

# 基于协作通信异构网络链路质量提升技术研究\*

滕世海, 蒋占军<sup>†</sup>, 全震, 张华卫  
(兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 针对双层异构网络中跨层干扰、频繁越区切换等问题对 Macrocell 用户上行链路性能的不利影响, 提出利用协作通信技术削弱其影响的方法, 即利用 Femtocell 接入点充当中继节点, 对接收到来自 Macrocell 用户的信息进行转发, 通过 Femtocell 接入点和 Macrocell 用户的协作传输提升 Macrocell 用户上行链路中断概率和误比特率的性能, 并同时分析了译码和直接两种转发方式下 Macrocell 用户性能。理论分析和仿真结果表明, 基于 Femtocell 接入点的协作通信技术确实在 Macrocell 用户上行链路性能方面明显优于直接传输。

**关键词:** 异构网络; 协作通信; 上行链路; Femtocell 接入点; 译码转发; 直接转发

**中图分类号:** TP393.03      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2018)05-1491-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.05.046

## Research on link quality improvement technique based on cooperative communication in heterogeneous network

Teng Shihai, Jiang Zhanjun<sup>†</sup>, Quan Zhen, Zhang Huawei

(School of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Due to the problems of cross-tier interference and handover frequently affected the uplink performance of Macrocell users adversely in two-tier heterogeneous network, this paper proposed a method that relying on cooperative communication technology to weaken the influence. It used the Femtocell access point as the relay node, which forwarded the information received by the Macrocell users, and improved the uplink outage probability and bit error rate of Macrocell users through cooperative transmission of MBS and Femtocell access points, and also analyzed the performance of Macrocell user in two forwarding modes, which was decode forwarding and direct forwarding. Theoretical analysis and simulation results show that the cooperative communication technology based on Femtocell access point is significantly superior to the direct transmission in terms of the uplink performance of Macrocell users.

**Key words:** heterogeneous networks; cooperative communication; uplink; Femtocell access point; decode forwarding; direct forwarding

## 0 引言

进入 21 世纪以来, 移动通信技术飞速发展, 用户数量急剧增长, 各种新业务层出不穷, 致使移动数据业务需求以指数形式迅速攀升, 有研究指出从 2010 年到 2020 年移动数据业务的增长速度将超过 500 倍<sup>[1]</sup>。为了满足日益增长的数据业务需求, 3GPP LTE-advanced 引入了异构网络以实现较高的频谱效率。Femtocell/Macrocell 异构网络则是由传统的宏基站 (Macrocell base station, MBS) 和低功率的 Femtocell 基站共同构成。通过引入 Femtocell 基站, 不仅能够增大小区分裂增益, 还能够增强室内环境区域的覆盖。有研究表明, 超过 60% 的话音业务和 80% 的数据业务都发生在室内场所, 并且移动用户有近 70% 的时间也处在室内场所<sup>[2]</sup>。因此, Femtocell/Macrocell 异构网络因其能够改善 Macrocell 局部区域 (如室内环境) 无线覆盖不足的缺点逐渐受到越来越多研究人员的关注<sup>[3]</sup>。

虽然 Femtocell 的引入给异构网络带来了许多的好处, 但

是其加入同时也带来了一些技术挑战。例如, Femtocell 接入点 (Femtocell access point, FAP) 有封闭式接入 (closed access, CA)、开放式接入 (open access, OA) 和混合式接入 (hybrid access, HA) 三种接入方式。当 FAP 的接入方式为 CA 时, 由于 FAP 与 Macrocell 工作在相同频段, 所以 Femtocell 用户会对 MBS 产生跨层干扰; 而当 FAP 的接入方式为 OA 时, 虽然会减轻 FAP 与 Macrocell 用户的跨层干扰问题, 但是因为 Macrocell 用户的随机接入与移动性则会导致其频繁的越区切换问题<sup>[4]</sup>; 为了削减跨层干扰和越区切换对 Macrocell 用户的影响, FAP 可以选择 HA 接入方式, 即将 FAP 的资源划分为两部分, 一部分分配给 Femtocell 用户, 另一部分则分配给 Macrocell 用户。

尽管 HA 方式确实对解决上述问题起到了一定作用, 但这些问题仍造成 Macrocell 用户上行链路中断概率过高, 严重影响其服务质量 (quality of service, QoS)。因此, 有文献提出利用功率控制技术来抑制跨层干扰, 进而削弱层间干扰对 Macrocell 用户的影响<sup>[5]</sup>; 同时为了减少切换次数, 文献<sup>[6]</sup>提出将若干

**收稿日期:** 2016-12-22; **修回日期:** 2017-02-22      **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61261014); 甘肃省自然科学基金资助项目 (145RJZA206); 兰州交通大学青年科学基金资助项目 (2012005)

