



浅海周期起伏海底环境下的声传播

刘代 李整林 刘若芸

Sound propagation in shallow water with periodic rough bottom

Liu Dai Li Zheng-Lin Liu Ruo-Yun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 034302 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201233

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201233>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

浅海起伏海面下气泡层对声传播的影响

Effects of wind-generated bubbles layer on sound propagation underneath rough sea surface in shallow water

物理学报. 2020, 69(2): 024303 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191208>

深海海底山环境下声传播水平折射效应研究

Horizontal refraction effects of seamounts on sound propagation in deep water

物理学报. 2018, 67(22): 224302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181480>

深海海底反射会聚区声传播特性

Characteristics of convergence zone formed by bottom reflection in deep water

物理学报. 2019, 68(1): 014301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181761>

利用海洋环境噪声空间特性估计浅海海底分层结构及地声参数

Estimating structure and geoacoustic parameters of sub-bottom by using spatial characteristics of ocean ambient noise in shallow water

物理学报. 2019, 68(21): 214303 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190824>

浅海小掠射角的海底界面声反向散射模型的简化

Simplification of roughness bottom backscattering model at small grazing angle in shallow-water

物理学报. 2019, 68(4): 044301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181475>

一种低声速沉积层海底参数声学反演方法

Geoacoustic inversion for acoustic parameters of sediment layer with low sound speed

物理学报. 2019, 68(9): 094301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190183>

浅海周期起伏海底环境下的声传播*

刘代¹⁾²⁾ 李整林^{1)†} 刘若芸¹⁾²⁾

1) (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)

2) (中国科学院大学物理学院, 北京 100190)

(2020年7月30日收到; 2020年9月21日收到修改稿)

海底粗糙对水下声传播及水声探测等应用具有重要影响. 利用黄海夏季典型海洋环境, 分析了同时存在海底周期起伏和强温跃层条件下的声传播特性, 结果表明: 由于海底周期起伏的存在, 对于低频 (< 1 kHz)、近程 (10 km) 的声信号, 传播损失可增大 5—30 dB. 总结了声传播损失及脉冲到达结构随声源深度、海底起伏周期及起伏高度等因素变化的规律. 当海底起伏周期不变时, 起伏高度越大引起的异常声传播的影响随之变大; 当起伏高度不变时, 随着起伏周期变大, 其对声传播的影响逐渐变小. 用射线理论分析了其影响机理, 由于海底周期起伏改变了声波与海底的入射和反射角度, 使得原本小掠射角入射到海底的声线变为大掠射角, 导致海底的反射损失增大; 另一方面, 声线反射角度的改变会使得原本可以到达接收点的声能量, 由于与海底作用次数增加或变为反向传播而大幅度衰减. 在浅海负跃层环境下, 声源位于跃层上比位于跃层下对声传播影响更大. 周期起伏海底对脉冲声传播的影响表现在引起不同角度的声线 (或简正波号数) 之间的能量发生转化, 一些大角度声线能量衰减加大, 多途结构变少. 多途结构到达时间及相对幅度的变化进而影响声场的频谱, 会使得基于匹配场定位的方法性能受到影响. 所以, 声呐在实际浅海环境中应用时, 应对起伏海底的影响予以重视. 此外, 研究结果对海底地形测绘空间精度的提高也具有重要参考意义.

关键词: 浅海负跃层, 周期起伏海底, 声传播损失异常, 脉冲声传播特性

PACS: 43.30.+m, 43.30.Hw, 43.30.Cq

DOI: 10.7498/aps.70.20201233

1 引言

在浅海中, 由于声波会与海底及海面发生多次作用, 海底作为水下声场的重要下边界, 其声学特性和海底地形起伏对声传播的影响极为重要, 所以海底一直是浅海声学研究中的一个重要方向^[1]. 与海面波浪起伏引起的形态和统计特性随风速变化而变化的情况不同, 海底特性在相当长一段时期内可以近似认为随时间不变^[2]. 在实际的海洋环境中, 海底界面一般是粗糙不平的, 已有的文献^[3—18]指出粗糙海底会对声通信、匹配场定位、海底参数反演产生影响. 有关海底山、海洋斜坡等地形变化

对声传播的影响以及海底声散射特性的研究得到了国内外学者的广泛关注^[3—18].

20世纪50—80年代, Urick^[3]与McKinney和Anderson^[4]通过研究海底声散射得出海底的粗糙度或微起伏是引起海底声散射主要原因的结论. 20世纪90年代, Jackson等^[5]和Lyons等^[6]在海底声散射特性测量和研究中, 得出可采用海底粗糙度谱来表征海底粗糙性的结论. 2002年李整林^[7]研究了匹配场定位时由海底表面粗糙等引起的环境失配问题, 得出结论, 海底界面粗糙会降低宽带匹配场处理的定位性能, 引起主瓣相关值降低、旁瓣升高, 使用频域相干的宽带匹配场处理器可以减小这些随机起伏引起的失配. 2014年Chiu和

* 国家自然科学基金 (批准号: 11874061, 11674349) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn

Chang^[8]对南海水下大片沙丘空间变化用浅地层剖面进行测量,得到了一处位于上陆坡的大型周期性海底沙丘图像,沙丘长度约为 2000 m,所在海域的平均海深为 320 m,振幅范围为 5—10 m,坡峰到坡峰的长度范围为 100—150 m,并研究了其对声传播的影响,根据 EDF (effective density fluid) 模型估算反射系数,对比平坦海底估算结果得出,沙丘的曲率是导致反射系数异常变化的关键因素. 2015 年 Li 等^[9]研究了深海海底山对声传播的影响,发现当海底山位于第一影区位置,声源深度较浅时,由于海底山的反射,会使得传播损失减小近 7 dB,且在声波第一次入射到海底山对应的声反射区距离上 (28 km 附近),声传播损失会随着接收深度的增大而增大,特定深度上不同接收深度处的传播损失最大相差将近 10 dB. 2016 年胡治国等^[10]研究了深海海底斜坡环境对声传播的影响,发现在海底有较小幅度山丘时,可对声波有反射遮挡作用,导致在其反射区特定传播距离和深度上出现倒三角声影区,比平坦海底环境下相同影区位置处的传播损失增大约 8 dB,且深海海底斜坡对入射的声波有反射增强作用,可使得斜坡上方靠近海表面深度处形成一个声增强区,其声传播损失减小约 5 dB. 2019 年梁民帅等^[11]通过进行周期起伏海底界面 Scholte 波激发的研究,建立了周期起伏界面 Bragg 散射与 Scholte 波激发之间的耦合关系,得到了与平整界面相比,周期起伏界面有助于 Scholte 波的激发的结论. 2020 年董阳等^[12]研究了深海三维海底山地形对甚低频声场的影响,得出了海底山地形变化会引起传播过程中声信号的耦合转化,从而激发深海海底界面波,以及海底山环境下的声传播会产生复杂的三维水平折射与散射现象,随着接收深度的增加地形变化引起的水平多途会逐渐增加的结论.

