

基于中继节点辅助的 Femtocell 混合接入控制算法

刘诚毅¹, 陈赓², 邢松³, 沈连丰¹

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 山东科技大学电子通信与物理学院, 山东 青岛 266590;

3. 美国加利福尼亚州立大学洛杉矶分校信息系统实验室, 美国 洛杉矶 90001)

摘要: 针对异构网络融合环境提出一种基于中继节点辅助的毫微微蜂窝 (Femtocell) 混合接入控制算法, 为 Femtocell 网络相邻用户 (NUE, neighboring user) 提供较好的性能支持。该算法将中继节点部署在网络外围的架构, 通过中继放大转发或直传链路的传播方式对 NUE 进行数据传输, 并设置 Femtocell 网络注册用户 (FUE, Femtocell user) 的 QoS 门限值、宏蜂窝用户 (MUE, Macrocell user) 的跨层同频干扰容忍门限值以及 Femtocell 基站 (FBS, Femtocell base station) 下行总功率受限为约束, 将上述资源分配问题建模成最优化问题, 通过采用对偶分解算法进行求解, 并将直传与中继放大转发模式相结合, 从而适用于多用户多基站环境下 Femtocell 混合接入。仿真结果显示, 所提算法不仅能够对 FUE 的 QoS 进行保护, 还能有效降低对 MUE 的跨层同频干扰, 而且动态、灵活地改变 NUE 的接入模式, 较大幅度地提高 NUE 的系统性能, 且在一定区域内采用中继转发链路获得的数据传输速率要比采用传统直传链路的数据速率高约 25% 左右。

关键词: 中继; 混合接入控制; 异构网络融合; 跨层干扰; 注册用户保护

中图分类号: TN915

文献标识码: A

Hybrid access control algorithm based on relay node assistant in Femtocell network

LIU Cheng-yi¹, CHEN Geng², XING Song³, SHEN Lian-feng¹

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Electronic, Communication and Physics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Department of Information Systems, California State University, Los Angeles 90001, USA)

Abstract: A Femtocell hybrid access control algorithm assisted with relay note was proposed to supply higher performance for the Femtocell neighboring users (NUE) in heterogeneous network. Deploying relay outside the Femtocell networks was used and amplify-and-forward (AF) relaying protocol or direct link protocol was alternated to use for the data transmission of Femtocell NUE. An optimization problem was formulated with the constraints of the required transmission rates thresholds of Femtocell registered users (FUE), the thresholds of the cross-tier interferences to the macrocell users (MUE), and total transmit powers of the Femtocell base station (FBS). By using the dual decomposition method, a Femtocell hybrid access control algorithm was given based on the combination of the direct mode and relay mode. Simulation results have shown that the scheme can not only protect the QoS required by the FUE, but also decrease the cross-tier interferences suffered by the MUE. It also illustrates the better performance of the NUE through the dynamic and flexible access mechanism. Furthermore, based on the last simulation the relay link would help the NUE obtain about 25% more performance than the traditional direct link in some regions.

Key words: relay, hybrid access control, heterogeneous network, cross-tier interferences, registered user protection

收稿日期: 2016-07-22; 修回日期: 2016-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61471164, No.61401399); 中央高校基本科研业务费专项资金资助和江苏省普通高校研究生科研创新计划基金资助项目 (No. KYLX_0133); 山东科技大学人才引进科研启动基金资助项目 (No.2016RCJJ010)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61471164, No.61401399), The Fundamental Research Funds for the Central Universities and the Program Sponsored for Scientific Innovation Research of College Graduate in Jiangsu Province (No.KYLX_0133), The Scientific Research Foundation of Shandong University of Science and Technology for Recruited Talents (No.2016RCJJ010)

1 引言

毫微微蜂窝网络 (Femtocell) 作为一种极具有应用价值的技术,能够在传统的宏蜂窝网络 (Macrocell) 盲区和室内环境中提供无线宽带接入覆盖。与其他室内覆盖技术相比较, Femtocell 网络具有更少的部署和维护成本等特点,并且用户可以获得更好的服务体验^[1]。

一般而言, Femtocell 网络采用封闭或开放接入控制模式对新申请接入该网络的用户进行数据传输:在封闭接入控制模式中,仅有 Femtocell 的注册用户 (FUE, Femtocell user) 可以接入到网络中获取资源,而该网络会拒绝一切非注册用户的接入申请;相反,在开放接入控制模式中,所有用户 (注册用户和非注册用户) 都允许接入到该网络中。显然,当宏蜂窝用户 (MUE, Macrocell user) 处于宏蜂窝网络覆盖盲区并且靠近某些 Femtocell 网络时,开放接入机制可以将这些用户切换到 Femtocell 网络中,从而避免了由于盲区等原因造成的用户体验度降低。一些研究表明^[2,3],采用开放接入机制的 Femtocell 网络能够通过将具有拥挤业务的宏蜂窝网络负载转移到 Femtocell 网络中,使整个系统的性能得到提高。然而,由于网络资源的有限性, Femtocell 网络的开放接入机制虽然能够提高新接入用户的性能,但是会造成一定 FUE 性能的降低^[4,5]。

文献[6]针对开放接入机制下的 Femtocell 网络中资源分配问题进行了研究,通过将新接入用户和 FUE 进行资源最优化建模,给出一种资源分配算法,该算法能够同时提高 FUE 和新接入用户的性能。但是,随着新接入用户需求的最低 QoS 值的提高,越来越多的基站资源将分配给该用户,因此,本应该拥有较高资源使用权限的 FUE 的系统性能得不到保护。文献[7]提出了一种 Macro-Femto 异构网络负载均衡算法,该算法在满足 Femtocell 网络一定效益的基础上最大化新接入的平均吞吐量,从而使 MUE 可以按照一定的规则切换到 Femtocell 网络内,达到 Macro-Femto 异构网络中的负载均衡。但是该算法在保证 FUE 的 QoS 性能的同时,不能够分配更多剩余资源给新接入用户,从而导致后者性能的降低。文献[8]提出了一种 Femtocell 网络中混合接入机制下的资源分配算法,采用带权重的比例公平算法对 FUE 和新接入的用户进行资源分配,

以保证不同用户的速率需求。但是,该算法将新接入用户的平均速率设置为 FUE 的平均速率的 ε 倍 ($\varepsilon \in [0,1]$),因此,会造成 FUE 速率在其 QoS 门限值上的溢出,所以该算法并不能在 FUE 低 QoS 需求时有效地最大化新接入用户的系统性能。文献[9]给出了一种 Macro-Femto 异构网络中下行干扰管理算法,该算法可以在满足最大化 FUE 和速率的同时,保证 MUE 的 QoS 需求,并且给出了一种复杂环境下的启发式算法,进而能够在得到近似最优解的前提下有效地降低算法复杂度。文献[10]采用图论的原理对密集 Femtocell 网络的吞吐量进行了优化,在该算法中, Femtocell 网络采用认知无线电技术,可以时刻监听附近 MUE 来自 Femtocell 网络的跨层干扰,从而起到保护 MUE 的作用。文献[11]提出一种基于预置门限跨层切换的同频干扰抵消算法,采用用户双向跨层切换机制和满足基于资源管理的干扰避免需求来解决 Macro-Femto 异构融合网络中的同频干扰问题。但是,上述异构网络干扰降低算法并没有合理区分 FUE 和新接入用户对 MUE 带来干扰的区别,因此,随着 MUE 干扰容忍值的降低或 QoS 需求的增大, FUE 的系统性能也将会受到一定程度的抑制。文献[12]采用 Femtocell 网络和中继节点相结合的网络架构,针对新接入用户同时采取直传和中继转发链路进行下行数据传输,该算法能够在基站一定的资源条件下利用中继节点有效地提高 Femtocell 网络总吞吐量。但是,该算法需要终端可以同时处理来自 2 个不同频段 (i 和 j) 的直传和中继转发链路信号,因此一定程度上增加了硬件复杂度。

上述文献并没有充分综合考虑 Macro-Femto 异构网络环境下用户种类的多样特性,即不同的用户在基站资源使用优先级和对 MUE 产生的干扰容忍级的相异性,以及多 Femtocell 网络场景下多用户接入等实际问题。本文基于中继节点的放大转发技术,研究 Macro-Femto 异构无线网络环境下的 Femtocell 接入控制算法,根据中继链路和直传链路所得性能的比较,提出一种基于中继节点辅助的 Femtocell 混合接入控制算法,该算法能够通过新接入用户在中继链路和直传链路中各自性能的比较,动态地调整接入用户所采取的接入模式 (基站直传或中继转发),并给出一种多用户与多基站间的接入控制选择算法,以解决多 Femtocell 网络环境下的多用户接入问题。

