



一种 LTE-Advanced 网络中的能效协作基站睡眠机制

赵季红^{1,2}, 胡江燕¹, 曲桦², 王伟²

(1. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710061;

2. 西安交通大学电子信息学院, 陕西 西安 710049)

摘要:在通信非高峰期, 关闭未充分利用的基站是一种减小能耗的有效方法, 睡眠基站内用户由邻近基站协作服务, 避免了因小区范围拓展导致的基站发射功率消耗。考虑将基站睡眠技术与 CoMP (coordinated multi-point, 协作多点) 传输技术相结合来提升系统性能, 全面考虑协作过程中的功耗情况, 提出一种基于功耗最小化的动态分簇和基站睡眠方案。该方案能够在为每个用户选择最佳分簇, 满足 QoS 需求的同时, 最小化系统功耗。仿真结果表明, 本方案在提升能效方面优于传统基站睡眠方案。

关键词:能效; 基站睡眠; 协作多点; 动态分簇

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016032

An energy efficiency cooperating base station sleep mechanism in LTE-Advanced network

ZHAO Jihong^{1,2}, HU Jiangyan¹, QU Hua², WANG Wei²

1. School of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: Shut down underutilized base station is a promising approach to reduce energy consumption of network during its off-peak time. The users in sleeping cell were served by neighboring cells, thus avoiding base station transmit power consumption caused by cell range expansion. Base station sleeping technique was combined with CoMP transmission to improve system performance, fully considered power consumption in the cooperative processing, and a scheme of dynamic clustering and base station sleeping to minimize power consumption was proposed. This scheme could select the best cluster to meet each user's QoS requirement and minimize system power consumption. Simulation results show that the proposed scheme is better than traditional base station sleeping scheme in improving energy efficiency.

Key words: energy efficiency, base station sleeping, coordinated multi-point, dynamical clustering

收稿日期: 2015-08-06; 修回日期: 2015-10-29

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 基金资助项目 (No.2014AA01706); 国家自然科学基金资助项目 (No.61372092); “新一代宽带无线移动通信”国家科技重大专项基金资助项目 (No.2013ZX0302010-003)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2014AA01706), The National Natural Science Foundation of China (No.61372092), “Next-generation Broadband Wireless Mobile Communication” National Major Project (No.2013ZX0302010-003)

1 引言

随着移动网络规模的飞速发展,移动网络能量消耗剧烈增长。提高 EE(energy efficiency,能效)已经成为未来绿色蜂窝网络的设计目标。在一个典型的蜂窝网络中,基站消耗的能量占据整个网络消耗能量总量的 80%,每个基站总能耗的 60%用于信号处理和空调处理^[1]。为了提高绿色无线蜂窝网络的能量利用率,减少基站的能量消耗是至关重要的。当网络中业务量较少时,一个基站仍然消耗了其消耗量最大值的 90%,话务量对基站消耗的影响微乎其微。由于通信业务有明显的潮汐效应^[2],比如,白天工作期间,商业区的通信业务量很大,而住宅区的通信业务量却很小;晚上下班后,情况恰恰相反。24 h 处于工作状态的基站在一段时间内服务于很少的用户,造成了巨大的能量浪费。在通信非高峰期,让一些基站睡眠是提高能效的一种有效方法。

当某个基站处于睡眠状态时,为了保证睡眠基站内用户的正常通信,传统方法是通过提高邻近基站的传输功率为这些用户服务。然而这种传统小区睡眠方案带来两种后果:一是睡眠小区内用户的中断率增高,二是邻区小区功耗增加^[3]。CoMP 技术通过多小区间协作可有效解决上述难题。联合 CoMP 技术的基站睡眠原理如图 1 所示。参考文献[4]提出一种结合静态分簇 CoMP 技术的小区睡眠方案,限定在静态簇场景中,当某个基站关闭后,簇内所有基站将协作服务于睡眠小区内用户。然而在用户动态变化情况下,静态簇方案性能波动大,而且带来非常大的回传开销以及计算复杂度。参考文献[5]提出一种结合 CoMP 动态分簇的小区睡眠方案,用户可根据自身位置动态选择簇,具有较好的性能且实现复杂度低。但该方案中簇大小固定且未考虑协作传输功耗和回程功耗。