在海底散射模型方面,众多学者将基尔霍夫 (Kirchhoff) 近似模型用于不同情况的水下声场计算, Dacol^[13]将基尔霍夫近似用于具有随机粗糙特性的弹性海底的声散射研究. 目前基尔霍夫近似主要用于倾角变化缓慢的粗糙海底近垂直方向附近的海底声散射场计算. Broschat 和 Thorsos^[14]推导了适合 Dirichlet 边界条件的粗糙界面小斜率近似模型的散射截面表达式,并研究了小斜率近似用于海底声散射计算时的精度. 目前,该小斜率近似模型是应用最广泛的海底声散射模型. Jackson^[15]将

复合粗糙度近似模型应用于海底声散射研究,其将垂直入射附近的大尺度粗糙度采用基尔霍夫近似计算海底散射,小粗糙度采用微扰近似计算海底散射. 彭朝晖等^[16]结合 Ivakin 等^[17]提出的射线管积分法和 Hines 的复射线法,推导出了一种计算随机非均匀海底和粗糙界面引起的平面内海底散射模型,利用这个模型可以计算出一个任意给定的入射角和不同散射角时的海底散射强度.

总体来说,目前的研究多集中在海底有较大起伏,如海底山、海底斜坡等海底地形变化对声传播的影响,对于一些小的起伏,例如周期性沙隆,或海底随机起伏对声传播影响的研究较少;关于粗糙海底对声场影响的模型大多集中在海底声散射研究,海底起伏对声传播的统计特性研究相对较少. 这使得声呐在起伏浅海环境应用时,其探测性能下降的原因还不清楚. 此外,过去海底地形测绘的主要目的是为了保障航行安全,而基于匹配场定位原理的声呐环境保障,对海深参数的空间分辨率及精度提出了新要求. 所以,开展周期起伏海底环境下声传播损失及脉冲传播特性的影响研究,对深入认识声呐在复杂浅海环境中探测性能下降程度,同时对海深数据库建设及提高海底地形绘制的精度要求具有重要的意义.

本文利用黄海夏季存在的温跃层环境,分析海底存在周期起伏地形条件下的声传播损失变化规律与脉冲声传播现象,并利用射线理论解释了海底地形起伏引起异常声传播的机理,为海底地形起伏等复杂浅海环境下声传播及其应用奠定重要理论基础.

2 黄海跃层环境及适用于海底地形起伏的二维声场模型

2018 年 Liu 和 Li^[18]通过抛物方程模型统计分析随机起伏海面对声传播的影响,并利用射线理论解释了海面波浪引起声传播起伏统计特性的机理. 这里可借鉴其研究思路,认识海底起伏对浅海声传播影响.

为了研究浅海中同时存在温跃层和周期性海底起伏环境时的声传播规律,采用图 1 所示的 2002 年 8 月测量得到的黄海夏季实验水文环境,其中:海深为 50 m,温跃层位于 10 m 至 25 m 之间,跃层上下的声速分别为 1536 和 1496 m/s,海

底取单层半无限大模型, 海底密度为 1.75 g/cm^3 , 海底声速为 1600 m/s , 海底衰减系数为 $0.311 \times (f/1000)^{1.75} \text{ dB/m}$ [19], 频率 f 的单位为 Hz . 不失一般性, 假设海底界面起伏如图 1 所示, 这种周期性起伏一般存在于一些大陆架海域. 为了便于文中的分析, 定义起伏周期 L 为相邻两个坡峰间的距离, 起伏高度 ΔH 为坡峰和平坦海底的高度差. 在分析中将通过改变起伏周期和起伏高度等参数, 研究不同海底地形起伏对声场影响的规律.

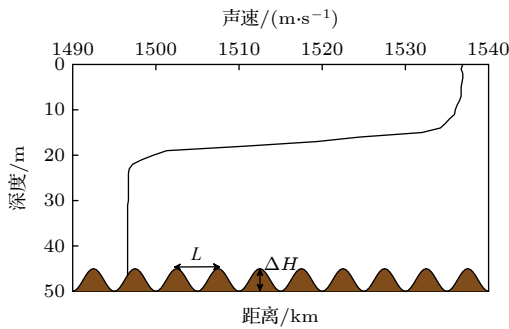


图 1 黄海夏季负跃层环境及周期海底起伏示意图
Fig. 1. Shallow water environment with a negative thermocline in the Yellow Sea and the diagram of the periodic rough bottom.

对于图 1 所示的海底周期起伏地形, 需要使用水平变化声场模型进行分析. 考虑到 Collins 提出的基于抛物方程 (PE) 理论的 RAM-PE 模型具有计算速度快、精度高等优点, 因此文中使用 RAM-PE 模型来计算声场, RAM-PE 模型是基于 Padé 序列逼近 PE 传播算子的一种宽角 PE 算法 [20].

对于二维浅海波导, 介质密度 ρ 和声速 $c(r, z)$ 随距离 r 和深度 z 变化而变化, 在柱坐标系下, 在 $(0, z_s)$ 位置上一个简谐点声源 (略去了时间依赖关系 $e^{-j\omega t}$) 激发的声场满足波动方程 [20]

$$\frac{\rho}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(r, z)} P = -\frac{\delta(r) \delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad (1)$$

和相应的边界条件, 其中 $P(r, z, \omega)$ 为声压, ω 为角频率, $\delta(r)$ 和 $\delta(z - z_s)$ 为冲激响应函数表达式. 对于水平变化环境, (1) 式可由抛物方程近似把边值问题转化为初始值问题进行求解 [21–23], 则有

$$P(r, z, \omega) = H_0^1(k_0 r) p(r, z, \omega), \quad (2)$$

$$p(r + \Delta r, z, \omega) = \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_{j,n} X}{1 + \beta_{j,n} X} \right) p(r, z, \omega), \quad (3)$$

其中 $H_0^1(k_0 r)$ 为第一类零阶汉克尔函数, 是随距离的快变项; $k_0 = \omega/c_0$, c_0 为参考声速; Δr 为距离方向的步长; $\alpha_{j,n}$ 和 $\beta_{j,n}$ 是 Padé 序列的复系数; X 为深度算子, 满足

$$X = k_0^{-2} \left[\rho \frac{\partial p}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k^2 - k_0^2 \right]. \quad (4)$$

