

基于认知无线电的LTE系统频谱感知方法

左旭舟, 夏玮玮, 沈连丰

(东南大学移动通信国家重点实验室 南京 210096)

【摘要】提出一种认知无线电技术框架下LTE系统中femtocell的频谱感知方法。在该方法中, femtocell对上行频谱进行能量检测, 通过一种两步决策的频谱感知技术, 发现周围正在承载业务的macrocell用户, 并进一步对其承载的业务类型进行识别, 根据不同的业务类型, 调整感知周期, 使其在femtocell取得的吞吐量和消耗的感知能量之间进行有效折中。仿真结果表明, 该方法可在控制对macrocell用户的干扰和控制感知开销的情况下, 提高femtocell小区的吞吐量, 提高系统性能。

关键词 认知无线电; femtocell; 能量检测; 感知开销; 感知周期; 频谱感知; 业务识别

中图分类号 TN923

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.005

Spectrum Sensing Method Based on Cognitive Radio in LTE Systems

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

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

Abstract A spectrum sensing method in the femtocell of long time evolution (LTE) system is proposed. In this method, the femtocells sense the uplink spectrum via energy sensing and discover the active macrocell users through two-steps decision spectrum sensing method. The femtocells identify the traffic types of these active macrocell users and adjust the sensing period according to different traffic types to implement the tradeoffs between throughput and sensing overhead of femtocells. Simulation results indicate that this method can improve the femtocell throughput and system performance when the interference to macrocell users and sensing overhead are effectively controlled.

Key words cognitive radio; femtocell; energy sensing; sensing overhead; sensing period; spectrum sensing; traffic identification

随着无线通信的发展, 频谱资源变得越来越宝贵, 而传统的固定频谱资源分配方式导致大部分授权频段的利用率很低^[1]。认知无线电(cognitive radio, CR)技术被认为是提高授权频段利用率的最有前景的解决方案。在CR中, 次用户通过频谱感知, 在不影响主用户通信质量的情况下使用主用户暂时未使用的授权频段, 提高了频谱效率。

在长期演进(long time evolution, LTE)系统中, 为解决蜂窝网络的室内覆盖问题, 毫微微小区(femtocell)被提出^[2]。Femtocell是一种小型低功耗基站, 通常安装在室内。在宏小区(macrocell)的覆盖范围内, femtocell的位置是随机分布的。采用传统的集中频谱划分方式决定femtocell使用频段非常复杂, 且不利于控制干扰。Femtocell可以通过认知无线电技术使用频谱, 此时将macrocell用户作为主用户(macrocell user, MUE), femtocell作为次用户, 即

在不干扰主用户的前提下应用频谱资源。

频谱感知是认知无线电的最基本技术。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, 获得周围MUE的频谱占用信息。已有很多文献对频谱感知进行了研究。文献[3]对全频谱进行扫描, 目的是为了检测出被占用的频谱, 但在本文的场景中, 这很难精确地检测到周围MUE对频谱的使用情况。文献[4]研究了femtocell对主用户上行信号的检测方法, 然而没有说明如何具体确定MUE使用的下行频谱。

对频谱感知的研究不仅局限于感知方法, 还涉及到感知周期的优化, 其目的是最大化次用户的吞吐量收益和减小频谱感知的能量损耗。文献[5]研究感知周期时间的优化方法, 但是没有考虑频谱感知带来的能量损耗。文献[6-9]对主用户的频谱占用时间进行建模, 然后根据模型信息分析主用户的实际

收稿日期: 2014-05-24; 修回日期: 2014-06-25

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX03005-004-03); 国家自然科学基金(61171081, 61201175)

作者简介: 左旭舟(1983-), 男, 博士生, 主要从事认知无线电、LTE系统方面的研究。

频谱占用情况，从而优化认知用户对频谱的感知周期。然而上述研究没有考虑到在实际的场景中，主用户不同类型的业务对频谱占用的时间特点不一样，如VoIP、浏览和下载业务的差异，采用完全相同的模型难以对主用户频谱占用时间进行精确建模。

