

◇ 李启虎院士八十华诞学术论文 ◇

低频大孔径线列阵声呐在海底反射区的测向性能分析*

韩志斌^{1,3} 彭朝晖^{2†} 刘扬³

(1 中国科学院大学 北京 100049)

(2 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)

(3 中国人民解放军 92578 部队 北京 100161)

摘要 与深海直达声探测、会聚区探测不同,在海底反射声探测模式下,低频大孔径线列阵声呐采用常规阵列信号处理方法,会产生测向误差增大和方位分裂等测向性能下降现象。目前,关于海底反射声探测模式下测向性能下降程度的预报、测向性能下降现象出现的区域位置预报等方面尚缺乏研究。该文针对该问题,提出一套海底反射区声呐测向性能预报方法。该方法以深海声场存在简正波簇现象及高阶简正波簇在角谱域分布具有稳定性等分析结论为支撑,提出高阶简正波簇角谱域分布向空域分布的转换方法、高阶简正波簇引起的测向误差量值预报方法、不同高阶简正波簇干涉产生多目标现象的条件的计算方法,实现了对低频大孔径线列阵声呐在深海海底反射区不同位置的测向误差预报、目标方位分裂现象产生的位置和目标角度范围要求预报。

关键词 深海低频声场,简正波分布,海底反射区

中图法分类号: P733.2;TB566

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2019)04-0569-11

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.014

Deep water azimuth predication using bottom bounce sound received by a low frequency large aperture linear array

HAN Zhibin^{1,3} PENG Zhaohui² LIU Yang³

(1 China University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

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

(3 Unit 92578 of PLA, Beijing 100161, China)

Abstract Different from direct sound detection and convergence zone detection, there are limitations while conventional array signal processing applying in bottom bounce sound areas, including phenomenon as direction error increasing and azimuthal splitting. So far, the areas where the phenomenon exists and the predication of decline degree are to be studied. Aiming at issues above, the paper develops a method for deep water azimuth predication. First, the paper submits concepts of normal mode cluster and verifies the stability of high normal mode cluster in angular spectrum. Based on these, the paper develops the method deriving the spatial distribution of normal mode cluster using the position in angular spectrum, and the method predicating the direction error arousing by each high normal mode cluster, and the method for calculating azimuthal splitting conditions caused by the interference of two normal mode clusters. Above all, the method realizes the predication of the areas where the phenomenon exists and the decline degree.

Key words Low frequency sound field in deep sea, Normal mode distribution, Bottom bounce sound area

2019-02-12 收稿; 2019-04-05 定稿

*国家自然科学基金项目 (11434012)

作者简介: 韩志斌 (1985-), 男, 河北邢台人, 博士研究生, 研究方向: 水声物理。

† 通讯作者 E-mail: pzh@mail.ioa.ac.cn

0 引言

当前,低频大孔径线列阵声呐凭借其低频探测声传播衰减小、阵增益高的优势,成为对安静型水下目标实现远程探测的有效手段。在提供水下目标远程信息时,测向精度是该类声呐的重要指标之一。

低频大孔径线列阵声呐测向精度与波束宽度有关,测向误差估计值通常取3 dB波束宽度的0.14倍。在浅海、深海直达声区和第一会聚区,由于到达接收阵的声线掠射角较小,声线难以分辨大掠射角声线造成的测向误差^[1-3](或者说,参考声速与简正波相速度不一致引起的测向误差^[4])可以忽略,该测向误差估计方法可较为准确地反映实际情况。但是,在深海海底反射区,以大掠射角的声线作用为主,会产生测向误差增大现象。吴俊楠等^[1]和宋俊^[4]分别从射线声学 and 简正波理论的角度解释了该现象的物理机理。吴俊楠等^[5-6]还指出,在深海某些区域,由于声线的多途到达现象,线列阵声呐还会出现方位分裂现象。但是目前,关于低频大孔径线列阵声呐在深海测向性能下降(含测向误差增大和目标方位分裂)现象出现的区域位置、下降的量化数值预报等方面尚缺乏研究,使得线列阵声呐在深海下的作战使用及信号处理方法改进缺乏基础理论支撑。

本文针对该问题,开展深海声场简正波分布结构研究,提出深海存在“简正波簇”现象,且在角谱域上的高簇“简正波簇”分布存在稳定性;角谱域上高簇简正波在深海海底反射区形成高簇简正波主要作用区和多个高簇简正波的干涉,导致线列阵声呐在进行常规波束形成处理时,产生测向误差增大和方位分裂现象。通过估计深海海底反射区中高簇简正波空域分布和多簇简正波干涉位置,本文预报了低频大孔径线列阵声呐深海测向性能下降的位置和下降的量化数值,在此基础上提出了常规阵列信号处理方法的改进方向。

1 深海声场简正波分布结构

1.1 深海声场“简正波簇”现象及其角谱域分布

简正波理论指出,在水平不变波导中,声场由各阶简正波叠加而成:

$$P(r, z_s, z_r, \omega) = \frac{j}{\rho(z_s)\sqrt{8\pi r}} \sum_m \Psi_m(z_r, \omega) \Psi_m(z_s, \omega) \frac{e^{-jk_{rm}r}}{\sqrt{k_{rm}}}, \quad (1)$$

其中, k_{rm} 为波数矢量 \mathbf{k}_0 的水平分量,第 m 号简正波的掠射角可表示为

$$\cos \varphi_m = \left| \frac{k_{rm}}{\mathbf{k}_0} \right|. \quad (2)$$

定义第 i 号简正波的相对强度:

$$|A_i| = \left| \frac{P_i(r, z_s, z_r, \omega)}{\max_{j=1:m} P_j(r, z_s, z_r, \omega)} \right|. \quad (3)$$

将式(1)代入式(3),得到

$$|A_i| = \left| \frac{\Psi_i(z_r, \omega) \Psi_i(z_s, \omega) \sqrt{k_{rj}}}{\max_{j=1:m} \Psi_j(z_r, \omega) \Psi_j(z_s, \omega) \sqrt{k_{ri}}} \right|. \quad (4)$$

各阶简正波相对强度 $|A_i|$ 随 φ_m 的变化情况称为简正波在“角谱域”^[4]的分布,该分布决定了简正波在水平距离上的分布情况。由式(4)可知,简正波在角谱域的分布与水平距离无关,只与本征值与本征函数(或者说与声源深度、接收阵深度和外部环境条件)相关。

