

纪念《声学技术》创刊 30 周年特邀文章——

# 浅海信道有效声速估计及其在水声定位中的应用

梁国龙, 林旺生, 王 燕

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 提出了基于本征声线视在搜索的浅海信道有效声速估计方法。在给定海面海底及垂直声速分布条件下, 该方法能快速准确地估计浅海信道中任意两点的有效声速以及有效声速空间分布物理图像。因该方法采用本征声线视在搜索思想, 计算量大为减小, 易于实际工程应用。随后探讨了其在长基线水声定位解算中的应用。海试与应用结果表明, 该方法可以提高长基线定位系统对浅海信道复杂水文的适应能力。

**关键词:** 浅海信道; 有效声速; 本征声线视在搜索; 水声定位

中图分类号: TB56; O427.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-01-0042-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.01.006

## Estimation of effective sound velocity in shallow channel and its application in underwater acoustic positioning

LIANG Guo-long, LIN Wang-sheng, WANG Yan

(National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** An accurate estimate algorithm of effective sound velocity in shallow water based on eigenrays pseudo search is proposed. For a given sound speed profile of the sea and the characteristics of surface and seabed, the method acquires effective sound velocity between any two points in the channel and the physical image of their spatial distribution. It is easy to use the method for actual project applications because of its minimal calculations by adoption of eigenrays pseudo search model. Furthermore, the application of effective sound velocity in long baseline underwater acoustic positioning solution is investigated. Sea trial and application results indicate that this method can improve the complex hydrological adaptability of long baseline positioning system in shallow channel.

**Key words:** shallow water channel; effective sound velocity; eigenrays pseudo search; underwater acoustic positioning

## 0 引言

在水介质中关于声速的研究, 是最早的水声学定量研究。1827 年, Colladon 和 Sturm 在日内瓦湖测定了声波在水中的传播速度, 所得的结果接近现代的测量值。随后一段时间有人更为精确地测定了海洋中的声速值。研究表明: 海洋中声速具有缓慢时变的垂直分层性质, 实际工程应用中往往给出声速随深度的变化, 或者声速与深度的函数关系 (Sound Speed Profile, SSP)。然而更为广泛的应用在于海洋信道中任意两点间的声速获取, 因为在把海洋中声传播时间转换为传播距离时都是需要精确的声速值<sup>[1-6]</sup>。Vincent 在研究深海水声定位时, 首次将海洋空间中任意两点间的声速定义为有效声

速 (Effective Sound Velocity, ESV)<sup>[5,6]</sup>, 并提出了有效声速的估计方法, 但是此方法仅适用于直达波所在区域的有效声速的估计, 其仿真与海试结果表明深海信道有效声速呈现规律性的缓慢变化。

在海洋边界与声速垂直分布约束下, 浅海信道多径效应甚为显著, 有效声速估计颇具难度。孙万卿<sup>[7]</sup>提出了一种基于有穷状态自动机的浅海信道有效声速估计方法, 此方法虽然考虑了海面海底反射, 但对海面反射考虑得不够充分, 以小步长搜索时计算量甚大。阳凡林<sup>[8]</sup>提出一种基于最小二乘技术的有效声速估计方法, 其方法利用大量的观测量, 可以同时定位水下静态目标, 仿真结果表明, 对于 50~100 m 海深中的目标, 完成一次位置与有效声速估计大约需要 5~10 min, 此方法无需声速垂直分布先验信息, 却也带来繁重的计算量, 对于快速获取有效声速空间分布物理图像难以短时完成。

作者<sup>[9,10]</sup>也曾就有效声速的估计进行过初步探讨, 这里进一步提出基于本征声线视在搜索的浅海信道有效声速估计方法以快速获取信道中任意两点间有效声速及其空间分布的物理图像, 为评价水

收稿日期: 2011-12-30; 修回日期: 2012-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(51009042)、高等学校博士学科点专项科研基金(20102304120030)、黑龙江省自然科学基金(E201024)

作者简介: 梁国龙(1964—), 男, 吉林农安人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水声信号处理、水下定位导航、水下目标探测等。