2 系统模型

图 1 表示中继节点辅助下的 Macrocell 与 Femtocell 共存的异构网络融合场景。该异构网络中共有 3 种用户存在，分别为 MUE、FUE 和新接入 Femtocell 网络的相邻用户(NUE, neighboring user)。其中，MUE 由宏蜂窝基站 (MBS, Macrocell base station) 提供业务服务支持，Femtocell 基站 (FBS, Femtocell base station) 提供业务给 FUE 和 NUE。NUE 由于处在 Macrocell 网络的盲区，从而不能获得理想的 Macrocell 服务质量，因此需要切换到临近的 Femtocell 网络中。中继节点部署在 Femtocell 网络外围，可以对 NUE 提供数据转发服务。FBS 对 NUE 可以采取直传或中继转发链路的方式进行数据传输。

基于上述异构网络融合场景，假设网络中有 K 个 NUE 和 F 个 Femtocell 网络可供接入，用集合分别表示为 $K = \{1, 2, \dots, K\}$ 和 $F = \{1, 2, \dots, F\}$ ，且该 Femtocell 网络区域部署一个中继节点可用于数据的放大转发；对于任意 $i \in F$ ，有 M_i 个 FUE 可以获得资源，表示为 $M_i = \{1, 2, \dots, M_i\}$ ， $i \in F$ ，且每个 Femtocell 网络由于频谱资源的稀缺性，最多仅提供一个 NUE 的接入；每个基站的下行功率总资源可以表示为 p_{\max}^i ， $i \in F$ ，且中继节点由每个 FBS 独立提供功率资源用于自身用户的数据转发，即中继节点用于第 k 个 NUE 数据转发的发送功率是由

第 k 个 NUE 所属的第 i 个 FBS 提供。

中继节点工作在放大转发 (AF, amplify and forward) 协议模式下^[13]，并采用一对子载波对，即 (i, j) 用于每个 NUE 的数据传输，如图 2 所示，其中，子载波 i 用于 FBS 到中继的数据传输，而子载波 j 用于中继到 NUE 的数据传输。在第 1 个时隙中，中继节点接收来自 FBS 的数据并将该数据存储，而 NUE 在第 1 个时隙中不接收任何数据信息。在第 2 个时隙中，中继节点将第 1 个时隙中存储的数据通过子载波 j 发送给 NUE，同时接收来自 FBS 发送的下一组数据并存储，用于下一个时隙转发给 NUE。因此，采用上述数据传输模式，NUE 可以通过中继连续不断地接收来自 FBS 的数据信息。由上述描述可知，本文在使用中继技术的基础上创新地摒弃传统中继传输中的直传链路，仅采用中继转发链路进行数据发送。与文献[12]中的传输模式比较可知，文献[12]中的终端设备需要同时接收和处理来自 i 和 j 的子载波信号，因此适用该算法的终端设备的接收机需要拥有多个滤波器才能完成完整信号的接收。而本文提出的算法，终端设备仅需要一个滤波器即可完成信号的接收，因此，本文所提算法对终端的硬件要求较低，从而可以更好地适用于实际场景中的通信设备。

同时，频谱分裂技术应用在 Femtocell 网络间^[14]，因此，Femtocell 网络之间由于采用不同的频段，没有同频干扰问题的出现。但是，由于 Macrocell 网

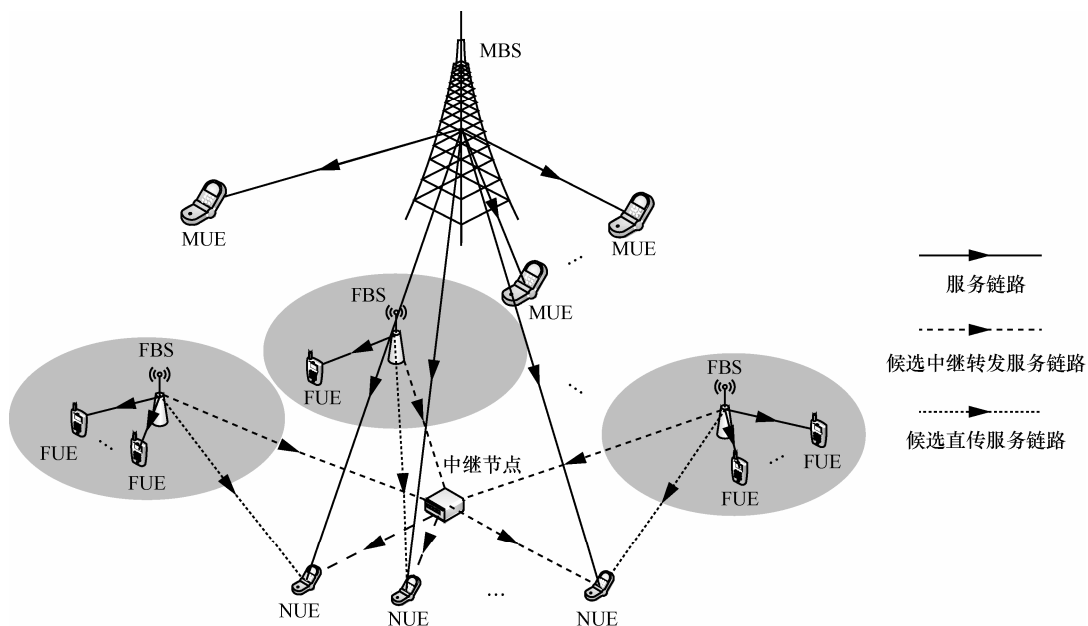


图 1 中继节点辅助的异构网络融合场景

络为了提高频谱利用率，采用了全部可用频谱资源，因此，Macro-Femto 异构网络间的跨层同频干扰是数学建模中需要考虑的问题。

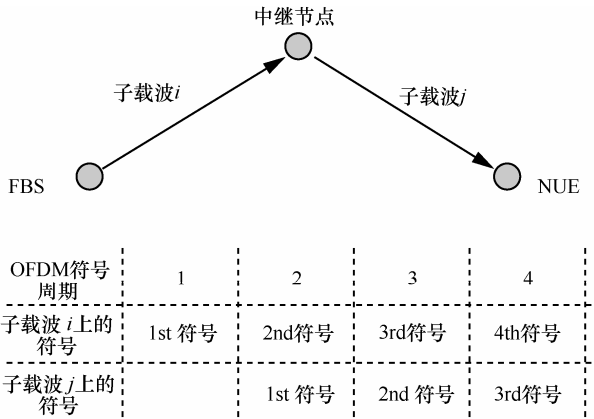


图 2 中继节点辅助的 FBS 和 NUE 间的数据传输方案

3 Femtocell 网络中基于中继或直传链路的混合接入控制算法

在 Macro-Femto 异构网络环境下，由于网络环境的复杂性，许多 MUE 会进入 Macrocell 网络的盲区，使其获得的服务质量变差，如果在此盲区区域周围有 Femtocell 网络的覆盖，上述用户可以切换到 Femtocell 网络中去，从而获得较好的服务质量。但是，由于 Femtocell 网络通常部署在室内以及 FBS 具有较低的发送功率，因此其覆盖半径较小，所以，如何在原有网络架构的基础上提高新接入用户的服务质量是亟须解决的问题。由于中继具有数据转发的功能，所以能够通过将信号转发到基站直接发送不能到达或者路径损耗较大的区域，从而达到扩展网络的覆盖范围的目的。因此，本节首先提出一种基于中继节点辅助的 Femtocell 功率分配算法，该算法根据 NUE、中继和 FBS 间信道状态的变化以及网络参数动态调整三者间的资源分配关系，使所提算法能够在一定区域内比采用直传链路数据传输的算法在用户吞吐量上获得较大提高。然后，给出了一种基于直传链路数据传输模式的资源分配算法。最后，将基于中继节点辅助模式和基于直传链路数据传输模式的 2 种算法性能相比较，提出了一种适用于多用户与多基站网络环境下的基于中继节点辅助的 Femtocell 混合接入控制算法。

