

# SC-FDMA 动态子载波分配算法

李一兵<sup>a</sup>, 张旭<sup>a</sup>, 高振国<sup>b</sup>

(哈尔滨工程大学 a. 信息与通信工程学院; b. 自动化学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 基于单载波频分复用系统, 提出一种应用于动态子载波分配方案的算法。在动态分配过程中, 利用约束条件实现信道资源对各用户终端的公平分配, 以此完成比例约束算法设计, 并对其进行简化。实验结果表明, 该算法能在提升系统总容量的同时保证公平性, 其简化算法具有较好的分配性能和较低的计算复杂度。

**关键词:** 单载波频分复用; 动态子载波分配; 贪婪算法; 比例约束; 比例公平

## Dynamic Subcarrier Allocation Algorithm for SC-FDMA

LI Yi-bing<sup>a</sup>, ZHANG Xu<sup>a</sup>, GAO Zhen-guo<sup>b</sup>

(a. College of Information and Communication Engineering; b. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**【Abstract】** In this paper, a proportional rate constraints algorithm based on single carrier frequency division multiple access system, used for dynamic subcarrier allocation is proposed. The proposed algorithm utilizes appropriate allocation constraints to achieve the channel capacity resources allocation fairness for each user, thereby realizing the design of proportional rate constraints algorithm. On this foundation, a simplified algorithm is also proposed. Experimental results show that the algorithm can effectively improve the system capacity and guarantee the fairness, its simplified algorithm have good distribute performance and low calculation complexity.

**【Key words】** Single Carrier Frequency Division Multiple Access(SC-FDMA); Dynamic Subcarrier Allocation(DSA); greedy algorithm; proportion constraint; proportion fair

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.24.024

### 1 概述

已知单载波频分复用(Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA)利用单载波调制方式和频域均衡技术, 以及正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)系统具有相似的性能及整体复杂度, 可以看成是一种经过离散傅里叶变化(Discrete Fourier Transform, DFT)扩展的 OFDMA, 即将时域信号首先通过 DFT 转化为频域, 使每个数据符号均扩展到几个子载波上再送入 OFDMA 系统中, 因此可以有效克服无线信道对某一子载波深度衰落的影响。SC-FDMA 系统相较于 OFDMA 的一项突出优势是具有低峰均比(Peak to Average Power Ratio, PAPR)特性, 这是由其单载波内部结构所决定的。该优势使其作为 OFDMA 的替代技术而受到广泛关注, 特别是对于传输效率要求较严格的通信系统上行链路中。目前 SC-FDMA 已成为 3GPP-LTE 上行链路多用户接入方案的一项有力的竞争技术<sup>[1]</sup>。动态子载波分配(Dynamic Subcarrier Allocation, DSA)利用系统用户由于空间分散而具有不同传输函数这一特性, 将一系列子载波集分配给与之对应具有最佳传输特性的终端以提升系统传输性能, 目前已被应用于 SC-FDMA 和 OFDMA 系统中<sup>[2]</sup>。

高速无线数据传输可以通过动态频谱分配、自适应调制编码以及功率控制技术来调整传输方案以对抗无线传输环境的不利影响<sup>[3]</sup>。在频域信道资源分配方面, 子载波的分配主要有静态分配和动态分配 2 种。静态子载波分配算法, 即轮循(Round Robin, RR)算法, 各用户子载波的分配独立于信道状态信息, 具有一定的公平性, 但是不能充分利用信道资源。本文在基于贪婪算法的频谱资源分配基础上, 提出一种应用

于 SC-FDMA 系统进行动态子载波分配算法, 并对其进行计算复杂度简化。

### 2 动态子载波分配模型

由于逐个进行动态子载波分配是一个复杂度过高的组合最优化问题, 特别是在子载波数目和终端数目都较大的情况下。然而在实际中, SC-FDMA 系统以由一系列子载波所组成的“资源块(Chunk)”为单位进行分配。

