

Femtocell 基站休眠机制研究

张永棠^{1,2}

(1. 广东东软学院计算机科学与技术系, 广东 佛山 528225; 2. 江西微软技术中心, 南昌 330003)

摘要: Femtocell 基站是解决蜂窝覆盖问题的一种有效途径, 然而 Femtocell 基站大能耗已成为一个紧迫的问题。分析了 Femtocell 基站传统的固定周期休眠机制算法, 提出了两种改进的自适应休眠机制。其设计思想分别为: 改进方案 A 通过引入休眠周期因子改变增长倍数, 动态调整休眠周期; 改进方案 B 通过上一次休眠周期状态的阶数来确定初始休眠的间隔时间, 降低休眠模式下的能量消耗。并对两种改进的休眠方案进行 Markov 分析和 Matlab 仿真, 结果表明, 两种改进休眠方案均有比较大的能量改善, 改进方案 A 比较适应环境变化小、通话率高的单基站通信; 改进方案 B 能在通话率波动比较大的范围内保持良好性能, 且性能最好, 适应多基站协作的通信。

关键词: Femtocell; 休眠机制; 马尔科夫分析; 基站节能; 通话率

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

引言

Femtocell 基站是近年来兴起的一种能量消耗低、费用低、用户自己安置的蜂窝基站, 它的覆盖范围一般为几十米。Femtocell 基站被认为是一种解决蜂窝覆盖问题的很有前途的方案, 它可以减小宏基站的负担、供应增值业务, 如 IPTV^[1]。然而在 Femtocell 基站大范围推广的情况下, 它的能量消耗和环境可持续将成为一个紧迫的问题。作为网络的重要组成部分, Femtocell 的数量也在逐年递增。根据 ABI 调查^[2], 2016 年底全球 Femtocell 基站的数量超过 8500 万台。假设每个 Femtocell 需要 12 W 的功率(105.12 kWh/annum), 则所有的 Femtocell 的年能耗高达 9 亿 kWh。可见 Femtocell 能耗是个紧迫的问题。

在休眠机制方面, 之前也有些针对 Femtocell 基站休眠的相关研究, 如 Femtocell 基站能耗方面综述文献^[3-5], 在 Femtocell 基站运行前期, 没有过多的考虑其自身工作能耗, 都是以长时间全激活状态工作。文献[6]中提出

了“空闲模式”的方案, 用“嗅探器”(Sniffer)来检测用户通信。这个方案相对于以前的方案能量消耗减少了 37.5%。然而文献[7]提出的方案仍可进一步进行优化, 它引入的空闲模式中有“嗅探器”的相关硬件的进程不停地工作着。尽管这部分能量在 Femtocell 基站总体能量消耗中占比不大, 但在实行 Femtocell 推广政策^[8]、大面积部署时, 这部分能量还是比较大的。因而本文对休眠机制进行改进, 将嗅探器进行周期运行, 从而完善 Femtocell 基站的休眠机制, 并对传统固定周期休眠算法的休眠时间间隔设置提出了两种改进方案。

1 Femtocell 基站的硬件能耗

Femtocell 基站硬件设计的高层次示意图如图 1 所示, 它包括一个微处理器来负责执行和管理标准化无线电协议栈和相关的基带处理。同时设计中还包含一个 FPGA(Field-Programmable Gate Array)和一些其他的综合电路用来执行很多功能, 比如说数据加密、硬件认证和网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)等^[9-10]。

收稿日期:2017-02-07

基金项目:国家自然科学基金(61363047);江西省科学技术创新项目(GJJ12255);佛山市科技创新项目(2016AG100382)

