

关于模拟噪声分析的11个误区

Scott Hunt
ADI公司

摘要

噪声是模拟电路设计的一个核心问题，它会直接影响能从测量中提取的信息量，以及获得所需信息的经济成本。遗憾的是，关于噪声有许多混淆和误导信息，可能导致性能不佳、高成本的过度设计或资源使用效率低下。本文阐述关于模拟设计中噪声分析的11个由来已久的误区。

1. 降低电路中的电阻值总是能改善噪声性能

噪声电压随着电阻值提高而增加，二者之间的关系已广为人知，可以用约翰逊噪声等式来描述： $e_{rms} = \sqrt{4kTRB}$ ，其中 e_{rms} 为均方根电压噪声， k 为玻尔兹曼常数， T 为温度（单位为K）， R 为电阻值， B 为带宽。这让许多工程师得出结论：为了降低噪声，应当降低电阻值。虽然这常常是正确的，但不应就此认定它是普遍真理，因为在有些例子中，较大的电阻反而能够改善噪声性能。举例来说，在大多数情况下，测量电流的方法是让它通过一个电阻，然后测量所得到的电压。根据欧姆定律 $V = I \times R$ ，产生的电压与电阻值成正比，但正如上式所示，电阻的约翰逊噪声与电阻值的平方根成正比。由于这个关系，电阻值每提高一倍，信噪比可以提高3 dB。在产生的电压过大或功耗过高之前，此趋势一直是正确的。

2. 所有噪声源的噪声频谱密度可以相加，带宽可以在最后计算时加以考虑

将多个噪声源的噪声频谱密度(nV/\sqrt{Hz})加总（电压噪声源按平方和开根号），而不分别计算各噪声源的rms噪声，可以节省时间，但这种简化仅适用于各噪声源看到的带宽相同的情况。如果各噪声源看到的带宽不同，简单加总就变成一个可怕的陷阱。图1显示了过采样系统中的情况。从噪声频谱密度看，系统总噪声似乎以增益放大器为主，但一旦考虑带宽，各级贡献的rms噪声其实非常相近。

3. 手工计算时必须包括每一个噪声源

设计时有人可能忍不住要考虑每一个噪声源，但设计工程师的时间是宝贵的，这样做在大型设计中会非常耗时。全面的噪声计算最好留给仿真软件去做。不过，设计人员如何简化设计过程需要的手工噪声计算呢？答案是忽略低于某一阈值的不重要噪声源。如果一个噪声源是主要噪声源（或任何其他折合到同一点的噪声源）的 $1/5$ e_{rms} 值，其对总噪声的贡献将小于2%，可以合理地予以忽略。设计人员常会争论应当把该阈值选在哪里，但无论是 $1/3$ 、 $1/5$ 还是 $1/10$ （分别使总噪声增加5%、2%和0.5%），在设计达到足以进行全面仿真或计算的程度之前，没必要担心低于该阈值的较小噪声源。

