多用户 OFDM 系统中的联合子载波和功率分配算法

李晓辉，刘乃安，易克初，顾华玺，寇卫东
(西安电子科技大学 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室,陕西 西安 710071)

摘要：正交频分复用系统中的动态资源分配对提高频谱效率起着至关重要的作用,故提出了一种多用户正交频分复用系统中的新型子载波和功率分配算法,根据用户速率请求进行子载波分配,并结合改进的多用户注水算法,在提高系统频谱效率的同时,满足用户的误比特率要求.研究结果表明,该算法在保证误比特率和用户间公平性的前提下提高频谱效率.

关键词：多用户;正交频分复用;注水算法;资源分配;公平性
中图分类号:TN929.5 **文献标识码**:A **文章编号**:1001-2400(2006)03-0366-05

Joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM systems and its performance

LI Xiao-hui, *LIU Nai-an*, *YI Ke-chu*, *GU Hua-xi*, *KOU Wei-dong*
(State Key Lab. of Integrated Service Networks, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: Adaptive resource allocation is crucial to improving the spectrum efficiency for OFDM systems. A novel resource allocation algorithm is developed here to assign subcarriers and power to each user. According to the user's rate requirement, the subcarriers are allocated with proportional fairness. The improved multiuser water-filling algorithm, with the consideration of the bit error rate, is used to determine the power on each subcarrier. The results show that the proposed algorithm can obtain a high spectrum efficiency and that the bit error rate and the fairness among the users are considered simultaneously.

Key Words: multiuser; OFDM; water-filling algorithm; resource allocation; fairness

目前,正交频分复用(OFDM)是业界公认的下一代无线通信系统中的核心技术,具有抗符号间干扰和抗频率选择性衰落等特性[1];而 OFDM 的动态资源管理技术将对提高系统频谱效率起着至关重要的作用[2].

为了实现多用户的接入,OFDM 可以与 TDMA,FDMA 以及 CDMA 等多址接入方式相结合,其中 OFDM-FDMA(OFDMA)和 OFDM-CDMA(MC-CDMA)是第 4 代(4G)移动通信系统中具有竞争力的技术.由于在频率选择性衰落环境中,OFMDA 系统可使用动态子载波、比特及功率分配等技术获取巨大的性能增益,用户可选择对其来说最佳的子信道来发送数据,所以 OFDMA 的性能优于 MC-CDMA[3].

目前,已有很多文献[3~6]对 OFDM 系统中的动态资源管理算法进行了研究,但这些文献没有同时既考虑用户比例分配,又考虑不同用户误比特率需求不同.针对这一问题,笔者提出了一种新型的子载波和功率分配算法.该算法在资源分配的过程中,通过子载波数目的预分配保证用户间的公平性;通过改进的多用户注水算法,实现基于用户误比特率需求的动态功率分配.

收稿日期:2005-06-11
基金项目:华为基金资助项目(YJCB2004002WL);通信抗干扰技术国家重点实验室基金资助项目(51434140104DZ0105);西安电子科技大学研究生创新基金资助项目(创 05014)
作者简介:李晓辉(1972-),女,副教授,西安电子科技大学博士研究生.

1　系统模型

假设 OFDM 系统中共有 M 个用户，N 个子载波. 此外，假设用户信道状态信息(CSI)已知，发送端的动态资源管理模块可以根据用户和信道两方面的信息控制子载波、比特和功率分配模块. 用户数据经过自适应的子载波、比特和功率分配后，再经过快速反傅里叶变换(IFFT)模块实现 OFDM 功能，并增加循环前缀作为保护间隔，此后将信息发送到信道上.

在接收端，第 m 个用户的接收机收到来自信道的信息，在去保护间隔后，经过 OFDM 解调(FFT)，根据相对应的比特和子载波分配信息提取数据. 多用户 OFDM 系统的基本结构如图 1 所示.

