

南海夏季沿岸内波与定点声起伏特征分析

王 臻^{1,2} 胡 涛^{1†} 王文博¹ 郭圣明¹ 马 力¹

(1 中国科学院水声环境特性重点实验室(声学研究所) 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

2023 年 7 月 26 日收到

2023 年 10 月 18 日定稿

摘要 利用 2020 年 6 月海南岛沿岸试验数据, 分析内波及声能量起伏特征。试验海域以全日潮内波为主, 并伴随有高频内波活动。内波活动引起 360 Hz 单频信号 20 km 定点声起伏峰峰值超过 30 dB, 320~400 Hz 线性调频信号起伏峰峰值超过 15 dB。利用测量数据结合数值仿真, 讨论了内波引起单频信号和线性调频信号呈现不同起伏特征的原因。结果表明: 试验海域内波活动导致单频声场模态间干涉条纹出现移动, 进而导致接收位置处特定频率的声能量出现大幅度的快速起伏; 由于带宽内的平均作用, 宽带信号的能量起伏远小于单频信号的能量起伏。当内波传播速度变化时, 各内波成分在声传播路径上出现的时间和位置发生了变化, 使得声场出现剧烈起伏的时间也随之变化。

关键词 浅海内波, 声能量起伏, 声传播, 模态分析

PACS 数 43.30

DOI: 10.12395/0371-0025.2023147

Characteristics of coastal internal waves and acoustic-energy fluctuations in the South China Sea in summer

WANG Zhen^{1,2} HU Tao^{1†} WANG Wenbo¹ GUO Shengming¹ MA Li¹

(1 *Key Laboratory of Underwater Acoustic Environment, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences* Beijing 100190)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences* Beijing 100049)

Received Jul. 26, 2023

Revised Oct. 18, 2023

Abstract The characteristics of internal waves and acoustic-energy fluctuations are analyzed by the experimental data from the coast of Hainan Island in China in June 2020. Internal waves with a diurnal tide period dominate the experimental sea area, accompanied by high-frequency internal-wave activities. Owing to internal-wave activities, the peak-to-peak value of the energy fluctuations of 360 Hz continuous wave signals at 20 km exceeds 30 dB and that of 320–400 Hz linear frequency modulation signals exceeds 15 dB. The reasons for different fluctuation characteristics of continuous wave signals and linear frequency-modulated signals are discussed based on the experimental measurements and numerical simulation of acoustic field. The results show that the internal-wave activities in the experimental sea area can move the interference stripes between acoustic normal modes, leading to the rapid fluctuations of sound energy at a specific frequency at the receiving location. The energy fluctuations of broadband signals are much smaller than those of single-frequency signals because of the averaging effect of bandwidth. When the propagation velocity of internal waves changes, the time and position of internal-wave components along the sound propagation path change, varying the time of rapid fluctuations in the sound field accordingly.

Keywords Shallow-water internal waves, Acoustic-energy fluctuation, Acoustic propagation, Modal analysis

† 通讯作者: 胡涛, hutao@mail.ioa.ac.cn

引言

夏季大陆架及沿岸地区内波活动频繁,海洋内波使海水声速剖面产生显著的时空变化,从而引起声场起伏^[1-3]。浅海环境下,线性内波可分为内潮波和高频线性内波,前者一般振幅和空间尺度较大,后者幅度较小且频率较高;而另一类内波——非线性内波,则因为其对环境及声场的显著影响得到国内外学者的广泛关注^[4]。在黄海及南海的浅海大陆架环境中,非线性内波往往伴随着周期性的内潮出现,且受海底地形的影响较大,使不同区域的内波呈现不同的主导成分及周期、幅度等特征。

1991年,周纪浔等在黄海声学 and 海洋环境试验数据分析的基础上,通过抛物方程模型数值仿真研究了孤子内波与声波的共鸣现象(Resonant interaction),孤子内波在单接收深度引起的声强度起伏达到了20 dB,这一发现对国内外相关研究产生了很大的影响^[1]。1995年夏季在陆架区进行的SWARM(Shallow-Water Acoustics in a Random Medium)试验为浅海中线性与非线性内波对声传播影响规律研究提供了大量数据,取得了多方面的研究成果^[5-11]。在此基础上实施的ASIAEX 2001亚洲海海洋声学试验将目光转向南中国海,Chiu等分析了内潮和孤子内波对声信号能量起伏的影响,试验现象可以用耦合简正波理论解释^[12];Duda等利用长时间的试验测量数据,研究了同一试验中南海北部大陆坡的内潮和孤子内波活动,以及阵列声强起伏特征与内波活动的关系^[13-14]。国内学者通过ASIAEX 2001实测温度链等数据,分析了南中国海内波特征及其引起的声信号能量起伏、到达时间起伏等^[15-17]。Katsnelson等在试验数据和耦合简正波理论的基础上,分析发现非线性内波沿声传播路径移动时声强起伏频谱中存在主导频率,且该频率由内波传播速度和波导模态间干涉尺度决定^[18]。

随后,王宁、高大治等从内波引起的幅度起伏、深度分布等角度分析了2005黄海内波-锋面声学试验(AEYFI05)数据,并探究了所得结果应用于海底声参数反演、温跃层深度起伏监测等的可行性^[19-21]。郭圣明等利用调和分析^[22]研究了黄海内潮的特征,并在此基础上分析了它对声传播的影响^[23]。秦继兴等通过数值仿真发现浅海孤子内波环境下,接收点声强随时间的变化呈准周期性,频谱峰值所对应的频点与孤子内波沿声传播路径的移动速度成正比^[24]。季桂花等在试验数据和数值仿真的基础上,研究了

南海北部浅海海域近海底发射、接收条件下内波引起接收信号声强起伏的统计特性^[25]。胡平等研究了南海北部线性内波和孤子内波环境下声传播损失的统计特征,并从简正波理论的角度分析了各阶模态的能量起伏特征^[26];张青青等利用该试验中的水文数据结合二维平流模型,使用蒙特卡罗方法研究了有无孤子内波经过时声传播路径上的声传播损失统计特性^[27]。

海洋内波引起的声传播起伏研究是浅海声学的经典问题之一,其中声信号能量起伏(包括传播损失起伏、声强起伏)因其直观、与实际应用联系紧密等受到广泛关注。受到试验区域及时间等因素影响,现有试验分析大多以孤子内波环境或线性内波与非线性内波同时存在的环境为主,相应的声起伏分析也多关注于大幅度孤子内波对声传播的影响。2020年6月在海南岛沿岸海域的内波与定点声起伏试验,试验海域内波以潮周期波动为主,伴随有不规则的高频内波活动,未观察到显著的孤子内波波包,这与其他文献试验观测到孤子内波环境有明显不同^[25-27],且该环境下存在单接收深度声能量的大幅度(峰峰值达到15 dB)快速起伏,具有一定研究意义与价值。本文给出了试验中内波和声起伏的测量结果,并分析了内波活动等引起接收信号能量起伏的差异和原因。

