

有效的基于软频率复用长期演进 femtocell 网络的小区间干扰协调方案

李亚男*, 苏寒松, 李媛, 刘高华

(天津大学 电子信息工程学院, 天津 300072)

(* 通信作者电子邮箱 yananli0206@126.com)

摘要: 家庭基站是一种小体积、低发射功率的基站, 它为长期演进 (LTE) femtocell 双层网络提供更好室内覆盖的同时也增加了整个系统的容量。然而, femtocell 和宏基站 (MeNB) 之间的干扰不容小觑。针对二者间的干扰问题, 提出一种基于软频率复用 (SFR) 的有效的 LTE femtocell 网络的小区间干扰协调 (ICIC) 方案。该方案中, 为避免共信道干扰, 先对宏小区进行 SFR 频域资源分配, 然后让 femtocell 用户使用宏基站未占用的频域资源; 并且当 femtocell 位于宏小区中心区域时, 不使用同一扇区边缘区域占用的频带。仿真结果表明, 此方案减小了不同类型用户间的干扰, 整个网络的吞吐量比没有使用 ICIC 技术的情况提高了 14%, 同时小区边缘用户的平均吞吐量至少提高了 34%。

关键词: 软频率复用; 长期演进; 家庭基站; 小区间干扰协调; 吞吐量

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Effective inter-cell interference coordination scheme in long term evolution femtocell network based on soft frequency reuse

LI Yanan*, SU Hansong, LI Yuan, LIU Gaohua

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Femtocell is a small low powered base station which can provide an increase in system capacity and better indoor coverage for two-tier Long Term Evolution (LTE) network. However, interference problem between the femtocell and the Microcell eNodeB (MeNB) should be solved in advance. Concerning the interference between them, an effective Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) scheme using Soft Frequency Reuse (SFR) was proposed in LTE femtocell system. Under the macrocell pre-allocating frequency band by the SFR, the femtocell user equipments chose sub-bands which were not used in the macrocell sub-area to avoid co-channel interference. At the same time, when the femtocell was located in the center of a macrocell, it was not going to select the sub-bands which were occupied by the boundary region of the same sector. Simulation results show that the proposal scheme improves the throughput performance of overall network by 14% compared to the situation without ICIC, and the average throughput of cell edge users increases by 34% at least.

Key words: Soft Frequency Reuse (SFR); Long Term Evolution (LTE); femtocell; Inter-Cell Interference Coordination (ICIC); throughput

0 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术对下一代移动通信长期演进 (Long Term Evolution, LTE) [1] 而言是一项很有发展前景的技术, 这主要是由于它的高频谱效率 [2], 以及能够通过将频带分成一组相互正交的子载波从而达到抗频率选择性衰落和防止码间串扰 (Inter Symbol Interference, ISI) 的效果。通常为达到最大的资源利用率, 选择的频率复用因子为 1。然而, 当相邻小区的不同用户使用相同子载波时, 会产生共信道干扰 (Co-Channel Interference, CCI) 问题, 尤其是小区边缘用户会受到更大影响。因此, 为避免或者减小这种共信道干扰、提高系统吞吐量, 需要使用合适的小区间干扰协调 (Inter-Cell Interference Coordination, ICIC) 技术 [3]。

随着对数据速率和网络容量需求的日益提高, 室内蜂窝用

户大多面临较差的信号覆盖环境。目前, 家庭基站 (femtocell, Femto) 是增加室内无线覆盖的一种可行的解决方案 [4], 它是由回程网络连接到核心网的一种低发射功率的基站。

然而, 与各宏基站 (Microcell eNodeB, MeNB) 共信道部署的 femtocell 是一个新的无线覆盖层, 它的密集部署会对宏网络层产生高干扰 (跨层干扰) [5]。研究人员已经提出一些缓解技术来处理此问题。Femtocell 可以在任意时间部署在宏小区内的任意位置并可从一个位置移到另一个位置, 所以无线资源和干扰的动态管理变为一项艰巨的任务 [6]。因此, 高效的干扰协调方案在 LTE femtocell 系统构建中起到至关重要的作用。目前, LTE 和全球微波互联接入 (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX) [7] 都在积极地讨论双层网络的干扰协调问题。

