

# 基于正交频分复用的水下转发器的设计

周 锋<sup>1</sup>, 高金辉<sup>2</sup>, 孙宗鑫<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工程大学水声技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001;  
2. 河南师范大学物理与信息工程学院, 河南新乡 453007)

**摘要:** 为解决长距离高速水声数据传输问题, 采用接力式水声数据转发传输是一个很好的解决方案。结合正交频分复用技术的特点设计实现了一个数字式的水下转发器系统。系统功耗低、结构简单, 可以很好地解决水声通信中存在的多途干扰和窄带宽问题, 实现高速、可靠的水下数据转发的目的。湖试中, 在 6000m 的距离内, 3kHz 带宽下, 转发速率为 4.32kb/s, 误码率低于  $10^{-3}$ 。湖试结果表明, 基于正交频分复用的水下转发器可以达到较高的转发速率和较低的误码率。

**关键词:** 正交频分复用; 水下转发器; 水声通信

中图分类号: TB565

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2010)-03-0264-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2010.03.005

## Design of underwater repeater based on orthogonal frequency division multiplexing

ZHOU Feng<sup>1</sup>, GAO Jin-hui<sup>2</sup>, SUN Zong-xin<sup>1</sup>

(1. National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;  
2. College of Physics, Henan Normal University, Xinxiang 453007, He'nan China)

**Abstract:** In order to solve the problems of long-distance high-speed underwater acoustic data transmission, a good method is to transmit the data by using repeaters. In the paper, an underwater repeater system based on orthogonal frequency division multiplexing is designed. The structure of the repeater is very simple and it has the characteristic of low power. The repeater can overcome the problems due to multi-path propagation and limited bandwidth in underwater acoustic communication to achieve reliable high-speed transmitting communication. According to lake testing, the bit rate reaches 4.32kb/s for the bandwidth of 3kHz within 6000m with the bit error rate (BER) lower than  $10^{-3}$ . The experiments show that the repeater can reach high data rate with low BER.

**Key words:** orthogonal frequency division multiplexing; underwater repeater; underwater acoustic communication

## 1 引言

在水下声通信技术领域, 不管是远程、超远程的低比特率的指令和命令的传输, 还是近程高速信息的传输, 都已经找到了近乎实用的解决方案并有大量的试验系统和试验结果作为辅证, 唯独远程、高速信息传输尚未找到一个圆满的解决方案。为了解决这个问题, 本文设计实现了一个数字化的基于正交频分复用的水下转发器系统, 它用类似于微波接力传输的方法解决了高数据率信息远程中继传输问题。

由于水声环境的复杂性以及传感器的运动和海面波浪等原因, 接收的声信号无论在幅度上还是相位上都显示出随机的时间和空间的频率起伏; 而且由于水下声信道的多径传输特性, 使得接收的水下声信号遭受严重的时间和频率选择性衰落。正因为这种空间、时间、频率上的特性, 给实现可靠、高速、远距离水声通信带来了极大的困难<sup>[1-3]</sup>。

为了实现可靠、高速的水声通信, 近十几年来频带利用率较高的相干通信技术得到了广泛的研究<sup>[4]</sup>, 采用自适应均衡技术克服码间干扰和相位畸变的各种算法不断涌现, 但是计算比较复杂, 尤其是对于高速通信而言。而且对于时变频率选择性衰落信道, 很难设计一个有效的均衡器, 这也是基于相位相干通信系统的一个瓶颈所在<sup>[1]</sup>。一个可进行可靠、高速的水下声通信方式就是多载波调制方式。多载波通信的研究是近年来开始的, 已经取得了一些令人鼓舞的结果<sup>[5]</sup>。多载波调制可有效地在

收稿日期: 2009-03-10; 修回日期: 2009-06-04

基金项目: 国家 863 项目(2006AA09Z105), 国家自然科学基金项目(10704020)

