

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: 23320101153122

UDC_____

廈門大學

硕士学位论文

浅海水声节点定位技术及应用研究

Research of Shallow Sea Underwater Acoustic Node
Positioning and Application

黄盛德

指导教师姓名: 林聪仁 副教授

专业名称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2013 年 月

论文答辩时间: 2013 年 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2013 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

水声定位技术在水下测深、定位、目标探测与识别、通信、导航、遥控、寻找油气、开发矿产等方面得到了广泛的应用，在保障国家的国防安全和国民经济建设的顺利进行中起着重要作用。随着人类对水下探索研究工作的深入开展，所采用的研究手段也越来越丰富，水下机器人，载人深潜器以及其它各种探测设备不断革新，具有高可靠性的水下导航定位在海洋发展中的重要作用日益凸显。

传统的水声定位系统大部分比较复杂，布放较为麻烦，而且整个系统价格不菲，维护成本高，同时灵活性不够。单就其中数据采集系统而言，或者是软件系统或者是硬件系统，传统定位系统都需要花费大量的精力去搭建。为此，很多定位系统搭建者不惜花重金直接去购买现成的采集装置。本文基于这样的背景条件下设计出了一整套改进的短基线水声节点定位系统，该系统一方面有效的克服了上述传统定位系统的缺点，另一方面也具有较高的定位精度。

本文在传统短基线定位模型的基础上，建立一套改进的短基线水声节点实时定位系统平台。首先，系统基于 LabVIEW 软件平台，开发了一套定位信号的单通道发射和多通道接收程序，并建立相应软件界面。在此基础上，完成对接收信号的后台处理算法程序的设计和调试，最终使目标节点在界面实时显示，实现对水下目标的定位。

论文对水声信道传输特性及多种水声定位模型和节点定位算法进行了详细研究，对可能引起定位误差的各种因素及其解决途径加以分析。该系统采用基于测时的异步、短基线水声节点自定位方法，以线性调频信号为主要定位信号，测量定位信号到达节点的时延差作为距离测量的依据；取三个点，通过测量一点到另外两点的时延差和距离差来推算水中声速；采用双曲线定位数学模型，运用基于 TDOA 的质心误差分析算法来确定目标最终位置，有效地提高了定位精度。

经过多次仿真分析、水池实验验证表明，本文架构的水声节点定位系统在 25m 范围内的定位误差 σ 最大不超过 80cm，最小达 2cm；系统平均定位误差约为 20cm，精度 α （平均定位误差占测距范围百分比）约为 13%。明显地降低水下目标的方位统计误差，相比于其他的短基线水声定位系统具有更快的响应速

度，从而较好地改善了定位系统的性能。

论文所做的工作能够对海洋工程建设、水下潜艇定位、海洋探测与开发提供理论和技术支持，具有深刻的现实意义和广泛的应用前景。

关键词：多通道数据采集，广义互相关时延估计，双曲定位数学模型，三角质心节点定位

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Underwater acoustic positioning technology which is widely used in underwater depth measuring, positioning, target detection and recognition, communications, navigation, remote control, oil and gas detection, mineral exploitation and so on, plays an important part in the protection of national security and the well progress of national economy. With the human's in-depth development of the underwater exploration, the research methods used are richer and richer. For the continuous innovation of underwater robot submarine, manned submarine, as well as a variety of other detection equipments, underwater navigation and positioning with highly reliability are more and more important in marine development.

Most of the traditional underwater acoustic positioning systems are complex and inconvenient in laying. And the entire system is expensive, with high maintenance costs, and lack of flexibility. Just considering the data acquisition system, with software or hardware, which the traditional positioning systems need to take a lot of effort to build. For this reason, many of the positioning systems' builders are much more willing to buy off-the-shelf acquisition device directly, though they cost a large number of money. Based on this background conditions, the essay designed a set of improved SBL (short baseline: SBL) UANP (underwater acoustic node positioning: UANP) system, which overcomes the shortcomings of the traditional positioning system effectively, and also has a high positioning accuracy.

Based on the traditional SBL positioning model, the paper builds a set of improved SBL UANP Real-time system platform. Firstly, based on LabVIEW software platform, the system explores the signal channel transmitting and multi-channel receiving programs for positioning signal, and establish software interface respectively. Secondly, the system finishes the designing and debugging of the signals' processing program, and make the target display in the interface real-time,

which realized positioning of the underwater targets.

The essay studies hard on transmission characteristics of underwater acoustic channel (UAC), positioning models and node localization algorithms. A variety of factors which are related to positioning error and their solutions were analyzed in detail. The system is designed base on time measurement, asynchronous and SBL UAN self-localization method, which takes LFM signal as the main positioning signal. Taking three transducers, one to be transmitter, and others receivers. Measuring the time delay difference and distance difference from transmitter to the other two receivers, so as to calculate the speed of sound in water. The essay uses hyperbolic positioning mathematical model, and also uses the centroid error analysis algorithm which based on TDOA to determine the target' s final position, which improve the positioning accuracy effectively.

Simulations and pool experiments show that the UANP system that proposed gets an error σ between 80 centimeters and 2 centimeters within a range of 25 meters. The system's average positioning error is about 20 centimeters. The accuracy (per mille of average positioning error in ranging range) is 13%. The results also show that the system could reduce the underwater target orientation statistical error significantly, and gets a faster response than other SBL UAP systems, which largely improves the performance of the positioning system.

Works of this paper can provide theoretical and technical support to marine construction, positioning of underwater submarines, and marine exploration and development, which has profound practical significance and broad application prospects.

Keywords: Multi-channel data acquisition; Generalized cross-correlation time delay estimation; Hyperbolic positioning model; Triangle centroid note positioning

摘要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
Contents	VII
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 浅海水声定位系统发展概述	3
1.2.1 水声定位技术的起源.....	3
1.2.2 国内外研究发展现状.....	4
1.3 虚拟仪器与 LabVIEW	9
1.4 论文框架	13
第 2 章 浅海水声节点定位原理	14
2.1 引言	14
2.2 水声定位技术的分类与应用	14
2.2.1 USBL、SBL、LBL	15
2.2.2 基于测距的定位和距离无关的定位.....	21
2.2.3 递增式定位和并发式的定位.....	21
2.2.4 集中式定位和分布式定位.....	22
2.3 水声节点定位算法研究	22
2.3.1 广义互相关时延估计算法.....	22
2.3.2 双曲线定位数学模型.....	26
2.3.3 基于 TDOA 的质心误差分析算法	30
2.4 本章小结	31
第 3 章 浅海水声节点定位关键技术	32

3.1	引言	32
3.2	水声节点定位系统的性能指标	32
3.2.1	水声节点密度.....	32
3.2.2	精度与规模.....	33
3.2.3	容错性和自适应性.....	33
3.2.4	代价.....	34
3.3	浅海声信道对声传输的影响	34
3.4	浅海声速的选取	38
3.5	本章小结	42
第 4 章	节点定位系统平台的设计与实验	43
4.1	系统整体架构	43
4.2	定位系统的硬件系统构成	44
4.3	定位信号选择	48
4.4	系统上层的 LabVIEW 实现	51
4.5	浅海水声节点定位系统实验	52
4.5.1	发送端和接收端.....	52
4.5.2	水池实验情况.....	55
4.5.3	节点定位结果与误差分析.....	57
4.6	本章小结	61
第 5 章	结论与展望	63
5.1	全文工作总结与创新之处	63
5.2	后期研究展望	64
	参考文献	66
	致谢.....	70
	攻读硕士学位期间发表的学术论文	71

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Contents in Chinese	V
Contents in English	VII
Chapter1 Preface	1
1.1 Research Background and Meaning	1
1.2 Development of Shallow Water Acoustic Positioning System	3
1.2.1 Origin of the UAP Technology	3
1.2.2 Domestic and International Research Status.....	4
1.3 Virtual Instrument and LabVIEW	9
1.4 Framework of the Essay	13
Chapter2 Principle of UANP System	14
2.1 Introduction	14
2.2 Classification and Application of the Positioning Technology	14
2.2.1 USBL、SBL、LBL	15
2.2.2 Positioning Systems Whether Based on Ranging	21
2.2.3 Incremental Orientation and Concurrent Positioning Systems.....	21
2.2.4 Centralized and Distributed Positioning Systems.....	22
2.3 Algorithms of the UANP	22
2.3.1 Generalized Cross-Correlation Algorithm	22
2.3.2 Hyperbolic Positioning Mathematical Model.....	26
2.3.3 Centroid Error Analysis Algorithm Based on TDOA	30
2.4 Summary	31
Chapter3 Key Technologies of UANP System	32

3.1	Introduction.....	32
3.2	Performance of UANP System.....	32
3.2.1	Node density of positioning system.....	32
3.2.2	Positioning Precision and Scale.....	33
3.2.3	Fault Tolerance and Adaptability.....	33
3.2.4	Location Cost.....	34
3.3	Effect of Underwater Channel to Sound Transmission.....	34
3.4	Selection of the shallow Water Sound Velocity.....	38
3.5	Summary.....	42
Chapter4	Platform Designing and Experiment of UANP System ..	43
4.1	The Overall Architecture of the System.....	43
4.2	Hardware Configuration of the UANP System.....	44
4.3	Selection of the Positioning Signal.....	48
4.4	LabVIEW Implementation of the Upper UANP System.....	51
4.5	Experiment of the Shallow Water	52
4.5.1	Sending and Receiving Ends.....	52
4.5.2	Pool Experiments.....	55
4.5.3	Position Results and Error Analysis.....	57
4.6	Summary.....	61
Chapter5	Summary and Prospect.....	63
5.1	Summary of the Essay and Innovation.....	63
5.2	Future Research Prospects.....	64
	Reference.....	66
	Acknowledgement.....	70
	Published Paper During Pursuing Master Degree	71

第1章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

在地球表面，海洋面积约占 71%，而整个海洋拥有近 14 亿 km^3 的体积，其中蕴藏着极其丰富的生物资源以及 6000 亿吨的矿产资源。此外，海洋更是一个庞大的能源储备仓库，大约有 2800 亿吨石油和近 140 亿立方米的天然气储存在全世界海洋中，可以说，海洋就是人类资源的宝藏。进入 21 世纪以后，人类开始更加频繁的利用，开发并保护着海洋，同时，各国也更加关注对海洋的开发利用工作，特别是海上军事安全与对抗，更是从战略高度受到各国的重视。不管是海洋的开发与利用，还是军事的安全与对抗，都需要首先解决一个最基本的问题，那就是“如何确定自己以及其他目标的位置”，也即“定位”问题^{[1][2][3]}。15 世纪初，各国科研工作者就对这一问题，开始了有针对性的曲折而漫长的探索。在浅海海水中，光波和电磁波的传播衰减都很大，所以它们在海水中的传播距离十分有限。新近研究发展的蓝绿激光技术^[4]尽管已取得了较好的进展，然而其造价太高，不适用于长距离、大规模的水下定位。到目前为止，发现在各种能量形式中只有声波在海洋中具有最佳的远距离传播性能，故而，声波便逐渐成为海洋中信息传播的主要载体，水声定位导航技术也成为水下目标定位和导航的强有力工具。

在海洋环境监测、海洋能源开发、海上科考、水下机器人导航、渔业资源的探测和开发等中，水声定位技术可以为目标提供可靠的服务；特别是 1950 年以来，经济快速向前发展，陆地上的能源渐渐满足不了人类的需求，此时，海洋自然就成了世界各国关注的焦点。据不完全统计，海洋油气资源的储量约占全球油气储量的三分之一。北美的墨西哥湾、西亚的波斯湾、欧洲的北海以及中国近海，都是世界公认的油气储量丰富的海区。能源的开发需要准确地布置和敷设海洋工程结构物、海底光缆管线，以保障生产及生活的安全。因此，水声技术受到了更多的重视，并提出了更高的要求。2013 年 1 月 25 日国务院批准了《国家海洋事业发展“十二五”规划》^[5]，《规划》指出“到 2020 年，要实现海洋科技自主创新能力和产业化水平大幅提升”，同时，《规划》还提出了制定海洋发展战略、

实施海洋综合管理、强化规划配套指导、加大政府投入力度等保障措施。可见，海洋开发利用问题已经上升为国家重要战略问题。在这种战略需求的刺激下，水声定位导航技术又得到更进一步的发展。

实际上，海洋不仅是人类资源的宝库，更是开阔的战场。海军利用声学定位导航系统，可以实现水下作战武器安全自主航行、准确发现和攻击目标、并实施有效敌我对抗。对于战略潜艇，它需要的是高精度和长时间的隐蔽航行，这是现代战争对战略潜艇的基本要求，然而，经典的惯性导航系统累积误差较大，这种弱点使得它不适合做长时间机动，所以，此方案不可行；另外，大家耳熟能详的 GPS 导航模式，其导航信号在水中会随距离而出现较大的衰减，不能进行自由传播，假如坚持采用 GPS 方案，则要求潜艇浮出水面，这样还是会大大降低潜艇的隐蔽性，此方案也不可行。之后，科研工作者开始专注于声学定位导航技术的研究，以期找到更好的突破口。自从 80 年代初在战略潜艇上部署了导航声呐系统（NSS）后，声学定位导航系统迅速地在潜艇等水下作战武器的导航领域开辟了一片天地^{[6][7][8]}。

美国海洋战争委员会联合其他几个军方部门，专门指出：反潜是未来海军的支柱性任务。尽管某些非声学的手段也可以用来探测潜艇，比如可以利用机载合成孔径雷达进行遥感探测，但是就目前的发展水平来看，这些非声学的技术只能是声学反潜技术的一种补充。声学定位导航系统也是检验和鉴定水下作战武器性能的主要手段，是靶场建设的重要组成部分。在世界各国对海上防御和海上作战能力高度重视的推动下，海军水下武器装备也有了长足的进步和发展，在技术水平和产品性能指标上都有了新的突破，其显著特点是作用范围更大、测量精度更高、工作深度更深、航行速度更快，这对靶场试验鉴定的手段提出了更高的要求^[9]。

随着海洋工程的不断发展，水声学、信号处理理论逐步成熟，网络化的水声通信、水声监测技术得到长足发展，水声技术的应用愈来愈广泛。利用节点定位技术对水声网络中的目标节点进行定位、跟踪或导航在军事和民用方面都有着重要和不可取代的地位，将在人类向海洋的发展中做出更大的贡献。

1.2 浅海水声定位系统发展概述

1.2.1 水声定位技术的起源

列昂纳多·芬奇是一个多才多艺的工程师，在 1490 年，也就是哥伦布发现美洲大陆的前两年，他写道：“如果使船停航，将长管的一端插入水中，而将管的另一开口放在耳朵旁，则能听到远处的航船”。其实这即是被动声纳的雏形。水声的第一次定量测量，大约是在 1827 年进行的。那时，瑞士物理学家 Daniel Collaton 和法国数学家 Charles Sturm 合作，在瑞士日内瓦湖将声速测到一个惊人的精度。之后不久，碳粒微音器作为声纳基石的一个发明悄然出现，它是最早也是最灵敏的水听器^[10]。

20 世纪初，潜水钟作为水声的第一个实际应用悄然诞生，它通过在灯塔船上安装潜水钟和雾号，可测定船舶和灯塔船之间的距离；1912 年，面对“泰坦尼克号”海难，各国科学家们开始对海底冰山的探测定位进行研究，不久，美国出现了第一台水声测深仪，这标志着水声助航设备的诞生。1913 年，美国科学家 R·A·费森登(R·A·Fessenden)申报了水下探测的多项专利并用自己设计的动圈式换能器制造了第一台回声探测仪。1914 年 4 月他用这台设备发出的 0.5-1kHz 的声波成功地探测到两英里（合约 3.7km）之外的冰山^[9]。

如果说回声探测仪是水声定位技术的雏形，那么 20 世纪初的两次世界大战就是推动声学定位技术军事应用迅速成长的催化剂：第一次世界大战期间，德国运用其强大的水声定位系统对协约国及其他国家的海上运输造成很大的威胁。之后，其他国家也相继在水声定位技术方面取得进展，并对水下潜艇进行探测。1918 年郎之万研制出压电式换能器，实现了超声波进行水下远距离目标的探测，第一次收到了潜艇的回波，开创了近代水声学并发明了声纳。不过，当时船载声纳的主要任务是以本舰为坐标系原点，去探测目标的方位和距离。直到 20 世纪 50 年代，利用声学技术对船舶和水中载体进行地理位置（大地坐标）的测定，才逐渐发展壮大起来。1937 年发明了温度深度仪，能够快速测量和计算海水中声速随深度的变化，从而掌握声波的传播，为声纳的进一步发展打下了基础^[10]。1958 年，美国华盛顿大学应用物理实验室在大波湾建成的三维坐标跟踪水下武器靶场，在海底放置了四个间距严格测定的水听器，可以在近距离上对带有同步声信

