

消除小区间干扰的 OFDMA 系统多小区上行资源分配方案^①

蒋轶琳^② 张中兆 沙学军 孙丽楠

(哈尔滨工业大学通信技术研究 所 哈尔滨 150080)

摘 要 针对 OFDMA 系统多小区上行链路资源分配问题,提出了一种新的基于基站合作(BSC)和软频率复用(SFR)的资源分配方案。该方案通过相邻小区使用不同的子载波的软频率复用减少小区间干扰,利用基站合作对边缘用户的信号重构,使小区间干扰进一步消除,从而将多小区资源分配转化为单一小区资源分配。然后根据选择子载波避免冲突原则进行第一次子载波分配。最后根据速率要求,在不影响其他用户最低速率要求的前提下,对子载波进行二次分配。分析和仿真结果表明,该方案可以很好地解决小区边缘干扰严重的问题,降低用户的中断率,使多小区资源分配更加简单、公平、有效,尤其可保证边缘用户的服务质量,从而改善了系统的性能。

关键词 正交频分多址接入(OFDMA),软频率复用(SFR),基站合作(BSC),资源分配

0 引 言

在提高频谱效率上,正交频分多址接入(orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)被认为是未来无线通信系统中最有前途的多址接入技术之一。第三代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)的长期演进(long term evolution, LTE)和全球微波互联接入(worldwide interoperability for microwave access, WiMAX),都选择了 OFDMA 作为其物理层接入技术,以实现数据的高速传输。相应地,在这些系统的媒体接入控制(media access control, MAC)层,由于子载波对不同的用户经历的信道衰落不同,合理有效分配用户的子载波,可以提高资源的利用效率。

现有资源分配技术大都针对单小区情况^[1-5]。其中文献[1-3]的算法应用起来具有高复杂性而且缺少约束:没有考虑每个用户的最小比特速率。这样有的用户信道质量好,分配较多的子载波,而信道差的没有子载波分配。文献[4]提出了减少反馈开销的低复杂度资源分配算法,文献[5]提出了一种简单的用户速率比例约束松弛的非迭代方法,但是这些方法^[4,5]都是针对下行。文献[6]考虑了服务质量(quality of service, QoS),但是没有进行小区间

的干扰管理的研究。频率复用因子为 1 的多小区系统中,由于同频信道干扰的存在,直接将单小区算法扩展到多小区中的做法不可取。目前多小区 OFDMA 系统资源分配研究大都进行下行研究,对上行 OFDMA 系统多小区资源分配的文献很少。多小区资源分配方法大都为集中式资源分配^[7],多数关注最优系统性能,没有考虑边缘小区用户和功率低的用户,而且由于小区间的信息交互,因而复杂度较高。而且多数研究集中在资源分配的优化实施,很少涉及干扰协调的优化以提高系统资源分配的性能。在未来移动通信系统中,用户对于上行业务的容量需求会越来越高。如果考虑公平性、业务特性等内容,上行资源分配会趋于复杂,如何高效地分配上行 OFDMA 系统资源会变得越来越重要。针对 OFDMA 系统多小区上行链路资源分配问题,本文提出了软频率复用(soft frequency reuse, SFR)和基站合作^[8](base station cooperation, BSC)联合消除小区间干扰(inter-cell interference, ICI)的 OFDMA 多小区上行资源分配优化方案。该方案能够很好地解决小区边缘干扰严重问题和多小区上行资源分配问题。

1 上行 OFDMA 系统模型

考虑 OFDMA 系统多小区上行情况,作如下假

^① 973 计划(2007CB310601)和新一代宽带无线移动通信网科技重大专项(2009ZX03004-001)资助项目。

^② 女,1973 年生,博士生;研究方向:多域协同无线通信系统理论研究;联系人, E-mail: wlijiang6666@163.com

(收稿日期:2009-09-29)

设:基站数为 N , 每个小区用户数为 K , 系统带宽为 B , 每个小区总子载波数为 M , 采用 OFDMA 多址方式。基站利用训练序列周期估计每个用户的所有子载波上行信道质量^[9]和用户的位置信息。资源分配由基站资源分配中心完成。根据信道状态信息(channel state information, CSI)和位置信息,资源分配中心按照一定的资源分配算法通过下行控制信道分配给每个用户一定的资源。用户根据分配的资源信息进行信息发送。OFDMA 上行资源分配系统模型如图 1 所示。

