

## 区域化的无线蜂窝网自主节能管理机制

喻鹏\* 李文璟 邱雪松

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)

**摘要:** 为了实现无线蜂窝网的区域化节能,该文基于自主管理技术提出了区域化的自主节能管理机制(AESMM)。首先分析了无线蜂窝网的节能模型,之后提出 AESMM 流程。针对 AESMM 中核心问题,提出了区域化双基站补偿法和智能自主覆盖优化算法,以在保证区域覆盖率的同时实现区域节能的最大化。该机制在 WCDMA/HSDPA 城区场景中进行了仿真,并与参考文献中的两种算法进行对比,验证了该机制能够在保证有效业务质量和良好的覆盖情况下,节约区域约 17% 的能量,实现最大化的节能。

**关键词:** 无线网络; 自主化; 区域化; 节能管理; 双基站补偿

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)11-2707-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2012.00508

## A Regional Autonomic Energy-saving Management Mechanism for Cellular Networks

Yu Peng Li Wen-jing Qiu Xue-song

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** An Autonomic Energy-Saving Management Mechanism (AESMM) based on autonomic management is proposed for saving energy in wireless cellular networks. Energy-saving model is analyzed firstly, and then procedures of AESMM are introduced. As two key issues of AESMM, regional BS opposite-pair compensation method and autonomic intelligent optimization algorithm for coverage compensation are proposed. Objective is maximizing regional saving energy and meanwhile guaranteeing regional coverage and service quality. AESMM is simulated under WCDMA/HSDPA scenario. Comparing to other two methods adopted in the references, results show that AESMM can save maximal energy (about 17% of regional energy consumption) while keep regional coverage and service quality acceptable.

**Key words:** Wireless networks; Autonomic; Regional; Energy-saving management; Opposite-pair compensation

### 1 引言

随着温室气体效应越来越受到关注,能效成为当前工业界所要考虑的重要问题之一。当前 ICT 工业的所消耗的能量已经占到全球能耗的 5%,并在接下来的时间内增长趋势更加明显<sup>[1]</sup>。同时,随着无线蜂窝网的不断发展,网络提供的业务越来越多样化,无线接入节点(例如 BTS, NodeB, eNodeB 等)的部署也越来越密集。这些众多的无线接入节点耗费了整个通信网络 80%~90% 的能量<sup>[2]</sup>。目前,按照峰值容量设计的无线蜂窝网络在低业务量时一些接入节点的负载为 0 或者很低,从而导致资源和运行维护

成本的浪费<sup>[3]</sup>。因此,研究无线蜂窝网的节能对减少温室效应的影响,降低运营商的运行维护成本有很大的意义。

目前已有的研究成果中无线蜂窝网节点的节能包括两个方向:一是设计高效率的基站硬件,以提高功放电路等部分的效率。另外一个软件层次的节能管理,即在基站低业务量时,通过软件控制休眠部分的基站,并控制相邻的基站完成这部分区域的覆盖和容量补偿<sup>[2]</sup>。本文提出的自主节能管理机制(Autonomic Energy-Saving Management Mechanism, AESMM)属于后一种方法。但是目前有关触发节能动作业务量门限值的确定方法还没有明确的结论。文献[4]分析了从用户角度考虑的节能算法,但是并没有考虑区域的覆盖和干扰的影响,也没有给出具体的网络参数调整方案。当前覆盖补偿的参数调整方法已有共识,主要是调整邻基站的下倾角和发射功率来实现单基站的覆盖补偿<sup>[5,6]</sup>,但是仅仅考虑了

2012-05-02 收到, 2012-08-23 改回

国家自然科学基金创新研究群体项目(61121061), 国家科技重大专项课题(2011ZX03003-002-01), 国家自然科学基金项目(61271187), 国家科技支撑计划课题(2012BAH06B02)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-10-0240)资助课题

\*通信作者: 喻鹏 yupeng\_bupt@126.com

下行的覆盖范围需求。文献[7]提出了一种基于功率调整的覆盖补偿算法,但是仅仅考虑了规则化的网络部署情况,并对所有补偿基站采取统一的处理方式,并未考虑用户的不均与分布。而从规划的角度增加毫基站和毫微微基站来降低区域的能耗<sup>[8]</sup>,并不适用于已运行的动态网络。针对基站的能耗模型,基站功率的静态和动态组成部分已有分析<sup>[9]</sup>,但是动态部分与业务量之间的关系还没有精确的结论,同时也没有将覆盖、质量和容量同时纳入约束范围。

针对以上问题,本文首先分析了无线蜂窝网的节能模型,之后依据节能模型提出了适用于无线接入网络的 AESMM。AESMM 给出了自主化节能管理的实现流程和其中的关键算法,并解决了上述的业务量门限无法确定、缺乏兼顾多因素的节能方法,以及能耗模型不完备等问题。

