

## 特约专题：扬声器阵列研究

# 一种用于线阵列系统极性 测试的可靠方法

· 技术分析 ·

葛瑞格·史密特<sup>1</sup>, 马库斯·贝克尔<sup>1</sup>, 咸爱清<sup>2</sup>

(1. 恩缇艾音频设备技术有限公司, 列支敦士登 沙恩 9494;

2. 恩缇艾音频设备技术(苏州)有限公司, 江苏 苏州 215168)

**【摘要】**一组线阵列系统的性能在很大程度上取决于其扬声器的正确安装。例如,一个极性错误的单体扬声器可能会明显地影响整个系统的声压和指向性。然而,这种错误的鉴定非常耗时。因此,这就需要一种快速同时又可靠的方法来找出这样的线阵元素。介绍了一种怎样一步一步来检查一个完整的线阵列系统的方法,同时,还能找出引起极性问题的原因。除了理论背景,还描述了一个实际应用的成功案例。

**【关键词】**线阵列; 极性; 公共广播

**【中图分类号】** TN643

**【文献标志码】** A

**Reliable Procedure for Polarity Measurements on Line Arrays**

SCHMIDLE Gregor<sup>1</sup>, BECKER Markus<sup>1</sup>, XIAN Aiqing<sup>2</sup>

(1. NTi Audio AG, Schaan 9494, Liechtenstein; 2. NTi China, Suzhou Jiangsu 215168, China)

**【Abstract】** The performance of a line array strongly depends on the correct installation of its loudspeakers. For instance, a single speaker with incorrect polarity may clearly compromise the sound level and directivity of the whole system. The identification of such errors however can be very time consuming. Therefore, it is desirable to have a fast, yet reliable procedure to finding such array elements. A step - by - step method is presented to check the integrity of a line array, and to find the cause in case of a polarity problem. Besides the theoretical background, a successful practical case is described.

**【Key words】** line arrays; polarity; PA system

## 1 引言

公共广播的安装以及现场声压事件通常都用线阵列系统,因为当需要一个稳定声场时,这些线阵列系统代表了一种稳定而又有效的解决方案<sup>[1-2]</sup>。安装简单,垂直波束形成的能力以及远距离的低声压衰减也是它的一些重要优点。线阵列系统的性能直接取决于正确的间隔以及被封装扬声器的正确运行。为了验证后者,必须采用一些测试,由此,每个单体扬声器必须有正确的极性。例如,如果线阵列系统中的一个单体扬声器被连接到一根反相的缆线上,结果将会被很清楚地听出来。通常会影响到声压的分布、频响或者立体感。核查扬声器的极性初看貌似是一个简单的任务。然而,在实际应用中,很难识别出一组线阵列系统中的一个与其他极性正确的扬声器非常接近的极性不正确的单体扬声器,同时也很难找出引起问题的根本原因。除此之外,当线阵列系统已经安装好离

地面几米高的时候就很难进入扬声器单元了。

而且,不能总是以一种简单的方式来回答一个扬声器是否被“正确极化”的问题。从理论上讲,如果扬声器收到一个正阶跃电流,扬声器膜片显然应当建立一种“正向”压力运动。然而在实践中,例如在实际的音频世界里,所谓“正确的极性”可以是相对的,因为扬声器并不总是表现出线性相位响应。频率依赖于内部的阻抗和分频可能影响到相位响应差不多高达180°的相位旋转,这将相当于一个倒置的极性。此外,音箱的类型和设置能表现出扬声器其本身在一个反相的方式下运行,其目的是为了生产校准到有效的声学相位。例如,一个3路的高音扬声器可能已经被设计为以产生“反相”相位的目的。正确的相位响应被生产厂家和整个系统的设计所定义。换句话说,“正确的极性”意味着扬声器再现了预期的相位响应,而“反相极性”表示在整个频率带宽内的一个额外的π相移。

## 2 扬声器的极性

### 2.1 正弦波相位测试

一种普遍验证一个扬声器极性的途径是测量受到激励的原件在设备中传输以后的正弦曲线的相位偏移。通常使用常数或者阶跃正弦信号作为激励源,因为它们还允许额外的测试,例如频响和失真,这些使得它们在很好地定义设置时特别具有吸引力,例如生产线的测试。然而,当遇到测量线阵列系统的时候,通过测量单独的正弦成分的相位偏移的策略就会遭遇下面的缺陷<sup>[3]</sup>:

(1) 信号源和分析系统双方必须非常仔细地被同步。

(2) 在测量之前,必须有执行用一个正确连线的系统的参考测试。这是必须来对相位在经过空气和其他像功放、调音台等相关元件中偏移进行补偿。

(3) 在测量中扬声器和传声器之间的距离必须保持常数。

由于这些严格的限制,这种极性测试方式几乎都用于实验室或者生产环境。

### 2.2 增强的极性测试信号

需要一种更高端的方式用于测量扬声器的极性:

(1) 这种方法在扬声器到传声器之间的距离的变化必须不灵敏。

(2) 分析仪能够从信号源中独立出来工作(例如:没有缆线的连接)。

(3) 不要正确接线的系统的参考测试应该是必须的。

能够被用到的激励的数量实际上是不限定的,例如:不同的脉冲,啁啾,伪随机噪声等。然后,在实际中,进一步的标准也导致了其他的限制:

(1) 测试信号的频谱内容必须覆盖整个音频频带。

(2) 测试信号的频谱形状必须适合实现了高信号噪声比,即免除对环境噪声。

(3) 低波峰因数,零均值和对称正/负峰值避免过度加压在放大器或驱动扬声器。

并尽量减少特别是在高音上的二次谐波。一个好的解决方案是有一个相对于极性的能明显显示峰值的自相关功能的测试信号。换句话说,如果反相,信号必须不对称,随着时间的推移,信号不能被映射成原型。

这里所使用的信号是一个具有周期频率为 20 Hz 的锯齿波。它具有以下特征:

(1) 信号包含的频谱部分  $n \cdot f_0$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ );  $f_0 = 20 \text{ Hz}$ ;

(2) 频谱成分中的相对幅度以  $1/n$  降低;

(3) 所有的信号成分都从在时间  $t = 0$  时相位为 0 开始。

$$y(t) = \alpha \cdot \sum_n \frac{1}{n} \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t \cdot n) \quad (1)$$

请注意,在每个信号开始的时候( $T = 0$ ),信号幅度为零,但具有最高倾斜度。此外,信号具有零均值,对称峰值峰和适度的峰值因素 1.7 (4.64 dB)。重要的是要了解极性分析的原理,如果测试信号是在一个线性相位带通滤波器中传送。图 1 显示了一个锯齿波信号怎样在一个 125 Hz 的带通滤波器中变化的两个特殊的例子。

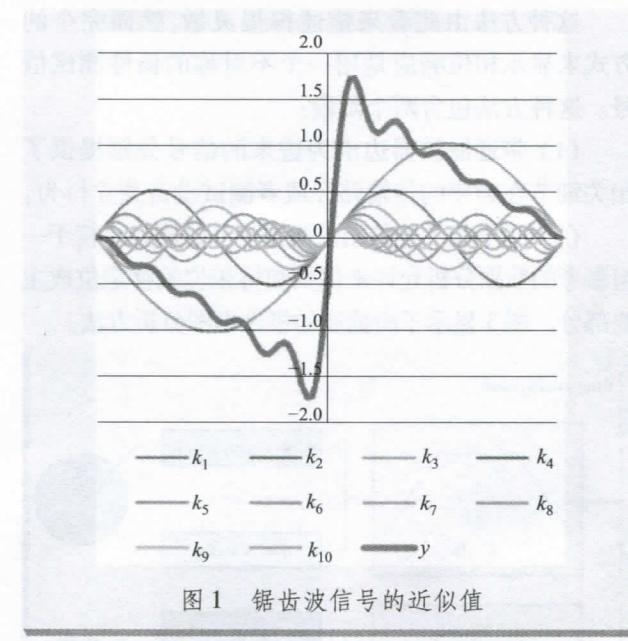


图 1 锯齿波信号的近似值

其中,输入信号没有相位变化的曲线为  $y$ ; 输入信号的相位变化见  $k_1$ 。

如果输入信号显示是  $180^\circ$  的相位偏移(也就是如果极性翻转),结果滤波器的输出信号映射在  $X$  轴上。然而在现实中的扬声器在整个频率范围内不是线性的相位。因此一个被传输的测试信号的频谱部分能显示独特的相位变化,表现出了图 2 中的两个响应的计权之和。例如,在规定的频带内,扬声器信号的响应可能  $0^\circ$  或者  $90^\circ$  相位偏移,或者甚至  $180^\circ$  翻转。换句话说,扬声器可能引起  $45^\circ$  相移,产生的信号将类似于在图 2 中的两个信号的总和。因此,设备

