

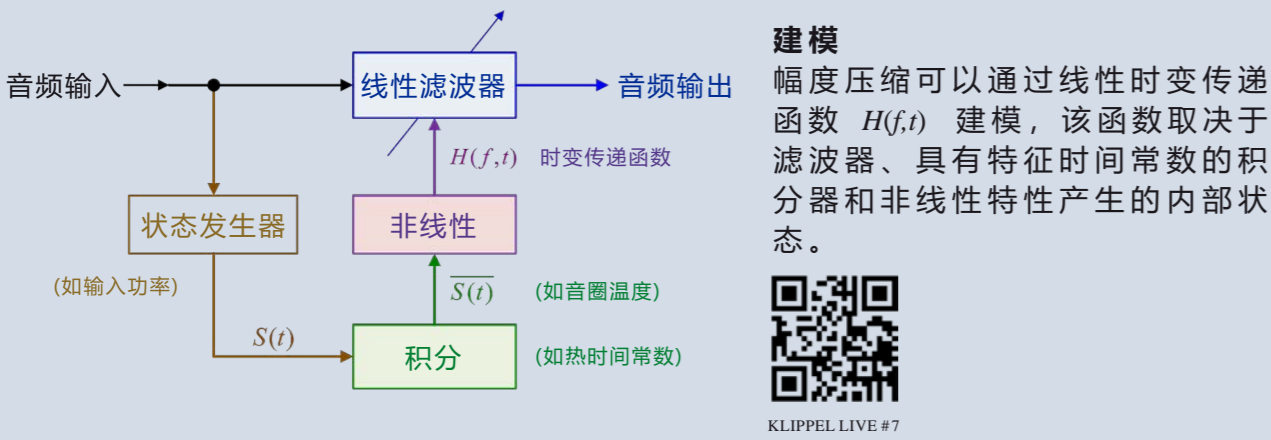
最大输出时的失真

时变失真

幅度压缩

物理原因:

- 换能器 (发热 [1]、非线性、材料性能的可逆变化、疲劳、老化)
- 外部影响 (负载、声学环境、气候)
- 音频 DSP 软件 (压缩器、限幅器 [2]、换能器保护 [3, 4])



测试结论:

- 窄带激励显示激活幅度压缩的关键激励频率
- 需要宽带测试激励来模拟典型的节目材料 (音乐)
- 间歇测试 (开/关循环) 对测量热时间常数有用
- 需要快速分析来识别 DSP 中的短时间常数
- 幅度上升 (电压步进) 的测试序列显示非线性特性
- 瞬态激励会产生脉冲失真和其他瑕疵
- DSP 用扬声器非线性失真换幅度压缩

IEC 60268-21 中的定义

幅度压缩 $C(f,t)$ 定义为用在相同条件 (位置 r 、环境) 下小信号域 ($0.1 u_{MAX}$) 测得的线性传递函数 $H_{LIN}(f,r)$ 归一化后的时变传递函数 $H(f,r,t)$ 的衰减水平。

