

浅海中水平阵的匹配定位

马 力

(中国科学院声学研究所, 北京 100080)

1994年3月9日收到

1994年6月23日定稿

摘要 匹配场 (MFP) 和匹配模 (MMP) 已经广泛地用于浅海中的被动源定位。本文利用简正波过滤的一种新方法, 通过短水平阵实行源定位, 并比较了 MFP 和 MMP, 结果表明: MMP 源定位的分辨率高于 MFP, 旁瓣较低, 计算量大大减小, 同时也讨论了水平阵系统的偏差带来的源定位失配问题。

Matched localization of a horizontal array in shallow sea

MA Li

(*Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Received March 9, 1994

Revised June 23, 1994

Abstract Matched-field processing (MFP) and matched-mode processing (MMP) are passive range and depth source localization technique that have been extensively used in shallow-water environments. This paper presents a new technique of normal-mode filtering and simulated results on source localization of a short horizontal array. The results of MMP are compared to those obtained by conventional MFP. The simulated results indicate that for MMP source location the resolution is higher than that of MFP's and the sidelobe rejection is improved, the expense of the computational time is less. The effects of system mismatching are also given.

一、引 言

浅海中被动源定位是一个既困难、又有趣的问题。最近几年, 这个问题已经引起很多人的重视^[1-5], 传统的源定位是由传播模型计算的声场去和接收到的声场进行匹配, 这个方法称为匹配场 (MFP)。我们知道, 浅海中声场都可以由简正波模型描述, 根据这个模型, 声压应该是简正波的和, 而每个简正波的权系数称作简正波幅度 (NMA), NMA 中包含了源位置的信息, 最近由 NMA 进行源定位的技术得到了发展^[6-10], 这种方法叫简正波匹配 (NMM), 也称匹配模 (MMP)。

现在, 讨论垂直阵的匹配模 (VAMMP) 和匹配场 (VAMFP) 的问题^[4-10]的文章不少, 而水平阵的匹配模 (HAMMP) 和匹配场 (HAMFP) 还很少见诸讨论, 水平阵的失配 (Mismatch) 问题讨论也很少。本文利用一种新的简正波过滤方法^[11], 由较短的水平阵就可以实行精确源定位, 并把 HAMMP 和传统的 HAMFP 两种技术进行比较, 同时讨论了水平阵系统的失配问题。

二、简正波模型

在等声速浅海中，考虑一个线性阵，它由 $2Q+1$ 个相同的水听器组成，如图 1 所示， xy 平面为海平面。

线阵 $-QQ$ 位于 xz 平面中，和 z 轴的夹角为 α ，每个水听器的坐标分别为 $(x_q, 0, z_q)$ ， $q = -Q, -Q+1, \dots, 0, \dots, Q-1, Q$ ，其中 $x_0 = 0$ 。假定声源位于 (x_s, y_s, z_s) ，则源的方位角为：

$$\beta = \tan^{-1}(y_s / x_s) \quad (1)$$

那么源到第 q 个水听器之间的水平距离为：

$$r_q = (r^2 + x_q^2 - 2rx_q \cos\beta)^{1/2} \quad (2)$$

这里 $r = r_0$ 是源到阵的中间水听器之间的水平

距离。若 $r \gg (x_Q - x_{-Q})$ ，此为阵长在 xy 平面上的投影，我们有(2)式的近似表达式：

$$r_q = r - x_q \cos\beta \quad (3)$$

如果阵上水听器的布放是等间隔的，相邻之间的距离为 d ，有：

$$x_q = qd \sin\alpha, \quad z_q = qd \cos\alpha + z_0 \quad (4)$$

式中 z_0 为中间水听器与坐标原点的距离。

根据简正波模型，忽略时间因子 $e^{-j\omega t}$ ，则第 q 个水听器接收到的声压能够表示成^[10]：

$$p_q = \sum_{m=1}^M a_m^2 (2\pi / k_m r_q)^{1/2} \sin(\gamma_m z_s) \sin(\gamma_m z_q) \exp[j(k_m r_q + \pi/4)] \quad (5)$$

这里 a_m 是第 m 号简正波的归一化常数，

$$a_m^2 = \frac{2}{h} \left\{ 1 + \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^2 \left(\frac{k^2}{\gamma_m^3 h} \right) \left[1 - \left(\frac{c}{c_1} \right)^2 \right] \sin^2(\gamma_m h) \tan(\gamma_m h) \right\}^{-1}$$