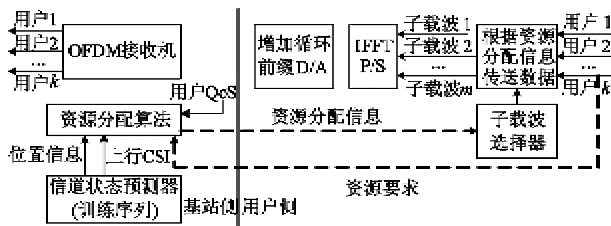


图 1 OFDMA 上行资源分配系统模型

如果不进行 ICI 消除,第 n 小区上行用户 k 的第 m 子载波上信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)为

$$\gamma_{n,k,m} = \frac{g_{n,k,m} p_{n,k,m}}{\sum_{j=1, j \neq n}^N g_{j,k,m}^n p_{j,k,m} + \sigma^2} \quad (1)$$

$g_{n,k,m}$ 表示在小区 n 中第 k 个用户在第 m 个子载波上的增益, $g_{j,k,m}^n (j \neq n)$ 表示同频小区 j 的第 m 个子信道上的用户到用户 k 所在小区 n 基站的信道增益, $p_{n,k,m}$ 为小区 n 中的第 k 个用户在第 m 个子载波上的传输功率。假定在加性高斯白噪声信道下, σ^2 为噪声功率,对于所有的用户 k 在子载波 m 的噪声功率都相等,那么第 n 个小区的第 k 个用户在子载波 m 上的速率可以表示为

$$r_{(n,k,m)} = \log_2(1 + \gamma_{n,k,m}) \quad (2)$$

所有用户在所有子载波下和速率可以表示为

$$R = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \rho_{(n,k,m)} r_{(n,k,m)} \quad (3)$$

$\rho_{(n,k,m)}$ 定义为:

$$\rho_{(n,k,m)} = \begin{cases} 1 & \text{在第 } n \text{ 小区第 } m \text{ 子载波分配给用户 } k \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

由定义可知,每个子载波 m 在一个小区 n 内只能在一个时刻分配给一个用户 k , 从而有

$$\sum_{k=1}^K \rho_{(n,k,m)} = 1, \forall n \in N, m \in M \quad (4)$$

$$\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \rho_{(n,k,m)} = NM \quad (5)$$

目标是最大化速率 R 。假设 P_k 为用户 k 总的传输功率,假设 OFDMA 一帧内信道增益保持不变:

$$\text{s.t.} \sum_{\Omega_k} p_{k,m} \leq P, k \in K \quad (6)$$

其中 Ω_k 为用户 k 使用的子载波集合。

约束条件:满足用户最大功率约束。目的是找到最优分配方案使系统的和速率最大,即 $\Omega_p = \{\rho_{n,k,m}(t) \mid \forall n \in N, \forall k \in K, \forall m \in M, \forall t \geq 0\}$ 。

这属于非线性规划问题,即具有有限多个等式与不等式约束的有限维最优化问题,很难求出最优解,而且这种子载波分配属于集中式解决方案,需要太多的反馈信息。在下面的小节将介绍一种将多小区上行资源分配转化为单一小区的方案,因为目前单一小区的资源分配已经比较成熟^[3,10]。

2 软频率复用下的基站合作

无线网络在好的信道状态下,应该利用多用户分集在用户之间分享无线资源。但是决定哪个终端进行传输是很困难的,因为信道好的用户可能成为很强的干扰用户。正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术能够比码分多址接入(code division multiple access, CDMA)技术更好地解决小区内干扰的问题,但付出的代价是,OFDM 系统带来的 ICI 问题会比 CDMA 系统更加严重。一个小区内的资源分配会影响到其他小区的系统容量和边缘用户性能,因此需要多个小区之间进行协调。所以研究多小区 OFDMA 系统资源分配算法,首先需要研究 ICI 抑制。

基于此,本文提出了软频率复用(SFR)和基站合作(BSC)联合消除 ICI 的方案。首先进行软频率复用,如图 2 所示,将总子载波分为 3 个部分 {A, B, C}。3 个相邻小区在业务量不大时使用不同的部分,

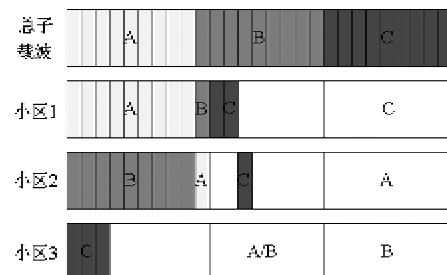


图 2 软频率复用方案

例如小区 1 使用的顺序为 {A, B, C}, 小区 2 使用的顺序为 {B, C, A}, 小区 3 使用的顺序为 {C, A, B}, 这样保证了频谱复用系数为 1。当某个小区业务量增大时, 可以随机选择其他两部分。这样, 当业务量不大时, 可以有效地减少 ICI。

