

# 超声波遥测系统及其在海洋生物领域的应用研究进展

王志超<sup>1,2</sup>, 汤勇<sup>1</sup>, 陈国宝<sup>2\*</sup>, 曾雷<sup>2</sup> (1. 大连海洋大学, 辽宁大连 116023; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 中国水产科学研究院海洋牧场技术重点实验室, 农业部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东广州 510300)

**摘要** 超声波遥测是研究海洋动物行为和生理的重要手段之一, 目前已应用于鱼类、头足类、甲壳类以及一些哺乳类和爬行类动物的研究, 并在水产增殖和自然资源保护领域得到重视。介绍了超声波遥测系统的组成和定位原理, 回顾了超声波遥测技术在国内外海洋生物研究领域的应用进展, 分析了其目前存在的问题并对未来的发展前景进行了展望。

**关键词** 超声波遥测; 组成; 定位原理; 应用

中图分类号 S951.4 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)15-0020-04

## Research Progress on Ultrasonic Telemetry System and Its Application in Marine Biology Research Field

WANG Zhi-chao<sup>1,2</sup>, TANG Yong<sup>1</sup>, CHEN Guo-bao<sup>2</sup> et al (1. Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Marine Ranch Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences, Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Guangzhou, Guangdong 510300)

**Abstract** Ultrasonic telemetry is an important method in the study of ethology and physiology of marine animals, it has been applied in the study of fishes, cephalopods, crustaceans, some mammals and reptiles, and widely used in aquaculture and natural resources' protection. This paper introduced the composition and location principle of ultrasonic telemetry, reviewed the research progress on the applications of ultrasonic telemetry technology in foreign and domestic fields of marine biology research, analyzed the existing problems at present and predicted the development foreground in future.

**Key words** Ultrasonic telemetry; Composition; Location principle; Application

生物遥测是一种能够对自由生活状态下的动物生理、行为和体能状况实施遥测的技术, 包括陆上、空间(如鸟类)及海洋生物遥测<sup>[1]</sup>。海洋生物遥测是生物遥测的一个分支, 因为海洋生物的生存环境具有多样性, 其大多数活动是无法直接观测的, 所以生物遥测是研究海洋生物最有效的手段, 因其具有原位观察的优势, 受到学者们的日益重视。海洋生物遥测与陆地、空间生物遥测的原理基本相同, 但由于海洋环境复杂, 在仪器设计、数据传输和检测上都较其他遥测更加困难。

海洋生物遥测的主要方式有无线电遥测及声学遥测。无线电遥测使用无线电波, 由于海水导电率高, 无线电波在海水中衰减极快, 因而只适宜在海面上方的空气介质中传播, 中长波无线电信号甚至可以传播数百乃至数千公里。因此, 使用无线电波传输信号的方法适用于海洋哺乳动物和爬行动物研究, 在生物浮出水面呼吸时发射电波, 可以进行生物大尺度迁徙活动等方面的研究<sup>[2-3]</sup>。相对于无线电波, 超声波在水中传播信号的优势尤为明显, 研究对象更为广泛, 适用于大多数水中生物的研究, 对硬骨鱼类、软骨鱼类以及其他水生生物行为和生态学方面都有涉及, 近年来还被应用于改善人工增殖放流策略、评估鱼道设计等研究中<sup>[4]</sup>。

作为海洋生物遥测最早的应用手段, 超声波遥测技术自 20 世纪 50 年代诞生以来, 经过数十年的发展, 在遥测设备和

遥测手段上取得了较大进步。最初, 受限于传感器制作工艺和电池材料, 超声波标记牌的体积和质量均较大, 工作寿命也较短, 且信号发射模式简单<sup>[5]</sup>。20 世纪 80 年代以后, 随着电子技术的迅速发展, 超声波标记牌的制作工艺有了较大提高, 整合了微型陶瓷传感器的微芯片使标记牌的质量和体积大幅减小, 并可以通过发射多种模式的信号提供编码数据以及深度、温度等环境信息, 目前应用的最小标记牌长 11 mm, 水中质量仅为 0.24 g, 可连续工作 60 d 左右, 适用于幼鱼生长史等方面的研究<sup>[6]</sup>。遥测手段也由最初的移动跟踪发展到现在普遍采用的接收机阵列遥测, 已经实现了多目标大范围遥测。

