

# 动态关断资源栅格的异构无线网络基站节能算法

石文孝, 王继红, 赵颖, 张阁

(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘要:** 针对现有的基于载频/时隙关断的基站节能算法没有考虑异构网络之间的协同或者只考虑单一的业务与实际网络情况不相适应的问题, 在异构网络环境下提出了动态关断资源栅格(RG, resource grid)的基站节能新算法——DRGSM(dynamic resource grid shut mode)算法。该算法根据网络的即时负载, 当有业务接入时, 动态打开 RG 以满足业务的 QoS 要求; 当 RG 闲置时, 即将其关断以实现节能。仿真结果表明, 所提算法较现有的基于载频/时隙关断的基站节能算法, 明显地降低了能耗, 提高了节能百分比。

**关键词:** 节能; 基站; 异构网络; 资源栅格

中图分类号: TN929.53

文献标识码: B

文章编号: 1000-436X(2012)07-0151-07

## Energy-efficient algorithm of base station based on dynamic resource grid shut in heterogeneous wireless networks

SHI Wen-xiao, WANG Ji-hong, ZHAO Ying, ZHANG Ge

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Aiming at solving the problem that the energy efficient effect of current energy saving algorithms of base station based on shutting down carriers/time slots was not ideal, a novel energy saving algorithm of base station based on shutting down RG in heterogeneous networks dynamically was proposed, which called DRGSM algorithm. According to the instantaneous load of the networks, when there were new services to be served, the system would open new resource grids to satisfy their requests for QoS; when the resource grids were free, it shut them down in order to achieve the goal of energy saving. Simulation results show that the proposed algorithm has a better performance in energy deduction and energy saving percentage than current energy saving algorithms of the base station based on shutting down carriers/time slots.

**Key words:** energy efficient; base station; heterogeneous networks; resource grid

### 1 引言

节约资源、保护环境已成为我国可持续发展的基本国策。随着通信业的发展和用户数的迅猛增加, 通信网络的能耗问题日益突出, 节能降耗已成为业界关注的焦点<sup>[1]</sup>。目前, 移动通信系统中, 约80%的能耗来自基站系统<sup>[2]</sup>, 而未来无线通信网络的发展趋势必然是多种网络共存且相互融合的异

构网络<sup>[3]</sup>, 因此异构环境下基站节能技术的研究对营造绿色通信环境具有重要的应用价值。

基站能耗可以分为3部分——基站主设备能耗、机房环境设备能耗、电源系统和其他辅助设备能耗。其中基站主设备能耗占基站总能耗的49%~51%, 是基站中耗电量最多的部分<sup>[4]</sup>。目前, 在基站主设备节能方面有众多的研究。文献[5]通过均衡不同资源的负载来实现节能, 一个资源即使在

收稿日期: 2011-11-23; 修回日期: 2012-06-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972028)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (60972028)

闲置状态下耗能仍很可观,耗能主要来源于固定能耗和导频信道能耗。文献[6]和文献[7]提出了一种 2 个和多个蜂窝网络完全重叠覆盖的能量感知协作管理方案,即轻载条件下关闭一个蜂窝网,将其负载转移到其他蜂窝网中以实现节能,资源关闭的粒度是基站。文献[8]提出了 GSM 基站根据业务量的实时变化对业务予以集中,关闭空闲的收发信机实现节能,属于同构网络环境下的基站节能,关断的粒度是载频。文献[9]在文献[5]的基础上,提出了一种异构环境下的基站动态休眠模式(DSM, dynamic sleep mode) 算法,当资源(时隙或载频)不被占用时可以关闭,以减小整体能耗。其每种网络只接入一种业务,这与实际网络情况不相适应。另外,其系统资源关闭的粒度是载频/时隙,当已打开的载频资源不能满足新到用户需求时,系统必须打开一个新的资源,这样会出现新用户只占用其中部分资源,余下的仍处于闲置状态的情况,从而造成了一定的能量浪费。文献[9]中为了验证其算法性能,与基本模式(BM, basic mode)算法进行了比较,BM 算法就是在有用户接入的情况下,基站中所有的设备一直处于打开状态。

针对上述节能算法存在的问题,本文在文献[9]的基础上提出了一种动态关断资源栅格(RG, resource grid)的节能算法,称为 DRGSM(dynamic resource grid shut mode)算法。该算法在更细的粒度上考虑关断资源,并将其应用于 LTE/WiMAX 异构网络环境,仿真结果表明,本文所提出的 DRGSM 算法较文献[9]的 BM 算法和 DSM 算法节能效果更佳。