在求得不同深度 z 和距离 r 下的声压值 $p(r, z)$ 后, 进而可求得声强:

$$I(r, z) = \frac{p^2(r, z)}{Z_\omega}, \quad (5)$$

其中 Z_ω 是声场点的声阻抗. 由于不同路径信号相互干涉, 单频时的声强随距离会有较大的起伏, 为了得到平滑的传播损失, 在 $1/3$ oct (倍频程) 带宽内对多个频点声强进行窄带平均, 得到

$$\bar{I}(r, z) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I(f_n; r, z), \quad (6)$$

其中 N 为频点个数. 最终得到窄带平均的声传播损失为

$$TL(r, z) = -10 \lg \frac{\bar{I}(r, z)}{I(r=1)}. \quad (7)$$

此外, 为了分析周期起伏地形对脉冲声传播的影响, 利用 (2) 式求解出一定带宽内的复声压 $p(r, z, \omega)$ 后, 乘以 $H_0^1(k_0 r)$, 再通过傅里叶逆变换可以得到声场的时域脉冲波形信号:

$$P(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) p(r, z, \omega) H_0^1(k_0 r) e^{-j\omega t} d\omega, \quad (8)$$

其中 $S(\omega)$ 是声源谱. 在用 (8) 式进行脉冲信号合成时, 声源谱 $S(\omega)$ 可取为汉宁窗, 在声源频带以外予以补零处理.

3 周期起伏海底对传播损失的影响

为了研究不同海底周期起伏高度 ΔH 和起伏周期 L 变化这两个参数对声传播损失 (transmission loss, TL) 的影响, 假设声源中心频率为 300 Hz , 当参考声速 $c_0 = 1500 \text{ m/s}$ 时对应的声波波长 λ 为 5 m , 先设起伏高度 ΔH 为 5 m (λ)、起伏周期 L 为 50 m (10λ). 为了讨论声源深度变化对 TL 的

影响,取两种典型声源深度 7 m 和 40 m,分别表示位于图 1 负跃层环境中的温跃层上和温跃层下,并令接收深度为位于跃层下的 40 m. 图 2 给出了周期起伏海底情况下的传播损失 $TL_{\text{起伏海底}}$ 与平坦海底时的传播损失 $TL_{\text{平坦海底}}$ 的对比图. 这里将收发距离 10 km 处二者的传播损失差值定义为 ΔTL ($\Delta TL = TL_{\text{起伏海底}} - TL_{\text{平坦海底}}$). 图 2(a) 可见,当声源位于跃层上时,周期起伏海底比平坦海底增大了 $\Delta TL = 21.8$ dB,明显大于声源位于跃层下时的 $\Delta TL = 8.4$ dB (参见图 2(b)).

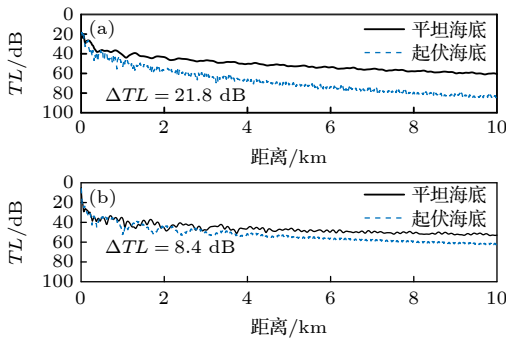


图 2 周期起伏海底与平坦海底情况下的 TL 比较,其中接收深度为 40 m,声源深度分别为 (a) 7 m 和 (b) 40 m
Fig. 2. Comparison of the TLs between rough bottom and flat bottom at two different source depths: (a) 7 m; (b) 40 m.

固定收发距离为 10 km,可以通过改变起伏周期和起伏高度来分析其对 ΔTL 的影响. 图 3 给出起伏周期 L 分别为 $2\lambda, 4\lambda, 6\lambda, 8\lambda, 10\lambda, 12\lambda, 14\lambda, 16\lambda, 18\lambda, 20\lambda$ (对应的长度分别为 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 和 100 m),起伏高度 ΔH 为 3 和 5 m 时,在不同声源深度的情况下起伏海底与平坦海底的 ΔTL 变化折线图. 从图 3(a) 可以看出:起伏周期一定时,周期起伏海底对声传播的影响随起伏高度的增大而增大;当起伏高度一定时,周期起伏海底对声传播的影响随起伏周期的增大而减小. 为了验证此结论对于低频声源的普适性,在同样的水文环境和海底起伏条件下,对声源中心频率为 1000 Hz 的情况进行仿真计算,结果如图 3(b) 所示,可以看出也符合上述结论. 此外,可以看出对于同样的海底起伏和水文环境,声源频率越高,声场受起伏海底影响越大,因为频率越高波长越短,可以认为相对于同样的起伏海底而言其相对粗糙度越大,因此受到的影响也更大. 在温跃层环境下,声源位于跃层上时,海底存在周期起伏对声传播的影响比位于跃层下方更大,起伏周期越长,传

播损失差 ΔTL 越小. 这对于被动声呐在实际浅海环境中的应用具有很重要的意义,在负跃层海洋环境中,当被动声呐位于跃层下,对跃层上的水面目标进行探测时,应充分考虑到海底存在起伏时的影响.

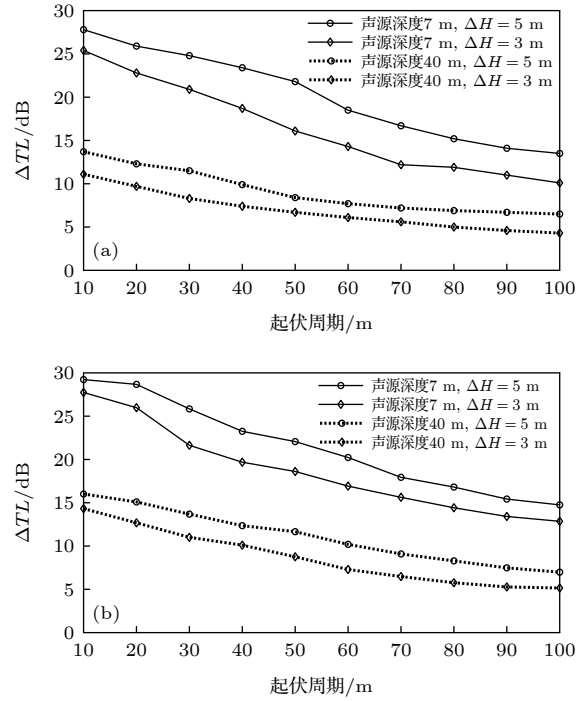


图 3 不同声源深度下传播损失差值 ΔTL 随海底起伏周期的变化,其中接收深度 40 m,声源频率分别为 (a) 300 Hz 和 (b) 1000 Hz
Fig. 3. Statistical diagram of ΔTL with different source depths, periods and heights of the rough bottom at the receiver depth of 40 m, where the frequency of the source is (a) 300 Hz and (b) 1000 Hz.