**作者简介:** 滕世海 (1991-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要研究方向为异构网络协作通信; 蒋占军 (1975-), 男 (通信作者), 宁夏中卫人, 教授, 博士, 主要研究方向为无线移动通信 (59444069@qq.com); 全震 (1991-), 女, 黑龙江鹤岗人, 硕士研究生, 主要研究方向为异构网络资源管理; 张华卫 (1980-), 男, 甘肃兰州人, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为通信与信息系统。

小蜂窝按照组的形式组成一个虚拟 Macrocell 的方式并基于用户位置和移动速度等信息来辅助切换,从而避免过多切换次数的出现;此外,通过相邻的若干个 Femtocell 的协作波束赋形保证服务用户的 QoS,同时降低对协作小区内其他用户的干扰<sup>[7]</sup>,但是其需要基站间彼此共享大量的辅助信息,实现起来比较困难。

本文主要研究的是 Femtocell/Macrocell 部署场景下,将 HA 作为 Macrocell 用户接入 FAP 的方式,同时考虑在 FAP 与 Macrocell 用户之间采用协作分集技术以减小 Macrocell 用户的中断概率,提高 Macrocell 用户上行链路的通信质量。该方法无须基站之间共享大量辅助信息,实现起来比较容易,而且 FAP 通过回程链路传递信息给 MBS,可避免造成不必要的干扰。

## 1 系统模型

双层异构网络的系统模型如图 1 所示,在 MBS 的覆盖范围随机分布多个 Femtocells 和单个 Macrocell 用户。每个 Femtocell 包含一个 FAP 和一个 Femtocell 用户,每个 FAP 通过公共 Internet 接入的回程链路实现与 MBS 的连接。另外该系统模型下,为了降低层间干扰、减少频繁越区切换的同时最大化地满足用户的数据需求,假设 Macrocell 用户以 HA 方式接入到 FAP;同时假设系统模型的环境为一般车载环境,因为行驶车辆导致的快衰落分布一般服从瑞利分布,则该模型中假设所有信道为瑞利衰落信道,噪声为加性高斯白噪声。

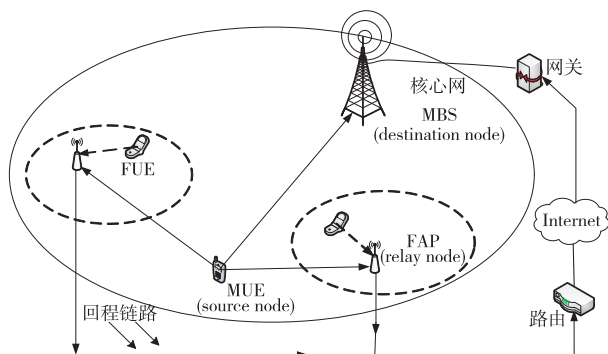


图1 双层异构网络系统模型

由于异构网络中跨层干扰、频繁切换以及 Macrocell 用户处于 MBS 覆盖边缘都会导致其上行链路质量下降,影响 Macrocell 用户的正常通信,针对这些问题,本文拟通过 FAP 协作增强 Macrocell 用户上行链路的性能。这样,Macrocell 用户就可以依靠 FAP,利用其协作分集来提升信号的质量。协作方式则是当 Macrocell 用户给 MBS 传送信号时,除了 MBS 接收到传输的信号外,其附近的 FAP 也可以接收到该信号;然后,这些 FAP 利用回程链路对接收到的信号按照一定的转发方式转发给 MBS,而 FAP 利用回程链路转发信号在一定程度上可避免不必要的干扰;最后,在 MBS 端肯定存在多个原始信号的复本信号,则利用最大比合并方式(maximal ratio combining, MRC)恢复出原始信号<sup>[8]</sup>。

## 2 译码转发方式

译码转发方式是指利用中继节点 FAP 先对接收到来自 Macrocell 用户发送的信息进行译码,译码完成后重新编码,将编码后的信息通过回程链路转发给 MBS。在该方式下,可

以考虑两种不同的情况:a)不考虑 Femtocell 用户的影响,即 FAP 只对 Macrocell 用户发送的信息进行解码转发;b)考虑 Femtocell 用户的影响,即 FAP 不仅要为 Macrocell 用户发送的信息进行解码转发,还需要对其服务的 Femtocell 用户发送的信息进行译码转发。