通讯作者: 林旺生, Email: 02051237@163.com

文条件, 水下传感器网络、长基线水声定位阵元位置规划, 精确定位模型建立等奠定基础。

## 1 有效声速及估计方法

声信号自声源发出后沿不同路径到达空间某点, 按照射线声学的观点, 该点接收的信号是所有本征声线之和, 每条声线都存在一个等效声速, 所有等效声速构成一个等效声速集合  $S$ , 假设有  $m$  条本征声线, 则有:

$$S: \{\bar{c}_0, \dots, \bar{c}_j, \dots, \bar{c}_m\} \quad (1)$$

其中,  $\bar{c}_j$  为第  $j$  条本征声线的等效声速, 即收发两者直线距离与第  $j$  条声线传播时间的比值。

对于给定声速分布函数  $c(z)$ , 若点声源位于  $P_s(r_s, z_s)$  处, 声速为  $c_s$ , 第  $j$  条声线以初始掠射角  $\theta_s$  出射, 声线上的任意点  $P(r, z)$  的声线传播轨迹和传播时间计算表达式为:

$$r = r_s + \int_{z_s}^z \frac{\cos \theta_s}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \theta_s}} dz \quad (2)$$

$$t = \frac{1}{c_s} \int_{z_s}^z \frac{n^2(z)}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \theta_s}} dz \quad (3)$$

其中, 折射率  $n(z) = \frac{c_s}{c(z)}$ 。

这样到达接收点  $(r, z)$  的第  $j$  条声线的等效声速即可求得:

$$\bar{c}_j = \frac{\sqrt{(r-r_s)^2 + (z-z_s)^2}}{t_j} \quad (4)$$

定义有效声速  $esv$  为声源与水听器之间的直线距离和声波从声源出发到水听器的传播时间的比值, 即最早到达声线对应的等效声速, 则有:

$$esv(z_s, z, r) = \text{Max}(S) \quad (5)$$

因此, 要准确地给出信道中某两点间的有效声速, 需要搜索所有到达接收点的本征声线。

搜索出从声源出发到空间所有接收点的所有本征声线其计算量是相当大的。这里提出本征声线视在搜索思想, 即对从声源以不同初始掠射角出发的声线进行跟踪, 在声线跟踪过程中提取各个采样点(不同距离、深度)等效声速有用信息, 相当于各个采样点的本征声线记录在案, 最后比较各条本征声线等效声速大小获得有效声速。这种思想基于多途信道模型却不着眼于本征声线的搜索, 一次初始掠射角空间遍历就可以实现声场空间中任意一点有效声速估计, 大大降低了计算量。空间所有点的有效声速估计包括初始化基本参数、声线跟踪、同类声线等效声速求取和有效声速求取四个过程。

初始化基本参数过程主要包括海洋环境参数的初始化、声速分布的分层量化和水听器空间采样范围及间隔的设定。声线跟踪过程主要包括声线分类算法<sup>[11]</sup>和声线跟踪算法<sup>[10]</sup>。

声线分类算法依据初始掠射角符号、海面反射次数、海底反射次数以及声线反转这几个特征对声线进行分类。初始掠射角符号、海面反射次数、海底反射次数、上反转次数和下反转次数分别用特征标志  $sign(\theta_0)$ 、 $RFS$ 、 $RFB$ 、 $RAS$ 、 $RUS$  来描述。通过特征标志矢量  $[sign(\theta_0), RFS, RFB, RAS, RUS]$  对抵达声线进行分类。

声线跟踪算法主要实现对抵达声线等效声速的不等间隔空间采样。对每个初始掠射角为  $\theta_{sj}$  的声线跟踪时, 当声线抵达设定的接收深度时, 依声线分类算法对抵达声线分类, 而后依据式(4)计算等效声速, 直至不满足海面海底筛选准则或抵达距离边界。具体来说, 将海洋介质划分为  $N$  层, 初始掠射角为  $\theta_{sj}$ , 对应声速为  $c_{sj}$ , 声线行进到第  $i$  层时, 掠射角为  $\theta_i$ , 对应声速梯度为  $g_i$ , 则:

$$\frac{\cos \theta_{sj}}{c_{sj}} = \frac{\cos \theta_i}{c_i} \quad (6)$$

$$r = \frac{c_{sj}}{\cos \theta_{sj}} \sum_{i=0}^{N-1} \left| \frac{\sin \theta_i - \sin \theta_{i+1}}{\theta_i} \right| \quad (7)$$

$$t = \sum_{i=0}^{N-1} \left| \frac{1}{g_i} \ln \frac{\text{tg}(\frac{\theta_{i+1} + \pi}{2} + \frac{\pi}{4})}{\text{tg}(\frac{\theta_i + \pi}{2} + \frac{\pi}{4})} \right| \quad (8)$$

