

超声波生物遥测技术及其在现代渔业中的应用

刘景^{1,2}, 汤勇¹, 邢彬彬¹, 殷雷明¹, 庄鑫^{1,2}, 毕福洋¹, 张国胜¹

(1 大连海洋大学海洋科技与环境学院, 辽宁 大连 116023;

2 东京海洋大学大学院海洋科学技术研究科, 日本 东京 1080075)

摘要:超声波生物遥测技术是应用声学发信器对水生生物进行标记跟踪的一种声学遥测技术,自1956年首次应用至今,已广泛应用于遥测海洋、河流、河口、湖泊、水库中的多种水生动物,是研究水生动物在自然水域中行为特征的最为有效的方法,但这一技术目前在国内的研究比较少。文章分析了该研究领域的相关文献,并进行了全面的梳理和探讨;概述了超声波生物遥测技术在国内外的研究进展及其系统组成;总结了该方法分类、工作原理以及不同超声波生物遥测技术之间的差异和使用条件等;分析了该技术在国内外现代渔业领域的应用前景以及所面临的问题,可为该技术在国内的应用提供一定的参考。

关键词:超声波;生物遥测;标记跟踪

中图分类号:SP32.2

文献标志码:A

文章编号:1007-9580(2018)05-075-06

1 超声波生物遥测技术简介

动物遥测是一门用来阐明动物的活动和行为与其所处的环境或栖息地之间关系的科学^[1]。陆生动物多采用电磁波标志及卫星定位系统实现对目标动物的遥测跟踪。电磁波在水中传播衰减系数过大,有效传播距离非常短,而声音在水中传播时则具有衰减系数小、传播距离远等优势。20世纪50年代开始,有研究者尝试将小型超声波发信器固定于鱼体进行超声波标记跟踪^[2],发展至今,超声波生物遥测技术已成为研究水生动物在自然水域中的行为特征最为有效的方法之一。随着电子科学技术的快速发展,超声波发信器也逐渐趋于小型化和多样化,目前已出现了多种类型的超声波生物遥测方法,并各具所长。随着小型传感器的诞生,研究者开发出携带小型传感器的超声波发信器,在观测水下动物活动路线的同时,还可以获得目标生物栖息水层的温度和深度等环境信息。近年来,研究人员对多种水生生物进行了超声波生物遥测分析,小到6 g的鲑鱼,大到150 t的鲸鱼,涉及到海洋哺乳类、鱼类、蟹类、龟

类等,掌握了大量的水生生物的行为学信息^[1],对于水生生物的行为学、相关渔具渔法学、濒危生物资源保护及增殖放流等领域的研究工作具有重要意义,对渔业资源的保护和现代渔业的发展起到了关键的推动作用。

2 超声波生物遥测技术在国内外的研究进展

Trefethen^[3]在1956年首次尝试使用超声波标志对成年大马哈鱼(*Oncorhynchus keta*)和银鲑(*Oncorhynchus kisutch*)进行超声波遥测研究,这种研究方法随后在美国西部哥伦比亚河上的邦纳维尔坝的坝前水域被用来研究太平洋鲑鱼(*Pacific salmon*)的逆流迁徙行为,早期由于超声波发信器体积较大,多悬挂于成年鱼体表进行标志。Yuen等^[4]在1969年首次将超声波发信器植入鲱鱼(*Katsuwonus pelamis*)腹腔内进行跟踪研究。早期的超声波标志跟踪通过将定向水听器固定于船舶,通过耳机或扩音器监听发信器相对于船体的方位并实时追踪。1972年Watkins等^[5]首次提出,通过检测鱼体携带的超声波发信器发射的超声波到达4通道接收机阵列各个水听器的时间差,进行三维测位。Hawkins等^[6]在1974年使用多个全方位水

收稿日期:2018-08-09

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划项目“生态节能牧场化增殖技术开发与产业化示范(2013BAD23B02)”

