

声压振速联合信息处理及其物理基础初探

惠俊英 刘 宏 余华兵 范敏毅

(哈尔滨工程大学水声工程系 哈尔滨 150001)

1999 年 3 月 26 日收到

1999 年 6 月 5 日定稿

摘要 研究了水声场声压和振速联合信息处理的一些基础问题,如声压和振速的相关性,平均声强器和指向性的旋转和锐化等。通过理论分析和湖试结果对声压振速联合信息处理技术进行了初步的探讨,为今后进一步的研究打下了基础。

PACS 数: 43.30, 43.60, 43.85

Study on the physical basis of pressure and particle velocity combined processing

HUI Junying LIU Hong YU Huabing FAN Minyi

(Underwater Acoustic Engineering Dept., Harbin Engineering University Harbin 150001)

Received Mar. 26, 1999

Revised Jun. 5, 1999

Abstract Some basic studies of pressure and particle velocity combined processing such as correlation between them, average acoustic intensity processing, rotation and sharpening of directivity are described in this paper. Primary results based on theoretical analysis and lake trial are put forward and this will make foundation for further research.

引言

自 1918 年法国物理学家郎之万研制了第一个声呐装置迄今,声呐系统仅处理声场的声压信息。水听器几乎是声呐的唯一的接收传感器。甚至,水声物理实验研究也主要是研究海洋声信道的声压场。无线电波只有两个矢量场—磁场和电场。但声波兼有标量场和矢量场,它们是声压和振速。这正是水声信号处理和声场研究可以发挥的特色,而与无线电信号处理不同的物理基础。

声压是标量,所以单个小尺度水听器是无指向性的,单个声压接收器不能提供目标和环境的方位声信息。声波是纵波,振速是矢量,单个振速传感器就能提供声场的方位信息。

振速传感器响应振速在它轴上的投影分量,因而具有偶极子指向性,并且该指向性与频率无关,这意味着在甚低频它也有指向性。

声压和振速均携带了环境和目标的信息,为什

么不同时,而且是联合处理它们的信息呢?

声场的振速这个矢量被冷落了将近百年而没有受到充分关注。

最早联合处理声压和振速信息的是水声测量领域,用声强流测量来实现声强直接测量。美国在 10 年前已开始关注振速传感器在声呐中的应用,最早将多偶极子传感器用于声呐浮标,近年来还探索矢量传感器应用于拖曳线列阵声基阵^[1],但是仍然没有深刻地关注到声压和振速信息的联合处理。俄国(前苏联)对联合信息处理已有多年深入研究,但很少见诸于公开文献。

被冷落了将近百年的声矢量场应该与其标量场一起受到水声信号处理及声呐技术领域的关注,联合处理和联合理解他们共同携带的环境和目标信息。

1 声压和振速的相关性

一个重要的基本事实是:对有限尺度的声源的辐射声场,称之为相干源信号,声压和振速是完全相关的;而对于各向同性噪声场,称之为非相干信号,

它的声压与振速是不相关的。这是声压与振速联合信号处理抗干扰的基础。

1.1 平面波的声学欧姆定律

将牛顿第二定律应用于平面波声场的质点就得到声学欧姆定律:

$$\frac{p(t)}{v(t)} = \rho c, \quad (1)$$

$p(t)$ 为平面波声压, $v(t)$ 为平面波振速, ρc 为平面波波阻抗, ρ 为介质密度, c 为声速度。波阻抗 ρc 是实数, 因而 (1) 式表明声压 $p(t)$ 和振速 $v(t)$ 有完全相同的波形, 它们是完全相关的。

