

浅海中声源激发的波场成分及特性分析

孟路稳^① 赵德鑫^{*①} 张明敏^②

^①(军事科学院国防科技创新研究院 北京 100071)

^②(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

摘要:为更好地认识和利用浅海波导中的声场,该文对浅海中声源激发的波场成分及特性进行了研究。提出了能给出浅海中声场全波解的理论研究方法,给出了声场的复积分表达式,并在复平面上利用围道积分对声场复积分式进行求解,得出了浅海中声源激发出的声场组成部分;同时应用高阶交错网格有限差分法对浅海中声场进行数值模拟,呈现出了不同海水深度、声源频率和声源深度下浅海波导中的波场结构和空间能量分布。研究表明:浅海中声场由离散谱部分和连续谱部分组成;其中离散谱部分包括各阶简正波和Scholte波,连续谱部分包括侧面波;简正波和Scholte波的振幅与水平传播距离的平方成反比,而侧面波的振幅与水平传播距离的平方成正比;海水越浅、声源频率越小、声源深度越大,都会导致海水中的能量越少,越有利于Scholte波的激发,此时声源辐射的能量主要以Scholte波的形式传播出去,能量更多地集中在海底界面处。

关键词:浅海声场;全波解;离散谱;连续谱

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0788-08

DOI: 10.11999/JEIT200704

Analysis of Wave Field Composition and Characteristics in Shallow Sea

MENG Luwen^① ZHAO Dexin^① ZHANG Mingmin^②

^①(National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China)

^②(Electronics Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To better understand and utilize the acoustic field in shallow sea, a theoretical method that can give the full-wave solution is proposed, then the complex integral expression of the acoustic field is given. The complex integral fraction is solved in the complex plane, and the components of the acoustic field in shallow sea are obtained. The high-order staggered grid finite difference method is also used to numerically simulate the acoustic field in shallow sea, showing the wave field structure and spatial energy distribution. Results show that the acoustic field in shallow sea includes discrete spectrum and continuous spectrum; The discrete spectrum includes normal waves and Scholte wave, and the continuous wave includes lateral waves; The amplitudes of normal waves and Scholte wave are inversely proportional to the root of horizontal propagation distance, and the amplitude of lateral wave is inversely proportional to the power of horizontal propagation distance; The shallower the sea water, the lower the frequency and the greater the depth of the sound source, the less energy in the sea water will be. The energy radiated by the acoustic source is mainly propagated in the form of Scholte wave, and the energy is mostly concentrated at the seabed interface.

Key words: Shallow sea acoustic field; Full-wave solution; Discrete spectrum; Continuous spectrum

1 引言

在浅海中,海洋声学环境复杂,海面、海底以及海水对声传播而言,确定性和非确定性影响的3维效应要远大于深海,使得声呐设备的探测性能

急剧下降,引起学者对浅海区域声纳性能改进的关注,浅海区域的声场传播问题成为水声领域的研究热点之一^[1-8]。

简正波理论通过相长干涉的作用来体现声场能量的变化和空间分布,各阶简正波的相速度和群速度可直接与声场相位和能量的传播相对应,形式简单,物理意义明确直观,并且简正波理论频率适用范围广,尤其是中低频的情况,因此多被用于研究浅海声场传播问题^[9-11]。但随着减震降噪技术的提

收稿日期: 2020-08-10; 改回日期: 2021-02-05; 网络出版: 2021-02-22

*通信作者: 赵德鑫 zhaodx2008@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51809274)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(51809274)

高,舰船辐射噪声水平大幅降低^[12],然而现有的降噪技术对几到几十赫兹内的甚低频辐射噪声仍很难消除,由于甚低频声波的传播会受到浅海波导截止频率的限制,使得甚低频声波信号局限在声源附近(近场),此时已无有效传播的简正波,简正波理论不再适用。一些学者进而将关注点转移到了沿海底界面传播的海底地震波^[13-16]。为获取海底地震波波动成分及其传播特性,文献^[13]理论推导了两层半无限液固海洋模型中的地震波场,并给出了波场的远场近似解,同时借助数值模拟结果对理论分析结论进行了物理解释,但为了方便理论推导,忽略了海面的影响。在文献^[13]的基础上,文献^[14]在理论推导海底地震波的波场时,引入了海面的影响,给出了海底地震波的波动形式,但只给出了近场的数值模拟结果。文献^[15,16]着重分析了海底地震波的频散特性,并利用抛物方程法给出了浅海波导中声场的空间分布,但抛物方程法是波动方程的近似求解^[17],无法呈现声场的精细结构。

针对上述问题,本文首先引入了能求解浅海中声场全波解的理论研究方法,概述了其求解过程及相关理论结果;然后利用高阶交错网格有限差分法给出了不同海水深度、声源频率和声源深度下浅海波导中声场的数值模拟结果,呈现了浅海波导中波场的精细结构和空间能量分布,并结合理论结果对波场现象进行了重点分析和解释。