### 2.1 不考虑 Femtocell 用户的影响

该场景下假设选取的 FAP 是空闲的,即对其自身 Femtocell 用户没有进行服务。因此,没有考虑 Femtocell 用户对 MBS 的干扰以及对于 Femtocell 用户发送信息解码的正确与否,只考虑 Macrocell 用户发送信息解码是否正确,并且该 Femtocell 将其总的回程链路容量全部分配给 Macrocell 用户。在该场景下,MBS 和 FAP 端接收到来自 Macrocell 用户发送的信号就表示为

$$y_{sd} = \sqrt{\frac{E_s}{L_{sd}}} h_{sd} X_s + W_d \quad (1)$$

$$y_{si} = \sqrt{\frac{E_s}{L_{si}}} h_{si} X_s + W_i \quad (2)$$

从式(1)(2)可观察到,不管是 MBS 的接收端还是 FAP 的接收端,只接收到了关于 Macrocell 用户发送的信息。 $E_s$  表示 Macrocell 用户的发射功率; $h_{ij}$  是节点  $i$  和  $j$  之间的信道衰落系数,服从均值为 0、方差为  $\sigma_{ij}^2$  的独立、循环复高斯随机分布,包络平方  $|h_{ij}|^2$  满足均值为  $\sigma_{ij}^2$  的指数分布<sup>[9]</sup>,如  $h_{si}$  就表示 Macrocell 用户和第  $i$  个 Femtocell 中的 FAP 之间的信道衰落系数; $W_d, W_i$  表示服从均值为 0、方差为  $\sigma_N^2$  的高斯噪声; $L_{ij}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间的路径损耗。

根据提出的双层异构网络场景,考虑构建符合实际的路径损耗模型,根据文献[10,11]总结出本文路径损耗模型如下:

$$L(\text{dB}) = \begin{cases} 39.676 + 20 \log_{10} d + kG & \text{室内场所} \\ 15.3 + 37.6 \log_{10} d & \text{室外场所} \end{cases}$$

其中:室外 Macrocell 用户到 FAP、室内 Femtocell 用户到 MBS 和两个不同 Femtocell 之间的路径损耗运用室内场所模型;而 Macrocell 用户到 MBS 之间的直达路径损耗采用室外场所模型。 $d$  表示发射端到接收端的距离,单位为 m,其取值为  $d \in [5, 200]$ ,并且根据发射端与接收端的不同, $d$  的取值也不同; $G$  表示墙面隔断损耗,通常假设一面墙的损耗为 5 dB; $k$  则表示发送端到接收端信号穿过的墙面数。由于室内场所的路损模型运用场景,像室外 Macrocell 用户到 FAP 这种情形,除了考虑距离损耗外还要考虑墙面损耗,所以有些情形室内路径损耗要比室外直达路径损耗大。下面分析该场景下 Macrocell 用户上行链路的中断概率性能。

FAP 对于 Macrocell 用户信息解码正确的概率设为

$$P_{\text{muc},r} = \Pr\{\log_2(1 + \gamma_{si}) \geq R_m\} = \exp\left(-\frac{2^{R_m} - 1}{\gamma_{si}}\right) \quad (3)$$

其中: $\gamma_{ij} = \frac{E_i |h_{ij}|^2}{\sigma_N^2 L_{ij}}$  表示节点  $i$  和  $j$  之间的信噪比, $\gamma_{si}$  则表示 Macrocell 用户与第  $i$  个 FAP 之间的信噪比; $R_m$  表示 Macrocell 用户的传输速率。

另外,本文 FAP 对于用户信息解码正确与否的判定依赖于信道容量与用户传输速率的关系。式(3)中  $\log_2(1 + \gamma_{si}) \geq R_m$  表示 Macrocell 用户的传输速率在信道容量的范围之内,若超出信道容量范围,则会判断 FAP 不能正确解码 Macrocell 用户信息,即通信链路中断。

在解码正确的条件下,Macrocell 用户上行链路中断概率  $P_{out,r}$  为 0。当 FAP 对于 Macrocell 用户信息解码错误时,其概率  $P_{muc,w}$  可表示为

$$P_{muc,w} = 1 - \exp\left(-\frac{2^{R_m}-1}{\gamma_{si}}\right) \quad (4)$$

在此条件下,Macrocell 用户上行链路中断概率  $P_{out,w}$  则为 1,这是因为将回程链路设为无差错链路。该场景下,Macrocell 用户单条协作中继链路的中断概率如式(5)所示。

$$P_{out} = P_{muc,w} \times P_{out,w} + P_{muc,r} \times P_{out,r} \quad (5)$$

同时,Macrocell 用户到 MBS 直达路径的中断概率可表示为

$$P_{out,direct} = \Pr\{\log_2(1 + \gamma_{sd}) < R_m\} = 1 - \exp\left(-\frac{2^{R_m}-1}{\gamma_{sd}}\right) \quad (6)$$

其中: $\gamma_{sd}$ 表示 Macrocell 用户与 MBS 直达路径之间的信噪比。

图2给出了只考虑 Macrocell 用户在 FAP 协作与无协作时,Macrocell 用户与 MBS 间的信噪比与 Macrocell 用户上行链路中断概率的关系。