1.2 各向同性干扰场声压和振速相关性

设有 N 个独立的点噪声源, 它们辐射的球面波声压为 $x_i(t)$, 由它们构成各向同性的噪声场, 总声场的声压 $p_n(t)$ 为:

$$p_n(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t). \quad (2)$$

振速的 x 轴分量为:

$$v_{xn}(t) = a \sum_{i=1}^N x_i(t) \cos(\theta_i). \quad (3)$$

(2) 式和 (3) 式中 $x_i(t)$ 是独立噪声, a 为与波阻抗有关的常数。对于各向同性噪声, (3) 式中 θ_i 为噪声源相对于传感器 x 轴的水平方位角, 且为 $[0, 2\pi]$ 中均匀分布的随机变量。声压和振速的相关为:

$$\overline{p_n(t)v_{xn}(t)} = a \left\{ \sum_{i=1}^N x_i(t) \right\} \left\{ \sum_{j=1}^N x_j(t) \cos \theta_j \right\} = 0. \quad (4)$$

对于振速的 v_{yn} 和 v_{zn} 分量, 只要噪声场是各向同性的, 类似于 (4) 式, 声压和振速是不相关的。

1.3 球面波声压振速相位差频率特性

任何声波的远场都可以近似为平面波, 因而此时 (1) 式均成立, 相干信号声压和振速的波形是相同的。在大多数声源的极近场, 波阻抗是复数, 因而声压与振速有相位差, 且依赖于频率, 若该相位差的频率特性显著偏离直线, 则宽带相干信号的声压与振速将有不同的波形, 归一化相关系数因而减小。因此, 除了传感器本身引起的相位差以外, 还需讨论声场引起的声压与振速的相位差。

谐和球面波的势函数为:

$$\varphi(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(kr - \omega t)}. \quad (5)$$

声压和振速为:

$$p(r, t) = \rho \frac{\partial \varphi(r, t)}{\partial t}, \quad v(r, t) = -\frac{\partial \varphi(r, t)}{\partial r}. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式得到球面波的阻抗 $z(f, r)$ 为:

$$z(f, r) = \frac{p(r, t)}{v(r, t)} \cong \begin{cases} \rho c, & \text{当 } r \gg \lambda \text{ 时,} \\ -j\omega \frac{\rho r}{1 + k^2 r^2}, & \text{当 } r \leq \lambda \text{ 时,} \end{cases} \quad (7)$$

(7) 式中 λ 为波长。可知在球面波的极近场处 ($r \leq \lambda$) 声压与振速有 90° 相位差, 当 $r \gg \lambda$ 时声压与振速是同位相的。球面波声场声压与振速相位差的频率特性示图 1。其中横坐标为 kr 乘积, 纵坐标为相位差 ($^\circ$)。

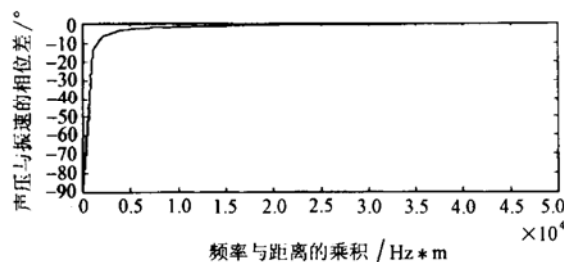


图 1 球面波声场声压与振速的相位差 - 距离频率特性

1.4 分层介质水层中声压与振速的相位差频率特性

考察分层介质中谐和点源的简正波解, 势函数 $\varphi(z, z_0, r)$ 为 [2]:

$$\varphi(z, z_0, r) = \frac{2\pi j}{h} \sum_l G_l W_l(z) W_l(z_0) H_0^{(1)}(\xi_l r) + \varphi_F, \quad (8)$$

(8) 式中 φ_F 为侧面波势函数。不失一般性, 考察二层均匀流体介质。上层介质为海水, 密度为 ρ_1 , 声速为 c_1 , 下层介质密度为 ρ_2 , 声速为 c_2 , $m = \rho_2/\rho_1$, 水介质层厚为 h , 得到:

$$\begin{cases} W_l(z) = \sin(\sqrt{k_1^2 - \xi_l^2} z) = \sin(\beta_l z), \\ W_l(z_0) = \sin(\sqrt{k_1^2 - \xi_l^2} z_0) = \sin(\beta_l z_0), \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta_l = \sqrt{k_1^2 - \xi_l^2},$$

