第 44 卷第 4 期	声 学 学 报	Vol. 44, No. 4
2019年7月	ACTA ACUSTICA	Jul., 2019

庆祝李启虎先生80华诞

浅海负跃层条件下的双基地有源探测实验

及定位声速修正*

顾怡鸣^{1,2} 李整林^{1†} 官在晓¹ 余炎欣¹ 张仁和^{1,2} 李风华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)

2019 年 1 月 23 日收到

2019年6月11日定稿

摘要 为了研究浅海条件下海底固定水平阵和机动声源的双基地有源探测性能,建立了浅海双基地有源探测仿真模型,分析 了实验海区负跃层条件下的传播损失和多途能量扩展损失,实现了双基地有源探测的性能预估。以模型仿真为基础,在南海 北部海域开展了一次浅海双基地有源探测实验。针对定位中的声速与实验中目标回波的脉冲传播速度的偏差导致定位精度下 降的问题,提出了一种目标回波脉冲传播速度近似估计方法。实验结果表明,双基地有源探测可在浅海负跃层条件下实现对 水中目标的有效探测,多个实验站位的回波信噪比实测值与仿真预测值符合较好,定位声速近似估计方法可进一步提高定位 精度.

PACS 数: 43.30, 43.60

Experimental verification of bistatic active detection and propagation speed correction in shallow water with negative thermocline

GU Yiming^{1,2} LI Zhenglin¹ GONG Zaixiao¹ YU Yanxin¹ ZHANG Renhe^{1,2} LI Fenghua¹

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

(2 University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049)

Received Jan. 23, 2019

Revised Jun. 11, 2019

Abstract In order to estimate the capability of bistatic active detection based on a stationary horizontal array and flexible source in shallow water environment, a bistatic active signal simulator is developed. Further, the transmission losses and energy spreading losses are analyzed and the capability of bistatic active detection in shallow water environment is estimated. An experiment was conducted in the South China Sea according to the predicted detection range. The bias between the selected reference sound velocity and the pulse propagation velocity of the target echo degrades the positioning accuracy. An approximate method for the pulse velocity estimation is proposed to reduce the positioning error caused by the bias. Experimental results show that bistatic active detection can effectively detect target in negative thermocline environment, the estimated SNR (Signal-to-Noise Ratio) with the simulator are reliable, and the positioning accuracy can be improved by using estimated pulse velocity.

引言

双基地有源探测系统是构成多基地有源探测系

统的基本单元,由收发分置的声源和接收阵构成,接 收阵接收声源发射信号的目标回波后,通过时-空域 联合处理提高回波信噪比^[1],开展回波检测^[2-3]并获 取回波的时延和方位,进而根据几何关系实现目标定

^{*} 国家自然科学基金项目(11434012, 11874061)资助

[†] 通信作者:李整林, lzhl@mail.ioa.ac.cn

位。回波携带了目标的信息,易受到探测信号^[4-6]、 声传播^[7-8]、目标特性^[9-11]等因素的影响,而直达 波^[12]、异地混响^[13-14]则是双基地有源探测中的主 要干扰。

目标定位是双 / 多基地有源探测的主要目的, 国 内外学者对导致定位误差的因素和提高定位精度的 方法进行了许多研究。Sandys-Wunsch 等分析了多基 地有源探测系统的接收点存在位置误差时的定位误 差^[15],研究表明声源-目标-接收的几何关系是决定 定位精度的关键因素。Coraluppi 对双基地有源探测 系统收发位置、回波方位、回波时延、声速等参数存 在高斯误差时,对定位精度的影响进行了蒙特卡洛 仿真分析^[16],研究表明双基地系统的定位误差受几 何关系影响较大,在目标靠近收发连线时定位误差 很大。为了提高定位的精度, Kim 等对收发合置、双 基地和多基地的定位性能进行了对比,提出利用多 基地信息融合来获取更高的定位精度^[17]。Peters 提 出采用贝叶斯方法将存在误差的收发位置、回波方 位、回波时延、定位声速和目标位置联合估计, 通过 蒙特卡洛仿真证明了其有效性^[18],但缺点在于计算 量很大。闫晟等^[19]利用水下爆炸声源构成类似双基 地有源探测系统,针对爆炸声源位置存在较大误差 的问题,提出根据接收阵和目标位置选择爆炸声源 的投放位置来降低定位误差的方法,并在湖上实验 中取得了较高的定位精度。实际上,有源探测通常是 对目标回波匹配滤波的脉冲峰进行检测, 而脉冲峰 在信道中的传播速度被定义为声脉冲传播速度^[20]。 浅海声信道的频散往往会使声脉冲传播速度随收发 深度、目标深度、目标距离等参数而变化, 而现有的 目标定位方法通常假设定位声速为已知常数,从而 导致定位误差。

实验研究方面,现有的水平阵双 / 多基地有源 探测实验大多采用应答器模拟目标回波。例如, DEMUS'04 和 PreDEMUS'06 海试实验中采用应答 器模拟回波来研究跟踪算法的性能^[21-22],TREX13 海试中也采用了应答器模拟目标回波信号^[23-24]。国 内相关湖上实验也大多采用应答器信号作为目标回 波^[25],对水下连续波有源探测的各项技术进行了初 步验证,而采用实际目标进行有源探测实验时,航路 规划等实验准备则要复杂得多,需要对实际海洋环 境条件下的探测范围进行预估,以确保接收回波信 号具有适于研究分析的足够信噪比。双基地目标强 度方面的研究表明,双基地目标强度在镜反射方向 明显较高^[9-10],对多基地探测实验的部署有很大的 指导意义。但现有对双基地有源探测性能的研究大 多没有考虑声传播的影响^[26-28], 难以对双基地有源 探测在实际海洋环境中的性能进行评估。Hermand 指出信号经过频散信道后匹配滤波器不再是最大信 噪比准则下的最优滤波器,并将由频散造成的信噪 比损失定义为能量扩展损失 (Energy Spreading Loss, ESL)^[32]。因此,声传播对双基地有源探测性能的影 响不仅体现在传播损失,还需要考虑频散信道带来 的信噪比损失。

