噪声源非均匀分布海洋环境噪声

水平声能流理论分析*

李家亮^{1,2,3} 林建恒¹ 郭圣明² 衣雪娟¹ 孙军平^{1,3} 殷宝友² 蒋国健¹ (1 中国科学院声学研究所北海研究站 青岛 266023) (2 中国科学院水声环境特性重点实验室 北京 100190) (3 中国科学院大学 北京 100049) 2014年2月2日收到 2014年4月24日定稿

摘要 研究水平非均匀分布噪声源所产生的各向异性海洋环境噪声场声能流。提出一种混合型非均匀分布噪声源模型,理论 分析并数值计算了此模型情况下的环境噪声场水平声能流。结果表明:非均匀分布噪声源引起的海洋环境噪声场具有显著非 零平均水平声能流;不同接收点的水平声能流明显不同;其幅度和方向取决于各个局部海域不等强度声源产生的合成噪声声 能流矢量和。研究了两接收点间噪声的声压和振速水平分量、振速水平分量归一化相关系数随两接收点间距的关系,各量之 间表现出较强相关性,为分析水下矢量声场目标探测技术性能提供理论依据。 PACS 数: 43.30, 43.50

Theoretical analysis of acoustic energy flux of ocean ambient noise caused by non-uniform distributed noise sources

LI Jialiang^{1,2,3} LIN Jianheng¹ GUO Shengming² YI Xuejuan¹

SUN Junping^{1,3} YIN Baoyou² JIANG Guojian¹

(1 Qingdao Lab, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Qingdao 266023)

(2 Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100190)

(3 University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049)

Received Feb. 2, 2014

Revised Apr. 24, 2014

Abstract Acoustic energy flux of anisotropic ocean ambient noise is studied, which is caused by horizontally nonuniform distributed noise sources. A mixed model of non-uniform distributed noise sources is established. Acoustic energy flux of anisotropic ocean ambient noise is analyzed and calculated based on this noise model. The numerical results show that the ambient noise field caused by non-uniform distributed noise sources has obvious nonzero horizontal acoustic energy flux; the acoustic energy flux varies distinctively at different receiver position; its magnitude and direction depend on the synthetic effects of the different parts of noise sources. The changes of the normalized correlation coefficients with the receiver distance between the pressure and horizontal particle velocity at two different receivers, and horizontal particle velocities at two different receivers have been studied, with high correlation coefficients, which provides theoretical basis for analyzing the performance of target detection technology using underwater vector field.

^{*} 国家自然科学基金 (11204345) 资助

引言

随着声隐身技术的迅速发展,现代水中目标声 信号日趋微弱,对目标检测提出了更高要求。在此背 景下,不少学者指出,矢量水听器可以同步共点的获 得声场的声压和振速,进而得到声能流,增加了信息 量,拓展了后置信号处理空间,可以用来减小低频阵 孔径、获得俯仰角估计、消除拖曳式线列阵左右舷模 糊等,从而提高水下探测性能^[1-5]。矢量场信号处 理研究表明,对于无明显的定向平均背景声能流的 各向同性环境噪声场,矢量声场探测具有远比标量 声场探测更可观的增益。鉴于水下矢量声探测的需 求前景,关于海洋中矢量声场的理论分析和深入研 究日益加强^[6-7],更为人们密切关注^[8-12]。

海洋环境噪声矢量场分析是矢量声信号处理抑 制背景噪声干扰的理论基础。矢量声信号处理研究 从各向同性海洋环境噪声干扰背景入手^[13],此后, 诸多学者考虑到实际海洋环境噪声场因多种因素呈 现各向异性,着重分析了海面噪声源指向性带来的 对环境噪声场垂直方向声能流的影响,指出在指向 性(或偶极子形式)海面噪声源模型下,环境噪声 垂直方向呈现各向异性,导致矢量水听器垂直方向 定位产生误差,国内相关专家也获得类似的研究结 果^[1,7-12]。

俄罗斯 V.A.Shchurov 等^[14-16], 从上世纪 70 年 代末 80 年代初开始, 率先利用矢量水听器 (基站) 对 大陆架和深海环境噪声进行细致研究。俄学者考虑 海气动力分布不均衡, 研究了以海洋动力噪声为主 要噪声源的各向异性环境噪声,将环境噪声场分解 为各向同性和非各向同性成分,并将环境噪声声能 流分为沿垂直和水平方向传播的不相关的两部分声 能流。

事实上,不均衡分布的海气动力以及人类活动 (如航船)等因素产生的噪声源在水平面为非均匀分 布,导致海洋环境噪声场在水平方向同样呈现各向 异性,接收点平均水平声能流不为零 (实测平均水平 声能流不在零值附近摆动),这将给矢量声场信号处 理和矢量水听器水平方向定向带来重要影响。

人们已注意到, 航运量快速增长导致低频海洋 环境噪声级显著增加, 其航船噪声源在海域上呈非 均匀分布。美国学者^[17]研究了远处航船产生的环境 噪声场,分析了该情况下噪声场的各向异性特性。国 内学者正着手开展海洋环境噪声声压场水平各向异 性特性研究^[18],指出航船噪声源和某些特定环境水 文条件 (如较大范围孤子内波), 将使噪声声压场在水 平面产生方向特性。然而迄今为止, 关于水平各向异 性环境噪声矢量场水平分量的探讨, 以及噪声源在 水平方向非均匀分布模型的研究, 鲜见发表于公开 刊物。

针对水平非均匀分布噪声源产生的海洋环境噪 声,本文重点探讨了噪声声能流水平分量的特性,提 出一种混合型非均匀分布噪声源模型,它由海面下 一无限平面上水平均匀分布噪声源和另一平面上多 个局部海域分布不等强度噪声源叠加组成。在此水 平非均匀分布噪声源模型基础上,理论分析了接收 点处海洋环境噪声水平声能流,以及两接收点声压 与振速、振速与振速的互谱密度,并对海面上存在航 道、港口或离散航船等非均匀分布或强度不等的噪 声源情形进行数值仿真计算。

