一种具有二级触发功能的水声释放器遥控系统

吴燕艺,江伟华,童峰 (厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室,福建厦门 361005)

摘要:水声释放器在海洋环境监测、水下施工和海洋测绘等领域发挥着重要作用。考虑到长期值守对低功耗的要求, 传统水声释放器采用简单的非相干频率调制解调方法进行遥控,要求遥控信号有较高的信噪比,因此易被非授权方 截获、复制从而导致丢失。基于 STM32 微处理器设计了一种频率调制结合扩频调制的二级触发释放器遥控系统,该 系统在通过作为第一级触发的频率检测后,需对低信噪比扩频信号检测进行二级触发,从而提高系统的可靠性、安 全性。海上实验结果表明了该方案的有效性。

关键词:水声遥控;低功耗;STM32;二级触发

中图分类号: TN929.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3630(2016)-01-0006-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2016.01.002

A two-level remote control system of acoustic release transponder

WU Yan-vi, JIANG Wei-hua, TONG Feng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: The acoustic release transponder plays an important role in marine environmental monitoring, underwater construction and marine mapping, and so on. Taking into account the low power requirements to support long lifetime, the traditional acoustic release transponder uses simple frequency modulation and demodulation for signal detection, thus the remote control signal is easily intercepted and copied by unauthorized user. To improve the reliability and safety, a scheme of developing a two-level remote control system is presented by incorporating the classic frequency modulation with the spread spectrum modulation. With the proposed method, following the non-coherent detection of frequency modulation signals, the receiver needs to detect the low SNR spread spectrum signal to finish the two-level remote control. Based on STM32 microprocessor, the design and implementation of the proposed scheme is provided. The offshore experimental results validate the effectiveness of the proposed method.

Key words: acoustic remote control; low power consumption; STM32; secondary trigger function

引言 0

水声释放器是一种常用的水声遥控设备,在水 下工程、地震测量、石油探测、水文分析等方面都 有广泛应用。法国 Oceano Technologies 公司^[1]、美 国的 Benthos 公司^[2]等开发了系列化的水声释放器 产品,可满足不同海洋条件下的需要。国内研制的 释放器在工作水深、应答距离、连续工作时间和可 靠性方面与国外先进水平相比较还有一定的差距。 西北工业大学基于自主研制的短基线水下定位系 统进行应答释放器设计^[3]。杭州瑞声海洋仪器有限 公司的SFO-1型声学释放器是国内少数的商用声学 释放系统,连续工作时间为 90 天,释放作用距离

为 3000 m^[4]。

考虑到支持水下长时间工作的低功耗要求,水 声释放器通常采用实现简单方便的非相干频率调 制解调方案,如 MSP430 系列微功耗处理器具有功 耗低、精度高、尺寸小等特点,具有5种低功耗工 作方式^[5]。但由于微功耗处理器运算功能比较有限, 所以水声释放器遥控系统通常采用对特定频率进 行非相干检测唤醒释放器。而非相干频率检测需要 较高的接收信噪比,因此常规水声释放器的遥控信 号容易被截获、复制,从而导致释放器被非授权方 唤醒并回收,造成重要数据丢失等严重后果。

针对上述问题,本文采用兼具低功耗和较高运 行能力的 STM32 微处理器设计了一种具有二级触 发功能的水声释放器遥控系统。该系统采用二级触 发体制:处理器以极低功耗模式进行非相干频率检 测等待第一级触发,以保证系统长期值守;通过第 一级触发的频率检测后,处理器被唤醒进行扩频码 的相关检测以通过二级触发功能,二级触发后方可

收稿日期: 2015-03-14; 修回日期: 2015-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11274259)

作者简介:吴燕艺(1990-),女,福建人,硕士研究生,研究方向为水声 通信。

通讯作者: 童峰, E-mail: ftong@xmu.edu.cn

遥控水声释放器。由于作为第二级触发信号的扩频 码信号可在较低信噪比情况下进行检测,能够有效 防止非授权方通过截获、复制频率调制遥控信号导 致的释放器丢失,从而提高水声释放器的使用安全 性。最后通过海上试验验证了本文方案的有效性。

