

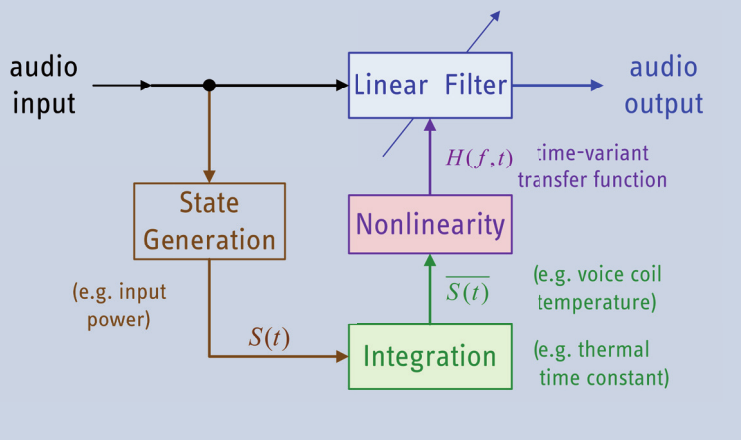
最大输出时的失真

时变失真

幅度压缩

物理原因

- 换能器 (发热 [1], 非线性, 材料特性的不可逆变化, 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])



建模

幅度压缩可用一个线性时变传递函数 $H(f,t)$ 来建模, 该函数取决于滤波器, 特性时间常量积分器和非线性特性所产生的内部状态.



测试结论:

- 窄带激励展现出激发幅度压缩的关键频率
- 需要宽带激励信号来模拟典型节目材料 (音乐)
- 间歇测试 (ON/OFF 周期循环) 对测试热学时间常量很有用
- 需要快速分析来识别DSP中的短时间常量
- 幅度递增 (电压步进) 测试序列展示出非线性特性
- 瞬态激励可产生脉冲失真和其他瑕疵
- DSP用喇叭非线性失真换取幅度压缩

IEC 60268-21的定义

幅度压缩 $C(f,t)$ 定义为时变传递函数 $H(f,r,t)$ 用相同条件 (位置 r , 环境) 下小信号域 ($0.1 \mu_{MAX}$) 测得的线性传递函数 $\underline{H}_{LIN}(f,r)$ 归一化后的衰减水平.

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

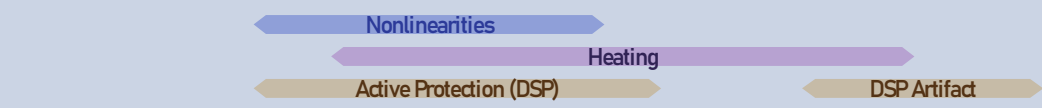
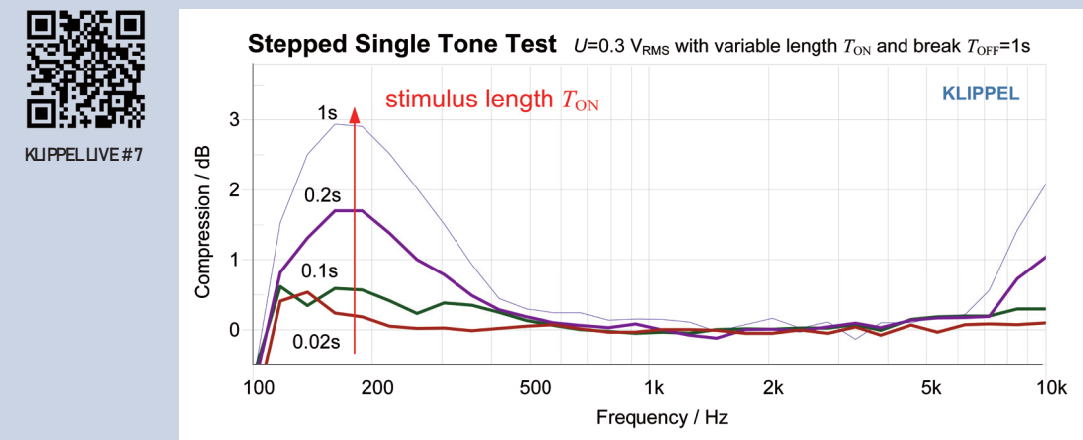
解读:

- 指示出信号随频率的衰减 ($C > 0$ dB) 和放大 ($C < 0$ dB)
- 反映了影响基频的换能器非线性特性
- 相对指标, 不需要远场和自由场测试条件
- 可用频段内的最大值 C_{MAX} 和平均值 C_{MEAN} 来表示

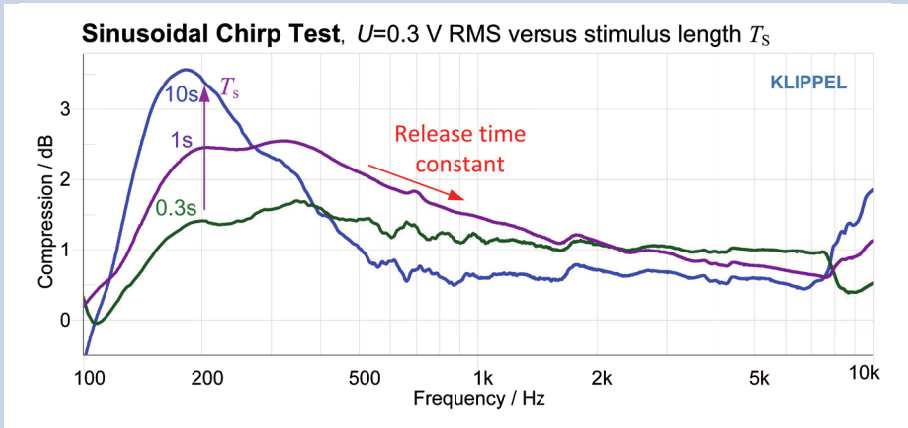
激励信号的影响

Spectrum (time-frequency analysis)	Single Tone/Burst	Logarithmic Chirp	Multi-Tone/Pink Noise
Excitation Frequencies	Stepping at discrete frequencies f_i (with breaks)	Continuous (logarithmic sweep)	Set of logarithmically spaced frequencies
Test Effort	Time consuming	Fast, simple	Fast, simple
Temporal Resolution	High (limited by period length $T=1/f_i$ of the tone)	High (limited by instantaneous period length $T=1/f_i$)	Low (limited by stimulus length, FFT length)
Interpretation	Shows compression versus excitation frequency f	Reveals a transient filter response $\underline{H}(f,t)$	Reveals a steady-state filter response $\underline{H}(f)$
Typical Applications	Evaluation of attack time constant in DSP	Testing of maximum compression C_{MAX}	Rating Max SPL with mean compression C_{MEAN}

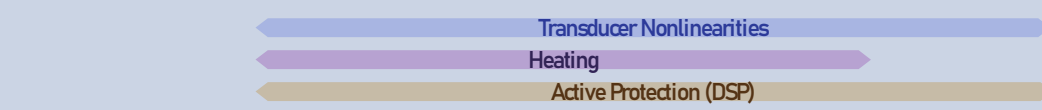
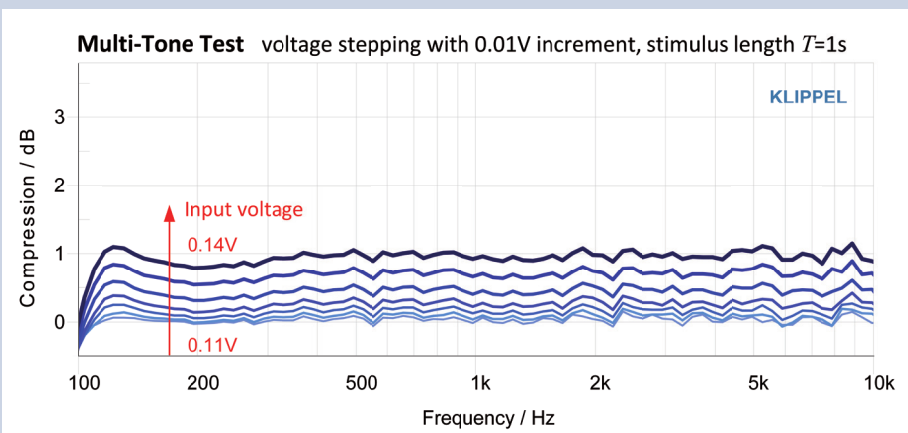
样例: 使用三种激励 (步进正弦, Chirp 和多频音复合信号) 来研究蓝牙音箱的幅度压缩.



