



2007 年 3 月 5 日

作者: Charlie Hughes

超低音音箱与全频音箱之间的校准

经常听人问起“如何对超低音音箱和全频音箱之间进行校准? ”。笔者觉得值得就这个问题深入研究一下,看看能否得出一个满意的答案。用超低音音箱来补充全频系统的低频下限,具体说来有三个方面的主要因素。

- 超低音和全频系统的带宽关系(分频)
- 超低音和全频系统的输出声压级关系(增益)
- 超低音和全频系统的信号到达时间关系(延迟)

最后一项可能是难度最大的,所以我们就先来研究一下。同时我们也要简单了解一下分频方面的问题,解决了这两项,剩下的增益问题就不是什么大问题了。

音箱本身是一种带通设备。因此,为了简化测量且便于观察图像,笔者将采用高通和低通滤波器来代替实际的音箱。这样得到的结果也基本上贴合实际情况,只不过这样的仿真测试中无法加入实际的测量话筒,因此也就无法仿真出话筒测试位置变化带来的影响。但是考虑到测试话筒位置改变造成的影响主要影响到的是音箱指向性比较明显的高频部分,而音箱在低频段表现出的基本上是全指向特性,测试话筒位置不同造成的影响不大,所以测试话筒位置的问题就不足为虑了。

另外一个受测试话筒位置影响的因素是,不同话筒位置会导致两组待测音箱(低音和全频)的声音到达测试话筒的距离发生改变。这样以来,在某些位置测量的结果可能很好,但是换个测量位置的话,如果恰好两音箱到话筒的距离差相当于分频点附近频率的 1.5 倍波长时,则总体响应曲线上就会出现凹谷(干涉抵消)。因此,在进行现场测量的时候,建议将测试话筒放在听众区里那些振幅和时间差都具有代表性的位置上。

我们假设有一个全频音箱系统,可以良好地重放 60Hz-14kHz 的声音。然后,在场地中另外一个位置再增加一只超低音音箱。超低音音箱的下限频率可以达到 30Hz。它们的响应曲线如图 1 所示。现在我们要以 100Hz 为分频点,进行 4 阶 Linkwitz-Riley 分频校正。

由于超低音音箱在该分频点附近的响应曲线比较平直,所以我们可以直接给它加一个 100Hz 的 4 阶 L-R 低通滤波器。但是,鉴于全频音箱组的频响曲线在分频点附近已经出现了衰减,我们需要采用低于 4 阶的电子滤波器,从而使全频音箱组的声输出与 4 阶 L-R 滤波器的 100Hz 截止频率 f_c 相匹配。图 2 所示的是这组全频音箱本身的输出曲线,以及 4 阶 L-R 高通滤波的期望响应曲线。为了达到该期望响应曲线的要求,这里给全频音箱加了一个 115Hz 的 3 阶巴特沃斯高通滤波器。如果需要更加精确地匹配期望响应曲线,可以适当降低该巴特沃斯滤波器的截止频率,然后再增加一个参量均衡器进行更精确的校调。总之,要让响应曲线尽可能贴合我们的期望曲线。