## 2 无线蜂窝网的节能模型分析

假设网络中的基站数目为  $N$ , 支持的业务种类数为  $K$ ,  $t$  时刻网络中的用户数为  $M(t)$ , 基站  $i$  的总功率为  $P_{BS}^i(t)$ , 发射功率为  $P_{Tx}^i(t)$ ,  $c_{ijk}(t)$  表示用户  $i$  与基站  $j$  的对应的业务  $k$  的连接状态,  $B_j^k(t)$  表示  $t$  时刻到达基站  $j$  的业务  $k$  的阻塞率,  $p_{jk}$  表示基站  $j$  在业务  $k$  上的最小信道功率,  $v_k$  表示业务  $k$  所需的资源数目,  $V_j$  表示基站  $j$  的可用资源。则基站  $i$  发射功率与基站总功率的关系如式(1)所示<sup>[9]</sup>:

$$P_{BS}^i(t) = n_{sc}[n_{Tx}(P_{Tx}^i(t)/\eta + P_{Trans}) + P_{Proc} + P_{Rect}] + P_{micro} + P_{airco} \quad (1)$$

其中  $n_{sc}$  表示基站小区的数目,  $n_{Tx}$  为一个小区对应的天线数,  $\eta$  为功放电路的效率,  $P_{Trans}$  为收发器的功率,  $P_{Proc}$  为数字信号处理器的功率,  $P_{Rect}$  为整流器的功率,  $P_{micro}$  为微波链路功率,  $P_{airco}$  为空调的功耗。式(1)对所有的基站均适用。在业务量变化周期区间  $[0, T]$  上, 无线蜂窝网的节能问题可以用如下形式描述:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j=1}^N \int_0^T P_{BS}^j(t) dt \\ & \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} \forall i, k, t, \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N c_{ijk}(t) \leq 1, c_{ijk}(t) \in \{0, 1\} \\ \forall j, t, \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M(t)} v_k \cdot c_{ijk}(t) \leq (1 - \tau_j) \cdot V_j \\ \forall k, t, B_j^k(t) \leq B_p^k \\ \forall j, k, t, \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M(t)} TL \cdot p_{jk} \cdot c_{ijk}(t) / (1 - \alpha) \\ \leq P_{Tx}^j(t) \leq P_{Tx}^M \end{array} \right. \quad (2) \end{aligned}$$

以上约束中, 第 1 项是用户角度的需求, 即任

何时刻, 单个用户  $i$  最多只能被一个基站  $j$  所服务, 并最多使用一种业务。第 2 项是资源角度需求, 即任何时刻所有的基站  $j$  都不存在过载情况,  $\tau_j$  是用作切换和克服干扰的余量。第 3 项是业务质量角度的需求, 任何时候, 到达各个基站  $j$  的不同业务  $k$  的阻塞率应小于目标值  $B_p^k$ 。第 4 项是功率角度的需求,  $\alpha$  是控制信道功率所占的比例。即每个基站  $j$  的发射功率都不大于功放电路所能提供的发射功率上限值  $P_{Tx}^M$ 。

如果要求解以上问题, 需要在各个离散的时间点上进行分析。由于很多变量会随时间发生变化, 因此以上问题很难在各个时间点上获取有效的解决方案<sup>[4]</sup>。而在节能初始时刻  $t^*$  时, 业务量分布的突变会带来业务质量和覆盖的显著变化; 而网络进入节能状态后, 业务量、覆盖和业务质量变化则相对平滑, 因此解决时间点  $t^*$  上的节能问题尤为重要。本文采用的方案是通过 AESMM 确定节能触发和恢复门限, 并针对  $t^*$  时的节能问题进行求解, 并给出具体的发射功率参数调整方案。

在节能触发时, AESMM 将会与其他节能算法进行对比, 验证在  $t^*$  时刻的业务阻塞率, 覆盖间隙率, 发射功率, 资源约束是否满足要求。

同时为了验证 AESMM 的有效性和可行性, 在节能结束之后, AESMM 的节能效果, 覆盖和干扰的影响也会得到评估和分析, 并与其他算法进行对比。首先要分析节能时间段内和整个时间域上的节能的有效性。设节能恢复时间为  $t^\#$ , 网络在节能状态下和正常状态下基站  $j$  的功率分别为  $P_{BS-ES}^j(t)$  和  $P_{BS-NS}^j(t)$  (均满足关系式(1)), 则节能时间段上的节能率  $E_s$  如式(3)所示:

$$E_s = 1 - \frac{\int_{t^*}^{t^\#} P_{BS-ES}^j(t) dt}{\int_{t^*}^{t^\#} P_{BS-NS}^j(t) dt} \quad (3)$$

整个时间域上的节能效率  $E_e$  表示如式(4)所示:

$$E_e = \frac{\int_{t^*}^{t^\#} P_{BS-NS}^j(t) dt - \int_{t^*}^{t^\#} P_{BS-ES}^j(t) dt}{\int_0^T P_{BS-NS}^j(t) dt} \quad (4)$$

由于传播环境复杂, 用户分布不均匀等情况的存在, 干扰很难得到准确地量化。因此, 我们需要在节能时间段内, 对覆盖和干扰的影响进行监测, 并在机制执行完毕后进行分析, 以验证该方法的可行性。这里主要通过区域的用户接受服务基站的信号强度和载干比的累积概率来进行评价。设节能时间段内的时刻点  $t$ , 用户  $i$  接收到的来自于  $j$  的覆盖相关的信号强度为  $\rho_{ij}(t)$ , 对应的载干比为  $\kappa_{ij}(t)$ , 为

