

## 多小区 OFDMA 系统的分布式资源分配方案

孙治水 尹长川 乐光新

(北京邮电大学数字通信与信息网络实验室 北京 100876)

**摘要:** 该文研究了多小区 OFDMA 系统中下行链路的资源分配问题, 主要考虑同信道干扰和频率选择性衰落对资源分配的影响, 提出一种基于基站的分布式分配方案, 同时考虑用户的服务质量要求(QoS)及公平性, 完成子载波和功率的联合分配。算法只要求基站间简单的子载波使用计数的信息交换, 不会给系统带来很大的信令负载。仿真表明, 通过调整参数, 该算法可以取得不同性能间的折衷。

**关键词:** OFDMA; 多小区; 分布式算法; 蜂窝网络; 资源分配

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)06-1295-04

## A Distributed Resource Allocation Scheme for Multi-cell OFDMA Systems

Sun Zhi-shui Yin Chang-chuan Yue Guang-xin

(Laboratory of Digital Communications and Information Networks, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** In this paper, a distributed resource allocation scheme is developed for OFDMA cellular systems in a downlink transmission. The major impairments considered are co-channel interference and frequency selective fading. The allocation problem includes assignment of sub-carriers, bit loading and power control for multiple users considering their individual QoS as well as the fairness. Exchanging the simple occupation of sub-carriers among cells, the scheme does not result in heavy signal load. Simulation results show that the allocation scheme can achieve the tradeoff among different performance objects by adjusting the parameters.

**Key words:** OFDMA; Multi-cell; Distributed algorithm; Cellular network; Resource allocation

### 1 引言

无线多媒体业务的发展, 要求无线信道支持更可靠更高速率的通信, 并能保证各个用户的QoS及用户间的公平性。在诸多技术中, OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)最为引人注目。OFDM由于其抗ISI(符号间干扰)的能力及灵活的频率信道控制, 可以提供高性能的物理层链路<sup>[1, 2]</sup>。

在 OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiple Access)多用户系统中, 对某个用户来说信道质量很差的子载波, 对于另一个用户来说信道质量可能会很好, 因而可以相应地分配子载波。通过自适应的子载波分配, 来自不同位置的用户间的信道分集可得到充分利用, 称之为“多用户分集”<sup>[3]</sup>。

在单小区的情况下, 已有大量文献研究了分配算法<sup>[3-6]</sup>。基于OFDMA的蜂窝网络中的资源分配, 除了要充分利用多用户分集外, 还要考虑频率复用带来的共道干扰、用户的QoS及频谱的充分利用。OFDMA中的DCA(Dynamic Channel

Allocation)不同于传统的DCA, OFDMA由于采用自适应调制而不需要预先设定的SINR阈值, 而且系统中用户的速率要求是不同的, 信令负载也是OFDMA系统需要考虑的一个因素。文献[7]提出一种集中控制式的分配算法, 在分配子载波及功率的同时兼顾用户的速率要求; 文献[8]中提出的一种分布式功率分配算法, 采用功率注水算法后丢弃SINR较低的子载波, 这种算法只考虑了一个用户的情况, 没有考虑多用户分集及用户间的公平性。文献[9]提出了一种基于非合作博弈的分布式算法, 联合分配功率和子载波, 但该文仅考虑了每个小区只有一个干扰用户的情况。文献[10]提出了半分布式的分配算法, 该算法仍需要一定的集中控制。集中式的分配方案往往由于算法复杂而无法实际应用, 所以分布式算法越来越来引起人们的重视。

本文提出一种基于基站的分布式算法, 基站之间交换简单的信息, 资源分配算法在各个小区独立进行, 同时考虑用户的服务质量要求(QoS)及公平性, 完成子载波和功率的联合分配。多小区的资源优化是一个很复杂的问题, 仿真表明, 本文的算法可以在复杂度和性能之间取得一定的折衷, 是一种实际且易于实现的分配方案。