需特别注意的是, 声线跟踪过程中声线发生反射或反转时, 掠射角符号要改变。

同类声线等效声速求取是在获得抵达声线等效声速的不等间隔空间采样后通过内插拟合对等效声速等间隔空间采样。最后根据式(5), 比较各个空间采样点处各类抵达声线(本征声线)的等效声速获得有效声速。

这里给出在某海域实测水文条件下有效声速估计的实例。浅海信道条件为: 海况 2 级, 海底平坦, 海底底质密度为  $1.421 \text{ kg/m}^3$ , 声源位于水下  $7.32 \text{ m}$ , 水文如图 1 所示。要计算  $30 \text{ m}$  水层处的有效声速, 图 2 为声线跟踪的示意图, 在声线每抵达一次该水层时记录一次声线参数, 图 3 给出了各类抵达声线等效声速图。表 1 列出了各条抵达声线对应的标志矢量。图 4 给出了该深度有效声速随距离变化图。

要估计浅海信道声源至所有点的有效声速时, 只需在深度维进行采样或重复上面过程。该仿真条件下有效声速的物理图像如图 5 所示。图 6 是该图

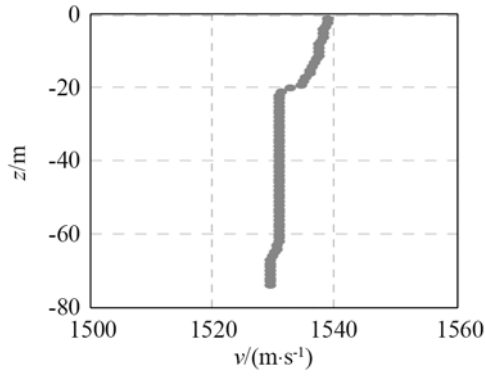


图 1 声速分布  
Fig.1 Sound speed profile

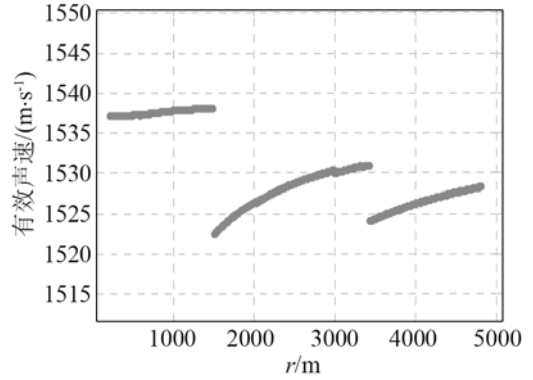


图 4 固定接收时深度有效声速随距离变化估计结果  
Fig.4 Estimation of ESV for various ranges with a fixed depth