1 混合型非均匀分布噪声源模型

实际海洋环境中,远处航船以及远处风暴等海 气动力作用在地域上具有不均衡性,海面噪声源在 水平方向呈非均匀分布。图 1 是某海域航船统计分 布示意图,显见航船噪声源在海面上呈显著的非均 匀分布状态。本文侧重考虑海面上非均匀分布或不 等强度航船噪声源情形。



基于上述航船分布,并考虑到海面上还存在通 常视为均匀分布的无数破碎波浪等因素产生的等强 度噪声源,这里提出一种混合型非均匀分布噪声源 模型,它由海面下一无限平面上水平均匀分布噪声 源和另一平面上多个局部海域分布不等强度噪声源 组成。假设在海面下一无限大平面上水平均匀分布无 数等强度噪声源,海面下另一深度平面上存在 N 个 局部区域间不等强度噪声源 (如航船) 区,如图 2。 图中,将海面上某点取作原点,建立直角坐标系或柱 坐标系,海面下 $z = z_{s1}$ 平面上均匀分布等强度噪声 源 $s(r_{s}, z_{s1}, t), z = z_{s2}$ 平面上分布着 N 个局部区域 间不等强度噪声源:即噪声源区 $\Omega_1 : s_1(\mathbf{r}_s, z_{s2}, t)$,噪 声源区 $\Omega_2 : s_2(\mathbf{r}_s, z_{s2}, t)$,噪声源区 $\Omega_3 : s_3(\mathbf{r}_s, z_{s2}, t)$, …,噪声源区 $\Omega_N : s_N(\mathbf{r}_s, z_{s2}, t)$ 。考虑噪声源仅分布 在 $z = z_{s1}$ 和 $z = z_{s2}$ 两个平面上,并不失一般性, 容易推广至任意深度的平面上存在噪声源情形。这 里,用英文小写字母表示噪声时域函数,其傅里叶变 换用相应的大写字母表示。如噪声源 $s(\mathbf{r}_s, z_{s1}, t)$ 为 互相独立的全海域均匀分布随机噪声源信号,其傅 里叶变换形式为 $S(\mathbf{r}_s, z_{s1}, \omega)$,即噪声源频谱。考虑 平面 $z = z_{s1}$ 上任意两点源 $s(\mathbf{r}_s, t)$ 和 $s(\mathbf{r}'_s, t)$ 互相独



图 2 混合型非均匀分布噪声源模型

立且等强度:

$$\langle S(\mathbf{r}_{s}, z_{s1}, \omega) S^{*}(\mathbf{r}'_{s}, z_{s1}, \omega) \rangle =$$

$$|S(\mathbf{r}_{s}, z_{s1}, \omega)|^{2} \delta(\mathbf{r}_{s} - \mathbf{r}'_{s}) =$$

$$\begin{cases} |S_{0}(z_{s1}, \omega)|^{2}, & \mathbf{r}'_{s} = \mathbf{r}_{s}, z = z_{s1}, \\ 0, & \mathbf{r}'_{s} \neq \mathbf{r}_{s}, z = z_{s1}, \end{cases}$$

$$(1)$$

式中 $|S_0(z_{s1},\omega)|^2$ 为源强度。本文为便于分析,设 $z = z_{s2}$ 平面上所分布的N个局部区域噪声源,每个区域内部作为随机时空平稳过程的各噪声源互相独立且等强度,而不同局部区域噪声源具有不同的噪声源强度,即 $|S_1(z_{s2},\omega)|^2$, $|S_2(z_{s2},\omega)|^2$, $|S_3(z_{s2},\omega)|^2$,..., $|S_n(z_{s1},\omega)|^2$ 分别表示 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, ..., \Omega_N$ 局部区域的噪声源强度:

$$\langle S(\boldsymbol{r}_{s}, z_{s2}, \omega) S^{*}(\boldsymbol{r}_{s}', z_{s2}, \omega) \rangle = |S(\boldsymbol{r}_{s}, z_{s2}, \omega)|^{2} \, \delta(\boldsymbol{r}_{s} - \boldsymbol{r}_{s}') = \left\{ \begin{split} |S_{n}(z_{s2}, \omega)|^{2}, & (\boldsymbol{r}_{s}, z_{s2}) \in \Omega_{n}, n = 1, 2, \cdots, N \\ 0, & (\boldsymbol{r}_{s}, z_{s2}) \notin \Omega_{n}, n = 1, 2, \cdots, N, \end{split} \right.$$

$$(2)$$

2 噪声源水平非均匀分布下的声能流

在上述混合型非均匀分布噪声源模型下,考虑 水平分层海洋环境,设接收点位于 *R*(*r*, *z*),其相应的 直角坐标为 *R*(*x*, *y*, *z*),则由平面 *z*_{s1} 和 *z*_{s2} 上噪声源 产生环境噪声场,在该接收点处的声压谱为:

$$P(\mathbf{r}, z, \omega) = P_{zs1}(\mathbf{r}, z, \omega) + P_{zs2}(\mathbf{r}, z, \omega), \qquad (3)$$

式中:

$$P_{zs1}(\boldsymbol{r}, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\boldsymbol{r}_s, z_{s1}, \omega) G(\boldsymbol{r}_s - \boldsymbol{r}, z, z_{s1}, \omega) \, \mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s, \tag{4}$$

$$P_{zs2}(\boldsymbol{r}, z, \omega) = \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_n} S_n\left(\boldsymbol{r}_s, z_{s2}, \omega\right) G\left(\boldsymbol{r}_s - \boldsymbol{r}, z, z_{s2}, \omega\right) \mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s,\tag{5}$$

