

基于矢量水听器的深海直达波区域声传播特性及其应用

孙梅 周士弘 李整林

Analysis of sound propagation in the direct-arrival zone in deep water with a vector sensor and its application

Sun Mei Zhou Shi-Hong Li Zheng-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 094302 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094302

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094302>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

基于水声信道传播时延排序的分层空时信号检测

Ordered detection of layered space-time signals based on the propagation delays of underwater acoustic channels

物理学报.2015, 64(16): 164302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164302>

矢量拖线阵水听器流噪声响应特性

Flow-induced noise calculations for vector hydrophones in towed arrays

物理学报.2015, 64(15): 154306 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154306>

# 基于矢量水听器的深海直达波区域声传播特性及其应用\*

孙梅<sup>1)2)†</sup> 周士弘<sup>1)</sup> 李整林<sup>1)</sup>

1)(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)

2)(泰山学院物理与电子工程学院, 泰安 271000)

(2015年11月9日收到; 2016年1月18日收到修改稿)

对于深海近水面声源产生的声场, 处于较大深度处的接收器在一定水平距离范围内能接收到直达波. 2014年在某深海海域进行的水声考察实验中, 应用深度为140 m的拖曳声源发射实验信号, 布放在水下3146 m深处的矢量水听器成功地接收到了直达波信号. 本文应用射线理论, 分析了深海直达波区域声场的传播特性, 得出了水平振速与垂直振速的传播损失与声线到达接收点处的掠射角以及收发水平距离之间的关系. 在以上分析的基础上, 提出了一种利用水平振速与垂直振速的能量差估计声源距离的方法, 并结合2014年实验数据对实验中两条航线上8 km范围内的目标声源进行了测距, 测距结果与目标的GPS数据符合得较好.

**关键词:** 矢量水听器, 深海直达波区域, 传播特性, 距离估计

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

**DOI:** 10.7498/aps.65.094302

## 1 引言

矢量水听器能同时测量声场中的声压信号和质点振速信号, 是一种重要的水声传感器. 在浅海中, 基于矢量水听器测量信号的声场理论及其应用得到了较为系统的研究. 文献[1]分析了浅海声场中声压、质点水平振速和垂直振速的传播特性, 结果表明低号简正波对声压和质点水平振速起主要贡献, 而高号简正波对质点垂直振速的贡献更大. 文献[2]对 Pekeris 波导中简正波的复声强进行了分析, 指出由于简正波之间的相互干涉, 总声场的复声强既有有功分量, 也有无功分量, 当接收传感器置于适当位置时, 通过与一临界深度比较, 可以利用复声强无功分量对甚低频目标的深度进行分类. 文献[3, 4]的研究表明利用声能流密度检测可以通过时间累加获得较好的时间增益. 文献[5]分析了

浅海声场中质点水平振速与垂直振速的相关特性, 指出二者的零延时相关系数近似为零, 并在此基础上提出了一种校正矢量水听器俯仰姿态的方法. 文献[6—8]利用矢量水听器测量信号进行海底地声参数反演, 结果表明利用声压与质点振速的联合信息进行海底地声参数反演能提高反演结果分辨率. 除以上方面外, 矢量水听器还广泛应用于达波方向估计[9—11]、声源定位[12—14]及多目标分辨等[15]领域.

但是, 矢量水听器在深海声场特性及其应用方面的研究相对较少, 而基于声场矢量信号的深海目标探测也是一种重要的技术手段. 在2014年进行的一次深海实验中, 用布放在3146 m深度处的矢量水听器成功地获取了深海直达波区域内的声压信号和质点振速信号. 本文重点分析了深海直达波区域声场传播特性, 并在此基础上提出了一种声源

\* 国家自然科学基金(批准号: 11434012, 41561144006)、山东省高等学校科技计划项目(批准号: J12LJ56)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

距离估计方法, 并利用实验数据进行了验证.

## 2 深海直达波区域的声传播特性

### 2.1 深海直达波区域的声场

在典型的深海水声应用中, 声源一般会处于海水表层. 在深海环境下, 位于海面附近的声源产生的声场在空间中可以划分为直达波区域、声影区和会聚区, 直达波区域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和海底参数, 在该环境下, 设声源位于 140 m 深度处, 图 2 给出了频率为 100—200 Hz 时信号能量非相干叠加的二维传播损失. 从图 2 中可以看到该声源产生的声场的直达波区域, 且从图 2 中还可以看出, 直达波区域对应的水平距离范围随深度增大而增大.

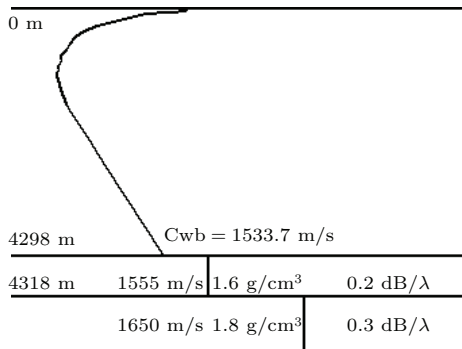


图 1 某深海海洋环境

Fig. 1. Sound speed profile and bottom parameters of a deep-water area.

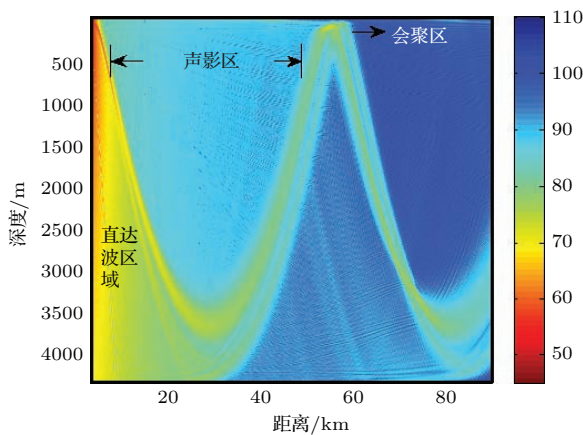


图 2 (网刊彩色) 深海二维声传播损失

Fig. 2. (color online) Transmission loss in deep water.

