

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.11.003

异构网络中几乎空白子帧存在时干扰协调方法

姜来为, 沙学军, 吴宣利, 张乃通

(哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对异构网络中几乎空白子帧存在时用户接入选择和资源分配方法过于复杂的情况, 以及吞吐量需求难以得到满足问题, 以最大化系统总吞吐量为目标提出一种易于实现的蚁群算法. 在考虑不同用户不同需求的前提下, 根据微基站用户在几乎空白子帧和正常子帧时受到干扰的不同, 把一个微基站划分为两个虚拟基站, 将所存在的问题建模为广义分配问题进行求解, 同时解决了用户接入选择和资源分配问题. 仿真结果表明, 所提出方法与参考文献方法及两种增强型小区干扰协调固定配置结果相比, 可以有效提高系统总吞吐量, 同时兼顾小区边缘用户吞吐量, 实现了良好的综合性能, 能够更好地满足用户需求并在实际系统中易于实现.

关键词: 异构网络; 几乎空白子帧; 蚁群算法; 广义分配问题; 增强型小区干扰协调

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)11-0014-06

Algorithm for interference coordination in heterogeneous networks with almost blank subframe

JIANG Laiwei, SHA Xuejun, WU Xuanli, ZHANG Naitong

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Since the existing algorithms of user selecting access and resource allocation algorithms are too complicated in heterogeneous networks (HetNets) with almost blank subframe (ABS), and the system throughput demand is difficult to meet, we propose ant colony optimization (ACO) algorithm that is easy to be implemented. On the premise of different demands of different users, according to the definition of ABS, it is obvious that, in ABS and n-ABS periods, the UEs associated to PBS will suffer different interference. Therefore, a PBS can be divided into two virtual PBSs and the problem can be modeled as a generalized assignment one. The user equipment (UE) assignment problem and resource allocation problem are jointly solved. Simulation results demonstrate that, compared with the algorithm proposed in the reference paper and two kinds of fixed enhanced inter-cell interference coordination (eICIC) patterns, the proposed algorithm has a quite well improvement on the total system throughput, and at the same time, while taking into account the cell edge user throughput and achieving a good overall performance, this algorithm can better meet the needs of UEs and be easy to implement in practice.

Keywords: heterogeneous networks; almost blank subframe; ant colony optimization; generalized assignment problem; enhanced inter-cell interference coordination

随着无线通信技术的发展,新的无线应用和服务正在呈爆发式增长. LTE-A 系统中异构网络通过在宏蜂窝中部署大量低功率节点,如微微小区或家庭基站,可以提供更高的系统容量、扩大覆盖范围并

降低通信系统面临的需求压力^[1],受到越来越多研究者的关注. 这些低功率节点可以采用与宏蜂窝相同的频率,从而形成异构的网络环境. 由于低功率节点的发射功率比宏基站低,网络中大部分用户仍然会选择宏基站接入,低功率节点没有得到充分利用,这就带来了小区负载不平衡问题.

针对此问题,小区范围扩展 CRE (cell range expansion) 概念被提出,通过对不同基站设置不同的功率偏置,令用户在接收到低功率节点发送来信号功率不是最强的情况下,仍然有可能接入其中,实现了小区负载均衡. 然而小区范围扩展带来的问题

收稿日期: 2015-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2013CB329003); 国家自然科学基金 (61171110)

作者简介: 姜来为 (1986—), 女, 博士研究生;
沙学军 (1966—), 男, 教授, 博士生导师;
吴宣利 (1980—), 男, 副教授, 博士生导师;
张乃通 (1934—), 男, 教授, 中国工程院院士

通信作者: 沙学军, shaxuejun@hit.edu.cn

是,处于扩展范围的用户将受到来自宏基站严重的下行干扰,这将导致很差的信号干扰比和传输速率. 根据文献[2],当偏置值超过 6 dB 时,系统下行干扰很大,将对系统总吞吐量造成很大影响. 在实际系统中,CRE 偏置不会超过 15 dB. 还有学者在时域和频域干扰协调方法基础上,提出了变换域干扰协调方法^[3-4],但在异构网络中都不是很适用.

