

## 基于自适应遗传算法的 OFDMA 资源分配

汪 照, 李有明\*, 赵翠茹

(宁波大学 通信技术研究所, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 针对 OFDMA 系统, 提出了基于边缘自适应(MA)准则的子载波分配算法, 该算法基于一种新颖的自适应遗传算法. 在新算法中的交叉概率、变异概率随着群体适应度的改变而改变, 同时在该算法的初始种群中加入优秀基因的个体, 使得算法快速收敛, 并能搜寻到优秀的子载波分配方案. 仿真结果表明: 新算法与已有分布式算法、遗传算法相比较, 在性能上有较大的改善, 并远优于静态的频分多址资源分配方式.

**关键词:** OFDMA 资源分配; 自适应遗传算法; 子载波分配; 分布式算法

**中图分类号:** TN92

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2013) 01-0023-05

多用户正交频分多址(OFDMA)是下一代无线通信的关键技术之一, 其继承了 OFDM 频谱利用率高、抗衰落能力强等优势, 为用户提供部分可用子载波方式实现多用户接入. 同时, OFDMA 是国内外学者研究热点之一的原因是它的系统资源分配问题是保证用户服务质量、提高系统容量及频谱利用率的重要手段.

动态资源分配问题可有效地利用用户的多样性, 提高系统的容量. 在 OFDM 系统中, 根据优化目标的不同, 资源分配问题一般可以分为两种形式: 一种是基于速率最大化的 RA (Rate Adaptive) 问题<sup>[1-2]</sup>, 它是在总功率固定的条件下, 保证系统的容量达到最大化; 另一种是基于发射功率最小化的 MA (Margin Adaptive)问题, 它是在用户数据率固定的条件下, 使总的发射功率达到最小化. 针对 MA 问题, Wong 等提出了一种联合的子载波、比特和功率分配算法<sup>[3]</sup>, 该算法一旦确定了子载波的分配, 比特和功率的分配就可以在每个用户的子载波上完成, 它是一种近似最优算法, 但其复杂度较高. 为了减小复杂度, 文献[4]采用分步方式解决多用户子载波、功率和比特的分配问题. 第一步子载波数分配, 每个用户应该分配到的子载波

数需根据用户的平均信噪比确定; 第二步子载波分配, 在第一步基础上为用户分配具体的子载波; 最后在每个用户分配的子载波上进行单用户的功率和比特分配.

近几年来, 针对多用户 OFDMA 系统中的资源分配问题已进行了大量的研究, 而遗传算法 GA (Genetic Algorithm)因其操作的简明性、信息处理的隐并行性和强大的全局最优解搜索能力, 也被广泛应用到资源分配中. 文献[5-8]根据标准遗传算法(GA)对多用户 OFDM 系统资源进行分配, 在系统性能相近的情况下, 与传统算法相比, 简化了运算复杂度. 文献[9]根据用户速率最大者-最小者(Max-Min)子载波交换为原则进行子载波调整, 并利用贪婪算法进行比特分配, 实现系统功率最小化. 文献[10]将改进的粒子群算法(MPSO)用于多用户的子载波、比特分配, 在保证一定误比特率的同时, 优化了系统的总传输功率和传输速率.

针对 MA 问题, 笔者研究了基于自适应遗传算法的 OFDMA 资源分配, 提出一种新颖的自适应遗传算法, 该算法能搜寻到一种使系统功率最小的子载波和比特分配方案. 笔者先根据用户的最低比特要求确定每个用户分配的子载波数目, 然后

收稿日期: 2012-06-18.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://nbdxlg.paperopen.com/>

基金项目: 国家自然科学基金(61071119, 60772126); 浙江省自然科学基金(Y1091155); 浙江省科技厅基金项目(2009C34001).

第一作者: 汪 照(1987-), 男, 湖北孝感人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: OFDM 中的资源分配. E-mail: 598329439@qq.com

\*通信作者: 李有明(1963-), 男, 陕西扶风人, 博导/教授, 主要研究方向: 宽带接入技术. E-mail: liyouming@nbu.edu.cn

利用提出的自适应遗传算法搜索到多用户的一个较优子载波分配,最后利用贪婪算法给各用户相应的子载波分配功率和比特,最终达到优化系统目标的目的.同文献[4]和[8]中的算法相比,性能上有了有一定的提升.

