

扬声器的全息测试

评估3D空间的辐射声场

原理

测量

应用

球面波函数级数

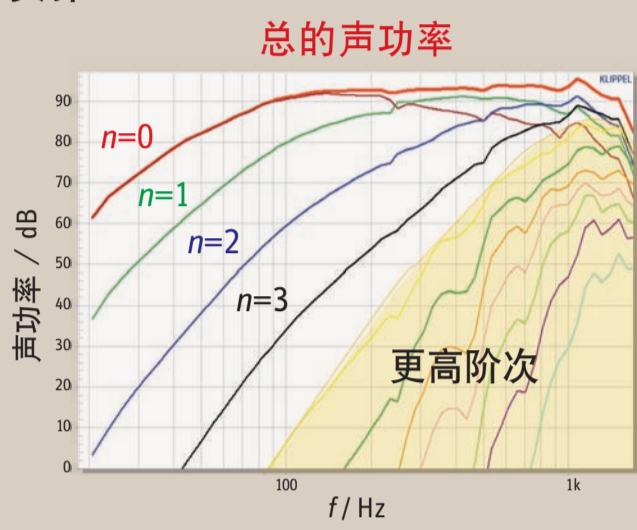
复传递函数 $H(f, r)$ 将扬声器的输入 $u(t)$ 与自由场条件下特定点 r 的声压 $p(r)$ 联系在一起，它可以用正交基函数 $B(f, r)$ 与其计权的复系数 $C(f)$ 来表示。

$$H(f, r) = C(f) \sum_{n=0}^{\infty} c_{nm}(f) \cdot h_n^{(2)}(kr) \cdot Y_n^m(\theta, \phi)$$

基函数 $B(f, r)$ 是球坐标下波动方程的通解，包含了第二类汉克尔函数 $h_n^{(2)}$ 和球谐函数 Y_n^m 。系数 $c_{nm}(f)$ 和级数的最高阶 N 都取决于待测的特定扬声器的属性。

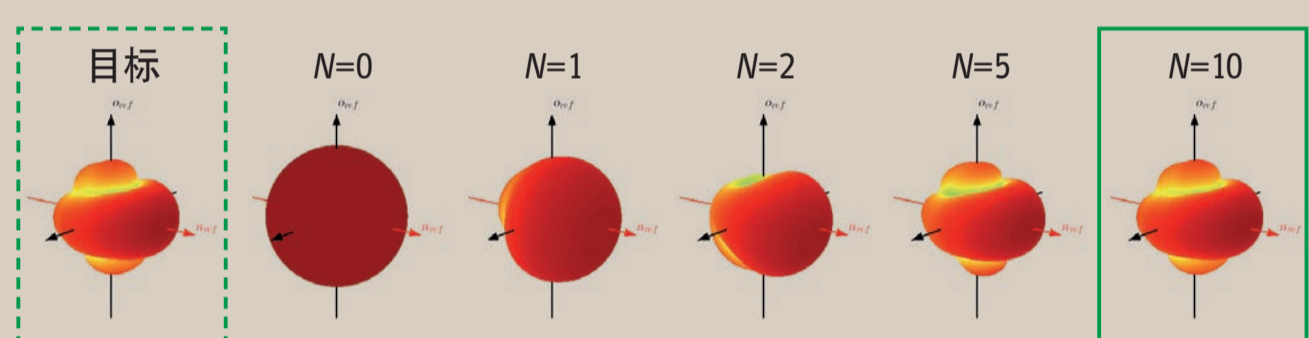
正交分解

分解正交基函数 $B(f, r)$ 就可以对于3D输出提供更为全面的表现方式。级数的最高阶 N 与扬声器可能生成的指向性图案的复杂性有关。小型音箱在低频段所发出的总的声功率可以用一个低阶的级数($N=3$)来表述。此时，当声源表现为单极时， $n=0$ ；偶极时， $n=1$ ；四极时， $n=2$ 。



总的声功率以及球面波级数中各阶次项的分别贡献

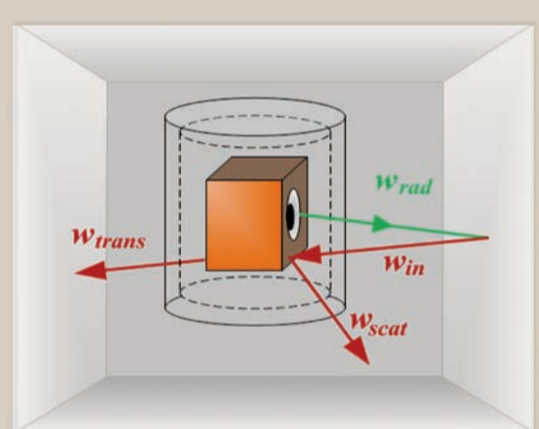
更高的阶次项用来模拟扬声器高频段的指向性，这样可以获得足够高的角分辨率及精确性。



