

# 一种基于遗传算法的 OFDMA 系统的跨层资源分配

何庆, 曾黄麟, 熊兴中

(四川理工学院自动化与电子信息学院, 四川 自贡 643000)

**摘要:**针对现有的跨层资源分配算法计算量大、复杂度较高的问题,提出了一种基于遗传算法的 OFDMA 系统的跨层资源分配算法。利用遗传算法隐形并行处理、较好的全局搜索性能、易收敛到最优解的特点,在系统性能一定,且满足各个用户业务要求的条件下,对资源进行优化分配,较好地解决了跨层资源的分配问题。仿真结果表明,在满足用户间公平性的前提下,算法有效提高了系统的频谱利用率及吞吐量,减小了用户的平均等待时延,提高了服务质量,并且随着子载波数和用户数的增加,算法在复杂度方面优势更突出。

**关键词:**OFDMA;跨层;资源分配;遗传算法

**中图分类号:**TN92

**文献标志码:**A

## 引言

正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)是利用 OFDM 将信道划分为多个载波后,在部分子载波上加载传输数据的一种新的传输技术。每个用户可以选择信道条件较好的子信道进行数据传输,保证各子载波被信道条件较好的用户使用。

OFDMA 系统利用子载波之间的相互独立性,根据各个用户业务量的大小以及各用户的信道状态信息,动态地分配系统的资源,以提高系统的频谱利用率和支持不同的业务。随着许多高速率业务的出现,如视频流、音频流等,不仅要求通信系统能够提供较高的数据传输速率,而且要求数据包的传输时延控制在要求的时间阈值之内。而传统的资源分配方案仅仅是从物理层的角度考虑资源的分配,忽略了 MAC 层的业务数据到达特性、队列状态信息、用户时延要求等因素,这显然已不能满足业务的需求,因此,OFDMA 系统中的跨层资源分配

问题成为目前的研究热点。

资源分配是为了更好地利用系统的有限资源,即在系统资源一定的情况下,提高系统资源的利用率,优化系统性能,如公平性更好、服务质量(QoS)更优。而资源分配的数学模型通常是一个含有多个约束条件下,极大化(或极小化)非线性函数,简单的数学方法难以求解。近年来,人们开始研究基于跨层的资源分配方案,文献[1]提出了一种跨层方案,但其基于注水算法,复杂度高、实用性不强。文献[2]也采用了跨层方案,但计算量大、公平性较差。文献[3]基于效用函数的资源分配算法,通过子载波分配来得到系统最大效用函数,但其采用传统的数学优化方法来求解资源的优化分配,计算复杂度和求解难度都较高。

本文提出利用遗传算法来解决跨层资源分配的优化问题,利用遗传算法的并行处理、较好的全局搜索性能、易收敛到最优解等特点,提高系统的整体性能和降低资源分配算法的复杂度。

收稿日期:2012-08-15

基金项目:四川省杰出青年基金项目(2011JQ0034);四川理工学院人才引进项目(2010XJKR1014)

作者简介:何庆(1987-),男,四川自贡人,硕士生,主要从事智能信号处理方面的研究,(E-mail)heqing693@126.com

## 1 OFDMA 系统物理层(PHY)与 MAC 层联合优化的系统模型

本文研究 OFDMA 下行链路的跨层资源分配问题,其系统模型如图 1 所示<sup>[4-5]</sup>。

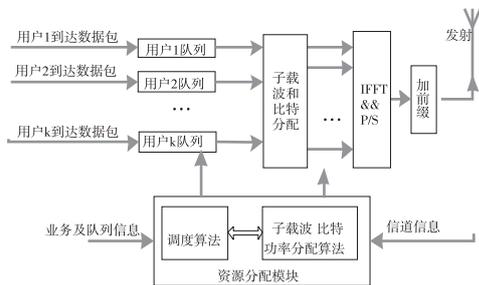


图 1 OFDMA 系统 PHY 层与 MAC 层联合优化的系统模型

### 1.1 MAC 层资源调度分析

设用户  $k$  业务数据到达缓存区服从到达率为  $\lambda_k$  的独立泊松过程。在第  $n$  个时隙即  $[nT_s, (n+1)T_s]$  时间间隔内,用户  $k$  在  $nT_s$  时刻从基站发送的数据量为  $r_k(n)$ ,即为用户  $k$  所传输业务的服务率。用户  $k$  在第  $(n-1)$  个时隙内到达的数据量为  $a_k(n)$ 。则由泊松分布的定义有<sup>[6-7]</sup>:

$$P(T_s \text{ 内到达}) = \frac{(\lambda_k T_s)^{a_k} e^{-\lambda_k T_s}}{a_k!} \quad (1)$$