2 浅海波导声场模型

如图1所示的浅海波导模型,海水深度为 H ,声波速度为 c_1 ,海水密度为 ρ_1 ;海底为半无限弹性海底,海底纵波和横波的速度分别为 c_p 和 c_s ,海底密度为 ρ_2 。声源用 O_{00} 符号表示,其位于 z 轴上的 z_0 点处。则对海水中任一点 M 质点振动有贡献的除了直达波部分以外,还有从海底和海平面两个界面上反射不同次数的波所组成的无穷波系部分,但碍于图中的空间有限,图1只画出了引起点 M 处质点振动的直达波、经过海底1次反射的波、经过海面1次反射的波以及分别经过海底1次反射和海面1次反射的波,这些反射波等同于分别由虚源 O_{01}, O_{02}, O_{03} 直接辐射出来的。以此类推,从海底和海平面两个界面上反射不同次数的波好像从虚源 O_{lm} 辐射出来的。下标 l 和 m 的不同组合反映出波分别从海底和海面两个界面上反射的次数,并且遍历如下的值: $l = 0, 1, \dots, \infty, m = 0, 1, 2, 3$ 。

点声源 O_{00} 辐射出的球面波可由一组平面波合成得到^[13],海面可以近似看成镜反射界面,则将在海底和海面两个界面上反射不同次数的所有平面波

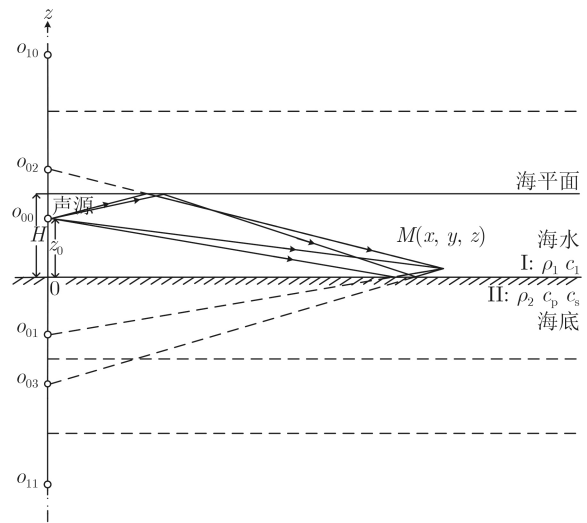


图1 浅海波导模型

叠加起来,每从界面上反射一次就需把波的振幅乘上相应的反射系数,经过一系列数学推导,可得点 M 处的波函数 ϕ 为^[14]

$$\phi = \frac{jk}{2} \int_{-\frac{\pi}{2} + j\infty}^{\frac{\pi}{2} - j\infty} \frac{[e^{-az} + Re^{az}] [e^{-a(H-z_0)} - e^{a(H-z_0)}]}{e^{-aH} (1 + Re^{2aH})} \cdot H_0^{(1)}(kr \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (1)$$

式中, $j = \sqrt{-1}$; k 为声波波数; r 为点 M 距声源的水平距离; θ 为平面波在海底界面的入射角; R 为平面波在海底界面上的反射系数,其是入射角 θ 的函数; $a = jk \cos \theta$; $H_0^{(1)}(\cdot)$ 为0阶第1类汉克耳函数。

式(1)表示的波场为一复积分表达式,其积分路径 Γ 见图2,其一端延伸到 $-\pi/2 + j\infty$,而在另一端延伸到 $\pi/2 - j\infty$ 。则根据柯西定理,保持复平面上原积分路径 Γ 的两端不变,可将积分路径 Γ 变形为更容易积分计算的积分路径,即图2中的积分路径 Γ_1 和 Γ_2 ,则复积分式(1)的解不变。其中路径 Γ_1 在复平面上从无穷远处 $-\pi/2 + j\infty$ 出发并与实轴相交于点 $(-\pi/2, 0)$,然后沿着实轴到达点 $(\pi/2, 0)$ 后再延伸到无穷远处 $\pi/2 + j\infty$;路径 Γ_2 与复平面的实轴垂直,并从无穷远处 $\pi/2 + j\infty$ 出发再延伸到无穷远处 $\pi/2 - j\infty$ 。易得式(1)沿路径 Γ_2 的积分项等于0,并将积分路径 Γ_1 沿虚轴的正方向延伸到无穷远处,进而在无穷远处转化为积分路径 Γ_3 ,如图2所示,路径 Γ_3 平行于复平面的实轴并在无穷远处连接着路径 Γ_1 的两端。由于0阶第1类汉克耳函数 $H_0^{(1)}(kr \sin \theta)$ 在复平面无穷远处收敛于0,则式(1)沿路径 Γ_3 的积分等于0。在积分路径 Γ_1 转换为 Γ_3 的过程中,需绕过式(1)中被积函数的支点和极点。被积函数存在两个支点,即 $\theta_p = \arcsin(c_1/c_p)$ 和 $\theta_s = \arcsin(c_1/c_s)$,它们分别对应于图2中的点 B_1 和

