

基于 TD-LTE 异频组网的绿色通信机制研究^①

孟利民^{②***} 翁 韬^{***} 蒋 维^{***}

(* 浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

(** 浙江省通信网技术应用研究重点实验室 杭州 310023)

摘 要 为了减少无线通信网络的能量消耗,研究了基站休眠机制,提出了一种基站和天线协同休眠的方案,在保证用户服务质量的前提下最小化能量的消耗。基站整体负载低时,进入休眠模式,减少扇区工作天线数量,降低能耗。进而提出了一种基于 TD-LTE 异频组网的绿色通信机制及算法,该机制通过移动基站和天线的协同休眠设计以及一种距离优先的轮询(DPRR)接入算法,达到可观的绿色通信目的。

关键词 绿色通信, TD-LTE, 协同休眠, 距离优先的轮询(DPRR), DPRR 接入算法

0 引 言

随着移动设备用户的大规模增长以及用户对数据速率要求的不断提高,通信基站建设越来越密集,通信系统消耗的能量也越来越大^[1]。而当下环境问题日益凸显,如何减少通信系统的能量消耗吸引了大家的关注。数据分析表明基站运行耗能大约占了通信系统总能耗的 80%^[2],因此如何减少通信基站的能耗显得尤为重要。

现阶段减少基站能耗的研究主要有两个方面,一是将可再生能源运用到通信系统之中。例如 Zhou^[3]等介绍了一种利用可再生能源对信息进行提前推送的想法,充分利用了可再生能源,减少了电力的消耗。二是在系统负载低于某阈值时让部分低负载基站进入休眠模式。Wang^[4]等研究了宽带码分多址接入(WCDMA)网络中基站休眠的效益,但由于 WCDMA 网络的局限性,对应结论的实用性一定程度上下降。Han^[5]等介绍了一种一维模型来模拟道路上运行车辆的移动网络接入,各车辆由距离最近的基站提供服务,范围内没有车辆的基站进入

休眠模式。另外 Han^[5,6]提出了一种 V2V 模式,将相聚较近的车辆组成一个集群,每个集群只有一辆头车与基站通信,其余车辆与头车通信,提高了高负载时基站休眠的概率,减少了能耗,但是一维模型仅在特殊情形下适用。Chai^[7,8]等将频谱共享与基站休眠相结合应用在异构网络之中,达到了较高的能量利用率,但是方案复杂度较高。Jin^[9]等使用马尔科夫概率矩阵来确定基站在下一个时隙的休眠状态。而 Hu^[10]等利用神经网络来预测扇区未来的流量,进而决定基站是否休眠,但是没有考虑基站休眠后用户的分配问题。Li^[11]等利用沃罗诺伊图研究了具有休眠机制的无线通信网络最佳的基站密度,但利用沃罗诺伊图划分扇区,其实现基站天线方面颇有难度。Meng^[12]等提出了一种基站休眠用户分配算法,但将用户分配到高负载基站存在因其基站负载过重的问题,另外用户可能分配到远距离基站,造成能耗增大。

综上,本文提出了一种基站和天线协同休眠的方案,在保证用户服务质量的前提下最小化能量的消耗。当某扇区负载量低于阈值时,减少扇区工作天线数量,节省能耗。更进一步,当某基站整体负载

① 国家自然科学基金(61372087)资助项目。

② 女,1963 年生,博士,教授;研究方向:多媒体数字通信和绿色通道;联系人,E-mail: mlm@zjut.edu.cn
(收稿日期:2017-05-05)

低时,使其进入休眠模式,该基站所覆盖用户交由相邻基站提供服务。另外,本文还提出了一种距离优先的轮询(distance priority round robin, DPRR)接入算法来解决休眠基站扇区内用户的分配问题。仿真结果显示了本方案能起到相当可观的节能作用。

1 系统模型

在此模型中,本文采用经典六边形蜂窝网络模型,基站位于六边形中央,每个基站有多个扇区,每个扇区都使用有向 MIMO 天线进行发射和接收,天线覆盖半径为 R ,如图 1 所示。