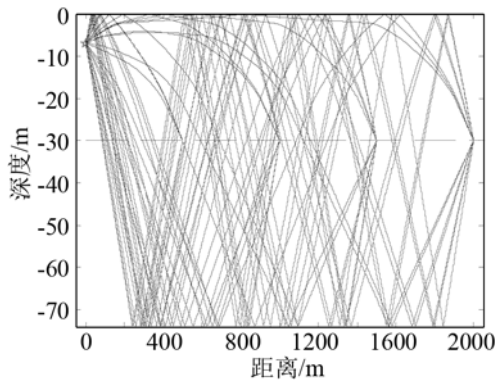


图 2 声线跟踪及本征声线视在搜索示意图  
Fig.2 Ray tracing and eigenrays pseudo search

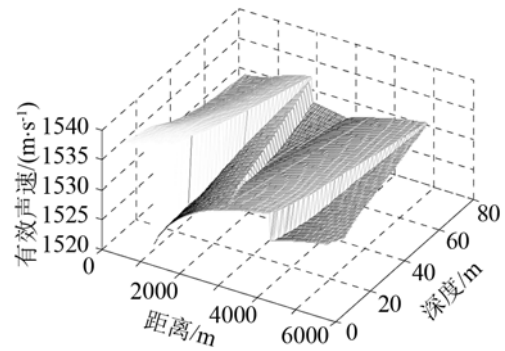


图 5 有效声速随深度及距离变化  
Fig.5 Estimation of ESV for various ranges and depths

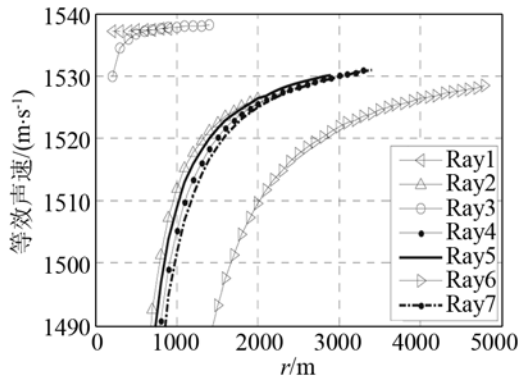


图 3 各类抵达声线的等效声速  
Fig.3 The equivalent sound velocities of arrival rays

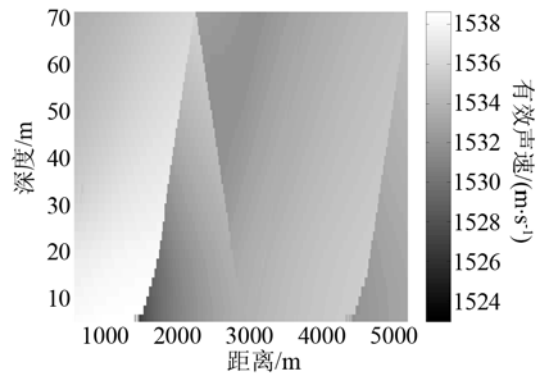


图 6 有效声速随深度及距离变化(灰度表示)  
Fig.6 Estimation of ESV for various ranges and depths (grey scale)

表 1 抵达声线标志矢量  
Table 1 The symbolic vectors of arrival rays

Ray	Sign( $\theta_0$ )	RFS	RFB	RAS	RUS
1	+	0	0	0	0
2	+	0	1	0	0
3	-	1	0	0	0
4	+	1	1	0	0
5	-	1	1	0	0
6	+	1	2	0	0
7	-	2	1	0	0

的伪彩图。为评估有效声速空间变化特性，依照以下两式计算有效声速水平变化率和垂直变化率：

$$\frac{\partial c_e}{\partial r} = \frac{c_e(z_s, z_r, r^+) - c_e(z_s, z_r, r^-)}{r^+ - r^-} \quad (9)$$

$$\frac{\partial c_e}{\partial z} = \frac{c_e(z_s, z^+, r) - c_e(z_s, z^-, r)}{z^+ - z^-} \quad (10)$$

图 7、8 给出了数值计算的结果，声线抵达结构的空变化更为明显，有效声速在垂直维度上变化率要较水平维度上变化率高一个数量级，在同一深度，同一声线抵达区域，在数十米的范围内，有效声速变化较小。