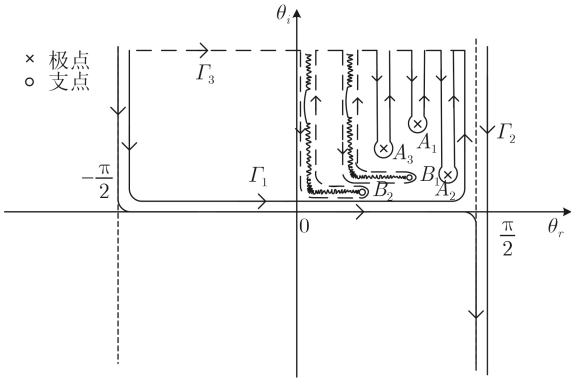


图 2 积分路径变换

B_2 。而被积函数的极点由方程 $1 + Re^{2aH} = 0$ 的根确定，这些极点在图2中用点 $A_1, A_2, A_3, \dots$ 来表示。

从而，式(1)的积分解就由因绕过这些奇点而引起的额外项给出。则点 M 处的波场 ϕ 主要有两部分的贡献，即离散谱部分和连续谱部分。其中离散谱部分由积分路径变形中遇到的所有极点上的留数之和给出，其对应于简正波和海底表面波；而连续谱部分乃是沿着从支点画出的分割线边岸的积分解，其对应于侧面波。声场复积分式(1)的具体求解过程可参考文献[14]，这里不再赘述，只给出主要结论。海水波导中存在简正波、海底表面波(Scholte波)和侧面波，每一阶简正波的振幅都按照 $1/\sqrt{r}$ 的规律减小，即简正波按照柱面性的几何规律扩散，且存在低频截止现象；海底表面波的波阵

面为圆柱面，波场振幅与 $\sqrt{r}$ 成反比；侧面波的波阵面为圆锥面，波场振幅与 r^2 成反比。

3 浅海声场的数值模拟及分析

为形象地展示浅海中声源激发的波场成分及其声场的空间分布，这里采用高阶交错网格有限差分法[18]对浅海中单频声源激发的声场进行数值模拟，研究浅海波导中的声场分布以及海水深度、声源频率、声源深度对浅海波导中声场分布的影响。数值模拟时所采用的介质类型及其声学参数见表1。

3.1 海水深度对声场的影响

浅海条件下，水中声波频繁地与海平面和海底界面接触，而海水深度直接决定着水中声波与界面的接触次数，因此海水深度决定着浅海中波场的空间分布。图3、图4给出了海水深度分别为30 m和80 m时声源激发0.75 s后水平正应力分量、垂直正应力分量的能量分布图(从水平距离声源10 m处开始显示)。两种海水深度下声源频率都为20 Hz。海水深度分别为30 m, 80 m时，设置的声源深度分别为26 m, 76 m。图中的水平红色虚线代表海底界面，下文同。这里需要说明的是，由于海底纵波、海底横波和水中声波都能到达区域的波场能量较

表 1 浅海波导模型中的介质类型及其声学参数

介质类型	纵波速度 c_p (m/s)	横波速度 c_s (m/s)	密度 ρ (kg/m ³)
海水	1500	0	1000
砂岩海底	3500	1800	2300

