

# 基于短时傅里叶变换的水声 OFDM 时间同步方法

郑彩云<sup>1</sup>, 马雪飞<sup>2</sup>, 张可<sup>2</sup>, 章佳荣<sup>2</sup>, 乔钢<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001;  
2. 哈尔滨工程大学水声技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术具有抗多径、频带利用充分、传输数据率高的优点, 在水声通信中具有重要的发展前景。由于多普勒频移和多径时延的存在, 需对 OFDM 信号进行时间同步。同步不准会引起 OFDM 水声通信中符号间干扰和子载波间干扰, 提出了一种基于叠加单频序列的短时傅里叶变换(STFT)时间同步方法, 该方案首先提取叠加在 OFDM 符号上的单频信号, 对该信号进行短时傅里叶变换, 随后对其时频幅度谱进行分析, 利用平坦区域确定同步时刻。仿真和试验结果表明, 该方案有效可行。

**关键词:** 水声通信; 时间同步; 短时傅里叶变换; 正交频分复用; 单频信号

中图分类号: TN914.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-03-0233-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.03.012

## Research on underwater orthogonal frequency division multiplexing timing synchronization based on short time Fourier transform

ZHENG Cai-yun<sup>1</sup>, MA Xue-fei<sup>2</sup>, ZHANG Ke<sup>2</sup>, ZHANG Jia-rong<sup>2</sup>, QIAO Gang<sup>2</sup>

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. National Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is a method that can combat multipath, fully use the frequency band and have high data transmission rate. Consequently it has a promising future in underwater acoustic communication. Underwater channel is a Doppler-distorted, high noised and time-varying multipath channel. Due to the existence of multipath and Doppler shift, timing synchronization plays a key role in OFDM systems. In this paper, a timing synchronization method based on short time Fourier transform (STFT) is proposed. First, STFT is operated on the outcome of the received single frequency signal accompanying the OFDM symbol, and then the time-frequency spectrum is obtained for calculating the summation of the outcome after STFT and finding the edge which is the original point of the underwater acoustic OFDM symbol. The results of simulations show good performance of this method even under low ratio of signal to noise.

**Key words:** Underwater communication; timing approach; short time Fourier transform; orthogonal frequency division multiplexing; cosine wave signal

## 0 引言

随着水声通信技术的发展, 对水下高速通信的需求越来越大, 使得水下通信采用了一些多载波通信技术, 如正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术, 而时间同步是 OFDM 系统中的一项关键技术, OFDM 系统对时间同步误差非常敏感。符号的时间同步偏差会导致符号间干扰(Inter-Symbol Interference, ISI)和载波间干

扰(Inter-Carrier Interference, ICI)<sup>[1]</sup>。

文献[2,3]给出了一种稳健的符号定时方法, 但是由于导频时域能量分散, 不容易集中利用, 而且受数据信号的影响, 性能并不理想。

文献[4,5]提出了利用自相关矩阵实现 OFDM 信号符号定时参数和频偏估计算法, 该算法不需要数据辅助, 通过使对角线上对应虚载波位置的元素的模值之和最小实现符号同步, 但计算比较复杂。

文献[6]中提出了一种低复杂度的符号定时估计算法, 利用简化的时间测度函数检测峰值来实现同步, 该法的性能受信道频率选择性的影响。采用数据辅助的方法使定时精度得到提高, 但需要训练数据, 降低了传输效率<sup>[7-9]</sup>。文献[10]首次采用了短

