超低音箱与全频音箱的相位耦合

介绍

在固定安装及流动演出中，我们常常需要对音频系统进行相位耦合，因为不同的场合需要不同的调整。基于快速傅里叶变换（FFT）的声场测量系统使相位耦合成为可能。今天我们所使用的音频系统中，全频音箱常常被高高吊挂起来，而超低频音箱则摆放于地面，这会在听众位置产生非常明显的相位差，这种情况下对系统进行相位耦合显得尤为重要。笔者对此课题深感兴趣，并且意识到相位耦合对于改善音响系统的显著意义，因此认为写一篇文章来说明测量过程的具体步骤是一个绝好的想法。当然，首先我们要了解一下相位的概念。

极性与相位

极性只有两个值：正和负。极性不会随频率而改变，但有时会因为接错音箱线而被意外改变，当然也有可能是在焊接信号线时将端子 2 和端子 3 接反，又或者是在信号处理器中错误地将某一频段的信号极性设置反了。也有一些时候，极性可能会被故意改变，例如当我们使用被动分频滤波器的时候。

相位则可以是以度为单位的任何值——连续的值。要知道某只音箱的相位响应，我们需要进行相位测量。

本文中的测量都是使用 SATLive 进行的。每张图的下半部显示的是相位曲线，上半部则显示幅频响应曲线。图 1 中的蓝线显示的是一个典型的超低音箱的相位响应，绿线是改变其极性之后的相位响应，可以很清楚的看到所有频率处都有 180° 的相位差。

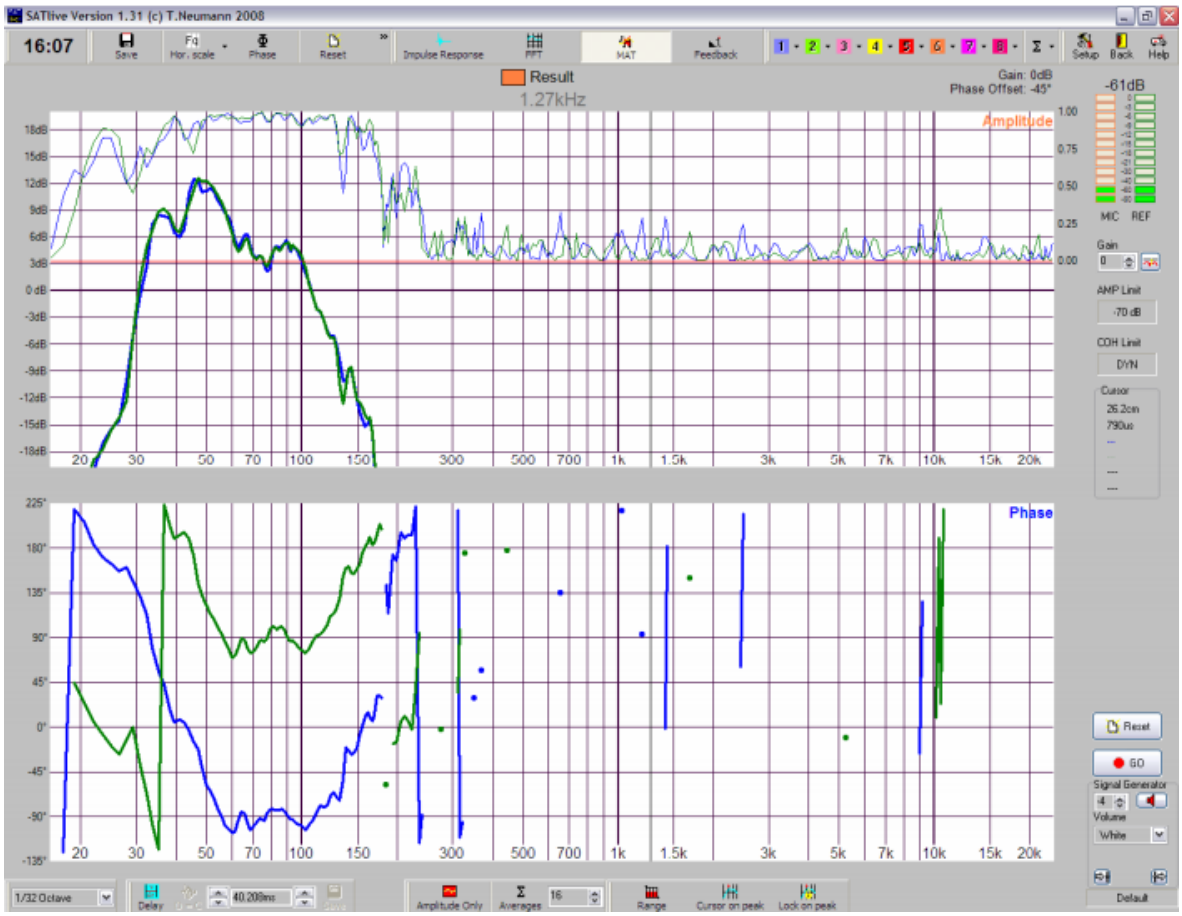


图 1 极性相反的两条相位曲线的对比

对音响系统进行相位测量，并将测量结果保存作为参考，这样做有利于安装系统后的极性校正工作。由于我们只是为了对比，所以测量位置只要是可重复的就可以了。例如可将麦克风置于音箱中心正前方贴近面网的位置。这是一个易于重复的测量位置，而且测量结果不易受环境噪声的污染。

是什么改变相位？

1）对于一个音响系统，其幅频响应的任何改变都会对相位响应产生影响。例如，在系统中加入均衡时，相位曲线也会随之改变。图 2 反映的是在处理器中对高频段加入一个贝尔型滤波器的结果。滤波器的中心频率为 5.4kHz，带宽为 0.42 Oct，增益为+10dB。由此导致相位曲线的改变为中心频率之前上升，在此之后下降。

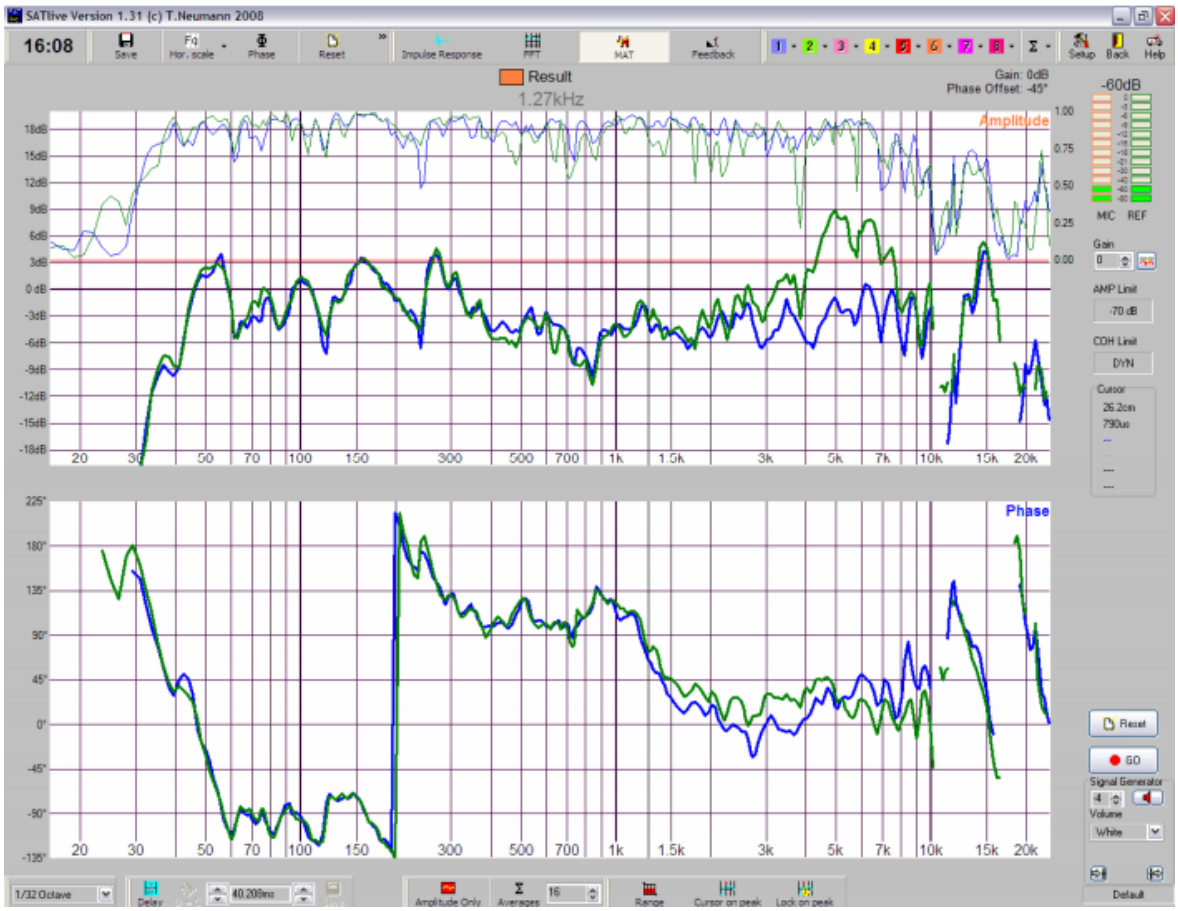


图2 图中绿色曲线显示了贝尔型滤波器对相位响应的影响

由于均衡会影响相位响应，所以一旦相位耦合完成之后，就不要再对处理器的输出通道加入均衡，尤其是在分频点附近。否则我们要在均衡之后重新进行相位测量，进而调整（超低音箱和全频音箱的）相位响应之间的关系，这也是我们加入延时所要达到的目的。而对输入信号进行均衡（如在处理器上调整或调整图示均衡器或在使用调音台上的均衡）则不会影响到相位耦合，因为这些都是在分频之前进行的。

2）在处理器中给某个通道加入延时，或者将音箱往后移动（比如将超低音箱移到离测量麦克风更远的位置）会对相位响应造成同样的影响。图 3 显示的是给全频音箱加入延时对其相位响应造成的影响。蓝色线表示加入延时之前的响应，绿色线是加入 0.0313ms（Δτφ=0.0313ms）延时之后得到的结果。相位的增量（Δφ°）可以应用公式Δφ°=360f*Δτφ计算得到。

可以很清楚地看到，相位是随着频率而改变的并且是延时值的函数。由于是对整个频段加入延时，所以频率越高，或者说周期越小，相位的增量就越大，图 3 中显示了相位差随着频率的升高而增大。