## 2 系统模型

### 2.1 资源栅格

OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)是下一代无线通信的关键技术,能有效提高无线衰落信道条件下的通信性能。对 OFDM 系统资源进行分配一般是按 RG 来进行分配<sup>[10,11]</sup>。

如果有  $M$  个不同的接入系统,对于其中某个系统  $m$  来说,将所有的子载波分为若干个等同的信道,每个信道中含有的子载波数为  $N_m$ 。将帧长  $T_m$  分成若干个等同的时隙,每个时隙中含有的 OFDM 符号数为  $S_m$ 。这样由时域上的一个时隙和频域上的一个子信道就构成一个 RG<sup>[10,11]</sup>,其示意图如图 1 所示。

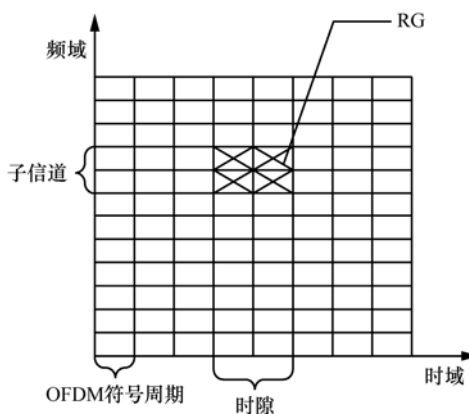


图 1 RG 示意

则一个 RG 中可以达到的最大传输速率为<sup>[11]</sup>

$$b_m = \frac{N_m S_m C}{T_m} \tag{1}$$

其中,  $C$  为按自适应调制机制所确定的每个调制符号携带的信息比特数。

### 2.2 系统模型

本文考虑的系统模型是 LTE 和 WiMAX 重叠覆盖的异构网络。LTE 系统中的业务可以分为 4 类——会话级、交互级、流级和背景级<sup>[12]</sup>。为了便于分析,本文将会话级和流级业务当作实时业务总体来进行研究,将交互级和背景级业务当作非实时业务总体进行研究。LTE 定位于无线广域网范畴,是 2G 和 3G 系统的演进,具有较高的下行峰值速率、覆盖范围以及移动终端最大速度等性能参数,能够更好地支持用户在移动过程中的无缝切换,更适合为实时业务服务<sup>[13]</sup>。WiMAX 系统中的业务也可以分为 4 类——主动授权业务、实时查询业务、非实时查询业务和尽力而为业务<sup>[14]</sup>。类似地,将主动授权业务和实时查询业务当作实时业务总体进行研究,将非实时查询业务和尽力而为业务当作非实时业务总体进行研究。WiMAX 属于无线城域网技术,更适用于解决高速连接“最后一公里”或“最初一公里”的无线宽带城域网的接入问题<sup>[15]</sup>。对于异构网络下的接入选择,本文基于业务的实时性对其进行了简化,规定实时业务优先接入 LTE 系统,并且 LTE 系统中的 RG 由实时和非实时业务共用。非实时业务优先接入 WiMAX 系统,为了保证非实时业务 QoS(quality of service),部分 RG 仅接入非实时业务,实时业务不得占用。对于共用的 RG,赋予实时业务较高优先级,当其空闲时可以由非实时业务占用,而实时业务到来时可以抢占该网络资源来传输信息。网络模型如图 2 所示。

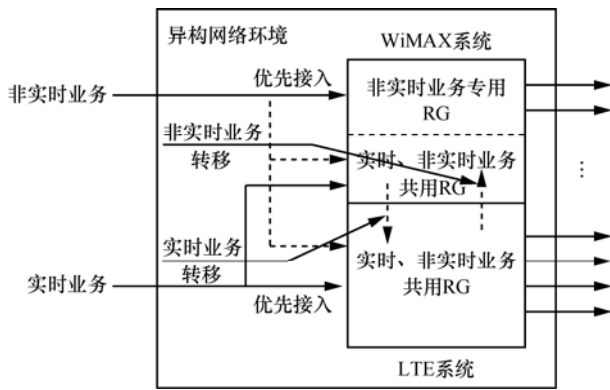


图 2 异构网络模型示意

假设实时和非实时业务的到达分别服从参数为  $\lambda_s$  和  $\lambda_f$  的泊松分布，系统服务时间分别服从参数为  $\mu_1$  和  $\mu_w$  的负指数分布<sup>[16,17]</sup>。又假设 LTE 系统的容量为  $C_l$ ，WiMAX 系统的容量为  $C_w$ ，其中有  $C_{sfw}$  组 RG 是固定分配给非实时业务的，则在该系统模型下，LTE 系统中的实时业务服从  $M/M/C_l/C_l$  的排队模型，非实时业务服从  $M/M/b/b$  的排队模型；WiMAX 系统中的实时业务服从  $M/M/C_w-C_{sfw}/C_w-C_{sfw}$  的排队模型，非实时业务服从  $M/M/d/d$  的排队模型，其中， $b$  和  $d$  均随实时业务数变化而变化。用  $p(i,j,k,l)$  表示系统稳定状态，其中  $i$  和  $j$  分别表示 WiMAX 系统中正在接受服务的实时和非实时业务数， $k$  和  $l$  分别表示 LTE 系统中正在接受服务的实时和非实时业务数，根据流量守恒原则，对每个状态令“流入速率=流出速率”即可列出稳态方程。以状态  $(0, c, C_l, 0)$  为例，有