能显示在不同频带内的不同相位变化,一个相关的极性测试必须在单独的频带内比较独自的相位分析,来显示整个的“相位图”在测试设备上。

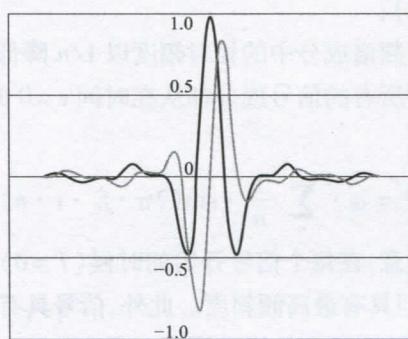


图2 锯齿波通过125 Hz带通滤波器之后的未变形( $0^\circ$ )和变形( $90^\circ$ )

### 2.3 不对称信号相位分析

这种方法由此看来描述得很灵敏,然而完全的方式来显示相位响应是用一个不对称的极性测试信号。这种方法包含两个阶段:

(1) 带通滤波器边沿为进来的信号分别提供了相关细节在频率的传输路径或者测试设备独立行为。

(2) 一个相关连的结果频谱信号的成分比较于一组参考的数据分析允许来识别和将相位偏移定位成主要部分。图3显示了所描述的极性框图分析方法。

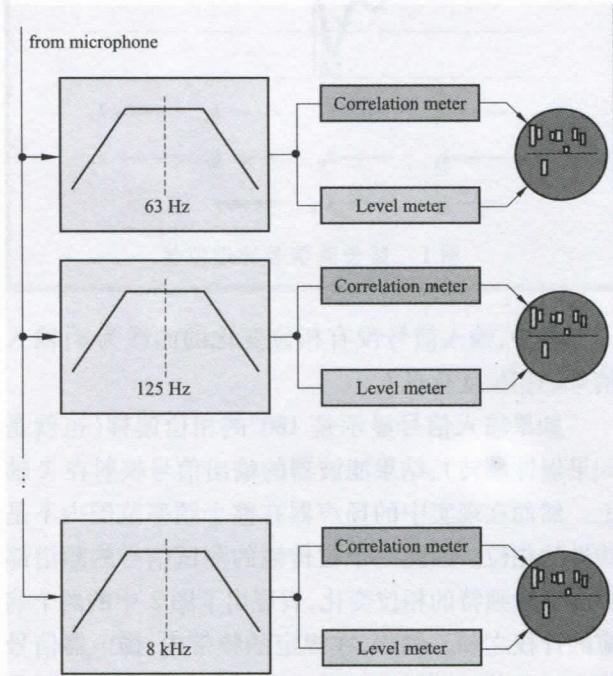


图3 极性分析的部分图解

测试信号从测试传声器反馈进来后经过八个倍频程带的滤波器;在经过每个滤波器后,一组修正,电平表平行分析输出的信号;修正过的计量值能识别信号的范围是在或者不在相位内;电平表测试修正的意义。

第一步将进来的信号分到八个倍频程带内。这些滤波器的中心频率是63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz 和 8 kHz。第二步是单独地检查“在或者不在相位内”的信息,分析相位和振幅,因此允许详细的结果说明。