翻译 by audiokid　　校对 by fayeba

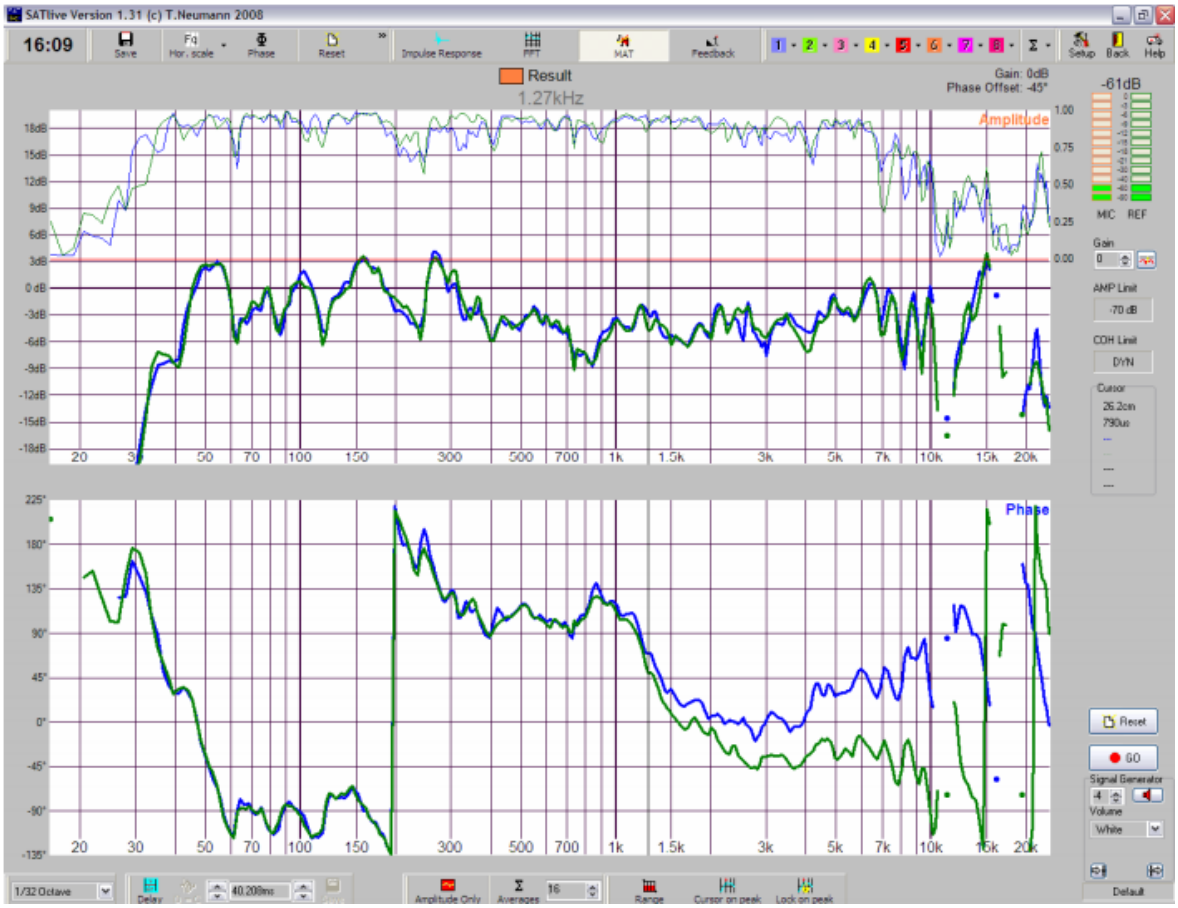


图 3 加入延时后，高频的相位响应受到了较大的影响，因为相对于低频来说，同样的延时值对于高频造成的相位偏移的度数更大。

同样的情况也会发生在超低音箱上。图 4 中蓝色线表示一个双 18″ 超低音箱的相位响应，绿色线反映了将音箱向后移动 1.7 米（约 5.6 英尺）所造成的影响。延时（此例中为物理延时）增加了通带内相位曲线的斜率。同样，频率越高影响越大。

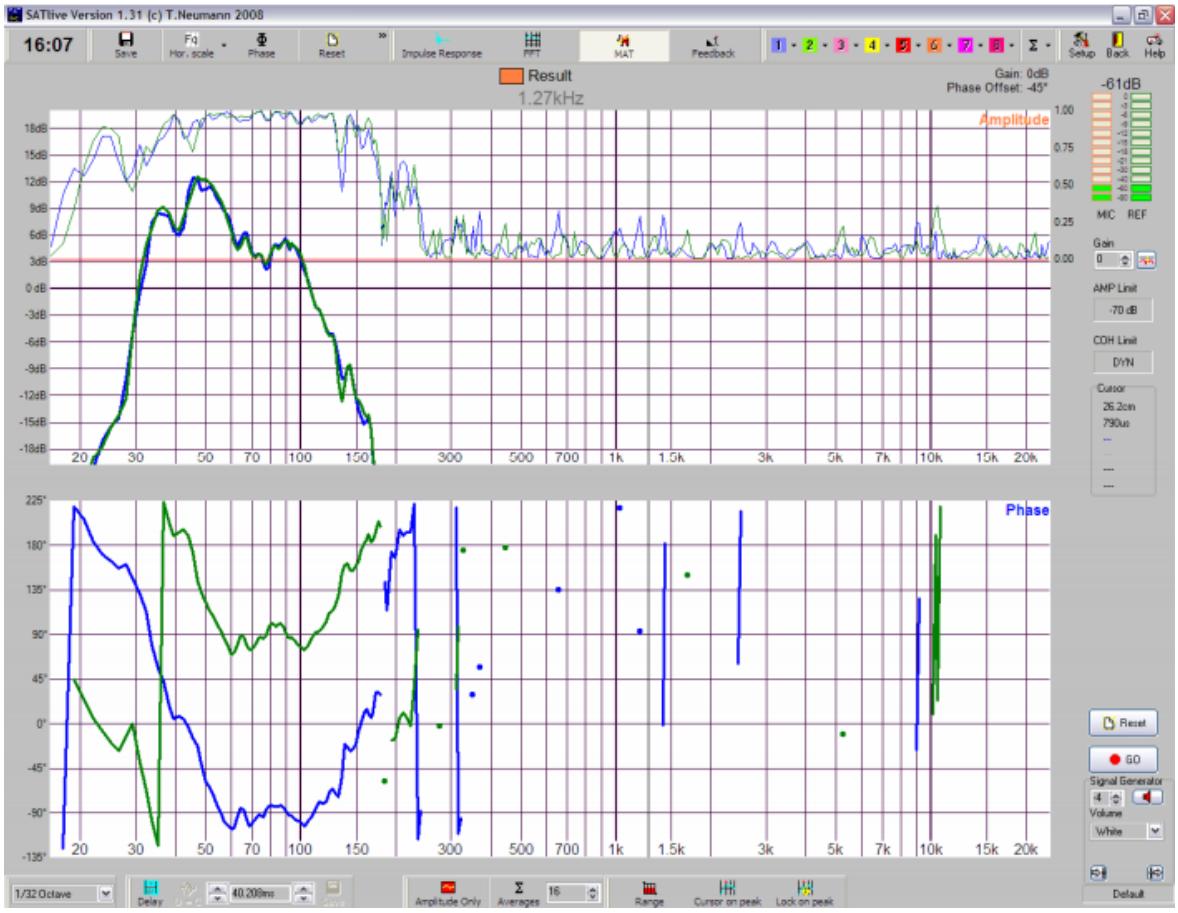


图 4 和加入延时一样，音箱物理位置的移动也会影响相位。蓝色线是音箱在初始位置时的响应，绿色线是将超低音箱向后移动 1.7 米之后的相位曲线。

3）分频滤波器的类型改变也会对相位造成影响。因为不同的滤波器类型，以及各自选定的斜率不同，都会对相位产生不一样的影响。图 5 分别显示了 Linkwitz-Riley 和 Bessel 高通滤波器的相位响应，两个滤波器斜率都设为 24dB 且低切频率也相同。

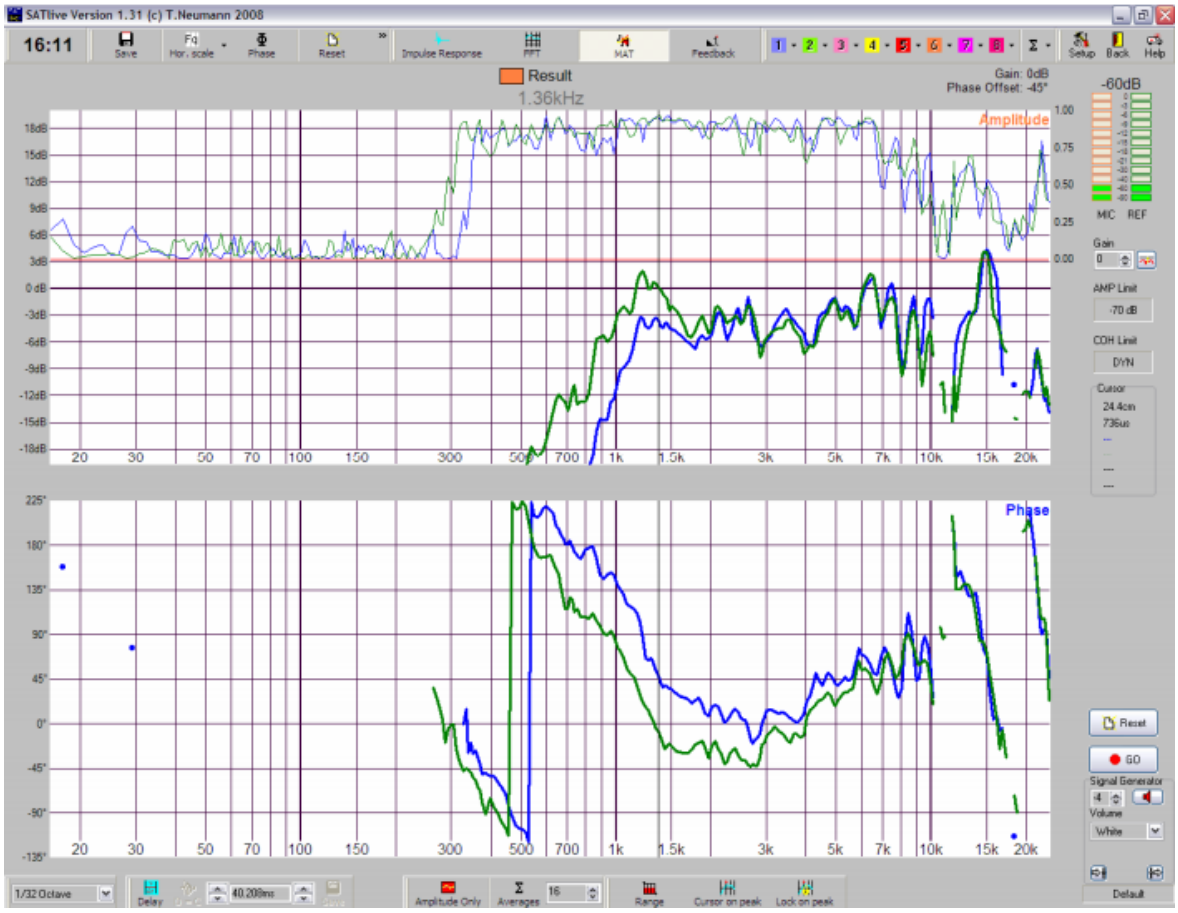


图 5 在处理器中改变滤波器类型，对幅频响应和相位响应都会产生影响。上图显示了一个 24dB/oct L-R 高通滤波器（蓝色）和一个 24dB/oct Bessel（绿色）高通滤波器的效果，两个滤波器的低切频率一样（1410Hz）。

相位耦合是什么？

我们之所以进行相位耦合，是为了实现超低音箱和全频音箱之间的叠加以达到最大的声压级，或者说避免分频点附近的频率抵消（不论是部分抵消还是完全抵消）。为了达到这个目标，我们要将相位曲线调整到重叠。

有时候相位曲线能达到完全的重叠，有时候却不能完全重叠——就像本文中的例子一样，但是相比未经相位调整的系统来说，总会有一定的改善。在所有的调整工作完成之后，我们需要做一个最终的频响测试，通过与相位耦合之前的曲线比较我们就能发现哪些地方得到了改善。有时候仅仅通过延时并不能达到相位曲线完全重合，我们可以使用处理器中的相位滤波器进行进一步的调整。然而，为了易于理解，本文中的例子只使用了延时。

相关性曲线

基于快速傅里叶变换的测量系统还可以显示一条可以代表测量数据可靠性的曲线，即相关性曲线。很多时候相关性曲线在部分频段的值很低（取值在 0—1 之间，或 0%—100%之间，依不同的测量系统而不同）。这说明所测的曲线在该频段的幅频响应和相位响应是不可信的。

导致相关性曲线差的原因主要有两个：

1) 参考信号与测量信号之间不同步

我们很容易检查出这个问题——如果我们在测量之前没有使用 SATlive 的“Delay Finder”功能（或其它测量系统的对应功能）对测量信号进行同步的话。这时高频部分的曲线的