1 南海内波与声起伏试验介绍

2020年6月4日至6日在海南岛沿岸海域进行了内波与定点声起伏试验。试验设备布放情况如图1所示,其中试验船在A点(发射站位)抛锚,船尾吊放宽带发射声源进行周期性信号发射,声源深度约为55.2 m,在试验期间发射深度起伏在0.5 m内;声源相对初始位置的距离变化如图2所示,试验期间声源缓慢向垂直阵方向移动,整体移动距离小于300 m;32元声学垂直阵潜标布放于B点(接收站位)进行声信号接收,水听器覆盖深度从水下20 m到65 m。A点和B点相距约20.03 km,水深分别为

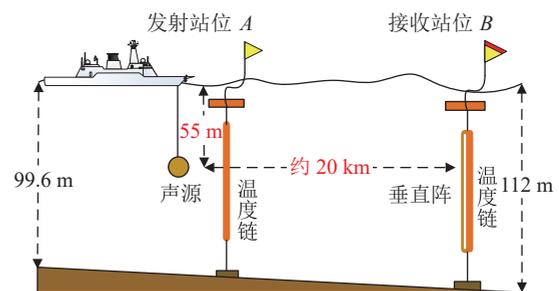


图1 内波与声起伏试验中设备布放示意图

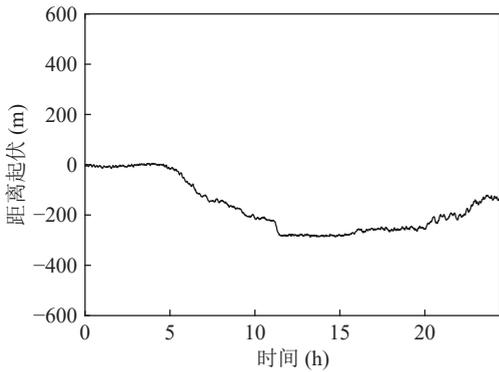


图2 试验期间声源相对初始点的距离变化

99.6 m 和 112 m。在发射和接收站位附近分别布放 2 条温度链进行内波监测。

定点声起伏试验中, 发射声源以 45 s 为周期进行声信号发射, 共连续发射 24.5 h。一个周期的发射信号包括 5 s 的单频信号 (360 Hz) 和 10 s 的线性调频信号 (320~400 Hz), 共有 1960 组信号被记录。

2 试验数据分析

2.1 内波数据分析

图 3 给出了试验期间接收站位 CTD 测量的全海深温度剖面, 该温度剖面具有典型的三层结构, 上等温层厚度约 23.5 m, 下等温层厚度约为 9 m, 中间为温跃层。图中点划线为声源所在深度, 虚线标示接收阵的深度范围。

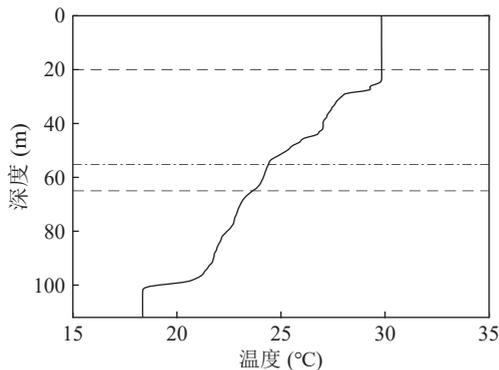


图3 接收站位温度剖面

接收站位温度链测量的温度剖面随时间变化如图 4 所示, 测量时间约 58 h, 图中黑色虚线框为定点声起伏试验期间的温度剖面变化。图 4 中黑色实线表示不同温度的等温线起伏, 各条等温线起伏并不完全一致, 在 26 h 附近最为明显。

内波引起的等温线起伏可用来分析试验海域的内波特征。图 5 以 26 °C 等温线为代表, 给出了接收站位等温线深度随时间的变化, 等温线变化曲线中

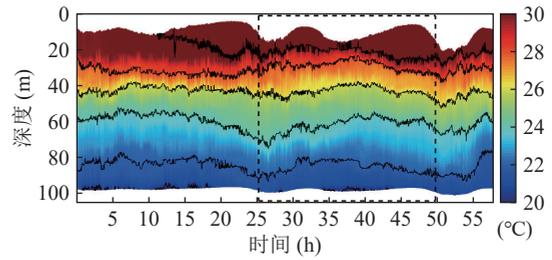


图4 接收阵上温度链测量结果及等温线

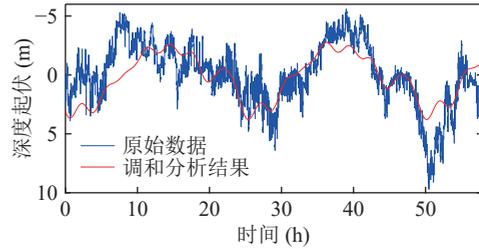


图5 26 °C 等温线深度起伏及调和分析结果

已减去等温线所在的平均深度。从等温线变化曲线可知, 试验海域内波活跃, 引起 26 °C 等温线剧烈波动, 并呈现一定的周期性。对 26 °C 等温线进行调和和分析^[22], 并拟合得到不同潮周期成分叠加的等温线波动曲线, 见图 5 中的红色实线。26 °C 等温线调和与分析得到的潮周期波动参数见表 1, 调和与分析结果显示, 试验海域以全日潮 (24 h) 内波活动为主, 潮周期内波引起的等温线波动幅度约为 3~4 m。

表 1 接收阵上温度链 26 °C 等温线调和与分析结果

潮分量	周期 (h)	频率 (cph)	幅度 (m)	相位 (°)
K1	23.93	0.0418	2.54	129.24
M2	12.42	0.0805	0.48	277.86
M3	8.28	0.1208	0.41	181.87
M4	6.21	0.1610	0.36	69.71
2MK5	4.93	0.2028	0.39	101.13
M6	4.14	0.2415	0.37	190.83
M8	3.11	0.3220	0.27	100.90

注: cph, 即每小时周期。

图 6(a) 为声起伏试验期间内 27 °C 等温线与 25 °C 等温线深度的对比, 两曲线在不同时间段呈现的起伏一致性不同: 在前 8 h 内, 两等温线在小时周期的起伏不同相, 25 °C 等温线在小时周期的起伏较多; 在 8~20 h 间, 两等温线的起伏基本一致; 在试验结束前, 与 25 °C 等温线相比, 27 °C 等温线上有幅度较大的非线性成分出现, 如图 6(a) 右图所示。图 6(b) 为两等温线深度的功率谱密度曲线对比, 以及功率谱密度的拟合曲线, 曲线随频率的下降趋势在 10 cph (周期约 6 分钟) 附近发生改变, 说明等温线在潮周期成分之上叠加有大量分钟量级以上的高频波动成分,