收稿日期: 2012-05-15; 修回日期: 2012-08-23

作者简介: 郑彩云(1981—), 女, 博士研究生, 助理研究员, 研究方向为水声通信技术。

通讯作者: 郑彩云, E-mail: caiyunzheng@126.com

时傅里叶变换方法进行时间同步。本文利用短时傅里叶变换的方法，提出了一种短时傅里叶变换的 OFDM 水声通信时间同步方法，对信号进行时频分析以达到同步的目的。

### 1 水声 OFDM 通信模型

图 1 所示为本文的 OFDM 水声通信系统的系统结构。

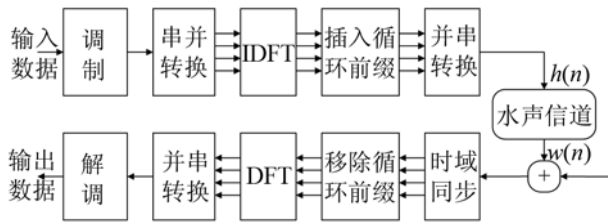


图 1 OFDM 系统模型

Fig.1 Framework of the OFDM communication system

输入数据先经过子载波调制，可以采用 PSK 或 QAM 等映射方式。

在  $N$  个子载波的 OFDM 系统中，采样间隔为  $T_s$ ，第  $k$  个子载波频率满足

$$f_k = f_0 + \frac{k}{T_s}, \quad k=1, 2, \dots, N-1 \quad (1)$$

则发射的 OFDM 信号  $s(t)$  可以写式(2)形式：

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} s_k(t) e^{j2\pi f_k t} \quad (2)$$

其中， $s_k(t)$  为第  $k$  个子载波传输的 OFDM 信号。经过 IDFT 后，发射采样信号为

$$s(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) \exp(j \frac{2\pi n k}{N}) \quad (3)$$

加入循环前缀 CP，其长度为  $N_g$ ，则  $s(n)$  的一个 OFDM 符号长度为  $N+N_g$ ，经过水下信道后到达接收机。首先将接收到的时域数据进行时域同步，找到 OFDM 符号的起始点，然后进行 DFT 变换，将时域数据变为频域数据。最后进行子载波逆映射，以完成对信号的解调。

接收端的信号为

$$y(n) = s(n) \otimes h(n) + w(n) \quad (4)$$

其中， $h(n)$  为信道冲激响应， $w(n)$  为加性高斯白噪声， $h(n)$  可以表示为

$$h(n) = \sum_{i=0}^{r-1} h_i \delta(n - \tau_i), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (5)$$

其中， $r$  为多径信道的径数， $h_i$  为第  $i$  径在时域内的复冲激响应， $\lambda$  为时延参数， $\tau_i$  为对应第  $i$  径的时延。为方便起见，以抽样间隔为单位对  $\lambda$  和  $\tau_i$  进行归一化处理。

### 2 基于短时傅里叶变换定时同步

传统傅里叶变换使用的是一种全局的变换，对整个时域信号进行分析，短时傅里叶变换把信号划分成许多小段，用傅里叶变换分析信号的每一段，以确定该段的频谱，短时傅里叶变换可以进行微观的时频分析。信号  $f(t)$  的短时傅里叶变换为

$$F_{\text{STFT}}(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau) g(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (6)$$

其中， $g(t)$  为时间宽度为  $l_g$  的窗函数。对于每次窗口滑动，计算  $f(t)g(t-s)$ ，通常情况下  $l_g$  都比较短。由于窗函数  $g(t)$  的存在，窗口移动的距离小于窗口的宽度时，短时傅里叶变换还可以允许重叠。为了提高短时傅里叶变换的时间分辨率，选择的窗函数  $g(t)$  要尽可能短。另一方面，短时傅里叶变换要得到高的频率分辨率，要求选择的窗函数  $g(t)$  时间宽度尽可能长，因此频率分辨率与时间分辨率之间需要平衡。