文献 [8] 中提出了一种有效的 femtocell 功率控制方案。该方案通过限制室内覆盖和 femtocell 对宏用户设备 (Macro User

收稿日期: 2013-11-05; 修回日期: 2013-12-09。

作者简介: 李亚男 (1988 -), 女, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线通信; 苏寒松 (1960 -), 男, 河南滑县人, 教授, 博士, CCF 会员, 主要研究方向: 无线通信、光通信、移动通信、光纤传感; 李媛 (1957 -), 女, 河北保定人, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 现代天线理论与技术、微波与毫米波技术、电磁理论与数值分析; 刘高华 (1987 -), 女, 山东烟台人, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 无线通信。

Equipment, MUE)的干扰实现 LTE femtocell 网络优化。然而,当 femtocell 部署密集并且周围有很多 MUE 时,室内覆盖效果会受到严重影响;同时算法复杂度也会提高。此时该算法很难再适用于 femtocell。

文献[9]中提出了频谱划分方案。该方案通过在 MeNB 和 femtocell 之间分配正交的频谱资源来达到消除干扰的目的。家庭基站中,每个 femtocell 以随机的方式占用子信道。然而,该方案是基于专用信道的;虽然频谱使用是自适应的,但是 MeNB 并不能使用全部带宽,降低了系统吞吐量。

文献[10]讨论了考虑用户位置的隔离和耦合模式。隔离模式中,MUE 和家庭基站用户设备(Femtocell User Equipment, FUE)占用不同的时频块。耦合模式中,位于宏小区边缘的各 femtocell 复用 MeNB 使用的资源。不过该方案中并没有使用正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)系统软频率复用(Soft Frequency Reuse, SFR)^[11]的概念,这将降低频谱利用率。

SFR 是 OFDMA 系统中为克服 CCI 问题而讨论的方法。在 SFR 方案中,每个小区使用的子载波被分为两组:一组叫作主子载波,另一组叫作次子载波。它们的区别在于,主子载波的发送功率大于次子载波,并且主子载波供小区边缘用户使用,而次子载波供小区中心用户使用。相邻的小区边缘主子载波复用因子大于 1,且是相互正交的,这就减小了小区间干扰;而对小区中心区域来讲,频率复用因子为 1。所以 SFR 和传统蜂窝网的频率复用方式相比,既可以减小小区间干扰,又可以使整个系统的吞吐量维持在一个较高的水平。

本文从减小双层网络间干扰的角度出发,以提高整个系统吞吐量的为目的,提出了一种基于 SFR 的适用于 LTE femtocell 双层网络系统的 ICIC 方案。该方案中,先对宏小区通过 SFR 方式分配频带资源;然后让各 femtocell 选用没被宏小区占用的子带资源,以达到避免干扰的效果,从而提高系统吞吐量。

1 LTE femtocell 资源分配方案

在 SFR 方案中,将每个小区的子载波分成主、次子载波;主子载波传输功率大于次子载波。主子载波仅能由各个小区边缘用户使用,而次子载波可以用于所有小区中心用户。LTE femtocell 系统常见的 SFR 使用方案如图 1 所示。图 1(a)、(b)表示,MeNB 覆盖区域由 3 扇区构成,将其整个覆盖范围分为小区中心区域 C1、C2、C3 和小区边缘区域 E1、E2、E3。长期研究结果显示,当中心区域半径是宏小区半径的 64% 以及中心区域和边缘区域的频率复用因子分别为 1,3 时,干扰协调效果最好。系统整个带宽被分为两大部分,功率分别为 P_0 和 P_1 ;然后再将 P_1 功率对应带宽分为 3 部分;所有带宽标记分别为 c、e1、e2、e3,如图 1(c)所示。