当小区的业务量都变大时, 干扰逐渐增强。当小区边缘使用子载波的冲突达到一定门限时, 启动 BSC 机制, 如图 3 所示。

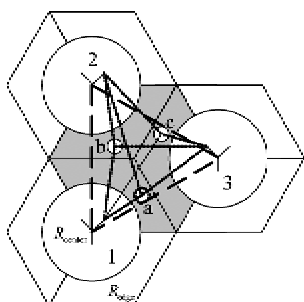


图 3 软频率复用下的基站合作

以小区 1、2 和 3 为例, BSC 需要根据一定的准则把一个小区分为合作区 R_{edge} 和中心区 R_{center} 。选择需要 BSC 进行干扰消除的用户的标准不仅仅要考虑是否与目标小区冲突, 还要考虑其它一些可用资源, 例如信道的质量、信号强度、功率、移动速度以及位置和小区负载情况等, 这样保证减少不必要的合作, 提高 BSC 效率。假设用户 a、b 和 c 使用了相同的子载波, 在基站 1 所在的小区用户 a 首先被检测译码, 它的信息传给基站 2 和 3; 在基站 2, 对来自于用户 a 的干扰进行重构, 并且从接收信号中减掉; 这种干扰消除后的信号用于检测用户 b, 它的信息传给基站 3, 在那里用户 c 最终被检测出来。这样, 基站合作利用了小区间干扰, 而不是将其作为噪声对待。通过信号的重构, 可有效地消除小区间的干扰, 从而提高小区边界用户的通信质量。

3 多小区上行资源分配方案

本节提出的多小区上行资源分配方案分为两个步骤: 第一步通过 SFR 下的 BSC 对小区边缘干扰进行消除; 第二步进行子载波分配: 根据避免碰撞原则进行第一次子载波分配, 然后根据速率要求, 对部分子载波重新分配, 尽量保证用户公平性。

3.1 小区边缘干扰消除

设小区 n 中一个用户使用子载波 m 传输数据,

$N_{\text{collision}}^n$ 表示使用了与小区 n 相同的子载波 m 的干扰小区集合, N_{center}^n 表示干扰用户靠近基站中心的干扰小区集合, N_{edge}^n 表示干扰用户远离基站的干扰小区集合。如果用 $\Delta_n = |N_{\text{collision}}^n|$ 表示对小区 n 产生干扰的总小区数, 则干扰用户靠近基站中心的小区数为 $\Delta_{\text{center}}^n = |N_{\text{center}}^n|$, 干扰用户远离基站的小区数为 $\Delta_{\text{edge}}^n = |N_{\text{edge}}^n|$, $\Delta_n = \Delta_{\text{center}}^n + \Delta_{\text{edge}}^n$, $N_{\text{edge}}^n \cap N_{\text{center}}^n = \emptyset$ 。

这样, 式(1)在软频率复用下, 小区 n 中第 k 个用户的 SINR 变为

$$\gamma_{n,k,m} = \frac{\mathcal{E}_{n,k,m} p_{n,k,m}}{\sum_{j \in \Delta_n} \mathcal{E}_{j,k,m}^n p_{j,k,m} + \sigma^2} \quad (7)$$

ICI 通过 BSC 可以进一步得到消除, 则小区 n 中的第 k 个用户的 SINR 为

$$\gamma_{n,k,m} = \frac{\mathcal{E}_{n,k,m} p_{n,k,m}}{\sum_{j \in \Delta_{\text{center}}^n} \mathcal{E}_{j,k,m}^n p_{j,k,m} + \sigma^2} \quad (8)$$

由于利用 SFR 下的 BSC 方案, 干扰仅来自于相邻小区中心区域使用相同子载波的用户, 而这些干扰用户相对于干扰小区的边缘用户来说, 对小区 n 中的用户产生的干扰要小, 因此 ICI 得到了有效抑制。

