

全差分放大器噪声系数计算

毛华平

德州仪器公司 (TI) 高速应用工程师

摘要

本文简要介绍了全差分放大器噪声系数计算, 提供了用于比较带阻抗匹配和不带阻抗匹配的 FDA 组成的驱动电路的噪声的直观方法, 并提供计算小工具.

Abstract: this article introduce the noise figure calculation of FDA, can help the reader get an visual method to compare different circuits with and without input impedance matching, And also provide the calculation tool.

Key words: Noise figure, FDA, ADC driver.

Contents

1 引言	2
2 放大器噪声指标.....	2
3 信噪比计算	7
4 全差分放大器噪声系数计算	8
5 案例分析.....	10
6 总结.....	11
7 附件.....	11
8 参考资料.....	11

Figures

Figure 1 输入电压噪声和电流噪声曲线图例.....	2
Figure 2 噪声种类分布图	3
Figure 3 放大器噪声分量分解	4
公式 1	5
Figure 4 无匹配电阻全差分放大器	6
公式 2	7
公式 3	7
公式 4	8
Figure 5 无匹配电阻全差分放大器	8
公式 5	9
公式 6	10

1 引言

在驱动高速 ADC 的场合, 我们经常需要用到全差分放大器结构的驱动器, 有时可能是单纯增益结构的 FDA, 有时可能是 FDA 结构的 DVGA, FDA 指标书通常标注的噪声是放大器本身的噪声谱密度, 而 DVGA 经常标注的是一定增益下的噪声系数, 在要求驱动电路带来的噪声最小化的前提下, 设计者经常疑惑于该怎么选择器件. 这篇文章就把所有的器件指标归结到噪声系数, 这样设计者可以很直观地比较自己去搭一个放大电路以及使用 DVGA 下, 哪个噪声最优。

2 放大器噪声指标

如笔者在《放大器噪声系数计算》中提到, 电子元件应用中, 常见如下 5 种噪声来源:

1. 散弹噪声(shot noise, 白噪声, 在频谱中表现为平坦的噪声)
2. 热噪声(thermal noise, 白噪声, 在频谱中表现为平坦的噪声)
3. 闪烁噪声(flicker noise, 1/f 噪声)
4. 突发噪声(burst noise, 脉冲噪声)
5. 雪崩噪声(Avalanche noise, 反向击穿时才出现的噪声)

基本上每个放大器都有输入电压噪声和输入电流噪声两个指标。在频域, 通常其单位用 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 和 $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 来表征。如下图:

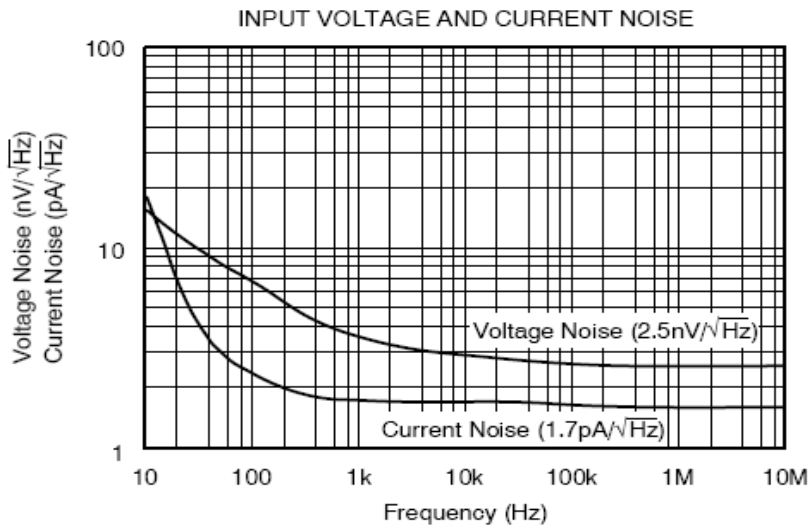


Figure 1 输入电压噪声和电流噪声曲线图例

按噪声种类来分, 其大致贡献在不同的频段如下:

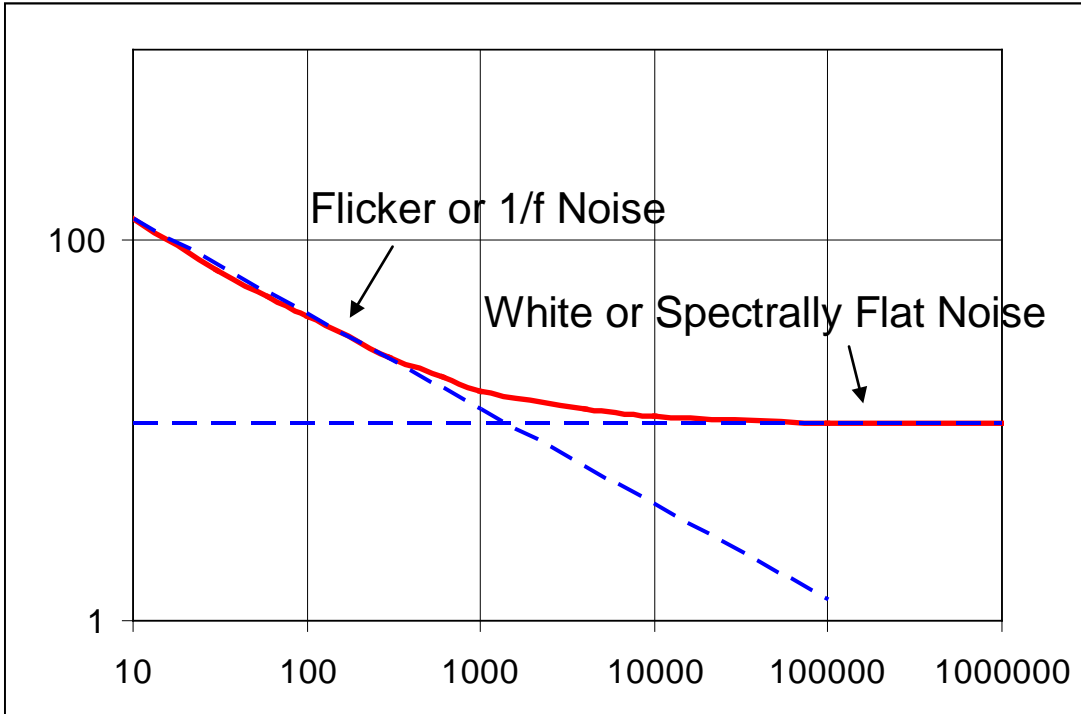


Figure 2 噪声种类分布图

如果把所有电容,电感都看做无噪声的器件,一个普通的全差分放大器的输出噪声按主要的贡献可以按如下图所示:

一般的配置是 $R1=R3$, $R2=R4$.