作者简介:张永棠(1981-),男,江西南昌人,副教授,硕士,主要从事光通信及无线传感器网络应用方面的研究,(E-mail)1141760796@qq.com

当完全激活处于工作状态时,硬件电路的能量消耗总共为 10.2 W,并且从能量供应上的使用效率为 85%。来自电源插座中能量总共为 12 W。

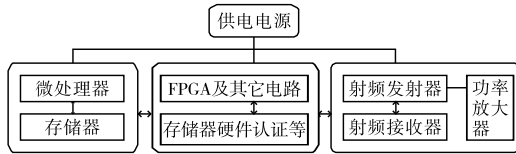


图 1 Femtocell 基站硬件设计的高层次示意图

2 Femtocell 休眠机制及模型

2.1 休眠机制

Femtocell 基站休眠机制流程图如图 2 所示。

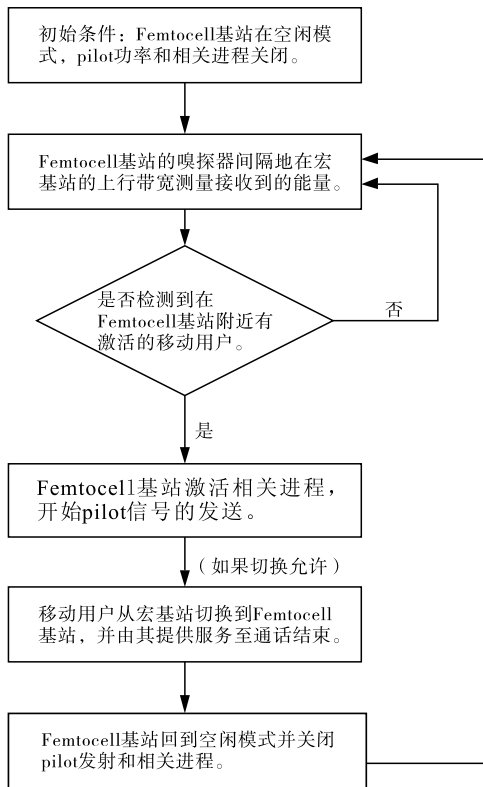


图 2 Femtocell 基站休眠机制的流程图

开始时, Femtocell 基站处于空闲模式即导频发射和相关程序都关闭,嗅探器以一定的休眠间隔在宏蜂窝的上行频段进行测量^[11]。这些测量使得 Femtocell 基站可以基于上行链路信号强度来检测到用户在它的覆盖范围内进行通话。当一个在 Femtocell 基站覆盖范围内的一个用户向宏蜂窝发出呼叫时,嗅探器会检测到在接受到的上行链路频段的能量上升。当接收到信号能量的强度超过某一个提前设定的阈值时,被检测到的用户就认为是距离潜在范围覆盖的基站比较近。如果一个有效用户被检测到, Femtocell 基站从“空闲”模式转换到

“激活”模式,同时激活它的进程和导频发射能量。在 Femtocell 基站覆盖范围内的有效用户会把 Femtocell 基站的导频测量发送给宏基站,如果用户被允许接入到 Femtocell 基站,则用户从宏基站到 Femtocell 基站的切换会初始化。不然的话, Femtocell 基站就恢复到空闲模式。当上述程序完成切换时, Femtocell 一直支持用户的服务,直到通话接受。随着呼叫结束, Femtocell 转回“空闲”模式,关闭相关进程和导频信号的发射^[12]。

这种技术允许 Femtocell 基站在覆盖范围内用户没产生有效的呼叫时,关闭所有导频能量和无线接受相关的程序,只有硬件中那些时刻与核心网络保持连接的相关元器件是保持工作状态。回程链路一直处于工作状态以保持射频同步和避免冗长的启动时间。当检测到来自注册用户的一个有效呼叫时, Femtocell 可以重启空中接口和它的导频能量的发射(即工作在激活状态)。

2.2 休眠模型

为了更好地研究 Femtocell 休眠机制,建立一个 Femtocell 基站休眠的系统模型,如图 3 所示。

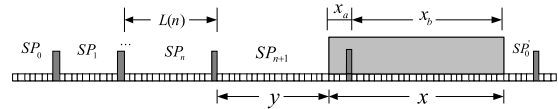


图 3 Femtocell 基站休眠算法模型

Femtocell 基站是从空闲状态开始进入休眠,假设将每个休眠时段分成 $L(n)$ 个长度为 Δt 的时隙片段, Femtocell 基站以周期 SP_n 检测用户上行链路的能量,一旦超过阈值,就将 Femtocell 基站激活并让用户转接到 Femtocell 基站通信,当通信结束后基站继续返回到休眠模式以 SP_n 周期检测用户。 SP_n 表示休眠时期的第 n 个间隔, $L(n)$ 表示其长度。 x 表示用户通话持续时间,并且 x 由 x_a 和 x_b 组成,其中 x_a 表示用户与宏基站通信, x_b 表示用户与 Femtocell 基站通信的时间间隔; y 表示某个休眠周期内通话到达时间。本文的研究着重分析一次通话的能耗,即从前一次通话结束到下一次通话结束整个过程的能量消耗。另外假设用户的通话时间满足参数分别为 λ_1 的指数分布,用户的通话到达满足泊松分布^[13],即通话到达时间满足参数为 λ_2 的指数分布。

