

# 应用于水声 MC-CDMA 系统的一种自适应调制算法

方 荟<sup>1</sup>, 胡晓毅<sup>2</sup>

(1. 闽江学院计算机科学系, 福建 福州 350108; 2. 厦门大学信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 自适应调制技术能有效地利用系统有限的功率和频谱资源, 改善系统的误码率性能. 针对资源受限的水声 MC-CDMA 系统提出一种自适应的调制算法. 采用该方案的自适应水声 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. 分析了提出的自适应调制算法的性能, 并通过 MATLAB 系统仿真, 表明自适应调制算法较非自适应调制可以使系统性能有明显的提高, 说明了自适应调制技术在水声 MC-CDMA 中的有效性.

**关键词:** MC-CDMA; 水声通信; 自适应调制

**中图分类号:** TP309

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-7821(2012)02-0073-04

## An adaptive modulation algorithm applied to MC-CDMA underwater acoustic communication system

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

(1. Department of Computer Science, MinJiang University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

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

**Abstract:** Adaptive modulation technology can improve the system performance with finite power and high spectral efficiency. In this paper, a combining scheme of UWAC MC-CDMA and adaptive modulation is proposed in order to achieve the spectral efficiency and the frequency diversity without loss of much BER performance. The performance of the adaptive modulation algorithm is analyzed. MATLAB simulation results also indicate that the adaptive modulation algorithm can obviously improve the system performance compared with non-adaptive one. The affectivity of adaptive modulation has been verified in UWA MC-CDMA.

**Key words:** MC-CDMA; UWAC; adaptive modulation

自适应调制技术是下一代移动通信技术的关键技术之一. 不同子载波可根据各自的信道增益情况使用不同的编码调制方式, 分配不同的比特数, 分配不同的发射功率, 达到功率的最小化或速率的最大化. 近年来, 众多学者已就 MC-CDMA 自适应调制技术<sup>[1-3]</sup> 展开了一些有益的探讨. Tang 和 Stolpmann<sup>[4]</sup> 提出了等效子载波的概念, 用于速率最大化的自适应分配策略, 但是只适用于接收端采用正交恢复合并的系统. 曾国燕<sup>[2]</sup> 提出了一种选择简单分块的动态载波分配方案, 该方案对信噪比估计的要求很高. Chatterjee<sup>[5]</sup> 提出采用连续相位调制的星座映射方式, 获得了比非连续相位调制优越的性能.

但在水声通信领域关于自适应调制技术的研究还比较少. 在水声通信中可用频带较窄, 频带资源宝贵, 水声设备发射功率有限, 采用自适应调制技术可以最大限度地利用水声信道资源, 降低发射功率. 本文提出一种自适应的贪婪分配算法<sup>[1, 6]</sup>, 将其应用于水声 MC-CDMA 系统.

## 1 系统模型

### 1.1 发射端

假设系统的用户数为  $U$ , 第  $u$  个用户发送时域信号的复等效低通形式为: 
$$S_u(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{K-1} \sum_{n=0}^{SF-1} b_{u,i} C_{u,n} \exp(j2\pi)$$

收稿日期: 2012-02-29

作者简介: 方 荟 (1984-), 男, 福建福州人, 闽江学院计算机科学系助教.

胡晓毅 (1966-), 女, 陕西西安人, 厦门大学信息科学与技术学院副教授.

$(m^* SF + n) \Delta f(t - i^* T)$ , 其中  $b_{u,j}$  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.

### 1.2 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>[7]</sup>, 假设水声信道中有这样几条路径, 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:  $r_s(t) = S \cos(2\pi f_c t - \theta) + x(t) \cos(2\pi f_c t) + y(t) \sin(2\pi f_c t)$ . 式中  $S \cos(2\pi f_c t - \theta)$  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>[8]</sup>.

### 1.3 接收端

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:

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

式中,  $S_u(t)$  为第  $u$  个用户的发送信号,  $\otimes$  表示卷积操作,  $h_u(\tau_u, t)$  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  $\tau$ , 式 (1) 可以修改为:

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

为了减小多用户干扰的影响, 接收信号解扩解调前进行基于并行干扰抵消的多用户检测<sup>[9]</sup>.