作者简介: 周锋(1980-), 男, 吉林人, 博士生, 讲师, 研究方向为水声通信技术。

通讯作者: 周锋, E-mail: zhoufeng@hrbeu.edu.cn

$N$  个子载波所形成的  $N$  个子信道上并行传输。为了提高频带利用率, 消减子载波的保护带, 可以选择互相都正交的子载波, 这就是正交频分复用 (OFDM)。当每个子载波的带宽低于信道的相干带宽时, 各子载波信道呈现平坦衰落, 而且可以通过循环前缀有效抵抗多途带来的码间干扰。显然, 采用 OFDM 技术可实现近程可靠的高速水声通信, 而且结构简单, 易于实现<sup>[6,7]</sup>。本文正是结合了 OFDM 技术的特点设计并实现了一个基于正交频分复用的水下转发器系统。

## 2 水下转发器的工作原理

水下转发器就是把信源发射来的信号或者前一个转发器发射来的信号进行解码, 还原出“原始”数据, 然后再以同样的编码方式、同样的数据帧格式把还原的数据发射出去。其工作示意图如图 1 所示。其作用就是把在传输过程中所引入的噪声和其他干扰清理干净, 使其尽可能地复原出原始的数据信号, 然后再进行转发, 以达到远程通信的目的。

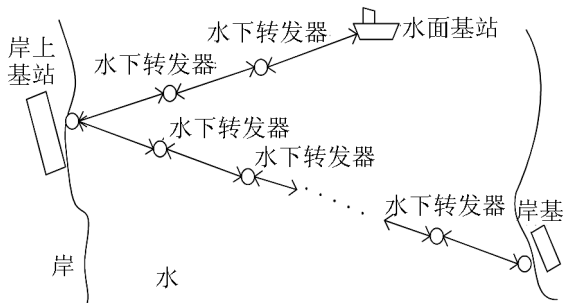


图 1 水下转发器工作示意图  
Fig.1 Working diagram of underwater repeater

本文设计实现的水下转发器是一个数字化的系统。因为数字通信在传输的过程中可以再生和重发, 不会出现模拟中继转发的噪声累积问题, 这就使得数字化通信系统具有较高的抗干扰能力, 适于远距离传输; 同时, 数字化系统易于处理、存储方便、便于进行多种数字信号处理, 且可靠性高。由于水下转发器要对各个方向的信号进行转发, 而且实现水下全双工通信系统较复杂, 很难控制本地发射信号对接收信号的影响, 本文设计实现的水下转发器系统是一个半双工通信系统。

## 3 水下转发器的硬件结构

由于水下转发器需要长期工作于水下, 靠电池供电, 故在设计整个系统硬件时, 一个最主要的因素就是尽量降低系统的功耗; 同时水下转发器要转

发的是大量的数据和图像信息, 这就要求主处理器具有较高的处理速度。因此, 本系统采用具有超低功耗和较高处理速度的 DSP 芯片 TMS320C5509, 它是 TI 公司超低功耗 DSP 芯片 TMS320C55XX 系列之一, 完全可以满足系统的需求。系统硬件框图见图 2。

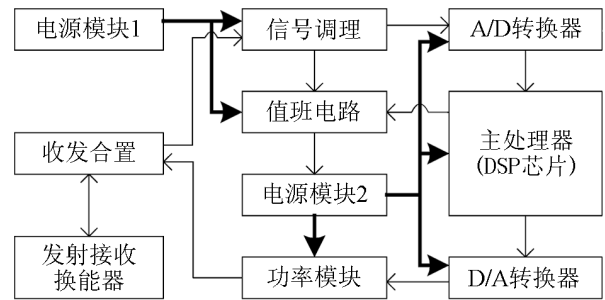


图 2 系统硬件结构框图  
Fig.2 Framework of system hardware

为了进一步降低系统的功耗, 系统设计了一个值班电路, 该值班电路一直处于工作状态, 只有几毫瓦的功率损耗, 其主要功能是负责检测信号的有无, 在检测到信号的时候就开启主处理器和功率放大模块等以进行数据的处理和转发。值班电路的原理框图见图 3。

