

水声传感网中的高效调制解调器的设计

王 斌, 朱昌平, 单鸣雷, 马济通, 谢 希,
韩秋铨, 汤一彬, 高 远, 韩庆邦

(江苏省输配电装备技术重点实验室, 常州市传感网与环境感知重点实验室, 河海大学, 常州 213022)

摘要: 为适应水声传感网络节点密集、规模大、工作时间长的特点, 提出了一种具有小体积、低成本、低功耗等特点的水声调制解调器。采用数字幅度调制 2ASK 调制解调方式, 硬件使用低功耗设计方案, 电池供电, 使用市场上量产的收发一体式小型水声换能器, 使功耗和成本得到大幅度降低。经实际测试, 整机最大功耗为 90 mW, 数据传输速率为 2kbps, 具备代替市场上昂贵水声调制解调器的潜力, 在水声传感网技术中有良好的应用前景。

关键词: 水声传感网; 调制解调器; 低功耗与成本; 数字幅度调制

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-04-0436-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.04.020

A high-efficiency acoustic modem used in the underwater acoustic sensor network

WANG Bin, ZHU Chang-ping, SHAN Ming-lei, MA Ji-tong, XIE Xi,
HAN Qiu-cheng, TANG Yi-bing, GAO Yuan, HAN Qing-bang

(Jiangsu Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment Technology, Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu, China)

Abstract: The features of underwater acoustic sensor network are mainly indicated in dense nodes, large scale and long time working. To adapt these features, a kind of acoustic modem of small size, low-cost, low-power and short range is developed. The modem uses 2ASK modulation and demodulation method, and the hardware is designed by low-power scheme. The results of lake experiment show that the maximum power consumption of a complete machine is up to 90 mW, data rate is 2kbps. This kind of underwater acoustic modems can replace the expensive ones on the market, and can be widely used in underwater acoustic sensor networks.

Key words: underwater acoustic sensor network, modem, low-power and low-cost, 2ASK

0 引 言

水声传感网是全球网络化技术普及的产物, 它是在一定的水下区域内, 通过各种传感器节点获取水下信息, 并对水下节点进行声学通信和组网, 最终通过特定的节点, 重新以无线电和有线的形式把在覆盖区域中所获取的信息纳入岸上的常规网络, 并发送给观察者的水下子网^[1]。

由此可见, 水声传感网中的传感节点需要拥有以下两个特点: 第一, 由于传感节点密度较大, 必须降低单个传感节点的成本以节约整个水声传感网的建设成本; 第二, 传感节点往往在水下需要持

续数月在无人维护的情况下工作, 必须尽量降低传感节点的功耗以延长水声传感网持续工作的时间^[2,3]。

如图 1 所示, 一个传感节点主要由六部分组成。传感器、接口电路、节点控制器、本地存储器、水声调制解调器和供电模块^[5]。其中, 完成信息收发关键是水声调制解调器, 也是所有部分中功耗最大、成本最高的部分。因此, 降低水声调制解调器的功耗和成本可以有效地降低水声传感节点的整体

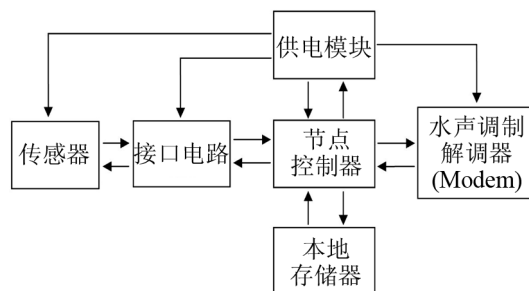


图 1 传感节点的基本组成

Fig.1 The basic structure of a sensor node

收稿日期: 2012-04-05; 修回日期: 2012-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10974044)、河海大学中央高校
基本科研业务费资助项目(2009B31514、2009B31614、
2011B11014、和 2011B11314)

