



关于 5G 中继技术的节能算法研究

郭杨波, 张治中, 胡昊南, 程 方

(重庆邮电大学通信网测试工程研究中心 重庆 400065)

摘 要: 针对 5G 中继网络的节能降耗问题进行了研究。中继技术是第五代移动通信(5G)的重要技术,通过关闭 5G 网络中部分业务负载量较低的基站来达到节能降耗的目标,然而在此过程中网络时常会发生基站状态的转换,所以网络的拓扑情况也会随着时间及业务的变化而发生改变。联合考虑网络的服务质量(QoS)及网络功耗,针对 5G 中继蜂窝网络提出了一种动态节能(DES)算法来优化 QoS 和网络功耗的综合性能。仿真结果表明,DES 算法可以使网络得到重新配置,关闭部分基站及中继节点,从而大幅提高节能效果,尤其是网络负载降低时。

关键词: 5G; 中继选择; 绿色通信; 能量效率; 服务质量

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2015052

Research on Energy Saving Algorithm of 5G Relay Cellular Network

Guo Yangbo, Zhang Zhizhong, Hu Haonan, Cheng Fang

(Communication Networks Testing Engineering Research Center,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The energy saving issue of 5G relay cellular network was discussed. Relay technology is an important technology in the fifth generation mobile communication network(5G). By switching some base stations with low traffic into sleep mode, the energy can be saved. Therefore, the state of base stations in 5G may convert usually, the network topology and business changed over time. Considering both quality of service (QoS) and power consumption of the whole network, a dynamic energy saving (DES) algorithm was proposed to optimize the overall performance of QoS and energy efficiency for 5G relay cellular network. Simulation results under different traffic conditions demonstrate that the DES algorithm can reconfigure the network, shut down part of the base station and relay nodes to significantly reduce energy consumption, especially when the network load is low.

Key words: 5G, relay selection, green communications, energy efficiency, quality of service

收稿日期: 2014-12-03; 修回日期: 2015-02-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2014AA01A706), 国家科技重大专项基金资助项目(No.2012ZX03001021, No.2012ZX03005008), 重庆高校创新团队基金资助项目(2013)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(No.2014AA01A706), The National Science and Technology Major Project(No.2012ZX03001021, No.2012ZX03005008), The Chongqing University Innovation Team Building Special Fund(2013)

论文引用格式: 郭杨波, 张治中, 胡昊南等. 关于 5G 中继技术的节能算法研究. 电信科学, 2015052

Guo Y B, Zhang Z Z, Hu H N, *et al.* Research on Energy Saving Algorithm of 5G Relay Cellular Network. Telecommunications Science, 2015052



1 引言

随着通信行业的飞速发展,产生了大量的能量消耗,并造成了日益严重的环境问题。Gartner 的调查显示,在全球总能耗中通信行业能耗高于其他行业,达到了 3%,其中蜂窝网络中无线接入部分的能耗占移动运营商总能耗的 70% 以上。在能源日益短缺的今天,如何降低能源消耗已经成为通信行业研究的一个热点问题。

在 LTE-B 以及未来 5G 网络中,如何扩展基站的覆盖范围对通信行业来说始终是一个研究热点。在现阶段,为了克服无线信道中的信号衰落以及路径损耗等对网络的影响,且能够满足用户所需的 QoS,往往需要很大的基站发射功率,并且需要在用户和基站之间部署高级的无线接口。因此,在网络中加入中继节点是非常必要的,尤其是随着微蜂窝甚至微微蜂窝在 5G 网络中的部署应用,小区范围不断缩小,中继节点的发射功率小、部署灵活等特性使其非常适合于 5G 网络。因此,在未来的 5G 网络中,中继技术将会具有举足轻重的作用。