图 4 给出在声源频率为 300 Hz,声源深度为 7 和 40 m 下,起伏周期从 10 m (2λ) 变化到 100 m (20λ),起伏高度从 3 m (0.6λ) 变化到 5 m (λ) 时的 ΔTL 二维分布结果. 从图 4 可以更直观看出在不同声源深度下, ΔTL 随起伏周期和高度变化的渐变关系.

4 周期起伏地形对传播损失影响机理的射线解释

为了解释不同海底起伏情况引起的传播损失差异,现在利用 BELLHOP 射线模型计算了不同声源深度下,有无海底起伏时的声线传播示意图,以便直观地了解声线的传播情况. 分析时依然取声源中心频率为 300 Hz,声源深度为 7 和 40 m,接

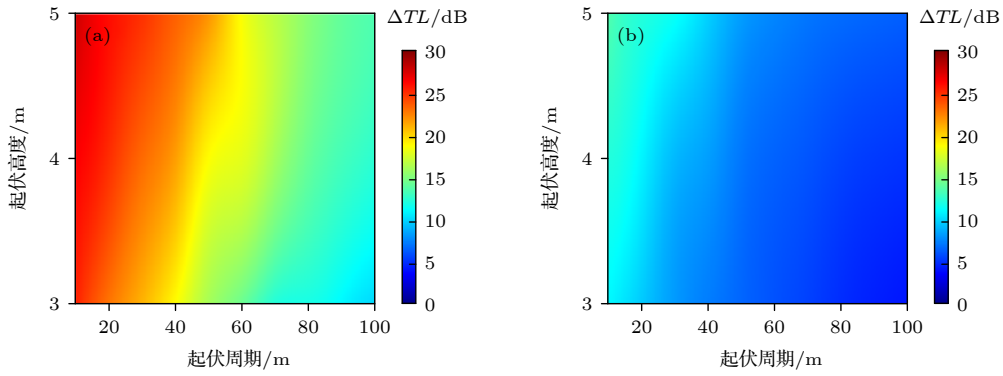


图 4 不同声源深度下传播损失差值 ΔTL 随海底起伏周期及起伏高度二维变化结果 (a) 7 m; (b) 40 m

Fig. 4. The ΔTL with different periods and heights of the rough bottom at two different source depths: (a) 7 m; (b) 40 m.

收深度为 40 m. 图 5 和图 6 给出了不同海底起伏时的声线图. 图 5(a)—(d) 和图 6(a)—(d) 的海底依次为平坦海底, 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m, 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m 以及起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m. 为了更直观地分析周期起伏海底环境对不同掠射角大小的声线的影响, 将 0° — 10° , 10° — 20° , 20° — 30° 和大于 30° 掠射角范围的声线分别标记为绿色、蓝色、红色和黑色 (掠射角范围均指其绝对值).

当声源位于跃层上方时, 如图 5(a) 所示, 声线被海面 and 海底反射, 在整个波导中传播, 这部分声线称为 SRBR (surface-reflected bottom-reflected) 声线, 由于海底吸收, 掠射角较大的声线经过几次海底反射后能量急剧衰减, 只能在近场传播, 只有

掠射角较小的声线可以到达接收点. 当声源位于跃层下方时, 如图 6(a) 所示, 大部分声线 (红色、蓝色、绿色) 向上传播时在跃层中发生反转改为向下传播, 经过海底反射, 部分声线只在跃层和海底之间的浅海声道中传播, 这部分声线称为 RBR (refracted bottom-reflected) 声线, 它们的掠射角较小, 对应的海底反射损失较小, 经过几次海底反射后到达接收点时仍然具有较高的能量. 其余穿过跃层与海面发生作用的黑色声线由于掠射角较大, 与海面海底发生作用后能量衰减很快, 到达接收点时能量较低.

当海底起伏周期不变, 起伏高度增大时, 对比图 6(b) 和图 6(c) 可以看到, 掠射角较大的红色声线和黑色声线传播到一半就消失了, 能够到达接收

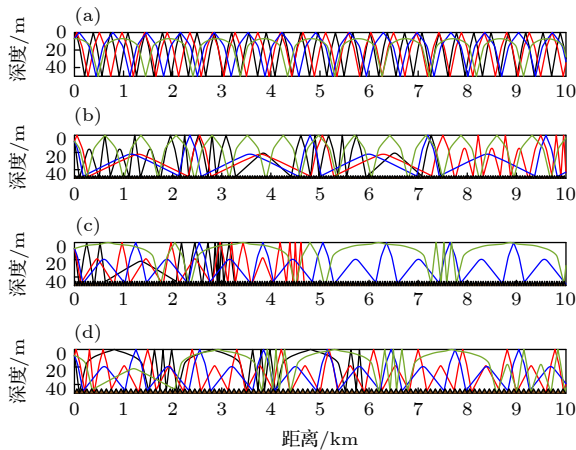


图 5 声源深度 7 m 时声线图 (a) 平坦海底; (b) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m; (c) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m; (d) 起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m

Fig. 5. Rays for source above the thermocline (7 m) with different periodic rough bottom: (a) Flat sea bottom; (b) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 3$ m; (c) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 5$ m; (d) $L = 100$ m (20λ), $\Delta H = 5$ m.

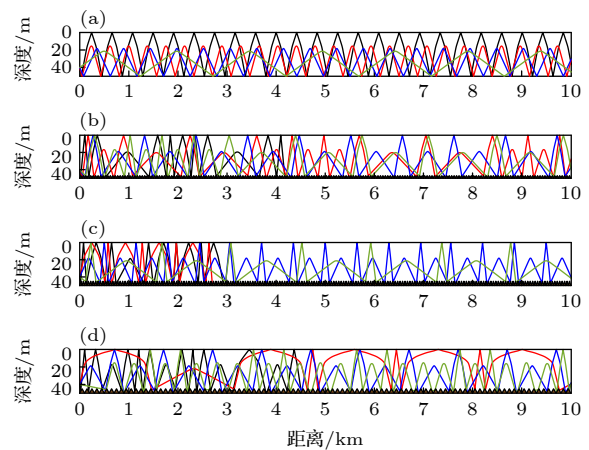


图 6 声源深度 40 m 时声线图 (a) 平坦海底; (b) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m; (c) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m; (d) 起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m

Fig. 6. Rays for source below the thermocline (40 m) with different periodic rough bottom: (a) Flat sea bottom; (b) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 3$ m; (c) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 5$ m; (d) $L = 100$ m (20λ), $\Delta H = 5$ m.