$$C(f,t) = -20 \log \left(\frac{|H(f,r,t)|}{|H_{LIN}(f,r)|} \right)$$

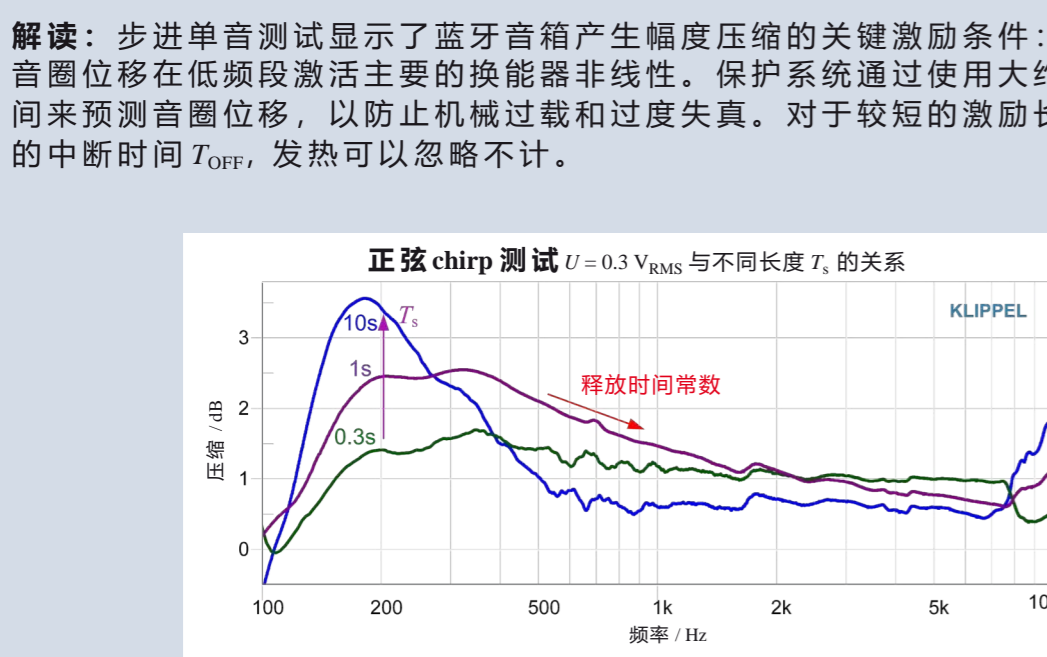
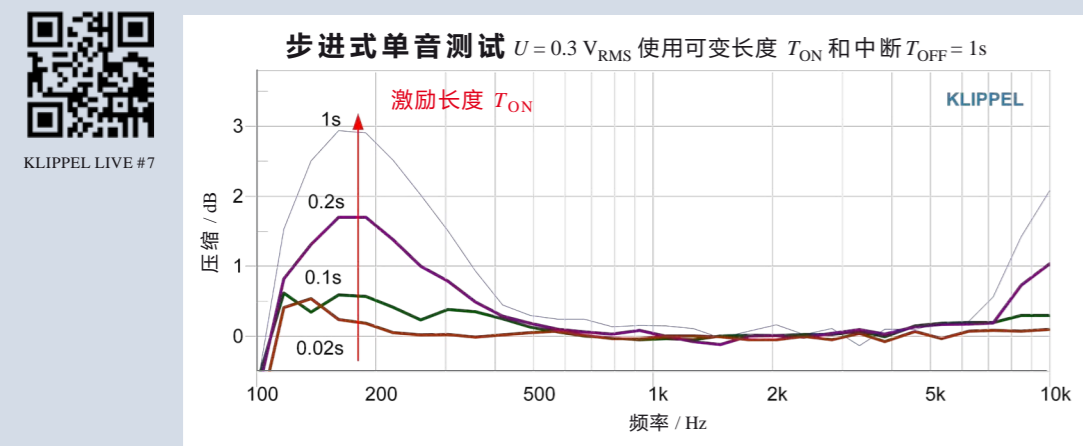
解读:

- 指示随频率变化的衰减 ($C > 0$ dB) 和放大 ($C < 0$ dB)
- 反映影响基频的换能器非线性
- 相对指标: 不需要远场和自由场测量条件
- 可以用一个频带中的最大值 C_{MAX} 和平均值 C_{MEAN} 来表示