### 2 系统模型

考虑 OFDMA 蜂窝系统下行链路的情况, 设系统中有

2005-11-07 收到, 2006-04-28 改回

国家“863”计划(2003AA12331004), 国家自然科学基金(60472070), 国家科技攻关计划重大项目(2003BA808A16)和教育部科学技术研究重点项目(105035)资助课题

$M$  个小区,  $N$  个 OFDM 子载波, 每个小区有一个服务基站, 每小区内有  $U_m$  个用户。假定每个子载波的带宽均小于信道的相干带宽, 则每个子载波的信道为平坦衰落; 又假定基站可以获得每个用户在各个子载波上的瞬时信道增益, 并且分配信息可以无失真地反馈到用户终端; 并进一步假设可以忽略 ICI(Inter-Channel Interference)。

假设小区  $m$  中用户  $k$  在子载波  $n$  上经过路径损耗、阴影衰落及频率选择性衰落, 其信道增益记为  $h_{m,n,k}^2$ , 子载波上的分配功率为  $P_{m,n,k}$ , 若  $P_{m,n,k} = 0$  则表示子载波  $n$  未分配给用户  $k$ 。

同一小区内的用户不能共用相同的子载波, 考虑复用因子为 1 的情况, 则用户  $k$  在子载波  $n$  上受到的干扰主要来自相邻小区  $G_m$  中子载波  $n$  的复用, 有

$$I_{m,n,k} = \sum_{k' \neq k, m' \in G_m} h_{m',n,k'}^2 P_{m',n,k'} \quad (1)$$

则用户  $k$  在子载波  $n$  上的接收信干比 SINR 可以表示为

$$\text{SINR}_{m,n,k} = (h_{m,n,k}^2 P_{m,n,k}) / (\sigma^2 + I_{m,n,k}) \quad (2)$$

其中  $\sigma^2$  是噪声功率。

根据香农(Shannon)的信道容量理论, 用户  $k$  在子载波  $n$  上的容量为

$$c_{m,n,k} = (1/2) \log_2(1 + \text{SINR}_{m,n,k}) \quad (3)$$

若使用自适应 M-QAM 调制,  $M_{m,n,k}$  表示用户在子载波上调制方式, 则该子载波能发送的比特数目为  $b_{m,n,k} = \log_2(M_{m,n,k})$ , 给定 BER, 用户  $k$  在子载波  $n$  上可以传输的最大比特数为<sup>[5]</sup>

$$b_{m,n,k} = \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SINR}_{m,n,k}}{\Gamma_{m,n,k}} \right) \quad (\text{bits/sec-Hz}), \quad (4)$$

$$\Gamma_{m,n,k} = -\ln(5\text{BER}) / 1.5$$

设每个基站的总发送功率最大为  $P_m$ , 用户  $k$  的最低速率要求为  $R_{m,k}$ , 资源分配的目的在于各基站总传输功率一定的条件下, 使系统的吞吐量最大化, 并满足各个用户的速率要求。则问题可表述为

$$\max_{P_{m,n,k}} \sum_{m=1}^M \sum_{k \in U_m} \sum_{n=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{\text{SINR}_{m,n,k}}{\Gamma_{m,n,k}} \right) \quad (5)$$

其中须满足:  $\sum_{n=1}^N \sum_{k \in U_m} P_{m,n,k} \leq P_m, m \in \{1, 2, \dots, M\}; r_{m,k} = \sum_{n=1}^N b_{m,n,k} \geq R_{m,k}, k \in U_m, m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

显然, 式(5)是很复杂的非线性约束优化问题, 要得到最优解, 要求系统必须有中央控制器收集各小区的子载波、功率分配及用户分布情况, 这势必给系统带来巨大的信令负荷; M-QAM 调制要求式(4)中的  $b_{m,n,k}$  必须为整数, 这又增加了了解的复杂度。大量的运算会给系统带来不可容忍的延时。

