

基于基站间合作的下行干扰协调方法及其性能评估^①张 健^② 戎 璐 胡宏林

(中科院上海微系统与信息技术研究所上海无线通信研究中心 上海 200050)

摘 要 从基站间合作的角度研究了蜂窝系统下行多小区干扰协调问题。引入了合作虚拟小区的概念,并提出了三扇区合作虚拟小区规划方案和双扇区合作虚拟小区规划方案。所提方案在实现小区间干扰协调的同时,还可使系统实现同频组网和无缝切换。仿真结果显示,与传统的频率复用方式相比,合作虚拟小区方案能很好地平衡小区内不同位置频谱效率的分布,改善边缘用户的性能。其中,双扇区合作方案可使系统中断概率比频率复用方式(1,3,3)下降 5% 以上,而且其扇区吞吐量与频率复用方式(1,3,1)相当。

关键词: 蜂窝系统, 同频组网, 干扰协调, 小区规划, 合作传输

0 引 言

随着移动数据业务的不断增长,用户对未来宽带移动通信系统的速率要求会越来越高,系统需在其全部覆盖范围内提供良好的服务质量(quality of service, QoS)保障。在传统蜂窝架构下,由于无线信号随距离呈指数衰落,小区边缘用户的接收信号强度远小于小区中央用户,且边缘用户受到周围同频小区(扇区)的干扰也大于中心用户,因而其频谱效率将远小于中心用户,很难满足高速业务的需求。为了提高小区边缘用户的信号质量,研究人员提出了各种多小区干扰协调技术。

在传统的蜂窝小区环境下,由于扇区天线的使用,频率复用方式(1,3,3)(复用方式(x, y, z)中 x 是小区集合的小区个数, y 是每个小区的扇区个数, $\frac{1}{z}$ 是每个小区使用的总频谱的比例)有效地降低了相邻小区的干扰,但这种方式下每个扇区只能使用总频谱的 $\frac{1}{3}$,扇区的容量远小于(1,3,1)的复用方式^[1]。为了兼顾边缘用户的信号质量与系统总容量,文献[2]提出了部分频率复用(fractional frequency reuse, FFR)的概念,在小区中央和边缘使用不同的频率复用方式;3GPP LTE 提案中对部分频率复用提出了各种的改进和增强方案,文献[3]对其进行了详细的介绍和分析。所有基于 FFR 的方案中,相邻小区在边缘都使用不同的频率,这为小区间的无缝切换带来了困难。文献[4]提出了多小区联合资源调

度的方案,多个基站(BS)由一个无线网络控制器协调调度资源,从而避免了干扰,但其调度复杂度太高。文献[5]则从链路级角度研究了基站合作传输的不同发送和接收算法及其所带来的性能增益。

基站合作传输可使小区间的干扰变成有用信号,从而提高小区边缘的信号质量。在文献[5]的基础上,本文从系统级角度研究了基站间合作通信在小区规划中的应用,以有效解决下行多小区干扰协调问题。针对具体的基站合作传输方案,本文引入了虚拟合作小区的概念,提出了双扇区合作和三扇区合作的虚拟小区规划方案,从而实现了同频组网和无缝切换。而且,对系统性能进行了数值分析比较。

1 基于基站合作的干扰协调方案

1.1 基站间合作传输

对于一个蜂窝小区,其系统容量可由香农定理得到

$$C = \sum_i W_i \log(1 + SINR_i) \quad (1)$$

其中 i 为小区内不同的位置(用户), $SINR_i$ 为位置 i 处的信干噪比(signal to interference and noise ratio, SINR), W_i 为位置 i 占用的带宽,假设所有位置占用的带宽相同,则有

$$C = \frac{\alpha W}{N} \sum_i \log(1 + SINR_i) \quad (2)$$

① 863 计划(2006AA01Z280)和上海市研发公共服务平台建设专项(07dz22023)资助项目。

② 男,1981 年生,博士生;研究方向:无线资源管理;联系人,E-mail: jian.zhang@mail.sim.ac.cn
(收稿日期:2008-07-07)