式中, z_{s1} , z_{s2} 表示噪声源所在平面, $S(\mathbf{r}_s, z_{s1}, \omega)$, $S_n(\mathbf{r}_s, z_{s2}, \omega)$ 是噪声源频谱。在以下分析中, 为书写 简洁, 在涉及频谱的表达式中, 一律将省略频率项 ω , 如将接收点的声压频谱 $P(\mathbf{r}, z, \omega)$, 书写为 $P(\mathbf{r}, z)$, 即 $P(\mathbf{r}, z) = P(\mathbf{r}, z, \omega)$ 。格林函数 *G* 的简正波表达 式为:

$$G\left(\boldsymbol{r}_{s}-\boldsymbol{r},z,z_{s}\right) = \frac{1}{\rho_{s}}\sqrt{2\pi}\sum_{m=1}^{\infty}\frac{1}{\sqrt{\xi_{m}r_{d}}}\psi_{m}\left(z_{s}\right)\psi_{m}\left(z\right)e^{\mathrm{i}\left(\xi_{m}+\mathrm{i}\delta_{m}\right)r_{d}+\mathrm{i}\pi/4},\tag{6}$$

为后面方便书写,此处记

$$G(\boldsymbol{r}_s - \boldsymbol{r}, z, z_s) = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(r_d, z, z_s), \qquad (7)$$

式中
$$\rho_s = \rho(z_s), r_d$$
是声源到接收点的水平距离:

$$r_d = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_s| = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2},$$
 (8)

 ξ_m , $\psi_m(z)$, δ_m 分别表示第 *m* 号简正波的水平波数、本征函数和衰减系数。将格林函数代入式 (4) 和式 (5), 得:

$$P_{zs1}\left(\boldsymbol{r},z\right) = \frac{\mathrm{i}\sqrt{2\pi}}{\rho\left(z_s\right)} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi/4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S\left(\boldsymbol{r}_s, z_{s1}\right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\xi_m r_d}} \psi_m\left(z_s\right) \psi_m\left(z\right) e^{\mathrm{i}(\xi_m + \mathrm{i}\delta_m)r_d} \mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s,\tag{9}$$

$$P_{zs2}\left(\boldsymbol{r},z\right) = \frac{\mathrm{i}\sqrt{2\pi}}{\rho\left(z_s\right)} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\pi/4} \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_n} S_n\left(\boldsymbol{r}_s, z_{s2}\right) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\xi_m r_d}} \psi_m\left(z_s\right) \psi_m\left(z\right) e^{\mathrm{i}(\xi_m + \mathrm{i}\delta_m)r_d} \mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s. \tag{10}$$

利用欧拉公式求振速:

$$\boldsymbol{v} = -\frac{1}{\rho} \int \nabla p \cdot \mathrm{d}t,\tag{11}$$

对于简谐波,取时间因子 $e^{-i\omega t}$,某一频率接收点振速可表示为 $V = (1/(i\rho\omega))\nabla P$,其频域表达式为:

$$\boldsymbol{V}(\boldsymbol{r}, z) = \boldsymbol{V}_{zs1}(\boldsymbol{r}, z) + \boldsymbol{V}_{zs2}(\boldsymbol{r}, z), \qquad (12)$$

$$\boldsymbol{V}_{zs1}\left(\boldsymbol{r},z\right) = \frac{1}{\mathrm{i}\rho\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S\left(\boldsymbol{r}_{s}, z_{s1}\right) \nabla G\left(\boldsymbol{r}_{s} - \boldsymbol{r}, z, z_{s1}\right) \mathrm{d}x_{s} \mathrm{d}y_{s},\tag{13}$$

$$\boldsymbol{V}_{zs2}\left(\boldsymbol{r}, z\right) = \frac{1}{\mathrm{i}\rho\omega} \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_{n}} S_{n}\left(\boldsymbol{r}_{s}, z_{s2}\right) \nabla G\left(\boldsymbol{r}_{s} - \boldsymbol{r}, z, z_{s2}\right) \mathrm{d}x_{s} \mathrm{d}y_{s}.$$
(14)

接收点处振速在 x 方向的分量为:

$$V_x\left(\boldsymbol{r}, z\right) = V_{x-zs1}\left(\boldsymbol{r}, z\right) + V_{x-zs2}\left(\boldsymbol{r}, z\right),\tag{15}$$

$$V_{x-zs1}(\mathbf{r},z) = \frac{1}{\mathrm{i}\rho\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\mathbf{r}_s, z_{s1}) \frac{\partial}{\partial x} G(\mathbf{r}_s - \mathbf{r}, z, z_{s1}) \,\mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\mathbf{r}_s, z_{s1}) \frac{x - x_s}{r_d} \sum_m \sqrt{\frac{\xi_m}{r_d}} \psi_m(z_{s1}) \psi_m(z) e^{\mathrm{i}\xi_m r_d - \delta_m r_d} \mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s,$$
(16)

$$V_{x-zs2}(\boldsymbol{r},z) = \frac{1}{\mathrm{i}\rho\omega} \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_n} S_n(\boldsymbol{r}_s, z_{s2}) \frac{\partial}{\partial x} G(\boldsymbol{r}_s - \boldsymbol{r}, z, z_{s2}) \,\mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s = A \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_n} S_n(\boldsymbol{r}_s, z_{s2}) \frac{x - x_s}{r_d} \sum_m \sqrt{\frac{\xi_m}{r_d}} \psi_m(z_{s2}) \psi_m(z) \mathrm{e}^{\mathrm{i}\xi_m r_d - \delta_m r_d} \mathrm{d}x_s \mathrm{d}y_s,$$

$$(17)$$

其中, A为常数,各式不一定相同:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \frac{x - x_s}{r_d} \sum_m p_m \left[-\frac{1}{2r_d} + i\left(\xi_m + i\left|\delta_m\right|\right) \right].$$
(18)