面对上述问题,第三代合作伙伴计划提出了增强型小区干扰协调^[5-7]. 其中几乎空白子帧 ABS (almost blank subframe)^[8]就是针对异构网络低功率节点的一种时域干扰协调方法,其核心思想是通过合理分配时域资源来减少宏基站对微基站的干扰. 此时系统中同时存在正常子帧 n -ABS (non-ABS) 和 ABS. 干扰源基站在 n -ABS 子帧发送有用信号,而在 ABS 子帧时只发送控制信号,这样被干扰基站在 ABS 子帧时调度受到宏基站严重干扰的用户进行信号传输. 已有一些研究者利用几乎空白子帧概念在异构网络中进行研究^[9-12]. 文献[9]对处于扩展范围内用户受到的干扰进行了分析研究,并提出宏基站和微基站协作策略来进行干扰预测. 文献[10]通过系统级仿真研究小区范围扩展偏置设置及 ABS 比率对系统性能的影响. 文献[11]在异构网络中研究小区范围扩展偏置和干扰协调对系统容量和公平性的影响. 文献[12]提出一种利用几乎空白子帧的增强型小区联合干扰协调方法,通过合理分配 ABS 子帧数量来获得系统的最优性能. 而此方法需要多个小区联合进行干扰协调,适用于理论分析,在实际系统中应用则显得过于复杂. 如何在实际异构网络系统中找到一种合理并容易实现的干扰协调方法仍然是一个具有挑战性的问题.

针对上述问题,本文利用几乎空白子帧,以提升系统总吞吐量为目标,分析异构网络中存在的干扰并建立数学模型,利用蚁群算法研究系统总吞吐量和几乎空白子帧比率之间的关系,在系统总吞吐量和系统边缘用户吞吐量之间寻求折中,同时解决了宏基站和微基站资源分配问题,以及用户的接入选择问题.

1 异构网络中干扰分析

异构网络架构如图 1 所示. 它是指在传统蜂窝覆盖的基础上,通过在热点区域布置一些低功率基站,形成宏蜂窝加低功率基站的分层组网方式来进行进一步提升热点地区的数据传输速率.

这种低功率节点的存在能够使运营商提供更高的数据速率,降低运营成本,并提供更有吸引力的业务^[13]. 本文考虑的是包括宏基站与微基站的同频组

网异构网络. 从前面叙述可知,几乎空白子帧的引入使得被干扰基站可以在 ABS 子帧中调度被严重干扰的边缘用户进行信号传输. 图 2 为宏基站与微基站组网 ABS 子帧图样示例. 宏基站在普通下行子帧时发送有用信号,而在 ABS 子帧时不发送有用信号,此时对应微基站子帧为被保护的低干扰子帧. 微基站可以利用被保护的低干扰子帧调度其边缘用户进行数据传输. 虽然宏基站在某些子帧上不发送数据,降低了资源利用率,但微基站获得了更好的性能,系统整体性能可以获得显著提升.