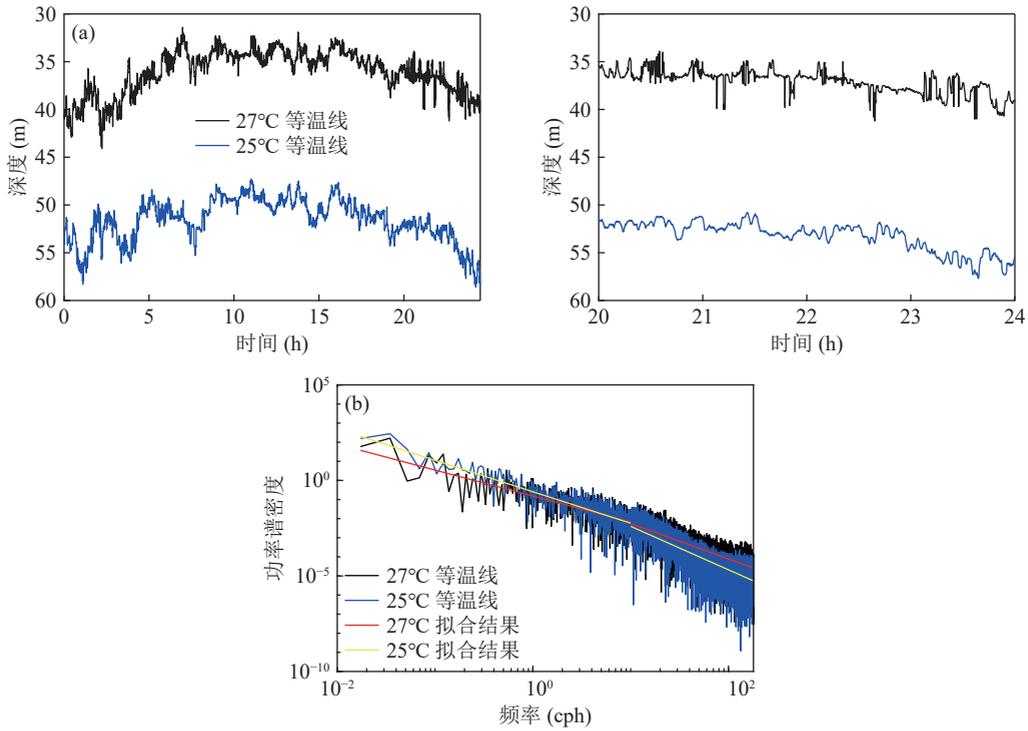


图6 27 °C 等温线与 25 °C 等温线对比 (a) 等温线深度起伏; (b) 深度起伏的功率谱密度曲线

两曲线上不同频率起伏的幅度整体呈现一定差异, 25 °C 等温线在低频段的起伏较多, 而 27 °C 等温线在高频段起伏的能量较高, 与图 6(a) 中现象一致。

发射站位的温度链测量时间相对较短, 约为 31 h, 但也覆盖了一个完整的全日潮周期。测量结果如图 7 所示, 图中的黑色虚线框为定点声起伏试验期间的温度剖面变化, 黑色实线表示不同温度的等温线起伏。与接收站点类似, 各条等温线的起伏变化并不完全一致, 具有明显的深度变化特征, 说明试验海域的内波可能受多个内波模态控制, 或存在其他海洋动力学活动。

发射和接收站位的内波若起源相同, 且在传播

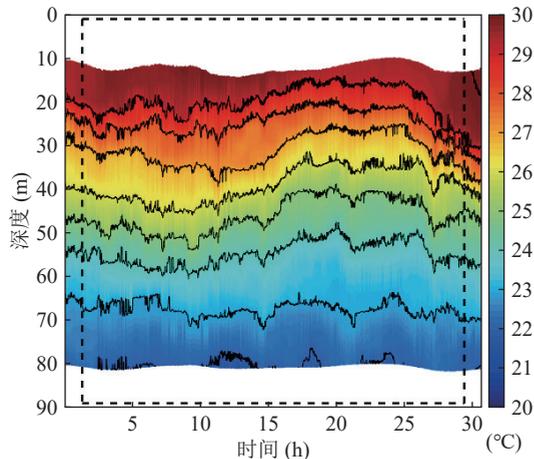


图7 发射站位温度链测量结果

期间其主要成分未发生显著畸变, 则可通过分析内波到达不同站位的时延来计算其传播速度。这里采用等温线时间滞后互相关的方法计算内波在两站位间的传播速度。利用接收站点 26 °C 等温线起伏 d_r 与发射站点 26 °C 等温线起伏 d_e , 得到时间滞后互相关的结果:

$$r(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} d_e(m) * d_r(m-n). \quad (1)$$

归一化处理后的结果见图 8(a)。图中曲线峰值对应时间差为 18.21 h, 图 8(b) 为互相关系数取最大值时, 两站位等温线的潮周期波动成分的对比。为了便于比较, 将两条等温线的深度起伏进行了归一化处理, 可以看到两者起伏趋势一致。考虑两站位温度链的开始测量时间, 最终计算得出内波由接收站点向发射站点传播, 用时约为 5.74 h。两个站位的温度链实际相距 20.03 km, 由此得到内波在两个站位间的传播速度为 0.97 m/s, 其传播方向与声传播方向相反。由于试验中仅在声发射、接收站位布放温度链, 此时得到的内波传播方向与速度为实际内波传播方向与速度在声传播测线上的投影。由于发射站位温度链测量时间较短, 持续时间仅包含一个全日潮周期, 估计的内波传播速度存在一定误差。

2.2 定点声起伏数据分析

接收站位的声学潜标一共记录了 1960 组 (24.5 h)

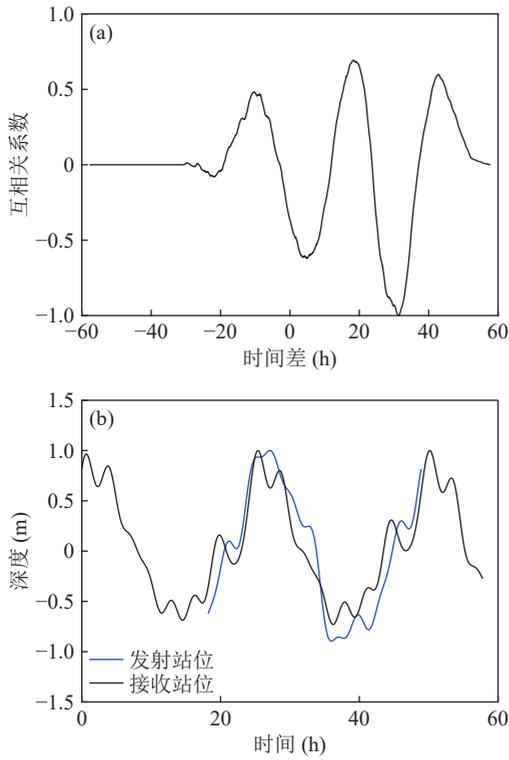


图 8 内波到达时延分析 (a) 两站位温度链 26 °C 等温线时间滞后互相关结果; (b) 互相关系数取最大值时两站位等温线调和分析结果对比

定点声起伏信号。图 9 为声学潜标第 1 通道 (深度约 19.8 m) 获得的信号波形和频谱, 其中图 9(a) 为线性调频信号, 图 9(b) 为单频信号。可以看到接收信号信噪比非常高, 有利于进行声起伏分析。