本文通过仿真计算了实验海区负跃层环境条件 下的传播损失、能量扩展损失,以此为基础预估了实 验海洋环境条件下双基地有源探测的性能。以仿真 结果为基础,在南海海域开展了基于海底水平阵的 双基地有源探测实验。在对回波数据处理中,采用先 空后时的处理方法,先对阵列接收信号进行常规波 束形成以获取阵增益,再对波束输出进行匹配滤波 获取时间处理增益,实现了对水面目标的双基地有 源探测。浅海声信道的频散导致水面目标回波的声脉冲传播速度与测量得到的介质声速偏差较大,进 而会导致出现定位误差。结合信道特征分析了水中 目标回波的声脉冲传播速度,提出的定位声速修正 方法可有效降低定位误差。

1 浅海双基地有源探测方法

双基地有源探测系统的几何关系如图 1 所示, r_1 为声源到目标的距离, r_2 为目标到接收阵的距离, r_3 为声源到接收阵的距离; 角度 α 为目标回波的方 位, β 为双基地分置角, γ 为目标-接收阵-声源的 夹角。 r_3 通常可以可根据声源和接收阵的已知坐标 位置精确获取。



图 1 水平阵双基地有源探测几何关系示意图

声源和接收阵通过时间基准系统实现时钟同步,可采用回波的信号时延和方位进行目标定位。 以信号发射时刻为起始时刻,目标回波时延 τ_{12} 和方位 α 可通过阵列信号时空处理得到的时延-方位扫描结果估算,得到的回波时延和方位估计值分别记为 $\hat{\tau}_{12}$ 和 $\hat{\alpha}$ 。

根据余弦定理可得目标和接收阵之间的距离:

$$\hat{r}_2 = \frac{(c\hat{\tau}_{12})^2 - r_3^2}{2(c\hat{\tau}_{12} - r_3\cos\hat{\gamma})},$$
(1)

其中, c为定位声速, r_3 精确已知, 角度 γ 的估计 值 $\hat{\gamma}$ 通过回波方位 $\hat{\alpha}$ 和声源方位得到。则目标的笛 卡尔坐标为:

$$\widehat{x}_{\mathrm{T}} = x_{\mathrm{R}} + \widehat{r}_{2} \cos \widehat{\alpha},
\widehat{y}_{\mathrm{T}} = y_{\mathrm{R}} + \widehat{r}_{2} \sin \widehat{\alpha},$$
(2)

其中, x_R和 y_R为接收阵的坐标。

目标定位误差为:

$$e = \sqrt{(\hat{x}_{\rm T} - x_{\rm T})^2 + (\hat{y}_{\rm T} - y_{\rm T})^2},$$
 (3)

其中, x_T和 y_T为目标坐标真值,实验中一般通过 GPS或者北斗定位系统获取。

图 2 为接收阵列信号处理的流程,这里采用先 空后时的处理方法,先对阵列接收信号进行常规波 束形成以获取阵增益 AG,再对波束形成得到的波束 输出进行匹配滤波获取时间处理增益 PG,匹配滤波 后输出信噪比为 SNR_{out}。设置检测门限对时延-方 位扫描结果进行峰值检测,并对目标回波的时延和 方位进行估计,得到时延和方位的估计值 $\hat{\tau}_{12}$ 和 $\hat{\alpha}$ 。



图 2 双基地有源探测信号处理流程

在实际浅海环境中进行有源探测实验时,能否 获取足够高信噪比的回波信号是实现对目标的有效 探测的关键。当声源、接收阵和目标确定时,有源探 测实验的注意事项有:首先,采用真实目标开展实验 时,双基地目标强度随入射角度、接收角度和目标姿 态的影响很大,偏离镜反射方向时目标强度会很弱, 导致回波信噪比过低、难以进行检测;其次,双基地 有源探测在浅海负跃层条件下探测范围有限,若目 标船航线处于探测范围之外,则同样不能获取足够 高信噪比的回波信号。

针对偏离镜反射方向回波较弱的问题,实验中 可实时调整目标船的航向,使声源船和接收阵相对 目标船长轴方向构成近似镜反射的几何位置关系, 从而保持最优的目标强度。实验期间目标船的机动 策略如图 3 所示, θ_1 和 θ_2 分别为目标船相对声源和 接收阵的方位,可通过声源、目标和接收阵的位置获 取。要使目标船、声源和接收阵三者达成镜反射,目 标船**艏**向为 $\varphi = (\theta_1 + \theta_2 \pm \pi)/2$ 。实验中目标船速度约 为 2 节,通过实时计算目标船艏向 φ 来实时计算目 标船的最佳姿态,以获取较强的回波信号。



图 3 实验目标船机动策略示意图

目标船航线设计需要以合理的探测范围估计为 基础。实际浅海海洋环境对声传播影响很大,在声 源、目标、接收阵都确定时,海洋环境直接决定了双 基地有源探测的探测范围。只有对实验海区负跃层 海洋环境条件下的传播损失和能量扩展损失进行全 面仿真计算,才能对双基地有源探测的性能进行准 确预估。