基于上述考虑，本文提出一种基于LTE系统的频谱感知方法。该方法有如下特点：

1) 为了检测出周围的MUE用户，femtocell采用一种两步决策的感知方法。第一步判断MUE用户信号的存在与否，第二步判断MUE用户是否位于主用户发射机的保护区域内。这样相比于传统的单一检测方法，频谱感知在空间维度上得到了增强。

2) 基于LTE系统的特点，femtocell通过对MUE用户上行确认(acknowledgement, ACK)信号和数据信息的检测，判断其下行频谱使用情况，同时识别该MUE的业务模型。

3) 基于MUE用户承载的业务类型，femtocell调整频谱感知的周期，在控制对MUE用户的干扰和控制感知能量开销的情况下，提高femtocell小区的吞吐量。

1 网络模型和系统架构

LTE系统的网络模型可以被看作一个双层网络共存的模型，如图1所示。其中，macrocell以其基站为中心，为大面积内的MUE提供服务；femtocell以小型基站为中心，为室内场所的用户提供服务。如图所示，macrocell的覆盖范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，工作在相同的授权频谱上。

在3GPP LTE协议中，时频资源块(resource

block, RB)^[10-11]是LTE系统理论上最小的资源分配单元，时域上为1 ms，频域上为180 kHz。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^[11-12]。

LTE的数据传输采用混合自动反馈重传(hybrid automatic repeat request, HARQ)机制。当用户在子帧 n 接收到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，如果基站在进行下行传输后没有接收到来自用户的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。基站在收到ACK反馈后，在子帧 $n+8$ 后继续发送数据包。

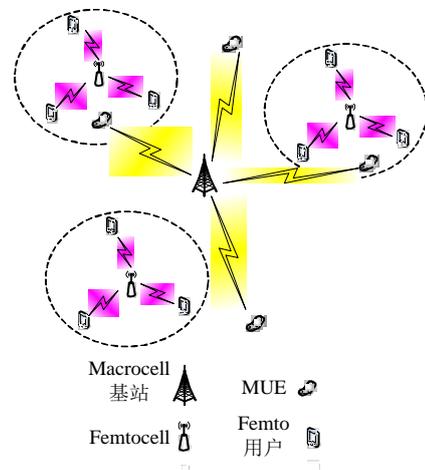


图1 LTE系统中macrocell与femtocell的共存网络架构模型

如图2所示，LTE系统中有两种基本的业务类型：语音业务和数据业务。其持续时间不同，本文将在下一节根据这个特点来调整感知周期。

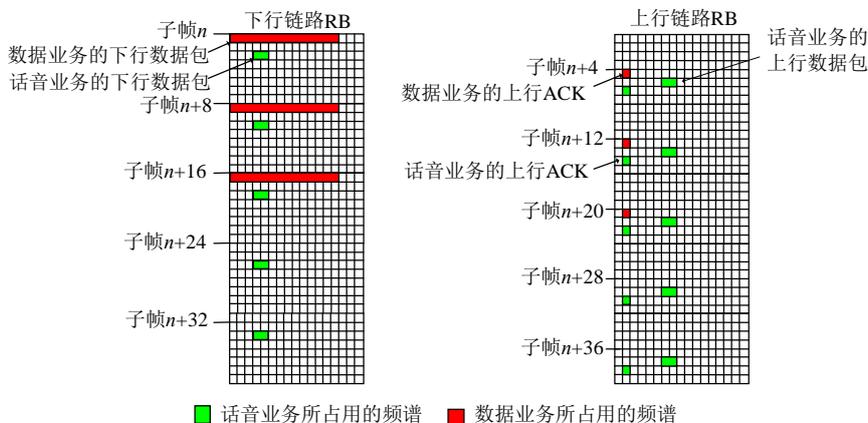


图2 LTE系统中传输时的频谱分配特点

2 感知方法及感知周期优化

2.1 基于二步检测的频谱感知

在本文的方案中, femtocell基站通过能量检测对上行频谱上的MUE信号进行检测。与一般检测方案不同的是, 该方案不仅要检测MUE信号的存在性, 还要判断MUE用户的位置是否在femtocell的覆盖范围内, 所以检测方法为两步: 1) femtocell首先判断MUE用户信号的存在与否。在子帧 n , femtocell基站检测上行频谱, 如果在某个RB上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信号, 判断为主用户存在; 否则判断主用户不存在。2) 判断MUE用户是否位于其覆盖范围内。如果判断用户MUE位于覆盖区域内, 那么认为该RB不能为femtocell使用, 否则认为可以使用。下面给出具体步骤。