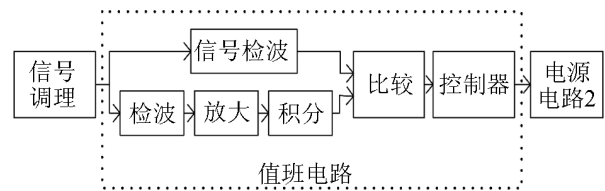


图 3 值班电路原理框图  
Fig.3 Framework of circuit on duty

值班信号采用检测 CW 脉冲信号的办法。为了进一步提高值班电路检测的可靠性, 本系统采用图 4 中的值班触发信号, 它包括 3 个等脉宽的 CW 脉冲信号。检测该触发信号需要满足以下三个条件: (1) 每个 CW 脉冲信号需要一定的幅值, 即需要一定的信噪比; (2) 对每个 CW 脉冲信号的脉宽有一定的要求, 图 4 中 CW 脉冲的脉宽为 20ms; (3) 每个 CW 脉冲之间需要满足一定的时间约束关系, 如图 4 中的 50ms。只有值班电路检测到同时满足以上三个条件的信号时才能开启主处理器部分电路。

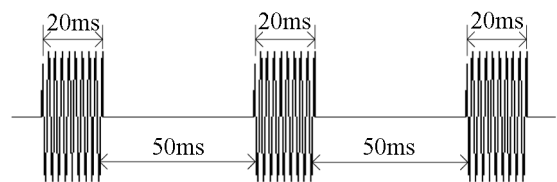


图 4 触发信号  
Fig.4 Signal for triggering

值班电路中的控制器选用 TI 公司的微安级单片机 MSP430F149。它功耗较低，处理能力强大，并且工作稳定。其主要功能是完成对触发信号中单个 CW 脉冲的脉宽和各个 CW 脉冲间的约束时间关系的控制，同时完成对主处理器和功率放大模块以及 A/D、D/A 转换器电源的开启和关闭工作。显然，采用此单片机作为系统的控制器具有功耗低、易于实现、稳定可靠等优点。

### 4 水下转发器的软件设计

#### 4.1 OFDM 的基本原理

设 OFDM 的基带调制信号带宽为  $B$ ，码元调制速率为  $R$ ，码元周期为  $t_s$ 。OFDM 的基本原理是将原信号通过串并转换分割为  $N$  个子信号，转换后码元速率为  $R/N$ ，周期为  $T=N*t_s$ ，然后用  $N$  个子信号分别调制  $N$  个相互正交的子载波，最后将  $N$  路调制后的信号相加即得到发射信号。发射端和接收端的原理框图见图 5、6<sup>[8]</sup>。

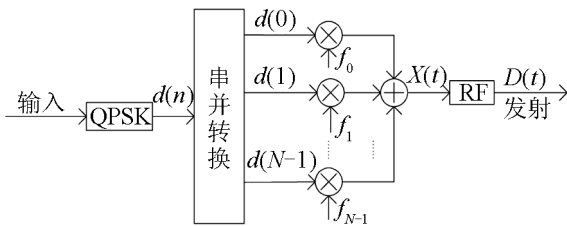


图 5 OFDM 发射端原理框图  
Fig.5 Transmitter of OFDM system

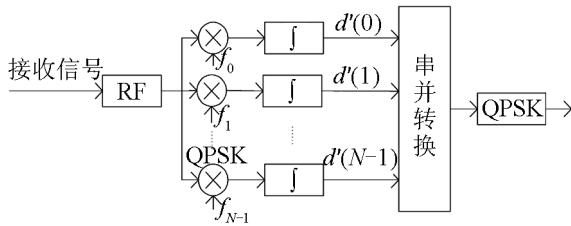


图 6 OFDM 接收端原理框图  
Fig.6 Receiver of OFDM system

在接收端，输入信号分为  $N$  个支路，分别用  $N$  个子载波混频和积分，恢复出子信号，再经过并串转换和解调就可以恢复出原始数据。由于子载波的正交性，混频和积分电路可有效分离各个子信道。

OFDM 调制信号  $D(t)$  可写成式(1)的形式，其  $X(t)$  为复等效基带信号，见式(2)：

$$D(t) = \left[ \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \cdot e^{j2\pi n t / N t_s} \right] \cdot e^{j2\pi f_c t} = X(t) \cdot e^{j2\pi f_c t} \quad (1)$$

$$X(t) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \cdot e^{j2\pi n t / N t_s} \quad (2)$$