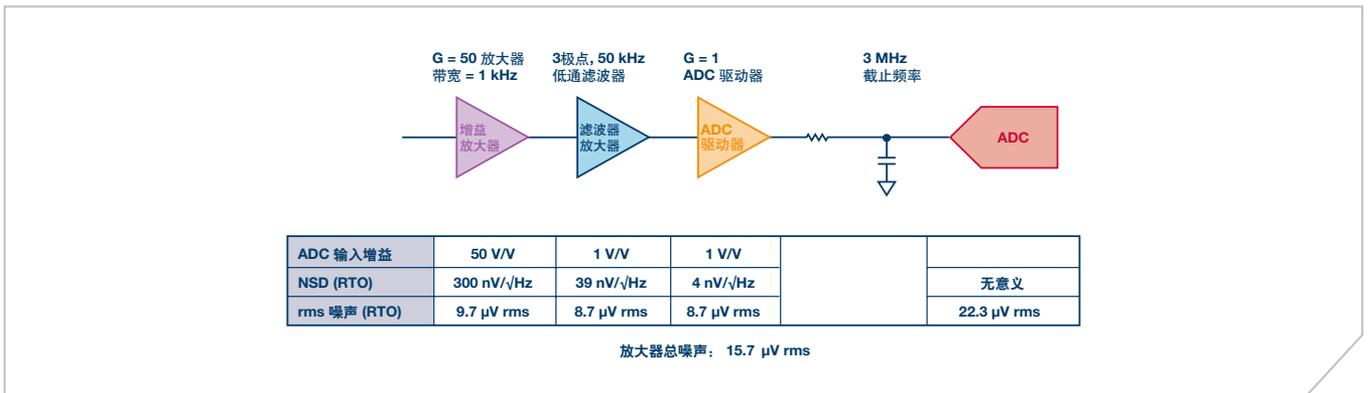


图1 使用rms噪声而不是频谱密度进行噪声计算的理由

4. 应挑选噪声为ADC $1/10$ 的ADC驱动器

模数转换器(ADC)数据手册可能建议利用噪声为ADC $1/10$ 左右的低噪声ADC驱动放大器来驱动模拟输入。但是,这并非总是最佳选择。在一个系统中,从系统角度权衡ADC驱动器噪声常常是值得的。

首先,如果系统中ADC驱动器之前的噪声源远大于ADC驱动器噪声,那么选择超低噪声ADC驱动器不会给系统带来任何好处。换言之,ADC驱动器应与系统其余部分相称。

其次,即使在只有一个ADC和一个驱动放大器的简单情况下,权衡噪声并确定其对系统的影响仍是有利的。通过具体数值可以更清楚地了解其中的理由。考虑一个系统采用16位ADC,其SNR值相当于100 $\mu\text{V rms}$ 噪声,用作ADC驱动器的放大器具有10 $\mu\text{V rms}$ 噪声。按和方根加总这些噪声源,得到总噪声为100.5 $\mu\text{V rms}$,非常接近ADC单独的噪声。可以考虑下面两个让放大器和ADC更为平衡的方案,以及它们对系统性能的影响。如果用类似的18位ADC代替16位ADC,前者的额定SNR相当于40 $\mu\text{V rms}$ 噪声,则总噪声变为41 $\mu\text{V rms}$ 。或者,如果保留16位ADC,但用更低功耗的放大器代替上述驱动器,该放大器贡献30 $\mu\text{V rms}$ 噪声,则总噪声变为104 $\mu\text{V rms}$ 。就系统性能而言,以上两种方案之一可能是比原始组合更好的选择。关键是要权衡利弊以及其对系统整体的影响。

5. 直流耦合电路中必须始终考虑1/f噪声

1/f噪声对超低频率电路是一大威胁,因为许多常用噪声抑制技术,像低通滤波、均值和长时间积分等,对它都无效。然而,许多直流电路的噪声是以白噪声源为主,1/f噪声对总噪声无贡献,因而不用计算1/f噪声。为了弄清这种效应,考虑一个放大器,其1/f噪声转折频率 f_{nc} 为10 Hz,宽带噪声为10 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。对于各种带宽,计算10秒采集时间内包含和不含1/f噪声两种情况下的电路噪声,以确定不考虑1/f噪声的影响。当带宽为 f_{nc} 的100倍时,宽带噪声开始占主导地位;当带宽超过 f_{nc} 的1000倍时,1/f噪声微不足道。现代双极性放大器可以具有比10 Hz低很多的噪声转折频率,零漂移放大器则几乎完全消除了1/f噪声。

表1. 1/f噪声影响与电路带宽的关系示例

带宽(Hz)	带宽/ f_{nc}	宽带 (nV rms)	1/f 噪声 (nV rms)	总噪声 (nV rms)	1/f 引起的 增加
100	10	100	220	240	140%
300	30	170	250	310	77%
1000	100	320	290	430	36%
3000	300	550	330	640	16%
10000	1000	1k	360	1.1k	6%
30000	3000	1.7k	400	1.8k	3%
100000	10000	3.2k	440	3.2k	1%

