

# 一种水声 MC - CDMA 多用户信道估计仿真研究

方 荟<sup>1</sup> 胡晓毅<sup>2</sup>

(1. 闽江学院 福建 福州 350108; 2. 厦门大学 福建 厦门 361005)

**摘要:** 研究水声信道优化估计问题,在资源受限的水声环境下,多载波码分多址(MC-CDMA)上行系统信道,由于受到各种干扰,怎样获取多用户的信道准确信息是一个难题。为此提出了一种采用DFT的上行信道估计算法,可以很好的解决了上述问题。算法是在频域上构造不同的导频信号,在时域上估计用户的冲激响应从而得到其信道传输函数。采用改进方案的水声MC-CDMA系统在获得有效频谱效率和分集增益的同时,还能获得很好的误码率性能。首先利用DFT信道估计算法的性能,进行仿真。结果表明,DFT及改进算法较传统的LS信道估计算法,可以使水声系统性能有明显的提高,降低多用户干扰的影响,为水声多用户信道优化估计提供了依据。

**关键词:** 水声通信; 多载波码分多址; 上行信道估计

**中图分类号:** TN301.6 **文献标识码:** B

## Simulation of Uplink Channel Estimation for MC - CDMA Underwater Acoustic Communication System

FANG Hui<sup>1</sup>, HU Xiao-yi<sup>2</sup>

(1. Dept. of Computer Science, Mingjiang University, Fuzhou Fujian 350108, China;

2. Dept. of Communication Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361005, China)

**ABSTRACT:** A large amount of uplink channel information is difficult to estimate for MC-CDMA underwater acoustic communication (UWAC) uplink system. In this paper, an uplink channel estimation algorithm was proposed to solve this problem with spectral efficiency, as well as the frequency diversity without loss of much BER performance for MC-CDMA UWAC system. The basic idea is constructing different pilots in frequency domain and estimating channel impulse response in time domain. The performance of the algorithm was analyzed. Matlab simulation results also indicate that the uplink channel estimation algorithm can obviously improve the system performance compared with the one based on LS norm, with the reduction of the multiuser interference.

**KEYWORDS:** UWAC; MC-CDMA; Uplink channel estimation

### 1 引言

在存在频率选择性衰落的水声信道中,MC-CDMA可以有效地合并接收信号散布在频域中的所有能量,同时在单个子信道中可采用快速Walsh-Hadamard变换进行扩频和解扩,提高水声系统的运算效率。MC-CDMA作为水声通信系统的多址接入方式,可采用非线性的多用户检测方法<sup>[1,2]</sup>消除多用户干扰,但前提条件是获得不同接入用户准确的信道状态信息。

近年来,众多学者对MC-CDMA的信道估计技术做了许多的探讨和研究,大多集中于MC-CDMA下行的信道估计<sup>[1]</sup>。因为下行同步的特点,信道估计完全可以借鉴OFDM系统的信道估计方法<sup>[2]</sup>。如利用插入时域和频域的导频符

号,或通过周期地发送一些脉冲信号作为探测信道的方法<sup>[3,4]</sup>。而这些方法无法直接移植到MC-CDMA的上行多用户信道估计中。因为在上行中接入的不同用户是位于不同的位置,经过不同的信道到达基站。这意味着在基站需要估计大量不同的信道状态信息,如时延、信道传输函数。

对于水声MC-CDMA通信系统,存在频带资源紧张,水声信道空时变等问题。对于上行多用户信道估计,基于子空间的盲估计<sup>[5,6]</sup>需要较复杂的矩阵计算;基于频域的训练序列方法<sup>[3,7]</sup>,信道估计精度不高,且导频数有限;TDD\MC-CDMA<sup>[8]</sup>的信道估计方法受信道条件限制较大。本文针对水声信道条件恶劣和水声系统的功耗小特点,提出一种基于DFT的多用户信道估计方法<sup>[3,9]</sup>,避免了复杂的矩阵运算,减小功耗,并通过阈值法提高上行信道估计的精度,以对抗水声信道带来的影响。

收稿日期: 2011-09-05 修回日期: 2011-12-10

## 2 系统模型

### 2.1 发射端

发射端实现的是水声 MC-CDMA 系统扩频和调制子载波的过程。

假设系统的用户数为  $U$ , 第  $u$  个用户发送时域信号的等效低通形式为:

$$S_u(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{SF-1} b_{u,i} C_{u,n} \exp(j2\pi(m^* SF + n) \Delta f(t - i^* T)) \quad (1)$$