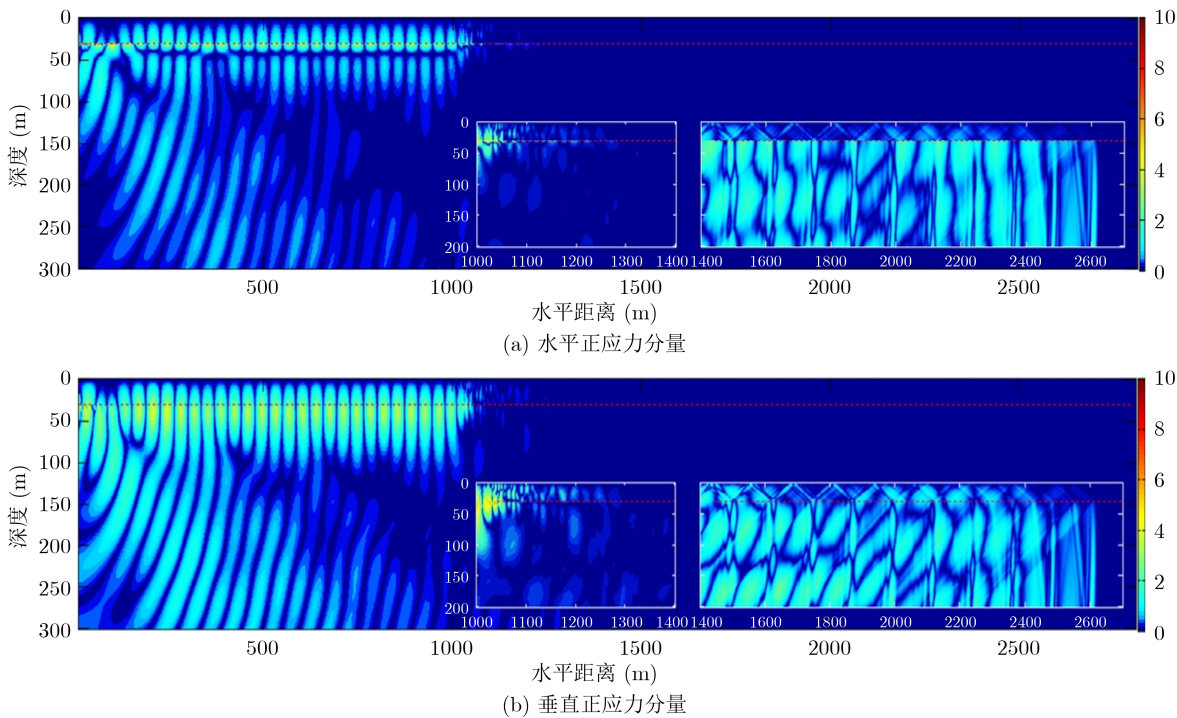


图 3 海水深度为30 m时的能量分布图

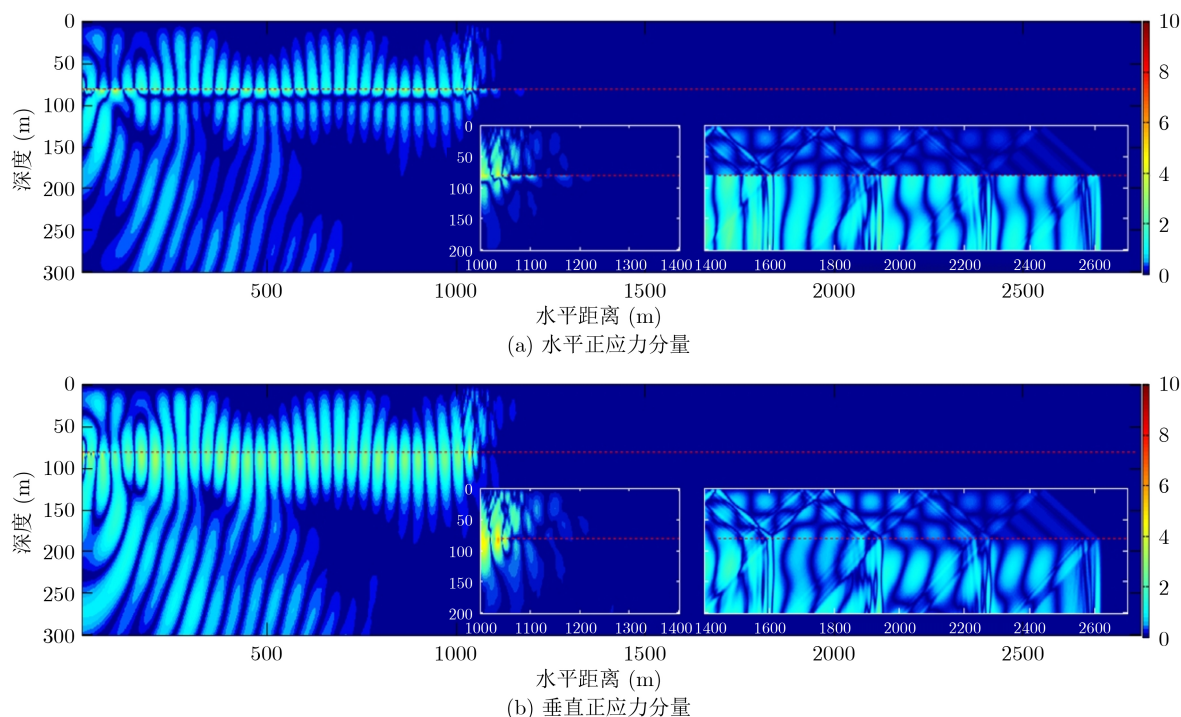


图4 海水深度为80 m时的能量分布图

强,会影响其他区域的波场显示,这里将每一张能量分布图中分3部分进行显示:一是只有海底纵波能到达的区域,如图3(a)中小图显示的水平距离1400~2700 m的区域;二是只有海底纵波和海底横波能到达的区域,如图3(a)中小图显示的水平距离1000~1400 m的区域;三是水平距离10~2800 m的区域,如图3(a)中的大图所示,这样有助于观察整个波场空间的能量分布。如果不作声明,后文中每一张能量分布图都按该原则进行显示。

由图3可见,图中显示海水层中约在水平距离2600 m处的波前为一条斜线,它即是侧面波的波阵面,该侧面波与海底纵波在海底界面处相衔接,在水中其以海底纵波的速度沿水平方向传播,在水中最先到达远处,在3维空间中其波阵面为一圆锥面,与理论分析结论一致。在1400~2700 m区域内,海底横波和水中声波还未到达,该区域的海水中只有与海底纵波相关联的侧面波场,并且由于海面和海底的多次反射,在海水中形成首尾相连接的三角形干涉图案。在1100~1300 m区域内,海底横波已能到达,在该区域的海水中即有与海底纵波相关联的侧面波,又有与海底横波相关联的侧面波,此海水空间内的能量已明显比1400 m之后海水空间内的能量大。在10~1000 m区域内,水中声波、海底横波和海底纵波都已经能够到达,在海底界面处出现了Scholte波,可以看出在整个区域内其能量最大,声源辐射的能量主要以Scholte波的形式向远处

扩散,理论可求出其传播速度为1428.6 m/s;并且水平正应力分量在海底界面下约10 m处能量变为0,说明Scholte波的能量主要集中在海底界面处。图3显示的能量分布图无法体现各声场分量的相位情况。

由图4可见,当海水深度变为80 m时,在1400~2700 m区域内,海水中同样只有与海底纵波相关联的侧面波场,而且由于海面和海底的反射影响,在海水中不仅形成了首尾相连接的三角形干涉图案,还出现了1阶简正波;理论可求得其相速度为1687.7 m/s。由于简正波的出现,在10~1000 m区域的海水中,简正波和Scholte波同时存在,使得海水中的干涉结构更加复杂;和海水深度为30 m的情况一样,海水深度变为80 m时,图4显示声源辐射的能量仍主要以Scholte波的形式向远处扩散。

为了观察应力分量的相位情况,图5给出了海水深度30 m时应力分量的波场快照。可见,水平正应力分量在海底界面两侧的相位符号相反,而垂直正应力分量在海底界面两侧保持连续、相位一致。

