

# 基于 Visual C 和 PC 的软件水声调制解调系统

颜国雄, 王 潜, 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:**介绍了一种 DS/DBPSK 调制解调技术方案, 该方案采用了具有较强抗干扰、抗衰落和抗多径性能的扩频技术, 并结合与信道适应性较好、不需载波恢复的差分相位调制技术, 对浅海水声信道造成的干扰进行抑制。在此方法上, 基于 Visual C(VC)及 PC 平台设计了一个通用性好的软件水声调制解调系统, 利用双缓冲和多线程技术机制实现算法实时处理, 同时可通过串口通信提供上层应用接口。实验系统验证了扩频和差分调制技术在浅海水声通信中的性能, 为水声组网提供了底层支持。海试实验结果表明了系统的有效性。

**关键词:** Visual C(VC); 直接序列扩频 (DSSS); 直接序列扩频/差分二相相移键控(DS/DBPSK)

**中图分类号:** Q356.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2009)08-0072-04

水声信道的多径效应是影响水声通信系统性能的主要因素, 也是水声通信研究的关键技术难题。水声信道特性非常复杂, 具有多途、色散、时变、空变、环境噪声高、信道带宽窄、多普勒频移等特性<sup>[1,2]</sup>。由于水声信道的时空变特性和声波的多途传播, 水声通信中存在强烈的相位波动和码间串扰<sup>[3]</sup>(ISI)。特别是浅海信道, 多途时延扩展可达 100 ms 量级且多途结构随着海底、海面及声速剖面随机时变。同时, 水声传输的带宽有限及远距离传输时的载波频率较低, 使得传输距离和数据率这一对矛盾尤为突出。

扩频通信是现代通信系统中的一种新兴的通信方式, 具有较强的抗干扰、抗衰落和抗多径等优点<sup>[4]</sup>。直扩和跳频是扩频通信系统的两种常见方案。在超宽带通信系统的设计中, 直接序列扩频(direct sequence spread spectrum, DSSS)/二进制相移键控(binary phase shift keyed, BPSK)具有速率高、抗干扰能力强、系统复杂低、易于实现的优点。DPSK 差分移相键控技术利用调制信号前后码元之间载波相对相位的变化来传递信息, 抗干扰能力强, 且不需要进行载波恢复, 信道适应性较好、实现较简单, 在水声通信中得到了较广泛的研究<sup>[5,6]</sup>。Foerster<sup>[7]</sup>对多径、多用户、窄带干扰环境下 DS/BPSK 通信系统进行了较完备的性能分析, 并推导了系统误码公式。

对于空间、电源等不受严格限制的载体平台如舰艇、潜艇、油气开发平台、岸站等, 基于 PC 的水声通信系统具有可利用现有设备、通用性好、实现方便等优势<sup>[8]</sup>。而 Visual C++ 是 PC 平台开发 Windows 应用程序的主流开发工具, 它提供了软件代码自动生成和可视化的资源编辑功能, 具有强大的硬件控制功能和人机界面设计灵活的优点。Visual

C++ 支持对话框程序的设计, 通过对话框资源编辑器, 容易添加各种控件(按钮, 列表框等), 而剩下的工作就是与控件交换数据。

作者基于直接序列扩频及差分相位调制技术, 使用 Visual C 实现基于 PC 的软件水声通信系统的设计, 利用多线程及双缓冲技术实现数据采集与系统同步、解调算法的实时实现, 并且可通过串口提供上层应用接口, 最后给出了系统在厦门五缘湾海域的初步实验结果。

## 1 DS/DBPSK 调制解调原理

假设差分编码后的信息流为  $a_n$ , 用  $-1, 1$  分别表示 0, 1 比特, 则基带波形可以表示为<sup>[9,10]</sup>

$$b(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n g_{T_b}(t - nT_b) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} b \left| \frac{t}{T_b} \right| g_{T_b}(t - nT_b) \quad (1)$$