循环前缀的引入能够克服符号间的干扰，将信号与信道冲激响应的线性卷积转化为循环卷积，使 OFDM 信号具有周期平稳性，避免引进 ICI 干扰<sup>[6]</sup>。第  $i$  个 OFDM 符号表示为

$$S_i(n) = [S(iN+1), S(iN+2), \dots, S(iN+N)] \quad (7)$$

经  $N_m$  点 IFFT 后变为  $s_i(n) = \text{IFFT}(S_i(n), N_m)$ ，逆傅里叶变换后，每个 OFDM 符号有  $N_m$  个数据，将时域数据  $s_i(n)$  的后面长度为  $N_g$  的数据复制并作为循环前缀添加到  $s_i(n)$  前面，其中循环前缀为

$$cp_i = s_i(N_m - N_g + 1, N_m - N_g + 2, \dots, N_m) \quad (8)$$

含有循环前缀的数据为  $s_i = [cp_i, s_i(n)]$ ，其长度为  $N_m + N_g$ 。其结构如图 2 中的每一行所示。

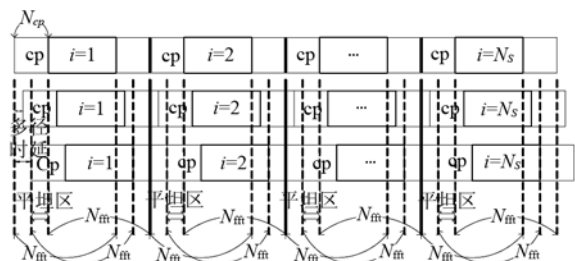


图 2 多径信道下平坦区域图

Fig.2 Plane area in multipath channel

对接收到的 OFDM 信号  $s_i$  进行长度  $l_g = N_m$  矩形窗短时傅里叶变换，可得

$$S_{\text{STFT}}(f, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) g(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (9)$$

其中： $g(t)$  是长度为  $l_g = N_m$  的矩形窗； $t$  为矩形窗

移动的点数。将  $s(\tau)g(\tau-t)$  写成矩阵形式:

$$X_t(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n)W_N^{kn} \quad (10)$$

$X_t(k)$  是长度为  $N_{ff}$  的向量, 其幅度谱为  $|s(\tau)g(\tau-t)|$ , 当  $t < N_g$  时, 即包含循环前缀的信号所对应的幅度谱是相等的:

$$|X_{t_1}(k)| = |X_{t_2}(k)| = \dots = |X_{t_{N_{cp}}}(k)| \quad (11)$$

在 多径条件下, 如图 2 所示, 式(11)仍然成立。第一行为原始 OFDM 信号, 第二行为在 多径条件下信号的变化趋势, 第三行为最大多径时延对信号的影响。由图 2 可以看出, 信号的平坦区域长度为  $N_g - N_{cir}$ , 其中  $N_{cir}$  是信道冲激响应长度, 即最大多径时延。

本文提出的水声 OFDM 同步方法, 单载波同样满足式(9)的结论, 叠加两个与所有 OFDM 子载波正交的单频信号, 确定了该单频信号的起止时刻, 也就确定了 OFDM 符号的起止时刻。该方法可以灵活控制单频信号的功率, 以获得比 OFDM 信号高的信噪比, 且处理时更为方便, 对 OFDM 符号的定时同步转变为对两个单频信号求同步。单频信号交替出现, 并与 OFDM 符号的结构相同。同时两个单频信号可以实现测频功能, 进行频率同步, 发射信号频谱如图 3 所示。

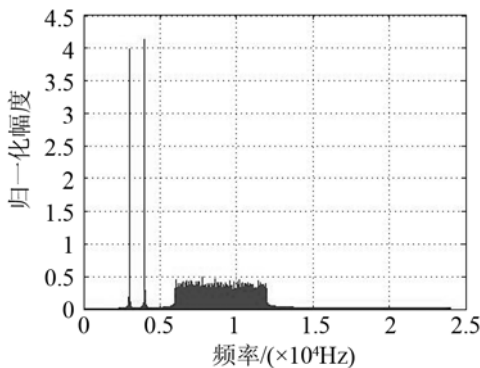


图 3 发射信号频谱  
Fig.3 Frequency spectrum of transmitting signal

通过该方法, 可以简化运算, 在时域叠加两个与 OFDM 子载波正交的正弦信号, 即保证了与 OFDM 所有子载波的正交性, 避免产生载波间的干扰, 并且两个载波信号的频率与 OFDM 正交, 可以通过带通滤波器将两个信号分离出来。在接收端需设置两个滤波器, 一个用来提取正交的单频信号, 另一个用来提取 OFDM 信号。

