

深海水平阵对空中声源的近场定位研究*

毛俊杰^{1,2} 张 波^{1†} 彭朝晖^{1†} 张燕君¹ 钱 鹏³ 林 霖¹

(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 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中山大学 海洋工程与技术学院 珠海 519082)

2023 年 8 月 23 日收到

2023 年 10 月 19 日定稿

摘要 为实现水下对空中声源的探测定位,提出了一种利用深海不同路径声线进行近场聚焦波束形成的定位方法,实现了海底水平阵对近场菲涅尔区空中声源的定位。分析表明,直接利用不同路径声线进行聚焦波束形成定位时,空间谱会产生伪峰。为此,应用了基于声线到达幅度加权的伪峰抑制方法。仿真及海试实验数据验证了该方法的有效性,能够准确定位飞行高度约 5000 m、水平距离在 13~17 km 范围内的固定翼飞机目标,平均定位误差为 0.9 km。与仅利用直接透射声线的传统方法相比,所提方法显著提升了远距离空中声源的定位性能。

关键词 水下对空探测, 聚焦波束形成, 海底水平阵, 空中声源

PACS: 43.30, 43.60

DOI: 10.12395/0371-0025.2023181

CSTR: 32049.14.11-2065.2023181

Near-field localization of airborne sources using deep-sea horizontal array

MAO Junjie^{1,2} ZHANG Bo^{1†} PENG Zhaohui^{1†} ZHANG Yanjun¹ QIAN Peng³ LIN Lin¹

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049)

(3 School of Ocean Engineering and Technology, Sun Yat-sen University Zhuhai 519082)

Received Aug. 23, 2023

Revised Oct. 19, 2023

Abstract To achieve underwater detection and localization of airborne sound sources, a localization method using sound rays of different paths in the deep sea for focused beamforming is proposed, which realizes the localization of airborne sound sources in the Fresnel zone by seabed horizontal array. The analysis shows that the spatial spectrum produces pseudo-peaks when different path sound rays are directly utilized for focused beamforming localization. For this reason, a pseudo-peak suppression strategy based on sound ray arrival amplitude weighting is applied. Simulation and sea trial data verify the effectiveness of the method, which is able to locate fixed-wing aircraft targets flying at an altitude of about 5000 m and a horizontal distance in the range of 13–17 km, with an average positioning error of 0.9 km. Compared with the traditional method that only utilizes direct transmitted sound rays, the proposed method significantly improves the localization performance of long-range airborne sound sources.

Keywords Underwater-to-air detection, Focused beamforming, Seabed horizontal array, Airborne source

引言

在水下对空中声源探测问题中,由于空气和海水阻抗差异显著,空气中声源辐射的声能量大部分

被海面反射,只有很小一部分能够透射进入水中,使得水下接收声信号比较微弱。加之海洋环境复杂多变,从水下探测和定位远距离空中声源的难度较大。Urlick^[1]从理论上指出,空中声源激发的水下声场由 4 部分贡献:直接透射入水的折射波,一次或多

* 国家自然科学基金项目 (11974017)、中国科学院青年创新促进会项目 (2017028) 和国家重点研发计划项目 (2021YFF0501200) 资助

† 通讯作者: 张波, zhangbo@mail.ioa.ac.cn; 彭朝晖, pzh@mail.ioa.ac.cn

次海底反射波,海面附近的侧面波以及起伏海面的散射波;在不同的环境和收发条件下,上述4部分对声场的贡献也不同。Chapman等^[2]给出了分层海洋介质中空中声源激发水下声场的简正波表达式。Schmidt^[3]编写了OASES波数积分程序,可用于空中声源激发水下声场的数值计算。孙炳文等^[4]将射线法和波数积分方法结合,提出在浅海环境中空中声源激发水下声场主要由直接透射入水的折射波以及一次或多次海底反射波贡献。Buckingham等^[5]进行了多次以海面上空飞行的螺旋桨飞机作为声源的海试实验,利用接收运动声源产生的多普勒信号,反演得到声源参数和海洋环境参数。以上空中声源激发的水下声场研究为水下对空中声源的探测和定位提供了理论基础和算法基础。

对于水下对空声源的探测问题,王光旭等^[6-7]采用大功率扬声器作为声源,发射不同频率的线性调频信号,并利用布放在浅海海底的水平阵,结合波束形成与方位交叉算法实现了对距离4 km范围内空中声源的探测与定位。刘凯悦等^[8-9]提出了利用线谱提取与干扰剔除相结合的水下对空运动声源的探测算法,利用空中高速运动声源激发水下接收声场的线谱多普勒频移特征,进行对空中运动声源的参数估计,实现了最远达16.8 km空中声源的定位,然而该方法需要较长时间的数据来获得多普勒频移特征,存在较大的局限性。苏林等^[10]利用布放在浅海的垂直阵使用匹配场处理对空中声源目标进行了测距,分析了单频匹配场和宽带匹配场处理对空中声源的探测性能,由于该方法利用OASES波数积分模型计算拷贝声场,计算量大,且只适用于水平不变环境下的空中声源透射入水的情况。目前在深海条件下,水下对空探测的研究相对较少。

当目标声源位于阵列的近场菲涅尔区时,信号不能再近似为平面波到达阵列。此时,波束输出不仅与来波方向有关,还与目标声源在空间中的位置有关。1979年,King等^[11]开始使用近场聚焦波束形成技术开展了对运动列车噪声源定位识别方法的研究。时洁等^[12-13]研究了窄带、宽带最小方差无畸变响应(MVDR)近场聚焦波束形成方法,分析了阵列阵形、阵列参数、测量距离以及声源辐射频率等因素对近场定位的影响。

本文将近场聚焦波束形成方法应用于深海海底水平阵列探测空中声源的问题,能克服现有方法(如文献[5][9])仅限于定位匀速直线运动目标且需长时间数据积累的局限性。与匹配场定位方法相比,本

研究仅聚焦于对水下声场做出主要贡献的直接透射声线和海底反射声线,显著降低了计算复杂度且物理意义清晰。此外,与文献[10]中方法相比,本方法能够适应水平变化的环境条件。文中分析了直接利用不同路径声线进行近场聚焦波束形成时产生伪峰的原因,并提出了一种基于声线到达幅度加权的空间谱伪峰抑制方法。仿真分析与海试数据处理结果表明,该方法不仅有效抑制了伪峰现象,还显著提升了远距离目标声源的定位精度与可靠性。

1 空中声源的水下近场聚焦波束形成模型

如图1所示,一个辐射窄带信号的空中点声源位于一个海底水平阵的近场菲涅尔区^[14] ($r \leq 2D^2/\lambda$, r 为声源到阵列参考点距离, D 为阵列孔径, λ 为波长),气中声源辐射的声波透射入水,只有掠射角大于临界角(约 77°)的声线才能有效透射入水。

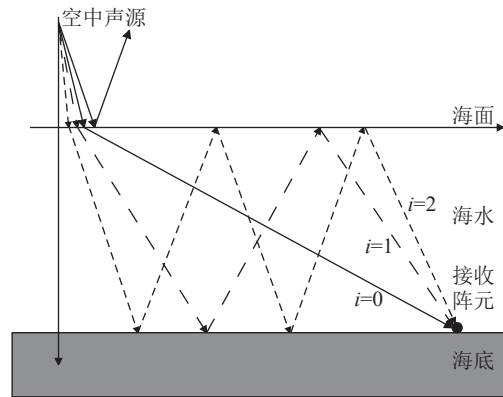


图1 本征声线示意图

考虑由 M 元声压水听器构成的水平阵列放置在海底,当接收器位于海底,根据射线声学理论^[15],空中点源激发的水下接收声场通常是由如图1所示的本征声线贡献,则第 m 号水听器接收到的信号可表示为

$$x_m(t) = \sum_{i=0}^I s(t) A_{mi}(r, h) \exp(-j\omega_0 t_{mi}(r, h)) + n_m(t), \quad (1)$$