显见,质点振速 y 方向分量的表达式与 x 方向 相似,不再表述。

考虑到所有噪声源之间相互独立,不同位置的 两个噪声源在同一接收点产生的声压与声压、声压 与振速、振速与振速的互谱为零,下面对于同一水 平面内两接收点 $R_1(\mathbf{r}_1, z)$ 和 $R_2(\mathbf{r}_2, z)$, 分别求声压 $P_1(\mathbf{r}_1, z, \omega)$ 与 $P_2(\mathbf{r}_2, z, \omega)$ 、声压 $P_1(\mathbf{r}_1, z, \omega)$ 与振 速 $V_{2x}(\mathbf{r}_2, z, \omega)$ 、振速 $V_{1x}(\mathbf{r}_2, z, \omega)$ 与 $V_{2x}(\mathbf{r}_2, z, \omega)$ 之间的互谱密度。

两个接收点声压互谱:

$$C(P_1, P_2) = \langle P_1(\boldsymbol{r}_1, z) P_2^*(\boldsymbol{r}_2, z) \rangle = C(P_{1-zs1}, P_{2-zs1}) + C(P_{1-zs2}P_{2-zs2}),$$
(19)

其中:

$$C(P_{1-zs1}, P_{2-zs1}) = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(z_{s1})|^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\xi_m \sqrt{r_{d1} r_{d2}}} |\psi_m(z_{s1})|^2 |\psi_m(z)|^2 e^{i\xi_m(r_{d1} - r_{d2})} e^{-\delta_m(r_{d1} + r_{d2})} dx_s dy_s,$$
(20)

$$C(P_{1-zs2}, P_{2-zs2}) = A\sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_{n}} |S_{n}(z_{s2})|^{2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\xi_{m}\sqrt{r_{d1}r_{d2}}} |\psi_{m}(z_{s2})|^{2} |\psi_{m}(z)|^{2} e^{i\xi_{m}(r_{d1}-r_{d2})} e^{-\delta_{m}(r_{d1}+r_{d2})} dx_{s} dy_{s}.$$
(21)

一个接收点的声压与另一接收点的振速 x 轴分量之间互谱:

$$C(P_1, V_{2x}) = \langle P_1(\boldsymbol{r}_1, z) V_{2x}^*(\boldsymbol{r}_2, z) \rangle = C(P_{1-zs1}, V_{2x-zs1}) + C(P_{1-zs2}, V_{2x-zs2}),$$
(22)

其中:

$$C(P_{1-zs1}, V_{2x-zs1}) = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(z_{s1})|^2 \frac{x_2 - x_s}{r_{d2}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r_{d2}r_{d1}}} |\psi_m(z_{s1})|^2 |\psi_m(z)|^2 e^{i\xi_m(r_{d1} - r_{d2})} e^{-\delta_m(r_{d1} + r_{d2})} dx_s dy_s,$$

$$C(P_{1-zs2}, V_{2x-zs2}) =$$
(23)

$$A\sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_{n}} |S_{n}(z_{s2})|^{2} \frac{x_{2} - x_{s}}{r_{d2}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r_{d2}r_{d1}}} |\psi_{m}(z_{s2})|^{2} |\psi_{m}(z)|^{2} e^{i\xi_{m}(r_{d1} - r_{d2})} e^{-\delta_{m}(r_{d1} + r_{d2})} \mathrm{d}x_{s} \mathrm{d}y_{s}.$$
(24)

两接收点噪声振速 x 轴分量之间互谱:

$$C(V_{1x}, V_{2x}) = \langle V_{1x}(\mathbf{r}_1, z) V_{2x}^*(\mathbf{r}_2, z) \rangle = C(V_{1x-zs1}, V_{2x-zs1}) + C(V_{1x-zs2}, V_{2x-zs2}),$$
(25)

其中:

$$C(V_{1x-zs1}, V_{2x-zs1}) = A \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_0(z_{s1})|^2 \frac{(x_1 - x_s)(x_2 - x_s)}{r_{d1}r_{d2}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\xi_m}{\sqrt{r_{d1}r_{d2}}} |\psi_m(z_{s1})|^2 |\psi_m(z)|^2 e^{i\xi_m(r_{d1} - r_{d2})} e^{-\delta_m(r_{d1} + r_{d2})} dx_s dy_s,$$
(26)

$$C(V_{1x-zs2}, V_{2x-zs2}) = A \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_{n}} |S_{n}(z_{s2})|^{2} \frac{(x_{1}-x_{s})(x_{2}-x_{s})}{r_{d1}r_{d2}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\xi_{m}}{\sqrt{r_{d1}r_{d2}}} |\psi_{m}(z_{s2})|^{2} |\psi_{m}(z)|^{2} e^{i\xi_{m}(r_{d1}-r_{d2})} e^{-\delta_{m}(r_{d1}+r_{d2})} dx_{s} dy_{s},$$

$$(27)$$

以上各式中

$$r_{d1} = |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_1| = \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2},$$

 $r_{d2} = |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_2| = \sqrt{(x_2 - x_s)^2 + (y_2 - y_s)^2}.$

这里需要说明,式 (20) 至式 (27) 应为四重积 分,在前文所有噪声源之间相互独立的假设下,四重 积分简化为二重积分。下面分别讨论由海面 (*z* = *z*₁ 平面) 均匀分布噪声源和 z = z₂ 平面上 N 个局部区 域非均匀分布噪声源在接收点产生的声能流。

2.1 均匀分布噪声源

取柱坐标系,假设均匀分布于 $z = z_1$ 平面的噪 声源关于接收点与坐标原点连线呈轴对称分布。不 失一般性,设接收点坐标为 (0,0,z),则接收点处的 声强为:

677

$$I_{pp-zs1} = C(P_{zs1}, P_{zs1}) = \langle P_{zs1}P_{zs1}^* \rangle = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} |S_0(z_{s1})|^2 G(\mathbf{r}_s, z, z_{s1}) G^*(\mathbf{r}_s, z, z_{s1}) r_s d\varphi dr_s = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} |S_0(z_{s1})|^2 \left(\sum_m p_m\right) \left(\sum_n p_n^*\right) r_s d\varphi dr_s = 2\pi \int_{0}^{\infty} |S_0(z_{s1})|^2 \left(\sum_m p_m\right) \left(\sum_n p_n^*\right) r_s dr_s,$$
(28)