本征值 γ_m 是下面方程的根，

$$\rho_1 \gamma_m \cot(\gamma_m h) + \rho \left\{ k^2 \left[1 - \left(\frac{c}{c_1} \right)^2 \right] - \gamma_m^2 \right\}^{1/2} = 0$$

这里 h 为海水深度， k_m 、 γ_m 分别是第 m 号简正波的水平波数和纵向波数， ρ 、 c 分别是水的密度和水中声速， ρ_1 、 c_1 分别是海底密度和声速。

在方程(5)的相位项中，我们使用方程(3)所给的近似，而在幅度项中，我们认为 $r_q \approx r$ 。现在方程(5)可以写作：

$$p_q = \sum_{m=1}^M a_m^2 (2\pi / k_m r)^{1/2} \sin(\gamma_m z_s) \sin(\gamma_m z_q) \exp\{j[k_m (r - x_q \cos\beta) + \pi/4]\} \quad (6)$$

此时阵的输出可以通过加权各个水听器的输出而得到，把它们求和得：

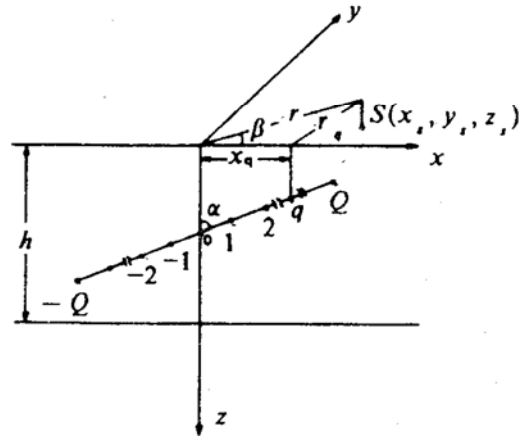


图 1 接收阵和源的坐标系

$$R = \sum_{q=-Q}^Q w_q P_q \quad (7)$$

代入方程(6), (7)式变成:

$$R = \sum_{q=-Q}^Q \sum_{m=1}^M w_q a_m^2 (2\pi / k_m r)^{1/2} \sin(\gamma_m z_s) \sin(\gamma_m z_q) \exp\{j[k_m(r - x_q \cos\beta) + \pi/4]\} \quad (8)$$

交换上式求和的次序, 我们有:

$$R = \sum_{m=1}^M g_m A_m \quad (9)$$

这里:

$$A_m = a_m (2\pi / k_m r)^{1/2} \sin(\gamma_m z_s) \exp[j(k_m r + \pi/4)] \quad (10)$$

是第 m 号简正波的幅度,

$$g_m = \sum_{q=-Q}^Q a_m w_q \sin(\gamma_m z_q) \exp(-j k_m x_q \cos\beta) \quad (11)$$

是第 m 号简正波的阵增益因子。

三、水平阵的简正波过滤及匹配场和匹配模技术

所谓简正波过滤实际上就是选择一特定号数的简正波幅度, 而其它号数的简正波幅度均没有选上, 即发现一组权系数 $W_n = \{w_{-Q}, w_{-Q+1}, \dots, w_Q\}$ 使得: $m \neq n$ 时 $g_m = 0$, 而 $m = n$ 时 $g_m \neq 0$ 。由波导理论可知, 在浅海中, 每个简正波都是由两个准平面波相对于水平面对称传播干涉的效果, 所以只要在组成第 m 号简正波的两个准平面波的方向上响应为零, 则第 m 号简正波幅度没有选上, 即被过滤掉了。现在我们就是要寻找一组权系数 U_m , 使得在第 m 号简正波的两个准平面波方向上响应为零, 为了能滤出第 n 号简正波, 滤掉其它所有号的简正波, 就是要设计一个阵在组成其它简正波的准平面波方向上的响应为零。如果在浅海中有 M 号简正波, 那么能滤出第 n 号简正波的一组权系数 W_n 可以由 $M-1$ 组权系数 U_m ($m \neq n$) 的卷积得到:

$$W_n = U_1 * U_2 * \dots * U_{n-1} * U_{n+1} * \dots * U_M \quad (12)$$

这里 $*$ 代表卷积。

对于一个等间距的水平阵, 水听器之间的间隔为 d , 深度位于 z_0 , 我们有:

$$z_q = z_0, \quad x_q = qd \quad (13)$$

则从方程(11)可以得到 m 号简正波的阵增益因子为:

$$g_m = a_m \sin(\gamma_m z_0) \sum_{q=-Q}^Q w_q \exp(-j k_m qd \cos\beta) \quad (14)$$