$$G_l = \frac{\beta_l h}{\beta_l h - \sin(\beta_l h) \cos(\beta_l h) - \frac{1}{m^2} \text{tg}(\beta_l h) \sin^2(\beta_l h)}, \quad (10)$$

$$\varphi_F = \frac{2k_2 \sin(\sqrt{k_1^2 - k_2^2} z) \sin(\sqrt{k_1^2 - k_2^2} z_0)}{m(k_1^2 - k_2^2) \cos^2(\sqrt{k_1^2 - k_2^2} h)} \cdot \frac{1}{r^2} e^{j(k_2 r - (\pi/2))}. \quad (11)$$

声压 p 为:

$$p = -j\omega \rho_1 \varphi(z, z_0, r). \quad (12)$$

振速 v_r 为:

$$v_r = \frac{\partial \varphi(z, z_0, r)}{\partial r} = \frac{2\pi j}{h} \sum_l G_L W_L(z) W_L(z_0) \times \frac{\partial}{\partial r} [H_0^{(1)}(\xi_l r)] + \frac{\partial \varphi_F}{\partial r}, \quad (13)$$

注意到:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial r} H_0^{(1)}(\xi_l r) = -\xi_l H_0^{(1)}(\xi_l r), \\ \frac{\partial \varphi_F}{\partial r} = \left(jk_2 - \frac{2}{r} \right) \varphi_F \approx jk_2 \varphi_F. \end{cases} \quad (14)$$

将 (14) 式代入 (13) 式, 得到波阻抗 $z(f, r)$ 为:

$$z(f, r) = \frac{j\rho_1 \cdot \frac{2\pi j}{h} \sum_l G_L W_L(z) W_L(z_0) H_0^{(1)}(\xi_l r) + j\rho_1 \varphi_F}{\frac{2\pi j}{h} \sum_l G_L W_L(z) W_L(z_0) H_1^{(1)}(\xi_l r) \cdot \frac{1}{c_l} + j \frac{\varphi_F}{c_2}}. \quad (15)$$

在远距离处可以忽略侧面波, 并且当声波频率 $f > c_1/h$ 时, 所有简正波的相速度均近似等于海水中的声速度 c_1 , 所以 (15) 式近似为:

$$z(f, r) \approx \frac{j\rho_1 c_1 \cdot \frac{2\pi j}{h} \sum_l G_L W_L(z) W_L(z_0) H_0^{(1)}(\xi_l r)}{\frac{2\pi j}{h} \sum_l G_L W_L(z) W_L(z_0) H_1^{(1)}(\xi_l r)}. \quad (16)$$

当 $\xi_l r \gg 1$ 时, (16) 式中的 Hankel 函数可用渐近展开式表示, 此时有:

$$\frac{H_0^{(1)}(\xi_l r)}{H_1^{(1)}(\xi_l r)} = e^{j\pi/2}. \quad (17)$$

将 (17) 式代入 (16) 式即再次得到声学欧姆定律:

$$z(f, r) \cong \rho_1 c_1, \quad \xi_l r \gg 1, \quad f > c_1/h. \quad (18)$$

(18) 式表明, 在远距离处, 当声波频率 $f > c_1/h$ 时, 二层流体介质中的平面波波阻抗的为实数, 可近似等于海水介质中平面波的波阻抗。

在远距离处, 当声波频率 f 靠近第一阶简正波的截止频率 f_c 时, 即 $(c_1/2h) > f > f_c$ 时, 在该频段内, 各阶简正波的相速度 c_l 相差很大, 因而 (16) 式应近似为:

$$z(f, r) \approx \frac{\rho_1 c_1 \cdot \frac{2\pi j}{h} \sum_l G_L W_L(z) W_L(z_0) H_0^{(1)}(\xi_l r)}{\frac{2\pi j}{h} \sum_l \frac{c_1}{c_l} G_L W_L(z) W_L(z_0) H_1^{(1)}(\xi_l r)}, \quad (\xi_l \gg 1, \quad \frac{c_1}{2h} > f > f_c). \quad (19)$$

