

基于 DSK6455 的 OFDM 水声通信 算法设计与实现

刘 淞 佐, 孙 宗 鑫, 周 锋, 李 慧, 乔 钢

(哈尔滨工程大学水声技术重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术由于其具有频谱利用率高、抗多径和抗脉冲噪声能力强、在高效带宽利用率情况下的高速传输能力以及实现方法简单的特点, 成为了近年来水声通信中的研究重点和热点之一。基于 OFDM 技术, 在 SDI 公司的 TMS320C6455DSK(DSP Starter Kit)板上实现了实时水声通信, 试验结果表明, 在 4.3km 的水平通信距离上, 采用 QPSK 调制, 1/2 卷积码编码, 通信带宽为 4kHz, 通信速率达到了 1873bps, 误码率小于 10^{-4} 。为实现 OFDM 技术的水声组网通信, 水声语音、图像传输奠定了基础。

关键词: 正交频分复用; 水声通信; 实时通信

中图分类号: TB565

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-06-0606-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.06.015

Algorithm design and implementation of OFDM underwater acoustic communication based on DSK6455

LIU Song-zuo, SUN Zong-xin, ZHOU Feng, LI Hui, QIAO Gang

(Science and Technology on Underwater Acoustic Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Because of the good performances such as high spectrum efficiency, strong abilities of anti-multipath and anti-impulse noise, high-speed transmission capacity under efficient bandwidth utilization and simple implementation, OFDM becomes one of the research priorities and hotspots in underwater acoustic communication. Underwater acoustic real-time communication is realized on the TMS320C6455DSK(DSP Starter Kit) based on the study of OFDM. The Songhua river trial got the following results: the data rate is 1873bps and the bit error rate less than 10^{-4} for the underwater acoustic communication with QPSK modulation, rate-1/2 channel coding, and signal frequency between 4kHz and 8kHz at the distance of 4.3km.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiplexing; underwater acoustic communication; real-time communication

0 引言

近年来, 分布式水声通信网成为水下通信领域的研究热点。它在海洋数据采集、环境监测、水下无人潜器之间数据传输以及中继远程通信中有着广泛的应用。组成水声通信网的基本单元是水声 modem, 其性能的好坏关键是水声通信算法及其在核心处理器上实现的效果。

国外许多公司及科研单位对声学 modem 进行了广泛的研究与开发。但各单位研发的水声 modem 采用通信体制不尽相同, 如德国 Evologics 公司开

发的基于 S2C(Sweep Spread Carrier)技术的水声 modem, 垂直距离 6000 m, 通信速率可以达到 6.7 kbit/s, 工作频带为 7~17kHz^[1]。麻省理工学院(MIT)开发的可配置 rmodem 是一种软件可定义的水声 modem, 能够把仿真环境和快速原型环境相结合, 因此不同开发者设计的算法能够快速实时地实现以用于试验^[2]。美国 Woods Hole Oceanographic Institution 开发的 Micro-modem 是基于多平台的水声通信和导航系统。它可工作在浅海, 工作频段介于 3~30kHz 之间的四个不同频段内。调制解调可采用低速 FH-FSK(Frequency-hopping Frequency-shift Keying)和可变速率的 PSK, 在 PSK 模式时数据通信速率为 300~5000 bps, FHSK 模式最远通信可达 2~4 km^[3]。康涅狄格州立大学无线通信研究实验室(Wireless Communication Research Laboratory, WCRL)开发了基于 DSP 的(2×2)MIMO-OFDM 及 SISO-OFDM 水声 modem 原型, MIMO-OFDM 采

收稿日期: 2011-12-02; 修回日期: 2012-02-26

基金项目: 国家 863 重点资助项目(2009AA093601-2)

作者简介: 刘淞佐(1986—), 男, 哈尔滨人, 博士研究生, 研究方向为水声通信技术。

通讯作者: 刘淞佐, E-mail: liusongzuo@hotmail.com

用 QPSK 调制, 1/2 码率的卷积码和 LDPC 码, 带宽为 6kHz^[4,5]。本文基于 OFDM 水声通信算法, 研究了其在 DSK 平台上的实现, 目的是达到实时通信的要求, 并通过实验验证了其可行性。