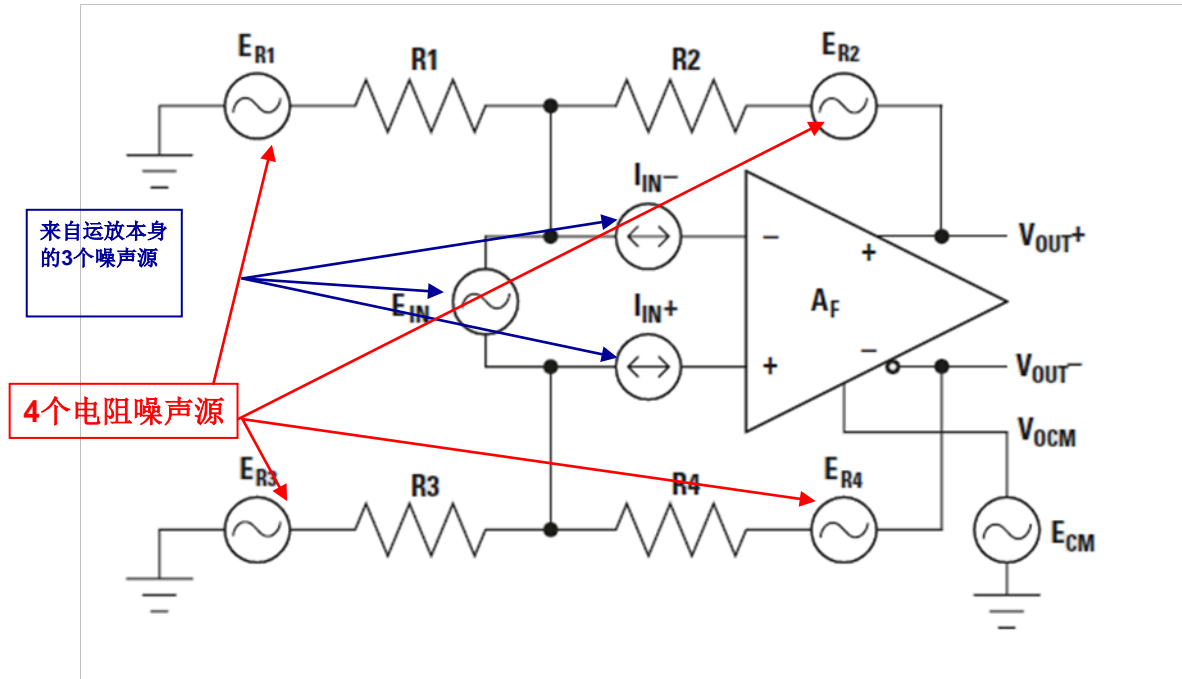


Figure 3 放大器噪声分量分解

其中电阻的噪声表征形式为 $\sqrt{4kTR}$, K 为玻尔兹曼常数, $K=1.3806505 \times 10^{-23} \text{J/K}$, T 为环境温度, 其单位是开尔文(K), $K=273.15 + \text{摄氏度}$. 由这些参数, 可以简化估计电阻噪声的电压噪声贡献公式如下, 其单位是 nV/rtHz

$$4 \times \sqrt{R_{(\text{in k}\Omega)}}$$

根据这个估计, 可以得到如下电阻值的电压噪声(单位: nV/rtHz):

R (Ω)	sqrt(4kTR)*1e9	4*sqrt(R in kΩ)
20	0.574	0.566
50	0.907	0.894
100	1.283	1.265
1k	4.056	4.000

在输出的噪声中, 上图的各个分量其贡献如下:

Source	Output noise Term
I_{N-}	$I_{N-} \times R_2$
I_{N+}	$I_{N+} \times R_4$

E_{IN}	$E_{IN} \times (1 + \frac{R_2}{R_1})$
E_{R1}	$\sqrt{\frac{4KT}{R_1}} R_2$
E_{R2}	$\sqrt{4KTR_2}$
E_{R3}	$\sqrt{\frac{4KT}{R_3}} R_4$
E_{R4}	$\sqrt{4KTR_4}$

输出的噪声是这些分量的均方和:

$$e_o = \sqrt{(I_{N-} \times R_2)^2 + (I_{N+} \times R_4)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \frac{4KTR_2^2}{R_1} + 4KTR_2 + \frac{4KTR_4^2}{R_3} + 4KTR_4}$$

一般指标书标注的 $I_{N-} = I_{N+}$, 另外 $R_2 = R_4$, $R_1 = R_3$, 合并后的结果如下:

$$\begin{aligned} e_o &= \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \frac{8KTR_2^2}{R_1} + 8KTR_2} \\ &= \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)} \end{aligned}$$