点的声线变少, 只有掠射角较小的绿色和蓝色声线可以到达, 因此 TL 也更大. 当海底起伏高度不变, 起伏周期增大时, 从图 6(d) 可以看到, 除了绿色和蓝色声线外, 掠射角较大的红色声线也可以到达接收点, 较之图 6(c), 起伏周期更大的海底相当于坡面变得平缓了, 声线在与坡面发生碰撞后传播角度改变地更小, 经过起伏坡面反射后与海面海底的反射次数减少, 可以传播地更远, 到达接收点时的能量损失也更小. 比较图 5 和图 6 可见, 当声源位于跃层上时, 由于温跃层的存在, 声线入射到海底的角度一般较大, 每次与周期海底作用后, 一些特定角度的声线在部分距离上反射角度变大, 在很短距离内出现多次海面 and 海底反射, 使得能量损失增大, 最终达到接收点的声线也变少, 因此 TL 也相应增大.

为了更加直观地说明起伏海底对声传播的影响, 图 7 分别给出了在一个周期上, 起伏高度变化和起伏周期变化时的声线反射示意图. 从图 7(a) 可以看到, 由于起伏高度变大, 掠射角较大的声线在被倾斜度更大的起伏面反射后, 反射角会变大, 当声线再次与海底接触时, 入射角度会越来越大, 对于海底损失 BL ($BL = -10 \log |R|^2$, R 为海底反射系数) 而言, 掠射角越大, 海底损失越大, 且当掠射角大于临界角之后, 海底损失会急剧增大, 经过十几次这样的海底反射, 累积起来的反射损失就会变大. 图 7(b) 中, 起伏高度不变时, 起伏周期越小, 声线反射后角度变化越大, 声线的反射次数会越多; 同时, 受起伏海底影响, 某些声线经海底反射后可能发生传播方向变反, 导致 TL 增大.

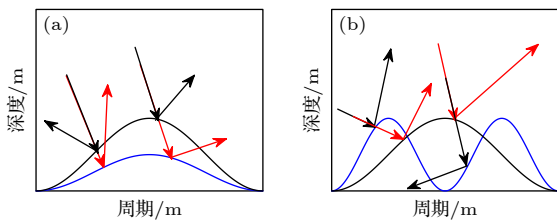


图 7 一个起伏周期声线传播示意图 (a) 海底起伏周期不变; (b) 海底起伏高度不变

Fig. 7. Diagram of ray propagation in one fluctuation period: (a) For constant L ; (b) for constant ΔH .

5 周期起伏海底对脉冲声传播特性影响及机理分析

以上讨论了不同海底时的声场传播损失, 并分析了造成不同传播损失的原因. 接下来从脉冲传播

角度对不同海底起伏情况下的能量变化进行分析. 图 8 和图 9 分别给出声源深度为 7 和 40 m 时, 由公式 (8), 结合 $TL = -10 \log |P|^2$ 计算得到不同海底起伏时的脉冲到达结构随接收深度变化的二维伪彩图. 计算中, 声源中心频率依然取 300 Hz, 带宽为 100 Hz, 频率步长为 1 Hz, 声源距离取 10 km, 接收深度从海面到海底. 图 8 和图 9 中横坐标为相对到达时间. 图 8(a)–(d) 和图 9(a)–(d) 的海底依次为平坦海底, 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m, 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m 以及起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m.

当海底不存在起伏时, 从图 8(a) 和图 9(a) 可以清楚地看到各号筒正波在深度和时间上的分布. 当海底起伏周期不变, 起伏高度增大时, 对比图 8(b) 和图 8(c), 可以看到在整个深度上的各个接收点的能量都有非常明显的衰减, 且随着起伏高度变大, 衰减得越厉害. 特别是接收深度位于跃层上方时尤为明显, 能够到达接收点的高号筒正波变少, 筒正波的时空结构也不如平坦海底的清晰^[24]. 当起伏高度不变, 起伏周期为 20λ 时 (图 8(d)), 相比于平坦海底 (图 8(a)), 接收点能够接收到的高号筒正波变少, 脉冲能量更小; 当起伏周期变小到 10λ (图 8(c)), 即起伏面倾斜度更大时, 大部分接收深度都只能接收到 1 号和 2 号筒正波了, 能量衰减更为迅速; 起伏周期为 20λ 的海底比起伏周期为 10λ 的海底能量衰减更缓慢, 能够到达接收点的高号筒正波更多. 对于同一频率的声源来说, 其波长是一定的, 那么起伏周期越大就相当于相对粗糙度越小, 即海底起伏越平缓, 对声传播的影响更小. 从图 8(c) 和图 9(c) 可见, 由于海底起伏的存在, 使得发生了高低号筒正波之间的能量转换, 图 8(a) 中声源深度为 7 m 激发的以高号筒正波为主的传播转化为图 8(c) 以跃层下低号筒正波为主; 而在图 9(a) 中以跃层下小角度传播的低号筒正波为主, 经过起伏海底后在近海面出现了小幅度的高号筒正波能量 (图 9(c)), 但是包括 2 号筒正波在内的高号筒正波逐渐衰减到消失, 所以传播损失也相应的增加.

文献 [7] 的数值仿真研究表明, 存在海底粗糙会使得匹配场定位的主瓣相关下降, 但是并没有对其中下降机理进行深入研究. 开展起伏海底对脉冲声传播影响的研究, 对于理解匹配场声源定位受海底影响机理具有重要意义. 图 10 和图 11 分别为声