对于深海 Munk 声道^[7]下的低频声场,其简正波的角谱域分布(即 $\varphi_m - |A_i|$ 曲线)如图1所示。在不同距离处,均存在固定的某“几簇”掠射角下简正波相对强度较大,对声呐探测性能起主导作用,这种现象称为深海声场的“简正波簇”现象。

假设声源与目标深度、声速值、混合层深度、声道轴深度和海深变化,根据式(1)~式(4)分析简正波簇在角谱域的分布规律。

(1) 声源与目标深度变化对简正波簇角谱域分布的影响

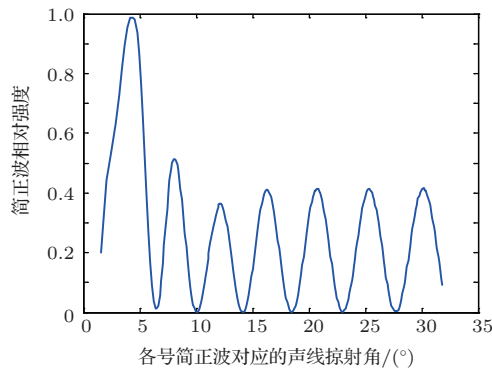
在典型深海 Munk 声道下,假设声阵与目标同深,分别取 5 m、50 m、80 m 和 100 m,对应的简正波簇角谱域分布如图2所示。

(2) 声速值变化对简正波簇角谱域分布的影响

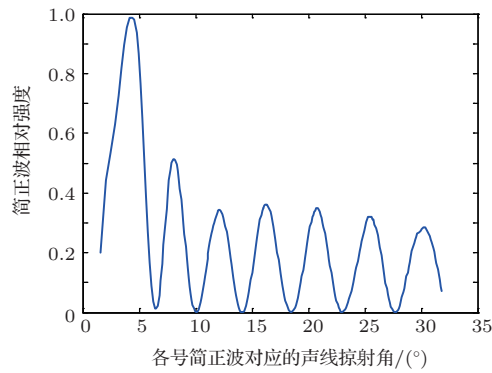
考虑声速剖面整体变化(声速值同时增加但声速梯度值保持不变)的情况,声速值每次变化 5 m/s,对应的简正波簇角谱域分布情况如图3所示。

(3) 混合层深度变化对简正波簇角谱域分布的影响

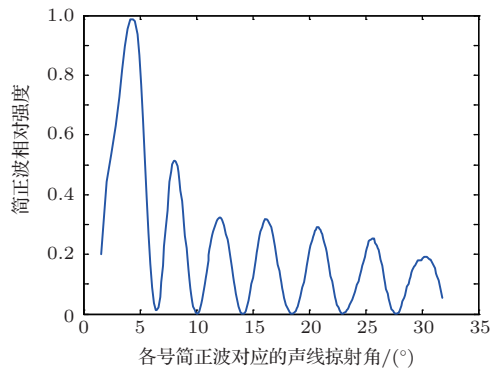
中纬度大洋海区的混合层通常具有明显的季节性变化,夏季较浅,冬季较深,而其下的主跃层结构往往变化较小。假设主跃层的形态结构不变,而混合层深度从 50 m 至 200 m 变化,对应的简正波簇角谱域分布情况如图4所示。



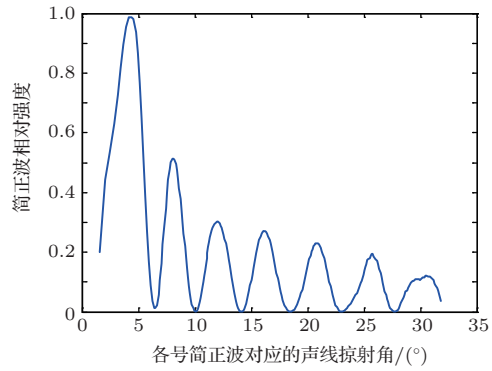
(a) 1 km处简正波角谱域分布



(b) 20 km处简正波角谱域分布



(c) 40 km处简正波角谱域分布



(d) 65 km处简正波角谱域分布

图1 深海低频声场“简正波簇”现象

Fig. 1 Normal mode cluster of sound field in deep water

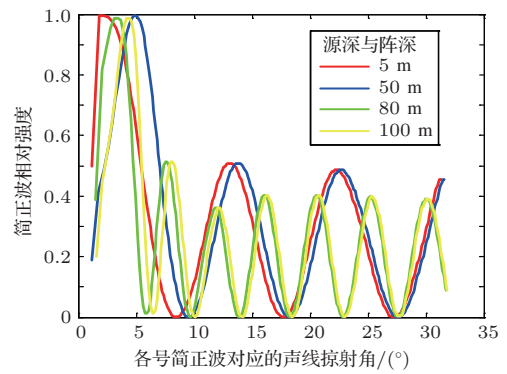
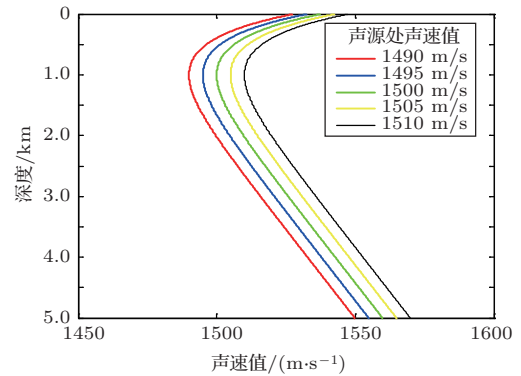
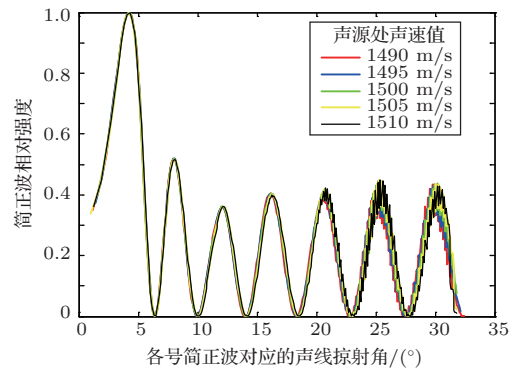


图2 阵深变化对简正波簇角谱域分布的影响

Fig. 2 Influence of array depth to normal mode cluster distribution in angular spectrum