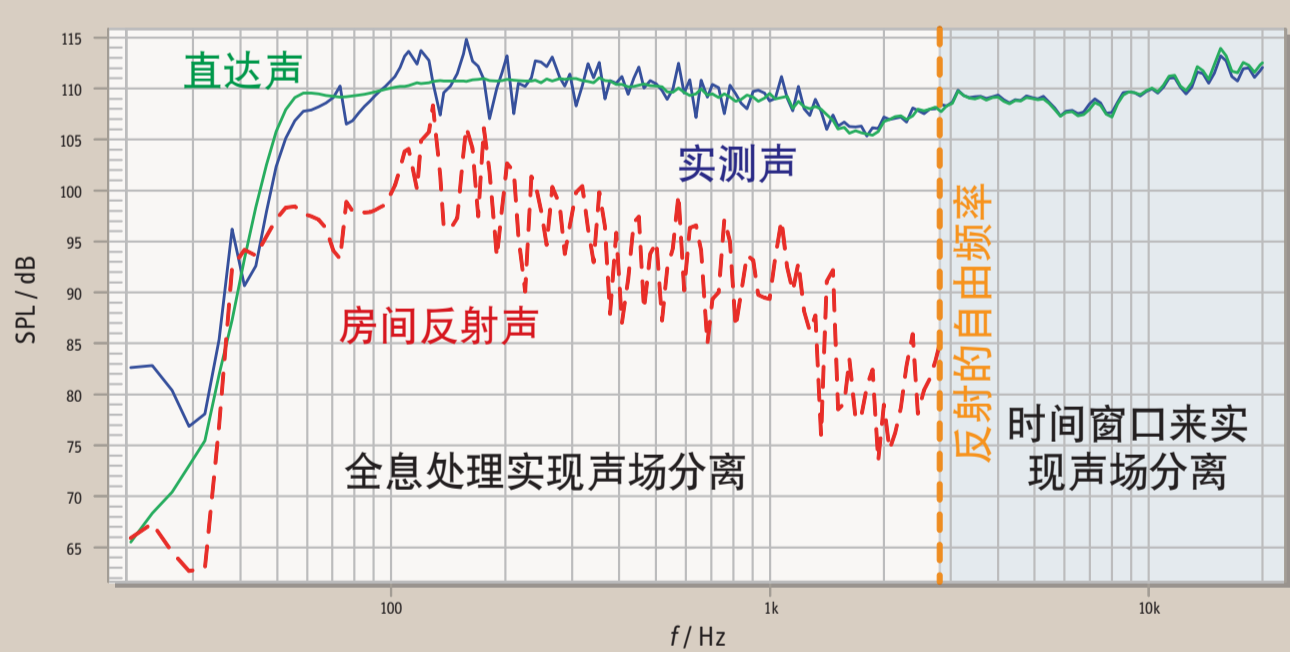
扬声器在 $f=2\text{kHz}$ (左图)的目标指向性，可以通过设定最高阶 $N=10$ 的球面波级数来近似模拟得到。

声场分离

在非消声室的环境下对扬声器声压进行测量表明，直达声分量与房间墙壁产生的反射声分量之间会有干涉。在高频段，可以通过窗口脉冲响应的方式将直达声分离出来；而低频部分，若使用此窗口术，则需要扬声器和反射边界之间有很大的距离，这样才可以获得足够的频谱解析度。