在直达波区域, 接收器接收到的本征声线有: 直达声线、海面反射声线、海底反射声线以及经过

多次海面 and 海底反射的声线. 对图 1 所示的海洋环境, 设声源深度为 140 m, 接收器深度为 3146 m, 收发距离为 5.1 km 时到达接收器的直达声线、海面反射声线、海底反射声线及海面-海底反射声线如图 3(a) 所示. 图 3(b) 给出了图 3(a) 中各条声线的到达时间和幅度, 可以看出海面反射波与直达波幅度近似相等, 而海底反射波和海面-海底反射波幅度明显低于直达波和海面反射波幅度. 经计算可得海底反射波能量比直达波能量低约 10 dB, 经过多次海底反射的声线能量则更低. 所以, 在直达波区域, 声场主要由直达波和海面反射波构成.

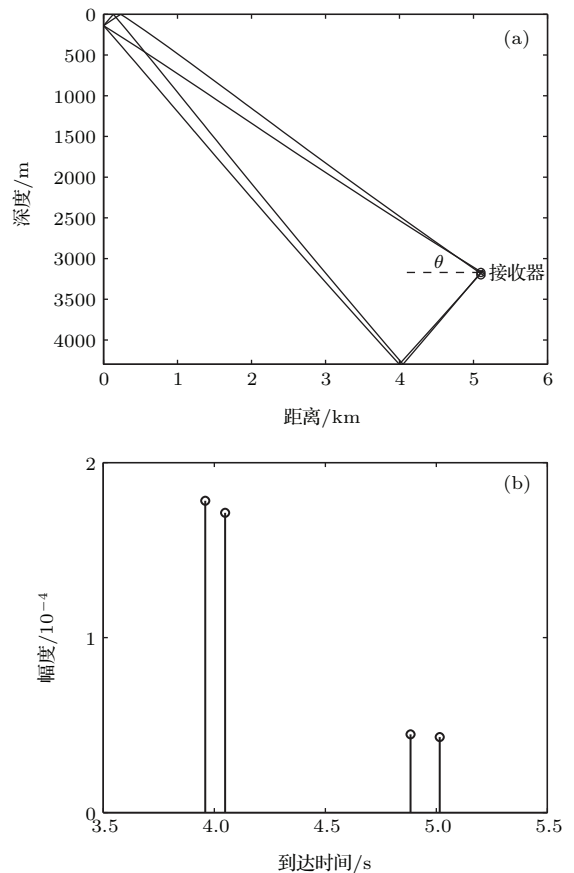


图 3 (a) 到达接收器的直达声线、海面反射声线、海底反射声线及海面-海底反射声线; (b) 各条声线的到达时间及幅度

Fig. 3. (a) The direct ray, the surface-reflected ray, the bottom-reflected ray and the surface-reflected-bottom-reflected ray; (b) the arrival time and amplitude of each ray.

根据射线理论<sup>[16]</sup>, 在直达波区域接收器接收的声压可以近似表示为

$$p(r, z, t) \approx p_1(r, z, t) + p_2(r, z, t), \quad (1)$$

其中  $p_1(r, z, t)$  和  $p_2(r, z, t)$  分别为直达波和海面反射波的声压. 根据射线理论,  $p_1(r, z, t)$  和  $p_2(r, z, t)$

可以表示为

$$p_1(r, z, t) = A_1(r, z) e^{j[\omega t - k(r, z)\varphi_1(r, z)]}, \quad (2)$$

$$p_2(r, z, t) = A_2(r, z) e^{j[\omega t - k(r, z)\varphi_2(r, z)]}, \quad (3)$$

式中  $A_1(r, z)$  和  $A_2(r, z)$  分别表示直达波和海面反射波的振幅因子,  $\varphi_1(r, z)$  和  $\varphi_2(r, z)$  分别为直达波和海面反射波的程函,  $k(r, z) = \omega/c(r, z)$ , 其中  $c(r, z)$  为  $(r, z)$  处的声速.

接收器处的质点振速可以近似表示为

$$v(r, z, t)\mathbf{D} \approx v_1(r, z, t)\mathbf{D}_1 + v_2(r, z, t)\mathbf{D}_2, \quad (4)$$

式中  $v_1(r, z, t)$  和  $v_2(r, z, t)$  分别与直达波和海面反射波对应;  $\mathbf{D}_1$ ,  $\mathbf{D}_2$  和  $\mathbf{D}$  分别表示  $v_1(r, z, t)$ ,  $v_2(r, z, t)$  和  $v(r, z, t)$  的方向矢量. 设直达波和海面反射波到达接收点处的掠射角分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 则在柱坐标系  $(r, z)$  下,  $\mathbf{D}_1 = \cos \theta_1 \mathbf{r} + \sin \theta_1 \mathbf{z}$ ,  $\mathbf{D}_2 = \cos \theta_2 \mathbf{r} + \sin \theta_2 \mathbf{z}$ .