1 DSK6455 板卡简介

DSK6455 是 TI 公司高性能数字信号处理器 (TMS320C6455) 的单板测试平台, 用户在该平台上可以快速完成原型算法的验证, 评估性能。该板卡包括丰富的外设, 如音频编解码器 TLV320AIC23, 128Mbytes 的 DDR2 存储器, 4Mbytes 的 non-Flash 存储器, 10/100MBPs 自适应网卡, IIC 串行接口, 可配置的程序加载模式, 以及调试 DSP 用的 JTAG 或 USB 接口, 整板采用 5V 供电^[6]。

核心处理器 TMS320C6455 以 C64X+ 为核心, 在美国 TI 公司第三代高性能 VelociTI™ 超长指令字 (Very Long Instruction Word, VLIW) 结构基础上开发的^[7]。它的主频最高可以达到 1.2GHz, 每秒执行的指令数可达 9600 MIPS。能快速处理各种复杂算法, 实现高速实时通信。DSP 与 AIC23 可以通过片内外设 MCBSP 实现无缝连接采集数据, EDMA3 能够在不占用 CPU 的基础上将数据采集到内存中, 片上集成的卷积码和 Turbo 协处理器使本设计中的纠错码的解码效率得到提高。基于 C64X+ 的内核可以调用 TI 公司提供的算法库 DSPLIB, 实现 64k 点 FFT, 提高了信号做 FFT 处理后的频率分辨率。综上所述, 该平台适合 OFDM 水声通信算法的实现。

2 OFDM 水声通信算法简介

正交频分复用 (OFDM) 技术把数据流分解为若干个独立的子比特流, 这样每个子比特流将具有低比特速率, 用低的比特率形成的低速多状态符号再去调制相应的子载波, 从而构成多个低速率符号并行发送的传输系统。它利用快速傅里叶反变换 (IFFT) 和快速傅里叶变换 (FFT) 来分别实现调制和解调, OFDM 系统中各个子载波信号在整个符号周期上相互正交, 在频率上相互重叠, 是实现复杂度最低、应用最广的一种多载波传输方案^[8]。

在单载波系统中, 单个衰落或干扰能够导致整个通信链路失败, 但是在 OFDM 多载波系统中, 仅仅有很小一部分载波会受到干扰。对这些子信道还可以采用纠错码来进行纠错, OFDM 技术可以很好地对抗浅海水声信道出现的频率选择性衰落或者

窄带干扰, 也正是这点, 使得 OFDM 技术适合应用到水声通信中^[9]。

每个 OFDM 符号是多个经过调制的子载波信号之和。若用 N 表示子信道个数, T 表示 OFDM 符号宽度, $d_i (i=0, 1, \dots, N-1)$ 是分配给每个子信道的数据符号, f_c 是载波频率, 则从 $t=t_s$ 开始的 OFDM 符号可以表示为

$$s(t) = \text{Re} \left\{ \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_{i+N/2} \exp[j2\pi(f_c - \frac{i+0.5}{T})(t-t_s)] \right\} \quad (1)$$

$$t_s \leq t \leq t_s + T$$

很多文献中经常采用如下所示的等效基带信号来描述 OFDM 输出的信号^[10]:

$$s(t) = \sum_{i=-N/2}^{N/2-1} d_{i+N/2} \exp[j2\pi \frac{i}{T}(t-t_s)] \quad (2)$$

$$t_s \leq t \leq t_s + T$$

$s(t)$ 的实部和虚部分别对应 OFDM 符号的同相和正交分量, 在实际中可以分别与相应子载波的余弦分量和正弦分量相乘, 构成最终的子信道信号和合成的 OFDM 符号^[11]。

水声 OFDM 通信系统发送数据要经过信道编码、交织、加扰、子载波调制, 快速傅里叶逆变换 (IFFT), 插入保护间隔, 峰均比抑制等过程, 构成一帧信号。接收信号解调则是发送信号调制的逆过程, 包括解码, 解交织, 解扰, FFT, QPSK 逆映射, 多普勒估计与补偿及信道估计与均衡等过程。

OFDM 信号帧结构如图 1 所示, 一帧信号由两部分组成: 帧头和 OFDM 符号。帧头采用 2 个 LFM 信号加 1 个 CW 脉冲的结构, 帧头部分的第一个 LFM 信号用于帧的粗同步, 中间的单频信号用于测量多普勒因子, 第二个 LFM 信号用于帧的细同步。所谓粗同步即用本地 LFM 与接收到的 LFM 相关得到的定时结果, 所谓细同步即生成一个受多普勒影响的本地 LFM 与接收到的 LFM 做相关得到定时结果, 均是利用线性调频信号具有良好的自相关性和抗多途能力。每个 OFDM 符号都采用加循环前、后缀的形式, OFDM 符号的结构如图 2 所示。

