

# 声源位置/声速剖面对本征声线到达时延的影响

张同伟<sup>1,2</sup>, 刘锡祥<sup>3</sup>, 李正光<sup>1</sup>, 王向鑫<sup>1</sup>, 秦升杰<sup>1</sup>

(1. 国家深海基地管理中心, 山东 青岛 266237; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 266237;

3. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:**本征声线相对到达时延估计是基于声线理论信道模型的匹配场定位方法中的关键环节,该文就声源位置变化和声速剖面扰动对本征声线相对到达时延的影响进行了研究。基于 Shallow Water'06 实验环境模型(海底参数源于文献反演结果)和大量实测声速剖面数据,发现两者对本征声线相对到达时延的影响类似。这种相似性对基于声线理论信道模型的匹配场定位稳健方法的研究具有一定的参考意义。

**关键词:**本征声线; 到达时延; 声速剖面扰动; 声源位置变化

中图分类号:O427.1

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.01.006

## Influence of Source Position/SSP Perturbation on Relative Arrival Delay of Eigenrays

ZHANG Tongwei<sup>1,2</sup>, LIU Xixiang<sup>3</sup>, LI Zhengguang<sup>1</sup>, WANG Xiangxin<sup>1</sup>, QIN Shengjie<sup>1</sup>

(1. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, China; 2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and

Technology, Qingdao 266237, China; 3. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The relative arrival delay estimation of the eigenrays is the key part of the matched-field processing based on acoustic ray modeling (MFP-ARM). In this paper, the influence of the source position changing and SSP perturbation on the relative arrival time delay of eigenrays is studied. Based on the Shallow Water'06 experimental environment model (the literature retrieval results) and SSP data measured during experiment, it is found that the influences of both the source position change and SSP perturbation on the relative arrival time delay of eigenrays are similar. The similarity can provide some reference value for robust MFP-ARM.

**Key words:** eigenray; arrival delay; SSP perturbation; source position changing

## 0 引言

匹配场定位所面临的两个难题<sup>[1]</sup>是较高的旁瓣和海洋环境参数失配导致定位性能的大幅度下降。针对不确定水声环境,国内、外学者提出了许多宽松的自适应匹配场处理方法<sup>[2-7]</sup>,较典型的有邻域位置约束法和环境扰动约束法。与传统的匹配场定位方法类似,基于声线理论信道模型的匹配场定位方法同样面临海洋环境参数失配导致定位性能大幅度下降的难题<sup>[8]</sup>。显然,针对不确定水声环境,基于声线理论信道模型的匹配场定位方法可以借鉴传统匹配场定位方法中的一些宽容算法。考虑到本征声线相

对到达时延估计是基于声线理论信道模型的匹配场定位方法中的关键环节,本文就声源位置变化和声速剖面扰动对本征声线相对到达时延的影响进行了研究,发现两者对本征声线相对到达时延的影响是相似的。

## 1 理论模型

### 1.1 声源位置变化对本征声线相对到达时延的影响

通过在测试点源位置设置矩形邻域,并进行网格划分,构建了声源位置变化的基本模型。假设测试点源的距离和深度分别为  $R$  和  $D$ 。以该测试点

收稿日期:2017-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41641049);青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金资助项目(QNLM2016ORP0406);山东省自然科学基金资助项目(ZR2015EM005);山东省重点研发计划资助项目(2016GSF115006);青岛市自主创新计划资助项目(15-9-1-90-JCH);泰山学者工程专项经费资助项目(TSPD20161007);国家重点研发计划资助项目(2017YFC0305700)

作者简介:张同伟(1983-),男,山东潍坊人,副研究员,博士,主要从事声场与声信号处理的研究。E-mail: tongwei.zhang@outlook.com.

通信作者:刘锡祥(1976-),男,江苏海安人,教授,博士,主要从事组合导航与信息融合的研究。E-mail: scliuseu@163.com.