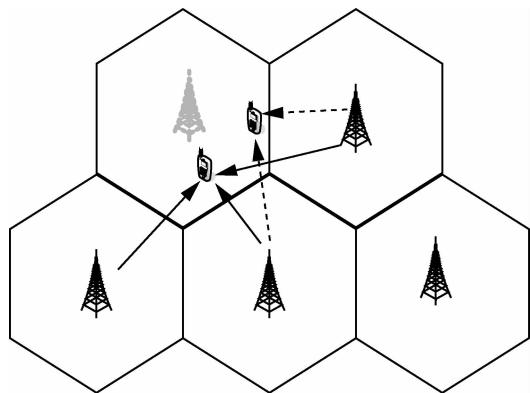


图1 基站睡眠原理

本文以提升能效为目标,考虑小区睡眠技术与基于 CoMP 技术相结合来提升系统性能,充分考虑协作过程中的功耗情况,分析动态分簇引起的协作传输功耗和回程功耗影响,提出一种基于协作功耗最小化的动态分簇和小区睡眠方案,该方案能够在为每个用户选择最佳分簇满足 SINR 需求的同时,最小化系统功耗。与之前已有方案比较,本文所提方案能效更高。

2 系统模型

2.1 系统模型

考虑在非通信高峰期,LTE-Advanced 网络下行 CoMP 传输场景,采用 OFDM 系统,共 K 个小区,小区 k 内有 L_k 个用户随机分布,其中 $k \in \Theta, \Theta = \{1, 2, \dots, K\}$ 。用户和基站均采用单天线配置的,网络中存在若干睡眠基站。睡眠基站内的用户由邻近基站联合协作为其提供服务。图 2 是多小区多用户场景示意。

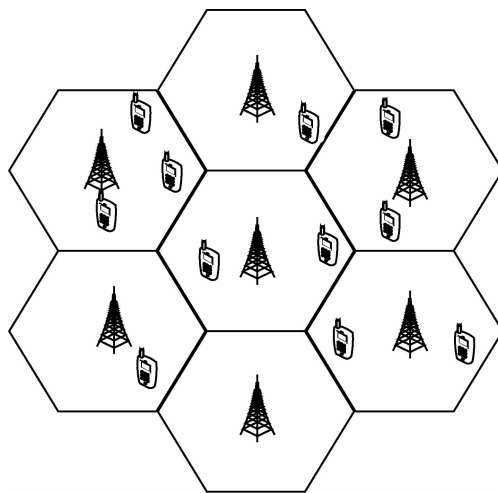


图2 多小区多用户场景示意

$h_{lk} = (h_{lk}^j | j \in \Theta)$ 为第 k 个小区内的用户 l 全局信道增益矢量估计, 其中 h_{lk}^j 表示 k 小区内的用户 l 与基站 j 间的信道矢量。 $s_{lk} = (s_{lk}^j | s_{lk}^j \in \{0, 1\}, j \in \Theta)$ 为该用户对应的协作簇矢量, $s_{lk}^j = 1$ 表示基站 j 是用户 l 的协作基站, 反之亦然。假定各小区均采用等功率分配, 即:

$$SINR_{lk} = \frac{p_{lk}(h_{lk}, s_{lk})}{z_{lk} + N_0} \quad (1)$$

其中, $(\cdot, \cdot)$ 表示内积, N_0 为高斯白噪声, z_{lk} 表示用户 l 受到的簇间干扰。根据香农公式可得小区内用户 l 的数据速率为:

$$r_{lk} = \ln(1 + SINR_{lk}) \quad (2)$$



2.2 功率损耗模型

一个典型的结合基站睡眠的 CoMP 系统总功耗定义为:

$$P_{\text{total}} = \sum_{k=1}^K q_k p_k + P_{\text{CoMP}} \quad (3)$$

其中, q_k 表示基站的工作模式, $q_k=1$ 表示基站处于工作状态, $q_k=0$ 表示基站 k 处于关闭状态; p_k 表示基站 k 的功耗, $p_k = \sum_{l=1}^{L_k} p_{lk}$; P_{CoMP} 表示基站在协作中产生的额外功率损耗, 取决于 k 小区 l 用户 u_k 的信号处理功率 $P_{\text{sp}}^{u_k}$ 、回程功率 $P_{\text{lh}}^{u_k}$ 。假定需要协作的用户数为 d , 用户集合记为 Ω_c , P_{CoMP} 可表示为:

$$P_{\text{CoMP}} = \sum_{u_k \in \Omega_c} P_{\text{sp}}^{u_k} + P_{\text{lh}}^{u_k} \quad (4)$$