可以看到, 增益因子与阵所放的深度有关, 当 $\sin(\gamma_m z_0) = 0$ 时, 即阵位于 m 号简正波的节点处, 增益因子变成零。

此时组成第 m 号简正波的两个平面波相对于阵轴的方向角为 θ_{m1} 和 θ_{m2} , 对于水平阵

而言, θ_{m1} 和 θ_{m2} 应该是相等的, 为:

$$\theta_{m1} = \theta_{m2} = \theta_m = \cos^{-1}[(k_m / k) \cos\beta] \quad (15)$$

于是只要阵在 θ_m 方向上的响应为零, 则第 m 号简正波就被滤掉。

考虑阵对第 m 号简正波的响应, 从方程 (14) 可以看到, 只要权系数符合下面条件:

$$w_{p+1} / w_p = -\exp(j k_m d \cos\beta)$$

和

$$w_q = 0 \quad q \neq p \text{ 或 } p+1 \quad (16)$$

此时 $g_m = 0$, 所以第 m 号简正波可以通过下面一组权系数

$$U_m^H = \{1, -\exp(j k_m d \cos\beta)\} \quad (17)$$

滤掉, 这里 H 代表水平阵。把 $U_m = U_m^H (m = 1, \dots, n-1, n+1, \dots, M)$ 代入方程 (12) 就可以得到能滤出第 n 号简正波的一组权系数 W_n^H , 既然 U_m^H 含有两个元, 那么 W_n^H 就含有 M 个元。

现在假定 $w_{nq} (n = 1, \dots, M \text{ 和 } q = 1, \dots, Q)$ 是滤出 n 号简正波的第 q 个权系数, 而 g_{nm} 是滤出 n 号简正波的第 m 号简正波的增益因子, 由方程 (11), 我们有:

$$g_{nm} = \sum_{q=1}^Q a_m w_{nq} \sin[\gamma_m (q d \cos\alpha + z_0)] \exp(-j k_m q d \sin\alpha \cos\beta) \quad (18)$$

此时第 n 号简正波的过滤输出为:

$$R_n = \sum_{m=1}^M g_{nm} A_m \quad (19)$$

当 $m \neq n$ 时, $g_{nm} = 0$, 这样简正波的过滤输出为:

$$R_n = G_{nn} A_n = W_{nq} P_q \quad (20)$$

由此就能过滤出第 n 号简正波的幅度, 为:

$$A_n = G_{nn}^{-1} W_{nq} P_q \quad (21)$$

假定实验时水平阵接收的声压为 p_i , 通过简正波模型计算的声压为 p_q , 由匹配场 (MFP) 得到的指示函数 (indicator function) 为:

$$RD_{\text{MFP}}(r'_s, z'_s) = \sum_{i=1}^N p_i p_q^* / \sqrt{\sum_{i=1}^N |p_i|^2 \sum_{i=1}^N |p_q|^2} \quad (22)$$

这里 * 代表复共轭, 当 $RD_{\text{MFP}} = 1$ 时, 源被正确的定在 $r'_s = r_s$ 和 $z'_s = z_s$ 。

假定由实验过滤所得简正波幅度为 a_i , 通过简正波模型计算的简正波幅度为 a_n , 由简正波匹配 (NMM), 又称匹配模 (MMP), 也可以得到一个指示函数:

$$RD_{\text{MMP}}(r'_s, z'_s) = \sum_{i=1}^M a_i a_n^* / \sqrt{\sum_{i=1}^M |a_i|^2 \sum_{i=1}^M |a_n|^2} \quad (23)$$