其中 α 为频率复用因子, W 为总带宽, N 为总的位置数(用户数)。

对于一个给定的蜂窝系统, W 和 N 取值固定。所以,影响系统容量的是 α 和 $SINR_i$ 的取值。当 $\alpha = 1$ 时,取得最大值,但这种情况下,即使使用扇区天线划分扇区(图 1(a)),不同小区之间同频干扰依然严重,位置 i 从小区中央到边缘变化时, $SINR_i$

取值是快速下降的,小区边缘 $SINR$ 值通常无法满足用户的最低需求。当 $\alpha = 1/3$ 时,即为(1,3,3)频率复用方式(图 1(b)),虽然小区内 $SINR$ 值较高,但总容量较低,且 $SINR_i$ 取值也是从小区中央到边缘快速下降的。干扰协调的目的可以认为是使 α 趋于 1 的同时,改变 $SINR$ 值的分布,使 $SINR_i$ 取值也是从小区中央到边缘保持平稳的变化。

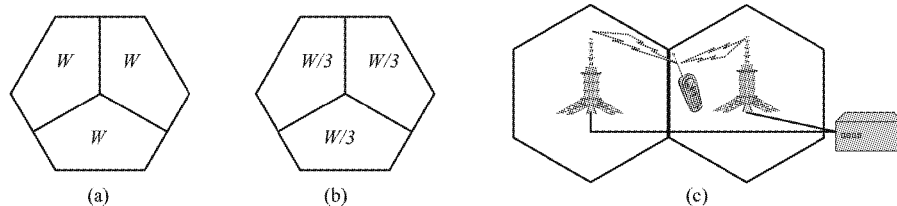


图 1 传统频率复用和基站合作示意图

现有的各种干扰协调方案^[2-4],都是将蜂窝小区划分为多个区域,通过静态、半静态或动态的规划,在不同的区域内使用不同的频率复用因子,联合多个小区合理分配频率和功率资源,降低干扰,改善小区内的 $SINR$ 分布。这些方法都存在两方面的不足。第一,由于频谱的分割,小区间切换只能进行异频切换,很难实现无缝切换;第二,通过频率分割和功率调整来减少干扰,降低了资源的效率。

采用基站间合作传输的干扰协调方案,可解决上述问题。如图 1(c)所示,移动台(MS)在小区边缘时同时与两个(或多个)基站建立连接,其中一个基站为主控基站,其余为合作基站,每个扇区可使用全部频谱(复用为 1)。主控基站为移动台入网时建立控制链路的基站,合作基站仅在移动台进行通信时与之建立数据链路。主控及合作基站与小区边缘的移动台协同进行数据通信,以解决小区边缘的干扰问题。与多小区联合调度类似,本方案也需要无线网络控制器来协调合作基站间的资源调度,但其仅需将主控基站的调度结果通知合作基站,复杂度与联合调度相比大大降低。基站合作传输及接收算法在文献[5]中有详细论述,虽然移动台同时占用了两个基站的无线资源,但由此获得了很好的接收增益,包括功率增益、信道增益(两个基站的信号相互独立)及宏分集增益^[5]。最重要的是,本方案使原本的最大干扰变成了有用信号,从而使小区边缘用户的信号质量大大提高。

1.2 基于基站间合作的小区规划

定义系统中需要相同基站集进行合作传输的区域为虚拟小区。为了使基站合作方案更加有效地工

作,本文提出了如下两种虚拟小区规划方案。

(1) 三扇区合作虚拟小区

基站使用 120° 扇区天线,如图 2 所示,三个方向相对的扇区形成虚拟小区。移动台在虚拟小区中同时接收三个基站的信号。由于虚拟小区将完全覆盖所有的小区边界,因此,移动台穿越小区边界时,实际是在虚拟小区内移动。此时,小区间切换可简化为主控基站的重选过程。即在这种方案下,移动台运动时只需进行扇区间切换过程,而不需要进行小区间切换。

