

基于梳状导频的 OFDM 系统子载波和功率分配

尹 胤, 杨宇航, 闫正航

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 提出一种根据梳状导频进行信道估计得到带有误差的信道信息, 来完成自适应比特装载的算法。把正交频分复用子载波进行分组, 利用基于梳状导频的信道估计对信道时变进行跟踪, 即时获取信道信息来完成分配算法。将子信道的分配和子信道上的比特、功率分配分离开来, 以降低计算复杂度。仿真结果表明与静态信道分配方案的等比特分配算法相比, 该算法可以节约发送功率大于 10 dB。

关键词: 正交频分复用; 边值自适应; 梳状导频; 自适应分配

Sub-channel and Power Allocation for OFDM Systems Based on Comb-pilots

YIN Yin, YANG Yu-hang, YAN Zheng-hang

(School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

【Abstract】 This paper proposes a method for adaptive bit loading under the imperfect CSI gotten by the channel estimation based on the comb-pilots insertion. The subcarriers are divided into a few groups and then CSI based on the channel estimations are got by comb-pilots to track the time-varying channel. It implements the bit loading algorithm. Sub-channel allocation and bit loading are performed to decrease the computation. The simulation results show that this algorithm can save more than 10 dB compared with the equal bit allocation algorithm of static sub-channel allocation methods.

【Key words】 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM); Margin Adaptive(MA); comb-pilots; adaptive allocation

1 概述

正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术与常规调制技术相比, 具有很高的频谱利用率和抗多径的能力。无线通信环境中信道信息(Channel State Information, CSI)随时间变化明显, 需要不断更新自适应比特装载和功率控制的策略。将自适应技术应用于 OFDM 系统中, 根据各子信道的瞬时估计值动态地分配传输比特数和发送功率, 可以优化整个系统的性能。

“注水法”是指根据每个子载波不同的信道情况来决定其不同的调制方案^[1], 在某一固定的发射功率下, 将达到香农定理的信道容量的极限。“注水法”能够适应信道变化缓慢的环境, 然而在无线环境中的运用受到很大限制。(1)它针对每个子载波进行计算, 产生较大计算量;(2)无线通信中信道是时变的, 要达到预计的效果很困难;(3)由于每个子载波都有可能采用不同的调制方案, 发送端则需向接收端发送大量的信令来传递调制策略以完成正确的解调。因此, 提出一种次优化的算法来解决上述问题。

本系统利用梳状导频信号进行信道估计, 已有研究表明这是一种有效和简单的方法^[2-3]。利用其得到带有误差 CSI, 完成对分组后的 OFDM 子载波的自适应比特装载和功率控制。与现有“注水法”算法比较, 系统仿真表明可以得到相近的 QoS 表现, 而且明显地减少了系统为解调传递的信令。

2 系统模型和问题阐述

2.1 信道估计

导频符号在数据符号中主要有块状导频和梳状导频^[2]这 2 类插入方式。梳状导频(如图 1)同块状导频相比, 能更好地

适应信道的时变特性^[3], 因此, 本文选用梳状导频插入的信道估计方式。

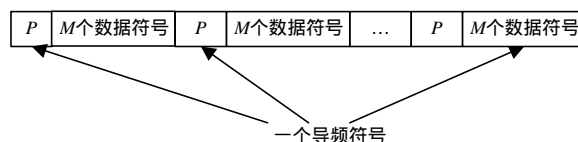


图 1 梳状导频插入的数据格式

在数据符号中每 M 个数据符号插入一个导频符号, 则在一个 OFDM 符号中有 $\frac{K}{M+1}$ 个导频符号, 也可以通过以下的公式来表示:

$$X(k) = X(iM + j) = \begin{cases} X_p(i) & j = 0 \\ X_d(iM + j) & j = 1, 2, \dots, M-1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $X_p(i)$ 是第 i 个导频符号; $X_d(j)$ 表示第 j 个数据符号。