#### 2.3.1 带通滤波器阶段

图4显示了一个带通滤波器的输出信号,如果被传递的信号极性是“在相位内”。

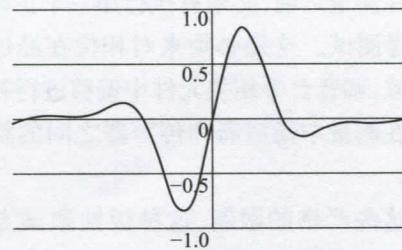


图4  $0^\circ$ 相位偏移的带通滤波器输出

图5显示了带通滤波器的输出,如果被传递的信号极性是“不在相位内”。

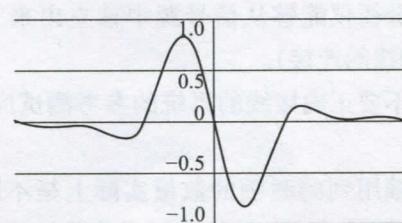


图5  $180^\circ$ 相位偏移的带通滤波器输出

图6显示了两个经由带通滤波器的信号,它们分别是 $90^\circ$ 或者是 $270^\circ$ 的相位偏移。

#### 2.3.2 修正分析

修正计量仪将每个频带的输出信号和上面描述的情况进行比较,因此测定各自的极性。电平测量仪量化哪个信号状态相关性的程度,其部分图解见图7。

整合过的修正过的输出和电平测试被映射在X-Y的图表上,由此:Y轴正半轴代表“在相位内”;零轴代表“不确定”;Y轴负半轴代表“不在相位内”,见图8所示。

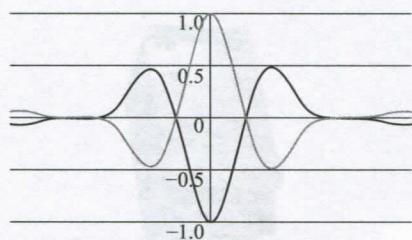


图 6 90°, 270° 相位偏移的带通滤波器输出  
(90° 或者 270° 相位偏移, 信号的极性  
没有被明显地定义)

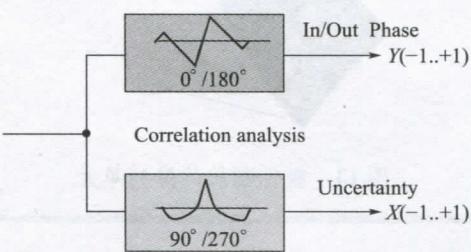


图 7 修正计量的部分图解

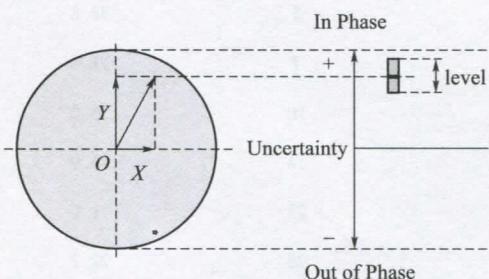


图 8 修正计量结果的映射

这个程序在所有的八倍频程内被执行, 因此最终的极性分析显示如图 9, 这里执行结果显示在一个 NTi Audio 手持音频分析<sup>[4]</sup>上。

### 3 对线阵列系统的实际测试

#### 3.1 会场和线阵列系统<sup>[5]</sup>

为了证实前面提到的测试方法, 一些实际线阵列系统的测试在奥地利布雷根茨的艺术节剧场。这是一个中等尺寸的会场, 一次最多能容得下 3700 人。固定安装的线阵列系统是 Kling&Freitag 的 SEQUENZA 10N, 包含 9 个高音和 3 个超低音单元, 所有的都悬空。现场分布如图 10~11 所示。

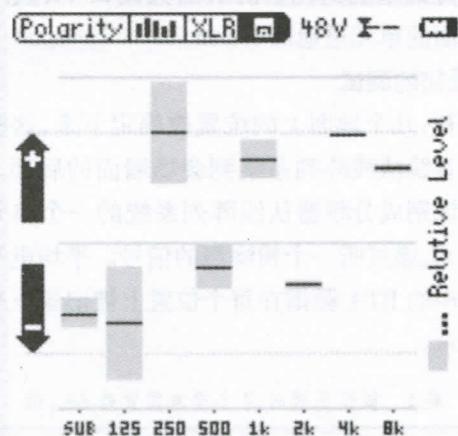


图 9 所有倍频带相位结果显示(截图)