2 实验负跃层环境下的探测范围预估

2.1 实验条件与海洋环境

如图 4 所示,实验海区的海深约为 90 m,采用 "实验 1 号"双体船的水下潜体作为目标,双体船吃 水深度 6 m,实际潜体目标的几何中心深度仅为 3 m, 潜体可以近似为两个长轴约 57 m、短轴约 6 m 的 旋转椭球体,吊放声源工作深度约为 56 m。声源无 指向性,实验期间发射船漂泊,运动速度很小,可以 认为静态。用 CTD 测量的声速剖面如图 5 所示,在 10 m 和 70 m 的深度上存在两个负跃层。海底模型可 近似为半无限液态海底,海底纵波声速 1600 m/s、 密度 1.7 g/cm³、衰减系数为 0.2 dB/λ。接收阵列为 100 阵元、阵元间隔 2 m 的等间隔线阵。



图 4 实验部署情况及海底参数

考虑到目标强度是影响回波强度的重要因素^[9-10],为了获取信噪比较高的回波信号,实验中必须考虑目标强度对回波的影响。利用边界元方法^[30] 计算目标强度,设定收发分置角 $\beta = 90^{\circ}$,如图 6(a) 所示。"实验1号"船水下潜体在不同姿态角下的目标强度计算结果如图 6(b)所示,可以看出,在偏离 镜向反射方向 5°范围内目标强度超过 20 dB,偏离 10°左右目标强度约为 15 dB,偏离镜向超过 30°目标强度则会下降至 0 dB 以下。



2.2 声源级与传播损失计算

探测信号采用多普勒频移不敏感的双曲调频 (Hyperbolic Frequency Modulation, HFM)信号^[4],信 号长度为 20 s,频率范围 400~500 Hz。为了获取准 确的声源级,实验期间在距离发射换能器中心上方 6 m 的位置布置有灵敏度为 –180 dB (re 1V/μPa)的 自容式水听器。对水听器接收离散信号进行傅里叶 变换得到信号的频谱,信号带宽内信号能量和功率 分别为:

$$E = \frac{2}{NF_{\rm s}} \sum_{i=nf_1}^{nf_2} |X_i|^2, \qquad (4)$$

$$W = \frac{E}{T},\tag{5}$$

其中, F_s 为采样频率, N 为离散傅里叶变换点数, T 为发射信号的脉宽; nf₁ 为信号频率下限对应点数,

nf₂为信号频率上限对应点数。假设能量扩展为球面 波扩展,则声源级为:

$$SL = 10 \lg W + 20 \lg d - M_S,$$
 (6)

其中, d=6 m 为接收水听器距离换能器中心的距离, Ms 为测量声源级水听器的灵敏度。图 7(b) 为根据 式 (6) 得到的声源级计算结果,可以看出实验期间声 源级基本稳定,约为 204.5 dB。



对实验海区双负跃层条件下的有源探测性能进 行分析,需要较为准确的传播损失。为了验证实验海 区声学参数和模型的可靠性,采用声源到接收阵的 直达波实验数据计算单程传播损失,与声场模型计 算的传播损失结果进行对比。声场计算使用简正波 声场模型 KRAKENC 程序^[29]。

通过式 (4) 可得到宽带信号的能量, 实验传播损 失为:

$$TL(r, z) = SL + 10 \lg T - (10 \lg E - M_R),$$
 (7)

其中, M_R 为接收水听器的灵敏度。

分别采用模型对直达波的宽带相干传播损失和 中心频率对应的非相干传播损失进行计算,计算结 果与实验数据的对比结果如图 8 所示。可以看出,实 验测量传播损失与模型计算的传播损失较为符合,非 相干传播损失可以作为相干传播损失的良好近似。



采用声场模型对声源到目标、目标到接收阵的 非相干传播损失进行计算,结果如图 9 所示。实验期 间声速剖面存在双负跃层,且采用水面实验船作为 目标,从跃层下发射的声信号首先传播到跃层上海 面目标处反射,然后再传回海底附近的接收器,多次 穿越跃层、传播损失大,对有源探测十分不利。此处 声源到目标的非相干传播损失略大的原因在于: 由 于接收阵的深度较深、接近高号简正波本征函数的 波峰,因此,相对于声源到目标的声传播,目标到接 收阵的声传播过程中高阶简正波的能量占比更大,在 传播距离较短时目标到接收阵的声能量相对较高、 传播损失略低于声源到目标的传播损失。但由于高 号简正波随距离衰减更快,随着传播距离的增加目 标到接收阵的传播损失增加更快,因此在更远的距 离目标到接收阵的传播损失会大于声源到目标的传 播损失。



图 9 声源到目标、目标到接收阵的非相干传播损失

2.3 能量扩展损失估计

浅海频散信道会导致接收信号相对发射信号严 重畸变,匹配滤波性能会出现严重下降,当信道响 应完全已知时,信道匹配^[31]可获取的最大时间增 益 $PG_{max} = 10 \lg 2T$ 。信道频散引起的匹配滤波与 最优滤波器之间的时间增益差定义为能量扩展损失 ESL (Energy Spreading Loss, ESL)^[32],则匹配滤波的 时间增益为 $PG_{MF} = PG_{max} - ESL$ 。对回波信号经过 最优滤波器和匹配滤波器开展仿真对比,计算两者 信噪比差异,可对实际声信道下由于频散导致的时 间增益损失进行估计。

噪声背景下回波信号匹配滤波过程可以表为:

$$s_{o}(t, r_{1}, r_{2}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[R_{12}(\omega, r_{1}, r_{2}) + N(\omega)H(\omega)\exp(-i\omega t) \right] d\omega,$$
(8)

其中, $R_{12}(\omega, r_1, r_2)$ 为回波信号频谱, $H(\omega)$ 为线性 滤波器, 对于常规匹配滤波器 $H(\omega) = S^*(\omega)$, 对于最 优滤波器 $H(\omega) = [G_{12}(\omega)S(\omega)]^*$ 。

匹配滤波处理后的回波信号的输出信噪比为:

$$\rho = \frac{\left[\max\left(s_{0}; H_{1}\right)\right]^{2}}{\operatorname{var}\left(s_{0}; H_{0}\right)},\tag{9}$$