用户的日常行为活动使得一天内不同小区的业务发生规律性的变化,这种变化被称为“潮汐效应”。因此,考虑在业务量较低时,有选择地将基站或者中继设备调整到休眠模式,以实现绿色节能效果。参考文献[1,2]等对基站休眠策略进行了广泛的研究。同一地区高峰时段的流量可多达 10 倍于非高峰时段^[3]。参考文献[4]考虑了日常业务变化对基站节能机制的影响。参考文献[5]在网络节能机制中考虑了可能影响 QoS 和系统稳定性的一些问题,比如调整时间和门限值等,但并没有针对影响 QoS 的问题提出具体的解决方案。参考文献[6]提出在部分小区关闭后,可以通过调整天线方向、基站协作或者中继等方式来保证网络的 QoS 不受影响,因此站点休眠的技术是可以实施的。但是通过简单的物理途径对网络进行操作会在一定程度上影响网络的稳定性,从而对网络服务水平产生影响。参考文献[7]提出了单用户以及多用户无线系统的资源分配方案,通过适时激活中继来减少网络能耗,然而并没有考虑到该过程中对用户 QoS 的影响,需要在网络能耗及通信质量之间取得一定的平衡。参考文献[8]研究了在 LTE-Advanced 网络中通过减少激活小区的数量和范围及采用休眠策略等方法能带来的节能程度。另外,随着基站状态的转换,用户的连接问题主要考虑接收信号质量^[9]和基站负载^[10-12]两个方面,该思想的核心与本文所采取的基

本方法是类似的。

针对以上问题,通过联合考虑网络的 QoS 及网络功耗,力求在两者之间取得合理的平衡来弥补上述相关研究的不足。本文将连接问题建模成一个加权二部图来描述网络的 QoS 和节能两方面性能。提出了网络性能最大化问题,并提出一个动态节能(DES)算法作为启发式解决方案。

2 系统模型

5G 中继蜂窝模型如图 1 所示。该网络中有 M 个基站(base station, BS)、 N 个用户设备(user equipment, UE)和 F 个中继节点(relay node, RN), b_m 表示基站 m , u_n 表示用户设备 n , r_f 表示中继节点 f 。UE 有两种接入模式:接入 BS 或者接入 RN, RN 可以提供服务给用户,且 RN 的功耗小于 BS。

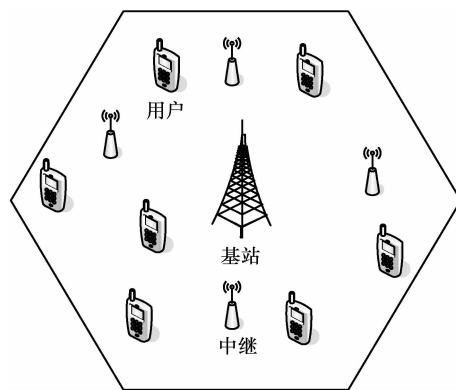


图 1 5G 中继蜂窝系统模型示意

本文中,路径损耗 PL 使用改进的自由空间路径损耗模型,则平均路径损耗可以表示为:

$$PL = (4\pi d_0 f / c)^2 (d / d_0)^\eta \quad (1)$$

其中, d_0 是参考距离,一般设为 10 m, f 是载波频率, c 是光速, d 是发射节点到接收节点间的距离, η 是传播指数。

若 u_n 同 b_m 连接,则其 SINR 值为:

$$\gamma_{m,n}^b = \frac{PL p_m^b}{\sum_{k=1, k \neq m}^M p_k^b + P_N + \sum_{k=1}^F p_k^r} \quad (2)$$

同理,若 u_n 同 r_f 连接,则其 SINR 值为:

$$\gamma_{f,n}^r = \frac{PL p_f^r}{\sum_{k=1}^M p_k^b + \sum_{k=1, k \neq f}^F p_k^r + P_N} \quad (3)$$

其中, p_m^b 和 p_f^r 分别表示 b_m 和 r_f 的发射功率,其业务量分别为 t_m^b 和 t_f^r 。式(2)和式(3)中的分母表示噪声功率和干扰率的和。