相关性很差，如图 6。

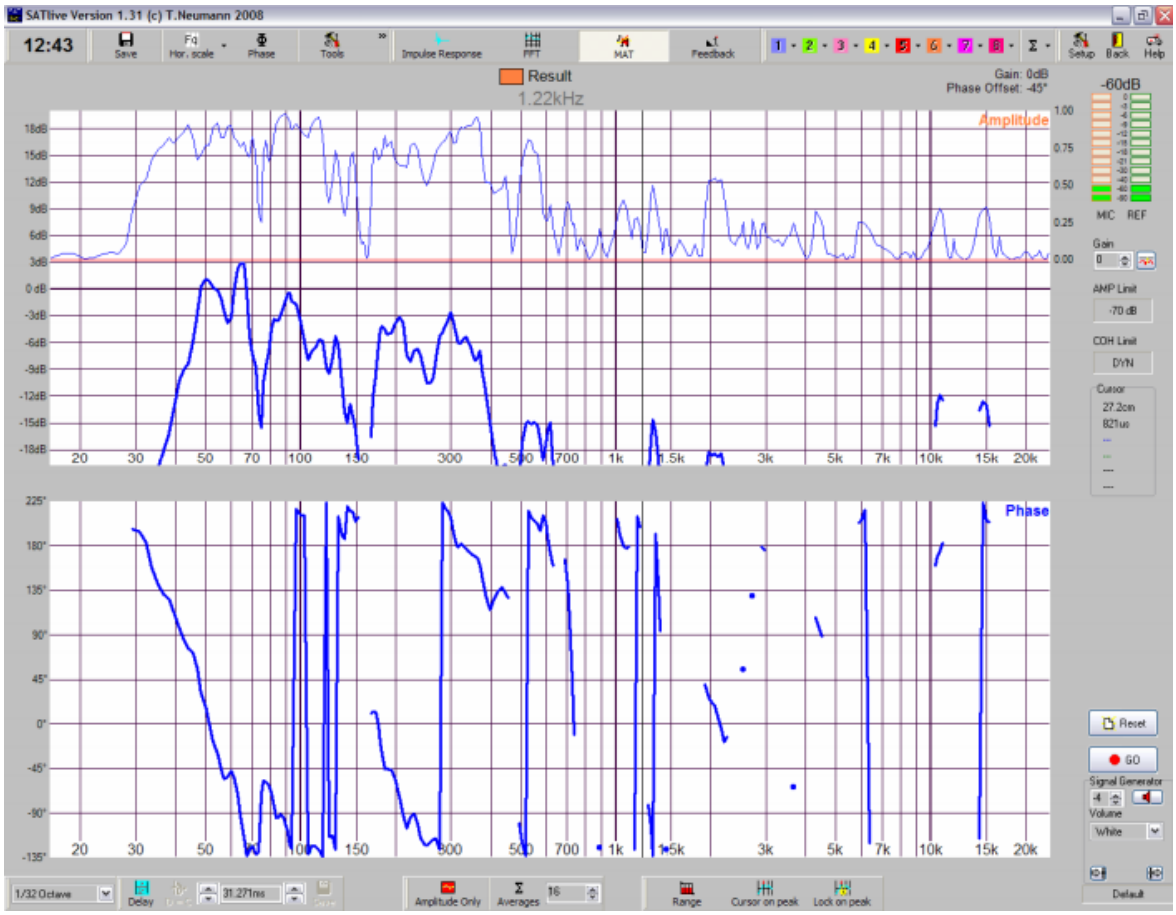


图 6 在 SATLive 中，相关性的取值范围是 0-1。可以使用 Trace Manager(曲线管理)功能储存和加载相关性曲线，它会在显示区域以更细的蓝色线显示。

2）反射

反射会降低某些频段的的曲线的相关性，这些频段上的测量结果也是不可信的。如果想测量这些相关性较差的频段，我们可以改变麦克风的位置。

当我们要调整相位时，我们就要通过相关性曲线来判断哪些频段的测量结果是可靠的，哪些频段受到了反射和混响的干扰。

例 1.“小型模拟系统测量示例：超低频音箱和全频音箱有交叉频率”

实际情形中的调试工作通常时间紧迫而且现场环境也远非理想，因此在第一次实际运用之前，做一个小型模拟系统的示例测量有助于我们熟悉测量流程的操作。

在此我们假设你已经知道如何使用测量系统进行传输函数的测量，而且你所采用的测量系统是符合要求的。

为了实现参考信号和测量信号的同步，我们需要测量系统的脉冲响应。由于高频的的脉冲响应更容易测得，所以我们先测量全频音箱对测量信号和参考信号进行同步。

调试中会发现，有时要对低频加入延时使低音“后移”，然而当我们需要将低音“前移”时，我们就要对低频加入“负延时”。然而“负延时”在处理器中无法实现，因此我们对所有音箱设置一个初始延时，这样就能根据需要在初始延时基础上增加或减少延时。当完成调整之后，在将所有多余的延时去掉，正如示例中所做的。

翻译 by audiokid　　校对 by fayeba

下面，我们模拟一个由 18″超低频音箱和全频音箱组成的系统进行测量。

实际系统中超低音箱的分频设置如下:

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，30Hz

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，85Hz

全频音箱的实际分频设置如下：

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，50Hz

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，20KHz

我们在此使用 4″的小音箱做模拟的测试，只是为了熟悉相位调整的操作步骤。由于使用的是 4″的音箱在声学上模拟一个实际的系统，因此我们要将系统的分频频率按比例放大。

为此我们将分频频率乘以实际系统与模拟系统的比率——即乘以 18″／4″=4.5。

重新得到这个缩小的模拟系统的分频频率如下：

缩小的模拟超低音箱频率：

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，30Hz×4.5=135Hz

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，85Hz×4.5=382Hz

缩小的模拟中高频音箱频率：

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，50Hz×4.5=225Hz

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，20KHz

中高频的高频上限依然是 20kHz，因为在 20kHz 以上是超声的频段。

测量所选用的音箱是两只 DAS Arco 4，其中一只横放于地面作为超低音箱。另一只要摆得更高，并且在超低音箱之后 15cm（6″）的位置，如图 7 所示。麦克风放置于地面距离模拟的超低音箱前方 90cm（3″）的位置。

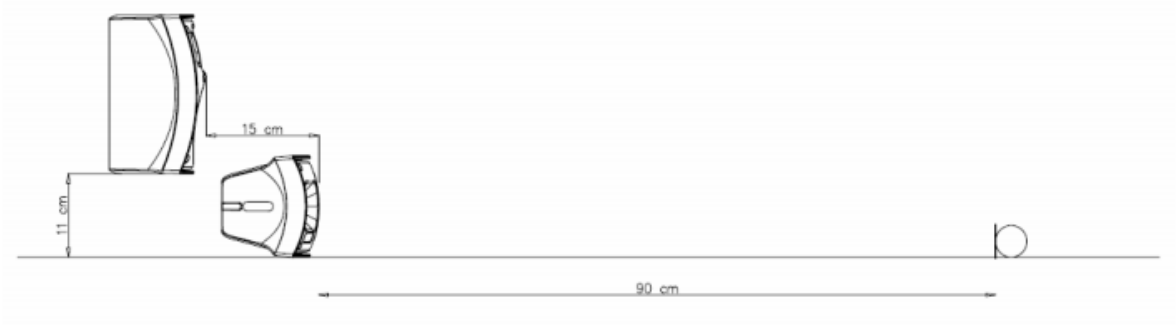


图7 例一和例二中的模拟测量系统的构造侧视图。

为了更好地观察耦合之后的相位和未经耦合的相位之间的差别，我们建议将超低音箱和中高频音箱的交叉频率的声压设置相同，此例中交叉频率为 225Hz —382Hz。

测量步骤如下：

1) 在处理器的各路输出通道加入 20ms 的初始延时（这个取值是随机的，也可设置为其它值）。

2）首先我们只开启全频通道，并利用 SATLive 中的“Delay Finder”功能找到参考通道信号和测量通道信号之间的时间差，并将这一延时值插入到参考通道，由此实现参考信号和测量信号的同步（详见 SATlive 或你所使用的其它测量软件的用户手册）。