式中, ω_0 为空中声源辐射声信号的角频率, i 表示不同路径声线分别与海面海底的反射次数($i=0$ 表示直接透射入水到达接收点的折射声线, $i=1$ 表示该声线与海底海面各反射一次到达接收点,以此类推), $s(t)$ 为声源辐射的信号, $A_{mi}(r, h)$ 和 $t_{mi}(r, h)$ 分别为位置在 (r, h) 的声源辐射的与海底海面各反射 i 次的声线(以下简称沿着路径 i 的声线)到达第 m 号接收器

的幅度响应和时延, $n_m(t)$ 为噪声。

相对于阵列参考点, M 个阵元的输出写成向量形式, 有

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{B}(r, h)\mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T, \quad (3)$$

$$\mathbf{S}(t) = [s(t), s(t), \dots, s(t)]^T, \quad (4)$$

$$\mathbf{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{B}(r, h) = [\mathbf{b}_0(r, h), \mathbf{b}_1(r, h), \dots, \mathbf{b}_I(r, h)], \quad (6)$$

$$\mathbf{b}_i(r, h) = [b_{1i}(r, h) \exp(-j\omega_0 \tau_{1i}(r, h)), b_{2i}(r, h) \cdot \exp(-j\omega_0 \tau_{2i}(r, h)), \dots, b_{Mi}(r, h) \cdot \exp(-j\omega_0 \tau_{Mi}(r, h))]^T, \quad (7)$$

$$b_{mi}(r, h) = \frac{A_{mi}(r, h)}{A_{\text{ref},i}(r, h)}, \quad (8)$$

$$\tau_{mi}(r, h) = t_{mi}(r, h) - t_{\text{ref},i}(r, h), \quad (9)$$

其中, $\mathbf{S}(t)$ 为声源辐射的信号向量, $\mathbf{B}$ 为阵列流形矢量, $A_{\text{ref},i}(r, h)$ 和 $t_{\text{ref},i}(r, h)$ 分别表示位于 (r, h) 的声源辐射的沿着路径 i 的声线到达参考点的幅度响应和时延, $\mathbf{n}(t)$ 为噪声向量。

由于目标声源位于阵列的近场, 平面波假设不成立, 声波扩展规律使得阵列接收数据存在幅度和相位的不一致。用 $\mathbf{a}_i(r, h)$ 和 $\mathbf{r}_i(r, h)$ 分别表示扫描面上点 (r, h) 的声源辐射的沿着路径 i 的声线相对于阵列参考点的相位补偿向量和能量归一化幅度补偿向量^[16]:

$$\mathbf{a}_i(r, h) = [\exp(-j\omega_0 \tau_{1i}(r, h)), \exp(-j\omega_0 \tau_{2i}(r, h)), \dots, \exp(-j\omega_0 \tau_{Mi}(r, h))]^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{r}_i(r, h) = \sqrt{\sum_{m=1}^M A_{mi}^2(r, h)} \cdot \left[\frac{1}{A_{1i}(r, h)}, \frac{1}{A_{2i}(r, h)}, \dots, \frac{1}{A_{Mi}(r, h)} \right]^T. \quad (11)$$

当近场聚焦波束形成只考虑相位补偿时, 利用路径 i 的声线得到的空间谱如下 (以 MVDR 波束形成为例):

$$P_i(r, h) = \frac{1}{\mathbf{a}_i^H(r, h) \mathbf{R}_X^{-1} \mathbf{a}_i(r, h)}. \quad (12)$$

同时考虑相位补偿和幅度补偿时, 利用路径 i 的声线得到的空间谱如下 (以 MVDR 波束形成为例):

$$P_i(r, h) = \frac{1}{\mathbf{v}_i^H(r, h) \mathbf{R}_X^{-1} \mathbf{v}_i(r, h)}. \quad (13)$$

其中, $\mathbf{v}_i(r, h) = \mathbf{a}_i(r, h)/r_i(r, h)$ 。

2 仿真分析

2.1 仿真环境

下面利用数值仿真进行水下对空中声源的聚焦波束形成定位。选取的仿真环境的声速剖面如图 2 所示, 为不失一般性, 海水中声速剖面假设为 Munk 声速剖面。其中, 海深为 1000 m, 海水密度为 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$, 沉积层中声速 $c_s = 1530 \text{ m/s}$, 沉积层密度为 $\rho_s = 1800 \text{ kg/m}^3$, 沉积层吸收系数为 $\alpha = 0.1 \text{ dB}/\lambda$ (λ 为声波波长), 同时考虑空气中声速剖面的影响, 根据国际标准大气表, 低空的声速剖面可以近似为线性变化的, 空气中声速从海面的 340 m/s 线性递减至 5000 m 高度处的 320 m/s, 空气密度为 $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$ 。声源频率为 $f_0 = 100 \text{ Hz}$, 距海面高度 $h = 4000 \text{ m}$, 接收阵为一位于海底的半径为 500 m 的均匀圆形水平阵列, 由 200 个阵元组成, 参考点为圆阵中心。声波波阵面主要在水中扩展, 在此仿真条件下, 按水中声波波长计算, 菲涅尔区范围约为 130 km 之内。

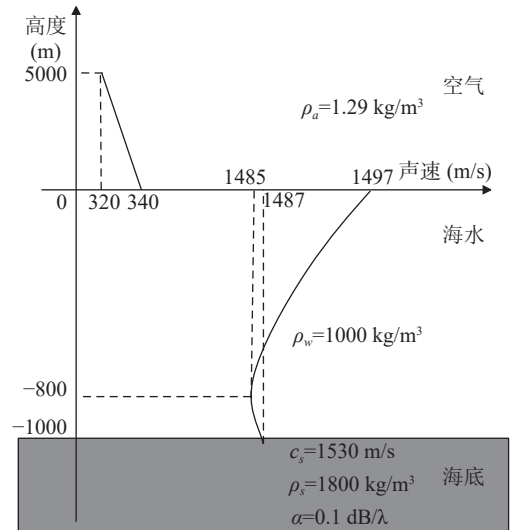


图 2 仿真环境

2.2 仿真结果及伪峰问题

利用 OASES 算法模型^[3] 计算各个阵元接收到的时域波形, 该算法模型可计算水平分层波导中空气中声源激发的水下声场。每个阵元接收信号中加入噪声, 使单通道信噪比为 -5 dB。按照式 (13) 进行近场聚焦波束形成, 图 3—图 5 分别给出了距离海面高度 4000 m, 至参考点水平距离分别为 1 km, 10 km, 19 km 的空中声源按照不同路径声线的幅度相位补