$$\begin{aligned}
 & (\lambda_s + \lambda_f + c\mu_w + C_l\mu_l)p(0, c, C_l, 0) \\
 & = \lambda_s p(0, c, C_l - 1, 0) + \lambda_f p(0, c - 1, C_l, 0) + \\
 & (c + 1)\mu_w p(0, c + 1, C_l, 0) + (C_l\mu_l + \mu_w)p(1, c, C_l, 0) \quad (2)
 \end{aligned}$$

将所有稳态方程联立再加上归一化条件即可求得系统各稳态概率  $p(i, j, k, l)$ 。

### 3 DRGSM 节能算法

#### 3.1 算法思路

目前，基站节能算法都是基于关断时隙或载频的，虽然可以节能，但是节能效果有待提高。本文提出的 DRGSM 算法是在更小的粒度上去打开或者关断资源以达到最佳的节能效果。当业务接入网络后，系统打开 RG 进行服务以满足其 QoS 要求，业务服务完毕后，RG 闲置出来则将其关断以实现节能。算法流程如图 3 所示。

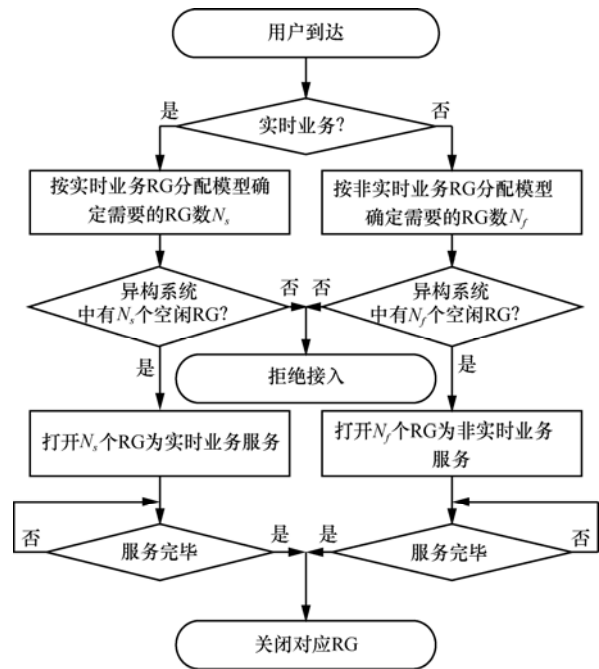


图 3 DRGSM 算法流程

为了保证非实时业务性能，对 RG 进行了分类，即非实时业务专用 RG 和实时、非实时业务共用 RG。在检测系统中是否有需要的空闲 RG 时，是按照如下步骤进行 RG 检测与分配的。

1) 对于实时业务，当检测到 LTE 系统中有足够的空闲共用 RG 时，则将其分配给该实时业务；否则检测 WiMAX 系统中是否有足够的空闲共用 RG，如果有则分配给该实时业务；否则看 WiMAX 系统中是否有被非实时业务占用的共用 RG，有则将其分配给实时业务，否则该业务被阻塞。

2) 对于非实时业务，当检测到 WiMAX 系统中有足够的空闲非实时业务专用 RG 时，将其分配给该非实时业务；否则检测 WiMAX 系统中是否有足够的空闲共用 RG，有则分配给该非实时业务；否则检测 LTE 系统是否有足够的空闲共用 RG，有则分配给该非实时业务，否则业务被阻塞。