作者简介:刘景(1992—),男,硕士研究生,研究方向:超声波生物遥测技术。E-mail:luking1992@163.com

通信作者:张国胜(1960—),男,教授,博士,博士生导师,研究方向:鱼类行为学。E-mail:hyz-zhang@dlou.edu.cn

听器阵列进行时间差测位研究。在 20 世纪末, Thorpe 等^[7]逐步使用该技术对大马哈鱼幼鱼进行跟踪研究并分析其洄游习性等行为信息。2000 年前后,美国的 Steig 等^[8]使用多个全方位水听器阵列,采用时间差算法对鱼类进行水下精确定位追踪,了解目标鱼类在坝前的滞留及鱼道选择等行为,并且评价了鱼道的效果;John 等^[9]总结了 2000 年之前的超声波生物遥测技术的发展历程并讨论了超声波生物遥测技术的定位精度。

近年来,随着超声波生物遥测技术的发展,定位精度不断提高,达到亚米级,并且跟踪时长也显著提高,因此,越来越多的研究者采用超声波生物遥测技术进行一些更为细致的研究。比如鱼类的交配行为、聚礁行为、栖息地辨别行为、产卵场搜寻、水生生物资源丰富度评价、产卵期行为特征、水生生物增殖放流效果评价等^[10-15]。日本的 Miyamoto 等^[16-17]近年来还利用超声波生物遥测技术分析鱼类与网具之间的关系,对金枪鱼延绳钓以及大型定置网的设计提出了改造意见,对于提高渔业作业效率、降低兼捕渔获物等起到了关键性作用。

相对于加拿大、美国、日本、英国等国家,中国关于超声波生物遥测技术方面的研究还较少。目前国内还未能自主开发出完备的超声波生物遥测系统,研究工作者主要依靠购买国外设备进行相关研究,所使用的超声波发信器也都全部进口。国内最早在 1981 年由中国水产科学研究院开始探索鱼类的水声遥测跟踪技术,并对长江中华鲟(*Acipenser sinensis*)和四大家鱼开展声学跟踪试验^[18]。危起伟等^[19]1993 年在葛州坝下对成熟的中华鲟进行标志和追踪试验,根据它们在产卵期的迁移情况推断其产卵场。危起伟等^[20]还在 1996 年利用美国 Sonotronics 公司的超声波发射器、接收仪和水下听筒装配的一套超声波遥测定位系统,利用三角形定位法,在长江宜昌江段对中华鲟进行遥测跟踪试验,记录了中华鲟在产前、产卵和产后的行踪;林永兵等^[21]2006 年 10 月—2008 年 5 月采用加拿大 Vemco 公司生产的超声波跟踪系统对非繁殖季节的中华鲟亲鲟在葛洲坝下至长江入海口江段的迁移和分布情况进行了初步研究,得到了中华鲟在产卵后的洄游路线和迁移速度;郭禹等^[22]2014 年在实验池内利用小型超声波标志跟踪技术

对花尾胡椒鲷(*Plectorhinchus cinctu*)进行持续 5 d 的跟踪研究,初步得到了其昼夜活动轨迹与行为规律;2013 年孙璐等^[23]利用超声波生物遥测技术对刺参和许氏平鲉进行标记进而对人工鱼礁的环境修复效果进行评价,并且总结了不同水生生物的超声波发信器标记方法;王成友等^[24]在 2010 年总结了超声波遥测在水生动物生态学研究中的应用及发展前景;俞立雄等^[25]2017 年研究了不同标记对鱼类游泳速度的影响,试验结果表明超声波标志对 3 个体长组草鱼的临界游泳速度有显著影响。

近年来,国内野生水产资源严重衰退,一些水生生物甚至面临着严重的生存威胁,渔业相关部门越来越重视资源的保护及恢复工作,循环水养殖、人工鱼礁、海洋牧场等现代化渔业发展模式也日趋重要,超声波生物遥测技术在现代化渔业的发展过程中逐渐显示出其独特的技术优势,也逐渐得到了越来越多的渔业科研工作者的重视。