源为中心,设置长为  $\Delta R$ ,宽为  $\Delta D$  的矩形邻域,并对该矩形邻域划分网格,其中距离步长为  $\Delta r$ ,深度步长为  $\Delta d$ 。通过合理设置  $\Delta R$ 、 $\Delta r$ 、 $\Delta D$  和  $\Delta d$ ,使得  $\frac{\Delta R}{\Delta r}$  和  $\frac{\Delta D}{\Delta d}$  均为偶数,则测试声源位置正好位于矩形邻域的中心网格点上,且矩形邻域被划分为  $M$  个小区域:

$$M = \frac{\Delta R}{\Delta r} \times \frac{\Delta D}{\Delta d} \quad (1)$$

且包含  $N$  个网格点:

$$N = \left(\frac{\Delta R}{\Delta r} + 1\right) \times \left(\frac{\Delta D}{\Delta d} + 1\right) \quad (2)$$

将测试声源分别放置在矩形邻域的  $N$  个网格点上,并利用已知环境参数通过射线理论模型计算各网格点到接收水听器的本征声线到达时延。从计算得到的本征声线到达时延中求最小的到达时延,并以该时延为参考基准,将其他本征声线到达时延与参考基准进行比较,且计算到达时延差  $\Delta\tau$ 。假设采样率为  $f_s$ ,可将  $\Delta\tau$  转化为采样周期数,即

$$m = \Delta\tau \times f_s + 1 \quad (3)$$

## 1.2 声速剖面扰动对本征声线相对到达时延的影响

通常希望在保证一定精度的前提下用尽量少的参数来表示复杂的海洋环境。在最小均方意义下,经验正交函数<sup>[9]</sup>(EOF)是描述声速剖面最有效的基函数。一般只需要前几阶 EOF 就可较准确地表示任意一条声速剖面,减少了描述声速垂直结构所需要的参数。

将测试点源放置在某测试位置(距离和深度分别为  $R$  和  $D$ ),采用文献[9]中描述的步骤生成随机声速剖面,通过射线理论模型计算测试点源到接收水听器的本征声线到达时延。与 1.1 节类似,由计算得到的本征声线到达时延中求最小的到达时延,并以该时延为参考基准,将其他本征声线到达时延与参考基准进行比较,计算  $\Delta\tau$ ,并将  $\Delta\tau$  转化为采样周期数。

## 2 海试数据验证

### 2.1 实验描述与环境模型

2006 年夏,美国海军研究机构资助了一个多学科、多机构、多国家的大型实验,即在新泽西大陆架海域进行的“Shallow Water’ 06”(SW06)实验<sup>[10]</sup>。图 1 为某子实验前、后的声速剖面测量值。CTD#36、

CTD#37 分别为实验前、后的测量值,两次测量的时间差为 45 min。由图可看出,在 30~50 m,声速值的变化为 5 m/s。声速剖面的剧烈波动由内波引起,对声传播有较大的影响。海底参数选用文献[11-12]中采用同样的实验数据进行反演得到的结果。

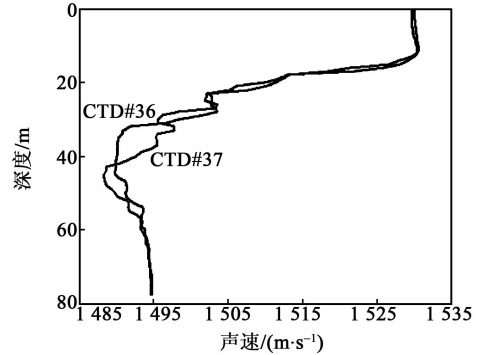


图 1 声速剖面

### 2.2 声源位置变化对本征声线相对到达时延的影响

利用 BELLHOP<sup>[13]</sup>射线模型计算本征声线的相对到达时延。将测试点源放置在某一位置邻域范围内,仿真分析测试点源在邻域内变化对水听器接收到的本征声线相对到达时延的影响,并分析其规律。

