# 矢量水听器宽带多途信号仿真及 俯仰角估计性能研究

吴艳群, 胡永明 (国防科学技术大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 以声线理论为基础, 建立了发射波形已知的声场振速信号的有限差分数值计算模型。在保证精度的前提下, 仿真宽带信号所需的计算量和运算时间都大大减少,可满足实时处理的需要。通过仿真分析了浅海环境下近、远场 的多途信号的到达结构及其对矢量水听器俯仰角定向性能的影响。研究结果表明:多途相干信号给矢量水听器的俯 仰角估计带来严重误差,应该寻求匹配场处理或者其它信号处理技术提取直达波以改善其性能:使用等声速剖面近 似弱负梯度声速剖面,对声压信号和垂直振速信号时域波形影响较小,但对水平振速的时域波形影响很大。

关键词: 矢量水听器; 宽带多途射线模型; 俯仰角估计; 声速剖面失配

中图法分类号: TB566 O427 TB565 文献标示码: A 文章编号: 1000-3630(2009)-05-0577-05 DOI编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.05.003

# Simulations of broadband multipath signals for vector hydrophone and the orientation performance study

#### WU Yan-qun, HU Yong-ming

(College of Photoelectric Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A finite difference model for acoustic velocity signals based on ray theory is proposed when the emitted signal waveform is known. The computation time is reduced significantly in the case of broadband signals at the tolerance of accuracy. Simulations are conducted in shallow waters to analyze the arrival patterns of multipath signals at short and long ranges and its influence on the elevation estimation performance of the vector hydrophones is analyzed. The results show that the multipath coherent signals severely degrade the estimation performance of the vector hydrophones, and thus matched field processing or signal processing techniques to pick up the direct arrival signals should be used to improve the performance. Using the iso-speed profile as an approximation to the weak negative gradient sound speed profile (SSP) influence little on the waveforms of pressure and vertical velocity signals, but greatly on the waveform of horizontal velocity signals.

Keywords: vector hydrophone; broadband multipath ray model; elevation estimation; mismatch of SSP

1 引言

矢量水听器通常由声压水听器和三个空间正 交的振速型(或加速度型)水听器构成,可同时测量 空间单点声压和质点振速的三个正交分量,具有指 向性与频率无关等优点,在军事和民用上具有广泛 的应用前景。目前利用矢量水听器进行测向定位大 多考虑矢量水听器置于自由声场的情形<sup>[1-4]</sup>,但实际 应用中,复杂的海洋环境使声波发生反射、折射, 导致到达声波的方向远远偏离目标声波的出射方 向,给基于矢量水听器的目标定向带来很多困难。

通讯作者: 吴艳群, E-mail: wuyanqun@nudt.edu.cn

简正波模型是目前应用最广泛的宽带信号仿 真模型之一。虽然该模型精度高,但每次只能处理 一个频点的信号,随着信号带宽的增大,运算量和 运算时间都大大增加,难以用于实时处理场合。这 一困难在匹配场定位时尤为严重。本文使用声线理 论描述矢量声场,建立了振速信号的有限差分求解 模型。相比于简正波模型,其形式简单,物理图像 清晰,利于分析理解,计算量和运算时间都大大减 小。此外,利用声线计算程序计算并分析了近、远 场的宽带多途信号的到达结构及其对矢量水听器 俯仰角估计性能的影响,为矢量水听器的应用提供 理论依据。

#### 模型建立 2

通常假设海洋波导在垂直方向受到海表和海

收稿日期: 2007-10-28; 修回日期: 2008-03-08

作者简介:吴艳群(1981-),女,福建人,博士研究生,研究方向为光纤 矢量水听器及其应用研究。

底的限制,水平方向自由扩展,因此可建立以声源 和矢量水听器共同所在平面为 roz 面的柱坐标系。 不妨设三维矢量水听器自身坐标系的 z 轴平行于柱 坐标系的 z 轴。

## 2.1 声线模型

声线理论是描述水下声场分布的一种高频近 似理论。一般认为声波频率满足经验公式*f*>10*c/H* 时,声线理论成立,其中*f*为声波频率,*H*为水深, *c*为声速<sup>[5]</sup>。对 100m 深的浅海,下限频率为 150Hz; 对 1000m 深的深海,下限频率为 15Hz。可见,在 主被动定位所感兴趣的几百到几千赫兹频段内,声 线理论成立。

