

# 一种支持宏分集策略的软分数频率复用方法

许方敏<sup>1,2</sup>, 陶小峰<sup>1,2</sup>, 许晓东<sup>1,2</sup>, 张 平<sup>1,2</sup>

(1. 北京邮电大学无线新技术研究所, 北京 100876; 2. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:** 在 3GPP2 AIE 的框架标准中同时要求采用频率复用和宏分集, 但是现有的频率复用方法是无法支持宏分集策略的. 鉴于此, 在软分数频率复用方法的基础上, 基于可拓集合思想, 通过建立可用频段与研究区域之间的物元模型, 得到了一种能够在小区边缘支持宏分集的软分数频率复用方法. 研究表明该频率复用方法在有效降低小区干扰的同时提高了频率利用率, 同时小区边缘用户由于小区间干扰的协调以及宏分集策略带来的增益, 性能得到了较大提高. 仿真结果表明该方法有效地提高了小区边缘的平均容量.

**关键词:** 频率复用; 宏分集; 软分数频率复用; 可拓集合; 3GPP2 AIE

**中图分类号:** TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-136-05

## Soft Fractional Frequency Reuse Scheme with Macro Diversity

XU Fang-min<sup>1,2</sup>, TAO Xiao-feng<sup>1,2</sup>, XU Xiao-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Ping<sup>1,2</sup>

(1. *Wireless Technology Innovation Institute (WTI), Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China*; 2. *Key Laboratory of Universal Wireless Communications (Beijing University of Posts and Telecommunications), Ministry of Education, Beijing 100876, China*)

**Abstract:** Frequency reuse and macro diversity are both requested in 3GPP2 AIE system, but current frequency reuse schemes do not support macro diversity. In order to obtain a frequency reuse scheme with macro diversity, a novel frequency reuse scheme based on soft fractional frequency reuse (SFFR) is proposed. Furthermore, matter-element model, using extension set theory, is established. By analyzing the model, a scheme called SFFR, supporting macro diversity, is derived. Study shows that the proposed scheme can effectively reduce the inter-cell interferences as well as increase spectral efficiency. Furthermore, performance of cell-edge users is improved because of interference coordination and macro diversity gain. Simulation results show that this scheme improves average capacity of cell-edge.

**Key words:** frequency reuse; macro diversity; soft fractional frequency reuse; extension set; 3GPP2 AIE

### 1 引言

目前, 移动通信行业面临大幅度发展的契机, 随着第三代(3G, 3rd Generation)移动通信系统在全球范围内逐渐得到商用, 关于 3G 系统增强与演进的标准化工作也已经全面展开. 其中 3GPP 长期演进计划(LTE, Long Term Evolution)<sup>[1]</sup>已经进入了标准的实际制订阶段(Work Item); 3GPP2 空中接口演进计划(AIE, Air Interface Evolution)<sup>[2]</sup>也完成了频分双工框架标准的制订<sup>[3]</sup>, 并开始了进一步的技术点标准化工作. 在标准化工作中, 关于小区边缘性能下降的问题受到了极大的关注, 3GPP LTE 与 3GPP2 AIE 的系统需求中都强调了必须要实现小区边缘性能提高这一关键目标.

目前各提案中用于提高小区边缘用户性能的方法

通常包括频率复用、宏分集、小区间干扰白化以及小区间干扰删除等<sup>[4]</sup>. 其中频率复用作为一种有效的干扰协调方法, 在 AIE 频分双工系统的框架标准中得到支持<sup>[3]</sup>. 同时, 频率复用在传统策略的基础上得到了新的发展, 出现了软频率复用方法<sup>[5]</sup>、分数频率复用方法<sup>[6]</sup>等, 本文作者也提出了一种软分数频率复用方法<sup>[7,8]</sup>, 可以通过有效地为小区边缘用户分配更多可用的频段来提高小区边缘用户性能. 软分数频率复用方法的提案也提交至 3GPP2 AIE, 得到了 3GPP2 各成员单位的关注. 另外, 在 3GPP2 AIE 计划中, 出于对 cdma2000 系统的后向兼容考虑, AIE 系统中基站间同步被保留, 宏分集方案也作为有效的提高小区边缘用户性能的方法, 写入 AIE 频分双工系统的框架标准中<sup>[3]</sup>.