其中,  $g_{T_b}$  为宽度为一个码元间隔  $T_b$  的矩形脉冲。同理, 设扩频增益为  $G$ ,  $T_c$  为切普码元宽度, PN 序列可表示为

$$c(t) = \sum_k c_{(k \bmod G)} g_{T_c}(k - T_c) = \sum_k c \left( \left\lfloor \frac{t}{T_c} \right\rfloor \bmod G \right) g_{T_c}(k - T_c) \quad (2)$$

收稿日期: 2008-11-03; 修回日期: 2009-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(10704063); 福建省新世纪优秀人才支持计划项目

作者简介: 颜国雄(1983-), 男, 江西萍乡人, 硕士研究生, 研究方向: 水声通信, E-mail: piaomiaojun@hotmail.com; 童峰, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向: 水声通信技术, 电话: 0592-2184077, E-mail: ftong@xmu.edu.cn

经过载波调制的信号为

$$s(t) = b \left| \frac{t}{T_b} \right| c \left( \left| \frac{t}{T_c} \right| \bmod G \right) \cos(\omega_c t) \quad (3)$$

接收端对模拟信号采样后得到信号

$$r(n) = b \left| \frac{n}{F_b T_b} \right| c \left( \left| \frac{n}{F_c T_c} \right| \bmod G \right) \cos\left(\frac{2\pi f_c n}{F_s}\right) \quad (4)$$

对接收信号来说,令  $F_b = F_s T_b$  为一比特数据采样得到的点数,  $F_c = F_s T_c$  为其中一个切普采样得到的点数,则  $r(n)$  可表示为

$$r(n) = b \left| \frac{n}{F_b} \right| c \left( \left| \frac{n}{F_c} \right| \bmod G \right) \cos\left(\frac{2\pi f_c n}{F_s}\right) \quad (5)$$

参考码元信号为:

$$l(n) = b \left| \frac{n}{F_b} \right| c \left( \left| \frac{n}{F_c} \right| \bmod G \right) \cos\left(\frac{2\pi f_c n}{F_s}\right) \quad (6)$$

进行相关解调处理:

$$\text{cor}(n) = \sum_{m=0}^{F_b-1} l(m)r(n+m) \quad (7)$$

$$\text{cor}(n) = \sum_{m=0}^{F_b-1} b \left| \frac{m}{F_b} \right| c \left( \left| \frac{m}{F_c} \right| \bmod G \right) \cos\left(\frac{2\pi f_c m}{F_s}\right) b \left| \frac{n+m}{F_b} \right| c \left( \left| \frac{n+m}{F_c} \right| \bmod G \right) \cos\left[\frac{2\pi f_c (n+m)}{F_s}\right] \quad (8)$$

当  $n$  为码元周期采样数  $F_b$  的倍数时,即  $n = F_b n'$ ,其中  $n'$  为基带码元序号,  $R_m$  为 PN 码相关峰值,

$$\text{cor}(n) = b(0)b(n')R_m \sum_{m=0}^{F_b-1} \cos^2\left(\frac{2\pi f_c m}{F_s}\right) \quad (9)$$

下一个码元与  $l(n)$  的相关输出

$$\text{cor}(n+F_b) = b(0)b(n'+1)R_m \sum_{m=0}^{F_b-1} \cos^2\left(\frac{2\pi f_c m}{F_s}\right) \quad (10)$$

前后解扩码元积分处理后可得到:

$$\sum_{p=-F_b/2}^{F_b/2} \text{cor}(n+p)\text{cor}(n+F_b+p) = \sum_{p=-F_b/2}^{F_b/2} b(n') b(n'+1) \left[ b(0)R_m \sum_{m=-F_b/2}^{F_b/2} \cos^2\left(\frac{2\pi f_c m}{F_s}\right) \right]^2 \quad (11)$$

对输出所含  $b(n')b(n'+1)$  符号项进行判决即可获得解差分结果。

## 2 系统设计

系统采用 DS/DBPSK 调制解调方式。发射信号基带信源码速率为 70 bps, 码元间隔为  $T_b = 14 \text{ ms}$ , 进行差分编码, 然后用长度为 63 位的 PN 码(增益为  $G$ )进行直接序列扩频。同步头采用线性调频信号, 长度为 10 ms, 频带范围 4~7 kHz。发射信号帧格式如图 1 所示。