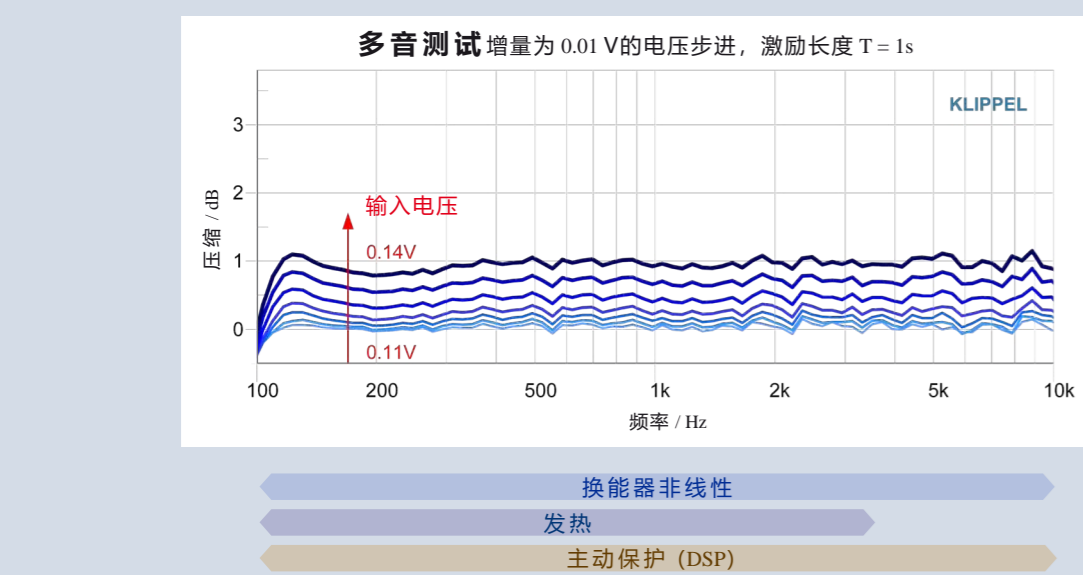
激励信号的影响

频谱 (时域分析)	单音/阶发音	对数 Chirp	多音/粉噪
激励频率	以离散频率 f_c (带中断) 步进	连续 (对数扫描)	一组对数间隔频率
测试工作量	耗时	快速、简便	快速、简便
时间分辨率	高 (受音调的周期长度 $T=1/f_c$ 限制)	高 (受扫描周期长度 $T=1/f$ 限制)	低 (受激励长度、FFT 长度限制)
解读	显示压缩与激励频率 f_c 的关系	揭示瞬态滤波器响应 $H(f,t)$	揭示瞬态滤波器响应 $H(f,t)$
典型应用	评估 DSP 中的启动时间常数	测试最大压缩 C_{MAX}	使用平均压缩 C_{MEAN} 额定 MAX SPL

示例: 使用三种激励 (步进正弦、chirp 和多音复合) 研究蓝牙音箱的幅度压缩。



解读: Chirp 激励产生的压缩 $C(f,t)$ 揭示了瞬态滤波器响应 $H(f,t)$ 。低扫描速度的长 chirp 信号 ($T_c = 10s$) 提供与步进正弦测试类似的结果。短向上扫描测试 ($T_c < 2s$) 在较高频率处显示出额外的由物理模型中积分器的释放时间 T_{REL} 引起的压缩。



解读: 多音测试提供稳态条件下的滤波器响应 $H(f,t)$ 。主动保护系统使用一个简单的增益控制器衰减所有音频频率。换能器的非线性会在较高频率处产生互调失真和基频的非线性压缩。较长测量时间产生的发热会在电输入阻抗较低的频率处产生热压缩。

多音信号可用密集平稳噪声信号 (粉噪、IEC 典型节目材料、M-Noise 等) 替代, 产生类似的结果, 但这些噪声信号失去了有益的伪随机特性以及简洁明了的测量和解读非线性失真的方法。

常规非线性失真

设计产生的非线性

物理原因:

- 换能器非线性 ($B(x)$, $K_{MS}(x)$, $L(x)$, $L(x)$ 等)
- 声学非线性 (端口)
- DSP (主动保护)

属性:

- 扬声器非线性症状 [5]
- 取决于激励信号 (频谱)
- 在小信号域中可以忽略不计
- 确定性、可再现性和可建模性
- 考虑到设计中 (性价比)
- 在认可的原型中可被接受

