

Multi-Instrument（万用仪）测量抖晃率的原理及方法

Rev: 01
2019. 1. 29

本文的目的是介绍 Multi-Instrument (万用仪)测量抖晃率的原理及方法。文章尽量避免采用复杂的数学运算，以使绝大多数的软件用户容易理解。

目录

1. 前言.....	3
2. 什么是抖晃率 (WOW & FLUTTER)	3
3. 抖晃率的频率加权.....	3
4. 抖晃率表达方式.....	4
5. 抖晃率的测试方法.....	5
6. 抖晃率测试的硬件设备	8
7. 抖晃率测试的 FM 数字解调算法	10
8. 抖晃率测试的检定.....	13

1. 前言

录音技术的发展在经历了的圆筒留声机、唱片留声机、磁带录音机等模拟录音机阶段后，在上个世纪八、九十年代即开始进入到以光盘或固态存储器等为介质的数码录音机阶段，旧的设备逐步被新兴的设备所取代，正所谓滚滚长江东逝水，浪花淘尽英雄…。然而时至今日，黑胶 LP 唱机并未绝迹于江湖，每年仍然有厂家销售全新的产品，据估计全世界每年黑胶唱机的销量仍然有百万余台。一些发烧友基于怀旧、时尚、DIY 等理由、或者喜欢欣赏机械转动与声音的美妙结合、或者固执地认为在模拟转数字以及数字再转模拟的过程总会丢失一些天籁之音的细节，仍然痴迷于纯模拟的唱机。在烧友界，如果没调试安装过黑胶唱机、没玩过胆机都不好意思说自己是资深玩家。

2. 什么是抖晃率 (Wow & Flutter)

Flutter (抖动)、Wow (晃动)、Drift (漂移)、Scrape Flutter (刮颤) 是以移动介质为记录材料做模拟录制和回放的系统所需要面对的几种失真。这些失真是在录制、复制、回放过程中，由记录介质不规则的运动而导致的频率调制引入的。抖晃率用于定量描述这种由于介质的运动速度不稳定所造成的频率晃动对人耳的主观影响。比如回放一个精准 3150Hz 的正弦信号，在理想的无抖晃的情况下，播放出来的信号就一直是 3150Hz，然而在实际有抖晃的情况下，播放出来的信号的瞬时频率将围绕某个均值（不一定正好等于 3150Hz）来回变动，就是说相对于那个均值有往复变化的频偏。

Drift (漂移) 指的是调制频率低于大约 0.5Hz 的频率调制。它给人的感觉是平均音调的缓慢变化。

Wow (晃动) 指的是调制频率范围为大约 0.5Hz~6Hz 的频率调制。它给人的感觉是音调的波动。

Flutter (抖动) 指的是调制频率范围为大约 6Hz~100Hz 的频率调制。它给人的感觉是声音品质的粗糙化。

Scrape Flutter (刮颤) 指的是调制频率高于大约 100Hz 的频率调制。它由磁带的粘连-滑动（粘滞）运动造成。它给人的感觉是声音中有噪音，而这种噪音在没有信号时是不存在的。这种噪音也称为摩擦噪音或粘滞噪音。

目前有多种抖晃率测试标准，例如：CCIR, DIN, NAB, JIS 等，这里介绍的是基于 AES (Audio Engineering Society) 的 AES6-2008(r2012) 标准（就是 2012 年的最新修订版），它与 IEC 60386、IEEE Std-193、CCIR 409-2 和 DIN 45507 标准兼容。标准测试信号的频率定为 3150Hz。当然用 3000Hz 的测试频率或其他频率，这里介绍的方法也适用。

3. 抖晃率的频率加权

在抖晃率测试中，测试信号频率通常取为 3150Hz。软件采集的信号先被频率解调以获

取信号中相对于平均频率的瞬时频偏。然后对瞬时频偏的变化按人耳的主观感受加权。心理声学的研究表明人耳对不同的调制频率的主观感受不一样。下图是不同调制频率所对应的权重。从图可见，根据该标准，经加权后的抖晃率测量基本上只考虑了 0.2Hz~200Hz 范围内的调制信号，其中 4Hz 频偏的权重最高，人耳对此最为敏感。也就是说，在此加权下，Drift（漂移）和 Scrape Flutter（刮颤）都被极大地衰减了，仅仅留下 Wow（晃动）和 Flutter（抖动）显得比较突出。软件也提供了一个“未加权”选项。为了准确测量调制频率的低限 0.2Hz，采样时间不得少于 5 秒。