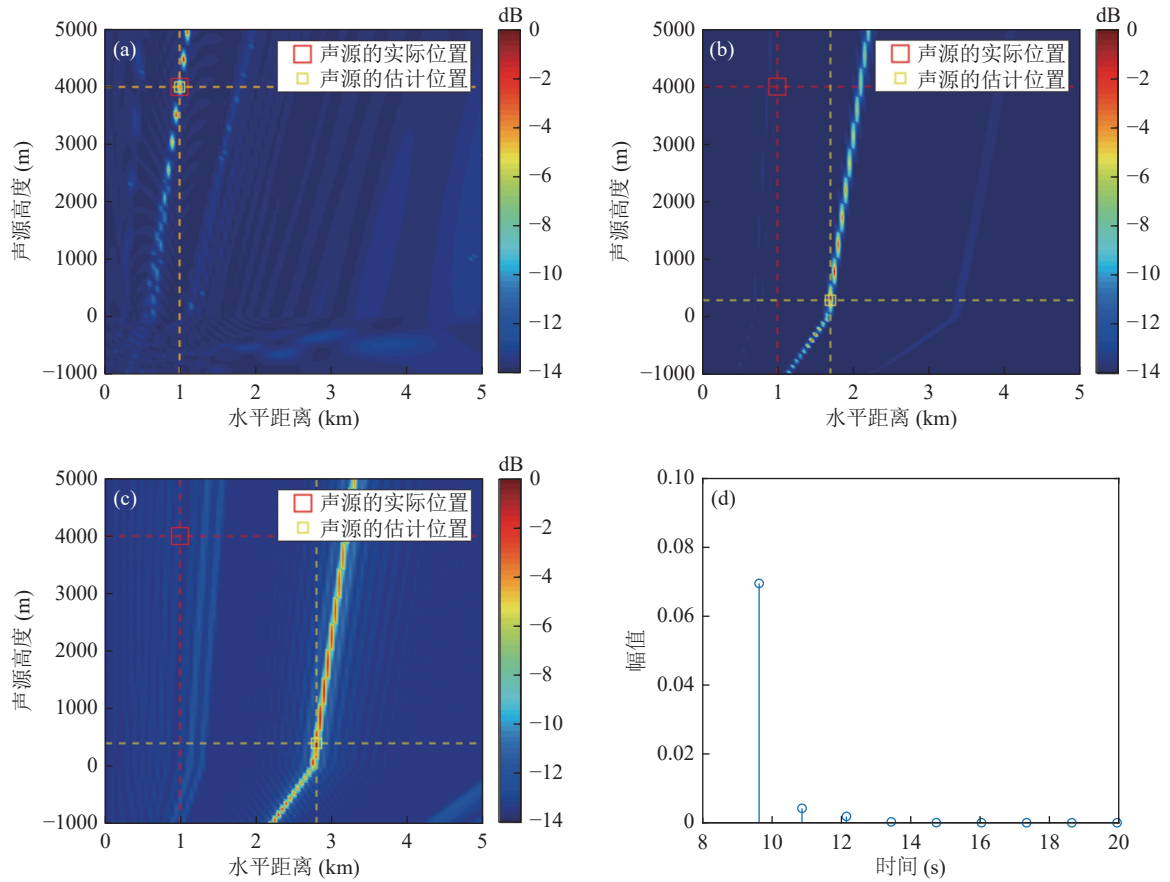


图3 高度 4000 m、距离阵列参考点 1 km 的声源分别按 (a) $i=0$, (b) $i=1$ 和 (c) $i=2$ 路径声线进行聚焦波束形成得到的空间谱; (d) 从声源到阵列参考点的声线到达结构

偿进行聚焦波束形成得到的空间谱, 以及声源至阵列参考点的声线到达结构, 空间谱中声源高度小于 0 的部分即为扫描点在水下时得到的空间谱, 图中红色虚线及方框指示了声源真实位置, 黄色虚线及方框指示了空间谱最大值所在位置 (即目标的估计位置)。由于声线与海底和海面分别反射超过 3 次时, 所携带的声能量就已损失大部分, 故本文只考虑利用 $i=0, 1, 2$ 路径声线得到空间谱。

当目标距离接收阵列距离较近时, 由声线到达结构可知, $i=1$ 和 $i=2$ 路径的声线由于海底反射损失较多的声能量, 此时 $i=0$ 路径的声线到达接收阵列的强度最大, 利用 $i=0$ 路径声线进行聚焦波束形成, 可以得到较为准确的定位结果。随着目标距离增大, $i=0$ 路径的声线须以较小的掠射角透射进入水中才能到达接收阵, 声能量损失也随之增大, 故随着目标距离的增大, $i=1$ 和 $i=2$ 路径的声线到达接收阵列的强度将先后达到最大。在 $i=1$ 或 $i=2$ 路径的声线到达接收阵列的强度达到最大时, 用该最大强度路径的声线进行聚焦波束形成, 可以得到相对准确的定位结果。

只利用直接透射入水的折射声线进行近场聚焦

波束形成定位, 只能对较近距离空中目标实现定位, 而利用不同路径声线则可对更远距离的空中目标实现定位。但同时, 声源在同一高度, 随着距离的增大, 空间谱的距离-高度耦合越来越严重, 这样的耦合现象会导致目标高度估计不准确, 原因是随着目标距离增大, 阵列对目标高度的分辨能力逐渐变弱。

此外, 直接利用不同路径声线进行聚焦波束形成会存在伪峰问题。以声源高度 4000 m, 水平距离 1 km 为例, 利用 $i=0$ 路径声线进行聚焦波束形成时, 能够较为准确地定位到目标位置, 但利用 $i=1$ 和 $i=2$ 路径进行聚焦波束形成时, 空间谱分别在水平距离 1.7 km 和 2.5 km 附近形成非常明显的伪峰, 下面分析伪峰的成因。

令

$$\tau_i(r, h) = [t_{1i}(r, h) - t_{\text{ref},i}(r, h), t_{2i}(r, h) - t_{\text{ref},i}(r, h), \dots, t_{Mi}(r, h) - t_{\text{ref},i}(r, h)]^T, \quad (14)$$

即扫描面上点 (r, h) 的声源辐射的沿着路径 i 的声线到达各阵元与参考点的时延差向量。图 6(a)(b) 分别给出了扫描面上各点的 $T_{10}(r, h)$ 和 $T_{20}(r, h)$, 其表达式分别为