本文中,假设 UE 的业务速率均为 p_m^u ,与基站连接的 UE 可以表示为 U_m^b 。令 t_m^b 代表基站 b_m 的业务负载,由此可得:

$$t_m^b = \sum_{u_n \in U_m^b} \rho_n^u \quad (4)$$

本部分假设 p_m^b 是与业务量相关的,即 $p_m^b = f(t_m^b)$, $f(\cdot)$ 是一个不减的函数。

本文中用加权二部图 $G(V, E)$ 表示 BS 与 UE、BS 与 RN 之间的连接关系, $G(V, E)$ 是由点集 $V = \{b_m\} \cup \{u_n\} \cup \{r_f\}$ 和边集 E 组成的。其中, E 中边的两个顶点分别属于 $\{b_m\}$ 和 $\{u_n\}$ 或 $\{r_f\}$ 和 $\{u_n\}$ 。

定义两个连接矩阵 $X^b = (x_{m,n}^b)_{M \times N}$ 和 $X^r = (x_{f,n}^r)_{F \times N}$ 表示 UE 同 BS 及 RN 的连接情况。

$$x_{m,n}^b = \begin{cases} 1, & b_m \text{ 与 } u_n \text{ 连接} \\ 0, & b_m \text{ 与 } u_n \text{ 未连接} \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{f,n}^r = \begin{cases} 1, & r_f \text{ 与 } u_n \text{ 连接} \\ 0, & r_f \text{ 与 } u_n \text{ 未连接} \end{cases} \quad (6)$$

5G 中继蜂窝网络中,用 u_n 的 SINR 衡量 QoS,用 b_m 的业务负载衡量能耗。通常来讲,UE 会优先选择连接负载较轻的 BS,此时,该 BS 为其提供较高的 SINR 值。然而,如果 UE 选择连接负载较重的 BS 从而关闭尽可能多的基站,对网络的节能效果显然是有利的,对于连接 RN 的 UE 同理。因此,用权值矩阵 $W^b = (w_{m,n}^b)_{M \times N}$ 为 SINR 和能耗做一个折中。对于连接 RN 的 UE 同理,用矩阵 $W^r = (w_{f,n}^r)_{F \times N}$ 做一个折中。由 UE、BS 和 RN 的连接情况,可以计算出每条边的权值为:

$$w_{m,n}^b = \alpha \hat{\gamma}_{m,n}^b + \beta \hat{t}_m^b = \alpha \frac{\gamma_{m,n}^b}{\max_m(\gamma_{m,n}^b)} + \beta \frac{t_m^b}{\max_m(t_m^b)} \quad (7)$$

$$w_{f,n}^r = \alpha \hat{\gamma}_{f,n}^r + \beta \hat{t}_f^r = \alpha \frac{\gamma_{f,n}^r}{\max_f(\gamma_{f,n}^r)} + \beta \frac{t_f^r}{\max_f(t_f^r)} \quad (8)$$

其中, $\hat{\gamma}_{m,n}^b$ 和 $\hat{t}_m^b$ 分别表示连接 BS 的 u_n 的归一化 SINR 值和 b_m 的归一化 BS 负载值, $\hat{\gamma}_{f,n}^r$ 和 $\hat{t}_f^r$ 分别表示连接 RN 的 u_n 归一化 SINR 值和 r_f 的归一化 RN 负载值。令 $\alpha + \beta = 1$, α 是 QoS 因子, β 是节能因子。可以通过调节 α 和 β 的值来改变用户重新连接过程中重点考虑因素的比重。

经过上述过程,5G 中继蜂窝系统已经建模成为一个加权二部图,加权二部图总权重为 $R = (W^b)^T X^b + (W^r)^T X^r$ 。因此,网络性能最优化问题表示为:

max R

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_m x_{m,n}^b + \sum_f x_{f,n}^r = 1 \\ x_{m,n}^b = \{0, 1\}, m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N \\ x_{f,n}^r = \{0, 1\}, f = 1, 2, \dots, F, n = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (9)$$

