



深海声学研究进展

李整林^{1*}, 余炎欣^{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 100049

* 联系人, E-mail: lzhl@mail.ioa.ac.cn

2021-07-01 收稿, 2021-07-30 修回, 2021-08-06 接受, 2021-08-09 网络版发表

国家自然科学基金(11874016)资助

摘要 水声基础研究的目的是揭示声波在复杂海洋环境下的传播现象及物理机理, 这是水声高科技装备研发与应用的基础。从深海声学规律认识及声呐应用需求出发, 首先综述国外深海声学理论与实验研究进展, 并简单回顾了我国水声学基础研究发展历程。过去, 我国在浅海声学研究方面成果显著。1997和2012年, 在第一届及第三届国际浅海声学会议上, 有学者对我国浅海声学研究给予了总结。近年来, 随着我国海洋战略的发展, 水声研究也逐渐走向深远海。在国家“全球变化与海气相互作用”专项和国家自然科学基金的支持下, 我国在深海声学研究方面取得了一些较为系统的进展。本文从深海声学实验技术、复杂地形下声传播特性、声场空间相关特性、环境噪声特性、混响规律、海底参数反演及水下声源定位等方面分别综述。最后梳理了深海声学应用基础研究的重点方向, 为我国未来的深海声学研究提供参考。

关键词 深海声学, 声场相关, 环境噪声, 海底反演, 声源定位

海洋占地球总面积的71%, 平均海深为3795 m。海底地形及水体水声环境的时空复杂多变, 会导致水下声场呈现随时空四维起伏变化。当人们利用声波进行目标探测、定位导航、环境测量以及信息传输时, 就必须对深海环境下声场特征规律进行系统研究, 这是现代海洋高技术的基础。

从水声实际应用角度, 声呐信号处理一般通过增加积分时间或增加声呐阵元数来获得时间或空间处理增益。但是, 深海声场空间相关特性与浅海不同。浅海中距离大于5倍左右海深后, 声波进入了柱面波扩展损失区, 传播损失相对较小, 声场空间相关长度通常可达数十个波长, 时间相关长度与中尺度起伏有关, 在夏季温跃层环境一般从几秒到上百秒不等。深海声场在空间上可划分为直达声区、声影区和会聚区。会聚区是由声波在水体中折射形成的低传播损失区, 其声场空

间相关长度较长, 有利于深海远程探测与远程信息传输。声影区声传播损失比会聚区大10~20 dB, 其声场相关性受海底反射影响, 比会聚区相关长度短, 所以对于水下弱目标来说基本上属于探测盲区。而在近海底附近2~5倍海深范围内的直达声区, 声场能量主要来自直达路径及海面反射路径叠加, 声传播损失相对较小, 声呐可工作在大深度, 利用这种声场特性实现目标探测。所以, 一些原本在浅海中性能不错的水声探测技术, 到深海环境中需要进行相应的改进, 比如被动声呐在深海中应用时多途引起的被动测向方位分裂、声影区内低信噪比目标定位、主动声呐在深海环境下受混响非平稳性影响等。

过去, 美国在大陆架浅海区重点关注海底底质、地形和海洋孤立子内波引起的声场三维水平折射效应和不确定性及其对声呐探测性能的影响, 主要有

引用格式: 李整林, 余炎欣. 深海声学研究进展. 科学通报, 2022, 67: 125–134

Li Z L, Yu Y X. Overview of deep water acoustics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 125–134, doi: 10.1360/TB-2021-0643

SWARM95^[1]、PRIMER^[2]、ASIAEX2001^[3]、SW06^[4]等。为了弄清复杂深海环境下的声学机理及其对声呐的影响,美国北太平洋实验室(The North Pacific Acoustic Laboratory)在大西洋和太平洋开展了大量的水声实验,典型的有SLICE89^[5]、NPAL98^[6]、ATOC^[7]、LOA-PEX04^[8]等。传播距离从数十公里至上万公里,重点开展超远程水声信息传输技术、海底山和中尺度涡旋等对声散射的影响。2009~2012年,美国在巴士海峡外的菲律宾海(PhilSea10)进行实验^[9],通过声学测量、卫星遥感、水下声学滑翔机以及其他手段获取观测数据,以实现海洋模式及同化方法应用,改善海盆尺度内海水声速场预测性能及声场预测能力。重点关注复杂深海环境下的声场空时相干性、统计特性、声影区声传播机理和环境噪声场特性等科学问题^[10-13]。2016~2017年,美国在北极开展了为期一年的极地声学实验CANAPE,主要从年尺度范围研究不同冰层覆盖范围下北极声传播、冰下噪声统计特性及北极环流对水文和声场影响^[14]。近年来,美国开始关注浅海软泥底对声传播影响,专门组织了一次针对海底反演的海上实验SBCEX2017^[15],通过直接测量和声学反演等手段获取软泥底声学参数,认为软泥底声速与海水声速比约为0.97~0.99,为高频声呐在软泥底环境下性能评估奠定基础。

我国海洋声学研究历经建国以后70多年的发展,形成了海洋声学基础理论、水声信号处理、声学实验设备、声呐装备等全链条的研究体系与技术队伍,保障了我国水声装备的发展与应用。我国海洋声学研究最早始于1958年,汪德昭先生带领一批北京大学大三学生在三亚南海研究站与苏联水声学家开展合作研究(史为“拔青苗”)。中国与苏联关系破裂后,受综合国力与实验条件限制,我国海洋声学研究重点局限在大陆架浅海区。1996年,中国与美国在黄海开展了第一次国际浅海实验。1997年,在北京举办了第一届国际浅海声学会议, Guan^[16]综述了我国从1958~1996年近38年的水声学研究进展。2001年,中国与美国在东海开展了亚洲海联合声学实验。在2012年的第三届国际海洋声学会议上, Zhang等人^[17]综述了声场声信息国家重点实验室(State Key Laboratory of Acoustics, SKLA)从1997~2012年间的浅海声学研究进展。