6. 因为1/f噪声随着频率降低而提高,所以直流电路具有无限大噪声

虽然直流对电路分析是一个有用的概念,但真实情况是,如果认为直流是工作在0 Hz,那么实际上并不存在这样的事情。随着频率越来越低,趋近0 Hz,周期会越来越长,趋近无限大。这意味着存在一个可以观测的最低频率,哪怕电路在理论上是直流响应。该最低频率取决于采集时长或孔径时间,也就是观测器件输出的时长。如果一名工程师开启器件并观测输出100秒,则其能够观测到的最低频率仿佛将是0.01 Hz。这还意味着,此时可以观测到的最低频率噪声也是0.01 Hz。

现在通过一个数值例子来展开说明,考虑一个DC至1 kHz电路,连续监控其输出。如果在前100秒观测到电路中一定量的1/f噪声,从0.01 Hz至1 kHz(5个十倍频程的频率),则在30年(约1 nHz,12个十倍频程)中观测到的噪声量可计算为 $\sqrt{12/5} = 1.55$,或者说比前100秒观测到的噪声多55%。这种增加几乎没有任何意义,即使考虑最差情况——1/f噪声持续增加到1 nHz(目前尚无测量证据)——也是如此。理论上,如果没有明确定义孔径时间,1/f噪声可以计算到一个等于电路寿命倒数的频率。实践中,电路在如此长时间内的偏差以老化效应和长期漂移为主,而不是1/f噪声。许多工程师为直流电路的噪声计算设定0.01 Hz或1 mHz之类的最低频率,以使计算切合实际。

7. 噪声等效带宽会使噪声倍增

噪声等效带宽(NEB)对噪声计算是一个很有用的简化。由于截止频率以上的增益不是0,某些超出电路带宽的噪声会进入电路中。NEB是计算的理想砖墙滤波器的截止频率,它会放入与实际电路相同的噪声量。NEB大于-3 dB带宽,已针对常用滤波器类型和阶数进行计算,例如:对于单极点低通滤波器,它是-3 dB带宽的1.57倍,写成公式就是 $NEB_{1-pole} = 1.57 \times BW_{3dB}$ 。然而,关于应把该乘法因数放在噪声公式中的何处,似乎一直存在混淆。请记住,NEB调节的是带宽,而非噪声,因此应在根号下面,如下式所示:

$$e_{rms} = NSD \times \sqrt{NEB_{1-pole}} = NSD \times \sqrt{1.57 \times BW_{3dB}}$$

8. 电压噪声最低的放大器是最佳选择

选择运算放大器时,电压噪声常常是设计人员唯一考虑的噪声规格。其实电流噪声同样不能忽略。除非在有输入偏置电流补偿等特殊情况下,电流噪声通常是输入偏置电流的散粒噪声: $i_n = \sqrt{2 \times q \times I_B}$ 。电流噪声通过源电阻转换为电压,因此,如果放大器输入端前面有一个大电阻,那么电流噪声对系统噪声的贡献可能大于电压噪声。电流噪声会成为问题的典型情况是使用低噪声运算放大器且其输入端串联一个大电阻时。例如,考虑低噪声运算放大器ADA4898-1,其输入端串联一个10 k Ω 电阻。ADA4898-1的电压噪声为0.9 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,10 k Ω 电阻的噪声为12.8 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,2.4 $\text{pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 电流噪声乘以10 k Ω 电阻等于24 $\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,这是系统中的最大噪声源。在类似这种电流噪声占主导地位的情况下,常常可以找到电流噪声较低的器件,从而降低系统

噪声；对精密放大器尤其如此，不过高速FET输入运算放大器对高速电路也可能有帮助。例如，若不选择ADA4898-1（从而得不到电压噪声低至0.9 nV/√Hz的好处），可以选择AD8033或ADA4817-1等JFET输入放大器。

9. 在第一级提供大部分增益可实现最佳噪声性能

为了实现更好的噪声性能，常常建议在第一级提供增益，这是对的，因为信号会比随后各级的噪声要大。然而，这样做的缺点是会削弱系统能够支持的最大信号。某些情况下，与其在第一级提供很大一部分增益（虽然这样可以提高测量灵敏度，但会限制动态范围），不如限制第一级提供的增益，并用高分辨率进行数字化处理，使灵敏度和动态范围都达到最大。

