

张燕武. 自适应海洋观测[J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 537-541. [Zhang Yanwu. Adaptive ocean observation[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(5): 537-541.]

自适应海洋观测*

张燕武

(蒙特瑞湾海洋研究所, 莫斯兰丁, 加利福尼亚 95039, 美国)

摘 要:“自适应海洋观测”指固定或移动的海洋观测平台能够根据海洋环境和信号的变化, 自主调节测量和运行参数, 获取最关键的海洋信息。自主水下航行器运用自适应检测和采样技术, 在研究上升流锋面等实验中显示出前所未有的观测准确度和效率。一个海洋观测系统的综合效能, 取决于固定平台和移动平台的功能互补以及自适应观测能力的增强。

关 键 词: 自适应海洋观测; 固定观测平台; 自主水下航行器

中图分类号: P71

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2013)05-0537-05

1 从自适应信号处理到自适应海洋观测

地球表面的 71% 是大海, 海面下是一个丰富多彩的世界。大海是我们家园的一部分, 但我们对深海的了解还不及对月球表面的了解。海洋研究的欠缺归咎于观测手段不足、观测效率不高。

自适应海洋观测, 依随机应变之理, 生事半功倍之效。“自适应”指测量仪器或观测平台根据物理环境的变化, 自主调节测量和运行参数, 以获得最佳质量的信号以及获取大量的关键信息。自适应信号处理 (adaptive signal processing) 的理论建立和实际应用始于 20 世纪 60 年代^[1], 一个著名的应用实例是用于心电图仪的自适应噪声抵消 (adaptive noise cancellation)^[2], 用以剔除夹杂在心电图信号中的交流电源噪声。传感器阵列使用自适应信号处理方法, 可以在未知干扰环境中消除干扰, 提取信号^[3]。改革开放之初, 我国学者就将自适应信号处理技术引入国内并继续发展, 应用于水声信号处理等领域^[4]。

对海洋信号的自适应测量始于 20 世纪 80 年代。在研究海洋内波的实验中, 让固定于海底的温

度、盐度、压强传感器能够根据检测到的内波信号的强度, 自主调节传感器的采样率: 在内波信号强时提高采样率, 在信号弱时降低采样率^[5]。当年测量系统的可存储数据量很低, 这项技术使宝贵的数据存储量用在最需要捕捉的信号上。然而固定平台毕竟没有空间上的自由度, 自适应测量只能在时间上做文章。移动平台的加入, 让自适应海洋观测顿生活力。

2 应用自主水下航行器进行自适应海洋观测

2.1 自主水下航行器

海洋辽阔而深邃, 且常有惊涛骇浪。卫星只能观测到大海表面, 从舰船上吊放仪器测量海水的传统方式, 效率低、耗费大, 船员和科学家既辛苦又历险。让机器人代替人下海, 一直是海洋工程科研人员奋斗的目标。经过 20 多年的艰辛, 自主水下航行器——AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 从少量研制到成熟运行, 逐渐成为探索海洋的一支生力军。AUV 不拖带电缆, 投放入水后即自主航行。

AUV 的能源是电池, 计算机是它的大脑。AUV 的导航, 在水下是基于对航速、航向和姿态的测量以

* 收稿日期: 2013-04-07; 修回日期: 2013-04-10.

作者简介: 张燕武 (1969-), 男, 陕西咸阳人, Senior Research Specialist, 主要从事设计自主水下航行器的自适应采样策略, 捕获海洋关键信息工作. E-mail: yzhang@mbari.org

及利用声呐测速,此外,AUV周期性地浮上水面利用卫星全球定位系统(GPS)校正航行误差。AUV携带各种物理、化学、生物传感器,在大海里进行高时空分辨率的测量。由于电磁波在水中骤然衰减,AUV的“视听”主要靠声波。AUV可携带多种声呐,用于避免碰撞,搜寻目标,测量水流速度、海底距离和地形、海底沉积层特性,以及用于定位导航和 underwater 通讯。