具有二级触发功能的水声释放器 遥控方案设计

本文所设计的水声释放器遥控系统在传统非 相干检测基础上增加了二级触发模式,以保证长期 值守及对扩频信号的相关检测能力,从而提高系统 的安全性和可靠性。系统的主要功能模块包括:

第一级触发为非相干频率检测,整个水声释放 器遥控系统保持在低功耗状态下进行检测,以达到 长期值守的要求,值守电路负责检测唤醒信号与产 生唤醒中断¹⁶。值守电路包括前置放大、带通滤波 器、包络检波、比较器等四个功能单元。该部分能 够完成对水听器接收信号的放大滤波,并进行检波 比较,从而唤醒处于休眠状态的处理器。在此模式 中,微处理器处于低功耗工作模式,以实现释放器 的长时间值守功能。

第二级触发为相关检测,处理器采集带通滤波 后的接收信号并对其采用拷贝相关算法进行扩频 信号检测。通过检测后,系统的二级触发机制生效, 启动对释放器的遥控,可有效提高释放器使用的安 全性。本文系统使用 m 序列编码的扩频信号,可在 极低信噪比下进行检测,从而降低被截获概率。具 有二级触发功能的水声释放器遥控系统框图如图 1 所示。

2 系统实现方案

2.1 硬件设计

本文遥控系统硬件设计方案主要由以下几个 部分组成:低功耗运放构成的前置放大电路、 MAX274芯片构成的带通滤波电路、UAF42构成的 窄带滤波电路。此外,还包括有源包络检波电路、 比较电路、加法电路及其外围器件组成的信号处理 模块。主控制器采用 ARM 公司的超低功耗单片机 STM32,结合其丰富的片上外设资源和处理能力, 负责整个系统的待机值守。单片机在相对简单的逻 辑控制中具有低功耗、低硬件成本、编程易实现等 优点。

STM32 微处理器采用 32 位 Cortex-M3 内核,





最高工作频率为 72 MHz,具有较强的信号处理能 力,为实时信号能量检测提供了有利保证;同时, STM32 含有 3 种低功耗模式:休眠、停止和待机模 式,这三种模式为其功耗管理提供了极好的性能保 证,在 72 MHz 时消耗 36 mA(所有外设处于工作状 态),待机时下降到 2 μA^[7]。并具有丰富的内部模块 如 DMA、11 个定时器、多达 112 个多功能双向 I/O 口均可映像到 16 个外部中断等方便系统调用,在 存储器的零等待周期访问时可达 1.25 DMips/MHz, 具有单周期指令乘法和硬件除法器,其高性能的信 号处理能力满足系统在信号解码时大量相关运算 的需要。

2.2 遥控信号帧格式

浅海信道极其复杂,在时间、空间、频率三方 面对信号产生极其严重的影响,为了抑制水声信道 频率选择性衰落带来的影响,第一级触发信号本文 采用时延编码方式^[8],即利用不同频率脉冲信号间 的时间间隔对遥控指令进行编码。如图 2 所示,其 中, f_1 、 f_2 、 f_3 分别为信源中的三种频率,3 种频 率的脉宽一致,但码元间时延不相同。若值守电路 以正确的频率、时延接收到三种频率的信源,则启 动第一级触发,主控处理器唤醒等待第二级触发信 号。

图 2 为本文遥控信号示意图,包括了用于进行 第一级触发的频率调制信号和进行第二级触发的 扩频信号,其中前者采用较大功率发射,后者则采 用低功率发射。作为第二级触发信号的扩频码(Pn), 码元时间宽度为t₂,主控处理器对接收到的 Pn 信 号进行拷贝相关处理,在时间窗t,内,通过对相关



Fig.2 Schematic diagram of the communication coding signal

峰的计算来判别是否启动二级触发。

2.3 软件实现

系统接收机的工作流程图如图 3 所示,在微控 制器 STM32 没有收到接收信号的触发中断时,整 个系统处于低功耗的休眠模式,此时整个系统的电 流消耗只有 3 μA。