信号处理功率 $P_{\text{sp}}^{u_k}$ 取决于协作簇大小 $N_c^{u_k}$ 和单基站信号处理功率基准 p_{sp} , $P_{\text{sp}}^{u_k}$ 表达式为:

$$P_{\text{sp}}^{u_k} = \frac{N_c^{u_k} \times p_{\text{sp}} ((1 - \xi_1 - \xi_2) + \xi_1 N_c^{u_k} + \xi_2 (N_c^{u_k})^2)}{N_c^{u_k}} \quad (5)$$

其中, $\xi_1 N_c^{u_k}$ 和 $\xi_2 (N_c^{u_k})^2$ 分别表示 CoMP 信道估计和 SDMA 预编码对应的功耗, 两者均随簇大小增加而增大, 协作簇大小 $N_c^{u_k} = \sum_{j=1}^K S_{lk}^j$, 其中 $N_c^{u_k}$ 表示和 k 小区 l 用户选择相同协作簇的用户数。

回程功率 $P_{\text{lh}}^{u_k}$ 主要包括协作基站间信道状态信息和数据共享所损耗的功率, 可表示为:

$$P_{\text{lh}}^{u_k} = \frac{N_c^{u_k} \times p_{\text{lh}} (\beta_D^{u_k} + \beta_C^{u_k})}{N_c^{u_k}} \quad (6)$$

其中, p_{lh} 表示在回程上传送 1 bit 信息所对应的功耗, $\beta_D^{u_k}$ 和 $\beta_C^{u_k}$ 分别表示每个基站共享的小区 k 用户 l 的数据和信道状态信息。

3 基于功耗最小化的动态分簇 CoMP 和基站睡眠算法

3.1 问题描述

令 r_{lk}^0 表示小区 k 中用户 l 的数据速率目标值, 假定簇与簇之间使用正交资源, 要求同一时刻在同一资源块上最多只能服务一个用户, 以保证用户最小传输速率的前提下系统功耗量小为目标, 综合考虑用户动态选簇、功率分配和基站睡眠对降低系统功耗的作用, 构建优化问题模型如下:

$$\min_{s_{lk}^j, p_{lk}, q_k} P_{\text{total}} = \sum_{k=1}^K q_k \left(\sum_{l=1}^{L_k} p_{lk} \right) + P_{\text{CoMP}}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad (1) \quad & \sum_{j=1}^K s_{lk}^j \in \{1, 2, 3\} \quad \forall l, k \\ (2) \quad & s_{lk}^j \in \{0, 1\} \quad \forall l, j, k \\ (3) \quad & r_{lk} \geq r_{lk}^0 \quad \forall l, k \\ (4) \quad & \sum_{l=1}^{L_k} p_{lk} \leq q_k P_{\text{max}} \quad \forall k \\ (5) \quad & q_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \end{aligned} \quad (7)$$

其中, 条件(1)表示每个用户所选协作簇大小不能超过 3, 条件(3)要求满足用户最小速率要求, 条件(4)和条件(5)表示当 $q_k=1$ 时满足单基站最大功率约束要求, 当 $q_k=0$ 时基站 k 处于关闭状态, $q_k=1$ 时基站处于工作状态。

对问题(7)优化求解过程中, 假定每个用户选择的协作簇内基站为该用户分配相同的功率, 即小区 k 中用户 l 的协作集合假定为基站 m 和 j , 则有 $p_m = p_{jl}$ 。另外由于用户自身选择协作簇, 对协作簇外基站干扰程度未知, 采用式(8)作为用户所受的簇间干扰估计值:

$$\tilde{z}_{lk} = \sum_{j=1}^K \frac{P_{\text{max}}}{L_j} h_{lk}^j \bar{s}_{lk}^j \quad (8)$$

其中, $\bar{\cdot}$ 表示取反操作。进而用户的 SINR 可表示为:

$$\gamma_{lk} = \frac{p_{lk} (h_{lk}, s_{lk})}{\tilde{z}_{lk} + N_0} = \frac{p_{lk} (h_{lk}, s_{lk})}{\sum_{j=1}^K h_{lk}^j \bar{s}_{lk}^j P_{\text{max}} / L_j + N_0} \quad (9)$$