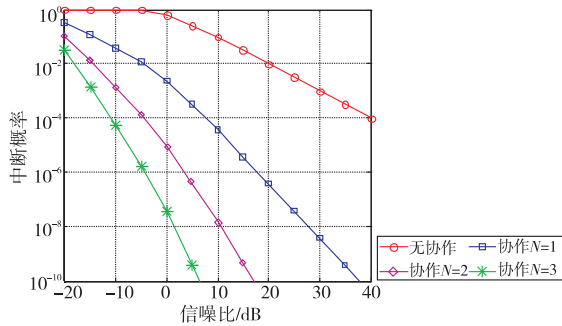


图2 只考虑Macrocell用户时中断概率性能对比

随着信噪比的不断增大,无论是协作方式还是无协作方式,Macrocell 用户中断概率都随之减小;但是,采取协作方式的 Macrocell 用户的上行链路性能明显优于无协作方式。而且对于相同的信噪比,参与协作的 FAP 的数目越多,即中继数目越多,Macrocell 用户的中断概率就越低。

## 2.2 考虑 Femtocell 用户的影响

此场景下要求 FAP 不仅要向 Macrocell 用户发送的信息进行译码转发,还需要对其服务的 Femtocell 用户发送的信息进行解码传输;然后,Femtocell 按照一定的比例规则将该 Femtocell 总的回程链路容量分别分配给 Femtocell 用户和 Macrocell 用户。假设第  $i$  个 Femtocell 分配给 Femtocell 用户的回程链路容量为  $\lambda C_i$  bit per channel use (bpcu),分配给 Macrocell 用户的容量则为  $(1-\lambda)C_i$  bpcu。其中, $0 < \lambda < 1$ ;  $C_i$  表示第  $i$  个 Femtocell 的回程链路总容量, $i \in [1, 2, \dots, N]$ 。另外, $C = \sum_{i=1}^N C_i$ ,  $C$  表示整个回程链路总的容量。MBS 和 FAP 端接收到来自 Macrocell 用户发送的信号分别表示为

$$y_{sd} = \sqrt{\frac{E_s}{L_{sd}}} h_{sd} X_s + \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{E_i}{L_{id}}} h_{id} X_i + W_d \quad (7)$$

$$y_{si} = \sqrt{\frac{E_s}{L_{si}}} h_{si} X_s + \sqrt{\frac{E_i}{L_{ii}}} h_{ii} X_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N \sqrt{\frac{E_j}{L_{ji}}} h_{ji} X_j + W_i \quad (8)$$

其中: $E_i$ 和 $E_j$ 表示第 $i$ 和 $j$ 个 Femtocell 的用户发射功率;式(7)中的第二项表示 Femtocell 用户对 MBS 的干扰;式(8)中的第三项则表示其余  $N-1$  个 Femtocell 的用户对于第  $i$  个 FAP 的干扰。而后,通过理论分析和仿真验证 Macrocell 用户中断概率的性能表现。

### 2.2.1 中断概率分析

首先考虑第  $i$  个 Femtocell 的中断概率,即考虑第  $i$  个 Femtocell 对于 Macrocell 用户和 Femtocell 用户信息解码的正确与否。以第  $i$  个 Femtocell 用户解码错误、Macrocell 用户解码正确为例,将该事件发生的概率设为  $P_{i,muc}$ <sup>[12]</sup>,将第  $i$  个 Femtocell 用户解码错误看做事件  $A$ ,将 Macrocell 用户解码正确看做事件  $B$ ,则  $P_{i,muc}$  可表示为  $\Pr\{A \cap B\}$ 。而事件  $A$  和  $B$  可以看做是两个相互独立的事件,因此,  $\Pr\{A \cap B\} = \Pr\{A\} \times \Pr\{B\}$

$$P_{i,muc} = \Pr\{A\} \times \Pr\{B\} =$$

$$\Pr\{\log_2(1 + \frac{\gamma_{si}}{1 + \gamma_{ii} + \omega}) \geq R_m\} \times \Pr\{\log_2(1 + \frac{\gamma_{ii}}{1 + \omega}) < R_f\} = \quad (9)$$

$$\left(1 - \exp\left(-\frac{2^{R_m}-1}{\gamma_{si}}(1 + \omega)\right)\right) \left(\exp\left(-\frac{2^{R_f}-1}{\gamma_{ii}}(1 + \gamma_{ii} + \omega)\right)\right)$$

其中: $h_{ii}$ 代表第  $i$  个 Femtocell 用户到其 FAP 的信道衰落系数; $R_m$ 、 $R_f$  分别表示 Macrocell 用户和 Femtocell 用户的传输速率; $\omega$  表示来自其余  $N-1$  个 Femtocell 的 Femtocell 用户对于解码 FAP 的干扰。同理, $P_{i,fue}$  可表示为

$$P_{i,fue} = \Pr\{\log_2(1 + \frac{\gamma_{ii}}{1 + \gamma_{si} + \omega}) \geq R_f\} \times \Pr\{\log_2(1 + \frac{\gamma_{si}}{1 + \omega}) < R_m\} =$$

$$\left(1 - \exp\left(-\frac{2^{R_f}-1}{\gamma_{ii}}(1 + \omega)\right)\right) \left(\exp\left(-\frac{2^{R_m}-1}{\gamma_{si}}(1 + \gamma_{ii} + \omega)\right)\right) \quad (10)$$