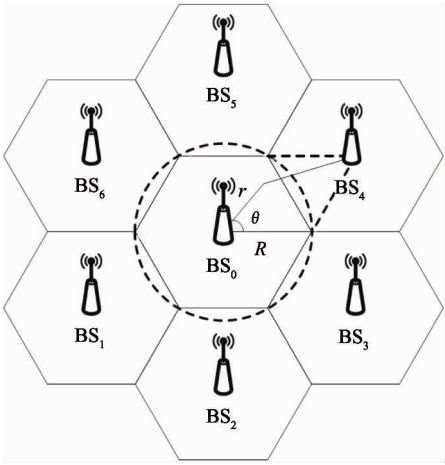


图 1 网络拓扑模型

每个基站用户峰值为 M 。每个基站内用户位置极坐标为 (θ, r) , 其中 θ 为用户相对基站正东方向的角度, r 为用户与所在小区基站的距离, θ 与 r 分别满足 $(0, 2\pi)$ 和 $(0, R)$ 的均匀分布。在本文中,由于使用的是 TD-LTE 异频组网方式,各个扇区分别使用不同的频带,虽然系统的频谱利用率相较于同频组网低,但极大地降低了同频干扰,提高了扇区边缘用户的容量^[13]。

1.1 容量模型

由于快衰落在应用中可以使用多种技术进行平均处理,因此本文只考虑大规模路径损耗所带来的功率减益。本文使用 3GPP-LTE 建议的损耗模型^[12],用户 i 收到基站 k 信号的信噪比可由下式表示:

$$SNIR_{k,i} = P_{\max(k)} - SF_{k,i} - N_0 \tag{1}$$

$$SF_{k,i} = 131.1 + 42.8\lg d_{k,i} \tag{2}$$

$$N_0 = -174\text{dbm} + 10\lg B \tag{3}$$

其中 $P_{\max(k)}$ 是天线最大发射功率, $SF_{k,i}$ 代表基站 k 到用户 i 的路径损耗,其中 $d_{k,i}$ 代表用户 i 到基站 k 的距离, N_0 为信道热噪声,大小与带宽 B 有关。

在 TD-LTE 网络中,由天线的时频资源块为用户提供服务,每个时频资源块占用频带为 B ,切换点周期为 τ ,天线的时频资源块个数与天线所占带宽有关。因此,由香农公式可得,每个基站 k 提供给用户 i 的每一个时频资源块可为用户 i 提供的容量为

$$C_{k,i} = B \cdot \log_2(1 + 10^{SNIR_{k,i}/10}) \cdot \tau \tag{4}$$

若用户 i 由基站 k 的 j 扇区提供服务,且用户 i 所需服务容量为 r_i (bit/s),则用户需占用扇区 j 时频资源块个数为

$$l_{k,j,i} = \lceil r_i / C_{k,i} \rceil \tag{5}$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 代表进一取整。

1.2 能量模型

基站 k 在活跃状态下的总能耗可由下式表示:

$$P_k = \sum_{j=1}^N a_j \cdot \left(\frac{P_{\max(k)} \cdot \frac{l_j}{L} \cdot a_j}{\eta_{PA}} + P_{RF} + P_{BB} + P_0 \right) + b_j \cdot (P_{BB} + P_0) \tag{6}$$

式(6)中参数含义详见表 1。

表 1 参数定义

变量	含义
N	基站内扇区数量
a_j	扇区内活跃天线数量
b_j	扇区内休眠天线数量
$P_{\max(k)}$	天线最大发射功率
l_j	扇区内被占用的时频资源块数量
L	单天线提供的时频资源块数量
η_{PA}	功放效率
P_{RF}	射频模块功耗
P_{BB}	基带模块功耗
P_0	电源、散热等其他功耗

当一个基站 k 进入休眠状态时,基站总功耗可

由下式表示:

$$P_k = A_k \cdot \varepsilon \cdot (P_{BB} + P_0) \quad (7)$$

其中 A_k 代表基站 k 天线总数, ε 表示基站休眠时的能量节省系数。

2 天线基站协同休眠算法

当某扇区负载量低于阈值时,减少扇区工作天线数量,节省能耗。更进一步,当某基站整体负载低时,使其进入休眠模式,该基站用户分配给周边活跃基站。

假定系统基站总数为 K , 且系统内休眠基站数量为 S , λ 表示用户平均需求容量。

由图 2 所示,相同负载的用户占用基站的时频资源块数量由于距离不同而差异巨大。为了对用户进行合理的分配,本研究提出了距离优先的轮询 (DPRR) 接入算法。算法的主要思想在于,将所有休眠基站的用户分别依次分配给距离最近的活跃基站,若最近基站的相应扇区处于满负载状态,则选择接入次近基站对应扇区,若仍然处于满载状态,则选择三近基站,如此循环直到用户接入某个基站,否则将拒绝该基站休眠。