为了防止过覆盖和弱覆盖的出现,  $\rho_{ij}(t)$  和  $\kappa_{ij}(t)$  在整个节能时间段上的累积概率分布应该满足式(5)要求:

$$\text{s.t.} \begin{cases} F_{\rho_{ij}(t)}(\rho_{ij}^*(t) \geq \rho_{\min}) \geq \beta \\ F_{\kappa_{ij}(t)}(\kappa_{ij}^*(t) \geq \kappa_{\min}) \geq \gamma, j^* = \arg \max\{\rho_{ij}(t)\} \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\rho_{\min}$  和  $\kappa_{\min}$  表示了用户  $i$  接受基站  $j$  的服务时  $\rho_{ij}(t)$  和  $\kappa_{ij}(t)$  的下限值,  $\beta$  和  $\gamma$  表示  $\rho_{ij}(t)$  和  $\kappa_{ij}(t)$  累积概率分布的约束门限,  $F_x(C)$  表示变量  $x$  在满足条件  $C$  时的累积概率分布。经过以上分析对比, AESMM 即可得到有效的验证。

### 3 自主的节能管理机制

AESMM 基于自主管理的理念设计<sup>[10]</sup>, 通过自主监测、分析、规划、执行完成无需人工干预的节能管理。具体流程分析如下:

(1) 在自主监测阶段, 自主管理实体周期性监测区域的业务量和能耗。这里将占用的业务信道数作为区域业务量衡量参数。管理实体监测单个基站和区域的业务量变化情况, 以及单个基站和区域的能耗变化。之后进入自主分析阶段;

(2) 在自主分析阶段, 若处于正常状态下的网络的业务量  $Tr$  低于节能触发的门限  $\delta$ , 且持续时长大于等于缓冲时间  $t_s$ , 则触发节能处理流程, 进入自主规划阶段; 若处于节能状态下的网络的业务量  $Tr$  高于节能恢复的门限  $\sigma$ , 且持续时长大于等于缓冲时间  $t_c$ , 则触发节能恢复流程, 进入自主执行阶段; 如果以上条件均不满足, 则返回自主监测状态继续监测;

(3) 在自主规划阶段, 自主管理实体首先根据基站的布局, 针对时刻  $t^*$ , 在可行的局部补偿机制上选取待休眠的基站集合, 通过区域化的双小区补偿法来实现; 之后, 针对未休眠的基站, 在时刻  $t^*$  采用自主覆盖优化算法获取基站的功率调整值的集合, 以在保证基站覆盖范围的基础上实现基站的最大化节能, 进入自主执行阶段。上述两个功能是 AESMM 的核心;

(4) 在自主执行阶段, 自主管理实体依据网络的状态和自主规划的结果, 针对基站和用户执行相应的动作。主要包括休眠和开启部分基站, 调整和恢复基站的功率, 执行用户切换等等。执行完毕后, 重新进入自主监测阶段。

设执行区域化的双基站补偿法后, 处于正常状态, 休眠状态和补偿状态的基站比例分别为 NR, SR 和 CR。一般情况下, 节能触发门限值  $\delta$  和节能恢复门限值  $\sigma$  相一致, 缓冲时间  $t_s$  和  $t_c$  也一致。可设初始节能的门限与峰值业务量  $Tr_{\max}$  关系为  $\delta = Tr_{\max}/2$ 。由于区域的业务量近似呈周期性变化, 每

经过一个周期之后,  $\delta' = Tr_{\max} \times \min(\delta / Tr_{\max}, NR + CR)$  作为新的门限值。从而实现节能触发和恢复门限值的动态更新。

在分析阶段针对业务量设置缓冲时间的目的是防止由于业务量的快速变化而出现的频繁控制和切换。由于需要获取多个基站的业务量信息, 并且执行必要的切换, 因此管理功能适合在无线网络控制器(RNC)中实现。由于每个控制器的控制范围有限, 当切换涉及不同控制器下的基站时, 需要各控制器协调完成相应的规划和执行功能。同时, 为了实现网络状态的快速恢复, 各控制器需要对正常状态下其下属的基站的发射功率值进行记录。

### 4 区域化的双基站补偿法

考虑到基站和小区的对称性, 针对单基站, 依据已有的均匀布局场景下的对称基站补偿方法, 本文提出了双基站覆盖补偿方法。

#### 4.1 双基站覆盖补偿方法(OP 补偿)

从局部看, 单个待关闭基站的覆盖范围可以由相邻的基站来补偿。由于单个基站的覆盖范围有限, 因此在执行补偿时, 单个待关闭基站的覆盖范围同时由多个邻基站同时来补偿是相对可行的。针对均匀布局的基站, 当由对称的一对基站来进行补偿时, 区域可以关闭近一半数量的基站, 具有良好的补偿效果<sup>[7]</sup>。以市区常用的三小区基站为例, 图 1(a)给出了 OP 补偿的示意图, 称基站对( $BS_1, BS_2$ )为基站  $BS_0$  的对偶对(Opposite Pair, OP), 每个基站的对偶对构成集合 OP。针对现实网络基站布局不均匀的情况, 图 1(b)给出了更为普适的 OP 补偿示例。基站  $BS_0$  的 OP 确定方法如下: (1) 选取  $BS_0$  邻基站中信号最强的 6 个基站作为候选补偿基站, 如  $BS_1 \sim BS_6$  所示; (2) 从 6 个基站中选取布局这样两个基站构成一个 OP: 其与  $BS_0$  构成的钝角  $\theta$  满足  $150^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ , 且业务量均低于峰值, 如图 1(b)中的 ( $BS_1, BS_4$ ), ( $BS_2, BS_5$ ) 和 ( $BS_3, BS_6$ ); (3) 将所有的 OP 构成集合 OP, 作为备选的补偿方案集合。