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

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

式中, $r_{n,k}(t)$ 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 λ_1 相比较, 从而做出判断。

这样, 检测概率和虚警概率可以分别表示为:

$$P_{de1} = p(Y > \lambda_1 / H_1) \quad (2)$$

$$P_{fa1} = p(Y > \lambda_1 / H_0) \quad (3)$$

式中, H_1 和 H_0 分别表示MUE信号存在与否。

决策统计量 Y 服从的分布为:

$$Y \sim \begin{cases} \chi_{2TW}^2 & H_0 \\ \chi_{2TW}^2(2\gamma) & H_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, χ_{2TW}^2 与 $\chi_{2TW}^2(2\gamma)$ 分别表示自由度为 $2TW$ 的中心卡方分布和非中心参数为 2γ 的非中心卡方分布, $\gamma = |hs(t)|^2 / \sigma^2$ 为信噪比(signal to noise ratio, SNR)。为简化起见, 假设时间和带宽的乘积 TW 可以用一个整数 m 表示。

检测概率和虚警概率可以分别表示为^[13]:

$$\begin{cases} P_{de1} = p\{Y > \lambda_1 | H_1\} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda_1}) \\ P_{fa1} = p\{Y > \lambda_1 | H_0\} = \frac{\Gamma(m, \lambda_1/2)}{\Gamma(m)} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 与 $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 分别表示完全和不完全伽马函数; $Q_m(\cdot, \cdot)$ 为广义马库姆 Q 函数, 定义如下:

$$Q_m(a, b) = \int_b^a \frac{x^m}{a^{m-1}} e^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{m-1}(ax) dx \quad (6)$$

式中, $I_{m-1}(\cdot)$ 为 $m-1$ 阶的修正贝塞尔函数。

2) 判断MUE用户是否位于femtocell的覆盖范围内。与步骤1)相同, femtocell基于接收信号的能量做出判断, 但是本地能量检测的门限为一个新门限。当检测器的输出比门限高时, 它认为MUE用户位于覆盖区域内, 否则认为其位于覆盖区域外。如果MUE用户位于覆盖区域外, 则其信号到达femtocell时会经历墙壁的穿透损耗, 检测问题可以被建模为一个二元判断:

$$\begin{cases} H_3 : y(t) = hs(t) + n(t) & 0 < t \leq T \\ H_4 : y(t) = hs(t) + n(t) + L & 0 < t \leq T \end{cases} \quad (7)$$

式中, $s(t)$ 为主用户发射机信号; $n(t)$ 为均值为零、方差为 σ^2 的加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN); h 为信道增益; L 为穿透损耗。

这样, 步骤2)中的检测概率和虚警概率分别为:

$$P_{de2} = p(Y > \lambda_2 / H_3) \quad (8)$$

$$P_{fa2} = p(Y > \lambda_2 / H_4) \quad (9)$$

检测概率和虚警概率可以分别表示为:

$$\begin{cases} P_{de1} = p\{Y > \lambda_2 | H_3\} = Q_m(\sqrt{2L}, \sqrt{\lambda_2}) \\ P_{fa1} = p\{Y > \lambda_2 | H_4\} = \frac{\Gamma(m, \lambda_2/2)}{\Gamma(m)} \end{cases} \quad (10)$$

总体上, 检测概率和虚警概率可以分别表示为:

$$\begin{cases} P_{de} = P_{de1}P_{de2} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda_2})Q_m(\sqrt{2L}, \sqrt{\lambda_2}) \\ P_{fa} = \frac{P(H_0)P_{fa1}P_{fa2} + P(H_3)P_{de1}P_{fa2}}{P(H_0) + P(H_1)} \\ P_{fa1} = P_{fa2} = \frac{\Gamma(m, \lambda_2/2)}{\Gamma(m)} \\ P_{de1} = Q_m(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda_2}) \end{cases} \quad (11)$$

