

为运算放大器噪声质量控制缩短测试时间

作者: Mohamed Tabris, 高精度放大器测试工程师

Richard Barthel, 高精度放大器表征与验证工程师

简介

工业和高精度应用要求对非确定性噪声的严格控制。也许需要某些测试来确保系统质量,这是因为噪声典型值表示一定数量的器件中某一参数的平均值,而并不能保证单个器件不会超过特定水平值。

未经噪声参数品质保证的器件可进行快速测试以确保质量。针对运算放大器(运放)的大多数产品数据表在0.1Hz至10Hz的范围内规定一个1/f噪声典型值(也被称为闪变噪声)。按惯例,在这些情况下,器件测试需要成百或上千秒的时间,从而大大地增加了上市时间和生产成本。

此外,在宽频带范围内测得的噪声密度也许并不是适用于所有系统或应用。为了解决这个问题,本文使用现有的理论和实验数据来系统地研究快速测试1/f区域任一部分内的噪声的测试方法。而且,还使用德州仪器(TI)生产的OPA1652低噪声音频运放来比较理论值与实际测量结果。

说明和原理

标准运放的电压噪声密度曲线(图表1)有两个区域:被称为宽频带噪声区域的频率无关区域;以及被称为1/f噪声区域的频率相关区域。1/f噪声区域是指1/f噪声,而1/f噪声,正如其名称所表示的那样,显示为一个相对于频率的1/f斜坡。较低频率区间内的主要噪声为1/f噪声,而在较高频率范围内此类噪声减少。这意味着它的测量时间要长于宽频带噪声。由于低频信号的周期在时域内的完成时间较长,所以它的测量时间也比较长。宽频带噪声等于1/f噪声的那一点上的频率被称为角频率。双极和CMOS放大器的角频率会因架构和工艺的不同而有所不同。通常情况下,双极放大器的角频率要低于CMOS放大器的角频率。

这篇文章将噪声显示为一个密度函数,其中的电压噪声密度单位为 $V/\sqrt{\text{Hz}}$ 。可通过将两个感兴趣的频率之间(f_1 和 f_2)的功率频谱密度进行积分来计算出现的电压噪声,这一点与概率密度函数不同。将 e_n 用作噪声频谱密度来计算综合电压噪声:

$$V_{\text{RMS}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} (e_n)^2 df} \quad (1)$$

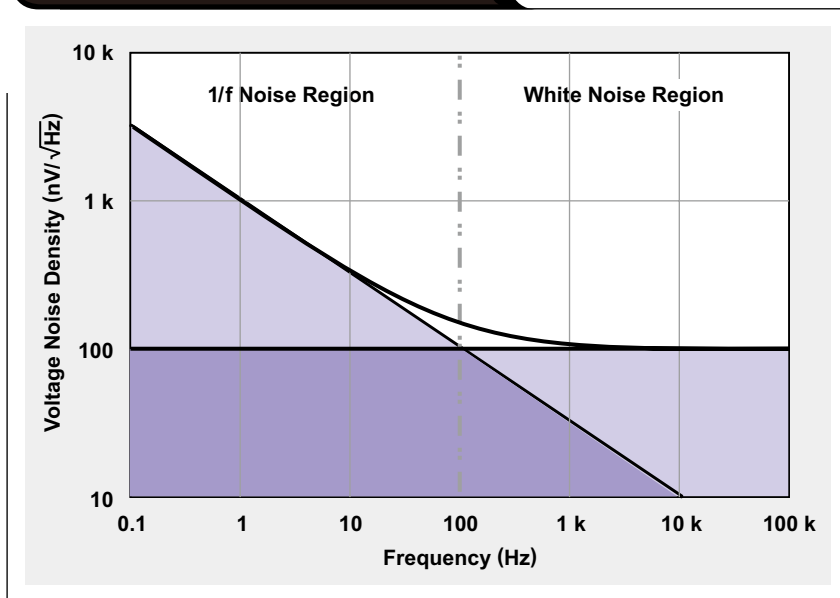
通过分别取宽频带分量和1/f分量RMS值平方和的平方根可获得运放的宽频带噪声和1/f噪声的组合(等式2)。由于宽频带噪声和1/f噪声被模拟为无关联噪声源,这一点是有可能实现的。