3.1 基于中继节点辅助的资源分配算法建模

当第 k 个 NUE 通过中继节点接收来自第 i 个 FBS 的信号时，其得到的信号与干扰加噪声比

(SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio) 为^[13]

$$\Gamma_{i,r,k} = \frac{P_{r,k}^i H_r^k P_k^i H_i^r}{P_{r,k}^i H_r^k + P_k^i H_i^r + 1} \quad (1)$$

其中，

$$H_r^k = \frac{G_r^k}{Q_{M,k}^k + \sigma^2} \quad (2)$$

$$H_i^r = \frac{G_i^r}{Q_{M,k}^r + \sigma^2} \quad (3)$$

P_k^i 表示基站 i 针对用户 k 数据的发送功率，该信号实际由中继节点接收； $P_{r,k}^i$ 表示中继节点给用户 k 转发数据的发送功率，该信号由用户 k 接收；式(2)和式(3)中的 G_r^k 和 G_i^r 分别代表中继节点到用户 k 和基站 i 到中继节点的信道功率增益； σ^2 为接收端加性噪声的方差值； $Q_{M,k}^k$ 和 $Q_{M,k}^r$ 分别表示 MBS 对于使用相同频率的相邻用户 k 和中继节点的跨层同频干扰。

因此，通过中继节点放大转发信号，第 k 个 NUE 获得的吞吐量（假设为香农容量）可以表示为

$$R_{r,k}^i = \Delta f \text{lb} \left(1 + \frac{P_{r,k}^i H_r^k P_k^i H_i^r}{P_{r,k}^i H_r^k + P_k^i H_i^r + 1} \right) \quad (4)$$

其中， Δf 为子载波带宽。

在资源有限的下行系统中，如何提高 SINR 或传输速率是研究的热点和难点之一。本文提出一种通过采用中继节点放大转发的模式将 FBS 下行传输的数据转发给 Femtocell 网络中新接入用户的网络架构，并通过对该系统中基站和中继节点功率联合分配的方法，使用户的吞吐量得到一定的提高。

虽然 FUE 和 NUE 共同组建了 Femtocell 网络的用户群，但是由于 Femtocell 网络是由 FUE 部署的，因此 Femtocell 网络对 2 种用户群的资源使用方法应区分对待。首先，FUE 享有 Femtocell 网络资源的绝对使用权，因此，Femtocell 网络应该优先满足 FUE 的 QoS 需求。其次，对于外来用户 NUE，Femtocell 网络应在满足 FUE 的 QoS 后，将剩余资源尽最大可能地服务 NUE。同时，由于 Macro-Femto 中跨层干扰的存在，分配给 NUE 的资源所产生的对 MUE 的跨层同频干扰应小于一定的 MUE 干扰容忍门限值，否则 FBS 对其提供的资源就应相应地降低。

基于上述问题描述，中继节点辅助的 Femtocell

网络资源分配可以描述为在系统功率资源有限、FUE 的 QoS 以及 NUE 对 MUE 的跨层同频干扰等约束条件下的最大化 NUE 数据传输速率的问题，该问题可以建模为

$$\max_{\{p_k^i, p_{r,k}^i\}} \Delta f \text{lb} \left(1 + \frac{p_{r,k}^i H_r^k p_k^i H_i^r}{p_{r,k}^i H_r^k + p_k^i H_i^r + 1} \right) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \Delta f \text{lb} (1 + p_m^i H_i^m) \geq R_m^{\min}, \forall m \in M_i \quad (6)$$

$$p_{r,k}^i G_{r,k}^{\text{MUE}} \leq I_{\text{th}}^r \quad (7)$$

$$p_k^i G_{i,k}^{\text{MUE}} \leq I_{\text{th}}^i \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M_i} p_m^i + p_k^i + p_{r,k}^i \leq p_{\max}^i \quad (9)$$

其中，系统变量定义如下：对于第 k 个 NUE， $k=1,2,\dots,K$ ，有 $Q_{M,k}^k = p_M (d_{M,k})^{-\beta}$ 和 $G_r^k = (d_{r,k})^{-\beta}$ ；对于第 m 个 FUE， $m=1,2,\dots,M_i$ ，有 $Q_{M,m}^m = p_M L (d_{M,m})^{-\beta}$ 、 $G_i^m = (d_{i,m})^{-\alpha}$ 和 $H_i^m = \frac{G_i^m}{Q_{M,m}^m + \sigma^2}$ ；对于中继节点，有 $Q_{M,k}^r = p_M L (d_{M,r})^{-\beta}$ 和 $G_i^r = L (d_{i,r})^{-\beta}$ 。

约束条件式(6)中的 R_m^{\min} ， $m \in M_i$ ，表示每个 FUE 的最小的传输速率门限值，其值随着该用户 QoS 需求的变化而动态地改变；式(7)和式(8)中的 I_{th}^r 和 I_{th}^i 分别为 MUE 受到来自中继节点和基站 i 的跨层同频干扰的容忍门限值，实际上 MUE 干扰门限值的设定根据其自身的 QoS 需求可以动态地调整，即当 MUE 用户 QoS 高时，其跨层干扰容忍门限值应该设置的较低，反之亦然； $G_{r,k}^{\text{MUE}}$ 和 $G_{i,k}^{\text{MUE}}$ 分别表示中继节点和基站 i 到相应的 MUE 的信道功率增益； p_M 为 MBS 分配给 MUE 用户的发送功率； $d_{a,b}$ 为发送端 a 点到接收端 b 点的距离变量； L 为信号的穿墙因子； α 和 β 分别表示室内和室外的路径损耗因子。

3.2 基于对偶分解优化算法的中继节点辅助最优功率分配求解

由文献[12]和文献[15]可知，在高 SINR 环境下，式(4)中的中继节点辅助机制下的用户吞吐量可以近似为

$$R_{r,k}^i \approx \Delta f \text{lb} \left(1 + \frac{p_{r,k}^i H_r^k p_k^i H_i^r}{p_{r,k}^i H_r^k + p_k^i H_i^r} \right) \quad (10)$$

因此，3.1 节中提出的中继节点辅助机制下的资源分配优化算法可以等价转化为

$$\max_{\{p_k^i, p_{r,k}^i\}} \Delta f \text{lb} \left(1 + \frac{p_{r,k}^i H_r^k p_k^i H_i^r}{p_{r,k}^i H_r^k + p_k^i H_i^r} \right) \quad (11)$$

s.t. 式(6)~式(9)

上述最优化问题是典型的非线性规划问题。首先研究目标函数的凹凸性。

假设 $a = p_{r,k}^i H_r^k$ 和 $b = p_k^i H_i^r$ ，然后将式(10)分别对 $p_{r,k}^i$ 和 p_k^i 求一阶偏导可得

$$\frac{\partial R_{r,k}^i}{\partial p_{r,k}^i} = \Delta f \frac{1}{\ln 2 \left(1 + \frac{ab}{a+b} \right)} \frac{b^2 H_r^k}{(a+b)^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial R_{r,k}^i}{\partial p_k^i} = \Delta f \frac{1}{\ln 2 \left(1 + \frac{ab}{a+b} \right)} \frac{a^2 H_i^r}{(a+b)^2} \quad (13)$$

通过式(12)和式(13)分别再次对 p_k^i 和 $p_{r,k}^i$ 求偏导，可得 $R_{r,k}^i$ 关于 $p_{r,k}^i$ 和 p_k^i 的二阶偏导为

$$\frac{\partial^2 R_{r,k}^i}{\partial (p_{r,k}^i)^2} = -\Delta f \frac{1}{\ln 2 \left(1 + \frac{ab}{a+b} \right)^2} \cdot \frac{b^2 (H_r^k)^2 (b^2 + 2a + 2b + 2ab)}{(a+b)^4} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 R_{r,k}^i}{\partial (p_k^i)^2} = -\Delta f \frac{1}{\ln 2 \left(1 + \frac{ab}{a+b} \right)^2} \cdot \frac{a^2 (H_i^r)^2 (a^2 + 2a + 2b + 2ab)}{(a+b)^4} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 R_{r,k}^i}{\partial p_k^i \partial p_{r,k}^i} &= \frac{\partial^2 R_{r,k}^i}{\partial p_{r,k}^i \partial p_k^i} \\ &= \Delta f \frac{1}{\ln 2 \left(1 + \frac{ab}{a+b} \right)^2} \cdot \frac{ab H_i^r H_r^k (2a + 2b + ab)}{(a+b)^4} \end{aligned} \quad (16)$$