由于泊松过程具有平稳性,  $a_k(n) = a_k = \lambda_k T_s$ 。令  $Q_k(n)$  为  $nT_s$  时刻用户  $k$  的队列长度,则:

$$Q_k(n+1) = Q_k(n) + a_k(n+1) - r_k(n) \quad (2)$$

由排队论中的 Little 定理,可以得到  $nT_s$  时刻用户  $k$  平均等待时间为:  $w_k(n) = \frac{E(Q_k(n))}{\lambda_k}$ , 进而可得

$$w_k(n+1) = w_k(n) + T_s - \frac{r_k(n)}{\lambda_k} \quad (3)$$

等待时间是保证用户时延的一项重要指标。调度用户时,若能减小等待时间则能降低用户的丢包率,提高用户的满意度。

### 1.2 PHY 层资源分配模型的建立

OFDMA 系统中资源分配可以分为两类:(1) MA (margin adaptive) 优化<sup>[8]</sup>,即在满足每个用户的传输速率或误比特率条件下使传输功率最小;(2) RA (rate adaptive) 优化<sup>[9-13]</sup>,即在满足每个用户获得速率公平性和总传输功率一定的条件下,使系统总传输速率最大。本文以 RA 优化为目标。

设系统总带宽为  $B$ ,子载波总数为  $N$ ,每个子载波带宽为  $B/N$ ,系统总功率为  $P$ ,每一帧由  $S$  个 OFDM 符号

组成,OFDM 符号周期为  $T_s$ ,激活用户数为  $K$ ,假设基站通过信道估计能够准确获得各信道状态信息 CSI (Channel State Information),信道增益  $h_{k,n}$  表示用户  $k$  在子信道  $n$  上的瞬时信道增益,  $P_{k,n}$  表示用户  $k$  在第  $n$  个子载波上所获得的功率。由于子载波分配和多用户分集的存在,每个用户可以保证得到信道条件较好的子载波,而自适应功率分配对系统整体性能提高有限,因此各个子载波上的功率呈平均分配。在每个 OFDM 符号期间,每个用户的数据比特为  $R_k$ ,假设某一子信道被分配  $c$  个比特数据,该子信道采用  $M$ -QAM,其中  $(M = 2^e)$  调制方式,子信道上的数据被映射成  $M$ -QAM 符号。定义  $c_{k,n}$  表示用户  $k$  在子信道  $n$  上所分配的比特数据,  $c_{k,n} \in \{1, 2, \dots, c_{\max}\}$ ,  $c_{\max}$  为一个  $M$ -QAM 符号所能携带的最大数据比特数。由于一个子信道只能被一个用户所占用,故当  $c_{k,n} \neq 0$  时,  $\exists k' \neq k, k' \in \{1, 2, \dots, K\}$ , 都有  $c_{k',n} = 0$ 。在每个 OFDM 符号期间用户的数据比特为:

$$R_k = \sum_{n=1}^N c_{k,n} \rho_{k,n} R_k \quad (4)$$

其中用户  $k$  占用子信道  $n$ ,则  $\rho_{k,n}$  为 1;否则  $\rho_{k,n}$  为 0,把 (4) 式称为效用函数。

由 Shannon 公式得到:

$$c_{k,n} = \frac{B}{N} \log_2 \left( 1 + \frac{h_{k,n}^2 P_{k,n}}{\Gamma N_0 \frac{B}{N}} \right) \quad (5)$$

其中  $\Gamma = -\frac{\ln(5BER)}{1.6}$ ,  $N_0$  为信道中加性高斯白噪声的单边功率谱密度,  $BER$  为误比特率。

于是得到本文资源分配优化目标函数的表达式<sup>[14-15]</sup>:

$$\max \frac{B}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho_{k,n} \log_2 \left( 1 + \frac{h_{k,n}^2 P_{k,n}}{\Gamma N_0 \frac{B}{N}} \right) \quad (6)$$

其约束为:

$$\text{条件 1: } \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = 1, n \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$\text{条件 2: } \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \rho_{k,n} = N$$

约束条件 1 表示一个子载波只能被一个用户占用,约束条件 2 表示所有子载波都被使用。

## 2 基于遗传算法的资源分配

### 2.1 遗传算法基本原理

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,通过模拟自然进化过程来搜索最

优解,它利用某种编码技术,作用于被称为染色体的数字串来模拟由这些数字串所组成的群体进化过程。遗传算法通过有组织的、随机的信息交换来重新组合那些适应度好的串,生成新的群体。遗传算法的一般步骤主要包括:编码、生成初始群体、适应度评价、选择、交叉、变异等<sup>[16]</sup>。算法流程如图 2 所示。