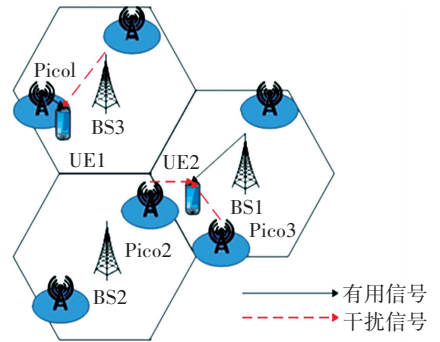


图 1 异构网络架构

Fig.1 A typical HetNet architecture

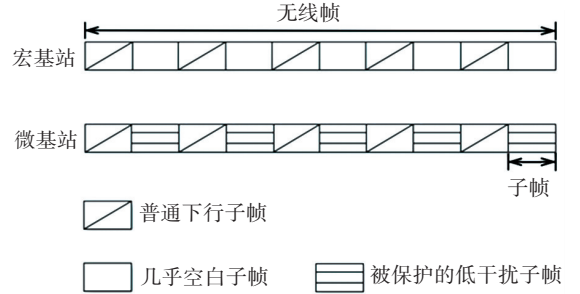


图 2 宏基站与微基站组网中几乎空白子帧图样示例

Fig.2 An example of ABS pattern between macro base station and pico base station

对于每个用户 $UE - u$, 根据参考信号接收功率, 可以获得其归属的宏基站或微基站. 本文中微基站均为 Pico 基站. 假设系统中宏基站都采用相同的几乎空白子帧图样, 当系统中存在几乎空白子帧和正常子帧两种子帧时, 存在的干扰可以分别进行考虑.

1) 在几乎空白子帧时, 对于和宏基站相连的用户, 由于宏基站在 ABS 子帧时对其相连用户不发送有用信号, 故信号与干扰噪声比 $SINR$ (signal to interference plus noise ratio) 为零. 对于和 Pico 基站相连的用户, 用户只会收到来自其他 Pico 基站的干扰信号. 此时 $SINR$ 可以表示为

$$\forall u \in U_p, SINR(u) = \frac{P_{Rx}(u)}{P_{Int}^{pico}(u) + N_0}. \quad (1)$$

式中: U_p 为以 Pico - p 为归属 Pico 基站的用户集

合, $P_{Rx}(u)$ 为用户 UE - u 接收到的下行有用信号, $P_{Int}^{pico}(u)$ 为所有会对 UE - u 产生干扰的 Pico 小区对其产生的干扰, N_0 为噪声.

2) 在正常子帧时, 对于和宏基站相连的用户, 它可以收到来自其他宏基站和 Pico 基站的干扰信号, 此时 SINR 可以表示为

$$\forall u \in U_m, \text{SINR}(u) = \frac{P_{Rx}(u)}{P_{Int}^{pico}(u) + P_{Int}^{macro}(u) + N_0}. \quad (2)$$

式中: U_m 为以宏基站为归属基站的用户集合, $P_{Int}^{macro}(u)$ 为所有会对 UE - u 产生干扰的宏基站对其产生的干扰.

对于和 Pico 基站相连的用户, 在正常子帧时会对此 Pico 产生干扰的宏基站信号正常发送, 因此既可以收到会对其产生干扰的宏基站发送来的干扰信号, 又可以收到其他会对其产生干扰的 Pico 基站对其产生的干扰, SINR 可以表示为

$$\forall u \in U_p, \text{SINR}(u) = \frac{P_{Rx}(u)}{P_{Int}^{pico}(u) + P_{Int}^{macro}(u) + N_0}. \quad (3)$$

2 数学模型建立与问题描述

考虑由宏基站与 Pico 基站组成的两层异构网络, 采用同频组网模式. 由于主要研究的是异构网络中存在的下行干扰对系统性能影响和基于几乎空白子帧的干扰协调方法, 所以只考虑下行链路情况. 在宏基站覆盖范围内随机分布的用户集合为 U , 用户个数为 $|U|$. 宏基站集合为 M , 宏基站个数为 $|M|$. Pico 基站集合为 N , Pico 基站个数为 $|N|$. 根据上文干扰分析可知, 与 Pico 基站相连用户在几乎空白子帧和正常子帧时受到的干扰是不同的. 在几乎空白子帧时, 宏基站几乎不发送有用信号, 此时与 Pico 基站相连用户仅受到来自其他 Pico 基站的干扰; 而在正常子帧时, 相连用户将受到宏基站和其他 Pico 基站的干扰. 因此可以将一个 Pico 基站分为两个虚拟的基站, 其中一个虚拟基站代表几乎空白子帧时的 Pico 基站, 记为 IFPico, 而另一个虚拟基站代表正常子帧时的 Pico 基站, 记为 ILPico. IFPico 基站集合为 P_{IF} , ILPico 基站集合为 P_{IL} . 此时系统中有 $|M|$ 个宏基站, $|N|$ 个 IFPico 基站和 $|N|$ 个 ILPico 基站. 用 B 表示所有基站集合, 总基站个数 $|B| = 2|N| + |M|$. ABS 比率定义为 ABS 子帧个数与总子帧个数的比. 假设总资源块个数为 F , 根据上述假设和 ABS 比率定义可知, 宏基站和 ILPico 基站可用资源块个数为 $F \cdot (1 - \alpha)$, IFPico 基站可用资源块个数

