

通过实测 ZOOM UAC-232 探究 32 位浮点 ADC 系统的构成及特点



Rev: 02

2023 年 10 月 6 日

本报告仅适用于我们所测试的特定的一台 ZOOM UAC-232。测试重点是其在 32 位浮点模式下的性能。

注意：虚仪科技保留随时在无需通知的情况下对本文档进行修改的权利。本文档可能包含排版错误。

目录

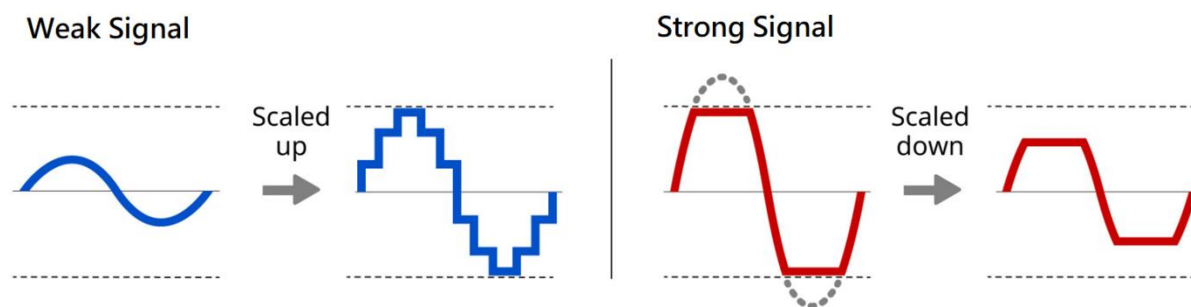
一、简介	3
二、XLR 话筒输入	6
2.1 最高电平	6
2.2 底噪电平	7
2.3 动态范围	9
2.4 THD, THD+N, SNR, SINAD, ENOB, 底噪电平	9
2.5 IMD	10
2.6 带宽	11
2.7 带宽	13
2.8 THD、THD+N、底噪电平随输入 RMS 幅度（经校准）的变化	14
2.9 输入输出线性图	16
2.10 ADC 切换算法的实验探究	18
2.10.1 有/无低增益 ADC 介入的冲激响应测试	18
2.10.2 跨越 ADC 切换点的扫幅测试	20
三、线路/HIZ 输入	22
四、输出	22
五、结论	22

一、简介

能输出 32 位浮点格式数据的 ADC 系统是近两年的热门话题。无论是从理论上还是实际上，32 位浮点格式都提供了远高于 16 位、24 位和 32 位整数格式的动态范围。在理想情况下，应将底噪水平维持在 ADC 最低的 1 个 BIT 内，而信号最高电平应能充分利用 ADC 所有的 BIT。因此在理论上，这几种格式所提供的动态范围如下：

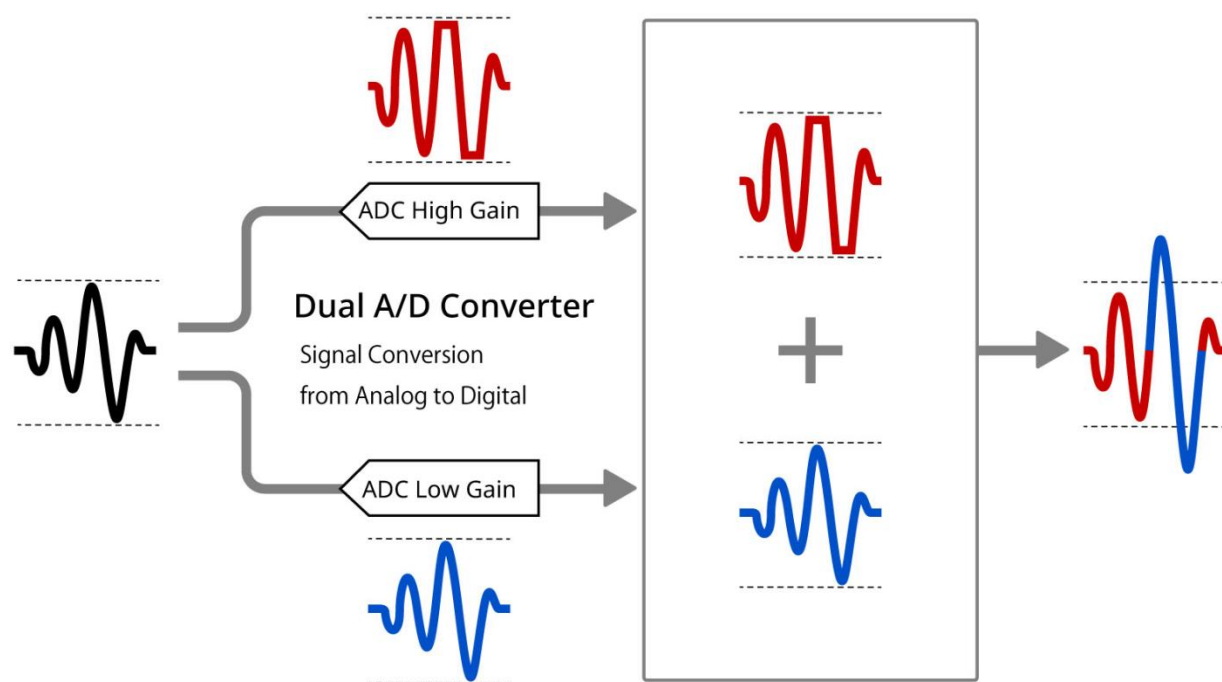
数据格式	范围	底噪 (大于 0 的最小值)	底噪电平 (dB)	最高电平 (dB)	动态范围(dB)
16 位整数	无符号整数 0~65535 有符号整数 -32768~32767	1	-96.3	0	96.3
24 位整数	无符号整数 0~16777215 有符号整数 -8388608~8388607	1	-144.5	0	144.5
32 位整数	无符号整数 0~4294967295 有符号整数 -2147483648~2147483647	1	-192.7	0	192.7
32 位浮点 数	$-3.40282347 \times 10^{38}$ $\sim 3.40282347 \times 10^{38}$	$1.17549435 \times 10^{-38}$	-1535	0	1535

在现实中，想通过单个 ADC 达到 125 dB 的动态范围都是异常困难的，即使其声称位深有 24 位或 32 位，这是因为很难在如此大的动态范围内将底噪保持在 1 bit 以下。如今，麦克风的动态范围可以高达 140 dB，与人类听觉的动态范围相符。因此，调整输入模拟增益以使音频信号的主要部分位于单个 ADC 的动态范围内是一项技术活儿。音频信号过大将使波形被削顶，而音频信号过小将失去其保真度，甚至会被淹没于底噪中（见下图）。



由单个 ADC 相对受限的动态范围引起的问题

与其将单个 ADC 的性能提升到极限，不如另辟蹊径。目前支持 32 位浮点格式的音频设备通常有两个 ADC 协同工作，并合成单一的 32 位浮点数据流输出（见下图）。其中的“低增益”ADC 被优化用于强音频信号，而“高增益”ADC 被优化用于弱音频信号。当高增益 ADC 因信号幅度过大而削顶时，低增益 ADC 则不会。当低增益 ADC 因信号幅度过低而无法在其底噪之上清晰地采集到声音时，高增益 ADC 在其底噪之上仍然有足够的余量。因此，通过这种双 ADC 配置，可显著扩展总的动态范围，实现低噪声且无削顶的录音，甚至无需调节模拟增益。这就是为什么 Zoom UAC-232 的面板上不配备输入模拟增益开关和旋钮的原因。本篇文章的主要目标之一就是找出该设备能够达到的实际动态范围。另一个关注点是通过实验来探究其 ADC 切换算法及其影响。



支持 32 位浮点格式的双 ADC 架构

Multi-Instrument 是最先全面支持 32 位浮点格式 ADC 的测试测量软件之一。在 32 位浮点模式下，该软件始终将原始采样数值 1 作为 0 dBFS。在软件中，可通过[设置]>[校准]>“其它/ASIO”>“范围”来输入该值所代表的实际电压值，以实现校准。需注意的是，在 32 位浮点模式下，0dBFS 不一定代表最大电平值。刚好出现削顶失真的最大电平值需要在这里实测。在以下测试中，除非特别指明，“范围”设置为默认的未经校准的 1Vp，这样的好处是测得的瞬时电压值可直接反映原始的采样值，例如：瞬时电压值 1V 表明在 32 位浮点格式下的原始采样值为 1。

以下测试采用了 2023 年 5 月 30 日发布的 ZOOM UAC-232 ASIO 驱动程序 V1.1.0 版和 2023 年 2 月 9 日发布的 ZOOM UAC-232 Mix Control V1.0.0.13 版。ZOOM UAC-232 Mix Control 是用来控制 ZOOM UAC-232 内部的混合器设置的，它为不同的输入设备（XLR 话筒输入、LINE 输入和 HiZ 输入）设置

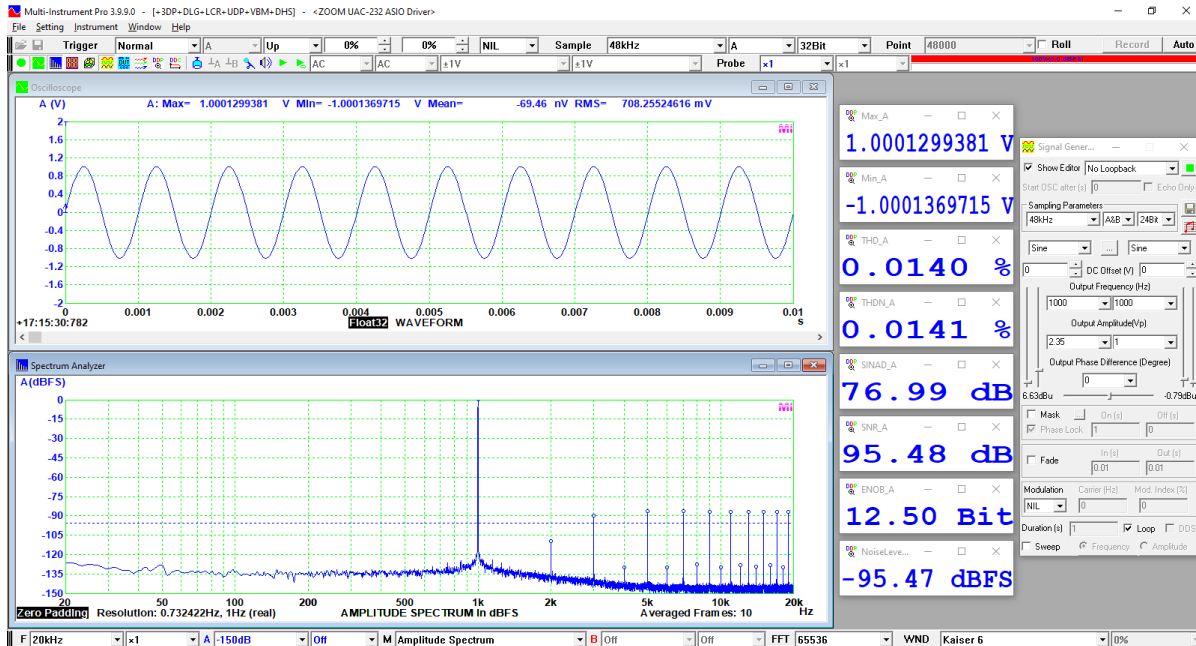
了不同的默认数字增益（见下表）。修改这些默认值后会自动保存于硬件设备中。请注意：修改数字增益设置后，前述的“范围”校准将无效，需重新校准。在 32 位浮点模式下，录音的质量不会随着数字增益的改变而改变。因此在以下的测试中，数字增益始终保持为 0dB。