针对 3GPP2 AIE 系统中既采用频率复用又采用宏

收稿日期: 2007-06-11; 修回日期: 2008-01-11

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No. 60496312); 国家 863 高技术研究发展计划(No. 2006AA01Z260); 新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-05-0116)

分集的特点,而现有的软频率复用、分数频率复用以及软分数频率复用均由于对小区边缘部分区域的划分问题不能支持宏分集.所以研究如何支持宏分集的频率复用成为了 3GPP2 AIE 系统必须解决的问题.

本文基于作者提出的软分数频率复用,进一步提出了一种支持宏分集策略的软分数频率复用,通过在实施频率复用时对小区边缘区域的合理划分来支持宏分集,有效的解决了 3GPP2 AIE 系统目前面临的问题.同时结合宏分集的软分数频率复用可以进一步提高小区边缘用户性能,为小区边缘用户提供更高的数据速率.

## 2 蜂窝系统区域划分模型

在实际的移动通信系统中,处于小区边缘的用户由于距离基站较远,而且受到其它小区的干扰较大.因此,与处于小区中心的用户相比,小区边缘用户的性能将有所下降.为了实现提高小区边缘性能的目标,本文采用的频率规划策略为:将每个小区中的用户分为两组,分别为小区中心用户和小区边缘用户,对这两组用户分别采用不同的频率复用策略,在保证小区中心用户正常通信的基础上,通过对边缘区域进行适当的频率规划,减小处于小区边缘用户受到的干扰,提高小区边缘性能.

根据本文提出的方法,对小区中心与小区边缘区域的具体划分如图 1 所示.在无线蜂窝网络中任取小区 1、小区 2、小区 3 三个两两相邻的小区组成一个区群,将每个小区中的用户按所在区域分为两组,一组为小区中心用户,一组为小区边缘用户.参见图 1,区域  $C_5, C_6, C_7$  分别为小区 1、小区 2、小区 3 的中心区域,区域为位于三个小区交界处的边缘区域,称为 I 型边缘区

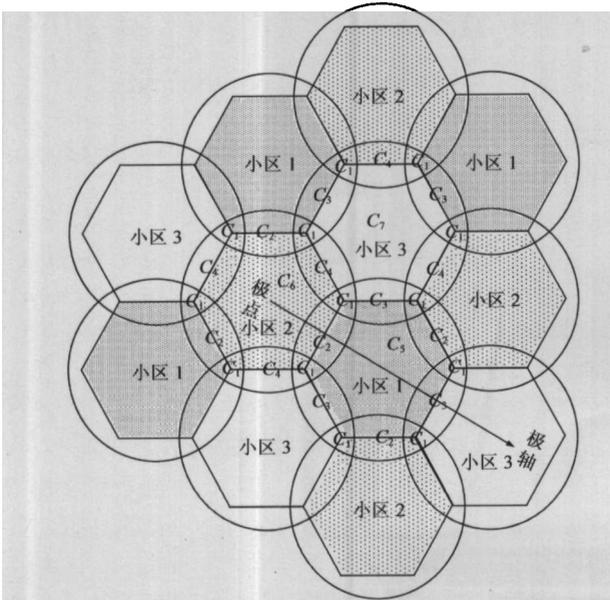


图 1 蜂窝系统区域划分模型

域;区域  $C_2$ 、区域  $C_3$  和区域  $C_4$  表示处于两个小区交界处的边缘区域,称为 II 型边缘区域;图中区域的划分只是一个示意性的表示,实际应用中是根据用户接收信号质量来区分的.

## 3 基于可拓集合的频率规划

在实际系统的频率规划过程中,一个频段的使用状态并不是固定的,而是始终处于变化中.因此,需要一个可以描述这种变化过程的模型来分析这个动态的频率规划过程.集合可以有效的表示出某个频段与区域或者用户的所属关系.经典的康托集合可以描述确定的某个区域与可用频段的对应关系,描述一个元素属于一个集合使用  $\{0,1\}$  来表示.在随后发展起来的模糊集合理论中此二值问题被模糊化了,其被推广到一个元素隶属于一个集合的程度——隶属度;隶属度的取值范围是  $[0,1]$ .在蔡文<sup>[9]</sup>提出的可拓集合理论中,隶属度的取值范围从  $[0,1]$  被扩展到了  $(-\infty, +\infty)$ ,并称之为关联度.于是可拓集合通过对物元进行变换使得集合可以包含任意的元素,而每一元素都通过关联函数对应到其各自的关联度上.相对比经典康托集合和模糊集合,可拓集合的本质在于它描述了元素从不具有性质  $P$  转化到具有性质  $P$ ,这是质的改变.因此,可拓集合可以用来描述频率规划过程中的动态特性,本文用可拓集合思想来研究频率复用方案,并把整个系统的频率规划问题归结为区域  $(-\infty, +\infty)$  的可用频段的分配问题.