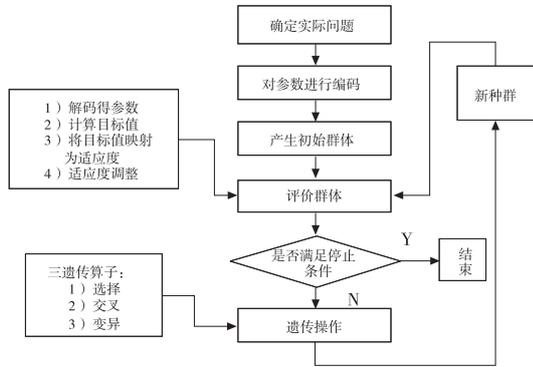


图 2 遗传算法基本流程图

遗传算法的运行过程为一迭代过程,其运行过程所必须完成的内容和过程如下:

- (1) 结合实际问题选择编码策略,将问题参数集合  $X$  映射到位串结构空间  $S$ ;
- (2) 定义适应度函数  $F(X)$ ;
- (3) 确定遗传策略,包括群体的大小,选择、交叉、变异的方法,以及确定交叉概率  $P_c$ 、变异概率  $P_m$  等参数;
- (4) 生成初始群体;
- (5) 计算初始群体中适应度值  $F(X)$ ;
- (6) 按照遗传策略,将选择、交叉、变异算子作用于群体,生成下一代的群体;
- (7) 判断群体性能是否满足结束准则,若不满足则返回(6),直到满足为止。

## 2.2 资源分配算法实现

OFDMA 系统资源分配问题属于复杂的优化问题,本文通过遗传算法,根据每个用户在每个子载波上  $h_{k,n}$  的大小,找到一组子载波的分配方案,使得系统性能更优。其算法实现过程如下:

### (1) 编码方式:

采用字符串编码方式,染色体长度为系统子载波个数  $N$ ,第  $n$  个基因所对应的数值代表第  $n$  个子载波分配给该用户。某一染色体表示如表 1 所示。

表 1 染色体表示形式

基因 1	基因 2	基因 3	……	基因 k	基因 N
1	5	9	……	k	3

其中该染色体表示第一个子载波分配给第一个用

户,第二个子载波分配给第 5 个用户,第三个子载波分配给第 9 个用户,其余依次类推。

### (2) 种群初始化:

由于随机产生的初始种群会使最优资源分配方案的质量下降,因此,本文通过如下式子得到初始种群:

$$K^* = \operatorname{argmax}_k \frac{Q_k}{\lambda_k} h_{k,n} \quad (7)$$

式中  $Q_k$  与  $\lambda_k$ , 分别为用户的平均队列长度和平均业务量,表示把第  $n$  个子载波分配给用户  $K^*$ 。当每个子载波所分配的功率一定时,  $h_{k,n}$  越大,子载波上所发射的比特就越多,  $Q_k, \lambda_k$  之比相当于用户  $k$  的平均时延,该种群的产生方式较好的满足了用户间的公平性,平均时延较大的用户可以获得较好的子载波以发送较多的比特数。

由该方案得到的一个染色体成为母体,为了保持群体多样性以及使群体向更好的方向发展,在该母体的基础上生成其他染色体。其方式为:新染色体的第  $i$  位基因以某一继承概率  $P_h$  继承母体的第  $i$  位基因,以变异概率  $1 - P_h$ , 随机赋予一个用户。考虑到种群的多样性,  $P_h$  不能太大,通常取值范围为  $[0.1, 0.3]$ 。

### (3) 适应度函数:

采用式(6)表示的目标函数作为遗传算法的适应度函数。

### (4) 选择算子:

按照“适者生存,优胜劣汰”的机制,用适应度大的染色体代替适应度小的染色体。

### (5) 交叉与变异算子:

遗传算法参数中,交叉概率和变异概率的选择是影响遗传算法性能优劣的关键所在,直接影响算法的收敛性。交叉概率控制着个体交叉的速率,交叉概率越大,新个体产生的速率也就越快;然而,若交叉概率过大,个体被破坏的可能性也就越大,好的模式也将被破坏;若交叉概率过小,则搜索过程会变得很慢,以至停止不前。对于变异概率而言,若变异概率过大,则搜索方向感变弱,以至于成为随机搜索;若变异概率过小,则不利于产生新个体,群体多样性差,易于早熟。为此,本文采用如下方式来确定  $p_c, p_m$ 。