现求接收点平均声能流,由于

$$\frac{\partial r_s}{\partial x} = \cos\varphi, \quad \frac{\partial r_s}{\partial y} = \sin\varphi,$$
(29)

因此格林函数 G 对 x, y 的偏导为:

$$\frac{\partial}{\partial x}G(\boldsymbol{r}_{s}, z, z_{s1}) \approx \sum_{m=1}^{\infty} \left(\mathrm{i}\xi_{m} - \delta_{m}\right) P_{m}\left(\boldsymbol{r}_{s}, z, z_{s1}\right) \cos\varphi,\tag{30}$$

$$\frac{\partial}{\partial y}G(\mathbf{r}_s, z, z_{s1}) \approx \sum_{m=1}^{\infty} \left(\mathrm{i}\xi_m - \delta_m\right) P_m(\mathbf{r}_s, z, z_{s1})\sin\varphi,\tag{31}$$

由此获得 x 方向的声能流:

$$I_{pvx-zs1} = \frac{1}{\mathrm{i}\rho\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} |S(z_{s1})|^2 G(\mathbf{r}_s, z, z_{s1}) \frac{\partial}{\partial x} G^*(\mathbf{r}_s, z, z_{s1}) r_s \mathrm{d}\varphi \mathrm{d}r_s = -\frac{1}{\rho\omega} \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} |S(z_{s1})|^2 \left(\sum_{m}^{P_m}\right) \left(\sum_{n}^{P_m^*} (\xi_n + \mathrm{i}\delta_n)\right) r_s \cos\varphi \mathrm{d}r_s \mathrm{d}\varphi,$$
(32)

同理 y 方向的声能流为:

$$I_{pvy-zs1} = -\frac{1}{\rho\omega} \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} |S(z_{s1})|^2 \left(\sum_{m}^{P_m}\right) \left(\sum_{n}^{P_n^*} (\xi_n + \mathrm{i}\delta_n)\right) r_s \sin\varphi \mathrm{d}r_s \mathrm{d}\varphi.$$
(33)

以上各式中,下标 z_{s1} 表示由 $z = z_{s1}$ 平面上噪 声源产生的声压、振速或声能流。式 (32)和式 (33) 被 积函数乘积项中含三角函数的积分为零: $\int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi = 0 和 \int_0^{2\pi} \sin \varphi d\varphi = 0$,因此式 (32)和式 (33)积分结果为零。这表明,对于噪声源水平均 匀分布情况,接收点环境噪声总的平均合成水平方 向声能流为零。其实只要噪声源分布 (包括强度和位 置)关于接收点位置中心对称,平均合成水平方向声 能流即为零。这说明海面均匀分布噪声源情形下, 接收点处环境噪声(水平方向)平均声能流为零,这 意味着与传统的声压信号检测相比,从声能流角度 检测目标信号可以显著降低噪声背景。

2.2 非均匀分布噪声源

现在仅考虑 $z = z_{s2}$ 平面上 N 个局部区域非均 匀分布噪声源,由于各噪声源相互独立,容易得到接 收点处声强:

$$I_{p,p} = C(P_{zs2}, P_{zs2}) = \langle P_{zs2}P_{zs2}^* \rangle = \sum_{n=1}^{N} I_{pp-zs2}^{(n)} = A \left[\sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_n} |S_n(z_{s2})|^2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\xi_m r_d} |\psi_m(z_{s2})|^2 |\psi_m(z)|^2 e^{-2\delta_m r_d} dx_s dy_s \right],$$
(34)

接收点水平声能流 x 轴分量为:

$$I_{pvx-zs2} = C(P_{zs2}, V_{x-zs2}) = \left\langle P_{zs2}V_{x-zs2}^* \right\rangle = \sum_{n=1}^{N} I_{pvx-zs2}^{(n)} = A \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_n} |S_n(z_{s2})|^2 \frac{x-x_s}{r_d^2} \sum_{m=1}^{\infty} |\psi_m(z_{s2})|^2 |\psi_m(z)|^2 e^{-2\delta_m r_d} dx_s dy_s,$$
(35)

接收点水平声能流 y 轴分量为:

$$I_{pvy-zs2} = C(P_{zs2}, V_{y-zs2}) = \left\langle P_{zs2}V_{y-zs2}^* \right\rangle = \sum_{n=1}^{N} I_{pvy-zs2}^{(n)} = A \sum_{n=1}^{N} \iint_{\Omega_n} |S(z_{s2})|^2 \sum_m \frac{y-y_s}{r_d^2} |\psi_m(z_{s2})|^2 |\psi_m(z)|^2 e^{-2|\delta_m|r_d} dx_s dy_s.$$
(36)

以上各式中,下标 z_{s2} 表示由 $z = z_{s2}$ 平面上噪 声源产生的声压、振速或声能流,式中积分是第 Ω_n 局部区域噪声源对接收点平均声强或平均水平声能 流 x, y 轴分量的贡献,式中分别用 $I_{pp-zs2}^{(n)}, I_{pvx-zs2}^{(n)}$ 和 $I_{pyy-zs2}^{(n)}$ 表示。

2.3 接收点处水平声能流

接收点平均声强:

$$I_{pp} = I_{PP-zs1} + \sum_{n=1}^{N} I_{PP-zs2}^{(n)}, \qquad (37)$$

接收点水平声能流的 x 、 y 轴方向分量:

$$I_{pvx} = I_{Pvx-zs1} + \sum_{n=1}^{N} I_{Pvx-zs2}^{(n)} = \sum_{n=1}^{N} I_{Pvx-zs2}^{(n)}, \quad (38)$$

$$I_{pvy} = I_{Pvy-zs1} + \sum_{n=1}^{N} I_{Pvy-zs2}^{(n)} = \sum_{n=1}^{N} I_{Pvy-zs2}^{(n)}, \quad (39)$$