解读: 步进正弦显示了蓝牙音箱产生幅度压缩的关键激励条件
音圈位移在低频处激发了换能器的主要非线性. 保护系统通过用约0.3s的启动时间来预测音圈位移以防止机械过载和过量失真. 对于短期 T_{ON} 和长期 T_{OFF} 的激励, 发热可忽略.



解读: Chirp扫描激励产生的压缩 $C(f,t)$ 揭示了瞬态滤波响应 $\underline{H}(f,t)$.
长时间 ($T_S = 10s$) 的Chirp低速扫描激励可得到与步进正弦测试类似的结果. 短时间 ($T_S < 2s$) 的频率向上扫描测试在高频处表现出额外的压缩, 主要是物理模型中积分器的释放时间 T_{REL} 引起的.



解读: 多频音激励提供稳态条件下的滤波响应 $\underline{H}(f,t)$. 主动保护系统使用一个简单的增益控制器衰减所有频率. 在高频区换能器非线性产生互调失真和基波成分的非线性压缩, 长时间测试出现的热在电输入阻抗较低的频率处产生热学压缩.



多频音信号可用密集稳态噪音信号 (粉噪, IEC 典型节目材料, M噪音) 来替代, 可产生类似的结果, 但缺少了信号准随机特性带来好处, 以及非线性失真测试和解读的简洁性.

常规非线性失真

设计带来的非线性

物理成因

- 换能器的非线性 ($B(x)$, $K_{MS}(x)$, $L(x)$, $L(x)$, ...)
- 声学非线性 (开口)
- DSP (主动保护)

特性

- 喇叭非线性的症状 [5]
- 取决于激励信号 (频谱)
- 在小信号域可忽略
- 确定性的, 可再现的且可建立模型
- 在设计中考虑 (性价比)
- 在承认的样品中可被接受

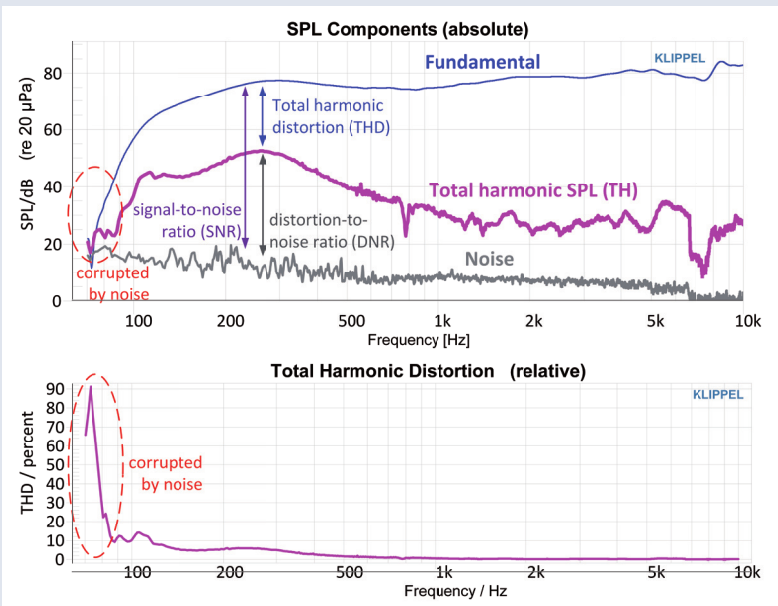
测试结论:

- 失真测试的结果取决于所选激励信号
- 通过检测离散频谱 (如: 单频) 仿真测试信号所产生的新谱线成分可简化非线性失真的分离
- 需要宽带测试信号 (多频音) 来代表普通的音乐信号
- 需要建立模型来分离密集激励信号 (噪音, 音乐) 里面的非线性失真

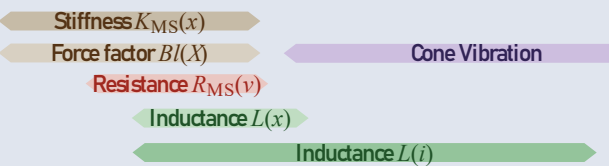
谐波失真

- 需要正弦测试信号 (单音, 连续扫频)
- 在激励频率 f_i 的若干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 (如: 音乐)
- 展现激发扬声器非线性的关键激励条件
- 二次谐波揭示了扬声器非线性特性的对称性

样例: 在仿真自由场和远场条件下使用Chirp连续扫描信号在办公桌上测得的蓝牙音箱基波成分的SPL频率响应和总谐波失真 (L_{THD}).