总体RMS电压噪声为:

$$E_{n_T} = \sqrt{E_{nf}^2 + E_{nBB}^2}, \quad (2)$$

其中, E_{nf} = 1/f RMS 噪声 [V_{RMS}], 而 E_{nBB} = 宽频带RMS 噪声 [V_{RMS}]。

图表1.电压噪声密度曲线



在数据表中，1/f区域中的噪声通常表示为一个频率范围内的峰值到峰值噪声，而宽频带噪声的表示形式为特定频率上的电压噪声密度。噪声频谱密度的单位为 V/\sqrt{Hz} 。通过使用以下等式，可以计算出单个噪声分量，前提是噪声频率密度固定。

综合宽频带噪声（宽频带噪声在频率范围内保持恒定）：

$$E_{nBB} = e_{BB} \times \sqrt{BW_n}, \quad (3)$$

其中， e_{BB} = 宽频带频谱噪声密度 [V/\sqrt{Hz}]，而 BW_n = 带宽 [Hz]。

综合1/f噪声分量：

$$E_{nf} = e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln(f_H / f_L)}, \quad (4)$$

在这里， $e_{f_{norm}}$ = 等式5中，1Hz时的标准化噪声密度 [V/\sqrt{Hz}]， f_H = 频带上限 [Hz]，而 f_L = 频带下限（典型值0.1Hz） [Hz]。1/f区域中，1Hz时的标准化噪声密度为：

$$e_{f_{norm}} = e_{known} \times \frac{\sqrt{f_{known}}}{\sqrt{1Hz}}, \quad (5)$$

其中， e_{known} = 1/f区域中的已知电压噪声密度 [V/\sqrt{Hz}]，而 f_{known} = 噪声密度已知的1/f区域中的频率 [Hz]。

详细的计算方法显示在参考文献1中，此计算方法已经超出了本文的范围。

问题

在噪声敏感应用中，选择一个噪声尽可能小的运放对于保持准确度和精度十分关键。当为应用选择合适的运放时，也许需要进行仔细筛选来消除任何异常值。对于宽频带噪声的测试可以很快进行，这是因为kHz周期在几毫秒的时间内即可测得。然而，对于1/f噪声分量并非如此。对于1/f噪声区域的测量会需要0.1秒直到几分钟的时间，这取决于平均带宽和电平。这是因为0.1Hz信号的一个周期至少需要10秒钟才能完成。当进行平均时，所需时间会变得更长。此外，当执行快速傅里叶变换 (FFT) 来计算噪声密度时，所需的分辨率带宽也许会产生很多小时的测试时间。这就要求一个快速且精确的方法来外推出运放的1/f噪声。

一个快速且简单的解决方案

测试放大器1/f分量的最快速方法是使用等式4和等式5来外推。1/f综合噪声与两个频率 (f_L , f_H) 比的自然对数的平方根成正比，在这个频率范围内1/f噪声是确定的。更进一步说，可以认为1/f RMS噪声分量取决于两个频率： f_H 和 f_L 之间的比率。下面给出了一个计算示例，其方法是在确定电压噪声密度曲线的情况下计算1/f RMS噪声（图表1）。

为了在两个频率范围内，即1Hz至10Hz以及10Hz至100Hz，计算1/f RMS噪声，假定在1Hz上有一条具有已知经标准化噪声密度 $e_{f_{norm}}$ 的理想1/f曲线。这两个范围都位于噪声频谱密度曲线（图表1）的1/f其主导作用的部分内。这样就确保来自宽频带噪声部分的误差可以忽略不计。等式4被用来比较针对两个范围的噪声：

$$\begin{aligned} E_{nf} &= e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln(f_N / f_L)} \\ E_{nf1} &= e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln(10/1)} \text{ and } E_{nf2} = e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln(100/10)} \\ E_{nf1} &= e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln 10} \text{ and } E_{nf2} = e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln 10} \\ E_{nf1} &= e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln 10} = E_{nf2} = e_{f_{norm}} \times \sqrt{\ln 10} \end{aligned}$$