公式 1

类似的, 在有些应用场合, 比如和前级距离比较远的应用中, 需要加匹配电阻 R_T 作负载匹配, 结构就变成如下, 这里比前面多了两个噪声源。

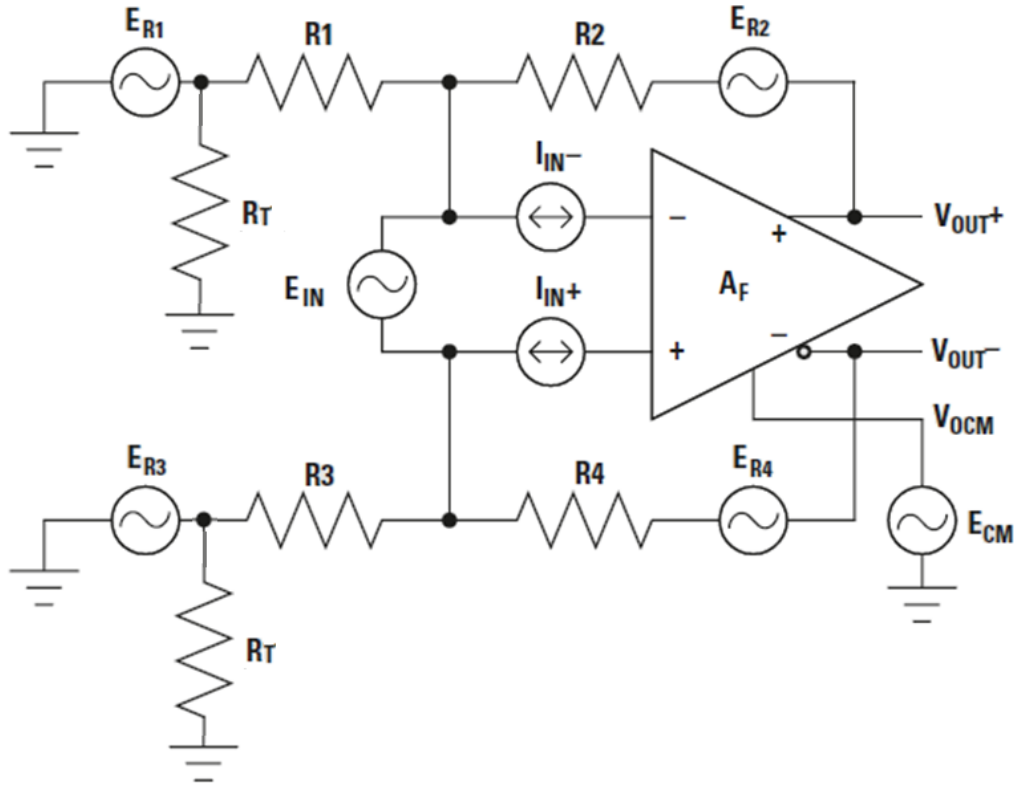


Figure 4 无匹配电阻全差分放大器

则噪声拆分如下：

Source	Output noise Term
I_{N-}	$I_{N-} \times R_2$
I_{N+}	$I_{N+} \times R_4$
E_{IN}	$E_{IN} \times (1 + \frac{R_2}{R_1})$
E_{R1}	$\sqrt{\frac{4KT}{R_1}} R_2$
E_{R2}	$\sqrt{4KTR_2}$
E_{R3}	$\sqrt{\frac{4KT}{R_3}} R_4$
E_{R4}	$\sqrt{4KTR_4}$
E_{RT}	$\sqrt{4KTR_T} \times \frac{R_2}{R_1}$

$$\sqrt{4KTR_T} \times \frac{R_4}{R_3}$$

输出的噪声是这些分量的均方和:

$$e_o = \sqrt{(I_{N-} \times R_2)^2 + (I_{N+} \times R_4)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \frac{4KTR_2^2}{R_1} + 4KTR_2 + \frac{4KTR_4^2}{R_3} + 4KTR_4 + 4KTR_T \times \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 4KTR_T \times \frac{R_2}{R_1}}$$