国外一些渔业技术发达国家的超声波遥测技术已经较为成熟, 已被广泛应用于各类水域的水生动物生态研究, 在指导海洋捕捞和资源增殖与保护方面也广泛涉及<sup>[7]</sup>, 一些国家还建立了生物遥测数据共享网络, 在海洋生态保护领域具有重要意义。我国在超声波遥测方面起步较晚, 主要应用于对珍稀物种的生态行为研究, 始于 20 世纪 90 年代对中华鲟产卵场的定位<sup>[8]</sup>, 近年来在海洋生物遥测方面也开展了一些工作, 但主要依赖于国外的遥测设备, 所以利用超声波遥测方法进行海洋生物生态的研究在国内尚处于起步阶段。笔者阐述了超声波遥测系统的组成及定位原理, 综述了该技术在国内外海洋生物研究领域的应用进展, 并对其发展前景进行了展望。

## 1 超声波遥测系统的组成及定位原理

### 1.1 超声波遥测系统的组成

超声波遥测系统主要由发射装置和接收装置 2 个部分组成。发射装置即为植入生物体内或悬挂在生物体外的标记牌; 接收装置是用于在有效范围内接收标记牌发射的带有编码信息的超声波信号, 以获取标

**基金项目** 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2016TS31); 广东省 2016 年度中央海洋经济物种增殖放流效果评估项目(201620881); 农业部财政项目“南海海洋捕捞生产结构调查”(640)。

**作者简介** 王志超(1992—), 男, 山东莒县人, 硕士研究生, 研究方向: 渔业资源及渔业声学。\* 通讯作者, 研究员, 硕士, 硕士生导师, 从事渔业资源及渔业声学研究。

**收稿日期** 2018-03-05

记牌的定位等相关信息的设备。

**1.1.1 发射装置。**标记牌的体积主要取决于传感器的大小,为方便植入,标记牌的形制一般为圆柱体,也有一些标记牌设计为其他形制。自 20 世纪 70 年代末以来,得益于整合电路技术的发展,超声波标记牌的规格实现了小型化,并可以通过整合传感器记录水深、水温等环境参数<sup>[9]</sup>。超声波标记牌的发射频率一般在 30~300 kHz,信号通过标记牌内部的微型陶瓷传感器驱动产生。超声波标记牌发出简单的声脉冲,通过调节频率或者脉冲重复速率对标记牌进行编码。起步阶段,标记牌发射的脉冲信号是连续固定的,这种不间断的信号可以排除部分噪声干扰,但不能同时跟踪多个个体,且标记牌的使用寿命较短<sup>[10]</sup>。随着技术的进一步发展,伪随机编码的信号发射方式被广泛采用,解决了信号冲突问题,实现多目标识别跟踪,一些标记牌也可以根据研究需要改变脉冲发射的时间间隔<sup>[11]</sup>。

选择标记牌应考虑目标生物是否适宜,根据目标生物的大小与生活习性选择标记牌的规格和标记方式。标记方式一般有体内植入和体外悬挂 2 种,鱼类的体外悬挂一般在脊背处,但长期标记有脱落的风险;体内植入一般在腹腔内,在鱼腹部切 2~3 cm 的小口,足够塞入标记牌即可,这种方法容易对鱼产生较大伤害,最近一种注射植入式标记牌可以有效减轻这种伤害<sup>[12]</sup>;对一些大型鱼类,也可采用肌肉植入等方法<sup>[13]</sup>;早期研究中也采用胃内植入的方法,但经过一段时间后,标记牌被鱼排出的可能性较大,现在较少采用<sup>[14]</sup>。一般情况下,标志牌的质量不宜超过目标生物的 2%,在该范围内标志牌本身对鱼的影响可以忽略,在一些短期研究中标记牌质量占生物体重的 6% 以下是被允许的<sup>[15]</sup>,手术结束后需对目标生物进行观察,在投放前确定其活动状态正常。