### 3.1 物元模型的建立

与 7 个区域  $C_1, C_2, \dots, C_7$  相对应的,将系统中全部可用的频段集合  $F$  划分为互不重叠的 7 个子频段集合,分别记为  $f_1, f_2, \dots, f_7$ ,即  $f_i \cap f_j = \emptyset$  ( $\emptyset$  表示空集)且  $\cup f_i = F$ ,其中  $i=1, \dots, 7, j=1, \dots, 7$ .

基于可拓集合<sup>[9]</sup>,建立关于可用频段与区域之间的物元模型如下:

$$\begin{aligned} R_1 &= [f_1, \text{related fields}, (C_1, C_2, \dots, C_7)] \\ R_2 &= [f_2, \text{related fields}, (C_1, C_2, \dots, C_7)] \\ &\dots \end{aligned} \tag{1}$$

$$R_7 = [f_7, \text{related fields}, (C_1, C_2, \dots, C_7)]$$

并定义  $f_i$  关于  $C_j$  的关联度为  $K_f(C_j)$  (简记为  $K_{ji}$ ),  $i=1, \dots, 7, j=1, \dots, 7$ .其中,  $f_i$  表示物元模型  $R_i$  中物的名称,  $\text{related fields}$  表示物元模型中物的属性,  $C_1, C_2, \dots, C_7$  表示物元模型中属性的值.

根据可拓集合理论,可以给出以下简化的规则:

(1) 假设  $K_f(C_j) \in [-1, 1]$  (其中  $[-1, 1]$  表示 -1 到 1 的闭区间);

(2)  $K_f(C_j)$  表示  $f_i$  被区域  $C_j$  调用的优先级  $K_f(C_j)$

越大意味着优先级越高;

(3)  $K_f(C_j) = 1$  表示  $f_i$  在整个资源分配过程中被区域  $C_j$  使用, 而  $K_f(C_j) = -1$  表示  $f_i$  在整个资源分配过程中不被  $C_j$  调用;

(4)  $K_f(C_j) \in (0, 1)$  等价于存在一个变换  $D$  使得  $K_{D[K_f(C_j)]} \neq K_f(C_j), \forall i \neq j$ . 其中  $K_{D[K_f(C_j)]}$  表示  $f_i$  被区域  $C_j$  调用后的关联度; 为简化推导过程,  $f_i$  被区域  $C_j$  调用后的关联度为 1.

在可用频段的分配过程中, 先为每个区域分配一个频段, 不失一般性, 假设  $f_i$  预先分配给区域  $C_i (i = 1, \dots, 7)$ , 即  $K_f(C_i) = 1$ . 另外, 由于区域  $C_1$  与其他 6 个区域都相邻, 即区域  $C_1$  中可以使用的频段不能用于其他区域, 同时其他 6 个区域中的可用频段也不能用于区域  $C_1$ . 这等价于  $K_f(C_1) = -1, i = 2, \dots, 7$  且  $K_f(C_j) = -1, j = 2, \dots, 7$ . 由于区域  $C_2$  与  $C_3, C_4$  和  $C_7$  不相邻, 因此存在一个变换  $D$  使得  $C_2$  可以调用  $f_3, f_4$  或  $f_7$ , 即  $K_f(C_2), K_f(C_2), K_f(C_2) \in (0, 1)$ . 由区域  $C_3$  和区域  $C_4$  的对称性得  $K_f(C_2) = K_f(C_2)$ , 记为  $a$ . 同理可以得到其他区域的关联度. 根据关联度函数的规则和区域分布的特点, 建立关联度矩阵(2), 其中  $a, b, c, d \in (0, 1)$  (表示大于 0 小于 1 的任意实数).