假设 $\Psi = \Delta f \frac{1}{\ln 2 \left(1 + \frac{ab}{a+b} \right)^2 (a+b)^4}$ ，因此，关

于 $R_{r,k}^i$ 的海森矩阵可以表示为

$$H(R_{r,k}^i) = \begin{bmatrix} -\Psi b^2 (H_r^k)^2 (b^2 + 2a + 2b + 2ab) & \Psi ab H_s^r H_r^k (2a + 2b + ab) \\ \Psi ab H_s^r H_r^k (2a + 2b + ab) & -\Psi a^2 (H_s^r)^2 (a^2 + 2a + 2b + 2ab) \end{bmatrix} \quad (17)$$

因为海森矩阵中的对角线元素为负值，且该矩阵的行列式为正值，因此目标函数为凸函数。同时，非线性约束条件式(6)对于变量 p_m^i 来说是凸函数，且约束条件式(7)、式(8)和式(9)为仿射函数。因此，所提的优化问题是个凸优化问题。

本文采用对偶分解的方法对上述凸优化问题进行求解，拉格朗日函数可以表示为

$$\begin{aligned} & \ell(p_k^i, p_{r,k}^i, \mu_i, \gamma_k, \lambda_k, \eta_i) \\ &= \Delta f \text{lb} \left(1 + \frac{p_{r,k}^i H_r^k p_k^i H_i^r}{p_{r,k}^i H_r^k + p_k^i H_i^r} \right) + \\ & \sum_{m \in M_i} \mu_{i,m} \left[\Delta f \text{lb} (1 + p_m^i H_i^m) - R_m^{\min} \right] + \\ & \gamma_k (I_{th}^r - p_{r,k}^i G_{r,k}^{\text{MUE}}) + \lambda_k (I_{th}^i - p_k^i G_{i,k}^{\text{MUE}}) + \\ & \eta_i (p_{\max}^i - \sum_{m \in M_i} p_m^i - p_k^i - p_{r,k}^i) \end{aligned} \quad (18)$$

其中， $\mu_i = \{\mu_{i,m}\}$ 、 γ_k 、 λ_k 和 η_i 是对应于约束条件式(6)~式(9)的非负的拉格朗日乘子。

因此，拉格朗日对偶函数可以表示为

$$f(\mu_i, \gamma_k, \lambda_k, \eta_i) = \max_{p_k^i, p_{r,k}^i} \ell(p_k^i, p_{r,k}^i, \mu_i, \gamma_k, \lambda_k, \eta_i) \quad (19)$$

原始的有约束最优化问题满足 Slater 条件 (Slater's condition) [16]，其对偶间隙（对偶问题与原始问题间的差值）为 0，因此，可以通过求解对偶问题来得到原始问题的最优解，即

$$\begin{aligned} & \min f(\mu_i, \gamma_k, \lambda_k, \eta_i) \\ & \text{s.t. } \mu_i \geq 0, \gamma_k \geq 0, \lambda_k \geq 0, \eta_i \geq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

为了解决上述对偶问题，首先应该给出在给定 $\mu_i = \{\mu_{i,m}\}$ 、 γ_k 、 λ_k 和 η_i 值情况下的对偶函数。然后，该对偶问题可以通过采用对偶分解算法进行求解，拉格朗日对偶函数可以写为

$$\begin{aligned} f(\mu_i, \gamma_k, \lambda_k, \eta_i) &= \max_{p_k^i, p_{r,k}^i} (F) - \sum_{m \in M_i} \mu_{i,m} R_m^{\min} + \\ & \gamma_k I_{th}^r + \lambda_k I_{th}^i + \eta_i p_{\max}^i \end{aligned} \quad (21)$$

对于用户 k ，有

$$\begin{aligned} F &= \Delta f \text{lb} \left(1 + \frac{p_{r,k}^i H_r^k p_k^i H_i^r}{p_{r,k}^i H_r^k + p_k^i H_i^r} \right) - \\ & \gamma_k p_{r,k}^i G_{r,k}^{\text{MUE}} - \lambda_k p_k^i G_{i,k}^{\text{MUE}} - \eta_i p_k^i - \eta_i p_{r,k}^i \end{aligned} \quad (22)$$

对注册用户，有

$$F = \sum_{m \in M_i} (F_m) \quad (23)$$

其中，对注册用户 m ，有

$$F_m = \mu_{i,m} \Delta f \text{lb} (1 + p_m^i H_i^m) - \eta_i p_m^i \quad (24)$$

因此，原始优化问题可以分解为 $|M_i| + 1$ 个子功率优化问题，且子优化问题满足标准的凸优化形式。根据卡罗需—库恩—塔克 (KKT, Karush-Kuhn-Tucker) 条件，可以得到针对不同种类用户的功率分配最优解，如下所示。

对第 k 个 NUE，有

$$p_k^{i*} = \left(\frac{\Delta f}{\ln 2} \frac{C_{i,k}}{A_{i,k} (C_{i,k} + 1)} - \frac{C_{i,k} + 1}{C_{i,k} H_i^r} \right)^+ \quad (25)$$

$$p_{r,k}^{i*} = \left(\frac{\Delta f}{\ln 2} \frac{1}{B_{i,k} (C_{i,k} + 1)} - \frac{C_{i,k} + 1}{H_r^k} \right)^+ \quad (26)$$

其中， $A_{i,k} = \lambda_k G_{i,k}^{\text{MUE}} + \eta_i$ ， $B_{i,k} = \gamma_k G_{r,k}^{\text{MUE}} + \eta_i$ ，

$$C_{i,k} = \sqrt{\frac{A_{i,k} H_r^k}{B_{i,k} H_i^r}}.$$

对第 m 个 FUE，则有

$$p_m^{i*} = \left(\frac{\mu_{i,m} \Delta f}{\eta_i \ln 2} - \frac{1}{H_i^m} \right)^+ \quad (27)$$

其中，

$$(x)^+ = \begin{cases} x, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (28)$$

通过以上得到的功率变量的最优值，即 $(p_k^{i*}, p_{r,k}^{i*}, p_m^{i*})$ ，采用梯度法可以得到对偶问题的解，对偶变量在第 $t + 1$ 次迭代的值分别可以表示为

$$\mu_{i,m}(t+1) = \left[\mu_{i,m}(t) - \sigma_1(t) (R_m^{i*} - R_m^{\min}) \right]^+ \quad (29)$$

$$\gamma_k(t+1) = \left[\gamma_k(t) - \sigma_2(t) (I_{th}^r - p_{r,k}^{i*} G_{r,k}^{\text{MUE}}) \right]^+ \quad (30)$$

$$\lambda_k(t+1) = \left[\lambda_k(t) - \sigma_3(t) (I_{th}^i - p_k^{i*} G_{i,k}^{\text{MUE}}) \right]^+ \quad (31)$$

$$\eta_i(t+1) = \left[\eta_i(t) - \sigma_4(t) (p_{\max}^i - p_k^{i*} - p_{r,k}^{i*} - \sum_{m \in M_i} p_m^{i*}) \right]^+ \quad (32)$$

其中, $\sigma_1(t)$ 、 $\sigma_2(t)$ 、 $\sigma_3(t)$ 和 $\sigma_4(t)$ 为迭代步长, 且每次迭代中需要用参数 $\mu_{i,m}(t)$ 、 $\gamma_k(t)$ 、 $\lambda_k(t)$ 和 $\eta_i(t)$ 根据式(25)~式(27)更新变量 p_k^* 、 $p_{r,k}^*$ 和 p_m^* 。

3.3 基于直传链路的资源分配

因为中继节点是固定在 Femtocell 网络外围的, 因此由中继转发模式的性能可知, 当相邻用户移动到中继节点和基站之间的某些区域时, 通过采用中继节点转发模式下得到的用户传输速率将会低于采用传统的 FBS 直传模式下得到的数据传输速率。因此, 本节将研究当采用直传链路时, 相邻用户 k 在基站 i 服务下可得到的吞吐量。