各资源块内部所包含的子载波数目即为每次分配的最小单元, 各用户可分得一个或多个这样的资源块。与 SC-FDMA 系统 2 种子载波映射方式相结合, 集中式映射所定义的资源块由一系列连续的子载波组成, 通过给每个用户分配具有最佳传输特性的资源块可以实现系统的频率选择性分集; 而对于分布式映射方式, 资源块内的子载波均匀分布于整个信道, 因此可以避免具有深度衰落的相邻子载波同时进行分配, 以实现系统的多用户分集。长期演进项目(Long Term Evolution, LTE)的上行链路规定采用集中式映射方式。

单载波频分复用的上行链路动态子载波分配实现过程如图 1 所示。系统用户数目为  $K$ , 各用户终端具有相互独立的信道传输函数。将 DSA 应用于实际系统中, 首先要了解各用户终端的传输要求, 并由基站测量信道特性, 然后根据最优

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60703090); 哈尔滨市科技创新人才研究专项基金资助项目(2008RFQXG025)

**作者简介:** 李一兵(1967—), 男, 教授、博士生导师, 主研方向: 认知无线电, 超宽带信号检测与处理; 张旭, 博士研究生; 高振国, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2011-06-21 **E-mail:** liyibing@hrbeu.edu.cn

化算法得到子载波分配方案, 最后由基站向终端传送分配方案<sup>[3-4]</sup>。其中, 数字调制左边的箭头是数据流; 资源分配指出的虚箭头指向各用户; SC-FDMA 接收端和资源分配均属于基站端; 信道左边是发动终端即发送端, 信道右侧是信号接收端, 即基站。

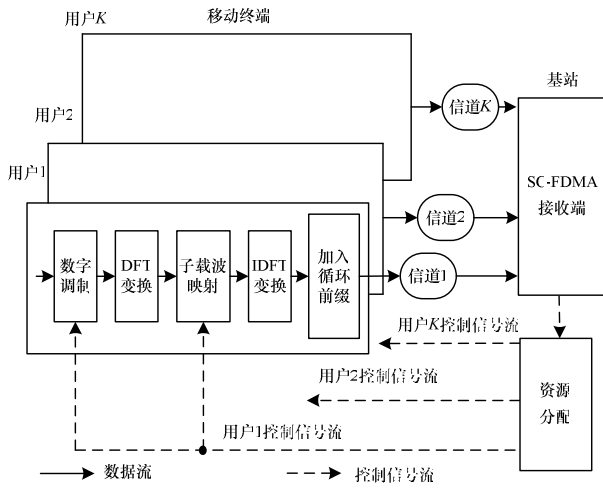


图1 SC-FDMA 上行链路动态子载波分配实现过程

系统设定用户终端数目为  $K$ , 子载波数目为  $L$ , 资源块数目为  $N$ , 则各资源块内包含  $M = L/N$  个子载波。由于在动态子载波分配的基础上, 再进行动态传输速率及功率的分配并不能显著提升系统性能, 且会引入较高复杂度, 因此在 SC-FDMA 系统实际进行信道资源分配时, 通常设定资源块内等比特-等功率(Equal Bit Equal Power, EBEP), 即分配给用户  $k$  的各子载波功率为:

$$P_k^{(sub)} = \frac{P_k}{|I_{sub,k}|}$$

其中,  $P_k$  为用户  $k$  的总传输功率;  $I_{sub,k}$  为分配给用户  $k$  的子载波集;  $|I_{sub,k}|$  为分配给用户  $k$  的子载波数目。

$I_{ch,k}$  为分配给用户  $k$  的资源块集。系统接收端各用户信噪比由下式可得:

$$\gamma(P_k, I_{ch,k}) = \left( \frac{1}{\frac{1}{|I_{sub,k}|} \sum_{l \in I_{sub,k}} \frac{\gamma_{l,k}}{\gamma_{l,k} + 1}} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\gamma_{l,k} = \frac{P_k^{(sub)} H_{l,k}}{\sigma_l^2} \quad (2)$$

其中,  $\gamma_{l,k}$  表示分配给用户  $k$  的子载波  $l$  的信噪比;  $\sigma_l^2$  表示子载波  $l$  的噪声功率;  $H_{l,k}$  表示分配给用户  $k$  的子载波  $l$  的信道增益<sup>[5]</sup>。