选择标记牌需要考虑研究本身需求以及客观环境因素,影响标记牌信号传播的因素很多,主要包括以下因素:①标记牌的发射频率。不同频率的超声波在水中的传播损耗也不同,声波在海水中的吸收比淡水大得多,在理想状态下,32 kHz 的标记牌可以传播 2.5 km,而 300 kHz 的标记牌只能传播 400 m,标记牌发射高频声波时识别度更高,但超过 200 kHz 的频率不适宜在海洋中进行研究<sup>[16-18]</sup>。②水深。水深是影响超声波标记牌信号传播的主要因素。标记牌发射球面声波,到达海底或海表时发生反射,经过多次反射后,造成声波信号难以识别。③环境背景噪声。环境背景噪声包括人为和自然产生的环境噪音。若环境噪音较高,会使标记牌的信号在传播到一定距离后受到干扰或被覆盖,使信号的有效传播距离减小,同时环境中某些与标记牌发射频率相同或接近的声波会与标记牌信号混淆,尽管伪随机编码有效保证了信号的唯一性,但也不能完全避免这种情况的发生。④海底地形。海底地形起伏,或有不同介质的障碍物在标记牌附近时,会影响信号的传播,可能造成信号被遮蔽等情况。

**1.1.2 接收装置。**接收装置包括一些被动的超声波检测设备,信号接收的主要方法有移动检测和固定检测 2 种。

移动检测系统是早期超声波遥测的主要手段,通过船等

水上移动载体,携带水听器、接收机对目标进行实时跟踪,这种方法存在研究人员劳动强度大、不能进行长时间跟踪、定位精度较差、容易丢失目标等缺点,主要应用于河流和湖泊等范围较小的区域中,不适宜在海洋中进行,但在大型海洋哺乳动物和大型鱼类的研究中,移动检测依然作为有效方法被广泛采用<sup>[19-20]</sup>。

早期的固定检测系统,将水听器或水听器阵列布置在近岸水域,通过线缆连接到岸上的检测站接收信号,但检测范围受到线缆长度限制<sup>[21]</sup>。随着技术的进一步发展,出现了可以将声信号转换为无线电信号的浮标式声呐,检测范围相较于线缆传输有了较大提升。目前的生物超声波遥测主要使用固定的水下设置式接收机,整合水听器和接收记录仪,可以将接收到的数据进行存储,待研究结束后读取数据,有效节省了人力,一些设备中也同时整合压力、温度等传感器,可以在检测目标的同时获取部分环境信息。水下设置式接收机的布置距离不宜太远,通常在 300 m 以内<sup>[22]</sup>,在海洋中可以根据需要设计布置接收机阵列。近年来,可以通过卫星通讯传递数据的接收设备也在一些研究中得到应用,可以弥补水下设置式接收机无法实时获取数据的缺陷且不影响检测范围。在使用固定检测系统进行海洋生物遥测的同时,也可以使用移动检测方法进行辅助研究。

**1.2 超声波遥测系统的定位原理** 一般情况下,超声波遥测接收装置记录的数据为标记牌发射信号的时间序列,接收机接收数据后,需对数据进行复杂的降噪和滤波处理,现在常用的固定检测系统一般使用长基线测位法,这是一种空间的距离交会原理,接收机的设置间距需远大于声波的波长,根据声波到达各个接收机的时间进行计算<sup>[23]</sup>。当最少有 3 个接收机同时接收到标记牌发射的同一次信号时,即可实现定位,首先要确定每个接收机的准确位置,设接收机的坐标为 $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=1 \sim n$ ),标记牌的坐标为 $(x_p, y_p, z_p)$ , $c$  为声速值, $\Delta t_i$  为信号到达每个接收机的单程传播时间,按照以下公式计算  $c\Delta t_i$ :  $c\Delta t_i = \sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p)^2}$ 。

在实际应用中,需经过拟合计算推定标记牌的实际位置。一些接收装置记录的时间信息可以精确到百万分之一秒,定位精度在 1 m 左右,而对移动速度较快的目标,定位精度要差一些。在进行定位时,需要首先确定接收机接收信号的同步时间,一般通过携带同步标记或同步开启接收机实现。在一些研究中,还需要将参考标记放置于接收机阵列的中心位置,用以辅助定位及验证定位结果的准确性,接收机阵列范围大时,需设置多枚参考标记。