## 2 海试数据分析

2009 年 4 月在某水域进行了水声定位与有效声速空间变化特性的相关试验。试验时换能器通

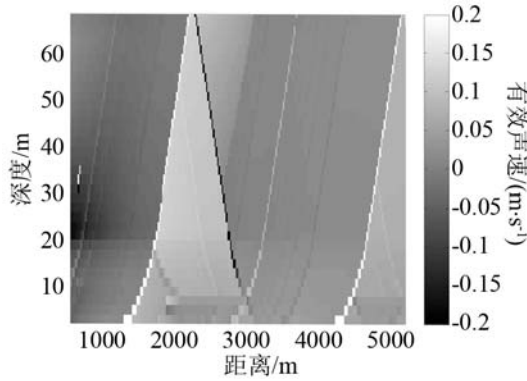


图 7 有效声速在深度维变化率  
Fig.7 The change rate of ESV for various depths

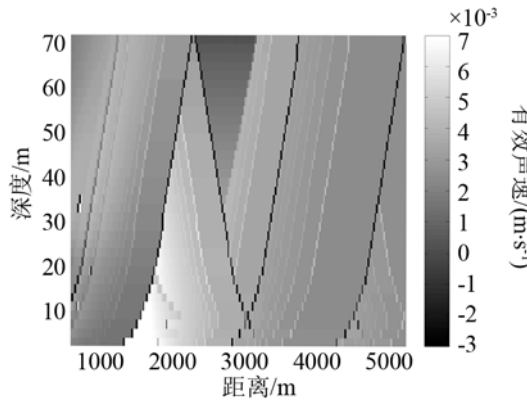


图 8 有效声速在水平维变化率  
Fig.8 The change rate of ESV for various ranges

过试验船海底门伸入水下，周期发射单频脉冲信号，试验船实时记录换能器精确的水平位置，布放的三个智能浮标检测声信号并将检测时延值及自身位置信息实时通过无线电传至监控船。试验船发射换能器正上方安装了高精度差分 GPS，且试验船升降机构上安装的高精度罗经和方位姿态仪，可测量试验船的摆动所引起的换能器位置的偏离，保证其水平定位精度标准差在 0.3m 以内。

试验条件：海况 2 级，海底较平坦，试验船航速 6kn，换能器声头深度 7.32m，系统同步周期 1.6 s，布放 12#、13#、23#号浮标，浮标水听器位于水下 30m，试验测量水文示情况于图 1。试验的工作态势图示于图 9，各个浮标的时延测量结果图示于图 10。

有效声速的预测估值示于图 3 和图 4。观察图 3、图 4 可以看到，由于声源与水听器位于水域上层，有效声速在整个水平区域内明显地分成了三个区域，其最早抵达声线分别是直达声或海面一次反射声线；两次海面反射和一次海底反射声线；一次海面反射和两次海底反射声线。

根据实际测量数据计算出的有效声速结果示于图 11，图 11(a)给出了全局结果，图 11(b)和图 11(c)分别给出了两个局部区域的放大图。将预测估

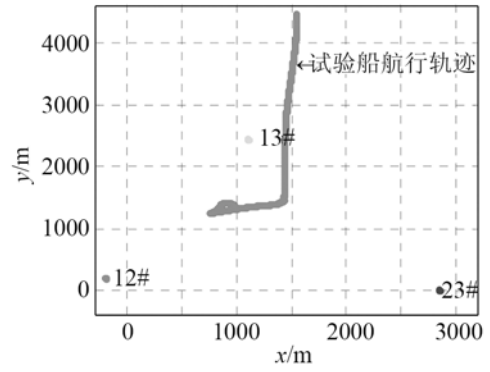


图 9 试验工作态势  
Fig.9 Work situation of sea trial

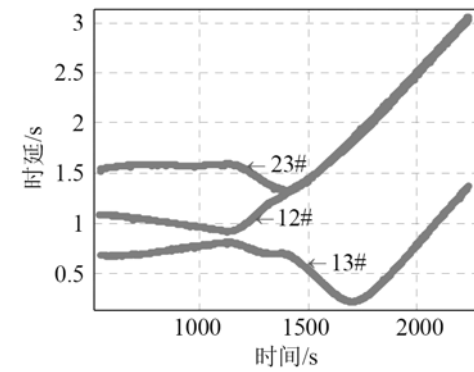


图 10 测量时延值  
Fig.10 The measurement results of time delay

值与实测有效声速比较可以看到：在第一区域和第二区域两者十分吻合，而在第三区域，声线经过了两次海底反射才抵达接收点，海底地形的不确定性导致了两者在数值上的微小差异。此外，12#、23#浮标距声源 3700 m 以内时有效声速一致，海面小的波浪对有效声速的估计影响不大。对于一次的海底反射，地形小的变化影响不是很大；而在超过 3700m 时两者产生了明显的差异，主要是由两个浮标与声源在中远距离处地形不一致产生的。海底地形的不确定性导致了两者在数值上的微小差异。

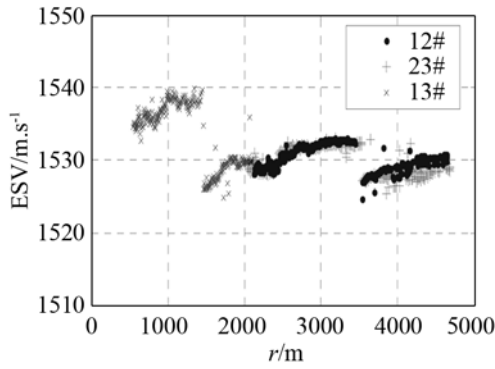
### 3 有效声速在水声定位中的应用

传统的基于距离或距离差交汇的长基线定位系统定位解算模型基于一个恒定声速(Constant Sound Velocity, CSV)，从前面的研究结果可以看到这与物理实际不符，为实现更精确的定位有必要将有效声速引入定位模型<sup>[5,6,10,12,13]</sup>。