根据驱动方式的不同,AUV分为2类:螺旋桨驱动的AUV,以及没有螺旋桨而是依靠一个浮力控制装置驱动的AUV(即glider——水下滑翔机)。蒙特瑞湾海洋研究所(Monterey Bay Aquarium Research Institute, MBARI)研制的Dorado AUV为螺旋桨驱动(图1)。螺旋桨驱动的AUV的航行轨迹灵活多样,既可水平航行,亦可沿锯齿状轨迹航行。水下滑翔机的运行,则是通过控制一个油囊充涨或缩小来调节浮力,它上浮或下沉的垂直运动进而通过机翼转化为具有水平运动分量的锯齿状航行轨迹。美国斯克里普斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography, SIO)研制的Spray水下滑翔机(如图2所示)。螺旋桨驱动的AUV速度较快(约1.5 m/s),可以携带比较多的传感器(包括声呐),能够完成较为复杂的任务,但螺旋桨耗电高,因此续航时间较短。水下滑翔机的滑翔速度慢(约0.25 m/s),但没有螺旋桨这个主要的耗电环节,而且只携带少量耗电很低的传感器,因而非常省电,可以长时间航行。MBARI研制的既有螺旋桨也有浮力控制装置的Tethys AUV^[6],兼收2类AUV的优点。

AUV研制初期的重点是航行器本身的硬件、软件系统,让AUV能够按照预先编程的路径、速度和姿态完成测量任务,不丢失、不损伤,确保常规航次善始善终,在这个研究阶段,“AUV”里的“A——Autonomous”仅体现在水下航行器是无人、无缆运行,离真正的“autonomous(自主)”差距尚远。随着AUV的成熟运行,研究目标提升为让AUV增添智能,趋向真正的“autonomous(自主)”。欲充分利用AUV的“自主”,须赋予它“相机行事”的智能,即根据检测到的海洋信号,自主调节运行和测量参数,以捕捉最重要的海洋信息。对于AUV而言,这2个“A”——“Autonomous(自主)”和“Adaptive(自适应)”,不可分割^[7]。

2.2 自适应海洋观测实例

研究时、空变化比较快的海洋过程,尤其需要自适应观测手段。对上升流锋面(upwelling front)的

研究就是一个例子。近岸上升流将深水里富含的营养盐带到浅水的真光层,促进海洋浮游植物的生长,进而促进海洋浮游动物的聚集以及渔业的丰收。上升流水体与相邻的非上升流水体(即分层水体)之间的锋面(称作上升流锋面)往往是海洋浮游植物及浮游动物富集之处,海洋生物学家需要准确地在上升流锋面内采集水样进行分析。然而上升流锋面通常只有几公里宽,而且锋面位置随着风向、风速以及洋流的变化移动,用传统方法很难准确定位。我们设计了一种方法,使AUV能够自主辨识上升流水体和非上升流水体,并根据水体垂向温差的水平方向梯度精确定位锋面^[8],采集水样,以及紧密跟踪锋面的移动^[9],以自适应的方式观测这个重要而易变的海洋现象。2011年在美国加利福尼亚州Monterey海湾进行的一次实验中,MBARI的Dorado AUV用上述方法准确地捕捉到上升流锋面,并在很窄的锋面内以及毗邻的上升流水体和分层水体中采得水样^[8](图3)。AUV自适应采样的效率及准确度显著优于传统的粗略采样,而AUV实时跟踪锋面更是传统方法难以做到的。

另一个自适应观测的实例是普林斯顿大学(Princeton University)设计的一种自适应控制方法,协调6个Slocum水下滑翔机和4个Spray水下滑翔机在一个三维空间的边界面上同步航行,即便在水流方向和强度变化时仍能保持队形,获得对海洋场在空间、时间上的优化测量^[10]。

3 自适应海洋观测的前景展望

固定平台的优点是长时间、不间断监测,缺点是空间位置固定,知此处不知彼处。AUV的优点是大范围游动搜索,缺点是无法对空间点不间断监测,知此时不知彼时。固定平台和AUV两者协同,则长短互补,“攻”(游动搜索)“守”(长期监测)兼备^[7]。位于美国东海岸外的Pioneer Array(http://www.whoi.edu/ooi_cgsn/pioneer-array)就是一个由固定平台和移动平台组成的观测阵列^[11],包含多个锚系站、垂向缆线剖面仪、自主水下航行器(包括由螺旋桨驱动的AUVs以及由浮力控制装置驱动的gliders),其中2个锚系站上安装AUV停靠站(docking station)。这个观测阵列的科学目标为:用固定平台监测陆架坡折(continental shelf break)锋面的物质通量和热通量;用自主水下航行器在更大的空间范围内游动观测。