具体算法步骤如下:

(1) 对接收信号进行带通滤波后, 提取出插入的正交单频信号, 对单频信号短时傅里叶变换, 采用长度为  $l_g = N_{m}$  的矩形窗, 为提高同步的准确度,

每次短时傅里叶变换的重叠长度应小于并尽量接近  $N_{m}$ 。

(2) 求出步骤(1)中所得结果在每个时间点的幅度谱, 再计算幅度谱的和, 然后整形。

(3) 利用(2)所得的方波, 采用前后求差的方法得到冲激信号。

### 3 仿真及实验结果

对本算法在 OFDM 水声通信系统中的性能进行仿真。信号频带为 6~12kHz。仿真中一个 OFDM 符号长度为 200ms, 循环前缀 68ms, 信号调制映射采用 QPSK 调制方式, 抽样频率  $F_s$  为 48kHz, IFFT 长度为  $N_{m} = 8192$  点, 针对 OFDM 多径信号在高斯噪声情况下进行了仿真。

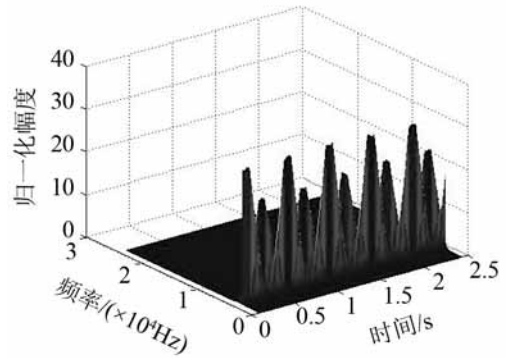


图 4 接收信号短时傅里叶变换  
Fig.4 Short time Fourier transform of received signal

图 4 中信号平坦区域受到噪声的影响有些起伏, 图 4 中给出了其中截短后的(0~2.5s 内)单频信号短时傅里叶变换的结果。对短时傅里叶变换后的数据, 固定每个短时傅里叶变换的起始时间点, 求幅度谱的和, 如图 5 所示。

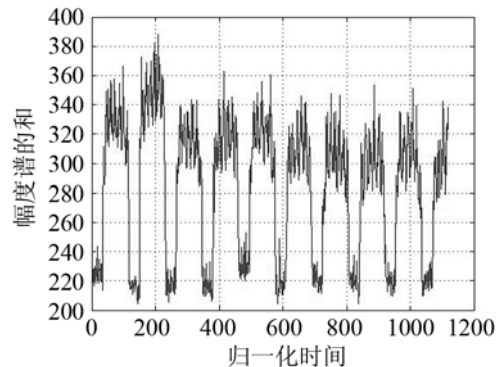


图 5 短时傅里叶变换后幅度谱的和  
Fig.5 Amplitude spectrum summation after short time Fourier transform