式(1)中  $b_{u,i}$  为第  $u$  个用户要发送的数据比特流,  $C_{u,n}$  ( $n = 0, 1, \dots, SF-1$ ) 为分配给第  $u$  个用户的扩频码。 $SF$  为扩频码增益。 $N_c$  为系统子载波的个数, 且  $N_c = K^* SF$ , 即子载波数  $N_c$  为扩频增益  $SF$  的整数倍。 $T$  为符号周期,  $\Delta f$  为 OFDM 子载波间隔。

### 2.2 水声信道

水声信道是一个水声通信仿真系统不可或缺的组成部分。根据射线声学理论<sup>[10]</sup>, 假设水声信道中有这样几条多径, 信号通过这些路径从发射机到达接收机, 称这些路径为本征路径。每一个本征路径信号包含一个稳定的主分量和许多随机分布的子分量, 每一个本征路径信号都可以用一定的信噪比、传播时延、传播衰减以及多普勒频移来共同描述。一个本征路径用数学式子可以表示为:

$$r_s(t) = S \cos(2\pi f_c t - \theta) + x(t) \cos(2\pi f_c t) + y(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (2)$$

式(2)中  $S \cos(2\pi f_c t - \theta)$  为信号的主分量。 $x(t) \cos(2\pi f_c t) + y(t) \sin(2\pi f_c t)$  为随机的子分量, 主分量和多径分量的振幅和相位是慢变化的,  $x(t)$ 、 $y(t)$  是零均值的窄带高斯过程。 $\theta$  为本征路径的传播时延。当在浅海信道中且发射机和接收机相距较远时, 本征路径上的本征信号减弱, 使得在接收端, 没有一条本征路径的分量是占主要成分的。因而可以将接收端的信号包络看作近似服从瑞利(Rayleigh)分布<sup>[11]</sup>。

### 2.3 接收端

接收端实现的是水声 MC-CDMA 系统解扩和解调的过程。

接收信号  $r$  是所有用户信号的叠加, 其中可能包含用户 0 到用户  $U-1$  之间任意多个用户的信号, 假设  $U$  个用户传播时延分别为:  $\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_u, \dots, \tau_{U-1}$ , 且  $0 \leq \tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_u < \dots < \tau_{U-1}$ , 那么接收信号可以表示为:

$$r(t) = \sum_{u=0}^{U-1} \int_{-\infty}^{+\infty} S_u(t - \tau_u) \otimes h_u(\tau, t) d\tau + n(t) \quad (3)$$

式(3)中  $S_u(t)$  为第  $u$  个用户的发送信号, 其形式如式(1),  $\otimes$  表示卷积操作,  $h_u(\tau, t)$  为第  $u$  个用户所经历信道的信道冲激响应,  $n(t)$  为信道噪声。如果各用户是同时达到接收机的, 假设传播时延均为  $\tau$ , 上一式可以修改为:

$$r(t) = \sum_{u=0}^{U-1} \int_{-\infty}^{+\infty} S_u(t - \tau) \otimes h_u(\tau, t) d\tau + n(t) \quad (4)$$

为了减小多用户干扰的影响, 接收信号在解扩解调前采用基于并行干扰抵消的多用户检测<sup>[12]</sup>, 而多用户检测需要知道各用户的信道状态信息。

## 3 性能分析

### 3.1 一般算法

本节就基于 DFT 的多用户信道估计方法<sup>[3][9]</sup> 的性能展开分析。其基本思想是对不同的用户在频域上构造不同的导频信号, 通过在时域估计用户的时域冲激响应以达到区分用户的信道信息的目的, 再通过 DFT 操作, 得到各用户的信道传输函数。与传统的下行信道估计方法相比, 该方法最大的特点是, 可以区分出不同用户的信道传输函数, 在导频资源有限的情况下, 同时估计大量不同的信道状态信息。

为了将所有用户的导频放在相同的频域空间当中, 需要对用户导频的进行如下相应的构造。第  $u$  个用户的导频可以表示为:

$$P^{(u)}(k) = P^{(1)}(k) e^{-j2\pi(u-1)L_{cp}k/N} \quad (5)$$

式(5)中  $0 \leq k \leq N-1$ ;  $1 \leq u \leq U$ ,  $N$  为子载波数,  $L_{cp}$  为 OFDM 循环前缀的长度,  $\mu$  为用户序号。