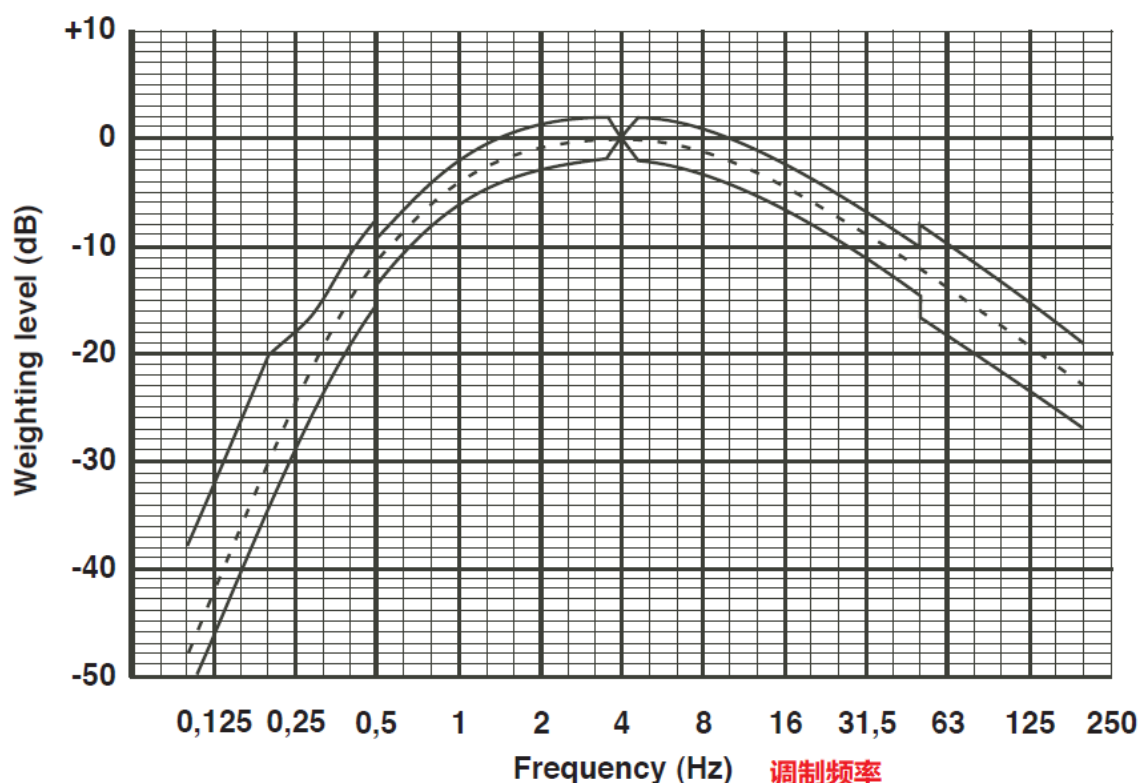


Figure 1 - Weighting Curve

图 1. 调制频率的加权曲线

4. 抖晃率的表达方式

抖晃率常用频偏的峰值或有效值来表示，而 AES6-2008 (r2012) 标准采用的是峰值表示。但这个峰值不是传统意义上的最高频偏对应的那个数值，而是按所谓的“Two Sigma”统计分析法来搜寻未加权或经加权后的峰值抖晃率（%，与平均频率相比）数值。瞬时速度偏移（或称频率偏移）（%）从正向和负向超过峰值抖晃率（%）的累计时间正好占总时间的 5%。

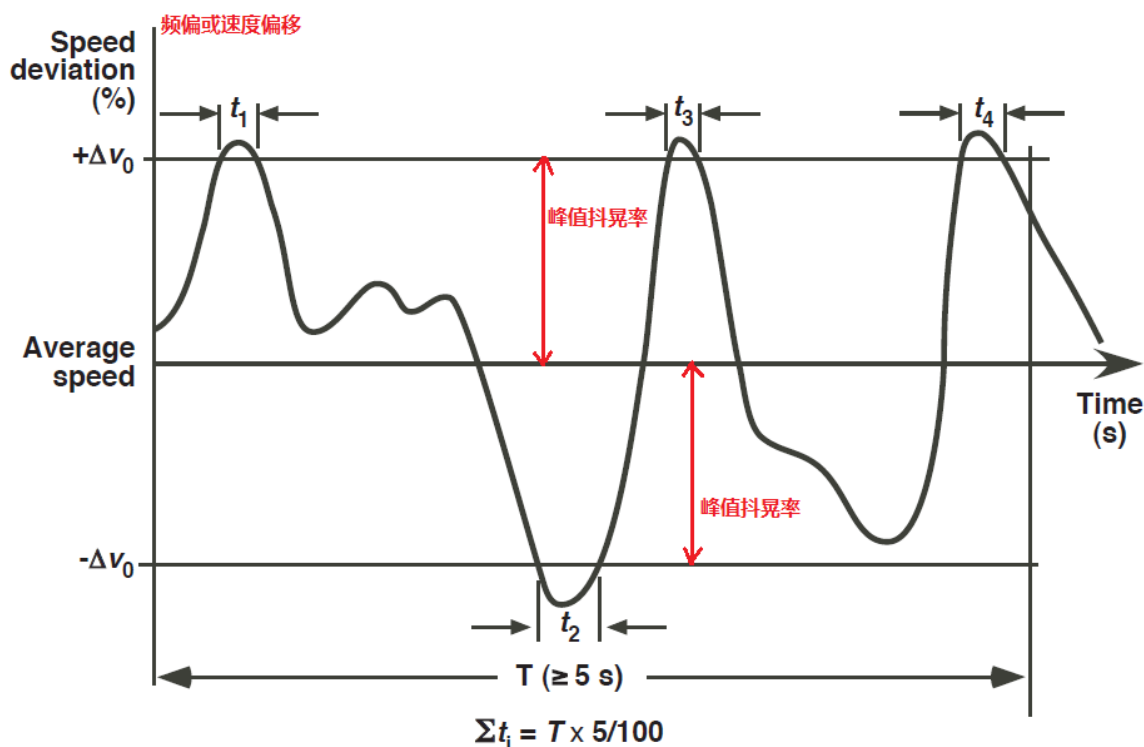
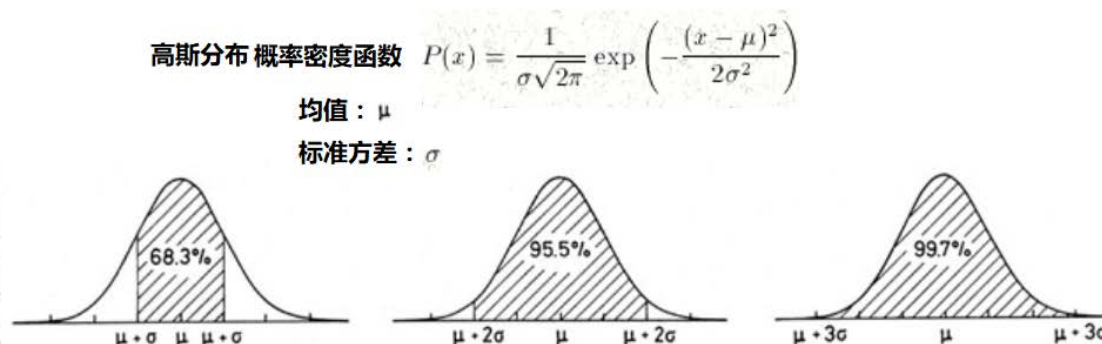


Figure 2 - Example of 2-sigma calculation method

图 2. 2-Sigma 统计法

“Two Sigma” 统计分析法是 AES 推荐的方法。简单地说，如果频偏是以标准方差为 Sigma 的高斯分布的话，那么在频偏落在[均值]-Sigma ~ [均值]+Sigma 的范围内的概率为大约 68%，落在[均值]-2 Sigma ~ [均值]+2 Sigma 的范围内的概率为大约 95%。如下图所示。这就是这个名称的来历。