3）测量系统的幅频响应，此时系统是未经相位调整的。最糟的情况是在两只音箱的交叉频率处出现严重的抵消。测量结果见图 8。

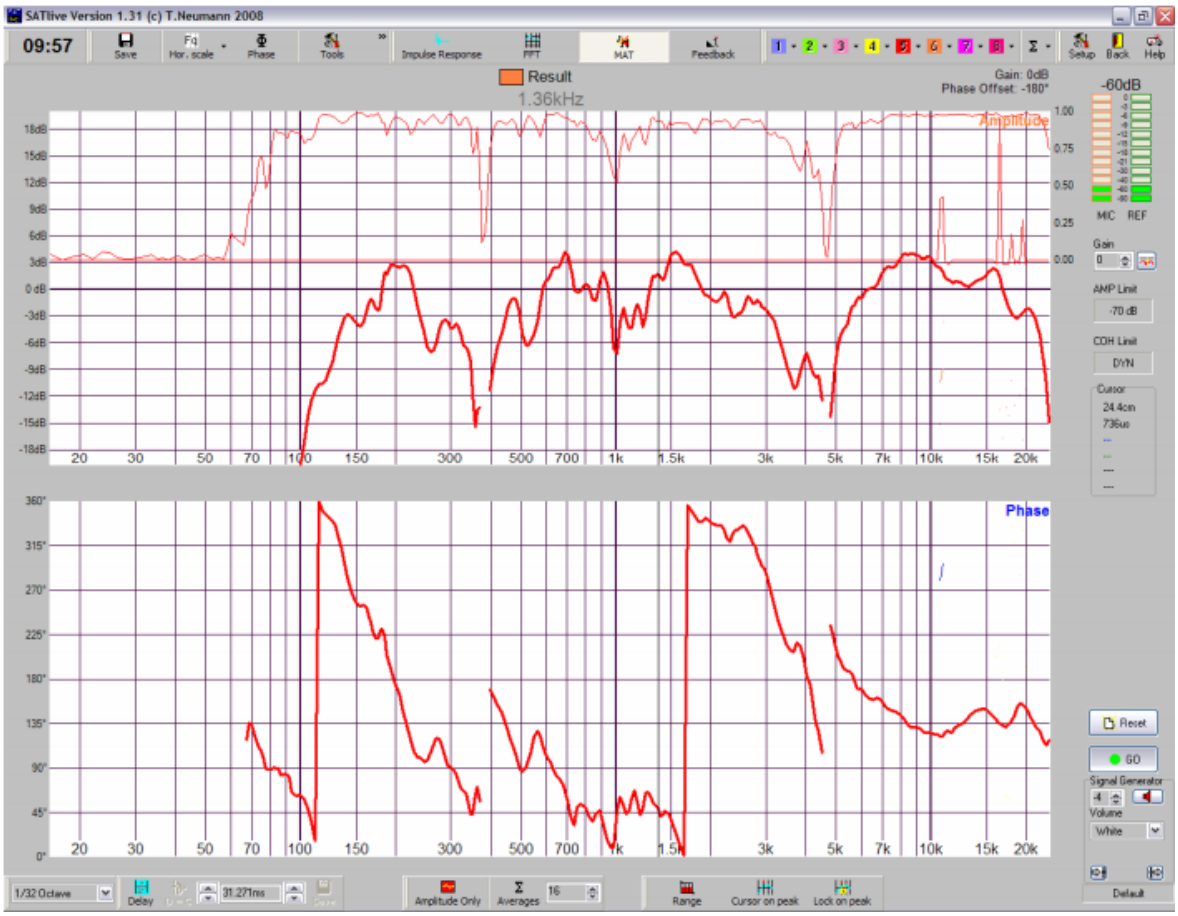


图 8 这里的幅频响应曲线就是我们要加以改善的。在 400Hz 处发生了频率抵消，正好是在两只音箱交叉频带范围内。

4）在处理器中将超低通道静音，只开启全频通道。

5）测量全频音箱的频响曲线和相位曲线并保存，见图 9。

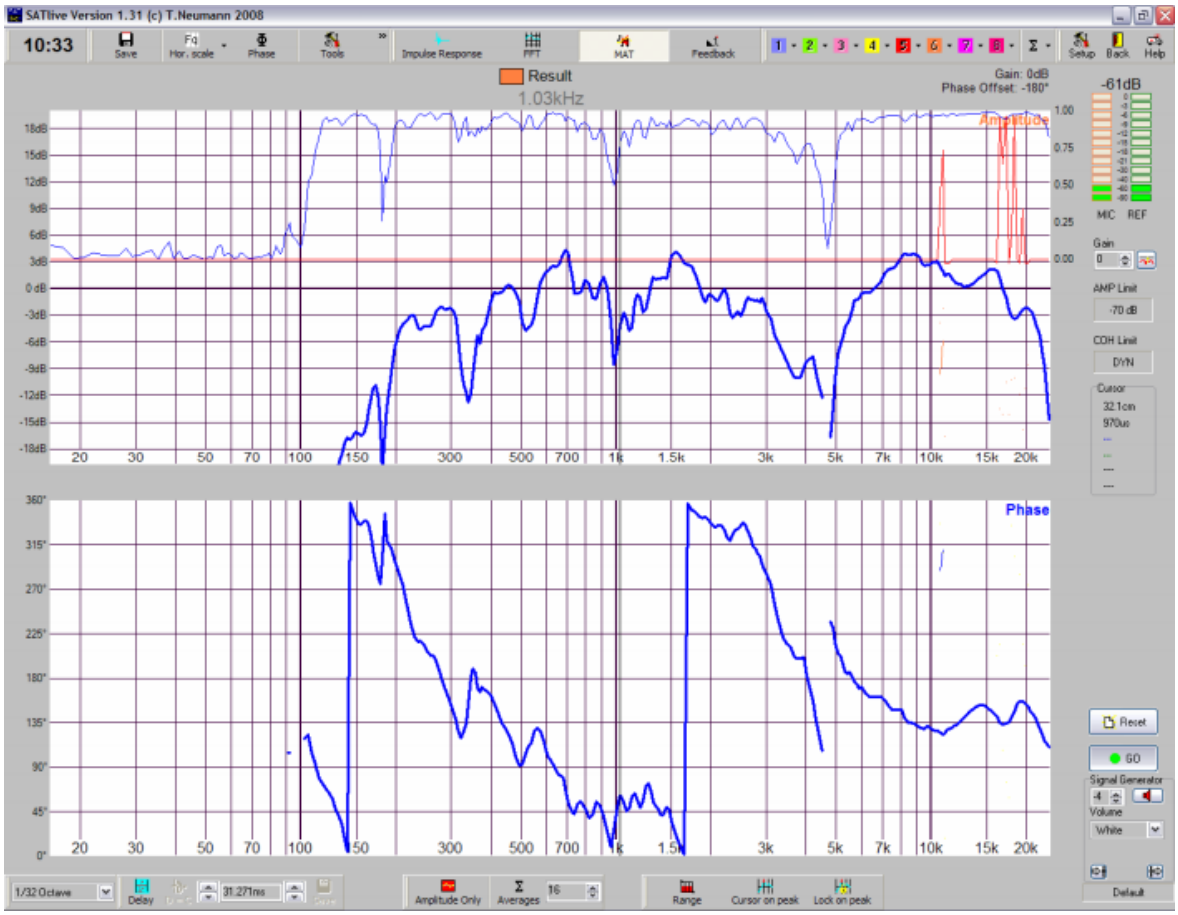


图9 全频音箱的幅频响应和相位响应。

6）将全频通道静音，只开启超低通道。

7）注意：不要再次使用“Delay Finder”（即不要将再次将参考信号和测量信号同步）。要知道我们是要比较超低音箱和中高频音箱的相位响应，即我们要测量的是两个通道不同信号的到达时间的差异，到达时间是频率的函数。因此不要在测量软件上再次改变参考信号的同步延时。记住我们是使用全频音箱作为时间参考，因为全频的信号脉冲更易于捕捉。

8）测量超低音箱的相位曲线，并将之与全频音箱的曲线对比。如图 10。

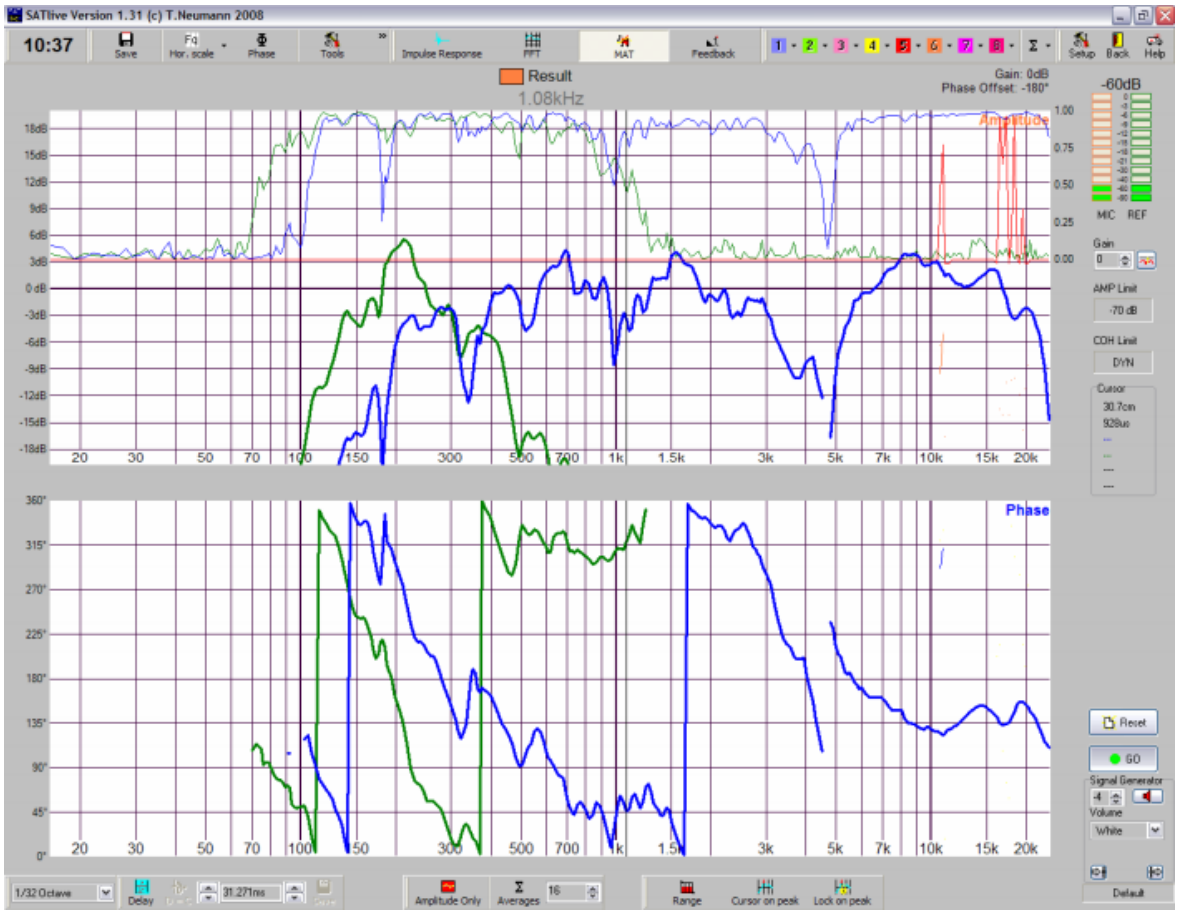


图 10. 测量结果显示了超低音箱和全频音箱在交叉频带内(200Hz-400Hz)的相位差。这就解释了为什么在两只音箱的交叉频带内没有明显的叠加，反而在 400Hz 附近还发生了抵消。

9）在超低频输出通道上**增加或减少**延时，直到分频点附近区域的相位曲线**重叠**。注意保存曲线！

两条曲线中斜度比较陡的就是延时比较多的。因此很容易看出，我们要将绿色曲线的延时减少，也就是减少超低频通道的延时。由于我们一开始在所有通道上都加入了 20ms 的初始延时，因此我们可以在此基础上减小延时。

减小超低频通道的延时，绿色曲线的斜度会减小，同时会向上移动，最终两条曲线会在相当宽的频带上重叠。

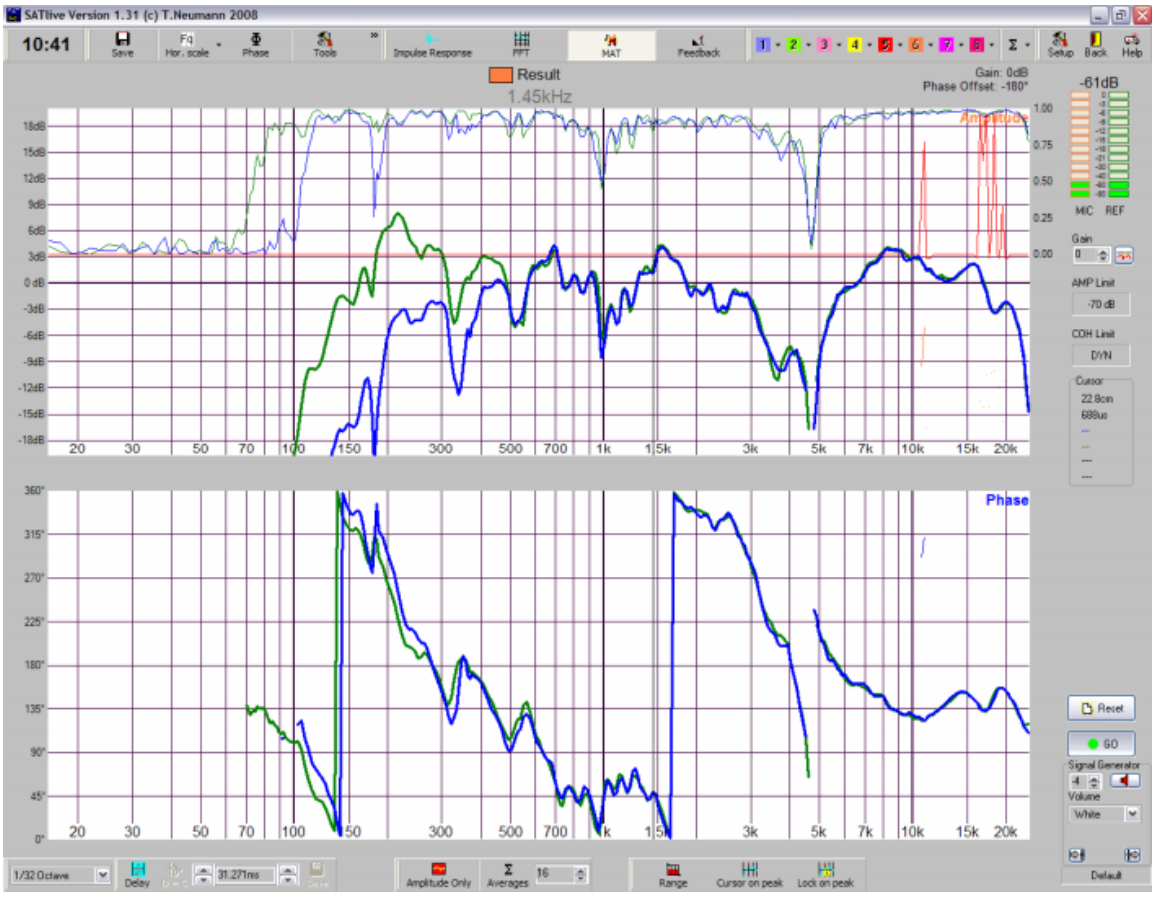


图 11　经过相位耦合之后的全频音箱与超低音箱的响应曲线。可以看到在两只音箱的交叉频带内，相位曲线几乎实现了全部重叠。

调整好的超低频通道的延时为 18.666ms。从 150Hz 到 400Hz 范围内，两条相位曲线重叠，也就是说它们在交叉频段上相位一致。

可见在对比两条相位曲线并想要减小它们之间的相位差时，我们要记住，斜度比较大的说明声音到达更迟，因此要减小延时。而斜度比较小的说明声音到达的早，需要增加延时。

本例中要记住的是，超低音箱在位置上比中高频音箱跟靠前，所以我们可能会错误地认为超低音箱需要更多的延时。要知道滤波器会改变相位，因此我们无法预判要增加还是减少延时，只有测量之后才能判断。让我们看看假设我们不是减小而是增加超低频的延时会发生什么。

我们在超低频通道增加延时，直到相位曲线出现最大重叠，如图 12。此时超低频的延时为 22.276ms。两条相位曲线在 250—300Hz 范围内重叠，这个频带非常窄。250Hz 以下，蓝色相位曲线在绿色线之下，而高于 300Hz 时，绿色曲线又在蓝色线之下，就是说他们之间有相位差。

