

# 基于 OFDM 的水声通信算法<sup>①</sup>

韩文斌, 刘建明

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 桂林 541004)

**摘要:** 在水声通信领域, 基于正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)的通信技术是最直接和最有效的手段之一。但是水声通信信道是多变的和复杂的, 在传输的过程中可能会受到多途扩展严重、可用带宽有限和高噪声等不理想因素的影响, 导致无法恢复出原始数据, 所以保证数据的可靠性传输是极其重要的。本文在原有的 OFDM 通信基础上加入了交织技术、chirp 扩频技术、加窗以及 chirp 同步技术, 并通过 MATLAB 的仿真和实验分析, 验证了该系统的可行性, 最后通过对比加入噪声、多径和多普勒效应的误码率曲线图, 说明了该系统的性能和抗干扰能力。

**关键词:** OFDM; 水声通信; 交织; chirp 扩频; 加窗

## Underwater Acoustic Communication System Based on OFDM

HAN Wen-Bin, LIU Jian-Ming

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** In the field of underwater acoustic communication, communication technology based on OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) is one of the most direct and effective means. But the underwater acoustic communication channel is changeable and complicated. In the process of transmission, it may be affected by the multipath propagation, the limited available bandwidth and the high noise, which cause the original data not been recovered. So it is very important to ensure the reliability of data transmission. On the basis of the original OFDM communication, this paper adds the weaving technology, chirp spread spectrum technology, the window and the chirp synchronization technology. And through the simulation and analysis of MATLAB, the feasibility of the system is verified. At last, the performance of the system and the ability of anti-jamming are illustrated by comparing the error rate curves of adding noise, multipath and Doppler effects.

**Key words:** OFDM; underwater acoustic communication; interweave; chirp spread spectrum; windowed

## 1 引言

海洋环境中多径效应、多普勒效应以及海洋环境噪声的存在注定了水声信道是一个复杂的和时变的信道。因此, 如何保证数据的可靠性传输成为了水声通信中最难以突破的瓶颈。传统的单载波通信技术可以解决数据的可靠性问题, 但是单载波通信技术却造成了有限带宽的严重浪费, 限制了发送速率, 只适合于低速率的数据传输, 难以满足人们的需求。21 世纪以来, OFDM 通信系统开始越来越收到了科研人员的注

意, 这正是由于正交频分复用技术把高速的数据流转化为并行低速的数据流, 解决了高速数据流的传输问题, 还可以根据需求对通信系统的带宽进行灵活的调整, 设定频带的分配问题。但是, 因为 OFDM 的发送信号是由许多相互正交子载波上的发送信号的叠加而成的, 所以 OFDM 系统容易受到多普勒频偏的干扰<sup>[1]</sup>。

本文针对这一问题提出了基于频域 Chirp 扩频的 OFDM 水声通信系统。该通信系统加入了交织技术, 以及结合 OFDM 和 Chirp 扩频技术来克服它们的不足,

① 收稿时间:2016-07-21;收到修改稿时间:2016-09-02 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005708]

在复杂水声通信信道中，具有防止突发性错误、强抗多径干扰、抗多普勒效应和抗噪声的特性，从而一并解决可靠性和高数据流的传输问题。

### 2 理论依据

正交频分复用技术(OFDM)是把高速的数据流通过串并转换，使得每个子载波上的数据符号持续时间相对增加，可以减轻水声信道的时延弥散，信号的带宽小于信道的相干带宽，从而消除符号间干扰(ISI)。OFDM 系统在满足子载波正交的情况下，允许子载波的频谱部分重叠，并且可以从重叠的子载波中获得数据信息，频谱的利用率可以得到显著提高。从发射端发送数据的时候，经过子载波上的调制，将数据转换为一组复数序列，将映射后的数据经过 IFFT 变换得到一组新的数据。因此，OFDM 是一种高效的传输方式<sup>[2]</sup>，它的优点有很多，将其关键技术引入水声通信系统中是很有必要的，但是需要特别注意的是，水声环境的复杂性和多变性对整个系统的影响。