图 5 中归一化的时间是指用抽样间隔时间归一化后的结果。从图 5 可见, 信号幅度谱的和也有平

坦区域,但是受到信道多径和噪声的影响产生了起伏,为了求出信号起始时刻,对数据进行整形处理。

图 6 为整形后的数据,可以通过后一个点减前一个点的方法进行处理,得出信号上升沿的跳变时刻,即信号的起始时刻。

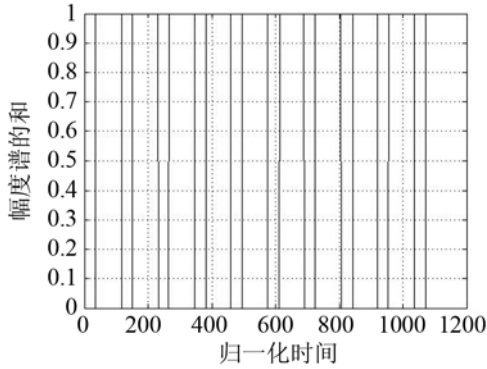


图 6 整形后的幅度谱和  
Fig.6 Amplitude spectrum summation after reshape

图 7 通过相邻点做差的方法得到一个脉冲波形,通过该波形可以确定符号的起始时刻与结束时刻。其中正脉冲表示符号的开始,负脉冲表示该符号的结束,即下一个符号循环前缀的开始。

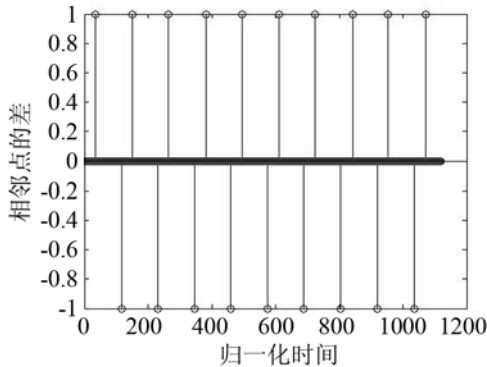


图 7 符号起始时刻与结束时刻脉冲  
Fig.7 Symbol beginning and ending impulses

为了验证算法性能,于 2011 年 9 月在某湖进行了定点的和运动的水声通信实验。由于水文条件不好,进行了短距离的通信实验,实验距离约 1.5km,吊放深度均为 2m,信号频带为 4~8kHz,子载波映射方式为 QPSK。实验区域水深约为 30m,实验期间利用声速梯度计测得典型声速分布如图 8 所示。表面声道近似等温分布,10m 以后呈现负梯度分布。试验中采集的原始数据如图 9 所示。

图 10 为实验时截取的前四个符号的幅度谱和,表明在水声信道中传输时,所提的算法仍然有效。

由图 11 可看出,实验时信道的多径干扰非常严重,造成了起止时刻有一些模糊度,在起始时刻会有两条或多条脉冲,通过辅助手段(利用 OFDM 符号中的导频训练序列)可以去掉部分多余的脉冲,

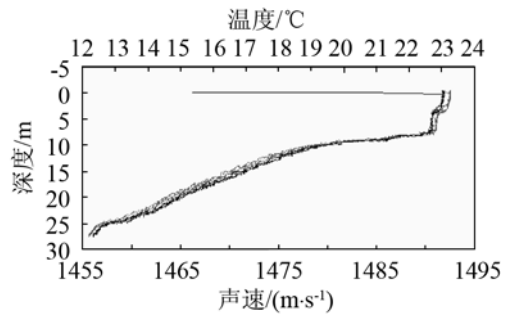


图 8 实验中的声速分布  
Fig.8 Sound speed profile in experiment

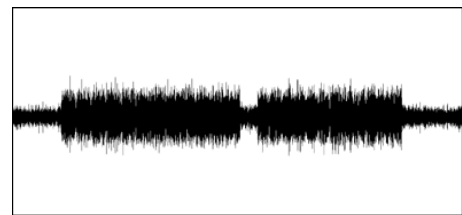


图 9 试验中的原始数据  
Fig.9 The original data acquired in experiment

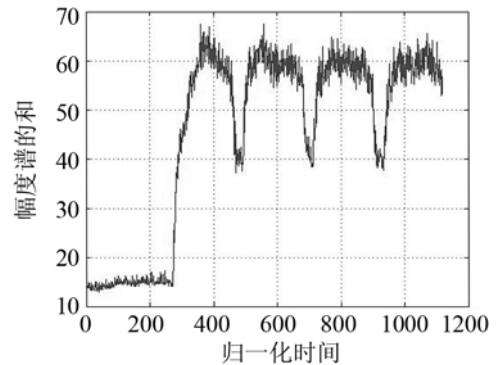


图 10 实验接收的单频信号幅度谱的和  
Fig.10 Amplitude spectrum summation of received single frequency signal in experiment