输入源	数字增益（出厂默认）
动圈话筒（关闭幻象电源）	+45 dB
电容话筒（开启幻象电源）	+27 dB
线路输入（关闭吉他/贝斯）	+24 dB
HiZ 输入（开启吉他/贝斯）	+18 dB

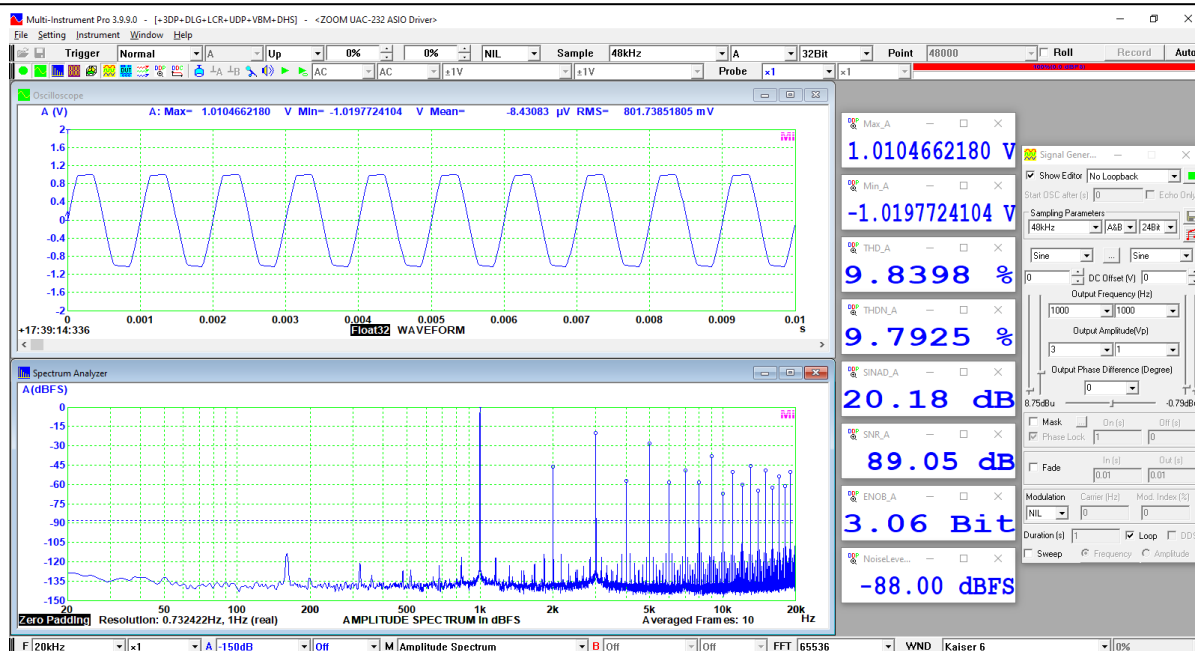
二、XLR 话筒输入

2.1 最高电平

最高电平可通过向 XLR 接口输入平衡的 1kHz 正弦波来测量。48V 幻象电源的开关状态并不影响测得的最大电平。测得的最大电平为 1Vp（未校准值）或者 0dBFS，对应于校准值 2.35Vp(6.63 dBu)。这个值略高于 ZOOM 标明的最大电平值 2.19Vp (6 dBu)。下面第二幅图则确认了削顶失真发生于 1 Vp（未校准值）或者 0dBFS。



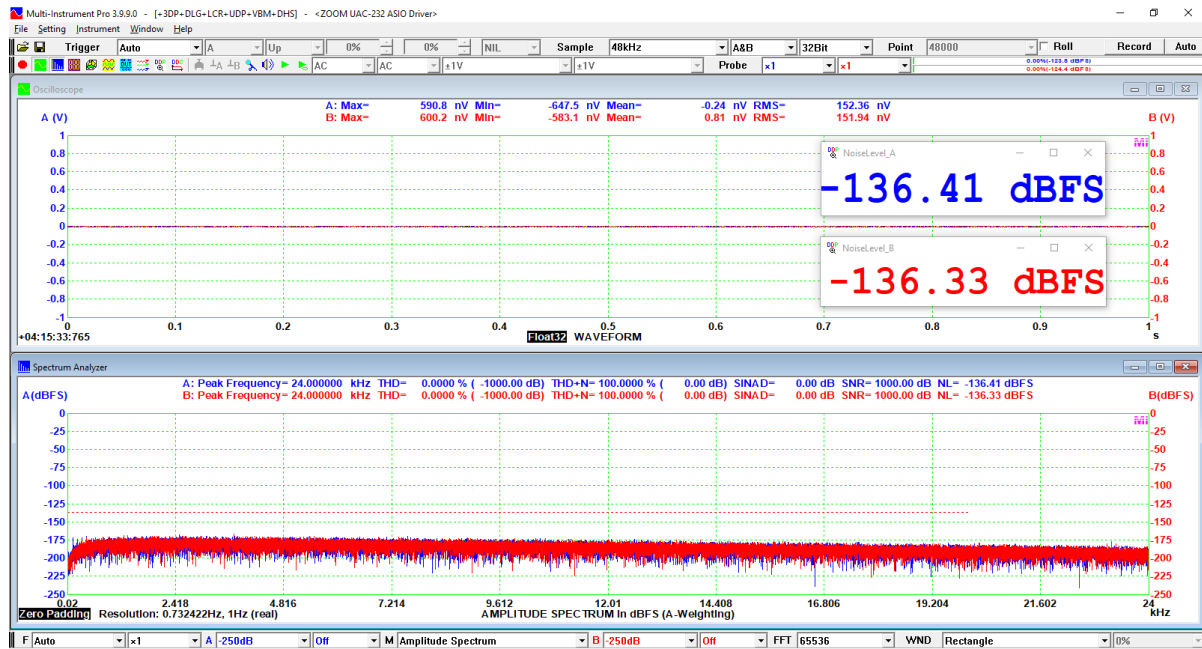
XLR 话筒输入的非削顶失真的最高电平（数字增益=0dB）



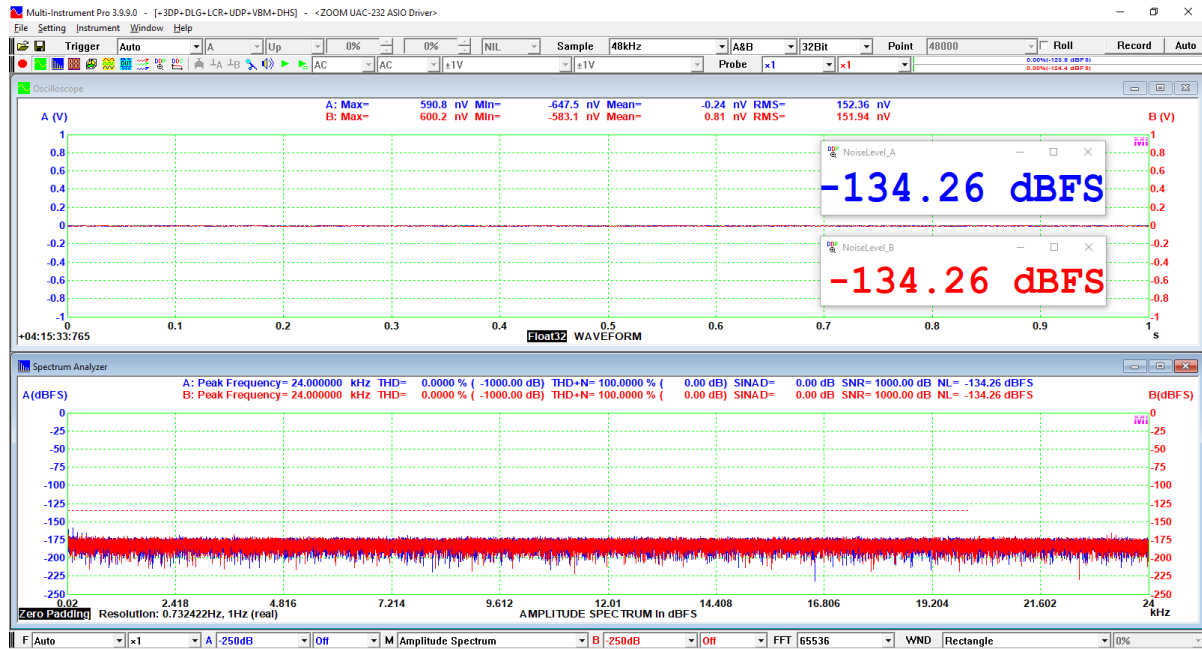
XLR 话筒输入的有削顶失真的最高电平（数字增益=0dB）

2.2 底噪电平

底噪电平可通过将 XLR 输入端的“+”和“-”短路到地来测量，否则测得的底噪电平将会增大 12dB。这是因为 ZOOM UAC-232 具有极低的底噪电平，很小的外部干扰都可能影响到测量结果。在软件中，将 THD 测量的基波手动设置为 24 kHz，以保证将 20Hz~20kHz 之间的信号都计算为底噪电平，而不会有部分信号被计算为基波和谐波失真。下面两图为具有 A 计权和没有 A 计权的底噪电平的测量结果，可见底噪电平为 -136.4 dBFS 或 -134.3 dBFS。