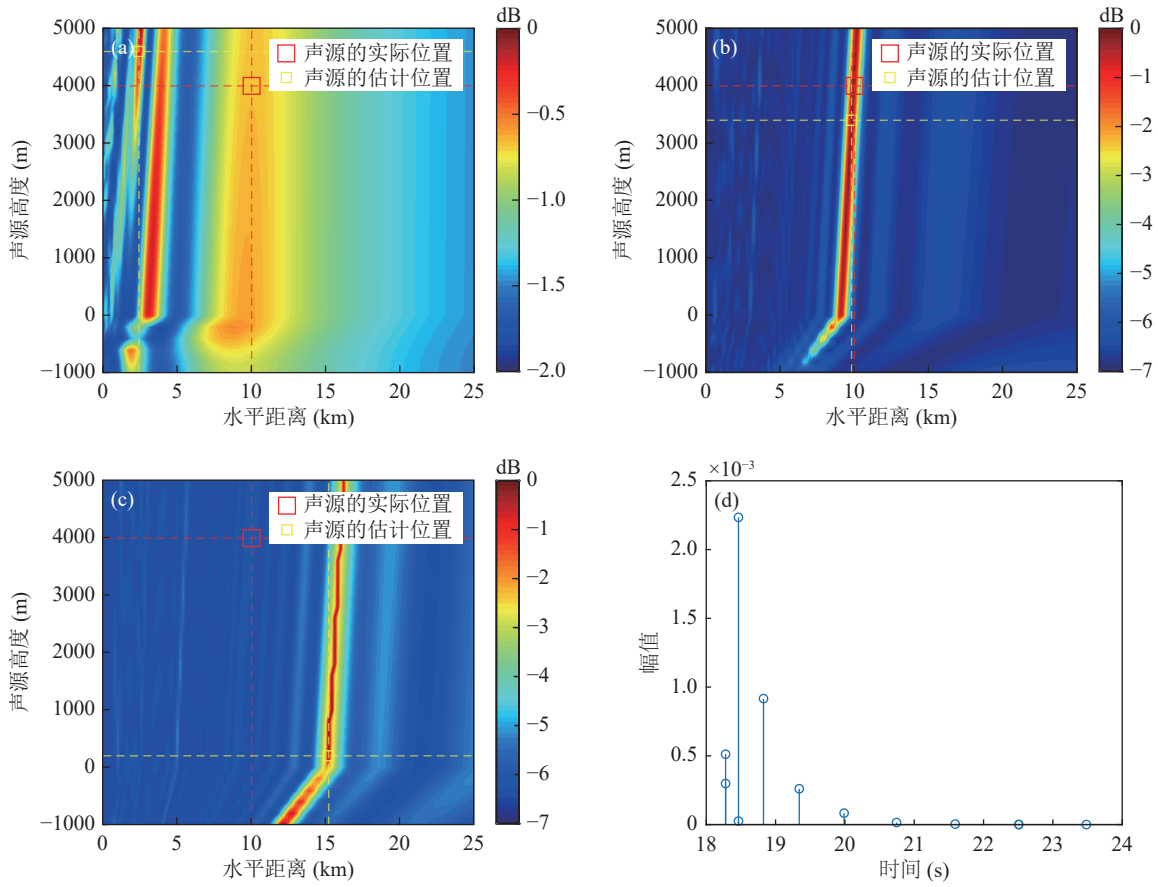


图4 高度 4000 m、距离阵列参考点 10 km 的声源分别按 (a) $i=0$, (b) $i=1$ 和 (c) $i=2$ 路径声线进行聚焦波束形成得到的空间谱; (d) 从声源到阵列参考点的声线到达结构

$$T_{10}(r, h) = \|\tau_1(r, h) - \tau_0(r_0, h_0)\|_{\infty}, \quad (15)$$

$$T_{20}(r, h) = \|\tau_2(r, h) - \tau_0(r_0, h_0)\|_{\infty}, \quad (16)$$

式中, $\|\cdot\|_{\infty}$ 表示向量的无穷范数。 $T_{10}(r, h)$ 和 $T_{20}(r, h)$ 分别表征了各扫描点 $i=1$ 和 $i=2$ 路径声线到达各阵元与参考点时延差和声源实际位置 (r_0, h_0) 沿 $i=0$ 路径声线到达各阵元与参考点时延差的差别。

图 6 中给出了声源的实际位置, 以及图 3(b)(c) 空间谱估计的声源位置, 通过图 6(a)(b) 各点时延差比较和图 3(b)(c) 空间谱对比可以看到, 图 3(b)(c) 空间谱中伪峰出现的位置, 恰好是图 6(a)(b) 中时延差的差别的极小值位置。由此可见, 图 3(b)(c) 空间谱出现伪峰的原因是两图伪峰上各点分别按 $i=1$ 和 $i=2$ 路径到达阵元和参考点的时延差, 与目标真实位置按 $i=0$ 路径到达阵元和参考点的时延差十分接近。因此, 图 3(b)(c) 空间谱出现的伪峰, 仍然由 $i=0$ 路径声线的能量产生, 由于此时 $i=0$ 路径声线的能量最大, 故而使得 $i=1$ 和 $i=2$ 路径产生的空间谱峰值不明显, 造成误判。类似地, 也可解释图 4(a)(c) 和图 5(a)(b) 中伪峰的产生。

因此, 直接利用空中声源辐射的不同路径的声

线进行近场聚焦波束形成时会存在伪峰, 因而难以辨别伪峰和目标真实峰值位置, 以及实现可靠的声源定位。

2.3 利用声线到达幅度进行加权的伪峰抑制方法

为消除直接利用不同路径声线进行聚焦波束形成时伪峰的影响, 本文提出了一种利用声线到达幅度进行加权的伪峰抑制方法。不同声线路径的到达幅度不同, 在海洋环境确知的条件下, 该方法通过声场建模计算不同声线路径的到达幅度, 对近场波束形成加权处理, 进而抑制伪峰。算法主要流程如下:

(i) 利用不同路径声线进行聚焦波束形成, 得到空间谱 $P_i(r, h)$;

(ii) 计算扫描面上各个位置 (r, h) 到达阵列的各路径声线 i 的到达幅度, 记为 $A_i(r, h)$;

(iii) 记 $\omega_i(r, h) = A_i^2(r, h) / \sum_{k=1}^I A_k^2(r, h)$ 为权值, 则加权后的空间谱为

$$P(r, h) = \sum_{i=0}^I \omega_i(r, h) P_i(r, h). \quad (17)$$

将加权后得到的空间谱归一化, 其最大值对应

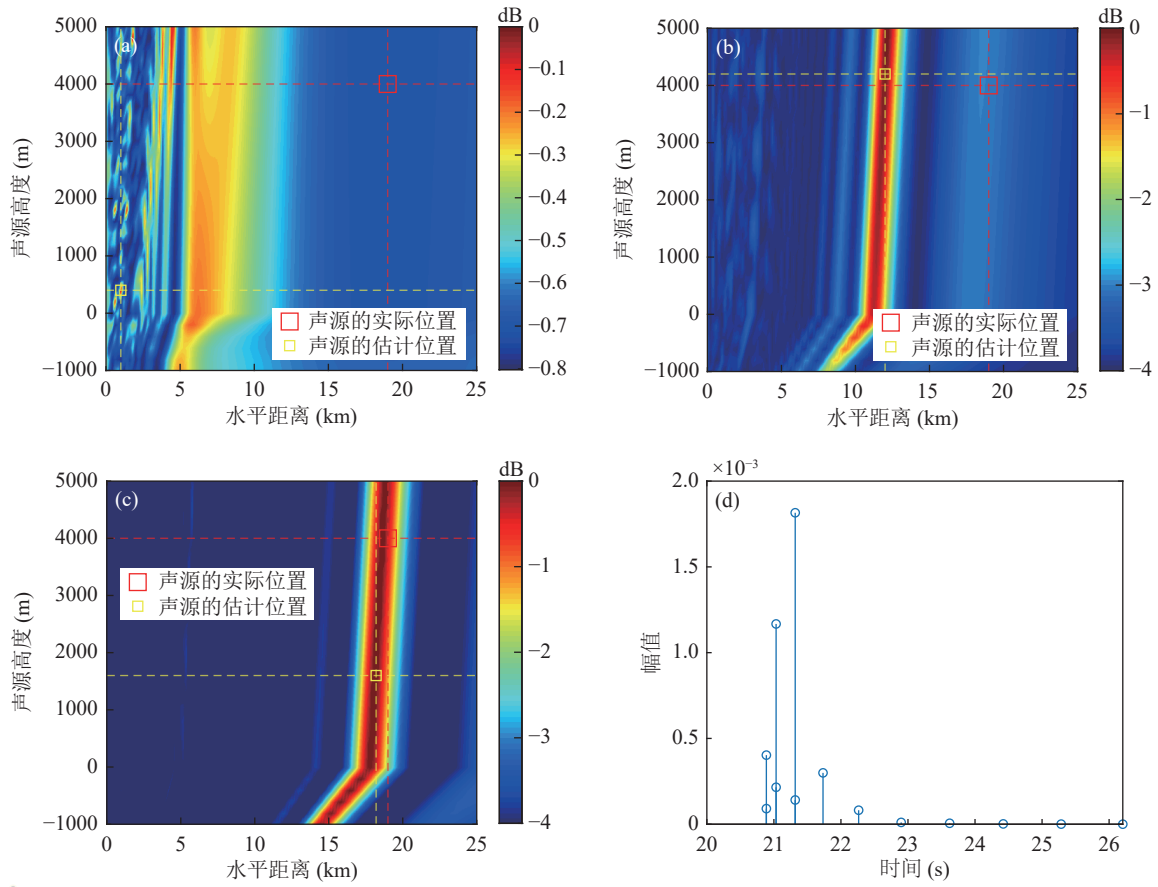


图5 高度 4000 m、距离阵列参考点 19 km 的声源分别按 (a) $i=0$, (b) $i=1$ 和 (c) $i=2$ 路径声线进行聚焦波束形成得到的空间谱; (d) 从声源到阵列参考点的声线到达结构