(a) 不同声速值对应的声速剖面



(b) 声速剖面变化对简正波簇角谱域分布的影响

图3 声速值变化对简正波簇角谱域分布的影响

Fig. 3 Influence of sound velocity to normal mode cluster distribution in angular spectrum

(4) 声道轴深度变化对简正波簇角谱域分布的影响

中纬度地区声道轴深度在1000 m左右,纬度越高,上部水温受热小,声道轴也随之上升。假设声道轴深度在800~1200 m范围内变化,对应的简正波簇角谱域分布情况如图5所示。

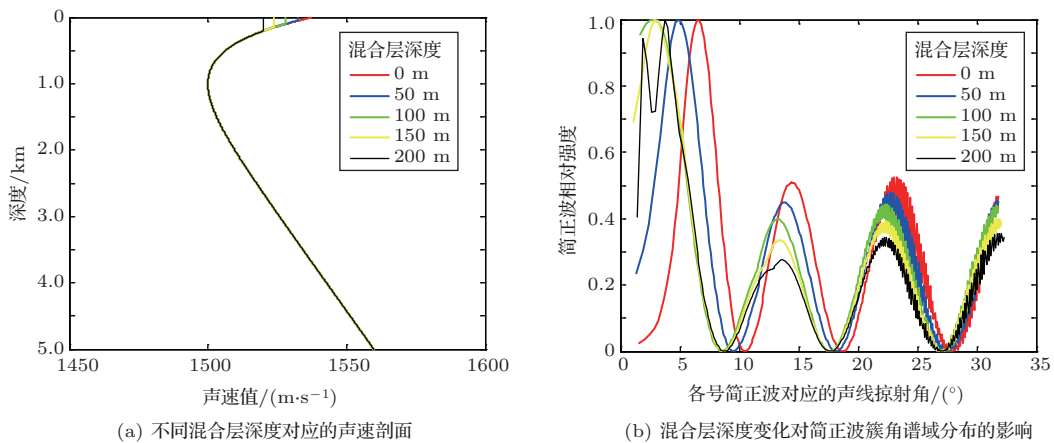


图4 混合层深度变化对简正波簇角谱域分布的影响

Fig. 4 Influence of mixing layer depth to normal mode cluster distribution in angular spectrum

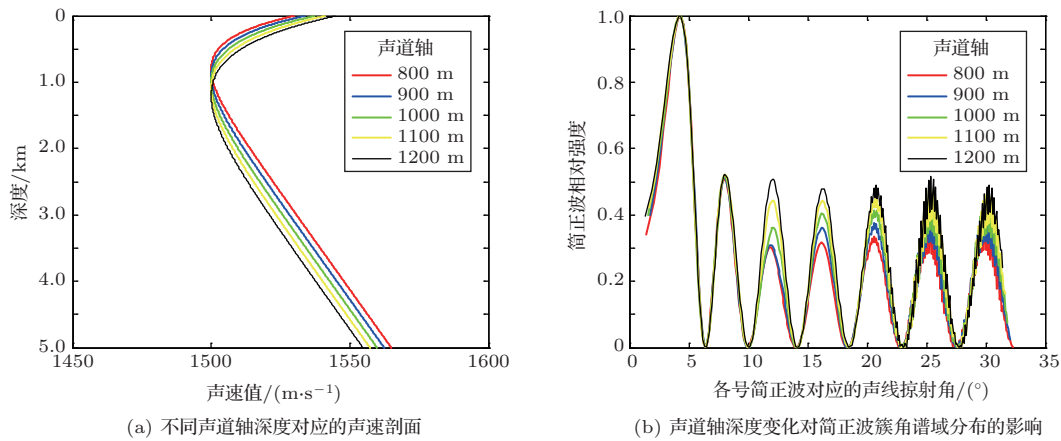


图5 声道轴深度变化对简正波簇角谱域分布的影响

Fig. 5 Influence of vocal track axis to normal mode cluster distribution in angular spectrum

(5) 海深变化对简正波簇角谱域分布的影响
 在典型深海Munk声道下，海深在3000~5000 m变化，对应的简正波簇角谱域分布完全一致，如图6所示。

通过上述分析，简正波簇在角谱域的分布规律如下：

(1) 随着环境条件、阵深和目标深度等外部条件变化，深海低频声场简正波簇现象均稳定存在。

(2) 当频率确定时，简正波簇的数目只与阵深、目标深度有关，与外部环境条件变化无关。阵深与目标深度50 m以浅时简正波簇数较少(4簇)，50 m以深时簇数较多(7簇)。

(3) 外部条件变化对高低簇简正波的角谱域分布影响程度不同。高簇(2簇及以上)简正波在角谱域的位置分布基本固定，受外部条件影响可以忽略；

低簇简正波(1簇)在角谱域的位置分布主要受混合层深度、阵深和目标深度的影响。

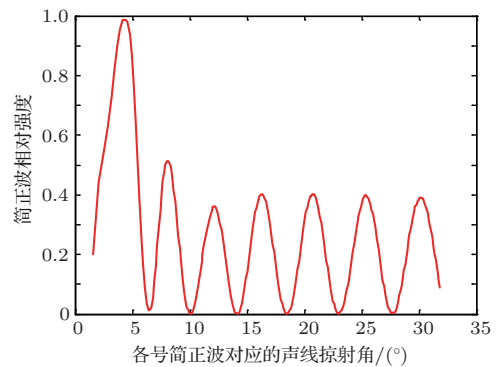


图6 海深变化对简正波簇角谱域分布的影响

Fig. 6 Influence of sea depth to normal mode cluster distribution in angular spectrum

1.2 深海海底反射区“简正波簇”空域分布规律

简正波簇在角谱域的分布决定了其在空域的分布,由于高簇(2簇及以上)简正波在角谱域的分布相对固定,因此可利用表1中各簇简正波的角谱域位置和射线追踪理论,预报简正波簇空域位置。按照射线追踪理论对简正波簇进行射线追踪,如图7所示(不同颜色表示不同簇简正波)。根据简正波簇射线追踪结果,以最高簇简正波的二次海底反射声线为界,将海底反射区分为单簇简正波能量作用区和多簇简正波能量干涉区。

