

# OFDM 水声通信系统定时同步的 FPGA 实现

解永军, 胡晓毅, 王德清, 雷王微

(厦门大学 信息科学与技术学院 水声通信与海洋技术教育部重点实验室 福建 厦门 361005)

**摘要:** 结合水声信道和线性调频(LFM)信号的特点, 采用 LFM 信号作为 OFDM 水声通信系统的定时同步信号。介绍 LFM 信号的产生和检测原理, 并在 FPGA 上实现了 LFM 定时同步信号的产生和同步信号的检测。通过实验室水池实验, 验证了该方案的可行性。

**关键词:** 水声通信; 线性调频; 定时同步; 现场可编程门阵列; 正交频分复用

中图分类号: TN914.3

文献标识码: B

文章编号: 1004-373X(2009)07-001-03

## Implement of Timing Synchronization for OFDM Underwater Communication System on FPGA

XIE Yongjun, HU Xiaoyi, WANG Deqing, LEI Wangwei

(Ministry of Education Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology, College of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, 361005, China)

**Abstract:** Based on characteristics of underwater acoustic channel and Linear Frequency Modulation (LFM) signal, LFM signal is adopted for timing synchronization signal of OFDM underwater communication system. The generation and detection principle of LFM signal are summed up. Then the scheme based on the theory above is implemented on Field Programmable Gate Array (FPGA). Finally, the result of pool test shows the feasibility of the scheme.

**Keywords:** underwater acoustic communication; linear frequency modulation; timing synchronization; field programmable gate array; orthogonal frequency division multiplexing

## 0 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术是一种多载波调制技术, 它将宽带信道分解为相互正交的一组窄带子信道, 利用各个子信道进行并行数据传输, 因此其频谱利用率高、抗多径衰落能力强。目前已经在数字视频广播 (DVB-T<sup>[1]</sup>)、无线局域网 (802.11a/g<sup>[2]</sup>) 等系统中成功得到应用, 并且成为第四代移动通信的核心技术之一<sup>[3]</sup>。水声信道是一个时、空、频变的多径信道, 它具有强多径、窄频带和强噪声等特点, 将 OFDM 传输技术应用到水声通信中, 已成为水声通信的研究热点之一。

OFDM 系统自身的正交多载波调制特点, 决定了其对同步误差十分敏感<sup>[4]</sup>。能否实现准确的符号定时同步和载波频率同步, 将直接影响到 OFDM 通信系统的性能。由于线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) 信号具有良好的时频聚集性, 使得 LFM 信号适合作为 OFDM 水声通信系统的定时同步信号<sup>[5]</sup>。在接收端, 利用 LFM 信号的自相关特性检测其相关峰

的位置, 可以实现 OFDM 水声通信系统的定时同步。

## 1 基本原理介绍

### 1.1 OFDM 水声通信系统原理

典型的 OFDM 水声通信系统原理框图如图 1 所示。

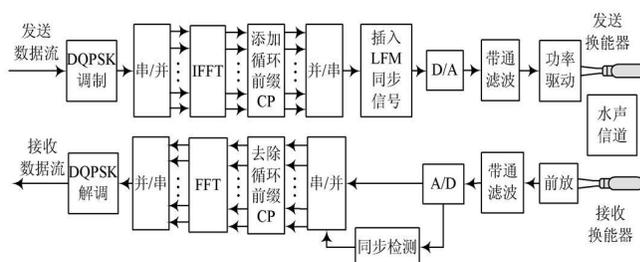


图 1 OFDM 水声通信系统原理框图

输入的数据符号经过 DQPSK 映射成一个复数数据序列  $X[0], X[1], \dots, X[N-1]$ , 经过串并转换后将  $N$  个并行符号调制到  $N$  个子载波上, 经过 IFFT 后成为时域抽样值  $x[n]$ :

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} X[i] e^{j2\pi ni/N}, \quad 0 \leq n \leq N-1$$

再经过添加循环前缀 (Cyclic Prefix, CP)、插入

LFM 同步信号、D/A 转换等步骤,最后经水声换能器转换成声信号在水声信道中传输。在接收端,信号经接收换能器转换成电信号,经信号调理以及 A/D 采集、FFT 等一系列逆过程,即可完成数据符号的解调。

为了正确恢复数据符号,本系统利用 LFM 信号较好的自相关特性,将其作为 OFDM 符号的定时同步信号。OFDM 水声通信系统发送信号的帧结构如图 2 所示。在接收端采用滑动相关检测的方法,获得相关峰的位置,实现定时符号的准确同步,然后经过发送端的逆过程即可实现 OFDM 信号的解调,最后恢复出原始的数据符号。

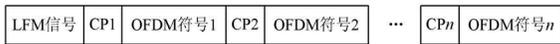


图 2 OFDM 发送信号的帧结构

## 1.2 LFM 信号的特点

LFM 信号是雷达系统中应用极为广泛的一种大时宽-带宽信号。LFM 信号的复数表达式为<sup>9</sup>:

$$s(t) = u(t)e^{j\pi\mu t^2} = e^{j2\pi(f_0 t + \mu t^2/2)}, \quad -\tau/2 \leq t \leq \tau/2$$