3.2 子载波分配

已有的文献^[11,12]对于子载波有两种分配方法。第一种是子载波分配给信道增益大的用户。如果这样分配的话, 就会出现有的用户分配到多个子载波, 而有的用户没有任何子载波可分配。第二种是用户根据每个子载波的信道增益选择子载波。这样, 每个用户都能分配到子载波, 但是有可能出现第一个用户选择了对自己信道增益最大的一个子载波, 而第二个用户不能选择这个子载波, 尽管有可能对于第二个用户来说, 这个子载波的信道增益对第二个用户也可能是最大的, 而且以上两种情况都有可能出现有的用户不能达到要求的速率, 而有的用户大大超过了用户要求的速率。

在 ICI 已经部分被消除的基础上, 本文提出的方法是: 基站把子载波对每一个用户根据信道增益大小进行排序, 找出信道增益最大的而没有冲突的子载波分配给用户 1。如果有两个用户都同时选择了同一个子载波, 选择增益大的用户, 而另一个用户选择对自己增益次最优的子载波。依次类推, 如果 3 个用户选择了同样的子载波, 对其进行性能增益进行比较, 增益小的退而求其次。当每个用户都选完第一个子载波后, 进行第二个子载波的选择, 直到

每个用户达到基站的资源分配器分配给的子载波数为止。最后根据每个用户达到的速率及其约束速率进行子载波的重新分配,如果某用户已经满足其速率要求,将其多余的资源分配给其他用户;将重新需要分配的子载波分配给系统吞吐量减少最小的用户。同时保证重新分配必须满足原有用户的约束条件,并且如果把多余的子载波分配给某一用户也不能达到其要求速率,则不重新分配。

本文提出的方案相比于第一种方案,保证了用户的公平性,所有的用户都能选择到自己增益较大的子载波;相比于第二种分配方案,基站首先对每个用户子载波的增益进行排队,有效避免了用户选择了对自己增益最大的子载波,而这个子载波对于另一个用户来说增益可能更大,保证了系统的容量尽量最大化。

分配算法可以描述如下:

$C = \{1, 2, \dots, M\}$, $C \subset M$, $\forall k = 1, 2, \dots, k, M$ 为子载波序号数, C 为子载波集合;

(1) 如果 $C \neq \emptyset$;

对于每一用户 $k, k \in K$, 基站把子载波对每一个用户根据信道增益大小进行排序:

$\Pi = (\pi(1), \pi(2), \dots, \pi(k))$;

(2) 如果没有冲突, $(m^*, k) = \operatorname{argmax} g_{k, m}$

则 $(m^*, k_1) = \operatorname{argmax}(g_{k_1, m}), g_{k_1, m} > g_{k_2, m}$;

如果冲突, 用户 k_2 分配次最优 $\max(g_{k_2, m})$;

更新 $C = C - m^*, \Omega_k = \Omega_k + m^*$; 每个用户的第一个子载波分配结束后, 跳转到(1);

若 $C = \emptyset$, 子载波第一次分配结束。

(3) 重新分配的过程为:

如果 i 满足 $R_i^{\Omega_i} < R_i^{\Omega_i^s} \cap R_i^{\Omega_i + m^*} > R_i^{\Omega_i^s}$, j 满足 $R_j^{\Omega_j - m^*} > R_j^{\Omega_j^s}$, $i, j \in k$, 并且有:

$(i, j) = \operatorname{argmin}(R_j^{\Omega_j} + R_i^{\Omega_i} - R_j^{\Omega_j - m^*} - R_i^{\Omega_i + m^*})$,

则 $\Omega_i = \Omega_i + m^*, \Omega_j = \Omega_j - m^*$ 。

4 仿真及结果分析

本文的仿真环境为 OFDMA 系统的多小区上行情况, 小区数为 19, 小区半径为 1km, 无线信道为频率选择性衰落信道^[3], 系统带宽为 1MHz。对于任意子载波 m , 小区 n 收到的来自干扰小区 Δ_n 的干扰可以表示为: $I_n(\Delta_n) = \sum_{\Delta_n} d^{-l} 10^{-\epsilon_{i,j}/10} \zeta_{nj}$ 。其中, l

为路径损耗因子, ζ_{nj} 代表小区 j 的用户到基站 n 瑞利衰落, d 为小区 n 的基站和小区 j 中的用户之间的距离。这里采用的路径损耗模型为 $PL(d) = 128.1 + 37.6 \log_{10} d$ [dB]。 $10^{-\epsilon_{i,j}/10}$ 表示小区 j 中的用户到小区 n 基站的对数阴影衰落, $\epsilon_{i,j} \sim N(0, \sigma^2)$, 阴影衰落的标准方差为 8dB。上行噪声方差为 -120dB, 每个用户发射功率为 50mW。信噪比定义为发射功率与接收端的噪声功率比值。