#### 3.2 RG 分配模型

##### 3.2.1 非实时业务 RG 分配模型

速率为  $R$  的业务接入系统后所需要的 RG 数为<sup>[11]</sup>

$$n_m = \left\lceil k \frac{R}{b_m} \right\rceil \quad (3)$$

其中， $k$  为正确传送一个分组所需要的平均传送次数。

对于非实时业务，一般采用尽力而为的服务方式，只要满足非实时业务的平均服务速率大于其最小

要求的服务速率,即可满足其 QoS 要求。因此,可以认为式 (3) 即为非实时业务平均所需要的网络资源。

### 3.2.2 实时业务 RG 分配模型

对于实时业务,本文采用有效带宽理论来保证其 QoS 要求,即当系统提供的带宽超过有效带宽时,就可以保证其 QoS<sup>[18]</sup>。假设系统有 2 种状态:激活 (ON) 状态和非激活 (OFF) 状态,业务的产生只发生在 ON 状态下,在 OFF 状态下是不能产生业务的。又假设系统逗留时间在 ON 和 OFF 状态分别服从参数为  $\lambda$  和  $\mu$  的指数分布,则实时业务的等效带宽可以表示为<sup>[19]</sup>

$$W = \frac{R(\mu D - \ln \varepsilon)}{(\lambda + \mu)D - \ln \varepsilon} \quad (4)$$

其中,  $D$  为给定的分组时延的上限,  $\varepsilon$  为时延超过  $D$  的概率。当速率为  $R$  的实时业务接入系统后所需要的平均 RG 数目为<sup>[11]</sup>

$$n'_m = \left\lceil k \frac{W}{b_m} \right\rceil \quad (5)$$

### 3.3 节能机制及性能评价

假设 WiMAX 系统中有  $Y_w$  个载频,载频  $y_w \in [1, Y_w]$  的负载率可以表示为  $\rho_{y_w, \lambda_w, \mu_w}$ , LTE 系统中有  $Y_l$  个载频,载频  $y_l \in [1, Y_l]$  的负载率可以表示为  $\rho_{y_l, \lambda_l, \mu_l}$ 。定义 WiMAX 系统打开的平均载频数为  $y'_{Nw, \lambda_w, \mu_w}$

$$= \sum_{nw=0}^{\infty} p_{nw, \lambda_w, \mu_w} y_{nw, \lambda_w, \mu_w} \rho_{y_w, \lambda_w, \mu_w}, \text{ LTE 系统打开的平均}$$

载频数为  $y'_{Nl, \lambda_l, \mu_l} = \sum_{nl=0}^{\infty} p_{nl, \lambda_l, \mu_l} y_{nl, \lambda_l, \mu_l} \rho_{y_l, \lambda_l, \mu_l}$ , 则整个异构无线系统打开的平均载频数为  $y'_{N, \lambda, \mu} = y'_{Nl, \lambda_l, \mu_l} + y'_{Nw, \lambda_w, \mu_w}$ , 其中  $p_{nw, \lambda_w, \mu_w}$  和  $p_{nl, \lambda_l, \mu_l}$  分别指 WiMAX 和 LTE 系统接入  $n$  个顾客的概率,  $y_{nw, \lambda_w, \mu_w}$  和  $y_{nl, \lambda_l, \mu_l}$  分别指 WiMAX 和 LTE 系统在接入  $n$  个顾客时打开的载频数。假设做出打开或者关断 RG 的决定时,系统能立即执行<sup>[9]</sup>。这样,当实时或非实时业务接入系统时,分别按照式 (1)、式 (4) 和式 (5) 或式 (1) 和式 (3) 确定所需要打开的 RG 数,随即按照 2.2 节中的系统模型打开 RG 进行业务的接入,当业务服务完毕空出 RG 时即将其关断,处于关断状态时 RG 是没有能量消耗的,从而达到节能的目的。本文使用能耗作为算法性能的评价指标,系统的能耗可以表示为

$$P_S = P_{CONw} + P_{ELEw} + P_{OTHw} + \left( \sum_{nw=0}^{\infty} p_{nw, \lambda_w, \mu_w} y_{Nw, \lambda_w, \mu_w} \cdot \right.$$

$$\left. \frac{P_{MAXw}}{c} + y'_{Nw, \lambda_w, \mu_w} P_{TRXw} \right) + P_{CONl} + P_{ELEl} + P_{OTHl} + \left( \sum_{nl=0}^{\infty} p_{nl, \lambda_l, \mu_l} y_{Nl, \lambda_l, \mu_l} \frac{P_{MAXl}}{c} + y'_{Nl, \lambda_l, \mu_l} P_{TRXl} \right) \quad (6)$$

其中,  $\left( \sum_{nw=0}^{\infty} p_{nw, \lambda_w, \mu_w} y_{Nw, \lambda_w, \mu_w} \frac{P_{MAXw}}{c} + y'_{Nw, \lambda_w, \mu_w} P_{TRXw} \right)$  和

$\left( \sum_{nl=0}^{\infty} p_{nl, \lambda_l, \mu_l} y_{Nl, \lambda_l, \mu_l} \frac{P_{MAXl}}{c} + y'_{Nl, \lambda_l, \mu_l} P_{TRXl} \right)$  分别是