$RD_{\text{MMP}} = 1$ 也可以进行源定位。

四、数值仿真

我们选择 Pekeris 模型进行计算机仿真, 因为它和我室海试地点青岛海区很相似。仿

真所需各参数如下: 水深 $h=28$ m, 源深 $z_s=10$ m, 源与阵中间水听器之间的距离 $r=5000$ m, 源频率 $f=300$ Hz, 水中声速 $c=1500$ m/s, 海底声速 $c_1=2000$ m/s, 水的密度 $\rho=1000$ kg/m³, 海底密度 $\rho_1=1100$ kg/m³, 相邻水听器之间的间隔 $d=10$ m, 阵的深度 $z_0=10$ m。对于上述参数, 在浅海中, 有七号简正波可以传播, 它们所对应的平面波与水平面的夹角分别为: $\pm 4.8904^\circ$, $\pm 9.8146^\circ$, $\pm 14.8082^\circ$, $\pm 19.9104^\circ$, $\pm 25.1659^\circ$, $\pm 30.6247^\circ$, $\pm 36.3282^\circ$ 。

1. MMP 和 MFP 源定位

考虑一完全水平阵, 七个水听器的水平阵就可以准确定位、定深。当源的方位角 $\beta=0$ 时, 我们可以由方程 (21) 和 (23) 进行 MMP 源定位, 同时也可以由方程 (6) 和 (22) 进行 MFP 源定位 (如图 2)。

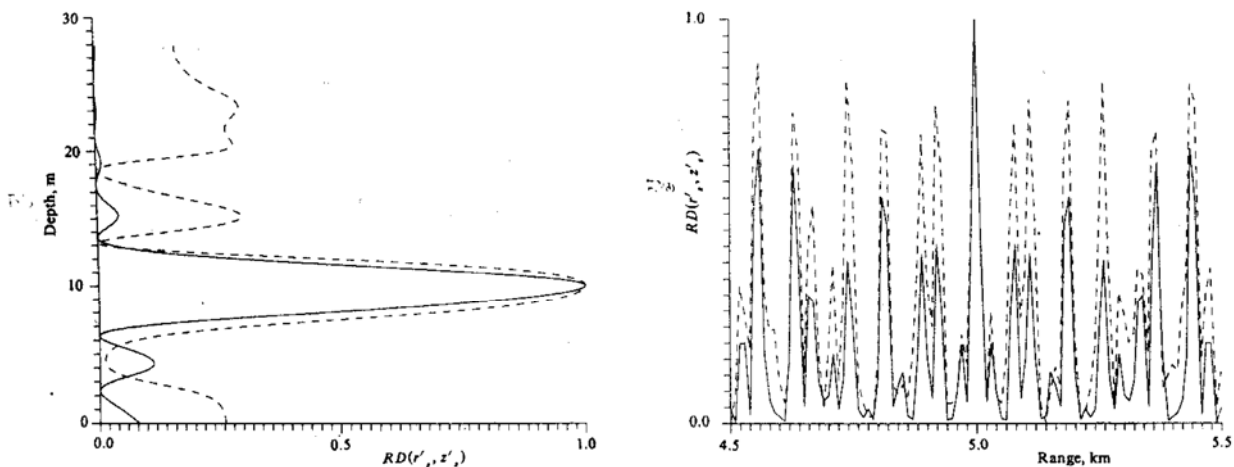


图2 水平阵 MMP 和 MFP 源定位的比较

—: MMP : MFP

2. 阵的深度对定位的影响

我们通过双精度的计算, 得到第四号简正波在深度 $z=20.65894221451256$ m 处幅度为零, 即 z 为第四号简正波的节点。假如水平阵的深度位于 $z_0=20.6589422$ m, 则上述 MMP 源定位方法失效, 不过若 $z_0=20.658942$ m, 仍可用 MMP 进行源定位 (如图 3)。