南海、西太平洋和印度洋等海域,是我国海上丝绸之路的重要战略空间,不仅有相对平坦的深海平原,还存在大陆斜坡、深海海沟、海底山、深海盆地等复

杂海底地形。受不同季节大洋环流影响,内波、中尺度涡旋、锋面和黑潮等动力学现象广泛存在,这些复杂海洋环境对水声装备应用具有重要影响。过去我国受大深度水声实验设备条件限制,在深海海洋声学及水下探测等方面研究相对较少。1990、1992和1995年,我国与俄罗斯科学家合作在西太平洋进行了3次水声考察^[18],1994年,我国在南海开展了水声考察实验等。张仁和等人^[19]建立了适用于深海的声场广义相积分简正波理论模型,并用于研究深海会聚区声场特性,及信道时空相关性变化规律和深海声场空间相关特性。

从2012年起,随着国家“全球变化与海气相互作用”专项的成功实施,学界获得了大量的深海实验机会,同时在中国自然科学基金等基础研究项目的支持下,我国在深海声学研究方面取得了不小的进步^[20]。SKLA作为国内从事海洋声学基础研究的一支重要力量,这里对SKLA近10年来在深海声学研究方面的主要进展予以综述,并对未来深海声学应用基础研究重点进行展望。

1 深海声学实验技术

水声学科本质上是一门实验科学,涉海相关的实验设备要求可靠性高。深海声学研究涉及两大核心设备:耐高静水压声学接收与发射设备。在“全球变化与海气相互作用”专项支持下,成功研制了分布式大深度水声信号记录系统。该系统突破12000 m耐高静水压水听器技术,打破国外对我国大深度水听器技术封锁。采用高精度时钟授时与守时技术,实现不同记录单元之间信号同步采集,使得自容式水听器可灵活组阵。采用低功耗技术提高自容式水听器工作时间,使我国具备大深度、大跨度、长时间水声信号的高可靠采集能力,能够在世界大洋任意深度上有效拾取声信号。分布式大深度水声信号记录系统曾用于在马里亚纳海沟10000 m深度上实现声学信号可靠采集,并在南海记录了1年以上海洋环境噪声信号等^[21]。2019年,在分布式大深度水声信号记录系统基础上集成了温深传感器,实现了声学信号与海洋水温环境的长期同步采集,并应用于水下滑翔机及水下无人航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)等无人平台水声信号的采集。在此基础上发展的深海声学接收潜标已成为我国海洋声学调查和实验的核心接收设备,被国内多家水声研究单位采购和应用,用于南海、西太平洋和东印度洋调查,获得了数万公里的深海远程声传播信号及海洋

环境噪声长时间连续观测信号, 极大推动了我国深海声学基础研究与应用基础研究的发展。

针对深海水声信号发射及信息传输需求, 研制成功深海自主式声学发射潜标, 突破了大深度低频发射换能器技术和高电声效率的大功率发射技术, 能在1000 m深度实现声源级185 dB@500 Hz信号的高可靠发射, 既可用于水下远程声信息传输, 也可与分布式大深度水声信号记录系统结合, 可用于内波和涡旋等中尺度现象海洋环境下声场起伏测量^[20]。

2 深海复杂海底地形下声传播特性

深海声传播特性是实现深海水下目标探测与识别、深海水声通信和导航定位等应用的基础。过去人们认为海底地形和底质等因素对深海声传播影响不大, 实际上在特定收发位置条件下, 深海海底地形对声传播有显著影响。在南海中南部深海及北部陆架区开展的海底山、海底斜坡、海沟、地形微小起伏等环境下二维和三维声传播实验, 获得了典型海底变化环境下的声传播特性, 观测到了不完全声道环境下, 海底地形引起的局部区域声场增强或减弱的物理现象, 并对物理机理给予了理论解释。

如果海底起伏地形的位置恰好位于声波第一次入射到深海海底处时的位置, 在地形隆起部分的前方和后方会出现地形反射导致的声强增强区或减弱区^[22]。李晟昊等人^[23]在国内首次观测到海底地形引起的三维声传播效应, 发现海底山水平折射效应会引起海山后的声影区宽度增加和传播损失增大10 dB, 利用射线理论对这种三维传播现象的物理机理给予了理论解释。而海沟地形环境下, 浅海的斜坡地形和负梯度水温环境共同作用, 会使声波在水体与海底形成的波导中向下折射与反射传播。当海深大于声道轴深度后, 声线就脱离海底开始在深海声道中来回折射向前传播。当遇到海岛等变浅地形后, 海底斜坡使可供声波传播的垂向空间变小, 使声波出现反射增强效应, 并在对应的距离上出现声波能量会聚^[24]。而在大陆架海区, 海底斜坡的地形与海底底质等因素综合的变化, 使不同方向的声传播水平各向异性明显, 传播损失变化最大可达30 dB以上^[25]。

SKLA研究团队分别在西太平洋、南海和东印度洋, 完成了超过1000 km的远程声传播与水声通信实验^[26]。对于深海声道, 海深与声速梯度均可影响声线在水体中反转传播的跨度, 使得相同海深环境下会聚区

位置出现差异。利用深海会聚区特性, 实现了千公里级超远程水声通信, 为水下平台远程信息传输与指挥控制奠定了基础。

3 深海大深度声场空间相关特性

深海声场空间相关特性对提高垂直阵列增益和声呐水下目标探测性能具有重要意义, 而声场空间相关长度是声呐设计与应用的一个关键物理量。利用拖曳声源连续发射信号结合深水接收潜标系统, 获得了不同深度和距离上的宽带声信号, 系统研究了深海直达声区、会聚区和声影区内的声场纵向相关特性。理论和实验结果表明, 在整个高声强区域内空间相关性较好, 相关系数几乎都大于0.7, 而高声强区声场与声影区内的声场相关较低, 声场空间相关系数随距离和深度变化结构与深海声传播损失结构相近^[27]。高声强区内的接收声信号主要是在水中折射传播的一组相位相近的简正波簇相互干涉, 形成相关性较好的1~2个主脉冲波包, 所以高声强区内的声场空间相关可覆盖整个会聚区, 乃至跨不同会聚区至上百公里。声影区内声场由海底反射类简正波组成, 其声场纵向相关长度小于1 km, 其声场空频相关特性与浅海环境类似。声影区内的声场纵向相关呈现振荡现象, 而海底地形起伏引起的声波反射效应, 会破坏声场的周期相位, 使周期振荡现象消除^[28]。当接收器位于直达声区内, 其能量主要来自直达路径和海面反射路径, 对于近海面声源, 近场整体相关性较好。而对水下声源, 两条路径干涉使近程声场纵向相关出现振荡现象, 对大规模阵列处理增益获取存在不利影响。当接收器在近海底时, 离声源距离越远, 直达声和海面反射声两个路径的声程差越小, 声场振荡周期越大, 当距离到达声线开始从海底附近的水体中向上折射时, 声场的相关长度达到最长^[29]。