WiMAX 和 LTE 系统基站主设备能耗。 $P_{TRX}$  为收发信机除 PA 部分的能耗,这里主要指射频部分能耗; $P_{MAX}$  为功放的射频输出功率,  $c$  为直流到射频的转换因子;  $P_{CON}$  是机房环境设备的能耗,主要指空调、新风系统、热交换系统等温湿度调控设备的能耗;  $P_{ELE}$  是电源系统的能耗,一般主要指开关电源、蓄电池及发电机等的能耗;  $P_{OTH}$  是其他设备的能耗,主要指数据传输、机房监控及照明设备等的能耗。

#### 3.3.1 接入用户稳态概率及载频负载率计算

##### 1) 系统容量

设 WiMAX 系统总的可用 RG 数目为  $N_{totw}$ , 接入 WiMAX 的每个实时业务平均占用的 RG 数目可以由式 (1)、式 (4) 和式 (5) 计算出来。为保证非实时业务的 QoS, 有部分 RG 是固定为其预留的, 数目为  $N_{sfw}$ , 则对于实时业务来说 WiMAX 的系统容量为

$$C_{ws} = \frac{N_{totw} - N_{sfw}}{n'_{mw}} \quad (7)$$

对于非实时业务, 平均需要的 RG 数目可以由式 (1) 和式 (3) 计算出来, 但是规定实时业务具有较高的优先级, 于是可以接入非实时业务的数目便取决于已接入的实时业务数, 保证它们占用的 RG 数目之和最大为  $N_{totw}$ 。

对于实时业务, LTE 系统的容量为

$$C_l = \frac{N_{totl}}{n'_{ml}} \quad (8)$$

仍规定实时业务具有较高优先级, 接入的非实时业务数取决于接入的实时业务数, 总的可用 RG 数目最大为  $N_{totl}$ 。

##### 2) 接入用户稳态概率

由稳态方程和归一化条件求解得到的系统稳态概率  $p(i, j, k, l)$  可以计算得到 WiMAX 系统中有  $n_w (n_w = i + j)$  个用户的概率如下。

① 当  $i=0, 0 \leq j < C_w$  时

$$p_{nw,\lambda_w,\mu_w} = \sum_{k=0}^{C_l} p(i, j, k, 0) \quad (9)$$

② 当  $i=0, j=C_w$  时

$$p_{nw,\lambda_w,\mu_w} = \sum_{k=0}^{C_w} \sum_{l=0}^{C_w-k} p(i, j, k, l) \quad (10)$$

③ 当  $i \neq 0$  时

$$p_{nw,\lambda_w,\mu_w} = p(i, j, C_l, 0) \quad (11)$$

LTE 系统中接入  $n_l$  ( $n_l=k+l$ ) 个用户的概率如下。

① 当  $0 \leq k < C_l, l=0$  时

$$p_{nl,\lambda_l,\mu_l} = \sum_{j=0}^{C_w} p(0, j, k, 0) \quad (12)$$

② 当  $l \neq 0$  时

$$p_{nl,\lambda_l,\mu_l} = \sum_{j=0}^{C_w} p(0, C_w, k, l) \quad (13)$$

③ 当  $k=C_l, l=0$  时

$$p_{nl,\lambda_l,\mu_l} = \sum_{i=0}^{C_w-C_{sfw}} \sum_{j=0}^{C_w-i} p(i, j, C_l, 0) \quad (14)$$

### 3.3.2 载频负载率的计算

WiMAX 系统在接入  $n_w$  个用户时的载频负载率可以表示为

$$\rho_{yw,nw,\lambda_w,\mu_w} = \frac{in'_{nw} + jn_{nw}}{N_{totw}} \quad (15)$$

LTE 系统在接入  $n_l$  个用户时的载频负载率可以表示为

$$\rho_{yl,nl,\lambda_l,\mu_l} = \frac{k * n'_{ml} + l * n_{ml}}{N_{totl}} \quad (16)$$

## 4 仿真分析

为了验证所提出的 DRGSM 算法的性能，本文将其与文献[8]提出的 BM 算法和 DSM 算法的性能进行了仿真对比分析。

### 4.1 仿真场景

本文采用 LTE 和 WiMAX 网络重叠覆盖的异构无线网络场景，重叠覆盖区域内每个网络有一个基站，基站中的载频数各为 2。由于 LTE 和 WiMAX 系统均是以 OFDM 技术为基础的，在用户节能接入或切换的过程中，是以资源栅格为单位进行资源分配的，系统资源关闭的粒度更精细，因此由 LTE/WiMAX 组成的异构网络在节能方面能获得很大好处。

