

# LTE 系统中 femtocell 的动态频谱接入方法

左旭舟, 夏玮玮, 沈连丰

(东南大学 移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 针对 LTE 系统中 femtocell 的通信需求, 给出一种基于认知无线电技术的动态频谱接入方案, 提出一种上行频谱的感知方法, femtocell 可发现周围被 macrocell 用户占用的频谱, 还能进一步对这些频谱承载的业务类型进行识别, 并根据不同的业务类型, 选择不同的接入方法。如果 femtocell 检测到一段频谱承载的是语音业务, femtocell 采用跳频的方法接入这段频谱; 如果承载的是数据业务, femtocell 就采用功率控制的方法接入频谱。仿真结果表明, 该方法使 femtocell 实现对周围频谱承载业务的智能化识别和接入, 从而在满足 macrocell 用户不同业务类型信干噪比要求的前提下, 提高了 femtocell 小区的吞吐量。

**关键词:** LTE; femtocell; 频谱感知; 业务识别; 跳频; 功率控制

**中图分类号:** TN914

**文献标识码:** A

## Dynamic spectrum access method for femtocells in LTE

ZUO Xu-zhou, XIA Wei-wei, SHEN Lian-feng

(National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Dynamic spectrum access method for femtocells in LTE using cognitive radio method to meet the communication requirements was investigated. An uplink sensing method was proposed. By this method, femtocells could not only identify occupied spectrums but also identify service categories of those spectrums. A dynamic spectrum access method of power control and frequency hopping for femtocells that ensured a low pre-definable performance impact to macro users was proposed. The femtocell could adopt power control to access the spectrum that carried data service while adopt frequency hopping to access the spectrum that carried voice service. Simulation results show that the downlink throughput of the femtocell can be significantly increased by using proposed spectrum access method.

**Key words:** LTE; femtocell; spectrum sensing; service identification; frequency hopping; power control

### 1 引言

随着智能手机的普及和宽带业务的发展, 室内移动通信业务的使用量正在迅猛增加。数据显示, 70%的话音业务和数据业务产生于室内<sup>[1]</sup>。然而, 对于宏小区 (macrocell) 而言, 由于墙壁等引起的信号损耗, 往往导致其室内覆盖偏弱, 从而无法满足室内用户对话音和数据业务的服务质量 (QoS, quality of service) 要求。毫微微小区 (femtocell)

就是为解决蜂窝网络的室内覆盖问题而提出的<sup>[2]</sup>。Femtocell 是一种小型低功耗基站, 往往安装在室内, 并通过回程链路连接到核心网。Femtocell 可以承载室内用户的语音和数据业务, 相对于 macrocell, 其成本更低, 服务质量更好<sup>[3]</sup>。本文的研究背景为移动通信长期演进 (LTE, long term evolution) 系统, LTE 系统通过高效利用频谱资源从而提高数据传输速率, 从 R8 版本起就把 femtocell 融合在 LTE 系统的体系结构中。

收稿日期: 2013-10-16; 修回日期: 2014-03-17

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (2011ZX03005-004-03); 国家自然科学基金资助项目 (61171081, 61201175); 东南大学移动通信国家重点实验室自主研究课题基金资助项目 (2013A03)

**Foundation Items:** The Important National Science & Technology Specific Projects (2011ZX03005-004-03); The National Natural Science Foundation of China (61171081, 61201175); The Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2013A03)

当 femtocell 使用周围 macrocell 占用的频谱时,会产生同频干扰,降低系统性能。在传统的无线蜂窝网络避免同频干扰的方式是通过频谱划分和协调。然而,在 femtocell 广泛使用的情况下,由于频谱资源稀缺,这种方式会极大地降低频谱利用率。而且 femtocell 的位置往往是随机分布的,这种频谱划分的方法会非常复杂,由于工作量巨大而不可行。所以理想的 femtocell 的频谱使用应该不需要进行专门的规划,而是利用自适应的方式来选择使用的频段,从而与 macrocell 共存。

认知无线电 (CR, cognitive radio) 技术可被用来解决这个问题,此时将宏小区用户作为主用户 (MUE, macrocell user), femtocell 作为次用户,即在不干扰主用户的前提下应用频谱资源。首先, femtocell 通过对附近 MUE 的无线资源利用情况进行自动感知,从而获得周围无线频谱资源的使用情况,然后, femtocell 只利用周围 MUE 未使用的频谱或在一定干扰约束条件下利用 MUE 正在使用的频谱,就可以避免对 MUE 产生干扰<sup>[5]</sup>。因此,频谱感知是 femtocell 能动态接入 macrocell 频谱资源的最基本技术。频谱感知的核心是为了帮助 femtocell 在不需要和 macrocell 交互信息的情况下,获得 MUE 的频谱占用信息,然后结合对 MUE 的频谱使用习惯进行建模,从而有效和动态地利用 macrocell 频谱资源。

如何设计顽健的频谱感知方案是很多文献的研究内容。文献[6]研究了 femtocell 对周围 MUE 上行信号的检测方法,从而确定周围是否有活跃的 MUE 存在,然而没有说明如何具体检测和利用 MUE 使用的下行频谱。文献[7]主要对系统的下行信号,也就是 macrocell 基站的信号进行感知,文献[8]对全频谱进行扫描,目的都是为了检测出被占用的频谱。实际中这很难精确地检测到周围 MUE 对频谱的使用情况。因为如果只检测下行信号, femtocell 只能检测出大范围内的下行频谱使用情况,不能识别出附近 MUE 究竟使用哪些下行频谱。Femtocell 附近的 MUE 所占用的下行频谱可能只是的 macrocell 占用的下行频谱的很小一部分。此外,扫描整个下行链路频谱不仅能耗高而且也耗时。

在很多关于认知无线电的研究中,认知用户需要对频谱的占用情况进行建模,从而有效和动态地利用频谱资源。文献[9,10]对频谱的占用时间进行建模,假设频谱占用模型为 ON/OFF 传输模型,然后