经过 DFT 反变换之后, 导频在时域上可以表示为:

$$p^{(u)}(n) = p^{(1)}(n) ((n - (u-1) * L_{cp}))_N \quad (6)$$

从(6)式看出, 第  $u$  个用户的导频时域信号是第 1 个用户导频时域信号延迟  $(u-1) * L_{cp}$  点的拷贝。假设用户的最大信道延迟小于 OFDM 循环前缀的长度, 即在 OFDM 符号长度  $L$  一定的情况下, 至少可以同时构造  $L/L_{cp}$  个用户的时域导频信号。

将第  $m$  个用户的信道建模成具有  $L$  径的时变低通等效复信道:

$$h^{(u)}(n) = \sum_{s=0}^{L-1} \alpha_s^{(u)} \delta(n - \tau_s^{(u)}) \quad (7)$$

式(7)中  $\alpha_s^{(k)}$  为第  $u$  个用户第  $s$  径的路径增益, 它满足高斯随机分布。 $\tau_s^{(k)}$  为第  $u$  个用户第  $s$  径的传播延迟。并假设水声信道的最大信道延迟不大于循环前缀的长度。

经过多径信道之后, 在接收端的导频信号在时域表示为:

$$r(n) = \sum_{u=1}^U p^{(u)}(n) \otimes h^{(u)}(n) + w(n) \quad (8)$$

式(8)中  $\otimes$  表示  $N$  点循环卷积,  $w(n)$  和  $W(k)$  为服从独立分布的零均值的高斯噪声分量。

假设理想同步, 经过 DFT 变换之后, 接收信号在频域表示为:

$$R(k) = \sum_{u=1}^U P^{(u)}(k) / H^{(u)}(k) + W(k) \quad (9)$$

第  $u$  个用户第  $l$  个子载波的信道传输函数可以表示为:

$$H^{(u)}(l) = \sum_{s=0}^{L-1} \alpha_s^{(u)} e^{-j\frac{2\pi l \tau_s^{(u)}}{N}} \quad (10)$$

那么所有用户的信道传输函数为:

$$\begin{aligned} \hat{H}_{total}(k) &= R(k) / P^{(1)}(k) \\ &= \sum_{u=1}^U H^{(u)}(k) e^{-j2\pi(u-1)L_{cp}k/N} + W(k) / P^{(1)}(k) \end{aligned} \quad (11)$$

对应的时域的信道冲击响应为:

$$\hat{h}_{total}(n) = \sum_{u=1}^U h^{(u)}(n - L_{cp} * (u - 1)) + \hat{w}(n) \quad (12)$$

由于导频的特殊构造,可从式(12)中剥离出每个单独用户的信道冲击响应,即:

$$\hat{h}^{(u)}(n) = \hat{h}_{total}(n + (u - 1) * L_{cp}) \quad \mu = 1, 2, \dots, U \quad (13)$$

### 3.2 改进算法

观察(12)式,发现冲击响应包含了噪声分量,性能只会与LS信道估计相差不多。又因为OFDM符号的长度比信道的冲击响应要长得多,所以信道的能量主要集中在信道时域抽样点的小部分范围内。对于水声信道,存在多径,且信道最大延迟较大的特点,可以充分利用有限的信道能量。具体操作时,就是在估计时域信道冲击响应的时候,设定一个阈值,只选择重要的信道抽头,忽略不重要的信道抽头。

通常又分为两种选择主要抽头的方法。一个是选择L个能量大于某一个门限值的抽头;另一个是选择L个最大能量的抽头。这里采用相对比较简单的方法:

$$\bar{h}^{(u)}(n) = \begin{cases} \hat{h}^{(u)}(n) & \text{if } |\hat{h}^{(u)}(n)|^2 \geq \text{Threshold} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

其中  $\text{Threshold} = \lambda * \text{SNR}$ ,  $\lambda$  为门限系数。门限系数的取值需要从信道中获取。

最后可以得到期望用户的信道传输函数为:

$$\bar{H}^{(u)}(n) = \text{FFT}_N\{\bar{h}^{(u)}(n)\} \quad 1 \leq u \leq U \quad (15)$$

该多用户信道估计方法是在频域构造用户的不同导频,避免在时域中重叠设计导频,造成导频互相干扰;在接收端同样是在频域估计信道的传输函数,再得到时域的信道冲击响应。充分利用OFDM时频域的符号结构,将时域的信道状态信息通过频域来求解。采用门限值的方法,使得信道能量被充分利用,得到准确地信道状态信息,理论上可以获得比基于LS的信道估计方法优越的性能。