$$(K_{ij})_{7 \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & a & a & -1 & -1 & b \\ -1 & a & 1 & a & -1 & b & -1 \\ -1 & a & a & 1 & b & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & d & 1 & c & c \\ -1 & -1 & d & -1 & c & 1 & c \\ -1 & d & -1 & -1 & c & c & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.2 频率复用方法的推导

基于所建立的关联度矩阵, 可以通过为各个区域分配可调用频段, 计算调用该频段所引起的对其它区域的干扰, 从而得出各个区域的频段分配情况, 并实现全网规划. 算法流程如下:

步骤 1: 记

$$K_{f_i}(C_{j_0}) = \max_{i=1, \dots, 7, j=1, \dots, 7} \{K_f(C_j) | K_f(C_j) \neq 1\} \quad (3)$$

则区域  $C_{j_0}$  调用频段  $f_{i_0}$ , 即  $K_{D[K_f(C_{j_0})]} = 1$ ;

注: 如果有两个或两个以上的元素满足式(3), 则任选其一;

步骤 2: 对第  $i_0$  列, 若存在  $l$ , 使得

$$K_{i_0} \in (0, 1) \text{ 且 } K_{i_0} \times K_{j_0} = -K_{i_0} \quad (4)$$

则用  $-1$  代替  $K_{i_0}$  直到第  $i_0$  列中不存在满足式(4)的元素为止;

步骤 3: 重复步骤 1 和步骤 2 直到矩阵中不存在大于 0 小于 1 的元素.

下面分析  $a, b, c, d$  的  $P_4^4$  种不同排列组合下的分配结果. 易知, 其实只需考虑  $a < d$  且  $b < c, a < d$  且  $b > c, a > d$  且  $b < c, a > d$  且  $b > c$  四种情况即可. 若再假设大面积区域优先级高, 则问题可进一步简化为考虑  $a < d$  且  $b < c$  的情况. 因此, 当  $a < d$  且  $b < c$  时, 根据以上步骤解得矩阵(1). 最终推导结果为:

$$(K_{ij})_{7 \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由  $K_f(C_j) = 1$  的定义, 7 个区域对应的可使用频段集合如表 1 所示, 其中  $u_1 = f_1, u_2 = f_2, u_3 = f_3, u_4 = f_4, u_5 = f_5 \cup f_6 \cup f_7$ .

表 1 区域与可用频段之间的对应关系

区域	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
可用频段	$u_1$	$u_2$	$u_3$	$u_4$	$u_4 \cup u_5$	$u_3 \cup u_5$	$u_2 \cup u_5$

由表 1 可得, 一个区群中各个区域的可用频段分配情况如图 2 所示.

本文提出的支持宏分集策略的软分数频率复用方法, 与其它频率复用方法的区别主要在如下几方面:

(1) 把全部可用频段分为 5 个互不重叠的部分即  $F = \sum_{i=1}^5 u_i$ , 然后, 按照表 1 (或图 2) 中的方法为对应的区域分配可用频段;

(2) 当用户处于小区边缘时, 可以由多个小区用同一频率资源为其提供服务, 如 3GPP2 AIE 中采用的基于宏分集的软切换组策略 (SHOG, Soft Handover Group)<sup>[3]</sup>. 比如, 当用户位于小区 1、小区 2 和小区 3 的覆盖交界区域  $C_1$  时, 小区 1、小区 2、小区 3 中的一个或几个小区形成小区组使用同一频率资源同时为其提供服务; 当用户位于 II 型边缘区域  $C_2$  时, 如小区 1 和小区 2 覆盖交界区域时, 用户所在的小区 1 和小区 2 形成小区组并为用户提供服务;

(3) 区域  $C_5$ 、区域  $C_6$  和区域  $C_7$  中的用户为小区中心用户. 这三个区域使用了同一个频段  $u_5$ , 同时还利用

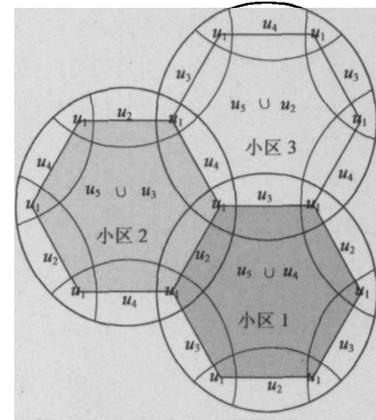


图 2 支持宏分集的软分数频率复用方法

了边缘区域的频段.如区域  $C_5$ ,它使用了频段  $u_5$  以外,还使用了频段  $u_4$ ,该频段同时是小区 2 和小区 3 的交界区域  $C_4$  的可用频段,但区域  $C_4$  和区域  $C_5$  之间的互相干扰较小,在一定条件下有复用同一频段的可能.因而这种频率复用方法提高了整个系统的频率利用率.