声线模型下,海洋通道的脉冲响应由*M*条本征 声线构成,每条本征声线对应一个多途信道,即

$$h(t) = \sum_{m=1}^{M} a_m \delta(t - \tau_m) \tag{1}$$

其中 *M* 为有效多途信道的数目; *a<sub>m</sub>、τ<sub>m</sub>*表示第 *m* 个有效多途信道的幅度衰减系数及时延,其大小 与声源、接收器的位置均相关。

求解本征声线的  $a_m$ 、 $\tau_m(m=1,\dots,M)$ 是应用声线 模型的关键环节。Bellhop 程序采用数值方法求解本 征声线轨迹和声线传输时间,是较为通用的一种声 线模型程序<sup>[6]</sup>。使用 Bellhop 程序计算得到参数  $a_m$ 、  $\tau_m$ ,如果已知发射信号时域波形  $s_0(t)$ ,则声压信号 为:

$$p(t) = \sum_{m=1}^{M} a_m s_0(t - \tau_m) + n(t)$$
(2)

其中 n(t)为外界加性噪声。

由于声线模型与信号频率无关,对宽带信号只 需要求解一次参数 *a<sub>m</sub>、τ<sub>m</sub>*,大大减小了运算时间。 声线模型采用了高频近似,因此运算量的减少是以 牺牲一定的精度为代价的。但在一般应用场合,声 线模型是能够满足要求的。

# 2.2 振速信号的有限差分模型

振速和声压满足欧拉公式:

$$\mathbf{v}(t, \mathbf{x}_{0}) = -\frac{1}{\rho} \int \nabla p(t, \mathbf{x}_{0}) dt$$
(3)

声线模型下,质点振速信号没有明确的解析表 达式,声压的各参数变量也与空间坐标没有确定的 关系,只能从数值方法入手求解空间任意一点 **x**<sub>0</sub> 的质点振速。

如图 1 所示,建立有限差分网格,对∇p 取差分近似,即:

$$\nabla p(t, \mathbf{x}_0) \approx \left[ \frac{p(t, \mathbf{x}_2) - p(t, \mathbf{x}_1)}{d_r} \frac{p(t, \mathbf{x}_4) - p(t, \mathbf{x}_3)}{d_z} \right]^T (4)$$



Fig.1 Scheme of finite difference grids

分别使用 Bellhop 声线模型计算得到从声源到 各接收点  $x_i$  (i=0,1,...,4)的信道参数  $a_m(x_i) < \tau_m(x_i)$ (m=1,...,M),代入式(2)求解得到  $p(t,x_i)$ ,从而质点 的水平和垂直振速分别为:

$$\begin{vmatrix} v_r(t, \mathbf{x}_0) \approx -\frac{1}{\rho d_r} \int [p(t, \mathbf{x}_2) - p(t, \mathbf{x}_1)] dt + n_r(t, \mathbf{x}_0) \\ v_z(t, \mathbf{x}_0) \approx -\frac{1}{\rho d_z} \int [p(t, \mathbf{x}_4) - p(t, \mathbf{x}_3)] dt + n_z(t, \mathbf{x}_0) \end{aligned}$$
(5)

式(5)引入有限差分误差,这种误差在差分网格 *d*<sub>r</sub>和*d*<sub>z</sub>很小的情况下可忽略不计。

# 3 矢量水听器宽带信号俯仰角估计

设 *P*(*f*)、*V*(*f*)分别为矢量水听器接收到的声 压、振速信号的傅立叶变换,由定义可得声能流谱 (也称声强流谱)为:

$$\mathbf{j}(f) = \operatorname{Re}\{P(f) \cdot \operatorname{conj}(V(f))\}$$
6)
  
各频点处声源的俯仰角估计值  $\hat{\phi}$  为<sup>[7]</sup>:
  
 $\hat{\phi} = \arctan[j_r(f)/j_z(f)]$ 
(7)

对所有频点的估计值进行直方图统计得到某 一时刻的声源俯仰角曲线的概率统计,曲线最大值 对应的方位即为声源的俯仰角估计值。

# 4 仿 真

声速分布是海洋信道的重要参数,且不同季节 声速剖面不同。声速剖面导致声线发生折射,这使 声线到达角远远偏离声线出射角。此时,使用常规 的信号处理方法(如直方图统计法)处理矢量水听器 采集的数据失去了意义。因此,这里对等声速剖面 和非等声速剖面分别进行讨论。为了更好地分析多 途对矢量水听器造成的影响,不考虑外界环境噪声 的影响。