失真的成因:



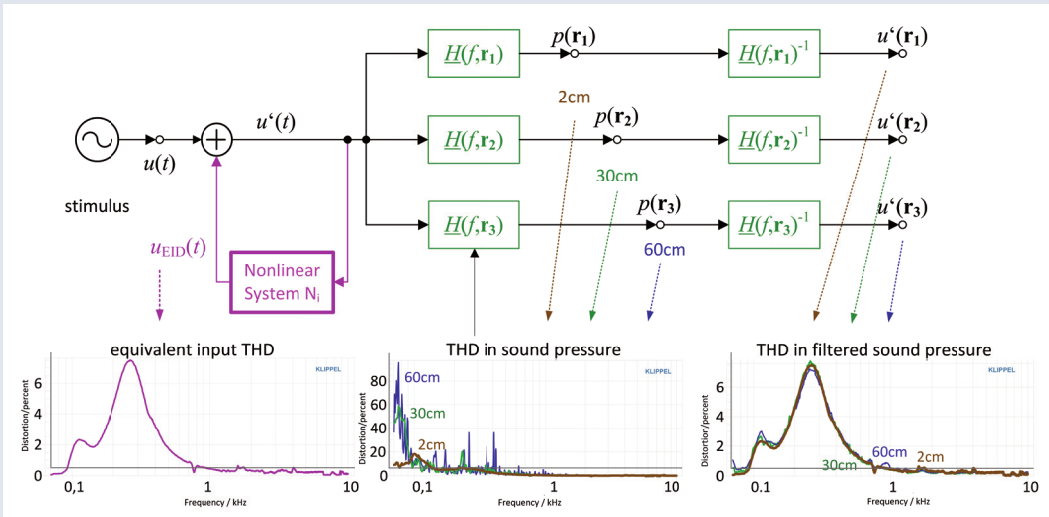
解读: 总谐波成分的绝对SPL (L_{THD}) 可与基频激励音以及扬声器未激励时测得的底噪相比较. 相对总谐波失真比 (THD) 比较谐波成分与参考信号 (如: 总信号) 的能量. 在低频处高的相对谐波失真比 (THD $> 80\%$) 是由于基波SPL低和不足的失真-噪音比 (DNR < 12 dB) 引起的. 在高频处低的相对谐波失真比 (THD $< 0.3\%$) 是因为只考虑了纸盆非线性振动和电感 $L(f)$ 非线性症状, 但使用宽带激励信号 (音乐) 时要高20 dB以上 [5].

等效输入失真



- 解释了主要的扬声器非线性特性
- 与测试位置, 空间, 测试麦克风等无关
- 可在近场测试
- 是生成相对电压失真比 u_{Df}/u (百分比) 的基础
- 简化了根本原因的分析

样例: 等效输入总谐波失真的计算基于蓝牙音箱在三个不同距离 (2 cm, 30 cm 和 60 cm) 执行的声学测试结果. 音箱放置于混响办公室的桌面上.

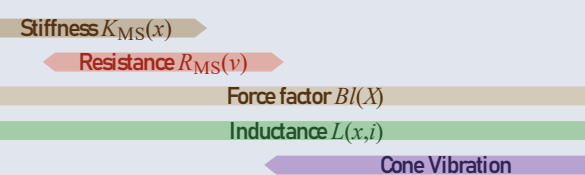
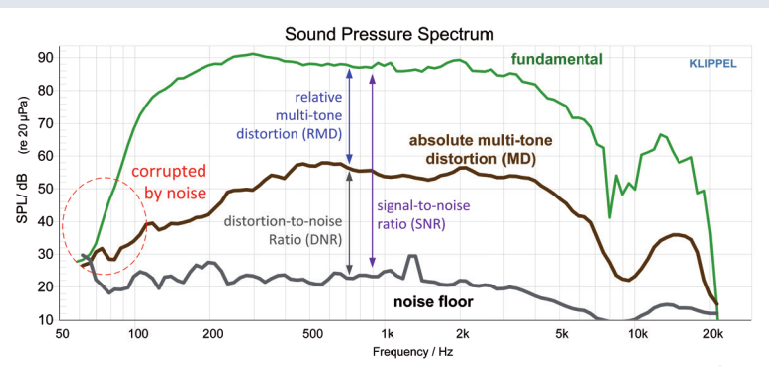