$v_1(r, z, t)$  和  $v_2(r, z, t)$  分别满足以下关系式

$$\frac{\partial \mathbf{v}_1(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_1, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}_2(t)}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p_2, \quad (6)$$

其中  $\mathbf{v}_1(t) = v_1(r, z, t)\mathbf{D}_1$ ,  $\mathbf{v}_2(t) = v_2(r, z, t)\mathbf{D}_2$ ,  $\rho$  是介质密度,  $\nabla$  是梯度算符, 在柱坐标系  $(r, z)$  下,  $\nabla$  代表  $\frac{\partial}{\partial r} \mathbf{r} + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{z}$ . 则质点振速的水平分量和垂直分量可以表示为

$$v_r(r, z, t) \approx v_1(r, z, t) \cos \theta_1(r, z) + v_2(r, z, t) \cos \theta_2(r, z), \quad (7)$$

$$v_z(r, z, t) \approx v_1(r, z, t) \sin \theta_1(r, z) + v_2(r, z, t) \sin \theta_2(r, z). \quad (8)$$

当声源位于海面附近时, 掠射角  $\theta_1$  和  $\theta_2$  近似相等, 设  $\theta = (\theta_1 + \theta_2)/2$ , 则

$$v_r(r, z, t) \approx v(r, z, t) \cos \theta(r, z), \quad (9)$$

$$v_z(r, z, t) \approx v(r, z, t) \sin \theta(r, z). \quad (10)$$

从 (9) 和 (10) 式可以看出, 质点水平振速  $v_r$  和垂直振速  $v_z$  的大小与声线到达接收点的掠射角密切相关, 大掠射角的声线对  $v_z$  贡献较大, 小掠射角的声线对  $v_r$  贡献较大.

## 2.2 深海直达波区域声场传播损失

设声源是简谐点源, 角频率为  $\omega$ , 则声场中  $(r, z)$  处的声压、质点水平振速和垂直振速可以

表示为

$$p(r, z, t) = p(r, z) e^{j\omega t}, \quad (11)$$

$$v_r(r, z, t) = v_r(r, z) e^{j\omega t}, \quad (12)$$

$$v_z(r, z, t) = v_z(r, z) e^{j\omega t}. \quad (13)$$

则声压、质点水平振速和垂直振速的传播损失为

$$TL_p = -20 \lg \left| \frac{p(r, z)}{p_{\text{ref}}} \right|, \quad (14)$$

$$TL_{v_r} = -20 \lg \left| \frac{v_r(r, z)}{v_{\text{ref}}} \right|, \quad (15)$$

$$TL_{v_z} = -20 \lg \left| \frac{v_z(r, z)}{v_{\text{ref}}} \right|, \quad (16)$$

其中

$$p_{\text{ref}} = \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \Big|_{r=1}, \quad (17)$$

$$v_{\text{ref}} = \frac{k_0}{\rho\omega} \cdot \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \Big|_{r=1}, \quad (18)$$

$p_{\text{ref}}$  和  $v_{\text{ref}}$  分别为参考声压和参考振速,  $k_0 = \omega/c(z_0)$ ,  $z_0$  为声源深度,  $c(z_0)$  为声源深度处的声速.

根据 (15) 和 (16) 式可得垂直振速  $v_z$  和水平振速  $v_r$  的传播损失差:

$$\begin{aligned} \Delta TL(v_z, v_r) &= TL_{v_z} - TL_{v_r} \\ &= 20 \lg \left| \frac{v_r(r, z)}{v_z(r, z)} \right|. \end{aligned} \quad (19)$$

根据 (9), (10) 和 (12), (13) 式可得

$$\Delta TL(v_z, v_r) \approx 20 \lg |\cot \theta(r, z)|. \quad (20)$$

由于  $TL_{v_r}$  和  $TL_{v_z}$  的参考值相同, 所以 (20) 式表示的  $v_z$  和  $v_r$  的传播损失差即  $v_r$  和  $v_z$  的能量差:

$$\begin{aligned} \Delta E(v_r, v_z) &= E_{v_r} - E_{v_z} \\ &\approx 20 \lg |\cot \theta(r, z)|. \end{aligned} \quad (21)$$

从 (21) 式可以看出, 当掠射角  $\theta$  大于  $45^\circ$  时,  $v_z$  的能量高于  $v_r$  的能量, 当掠射角  $\theta$  小于  $45^\circ$  时,  $v_r$  的能量高于  $v_z$  的能量.

## 2.3 仿真分析

本节通过仿真分析深海近海面声源直达波区域的声场传播特性, 采用图 1 所示的声速剖面, 将声源深度限定在 300 m 以浅, 接收器深度为 3146 m. 假设声源位于海面, 则在 3146 m 深度上接收器能接收到水平距离 13 km 范围内的直达波, 因此本节的仿真只分析水平距离 13 km 范围内的声传播特性.

首先分析直达波区域内声线掠射角随距离的变化. 图4给出了不同水平距离上到达接收器处的直达波掠射角 $\theta_1$ 和海面反射波掠射角 $\theta_2$ , 其中图4(a)—(d)的声源深度分别为10, 100, 200, 300 m. 可以看出, 声源离海面越近,  $\theta_2$ 与 $\theta_1$ 之间的差异越小. 图5给出了不同距离上到达接收器处的直达波掠射角和海面反射波掠射角的均值 $\theta$ , 可

以看出, 不同声源深度下 $\theta$ 随水平距离的变化规律基本一致. 此外, 从图4和图5中还可以看出, 在直达波区域内,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$ 及 $\theta$ 随水平距离变化较快, 在水平距离为1 km时, 掠射角在 $70^\circ$ 以上, 在水平距离为13 km时, 掠射角约为 $10^\circ$ . 根据(9), (10)和(21)式, 接收器处声线掠射角的大小将对 $v_r$ 和 $v_z$ 有重要影响.