## 2 性能分析

鉴于水声信道资源受限, 在保证传输速率的前提下, 提高传输的有效性成为当务之急. 由于系统采用 MC-CDMA 多载波技术, 因此传输速率是可以保证的. 自适应调制算法分为速率最大化和功率最小化两种<sup>[6]</sup>. 本文采用的是适用于固定数据速率的比特和功率自适应分配算法<sup>[1-6]</sup>, 以最小化发送功率. 该方法能达到最优的比特和功率分配结果. 其主要思想: 首先设置所有子载波的比特数为零, 然后把所有待分配的比特依次分配给子载波. 每一轮分配, 首先找到所需增加功率最小的那个子载波, 然后给该子载波分配若干个比特. 每次分配的比特数 (分配步长) 由系统调制方式决定. 这样循环下去, 直到所有的比特得到分配. 最后计算各个子载波保证一定的误码率时所需要的发射功率.

对于 MC-CDMA, 我们采用了“等效子载波”的概念<sup>[2-3]</sup>, 即  $N_c$  个子载波首先被连续划分为若干个扩频支路, 每个扩频支路生成一个“等效子载波”. 为了简化问题, 设定每个扩频支路中的各子载波实行等功率分配, 同时由于这些子载波上所分配的比特数也相同, 所以这个“等效子载波”的分配信息就可以完全代表此扩频支路中每个子载波的分配情况. 为了分析方便, 假设理想信道估计, 且信道状态信息能及时准确地反馈给发射机.

此算法的优化目标为  $\min_{b_{u,j} \in D} \sum_{j=1}^K P_j(b_{u,j})$ , 约束条件为  $\sum_{j=1}^K b_{u,j} = R_b$ , 其中  $b_{u,j}$  是用户  $u$  第  $j$  个“等效子载波”所分配的比特数,  $P_j$  是传送  $b_{u,j}$  比特所需要的发送功率,  $R_b$  是一次分配中要分配给各“等效子载波”的总的信息比特数,  $D = \{0, 1, 2, 3, \dots, M\}$  是  $b_{u,j}$  的取值范围,  $M$  是最高调制阶数.

第  $j$  组扩频支路的平均接收信噪比为:

$$\text{SNR}_j = \frac{E \left( \left| \sum_{n=(j-1)^* SF+1}^{j^* SF} G_n H_n \sqrt{P_n} b_{u,j}^* C_{u,n} \right|^2 \right)}{E \left( \left| \sum_{n=(j-1)^* SF+1}^{j^* SF} G_n n_n \right|^2 \right)}.$$

考虑正交比合并系数, 所以合并系数:  $G_n = C_{u,n} \mathbf{H}_n^* / |\mathbf{H}_n|^2$ , 平均接收信噪比可以简化为:

$$\text{SNR}_j = \frac{\text{SF}^2 \cdot P_j}{\sigma_{nj}^2 \left( \sum_{n=(j-1)\text{SF}+1}^{j\text{SF}} \frac{1}{|H_n|^2} \right)}$$

因为 QAM 的误比特率为:

$$\text{BER} \approx \frac{2}{b_{u,j}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2^{b_{u,j}}}} \right) \text{erfc} \left( \sqrt{\frac{1.5 \text{SNR}_j}{2^{b_{u,j}} - 1}} \right)$$

其中 erfc 为误差函数. 经过等量变换得到, 并令发射功率系数:

$$S = \frac{\text{SNR}_j}{2^{b_{u,j}}} = \frac{2}{3} \left( \text{erfc}^{-1}(A) \right)^2$$

可以看到系数  $S$  和 BER 是一一对应的. 考虑到水声通信对误码率水平的要求较无线通信要低, 修正  $S$  值<sup>[1]</sup>, 使之与相应的 BER 的数值对应.

自适应调制分配算法执行过程如下:

1) 进行初始化, 设置所有“等效子载波”当前被分配的比特数为 0. 即令  $b_{u,j} = 0, j = 1, 2, \dots, K$ .