此外,一些携带深度、温度等传感器的超声波标记,会根据环境变化发射特殊脉冲间隔的信号,这种信号只需被单个接收机接收,即可获得标记牌所在深度及环境温度等信息,一般根据标记牌提供的拟合参数计算,一些标记牌由于制作工艺原因,标记牌之间的拟合参数也有一定差异。

## 2 超声波遥测在国外海洋生物研究领域的应用

超声波遥测在国外起步较早。美国学者 Trefethen<sup>[24]</sup> 早在 1956 年就有应用超声波遥测技术跟踪个体鱼类的报道。

20世纪70年代超声波遥测技术已经成为鱼类监控的主要手段,并有了较为完整的理论体系,加拿大、日本以及许多欧洲国家都相继开展了这方面工作,研究涉及鲨鱼、蝠鲼、金枪鱼等大型鱼类<sup>[25-27]</sup>,也有鲑鳟、鲟鱼、鲤鱼等体型较小的鱼类<sup>[28-30]</sup>,还包括海豹、海狗等海洋哺乳动物<sup>[31-32]</sup>。20世纪70年代末期,美国学者 Brawn<sup>[33]</sup>已经使用小型超声波标记进行大西洋鲑的行为研究,标记长度48 mm,水中质量9.1 g,并可以实现连续数月的长期工作。20世纪90年代,超声波遥测关于海洋生物水平和垂直移动、洄游、季节移动、摄食等自然生态活动,发电站或堤坝的建设、对渔具的反应等人为活动对海洋生物的影响以及海洋生物的水温选择等生理活动的研究都取得了大量成果<sup>[34-36]</sup>。进入21世纪,超声波遥测技术的理论和方法基本成型,但设备制造水平还在不断提升,近年来,结合大量环境数据以及数字模拟技术等手段展开的研究,可以更全面准确地了解海洋生物的生态活动。

目前,在海洋生物遥测领域走在前沿的一些国家已经建立了大规模的遥测网络。美国处于领先地位,作为美国海洋综合观测系统(IOOS)的一部分内容,其动物遥测网络 ATN (animal telemetry network) 检测站已经覆盖美国本土沿岸的大部分海域以及夏威夷群岛周边海域,主要为海洋渔业资源管理、保护及恢复海洋生态环境以及海洋珍稀物种的保护工作服务,主要使用卫星遥测、存档型遥测及超声波遥测3种手段,其中超声波遥测最为广泛,卫星遥测主要应用于海洋哺乳动物及爬行动物的研究,存档型遥测用于一些有洄游规律的鱼类,超声波遥测则用于大多数鱼类及其他水生生物,在部分海洋哺乳动物及爬行动物的研究中一般同时使用卫星标记和超声波标记<sup>[37]</sup>。加拿大的 OTN (ocean tracking network) 则使用超声波遥测设备和海洋环境观测设备,致力于建立对大陆架生态系统的认知,并为全球沿海和海洋生态系统的观察做出贡献,在全球范围内寻求合作,数据共享已经覆盖北美和西欧、北欧的大部分沿海以及中南美洲和非洲、西亚以及澳大利亚的部分沿海区域,自2010年起,OTN将研究方向设计为更好地了解海洋动态变化及其对海洋生态系统、动物生态和海洋资源的影响,并以解决资源管理中的关键问题以及海洋环境治理为目的,该计划先已进入第二阶段(2014年至今)<sup>[38]</sup>。澳大利亚的动物标记与观测系统 AATAMS (Australian Animal Tagging and Monitoring System) 希望建立起国家级的超声波遥测网络,计划在其沿海区域布置大规模的接收机阵列,促进研究者之间的合作,建立数据的开放共享平台,实现海洋生物遥测的研究价值最大化,目前计划正在逐步实施<sup>[39]</sup>。

### 3 超声波遥测在国内海洋生物研究领域的应用

国内超声波遥测起步较晚。20世纪80年代,傅仰大<sup>[40]</sup>、顾嗣明<sup>[41]</sup>介绍了国外超声波遥测的经验和方法,将超声波遥测法作为一种新型标志放流方法引入。国内的超声波遥测最早被用于1993年危起伟等<sup>[42]</sup>与美国专家合作进行的葛洲坝下中华鲟产卵场定位研究,研究使用了移动跟踪的方法,1996年已经取得中华鲟产卵场定位的初步结果。国内

