

基于基站密度和业务负载的异构蜂窝网络能效优化

李云 王俊伟* 赵为粮 刘期烈

(重庆邮电大学重庆市移动通信重点实验室 重庆 400065)

摘要: 该文在两层异构网络架构下,采用泊松分布(PPP)建立基站分布模型,构建基于基站密度和业务负载的网络能效模型。分析基站密度对网络能效的影响,并根据网络业务流量的到达率对宏基站和小基站的密度进行联合优化,得到宏基站和小基站的最优联合密度,在保证网络服务质量的同时,使能效达到最优。仿真结果表明,在不同的网络业务需求下,通过基站密度的优化,在保证网络服务质量的同时,合理部署宏基站和小基站的密度,可使能效大幅度提高。

关键词: 异构网络; 网络能效; 基站密度; 最优联合密度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-0854-06

DOI: 10.11999/JEIT160192

Optimizing the Energy Efficiency of Heterogeneous Cellular Networks Based on the Base Station Density and Traffic Load

LI Yun WANG Junwei ZHAO Weiliang LIU Qilie

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Post and Communications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Poisson Point Process (PPP) is used to establish the distribution model of base stations in two-tier heterogeneous networks, and formulate the energy efficiency maximization problem based on the base station density and the traffic load. The influence of the base station density on the energy efficiency is analyzed to optimize the densities of the macro base stations and small base stations according to the traffic load. The optimal densities of the macro base stations and small base stations are deduced, which can optimize the energy efficiency under the constraint of the quality of service. Simulation results indicate that, under the constraint of the quality of service, reasonable deployment of macro and small stations can greatly improve the energy efficiency.

Key words: Heterogeneous network; Energy efficiency of network; Base station density; Optimal joint density

1 引言

第5代(5G)蜂窝移动通信网络对能耗提出了明确要求。现有研究表明在无线网络能耗中,基站能耗比重较大^[1]。同时,为了保证无缝覆盖,为用户密集、业务需求量大的热点地区提供高速无线移动数据业务,5G网络采用宏蜂窝+小蜂窝的异构网络结构^[2-3]。在网络规划阶段,根据网络负载合理地部署基站,减少不必要的基站能源消耗,在能效研究中也极为重要。为了根据网络负载合理地部署基站,

需要首先分析基站分布同网络能效的理论关系。

文献[4,5]假设基站服从均匀的点分布过程,分析了异构蜂窝网络的能效和吞吐量等性能。文献[6]分析了在热点区域引入小基站对能效的影响,并提出在网络低负载的时间段使小基站休眠的节能策略。文献[7]指出小基站的引入可以提高网络的吞吐量,但只有部署合理的小基站数量才可以提高网络的能效。文献[8]介绍了中继对异构网络的吞吐量和能效的影响,同时对网络吞吐量和能耗进行折中。上述研究均假设基站服从均匀的点分布过程,有研究表明:假设基站是一个规则的点分布过程并不符合真实的场景,导致能效模型的准确性差^[9,10],不能准确地描述网络参数对能效的影响。为此,文献[11]通过对异构蜂窝网络不同的位置进行快拍,发现异构蜂窝网络的宏基站和小基站均服从一定密度的泊松分布。近年来,部分研究成果,文献[12-15]基于基站的泊松分布,建立异构蜂窝网络的能效模型。文献[16]计算了每层小区的成功传输概率和吞吐量,

收稿日期:2016-03-01;改回日期:2017-01-20;网络出版:2017-03-07

*通信作者: 王俊伟 wangjunwei1266@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671096), 国家重点基础研究发展计划(2012CB316004), 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2015D07)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671096), The National Basic Research Program of China (2012CB316004), The Open Research Foundation of National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University (2015D07)

分析了基站密度对每层小区的成功传输概率的影响，同时研究了宏基站和小基站密度的比值对能效的影响。文献[17]进一步分析了随机休眠策略和动态休眠策略对能效的影响，分析结果表明基站根据相应小区的活跃用户数进行动态休眠比随机休眠更能提高能效。文献[18]将负载引入能效目标函数中，得出基于负载的能效表达式，并根据负载情况分析了网络的阻塞率。文献[19]指出在网络负载比较低时，可将低负载小基站下的用户切换到相应的宏基站下，使部分小基站进行休眠，并分析出在不同的业务负载下能效最大的小基站休眠比例。文献[20]给出了用户行为多样性对能效的影响。