接收点声能流的水平方向为:

$$\tan(\theta) = \frac{I_{Pvy}}{I_{Pvx}} = \frac{\sum_{n=1}^{N} I_{pvy-zs2}^{(n)}}{\sum_{n=1}^{N} I_{pvx-zs2}^{(n)}}.$$
 (40)

3 数值仿真计算

考虑如图 3 所示的 Pekeris 浅海波导环境参数: 海水声速 1500 m/s,海底声速 1610 m/s,底质密度 1.7 g/cm³,衰减系数 0.4 dB/ λ ,海深 60 m,声源深度 5 m,接收点深度 30 m,按上述非均匀噪声源分布模 型,数值计算 300 Hz 频率接收点水平方向声能流。 由于 $z = z_{s1}$ 平面上均匀分布噪声源在水平方向的平 均声能流为零,仅需考虑 $z = z_{s2}$ 平面上非均匀分布 噪声源在接收点处的平均声能流。



3.1 接收点水平声能流

3.1.1 某局部区域噪声源对称均匀分布

设在第 n 个局部区域内,噪声源对称分布在该 区域中心点和 z_{s2} 平面坐标原点连线两侧,见图 4. 如考虑仅存在该噪声源区,则接收点平均水平声能 流方向指向该噪声源区域的中心点方向,表 1 是计 算获得的三种轴均匀对称分布情形下接收点水平声 能流 $I_{Pv=z2}^{(n)}$ 的方向。



图 4 单个噪声源区域分布示意图

衣 I 仅仔住另 <i>n</i> 1 向 动 凶 域 对 你 牙 伊 咪 巴 你 可 小 干 严 能 流 方	衣⊥	表⊥	1 以仔仕弗 n	个同部区或对	邴分巾 嘿戸	「源町水平戸肥沉」	1 円
---	----	----	----------	--------	---------------	-----------	-----

噪声源分布区域开角 (°)	$15 \sim 45$	30~60	$45 \sim 75$
合成水平声能流 $I^{(n)}_{Pv-z2}$ 理论方向 $ heta_n$ (°)	30	45	60
合成水平声能流 $I^{(n)}_{Pv-z2}$ 计算方向 $ heta_n$ (°)	30	45	60

对于一般情况,当第 n 个局部区域噪声源为非 均匀对称分布时,可以计算获得其在接收点的合成 平均声能流方向和幅度,记为:

$$I_{Pv-xy-zs2}^{(n)} = \left| I_{Pv-xy-zs2}^{(n)} \right| e^{j\theta_n}.$$
 (41)

显见,在本文混合型非均匀分布噪声源模型下, 由于海面均匀分布噪声源在接收点处的平均声能流 为零,所以接收点处水平声能流就等于 *z* = *z*_{s2} 平面 上 *N* 个局部区域噪声源产生的水平声能流矢量和:

$$I_{pv-xy} = \sum_{n=1}^{N} I_{Pv-xy-zs2}^{(n)} = |I_{pv-xy}| e^{j\theta}, \qquad (42)$$

$$|I_{pv-xy}| = \sqrt{I_{pvx}^2 + I_{pvy}^2} = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N I_{pvx-zs2}^{(n)}\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N I_{pvy-zs2}^{(n)}\right)^2},$$
(43)

接收点的水平声能流方向由前述式 (40) 确定。 **3.1.2** 同时存在三种局部区域噪声源分布

在上述图 3 所示的 Pekeris 波导环境下,考虑某 海域存在航道、港口和离散航船 (单点噪声源) 三种 局部噪声源区域,即 N = 3,并设矩形 (20 km×80 km) 航道噪声源区 Ω_1 内均匀分布着 60 只船;矩形 (20 km×20 km)港口噪声源区 Ω_2 内均匀分布着 20 只船;离散航船噪声源 Ω_3 位于距离坐标原点 74 km 方位在 315°处。三种局部噪声源区的相对位置如图 5 所示,各噪声源在 300 Hz 和 150 Hz 频率处的谱源级 见表 2。图 5 中,三个接收点 R_1, R_2, R_3 均在同一



图 5 噪声源区和接收点平面位置示意图

表 2 各局部区域航船数和航船源谱源级

		航道区 Ω_1	港口区 Ω_2	离散船只 Ω_3	
航船数	数 (只)	60	20	1	
航船谱	$300 \ Hz$	160 dB	$157 \mathrm{~dB}$	166 dB	
源级	$150~\mathrm{Hz}$	163 dB	160 dB	175 dB	

深度 z 的水平平面上,其中 R₁ 位于 (0,0,z), R₂ (80 km,80 km,z) 靠近航道区, R₃(-20 km,-60 km,z) 在港口附近。

这里需要说明,以下数值计算时所涉及的远处 航道航船噪声源和港口区航船噪声源,实质上是不 可识别其各单体噪声源级和具体位置的。但为了便 于给出航道区和港口区由航船引起的单位面积源强 度估计值,这里作出了一些简化假设:(1)设定该源 区内航船噪声源为有限个 (如 60 条或 20 条航船),并 假定均为同一类船舶,且具有相同的声源级; (2)在 此基础上, 推算给出该源区的单位面积源强度估计 值,然后进行远处航船引起的环境噪声场的分析和 计算。事实上, 通过大量实际调查所获得的航道区和 港口区单位面积航船分布密度,是各种类型的分类 航船密度,各类航船噪声源级并不相同。此外,计算 时考虑离散航船噪声源区 Ω_3 的强点源噪声, 是由于 它在浅海中常碰见, 是强点干扰源, 探讨其对接收点 环境噪声声能流的影响程度。应该说,这类噪声源可 作为目标来对待。