3. 相邻水听器的间隔对定位的影响

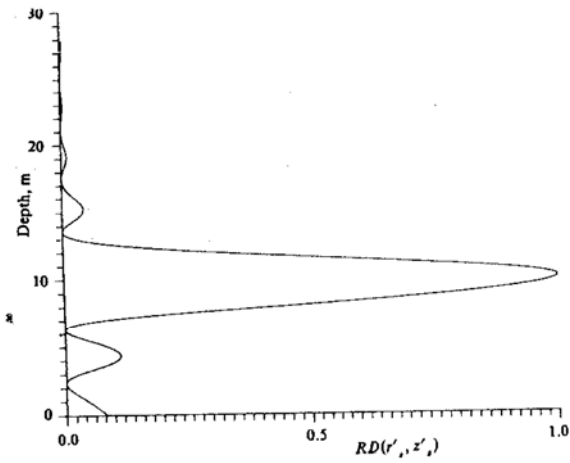
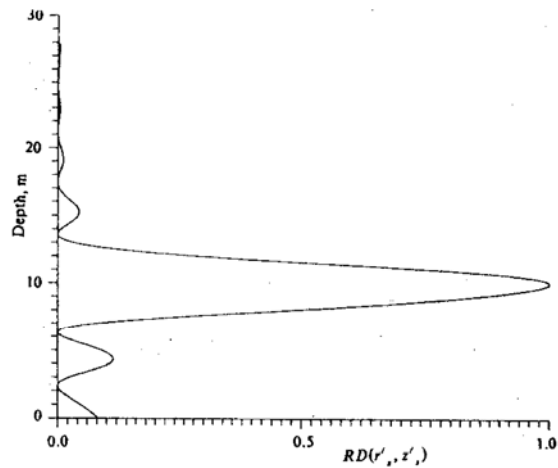
通过仿真, 当水听器之间的距离 $d=0.5$ m 时, MMP 源定位的方法也失效, 只是当间隔增加到一定的距离之后, MMP 才能进行有效地源定位。如 $d=1.0$ m 时, 源定位如图 4 所示。

4. 源方位角失配对定位的影响

如果实际海试中源的方位角 β 并不为零, 而我们却认为是零, 这将对定位带来很大的误差。例如海试中方位角 $\beta=5^\circ$ 时, 所定距离 $r'_s=5190$ m、深度 $z'_s=10.9$ m, 与真实距离和深度差距较大; 若方位角 $\beta=3^\circ$ 时, 虽然可以精确地定位 (如图 5), 但分辨率大大降低了。即使我们知道方位角, 一般是可以精确定位的 (如图 6), 但在 $94^\circ > \beta > 86^\circ$ 时, 上述 MMP 源定位方法失效。

5. 水平性失配对定位的影响

如果实际海试中水平阵并不水平, 而是有点倾斜。如图 1, $\alpha \neq 90^\circ$ 而是 $\alpha=89^\circ$, 那

图 3 水平阵 MMP 源定位($z_0 = 20.658942$ m)图 4 水平阵 MMP 源定位($d = 1.0$ m)

么用 MMP 进行源定位, 距离定在 5200 m, 深度定在 19.6 m, 误差很大。

五、结 论

本文通过一种新的简正波过滤方法, 用 MMP 实行被动源定位, 并和传统的 MFP 源定位方法进行比较, 同时讨论了水平阵系统的失配问题。

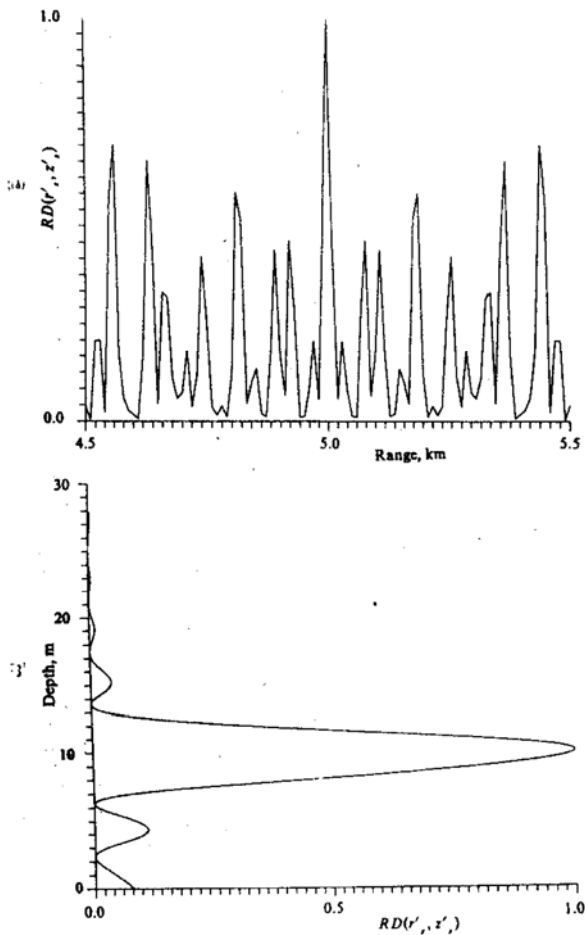
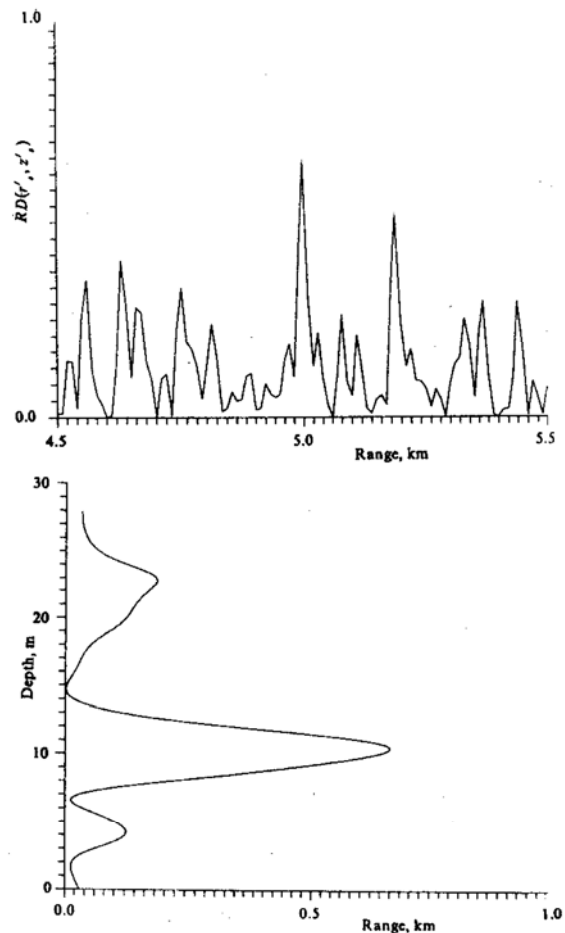
(1) MMP 不仅比传统的 MFP 源定位方法分辨率高, 而且计算时间也大大缩短, 通过比较计算时间大约减少了 3.5 倍。另外 MMP 定位时, 主峰周围的旁瓣大大压低了。