2) 分别计算每个“等效子载波”增加  $d$  个比特时, 所需要增加的平均发射  $\Delta P_j$  (这里  $d$  为比特分配的步长, 由实际系统所采用的调制方式决定), 计算按下式进行:

$$\Delta P_j = \begin{cases} P_j(b_{u,j} + d) - P_j(b_{u,j}) & (b_{u,j} + d \leq m) \\ 0 & (b_{u,j} + d > m) \end{cases}$$

其中  $m$  为每个“等效子载波”所能被分配的比特数目的最大值 (由实际系统中采用的最高阶的调制方式决定), 而发射功率的计算式为:

$$P_j(b_{u,j}) = \frac{S \cdot (2^{b_{u,j}} - 1) \cdot \sigma_m^2 \cdot \left( \sum_{n=1}^{\text{SF}} \frac{1}{|H_n|^2} \right)}{\text{SF}^2}$$

其中,  $S$  如前所述, 由对应的 BER 得到.

3) 比较所有的  $\Delta P_j$ , 找到功率增量值最小、且不为零的“等效子载波” $j$ , 将该“等效子载波”当前被分配的比特数增加  $d$ . 即  $b_{u,j} = b_{u,j} + d$ .

4) 计算当前分配的比特总数  $R_{\text{total}} = \sum_{j=1}^K b_{u,j}$ , 如果  $R_{\text{total}} < R_b$ , 跳至 3). 如果  $R_{\text{total}} = R_b$ , 则比特分配结束.

可见, 所有子载波的比特分配是个迭代的过程. 以最小化发射功率作为优化目标, 在分配比特时, 增加的比特数就取决于功率的增量, 而功率的计算恰恰与等效子载波的信噪比有关. 信噪比反映了各个子信道的状态. 在理想信道估计的情况下, 能够获取准确的各子信道的信息, 子信道条件好的, 衰落小的, 需要增加的发射功率就小, 就可以优先增加比特数; 反之, 子信道条件不好的, 衰落大的, 暂缓或不增加比特数. 至于增加多少比特, 取决于采取的具体调制方式和误码率要求的水平. 经过自适应调制之后, 比特分配在信道条件好的子载波上, 而且分配的过程始终遵循发射功率最小的原则. 在恶劣的水声信道条件下, 传输比特可以避开深衰落区域. 在发送相同的比特数时, 可以最大限度地降低发射的功率.

### 3 仿真结果与分析

对采用自适应调制算法的 MC-CDMA 水声系统与传统的水声 MC-CDMA 系统进行 MATLAB 仿真比较. 仿真参数如下: 瑞利水声信道, 用户数  $u = 8$ ; 子载波为 385. 可选的调制方式为 0、QPSK、16QAM、64QAM, 对应调制后的符号内包含的比特数为 0、2、4、6, 比特分配的步长均为 2, 每个子信道最大比特数为 6, 发射功率系数  $S$  取 3.3, 对应误码率. 测试信噪比 4、8 和 12 dB.

图 1-3 给出了在信噪比 4、8 和 12 dB 条件下, 调制方式分别为模式 1 {0、QPSK}, 模式 2 {0、QPSK、16QAM}, 模式 3 {0、QPSK、16QAM、64QAM}. 且不同用户接入数的情况下系统误码性能的比较. 从图中可以看出, 无论是用户数和信噪比如何, 采用模式 1 {0、QPSK} 的自适应调制方式的水声 MC-CDMA 系统性能优于传统的未采用自适应调制方式的水声 MC-CDMA 系统. 而采用模式 2 和模式 3 自适应调制方式, 其系统的误码性能反而差于传统的水声 MC-CDMA 系统, 且误码出现了严重的平台. 这主要是因为: 模式 2 和模式 3 采用了高阶调制的方式, 在进行相干解调时, 判决空间减小, 加之在多用户接入的条件下, 尽管采用了一定的多用户检测, 但多用户干扰仍然存在, 使得误码性能大大降低, 恶劣到无法接受的地步. 而模式 1 采用的是低阶调制和不传比特方式, 在进行相干解调时, 判决空间较大. 显然不同用户会根据各自不同的信道增益条件, 自适应调制不同的比特数在各自的子载波上进行传输, 也在一定程度上减少了多用户干扰的几率.

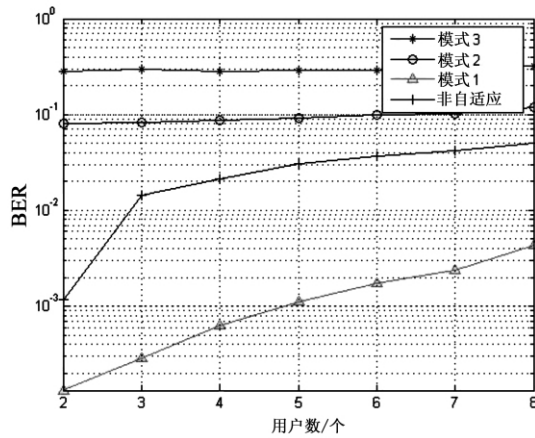


图 1 4 dB 下误码率与用户数的关系

Fig. 1 Relationship between BER and user under number 4 dB.