2.2 基于业务类型判断的感知周期优化

图3给出本文的上行感知方法的时序图。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和上行数据包。在时隙 n , 如果检测到存在上行ACK信号, 说明周围有MUE用户从macrocell基站接收数据, 即下行频谱被占用, 可以推断出下行频谱被占用的具体时隙为 $n+4$ 。

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。判断的原理根据两种业务类型数据包和ACK的对应特点。从图2中可以看出, 语音业务的ACK信号和数据包在上行链路中基本存在对称关系, 上行链路的RB既承载该业务的ACK, 也承载该业务的数据包。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能量相似的数据包,且数据包的带宽占用并不太大,那么,可以判断是语音业务。而数据业务的ACK信号和数据包在上行链路中就不存在对称关系,往往只有ACK信号,而没有数据包。即在时隙 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包存在,那么就判断该ACK信号对应的业务是数据业务。

Femtocell根据LTE系统业务频谱占用的特点调整感知周期。不失一般性,假设语音业务、数据业务的持续时间和频段空闲的持续时间分别服从参数为 μ_1 、 μ_2 、 μ_3 的指数分布。持续时间 t 的概率密度可表示为:

$$P(t) = \frac{1}{\mu} \exp\left(-\frac{t}{\mu}\right) \quad t > 0 \quad (12)$$

式中, μ 是指数分布的参数。由于用户业务出现的随机性,femtocell用户的传输与突然产生的MUE用户的业务有可能发生冲突。

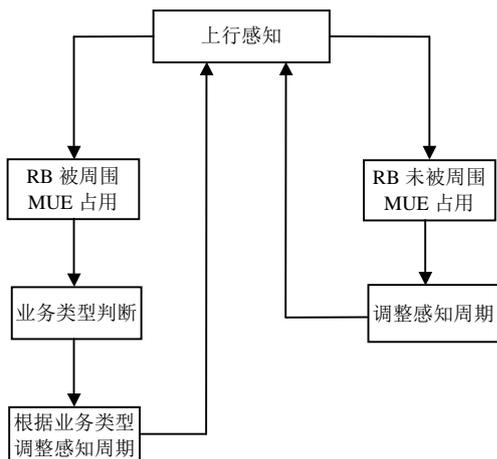


图3 感知时序图

发生数据冲突大致存在两种可能:1) 由于漏检,在主用户忙时认知用户的接入而发生的冲突。这种情况可以通过提高检测概率实现对MUE用户的保护;2) 由于MUE用户的业务在femtocell用户使用频谱时出现,在认知用户开始之前,对MUE用户的干扰已经发生。这种情况可以通过调整感知周期解决。一般来说,感知周期越小,冲突的概率也越小。但过小的感知周期将会带来更大的感知能量开销。

本文根据主用户实际的频谱占用情况优化认知用户对频谱的感知周期。考虑到主用户不同类型的业务对频谱占用的时间特点不同,femtocell调整频谱感知的周期,在控制对MUE用户的干扰和控制感知能量开销的情况下,提高femtocell小区的吞吐量。

下面将分情况讨论:

1) 当检测到频段为空闲状态时,对应频段空闲的概率为 P_1 ,femtocell将会利用这一频段,同时周期性地检测该频段,确保能及时发现回归的MUE。这时,感知周期为 T_1 。

在一个感知周期内,femtocell的下行吞吐量为:

$$TH_1 = BP_1(1 - P_{fa}) \exp\left(-\frac{T_1}{\mu_1}\right) \quad (13)$$

式中, B 代表femtocell的发射能量,femtocell用户的分布规律等参数对系统吞吐量的影响,不失一般性,在本文的研究中用一个正的常量表示。

2) 当检测到频段为业务占用状态时,femtocell暂时不利用这一频段,但还会周期性地检测该频段。对应语音业务和数据业务,频段被占用的概率为 P_2 和 P_3 ,感知周期分别为 T_2 和 T_3 。