XLR 话筒输入的经过 A 计权的底噪电平（数字增益 = 0dB）



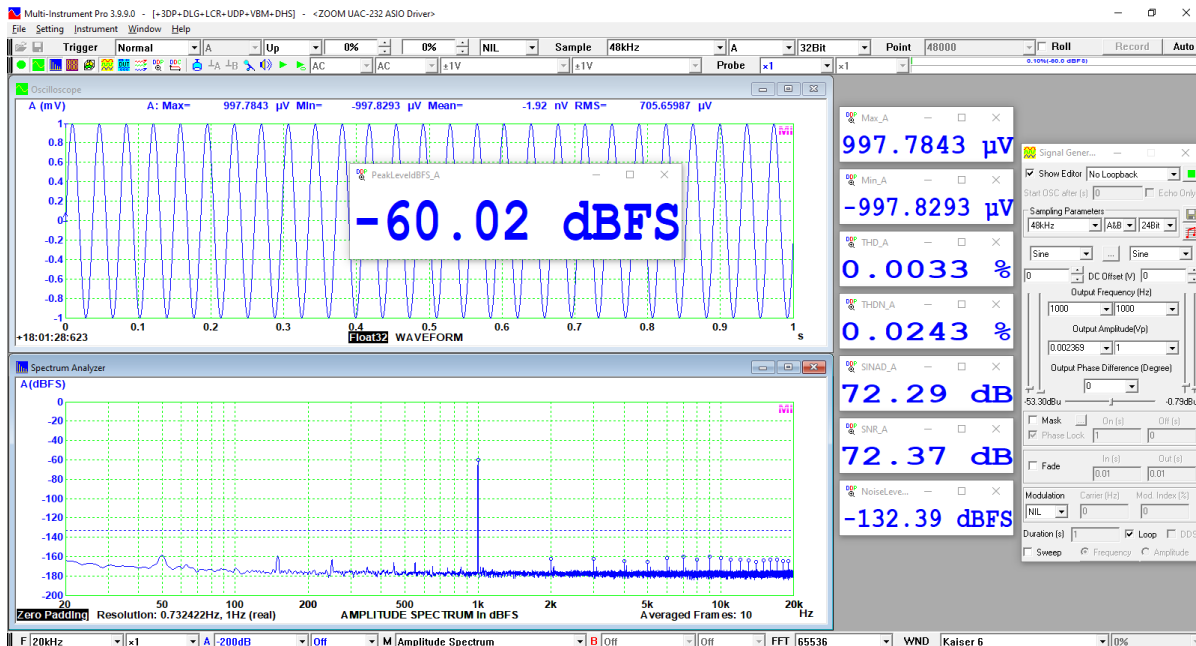
XLR 话筒输入的无频率计权的底噪电平（数字增益 = 0dB）

因此等效输入底噪电平可计算为： $2.35 \times 0.7071 \times 10^{-134.3/20} = 3.2 \times 10^{-7}$ (Vrms) 或 -127.7 dBu。此结果于 ZOOM 指标中的 -127dBu 一致。

2.3 动态范围

动态范围等于前面测得的最高电平（0 dBFS）与底噪电平（-134.3dBFS 或经 A 计权的-136.4dBFS）之差，即：134.3dB 或 136.4dB。

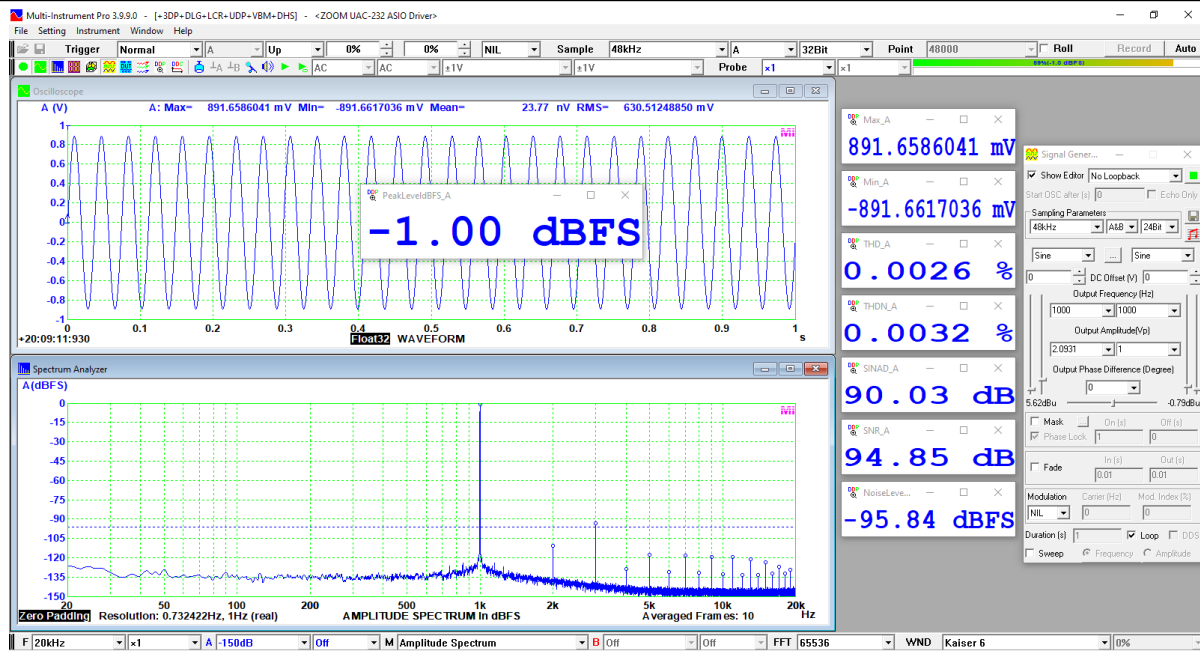
传统上，动态范围是通过测量信号电平为-60dBFS 时的信噪比 SNR 来推得的。动态范围为 SNR+60（dB）。下图为按此法测试的结果。测得的 SNR 为 72.4dB，因此动态范围为 132.4dB。但是在本测试中所使用的信号发生器的底噪电平略高于 ZOOM UAC-232 的 XLR 话筒输入的等效底噪电平，因此用前面方法测得的 134.3dB 的动态范围更准确。



-60dBFS 处 XLR 话筒输入的 SNR（数字增益 = 0dB）

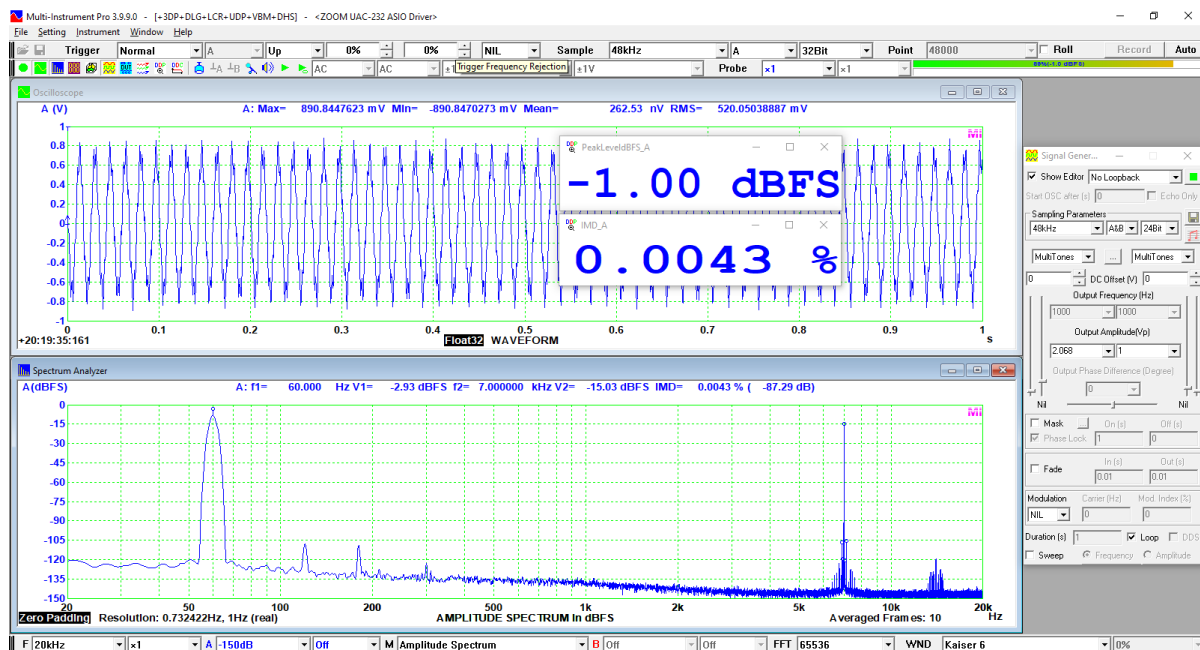
2.4 THD, THD+N, SNR, SINAD, ENOB, 底噪电平

当信号电平为-1dBFS 时，测得的 THD、THD+N、SNR、SNAD 和底噪电平分别为 0.0026%、0.0032%、90.03dB、94.85dB 和 -95.84 dBFS。这里测得的底噪电平远比前面测得的高，这是因为这里的信号电平高，底噪来自于低增益 ADC 而非高增益 ADC。