该方法中小区边缘用户由多个基站同时为其提供服务,因此这种小区间干扰的协调以及宏分集策略将在一定程度上提高小区边缘用户性能;为了尽可能的减小干扰,对小区中心用户则只需要一个基站为其提供服务.

#### 4 性能分析

本节将基于 OFDMA 系统,以前向链路传输为例对本文提出的支持宏分集的软分数频率复用方法进行性能分析与验证.假设所有子载波相互正交,并且假设每个子载波上的频率响应都经历平坦衰落,用户接收到的信号为单径信号且同时受到大尺度衰落和小尺度衰落的影响.记目标小区基站的极坐标为  $(0,0)$ ,如图 1 中的小区 2 中心的极坐标为  $(0,0)$ .归一化小区半径后,该小区中任意用户的极坐标可以表示为  $(\rho, \theta)$ ,其中  $\rho \in (0,1], \theta \in (0,2\pi)$ ;假设该小区中某用户由一个或多个小区同时提供服务,则这些服务小区中心的极坐标可以用来  $(\sqrt{3}, \theta_j)$  表示;由文[10]可得,用户在第  $t$  个时刻第  $k$  个子载波上的信号接收功率可以表示为:

$$P_r[k, t, (\rho, \theta)] = P_w(k) \sum_j ((\rho \cos \theta - \sqrt{3} \cos \theta_j)^2 + (\rho \sin \theta - \sqrt{3} \sin \theta_j)^2)^{-\alpha/2} F_d \quad (6)$$

其中  $P_w(k)$  表示第  $k$  个子载波在距离小区中心为 1(归一化)的角落部分的平均接收功率,  $\alpha$  是路径损耗指数,这里考虑  $F_d$  是概率密度函数为  $f_{F_d}(\varphi) = \exp(-\varphi)$ , ( $\varphi \geq 0$ ).则用户在目标小区所受的干扰可以表示为

$$I[k, (\rho, \theta)] = P_w(k) \sum_{i \neq j} ((\rho \cos \theta - \rho_i \cos \theta_i)^2 + (\rho \sin \theta - \rho_i \sin \theta_i)^2)^{-\alpha/2} \quad (7)$$

其中  $(\rho_i, \theta_i)$  表示第  $i$  个干扰小区的极坐标.因此,系统平均容量可以计算得到

$$\bar{C}_w[k, (\rho, \theta)] = \int_0^\infty \log_2 \left( 1 + \frac{P_r[k, (\rho, \theta)]}{P_N + I[k, (\rho, \theta)]} f_{F_d}(\Psi) \right) d\Psi \quad (8)$$

其中  $P_N$  为每个子载波的高斯加性白噪声功率.区域  $S$  内的系统平均容量为

$$C = \left( \iint_{(\theta, \rho) \in S} \bar{C}_w[k, (\rho, \theta)] \cdot \rho \cdot f(\rho, \theta) d\theta d\rho \right)$$

其中  $f(\rho, \theta)$  表示  $\rho$  和  $\theta$  的联合概率密度函数.

#### 5 数值仿真

在下面的数值仿真中,设小区中心区域的半径为

整个小区半径的  $r$  倍 ( $0 < r < 1$ ),并且区域内的子载波数与区域面积成正比.则目标小区的小区中心区域近似为  $0 < \rho \leq r$  的区域;边缘区域近似为  $r < \rho \leq 1$  的区域. I 型边缘区域的极角范围为  $\theta_{I型} \in \left( \frac{20}{180}\pi, \frac{40}{180}\pi \right) \cup \left( \frac{80}{180}\pi, \frac{100}{180}\pi \right) \cup \left( \frac{140}{180}\pi, \frac{160}{180}\pi \right) \cup \left( \frac{200}{180}\pi, \frac{220}{180}\pi \right) \cup \left( \frac{260}{180}\pi, \frac{280}{180}\pi \right) \cup \left( \frac{320}{180}\pi, \frac{340}{180}\pi \right)$ , II 型边缘区域的极角范围为  $\theta_{II型} \in [0, 2\pi] \setminus \theta_{I型}$ . 设  $f(\rho, \theta)$  是二维区域上的均匀分布.仿真中取  $\alpha = 4, P_w(k)/P_N = 15\text{dB}$ .