当相邻用户 k 接入到第 i 个 Femtocell 时, 由于 i 网络有自身注册用户的存在, 因此, 基站会优先分配功率资源给这些 FUE 以满足其 QoS 的需求, 同时最大化剩余资源导出的吞吐量给相邻用户 k , 所以对应于式(5)~式(9), 可以给出直传链路模式下的资源分配模型如下所示

$$\max_{p_{d,k}^i} \Delta f \text{lb}(1 + p_{d,k}^i H_i^k) \quad (33)$$

$$\text{s.t.} \quad \Delta f \text{lb}(1 + p_m^i H_i^m) \geq R_m^{\min}, \forall m \in M_i \quad (34)$$

$$p_{d,k}^i G_{i,k}^{\text{MUE}} \leq I_{\text{th}}^i \quad (35)$$

$$\sum_{m \in M_i} p_m^i + p_{d,k}^i \leq P_{\max}^i \quad (36)$$

通过凸优化问题的求解, 可以得到相邻用户采用直传链路得到的资源分配值为

$$p_{d,k}^{i*} = \begin{cases} \left(P_{\max}^i - \sum_{m \in M_i} \frac{2R_m^{\min} - 1}{H_i^m} \Delta f \right)^+, & p_{d,k}^i G_{i,k}^{\text{MUE}} \leq I_{\text{th}}^i \\ \min \left\{ \frac{I_{\text{th}}^i}{G_{i,k}^{\text{MUE}}}, \left(P_{\max}^i - \sum_{m \in M_i} \frac{2R_m^{\min} - 1}{H_i^m} \Delta f \right)^+ \right\}, & \text{其他} \end{cases} \quad (37)$$

因此, 相邻用户 k 采用直传链路得到的数据传输速率可以表示为

$$R_{d,k}^{i*} = \Delta f \text{lb}(1 + p_{d,k}^{i*} H_i^k) \quad (38)$$

3.4 多用户与多基站间的混合接入控制选择算法

通过 3.1 节、3.2 节和 3.3 节, 可以得到用户 k 在基站 i 的服务下并采用中继辅助或直传链路模式的系统框架得到的功率分配值, 即 p_k^{i*} 、 $p_{r,k}^{i*}$ 和 $p_{d,k}^{i*}$,

然后根据式(10)或式(38)可以计算当用户 k 接入到基站 i 可以得到的数据传输速率, 即

$$R_k^{i*} = \max \{ R_{r,k}^{i*}, R_{d,k}^{i*} \} \quad (39)$$

因此, 本文为每个 NUE 都对任意一个 Femtocell 网络进行上述的资源分配, 可以得到一个 $K \times F$ 的数据传输速率分配矩阵 \mathbf{R}^* , 如下所示

$$\mathbf{R}^* = \begin{bmatrix} R_1^{1*} & R_1^{2*} & \cdots & R_1^{F*} \\ R_2^{1*} & R_2^{2*} & \cdots & R_2^{F*} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_K^{1*} & R_K^{2*} & \cdots & R_K^{F*} \end{bmatrix} \quad (40)$$

下面, 根据不同的网络状态给出相应的多用户与多基站间的混合接入控制选择算法。

1) 当 $K > F$ 时, 表明需要接入 Femtocell 网络的相邻用户数大于 Femtocell 网络的基站数, 又因为每个基站最多可接纳一个 NUE 接入, 因此, K 个相邻用户中仅有 F 个用户可以接入, 所以此时 Femtocell 网络具有相邻用户接入的最终选择权, 具体步骤如下。

① 针对每个 FBS, 计算 $k^i = \arg \max \{ R_1^{i*}, R_2^{i*}, \dots, R_K^{i*} \}$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, F\}$, k^i 表示在第 i 基站中相邻用户 k 可以获得最大的数据传输速率, 从而得到一组关联向量 $\Theta = \{k^i\}_{i=1}^F$ 。

② 若对任意 $i \neq j$, 有 $k^i \neq k^j$, 则表明任意基站中的可获得最大传输速率的用户不重复, 因此, 关联向量 Θ 即为最终的接入结果, 即用户 k^i 接入到基站 i 中去; 若存在 $i \neq j$, 有 $k^i = k^j$, 则表明针对该相邻用户, 基站 i 和基站 j 都允许其接入, 该问题从以 FBS 为主导的决策问题转化为以该 NUE 为主导的接入决策问题, 此时作为主导用户, 该 NUE 将会选择能提供最大数据传输速率的基站进行接入, 即 p^{k^i} 或 $p^{k^j} = \arg \max \{ R_{k^i}^{i*}, R_{k^i}^{j*} \}$, 进而根据 p^{k^i} 或 p^{k^j} 更新关联向量 Θ 。

③ 将步骤②中已经配对的相邻用户和基站在 \mathbf{R}^* 中分别所在相应的行和列删除, 可以得到一个新的传输速率矩阵 \mathbf{R}' , 此时矩阵的行数为还未分配接入的相邻用户数, 而列数为还未分配用户接入的基站数。若 $\mathbf{R}' = \emptyset$, 则分配完毕, 算法结束; 若 $\mathbf{R}' \neq \emptyset$, 则返回步骤①依据新生成的矩阵计算, 直至最终的传输速率矩阵为空集, 算法结束。

2) 当 $K \leq F$ 时, 表明需要接入 Femtocell 网络

的相邻用户数小于或等于 Femtocell 网络的基站数，所以 F 个基站中仅有 K 个基站可以有 NUE 接入，因此，每个相邻用户具有接入的最终选择权，具体步骤如下。

① 针对每个相邻用户，计算 $i^k = \arg \max \{R_k^{1*}, R_k^{2*}, \dots, R_k^{F*}\}$, $\forall k \in \{1, 2, \dots, K\}$, i^k 表示相邻用户 k 在第 i 基站中可以获得的最大数据传输速率，从而得到一组关联向量 $\Psi = \{i^k\}_{k=1}^K$ 。

② 若对任意 $k \neq l$, 有 $i^k \neq i^l$, 则表明相邻用户可获得最大传输速率的接入基站不重复，因此，关联向量 Ψ 即为最终的接入结果，即用户 k 接入到基站 i^k 中去；若存在 $k \neq l$, 有 $i^k = i^l$, 则表明针对该基站，相邻用户 k 和 l 都想接入其中，从而该问题从相邻用户为主导的决策问题转化为由该 Femtocell 为主导的接入决策问题。此时作为主导基站，该基站将会选择能获得最大数据传输速率的相邻用户进行接入，即 p^k 或 $p^l = \arg \max \{R_k^{i^k*}, R_l^{i^l*}\}$, 进而根据 p^k 或 p^l 更新关联向量 Ψ 。

③ 同 1) 中的步骤③。

3.5 算法流程

针对 K 个相邻用户在 F 个 Femtocell 网络中基于中继节点辅助的混合接入控制算法流程可以表示如下。

首先，对每个相邻用户 k , F 个 Femtocell 网络都对其进行基于中继节点辅助 (3.1 节和 3.2 节) 和基于直传链路 (3.3 节) 的功率资源分配算法，并获得相应的最优功率分配值；然后，按照式(39)判断每个相邻用户采用何种传输方式；最后，根据 K 和 F 的关系按照 3.4 节给出的混合接入控制选择算法进行多用户、多网络间的接入决策。

由于每个 FBS 都要针对所有 NUE 进行中继转发链路和直传链路的资源分配算法的计算，因此，所提的多用户与多基站间的混合接入控制选择算法的计算复杂度为 $O(3FK)$ 。所以， F 和 K 任意一个变大都会增加算法的计算复杂度，且与两者的乘积成正比。

4 仿真结果与性能评估

本文采用 Matlab 2012b 作为仿真实验平台对所提的基于中继节点辅助的 Femtocell 混合接入控制算法的性能进行验证和分析，并将其与传统的无中

继节点辅助的功率分配算法的性能进行比较分析。首先给出 Femtocell 网络环境下仅基于中继节点辅助的算法性能的变化情况，然后给出相邻用户在多个 Femtocell 网络环境下的系统性能，所设置的仿真参数如表 1 所示。

参数	取值
宏蜂窝基站位置	(0, 500)
毫微微蜂窝基站功率	30 dBm
热噪声	-120 dBm
子载波宽度	0.125 MHz
$\frac{\alpha}{\beta}$	$\frac{2}{3}$
穿墙因子	0.8