作者简介: 王斌(1990—), 男, 天津人, 研究方向为水下通信。

通讯作者: 朱昌平, E-mail: cpzhu5126081@163.com

功耗和成本。

传统的水声调制解调器体积较大、造价昂贵、功耗较高,通信距离可达数公里甚至几十公里^[6]。显然,传统的水声调制解调器不能够适应水声传感网的使用要求。为了降低水声传感网的整体成本、保证传感网长时间可靠地进行水下信息收集和传递,非常有必要研制一种具有体积小、成本低、功耗低的高效水声调制解调器^[7]。

最近几年,已经有研究机构开发出了低功耗、低成本的水声调制解调器,但是这些调制解调器的数据传输速度非常慢,在水下通信时不能够支持介质访问控制层(Medium Access Control, MAC)和路由层的协议,MAC层协议包含大量数据控制信息,可以检验出传输过程中发生的错误,一旦出现错误,由路由层处理错误数据,两种协议每秒钟的总数据量将近 2000 bit,所以传输速率过低的水声调制解调器不能用于水下传感网的节点^[8]。在尽量低的功耗下实现尽量远的信息传送距离,就要求水声调制解调器具有很高的效率,因此,在硬件设计上需要遵循尽量以软代硬的原则,首先降低硬件的功耗和成本,在软件设计上使用尽量高效的算法,降低微处理器(Micro Control Unit, MCU)的运算量,提高抗干扰、抗误码的能力。

1 硬件设计

水声调制解调器由三部分组成,发送部分、接收部分和水声换能器。从低功耗的设计原则上来看,二进制振幅键控(2 Amplitude Shift Keying, 2ASK)的调制解调方式相比其他方式有更低的功耗。2ASK 信号可表示为

$$e_{2ASK}(t) = \sum_n a_n g(t - nT_s) \cos \omega_c t \quad (1)$$

式中: T_s 是二进制基带信号时间间隔, $g(t)$ 是持续时间为 T_s 的矩形脉冲。调制解调器使用 MCU 内部的快速 PWM 功能直接模拟产生 2ASK 信号,降低了调制部分硬件的成本和数量,由于没有使用额外的硬件电路用于 2ASK 调制,系统的功耗能够进一步降低。

从误码率的角度比较相干 2ASK 解调与非相干 2ASK 解调的性能。每个码元的平均能量为

$$E_b = \frac{A^2 T_b}{4} \quad (2)$$

式中: A 表示信号的振幅, T_b 表示每个码元持续的时间。因此,对于相干 2ASK 解调方式,每比特出错的概率 P_{e-co} 为

$$P_{e-co} = Q\left(\frac{d_{\min}}{2\sigma}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (3)$$

式中: $d_{\min}$ 表示最小符号间距, σ 表示标准差, N_0 表示信道噪声密度, $Q(z)$ 表示 Q 函数。对于非相干 2ASK 解调方式,每比特出错的概率 P_{e-co} 为

$$P_{e-co} = \frac{1}{2} \left\{ \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) + Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \right\} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right) \quad (4)$$

由式(2)和式(3)绘图如图 2 所示。可见,在相同的信噪比条件下,相干 2ASK 解调比非相干 2ASK 解调有更低的误码率^[9]。解调部分使用 MCU 进行采样来实现,省去了非相干解调端的复杂硬件电路,达到了降低成本和功耗的目的。