此外由于系统总功耗是用户功率和用户速率的单调增函数, 而用户速率随用户功率增大而增大, 因此当系统功耗最小时, 问题(7)中的条件(3)取等式。假定分配给每个用户单位资源, 故而条件(3)可调整为用户 SINR 等式约束。

3.2 算法描述

由于问题(7)是组合优化问题, 属于 NP 难问题, 假定等功率分配前提下采用穷举搜索算法可以求出问题的全局最优解, 但复杂度太高。此外, 在实际的系统中穷举搜索算法的信息迭代产生的费用也十分高。本文考虑将原问题分成两层, 外层先确定睡眠基站, 内层简化为联合用户选簇和功率分配问题。本文考虑分布式用户选簇和功率分配方案, 假设各基站最大发射功率始终满足协作传输需求, 主体思路是对条件(4)进行松弛, 将原问题解耦合为面向单个用户的动态选簇和功率分配子问题。

3.2.1 单个用户动态选簇和功率分配问题模型

假定外层确定的睡眠基站为基站 m 。每个用户决定自

己的协作簇且用户独立选簇。由用户 SINR 的门限值计算出协作基站为用户分配的传输功率, 选出一个满足用户 QoS 要求的最优协作簇最小化系统功耗。对任意小区 k 内的用户 l 构建的问题模型为:

$$\begin{aligned} \min_{s_{lk}} \quad & p_{lk} + P_{sp}^{u_{lk}} + P_{bh}^{u_{lk}} \\ \text{s.t.} \quad & (1) \sum_{j=1, j \neq m}^K s_{lk}^j \in \{1, 2, 3\} \\ & (2) s_{lk}^j \in \{0, 1\} \quad \forall j \\ & (3) \gamma_{lk} = \gamma_{lk}^0 \\ & (4) p_{lk} = \frac{\gamma_{lk} \times (N_0 + Z_{lk}')}{N_c^{u_{lk}}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $N_c^{u_{lk}} = \sum_{j=1, j \neq m}^K S_{lk}^j$, γ_{lk}^0 表示小区 k 中用户 l 的信干噪比门限, 条件(4)表示在满足用户信干噪比门限 γ_{lk}^0 的条件下协作基站分配给用户的传输功率。其中 Z_{lk}' 同理于式(8)进行干扰估计 $\tilde{Z}_{lk}' = \sum_{j=1, j \neq m}^K \frac{P_{\max}}{L_j} h_{lk}^j \bar{s}_{lk}^j$ 。

问题(10)的求解过程: 对条件(1)分别取值 1、2、3 时, 条件(3)带入条件(2)计算出用户传输功率。在协作簇大小不同的情况下选出最优协作簇并计算系统功耗, 最后选出使功耗最小的协作簇作为用户最优协作簇。直到为所有 CoMP 用户和睡眠基站内用户完成最优簇选择, 使得系统功耗最小。

(1) 用户分类

这里介绍一种将用户分为中心用户和 CoMP 用户的准则。假定, 信道状态信息(CSI)已知, 计算各个用户的 SINR。若 $\text{SINR}_{lk} < \alpha$, 则 k 小区内的 l 用户为 CoMP 用户, 否则为中心用户。满足 $L_k = L_k^{\text{CoMP}} + L_k^{\text{Center}}$, L_k^{CoMP} 和 L_k^{Center} 分别表示小区 k 内的 CoMP 用户数和中心用户数。 α 是一个预定义的门限值, 通过门限值, 将小区内的用户分为两部分。

(2) 单个用户动态选簇

本文采用以用户为中心的动态选簇方法, 在用户侧根据用户状态变化不断调整协作簇, 充分适应每个用户的信道条件, 并对可能产生的干扰进行估计, 然后根据自身偏好并按照某一准则选择最佳协作簇。灵活地选择协作簇, 能够适应无线网络和用户的动态变化, 可以保证各用户的传输速率得到满足。充分考虑到回程功耗, 为不同用户选择大小不同的协作簇, 起到节约能耗的效果。

具体选簇方法是: 考虑从用户侧角度, 对每个 CoMP 用户或睡眠基站内的用户选簇, 簇间允许重叠。用户需要获

得相邻基站间的信道增益, 在满足用户 SINR 下, 分别选择信道条件最好的 1 个、2 个和 3 个基站作为用户候选协作簇, 计算出各个候选簇下的功耗。该策略下, 信道增益较大的基站提供有用信号使得簇间干扰降低。另外限定协作基站数目小于或等于 3, 确保了实现复杂度低并减轻了回程负载压力, 最终选择候选簇中功耗最小的作为用户的协作簇。