3.2 声源频率对声场的影响

由于海洋中的波导效应,不同频率的声波在浅海中存在简正波的阶数不同,低于截止频率的声波在浅海中将无法有效地远距离传播,因此声源频率对浅海中波场的分布具有重要影响。图6、图7显示的是声源频率分别为20 Hz、60 Hz时声源激发0.75 s后应力分量的能量分布图。其中海水深度为100 m、声源深度96 m。

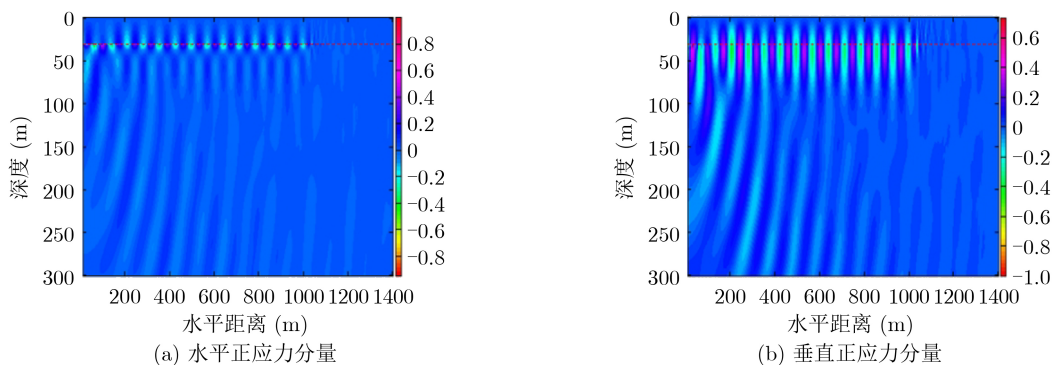


图5 海水深度为30 m时的波场快照

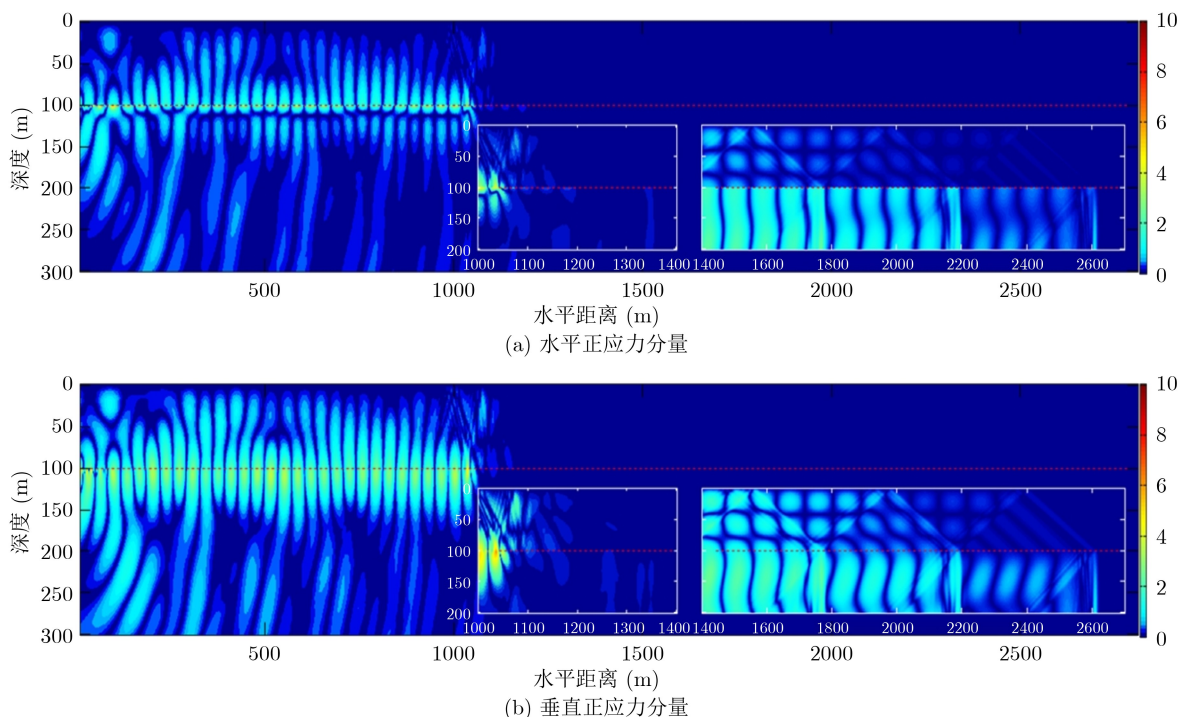


图6 声源频率为20 Hz时的能量分布图

由图6可见,海水中出现了1阶简正波,理论可计算出其相速度为1632.7 m/s,而且Scholte波的传播速度为1385.2 m/s;波场能量主要集中在海底界面处,以Scholte波的形式向远处扩散;在10~1000 m区域的海水中呈现简正波和Scholte波的干涉结构。当声源频率由20 Hz增加到60 Hz后,水中简正波的阶数增多,出现了4阶简正波,相速度分别为1719.8 m/s, 1624 m/s, 1554.1 m/s, 1513.5 m/s, 由于水中简正波的干涉叠加,水中声场的干涉结构更加复杂。图7中显示,声源频率为60 Hz时,沿海底界面传播的Scholte波的速度为1384.8 m/s,与声源频率为20 Hz时Scholte波的速度(1385.2 m/s)相当,但由于频率增加,其波长更短, Scholte波的能量更加集中在海底界面处更窄的空间内。