用区和多簇简正波能量干涉区。

将深海 Munk 声道声速分布(式(5))简化为式(6)的线性模型:

$$c(z) = c_0\{1 + \varepsilon[e^{-\eta} - (1 - \eta)]\}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} c = c_a(1 - a_1z), & z < z_a, \\ c = c_a(1 + a_2z), & z \geq z_a, \end{cases} \quad (6)$$

其中, z_a 和 c_a 分别为声道轴深度和声速。

表1 低频声场高簇简正波在角谱域的分布情况

Table 1 High normal mode cluster distribution of sound field in angular spectrum

| | 2簇 | 3簇 | 4簇 | 5簇 | 6簇 | 7簇 |
|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 声阵(目标)50 m以浅 | 9.5° ~ 18.2° | 18.2° ~ 27.6° | 27.6° ~ 31.6° | | | |
| 声阵(目标)50 m以深 | 6.5° ~ 10.2° | 10.2° ~ 14.2° | 14.2° ~ 18.5° | 18.5° ~ 23.1° | 23.1° ~ 27.9° | 27.9° ~ 31.9° |

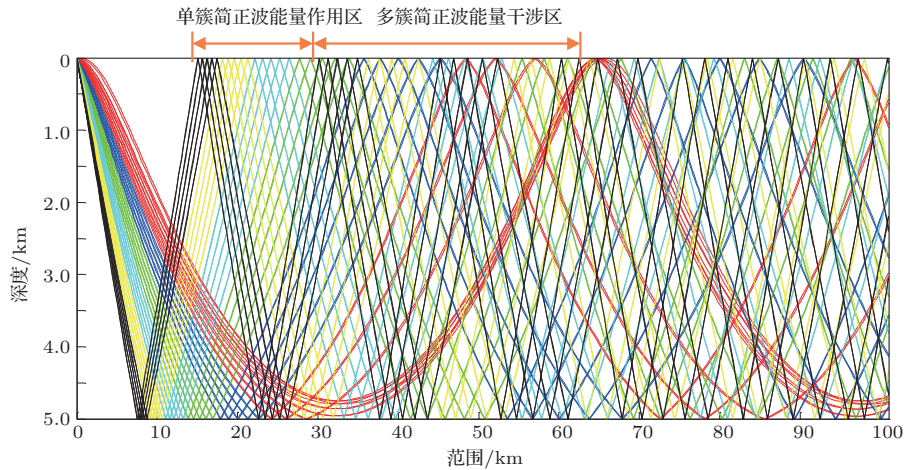


图7 深海声场“简正波簇”射线追踪结果

Fig. 7 Normal mode cluster ray tracing of sound field in deep sea

假设声源和目标深度为 z_s , 海深为 H , 第 i 簇简正波的起始掠射角为 φ_{is} , 终止掠射角为 φ_{ie} , 根据射

线理论推导第 i 簇简正波在空域起始位置 R_{is} 和终止位置 R_{ie} :

$$R_{is} = \begin{cases} 2 \cdot \left[\sqrt{\left| \left(\frac{c_s}{c_0 a_1 \cos \varphi_{is}} \right)^2 - \left(z_a - z_s - \frac{c_s}{c_0 a_1} \right)^2 \right|} - \left| \frac{\tan \varphi_{is} \cdot c_s}{c_0 a_1} \right| + |\tan \varphi_{ia}| \right], & \varphi_{is} \leq \varphi_T, \\ 2 \cdot \left[\sqrt{\left| \left(\frac{c_s}{c_0 a_1 \cos \varphi_{is}} \right)^2 - \left(z_a - z_s - \frac{c_s}{c_0 a_1} \right)^2 \right|} + \left| \frac{\tan \varphi_{isa}}{a_2} \right| \right. \\ \left. - \sqrt{\left| \left(\frac{1}{a_2 \cos \varphi_{isa}} \right)^2 - \left(H - z_a - \frac{1}{a_2} \right)^2 \right|} \right], & \varphi_{is} \geq \varphi_T, \end{cases} \quad (7)$$

$$R_{ie} = \begin{cases} 2 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{c_s}{c_0 a_1 \cos \varphi_{ie}} \right)^2 - \left(z_a - z_s - \frac{c_s}{c_0 a_1} \right)^2} - \left| \frac{\tan \varphi_{ie} \cdot c_s}{c_0 a_1} \right| + |\tan \varphi_{ia}| \right], & \varphi_{ie} \leq \varphi_T, \\ 2 \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{c_s}{c_0 a_1 \cos \varphi_{ie}} \right)^2 - \left(z_a - z_s - \frac{c_s}{c_0 a_1} \right)^2} + \left| \frac{\tan \varphi_{iea}}{a_2} \right| \right. \\ \left. - \sqrt{\left(\frac{1}{a_2 \cos \varphi_{iea}} \right)^2 - \left(H - z_a - \frac{1}{a_2} \right)^2} \right], & \varphi_{ie} \geq \varphi_T, \end{cases} \quad (8)$$

其中, φ_{isa} 和 φ_{iea} 分别为第 i 簇简正波的起始声线和终止声线在声道轴处的掠射角, $\varphi_{isa} = a \cos((c_a/c_s) \cdot \cos \varphi_{is})$, $\varphi_{iea} = a \cos((c_a/c_s) \cdot \cos \varphi_{ie})$; φ_T 为简正波的临界掠射角, $\varphi_T =$