3 超声波生物遥测系统的组成

超声波生物遥测系统主要包括发射装置和接收装置。发射装置发出超声波信号,由接收装置识别并储存,最后通过电脑对数据信号进行处理,转换为位置、深度等信息。

发射装置又称为超声波发信器,通常由电池、振动子、CPU、电路控制板及传感器组成,根据研究需要可配置不同类型的传感器;根据超声波发射周期的不同可以工作几天至几年时间,发射周期通常由磁力开关在超声波发射器外部控制,根据调制方式和编码方式的不同,可同时接收超声波发信器的最大个数也不同。例如,日本 Aqua Sound 公司生产的超声波发射器(图 1),直径 9.5 mm,长 43 mm,采用 M 系列信号编码,理论上

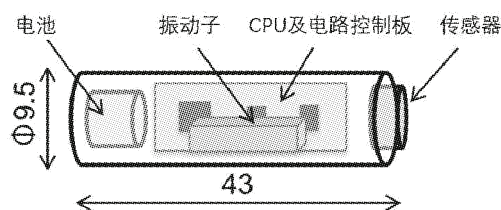


图 1 日本 Aqua Sound 公司生产的超声波发射器内部结构

Fig. 1 Internal structure of ultrasonic transmitter produced by Aqua Sound

最多可同时识别 32 768 个超声波发信器,其振动子采用新型多层电致伸缩换能器,相对于之前的 PZT 压电陶瓷振动子电声转化效率更高^[26];提出超声波发射器的性能定义由以下 4 个指标决定:小型化、电池寿命、传输距离和信号识别能力^[27]。

目前国内外使用的超声波发信器主要来自加拿大、美国和日本,型号和功能多样化,主要区别为电池寿命、尺寸大小、发射频率、识别能力、可识别个数以及传感器种类,可根据具体实验条件和研究目的选择不同的超声波发射器。表 1 为常见超声波发射器的规格参数。

表 1 常见超声波发信器规格
Tab. 1 Specification for common ultrasonic transmitters

名称	公司(国家)	直径/mm	长/mm	水中质量/g	发射声压/dB	发射频率/kHz	电池寿命	可同时识别个数/个
V7	VEMCO(加拿大)	7	18	0.70	136	69	225 day/90s	>1 000 000
V9	VEMCO(加拿大)	9	21	1.60	145 ~ 151	69	550 day/90s	>1 000 000
900S	HTI(美国)	6	16	0.29	152	307	65 day/10s	>100
980MX	HTI(美国)	16	48	9.65	156	80	5 year/10s	>100
1030P	AQUA(日本)	9.5	36	1.60	155	62.5	1 year/180s	32 768
1040P	AQUA(日本)	9.5	43	1.80	155	62.5	1 year/260s	32 768

接收装置通常包括水听器 and 信号识别及储存系统,早期的接收装置多由定向水听器和收听设备组成,结构比较简单,随着调制技术的发展,为了可同时监测更多样本,超声波发信器逐渐改进为调制声波发射,调制方法包括振幅变调、频率变调和相位变调,接收装置也添加了解调单元及数据存储单元,根据接受系统的不同,一部分超声波生物遥测系统还增添了显示仪,另一部分则是通过存储单元后期进行数据处理,进而获得距离、位置、深度、温度等信息^[27]。

4 超声波生物遥测技术的分类

根据超声波生物遥测技术的工作原理,可以将该技术划分为 3 类,即跟踪型、设置型、双曲线测位型(图 2)。

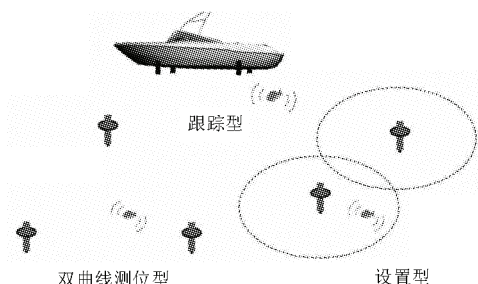


图 2 3 类超声波生物遥测方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of three ultrasonic biological telemetry methods