我国海洋观测网络的建设,在科学目标上应针

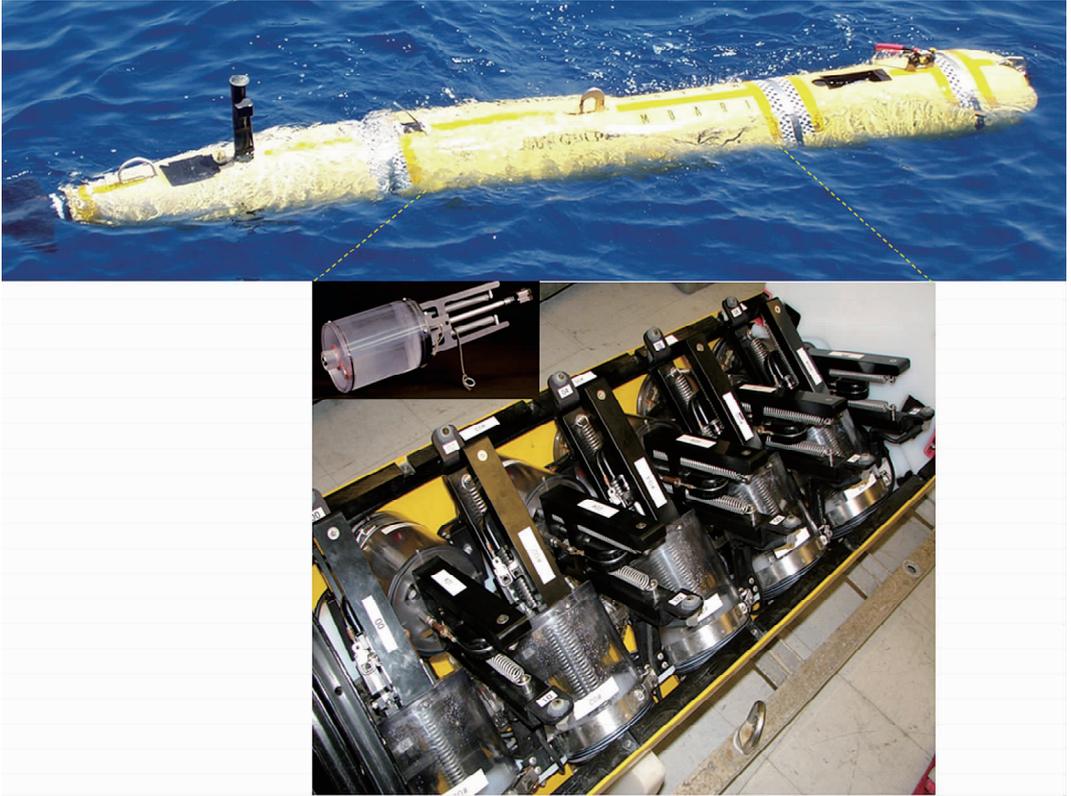


图1 MBARI Dorado AUV

Fig.1 The MBARI Dorado AUV

长4.2 m, 中央截面直径0.53 m. 在AUV中段装有10个水样快速采集器(上图摄影:本文作者;下图摄影:Larry Bird and Alana Sherman)

The vehicle has a length of 4.2 m and a diameter of 0.53 m at the midsection. Ten fast water samplers are installed in the midsection (photo credit: Upper photo by the author; Lower photo by courtesy of Larry Bird and Alana Sherman)



图2 SIO Spray 水下滑翔机

Fig.2 The SIO Spray glider

长2 m, 中央截面直径0.2 m, 翼展1.2 m (引自 http://spray.ucsd.edu/pub/rel/info/spray_description.php)

The glider has a length of 2 m, a diameter of 0.2 m at the midsection, and a wingspan of 1.2 m

(from http://spray.ucsd.edu/pub/rel/info/spray_description.php)