以上研究均着重分析了小基站对网络能效的影响，建立小基站的密度同网络能效的关系。存在如下问题：(1)没有考虑宏基站的密度对能效的影响；(2)没有同时考虑小基站和宏基站的密度对能效的影响，从而给出基站的合理部署。针对上述问题，本文建立了一个宏基站加小基站异构蜂窝网络的能效模型，该模型在网络覆盖率和吞吐量的约束条件下，分析宏基站/小基站分布以及业务负载对网络能效的影响，得到使能效最大的宏基站和小基站密度组合。

本文剩余章节安排如下：第2节描述异构蜂窝无线网络的模型；第3节分析能效模型；第4节介绍能效的优化；第5节进行仿真验证和分析；第6节总结本文工作。

2 系统模型

考虑一个包含宏基站和小基站的两层异构蜂窝无线网络，如图1所示，其中宏基站服从密度为 λ_m 的泊松分布，其最大传输半径为 R_m ；小基站服从密度为 λ_s 的泊松分布，其最大传输半径为 R_s ； λ_m 和 λ_s 分别表示单位面积内宏基站和小基站的个数。且宏基站和小基站分布相互独立。用户分布服从到达率为 μ_t 的泊松分布，且为以基站为中心的Mtern簇不均匀分布^[4]， μ_t 表示单位时间和单位面积内到达的活跃用户数。由宏基站服务的用户，我们称为宏用户；由小基站服务的用户，我们称为微用户。假设宏用户下载文件的平均大小为 ε_m ，微用户下载文件的平均大小为 ε_s ，单位为bit。由于用户成不均匀的Mtern簇分布，则由文献[4]知：宏用户与宏基站之间的距离 r_m 的概率密度函数为： $p(r_m) = 2r_m/R_m^2, r_m \leq R_m$ ；微用户与小基站之间的距离 r_s 的概率密度函数为： $p(r_s) = 2r_s/R_s^2, r_s \leq R_s$ ^[11]。

为了提高频谱利用率，我们采用宏基站和小基站共享频谱机制，假设总的网络频谱带宽为 B Hz，

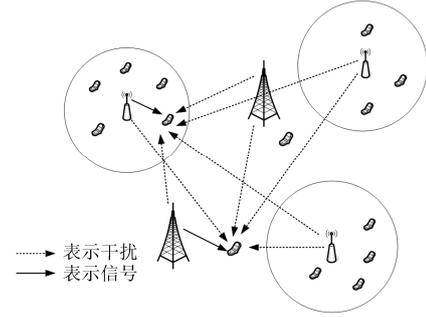


图1 两层异构网络

包含 N 个子信道，所有宏基站和小基站都可接入。采用部分功率控制策略^[21]，假设宏用户和微用户需要的接收信号的最小功率分别为 $P_{a,m}$ 和 $P_{a,s}$ ，则宏基站和小基站的对其服务的用户的最小发射功率分别为 $P_m = P_{a,m} R_m^{\alpha(1-\kappa)} r_m^{\alpha\kappa}$ 和 $P_s = P_{a,s} R_s^{\alpha(1-\kappa)} r_s^{\alpha\kappa}$ ，其中 $\kappa \in [0,1]$ 为功率控制因子， r_m 和 r_s 分别为宏用户与宏基站之间、微用户和小基站之间的距离， α 为路径衰落因子。本文采用全信道逆转功率控制(FPI)，即 $\kappa = 1$ 。从发射功率表达式可以看出，基站的发射功率可以根据离目标用户的距离进行调整，从而减小功率的浪费，使网络的总体能量消耗降低。因此，在基站覆盖范围内的用户，无论距离基站远近，都维持一定的接收功率，本文的研究基于以上功率控制的场景。

由于宏基站和小基站共享频谱，使得宏基站和小基站之间存在干扰，由此，宏基站 i 服务的宏用户 k 的接收信号的信干噪比 SINR_m 为

$$\text{SINR}_m = \frac{P_m h_m r_m^{-\alpha}}{I_m + I_s + N_0} \quad (1)$$

其中， P_m 代表该宏基站向该宏用户的发射信号的功率， h_m 为该宏基站与该宏用户之间的衰落系数， $r_m^{-\alpha}$ 代表该宏基站 i 与该用户之间的路径损耗， r_m 为该宏用户与该宏基站之间的距离；其它宏基站对该宏用户的干扰为 I_m ， N_0 为高斯白噪声。

类似可得微用户得到的信干噪比 SINR_s 为

$$\text{SINR}_s = \frac{P_{s,ik} h_{ik,s} r_{s,ik}^{-\alpha}}{I_m + I_s + N_0} \quad (2)$$