当实时业务接入系统后可根据式(1)、式(4)和式

(5)计算出所需要的 RG 数目，具体计算过程如下：

$$b = \frac{24 \times 10 \times 2}{10 \times 10^{-3}} \text{ bit/s} = 46.9 \text{ kbit/s}$$

$$W = \frac{64 \times (1.53 \times 0.06 - \ln 0.05)}{(2.84 + 1.53) \times 0.06 - \ln 0.05} \text{ kbit/s} = 61 \text{ kbit/s}$$

$$n' = \left\lceil \frac{61 \text{ kbit/s}}{46.9 \text{ kbit/s}} \right\rceil = 2$$

根据式(1)和式(3)可计算出非实时业务接入系统后所需要的 RG 数目为

$$n = \left\lceil \frac{50 \text{ kbit/s}}{46.9 \text{ kbit/s}} \right\rceil = 2$$

为了在相同条件下进行比较，这里忽略机房环境设备、电源系统和其他辅助设备固定能耗。仿真参数设置如表 1<sup>[10,21,21]</sup>所示。

表 1 仿真参数设置

名称	3GLTE	WiMAX
载频/带宽	2GHz/5MHz	2.5GHz/10MHz
帧长	10ms	10ms
子载波间隔	15kHz	11.2kHz
NFFT	512	1 024
功放最大功率	43dBm(20W)	46dBm(40W)
收发信机功能	100W	100W
二维资源单元	均由 24 个连续子载波与 10 个符号周期组成	
实时业务速率	64kbit/s	
非实时业务速率	50kbit/s	
ON/OFF 状态持续时间	2.84s/1.53s	
AC 到 DC 转换因子	0.31	

### 4.2 仿真结果及分析

通过 MATLAB 仿真得到的 DSM 和 DRGSM 算法打开的平均载频数如图 4 和图 5 所示。

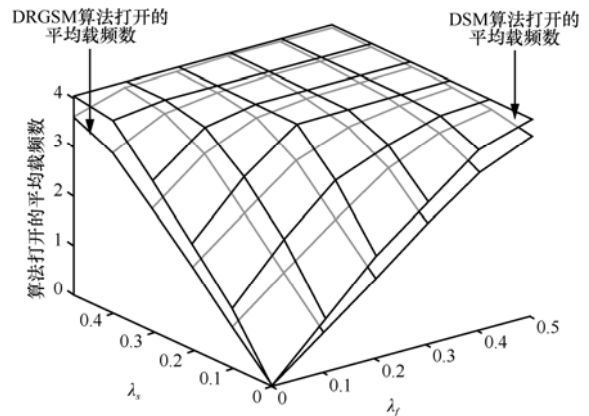


图 4 2 种算法下打开的平均载频数对比

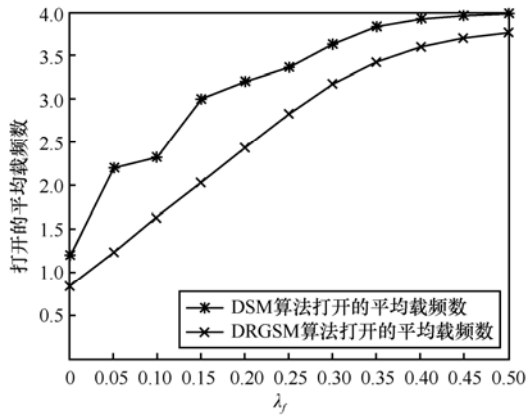


图 5 不同非实时业务到达率下 2 种算法打开的载频数对比

由图 4 可以看出，到达率越大，系统打开的平均载频数目越多。

打开的平均载频数的仿真对比如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出，在相同条件下 DRGSM 算法比 DSM 算法打开的平均载频数要少。这是由于 DRGSM 算法是在 RG 的维度上进行资源的动态打开和关断的，它是系统瞬时负载的函数。而 DSM 算法是在载频的维度上进行资源的动态打开和关断的，颗粒度大，会出现打开的载频仅有部分被占用，余下的仍处于闲置状态的情况，已打开的载频没有得到充分利用，因此打开的平均载频数目多。

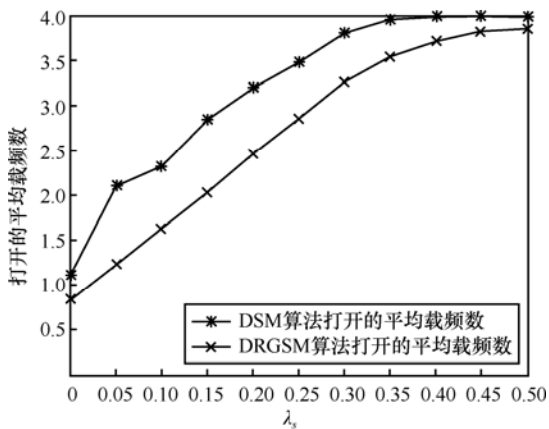


图 6 不同实时业务到达率下 2 种算法打开的载频数对比

在异构网络环境下仿真得到的各算法的能耗如图 7 所示。

由图 7 可以看出，BM 算法其能耗不随到达率而变化；DSM 算法和 DRGSM 算法的能耗随到达率的增加而增大，这主要是因为当到达率变大时，系统需要打开的平均载频数增加，能耗也随之增大。