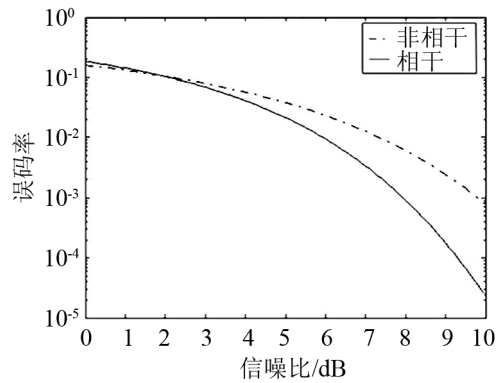


图2 误码率与信噪比关系图

Fig.2 Diagram of BER vs. SNR

为实现低功耗的目的,整个调制解调器系统采用直流 3.3 V 供电,因此在芯片的选择和方案的确定上必须能够满足 3.3 V 供电的要求,低功耗水声调制解调方案包括 2ASK 和相移键控(Phase Shift Keying, PSK)方式,根据已有实验结果,2ASK 的调制方式相比 PSK 方式能够节约一部分电能,其次,PSK 方式往往需要更高的驱动电压,使用 2ASK 方式能够简化整机电源方案^[10]。本文涉及的水声调制解调器使用 2ASK 的调制解调方式。

为了验证水声调制解调器的有效性,并方便测试性能和参数,搭建了一个实验平台,如图 3 所示。平台包括个人电脑(Personal Computer, PC)、传感节点和水声调制解调器^[11]。在发射端,信息由 PC 机通过 RS-232 串口发送给调制解调器,调制解调器内部 MCU 将数据进行打包,并将数据包的二进制信息编码,并由 MCU 将编码后的二进制信息变为连续的幅度不同的 40kHz 的方波信号进行输出,即完成了数字幅度调制过程,输出的电信号经信号放大电路后驱动换能器发出声波在水中传播;在接收端,换能器接收到水中的声波信号并转化为微弱的电信号,微弱的电信号经过多级电压放大电路将信号强度增大以进入后续电路进行处理,放大后的信