### 3 分布式资源分配算法

假设系统中的  $M$  个小区只跟他的相邻小区交换子载波

使用信息, 亦即小区  $m$  只需向它的相邻小区  $G_m$  传送  $N$  个比特的信息, 如图 1 所示,

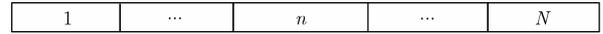


图 1 小区交换的信令格式

如果第  $n$  位为 0, 表示子载波  $n$  未分配; 为 1, 表示子载波  $n$  已分配。

则每个小区可计算出每个子载波在其相邻小区的分配计数  $\alpha_{m,n}$ , 基于此计数, 本文提出一种基于小区的分布式子载波和功率联合分配方案。

设  $g_{m,n,k} = h_{m,n,k}^2 / [(\sigma^2 + I_{m,n,k}) \Gamma_{m,n,k}]$ , 则  $g_{m,n,k}$  可以完全反应小区  $m$  中用户  $k$  在子载波  $n$  上的信道情况。

记  $\alpha_{m,n}$  为小区  $m$  的相邻小区  $G_m$  中子载波  $n$  的分配计数。为减小由于复用子载波带来的共道干扰, 定义一个信道增益因子

$$\lambda_{m,n} = 1/2^{\mu \alpha_{m,n}}, \quad \mu \geq 0 \quad (6)$$

令  $g'_{m,n,k} = \lambda_{m,n} g_{m,n,k}$ , 则复用的子载波上的信道增益均不同程度得到降低, 在此基础上使用功率注水, 则复用子载波上分配到的功率会得到不同程度抑制, 从而会降低共道干扰。

在小区内, 在保证用户速率的同时要考虑用户间分配的公平性, 文献[3]中使用的最大化最小准则使用户总是有机会参与分配, 但会使信道较好的用户受到惩罚。本算法中对最大化最小准则作了改进, 根据用户的速率要求和用户已分配的速率来决定哪个用户优先分配子载波, 即

$$\max \min((r_{m,k} - R_{m,k}) / R_{m,k}) \quad (7)$$

取得交换信息后, 算法在各小区内独立进行, 描述如下:

- (1) 计算  $g'_{m,n,k}$ 。
- (2) 令  $r_{m,k} = 0, k \in U_m, A = \{1, 2, \dots, N\}, P_{m,k} = 0, A_{m,k} = \emptyset$ 。
- (3) 找到速率离要求相对较大的用户,  $k^* = \arg \min_{k \in U_m} ((r_{m,k} - R_{m,k}) / R_{m,k})$ 。
- (4) 找到对用户  $k^*$  来说为最好的未分配子载波,  $n^* = \arg \max_{n \in A} g'_{m,n,k^*}$ 。
- (5) 假设等功率分配, 即子载波  $n^*$  分配的功率为  $P_m / N$ , 计算  $b_{m,n^*,k^*}$ , 若  $b_{m,n^*,k^*} \geq 1$ , 则接受; 否则说明用户  $k^*$  的信道状况不好, 不再参加分配剩余的子载波, 转到步骤(3)。
- (6) 将子载波  $n^*$  分配给用户  $k^*$ , 并增加用户  $k^*$  的功率,  $A_{m,k^*} = A_{m,k^*} \cup \{n^*\}, P_{m,k^*} = P_{m,k^*} + P_m / N, A = A - \{n^*\}$ 。
- (7) 对用户  $k^*$ , 将功率  $P_{m,k^*}$  在分配到的子载波  $A_{m,k^*}$  上进行功率注水<sup>[11]</sup>:

$$\text{注水水平 } \nu_{k^*} = \frac{1}{|A_{m,k^*}|} \left( P_{m,k^*} + \sum_{g'_{m,n,k^*}, n \in A_{m,k^*}} \frac{1}{g'_{m,n,k^*}} \right), \text{ 其中}$$