由于单基站的 OP 补偿存在多个选择, 不同的选择会对邻基站的覆盖造成影响。为了使区域化的覆盖和节能效果趋向最佳, 需要从区域的角度来选取不同基站的 OP 补偿方案, 以保证补偿基站的效用的最大化, 区域最优化的选取算法解决了这一问题。

#### 4.2 面向 OP 补偿的区域最优化选取算法

本文将基站的状态分为正常状态、补偿状态和休眠状态 3 种。网络状态分为正常状态和节能状态两种。节能状态下的网络中的基站由正常状态下和补偿状态下的网络提供覆盖, 休眠状态下的基站则

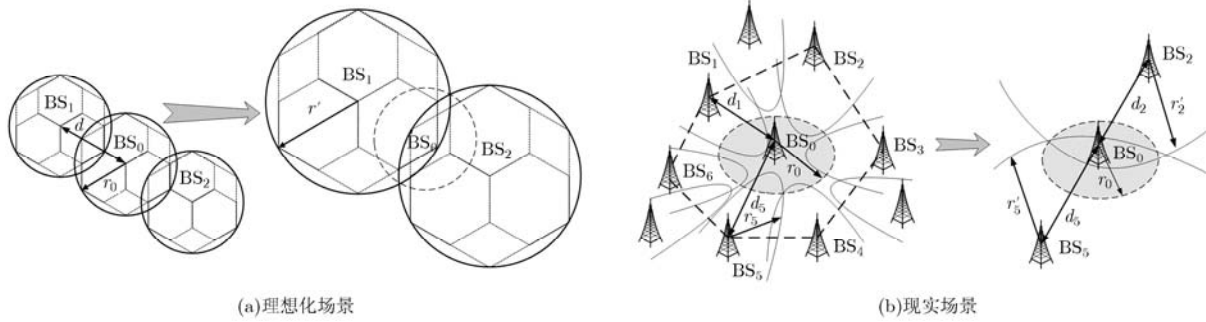


图1 三小区基站 OP 覆盖补偿示例图

维持在低能耗状态。区域最优化的选取算法保证在满足 OP 补偿的条件下使休眠的基站数目最大化。

表 1 给出了 OP 补偿的区域最优化选取算法描述。其中  $n_{ij}$ ,  $o_{ij}$  和  $c_{ij}$  分别表示序列对  $op_{ij}$  中处于正常状态、休眠状态和补偿状态基站的数目。 $B$  表示所有基站的集合； $S$  表示所有基站状态的集合，0, 1 和 2 分别表示正常状态，休眠状态和补偿状态。算法 1 的目标是使处于补偿状态的基站的补偿效用最大化，从而达到关闭更多基站的目的。

表 1 OP 补偿的区域最优化选取算法

#### 算法 1 区域最优化选择算法

```

(1) Input:  $B, S$ 
(2) Output:  $S$ 
(3) while  $B \neq \emptyset$  do
(4)   for  $\forall b_i \in B$ 
(5)     if  $s_i = 0$ , then
(6)       find the set of opposite pairs  $OP_i$ 
(7)       while  $OP_i \neq \emptyset$  do
(8)         for  $\forall op_{ij} = (b_k, b_l) \in OP_i$ ,
           count  $n_{ij}$ ,  $o_{ij}$  and  $c_{ij}$ 
(9)          $OP_i = OP_i - op_{ij}$ 
(10)      end while
(11)     if such  $J$  exists, where
(12)        $op_{i,l} = (b_K, b_L) \in OP_i$ ,  $o_{i,l} = 0$ , and
            $J = \operatorname{argmax}\{c_{ij}\}$ 
(13)     then
(14)        $s_i = 1, s_K = 2, s_L = 2$ 
(15)        $B = B - b_K - b_L$ 
(16)     end if
(17)   end if
(18)    $B = B - b_i$ 
(19) end while

```

由于基站的功率值决定了基站的覆盖范围，在确定了节能状态下网络中各个基站的状态之后，需要调整处于非节能状态的基站发射功率值，以保证区域化节能最大的目标上保证覆盖目标。基站的功率调整值将通过智能覆盖优化方法来获取。

## 5 智能覆盖优化算法

在明确了基站的状态之后，针对时刻  $t^*$ ，需要调整补偿状态基站功率值以在保证区域覆盖的基础上实现区域能耗的最小化，首先我们分析了优化模型，之后选取合适的算法来进行求解。

### 5.1 优化模型分析

在选取了需要休眠的基站之后，基站的覆盖范围由参数下倾角和业务信道功率决定。本文假设天线倾角不变，则业务信道功率  $p_{jk}$  决定了覆盖范围，这里将矩阵  $\mathbf{P} = \{p_{jk}\}$  作为优化对象。