3 能效模型分析

3.1 网络的能效定义

将网络能效定义为单位能耗所能传输的业务量，即网络中单位时间成功传输的业务流量与总功率消耗的比值：

$$\text{EE} = \frac{(\lambda_m C_m + \lambda_s C_s) / B}{\lambda_m P_m + \lambda_s P_s} \quad (3)$$

其中， B 为系统带宽，单位为Hz， λ_m 和 λ_s 分别表示

宏基站和小基站的密度,即单位面积内基站的个数, C_m 和 C_s 分别表示一个宏小区和一个微小区单位时间内成功传输的业务流量, P_{tm} 和 P_{ts} 分别表示一个宏基站和一个小基站的功率消耗;分子部分表示单位带宽在单位时间和单位面积内成功传输的业务流量;分母部分表示单位面积内的总功率消耗,则能效单位为 $\text{bps}/(\text{Hz} \cdot \text{W})$ 。

3.2 小区成功传输业务量 C_m 和 C_s

一个宏基站和小基站单位时间内需要传输的业务量分别表示为 L_m 和 L_s , 单位为 bit/s , 平均成功传输概率为 Q_m 和 Q_s , 则宏基站和小基站平均成功传输业务量 C_m 和 C_s 分别为

$$C_m = L_m \cdot Q_m \quad (4)$$

$$C_s = L_s \cdot Q_s \quad (5)$$

由第2小节系统模型假设网络的平均用户到达率为 μ_t , 且宏用户下载文件的平均大小为 ε_m , 微用户为 ε_s , 则微小区单位时间需要传输的业务量为

$$L_s = \mu_t \cdot \pi R_s^2 \cdot \varepsilon_s \quad (6)$$

假设一个宏小区和一个微小区的面积分别表示为 S_m 和 S_s , 一个宏小区覆盖范围内的微小区的平均数量为 $N_s = \lambda_s \cdot E[S_m]$, 一个宏小区中减去微小区面积的平均剩余面积可表示为

$$E[S] = E[S_m - N_s \cdot S_s] \quad (7)$$

由于基站的分布是独立互不相关的, 所以式(7)可表示为

$$\begin{aligned} E[S] &= E[S_m - N_s \cdot S_s] = E[S_m] - E[N_s \cdot S_s] \\ &= \int_0^\infty S_m f(S_m) dS_m - N_s \pi R_s^2 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $f(S_m)$ 为宏基站覆盖面积的概率密度函数, 则宏小区单位时间需要传输的业务量为

$$L_m = \mu_t \cdot E[S] \cdot \varepsilon_m \quad (9)$$

假设宏用户和微用户能正确接收的信号的信噪比阈值分别为 β_m 和 β_s , 在干扰受限和全信道逆功率控制策略 ($N_0 = 0, \kappa = 1$) 下, 取 $\alpha = 4$, 根据参考文献[19], 可得一个宏基站的平均成功传输概率 Q_m 和一个小基站的平均成功传输概率 Q_s 分别为

$$\begin{aligned} Q_m &= \int_0^{R_m} P\{\text{SINR}_m(r_m) > \beta_m\} \frac{2r_m}{R_m^2} dr_m \\ &= \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} \beta_m^{1/2} (\lambda_m R_m^2 + \lambda_s R_s^2 \theta^{1/2})\right] \end{aligned} \quad (10)$$

$$Q_s = \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} \beta_s^{1/2} (\lambda_s R_s^2 + \lambda_m R_m^2 \theta^{-1/2})\right] \quad (11)$$

其中, $\theta = P_{a,s}/P_{a,m}$ 。

由式(10), 式(11)可知, 用户的成功传输概率随着基站密度的增加而减小, 这是因为由于我们采用

功率控制策略, 用户接收的基站信号强度与其离基站的距离无关, 增加基站数量并不能增强用户接收信号的信噪比; 相反, 基站的增加会增强层内和层间小区之间的干扰, 从而使信干噪比降低, 成功传输概率减小。

将式(9)和式(10)代入式(4), 将式(6)和式(11)代入式(5)可分别得到宏小区和微小区单位时间内平均成功传输业务量 C_m 和 C_s 分别为

$$\begin{aligned} C_m &= \mu_t \cdot (E[S_m] - N_s \pi R_s^2) \cdot \varepsilon_m \\ &\cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} \beta_m^{1/2} (\lambda_m R_m^2 + \lambda_s R_s^2 \theta^{1/2})\right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} C_s &= \mu_t \cdot \pi R_s^2 \cdot \varepsilon_s \\ &\cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4} \beta_s^{1/2} (\lambda_s R_s^2 + \lambda_m R_m^2 \theta^{-1/2})\right] \end{aligned} \quad (13)$$