根据受信机之间的阵列距离,又将超声波测位类型划分为长基线法(LBL)、短基线法(SBL)和超短基线法(SSBL)^[28]。

4.1 跟踪型

跟踪型超声波生物遥测技术也分为 2 类。第 1 类是将定向水听器固定在船舶上,监听人员通过耳机或喇叭辨别超声波发射器的大体方位,Trefethen 等^[2]在 1957 年就使用这种方法对银鲑进行追踪。第 2 类是将 4 个全方位水听器固定在船的周围,根据超声波信号到达 4 个水听器的时间差以及超声波所在位置到达 4 个水听器之间的俯仰角关系来判断超声波发信器相对于船体的方向,这种方法也属于短基线法(SBL)。

跟踪型超声波生物遥测方法操作简单,而且能够在范围水域追踪标志鱼,不受接收机位置的限制,缺点是需要操作人员不间断地观察追踪终端显示设备,稍有不慎就容易跟丢实验对象,并且受到天气的影响较大,另一个缺点是不方便同时跟踪多个实验对象。因此,跟踪型通常与设置型和双曲线测位型配合使用^[12,29]。

4.2 设置型

设置型超声波生物遥测技术是将接收机阵列布置于实验水域,根据接收机和超声波发信器的性能,接收机可以接收一定半径以内的超声波信号,当携带超声波发信器的实验鱼游到接收机的有效接收半径以内时,接收机便可以识别并储存相关信息。该技术可根据实验需要布置任意多个

接收机。

设置型超声波生物遥测技术的优点是可同时监测多个目标,可根据需要布置任意大小的接收机阵列,缺点是测位精度较低,只能判断实验对象处于哪个接收机周围,不能得到实验对象精确的活动路线。这种方法被广泛应用于鲑鳟鱼的洄游路线、产卵场等方面的研究^[29-30]。

4.3 双曲线测位型

双曲线测位型超声波生物遥测技术是3种遥测技术中测位精度最高的,通常需要3个或3个以上接收机,测位精度可达到亚米级,但是根据超声波发信器所处接收机阵列内位置的不同,测位精度也有很大差异,接收机分为有线式和无线式,有线式接收机可直接连接终端设备,实时提取数据,无线式通常将数据存储在接收机内,后期提取并处理。Frank Smith^[31]在2013年系统地分析了使用3个接收机的三角形超声波生物遥测技术的测位精度差异,阵列内的模拟测位精度差异显示(图3),中间深色区域测位误差相对较低,阵列以外随着颜色的加深代表测位误差越来越大。

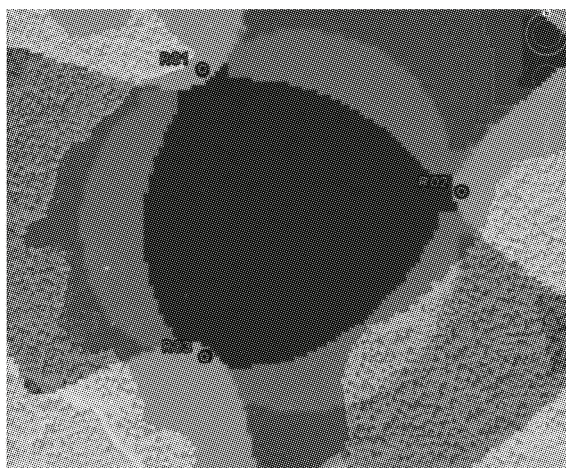


图3 三角形阵列超声波测位精度模拟图

Fig. 3 Simulation diagram of ultrasonic position measurement accuracy of triangular array

双曲线测位型超声波生物遥测技术能够实现精确测位,并且不需要研究人员不间断监测,操作相对简单,相对于跟踪型和设置型更便于研究水生生物在某一地点的详细活动规律,缺点是需要处理大量的数据,无线式接收机由于存在时钟差,数据处理方法更加复杂,难以实现实时监测。这种方法被广泛应用于鱼类在水坝附近的游泳路线

监控、鱼道选择、聚礁行为等研究^[32-34]。

5 超声波生物遥测技术在现代渔业领域的应用探讨

5.1 鱼类行为学研究

鱼类行为是指鱼类进行的各种运动,是鱼类对外界环境和内部环境变化的外在反应^[35]。在研究鱼类对外界环境的变化时,经常需要了解鱼类所处环境的温度、盐度、深度等信息,在自然水域中很难准确实时地得到这些信息,利用超声波生物遥测技术则可以24 h持续观察实验鱼在自然水域的环境信息。另外,利用超声波生物遥测技术还可以研究鱼类在自然水域的游泳速度、迁移速度、洄游路线等行为信息。

