

一种基于 OFDMA 系统的频率复用方法

许方敏^{①②} 陶小峰^① 张平^①

^①(泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学) 北京 100876)

^②(杭州电子科技大学通信工程学院 杭州 310018)

摘要: 频率复用作为提高小区边缘用户性能的有效方式已被广为研究。然而,如何在提高小区边缘用户性能的同时,使频谱利用率得到有效提高仍是一个有待解决的问题。在以正交频分多址(OFDMA)为基本多址方式的第 4 代(4G)系统中该问题尤为突出。为此,该文提出了一种 OFDMA 系统中的频率复用方法,通过抑制小区间干扰提高小区边缘用户性能;同时,根据小区中心与小区边缘通信环境的差异,分别对其实施不同的频率复用策略使频率复用系数接近于 1 以提高频谱利用率。仿真结果表明,与未经过频率规划的全频率复用相比,该文提出的频率复用方法提高了系统吞吐量并显著改善了小区边缘用户性能。

关键词: 正交频分多址(OFDMA); 频率复用; 小区边缘用户性能; 第 4 代(4G)移动通信

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0903-04

A Frequency Reuse Scheme for OFDMA Systems

Xu Fang-min^{①②} Tao Xiao-feng^① Zhang Ping^①

^①(Key Laboratory of Universal Wireless Communications (Beijing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education, Beijing 100876, China)

^②(Institute of Communications Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Frequency reuse, as an efficient strategy to improve Cell-Edge User (CEU) performance, has already been well studied. However, improving spectral efficiency, as well as enhancing performance for CEU, is still left for an open research issue, especially for Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)-based 4-generation (4G) systems. Hence, a frequency reuse scheme which improves CEU performance by inter-cell interference mitigation is proposed for OFDMA systems here. In the meantime, to achieve a frequency reuse factor near 1, different frequency reuse strategies are assigned to cell-edge and cell-center due to the discrepancy between them. Simulation results demonstrate that, compared with full frequency reuse without frequency planning, the proposed frequency reuse scheme improves system throughput and CEU throughput significantly.

Key words: Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA); Frequency reuse; Cell-edge user performance; The 4th generation mobile communication

1 引言

随着移动通信技术的不断发展和演进以及全球范围内移动用户数的持续增长,移动业务主体开始向更高速率及质量的无线通信业务逐步转变。这不仅预示着手持移动终端将逐步取代 PC 机成为人机接口的主要设备,同时也意味着,为满足未来用户的进一步需求,移动通信系统向第四代(4G, 4th Generation)移动通信系统的演进已成为必然的趋势。

在 4G 研发及标准化过程中,关于小区边缘性能下降的问题也受到了极大的关注,第 3 代合作伙伴(3GPP)长期演进计划(LTE)^[1]与 3GPP2 空中接口演进计划(AIE)^[2,3]的系统需求中都强调了必须要实现提高小区边缘性能这一关键

目标。事实上,小区边缘性能问题是蜂窝移动通信系统的一个固有问题。频率复用^[4-6]作为改善小区边缘用户性能的重要策略已被广为研究。研究表明^[4],在频率复用系数为 1 的正交频分多址(OFDMA)系统中,复用系数为 1 即表示相邻小区都使用相同的频率资源,表面上达到很高的频谱效率,但是当两个在小区交界处的用户使用同一频率与不同基站通信时,两个用户彼此间产生的干扰将导致信干比急剧下降,严重影响小区边缘的服务质量。另一方面,由于 OFDMA^[7]本质上仍是频分多址,所采用的频率复用方法的复用系数只有特定的几个选择,如 1, 3, 7 等。较高的复用系数(如 3 或 7)可以有效地抑制小区间干扰、提高小区边缘性能,但频谱效率将降低到 1/3 或 1/7 甚至更低,这远远满足不了 4G 系统高质量、高速率的业务需求。文献[6]提出的软频率复用方法,在一定程度上提高了系统性能,由于相邻小区边缘采用完全正交的频率集合,因此限制了频谱效率的

2007-10-23 收到, 2008-09-15 改回

国家自然科学基金重大项目(60496312)和国家 863 计划项目(2006AA01Z260)资助课题

提高。为此,本文提出了一种基于 OFDMA 系统的频率复用方法,根据小区边缘用户和小区中心用户所处通信环境的特点,分别对其采用不同的频率复用策略。进一步地,本文提出了基于最大效用函数的调度算法以优化系统性能,这种基于频率预规划的调度算法与一般的算法相比有更低的复杂度。需要说明的是,本文关于区域的划分是一个抽象的概念,实际上是根据用户在不同频率集合上的效用函数决定的。