请注意，针对 E_{nf1} 和 E_{nf2} 的等式是如何表示同一个针对1/f RMS噪声的值。这是因为这个等式取决于两个频率限值的比，而非频率本身。适用此经验法则需要三个关键条件：

- 1、1/f曲线必须接近功率频谱上的1/f或者噪声频谱上的 $1/\sqrt{f}$ ，
- 2、关注的区域必须在1/f起主导作用的噪声频谱区域内，并且
- 3、比率必须一样。

通过使用这一方法，只要上面提到的频率在1/f起主导作用的区域内，我们就可以通过仔细筛选10Hz到1kHz范围内的运放来估算0.1Hz到10Hz范围内的1/f RMS噪声。这个频率方面的变化将器件的测试时间缩短100倍，甚至更多。可在100毫秒内获得一个样本，而不用为此等待10秒钟。在使用CMOS放大器时节省的时间最多，这是因

为它的角频率要大于双极放大器的角频率。图表2和3中的图显示放大器的峰值到峰值噪声水平在不同的频率范围内保持不变，前提是频率比相等，并且测量值在 $1/f$ 为主要噪声因素的区域。

结论

外推 $1/f$ 噪声分量的技巧只有在所有频率处于 $1/f$ 为主要噪声因素的区域才有效。只要为外推选择的带宽足够远离角频率，这个技巧就具有极高的执行准确度，其原因是宽频带噪声分量在这个区域内很明显。此外， $1/f$ 曲线必须接近功率频谱上的 $1/f$ 或者噪声频谱上的 $1/\sqrt{f}$ 。大多数传统半导体运放遵守这个规则，值得注意的例外情况是斩波或自动归零放大器，这些放大器没有 $1/f$ 噪声区域。其中一个例子就是低噪声、零漂移OPA2188。

致谢

本文作者希望向Art Kay和Matthew Pickett在概念和思路方面给予的指导致谢。

参考文献

Art Kay, “分析和测量运算放大器电路中的固有噪声,” AnalogZone, 2006年。

在线版地址:

www.ti.com/3q14-slyy061

Art Kay, “运算放大器噪声: 分析和减少噪声的技巧和提示 (第一版),” Elsevier Inc., 2012年1月27日

相关网站:

www.ti.com/3q14-OPA1652

www.ti.com/3q14-OPA2188

订阅《模拟应用期刊》:

www.ti.com/subscribe-aaaj

图2. 0.1Hz至10Hz的电压噪声

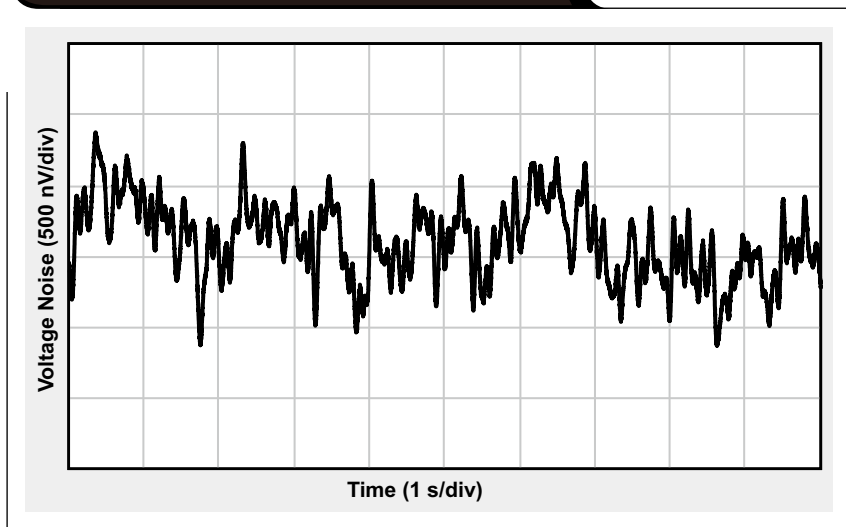
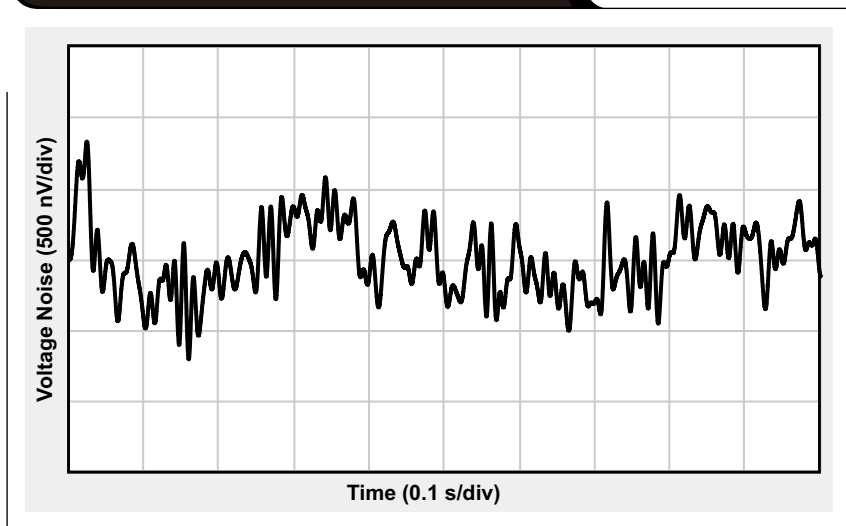