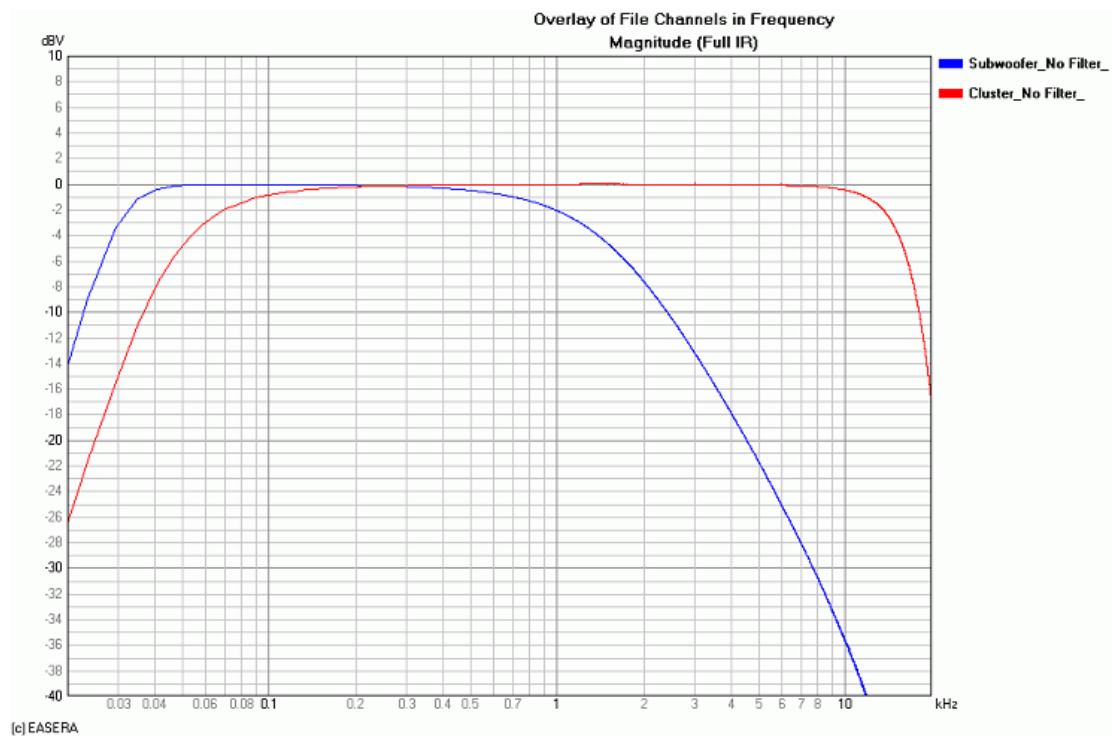


图 1: 分别仿真的音箱幅频响应曲线

图 3 是将高低音音箱输出合并后的响应曲线。此时总体幅频响应完全不符合要求。很明显其中存在抵消。我们知道两组音箱的 L-R 声学响应应当叠加出平直

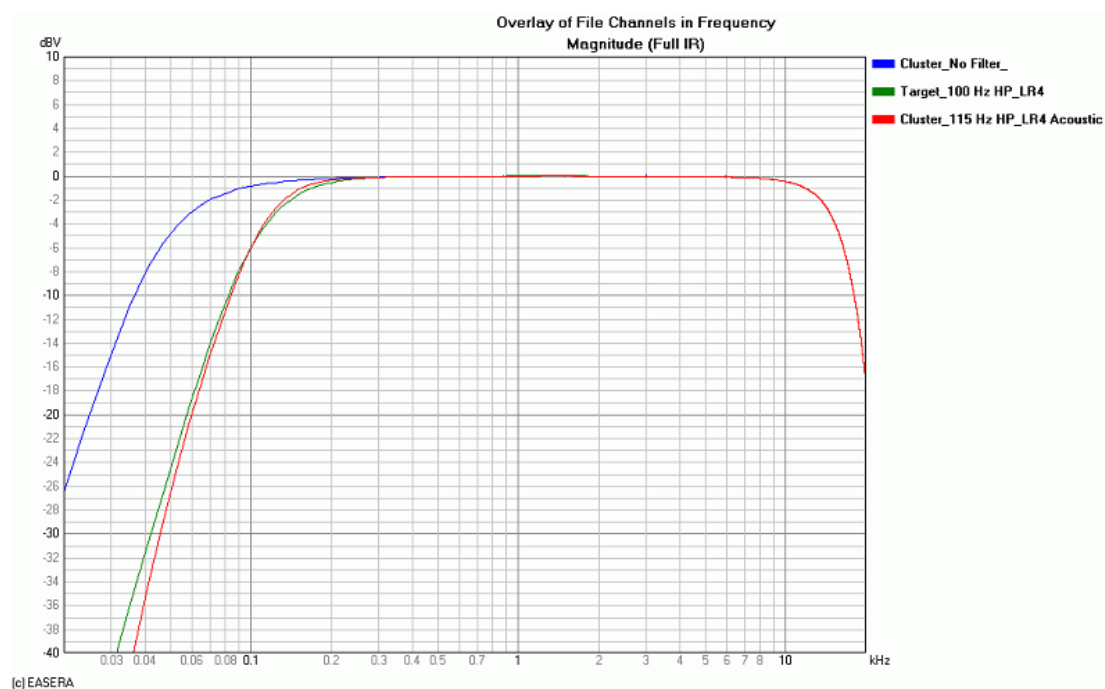


图 2: 不加高通滤波器时的全频音箱组的幅频曲线 (蓝色), 以及期望的 Linkwitz-Riley 响应曲线 (绿色) 和加入 3 阶巴特沃斯滤波器后的响应曲线 (红色)

的响应曲线。但是这里没有, 也就是说两组音箱在时域上存在校准不当的问题。通过观察图 4 中通带内的能量包络曲线 (ETC), 可以确认两者之间的确存在不同步的问题。因此我们需要对全频音箱组进行延迟, 但是延迟量要多大才合适呢?