## 1 系统的优化目标

在OFDMA的自适应资源分配系统中,假设各用户已通过反馈信道将信道状态信息反馈给基站,基站根据子载波和比特分配算法对不同用户的载波进行相应功率和比特的分配.相应调制方案由不同载波上分配的比特数来确定,并根据通信服务质量及相应的调制模式来决定载波上传输功率的大小级数.现假设系统中共有 $K$ 个用户, $N$ 个子载波,第 $k$ 个用户要求的最低比特数为 $R_k$ ,并定义 $c_{k,n}$ 为用户 $k$ 在第 $n$ 个载波上的比特数, $c_{k,n}$ 的取值范围为 $D = \{0, 1, 2, \dots, M\}$ ,其中 $M$ 为子载波调制允许的最大信息比特数.此时, $N_0$ 为高斯白噪声的功率谱密度,对所有用户的子载波而言是相同的. $g_{k,n}$ 为第 $k$ 个用户在第 $n$ 个载波上的信道增益幅度值. $f_k(c)$ 为第 $k$ 个用户的子载波接收 $c$ 比特所需功率,由于不同用户采用不同的编码和调制方案,且具有不同的服务质量需求,所以它需要不同的功率进行匹配.因此,为满足接收端达到指定服务质量的需求,第 $k$ 个用户在第 $n$ 个载波上的接收功率必须符合:

$$P(c_{k,n}) = f_k(c_{k,n}) / g_{k,n}^2, \quad (1)$$

其中, $f_k(c_{k,n}) = (2^{c_{k,n}} - 1) \Gamma_k \delta^2$ ,  $\Gamma_k$ 为实际通信系统信道极限容量与传输速率间的差距, $\delta^2$ 为噪声功率.如传输的误码率和物理层编码调制方式为MQAM与格雷编码联合时, $\Gamma_k = -\ln(5BER) / 1.5$ .

当前的优化目标是确定分配给每个用户的子信道及每个信道上的功率与比特数,因此,在满足每个用户速率和误码率需求的同时,并使所有用户的总功率最小,算式可表示为:

$$\min_{c_{k,n} \in D} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \frac{1}{g_{k,n}^2} f_k(c_{k,n}), \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{n=1}^N c_{k,n} \geq R_k, \quad k=1, 2, \dots, K, \quad (a)$$

$$\sum_{n=1}^N c_{k,n} c_{l,n} = 0, \quad k, l=1, 2, \dots, K, (k \neq l), \quad (b)$$

其中,(a)式表示每个用户在每个OFDM符号需要达到的最低比特数;(b)式表示不能有2个用户同时占用同个子信道.

## 2 遗传算法的资源分配

遗传算法结构简单,易于实现,对于大型、复杂的非线性系统而言,它比传统的优化算法有更优越的性能.由于OFDMA系统中的资源分配问题属于复杂的NP问题,如采用传统数学优化算法计算,其复杂度较大,而用遗传算法则较为适宜,它能在保证系统性能的同时还降低了运算复杂度.因此针对OFDMA资源分配问题,提出一种新颖的遗传算法求解模型,先利用遗传算法寻找到一个优秀的子载波分配方案,然后利用贪婪算法进行比特、功率分配,另外,在基本遗传算法求解模型上,提出了改进的自适应遗传算法求解模型,主要是对遗传算法中的交叉概率、变异概率进行自适应调整.

### 2.1 基本遗传算法的资源分配

将OFDMA资源分配问题转化成一种新颖遗传算法求解模型,通过各种遗传操作搜索到一个较优的子载波分配方案,整个算法流程如下.

#### 2.1.1 编码

设系统中有用户为 $K$ 个,子载波为 $N$ 个,生成1个长度为 $N$ 的向量,向量中的元素为1~ $N$ 间的某个数;为保证用户的公平性,使每位用户分配到的子载波数与其发送比特数近似成正比,即:

$$R_1 : R_2 : \dots : R_K \approx M_1 : M_2 : \dots : M_K,$$

其中,

$$M_k = \left\lfloor NR_k / \sum_{i=1}^K R_i \right\rfloor, \text{ 而 } \lfloor \cdot \rfloor \text{ 为向下取整.}$$

在子载波分配中,第1个用户被分配到的子载波为该向量的1~ $M_1$ 个元素,第2个用户分配到的子载波为该向量的 $(M_1 + 1) : (M_1 + M_2)$ 个元素,依次类推.分配情况如图1所示.