Fig. 3. The area contained between the limits $\mu \pm 1\sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ and $\mu \pm 3\sigma$ in a Gaussian distribution.图 3. 高斯分布概率密度函数在 $\mu \pm \sigma$ 、 $\mu \pm 2\sigma$ 、 $\mu \pm 3\sigma$ 内的面积

5. 抖晃率的测试方法

放音设备的抖晃率和录音设备的抖晃率一般是单独测量的。测量放音设备的抖晃率时要求录音设备的抖晃率指标大大优于被测的放音设备以至于可以忽略录音设备的抖晃

率，例如测量唱机的抖晃率要求测试唱片上刻录的测试频率自身的抖晃率非常小；反之，如果是测量录音设备的抖晃率则要求放音设备的抖晃率大大优于被测的录音设备的抖晃率。

在被测系统上通过测试唱片或测试磁带等播放 3150Hz 的标准测试信号时，在理想的无抖晃的情况下，被测系统的输出信号应该是精准的没有晃动的 3150Hz，如下图所示，测得的未加权的峰值抖晃率为 0.000%。



图 4. 理想情况下的 3159Hz 正弦信号的频谱和峰值抖晃率

在实际情况下，由于被测系统的抖晃而使其输出的信号变为以 3150Hz 为载波的频率调制（FM）信号。下图为实测的一台 LP 唱机输出的 3150Hz 测试信号，测得的未加权的峰值抖晃率为 0.4845%。注意下图中的实测平均频率是 3129Hz, 与 3150Hz 有差别，这个固定差别是可以通过对平均速度的调节和校准来去除的，不含在抖晃率这个指标内。

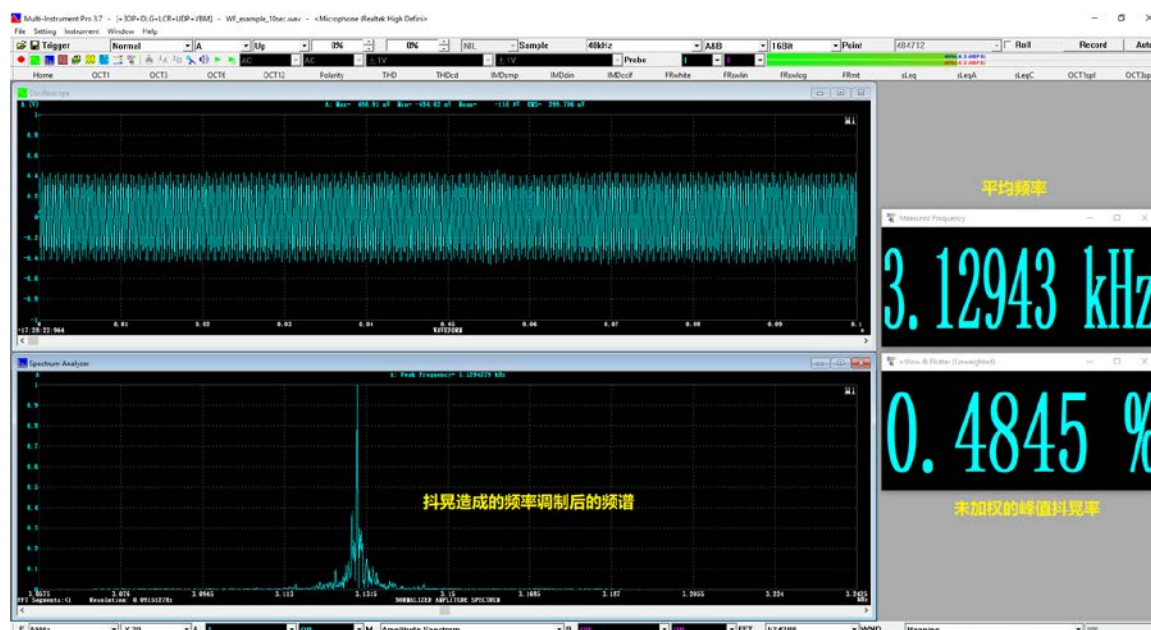


图 5. 一台唱机输出的 3150Hz 正弦信号的频谱和峰值抖晃率

上图的示波器窗口中显示的是 FM 调制信号，下图的示波器窗口中则为这个信号经过 FM 解调后得到的频偏 (%) 随时间变化曲线。在图中通过对示波器属性的设置将信号处理流程设置为：

第一步：321.9Hz~5945Hz 带通

第二步：FM 解调，载频设置为实测的 3129 Hz，调频灵敏度技巧性地设置为 3129 Hz/V。就是说 3129Hz 的频偏对应于 1V(可看作抖晃率 100%), 1Hz 的频偏对应于 $1/3129=0.00032V$ (可看作抖晃率 0.032%)