假设  $\{s_{n,k}\}$  是第 n 帧的 OFDM 的传输符号中的第 k 个子载波上的数据，那么经过 OFDM 调制以后的数据可以表示为：

$$s_n(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_{n,k} e^{2\pi j k \Delta f t} \quad (0 \leq t \leq T_s) \quad (1)$$

其中  $k=0,1,\dots, N-1$ ,  $T_s$  是符号的周期,  $\Delta f$  是子载波的带宽,  $N$  是子载波的个数。为了保证各个子载波之间的

正交性，符号周期必须满足足够的长度。在数据的接收端可以通过下面公式获得：

$$s_{n,k} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} s_n(t) e^{-2\pi j k \Delta f t} dt \quad (2)$$

然后经过数据逆映射，就可以得到原始的发射数据了。可以看出子载波的调制其实就傅里叶的正逆变换，对于变换采用的是 IFFT/FFT 算法是实现的，这是因为快速傅里叶变换可以减少计算量，提高运算效率<sup>[3]</sup>。

### 3 改进后的OFDM通信系统

#### 3.1 系统的整体框图

基于 OFDM 的水声通信系统框图如图 1 所示。在整个水声通信系统的发射端，首先将需要发送的数据通过信道编码器进行卷积编码和交织<sup>[4]</sup>，其目的是为了防止突发性错误和随机性错误，然后通过串并转换将数据转换到每个子载波上进行载波调制，调制以后的信号就是 OFDM 的调制信号了，为了克服多径效应带来的码间干扰(ISI)，可以在 OFDM 信号的后面加入保护间隔，保护间隔可以从信号本身的截取(保护间隔的长度理论上应该大于最大时延的长度)，即循环前缀(CP)，加循环前缀的目的是为了克服接收端接受到的信号之间的干扰<sup>[5]</sup>。将加入 CP 以后的 OFDM 信号进行加窗处理以后，可以使的频谱能量更加集中，为了区分噪声和有用信号，可以在信号的前端加入同步信号。最后，将处理以后的信号经过上变频后与换能器相匹配，接收端是发送端的逆过程。

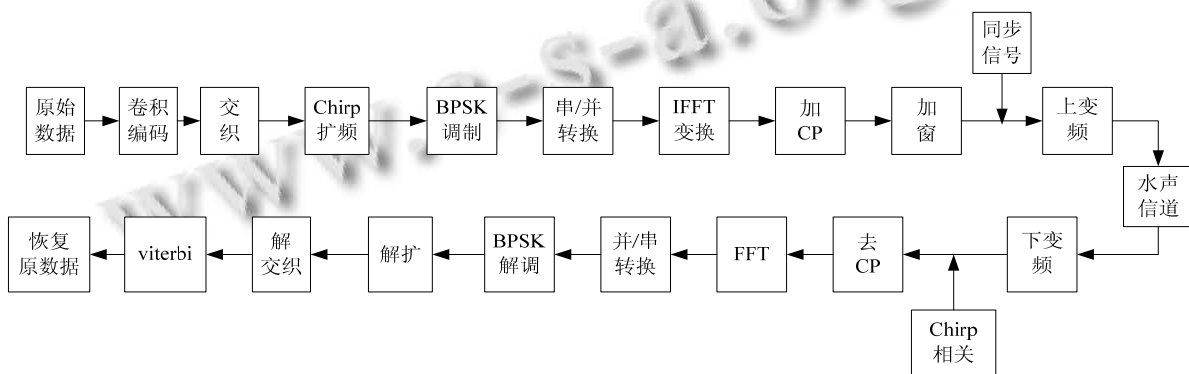


图 1 基于 OFDM 水声通信系统的总体框架

#### 3.2 交织技术

交织是指通信系统在通信的过程中对数据进行处理的一种技术<sup>[5]</sup>。交织的主要目的是防止信号在信道传输时发生连续性错误，通过解交织把突发性的错误

随机化，再通过解码达到纠错的效果。交织有规则交织、不规则交织和随机交织三种方式。本文采用的是 5×6 规则交织，这种交织的基本原理是把送入交织器的数据按行存入到 5×6 的矩阵中，解交织时按列从

5×6 矩阵中取出再送出交织器, 即交织时对 5×6 矩阵进行转置处理, 解交织时进行逆转置处理. 图 2 为交织的顺序图.