3.3 声源深度对声场的影响

声源深度不影响水中存在简正波的阶数,但其影响着各阶简正波和海底表面波的幅度。图8、图9显示的是声源深度分别为10 m, 46 m时声源激发0.75 s后各场量的能量分布图。其中海水深度为50 m, 声源频率为20 Hz。

由图8、图9可见,海水中出现了1阶简正波,声源深度为10 m时,简正波与Scholte波的能量可比拟,水中的干涉结构是简正波和Scholte波的共同扰动引起的,干涉结构比较复杂;声源深度为46 m时, Scholte波的能量增强,构成浅海声场的主要部分。Scholte波的能量与声源深度有关,声源越靠近海底, Scholte波的能量越大,水中简正波能量减少,水中干涉结构越简单,水中波场主要是Scholte波扰动的。

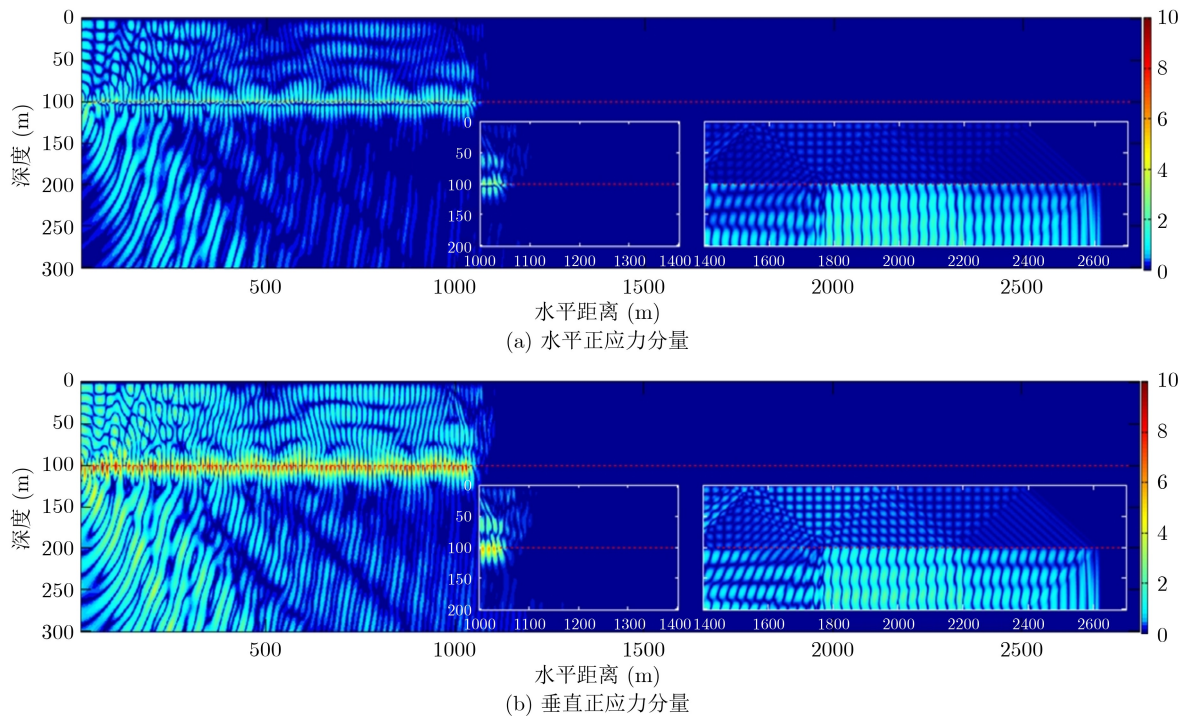


图7 声源频率为60 Hz时的能量分布图

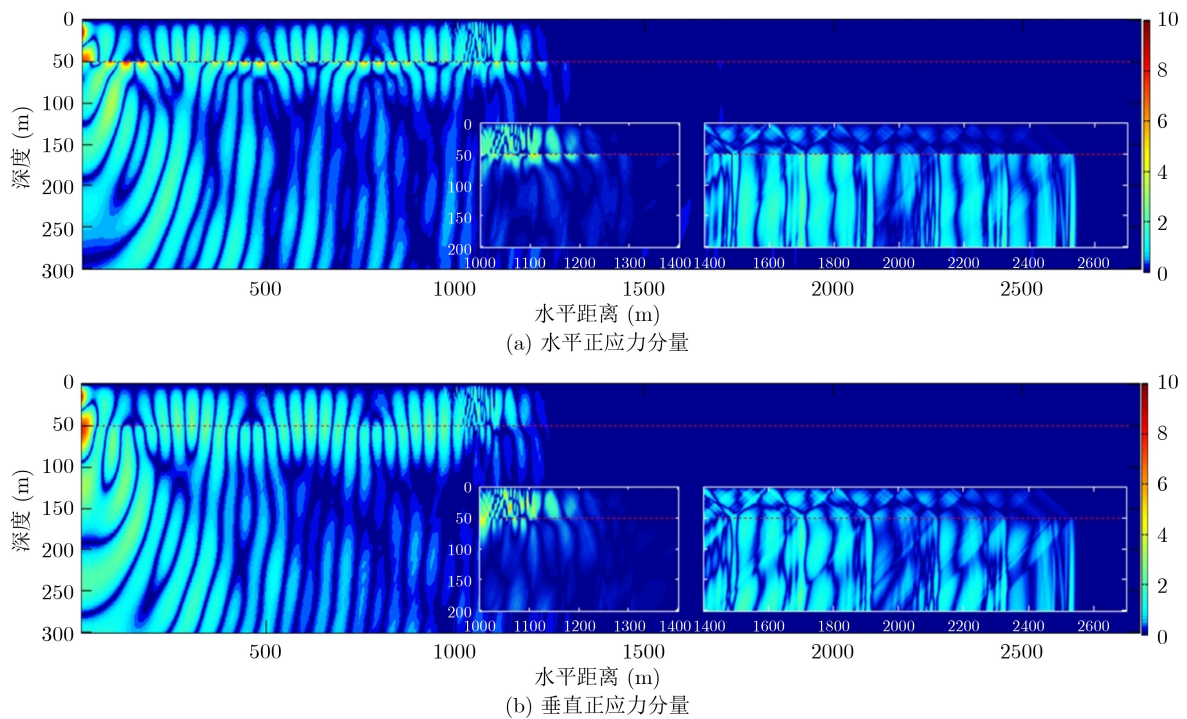


图8 声源深度为10 m时的能量分布图

4 结束语

为获取浅海中声源激发的波场成分及特性,有效提升浅海水下信息的获取能力以及对水下运动平台的预警探测能力,利用高阶交错网格有限差分法对浅海中单频声源激发的声波进行了数值模拟,展现出了浅海中单频声源激发出的各种波型的时空结

构。呈现出了浅海波导中的波场结构及能量分布,海水深度、声源频率以及声源深度对浅海波导中的声场有重要影响,海水越浅、声源频率越小、声源深度越大,都会导致水中的能量越少,越有利于Scholte波的激发,此时声源辐射的能量主要以Scholte波的形式传播出去,能量更多地集中在海