其中, max(s_o ; H₁)表示存在回波信号时滤波输出 的峰值, var(s_o ; H₀)表示只存在噪声时滤波输出的 方差。

能量扩展损失 ESL 可按照下式计算:

$$\text{ESL} = 10 \lg \frac{\rho_{\text{max}}}{\rho_{\text{MF}}},\tag{10}$$

其中, ρ_{max} 为信道完全匹配时的最优滤波器输出信 噪比, ρ_{MF} 为常规匹配滤波输出信噪比。

根据实验环境参数, 计算 20 km 范围内水面目标的回波能量扩展损失, 如图 10(a) 所示。由于各号简正波的群速度不同, 随着传播距离的增加, 能量逐渐分散, 表现为 ESL 随传播距离增加。同时, 由于匹配滤波后脉冲的峰值是多号简正波的干涉叠加的结果, 因此随距离存在一定的起伏。图 10(b) 为对应的 ESL 概率分布, 可见实验距离范围内 ESL 的分布较为集中, ESL 可取 8 dB, 用于对此范围内的探测性能进行评估。

2.4 实验海洋环境探测性能估计

噪声背景下回波信号经过匹配滤波后输出信噪 比为:

$$SNR_{out} = SL - TL_1 - TL_2 + TS -$$

$$NL + DI + 10 \lg(2T) - ESL,$$
(11)

其中, SL 为声源级, TL₁ 为声源到目标的声传播损 失, TL₂ 为目标到接收阵的声传播损失, TS 为目标 强度, NL 为海洋环境噪声的谱级, DI 为指向性指 数, 假设噪声各向同性且不相关, 则 DI 等效于阵增 益 AG。

式 (11) 中, 声源级 SL、双程传播损失 TL₁ 和 TL₂、能量扩展损失 ESL 已经进行了计算。实验采 用阵元数为 100 的水平阵, 阵增益 AG 约为 20 dB。 假定目标姿态满足镜面反射, 目标强度 15 dB。噪声 谱级在 450 Hz 处的实测值为 73 dB, 在较窄的工作 频带内可近似为高斯白噪声。



图 10 实验海洋环境 ESL 计算结果及统计分析

仿真参数汇总如表 1 所示,发射换能器声源级 204.5 dB。为了获取较高的时间增益,发射信号脉宽 *T*=20 s、中心频率 450 Hz、带宽 100 Hz,噪声谱级 在 450 Hz 为 73 dB,随频率按照 -6 dB/OCT 规律 变化。

参数	数值	
声源级 SL	$204.5~\mathrm{dB}$	
目标强度 TS	15 dB	
噪声谱级 NL	$73~\mathrm{dB}$ @450 Hz	
接收阵元数	100	
发射信号脉宽	20 s	
发射信号中心频率	450 Hz	
发射信号带宽	100 Hz	

表1 仿真参数汇总

图 11 为根据式 (11) 得到的实验条件下的回波 信噪比估计结果,其中声源位于 (0 km,5 km)。此 处以输出信噪比大于 18 dB 的范围作为有效探测范 围,该信噪比可满足检测概率高于 99.99%、虚警概 率低于 10⁻⁶ (见附录 A)。输出信噪比 18 dB 分界以 等高线给出。实际上,当目标位于收发连线区域时, 回波信号会被强直达波信号掩蔽,因此存在一定的 探测盲区^[12]。直达波引起的探测盲区范围受到声源 级、直达波的传播损失、常规波束形成旁瓣、发射信 号匹配滤波旁瓣等多方面因素影响。



2.5 浅海双基地有源探测仿真

对于双基地有源探测,接收阵列的接收信号主要 包括目标回波信号、直达波、异地混响和环境噪声。 相对收发合置有源声呐,双基地有源探测由于收发 分开,异地混响掩蔽的时延范围相对小^[13]。当收发 距离较远或目标较远时背景干扰的主要因素是海洋 环境噪声。因此以下仿真主要研究环境噪声掩蔽下 的探测性能,暂不考虑异地混响的影响。

假设海洋环境为水平不变,目标为点源,根据简 正波理论^[29],给出声源到目标再到接收阵的双程声 传播的格林函数如下:

$$G_{12}(\omega, r_1, r_2, z_{\rm S}, z_{\rm R}, z_{\rm T}) =$$

$$C^2 \sum_m \sum_n \phi_m(z_{\rm S}) \phi_m(z_{\rm T}) \frac{\exp[-ik_m(\omega)r_1]}{\sqrt{k_m(\omega)r_1}} \qquad (12)$$

$$T_{mn}(\omega, \varphi_{\rm i}, \varphi_{\rm s}) \phi_n(z_{\rm T}) \phi_n(z_{\rm R}) \frac{\exp[-ik_n(\omega)r_2]}{\sqrt{k_n(\omega)r_2}},$$

其中, $C = \sqrt{2\pi} i \exp[-i(\pi/4 + k_0)]/\rho(z_S)$ 为常数, ω 为 角频率, $k_0 = \omega/c_0$, c_0 为参考声速, z_S 为声源深度, z_R 为接收阵深度, z_T 为目标深度。 ρ 为海水密度, $\phi_m(z)$ 和 $\phi_n(z)$ 为第 m 号和第 n 号简正波的本征函 数, $k_m(\omega)$ 和 $k_n(\omega)$ 为第 m 号和第 n 号简正波的本征 值, $T_{mn}(\omega, \varphi_i, \varphi_S)$ 为目标散射函数, φ_i 和 φ_S 分别为 水平入射和散射角度。这里假设目标散射函数随频率 不变, 但强度与目标姿态、入射和接收的方位有关。