$a \cos(c_H/c_s)$ 。

根据表1中简正波簇角谱域分布, 结合式(5)~式(8), 得到简正波簇空域分布随声阵与目标深度、环境条件的变化情况, 如图8所示。

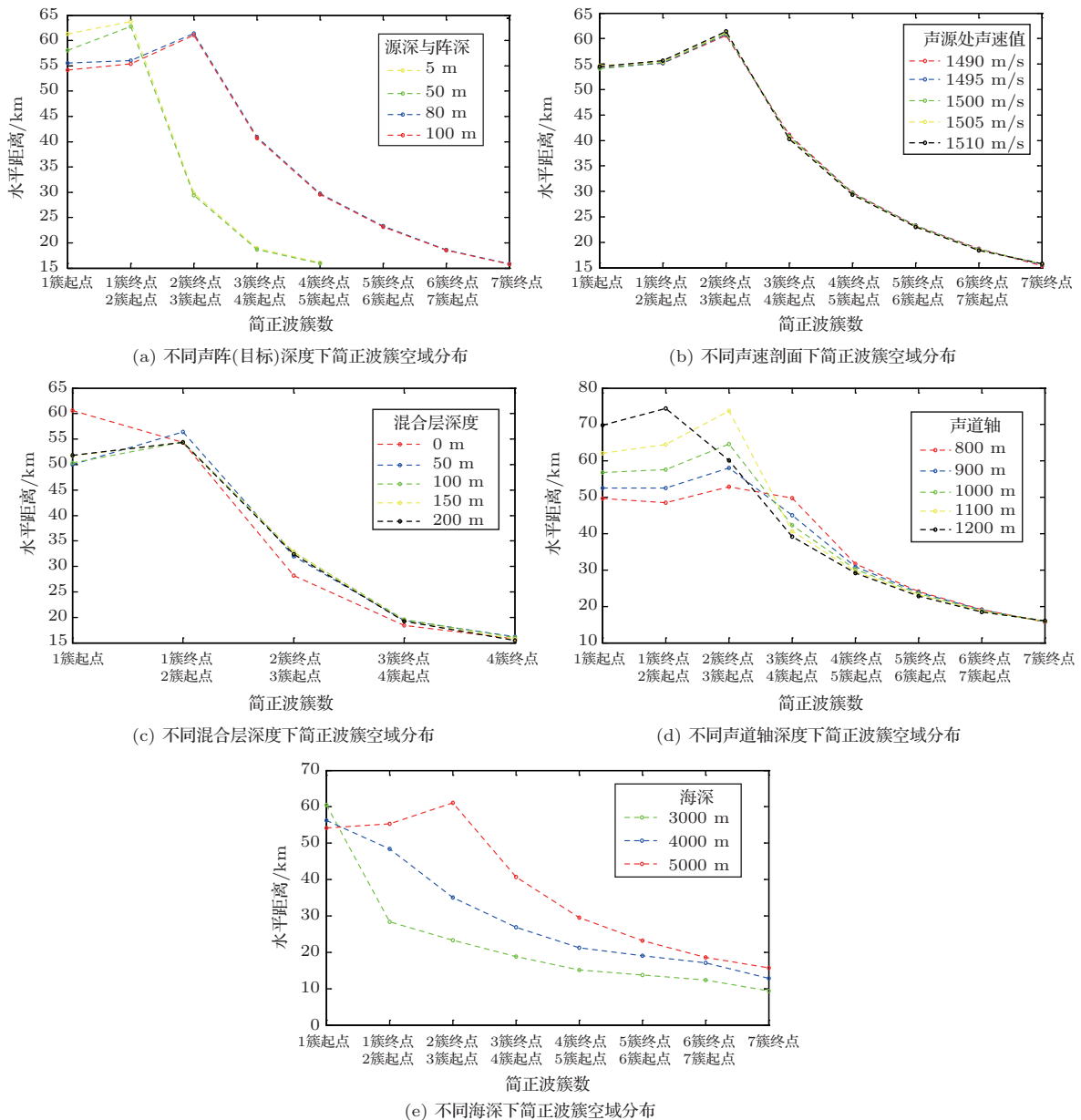


图8 简正波簇空域分布变化情况

Fig. 8 Normal mode cluster distribution in space domain

虽然2簇及以上的高簇简正波在角谱域分布具有稳定不变性,但由于信道传播的影响,其在空域分布会受到混合层深度、声道轴深度和海深等因素的影响。因此,海底反射区各阶高簇简正波作用的位置需要根据外部条件采用式(7)、式(8)预测。

其中,单簇简正波能量作用区和多簇简正波能量干涉区分界线(与最高簇简正波的空域分布相关,即最高簇简正波起始声线二次海底反射到达接收阵位置)几乎不随水文条件变化而变化,只与海深

有关。该位置随海深近似呈线性变化,通过数据拟合得到的经验公式可近似表达为

$$x = 31.5 - 0.688 \cdot (5000 - H). \quad (9)$$

利用式(7)、式(8)预报的深海典型Munk声道(假设海深5000 m,不存在混合层,声道轴深度1000 m)下单簇简正波能量作用区中各簇简正波主要作用区域和多簇简正波能量干涉区简正波簇干涉位置如表2、表3所示。

表2 阵深与目标深度50 m以浅时海底反射区简正波簇分布情况

Table 2 Normal mode cluster distribution when array depth and target depth less than 50 m

| 水平距离/km | 单簇简正波能量作用区 | | | 多簇简正波能量干涉区 | |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 16.1 ~ 18.9 | 19.0 ~ 29.8 | 29.9 ~ 32.2 | 32.3 ~ 37.8 | 37.9 ~ 59.6 |
| 作用的简正波簇 | 4簇 | 3簇 | 2簇 | 4簇和2簇干涉 | 3簇和2簇干涉 |

表3 阵深与目标深度50 m以深时海底反射区简正波簇分布情况

Table 3 Normal mode cluster distribution when array depth and target depth more than 50 m

| 水平距离/km | 单簇简正波能量作用区 | | | | 多簇简正波能量干涉区 | | | | |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 15.8 ~ 18.6 | 18.7 ~ 23.2 | 23.3 ~ 29.6 | 29.7 ~ 31.5 | 31.6 ~ 37.2 | 37.3 ~ 40.7 | 40.8 ~ 46.4 | 46.5 ~ 55.8 | 55.9 ~ 59.2 |
| 作用的简正波簇 | 7簇 | 6簇 | 5簇 | 4簇 | 7簇和4簇干涉 | 6簇和4簇干涉 | 6簇和3簇干涉 | 7簇、5簇和3簇干涉 | 6簇、5簇和3簇干涉 |

同理,水文环境变化时,可利用式(7)、式(8)开展预报,得到海底反射区简正波簇空域分布情况表。

2 深海声场简正波簇分布结构引起的测向误差预报

对低频大孔径线列阵声呐,其基于平面波假设的波束形成器是通过水平阵各阵元接收信号进行相位补偿后的相干求和实现的。设声源到第一个阵元的距离为 r_0 ,可得接收阵的频域输出为^[1]

$$BF(s, w) = \sum_m A_m \frac{e^{jk_{rm}r_0}}{\sqrt{k_{rm}r_0}} B(s - s_m), \quad (10)$$

$$B(s - s_m) = e^{jk_0 \frac{(N-1)}{2} d(s-s_m)} \sin b(s - s_m), \quad (11)$$

其中, $s = \cos \theta$, $s_m = \cos \varphi_m \cos \theta_0$, φ_m 为掠射角, $\cos \varphi_m = k_{rm}/k_0$ 。