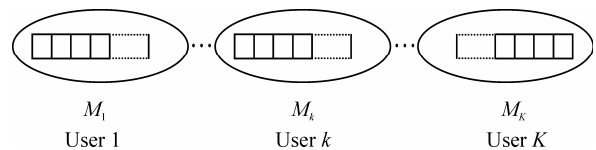


图1 子载波分配在遗传算法中的一种编码方式

当 $\sum_{k=1}^K M_k < N$ 时,将剩余的子载波分配给信

道条件较好的用户,直至所有的子载波分配完毕。

### 2.2.2 初始种群的产生

根据编码的方法随机生成  $L-1$  个向量,即产生了 1 个初始种群,其中,  $L$  为种群规模。

### 2.2.3 优秀基因个体的加入

随机产生的初始种群所得个体对应的子载波分配方案可能都很差,导致搜索优秀个体的速度缓慢。为加快搜索进程,可以先找到一个较好的子载波分配方案(即优秀个体),加入到初始种群中。该优秀个体的产生过程如下。

#### (1) 初始子载波数

考虑到用户的公平性及用户最低传输比特要求,首先根据每个用户的最低传输比特数  $R_k$  确定其子载波数,

$$M_k = \left\lfloor NR_k / \sum_{i=1}^K R_i \right\rfloor, k=1,2,\dots,K,$$

则用户  $k$  分配到  $M_k$  个子载波。

#### (2) 子载波分配

① 对用户  $k(k=1,2,\dots,K)$ ,从信道增益矩阵  $[g_{k,n}]_{K \times N}$  的第  $k$  行,依次找寻前  $M_k$  个最大的信道增益所对应的子载波。以这种方式,不同的用户可能出现对同个子载波的共享。现假设用户  $k$  唯一占有的子载波集合为  $c_k(c_k \subset \{1,2,\dots,N\})$ ,以  $N_{c_k}$  表示其集合的个数。则将  $c_k$  所对应的子载波分给用户  $k$ ,该用户占有了  $N_{c_k}$  个子载波,同时用户  $k$  还需要的子载波个数为  $M_k - N_{c_k}$ 。

② 对剩下的多个用户同时占有或未被任何一个用户占有的子载波  $n(n \notin c_k, n=1,2,\dots,N, k=1,2,\dots,K)$ ,从信道增益矩阵  $[g_{k,n}]_{K \times N}$  的第  $n$  列依次找寻最大信道增益所对应的用户  $k$ ,然后将该信道增益对应子载波  $n$  分配给用户  $k$ ,直至用户  $k$  分配的子载波个数达到  $M_k$ ,然后用户  $k$  不再要求额外的子载波。

③ 当  $\sum_{k=1}^K M_k < N$  时,将剩余的子载波分配给信道条件较好的用户,直到所有子载波分配完毕。

上述过程产生了一个较优秀的子载波分配方案,即产生了一个优秀的个体,然后将其加入初始种群,即形成规模为  $L$  的种群。

### 2.2.4 评价

针对种群中个体的子载波分配方案,如果直

接采用贪婪算法或注水算法来分配每个用户比特,此时用户的发射功率就能完全反映其个体的适应度,即总发射功率小,适应度就越大,然而它会带来一定的算法复杂度。由于较优个体用户所用子载波信道增益没有大的差距,所以可以采用平均分配比特的方式。假设用户  $k$  最终分配的子载波个数为  $M'_k$ ,分配的子载波所对应的信道增益幅度为  $h_{k,n}$ ,于是其最优的评价函数可表示为:

$$\left( \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{M'_k} f(R_k / M'_k) / h_{k,n}^2 \right). \quad (3)$$

### 2.2.5 选择

采用精英保留思想,从当前群体中选择适应度最大的  $L$  个个体直接进入下一代来进行相应的遗传操作。

### 2.2.6 交叉

选择  $L/2$  对母体,以概率  $P_c$  执行交叉,形成  $L$  个中间个体。假设用 1 个数字(例如 1,2,...,8)代表 1 个子载波序号,通过对这 8 个数字排序构成 1 个子载波分配方案,接着可采用有序交叉的方式产生子代。首先,选择 2 个划分点,用“|”标志,划分点任意插入到双亲中的相同位置,如  $p1=(1\ 3\ 4\ 7\ 5\ 6\ 8\ 2)$  和  $p2=(8\ 5\ 7\ 1\ 4\ 2\ 3\ 6)$ 。将双亲中划分点中间部分复制到后代中,  $c1=(*\ *|4\ 7\ 5\ 6\ |*\ *)$  和  $c2=(*\ *|7\ 1\ 4\ 2\ |*\ *)$ ,然后,从  $c_1$  的第 2 个划分点和  $p2$  的第 1 个划分点开始,依次将  $p2$  中的数填入  $c1$  的“\*”处,且不与  $c1$  中出现的数重复,当字符串的结尾到达时,转从字符串开始处继续,于是  $c1=(3\ 8\ 4\ 7\ 5\ 6\ 1\ 2)$ ,类似的方式得  $c2=(8\ 3\ 7\ 1\ 4\ 2\ 5\ 6)$ 。