根据 ON/OFF 模型信息来分析主用户实际的频谱占用情况,从而优化认知用户对频谱的使用。但是在实际的场景中, macrocell 的频谱占用特点随业务不同而不同,而且不同类型的业务对 QoS 的要求不一样。如果仅仅是用相同的 ON/OFF 频谱占用模型来分析 macrocell 的频谱占用,没有考虑不同业务的频谱使用特点不同,诸如 VoIP、浏览和下载业务的差异,则 femtocell 可能无法精确判断出其附近存在的 MUE 频谱利用情况。

如果 femtocell 在正确感知频谱的基础上,能够对频谱承载的 MUE 业务模型进行识别,从而根据不同的业务类型调整对频谱的接入方法,就能提高对频谱的利用效率和自身的业务吞吐量。在以前的文献中,为了减小对 macrocell 的干扰, femtocell 采用不同方式接入授权频谱。在文献[11,12]中, femtocell 采用自适应的方式控制发射功率来解决干扰问题。另外一种方法是通过随机的跳频技术来减少对 macrocell 的干扰<sup>[13]</sup>。

基于上述考虑,本文提出一种新的感知方法和动态频谱接入方案, femtocell 通过对 MUE 用户上行确认 (ACK, acknowledgement) 信息和数据信息的检测,来判断其下行频谱使用情况,同时识别该 MUE 的业务模型。本动态频谱接入方案实现的关键是发现 femtocell 附近处于工作状态 (或激活状态) 的 MUE,进而识别其业务类型。对待 MUE 不同的业务类型, femtocell 采用不同的方法接入频谱,在控制对 macrocell 干扰的情况下,尽量提高频谱利用率。在本方案中,考虑 macrocell 的 2 种基本业务类型: 话音业务 (如 VoIP 业务等) 和数据业务 (如 HTTP 业务等)。具体来说,当下行频谱没有承载周围 MUE 的业务时, femtocell 就可以以最大功率来利用这段频谱,以达到最大的吞吐量;当下行频谱承载有周围 MUE 的业务时, femtocell 根据其承载的 2 种业务类型来决定接入方法,比如当下行频谱承载的业务类型是 HTTP 业务, femtocell 在利用下行频谱时适合采用功率控制的方法;当下行频谱承载的是 VoIP 业务时, femtocell 在利用下行频谱时,只要避开被 macrocell 使用的频段即可,故 femtocell 采用跳频的方法比较适合。

## 2 网络模型和系统架构

本文的研究背景为 LTE 系统,图 1 所示为给出 LTE 系统中 macrocell 与 femtocell 的共存网络架构

模型，其中，macrocell 以高功率的基站为中心，覆盖范围较大，服务较多的 MUE；femtocell 往往处于室内，发射功率较低，主要为室内的较少授权用户提供服务。如图 1 所示，femtocell 处于 macrocell 的覆盖范围内，周围可以有若干个其他 femtocell。femtocell 与 macrocell 同步，且应用相同的载波和时隙方案，工作在相同的频谱上。

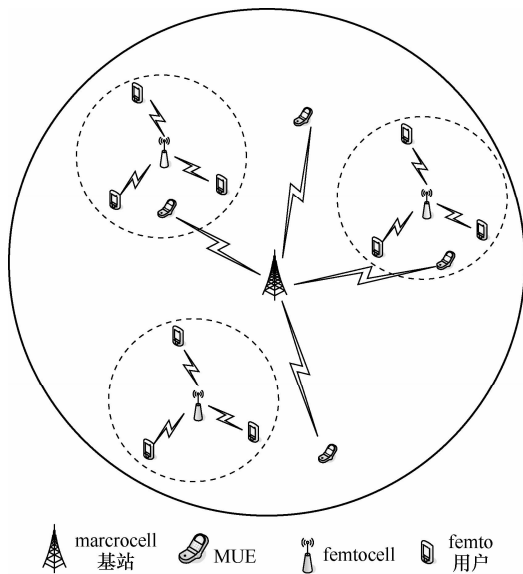


图 1 LTE 系统中 macrocell 与 femtocell 的共存网络架构模型

在 3GPP LTE 协议中，LTE 系统在传输时，理论上最小的资源分配单元为一个持续 1 ms 的 180 kHz 的时频资源块（RB，resource block）<sup>[14,15]</sup>。但是在实际应用中，为减小资源分配的复杂度，大多数传输采用持续调度时频资源块的方式。当一个 RB 被分配给某一业务时，会被一直占用到该业务结束<sup>[15,16]</sup>。

图 2 所示为 LTE 系统传输时的频谱分配特征，其数据传输采用混合自动反馈重传（HARQ，hybrid automatic repeat request）机制。当 MUE 在子帧  $n$  接收到 macrocell 基站发送的下行链路数据块后，需要在 4 ms 后，即子帧  $n+4$  后在上行链路上反馈确认 ACK 信息。根据 HARQ 方案，如果 macrocell 在进行下行传输后没有接收到来自 MUE 的 ACK 反馈，它会认为先前的传输数据失败，从而在 4 ms 后重新发送数据。当 macrocell 在收到 ACK 反馈后，在子帧  $n+8$  后继续发送数据分组。