注意到 Hankel 函数是复函数, (19) 式表明波阻抗 $z(f, r)$ 在声波频率靠近截止频率时为频率的复数, 二者的相位差频率特性也不是直线, 因而声压与振速的波形不会相同。

在近程, 侧面波不可忽略时, 波阻抗 $z(f, r)$ 为复数; 在更近的距离处, 当声波频率足够低时, 波阻

抗与球面波的相近。由 (7) 式可知此时波阻抗呈电抗特性, 声压与振速有 90° 的相位差。

综上所述, 当声波频率 $f > c_1/h$ 时, 在远程声场声压与振速才是接近完全相关。二层流体中声压与振速的相位差频率特性如图 2, 其中横坐标为频率 (每格 200 Hz), 纵坐标为相位差 (每格为 50°), 海深为 50 m, 距离为 40 m。

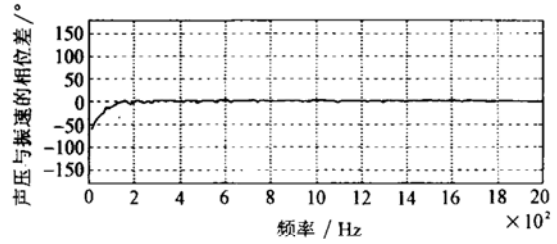


图 2 二层流体中声压与振速的相位差频率特性

1.5 声压振速相关性湖试结果

1998 年 9 月, 哈尔滨工程大学在吉林省松花湖进行组合传感器试验, 对 CW、粉红噪声、机电声源和船辐射噪声, 各种干扰背景采集的数据进行相关分析, 其中 V_c 的含义见本文 3.2 节。

(1) CW 信号声压振速相关性

定点发射 380 Hz 的正弦信号, 声压 90° 相移后声压与各振速的归一化相关系数都为 1。

(2) 粉红噪声的相关性分析

粉红噪声是频段为 200 Hz ~ 2 kHz 的宽带信号。声压 90° 相移前后相关性分析分别如下表所示, 积分时间长度为 1.31 s。

	$\overline{pv_x}$	$\overline{pv_y}$	$\overline{pv_z}$	$\overline{pv_c}$
声压移相前	0.775	0.765	0.286	0.827
声压移相后	0.893	0.855	0.315	0.936

P 与 V_z 的相关系数较小是由于信道边界的影响。

(3) 环境噪声相关性分析

下表为采集的水平各向同性环境噪声, 声压 90° 相移前后相关性, 带宽为 570 Hz, 积分时间长度为 2.62 s。

	$\overline{pv_x}$	$\overline{pv_y}$	$\overline{pv_z}$	$\overline{pv_c}$
声压移相前	0.2	0.11	0.34	0.265
声压移相后	0.208	0.107	0.343	0.259

从测试结果可以看到对相干源信号, 声压和振速是完全相关的; 而对于水平各向同性噪声场, 它的声压与振速是不相关的。

2 平均声强器

2.1 平均声强器原理

平均声强器最早用于声场的声强流测量, 本文从检测和估计的观点来讨论它。最简单的平均声强器的框图示于图 3。

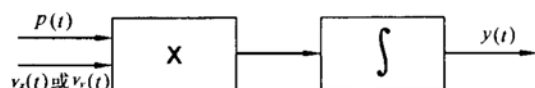


图 3 平均声强器原理图

假设目标信号是相干的, 干扰背景是非相干的, 则:

$$\begin{cases} p(t) = p_s(t) + p_n(t), \\ v_x(t) = v_{xs}(t) + v_{xn}(t), \\ v_y(t) = v_{ys}(t) + v_{yn}(t). \end{cases} \quad (20)$$