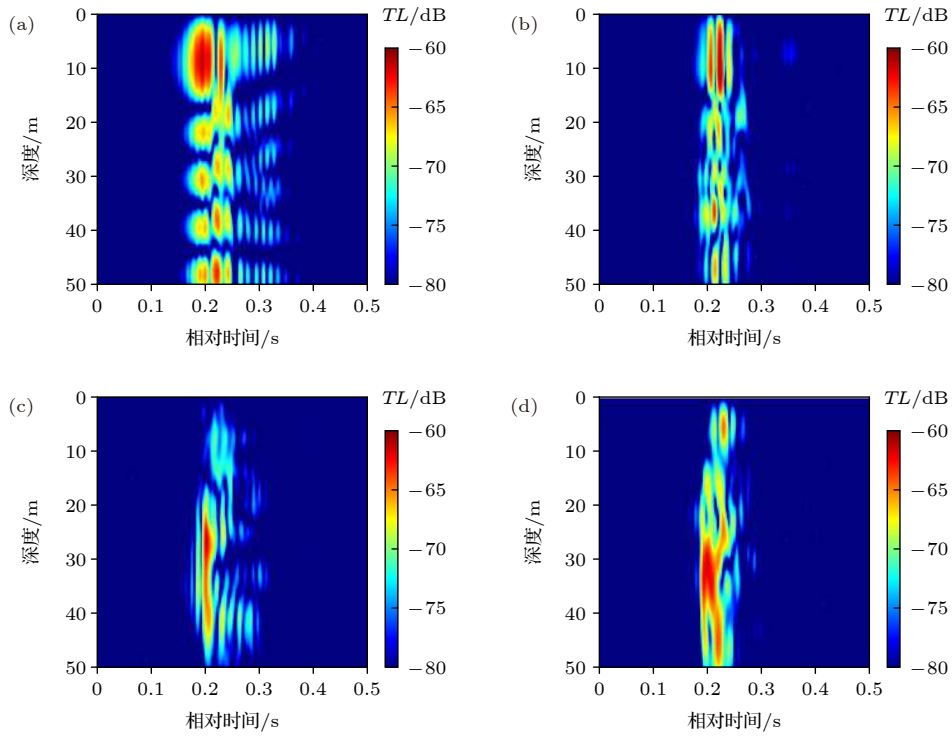


图 8 声源位于跃层上 (7 m) 时脉冲到达结构随深度变化 (收发距离为 10 km) (a) 平坦海底; (b) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m; (c) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m; (d) 起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m

Fig. 8. Arrival pulses at different receiver depths for the source above the thermocline (7 m): (a) Flat sea bottom; (b) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 3$ m; (c) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 5$ m; (d) $L = 100$ m (20λ), $\Delta H = 5$ m.

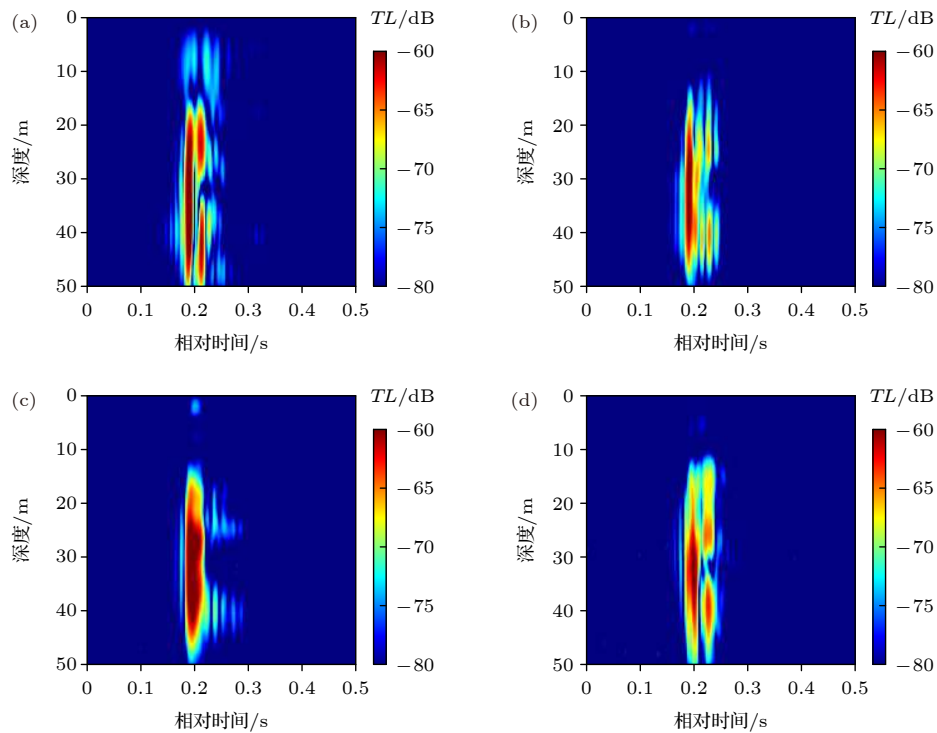


图 9 声源位于跃层下 (40 m) 时脉冲到达结构随深度变化 (收发距离为 10 km) (a) 平坦海底; (b) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m; (c) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m; (d) 起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m

Fig. 9. Arrival pulses at different receiver depths for the source below the thermocline (40 m): (a) Flat sea bottom; (b) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 3$ m; (c) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 5$ m; (d) $L = 100$ m (20λ), $\Delta H = 5$ m.

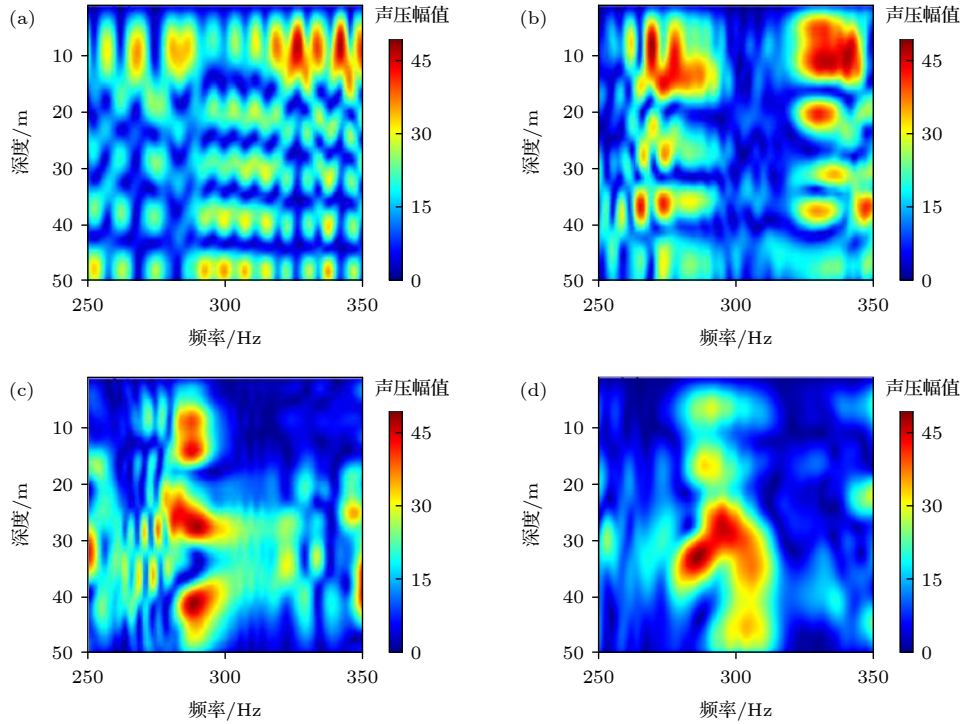


图 10 声源位于跃层上 (7 m) 时各接收深度频谱图 (收发距离为 10 km) (a) 平坦海底; (b) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m; (c) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m; (d) 起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m

Fig. 10. Spectrogram at different receiver depths for the source above the thermocline (7 m): (a) Flat sea bottom; (b) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 3$ m; (c) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 5$ m; (d) $L = 100$ m (20λ), $\Delta H = 5$ m.