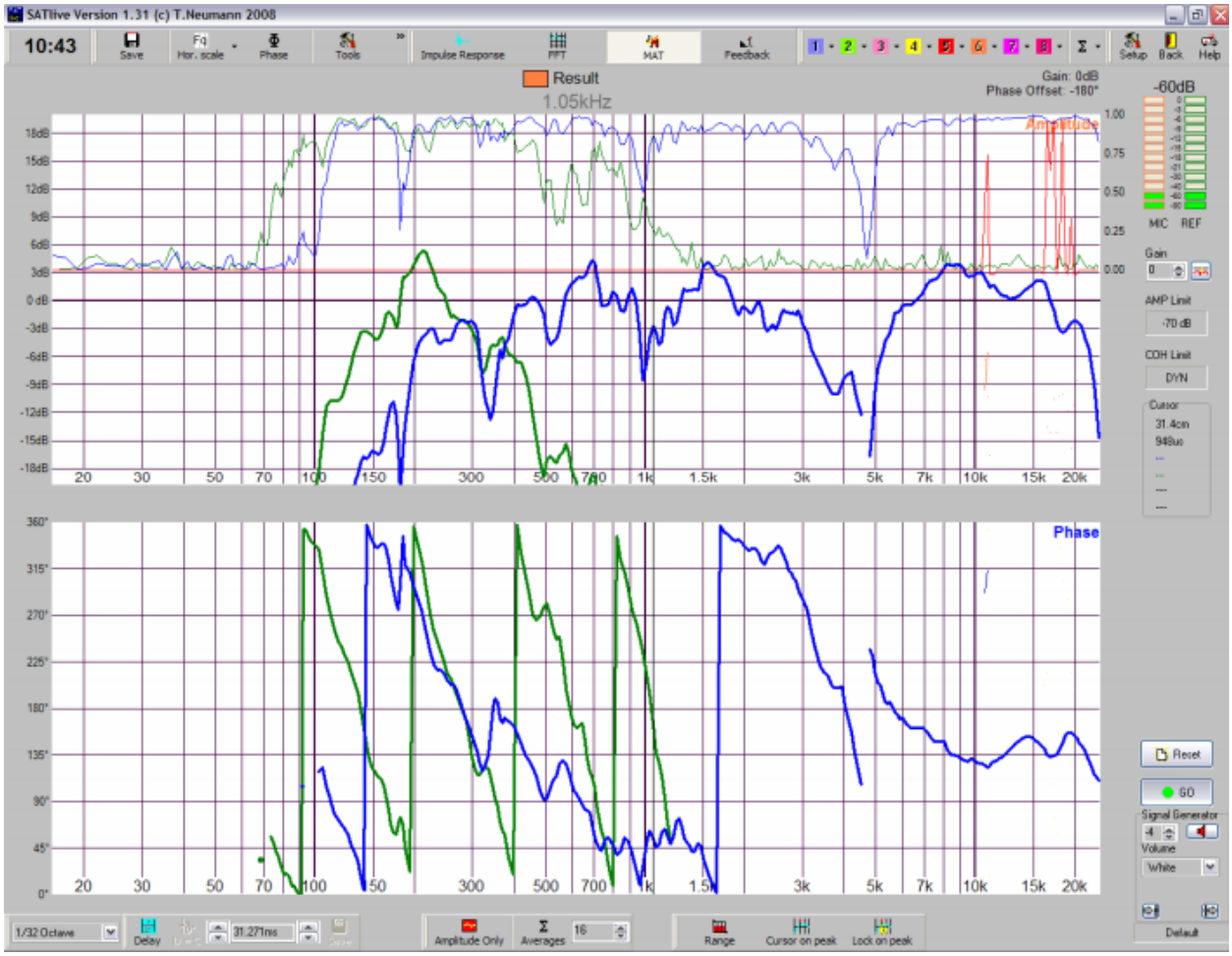


图 12　在本例中，给超低音通道加延时很难实现在整个交叉频段内实现重叠。

10）测量系统的幅频响应并与最初的测量结果对比。如果相位已经被正确调整，超低频和全频就会产生正向叠加，这会反映在幅频响应中。

在图 13 中，我们可以比较未经相位调整的系统（红线）和超低频加入 22.2766ms（绿线）及 18.666ms（蓝线）。

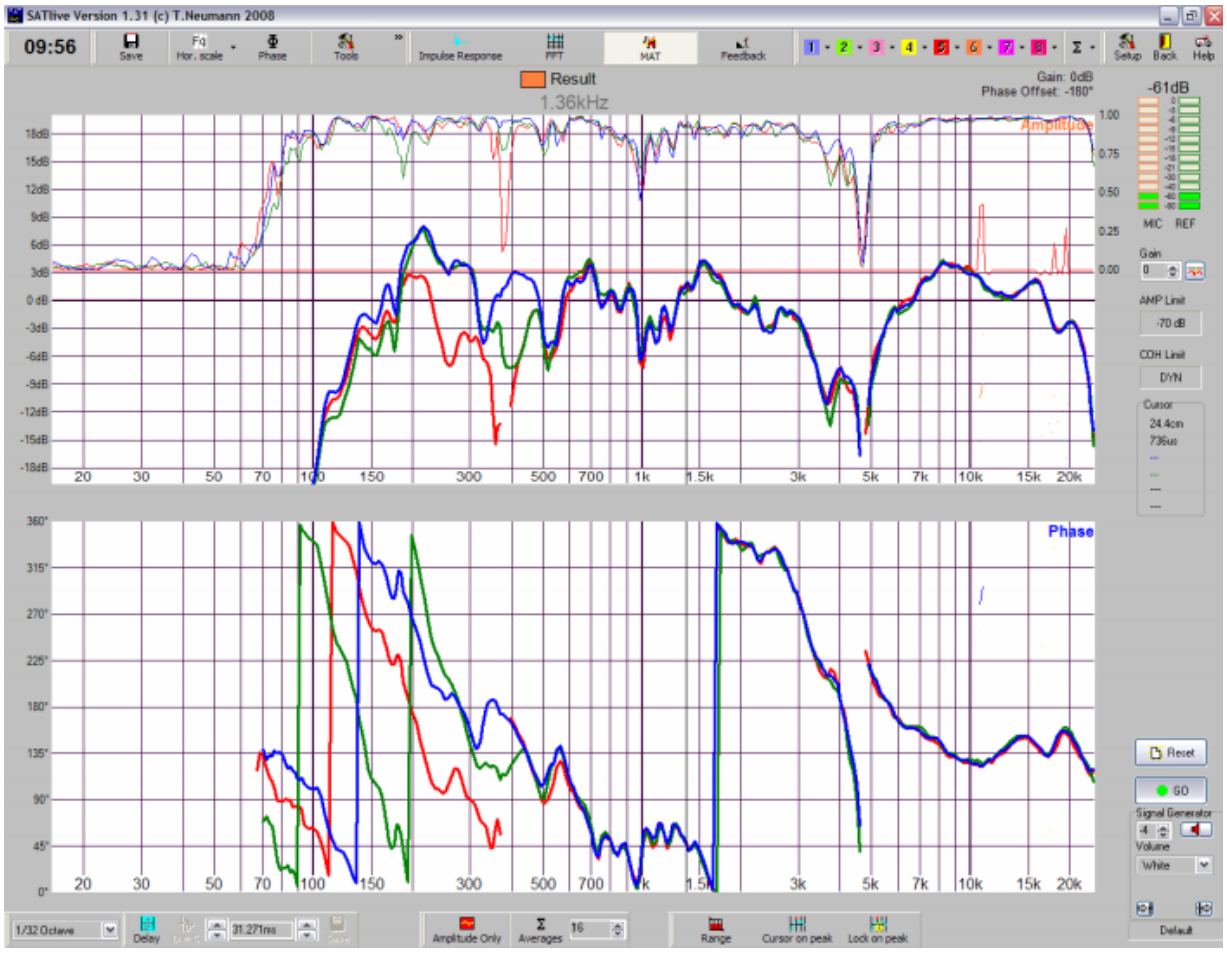


图 13　在本例中，在超低通道减掉延时实现了两只音箱的最优叠加。

可以很清晰地看到超低频的延时为 18.666ms 时叠加的效果最好。

11）分别在超低频通道中和全频通道中减去二者之中较小的延时值。这样较小延时值的输出通道的延时就变成 0ms。

此例中全频通道的延时为 20ms，超低频通道延时为 18.666ms。测量之前我们随机设置了 20ms 的初始延时，这是为了能在此基础上增加或减少延时。当相位调整完成后，就不再需要过量的延时，所以在两个通道中减去二者之中较小的延时值。使得较小延时值的输出通道的延时为 0ms。

最终，中高频通道的延时设置为：20ms—18.666ms=1.334ms。

超低频通道的延时为：18.666ms—18.666ms=0ms。

例 2，模拟系统测量：超低频音箱和全频音箱在同一频率点分频（无交叉频段）

在一个实际的系统中，假设超低频音箱的分频设置为：

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，30Hz

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，85Hz

全频的分频设置为：

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，85Hz

翻译 by audiokid　　校对 by fayeba

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，20kHz

而在我们的模拟系统中，超低频的分频设置为：

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，30Hz×4.5=135Hz

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，85Hz×4.5=382Hz

全频的分频设置为：

高通滤波器（HPF）LR 24dB／Oct，85Hz×4.5=382Hz

低通滤波器（LPF）LR 24dB／Oct，20kHz

音箱摆放及操作步骤与例 1 相同。

1）在处理器中给每个输出通道加入 20ms 延时（也可以是其它值）。

2）首先我们开启中高频通道，并利用“Delay Finder”功能找到延时，然后将这个延时值插入到参考通道，即将参考信号和测量信号同步（详见 SATlive 或你所使用的其它分析软件的用户手册）。