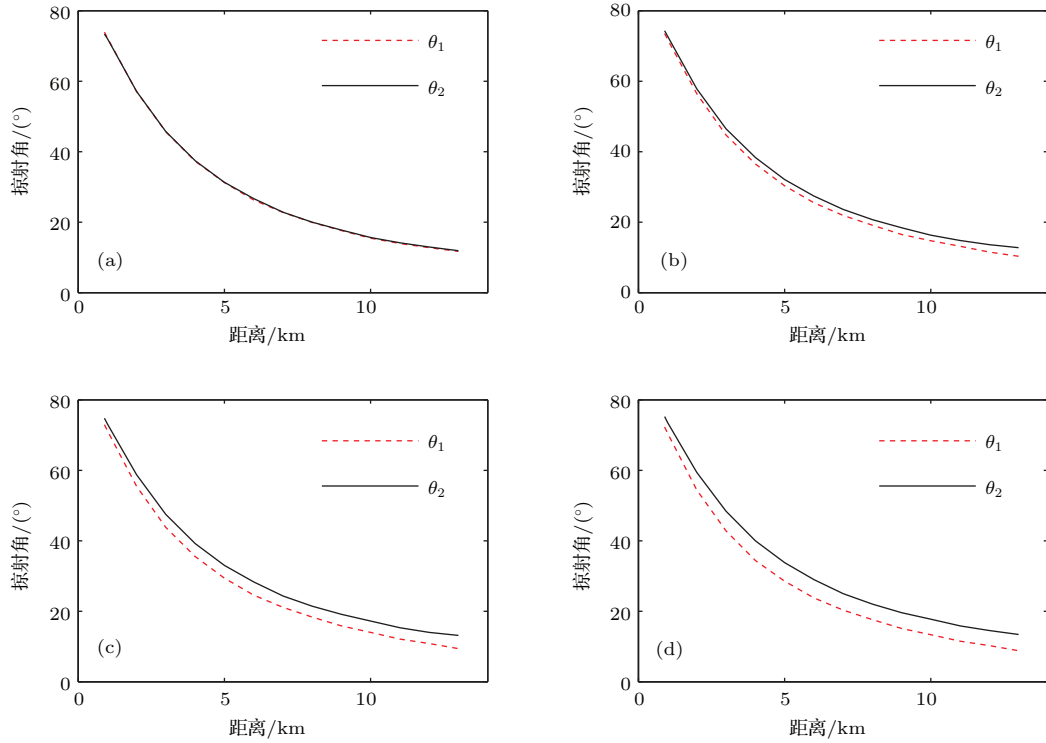


图4 不同距离上的直达波掠射角 $\theta_1$ 和海面反射波掠射角 $\theta_2$ , 其中图(a)—(d)对应的声源深度分别为10, 100, 200, 300 m

Fig. 4. Grazing angles of direct-arrival rays and surface-reflected rays at different ranges, where the source depths in figures (a), (b), (c) and (d) are 10 m, 100 m, 200 m and 300 m, respectively.

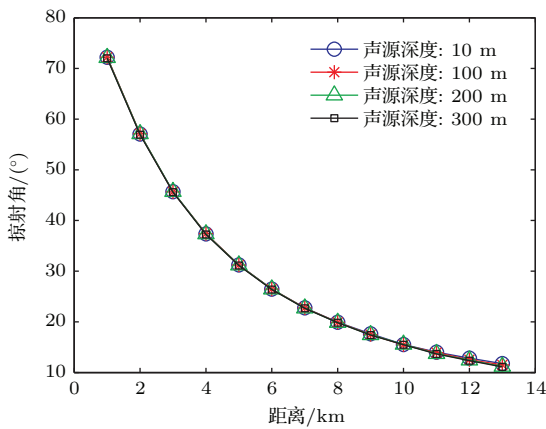


图5 不同声源深度时不同距离上的掠射角 $\theta$

Fig. 5. The mean angle  $\theta$  versus range for different source depths.

为了分析深海近水面声源直达波区域的声传播特性, 这里应用图1所示的声速剖面进行仿真计算. 设声源深度为140 m, 频率为800—1000 Hz, 图6给出了水平距离13 km范围内声压、水平振速与垂直振速的传播损失, 图中的结果由RAM-PE模型<sup>[17]</sup>计算得到. 从图6中可以看出, 在直达波区域, 声压和垂直振速的传播损失随水平距离增大而增大, 且垂直振速衰减更快, 根据(10)式和图5可以看出, 由于掠射角 $\theta$ 随水平距离增大而减小, 因此垂直振速随水平距离增大而快速衰减. 从图6中还可以看出, 水平振速的传播损失随水平距离增大先减小再增大, 在水平距离约3 km处, 水平振速的传播损失与垂直振速的传播损失相等, 随着水平距离增大, 水平振速的传播损失与声压的传播

损失趋于一致. 图7给出了不同声源深度下水平振速与垂直振速的能量差随水平距离的变化, 从图中可以看出, 水平振速与垂直振速的能量差随水平距离增大而增大, 且声源深度变化对其影响较小, 在水平距离约3 km处, 水平振速与垂直振速的能量相等. 图中黑实线是根据图5中掠射角利用(21)式计算的结果, 从图中可以看出, 利用(21)式计算的结果与仿真计算结果存在一定差异, 这是由于应用RAM-PE模型仿真计算的声场中包含了海底反射波、而(21)式则忽略了海底反射波引起的. 虽然二者之间存在一定差异, 但从图中仍可以看出, 水平振速与垂直振速的能量差随水平距离的变化关系近似满足(21)式. 结合(21)式和图5可以看出, 由于掠射角 $\theta$ 随水平距离增大而减小, 因此水平振速与垂直振速的能量差随水平距离的增大而增大, 在水平距离约3 km处, 掠射角 $\theta$ 约为 $45^\circ$ , 因此水平振速与垂直振速的能量相等, 当水平距离

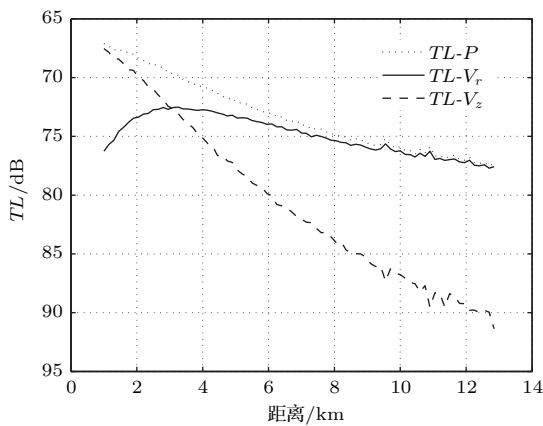


图6 声压、水平振速和垂直振速的传播损失

Fig. 6. Transmission losses of sound pressure, horizontal particle velocity and vertical particle velocity.