分别计算线性调频信号频带内能量均值, 单频信号能量 E , 并结合发射声源级 SL 、接收水听器灵敏度 M_v 、接收系统放大倍数 m 得到不同接收信号的传播损失:

$$TL = SL - (10 \lg E - M_v). \quad (2)$$

图 10 为不同深度线性调频信号 (320~400 Hz) 传播损失随时间变化情况, 可以看到, 声信号能量主要集中在接收阵下半部分, 且声场能量的深度分布随时间有明显变化。传播损失没有明显地随时间周期性演变, 一方面是由于试验海域的主导潮周期成分为全日潮, 与声起伏试验测量时间相近; 另一方面与试验海域内波成分复杂度有关。受潮汐、海流等的影响, 图 10 中的传播损失变化为声源、接收阵间距离变化, 接收阵倾斜引起的阵元深度变化与内波引起的声速剖面变化共同作用的结果。

为了分析 320~400 Hz 线性调频信号和 360 Hz 单频信号的声能量起伏特征, 图 11(a) 和图 10(b) 分别给出了 19.8 m 深度 (第 1 通道) 和 64.8 m 深度 (第

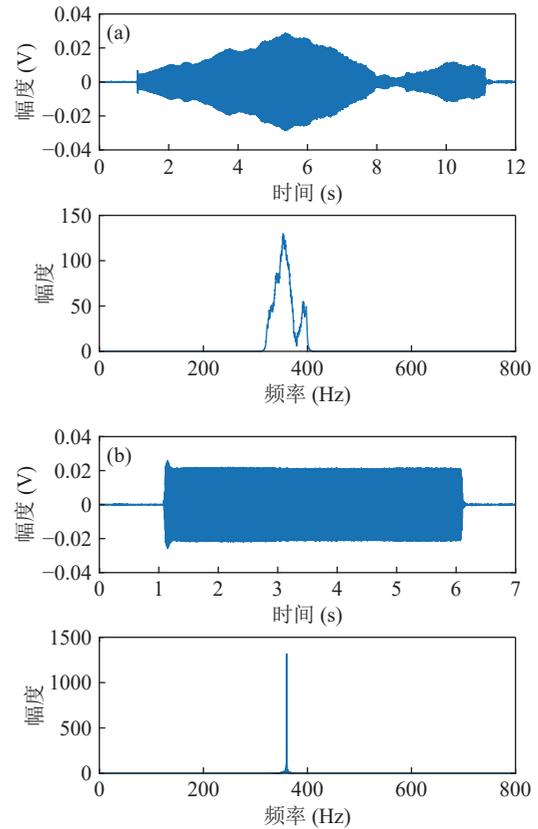


图 9 声学潜标第 1 通道接收信号示例 (a) 线性调频信号; (b) 单频信号

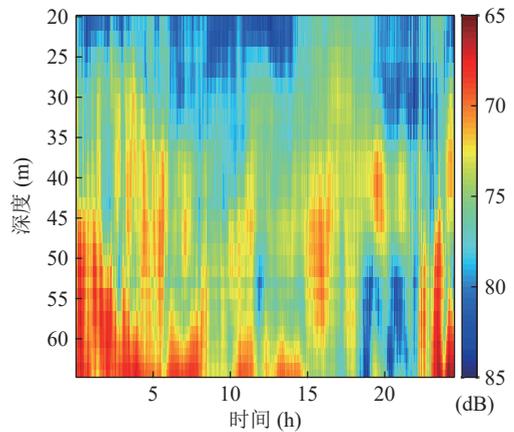


图 10 线性调频信号传播损失

32 通道) 两种信号的能量起伏曲线的对比。为便于比较, 两条曲线减去了平均值。两种信号的起伏曲线在变化趋势上较为相似, 但某些时间段差异明显。

图 11(a) 中, 线性调频信号在单接收通道的能量峰峰值约为 10 dB, 单频信号在单接收通道的能量起伏峰峰值超过了 20 dB, 且在 11 h, 20 h 附近两种信号对应的值存在明显差异。两种信号的曲线都同时存在缓慢起伏和快速起伏, 起伏时间分别是小时量级和分钟量级, 而单频信号中快速起伏的幅度更大, 变化更为剧烈。

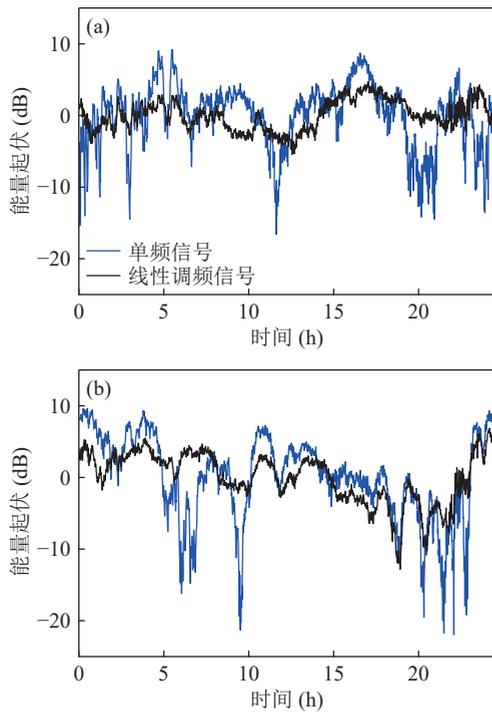


图 11 信号能量起伏曲线 (a) 19.8 m 深度 (第 1 通道); (b) 64.8 m 深度 (第 32 通道)

由图 11(a) 和图 11(b) 可知, 接收深度越深, 声起伏越剧烈。图 11(b) 中单频信号在 5~10 h, 20~24 h 都出现了大幅度的快起伏, 起伏峰峰值超过 30 dB。试验测量过程中声源、接收阵的深度没有异常起伏, 声源级没有明显变化, 且接收信号中不存在明显干扰, 这种间隔出现的大幅度快起伏与试验海域叠加在全日潮幅度上的高频或非线性的内波成分有关。

为更清晰地显示单频信号与线性调频信号声能量起伏特征的差异, 图 12 给出了声学接收潜标前 8 通道 (19.8~33.4 m) 得到的信号能量起伏曲线对比, 纵轴上相邻两通道 (虚线) 间的能量为 20 dB。为便于比较, 各通道能量减去了该通道能量的平均值, 同一通道声能量的起伏幅度没有变化。从图中可以看到, 单频信号 (蓝色线) 在 3 个时间段存在大幅度快速起伏, 比如第 1 小时、第 10 小时、第 22 小时附

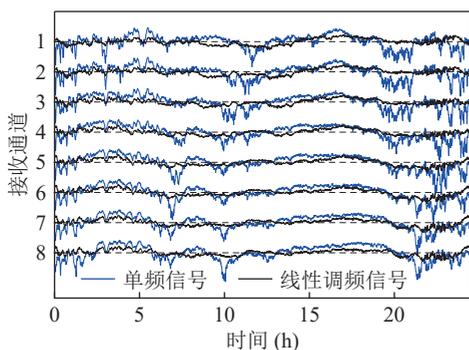


图 12 实测不同接收深度信号能量起伏曲线

近。与线性调频信号 (黑色实线) 相比, 这种能量的剧烈波动主要由于接收信号能量突然变小引起, 且能量变化的幅度平均超过 10 dB。线性调频信号的起伏平缓很多, 线性调频信号的能量由信号带宽内能量平均 (频点能量累加后再除以带宽) 得到, 因此在频率上进行平均可有效减少高频内波引起的声场起伏。