(3) 基站睡眠策略

在某一时间段的通信非高峰期, 基站未得到充分利用, 造成了能源浪费。考虑通过让一些基站睡眠来提高能效。因为每个基站内情况相似, 即每个基站内用户数都很少而且都随机分布, 系统内每个基站都有睡眠的可能。由于各个基站内用户的随机分布, 其 CoMP 用户数、用户选簇情况及信道增益的不同导致关闭不同的基站会有不同的功率损耗。本文提出一种最优睡眠基站策略, 采用睡眠基站轮询的策略选出一个最优睡眠基站(即节能最多的基站)作为睡眠基站。对睡眠小区内的各用户按(2)中提到的选簇方案选择协作基站, 确保睡眠基站内用户正常通信。

基于上述分析, 本文假定只考虑关闭一个基站的情况, 提出一种启发式贪婪算法求解问题(7), 算法如下:

(1) 确定 CoMP 用户集合 Ω ;

(2) 根据 SINR 由小到大排序的 CoMP 用户列表 S ;

(3) 依次为 S 中的用户 i , 选择候选协作簇集合 C_i , 每个用户根据其与各基站间信道增益优先选择除本小区外最大的 2 个对应基站组成候选协作簇集合;

(4) 睡眠基站为 k 时, 为小区 k 用户 $\{1, \dots, L_k\}$ 选簇, 每个用户根据其与各基站间信道增益优先选择最大的 3 个工作基站组成候选协作簇集合;

(5) 初始化, 设总功耗 $P_{\text{total}} = 100$ (总功率初始值设定为一个较大值), 睡眠小区 $q_k = 1$, 候选睡眠基站 $C_{\text{sleep}} = \{\emptyset\}$, 用户选簇情况 $s_{lk} = 0$ 和功率分配情况 $p_{lk} = 0, \forall l, k$;

(6) $k=1$, 先关闭基站 k 时, 系统内所有用户获得目标 SINR 前提下的系统总功耗情况。

· j 从 1 到 K : 如果 $j=k$, l 从 1 到 L_j , 按照步骤(4)原则, 计算 j 小区内所有用户分别选择不同数目协作簇, 达到 SINR 目标时协作基站功耗, 选择最小功耗对应的协作簇结果和功率值; 如果 $j \neq k$, l 从 1 到 L_j , 按照步骤(3)的选簇原则, 计算 j 小区内列表 S 中第 l 个用户分别选择不同数目协作簇, 达到 SINR 目标时协作基站功耗, 选择最小功耗对应的协作簇结果和功率值;



- 计算关闭基站 k 后的总功耗 P_{total}^k , 如果 $P_{\text{total}}^k < P_{\text{total}}$, 将 k 代入候选睡眠集合 C_{sleep} 中。令 $k=k+1$, 返回到步骤(6);
- (7) $k=\min C_{\text{sleep}}, q_k=0$;
- (8) 输出 $P_{\text{total}}, q_k, S_{lk}$ 和 p_{lk} 。

4 仿真及其分析

4.1 仿真参数设置

本文考虑 LTE-Advanced 网络中由 7 小区构成的场景, 每个小区中心有一个基站, 4 个调度用户随机分布在每个小区中。假定小区半径 $R=100$ m, 用户距基站最小距离 $d_0=30$ m, 采用简单路损模型 $h_{lk}^k=\alpha_0^2(R/d_{lk}^k)^{\gamma}$ 估计信道增益, 其中 d_{lk}^k 代表基站 k 到其小区内用户 l 的距离。本节采用归一化基站最大传输功率, 且仅考虑 CoMP 传输引入回程功耗影响。图 3、图 5 中回程功率系数 p_{lh} 设为 0.1, 图 4 中 SINR 设为 4。

4.2 仿真分析

为验证本方案在提高系统能效, 降低功耗方面的优越性, 首先仿真对比了非 CoMP、非基站睡眠 CoMP、结合基站睡眠的 CoMP 3 种方式下系统总功耗; 其次, 仿真了在不同回程功率系数 p_{lh} 下这 3 种工作方式下的系统总功耗。最后, 仿真对比了本方案与其他已有方案针对不同类用户(睡眠小区内用户和所有用户)采用 CoMP 技术下系统功耗。