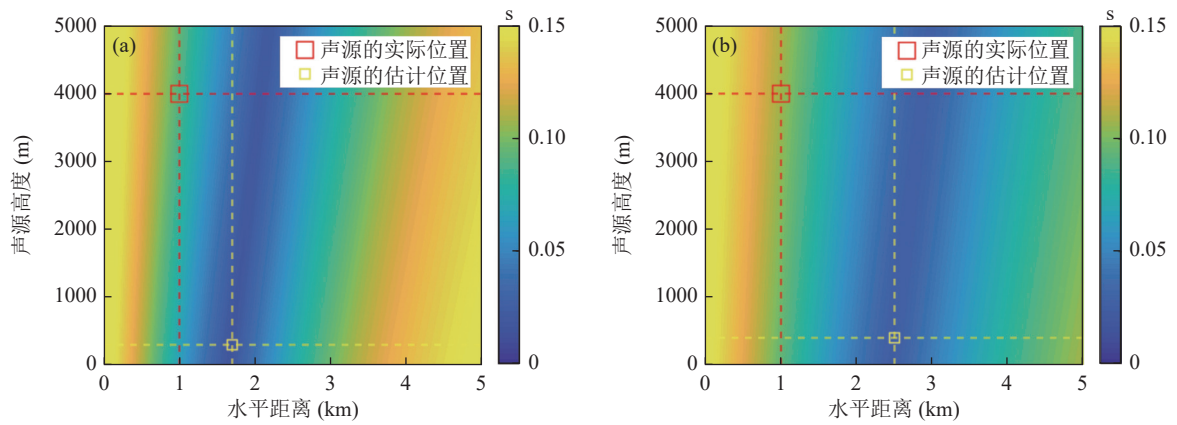


图6 时延差比较 (a) $T_{10}(r, h)$; (b) $T_{20}(r, h)$

的位置即为目标估计位置。

图7给出了上述仿真环境下扫描面上各个位置的加权重值, 图中各像素点的 RGB 值代表了对应位置的加权重值, 即 $RGB(r, h) = [\omega_1(r, h), \omega_2(r, h), \omega_3(r, h)]$ 。则图中红色区域的声源沿 $i=0$ 路径声线到达接收阵列的强度最大, 绿色区域的声源沿 $i=1$ 路径声线到达接收阵列的强度最大, 蓝色区域的声源沿 $i=2$ 路径声线到达接收阵列的强度最大。

对声源高度为 4000 m, 水平距离分别为 1 km, 10 km, 19 km 的情况进行加权处理, 幅度加权后的空间谱如图8所示。与直接利用不同路径声线进行聚焦波束形成的空间谱图3—图5对比可见, 幅度加权后, 各距离产生的伪峰被明显抑制, 从而能够凸显出声源真实峰值位置, 定位误差明显减小。

具体来说, 通过各位置的权值图(图7)可以看到, 当声源距离接收阵水平距离为 1 km 时, 直接利

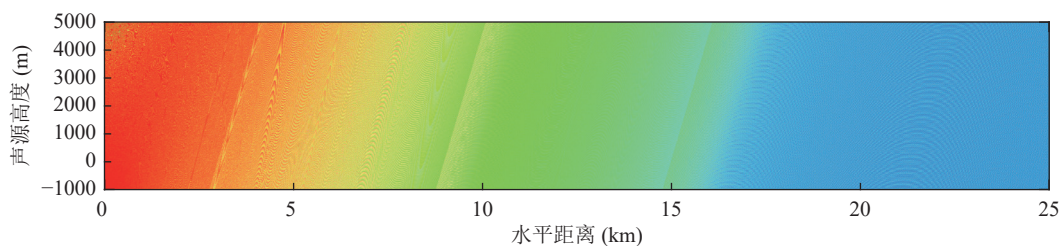


图7 不同路径声线幅度加权重值

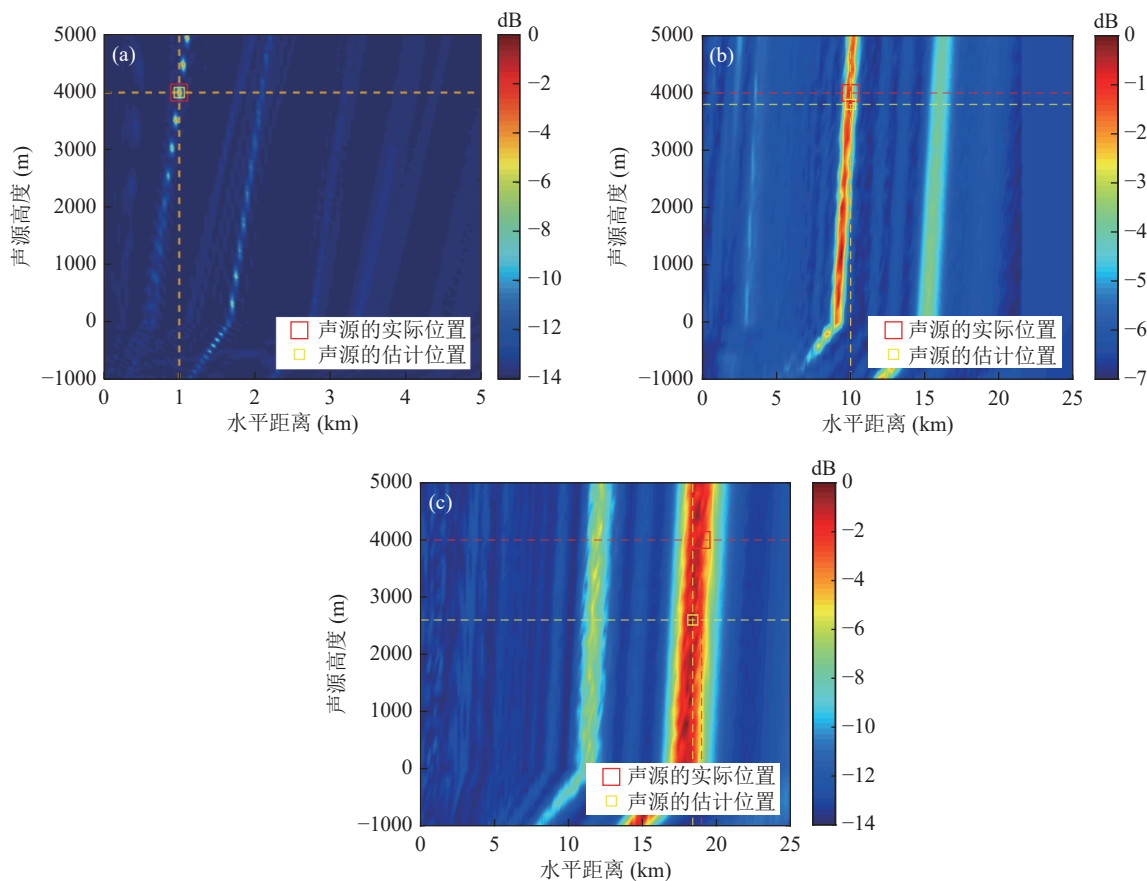


图8 幅度加权后的聚焦波束形成空间谱, 声源距接收阵参考点水平距离分别为 (a) 1 km; (b) 10 km; (c) 19 km

用不同路径声线进行聚焦波束形成的空间谱的真实目标峰值和伪峰位置都在 $i=0$ 路径声线到达接收阵列的强度最大的区域; 幅度加权时, 此区域对利用 $i=0$ 路径声线的空间谱权值较大, 对利用 $i=1$ 和 $i=2$ 路径声线的空间谱权值较小, 故能抑制伪峰, 凸显真实峰值位置。同样也可解释水平距离为 10 km 和 19 km 的声源的伪峰抑制机理。