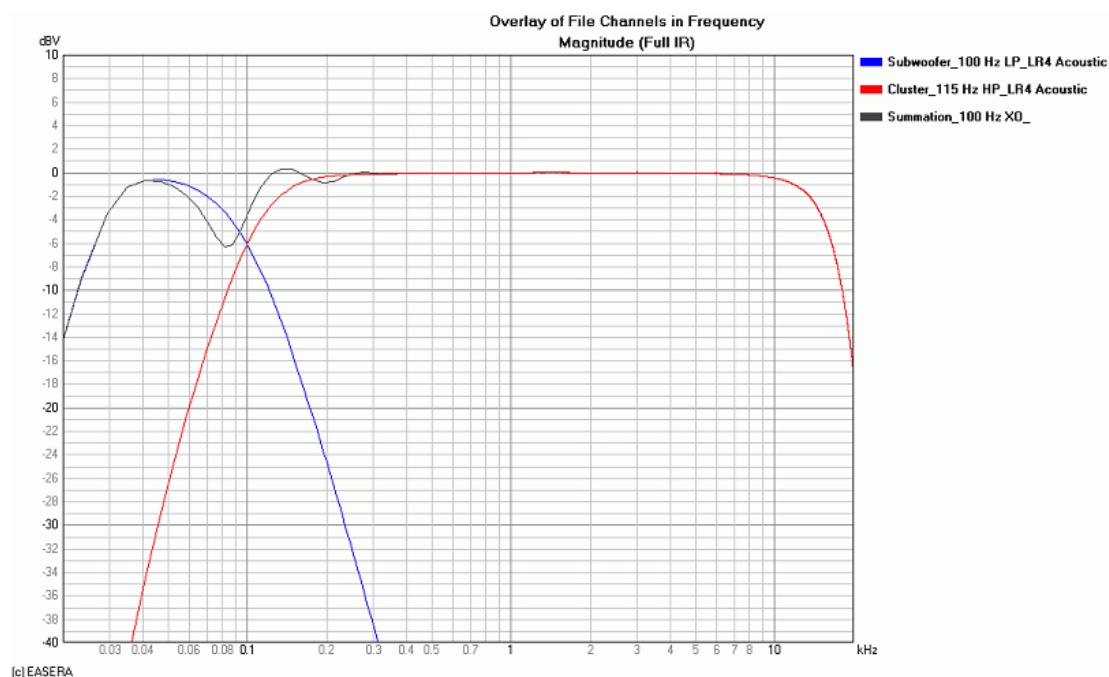


图 3: 通带内两组音箱各自的幅频响应, 以及叠加后的响应

如果我们选择将全频的峰值到达时间和超低的峰值到达时间对齐, 则需要将

全频延迟 14.7ms。或者我们也可以让全频的到达时间贴近超低 ETC 曲线中的前沿部分。这样全频的延迟时间大概是 10ms。图 5 和图 6 分别给出了这两种情况下的时域和频域图像。但这两者的幅频曲线看起来都不符合（相对平直的）要求。而从时域图像中看，延迟时间较短的结果比延迟时间较长的更理想一些。如果没有其它办法的话，那么接下来我们还要继续尝试猜测不同的延迟时间，以便找出一个能让时域和频域特性都比较理想的结果。不过，幸好我们还有更好的办法。