能耗的仿真对比如图 8 和图 9 所示。

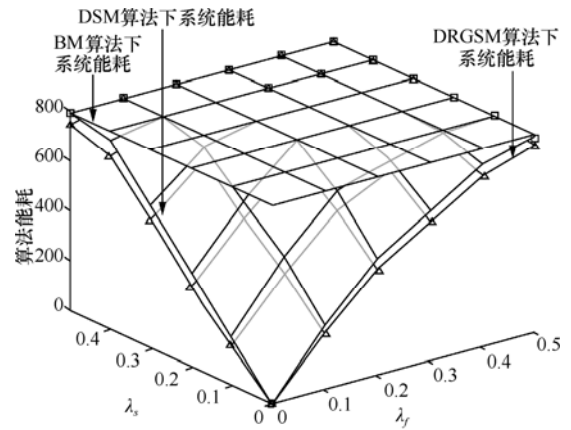


图 7 各算法下系统能耗

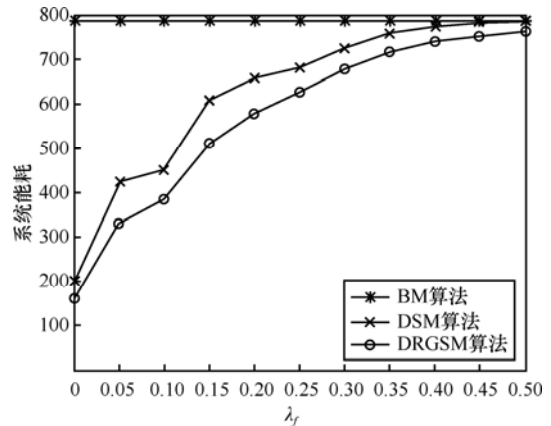


图 8 不同非实时业务到达率下各算法能耗对比

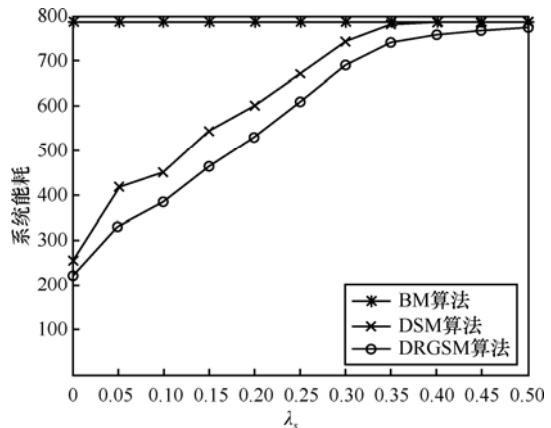


图 9 不同实时业务到达率下各算法能耗对比

从图 8 和图 9 可以看出，DRGSM 算法的能耗比其他 2 种算法有明显的降低。这主要是因为相同条件下，由于 DRGSM 算法打开的资源粒度更小，避免了资源的浪费，即避免了能量的浪费。

### 5 结束语

本文提出了一种异构网络环境下动态关断 RG 的基站节能新算法——DRGSM 算法。该算法根据系

统瞬时负载情况动态地调整 RG 的打开和关断, 在保证用户 QoS 需求的同时使基站打开的平均载频数最少。仿真结果表明, 该算法能够有效地减少基站的能耗, 使基站的总能耗较传统节能算法明显降低。