3）测量系统在未经相位调整之前的幅频响应。最糟的情况是两只音箱在交叉频率处发生严重的抵消。

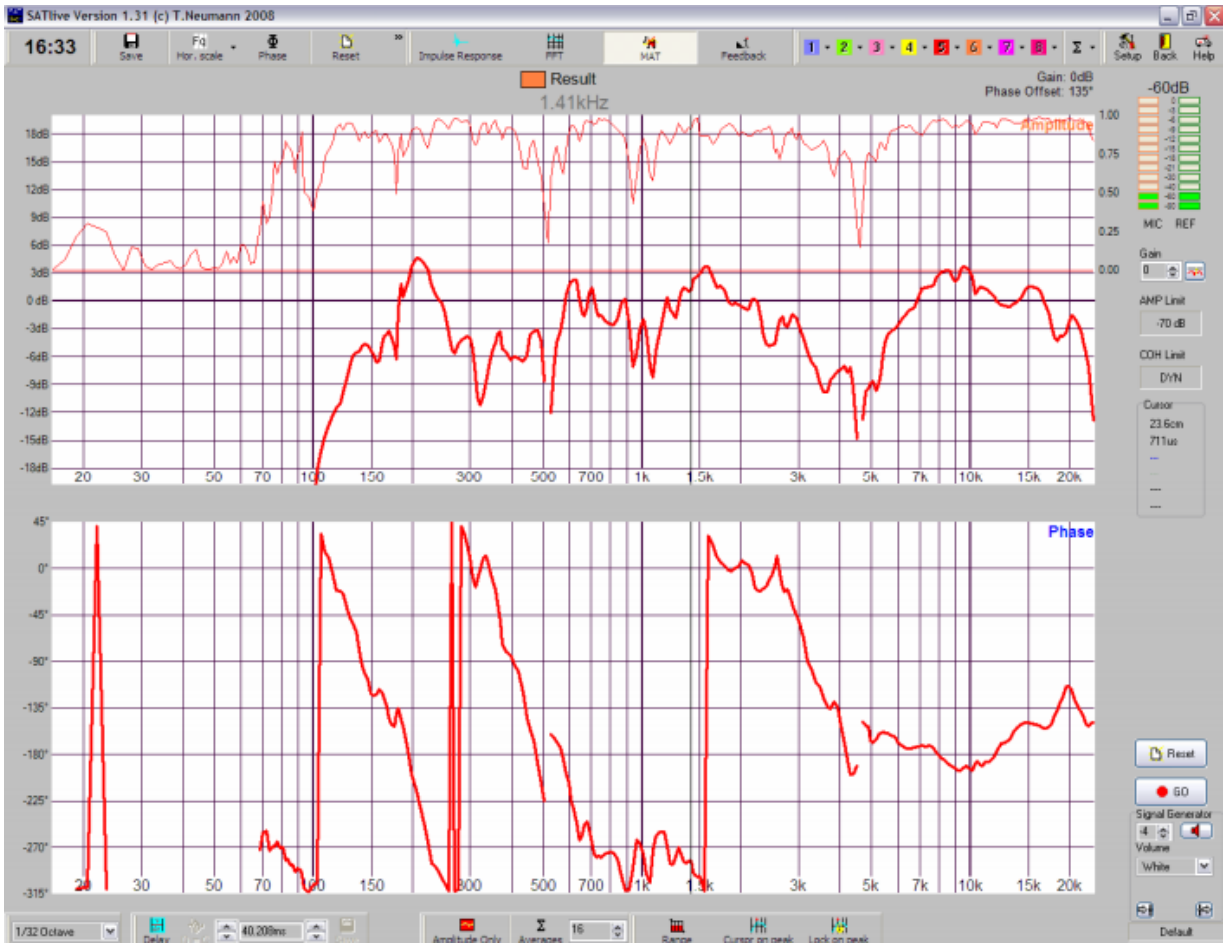


图 14　　这是系统未经耦合之前响应曲线，可以看到在分频点附近发生了抵消，有待优化。

4）在处理器中将超低频通道静音，只开启全频通道。

5）测量全频音箱的幅频响应和相位响应并保存，见图 15

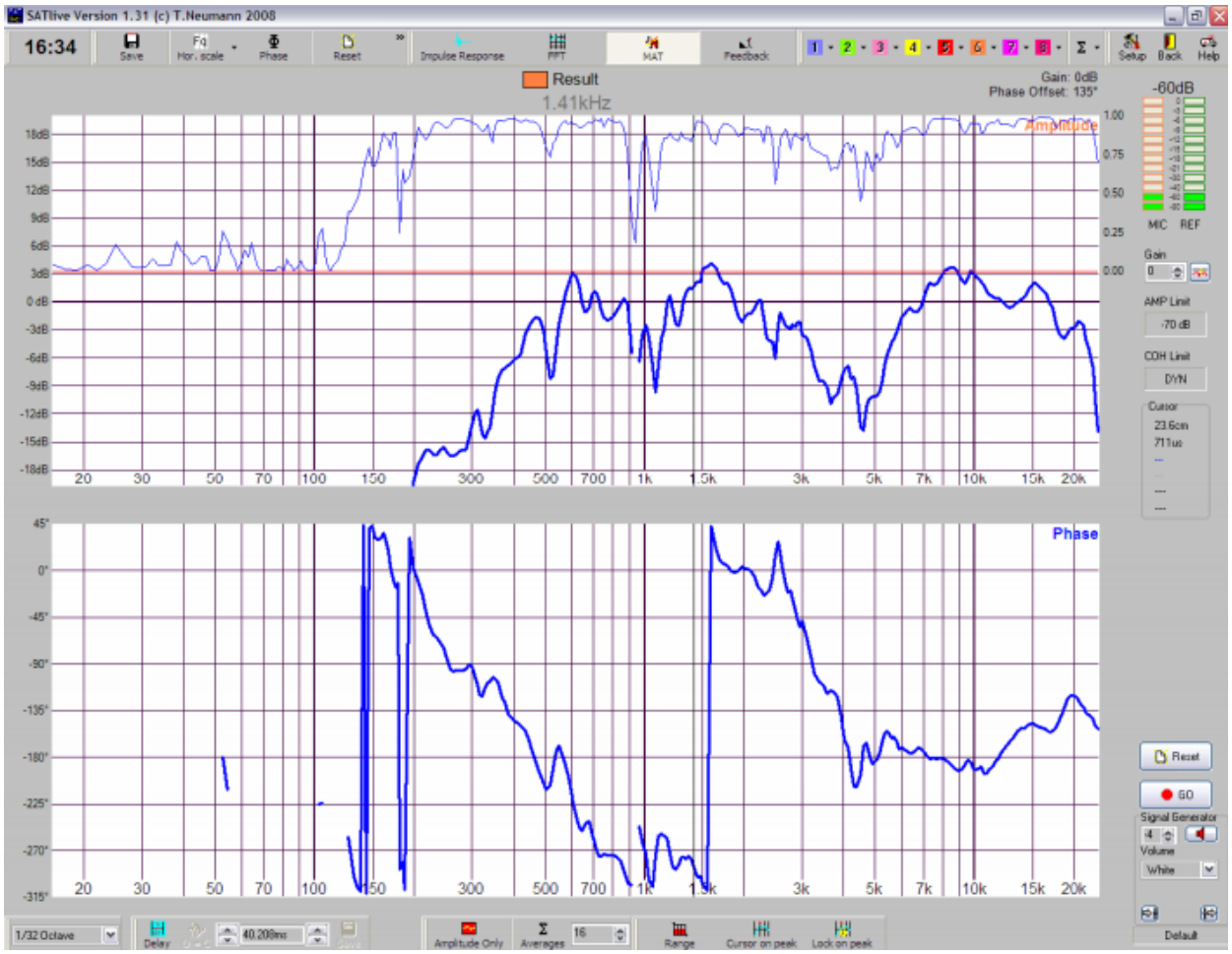


图 15　全频音箱的幅频响应和相位响应。

6）将全频通道静音，只开启超低频通道。

7）注意：不要再次使用“Delay Finder”（即不要将参考信号和测量信号再次进行同步）！要知道我们是要将超低频和全频进行对比，也就是说我们要测量的就是这两种信号的到达时间的差异，而到达时间是频率的函数。所以不要再次在测量软件中对参考信号加入同步延时。记住我们选择了全频音箱作为时间参考，因为全频信号的脉冲响应更容易捕捉。