文献[16]研究了无线蜂窝网络中各类基本的业务类型。不同业务类型的持续时间和占用带宽不同，本文的研究范围为其中 2 个基本的类型：数据业务和语音业务。

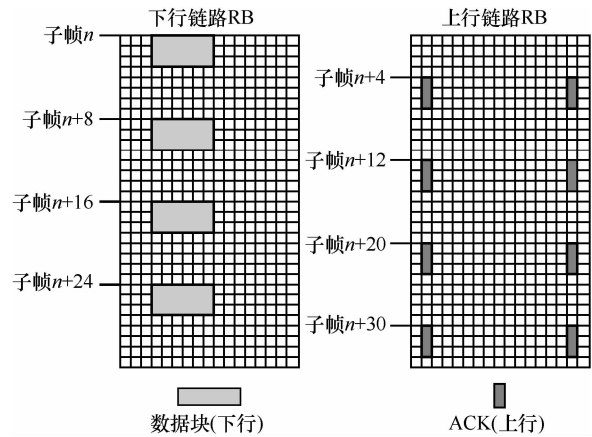


图 2 LTE 系统中传输时的频谱分配特点

业务类型 1：以数据为主，如网页浏览等，其特点是对频谱的占用较多，但持续时间较短。

业务类型 2：以语音为主，其特点是对频谱的占用很小，且持续时间较长。

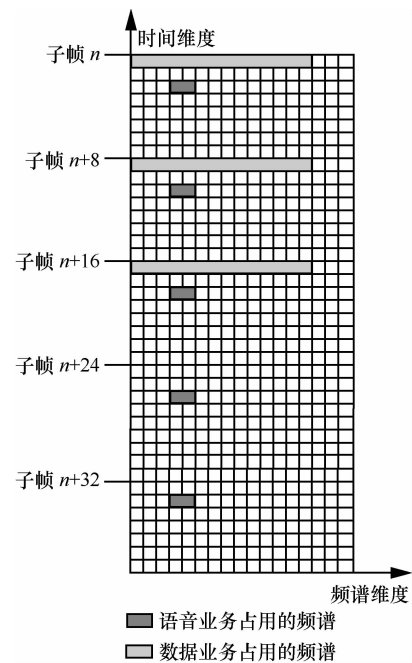


图 3 2 种业务类型的频谱占用特点

图 3 和图 4 给出了 2 类业务类型的时频占用情况，可以看出 2 类业务的时频占用特点。即对于以数据业务而言，其特点是以下行的数据传输为主，上行除了对上行传输的 ACK 确认信息外，几乎没有数据传输；对于以语音业务而言，其特点是上、下行的频谱使用是对称的，上、下行都有大小相同的数据分组在传递，也占用大小相同的频谱。

由于 femtocell 处于室内，发射功率较低，其信号到 macrocell 基站的损耗大，因此 femtocell 在上

行信道对 macrocell 的干扰可以忽略。在下行信道上, 当 MUE 在 femtocell 附近时, 会受到 femtocell 的干扰。因此, femtocell 进行频谱感知的目的就是检测出哪些下行信道的 RB 正在被附近的 MUE 使用, 从而避免对其造成干扰。下面将专门讲述 femtocell 的感知方法和动态接入方案。

### 3 感知方法及动态频谱接入方案

#### 3.1 基于上行 ACK 信号的频谱感知和业务类型判断

在本文的方案中, femtocell 基站通过能量检测对上行频谱上的 MUE 的信号进行检测。在子帧  $n$ , femtocell 基站扫描上行频谱, 如果在某个 RB 上的接收到的信号功率超过预先设定的门限, 那么认为该 RB 上存在 MUE 的信号, 否则, 认为上行频谱上不存在 MUE 的信号。由于检测对象的信号强度较高, 为简化分析, 可以合理假设能量检测是无误的。

在时隙  $n$ , femtocell 扫描检测到上行链路的第  $k$  个 RB 的能量为

$$Y_{n,k} = \frac{1}{T} \int_T |r_{n,k}(t)|^2 dt \quad (1)$$

其中,  $r_{n,k}(t)$  表示时隙  $n$  上行链路中第  $k$  个 RB 的信号,  $T$  是对应一个 RB 的扫描时间。然后, femtocell 将  $Y_{n,k}(t)$  与预先设定的门限  $\lambda$  相比较, 从而做出判断。

如果在子帧  $n$  时, 上行的 ACK 信息被检测出来, 那么对应的下行链路传输就发生在子帧  $n+4$  时刻。这样, femtocell 基站通过对上行链路 ACK 的认知, 来推断下行信号的存在时间, 从而 femtocell 附近的 MUE 的下行传输的时隙可以被检测出来。

传统上, femtocell 通过监听 macrocell 基站的下行信号来获得下行频谱的占用情况。在实际中, 这很难精确地检测到 femtocell 周围 MUE 对频谱的