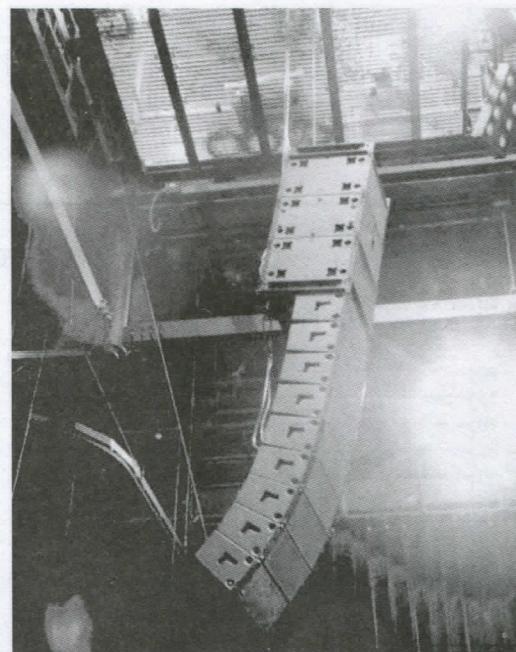


图 10 线阵列系统在布雷根茨的剧院

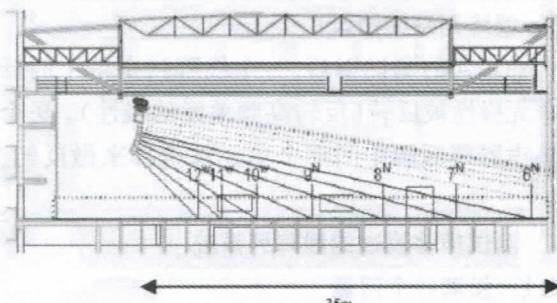


图 11 会场略图(截图)

线阵列系统到礼堂的后面大概 35 m, 线阵列系统最下面的单元离地面 5.2 m。

### 3.2 最初的测试

最初, 几个地面上的位置被确定下来, 这些位置沿一条直线从线阵列系统到会场墙面的后部。这些位置被识别成分频器从线阵列系统的一个单元到下一个单元, 通过听一个粉噪声的信号。平均电平  $LA_{eq}$  及粉噪声的 RTA 频谱在每个位置上被记录下来。如表 1 所示。

表 1 极性正确时, 7 个参考位置处  $LA_{eq}$  值

位置	线阵列系统在地面的水平距离/s	$LA_{eq}$ (15 s 的平均)/dB
1	5	78.3
2	7	78.2
3	10	77.5
4	14	76.9
5	23	75.5
6	28	73.5
7	33	72.8