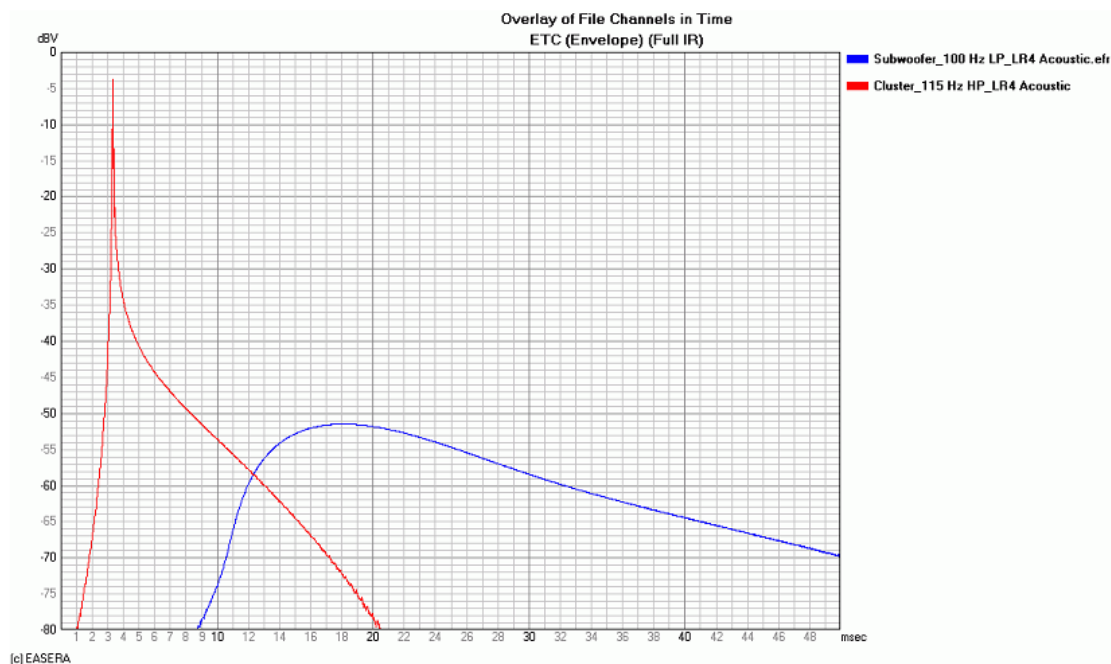


图 4: 各自通带内的 ETC 曲线

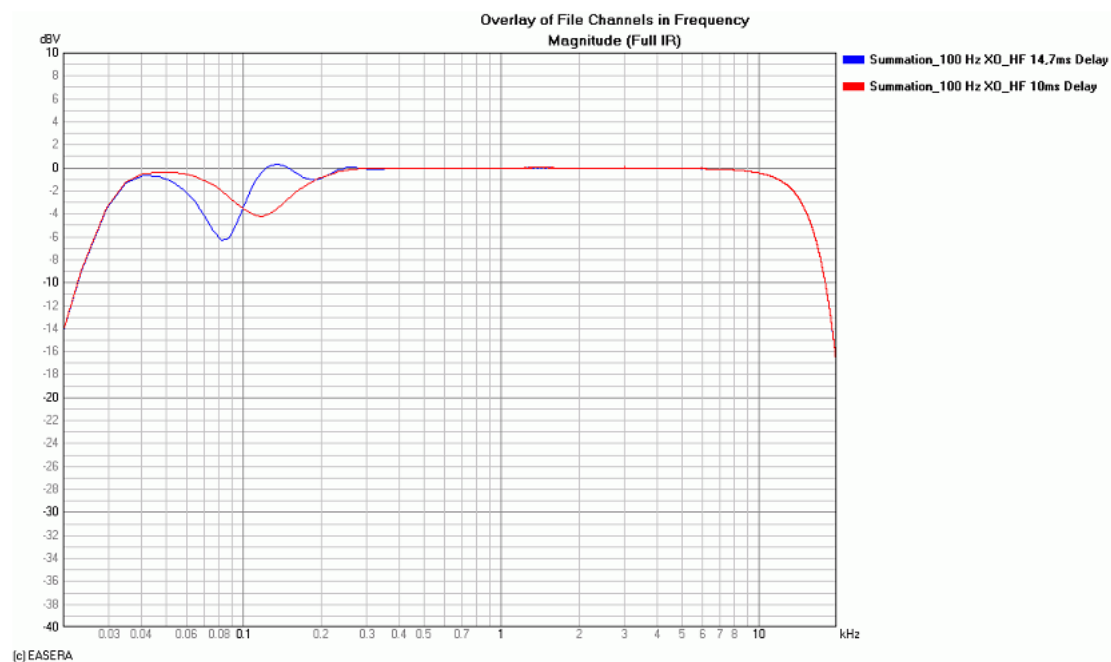


图 5: 10ms（红色）和 14.7ms（蓝色）延迟时的总体幅频响应

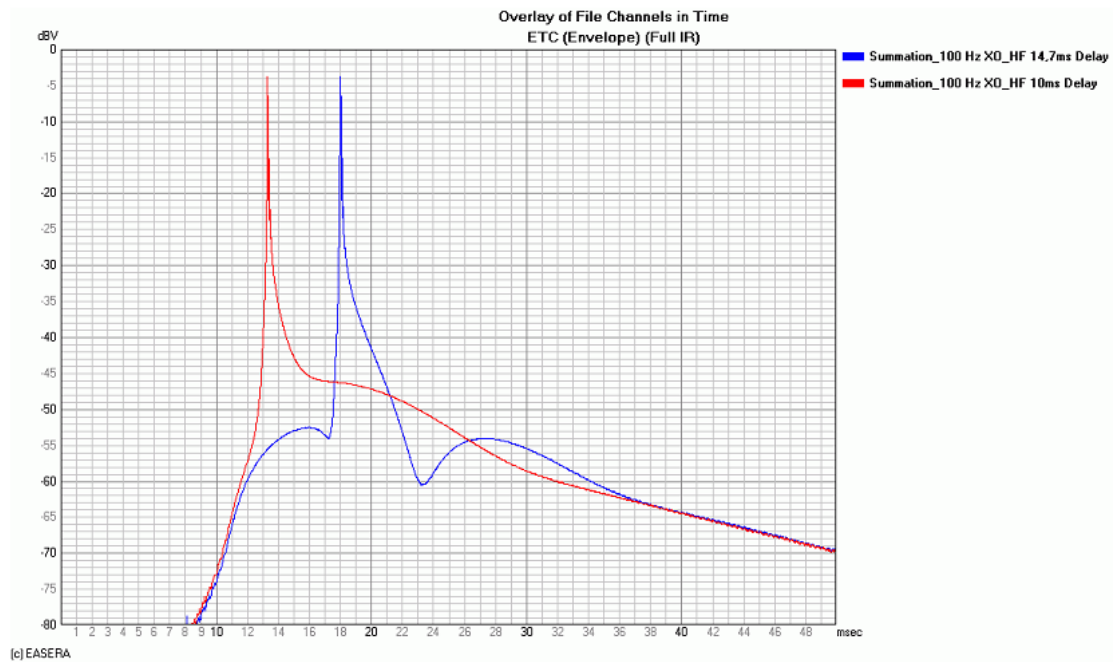


图 6: 10ms (红色) 和 14.7ms (蓝色) 延迟时的总体 ETC 曲线

根本问题，在于我们目前只有超低音输出的低频部分数据。在公式

$$\Delta t = 1 / \Delta f$$

中， Δt 是时间分辨率， Δf 是频率分辨率；从中我们可以看出更高的频率分辨率（更小的 Δf 值）会导致更低的时间分辨率（更大的 Δt 值）。因此，我们需要让超低音输出更高频率的信号（相当于 Δf 值更高，也就是让频率分辨率更低），来提高时间分辨率，从而更准确地判断出全频需要的延迟时间。可能的话，我们可以将超低的低通滤波器旁通，从而获得更多高频输出信号。这样有助于更精确地判断超低音的能量到达时间。假设我们现在无法旁通该滤波器，或者即使旁通之后仍然无法得到足够精确的时间分辨率。

此时，我们需要不借助高频信号，就能获得精确的时间信息。这看似一个不可能完成的任务。的确，单纯在时域内要做到这点是不可能的。但是在频域中，有一种方法可以让我们相当精确地获得时间信息，那就是群延迟。群延迟的数学定义是相位关于频率的负导数。

$$\tau_g = -d\phi / d\omega$$

图 3 和图 4 显示的是同一测量过程中音箱各自通带内的不同(域)视图。如果我们来看一看同一数据的群延迟图像，就能得到一些有价值的信息。图中曲线高频部分的平直区域表示的是该音箱组的信号到达时间。从图中可以看出，全频部分的到达时间大约是 3.3ms，这跟图 4 中的 ETC 曲线非常吻合。

不要被超低音曲线中的高频部分所困扰。那些起伏是因为测量到的 400Hz 以上数据信噪比过低造成的。参考图 3，超低音音箱的输出在 200Hz 处下降了 24dB，而且我们用的是 4 阶的滤波器，因此，到 400Hz 处音箱输出会低于 -48dB 且急速衰减。这就难怪高频部分信噪比这么差了。