为 $F \cdot \alpha$.

用户 UE - i 接入基站 BS - j 时获得的 SINR_j^i 可以根据基站不同类型分别利用式 (1) ~ (3) 得到, 然后通过香农公式可以得到传输速率为

$$R_j(i) = W \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_j^i).$$

式中 W 为资源块带宽, 它在 LTE-Advanced 系统中各个资源块的带宽是固定的, 取值大小与占用的系统带宽有关^[14]. 假设用户 UE - i 的需求为 $r(i)$, 当用户 UE - i 与基站 BS - j 相连时需要的资源块个数为

$$RB_j(i) = \lceil \frac{r(i)}{R_j(i)} \rceil.$$

本文目标是最大化系统总吞吐量, 目标函数表示为

$$\max \sum_{j=1}^{|B|} \sum_{i=1}^{|U|} R_j(i) \cdot x_{i,j}.$$

式中二元判决变量 $x_{i,j} = 1$ 表示用户 UE - i 与基站 BS - j 相连, 而 $x_{i,j} = 0$ 则表示该用户不与此基站相连. 在一般的 LTE-Advanced 系统中一个用户只能与一个基站相连, 可以表示为

$$\forall i \in U, \sum_{j=1}^{|B|} x_{i,j} \leq 1. \quad (4)$$

宏基站提供与其相连用户资源块总数不会超过其可用资源块数目, 可以表示为

$$\sum_{i \in U_m} x_{i,1} \cdot RB_1(i) \leq F \cdot (1 - \alpha), \quad \forall j \in M. \quad (5)$$

式中: $j = 1$ 表示宏基站, U_m 为与宏基站相连用户集合. IFPico 提供与其相连用户资源块总数不超过其可用资源块数目, 可以表示为

$$\forall j \in P_{IF}, \sum_{i \in U_{IFPico}} x_{i,j} \cdot RB_j(i) \leq F \cdot \alpha. \quad (6)$$

式中 U_{IFPico} 为以 IFPico 基站为归属基站的用户集合. 同理, ILPico 提供与其相连用户资源块总数不超过其可用资源块数目, 可以表示为

$$\forall j \in P_{IL}, \sum_{i \in U_{ILPico}} x_{i,j} \cdot RB_j(i) \leq F \cdot (1 - \alpha). \quad (7)$$

式中 U_{ILPico} 为以 ILPico 基站为归属基站的用户集合.

因此, 本文要解决的问题可以表示为

$$\begin{cases} \max \sum_{j=1}^{|B|} \sum_{i=1}^{|U|} R_j(i) \cdot x_{i,j}, \\ \text{s.t.} \quad \text{式(4) ~ (7)}. \end{cases} \quad (8)$$

3 问题求解

3.1 求解思路

根据 ABS 比率定义可知, α 的取值在一个有限范围内, 设 $\alpha \in \{0, (1/40), (2/40), \dots, 1\}$, 因此解的搜索空间显著缩小. 对于特定 α 值而言, 式 (8) 问题可以等价于广义分配问题 GAP (Generalized

Assignment Problem)^[15], 它是一个 NP-hard 问题. 也就是说, 不可能设计出多项式时间内的精确求解方法. 广义分配问题一般求解方法可分为两大类: 精确类算法和非精确类算法. 精确类算法一般包括匈牙利算法、分支定界法等, 一般用于理论分析; 而非精确类算法包括一些智能算法, 如蚁群算法、遗传算法等, 一般应用于实际系统中, 具有容易实现、性能较好等优点. 本文则选择蚁群算法对问题进行求解.