相对单程声传播,目标回波经历了双程声传播 和目标散射,若可传播的入射简正波有 *M* 号,每一 号入射简正波会激发 *N* 号可传播的散射简正波,则 总声场是 *M* × *N* 号简正波干涉叠加的结果。对回波 进行匹配滤波后得到的脉冲峰的位置和幅度是多号 简正波干涉叠加的结果,因此会造成定位声速和回 波峰值信噪比随传播距离的起伏。

回波信号可表示为:

$$R_{12}(\omega, r_1, r_2, z_{\rm S}, z_{\rm R}, z_{\rm T}) =$$

$$G_{12}(\omega, r_1, r_2, z_{\rm S}, z_{\rm R}, z_{\rm T})S(\omega),$$
(13)

其中, *S*(ω) 为发射信号的频谱,发射信号幅值取决于声源级。

声源到接收阵的格林函数为:

$$G_{3}(\omega, r_{3}, z_{\rm S}, z_{\rm R}) = C\sum_{m} \phi_{m}(z_{\rm S})\phi_{m}(z_{\rm R}) \frac{\exp\left[-\mathrm{i}k_{m}(\omega)r_{3}\right]}{\sqrt{k_{m}(\omega)}}.$$
(14)

直达波可表示为:

$$R_{3}(\omega, r_{3}, z_{\rm S}, z_{\rm R}) = G_{3}(\omega, r_{3}, z_{\rm S}, z_{\rm R})S(\omega).$$
(15)

根据接收信号模型,结合水平阵列的阵形参数、发射 信号波形,可构造水平阵各阵元接收的信号时域波 形,对实验条件下双基地有源探测进行仿真。仿真采 用实验海区的海底、声速剖面等海洋环境参数。采用 图 5 所示 CTD 测量得到的声速剖面。采用表 1 中 的参数,对多目标情况下双基地有源探测接收信号 进行仿真。图 12 为仿真的部署情况,接收阵坐标为 (0 km, 0 km),端向平行于 *x* 轴。声源坐标为 (0 km, 5 km)。数字 1 至 5 为目标序号,目标坐标分别为 (2 km, 8 km), (2 km, 11 km), (2 km, 14 km), (2 km, 17 km), (2 km, 20 km)。假设目标静止,该姿态下的 目标强度为 15 dB。

在对仿真信号开展常规波束形成和匹配滤波 后,得到的方位-时延扫描结果如图 13 所示。输出 结果以背景噪声方差为基准进行了归一化,色标为 相对幅度。对比 1 至 5 号目标的亮点可以看出,随 着目标逐渐远离,回波信噪比逐渐下降。采用很长的 探测信号会造成较大的直达波掩蔽区域,波束形成 在非直达波方位抑制了直达波的强度,但是在直达 波方位 (0°方位)存在较大的掩蔽区域,在很长的时 延范围内都造成了干扰。



图 12 仿真采用的声源、目标和接收阵位置坐标

仿真结果表明,采用先空后时的处理方法,先对 阵列接收信号进行常规波束形成以获取阵增益,再 对波束形成得到的波束输出进行匹配滤波获取时间 处理增益,可在浅海负跃层环境下可实现对较高目 标强度水面静止目标最远到 20 km 探测。





3 双基地有源探测实验结果

3.1 实验概况

2018年4月, 声场声信息国家重点实验室在南海 开展了一次浅海双基地有源探测实验。根据仿真模型 估计的实验海区探测范围, 设计了实验的各个站位。 "实验2号"作为发射船, 吊放换能器作为声源, 发 射信号为频带400~500 Hz、脉宽20 s的 HFM 信 号。采用"实验1号"双体船的水下潜体作为目标。 实验中采用布设于海底的水平接收阵接收信号。

图 14(a)—图 14(d) 为根据 GPS 定位获取的声

源船、目标船的航线图,声源、目标和接收阵的位置 以相对坐标给出。目标船的航线分为4条,分别记为 T21,T22,T23,T24。蓝色圆圈标识代表接收阵,十字 标识代表声源船,黑色轨迹为目标船的航线,箭头代 表目标船运动方向。由于声源船"实验2号"在实验 中处于漂泊状态、会随海流以一定速度运动,因此, 4个站位对应的声源船位置并不相同,S21,S22,S23, S24与接收阵的距离分别为4.7 km,4.1 km,3.6 km, 2.9 km,每个站位发射4组 HFM 信号。

3.2 时延方位扫描结果

采用图 2 所示处理流程对回波信号进行处理,

图 15(a) — 图 15(d) 分别为 4 条航线的单次脉冲经 过处理得到的时延 – 方位扫描结果,色标为相对幅 度。0 时刻对应信号发射时刻,可以看出首先到达的 为高强度的直达波,在直达波方位造成的掩蔽范围 较大。

根据时延-方位扫描结果进而获取回波脉冲的

峰值所在的时延 $\hat{\tau}_{12}$ 和方位 $\hat{\alpha}$ 。采用 CTD 测量获取 的声速剖面的平均值作为式 (1)中的定位声速,可计 算得到目标的位置。表 2 为以上站位定位误差结果 的汇总。由于阵列长度的限制,多目标方位分辨率约 为 0.8°,但是实验中只是对单目标进行测向,测向误 差会比多目标方位分辨率更高。



图 14 实验部分站位航线图





图 15 HFM 信号时延-方位扫描结果

站位	脉冲序号	目标-接收距离 (km)	测向误差 (°)	定位误差 (km)
T21 -	1	15.7	0.3	0.4
	2	15.7	0.3	0.4
	3	15.7	0.4	0.3
	4	15.7	0.4	0.4
T22	5	10.4	0.2	0.3
	6	10.4	0.3	0.3
	7	10.5	0.1	0.3
	8	10.5	0.2	0.3
T23 –	9	7.4	0.3	0.3
	10	7.5	0.3	0.3
	11	7.6	0.2	0.3
	12	7.8	0.5	0.3
T24	13	7.4	0.5	0.2
	14	7.3	0.3	0.2
	15	7.2	0.1	0.2
	16	7.1	0.3	0.1