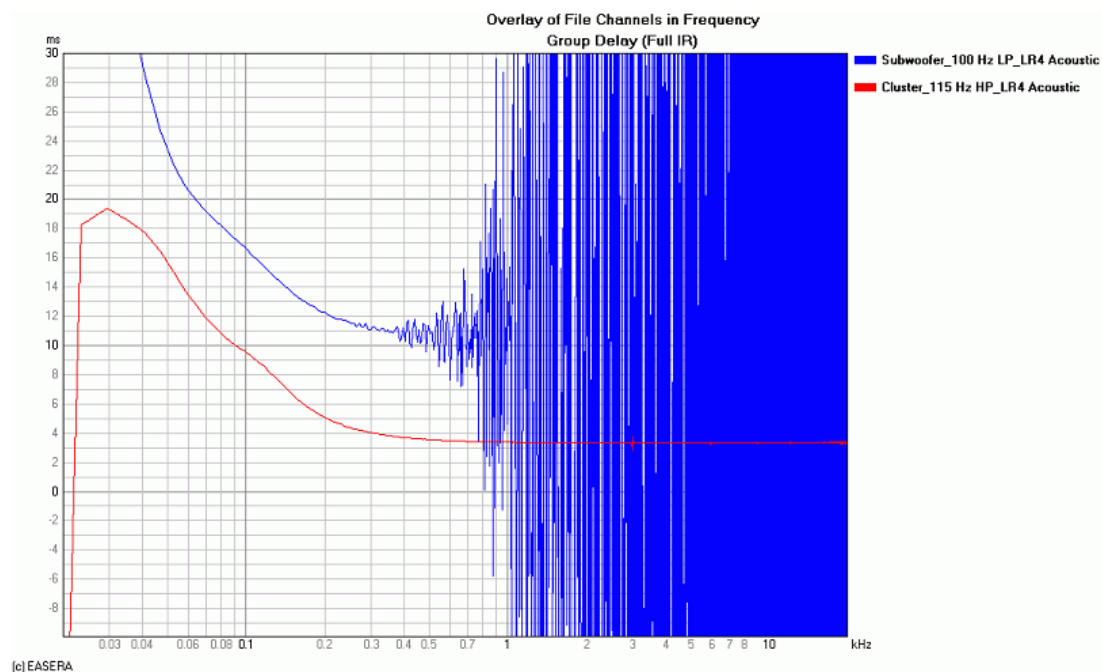


图 7：加入分频器后，全频（红色）和超低（蓝色）的群延迟曲线

我们可以看一下超低群延迟曲线上 300Hz 左右位置，得出其群延迟的高频时限。图中对应的大约是 11.0ms。而全频音箱在这个频率上的群延迟大约是 3.9ms。这跟全频音箱在高频上的 3.3ms 略有差异。这种差异是由于高通滤波器带来的相移、以及音箱本身的高通特性造成的。超低所用的滤波器也会带来类似的相移，如果我们有足够的测量信噪比，也能测得出来。

用 11.0ms 减去 3.9ms，就得到了 7.1ms 的一个延迟值。按这个值给全频设置延迟，所得结果见图 8、图 9。这基本上就是我们想要的效果了。图中在 150Hz 附近有个小于 0.5dB 的偏差。这是因为高频音箱组的输出没有严格贴合 L-R 响应曲线（参见图 2）的缘故。