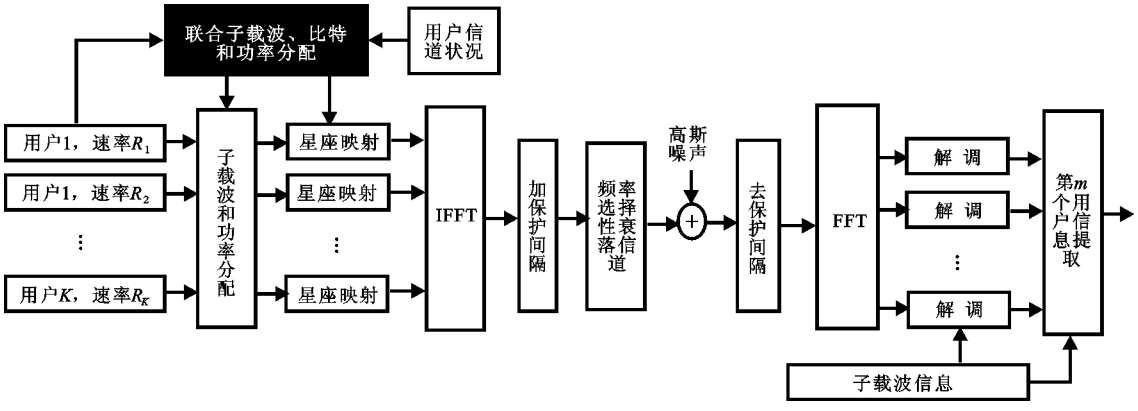

图 1　多用户 OFDM 系统的组成框图

OFDM 资源分配的目标可分为两个方面：一是在系统发射总功率的限制下，使得频谱效率最大；二是在一定的速率限制下，误比特率最小. 前者在近年来的研究中得到了更多的关注. 在此基础上，根据用户的带宽和误比特率需求，提出一种新型的多用户子载波、比特和功率资源分配算法，使频谱效率得到优化，同时满足用户误比特率及用户间公平性的要求.

2　数学描述

2.1　问题的描述

信道容量可通过山农公式[2]得到，表示为

$$C = B\log_2(1 + S/N) \quad , \tag{1}$$

其中 S/N 是高斯信道的输入功率与噪声之比，B 表示信道带宽.

定义最大频谱效率

$$\eta_{\max} = C/B = \log_2(1 + S/N) \quad . \tag{2}$$

如果传输信道被分成 N 个窄带的子信道，则最大频谱效率可表示为

$$\eta_{\max} = \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\rho_{m,n}\log_2(1 + p_{m,n}h_{m,n}^2/\sigma_{m,n}^2) \quad , \tag{3}$$

其中 $\rho_{m,n}$ 等于 1 或 0，表示第 m 个用户是否使用子载波 n，$p_{m,n}$ 表示第 m 个用户在第 n 个子载波上的发射功率，$h_{m,n}$ 表示第 m 个用户第 n 个子载波的信道增益，$\sigma_{m,n}^2$ 表示噪声功率.

令 $g_{m,n} = h_{m,n}^2/\sigma_{m,n}^2$，因此目标为频谱效率最大化的公式可简化表示为

$$\max_{p_{m,n},\rho_{m,n}} \sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}\rho_{m,n}\log_2(1 + p_{m,n}g_{m,n}) \quad , \tag{4}$$

限制条件：(A) $\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}p_{m,n} \leqslant P_{\text{total}}$；(B) $p_{m,n} \geqslant 0$，$\forall m,n$；(C) $\rho_{m,n} = \{0,1\}$，$\forall m,n$；(D) $\sum_{m=1}^{M}\rho_{m,n} = 1$，$\forall n$.

限制条件(A)和(B)用于保证各子载波上的发射功率大于 0，且发射功率总和不超过规定值；(C)和(D)保证每

个子载波供且仅供一个用户使用.

为了保证比例公平,令 $N_m = \sum_{n=1}^{N} \rho_{m,n}$ 表示为每个用户分配的子载波数,需要增加限制条件(E):

$$N_1 : N_2 : \cdots : N_M = R_1 : R_2 : \cdots : R_M \quad .$$

此外,为了保证不同用户的误比特需求,借鉴文献[6]中噪声容限的概念表示用户所能容忍的特定误比特率所对应的 SNR 差值(SNR gap),用 Γ 表示,则用户 m 的 SNR gap 可表示为 Γ_m.