式(9)表示的约束条件为一个 UE 只能连接到一个 BS 或 RN 上。假设 UE 的业务速率相同,可以用 X^b 的第 m 行的行和表示 t_m^b ,即 $t_m^b = \sum_n x_{m,n}^b$ 。同理, $t_f^r = \sum_n x_{f,n}^r$ 。因此,与 BS 连接的 UE 的 SINR 值和边的权值可以用 X^b 中的元素表示:

$$\gamma_{m,n}^b = \frac{PL p_m^b}{\sum_{k=1, k \neq m}^M p_k^b + P_N + \sum_{k=1}^F p_k^r} = g\left(\sum_n x_{m,n}^b\right) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} w_{m,n}^b &= \alpha \frac{\gamma_{m,n}^b}{\max_m(\gamma_{m,n}^b)} + \beta \frac{t_m^b}{\max_m(t_m^b)} \\ &= \alpha \frac{g\left(\sum_n x_{m,n}^b\right)}{\max_m g\left(\sum_n x_{m,n}^b\right)} + \beta \frac{\sum_n x_{m,n}^b}{\max_m \sum_n x_{m,n}^b} \end{aligned} \quad (11)$$

同理,与 RN 连接的 UE 的 SINR 值和边的权值可以用连接矩阵 X^r 中的元素表示:

$$\gamma_{f,n}^r = \frac{PL p_f^r}{\sum_{k=1}^M p_k^b + \sum_{k=1, k \neq f}^F p_k^r + P_N} = g\left(\sum_n x_{f,n}^r\right) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} w_{f,n}^r &= \alpha \frac{\gamma_{f,n}^r}{\max_m(\gamma_{f,n}^r)} + \beta \frac{t_f^r}{\max_m(t_f^r)} \\ &= \alpha \frac{g\left(\sum_n x_{f,n}^r\right)}{\max_m g\left(\sum_n x_{f,n}^r\right)} + \beta \frac{\sum_n x_{f,n}^r}{\max_m \sum_n x_{f,n}^r} \end{aligned} \quad (13)$$

通过式(10)~式(13)的计算,式(9)的最优化问题转化成了与 X^b 和 X^r 相关的 0-1 问题。

3 动态节能算法

0-1 规划问题中,如果数值较多,会消耗很长的计算时间。因此,提出一种动态节能(DES)算法,以重新配置加权二部图的连接矩阵 X^b 和 X^r ,从而最优化总权重 R 。

图 2 描述了 DES 算法的流程,该迭代方法的基本思路是:采用迭代思想,每次迭代计算出本次连接矩阵和加

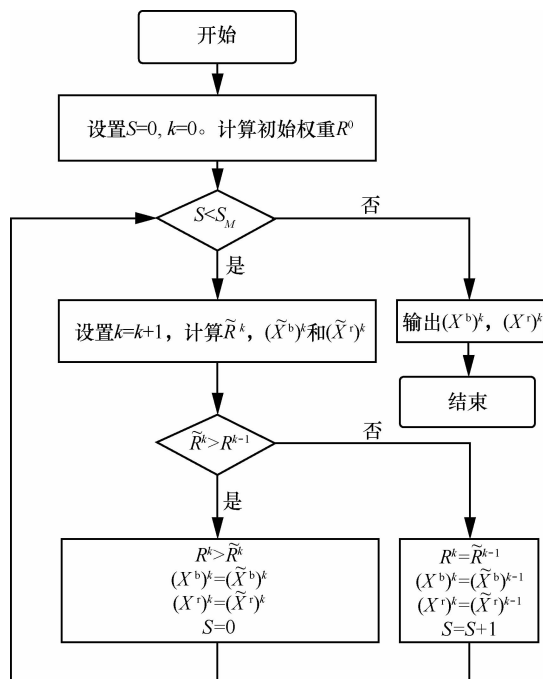


图2 5G中继蜂窝系统DES算法流程

权二部图总值。S表示连续两次迭代结果相同即 $R^k=R^{k-1}$ 的次数。此外,为了使最后的结果为最优迭代,定义常数 S_M ,连续 S_M 次迭代结果相同时才是最优解。