针对深海大孔径探测潜标阵列应用需求, 李整林等人^[30]分析了深海直达区、影区和会聚区等不同距离下的大深度声场垂直相关特性, 并使用射线理论解释了深海垂直相关随空间变化机理, 给出了深海垂直相关简明理论公式。在直达声区内, 声场垂直相关半径几乎可以覆盖整个水深, 且随深度增加, 直达声和海面反射声到达时间差增加, 相关略有下降。在声影区内, 声场能量主要来源为经一次海底反射和一到两次海面反射的声线, 垂直相关整体偏低。第一会聚区内垂直相关系数随接收深度的增加而周期性振荡, 并且与声能量在深度上的分布具有相似结构, 这是高声强区域两组

反转声线在垂直方向上周期性干涉的结果。在不平海底方向由于海底斜坡对反转声线的反射阻挡效应,接收信号多途干涉结构相比平坦海底更加复杂,降低了声场的垂直相关性^[31]。

声场空频干涉结构对水下目标探测具有重要意义。基于声场空频干涉结构的频移补偿方法,曾被用于弱目标信号增强^[32]。而深海中,声场空间频率干涉结构会随直达声区、声影区和会聚区而不同^[33]。这是由于波导不变量在深海会聚区趋向无穷,而在声影区约等于1。会聚区声场主要由水体折射类简正波组成,相位相近导致干涉结构近似垂直。声影区能量来自海底反射类简正波,声场空频干涉特征与浅海相似,可用于声影区信号增强。

4 深海声目标定位方法

随着我国战略走向深远海,发展深海水下探测技术日趋紧迫。在4000 m以上的深海中,靠近海底附近直达声范围可达30 km。针对深海大深度声场特性及其应用研究,SKLA研究团队在西太平洋完全声道、南海和印度洋不完全声道环境下,将分布式大深度水声信号记录系统布放于近海底附近,获得了大深度声传播特性。王梦圆等人^[34]提出基于深海多途到达结构的直达声定位方法,通过双水听器接收信号互相关函数和单水听器信号自相关函数实现对水下声源的距离和深度联合估计方法。首先,假设声源深度位于一定范围内,根据双水听器互相关函数提取直达波到达时间差估计水下声源距离。然后,根据距离估计结果以及单水听器自相关函数提取的直达波与海面反射波时延差估计水下声源深度。最后,估计声源深度结果,与双水听器互相关函数结合,得到更为精确的距离估计结果。结果表明,估计的水平距离相对误差在10.5%以内,声源深度相对误差小于13.3%。利用高信噪比条件下深海实验数据验证方法有效性,为UUV水声探测系统及岸基声呐在深海应用奠定了技术基础。

在深海中,时域上的多途到达结构,经过频谱分析后可获得稳定的声场距离-频率干涉特征。Liu等人^[35]利用这种声场距离-频率干涉结构,提出一种基于集成卷积神经网络的深海直达声区声源测距方法。他们尝试把机器学习算法引入深海声源被动定位,采用声传播模型计算声场作为训练数据,建立了基于集成卷积神经网络的深海直达声区声源测距方法,并利用南海深海实验数据验证了方法的有效性。研究表明,采用模型

数据训练的神经网络可有效实现声源被动定位,对直达声区30 km范围内的目标测距误差为1.0 km,平均相对测距误差为7.9%。该方法只需要利用单个接收器即可实现对水面目标的有效探测,具有重要应用前景。

矢量水听器由于能同时接收声场中的声压信号和质点振速信号而备受关注。在浅海环境下,矢量水听器广泛应用于目标方位估计、水下声源定位等领域。而在深海中,近海面声源发出的信号到达大深度矢量水听器后能获取更多的目标信息。孙梅等人^[36]结合矢量水听器在目标方位估计方面的优势及深海直达波区域声线传播的特点,提出了一种利用大深度矢量水听器接收的直达波信号对近水面声源进行定位的方法。通过

$$V_y \text{ 方向强度与 } V_x \text{ 方向强度之比 } \theta_I(r, z) = \arctan \frac{I_y(x, y, z)}{I_x(x, y, z)},$$

求取目标声源在水平方向上相对于矢量水听器x轴方向的角度,可以实现对目标声源方位进行估计。通过 V_z 方向强度与 V_r 方向强度之比求取声能流密度与水平方向的夹角,即 $\varphi_I(r, z) = \arctan \frac{I_z(r, z)}{I_r(r, z)}$,获得声线到达接收点的掠射角。而深海环境下声波到达角与目标距离具有单调对应关系,可实现基于单矢量水听器深海直达声区目标测距。

实验观测到影区内声场空间频率干涉结构,依据射线声学理论,海底反射声区声场强度在频率域呈现周期性,频率间隔随距离增加而增大,且频域间隔对应多途时延差的倒数,因此可以利用多途时延差与距离的对应关系来估计声源距离。吴俊楠等人^[37]提出基于多途时延差形成的声场空频干涉结构实现近海面声源定位的方法,利用南海深海实验舰船辐射噪声信号,实现了深海声影区内水面目标测距,测距误差在10%以内。该测距技术实现了从声直达区到声影区的突破,为拖曳阵声呐走向深海应用奠定了技术基础。

5 起伏海洋环境声场统计特性

海洋内波和中尺度涡旋对声传播具有重要影响,SKLA研究团队分析了存在水体内波、中尺度涡旋、海面波浪及海底粗糙等典型时空变化海洋环境下声场起伏特性及其变化规律。将内波条件下的声速场重构模型与声场模型结合,利用南海实验数据,通过蒙特卡罗方法,分析存在孤立子内波条件下的声场能量起伏规律,获得了线性内波条件下的传播损失统计特性^[37~39]。从理论上揭示了孤立子引起声场起伏机