第三步：去除解调后信号中的直流分量然后再通过 1564Hz 低通

从 FM 解调后的抖晃信号也可大概看出未加权的峰值抖晃率在 0.48%附近。

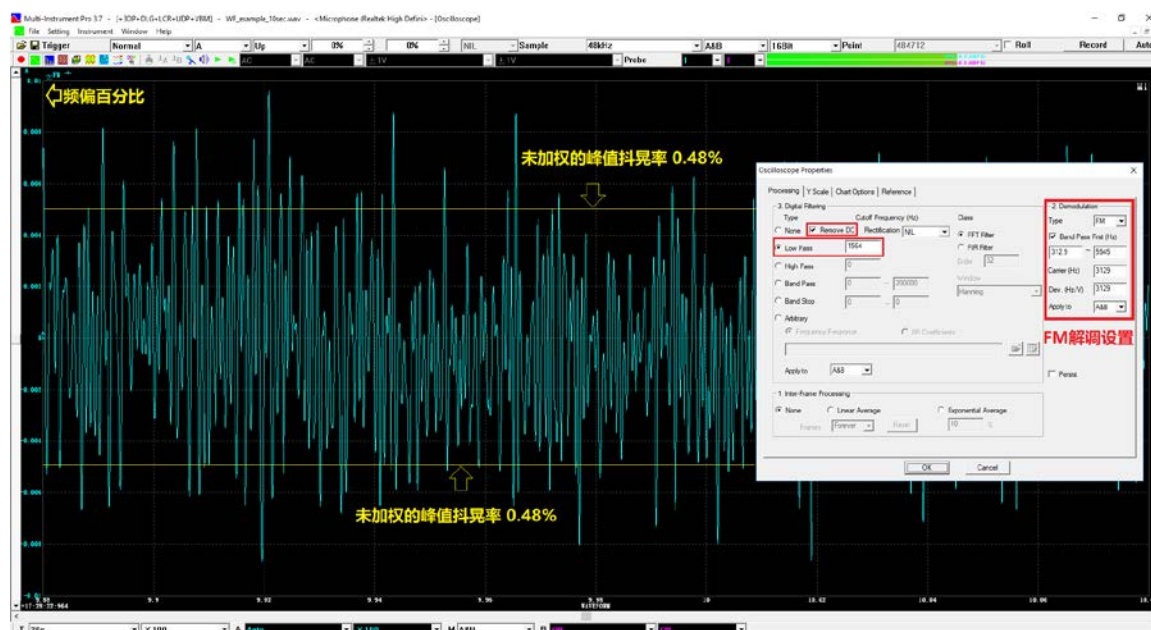


图 6. 一台唱机输出的 3150Hz 正弦信号的频偏随时间变化图

6. 抖晃率测试的硬件设备

传统基于模拟电路的抖晃率测试仪笨重而昂贵。而采用普通 ADC 硬件例如声卡再配以数字信号处理算法的抖晃率测试方法具有精度高、成本低的优点，测试精度很大程度上取决于测量电路的采样时钟的抖晃率（Jitter）和噪声。下图为通过回环测试得到的 Focusrite Scarlett Solo 声卡的未加权的残余峰值抖晃率。