在该传统方案中,首先使用 SFR 为 MUE 分配频域资源;然后 femtocell 可以使用全部带宽为 FUE 进行资源分配,这里将此方案命名为 M-SFR(Macro-SFR)方案。上述分配顺序是合理的,因为通常情况下 MUE 的优先级高于 FUE,并且这样的分配顺序降低了 LTE femtocell 双层网络中资源分配算法的复杂度。但是由于 femtocell 可以使用全部带宽,该方案中系统内的共信道干扰比较严重,尤其是当 femtocell 大量部署时。

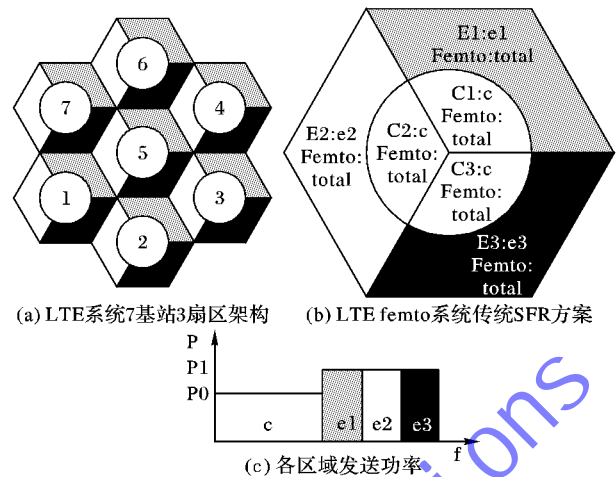


图 1 LTE femtocell 传统 SFR 使用方案

2 改进的 ICIC 方案

2.1 改进 ICIC 方案的介绍

为了解决上述问题,本文提出了改进的 ICIC 方案,即 MF-SFR(MacroFemtocell-SFR)方案。改进方案如图 2 所示。

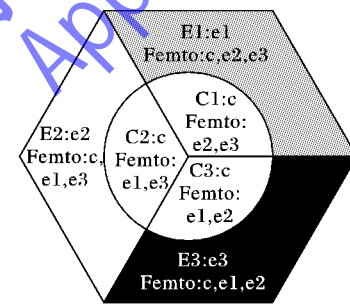


图 2 改进的 ICIC 方案 MF-SFR

MF-SFR 方案中的每个宏小区根据 SFR 分配频域资源。在这种情况下,femtocell 选用各个宏小区区域没有占用的频带。当 femtocell 位于宏小区中心区域时,femtocell 不能使用同一扇区边缘区域占用的频域资源。例如,一个 femtocell 位于 E1 边缘区域时,它可以使用的频域资源为 c、e2、e3,而宏小区用户占用频域资源为 e1;如果一个 femtocell 位于小区中心区域 C1,此时它可以使用的未被宏用户占用的频带 e2、e3。为了减小中心区域的干扰,位于小区中心的 femtocell 并没有使用中心带宽 c。同时,为了减小对边缘用户的干扰,femtocell 没有使用频带 e1,因为 e1 上的接收信号功率强度对此 femtocell 来讲比较强。采用上述措施之后,较 M-SFR 方案可以进一步减小 MeNB 和 femtocell 之间的干扰,从而系统边缘用户可以达到更高的吞吐量。

当一个 femtocell 开始工作时,它可以接收所属宏基站在各子频带 c、e1、e2、e3 上的发射功率相关信息,然后通过比较接收信号强度指示(Received Signal Strength Indication, RSSI)值来确定它的位置。如下:

- 1) 当对应子带 c 上的 RSSI 最大时,则它位于小区中心区域;同时,如果子带 e1 上的 RSSI 次大,那么该 femtocell 的确定位置是小区中心 C1 区域。
- 2) 如果 femtocell 在子带 c 上的 RSSI 非最大,那么它位于小区边缘区域;然后再通过 RSSI 最大值对应区域,确定它位于边缘区域 e1、e2 或 e3 中的哪一个。