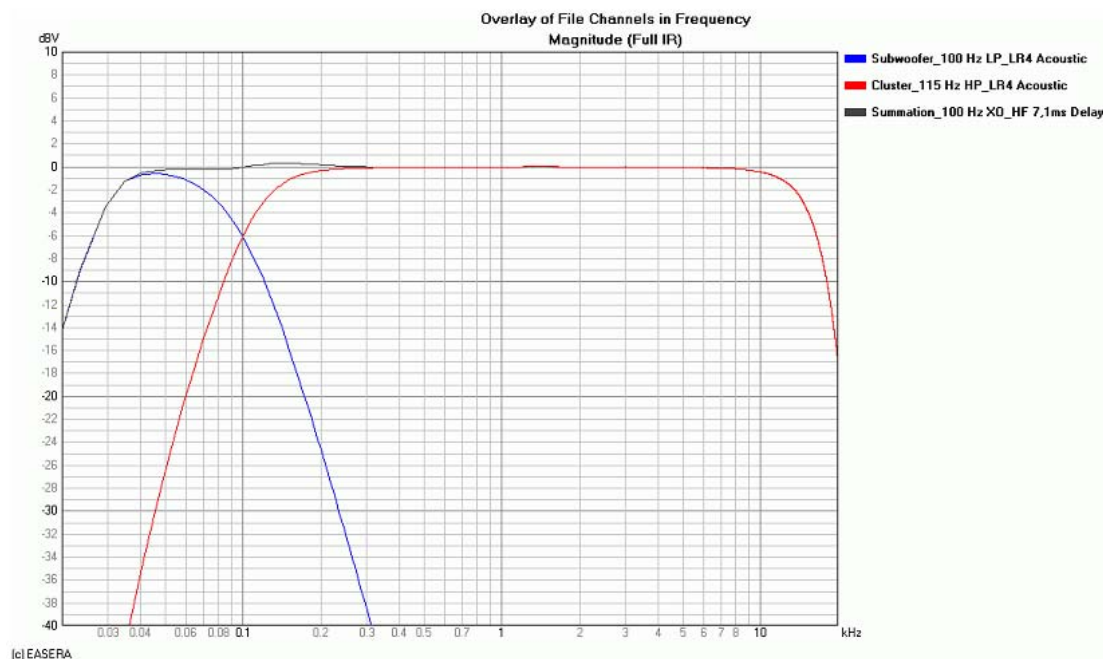


图 8: 全频延迟 7.1ms 后, 各自通带内的幅频响应以及总体响应曲线

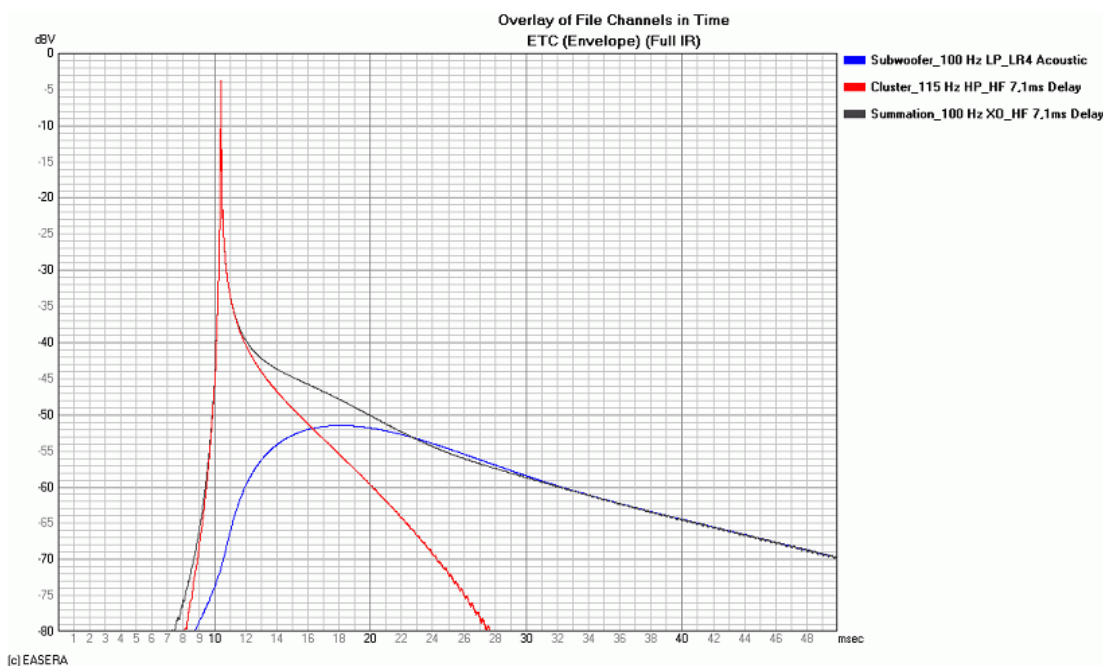


图 9: 全频延迟 7.1ms 后, 各自通带内的 ETC 以及总体 ETC 曲线

还有一点我觉得会有助于了解貌似低通滤波器对到达时间的影响的因素。之所以说是“貌似”，是因为这种情况只有在到达时间发生变化的时候才会出现。图 10 和图 11 中分别给出了一个 4 阶巴特沃斯低通滤波器的 ETC 和脉冲响应图像。这些曲线中的唯一区别在于滤波器的转折频率（-3dB）处。这些滤波器曲线的真实到达时间都是 5ms。图中一个具有 5ms 到达时间的互补型高通滤波器会和与之

互补的低通滤波器相叠合。如果对该高通滤波器设置延迟, 使之到达时间超过 5ms, 那么滤波器叠加后的曲线就会产生如同图 5 和图 6 中的问题。

综上, 我们已经看到了, 一个电子滤波器的响应会与音箱的响应叠加, 从而获得所期望的输出响应 (校准)。我们也了解到为什么低通设备会使到达时间表现得比实际值要晚。我们还论证了如何利用群延迟来准确校准输出频率上限受限的设备的延迟时间。希望上述内容能对某些人起到一些帮助。