3 OFDM 水声通信算法实现

基于 DSK6455 的水声 OFDM 通信算法实现主要包括三部分程序开发, 分别是涉及硬件资源分配

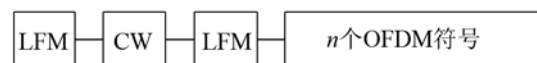


图 1 OFDM 信号帧结构
Fig.1 Schematic of OFDM frame structure

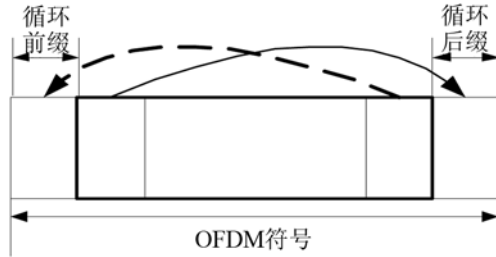


图2 OFDM 符号的结构
Fig.2 Schematic of OFDM symbol structure

任务调度的程序框架搭建、系统发送端的 OFDM 调制与接收端的解调程序开发。

3.1 程序框架设计

基于 DSP/BIOS 设计的应用程序框架，如图 3 所示。程序中用到了两个硬中断，两个任务，一个软中断。系统通过 BIOS 调用 DSP 内核及外设初始化函数，利用硬中断 HWI1 初始化 NDK(Network Develop's Kit)，实现网络初始化。将网络发送与接收任务配置为任务 TSK1，网络接收到数据后，在网络任务 TSK1 中动态创建优先级高的任务 TSK2 即 OFDM 信号的调制任务，调制完毕后，手动触发 EDMA3 开始将数据传给 MCBSP，数据传输完毕产生 EDMA3 发送完成中断，调用硬中断 HWI2，检验信号是否完全发送完毕，若没有，则拷贝数据，继续循环发送，直至发送完毕；若发送完毕则退出并删除 OFDM 信号的调制任务 TSK2。OFDM 信号接收时，系统上电后，EDMA3 以 48kHz 的采样率连续采集信号，每采集固定点数信号后，产生 EDMA3 接收完成中断，调用硬中断 HWI2，启动软中断 SWI，在该软中断中实现 OFDM 信号的同步检测与调制解调。