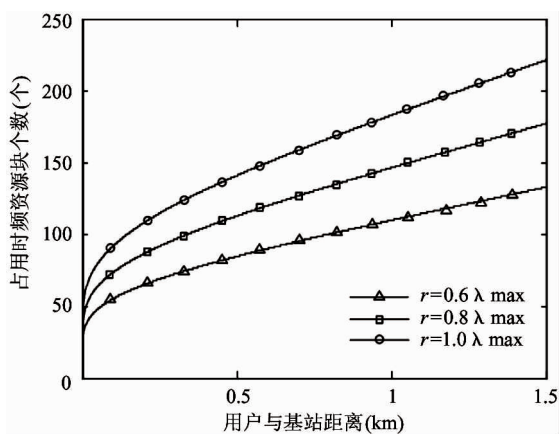


图 2 一定用户需求容量下占用基站时频资源块数量随距离的变化

算法的详细步骤如下所示:

- 1: 计算所有基站负载量,确定准备休眠基站个数 S , 及各个休眠基站用户数 $m_k, k = 1, \dots, S$ 。并将备休眠基站按负载量从小到大排列。
- 2: for $k = 1: S$
- 3: 计算休眠基站 k 相邻活跃基站个数 n_k , 将 m_k 个用户按用户需求容量降序排列
- 4: for $u = 1: m_k$
- 5: 计算用户 u 到 n_k 的距离,并将 n_k 按距离降序排列
- 6: for $n = 1: n_k$
- 7: 计算用户 u 在基站 n 占用的时频资源块数量 $l_{n,j,u}$
- 8: if $(L \cdot a_{n,j} > l_{n,j} + l_{n,j,u})$
- 9: 用户 u 由基站 n 服务
- 10: break to flag1
- 11: end if
- 12: end for
- 13: 拒绝基站 k 休眠
- 14: break to flag2
- 15: flag1
- 16: end for
- 17: flag2
- 18: end for

算法完成之后,确认已休眠基站个数为 S' , 则结合式(6)、(7)可得系统总能耗如下式所示:

$$P = \sum_{k=1}^{S'} A_k \cdot \varepsilon \cdot (P_{BB} + P_0) + \sum_{k=S'+1}^K \sum_{j=1}^N a_{k,j} \cdot \left(\frac{P_{\max(k)} \cdot \frac{l_{k,j}}{L \cdot a_{k,j}}}{\eta_{PA}} + P_{RF} + P_{BB} + P_0 \right) + b_{k,j} \cdot (P_{BB} + P_0) \quad (8)$$

3 算法仿真

根据 TD-LTE 带宽和时隙的设计,本文按照每个宏基站包含 6 个扇区,每个扇区使用 2×2 MIMO 天线,系统带宽 3MHz,切换点周期 5ms, $P_{\max} = 43 \text{ dbm}$, $\eta_{PA} = 31.1\%$, $P_{RF} = 12.9 \text{ W}$, $P_{BB} = 29.6 \text{ W}$, $P_0 = 18.9 \text{ W}$, $M = 210$, $R = 0.5 \text{ km}$, $L = 3000$ 个/s/天线,扇区天线休眠阈值为 3000 个/s^[14-16]。为方便计算,假定所有基站的基本能耗参数相同,且同一时间,所有基站内的用户需求容量服从参数为 λ 的泊松分布, λ 的值不超过 $\lambda_{\max}$, $\lambda_{\max}$ 的获得请参

照附录 A。假定 BS_0 为周边所有基站中用户数最少的基站,覆盖用户数 m_0 , 则其余 6 个基站内用户数量服从 $[m, M]$ 的均匀分布, 分别用 $m_1, m_2, \dots, m_6$ 表示。本文对三种情形进行了仿真与比较。