依此类推, $P_{i,both}$ 和 $P_{i,none}$ 相继可以推导出来。

在已知 Femtocell 用户和 Macrocell 用户信息解码正确与否的基础上,Macrocell 用户上行链路的中断概率如式(11)所示。

$$P_{out,g} = \log_2\left(1 + \frac{\gamma_{sd}}{1 + \sum_{i=1}^N \alpha_i \gamma_{id}}\right) <$$

$$(R_m - \sum_{i=1}^N (\beta_i (1-\lambda) C_i) - \sum_{i=1}^N \varphi_i C_i) \quad (11)$$

其中: $g \in \Omega = \{muc, fue, both, none\}$ ,  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  和  $\varphi_i$  是二进制向量,它的取值由  $g$  的状态决定,其可能取值在表1中给出。

表1  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  和  $\varphi_i$  可能取值

| $g$ | $\alpha_i$ | $\beta_i$ | $\varphi_i$ | $g$  | $\alpha_i$ | $\beta_i$ | $\varphi_i$ |
|-----|------------|-----------|-------------|------|------------|-----------|-------------|
| muc | 1          | 0         | 1           | both | 1          | 0         | 0           |
| fue | 0          | 1         | 0           | none | 0          | 0         | 0           |

最后,整个 Macrocell 用户上行链路中断概率为

$$P_{out} = \sum_{i,j \in \Omega} P_{1i} \cdots P_{Nj} \times P_{out,g=[i \cdots j]} \quad (12)$$

以  $N=2$  为例,

$$P_{out} = \sum_{i,j \in \Omega} P_{1i} P_{2j} \times P_{out,g=[ij]} =$$

$$\sum_{i,j \in \{muc, fue, both, none\}} P_{1i} P_{2j} \times P_{out,g=[ij]} \quad (13)$$

### 2.2.2 仿真结果与分析

#### 1) 仿真参数设置(表2)

表2 仿真参数设置

| 设置参数                               | 参数值 |
|------------------------------------|-----|
| Macrocell 用户、Femtocell 用户传输速率/bpcu | 1   |
| 不同 Femtocell 之间的距离/m               | 50  |
| Macrocell 用户与 MBS 之间距离/m           | 200 |
| Femtocell 用户与 MBS 之间距离/m           | 200 |
| Femtocell 用户与 FAP 之间距离/m           | 5   |
| Macrocell 用户与 FAP 之间距离/m           | 25  |
| $\lambda$ 的取值                      | 1/2 |
| 两个不同 Femtocell 之间的墙面数              | 4   |
| Macrocell 用户与 FAP 之间的墙面数           | 2   |

#### 2) 仿真结果及分析

图3给出了考虑 Femtocell 用户在 FAP 协作与无协作时,

Macrocell 用户与 MBS 间的信噪比与 Macrocell 用户上行链路中断概率的关系。从图 3 中可以看出,所有方案的中断概率都随着信噪比的增大而下降,只是采取协作方案的用户中断概率下降得更明显。而且在相同信噪比的前提下,协作中继的数目越多,中断概率就越低,这是因为多条协作路径的传输提升了上行链路的可靠性。另外,与图 2 的仿真结果对比可知,图 3 与图 2 的中断概率性能趋势具有一定的相似性,但是在相同的协作 FAP 的数目下,图 3 中 Macrocell 用户链路性能要明显劣于图 2,这主要是由于 Femtocell 用户对 MBS 的上行链路干扰以及考虑 Femtocell 用户发送信息解码的正确与否的缘故从而影响了上行链路的通信质量。

图 4 给出了 Macrocell 用户的中断概率与 FAP 数目、回程链路容量、Macrocell 用户与 MBS 间信噪比的关系。从图 4 中可以看出,无关协作 FAP 数目与回程链路容量,无论采取协作方案还是无协作方案,随着信噪比的不断增大,Macrocell 用户上行链路性能都在不断提升。但是,当 FAP 数目一定时,回程链路容量的减小会使得 Macrocell 用户中断概率增大,这表明了并不是只有协作中继的数目会影响 Macrocell 用户上行链路的性能,回程链路的容量同样也是影响其质量的一个关键因素。另外,FAP 数目为 3、回程链路容量为 1.3 bpcu 的中断概率曲线几乎重合于 FAP 数目为 2、回程链路容量为 2 bpcu 的仿真曲线,这说明协作 FAP 的数目与回程链路容量可以互相补充,即当回程链路容量资源需求比较大时,本文可以通过增加 FAP 的数目减小对于回程链路容量的要求;同理,也可以利用较大的回程链路容量减少协作中继数目的使用。FAP 数目为 3 时,回程链路容量 1.3 bpcu 的确定则是通过仿真程序一步步修改得出的,这样做是因为前面验证了中继数目和回程链路容量都是影响 Macrocell 用户性能的因素,从而推测它们之间存在一定的联系,之后通过 FAP 数目为 3、回程链路容量为 1.3 bpcu 的曲线得以验证,并不具有特殊性。