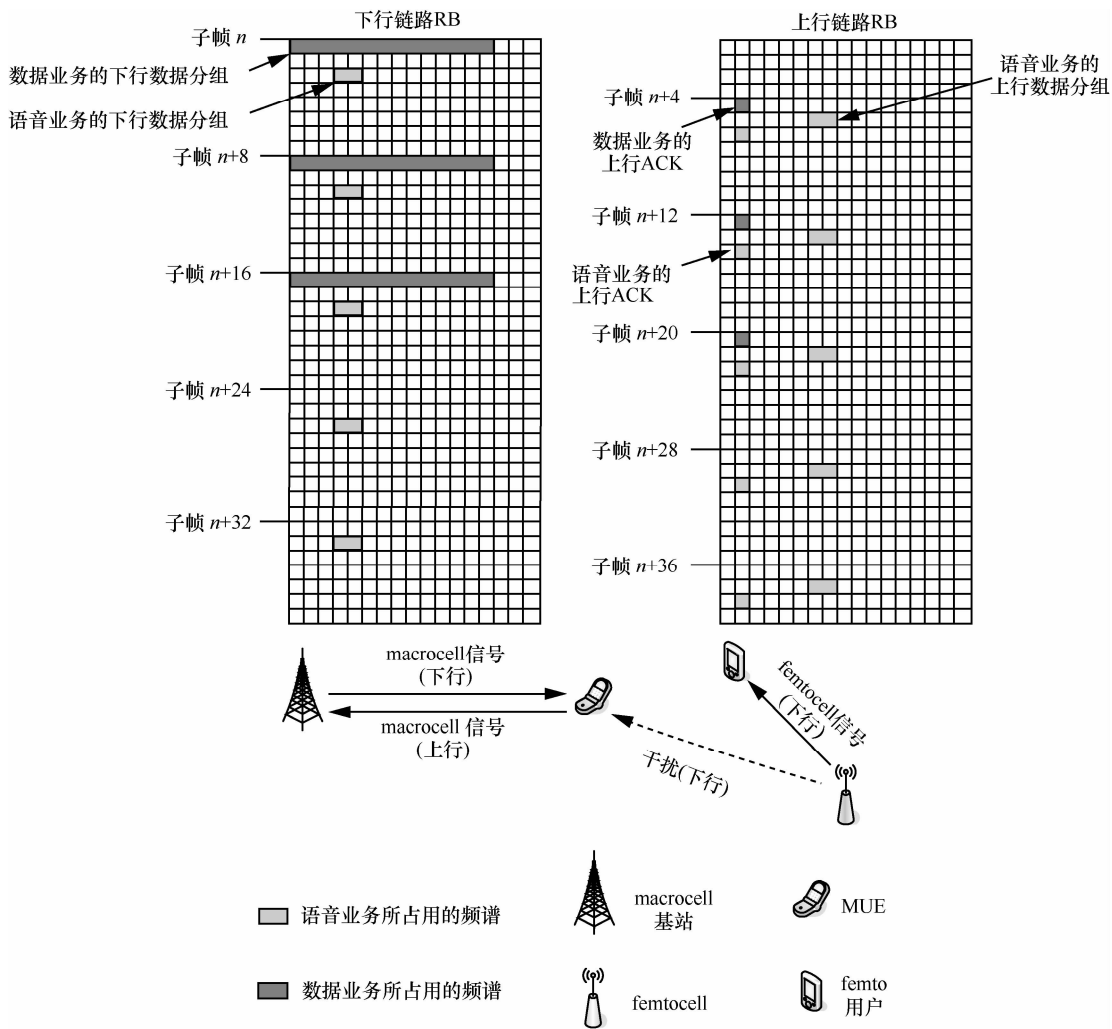


图 4 2 种业务的频谱占用和干扰场景

占用情况。如图 5 所示，macrocell 基站要为其覆盖范围内的多个 MUE 提供服务，而每个 MUE 在不同的频谱接收下行数据。如果只检测下行信号，femtocell 只能检测出大范围的下行频谱使用情况，但是 femtocell 真正需要检测的是 MUE1 的频谱使用情况，而 MUE1 使用的频谱可能仅是这些被占用的下行频谱中的一小部分，而且难以被单独识别出来。

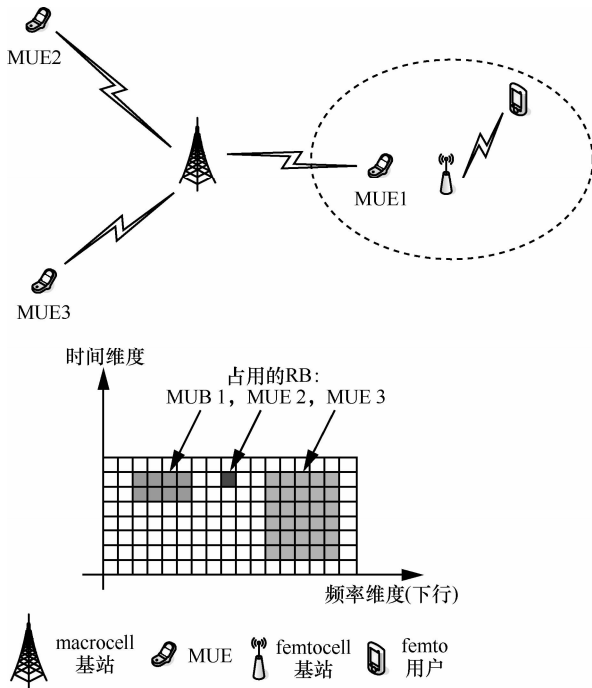


图 5 MUE 对下行频谱的占用

然而，在上行链路，femtocell 很容易检测出周围 MUE 的上行信号。通常情况下，在 femtocell 的覆盖范围内的 MUE 上行信号到达 femtocell 基站时，其信号强度较强，比较容易被检测出来。而其覆盖范围之外 MUE 的上行信号由于穿透衰减和路径损耗，到达家庭基站的强度较低。所以，用能量检测就可以比较容易地检测出在 femtocell 覆盖范围内 MUE 用户的上行信号。

图 6 给出本文感知方案和接入方案的大概时序。首先，在上行感知中，femtocell 基站会对上行链路的 RB 进行周期性的扫描，包括确定是否存在上行 ACK 和上行数据分组。在时隙  $n$ ，如果检测到上行 ACK 信号的存在，可以反向说明周围有 MUE 用户在从 macrocell 基站接收数据，也就是说有下行频谱被占用，可以推断出下行频谱被占用的具体时隙为  $n+4$ 。

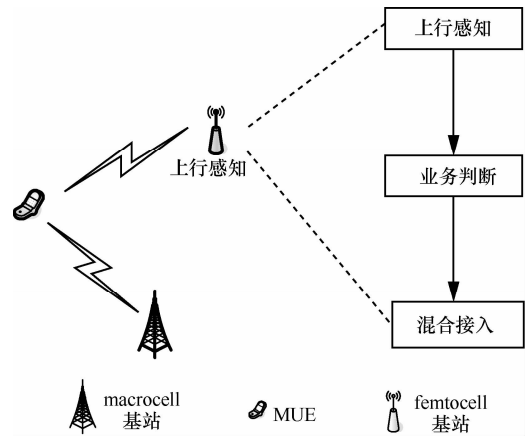


图 6 感知时序

然后，在业务判断中，femtocell 基站会根据检测到的 MUE 上行信号，对 MUE 的业务类型进行判断。判断的原理还是根据 2 种业务类型数据分组和 ACK 的对应特点。从图 4 中可以看出，语音业务的 ACK 信号和数据分组在上行链路中基本存在对称关系，也就是说，上行链路的 RB 既承载该业务的 ACK，也承载该业务的数据分组。所以，在时隙  $n$  时，当 femtocell 检测到上行频谱中存在 ACK 信号时，如果能在上行 RB 中同时检测到与该 ACK 能量相若的数据分组，而且数据分组的带宽占用并不太大的话，那么，就可以判断是语音业务。而数据业务的 ACK 信号和数据分组在上行链路中就不存在对称关系，往往只有 ACK 信号，而没有数据分组。也就是说，在时隙  $n$  时，当 femtocell 检测到上行频谱中存在 ACK 信号时，如果在上行频谱中没有能量相若的数据分组存在，那么就判断该 ACK 信号对应的业务是数据业务。