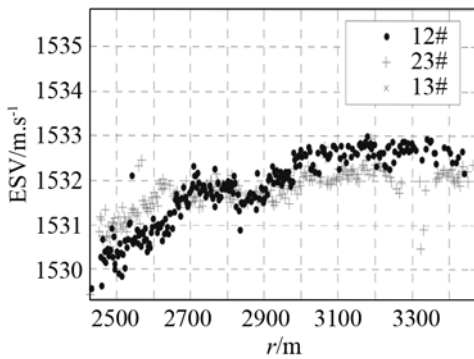
假定水下目标在时刻  $t_a$  辐射声信号，其位置坐标为  $(x, y, z)$ ，长基线各基元水听器分别在  $t_i$  时刻接收到信号，则有<sup>[5,6,10,12,13]</sup>：

$$R_i = c_i(t_i - t_a), \quad i=1, \dots, N \tag{11}$$

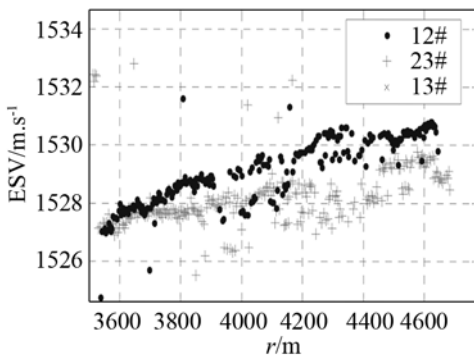
式中： $R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}$  为目标与各基



(a) 海试测量结果全局图



(b) 海试测量结果局部放大



(c) 海试测量结果局部放大

图 11 有效声速随距离变化海试测量结果

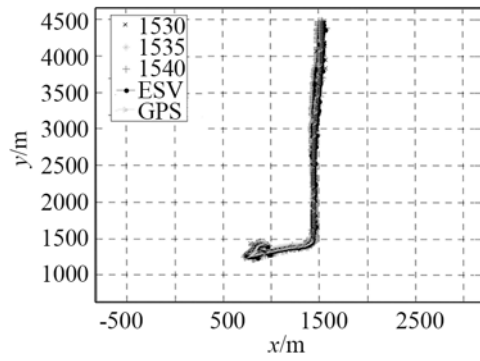
Fig.11 The experimental results of ESV for various distances

元水听器的直线距离； $c_i$  为到达各个水听器对应的有效声速。对上述海试试验进行定位解算，得到定位结果如图 12 所示。可以看到相比于 CSV 定位模型，ESV 模型定位解算结果与 GPS 更一致，定位误差减小。

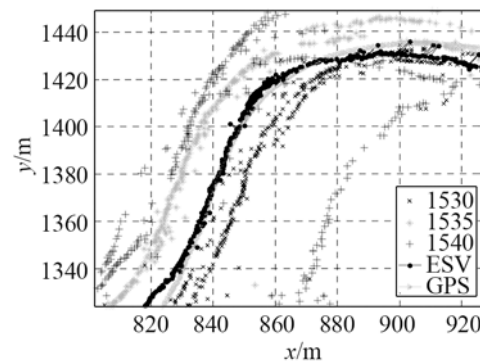
### 4 结论

通过本文对有效声速的研究可知：

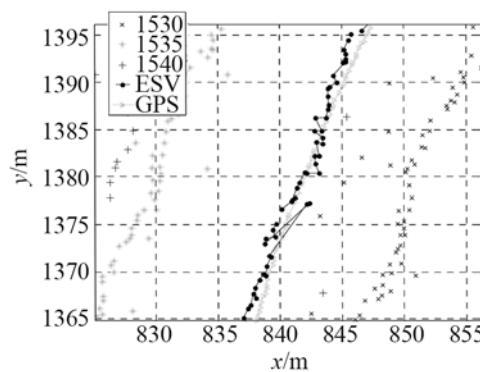
(1) 基于本征声线视在搜索的有效声速估计方法可以快速估计浅海信道有效声速；在近程直达声所在区域具有很高精度，在中远程非直达声区域受海洋边界影响，海底较大，海面次之。