蚁群算法是生物学家通过观察自然界中蚂蚁觅食的群体性行为得到的^[16]. 蚂蚁在寻找食物过程中, 会在其经过的路径上释放一种信息素, 并且能够感知其他蚂蚁释放的信息素. 信息素浓度的大小则表示了路径的远近, 信息素浓度越高, 表示对应的距离越短. 将蚁群算法应用于求解优化问题时, 蚂蚁的行走路径表示优化问题的可行解, 而蚁群所有路径则构成了待优化问题的解空间. 通常, 蚂蚁会以较大概率优先选择信息素浓度较高的路径, 并释放一定量的信息素, 以增强该条路径上的信息素浓度, 这样会形成一个正反馈. 最终蚂蚁能够找到一条到达食物的最佳路径, 此时对应的便是待优化问题的最优解.

3.2 具体步骤

为了将蚁群优化算法应用到 GAP 问题中, 可以把 GAP 问题表示为一个二部图 $G = (U, B, E)$. U 为二部图一侧用户集合; B 为另一侧基站集合; E 是连接用户和基站的边, $E = \{e_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, |U|; j = 1, 2, \dots, |B|\}$. 若某用户 UE- i 接入 BS- j , 则二部图中一侧点 i 和另一侧点 j 之间有边相连, 否则无边相连. τ_{ij} 是边 e_{ij} 的迹, 如果用户 UE- i 和基站 BS- j 之间无边, 则 $\tau_{ij} = 0$. 二部图的多个边可以组成一条可行路径, 而 GAP 问题的最优解即对应二部图的最优路径. 每只蚂蚁都是一个计算单元, 需要存储目前任务的分配情况, 判别基站剩余待分配资源, 计算并存储其构建解的目标值. 另外还需要判别基站的剩余工作能力, 每当一个用户接入基站后, 减去占用的 RB 个数可以得到此基站的剩余工作能力. 当某基站剩余工作能力为零后, 就不能再分配用户.

具体步骤如下:

1) 初始化参数. 用 $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻用户 UE- i 与基站 BS- j 相连的期望度, 也就是 t 时刻用户 UE- i 与基站 BS- j 的信息素强度. 初始时 $\tau_{ij}(0) =$

$$\frac{1}{|U|} \sum_{i=0}^{|U|} \frac{1}{R_j(i)}.$$

2) 基站选择策略. 用户分配时, t 时刻第 k 只蚂

蚁把用户 UE- i 与基站 BS- j 连接的概率 $p_{ij}^k(t)$ 可以表示为

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\mu [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{s \in \text{allow}_k} [\tau_{is}(t)]^\mu [\eta_{is}(t)]^\beta}, & s \in \text{allow}_k; \\ 0, & s \notin \text{allow}_k. \end{cases}$$

式中: μ 为信息素重要程度因子, 其值越大表示信息素的浓度在转移中起的作用越大; $\eta_{ij} = 1/R_j(i)$ 为启发因子, 这是一个定值可以表示能见度, 反映了用户 UE- i 与基站 BS- j 相连的启发程度; β 为启发函数重要程度因子, 其值越大表示启发函数在转移中的作用越大; allow_k 为蚂蚁 k 待访问基站集合. 一开始, allow_k 中有 $(|B| - 1)$ 个元素, 即包括除了蚂蚁 k 出发基站的其他所有基站. 随着时间的推进, allow_k 中元素不断减少直至为空, 即表示所有基站访问完毕.