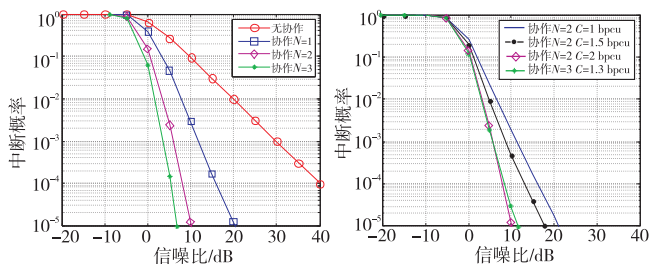


图3 FAP协作与无协作时中断概率性能对比

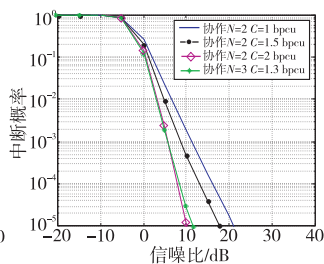


图4 回程链路容量与FAP数目不同时中断概率对比

### 3 直接转发方式

该场景下假设选取的 FAP 仍是空闲的,FAP 接收到来自 Macrocell 用户的信息后直接通过回程链路转发给 MBS,不需要 FAP 对 Macrocell 用户的信息进行任何操作,然后经过理论分析和仿真验证其 BER 性能表现。

#### 3.1 误比特率 BER 分析

由于 FAP 是通过回程链路实现对 MBS 的信息传输,并且设回程链路为无差错传输链路,所以在该理论分析和仿真验证中假设用 FAP 与 MBS 之间的高信噪比信道(信噪比设为 15 dB)替代回程链路以实现信息传输。

在 MBS 处由于协作分集接收到多个原始信号的复本,经过 MRC 合并技术后在其输出端的信噪比可以表示为

$$\gamma = \gamma_{sd} + \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_{si}\gamma_{id}}{\gamma_{si} + \gamma_{id} + 1} \quad (14)$$

因为条件误比特率  $P(E/\gamma)$  是关于瞬时接收信噪比的函数,可表示为

$$P(E/\gamma) = F\left(\sqrt{\gamma_{sd} + \sum_{i=1}^N \frac{\gamma_{si}\gamma_{id}}{\gamma_{si} + \gamma_{id} + 1}}\right) \quad (15)$$

其中: $F(\cdot)$  是标准高斯误差函数。

根据式(15)可推导出接收信号的误比特率为

$$P(E) = \int_0^\infty P(E/\gamma) P_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (16)$$

通过运用标准高斯误差函数  $F(\cdot)$  的积分形式可将  $P(E)$  表示为

$$P(E) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \int_0^{\pi/2} P_\gamma(\gamma) e^{-\frac{\gamma}{\sin^2\theta}} d\gamma d\theta \quad (17)$$

其中: $P_\gamma(\gamma)$  为 MRC 合并器输出端信噪比的概率密度函数;同时两跳路径信噪比的概率密度函数<sup>[13]</sup>可近似表示为

$$P_\gamma(\gamma) \approx \frac{1}{\gamma_{sd,i}} e^{-\frac{\gamma}{\gamma_{sd,i}}} \quad (18)$$

其中: $\frac{1}{\gamma_{sd,i}} = \frac{1}{\gamma_{si}} + \frac{1}{\gamma_{id}}$ ,表示两跳路径的信噪比。

而从 Macrocell 用户到 MBS 直达路径的概率密度函数为

$$P_\gamma(\gamma) \approx \frac{1}{\gamma_{sd}} e^{-\frac{\gamma}{\gamma_{sd}}} \quad (19)$$

最后推导出整个上行链路的误比特率为

$$P(E) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \prod_{i=1}^N \left( \frac{\sin^2\theta}{\sin^2\theta + \gamma_{sd,i}} \right) d\theta \quad (20)$$

### 3.2 仿真结果与分析

图 5 给出了 FAP 协作与无协作方式时,不同的信噪比对 MBS 端 BER 造成的影响。随着信噪比的不断增大,所有方式的 BER 都随之下降,但是采取协作方式的 BER 下降得更明显。而且在相同信噪比的条件下,协作 FAP 的数目越多,Macrocell 用户上行链路性能越好,说明采取协作方式能够有效提升 Macrocell 用户上行链路质量。