2 基于 OFDMA 的频率复用方法

根据用户在小区边缘和小区中心所处的通信环境不同,将蜂窝网络以如下方式划分:如图 1 所示,以 3 个两两相邻的小区:小区 1(阴影区域),小区 2(竖线区域),小区 3(空白区域)为一个簇;将每个小区分为小区边缘和小区中心;小区边缘区域则可以看成两类,分别为:第 1 类边缘区域即两两相邻的 3 个小区交界处的边缘区域(参见图 1 中标记为“1”,“2”,“3”的边缘区域),第 2 类边缘区域即除第 1 类边缘区域的其它边缘区域(参见图 1 中标记为“4”,“5”,“6”,“7”,“8”,“9”的边缘区域)。再将整个可用频段 Ω 分为两个互不重叠的部分:频率集合 G 和频率集合 F 。小区中心对应于频率集合 G ,即属于小区中心的用户可使用该集合中的频率。边缘区域的频率分配方式如下:将 F 分为 3 个频率集合 F_1, F_2 和 F_3 ,分别为小区 1,小区 2 和小区 3 的小区边缘用户的可用频段。下面需要为数字“1”至数字“9”所在的区域分配可用频率,数字“1”(小区 1 中)所在的区域主要受到相邻小区——小区 2 和小区 3 的干扰,因此它的可用频率应该去掉小区 2 和小区 3 的可用频率,即 $F_1 \setminus (F_2 \cup F_3)$ 。数字“4”所在的区域主要受到来自小区 2 的干扰,因此它的可用频率集合应该为小区 1 的可用频率集合去掉小区 2 的可用频率集合,即 $F_1 \setminus F_2$ 。数字“9”所在的区域主要受到来自小区 3 的干扰,因此它的可用频率集合应该为小区 1 的可用频率集合去掉小区 3 的可用频率集合,即 $F_1 \setminus F_3$ 。综上所述,在小区 $i(i=1, 2, 3)$ 中某边缘区域的可用频率集合即: {该边缘区域所在小区的可用频率} \setminus {主要干扰小区的边缘可用频率}。由此可得,区域 2, 区域 3, 区域 5, 区域 6, 区域 7, 区域 8 的可用频率集合分别为 $F_2 \setminus (F_1 \cup F_3)$, $F_3 \setminus (F_1 \cup F_2)$, $F_3 \setminus F_1$, $F_2 \setminus F_3$, $F_3 \setminus F_2$, $F_2 \setminus F_1$ 。

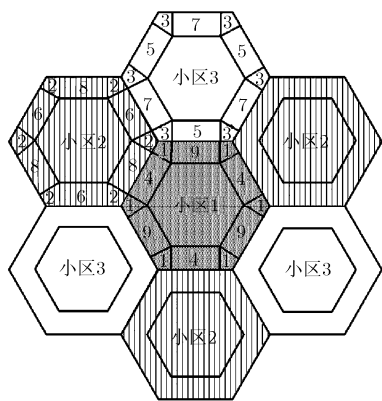


图 1 频率复用系统模型

可见,本文所提出的频率复用方法一方面通过协同小区间的干扰避免了每个区域的主要干扰源,另一方面,从频率集合的分配来看,通过不同区域的可用频率集合相交的方式提高频率利用率。在 OFDMA 系统中,这种方法的每个子载波(频率)集合都对应于一个用户集合。因此,子载波分配时不需要在系统中所有用户中选择效用最大的用户,极大地降低了实现的复杂度。基于这种频率复用预规划的子载波分配方法流程如下:

步骤 1 确定用户类别(用户类别包括中心用户和属于不同区域的边缘用户)以及对应的可用子载波集合。确定的方法为:确定用户的服务小区后,在服务小区对应的子载波集合上,确定用户总传输能力最高的子载波集合称为该用户的可用子载波集合。

步骤 2 根据每个用户的每个空间子信道在其可用子载波集合的每个子载波上的平均传输能力,以及该用户要求的最小速率等,分别确定每个用户在每个子载波上的调度优先级,若该子载波不在此用户的可用子载波集合内,则定义优先级为 0。