5.2 新型网具开发与设计

网具的开发往往需要了解目标鱼类的栖息深度、活动范围、昼夜活动差异等详细信息,然而利用传统方法很难得到具体信息,利用超声波生物遥测技术正好解决了这一问题;另一方面,近年来随着渔业资源的骤减,越来越多的研究者试图开发出兼捕渔获物少的新型网具。日本的内田圭一等^[17]通过超声波生物遥测技术分析了蓝鳍金枪鱼(*Thunnus thynnus*)幼鱼和黄鳍短须石首鱼(*Umbrina roncadore*)在同一个定置网内的活动差异,试图通过行为研究起到保护蓝鳍金枪鱼幼鱼的目的。定置网是对环境危害较小的网具,目前日本沿海分布大量的大型定置网。随着中国渔业资源量的恢复,未来也很可能在中国大范围应用,而定置网的网墙设置、深度选择等参数尤为重要,超声波生物遥测技术也是获得这些信息的有效工具。宫本佳则等^[36]利用超声波生物遥测技术研究了金枪鱼延绳钓的水下形态变化,对网具的改进和渔法提出了建议;除此之外,超声波生物遥测技术还可以用于大型围网和拖网的沉降速率和网具深度监测方面的研究。

5.3 人工鱼礁和海洋牧场建设

了解人工鱼礁、海洋牧场内鱼群的活动信息对海洋牧场管理和建设非常重要,然而国内人工鱼礁和海洋牧场建设过程中对鱼类在人工鱼礁和海洋牧场内活动范围的检测信息非常少,未来可利用超声波生物遥测技术对人工鱼礁和海洋牧场内的目标鱼群进行定位追踪,获得更多的鱼群

信息,进而起到提高人工鱼礁亲鱼聚集效果和产卵率、提高海洋牧场饲料利用率以及网具作业位置选择等作用。另一方面,人工鱼礁也是现代海洋牧场建设中的一项重要内容,利用超声波生物遥测技术能够有效监测人工鱼礁对鱼类的聚集效果,通过超声波生物遥测技术的应用,可以促使中国现代海洋牧场建设系统更加合理化和高效化。

5.4 增殖放流及资源保护

近年来,中国的经济鱼类增殖放流工作不断扩大,放流鱼类的年龄选择、放流地点选择、放流效果评价等研究非常迫切,超声波生物遥测技术可以对这些研究起到技术支持,国内已有很多相关研究。在水生生物资源保护方面,国内已经做了对长江中华鲟保护方面的研究,包括产卵场、洄游路线调查等,未来可利用该技术对更多水生生物进行研究,从而对中国的水生生物进行更有针对性的保护,还可以利用该技术实现对大坝鱼道效果的评价。随着人类在河流及浅海建筑设施的增加,这些人类活动可能对水生生物的栖息场所产生威胁,利用超声波生物遥测技术可以评估这些人工设施对水生生物的影响。

6 结论

超声波生物遥测技术发展至今已经形成了一套比较完善的声学生物遥测系统,接收机以及超声波发信器的种类非常丰富,测位精度也有了显著提高,是研究水生生物行为信息的一种非常有效的方法。应用超声波生物遥测技术可以对中国的现代渔业发展提供有力的技术支持,在渔业资源保护、增殖放流、网具设计等领域将起到关键性作用。但国内目前还不能自主研发相关核心设备,接收机和发信器主要依赖进口,价格昂贵,在一定程度上制约了该技术在国内的大范围应用。