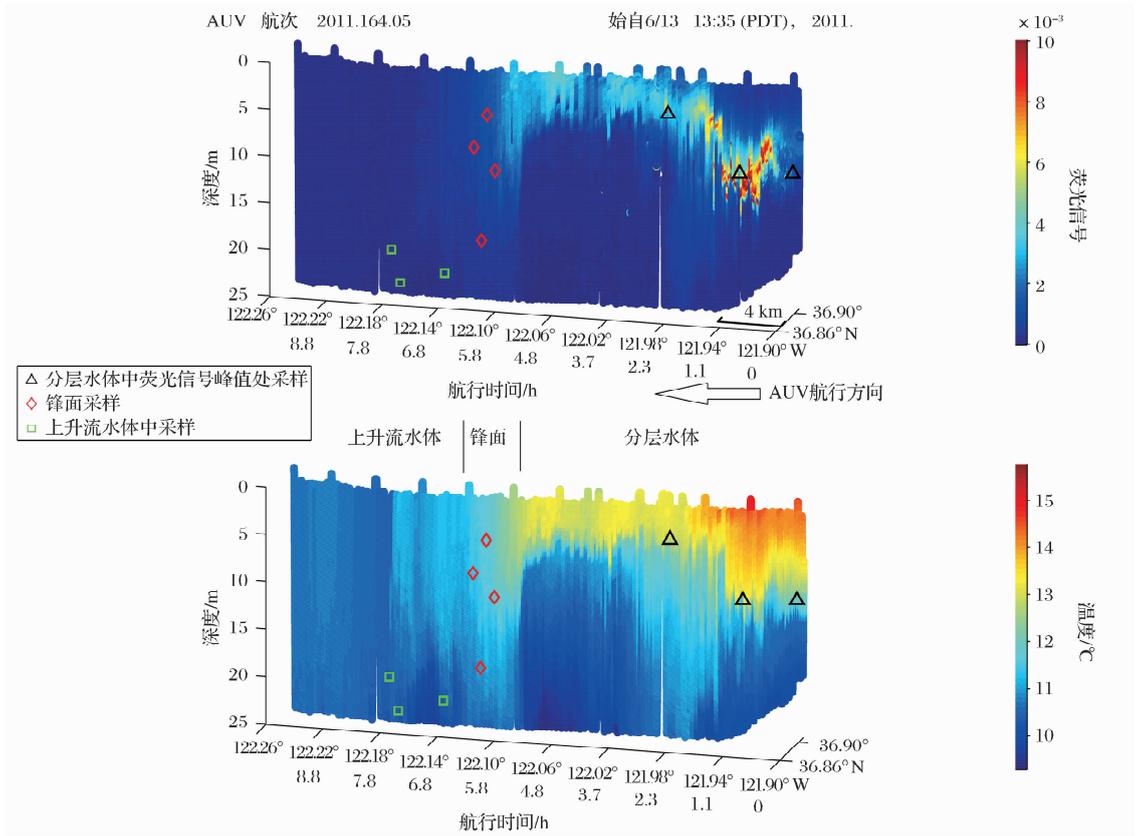


图3 2011年在美国加利福尼亚州 Monterey 海湾进行的一次实验中,MBARI Dorado AUV 自主辨识上升流水体和分层水体、精确定位锋面,并在3种水体中采集水样

Fig. 3 In an experiment in Monterey Bay (California) in 2011, the MBARI Dorado AUV autonomously classified the upwelling water column and the stratified water column, accurately detected the upwelling front, and acquired water samples from the three distinct water columns

AUV 沿垂直面锯齿状轨迹自东向西航行,测得的叶绿素荧光信号和水温分别由上、下图所示^[8]

The AUV flew westward on a sawtooth trajectory (in the vertical dimension). The AUV-measured chlorophyll fluorescence and temperature are shown in the upper and lower panels, respectively^[8]

对海域的特点,在工程方法上宜采用先进技术^[12]。“我国的近海属于最大的大陆和大洋之间的西太平洋边缘海,特点是季风气候的季节反差大、河流入海物质通量大、海洋动力过程复杂,是全球变化(尤其是海陆相互作用)的理想研究区域”^[13]。一些海洋过程不仅有科学研究意义,而且关乎国计民生。例如,东海沿岸的上升流将营养盐带到表层,促进海洋浮游植物和浮游动物的生长,利可带来渔业丰收(如舟山渔场),弊则促发赤潮(即有害藻类的勃发),自适应观测手段有助于对上升流的时、空变化规律及其对海洋生态的影响进行更精细的探究。在我国的东海、南海海洋观测网络中,固定平台与移动平台相结合的自适应观测技术应有有用武之地。