3 休眠算法

根据上述休眠机制流程和建模分析,休眠间隔的设置是影响 Femtocell 基站能耗的关键因素。休眠间隔取得过短时, Femtocell 基站在话务量低时消耗过多的无效探测能量;当休眠间隔取得过大时,就会因为未能及时

检测到用户通话而使用户以较高的功率与小区宏基站进行通信,而消耗大量的能量。

下面从传统的固定周期休眠算法和两种改进的休眠算法,对 Femtocell 基站休眠机制进行研究。

3.1 传统固定周期休眠算法

传统的 Femtocell 基站休眠算法,是嗅探器以固定周期 T 检测用户的上行链路的能量,在每个休眠周期末若没有检测到有效用户通话,则 Femtocell 基站继续下一个周期的休眠,反之若检测到用户通话,则激活基站,使用户与 Femtocell 基站通信,当通话结束后基站继续进入休眠状态并且令嗅探器以相同周期 T 工作。该算法是一种周期休眠,即休眠间隔 $T = L \cdot \Delta t$, 其状态转换图如图 4(a) 所示。

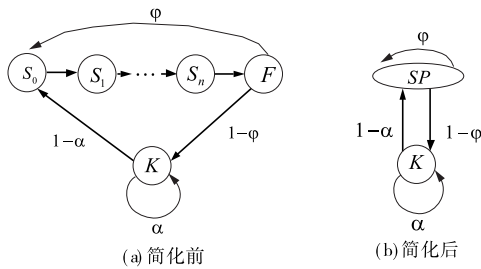


图 4 周期休眠的状态转换图

图 4(a) 中状态 S_0, S_1, \dots, S_n 分别表示休眠时段内相应的每个 Δt 时隙片状态,状态 F 表示嗅探器,用以检测用户上行链路的能量,若没有检测到有效用户,则以概率 φ 继续回到状态 S_0 开始休眠过程;反之则以概率 $1 - \varphi$ 进入基站激活状态 K 。在激活状态 K , 基站又会以概率 α 维持激活状态,或者以概率 $1 - \alpha$ 因通话完成而结束激活状态重新回到状态 S_0 开始休眠过程。由于在状态 S_0, S_1, \dots, S_n 中任何一个产生用户通话时都继续转入休眠片段而不进入激活状态(用户通话的前期是与宏基站通信,直至被嗅探器检测到后激活 Femtocell 基站并与之通信),于是可以将休眠方案 A 的状态转换图进行简化,如图 4(b) 所示,其中状态 SP 表示同一个休眠时段 L 内的状态集合。

根据马尔科夫过程^[14]的稳态 $\pi = \pi \cdot P$ 可以求出最终 Femtocell 处于休眠状态 SP 或激活状态 K 的稳态解,即:

$$\begin{cases} \pi(SP) = \frac{1 - \alpha}{2 - \alpha - \varphi} \\ \pi(K) = \frac{1 - \varphi}{2 - \alpha - \varphi} \end{cases} \quad (1)$$

系统消耗的总的能量有两部分组成:用户与基站的通信能量和嗅探器的工作能耗 E_s 。由于用户在每个休眠

周期内都有可能产生通话,由通话前一小部分时间用户与宏基站的通信能量加上后部分时间与 Femtocell 基站通信的能量。系统的总能量表达式为:

$$E = \sum_{i=0}^N \frac{\pi(SP_i)}{\sum_{j=0}^N \pi(SP_j)} \left\{ \int_0^{L\Delta t} \lambda_2 e^{-\lambda_2 y} \int_0^{L\Delta t - y} (x \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} P_{macro}) dx dy + \int_0^{L\Delta t} \lambda_2 e^{-\lambda_2 y} \int_0^{L\Delta t - y} [(L\Delta t - y) P_{macro} + (x - (L\Delta t - y)) P_{femtoall}] \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} dx dy + E_s \right. \quad (2)$$