假定某距离处起主要贡献的简正波为第 m 阶,则其接收阵波束形成得到的角度 θ' 满足

$$\cos \theta' = \cos \varphi_m \cos \theta_0. \quad (12)$$

对式(12)两边取微分,有

$$|d\theta'| = |\cos \varphi_m d\theta_0 - \sin \varphi_m \cot \theta_0 d\varphi_m|. \quad (13)$$

由式(13)可知,测向误差与目标真实方位和声波掠射角相关。对同一声波掠射角($d\varphi_m = 0$),目标方位越偏离声基阵正横方向($d\theta_0$ 越大),测向偏差越大;对同一目标方位($d\theta_0 = 0$),声波掠射角越大,测向偏差越大。

在单簇简正波能量作用区,当声阵和目标位50 m以浅时,将出现第4簇、第3簇……简正波依次作用的情况;当声阵和目标位50 m以深时,将出现第7簇、第6簇…简正波依次作用的情况。由于不同簇简正波在角谱域对应的初始掠射角不同(如

表1所示),其引起的测向误差也不一致。假设目标分别位声阵端射方向、45°方向和正横方向,将简正波簇角谱域峰值对应的掠射角代入式(13),得到不同簇简正波作用导致的测向误差如表4、表5所示。

表4 阵深与目标深度50 m以浅时海底反射区各高簇简正波作用引起的测向误差

Table 4 Azimuth error induced by high normal mode cluster when array depth and target depth less than 50 m

| 简正波簇数 | 4簇 | 3簇 | 2簇 |
|----------------|-------|-------|-------|
| 目标位声阵端射方向测向误差 | 31.3° | 22.3° | 13.2° |
| 目标位声阵45°方向测向误差 | 7.8° | 4.1° | 1.5° |
| 目标位声阵正横测向误差 | 0° | 0° | 0° |

表5 阵深与目标深度50 m以深时海底反射区各高簇简正波引起的测向误差

Table 5 Azimuth error induced by high normal mode cluster when array depth and target depth more than 50 m

| 简正波簇数 | 7簇 | 6簇 | 5簇 | 4簇 | 3簇 | 2簇 |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 目标位声阵端射方向测向误差 | 30.2° | 25.3° | 20.7° | 16.3° | 12.2° | 8.1° |
| 目标位声阵45°方向测向误差 | 7.3° | 5.3° | 3.6° | 2.3° | 1.3° | 0.6° |
| 目标位声阵正横测向误差 | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° |

结合表2~5,得到深海典型Munk声道(假设水深5000 m,不存在混合层,声道轴深度1000 m)下海底反射区测向误差如表6、表7所示。

表6 阵深与目标深度50 m以浅时海底反射区测向误差

Table 6 Azimuth error in bottom bounce sound area when array depth and target depth less than 50 m

| 水平距离/km | 单簇简正波能量作用区 | | | 多簇简正波能量干涉区 | |
|---------------|------------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| | 16.1~18.9 | 19.0~29.8 | 29.9~32.2 | 32.3~37.8 | 37.9~59.6 |
| 作用的简正波簇 | 4簇 | 3簇 | 2簇 | 4簇和2簇干涉 | 3簇和2簇干涉 |
| 目标位声阵端射方向测向误差 | 31.3° | 22.3° | 13.2° | 13.2°~31.3° 振荡变化 | 13.2°~22.3° 振荡变化 |
| 目标位声阵45°测向误差 | 7.8° | 4.1° | 1.5° | 1.5°~7.8° 振荡变化 | 1.5°~4.1° 振荡变化 |
| 目标位声阵正横测向误差 | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° |

表7 阵深与目标深度50 m以深时海底反射区测向误差

Table 7 Azimuth error in bottom bounce sound area when array depth and target depth more than 50 m

| 水平距离/km | 单簇简正波能量作用区 | | | | 多簇简正波能量干涉区 | | | | |
|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 15.8~18.6 | 18.7~23.2 | 23.3~29.6 | 29.7~31.5 | 31.6~37.2 | 37.3~40.7 | 40.8~46.4 | 46.5~55.8 | 55.9~59.2 |
| 作用的简正波簇 | 7簇 | 6簇 | 5簇 | 4簇 | 7簇和4簇干涉 | 6簇和4簇干涉 | 6簇和3簇干涉 | 7簇、5簇和3簇干涉 | 6簇、5簇和3簇干涉 |
| 目标位声阵端射方向测向误差 | 30.2° | 25.3° | 20.7° | 16.3° | 16.3°~30.2° 振荡变化 | 16.3°~25.3° 振荡变化 | 12.2°~25.3° 振荡变化 | 12.2°~30.2° 振荡变化 | 12.2°~25.3° 振荡变化 |
| 目标位声阵45°测向误差 | 7.3° | 5.3° | 3.6° | 2.3° | 2.3°~7.3° 振荡变化 | 2.3°~5.3° 振荡变化 | 1.3°~5.3° 振荡变化 | 1.3°~7.3° 振荡变化 | 1.3°~5.3° 振荡变化 |
| 目标位声阵正横测向误差 | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° |

其他水文环境下低频大孔径线列阵声呐海底反射区的测向误差预报方法可参照上述深海典型Munk声道下测向误差计算流程,其主要预报步骤如下:

- (1)对照表1,根据声源与目标深度确定简正波簇数及高簇简正波在角谱域的分布。
- (2)将高簇简正波角谱域分布结果、声源与目标深度、外部环境条件代入式(7)、式(8),估计高簇

简正波在深海海底反射区的空域分布。

(3) 对照高簇简正波在深海海底反射区的空域分布结果和表4、表5中不同阶高簇简正波引起的测向误差, 得到深海海底反射区不同位置处低频大孔径阵列声呐的测向误差。

3 深海声场简正波簇分布结构引起的目标方位分裂现象预报

由式(10)可知, 低频大孔径阵列声呐的指向性函数相当于多个简正波指向性函数的相干叠加,

当某个距离上存在多个简正波簇作用且各简正波簇指向性函数主瓣方向足够分开时, 会产生目标方位分裂现象。在深海海底反射区的多簇简正波能量干涉区, 由于2~3个简正波簇的干涉, 会产生该现象, 如图9所示。