一级触发后 STM32 处理器唤醒, 主频为 72 MHz 同时可调用 FFT 库函数, 如完成 1024 点 FFT 运算只需 1.0941 ms, 因此可支持高性能的数字信 号处理实现对扩频码的匹配滤波检测。





在软件实现方面,本文方案采用多级防误动措施,避免受到干扰信号的影响,导致释放器进行释放动作。软件处理时序图如图4所示。

通信编码的中心频率 f_1 、 f_2 、 f_3 的顺序始终一 致,水声遥控系统上电后 STM32 处理器处于休眠



状态,当系统接收到f,的信号后,触发f,对应的中断接口,并打开计时定时器A开始计时,之后关闭 f,中断,打开f,对应中断接口,以此类推,每个信 号来临前只有相应的中断打开,从而避免不同频率 码元多径造成的码间干扰。同时,为避免海洋信道 中脉冲干扰的影响,采用定时器B对码元间隔进行 定时,若设定时间内未接收到后续码元,则认为是 干扰信号,软件复位相关变量,重新进入休眠模式, 等待第一级触发信号的状态。

通过第一级触发信号的检测后唤醒 STM32 处 理器,并开启采集窗口对信号进行采集及相关检 测,考虑到完成第一级触发的时刻受包络检波、电 平比较电路影响将存在一定的起伏,发射信号格式 中在扩频信号前设定一定的保护间隔;同时,考虑 到多径扩展的影响,设定采集窗宽度t₁大于扩频信 号的宽度t₂,以确保 STM32 处理器开启采集窗能 够采集到完整的扩频信号(如图 2 所示)。

STM32 处理器对采集窗内采集的接收信号与本地信号进行拷贝相关处理,通过对相关峰的计算 来判别是否启动二级触发。若超过阈值,则启动二 级触发,执行控制动作;若未超过阈值,则STM32 再次进入低功耗的休眠模式。

3 海上实验结果

为了验证本文所设计的水声遥控系统的性能, 在台湾海峡海域进行了本文设计的二级触发释放 器遥控系统实验。实验海域水深180 m,接收模块 利用"延平二号"实验船船载绞车吊放于水下150 m 处,发射换能器从甲板吊放至水面以下3m深度。 系统第一级触发信号中心频率分别设置为 14.25、 15.5、16.75 kHz 的调制信号; 第二级触发信号采用 的扩频码长度 *t*, =23 ms, 采集窗长 *t*, =50 ms。

海上实验接收信号经过前放、滤波、检波等得 到的第一级触发信号处理结果如图 5 所示,图 5(a) 为接收的第一级触发信号波形图,图 5(b)~5(d)分别 表示经过三路检波比较后的结果,图 5(e)由三路检 波比较结果累加得到,可有效保证对 STM32 处理 器的第一级触发动作。



第二级触发支持低信噪比条件下的扩频信号 检测,由于实验中获得的原始接收信号信噪比高, 无法评估低信噪比性能,本文采用叠加实测海洋环 境噪声的方法近似分析了不同信噪比条件下的第二 级触发性能,以评估本文系统中第二级触发信号的 低截获性能。叠加噪声信号的信噪比(SNR)定义^[9]:

$$SNR = 10 \lg(\frac{\sum [x(t)]^2}{\sum [n(t)]^2})$$
 (1)

$$y(t) = x(t) + n(t)$$
 (2)

其中: x(t)为实验接收到的原始高信噪比信号; n(t) 为实录海洋背景噪声; y(t)为叠加噪声信号。实验中 为了量化评估第二级触发相关检测输出的性能,定 义判决因子 DF 为

$$DF = \frac{R_{\max}}{\sqrt{\operatorname{var}[R_t]}} \tag{3}$$

其中: *R*, 为为拷贝相关结果; *R*_{max} 为相关结果的最大值; var[]为求方差函数。

图 6 为本文系统 STM32 处理器中采集的不同 信噪比第二级触发信号波形及相关运算结果。图 7







通过不同调制方式组合进行复合调制来隐藏 信号和增加解调难度是提高系统低截获概率的有 效途径^[10-12]。本文设计的遥控信号利用频率调制和 扩频技术相结合进行二级触发来提高信号隐蔽性, 非授权方仅通过截获第一级频率调制触发信号无 法实现对释放器遥控系统的唤醒,从而降低被截获 的概率,提高释放器使用中的安全性。