式中, P_{macro} 和 $P_{femtoall}$ 分别表示用户与宏基站和 Femtocell 基站通信的通信功率, $\frac{\pi(SP_i)}{\sum_{j=0}^N \pi(SP_j)}$ 表示处于休眠状态

SP_i 的概率。将式(1)代入式(2)即得传统固定周期休眠算法的系统能耗式(3),其中 $E_{sniffer}$ 为嗅探器检测一次的能耗:

$$E = \left\{ \frac{(P_{macro} - P_{femtoall}) \lambda_2 (e^{-L\Delta t \lambda_1} - e^{-L\Delta t \lambda_2})}{\lambda_1 (\lambda_1 - \lambda_2)} - \frac{P_{macro}}{\lambda_1} (e^{-L\Delta t \lambda_1} - 1) \right\} + \frac{E_{sniffer}}{1 - e^{-\lambda_2 L \Delta t}} \quad (3)$$

在之前的讨论中已经发现,该算法(周期休眠)的周期 T 选择比较关键,因而可以进一步假设 λ_1 相对 λ_2 比较大(通话时间间隔比通话持续时间长的这种情形在现实中更加常见),对式(3)进一步优化,并在休眠周期有效范围内求得极值(即最佳休眠间隔) T 为:

$$T = L * \Delta t = \frac{1}{\lambda_2 \ln \left[1 - \frac{E_{sniffer}}{\sqrt{\frac{(P_{macro} - P_{femtoall}) \lambda_2}{\lambda_1 (\lambda_1 - \lambda_2)} + \frac{P_{macro}}{\lambda_1}}} \right]} \quad (4)$$

3.2 两种改进的休眠算法

由于传统周期休眠算法的嗅探器是以固定周期来检测用户通话情况,在实际应用中存在很大的缺陷,因此对该算法提出了两种改进的方案。

3.2.1 改进方案 A

改进方案 A 的嗅探器以初始休眠长度为 L_0 , 并且以 q 因子增加休眠周期至最大长度 L_{max} , 然后保持不变。期间任何一个休眠时期中若嗅探器检测到用户通话,则激活 Femtocell 基站并让用户转接到与 Femtocell 基站通信^[13] 状态。当通话结束后基站继续进入休眠状态,且重新初始休眠长度为 L_0 , 慢慢增加休眠周期,其表达式为:

$$L(n) = \begin{cases} L_0, n = 1 \\ \min \{ L_{max}, q \cdot L(n - 1) \}, n \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

改进方案 A 与传统周期休眠算法的分析方法类似,

区别在于这里由于休眠时长的不同,总的休眠状态数有 SP_0, SP_1, \dots, SP_N 共 $N + 1$ 个,加上激活状态 K 系统共有 $N + 2$ 个状态。可以类似地画出改进方案 A 的状态转移图,如图 5 所示,其中每个休眠状态 SP_i 以概率 φ_i 继续下一个休眠状态,或者以 $1 - \varphi_i$ 概率进入激活状态。当 Femtocell 基站处于激活状态时,在下一时刻可以以 α 的概率维持激活状态,或者以 $1 - \alpha$ 的概率进入休眠状态。

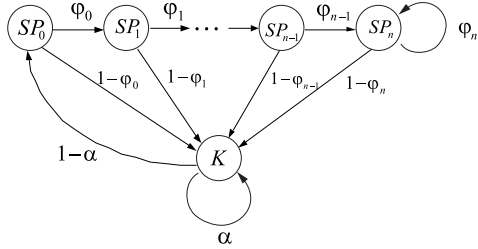


图 5 改进方案 A 的状态转移图

相应地求出每个状态的马尔科夫^[14]稳态解为:

$$\pi(K) = \frac{1}{\left\{ (1 - \alpha) \left[\sum_{j=0}^{N-2} \prod_{i=0}^{i=j} \varphi_i + 1 + \frac{\prod_{i=0}^{N-2} \varphi_i}{1 - \varphi_N} \right] + 1 \right\}} \quad (6)$$

$$\pi(SP_n) = \begin{cases} (1 - \alpha) \pi(K) & n = 0 \\ (1 - \alpha) \prod_{i=0}^{n-1} \varphi_i \pi(K) & 1 \leq n < N \\ \frac{\prod_{i=0}^{N-1} \varphi_i}{1 - \varphi_N} \pi(K) & n = N \end{cases} \quad (7)$$