理^[40,41],给出声场起伏的耦合简正波表达式,指出孤立子对耦合模态相位的调制使声强随时间呈现周期振荡。当孤立子内波的波阵面与声传播路径所成角度较大时,简正波耦合是导致声信号起伏的主要因素。浅海中孤立子内波引起的声能量随时间变化呈准周期性。在频谱图中能够得到声强起伏的主导频率,主导频率与孤立子内波沿声传播路径的移动速度成正比,与无扰动波导中简正波在距离上的干涉周期(对应于射线理论中临界声线的跨度)成反比。也就是说,起伏周期由内波传播速度和声线跨度共同决定,即 $T=D/V$,与孤立子内波的形状无关^[42]。

深海声波在远距离传播时,收发路径上一般会遇到中尺度涡旋等海洋动力过程。为了弄清中尺度涡旋活动引起的水体起伏对远程声传播和水声通信的影响,Xiao等人^[43]利用遥感数据与全球再分析数据,结合涡旋探测和追踪方法分析南海北部中尺度涡旋的参数特征和分布情况,对涡旋中心位置、大小、极性、强度、移动速度及生命期等特征进行统计。分析了南海和墨西哥湾区中尺度涡旋对声场的传播损失、脉冲传播时间、到达角度影响效应,并基于简正波和射线理论对中尺度涡引起声场时空变化机理进行了解释。同时,总结了中尺度涡旋从生成到消亡整个过程引起的声传播能量起伏及到达时间起伏。涡旋会使部分近海面声线轨迹反转深度加深,使通常舰艇声呐所在深度上接收水声通信信号变弱,同时使每个跨度中走过的传播路径变小,脉冲声传播时间变小,进而影响基于水声通信的导航精度。

海面作为海洋波导上边界,波浪导致的海面起伏及气泡散射使声波相位和能量都发生起伏。Liu和Li^[44]提出了海面存在波浪起伏及气泡散射层的随机实现模型,并与二维声场并行计算模型集成,实现了不同风速下声场统计特性快速分析,系统研究了不同风浪条件下起伏海面和存在气泡散射下传播损失的平均值、变化范围、统计特性及其影响因素。研究表明,海面的两种随机变化:起伏海面和海面下气泡层,都会导致声场相位和能量在一定范围内随机起伏。起伏海面引起声场随机变化更明显,而气泡层引起的能量衰减更大。所以,在恶劣海况下,应同时考虑起伏海面和气泡层对低频声传播的影响,强风条件下气泡层引起的散射衰减更大。他们利用射线理论揭示了跃层环境中导致不同声源位置的传播损失统计特性差异的机理。在跃层环境中,温跃层上发射及温跃层下接收时的散射衰减随

海面起伏增加而急剧增大,而当声源和接收器都在跃层下时的声传播损失几乎不受起伏海面影响。声线在海水中发生折射,经起伏海面散射后,向下传播的声线在经过负跃层时,其折射角增加,导致海底反射损失进一步增加。因此,相对于等声速环境,负跃层环境声源和接收器分别处在温跃层上下时,起伏海面的影响更显著。

海底的随机起伏或粗糙度等特性在江河口冲积海域区比较多见。刘代等人^[45]分析了海底粗糙环境下的声场统计特性,从理论上揭示了海底粗糙的起伏高度和粗糙相关长度变化时对声传播的影响机理。声线经海底反射后改变了原有的传播方向及其与海底的作用次数,使声波能量发生变化。当起伏周期一定时,起伏海底对声传播影响随起伏高度增大而增大;当起伏高度一定时,起伏海底对声传播的影响随起伏周期的增大而减小。海底周期起伏导致不同模态之间的耦合或不同角度声线能量转换,对某些特定频率的声波如同一个滤波器,会导致脉冲声结构发生变化,进而影响匹配场定位声呐的性能。

6 深海环境噪声特性及被动声学层析

海洋环境噪声是岸基声呐、拖曳阵声呐和水下潜标等水声探测系统的主要干扰背景,认识海洋环境噪声特性,对水声探测等应用具有重要意义。Jiang等人^[46]利用分布式大深度水声信号记录系统组成的声学接收潜标,对巴士海峡附近的西太平洋域和南海海域的海洋环境噪声进行了长时间连续记录。实验分析了风生海洋环境噪声场统计特性,修正了不同风速下噪声源的经验关系式,并在此基础上建立了适用于南海北部的风生噪声模型。模型可根据气象部门预报的风速和降雨率等参数实现海洋环境噪声频谱的快速、准确预报。在西太平洋完全声道环境下,如果接收器位于共轭深度以下接收,因为只有直达声路径范围的风生噪声源激发的声场可以到达接收器,噪声级比共轭深度以上低10~20 dB。同理,如果接收器位于大陆坡边缘,变深一侧的海面噪声源激发声场到达接收器时的传播损失增大,噪声谱级比水平不变浅海或深海环境下低。

此外,SKLA研究团队还获取了“杜苏芮”“苏力”“罗莎”“百合”“天兔”和“西马仑”等多次台风过顶、台风从潜标附近靠近及远离等情况下的海洋环境噪声资料。台风靠近时,环境噪声强度随海表面风速增加而增加。

随着台风远离, 潜标附近海表面风速减小, 噪声强度随之下降, 台风可使500~3000 Hz范围海洋环境噪声增大20 dB以上. 李风华等人^[47]利用Holland台风风速模型, 结合风成噪声源模型, 建立了适用于台风过程下的海洋环境噪声预报模型, 获得了噪声强度谱级与风速的3次方成正比、随频率为 -0.85 的经验关系. 所提出的噪声模型可预报随台风眼距离、台风中心风速和频率的噪声强度, 很好地解释了台风强度随时间变化的“双峰”及“单峰”结构, 为我国极端天气灾害预警奠定了技术基础.