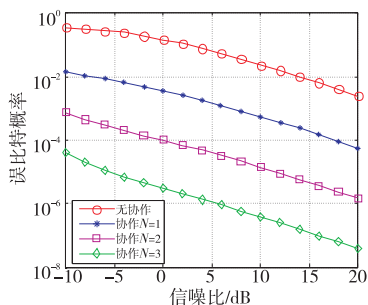


图5 协作与无协作时误比特率对比

### 4 结束语

在异构网络中,由于用户频繁越区切换、跨层干扰等问题严重影响了 Macrocell 用户上行链路的质量,如何削弱它们对 Macrocell 用户的影响是亟待解决的问题。本文提出了一种利用 FAP 和 Macrocell 用户的协作通信技术提升 Macrocell 用户上行链路质量的方法。针对 FAP 译码和直接两种不同的转发方式进行分析,而在译码转发方式下,又分析了考虑和不考虑两种 Femtocell 用户影响情形。最后,通过仿真验证,基于 FAP 的协作方案在 Macrocell 用户上行链路性能方面明显优于无协作方案。

(下转第 1499 页)



看出,偏置值越小导致微基站服务区域也越小,致使大量的移动用户仍然接受宏基站服务,由于总的可用资源相同,可以看出宏用户的丢包率明显比图8中要高;由于更少的用户接受微基站服务,微蜂窝用户丢包率明显比图8所示要低。

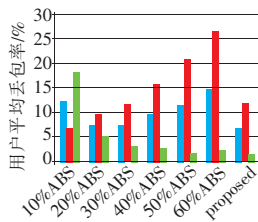


图7 偏置值 bias=10 时的用户平均丢包率

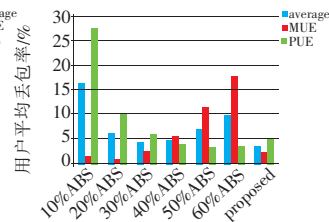


图8 偏置值 bias=20 时的用户平均丢包率

## 5 结束语

本文以提升边缘频谱效率和降低用户丢包率为目标,针对异构网络中的宏基站对微基站用户干扰严重、用户业务变化剧烈的问题,提出了一种基于用户业务感知的动态 ABS 调整方案。在该方案中,基站首先对调整周期内各用户待传数据量进行感知,结合用户的 QoS 需求以及基站在不同类型子帧下的服务能力差异,根据所提方案获得了最佳 ABS 密度。仿真结果显示,本文方法有效降低了丢包的发生,同时显著提升了边缘频谱效率,实现了对系统性能的改善。