3.1 天线和基站都不进行休眠

由式(6)化简可得整个系统总能耗为

$$P = \sum_{k=0}^6 \sum_{j=1}^N a_{k,j} \cdot \left(\frac{P_{\max(k)} \cdot \frac{l_{k,j}}{L \cdot 2}}{\eta_{PA}} + P_{RF} + P_{BB} + P_0 \right) \tag{9}$$

无休眠系统在不同基站用户数以及用户平均需求容量时的总能耗如图 3 所示。

由图 3 可见,系统总能耗随着用户数量的增加以及较为稳定的增量变大,用户平均负载量也会造成类似的影响。

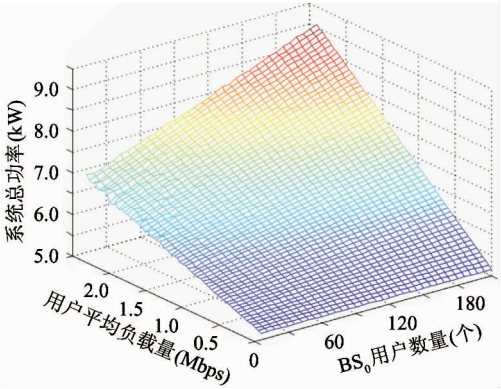


图 3 无休眠系统总能耗与基站用户数以及用户平均需求容量的关系

3.2 仅基站休眠

化简式(6)、(8)并结合可得基站休眠系统总能耗表达式为

$$P = \begin{cases} A_0 \cdot \varepsilon \cdot (P_{BB} + P_0) + \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^N a_{k,j} \cdot \left(\frac{P_{\max(k)} \cdot \frac{l_{k,j}}{L \cdot a_{k,j}}}{\eta_{PA}} + P_{RF} + P_{BB} + P_0 \right), & BS_0 \text{ 准许休眠} \\ \sum_{k=0}^6 \sum_{j=1}^N a_{k,j} \cdot \left(\frac{P_{\max(k)} \cdot \frac{l_{k,j}}{L \cdot a_{k,j}}}{\eta_{PA}} + P_{RF} + P_{BB} + P_0 \right), & BS_0 \text{ 拒绝休眠} \end{cases} \tag{10}$$

基站休眠系统在不同基站用户数以及不同用户平均需求容量时的总能耗如图 4 所示。

一定程度时,由于基站休眠,总耗能发生突变,但随着负载的进一步降低,节省的能耗并没有进一步地变化。

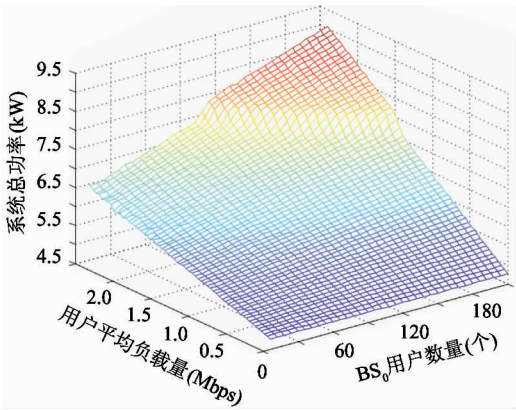


图 4 基站休眠系统总能耗与基站用户数以及用户平均需求容量的关系

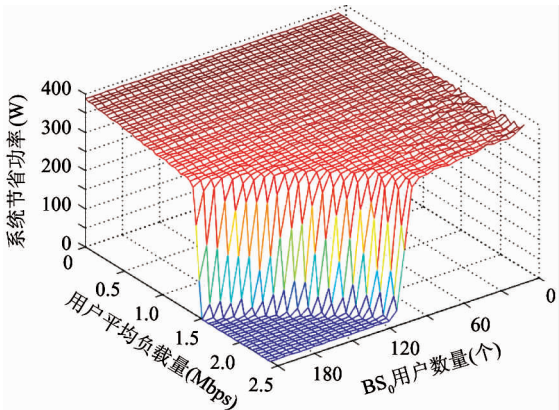


图 5 基站休眠系统节省能耗与基站用户数以及用户平均需求容量的关系

图 5 展示了基站休眠系统相对于普通系统能耗减少量与基站用户数以及用户平均需求容量的关系。由图可知,当基站占用时频资源块个数减少到

3.3 天线基站协同休眠

结合式(6)、(8)可得基站天线协同休眠系统的总能耗如下式所示:

$$P = \begin{cases} A_0 \cdot \varepsilon \cdot (P_{\text{BB}} + P_0) + \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^N a_{k,j} \cdot \left(\frac{P_{\text{max}}^{(k)} \cdot \frac{l_{k,j}}{L \cdot a_{k,j}}}{\eta_{\text{PA}}} + P_{\text{RF}} + P_{\text{BB}} + P_0 \right) + b_{k,j} \cdot (P_{\text{BB}} + P_0), & \text{BS}_0 \text{ 准许休眠} \\ \sum_{k=0}^6 \sum_{j=1}^N a_{k,j} \cdot \left(\frac{P_{\text{max}}^{(k)} \cdot \frac{l_{k,j}}{L \cdot a_{k,j}}}{\eta_{\text{PA}}} + P_{\text{RF}} + P_{\text{BB}} + P_0 \right) + b_{k,j} \cdot (P_{\text{BB}} + P_0), & \text{BS}_0 \text{ 拒绝休眠} \end{cases}$$

(11)

图 6 展示了协同休眠系统在不同基站用户数以及用户平均需求容量时的总能耗,可以看出在相同用户数量和平均负载的情况下,能耗较基站休眠系统有进一步下降。图 7 展示了协同休眠系统相对于普通系统能耗减少量与基站用户数以及用户平均需求容量的关系。从图中可以看出,随着休眠基站占用时频资源块个数减少,系统整体能耗呈阶梯式下

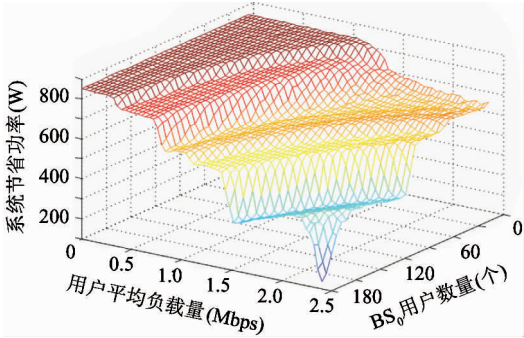


图 7 协同休眠系统节省能耗与基站用户数以及用户平均需求容量的关系

降。需要注意的是,在最低一阶,随着负载减少,能耗反而有所增加,这是由于当 BS_0 休眠后,周边基站扇区负载增大,部分休眠天线重启,导致能耗有所回升。

另外将本文提出的 DPRR 接入算法与 Meng^[12] 提出的 MSRRBS 算法进行比较,比较结果如图 8 所示。

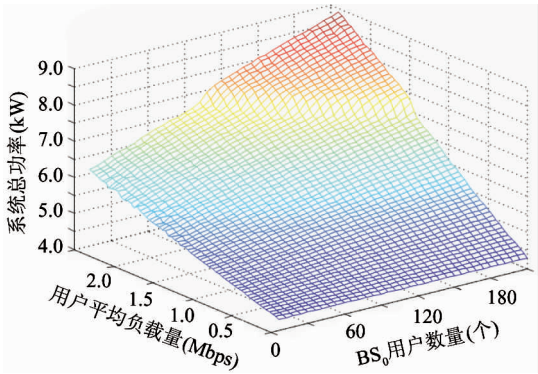


图 6 协同休眠系统总能耗与基站用户数以及用户平均需求容量的关系

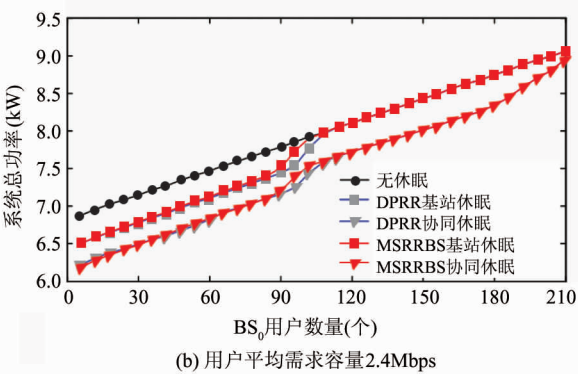
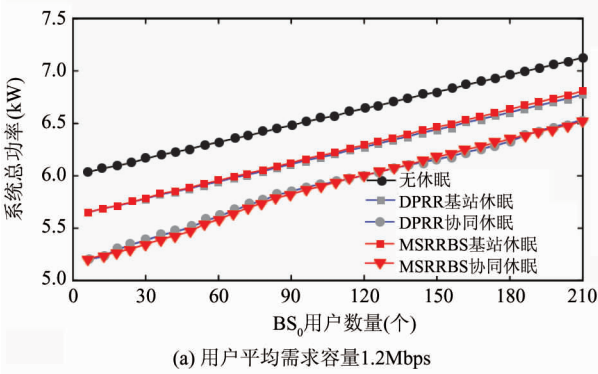