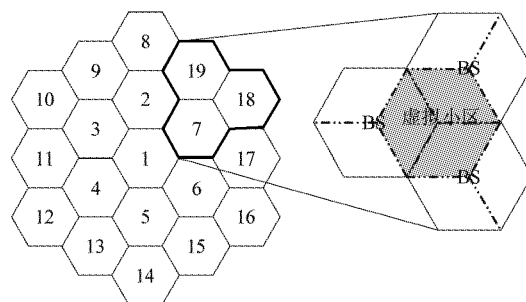


图 2 三扇区合作虚拟小区方案

移动台在虚拟小区中移动时,会周期性地检测主控基站的信号质量。当主控基站的信号质量低于门限(切换门限)时,则移动台开始扫描邻居扇区,选择信号质量最好的合作基站并向其注册。此合作基站即切换为主控基站,主控基站切换为合作基站。当移动台移出虚拟小区时,其实际是在同一小区的不同扇区间移动,因而将进行传统的扇区间切换。扇区间切换后,主控基站不变,但是需要重新发起建立合作基站的过程。

(2) 双扇区合作虚拟小区

基站同样采用 120°扇区天线,但扇区方向与传统扇区相同,如图 3 所示。当移动台在小区中央时,只与主控基站建立连接,当其检测到下行链路质量低于给定门限时,发起扫描过程,选择邻居扇区中信号最好的扇区建立合作链路。选择不同的扫描门限,虚拟小区大小和形状也会不同。移动台在虚拟小区内,仍然会检测主控小区和合作小区的下行链路质量,以决定是否断开合作链路或者请求将合作基站切换为主控基站。由于主控基站与周围所有邻居基站在边缘都存在虚拟小区,所以移动台在小区间移动时,其切换过程也将简化为主控扇区的选择过程,上层业务将不会因为切换而中断。

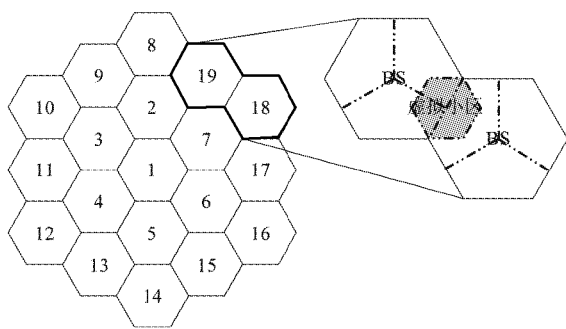


图 3 双扇区合作虚拟小区方案

与三扇区合作虚拟小区不同的是,双扇区合作时,申请的合作小区可能会出现无合作资源的情况。为了保证合作链路的顺利建立,每个扇区都预留一部分资源用于合作链路的建立。当相邻小区业务量相差较大时,仍然会出现合作小区没有合作资源的情况。此时,合作链路建立失败,移动台将只能通过主控链路进行通信。主控基站也将根据情况降低移动台的调制编码方式来保证其通信质量。如果主控链路也出现资源不足,或使用最低的调制编码方式也无法保证传输,则主控基站的接纳控制模块将拒绝建立该业务。

2 性能评估

本小节将对上述基于基站间合作的传输方案进行性能分析。由式(2)可得,小区内位置 i 的频谱效率的理论上限为

$$\gamma_i = \log_2(1 + SINR_i) \quad (3)$$

考虑实际系统,采用自适应调制(adaptive modulation, AM),目标误码率为 P_b , 调制方式采用 M -QAM,根据文献[6],当 $M \geq 4$ 且 $0 \leq SINR_i \leq 30$ 时,其频谱