3) 更新信息素. 每只蚂蚁选择好下一个基站之后, 就应用联机信息迹更新规则局部更新边 e_{ij} 上的迹:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^{|B|} \Delta\tau_{ij}^k.$$

式中: ρ 为一个常数且 $0 < \rho < 1$, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为第 k 只蚂蚁在用户 UE- i 与基站 BS- j 相连路径上释放的信息素浓度. 蚂蚁 k 的信息素浓度更新采用蚁环系统模型:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} Q \cdot R_j(i), & \text{当 UE-}i \text{ 与 BS-}j \text{ 相连;} \\ 0, & \text{当 UE-}i \text{ 与 BS-}j \text{ 不相连.} \end{cases}$$

式中 Q 为信息素释放总量.

4) 判断是否终止. 若 $\text{iter} < \text{iter_max}$, 令 $\text{iter} = \text{iter} + 1$, 清空蚂蚁经过路径的记录表, 并返回步骤 2); 否则, 终止计算, 输出最优解.

4 仿真实验与结果分析

为了验证本文方法可行性, 使用仿真软件进行仿真. 异构网络部署场景是宏基站加 Pico 基站, 系统中有 19 个位置固定的宏基站, 站间距离 500 m, 正常发送功率 45 dBm. 每个宏基站中随机分布了 10 个 pico 基站和 100 个用户. 以处于中心位置基站范围内用户吞吐量作为研究对象, 中心位置基站外其他基站的作用是给中心基站用户提供小干扰, 使仿真情况和实际情况相仿. 根据文献[12], Pico 基站发送功率一般在 23-30 dBm, 覆盖范围不超过 300 m. 这里 Pico 基站发送功率选为 27 dBm, 频带宽度 10 MHz.

基于异构网络基站部署和用户位置确定以及上述已知条件, 可以得到 macro-pico 干扰图. 对每个用

户而言,可以得到其与宏基站、IFPico 和 ILPico 相连时的 SINR,进而通过香农公式将上述 SINR 转化为对应物理层数据传输速率,从而得到与不同基站相连时需要的资源块数,作为蚁群算法的输入. ABS 比率的取值 $\alpha \in \{0, (1/40), (2/40), \dots, 1\}$ [12]. 蚁群算法中迭代次数设为 50,信息素重要程度因子 μ 为 1.5,启发函数重要程度因子 β 为 2, ρ 为 0.9,其他参数设置如上文所述. 通过仿真可知,当 ABS 比率 $\alpha = 15/40$ 时采用本文方法得到的系统总吞吐量最大. 在此场景下,本文方法与文献[12]中算法和固定配置增强型小区干扰协调结果做对比. 固定配置用 (α, c) 形式表示,其中 α 为 ABS 比率, c 为 CRE 偏置值. 由于本文场景下 $\alpha = 15/40$ 时系统总吞吐量最大,且实际系统中 CRE 取值通常不会超过 15 dB,因此选择 $(15/40, 10 \text{ dB})$ 和 $(15/40, 15 \text{ dB})$ 配置做为对比. 图 3 为所有用户平均吞吐量对比图,将得到的所有用户平均吞吐量从小到大进行排列,然后取前 5%, 50% 和 90% 的平均吞吐量. 从图 3 可以看出,本文方法与两种固定配置对比方法相比,对于前 5%, 50% 和 90% 的用户吞吐量均有提升. 具体来讲,和性能较好的固定配置 $(15/40, 15 \text{ dB})$ 相比,前 5% 用户平均吞吐量提升 51.4%, 50% 用户平均吞吐量提升 52.4%, 90% 用户平均吞吐量提升 38.1%, 系统总吞吐量有显著提升. 本文方法和文献[12]结果相比,5% 用户吞吐量较高但 50% 和 90% 用户吞吐量较低. 文献[12]中方法是一种较为复杂的干扰协调方法,需要多个基站进行协作以达到系统整体最优,适宜于理论分析,但在实际系统中不易实现,而本文方法则易于实现且性能较好.