图 8 DPRR 算法与 MSRRBS 算法能耗比较

由图 8 可知,当基站负载量较大时,基站休眠系统能耗与无休眠系统能耗相差无几,直到到达休眠阈值,能耗发生跳变,当基站休眠后,负载继续下降,能耗较普通系统没有更进一步变化。然而由于

DPRR 算法的能耗优先考虑,DPRR 基站休眠系统的休眠阈值明显大于 MSRRBS 基站休眠系统,系统总能耗持续低于 MSRRBS 系统,但能耗差随负载的降低逐渐缩小。协同休眠系统在负载高时随负载量下

降,与普通系统的能耗差不断增大并在到达休眠阈值时抵达相对峰值,另外在基站休眠之后,若负载继续下降,随着休眠天线数量的增加,相较于普通系统的能耗差进一步扩大,节能效果显著。需要注意到,在基站休眠之后,若系统负载继续降低,MSRRBS 协同休眠系统能耗会略微优于 DPRR 协同休眠系统,原因在于 MSRRBS 算法将负载尽可能地集中,天线休眠概率增大,能耗减少。

图 9 显示了能耗节省率随每个扇区中天线数量的关系,其中 i 表示每个扇区的固定能耗与单天线最大能耗的比值。可以看出,随着扇区内天线数量的增加,天线休眠策略极大地降低了系统的总能耗,这也显示天线休眠技术对于绿色 MASSIVE MIMO 技术具有重要意义。

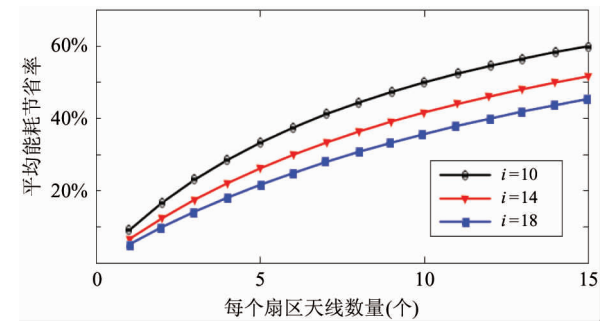


图 9 能耗节省率与扇区天线数量的关系

4 结 论

本文介绍了一种基于异频 TD-LTE 网络的基站天线协同休眠系统。当通信网络负载量低时,在保证用户需求容量的同时,大大减少了系统的总能耗。另外本文介绍了一种距离优先的轮询(DPRR)接入算法来解决休眠基站所属用户的分配问题,算法复杂度低,易于实现。仿真结果显示,低负载时基站天线协同休眠与 DPRR 接入算法结合后能减少至少 10% 的能耗,与 MSRRBS 接入算法的比较显示出了一定的能耗优势。需要注意,本方案只适用于异频组网的 MIMO 网络中,同频组网或混频组网的通信网络若使用本方案将会造成严重的同频干扰。另外,若基站扇区天线数量较少,则无法达到显著的节能效果。

本文考虑的是异频组网 TD-LTE 网络的情况,未来可以进一步研究同频组网模式的 TD-LTE 网络中的基站休眠方式。随着 5G 通信的发展和 MASSIVE MIMO 的应用,天线休眠的研究将具有较高价值,因此更优的天线休眠策略也将是未来的热点问题。

附录 A

用户最大平均需求容量 $\lambda_{\max}$ 的计算考虑以下情况,单基站满负载运行,假设基站内用户全部位于扇区边界,将各参数代入式(1)和(4)可得

$$SNIR = P_{\max} - (131.1 + 42.8 \lg R) - (-174 \text{dBm} + 10 \lg B) \tag{A1}$$