4 结论

针对常规水声释放器采用频率调制遥控信号 易被截获、复制的问题,本文设计了一种具有二级 触发功能的水声释放器遥控系统,通过在遥控系统 中增加对低截获概率扩频信号的检测形成二级检 测机制,遥控信号由频率遥控信号和低信噪比扩频 信号组成,从而可有效防止非授权方通过截获、复 制频率调制遥控信号导致的释放器丢失,提高使用 的安全性。海上实验结果验证了本文系统的有效 性。

致谢:感谢福建省海洋研究所"延平2号"科 学考察船船员为本文试验工作提供的帮助。

参考文献

- [1] 陈学良. 水声应答器硬件及软件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] 夏冬. 声学释放器数字电路设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程 大学, 2010.

XIA Dong. Digital circuit design and implementation for acoustic release system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.

[3] 徐飞翔,李斌,杨杰. 基于 MSP430 的低功耗深海应答释放器设计
 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(5): 1148-1150.
 XUL Feiving, LL Bin, XANG, Lie, Design of acoustic release

XU Feixiang, LI Bin, YANG Jie. Design of acoustic release

transponder for seep water deployment[J]. Computer Measurement & Control, 2010, **18**(5): 1148-1150.

- [4] 王琪. 声学释放系统数字平台设计及在同步定位系统中应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
 WANG Qi. The design of Acoustic release system digital platform and application in the synchronous positioning system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009.
- [5] 杨微,秦华伟. 基于 MSP430 的深海低功耗数据采集系统[J]. 机电 工程, 2009, 26(5): 16-19. YANG Wei, QIN Huawei. Low power-consumption deep-sea data logger based on MSP430[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(5): 16-19.
- [6] 陈君, 万洪杰, 王学伟. 基于 DSP 和 MSP430 的水声应答器设计
 [J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(10): 3817-3820, 3886.
 CHEN Jun, WAN Hongjie, WANG Xuewei. Design of acoustic responder based on DSP and MSP430[J]. Computer Engineering and Design, 2012, 33(10): 3817-3820, 3886.
- [7] 陈鑫, 秦宏伟. 基于 Cortex-M3 内核的 STM32 微控制器研究与电路设计[J]. 大庆师范学院学报, 2013, 33(6): 44-47. CHEN Xin, QIN Hongwei. The research of microcontroller STM32 and circuit design based on Cortex-M3[J]. Journal of Daqing Normal University, 2013, 33(6): 44-47.
- [8] 惠俊英,刘丽,刘宏,等. Pattern—时延差编码水声通信研究[J]. 声学学报, 1999, 24(6): 561-573.
 HUI Junying, LIU Li, LIU Hong, et al. A study of pattern time delay coding underwater acoustic communication[J]. Acta Acustica, 1999, 24(6): 561-573.
- [9] Narayanan A, Member S, Wang D. A CASA-Based System for Long-Term SNR Estimation[J]. IEEE Transactions on Audio Speech & Language Processing, 2012, 20(9): 2518-2527.
- [10] 何惠江,刘军凯,刘雪辰,等. 声纳低截获技术方法与策略研究
 [J]. 鱼雷技术, 2010, 18(2): 99-103.
 HE Huijiang, LIU Junkai, LIU Xuechen, et al. Techniques for low probability of intercept sonar[J]. Torpedo Technology, 2010, 18(2): 99-103.
- [11] 黄鹏刚. 低截获概率雷达技术研究[J]. 现代电子技术, 2003, 27(18): 24-28.
 HUANG Penggang. Analysis of low probability of intercept radartechnology[J]. Modern Electronic Technology, 2003, 27(18): 24-28.
- [12] 王燕, 韩成龙, 范展, 等. 一种低截获水声遥控信号的设计方法及 性能分析[J]. 声学技术, 2014, 33(3): 260-264.
 WANG Yan, HAN Chenglong, FAN Zhan, et al. The design and performance analysis of a low intercept probability signal for underwater acoustic remote control[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(3): 260-264.