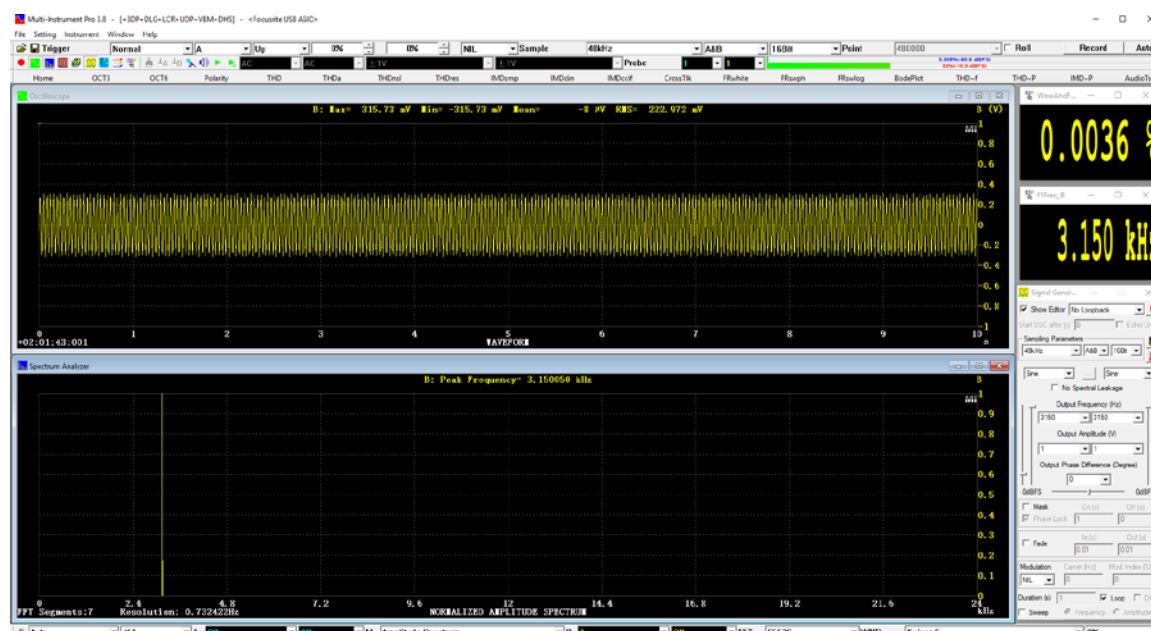


图 7. 通过回环测试得到的 Focusrite Scarlett Solo 声卡未加权的残余峰值抖晃率

下图为通过回环测试得到的 M-Audio Mobile Pre 声卡的未加权的残余峰值抖晃率。

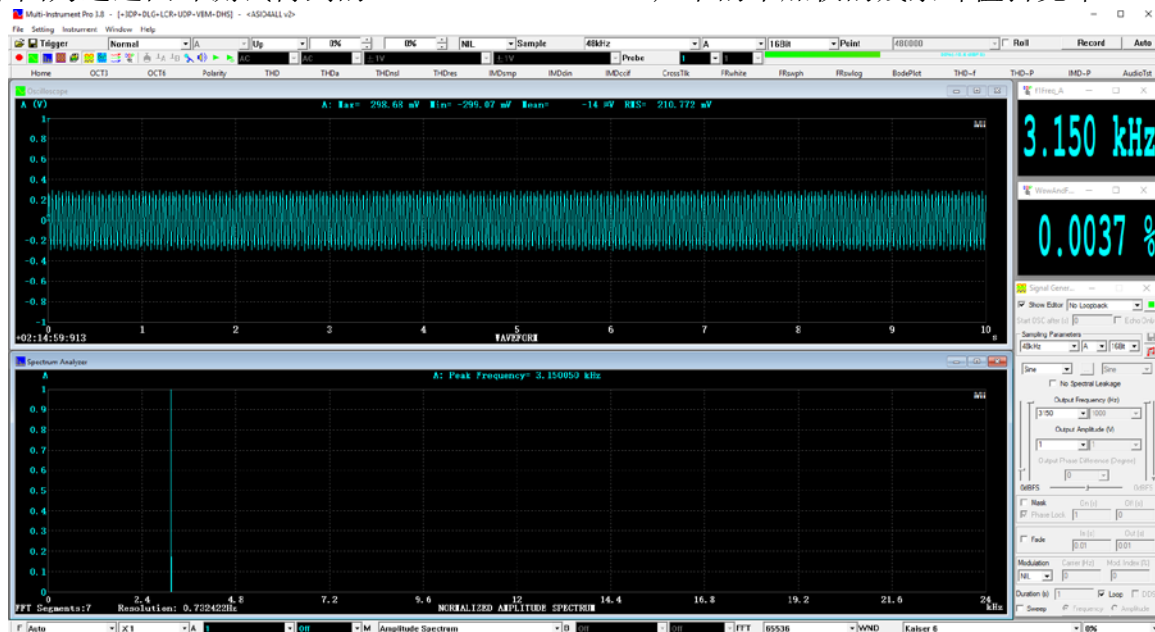


图 8. 通过回环测试得到的 M-Audio Mobile Pre 声卡未加权的残余峰值抖晃率

在上面的测试中，ADC 和 DAC 处于同一声卡中，因此它们的采样时钟的抖晃可能是相关的。下面是采用 M-Audio Mobile Pre 为 ADC，Focusrite Scarlett Solo 为 DAC，通过回环测试测得的联合的未加权的残余峰值抖晃率。

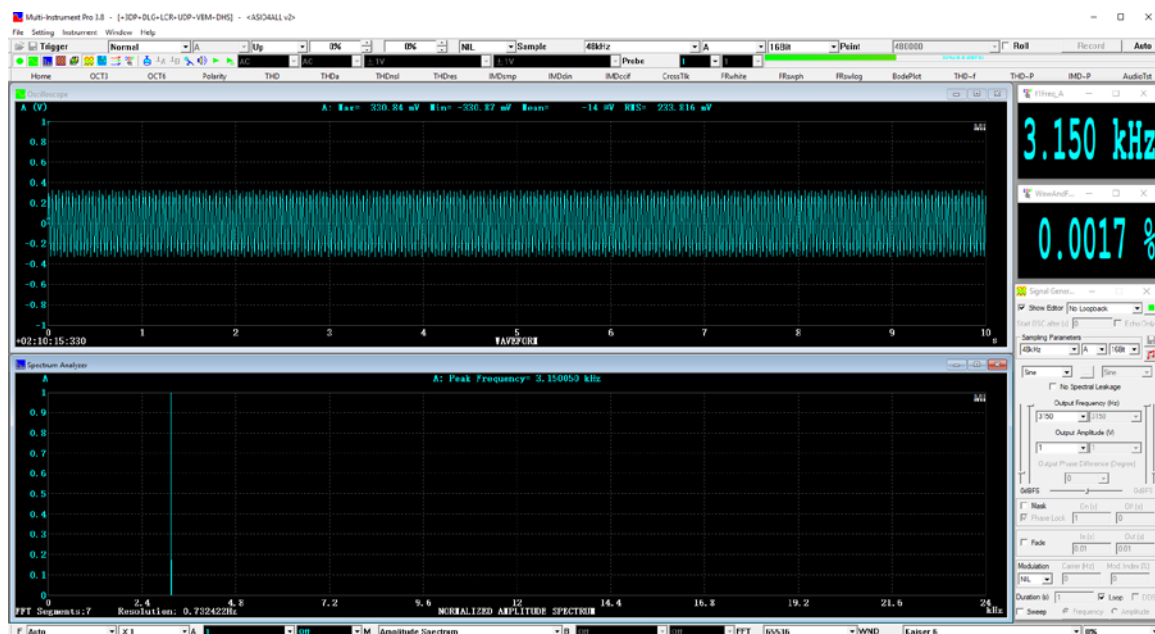


图 9. 通过回环测试得到的 Focusrite Scarlett Solo 声卡(DAC)和 M-Audio Mobile Pro 声卡(ADC)联合的未加权的残余峰值抖晃率

一般唱机的抖晃率在 0. x%左右，很好的可到 0. 0x%，从上面的回环测试结果（0. 0036%、0. 0037%、0. 0017%）可推断，用声卡可以准确测量唱机的抖晃率。

对于 3150Hz 的测试信号，最方便的采集卡当然就是声卡了。如果唱机有线路输出，可直接接入声卡的线路输入，或衰减一下接入声卡的话筒输入。如果唱机只有 Phono 输出，就不能直接与声卡的普通线路或话筒输入相连，而需要在中间插入一级 Phono 前置放大器。当然最方便的就是买一个带 Phono 输入的声卡了，诸如 USB Phono Plus，Audio Genie II 等。LP 唱片在录制时为了能加大录制密度并防止低频使唱针振幅过大做了衰减低频的处理，同时为了提高信噪比，做了增强高频处理，因此回放的时候前置放大器必须做反处理，以实现平坦的频率响应。如下图所示。这条曲线叫 RIAA 均衡曲线。

