

基于 LoRa 蓝牙和安卓手机的 AUV 手柄遥控系统设计

朱衍明, 林九根, 余景锋, 王天昊

(中国船舶集团有限公司 系统工程研究院, 北京 100094)

摘要: 为实现 AUV 手柄遥控模式不增加 AUV 无线电通信硬件开销, 且为了实现该功能模式的低成本、易实现、全透明和自定义, 设计了 AUV 手柄遥控指令经中控台中转的 AUV 手柄间接遥控方案; 方案硬件上以安卓手机为遥控手柄, 配套遥控手柄 APP 软件实现手柄操作, 通过手机蓝牙与中控台计算机蓝牙进行近距离点对点连接, 以蓝牙无线通信实现手柄遥控指令对指挥台的传输, 之后中控台通过 LoRa 无线通信实现手柄遥控指令对 AUV 的无线传输; 方案试验验证环节以 Arduino 开发板模拟指挥台, 结合无线蓝牙收发模块接收手机遥控手柄发来的遥控指令, 实现了 10 米间距 20 Hz 数据帧蓝牙通信, 结合 LoRa 模块进行遥控指令的无线发送, 以 AUV 无线通信板进行 LoRa 接收, 并对收到的遥控指令进行解析和执行, 实现了 1 000 米间距 9 600 bps 速率的 LoRa 通信; 最终通过点灯试验、打舵试验和推进器试验证明了该设计方案链路完整可行并应用到工程实践。

关键词: AUV; 遥控; 手柄; LoRa; 蓝牙; 手机; 安卓

Design of AUV Handle Remote Control System Based on LoRa Bluetooth and Android Phone

ZHU Yanming, LIN Jiugen, YU Jingfeng, WANG Tianhao

(Systems Engineering Research Institute, CSSC, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to realize the autonomous underwater vehicle (AUV) handle remote control mode without increasing the hardware overhead of AUV radio communication, and to realize the function models of low cost, easy implementation, full transparency and customization, an indirect remote control scheme of the AUV handle is designed in which the AUV handle remote control command is transferred through the command station. The hardware of the scheme uses an Android mobile phone as a remote control handle, and is equipped with a remote control handle APP software to realize the handle operation. Through the mobile phone Bluetooth and the command station computer Bluetooth, a short-range point-to-point connection is made, and the Bluetooth wireless communication is used to realize the transmission of the handle remote control command to the control station, and then charge the control station. The station realizes the wireless transmission of the handle remote control command to the AUV through the LoRa wireless communication. In the test and verification process, the Arduino development board is used to simulate the control station. Combined with the wireless Bluetooth transceiver module to receive the remote control commands from the mobile phone remote control handle. Realized Bluetooth communication of 20 Hz data frame at 10 m distance. Combined with the Lora module, the remote control commands is sent wirelessly. The AUV wireless communication board is used for the LoRa reception, and the received remote control commands are parsed and executed, which is realized the LoRa communication with 9 600 bps rate at 1 000 m distance. Finally, through the lighting test, the rudder test and the thruster test, it is proved that the link of the design scheme is complete and feasible and applied to engineering practice.

Keywords: AUV; remote control; handle; LoRa; Bluetooth; mobile phone; Android

0 引言

进入 21 世纪以来, 随着全球各国特别是海洋大国对海洋资源开发的逐步深入, 以及各海洋军事强国在海洋上的对抗加剧, 自主水下航行器 (AUV, autonomous underwater vehicle) 在越来越多的场合被用作水下资源开发和对抗的关键平台, AUV 的研制和发展也随之步入快车道^[1-3]。

AUV 的研制过程通常会有室内水池测试和野外湖水测

试阶段, 并且这两个阶段都会首先进行水面测试^[4]。AUV 在进行水面测试时通常会配套有 AUV 手柄遥控模式, 即采用类似消费级无人机遥控器遥控的方式来操作 AUV。AUV 手柄遥控模式是 AUV 地面指挥台遥控模式的有利补充, 通过人工手柄遥控的方式可进行 AUV 水面机动操作, 特别是在近岸、近船或入港等需要人工就近观察并进行精细操作的场合, AUV 手柄遥控模式能够提供显著的便利^[5-6]。

收稿日期: 2022-07-12; 修回日期: 2022-07-25。

作者简介: 朱衍明(1988-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 工程师, 主要从事嵌入式电子技术方向的研究。

引用格式: 朱衍明, 林九根, 余景锋, 等. 基于 LoRa、蓝牙和安卓手机的 AUV 手柄遥控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(10): 216-221.

市面上常见的消费级无人机遥控器解决方案由两部分组成——遥控器和接收机, 遥控器和接收机之间为无线电通信, 但是各厂商的无线电通信协议是非公开且互不兼容的。接收机的输出一般是业内标准的 PPM 或者 SBUS 协议, 这对于消费级无人机的飞控系统来说有许多成熟的配套方案可选, 但是 AUV 的控制系统一般不会用到消费级无人机的飞控系统^[7]。因此对于 AUV 手柄遥控模式来说, 开发一套低成本、易实现、全透明且自定义的无线遥控系统显得十分具有实用意义和价值。

1 手柄遥控方案总体设计

1.1 AUV 手柄遥控方案设计

单独的 AUV 平台无法完成工作, 通常需要配套对应的地面指控台。地面指控台作为上位机通过无线或者有线的方式对 AUV 进行岸基任务分配、数据导入导出、下位机升级维护等操作。在 AUV 处于水面时, 地面指控站可以通过无线电指令方式对 AUV 进行遥控和路径重规划等操作。所以 AUV 平台自身是携带无线电通信设备的。因此, 如果 AUV 手柄遥控模式能够利用或者共用已有的这套无线电通信硬件设备, 而不是在 AUV 上再加一套无线电接收器, 将会节省 AUV 有限的载荷空间和重量、规避潜在的电磁兼容问题, 进而简化 AUV 设计的同时提高系统可靠性。

AUV 指控台通常部署在岸边或者母船, 并且由于其体积、重量、无线电通信天线和全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 天线等因素限制, 指控台一旦部署完毕就很难临时挪动, 因此, 在需要 AUV 指控台操作员对 AUV 进行水面上近距离观察操作时, 操作员通常会把 AUV 切换到手柄遥控模式后, 手持遥控手柄对 AUV 进行近距离观察和精细手工遥控。

由于操作员一般不能在开机状态下离开指控台, 且 AUV 手柄遥控模式也是近距离操作, 因此设计方案如图 1 所示, 遥控手柄通过近距离 (数十米量级) 无线电通信把操作指令发送给指控台, 指控台在 AUV 处于手柄遥控模式时把收到的遥控手柄指令通过 AUV 已有的远距离 (几千米量级) 无线电通信通道发送给 AUV, 进而间接实现 AUV 的手柄遥控。

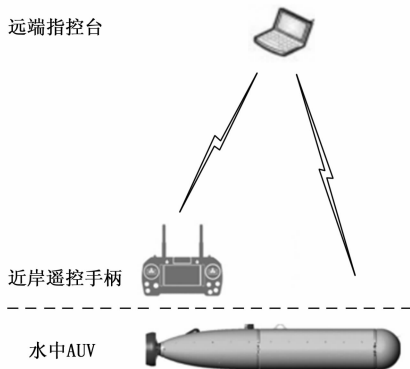


图 1 AUV 手柄遥控方案设计图

1.2 无线电通信方案设计

根据图 1 的 AUV 手柄遥控方案设计, 完整的通信链路由近距离无线电和远距离无线电通信两部分。无线电通信频段是公共资源不能够随意选用, 依据中华人民共和国无线电频率划分规定, ISM (industrial scientific medical) 波段开放给工业、科学和医学机构免费使用, 无需申请, 但是必须满足一定的射频能量要求^[8-9]。因此本方案中的 AUV 遥控手柄对地面指控台的近距离无线电通信设备需要满足 ISM 波段要求。同理, 地面指控台到 AUV 的无线电通信设备也需要满足 ISM 波段要求。因此, 为了 AUV 手柄遥控系统的低成本和易实现, 选用商用现货 (COTS, commercial off-the-shelf) 无线电通信技术和设备无疑是最有效的途径。

市面上常见的近距离无线电通信技术有 WiFi、蓝牙、UWB、ZigBee、NFC 等, 其信号的覆盖范围一般都在几十厘米和几百米, 其最大传输速度在几百 kbps 到几百 Mbps 之间不等, 对于近距离遥控这种数据传输量不大的应用场合都能满足需求^[10-12]。其中 WiFi 是一种人们生活中最常见的无线局域网接入技术, 具有传输速度快、通信带宽较大等优点, 广泛应用于人员密集的室内环境; 蓝牙 (Bluetooth) 技术则是无线数据和语音通信的全球开放规范, 其传输频带为 2.4 GHz 的 ISM 频段。且 WiFi 和蓝牙目前在智能手机和笔记本电脑上都是标配, 无需另行采购硬件设备。因此本文 WiFi 和蓝牙技术二选一, 选用了蓝牙作为近距离遥控手柄向 AUV 指控台的无线电通信方式。

市面上常见的远距离无线电通信技术有 GPRS/CDMA、数传电台、卫星通信、LoRa 等, 其信号的最远传输距离一般可达几千米到几百千米, 其最大传输速度在几十 kbps 到几百 kbps 之间不等, 对于远距离遥控这种数据传输量不大的应用场合都能满足需求^[16-17]。GPRS (通用无线分组业务) 是由中国移动开发运营的一种基于 GSM 通信系统的无线分组交换技术, CDMA (码分多址) 由中国电信运行的一种基于码分技术和多址技术的无线通信扩频技术。数传电台是数字式无线数据传输电台的简称, 其工作频段通常采用 ISM 频段。卫星通信是指利用人造地球卫星作为中继站来转发无线电信号, 从而实现在多个地面站之间进行无线电通信的一种技术。LoRa (long range radio) 的名字即为远距离无线电, 其工作频率为 ISM 频段^[18]。GPRS/CDMA 和卫星通信都需要向运营商购买服务, 采用 ISM 频段工作的数传电台和 LoRa 作为成熟的低成本解决方案, 非常适合 AUV 平台远距离指控应用场景的需求。因此本文数传电台和 LoRa 二选一, 选用了 LoRa 远距离无线电通信技术作为 AUV 的指控通信方式。

1.3 遥控手柄方案设计

根据图 1 的 AUV 手柄遥控方案设计, AUV 的遥控手柄需要同时具备手持遥控能力和近距离无线电发送能力。而当今的智能手机几乎都具备 WiFi 和蓝牙无线功能, 且在中国几乎做到了人手一部甚至多部智能手机。因此, 如果

能直接在个人智能手机上实现遥控手柄功能，通过调用智能手机自身的 WiFi 或者蓝牙进行无线电发射，这便实现了遥控手柄的功能。

在智能手机市场，安卓（Android）系统的市场占有率在八成以上，因此，基于安卓智能手机开发遥控手柄 APP 软件，在手机触摸屏上实现遥控手柄的各种操作，能够节省遥控手柄和近距离无线传输的硬件研制成本，且能轻松实现遥控手柄的各种自定义。

2 遥控手柄 APP 软件设计

2.1 软硬件需求

遥控手柄 APP 软件需要运行在安卓智能手机平台上，因此需要对平台软硬件环境提出一定的要求。考虑到 APP 软件的需要具备一定的通用性以适配不同的安卓手机，因此 APP 软件不能仅仅适配最新的安卓系统和蓝牙技术^[19]。因为安卓系统和蓝牙技术一般具有向下兼容的技术特点，因此本文基于较老一些的安卓系统 4.0 版本和蓝牙技术 2.0 标准来设计 APP 软件。

消费级无人机遥控器一般提供两个摇杆，两个摇杆共有四个控制通道，分别用来控制方向舵、升降舵、副翼和油门。同时还会提供若干个开关，主要用来完成飞行模式的选择和任务载荷的操作等。因此遥控手柄 APP 软件需要在手机触摸屏上模拟出两个摇杆和多个自锁按钮开关。

2.2 蓝牙连接设计

遥控手柄 APP 软件应该首先进行蓝牙连接设置，开启软件后进入第一个操作界面，蓝牙控制器如图 2 所示，在此界面选择需要进行蓝牙配对连接的设备^[20]。



图 2 蓝牙连接控制界面

如果此时手机蓝牙尚未开启，则如图 3 所示，需要弹出对话框请求开启手机蓝牙。

2.3 手柄界面设计

在完成蓝牙连接设置后，软件进入手柄界面，如图 4 所示，该界面从上到下由三部分组成。界面最上层为蓝牙连接的设备名称以及其连接状态，如果蓝牙连接因某些原因没有连接成功或者在连接成功后又因某些原因断连，操作人员可以根据显示的连接状态判断蓝牙通信是否正常。图 4 中即显示蓝牙连接对象为“nova8”，连接状态为“连接失败”。

手柄界面的中间层为两组共 16 个开关，开关设计成小灯珠的样式，由灯珠的亮灭来表示开关的闭合状态。每点击一下灯珠，其亮灭状态便翻转一次。软件开启后灯珠默



图 3 蓝牙使用请求对话框

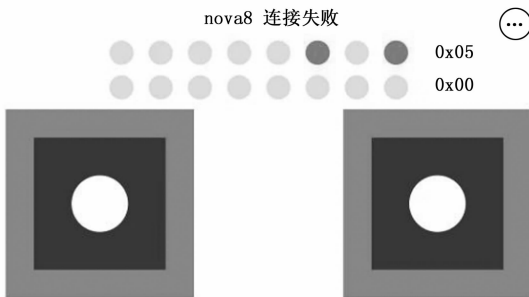


图 4 遥控手柄操作界面

认为全灭，对应开关状态位全关，用数字信号表示即为全 0；灯珠亮起表示开关闭合，对应数字信号 1。两组开关从左到右对应的无符号八位十六进制数的最高位到最低位，并将其显示在其两组开关的右侧。图 4 中第一组开关的值为 0x05，对应第一组开关的第零和第二位为 1，即表明这两个开关为闭合状态。

手柄界面的最下层为左右两个摇杆，左侧定义为摇杆 1，右侧定义为摇杆 2，每个摇杆以平面坐标系 X 、 Y 轴为独立的两个通道。左边的摇杆从左下角开始到右上角 X_1 、 Y_1 轴数值从零开始逐渐增大。右边的摇杆从右下角开始到左上角 X_2 、 Y_2 轴数值从零开始逐渐增大。如图 5 所示的右摇杆在左上角时 X_2 、 Y_2 对应的数值分别是位置 2 所示的 255 和 255。



图 5 摇杆的操作显示

在图 5 中显示的“位置：1 回中”，表示此时操作员并未操作摇杆 1，摇杆 1 自动回到中间位置，以此来模拟真实的摇杆复位回中操作。由于 AUV 执行机构的惯性及其系统响应速度这些真实物理条件限制，回中操作不能过快，因

此需要在一段时间内完成相对缓慢的回中操作, 而不能是瞬间回中。这就需要对摇杆的回中时长参数进行设置。

2.4 通信协议等设置

点击图 4 遥控手柄操作界面的右上角即可进入遥控手柄 APP 软件的设置界面, 设置界面如图 6 所示, 在该界面可进行数据发送模式的设置、数据帧头帧尾的自定义设置和摇杆值域的设置。



数据发送的模式可以设置为定时发送模式, 操作人员可以根据系统需求自行定义合适的定时发送时间间隔。如果不使用定时发送模式, 则默认为触发发送模式, 即当遥控手柄界面有任何数值改变时就会触发数据发送。

蓝牙通信数据帧也可以加入帧头和帧尾, 以便进行帧校验, 增加通信的可靠性。通过开启数据帧头帧尾即可, 并且可以自定义帧头帧尾。帧头帧尾各占一个字节, 设置数值为十六进制数。

摇杆设置包括 X_1 、 X_2 、 Y_1 、 Y_2 四个轴向值域的设置, 因为这四个数值在通信帧中各占一个字节, 因此对应十进制最大设置为 255, 表示该轴向从 0 到 255 共有 256 个数值, 也就相当于摇杆在该轴向被细分为 255 段, 如此精密的细分对很多应用场合来说足够满足需求。并且基于手机触屏的数字式细分比真实摇杆的滑动变阻器式细分会有更好的线性度和一致性。

通信数据帧在不开启帧头帧尾时数据帧总长为 6 个字节, 帧格式发送顺序为: X_1 、 Y_1 、 X_2 、 Y_2 、 Z_1 、 Z_2 。 X_1 、 Y_1 表示左侧摇杆 1 轴向数值, X_2 、 Y_2 表示右侧摇杆 2 轴向数值, Z_1 、 Z_2 表示上下两组开关的值, 传输时均用十六进制表示。开启帧头帧尾后即在数据帧前增加自定义的帧头和帧尾, 详细数据帧格式如表 1 所示。

3 试验与验证

3.1 试验内容设计

AUV 从外观上看大体可分为矢量推进控制和舵面控制

表 1 遥控手柄 APP 软件数据帧格式

字节顺序	名称	含义
1	帧头	自定义的帧头
2	X_1	左侧摇杆 X 轴数值
3	Y_1	左侧摇杆 Y 轴数值
4	X_2	右侧摇杆 X 轴数值
5	Y_2	右侧摇杆 Y 轴数值
6	Z_1	第一组开关数值
7	Z_2	第二组开关数值
8	帧尾	自定义的帧尾

两种, 但无论哪种, 其运动模型一般可以采用大地坐标系 $E-\xi\eta\zeta$ 加随体坐标系 $G-xyz$ 来表示, 这与无人机十分相似^[21]。

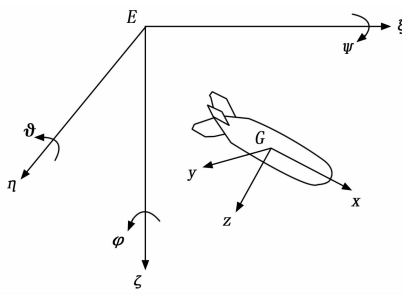


图 7 AUV 的坐标系

但是水下机器人和空中无人机的运动控制也有明显的不同, 那就是无人机的大规模转向需要通过横滚来配合实现, 而 AUV 一般不需要如此操作。前文说到消费级无人机遥控器一般提供两个摇杆, 两个摇杆共有四个控制通道, 分别用来控制无人机的方向舵、升降舵、副翼和油门。方向舵对应固定翼无人机的垂直尾翼, 用来改变机头的左右朝向, 即偏航操作。升降舵对应固定翼无人机的水平尾翼, 用来实现机身的抬头和低头, 即俯仰动作。副翼对应固定翼无人机的两片副翼, 用来实现机身的横滚动作。油门顾名思义是用来控制无人机的动力输出大小的。因 AUV 与无人机本质上的不同, 所以, AUV 在手柄遥控模式下一般只需要实现偏航、俯仰和油门操作, 且极少需要手动进行横滚操作。

无论是矢量推进控制式 AUV 还是舵面控制式 AUV, 其航向的改变都是通过舵机或者电机带动推进器或者舵面转动来实现的。因此试验设计以遥控手柄 APP 软件上左侧摇杆 1 的 X 轴进行偏航控制 Y 轴进行俯仰控制, 分别对应控制十字型舵 AUV 的上下和左右舵机。以遥控手柄 APP 软件上右侧摇杆 2 的 Y 轴进行油门杆操作, 对应控制 AUV 推进器的正反推进功率。

遥控手柄 APP 软件上的开关对 AUV 控制系统来说正是开关量 (或者称为数字量) 输入, 对开关量的试验验证可以简单得通过 LED 灯的亮与灭来进行。所以本文设计在遥控手柄 APP 软件上第一组开关全 0 状态时 LED1 熄灭, 非全 0 状态时 LED1 亮起。第二组开关对应 LED2, 第二组开关全 0 状态时 LED2 熄灭, 非全 0 状态时 LED2 亮起。

所有试验内容条目以及预期的效果如表 2 所示。摇杆 1 在回中位置时对应 AUV 方向舵和俯仰舵也在中位，轴向数值 0~255 变化时，映射到方向舵和俯仰舵的舵角即为从最小值转到最大值。摇杆 2 的 Y 轴在回中位置时对应 AUV 的推进器转速为 0，当其数值从 0~255 变化时，对应推进器从反转最大功率逐渐减小到零然后再从零逐渐增大到正转最大功率，此时需要注意的是 AUV 的推进器应当在水中测试，以免推进器电机在空气中高速空转而过热烧坏。

表 2 遥控手柄 APP 软件试验内容

序号	试验对象	预期试验效果
1	摇杆 1 的 X 轴	AUV 方向舵随动
2	摇杆 1 的 Y 轴	AUV 俯仰舵随动
3	摇杆 2 的 Y 轴	AUV 推进器正反转
4	第一组开关	LED1 亮灭
5	第二组开关	LED2 亮灭

3.2 试验链路搭建

根据试验内容的设计，设计搭建完整的通信测试链路如图 8 所示。

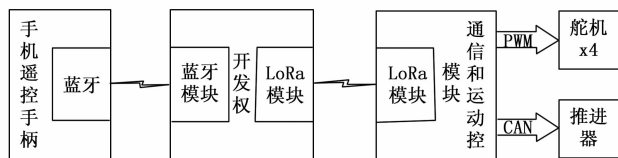


图 8 通信测试链路

测试链路中以开发板代替真实指控台，并搭配蓝牙模块和 LoRa 模块，蓝牙模块实现接收手机遥控手柄 APP 软件通过无线蓝牙发送来的遥控数据帧，LoRa 模块实现对遥控数据帧的转发。

AUV 端的通信和运动控制模块负责 LoRa 无线通信数据的接收，并对收到的遥控数据帧进行解析和执行，实现 LED 灯的点亮控制、舵机的舵角控制和推进器的功率控制。

蓝牙模块选用正点原子的 ATK-HC05 型蓝牙模块，这是一款高性能的主从一体式的蓝牙串口模块，能够同各种手机、电脑等带蓝牙功能的终端进行匹配。通信速率可配置为 4 800~1 382 400 bps，且其接口兼容 3.3 V 和 5 V 电平，可以适配 3.3 V 或者 5 V 接口电平标准的单片机开发板。

LoRa 模块选用骏晔科技的 DL-RTS1278M 型无线串口 LoRa 透传模块，该模块采用扩频调制和循环交织纠错编码，有多个通信频段可选，具有较高的灵敏度和较好的抗干扰能力。接口速率为 1 200~115 200 bps，0.81 kbps 传输速率下的传输距离可达 3 000 米，非常适合工业远程控制。

开发板选用 Arduino Mega 2560 开发板，这是一款基于 8 位微控制器 ATmega2560 的开发板，能够提供多达 4 个 USART 硬件串行接口，结合蓝牙串口模块和 LoRa 串口透传模块可快速完成简易指控台的搭建。再通过 Arduino IDE 软件提供的库函数能够方便地进行软件功能编写，实现蓝

牙串口数据的接收和 LoRa 串口透传模块的数据发送。

AUV 端的通信和运动控制模块为基于嵌入式系统 STM32 的嵌入式开发板，主要负责无线电通信的收发，以及 AUV 运动执行机构的（包括舵机和推进器）控制。STM32 通过 2 个 GPIO 完成板载 LED1 和 LED2 的亮灭控制，通过改变 PWM 输出占空比完成 4 个舵机的控制，通过 CAN 总线通信完成推进器推进正反转和推进功率的控制^[22-23]。图 9 为 AUV 端的通信和运动控制模块在控制推进器时完成摇杆 2 的 Y 轴的数值从全功率反转（-100%）到全功率正转（+100%）的等比例映射。摇杆数值到舵机舵角的映射关系与此类似。

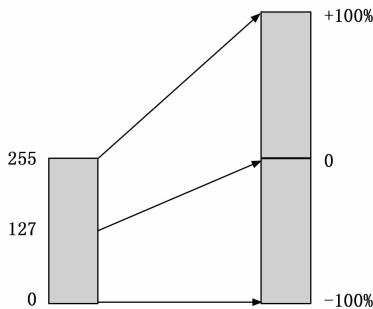


图 9 从摇杆 2 的 Y 轴数值到推进器输出功率的映射

3.3 试验结果与分析

根据表 2 的测试内容以及图 8 的测试链路，首先进行了 APP 遥控手柄软件开关的测试，测试结果表明第一组开关中任意一个开关闭合即可点亮 LED1，第二组开关中任意一个开关闭合即可点亮 LED2。其次进行了摇杆 1 的测试，实物测试如图 10 所示，测试结果显示 AUV 方向舵和俯仰舵能够跟随摇杆 1 的操作进行相应的打舵操作。

最后进行了摇杆 2 的测试，实物测试如图 11 所示。测试结果显示随着摇杆 2 在 Y 轴的缓慢上推和缓慢下推，推进器能够跟随操作进行加力正推和加力反推，水中实测过程如图 11 所示，左侧图中水波纹显示水流从推进器前端吸入后端喷出，因此左图为推进器正推；右侧图中水波纹显示水流从推进器后端吸入前端喷出，因此右图为推进器反推。

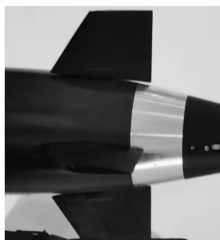


图 10 舵机打舵测试

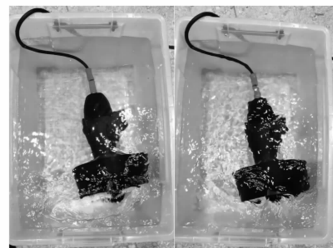


图 11 推进器正反转测试

通过以上试验，验证了遥控手柄 APP 软件的设计合理性，证明了基于 LoRa、蓝牙和安卓手机的 AUV 手柄遥控系统设计方案可行。

4 结束语

本文设计了一种 AUV 手柄遥控模式的间接实现方案, 即在安卓手机上开发 APP 软件来模拟遥控手柄, 通过手机蓝牙对指控台实现近距离无线通信, 指控台通过蓝牙接收到手柄操作信息后再通过远距离 LoRa 无线通信实现对 AUV 的手柄遥控信息的发送。本方案全过程透明, 通信协议可自定义, 且近距离和远距离无线电通信硬件设计有备选方案, 以较低的成本和较强的通用性实现了 AUV 的手柄遥控系统设计, 为 AUV 的开发和调试提供了有力保障。

参考文献:

[1] 于海斌. 海洋强国需要水下机器人 [J]. 机器人产业, 2017 (1): 42-45.

[2] 马伟锋, 胡震. AUV 的研究现状与发展趋势 [J]. 火力与指挥控制, 2008 (6): 10-13.

[3] 徐如玉, 李彭超. 水下机器人发展趋势 [J]. 自然杂志, 2011, 33 (3): 125-132.

[4] 高剑, 吴普国, 严卫生, 等. 便携式 AUV 分布式控制系统开发与试验 [J]. 控制工程, 2017, 24 (2): 315-320.

[5] 孙现有, 焦泽健. 无人水下航行器发展与应用 [J]. 水雷战与舰船防护, 2012, 20 (2): 50-52.

[6] 苏玉民, 万磊, 李晔. 舵桨联合操纵微小型水下机器人的开发 [J]. 机器人, 2007, 29 (2): 151-154.

[7] 张伟. 基于蓝牙协议的多旋翼无人机无线遥控系统的设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

[8] 彭飞飞. 低功耗长距离无线收发模块设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

[9] CHOW C W, LIN Y H. Convergent optical wired and wireless long-reach access network using high spectral-efficient modulation [J]. Optics Express, 2012, 20 (8): 9243-9248.

[10] 王保云. 物联网技术研究综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23 (12): 1-7.

[11] 程曼, 王让会. 物联网技术的研究与应用 [J]. 地理信息世界 (上接第 215 页)

[12] AHMAD M, ABOULNAGA A, BABU S. Query interactions in database workloads [C] // International Workshop on Testing Database Systems, ACM, 2009: 11.

[13] CHEN Y, SUN L. A hybrid machine learning approach to concurrent query performance prediction [C] // 2019 IEEE 14th International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE). IEEE, 2019: 1170-1177.

[14] AHMAD M, DUAN S, ABOULNAGA A, et al. Predicting completion times of batch query workloads using interaction-aware models and simulation [C] // International Conference on Extending Database Technology, ACM, 2011: 449-460.

[15] AHMAD M, DUAN S, ABOULNAGA A, et al. Interaction-aware prediction of business intelligence workload completion times [C] // IEEE, International Conference on Data Engineering. IEEE, 2010: 413-416.

[16] GUPTA C, MEHTA A, DAYAL U. PQR: predicting query

界, 2010 (5): 22-28.

[12] 孙晔慧, 罗汉文. 无线以太网和蓝牙在 ISM 频段的共存 [J]. 通信技术, 2002 (3): 24-26.

[13] 李晓阳. WiFi 技术及其应用与发展 [J]. 信息技术, 2012 (2): 196-198.

[14] 曾磊, 张海峰, 侯维岩. 基于 WiFi 的无线测控系统设计与实现 [J]. 电测与仪表, 2011 (7): 81-83.

[15] UMIROV U, PARK J I. Efficient use of Bluetooth in networked control systems [C] // Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012. 12th International Conference on IEEE, 2012: 13-17.

[16] 王阳, 温向明, 路兆铭, 等. 新兴物联网技术——LoRa [J]. 信息通信技术, 2017 (1): 55-59.

[17] CHEN Y L, WANG J W, LIN Y S, et al. Combined fuzzy-based power control with window-based transmission rate management in multimedia CDMA cellular systems [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2011, 65 (4): 377-383.

[18] 杨磊, 梁活泉, 张正, 等. 基于 LoRa 的物联网低功耗广域系统设计 [J]. 信息通信技术, 2017 (1): 40-46.

[19] KANG, SOO H, SONG, et al. A study on the attention of the internet shopping mall mobile app intro page-focused on domestic and foreign internet shopping mall [J]. Journal of the Korean Society Design Culture, 2018, 24.

[20] 中国船舶工业系统工程研究院. 通用遥控手柄手机 APP 软件 [P]. 中国: 2020SR0831992, 2020-07-27.

[21] 李岳明. 多功能自主式水下机器人运动控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.

[22] 朱衍明, 林九根, 宋家平, 等. 基于嵌入式系统 STM32 的 UUV 通用运动控制层设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (12): 120-125.

[23] 杨青书. 基于 CAN 总线的 AUV 分布式控制系统设计与实现 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.

[24] execution times for autonomous workload management [C] // International Conference on Autonomic Computing, IEEE Computer Society, 2008: 13-22.

[25] DUGGAN J, PAPAEMMANOUIL O, CETINTEMEL U, et al. Contender: a resource modeling approach for concurrent query performance prediction [C] // EDBT, 2014: 109-120.

[26] SINGHAL R, NAMBIAR M. Predicting SQL query execution time for large data volume [C] // International Database Engineering & Applications Symposium, ACM, 2016: 378-385.

[27] MILICEVIC M, BARANOVIC M, ZUBRINIC K. Application of machine learning algorithms for the query performance prediction [J]. Advances in Electrical & Computer Engineering, 2015, 15 (3): 33-44.

[28] POESS M, NAMBIAR R O, WALRATH D. Why you should run TPC-DS: a workload analysis [C] // International Conference on Very Large Data Bases, University of Vienna, Austria, DBLP, 2007: 1138-1149.