总体上,在一个感知周期内,发生冲突的概率、下行吞吐量和一个周期的能量损耗分别为:

$$\begin{cases} P_c = (1 - P_1)(1 - P_{de}) + P_1(1 - P_{fa}) \left(1 - \exp\left(-\frac{T_1}{\mu_1}\right)\right) \\ TH = \frac{T_1 BP_1(1 - P_{fa}) \exp\left(-\frac{T_1}{\mu_1}\right)}{P_1 T_1 + P_2 T_2 + P_3 T_3} \\ S = \frac{A}{P_1 T_1 + P_2 T_2 + P_3 T_3} \end{cases} \quad (14)$$

式中, A 代表单个周期内用于一次频谱感知所消耗的能量,不失一般性,在本文的研究中用一个正的常量表示。因此,感知周期的优化问题可以建模为:

$$\begin{cases} \max_{T_1, T_2, T_3} TH(T_1, T_2, T_3) \\ \text{s.t. } P_c(T_1) \leq P_{\max} \\ S(T_1, T_2, T_3) \leq S_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

上述优化问题的本质是将femtocell使用频谱引起的冲突概率和频谱感知带来的能量损耗控制在一定范围内,然后最大化吞吐量。具体解法可以用计算机迭代的方法求解。

3 仿真结果与分析

本节对所提出的频谱感知方法的性能进行仿真,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网络为macrocell和femtocell组成的双层网络。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和50个均匀分布的宏小区用户。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。仿真采用奥村-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。

本文仿真的业务类型有两种, 业务1是HTTP业务, 代表数据业务; 业务2是VoIP业务, 代表话音业务。图4所示为在业务1和业务2的数量相同情况下(场景1), 随着MUE的活跃度变化的两种方案femtocell的吞吐量比较。方案1为本文提出的方案, 其感知周期根据感知到的结果进行动态调整; 方案2为固定的感知周期。

表1 仿真参数

参数	取值
macrocell半径/m	500
femtocell半径/m	20
eNB天线增益/dB	14
HeNB 天线增益/dB	9
UE/HUE天线增益/dB	0
eNB发射功率/dBm	46
HeNB最大发射功率/dBm	23
UE/HUE发射功率/dBm	23
UEs数	100
HUEs数	10
femtocell数	10
热噪声/dBm·Hz ⁻¹	-174
UE/HUE/HeNB噪声系数/dB	5
BS噪声系数/dB	7
对数正态阴影/dB	8
穿墙损耗/dB	20

从图4中可以看到当MUE用户活跃度不高时, 其系统吞吐量没有明显区别。然而, 当MUE用户的活跃度开始提高以后, femtocell在方案1下的吞吐量开始显现出一定优势。因为方案1可以根据用户的业务类型动态的调整感知周期, 有利于发现更多的频谱机会, 尤其是当MUE用户对频谱的占用率较高时, 方案1可以比方案2发现更多的频谱机会。

图5所示为两种方案下, femtocell进行频谱感知的归一化能量耗损。由于在感知周期固定的情况下, femtocell的感知能量耗损在单位时间内是恒定的, 所以图中显示为一条直线; 而在感知周期动态变化的情况下, femtocell在单位时间内耗费的感知能量随时间变化。对于持续时间较短的业务, 感知周期也较短, 单位时间内耗费的感知能量较大。对于持

续时间较长的业务, 感知周期较长, 单位时间内相对耗费的能量较大。从图中可以看出, 方案1的感知能量损耗有明显的降低, 说明动态调整感知周期有利于节省感知能量的损耗, 降低感知开销。