(2) 阵的深度对于水平阵的 MMP 源定位精度没有影响, 只是有一点必须注意, 当阵位于某一号简正波的节点上时, 就不能进行有效的定位, 因为此时无法滤出各号简正波的幅度。不过有一点偏移 (大约百万分之一米), 我们就能精确地定位。

(3) 相邻水听器之间的间隔对于源定位也没有影响, 不过当间距太小, 也不能有效地进行简正波的过滤, 从而无法定位。

(4) 源方位角的测量误差会带来源定位的失配, 当误差大于 5° 时, 所定位置与真实距离和深度差距较大, 若能精确知到方位角的大小, 还是可以定位的。当 $94^\circ > \beta > 86^\circ$ 时, 由于不能有效地过滤出简正波, 也就无法用 MMP 定位。

(5) 用水平阵进行源定位时, 定位的精度对阵的水平程度特别敏感, 差一度就会带来

图5 水平阵 MMP 源定位 ($\beta=3^\circ$ 的失配)图6 水平阵 MMP 源定位 ($\beta=86^\circ$)

很大的误差。

总之, 在定位方面, 用水平阵比用垂直阵具有更大的灵活性, 它对阵的深度和水听器之间的距离要求不高, 几乎在任意深度和间距条件下, 水平阵都可以很精确的定位, 另外只要水听器个数与简正波号数一样多即可定位, 所以阵也不必很长。虽然源方位角的测量误差会给定位带来一定的影响, 但并不十分敏感, 应该注意却是阵的水平性, 定位对此很敏感, 差一度都不行。在算法上, 我们宜用 MMP 进行定位, 它的分辨率明显好于 MFP 方法。

参 考 文 献

- [1] Bucker H P. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1976, **59**: 368—373.
- [2] Klemm R. *Signal Process.* 1981, **3**: 333—344.
- [3] Sullivan E J. 1987, SAACLANTCEN SR—117 [AD A189404].
- [4] Hamson R M, Heitmeyer R M. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **86**: 1950—1959.
- [5] Smith G B, Feuillade C, DelBalzo D R, Byrne C L. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **85**: 1158—1166.
- [6] Shang E C. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, **77**: 1413—1418.
- [7] Shang E C, Clay C S, Wang Y Y. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, **78**: 172—175.
- [8] Yang T C. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1987, **82**: 1736—1745.
- [9] Wilson G R, Koch R A, Vidmar P J. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1988, **84**: 310—320.
- [10] Shang E C. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1989, **86**: 1960—1964.
- [11] Chouhan H M, Anand G V. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991, **89**: 735—744.