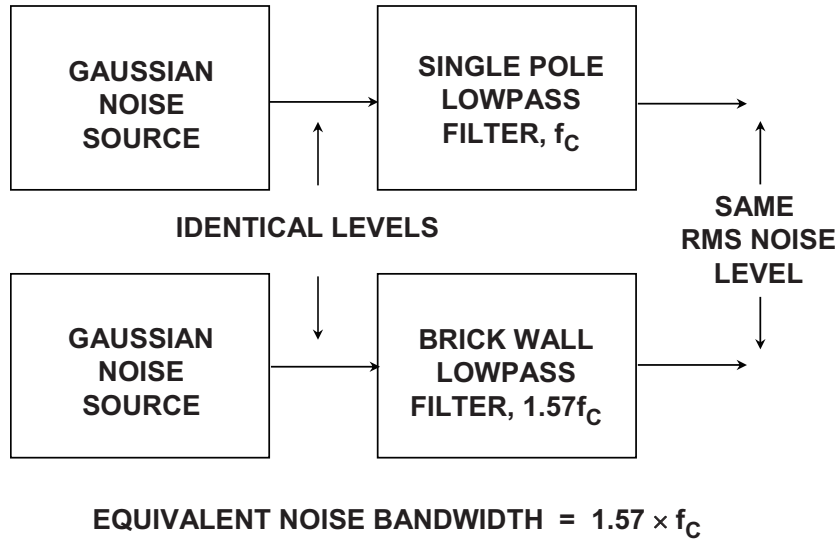


图4: 等效噪声带宽

通常需要将均方根噪声测量值转换为峰峰值。为此，我们必须对噪声的统计性质有所了解。对于高斯噪声和给定均方根噪声值，统计学告诉我们，超过特定峰峰值的概率随着该值增加而急剧下降，但该概率永远不会为零。

因此，对于给定均方根噪声值，可以预测超过给定峰峰值的时间百分比，但不存在永远无法超过的峰峰值，如下图5所示。

Nominal Peak-to-Peak	% of the Time Noise will Exceed Nominal Peak-to-Peak Value
$2 \times \text{rms}$	32%
$3 \times \text{rms}$	13%
$4 \times \text{rms}$	4.6%
$5 \times \text{rms}$	1.2%
$6 \times \text{rms}$	0.27%
$6.6 \times \text{rms}^{**}$	0.10%
$7 \times \text{rms}$	0.046%
$8 \times \text{rms}$	0.006%

****Most often used conversion factor is 6.6**

图5: 均方根-峰峰值比

因此，峰峰值噪声规格必须写上时间限制。6.6乘以均方根值较为合适，即该值仅在0.1%的时间内被超过。

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.