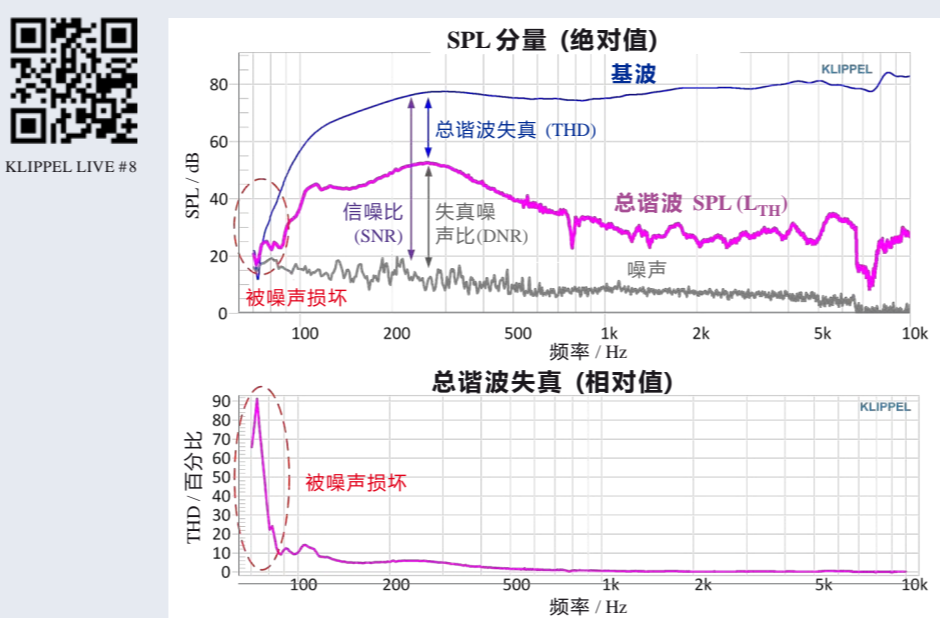
测试结论:

- 失真测量的结果取决于所选的激励
- 具有稀疏频谱 (例如单音) 的人工测试信号通过检测新的频谱分量来简化非线性失真的分离
- 需要宽带测试信号 (多音) 来代表常见的音频信号
- 需要建模以分离密集激励信号 (噪声、音频) 中的非线性失真

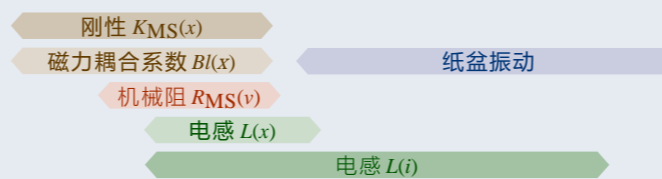
谐波失真

- 需要正弦测试激励信号 (单音、连续 chirp)
- 在激励频率 f_c 的数倍频处评估非线性失真
- 不能代表产生互调失真的宽带激励信号 (例如音乐)
- 显示激发扬声器非线性的关键激励条件
- 二阶谐波揭示了扬声器非线性的对称性