图3 1Hz至100Hz的电压噪声



TI Designs 参考设计库提供完整的设计方案，由资深工程师团队精心创建，支持汽车、工业、医疗、消费等广泛应用的设计。在这里，您能找到包括原理图、物料清单、设计文件及测试报告的全面设计方案。登陆TI Designs，找寻更多适合您的参考设计！简单设计，从TI起步。

马上登录 TI.COM.CN/TIDESIGNS 查询最适合您的设计文档。



WEBENCH® 设计中心: 易于使用且可提供定制结果的设计工具。
PowerLab™ 参考设计库, 包含了近千个适用于所有应用的参考设计。
电源在线培训课程

www.ti.com.cn/webench
www.ti.com.cn/powerlab
www.ti.com.cn/powertraining

WEBENCH® Designer My Designs

Clocks	Filters	传感器
电源	FPGA/μP	LED

输入您的供电要求:

直流 交流

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

多负载 单输出

Power Architect **开始设计**

WEBENCH® Designer My Designs

最小 最大

输入电压 14.0 V 22.0 V

输出 3.3 V 2.0 A

环境温度 30 °C

SIMPLE SWITCHER®

开始设计 ▶

德州仪器在线技术支持社区

www.deyisupport.com

中国产品信息中心 免费热线:

800-820-8682

TI新浪微博



e.weibo.com/tisemi

热门产品

- | | |
|------------|--|
| DAC8760 | 用于 4-20mA 电流回路应用的单通道、16 位、可编程电流/电压输出 DAC |
| DAC7760 | 单通道、12 位可编程电流输出和电压输出 DAC |
| ADS1247 | 极低噪音、精密 24 位 模数转换器 |
| ADS1120 | 具有串行外设接口的低功耗、低噪声、16 位 ADC |
| ISO7242 | 四通道 2/2 25MBPS 数字隔离器 |
| ISO7631FM | 4kV _{PK} 低功耗三通道、150MBPS 数字隔离器 |
| TPS54062 | 4.7V 至 60V 输入、50mA 同步降压转换器 |
| TLK105L | 工业温度、单端口 10/100Mbs 以太网物理层 |
| SN65HVD255 | CAN 收发器具有快速循环次数, 可用于高度已加载网络 |

了解更多, 请搜索以下产品型号:

DAC8760



重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或隐含权作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

产品	应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio 通信与电信 www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers 计算机及周边 www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters 消费电子 www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com 能源 www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp 工业应用 www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers 医疗电子 www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface 安防应用 www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic 汽车电子 www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power 视频和影像 www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity 德州仪器在线技术支持社区 www.deyisupport.com

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 © 2014, 德州仪器半导体技术(上海)有限公司