图 4 显示了完全没有小区干扰、SFR 和 BSC 合作下消除小区间干扰、单独 SFR 消除小区间干扰三种情况下系统吞吐量比较。总子载波为 64, 每个小区内的用户数为 16。以上三种情况子载波分配情况相同, 用户均匀分布在小区中。系统吞吐量定义为 bit/s (bps)。

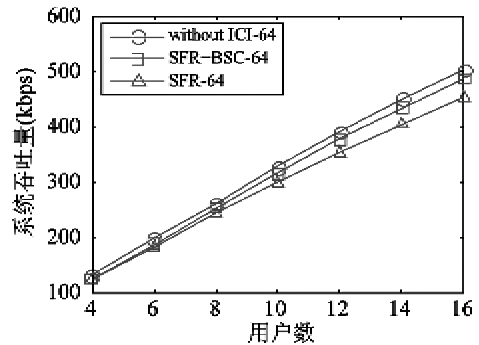


图 4 不同干扰消除对系统吞吐量的影响

从图中可以看出, 随着用户数的增加, 系统吞吐量也在增加。系统吞吐量的增加一部分来自于多用户分集, 另一部来自于总的用户功率增加。同时, 我们可以从图中看到, 只有 SFR 消除小区间干扰时, 在用户少的情况下可以有效消除小区间干扰, 但是当小区用户数增加时, 干扰逐渐增强。当用户数为 16 的情况下, 提出方案的系统吞吐量达到 485kbps, 而软频率复用达到 452kbps。利用 SFR 和 BSC 联合的干扰消除, 比只用 SFR 干扰消除的吞吐量增加了 7%。

图 5 显示三种子载波分配情况下频谱效率的比较。一种是 3.2 节提到的第二种分配方案, 这里简称为最大速率 MAXrate, 一种是静态的 OFDM - FDMA 子载波分配, 第三种是本文提出的子载波分配方案。

图 5 仿真条件是: 用户数为 6, 子载波数为 64, 每个用户使用 10 个子载波, 每个用户具有相同的速率要求。从图 5 可以看出: MAXrate 方案尽管对于有的用户可以达到最大的频谱效率, 但公平性差, 例

如第 1 个用户的频谱效率达到 1.01 bits/s/Hz,但是第 6 个用户的频谱效率只有 0.75bits/s/Hz,而 OFDM-FDMA 保证了用户的公平性,但频谱效率低。本文提出的子载波分配方案的频率效率都在 0.97 ~ 0.92 bits/s/Hz 附近,频谱效率基本都保持在 2% 的波动范围内,因此本文提出的子载波分配方案既保证了频谱效率又兼顾了用户的公平性。

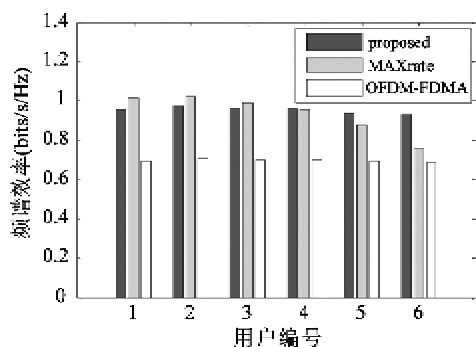


图 5 不同子载波分配方案下的频谱效率

图 6 显示的是不同信噪比下中断率的比较。本文的中断率表示为每一次信道实现的过程中不满足目标速率的用户数与总用户数的比值。图 6 仿真中信道实现次数为 1×10^7 , 子载波为 512, 用户数为 20, 每个用户分配的子载波数目相同。每个用户的最低目标速率为 0.3Mb/s。如果超过 30Mb/s 的用户将减少一个子载波而分配给没有满足目标速率的用户。

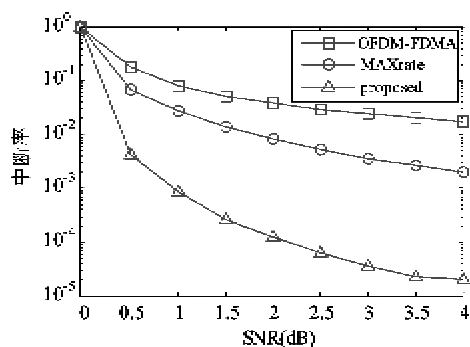


图 6 不同信噪比下的中断率

从图 6 可以看出,本文提出的基于干扰消除的子载波分配方案在满足所有用户最小约束速率以及系统容量下降最少的情况下,中断率随着信噪比的增加而迅速下降。在信噪比为 4dB 的情况下,比静态分配方案下降 4 个数量级,比最大速率子载波分配方式中断率下降 3 个数量级。