3 数值仿真分析

内波与声起伏试验中同步完成了声起伏测量和内波观测, 为内波环境下声起伏规律及原因分析提供了同步环境信息。为了分析试验海域内波活动引起宽带信号和单频信号声起伏的差异性及试验中声传播距离、接收深度起伏对声起伏的影响, 本节利用内波测量数据构建发射和接收站位间的声速剖面时空分布, 使用抛物方程模型 RAM^[28], 仿真内波引起单频信号 (360 Hz) 和线性调频信号 (320~400 Hz) 的起伏。

声源深度在仿真中取固定值 55.2 m。试验海域的海底地声参数根据试验中拖曳测线地声反演结果给出, 其中沉积层厚度 9.9 m, 声速 1560.1 m/s, 密度 1.57 g/cm³; 基底层声速 1604.1 m/s, 基底层密度 1.70 g/cm³; 海底衰减 0.036 dB/m。

3.1 声源与接收阵位置变化对声起伏的影响

声源与接收阵间距离和接收阵的深度在声起伏试验期间有明显的变化, 仿真分析这些因素对声能量起伏的具体影响。为排除内波引起的声速剖面变化对声起伏的影响, 仿真中声速剖面取试验持续时间内重构结果的平均值 (图 13)。

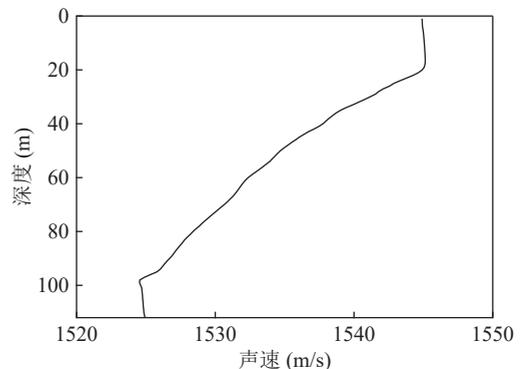


图 13 试验期间接收站位的平均声速剖面

3.1.1 声源位置变化对声能量起伏的影响

声起伏试验期间垂直接收阵通过水泥块固定, 声源缓慢向垂直阵方向移动, 整体移动距离小于

300 m (图 2)。图 14(a) 给出了接收距离为 19.88~20.18 km 时, 32 元阵的接收能量随距离的变化, 各阵元深度为试验期间的平均值。32 元阵的第 13~17 通道能量起伏大于 5 dB (红色曲线), 对应深度 41~47 m, 其中第 15 通道的起伏最大, 约为 26 dB; 其他 27 通道的能量起伏均在 5 dB 以内。图 14(b) 为 32 元阵接收能量随时间变化的仿真结果, 红色曲线为第 13~17 通道的能量起伏。对比图 14(b) 与图 2, 各深度的接收声能量均随距离变化而变化, 且不同接收深度的声能量呈现不同的变化趋势, 其中蓝色曲线 (第 21~32 通道, 对应深度 52~65 m) 能量随距离减小而增加, 其他通道能量随距离减小而减少。大部分深度 (图 14(b) 黑色曲线和蓝色曲线) 变化幅度在 5 dB 以内。

使用相同仿真参数, 通过简正波模型 KRAKEN^[29] 计算共得到 9 阶简正波模态, 相邻模态间干涉距离约为 1.6~2.1 km。在声速剖面不变时, 声传播距离仅变化 300 m 即可造成声能量的明显起伏。

3.1.2 接收阵深度变化对声能量起伏的影响

利用实测的 32 元接收阵深度起伏 (图 15(a)), 在仿真结果中读取各时刻对应深度的传播损失数据, 得到 32 元垂直阵 360 Hz 单频信号传播损失变化曲线 (图 15(b))。图中可明显看到接收深度周期变化对声能量起伏的影响, 在收发距离变化的基础上, 接收

深度变化引起的单频信号能量变化可以达到 7 dB。由于试验期间阵元深度起伏主要为潮周期的起伏, 快速起伏的幅度较小, 这种深度起伏所引起的传播损失变化也以数小时量级的变化为主。

3.2 声速剖面变化对声起伏的影响

利用温度链测量数据模拟试验中的声速剖面分布。考虑两条温度链的测量时间不同, 这里选择测量时间更长的接收站位温度链数据, 构建不同时刻声传播路径上的声速剖面分布, 即将温度链测量的温度剖面随时间变化数据乘以内波速度, 得到声传播路径上的温度剖面分布。测线上的内波传播速度取第 2 节的估计值 0.97 m/s。各时刻声场仿真中, 接收站位处的温度剖面为该时刻温度链实测结果。温度链未覆盖深度按照等温层补全。利用 Medwin 声速经验公式^[30] 将温度剖面转化为声速剖面, 盐度数据使用 CTD 实测结果。为获取内波引起的声速剖面时空分布变化对声能量起伏影响, 本节仿真中不考虑声源位置及接收阵深度的变化, 声传播距离及各阵元深度均取试验期间的平均值。

图 16(a) 为仿真第 1 通道 320~400 Hz 线性调频信号与 360 Hz 单频信号能量起伏曲线。与图 11(a) 相比, 线性调频信号和单频信号有相似的声能量起伏: 线性调频信号的能量峰峰值约为 10 dB, 单频信