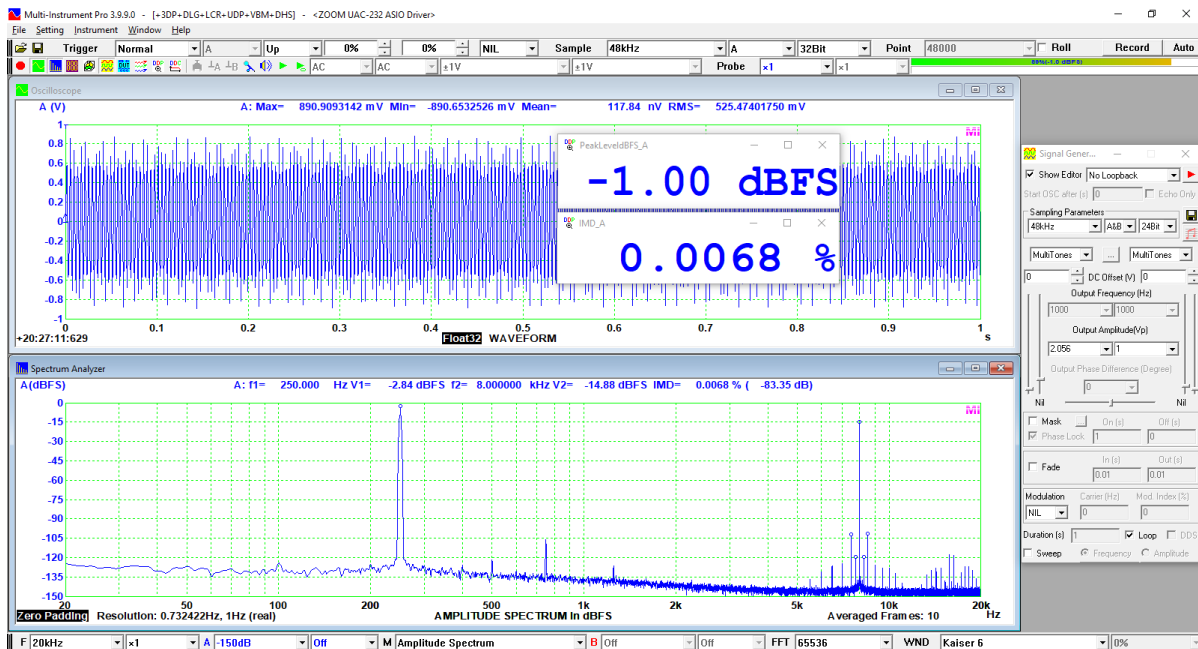


-1dBFS 处 XLR 话筒输入的 THD、THD+N、SINAD、SNR、底噪电平（数字增益 = 0dB）

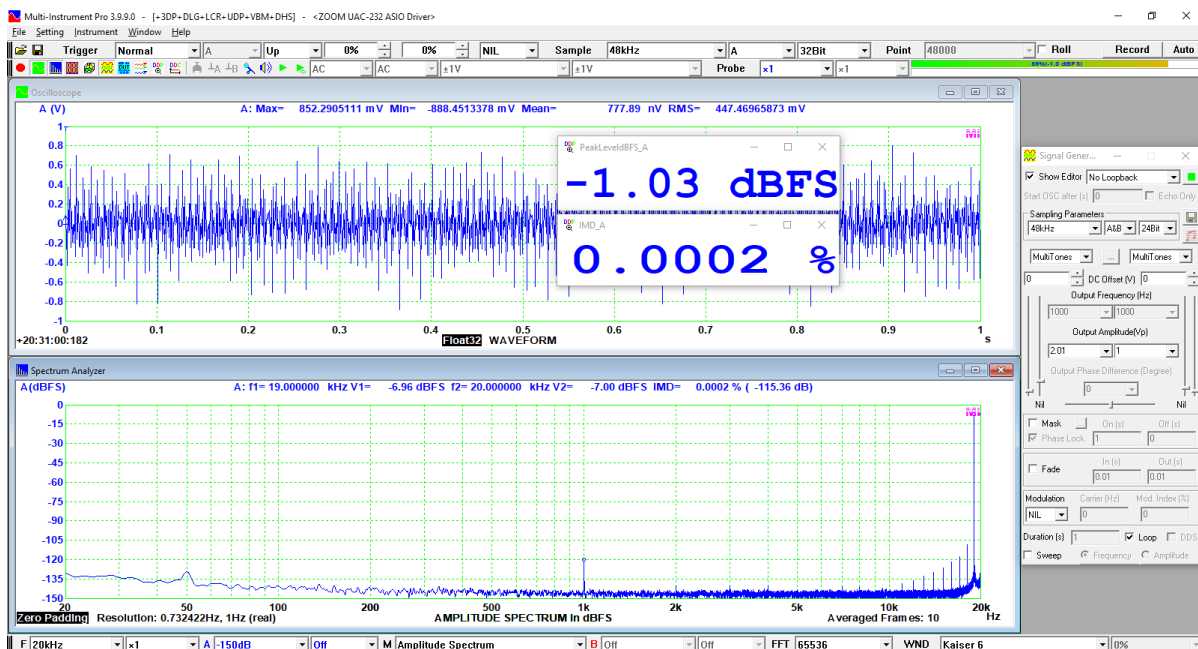
2.5 IMD



-1dBFS 处 XLR 话筒输入的 SMPTE IMD（数字增益 = 0dB）



-1dBFS 处 XLR 话筒输入的 DIN IMD (数字增益 = 0dB)



-1dBFS 处 XLR 话筒输入的 CCIF2 IMD (数字增益 = 0dB)

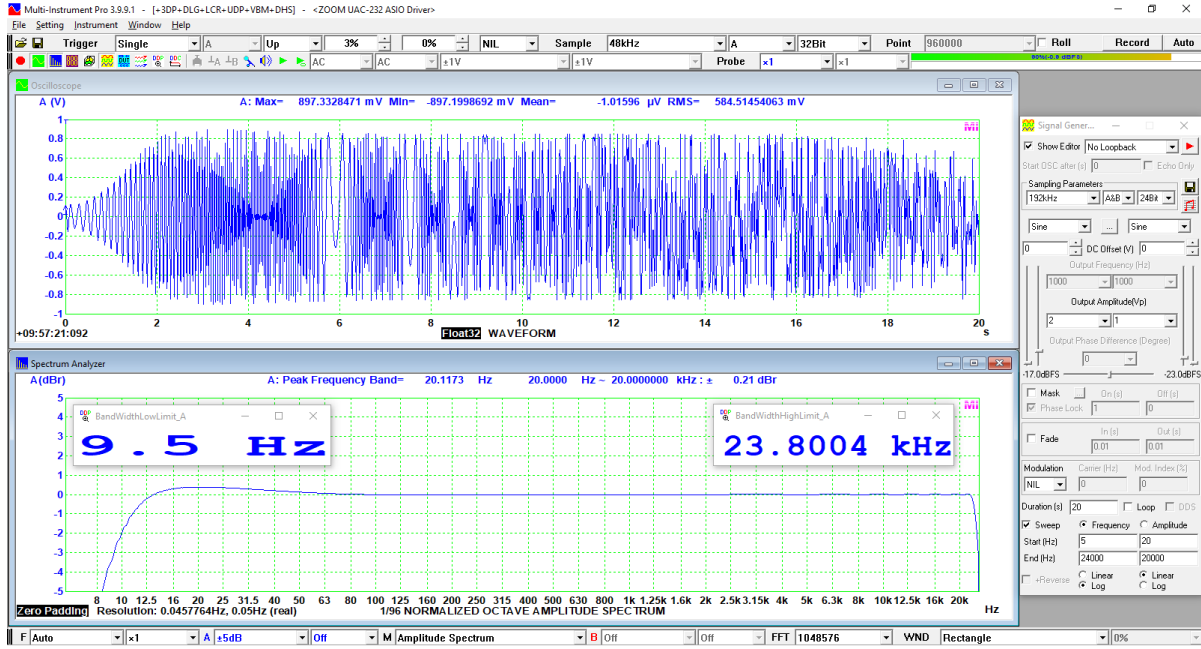
2.6 带宽

带宽可通过注入 20 秒的对数扫频信号来测得，分析时采用了 1/96 倍频分析。测得的结果如下：

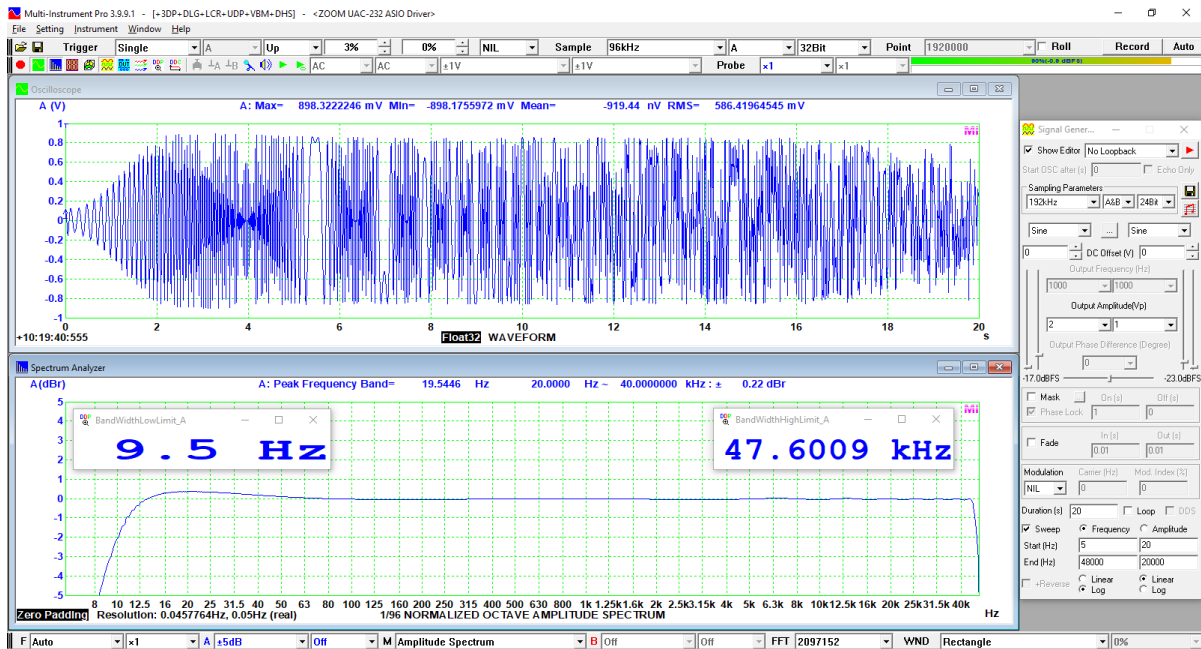
-3dB@48kHz 带宽：9.5Hz~23.8kHz；20Hz~20kHz， $\pm 0.21\text{dB}$ ，这与 ZOOM 指标中的+0.1~-0.2dB 一致。

-3dB@96kHz 带宽：9.5Hz~47.6kHz；20Hz~40kHz， $\pm 0.22\text{dB}$ 。

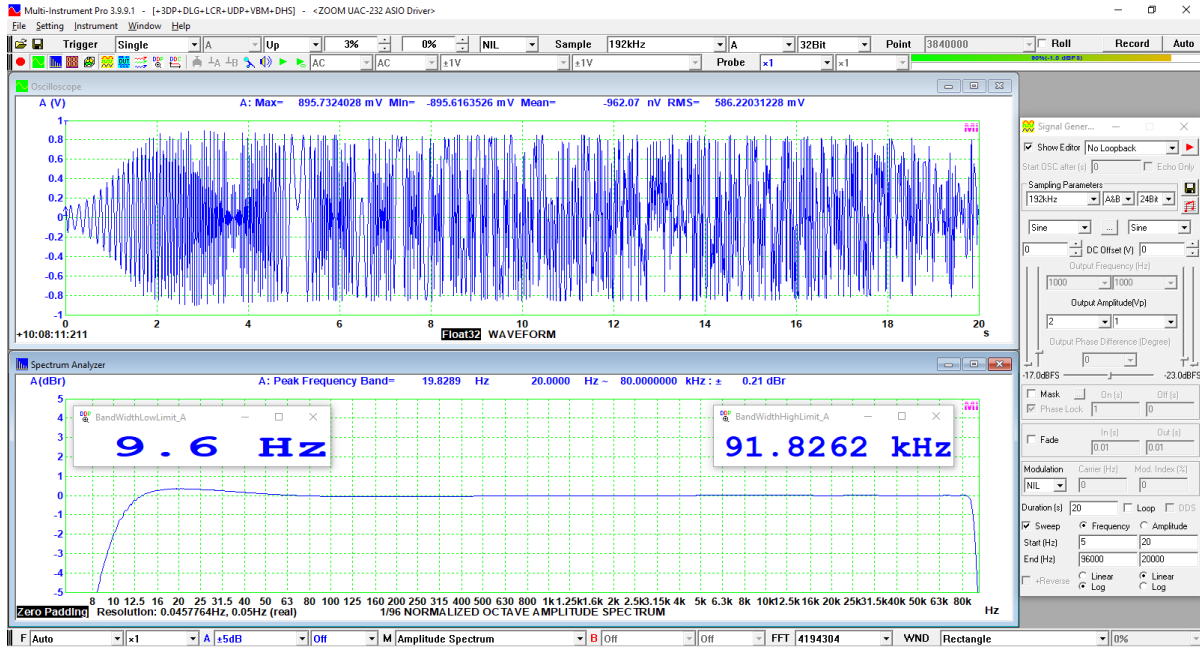
-3dB@192kHz 带宽：9.6Hz~91.8kHz；20Hz~80kHz， $\pm 0.21\text{dB}$ ，这与 ZOOM 指标中的+0.1~-0.2dB 一致。