步骤 3 将每个用户在其对应的子载波集合中每个子载波上的调度优先级进行排序,并分别选取优先级最高的一个用户为其进行服务。

下面结合基于最大效用函数的调度算法说明步骤 2 及步骤 3 的实现。设每个用户都有一个表征其满意度的效用函数 U , 则对任意其他的调度策略 S , 存在某调度策略 P , 有

$$\sum_{k \in K} U(R_k^P) \geq \sum_{k \in K} U(R_k^S) \quad (1)$$

成立。令 $r_{k,n}$ 表示 t 时刻用户 k 在子载波 n 上的传输速率, R_k^P 表示调度策略为 P 的情况下用户 k 的平均传输速率;集合 K 为子载波 n 所在的频率集合对应的用户集合。为了使基于式(1)的调度策略更有可操作性,对式(1)进行等价变换。用 $K^{(P)}$ 表示调度策略 P 选择的用户集合, $K^{(S)}$ 表示调度策略 S 选择的用户集合。设 $\bar{R}_1 = [(T-1)\bar{R}_k + \omega_{k,n}r_{k,n}]/T$ (T 为表示统计平均速率的时间窗, \bar{R}_k 表示时间窗 T 之内用户 k 的速率平均值, $\omega_{k,n} = 1$ 或 0 , 1 表示子载波 n 分配给用户 k , 否则为 0) 和 $\bar{R}_2 = [(T-1)\bar{R}_k]/T$ 表示 t 时刻在经过一次子载波选择后,用户速率的更新,并且假设对于调度策略 P , 设速率 R_k^P 更新后为 \bar{R}_k^P , 则

$$\bar{R}_k^P = \begin{cases} \bar{R}_1, & k \in K^P \\ \bar{R}_2, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

易见 $\sum_{k \in K \setminus (K^{(P)} \cup K^{(S)})} U(R_k^P) - \sum_{k \in K \setminus (K^{(P)} \cup K^{(S)})} U(R_k^S) = 0$ 。因此,式(1)等价于

$$\sum_{k \in K^{(P)} \cup K^{(S)}} U(R_k^P) \geq \sum_{k \in K^{(P)} \cup K^{(S)}} U(R_k^S) \quad (3)$$

故

$$\begin{aligned} \sum_{k \in K^{(P)}} U(R_k^P) + \sum_{k \in K^{(S)} \setminus K^{(P)}} U(R_k^P) &\geq \sum_{k \in K^{(S)}} U(R_k^S) \\ &+ \sum_{k \in K^{(P)} \setminus K^{(S)}} U(R_k^S) \end{aligned} \quad (4)$$

经过一次载波选择后，式(4)变为

$$\sum_{k \in K^{(P)}} U(\tilde{R}_1) + \sum_{k \in K^{(S)} \setminus K^{(P)}} U(\tilde{R}_2) \geq \sum_{k \in K^{(S)}} U(\tilde{R}_1) + \sum_{k \in K^{(P)} \setminus K^{(S)}} U(\tilde{R}_2) \quad (5)$$

再在式(5)左右两边同时加上 $\sum_{k \in K^{(S)} \cap K^{(P)}} U(\tilde{R}_2)$ 可得

$$\sum_{k \in K^{(P)}} (U(\tilde{R}_1) - U(\tilde{R}_2)) \geq \sum_{k \in K^{(S)}} (U(\tilde{R}_1) - U(\tilde{R}_2)) \quad (6)$$

因此，对于某个子载波 n 选择用户 k^* ，其中 $k^* = \arg \max_k [U((T-1)\tilde{R}_k + r_{k,n}/T) - U((T-1)\tilde{R}_k/T)]$ 。

3 仿真与分析

依据 3GPP LTE 的系统级仿真要求和典型场景^[8]搭建了仿真平台。在本仿真中，设置 27 个小区半径为 1km 的小区。区域边缘采用 wraparound，将所有的蜂窝置于一个平行四边形中，经过处理使上边界与下边界相连、左边界与右边界相连，这样形成了一种环绕往复的结构，当移动台移出上边界时就会自动地从下边界出现。用户在初始化阶段均匀分布在仿真区域中，并以 3km/h 的移动速度在仿真区域内随机移动。然后，计算移动台到基站间的衰落，包括路径损耗、天线增益和阴影衰落以及多径快衰落；接着计算干扰和分配资源。最后进行系统性能各项指标的统计。

3.1 仿真参数

仿真中用户使用的载波频率为 2 GHz，带宽为 10MHz，对于某个子载波 n 选择用户 k^* 根据 $k^* = \arg \max_k [\ln(r_{k,n}/(T-1)\tilde{R}_k)]$ ，其它的系统参数详见表 1。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
子载波间隔	15 kHz
采样频率	1.92 MHz
CP 长度	7.29/14 μ s/sample
FFT 大小	1024
数据子载波数目	600
帧长	10 ms
每帧的时隙个数	6
大尺度衰落	$L=128.1+37.6\lg(R)$, R 为距离, 单位 km
阴影衰落	对数正态衰落 (UMTS 30.03, B 1.41.4)
阴影相关距离	50 m
阴影标准差	8dB
小区间阴影相关系数	0.5
多径信道模型	Typical Urban (TU)
基站最大发射功率	43 dBm
移动台和基站的最小距离	35 meters
仿真步长	5 ms

