

# 两栖装备入舰引导系统方案研究

吴锋<sup>1,2</sup>, 丁晟<sup>3</sup>

(1.陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100072; 2.浙江省遂昌县人民武装部, 浙江 丽水 323300; 3.中国人民解放军 31606 部队, 杭州 310023)

**摘要:** **目的** 针对两栖装备上下登陆舰时自动化程度低、无法全天候实施的问题, 提高恶劣海况和黑夜条件下的登舰作业能力, 提出一种两栖装备入舰引导系统设计方案。**方法** 依托装备再制造升级技术手段, 通过水下探测器接收登陆舰发射的超声波定位脉冲信号, 获得装备相对位置和路线规划信息, 有效规避航线水下障碍物, 提高装备登舰的准确度和效率。**结果** 针对系统发出的超声波信号部分被水下超声接收器接收的情况, 对海水、海洋环境噪声和海洋混响等因素对声波信号传输特性的影响展开研究, 重点分析了浅海海域的季节性声速剖面、传播过程中的声强损失, 对海洋环境噪声、海底和海面的等效平面波混响级进行数学建模, 通过静态和动态试验, 验证了模型推导的准确性和数据的可靠性。**结论** 通过浅海多径传播信号合成模型和双路径传播的信号衰减模式的推导, 为求解声波传播模型的波动方程奠定了基础。

**关键词:** 两栖装备; 引导; 声波信号; 浅海海域; 传播特性

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2018.05.019

**中图分类号:** TJ410.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2018)05-0093-08

## Schemes for Amphibious Equipment Entering Landing Ship Guidance System

WU Feng<sup>1,2</sup>, DING Sheng<sup>3</sup>

(1. Department of Equipment Support and Remanufacturing, Academy of Armored Army Forces, Beijing 100072, China;  
2. People's Armed Forces Department of Suichang County, Lishui 323300, China;  
3. 31606 Troops of the Chinese PLA, Hangzhou 310023, China)

**ABSTRACT:** Objective To improve landing ability of amphibious equipment under severe sea state and dark night in allusion to low automation and incapability of being adaptive in all weather conditions. Methods The ultrasonic localization signal of landing ship was received by underwater detection device to obtain actual position of amphibious equipment, so as to avoid underwater barriers in route and improve guiding efficiency and accuracy effectively. Results Aiming at the fact that parts of the ultrasonic signal was received by underwater ultrasonic receiver, this paper studied on the effects on propagation characteristics of acoustic signal by factors of seawater, sea noise and oceanic reverberation. The seasonal sound speed profile (SSP) and acoustic transmission loss (TL) were analyzed emphatically. Mathematical modeling on reverberation level of ambient sea noise, seabed and sea level was completed. The derivation accuracy and data reliability were verified by static and dynamic tests. Conclusion Derivation of shallow sea multipath propagation signal synthesis model and double-path propagation signal degradation mode lays a foundation for solving the wave equation of propagation model.

**KEY WORDS:** amphibious equipment; guiding; acoustic signal; shallow sea region; propagation characteristics

## 1 两栖装备登舰过程中存在的问题

渡海作战不可避免地涉及到两栖作战装备的输送问题。目前两栖装甲装备的主要装载方式是通过登陆舰在海上装载。在渡海作战的抢滩登陆前,必须由登陆舰将装备运送到敌方阵地前沿浅海海域,然后让装备自行下水,遂行登陆作战任务。为了提高部队的机动性能和行动的隐蔽性,两栖装甲装备的登舰常常需要在夜间进行,并不可避免地伴有风浪和洋流的影响。因此,两栖装甲装备的登舰过程是一项技术难度和危险性很大的工作。

作为海上装载最重要环节的登舰过程,目前基本上是靠车长指挥驾驶员通过目视判断装甲装备与登陆舰间的距离与相互位置进行登舰的,不仅自动化程度较低,而且由于夜间照明不良和人眼观察视野受限造成操作不当,极易发生装甲装备与登陆舰相撞或碰撞的危险。因此亟需一种可在恶劣海况条件下,实现装甲装备安全、可靠、高效的登舰导航技术和设备,提高部队渡海作战能力和反应速度。

### 1.1 解决思路

为解决两栖装备登舰过程中存在的诸多问题,文中以两栖装备和装载登陆舰为对象,综合运用装备再制造升级的理论、技术和方法,升级原“两栖装备-登陆舰”结构的登舰体系,增加装备入舰导航模块,增强装备登舰体系的整体性能。具体来说,就是以部队急需解决的两栖装备入舰导航关键技术及导航系统为研究对象,运用适用于两栖装备登舰导航的装备再制造升级工程技术,进行系统、深入的研究,采用可靠、成熟和切合实际的工程设计和技术手段,实现两栖装备登舰过程的自动化引导。在解决目前渡海作战存在的问题上,该研究方案具有较大的军事意义和应用价值:

1) 通过升级改造,及时将新技术、新系统、新设备应用到登舰体系装备中,在相对较短的时间内以较低的成本,实现装备性能的突破式发展,进一步提高装备的两栖作战能力。

2) 提高部队在恶劣海况条件下两栖装备的登舰能力,解决以往恶劣海况无法登舰的问题。

3) 解决实战化训练和作战的夜间登舰问题,使两栖装甲装备的登舰从现行的白天扩展到全天候,适应现代实战化训练和作战的需求。

4) 缩短常规战前准备时间,提高了部队的快速反应能力。

5) 减少了每年海训过程中两栖装甲装备的损坏率,节约了大量训练开支,降低了日常维护费用。

### 1.2 装备再制造升级方案

装备再制造升级作为装备改造的重要方式,是以

原装备为对象,综合运用结构改造和功能嵌入等先进技术手段,实现原装备的功能提升或质量升级。装备再制造升级的对象是具有固定结构的装备,对其升级加工相对新装备研制来说具有更大的约束度,所以对技术要求更高。通常装备再制造升级所采用的方式主要有以下三类<sup>[1]</sup>。

1) 以采用最新功能模块替换旧模块为特点的替换法。主要是直接用最新装备上安装的信息化功能新模块替换废旧装备中的旧模块,用于提高再制造后装备的信息化功能,满足当前对装备的信息化功能要求。

2) 以局部结构改造或增加新模块为特点的改造法。主要用于增加装备新的信息化功能以满足功能要求。

3) 以重新设计为特点的重构法。主要是以最新装备的多种功能化要求和特点出发,重新设计出再制造后装备结构及性能标准,综合优化装备再制造升级方案,使得再制造后装备性能接近或超过当前新装备性能。

通过对两栖装备入舰引导的需求分析,以及海上装备入舰自然环境的限制,在原有登舰体系装备上增加功能模块,设计一种能够用于两栖装备入舰引导的实用系统。根据两栖装备和登陆舰的性能特点和装备入舰的技术要求,依托装备再制造升级关键技术,提出具体战术技术指标,论证系统设计的技术难点和升级方案。确定再制造升级方案及装备再制造升级的步骤和工艺路线如图1所示。

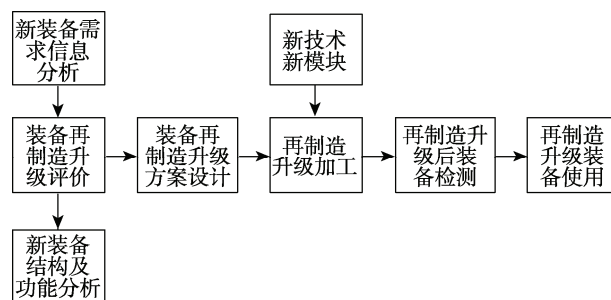


图1 装备再制造升级工艺路线

依据升级工艺路线,首先对原有装备的工况和存在问题进行分析,明确升级后装备的需求信息和性能要求,并对再制造升级的可行性进行综合评估,确定具体升级方案,明确需要增加的功能模块。然后,依据升级方案,采用相关技术进行装备的再制造升级加工,对装备进行加改装。最后,对升级后的再制造装备进行性能和功能的综合检测,确保装备质量。

## 2 系统总体设计方案

两栖装备入舰作业场如图2所示,作业场一般呈扇形分布,若装备引导范围以登陆舰的入口为原点,最大覆盖角度为左右各 $60^\circ$ (共 $120^\circ$ ),最远直线距

离为 200 m，装备编队登陆距离间隔大于 50 m。由于装备正面一般呈倒梯形，以装备底部质心为测算点，要求顶部引导精度的距离误差应不大于 50 cm，对中误差应不大于 50 cm，否则容易导致装备与登陆舰、编队装备之间碰撞。

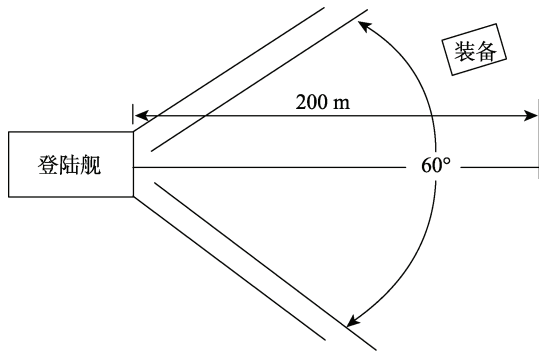


图 2 两栖装备入舰作业场

根据以往作业情况分析，装备发生碰撞受损，很大程度取决于装备的行驶距离和行驶方向。如果能使用某种引导信号使装备始终沿既定的路线行驶，发生偏转后系统能引导装备调整前进方向，通过不断修正路线，形成行驶→调整→行驶的闭环控制机制，则可在很大程度上提高作业的效率 and 安全性。因此，导引系统的关键部件应具有测距和纠偏功能。下面结合两栖装备入舰时行驶路线的两种情况分析所设计系统的基本工作原理。

1) 装备正常行驶时。如图 3 所示，根据装备行驶速度、相对于舰门的距离和对中偏角，首先进行测距，然后选择一种调制信号作为系统的基站信标，用不同的发射频率进行同步发射。按照三点定位原理，将三个超声波信号发生器均匀安装在登陆舰跳板端面上，周期性地发出三路独立的声脉冲信号。在接收端分别采用三个超声波信号接收器进行区分，获得基站的信号，经过信号处理模块计算出装备当前的位置，然后引导装备按既定路线行驶。

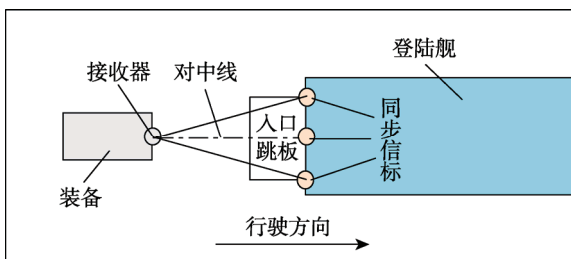


图 3 装备正常行驶时位置判定

2) 装备非正常行驶时。如图 4 所示，超声波信号接收器同时接收三路超声脉冲信号，并由此获得偏离预定路线的装备位置。通过计算得到装备相对于舰门中心线的对中偏角，系统实时显示偏角数值，并绘制远距离航迹图，引导装备沿着舰门中心线航行。当

装备距离小于某个阈值时，系统计算并显示出对中偏角和距离，在车载终端上重新规划路线，为驾驶员提供正确引导，实现盲视驾驶。

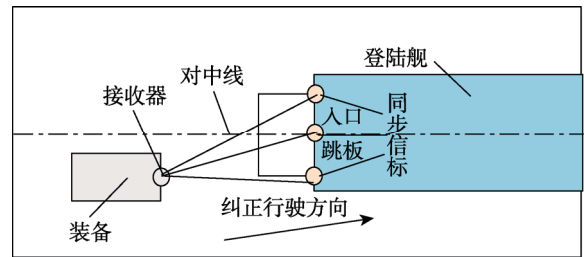


图 4 装备非正常行驶时位置判定示意图

### 3 声波信号传播特性影响的研究

由系统总体设计方案可知，舰上超声波发射器发出的超声波信号同时被水上超声接收器和水下超声接收器接收。作为传输介质的海水，对在其中传播的声波产生较大的干扰和影响，是影响声波传输的重要因素。另外，两栖装备在海上行驶，海域中的各种水下障碍物也会对超声信号的传输产生不同的影响。因此，在设计系统信号处理方案时，必须重点分析和考虑海水、海洋环境噪声和海洋混响等因素对声波信号传播特性的影响，以确保回波信号检测的正确性和稳定性。

#### 3.1 海水对声波传输的影响分析

根据 Snell 定律，在声波的传播过程中，声线总是向声速降低的方向弯曲<sup>[2]</sup>，因此，海水直接影响到声波在海水中的传播速度和传播路径。由于海水对声波的吸收和散射，使其能量衰减，进而影响声能所覆盖的范围，即水声设备的作用区域<sup>[3]</sup>。

影响海水中声速的因素主要有海水温度、海水盐度和静压力，其中对声速影响最大的因素是温度。实测数据表明，在同一海域，海水的等温线和等盐度线几乎都是水平的，而海水的静压力则和测量点与海面的垂直距离成正比。即影响声速的三个因素都接近于水平分层变化，因此声速也近似于水平分层变化。由于声速与温度、盐度和静压力之间确切的函数关系式很难获得，而通常使用的经验公式为<sup>[2]</sup>：

$$c=1449.2+4.6T-0.055T^2+(1.34-0.01T) \times (S-35)+0.016Z \quad (1)$$

式中： $c$ 、 $T$ 、 $S$ 、 $Z$  分别为声速、海试温度、海水含盐度和海水深度。

在不同海域，或同一海域的不同季节，海水的声速剖面有很大不同<sup>[4]</sup>，如图 5 所示。例如，就夏季的深海而言，其声速剖面是由温度垂直分布的“三层结构”形成的（见图 5a）。系统应用重点关注的浅海海域声速剖面，则受到更多因素的影响，具有明显的季节性。夏季为带跃层的负声速梯度剖面（见图 5b），而冬季多为等温层的声速剖面（见图 5c）。

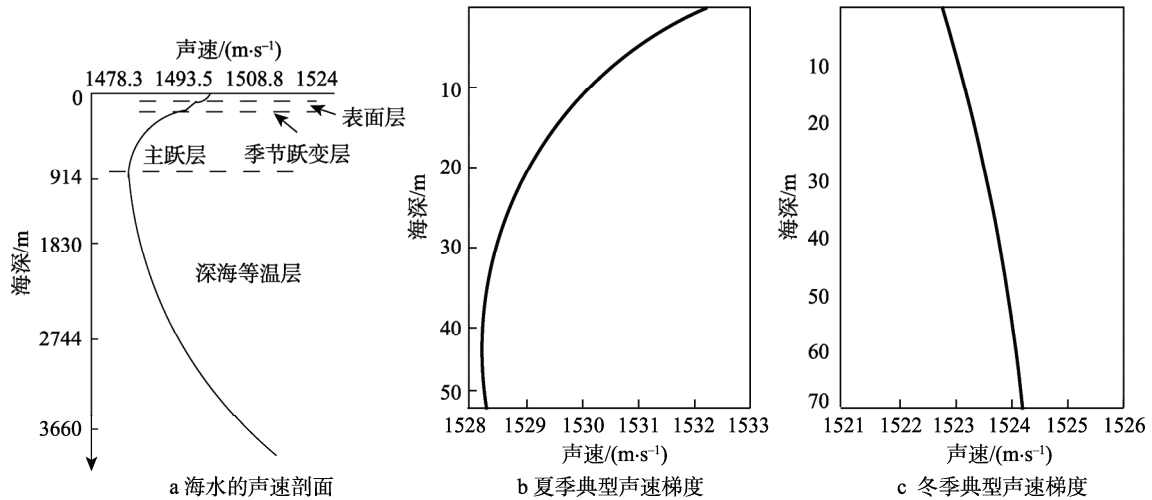


图5 不同季节海水声速分析

声波在海水传播过程中的声强损失是影响声纳作用距离最重要的因素之一，引发这种衰减的原因，可归纳为声波的扩展损失、吸收损失和散射。

扩展损失是由于声波波阵面在传播过程中不断扩展，单位面积上的声能（即声密度）随传播距离增大呈平方减小而引起的，因此又被称为几何衰减。一般来说，扩展损失可以表示为<sup>[4]</sup>：

$$TL_{\text{Spread}} = 10n \lg r \tag{2}$$

式中： $n$ 的可能取值为0（平面波传播）、1（柱面波传播）、3/2（浅海信道中考虑海底吸收情况下的声传播，是对柱面波传播的修正）、2（球面波传播）、3（声波通过浅海声速负跃变层后声传播）、4（考虑声波干涉后对球面波的修正），分别代表不同传播条件下的扩展损失系数； $r$ 表示接收点与声源之间的距离。

海水中声波传播的吸收损失可以分为介质切变粘滞声吸收、介质热传导声吸收以及介质的超吸收。表1是实测的1 Hz ~ 100 kHz 范围内声吸收系数与声频率的关系。

表1 1 Hz~100 kHz 频率的声吸收系数

频率/ Hz	吸收系数 /(dB·km <sup>-1</sup> )	频率 /Hz	吸收系数 /(dB·km <sup>-1</sup> )	频率 /Hz	吸收系数 /(dB·km <sup>-1</sup> )
1	0.003	900	0.056	10000	1.08
10	0.003	1000	0.063	20000	3.78
100	0.004	2000	0.12	30000	7.55
200	0.007	3000	0.18	40000	11.8
300	0.012	4000	0.26	50000	15.9
400	0.018	5000	0.35	60000	19.8
500	0.026	6000	0.46	70000	23.2
600	0.033	7000	0.59	80000	26.2
700	0.041	8000	0.73	90000	28.9
800	0.048	9000	0.90	100000	31.2

由此可见，在低频段，海水的声吸收系数通常可以用 Thorpe 公式近似计算<sup>[5]</sup>：

$$\alpha_{\text{Thorpe}} = \frac{0.102f^2}{1+f^2} + \frac{40.7f^2}{4100+f^2} + 3.06 \times 10^{-4} f^2 \tag{3}$$

式中： $f$ 的单位是 kHz。表1和式（3）表明，声吸收系数随频率的增大迅速增大，如1，10，100 kHz 的吸收系数分别是100 Hz 吸收系数的15.8，270和7800倍，这正是主动式声纳低频化最主要的原因。

### 3.2 海洋环境噪声对声波传输的影响分析

海洋环境噪声是海洋固有的噪声，它既不是水下声波接收器（水听器）以及其固有安装方式引起的与声波频率无关的“白噪声”，也不是某些局部可辨别的噪声源产生的噪声，而是除去所有可辨别的噪声源后的噪声背景，是水声信道的干扰背景场。

海洋环境噪声是由来自不同噪声源的各种噪声混合叠加形成。在相当宽的频带内，海洋环境噪声在不同频率上表现出不同的特性，并且随着环境条件，如风速等的变化而变化。

海洋噪声数学模型，无论是环境噪声模型还是波束噪声模型都由两部分组成，即传播损失部分和指向性部分。传播损失可以在噪声模型内计算，也可以根据其他独立模型预报，还可以进行现场测量。而环境噪声的指向性（包括垂直指向性和水平指向性）则可以通过噪声模型的输出计算得到。例如，利用 ANDES 噪声模型的输入  $N_s(\theta, \varphi)$ （单位立方角的噪声密度），可以获得噪声的水平指向性  $N(\varphi)$ 和垂直指向性  $N(\theta)$ <sup>[6-7]</sup>：

$$N(\varphi) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} N_s(\theta, \varphi) \cos \theta d\theta \tag{4}$$

$$N(\theta) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} N_s(\theta, \varphi) d\varphi \tag{5}$$

式中： $\varphi$ 为水平角，正北为0°，顺时针为正； $\theta$ 为垂直角，水平方向为0°，向上为正。

### 3.3 海洋混响对声波传播的影响分析

混响是主动声纳所特有的物理现象，产生混响的原因是：在海洋本身及其接口具有不均匀性，尺寸小的如灰尘大小的微小粒子，大的如海洋鱼群、海底峰峦和海底山脉等。所有的这些不均匀性造成海洋介质物理性质的不连续性，当受到声能照射时，海洋散射体将阻挡一部分声能，并将其反射回去，产生散射，所有散射体产生的散射的总和就是混响。

如图 6 所示，根据散射体种类的不同，混响可分为三类：由海水本身或水中其他散射体（生物、非生物体以及海水本身的不均匀结构等）引发的混响称为体积混响；由海面或海面附近的散射体，尤其是波浪产生的气泡所产生的混响称为海面混响；由海底或海底附近的散射体引起的混响则称为海底混响。其中海面混响和海底混响统称为界面混响。

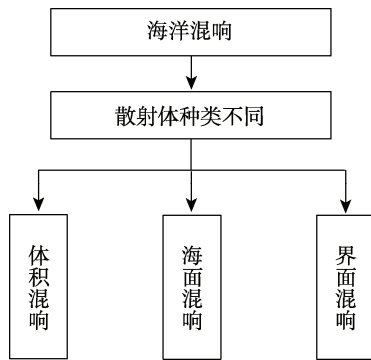


图 6 海洋混响分类

混响限制下的主动声纳方程中有一个量是混响级  $RL$ ，由于混响产生的机理非常复杂，为了得到在声纳设计和混响预报中可以应用的表达式，通常需做如下简化假设：声波按直线传播，除球面衰减外，其他衰减可忽略不计；任一瞬间位于某一面积上或体积内的散射体数目是随机均匀的；散射体的密度很大，在任一体积单元内或面积单元上都有许多散射体；脉冲持续时间足够短，可忽略体积单元或面积单元内的传播效应。

在上述假设的基础上，引入等效平面波混响级的概念，则声波发射信号结束后  $t$  时刻体积混响的等效平面波混响级为<sup>[8]</sup>：

$$RL_V = SL + S_V - 20 \lg \frac{ct}{2} + 10 \lg \left( \frac{c\tau}{2} \Psi \right) \quad (6)$$

式中： $SL$  为发射信号的声源级； $S_V$  为体积单元的散射强度； $\frac{c\tau}{2} \Psi \left( \frac{ct}{2} \right)^2$  则表示理想合成指向性条件下，对产生体积混响有贡献的体积大小。

如式（7）和式（8）所示，海面混响和海底混响的等效平面波混响级分别为  $RL_s$  和  $RL_b$ <sup>[8-9]</sup>：

$$RL_s = RL - 40 \lg r + S_V + 10 \lg H + 10 \lg \left( \frac{c\tau}{2} r \Phi \right) \quad (7)$$

$$RL_b = SL - 40 \lg r + S_b + 10 \lg \left( \frac{c\tau}{2} r \Phi \right) \quad (8)$$

此外，由于海洋中产生混响的散射体的分布是完全随机的，而且每个散射体散射声波的相位也是随机的，因此混响也是一个随机过程。另外，体积、海面和海底混响是同时存在的，几乎不可能将它们严格分开，就某一确定时刻而言，三种混响对水声设备的干扰程度是不一样的。因此，确定不同时刻起主要作用的混响干扰类型，是采取有效抑制混响的措施或对混响进行准确预报的前提条件之一。

### 3.4 浅海多径信道对声波传播的影响分析

声波在海洋中传播时，将不可避免地经历声强衰减以及被环境噪声污染。尤其是工作在浅海环境中，声波还将受到以下不利因素的影响。

1) 相对于深海，浅海信道的相干时间更容易受到外界因素的干扰而缩短，从而限制了浅海主动信号源发射信号的最大脉宽。因为当发射信号的长度接近或大于信道相干时间时，系统的相干处理（匹配滤波）增益将下降。

2) 浅海声道存在严重的多径传播现象，多径传播是指在声源和接收器之间存在两个或两个以上的传播路径。浅海中的多路径主要是由声波在海面、海底发生多次反射以及因海洋声速的不均匀性引发的声线弯曲造成的。这种多径传播现象将产生各种干涉结果。

对在浅海多径信道中沿每一条路径传播的声音信号而言，它的衰耗和时延都是随机变化的。因此，多径信号的接收信号将是衰落和时延都随时间变化的多路径信号的合成。如式（9）所示，假设发射信号为  $A \cos \omega_0 t$ ，经过  $N$  条路径传播后的接收信号  $R(t)$  可以表示为<sup>[8,10]</sup>：

$$R(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos \omega_0 [t - \tau_i(t)] = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos [\omega_0 t + \phi_i(t)] \quad (9)$$

式中： $\mu_i(t)$   $\mu_i(t)$  表示第  $i$  条路径接收信号的振幅； $\tau_i(t)$  表示第  $i$  条路径的传输时延，为随机量， $\phi_i(t)$  表示第  $i$  条路径信号的随机相位。

实际观察表明<sup>[10]</sup>，与声波信号的周期相比， $\mu_i(t)$  和  $\tau_i(t)$  的变化速度通常要缓慢的多，因此可以认为它们是缓变的随机过程。故式（9）可改写为：

$$R(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos \phi_i(t) \cos \omega_0 t - \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \sin \phi_i(t) \sin \omega_0 t \quad (10)$$

如定义：

$$\begin{cases} X_c(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos \phi_i(t) \\ X_s(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \sin \phi_i(t) \end{cases} \quad (11)$$

则式(10)变为:

$$R(t) = X_c(t)\cos\omega_0 t - X_s(t)\sin\omega_0 t = V(t)\cos[\omega_0 t + \phi(t)] \quad (12)$$

式中:  $V(t)$ 表示合成波  $R(t)$ 的包络;  $\phi(t)$ 表示合成波  $R(t)$ 的相位。

由于  $\mu_i(t)$ 和  $\varphi_i(t)$ 是缓慢变化的,故  $X_c(t)$ 和  $X_s(t)$ 也是缓慢变化的,因此  $R(t)$ 可以认为是一个窄带过程。由此从波形上看,多径传播的结果使确定的载波信号变成了包络和相位受到调制的窄带信号,即所谓的衰落信号。从频谱上看,多径传播引起了频率弥散,即由单个频率变成了一个窄带频谱。

多径传播不仅造成上述的衰落和频率弥散,还可以造成频率选择性衰落。所谓频率选择性衰落,就是信号中某些分量被衰减的现象,这又是多径传播的一个重要特征。

假设多径传播的路径有  $N$ 条,且到达接收点的两条路径具有相同的强度和一个相对的时延差。若令发射信号为  $s(t)$ ,则到达接收点的多路信号可以分别表示为:  $A_1s(t-t_0)$ ,  $A_1s(t-t_0-\tau_1)$ , ...,  $A_{N-1}s(t-t_0-\tau_{N-1})$ 。若以传播时延最小的信号(即时延为  $t_0$ )为基准,  $\tau_1, \dots, \tau_{N-1}$ 为相对时延,  $A_N$ 为第  $n$ 条路径上的衰落,则上述传播过程可以表示为图7所示的模型<sup>[11]</sup>。

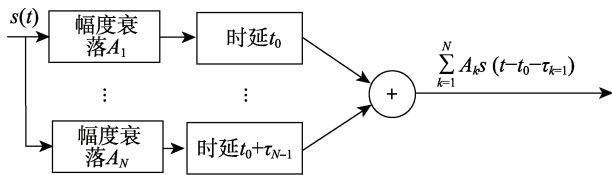


图7 浅海信道的多径传播模型

对于双路径传播信道,即令图7中的  $N=2$ ,并忽略这两条路径上信号的幅度差异,则根据傅立叶变换的性质,信道的传递函数可以表示为:

$$H(\omega) = Ae^{-j\omega t_0} (1 + e^{-j\omega\tau}) \quad (13)$$

其幅度特性为:

$$|H(\omega)| = A|1 + e^{-j\omega\tau}| = 2A|\cos(\omega\tau/2)| \quad (14)$$

即对于不同的频率,双路径传播的结果将会有不同的衰减,尤其是当信号频率为  $(k+1/2)/\tau$ 时,出现零点;而当信号频率为  $k/\tau$ 时,则出现极点,其中  $k$ 均为0或正整数。

与此同时,由于相对时延  $\tau$ 一般是随时间变化的,故传输特性出现的零点与极点在频率轴上的位置也是随时间变化的。随着传播信号带宽的增大,即当一个传播波形的频谱宽于  $1/\tau(t)$ ,传播波形的频谱将会有畸变。

对于多径传播 ( $N>2$ )信道,出现频率选择性衰落的基本规律将是相同的,但传输特性更为复杂,即频率的选择性将依赖于相对时延。多径传播时的相对

时延差(简称为多径时延差)通常用最大相对时延差来表征,它可以用来估算传输零极点在频率轴上的位置。设最大多径时延差为  $\tau_{max}$ ,则定义:

$$\Delta f = 1/\tau_{max} \quad (15)$$

式中:  $\Delta f$ 即为相邻传输零点的频率间隔。如果传输信号的频谱大于  $\Delta f$ ,则它可被称为多径传播介质相关带宽。对工作在浅海中的单频主动声纳而言,这种频率选择性衰落是造成检测起伏的根本原因。对于信号带宽大于信道相关带宽的宽带主动声纳而言,多路径传播在单个接收器上产生信号的振幅和相位起伏破坏了接收信号与拷贝信号的相关性,影响了匹配滤波的处理增益,同时,多径信道引起的时间扩展则导致接收信号能量在时间轴上的分散,从而造成检测器输出信噪比的下降。

在浅海多径信道中,同一目标不同路径的回波信号到达接收阵列的角度将不尽相同,这不仅造成目标方位估计的模糊,同时还导致不同接收阵元上信号振幅和相位的相干性减弱,从而使基阵的空间处理相干处理(波束形成)增益下降。

### 4 静态和动态实验

为了测量装备偏角和距离,需要在登陆舰上安装三个完全相同的高频宽带发射换能器,并周期性地发出脉冲信号。每辆登舰装备上安装一个收发合置换能器,用于接收舰载换能器发出的脉冲信号。对换能器输出信号作前置预处理、模/数转换后,作数字信号处理,解算出各个脉冲信号传播到装备的时刻点,计算出装备相对于舰门中心线的对中偏角。其工作流程如图8所示。

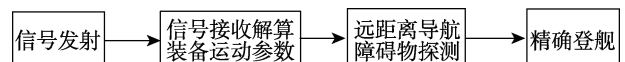


图8 硬件系统工作流程

1) 信号发射。引导系统启动后,安装在登陆舰跳板端面上的三个发射换能器阵,周期性地发出三路独立的声脉冲信号。

2) 信号接收,解算装备运动参数。安装在装备前滑板上的收发合置换能器同时接收三路声脉冲信号,计算出装备相对于舰门中心线的对中偏角,实时显示偏角,并绘制远距离航迹图,引导装备沿舰门中心线航行。

3) 远距离导航,障碍物探测。当装备距离登陆舰大于50m时,驾驶员根据行驶轨迹和当前的偏角、距离等信息,实时引导装备行驶。车载高频发射换能器向正前方发射一个声脉冲,如果前方有障碍物,将产生回波信号,水听器接收到回波后,通过分析水听器输出信号,得到回波的能量大小、到达时刻等特征,系统估算障碍物与装备的距离,并定量反映障碍物体

积的大小，在屏幕上高分辨扫描显示。

4) 精确登舰。当装备与登陆舰距离小于 10 m，偏角小于 5°时，驾驶员通过系统，可将登舰偏角控制在 1°以内。同时观察扫描图，收听语音提示，了解前进线路上的障碍物情况，通过调整车体行驶角度和速度，避开障碍物，实现精确登舰。

由于入舰引导系统的水声工作环境较恶劣，海水水层较浅，泥沙含量偏高，引起严重的声线多路径传播和散射现象，通过射线声场计算软件模拟了实际海洋环境下的声传播<sup>[13]</sup>。结果表明，距离较远时，多路径现象几乎一直存在，直达波的能量可能会远小于反射波，机器很难自动判断直达波的到达时刻点。根据三路宽带脉冲的多路径特征相似这一现象，采用谱相关处理可以较好地克服该难点。海水中含有的泥沙会引起声线散射，增大了声传播损失，通过增大换能器的发射功率可以解决这一问题。为比较分析在浅水波导条件下各个宽带脉冲的多路径传播现象，验证提高时延估计精度的谱相关技术性能，在大型室内消声水池内和与浅海海域环境较为接近的江、湖水域开展了原理验证实验。

### 4.1 室内水池静态实验

为了验证技术方案的基本原理，在大型室内消声水池四周、底部和水面均铺设了消声装置，有效吸收声波，避免出现声线多路径传播现象，以此来分析验证算法的测向和测距精度。

该实验利用三个发射换能器周期性地发射宽带脉冲信号，采用无指向性球形水听器接收信号，利用一台计算机进行信号处理。静态实验目标实际方向约 0.5°，发射换能器与接收水听器入水深度相同，两者的实际距离小于 25 m（受限于实验水池的尺寸，此范围内的距离估计误差不超过 5%）。图 9 是一组静态实验数据的处理结果。

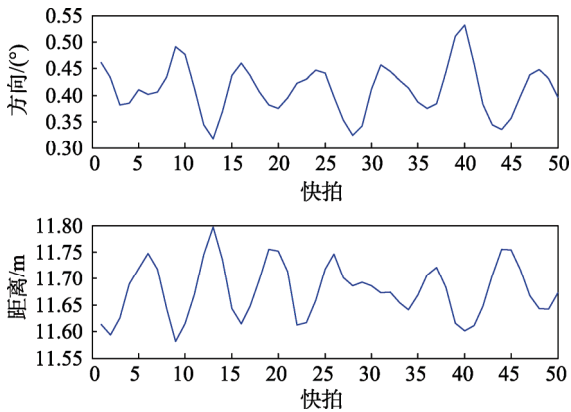


图 9 静态实验处理结果

通过在不同方向和距离上多次静态测试，结果表明，方向角估计误差小于 0.25°。在实装操作场地，装备之间的距离按 50 m 计算，根据弧长公式得  $l=0.21$

m，符合距离舰门两侧引导精度均不大于 50 cm 的要求。

### 4.2 湖上和江上动态实验

实验场地设在富春江和千岛湖，主要目的包括：通过动态试验，在接收端运动的情况下，比较各个宽带脉冲的多路径传播现象，分析多谱勒频移对估计精度的影响，对拷贝信号作多谱勒频移补偿，验证运动状态下算法的可行性及性能<sup>[14]</sup>。

湖上实验时，超声发射器安装在趸船上，而把超声信号接收器（水听器）安装在一条小船上，即把趸船模拟作为登陆舰，而把小船模拟作为两栖装备。小船朝着趸船由远及近相向航行，模拟两栖装备的登舰过程。三个超声发射器和接收器（水听器）的安装固定位置如图 10 所示。

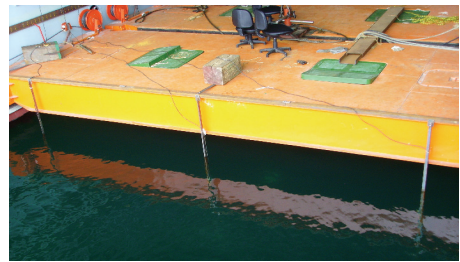


图 10 湖上实验超声发射器和接收器在趸船上的固定安装

富春江试验时，把发射换能器安装在一个三角铁架上（如图 11 所示），然后把铁架安置在两栖装备登陆的航道上，以模拟在登陆舰的舰门底部安装发射换能器。接收水听器安装在装备导流板的底部，如图 12 所示。



图 11 富春江实验超声发射器的固定安装



图 12 富春江实验接收水听器的固定安装

该次实验可得到如下结论。

1) 如图 13 所示，在水声环境比较复杂的湖上和

江上,表现出明显的多路径传播现象。采用谱相关处理后,能够大大提高导航算法的可靠性和稳定性。

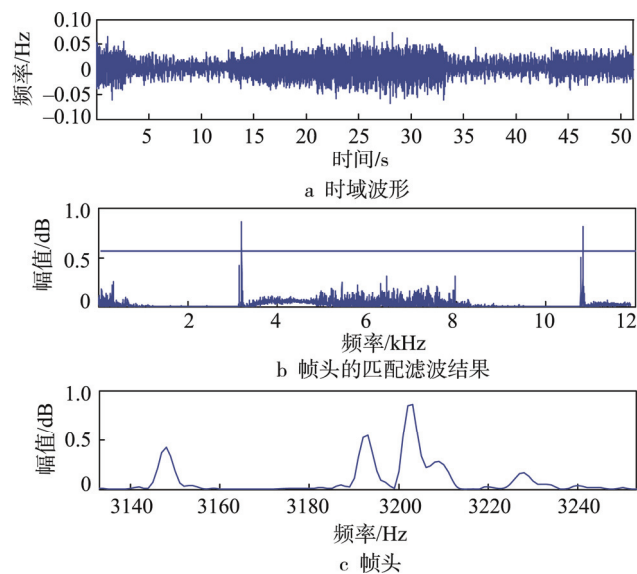


图13 帧头信号的多路径传播特征

2) 目标相对运动引起的多谱勒频移,会大大降低匹配滤波器的相关性,从而降低时延差估计精度。对拷贝信号作多谱勒频移补偿后,算法的性能接近静止状态下的性能。作多谱勒补偿和谱相关处理后的一组动态实验结果如图14所示。

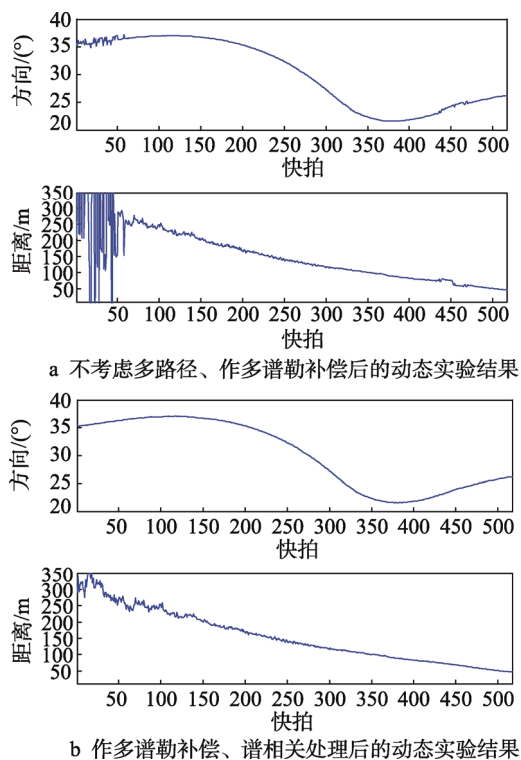


图14 动态实验结果

## 5 结语

入舰引导系统超声波接收器接收的声波信号经自适应窄带数字滤波,抑制了回波信号频率之外的噪

声,然后进行匹配滤波。通过计算回波信号的相关峰和到达时刻,以及根据相关峰的特征确定窗函数的大小。通过窗口滑动并计算滑动窗内的能量,最后以历程图的形式显示计算结果。

由于海洋中声传播非常复杂,通常需要对海洋环境作某些简化处理,通常的做法是建立声波传播模型,即在某些特定假设条件下对波动方程求解方法的建模。总的来说,目前波动方程主要有五类规范解法,即射线理论、简正波理论、多径展开理论、快速声场和抛物方程技术等<sup>[15]</sup>。这些求解方法各有其优点和不足,同时为了克服这些不足,它们其中的某些理论相互结合,进而衍生出信道求解方法。例如,将耦合简正波理论与抛物方程相结合的耦合简正波-抛物方程(CMPE)方法等。

海洋作为一个随时间和空间复杂变化的传输信道,声强衰减、海洋环境噪声和海洋混响对声波的影响,使其在海水中传播规律的研究变得十分困难。上述影响因素也对浅海多径信道模型的建立至关重要,根据实际应用中的需求,文中将上述影响因子纳入模型,用于相似环境的动态和静态实验,获得可靠稳定的实测数据,为下一步海上实装试验提供基础数据并可相互验证,具有一定的工程应用价值和学术价值。

## 参考文献

- [1] 朱胜,姚巨坤.再制造技术与工艺[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [2] CLAY C S, MEDWIN H. Fundamentals of Acoustical Oceanography[M]. San Diego: Academic Press, 1997.
- [3] 刘永伟,李琪,商德江,等.混浊海水声吸收与温度、盐度、压强关系[J].声学技术,2012,31(4):156-161.
- [4] RICHARDS S D, LEIGHTON T G, BROWN N R. Visco-inertial Absorption in Dilute Suspensions of Irregular Particles[J]. Proc R Soc Lond A, 2003, 459: 2153-2167.
- [5] 刘永伟,李琪,张超,等.混浊海水声吸收的计算与测量研究[J].哈尔滨工程大学学报,2010,31(11):1472-1477.
- [6] 彭临慧,王桂波.悬浮颗粒物海水及其声吸收[J].声学技术,2008,27(2):168-171.
- [7] ANDREW C S, JILL K N, SULEYMAN S K. Signal Processing for Underwater Acoustic Communications[J]. Communications Magazine, 2009, 47(1): 90-96.
- [8] XING J, LIU Z, PENG P. Intelligent Detection with Dual-channel Detectors for Non-Gaussian Underwater Acoustic Transient Signals[C]// International Conference on Information and Automation. 2008.
- [9] 郭熙业,苏绍憬,王跃科.多通道海底混响线性预测方法研究[J].兵工学报,2010,31(1):99-103.
- [10] 高博.浅海远程海底混响的建模与特性研究[D].黑龙江:哈尔滨工程大学,2013.
- [11] 高成志.浅海环境下的水声信道辨识技术研究[D].黑龙江:哈尔滨工程大学,2011.
- [12] 朱昌平,韩庆邦,李建,等.水声通信基本原理与应用[M].北京:电子工业出版社,2009.
- [13] 李春雨,张东升,张延顺,等.一种基于声学定位/航位推算的水下导航定位方法[J].船舶工程,2015(8):57-60.
- [14] 孙万卿.浅海水声定位技术及应用研究[D].山东:中国海洋大学,2007.
- [15] 何利,李风华,李整林,等.基于海底水平阵的低频脉冲信号海水声速剖面反演[J].声学技术,2011,30(3):109-111.