在 48kHz 采样频率下 XLR 话筒输入的带宽（数字增益 = 0dB）

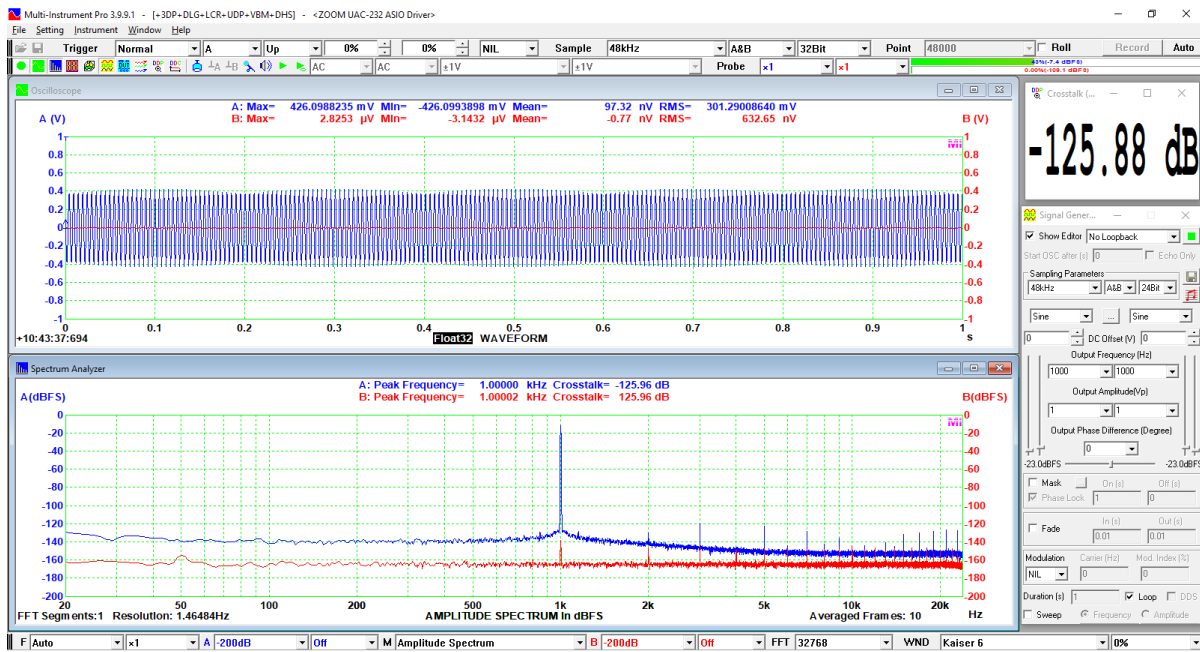


在 96kHz 采样频率下 XLR 话筒输入的带宽（数字增益 = 0dB）



在 192kHz 采样频率下 XLR 话筒输入的带宽（数字增益 = 0dB）

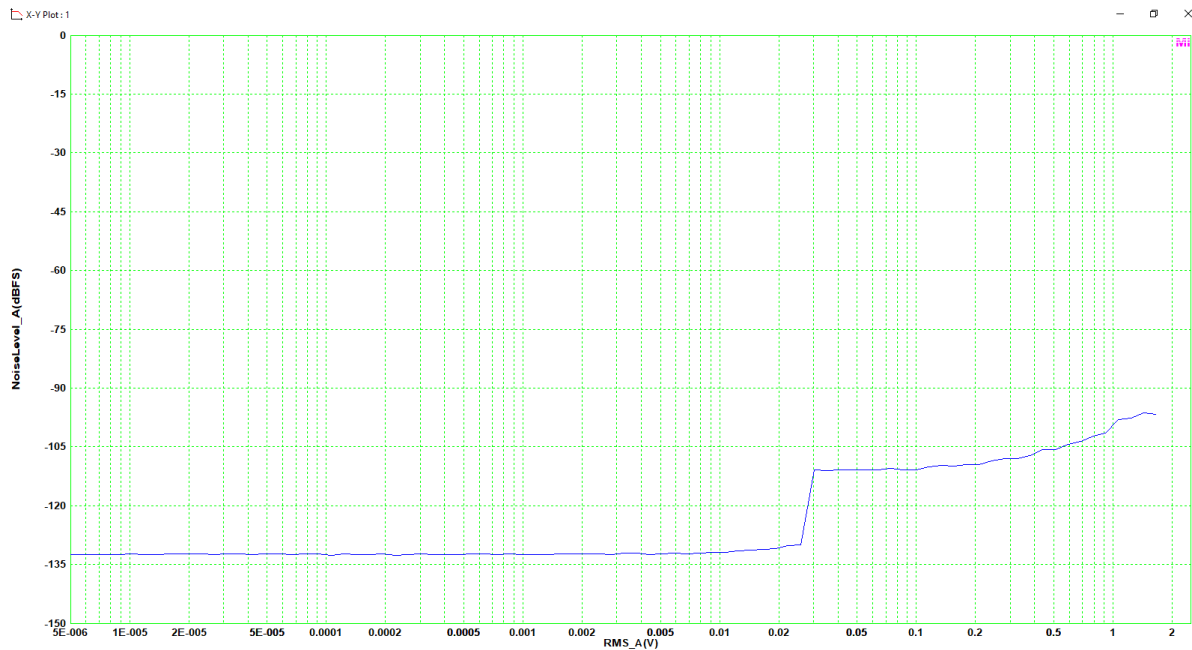
2.7 串扰



1kHz 处 XLR 话筒输入的串扰（数字增益 = 0dB）

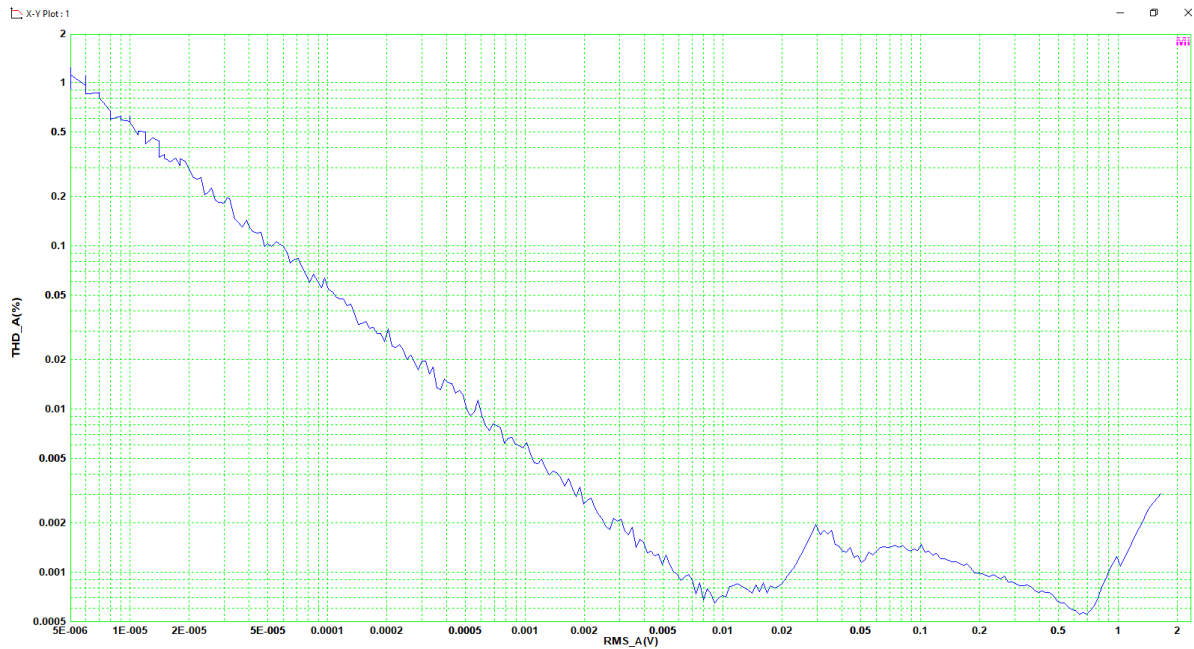
2.8 THD、THD+N、底噪电平随输入 RMS 幅度（经校准）的变化

此测试通过 Multi-Instrument 的设备检测计划模块实现。测试信号为 1kHz 正弦波，其幅度经过 300 步从 5 μ Vrms 步进到 1.66Vrms（2.35Vp，即：0 dBFS，见前面的校准结果）。这里采用的是音频分析仪 RTX6001 的信号发生器，它具有三个输出电压范围：0.1Vrms、1Vrms、10Vrms。当输出电平达到 0dBFS 后，软件会自动切换到更高的输出范围上。测试结果如下。



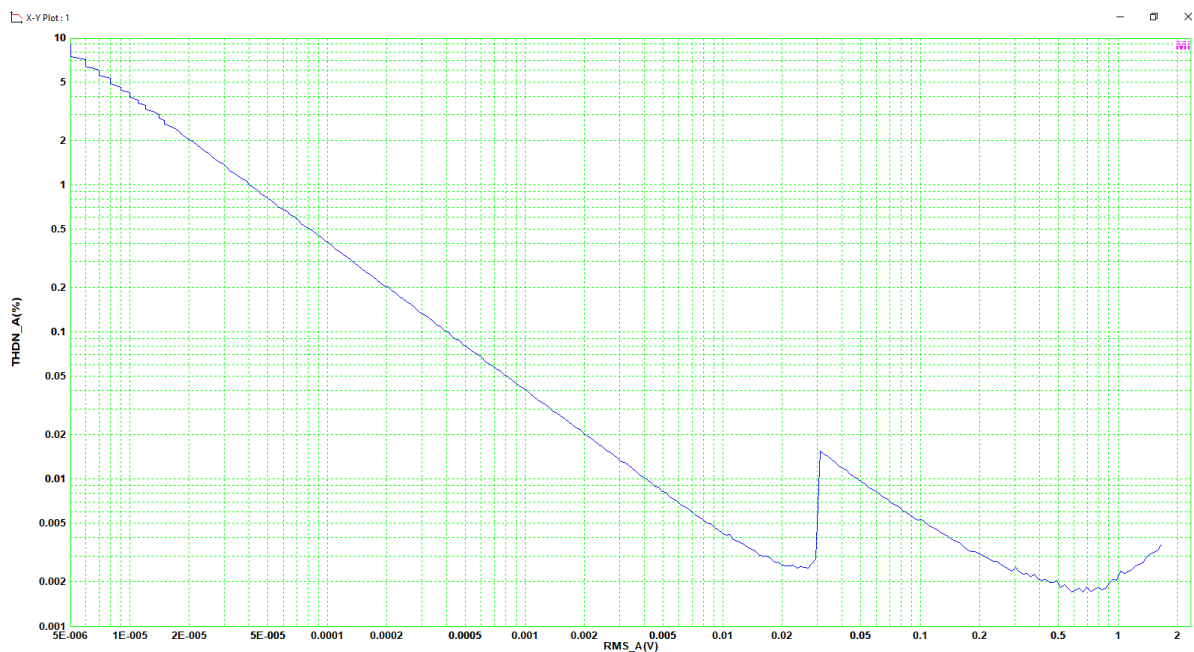
XLR 话筒输入的底噪电平随输入 RMS 幅度（经校准）的变化（数字增益 = 0dB）