一般指标书标注的 $I_{N-} = I_{N+}$, 另外 $R_2 = R_4, R_1 = R_3$, 合并后的结果如下:

$$e_o = \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + \frac{8KTR_2^2}{R_1} + 8KTR_2 + 8KTR_T \times \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}$$

$$= \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 R_T}{R_1^2}\right)}$$

公式 2

需要注意的是, 这里得到的噪声是 rms 噪声, 且这里得到的噪声仅考虑了放大器环节引入的噪声。

3 信噪比计算

如前所述, 以上计算得到的结果是 nV/rtHz, 这个是表征噪声谱密度的量, 放大器除带来额外的噪声外, 还对信号带来增益, 在实际信号处理的应用中, 其实主要关注的是信噪比的变化, 也就是噪声系数, 这就需要计算信噪比,

在计算信噪比时, 需要引入噪声计算中很重要的一点: 带宽. 所以还需要考虑到带宽积分后的总噪声.

宽带应用中(带宽大于 1MHz 的场合), 在得到一定带宽内的电压噪声密度后, 可用如下公式转换成一定带宽内的总噪声:

$$en_{total} = (e_o) \sqrt{BW_n}$$

这里:

en_{total} = 宽带电压噪声, 单位是 nVrms

e_o = 宽带电压噪声密度, 单位一般是 nV/rtHz

BW_n = 特定系统的噪声带宽

请注意, 以上得到的总的噪声是 rms 值, 不是 pk-pk。

得到总的输出噪声后, 就可用得到输出信噪比, 假设输入信号为 A, 以上两种结构的 G 相同, 都为 $\frac{R_2}{R_1}$, 不同的是输出的噪声。

第一种结构的计算公式如下:

$$SNR_{output} = \frac{A \times G}{en_{total}} = \frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}}$$

公式 3

第二种结构的信噪比计算如下:

$$SNR_{output} = \frac{A \times G}{en_{total}} = \frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{IN-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 R_T}{R_1^2}\right)}}$$

公式 4

4 全差分放大器噪声系数计算

假定源阻抗为 R_s , 链路配置如下:

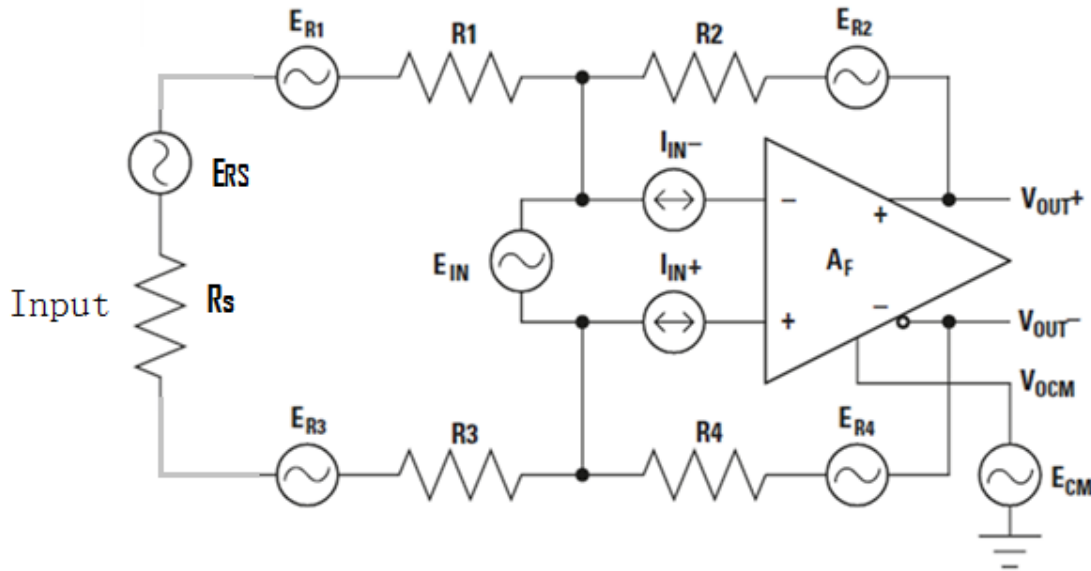


Figure 5 无匹配电阻全差分放大器

假定输入信号为 A 放大器增益为 G , 输入的噪声源为 R_s 的热噪声: $\sqrt{4KTR_s}$, 则输入的信噪比为:

$$SNR_{input} = \frac{A}{\sqrt{BW_n} * \sqrt{4KTR_s}}$$

$$SNR_{output} = \frac{A \times G}{\sqrt{en_{total}^2 + G^2 \times 4KTR_s}}$$

$$= \frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{IN-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + 4KTR_s \times \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_s R_2}{2R_1^2}\right)}} \\
 NF &= 10 \log \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} \\
 &= 10 \log \frac{\frac{A}{\sqrt{BW_n} * \sqrt{4KTR_s}}}{\frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_s R_2}{2R_1^2}\right)}}} \\
 &= 10 \log \frac{\sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_s R_2}{2R_1^2}\right)}}{\sqrt{4KTR_s} \times \frac{R_2}{R_1}}
 \end{aligned}$$

公式 5

同理，对于带阻抗匹配的全差分放大器，考虑进源阻抗的热噪声后，其输出信噪比计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 SNR_{output} &= \frac{A \times G}{en_{total}} \\
 &= \frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 R_T}{R_1^2}\right) + 4KTR_s \times \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2}} \\
 &= \frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 R_T}{R_1^2} + \frac{R_2 R_s}{2R_1^2}\right)}}
 \end{aligned}$$

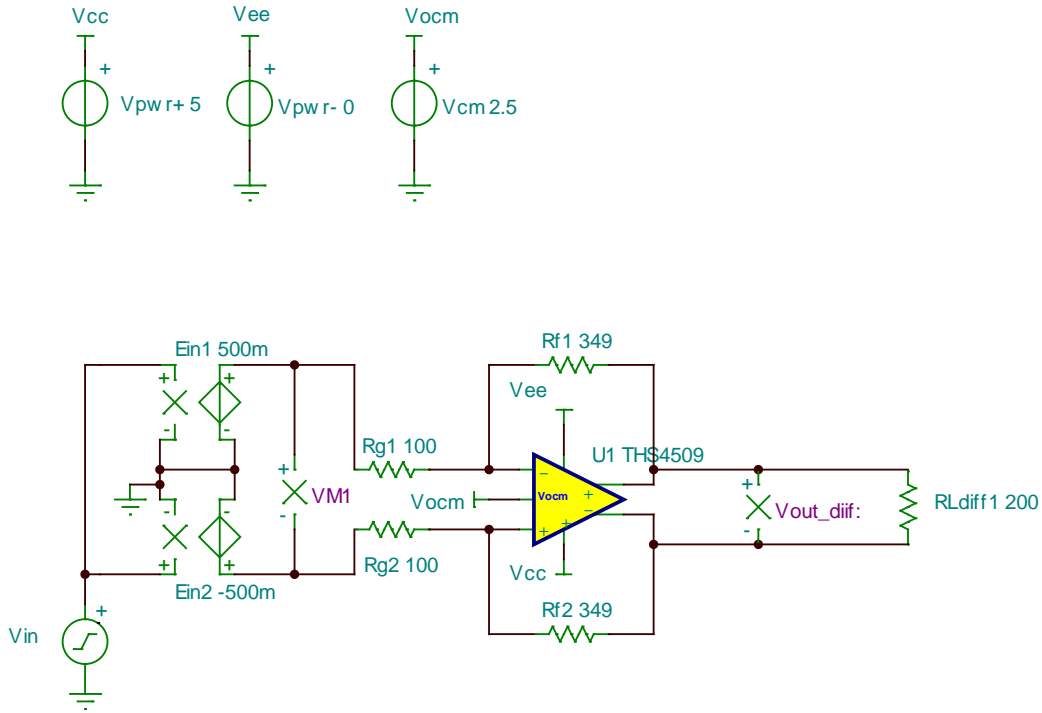
噪声系数计算结果如下：

$$\begin{aligned}
 NF &= 10 \log \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} \\
 &= 10 \log \frac{\frac{A}{\sqrt{BW_n} * \sqrt{4KTR_s}}}{\frac{A \times \frac{R_2}{R_1}}{\sqrt{BW_n} \times \sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 R_T}{R_1^2} + \frac{R_2 R_s}{2R_1^2}\right)}}} \\
 &= 10 \log \frac{\sqrt{2(I_{N-} \times R_2)^2 + E_{IN}^2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)^2 + 8KTR_2 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2 R_T}{R_1^2} + \frac{R_2 R_s}{2R_1^2}\right)}}{\frac{R_2}{R_1} * \sqrt{4KTR_s}}
 \end{aligned}$$

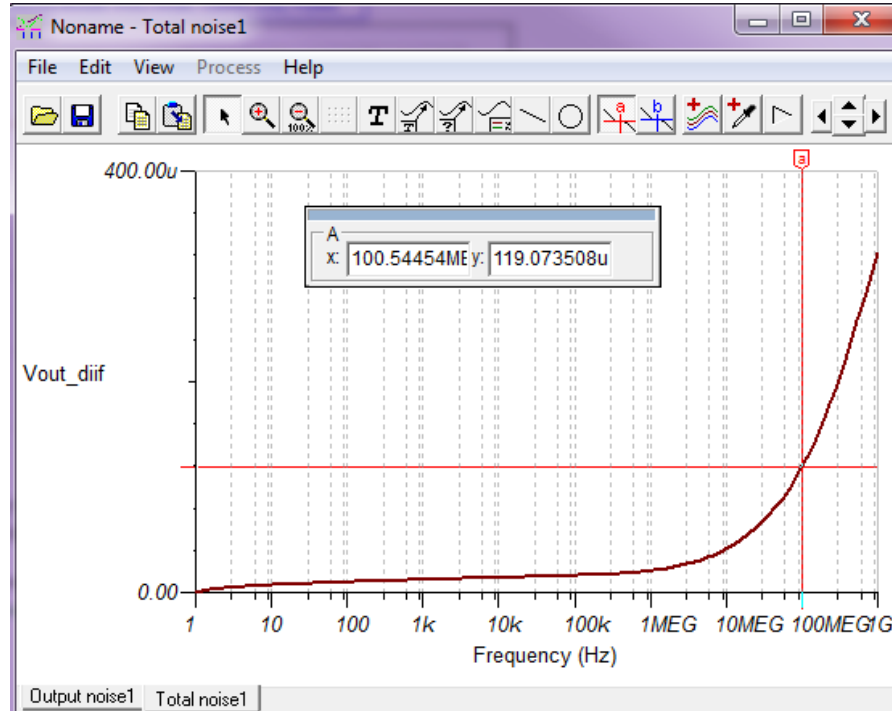
5 案例分析

我们可以通过比较 TINA 的输出噪声仿真结果和计算结果来看计算的准确性。

以 THS4509 如下配置电路为例, 假定输入信号源幅度 $\pm 0.5V$, 源阻抗 50 Ohm, 计算到 100M 带宽:



仿真得到 100MHz 带内总噪声为 119uV:



源阻抗 50 Ohm，噪声谱密度为 0.907nV/rtHz，积分 100MHz 带内的总噪声，得到 9.07uV，假设输入信号大小为 A，该链路增益计算出来为 3.49，则噪声系数计算结果如下：

$$NF = 10\log \frac{SNR_{input}}{SNR_{output}} = 10\log \frac{A/9.07}{3.49A/119} = 5.75dB$$

