

该噪声会让您夜不能眠

作者: Gustavo Castro

分享    

问:
我能测量的最小电压是多少?



答:
我作为工程师的第一个项目是测量生产中的6½位数字万用表的建立时间。这似乎没什么难度,我只需弄清最终建立值,然后反向求解可检测的最小变化是多少。一切准备妥当,我输入短路,开始增加孔径时间。同预期一样,噪声开始下降,达到一定程度后便停止下降,基线一直前进。我已经消除了外部噪声源、热电动势,甚至空调通风口的气流声。这些随机波动的噪声来自电路内部。但在消除了大部分宽带噪声之后,还有一种噪声残留不去。任何做过这种实验的人都会注意到这一限制。与常理相反的是,我们发现晚些停止下降的噪声比早些停止时还要高。发生这种现象时,我们便知道测量处于1/f噪声区域。

这种1/f噪声(或闪烁噪声)是精密测量最普遍的限制。之所以取这个名称,是因为其功率谱密度与频率成反比,如下式所示:

$$\text{噪声功率}(f) = \left(\frac{k}{f^\alpha}\right)$$

其中, k为幅度系数, α为大于0的指数,但在基本形式中, α = 1。该噪声最终会小于宽带噪声,产生一个转折频率,如图1所示。在电子电路之外的领域,比如地球转动、经济指标和生物系统等,也已发现此类噪声存在的证据。虽然最聪明的科学家也不知道其根本原因是什么,但若要进行低电平测量,我们必须懂得如何减轻其影响。

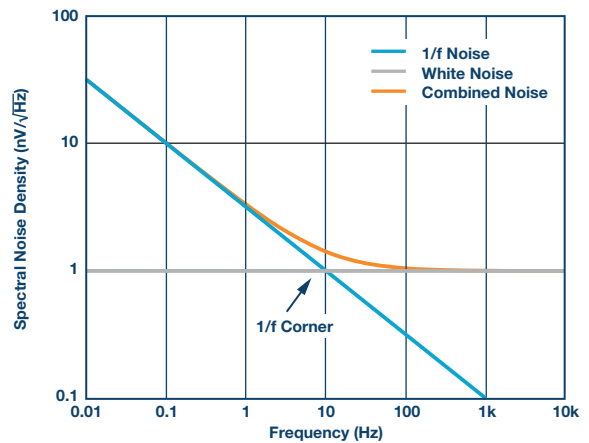


图1. 低噪声电子器件的典型噪声谱密度图

让我们从现成器件开始。现有最高灵敏度的ADC芯片是AD7177-2,其在5 SPS时的噪声为200 nV p-p。但是,在ADC之前添加一定的增益,便可实现更好的性能。我们需要一种既有低噪声特性又有低1/f转折频率的放大器。最简单的办法是查看数据手册上的0.1 Hz到10 Hz噪声规格,它相当于以10 Hz带宽记录测量结果10秒。

如果您留意的话,可能知道运算放大器AD797被用于人类首次探测引力波的LIGO实验。AD797在0.1 Hz到10 Hz范围的噪声规格为50 nV p-p (8 nV rms)。最低噪声仪表放大器AD8428只有40 nV p-p (7 nV rms)。这些放大器采用双极性工艺制造,如果配合较大源电阻(包括增益电阻)使用,其电流噪声可能相当大,而且电流噪声也有1/f转折频率!另外别忘了,电阻本身可能产生与电流相关的过量噪声,这是由其构造决定的。金属箔和线绕电阻的噪声系数往往是最底的。

避开1/f噪声的一个巧妙方法是将信号调制到没有1/f噪声的区域,然后进行解调。这一招被称为“斩波稳定”,已使用数十年,它把1/f噪声移动到其他频段,以便能够将其轻松滤除。诸如ADA4528-1和ADA4522-1之类的零漂移运算放大器利用这种技术(及其他方式),获得了大约100 nV p-p (16 nV rms)的0.1 Hz至10 Hz噪声,其中大部分是由白噪声引起的。一个更简单的办法是并联多个放大器以达到更低的噪声水平,因为这相当于对多个不相关的噪声源求均值。

基本要旨是您可以利用现成器件检测到比10 nV低一点的信号;如果并联多个放大器,检测精度可接近1 nV水平。要检测比这还小的信号,必须采用特殊技术(成本可能非常高)。但不管怎么做,1/f都会以某种方式重新出现。

那么,要是长时间记录多个测量结果,情况会怎样? $1/f$ 噪声是否会
让这成为不可能完成的任务? 这么说吧:即使从宇宙大爆炸那一刻
起开始记录AD797噪声,一直到大家读到这篇文章时为止ⁱⁱ,其结果
也只比最近10秒测得的结果大3倍ⁱⁱⁱ。因此,我可不会为此而失眠。

参考文献

ⁱ数字万用表的孔径时间是指信号求积分或均值的时间间隔。

ⁱⁱ假设自宇宙大爆炸以来已经过4.32e17秒。

ⁱⁱⁱ这只是假设,没有证据表明 $1/f$ 噪声在如此长的时间内会遵循该曲线。当测量间隔延长时,老化和其他因素就会开始产生影响。

Gerstenhaber, Moshe, Rayal Johnson和Scott Hunt。“[无烦恼,高增益:构建具有纳伏级灵敏度的低噪声仪表放大器](#)”。*模拟对话*,第49卷,2015年5月。

Horowitz, Paul和Winfield Hill。*电子的艺术*。剑桥大学出版社,1989年。

Motchenbacher, C. D.和F. C. Fitchen。*低噪声电子设计*。John Wiley & Sons, Inc., 1973年。

Seifert, Frank。“[电阻电流噪声测量](#)”。开放获取LIGO文档, LIGO-T0900200。

“[宇宙中传来的神秘嘈声](#)”。ADI公司。

van der Ziel, Aldert。“电子器件 $1/f$ 噪声的统一表示:基波 $1/f$ 噪声源”。*IEEE论文集*,第76卷第3期,1988年3月。

Weissman, M. B。“凝聚态物质中的 $1/f$ 噪声和其他慢速非指数式动力学”。*现代物理评论*,1988年。

West, Bruce和Michael Shlesinger。“自然现象中的噪声”。*美国科学家*,78(1),1990年。

Gustavo Castro [gustavo.castro@analog.com] 是马萨诸塞州威明顿市线性和精密技术部的应用工程师。其主要兴趣是精密信号调理和电子仪器的模拟与混合信号设计。2011年加入ADI公司之前,他在National Instruments从事高性能数字万用表和精密直流源设计工作达10年。Gustavo拥有墨西哥蒙特利技术学院电子系统学士学位和美国东北大学微系统与材料硕士学位。他拥有三项专利。



Gustavo Castro

该作者的其它文章:
[电流检测常识](#)
[第50卷第3期](#)