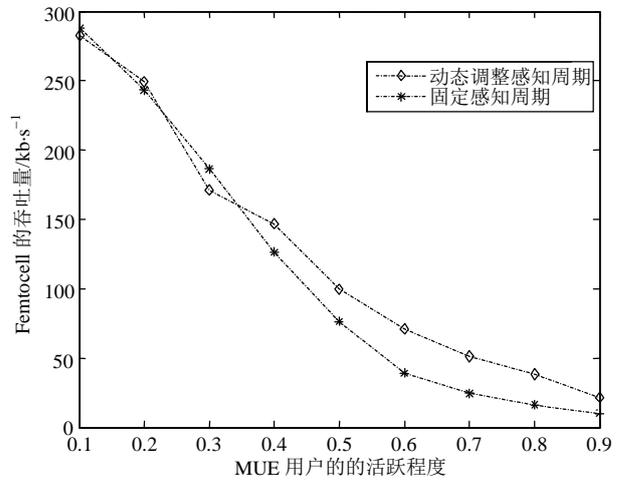


图4 Femtocell的平均吞吐量

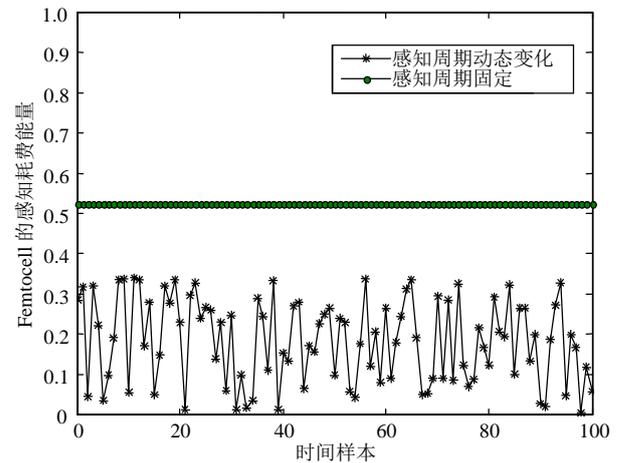


图5 Femtocell的感知耗能能量

4 结论

针对LTE系统中femtocell的频谱使用需求, 本文给出了一种基于认知无线电技术的频谱感知方法。首先, 本方法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; 其次, 该方法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感知周期进行调整, 而在对macrocell用户干扰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, 同时降低了感知能量耗费, 实现对频谱承载业务的智能化识别, 系统性能明显提高。

本文的研究工作得到了东南大学移动通信国家重点实验室自主研究课题(2013A03)的资助, 在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] LIEN S Y, TSENG C C, CHEN K C, et al. Cognitive radio resource management for QoS guarantees in autonomous femtocell networks[C]//IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010: 1-6.
- [2] CHANDRASEKHAR V, ANDREWS J, GATHERER A. Femtocell networks: a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 59-67.
- [3] LIEN Shao-yu, TSENG Chih-cheng, CHEN Kwang-cheng, et al. Cognitive radio resource management for QoS guarantees in autonomous femtocell networks[C]//2010 IEEE International Conference on Communications (ICC). [S.l.]: IEEE, 2010: 1-6.
- [4] HARJULA I, HEKKALA A. Spectrum sensing in cognitive femto base stations using welch periodogram[C]//2011 IEEE 22nd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). [S.l.]: IEEE, 2011: 2305-2309.
- [5] PEI Y Y, HOANG A T, LIANG Y C. Sensing-throughput tradeoff in cognitive radio networks: How frequently should spectrum sensing be carried out[C]//PIMRC07. [S.l.]: [s.n.], 2007: 1-5.
- [6] 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.
- [7] SHEN J Y, JIAN G T, LIU S Y, et al. Maximum channel throughput via cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5166-5175.
- [8] WANG P, XIAO L M, ZHOU S D, et al. Optimization of detection time for channel efficiency in cognitive radio systems[C]//IEEEWCNC 2007. Hongkong, China: IEEE, 2007: 111-115.
- [9] TANG L, CHEN Y, HINES E L, et al. Effect of primary user traffic on sensing-throughput tradeoff for cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(4): 1063-1068.
- [10] 3GPP. 3GPP TS36.300 (v9.1.0): Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN); Overall description[S]. 2009.
- [11] 3GPP. 3GPP TS36.304 (v9.4.0): Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); User equipment (UE) procedures in idle mode[S]. 2010.
- [12] ASTELY D, DAHLMAN E, FURUSKAR A, et al. LTE: the evolution of mobile[J]. Broadband, IEEE Communications Magazine, 2009, 47(4): 44-51.
- [13] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]//Proc of IEEE International Conference on Communications (ICC'03). [S.l.]: IEEE, 2003: 3575-3579.

编辑 漆蓉