示例: 在模拟自由场和远场条件下, 使用 chirp 激励信号在办公桌上测量的蓝牙音箱基频分量的 SPL 频率响应和总谐波 (L_{TH})。



失真原因

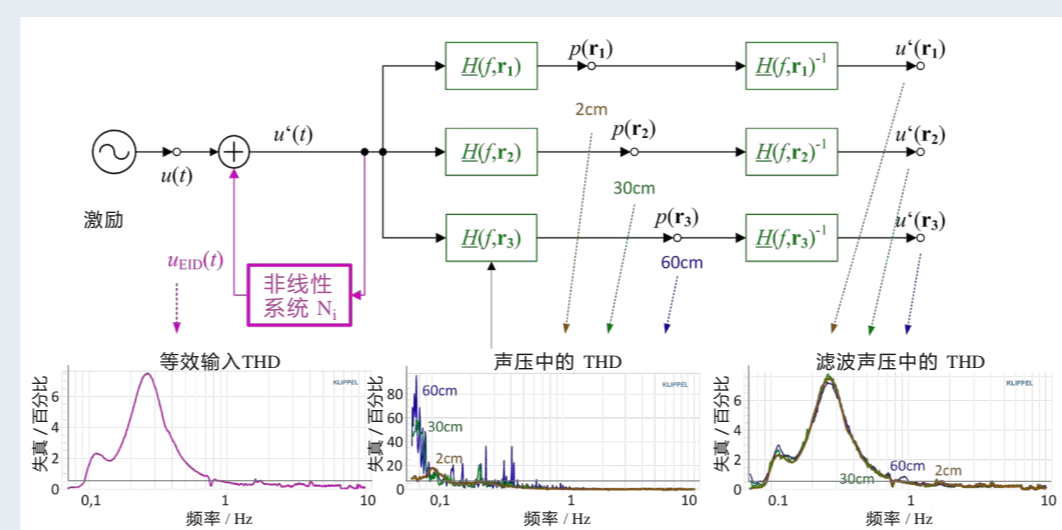


解读: 总谐波的绝对 SPL (L_{TH}) 可与基波激励音和无激励扬声器情况下测量的底噪相比较。相对总谐波失真比 (THD) 将谐波的能量与参考信号 (例如, 总信号) 进行比较。在低频处, 高相对谐波失真比 (THD > 80%) 是由基波的低 SPL 和失真噪声比不足 ($DNR < 12$ dB) 引起的。较高频率处的谐波失真低 (THD < 0.3%) 是因为仅考虑了非线性纸盆振动和电感 $L(x)$ 的症状, 但使用宽带激励 (音乐) 时会高出 20 dB [5]。

等效输入失真

- 解释主要的扬声器非线性
- 与测量位置、房间、麦克风等有关
- 可在近场测量
- 产生相对电压失真比 u_{v}/u (百分比) 的基础
- 简化根本原因分析

示例: 等效输入总谐波失真的计算基于蓝牙音箱在三个距离 (2cm, 30cm 和 60cm) 处执行的声学测量, 蓝牙音箱工作在混响办公室的桌面上。

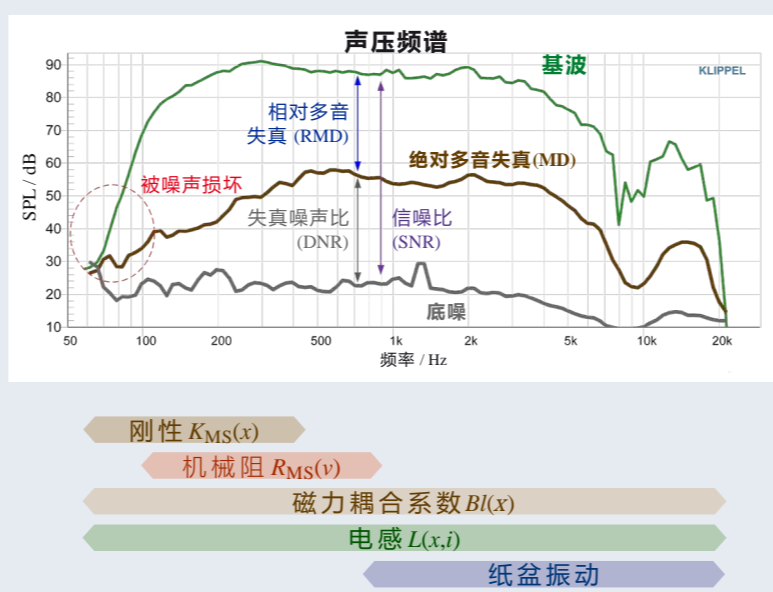


解读: 上图显示应用于声压信号的相对总谐波失真 (THD) 较高 (THD > 80%) 并且高度依赖于麦克风的位置。使用逆传递函数 $H(f,r)^{-1}$ 对声压信号进行滤波实际上将失真转换到输入端。如果分布式非线性失真 p_0 可以忽略不计, 则这三个曲线与等效输入失真几乎相同。

多音失真

- 由类噪声激励信号 (宽带、稀疏、平稳、伪随机) 产生
- 代表典型的节目材料 (例如, 音乐)
- 通过循环激励 (预激励) 提供稳态条件
- 考虑各种非线性失真 (谐波和互调)
- 在声场中任意点测量的相对多音失真 (RMD) 与相对等效输入失真相同
- 可以在扬声器的近场测量 (良好的 DNR)