如图 3 所示,带 \* 号的线表示支持宏分集策略的软分数频率复用的区域平均容量,带  $\Delta$  号的线表示不支持宏分集和软分数频率复用的平均容量;实线表示 I 型边缘区域的平均容量,虚线表示 II 型边缘区域的平均容量.

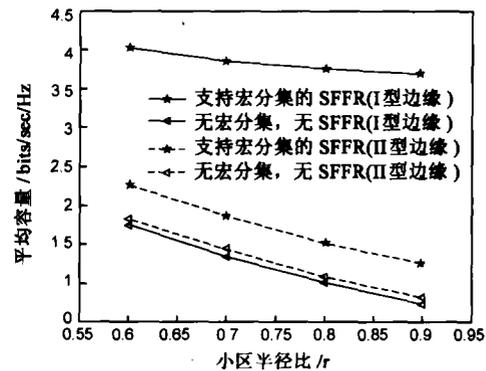


图 3 支持宏分集 SFFR 的平均容量 vs. 不支持宏分集 SFFR 的平均容量

仿真结果表明,本文提出的支持宏分集的软分数频率复用方法提高了小区边缘区域的平均容量.特别地,它在很大程度上提高了处于三个小区交界处的 I 型边缘区域的平均容量.

#### 6 结束语

3GPP2 AIE 标准中同时要求支持频率复用和宏分集,而现有的频率复用方法,其对小区边缘部分区域的划分恰恰与宏分集策略相悖.本文在作者提出的软分数频率复用方法的基础上,通过分析和建立物元模型,从理论上推导出了支持宏分集的软分数频率复用方法,有效地将宏分集思想融入到频率复用方法中并发挥了二者的优势.研究表明,小区边缘用户由于小区间干扰的协调以及宏分集策略带来的增益,性能得到了较大提高.仿真结果表明,该频率复用方法显著改善了小区边缘的平均容量,特别是三个小区交界处的 I 型边缘区域的平均容量.

#### 参考文献:

- [1] 3GPP. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and E-

- volved UTRAN (E-UTRAN)[S]. TR25.913,2005.
- [2] 3GPP2. cdma2000 Enhanced Packet Data Air Interface System-System Requirements Document[S]. S.R0113-0,2005.
- [3] 3GPP2. Joint Proposal for 3GPP2 Physical Layer for FDD Spectra[S]. C30-20060731-0xx,2006.
- [4] 3GPP. Physical Layer Aspects for Evolved UTRA[S]. TR 25.814,v7.1.0,2006.
- [5] 3GPP. Huawei Technologies Co.,Ltd, Further Analysis of Soft Frequency Reuse Scheme[S]. R1-050841,2005.
- [6] 3GPP2. SFN and signaling mechanisms for softer handoff groups in LBC FDD[S]. C30-20060911-079R1,2006.
- [7] 3GPP2. HRZ Soft Fractional Frequency Reuse [S]. C30-20060911-064R1,2006.
- [8] 许方敏,陶小峰,许晓东. 软分数频率复用[J]. 中兴通讯技术,2007,13(4):17-19.  
Xu Fangmin, Tao Xiaofeng, Xu Xiaodong. Soft fractional frequency reuse[J]. ZTE Communications,2007,13(4):17-19. (in Chinese)
- [9] 蔡文. 可拓集合和不相容问题[J]. 科学探索学报,1983,3(1):83-97.  
CAI Wen. Extension set and incompatible problems[J]. Science Exploration,1983,3(1):83-97. (in Chinese)
- [10] Huo C, Sesay A B, Fajokuwo A O. Co-channel diversity schemes for an OFDM based cellular system with one-cell frequency reuse[C]. WCNC,2006.798-803.

#### 作者简介:



许方敏 女,1980年10月出生于浙江,博士生.研究方向:无线资源管理.  
E-mail:fangminxu@gmail.com



陶小峰 男,1970年5月出生于湖北,副教授.研究方向:第四代移动通信系统关键技术.  
E-mail:taoxf@bupt.edu.cn