设第  $t$  代种群个体由  $X_t^1, X_t^2, \dots, X_t^M$  构成,适应度分别为  $F_t^1, F_t^2, \dots, F_t^M$ , 则个体的平均适应度为:

$$\bar{F}_t = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M F_t^i \quad (8)$$

设  $x$  为适应度大于  $\bar{F}_t$  的个数,  $y$  为适应度小于  $\bar{F}_t$  的个数,则  $p_c, p_m$  为:

$$p_c = \frac{1}{1 + \exp(\frac{x}{M} * \frac{x}{y})} \tag{9}$$

$$p_m = \frac{1}{1 + \exp(-\frac{x}{M} * \frac{x}{y})} \tag{10}$$

由式(9)与式(10)可知,进化过程中  $p_c$ 、 $p_m$  会随着  $\frac{x}{M} * \frac{x}{y}$  的取值而动态调整,当种群个体趋于离散时,  $\frac{x}{M} * \frac{x}{y}$  会相应变小,  $p_c$  变大,  $p_m$  变大;当种群个体趋于集中时,  $\frac{x}{M} * \frac{x}{y}$  会相应变大,  $p_c$  变小,  $p_m$  变大。

### 3 性能仿真

在仿真中,本文考虑带宽为 1 MHz,总功率  $P_{total} = 1$ ,子载波数为 512 的多用户 OFDMA 下行链路。信道采用 6 径的瑞利衰落模型,每个用户的业务数据到达率  $\lambda_k$  在 5 ~ 30 kbps 内随机取值,  $T_s$  取 2 ms,信道功率谱密度  $N_0 = 10^{-8}$ ,  $BER \leq 10^{-3}$ 。遗传算法参数设定为:最大遗传代数设为 500,种群规模设为 100,种群中基因长度设定为子载波个数 512,继承概率  $P_k = 0.1$ 。

本实验从最大效用函数和平均等待时延两个方面来验证基于自适应遗传算法的资源分配算法效果,与文献[17]所用的线性算法进行了比较。

图 3 比较了本文所采用的遗传算法与线性算法在不同用户数情况下的系统的吞吐量,图中 \* 号线表示采用遗传算法进行资源分配, o 线表示采用线性算法,可以看出采用遗传算法所得到的系统吞吐量要高于线性算法。这是因为遗传算法有较好的全局收敛性。

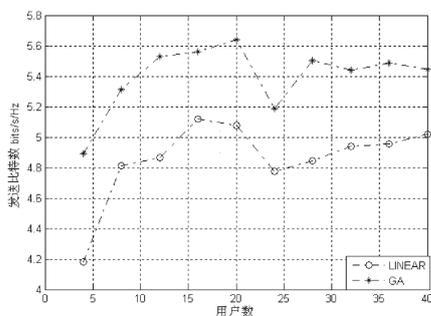


图3 两种算法速率比较

图 4 比较了两种方法在不同用户数情况下系统的时延,图中 \* 线表示采用遗传算法进行资源分配, o 线表示采用线性算法,可以看出在相同用户数的情况下采用本文方法的系统时延要低于线性算法的系统时延,本文方法较优。

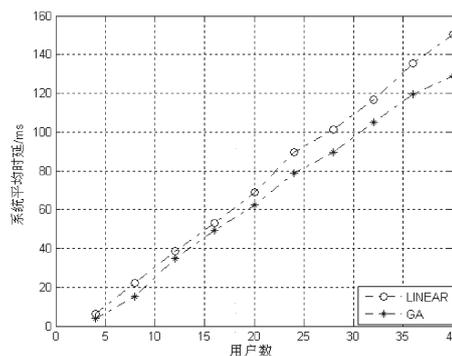


图4 两种算法时延比较

图 5 比较了本文算法与线性算法在不同用户情况下两算法运算量。联合子载波和功率的分配算法复杂度往往较高,文献[17]中算法子载波分配的计算复杂度  $O(NK \ln N)$ , 功率分配的计算复杂度为  $O(K)$ , 且该算法是以牺牲系统性能为代价。