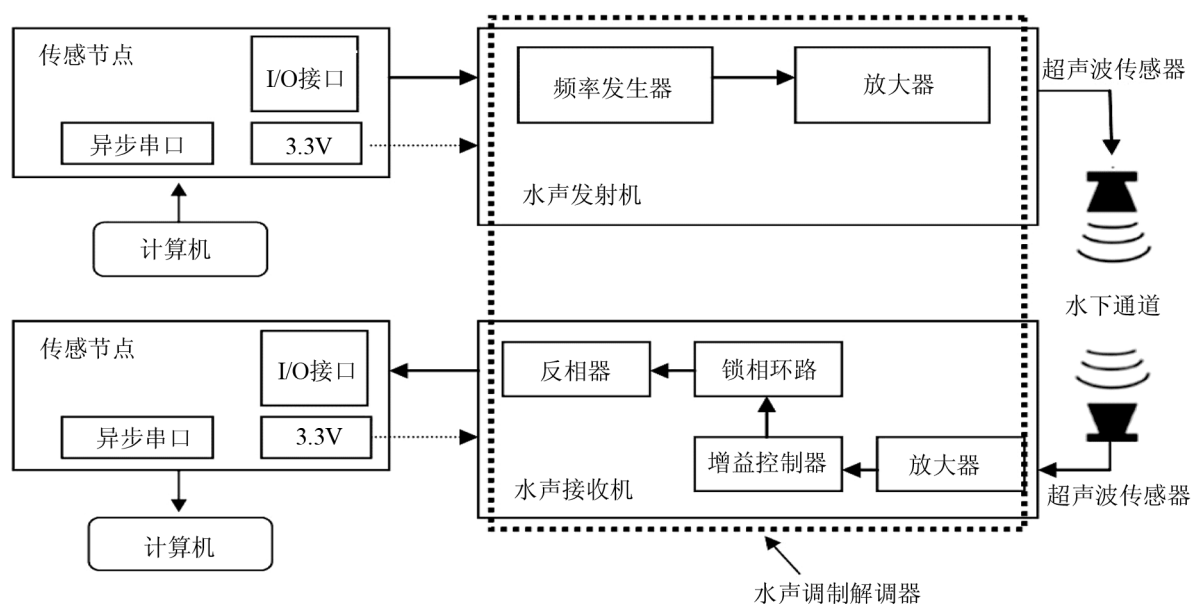


图3 水声调制解调器实验平台
Fig.3 A test platform of the acoustic modem

号送入锁相环电路以稳定相位并进行相干解调，解调后的信号送回 MCU，进行解码和拆解数据包，最终将发射端发送的有效数据还原并通过串口传送到 PC 机。

为实现低成本的目的，系统在整体设计上最大程度地减少了硬件的使用数量，在满足功能的基础上选用性价比高的 MCU、运算放大器和信号调理芯片，选用量产的小型防水收发一体式水声换能器，为适应硬件设计需求，选择换能器的中心频率为 40kHz，进一步降低了调制解调器的总成本^[12]。调制解调器系统封装在防水性好、密闭性强、有一定抗压能力的容器内，保证系统可靠稳定地长期运行。

水声调制解调器对功耗的要求比较严格，在整个调制解调器系统中 MCU 的功耗最大，因此选用合适的低功耗 MCU 对于降低整机功耗是至关重要的^[13]。MSP430 系列单片机是美国德州仪器公司生产的超低功耗单片机，MSP430 系列单片机的电源电压采用 1.8~3.6 V 直流电压供电。在 MSP430 系列中有两个不同的时钟系统：基本时钟系统、锁相环(FLL 和 FLL+)时钟系统和 DCO 数字振荡器时钟系统。可以只使用一个晶体振荡器(32768Hz)，也可以使用两个晶体振荡器。由系统时钟系统产生中央处理器(Central Processing Unit, CPU)和各功能所需的时钟。这些时钟可以在指令的控制下，打开和关闭，从而实现对总体功耗的控制。由于系统运行时开启的功能模块不同，即采用不同的工作模式，芯片的功耗有着显著的不同。在系统中共有一种活动模式和五种低功耗模式。在实时时钟模式下，可达

2.5 μ A，在 RAM 保持模式下，最低可达 0.1 μ A。本文涉及的水声调制解调器使用 MSP430F149 单片机，在满足数据处理需要的同时实现了低功耗的目标。由单片机产生的 40 kHz 信号电压为 3.3 V，且 MSP430 单片机的 I/O 口驱动能力很差，因此不能够直接驱动水声换能器，系统中必须采用信号放大电路，但是目前市场上集成的信号放大 IC 并没有采用 3.3V 供电的^[14,15]。考虑到可以使用电平转换的原理提高驱动能力，系统采用 3.3 V 供电的 MAX3232 作为放大芯片。MAX3232 采用专有的低压差发送器输出级，利用双电荷泵在 3.0V 至 5.5V 电源供电时能够实现真正的 RS-232 性能。器件仅需四个 0.1 μ F 的外部小尺寸电荷泵电容。MAX3232 确保在 120kbps 数据速率下维持 RS-232 输出电平。正常工作模式下可确保 250kbps 的数据速率，芯片可以将 3.3 V 信号转换为+12 V 和-12 V 的高电压信号来驱动换能器，从而达到信号放大的目的。

水声调制解调器的接收部分由四部分组成：信号放大器、增益控制器、锁相环(phase-locked loop: PLL)和反相器。这部分电路必须全部使用 3.3 V 供电。信号前置放大电路使用低成本的三运放结构的仪表放大器 AD620，用以精密放大换能器接收到的微弱信号，为减少水下环境噪声的影响，后续连接一个由 OP07 构成的滤波电路。锁相环由鉴相器、环路滤波器和压控振荡器组成。鉴相器用来鉴别输入信号与输出信号之间的相位差，并输出误差电压。误差电压中的噪声和干扰成分被低通性质的环路滤波器滤除，形成压控振荡器(VCO)的控制电压。