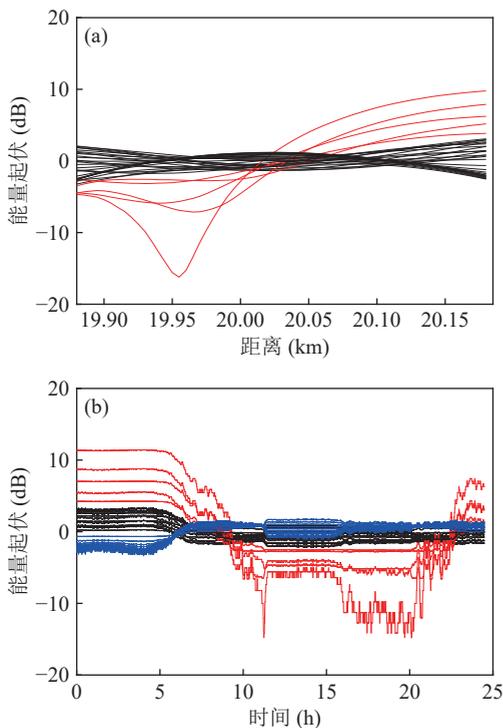


图 14 32 元垂直阵 360 Hz 单频信号传播损失变化仿真结果 (a) 随接收距离变化; (b) 随时间变化

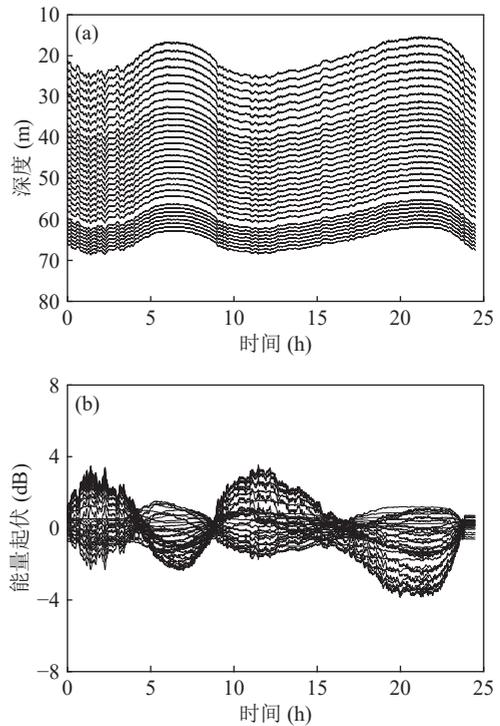


图 15 32 元接收阵深度起伏及其引起的单频信号传播损失变化 (a) 阵元深度随时间的变化; (b) 360 Hz 单频信号传播损失变化仿真结果

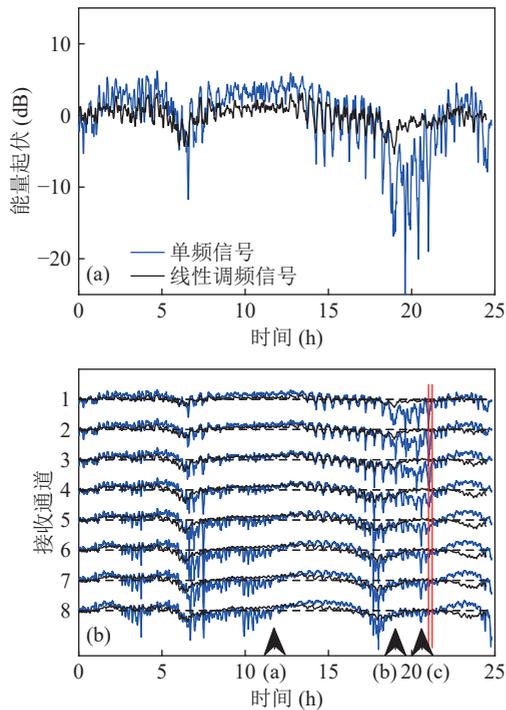


图 16 能量起伏曲线仿真结果 (a) 第 1 通道; (b) 前 8 通道

号能量起伏峰峰值超过了 20 dB, 在 20 h 附近两种信号对应的值存在明显差异。图 16(b) 给出了数值仿真实接收阵前 8 通道的线性调频信号和单频信号的能量起伏。对比图 16(b) 和图 12, 仿真的定点声起伏曲线与实测起伏曲线具有相似的起伏幅度、起伏成分等特征, 数值仿真重现了单频信号在某些时段的大幅度快速起伏 (接收信号能量异常减小), 且线性调频信号的起伏幅度明显减小, 说明采用的声起伏数值仿真方法具有一定的有效性和可信度, 为分析内波引起的声起伏试验现象提供了可能。图 17 为图 16(b) 中箭头标注三个时刻 (12.5 h, 21 h, 23 h 处) 的声速剖面对比, 分别对应没有明显的快速起伏、有大幅度快速起伏和有小幅度快速起伏的情况。不同时刻, 潮周期内波等内波成分使上等温层厚度存在差异, 高频和非线性内波成分均分布在声传播路径上。仿真中单频信号快速强起伏出现的时刻与试验结果中快速强起伏出现的时刻并不完全一致, 这是由于温度链未完全覆盖到等温层、内波在传播过程中有畸变以及不同内波成分的传播速度存在差异, 导致声速剖面仿真结果与实际情况存在一定误差。

浅海环境低频单频声场存在较为明显的 (垂直深度 - 水平距离) 干涉结构, 即声能量增强的亮区和声能量减小的暗区, 且声场干涉结构受声速剖面影响较大^[31]。下面通过仿真内波引起单频声场干涉结构的变化, 分析单频接收信号在某些时刻出现能量

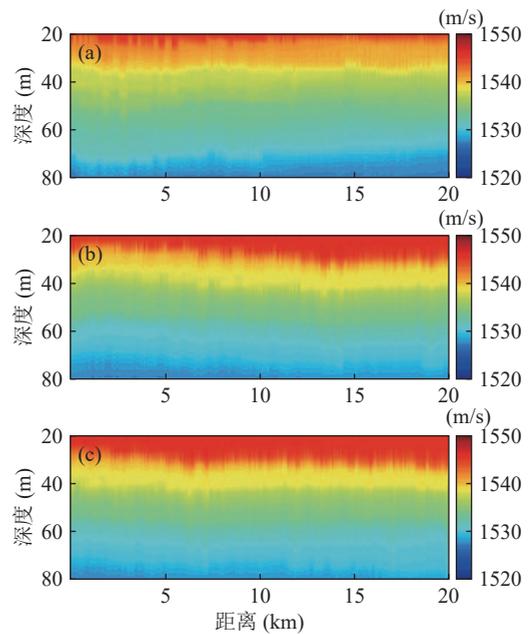


图 17 声传播路径上的声速剖面分布 (a) 12.5 h; (b) 21 h; (c) 23 h

大幅度快速起伏的原因。图 18 是频率为 360 Hz 时, 第 21 小时和第 21.2 小时的声场分布仿真结果, 以及 18.00~20.03 km 距离范围的局部放大图, 对应时间点图 16(b) 中用红色竖线标出。图 18 中黑色虚线表示 32 元垂直接收阵的深度范围, 其中前 8 通道的深度覆盖范围约为 19.8~33.4 m。两时刻的声场在距离 - 深度切面上的能量分布非常相似, 仅模态间干涉条纹有百米级的移动和变化, 这种变化在主导筒正波模态较少的上方通道更为明显。内波引起干涉条纹的移动和变化使两时刻 (间隔 0.2 h) 接收位置 (红色圆圈) 分别处于亮区和暗区, 导致声传播损失变化约 10~20 dB。与 3.1.1 节仿真结果对比, 声速剖面变化导致的声能量变化与声传播距离百米级变化引起的能量起伏等在机理上具有相似性, 均由于不同时刻某一固定接收通道处的干涉条纹发生明暗变化, 从而导致声能量起伏。试验中的声能量起伏应为声速剖面引起的干涉条纹移动、变化和声传播距离等改变引起接收距离与深度处干涉条纹明暗变化共同作用的结果。

当声场频率改变时, 干涉结构也有所不同。图 19(a) 为 365 Hz 和 360 Hz 单频信号能量起伏曲线对比, 两曲线整体趋势和起伏成分相似, 360 Hz 的能量起伏曲线在 3~4 h 以及 10 h 附近有大幅度的快速起伏, 这可能与环境中特定起伏频率的内波成分有关; 两组曲线在 7 h 和 18 h 附近都存在大幅度快速起伏, 但起伏并不同步。图 19(b) 为频率取 365 Hz 和 360 Hz 时, 21.2 h 的声场分布仿真结果对比, 365 Hz

