

大深度接收时深海直达波区的复声强及声线到达角估计

孙梅 周士弘

Complex acoustic intensity with deep receiver in the direct-arrival zone in deep water and sound-ray-arrival-angle estimation

Sun Mei Zhou Shi-Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 164302 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.164302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

陆架斜坡海域声场特性对常规波束形成阵增益的影响

Array gain of conventional beamformer affected by structure of acoustic field in continental slope area

物理学报.2016, 65(14): 144303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144303>

海洋环境噪声场对称性分析及噪声消除方法

Analysis of the symmetry of the ambient noise and study of the noise reduction

物理学报.2016, 65(14): 144302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.144302>

基于单矢量差分能量检测器的扩频水声通信

Direct-sequence spread-spectrum underwater acoustic communication based on single vector differential energy detector

物理学报.2016, 65(4): 044302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044302>

基于时反镜能量检测法的循环移位扩频水声通信

Cyclic shift keying spread spectrum underwater acoustic communication using time reversal energy detector

物理学报.2016, 65(1): 014302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014302>

一种基于简正波模态频散的远距离宽带海底参数反演方法

A far distance wideband geoacoustic parameter inversion method based on a modal dispersion curve

物理学报.2015, 64(17): 174302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174302>

大深度接收时深海直达波区的复声强及声线到达角估计*

孙梅^{1)2)†} 周士弘²⁾

1) (泰山学院物理与电子工程学院, 泰安 271000)

2) (中国科学院声学研究所, 声场声信息国家重点实验室, 北京 100190)

(2016年3月16日收到; 2016年6月13日收到修改稿)

基于射线模型给出了质点水平振速、垂直振速及复声强的表达式. 结合深海直达波区的声线到达结构, 分析了大深度接收时深海直达波区复声强的特点, 理论分析与仿真结果表明, 利用声场中不同组声线的复声强可以估计声线到达接收点的掠射角. 根据在2014年进行的一次深海实验中布放在3146 m深处的矢量水听器获取的实验信号, 利用直达波和海面反射波的复声强估计了直达声线与海面反射声线到达接收矢量水听器处的掠射角, 结果表明, 估计的声线到达角与理论计算结果基本一致.

关键词: 深海直达波区, 大深度接收, 复声强, 声线到达角

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d, 43.58.+z

DOI: 10.7498/aps.65.164302

1 引言

一直以来, 深海水声研究主要关注深海远场和声影区、会聚区的声场特性及其应用^[1-7]. 但近年来, 有关深海较近距离的声场特性及其应用也逐步受到重视, 其中可靠声路径是关注的热点之一. 可靠声路径是声源与接收器之间声传播的直达路径, 在可靠声路径环境下可以获得更高的信噪比, 在满足可靠声路径传播条件的情况下, 其适用范围可以从近距离达到中等距离^[8,9]. 在2009年由美国海军研究室发起的菲律宾海实验中, 可靠声路径环境下的多途到达结构是实验研究内容之一^[10,11]. Heaney等^[11]和Westwood^[12]在深海匹配场定位研究中指出, 阵列接收信号中的可靠声路径传播信号能提高匹配场定位性能. 文献^[13-16]根据可靠声路径传播环境下直达声与海面反射声之间的Lloyd镜干涉图样与声源深度之间的调制关系, 将垂直阵布放在临界深度以下接收信号, 采用

一种修正的Fourier变换方法实现了声源深度的被动估计. Duan等^[17]详细分析了深海可靠声路径环境下声线多途传播的特点, 提出了一种加权子空间拟合匹配场方法, 利用不同声线的到达角对目标声源进行定位. Duan等^[18]还利用可靠声路径环境下单个水听器接收信号中直达声与海面反射声之间的传播时间差实现了对运动声源的定位. 可以看出, 可靠声路径在水下目标定位方面有重要应用.

在可靠声路径环境下, 声源与接收器之间的直达路径是声传播的重要路径之一, 即使不满足可靠声路径传播条件, 处于较大深度的接收器也能在一定水平距离范围内接收到来自近水面声源的直达波, 这一直达波区域可以看作可靠声路径传播环境的一部分.

在深海直达波区和可靠声路径环境下, 声线到达角是声场的重要特征物理量之一. 仅利用声压信号, 则必须采用一定的信号处理方法才能获得声线的到达角^[17]. 而矢量水听器在估计波达角方面有

* 国家自然科学基金(批准号: 11434012, 41561144006)、声场声信息国家重点实验室开放课题(批准号: SKLA201602)和泰山学院科研启动基金(批准号: Y-01-2013009)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunmei@mail.ioa.ac.cn

独特优势, 其中基于声能流密度或复声强的波达角估计方法是一种重要的方法^[19]. 本文根据深海直达波区的声场特点, 分析大深度接收时深海直达波区的复声强特性, 并将其应用于声线到达角估计, 实验数据处理结果表明, 利用大深度矢量水听器接收信号获取的复声强估计的声线到达角与理论计算结果符合较好.

2 基于射线模型的声矢量场和复声强

2.1 基于射线模型的声矢量场

根据射线理论^[20], 空间中某点 (r, z) 处的声压可以表示为

$$P(r, z) = A(r, z) e^{-jk_0 \varphi(r, z)}, \quad (1)$$

其中 $k_0 = \omega/c(z_0)$, ω 为声源角频率, z_0 为声源深度, $c(z_0)$ 为声源深度处的声速, $A(r, z)$ 和 $\varphi(r, z)$ 分别为声压幅度和程函, 表示为

$$A(r, z) = |I|^{1/2} = \sqrt{\frac{W \cos \alpha_0}{r \left(\frac{\partial r}{\partial \alpha} \right)_{\alpha_0} \sin \alpha_z}}, \quad (2)$$

$$\varphi(r, z) = r \cos \alpha_0 + \int_{z_0}^z \sqrt{n^2(\xi) - \cos^2 \alpha_0} d\xi + C, \quad (3)$$

其中 W 代表单位立体角内的辐射声功率, I 为声强, α 为声线掠射角, α_0 为掠射角起始值, α_z 为深度 z 处的声线掠射角, n 为折射率, C 为积分常数.