控制电压作用于压控振荡器的结果是把它输出振荡频率拉向环路输入信号频率, 当两者相等时, 环路被锁定, 称为入锁。维持锁定的直流控制电压由鉴相器提供, 因此鉴相器的两个输入信号间留有一定的相位差。微弱信号经过放大器和锁相环路后, 相位得到修正, 此时信号相位与输入端是相反的, 反相信号经过反相器电路还原成了原始信号传送给 MCU。整个电路中最为困难的是 PLL 的设计和使用, 考虑到整机的低功耗性能, 最终方案确定使用集成锁相环芯片 LMC568, 这是一款低功耗锁相环 IC, 包括了压控振荡电路, LCMOS 鉴相器和负载检测输出。LMC568 使用 3.3 V 电源, 能够输出解调信号。LMC568 的 5 脚和 6 脚之间接入压控振荡电路, 其振荡频率必须是信号频率的两倍。在本文的调制解调器中, 信号的频率范围是 39~41 kHz, 因此, 接入的压控振荡器频率必须为 78~82 kHz^[16]。如图 4 所示, 为达到此目的, 在电路设计中使用了电位器 R8 来调节频率。LMC568 内部原理图如图 5 所示。

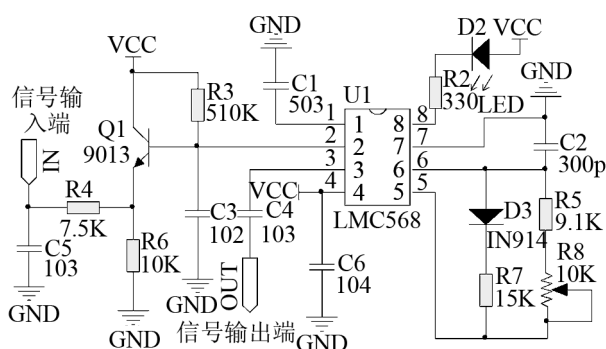


图4 锁相环电路原理图

Fig.4 The circuit diagram of PLL

2 软件设计

在 OSI 参考模型中, 同等层之间经常要进行信息交换。为了实现同等层通信, 当数据需要通过网络从一个节点传送到另一节点前, 必须在数据的头部和尾部加入特定的协议头和协议尾, 即进行数据封装^[17]。在数据到达接收节点的对等层后, 接收方将识别、提取和处理发送方对等层增加的数据头部和尾部, 即数据解封。水声调制解调器之间的数据通信是由数据包的传递完成的, 因此必须在发射机与接收机之间建立通信协议。这个数据包由调制解调器 MCU 上运行的程序编辑, 从而为各项指标参数的测试提供了灵活性。协议中的数据包包括两个标志段、有效数据头部、有效数据体和循环冗余项。其中两个标志段作为水声通信数据流的头部, 有效