$i = 0, 1, \dots, \frac{K}{M+1} - 1$ 。

2.2 系统模型

下行链路中采用自适应技术的多用户 OFDM 系统如图 2 所示。

假设系统有 K 个用户、 N 个子信道, 每个 OFDM 符号期间数据比特数为 $R_k(k=1, 2, \dots, K)$, 第 k 个用户在第 n 子信道的瞬时信道增益用 $\alpha_{k,n}$ 来表示。在发送端, 每个用户的串

作者简介: 尹 胤(1983 -), 女, 硕士研究生, 主研方向: 通信与信息系统; 杨宇航, 教授、博士生导师; 闫正航, 博士研究生

收稿日期: 2007-12-15 **E-mail:** elva747@163.com

行比特流根据信道的估计值,按自适应算法被分配到各个子信道。假设某一子信道被分配到 c 个比特数据,则在该子信道采用 MQAM($M=2^c$)调制方式。经过自适应调制后的各路信号被并行送入 IFFT 单元,再插入保护间隔。OFDM 系统一般采用循环前缀(CP)的形式,这样只要信道的最大传输时延小于保护间隔,就可以消除符号间干扰(ISI)。然后信号经由衰落信道传送到接收端,系统利用一个专用信道实时传输自适应分配信息。在接收端,去除接收信号中的保护间隔,经 FFT 后获得解调信号,各用户的数据检测器根据专用信道中的分配信息来进行子信道的提取和信号的自适应解调。

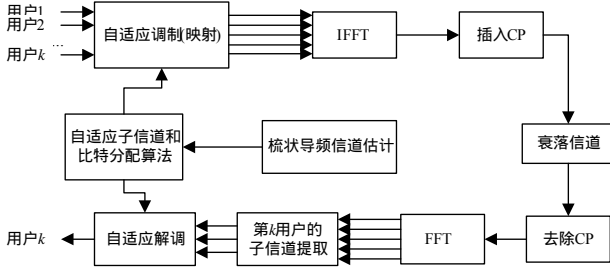


图2 多用户 OFDM 系统框图结构

假设第 k 用户分配给第 n 子信道的比特数用 $c_{k,n}$ 表示, $c_{k,n} \in \{1, 2, \dots, c_{\max}\}$, c_{\max} 为一个 MQAM 符号所携带的最大比特数。因为在每个 OFDM 符号期间一个信道只能被一个用户占用,所以若 $c_{k,n} \neq 0$, 则对任意 $k' \neq k$, $k' \in \{1, 2, \dots, K\}$, 有 $c_{k',n} = 0$ 。每个 OFDM 符号期间各用户的数据比特数为

$$R_k = \sum_{n=1}^N c_{k,n} \rho_{k,n} \quad (2)$$

其中, $\rho_{k,n} = \begin{cases} 0 & \text{若 } c_{k,n} = 0 \\ 1 & \text{若 } c_{k,n} \neq 0 \end{cases}$ 。

对于给定的传输质量 QoS(主要用误比特率 p_e 来衡量),假设在接收端正确解调所需的最小信号功率为 $f(c)$, 则第 k 用户对第 n 个子信道的发送功率为

$$P_{k,n} = \frac{f_k(c_{k,n})}{\alpha_{k,n}^2} \quad (3)$$

系统需要发送的总功率为

$$P_T = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N P_{k,n} \rho_{k,n} = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{f_k(c_{k,n})}{\alpha_{k,n}^2} \rho_{k,n} \quad (4)$$

这里采用 MQAM 调制,则 c 比特/符号所需的功率为

$$f(c) = \frac{N_0}{3} [Q^{-1}(\frac{p_e}{4})]^2 (2^{c-1}) \quad (5)$$

其中, N_0 为加性高斯白噪声(AWGN)的单边功率谱密度,而

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$$

在边值自适应准则下,自适应分配算法的目的是确定子信道、比特分配方案,即寻找最佳的 $c_{k,n}^2$, 使系统的发送总功率 p_T 最小化。这样,得到的优化模型为

$$\min_{c_{k,n} \rho_{k,n}} P_T = \min_{c_{k,n} \rho_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{f_k(c_{k,n})}{\alpha_{k,n}^2} \rho_{k,n} \quad (6)$$