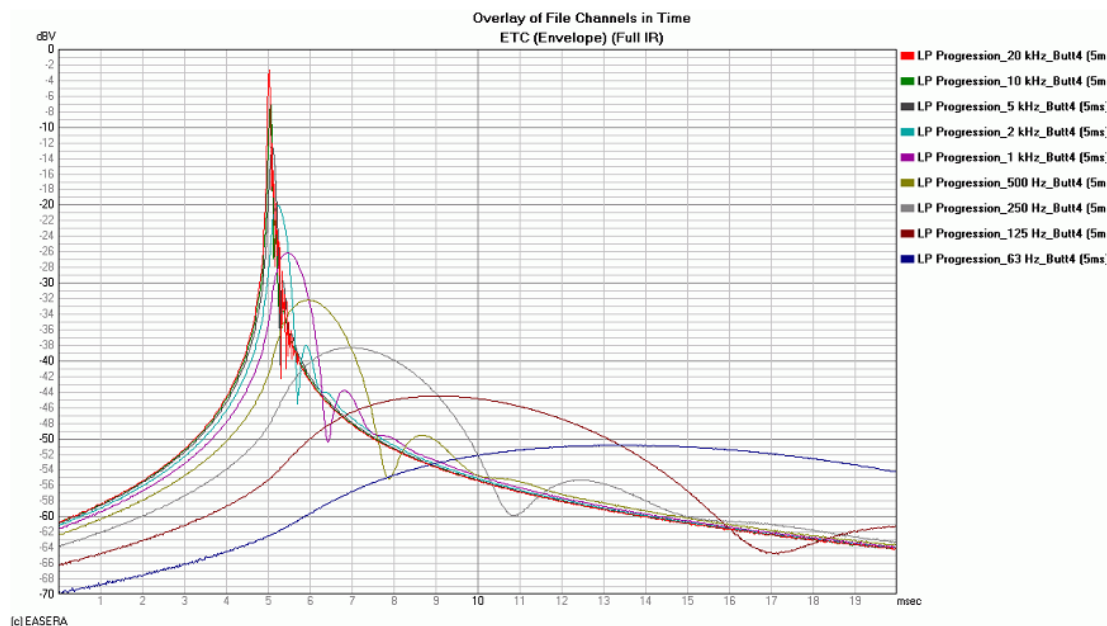


图 10: 不同转折频率的低通滤波器的 ETC 曲线

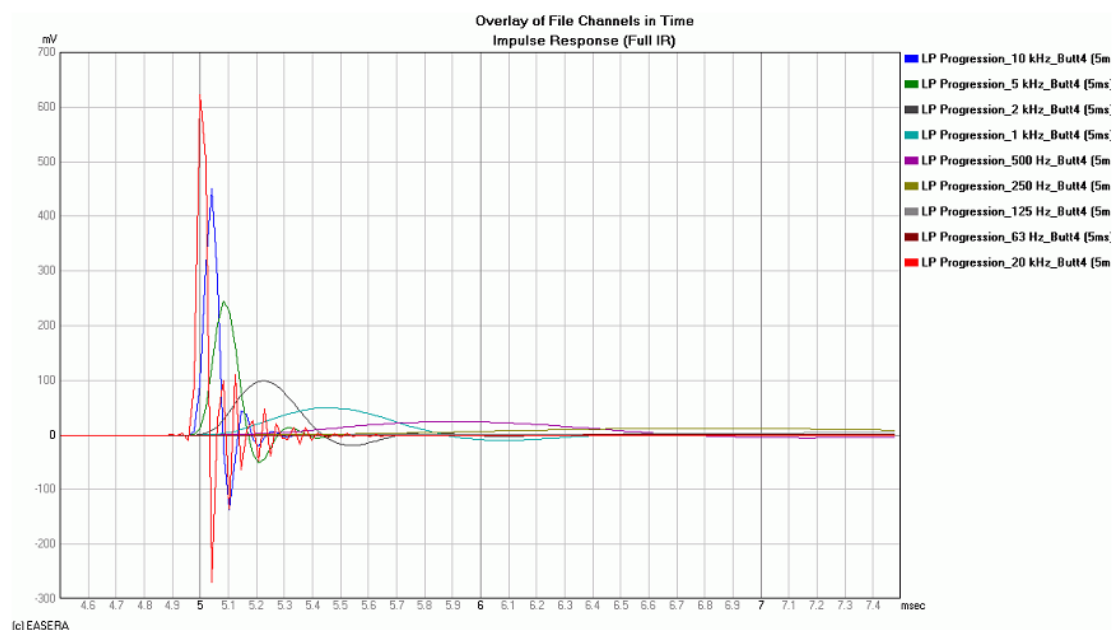


图 11: 不同转折频率的低通滤波器的脉冲响应曲线