经此流程,可以得到连接矩阵 $(X^b)^k$ 和 $(X^r)^k$,并判断出用户的连接情况。若某个基站 b_m 的业务量为0,即 $t_m^b = \sum_n (x_{m,n}^b)^k = 0$, b_m 就可以关闭了,从而可以减少无线蜂窝网络的能耗。

4 仿真分析

5G中继蜂窝系统仿真场景如图3所示。该场景为两层5G中继网络,包括19个小区,基站位于小区中心。每个小区有6个RN,中继节点分布在距基站200 m处的圆周上,用户分布在距基站100~250 m的边缘区域,如图3中的小方框,频率复用因子为1。

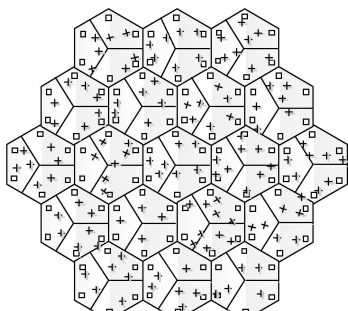


图3 5G中继网络仿真场景示意

假设一天之内,网络中总UE数的曲线类似正弦曲线,UE的数量范围为100~400个。仿真过程中的参数设置见表1。

表1 仿真参数

参数	数值大小
站间距	500 m
基站发射功率	30 dBm
载波频率	2 GHz
噪声功率谱	-175 dB/Hz
载波宽度	50 MHz
大尺度路径损耗	8 dB

在仿真过程中,用系统中断率、总能耗和能效衡量算法的性能。系统的总能耗用 P 表示,代表系统内BS和RN节点功耗的总和,即:

$$P = \sum_{m=1}^M p_m^b + \sum_{f=1}^F p_f^r \quad (14)$$

其中, p_m^b 和 p_m^r 分别是 b_m 和 r_f 的总功耗,计算网络的能量效率参考式(15):

$$EE = \frac{\sum_{n=1}^N T_n^u}{P} \quad (15)$$

设 T_n^u 是 u_n 经过RR调度得到的吞吐量。

当UE的吞吐量低于某一设定的阈值时,称为中断UE,它们的集合用 U_B 表示,阈值设为10 kbit/s。 N 是蜂窝网络中所有UE的数量,那么中断率为:

$$P_b = \frac{|U_B|}{N}, U_B = \{u_n | T_n^u \leq 10 \text{ kbit/s}\} \quad (16)$$