系统能耗的计算方法同公式(2)一样,将式(6)与式(7)同时带入式(2)可以得到最终的系统能耗表达式。这里没有写出最终表达式是因为表达式不能简化成一个简单的式子。

3.2.2 改进方案 B

改进方案 B 与改进方案 A 的不同之处是方案 B 休眠起始间隔是 Femtocell 基站激活前的最后一个休眠间隔除以 q^M 的长度, M 设定的大小可以使其回退到之前 M 个休眠间隔的长度:

$$L(n) = \begin{cases} \max \left\{ L_0, \frac{L(n-1)}{q^M} \right\} & n = 0 \\ \min \left\{ L_{\max}, q \cdot L(n-1) \right\} & n \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $L_{\max} = q^N \cdot L_0$, M 为正整数,且 $M \leq N$ 。

在改进方案 B 中,根据 M 取值的不同,改进方案 B 所体现出的性能就不一样,且当 M 取值越大,改进方案 B 的性能与方案 A 就越接近。这里为讨论方便且不失一般性,设计一个与方案 A 性能差异最大的情形为例进

行讨论,即 Femtocell 基站重新休眠时以激活时那个休眠时段的前一个休眠时长为初始值慢慢增长^[7]。这时,根据激活后回到休眠状态的不同可以分成 K_0, K_1, \dots, K_{N-1} 等 N 个状态,其中 K_0 表示 Femtocell 基站激活后回到休眠时段 SP_0 , K_1 表示 Femtocell 基站激活后回到休眠时段 SP_1 , 依此类推。最后方案 B 的状态流程图可以表示成如图 6 所示的过程。其中每个休眠状态 SP_i 继续下一个休眠状态,或者以 $1 - \varphi_i$ 概率进入激活状态 K_{i-1} 。当 Femtocell 基站处于激活状态时,在下一时刻可以以 α 的概率维持激活状态,或者以 $1 - \alpha$ 的概率进入休眠状态 SP_{i-1} 。

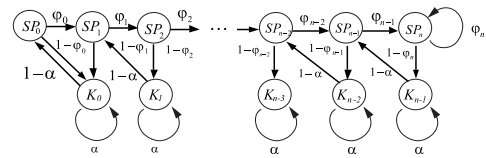


图 6 改进方案 B 的状态转移图

相应地求出每个状态的马尔科夫稳态解为^[14]:

$$\pi(K_n) = \varphi_0 \left(\prod_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{1 - \varphi_i} \right) \cdot \pi(K_0) \quad 1 \leq n \leq N - 1 \quad (9)$$

$$\pi(SP_n) = \begin{cases} (1 - \alpha) \pi(K) & n = 0 \\ (1 - \alpha) \prod_{i=0}^{n-1} \varphi_i \pi(K) & 1 \leq n < N \end{cases} \quad (10)$$

$$\sum_{n=0}^N \pi(SP_n) + \sum_{n=0}^{N-1} \pi(K_n) = 1 \quad (11)$$

将式(9)~式(11)代入式(2)便可计算求的采用改进方案 B 所产生的系统能量消耗。最终表达式不能简化成一个简单的式子,因而没在文中给出。

4 算法仿真与分析

为了验证上述提出的三种休眠方案的有效性,采用 Matlab 进行仿真。仿真参数^[15]:载波频率 2.0 MHz,发射功率 1 W,带宽 10 MHz,用户需求速率 122 Kbit/s,正常工作功率 12 W,睡眠功率 2 W。

不同休眠算法的仿真结果如图 7 所示。由图 7(a)可知,本文提出的两种休眠方案相对于未使用休眠机制和只用嗅探器连续监测方案有了进一步的能耗优化。与固定周期休眠方案相较,三种方案本身在整体上的性能相差不大(因为能耗中有一大部分是 Femtocell 工作固定元器件能耗)。除去 Femtocell 固定元器件能耗,三种方案相对能耗如图 7(b)所示。