SC-FDMA 系统接收端各用户的信道容量性能为:

$$C_k(P_k, I_{ch,k}) = \frac{B|I_{ch,k}|}{N} \cdot \text{lb}[1 + \gamma(P_k, I_{ch,k})] \quad (3)$$

系统总容量为:

$$C_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K C_k(P_k, I_{ch,k}) \quad (4)$$

### 3 比例约束 DSA 算法

贪婪算法将全局最优化问题转化为一列子问题再分步进行解决, 相较于传统最优算法在大幅度降低计算复杂度的同时, 获得较理想的系统总容量性能, 缺点是分配公平性差, 这是由于在每次分配过程中, 仅重视当前被优化的用户, 使

得因传输性能差而后被分配的用户只能分得较差的信道资源<sup>[6]</sup>。文献[7]中提出一种比例公平算法, 最大化系统总容量以实现各用户信道资源分配的公平性, 缺点是系统总容量性能较差。本文基于贪婪算法提出一种比例约束动态子载波分配算法, 在实现公平性分配的同时, 获得系统总容量性能的提升, 并在此基础上对所提出算法进行简化, 降低计算的复杂度。

#### 3.1 比例约束算法原理

比例约束算法的原理如下:

初始化将所有用户和资源块分别组成待分配的用户集合  $I_{\text{user}} = \{1, 2, \dots, K\}$  和待分配的资源块集合  $I_{\text{chunk}} = \{1, 2, \dots, N\}$ 。算法要求各用户分得信道容量的比值应满足比例约束:

$$C_1 : C_2 : \dots : C_K = \lambda_1 : \lambda_2 : \dots : \lambda_K$$

其中,  $\lambda_k$  为用户  $k$  的信道容量比例约束。

为实现信道资源分配的公平性, 算法设定比例约束为:

$$\lambda_1 : \lambda_2 : \dots : \lambda_K = 1 : 1 : \dots : 1$$

以最大限度实现系统信道容量的公平分配<sup>[8]</sup>。

**情况 1** 当用户数目小于资源块数目时, 即  $K < N$  的情况下,  $I'_{\text{user}} = I_{\text{user}}$ 。

**步骤 1** 在  $I'_{\text{user}}$  和  $I_{\text{chunk}}$  中, 寻找信道容量最高的用户与资源块的组合, 即对各资源块  $n$  和用户  $j$  寻找:

$$[n^*, j^*] = \arg \max_{\substack{j \in I'_{\text{user}} \\ n \in I_{\text{chunk}}}} C_j(P_j, \{n\}) \quad (5)$$

其中,  $\{n\}$  为包含单个资源块  $n$  的集合。

**步骤 2** 将步骤 1 中得到的资源块  $n^*$  试分配给  $I'_{\text{user}}$  中各用户, 并计算该分配方式下的信道容量增益, 从中寻找增益最大的用户  $i^*$ , 并将资源块  $n^*$  分配给用户, 上述即为贪婪分配, 即:

$$I'_{ch,i} = I_{ch,i} \cup \{n^*\} \quad \forall i \in I'_{\text{user}} \quad (6)$$

$$i^* = \arg \max_{i \in I'_{\text{user}}} [C_i(P_i, I'_{ch,i}) - C_i(P_i, I_{ch,i})] \quad (7)$$

$$I_{ch,i^*} = I_{ch,i^*} \cup \{n^*\} \quad (8)$$

其中,  $I'_{ch,i}$  为预分配给用户  $i$  的资源块集合。

**步骤 3** 分别从  $I'_{\text{user}}$  和  $I_{\text{user}}$  中去除已分配用户  $i^*$  和资源块  $n^*$ , 并重复步骤 2、步骤 3 直至所有用户均分得信道资源:

$$I'_{\text{user}} = I'_{\text{user}} - \{i^*\} \quad (9)$$

$$I_{\text{user}} = I_{\text{user}} - \{n^*\} \quad (10)$$

**步骤 4** 在  $I_{\text{user}}$  中寻找最不满意比例约束条件的用户  $k^*$ , 上述即为比例约束分配, 即:

$$k^* = \arg \min_{k \in I_{\text{user}}} [C_k(P_k, I_{ch,k}) / \lambda_k] \quad (11)$$