假设上行链路预算获取的用户覆盖范围为  $r^u$ ，基站  $j$  的高度为  $h_j$ ，则通过链路预算获取的基站  $j$  的覆盖范围可以表示如下：

$$d_{jk} = g^{-1}(p_{jk}, L_{jk} | h_j, f_j, h_{ms}) \quad (6)$$

其中  $L_{jk}$  是基站  $j$  针对业务  $k$  的最大下行路损， $f_j$  是基站  $j$  的下行工作频率， $h_{ms}$  是用户平均高度。函数  $g(\cdot)$  由选取的路损模型来确定。“|”之前的参数为变量，之后的参数为取值固定的离散值。

仅从覆盖范围角度进行分析，基站  $j$  的半径  $r_j$  应该满足如下约束：

$$r_j = \min\{\max\{d_{jk}\}, r^u\} \quad (7)$$

在现网中，一般都有  $r^u \geq d_{jk}$ 。以上两式建立了  $p_{jk}$  与  $r_j$  的关系。进一步，从覆盖的角度来说，要保证整个区域的覆盖，需要最小化覆盖间隙率  $H(\mathbf{P})$ ，优化目标为

$$\min H(\mathbf{P}) = \frac{S - \sum_{j=1}^n \pi r_j^2 + \sum_{l=1}^n \sum_{q=1}^n O_{lq}}{S} \times 100\% \quad (8)$$

其中  $O_{lq}$  表示基站  $l$  与基站  $q$  的重叠面积。由于业务信道功率的变化与基站发射功率成正比，因此需要使区域化的业务信道功率尽量小，即满足：

$$\min G(\mathbf{P}) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N p_{jk} \quad (9)$$

由于区域覆盖、功率约束、资源约束等等可计算指标直接决定了节能机制的有效性，因此在  $t^*$  时

刻这些因素将会被列作  $G(\mathbf{P})$  的约束条件, 如式(10)所示:

$$\text{s.t.} \begin{cases} H(\mathbf{P}) \leq \mu \\ \forall i, \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N c_{ijk}(t^*) \leq 1 \\ \forall j, P_{\text{Tx}}^j(t^*) \leq P_{\text{Tx}}^{\max} \\ \forall j, \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M(t^*)} v_k \cdot c_{ijk}(t^*) \leq (1 - \tau_j) \cdot V_j \end{cases} \quad (10)$$

上述约束中  $\mu$  表示覆盖空白率的上限。设  $P_T$  表示  $\mathbf{P}$  的取值集合, 在网络中业务功率值支持步长为 1 dBm 的调整, 因此  $P_T$  是一个离散的状态空间, 该优化问题在求解过程中需要处理大量的信息, 是一个复杂的组合优化问题。需要通过智能优化算法来求解。

### 5.2 模拟退火的算法实现

作为一种通用的随机搜索算法, 模拟退火能够有效地解决复杂的组合问题, 并具有避免陷入局部最优, 克服初值依赖性等优点, 是一种理论上的全局最优算法<sup>[11]</sup>。模拟退火算法相对于其他智能优化算法, 特点是其能够获取全局的最优解, 但是收敛速度相对较慢。由于节能管理是个优化问题, 一方面, 其目标是寻求有效的最优解, 另一方面, 网络优化的周期都相对较长, 并不是一个时间敏感的问题, 因此模拟退火算法在这里较为适用。另外, 本文的节能模型只与基站数目的规模有关, 同时离散的取值空间降低了计算复杂度, 因此相对易于实现。

模拟退火算法主要用来求解无约束问题, 因此需要将上述优化问题转化成如下的无约束问题:

$$\begin{aligned} \min z = & G(\mathbf{P}) + \left( \frac{\varsigma}{T_l} \right) | H(\mathbf{P}) - \mu |^2 \\ & + \left( \frac{\omega}{T_l} \right) \sum_{j=1}^N \left[ \sum_{P_{\text{Tx}}^j(t^*) \in P_U} (P_{\text{Tx}}^j(t^*) - P_{\text{Tx}}^{\max})^2 \right] \\ & + \left( \frac{\chi}{T_l} \right) \sum_{j=1}^N sg^2 \left( \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M(t^*)} v_k \cdot c_{ijk}(t^*) + \tau_j \cdot V_j - V_j \right) \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中,  $\varsigma$ ,  $\omega$  和  $\chi$  分别为覆盖区域, 发射功率和资源的惩罚因子。  $T_l$  表示当前的温度,  $P_U$  表示大于  $P_{\text{Tx}}^M$  的数值集合, 函数  $sg(x) = \max\{0, x\}$ 。本文采用的模拟退火算法的流程如下:

第 1 步 选定有效的初始解  $\mathbf{P} \in P_T$ , 给定初始温度  $T_0$  和终止温度  $T_p$ , 令迭代指标  $l = 0$ ,  $T_l = T_0$ , 设定内循环迭代次数  $n(T_l)$ , 令内循环计数器  $n = 0$ ;

第 2 步 随机生成 1 个领域解  $\mathbf{P}' \in N(\mathbf{P}) \in P_T$ , 其通过改变  $\mathbf{P}$  中一个随机选取的基站  $j$  和业务  $k$  的