2.4 算法性能分析

在每个阵元信号加入噪声, 使得单通道信噪比为 -5 dB, 各水平距离进行 1000 次蒙特卡罗随机噪声试验。图 9 分别给出了直接利用各路径声线进行聚焦波束形成定位以及幅度加权后定位时, 高度和水平距离定位的均方根误差随距离的变化。

由图 9 可见, 未经幅度加权时, 水平距离 5 km 以内利用 $i=0$ 路径声线定位最为准确, 与图 7 结论一致; 水平距离为 5~15 km 时, 利用 $i=1$ 路径声线定位最为准确; 水平距离 15 km 以外, 利用 $i=2$ 路径声线定位最为准确。但在其他范围时, 直接利用不同路径的声线进行定位由于存在伪峰而有很大的误差。

经声线到达幅度加权处理后, 各距离的近场聚焦波束形成算法都能很好的抑制伪峰, 定位准确性有较大提高。影响算法定位的性能主要有以下两个因素, 一是由于算法在计算各路径声线到达幅度时, 需要海底的底质数据, 底质数据不准确可能会导致算法将伪峰误判为目标真实位置; 二是算法存在的距离-高度耦合问题, 会导致对高度的分辨能力较弱。

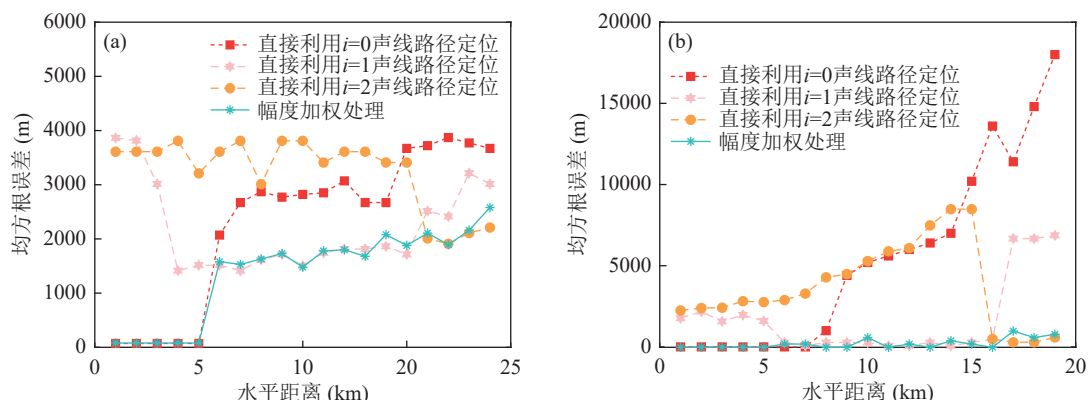


图9 单通道信噪比为-5 dB时高度和水平距离估计的均方根误差 (a) 高度的均方根误差; (b) 水平距离的均方根误差

海底底质声速对声线到达幅度影响较大, 对高度 4000 m、不同水平距离的声源, 利用不同海底底质声速计算到达幅度, 所提算法的水平距离定位误差如图 10 所示。真实底质声速为 1530 m/s, 水平距离为 1 km 时, 由于按 $i=0$ 路径声线得到的空间谱中峰值为目标真实位置, 随着用于计算到达幅度的底质声速增大至 1560 m/s 时, $i=1$ 路径声线到达强度超过 $i=0$ 路径声线, 算法会将 $i=1$ 路径声线得到的空间谱中峰值误判为目标真实位置。同样, 水平距离为 10 km 时, 按 $i=1$ 路径声线得到的空间谱中峰值为目标真实位置, 计算到达幅度的底质声速小于 1500 m/s 或大于 1550 m/s 时, 算法会分别将 $i=0$ 和 $i=2$ 路径声线得到的空间谱中峰值误判为目标真实位置; 水平距离为 19 km 时, 按 $i=2$ 路径声线得到的空间谱中峰值为目标真实位置, 计算到达幅度的底质声速小于 1500 m/s 时, 算法会将 $i=1$ 路径声线得到的空间谱中峰值误判为目标真实位置。各水平距离在底质声速为 1500~1550 m/s 范围时, 目标水平距离估计较为准确, 不会出现将伪峰误判为目标真实位置的情况。

考虑到算法存在距离-高度耦合问题, 图 11 给

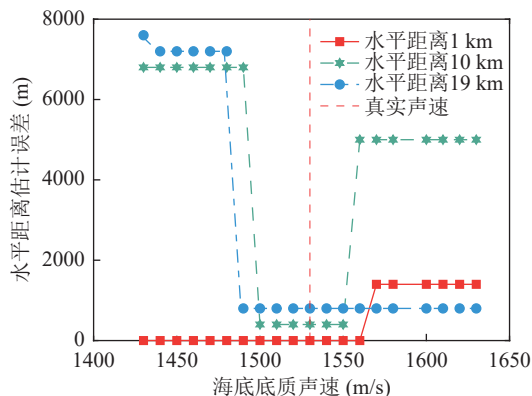


图10 利用不同海底底质声速计算到达幅度时水平距离的估计误差

出了不同水平距离时高度估计误差随声源实际高度的变化情况。与前文所述一致, 声源在同一高度时, 随着距离的增大, 空间谱的距离-高度耦合越来越严重, 这种耦合现象导致目标高度估计不准确。由图 9 和图 11 仿真结果可知, 本文仿真环境下, 所提方法对水平距离 5 km 内空中目标的高度估计是准确的, 水平距离超过 5 km 时则由于距离-高度耦合问题使得高度估计误差较大。特别地, 本文仿真环境下, 同样由于距离-高度耦合问题, 所提方法可分辨水平距离 5 km 内的目标是在空中或是水下, 而当目标水平距离超过 5 km 时, 所提方法可能会将空中目标误判为水下目标, 或将水下目标误判为空中目标。