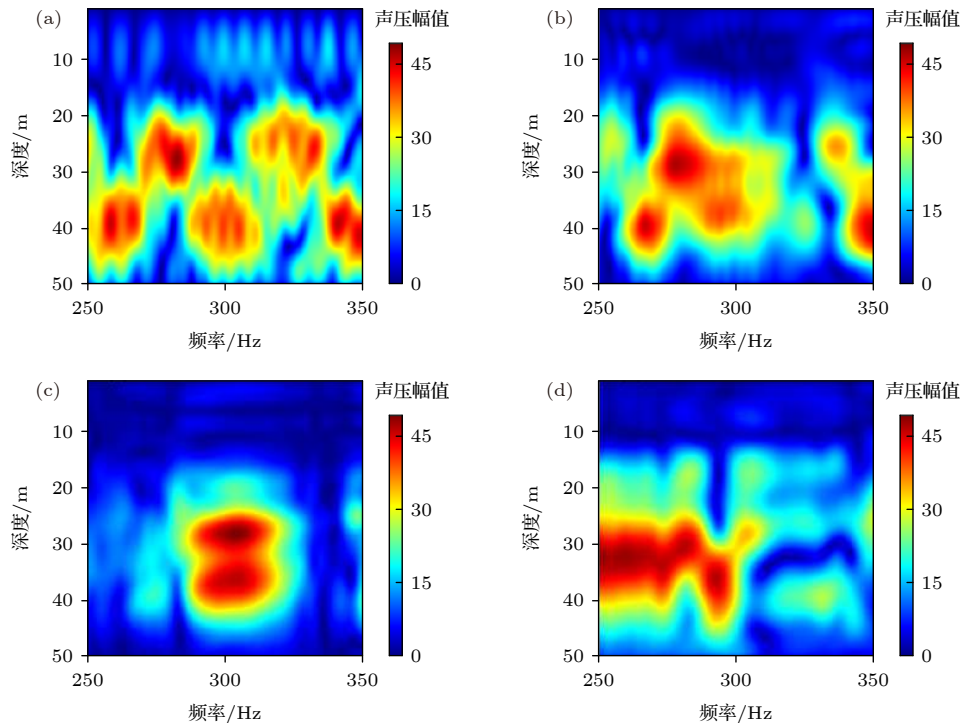


图 11 声源位于跃层下 (40 m) 时各接收深度频谱图 (收发距离为 10 km) (a) 平坦海底; (b) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m; (c) 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m; (d) 起伏周期为 100 m (20λ)、起伏高度为 5 m

Fig. 11. Spectrogram at different receiver depths for the source below the thermocline (40 m): (a) Flat sea bottom; (b) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 3$ m; (c) $L = 50$ m (10λ), $\Delta H = 5$ m; (d) $L = 100$ m (20λ), $\Delta H = 5$ m.

源深度为 7 和 40 m 时, 不同海底起伏时的频谱图. 计算中, 参数设置同图 8 和图 9. 图 10 和图 11 中横坐标为频率, 范围为 250—350 Hz; 纵坐标为接收深度; 颜色条为归一化的声压幅值. 图 10(a)—(d) 和图 11(a)—(d) 的海底依次为平坦海底, 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 3 m, 起伏周期为 50 m (10λ)、起伏高度为 5 m 以及起伏周期 100 m 为 (20λ)、起伏高度为 5 m. 结合图 8 及图 9 可见, 声波在不同海底起伏环境下传播, 使得到达接收器的多途结构发生变化, 在频谱上反映的就等同于经过了一个滤波器, 使得一些特定频率的能量发生了变化, 与平坦海底完全不同.

结合图 3 及图 8—11 可看到, 相比于平坦海底, 浅海中存在高度为 3—5 m 及周期为 10—100 m 的地形起伏, 在引起传播损失变化的同时, 会引起多途结构到达时间及相对幅度变化, 进而使得声场的频谱发生改变. 所以, 在存在海底起伏时, 声呐的探测距离及匹配场定位性能都会受到较大影响. 此外, 在实际工程应用中, 例如利用多波束测深仪测量海底数据时, 对于存在起伏海底的海域, 需要进行更高分辨率的测绘, 否则空间采样不够密集, 不能刻画真正的海底地形起伏. 所以, 研究结果对评估声呐在起伏海底地形环境下的探测性能、阵列信号处理算法改进及指导海深数据库建设等具有重要意义.

6 结 论

本文针对海底粗糙对浅海声场影响问题, 开展了海底存在周期起伏条件下的声传播特性研究. 利用黄海夏季负跃层水文环境, 分析了声源处于温跃层不同位置情况下的低频 (< 1 kHz)、近程 (10 km) 声场能量起伏规律和脉冲声传播特性, 并用射线理论揭示了海底的起伏周期、起伏高度变化引起的传播损失能量变化机理. 主要结论有以下四点:

1) 在浅海负跃层环境下, 由于声线入射角度的影响, 声源位于跃层上比位于跃层下对声传播的影响更大. 声线穿过跃层时入射角度会发生偏转, 一些小掠射角声线穿过跃层后入射角度会变大, 经过海底周期起伏海底的反射后, 大部分大掠射角的声线穿过跃层后入射角度会大于临界角, 导致海底损失急剧增大.

2) 总结了不同海底起伏对声传播的影响规律,

并理论解释了其中的物理机理. 当海底的起伏周期不变时, 起伏高度越大引起的附加传播损失越大. 当起伏高度变大时, 部分小掠射角声线经倾斜度更大的坡面反射后反射角变大, 从而与海面海底反射次数增多, 掠射角较大的声线经海底反射后, 海底反射损失增大, 能量损失更大, 传播距离更短. 部分声线还会变成反向传播, 使得到达接收点的声线变少, 导致传播损失更大.

3) 当海底的起伏高度不变时, 起伏周期越大, 等效的海底起伏更加平缓, 声线被海底反射后传播角度受到的影响变小, 与海面海底的反射次数也减少, 使得声能量可以传播得更远, 到达接收点时的传播损失也较小.

4) 从不同脉冲传播特性角度看, 周期起伏海底会使得一些大角度的声线 (或高号简正波) 与小角度声线 (或低号简正波) 之间发生能量转换, 当海底的起伏高度较大且起伏周期较小时, 使得部分大角度声线能量在一定距离上衰减掉, 只剩下个别能在温跃层与海底之间传播的小角度声线 (或第一号简正波). 这种起伏海底引起的浅海多途特性的改变, 进而引起了声场频谱变化, 会使得以匹配声场为基础的定位方法受到影响.