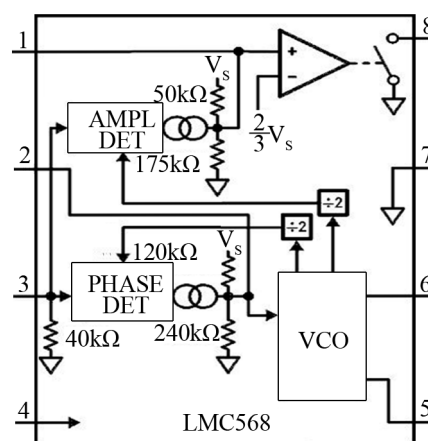


图5 LMC568 内部结构图

Fig.5 The internal circuit structure of LMC568

数据头部是水声通信协议中 MAC 层协议的开端, 其中包括有效数据的长度、多余的数据位、确认字符和数据的序号等信息^[18]。如图 6 所示为协议中数据包结构。

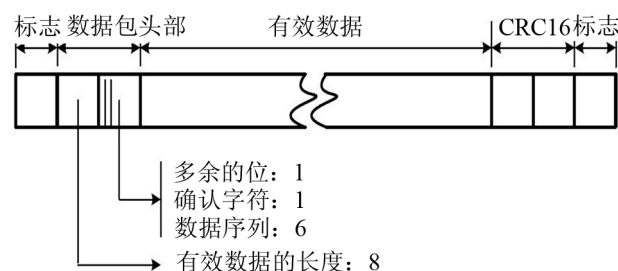


图6 数据包结构示意图

Fig.6 Schematic of packet structure

数据标志段使用一串有规律的二进制数字序列 11011011, 用它来标志整个数据流的开头和结尾。当解调器检测到标志长度为 1 个字节, 并且标志的第一位数字为 1 时, 便得知将会有有一个数据包到来。所以, 该标志是用来让调制器与解调器之间同步, 使解调器读取到数据包即将到来的信息时产生一个中断, 进入中断后 MCU 进行连续的数据读取, 直到检测到数据包的结尾标志后跳出中断, 进行数据处理。

有效数据长度以字节为单位存入数据包相应的位置中, 其大小由实际被打包的有效数据的大小直接决定。

多余的数据位用来标志数据流的结尾, 若多余数据位的值为 1, 表示数据流没有结束, 调制器继续发送数据, 若读取到多余数据位变为 0, 调制器则停止发送。

确认字符为 1 个位大小的数据, 用来区分有效数据主体和数据包的开头。

数据序列是长度为 6 位的数据, 表示所在数据

包在整个数据流中的序列。

循环冗余项用于检测传输错误,在实际使用中,采用长度为 2 字节的循环冗余序列,序列取自于 CRC16 表中。

调制解调器使用 2ASK 调制方式,发送数据 1 时,产生 40kHz 频率信号,发送数据 0 时,不产生信号。当发送数据为 10101101 时,发送出的信号如图 7 所示。

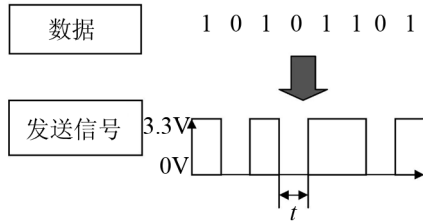


图 7 数据发送示意图
Fig.7 Data being transmitted

图 7 中 t 为数据发送间隔,故数据传输速率为

$$\text{DataRate} = \frac{1000}{t} \quad (5)$$

接收信号经过放大和 PLL 电路后,送入 MCU,MCU 对接收信号进行定时采样,还原发送的数据。图 8 为软件采样方法示意图,当 MCU 检测到数据包的开端时,程序进入中断并对接收到的信号开始采样,其中,进入第一次中断后,程序延迟半个 t 的时间后再开始采样,之后每隔 t 时间进入一次中断并采样,这种方式可以保证每一次中断都采样到每一位数据的中间时刻。设参考电位介于 0 电平与 1 电平之间,MCU 将采样电平与参考电位相比较,若采样电平高于参考电位,则表示接收到数据 1,反之接收到数据 0。

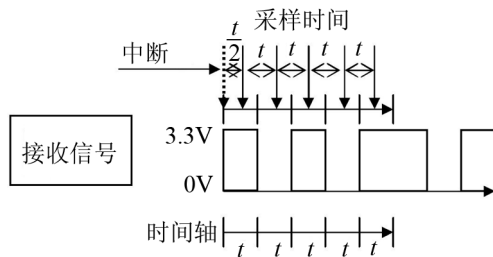


图 8 接收端软件采样方法
Fig.8 Data being received by MCU

水声调制解调器的数据编码方案采用扩展 Hamming 码,假设信道误码率为 P ,由纠错原理,在码长为 n 的分组中译码后仍存在的不可检测差错的概率 $P_{n,i}$ 为

$$P_{n,i} = 1 - \sum_{j=0}^i C_n^j P^j (1-P)^{n-j} \quad (6)$$

式中, i 为纠错码元数。假设 P 为 10^{-2} ,对于 (8, 4)