对  $X(t)$  进行抽样，抽样速率为  $1/t_s$ ，即  $t_k = k t_s$ ，

则有：

$$X(t_k) = \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \cdot e^{j2\pi n k / N} = N \cdot \text{IDFT}[d(n)] \quad (3)$$

其中  $0 \leq k \leq (N-1)$ ，由式(3)可以看出，OFDM 调制解调可以通过发射端的 IFFT 变换来实现，同样接收端可以通过 FFT 变换来实现。

#### 4.2 OFDM 的正交性条件

正交频分复用是多载波调制的一种，其基本思想是将信号流分成多路子数据流，再去并行调制多路载波。如果  $T$  表示 OFDM 信号的符号周期， $B$  为信号的带宽，而  $N$  为子载波个数，则  $N$  个子载波的频率分别为：

$$f_k = f_0 + k \cdot \Delta f, (k=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (4)$$

式(4)中  $f_0$  为载波， $\Delta f$  为子载波间的频率间隙。要使各子载波间满足正交性，即式(5)成立：

$$\int_0^T e^{j2\pi f_i t} (e^{j2\pi f_k t})^* dt = \begin{cases} T & i=k \\ 0 & i \neq k \end{cases} \quad (5)$$

显然，只要选择载波间的频率间隔为  $\Delta f$ ，使  $\Delta f = 1/T$ ，即可使各个子载波在整个 OFDM 信号的符号周期内满足正交性。

#### 4.3 基于 OFDM 的水下转发器的实现

水下转发器的主要功能是把已受到噪声污染的数据提取出来，然后再把提取出来的数据以同样的调制方式发射出去，这样就能通过多个水下转发器的逐一转发以达到远程通信。本系统水下转发器基于 OFDM 技术，其实现的软件流程图见图 7。

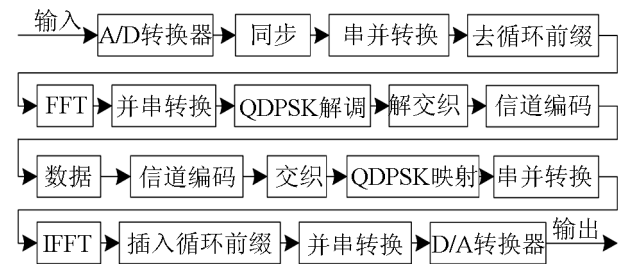


图 7 系统软件原理框图  
Fig.7 Diagram of system software

系统采用四进制差分相移键控(QDPSK)调制方式，其接收和发射的每帧数据结构如图 8 所示。

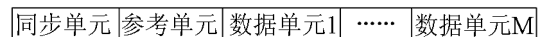


图 8 数据帧结构  
Fig.8 Structure of data frame

同步单元由线性调频信号构成，用以实现系统的同步。参考单元为其后按 QDPSK 调制的单元提供初始相位。每一数据帧包括  $M$  个数据单元，每个数据单元的结构如图 9 所示。

循环前缀(斜线部分)由数据码元后部的若干数

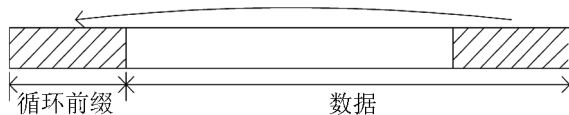


图 9 数据单元结构  
Fig.9 Structure of data unit

据复制后添加到数据码元前面构成, 用于克服多途的影响。但加入循环前缀会降低系统的通信速率, 同时会损耗系统的发射功率, 故应根据实际情况确定循环前缀的长度。

### 5 实验结果及分析

为验证水下转发器系统的实际性能, 在某湖进行了湖上试验研究。水域宽度为 600~1000m, 长 7000m, 水深 60~80m。收发换能器皆为无指向性, 发射接收基站分别放置于两条船上, 水下转发器以浮球方式放在两个船之间, 均吊放于水下 5~8m, 发射接收船只距离水下转发器均为 3km, 传送数据为大量黑白图像与灰度图像, 每一幅图像都包含大量的比特数据信息。本文以一黑白图像和灰度图像为例, 如图 10(a)和图 11(a)。系统采用四进制差分相移键控(QDPSK)调制方式, 子载波带宽设计为 10.99Hz( $T=91ms$ ), 共计 270 个子载波, 循环前缀为 34ms( $T_g$  为 34ms), 中心频率为 8kHz, z 带宽约为 3kHz, 传输速率为:

$$R=270 \times 2 \times 1000 / (91+34) = 4.32 \text{ kb/s}$$

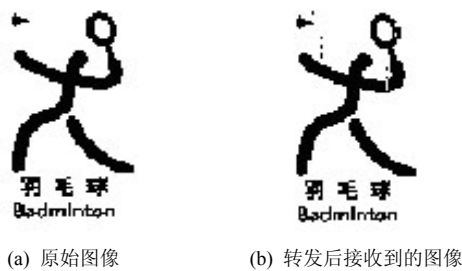


图 10 发射和接收的黑白图像数据  
Fig.10 Black-white images transmitted and received



图 11 发射和接收的灰度图像数据  
Fig.11 Gray images transmitted and received

图 10、11 是两组实验图像。  
图 10 是一组 95\*123 像素黑白图像的接收处理

结果。图 10(b)的误码率为  $3.7 \times 10^{-3}$ 。

图 11 是一组 180\*214 像素 256 级的灰度图像接收处理结果。图 11(b)的误码率达到了  $1.12 \times 10^{-3}$ 。

水声信道的时变-空变-频变特性导致水声信道的复杂多变性, 会引起传输信号的幅度、相位和频率失真。从而导致接收端出现误码。只有实时跟踪信道的特性并去均衡信道带来的干扰才能有效抵制信道带来的影响。所以, 下一代的转发器设计需要考虑加入信道估计和均衡技术。

另一个需要考虑的问题是多普勒频移带来的影响。OFDM 技术的一个固有弱点就是易受多普勒频移影响, 多普勒频偏的存在导致子载波间的正交性遭到破坏, 产生载波间干扰, 降低了 OFDM 系统接收性能。多普勒问题一直是 OFDM 的技术难点和研究热点。

### 6 结束语

实验证明, 基于正交频分复用技术的水下转发器系统可达到较高的通信速率和较低的误码率, 为以后实现可靠的、高速的、远程水声通信打下了坚实的基础。但其在高速、远程水声中的应用还有待于进一步研究, 特别是多个水下转发器系统进行转发时的转发时序及功能匹配等问题有待于深入研究。

#### 参 考 文 献

- [1] Kim Byung-Chul, Lu I-Tai. Parameter study of OFDM underwater communications system[A]. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition[C]. 11-14 Sept. 2000, 2: 1251-1255.
- [2] Kilfoyle D B, Baggeroer A B. The state of the art in underwater acoustic telemetry[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2000, 25(1): 4-27.
- [3] Lam W K, Ormondroya R F. A broadband UWA communication system[A]. Underwater Applications of Image Processing (Ref. No. 1998/217), IEEE Colloquium on 25 March 1998[C]. 1998. 8/1-8/6.
- [4] Stojanovic M, Catipovic J A, Proakis J G. Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1994, 19(1): 100-111.
- [5] Coatelan S, Glavieux A. Design and test of a multicarrier transmission system on the shallow water acoustic channel[A]. OCEANS'94[C]. France, Brest: 1994. 472-477.
- [6] ZHU Tong, San Enfang. Research on the high speed underwater acoustic communication based on OFDM[J]. Journal of Harbin Engineering University, February, 2005, 26(1): 71-74.
- [7] 朱彤. 基于正交频分复用的水声通信技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [8] ZHU Tong. Research on underwater acoustic communication based on OFDM[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [9] 王文博, 郑佩. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 9-12.
- [10] WANG Wenbo, ZHENG Kan. OFDM technology for Broadband wireless communication[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, November, 2003. 9-12