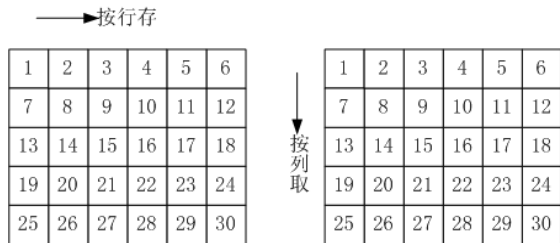


图 2 交织顺序

根据图 2 所示, 按行存入到 5×6 交织器中的比特数据顺序为 1、2、3、4、5、6……29、30, 按列从 5×6 交织器中取出的比特数据顺序为 1、7、13、19、25、2……24、30.

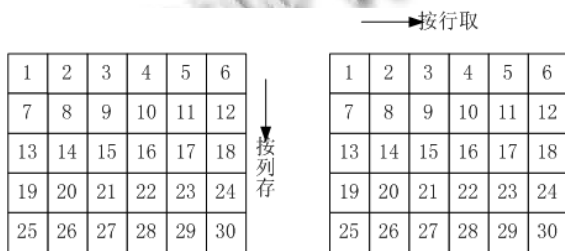


图 3 解交织顺序

图 3 为解交织的顺序图. 根据图 3 所示, 解交织与交织器的顺序相反, 按列存入到 5×6 解交织器中的比特数据顺序为 1、7、13、19、25、2……24、30, 而按行从 5×6 解交织器中取出的比特数据顺序为 1、2、3、4、5、6……29、30.

### 3.3 Chirp 扩频技术

所谓的扩频技术就是用高速的扩频序列在发射端扩展信号的频谱, 而接收端用同一种序列进行解扩, 把原始信号恢复出来. 本文引入了 chirp 信号扩频技术, chirp 信号不但具有抗干扰<sup>[6]</sup>、抗频率选择性衰落及低功耗的特性, 而且还具有很好的抗多普勒频偏的能力<sup>[7]</sup>. 由于在水声通信系统中, 信道的多普勒频偏是不可忽略的, 因此, 在通信系统中引入扩频技术是必不可少的. 目前的通信系统中引用较多的是直接扩频技术, 虽然直接扩频技术可以满足需求, 但是却存在这一定的缺陷, 如频道数减少、带宽增大和信息量增大的不足. 而本文引入的 chirp 扩频技术不但可以克服以上缺

点, 而且可以极大地提高通信系统的可靠性, 所以, 在通信系统中引入 chirp 扩频技术是很有必要的<sup>[8]</sup>.

数据经过交织以后, 将处理的数据进行 chirp 映射. 首先, 初始化频域的上调频信号和频域 下调频信号, 本文选用的 chirp 信号的长度是 16, 可以达到 16 倍扩频的效果. 当接收到的比特数为 1 时, 那么输出保存的是输出的 16 个上调频数据, 如果接收到的数据是 0, 那么输出保存的是输出的 16 个下调频数据, 将所有的比特数据按照上面的方式输出.