的早期研究主要针对珍稀物种的保护,最近研究人员利用超声波遥测技术开展了对许氏平鲈在不同栖息地活动特点的研究,对比了其在人工鱼礁和天然礁体环境下的活动状态差异,拓展了国内超声波遥测新的研究与应用方向<sup>[43]</sup>。近年来,国内一些其他的海洋生物遥测研究也在陆续展开,超声波遥测技术也越来越受到重视。

尽管国内的研究手段与国外基本同步,但实际水平与国外还有较大差距,主要有以下原因:①国内超声波遥测技术起步较晚,尚未形成完善的科研规划和应用体系,科研人员无法获得足够的资金和技术支持。②国内的研究主要依赖于国外提供设备,迄今为止国内还没有厂商可以生产出与国外同等水平的包括标记牌和接收机在内的超声波遥测设备,导致研究成本较高。③国外超声波遥测已经可应用于大面积海域,研究涉及渔业管理、生态保护等方面,而国内的研究比较单一,大部分研究还处于实验阶段。同时,国外的数据采集比较全面,包括温度、盐度、海流等环境物理信息,国内尚未形成完善的数据采集体系。④与国外已经基本成型的数据共享网络系统相比,国内缺乏成熟的技术条件来建立超声波遥测的数据共享平台。

### 4 展望

随着海洋生物研究的不断深入,超声波遥测已经能与其他方法有效结合,拓展了新的研究领域,与遗传学、生理学、行为学和其他标记方式(如传统挂牌标记、PIT 射频标记等)相结合,在鱼类的生长史、栖息地选择以及完整的洄游行为等研究方面取得了进展,对水产增养殖和资源保护提供了极大帮助<sup>[44]</sup>。目前,超声波遥测在国内海洋生物研究领域的应用还有很大的发展空间:①随着国内水产品需求量的日益增加,充分了解经济鱼类及其他水生动物的生长过程和行为习惯,制定科学高效的天然水域生态环境恢复办法和提高水产增养殖经济效益已成为当今的工作重点,超声波遥测在这一领域将发挥至关重要的作用。②在现有海洋牧场建设和增殖放流效果评价方法的基础上,将超声波遥测方法纳入到评价体系,并作为一种海洋牧场监控管理的有效手段加以应用。③现阶段超声波遥测的成本过高,投入与产出差距悬殊是限制该方法应用的最主要原因。如果国内能形成良好的研究环境,具备一定的市场规模,吸引相关单位投入接收机和标记牌等超声波遥测设备的制作研发,提供高质量的国产设备,就可以大幅缩减研究成本,使超声波遥测技术不再局限于实验研究,真正成为了一种可以被广泛应用的标志放流方法。

电子技术的发展将推进标记牌的进一步小型化,功能更加多样化,新电池材料的应用将延长标记牌的工作时间并减小标记牌的质量,使超声波遥测应用的领域更加广泛。希望更多的科研人员通过超声波遥测方法进行海洋及各类水生动物的生态、生理行为研究,能够借助这种科学、高效的手段寻找保护和利用渔业及水生资源的合理方法。