#### 4.1 等声速剖面

图 2 为 Pekeris 波导的示意图,水深 *H*=100m。 设海底沉积层为砂-泥-粘土,其典型密度值  $\rho_2$ =1.583g/cm<sup>3</sup>,声速  $c_2$ =1580m/s,衰减系数  $\alpha$ =0.113dB/m/kHz<sup>[8]</sup>。声源深度 *D*s=80m。发射的信 号是频带为 300~800Hz 的线性调频信号,信号持续 时间 0.0625s,采样率 3400Hz,如图 3 所示。仿真 中计算特征声线时所设跟踪声线的范围是:掠射角  $-50^{\circ}\sim50^{\circ}$ ,在此范围内以等间距掠射角  $\delta q$ =100/1000=0.1°跟踪 1000 条声线。



当接收器深度 Dr=1m、声源和接收器间距 R=100m时,接收到的声压和振速波形如图4(a)~4(c) 所示。受到多途混叠影响,各波形不仅存在时间色 散,即信号在时间上展宽(约 0.095s),且波形发生 畸变,其中垂直振速的畸变最为严重。由图4(d)的 信道多途到达结构可知,三条本征声线分别对应直 达波、一次表面反射波和一次海底反射波,到达时 间分别为 0.0858s、0.0850s 以及 0.1036s。由于直达 波 与一次表面反射波到达时间间隔极近(不到 1ms),信号混叠在一起,而海底反射波衰减厉害, 且到达时间与前两个波相差 20ms 左右,形成小幅 度的"拖尾"反射波。

使用直方图统计法估计声源俯仰角,结果如图 5(a)所示。由于三条本征声线的到达角为 51.72°、 -51.01°、40.0°,这些信号在时间上互相重叠形成相 干信号,导致声源俯仰角模糊,最大值在 0.89°,且 出现的概率很小。如果仅从接收到的垂直振速中分 离出直达波,估计得到的俯仰角约为 67.0°,估计值 仍然不正确。如果从水平和垂直振速中同时分离出 直达波进行俯仰角估计,如图 5(b)所示,估计值为 51.7°,极接近真实值(略有偏差是由 Bellhop 的数值 计算带来的)。由此可以断定:水平振速和垂直振速 均包含经过不同路径到达的声线信息,如果能使用



(d)本征声线到达时间及对应幅度
图4 R=100m, Dr=1m 处矢量水听器接收到信号波形及本征声线
到达结构图

Fig.4 Received signals of vector hydrophones and arrival pattern of eign-rays at *R*=100m, *D*r=1m

某种信号处理手段从振速信号中分离出直达波,就 能够确定声源的俯仰角。

改变接收器的深度,本征声线到达结构不同, 但结论相似。

当接收器深度 Dr=10m 时,增加传播距离至 R=1000m,由图 6 可见,远距离传播受多途影响更 为严重,信号波形发生严重畸变。将到达的本征声 线根据彼此间的时延和幅度分组(见图 6(d)),第 1 组包含直达波和海面一次反射波。这两个波到达接 收器的时间和幅度均很接近,不易分辨。受到海底 衰减作用,与海底作用次数越多,信号幅度衰减越

65









严重。从第4组开始为与海底作用次数三次以上的 反射波,其信号幅度小于直达波的1%,可以忽略。

进一步将本征声线的幅度和到达时间以声线 在声源的起始出射角的顺序排列。如图 7 所示,到 达时间最小、幅度最大的声线对应直达声线,即编 号 10。直达声线两边,随着入射角度远离直达路径, 到达时间逐渐增大,呈碗状(见图 7(b)),幅度逐渐 减小。

可见,在远距离传播条件下,有效本征声线的 到达角密集在水平轴附近。但是估计的俯仰角峰值 为 87.61°,而真实角在 86.05°。虽然分离出直达波 后能准确估计出声源的俯仰角(估计值为 85.92°), 但是现有的信号处理方法很难将时延和幅度如此 接近的多途相干信号分离出来。

综上所述,在多途情况下,来自不同方向的反 射波互相干涉,使俯仰角的值不确定;声压和水平 振速的时域波形畸变不严重,垂直振速的时域波形 受多途影响严重,且受海底衰减作用影响最厉害, 如果能够使用信号处理技术提取直达波或者匹配的



方法可以改善矢量水听器的定向性能。

#### 4.2 非等声速剖面

在有些应用场合,通常使用等声速剖面来近似 声速剖面起伏不大的情况。考虑如表1所示的负声 速剖面的情况,其中海底参数同4.1节。

表 1 负声速梯度波导 Table 1 SSP waveguide with negative gradient

深度/m	声速/(m/s)
0	1505
10	1505
30	1495
100	1495

图 8 为 *R*=100m, *D*r=1m 与 *R*=1000m, *D*r=1m 这两种情况的声线到达结构,分别与图 4(d)和图 7(d)比较,当声速剖面梯度变化不大情况下,声线 到达结构与等声速的到达结构差不多。