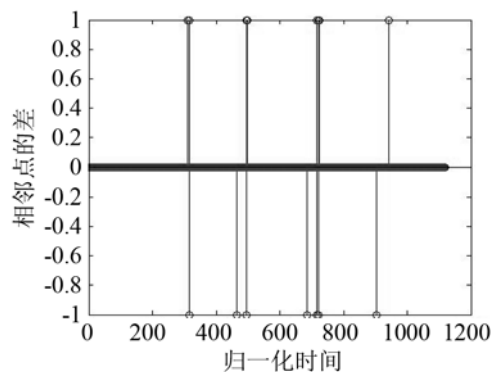


图 11 实验中符号起始时刻与结束时刻脉冲  
Fig.11 Symbol beginning and ending impulses obtained in experiment

将定时的模糊度偏差消除。

### 4 结 论

仿真结果表明,本文提出的基于短时傅里叶变换叠加正交信号的同步算法在水声 OFDM 通信定

时同步中效果较好。对提出的算法在加性高斯噪声、多径信道的低信噪比情况下进行了仿真。对提取的单频信号进行短时傅里叶变换, 随后通过对其时频幅度谱的分析确定了 OFDM 信号的起止时间, 从而完成对 OFDM 信号的时间同步, 仿真结果表明了该算法在理论上的有效性。在湖试中, 验证了其算法在多径干扰较为严重的环境中, 仍然可以有效地实现对 OFDM 信号的时间同步。

#### 参 考 文 献

- [1] 胡登鹏, 石峰, 张尔扬. 非数据辅助的 OFDM 系统符号同步算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 739-743.  
HU Dengpeng, SHI Feng, ZHANG Eryang. Non-data-aided symbol synchronization algorithm for OFDM systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3): 739-743.
- [2] Yasamin M, Donald C C. A Robust timing synchronization design in OFDM systems-part I: low mobility cases[J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2007, 6(12): 4329-4339.
- [3] Yasamin M, Donald C C. A Robust timing synchronization design in OFDM systems-part II: high mobility cases[J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2007, 6(12): 4340-4348.
- [4] 王庆, 葛临东, 巩克现. 一种基于自相关矩阵的 OFDM 信号同步参数盲估计算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(02): 383-387.  
WANG Qing, GE Lingdong, GONG Kexian. A blind estimation algorithm of synchronization parameter for OFDM signals based on auto-correlation matrix[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(02): 383-387.
- [5] 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.
- [6] 孙海信, 杨雪梅, 张俊. OFDM 系统符号定时精同步研究[J]. 声学技术, 2007, 26(4): 747-751.  
SUN Haixin, YANG Xuemei, ZHANG Jun. Fine estimation of timing offset for OFDM[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(4): 747-751.
- [7] 高燕, 王炎, 尤肖虎. 一种基于数据辅助的 OFDM 系统符号同步算法[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(01): 44-47.  
GAO Yan, WANG Yan, YOU Xiaohu. A data-aided symbol synchronization algorithm for OFDM systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(01): 44-47.
- [8] LI Ya, ZHANG Lina, JIA Liqin. A robust timing synchronization method for OFDM system[C]// Natural Computation (ICNC), 2011 Seventh International Conference on, 2011, 1: 52-55.
- [9] Durak L, O'zdemir A K, Arıkan O. Efficient computation of joint fractional Fourier domain signal representation[J]. Journal of the Optical Society of America, 2008, 25(3): 765-772.
- [10] KUANG Yujun, TENG Yong, YIN Changchuan. Novel synchronization approach for cyclic based systems[C]// Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003, 1: 245-248.