质点振速与声压的关系满足质点的运动方程, 在小振幅条件下有

$$\frac{\partial \mathbf{v}(r, z, t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p(r, z, t), \quad (4)$$

其中 ρ 为介质密度, ∇ 为方向梯度算符, 在柱坐标系下, 它代表 $\frac{\partial}{\partial r} \mathbf{r} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{z}$. 对于简谐点源激发的声场有:

$$p(r, z, t) = P(r, z) e^{j\omega t}, \quad (5)$$

$$\mathbf{v}(r, z, t) = \mathbf{V}(r, z) e^{j\omega t}, \quad (6)$$

将 (5) 式和 (6) 式代入 (4) 式可得:

$$\mathbf{V}(r, z) = -\frac{1}{j\rho\omega} \nabla P(r, z), \quad (7)$$

则质点水平振速 V_r 和垂直振速 V_z 分别为:

$$V_r(r, z) = -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial P(r, z)}{\partial r}, \quad (8)$$

$$V_z(r, z) = -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial P(r, z)}{\partial z}. \quad (9)$$

海水介质具有垂直分层特性, 可在深度方向将其分成若干层, 每层中的相对声速梯度可以看作常数. 对于单层线性分层介质, 声强可以表示为^[20]

$$I = \frac{W \cos^2 \alpha_0}{r^2}, \quad (10)$$

则声压幅度为

$$A(r, z) = \sqrt{I} = \frac{\sqrt{W} \cos \alpha_0}{r}, \quad (11)$$

将 (11) 式和 (3) 式代入 (1) 式并求偏导数得

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} &= -\frac{\sqrt{W} \cos \alpha_0}{r^2} \cdot e^{-jk_0 \varphi(r, z)} \\ &\quad + \frac{\sqrt{W} \cos \alpha_0}{r} \cdot (-jk_0 \cos \alpha_0) \\ &\quad \times e^{-jk_0 \varphi(r, z)}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(r, z)}{\partial z} &= \frac{\sqrt{W} \cos \alpha_0}{r} \cdot (-jk_0) \\ &\quad \times \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_0} \cdot e^{-jk_0 \varphi(r, z)} \\ &= -jk_0 \sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_0} \cdot P(r, z), \end{aligned} \quad (13)$$

其中在远距离情况下 (12) 式中等号右边第一项远小于第二项, 于是

$$\begin{aligned} \frac{\partial P(r, z)}{\partial r} &\approx \frac{\sqrt{W} \cos \alpha_0}{r} \cdot (-jk_0) \cdot \cos \alpha_0 \\ &\quad \times e^{-jk_0 \varphi(r, z)} \\ &= -jk_0 \cos \alpha_0 \cdot P(r, z), \end{aligned} \quad (14)$$

用 α 表示接收点 (r, z) 处的声线掠射角, 根据 Snell 定律可得

$$\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \alpha_0} = \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \cdot \sin \alpha, \quad (15)$$

所以 (13) 式可以写为

$$\frac{\partial P(r, z)}{\partial z} = -jk_0 \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \sin \alpha \cdot P(r, z). \quad (16)$$

如果声速梯度较小, 声线的起始掠射角 α_0 与到达接收点处的掠射角 α 近似相等, 于是 (14) 式和 (16) 式可以写为:

$$\frac{\partial P(r, z)}{\partial r} \approx -jk_0 \cos \alpha \cdot P(r, z), \quad (17)$$

$$\frac{\partial P(r, z)}{\partial z} \approx -jk_0 \sin \alpha \cdot P(r, z). \quad (18)$$

将 (17) 式和 (18) 式代入 (8) 式和 (9) 式可得:

$$V_r(r, z) = -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial P(r, z)}{\partial r}$$

$$\approx \frac{k_0}{\rho\omega} \cos \alpha \cdot P(r, z), \quad (19)$$

$$V_z(r, z) = -\frac{1}{j\rho\omega} \frac{\partial P(r, z)}{\partial z} \approx \frac{k_0}{\rho\omega} \sin \alpha \cdot P(r, z). \quad (20)$$

在分析声场传播损失时, 通常将自由空间中距离声源中心 1 m 处的值作为参考值, 所以声压传播损失的参考值为 $P_{\text{ref}} = \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi} \Big|_{r=1}$. 文献 [21] 在讨论质点振速传播损失时指出, 质点振速传播损失的参考值为 $V_{\text{ref}} = \frac{k_0}{\rho\omega} \cdot \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi} \Big|_{r=1}$. 所以, 如果 (19) 式和 (20) 式中的 $P(r, z)$ 为归一化声压, 相应地, 归一化质点水平振速和垂直振速分别为

$$V_r(r, z) \approx \cos \alpha \cdot P(r, z), \quad (21)$$

$$V_z(r, z) \approx \sin \alpha \cdot P(r, z). \quad (22)$$

一般情况下, 会有多条声线到达接收点, 设第 i 条本征声线在接收点 (r, z) 处的声压、水平振速和垂直振速分别为:

$$P_i(r, z) = A_i(r, z) e^{-jk_0 \varphi_i(r, z)}, \quad (23)$$

$$V_{ri}(r, z) \approx \cos \alpha_i \cdot P_i(r, z), \quad (24)$$

$$V_{zi}(r, z) \approx \sin \alpha_i \cdot P_i(r, z), \quad (25)$$

其中 $|A_i|$ 和 $\varphi_i(r, z)$ 分别为第 i 条声线的声压幅度和程函, 海面和海底边界的声压反射系数包含在 A_i 内, α_i 为第 i 条声线到达接收点的掠射角. 设第 i 条声线的传播时间为 t_i , 声源频率为 f , 则 $k_0 \varphi_i(r, z) \equiv 2\pi f t_i$. 考虑各条声线相干叠加, 则接收点处的总声压为:

$$P(r, z, f) = \sum_{i=1}^{N(r, z)} P_i(r, z, f) = \sum_{i=1}^{N(r, z)} A_i(r, z, f) e^{-j2\pi f t_i}, \quad (26)$$

$$V_r(r, z, f) \approx \sum_{i=1}^{N(r, z)} \cos \alpha_i \cdot P_i(r, z, f) = \sum_{i=1}^{N(r, z)} \cos \alpha_i \cdot A_i(r, z, f) e^{-j2\pi f t_i}, \quad (27)$$

$$V_z(r, z, f) \approx \sum_{i=1}^{N(r, z)} \sin \alpha_i \cdot P_i(r, z, f)$$

$$= \sum_{i=1}^{N(r, z)} \sin \alpha_i \cdot A_i(r, z, f) e^{-j2\pi f t_i}, \quad (28)$$

其中 $N(r, z)$ 为到达 (r, z) 处的本征声线数.