总之, 在浅海环境下, 声波与海底作用次数很多, 起伏海底对声场的影响不容忽视. 在实际浅海环境中, 海底会存在非周期的起伏, 进而引起声传播和混响特性的变化. 掌握起伏海底环境下声传播损失及脉冲传播特性的规律, 对于声呐探测性能评估、基于匹配场处理方法的水下目标定位环境适配、海深数据库建设及提高海底地形绘制精度等方面均具有重要意义. 同时, 声呐在起伏海底地形环境下定位性能改进方法将是下一步的研究重点.

参考文献

- [1] Katsnelson B, Petnikov V, Lynch J (translated by Cheng G L, Zhang Y L) 2012 *Fundamentals of Shallow Water Acoustics* (Beijing: Electronic Industry Press) p7 (in Chinese) [鲍里斯·卡茨内尔松, 瓦莱里·佩提尼科夫, 詹姆斯·林奇 著 (程广利, 张亚蕾 译) 2012 浅海声学原理 (北京: 电子工业出版社) 第7页]
- [2] Etter P C (translated by Cai Z M) 2005 *Underwater Acoustic Modeling and Simulation* (Beijing: Electronic Industry Press) p44 (in Chinese) [艾特P C 著 (蔡志明 译) 2005 水声建模与仿真 (北京: 电子工业出版社) 第44页]
- [3] Urick R J 1954 *J. Acoust. Soc. Am.* **26** 231
- [4] McKinney C M, Anderson C 1964 *J. Acoust. Soc. Am.* **36** 158
- [5] Jackson D R, Baird A M, Crisp J J, Thomson P A G 1986 *J.*

- Acoust. Soc. Am.* **80** 1188
- [6] Lyons A P, Anderson A L, Dwan F S 1995 *J. Acoust. Soc. Am.* **95** 2441
- [7] Li Z L 2002 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: The institute of Acoustics of the Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [李整林 2002 博士学位论文 (北京: 中国科学院声学研究所)]
- [8] Chiu L Y, Chang A Y 2014 *J. Acoust. Soc. Am.* **136** EL376
- [9] Li W, Li Z L, Zhang R H, Qin J X, Li J, Nan M X 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 064302
- [10] Hu Z G, Li Z L, Zhang R H, Ren Y, Qin J X, He L 2016 *Acta. Phys. Sin.* **65** 014303 (in Chinese) [胡治国, 李整林, 张仁和, 任云, 秦继兴, 何利 2016 物理学报 **65** 014303]
- [11] Liang M S, Yu G K, Peng L H 2019 *Acoustical Society of China Shenzhen, China, September 20-23, 2019* p123 (in Chinese) [梁民帅, 郁高坤, 彭临慧 2019 全国声学大会 中国深圳 9月20—23日, 1999 p123]
- [12] Dong Y, Piao S C, Gong L J 2020 *J. Harbin Eng. Univ.* **10** 1 (in Chinese) [董阳, 朴胜春, 龚李佳 2020 哈尔滨工程大学学报 **10** 1]
- [13] Dacol D K 1990 *J. Acoust. Soc. Am.* **88** 978
- [14] Broschat S L, Thorsos E I 1997 *J. Acoust. Soc. Am.* **101** 2615
- [15] Jackson D 2013 *J. Acoust. Soc. Am.* **133** 3251
- [16] Peng Z H, Zhou J X, Zhang R H 2004 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **34** 304 (in Chinese) [彭朝晖, 周纪浔, 张仁和 2004 中国科学: 物理学 力学 天文学 **34** 304]
- [17] Ivakin A N, Lysanov Y P 1981 *Sov Phys Acoust* **27** 212
- [18] Liu R Y, Li Z L 2019 *Chin. Phys. B* **28** 014302
- [19] Li Z L, Zhang R H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1100
- [20] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, Schmidt H 2011 *Computational Ocean Acoustics* (2nd Ed.) (New York: Springer) pp463, 458
- [21] Collins M D, Westwood E K 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 1068
- [22] Collins M D 1993 *J. Acoust. Soc. Am.* **93** 1736
- [23] Collins M D 1994 *J. Acoust. Soc. Am.* **96** 382
- [24] Li Z L, Zhang R H, Mohsen Badiy, Luo J 2011 *Acta. Acust.* **36** 559 (in Chinese) [李整林, 张仁和, Mohsen Badiy, Luo Jing 2011 声学学报 **36** 559]

Sound propagation in shallow water with periodic rough bottom*

Liu Dai¹⁾²⁾ Li Zheng-Lin^{1)†} Liu Ruo-Yun¹⁾²⁾1) (*State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 30 July 2020; revised manuscript received 21 September 2020)

Abstract

The rough sea bottom has a large effect on underwater acoustic propagation and underwater acoustic detection applications. By using the typical shallow water environment from the Yellow Sea, the acoustic propagation characteristics under the condition of both periodic rough sea bottom and strong negative thermocline layer are systematically analyzed by using the parabolic equation model RAM (where RAM stands for range-dependent acoustic model) and ray theory. For a low-frequency and short-range acoustic source, the transmission loss (TL) increases up to about 5–30 dB due to the existence of the periodic rough bottom. Abnormal TLs and pulse arrival structures with different source depths, different periods and heights of the rough bottom are analyzed and summarized. Specifically, when the period of the rough bottom is constant, TL increases with the height of the rough bottom increasing. When the height of the rough bottom is constant, the effect of the rough bottom on the sound propagation becomes smaller with the increase of the period. The mechanism of the TL difference caused by rough bottom is explained by using the ray theory. The incidence and reflection angle of the sound ray on the sea bottom are changed due to the periodic rough bottom, which makes small grazing angles of some of the rays incident at sea bottom become large grazing angles, and the bottom loss increases. On the other hand, the change of the reflection angle increases the number of ray interaction with the sea bottom, causing the reversion propagation. Therefore, the energy of the sound field will attenuate with range increasing. The influence of the periodic rough bottom on the sound pulse propagation is mainly reflected in the energy conversion between sound rays (or normal modes) with different angles, the increasing of energy attenuation of some sound rays with large angles, and the decreasing of multipath structure. The change of the arrival time and relative amplitude of the multipath structure affect the frequency spectrum of the sound field, which will affect the performance of the method based on matching field localization. Most of existing studies focus on the influence of the change in large scale sea bottom topography on the sound field, but there are few studies on small scale periodic sea bottom fluctuations, and the relevant summary of the law of sound propagation is lacking. When sonar is used in the actual shallow water environment, more attention should be paid to the influence of the periodic rough bottom. In addition, the present research results also have important reference significance for the spatial accuracy of surveying and mapping of sea bottom topography.

Keywords: negative thermocline environment, periodic rough sea bottom, abnormal sound propagation, characteristics of sound pulse propagation

PACS: 43.30.+m, 43.30.Hw, 43.30.Cq

DOI: 10.7498/aps.70.20201233

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11874061, 11674349).

† Corresponding author. E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn