

自主回收 UUV 水声定位与遥测遥控导引技术研究

付传宝¹, 段文海¹, 张先奎¹, 宋文生², 童赛美¹

(1. 昆明船舶设备研究试验中心, 云南 昆明 650051;
2. 中国电子科技集团公司第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要 针对 UUV 任务结束或能源不足时自主回收的需求, 深入研究了 UUV 中远程水声定位与遥测遥控导引技术, 完成了水声定位与遥测遥控导引系统方案设计, 重点研究了 MFSK、OFDM、扩频等水声遥测遥控调制方式。通过分析和对比, 设计了一种正交混合扩频调制方式, 并采用相干二维搜索技术, 提高扩频技术多普勒补偿能力。开展了湖上静态与动态跑船试验, 试验数据结果表明: 水声水平定位精度优于 0.5%, 水声遥测遥控系统解算误码率达到了 10^{-3} 数量级, 可有效引导 UUV 回收作业。

关键词 UUV; 水声定位; 遥测遥控; 扩频技术

中图分类号 U661.313 **文献标识码** A

Research on Technology of Underwater Acoustic Location and Telemetry and Remote Control Guidance for Self-recovery UUV

FU Chuanbao¹, DUAN Wenhai¹, ZHANG Xiankui¹, SONG Wensheng², TONG Saimei¹

(1. Kunming Shipborne Equipment Research and Test Center, Kunming 650051, China;
2. The 34th Research Institute of CETC, Guilin 541004, China)

Abstract Based on self-recovery demand for UUV at the end of missions or when energy is insufficient, this paper deeply studies underwater acoustic location and telemetry and remote control guidance technology on mid-long range, completes underwater acoustic location and telemetry and remote control guidance system scheme design, and focus on the modulation methods of underwater acoustic location and telemetry and remote control, such as MFSK, OFDM, spread spectrum, etc. Through analysis and comparison, this paper designs an orthogonal hybrid spread spectrum modulation method, and uses coherent 2-D search technology to improve the Doppler compensation capability of spread spectrum technology. The static and dynamic ship experiments are carried out on lake, and the results of experiments data show that the system can effectively guide the recovery operation of UUV, the accuracy of underwater acoustic horizontal location is better than 0.5%, and the bit error rate of underwater acoustic location and telemetry and remote control system is 10^{-3} magnitude.

Key words UUV; underwater acoustic location; telemetry and remote control; spread spectrum technology

0 引言

近年来, 无人水下航行器 (Unmanned Underwater Vehicle, UUV) 相关的各项技术发展迅猛 (包括 UUV 回收技术), UUV 已经成功应用于海底地

形探测, 海域监视、侦查和警戒, 情报搜集, 扫雷, 海底管道故障检测, 以及油田勘探等商业领域。同时, UUV 在各国军事力量中扮演着越来越重要的角色, 在现实海战中正发挥着不可替代的作用, UUV 已被应用于情报侦察、反水雷、辅助通信、后

收稿日期: 2018-09-11

作者简介: 付传宝 (1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水下武器弹道测量与水声通信技术研究。

基金项目: 海装预研 (3020605040301) 项目资助。

勤支援和补给等军事领域^[1-3]。

由于 UUV 执行水下任务时的能源通常需要自带,所以有限的自带能源就限制了 UUV 的航行距离和工作时间,因此,需要在 UUV 任务结束或能源不足时对其进行回收,来下载任务数据或补充能源。布放和回收对于 UUV 的水下作战能力和续航能力等是至关重要的。通常将 UUV 回收方式分为 2 种:水面回收和 underwater 回收。水面回收易受海情的影响,而且在执行军事任务时易暴露,而水下回收不影响母船的运动状态,效率更高,隐蔽性更好。但水下环境复杂,以及水压和碰撞对其带来的破坏,要求母船精准地掌握 UUV 的航行轨迹等参数才能完成对接,从而顺利地回收。

UUV 水下回收时近端一般采用高频图像声呐、光学导引捕获、管道爬行辅助装置等设备联合回收 UUV,但 UUV 中近程的航行轨迹等参数也是对接成功的关键数据,因此,母船必须配备可获取 UUV 航行轨迹、姿态等参数的水声定位与遥测遥控导引设备^[4]。

课题组对水声定位与遥测遥控导引技术进行了深入的研究,完成了水声定位与遥测遥控导引系统方案,设计了一种水声定位与遥测遥控互相兼容的信标体制。课题组重点研究了 MFSK、OFDM、扩频等水声遥测遥控调制方式,通过分析和对比,设计了一种正交混合扩频调制方式,并采用相干二维搜索技术,提高扩频技术多普勒补偿能力。

1 水声定位与遥测遥控导引技术系统组成与技术方案

1.1 系统工作原理

UUV 自主回收系统工作原理示意图如图 1

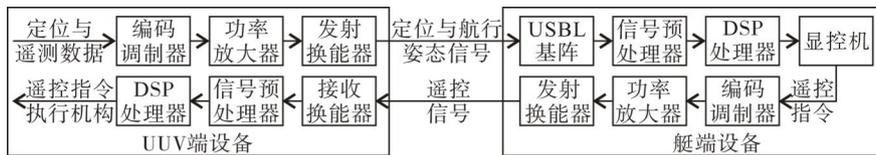


图 2 水声定位与遥测遥控导引系统组成示意图

Fig. 2 Composition schematic diagram of underwater acoustic location and telemetry and remote control guidance system

水声定位与遥测遥控导引系统完成 2 个功能: 1) 完成母船对 UUV 定位及航行参数的实时联合

所示,虚线框内非本文研究内容。安装于 UUV 上的导引信标采用低功耗设计,在 UUV 执行任务时处于休眠状态,当执行回收任务时才真正启动,发出水声定位与遥测信号;母船通过 USBL 基阵接收水声信号,经信号处理器、解调解码器等处理解算出 UUV 定位与航行参数信息,依据 UUV 定位与航行参数信息采用波束旋转控制方式定向发送给 UUV 遥控指令,完成远程导引控制。当 UUV 运动到母船近程时,启动高频图像声呐、虚拟 3D 光学成像及显示系统等,精准导引、控制管道爬行辅助装置完成 UUV 捕获及回收。

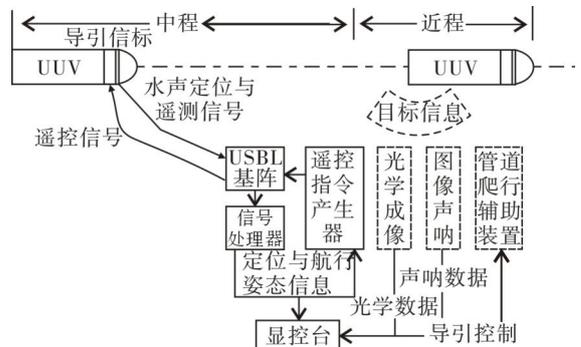


图 1 UUV 自主回收系统工作原理示意图

Fig. 1 Principle schematic diagram of UUV self-recovery system

1.2 系统组成与方案设计

1.2.1 系统组成

水声定位与遥测遥控导引系统主要由艇端设备与 UUV 端设备组成,如图 2。艇端设备包括 USBL 基阵、信号预处理器、DSP 处理器、显控机、编码调制器、功率放大器、发射换能器等;UUV 端设备包括导引信标、信号预处理器、DSP 处理器、编码调制器、功率放大器、发射换能器等。

测量; 2) 完成母船对 UUV 实时遥控。母船对 UUV 定位及航行参数的实时联合测量时,UUV 端

经编码调制器将遥测信息编码调制,经功率放大器放大后由发射换能器发出;艇端通过声学基阵接收定位与航行参数水声信号,信号预处理器将接收的水声信号经过放大、滤波、包络检波等处理后,送 DSP 处理器;DSP 处理器完成信号检测解调、单频频率判别、时延估计、增益控制及数据传送等功能,并将解调信息、时差数据等通过 RS422 口传送给显控机;显控机负责实现 UUV 轨迹解算与描绘、航行参数的解码与 UUV 航行参数 3D 显示等功能。母船对 UUV 实时遥控时,艇端经编码调制器将遥控指令编码调制,经功率放大器放大后由发射换能器发出;UUV 端通过接收换能器接收遥控水声信号,接收的水声信号经信号预处理器、DSP 处理器等组件解调解码后,将遥控指令传送到执行机构。声学基阵采用超短基线阵,根据 UUV 定位与航行参数遥测的需求进行信标体制的设计。

1.2.2 定位与遥测信标体制设计

在满足 UUV 航行姿态数据遥测功能的同时要求调制信号需具备较好的抗反射与叠加的能力,遥测周期为 1 s,定位周期为 0.2 s。

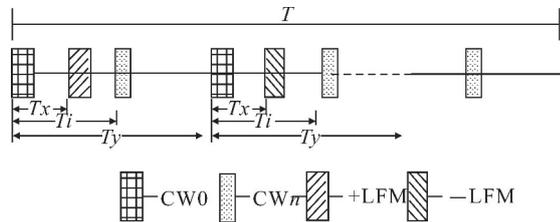


图 3 定位与遥测联合测量信标体制示意图

Fig. 3 Signal system schematic diagram for location and telemetry

遥测信标体制示意图如图 3 所示,采取 1 帧 3 行的形式,帧同步周期为 $T=1\text{ s}$,行同步周期为 $T_y=0.2\text{ s}$,同步保护间隔 $T_x=50\text{ ms}$, $T_i(i=1,2,3,4)$ 为遥测信息的时延粗调值。 CW_0 为脉宽 4 ms 频率为 f_0 的单频脉冲;+LFM 代表帧识别脉冲,为脉宽 5 ms 线性正调频,以 f_0 为中心频率,带宽为 6 kHz;-LFM 代表行识别脉冲,为脉宽 5 ms 线性负调频,以 f_0 为中心频率,带宽为 6 kHz; $CW_n(n=1,2,3,4)$ 代表遥测信息的频率细调脉冲,为 4 ms 的单频信号。定位信息通过对 CW_0 脉冲的时延估计,结合 USBL 定位解算算法得出。遥测信息包括

航向、深度、横滚角度和纵倾角度等,其粗调值由 T_i 值解算出,细调值由 CW_n 载波频率解算出。

1.2.3 遥控信标体制设计

遥控信号调制方式采用正交多载波扩频调制方式,此调制方式由于子载波间的正交性,保证了载波间的互不干扰,由于子载波间的相互重叠,保证了最优的频谱利用率,另外此方式引入了扩频机制,有效地提高了遥控信号的传输隐蔽性^[5-6]。

体制初步设计分为地址码、指令信息码和信息确认码 3 部分,可以满足识别多个以上目标要求、多条指令要求,减少误码率。其中地址码用于识别需要遥控的目标,指令信息码用于识别同一目标的指令,地址码和指令信息码通过正交混合扩频调制方式调制发出。如图 4 所示, t 为地址码和指令信息码之间的保护间隔,为抵消码间干扰,地址码和指令信息码里面的频率脉冲也会采用适当的保护间隔,同时为了加强系统可靠性,在信标体制中加入信息确认码。

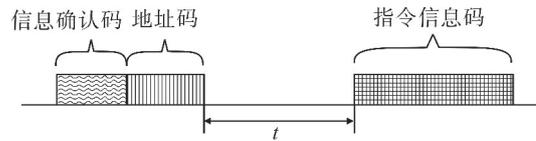
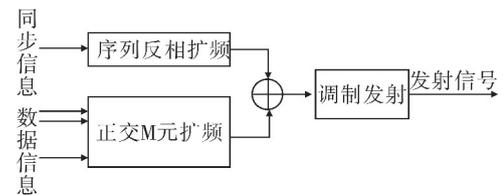
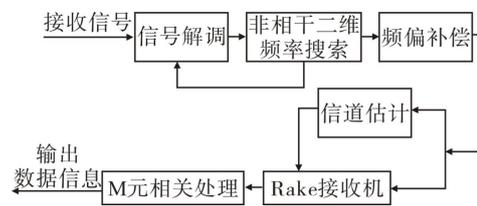


图 4 遥控信标体制示意图

Fig. 4 Signal system schematic diagram for remote control



(a)发射端



(b)接收端

图 5 水声遥控系统原理框图

Fig. 5 Principle block diagram of underwater acoustic remote control system

UUV 水声遥控技术主要解决的问题是如何实

现多普勒跟踪和补偿,如何克服多途衰落信道。针对这 2 个问题,系统采用扩频通信技术。为实现多普勒的实时跟踪与补偿,我们提出非相干二维搜索技术;为克服多途衰落信道,我们提出改进的 Rake 接收技术。系统框图如图 5 所示,图 5(a)为系统发射原理框图,图 5(b)为接收原理框图。

2 关键技术及突破途径

2.1 低信噪比弱信号检测技术研究

课题组着重研究了时延频率估计、噪声抑制、信号幅度自动均衡等接收端数字信号检测处理方法。

时延估计利用自适应更新样本相关的方法,提高时延估计精度,再进行时延值精密内插,从而保证时延估计精度。频率估计采用基于 FFT 的插值频率估计算法,插值采用拉格朗日与最小二乘拟合算法。

采用小波变换消除噪声,小波降噪的方法主要有模极大值去噪法、相关性去噪法和阈值去噪法。阈值去噪法是常用的一种小波降噪方法,其基本原理:小波的多分辨率时频局部化分析特性可以在多个尺度下把信号中不同频率的成分分解到不同的子空间中去,如果对分解得到的小波系数作用阈值,将低于阈值的噪声成分所在频道的小波变换系数置零,保留我们关心的频带的小波变换系数,然后重新合成信号,就可以得到消除噪声的信号。

软件部分采用 Hilbert 变换与相关算法实现幅度自动均衡,在水声信号中对起伏大和强噪声干扰信号进行抑制。基于 HHT 的分析主要由 2 个步骤组成:首先对时间序列进行经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)得到本征模态函数组,然后对每个本征模态函数进行希尔伯特变换,再组成时频谱图进行分析。其中最为关键的是经验模式分解,该方法从本质上来讲是将信号进行平稳化的过程,其结果是将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解开来,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,每 1 个序列即为 1 个本征模态函数分量。对这些本征模态函数进行希尔伯特变换便可得到信号的时频谱图,由此得到的谱图能够准确地

反映出系统原有的特性。经验模式分解的最大优点是使希尔伯特变换后的瞬时频率具有物理意义,避免了傅立叶变换中需使用许多谐波分量表达非线性、非平稳信号的不足。

2.2 基于正交多载波扩频的水声通信技术研究^[7-8]

首先通过串并转换将串行的原始数据转换成 P 路并行的数据流,对每一路数据流我们进行 S 次重复发送,同时对多路数据进行交织处理,后对多组数据进行短码扩频,最后进行正交载波调制,并行发送。由于每个子载波采用低速的码序列,降低了 ICI 干扰,同时串并转换后,数据符号周期延长,降低了 (Inter-symbol-interference) ISI 干扰。本系统可以提高扩频处理增益,降低多途干扰影响,且可以同时取得时间域和频率域的分集效果。

发射结构框图和频谱结构示意图如图 6 和图 7 所示。

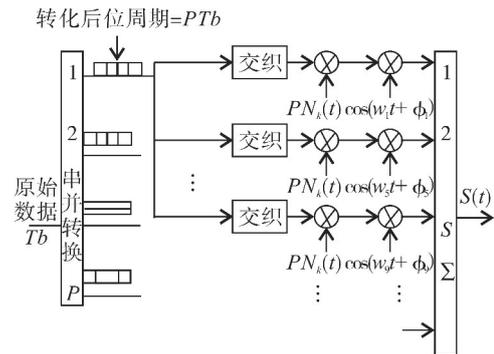


图 6 时频域分集的正交多载信号发射结构框图

Fig. 6 Orthogonal multicarrier signal transmitting structural block diagram with time-frequency diversity

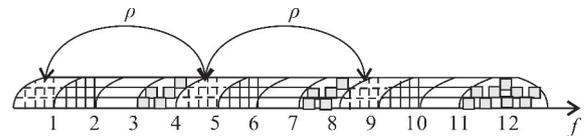


图 7 时频域分集的正交多载信号频谱结构示意图

Fig. 7 Orthogonal multicarrier signal spectrum structural block diagram with time-frequency diversity

3 湖上试验结果分析

为验证自主回收 UUV 水声定位与遥测遥控引导系统关键组件的性能,开展了湖上静态与动态跑船试验。试验过程:试验船 A(携带系统发射设

备)在距工作母船 B (携带系统接收设备)的半径 2 km 范围不同距离点进行静态拉距试验,在距母船半径 2 km 范围内以不同航行速度进行动态跑船试验。携带系统发射设备的试验船 A 可模拟发射 UUV 水声定位与遥测信标及遥控信标;携带系统接收设备的工作母船 B 接收试验船 A 发出的水声信号,进行信号调理、数据记录与处理等,从而分析试验效果。