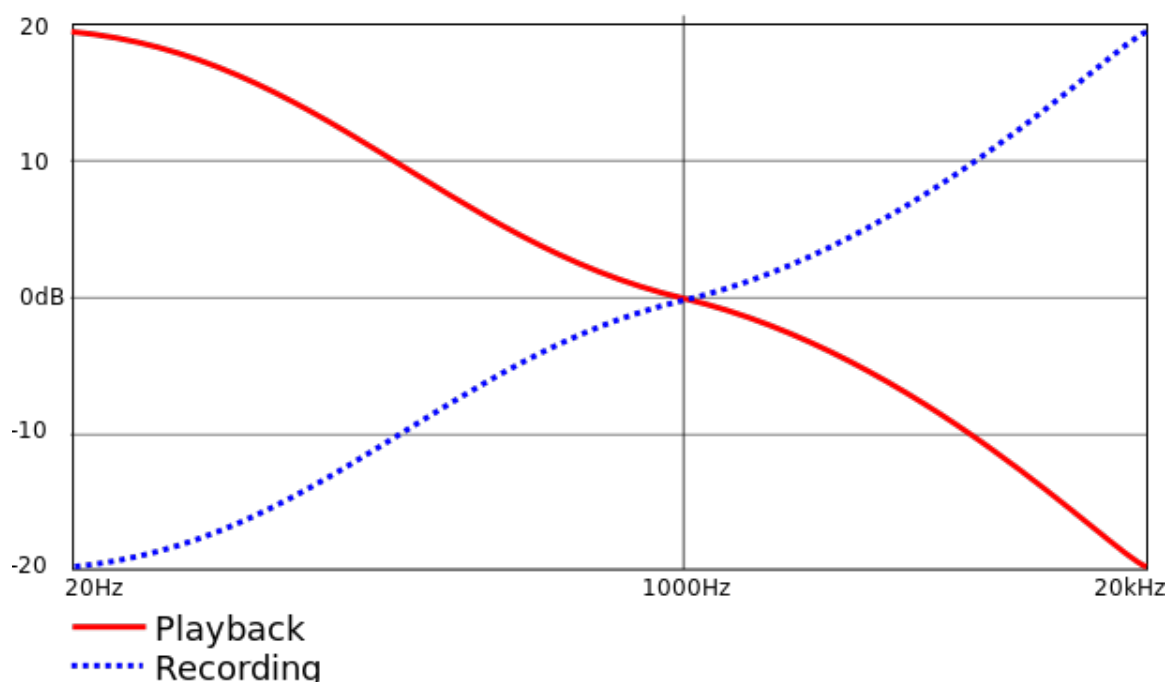


图 10. RIAA 均衡曲线

7. 抖晃率测试的 FM 数字解调算法

如前所述，测量抖晃率的首要任务是 FM 解调，以获取瞬时频偏随时间的变化数据。然后将瞬时频偏数据按前述图 1 的加权曲线进行加权，最后用前述图 2 的“Two Sigma”法来搜寻并得到峰值抖晃率。

FM 信号的数字解调法有多种，比如常见的正交解调法。假定 $I(t)$ 为原始信号， $Q(t)$ 为其希尔伯特变换，则可构建一复数解析信号 $I+jQ$ ，瞬时幅度、瞬时频率、瞬时相位都可方便地从这个解析信号中求得：

$$\text{瞬时幅度} = \sqrt{I^2 + Q^2}$$

$$\text{瞬时相位} = \arctan\left(\frac{Q}{I}\right)$$

$$\text{瞬时角频率} = \frac{d(\arctan(\frac{Q}{I}))}{dt} = \frac{1}{(1+(\frac{Q}{I})^2)} \times \frac{d(\frac{Q}{I})}{dt}$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{Q}{I}\right)^2} \times \left(\frac{1}{I} \times \frac{dQ}{dt} - \frac{Q}{I^2} \times \frac{dI}{dt} \right) = \frac{I \times \frac{dQ}{dt} - Q \times \frac{dI}{dt}}{I^2 + Q^2}$$

得到信号的瞬时幅度、瞬时频率、瞬时相位后，AM、FM、PM 的解调就容易了。对于抖晃率测试，需对原始信号做 FM 解调。对于时间离散的信号，在实际应用时，应将上面的瞬时角频率公式中的微分变为差分。由于微分（差分）操作对高频噪音非常敏感，须做好带限处理。得到瞬时频率后，减去测得的平均频率可得瞬时频偏。

离散希尔伯特变换，可在时域做（可用 FIR 近似），也可在频域做（可用 FFT），后者相当简单。多数情况下，我们希望得到的不是从实数序列 $I(n)$ 通过希尔伯特变换出来的 $Q(n)$ ，而是整个复数序列 $I(n) + jQ(n)$ 。一般做法就是，对实数序列 $I(n)$ 做 FFT 后，将正频率那部分系数乘 2 以保持原信号的幅度不变，而将负频率那部分系数置为零，注意不要动到 0 和 Nyquist 频率。然后再 IFFT 反变换回时域即可得到此复数序列。