5 结论

在现有的 OFDMA 系统单一小区资源分配研究的基础上,提出了一种多小区上行资源分配方法,该方法通过 SFR 和 BSC 联合进行有效的小区边缘干扰消除,将多小区资源分配转化为单一小区资源分配,在此基础上进行两步的子载波分配。分析和仿真结果表明,在用户数为 16 情况下,利用 SFR 和 BSC 联合的干扰消除相比 SFR 干扰消除方案,系统吞吐量增加了 7%;在信噪比为 4dB 的情况下,本文提出的方案相比最大速率子载波分配方案,中断率下降了 3 个数量级。因此本文提出的方案可以很好地解决小区边缘干扰严重问题,支持大量的用户拥有合理的服务质量水平,有效地解决了多小区上行资源分配问题。

参考文献

- [1] Keunyoung K, Youngnam H, SeongLyun K. Joint subcarrier and power allocation in uplink OFDMA systems. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(6): 526-528
- [2] Mohanram C, Bhashyam S. A sub-optimal joint subcarrier and power allocation algorithm for multiuser OFDM. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(8): 685-687
- [3] Zukang S, Andrews J G, Evans B L. Adaptive resource allocation in multiuser OFDM systems with proportional rate constraints. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2005, 4(6):2726-2737
- [4] Agarwal R, Majjigi V, Zhu H, et al. Low complexity resource allocation with opportunistic feedback over downlink OFDMA networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2008, 26(8):1462-1472
- [5] Wong I C, Shen Z K, Evans B L, et al. A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems. In: *Proceedings of the IEEE Workshop of Signal Processing Systems*, Austin, Texas, USA, 2004. 1-6
- [6] Shi J C, Hu A Q. Radio Resource allocation algorithm for the uplink OFDMA system. In: *Proceedings of the IEEE Communications Society, ICC 2008 Workshops*, Beijing, China, 2008. 11-15
- [7] Ng C Y, Sung C W. Low complexity subcarrier and power allocation for utility maximization in uplink OFDMA systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5), Part 1: 1667-1675
- [8] Osvaldo S, Oren S, H, Vincent P, et al. Base station cooperation via finite-capacity links for the uplink of linear cellular networks. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009,

- 55(1):190-204
- [9] Long G, Shuguang C. Efficient subcarrier, power and rate allocation with fairness consideration for OFDMA uplink. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(5), Part 1: 1507-1511
- [10] Ying Jun Z, Khaled B L. Multiuser adaptive subcarrier-and-Bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2004, 3(5): 1566-1575
- [11] Kivanc D, Hui L. Subcarrier allocation and power control for OFDMA. In: Proceedings of the Record of the 34th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, California, USA, 2000. 147-151
- [12] Zhen L, Geping Z, Weihua W, et al. Improved algorithm of multiuser dynamic subcarrier allocation in OFDM system. In: Proceedings of the Communication Technology Proceedings, ICCT, Beijing, China, 2003. 1144-1147

An ICI-eliminating resource allocation scheme for the uplink of multi-cell OFDMA systems

Jiang Weilin, Zhang Zhongzhao, Sha Xuejun, Sun Linan

(Communication Research Center of Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract

A new resource allocation scheme based on base station cooperation (BSC) under soft frequency reuse (SFR) is proposed for the uplink of multi-cell orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) systems. Firstly, the inter-cell inference (ICI) is decreased by using the SFR of different subcarriers in adjacent cells, meanwhile, and the base stations combine the interference users' signal to further efficiently mitigate ICI. Thus, the multi-cell resource allocation is transformed into the single-cell allocation. Secondly, the subcarriers are initially allocated by the channel gain under avoiding collision for each others. Thirdly, redistribution is accomplished on the premise of not influencing other users' rate target. The analysis and the simulation results show that ICI can be efficiently mitigated and the outage ratio decreases quickly with SNR. Besides, the complexity of resource allocation is reduced and fairness is achieved. The proposed scheme guarantees QoS and improves system performance, especially for users at the cell boundary.

Key words: orthogonal frequency division multiple access (OFDMA), soft frequency reuse (SFR), base station cooperation (BSC), resource allocation