3.3 功率消耗

由文献[18]功率消耗模型可知一个基站的功率消耗可表示为

$$P_{tx} = a_x \cdot P_x \cdot \frac{L_x}{T_x} + b_x \quad (14)$$

其中, a_x 为基站动态功率消耗系数, 偏置功率 b_x 为基站无负载时的基本功率消耗, P_x 为基站向宏用户传输信号时的平均发射功率, L_x 为小区单位时间需要传输的业务量流量, T_x 为基站的吞吐量, L_x/T_x 为与业务相关的因子。当式(14)的脚标 x 为 m 和 s 时分别表示宏基站和小基站的功率消耗 (P_{tm}, P_{ts}), 即

$$P_{tm} = a_m \cdot P_m \cdot \frac{L_m}{T_m} + b_m \quad (15)$$

$$P_{ts} = a_s \cdot P_s \cdot \frac{L_s}{T_s} + b_s \quad (16)$$

3.3.1 一个宏基站的平均功率消耗

(1) 平均发射功率 P_m : 在干扰受限和 FPI 策略 ($N_0 = 0, \kappa = 1$) 下, 由第2小节功率控制策略可得一个宏基站向期服务的宏用户传输信号时的平均发射功率为

$$\begin{aligned} P_m &= \mu_t \cdot (E[S_m] - N_s \pi R_s^2) \int_0^{R_m} P_{a,m} R_m^{\alpha(1-\kappa)} r_m^{\alpha\kappa} \\ &\cdot \frac{2r_m}{R_m^2} dr_m = \mu_t \cdot (E[S_m] - N_s \pi R_s^2) \frac{2P_{a,m} R_m^\alpha}{2 + \kappa\alpha} \end{aligned} \quad (17)$$

取路径衰落指数 $\alpha = 4$, 将 $\kappa = 1, \alpha = 4$ 代入式(17)得

$$P_m = \frac{1}{3} \mu_t \cdot (E[S_m] - N_s \pi R_s^2) \cdot P_{a,m} R_m^4 \quad (18)$$

(2) 宏基站吞吐量 T_m : 宏基站吞吐量即宏基站可达到的最大平均传输速率, 定义为传输速率的香农限。则采用频谱共享策略, 在干扰受限和 FPI 策略 ($N_0 = 0, \kappa = 1$) 下, 取路径衰落指数 $\alpha = 4$, 参

考文献[19], 一个宏小区的平均吞吐量为

$$\begin{aligned} T_m &= E \left[B \ln(1 + \text{SINR}_m(r_m)) \right] \\ &= -2BE_i \left[-(\pi^2/4) (\lambda_m R_m^2 + \lambda_s R_s^2 \theta^{1/2}) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $E_i[\cdot]$ 为指数积分函数。将式(9), 式(18)和式(19)代入式(15)得一个宏基站的总功率消耗:

$$P_{tm} = \frac{a_m P_{a,m} R_m^4 \cdot \mu_t (E[S] - N_s \pi R_s^2) \cdot \varepsilon_m}{-6BE_i \left[-(\pi^2/4) (\lambda_m R_m^2 + \lambda_s R_s^2 \theta^{1/2}) \right]} + b_m \quad (20)$$

3.3.2 一个小基站的平均功率 与宏基站相似, 采用频谱共享策略, 在干扰受限和 FPI 策略 ($N_0 = 0, \kappa = 1$) 下, 取路径衰落指数 $\alpha = 4$, 一个小基站的平均发射功率 P_s 和网络吞吐量 T_s 分别为^[19]

$$\begin{aligned} P_s &= \mu_t \pi R_s^2 \cdot \int_0^{R_s} P_{a,s} R_s^{\alpha(1-\kappa)} r_s^{\alpha\kappa} \cdot \frac{2r_s}{R_s^2} dr_s \\ &= \mu_t \pi R_s^2 \cdot \frac{2P_{a,s} R_s^\alpha}{2 + \kappa\alpha} \end{aligned} \quad (21)$$

$$T_s = -2BE_i \left[-(\pi^2/4) (\lambda_s R_s^2 + \lambda_m R_m^2 \theta^{-1/2}) \right] \quad (22)$$