扩展 Hamming 码来说,纠正一位错误码率为 $P_{8,1} = 2.6 \times 10^{-3}$ 。当检出有两位出现错误后,发送端重发,其通过后误码率为 $P_{8,2} = 5.4 \times 10^{-5}$ 。可以看出,采用扩展 Hamming 码纠、检错后,码元出错概率降低了 2 个数量级。本文中假设的误码率是较大的,实际工作中要小得多,该编码方案能够满足实际应用的要求。在仿真实验分析的基础上,在实验室进行了编解码试验。本实验发射编码采用 (7, 4) Hamming 码和 (8, 4) 扩展 Hamming 码两种编码方式,发射 1800 位有效信息,在不同信噪比下的试验结果如表 1 所示。

表 1 信噪比实验结果
Table 1 Results of SNR

信噪比 SNR/dB	信道误 码率/%	纠错后误码率/%	
		(7,4) Hamming	(8,4) 扩展 Hamming
0	0	0/1800	0/1800
-10	0	0/1800	0/1800
-15	0.57	3/1800=0.17	0/1800
-20	1.94	9/1800=0.50	1/1800=0.06

当 SNR 达到 -20 dB 时,用 (8,4) 扩展 Hamming 码的误码率小于 0.2%,但系统仍处于可以正常通信的状态。

3 测试与分析

利用已搭建好的实验平台,对水声调制解调器的性能进行了初步测试。测试条件为,长度为 8m,宽度为 2m,水深为 1.5m 的透明玻璃水缸中,为了仿真真实的使用环境,对水缸侧壁进行了一定的吸音处理,防止反射的声波能量过强,淹没传输信号。将两台水声调制解调器分别置于玻璃水缸底部两端,通信距离约为 7.5 m,每台水声调制解调器再分别与一台 PC 机相连,并使用 PC 机控制水声调制解调器发送连续的 0、1 相间的数据。试验中利用示波器观察发送端的信号波形图与接收端解调后信号波形,如图 9、10 所示。经测量,在实验平台中,水声调制解调器最大功耗为 90mW,连续运行三个半小时过程中,未出现工作异常情况,也未出现传输错误。

由图 9、图 10 可见,信号周期稳定在 500us。可见,数据在 2kbps 的速率下可以进行可靠传输。该调制解调器总造价约为 450 元人民币(包括水声换能器成本 175 元、主板成本 220 元和其余部件成本 55 元)。由此,实现了调制解调器的低成本、低功耗的目标。该水声调制解调器实物如图 11 所示。

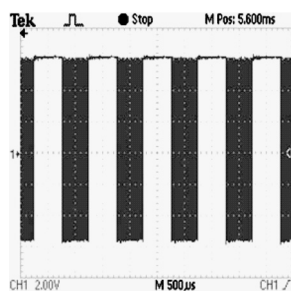


图9 发送端信号波形图

Fig.9 Experimental results of SNR

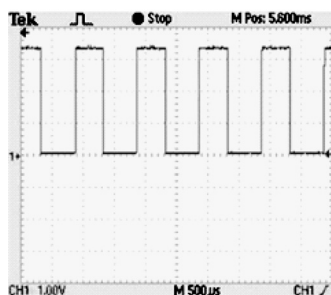


图10 解调后信号波形图

Fig.10 Demodulation signals in the acoustic receiver

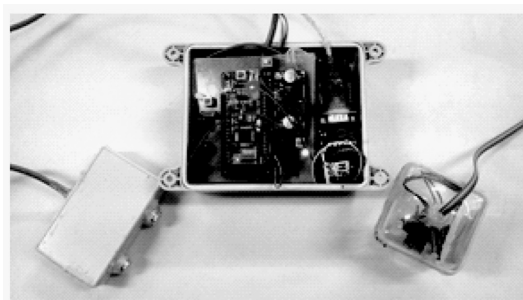


图11 水声调制解调器实物图

Fig.11 The acoustic modem

4 结论

针对水声传感网中的传感节点密度大的特点, 本文提出了一种低成本、低功耗的水声调制解调器的设计方案并进行了实现。实际测试结果表明, 调制解调器能够在水下稳定工作, 通信速率可达 2 kbps, 满足 MAC 层组网速度需求, 理论连续工作时间为 6 个月, 可用于水声传感网的组建。同时, 调制解调器具有低成本、低功耗的特点, 可更好地满足基于水声传感网通信技术的应用需求。