效率可近似表示为

$$\gamma_i = \log_2(1 + \frac{1.5}{-\ln(5P_b)} SINR_i) \quad (4)$$

考虑小尺度衰落的影响,设 K 个基站对位置 i 合作传输,其信道系数为 $\mathbf{h} = [h_{i1}, h_{i2}, \dots, h_{iK}]$, P_{ik} 为位置 i 对基站 k 的接收功率(包括路损,阴影衰落), σ_z^2 为干扰和噪声功率之和,假设基站端有信道状态信息,根据文献[7],在合作传输下,频谱效率可表示为

$$\begin{aligned} \gamma_i &= E_{\mathbf{h}}[\log_2(1 + \frac{1.5}{-\ln(5P_b)} \sum_{k=1}^K |h_{ik}|^2 P_{ik})] \\ &= -\frac{1}{\ln 2} \sum_{k=1}^K v_k \exp(\frac{\ln(5P_b) \cdot \sigma_z^2}{1.5 \cdot P_{ik}}) Ei(\frac{\ln(5P_b) \cdot \sigma_z^2}{1.5 \cdot P_{ik}}) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $v_k = \prod_{j=1, j \neq k}^K (P_{ik} / (P_{ik} - P_{ij}))$, $Ei(x)$ 为指数积分函数($Ei(x) = -\int_{-x}^{\infty} (e^{-t}/t)dt$, 其在 MATLAB 中有对应函数)。

根据公式(5),以及移动 WiMAX 的系统评估方法[8],本文对两种基于虚拟小区的合作传输方案进行了性能评估,并与传统的(1,3,1)和(1,3,3)频率复用方式进行比较。具体仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

参数名称	参数值
小区分布	19 蜂窝小区, 每小区 3 扇区, 基站间距 1732m, 用户在蜂窝内均匀分布
天线高度	BS: 32m, MS: 1.5m
基站发射功率	43dBm
基站天线模型	$A(\theta) = -\min[12(\frac{\theta}{\theta_{3dB}})^2, A_m]$ $\theta_{3dB} = 70^\circ, A_m = 25dB$
天线增益	基站: 16dBi, 移动台: 0dBi
天线数量	基站: 1, 移动台: 1
中心频率	2.5GHz
带宽	10MHz/小区,
路损模型	COST321-HATA 市区模型
阴影衰落方差	8dB
阴影衰落相关性	小区间: 0.5, 扇区间: 1
噪声功率密度	-174dBm/Hz
移动台噪声系数	7dB
调制编码方式	QPSK 1/2, QPSK 3/4, 16QAM 1/2, 16QAM 3/4, 64QAM 1/2, 64QAM 3/4
目标误码率	0.001

3 仿真结果

为了比较基于基站间合作的虚拟小区与传统复用方式的性能差异,本文从中断概率、扇区容量、平

均频率复用系数以及频率效率在小区内的分布三个方面进行了性能比较。对于双扇区合作虚拟小区方案,还比较了不同扫描门限对系统性能的影响。为了保证比较的公平,所有方案的性能都是遍历中心小区(图 2 和图 3 中的小区 1)所有位置的结果。

图 4 为不同方案小区内 SINR 的累积概率分布,其中双扇区方案的 $Th = 0.5\text{dB}$ 、 1dB 、 2dB 和 5dB 分别表示不同的扫描门限值,下同。设 SINR 中断门限值为 0dB ,则中断概率如图 5 所示。由图可见,(1,3,1)复用时中断概率最大,双扇区合作虚拟小区方案的中断概率最小,无论扫描门限取 0.5dB 还是 5dB ,其中断概率都小于 0.05 。而(1,3,3)复用和三扇区合作虚拟小区方案中断概率都在 0.1 附近,也达到了系统的基本需求。