在干扰受限和 FPI 功率控制策略条件下, 即 $N_0 = 0, \kappa = 1$, 取路径衰落指数 $\alpha = 4$, 将式(6), 式(21)和式(22)代入式(16)得一个小基站的功率消耗为

$$P_{ts} = \frac{a_s P_{a,s} R_s^4 \cdot \mu_t \pi R_s^2 \cdot \varepsilon_s}{-6BE_i \left[-(\pi^2/4) (\lambda_s R_s^2 + \lambda_m R_m^2 \theta^{-1/2}) \right]_s} + b_s \quad (23)$$

4 能效优化

(1) 无约束条件下的能效优化: 由 3.1~3.3 节可得到网络的能效表达式为式(3) $EE = \frac{(\lambda_m C_m + \lambda_s C_s)/B}{\lambda_m P_{tm} + \lambda_s P_{ts}}$, 其中, C_m, C_s, P_{tm}, P_{ts} 的表达式分别如式(12), 式(13), 式(20), 式(23)所示。

在给定 $\mu_t, R_m, R_s, P_{tm}, P_{ts} > 0$ 的情况下, 能效目标函数 EE 是关于 λ_m, λ_s 的二元函数, 当 $\lambda_m, \lambda_s > 0$ 时, 此函数为一个关于 λ_m, λ_s 的二元凸函数, 即此函数存在最大值。

进一步, 可通过求极值的方法得到使 EE 最大的基站密度 λ_{m1} 和 λ_{s1} 。即由方程组

$$\begin{cases} \partial EE / \partial \lambda_m = 0 \\ \partial EE / \partial \lambda_s = 0 \end{cases} \quad (24)$$

求得最优的 λ_{m1} 和 λ_{s1} , 以此得到最优的基站密度组合。由于此方程的复杂度较高, 可用数值计算方式求解。

(2) 约束条件下的能效优化: 本文主要考虑覆盖约束和吞吐量约束。覆盖由宏基站提供。假设当用户与最近基站的距离大于 R_m 时中断, 且中断概率

阈值为 v , 则要保证网络的覆盖, 用户离其最近基站的距离大于 R_m 的概率应小于 v , 即

$$\Pr(r_m > R_m) = \int_{R_m}^{\infty} 2\pi\lambda_{m2} r_m \exp(-\pi\lambda_{m2} r_m^2) dr_m \leq v \quad (25)$$

计算得

$$\lambda_{m2} \geq -\ln(v) / \pi R_m^2 \quad (26)$$

同时, 考虑用户对服务质量的需求, 假设宏用户和微用户需要的最小吞吐量分别为 δ_m 和 δ_s , 为了保证用户的吞吐量需求, 宏小区和微小区的吞吐量 T_m 和 T_s 需大于相应的阈值 δ_m 和 δ_s 。即 $T_m \geq \delta_m$, $T_s \geq \delta_s$ 。

由以上分析可得覆盖和吞吐量约束条件下优化系统能效的最优化模型为

$$\max_{\lambda_m, \lambda_s} EE \quad (27)$$

$$\text{s.t.} \int_{R_m}^{\infty} 2\pi\lambda_m r_m \exp(-\pi\lambda_s r_m^2) dr_m \leq v \quad (28)$$

$$T_m \geq \delta_m \quad (29)$$

$$T_s \geq \delta_s \quad (30)$$

由式(24)可得到在无约束条件下最大化能效的宏基站密度 λ_{m1} ; 由式(27), 式(28)得到网络覆盖约束条件下宏基站的最小密度 $\lambda_{m2} = -\ln(v) / \pi R_m^2$; 则在保证覆盖的情况下最优宏基站的密度 $\lambda_{m1}^* = \max(\lambda_{m1}, \lambda_{m2})$ 。由式(20), 式(31)和式(32)可得宏小区的吞吐量不小于 δ_m 的最大宏基站密度 λ_{m3} ; 由式(23), 式(31)和式(32)可得微小区的吞吐量不小于 δ_s 的最大宏基站密度为 λ_{m4} , 则满足吞吐量约束的最优宏基站密度为 $\lambda_{m2}^* = \min(\lambda_{m3}, \lambda_{m4})$ 。在正常情况下 $\lambda_{m2} < \lambda_{m2}^*$, 这是因为仅满足网络覆盖的情况下部署基站, 其密度较小, 基站间的干扰也较小, 所以足以满足用户的吞吐量需求。因此, 在约束条件式(28), 式(29)和式(30)下, 最优的宏基站密度为

$$\lambda_m^* = \min(\lambda_{m1}^*, \lambda_{m2}^*) \quad (31)$$

相应地, 在约束条件式(29)和式(30)下, 最优的小基站密度

$$\lambda_s^* = \min(\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}) \quad (32)$$