参考文献

- [1] Istepanian R, Stojanovic M. Underwater Acoustic Digital Signal Processing and Communication System[J]. Massachusetts: Kluwer Academic Publisher, 2002, 12(3): 1-13.
- [2] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用[J]. 声学技术, 2009, 28(6): 811-816.
- [3] 李晓东, 杨军, 李双田, 等. 通信声学: 过去、现在和未来[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 967-967.
- [4] 杨长清, 孟桥, 陆佑人. 水声通信网若干问题的探讨[J]. 声学技术, 2003, 22(z2): 212-214.
- [5] Yang Changqing, MENG Qiao, LU Jiren. Primary Research on Some Problems of Underwater Acoustic Networks[J]. Technical Acoustics, 2003, 22(z2): 212-214.
- [6] Bridget Benson, Ying Li, Brian Faunce, Kenneth Domond, Don Kimball, Curt Schurgers, Ryan Kastner[J]. Design of a Low-Cost Underwater Acoustic Modem, 2010, 8(2): 2-8.
- [7] WANG Yifan, ZHANG Zaichen, et al. An overview on underwater acoustic sensor networks[J]. IEEE ICT, 2010, 2(10): 1-6.
- [8] YU Yang, ZHANG Xiaomin, PENG BO, et al. Design of sensor nodes in underwater sensor networks[J]. IEEE ICIEA, 2010, 14(2): 4-9.
- [9] 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, 70-82.
- [10] ZHU Changping, HAN Qingbang, LI Jian, et al. The basic principle and applications of Underwater acoustic communication[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009, 70-82.
- [11] Ian F. Akyildiz *, Dario Pompili, Tommaso Melodia. Underwater acoustic sensor networks: research challenges[J]. Ad Hoc Networks, 2005, 20(12): 2-19.
- [12] Heungwoo Nam, Sunshin An. Low-power based coherent acoustic modem for emerging underwater acoustic sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2010, 57(7):291-309.
- [13] Mari Carmen Domingo. Overview of channel models for underwater wireless communication networks[J]. Physical Communication, 2008, 19(4): 1-22.
- [14] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey[J]. Computer Networks (Elsevier), 2002, 9(4): 393-422.
- [15] Wills, J., Ye, W., & Heidemann, J. Low-power acoustic modem for dense underwater sensor networks[C]// Proceedings of the first ACM international workshop on underwater networks (WUW-Net), 2006, (8): 118-125.
- [16] Makhija D, Kumaraswamy P, Roy R. Challenges and design of Mac protocol for underwater acoustic sensor networks[C]// Fourth International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 2006, (6): 1-6.
- [17] Domingo M C, Prior R. Energy analysis of routing protocols for underwater wireless sensor networks[J]. Computer Communications (Elsevier), 2008, 18(30): 1227-1238.
- [18] National Instruments. LMC568 Datasheet[DB/OL]. <http://www.national.com/ds/LM/LMC568.pdf>, 1999.
- [19] 吴碧, 王华奎, 汪新. 水下报文通信抗干扰方法[J]. 声学技术, 2011, 30(1): 107-110.
- [20] WU Bi, WANG Huakui, WANG Xin. Research on the anti-disturbance method in underwater message communication[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(1): 107-110.
- [21] 刘林泉, 梁国龙, 吴波, 等. 一种低能耗的水声通信编码方案的研究[J]. 声学技术, 2007, 26(1): 130-133.
- [22] LIU Linquan, LIANG Guolong, WU Bo, et al. Power saving coding for underwater acoustic communication[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(1): 130-133.