4.1 权值因子

图4和图5分别表示权值因子对系统功耗和系统中

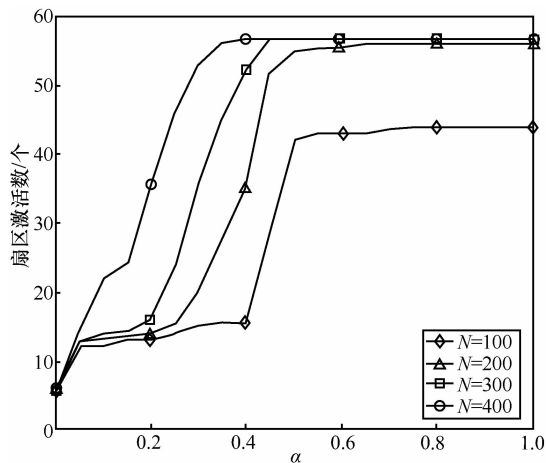


图4 权值因子对5G中继蜂窝系统功耗的影响

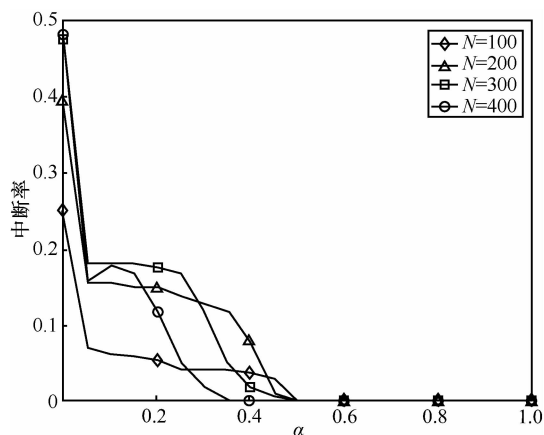


图 5 权值因子对 5G 中继蜂窝系统中断率的影响

断率的影响。 α 表示 QoS 因子,当 α 增大时,用户会优先选择 SINR 更好的连接方式,这就需要激活更多的基站(扇区)来满足系统的需求,然而这同时也增加了系统的功耗,但此时中断率却是降低的。由此可见,系统的功耗与中断率之间是一个此消彼长的关系。可以看出,当 $\alpha=0.3$ 且 $\beta=0.7$ 时,可以在功耗和中断率之间达到最优折中。

4.2 业务负载量

为了综合分析该 DES 方案的系统性能,将 DES 方案同 all on 方案(即网络中所有 BS 和 RN 节点都处于激活状态)的系统性能进行仿真比较,仿真结果如图 6 所示,横坐标表示网络中随时间变化的 UE 激活量。

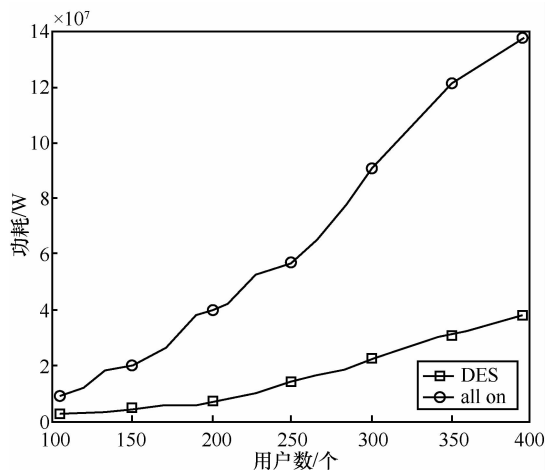


图 6 业务量对系统功耗的影响

图 6 中,随着 UE 数量的增多,两种方案的系统功耗都会增加,但本文提出的方案能够有选择地关闭部分节点(BS 和 RN),因此系统的功耗增长率比 all on 方案小。此外,由图 6 可以看出,当 UE 数量超过 250 个后,为了保证系统中每个用户的 QoS,必须开启更多的节点,两个方案的

功耗增长率变大。

图 7 描述了 DES 和 all on 两种方案的系统能效。当网络中 UE 的数量较少时,两种方案的能效都很高,随着 UE 数量的增加,为了保证系统中每个用户的 QoS,系统激活节点数量增加,能效同时会降低,且下降率不断增大。当 UE 数量趋近 400 时,DES 方案节能效果不明显。

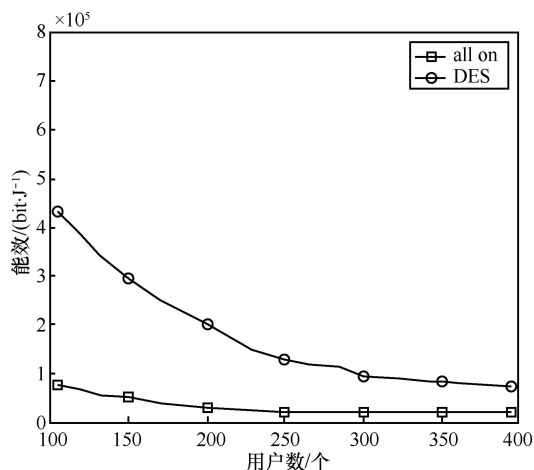


图 7 业务量对系统能效的影响

5 结束语

本文针对 5G 中继网络提出一种基于休眠策略的动态基站节能(DES)算法对系统进行建模及优化,该算法联合考虑网络的 QoS 及网络功耗。利用图论基础理论将 5G 中继蜂窝网络建模成一个加权二部图,对 QoS 和功耗两方面性能进行最优折中,从而最大化网络的综合性能。仿真结果表明,DES 方案可以使网络得到重新配置,使部分 BS 及 RN 关闭,从而大幅提高节能效果,尤其是当网络负载降低时。