图 3 给出了本文所提的中继节点辅助算法与文献[17]中所提算法的性能比较，其中，文献[17]采用的中继数据传输模式对终端硬件的需求与本文一致，因此 2 种算法的性能比较具有一定的现实意义。如图 3 所示，本文所提算法在相邻用户的数据传输速率性能上要高于文献[17]所提算法，但是文献[17]的算法可以使 NUE 获得较高的 SINR。这是由于在文献[17]中的中继节点对相邻用户的数据转发过程在 2 个相邻的时隙中分别进行，其中，在第 1 个时隙中 FBS 发送数据给中继节点和相邻用户，而在第 2 个时隙中中继节点转发数据给相邻用户，因此相邻用户接收信号的信噪比由直传链路和转发链路 2 部分组成，进而得到的 SINR 较高。由于数据传输是在 2 个时隙中进行，因此，在计算数据传输速率时有 $\frac{1}{2}$ 系数，从而导致算法在数据传输速率上的性能要比本文所提的算法有所降低。但是，文献[17]采用的中继数据传输模式仅需要一个子载波进行数据传输，而本文所提的算法则需要 2 个子载波，因此，本文所提算法是牺牲一定的频谱资源来换取数据传输速率的提高。

为了较好地说明本文所提的基于中继节点辅助的 Femtocell 混合数据传输机制在中继辅助和直传链路上性能的区别，图 4 给出了采用所提的基于中继节点辅助的功率分配算法和采用传统的直传链路的功率分配算法中 NUE 的数据传输速率随相邻用户不同水平和垂直位置的比较，其中，FBS 坐标为(0, 0)，中继节点位置固定在(0, 40)，相邻用户固定的垂直和水平坐标分别为 45 和-5。当 NUE 垂

直坐标固定时, 该用户靠近中继节点, 所采用中继节点辅助算法的 NUE 数据传输速率要明显高于采用传统直传链路的算法。若用户远离中继节点, 基于中继节点辅助提供的数据传输速率将会低于直传链路。另一方面, 当 NUE 水平坐标固定且在垂直坐标大于 40.7 时, 所提算法性能高于传统算法, 但当用户靠近 FBS 时, 传统算法所提供的性能明显高于中继节点辅助的算法。这是因为采用中继节点有延伸基站覆盖范围的作用, 从而提高用户性能。但是, 当用户处在中继节点和 FBS 间的区域时, 由于本文所提算法的链路不包括直传链路, 因此采用传统直传链路所产生的用户速率会高于基于中继节点辅助的算法。因此, 从仿真中可以看出, 基于中继节点辅助的算法所提供的系统性能在一定区

域内要高于传统算法。

图 5 给出了采用本文基于中继节点辅助的功率分配算法和采用传统的直传链路的功率分配算法 NUE 的数据传输速率随中继节点不同部署位置变化的仿真结果, 其中, 中继节点的垂直位置固定在 20, 相邻用户位置坐标固定为 (0, 25)。从图 5 中可以看出, 中继节点水平坐标越接近 0, 中继节点辅助算法所提供的 NUE 数据传输速率逐渐逼近最大值, 这是由于当中继节点位于 (0, 20) 时, FBS、中继节点和 NUE 处于一条直线上, 因此此时中继转发链路最短, 从而 NUE 的性能最高; 而直传链路由于没有中继节点的参与, NUE 的数据传输速率不随中继节点位置的变化而改变。同时, 从图 5 可以看出, 当中继节点的水平坐标处于 0 左右区间时

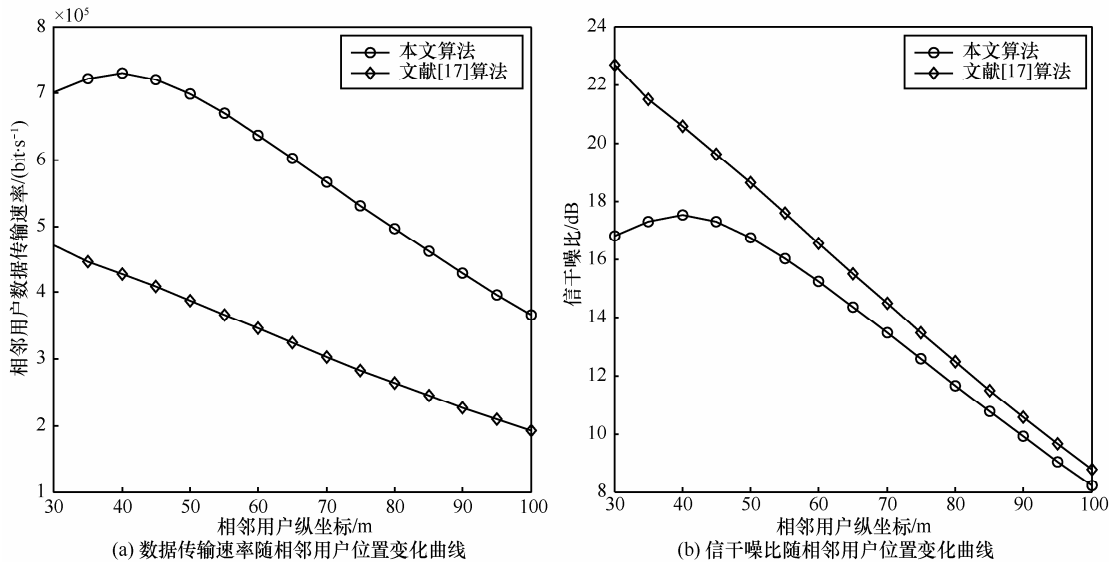


图 3 本文算法与文献[17]算法性能比较

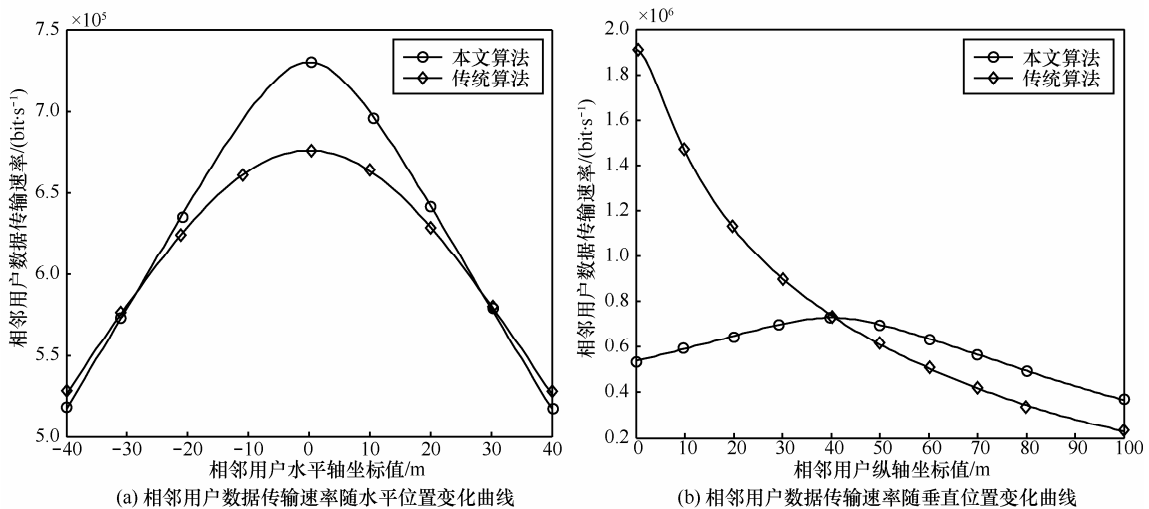


图 4 相邻用户数据传输速率随水平和垂直位置变化曲线

中继节点辅助算法所提供的性能高于直传链路，但是当中继节点的水平坐标距离 0 较远时，2 种算法的性能比较结果则相反。除此之外，还可以看出，当 $I_{th} = \text{inf}$ 和 $I_{th} = -20 \text{ dBm}$ 时，其中 inf 为无穷大，中继节点辅助算法在这 2 种情况下所提供的性能相同，但是当 $I_{th} = -30 \text{ dBm}$ 时，中继节点辅助算法的性能相对于前 2 种情况有所下降。而对于直传链路算法性能随 I_{th} 的降低而减小。这是由于在中继节点辅助算法中每个 NUE 可使用 2 个子载波进行数据传输，因此，当 $I_{th} = \text{inf}$ 和 $I_{th} = -20 \text{ dBm}$ 时，每个子载波上的信号对 MUE 造成的干扰值还未达到 MUE 的容忍值，所以 2 种情况下中继节点辅助算法的性能相同。但是当 $I_{th} = -30 \text{ dBm}$ 时，由于中转转发链路中某一跳链路达到了 MUE 的跨层同频干扰容忍门限值，因此 NUE 的性能降低。而采用直传链路算法，由于每个 NUE 仅可使用 1 个子载波进行数据传输，因此相对于中继节点辅助算法更易对 MUE 达到其容忍门限值，从而直传链路算法性能在 $I_{th} = -20 \text{ dBm}$ 和 $I_{th} = -30 \text{ dBm}$ 这 2 种情况下都有一定程度的降低。