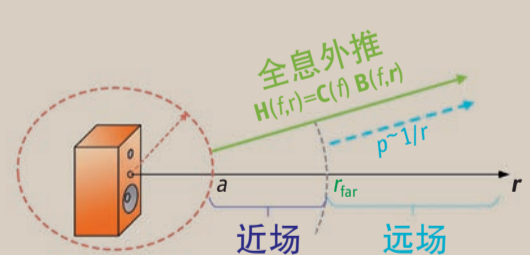


声压数据的全息处理，是采用两层扫描的方式，把辐射的直达声 w_{rad} 与反射声 w_{in} 、 w_{trans} 和 w_{scat} 分离开来。

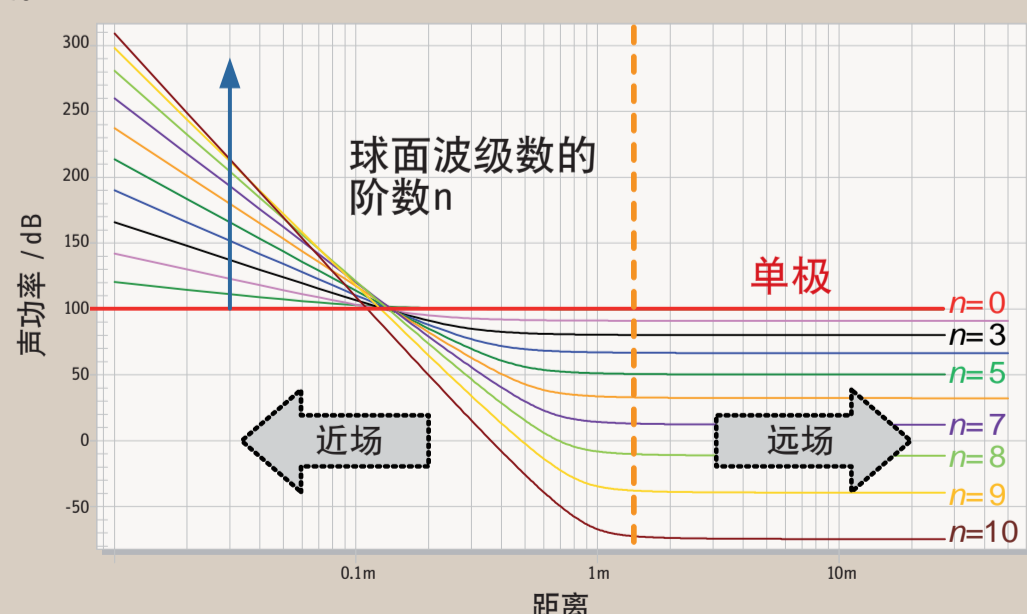


声场外推

在远场，声压 p 与距离 r 成正比，可以用 $1/r$ 法则去计算，即：距离增大一倍，声压级则下降6dB。



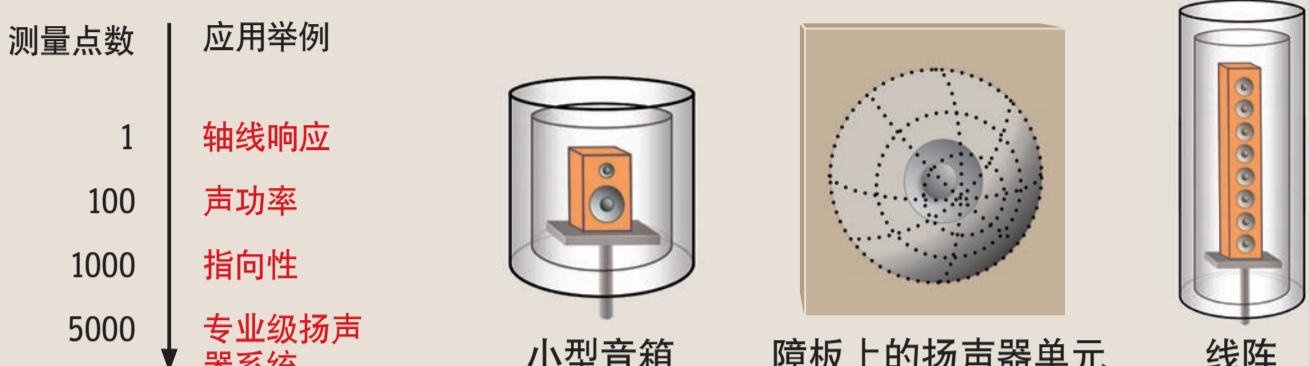
在近场， $1/r$ 法则则不适用，这是由于声压与速度之间的相移的原因，此时很小的一个 r 变化值其声功率就会很明显地增大。球面波函数级数则可以描述扫描层之外3D空间中无论是近场或是远场里的任意一点的声压。



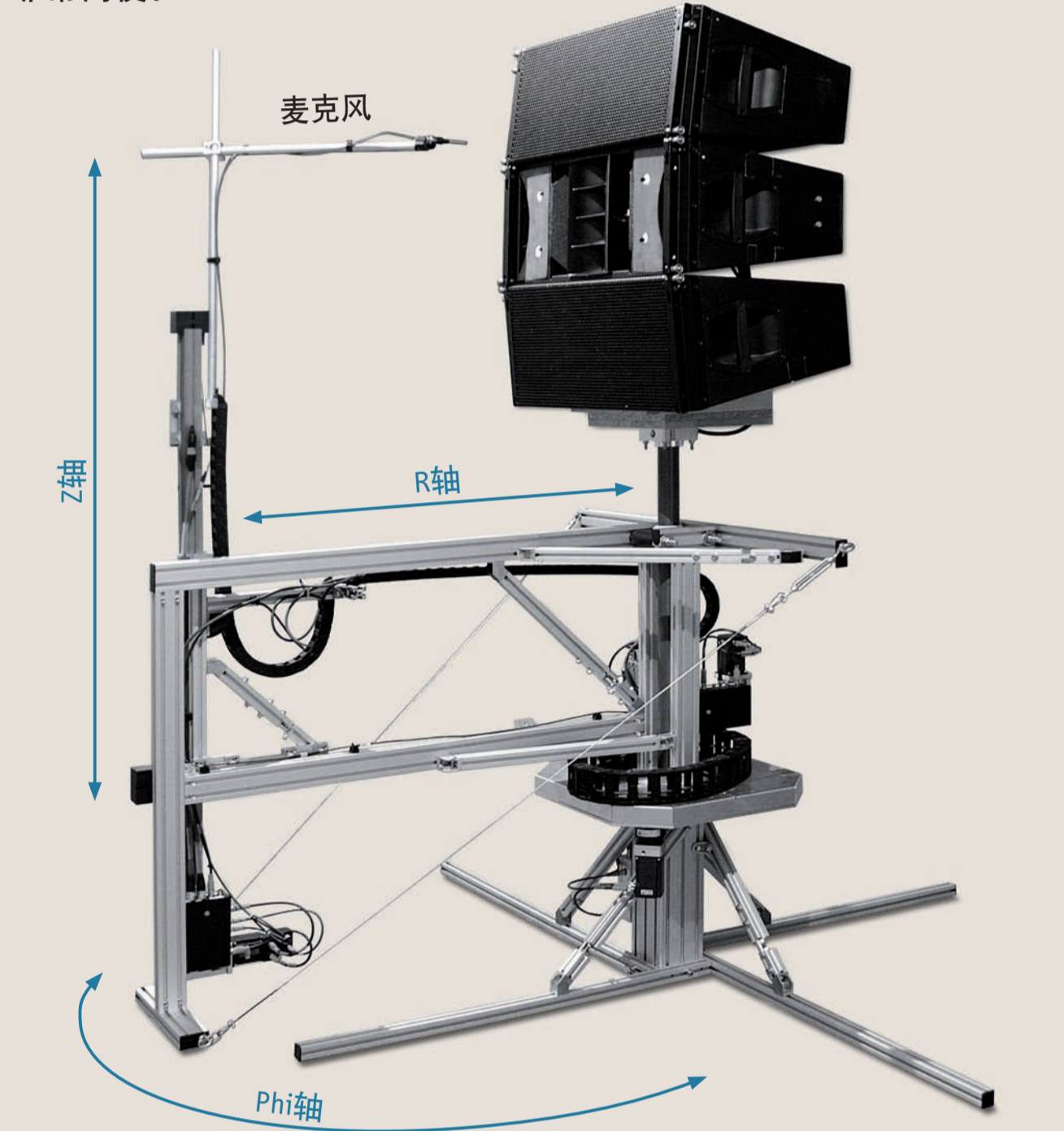
很明显，阶数 $n>0$ 时的球面波的声功率在近场是随着距离的增加而减小，而在声源的远场里却保持恒定不变。