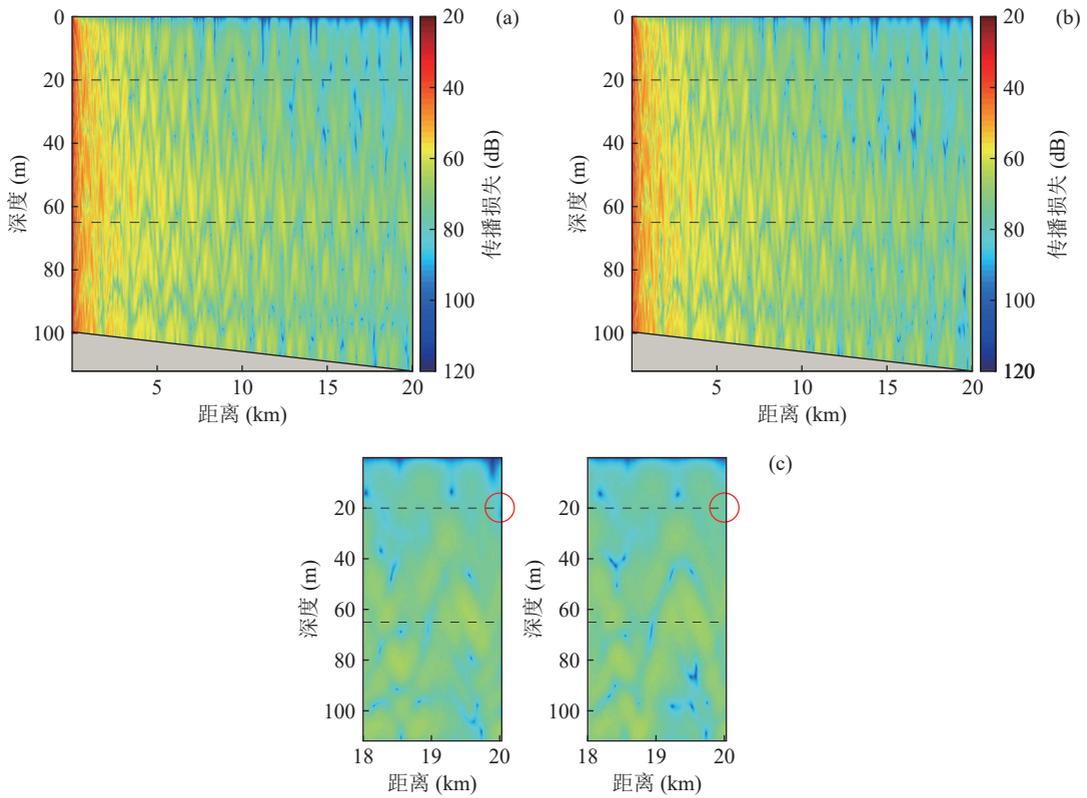


图 18 不同时刻 360 Hz 声场分布仿真结果 (a) 21.0 h; (b) 21.2 h; (c) 局部放大图

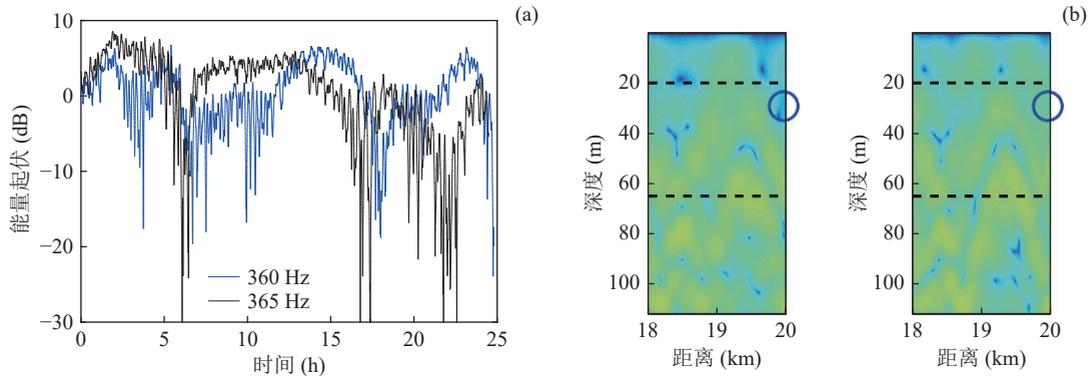


图 19 365 Hz 和 360 Hz 声场仿真结果 (a) 第 8 通道能量起伏曲线; (b) 声场分布

频率下接收距离处部分深度为暗区, 与 360 Hz 时的仿真结果相反 (蓝色圆圈)。对宽带信号而言, 带宽内的平滑效应会减弱该现象。

仿真分析说明, 受不同时刻声传播路径上声速剖面变化的影响, 单频信号在声场深度 - 距离切面上的干涉条纹会发生移动和变化, 导致接收位置处声能量出现时间上的大幅度快速起伏; 对于宽带信号, 由于带宽内的平滑效应, 声场干涉结构会变得较为模糊, 使宽带接收信号不会出现明显的快速剧烈起伏。

3.3 内波传播速度对声场起伏的影响

内波的传播速度不同, 在声传播路径上, 内波引

起声速剖面的空间分布也会出现变化。因此内波传播速度取不同值时, 接收声场起伏也会随之发生变化。图 20(a) 为测线上内波传播速度分别为 0.9 m/s 和 1.1 m/s 时, 360 Hz 单频信号能量起伏曲线的对比。内波传播速度变大时, 单频信号能量起伏曲线的趋势没有发生根本性变化 (如第 12 小时到第 17 小时的缓慢变化), 但某些时刻大幅度的快速起伏现象更为剧烈, 且该现象发生的时刻也有所不同。内波传播速度增加 0.2 m/s 后, 这种信号能量大幅度快速起伏出现的时刻有提前的趋势, 大约提前 0.5 h。当内波速度为 0.9 m/s 时, 1 列内波由接收站位传播到发射站位需 6.2 h; 当内波速度为 1.1 m/s 时, 则只需要 5.1 h, 两者相差约 1.1 h, 这一时间间隔约为单频

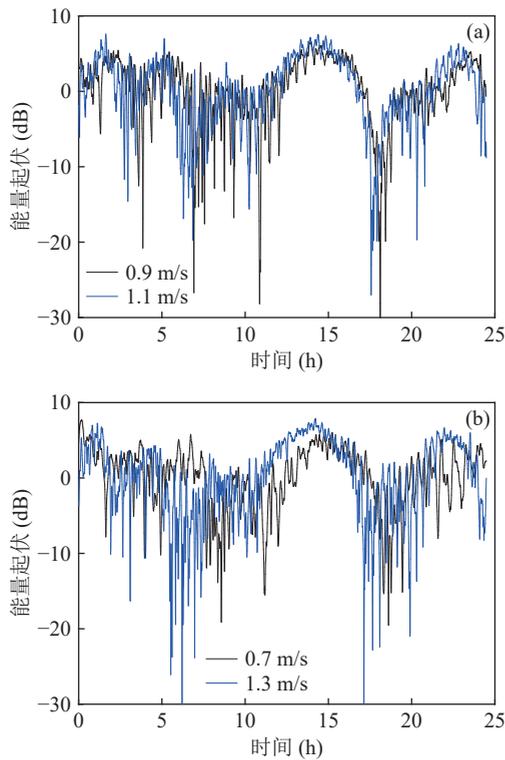


图 20 不同内波传播速度下的 360 Hz 声能量起伏曲线
(a) 0.9 m/s, 1.1 m/s; (b) 0.7 m/s, 1.3 m/s

信号快速起伏提前量的 2 倍。

图 20(b) 为仿真内波传播速度为分别为 0.7 m/s 和 1.3 m/s 时, 360 Hz 单频信号能量起伏曲线的对比。当内波传播速度增加 0.6 m/s, 内波由接收站位传播到发射站位的时间会缩短 3.7 h; 由图 20(b) 可知, 单频信号出现大幅度快起伏的时刻也提前了约 1.5~1.9 h, 近似为内波传播时间缩短量的 1/2。此外, 从图 20 可知, 当内波传播速度增加时, 单频信号能量起伏曲线中的大幅度快起伏成分有增多的趋势。进一步仿真表明, 内波传播速度为 0.3~1.5 m/s 时, 该现象普遍存在: 当内波传播速度增加时, 单频接收信号剧烈的快起伏现象有增加的趋势, 并且该现象出现的时间会有所提前。