使对所有 k , $R_k = \sum_{n=1}^N c_{k,n} \rho_{k,n}$ 。

3 动态子信道分配

在分配之前,先根据用户业务量大小确定应分得的子信道数目,然后根据各用户的瞬时信道增益动态地分配子信道。

这一阶段假设调制方式固定,且各用户要求的误比特率相同,则问题是使得

$$\min_{\rho_{k,n}} P_T = \min_{\rho_{k,n}} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{P}{\alpha_{k,n}^2} \rho_{k,n} \quad (7)$$

式中, P 为一个信息符号的传输功率。

在文献[4-5]中提出的子信道分配的试探算法,尽管是一种次最佳算法,但计算复杂度大大低于文献[6]中提出的 Hungarian 算法,能满足快衰落信道的实时分配要求,而且性能也比较接近 Hungarian 算法。试探算法分 2 步来实现子信道动态分配,即初始分配和迭代逼近。先根据各用户的信道特性初步给出分配矩阵 ρ , 再通过迭代交换不断地逼近最终结果,以尽可能地减小发送总功率。

3.1 初始分配

首先根据每个用户对各子信道的增益按从高到低的顺序排列,将这些子信道序号组成一个 $K \times N$ 的矩阵 N_{sort} 。这里假设一个用户数 $K=3$,子信道数为 $N=8$ 的 OFDM 系统(实际子信道数和用户数一般很大),且用户 1 和用户 2 需要的子信道数为 3,而用户 3 需要的子信道数为 2。各用户的信道增益分别见表 1 所列。

表1 信道增益分配

用户	子信道							
	1	2	3	4	5	6	7	8
用户 1	0.99	0.74	0.84	0.93	1.11	1.00	0.80	0.60
用户 2	1.05	1.02	0.81	0.85	0.57	0.66	0.98	0.67
用户 3	0.57	0.67	0.95	1.05	1.02	0.75	0.78	0.87

那么得到的排序矩阵为

$$N_{\text{sort}} = \begin{bmatrix} 5 & 6 & 1 & 4 & 3 & 7 & 2 & 8 \\ 1 & 2 & 7 & 4 & 3 & 8 & 6 & 5 \\ 4 & 5 & 3 & 8 & 7 & 6 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

然后从矩阵 N_{sort} 的第 1 列子信道序号开始,依次给用户 1、用户 2、用户 3 分配子信道。如果该子信道还未分配,并且该用户还没被分配完所需的子信道数,则将子信道分配给该用户,且在分配矩阵 ρ 的相应位置赋值为 1,该列的其余值为 0。如果遇到一个子信道同时在 2 个用户的排序相同的情况时,则将它分配给增益较大的那个用户。完成一系列的分配后转向下一列,直到所有子信道分配完毕。按以上方法得到的初始分配矩阵为

$$\rho_{\text{ini}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3.2 迭代逼近

这一阶段通过子信道在不同用户之间迭代交换来减小系统的发送总功率。对每一组用户组合 (i, j) , $(i, j=1, 2, \dots, K)$, 且 $i \neq j$, 作以下计算:

(1)对暂时分配给用户 i 的子信道 S_i 集中的每一个元素 n , 计算如果将它分配给用户 j 的功率减小量 $dp_{ij}[n] = p_{i,n} - p_{j,n}$ 。然后找出使减小量最大的那一个子信道 n_{ij} , $n_{ij} = \arg \max_{n \in S_i} dp_{ij}[n]$, 且最大的功率减小量 $\Delta p_{ij} = dp_{ij}[n_{ij}]$ 。