SNR gap 对优化目标(4)的影响可表示为

$$\max_{p_{m,n},\rho_{m,n}} \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} \rho_{m,n} \log_2(1 + p_{m,n} g_{m,n}/\Gamma_m) \quad . \tag{5}$$

2.2 多用户注水

用改进的多用户注水算法确定各用户所使用子载波的功率,是整个优化问题的核心.

在单用户注水算法中,存在一条注水线 K,用户在每条子载波上的传输功率 p_n 等于注水线 K 与该子载波上信道噪声比 $g_n = |h_n|^2/\sigma^2$ 的倒数的差值,表示为[2]

$$p_n = (K - 1/g_n)^+ \quad , \tag{6}$$

其中 $(x)^+ = \max(0,x)$.

在多用户系统中,每个用户都将有一条注水线 k_m. 为了使所有用户的注水线在同一水平线上,引入比例系数 b_m 将每个用户的注水线升高或降低,即令 $k_m^* = b_m k_m$,且所有的 k_m^* 相同. 不失一般性,可设 k_m^* 为常数 1,于是 m 用户在子载波 n 上经过 b_m 缩放的传输功率 $p_{m,n}^*$ 可表示为

$$p_{m,n}^* = (1 - b_m/g_{m,n})^+ \quad , \tag{7}$$

其中 $p_{m,n}^* = b_m p_{m,n}$.

为了在功率分配时考虑用户的误比特率要求,引入比例因子 α,$\alpha > 0$,令 $b_m = \alpha\Gamma_m$, 公式(7)改写为

$$p_{m,n}^* = (1 - \alpha\Gamma_m/g_{m,n})^+ \quad . \tag{8}$$

用户 m 使用的总功率 $P(m)$ 可表示为 $$P(m) = \sum_{n=1}^{N} p_{m,n} \quad . \tag{9}$$

进一步可得 $$\sum_{n=1}^{N} p_{m,n}^* = \sum_{n=1}^{N} \alpha\Gamma_m p_{m,n} = \alpha\Gamma_m P(m) \quad , \quad \forall m = 1,\cdots,M \quad . \tag{10}$$

由于 $\sum_{m=1}^{M} P(m) = P_{\text{total}}$,结合公式(8)和(10),可得出一个 $M+1$ 阶线性方程组,从而得出 α 和 $P(m)$. 在已知 Γ_m 和 $g_{m,n}$ 的情况下,通过(8)可得各子载波上的功率分配.

经过子载波和功率分配后,通过公式 $$b_{m,n} = \text{round}[\log_2(1 + p_{m,n} g_{m,n}/\Gamma_m)] \quad , \tag{11}$$
可得到特定误比特率要求下的各子信道携带的比特数,其中 round[·]表示取最接近的整数.

3 算法流程

为了完成 OFDM 系统的子载波和功率分配,令 N_m 表示用户 m 使用的子载波数,N_{used} 表示已经使用的子载波数,S_m 为用户 m 使用的子载波的集合. 假定 P_{total},$\sigma_{m,n}^2$,Γ_m 以及用户要求的速率之比已知,整个算法可分为以下几个步骤:

第 1 步 参数初始化 $N_m = 0, S_m = \varnothing, \rho_{m,n} = 0, N_{\text{used}} = 0$;根据信道模型创建 $h_{m,n}^2$,这里选用指数衰落模型.

第 2 步 对子载波进行分配.

(a) 为每一用户分配 1 个子载波

while $N_{\text{used}} \leqslant \min(M,N)$

$m^* = \arg\max_m(R_m)$, $n^* = \arg\max_n(g_{m^*n})$

$N_{m^*} = N_{m^*} + 1$, $\rho_{m^*,n^*} = 1$, $S_{m^*} = S_{m^*} \cup \{n^*\}$, $R_{m^*} = 0$, $g_{m^*,n^*} = 0$

$N_{\text{used}} = N_{\text{used}} + 1$

end while

(b) 如有剩余子载波,按照用户比例需求继续分配,直到所有子载波分配完为止

while $N_{\text{used}} < N$

$$m^* = \arg\min_m (N_m / R_m) \quad , \quad n^* = \arg\max_n (g_{m^*,n})$$

$$N_{m^*} = N_{m^*} + 1,\ \rho_{m^*,n^*} = 1,\ S_{m^*} = S_{m^*} \cup \{n^*\},\ R_{m^*} = \mathrm{e}^{-6},\ g_{m^*,n^*} = 0$$

$$N_{\text{used}} = N_{\text{used}} + 1$$

end while

第 3 步　采用多用户注水算法分配功率和比特.