10ms LFM 信号	10ms 空白信号	DS/DRPSK 信号	10ms 空白信号
-------------	-----------	-------------	-----------

图 1 信号帧格式

Fig. 1 Format of the signal

## 2.1 发射端的设计

直接序列扩频发射的原理方框图<sup>[7]</sup>如图 2。

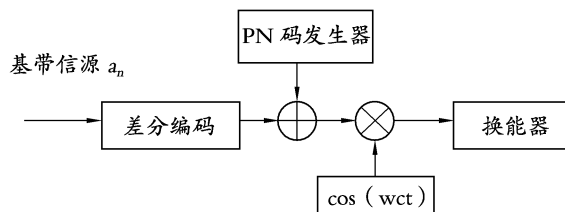


图 2 直接序列扩频调制端

Fig. 2 Direct sequence spread spectrum modulation

## 2.2 接收端的设计

系统采用不需载波恢复的非相干解扩解调<sup>[9]</sup>, 采样后的信号直接与本地 PN 码进行相关解扩, 相干解扩后的信号延时一个信息码元的间隔再与本身信号相乘。由于相乘的结果反映了前后码元的相对相位关系, 所得的相关运算结果通过判决恢复即可得到原始数字信息。

基于 VC 的接收系统设计框图如图 3 所示, 数据采集通过 PC 机声卡和调用 windows 音频处理函数来完成。系统 GUI 用户界面基于 MFC 的对话框应用程序向导, 它具有灵活的控件处理功能, 调制解调信号处理算法调用多线程版本的 C/C++ 运行库<sup>[11]</sup>。水声数据采集的流程为:

打开录音设备 waveInOpen → 准备 wave 数据头 waveInPrepareHeader → 准备数据缓冲区 waveInAddBuffer → 开始录音 waveInStart → 停止录音 (waveInReset) → 关闭录音设备 (waveInClose)。

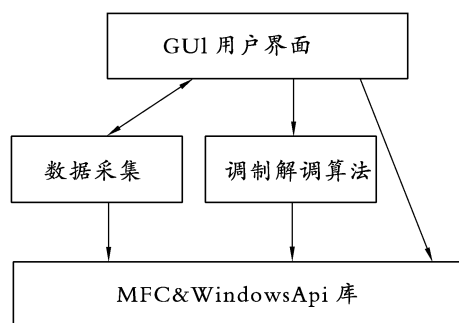


图 3 接收系统框图

Fig. 3 Receiving system block

设置的音频格式类型是 PCM 格式, 单通道, 44 100 Hz 的采样率, 每秒采集的数据大小为 44 100 B, 8 位量化(A/D 后的数据是无符号数)。

## 2.3 系统实时实现

调制解调中同步的捕获、数据解调均需实时处理, 作者采用双缓冲技术来实现信号的连续采样与处理。开始采集后当数据缓冲区已满时, 消息映射函数 OnMM\_WIM\_DATA 自动执行, 同时采集进程仍在同步进行。在函数 OnMM\_WIM\_DATA 内, 调用同步搜索子函数, 同步搜索不断地将采样后的水声信号与本地 LFM 信号进行相关运算, 这里采用取

最大值和完整匹配本地 LFM 信号的方法保证同步捕获精度,当相关运算结果的最大值大于设定的门限值时,调用解扩解调子函数,直到一帧数据结束,重新进行同步搜索,如此往复。

为了实现实时采集、处理,分配一块长度为数据缓冲区两倍的内存,每次当数据缓冲区填满以后,在消息映射函数 OnMM\_WIM\_DATA 内(如图 4)将内存后半部分的内容拷贝到前半部分,然后将缓冲区的内容拷贝到内存的后半部分,马上释放缓冲区,以备另一块缓冲区满的时候使用。