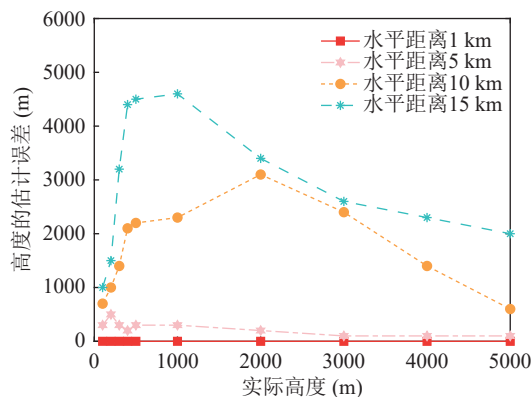


图11 不同水平距离时高度估计误差随实际高度的变化

3 实验数据验证

2022 年, 利用布放在海底的深海水阵对经过的高空固定翼飞机进行了水下探测。该固定翼飞机以一定速度飞越海底水平阵, 本节利用该实验数据验证算法的有效性。

实验海区水深约 1000 m, 空气中声速剖面与前文一致, 实验时测得的海水声速剖面如图 12 所示, 为不完全声道, 则空中目标辐射的能够透射进入海

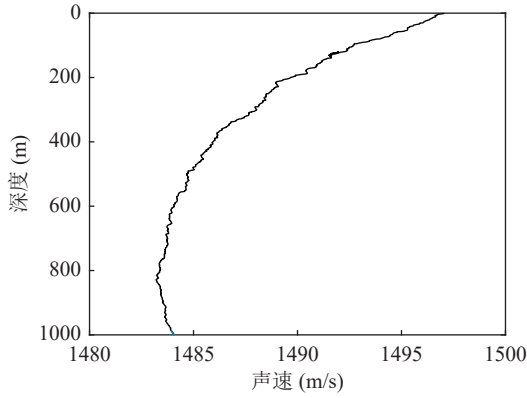


图 12 声速剖面

水的声线必然能与海底发生反射,而不会在海水中反转,符合前文所述环境模型。

3.1 数据处理

选取两个时刻,使用本文方法对海底接收阵信号进行处理。第 1 个时刻空中声源目标高度约为 5000 m, 距离接收阵约 6 km, 此时 $i=1$ 路径声线阵元幅度最大。将阵列采集到的信号转换到频域中。将接收数据分帧处理, 选择处理数据的时间窗长度为 1 s, 处理的数据长度为 3 s, 共 3 帧数据, 然后将各帧

数据傅里叶变换到频率域。提取目标辐射噪声频段上的频点, 按照前文所述方法处理。考虑到实际情况下波束形成器的稳健性, 对数据协方差矩阵进行对角加载。图 13 为按不同路径声线直接进行聚焦波束形成以及按声线到达幅度进行加权后得到的空间谱。

第 2 个时刻空中声源目标高度约为 5000 m, 距离接收阵约 13 km, 此时 $i=1$ 路径声线阵元幅度最大。图 14 为按不同路径声线进行聚焦波束形成以及幅度加权后得到的空间谱。此外, 又选取了固定翼飞机飞过该水平阵的 15 个时刻, 此段时间内飞机高度约为 5000 m, 水平距离定位结果如图 15 所示。

3.2 结果分析

由图 13 和图 14 可见, 与前文所述一致, 声源距离接收阵水平距离 6 km 时, $i=1$ 路径声线能量最大, 按 $i=1$ 路径声线得到的空间谱峰值为真实声源位置, 按 $i=0$ 和 $i=2$ 路径声线得到的空间谱中均存在伪峰; 而当声源距离接收阵水平距离 13 km 时, 由于距离较远, 此时 $i=2$ 路径声线能量最大, 按 $i=2$ 路径声线得到的空间谱为真实声源峰值, 按 $i=0$ 和 $i=1$ 路径

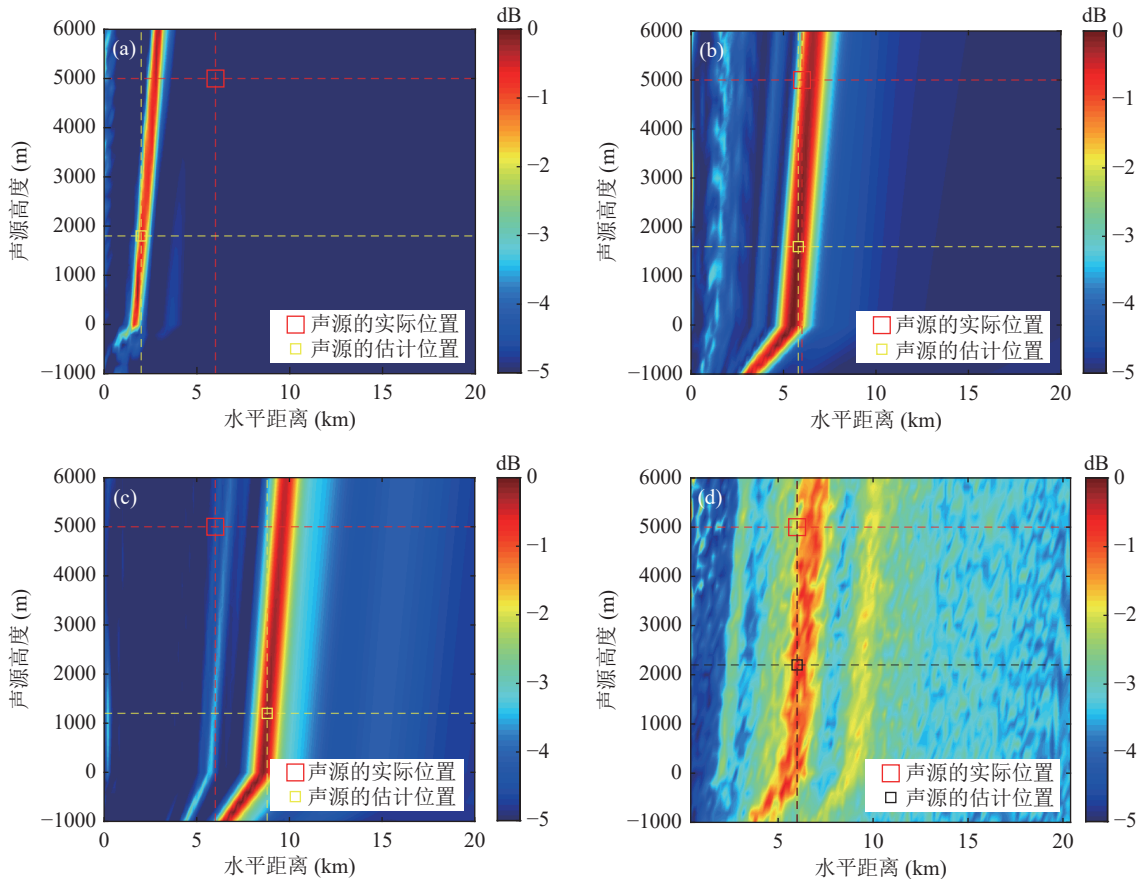


图 13 高度约 5000 m、距离阵列参考点约 6 km 的声源分别按 (a) $i=0$, (b) $i=1$, (c) $i=2$ 路径声线进行聚焦波束形成的空间谱; (d) 幅度加权后聚焦波束形成空间谱