解读: 应用于声压信号的相对总谐波失真 (THD) 较高 (THD $> 80\%$) 并且高度依赖于测试麦克风位置. 使用逆传递函数 $\underline{H}(f,r)$ 对声压信号进行滤波处理实际上将失真转换到信号输入端. 如果分布式非线性失真 p_{Df} 可忽略, 使用等效输入失真表示的三条曲线几乎相同.

多频音失真

- 由类噪音激励信号 (宽带, 离散频, 稳态, 准随机) 产生
- 代表了典型的节目材料 (如: 音乐)
- 循环激励 (预激励) 提供稳态条件
- 考虑所有的非线性失真 (谐波和互调)
- 声场内任意点测得的相对多频音失真 (RMD) 与相对等效输入失真相同
- 可在扬声器近场测试 (优良的DNR)

样例: 普通办公室桌面上距离 $r = 0.3m$ 处测得蓝牙音箱在仿真远场和自由场条件下的多频音失真



解读: 非线性磁力耦合系数 $B(x)$ 在蓝牙音箱通带内产生互调失真. 多频音失真谱 (MD) 的SPL与总声压输出 (基波) 和底噪比较. 低的失真噪音比 (DNR < 12 dB) 表示多频音失真 (MD) 受到噪音干扰. 相对多频音失真 (RMD) 代表了失真和总信号之间的比率, 用dB或%表示.

不规则非线性失真

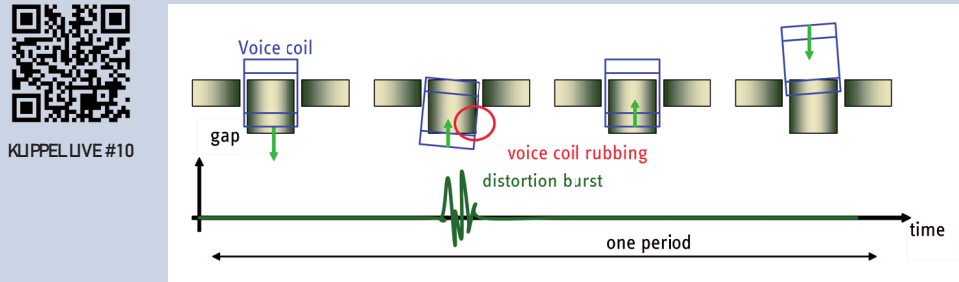
扬声器缺陷

成因

- 非设计本意的非线性振动
- 空气湍流产生额外噪音
- 生产制造不良 (如: 胶水问题)
- 目标应用中的过载或缺陷
- 初始问题导致后续失效
- 放大器的限制, DSP中的瑕疵

特性:

- 有效值 (RMS) 很低但峰值很高 (高峰值因子)
- 与音频信号没有直接关系
- 时域上复杂的细微结构
- 覆盖音频带上很宽频谱
- 缺陷不稳定 (随时间推移而恶化)
- 对接收音频质量影响很大



测试结论:

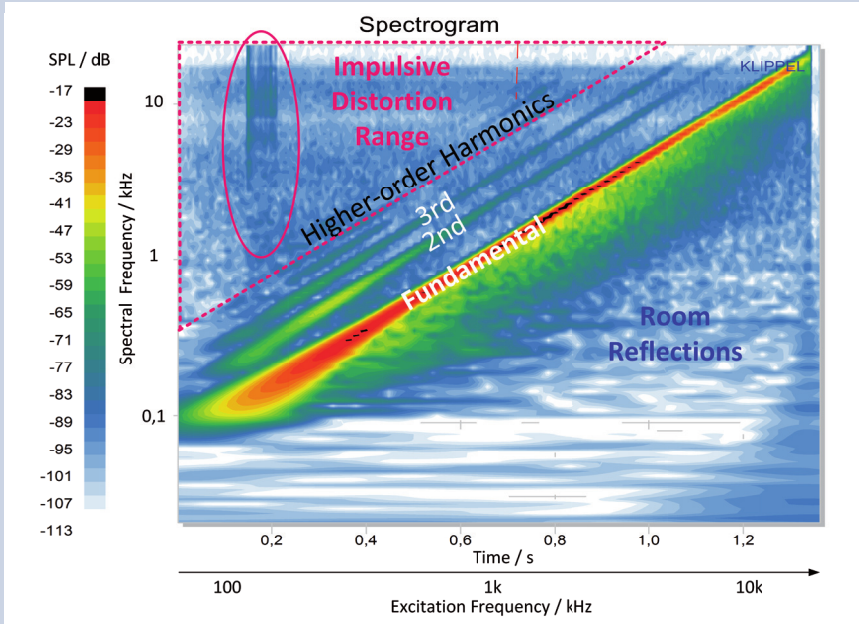
- 窄带激励 (大幅度的单音或连续扫频信号)
- 分析时必须去除基波成分和次谐波成分
- 时域分析提供最大的灵敏度和诊断价值
- 近场测试提供最大信噪比
- 定义在IEC 60268-21标准中特别的方法和特殊的失真指标

	Higher-order Harmonics	Spectrogram	Impulsive Distortion
Stimulus	Sinusoidal (chirp)	Any stimulus	Sinusoidal (chirp)
Distortion Separation	Spectral analysis	Time-Frequency Analysis	High-pass filtering, (residual)
Characteristics	Total RMS value	Spectral power density	Time domain analysis
Fine-Structure	Limited information	Reveals envelope	Full temporal resolution
Sensitivity ¹	Low	Medium	High

¹ Loose particles and other critical defects with impulsive and random properties

连续扫频响应的声谱图

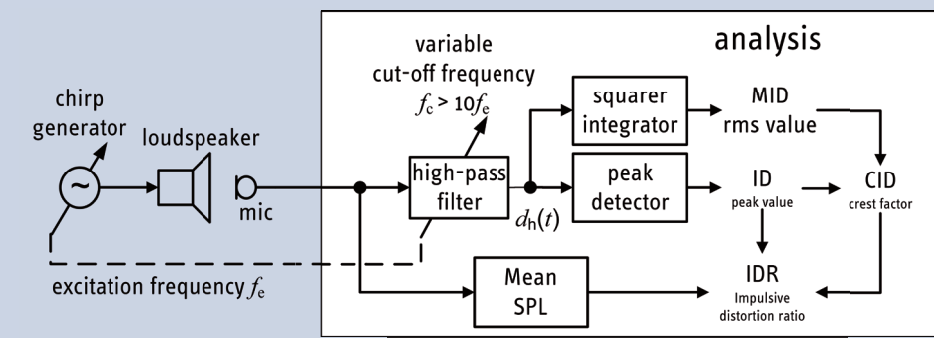
基于小波分析的声谱图以高分辨率反映了失真在双域 (时域, 频域) 内的能量.



样例: 普通房间桌面上距离 $r = 0.3m$ 测得的蓝牙音箱结果. 基波成分和谐波成分显示为对应于扫描信号频率-时间映射的若干斜线. 脉冲失真表现为不同时间上的宽带频谱事件 (垂直线), 由非线性谐振器产生的异常音出现在特定频段, 随时间衰减 (图中未显示).