标发射机的鱼雷提供距离和方位信息,这是高精度水声定位系统开始出现的一个标志^{[11][12]}。

1.2.2 国内外研究发展现状

现代科学对地面目标的定位研究详细而且深入。然而,由于声传输介质本身具有的独特性质,对水下目标的定位问题又给我们带来了全新的挑战。水声定位是一个宽泛的多学科领域,其中包含水下声学、物理海洋学、电声传感器设计、电子设计、水下建筑物、信号处理、概率、随机过程、估算理论、控制理论等学科领域的内容。就实时的水声定位系统而言,还涉及计算机及软件设计知识。随着电子计算机微处理技术的发展和应用,它可以实时、快速、连续自动地显示出所需要的位置信息,这对于研究水下航行器、水下工作系统以及水面工作船所处的状态等都是很重要的。水声定位系统既然可以确定船位或目标位置,因而也广泛用于局部水域的精确导航。正因为如此,水声定位系统常被人称为水声定位导航系统。声学定位系统与其他导航系统结合起来,进行坐标变换,可以精确地解算出大地坐标量。下面主要对国内外水声定位技术的发展现状做简要介绍。

(1) 国内发展现状

由于水声定位导航系统在民用生活和军事上的重要作用,我国已有越来越多的机构投入到水声定位技术方面的研究,但是由于资金、市场需求、及人力的限制,加上起步较晚,其与国外的发展水平还存在比较大的差距。国家海洋局海洋技术研究所对水声定位技术做了深入的研究,研发出了一套高精度的超短基线跟踪定位系统,该系统在船速小于 12km 的情况下,方位角的测量、距离的测量和深度的测量精度都相当高,其中方位角测量精度均方差为 0.4° , 距离和深度测量的精度均方差小于 1.3m。360° 全方位定位误差小于 1° ^[13]。

在对海底地形和地貌的测量研究中,中科院声学所等单位开发研发出的浅海、深海地层剖面仪被广泛的应用于其中,如对海底浅层地质结构、水下地形地貌、海底矿产资源的勘测、海岸港口建设、海洋石油钻井平台的安装、海底管线的测定铺设等工程^[14]。

1991 年,我国研制成功了车载式鱼雷轨迹测量系统,此系统采用同步定位方式,实现了数字化定位。东南大学研制的 YTM 鱼雷弹道测量系统是我国水声

定位系统中具有代表性的^[14]。它采用 6 个阵元组成水听器阵列,采用三点法定位,通过测量目标信号到达基阵对角线上三个阵元的时间差,由双曲面交汇得到目标点的坐标。YTM 系统由于在垂直方向上的尺度很小,所以深度测量精度不是很理想^[11]。

匹配场声源定位是近年来国际上新兴的水声定位方法,它根据海洋声信道的特性,在声场建模的基础上,运用一定的匹配场处理算法反演声源位置^[15]。国内学者张仁和和孙枕戈阳在匹配场目标定位作了大量的研究,取得了一些成果。射线模型的声场计算由于算法简单、直观的特点近几年得到发展并应用到浅海匹配场声源定位^[9]。

2004 年,由国家“863”计划资助的我国水下 GPS 高精度定位导航系统“差分 GPS 水下立体定位系统”已研制成功,填补了我国在水下高精度定位导航和水下工程测量领域的空白。该系统采用长基线海面浮标系统,可从水上(海面、沿岸陆地或飞机上)对水下目标跟踪监视和动态定位,同时利用 GPS 技术实现了水下设备导航、水下目标瞬时水深监测、水下授时(通过网络发布标准时间)、水下工程测量控制和工程结构放样(将一项比较复杂的构件以图表形式画出,实施的时候按照图表施工)等功能。该系统静态定位精度为厘米级,动态定位精度小于 2m,工作深度大于 100m,水声作用距离大于 200m,可实现水下目标跟踪与导航功能;其浮标连续工作时间大于 6 小时,水下收发机连续工作时间大于 24 小时。可用于水下目标动态定位、水下工程结构放样、目标瞬时水深检测、水下目标导航和水下工程测量。该系统的成功研制,打破了发达国家对水下高精度定位技术的垄断,填补了我国在水下高精度定位导航和水下工程测量领域的空白^[12]。

最近几年,哈尔滨工程大学也研制出三种超短基线定位系统:“深水重潜装潜水员超短基线定位系统”;“探索者”号水下机器人超短基线定位系统;“灭雷具配套水声跟踪定位装置”。前两种都是简易的系统,仅用于近程的特殊使用场合,最后一种是型号产品,该系统的显著优点是浅海定位性能优良,即使对于水平方向(目标俯仰角为 0°)的目标,定位精度仍优于 3%斜距,浅海作用距离达到 3km,可实时给出 3 个目标的轨迹^[12]。

此外,国内科研工作者已经作了大量的水声定位技术理论研究。陈晓忠^[16]

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库