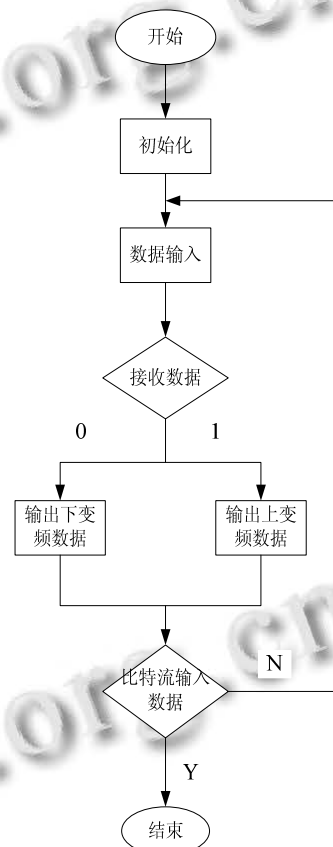


图 4 chirp 频域映射

### 3.4 加窗技术

通常情况下, 在 OFDM 系统中, 在加入 CP 以后, 并没有再对 OFDM 信号进行处理. 对于矩形 OFDM 符号来说, 其功率密度的带外功率密度衰减很慢, 带外的辐射功率会很大. 本文提出了一种可以使功率谱密度衰减很快的方法, 即加窗技术. 对于 OFDM 信号来说, 加窗就会使得周期边缘的幅度慢慢过渡成 0. 在本文中加窗函数选用的是余弦窗函数:

$$w(t) = \begin{cases} 0.5 + 0.5 \cos(\pi + t * \pi / (\alpha T_s)) & 0 \leq t \leq \alpha T_s \\ 1 & \alpha T \leq t \leq T_s \\ 0.5 + 0.5 \cos((t - T_s) * \pi / (\alpha T_s)) & T_s \leq t \leq (1 + \alpha) T_s \end{cases} \quad (3)$$

其中  $w(t)$  表示余弦窗函数,  $T_s$  表示加入循环前缀以后的数据周期长度,  $(1 + \alpha)T_s$  表示加窗以后的符号周期长度. 如果只是加循环前缀, 没有加窗的话, 那么带外功率得不到抑制. 经过处理以后的信号乘以窗函数, 相当于频域就是离散信号的频谱和窗函数频谱的卷积. 加窗以后的数据:

$$s(t) = win * L_{cp} \quad (4)$$

其中  $S$  代表的是加窗以后的数据,  $win$  代表的是窗函数,  $L$  表示加了 CP 以后的数据. 从图中我们可以明显看出加窗以后, 带外功率得到抑制.