假设测试点源的距离和深度分别为 230 m 和 45 m。以该测试点源为中心,设置长为 10 m、宽为 1 m 的矩形邻域,并对该矩形邻域划分网格,其中距离步长为 5 m,深度步长为 0.5 m。这样该矩形邻域被划分为 4 个小区域,共有 9 个网格点,且测试声源位置正好位于矩形邻域的中心。把测试声源分别放置在矩形邻域的 9 个网格点上,并利用已知的环境参数通过射线理论模型计算各网格点到接收水听器的本征声线到达时延。

表 1 为以测试声源位置为中心的矩形邻域各网格点对应的本征声线相对到达时延(已转化为采样周期数)。表中,第 1 列是矩形邻域各网格点编号及其对应距离、深度;A~J 代表本征声线的阶次。由表可看出,随着本征声线阶次的升高,同阶本征声线的相对到达时延差不断增大。当测试声源在其邻域内变化时,本征声线相对到达时延也发生变化,且随着本征声线阶次的升高,相对到达时延的变化范围也不断增大。

表1 声源位置变化对本征声线相对到达时延的影响

| 位置/m               | A | B  | C   | D   | E   | F   | G   | H   | I     | J     |
|--------------------|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| (1, 1)=(44.5, 225) | 1 | 27 | 137 | 219 | 446 | 576 | 778 | 929 | 1 248 | 1 416 |
| (1, 2)=(44.5, 230) | 1 | 26 | 135 | 216 | 439 | 567 | 767 | 917 | 1 234 | 1 400 |
| (1, 3)=(44.5, 235) | 1 | 25 | 133 | 212 | 432 | 558 | 757 | 905 | 1 220 | 1 385 |
| (2, 1)=(45.0, 225) | 1 | 27 | 135 | 217 | 447 | 577 | 774 | 925 | 1 251 | 1 418 |
| (2, 2)=(45.0, 235) | 1 | 26 | 133 | 213 | 440 | 569 | 764 | 913 | 1 236 | 1 402 |
| (2, 3)=(45.0, 235) | 1 | 25 | 131 | 209 | 433 | 560 | 753 | 901 | 1 222 | 1 387 |
| (3, 1)=(45.5, 225) | 1 | 28 | 133 | 214 | 449 | 579 | 771 | 922 | 1 253 | 1 420 |
| (3, 2)=(45.5, 230) | 1 | 27 | 131 | 211 | 441 | 570 | 761 | 910 | 1 238 | 1 404 |
| (3, 3)=(45.5, 235) | 1 | 26 | 129 | 207 | 434 | 562 | 750 | 898 | 1 224 | 1 389 |
| 同阶本征声线的相对到达时延差     | 0 | 3  | 8   | 12  | 17  | 21  | 28  | 31  | 33    | 35    |

### 2.3 声速剖面扰动对本征声线相对到达时延的影响

将测试点源放置在某固定位置,令随机环境参数向量在随机环境参数向量集中变化,仿真分析其对本征声线相对到达时延的影响。图2为SW06实验中采集到部分声速剖面。这些声速剖面是在2006年8月30日到9月1日期间采集的,共计6 501条。由图可看出,海表20~40 m深度范围内声速变化较大,声速的最小值约在海水中部40 m。