### 参考文献

[1] COOKE S J, HINCH S G, WIKELSKI M, et al. Biotelemetry: A mechanistic

- approach to ecology[J]. Trends in ecology & evolution, 2004, 19(6): 334 – 343.
- [2] SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ D, CALOSI P, ATFIELD A, et al. Reduced salinities compromise the thermal tolerance of hypersaline specialist diving beetles[J]. Physiological entomology, 2010, 35(3): 256 – 273.
  - [3] MOORCROFT P R, POWELL R. Mechanistic approaches to understanding and predicting mammalian space use: Recent advances, future directions [J]. Journal of mammalogy, 2012, 93: 903 – 916.
  - [4] PARTRIDGE G J, GINBEY B M, WOOLLEY L D, et al. Development of techniques for the collection and culture of wild-caught fertilised snapper (*Chrysophrys auratus*) eggs for stock enhancement purposes[J]. Fisheries research, 2017, 186(2): 524 – 530.
  - [5] LOFTUS K H. Science for Canada's fisheries rehabilitation needs[J]. Journal of the fisheries research board of Canada, 2011, 33(8): 1822 – 1857.
  - [6] HUVENEERS C, SIMPFENDORFER C A, KIM S, et al. The influence of environmental parameters on the performance and detection range of acoustic receivers[J]. Methods in ecology and evolution, 2016, 7(7): 825 – 835.
  - [7] LONERAGAN N R, JENKINS G, TAYLOR M D. Marine stock enhancement, restocking and sea ranching in Australia: Future directions and a synthesis of two decades of research and development[J]. Reviews in fisheries science, 2013, 21(3/4): 222 – 236.
  - [8] KYNARD B, 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, 40(2): 172 – 174.
  - [9] COUTANT C C, CARROLL D S. Temperatures occupied by ten ultrasonic-tagged striped bass in freshwater lakes[J]. Transactions of the American fisheries society, 1980, 109(2): 195 – 202.
  - [10] BOVEE K D. A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology[J]. Scientific research & essays, 1982, 6(30): 6270 – 6284.
  - [11] XYDES A, MOLINE M, LOWE C G, et al. Behavioral characterization and Particle Filter localization to improve temporal resolution and accuracy while tracking acoustically tagged fishes[J]. Ocean engineering, 2013, 61: 1 – 11.
  - [12] AMMANN A J, MICHEL C J, MACFARLANE R B. The effects of surgically implanted acoustic transmitters on laboratory growth, survival and tag retention in hatchery yearling Chinook salmon[J]. Environmental biology of fishes, 2013, 96(2/3): 135 – 143.
  - [13] WAGNER G N, COOKE S J, BROWN R S, et al. Surgical implantation techniques for electronic tags in fish[J]. Reviews in fish biology and fisheries, 2011, 21: 71 – 81.
  - [14] DANIEL A J, HICKS B J, LING N, et al. Acoustic and radio-transmitter retention in common carp (*Cyprinus carpio*) in New Zealand[J]. Marine and freshwater research, 2009, 60(4): 328 – 333.
  - [15] BARAS E, LAGARDÈRE J P. Fish telemetry in aquaculture: Review and perspectives[J]. Aquaculture international, 1995, 3(2): 77 – 102.
  - [16] DANCE M A, MOULTON D L, FUREY N B, et al. Does transmitter placement or species affect detection efficiency of tagged animals in biotelemetry research? [J]. Fisheries research, 2016, 183: 80 – 85.
  - [17] BROWN R S, OLDENBURG E W, SEABURG A G, et al. Survival of seaward-migrating PIT and acoustic-tagged juvenile Chinook salmon in the Snake and Columbia Rivers: An evaluation of length-specific tagging effects[J]. Animal biotelemetry, 2013, 1(8): 1 – 13.
  - [18] BROWN R S, DETERS K A, COOK K V, et al. A comparison of single-suture and double-suture incision closures in seaward-migrating juvenile Chinook salmon implanted with acoustic transmitters: Implications for research in river basins containing hydropower structures[J]. Animal biotelemetry, 2013, 1(10): 1 – 9.
  - [19] WEILAND M A, DENG Z D, SEIM T A, et al. A cabled acoustic telemetry system for detecting and tracking juvenile salmon: Part I. Engineering design and instrumentation[J]. Sensors, 2011, 11(6): 5645 – 5660.
  - [20] HUANG Y T, BENESTY J, ELKO G W, et al. Real-time passive source localization: A practical linear-correction least-squares approach[J]. IEEE Trans Speech Audio Process, 2011, 9(8): 943 – 956.
  - [21] WATKINS W A, SCHEVILL W E. Sound source location by arrival-times on a non-rigid three-dimensional hydrophone array[J]. Deep sea research and oceanographic abstracts, 1972, 19(10): 691 – 706.