(2)对用户 j 作同样的计算,找出 $n_{ji} = \arg \max_{n \in S_j} dp_{ji}[n]$, 且 $\Delta p_{ji} = dp_{ji}[n_{ji}]$ 。

(3)计算如果将用户 n_{ij} 的子信道和用户的 n_{ji} 子信道交换时,系统将减小的总功率 $p_{ij} = \Delta p_{ij} + \Delta p_{ji}$ 。

(4)在所有组合 (i, j) 中,找出系统减小总功率 $\{p_{ij}\}$ 中最大

的那一个 $p_{i,j}$, 以及相应的用户 (\hat{i}, \hat{j}) 和子信道 $n_{i,j}$ 和 $n_{j,i}$ 。若 $p_{i,j} < 0$, 说明系统总功率已不能再减小 , 结束分配 ; 若 $p_{i,j} > 0$, 则进行 $n_{i,j}$ 和 $n_{j,i}$ 子信道在用户 (\hat{i}, \hat{j}) 之间的交换。然后更新分配矩阵 ρ , 使 $\rho_{i,n_{i,j}} = 0, \rho_{i,n_{j,i}} = 1, \rho_{j,n_{j,i}} = 0, \rho_{j,n_{i,j}} = 1$ 。

(5)重复步骤(1)~步骤(4)。

经迭代逼近后, 得到的最终分配矩阵为

$$\rho = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

得到各用户分得的子信道集 $\{S_1, S_2, \dots, S_K\}$, $U_k^K S_k = \{1, 2, \dots, N\}$ 。在上例中, $S_1 = \{4, 5, 6\}$, $S_2 = \{1, 2, 7\}$, $S_3 = \{3, 8\}$ 。

4 子信道上的比特、功率分配

完成子信道分配后, 分别对每个用户在各自分得的子信道上进行自适应比特和功率分配, 分配依然按照 MA 优化准则, 使每个用户的发送总功率最小化。其基本方法是: 首先将所有子信道的比特数设置为 0, 然后依据各子信道的瞬时增益对子信道进行比特分配, 每次分配 1 个比特, 选择所需发送功率最小的那个子信道进行分配。

下面给出在第 k 用户分得的子信道上比特分配具体过程(假设 $S_k = \{n_1, n_2, \dots, n_{N_k}\}$, N_k 为第 k 用户分得的子信道数)。

(1)初始化

对所有 n , 令 $c_{k,n} = 0$; $\Delta p_{k,n} = \frac{f(1) - f(0)}{\alpha_{k,n}^2}$; $s = s_k$ 。

(2)比特分配

重复以下步骤 R_k 次:

$$\hat{n} = \arg \min_{n \in S_k} \Delta p_{k,n}; \quad c_{k,n}^{\wedge} = c_{k,n}^{\wedge} + 1$$

如果 $c_{k,n}^{\wedge} = C_{\max}$, 则 $s = s - \{\hat{n}\}$; $\Delta p_{k,n}^{\wedge} = \frac{f(c_{k,n}^{\wedge} + 1) - f(c_{k,n}^{\wedge})}{\alpha_{k,n}^2}$ 。

(3)完成

$\{c_{k,n}^{\wedge}\}_{n \in S_k}$ 即为最终比特分配的结果。

假设这里 $R_k = [10, 10, 5]$, 按上面得到的结果来分配比特。可得到:

$$c_{1,4} = 3, \quad c_{1,5} = 4, \quad c_{1,6} = 3, \quad c_{2,1} = 4, \quad c_{2,2} = 3, \quad c_{2,7} = 3, \quad c_{3,3} = 3, \quad c_{3,8} = 2$$

5 仿真

为了检验自适应分配算法(AA)的性能, 通过 Matlab 仿真将本算法与传统的 OFDM 系统算法(这里以 OFDM-TDMA 为例)作比较。

假定多径频率选择性衰落信道的带宽为 5 MHz, 信道中 AWNG 的单边功率谱密度为 $N_0 = 1$, 时变信道对第 1 个 OFDM 符号的冲激响应为

$$h_l(t) = \sum_{i=0}^{r-1} \mu_i(i) e^{j\theta_i(i)} \delta[t - \tau_i(i)] \quad (8)$$