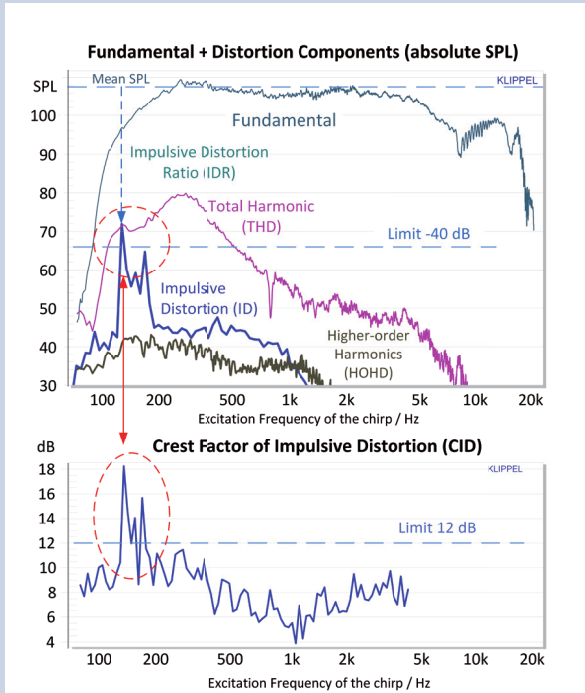
脉冲失真

脉冲失真可使用一个截止频率随连续扫描信号瞬间频率变化的高通滤波器, 与声压信号中的其它信号成分区分开来 (参考上面的声谱图).



Characteristics	Definition
Impulsive Distortion Level (ID)	Peak SPL of the high-pass filtered sound pressure signal determined within one period of a chirp signal
Mean Impulsive Distortion Level (MID)	RMS value of the high-pass filtered sound pressure signal within one period of the chirp
Crest Factor Impulsive Distortion (CID)	Ratio (level difference) between ID and MID is an essential criterion for impulsive distortion (CID > 12 dB)
Maximum Impulsive Distortion Ratio (IDR)	Difference between maximum ID in the stated frequency range (with CID > 12 dB) and mean SPL of the fundamental

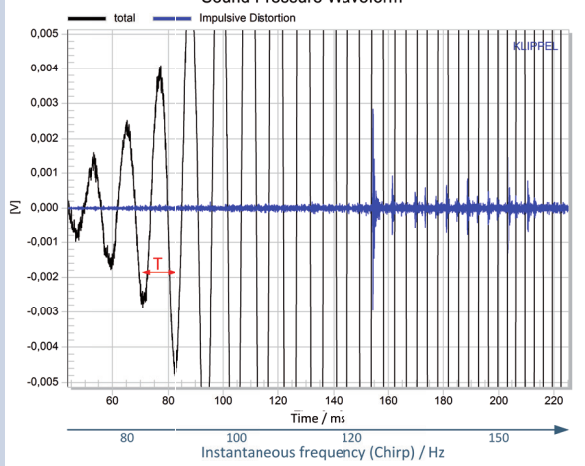
样例: 普通办公室桌面上距离 $r = 0.3m$ 处测试蓝牙音箱, 主动保护系统 (DSP) 产生了瑕疵.



- 总谐波失真 (THD) 以低阶失真为主
- 高阶谐波失真 (HOHD) 主要为测试噪音
- 脉冲失真电平 (ID) 在120 Hz处表现出明显尖峰, 且比HOHD高30 dB以上
- 最大脉冲失真比IDR在120 Hz处超过了-40 dB
- 经高通滤波后的信号峰值因数在120 Hz处超过了12 dB
- 高IDR和CID结果之间的一致性脉冲失真的一个可靠指示

细微构造分析

该图显示了放大的脉冲失真时间信号 (蓝色) 与整体声压信号波形, 以便在Chirp信号的一个周期内分析脉冲的位置.



REFERENCES

- [1] W. Klippel, „Nonlinear Modeling of the Heat Transfer in Loudspeakers“, J Audio Eng. Soc., vol. 52, no. 1/2, pp. 3-25, (2004 Feb.)
- [2] U. Zölzer, „Digital Audio Processing“, J Wiley & Sons, Chichester, 1997
- [3] W. Klippel, „Mechanical Overload Protection of Loudspeaker Systems“, J Audio Eng. Soc., vol. 64, no. 10, pp. 771-783 (2016 Oct.).

- [4] K. M. Pedersen, „Thermal Overload Protection of High-Frequency Loudspeakers“, Rep. of final year dissertation, University of Salford (2002).
- [5] W. Klippel, „Loudspeaker Nonlinearities – Causes Parameters, Symptoms“, 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 IEC 62468:2010
- [7] W. Klippel, „Measurement and Application of Equivalent Input Distortion“, 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“, 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“, Webinar, KLIPPEL live

www.klippel.de

广州精音

www.audioapt.com