近场扫描

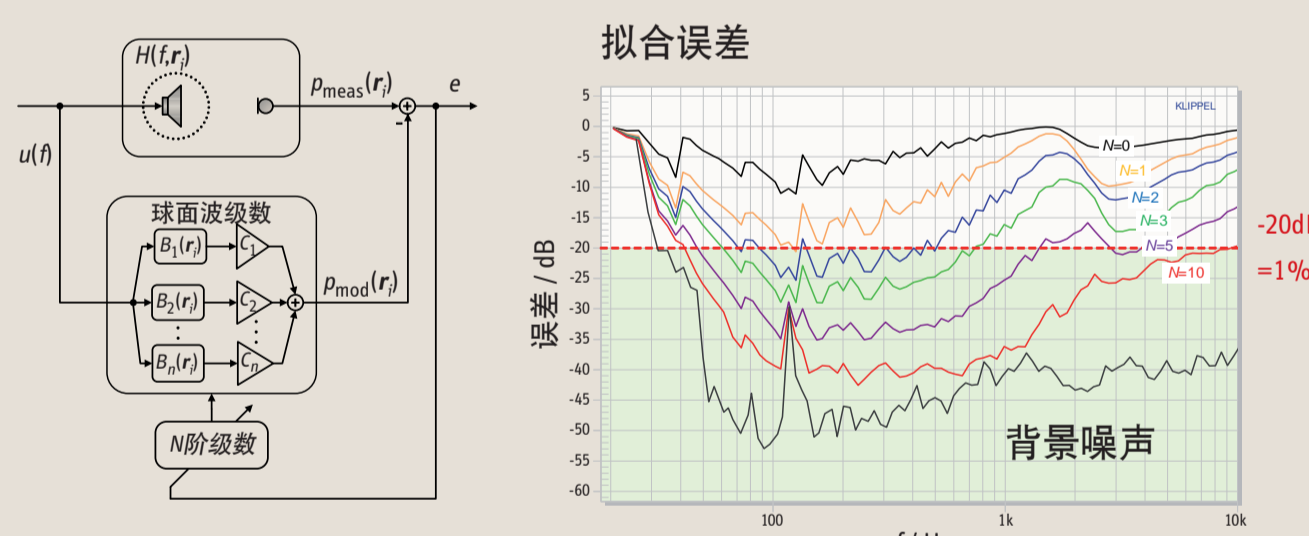
在被测扬声器的近场选择两个圆柱面或半球面进行测量。尽管与传统的技术相比，生成的指向性图案的角分辨率仍是一样的，但全息处理方式所需的测量点则更少。



近场的声压测量，由于将声波传输过程中的空气对流和温度变化的影响降到了最小，所以获得了有很高信噪比 (SNR) 的精确的声压幅值和有关的相位信息。为了确保扬声器与房间的相互影响是不变的，则让麦克风绕着扬声器周围的两个圆柱体扫描面上移动，而不是将扬声器放在转盘上转动。为了实现直达声与房间的反射声可以分离出来，这是必要的，同时，在测量一些笨重的扬声器系统时，这种测量方式也非常简便。



参数辨识

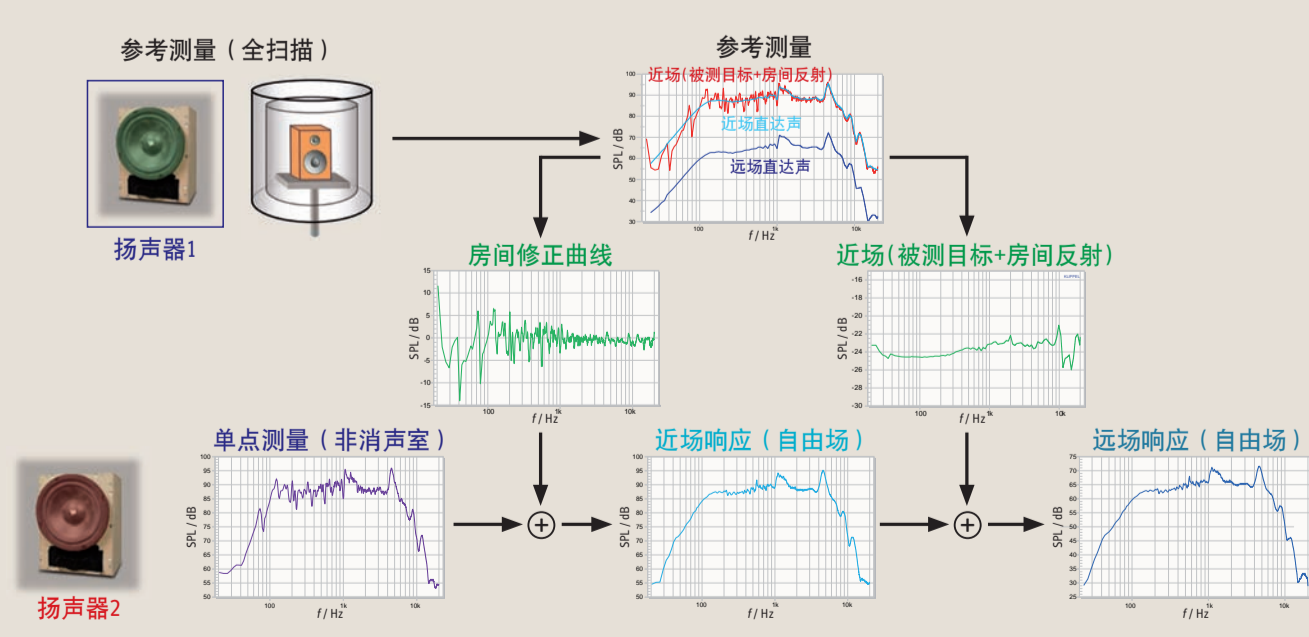


两层扫描法会产生重复的数据，这可以用来检查测量的精确性。拟合误差 E_{fit} 可以用来评估所有测量点 r_i 的实测声压 $p_{meas}(r_i)$ 与模拟的声压 $p_{mod}(r_i)$ 之间的相似度。

$$E_{fit} = \frac{\sum_{i=1}^M |p_{meas}(r_i) - p_{mod}(r_i)|^2}{\sum_{i=1}^M |p_{meas}(r_i)|^2} \cdot 100\%$$