表 2 S2 站位定位结果

根据声源-目标、目标-接收阵的距离可对实验 回波信噪比进行估计,估计的信噪比与实验回波信 噪比对比如图 16 所示。因为目标船姿态调整很难保



图 16 回波信噪比实验结果与理论估计值对比

持相同目标强度,所以即使同一站位实验输出信噪 比也会有起伏。其中,图 14(c)所示 T23 航线由于目 标船姿态逐渐偏离镜反射方向,导致 T23 航线的输 出信噪比逐渐下降,信噪比差距可达 10 dB。

4 实验定位声速修正

通过表 2 可以看出,回波的测向误差相对较小, 但定位结果仍有一定误差。实验中收发距离 r₃ 通过 GPS 定位确定,可以认为精确。导致定位距离误差 主要原因有:回波信号的时延误差和有源探测所用 定位声速偏差。定位声速越接近实际声脉冲传播速 度,定位结果会更准确。 通过 CTD 测量得到的实际声速是介质声速 (声速剖面),而回波检测得到的脉冲峰对应的是实际声脉冲传播速度,定位声速是定位公式中采用的速度。频散信道导致回波信号的脉冲峰传播速度与声速剖面声速存在偏差。不妨假设其他参数准确,对声速偏差引起的定位误差进行如下分析。

当采用的声速存在偏差 Δc 时, 目标定位误差:

$$e = \hat{r}_2(c + \Delta c) - \hat{r}_2(c). \tag{16}$$

对 $\hat{r}_2(c + \Delta c)$ 在 c 处进行泰勒展开,并忽略二阶及 以上高阶量,可得:

$$e \approx \frac{\partial \hat{r}_2}{\partial c} \Delta c = \frac{\tau_{12} \left(r_3^2 - 2c \hat{\tau}_{12} r_3 \cos \hat{\gamma} + c^2 \hat{\tau}_{12}^2 \right)}{2 \left(c \hat{\tau}_{12} - r_3 \cos \hat{\gamma} \right)^2} \Delta c.$$
(17)

当分置角较大、目标距离收发连线较近时,较小的参 数误差就会引起很大的定位误差 [16,19], 为避免这种 情况,需要优化多基地态势使得目标远离收发连线。 图 17 为收发距离 $r_3 = 5$ km 时式 (17) 所示的定位误 差。图 17(a) 所示为回波时延固定为 20 s 的情形, 可 见定位误差随角度 γ 的变化较小。图 17(b) 为回波 角度固定为 40°、声速存在不同的偏差时, 定位误差 随时延变化图,可见当声速存在 20 m/s 偏差、回波 时延超过 20 s 时, 声速偏差引起的定位误差会达到 200 m 以上。除此之外, 声速偏差引起的定位误差随 回波时延的增加近似线性增加。声速偏差引起的定 位误差不可忽视,采用合理的定位声速可提高双基 地有源探测的定位精度。实际上目标的距离是未知 的,因此无法根据实测数据计算声脉冲传播速度。因 此我们尝试采用仿真计算和近似得到的脉冲传播速 度作为定位声速来提高定位精度。

计算声脉冲传播速度的传统方法为通过数值 仿真构造时间序列信号。对于双基地有源探测,回 波脉冲峰的传播速度 (Travel Speed of Pulse Peak, TSPP) 为:

$$TSPP = \frac{r_1 + r_2}{\tau_{12, PP}},\tag{18}$$

其中, T12, PP 为回波脉冲信号最大值对应的时延。

采用仿真模型构造实验条件下的回波信号,根据 式(18)计算 TSPP。图 18(a)为 30 km 距离范围内的 TSPP 的仿真计算结果,可见 TSPP 随距离 r₁和 r₂ 起伏严重且随距离增加有增大的趋势。对计算得到的 声脉冲传播速度进行统计分析,概率分布如图 18(b) 所示,可以看出,相对 CTD 测量得到声速剖面平均 声速(1530 m/s),仿真得到的声脉冲传播速度分布明 显偏低,在 1510~1515 m/s 较为集中。



图 17 声速偏差引起的定位误差

为了对以上仿真计算结果进行解释,这里给出 信号中心频率对应的本征函数幅度和部分简正波的 群速度,分别为图 19(a)和图 19(b)。群速度为各号 简正波的能量传播速度,第*m*号简正波群速度的倒 数可以表示为^[29,33]:

$$e_{g,m}^{-1} = \frac{\omega}{k_m N_m} \int_0^\infty \frac{\rho(z)}{c^2(z)} |\phi_m(z)|^2 dz,$$
 (19)

其中, $N_m = \int_0^\infty \rho(z) |\phi_m(z)|^2 dz$ 为归一化系数。从 图 19(a) 可以看出, 水面目标激发的低号简正波能量 很小, 中高号简正波对应的群速度相对小, 导致声脉 冲传播速度整体偏小。随着传播距离的增加, 高号简 正波逐渐衰减使中号简正波的能量逐渐占优^[34], 声 脉冲传播速度逐渐增大。同时, 由于多号简正波之间 的干涉使脉冲峰位置起伏, 导致脉冲峰值传播速度 起伏严重。

通过仿真计算声脉冲传播速度需要构造时间序 列,计算量较大。声脉冲传播速度随距离起伏严重, 通过仿真计算声脉冲传播速度,需要在一定距离范 围内进行统计分析才能确定合理的定位声速。已有 的研究在计算深海汇聚区的声脉冲传播速度时,采 用能量占优势的简正波群速度作为近似是一种有效