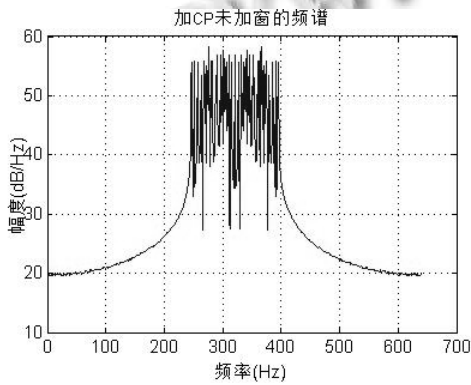


图 5 加 CP 未加窗的频谱

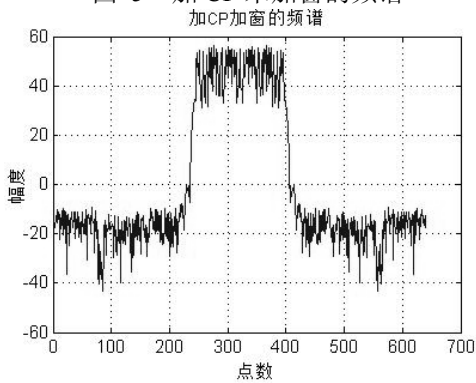


图 6 加 CP 加窗的频谱

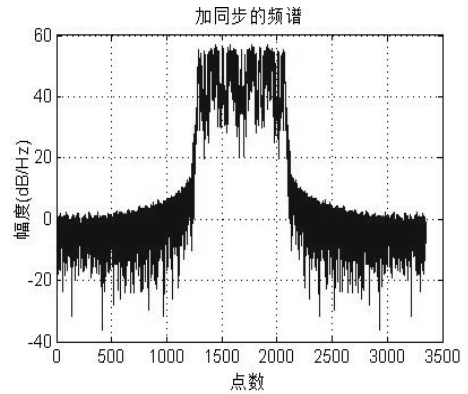


图 7 加入同步信号频谱

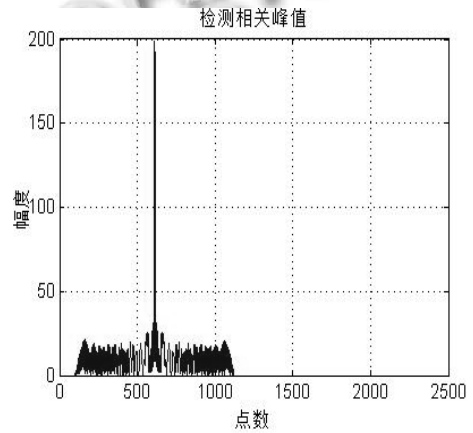


图 8 相关峰值检测

### 3.5 chirp 同步信号

在 OFDM 系统中, 由于该系统发送的是有多个严格相互正交的子载波叠加而成的信号, 所以具有较高的峰均比, 对同步的要求也比较高<sup>[9]</sup>. 其中传统的串行捕获、并行捕获虽然各自都有优点, 但是相关程度的明显和总的运算复杂度并没有发生变化. 本文提出了基于 chirp 的同步信号, 在非线形信号中, chirp 信号的相关性最好, 所以在接收端做相关时, 会有很明显的峰值, 从而检测出峰值定位数据的起始位置. 加入同步信号是因为当接收端开始接受数据时, 由于水声信道存在噪声的影响, 所以接收端开始接收到的数据是包含噪声数据的, 加入同步信号的目的就是为了把噪声信号和有用数据区分开来<sup>[1]</sup>, 程序中所用的 chirp 信号是由 MATLAB 生成的, 在非线形信号中, chirp 信号的相关性最好, 所以选用 chirp 信号做同步信号, 加入同步信号后的频谱图如下所示, 右图为峰值检测图, 接收端从峰值以后开始接收并处理数据.

本文选用的 OFDM 参数如表 1 所示.

表 1 OFDM 水声通信系统参数

系统参数	系统参考值
交织矩阵	5*6
扩频方式	频域 chirp 信号
调制方式	BPSK
FFT 点数	512
循环前缀	128
子载波	128
OFDM 信号长度	640

#### 4 通信系统的仿真实验以及实验验证

为了验证该 OFDM 系统的性能, 在程序加入了高斯噪声, 多径以及多普勒的干扰<sup>[10]</sup>, 并通过 MATLAB 仿真与 OFDM 系统相比较. 图 9 为高斯噪声和多径效应下的误码率曲线图. 其中黑色曲线为在高斯环境下不加入多径干扰的误码率曲线图, 其余 3 条曲线分别表示在不同信噪比时 2、3 和 4 径对应的误码率, 其延时分别为 0.2ms、0.6ms 和 1ms. 绿线为 2 径是对应的误码率曲线图, 红线为 3 径时对应的误码率曲线图, 蓝线为 4 径时对应的误码率曲线图. 从此图中可以看出, 系统受干扰的程度较小, 这是由于 OFDM 系统自身具有抗多径干扰的特性. 但是, 该系统在信噪比等于 -17dB 时, 误码率接近  $10^{-6}$ . 而传统的 OFDM 系统, 在信噪比为 -8dB 时, 误码率才接近为 0. 所以该系统具有非常强的抗多径干扰的能力.