示例: 普通办公室的桌面上距离 $r = 0.3m$ 处测量的蓝牙音箱在模拟远场和自由场条件下的多音失真。



解读: 非线性磁力耦合系数 $B(x)$ 在蓝牙音箱的通带内产生互调。多音失真谱的 SPL (MD) 可与总声压输出 (基波) 和底噪相比较。低失真噪声比 ($DNR < 12$ dB) 表明 MD 已被噪声干扰。相对多音失真 (RMD) 以分贝或百分比表示失真与总信号之间的比率。

不规则非线性失真

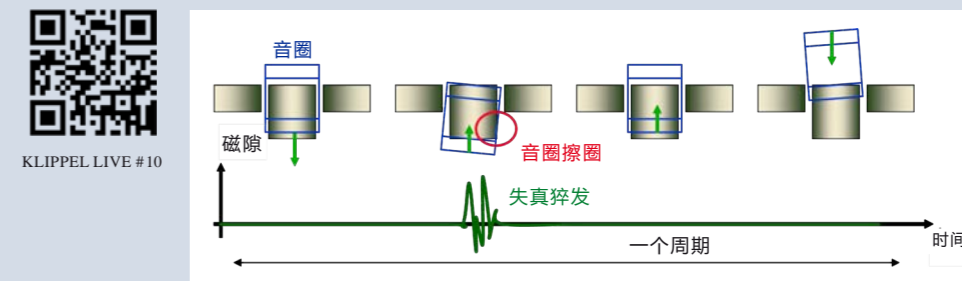
扬声器缺陷

原因:

- 非设计意图的非线性振动
- 空气湍流会产生额外噪音
- 生产制造不良 (例如胶水问题)
- 目标应用中的过载或缺陷
- 初始问题导致后续故障
- 放大器限制、DSP 中的瑕疵

特性:

- RMS 值低但峰值高 (高波峰系数)
- 与音频信号没有直接关系
- 时域上复杂的精细结构
- 覆盖音频频带的宽频谱
- 缺陷不稳定 (随着时间的推移而恶化)
- 对感知音频质量的影响很大



测试结论:

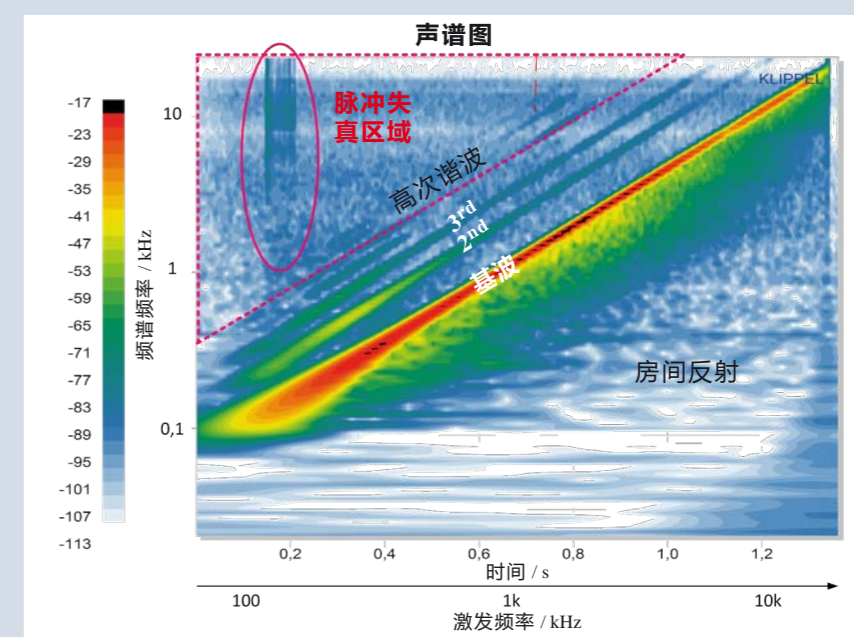
- 窄带激励 (最大幅值的单音或 chirp 信号)
- 在分析时必须去除基波和低次谐波
- 时域分析提供最大的灵敏度和诊断价值
- 近场测量提供最大信噪比
- IEC 60268-21 中定义的特殊方法和特定失真指标