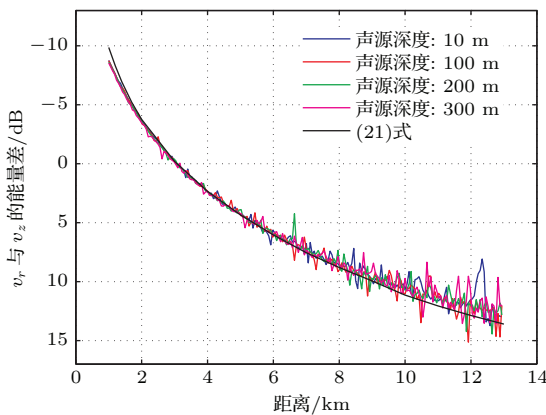


图7 (网刊彩色) 不同水平距离上的 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差  
Fig. 7. (color online) Energy differences between  $v_r$  and  $v_z$  at different ranges.

小于3 km时, 掠射角 $\theta$ 大于 $45^\circ$ , 垂直振速的能量高于水平振速的能量, 当水平距离大于3 km时, 掠射角 $\theta$ 小于 $45^\circ$ , 垂直振速的能量低于水平振速的能量.

### 3 一种基于 $v_r$ 与 $v_z$ 能量差的深海直达波区域近水面目标测距方法

从上一节的分析结果可见, 在深海近水面声源的直达波区域, 质点水平振速与垂直振速的能量差随水平距离增大而快速增大, 因此可以利用矢量水听器测量的质点水平振速和垂直振速的能量差来估计声源距离. 构造的代价函数如(22)式所示:

$$C = \frac{|\Delta E^c(v_r, v_z) - \Delta E^m(v_r, v_z)|}{\Delta E^m(v_r, v_z)}, \quad (22)$$

式中 $\Delta E^m(v_r, v_z)$ 表示实验测量的水平振速和垂直振速的能量差,  $\Delta E^c(v_r, v_z)$ 表示 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差理论值, 代价函数取最小值时对应的水平距离即为估计的声源距离.

根据上一节的仿真结果, 在近水面声源声场直达波区域, 不同声源深度下得到的水平振速与垂直振速的能量差随水平距离的变化规律基本相同, 因此, 应用(22)式估计声源水平距离时, 声源深度变化将对估计结果影响较小.

根据图1所示的传播环境, 图8给出了当声源水平距离为5 km时由(22)式得到的代价函数随水平距离的变化, 其中声源频率为800—1000 Hz. 从图中可以看出, 本节提出的方法能准确地估计声源的水平距离.

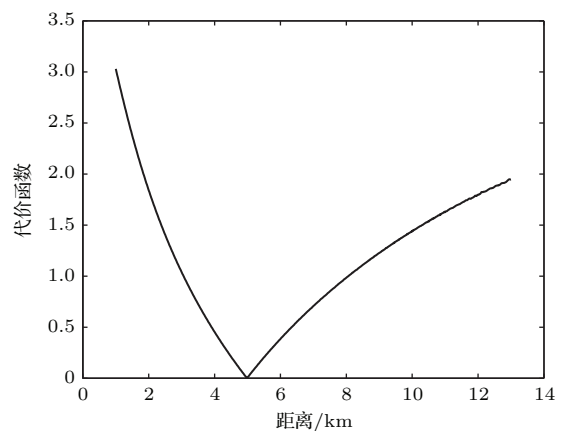


图8 代价函数随水平距离的变化

Fig. 8. Values of cost function at different ranges.

### 4 实验数据处理

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、哈尔滨工程大学等多家单位在某深海海域进行了一次综合性水声考察实验,图1所示的声速剖面即为实验海域的声速剖面.图9给出了实验船航线及站位示意图,矢量水听器布放在接收潜标的3146 m深度处接收传播信号.实验过程中,发射船先沿A2至A0航线航行,再沿A0至A1航线航行,航速约3节,航行过程中拖曳换能器在约140 m深度上发射双曲调频信号,发射信号频率范围为800—1000 Hz,时长为20 s,间隔130 s发射一次,发射信号声源级为185 dB.

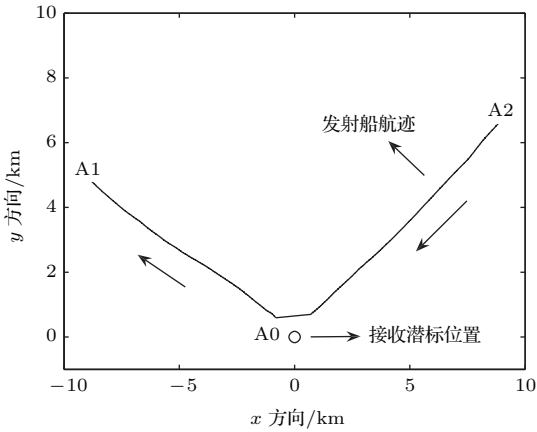


图9 实验船航线示意图

Fig. 9. Tracks of the research ship.

对矢量水听器接收的原始信号进行脉冲压缩以提高信噪比,图10给出了脉冲压缩后发射船位于A2—A0航线上距离接收潜标为5.1 km时的归一化波形,图中横坐标为2 s左右的脉冲即由直达波与海面反射波构成.