(a)根据 $\sum_{m=1}^{M} P(m) = P_{\text{total}}$,结合公式(8)和(10),可得出一个 $M+1$ 阶线性方程组;(b)解线性方程得出 α 和 $P(m)$;(c)用公式(8)计算各子载波上的功率分配;(d)通过公式(11)计算各子载波上相应的比特分配.

第 4 步　子载波、功率和比特的修正.

由于比特分配中的取整操作使得各子载波上的功率有所改变,改变后的功率为 $p'_{m,n} = \Gamma_m \cdot (2^{b_{m,n}} - 1)/g_{m,n}$,于是,实际分配功率与预期的总功率间出现差值

$$\Delta P = \sum_{m=1}^{M} \sum_{n=1}^{N} p'_{m,n} - P_{\text{total}} \quad . \tag{12}$$

如果 $|\Delta P| > \varepsilon$,需要根据 ΔP 进行子载波、功率和比特的修正,其中 ε 为远小于 1 的正数. 整个算法流程如图 2 所示.

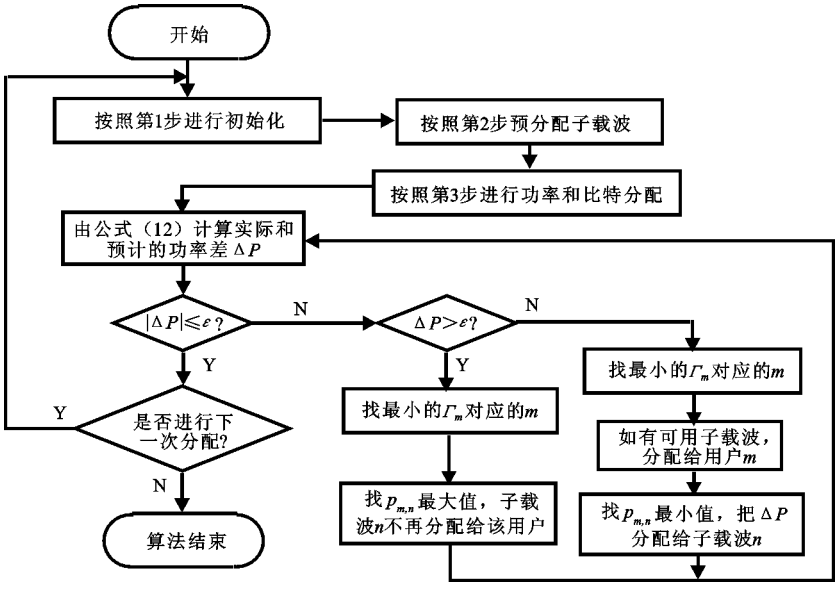

图 2　算法流程

4　仿真与性能分析

为了比较所提算法和现有算法,在 MATLAB 下对算法进行了仿真. 算法 1 是考虑用户速率请求的分步算法[4];算法 2 是不考虑用户速率请求及信噪比需求的算法,其中得到的频谱效率是与多用户无关的基于注水算法的最大频谱效率. 仿真中,频率选择衰落信道选用 6 径指数衰落信道,功率迟延谱为 $[1 \quad \mathrm{e}^{-1} \quad \mathrm{e}^{-2} \quad \mathrm{e}^{-3} \quad \mathrm{e}^{-4} \quad \mathrm{e}^{-5}]$;发送总功率为 1 W,噪声方差为 10^{-3},子载波数为 64,保护间隔为 16,QAM 调制的最大星座比特数为 8. 用户数 M 从 4 到 20 变化,其中两个用户称为用户 1 和 2,具有更高的服务质量需求,用户请求带宽的比值为[2∶2∶1∶…∶1],用户 1 和用户 2 的 SNR gap 为 10 dB,对应的未编

码情况下的误比特率为 10^{-8};其他用户的 SNR gap 为 5 dB,对应的未编码误比特率为 10^{-3}[6].