测试结果显示了一个从位置 1 到位置 7 的 6 dB 衰减, 如图 12 所示。

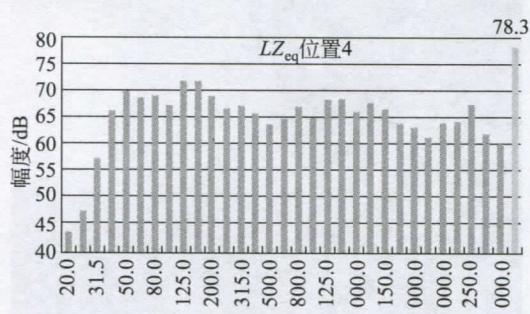


图 12 在位置 4 处被平均的  $LZ_{eq}$  的 RTA 频谱

### 3.3 线阵列系统修改

在最初的测试以后, 一个线阵列中单个的扬声器单元极性被反转(反转高频单元的极性)。9 个阵列扬声器单元的中间那个单元被选择来做反转, 见图 13。

### 3.4 测试被修改过的线阵列系统

#### 3.4.1 探测一个问题

如前面, 测试了被平均的  $LA_{eq}$  分布沿着线上的 7 个位置, 结果如表 2 所示。

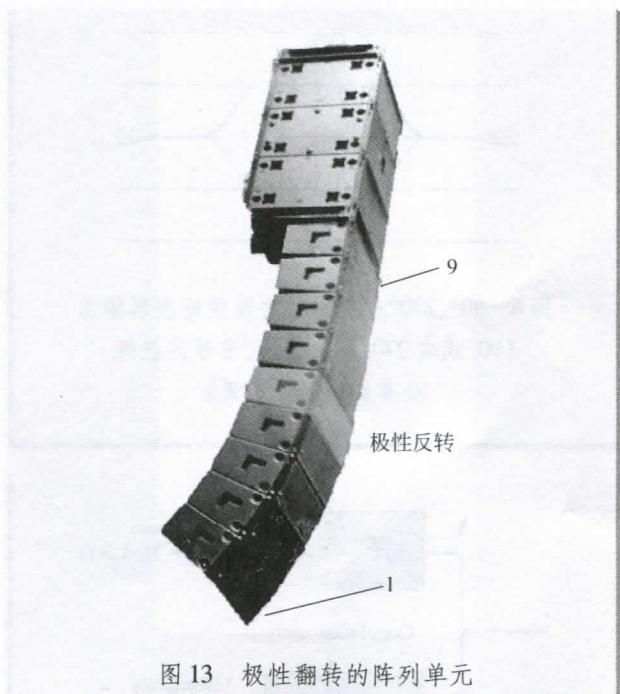


图 13 极性翻转的阵列单元

表 2  $LA_{eq}$  在 7 个参考位置上有一个单元极性翻转

位置	线阵列系统在地面的水平距离/m	$LA_{eq}$ (15 s 的平均)/dB
1	5	78.8
2	7	77.6
3	10	75.0
4	14	73.9
5	23	71.0
6	28	72.2
7	33	71.4

当比较两组  $LA_{eq}$  对应位置参考位置的测量结果时, 很明显的 3, 4, 5 三个位置受极性影响最大。这个效果很明显, 甚至可以通过在这 7 个位置上听得出来不同, 如图 14 所示。