2.2 基于射线模型的复声强

声强是指通过垂直于声传播方向上单位面积的平均声能流. 文献 [22] 利用简正波理论对 Pekeris 波导中的复声强进行了详细分析, 指出当接收传感器置于适当的位置时, 可以利用复声强对甚低频声源的深度进行分类. 这里基于射线模型给出复声强的理论表达式.

设接收点处的声压和质点振速分别为 $p(r, z, t)$ 和 $\mathbf{v}(r, z, t)$, 则声强可以表示为

$$\mathbf{I}(r, z, t) = \langle p(r, z, t) \mathbf{v}(r, z, t) \rangle, \quad (29)$$

其中 $\langle \rangle$ 表示对时间平均.

利用 Fourier 变换可以得到复声强

$$\mathbf{I}_c(r, z, f) = P(r, z, f) \mathbf{V}^*(r, z, f), \quad (30)$$

其中 $*$ 表示复共轭, $P(r, z, f)$ 和 $\mathbf{V}(r, z, f)$ 分别表示 $p(r, z, t)$ 和 $\mathbf{v}(r, z, t)$ 的 Fourier 变换.

将 (26) 式—(28) 式代入 (30) 式可得复声强的水平分量和垂直分量分别为:

$$I_r(r, z, f) = P(r, z, f) V_r^*(r, z, f) \approx \sum_{i=1}^{N(r, z)} \cos \alpha_i |A_i|^2 + \sum_{l=1}^{N(r, z)} \sum_{k \neq l} \cos \alpha_l A_k A_l^* \times e^{-j2\pi f(t_k - t_l)}, \quad (31)$$

$$I_z(r, z, f) = P(r, z, f) V_z^*(r, z, f) \approx \sum_{i=1}^{N(r, z)} \sin \alpha_i |A_i|^2 + \sum_{l=1}^{N(r, z)} \sum_{k \neq l} \sin \alpha_l A_k A_l^* \times e^{-j2\pi f(t_k - t_l)}. \quad (32)$$

3 大深度接收时深海直达波区的复声强

在典型的深海水声应用中, 声源一般处于海水表层. 在深海环境下, 位于海水表层的声源产生的声场在空间中可以划分为直达波区、声影区和会聚区. 直达波区指能接收到未经海底反射或未经海底附近反转的声线的近场区域.

图1是某深海海域的声速剖面, 图2给出了在图1所示的深海环境下声源位于海表面附近(140 m)时产生的声场在空间中的划分. 从图2中可以看出, 接收器能接收到直达波的水平距离范围与接收器所处的深度有关, 接收器深度越大, 能接收到直达波的水平距离范围越大.

在直达波区, 大深度接收器接收到的主要声线如图3所示. 其中图3中声源深度为140 m, 接收器深度为3146 m, 接收器与声源之间的水平距离为5.1 km. 从图中可以看出, 接收器接收到的声线有: 直达声线和海面反射声线(在图3中标为①)、海底反射声线和海面-海底反射声线(在图3中标为②)、海底-海面反射声线和海面-海底-海面反射声线(图3中标为③), 经过多次海面和海底反射的声线未在图中给出.

如果仅考虑第①组声线, 则由(31)式和(32)式可得复声强的水平分量和垂直分量分别为:

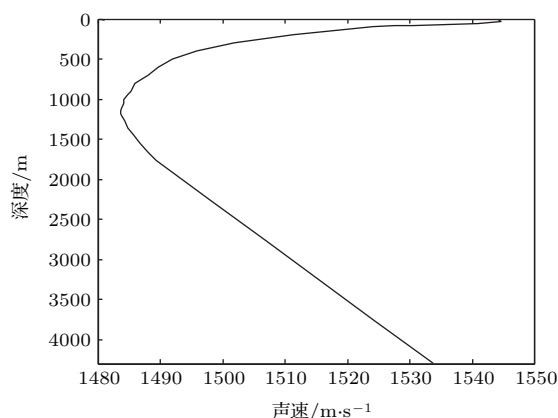


图1 某深海海域声速剖面

Fig. 1. Sound speed profile of a deep ocean area.

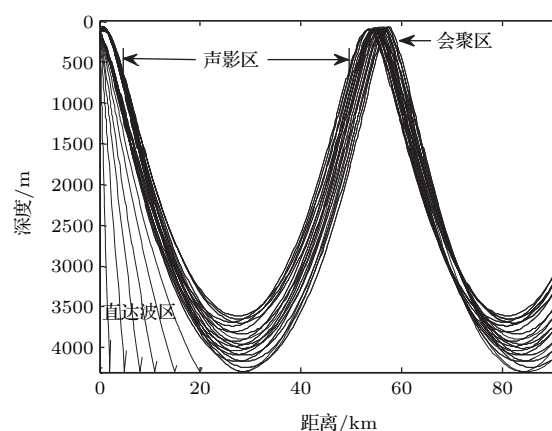


图2 深海声场区域划分

Fig. 2. Space division of sound field in deep water.

$$I_{1r}(r, z, f) \approx \cos \alpha_1 \cdot |A_1|^2 + \cos \alpha_2 \cdot |A_2|^2 + \cos \alpha_1 \cdot A_1^* A_2 e^{j2\pi f(t_1 - t_2)} + \cos \alpha_2 \cdot A_1 A_2^* e^{-j2\pi f(t_1 - t_2)}, \quad (33)$$

$$I_{1z}(r, z, f) \approx \sin \alpha_1 \cdot |A_1|^2 + \sin \alpha_2 \cdot |A_2|^2 + \sin \alpha_1 \cdot A_1^* A_2 e^{j2\pi f(t_1 - t_2)} + \sin \alpha_2 \cdot A_1 A_2^* e^{-j2\pi f(t_1 - t_2)}, \quad (34)$$

其中 $I_{1r}(r, z, f)$ 和 $I_{1z}(r, z, f)$ 表示图3中所示的第①组声线的复声强水平分量和垂直分量, α_1 和 α_2 分别为直达声线和海面反射声线到达接收点的掠射角, $|A_1|$ 和 $|A_2|$ 分别为直达声线和海面反射声线在接收点处的声压幅度, t_1 和 t_2 分别为直达声线和海面反射声线的传播时间.