再次重申，在上图中信号幅度的低端测得的底噪电平比前面测得的 134.3dBFS 略高是因为所用的信号发生器的输出底噪电平相对较高的缘故。从上图可见，在大约信号电平 0.03Vrms（等于-34.9dBFS）处，底噪电平突然升高，由于此处仍然处于信号发生器输出的最小量程范围内，不涉及信号发生器的输出范围切换，因此底噪电平的陡升明显是从高增益 ADC 切换到低增益 ADC 造成的。



XLR 话筒输入的 THD 随输入 RMS 幅度（经校准）的变化（数字增益 = 0dB）

上图表明，高增益 ADC 的 THD 起初是随着输入信号幅度的增加而降低，直到信号幅度达到大约 0.01Vrms。然后 THD 开始升高，直到信号幅度达到大约 0.03Vrms。此后，低增益 ADC 切入，其 THD 开始随信号幅度的增加而降低，直到信号幅度达到其大约 0.7Vrms 的转折点后，THD 又重新开始上升。从图可见，两个 ADC 能达到的最低的 THD 为大约 0.0006%。

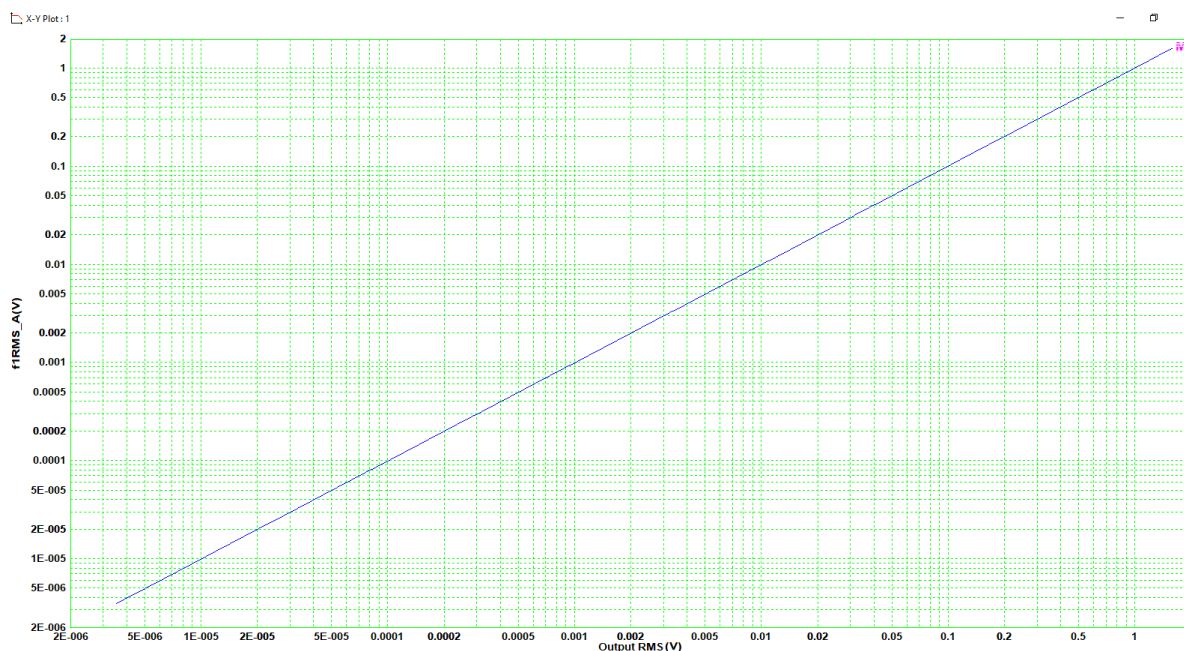


XLR 话筒输入的 THD+N 随输入 RMS 幅度（经校准）的变化（数字增益 = 0dB）

上图是更前面的两图的效果叠加，在信号幅度 0.03Vrms 处，更明显地显示了两个 ADC 之间的切换。

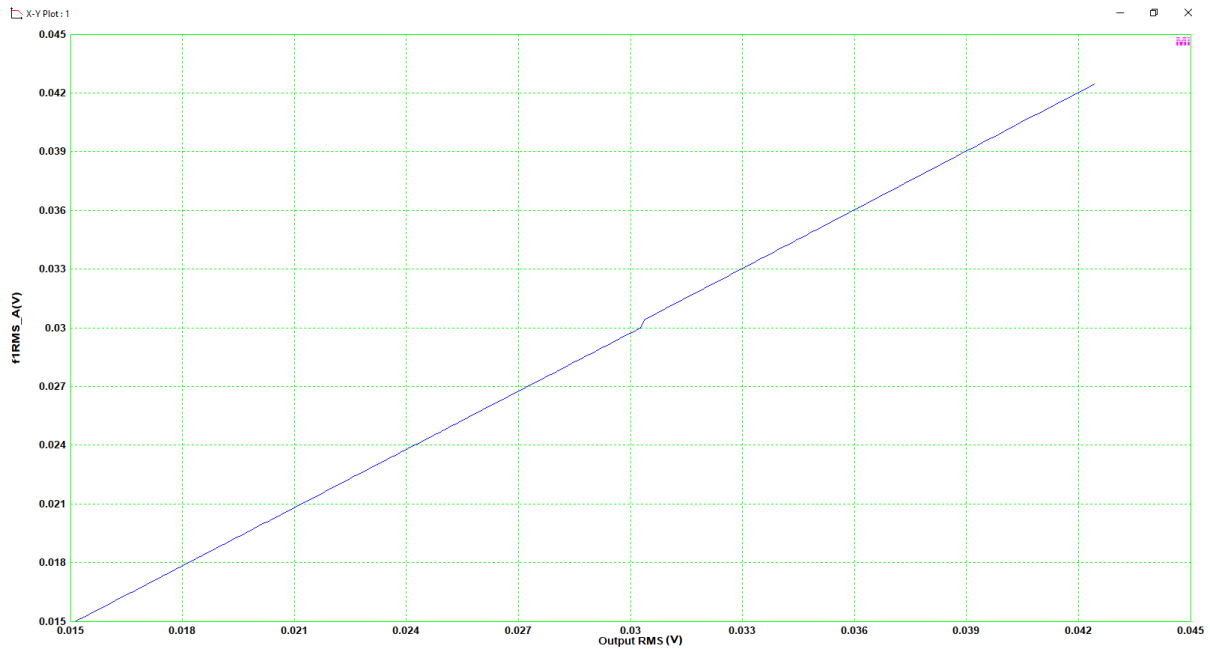
2.9 输入输出线性图

此测试通过 Multi-Instrument 的设备检测计划模块实现。测试信号为 1kHz 正弦波，其幅度经过 300 步从指定的幅度起点步进到幅度终点。横轴代表由信号发生器输出的信号的 RMS 值，而纵轴代表测得的峰值频率处 RMS 值。两者都是经校准后的值。采用从频域获得的峰值频率的 RMS 值而非从时域获得的总的 RMS 值，有效地消除了噪声的影响，这在信号微弱时是非常关键的。下图显示的是从 3.535 μ Vrms 到 1.661 Vrms 步进扫幅的测量结果。在对数-对数图上看，几乎是一条完美的直线。



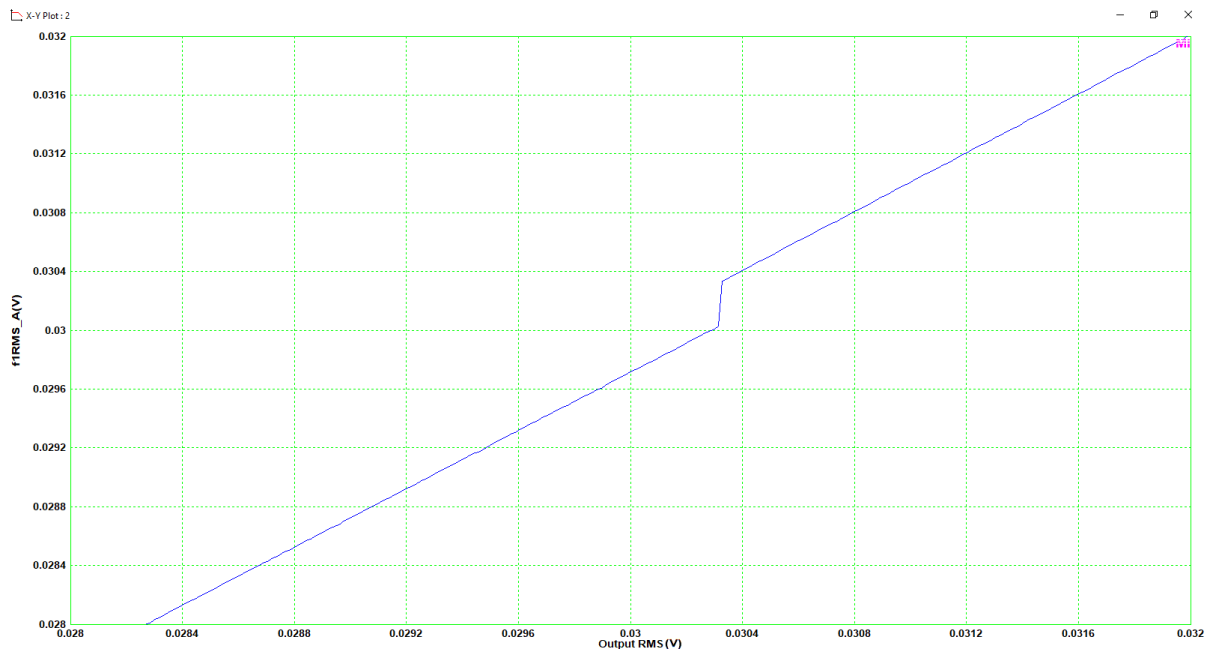
XLR 话筒输入的总输入输出线性图（数字增益 = 0dB）

为了详细查看这种线性图是否在 ADC 切换时受影响，需要缩小步进扫幅范围，下图显示的是分 300 步从 0.0141Vrms 步进到 0.0424Vrms 的测量结果。图中可看到在 0.03Vrms 处有一个小的跳变。这正是前面测试所发现的 ADC 切换发生的地方。



在 ADC 切换处附近的 XLR 话筒输入的输出输入线性图（数字增益 = 0dB）

为了进一步探究上图中由于 ADC 的切换导致的小的“非线性”跳变，需要再次缩小扫描幅范围，这次是分 300 步从 0.028Vrms 步进到 0.032Vrms。测试结果如下。由图可见，跳变的高度大约为 0.0003V。