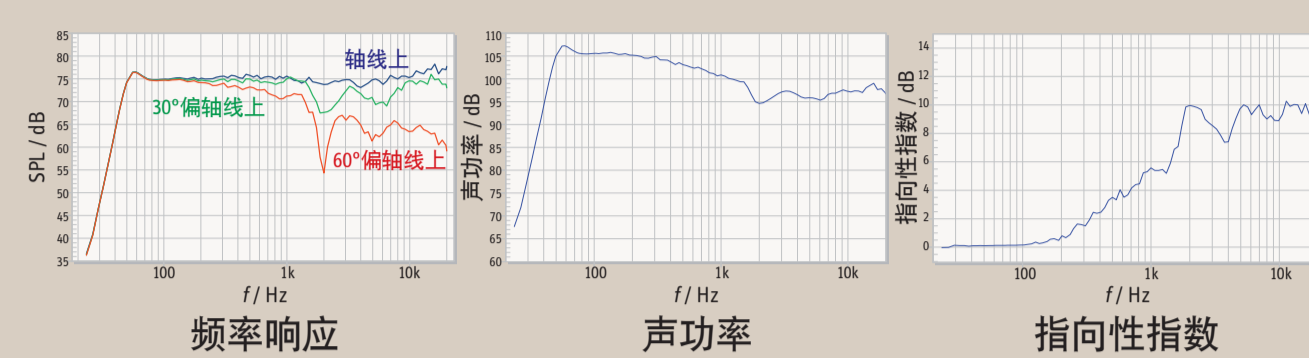
单点SPL测量

精确的远场数据可以通过只完成一次单点测量，再辅以曲线修正的方式确定。对于任意的扬声器：(1)修正曲线，通过将麦克风位置 r_0 的总的声压 (包含直达声和房间反射声) 与采用了全扫描数据和全息处理方式计算得到的直达声压 (不含房间反射声) 进行比较，而很容易地得到；(2)这一修正曲线可以应用到别的带有相同扬声器并且其几何体较为相似的扬声器系统上，而且房间里扬声器和麦克风的位置也应保持不变。