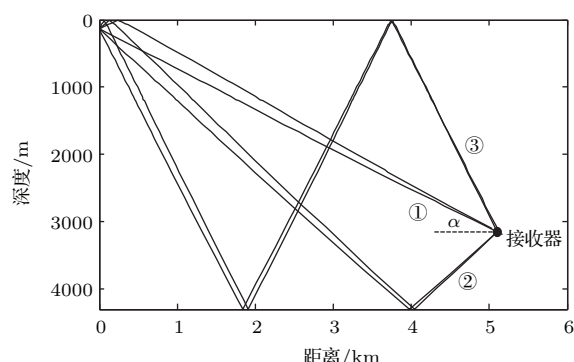


图3 直达波区接收器接收到的主要声线

Fig. 3. Main sound rays received by the receiver in the direct-arrival zone.

当声源位于海水表层而接收器位于较大深度时, α_1 和 α_2 之间的差别较小, 海面反射波和直达波的幅度近似相等, 同时由于海面的声压反射系数为 -1 , A_2 与 A_1 之间的关系满足 $A_2 \approx -A_1$, 取 $\alpha_{1,2} = (\alpha_1 + \alpha_2)/2$, 并用 $A_{1,2}$ 代替 A_1 和 $-A_2$, 则有

$$I_{1r}(r, z, f) \approx \cos \alpha_{1,2} \cdot |A_{1,2}|^2 \cdot \{2 - 2 \cos[2\pi f(t_1 - t_2)]\}, \quad (35)$$

$$I_{1z}(r, z, f) \approx \sin \alpha_{1,2} \cdot |A_{1,2}|^2 \cdot \{2 - 2 \cos[2\pi f(t_1 - t_2)]\}. \quad (36)$$

由(35)式和(36)式可得

$$\alpha_{1,2} \approx \arctan \left(\frac{I_{1z}(r, z, f)}{I_{1r}(r, z, f)} \right). \quad (37)$$

从(37)式可以看出, 利用图3中所示的第①组声线的复声强垂直分量和水平分量的比值可以估计直达声线和海面反射声线到达接收点的掠射角.

类似地,

$$\alpha_{3,4} \approx \arctan \left(\frac{I_{2z}(r, z, f)}{I_{2r}(r, z, f)} \right), \quad (38)$$

$$\alpha_{5,6} \approx \arctan \left(\frac{I_{3z}(r, z, f)}{I_{3r}(r, z, f)} \right), \quad (39)$$

其中 $I_{2r}(r, z, f)$ 和 $I_{2z}(r, z, f)$ 表示图 3 中所示的第②组声线的复声强水平分量和垂直分量, $\alpha_{3,4}$ 表示海底反射声线和海面-海底反射声线到达接收点的掠射角均值, (38) 式表示利用图 3 中所示的第②组声线的复声强垂直分量和水平分量的比值可以估计海底反射声线和海面-海底反射声线到达接收点的掠射角. $I_{3r}(r, z, f)$ 和 $I_{3z}(r, z, f)$ 表示图 3 中所示的第③组声线的复声强水平分量和垂直分量, $\alpha_{5,6}$ 表示海底-海面反射声线与海面-海底-海面反射声线到达接收点的掠射角均值, (39) 式表示利用图 3 中所示的第③组声线的复声强垂直分量和水平分量的比值可以估计海底-海面反射声线与海面-海底-海面反射声线到达接收点的掠射角.

如果考虑到达接收点的所有本征声线, 则复声强水平分量和垂直分量分别由 (31) 式和 (32) 式表示, 式中“+”号后的项随频率快速振荡, 经过一定带宽平均后, 该项将近似为 0. 不考虑声源频谱随频率的变化, 则

$$I_r(r, z) \approx \frac{1}{\Delta f} \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} \sum_{i=1}^{N(r,z)} \cos \alpha_i |A_i|^2 df, \quad (40)$$

$$I_z(r, z) \approx \frac{1}{\Delta f} \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} \sum_{i=1}^{N(r,z)} \sin \alpha_i |A_i|^2 df. \quad (41)$$

在深海直达波区, 处于较大深度的接收器能接收到图 3 中所示的三组声线以及经过多次海底和海面反射的声线, 由于海底的吸收作用, 经过海底反射的声线幅度衰减较大, 因此在直达波区, 声场主要由直达波与海面反射波构成, 其总声场的复声强可以近似表示为

$$I_r(r, z) \approx 2 \cos \alpha_{1,2} \frac{1}{\Delta f} \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} |A_{1,2}|^2 df, \quad (42)$$

$$I_z(r, z) \approx 2 \sin \alpha_{1,2} \frac{1}{\Delta f} \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} |A_{1,2}|^2 df. \quad (43)$$

由 (42) 式和 (43) 式可得

$$\arctan \left(\frac{I_z(r, z)}{I_r(r, z)} \right) \approx \alpha_{1,2}. \quad (44)$$

可以看出, 在深海直达波区利用大深度接收器接收的总声场的复声强根据 (44) 式估计的角度近似等

于直达声线和海面反射声线到达接收点的掠射角.