### 2.2.7 变异

对  $L$  个中间个体分别独立以概率  $P_m$  执行变异,并形成  $L$  个候选个体。接着采用交换方式选择 2 个划分点,用“|”标志,划分点任意插入到双亲中的相同位置,然后交换划分点后的 2 个数字。如  $c1=(3\ 8\ 4\ 7\ 5\ 6\ 1\ 2)$ ,交换后得  $c'1=(3\ 1\ 4\ 7\ 5\ 6\ 8\ 2)$ ,  $c2=(8\ 3\ 7\ 1\ 4\ 2\ 5\ 6)$ ,交换后得  $c'2=(8\ 5\ 7\ 1\ 4\ 2\ 3\ 6)$ 。

### 2.2.8 终止检验

如果终止准则满足,即循环次数达到上限或若干代后,没有适应度更高的个体,那么最后一代适应度最高的个体就是算法搜索出的较优子载波分配方案。

### 2.2.9 比特与功率分配

由 2.2.1~2.2.8 节可得到一个较优的子载波分配方案, 然后根据贪婪算法分配每个用户比特, 计算所有用户的总发射功率。

### 2.2 自适应遗传算法的资源分配

自适应遗传算法与基本遗传算法在资源分配问题的求解模型上是相同的, 它主要是对固定的交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  做了自适应调整, 表达式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}, \\ P_{c1}, & f' < f_{avg}, \end{cases} \quad (4)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}, \\ P_{m1}, & f' < f_{avg}, \end{cases}$$

其中,  $P_{c1}, P_{c2}, P_{m1}, P_{m2}$  为常数;  $f_{max}$  为种群的最大适应度;  $f_{avg}$  为种群的平均适应度;  $f'$  是要交叉的 2 个个体中较大的适应度或是要变异的个体适应度。由(4)式可以看出, 交叉概率和变异概率的大小随个体适应度大小而做相应的调整, 当个体适应度较小时, 其交叉和变异概率就较大, 使其向更好的方向发展; 反之, 若个体适应度较大时, 其交叉和变异概率相对较小, 且种群中最大个体的交叉概率和变异概率接近零, 这样既保持了个体的优良特性, 又相应地提高了群体中优良个体的多样性, 使群体的进化不会处于一种停滞不前的状态, 从而使算法跳出局部最优解。

## 3 仿真结果

对笔者提出的新算法用 Matlab 进行仿真分析, 为便于比较, 此外还实现了另外 3 种分配方式: (1) 文献[4]中的 BABS-ACG 算法, 同时每个用户的比特采用最佳分配(贪婪算法); (2) 文献[8]的遗传算法, (3) OFDM-FDMA-OBA 算法, 即载波以 FDMA 方式进行分配, 每个用户的比特实行最佳分配(贪婪算法)。

采用的仿真环境是 6 径频率选择性 Rayleigh 信道, 2~8 个用户数, 64 个子载波数, 在每个 OFDM 符号中传输总比特数为 256。采用 BPSK 和 MQAM 进行调制, 总带宽为 1 MHz, 噪声功率谱密度为

$-70 \text{ dBW} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。种群大小为 50, 遗传代数 200, 交叉率  $P_{c1}:0.9, P_{c2}:0.6$ , 变异率  $P_{m1}:0.1, P_{m2}:0.01$ 。

图 2 是仿真次数为 200 时, 在不同用户数量下对 4 种算法的传输功率比较。从图中可见, 本文算法的传输总功率比 BABS-ACG 少 1~3 dB, 比文献[8]少了 0.4~0.8 dB, 并远优于静态 OFDM-FDMA-OBA。

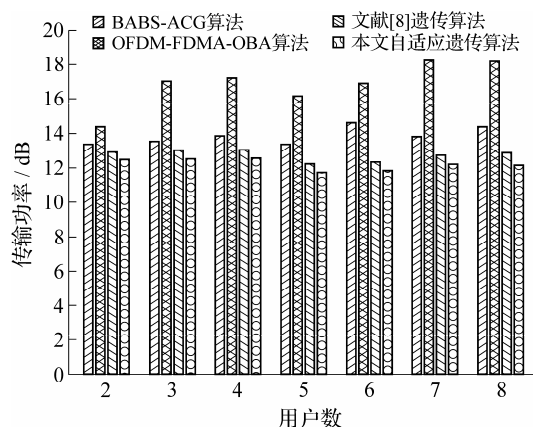


图2 不同用户数及不同算法下, 总的传输功率比较

图 3 是用户数为 8, 仿真次数为 200 时, 采用本文提出的自适应遗传算法与文献[8]中遗传算法得到的总传输功率收敛曲线。从图中可见, 自适应遗传算法比文献[8]遗传算法收敛更快, 这是由于它交叉概率、变异概率随着群体适应度而改变, 能更快地找到最优的子载波分配方案, 并且它的功率值略低于文献[8]中的功率值。