最后，femtocell 根据 LTE 系统业务频谱占用的特点来采取接入方式。LTE 系统作为一个多业务应用平台，承载了语音和数据等对 QoS 要求不同的业务类型，因此需对其不同业务类型区分保障。

### 3.2 基于业务类型判断的混合式频谱接入

在上一节中，femtocell 基站通过对上行频谱的感知，可以判断出，在某个时隙时，其覆盖范围内的 MUE 是否有业务在进行，以及相应的业务类型。当下行频谱没有承载周围 MUE 的业务时，femtocell 就可以最大功率来利用这段频谱，从而达到最大的吞吐量。

然而，当下行频谱承载周围 MUE 的业务时，femtocell 基站虽能判断其承载的业务类型，却无法判断下行频谱中的有哪些 RB 被周围 MUE 的业务

使用, 哪些 RB 又是空闲的。在传统的 CR 方法中, 认知用户一旦发现下行频谱中有 RB 承载主用户的业务, 则放弃对该段频谱的使用, 这就限制了 femtocell 的下行吞吐量, 尤其是 femtocell 周围 MUE 密度较大的时候。

在本文提出的方案中, 为了提高频谱的利用率和 femtocell 的吞吐量, 当 femtocell 发现下行频谱中承载有 MUE 的业务时, 在衡量 femtocell 在下行频谱中对周围 MUE 的干扰下, 来决定接入的方式和相关的参数, 接入的前提是要 femtocell 对周围 MUE 的干扰要控制其所能容忍的范围之内。

Femtocell 根据 LTE 系统业务频谱占用的特点来采取接入方式, 为干扰减小提供了一个新思路。LTE 系统作为一个多业务应用平台, 承载了语音和数据等对 QoS 要求不同的业务类型, 因此需对其不同业务类型区分保障。

对于下行频谱, femtocell 根据其承载的 2 种业务类型来决定接入方法。当下行频谱承载语音业务时, 如图 3 所示, 由于在单个时隙内, 语音业务只占用下行频谱中很少的 RB, femtocell 只要避开使用的这些被占用的 RB 即可, 故 femtocell 基站采用跳频的方法接入下行频谱比较适合; 当下行频谱承载的是数据业务时, 如图 3 所示, 由于在单个时隙内, 数据业务要占用下行频谱中较多的 RB, femtocell 适合采用功率控制的方法接入下行频谱, 来控制对该业务的干扰。为了利用下行频谱, femtocell 采用针对周围 MUE 不同的业务类型采用不同的接入方式, 具体说明如下。

#### 1) 功率控制方法

如果在一个时隙内, 一旦检测到下行频谱中承载有数据业务, 那么 femtocell 将采用功率控制的方法来接入下行频谱。在本方案的功率控制方法中, femtocell 会根据感知到的信息, 估计其对周围 MUE 的干扰, 以自适应的方式来调整发射功率, 从而把干扰控制在 MUE 可承受的干扰范围内。

对于处于激活状态的 MUE, 在下行第  $k$  个 RB 上的信干噪比 (SINR, signal to interference and noise ratio) 计算公式为

$$SINR^k = \frac{S}{N_0 + I_{fem}} = \frac{P_{mac} \frac{1}{F_{DL} L_1}}{P_{fem} \frac{1}{F_{DL} L_2} + N_0} \quad (2)$$

其中,  $S$  为 MUE 在第  $k$  个 RB 上接收到的基站信号

功率,  $I_{fem}$  为 MUE 在第  $k$  个 RB 上接收到的 femtocell 干扰信号功率,  $N_0$  为噪声,  $P_{mac}$  为 macrocell 基站发射功率,  $P_{fem}$  为 femto 基站发射功率,  $F_{DL}$  为下行频谱的 RB 数目,  $L_1$  为 macrocell 对 MUE 用户的路损,  $L_2$  为 femtocell 对 MUE 用户的路损。

由于 macrocell 基站在广播信道的发射功率是一个固定的值, 因此 femtocell 基站可以通过在广播信道接收到的 macrocell 基站功率, 确定自身到 HeNB 的路径损耗。由于 femtocell 的覆盖范围有限, 这个路径损耗可以等同于周围 MUE 到 macrocell 基站的路径损耗。

首先, femtocell 接收来自 macrocell 广播信道的信号, 然后估算路损  $L_1$ 。

$$L_1 = \frac{E_1}{R_1} \quad (3)$$

其中,  $E_1$  是 macrocell 基站信标 (beacon) 发射能量, 其大小可以从 macrocell 基站的广播信息中得到;  $R_1$  是 femtocell 基站接收到的 beacon 能量。

同样, femtocell 监听来自 MUE 的信号, 然后估计该 MUE 到 femtocell 的路损  $L_2$ 。

$$L_2 = \frac{E_2}{R_2} \quad (4)$$

其中,  $E_2$  是 MUE 的 ACK 信号的发射能量, 能量大小也可以预先为 femtocell 所知;  $R_2$  是 femtocell 基站接收 MUE 的 ACK 信号的能量。