$|A_{m,k^*}|$  为集合  $A_{m,k^*}$  的势。

子载波上分配的功率  $P_{m,n,k^*} = (\nu_{m,k^*} - 1/g'_{m,n,k^*})$ ,  $n \in A_{m,k^*}$ 。

计算  $b_{m,n,k^*}$ , 若  $b_{m,n,k^*} \geq 1$ , 则接受子载波  $n^*$ ; 否则, 用户  $k^*$  不再参加分配, 且

$$A_{m,k^*} = A_{m,k^*} - \{n^*\}, \quad P_{m,k^*} = P_{m,k^*} - P_m / N, \quad A = A + \{n^*\}。$$

(8) 重复步骤(3)–步骤(7), 直到所有用户不再参加分配或所有子载波分配完毕。

### 4 仿真及分析

对算法进行仿真, 考察其性能。假设仿真的蜂窝网络中共有 19 个小区, 每个小区内有一个基站, 使用全向天线, 用户在系统整个的服务区域内随机出现, 如图 2 所示。

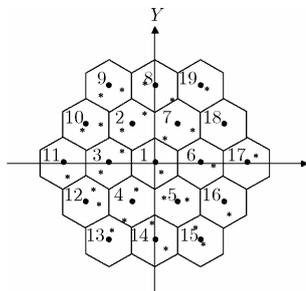


图 2 仿真使用的蜂窝网络示意图, 其中“.”为基站, “\*”表示用户的随机位置

系统仿真参数如表 1 所示:

表 1 系统的仿真参数

表 1 系统的仿真参数	
路径损耗指数	4
阴影衰落	6dB
最大时延扩展	200 ns
OFDM 子载波	128
错误概率(BER)	$10^{-4}$
用户速率要求	64bit/OFDM
调制方式	M-QAM 自适应调制, 无上限

如果选择 OFDM 符号的周期为  $4.8 \mu s$ , 则每个用户的速率要求为 13.3Mbit/s。我们从以下几个方面来衡量算法的性能:

(1) 系统吞吐量。这包括系统提供给所有用户的速率之和

$$\sum_k r_k。$$

(2) 中断概率。中断是指用户的瞬时速率低于预期的速率要求。我们只考虑数据业务的情况, 数据业务不同于语音业务, 它不需要始终维持一定的速率, 可以容忍一定延时和数据重传。

(3) 子载波的平均复用数。定义为  $\sum_{n=1}^N \frac{\psi_n}{MN}$ , 其中  $\psi_n$  是

使用子载波  $n$  的小区数。

(4) 系统的收敛次数。当一个小区单独的作出分配后, 由于共道干扰会引起其他小区的重新分配, 所有小区的重新分配次数称为系统的收敛次数, 收敛次数可以反映采用分

布式算法的系统的稳定性。

从式(6)中可看出, 参数  $\mu$  值越大, 则子载波复用越小, 反之, 则子载波的复用越大。仿真中分别取  $\mu = 0.2, \mu = 0.4, \mu = 0.8, \mu = 2.0, \mu = 4.0$ , 并与两个极端情况作比较: 充分复用和无复用。充分复用表示相邻小区可以充分复用全部的子载波, 无复用表示相邻小区不能复用任何子载波, 也即没有共道干扰存在。由图 3、图 4 可以看到, 随着  $\mu$  值的增大, 子载波的复用会降低, 同时由于复用引起的干扰也会降低, 从而系统的收敛次数也会随着减少, 系统趋于稳定。由图 5、图 6 可以看到, 中断概率会随  $\mu$  值的减小而降低, 系统吞吐量随  $\mu$  值的减小而增加, 这是因为充分的复用了子载波; 同时我们也看到, 当  $\mu$  值增大到一定程度(比如  $\mu = 4.0$ )时, 用户的中断概率超出了无复用的情况, 且系统的吞吐量也低于无复用的情况, 这说明较小的子载波复用不但不能带来系统性能的改善, 而且会由于干扰使系统性能下降。