三个不同接收点的水平声能流方向和大小见图 6,其中图 6(a) 频率 300 Hz,图 6(b) 频率 150 Hz。





图 6 同时存在三种噪声源区,三个接收点的水平声能流方向和幅度

由图 6 可见: (1) 当存在三种局部区域噪声源, 且 其强度不等时, 即使同一频率下, 不同接收点处水平 声能流方向和幅度均不相同, 差别很大; 当接收点靠 近某等强度局部噪声源区域时, 其水平声能流方向基 本指向该区域中心位置附近; (2) 接收点 $R_1(0,0,z)$ 离开三种局部噪声源区均较远, 其合成水平声能流方 向主要取决于强度最大的局部噪声源区, 通常指向该 强噪声源区中心位置所在方位附近, 本例为 $\theta = 56^\circ$, 见图 6(a); (3) 对于 150 Hz 频率, 由于离散点源 (航 船) 在该频率声源级显著高于其它噪声源, 因而使接 收点 $R_1(0,0,z)$ 合成水平声能流方向不同于 300 Hz 频率情况, 而明显偏向离散噪声源方向。

当只存在航道噪声源区 Ω_1 和港口噪声源区 Ω_2 , 而没有离散航船噪声源 Ω_3 时,接收点 $R_1(0,0,z)$ 300 Hz 频率合成水平声能流方向和幅度分别为 60° 和 83.5 dB,见图 7。和图 6 同时存在 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3 三噪$ 声源区时 $R_1(0,0,z)$ 声能流方向 56° 和幅度 94.6 dB 比较,由于 315° 方位不存在离散强噪声源,导致前



图 7 无离散船只时接收点 R1 处水平声能流大小和方向



图 9 无离散船只时接收点 R1 处水平声能流大小和方向

者合成水平声能流略偏向 y 轴, 其幅度也因此下降。

当航道噪声源区 Ω_1 和港口噪声源区 Ω_2 保持不 变,离散航船噪声源 Ω_3 向接收点 $R_1(0,0,z)$ 移动至 相距 17 km 处 (见图 8),这时 R_1 接收点 300 Hz 频率 合成水平声能流方向为 347.6°,幅度 95 dB,已基本 上接近离散航船噪声源 Ω_3 所在方位 315°了。

对于 150 Hz 频率, 情况和 300 Hz 类似, 见图 9 和图 10: 离散点源不存在时, *R*₁ 接收点 150 Hz 频 率水平声能流方向偏向 *y* 轴, 幅度下降; 离散点源存 在, 且距 *R*₁ 接收点仅 17 km, 这时, 由于 150 Hz 频率 处,离散航船谱源级为 175 dB, 显著高于航道区 Ω₁ 和港口区 Ω₂ 噪声源同频率的谱源级, *R*₁ 接收点合 成水平声能流方向为 315°, 已完全取决于离散点源 所在方位。这表明, 如果把离散航船 Ω₃ 看作目标, 当其辐射噪声源级甚高于周围环境噪声且距接收点 近时,单矢量水听器声能流法应能较有效地探测到 该目标的存在,方位测量较准确。



图 8 离散船只靠近接收点 R1 时水平声能流大小和方向



图 10 离散船只靠近接收点 R1 时水平声能流大小和方向

3.2 两接收点间声压、振速 x 分量互相关系数

式 (18) — 式 (21) 给出了第一接收点声压与第 二接收点振速 x 分量之间,以及两接收点振速 x 分 量之间互谱密度,据此,考虑到 z_{s1} 平面噪声源等强 度水平均匀分布,且和 z_{s2} 平面噪声源互相独立,可 求得单频情况下两接收点间声压和振速 x 分量的互 相关系数 $\gamma_{p-vx}(P_1, V_{2x})$ 、以及两接收点振速 x 分量 之间的互相关系数 $\gamma_{vx-vx}(V_{x1}, V_{2x})$:

$$\gamma_{p-vx}(P_1, V_{2x}) = \frac{\operatorname{Re}\left\langle P_{1-zs2}V_{2x-sx2}^*\right\rangle}{\sqrt{|P_{1-zs2}|^2}\sqrt{|V_{2x-zs2}|^2}}, \quad (44)$$

$$\gamma_{vx-vx}(V_{x1}, V_{2x}) = \frac{\operatorname{Re}\left\langle V_{1-zs2}V_{2x-sx2}^{*}\right\rangle}{\sqrt{|V_{1x-zs2}|^{2}}\sqrt{|V_{2x-zs2}|^{2}}}.$$
 (45)

3.2.1 同一深度不同水平位置互相关系数

在图 3 所示的 Pekeris 浅海波导环境下,对图 5 所示 *z*_{s2} 平面上存在三个局部区域噪声源情形 (各局 部区域航船数和源级参见表 2),按式 (44)和式 (45)数值计算了 300 Hz 频率处同一平面上一接收点声 压和另一接收点振速 *x* 分量以及两接收点振速 *x* 轴 分量之间的空间互相关系数,结果见图 11 和图 12,其中第一点为 *z* 平面的原点 (0,0,*z*),第二点沿直线



y = 3x/2 变动,该直线方向与(0,0,z)点合成水平声 能流方向一致。由图 11 和图 12 可见,声压和振速 x 分量、振速 x 分量之间具有强相关性,且其互相关 系数随接收点间距振荡。由于计算中非均匀分布噪 声源在远距离,已可视为平面波,振速和声压相位一 致,因此,上述两接收点间互相关系数图非常相似或 很接近。

3.2.2 同一水平位置不同深度互相关系数

图 13 是 *z* 轴上两接收点间 300 Hz 频率声压和 振速 *x* 分量、振速 *x* 分量之间的空间互相关系数,



计算环境参数和噪声源分布同图 (11)。图 13 中,虚 线表示一点声压与另一点振速 *x* 分量之间的空间相 关系数随两接收点垂直间距的变化,实线表示两点振 速 *x* 分量之间的空间相关系数随两接收点垂直间距 的变化。

由图 13 可见: (1) 在本文所提出的水平非均匀 噪声源模型下, z 轴上接收点声压和另一接收点振 速水平分量之间具有较强相关性,相关系数达 0.8 以 上,和接收深度关系不明显,即不同深度处的接收点 声压和另一接收点振速具有相似性; (2) z 轴上两接 收点振速 x 分量之间的空间互相关性较强,峰值出 现在接收点垂直间距为零处。