从上式可知, 可以自适应 femtocell 的发射功率来保证 MUE 的在频谱上 SINR 高于门限值, 从而把干扰控制在 MUE 可承受的干扰范围内

$$SINR^k \geq \gamma_{th} \quad (5)$$

其中,  $\gamma_{th}$  是承载数据业务的 RB 所要求的最低门限。

Femtocell 的传输功率可由式(6)决定。

$$P_{fem} = \left( \frac{P_1}{\gamma_{th} F_{DL} L_1} - N_0 \right) F_{DL} L_2 \quad (6)$$

#### 2) 跳频方法

如果在某个时隙的下行频谱中只承载有语音业务, 那么 femtocell 采用跳频的方式使用下行频谱, 避免对 MUE 的干扰。

通过在某一时刻的下行频谱中, 当 femtocell 和周围的 MUE 使用相同的 RB 时, 会造成相互干

扰，也就是碰撞（collision）。由于距离很近，这种碰撞会破坏 MUE 在共同使用的 RB 上的下行数据接收。

所以，控制对于 MUE 干扰的核心是控制碰撞概率。假设对碰撞概率的约束条件为

$$\eta \leq \gamma_2 \quad (7)$$

其中， $\eta$  为碰撞概率，也就是在某一时刻，femtocell 和周围 MUE 使用相同的 RB 的概率； $\gamma_2$  为确保 macrocell 用户不受到干扰而允许的碰撞概率最大值。

对于 femtocell 基站而言，采用跳频方法时，在不同时刻使用的 RB 是不同的，如图 7 所示。

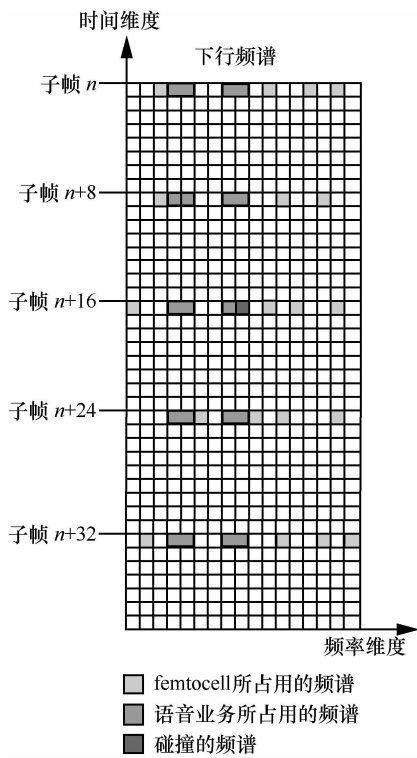


图 7 femtocell 采用跳频方法接入下行频谱

可以推出，这时的碰撞概率为

$$\eta = 1 - \frac{C_{F_{DL}}^{kF_2} C_{F_{DL}}^{F_H}}{C_{F_{DL}}^{F_H}} \quad (8)$$

其中， $F_{DL}$  为下行频谱中的 RB 数目， $F_2$  为语音业务在一个时隙中用到的 RB 数目， $F_H$  为 femtocell 采用跳频方法时在一个时隙用到的 RB 数目， $k$  为在这个时隙中检测到的业务类型 2 的个数。在图 7 中， $F_{DL} = 17$ ， $F_2 = 2$ ， $F_H = 4$ ， $k = 2$ 。

在干扰约束  $\eta$  下，可以找到  $F_H$  的最大值，这样可以最大化吞吐量，即

$$\begin{aligned} & \max F_H, \\ & \text{满足 } 1 - \frac{C_{F_{DL}}^{kF_2} C_{F_{DL}}^{F_H}}{C_{F_{DL}}^{F_H}} \leq \gamma_2 \end{aligned} \quad (9)$$

可以看出，femtocell 在每个时隙使用的 RB 数目  $F_H$  是根据在这个时隙中检测到的业务个数  $k$  而变的。如果  $k$  比较大，那么为了避免碰撞， $F_H$  就比较小，反之亦然。

### 3.3 femtocell 的容量计算

本节对 femtocell 采用混合频谱接入方法的容量进行估算。可以用排队理论来建立 MUE 的业务对下行频谱的使用模型。

如图 8 所示，femtocell 周围 MUE 的数据业务和语音业务到达的规律分别服从参数为  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  的泊松分布，对频谱的占用时间服从参数为  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  的指数分布。

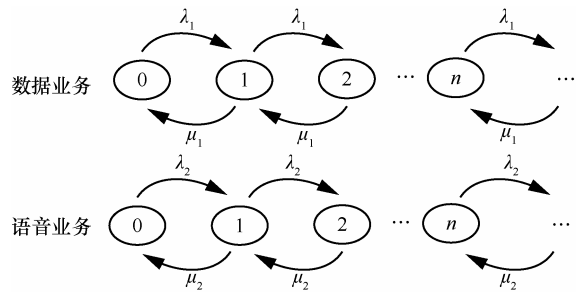


图 8 MUE 的业务模型

语音业务和数据业务的频谱使用可以看成是相互独立的，因此，根据排队论模型，可以计算出在下行频谱中语音业务和数据业务数量的概率。

$$\begin{cases} P_0^d = 1 - \frac{\lambda_1}{\mu_1} \\ P_n^d = \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda_1}{\mu_1}\right), n \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} P_0^v = 1 - \frac{\lambda_2}{\mu_2} \\ P_n^v = \left(\frac{\lambda_2}{\mu_2}\right)^n \left(1 - \frac{\lambda_2}{\mu_2}\right), n \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中， $P_n^d$  是 femtocell 周围的下行频谱中承载  $n$  个数据业务的概率， $P_n^v$  是 femtocell 周围的下行频谱中承载  $n$  个语音业务的概率。