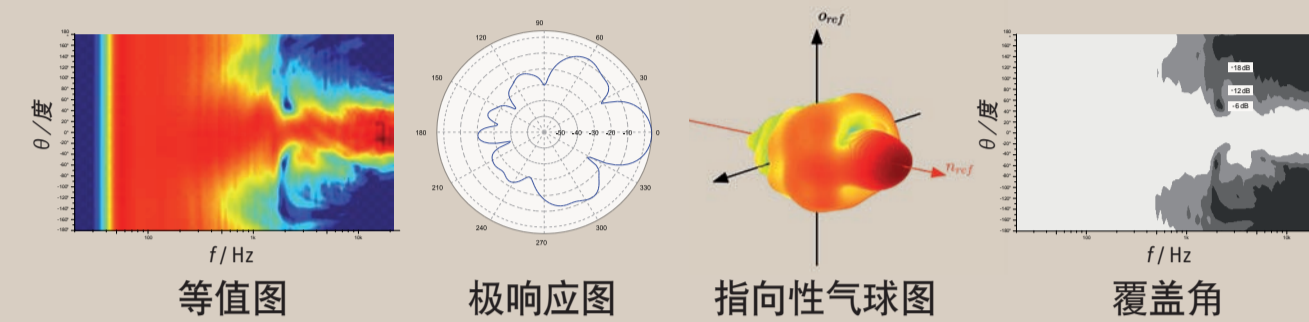
远场特性

在远场中的任意点的频率响应曲线可以由近场数据外推得到。



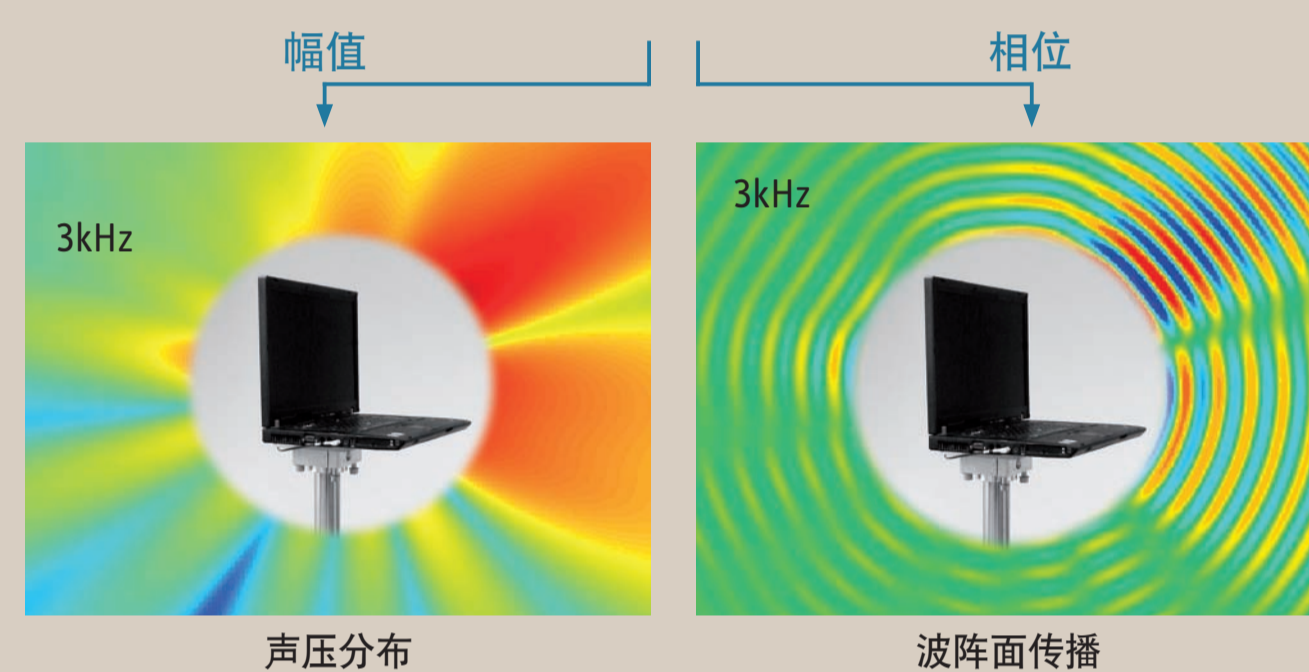
3D指向性

传统的方向性特性是基于波形函数级数计算得到的，并且还可以以期望的角分辨率 (比如：1°) 导入到别的声场仿真软件。



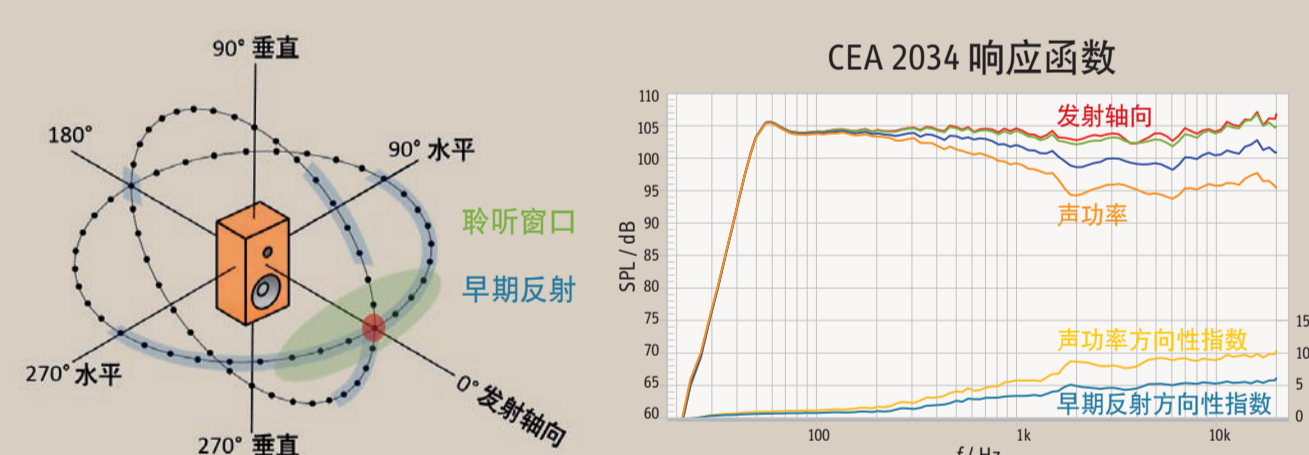
近场特性

考察近场特性对于录音棚监听箱、智能手机、笔记本电脑以及其它个人音响设备等尤其有意义。可以在3D空间定位一个观察面，以研究音响设备在此面上近场的SPL空间分布。全息测量可以提供精确的相位信息，以计算声波传入远场的相关信息，也有助于人们可视化理解双耳声感知。

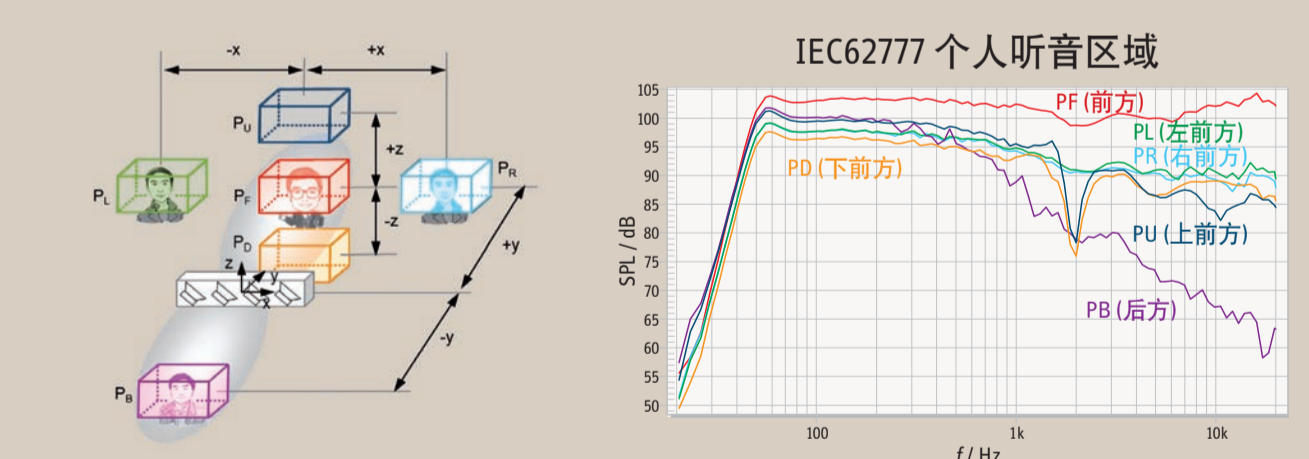


快速理解

CEA2034标准规定，对于家用扬声器，需要测试一些特定点的响应才有意义。因为当人们需要考虑扬声器与房间的相互影响时，或者需要在限定的聆听位置进行听音比时，这都是很有帮助的。