4 结论

2020 年 6 月海南岛沿岸内波与定点声起伏试验数据分析表明, 试验海域内波活动剧烈, 引起了显著的声起伏效应。结合数值仿真分析, 总结如下:

(1) 内波引起等温线波动的调和分析表明, 试验海域内波成分复杂, 以大幅度全日潮周期内波为主, 在全日潮内波振幅之上叠加有高频及非线性成分的内波, 最大波动幅度约 3~4 m。

(2) 试验海域内波活动引起 360 Hz 单频信号

20 km 定点声起伏的峰峰值达 30 dB, 320~400 Hz 线性调频信号起伏峰峰值达 15 dB。两种信号的起伏曲线在变化趋势上较为相似, 但某些时间段差异明显, 其中单频信号在某些时刻出现非常剧烈的快速起伏。

(3) 通过构建内波环境下声速剖面时空分布, 对观测到的声能量起伏现象进行数值仿真, 发现内波活动等引起单频声场深度-距离平面干涉条纹的移动和变化, 使单频信号的能量起伏曲线在某些时刻呈现大幅度快速起伏特征, 且快速起伏发生的时刻随声信号频率及测线上内波传播速度变化。

参 考 文 献

- Zhou J X, Zhang X Z, Rogers P H. Resonant interaction of sound with internal solitons in the coastal zone. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1991; **90**(4): 2042-2054
- Preisig J C, Duda T F. Coupled acoustic mode propagation through continental-shelf internal solitary waves. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1997; **22**(2): 256-269
- Zhou J X, Zhang X Z, Rogers P H. Model characteristics of acoustic signal fluctuations induced by shallow water internal waves. MTS/IEEE OCEANS Conference, IEEE, Fort Lauderdale, Florida, USA, 1996
- 胡涛, 宋文华. 海洋内波对水下声场的影响. *物理*, 2014; **43**(10): 667-672
- Apel J R, Badiy M, Chiu C S, *et al.* An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1997; **22**(3): 465-500
- Headrick R H, Lynch J F, Kemp J N, *et al.* Acoustic normal mode fluctuation statistics in the 1995 SWARM internal wave scattering experiment. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000; **107**(1): 201-220
- Headrick R H, Lynch J F, Kemp J N, *et al.* Modeling mode arrivals in the 1995 SWARM experiment acoustic transmissions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000; **107**(1): 221-236
- Badiy M, Katsnelson B G, Lynch J F, *et al.* Frequency dependence and intensity fluctuations due to shallow water internal waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007; **122**(2): 747-760
- Badiy M, Katsnelson B G, Lynch J F, *et al.* Measurement and modeling of three-dimensional sound intensity variations due to shallow-water internal waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2005; **117**(2): 613-625
- Katsnelson B G, Grigorev V A, Lynch J F. Variability of phase and amplitude fronts due to horizontal refraction in shallow water. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2018; **143**(1): 193-201
- Dossot G A, Smith K B, Badiy M, *et al.* Underwater acoustic energy fluctuations during strong internal wave activity using a three-dimensional parabolic equation model. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2019; **146**(3): 1875-1887
- Chiu C S, Ramp S R, Miller C W, *et al.* Acoustic intensity fluctuations induced by South China Sea internal tides and solitons. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2004; **29**(4): 1249-1263
- Duda T F, Lynch J F, Irish J D, *et al.* Internal tide and nonlinear internal wave behavior at the continental slope in the Northern South China Sea. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2004; **29**(4): 1105-1130

- 14 Duda T F, Lynch J F, Newhall A E, *et al.* Fluctuation of 400-Hz sound intensity in the 2001 ASIAEX South China Sea experiment. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2004; **29**(4): 1264–1279
- 15 陈守虎, 吴立新, 张仁和, 等. 南中国海内波特征及其引起的声场起伏. *自然科学进展*, 2004; **14**(10): 1163–1170
- 16 王少强, 吴立新, 王慧文, 等. 2001 南中国海试验温度场与声传播起伏及内潮(波)特征反演. *自然科学进展*, 2004; **14**(6): 635–640
- 17 刘进忠, 王宁, 高大治. 浅海内波及声场起伏数值研究. *中国海洋大学学报*, 2005; **35**(2): 317–324
- 18 Katsnelson B G, Ren Y. Sound intensity fluctuations due to mode coupling on moving internal waves. *IEEE/OES China Ocean Acoustics Symposium*, IEEE, Harbin, China, 2016
- 19 高大治, 刘进忠, 王宁, 等. 声简正波传播时延起伏特征: AEY-FI05 试验. *声学学报*, 2008; **33**(3): 212–219
- 20 王宁, 张海青, 高大治, 等. 2005 黄海声学试验-声传播起伏. *中国海洋大学学报*, 2009; **39**(5): 1029–1036
- 21 王宁, 张海青, 王好忠, 等. 内波、潮导致的声简正波幅度起伏及其深度分布. *声学学报*, 2010; **35**(1): 38–44
- 22 Pawlowicza R, Beardsleyb B, Lentzb S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput. Geosci.*, 2002; **28**(8): 929–937
- 23 郭圣明, 胡涛. 黄海内潮特征及对声传播的影响分析. *哈尔滨工程大学学报*, 2010; **31**(7): 967–974
- 24 秦继兴, Katsnelson B G, 李整林, 等. 浅海中孤立子内波引起的声能量起伏. *声学学报*, 2016; **41**(2): 145–153
- 25 季桂花, 何利, 张振洲, 等. 南海北部浅海声场起伏及统计特性. *声学学报*, 2021; **46**(6): 1132–1143
- 26 胡平, 彭朝晖, 李整林. 南海北部海域内波环境下声传播损失起伏统计特性. *声学学报*, 2022; **47**(1): 1–15
- 27 张青青, 李整林, 秦继兴. 南中国海海域存在孤立子内波条件下的声场统计特性. *应用声学*, 2020; **39**(6): 821–830
- 28 Collins M D. A split-step Pade solution for the parabolic equation method. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1993; **93**(4): 1736–1742
- 29 Porter M B. The KRAKEN normal mode program. Washington DC: Naval Research Laboratory, 1992
- 30 Medwin H. Speed of sound in water: a simple equation for realistic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975; **58**(6): 1318–1319
- 31 Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, *et al.* *Computational ocean acoustics*. 2nd ed. New York: Springer, 2011: 28–32