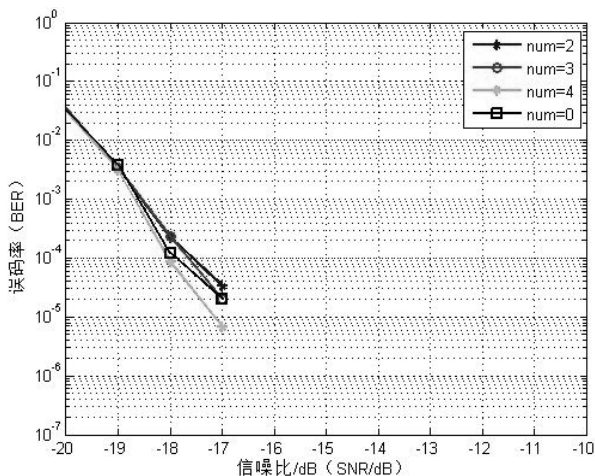


图 9 高斯噪声和多径干扰下的误码率曲线图

图 10 为高斯和多普勒环境下该通信系统的误码率曲线图. 其中黑色曲线为高斯环境下不加入多普勒

频偏的误码率曲线图, 绿线为频偏 0.5 个子载波时的误码率曲线图, 红线为频偏 0.75 个子载波带宽的误码率曲线图, 蓝线为频偏 1 个子载波的误码率曲线图. 传统的 OFDM 系统, 在通信过程中发生频偏后, 接收端几乎是不可能解调出来原始数据的, 因为 OFDM 系统对频偏很敏感. 从图中可以看出当信噪比大于 -12dB 时, 不同频偏下的误码率都为 0. 所以通过该误码率曲线图可以表明该通信系统具有比较好的抗多普勒频移的特性.

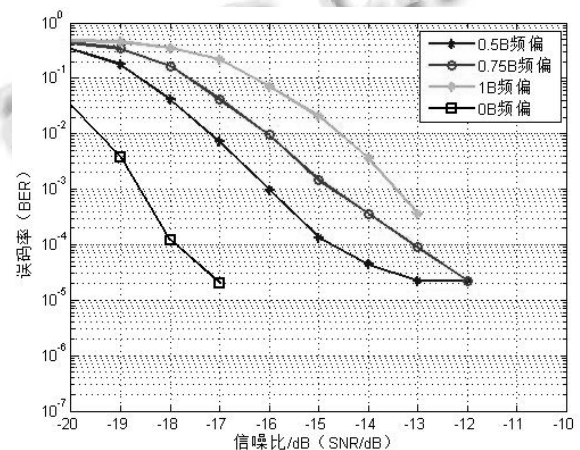


图 10 高斯噪声和多普勒频偏下的误码率曲线图

图 11 水槽实验, 测试的环境选择的是长 150cm、宽 70cm、高 70cm 的透明玻璃水槽中. 将装有调试软件的 PC 与采集卡用专用 USB 连线相连; 其次将采集卡的输出与功率放大器的输入相连; 最后将功率放大器的输出与水声换能器相连. 接收端的步骤为: 首先将水声换能器与采集的输入相连; 其次将采集卡与装有调试软件的 PC 用专用 USB 连线相连. 为了便于观察随机生成 100 比特的数据作为比较, 通过比较可以看出发送和接收的比特数据完全相同, 从结果可以看出解调出的数据准确无误. 因此, 从仿真结果和实验结果分析可以得出, 在高斯噪声、多径效应和多普勒效应的影响下, 该系统仍然有较好的抗干扰特性.

#### 5 总结

本文设计的 OFDM 系统与传统的 OFDM 通信系统相比, 具有很好的抗干扰能力. 其关键技术已经广泛地应用在无线电中, 但是由于水声信道比较复杂, 因此, OFDM 的通信技术很少应用在水声领域中. 本文设计的通信系统中, 在原有的 OFDM 系统中加入了

交织技术、chirp扩频和加循环前缀以及加窗等关键技术,使得通信变得更加稳定.并通过MATLAB

仿真和分析,验证了该系统的性能以及抗干扰能力.