过去缺乏观测技术手段, 我国对地震和台风等引起的甚低频海洋环境噪声研究较少. 徐东等人^[48]根据南海长期噪声观测数据, 对于频率在几十赫兹以下的甚低频环境噪声, 建立了海面波浪谱与水下环境噪声谱的理论关系, 分析了海面波浪谱对水下环境噪声强度的影响, 解释了100 Hz以下低频噪声谱倒“N”特征. 他们量化了噪声强度与频率、风速的关系, 基于射线理论和气泡振动理论建立了甚低频风成噪声模型.

Li等人^[49]利用海洋环境噪声长时间互相关处理可提取两接收点之间等效的格林函数的特性, 提出了从海底水平阵记录的海洋环境噪声中快速提取信道传输函数的方法. 利用阵列信号处理中奇异值分解的特点, 选取合适的特征值重构互相关矩阵, 以抑制非端射方向的离散干扰噪声, 大幅提高了格林函数的提取速度, 避免了单水听器提取格林函数时需要进行噪声长时间相关. 在此基础上提出基于多途到达结构的海底水平阵被动海洋声学声层析方法. 实验结果表明, 在3个月时间跨度内反演出的声速剖面均方根误差小于1 m/s. 该方法无需人工声源, 获取的声速剖面可满足水声探测系统的水文环境自主保障需求.

7 深海相干混响模型及其应用

随着水下平台减震降噪技术的发展, 水声探测技术向多基地主被动联合探测模式的方向发展. 李风华等人^[50]曾发展了浅海相干混响模型, 解释了特殊条件下的混响时间振荡现象. 深海中传播特性与浅海不同, 导致二者的混响特性也有明显区别. 根据多基地主被动声呐设计与研制需求, 利用分布式大深度水声信号记录系统, 在南海深海环境下获取了混响本地和异地混响实验数据, 包含近海底大接收深度的混响信号, 实验观察到了不同于浅海混响强度的深海混响衰减规律. 王龙昊等人^[51]在对多种收发距离和接收深度条件下的

混响实验数据深入分析的基础上, 提出了一种基于射线理论的深海相干混响模型. 该模型考虑深海环境传播路径丰富, 首先对海底散射体进行网格划分, 然后根据每个网格内散射体产生混响信号的准确时间进行混响计算, 比传统按圆环或椭圆环处理散射体的方式更加精确. 该模型能够很好地解释深海本地混响及异地混响强度衰减的非平稳变化规律, 并可很好地解释深海混响的产生过程. 同时, 他们验证了经典海底散射系数模型对于小掠射角海底散射更加准确, 可应用于深海大深度混响计算.

发展的相干混响模型, 可以实现混响时域信号模拟. 顾怡鸣^[52]结合声传播模型、目标回波模型和噪声模型, 开发了多基地主被动探测声呐目标模拟器, 实现多基地主被动联合探测阵列阵元域信号生成. 信号里包含水下目标回波、海底和海面混响信号及海洋环境噪声信号等信息, 可用于主被动探测声呐研制的波形设计与主动探测算法验证.

8 深海海底参数反演

海底声学参数是影响水下声传播的重要参数, 而且是各国海军数据库最不完善的一项. 过去, 对泥沙质海底声学参数反演工作研究得比较深入^[53]. Li和Zhang^[54]提出了基于等效海底模型的海底参数混合反演方法, 解决了反演多值性问题. 近年来, 软泥底沉积层声学反演是国际水声研究的热点^[15]. SKLA研究团队对软泥底及深海海底参数反演问题开展了研究. 李梦竹等人^[55]提出一种低声速海底参数反演方法, 解决了软泥底声速与层厚度之间的紧耦合问题, 并讨论了单层海底与双层海底模型典型条件下的等效性. 针对深海环境海底参数反演, 通过匹配近场声场干涉结构, 能够同时反演深海海底沉积层厚度与声速^[56]. 此外, 在分析不同距离声影区内声传播损失对深海海底声学参数敏感性基础上, Wu等人^[57]提出一种利用声影区范围内的传播损失结合Hamilton经验公式的联合反演方法, 反演出可应用于南海深海声场准确预报的海底声学参数, 为我国深海声场规律研究及声呐探测性能预报奠定了重要基础. 值得注意的是, 海底声学参数反演最好选择在浅海环境下进行, 因为在深海环境下, 软泥底的声速与近海底海水声速非常接近, 测深仪给出海深在深海的误差较大, 容易将深海软泥底等效为一定厚度的水层, 使深海软泥底环境下反演出的等效声速并不见得小.

9 深海声学应用基础研究展望

水声学是一门以应用为主的学科,而水下弱目标的探测是一个世界性难题,舰艇声呐一般会面临4个共性问题:(1)目标源级低、声波衰减大及阵列规模有限,使得声呐“探得近”;(2)海面舰船多,对弱目标探测造成严重干扰,使声呐“分不清”;(3)复杂海洋环境对声场影响机理掌握不充分,使声呐“测不准”;(4)水声信道多途严重、容量有限,水下平台探测信息“传不出”。近些年,我国在深海声学规律认识方面取得了一些进展。但是,从水声探测技术发展趋势来看,仍存在诸多不足,需要更为系统地研究复杂海洋环境下声场变化规律,以提高声呐设计水平及其环境适应性。所以,在深海声学基础研究领域应重点关注以下5方面。

一是深入认识典型深海环境下声传播规律、噪声统计特性和混响规律。主要包括:深海及陆架区声传播规律及其空频干涉特性;典型海域声场水平相关、垂直相关和时间相关特性;不同海况及极端天气条件下海洋环境噪声统计特性及其空间相关特性;不同海况、海底及海洋生物条件下的海面、海底及体积混响规律;高纬度和两极海域的声传播、混响与噪声特性。这些研究是声呐设计与应用的基础。

二是研究复杂海洋环境对声场起伏及其声呐探测性能的影响。主要包括:复杂海底地形、海面起伏和水体中尺度现象等三维环境引起的声场起伏特性及水平折射现象;典型底质环境下声场特性及其声学参数反演方法;海洋温跃层、内波等中尺度现象与声学起伏