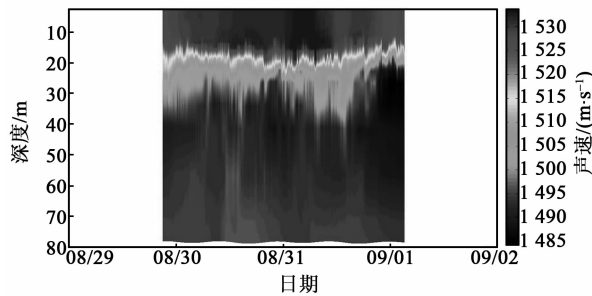


图2 SW06实验中采集到部分声速剖面

从SW06实验中采集到声速剖面数据集得到的5阶EOF,如图3所示。由图可见,拟合SW06实验

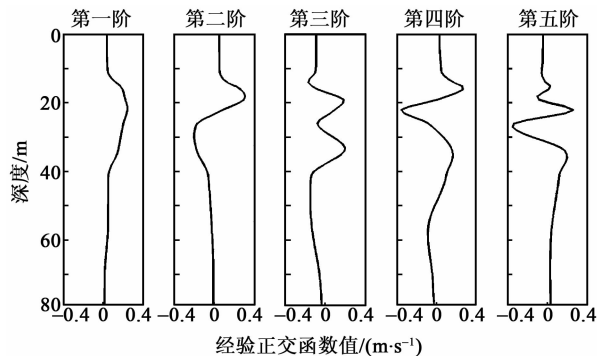


图3 SW06实验中采集到部分声速剖面数据集得到的5阶EOF

表3 声速剖面随机扰动对本征声线相对到达时延的影响

| 随机声速剖面 | A | B  | C   | D   | E   | F   | G   | H   | I     | J     |
|--------|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 1      | 1 | 27 | 141 | 226 | 452 | 583 | 792 | 945 | 1 261 | 1 410 |
| 2      | 1 | 26 | 137 | 218 | 437 | 565 | 770 | 920 | 1 232 | 1 398 |
| 3      | 1 | 24 | 133 | 211 | 424 | 559 | 750 | 917 | 1 214 | 1 368 |

中采集到的6 501条声速剖面,拟合得到6 501组5阶 $\alpha$ 系数。对每阶 $\alpha$ 系数求最大值和最小值,得到每阶 $\alpha$ 系数的变化范围,如表2所示。

表2 5阶 $\alpha$ 系数的最大值和最小值

| $\alpha$ 系数 | 第一阶    | 第二阶    | 第三阶    | 第四阶    | 第五阶    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 最大值         | 51.31  | 32.44  | 18.11  | 19.17  | 11.65  |
| 最小值         | -78.14 | -35.72 | -19.64 | -19.48 | -20.94 |

下面分析声速剖面随机扰动对本征声线相对到达时延的影响。随机声速剖面采用文献[9]中所述声速剖面经验正交函数(EOF)方法生成。将测试点源放置在某测试位置(这里取深度为45 m,距离为230 m),利用BELLHOP射线模型计算声速剖面随机扰动对水听器接收到的本征声线相对到达时延,并分析其影响和变化规律。表3为9组声速剖面随机扰动对水听器接收到的本征声线相对到达时延的影响。表中最左侧的一列是声速剖面随机扰动编号。由表可看出,个别随机扰动产生的声速剖面漏掉了某些阶次的本征声线;此外,随着本征声线阶次的升高,同阶本征声线的相对到达时延差不断增大。

与测试声源在其邻域内变化对本征声线相对到达时延的影响类似,声速剖面随机扰动也导致本征声线相对到达时延发生变化,且随着本征声线阶次的升高,相对到达时延的变化范围也不断增大。

续表

| 随机声速剖面         | A | B  | C   | D   | E   | F   | G   | H   | I     | J     |
|----------------|---|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|
| 4              | 1 | 28 | 137 | 221 | 454 | 586 | 785 | 938 | 1 265 | 1 415 |
| 5              | 1 | 26 | 133 | 213 | 440 | 569 | 764 | 913 | 1 236 | 1 402 |
| 6              | 1 | 25 | 129 | 206 | 436 | 562 | 753 | 910 | 1 208 | 1 372 |
| 7              | 1 | 26 | 134 | 208 | 429 | 561 | 751 | 903 | 1 241 | 1 408 |
| 8              | 1 | 27 | 128 | 208 | 443 | 572 | 757 | 906 | 1 240 | 1 406 |
| 9              | 1 | 25 | 135 | 211 | 439 | 565 | 757 | 903 | 1 212 | 1 376 |
| 同阶本征声线的相对到达时延差 | 0 | 4  | 13  | 20  | 23  | 24  | 42  | 42  | 53    | 47    |