### 参考文献:

- [1] 刘磊, 徐大凯. GSM 无线基站节能减排方法综述[J]. 电信设计技术, 2010, 2: 71-75.  
LIU L, XU D K. Review of the methods on energy saving and emission reduction of GSM base station[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2010, 2: 71-75.
- [2] RICHTER F, FEHSKE A J, FETTWEIS G P. Energy efficiency aspects of base station deployment for cellular networks[A]. IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall[C]. 2009.1-5.
- [3] 石文孝, 范绍帅, 王桢等. 基于模糊神经网络的异构网络接入选择算法[J]. 通信学报, 2010, 9(31): 151-156.  
SHI W X, FAN S S, WANG N, *et al.* Fuzzy neural network based access selection algorithm in heterogeneous wireless networks[J]. Journal on Communications, 2010, 9(31): 151-156.
- [4] 张高记, 吕建东, 陈文学. 通信基站节能减排评估指标及评估方法研究[J]. 电信科学, 2011, 27(3): 101-105.  
ZHANG G J, LV J D, CHEN W X. Study on energy conservation and emission reductions evaluation index and methods about communication base station[J]. Telecommunications Science, 2011, 27(3): 101-105.
- [5] SAKER L, ELAYOUBI S E, CHAHED T. System selection and sleep mode for energy saving in cooperative 2G/3G networks[A]. IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall[C]. 2009.1-5.
- [6] MARSAN M A, CHIARAVIGLIO L, CIULLO D, *et al.* Energy efficient management of two cellular access networks[A]. Proc of ACM SIGMETRICS[C]. Seattle, WA, 2009.
- [7] MARSAN M A, MEO M. Energy efficient wireless Internet access with cooperative cellular networks[J]. Computer Networks, 2011, 55(2): 386-398.
- [8] 清华大学. 一种应用于 GSM 基站的节能方法: 中国, 200710117714.0[P]. 2010-1-20.  
Tsinghua University. An Energy-Saving Method of GSM Base Stations: China, 200710117714.0[P]. 2010-1-20.
- [9] SAKER L, ELAYOUBI S E, CHAHED T. Minimizing energy consumption via sleep mode in green base station[A]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C]. 2010.1-6.
- [10] 石文孝, 李斌, 刘妍等. IP 流分流的异构无线网络负载均衡[J]. 应用科学学报, 2011, 28(6): 567-572.  
SHI W X, LI B, LIU Y, *et al.* Load balancing algorithm based on dividing IP flow over heterogeneous wireless networks[J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 28(6): 567-572.
- [11] 孙卓, 刘铁军, 张倩倩等. 异构无线分组网络中的接入选择机制[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10): 2762-2769.  
SUN Z, LIU T J, ZHANG Q Q, *et al.* Radio access selection algorithm in heterogeneous wireless packet networks[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10): 2762-2769.
- [12] 姚远. 排队论跨层优化 LTE 分组调度系统[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010.  
YAO Y. Cross-Layer Optimaztion with Queuing Therory in LTE Packet Scheduling System[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010.
- [13] 何玉申, 宫芳. 下一代无线移动通信 LTE 及 LTE-advanced 的研究[J]. 通信技术, 2010, 11: 132-138.  
HE Y S, GONG F. Research of LTE and LTE-advanced for next generation wireless mobile communication[J]. Communications Technology, 2010, 11: 132-138.
- [14] 石文孝, 龚静. 基于 WiMAX 技术的上行调度算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2010, 5: 1386-1391.  
SHI W X, GONG J. An uplink packet scheduling algorithm based on WiMAX[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 5: 1386-1391.
- [15] 朱荣. WiMAX 关键技术及网络结构探讨[J]. 通信技术, 2010, (1): 85-87.  
ZHU R. Key technology and network structure of WiMAX[J]. Communications Technology, 2010, (1): 85-87.
- [16] MUHAMMAD I, ZHUANG W H. Network cooperation for emergy saving in green radio communications[J]. Wireless Communications, 2011, 18(5): 76-81.
- [17] LOUVROS S, AGGLIS K, BALTAGIANNIS A. LTE cell coverage planning algorithm optimising uplink user cell throughput[A]. Proceedings of the 2011 11th International Conference on Telecommuniacations[C]. 2011.51-58.
- [18] SUN Z, ZHOU Y F, PENG M, *et al.* Dynamic resource allocation with guaranteed diverse QoS for WiMAX system[A]. International Conference on Communications, Circuits and Systems[C]. Guilin, China, 2006.1347-1351.
- [19] 张志飞, 王黎伟, 袁正定. 时延约束下的等效带宽估计[J]. 通信学报, 2000, 21(12): 73-77.  
ZHANG Z F, WANG L W, QIU Z D. Equivalent bandwidth estimation with delay constrain[J]. Journal on Communications, 2000, 21(12): 73-77.
- [20] DERUYCK M, VERECKEN W, TANGHE E, *et al.* Power consumption in wireless access networks[A]. 2010 European Wireless Conference[C]. 2010. 942-931.
- [21] DERUYCK M, TANGHE E, JOSEPH W, *et al.* Towards a deployment tool for wireless access networks with minimal power consumption[A]. IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops[C]. 2010. 295-300.

### 作者简介:



石文孝 (1960-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为现代通信理论与无线通信网络。

王继红 (1986-), 女, 辽宁营口人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为异构无线网络资源管理技术。

赵颖 (1988-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为无线资源管理技术。

张阁 (1988-), 男, 河南新郑人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为无线资源管理技术。