由图 4、图 6, 当  $\mu > 0.8$  且系统内的用户数超过 20 时, 曲线趋于平坦, 系统的频率复用和吞吐量不再随用户的增加而增加。综合图 3, 图 4, 图 6, 图 7,  $\mu \leq 0.8$  是比较合适的选择。

本文采用  $\mu = 0.2, \mu = 0.6$  比较功率注水与等功率分配下的性能。从图 7-图 10 中可以看出无论从中断概率、收敛次数, 还是系统吞吐量、子载波复用, 功率注水都要比等功率的分配表现要好, 这说明功率注水与增益因子的结合可以较好地抑制共道干扰。

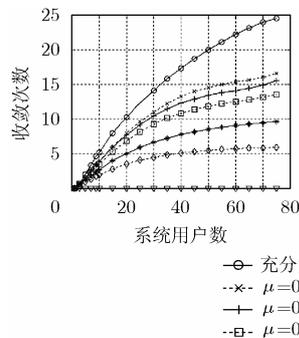


图 3 不同用户数下的系统收敛次数

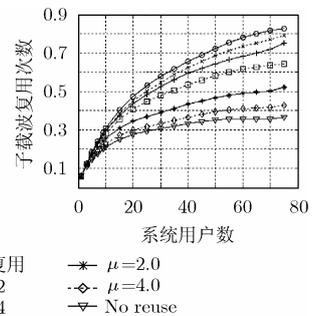


图 4 不同用户数下的子载波复用次数

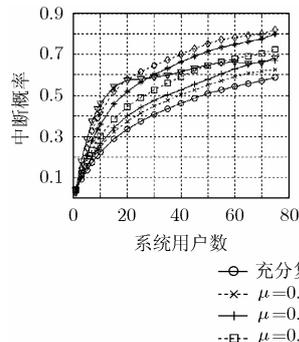


图 5 不同用户数下的中断概率

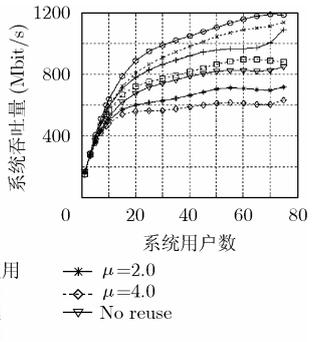


图 6 不同用户数下的系统的吞吐量

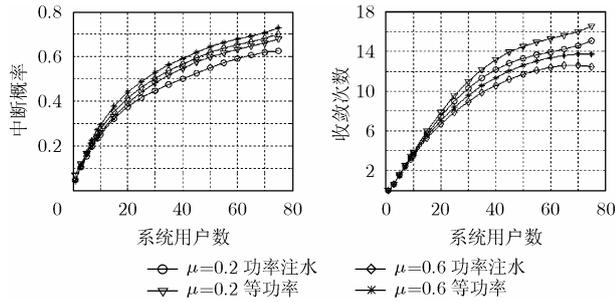


图 7 不同用户数下的中断概率

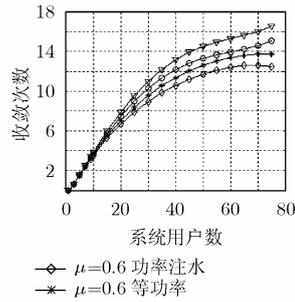


图 8 不同用户数下的系统收敛次数

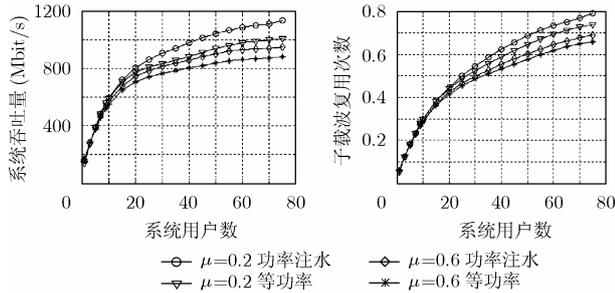


图 9 不同用户数下的系统的吞吐量

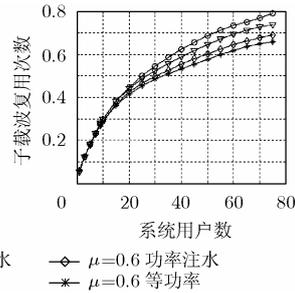


图 10 不同用户数下的子载波复用次数

## 5 结束语

多小区的资源优化是一个很复杂的问题, 本文研究了多小区 OFDMA 系统中下行链路的资源分配问题, 提出一种基于基站的分布式分配方案。算法主要考虑同信道干扰和频率选择性衰落对资源分配的影响。对于前者本文引入信道增益因子, 抑制对复用子载波的过度使用; 对于后者考虑到多用户的分集, 动态地为用户选择较好的子载波。算法同时考虑了用户的服务质量要求(QoS)及公平性, 完成子载波和功率的联合分配。算法只要求基站间简单的子载波使用计数的信息交换, 不会给系统带来很大的信令负载。仿真表明, 通过调整参数, 本算法可以取得不同性能间的折衷, 是一种实际且易于实现的分配方案。

## 参考文献

- [1] Yang B, Letaief K B, Cheng R S, and Cao Z. Channel estimation for OFDM transmission in multipath fading channels based on parametric channel modeling. *IEEE Trans. on Commun.*, 2001, 49(3): 467–479.
- [2] Keller T and Hanzo L. Adaptive multicarrier modulation: A convenient framework for time frequency processing in wireless communications. *Proc. IEEE*, 2000, 88(5): 611–640.
- [3] Rhee W and Cioffi J M. Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation. In Proc. Vehicular Technology Conf., Tokyo, 2000, vol.2: 1085–1089.
- [4] Wong C Y, Cheng R S, Letaief K B, and Murch R D. Multicarrier OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power Allocation. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1999, 17(10): 1747–1758.