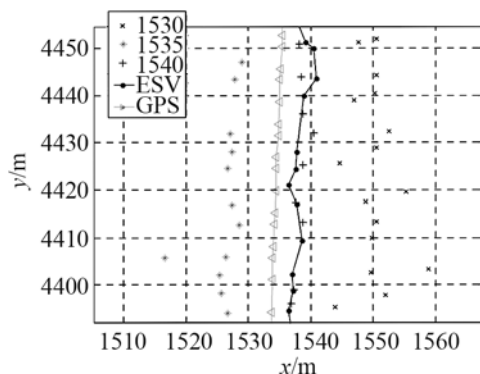
(a) 基于有效声速的定位结果全局



(b) 基于有效声速的定位结果局部放大图



(c) 基于有效声速的定位结果局部放大图



(d) 基于有效声速的定位结果局部放大图

图 12 基于有效声速与常声速定位解算结果比照

Fig.12 The results of ESV and CSV positioning

(2) 浅海信道有效声速随声源、目标深度以及其间水平距离复杂变化，数值仿真表明，一般而

言, 有效声速在垂直维度上变化率要较水平维度上变化率高一个数量级, 在同一深度, 同一声线抵达区域, 在数十米的范围内, 有效声速变化较小。

(3) 基于浅海信道有效声速的定位模型可以提高长基线定位系统信道适应能力, 消除模型误差。

### 参 考 文 献

- [1] Tan H P, Diamant R, Seah W K G, Waldmeyer M. A survey of techniques and challenges in underwater localization[J]. *Ocean Engineering*(s0029-8018), 2011, **38**: 1663-1676.
- [2] Isik M T, Akan O B. A three dimensional localization algorithm for underwater acoustic sensor networks[J]. *IEEE Trans. Wireless Commun*, 2009, **8**: 4457-4463 (3DUL).
- [3] Caiti A, Garulli A, Livide F, Prattichizzo D. Localization of autonomous underwater vehicles by floating acoustic buoys: a set-membership theoretic approach[J]. *IEEE J Oceanic Eng*, 2005, **30**(1): 140-152.
- [4] Kussat N H, Chadwell C D, Zimmerman R. Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle[J]. *IEEE J Oceanic Eng*, 2005, **30**(1): 153-164.
- [5] Vincent H T, Hu S L J. Geodetic position estimation of underwater acoustic sensors[J]. *J. Acoust. Soc. Am*, 1997, **102**(1): 87-94.
- [6] Vincent H T. Models, algorithms and measurement for underwater acoustic positioning[D]. Rhode Island: University of Rhode Island, 2001: 1-5.
- [7] 孙万卿. 浅海水声定位技术及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007: 69-101.
- [8] SUN Wanqing. Studies on underwater acoustic localization technique in shallow water and its application[D]. Qing Dao: China Ocean University, 2007: 69-101.
- [9] YANG Fanlin, LU Xiushan, LI Jiabiao, et al. Precise positioning of underwater static objects without sound speed Profile[J]. *Marine Geodesy*(S0149-0419), 2011, **34**(2): 138-151.
- [10] 梁国龙, 林旺生, 王燕. 水声信道有效声速估计方法及空间特征分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, **31**(12): 1587-1592.
- [11] LIANG Guolong, LIN Wangsheng, WANG Yan. Estimation method and special characteristic analysis of effective sound velocity in underwater acoustic channel[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, **31**(12): 1587-1592.
- [12] 林旺生. 水声信道仿真与声线修正技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 2-32.
- [13] LIN Wangsheng. Research on underwater sound channel simulation and sound ray revision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009: 2-32.
- [14] 范敏毅. 水下声信道的仿真与应用研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2000: 15-38.
- [15] FAN Minyi. A study on simulation & application of underwater sound channel[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2000: 15-38.
- [16] Spiesberger J L. Geometry of locating sounds from differences in travel Time: isodiachrons[J]. *J. Acoust. Soc. Am*, 2004, **116**(5): 3168-3177.
- [17] Spiesberger J L. Probability distributions for locations of calling animals, receivers, sound speeds, winds, and data from travel time differences[J]. *J. Acoust. Soc. Am*, 2005, **118**(3): 1790-1800.