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 门限系数的选取

基于本文第2节的所搭建系统模型,利用matlab软件,对基于DFT的多用户信道估计算法进行仿真。首先对基于DFT改进算法中的最佳门限系数进行仿真,在信噪比5dB和10dB不同的门限系数下信道估计的最小均方误差如图1所示。

从图1可以看到信噪比无论是5dB还是10dB,门限系数 $\lambda$ 均在0.015处取得最小值。因此门限系数与信噪比的取值无关。因此接下来的门限系数 $\lambda$ 取0.015。

### 4.2 误码率比较

接着,对基于DFT的信道估计算法及其改进算法,与传统的基于LS的信道估计进行了仿真比较。主要仿真参数:

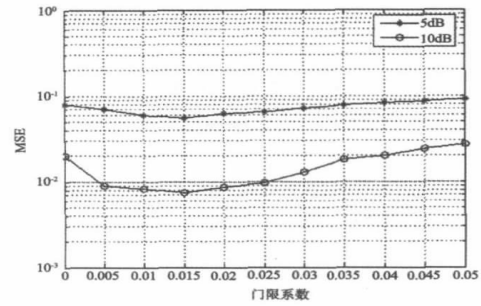


图1 不同门限系数下的最小均方误差

水声瑞利信道,调制方式QPSK,信噪比取-6:2:20。改进的DFT算法中,门限值选取  $\text{Threshold} = \lambda * \text{SNR} = 0.015 * \text{SNR}$ 。

在2个和5个用户条件下,基于DFT信道估计算法及其改进算法与传统基于LS信道估计的误码率比较如图2、3所示。在2个用户条件下,三种不同的信道估计算法最小均方误差的比较如图4所示。

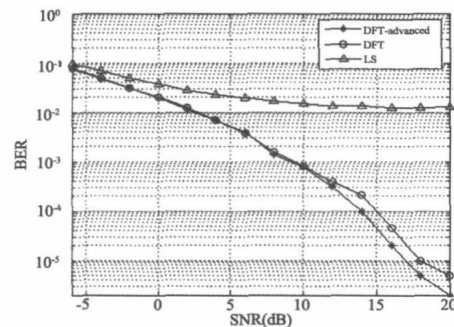


图2 2个用户数时误码率比较

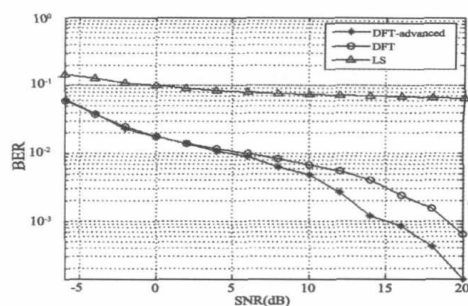


图3 5个用户数时误码率比较

从图2和图3可以看出,无论是2个用户接入还是5个用户接入,采用基于DFT的信道估计算法以及其改进算法时,水声MC-CDMA系统的误码性能都要优于采用基于LS的信道估计算法。而采用了门限系数的DFT改进算法又略优于未改进的DFT算法。无论信噪比如何,基于LS方法的误码率始终维持在 $10^{-2}$ 数量级以上,出现了误码平台,而基于DFT方法的误码率随着信噪比的提高,呈现逐渐下降的趋势。

势,在 10dB 处误码率已降至  $10^{-3}$ 。这是由于采用 LS 的信道估计算法时,各用户的导频在频域互相干扰,使得信道估计的精度大大降低,系统的误码率大大增加。而采用基于 DFT 的信道估计算法,可以很好的估计每一个用户的信道状态信息,而不受其用户导频的干扰,保证了信道估计的准确度,进而使得多用户检测的作用得以显现。对于改进算法,由于所设符号长度较水声信道冲激响应长度只长一些,所以只利用信道能量集中的部分,可以进一步提升系统性能,但提升有限。

### 4.3 最小均方误差的比较

4.2 的结论由图 4 的信道估计算法 MSE 的比较可以得到印证。基于 DFT 的估计算法及其改进算法的最小均方误差均远小于基于 LS 估计算法。基于 LS 方法的 MSE 始终维持在  $10^{-1}$  以上,而基于 DFT 的方法在 10dB 处,信道估计的 MSE 已接近  $10^{-2}$ 。