用前文的公式计算得出结果如下：NF=5.69dB，可以看出二者匹配得很好。

RS (ohm)	R1=R3 (ohm)	R2=R4 (ohm)	Iin=Iin+(nA/rtHz)	Ein(nV/rtHz)	signal gain	NF (dB)	4KT@290T
50	100	349	2.20E-03	1.9	3.49	5.69E+00	1.60E-20

6 总结

放大器的噪声计算需要考虑诸多因素，如放大器本身的噪声，外围匹配电阻带来的噪声，以及带后续滤波器宽带来的影响。通过上面所给的公式，就可以把放大器对整条链路的影响计算清楚。

7 附件



全差分放大器噪声系数计算.xls

8 参考资料

1. Jim Karki OpAmpNoiseAnalysis2007_JK 9-10-07.ppt
2. Op Amp Noise Calc_Sim_Meas_TG92309[1].pdf

有关 TI 设计信息和资源的重要通知

德州仪器 (TI) 公司提供的技术、应用或其他设计建议、服务或信息，包括但不限于与评估模块有关的参考设计和材料（总称“TI 资源”），旨在帮助设计人员开发整合了 TI 产品的应用；如果您（个人，或如果是代表贵公司，则为贵公司）以任何方式下载、访问或使用了任何特定的 TI 资源，即表示贵方同意仅为该等目标，按照本通知的条款进行使用。

TI 所提供的 TI 资源，并未扩大或以其他方式修改 TI 对 TI 产品的公开适用的质保及质保免责声明；也未导致 TI 承担任何额外的义务或责任。TI 有权对其 TI 资源进行纠正、增强、改进和其他修改。

您理解并同意，在设计应用时应自行实施独立的分析、评价和判断，且应全权负责并确保应用的安全性，以及您的应用（包括应用中使用的 TI 产品）应符合所有适用的法律法规及其他相关要求。就您的应用声明，您具备制订和实施下列保障措施所需的一切必要专业知识，能够 (1) 预见故障的危险后果，(2) 监视故障及其后果，以及 (3) 降低可能导致危险的故障几率并采取适当措施。您同意，在使用或分发包含 TI 产品的任何应用前，您将彻底测试该等应用和该等应用所用 TI 产品的功能而设计。除特定 TI 资源的公开文档中明确列出的测试外，TI 未进行任何其他测试。

您只有在为开发包含该等 TI 资源所列 TI 产品的应用时，才被授权使用、复制和修改任何相关单项 TI 资源。但并未依据禁止反言原则或其他法律授予您任何 TI 知识产权的任何其他明示或默示的许可，也未授予您 TI 或第三方的任何技术或知识产权的许可，该等许可包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权或与使用 TI 产品或服务的任何整合、机器制作、流程相关的其他知识产权。涉及或参考了第三方产品或服务的信息不构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用 TI 资源可能需要您向第三方获得对该等第三方专利或其他知识产权的许可。

TI 资源系“按原样”提供。TI 兹免除对 TI 资源及其使用作出所有其他明确或默示的保证或陈述，包括但不限于对准确性或完整性、产权保证、无复发故障保证，以及适销性、适合特定用途和不侵犯任何第三方知识产权的任何默认保证。

TI 不负责任何申索，包括但不限于因组合产品所致或与之有关的申索，也不为您辩护或赔偿，即使该等产品组合已列于 TI 资源或其他地方。对因 TI 资源或其使用引起或与之有关的任何实际的、直接的、特殊的、附带的、间接的、惩罚性的、偶发的、从属或惩戒性损害赔偿，不管 TI 是否获悉可能会产生上述损害赔偿，TI 概不负责。

您同意向 TI 及其代表全额赔偿因您不遵守本通知条款和条件而引起的任何损害、费用、损失和/或责任。

本通知适用于 TI 资源。另有其他条款适用于某些类型的材料、TI 产品和服务的使用和采购。这些条款包括但不限于适用于 TI 的半导体产品 (<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm>)、[评估模块](http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm)和样品 (<http://www.ti.com/sc/docs/sampters.htm>) 的标准条款。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司