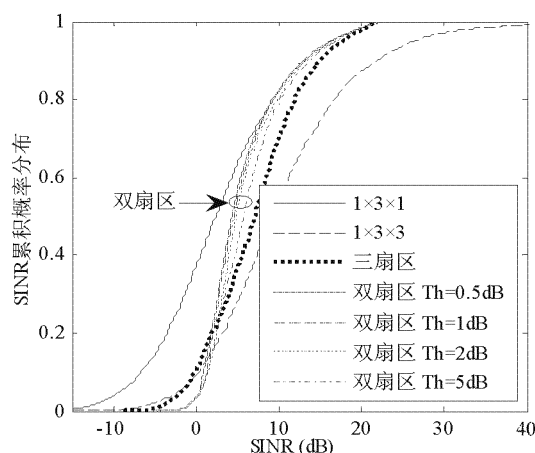


图 4 SINR 累积概率分布比较

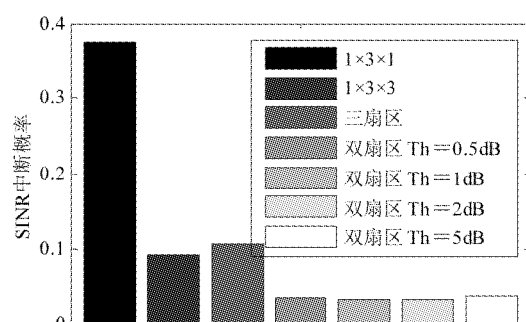


图 5 中断概率比较

各方案的扇区吞吐量如图 6 所示,(1,3,1)复用虽然有很高的中断概率,但其在一个扇区内使用了全部的频谱,因此其总的吞吐量依然是最大的。双扇区虚拟合作小区只在信号无法满足通信的情况下才进行合作通信,因此也有着较高的频谱利用率,其吞吐量接近于(1,3,1)复用的情况。此外,随着扫描门限的提高,虽然平均链路质量也会提高,但频谱利

用率会下降,结果扇区的吞吐量也出现了下降,这说明频谱利用率的提高对增大系统容量的贡献远大于链路质量的提高带来的增益。(1,3,3)复用和三扇

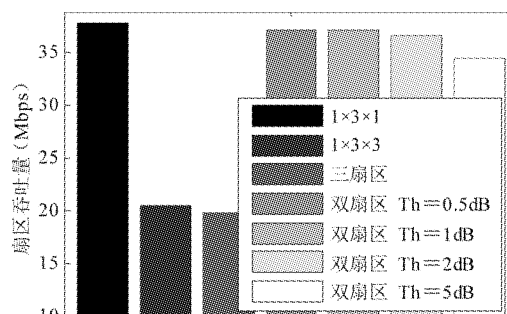


图 6 扇区吞吐量比较

区合作方案的扇区吞吐量最小也恰好说明了这一现象。本文定义每个扇区有效使用的频谱占总带宽的比例为平均频率复用因子,两种基站合作方案的频率复用因子如表 2 所示。

表 2 平均频率复用因子	
方案	复用因子 α
三扇区	1/3
双扇区, $Th = 0.5\text{dB}$	0.81
双扇区, $Th = 1\text{dB}$	0.8
双扇区, $Th = 2\text{dB}$	0.77
双扇区, $Th = 5\text{dB}$	0.68

由于扇区天线的使用,在扇区的不同方向上,频谱效率的分布也会不同,因此,本文将距离基站 L_m 处的频谱效率定义为半径 L 的六边形(中心为基站所在,六边与实际小区边界分别平行)边界处频谱效率的平均值。图 7 为小区内频谱效率分布。(1,3,1)和(1,3,3)复用频谱效率在小区内随着距离快速

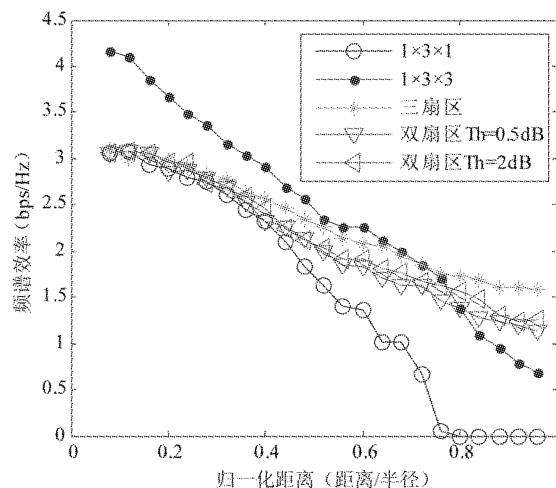


图 7 小区内频谱效率分布

下降,尤其(1,3,1)在小区边缘性能几乎不能工作。基站间合作的方案则很好的改善了小区边缘的频谱效率,使小区内的频谱效率分布更加平稳。

三扇区合作方案虽然扇区吞吐量最低,但其在小区边缘有很好的性能。双扇区合作方案无论在中断概率,扇区吞吐量还是频谱效率的分布上,都有着很好的性能。这是因为双扇区合作方案中,用户只有在主控链路质量降低到门限以下时才建立合作链路,是一种动态的虚拟小区规划方案。由此,相对于其他方案,双扇区合作需要通过扫描过程来建立,这会带来一定的信令开销。