图3 为改进 ICIC 方案的流程。

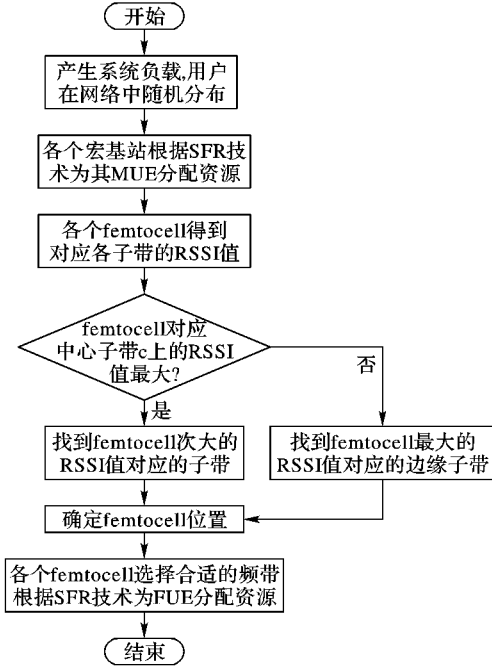


图3 改进的 ICIC 方案流程

2.2 系统模型

整个网络由7个宏小区构成,其中 femtocell 在宏小区中是随机分布的。为了简化计算复杂度,一个 femtocell 用户的干扰基站只计距离此用户最近的宏基站和同一小区内其他各个 femtocell;而对于宏用户来讲,其他所有的宏基站以及同一小区内的各 femtocell 都是该用户的干扰基站。

宏小区 M 内的 MUE m 使用物理资源块 (Physical Resource Block, PRB) k 进行下行信号传输时的信号与干扰噪声比 (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) 可以表示如下:

$$SINR_{m,k} = \frac{P_{M,k} G_{m,M,k}}{N_0 + I_m} \quad (1)$$

其中: $I_m = \sum_{M'} P_{M',k} G_{m,M',k} + \sum_F P_{F,k} G_{m,F,k}$

这里 $P_{M,k}$ 和 $P_{M',k}$ 分别是 MUE m 所属的服务宏小区 M 和相邻宏小区 M' 在 PRB k 上的发射功率, $G_{m,M,k}$ 是 MUE m 和服务宏小区 M 之间在 PRB k 上的信道增益,其他相邻宏小区在 PRB k 上的信道增益表示为 $G_{m,M',k}$, N_0 为热噪声, I_m 代表 MUE m 受到的干扰。同理, $P_{F,k}$ 是相邻 femtocell F 在 PRB k 上的发送功率; $G_{m,F,k}$ 是 MUE m 和 femtocell F 之间在 PRB k 上的信道增益。

对家庭基站用户来说,它受到距离最近的宏小区和邻近的 femtocell 的干扰。所以, FUE f 在 PRB k 上的 SINR 为:

$$SINR_{f,k} = \frac{P_{F,k} G_{f,F,k}}{N_0 + I_f} \quad (2)$$

其中: $I_f = \sum_M P_{M,k} G_{f,M,k} + \sum_{F'} P_{F',k} G_{f,F',k}$, I_f 代表 FUE f 受到的干扰;其他量可类比 MUE m 中涉及到的量。

信道增益 $G = 10^{-\frac{PL}{10}}$, 它是由路径损耗决定的,为计算电波传播损耗,这里使用一般路损计算模型^[12]:

$$PL = 15.3 + 37.6 \lg d + nL_{\text{wall}} \quad (3)$$

其中: L_{wall} 是由墙壁的厚度引起的穿墙损耗, d 是发送者和接收者之间的距离, n 是发送者和接收者之间的墙壁数。

依据香农容量定理, MUE m 在 PRB k 上的容量^[13] 可以

表示为:

$$C_{m,k} = B \cdot \lg(1 + SINR_{m,k}) \quad (4)$$

其中: B 是 PRB k 的频域宽度。

所以,服务宏小区的吞吐量为:

$$T = T_M + T_F = \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{k=1}^{N_k} C_{m,k} + \sum_{f=1}^{N_f} \sum_{k=1}^{N_k} C_{f,k} \quad (5)$$