随着目标角度从位声阵端射方向向正横方向接近, 各简正波簇指向性函数主瓣方向逐渐靠近(如图10所示), 多主瓣现象逐渐减弱、消失, 且产生干涉的两簇简正波簇数越接近, 多主瓣现象减弱越快。

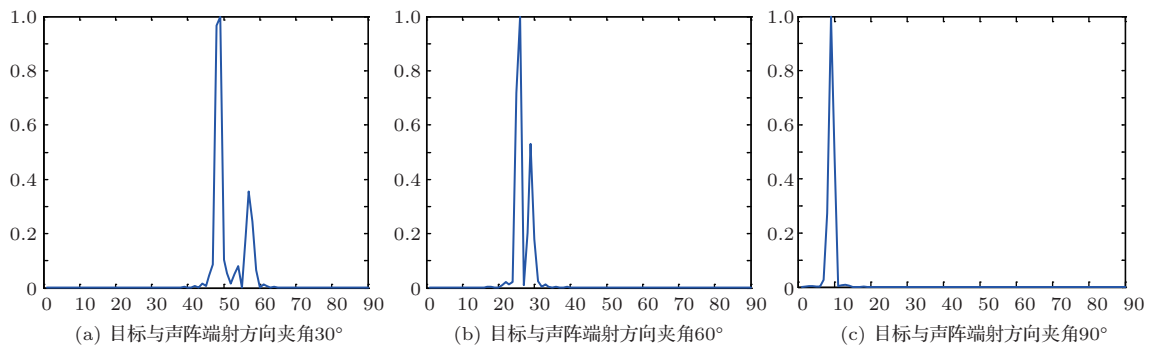


图9 深海多簇简正波能量干涉区常规阵列信号处理时的目标方位分裂现象

Fig. 9 Azimuthal splitting of conventional array signal processing in normal mode cluster interference areas of deep sea

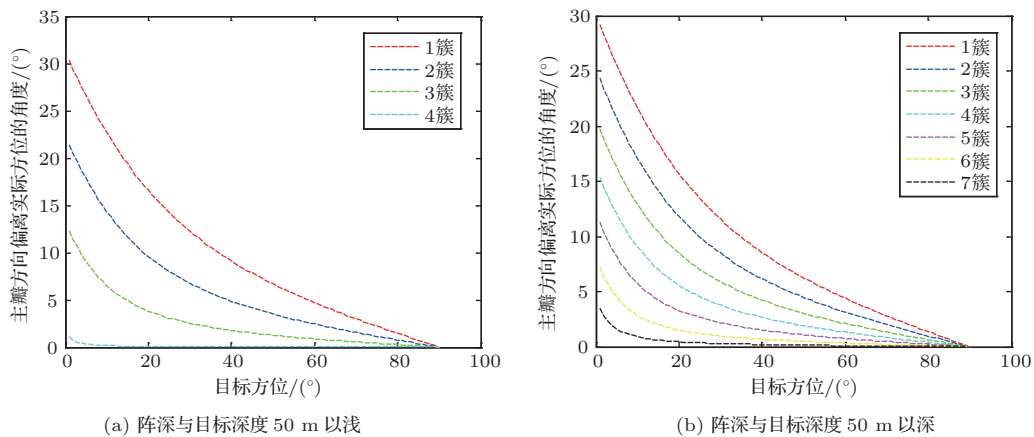


图10 不同目标方位下各简正波簇指向性函数主瓣方向

Fig. 10 Main lobe direction of normal mode cluster directivity function under the condition of different azimuth

对于深海典型Munk声道(假设海深5000 m, 不存在混合层, 声道轴深度1000 m), 根据表2和表3, 在海底反射区的多簇简正波能量干涉区, 阵深和目标深度50 m以浅时, 会产生2簇和4簇简正波、2簇和3簇简正波之间的干涉; 阵深和目标深度50 m以深时, 会产生3簇和7簇、4簇和7簇、3簇和6簇、4簇和6簇、5簇和7簇、3簇和5簇、5簇和6簇

简正波之间的干涉。假设低频大孔径阵列声呐对方位相近的两个目标的分辨能力为 5° , 不同簇简正波发生干涉时两簇指向性函数间的主瓣间隔随目标方位的变化如图11所示(间隔值超过 5° 黑线表示两簇简正波干涉时会产生目标方位分裂现象), 在多簇简正波能量干涉区产生目标方位分裂现象的位置和目标方位范围如表8、表9所示。

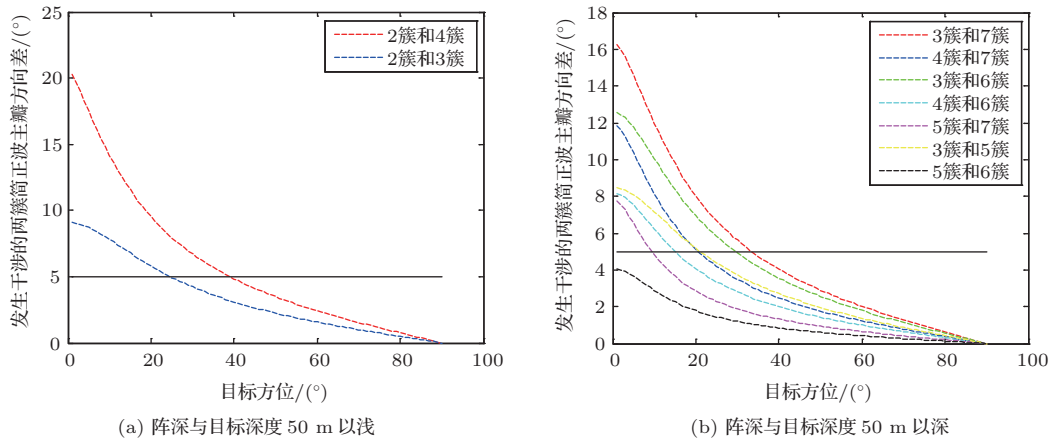


图 11 简正波簇干涉时两簇指向性函数主瓣间隔随目标方位的变化

Fig. 11 Main valve direction interval change law of normal mode cluster directivity function with changed azimuth