$P_{jk}$  值得到, 其中  $N(\mathbf{P})$  表示  $\mathbf{P}$  的领域。令  $n = n + 1$  并计算目标值增量  $\Delta z = g(\mathbf{P}') - g(\mathbf{P})$ ;

第 3 步 若  $\Delta z < 0$ , 令  $\mathbf{P} = \mathbf{P}'$ , 转第 4 步; 否则生成  $\xi = U(0,1)$ , 若  $\exp(-\Delta z/T_l) \xi$ , 则令  $\mathbf{P} = \mathbf{P}'$ ;

第 4 步 若达到热平衡(内循环次数  $n > n(T_l)$ ), 转第 5 步; 否则转第 2 步;

第 5 步 降低  $T_l$ ,  $l = l + 1$ , 若  $T_l < T_p$ , 则算法停止, 否则, 重新设定内循环迭代次数  $n(T_l)$ , 并令内循环计数器  $n = 0$ , 转第 2 步。

在获取了矩阵  $\mathbf{P}$  的优化结果  $\mathbf{P}'$  之后, 在节能时间段内, 设处于休眠状态的基站功率均为  $P_C$ , 正常状态下基站的发射功率为  $P_B$ , 对补偿状态的基站发射功率进行如下取值:

$$P_{\text{Tx}}^j(t) = \max \left\{ P_B, TL \cdot \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M(t^*)} p'_{jk} \cdot c_{ijk}(t^*) / (1 - \alpha) \right\} \quad (12)$$

结合节能模型, 即可计算出区域的节能效率。

## 6 仿真及分析

本文通过仿真, 在 UMTS 场景下中验证了 AESMM 在 3 天(72 h)内的节能效果。

### 6.1 仿真环境设置

本文采用的仿真软件是 QualNet, 场景为 WCDMA/HSDPA 的一个城区场景。上下行工作频率分别为 1.95 GHz 和 2.13 GHz, 路损通过 COST32-HATA 传播模型来进行近似计算。仿真场景的俯视图如图 2(a)所示。仿真区域的面积为 3 km×2.5 km, 街道宽度为 20 m。一个面积为 200 m×200 m 的小型公园位于该区域的中央。所有建筑物的高度位于 30 m 到 40 m 之间。区域共包括 18 个基站, 每个基站拥有 3 个小区。每个小区配置一个载频。基站间距离在 600 m 到 700 m 之间。所有的基站都与同一个 RNC 连接, 且基站类型一致。  $h_{ms} = 1.5$  m, 区域提供 12.2 kbps AMR 语音业务和 364 kbps 的 HTTP 业务, 初始的业务信道功率  $p_{jk}$  均一致, 分别为 25 dBm 和 28 dBm。每个小区的可用资源为 CE 数, 共有 128 个。单个语音用户占用的资源数为 1, HTTP 业务所占用的资源由 HSDPA 机制动态分配。假设每个小区到达的用户服从近似泊松分布, 如图 2(b)给出了一个相对实际的到达率变化图。可以发现到达率的变化周期为 24 h。

设语音业务和数据业务的平均服务时间为 3 min 和 15 min。则结合文献[12]的计算方法可以获取区域的业务量变化曲线。首先确定节能模型中的参数取值, 在式(1)中,  $n_{sc}$  与基站包含的小区数一致,  $n_{\text{Tx}}$  均为 1,  $\eta$  为 0.2, 其他功率部分的取值与文献[9]一致。在形式(2)中, 参照文献[13]的分析, 资源余

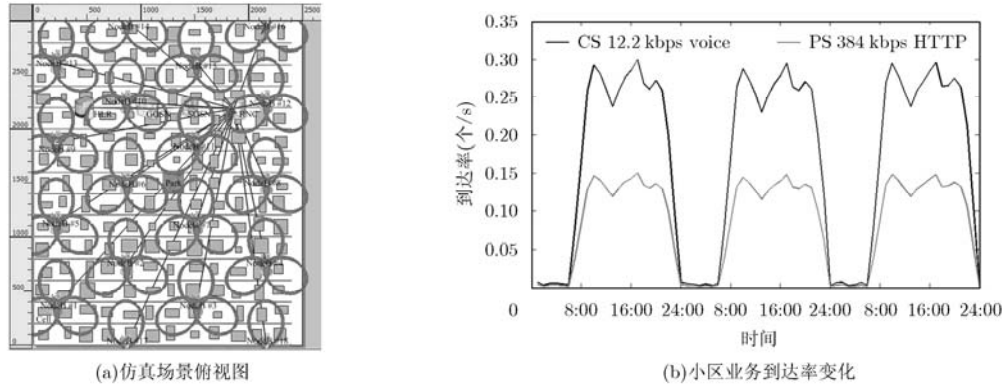


图 2 仿真场景说明图

量  $\tau_j$  均设为 0.25, 不同业务的阻塞率上限设为  $B_p^k = 0.01$ , 目标负载  $TL$  均为 0.75,  $\alpha$  取值均为 0.2,  $P_{TX}^M$  取值为 60 W。判断覆盖质量的指标为导频 CPICH 接收信号强度 RSCP 和对应的导频 CPICH  $E_c/I_o$  值, 对应的  $\rho_{\min}$  和  $\kappa_{\min}$  的取值分别为 -95 dBm 和 -12 dB, 相应的概率分布门限值分别为 98% 和 95%。在确定节能门限时, 设缓冲时间  $t_e=10$  min。进一步, 在智能覆盖优化算法中, 为了获取链路损耗  $L_{jk}$ , 基站  $j$  的覆盖半径  $r_j$  和上行覆盖范围  $r^u$ , 本文采用的链路预算参数也与文献[9]一致。