- [5] Zhang Ying-Jun and Letaief K B. Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive Cell Selection for OFDM Systems. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1566–1575.
- [6] Jang J and Lee K B. Transmit power adaptation for multiuser OFDM systems. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2003, 21(2): 171–178.
- [7] Pietrzyk S and Janssen G J M. Radio resource allocation for cellular networks based on OFDMA with QoS guarantees. Global Telecommunications Conference, 2004, GLOBECOM '04, Texas, IEEE, 29 Nov.-3 Dec. 2004, Vol.4: 2694–2699.
- [8] Su Hsuan-Jung and Geraniotis E. A distributed power allocation algorithm with adaptive modulation for multi-cell OFDM systems. 1998 IEEE 5th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, Sun City, South Africa, 2-4 Sept. 1998, vol.2: 474–478.
- [9] Zhu Han, Zhu Ji, and Liu K J R. Power minimization for multi-cell OFDM networks using distributed non-cooperative game approach. Global Telecommunications Conference, 2004, GLOBECOM '04, Texas. IEEE, 29 Nov.-3 Dec. 2004, Vol.6: 3742–3747.
- [10] Li Guo-qing and Liu Hui. Downlink dynamic resource allocation for multi-cell OFDMA system. Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall, 2003 IEEE 58<sup>th</sup>, Orlando, Florida, 6-9 Oct. 2003, Vol.3: 1698–1702.
- [11] Cover T M and Thomas J A. Elements of Information Theory. New York: Wiley and Sons, 1991, 250–253.

孙治水: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为宽带 OFDM 技术及自适应资源分配。

尹长川: 男, 1968 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究领域为无线移动通信、宽带无线接入、OFDM 及 MIMO 技术。

乐光新: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为数字通信、无线移动通信系统。