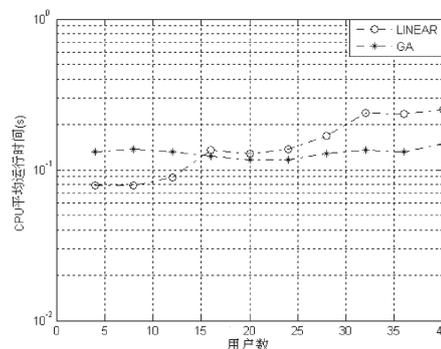


图5 两种算法的运算量比较

从图 5 可以看出随着用户数的增加,本文所提出的算法效率高于线性算法。并且实验表明当子载波数和用户数越高时,越能体现本文算法的优点。

### 4 结束语

本文研究了 OFDMA 系统中资源分配问题,结合数据链路层和物理层的相关信息利用遗传算法的隐形并行性和全局收敛性来进行系统的资源分配,实验仿真结果表明,与以往的方法相比,该方法能够在保证用户间公平性的前提下,提高吞吐量、减小时延,能够有效得的提高系统的整体性能,并且当子载波数和用户数较高时,本算法优势更突出,在实际应用中具有一定的参考价值。

#### 参考文献:

[1] Kemal K, Joseph H K, Murali K, et al. Cross-Layer optimization for OFDMA based wireless mesh backhaul

- networks[C].Proc of Wireless Communication and Networking Conference,2007:276-281.
- [2] Chen Wei,Fan Pingyi. Water filling in cellar:the optimal power allocation policy with channel and buffer state information[C].Proc of IEEE International Conference on Communications,2005(1):537-541.
- [3] Song G,Li Y,L J Cimini Jr,et al.Joint channel-aware and queue-aware data scheduling in multiple shared wireless channels[C].Proc of 2004 IEEE Wireless Communications and Net-working Conference(WCNC 2004),Atlanta, GA,United States,2004.
- [4] 王瑞文.一种新型 OFDMA 系统调度算法[J].通信技术,2011,44(3):9-14.
- [5] 黄琳,汪崇文.一种适用于多业务 OFDMA 系统的资源调度算法[J].湖北师范学院学:自然科学版,2010,30(2):51-53.
- [6] 赵芝卫,张琳.一种新的 OFDMA 系统功率与比特分配算法[J].通信技术,2011,44(5):31-33.
- [7] 沈加明.下一代多址接入技术 OFDMA 的研究[J].黑龙江科技信息,2010(14):82-93.
- [8] 邓卉,王有政,陆建华.基于博弈论的 OFDMA 系统多小区资源分配算法[J].清华大学学报:自然科学版,2010,50(1):156-160.
- [9] 王军平,景志宏,李阳.OFDMA 无线网络中提高 QoS 的资源分配[J].火力与指挥控制,2011,36(4):111-114.
- [10] 王军平,景志宏,李阳.OFDMA 系统中保证 QoS 的资源分配研究[J].计算机应用研究,2010,27(1):332-335.
- [11] 张清波,黄国刚,何加铭.OFDMA 系统资源分配算法研究[J].机电工程,2009,26(10):6-9.
- [12] 司钊,张静,董建萍.多天线 OFDMA 系统的动态子载波与功率分配方法[J].电视技术,2009,33(S2):179-181.
- [13] 蒋涛,廖磊,毛苏英.OFDMA 系统的一种资源分配方法[J].电子技术应用,2011,37(4):95-97.
- [14] 刘淑华,张海林,卢小峰.考虑用户优先级的 OFDMA 下行链路自适应子载波分配[J].信号处理,2011,27(1):154-159.
- [15] 曹兰,梁梁,全秀祥.遗传算法在负载均衡系统中的应用研究[J].四川理工学院学报:自然科学版,2011,24(1):82-85.
- [16] 孟佳娜,王立宏.基于多种群的强者进化遗传算法[J].计算机工程与应用,2004,14:41-48.
- [17] 徐伟尧.OFDMA 系统中资源分配方案的研究[J].广东通信技术,2010,9:39-43.

## Research on Cross-Layer Resource Allocation for OFDMA System Based on Genetic Algorithm

HE Qing, ZENG Huang-lin, XIONG Xing-zhong

(School of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

**Abstract:** According to the amount and complexity of computation for cross-layer resource allocation algorithm, an adaptive cross-layer resource allocation scheme employing Genetic algorithm (GA) in multiuser OFDMA system is proposed. A better solution to the cross-layer resource allocation satisfying system performances and users' requirements is presented based on the GA characteristics such as parallel processing, comprehensive ability of global search and easy convergence to the optimum. Under the prerequisite of fairness between users met, an improved algorithm is proposed to enhance the availability of frequency spectrum and also shorter the user's average wait delay. The experiment simulation result shows that the method proposed effectively improves cross-layer resource allocation for OFDMA System, and with the increase of Carrier number and the number of users, it has more advantage in complexity of computation.

**Key words:** OFDMA; cross-layer; resource allocation; Genetic algorithm