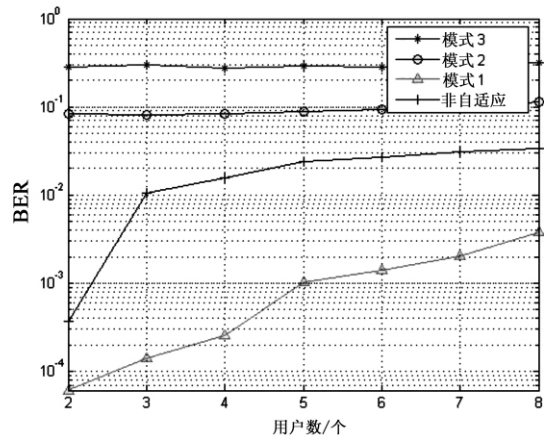


图 2 8 dB 下误码率与用户数的关系

Fig. 2 Relationship between BER and user under number 8 dB.

#### 4 结语

提出针对水声 MC-CDMA 系统的一种自适应调制算法,并通过瑞利水声信道下的理论分析和仿真,结果表明,此改进的水声 MC-CDMA 系统较传统的水声 MC-CDMA 系统的误码性能有很大的提高。尽管如此,自适应调制技术要应用于实际的水声领域,还有相当的挑战。如自适应调制需要信道状态信息的准确反馈<sup>[6,10]</sup>,在恶劣的水声信道条件下,准确的信道估计是很难做到的。特别在多用户干扰存在的条件下,如何能做到精确的信道估计,甚至在信道估计不准确的条件下,如何进行较优的自适应调制,还有待进一步的研究。因此,在下一步的工作中,还需要在实际的水池或海洋实验中验证和调整算法的参数选择,以获得水声 MC-CDMA 系统较优的自适应调制方案。

#### 参考文献:

- [1] 尹斐斐. MC-CDMA 系统自适应调制算法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2006.
- [2] 曾国燕, 郑侃, 黄琳, 等. MC-CDMA 系统中自适应调制算法的性能分析[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(6): 1 005 - 1 008.
- [3] 李娜. MC-CDMA 系统中动态资源分配算法的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009.
- [4] Tang C, Stolpmann V J. Multiple users adaptive modulation schemes for MC-CDMA [C]. IEEE Communication Society Globecom, 2004: 3 823 - 3 827.
- [5] Chatterjee S, Fernando W A C, Wasantha M K. Adaptive modulation based MC-CDMA systems for 4G wireless consumer applications [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4): 995 - 1 003.
- [6] 孙群龙. 多载波系统中的自适应资源分配研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2009.
- [7] 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, 19(5): 55 - 60.
- [8] 许俊. 水声语音通信研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2001.
- [9] 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: 厦门大学, 2010.
- [10] 李翠然, 谢健骊, 李承恕. 改进的多载波 CDMA 系统性能分析[J]. 信号处理, 2006, 22(3): 445 - 448.

(责任编辑: 唐诚焜)

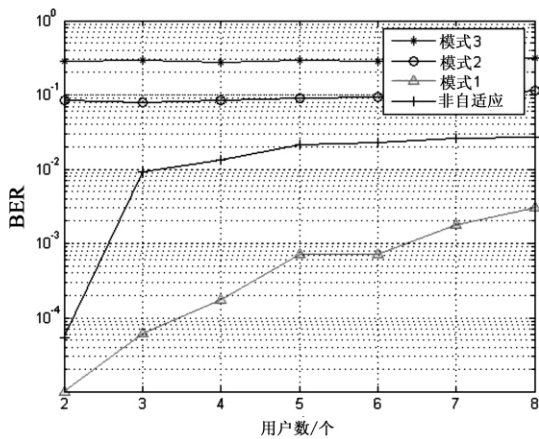


图 3 12 dB 下误码率与用户数的关系

Fig. 3 Relationship between BER and user under number 12 dB.