4 仿真分析

本节通过仿真研究大深度接收时深海直达波区复声强在估计声线到达角方面的特点. 仿真采用图 1 所示的深海声速剖面, 其中海底参数设置如下: 声速 1600 m/s, 密度 1.8 g/cm³, 吸收系数 0.5 dB/λ. 仿真时设声源深度为 140 m, 接收深度为 3146 m. 图 4 给出了频率为 150 Hz 收发距离为 5.1 km 时的声线到达结构, 其中图中标记的①, ②, ③组声线与图 3 中的三组声线对应. 从图 4 可以看出, 海面反射波与直达波幅度近似相等, 海底反射波和海面-海底反射波幅度比直达波幅度低得多, 经计算可得海底反射波的能量比直达波能量低约 10 dB, 经过多次海面和海底反射的声线能量更低. 因此, 在深海直达波区, 声场主要由直达波和海面反射波构成.

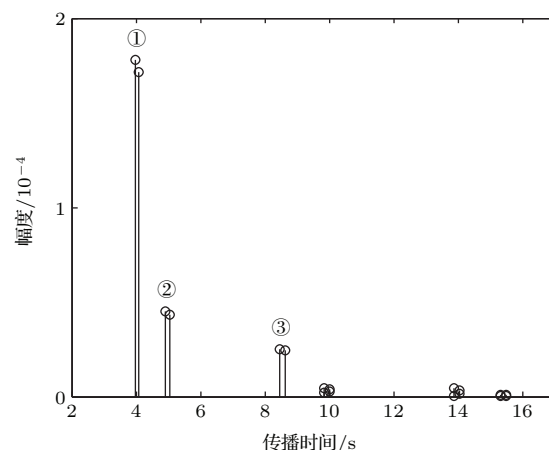


图 4 声线到达时间和幅度, 其中声源深度为 140 m, 接收器深度为 3146 m, 接收器与声源之间的水平距离为 5.1 km, 声源频率为 150 Hz

Fig. 4. The arrival time and amplitude of each ray, where the source depth is 140 m, the receiver depth is 3146 m, the horizontal range between source and receiver is 5.1 km, and the source frequency is 150 Hz.

设声源频率为 100—200 Hz, 图 5 给出了不同收发水平距离时利用复声强估计的声线到达角与声线到达接收点的掠射角理论值的对比. 其中图 5(a)—图 5(c) 分别是利用图 3 中所示的三组声线得到的结果, 图中黑实线是利用射线声场计算程序 Bellhop 得到的声线到达接收点的掠射角, 红虚线是利用各组声线的复声强水平分量和垂直分量根据 (37) 式—(39) 式估计的声线到达角, 可以看出, 利用复声强估计的声线到达角与声线到达接收

点的掠射角理论值基本相等,与上一节的理论分析一致.图5(d)中黑实线是直达波和海面反射波到达接收点的掠射角均值,红点是利用图3中三组声线构成的总声场的复声强根据(44)式估计的角度,可以看出,由于海底反射波的作用,根据(44)式利用复声强估计的角度略低于直达波和海面反射波到达接收点的掠射角均值,但二者随距离的变化趋势基本一致,因此在深海直达波区可以利用总声场的复声强估计直达波和海面反射波到达接收点的掠射角.

实际情况下,实验过程中矢量水听器测量的信号中除目标信号外,还包含一定的背景噪声,这里分析信噪比对利用复声强估计声线到达角的影响.由于在直达波区声场主要由直达波和海面反射波构成,因此这里只考虑接收数据中直达波和海面反射波信号的信噪比对估计声线到达角的影响.

设信噪比定义为

$$\text{SNR}_i = 10 \lg \frac{S_i}{\sigma_i^2}, \quad i = p, v_r, v_z, \quad (45)$$

其中, S_i 与 σ_i^2 分别为接收信号中声压、水平振速、垂直振速在一定带宽内的信号功率和噪声功率.

设声线的真实到达角为 α , 一定信噪比下估计的声线到达角为 α_k , 则估计的声线到达角的均方差用下式表示

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{k=1}^M (\alpha_k - \alpha)^2}, \quad (46)$$

其中 M 为统计次数.

采用与图5中结果相同的仿真环境,设声源距离为5 km,此时,到达接收点处的直达波与海面反射波的掠射角约为 31.3° . 设背景噪声是零均值的高斯白噪声,且设声压、水平振速、垂直振速的信噪比相同,图6给出了不同信噪比下利用复声强估计的声线到达角的均方差.从图6可以看出,信噪比对利用复声强估计声线到达角有较大影响,当信噪比较低时,随着信噪比降低,估计的声线到达角的均方差快速增大.