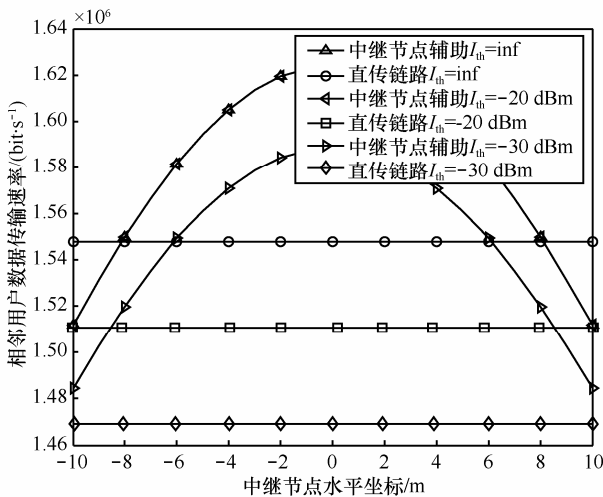
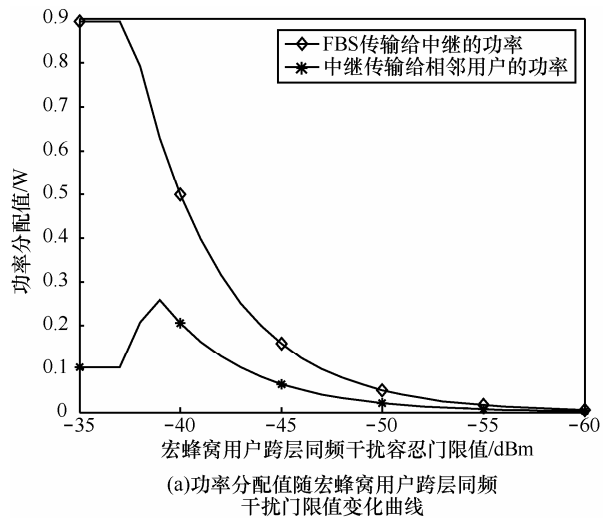


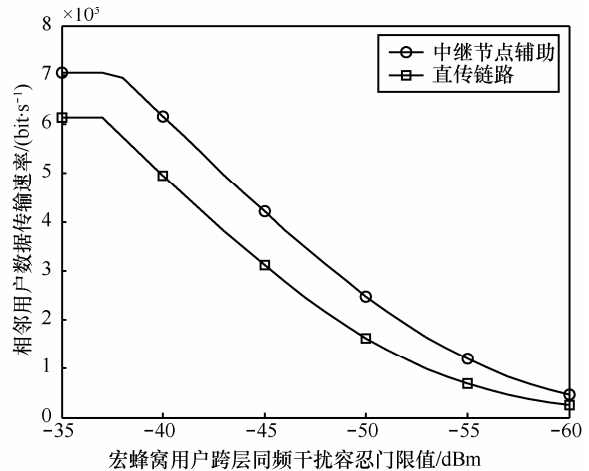
图 5 相邻用户数据传输速率随中继节点位置变化曲线

不同的跨层同频干扰容忍门限值将会影响 Macro-Femto 异构网络的性能指标，图 6 所示为 NUE 的性能随 MUE 跨层同频干扰容忍门限值的变化曲线。从图 6(a)中可以看出，当容忍门限值约小于 -37.45 dBm 时，由于 FBS 分配给中继的功率较高，因此其首先达到 MUE 干扰容忍门限值，所以所提算法将降低 FBS 到中继的功率，而此时中继节点对 MUE 的跨层同频干扰未达到该门限值，因此为了尽可能最大化 NUE 的吞吐量，中继传输给

NUE 的功率将会增大，直到其产生的跨层同频干扰大于 MUE 容忍门限值。从图 6(b)中可以看出，当 MUE 容忍的跨层同频干扰门限值较大时，不会影响 NUE 的数据传输速率，反之 NUE 的数据传输速率会随干扰门限值的降低而降低。因此，本文所提算法能够较好地保护 MUE，有效地降低来自 Femtocell 网络由 NUE 产生的跨层同频干扰。



(a) 功率分配值随宏蜂窝用户跨层同频干扰门限值变化曲线



(b) 相邻用户数据传输速率随宏蜂窝用户跨层同频干扰门限值变化曲线

图 6 相邻用户功率和数据传输速率随 MUE 跨层同频干扰门限值变化曲线

考虑到 Femtocell 网络中存在 FUE，且 FBS 应优先满足 FUE 的 QoS 需求，因此，图 7 给出了 NUE 数据传输速率随注册用户 QoS 门限值变化曲线。从图 7 中可以看出，随着 Femtocell 网络注册用户的 QoS 门限的增大，NUE 得到的数据传输速率将降低。特别地，当 QoS 门限达到某一值时，FBS 的最大功率仅可满足注册用户的 QoS 需求，因此，此时 NUE 将不再被分配功率，其数据传输速率变为 0。

因此，可以看出算法可以有效地保护 Femtocell 网络 FUE 的 QoS。

在多 FBS 环境下，相邻用户采用混合接入方法得到的算法性能如图 8 所示。现实场景中多个 FBS 随机部署在网络场景中，为了简化仿真复杂度，采用 2 个 Femtocell 网络（FBS 分别位于 (-30, 0) 和 (+30, 0)）和 1 个相邻用户的网络场景对本文算法在多基站环境下的性能进行仿真，该网络仿真环境可简单推广至一般场景。实际场景中相邻用户可随机出现在 Femtocell 网络周围，但是为了更好地说明本文算法在相邻用户的接入方式随用户与 FBS 和中继的相对位置的变化关系，在本仿真中相邻用户从起点 (-30, 100) 以 $\sqrt{2}$ m/s 的速度沿着直线到达终点 (+30, 40)，如图 8 (b) 所示，上述用户移动方式可扩展成现实场景中的相邻用户随机分布模式。

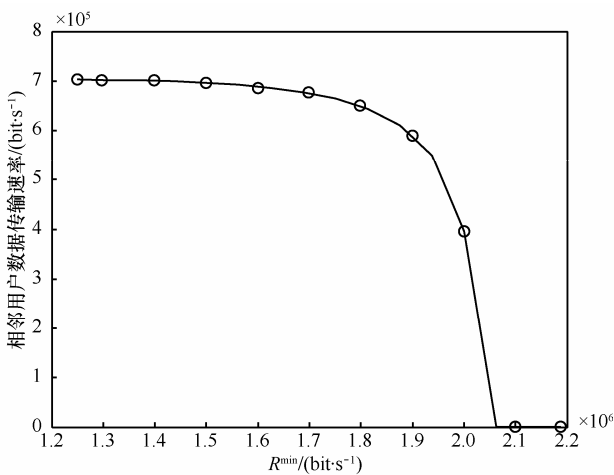
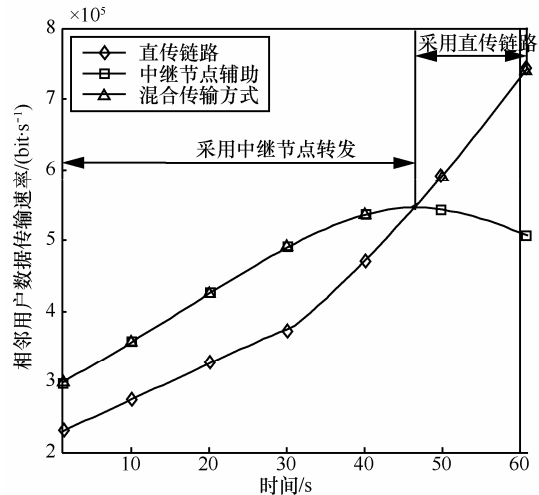
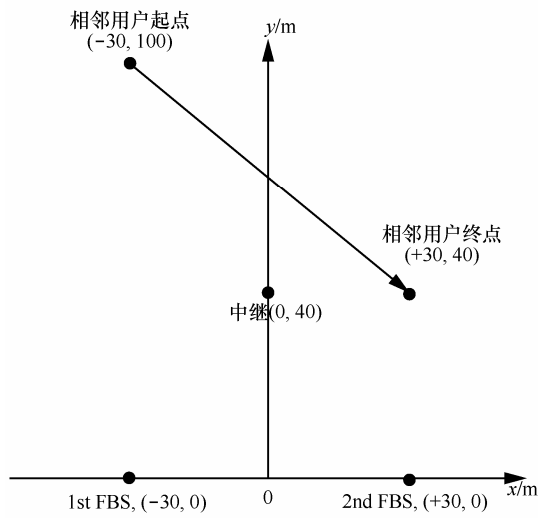