Femtocell 在下行信道的容量的期望表示为

$$R = P(H_1)C_1 + P(H_2)C_2 + P(H_3)C_3 \quad (12)$$

其中,  $P(H_1)$ 、 $P(H_2)$  和  $P(H_3)$  分别是针对在一个时隙里的下行频谱, femtocell 采用功率控制方法接入、采用跳频接入和最大功率接入的概率;  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  分别是这 3 种情况下 femtocell 的下行容量。若采用混合接入方法, 则式 (12) 中各参量可分别表示为

$$\begin{cases} P(H_1) = 1 - P_0' \\ P(H_2) = P_0'(1 - P_0'') \\ P(H_3) = P_0'P_0'' \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} C_1 = F_{DL} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{fem}}{P_{mac} + \sigma^2} \right) \\ C_2 = F_H \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{max}}{\sigma^2} \right) \\ C_3 = F_{DL} \text{lb} \left( 1 + \frac{P_{max}}{\sigma^2} \right) \end{cases} \quad (14)$$

#### 4 仿真结果与分析

对所提出的动态频谱接入模型的吞吐量性能进行评估, 并与其他方案进行比较。

仿真参数如表 1 所示, 仿真参数多参照 3GPP LTE 规范定义。在仿真中, LTE 网络由 macrocell 和 femtocell 重叠组网而成。考虑一个 macrocell 覆盖半径为 500 m, 在其覆盖范围内均匀分布有 10 个 femtocell。网络工作在 2 GHz, 系统带宽选择 5 MHz。如表 1 所示, 宏小区用户以固定等功率发送, 且采用全向天线。每个 macrocell 有 100 个宏小区用户。femtocell 均匀分布在 macrocell 覆盖范围内, 其覆盖半径为 20 m, femto 用户均匀分布在 femtocell 覆盖范围内。

在仿真中, 采用奥村-哈特模型计算室外路损, 并利用 COST-231 模型计算室内路损。假设穿墙损耗为 20 dB。另外, 假设 femtocell 采用闭合式接入策略, 即只对其鉴权用户提供服务。特别是, 考虑每个 femtocell 是满负荷。

本文比较的 2 个其他方案都不采用业务识别, 方案一是当 femtocell 判定下行频谱中存在 MUE 的业务后, 直接采用自适应功率控制的方法接入下行频谱; 方案二是当 femtocell 判定下行频谱中存在 MUE 的业务后, 直接采用跳频的方法接入下行频谱。

参数	取值
macrocell 半径	500 m
femtocell 半径	20 m
eNB 天线增益	14 dB
HeNB 天线增益	9 dB
UE/HUE 天线增益	0 dB
eNB 发射功率	46 dBm
HeNB 最大发射功率	23 dBm
UE/HUE 发射功率	23 dBm
UE 数	100
HUE 数	10
femtocell 数	10
热噪声	-174 dBm/Hz
UE/HUE/HeNB 噪声系数	5 dB
BS 噪声系数	7 dB
对数正态阴影	8 dB
穿墙损耗	20 dB

本文仿真的业务类型有 2 种: 业务 1 是 HTTP 业务, 代表数据业务; 业务 2 是 VoIP 业务, 代表语音业务。图 9 所示为在业务 1 的数量和业务 2 的相同情况下 (场景 1), 随着 MUE 的活跃度变化的 3 种方案 femtocell 的吞吐量比较。从图中可以看到, 动态频谱接入方案与其他 2 种不进行业务识别的方案比较, 容量上有较大提升。这是因为动态频谱接入方案是以 MUE 的频谱使用情况和空间条件来考虑如何利用频谱。以积极的方式利用频谱, 其他 2 种方案以较为保守的方式利用频谱。

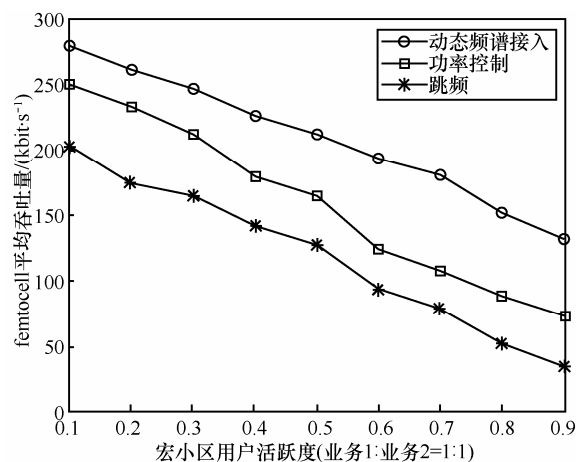


图 9 femtocell 的平均吞吐量 (场景 1)

图 10 所示为业务 1 的数量 3 倍于业务 2 情况



下(场景 2),随着 MUE 的活跃度变化的 3 种方案 femtocell 的吞吐量比较。从图中可以看到,这时功率控制方案在性能上占了较大优势,使 femtocell 在吞吐量上有较大提升,从图 10 中可见,当业务 2 数目很少时(图中两曲线交点之前),功率控制方案的性能甚至好过了动态频谱接入方案,但是当业务 2 逐渐增多后,由于有业务 2 存在的频谱上,功率控制接入的性能不如跳频接入,所以动态频谱接入方案逐渐开始展现优势。

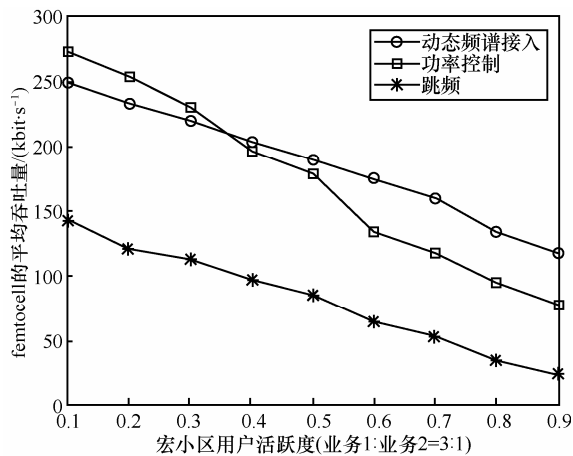


图 10 femtocell 的平均吞吐量 (场景 2)

