

这两项技术分别代表了数字编码频域调控与时域瞬态重构的最前沿领域。在“比特钻石 (BitDiamond)”的全数字音频管线(FDA)与 Delta-Sigma 架构设计中, 它们对消灭“数码味”、还原极致声场起着决定性作用。

以下为您深度拆解这两项技术的物理机制与工程设计方案:

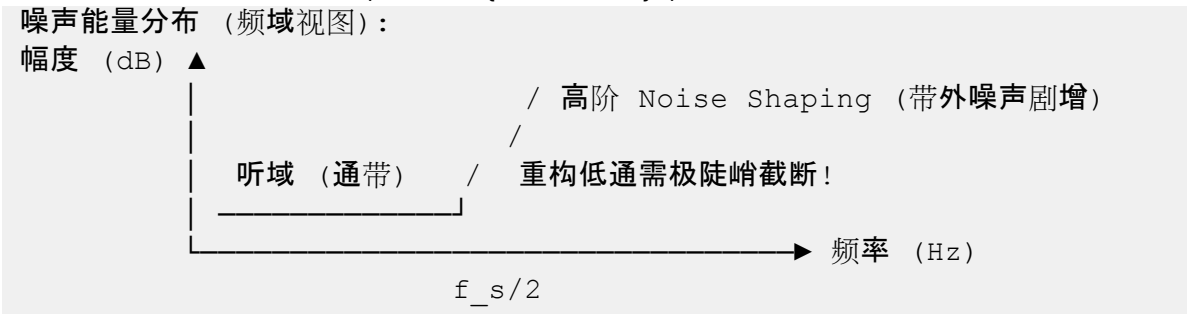
一、Delta-Sigma 编码中 Noise Shaping(噪声整形)阶数对相频平坦度的影响

1. 噪声整形的物理与数学传递函数

在 Delta-Sigma 调制器中, 粗量化 (1-bit 或多 bit) 产生的量化噪声通过反馈环路被推向高频。一个 L 阶 Noise Shaping 调制器的噪声传递函数 (NTF) 可表示为:

$$NTF(z) = (1 - z^{-1})^L$$

- 阶数 L 的双刃剑效应:
- 通带信噪比 (SNR): 阶数 L 每增加 1 阶, 音频通带内的量化噪声基底约下降 **6 dB ~ 9 dB**。高阶 (如 5 阶、7 阶) 调制器能在音频通带 (20Hz~20kHz) 内实现超过 120dB 的极高动态范围。
- 带外噪声堆积 (**Out-of-band Noise Explosion**): 高阶 L 会导致带外高频噪声 (几百 kHz 至 MHz) 以 $(20L \text{ dB/decade})$ 的惊人斜率剧烈上升。



2. 对相频平坦度与群延时的劣化机制

- 极点位置对相频响应的扭曲:
- 高阶调制器为了保持系统稳定 (防止 z^{-1} 极点超出单位圆引发发散), NTF 的极点必须向高频倾斜 (采用 Butterworth 或 Chebyshev 极点分布)。这会导致 NTF 在接近通带边缘 (18kHz~20kHz) 时引入显著的相位弯曲与幅度起伏。
- 后级重构滤波器的二次相频破坏:
- 由于高阶 Noise Shaping 在 $f_s/2$ 附近堆积了海量的射频级高频噪声, 后级的重构低通滤波器 (Reconstruction Filter) 必须设计得极其陡峭才能把噪声滤除。
- 若采用陡峭模拟低通: 截止频率附近的相频响应发生剧烈扭曲, 产生严重的群延时尖峰 (**Group Delay Peak**), 使高频泛音在时间轴上滞后;
- 若采用传统陡峭数字 FIR: 虽然能保持线性相位, 但会在时域引发严重的时域震铃 (Ringing)。