**步骤 5** 将  $I_{\text{chunk}}$  中各项试分配给步骤 4 中得到的用户  $k^*$ , 并从中寻找最大信噪比所对应的资源块  $p^*$ , 将其分配给用户  $k^*$ , 即:

$$p^* = \arg \max_{p \in I_{\text{chunk}}} \gamma_{k^*} [P_{k^*}, (I_{ch,k^*} \cup \{p\})] \quad (12)$$

$$I_{ch,k^*} = I_{ch,k^*} \cup \{p^*\} \quad (13)$$

**步骤 6** 从  $I_{\text{chunk}}$  中去除已分配资源块  $p^*$ , 并重复步骤 4 和步骤 5 直至所有资源块均分配完毕, 即:

$$I_{\text{chunk}} = I_{\text{chunk}} - \{p^*\} \quad (14)$$

**情况 2** 当用户数目大于或等于资源块数目, 即  $K \geq N$  时, 此时可利用的频谱资源块数目相对较少, 只需重复进行

情况1中的步骤1~步骤3,直至所有资源块分配完毕即可。此外,如果将比例约束分配和贪婪分配交换顺序,即优先进行贪婪性分配,之后再行比例约束性分配,则分配公平性的可提升度较低。在这种情况下,可以根据具体的通信网络需求偏好来确定优先选择的频谱分配算法。由于相对于本文所提出算法而言意义不大,因此在此处不予考虑。

### 3.2 比例约束算法简化

本文所提出的比例约束算法以贪婪算法为基础,但在步骤1~步骤3中每次迭代仅分配一个资源块,且已分配用户不再参与分配,资源块不可重复利用。由式(3)可知,用户信道容量与其信噪比呈正比,且各用户初始信道容量均为0,因而可将步骤1、步骤2简化为寻找具有最高信噪比的用户与资源块的组合并实施分配,即对各资源块 $n$ 和用户 $i$ 寻找:

$$[n^*, i^*] = \arg \max_{\substack{i \in I_{user} \\ n \in I_{channel}}} [\gamma_i(P_i, \{n\})] \quad (15)$$

$$I_{ch,i^*} = I_{ch,i^*} \cup \{n^*\} \quad (16)$$

## 4 实验结果与分析

系统假设任意时刻的信道状态信息理想可知,且信道状态的测量与分配方案的传输是瞬时的,即不考虑衰落信道下反馈时延所导致 DSA 不匹配的影响<sup>[9]</sup>。无线信道模型采用6径独立瑞利信道,系统传输功率为1W,带宽为1MHz,采用L-FDMA子载波映射方式,子载波数目 $L=256$ ,资源块数目 $N=16$ ,资源块内EBEP分配。

通过与贪婪算法和比例公平算法在系统总容量性能、分配公平性、最小用户容量和计算复杂度4个方面的比较,衡量所提出算法及其简化算法的性能<sup>[10]</sup>。4种算法的系统总容量性能如图2所示。由图2可知,各算法的系统总容量均随用户数目的增加而增大,其中贪婪算法的总容量性能最好,在用户数目为32时优于比例公平算法12.1%,所提出的比例约束算法优于比例公平算法1.5%。由于比例约束算法在用户数目大于资源块数目的情况不再进行约束性分配,而仅进行贪婪分配,因此当用户数目为16时图线出现不光滑折点。