同步监测方法;环境聚焦水下目标宽容定位方法;全球海洋声场模型及其快速算法。这些研究可掌握声呐在不确知环境下探测性能下降的原因,并提出相应的解决策略。

三是发展环境适配水声信号处理方法。主要包括:适用于不同孔径的宽带高分辨率波束形成技术;自适应噪声抵消与干扰抑制技术;利用声场空频干涉特征实现弱信号增强方法;机器学习水下目标环境宽容定位方法与目标频谱特性识别技术。这些是提高时空处理增益或声呐作用距离的基础。

四是发展基于深海大深度声场特性的水声目标探测技术。主要包括:利用UUV等无人平台可以工作在大深度的特点,发展深海水声目标自主探测技术;发展利用深海潜标垂直阵列实现直达声区多目标探测与干扰抑制技术;发展无人平台与传统声呐相结合的深水多基地主被动协同探测技术与海底海面混响抵消技术;发展基于大深度滑翔机平台海洋环境参数与声场协同组网观测技术,以及多源数据融合的水声环境实时预报方法等,为提高深海目标探测与环境保障能力提供关键技术手段。

五是发展适用于关键海域的水声局域网技术,为无人探测平台提供信息链路。主要包括:复杂深海环境下的低、中、高频脉冲声传播特性及多途扩展;高速水声通信时、频、码分复用技术;水声局域网组网协议设计及干扰抵消。重点在于实现近、中、远程水下信息的稳定、可靠、无缝传输。

参考文献

- 1 Apel J R, Badiey M, Ching-Sang Chiu M, et al. An overview of the 1995 SWARM shallow-water internal wave acoustic scattering experiment. *IEEE J Ocean Eng*, 1997, 22: 465–500
- 2 Lynch J F, Newhall A E, Sperry B, et al. Spatial and temporal variations in acoustic propagation characteristics at the New England shelfbreak front. *IEEE J Ocean Eng*, 2003, 28: 129–150
- 3 Lynch J F, Ramp S R, Chiu C S, et al. Research highlights from the Asian Seas International Acoustics Experiment in the South China Sea. *IEEE J Ocean Eng*, 2004, 29: 1067–1074
- 4 Tang D, Moum J, Lynch J, et al. Shallow water '06: A joint acoustic propagation/nonlinear internal wave physics experiment. *Oceanography*, 2007, 20: 156–167
- 5 Colosi J A, Baggeroer A B, Birdsall T G, et al. A review of recent results on ocean acoustic wave propagation in random media: Basin scales. *IEEE J Ocean Eng*, 2013, 24: 138–155
- 6 Munk W. Acoustic thermometry of ocean climate (ATOC). *J Acoust Soc Am*, 1999, 105: 982
- 7 Dushaw B D, Howe B M, Mercer J A, et al. The North Pacific Acoustic Laboratory (NPAL) experiment. *J Acoust Soc Am*, 2000, 107: 2829–2830
- 8 Chandrayadula T K. Mode tomography using signals from the Long Range Ocean Acoustic Propagation EXperiment (LOAPEX). Doctor Dissertation. Virginia: George Mason University, 2009
- 9 Chandrayadula T K, Periyasamy S, Colosi J A, et al. Observations of low-frequency, long-range acoustic propagation in the Philippine Sea and