下图是一个实序列 I 经过 FFT 后的频谱图，正负频率分量是共轭对称的。

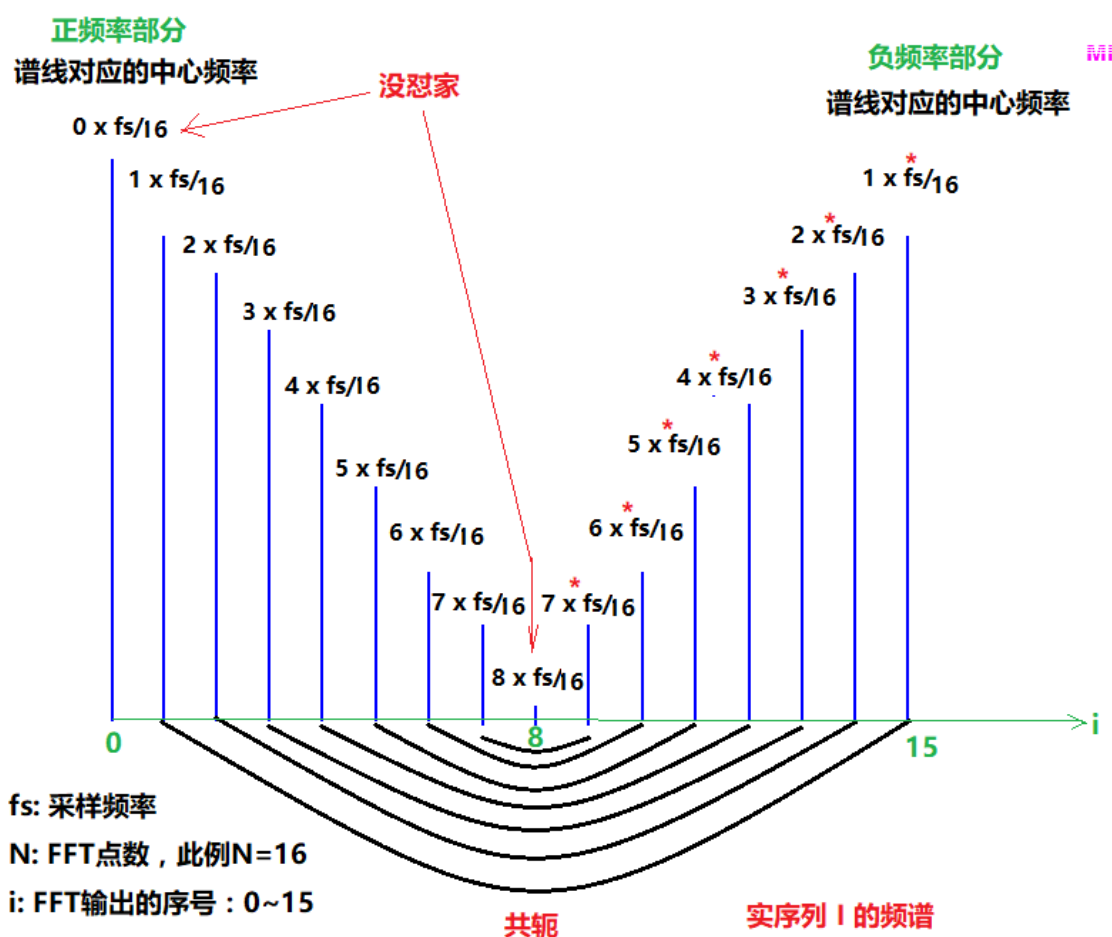


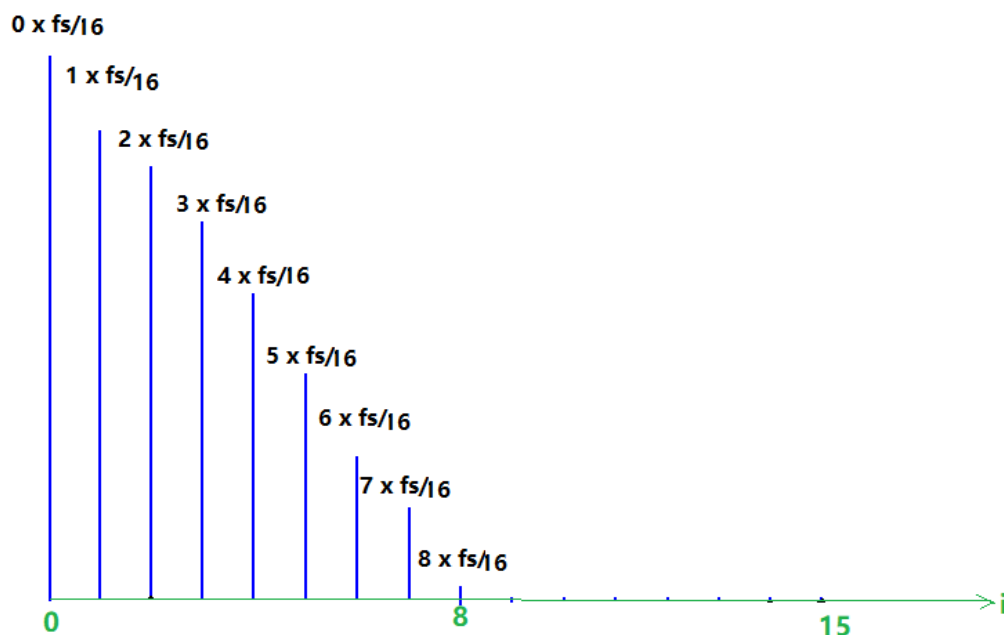
图 11. 实数序列 $I(n)$ 的 FFT 结果

下图是该实序列经过希尔伯特变换并构建出的复数解析信号的频谱图，它只具有正频率部分（单边谱），负频率部分为零。

谱线对应的中心频率 (正频率部分)

(负频率部分为零)

iii



fs: 采样频率

N: FFT点数, 此例N=16

解析信号 $I+jQ$ 的频谱, 其中Q为I的希尔伯特变换

i: FFT输出的序号: 0~15

图 12. 复数解析信号 $I+jQ$ 的频谱, 其中 Q 为 I 的希尔伯特变换

下图则是一个 FM 调制与解调的例子。信号发生器产生的是载频为 10kHz, 最大频偏为 3kHz, 调制频率为 1kHz, 幅度为 0.5V 的 FM 双通道信号。信号送入示波器后, 示波器属性设置为 FM 解调, 载波频率为 10kHz, 调频灵敏度设置为 6000Hz/V (意思就是 6000Hz 频偏对应于 1V, 3000Hz 频偏对应于 0.5V), 解调处理只施加于 A 通道 (紫色), 而 B 通道 (蓝绿色) 仍为未解调的 FM 信号, 以做比较。频谱分析仪则显示了两者的频谱。



图 13. 一个 FM 信号与其解调后的信号对比

8. 抖晃率测试的检定

前面介绍的抖晃率测试法并不存在需要校准的因子，但是如何检定一个抖晃率测试仪或测试算法是否准确呢？这需要产生标准的已知抖晃率的测试信号。最方便的产生方法当然还是用声卡。对于抖晃率测试软件的检定，也可采用标准的测试文件。由于抖晃率计算中的调制频率的计算范围是 0.2Hz 到 200Hz，为了能分辨 0.2Hz，就必须采集至少 5 秒，实际分析时可采集 10s~60s。下面是用 Multi-Instrument 的信号发生器生成的 30 秒长的标准测试信号（WAV 文件），可供免费下载。

1. www.virtins.com/3150Hz.wav
载波 3150Hz，无频率调制，未加权及加权的峰值抖晃率皆为 0%
2. www.virtins.com/3150HzModulatedBy4HzAt0.00997Percent0.315Hz.wav
载波 3150Hz，被 4Hz 调制，最大频偏 0.315Hz，未加权及加权的峰值抖晃率皆为： $0.315 / 3150 \times \sin(0.95 \times 90^\circ) = 0.00997\%$
3. www.virtins.com/3150HzModulatedBy4HzAt0.0997Percent3.15Hz.wav
载波 3150Hz，被 4Hz 调制，最大频偏 3.15Hz，未加权及加权的峰值抖晃率皆为： $3.15 / 3150 \times \sin(0.95 \times 90^\circ) = 0.0997\%$
4. www.virtins.com/3150HzModulatedBy4HzAt0.997Percent31.5Hz.wav
载波 3150Hz，被 4Hz 调制，最大频偏 31.5Hz，未加权及加权的峰值抖晃率皆为： $31.5 / 3150 \times \sin(0.95 \times 90^\circ) = 0.997\%$
5. www.virtins.com/3150HzModulatedBy4HzAt9.97Percent315Hz.wav
载波 3150Hz，被 4Hz 调制，最大频偏 315Hz，未加权及加权的峰值抖晃率皆为： $315 / 3150 \times \sin(0.95 \times 90^\circ) = 9.97\%$
6. www.virtins.com/3150HzModulatedBy0.8HzAt0.0499Percent3.15Hz.wav