### 3 结束语

通过在测试点源位置设置矩形邻域,并进行网格划分,构建了声源位置变化的基本模型。同时,利用经验正交函数构建了随机扰动的声速剖面生成方法。在此基础上,基于 Shallow Water' 06 实验环境模型(海底参数源于文献反演结果)和实验获得的大量实测声速剖面数据,通过 BELLHOP 射线模型分别计算声源位置变化和声速剖面随机扰动对水听器接收到的本征声线相对到达时延,并分析其影响和变化规律。结果表明,声源位置变化和声速剖面扰动对本征声线相对到达时延的影响相似,即均导致本征声线相对到达时延发生变化,且随着本征声线阶次的升高,相对到达时延的变化范围也不断增大。

与传统的匹配场定位方法不同,基于声线理论信道模型的匹配场定位方法采用本征声线到达结构的特征匹配。尽管如此,基于声线理论信道模型的匹配场定位方法同样面临海洋环境参数失配导致定位性能大幅度下降的难题。借鉴自适应匹配场处理方法的邻域位置约束法和环境扰动约束法,本文开展的声源位置变化和声速剖面扰动对本征声线相对到达时延影响的相似性研究,这将对基于声线理论信道模型的匹配场定位稳健方法的研究具有一定的参考意义。

### 参考文献:

- [1] 杨坤德. 水声阵列信号的匹配场处理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008.
- [2] WOOJAE S, SUNG H B. Robust matched field-processing algorithm based on feature extraction [J]. IEEE J Ocean Eng, 2002, 27: 642-652.
- [3] CHANDLER H A, FEUILLADE C, SMITH G B. Sector-focused processing for stabilized resolution of multiple acoustic sources[J]. J Acoust Soc Am, 1995, 97: 2159-2172.
- [4] KROLIK J L, SHOREY J A, NOLTE L W. Compu-

tationally efficient Monte Carlo estimation algorithms for matched field processing in uncertain ocean environments[J]. J Comp Acous, 1994, 2: 285-314.

- [5] RICHARDSON A M, NOLTE L W. A posteriori probability source localization in an uncertain sound speed, deep ocean environment[J]. J Acoust Soc Am, 1991, 89: 2280-2284.
- [6] SCHMIDT H, BAGGEROER A B, KUPERMAN W A, et al. Environmentally tolerant beamforming for high-resolution matched field processing: Deterministic mismatch[J]. J Acoust Soc Am, 1990, 88: 1851-1862.
- [7] YANG K D, MA Y L. Robust adaptive matched field processing with sector eigenvector constraints[J]. Acta Acoustica, 2006, 25: 243-257.
- [8] ZHANG T, YANG K, MA Y, et al. A robust localization method for source localization based on the autocorrelation function of wide-band signal[J]. Acta Phys Sin, 2015, 64: 024303.
- [9] LI J, YANG K, LEI B, et al. Research on the temporal-spatial distributions and the physical mechanisms for the sound speed profiles in north-central Indian Ocean[J]. Acta Phys Sin, 2012, 61: 084301.
- [10] TANG D, MOUM J N, LYNCH J F, et al. Shallow Water '06: a joint acoustic propagation/nonlinear internal wave physics experiment [J]. Oceanography, 2007, 20: 156-167.
- [11] JIANG Y, CHAPMAN N R, GERSTOFT P. Short range travel time geoacoustic inversion with vertical line array[J]. J Acoust Soc Am, 2008, 124: EL135-EL140.
- [12] JIANG Y, CHAPMAN N R, YANG K, et al. Estimating marine sediment attenuation at low frequency with a vertical line array[J]. J Acoust Soc Am, 2009, 125: EL158-EL163.
- [13] PORTER M B. The KRAKEN normal mode program [M]. La Spezia: SACLANT Undersea Research Center, 1995.