- comparisons with mode transport theory. *J Acoust Soc Am*, 2020, 147: 877–897
- 10 Vera M, Dzieciuch M. Horizontal coherence in the NPAL experiment. *J Acoust Soc Am*, 2004, 115: 2617
 - 11 Colosi J A, Baggeroer A B, Cornuelle B D, et al. Analysis of multipath acoustic field variability and coherence in the finale of broadband basin-scale transmissions in the North Pacific Ocean. *J Acoust Soc Am*, 2005, 117: 1538–1564
 - 12 Van Uffelen L J, Worcester P F, Dzieciuch M A, et al. Effects of upper ocean sound-speed structure on deep acoustic shadow-zone arrivals at 500- and 1000-km range. *J Acoust Soc Am*, 2010, 127: 2169–2181
 - 13 Curtis K R, Howe B M, Mercer J A. Low-frequency ambient sound in the North Pacific: Long time series observations. *J Acoust Soc Am*, 1999, 106: 3189–3200
 - 14 Worcester P F, Dzieciuch M A, Colosi J A, et al. The 2016–2017 deep-water Canada Basin Acoustic Propagation Experiment (CANAPE): An overview. *J Acoust Soc Am*, 2018, 144: 1665
 - 15 Wilson P S, Knobles D P, Neilsen T B. An overview of the seabed characterization experiment. *IEEE J Ocean Eng*, 2020, 45: 1–13
 - 16 Guan D H. Development of shallow water acoustic in China. In: Zhang R H, Zhou J X, eds. *Shallow-Water Acoustics*. Beijing: China Ocean Press, 1997. 23–28
 - 17 Zhang R H, Li Z L, Peng Z H, et al. Overview of shallow water acoustics in the State Key Laboratory of Acoustics. In: Zhou J X, Li Z L, Simmen J, eds. *Advances in Ocean Acoustics*. New York: American Institute of Physics, 2012. 16–35
 - 18 Zhang R, He Y, Liu H, et al. Applications of the WKBZ adiabatic mode approach to sound propagation in the Philippine Sea. *J Sound Vib*, 1995, 184: 439–451
 - 19 Zhang R H, He Y, Liu H. WKBZ mode approach to sound propagation in horizontally stratified oceans (in Chinese). *Acta Acust*, 1994, 19: 1–12 [张仁和, 何怡, 刘红. 水平不变海洋声道中的WKBZ简正波方法. *声学学报*, 1994, 19: 1–12]
 - 20 Li Z L, Yang Y X, Qin J X, et al. *Deep Sea Acoustics and Detection Technology* (in Chinese). Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2020 [李整林, 杨益新, 秦继兴, 等. *深海声学探测技术*. 上海: 上海科学技术出版社, 2020]
 - 21 Shi Y, Yang Y, Tian J, et al. Long-term ambient noise statistics in the northeast South China Sea. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145: EL501–EL507
 - 22 Zhang P, Li Z L, Wu L X, et al. Characteristics of convergence zone formed by bottom reflection in deep water (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 014301 [张鹏, 李整林, 吴立新, 等. 深海海底反射会聚区声传播特性. *物理学报*, 2019, 68: 014301]
 - 23 Li S H, Li Z L, Li W, et al. Horizontal refraction effects of seamounts on sound propagation in deep water (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2018, 67: 224302 [李晟昊, 李整林, 李文, 等. 深海海底山环境下声传播水平折射效应研究. *物理学报*, 2018, 67: 224302]
 - 24 Zhang Q Q, Li Z L, Qin J X, et al. The convergence effect of sound field in a canyon environment in the South China Sea (in Chinese). *Acta Acust*, 2020, 45: 458–465 [张青青, 李整林, 秦继兴, 等. 南海海域跨海沟环境的声场会聚特性. *声学学报*, 2020, 45: 458–465]
 - 25 Liu J, Peng Z, Li Z, et al. Measurement and modeling of sound propagation over continental slope in the South China Sea. *J Acoust Soc Am*, 2020, 147: EL209–EL214
 - 26 Wu L L, Peng Z H. Analysis of long-range transmission loss in the West Pacific Ocean. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 094302
 - 27 Li J, Li Z L, Ren Y, et al. Horizontal-longitudinal correlations of acoustic field in deep water. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 064303
 - 28 Hu Z G, Li Z L, Zhang R H, et al. The effects of the uneven bottom on horizontal longitudinal correlations of acoustic field in deep water (in Chinese). *Acta Acust*, 2016, 41: 758–767 [胡治国, 李整林, 张仁和, 等. 深海不平海底对声场水平纵向相关性的影响. *声学学报*, 2016, 41: 758–767]
 - 29 Wang M Y, Li Z L, Qin J X, et al. Horizontal-longitudinal correlations of sound field at large depth in the direct zone of deep water (in Chinese). *Acta Arma*, 2021, 42: 817–826 [王梦圆, 李整林, 秦继兴, 等. 深海直达声区中大深度声场水平纵向相关特性. *兵工学报*, 2021, 42: 817–826]
 - 30 Li Z L, Dong F C, Hu Z G, et al. Vertical correlations of sound field at large depths in deep water (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 134305 [李整林, 董凡辰, 胡治国, 等. 深海大深度声场垂直相关特性. *物理学报*, 2019, 68: 134305]
 - 31 Dong F C, Hu Z G, Li Z L. Effects of uneven bottom on vertical correlations of sound field in the deep water area of the South China Sea (in Chinese). *Acta Acust*, 2020, 45: 785–800 [董凡辰, 胡治国, 李整林. 南海深海典型不平整地形对声场垂直相关性的影响. *声学学报*, 2020, 45: 785–800]
 - 32 Zhang R H, Su X X, Li F H. Improvement of low-frequency acoustic spatial correlation by frequency-shift compensation. *Chin Phys Lett*, 2006, 23: 1838–1841
 - 33 Li Q Q, Li Z L, Zhang R H. Applications of waveguide invariant theory to the analysis of interference phenomena in deep water. *Chin Phys Lett*, 2011, 28: 034303
 - 34 Wang M Y, Li Z L, Qin J X, et al. Combined estimation of range and depth for underwater source in the direct zone in deep water (in Chinese). *J Sig Proc*, 2019, 35: 1535–1543 [王梦圆, 李整林, 秦继兴, 等. 深海直达声区水下声源距离深度联合估计. *信号处理*, 2019, 35: 1535–1543]
 - 35 Liu Y N, Niu H Q, Li Z L. Source ranging using ensemble convolutional networks in the direct zone of deep water. *Chin Phys Lett*, 2019, 36: 044302
 - 36 Sun M, Zhou S H, Li Z L. Analysis of sound propagation in the direct-arrival zone in deep water with a vector sensor and its application (in