图 3 显示了在不同用户数情况下不同算法的频谱效率比较,频谱效率通过公式(5)得到. 对算法 1 和 2,因为没有考虑 SNR gap, $\Gamma_m=1$, 即公式(4)中表示的形式. 图 4 是不同算法占用 CPU 时间,CPU 占用时间用 MATLAB 中的 cputime 函数来测量,采用的操作系统为 WIN XP,MATLAB 版本为 6.5.

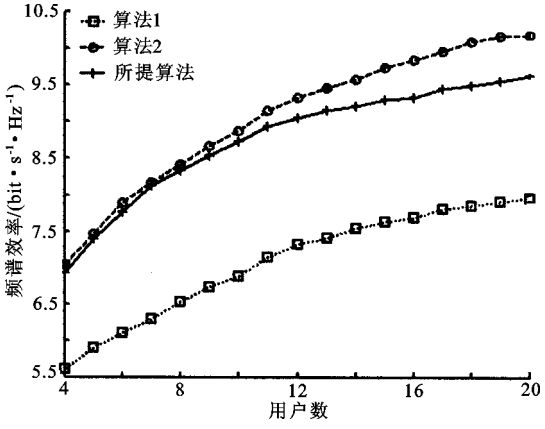

图 3 频谱效率比较

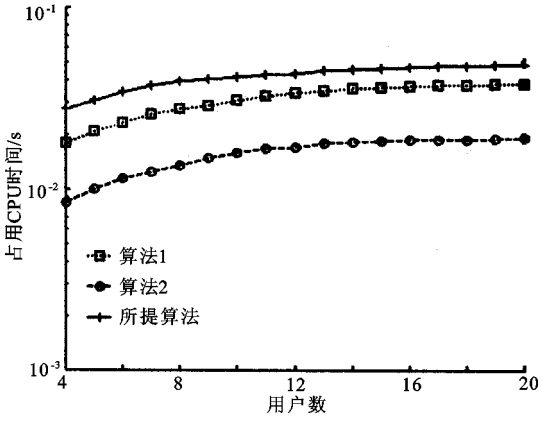

图 4 占用 CPU 时间比较

通过前面的描述及仿真数值结果可得出:

(1) 所提算法的频谱效率高于基于分步式设计的算法 1,接近算法 2 的基于注水的最优频谱效率;随着用户数的增加,由于可获得更高的多用户分集,频谱效率增加.

(2) 从设计的过程中可看出,所提算法的设计考虑了用户速率请求和误比特率需求,能够在频谱效率和用户服务质量要求间得到折中.

(3) 从仿真时间来看,所提算法的 CPU 占用时间大于算法 1 和算法 2,但在同一数量级范围内,因此,能够满足无线数据传输需求.

5 结 束 语

笔者提出了一种 OFDM 系统中的新型 OFDM 子载波和功率分配算法,该算法根据用户请求进行子载波预分配,结合改进多用户注水算法,有效地实现了每个用户具体的子载波和功率分配. 通过仿真可看出,所提算法可获得较高的频谱效率,能够在频谱效率和用户服务质量要求间得到折中. 同时,从算法仿真时间看,所提算法占用的 CPU 时间与其他算法接近. 因此,该算法可用于实际无线数据通信系统.

参考文献:

[1] Xiao Yeping, Ge Jianhua, Wang Yong. The Scheme for the Identification of the Channel Impulse Response in Channel Estimation of OFDM Systems[J]. Journal of Xidian University, 2005, 32(5): 753-757.

[2] 王文博,郑 侃. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.

[3] Kivanc D, Li G Q, Liu H. Computationally Efficient Bandwidth Allocation and Power Control for OFDMA[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1150-1158.

[4] Shen Z K, Andrews J G, Evans B L. Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems with Proportional Fairness[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2005, 4(6): 2726-2737.

[5] Wong C Y, Cheng R S. Multiuser OFDM with Adaptive Subcarrier, Bit, and Power Allocation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(10): 1747-1758.

[6] Hoo L M C. Multiuser Transmit Optimization for Multicarrier Modulation Systems[D]. California: Stanford University, 2000.

(编辑:郭 华)