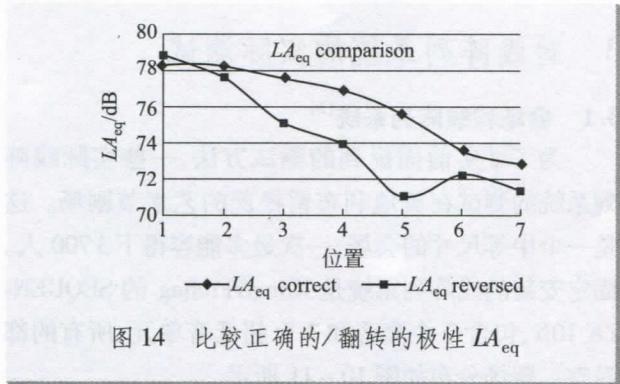


图 14 比较正确的/翻转的极性  $LA_{eq}$

进一步详细地看,RTA 的频谱在位置 1 到位置 5 上被分析绘制,如图 15~图 16 所示。

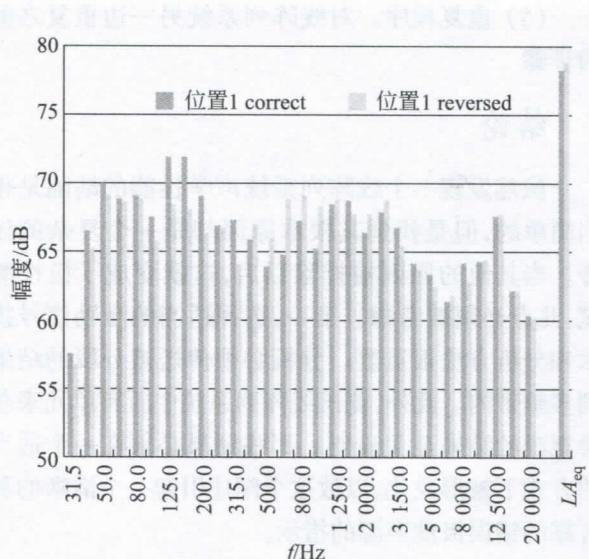


图 15 RTA 频谱在位置 1 上的比较

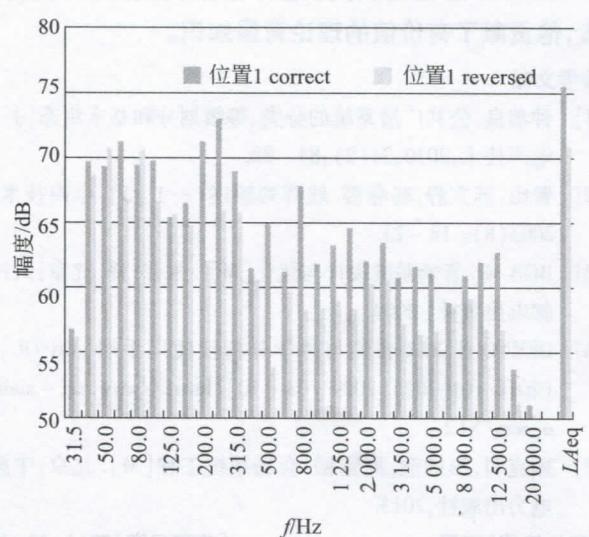


图 16 RTA 频谱在位置 5 上的比较

在图 15 位置 1 和图 16 位置 5 上, 主要频率从 200 Hz 到 12.5 kHz 受到被反转单元的影响。

#### 3.4.2 识别出根本原因

要识别出“缺陷”线阵列单元, 每一个单元都要被核查极性。在 2.2 节中描述的锯齿波激励源被运用到线阵列系统中, 每个单元都要被审查, 测试现场图见图 17。

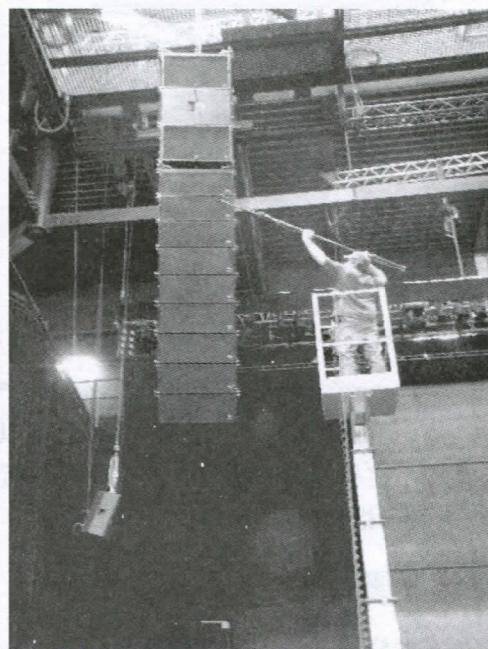


图 17 线阵列单元上的极性测试

对于每个单元, 将根据 2.3 节的方法测试极性。

当比较在不同单元上的极性屏幕截图时, 建议选择一种可视化的方式。一个途径是对被测单元的倍频程带绘制所有相关的 in - / out - of - phase 信息。图 18~19 将相关倍频程带内的所有 9 个单元的极性趋势进行形象化。由于传声器位置的原因, 只有 1 kHz 倍频程带显示足够的能量来传递可靠的极性信息。

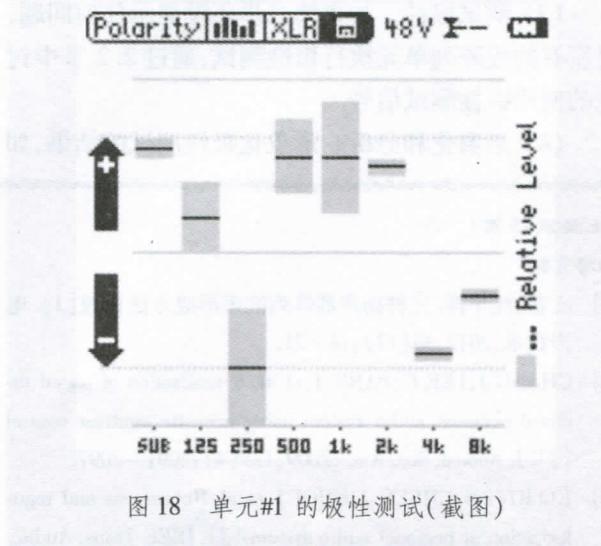


图 18 单元#1 的极性测试(截图)