(b) R=1000m, Dr=10m 处时本征声线到达时间及对应幅度 图 8 不同距离下,本征声线到达时间及对应幅度 Fig.8 Arrival times and amplitudes of eigenrays at different ranges and depths

为考察声速剖面(SSP)失配情况下接收信号波 形的差异,定义波形失配系数为:

$$M_m = 1 - \max\left\{corr(y_i(t), y_n(t))\right\}$$
(8)

其中  $y_i(t)$  为以等声速剖面作为近似得到的信号波形;  $y_n(t)$  为真实声速剖面情况下得到的信号波形;  $corr(\cdot)$  表示归一化相关系数。 $M_m$ 越大表明由声速剖面失配造成的波形畸变越严重。

当 *R*=100m, *D*r=1m 时, 声压、水平、垂直振 速的失配系数分别为 0.00000006、0.2690、0.0004。 当 *R*=1000m, *D*r=1m 时, 声压、水平、垂直振速的 失配系数分别为 0.1149、0.2188、0.0163。

可见对弱负梯度声速剖面,使用等声速剖面作 为近似,对声压信号和垂直振速信号影响不是很大, 对水平振速影响较大。但是在非等声速剖面情况 下,由于声线发生折射,已经无法确定声线的入射角。

# 5 结论

本文在声压的声线模型基础上,对振速信号进行有限差分数值求解,大大减少了宽带信号处理的 计算量和运算时间。通过 Bellhop 声线模型计算并 分析了浅海环境下近场与远场的多途信号的到达 结构及其对矢量水听器俯仰角估计性能的影响。研 究结果表明:多途相干信号严重恶化了矢量水听器 的俯仰角估计性能,应该寻求匹配场处理或者其它 信号处理技术提取直达波以改善其估计性能;使用 等声速剖面近似弱负梯度声速剖面,对声压和垂直 振速信号的波形影响较小,但对水平振速波形影响 较大,这使得矢量水听器俯仰角估计常规方法在非 等声速剖面情况下失效。

#### 参考文献

- Cray A B, Nuttall A H. Directivity factors for linear arrays of velocity sensors[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 110(1): 324-331.
- [2] Smith, K. B, Van Leijen, A. V. Steering vector sensors array elements with linear cardioids and nonlinear hippioids[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2007, 122(1): 370-377.
- [3] Petr Tichavský, Kainam Thomas Wong, Michael D. Zoltowski. Near-field/far-field azimuth and elevation angle estimation using a single vector hydrophone[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2001, 49(11): 2498-2510.
- [4] 杨秀庭,孙贵青,陈新华,等. 一种改进的 WSF 算法在单矢量水 听器多目标方位估计中的应用[J].声学技术,2007,26(2):165-168. YANG Xiu-ting, SUN Gui-qing, CHENG Xin-hua, et al. Multi-source DOA estimation using a modified WSF algorithm in a single vector hydrophone applications[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(2): 165-168.
- [5] 孙枕戈,马远良,屠庆平,等. 基于声线理论的水声被动定位原理
  [J]. 声学学报, 1996, 21(5): 824-831.
  SUN Zhen-ge, MA Yuan-Iiang, TU Qing-ping, et al. Theory of passive localization for underwater sources based on acoustic ray modelling[J]. Acta Acustica, 1996, 21(5): 824-831.
- [6] Michael B P. The Kraken Normal Mode Program(DRAFT). Available from: http://www. hlsresearch.com/oalib/Modes/ AcousticsToolbox/Mannual\_html [Accessed on 16th June., 2007].
- [7] 姚直象,惠俊英,殷敬伟,等. 基于单矢量水听器四种方位估计方法[J]. 海洋工程,2006,24(1):122-127.
   YAO Zhixiang, HU1 Junying, YIN Jingwei, et al. Four approaches to DOA estimation based on a single vector hydrophone[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(1): 122-127.
- [8] 张忠兵,马远良,童立,等. 几种沉积层参数对声线到达结构的影响[J]. 声学技术, 2001, 20(4): 154-156. ZHANG Zhongbing, MA Yuanliang, TONG Li, et al. The effect of sediment parameters on acoustic ray arrival structure[J]. Technical Acoustics, 2001, 20(4): 154-156.