表 8 阵深与目标深度 50 m 以浅时多簇简正波能量干涉区目标方位分裂现象产生条件

Table 8 Conditions of azimuthal splitting in normal mode cluster interference areas when array depth and target depth less than 50 m

| | | | |
|----------|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| 条件 | 水平距离/km | 32.3 ~ 37.8 | 37.9 ~ 59.6 |
| | 目标方位要求 | 端射 -25° 方向 | 端射 -39° 方向 |
| 目标方位分裂现象 | | 4 簇和 2 簇干涉导致 1 个目标分裂成 2 个目标 | 3 簇和 2 簇干涉导致 1 个目标分裂成 2 个目标 |

表 9 阵深与目标深度 50 m 以深时多簇简正波能量干涉区目标方位分裂现象产生条件

Table 9 Conditions of azimuthal splitting in normal mode cluster interference areas when array depth and target depth more than 50 m

| 水平距离/km | 多簇简正波能量干涉区 | | | | |
|----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|
| | 31.6 ~ 37.2 | 37.3 ~ 40.7 | 40.8 ~ 46.4 | 46.5 ~ 55.8 | 55.9 ~ 59.2 |
| 目标方位要求 | 端射 -21° 方向 | 端射 -15° 方向 | 端射 -29° 方向 | (1) 端射 -10° 方向: 7 簇、5 簇和 3 簇干涉导致 1 个目标分裂成 3 个目标; (2) $10^\circ \sim 33^\circ$ 方向: 7 簇、5 簇和 3 簇干涉导致 1 个目标分裂成 2 个目标 | 端射 -30° 方向 |
| 目标方位分裂现象 | 7 簇和 4 簇干涉导致 1 个目标分裂成 2 个目标 | 6 簇和 4 簇干涉导致 1 个目标分裂成 2 个目标 | 6 簇和 3 簇干涉导致 1 个目标分裂成 2 个目标 | | 6 簇、5 簇和 3 簇干涉导致 1 个目标分裂成 2 个目标 |

其他水文环境下低频大孔径线列阵声呐海底反射区的目标方位分裂现象预报方法可参照上述深海典型 Munk 声道下目标方位分裂现象的计算流程,其主要步骤总结如下:

(1) 对照表 1, 根据声源与目标深度确定简正波簇数及高簇简正波在角谱域的分布。

(2) 将高簇简正波角谱域分布结果、声源与目标深度、外部环境条件代入式 (7)、(8), 估计深海海底反射区不同阶高簇简正波发生干涉的位置。

(3) 对照图 10 中各高簇简正波波束形成后的主瓣方向, 和第 (2) 步中分析得到的高簇简正波干涉

情况, 分析不同阶高簇简正波发生干涉时的主瓣方向差, 根据声阵对两个目标的分辨能力, 确定是否会产生多目标现象。

(4) 综合第 (2) 步、第 (3) 步分析结果, 得到深海海底反射区中产生多目标现象的位置和该现象对目标方位范围的要求。

4 结论与讨论

由于深海条件下直达声探测距离有限, 利用海底反射声探测、会聚区探测是声呐深海水下目标探

测的重要工作模式。与直达声探测、会聚区探测不同,在海底反射声探测模式下,低频大孔径线列阵声呐采用常规阵列信号处理方法,会产生测向误差增大和方位分裂现象。

本文针对这些现象,开展深海声场简正波分布结构研究,提出深海存在“简正波簇”现象,且通过理论仿真验证了角谱域上的高簇“简正波簇”分布存在稳定性,并从海底反射区高簇“简正波簇”作用的角度分析了产生测向误差增大和方位分裂现象的物理机理;在此基础上,提出一套海底反射区低频大孔径线列阵声呐测向性能预报方法,该方法的主要预报流程为

(1) 根据声源深度和目标深度,确定深海简正波簇数及高簇简正波的角谱域分布。

(2) 由射线声学理论推导出“简正波簇”角谱域分布向空域分布的转换解析表达式,将外部环境条件、声阵与目标深度和高簇简正波的角谱域分布情况代入,得到高簇简正波的空域分布。

(3) 计算各阶高簇简正波引起的测向误差、不同阶高簇简正波干涉产生多目标现象的方位要求。

(4) 综合第(2)步、第(3)步,可得到海底反射区不同位置的测向误差预报结果、目标方位分裂现象产生的位置和对目标方位范围要求的预报结果。

利用该方法对深海典型 Munk 声道下低频大孔径线列阵声呐测向性能进行预报,可得到如下结论:

(1) 在海底反射区,当目标由声阵正横方向向端射方向靠近时,由于高号简正波作用,将产生逐渐增大的测向误差,这种测向误差在某些条件下甚至会超过由于声阵本身波束宽度引起的测向误差,成为

影响声阵测向性能的主要因素。

(2) 当目标接近至距声阵约 40° 以内时,在约 30 km 以外的海底反射区(多簇简正波能量干涉区),将产生严重的目标方位分裂现象,影响对目标探测。

因此,对于低频大孔径线列阵声呐,在海底反射区测向误差明显增大的区域和目标方位分裂现象明显的区域(可通过本文预报方法得到),下一步应重点开展与环境适配的信号处理方法研究。

参 考 文 献

- [1] 吴俊楠,周士弘,张岩. 深海水平阵海底反射声测向分析[C]. 中国声学学会青年学术会议, 2015.
- [2] Ma Y L, Liu M G, Zhang Z B, et al. Receiving response of towed line array to the noise of the tow ship in shallow water[J]. Chinese Journal of Acoustics, 2003, 22(1): 1-10.
- [3] Buckingham M J. On the response of a towed array to the acoustic field in shallow water[J]. Communications, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, 1984, 131(3): 298-307.
- [4] 宋俊. 光纤水听器长线阵应用的水声物理问题[D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [5] Wu J N, Zhou S H, Peng Z H, et al. Bearing splitting and near-surface source ranging in the direct zone of deep water[J]. Chinese Physics B, 2016, 25(12): 81-88.
- [6] 吴俊楠. 深海水平阵接收声信号场特征研究及其应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [7] 庄益夫,张旭,刘艳. 深海声速剖面结构变化对会聚区偏移特性的影响分析[J]. 海洋通报, 2013, 32(1): 45-52. Zhuang Yifu, Zhang Xu, Liu Yan. Analysis on the influence of sound speed profile structure change in deep sea on the convergence zone deflection[J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(1): 45-52.