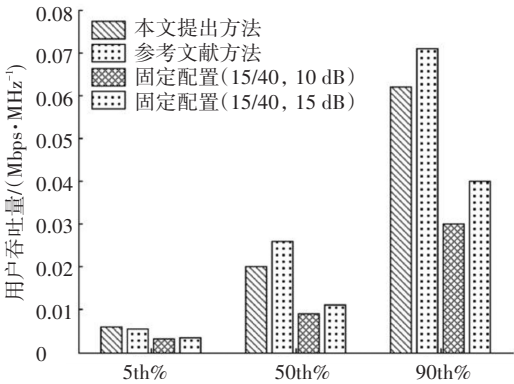


图 3 本文方法与参考文献方法及两种固定配置 eICIC 的 5%, 50% 和 90% 用户平均吞吐量对比
Fig.3 The 5th, 50th and 90th percentile average user throughput comparison with three contrast methods

图 4 为 Pico 范围内用户平均吞吐量对比,即边缘用户平均吞吐量对比. 同样,将得到的所有用户平均吞吐量从小到大进行排列,然后取前 5%, 50%

和 90% 的平均吞吐量做对比. 从图 4 可以看出,本文方法与两种固定配置对比方法相比,对于前 5%, 50% 和 90% 的用户吞吐量均有下降. 两种对比方法中,性能较好的是 $(15/40, 15 \text{ dB})$ 配置. 本文方法与其相比,前 5% 用户平均吞吐量下降 21.7%, 50% 用户平均吞吐量下降 32.4%, 90% 用户平均吞吐量下降 20.8%. 这是可以理解的,对比方法中由于设置了较大的 CRE 偏置值,使得几乎所有 Pico 范围内用户都与 Pico 基站相连,以获得较好性能,这在实际系统中是不可能的;而本文方法目标在于提升系统总吞吐量,对于边缘用户并没有过多考虑,所以 Pico 用户吞吐量下降是必然的. 本文方法和文献[12]结果相比, Pico 范围内用户平均吞吐量也有所提高. 总之,仿真结果验证了本文方法的可行性,和其他三种方法相比,本文方法易于实现,且在系统总吞吐量和边缘用户吞吐量之间取得了良好的折中.

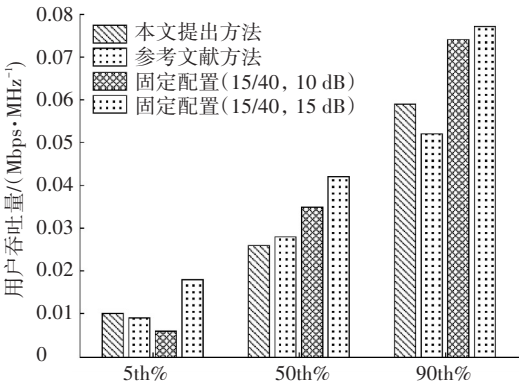


图 4 本文方法与参考文献方法及两种固定配置 eICIC 的 5%, 50% 和 90% Pico 范围内用户平均吞吐量对比
Fig.4 The 5th, 50th and 90th percentile pico range user throughput comparison with three contrast methods

5 结 论

异构网络中有几乎空白子帧存在时,有两大问题有待解决:一是用户选择接入问题,二是合理资源分配问题. 本文以最大化系统总吞吐量为目标,通过干扰分析,建立数学模型,将所存在问题建模为广义分配利用蚁群算法进行求解,同时解决了上述两大问题. 仿真结果表明,所提出方法和参考文献方法及两种增强型小区干扰协调固定配置结果相比,可以有效提高系统总吞吐量,同时兼顾小区边缘用户吞吐量,实现了良好的综合性能,能够更好地满足用户需求并在实际系统中易于实现.

参考文献

[1] 伍童辉. TD-LTE-Advanced 系统资源调度算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
WU Tonghui. Research on resource scheduling algorithms in TD-

LTE-Advanced system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[2] WANG YUANYE, PEDERSEN K I. Performance analysis of enhanced inter-cell interference coordination in LTE-advanced heterogeneous networks[C]// Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Yokohama: IEEE, 2012; 1-5. DOI:10.1109/VETECS.2012.6240233.