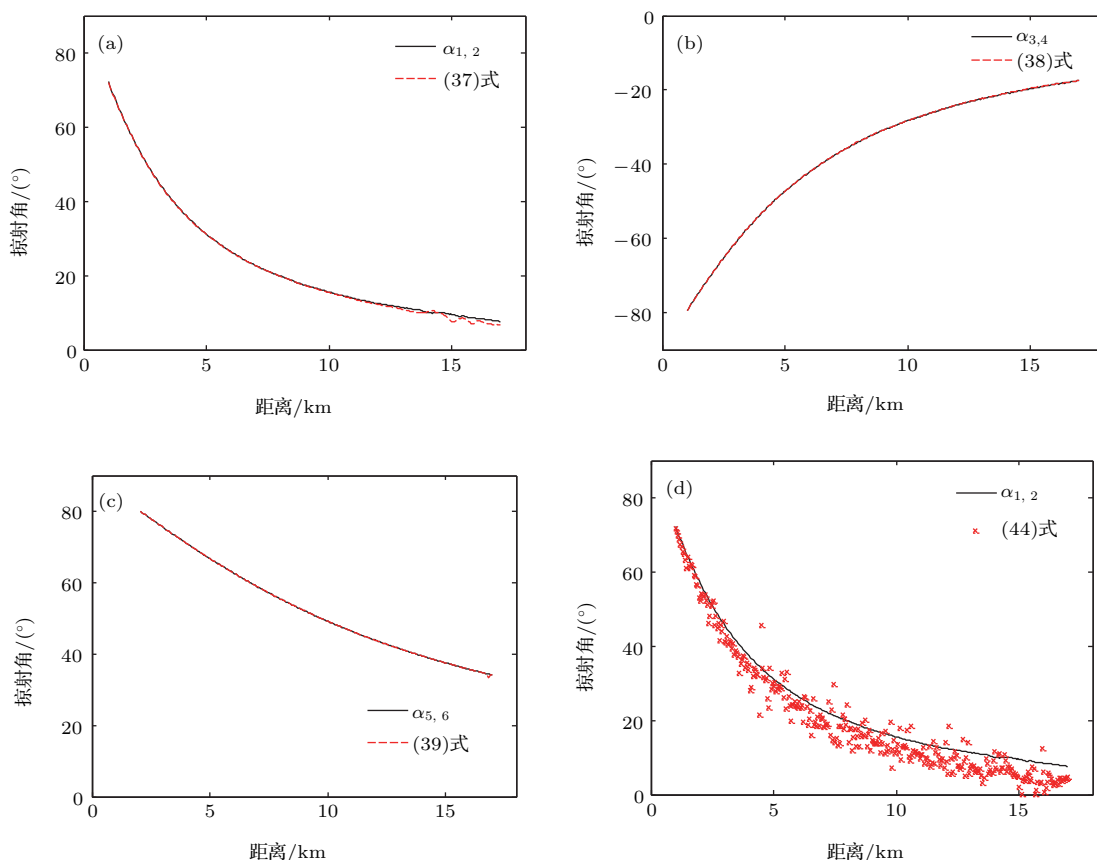


图5 利用复声强估计的声线到达角与声线到达角理论值的对比,其中(a)图是第①组声线的结果,(b)图是第②组声线的结果,(c)图是第③组声线的结果,(d)图是由①,②,③组声线构成的总声场的结果

Fig. 5. Comparison between the arrival angles estimated by the complex sound intensity and the theoretical arrival angles, where figures (a), (b), (c) and (d) are the results obtained with the rays denoted by ①, ②, ③ and the total field made up of the three groups of rays, respectively.

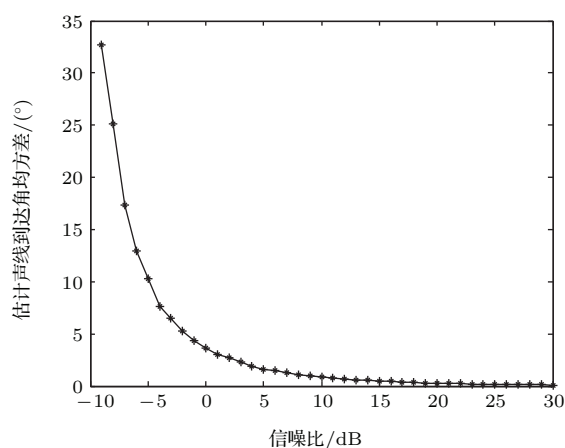


图6 信噪比对估计声线到达角的影响

Fig. 6. Influence of the signal-to-noise ratio on the estimation of the sound ray arrival angle.

5 实验数据

2014年夏季,中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室、哈尔滨工程大学等单位在某深海海域进行了一次综合性水声考察实验,实验海域的声速剖面如图1所示,平均海深约为4298 m,且实验海域海底较平坦.图7是发射船航线及接收器布放位置示意图,矢量水听器布放在图中 A_0 点3146 m深处接收实验信号.实验期间,发射船先沿 A_2 至 A_0 航线航行,再沿 A_0 至 A_1 航线航行,航速约3节,航行过程中拖曳换能器发射双曲调频信号,发射信号中心频率为900 Hz,带宽200 Hz,时长为20 s,间隔130 s发射一次,发射信号声源级为185 dB,拖曳换能器深度约为140 m.

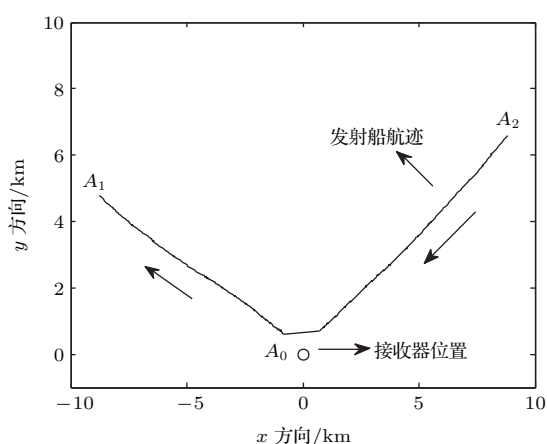


图7 实验船航线及接收器位置示意图

Fig. 7. Sketch of the track of the research ship and the receiver location.

在该实验环境下,矢量水听器在水平距离17 km范围内能接收到拖曳声源的直达声信号.

图8给出了实验中 A_2 - A_0 航线上收发水平距离为5.1 km时矢量水听器接收的信号经脉冲压缩后的归一化波形,图中 $p(t)$ 和 $v_x(t)$, $v_y(t)$, $v_z(t)$ 分别是声压和质点振速的三个分量.图8中在横坐标约2 s处的脉冲由直达波和海面反射波构成,在横坐标约3 s处的脉冲由海底反射波和海面-海底反射波构成,在 $p(t)$ 和 $v_z(t)$ 的波形中横坐标约6.5 s处的脉冲由海底-海面反射波和海面-海底-海面反射波构成.从图8中可以看出,经过海底反射以及多次海底和海面反射的声信号能量较低,直达波和海面反射波对直达波区声场起主要贡献.

图9给出了 A_2 - A_0 航线不同距离上接收信号经脉冲压缩后由直达波和海面反射波构成的脉冲的信噪比,可以看出,在不同距离上矢量水听器各通道大部分信号均有较高的信噪比. A_0 - A_1 航线上矢量水听器接收信号的信噪比与 A_2 - A_0 航线上的结果基本相同.