的快速计算方法 [20], 适用条件是该号简正波及其临 近号数简正波对声场起主要作用。水面目标激发的 声场中高号简正波较为集中,因此可采用该方法近 似计算声脉冲传播速度。

第 (m,n) 号简正波对应的双程群速度为:

$$c_{\mathrm{g},m,n}(r_1, r_2) = \frac{r_1 + r_2}{\tau_{1,m} + \tau_{2,n}},$$
(20)

其中, cg.m 为第 m 号入射简正波从声源到目标的时 延, cg.n 为第 n 号散射简正波从目标到接收阵的时 延, c_{g,m}和 c_{g,n}分别为第 m 号和第 n 号简正波对应 的群速度。

为了确定对声场起主要作用的简正波号数,不 对回波的 $M \times N$ 号简正波进行求和,单独计算回波 信号的第 (m,n) 号简正波对应的强度:

$$I_{m,n}(r_1, r_2) \propto \phi_m(z_S)\phi_m(z_T)\phi_n(z_T)\phi_n(z_R) \frac{\exp\{-i[k_m(\omega)r_1 + k_n(\omega)r_2]\}}{\sqrt{k_m(\omega)k_n(\omega)r_1r_2}}.$$
(21)

对于不同的距离,各号简正波的强度不同,将单号

图 19 实验期间海洋环境条件下本征函数幅度及部分简正波群速度

简正波的强度表示为入射简正波和散射简正波的 形式:

$$I_{m,n}(r_1, r_2) \propto I_m(r_1)I_n(r_2).$$
 (22)

在距离 r1 和 r2 确定时, 分别提取该距离入射简正波 和散射简正波最强的模态可以得到强度取最大值的 双程简正波号数 (m,n), 即:

$$\widehat{m} = \arg \max_{m} [I_m(r_1)],$$

$$\widehat{n} = \arg \max_{m} [I_n(r_2)].$$
(23)

第(m,n)号简正波对应的双程群速度为:

$$\tilde{c}_{\text{TSPP}}(r_1, r_2) = \frac{c_{\text{g},\hat{m}} c_{\text{g},\hat{n}}(r_1 + r_2)}{c_{\text{g},\hat{n}} r_1 + c_{\text{g},\hat{m}} r_2},$$
(24)

即为双程声传播声脉冲传播速度的近似公式。

图 20 中实线为采用式 (24) 计算的实验条件下 两个特定距离下的峰传播速度,红点为仿真信号声 脉冲传播速度, 对应图 18(a) 中不同声源和目标距离 r₁的切片。图 20(a) 和图 20(b) 分别为声源到目标 距离 $r_1 = 1 \text{ km}$ 和 $r_1 = 5 \text{ km}$ 时仿真信号计算得到的 TSPP 与近似公式的对比,结果表明近似公式给出的 速度与仿真结果的趋势基本吻合,数值偏小。

实际应用中,可先采用固定的定位声速进行定位,再根据目标的位置和深度信息按照式 (24) 对水面目标的定位声速进行修正,进一步提高定位精度。 不需要对整个距离范围进行搜索计算,因此声速修正的计算量很小。

图 21 所示为定位声速分别采用声速剖面测量声速、一定范围内的仿真统计 TSPP 和近似公式所得



(b) 声源到目标距离 $r_1 = 5 \text{ km}$

图 20 近似公式与仿真声脉冲传播速度对比



图 21 采用不同定位声速的定位误差对比

声速时,得到的定位误差对比,可以看出采用测量声 速进行定位会有较大的定位误差;仿真统计 TSPP (1510 m/s)相对测量声速具有更高的定位精度,但 由于没有考虑声脉冲传播速度随距离的变化,因而 并不适用于 T22 和 T23 站位声程较短的情况;近似 公式对不同目标位置的 TSPP 进行计算,因此在 T22 和 T23 站位获得了更高的定位精度。

5 结论

通过对双基地有源探测海试实验结果结合仿真 模型进行分析得到以下结论:

(1)数值仿真和海试实验结果说明,双基地有源 探测在实验浅海负跃层环境下可实现对目标的有效 探测定位。通过对实验海区海洋环境条件下的传播 损失和能量扩展损失进行合理估计,可以较好的预 估双基地有源探测的性能,实验回波信噪比与估计 信噪比具有较好的一致性。

(2) 浅海信道的频散导致声脉冲传播速度与测量 得到的介质声速存在偏差,采用测量声速会引起较大 的定位误差。针对该问题提出的一种水面目标的定位 声速选取方法,采用对声场起主要作用的简正波对应 的双程群速度作为定位声速,考虑了声脉冲传播速度 随距离的变化,在海试实验数据定位处理中有效提高 了目标定位精度。

仿真和实验处理结果表明直达波会带来一定的 探测盲区,后续工作会对抑制直达波干扰的不利影 响开展相关研究。

6 致谢

感谢全体实验人员的紧密合作,是他们的辛勤 工作保证了实验顺利进行和珍贵实验数据的获取。 感谢中国科学院声学研究所北海研究站安俊英研究 员对"实验1号"目标强度的数值分析。

附录 A 高斯白噪声背景下匹配滤波器 的 ROC 曲线

高斯白噪声背景下给定的虚警概率 P_{FA} 下的检测概率 P_D 为:

$$P_{\rm D} = Q \left[Q^{-1} \left(P_{\rm FA} \right) - \sqrt{\eta} \right], \qquad (A1)$$

其中, η 为匹配滤波器的输出信噪比, $Q(x) = \int_{x}^{+\infty} (1/\sqrt{2\pi}) \exp[-(1/2)u^{2}] du$, Q^{-1} 为 Q(x) 的反函数。由此得到高斯白噪声背景下匹配滤波器的 ROC 曲线, 如图 A1 所示, 输出信噪比为 18 dB 时可满足检测概率 99.99%、虚警概率 10^{-6} .