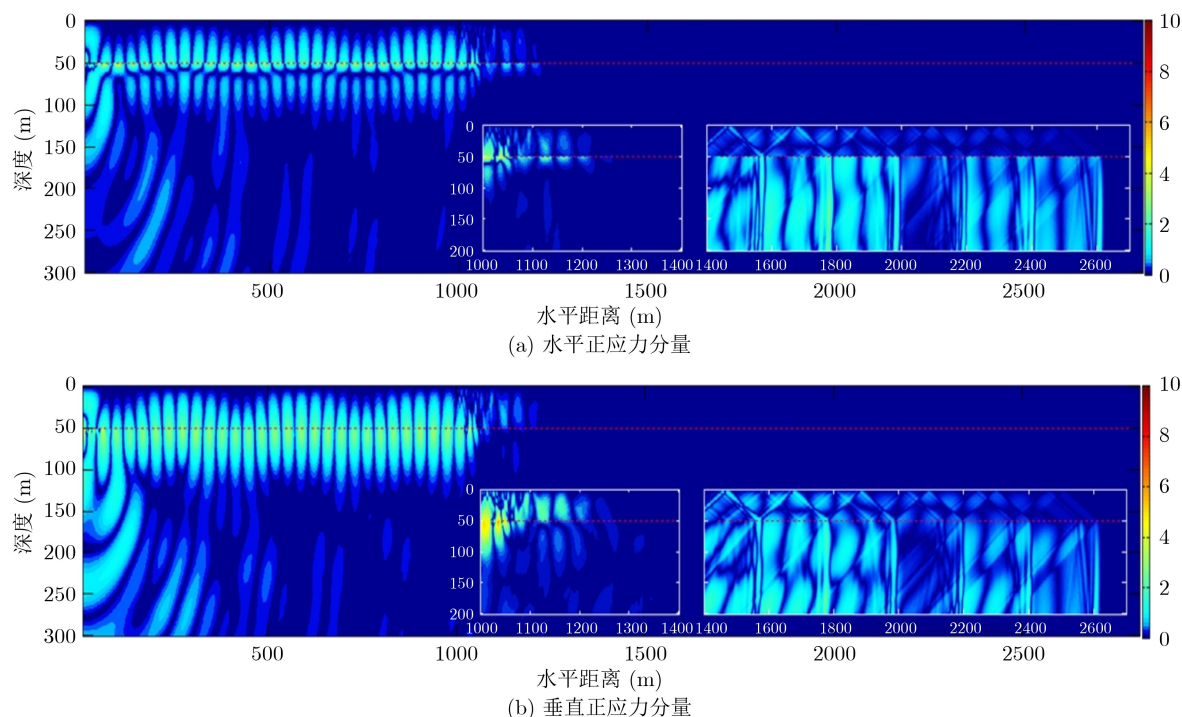


图9 声源深度为46 m时的能量分布图

底界面处,宜在海底布放传感器对Scholte波进行接收,为后续在浅海开展相关的试验研究提供了指导。

参考文献

- [1] KOZACZKA E and GRELOWSKA G. Shipping low frequency noise and its propagation in shallow water[J]. *Acta Physica Polonica A*, 2011, 119(6A): 1009–1012. doi: [10.12693/APhysPolA.119.1009](https://doi.org/10.12693/APhysPolA.119.1009).
- [2] LUNKOV A A and KATSNELSON B G. Using discrete low-frequency components of shipping noise for gassy sediment characterization in shallow water[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 147(5): EL428–EL433. doi: [10.1121/10.0001277](https://doi.org/10.1121/10.0001277).
- [3] DUNCAN A J, GAVRILOV A N, MCCAULEY R D, *et al*. Characteristics of sound propagation in shallow water over an elastic seabed with a thin cap-rock layer[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2013, 134(1): 207–215. doi: [10.1121/1.4809723](https://doi.org/10.1121/1.4809723).
- [4] TOLLEFSEN D. Thin-sediment shear-induced effects on low-frequency broadband acoustic propagation in a shallow continental sea[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1998, 104(5): 2718–2726. doi: [10.1121/1.423855](https://doi.org/10.1121/1.423855).
- [5] KOZACZKA E and GRELOWSKA G. Propagation of ship-generated noise in shallow sea[J]. *Polish Maritime Research*, 2018, 25(2): 37–46. doi: [10.2478/pomr-2018-0052](https://doi.org/10.2478/pomr-2018-0052).
- [6] 朱子尧, 韩树平, 郭正东, 等. 乘性噪声背景下基于非线性渐消滤波的单信标测距定位算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(1): 165–171. doi: [10.11999/JEIT180239](https://doi.org/10.11999/JEIT180239).
- [7] AKAL T and BERKSON J M. Ocean Seismo-Acoustics: Low-Frequency Underwater Acoustics[M]. Boston: Springer, 1986: 1–20. doi: [10.1007/978-1-4613-2201-6](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2201-6).
- [8] KATSNELSON B, PETNIKOV V, and LYNCH J. Fundamentals of Shallow Water Acoustics[M]. Boston: Springer, 2012: 1–11. doi: [10.1007/978-1-4419-9777-7](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9777-7).
- [9] 莫亚泉. 基于耦合简正波理论的水平变化波导声场建模与特性分析[D]. [博士学位], 哈尔滨工程大学, 2015.
- [10] MO Yaxiao. Acoustic field modeling and analysis based on coupled-mode in range-development waveguide[D]. [Ph. D. dissertation], Harbin Engineering University, 2015.
- [11] SABATINI R and CRISTINI P. A multi-domain collocation method for the accurate computation of normal modes in open oceanic and atmospheric waveguides[J]. *Acta Acustica united with Acustica*, 2019, 105(3): 464–474. doi: [10.3813/AAA.919328](https://doi.org/10.3813/AAA.919328).
- [12] KOESSLER M W, DUNCAN A J, GAVRILOV A N. Low-frequency acoustic propagation modelling for Australian range-independent environments[J]. *Acoustics Australia*, 2017, 45(2): 331–341. doi: [10.1007/s40857-017-0108-5](https://doi.org/10.1007/s40857-017-0108-5).