根据实验海域的声速剖面,矢量水听器能接收到水平距离13 km范围内的海面声源的直达波信号.由于深海声传播随水平距离增大存在周期性相似结构<sup>[18]</sup>,这里首先计算了实验环境下声源信号为800—1000 Hz时水平距离90 km范围内 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差,结果如图11中实线所示,其中计算时采用的海底参数与图1中的海底参数相同.从图11中可以看出,如果应用 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差估计声源距离,只有当 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差低于8 dB(如图11中的虚线所示)时,才能惟一地确定声源距离,而当 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差高于8 dB时,将出现相同能

量差时距离的多值性,难以判断声源距离.图11中 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差为8 dB时对应的水平距离约为8 km.所以,这里将应用实验测量数据对水平距离8 km范围内的目标声源进行距离估计.图12给出了在水平距离8 km范围内A2—A0与A0—A1两条航线上由矢量水听器测得的直达波与海面反射波的水平振速 $v_r$ 与垂直振速 $v_z$ 的能量差,如图中圆圈所示,图中实线是根据实验海域传播环境计算得到的理论值.

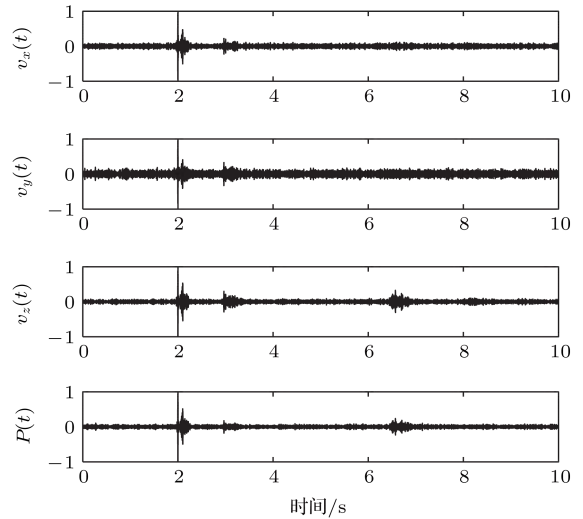


图10 矢量水听器接收的经脉冲压缩后的声压及振速信号

Fig. 10. Matched-filtered signals of pressure and particle velocities received by the vector sensor.

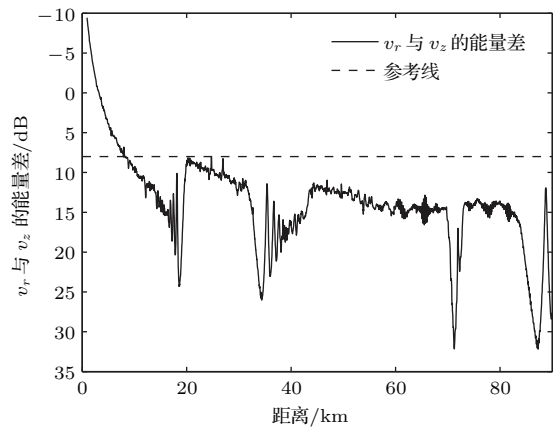


图11 声传播距离在90 km范围内 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差

Fig. 11. Energy differences of  $v_r$  and  $v_z$  within the range of 90 km.

根据(22)式所示的代价函数,利用实验测量的 $v_r$ 与 $v_z$ 的能量差估计声源的水平距离,结果如图13中星形所示,图中的实线为参考线,图13(a)和图13(b)分别是A2—A0航线和A0—A1航线上

的结果. 从图中可以看出, 应用实验数据估计的声源距离与GPS 距离基本一致. 图14给出了两条航线上估计距离的绝对误差和相对误差, 其

中A2—A0 航线上的估计距离相对误差均值为9.7%, A0—A1航线上的估计距离相对误差均值为5.5%.

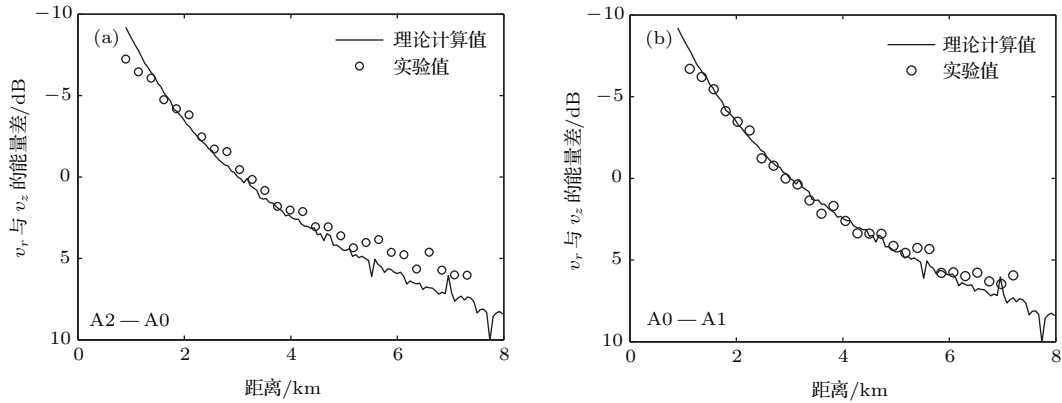


图12 实验测量的  $v_r$  与  $v_z$  的能量差与理论计算结果的比较, 其中图 (a) 和图 (b) 分别是 A2—A0 航线和 A0—A1 航线上的结果

Fig. 12. Comparison of the energy differences of measured  $v_r$  and  $v_z$  with the numerical results, where figures (a) and (b) are the results along the propagation tracks of A2—A0 and A0—A1, respectively.