利用香农公式可得

$$C = B \cdot \log_2(1 + 10^{SNIR/10}) \cdot \tau \tag{A2}$$

结合式(5)可得

$$12 \cdot C \cdot L = M \cdot \lambda_{\max} \tag{A3}$$

最终算得 $\lambda_{\max}$ 约为 2.369Mbps。

参考文献

[1] Gunther A, Oliver B, Vito Q, et al. Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown[EB/OL]. <https://www.ictearth.eu/publications/publications.html>; EARTH Consortium, 2012

[2] Fehske A, Malmodin J, Biczok G, et al. The global carbon footprint of mobile communications — the ecological and economic perspective [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(8):55-62

[3] Zhou S, Gong J, Zhou Z, et al. GreenDelivery: proactive content caching and push with energy-harvesting-based small cells[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(4):142-149

[4] Wang X, Krishnamurthy P, Tipper D. Cell sleeping for energy efficiency in cellular networks: is it viable? [C]. In: Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Paris, France, 2012. 2509-2514

[5] Han T, Zhang Z, Hu M, et al. Energy efficiency of cooperative base station sleep scheduling for vehicular networks[C]. In: Proceedings of the IEEE 79th Vehicular

- Technology Conference (VTC Spring), Seoul, Korea, 2014. 1-5
- [6] Han T, Liu X, Wang L, et al. Energy saving of base stations sleep scheduling for Multi-Hop vehicular networks [C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016. 1-5
- [7] Chai X M, Zhang Z S, Long K P. Joint spectrum-sharing and base station sleep model for improving energy efficiency of heterogeneous networks[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), London, UK, 2015. 1851-1856
- [8] Chai X M, Li Y, Lv Y, et al. Joint spectrum-sharing and base-station-sleep model for improving energy efficiency of HetNet[J]. *IEEE Systems Journal*, 2015, PP(99):1-11
- [9] Jin S F, Ma X T, Yue W Y. Energy-saving strategy for green cognitive radio networks with an LTE-advanced structure[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2016,18(4):610-618
- [10] Hu J M, Heng W, Zhang G D, et al. Base station sleeping mechanism based on traffic prediction in heterogeneous networks[C]. In: Proceedings of the International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), Sydney, Australia, 2015. 83-87
- [11] Li L, Peng M G, Yang C Q, et al. Optimization of base-station density for high energy-efficient cellular networks with sleeping strategies[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(9):7501-7514
- [12] Meng C, Li X, Lu X W, et al. A low complex energy saving access algorithm based on base station sleep mode [C]. In: Proceedings of the IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Tihany, Hungary, 2013. 491-495
- [13] 谢宁, 亓晓武, 刘玮, 等. TD-LTE 异频组网技术网络性能研究[C]. 见: LTE 网络创新研讨会, 北京, 2014. 193-196
- [14] Auer G, Giannini V, Desset C, et al. How much energy is needed to run a wireless network? [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(5):40-49
- [15] 肖清华, 毛卓华, 凌文杰, 等. TD-LTE 容量能力综合分析[J]. 邮电设计技术, 2012(4):36-40
- [16] Castellanos C U, Villa D L, Rosa C, et al. Further advancements for EUTRA physical layer aspects (Release 9), 36.814v9.0.0[R]. Valbonne: 3GPP, 2010

A green communication mechanism based on anti-frequency TD-LTE network

Meng Limin^{* **}, Weng Tao^{* **}, Jiang Wei^{* **}

(^{*} College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

(^{**} Zhejiang Provincial Key Laboratory of Communication Networks and Applications, Hangzhou 310023)

Abstract

To reduce wireless communication networks' energy consumption, a scheme of cooperative dormancy between base stations and antennas is proposed, thus energy consumption can be minimized on the premise of guaranteeing the quality of users' service, while base stations are under low load, the dormancy works to decrease the number of sector working antennas to reduce energy consumption. Furthermore, a green communication mechanism based on TD-LTE anti-frequency network and its algorithm are presented. The mechanism uses its design of cooperative dormancy of mobile base stations and antennas as well as a presented distance priority round robin (DPRR) access algorithm to achieve considerable green communication.

Key words: green communication, TD-LTE, cooperative dormancy, distance priority round robin (DPRR), DPRR access algorithm