由图 3 可以看出, 不同的 SINR 目标值下, 非 CoMP、非基站睡眠的 CoMP 和结合基站睡眠的 CoMP 3 种方式下的系统功耗曲线。随着 SINR 目标值的增大, 系统总功耗增加。这是由于用户 SINR 目标值的增大需要更高的传输功率, 也就增加了系统总功耗。在相同的 SINR 条件下, 非 CoMP 方式下系统功耗最大, 非基站睡眠的 CoMP 方式次之, 结合基站睡眠的 CoMP 方式系统功耗最小。随着目标

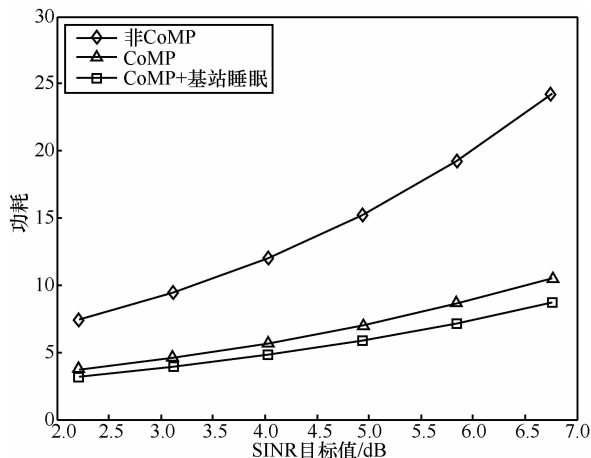


图 3 不同 SINR 目标值下, 系统功耗情况

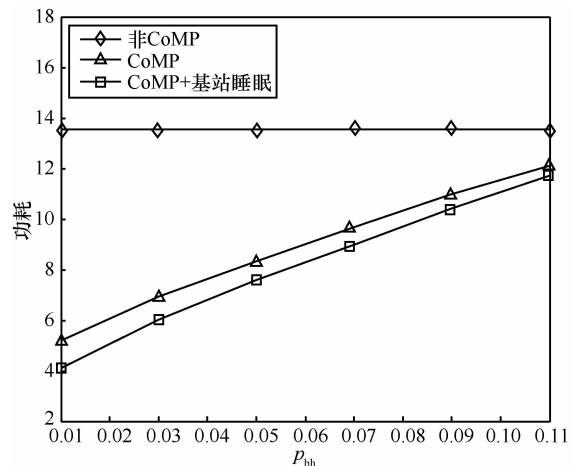
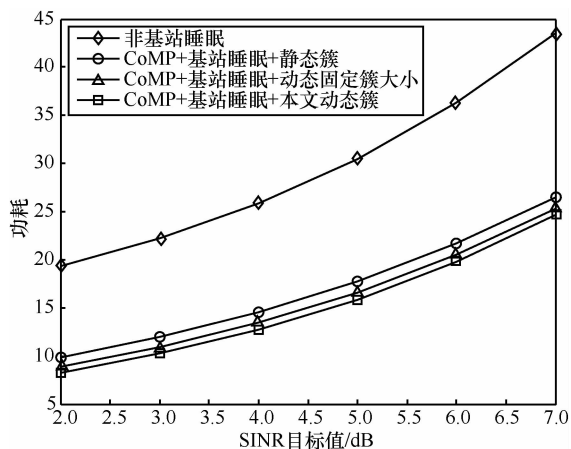
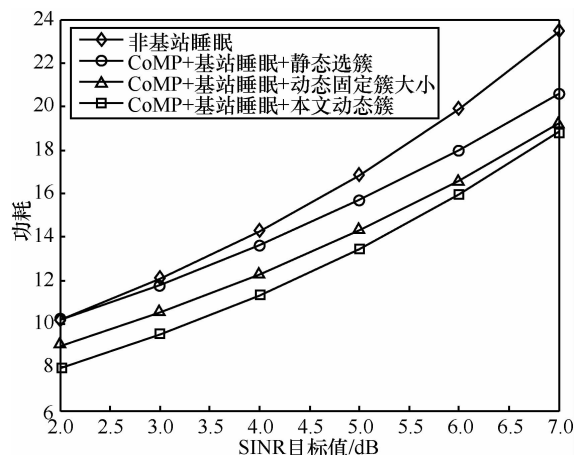