- [13] 王逸林, 马世龙, 邹男, 等. 时空域联合的水下未知线谱目标检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(7): 1682–1689. doi: [10.11999/JEIT180239](https://doi.org/10.11999/JEIT180239).

- 10.11999/JEIT180796.
- WANG Yilin, MA Shilong, ZOU Nan, *et al.* Detection of unknown line-spectrum underwater target using space-time processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1682–1689. doi: [10.11999/JEIT180796](https://doi.org/10.11999/JEIT180796).
- [13] 孟路稳, 罗夏云, 程广利, 等. 海底地震波波动成分及传播特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(12): 1627–1633. doi: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.12.012](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.12.012).
- MENG Luwen, LUO Xiayun, CHENG Guangli, *et al.* Components and propagation characteristics of seabed seismic waves[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2018, 52(12): 1627–1633. doi: [10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.12.012](https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2018.12.012).
- [14] 罗夏云, 孟路稳, 程广利, 等. 浅海地震波波动成分及传播规律分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 120–126. doi: [10.13245/j.hust.190122](https://doi.org/10.13245/j.hust.190122).
- LUO Xiayun, MENG Luwen, CHENG Guangli, *et al.* Analysis of wave component and propagation rule of seismic wave in shallow sea[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2019, 47(1): 120–126. doi: [10.13245/j.hust.190122](https://doi.org/10.13245/j.hust.190122).
- [15] LU Zaihua, ZHANG Zhihong, and GU Jiannong. Analysis on the frequency dispersion characteristics of seismic wave caused by low frequency sound source in shallow sea[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 106: 354–359. doi: [10.1016/j.oceaneng.2015.07.019](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.019).
- [16] LI Li, PIAO Shengchun, ZHANG Haigang, *et al.* Broadband modeling of sound propagation in shallow water with an irregular elastic bottom[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 135(4): 2302. doi: [10.1121/1.4877578](https://doi.org/10.1121/1.4877578).
- [17] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, *et al.* Computational Ocean Acoustics[M]. New York: Springer, 2011: 457–530. doi: [10.1007/978-1-4419-8678-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8678-8).
- [18] O'REILLY O, LUNDQUIST T, DUNHAM E M, *et al.* Energy stable and high-order-accurate finite difference methods on staggered grids[J]. *Journal of Computational Physics*, 2017, 346: 572–589. doi: [10.1016/j.jcp.2017.06.030](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2017.06.030).
- 孟路稳: 男, 1990年生, 助理研究员, 研究方向为水声物理、水声信号处理.
- 赵德鑫: 男, 1984年生, 副研究员, 研究方向为AUV行为控制、水声信号处理.
- 张明敏: 男, 1957年生, 教授, 研究方向为水声物理、水声信号处理.
- 责任编辑: 马秀强