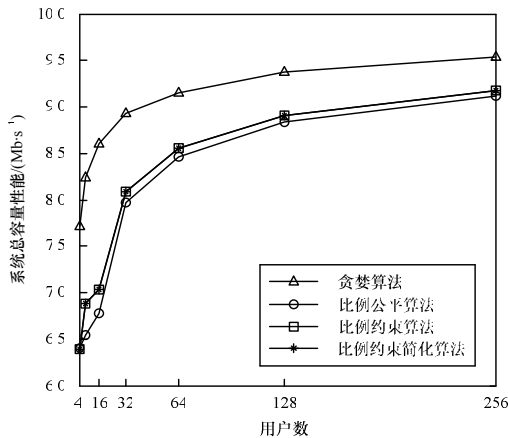


图2 4种算法的系统总容量性能

公平性指数为:

$$f = \frac{(\sum_{k=1}^K C_k)^2}{K \sum_{k=1}^K C_k^2} \quad (17)$$

其中,  $f$  越趋近于1表示算法的分配公平性越好。如图3所示,各算法分配的公平性均随着用户数目的增加而降低,特别是在用户数目大于资源块数目的情况下,这是由于随着用户数目的增加,数量有限的资源块并不能满足所有用户的分配需求。所提出的比例约束算法在用户数目小于资源块数目

时公平性略优于比例公平算法,而在用户数目更大的范围内两者公平性相同,且这2种算法的分配公平性均显著优于贪婪算法。

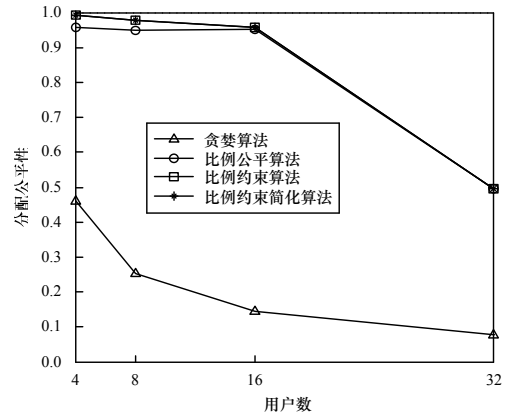


图3 4种算法的分配公平性

最小用户容量为:

$$C_{min} = \arg \min_{k \in K} C_k(P_k, I_{ch,k}) \quad (18)$$

为了最大限度地实现公平性,要求每次分配尽量避免给某一用户分配过小的信道容量。如图4所示,当用户数目为8时,比例约束算法的最小用户容量性能显著优于贪婪算法,且要优于比例公平算法31.8%。

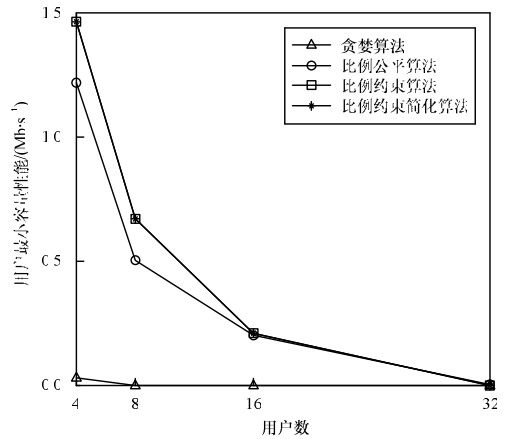


图4 4种算法的最小用户容量性能

对算法复杂度(表示计算时间)的分析以Matlab仿真时间来衡量,实验结果如图5所示。

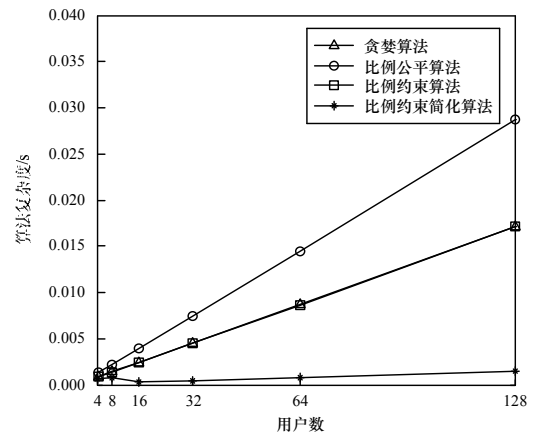


图5 4种算法的复杂度

由图5可知,比例公平算法的复杂度最高,比例约束算  
(下转第80页)