$$I_x = \overline{p(t)v_x(t)} = \overline{p_s(t)v_{xs}(t)} + \overline{p_n(t)v_{xn}(t)} + \overline{p_s(t)v_{xn}(t)} + \overline{p_n(t)v_{xs}(t)}. \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \overline{I_x} &= \overline{\left\{ x_s(t) + \sum_i x_i(t) \right\} \left\{ x_s(t) \cos \theta_s + \sum_j x_j(t) \cos \theta_j \right\}} = \overline{x_s^2(t)} \cos \theta_s + \sum_j \overline{x_s(t)x_j(t)} \cos \theta_j + \\ &\quad \sum_i \overline{x_i(t)x_s(t)} \cos \theta_s + \sum_i \sum_j \overline{x_i(t)x_j(t)} \cos \theta_j. \end{aligned} \quad (27)$$

对于 $\overline{I_y}$ 类似于 (27) 式的结果, 由此可见若目标信号与非相干干扰是互相独立的, 则上式的等号右边的后 3 项为零, 平均声强器是声强流的一致无偏估计器。考虑到积分长度和带宽是有限的, 因而考虑到估计偏差 (27) 式可近似为:

$$\hat{\overline{I_x}} \triangleq \sigma_s^2 \cos \theta_s + \frac{\sigma_n^2}{2\sqrt{BT}}, \quad BT \gg 1, \quad (28)$$

由于目标信号与背景干扰是不相关的, 且干扰背景是各向同性的, 所以上式右边的后 3 项的统计量为零, (21) 式是目标声强流 x 分量的一致无偏估计。

类似地有:

$$I_y = \overline{p(t)v_y(t)} = \overline{p_s(t)v_{ys}(t)}. \quad (22)$$

在 z 轴方向为驻波, 声强流的 z 轴分量为零, 所以水平声强流即目标声强 I 为:

$$I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} = \sqrt{p(t)v_x(t)^2 + p(t)v_y(t)^2}. \quad (23)$$

声强流矢量 I 的方位角 θ 为:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{I_y}{I_x} = \text{tg}^{-1} \frac{\overline{p(t)v_y(t)}}{\overline{p(t)v_x(t)}}. \quad (24)$$

2.2 各向同性干场中平均声强器的处理增益

假设目标信号是相干源信号, 干扰是相加型的各向同性非相干干扰, 则声压传感器的输出为 (只考虑平面问题, 即仅考虑水平能量流):

$$p(t) = x_s(t) + \sum_i x_i(t). \quad (25)$$

(25) 式中 $x_s(t)$ 为目标信号, $x_i(t)$ 非相干干扰。为书写简单起见, 省略了反应波阻抗的常数。于是有:

$$v_x(t) = x_s(t) \cos \theta_s + \sum_i x_i(t) \cos \theta_i(t). \quad (26)$$

(26) 式中 θ_s 为目标方位, $\theta_i(t)$ 为 $[0, 2\pi]$ 均匀分布的随机变量。平均能量流 $\overline{I_x}$ 为:

$$(28) \text{ 式中 } \sigma_n^2 = \sum_i \overline{x_i^2(t)}, \sigma_s^2 = \overline{x_s^2(t)}.$$

当 $\theta_s = 0^\circ$ 时平均声强器的处理增益 G 为:

$$G = 5 \log BT + 3 \text{ (dB)}, \quad BT \gg 1, \quad (29)$$

(29) 式中的 3 dB 是振速传感器的偶极子指向性增益。

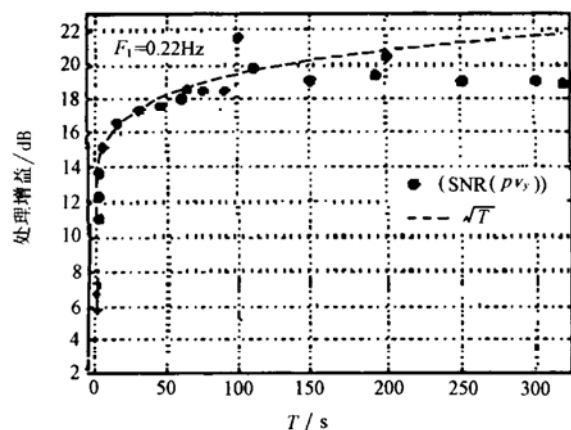


图4 平均声强器处理增益与积分时间的关系 (摘自文献 3)