其中:  $\mu = B/\tau$  为频率的变化斜率,  $B (= \Delta f)$  为频率变化范围。实信号表示为:

$$p(t) = \text{Re}[s(t)] = \cos[2\pi(f_0 t + \mu t^2/2)], \quad -\tau/2 \leq t \leq \tau/2$$

其时域波形和自相关输出如图 3 所示,可以明显看出 LFM 信号的频率在脉冲周期内按线性规律变化,自相关峰是非常尖锐的。

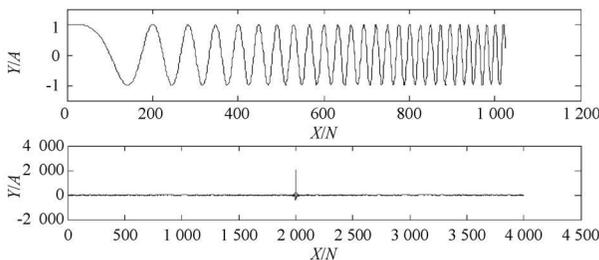


图 3 LFM 信号的时域波形和自相关输出

LFM 信号具有抛物线式的非线性相位谱,且  $B\tau \gg 1$ ,  $\tau$  为信号时宽,  $B$  为信号带宽。因此 LFM 信号具有很好的脉冲压缩特性<sup>10</sup>。它的模糊函数(自相关函数)曲面具有尖锐的主峰和较低的裙边。它对多普勒频移不敏感,即使存在较大的多普勒频移,它仍具有良好的脉冲压缩特性。水声信道具有强多途、时、空、频变的特性,采用 LFM 信号作为同步信号,可以获得较好的相关检测性能,不会由于多途带来明显的伪峰<sup>7</sup>。经过实验,验证了 LFM 信号作为系统的同步信号可以获得较好的同步性能<sup>5</sup>。因此本文重点讨论 LFM 信号在 FPGA 上的产生和同步检测。

## 2 LFM 信号的产生和检测

### 2.1 LFM 信号的产生

LFM 信号的产生方法通常有 I、Q 两路数字式产生法和中频直接产生法两种。前者实现时较复杂,适用于频率高、带宽大的场合。水声信号一般工作在较低频段,适合用中频直接产生法产生 LFM 信号。根据本实验室 OFDM 水声通信系统的可用带宽要求,利用直接数字合成(Directed Digital Synthesis, DDS)技术直接产生扫描频率为 13~16 kHz 的 LFM 信号。

DDS 技术又可进一步分为直接数字波形合成(DDWS)和直接数字频率合成(DDFS)两种,二者在实现结构上略有不同<sup>8</sup>。DDWS 也称为数字波形存储直读式波形产生系统,它把经过理想采样的数字波形预先存储,使用时通过查表进行 D/A 变换而得到所需的模拟信号。该方法产生的 LFM 信号基本上不受调频斜率的限制,可以用来产生任意波形(包括复杂波形及大数据量组合波形),还可对预先存储的数据波形进行失真处理,提高系统的性能。本设计采用 DDWS 方式产生 LFM 信号,产生 LFM 的基本原理框图如图 4 所示。

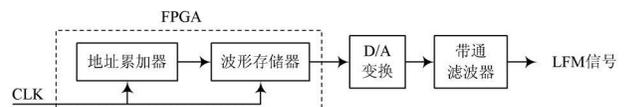


图 4 DDWS 法产生 LFM 的原理框图

在 50 MHz 主时钟的控制下, FPGA 内部逻辑以 120 kHz 的频率控制 LFM 信号的输出,数字信号经过 D/A 变换后输出阶梯形的时域信号,再经过带通滤波器滤除带外噪声后得到双极性的 LFM 信号。

### 2.2 LFM 信号的检测

接收端对 LFM 同步信号的检测,实质上是获得 LFM 信号的压缩窄脉冲的过程,以此达到同步信号提取的目的。采用的方法一般有匹配滤波法和相关提取法,匹配滤波的实现需要在频域利用 FFT 和 IFFT 变换进行处理,它需要耗费较大的 FPGA 资源,复杂度较高。考虑到硬件资源和计算复杂度,本设计采用在时域滑动相关的方法实现 LFM 信号的检测。该方法利用了 LFM 信号具有尖锐的自相关特性,根据相关运算的公式:

$$r(j) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n+j), \quad -N \leq j \leq N-1$$

当接收到的 LFM 信号与本地存储的 LFM 信号相同时(上式中  $j=0$ ),其相关值最大,出现尖锐的相关峰。图 5 是采用 FPGA 实现 LFM 信号相关算法的原理