4 结 论

多小区干扰协调是现代通信系统中提高边缘用户性能的重要方法。相邻基站间合作虽然在信号处理过程中增加了一定的复杂度,但使用户原本的最大干扰变成有用信号,且移动台的切换也变得更加方便。本文研究了通过基站间合作的方法实现多小区干扰协调的问题,并提出了两种同频组网的基站合作虚拟小区规划方案。其中,三扇区合作方案的中断概率和系统吞吐量都与(1,3,3)频率复用相当,且其频谱效率在小区内随距离分布最为平衡,在小区边缘性能最好。双扇区合作方案也很好地平衡了小区内频谱效率的分布,同时还获得了最好的中断概率和与(1,3,1)相当的吞吐量性能,这种动态的虚拟小区规划方案在实际中会有较好的应用前景。本文中双扇区合作时,合作基站是基于信号质量(即

SINR)来选择的,并没有考虑合作基站本身是否存在可用资源,有可能会出现合作链路建立失败的问题。因此,如何构造合作基站的选择准则,在信号质量和合作资源之间取得最好的折衷,以及如何实现虚拟小区的动态资源预留以保证合作链路的成功建立等问题,将成为下一步研究的方向。

参考文献

- [1] Wang Z, Stirling-Gallacher R. Frequency reuse scheme for cellular OFDM systems. *Electronics Letters*, 2002, 38(8): 387-388
- [2] Qualcomm Europe. Description and simulations of interference management technique for OFDMA based E-UTRA downlink evaluation. www.3gpp.org: 3GPP, 2005
- [3] 陈斌, 胡宏林, 张小东等. 未来移动通信系统中的小区间干扰协调技术. *电信科学*, 2006, 22(6): 38-42
- [4] Xu K, Tao X, Wang Y, et al. Inter-cell packet scheduling in OFDMA wireless network. In: *Proceedings of IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, Dublin, Ireland, 2007. 3115-3119
- [5] Zhang H, Dai H. Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2004, 2004(2): 222-235
- [6] Goldsmith A. *Wireless Communication*. New York: Cambridge University Press, 2005. 264-289
- [7] Choi W, Andrews J G, Yi C. The capacity of multicellular distributed antenna networks. In: *Proceedings of the 2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing*, Texas, USA, 2005. 1337-1342
- [8] Koc A, Ghosh A, Raghavan A, et al. WiMAX system evaluation methodology version 1.7. Beaverton: WiMAX Forum, 2007

Two interference coordination schemes based on cooperation between base stations and their performance analysis

Zhang Jian, Rong Lu, Hu Honglin

(Shanghai Research Center for Wireless Communication, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

Abstract

The downlink inter-cell interference coordination problem in cellular systems is studied in this paper from the perspective of base station cooperation. The concept of virtual cooperative cell is introduced, and two specific virtual cell planning schemes i.e. the three-sector cooperative and the two-sector cooperative, are proposed. The proposed schemes can get effective interference coordination, and also enable single frequency network planning and seamless handover. The simulation results show that the proposed schemes can balance the distribution of the spectrum efficiency of different positions in each cell and improve the performance of the cell-edge users. The two-sector cooperative scheme can reduce the system outage by 5% compared to the conventional (1, 3, 3) reuse scheme and achieve the sector throughput close to the conventional (1, 3, 1) reuse scheme.

Key words: cellular system, single frequency network planning, interference coordination, cell planning, cooperative transmitting