载波 3150Hz, 被 0.8Hz 调制, 最大频偏 3.15Hz, 未加权的峰值抖晃率为: $3.15 / 3150 \times \sin(0.95 \times 90^\circ) = 0.0997\%$ 。加权的峰值抖晃率为: $0.5 \times 0.0997\% = 0.0499\%$ 。
注: 0.5 是 AES 提供的加权数值, 可参考前面的频率加权图。

7. www.virtins.com/3150HzModulatedBy20HzAt0.0506Percent3.15Hz.wav

载波 3150Hz, 被 20Hz 调制, 最大频偏 3.15Hz, 未加权的峰值抖晃率为: $3.15 / 3150 \times \sin(0.95 \times 90^\circ) = 0.0997\%$ 。加权的峰值抖晃率为: $0.508 \times 0.0997\% = 0.0506\%$ 。
注: 0.508 是 AES 提供的加权数值, 可参考前面的频率加权图。

以上面的最后一个测试信号（第七个）为例子，按前面介绍的抖晃率测试方法实际测得的未加权和加权的峰值抖晃率如下，跟理论计算值完全吻合。

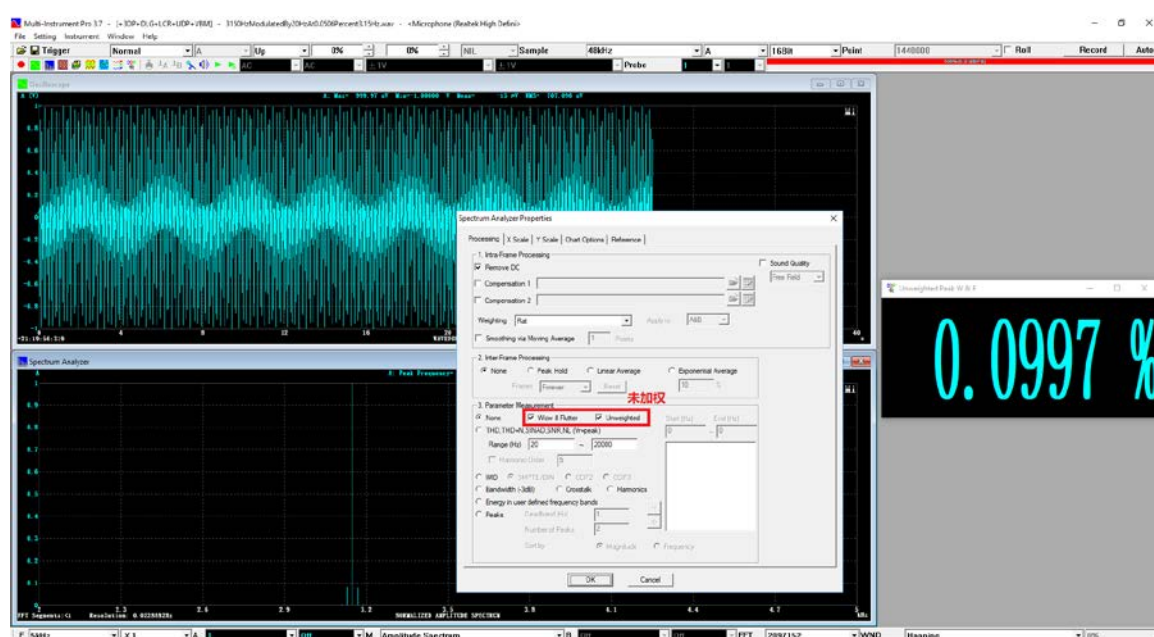


图 14. 第 7 个测试信号的未加权抖晃率

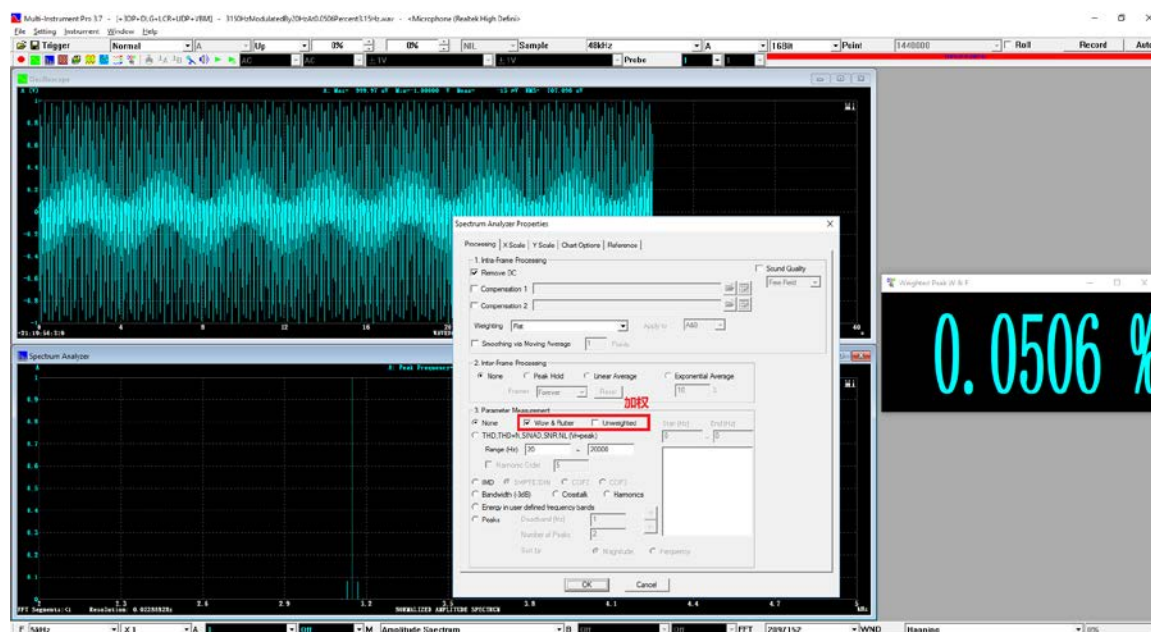


图 15. 第 7 个测试信号的加权抖晃率