8）测量超低频并将测得的曲线与全频的曲线对比。对比结果见图 16。

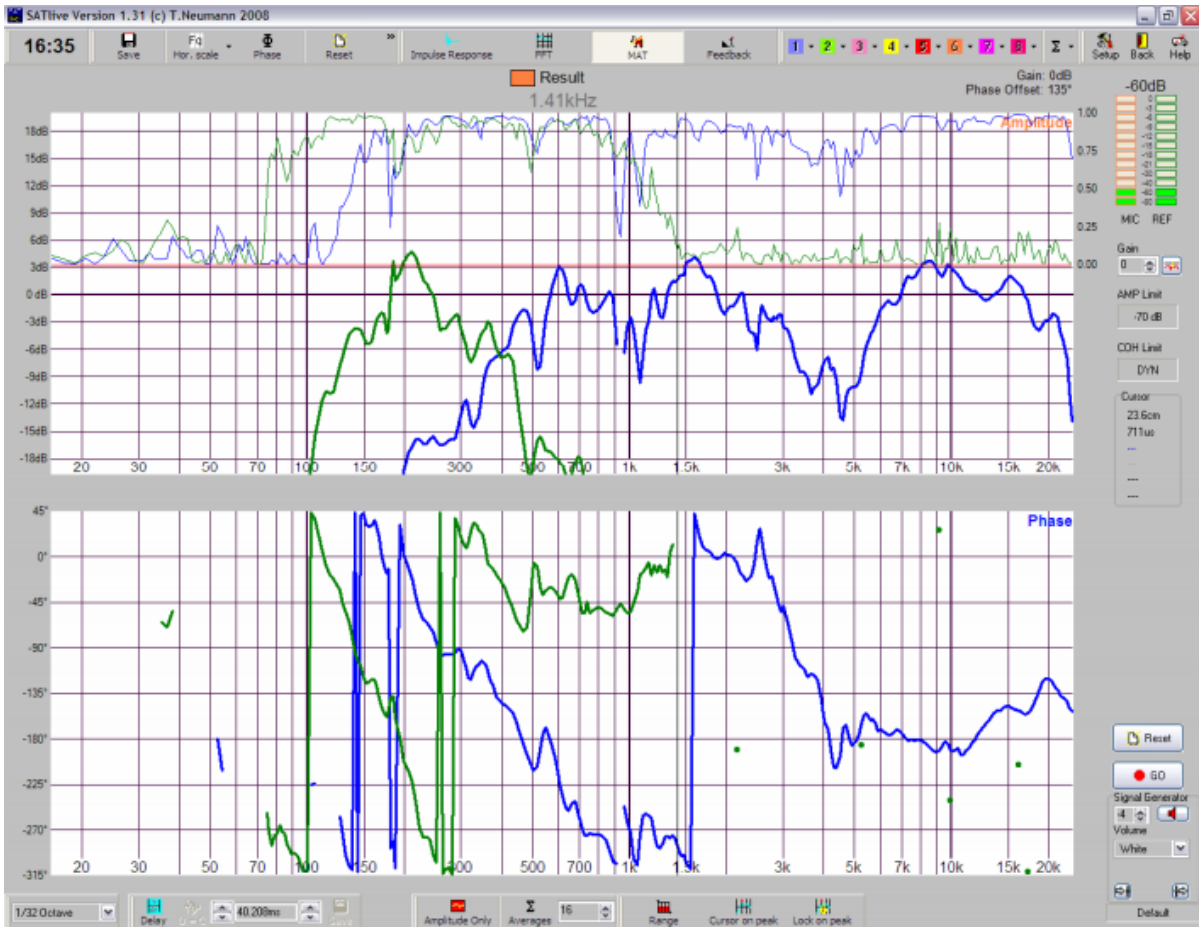


图 16　可以看到在分频点附近，两只音箱的相位曲线差异较大，需要进行调整来减小它们之间的相位差来改善叠加的效果。

9）在超低频通道中增加或减少延时，直到两条相位曲线重叠。注意保存曲线！

本例中，并不能明显看出应该对超低频通道增加还是减少延时。所以不妨都尝试一下，看看怎样会有最好的效果。

操作 a）减小超低频的延时，绿色曲线会向上移动。

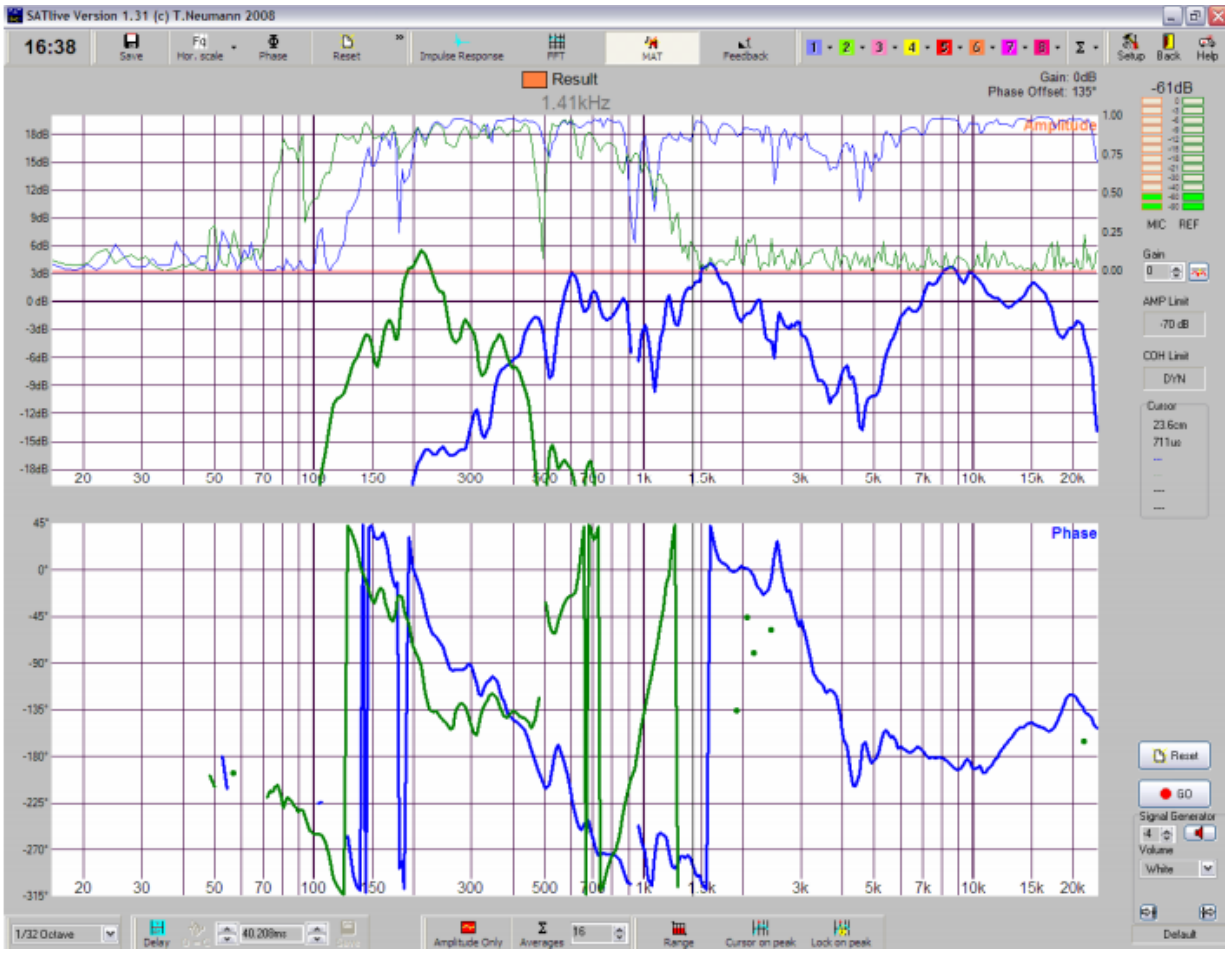


图 17　　经过对超低音箱的延时的调整，使得全频音箱和超低音箱在声学分频点附近的频带内实现了相位的重叠。

在曲线实现最佳重叠时，超低频的延时为 18.270ms。我们调整延时值直到两条相位曲线在声学分频点处重叠，这是它们在分频点处实现最佳的正相叠加。而在这个频率点之上和之下会有相位差，我们通过与不同的延时设置的叠加效果之间的对比而对其进行评估。

操作 b）增加超低频的延时值直到两条相位曲线在声学分频点处的相位一致。相位在分频点之上的频率比在其之下的频率耦合的更好。同样，我们接下来要对结果进行评估。

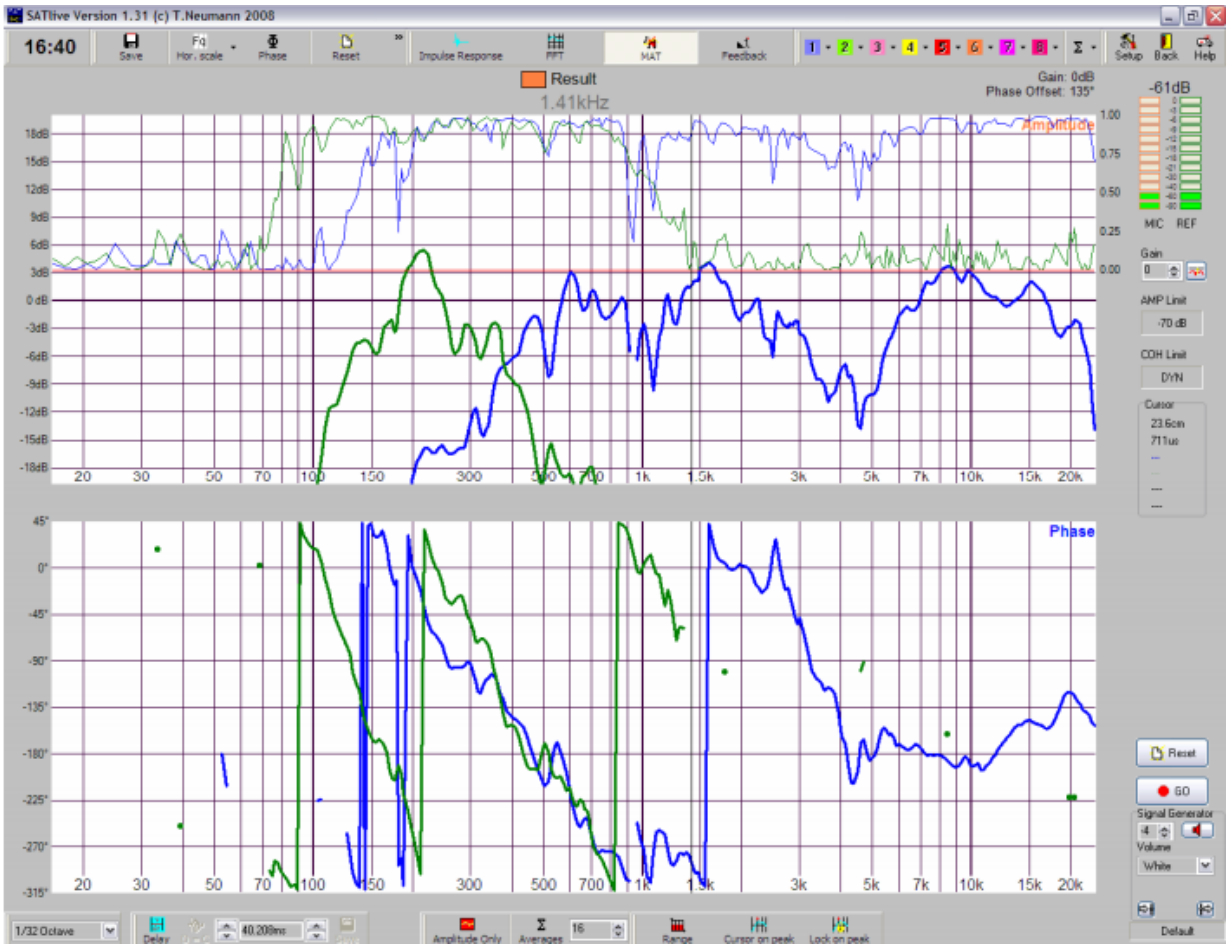


图 18　此图中可以看到，在给超低频通道增加延时之后，在声学分频点处及更高的频段内相位曲线是重叠的，但是在比分频点低的频段内没有重叠。

10）测量整个系统的幅频响应，并与最初的测量结果对比。如果相位已经被正确调整，则超低频和全频的叠加的更好，这会反映在幅频响应中。

在图 19 中，我们将比较两只音箱都未经延时的效果（红色）和超低频延时为 20.848（绿色）及 18.270 时的效果（蓝色）。



图 19　　相比调整超低音通道延时之前，幅频响应经过调整之后已经得到明显的改善——这种调整可以是增加延时也可以是减少延时。

我们很清楚地看到绿色和蓝色的频响曲线都有很明显的改善。而二者之间的差别并不是很大。

11）找出最小的延时值，并从超低频通道和中高频通道中减去这个延时值，这样就会有一个通道的延时为 0ms。

比如我们选中了蓝色曲线。全频的延时值为 20ms，超低频的延时值为 18.270ms。我们在测量之前为了方便增加和减少延时值而设置了 20ms 的初始延时，在相位调整完成后我们需要减去多余的延时。即从两个输出通道中分别减去最小的延时值，这样就会有一个通道的延时为 0ms。

此例中，全频通道的延时最终设置为

20ms—18.270ms=1.73ms。

超低频通道的延时最终设置为

18.270ms—18.270ms=0ms。

假如我们要用其它尺寸的音箱来做这个试验，我们只需要算出所要模拟的音箱和测量中实际使用的音箱之间的比例。

例 3，真实系统的测量

我们在固定安装或演出工程中测量一个扩声系统时，只需要测量某一侧阵列即可，麦克风应该置于声源和最远的覆盖距离的中间，当然要确保所选测量点能有较好的相关性曲线。此外，还要确保麦克风的摆放位置与观众区其他位置不会有太大的偏差。从测量点往前走或者往后走都不应感到很明显的差异（与音箱最近的区域另作考虑）。

还要避免地面反射在分频点处造成相关性降低，这在麦克风摆在唛架上时很容易出现。

本例中，我们要对 DAS Aero50 线阵列音箱和 DAS LX218A 超低频音箱进行相位耦合。二者之间的声压差别可能会导致交叉频带变宽或变窄。本例中，二者的交叉频带为 45Hz—125Hz。

DAS LX218A 是一款自带信号处理器（具备分频功能和均衡功能）的有源超低频音箱，但是我们还是要使用一台外部处理器用以对全频音箱进行延时调整。在使用有源音箱时的常见错误是在设置分频点时将其按无源音箱对待，这样最终的斜率就等于外部处理器的斜率加上音箱自带的分频器的斜率。所以，我们最终得到的斜率可能是 48dB/oct 而不是 24dB/oct。本例中，我们并未使用外部处理器的分频功能，而只是使用超低音箱自带的滤波器。

DAS Aero50 是一款 3 分频线阵列音箱。其 3 个频段的出厂延时设置已加载到外部处理器上。

操作步骤和前面两例相同：

1）在处理器中给每个输出通道加入 20ms 延时（也可以是其它值）。

2）首先我们利用“Delay Finder”功能，并根据参考信号在中高频通道加入所需的延时，即讲参考信号和测量信号同步（详见 SATlive 或你所使用的其它分析软件的用户手册）。

3）测量系统在未经相位调整之前的幅频响应。最糟的情况是两只音箱在交叉频率处有明显的抵消。

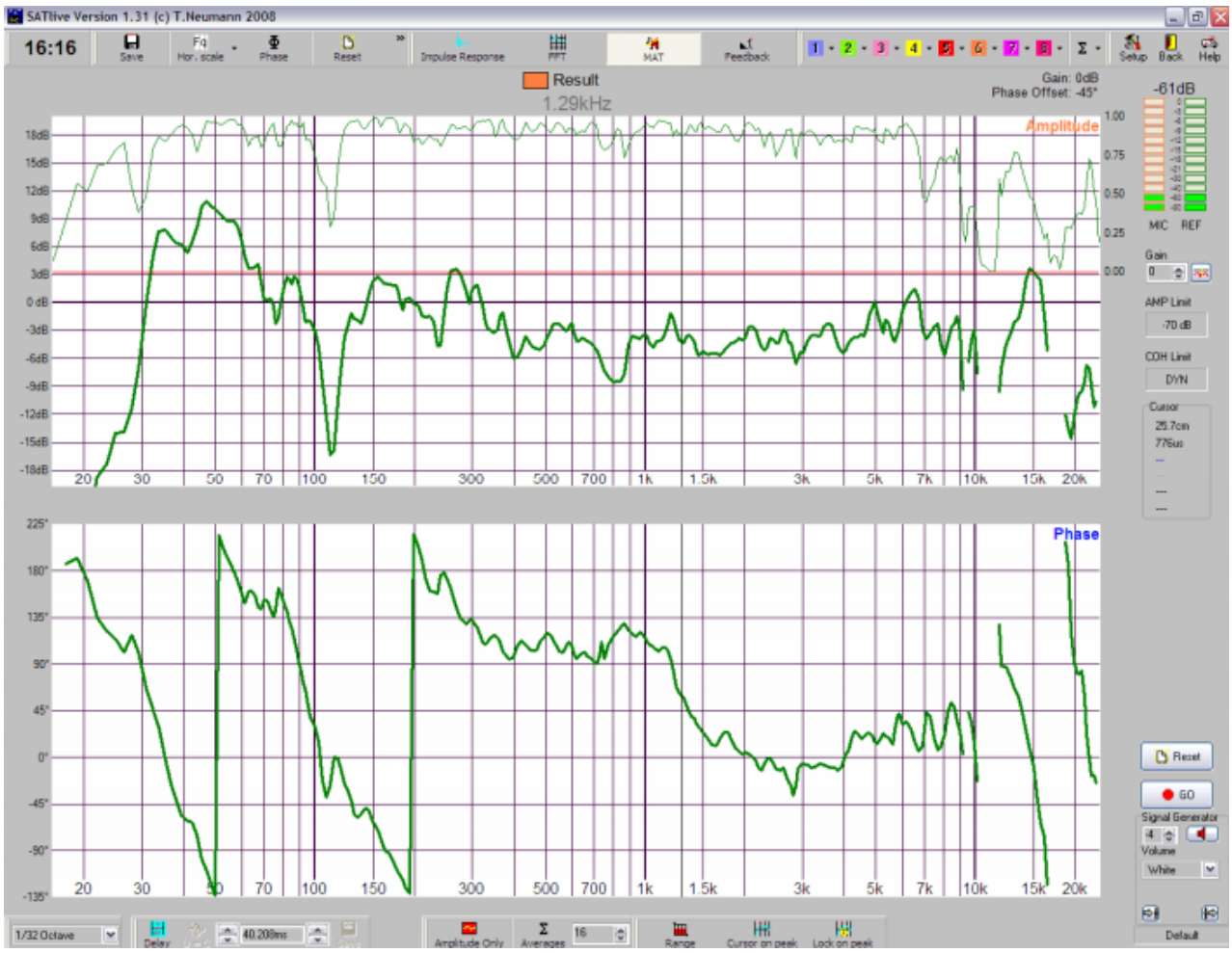


图 20　　上图是系统在未经优化之前的响应曲线，可以看到在 125Hz 处相关性曲线出现了一个凹谷。这是因为全频音箱和超低音箱在该频段的声压大小相当，但是由于它们之间的时间差导致在该频段出现相位差，并导致了抵消。同样的情况也会可能由于直达声和反射声的时间差所致。