□

参考文献

- [1] BLOCK B A, HOLBROOK C M, SIMMONS S E, et al. Toward a national animal telemetry network for aquatic observations in the United States[J]. *Animal Biotelemetry*, 2016, 4(1):1-8.
- [2] TREFETHEN P S, DUDLEY J W, SMITH M R. Ultrasonic tracer follows tagged fish [J]. *Electronics: the worldwide technology weekly*, 1957, 30:156-160.
- [3] TREFETHEN P S. Sonic equipment for tracking individual fish [M]. US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, 1956:1-11.
- [4] YUEN H S H. Behavior of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, as determined by tracking with ultrasonic devices [J]. *Journal of the Fisheries Board of Canada*, 1970, 27(11):2071-2079.
- [5] WATKINS W A, SCHEVILL W E. Sound source location by arrival-times on a non-rigid three-dimensional hydrophone array [C]//*Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*. Amsterdam:Elsevier, 1972:691-706.
- [6] HAWKINS A D, MACLENNAN D N, URQUHART G G, et al. Tracking cod *Gadus morhua* L. in a Scottish sea loch [J]. *Journal of Fish Biology*, 1974, 6(3):225-236.
- [7] STEIG T W. The use of acoustic tags to monitor the movement of juvenile salmonids approaching a dam on the Columbia River [C]//*Proceeding of the 15th International Symposium on Biotelemetry*, Juneau, Alaska; s. n., 1999:9-14.
- [8] STEIG T W, RANSOM B H, TIMKO M A. Monitoring the behavior of acoustically tagged chinook and steelhead smolts approaching Rocky Reach Dam on the Columbia River [J]. *Waterpower XII*, 2001(7):9-11.
- [9] EHRENBERG J E, STEIG T W. A method for estimating the "position accuracy" of acoustic fish tags [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2002, 59(1):140-149.
- [10] MCKINZIE M K, JARVIS E T, LOWE C G. Fine-scale horizontal and vertical movement of barred sand bass, *Paralabrax nebulifer*, during spawning and non-spawning seasons [J]. *Fisheries research*, 2014, 150:66-75.
- [11] NEWLANDS N K, LUTCAVAGE M E, PITCHER T J. Atlantic bluefin tuna in the Gulf of Maine, I: estimation of seasonal abundance accounting for movement, school and school-aggregation behaviour [J]. *Environmental biology of fishes*, 2006, 77(2):177-195.
- [12] TOPPING D T, SZEDLMAYER S T. Home range and movement patterns of red snapper (*Lutjanus campechanus*) on artificial reefs [J]. *Fisheries Research*, 2011, 112(1/2):77-84.
- [13] 伊藤靖, 三浦浩, 吉田司, 等. 佐渡海域におけるバイオテレメトリーを用いた人工魚礁に鯛集するマアジの行動解析(その2) [C]. 日本水産工学会学術講演会講演論文集, 2010, 22:147-150.
- [14] YOKOTA T, MITAMURA H, ARAI N, et al. Comparison of behavioral characteristics of hatchery-reared and wild red tilefish *Branchiostegus japonicus* released in Maizuru Bay by using acoustic biotelemetry [J]. *Fisheries Science*, 2006, 72(3):520-529.
- [15] WILLIAMS-GROVE L J, SZEDLMAYER S T. Acoustic positioning and movement patterns of red snapper *Lutjanus campechanus* around artificial reefs in the northern Gulf of Mexico [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2016, 553:233-251.
- [16] MIYAMOTO Y, UCHIDA K, ORII R, et al. Three-dimensional underwater shape measurement of tuna longline