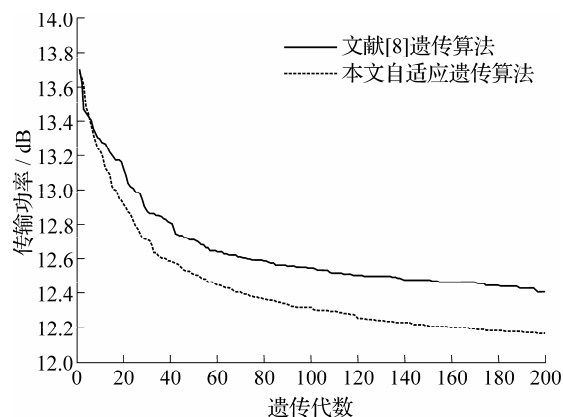


图3 用户数为 8 时, 2 种算法的总传输功率收敛曲线

## 4 结语

研究了基于自适应遗传算法的 OFDMA 资源分配问题, 提出了一种新颖的遗传算法资源分配

求解模型, 并在此基础上又提出了自适应遗传算法资源分配模型. 通过自适应遗传算法搜索最优的子载波分配方案, 然后利用贪婪算法给各用户相应的子载波分配功率、比特. 实验表明, 提出的自适应遗传算法与文献[8]中遗传算法、文献[4]中BABS-ACG 算法在 MA 优化问题上相比较, 性能上有较大的改善, 并远优于静态的频分多址资源分配方式.

#### 参考文献:

- [1] Wong I C, Shen Z, Evans B L, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems[C]. Proceedings of the IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation, Austin, Tex, USA, 2004:1-6.
- [2] Shen Z. Multiuser resource allocation in multiuser wireless communication systems[D]. Austin: University of Texas at Austin, 2006.
- [3] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, et al. Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation [J]. IEEE Selected Areas in Communications, 1999, 17 (10):1747-1758.
- [4] Kivanc D, Li G, Liu H. Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(6): 1150-1158.
- [5] Reddy Y B, Phoha V V. Genetic algorithm approach for resource allocation in multi-user OFDM systems[C]. Communication Systems Software and Middleware, 2007: 1-6.
- [6] 汪俊芳, 朱光喜, 金江. 基于遗传算法的多用户 OFDM 比特加载[J]. 华中技术大学学报: 自然科学版, 2006, 34(2):27-29.
- [7] Ahmadi H, Chew Y H. Adaptive subcarrier and bit allocation in multiclass multiuser OFDM systems using genetic algorithms[C]. IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, 2009:1883-1887.
- [8] Lio B, Jiang M, Yuan D. Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM System Based on Genetic Algorithm[J]. IEEE Proc, 2009(1):270-273.
- [9] 李城鑫, 黄玉清, 李强. 改进的多用户 OFDM 系统子载波和比特分配算法[J]. 信息与电子工程, 2010(8): 661-664.
- [10] Sadeque S, Ahmed I, Vaughan R. Impact of individual and joint optimizations in multi-user OFDM resource allocation by modified PSO[C]. Electrical and Computer Engineering, 2011:1233-1237.

## OFDMA Resource Allocation Based on Adaptive Genetic Algorithm

WANG Zhao, LI You-ming\*, ZHAO Cui-ru

( Institute of Communication Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China )

**Abstract:** For OFDMA system, a subcarrier allocation method based on a novel adaptive genetic algorithm for Margin Adaptive (MA) problem is proposed. In the genetic algorithm, the crossover probability and mutation probability vary in accordance with the diversity of population, while the individual with excellent genes is added to the initial population, which helps speed up the convergence and search a good subcarrier allocation scheme. Simulation results reveal that, compared with existing distributed algorithm and genetic algorithm, the proposed algorithm has improved performance greatly, and is found to be much superior to resource allocation in the static frequency division multiple access.

**Key words:** OFDMA resource allocation; adaptive genetic algorithm; subcarrier allocation; distributed algorithm

(责任编辑 章践立)