4）在处理器中将超低频通道静音，只开启全频通道。

5）测量中全频音箱的响应，并保存曲线。见图 21

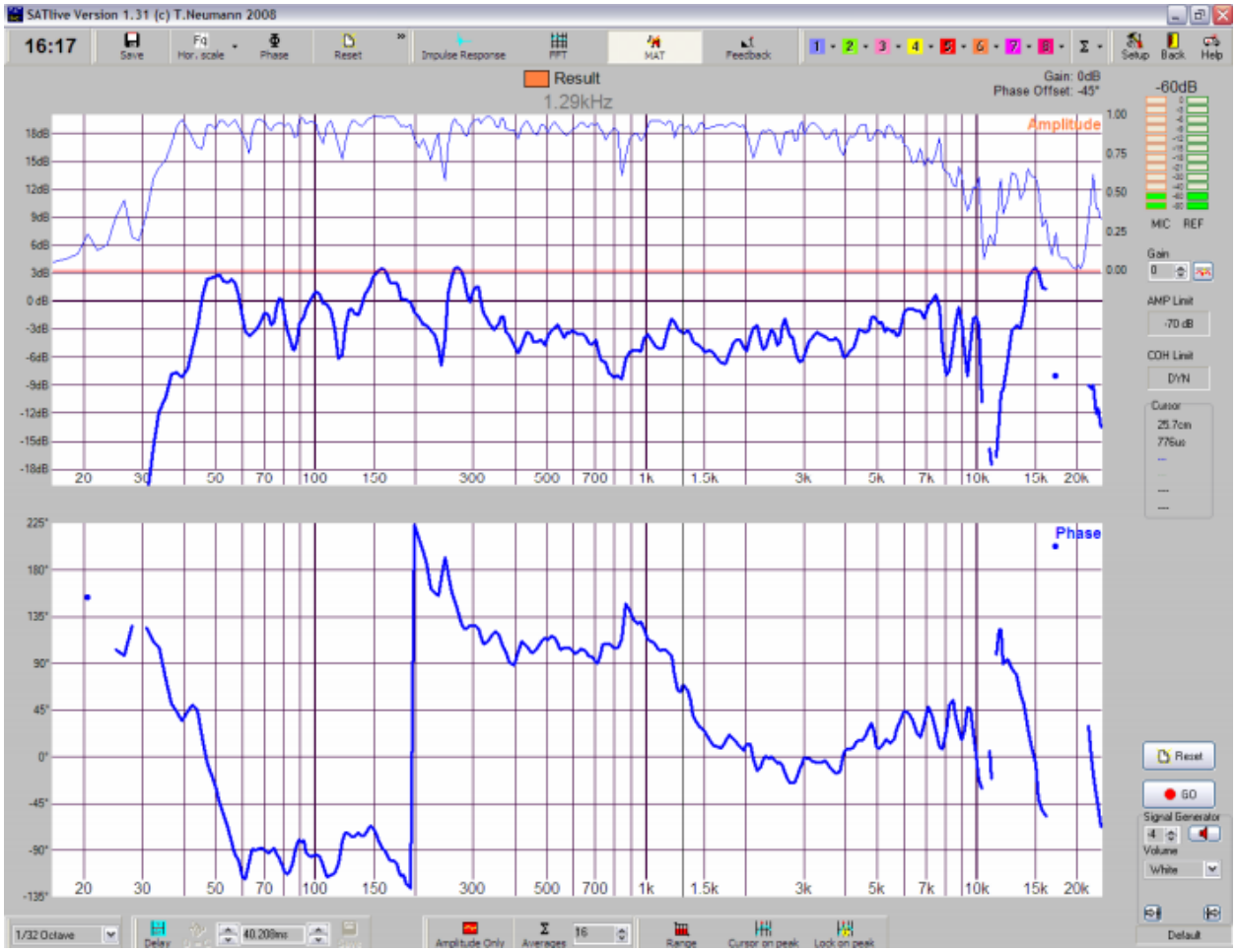


图 21　　这是全频音箱的响应曲线，在这个系统中，全频通道的高通频率设置得较低。

6）将全频通道静音，只开启超低频输出。

7）注意：不要再次使用“Delay Finder”（即不要将参考信号和测量信号再次进行 同步）！要知道我们是要将超低频和全频进行对比，也就是说我们要测量的就是这两种信号的到达时间的差异，而到达时间是频率的函数。所以不要再次在测量软件中对参考信号加入同步延时。记住我们选择了全频音箱作为时间参考，因为全频信号的脉冲响应更容易捕捉。

8）测量超低频的响应，并与全频的相位响应对比。如图 22。



图 22　　可以看到全频音箱与超低音箱之间存在很大的相位差，在 45Hz 至 125Hz 之间声学交叉频段内相位差都很大。

9）增加或减少超低频的延时直到两条相位曲线在分频点附近重叠，见图 23。注意保存曲线。

此例中超低频的相位曲线在通带内比全频的相位曲线更陡。这说明要减小超低频的延时直到在交叉频带内相位曲线实现最大重叠。

当我们减小延时时，图 22 中的绿色曲线会往上移动最终消失并从相位图下部重现。我们需要记住，相位图只显示—180°—+180°的值。超出这一范围的值会导致相位线呈“Z”字弯曲，正如图中所见。



图 23　　减小超低音通道的延时会使绿色的相位曲线往上移动，移到最上方时曲线会消失并重新在相位显示区的下方重新出现，同时相位曲线也会变得“平缓”。

10）再次测量系统的频率响应并与最初的测量结果对比。如果相位已经被正确调整则超低频和全频会正相叠加，叠加的结果会反映在幅频响应中。

图 24 中，我们比较了系统在相位调整前（蓝色）和调整后（红色）的叠加效果。可见原先 125Hz 左右的抵消和相关性差的问题已经解决。如前所述，相关性变差是因为同一频率的声波到达时间不一样，这与反射声的干涉相似。在加入适当的延时后两个系统的交叉频率的到达时间相同，相关性曲线就恢复正常了。

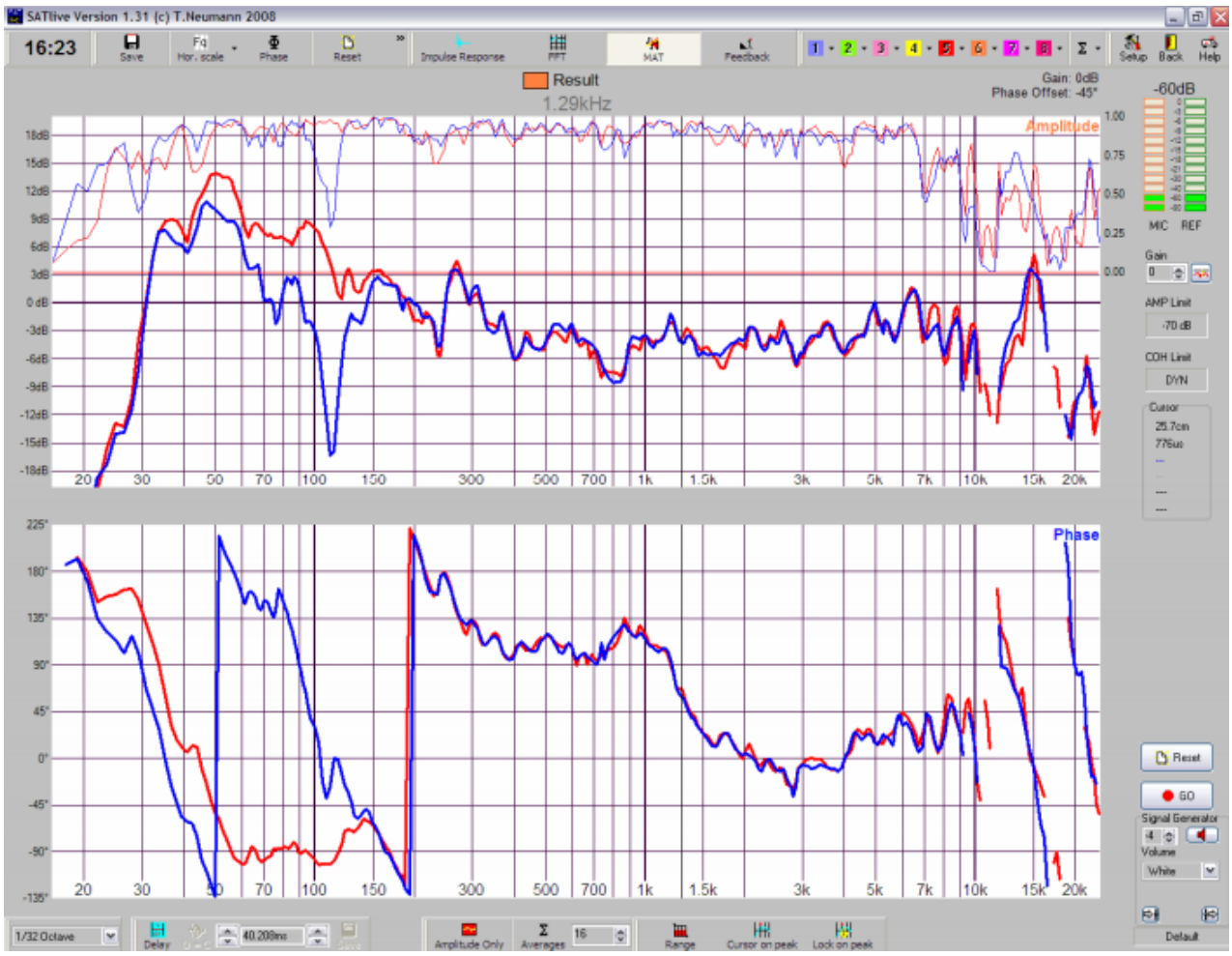


图 24　　相位耦合之前（蓝色）与耦合之后（红色）的系统响应的最比。

11）从各个输出通道中减去最小的延时值，这样至少有一个通道的延时为 0ms。

DAS Aero 是一款三分频无源线阵列音箱。相位耦合之后的延时设置如下：

DAS LX218A

Subwoofer: 14.458ms

DAS Aero

Low: 20ms

Mid: 25.9167ms

High: 26.0104ms

我们最终想要达到的是各个通道之间的相对延时差，因此我们要从各个通道中减去最小的延时值（本例中是 14.458ms）。最终的延时设置为：

DAS LX218A

Subwoofer: 0ms

DAS Aero

Low: 5.542ms

Mid: 11.4587ms

High: 11.5524ms

在所有的设置都完成之后，再进行一次测量以确保所有设置都是正确的。

在第一次对实际系统进行调试之前，尽可能多地实践这些调试步骤，可以利用我们所碰

到的任何音箱组合来进行调试。多进行小型模拟系统的测试有助于我们熟悉调试流程，让我们在面对更大的系统时更有信心。

Joan La Roda
DAS Audio, 工程部

翻译 by audiokid　　校对 by fayeba