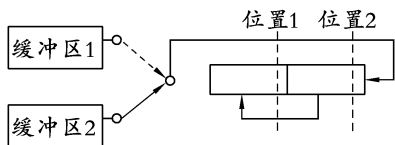


图 4 双缓冲内存分配

Fig. 4 Memory allocation of dual-buffer

由于实时的需要,同步搜索和解调运算应不慢于 windows 消息 MM\_WIM\_DATA 的到来。在搬移数据时,需确保位置 1 中的数据已经被利用。这既要求对信号和缓冲区尺寸合理设计,也要在算法中采取相应的措施。

### 3 实验结果及数据分析

系统进行了海试实验以初步验证性能,海试地点在厦门五缘湾海域,水深 3 m、传输距离 500 m,换能器带宽为 4~7 kHz,PC 机配置为 P4 3.0G,VC6.0。海试中系统工作稳定,通过控制发射信号的功率,测量了多个信噪比下的工作状况,每次发送 8 640 bit,未加入纠错码。实验中信噪比通过各采集一段时间信号和噪声用平均能量比进行估算,在负信噪比条件下则使用扩频信号相关峰来估算信噪比。

-3 dB 至 3 dB 几个不同信噪比条件下的信噪比误码率曲线如图 5 所示,数据解调中间过程如图 6 所示。

由图 6a, b 可以观察到,信道的起伏造成相关解调中不同码元的相关峰输出发生起伏,由于采用的是差分相位编码,相邻码元的相关解调输出经解差分处理后起伏被较好地抑制(如图 6b 所示)。部分判决前数据如图 6d, e 所示。