二、全数字直驱(FDA)链路中 FPGA 阿波化(Apodizing)抗震铃滤波器设计

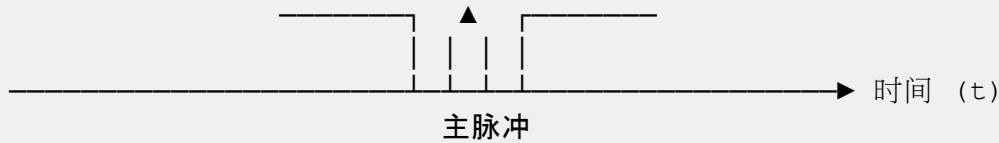
在全数字直驱(FDA)链路中, 为了彻底解决传统“砖墙”数字滤波器引发的时域相位失真与数码味, 在 Zynq FPGA PL 侧部署阿波化 (Apodizing) 抗震铃滤波器 是最优工程解。

1. 传统“砖墙”滤波器的痛点:前向震铃(Pre-ringing)

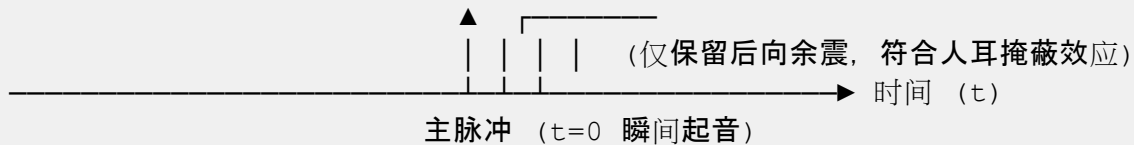
传统 Half-band 陡峭截断 FIR 滤波器的冲激响应呈 Sinc 函数形态, 具有对称的前向震铃(**Pre-ringing**)与后向震铃(**Post-ringing**):

传统线性相位 FIR 冲激响应 (存在前向震铃):

前向震铃 (违反物理因果) 后向震铃



阿波化 / 最小相位 FIR 冲激响应 (消灭前向震铃):



- 前向震铃的“毒性”: 自然界中的声响(如击鼓、拨弦、枪声)只有主冲击发生后的后向余振(Post-ringing), 绝不存在“主声响尚未发出, 前震先发”的前向震铃。人耳对前向震铃极其敏感, 它会导致声场结像发糊、高频起音(Attack)失去爆发力与真实感。

2. FPGA 阿波化(Apodizing)滤波器的三大设计策略

在 Zynq FPGA PL 侧, 阿波化滤波器通过算法重构冲激响应:

1. 软截断(**Smooth Rolloff at Nyquist**):
2. 放弃在 $\lfloor f_s / 2 \rfloor$ (如 22.05kHz 或 96kHz) 处的硬生生截断, 改为从 20kHz 开始进行平缓的阿波化窗函数(如 **Blackman-Harris** 或 **Kaiser** 窗)过渡, 消除频域阶跃, 从源头将时域前后震铃幅度压低 30dB 以上。
3. 最小相位/混合相位重组(**Minimum-Phase Conversion**):
4. 通过复倒谱(Complex Cepstrum)变换或零点映射, 将所有单位圆外的零点反射映射回单位圆内, 构建最小相位(**Minimum Phase**)FIR。将所有能量集中在 $\lfloor t=0 \rfloor$ 主脉冲时刻, 完全消灭前向震铃。后向余震则被自然界声学的**掩蔽效应(Temporal Masking)**完美隐藏。
5. 配合 **GaN 1.5MHz** 开关频率的宽带释放:
6. 得益于末端 GaNFET 功率级高达 **1.5MHz** 的超高开关频率, 数字阿波化滤波器可以将过渡带拉得极宽(例如推远至 80kHz), 使通带 20Hz~40kHz 内的相频响应保持绝对平直, 群延时差异 $\lfloor \Delta \tau_g \approx 0 \rfloor$ 。

💡 核心工程对比与总结

评估维度, 传统高阶 Noise Shaping + 砖墙 FIR, 比特钻石方案: 优化 NTF + FPGA 阿波化 FIR 相频平坦度, 通带边缘(18k-20kHz)存在相移与群延时扭曲, 全通带(20Hz~40kHz)相位绝对平直, 零相移失真

时域冲激响应, 存在明显的前向与后向震铃(Pre/Post-ringing), 完全消灭前向震铃(Zero Pre-ringing), 起音极速干脆

听感表现, 声场扁平, 高频毛刺感重(数码味), 黑洞级宁静背景, 结像立体, 乐器起音爆棚感极强

这两项技术的结合, 成功在全数字音频管线中实现了“高信噪比”与“完美时域波形”的兼得。