3.1 试验水域水文条件

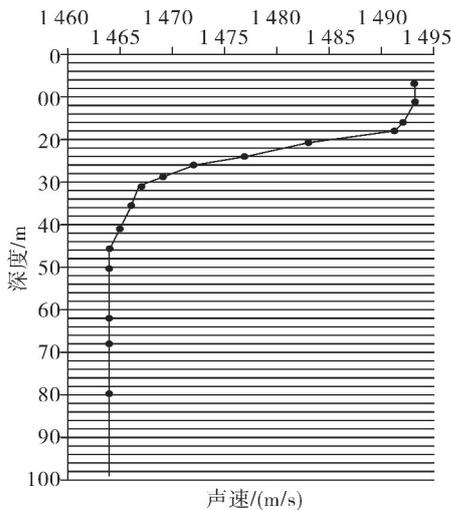


图 8 试验水域声速梯度实测结果

Fig. 8 Sound velocity gradient data on experiment lake

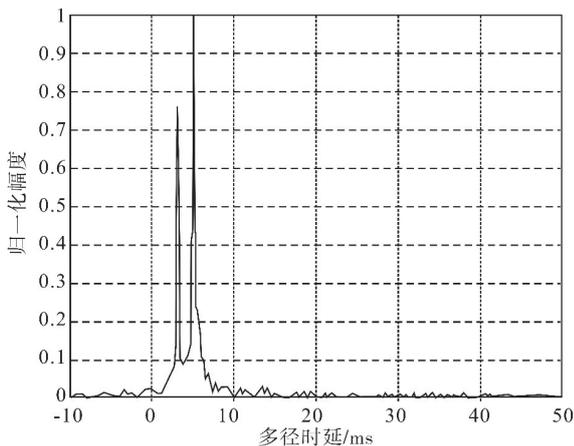


图 9 距离 1 000 m 时信道测量结果

Fig. 9 Underwater channel data at 1 000 m distance

图 8 为试验当天试验水域声速梯度实测结果。从图中可以看出,该季节试验水域声速梯度呈明显的负梯度现象,换能器吊放在不同水深处时的信道多径情况以及接收信噪比均会有较大差别,试验船

A 与工作母船 B 吊放的换能器应避免声速梯度的影响。试验船 A 与母船 B 的距离为 1 000 m 时,对信道情况进行了测试,从图 9 可以看出大部分多途反射在 5 ms 左右。

3.2 试验结果与分析

对静态与动态跑船试验数据进行分析,定位数据比对船载 DGPS 数据,通过多组数据比对,可得出水平定位精度优于 0.5%。遥测遥控数据通过统计解调后得到的二进制数据流与模拟发射设备调制的二进制数据流的差异得到误码率,统计次数为静态每个参数 6 000 次、动态跑船态每个参数 9 000 次。遥测遥控湖上试验误码率结果如表 1 所示,从表 1 可以看出水声遥测遥控系统解算误码率达到了 10^{-3} 数量级,达到了项目的指标要求,可有效引导 UUV 回收作业。

表 1 遥测遥控湖上试验误码率统计表

Table 1 Experiment bit error rate statistics table on lake for telemetry and remote control system

序号	试验项目	试验船只距离/m	误码率/ $(\times 10^{-3})$
1	静态 1	213	遥测 3/6 000=0.5
			遥控 3/6 000=0.5
2	静态 2	906	遥测 13/6 000=2.17
			遥控 10/6 000=1.67
3	静态 3	1 739	遥测 45/6 000=7.5
			遥控 15/6 000=2.5
4	动态跑船 1	100~1 200	遥测 46/9 000=5.11
			遥控 18/9 000=2
5	动态跑船 2	1 000~2 000	遥测 81/9 000=9
			遥控 26/9 000=2.89

4 结束语

本文突破了低信噪比弱信号检测、基于正交多载波扩频的水声通信等关键技术的解决途径,通过多种调制方式分析和比较,设计了一种正交混合扩频调制方式,并采用相干二维搜索技术,提高扩频技术多普勒补偿能力。湖上静态与动态跑船试验结果表明:水声水平定位精度优于 0.5%,水声遥测遥控系统解算误码率达到了 10^{-3} 数量级,可有效引导 UUV 回收作业。

(下转第 27 页)