由 OFDMA 系统的特点可知,每个 PRB 在每个发送时间间隔 (Transmission Time Interval, TTI) 内只能分配给一个 MUE 或 FUE。 N_m 和 N_f 分别表示宏小区内宏用户和家庭基站用户总数。

3 仿真

3.1 仿真场景和参数设置

本文从吞吐量和中断概率的角度评估该 MF-SFR 算法的性能。采用的网络布局是7基站3扇区模型,如图1(a)所示。MeNB 采用定向天线, femtocell 采用全向天线。中断概率 P_b ^[14] 定义如下:

$$P_b = \frac{\sum_u \sum_k \delta_{u,k} \cdot SINR_{u,k}}{\sum_u \sum_k SINR_{u,k}} \quad (6)$$

其中: $\delta_{u,k}$ 指示 PRB k 是否成功分配给用户 u , 取值为1或0。如果用户 u 在 PRB k 上的 SINR 小于设定的 SINR 阈值,则表示分配失败,取 $\delta_{u,k} = 1$;否则取值为0。

仿真参数如表1所示。文中用到的基本资源单位是 PRB,它是一个时频块。频域宽度是180 kHz,时域持续时间为 $1/2$ TTI ($1\text{TTI} = 1\text{ms}$)。各个基站下行采用的是 OFDMA 技术。通过改变每个宏小区覆盖范围内 femtocell 的数量20~120,从而改变仿真环境。MUE 和 FUE 在网络中是随机撒入的。不同方案下各个基站的发送功率详见表1。通过仿真,本文得到采用不同 ICIC 方案时各个 UE 在每个 PRB 上的 SINR,从而得到各方案下系统吞吐量和中断概率。其中 No-SFR 方案为没有使用 SFR 的方案。

表1 系统仿真参数

参数	值
基站数目	MeNB: 7; femtocell: 20~120
MF-SFR 方案发射功率	MeNB: 14 W, 20 W femtocell: 15 mW, 20 mW
M-SFR 方案发射功率	MeNB: 14 W, 20 W; femtocell: 15 mW
No-SFR 方案发射功率	MeNB: 18 W; femtocell: 15 mW
每个扇区内的 MUE	3
每个 femtocell 的 FUE	1
调度算法	比例公平
传输时间间隔	1 ms (1TTI)
载波频率/带宽	2 GHz/5 MHz
用户速度	5 km/h
用户接收噪声	9 dB
宏小区半径	500 m
小区中心区域半径	320 m
femtocell 路损模型	$PL_{\text{outdoor}} = 22.3 + 37.6 \lg d$ $PL_{\text{indoor}} = 38.5 + 20 \lg d + L_{\text{wall}}, L_{\text{wall}} = 7 \text{ dB}$

3.2 仿真结果及其分析

仿真结果如图4~6所示。

图4是随着 femtocell 接入数量的不同,各 ICIC 方案下 LTE femtocell 系统总吞吐量对比。通过图中 M-SFR 与 MF-SFR 的仿真

曲线对比可以看出,本文改进的 ICIC 方案 MF-SFR 对应的系统吞吐量比 M-SFR 传统方案时提高了近 10%;而通过图中 No-SFR、MF-SFR 两条曲线对比可以看出,与没有使用 ICIC 方案的系统相比,MF-SFR 对应的系统吞吐量提高了 14% 左右。因为,对于 No-SFR 和 M-SFR 两方案来讲,虽然 femtocell 可调用的频域资源较多,但由于其不同类型用户干扰严重,致使信道质量下降、重传次数增加,进而系统吞吐量下降。而在 MF-SFR 方案中 FUE 使用的是没被 MUE 占用的 PRB,因此该方案与另外两种方案相比大大减小了不同类型用户间的干扰,从而提高了系统吞吐量。