在智能优化算法中, 设  $T_0 = 20$ ,  $T_j = 1$ ,  $T_{i+1} = T_i \times 0.9$ ,  $\zeta = 20$ 。  $\zeta$ ,  $\omega$  和  $\chi$  的取值分为 100, 10 和 5。  $\mu$  的取值为 4%,  $n(T_i)$  取值均为 5, 参照文献[6], 可设  $P_B = 20$  W,  $P_C = 70$  W。

## 6.2 仿真结果分析

首先针对 AESMM 进行仿真, 在第 1 个周期上, 最优化结果在  $H(\mathbf{P}) = 2.99\%$ , 迭代次数为 171 时获取。此时基站功率, 资源约束均满足要求。说明 AESMM 是有效的节能机制。NR, SR 和 CR 的值分别为 1/16, 7/16 和 1/2, 对矩阵  $\mathbf{P}$ , 语音业务信道功率的调整范围为 [25 dBm, 32 dBm], 视频会话业务信道功率的调整范围为 [28 dBm, 35 dBm]。

在整个仿真时间段上, 网络不执行 AESMM 和执行 AESMM 后, 负载量最大的基站的阻塞率变化对比如图 3 所示。首先可以发现数据业务的阻塞率要高于语音业务, 同时, 执行 AESMM 后阻塞率在节能时间段上会发生改变, 且峰值高于正常网络状态, 但是依然处于目标值 1% 下。这就说明节能方法获取节能效果是以牺牲一定的性能为代价的。

在该仿真环境下, 将 AESMM 与文献[4]和文献[7]的算法进行对比分析, 一些指标值对比结果如表 2 所示。

通过表 2 可以发现, 3 种算法的区域空白率和单基站最高阻塞率都维持在目标值以下, 同时, 节

表 2 3 种算法仿真结果对比

指标	AESMM	文献[4]算法	文献[7]算法
平均节能时长(h)	9.6	9.9	10.2
节能效率 $E_s(\%)$	40.50	38.24	34.52
节能效率 $E_c(\%)$	16.52	15.78	14.67
区域最高空白率(%)	2.99	3.64	1.38
单基站最高阻塞率(%)	0.77	0.58	0.85

能时间的长短并不能直观反映出节能的效率。在覆盖区域指标上, 文献[4]算法由于从用户角度进行处理而相对忽略了基站的覆盖约束, 对所有基站执行近似的补偿方案, 因此会产生最高的覆盖空白, 也达不到最好的节能效果。而文献[7]算法由于将阻塞率作为节能门限的标准, 因此单基站峰值阻塞率最高。同时由于补偿基站数目较多, 关闭基站数目较少, 因此节能效率最低。相比之下, 本文提出的 AESMM 在节能时间段和整个仿真时间上拥有最高的节能效率。

进一步, 我们考察这 3 种算法对覆盖质量的影响。图 4 给出了导频信道 CPICH RSCP 和  $E_c/I_o$  的概率分布。在网络不执行节能方法, 执行 AESMM, 文献[4]算法和文献[7]算法时 CPICH RSCP 大于 -95 dBm 的概率分别为 99.30%, 98.54%, 98.01% 和 98.13%, 对应的 CPICH  $E_c/I_o$  大于 -12 dB 的概率分别为 100%, 96.70%, 97.74% 和 98.23%。因此, 虽然 3 种方法的信号强度和信干比的分布比正常状态有所下降, 但是仍然能够满足覆盖质量的要求。同时, 即使 AESMM 克服干扰的效果虽然略为低于文献[4]和文献[7]的算法, 但是却能够保证最强的信号分布, 可以有效避免弱覆盖的发生。