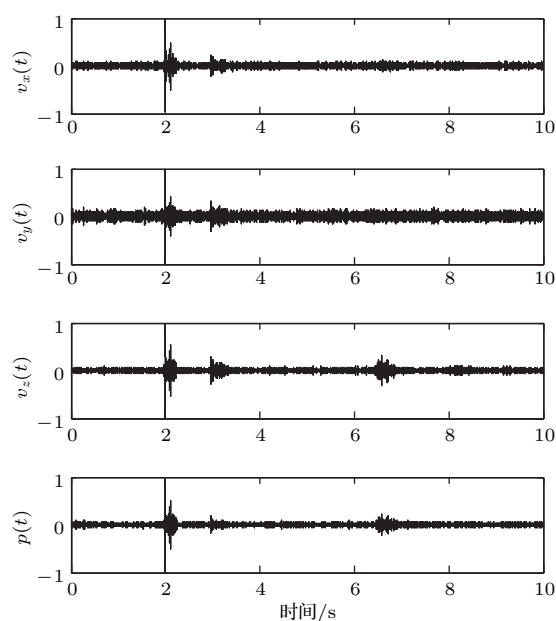


图8 收发距离为5.1 km时矢量水听器接收的经脉冲压缩后的声压和质点振速分量

Fig. 8. Pulse-compressed signals of pressure and particle velocities received by the vector sensor when the source-receiver range is 5.1 km.

利用矢量水听器测量数据中的直达波和海面反射波信号根据(37)式估计声线到达矢量水听器的掠射角,结果如图10和图11中圆圈所示,图中横坐标是接收矢量水听器与声源之间的水平距离,实线是在实验环境下直达波和海面反射波到达接收矢量水听器处的掠射角均值的理论结果,可以看出,由矢量水听器测量信号估计的声线到达角与

理论结果基本一致. 从图 10 和图 11 中还可以看出, 远距离处利用复声强估计的声线到达角与理论值

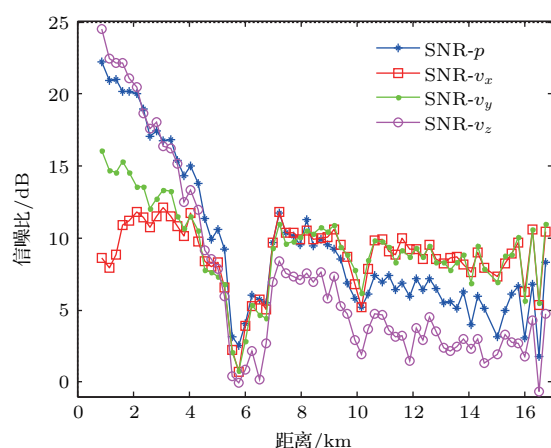


图 9 A_2-A_0 航线不同距离上接收信号经脉冲压缩后的信噪比

Fig. 9. Signal-to-noise ratios of the pulse-compressed signals at different ranges along the propagation track A_2-A_0 .

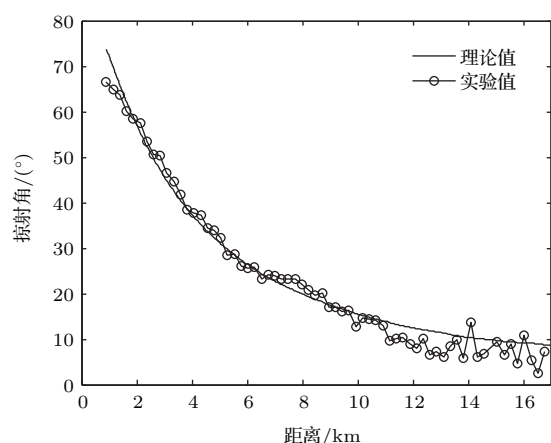


图 10 A_2-A_0 航线不同距离上声线到达角估计结果

Fig. 10. Estimated arrival angles of sound rays along the propagation track A_2-A_0 .

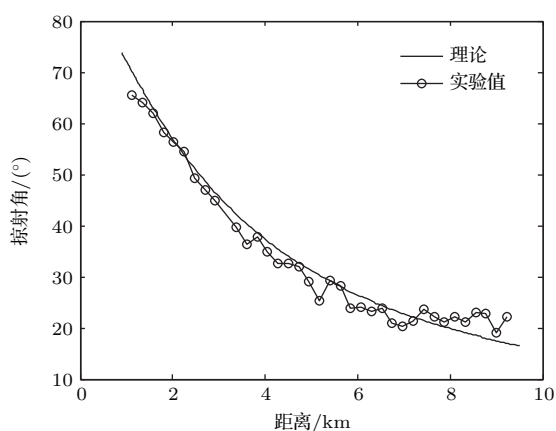


图 11 A_0-A_1 航线不同距离上声线到达角估计结果

Fig. 11. Estimated arrival angles of sound rays along the propagation track A_0-A_1 .

的误差变大, 这一方面是由于随着距离增大接收信号中垂直振速的信噪比降低引起的, 另一方面, 实验期间矢量水听器姿态变化导致的信号测量误差对远距离处声线到达角估计结果也有较大影响. 实验过程中, 矢量水听器的俯仰角度约为 22° , 这种姿态变化对矢量水听器实际测量的质点振速分量有一定的影响, 尤其是在远距离处, 声线到达接收器处的掠射角较小, 质点垂直振速比水平振速小得多, 而矢量水听器的俯仰则会导致实际测量的垂直振速数据中包含水平振速分量, 进一步会影响声线到达角估计结果. 虽然在进行声线到达角估计前, 已根据矢量水听器俯仰角度对测量数据进行了处理, 但仍难以消除矢量水听器姿态变化对声线到达角估计结果的影响. 同时由于两条航线相对于矢量水听器的方位不同, 矢量水听器的俯仰对测量结果的影响也不同, 所以图 10 和图 11 中两条航线上声线到达角估计误差随距离的变化也不同. 图 9 给出的信噪比是根据矢量水听器的俯仰角对测量数据进行处理后各通道信号的信噪比. 实验接收信号中的海底反射波和海面-海底反射波以及海底-海面反射波和海面-海底-海面反射波则由于信噪比等原因未能得到较好的声线到达角估计结果.

6 结 论

本文根据射线模型, 分析了大深度接收时深海直达波区的复声强特性, 研究表明在直达波区利用接收信号的复声强垂直分量和水平分量的比值可以估计声线到达大深度接收器的掠射角. 利用 2014 年深海实验中位于 3146 m 深处的矢量水听器测量的直达波和海面反射波信号的复声强估计的声线到达角与直达声线和海面反射声线的到达角理论值基本一致, 为进一步在深海利用矢量声信号开展目标探测等应用研究提供了理论基础.