由仿真结果可知:当 Femtocell 基站的工作环境如通话率等参数已知且相对比较稳定时,传统的固定周期休

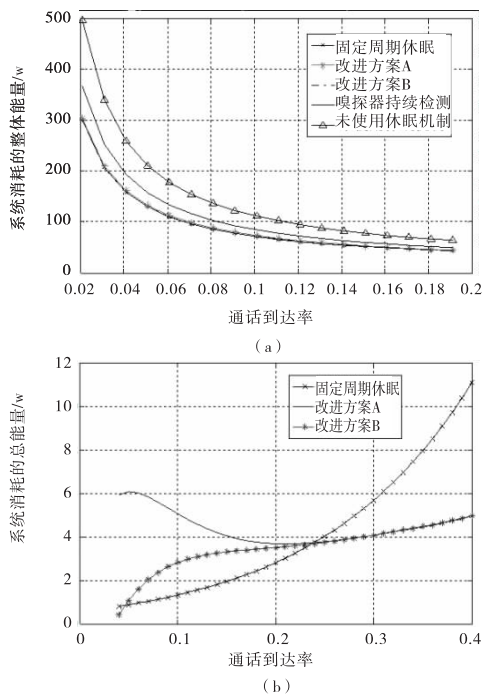


图7 三种休眠方案的性能比较

眠算法具有一定的优势,但是,当通话到达率 $\lambda > 0.24$ 时,固定周期休眠算法的能量消耗明显增大,当 $\lambda = 0.4$ 时,能量消耗大约等于 12 W。此时基站基本上处于持续工作状态。改进方案 A 适用于通话率比较高的水平,因为它在通话率高的趋势变化是才会有一定的优势,比较适合单基站的通信;改进方案 B 对高、低通话率均有比较好的适应性,比较适合环境不稳定、通话率变化较大的基站休眠,在多基站协作通信中有明显的优势。

此外,对改进方案 A 和改进方案 B 的平均延时进行了分析,如图 8 所示。

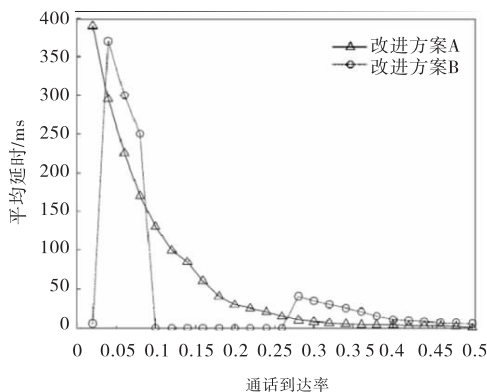
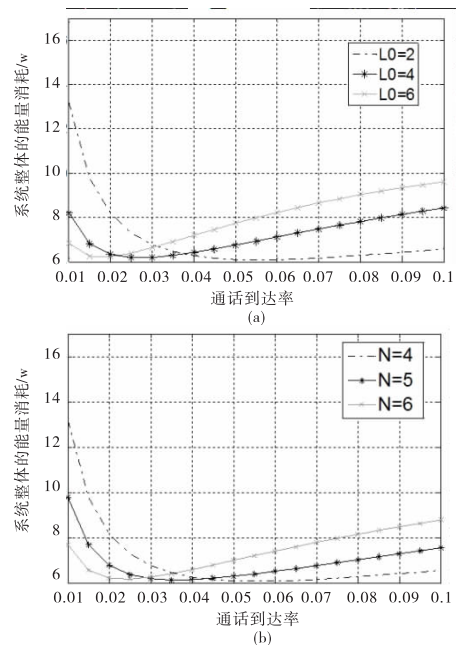


图8 两种改进方案的延时情况

由图 8 可知,随着通话到达率的增加,两种改进算法的平均时延都逐渐减小。在 $\lambda > 0.1$ 及 $0.25 < \lambda < 0.4$ 时,改进方案 B 会比改进方案 A 产生更高的时延,由于改进方案 B 的基站大部分时间均处在较大的休眠周

期,从而产生了较高的平均时延,但是,如果减去多基站协作产生的时延,在实际应用中改进方案 B 要优于仿真结果。因此,改进方案 B 对通信造成的延时影响不明显。

而改进方案 B 可以根据不稳定场景自适应地调整休眠间隔(改进方案 A 其实是其一种特例),它的初始参数设置比较重要,包括休眠间隔的状态数 N 、初始休眠间隔 L_0 等(图 9)。