10. 给定阻值时，所有类型电阻的噪声相同

电阻的约翰逊噪声非常重要，以至于我们需要一个简单的公式来计算某一电阻在某一温度下的噪声。然而，约翰逊噪声是电阻中可以观测到的最小噪声，而且并非所有类型的电阻都有同等噪声。还有过量噪声，它是电阻中1/f噪声的来源之一，与电阻类型密切相关。过量噪声（有时候也误称为电流噪声）与电流在非连续介质中流动的方式有关。它被规定为噪声指数(NI)，单位为dB，以每十倍频程1 μV rms/V_{dc}为基准。这意味着：如果一个0 dB NI的电阻上有1 V_{dc}电压，则给定十倍频程时的过量噪声为1 μV rms。碳和厚膜电阻的NI最高，可能高达+10 dB左右，在信号路径的噪声敏感部分中最好避免使用。薄膜电阻一般要好得多，约为-20 dB；金属箔和绕线电阻可以低于-40 dB。

11. 给定足够长的采集时间，均值法可将噪声降至无限小

一般认为均值法可将噪声降低均值数的平方根倍。这在一定条件下是成立的，即NSD必须保持平坦。然而，在1/f范围内和其他几种情况下，这种关系不成立。考虑在一个以恒定频率 f_s 采样的系统中使用均值法，对n个样本求均值并进行1/n抽取，返回m个抽取样本。取n个平均值会将抽取后的有效采样速率变为 f_s/n ，系统看到的有效最大频率降低n倍，白噪声降低 \sqrt{n} 倍。然而，获得m个样本的时间也会延长n倍，因此系统可以看到的最低频率也会降低n倍（记住，没有0 Hz这种事）。取的均值数越多，频段上的这些最大和最小频率就越往下移。一旦最大和最小频率均在1/f范围内，总噪声便仅取决于这些频率之比，再提高均值数对降低噪声没有进一步的好处。同样的道理也适用于多斜率等积分ADC的长积分时间。除了数学上的限制以外，还存在其他实际限制。例如，若量化噪声是主要噪声源，使得直流输入电压下的ADC输出为一个无闪烁的恒定码，则任何数量的均值都会返回同一个码。

参考文献

Motchenbacher, C. D.和J. A. Connelly。低噪声电子系统设计。Wiley, 1993年。

作者简介

Scott Hunt是ADI公司（美国马萨诸塞州威明顿市）线性和精密技术部门的系统应用工程师，主要从事精密仪器仪表工作。Scott于2011年作为一名产品应用工程师加入ADI公司，负责仪表放大器高性能集成式精密放大器。他拥有伦斯勒理工学院电气和计算机工程学士学位。Scott荣获ADI公司2015年杰出技术写作奖和2015年杰出计划支持奖。联系方式：scott.hunt@analog.com。

在线支持社区

访问ADI在线支持社区，与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。



请访问ezchina.analog.com

全球总部

One Technology Way
P.O. Box 9106, Norwood, MA
02062-9106 U.S.A.
Tel: (1 781) 329 4700
Fax: (1 781) 461 3113

大中华区总部

上海市浦东新区张江高科技园区
祖冲之路 2290 号展想广场 5 楼
邮编: 201203
电话: (86 21) 2320 8000
传真: (86 21) 2320 8222

深圳分公司

深圳市福田中心区
益田路与福华三路交汇处
深圳国际商会中心
4205-4210 室
邮编: 518048
电话: (86 755) 8202 3200
传真: (86 755) 8202 3222

北京分公司

北京市海淀区西小口路 66 号
中关村东升科技园
B-6 号楼 A 座一层
邮编: 100191
电话: (86 10) 5987 1000
传真: (86 10) 6298 3574

武汉分公司

湖北省武汉市东湖高新区
珞瑜路 889 号光谷国际广场
写字楼 B 座 2403-2405 室
邮编: 430073
电话: (86 27) 8715 9968
传真: (86 27) 8715 9931

©2016 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners. Ahead of What's Possible is a trademark of Analog Devices.
TA14962sc-0-B/16

analog.com/cn