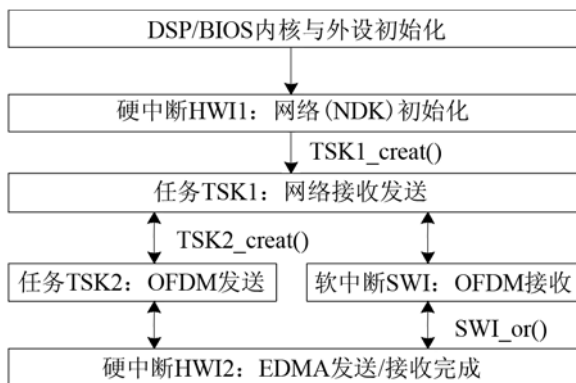


图3 基于 DSP/BIOS 的 DSP 程序框架
Fig.3 DSP programming framework based on DSP/BIOS

3.2 OFDM 调制程序开发

发送端的主要任务是接收网络端的十六进制数据，进行 OFDM 信号调制并通过 DA 发出模拟弱信号，再通过功放驱动换能器向水中辐射声波，发

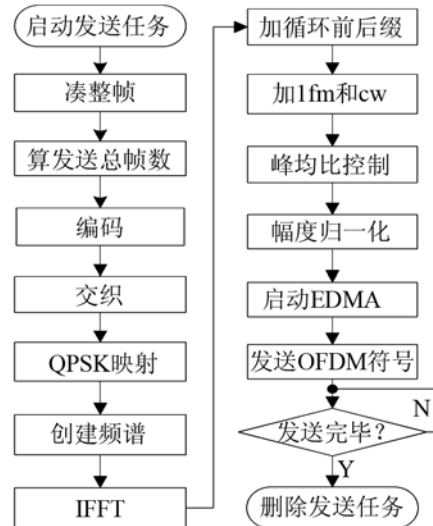


图4 发送端流程图
Fig.4 Flow chart of transmitting segment

送端产生 OFDM 符号的具体流程如图 4 所示。

发送任务启动后，需要根据通信参数计算一帧能传送的 bit 数，将要发送的数据补 0 或 1 凑成整帧，计算出需要发送的帧数，按帧进行调制发送，整个过程包括编码、交织、QPSK 映射、创建频谱、IFFT、加循环前后缀，至此 OFDM 符号生成，最后，根据帧结构(如图 1 示)，加上 LFM 信号和 CW 信号，并利用限幅方法进行简单的峰均比控制，启动 EDMA 发送通道，开始发送 OFDM 符号，当所有帧的 OFDM 符号均发送完后，关闭 EDMA 发送通道，并删除该发送任务。

3.3 OFDM 解调程序设计

信号接收端主要负责 OFDM 信号同步检测及解调工作，接收端工作流程图如图 5 所示。接收端采用乒乓工作方式，EDMA 接收通道采用 A 同步方式，启动 EDMA 后，将 AIC23 采集到的数据通过 MCBSP 传输到内存中，EDMA 采集固定点数据后，产生 EDMA 传输完成中断，启动作为软中断的接收函数 receive()。在该函数中首先对接收数据进行 FIR 滤波，滤除电源可能带来的工频干扰，硬件的温漂带来的直流分量和带外干扰。检测到第一个 LFM 时，取出 CW 信号，测频，求出多普勒因子，并根据此多普勒因子去生成受多普勒影响的第二个本地 LFM，与 OFDM 帧中的第二个 LFM 做相关测得精确时间，实现 OFDM 信号的同步。之后便开始真正进入 OFDM 信号的解调工作，主要包括高倍 FFT，找到准确采样点，信道估计与均衡，QPSK 解映射。当 OFDM 符号够一帧时，开始解交织，求原始误码率，解码，求最终误码率，将解调出的 bit 流恢复成发送端的十六进制数据，并通过网络向主

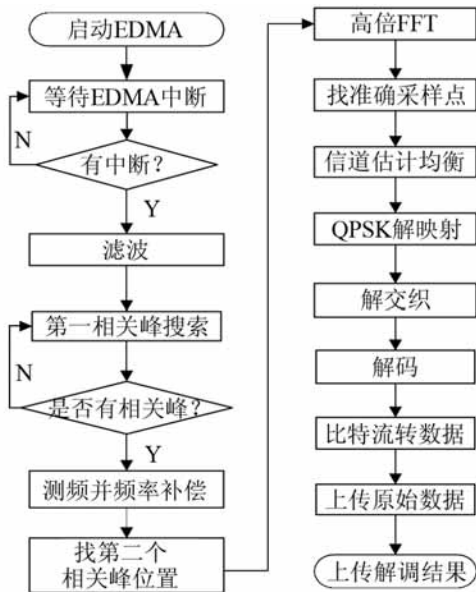


图 5 接收端流程图

Fig.5 Flow chart of receiving segment

机上上传原始数据，解调结果，误码率等。

算法实现过程中，充分发挥了 C6455 的 C64X+ 内核及超长指令集的特点，灵活运用 EDMA3 实现了数据的采集与搬移，并优化了算法及程序，主要体现在以下几个方面：

(1) 采用 DSP/BIOS 实时操作系统。合理分配各个线程，数据采集和 OFDM 信号发射线程设置为硬中断(HWI)，OFDM 解调线程设置为软件中断(SWI)，OFDM 调制及网络通信设置为任务(TSK)，通过高优先级线程抢占低优先级线程，以及允许阻塞、同步、通信等各种线程间的交互方式，使得这几个线程的应用程序可以在一个处理器上运行。

(2) 数据传输采用乒乓缓存形式。利用 EDMA3 来进行数据传输，既避免了 CPU 在处理过程中被数据传输打断，又可做到数据同时收发，为整个系统的实时处理提供了解决方案。

(3) 利用 FFT 和 IFFT 来实现线性卷积。FFT 和 IFFT 调用的是 C64x+的库函数，该库中 FFT 可实现 64K 点长度运算，是 C64 内核调用库函数实现 FFT 点数的 1 倍。并将这些运算在内存中实现，明显提高了运算速度，DSP 中大的内存空间为 64k 点 FFT 在内存中的实现提供了保障。64K 点 FFT 的实现用时 1.60ms。