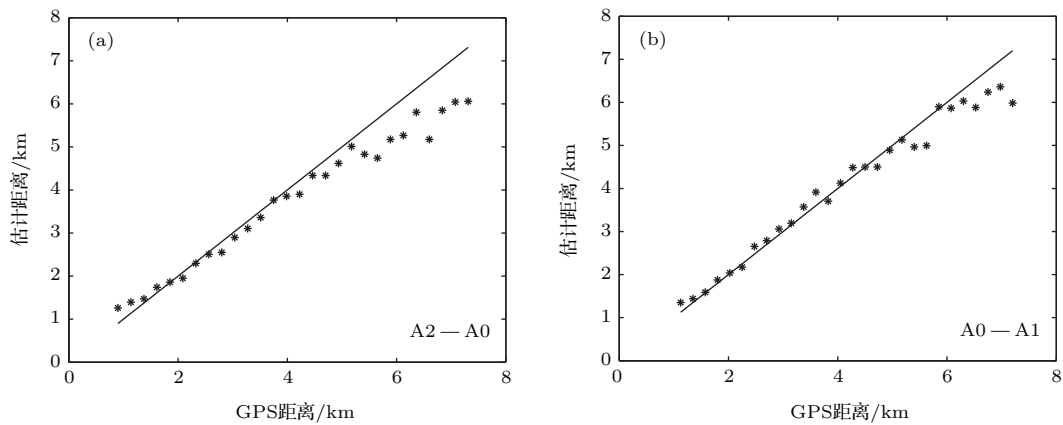


图13 距离估计结果, 其中图 (a) 和图 (b) 分别是 A2—A0 航线和 A0—A1 航线上的结果

Fig. 13. Range estimation results for the experimental signals, where figures (a) and (b) are the results along the propagation tracks of A2—A0 and A0—A1, respectively.

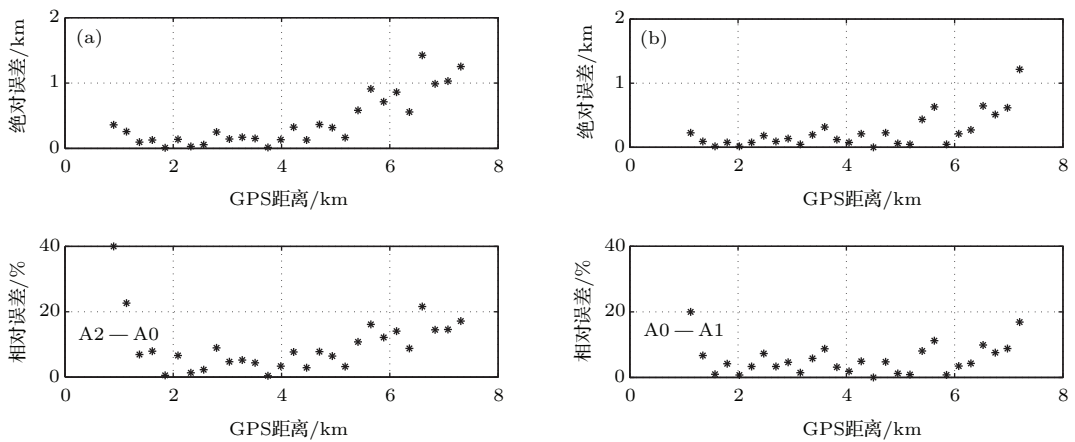


图14 距离估计误差, 其中图 (a) 和图 (b) 分别是 A2—A0 航线和 A0—A1 航线上的结果

Fig. 14. Errors of estimated ranges of the experimental signals, where figures (a) and (b) are the results along the propagation tracks of A2—A0 and A0—A1, respectively.



从图 13 和图 14 中的声源距离估计结果可以看出, 较近和较远距离处的声源距离估计误差较大. 导致声源距离估计误差的原因主要有以下两方面: 1) 根据图 5 和图 7, 声线到达角及  $v_r$  与  $v_z$  的能量差的变化率随距离的增大而减小, 因此 (22) 式所示的代价函数对距离的敏感性也随距离的增大而降低, 那么, 当收发水平距离较大时, 较小的  $v_r$  与  $v_z$  的能量差测量误差将会产生较大的声源距离估计误差; 2) 实验过程中矢量水听器的姿态变化是导致声源距离估计误差的另一因素, 实验过程中, 矢量水听器俯仰角度约为  $22^\circ$ , 这种姿态变化对水平振速与垂直振速的能量差估计有一定影响, 进而影响声源距离估计结果. 根据图 7, 在水平距离为 1 km 处,  $v_r$  与  $v_z$  的能量差约为  $-9$  dB, 即  $v_z$  的能量比  $v_r$  的能量高得多, 但由于矢量水听器的俯仰, 测量的水平振速中包含垂直振速分量, 导致测量的水平振速能量偏高, 而测量的垂直振速则由于偏离竖直方向使其能量偏低, 从而使测量信号中水平振速与垂直振速的能量差偏大, 将最终导致估计声源距离大于实际值, 如图 13 和图 14 中声源距离约为 1 km 处的结果. 而在水平距离约为 7 km 处,  $v_r$  与  $v_z$  的能量差约为  $+8$  dB, 即  $v_r$  的能量比  $v_z$  的能量高得多, 矢量水听器的俯仰将导致测量的水平振速能量偏小而测量的垂直振速能量偏大, 从而使测量信号中水平振速与垂直振速的能量差偏小, 最终导致估计声源距离小于实际值, 如图 13 和 14 中声源距离约 7 km 处的估计结果. 虽然在进行声源距离估计前, 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源距离估计结果的影响.

## 5 结 论

本文分析了深海近水面声源直达波区域的声传播特性, 结果表明, 质点水平振速与垂直振速的能量差与声线到达接收点处的掠射角密切相关. 在近距离处, 声线到达接收点的掠射角较大, 垂直振速的能量高于水平振速的能量, 在远距离处, 声线到达接收点的掠射角较小, 水平振速的能量则高于垂直振速的能量, 水平振速与垂直振速的能量差在直达波区域随距离单调变化 (近似满足 (21) 式).