图 A1 高斯白噪声背景下匹配滤波器的 ROC 曲线

参考文献

- Cox H. Fundamentals of bistatic active sonar//Underwater acoustic data processing. Springer, 1989: 3—24
- Abraham D A, Willett P K. Active sonar detection in shallow water using the Page test. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2002;
 27(1): 53—46
- 3 HAO Chengpeng, SHI Bo, XU Da, CHEN Dong, ZHU Dongsheng. Durbin test with enhanced detection performance to mismatched signal. *Chinese Journal of Acoustics*, 2016; **35**(4): 406—415
- 4 Yang J, Sarkar T K. Doppler invariant property of hyperbolic frequency modulated waveforms. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2006; 48(6): 1174—1179
- 5 Pecknold S P, Renaud W M, McGaughey D R et al. Improved active sonar performance using Costas waveforms. IEEE J. Oceanic Eng., 2009; 34(4): 559-574
- 6 任仕伟, 鄢社锋, 马晓川. Costas 编码跳频信号多普勒容限及 其在多声源宽带正交检测中的应用. 声学学报, 2014; 39(2): 154—162
- 7 王宁,高大治,王好忠.频散、声场干涉结构、波导不变量与消 频散变换.哈尔滨工程大学学报,2010;**31**(7):825-831
- 8 徐传秀,朴胜春,杨士莪,张海刚,唐骏.采用能量守恒和高阶 Padé 近似的三维水声抛物方程模型.声学学报,2016;41(4): 477—484
- 9 赵俊渭,赵日昌.收发分置水下目标声散射特征的实验研究.声 学学报,1997; 22(2):123—131
- 10 马黎黎,王仁乾,项海格.收发分置目标强度的计算及前向散射 信号的分离. 声学学报, 2009; 34(6): 481—489
- 11 雷波,杨益新,何传林.等声速环境中目标前向声散射简正波耦 合的垂直阵空域响应特征.声学学报,2018;**43**(4):471—480
- Xu L, Li J, Jain A. Impact of strong direct blast on active sonar systems. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2015; **51**(2): 894—909
- 13 刘建军,李风华,张仁和. 浅海异地混响理论与实验比较. 声学
 学报,2006; 31(2): 173—178
- 14 王晓宇,杨益新,卓颉. 浅海波导中水平接收阵被动时反混响抑 制方法研究. 声学学报, 2013; **38**(2): 21—28
- 15 Sandys-Wunsch M, Hazen M G. Multistatic localization error due to receiver positioning errors. *IEEE J. Oceanic*

Eng., 2002; 27(2): 328-334

- Coraluppi S. Multistatic sonar localization. *IEEE J.* Oceanic Eng., 2006; **31**(4): 964–974
- 17 Kim S, Ku B, Hong W et al. Performance comparison of target localization for active sonar systems. *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 2008; **44**(4): 1371—1380
- 18 Peters D J. A bayesian method for localization by multistatic active sonar. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2017; 42(1): 135—142
- 19 YAN Sheng, WEI Xiaojun, HAO Chengpeng, MA Hui, YAN Shefeng. Target localization and parameters estimation by sonar system with explosions as underwater sound sources. *Chinese Journal of Acoustics*, 2016; **35**(4): 416–430
- 20 Ren Y, Zhang R H, Wang J et al. Stability and a fast calculation method of travel speed of pulse peak in convergence zone. Sci. China: Phys. Mech. Astron., 2014; 57(7): 1274—1282
- 21 He C, Quijano J E, Zurk L M. Enhanced Kalman filter algorithm using the invariance principle. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2009; **34**(4): 575–585
- 22 Orlando D, Ehlers F. Advances in multistatic sonar. Sonar systems. IntechOpen, 2011
- 23 Murphy S M, Scrutton J G E, Hines P C. Experimental implementation of an echo repeater for continuous active sonar. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2009; **42**(2): 289—297
- Schecklman S, Zurk L M. Extraction of striations from continuous active sonar (CAS) data. OCEANS'15, IEEE, Genoa, Italy, 2015: 1-7
- 25 刘大利.水下连续波有源探测的目标回波有源检测算法.声学学报,2014; 39(2):163—169
- 26 杨丽,蔡志明. 混响背景下双基地声呐的探测范围分析. 哈尔滨 工程大学学报, 2006; 27(4): 257—601
- Fewell M P, Ozols S. Simple detection-performance analysis of multistatic sonar for anti-submarine warfare (Tech. Rep. No. DSTO-TR-2562). Edinburgh, South Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2011.
- 28 Craparo E M, Fügenschuh A, Hof C et al. Optimizing source and receiver placement in multistatic sonar networks to monitor fixed targets. Eur. J. Oper. Res., 2019; 272(3): 816-831
- 29 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B et al. Computational ocean acoustics. Springer, 2000: 337—341
- 30 龚家元,安俊英,马力,徐海亭.边界元奇异与近奇异数值积 分方法及其应用于大规模声学问题.声学学报,2016;41(5): 768—775
- 31 宫在晓,张仁和,李秀林,吴立新. 浅海脉冲声传播及信道匹配 实验研究. 声学学报, 2005; 30(2): 108—114
- 32 Hermand J P, Roderick W I. Acoustic model-based matched filter processing for fading time-dispersive ocean channels: Theory and experiment. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1993; **18**(4): 447—465
- 33 李整林,张仁和.孤立子内波引起的高号简正波到达时间起伏. 声学学报,2011; 36(6): 559—567
- 34 李整林, 王耀俊, 马力, 高天赋. 海底沉积物参数对浅海中低频 声传播的影响. 声学学报, 2000; 25(3): 242—247