(4) 编解码时采用 TMS320C6455 集成的高性能嵌入式增强型 VCP2 协处理器。为了实现该协处理器与 CPU 之间进行数据传输，完成卷积码的编码及译码功能，用 EDMA3 实现 VCP2 与 CPU 之间的通信。VCP2 协处理器的使用明显提高了片上信道编解码的速度。

3.4 实时性分析

通信参数设置如表 1 所示。该组参数下，算法在 DSK6455 板卡上的开销测试如表 2 所示。DSP 主频为 1.2 GHz，执行每条指令的时间是 0.83 ns。

表 1 一帧 OFDM 信号波形参数
Table 1 Parameters of a frame OFDM signal

采样率	48kHz
频带范围	4~8kHz
带宽	4kHz
FFT 点数	16384
子载波间隔	2.93Hz
循环前缀	62.5ms
循环后缀	62.5ms
LFM 长度	20ms
CW 长度	200ms
保护间隔	62.5ms
梳状导频间隔	5
一帧符号数	5
块状导频个数	1

表 2 各模块运行时间
Table 2 The operation time of each module

模块	指令周期数	时间/ms
检测 CW	5.190×10^7	43.3
检测 LFM	1.654×10^7	13.8
多普勒估计	2.128×10^6	1.8
64k 点 FFT	1.873×10^6	1.6
信道估计	2.554×10^6	2.1
Viterbi 译码	1.014×10^7	8.5
解调	1.197×10^8	99.8

系统采用 48kHz 的采样频率，每次处理的数据长度为 14070 点，EDMA 传输采用 A 同步的方式，进行乒乓处理，则待处理数据最大时间长度为 293 ms，通过对各个模块的时间测试，如表 2 所示，解调共用 99.8ms，可以看出完全能在该时间长度内将数据处理完毕，满足实时的要求，并留有冗余。因此系统还可扩展，这也为整个通信系统提供了条件。

4 江上实验数据分析

2011 年 7 月在某水域进行了基于 DSK6455 板卡的 OFDM 水声通信系统算法验证性能测试试验。收、发两端的 DSK6455 板卡与上位机通过网络交互 OFDM 调制参数、解调结果及原始数据，试验系统示意图如图 6 所示。实验中使用的功放和测量放大器如图 7 所示。

实验过程中江面较平静，微风，将发射换能器与接收水听器均吊放于 7 m 深处进行通信。某江 4.3 km 距离上信道冲激响应如图 8 所示。从图中可以看出，多途约为 10ms，而循环前缀为 62.5ms 满

足需求。图 9 为实验接收到的某帧比较具有代表性的信号波形与频谱。

实验中,连续接收 50 帧数据,共 112000bits,平均原始误码率为 5.29%,平均最终误码率为 0.05%。均衡采用的方法是先利用是梳状导频 LS 法估计出导频位置的信道,之后利用线性插值估计出整个信道,再对接收到的信号进行信道均衡,信源编解码器采用的是 1/2 码率的卷积码。

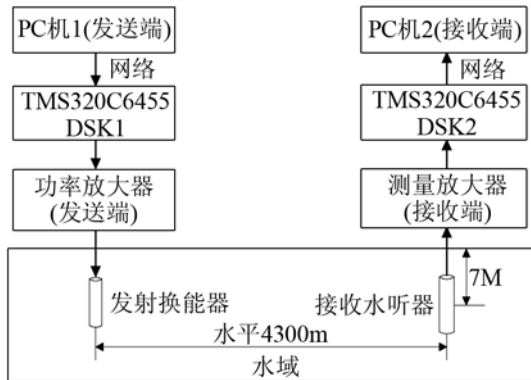
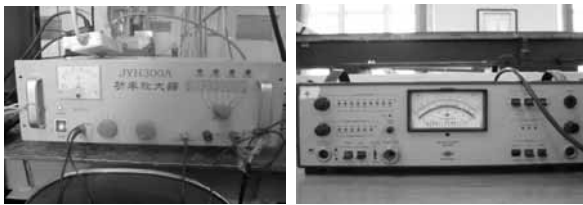