3.2 仿真结果

每隔 100 帧计算并记录用户在其间获得的平均数据传输速率。图 2 和图 3 给出了本文的频率复用方法与全频率复用方法系统吞吐量的比较。其中，全频率复用方法的频率复用系数为 1 并且没有采用频率规划，此时每个小区都用相同频率。另外，仿真中采用同样的业务模型，因此用户数的增加意味着系统负载的增加。图 2 表明，本文的复用方法显著地提高了用户平均吞吐量。但是，随着用户数的增加，使用了频率规划的频率复用方法的用户平均吞吐量下降较快，而频率复用为 1 的方法的平均吞吐量则变化较慢。这是由于所提出的频率复用主要保证小区边缘用户，所以会尽量多地将资源分配给边缘用户，而边缘用户的传输能力没有中心用户的传输能力高，所以用户平均吞吐量会下降较快。

图 3 给出了用户数为 30 时，小区中心用户吞吐量(图中虚线所示)和小区边缘用户吞吐量(图中实线所示)的累计分布函数(CDF)曲线。其中带“o”号的线条表示频率复用系数为 1 的全频率复用方法，带“□”号的线条表示本文提出的频率复用方法。从图 3 可以看出，经过频率规划后，由于适当协同了小区间干扰、合理利用了频率资源，小区中心吞吐量也略有提高。在没有频率规划的时候，小区边缘用户性能恶劣，用户服务质量得不到保证；而本文的频率复用显著改善了小区边缘用户的性能。

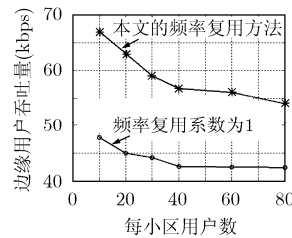


图 2 用户平均吞吐量

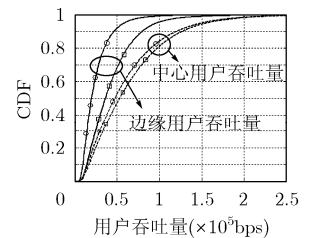


图 3 吞吐量的 CDF 曲线

4 结束语

随着 4G 系统的研发，各种高速率、高质量多媒体业务的不断增加，小区边缘性能下降变得尤为严重。另一方面，OFDMA 已成为 3GPP LTE 的下行链路的主流多址方案，大部分研究机构也表明将采用 OFDMA 作为 4G 的多址方式。传统上用来提高小区边缘性能的频率复用方法，在以 OFDMA 为基本多址方式的 4G 系统中遇到了新的挑战。本文提出了一种基于 OFDMA 系统的频率复用方法，通过对不同区域采用不同的频率复用策略，有效抑制了小区间干扰、提高了小区边缘用户性能，同时使频率复用系数接近于 1。仿真结果表明，未经过频率规划的全频率复用方法的小区边缘用户之间干扰严重，用户服务质量无法得到保障。而所提出的频率复用有效提高系统了吞吐量，并且显著地改善了小区边缘用户的吞吐量。

参 考 文 献

- [1] 3GPP. TR25.913. Requirements for evolved UTRA (E-UTRA) and evolved UTRAN (E-UTRAN) [S]. 2005.
- [2] 3GPP2. cdma2000 enhanced packet data air interface system-system requirements document [S]. 2005.
- [3] 3GPP2. C30-20060731-0xx. Joint proposal for 3GPP2 physical layer for FDD spectra [S]. 2006.
- [4] Huo C, Sesay A B, Fapojuwo A O. Co-channel diversity schemes for an OFDM based cellular system with one-cell frequency reuse [J]. *WCNC*, 2006, 2: 798-803.
- [5] Wang Zhao-cheng and Stirling-Gallacher R A . Frequency reuse scheme for cellular OFDM Systems. *Electronics Letters*, 2002, 38(8): 387-388.
- [6] R1-050841. Further analysis of frequency reuse scheme, London, UK, <http://www.3gpp.org>, Aug.2005.
- [7] Niyato D and Hossain E. Adaptive fair subcarrier/rate allocation in multirate OFDMA networks: Radio link level queuing performance analysis. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, 2006, 55(11): 1897-1907.
- [8] 3GPP. TR 25.814. Physical layer aspects for evolved UTRA [S]. V7.1.0, 2006.
- 许方敏: 女, 1980 年生, 博士, 讲师, 研究方向为先进移动通信系统及其关键技术、包括干扰抑制策略、无线资源管理策略。
- 陶小峰: 男, 1970 年生, 博士, 副教授, 研究方向为先进移动通信系统及其关键技术。
- 张 平: 男, 1959 年生, 博士, 教授, 主要研究方向为下一代移动通信系统中的关键技术及实现。