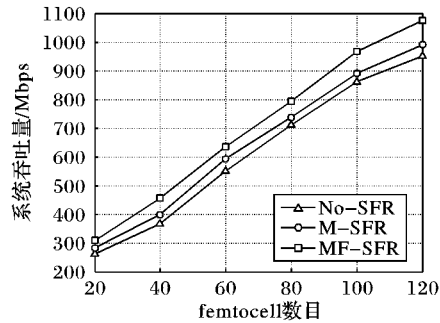


图4 各 ICIC 方案 LTE femtocell 系统总吞吐量对比

图5给出了随着 femtocell 接入数量的不同,各 ICIC 方案下 LTE femtocell 系统边缘用户平均吞吐量对比。由于 OFDMA 网络中的小区间干扰,边缘用户的性能通常较差。通过图中 No-SFR 和 M-SFR 两曲线对比可知,在 M-SFR 方案中,因为宏小区采用了 SFR 技术,所以系统边缘用户平均吞吐量高于 No-SFR 方案。图5三条曲线也明显展示出,采用 MF-SFR 方案后,位于小区边缘的用户其平均吞吐量比 No-SFR 方案和 M-SFR 方案平均分别提高了近 2.1 Mbps (47%) 和 1.7 Mbps (34%);并且通过图中三条曲线还可以看出,任意两条曲线间距离随着 femtocell 数目的增加呈缓慢增大趋势,这表明在一定数量范围内 femtocell 部署越密集,边缘用户性能提高得越明显。

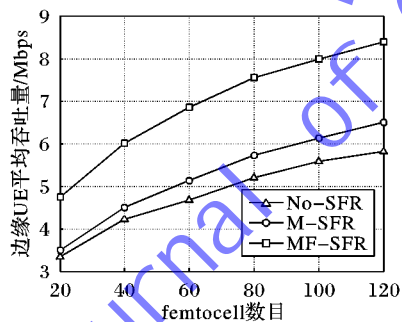


图5 各 ICIC 方案 LTE femtocell 系统边缘用户平均吞吐量对比

图6展示了当 femtocell 接入数量为 20 时,不同 SINR 阈值下各方案对应的系统中断概率。从图中看到,对于任何一个给定的 SINR 阈值,MF-SFR 方案对应的中断概率明显低于另外两种方案。并且当 SINR 阈值很低时,从 MF-SFR 对应曲线可以看出改进方案的中断概率仅为 4%,而 No-SFR、M-SFR 两方案的中断概率分别为 27% 和 13.5%;这说明即使系统间干扰很严重,采用 MF-SFR 方案的 LTE femtocell 系统也可以保证较多的用户正常通信。

4 结语

本文首先分析了 LTE femtocell 双层网络中传统 SFR 方案存在的不足,然后提出了改进的 ICIC 方案 MF-SFR。通过仿真比较

可以看到,MF-SFR 方案明显提高了系统(尤其是小区边缘用户)吞吐量,减小了系统中断概率从而保证了服务质量,所以本文改进方案相比传统 SFR 方案能取得更高的用户满意度。这就体现了改进方案理论方面的正确性,同时也证实了方案的有效性和可行性。由此可见,该方案对于采用 OFDMA 的网络,如 LTE femtocell 双层网络,是一种可行的工程使用方法。

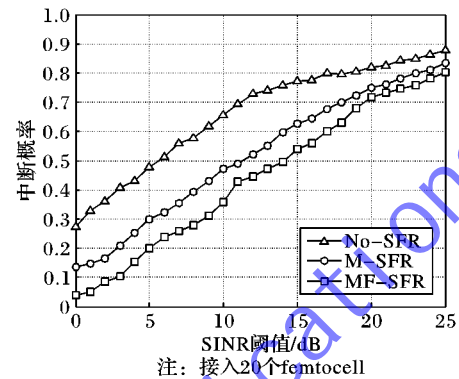


图6 各 ICIC 方案下 LTE femtocell 系统中断概率对比

参考文献:

- [1] ETSI. LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); overall description; stage 2 (3GPP TS 36.300 version 11.6.0 Release 11) [S/OL]. [2013-09-14]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/11.06.00_60/ts_136300v110600p.pdf.
- [2] ARMSTRONG J. OFDM for optical communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 189-204.
- [3] KLEIN S. Concept for inter-cell interference coordination in a cellular communication network: Germany, EP2544500 [P]. 2013-01-09.
- [4] SAQUIB N, HOSSAIN E, LE L B, et al. Interference management in OFDMA femtocell networks: issues and approaches [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(3): 86-95.
- [5] NGO D T, LE L B, TAO L N, et al. Distributed interference management in two-tier CDMA femtocell networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(3): 979-989.
- [6] ZHANG J, de La ROCHE G. Femtocells: technologies and deployment [M]. New York: Wiley, 2010: 156-164.
- [7] LI Y, MAEDER A, FAN L, et al. Overview of femtocell support in advanced WiMAX systems [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(7): 122-130.
- [8] LU Z, SUN Y, WEN X, et al. An energy-efficient power control algorithm in femtocell networks [C]// *Proceedings of the 2012 7th International Conference on Computer Science and Education*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 395-400.
- [9] WANG C C, QUEK T Q S, KOUNTOURIS M. Throughput optimization, spectrum allocation, and access control in two-tier femtocell networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(3): 561-574.
- [10] SUNDARESAN K, RANGARAJAN S. Efficient resource management in OFDMA femtocells [C]// *MobiHoc '09: Proceedings of the Tenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*. New York: ACM, 2009: 33-42.
- [11] YANG X. 3GPP, R1-050507, Huawei, soft frequency reuse scheme for UTRAN LTE [EB/OL]. [2012-12-03]. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/wg1_r11/TSGR1_41/Docs/R1-050507.zip.

(下转第1254页)

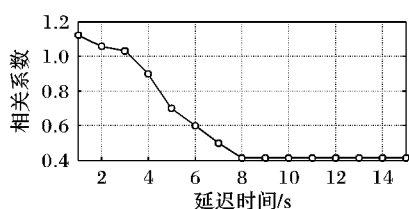


图7 含噪网络流量的延迟时间

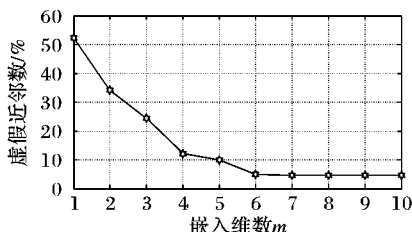


图8 含噪网络流量的嵌入维数

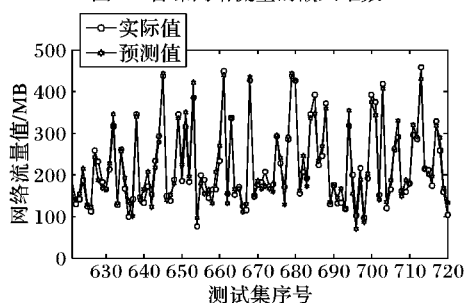


图9 IWO-GPR的含噪网络流量预测结果

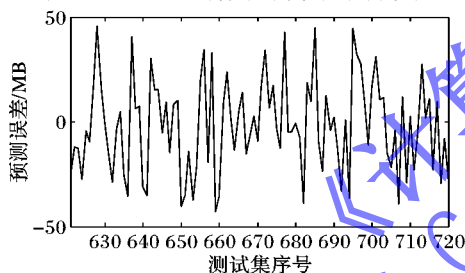


图10 含噪网络流量 IWO-GPR 的预测误差变化曲线

参考文献:

- [1] WEN X, MENG X, MA Z, *et al.* The chaotic analysis and trend prediction on small-time scale network traffic [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(8): 1609–1616. (温祥西, 孟相如, 马志强, 等. 小时间尺度网络流量混沌性分析及趋势预测[J]. *电子学报*, 2012, 40(8): 1609–1616.)
- [2] CHANG B R, TSAI H F. Improving network traffic analysis by foreseeing data-packet-flow with hybrid fuzzy-based model prediction [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 6960–6965.
- [3] LUO Y, XIA J, WANG H. Application of chaos-support vector machine regression in traffic prediction [J]. *Computer Science*, 2009, 36(7): 244–246. (罗葵, 夏靖波, 王焕彬. 混沌—支持向量机回归在流量预测中的应用研究[J]. *计算机科学*, 2009, 36(7): 244–246.)
- [4] YAO Q, LI C, MA H, *et al.* Novel network traffic forecasting algorithm based on grey model and Markov chain [J]. *Journal of Zhejiang University: Sciences Edition*, 2007, 34(4): 396–400. (姚奇富, 李翠凤, 马华林, 等. 灰色系统理论和马尔可夫链相结合的网络流量预测方法[J]. *浙江大学学报: 理学版*, 2007, 34(4): 396–400.)
- [5] WANG J, GAO Z. Network traffic modeling and prediction based on RBF neural network [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(13): 6–7. (王俊松, 高志伟. 基于 RBF 神经网络的网络流量建模及预测[J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(13): 6–7.)
- [6] CHEN Y, YANG B, MENG Q. Small-time scale network traffic prediction based on flexible neural tree [J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 12(1): 274–279.
- [7] XIONG N, LIU B. Online prediction of network traffic based on adaptive particle swarm optimisation and LSSVM [J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30(9): 21–24. (熊南, 刘百芬. 基于自适应粒子群优化 LSSVM 的网络流量在线预测[J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30(9): 21–24.)
- [8] ZHOU X, WANG W, CHEN W. Network traffic prediction model based on wavelet transform and optimised support vector machine [J]. *Computer Applications and Software*, 2011, 28(2): 34–36. (周晓蕾, 王万良, 陈伟杰. 基于小波变换和优化的 SVM 的网络流量预测模型[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(2): 34–36.)
- [9] LI J, ZHANG Y. Single-step and multiple-step prediction of chaotic time series using Gaussian process model [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 143–152. (李军, 张友鹏. 基于高斯过程的混沌时间序列单步与多步预测[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 143–152.)
- [10] SUN B, YAO H, LIU T. Short-term wind speed forecasting based on Gaussian process regression model [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2012, 32(29): 104–109. (孙斌, 姚海涛, 刘婷. 基于高斯过程回归的短期风速预测[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(29): 104–109.)
- [11] SEEGER M. Gaussian processes for machine learning [J]. *International Journal of Neural Systems*, 2004, 14(2): 69–106.
- [12] SONG X, HU C. Discrete invasive weed optimization algorithm for 0/1 knapsack problem [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(30): 239–242. (宋晓萍, 胡常安. 离散杂草优化算法在 0/1 背包问题中的应用[J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(30): 239–242.)
- [12] ZAHIR T, ARSHAD K, KO Y, *et al.* A downlink power control scheme for interference avoidance in femtocells [C]// *Proceedings of the 2011 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1222–1226.
- [13] EFFROS M, GOLDSMITH A, LIANG Y. Generalizing capacity: new definitions and capacity theorems for composite channels [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2010, 56(7): 3069–3087.
- [14] LEE P, LEE T, JEONG J, *et al.* Interference management in LTE femtocell systems using fractional frequency reuse [C]// *Proceedings of the 2010 12th International Conference on Advanced Communication and Technology*. Piscataway: IEEE Press, 2010, 2: 1047–1051.
- [15] ETSI. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis (3GPP TR 36.921 version 11.0.0 Release 11) [S/OL]. [2013-08-09]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136921/11.00.00_60/tr_136921v110000p.pdf.
- [16] ETSI. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis (3GPP TR 36.922 version 11.0.0 Release 11) [S/OL]. [2013-08-09]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136922/11.00.00_60/tr_136922v110000p.pdf.

(上接第1242页)