综上所述, 由于 AESMM 在节能模型和智能优化算法中针对业务质量, 覆盖和干扰等都进行了约束, 使得该机制相对于其他算法, 能够在均衡各方

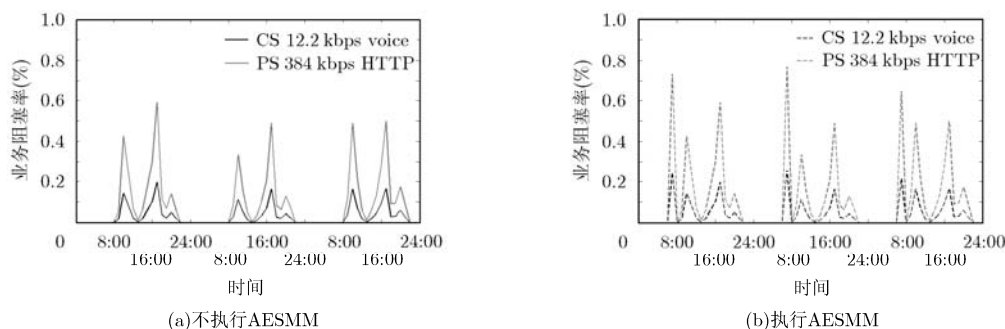


图 3 负载量最大基站阻塞率变化

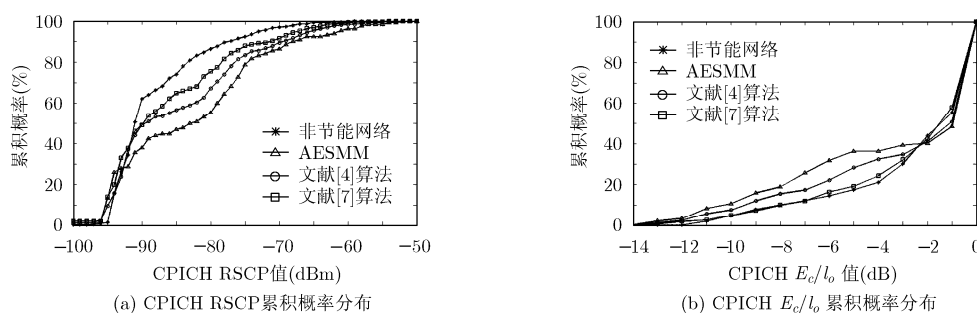


图 4 区域覆盖质量评价指标

面性能的同时，获取最好的节能效果。相比之下具有最高的有效性和可行性。

## 7 结束语

本章将自主网络管理技术应用到无线蜂窝网的节能实现中，基于“监测-分析-规划-执行”的自主控制闭环的理念，设计了自主的节能管理方法——AESMM。该方法可用于对运行中的无线蜂窝网进行自主的节能触发，节能补偿和节能恢复等。通过仿真验证了其能够在保证区域的覆盖质量的同时，减少区域约 17% 的能耗，相对于其他节能方法，具有最好的节能效果。

作为一种集中式的管理方法，AESMM 同时也存在集中式的管理方法所存在的缺点，例如失败中心点，通信瓶颈等，同时这里基站仅仅考虑了同构基站部署的情况。由于分布式的网络管理针对大型复杂的网络更具有优势，作者下一步的工作是基于 LTE 异构网络架构，研究多频段、多基站类型和多业务环境下的分布式自主节能方法。同时，作者当前正针对 AESMM 实现所面临的难点，例如协议流程，部署策略，以及更易于工程实现的算法等进行研究，以为自主节能机制在现网中的推广打下良好的基础。

## 参考文献

[1] Lubrittoa C, Petragliaa A, Vetromilea C, *et al.* Energy and

environmental aspects of mobile communication systems[J]. *Energy*, 2011, 36(2): 1109-1114.

- [2] Jyrkit L. Energy efficiency of modern cellular base stations [C]. Proceedings of the 29th International Telecommunications Energy Conference (INTELEC'07), Rome, Italy, 2007: 475-476.
- [3] 3GPP TR 32.826 v10.0.0. Study on Energy Saving Management (ESM) [S]. 2010.
- [4] Zhou S, Gong J, Yang Z X, *et al.* Green mobile access network with dynamic base station energy saving [C]. Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking Workshop (MOBICOM 09), Beijing, China, 2009: 25-29.
- [5] Niu Z S, Wu Y Q, Gong J, *et al.* Cell zooming for cost-efficient green cellular networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(11): 74-79.
- [6] Marsan M A, Chiaraviglio L, Ciullo D, *et al.* Optimal energy savings in cellular access networks [C]. Proceedings of the 1st International Workshop on Green Communications (ICCW '09), Dresden, Germany, 2009: 1-5.
- [7] Chiaraviglio L, Ciullo D, Meo M, *et al.* Energy-aware UMTS access networks[C]. Proceedings of the 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC '08), Lapland, Finland, 2008: 1-5.
- [8] Richter F, Fehske A J, and Fettweis G P. Energy efficiency aspects of base station deployment strategies for cellular networks[C]. Proceedings of the 70th Vehicular Technology

- Conference Fall (VTC Fall '09), Anchorage, USA, 2009: 1-5.
- [9] Deruyckd M, Tanghe E, Joseph W, *et al.* Modeling and optimization of power consumption in wireless access networks[J]. *Computer Communications*, 2011, 34(17): 2036-2046.
- [10] Brenan J, Sven M, Sasitharan B, *et al.* Towards autonomic management of communications networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(10): 112-121.
- [11] Meshkova E, Riihijarvi J, Ahtzahn A, *et al.* Exploring simulated annealing and graphical models for optimization in cognitive wireless network[C]. Proceedings of 2009 IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom '09), Anaheim, USA, 2009: 1-8.
- [12] Marsan M A and Meo M. Energy efficient wireless Internet access with cooperative cellular networks[J]. *Computer Networks*, 2010, 55(2): 386-398.
- [13] Abdel Khalek A, Al-Kanj L, Dawy Z, *et al.* Optimization models and algorithms for joint uplink/downlink UMTS radio network planning with SIR-based power control[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1612-1625.
- 喻 鹏: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为无线网络管理、自主管理与优化.
- 李文璟: 女, 1973 年生, 副教授, 研究方向为通信软件与网络管理.
- 邱雪松: 男, 1973 年生, 教授, 研究方向为通信软件与网络管理.