John Ryan, Julio Harvey, Michael Godin, Robert McEwen, Francisco Chavez, Christopher Scholin 在 AUV 自适应采样方法设计和实验中的合作及帮助。感谢同济大学汪品先院士对文章构架的建议。感谢翦知湓教授的约稿邀请。

参考文献 (References):

- [1] Widrow B, Mantey P E, Griffiths L J, *et al.* Adaptive antenna systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55 (12): 2 143-2 159.
- [2] Widrow B, Glover J R, McCool J M, *et al.* Adaptive noise canceling: Principles and applications[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1975, 63(12): 1 692-1 716.
- [3] Griffiths J W R. Adaptive array processing, a Tutorial[J]. *IEEE Proceedings*, 1983, 130(1): 3-10.
- [4] Ma Yuanliang. Adaptive coherent integration for detection of sin-

致 谢:感谢 MBARI 的同事 James Bellingham,

- gle-frequency or frequency-modulated pulse signals[C]//Proceedings of the 1st Chinese Conference on Signal Processing, 1984, 4: 971-974. [马远良. 检测单频或调频脉冲信号的自适应相干累积[C]//第一届全国信号处理学术会议论文集. 1984, 4: 971-974.]
- [5] Irish J D, Brown W S, Howell T L. The use of microprocessor technology for the conditional sampling of intermittent ocean processes[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1984, 1: 58-68.
- [6] Bellingham J G, Zhang Y, Kerwin J E, *et al.* Efficient propulsion for the Tethys long-range autonomous underwater Vehicle[C]//Proceedings of the IEEE AUV' 2010 Conference, 2010: 1-6.
- [7] Zhang Yanwu. Adaptive ocean observation using fixed platforms and autonomous underwater vehicles[C]//Proceedings of the 1st Chinese Conference on Seafloor Observation. 2012: 14-15. [张燕武. 利用固定平台及自主水下航行器进行自适应海洋观测[C]//第一届海底观测科学大会摘要集. 2012: 14-15.]
- [8] Zhang Y, Ryan J P, Bellingham J G, *et al.* Autonomous detection and sampling of water types and fronts in a coastal upwelling system by an autonomous underwater vehicle[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2012, 10: 934-951, doi: 10. 4319/lom. 2012. 10. 934.
- [9] Zhang Y, Godin M A, Bellingham J G, *et al.* Using an Autonomous underwater vehicle to track a coastal upwelling front[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2012, 37(3): 338-347, doi: 10. 1109/JOE. 2012. 2197272.
- [10] Leonard N E, Paley D A, Davis R E, *et al.* Coordinated control of an underwater glider fleet in an adaptive ocean sampling field experiment in Monterey Bay[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 27(6): 718-740.
- [11] Cowles T, Delaney J, Orcutt J, *et al.* The ocean observatories initiative: Sustained ocean observing across a range of spatial scales[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2010, 44(6): 54-64.
- [12] Shanghai Center of Marine Science & Technology (Preparatory Office), State Key Laboratory of Marine Geology of Tongji University. Seafloor Observation—Science and Technology[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2011. [上海海洋科技研究中心(筹)、海洋地质国家重点实验室(同济大学). 海底观测——科学与技术的结合[M]. 上海: 同济大学出版社, 2011.]
- [13] National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. Science Development Strategy of China in the Next Decade · Marine Science[M]. Beijing: Science Press, 2012. [国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 未来10年中国学科发展战略·海洋科学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]

Adaptive Ocean Observation

Zhang Yanwu

(Monterey Bay Aquarium Research Institute, Moss Landing, CA 95039, U. S. A.)

Abstract: “Adaptive ocean observation” refers to fixed or mobile observing platforms being able to autonomously adjust measurement/operational parameters based on the oceanographic environment and signals, aiming at acquiring key information of the observed oceanographic processes. Adaptive detection and sampling by Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) have achieved unprecedented accuracy and efficiency in studies of upwelling fronts and other oceanographic processes. The synergistic efficacy of an ocean observing system depends on the complementary functionalities of fixed and mobile platforms and their adaptive observation capabilities.

Key words: Adaptive ocean observation; Fixed observing platform; Autonomous Underwater Vehicle (AUV).