框图。

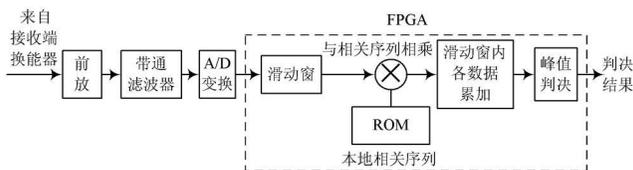


图 5 时域实现相关算法的原理框图

在发送端, 一个周期 LFM 信号的点数为 256, 在接收端经过 A/D 采样后得到 8 b 的数字量, 存入长度为 256 B 的接收缓冲区, 该缓冲区设计为先进先出 (First-in First-out, FIFO), 作为滑动窗与本地相关序列进行相关运算。本地相关序列 (存放在 ROM 中) 与发送端发出的 LFM 序列相同, ROM 的容量也是  $256 \times 8$  b。

每完成一次 A/D 采样, 得到的 8 b 数据存入 FIFO, 然后执行一次相关运算, 得到 256 个 16 b 的数据, 然后将这 256 个数据相加, 即得到此刻对应的相关值 (用 24 b 存储)。对得到的连续 256 个相关值构成的序列处理后求最大值, 即可判决出接收到 LFM 信号的位置。

### 3 实验结果

为验证 LFM 信号在水声通信中用作同步信号的性能, 在实验室水池进行了相关实验。实验中使用的 FPGA 为 Cyclone II EP2C20Q240C8<sup>[9]</sup>, 考虑到半双工通信的情况, LFM 信号的产生与检测在同一片 FPGA 中实现, 共使用了 3 693 个逻辑单元 (Logic Elements, LE), 占 EP2C20 芯片总 LE 的 20%。实验系统的基本框图如图 6 所示。

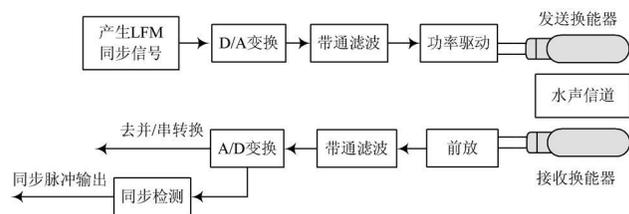


图 6 LFM 用作同步信号的实验框图

图 7 的示波器型号为 TDS2024, 各通道观测的信号如下:

CH1 为发送端发出的 LFM 信号。由于 D/A 输出的信号经过带通滤波器滤波, 因此信号的高频和低频部分有衰减。

CH2 为接收信号 (换能器输出的信号经过 5 000 倍放大和带通滤波处理后)。

作者简介 解永军 男, 1978 年出生, 山东日照人, 硕士研究生, 工程师。研究方向为 OFDM, 水声通信, 单片机与嵌入式系统。  
胡晓毅 副教授。研究方向为 OFDM, 水声通信, 单片机与嵌入式系统。

CH3 为接收端 FPGA 检测到 LFM 信号后的同步脉冲输出。

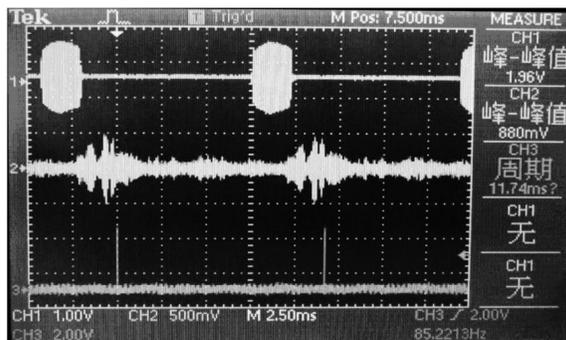


图 7 示波器观测的信号波形

由图 7 可以看出: 该方案实现了 LFM 信号的产生, 在多径较为严重的实验室水池中, 在接收端正确完成了对 LFM 信号的同步检测, 可以较准确地提取到 LFM 信号的相关峰位置, 证明该方法作为 OFDM 水声通信系统的定时同步方案是可行的。

### 参 考 文 献

- [1] ETSI. Frame Structure Channel Coding and Modulation for a Second Generation Digital Terrestrial Television Broadcasting System (DVB-T2) [EB/OL]. [http://www.dvb.org/technology/dvbt2/al22\\_tm3980r5\\_DVB-T2.pdf](http://www.dvb.org/technology/dvbt2/al22_tm3980r5_DVB-T2.pdf), 2008.
- [2] IEEE Std 802.11a-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band [EB/OL]. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>, 2005-08-01.
- [3] 佟学俭, 罗涛. OFDM 移动通信技术原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [4] 张海滨. 正交频分复用的基本原理与关键技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [5] 王德清. OFDM 高速水声通信系统的 DSP 实现及同步技术研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2005.
- [6] 汪学刚. 现代信号理论 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] 惠俊英. 水下声信道 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [8] 霍志勇. DDS 线性调频信号产生技术研究 [J]. 无线电工程, 2006(1): 27-29.
- [9] Altera International Limited. Cyclone II Device Handbook, Volume 1 [EB/OL]. <http://www.altera.com.cn/literature/lit-cyc2.jsp>, 2008-02-19.
- [10] 张直中. 雷达信号的选择与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.