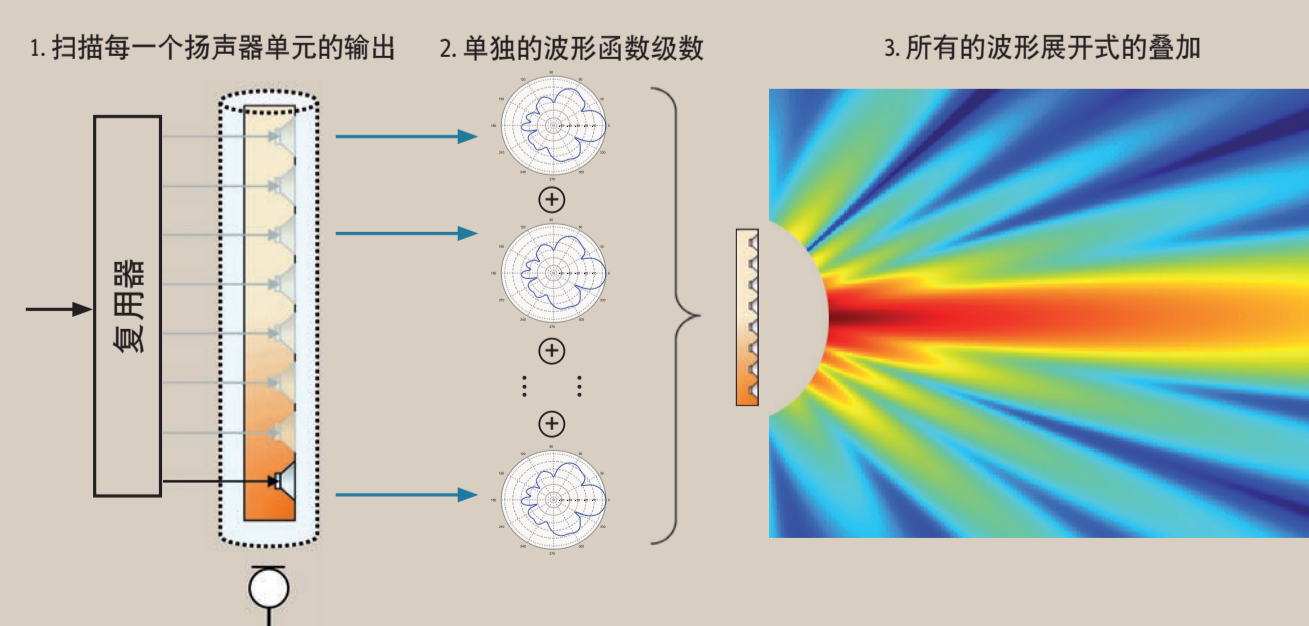


IEC62777标准规定，测试个人音响设备，需要在声源近场的个人听音区域内测试其声学特性。



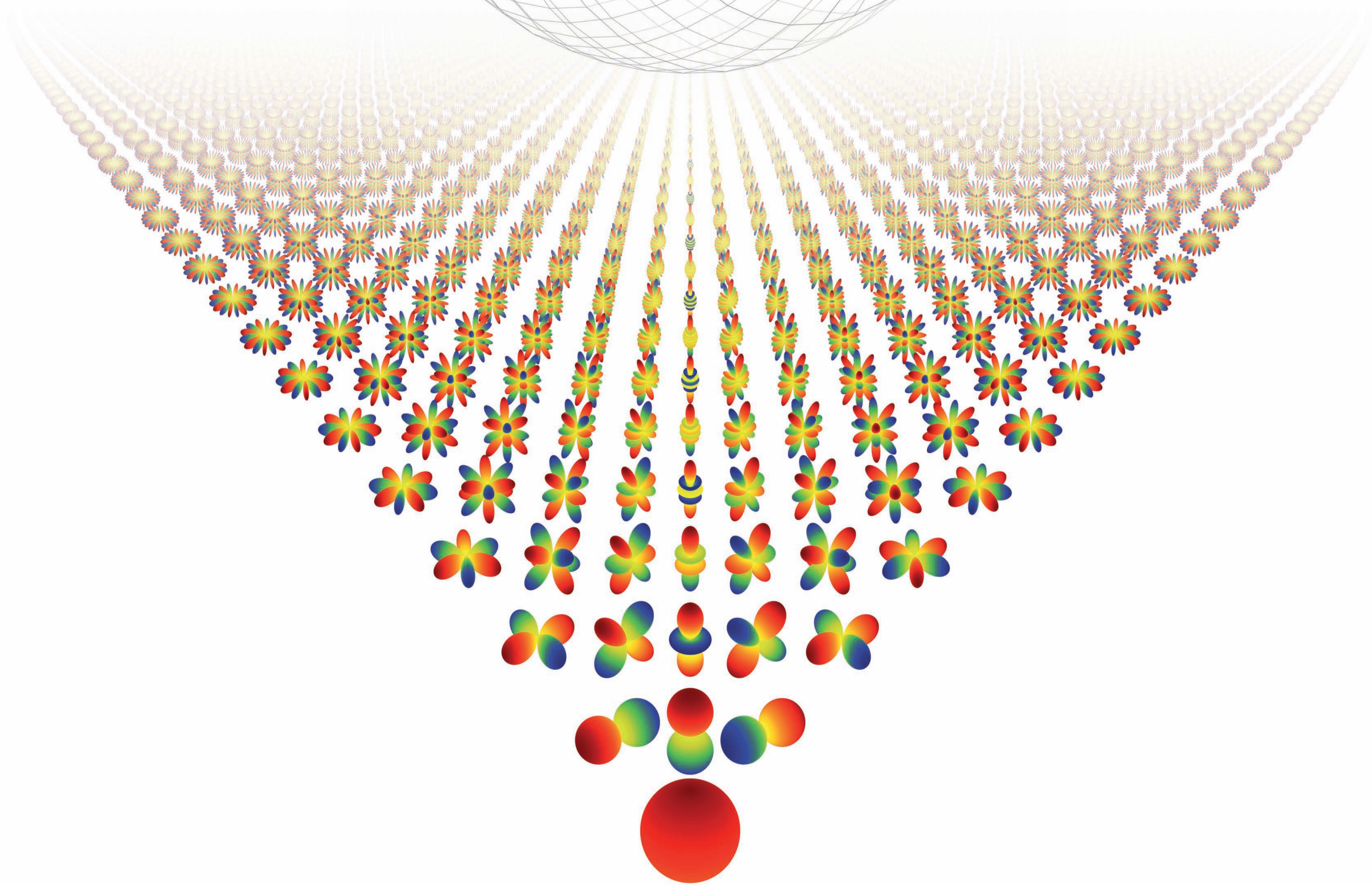
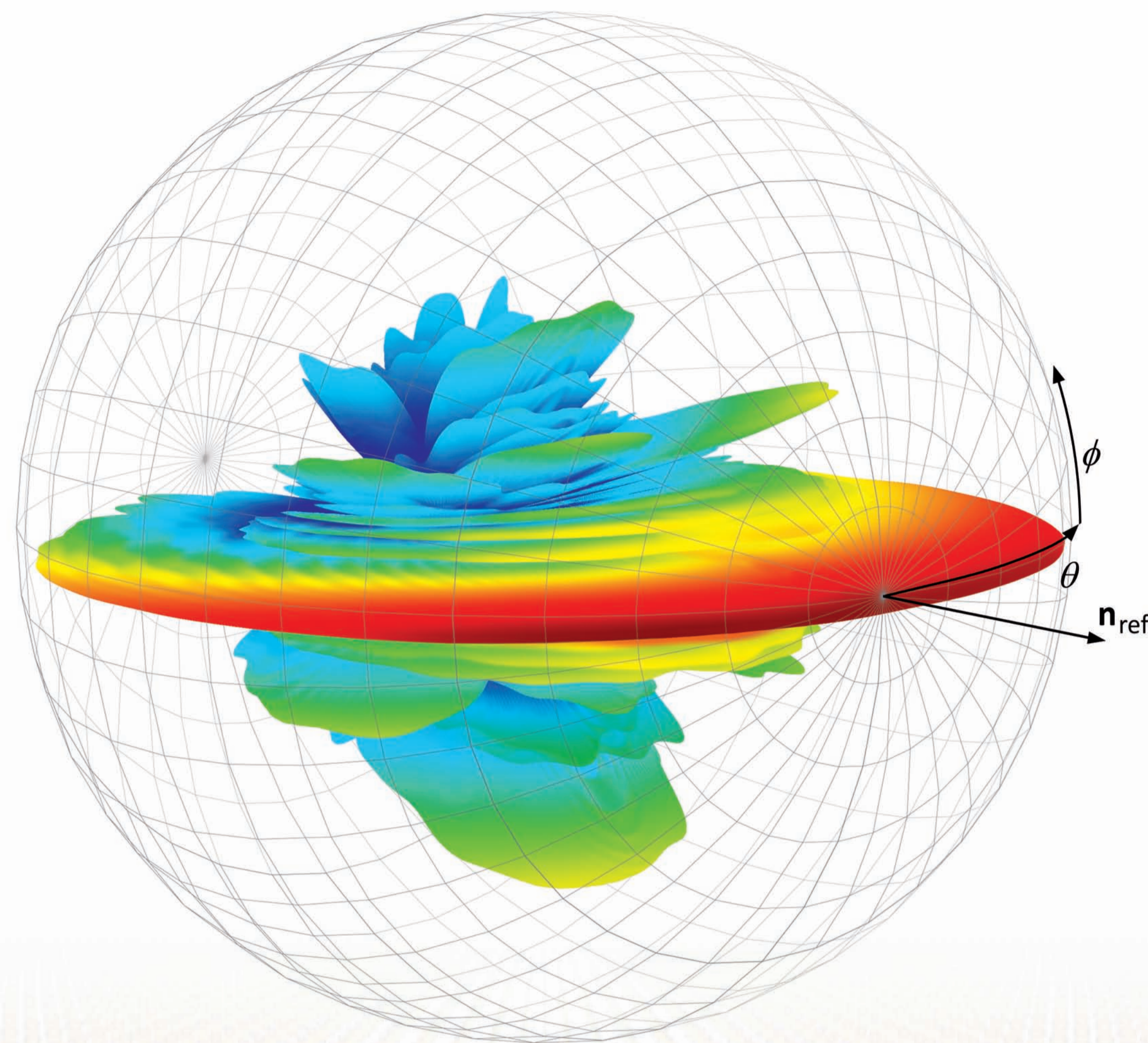
分布式声源

分布式声源 (如：线阵、条状音响) 的指向性可以通过测量扬声器系统里的每一个单独的扬声器单元来确定。因此，测量得到的每一个单元也都包含了扬声器箱体带来的阴影和衍射效应。经过全息处理，总的辐射声压可以通过将这些单个声源进行叠加计算得到。如果再对每一个单元运用独立的 (如：延迟、增益等) 滤波器，那么就可以很容易地对有源系统的指向性加以控制了 (如，声束控制)。



球面波函数级数

求解扬声器的指向性



KLIPPEL

www.klippel.de