  - [22] GJELLAND K Ø, HEDGER R D. Environmental influence on transmitter detection probability in biotelemetry: Developing a general model of acoustic transmission[J]. Methods in ecology & evolution, 2013, 4(7): 665 – 674.
  - [23] MIYAMOTO Y, UCHIDA K, ORII R, et al. Three-dimensional underwater shape measurement of tuna long line using ultrasonic positioning system and ORBCOMM buoy[J]. Fisheries science, 2006, 72(1): 63 – 68.
  - [24] TREFETHEN P S. Sonic equipment for tracking individual fish[J]. Special science report fisheries, 1956, 179: 1 – 11.
  - [25] VOEGELI F A, SMALE M J, WEBBER D M, et al. Ultrasonic telemetry, tracking and automated monitoring technology for sharks[J]. Environmental biology of fishes, 2001, 60(1/2/3): 267 – 282.
  - [26] GIRARD C, DAGORN L, TAQUET M, et al. Homing abilities of dolphin-fish (*Coryphaena hippurus*) displaced from fish aggregating devices (FADs) determined using ultrasonic telemetry [J]. Aquatic living resources, 2007, 20(4): 313 – 321.
  - [27] GOVINDEN R, JAUHARY R, FILMALTER J, et al. Movement behaviour of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) and yellowfin (*Thunnus albacares*) tuna at anchored fish aggregating devices (FADs) in the Maldives, investigated by acoustic telemetry[J]. Aquatic living resources, 2013, 26(1): 69 – 77.
  - [28] ÁLVAREZ D, NICIEZA A G. Predator avoidance behaviour in wild and hatchery-reared brown trout: The role of experience and domestication [J]. Journal of fish biology, 2003, 63(6): 1565 – 1577.
  - [29] ACOLAS M L, ANRAS M, VÉRON V, et al. Assessment of the upstream migration and reproductive behaviour of Allis shad (*Alosa alosa* L.) using acoustic tracking[J]. ICES journal of marine science, 2004, 61(8): 1291 – 1304.
  - [30] YOKOTA T, MACHIDA M, TAKEUCHI H, et al. Anti-predatory performance in hatchery-reared red tilefish (*Branchiostegus japonicus*) and behavioural characteristics of two predators: Acoustic telemetry, video observation and predation trials[J]. Aquaculture, 2011, 319(1): 290 – 297.
  - [31] TAYLOR M D, LAFFAN S W, FAIRFAX A V, et al. Finding their way in the world: Using acoustic telemetry to evaluate relative movement patterns of hatchery-reared fish in the period following release[J]. Fisheries research, 2017, 186: 538 – 543.
  - [32] STEWART B S, LEATHERWOOD, YOCHEM P K, et al. Harbor seal tracking and telemetry by satellite[J]. Marine mammal science, 2006, 5(4): 361 – 375.
  - [33] BRAUN V M. Behavior of Atlantic salmon (*Salmo salar*) during suspended migration in an estuary, Sheet Harbour, Nova Scotia, observed visually and by ultrasonic tracking[J]. Canadian journal of fisheries & aquatic sciences, 1982, 39(2): 248 – 256.
  - [34] ACOLAS M L, ANRAS M L B, VÉRON V, et al. An assessment of the upstream migration and reproductive behaviour of allis shad (*Alosa alosa* L.) using acoustic tracking[J]. ICES journal of marine science, 2004, 61(8): 1291 – 1304.
  - [35] KITTERMAN C L, BETTOLI P W. Survival of angled saugers in the Lower Tennessee River[J]. North American journal of fisheries management, 2011, 31(3): 567 – 573.
  - [36] MORRISCOREY J, GREENJOHN M, SNELGROVEPAUL V R, et al. Temporal and spatial migration of Atlantic cod (*Gadus morhua*) inside and outside a marine protected area and evidence for the role of prior experience in homing[J]. Canadian journal of fisheries & aquatic sciences, 2014, 71(11): 1704 – 1712.
  - [37] WEISE M J, SIMMONS S E. The U. S. animal telemetry network: A plan for implementation [R]. American Geophysical Union, Ocean Sciences Meeting, 2016.
  - [38] OTN. Ocean tracking network [EB/OL]. [2018 – 01 – 20]. <http://ocean-trackingnetwork.org>.
  - [39] 李亚文, 王斌, 张锁平. 海洋动物遥测技术进展研究[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(6): 120 – 126.
  - [40] 傅仰大. 海洋生物水声遥测介绍[J]. 海洋技术学报, 1981(1): 49 – 57.
  - [41] 顾嗣明. 生物遥测技术在渔业研究中的应用[J]. 国外水产, 1985(1): 1 – 4.
  - [42] 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, 22(3): 211 – 217.
  - [43] 孙璐. 许氏平鲉与刺参生物遥测技术的构建与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
  - [44] 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.