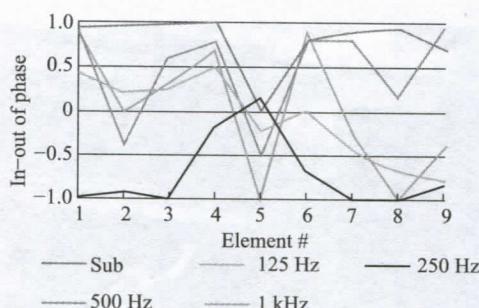


图 19 被修改的极性阵列趋势, 单元#1 ~ #9

一个有影响的相位改变对于单元#5 是可以感觉到的。在和不在相位内的数值在这个单元附近是对称的, 因为受到相邻单元的影响。

#### 4 方法步骤

下面是怎样通过一步一步的方法检测出一个线阵列系统设置中的极性问题。这个程序必须分别在线阵列系统两边执行。

(1) 识别问题。核查当前是否有问题。这个可以通过用适当的测试信号, 例如粉噪声测试在沿一条线上几个位置的频谱和宽频带电平来完成。如果在单元之间不连续, 就像图 14 中显示, 下一步将要被执行。

(2) 排除可能的根本原因。如果知道存在一个问题, 但是不知道原因, 在测试极性问题之前, 可以先核查是否存在以下问题: ①一个单个的扬声器或者单元完全不起作用。②功放故障或者接线错误由于线阵列本身的特性, 可能需要靠近每个扬声器单元进行测试。

(3) 测试极性。如果第二步还没显示任何问题, 对所有的线阵列单元执行极性测试, 通过 2.2 节中讨论的使用极性测试信号。

(4) 形象化和分析。形象化极性测试的结果, 如

在图 19 中显示的那样。观察 Y 轴上数值在不同的倍频程带内的突变。

(5) 重复程序。对线阵列系统另一边重复之前的步骤

#### 5 结论

虽然发现一个线阵列系统声学性能的缺陷是相当简单的, 但是找到其根本原因却是一个复杂的任务。当其他的原因被排除以后, 这就变成了极性测试, 几点必须被考虑。第一, 选择适当的激励信号技术和分析方法很重要。分析必须传送被分段的结果到多频带内。此外, 测试线阵列系统中所有单元来获得宽泛的结果至关重要。那些结果必须在一个适当的方式下被形象化, 以致这个阐述引起一个清晰的和可靠的错误极性声源的指示。

**特别感谢:** Uwe Riedle 先生, 来自“Bregenzer Festspiel – und Kongresshaus GmbH”, 他友善地支持本论文的实际测试。Ludger Holtzem 先生, 来自 NTi Audio 总公司, 作为这种极性测试方法的创新者, 他贡献了有价值的理论背景知识。

#### 参考文献

- [1] 钟恭良. 公共广播系统的分类、等级划分和基本组态 [J]. 电声技术, 2010, 34(2): 84–88.
- [2] 曾山, 苏文静, 杨春霞. 线阵列综述(一) [J]. 电声技术, 2003(8): 18–23.
- [3] BOB M. 音响系统设计与优化 [M]. 朱伟, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [4] BERNO N. XL2 音频与声学分析仪使用手册 [EB/OL]. (2014-01-02) [2009-03-10]. <http://www.nti-audio.com/XL2>.
- [5] 顾克明, 彭妙颜, 周锡韬. 会场系统工程 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[责任编辑] 丁雪

[收稿日期] 2014-02-12

(上接第 15 页)

#### 参考文献

- [1] 王备, 沈小祥. 三种扬声器阵列波束形成方法比较 [J]. 电声技术, 2012, 36(12): 18–21.
- [2] CHANG J, LEE C, PARK J, et al. A realization of sound focused personal audio system using acoustic contrast control [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125(4): 2091–2097.
- [3] ELLIOTT S, CHEER J, CHOI J, et al. Robustness and regularization of personal audio systems [J]. IEEE Trans. Audio,

- Speech and Language Processing, 2012, 20(7): 2123–2133.
- [4] DOCLO S. Multi-microphone noise reduction and dereverberation techniques for speech applications [D]. Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
- [5] CHANG J, PARK J, KIM Y. Scattering effect on the sound focused personal audio system [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125(5): 3060–3066.

[责任编辑] 闫雯雯

[收稿日期] 2013-11-25