- using ultrasonic positioning system and ORBCOMM buoy[J]. Fisheries science, 2006, 72(1): 63-68.
- [17] 内田圭一, 小川大道, 長谷川浩平, 等. 超音波テレメトリーを用いた定置網内のクロマグロ小型魚とブリの行動モニタリング[J]. 日本水産学会誌, 2018, 84(1): 14-22.
- [18] 中国水产科学研究院渔业工程研究所. 水声遥测跟踪鱼类装置的研制和跟踪试验在国内首获成功[J]. 渔业现代化, 1984(1): 14.
- [19] BOYDKYNARD, 危起伟, 柯福恩. 应用超声波遥测技术定位中华鲟产卵区[J]. 科学通报, 1995(2): 172-174.
- [20] 危起伟, 杨德国, 柯福恩. 长江中华鲟超声波遥测技术[J]. 水产学报, 1998(3): 20-26.
- [21] 林永兵. 非繁殖季节中华鲟繁殖群体在长江中分布与降海洄游初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- [22] 郭禹, 汤勇, 赵文武, 等. 基于小型声学标记的花尾胡椒鲷行为研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(2): 282-290.
- [23] 孙璐. 许氏平鲉与刺参生物遥测技术的构建与应用[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013.
- [24] 王成友, 危起伟, 杜浩, 等. 超声波遥测在水生动物生态学研究中的应用[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2286-2292.
- [25] 俞立雄, 段辛斌, 陈大庆, 等. 5 种鱼类标志对草鱼临界游泳速度的影响[J]. 中国水产科学, 2017, 24(3): 550-557.
- [26] 笹倉豊喜. 水中パイオテレメトリー[J]. 日本音響学会誌, 2016, 72(4): 207-212.
- [27] 宮本佳則, 内田圭一, 高尾芳三, 等. M 系列信号を用いた新型超音波パイオテレメトリーシステムの開発[J]. 海洋音響学会誌, 2011, 38(3): 119-127.
- [28] 大谷隆彦. 海洋音響の基礎と応用[M]. 东京: 成山堂書店, 2004.
- [29] VOEGELI F A, LACROIX G L, ANDERSON J M. Development of miniature pingers for tracking Atlantic salmon smolts at sea[J]. Hydrobiologia, 1998, 371: 35-46.
- [30] MITSUNAGA Y, KAWAI S, KOMEYAMA K, et al. Habitat utilization of largemouth bass around a set net[J]. Journal of Fisheries Engineering, 2005, 41(3): 251-255.
- [31] SMITH F. Understanding HPE in the VEMCO positioning system (VPS) [EB/OL]. [2018-03-03]. <http://vemco.com/wp-content/uploads/2013/09/understanding-hpe-vps.pdf>.
- [32] MIYAMOTO Y, UCHIDA K, ORII R, et al. Validity of data filtering technique for the behavior analysis of crab in neritic and closed sea by ultrasonic biotelemetry[J]. Fisheries Science, 2006, 72(1): 211-213.
- [33] SAKURAI Y, UCHIDA K, MITAMURA H, et al. Monitoring behavioral characteristics of the rockfish *Sebastes cheni* inhabiting a seawall using LBL acoustic positioning system[J]. 2013, 3: 103-108.
- [34] RANSOM B H, STEIG T W, TIMKO M A, et al. Basin-wide monitoring of salmon smolts at US dams[J]. The international journal on hydropower & dams, 2008, 15(3): 43-49.
- [35] 柴毅, 谢从新, 危起伟, 等. 鱼类行为学研究进展[J]. 水利渔业, 2006(3): 1-2.
- [36] HASEGAWA K, MIYAMOTO Y, UCHIDA K. Development of a real-time depth monitoring system for small fishing gear using an acoustic telemetry technique[J]. Fisheries science, 2016, 82(2): 213-223.

Ultrasonic biotelemetry and its application to modern fishery

LIU Jing^{1,2}, TANG Yong¹, XING Binbin¹, YIN Leiming¹, ZHUANG Xin^{1,2}, BI Fuyang¹, ZHANG Guosheng¹

(1 School of Marine Science and Environment Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning, China;

2 Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, Tokyo 1080075, Japan)

Abstract: Ultrasonic biotelemetry is a kind of acoustic telemetry technology which uses acoustic transmitters to mark and track aquatic organisms. Since its first application in 1956, it has been widely used in telemetering many aquatic animals in oceans, rivers, estuaries, lakes and reservoirs. It is the most effective method to study the behavior characteristics of aquatic animals in natural waters. However, the research of this technology in China is relatively few. Related papers of this research field are analyzed, comprehensively summarized and discussed. The research progress at home and abroad and the system composition of ultrasonic biotelemetry are summarized. This paper summarizes the classification of methods, working principle, differences between and application conditions of different ultrasonic biotelemetry, and analyzes the application prospect and problems of the technology in modern domestic fishery, providing some reference for the application of the technology in China.

Key words: ultrasonic; biotelemetry; marking and tracking