图 7 相邻用户数据传输速率随注册用户 QoS 门限值变化曲线

从图 8(a)可以看出，仅采用中继节点辅助或直传链路的算法不能在全部仿真区域内使该 NUE 的数据传输速率都达到较大值，但是混合接入方式能够改变相邻用户在多 Femtocell 网络中的接入方式，即能够根据用户所处位置等网络参数动态、灵活地分配直传或中继辅助数据传输模式给 NUE，使其获得较大的数据传输速率，从而本文提出的基于中继节点辅助的混合接入算法能够高效地解决多 Femtocell 网络中外围 NUE 的接入问题。从仿真结果中还可以看出，当 NUE 在混合传输机制中采用中继节点转发链路时的数据传输速率要比此时采用传统的直传链路的数据传输速率高约 25%左右。



(a) 相邻用户在多基站环境下数据传输速率变化曲线



(b) 相邻用户仿真位置随时间变化曲线

图 8 相邻用户在多基站环境下的数据传输速率随位置移动变化曲线

图 9 给出了 2 个 Femtocell 网络和多个相邻用户的网络场景下用户的总数据传输速率的累积分布函数 (CDF) 曲线，从图 9 中可以看出，本文所提的 Femtocell 网络混合传输方式在低用户数据传输速率方面要明显优于传统的直传链路传输方式，但是在高用户数据传输速率方面，由于混合传输方式也是采取直传链路进行传输，因此 2 种算法性能相当。该算法能够在用户处于中继节点外围环境中较好地利用中继节点的 AF 传输模式，改善直传链路对距离较远用户服务质量的降低，同时对近距离的用户又可以采取性能较好的直传链路传输方式。因此，所提算法能够根据基站、中继和相邻用户三者之间的信道增益等网络参数动态地调整相邻用户的数据传输方式，从而提高系统的吞吐量。

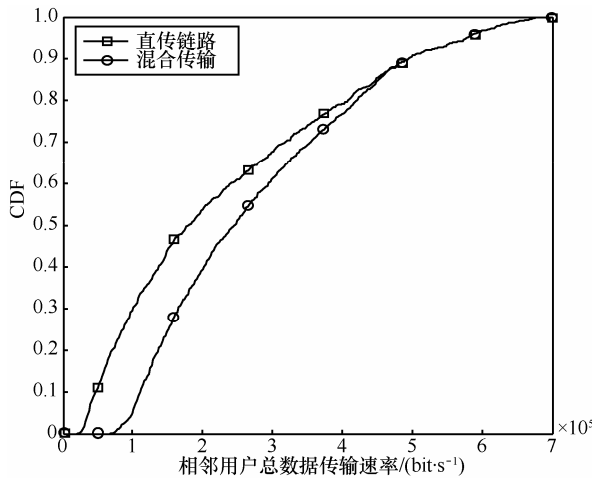


图 9 相邻用户的总数据传输速率的 CDF 曲线

5 结束语

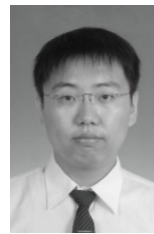
本文提出了一种基于中继节点辅助的 Femtocell 混合接入控制算法，以提高 Femtocell 相邻用户的网络性能。该算法采用中继节点部署在网络外围的架构，通过中继放大转发模式对 NUE 进行数据传输，并将该资源分配问题建模为最优化问题，其中，以最大化 Femtocell 网络相邻用户的数据传输速率为目标，以 Femtocell 网络注册用户的 QoS 门限、MUE 的跨层同频干扰容忍门限和 FBS 下行总功率门限为约束，通过采用对偶分解算法进行求解。通过与传统直传链路相结合，给出一种基于中继节点辅助的 Femtocell 混合接入控制算法。仿真结果表明，所提算法能够有效地提高 Femtocell 网络相邻用户的数据传输速率，并能提供 Femtocell 网络注册用户 QoS 的保护机制和有效地降低 MUE 所受的跨层同频干扰。

参考文献：

- [1] LI H, ZHU G X, DU X J. Cognitive Femtocell networks: an opportunistic spectrum access for future indoor wireless coverage[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 20(2): 44-51.
- [2] JO H S, XIA P, ANDREWS J G. Downlink Femtocell networks: open or closed?[C]//Proc 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2011: 1-5.
- [3] XIA P, CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J G. Femtocell access control in the TDMA/OFDMA uplink[C]//Proc 2010 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). 2010:1-5.
- [4] HOSSEINZADEH-SALATI A S, NASIRI-KENARI M. Aggregate interference modelling and static resource allocation in closed and open access femtocells[J]. IET Communications, 2014, 8(7): 1007-1016.
- [5] BERNAL-MOR E, PLA V, GUTIERREZ-ESTEVEZ D M, et al. Resource management for Macrocell users in hybrid access femtocells[C]//2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2012). 2012: 1859-1864.
- [6] LI L, XU C, TAO M. Resource allocation in open access OFDMA Femtocell networks[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012,

- [6]: 625-628.
- [7] KIM D, PARK T, KIM S, et al. Load balancing in two-tier cellular networks with open and hybrid access Femtocells[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 99: 1-15.
- [8] 张宝, 邱玲. OFDMA Femtocell 网络中混合接入方式下的资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2569-2574.
- ZHANG B, QIU L. Resource allocation in hybrid access OFDMA Femtocell networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(11): 2569-2574.
- [9] SAEED A, KATRANARAS E, DIANATI M, et al. Dynamic Femtocell resource allocation for managing inter-tier interference in downlink of heterogeneous networks[J]. IET Communications, 2016, 10(6): 641-650.
- [10] NING G, YANG Q H, KWAK K S, et al. Macro-and Femtocell interference mitigation in OFDMA wireless systems[C]//2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2012). 2012: 5068-5073.
- [11] CHEN G, ZHENG J, SHEN L F. A preset threshold based cross-tier handover algorithm for uplink co-channel interference mitigation in two-tier Femtocell networks[J]. Wireless Networks, 2016, 22(6): 1819-1835.
- [12] GAMAGE A T, ALAM M S, SHEN X M, et al. Joint relay, subcarrier and power allocation for OFDMA-based Femtocell networks[C]//Proc 2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2013). 2013: 679-684.
- [13] DAS P, MEHTA N B, SINGH G. Novel relay selection rules for average interference-constrained cognitive AF relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(8): 4304-4315.
- [14] CHEN Y J, ZHANG J, ZHANG Q. Utility-aware refunding framework for hybrid access Femtocell network [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(5): 1688-1697.
- [15] NG D W K, SCHÖBER R. Cross-layer scheduling for OFDMA amplify-and-forward relay networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(3): 1443-1458.
- [16] TAO M X, LIANG Y C, ZHANG F. Resource allocation for delay differentiated traffic in multiuser OFDM systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(6): 2190-2201.
- [17] LIU D T, CHEN Y, ZHANG T K, et al. Stackelberg game based cooperative user relay assisted load balancing in cellular networks [J]. IEEE Communication Letters, 2013, 17(2): 424-427.

作者简介：



刘诚毅（1986-），男，江苏丰县人，东南大学博士生，主要研究方向为异构网络资源管理算法研究等。

陈赓（1984-），男，山东潍坊人，博士，山东科技大学讲师，主要研究方向为异构融合网络无线资源管理与优化算法、高动态异构无线资源高效利用与优化方法等。

邢松（1964-），男，江苏扬州人，博士，美国加利福尼亚州立大学教授，主要研究方向为数字网络通信系统及语音和图像处理等。

沈连丰（1952-），男，江苏邳州人，东南大学教授、博士生导师，主要研究方向为宽带移动通信、短距离无线网络与泛在网络等。