感谢参加海上实验的全体工作人员. 感谢哈尔滨工程大学朴胜春教授提供的 2014 年深海综合考察实验矢量水听器数据.

参考文献

- [1] Urick R J, Lund G R 1968 *J. Acoust. Soc. Am.* **43** 723
- [2] Yang T C 1987 *J. Acoust. Soc. Am.* **82** 1736
- [3] Tappert F D, Spiesberger J L, Wolfson M A 2002 *J. Acoust. Soc. Am.* **111** 757

- [4] Li Q Q, Li Z L, Zhang R H 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 034303
- [5] Qin J X, Zhang R H, Luo W Y, Peng Z H, Liu J J, Wang D J 2014 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **57** 1031
- [6] Li W, Li Z L, Zhang R H, Qin J X, Li J, Nan M X 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 064302
- [7] Li J, Li Z L, Ren Y, Li W, Zhang R H 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 064303
- [8] Gaul R D, Knobles D P, Shooter J A, Wittenborn A F 2007 *IEEE J. Oceanic Eng.* **32** 497
- [9] Urick R J 1983 *Principles of Underwater Sound* (3rd Ed.) (New York: McGraw-Hill)
- [10] Baggeroer A B, Scheer E K, Heaney K, Spain G D, Worcester P, Dzieciuch M 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 2385
- [11] Heaney K D, Campbell R C, Baggeroer A B, Spain G D, Worcester P, Dzieciuch M A 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 2386
- [12] Westwood E K 1992 *J. Acoust. Soc. Am.* **91** 2777
- [13] McCargar R K, Zurk L M 2012 *J. Acoust. Soc. Am.* **132** 2081
- [14] McCargar R, Zurk L M 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** EL320
- [15] Zurk L M, Boyle J K, Shibley J 2013 *Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers* New York, America, November 3–6, 2013 p2130
- [16] Kniffin G P, Boyle J K, Zurk L M, Siderius M 2016 *J. Acoust. Soc. Am.* **139** 418
- [17] Duan R, Yang K D, Ma Y L, Lei B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 124301
- [18] Duan R, Yang K, Ma Y, Yang Q, Li H 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** EL159
- [19] Sun G Q, Yang D S, Zhang L Y, Shi S G 2003 *Acta Acustica* **28** 66 (in Chinese) [孙贵青, 杨德森, 张揽月, 时胜国 2003 声学学报 **28** 66]
- [20] Liu B S, Lei J Y 2002 *Principles of Underwater Acoustics* (Harbin: Harbin Engineering University Press) pp101–116 (in Chinese) [刘伯胜, 雷家煜 2002 水声学原理 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第101—116页]
- [21] Peng H S 2007 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Graduate University, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [彭汉书 2007 博士学位论文 (北京: 中国科学院研究生院)]
- [22] Yu Y, Hui J Y, Zhao A B, Sun G C, Teng C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5742 (in Chinese) [余赞, 惠俊英, 赵安邦, 孙国仓, 滕超 2008 物理学报 **57** 5742]

Complex acoustic intensity with deep receiver in the direct-arrival zone in deep water and sound-ray-arrival-angle estimation*

Sun Mei^{1)2)†} Zhou Shi-Hong²⁾

1) (School of Physics and Electronic Engineering, Taishan University, Taian 271000, China)

2) (State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 16 March 2016; revised manuscript received 13 June 2016)

Abstract

In the direct-arrival zone in deep water, the sound ray arrival angle is one of the most important properties of the sound field. However, it is complicated to estimate the arrival angle only by using the information about the sound pressure. Vector sensors have significant advantages in direction-of-arrival estimation, and the acoustic energy flux detection is one of the most important estimation methods. In this paper, the properties of complex acoustic intensity in the direct-arrival zone in deep water are analyzed, and the arrival angles of sound rays are estimated with the complex acoustic intensity extracted from the experimental data. Firstly, the expressions of horizontal particle velocity, vertical particle velocity and complex sound intensity are provided based on the ray theory. It is shown that the amplitudes of the horizontal and vertical particle velocities and the components of the complex sound intensity are closely related to the sound ray arrival angle. The larger the sound ray arrival angle, the greater the vertical particle velocity and the vertical component of the complex sound intensity are, but the weaker the horizontal particle velocity and the horizontal component of the complex sound intensity are. Secondly, for the direct-arrival zone of the sound field generated by a shallow source in deep water, the properties of the complex sound intensity with deep receiver are analyzed based on the sound ray arrival structure. The theoretical and simulation results show that the arrival angles of the sound rays can be estimated with the complex sound intensities of pulses received by a deep receiver. The mean arrival angles of the direct ray and the surface-reflected ray can be estimated with the complex sound intensities of the pulses of the direct-arrival wave and the surface-reflected wave. The mean arrival angles of the bottom-reflected ray and the surface-reflected-bottom-reflected ray can be estimated with the complex sound intensities of the pulses of the bottom-reflected wave and the surface-reflected-bottom-reflected wave. The angle obtained with the complex sound intensity of the total field comprised of all sound rays is approximately equal to the mean arrival angles of the direct ray and the surfaced-reflected ray. Thirdly, the validity of the arrival angle estimation with the complex sound intensity is verified by the experimental data. During a deep water experiment conducted in 2014, a vector sensor was placed at a depth of 3146 m to receive the experimental signals. Within the range of 17 km, the vector sensor received the direct ray from the sound source towed at about 140 m. By using the pulses of the direct-arrival wave and the surface-reflected wave received by the vector sensor, the mean arrival angles of the direct rays and the surface-reflected rays are estimated. It is shown that the estimated arrival angles are consistent with the theoretical results.

Keywords: direct-arrival zone in deep water, deep receiver, complex sound intensity, sound ray arrival angle

PACS: 43.30.+m, 43.60.+d, 43.58.+z

DOI: 10.7498/aps.65.164302

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11434012, 41561144006), the Foundation of State Key Laboratory of Acoustics, China (Grant No. SKLA201602), and the Scientific Research Foundation of Taishan University, China (Grant No. Y-01-2013009).

† Corresponding author. E-mail: sunmei@mail.ioa.ac.cn