图9 改进方案 B 的系统能耗随参数初始休眠间隔 L_0 和状态数 N 的变化

当通话率在比较高的水平波动时,这时初始休眠间隔 L_0 和休眠状态数 N 应自适应比较小的值;当通话率在比较低的水平波动时,这时初始休眠间隔 L_0 和休眠状态数 N 应自适应较大的值。

5 结束语

文章分析了 Femtocell 基站的休眠机制,在传统的固定周期休眠算法的基础上,提出了 Femtocell 基站的两种改进的自适应休眠方案,并对两种改进的休眠方案进行 Markov 分析和性能仿真,结果显示两种改进休眠方案均有比较大的能量改善,改进方案 A 比较适合环境变化小、通话率高的单基站;相对改进方案 A,改进方案 B 能在通话率波动比较大的范围内保持良好性能,且性能最好,适应多基站协作的通信。

参考文献:

- [1] CLAUSSEN H,HO L T W,SAMUEL L G.An overview of the femtocell concept[J].Bell Labs Technical Jour-

- nal,2008,13(1):221-245.
- [2] 张海波,邹剑,刘开健,等.Femtocell 网络中基于分簇的资源分配机制[J].通信学报,2017,38(1):16-25.
- [3] FENG K T,SU W C,CHEN C Y.Comprehensive performance analysis and sleep window determination for IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks[J].IEEE Transactions on Mobile Computing,2015,15(1):74-91.
- [4] 仲崇显,李春国,杨绿溪.基于非合作博弈论的多小区 OFDMA 系统动态资源分配算法研究[J].电子与信息学报,2009,31(8):1935-1940.
- [5] ANDREWS J G,CLAUSSEN H,DOHLER M,et al. Femtocells: Past, Present, and Future[J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2012,30(3):497-508.
- [6] 朱艺华,周标,李燕君.支持 WiMAX 节点灵活休眠的两阶段可靠多播策略[J].电子学报,2012,40(8):1552-1557.
- [7] 潘军.分层无线网络中的切换和接纳控制研究[D].合肥:中国科学技术大学,2013.
- [8] 李泳志,陶成,刘留,等.莱斯信道下分布式大规模 MIMO 系统基站选择算法的研究[J].电子与信息学报,2016,38(4):856-862.
- [9] 张红霞,邹华,林荣恒,等.基于马尔科夫决策过程的可适应业务流程建模及分析[J].电子与信息学报,2013,35(7):1760-1765.
- [10] 杨磊磊,黎海涛.基于业务量的自适应 IEEE802.16e 休眠机制[J].计算机科学,2013,40(5):107-109.
- [11] 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.
- [12] AUDHYA G H,SINHA H,MANDAL H,et al.A new approach to fast near-optimal channel assignment in cellular mobile networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2013,12(9):1814-1827.
- [13] 万晋京,宋艳华,彭帅.基于 Femtocell 分层无线网络的切换算法[J].北京联合大学学报,2017,31(1):81-86.
- [14] 蒋青,任行帆,张佳星.一种基于优先级的异构无线网络切换算法[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2014,26(6):826-831.
- [15] 张永棠.一种高精度 TR-UWB 系统同步算法[J].四川理工学院学报:自然科学版,2016,29(3):19-22.

Analysis of the Sleep-Mechanism for Femtocell

ZHANG Yongtang^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, Guangdong Neusoft Institute, Fushan 528225, China;

2. Jiangxi Microsoft Technology Center, Nanchang 330003, China)

Abstract: Femtocell is an effective way to solve the problem of cellular coverage, but Femtocell energy consumption has become an urgent problem. Traditional fixed-cycle sleep mechanism algorithm of Femtocell is analyzed, and two improved adaptive sleep mechanisms are proposed. In fact, the design ideas are: in improved program A, by introducing the sleep cycle factor to change the growth factor, the sleep cycle is dynamically adjusted; in improved program B, through the last sleep cycle state order to determine the initial sleep interval time, the sleep mode of energy consumption is reduced. The results show that there are relatively large energy improvements in the two improved dormancy schemes. The improved scheme A is more suitable for single base station communication with small change of environment and high call rate. The improved scheme B can maintain good performance in the range of relatively large fluctuations in call rate, gain best performance, and adapt to multi-base station collaboration communication.

Key words: Femtocell; sleep-mechanism; Markov analysis; energy saving station; call rate