图 11 所示为业务 2 的数量 3 倍于业务 1 的情况下(场景 3),随着 macrocell 用户的活跃度变化的 3 种方案 femtocell 的吞吐量比较。从图中可以看到,这时功率控制方案在性能和跳频方案大致相等,而动态频谱接入方案上占了较大优势。这是因为跳频方案对业务 2 的频谱利用率较高,而针对业务 1 的频谱利用率较低,然而在业务 1 的数量逐渐增加后,功率控制方案对频谱的利用率逐渐会超过跳频方案。

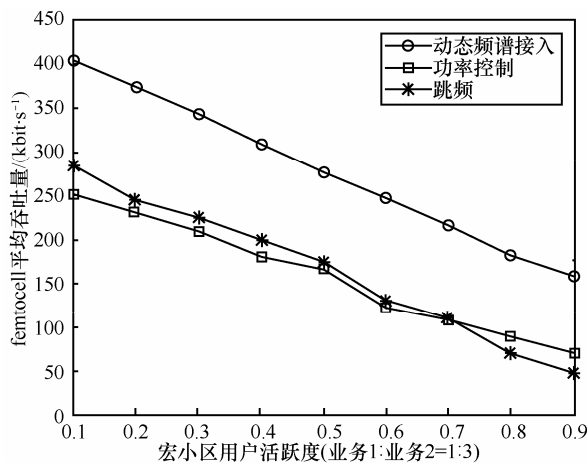


图 11 femtocell 的平均吞吐量 (场景 3)

## 5 结束语

针对 LTE 系统中 femtocell 的通信需求,本文给出了一种基于认知无线电技术的动态频谱接入方案。首先,本方案通过对上行链路中的 ACK 信号和数据信息来进行联合感知,从而得知周围 macrocell 用户的下行频谱使用情况;比起单纯通过感知 macrocell 基站信号来探究周围 macrocell 用户的下行频谱使用情况而言,这种方法能发现更多的空闲频谱,从而提高 femtocell 的吞吐量。其次,本方案在感知频谱的基础上,对频谱承载的业务类型进行识别,根据业务类型的特点决定对频谱的接入方法,从而在对 macrocell 用户干扰远低于允许值的前提下,提高了 femtocell 的吞吐量。最后,本文通过系统仿真来比较 femtocell 在混合接入的方案和单纯的功率控制和跳频方法下的吞吐量,仿真结果显示,该方法可在满足 macrocell 用户不同业务类型不受干扰的前提下,提高 femtocell 小区的吞吐量,实现对频谱承载业务的智能化识别,系统性能明显提高。

## 参考文献:

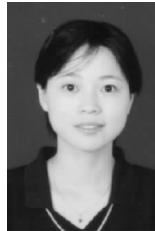
- [1] ZHANG J, DE L A, ROCHE G, *et al.* Femtocells-Technologies and Deployment[M]. Wiley, 2010.
- [2] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J, GATHERER A. Femtocell networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 59-67.
- [3] ROCHE G, *et al.* Access control mechanisms for femtocells[J]. IEEE Communications Magazine, 2010,48(1):33-39.
- [4] LOPEZ-PEREZ D, VAICARCE A, ROCHE G DE LA, *et al.* OFDMA femtocells: a roadmap on interference avoidance[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(9): 41-48.
- [5] LIEN S Y, TSENG C C, CHEN K C, *et al.* Cognitive radio resource management for QoS guarantees in autonomous femtocell networks[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. 2010.1-6.
- [6] HARJULA I, HEKKALA A. Spectrum sensing in cognitive femto base stations using welch periodogram[A]. 2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)[C]. 2011.2305-2309.
- [7] BOSE S, NATARAJAN B. Reliable spectrum sensing for resource allocation of cognitive radio based WiMAX femtocells[A]. 2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)[C]. 2012.889-893.
- [8] LIEN S Y, TSENG C C; CHEN K C, *et al.* Cognitive radio resource management for QoS guarantees in autonomous femtocell networks[A]. 2010 IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. 2010.1-6.

- [9] KIM H, SHIN K G. Efficient discovery of spectrum opportunities with MAC-layer sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Trans on Mobile Comp, 2008, 7(5): 533-545.
- [10] XU Y, SUN Y, LI Y, *et al.* Joint sensing period and transmission time optimization for energy-constrained cognitive radios[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2010, doi:10.1155/2010/8/18964.
- [11] JO H S, MUN C, MOON J, *et al.* Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks[J]. IEEE Trans on Wireless Comm, 2009, 8(10):4906-4910.
- [12] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J, SHEN Z, *et al.* Power control in two-tier femtocell networks[J]. IEEE Trans on Wireless Comm, 2009, 8(8):4316-4328.
- [13] PUTZKE M, WIETFELD C. Self-organizing ad hoc femtocells for cell outage compensation using random frequency hopping[A]. 2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)[C].2012.315-320.
- [14] 3GPP TS 36.213 V10.2.0 (2011-06). Technical Specification, 3rd GenerationPartnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network;Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures, (Release 10)[S].
- [15] R1-062714, 3GPP. Further Investigations on Resource Block Sie for E-UTRA[S].
- [16] R1-062819, 3GPP. Considerations for minimum TTI size for downlink LTE[S].

## 作者简介:



左旭舟(1983-),男,四川成都人,东南大学博士生,主要研究方向为认知无线电系统、LTE系统等。



夏玮玮(1975-),女,江苏句容人,博士,东南大学副研究员,主要研究方向为无线网络资源管理和性能评估、无线自组织网络等。



沈连丰(1952-),男,江苏邳州人,东南大学教授、博士生导师,主要研究方向为移动互联网、移动自组织网络、短距离无线通信与泛在网络等。