图 6 水声通信系统实验框图

Fig.6 Block diagram of underwater communication system



(a) 功放 JYH300A (b) 测放 B&K2636

图 7 功放与测量放大器

Fig.7 Power Amplifier and measuring amplifier

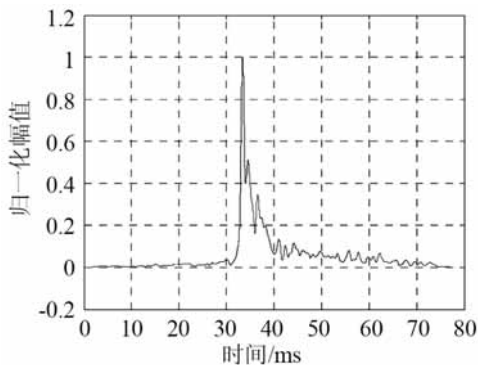


图 8 信道冲激响应图

Fig.8 Picture of channel impulse response

5 结 论

本文介绍了水声 modem 研究现状,给出了 OFDM 水声通信算法的简要介绍,详细描述了基于 DSK6455 的实时 OFDM 水声通信系统实现过程,分析系统实时性,并进行了水中实验,给出实验结论。在实验中,4~8 kHz 的通信频带,水平 4.3 km

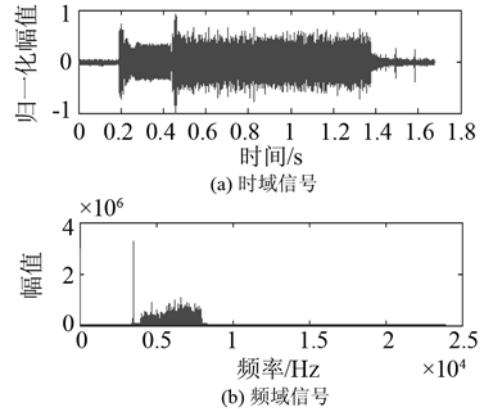


图 9 实验接收到的信号波形与频谱

Fig.9 Signal waveform and spectrum from Songhua river trial

的距离上,通信速率达到 1873 pbs,误码率小于 10⁻⁴。实时 OFDM 水声通信算法的实现,为下一步实现基于 OFDM 技术的水声组网通信、水声语音、图像传输奠定了基础。

参 考 文 献 :

- [1] Rudolf Bannasch, Konstantin Kebkal, Sergey Yakovlev. Fast and reliable underwater communication successful applications of biologically inspired techniques[C]// OMAE2006, Hamburg, Germany, 2006, 741-747.
- [2] Aydinlik, A Ozdemir, M Stojanovic. A physical layer implementation on reconfigurable underwater acoustic modem. in proc[C]// IEEE Oceans'08 Conference, Quebec City, Canada, September 2008, 1-4.
- [3] Freitag L, Grund M, Singh S, Partan J, Koski P, Ball K. The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms[C]// IEEE Oceans Conference, Washington DC, 2005, 2, 1086-1092.
- [4] YAN H, ZHOU S, SHI Z, et al. A DSP implementation of OFDM acoustic modem[C]// Proceedings of the ACM International Workshop on UnderWater Networks (WUWNet), Montreal, Quebec, Canada, 2007: 89-92.
- [5] LI B, ZHOU S, HUANG J, et al. Scalable OFDM design for underwater acoustic communications[C]// Proceedings of ICASSP, Las Vegas, NV, 2008: 5304- 5307.
- [6] Spectrum digital Inc. TMS320C6455 DSK technical reference[Z]. 2006: 1-10.
- [7] Texas instruments Inc. TMS320C6455 fixed-point digital signal processor[Z]. 2005: 22-23.
- [8] 张战争, 张效民. 基于正交频分复用技术的水声通信系统仿真[J]. 声学技术, 2007, 26(5): 855-859.
- [9] ZHANG Zhanzheng, ZHANG Xiaomin. The study of underwater acoustic communication system simulation based-on OFDM technique[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(5): 855-859.
- [10] LI Baosheng, ZHOU Shengli, Milica Stojanovic, et al.. Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts[J]. IEEE J.Oceanic Eng, 2008, 33(2): 198-209.
- [11] 马雪飞, 赵春晖, 乔钢. OFDM 水声通信线性最小均方误差算法信道均衡[J]. 声学技术, 2009, 27(4): 467-471.
- MA Xuefei, ZHAO Chunhui, QIAO Gang. Channel equalization of orthogonal frequency division multiplexing underwater communication based on linear minimum mean square error[J]. Technical Acoustics, 2009, 27(4): 467-471.
- [11] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北邮出版社, 2004, 23-24.
- YIN Changchuan, LUO Tao, LE guangxin. Multi-carrier wireless communication technology[M]. Beijing: Beijing University of Post Telecommunications Press. 2004, 23-24.