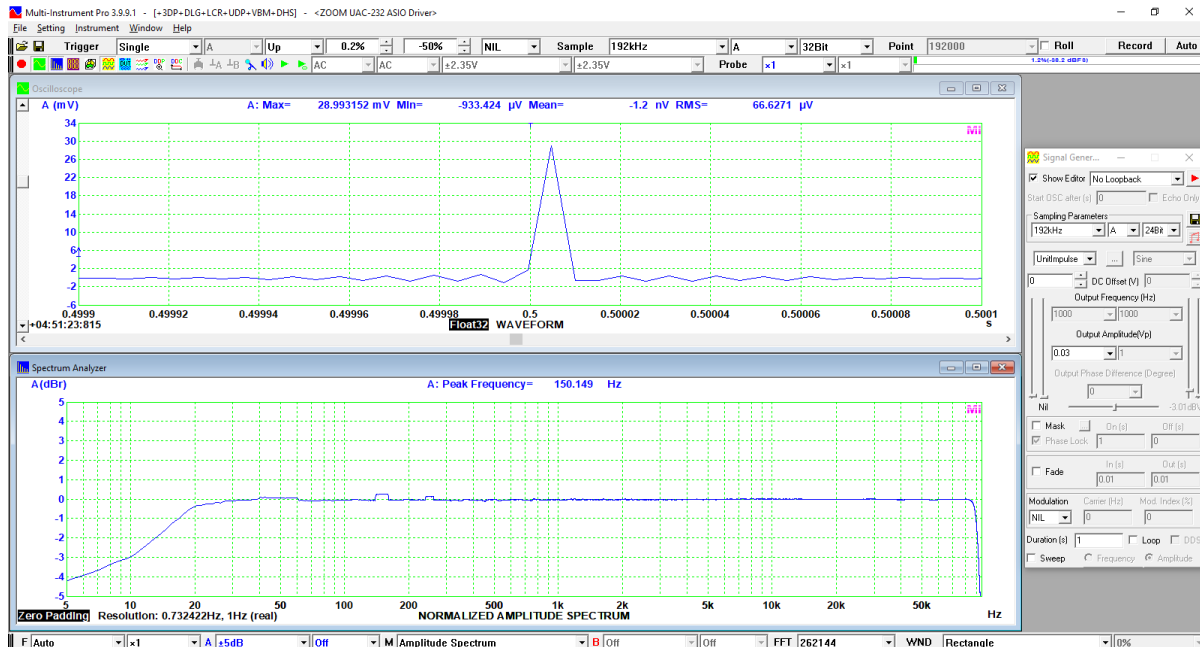


特写 ADC 切换处的 XLR 话筒输入的输出输入线性图（数字增益 = 0dB）

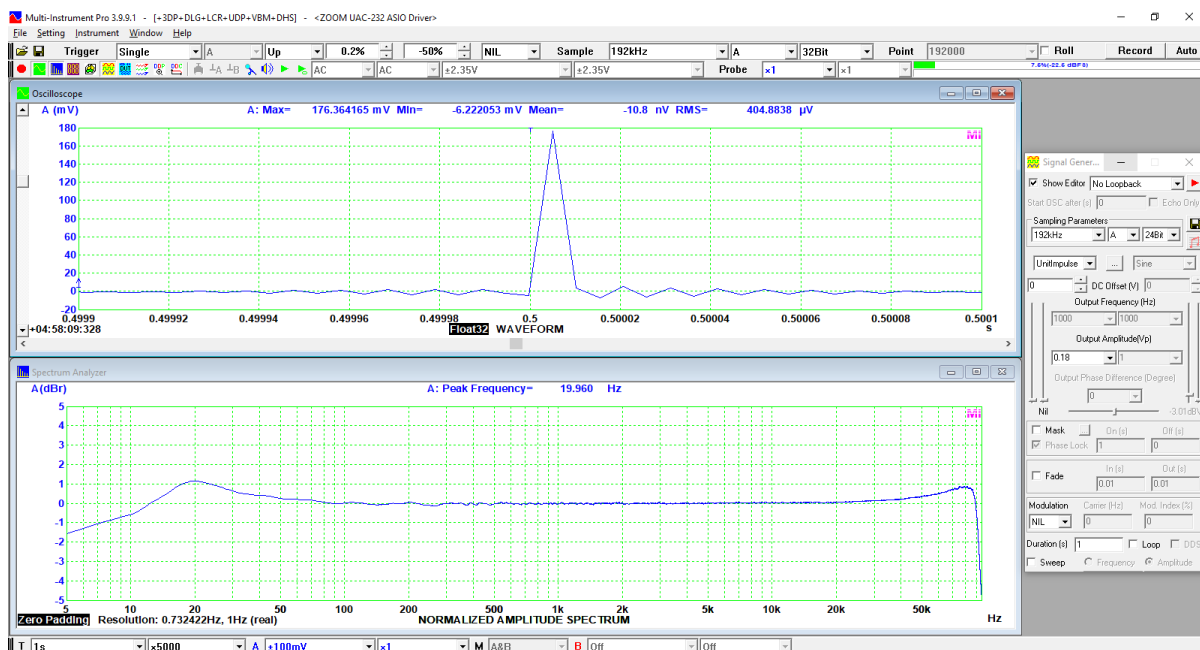
2.10 ADC 切换算法的实验探究

2.10.1 有/无低增益 ADC 介入的冲激响应测试

下面两图是测得的两个冲激响应。第一幅图的冲激幅度为 $0.03V_p$ ($0.021V_{rms}$)，因此它应只由高增益 ADC 单独产生。第二幅图的冲激幅度为 $0.18V_p$ ($0.127V_{rms}$)，因此它应足以触发高增益 ADC 向低增益 ADC 切换。



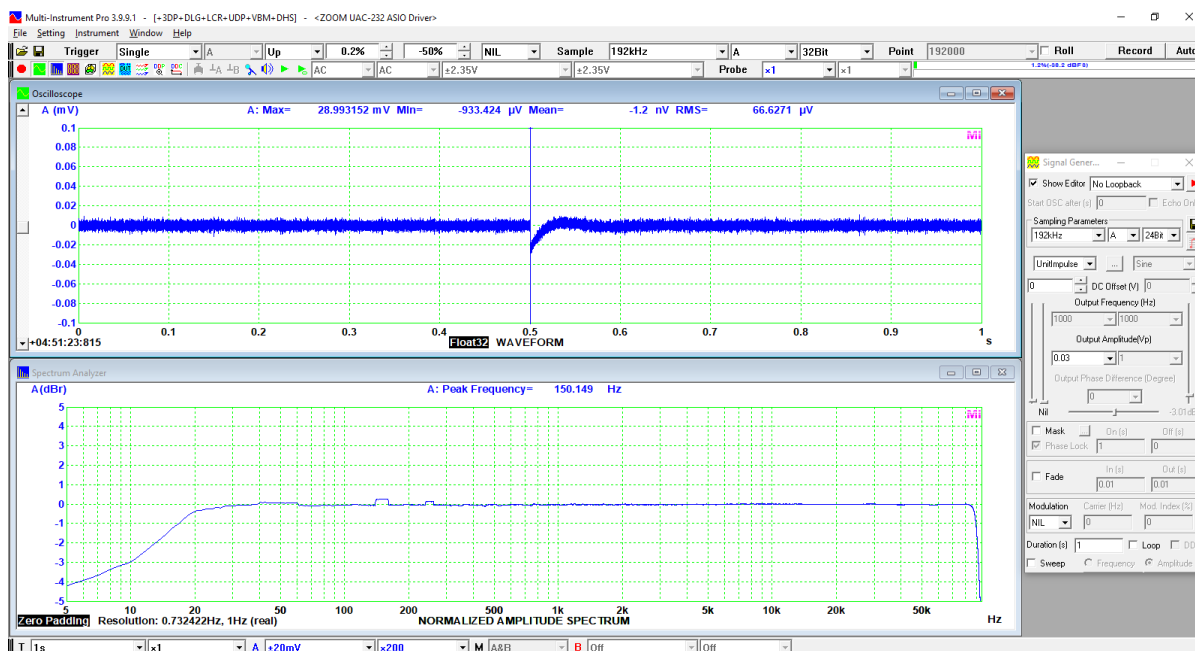
只涉及高增益 ADC 的 XLR 话筒输入的冲激响应（数字增益 = 0dB）



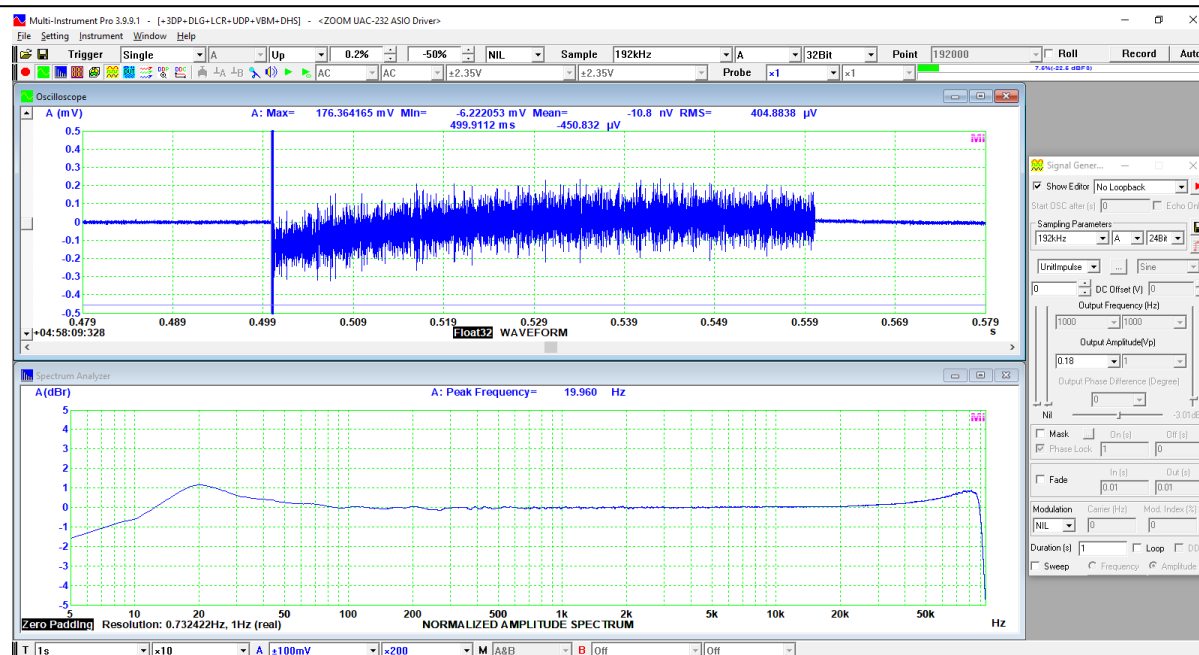
涉及低增益 ADC 的 XLR 话筒输入的冲激响应 (数字增益 = 0dB)