图 4 不同的 p_{lh} 下, 系统功耗情况



(a) 非 CoMP 情形



(b) CoMP 情形

图 5 不同情形下各个方案的系统功耗

SINR 值的增大,结合基站睡眠的 CoMP 方式较另外两种方式节能更多。表明采用基站睡眠和 CoMP 传输相结合的方式确实能够节约系统能耗,从而提高系统能效。

图 4 表明不同的回程功率系数下,3 种方式下的系统总功耗情况。可以看出,非 CoMP 方式下的系统功耗不随回程功率系数的变化而变化。这是由于基站之间不存在信息共享,不会产生回程功耗,系统功耗也就与回程功率系数无关。而在非基站睡眠的 CoMP 和结合基站睡眠的 CoMP 这两种方式下,随着值的增大,系统总功耗增加,这是由于在 CoMP 传输过程中协作基站间需要进行数据和信道状态信息共享,这样将产生回程功耗,而且回程功率系数越大,回程功耗也就越大。随着 p_{th} 的增大,3 种方式的功耗逐渐接近,EE 也就接近一致。在低回程功耗下,结合基站睡眠的 CoMP 对提高系统能效十分重要。

图 5 表示只对睡眠基站内的用户采用 CoMP 技术和对睡眠基站内的用户以及网络中其余 CoMP 用户均采用 CoMP 技术两种情形下的功耗情况,主要对比了在非 CoMP、CoMP 情形下结合 CoMP 和小区睡眠技术的 3 种不同方案(静态选簇和固定基站睡眠方案、动态固定簇大小和固定基站睡眠方案、动态选簇和动态基站睡眠方案)在不同 SINR 目标值时的总功耗情况。可以看出,随着 SINR 目标值的增大,系统总功耗增加。3 种方案在能耗方面静态选簇和固定基站睡眠策略功耗最大,动态固定簇大小和固定基站睡眠方案次之,动态选簇和动态基站睡眠方案最小。这是由于,静态选簇方案采用全协作的工作方式带来最大的回程功耗。固定簇的大小同样带来较大的回程功耗。而动态选簇和动态基站睡眠策略充分考虑回程功耗,动态关闭使系统能耗最小的基站作为睡眠基站,因此能耗最小。两种情形下,本文方案均功耗最小,但在 CoMP 情形下功耗低于非 CoMP 情形下的功耗。本文提出的 CoMP 情形下动态选簇和动态基站睡眠方案,在提高系统能效方面性能最优。

5 结束语

本文考虑基站睡眠技术与 CoMP 技术相结合来提升系统性能,全面考虑协作过程中的功耗情况,提出一种基于功耗最小化的动态分簇和小区睡眠方案,该方案能够在为每个用户选择最佳分簇,满足 SINR 需求的同时,最小化系统功耗。仿真结果表明,本方案在提升能效方面优于传统基站睡眠方案。

参考文献:

- [1] HAN C, HARROLD T, ARMOUR S, et al. Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(6): 46-54.
- [2] 胡宝珠. 基于无线蜂窝网络的多点协同通信能效性优化控制算法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014: 8-9.
HU B Z. The study of energy efficiency optimization algorithm based on coordinated multi-point transmission[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014: 8-9.
- [3] CILI G, YANIKOMEROGLU H, YU F R. Cell switch off technique combined with coordinated multi-point (comp) transmission for energy efficiency in beyond-lte cellular networks[C]//The IEEE International Conference on Communications, June 10-15, 2012, Ottawa, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2012: 5931-5935.
- [4] HAN S Q, YANG C, WANG G, et al. On the energy efficiency of base station sleeping with multicell cooperative transmission [C]//The IEEE 22nd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, September 11-14, 2011, Toronto, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2011: 1536-1540.
- [5] LI Y, MA Y F, WANG Y, et al. Base station sleeping with dynamical clustering strategy of comp in lte-advanced[C]//The IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, August 20-23, 2013, Beijing, China. New Jersey: IEEE Press, 2013: 157-162.

[作者简介]



赵季红(1963-),女,博士,西安邮电大学教授,西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信网、新一代网络的管理与控制。

胡江燕(1991-),女,西安邮电大学硕士生,主要从事密集网络中协作多点传输技术研究工作。

曲桦(1961-),男,博士,西安交通大学教授,主要从事新一代无线宽带无线通信技术的研究工作。

王炜(1989-),男,西安交通大学博士生,主要从事密集网络中协作多点传输技术研究工作。