3.3 讨论

(1)水平非均匀分布噪声源产生的海洋环境噪声 矢量场特性,显著不同于等强度水平均匀分布噪声源 产生的噪声场,其根本区别在于前者存在显著的合成 声能流,而后者理论上任一点的平均水平噪声能流 为零。

当在风平浪静的开阔海洋、观测点周边无航道、 航船,接近于水平各向同性噪声源分布环境中测量噪 声时,测得的噪声声能流幅度应在零点附近摆动,没 有固定的水平声能流方向。对于存在航道、航船的浅 海海域,接收点可观测到显著的、方向比较固定的噪 声平均水平声能流。预料仅在个别测点可观测到噪 声的平均水平声能流为零。如:在本文前述图 3 所示 Pekeris 浅海环境及图 5 所示 z_{s2} 平面上存在三个局 部区域噪声源情形,理论计算表明,测点布设在 x、y 轴上,噪声声能流随测点位置的变化见图 14,可见, 当接收点位于 y 轴上 (0,-30,z) 和 (0,-40,z) 之间的 某点附近,声能流可为零 (见图 14(b))。

(2) 对于各向同性环境噪声场,同一接收点处的 声压和互相正交的 xyz 三个方向的振速分量互相独 立;等强度水平均匀分布偶极子噪声源 (或半球面均 匀分布噪声源),其噪声场呈水平各向均匀,声压和 水平面 xy 方向的振速分量互相独立。而本文水平非 均匀分布噪声源,其环境噪声场呈各向异性,同一接 收点处的声压和互相正交的 xyz 三方向的振速分量 具有显著的相关性,通常均不为零,对于本文所关注 的水平面 xy 方向,存在显著的平均噪声声能流,它 由平面 zs2 各噪声源区声能流矢量叠加合成,其性质 好像在总合成声能流方向存在某种"伪噪声源",这 和各向同性环境噪声场,及水平各向同性环境噪声 场完全不同。关于同一接收点处声压和振速三分量 之间的互相关矩阵将在另文讨论。



图 14 水平面不同位置处噪声声能流幅度和指向性变化

4 结论

本文建立了一种混合型非均匀分布噪声源模 型。在 Pekeris 浅海环境下,假定噪声源互相独立, 理论分析了上述模型噪声源所产生的噪声场水平声 能流,从结果可知,非均匀分布噪声源引起的海洋 环境噪声场具有显著非零水平声能流,其大小和方 向取决于所有噪声源产生的声能流矢量和,不同位 置声能流的方向和大小可能差别显著,极个别点声 能流可能为零。在垂直和水平方向上,两个接收点间 声压与振速水平分量以及振速水平分量之间均表现 出较强的相关性,这与各向同性环境噪声场十分不 同,其具体特性需要更进一步的研究,以便更好的为 矢量信号处理提供理论支撑。

参考文献

- Hawkes M, Nehorai A. Acoustic vector-sensor correlations in ambient noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001; 26(3): 337–347
- Hawkes M, Nehorai A. Acoustic vector-sensor beam forming and capon direction estimation. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1998; SP-46: 2291—2304

- 3 Hawkes M, Nehorai A. Effects of sensor placement on acoustic vector-sensor beam array performance. *IEEE J.* Oceanic Engineering, 1999; 24: 33—40
- 4 惠俊英,刘宏,余华兵,范敏毅.声压、振速联合信息处理及其物理基础初探.声学学报,2000;25(4):303—307
- 5 惠俊英,李春旭,梁国龙,刘宏.声压、振速联合信息处理抗相 干干扰. 声学学报, 2000; **25**(5): 389-394
- Gulin O E, Yang De'sen. On the certain Semi-analytical models of low-frequency acoustic fields in terms of Scalarvector description. *Chinese Journal of Acoustics*, 2004; 23(1): 58—70
- 7 Yaroshchuk I O et al. Statistical Modeling of characteristics of scalar-vector sound fields generated in layerlyinhomogeneous shallow sea with fluctuations. In: Sun Hui eds. Proc. of the 3rd IWAET, the 3rd International Workshop on Acoustic Engineering & Technology, Harbin, 2002, Harbin: HEU Press, 2002: 439
- 8 孙贵青,李启虎. 声矢量传感器信号处理. 声学学报, 2004;
 29(6): 491-497
- 9 孙贵青,杨德森,时胜国.基于矢量水听器的声压和质点振速的 空间相关系数.声学学报,2003;28(6):509-513
- 10 孙岩松, 李平, 李风华. 海面噪声场条件下声压与振速的空间互.

相关系数.海洋技术, 2006; 25(3): 97-99

- 11 鄢锦,罗显志,侯朝焕.海洋环境噪声场中声压和质点振速的空间相干.声学学报,2006;31(4):310—315
- 12 黄益旺,杨士莪,朴胜春. 体积噪声矢量场空间相关特性研究的 一种方法. 哈尔滨工程大学学报, 2009; 30(11): 1209—1212
- Nehorai A, Paldi E. Acoustic vector-sensor array processing. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1994; **42**: 2481— 2491
- Shchurov V A. The properties of the vertical and horizontal power flows of the underwater ambient noise. J. Acoust. Soc. Am., 1991; 90(2): 1002—1004
- 15 Shchurov V A, Iilichev V I, Khvorostov Y A. Ambient noise anisotropy in horizontal plane. Proc.ICA-14, El-10, Beijing, China, 1992
- 16 Shchurov V A. The interaction of energy flows of underwater ambient and a local source. Natural Physical Sources of Underwater Sound, Kluwer Academic Publishers, 1993: 93—109
- 17 Research Ambient Noise Directionality (RANDI) 3-1
 Physics Description. 1996, ADA316034
- 18 江鹏飞,林建恒,马力,蒋国健.孤子内波导致环境噪声垂直指 向性异常分析.声学学报,2013;38(6):724—732