激励信号	高次谐波	声谱图	脉冲失真
失真分离	正弦 (chirp)	任意激励	正弦 (chirp)
特征	频谱分析	时域分析	高通滤波 (残余信号)
精细结构	总 RMS 值	功率谱密度	时域分析
灵敏度	有限信息	显示包络	全时间分辨率
	低	中等	高

¹ 具有脉冲和随机特性的松散颗粒和其他关键缺陷。

Chirp 响应的声谱图

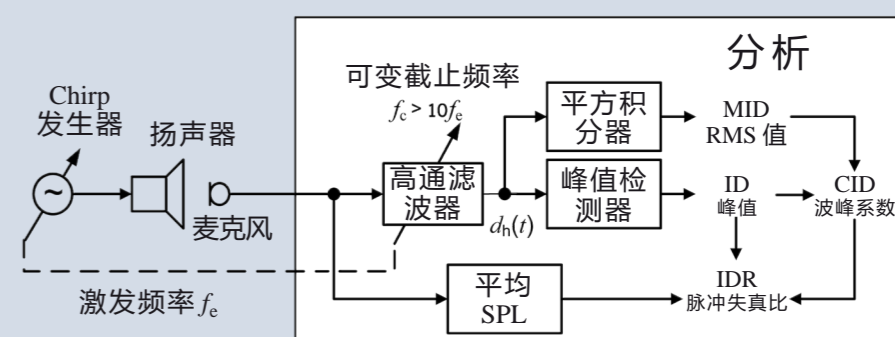
基于小波分析的声谱图以高分辨率揭示了双域 (时域和频域) 中的失真能量。



示例: 在普通房间的桌子上, 距离 $r = 0.3m$ 处测量的蓝牙扬声器。基波分量和谐波分量显示为对应于对数 chirp 信号频率-时间映射的斜线。脉冲失真表现为不同时间上的宽带频谱事件 (垂直线), 而非线性谐波产生的嗡嗡声出现在随时间衰减的特定频段 (图中未显示)。