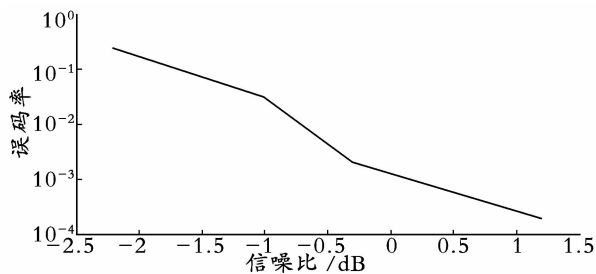


图 5 误码率曲线

Fig. 5 The BER curve

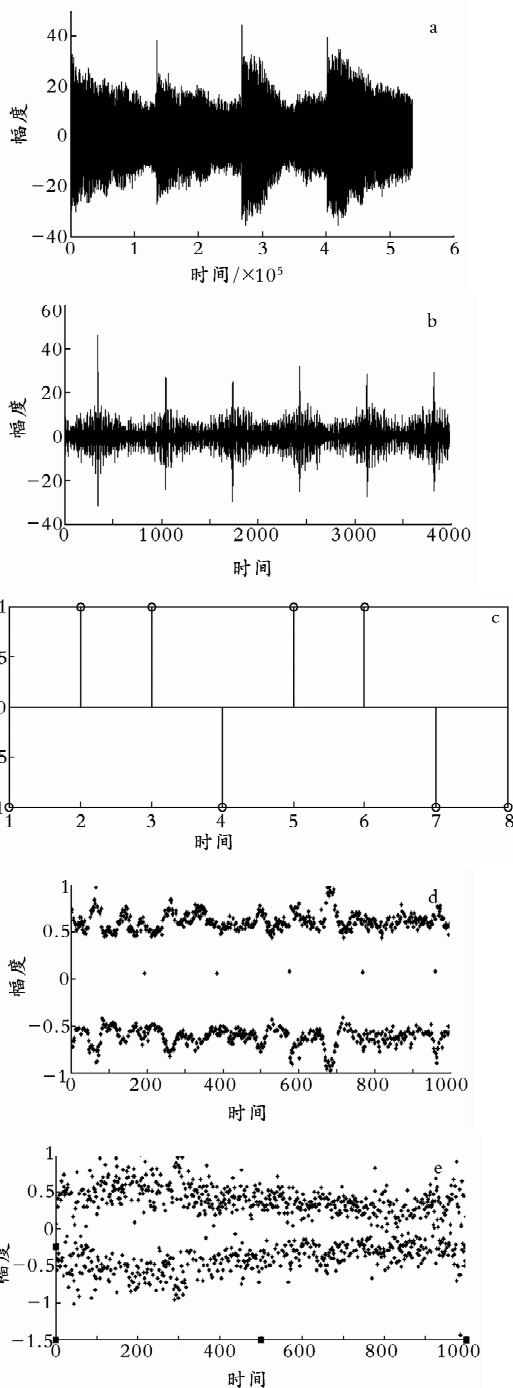


图 6 实验数据分析

Fig. 6 Data analysis

a. 四帧数据相关解扩图; b. 一帧数据部分码元解扩图形; c. 解差分处理后输出; d. 3 dB 数据解调判决前数据; e. -2.2 dB 解调判决前数据

a. correlation output of four data frames; b. correlation output of some bits; c. output of differential demodulation; d. decision for data with SNR 3 dB; e. decision for data with SNR -2.2 dB

### 4 结论

初步实验结果表明,基于微机和 VC 的直接序列扩频实时调制解调系统能正常工作。双缓冲和多

线程技术的应用实现了软件捕捉同步头的精确性和系统实时性。在浅海低信噪比信道下,系统有较好的抗干扰能力,提供了一种适用于较大载体平台、通用性好、性价比高的水声通信实现方案,并可方便地为水声组网等上层应用提供接口。

#### 参考文献:

- [1] 尤立克 R J. 水声学原理 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.
- [2] 童峰, 许肖梅, 方世良. 一种单频水声信号多径时延估计算法 [J]. 声学学报, 2008, **33**(1): 62-68.
- [3] 张刚强, 童峰. 基于 LMS/SOLMS 算法的时变多径水声信道估计方法 [J]. 应用声学, 2008, **27**(3): 212-216.
- [4] Stojanovic M, Proakis J G, Rice J A, *et al.* Spread spectrum underwater acoustic telemetry [A]. IEEE Oceanic Engineering Society. Oceans' 98 Conference Proceedings(vol. 2) [C]. Nice, France: IEEE Oceanic Engineering Society, 1998. 650-654.
- [5] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [6] Freitag L, Stojanovic M, Singh S, *et al.* Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication [J]. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 2001, **26**(4): 586-593.
- [7] Foerster J R. The performance of a direct-sequence spread ultra-wide-band system in the presence of multipath, narrowband interference, and multiuser interference [A]. IEEE Microwave theory and techniques society. IEEE Conference on Ultra Wide-band Systems and Technologies [C]. Wyndham Baltimore inner harbor: IEEE Microwave theory and techniques society, 2002. 2-4.
- [8] Chao Ru-min, Lin Shi-zheng, Huang Yu-xiang. The Implementation of PC-based Instrumentation for Underwater Acoustic Communication System [A]. IEEE Oceanic Engineering Society. Oceans 2006-Asia Pacific [C]. Singapore: IEEE Oceanic Engineering Society, 2007. 1-5.
- [9] 邹兴平. 中频数字化解扩解调技术研究及实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [10] 张伟斌. 基于软件无线电的通用调制、解扩解调器的研究与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006.
- [11] 侯俊杰. 深入浅出 MFC [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.

## Software defined underwater acoustic communication system based on Visual C and PC

YAN Guo-xiong, WANG Qian, TONG Feng

(Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, Ministry of Education of the People's Republic of China, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Received:** Nov. ,3,2008

**Key words:** Visual C(VC); direct sequence spread spectrum(DSSS); direct sequence spread spectrum/differential binary phase shift keying(DS/DBPSK)

**Abstract:** In this paper, we present a DS/DBPSK (direct sequence spread spectrum/differential binary phase shift keying) communication technology, which combines anti-multi-path and anti-jamming spread spectrum technology with differential phase modulation, the latter has better channel adaptation and avoids the adoption of phase recover in demodulation. Employing the double-buffer and multi-threading technology to guarantee a real-time processing, a software defined underwater acoustic modem system is designed based on Visual C++ and PC. The system is a verification experiment for DS-DBPSK technology in shallow water communication and will support underwater acoustic networks. The experimental results on sea demonstrated the effectiveness of this system.

(本文编辑:刘珊珊)