由于冲激信号的时长极短，响应信号的采样点之间的差值极大，足可掩盖两个 ADC 之间的任何增益和零偏上的差异，因此不能指望在波形图上看到明显的 ADC 切换痕迹。冲激响应的频谱则为频率响应，从上面两图可看出少许的、由这种方法测得的两 ADC 的频响差异。

将上面两波形图的纵向放大 (如下面两图所示)，以观察在冲激前后可能发生的底噪电平的变化。正如所估计的那样，在第一幅图中底噪电平保持不变。而在第二幅图中，底噪电平的变化清晰地反映了两个 ADC 之间的切换：从冲激前的高增益 ADC 到冲激之中及以后的低增益 ADC，以及 60ms 之后，由于信号微弱而再次回到高增益 ADC。



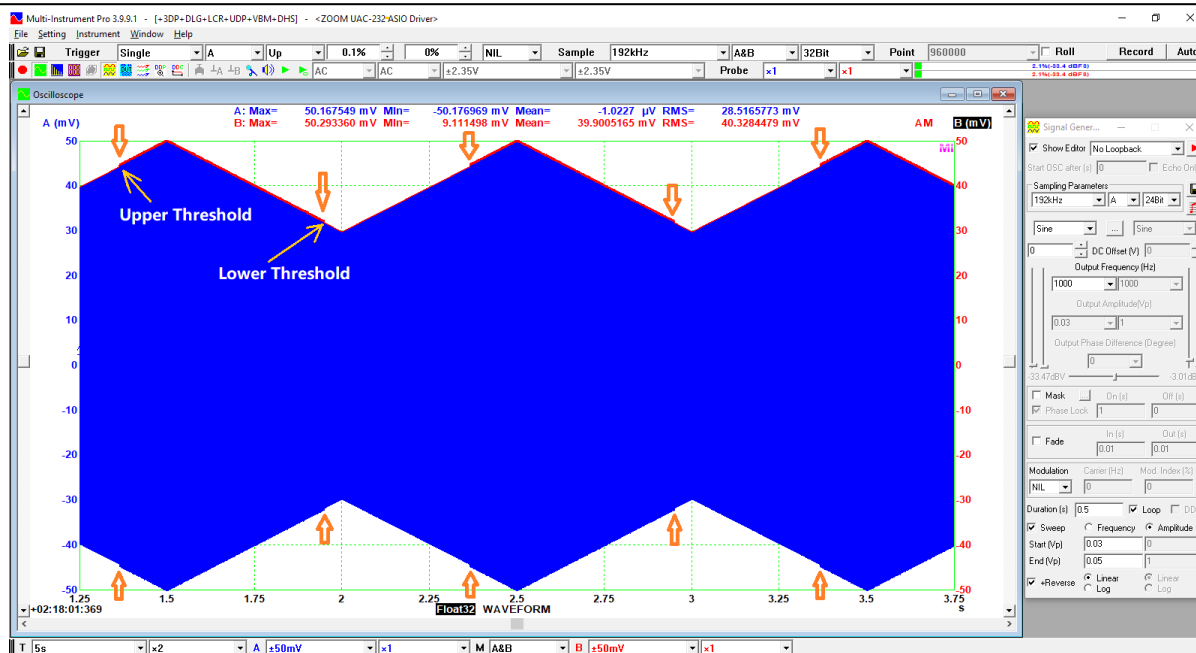
只涉及高增益 ADC 的 XLR 话筒输入的冲激响应 (数字增益 = 0dB)



涉及低增益 ADC 的 XLR 话筒输入的冲激响应（数字增益 = 0dB）

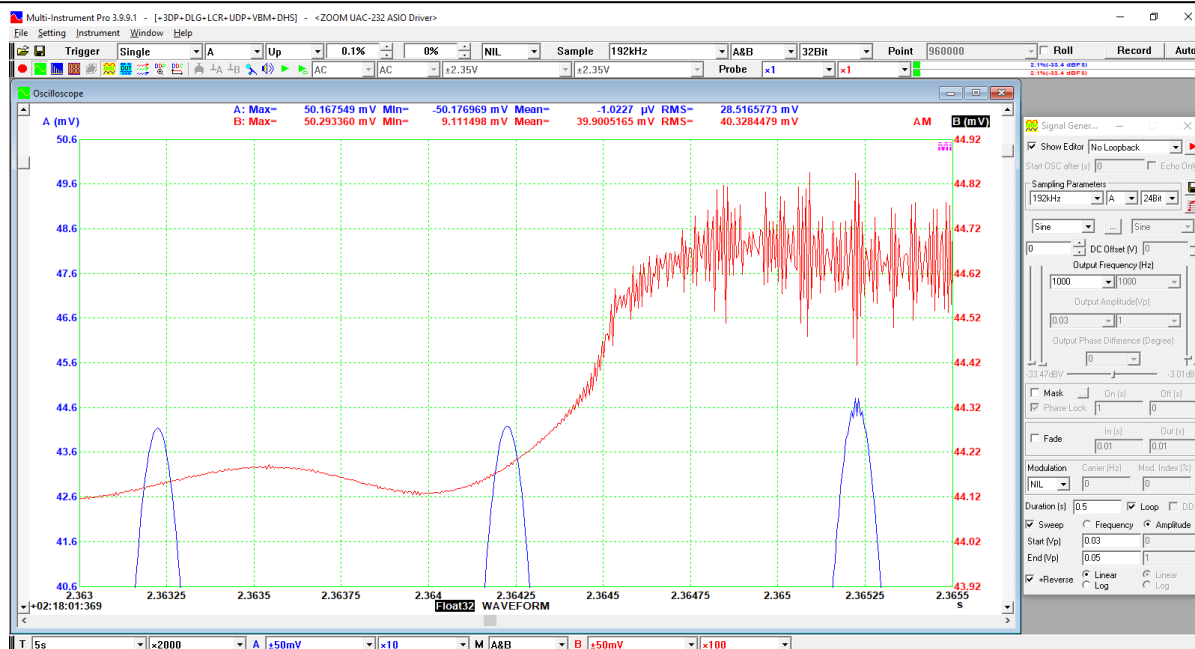
2. 10. 2 跨越 ADC 切换点的扫幅测试

为了探查在 ADC 切换过程中波形是否发生跳变，可采用连续的线性幅度扫描，用时 0.5 秒，从 0.03Vp 增加到 0.05Vp，然后再用时 0.5 秒，从 0.05Vp 回到 0.03Vp，周而复始。结果如下图所示。红线代表波形的幅度包络，它是原始波形经过希尔伯特变换进行幅度解调后而得。较粗的红线表示原始波形中噪声电平较高。ADC 切换的上限和下限阈值分别测得为 44.2mV 和 31.8mV。在 300Hz~20kHz 的载波频率范围内，这两个阈值保持不变。对于低于 300Hz 的载波频率，由于未知原因，测试发现，上限阈值增加，而下限阈值降低。



触发 ADC 切换的线性扫幅（数字增益 = 0dB）

在放大上图以检查 ADC 切换点处的波形时，没有发现任何明显的跳变。波形看起来相当平滑，就好像没有发生 ADC 切换一样。下图是从高增益 ADC 到低增益 ADC 的过渡区的特写。正弦波的顶部（或底部）是检查噪声水平的理想位置，因为它相对平坦。下图中，正弦波的第三个峰比前两个峰明显具有更高的噪声水平，这进一步确认了由红色幅度包络线指示的 ADC 切换位置。从下面的红色幅度包络线还可以观察到噪声水平是逐渐增加而不是瞬间增加的，这意味着在过渡区域存在一种用于拼接的 DSP 算法，用于淡入来自低增益 ADC 的新数据流并淡出来自高增益 ADC 的旧数据流，实现无缝拼接。过渡区长度似乎约为 0.5 毫秒。



ADC 切换处的过渡区（数字增益 = 0dB）

三、线路/HiZ 输入

与 XLR 话筒输入相同，当数字增益为 0dB 时，32 位浮点数 1 (0dBFS) 仍然对应于线路输入（平衡的）和 HiZ（单端的）输入的最高电平。经校准后，最高电平分别为 23.0Vp（26.4dBu）和 4.30Vp(11.9dBu)。同样地，这些值略高于 ZOOM 标明的 24dBu 和 11.5dBu。在动态范围方面，线路输入为 129.1dB 或 131.2dBa，而 HiZ 输入为 123.1dB 或 125.2dBa。这些指标都比 XLR 话筒输入略低。在带宽方面则与 XLR 话筒输入没什么区别。

四、输出

ZOOM UAC-232 似乎无法在 32 位浮点模式下输出信号。但幸运的是，在 Multi-Instrument 中，可以使用 Sound Card ASIO 作为 32 位浮点数据输入，同时可使用 Sound Card MME 进行 24 位整数数据输出。

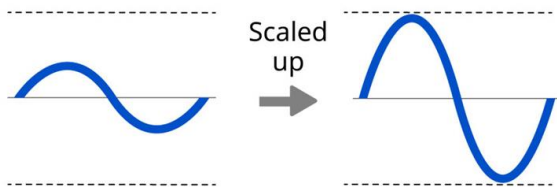
五、结论

在 32 位浮点模式下，当数字增益设置为 0 dB 时，采样值 1 始终对应于最高电平，超过该值后，就会发生削顶失真。在 Multi-Instrument 中，采样值 1 被定义为 0 dBFS。采样值随

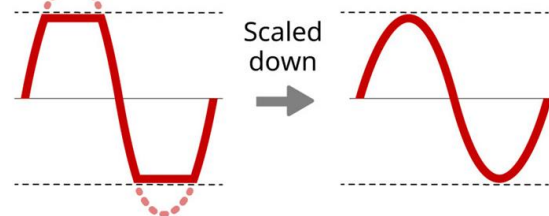
数字增益设置而变化，因此当数字增益高于 0 dB 时，即使信号幅度超过 0 dBFS 也不一定出现削顶失真（见下图）。

32bit float Recording

Weak Signal



Strong Signal



32 位浮点 ADC 的优点

尽管高增益 ADC 和低增益 ADC 之间不可避免地存在着非常微小的错位，但它们之间的切换是非常平滑的，在波形中未发现任何跳变的痕迹，这要归功于其在过渡区域所采用的 DSP 拼接算法。而且此过渡在非常短的时间内完成，几乎不会引起任何可听出的痕迹，对声音测量引入的误差完全可以忽略不计。ZOOM UAC-232 的 XLR 话筒输入的动态范围约为 134.3dB 或 136.4dBA，这比那些采用单个 ADC 的方案高出了 10dB 以上。配上适当的话筒，可以在不牺牲微弱信号保真度且不引发高强信号削顶失真的情况下捕捉到整个人类听觉范围内的声音，而且省去了手动进行模拟增益调节的麻烦。这在声音录制和测量行业中是一项极具吸引力的技术。