[3] WANG Kun, SHA Xuejun, MEI Lin, et al. Performance analysis of hybrid carrier system with MMSE equalization over doubly-dispersive channels[J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(7): 1048-1501. DOI:10.1109/LCOMM.2012.050112.120414.

[4] SHA Xuejun, QIU Xin, MEI Lin. Hybrid carrier CDMA communication system based on weighted-type fractional fourier transform[J]. IEEE Communication Letters, 2012, 16(4): 432-435. DOI:10.1109/LCOMM.2012.030512.111681.

[5] WEBER A, STANZE O. Scheduling strategies for HetNets using eICIC[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa: IEEE, 2012; 6787-6791. DOI:10.1109/ICC.2012.6364726.

[6] KAMEL M I, ELSAYED K M F. ABSF offsetting and optimal resource partitioning for eICIC in LTE-Advanced: proposal and analysis using a Nash bargaining approach[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC). Budapest: IEEE, 2013; 6240-6244. DOI:10.1109/ICC.2013.6655606.

[7] LU S H, LAI W P, WANG L C. Time domain coordination for inter-cell interference reduction in LTE hierarchical cellular systems[C]// International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, Rhodes. Allahabad: European Alliance for Innovation, 2014; 51-55. DOI:10.1109/QSHINE.2014.6928659.

[8] TRAN T T, SHIN Y, SHIN O S. Overview of enabling technologies for 3GPP LTE-Advanced[J]. EURASIP J. Wireless Communications Network, 2012(1):1-12.

[9] LOPEZ P D, CHU X. Inter-cell interference coordination for expanded region picocells in heterogeneous networks[C]// Proc. International Conf. on Computer Communications and Networks. Maui: IEEE, 2011; 1-6. DOI:10.1109/ICCCN.2011.6005775.

[10] SHIRAKABE M, MORIMOTO A, MIKI N. Performance evaluation in heterogeneous networks employing time-domain inter-cell interference coordination and cell range expansion for LTE-advanced downlink[J]. IEICE Transactions Communications, 2012, E95-B(4): 1218-1229.

[11] GUVENC I. Capacity and fairness analysis of heterogeneous networks with range expansion and interference coordination[J]. IEEE Communication Letters, 2011, 15(10): 1084-1087. DOI:10.1109/LCOMM.2011.082611.111387.

[12] DEB S P M, MIERNIK J, SEYMOUR J. P. Algorithms for enhanced inter cell interference coordination (eICIC) in LTE HetNets[J]. IEEE Transactions on Networking, 2014, 22(1): 137-150. DOI:10.1109/TNET.2013.2246820.

[13] LOPEZ P D, GUVENC I, KOUNTORIS M. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 22-30. DOI:10.1109/MWC.2011.5876497.

[14] 吴宣利, 韩杏林, 赵婉君. LTE 系统中一种低丢包率的实时业务调度算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(3): 24-28.
WU Xuanli, HAN Xinglin, ZHAO Wanjun. A low packet loss rate scheduling algorithm for real-time traffics in LTE system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(3): 24-28. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.03.004.

[15] MARTELLO S, TOTH P. Knapsack problems: algorithms and computer implementations[M]. 1th ed. England: Wiley, 1990.

[16] 张国印, 唐滨, 孙建国, 等. 面向内容中心网络基于分布均匀度的蚁群路由策略[J]. 通信学报, 2015, 36(6):1-12.
ZHANG Guoyin, TANG Bin, SUN Jianguo, et al. Ant colony routing strategy based on distribution uniformity degree for content centric network[J]. Journal on Communications, 2015, 36(6):1-12. DOI:10.11959/j.issn.1000-436x.2015126.

(编辑 王小唯 苗秀芝)