其中, $\mu_i(i)$, $\theta_i(i)$, $\tau_i(i)$ 分别是第 i 条路径的幅度、相位和相对时延; r 是路径数。各路径的随机变量 $\mu_i(i)$ 满足 Rayleigh 分布; $\theta_i(i)$ 满足均匀分布且相互独立; $\tau_i(i)$ 满足最大值为 τ_{\max} 的均匀分布。 $h_l(t)$ 是均值为零的复高斯变量, 具有指数型功率延迟分布特性。

仿真中用到的模拟参数如表 2 所示。

表 2 模拟参数

信道带宽	用户数	分布特性	多径路数	子信道数	子信道最大比特数
5 MHz	3	指数	5	128	6

图 3 为自适应分配算法 OFDM-TDMA 的误比特率(BER)和平均比特信噪比 E_b/N_0 的关系曲线。从图中可以看出, 为达到相同 BER, 本自适应分配算法(AA)相比 OFDM-TDMA 的自适应比特分配算法(TDMA/ABA), 可以节约 5 dB ~ 6 dB 的平均每比特信噪比 SNR; 和 OFDM-TDMA 的等比特分配算法(TDMA/EBA)相比, 可以节约的平均每比特 SNR 超过 10 dB。这足以说明自适应分配算法的优越性。

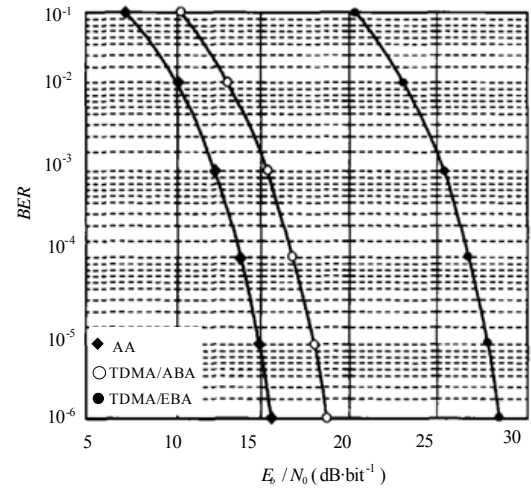


图 3 误比特率和平均比特信噪比的关系曲线

6 结束语

本文提出的比特和功率分配算法适应于多径频率选择性衰落信道的自适应子信道。在 MA 优化准则下, 将子信道的动态分配和子信道上的比特、功率分配分离开来, 这样既降低了算法的复杂度, 又优化了系统的性能。仿真结果表明, 该自适应分配算法大大优于一些传统的静态分配方案。

参考文献

- [1] Wong C Y, Cheng R S, Letaidf K B, et al. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit and Power Allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747-1758.
- [2] 周利岗, 傅海阳. OFDM 系统中基于导频插入的信道估计技术[J]. 通信技术, 2003, (8): 27-29.
- [3] 杨 祥, 韦 岗. 基于梳状导频的 OFDM 分组自适应比特装载与功率控制[J]. 电讯技术, 2005, (3): 64-67.
- [4] Wong C Y, Tsui C Y, Cheng R S, et al. A Real-time Sub-carrier Allocation Scheme for Multiple Access Downlink OFDM Transmission[C]//Proc. of the 50th Vehicular Technology Conference. Amsterdam, Netherlands: [s. n.], 1999: 1124-1128.
- [5] Pietrzyk S. Multiuser Subcarrier Allocation for QoS Provision in the OFDM Systems[DB/OL]. (2007-06-08). <http://www.google.com/www.ubicom.tudelt.nl/docs/PID11821.pdf>.
- [6] Khun H W. The Hungarian Method for the Assignment Problem[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1995, (2): 83-97.