- Chinese). *Acta Phys Sin*, 2016, 65: 094302 [孙梅, 周士弘, 李整林. 基于矢量水听器的深海直达波区域声传播特性及其应用. *物理学报*, 2016, 65: 094302]
- 37 Wu J N, Zhou S H, Zhang Y. Passive ranging of surface source using bottom bounced sound in deep water (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2016, 46: 094311 [吴俊楠, 周士弘, 张岩. 利用深海海底反射声场特征的水面声源被动测距. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46: 094311]
 - 38 Ren Y, Wu L X, Li Z L, et al. The signal temporal correlation length with the existence of solitons in the South China Sea (in Chinese). *Acta Acust*, 2010, 35: 515–522 [任云, 吴立新, 李整林, 等. 南中国海存在孤立子内波条件下的声场时间相关半径. *声学学报*, 2010, 35: 515–522]
 - 39 Ji G H, Li Z L. The coherence-time of matched-field processing with the presence of the linear internal waves in the South China Sea (in Chinese). *Acta Acust*, 2011, 36: 1–7 [季桂花, 李整林. 南海线性内波条件下的匹配场时间相关长度. *声学学报*, 2011, 36: 1–7]
 - 40 Qin J X, Katsnelson B, Li Z L, et al. Intensity fluctuations due to the motion of internal solitons in shallow water (in Chinese). *Acta Acust*, 2016, 41: 145–153 [秦继兴, Katsnelson B, 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: 145–153]
 - 41 Li Z L, Zhang R H, Badiey M, et al. Arrival time fluctuation of higher order normal modes caused by solitary internal waves (in Chinese). *Acta Acust*, 2011, 36: 559–567 [李整林, 张仁和, Badiey M, 等. 孤立子内波引起的高号简正波到达时间起伏. *声学学报*, 2011, 36: 559–567]
 - 42 Katsnelson B, Ren Y. Sound intensity fluctuations due to mode coupling on moving internal waves. In: *Proceedings of the COA2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics Symposium*, Harbin, 2016
 - 43 Xiao Y, Li Z, Li J, et al. Influence of warm eddies on sound propagation in the Gulf of Mexico. *Chin Phys B*, 2019, 28: 054301
 - 44 Liu R Y, Li Z L. Effects of rough surface on sound propagation in shallow water. *Chin Phys B*, 2019, 28: 014302
 - 45 Liu D, Li Z L, Liu R Y. Sound propagation in shallow water with periodic rough bottom (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2021, 70: 034302 [刘代, 李整林, 刘若芸. 浅海周期起伏海底环境下的声传播. *物理学报*, 2021, 70: 034302]
 - 46 Jiang D G, Li Z L, Qin J X, et al. Characterization and modeling of wind-dominated ambient noise in South China Sea. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2017, 60: 124321
 - 47 Li F H, Liu S Q, Wang J Y. A numerical model of underwater ambient noise generated by typhoons and application in estimation of typhoon wind speed (in Chinese). *Acta Acust*, 2016, 41: 750–757 [李风华, 刘珊珊, 王璟琰. 台风激发水下噪声场的建模及其在台风风速反演中的应用. *声学学报*, 2016, 41: 750–757]
 - 48 Xu D, Li F H, Guo Y G, et al. The effects of the ocean surface wave spectrum on low frequency ambient noise in deep water (in Chinese). *Acta Acust*, 2018, 43: 137–144 [徐东, 李风华, 郭永刚, 等. 海面波浪谱对深海低频环境噪声的影响. *声学学报*, 2018, 43: 137–144]
 - 49 Li F, Yang X, Zhang Y, et al. Passive ocean acoustic tomography in shallow water. *J Acoust Soc Am*, 2019, 145: 2823–2830
 - 50 Li F H, Jin G L, Zhang R H. Correlation reverberation theory in shallow water and oscillation phenomena of reverberation intensity (in Chinese). *Sci China Ser A*, 2000, 30: 560–566 [李风华, 金国亮, 张仁和. 浅海相干混响理论与混响强度的振荡现象. *中国科学A辑*, 2000, 30: 560–566]
 - 51 Wang L H, Qin J X, Fu D L, et al. Bottom reverberation for large receiving depth in deep water (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 134303 [王龙昊, 秦继兴, 傅德龙, 等. 深海大接收深度海底混响研究. *物理学报*, 2019, 68: 134303]
 - 52 Gu Y M. Long range bistatic active detection with a horizontal array in shallow water (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021 [顾怡鸣. 浅海水平阵远程双基地主动探测技术. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学, 2021]
 - 53 Zhou J X, Zhang X Z, Knobles D P. Low-frequency geoacoustic model for the effective properties of sandy seabottoms. *J Acoust Soc Am*, 2009, 125: 2847–2866
 - 54 Li Z L, Zhang R H. A broadband geoacoustic inversion scheme. *Chin Phys Lett*, 2004, 21: 1100–1103
 - 55 Li M Z, Li Z L, Zhou J X, et al. Geoacoustic inversion for acoustic parameters of sediment layer with low sound speed (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 094301 [李梦竹, 李整林, 周纪浔, 等. 一种低声速沉积层海底参数声学反演方法. *物理学报*, 2019, 68: 094301]
 - 56 Weng J B, Li F H, Guo Y G. Geoacoustic inversion based on near-field frequency-range interference pattern in deep water (in Chinese). *Acta Acust*, 2015, 40: 207–215 [翁晋宝, 李风华, 郭永刚. 深海近距离声场频率-距离干涉结构反演海底声学参数. *声学学报*, 2015, 40: 207–215]
 - 57 Wu S L, Li Z L, Qin J X. Geoacoustic inversion for bottom parameters in the deep-water area of the South China Sea. *Chin Phys Lett*, 2015, 32: 124301

Summary for “深海声学研究进展”

Overview of deep water acoustics

Zhenglin Li^{1*} & Yanxin Yu^{1,2}¹ State Key Laboratory of Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;² Department of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* Corresponding author, E-mail: lzh1@mail.ioa.ac.cn

The aim of research on ocean acoustics is to reveal the phenomenon and physical mechanism of sound propagation in complex marine environments, which is the basis of the high technology and application of underwater acoustics. From the view of the sound field in deep ocean and SONAR application, the progress of ocean acoustic theories and experiments by developed countries has been reviewed firstly. The history of basic research in China is introduced briefly. In 1997 and 2012, the progress of ocean acoustics in China has been summarized at the First and Third International Conference on Shallow Water Acoustics, respectively. In recent years, with the development of maritime strategy, research on ocean acoustics in China is moving from shallow water to deep water. Some progress on deep water acoustics has been made based on the funding from the Global Change and Air-sea Interaction Project and the National Natural Science Foundation of China. The scientific research achievements on deep water acoustics are reviewed from the aspects of acoustic experimental technology, sound propagation in complex ocean environments, sound field spatial correlation, characteristics of ambient noise and application on ocean tomography, ocean reverberation, geoacoustic inversion, and source localization.

The distributed sound signal recorders are developed which can work at the maximal depth of 12000 m. Experiment data from the South China Sea, the Pacific Ocean and the Indian Ocean surveys have been recorded with them. Three-dimensional propagation phenomena with the presence of seamount and trench-slope basin have been observed and explained by ray theory. Characteristics of spatial correlation of sound field for different ocean environments have been investigated. The sound field fluctuation and the probability distribution of the transmission losses (TLs) caused by internal waves, mesoscale eddy, surface waves and bottom roughness are systematically studied. Longitudinal and vertical correlations within the direct zone and convergence zone are relatively high for the main energy coming from the rays reflected by sound channel. Then long-time ambient noise measurements with typhoon passing by the submerged buoys have been done. The noise model for the South China Sea has been developed. A passive ocean tomography method from ambient noise is proposed to estimate sound speed profile. A geoacoustic inversion method for deep water environments is proposed by using the TLs in the shadow zone, which is very sensitive to bottom parameters. By using the relationship of arrival angle and source ranges, three source localization methods have been proposed, which can estimate the source depth and range at the same time with high precision.

Finally, the key research directions of deep water acoustics are given, such as characteristics of sound field in typical ocean environments, effects of ocean environments on SONAR performance, weak signal enhancement methods based on the interference of multi-path arrivals, and environment measurements and target detection methods with unmanned platforms. It has reference meaning for future work of deep water acoustics.

deep water acoustics, spatial correlation, ambient noise, geoacoustic inversion, source localizationdoi: [10.1360/TB-2021-0643](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0643)