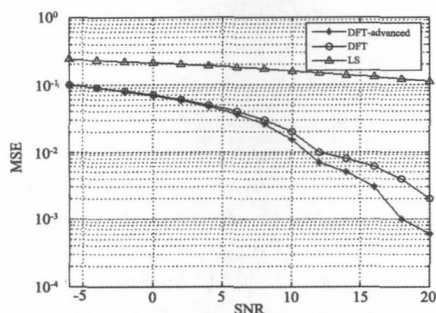


图 4 三种信道估计算法 MSE 比较

## 5 结束语

本文针对水声 MC-CDMA 上行系统提出了一种基于 DFT 的多用户信道估计算法。通过搭建水声 MC-CDMA 系统模型,在瑞利水声信道下的理论分析和仿真,结果表明,本文提出的基于 DFT 及其改进算法可以在  $10^{-2}$  最小均方误差范围内估计出每一个用户的信道信息,降低多用户干扰带来的系统误码率两个数量级以上。尽管如此,基于 DFT 信道估计算法还有待实际水池或海洋试验的进一步验证。

(上接第 366 页)

故对粒径低于  $10^{-5}$  m 的颗粒收集率较低。该结果也证明了螺旋气道长度对颗粒收集率影响较大,旋风式分离器的尺寸设计应该与搭载的柴油机排放特性相匹配。

## 4 结论

利用数值仿真的方法对旋风式分离器内的气固两相流场分布的规律和气固分离过程的特性进行了分析,得出了以下结论:

1) 分离器出口处的速度分布不均匀,越往 y 轴正方向,速度越低;压力呈阶梯状分布,越向 y 轴正方向,压力越高。

## 参考文献:

- [1] 王树彬. MC-CDMA 系统信道估计技术研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2007-3.
- [2] 孙翠珍. 正交频分复用\_OFDM\_系统中信道估计算法的研究[D]. 西安科技大学, 2005-4.
- [3] Luca Sanguinetti, Michele Morelli, Umberto Mengali. Channel estimation and tracking for MC-CDMA signals [J]. Euro Trans Telecom, 2004: 249-258.
- [4] Luca Sanguinetti, Michele Morelli, Umberto Mengali. Channel Acquisition and Tracking for MC-CDMA Uplink [J]. Transactions IEEE Trans on Vehicular Technology, 2006, 55(3): 956-967.
- [5] U Tureli, D Kivane, H Liu. Channel estimation for multicarrier CDMA [C]. in Proc IEEE Int Conf Acoustic Speech and signal Processing, Istanbul, Turkey, Jun. 5-9. 2000 5: 2009-2912.
- [6] K Deng, Q Yin, M Luo, Y. Zeng. Blind uplink channel and uniform linear arrays [C]. in Proc IEEE VTC, Los Angeles, CA. May 17-19, 2004 3: 69-73.
- [7] Aditya Trivedi, Rekha Gupta. Pilot Symbol Assisted Channel Estimation for Uplink MC-CDMA Systems using Parametric Channel Modeling [J]. IEEE, 2007: 989-993.
- [8] Bostemer P W Baier. Low cost channel estimation in the uplink receiver of CDMA [J]. mobile radio systems, 1993 47: 292-298.
- [9] Wang Feifei, Liu Siyang, Lin Xiaofeng. A Novel Channel Estimation for Uplink MC-CDMA Systems [J]. IEEE 2008: 278-282.
- [10] 涂峰, 黄瑞光. 水声信道的建模与仿真研究 [J]. 微计算机信息, 2003: 55-60.
- [11] 许俊. 水声语音通信研究 [D]. 厦门大学, 2001-6.
- [12] 方荟, 胡晓毅. MC-CDMA 水声通信系统并行干扰抵消多用户检测技术研究 [D]. 厦门大学, 2010.

### [作者简介]



方荟(1984-),男(汉族),福建省福州市人,硕士研究生,主要研究领域为多载波系统及其信号处理;胡晓毅(1966-),女(汉族),陕西省西安市人,教授,硕士研究生导师,主要研究领域为水声通信、单片机与嵌入式系统、DSP 技术。

2) 对于粒径是  $10^{-4}$  m、 $10^{-5}$  m 和  $10^{-6}$  m 的颗粒,压力降约是 3.75% 颗粒的粒径变化对压力降的影响很小。

3) 不同粒径的颗粒在旋风分离器中的收集效率明显不同,颗粒直径越大,收集效果越好,当颗粒直径为  $10^{-4}$  m 时,收集效率达到 87%,收集效果最佳。

## 参考文献:

- [1] 龚金科,等. 车用柴油机微粒捕集器捕集特性模拟计算与分析 [J]. 车用发动机, 2005 (6): 24-28.
- [2] A G Konstantopoulos, Evangelos Skaperdas. Optimized filters design and selection criteria for continuously regeneration diesel par-