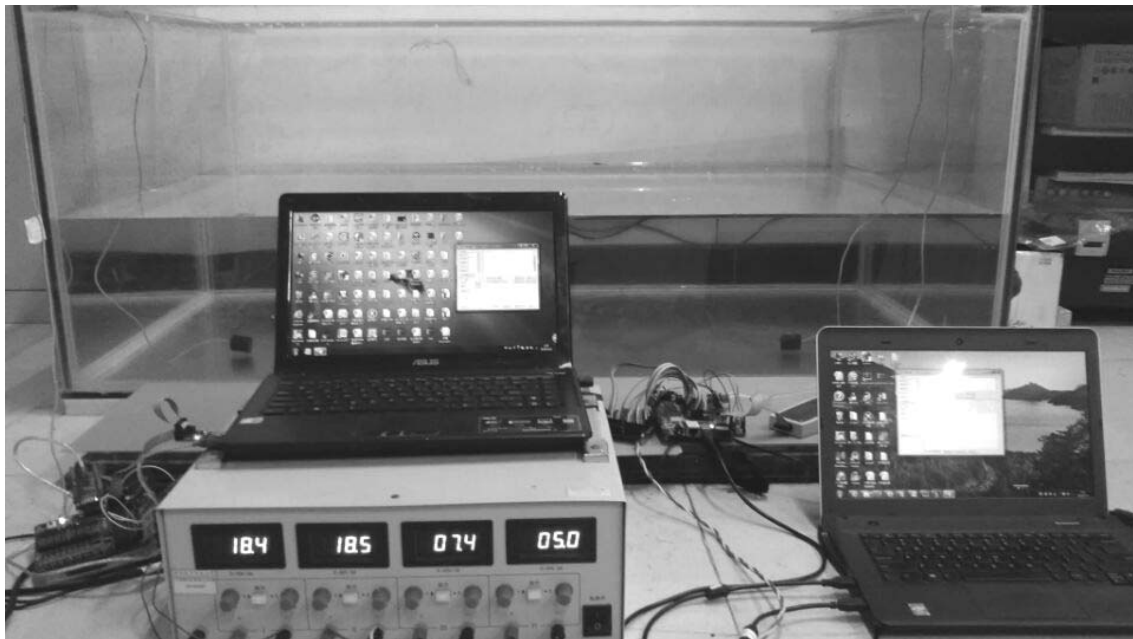


图 11 水槽实验

#### 参考文献

- 1 程恩,袁飞,苏为,等.水声通信研究进展.厦门大学学报(自然科学版),2011,50(2):271-275.
- 2 Stojanovic M. Underwater acoustic communication. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2015: 98-101.
- 3 卜文强,程恩.基于TMS320C67X的水声语音通信系统的设计与实现[硕士学位论文].厦门:厦门大学,2014.
- 4 Giacomidis E, Le ST, Phillips ID, et al. Dual polarization multi-band OFDM signals for next generation core networks. Magnetic Resonance in Medicine, 2014, 52(4): 699-703.
- 5 Guwenkaya E, Arslan H. Orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) transmitter and receiver windowing for adjacent channel (ACI) suppression and rejection.  $N+g+2mN$ , 2014.
- 6 林晓阳.线性调频信号水声调制技术的研究[硕士学位论文].厦门:厦门大学,2015.
- 7 孙嘉.Chirp超带宽通信的调制和时间同步技术研究[硕士学位论文].成都:电子科技大学,2009.
- 8 Wang J, Chen LY, et al. Implementation of the OFDM chirp waveform on MIMO SAP system. IEEE Trans. on Geoscience & Remote Sensing, 2015, 53(9): 1-11.
- 9 鲁亚丽.OFDM水声系统同步技术的研究[硕士学位论文].武汉:华中科技大学,2012.
- 10 魏莉,许芳,孙海信.水声信道的研究与仿真.声学技术,2008, (1):25-29.