参考文献

- 1 Marsan M A, Chiaraviglio L, Ciullo D, *et al.* Optimal energy savings in cellular access networks. Proceedings of IEEE International Conference on Communications Workshops, Dresden, Germany, 2009: 1~5
- 2 Niu Z, Wu Y, Gong J, *et al.* Cell zooming for cost-efficient green cellular networks. Communications Magazine, 2010, 48(11): 74~79
- 3 Correia L M, Zeller D, Blume O, *et al.* Challenges and enabling technologies for energy aware mobile radio networks. Communications Magazine, 2010, 48(11): 66~72



- 4 Soh Y S, Quek T Q S, Kountouris M, *et al.* Energy efficient heterogeneous cellular networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(5): 840~850
- 5 Elayoubi S E, Saker L, Chahed T. Optimal control for base station sleep mode in energy efficient radio access networks. *Proceedings of INFOCOM, Shanghai, China, 2011*: 106~110
- 6 Nokleby M, Aazhang B. User cooperation for energy-efficient cellular communications. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications, Princeton, New Jersey, 2010*: 1~5
- 7 Duval O, Hasan Z, Hossain E, *et al.* Subcarrier selection and power allocation for amplify-and-forward relaying over OFDDM links. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(4): 1293~1297
- 8 Khirallah C, Thompson J S. Energy efficiency of heterogeneous networks in LTE-Advanced. *Journal of Signal Processing Systems*, 2012, 69(1): 105~113
- 9 De Moreas T M, Saleh A B, Bauch G, *et al.* QoS-aware traffic scheduling in LTE-Advanced relay-enhanced networks. *Proceedings of IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Dresden, Germany, 2013*: 1~5
- 10 Ismail M, Zhuang W. Network cooperation for energy saving in green radio communications. *IEEE Wireless Communications*, 2011, 18(5): 76~81
- 11 Samdanis K, Kutscher D, Brunner M. Dynamic energy-aware network re-configuration for cellular urban infrastructures. *Proceedings of GLOBECOM Workshops, Miami, FL, 2010*: 1448~1452
- 12 Zhou S, Gong J, Yang Z, *et al.* Green mobile access network with dynamic base station energy saving. *Proceedings of ACM MobiCom, Beijing, China, 2009*

[作者简介]



郭杨波,男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为通信网测试及优化、第五代移动通信等。



张治中,男,博士,重庆邮电大学教授,主要研究方向为第三代、第四代移动通信测试技术和 NGN 网络测试技术等。



胡昊南,男,重庆邮电大学硕士生,主要研究方向为嵌入式软件和驱动开发。



程方,女,重庆邮电大学教授,主要研究方向为通信网测试技术、自动控制和仪器仪表。

2015052-6

2015 年 1 月通信业主要指标完成情况(一)

指标名称	单位	本年本月止累计到达	比上年同期累计(±%)	本月
营业收入	亿元	1 096.7	-2.4	1 096.7
其中:电信业务收入	亿元	884.2	2.9	884.2
固定资产投资完成额	亿元	107.8	-9.4	107.8
固定本地电话通话时长合计	万分钟	2 063 746.2	-9.9	2 063 746.2
固定长途电话通话时长合计	万分钟	443 061.3	3.7	443 061.3
移动电话通话时长合计(含本地)	万分钟	23 783 276.8	-3.5	23 783 276.8
其中:国内长途通话时长	万分钟	5 552 830.5	-0.3	5 552 830.5
国际长途通话时长	万分钟	9 614.6	-9.0	9 614.6
移动短信业务量	万条	6 094 927.5	-17.1	6 094 927.5
移动互联网接入流量	万吉字节	24 674.7	86	24 674.7

注:(1)电信业务收入增长率按可比口径计算。(2)固定长途电话通话时长和移动电话通话时长均包含相应的 IP 电话通话时长。(3)通话时长各项指标均为去话通话时长。

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)