### 参考文献:

- [1] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术[J]. 中国科学:信息科学,2014,44(5):551-563.
- [2] Damnjanovic A, Montojo J, Wei Yongbin, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):10-21.
- [3] Zhang Heli, Chen Shanzhi, Li Xi, et al. Interference management for heterogeneous networks with spectral efficiency improvement[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2):101-107.
- [4] Lopez-Perez D, Guvenc I, Roche G D L, et al. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):22-30.
- [5] Ho T M, Tran N H, Do C T, et al. Power control for interference management and QoS guarantee in heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8):1402-1405.
- [6] 朱晓荣,朱蔚然. 超密集小蜂窝网中基于干扰协调的小区簇和功率分配算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(5):1173-1178.
- [7] Vajapeyam M, Damnjanovic A, Montojo J, et al. Downlink FTP performance of heterogeneous networks for LTE-advanced[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications Workshops. 2011:1-5.
- [8] Lopez-Perez D, Claussen H. Duty cycles and load balancing in Het-Nets with eICIC almost blank subframes[C]//Proc of the 24th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2013:173-178.
- [9] 李全刚. 通信网络中用户行为分析与生成模型研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015.
- [10] Wang Ke, Li Xi, Ji Hong, et al. Traffic-based queue-aware scheduling for 3GPP LTE system[J]. Journal of China Universities of Posts & Telecommunications, 2014, 21(2):63-68.
- [11] Hsu C H, Feng Kaiten, Chang C J. Statistical control approach for sleep-mode operations in IEEE 802. 16m systems[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2010, 59(9):4453-4466.
- [12] 刘峰. 基于部分可观察马尔可夫决策过程的序列规划问题的研究[D]. 南京:南京大学, 2015.
- [13] 3GPP TS 36. 321 Std. 10. 2. 0 (release 10), medium access control (MAC) protocol specification[S]. 2012.
- [14] Ghorbanzadeh M, Abdelhadi A, Clancy C. A utility proportional fairness radio resource block allocation in cellular networks[C]//Proc of International Conference on Computing, Networking and Communications. Washington DC:IEEE Computer Society, 2015:499-504.
- [15] Lembo S, Lunden P, Tirkkonen O, et al. Optimal muting ratio for enhanced inter-cell interference coordination(eICIC) in HetNets[C]//Proc of IEEE International Conference on Communications Workshops. 2013:1145-1149.
- [16] Nakamura T, Nagata S, Benjebbou A, et al. Trends in small cell enhancements in LTE advanced[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2):98-105.
- [17] Carlaw S. IPR and the potential effect on femtocell markets[R]. London:Allied Business Intelligence Research, 2008.
- [18] Andrews J G, Claussen H, Dohler M. Femtocells: past, present, and future[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3):497-508.
- [19] 肖竹, 李仁发, 易克初, 等. 两层异构网络中 Femtocell 研究进展与展望[J]. 通信学报, 2013, 34(2):156-169.
- [20] Chandrasekhar V, Andrews J G, Muharemovic T, et al. Power control in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(8):4316-4328.
- [21] Pedersen K I, Michaelsen P H, Rosa C, et al. Mobility enhancements for LTE-advanced multilayer networks with inter-site carrier aggregation[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5):64-71.
- [22] Li Haoming, Hajipour J, Attar A, et al. Efficient HetNet implementation using broadband wireless access with fiber-connected massively distributed antennas architecture[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):72-78.
- [23] 郑侃, 彭岳星, 龙航, 等. 协作通信及其在 LTE-Advanced 中的应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010:12-14.
- [24] 林霏, 罗涛, 路安琼, 等. 协同通信系统中基于遍历容量的近似最优功率分配[J]. 通信学报, 2009, 30(6):26-32.
- [25] De Lima C H M, Bennis M, Ghaboosi K, et al. Interference management for self-organized Femtocells towards green networks[C]//Proc of the 21st IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2010:352-356.
- [26] Alves H, Bennis M, Souza R D, et al. Enhanced performance of heterogeneous networks through full-duplex relaying[J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2012, 2012(1):365.
- [27] Narasimhan R. Individual outage rate regions for fading multiple access channel[C]//Proc of IEEE International Symposium on Information Theory. 2007:1571-1575.
- [28] Adeane J, Rodrigues M R D, Wassell I J. Characterisation of the performance of cooperative networks in Ricean fading channels[EB/OL] (2016-12-22). [http://www.cl.com.ac.uk/research/dtg/tlce-Pub/public/ja316/paper\\_ver6.pdf](http://www.cl.com.ac.uk/research/dtg/tlce-Pub/public/ja316/paper_ver6.pdf).

(上接第1494页)

### 参考文献:

- [1] Nakamura T, Nagata S, Benjebbou A, et al. Trends in small cell enhancements in LTE advanced[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(2):98-105.
- [2] Carlaw S. IPR and the potential effect on femtocell markets[R]. London:Allied Business Intelligence Research, 2008.
- [3] Andrews J G, Claussen H, Dohler M. Femtocells: past, present, and future[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3):497-508.
- [4] 肖竹, 李仁发, 易克初, 等. 两层异构网络中 Femtocell 研究进展与展望[J]. 通信学报, 2013, 34(2):156-169.
- [5] Chandrasekhar V, Andrews J G, Muharemovic T, et al. Power control in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(8):4316-4328.
- [6] Pedersen K I, Michaelsen P H, Rosa C, et al. Mobility enhancements for LTE-advanced multilayer networks with inter-site carrier aggregation[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(5):64-71.
- [7] Li Haoming, Hajipour J, Attar A, et al. Efficient HetNet implementation using broadband wireless access with fiber-connected massively distributed antennas architecture[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3):72-78.
- [8] 郑侃, 彭岳星, 龙航, 等. 协作通信及其在 LTE-Advanced 中的应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2010:12-14.
- [9] 林霏, 罗涛, 路安琼, 等. 协同通信系统中基于遍历容量的近似最优功率分配[J]. 通信学报, 2009, 30(6):26-32.
- [10] De Lima C H M, Bennis M, Ghaboosi K, et al. Interference management for self-organized Femtocells towards green networks[C]//Proc of the 21st IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2010:352-356.
- [11] Alves H, Bennis M, Souza R D, et al. Enhanced performance of heterogeneous networks through full-duplex relaying[J]. EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking, 2012, 2012(1):365.
- [12] Narasimhan R. Individual outage rate regions for fading multiple access channel[C]//Proc of IEEE International Symposium on Information Theory. 2007:1571-1575.
- [13] Adeane J, Rodrigues M R D, Wassell I J. Characterisation of the performance of cooperative networks in Ricean fading channels[EB/OL] (2016-12-22). [http://www.cl.com.ac.uk/research/dtg/tlce-Pub/public/ja316/paper\\_ver6.pdf](http://www.cl.com.ac.uk/research/dtg/tlce-Pub/public/ja316/paper_ver6.pdf).