3 波束旋转及锐化

3.1 波束电子旋转

振速传感器响应振速在其轴上的投影, 因而在水平面内有:

$$p(t) = x(t), v_x(t) = x(t) \cos \theta, v_y(t) = x(t) \sin \theta. \quad (30)$$

(30) 式中 θ 为目标相对于 x 轴的方位。构造振速分量 v_x 和 v_y 的线性组合 v_s 和 v_c 为:

$$v_s(t) = -v_x(t) \sin \psi + v_y(t) \cos \psi = x(t) \sin(\theta - \psi), \quad (31)$$

$$v_c(t) = v_x(t) \cos \psi + v_y(t) \sin \psi = x(t) \cos(\theta - \psi), \quad (32)$$

ψ 称为引导方位角, 改变 ψ 值就可以旋转相互正交的偶极子指向性。 ψ 为 $v_s(t)$ 的零点方向, 并且是 $v_c(t)$ 的指向性峰值方位。

3.2 指向性锐化

若声源为点源, 在无界空间中的远场处转动传感器得到输出信号随角度的变化, 称之为传感器的指向性。小尺度水听器的声压指向性图是一个圆, 简称“无指向性”。振速传感器的指向性是偶极子指向性, 称它“自然指向性”。若利用声压和振速组合传感器并联合处理二者的信息就可以得到锐化的指向性, 其原理示于图 5, 锐化的指向性示于图 6。

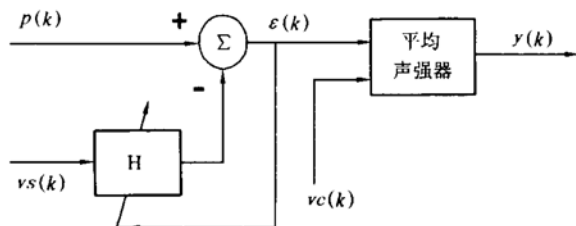


图5 基于自适应抵消器的指向性锐化原理

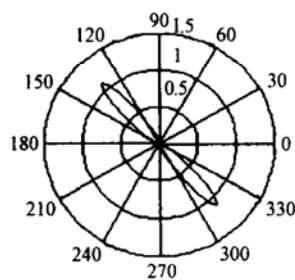


图6 湖试实验所得锐化的指向性图

4 结束语

水听器仅能拾取声场的声压信息, 组合传感器还拾取了振速信息, 声压和振速均携带了环境和目标的信息, 可以对它们的信息进行联合处理。由于联合利用了声压和振速信息的关联和差别, 这使得联合信息处理系统较传统的单纯声压信息处理系统有更多的途径和方法来实现信号处理。其中最简单的平均声强器有很好的抗各向同性干扰的能力。有多种方法可以改进振速传感器偶极子指向性。

本文研究了声压和振速联合信息处理的一些基础问题, 如声压和振速的相关性, 平均声强器和指向性的旋转和锐化等。通过理论分析和湖试结果对声压振速联合信息处理技术进行了初步的探讨, 为今后进一步的研究打下了基础。

声压和振速联合处理技术还可应用于水声技术其它领域, 如: 航空吊放声呐、海岸预警系统、低噪声测量技术、水雷声引信、鱼雷声自导、海洋监测及海洋环境信息获取技术等方面。

参 考 文 献

- 1 Abraham B M. Low-cost dipole hydrophone for use in towed arrays. Acoustic particle velocity sensors: Design, Performance and Applications//AIP Conference Proceeding, 1997: 1997
- 2 杨士莪. 水声传播原理. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1992
- 3 Shchurov V A. A use of acoustics intensity measurement method in underwater acoustics (Modern Achievements and Prospects). Proc. Euro-Noise 98.Munchen. Germany. 1998
- 4 惠俊英. 水下声信道. 北京: 国防工业出版社, 1994