基于这种近场声场特性, 提出了一种利用水平振速与垂直振速的能量差估计声源距离的方法, 并利用 2014 年的深海实验数据对实验中两条航线上 8 km 范围内的目标声源的距离进行了估计, 得到的声源距离与 GPS 距离基本一致, 统计测距误差

小于 10%, 对深海利用声矢量场进行目标测距具有重要意义. 下一步将重点进行低信噪比条件下的测距方法研究.

由衷感谢哈尔滨工程大学朴胜春教授提供的 2014 年深海实验矢量水听器数据及对本文的建议! 感谢参加海上实验的全体工作人员, 他们的辛勤劳动为本文提供了宝贵的实验数据!

## 参考文献

- [1] Li F H, Sun M, Zhang R H 2009 *Proceedings of the Second International Shallow-Water Conference* Shanghai, China, September 16–20, 2009 p383
- [2] Yu Y, Hui J Y, Zhao A B, Sun G C, Teng C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5742 (in Chinese) [余赟, 惠俊英, 赵安邦, 孙国仓, 滕超 2008 物理学报 **57** 5742]
- [3] Sun G Q, Yang D S, Zhang L Y, Shi S G 2003 *Acta Acust.* **28** 66 (in Chinese) [孙贵青, 杨德森, 张揽月, 时胜国 2003 声学学报 **28** 66]
- [4] Li F H, Zhu L M, Chen D S 2013 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **43** s99 (in Chinese) [李风华, 朱良明, 陈德胜 2013 中国科学: 物理学 力学 天文学 **43** s99]
- [5] Sun M, Li F H, Zhang R H 2011 *Acta Acust.* **36** 215 (in Chinese) [孙梅, 李风华, 张仁和 2011 声学学报 **36** 215]
- [6] Peng H S, Li F H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1977
- [7] Li F H, Sun M, Zhang R H 2010 *J. Harbin Eng. Univ.* **31** 895 (in Chinese) [李风华, 孙梅, 张仁和 2010 哈尔滨工程大学学报 **31** 895]
- [8] Santos P, Rodríguez O C, Felisberto P, Jesus S M 2010 *J. Acoust. Soc. Am.* **128** 2652
- [9] Hui J Y, Liu H, Yu H B, Fan M Y 2000 *Acta Acust.* **25** 303 (in Chinese) [惠俊英, 刘宏, 余华兵, 范敏毅 2000 声学学报 **25** 303]
- [10] Wong K T, Zoltowski M D 1999 *IEEE Trans. Signal Process.* **47** 3250
- [11] Wong K T, Zoltowski M D 2000 *IEEE J. Oceanic Eng.* **25** 262
- [12] Hawkes M, Nehorai A 2003 *IEEE Trans. Signal Process.* **51** 1479
- [13] Felisberto P, Rodriguez O, Santos P, Ey E, Jesus S M 2013 *Sensors* **13** 8856
- [14] Zhu L M, Li F H, Sun M, Chen D S 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 154303 (in Chinese) [朱良明, 李风华, 孙梅, 陈德胜 2015 物理学报 **64** 154303]
- [15] Zhong X, Premkumar A B, Wang H 2014 *IEEE Sensors J.* **14** 2502
- [16] Liu B S, Lei J Y 2011 *Principles of Underwater Acoustics* (Harbin: Harbin Engineering University Press) p91 (in Chinese) [刘伯胜, 雷家煜 2011 水声学原理 (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第 91 页]
- [17] Michael D C 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 1736
- [18] Chen L R, Peng Z H, Wang G X 2012 *Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Acoustics* Beijing, China, May 21–25, 2012 p611

# Analysis of sound propagation in the direct-arrival zone in deep water with a vector sensor and its application\*

Sun Mei<sup>1)2)†</sup> Zhou Shi-Hong<sup>1)</sup> Li Zheng-Lin<sup>1)</sup>

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

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

( Received 9 November 2015; revised manuscript received 18 January 2016 )

## Abstract

The receiver at larger depth can receive the direct-arrival signal from a shallow source in a certain range in deep water. During a deep-water experiment conducted in 2014, a vector sensor located at a depth of 3146 m received the direct-arrival signals from the transducer towed at about 140 m depth by the source ship. In this paper, the propagation properties of the sound field in the direct-arrival zone in deep water are studied based on the ray theory and subsequently a source-range-estimation method is proposed. In the direct-arrival zone, the arrival angle is one of the most important properties of sound field, and the sound field is mainly composed of the contributions of a direct ray and a surface-reflected ray. The theoretical analysis and simulation results show that the amplitudes of horizontal particle velocity and vertical particle velocity are related to the mean arrival angle of the direct ray and the surface-reflected ray, and the larger the arrival angle, the greater the vertical particle velocity is, but the weaker the horizontal particle velocity is. Furthermore, the energy difference between horizontal particle velocity and vertical particle velocity can be approximately expressed by a monotonic function of the arrival angle, which varies fast with the horizontal distance between source and receiver. This property is applied to the estimation of source range. The analysis of the experimental data shows that the estimated source ranges are consistent with the GPS ranges within the range of 8 km, and the mean relative error of source range estimation is within 10%.

**Keywords:** vector sensor, direct-arrival zone in deep water, propagation property, range estimation

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

**DOI:** [10.7498/aps.65.094302](https://doi.org/10.7498/aps.65.094302)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11434012, 41561144006), the Scientific Research Foundation of the Higher Education Institutions of Shandong Province, China (Grant No. J12LJ56), and the Scientific Research Foundation of Taishan University (Grant No. Y-01-2013009).

† Corresponding author. E-mail: [sunmei@mail.ioa.ac.cn](mailto:sunmei@mail.ioa.ac.cn)