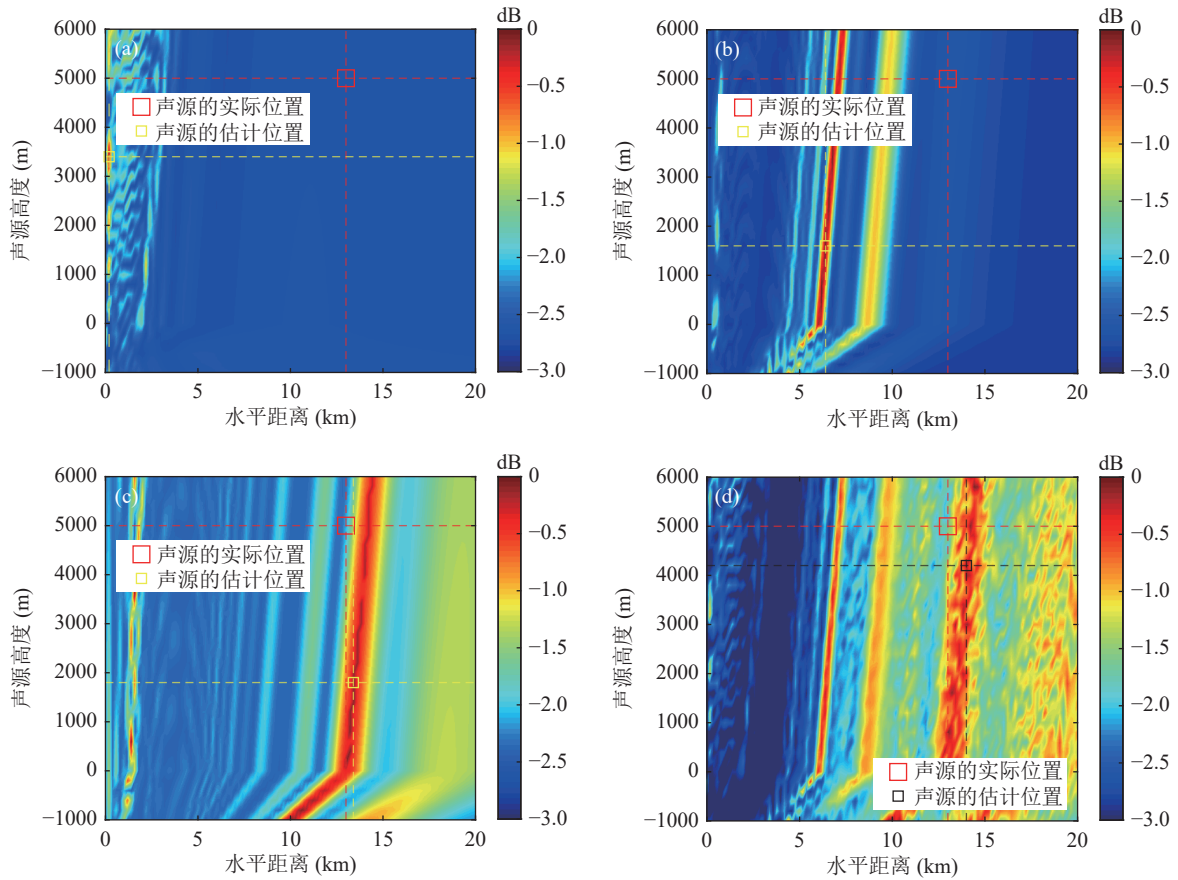


图 14 高度约 5000 m、距离阵列参考点约 13 km 的声源分别按 (a) $i=0$, (b) $i=1$, (c) $i=2$ 路径声线进行聚焦波束形成的空间谱; (d) 幅度加权后聚焦波束形成空间谱

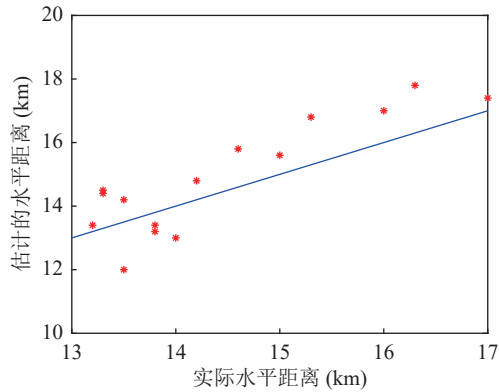


图 15 水平距离定位结果

声线得到的空间谱中均存在伪峰。直接利用不同路径声线进行近场聚焦波束形成定位时,存在伪峰和目标真实峰值难以区分的问题。即仅直接利用不同路径声线得到的空间谱,如图 13(a)(b)(c) 和图 14(a)(b)(c) 所示,无法分辨伪峰和目标真实位置;但经声线到达结构的幅度加权后的空间谱,如图 13(d) 和图 14(d) 所示,能够分辨伪峰和目标的真实位置,定位结果更为准确。

如图 15 所示,固定翼飞机飞过阵列的一系列时

刻的水平距离平均定位误差为 0.9 km,该定位结果是较为准确的。所提算法实现了对飞行高度约 5000 m、水平距离 13~17 km 的固定翼飞机目标的水平距离定位,算法的有效性得到验证。但对较远的目标进行定位时,本方法难以克服距离-高度耦合问题,对远距离目标的高度的分辨能力较弱。

4 结论

本文将聚焦波束形成应用于水下水平阵对空中声源的探测定位中,提出了利用声源到达海底水平接收阵不同路径的声线进行近场聚焦波束形成,对空中目标进行定位。仿真和实验结果表明,该方法相较于仅依赖直接透射入水的折射声线进行定位的传统近场聚焦波束形成,能够显著提升对远距离目标的探测能力;同时还克服了依赖线谱多普勒频移特征进行定位的限制,如仅适用于匀速直线运动目标和需要长时间数据的缺陷。与匹配场方法相比,该方法计算量大幅减少,物理意义更加明确。此外,通过引入声线到达幅度对空间谱进行加权的伪峰抑制技术,有效抑制了伪峰,提高了定位准确性,且对

海底底质声速变化的敏感度较小。该方法还成功实现了对飞行高度约 5000 m、水平距离 13~17 km 范围内的固定翼飞机目标的水平距离定位, 验证了其在实际应用中的有效性。

本文方法仍存在问题, 如对较远的目标进行定位时难以克服距离-高度耦合问题, 对远距离目标高度的分辨能力较弱。此外, 目标在各阵元产生的多普勒频移差别较大时 (如目标在阵列上方飞过的情况), 本方法难以适用。

致谢 感谢崔寒茵老师在大气层中声传播方面的有益讨论, 感谢参与本次实验的全体实验人员, 是他们的辛勤劳动提供了宝贵而可靠的实验数据。

参 考 文 献

- 1 Urick R J. Noise signature of an aircraft in level flight over the sea. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1972; **52**(3): 993-999
- 2 Chapman D M F, Ward P D. The normal-mode theory of air to water sound transmission in the ocean. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1990; **87**(2): 601-618
- 3 Schmidt H. OASES Version 3.1, User guide and reference manual. 2011
- 4 孙炳文, 郭圣明, 胡兵, 等. 浅海空气声入水传播特性分析. *声学学报*, 2015; **40**(2): 17-24
- 5 Buckingham M J. On the sound field from a moving source in a viscous medium. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2003; **114**(6): 3112-3117
- 6 王光旭, 彭朝晖, 陈连荣. 一种水下水平阵对空气中声源目标的定位方法. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013; **43**(z1): s138-s145
- 7 Peng Z H, Li Z L, Wang G X. Matched bearing processing for airborne source location by underwater horizontal line array. *Chin. Phys. Lett.*, 2010; **27**(11): 114303
- 8 刘凯悦, 彭朝晖, 张灵珊, 等. 水下水平阵对空中运动声源的线谱探测. *声学学报*, 2019; **44**(4): 566-575
- 9 刘凯悦, 彭朝晖, 张灵珊, 等. 水下对空中声源的运动参数估计. *应用声学*, 2020; **39**(2): 236-245
- 10 苏林, 孙炳文, 郭圣明, 等. 空气中声源的水下匹配场定位. *声学学报*, 2019; **40**(6): 799-806
- 11 King W F, Bechert D. On the sources of wayside noise generated by high-speed trains. *J. Sound Vib.*, 1979; **66**(3): 311-332
- 12 时洁, 杨德森, 刘伯胜, 等. 基于 MVDR 聚焦波束形成的辐射噪声源近场定位方法. *大连海事大学学报*, 2008; **34**(3): 55-58
- 13 时洁, 杨德森, 时胜国. 子带分解 MVDR 高分辨宽带聚焦波束形成算法研究. 全国声学学术会议, 中国声学学会, 中国上海, 2008
- 14 Johnson R C. Antenna engineering handbook. 3rd edition. New York: McGraw-Hill, 1993: 9-12
- 15 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, *et al.* Wave propagation theory. In: Computational Ocean Acoustics, New York: Springer, 2011
- 16 陈欢, 何良, 杨德森, 等. 基于幅度补偿的 MVDR 水下噪声源近场定位识别方法研究. *振动与冲击*, 2012; **31**(2): 51-54