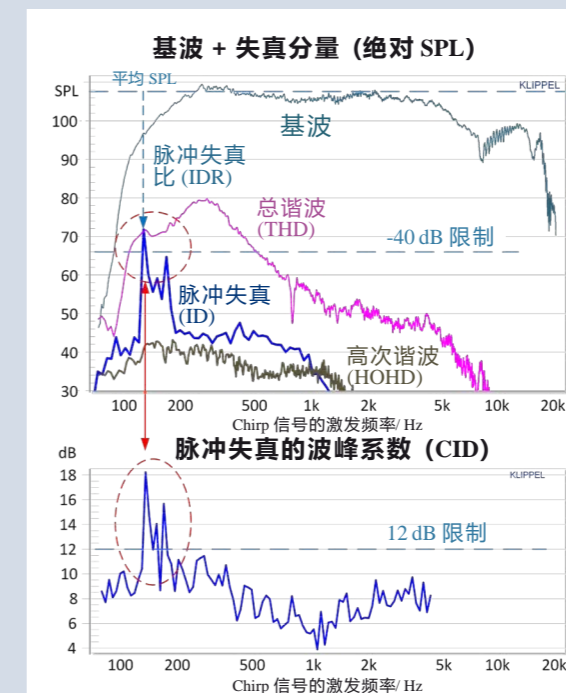
脉冲失真

通过使用随 chirp 信号瞬时频率变化的可变截止频率的高通滤波器, 可以将脉冲失真与声压信号中的其他信号分量分离 (参见上面的声谱图)。

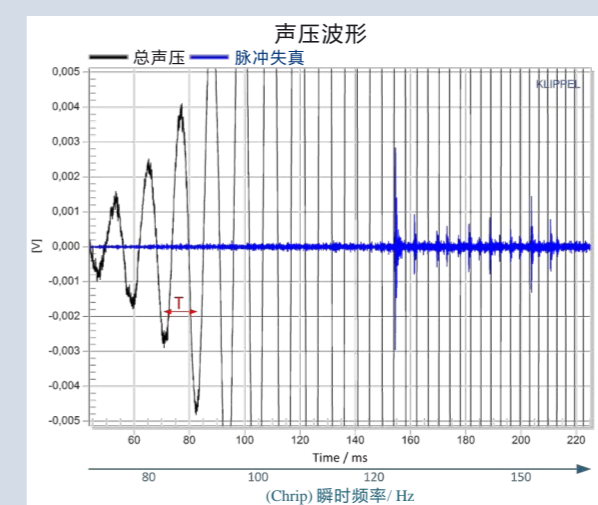


特征	定义
脉冲失真 ID	在 chirp 信号的一个周期内确定的高通滤波声压信号的峰值 SPL
平均脉冲失真 (MID)	在 chirp 信号的一个周期内确定的高通滤波声压信号 RMS 值
脉冲失真波峰系数 (CID)	ID 和 MID 之间的比率 (电平差) 是脉冲失真的基本标准 (CID > 12 dB)
最大脉冲失真比 (IDR)	指定频率范围内的最大 ID (CID > 12 dB) 与基波的平均 SPL 之间的差异

示例: 在普通办公室桌子上距离 $r = 0.3m$ 处测量的蓝牙音箱, 该音箱的主动保护系统 (DSP) 产生了瑕疵。



- 总谐波失真 (THD) 以低阶失真为主
- 高次谐波 (HOHD) 主要为测量噪声
- 脉冲失真大小 (ID) 在 120 Hz 处显示出明显的尖峰, 且比 HOHD 高 30 dB。
- 最大脉冲失真比 IDR 在 120 Hz 时超过 -40 dB
- 高通滤波信号的波峰因数在 120 Hz 时超过 12 dB
- 高 IDR 和 CID 之间的并存是脉冲失真的可靠指示。



精细结构分析
该图显示了放大的脉冲失真时间信号 (蓝色) 和总声压波形, 以分析脉冲在 chirp 信号的一个周期内的位置。

[1] W. Klippel, „Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers (扬声器中热转换的非线性建模)“, J. Audio Eng. Soc., vol. 52, no. 1/2, pp. 3-25, (2004 Feb).

[2] U. Zölzer, „Digital Audio Processing (数字音频处理)“, J. Wiley & Sons, Chichester, 1997

[3] W. Klippel, „Mechanical Overload Protection of Loudspeaker Systems (扬声器系统的机械过载保护)“, J. Audio Eng. Soc.,

vol. 64, no. 10, pp. 771-783 (2016 Oct).

[4] K. M. Pedersen, „Thermal Overload Protection of High-Frequency Loudspeakers (高频扬声器的热过载保护)“, Rep. of final year dissertation, University of Salford (2002).

[5] W. Klippel, „Loudspeaker Nonlinearities – Causes, Parameters, Symptoms (扬声器非线性 – 原因和症状)“, J. Audio Eng. Soc., vol. 54, no. 10, pp. 907-939 (2006 Oct).

[6] Sound System Equipment – Electro-acoustical Transducers – Measurement of Large Signal Parameters (音响系统设备 – 电声换能器 – 大信号参数的测量), IEC, 62458:2010.

[7] W. Klippel, „Measurement and Application of Equivalent Input Distortion (等效输入失真的测量和应用)“, J. Audio Eng. Soc., Vol. 52, No. 9, 2004 September

[8] W. Klippel and U. Seidel, „Measurement of Impulsive Distortion, Rub and Buzz and Other Disturbances (脉冲失真、异常音和其他干扰的测量)“, presented at the 114th Convention of the Audio Eng. Soc. (2003), preprint 5734.

[9] W. Klippel, „Acoustical Measurement of Sound System Equipment according IEC 60268-21 (符合 IEC 60268-21 标准的音响系统设备的声学测量)“, Webinar, KLIPPEL LIVE