其中, $\lambda_{s1}, \lambda_{s2}, \lambda_{s3}$ 分别为无约束条件下最大化能效的小基站密度、满足宏小区的吞吐量不小于 δ_m 的最大小基站密度、满足微小区吞吐量不小于 δ_s 的最大小基站密度。

最终, 由式(31)和式(32)可得约束条件下最优的基站密度组合为 $\{\lambda_m^*, \lambda_s^*\}$ 。

5 性能评估

本节对以上的基站密度优化方法进行仿真分析, 具体参数设置如下所示: 系统带宽 $B = 10$ MHz,

宏基站和小基站的传输半径分别为 $R_m=200\text{ m}$, $R_s=20$, 宏用户和微用户平均下载文件大小分别为 $\varepsilon_m=20000\text{ bit}$, $\varepsilon_s=40000\text{ bit}$, 宏用户和微用户平均接收到的最小功率分别为 $P_{a,m}=-35\text{ dBm}$, $P_{a,s}=-30\text{ dBm}$, $a_m=2.6$, $b_m=68.73\text{ W}$, $a_s=4$, $b_s=5.5\text{ W}$, 信噪比阈值 $\beta_m=1$, $\beta_s=1$, 覆盖中断概率阈值 $v=0.05$ 。

首先, 我们设用户到达率 $\mu_t=0.7\times 10^{-3}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 即在单位时间单位面积内到达的用户个数为 0.7×10^{-3} , 由图2所示, 系统能效随着宏基站和小基站密度的增加而先增加后减小, 当宏基站和小基站密度分别为 $\lambda_m=0.1696\times 10^2/\text{km}^2$, $\lambda_s=0.4566\times 10^3/\text{km}^2$ 时, 能效达到最大。当宏基站和小基站密度继续增大时能效降低, 这是因为: 基站密度开始增加时, 网络成功传输的业务量增长速度超过能量消耗的增长速度, 能效增加; 而当基站密度继续增加, 基站间的干扰增大, 业务量的增长速度小于基站能量消耗的增长速度, 导致能效降低。

在一个面积为 $0.4\times 10^6\text{ m}^2$ 的区域, 假设用户到达率为 μ_t , 图3给出在不同 μ_t 的情况下, 宏基站和小基站最优密度, 即宏基站和小基站的最优部署密度随 μ_t 的变化而变化的情况。由图3可知, 用户到达率比较小时 ($\mu_t < 0.4\times 10^{-3}$), 最优宏基站密度维持在大约 0.24×10^{-4} , 这是因为在业务量很小时, 也

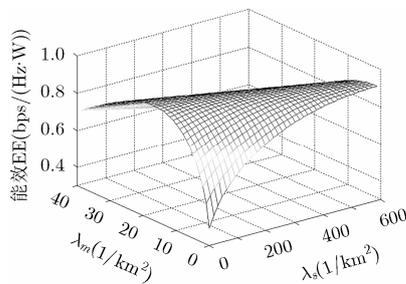


图2 能效随宏基站和小基站密度的变化而变化的情况

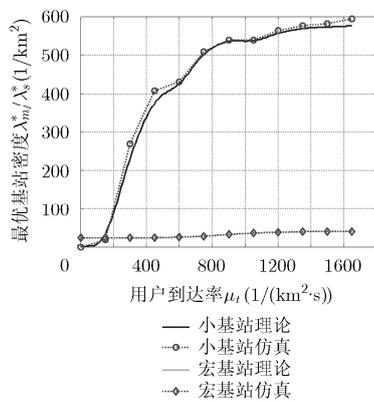


图3 最优基站密度随用户到达率变化而变化的情况

需要一定数量的宏基站保证网络覆盖。随着用户到达率的增加, 最优基站部署密度可分为3个阶段: (1)用户到达率小于 0.4×10^{-3} 时, 随着用户到达率的逐渐增大, 小基站的最优部署密度迅速增加, 而宏基站的最优部署密度基本不变, 此阶段, 小基站的增加足以承载增加的网络业务量, 为了节能就没有必要增加宏基站, 即在此阶段可在热点区域部署一定量的小基站, 在满足用户需求的同时减少能耗; (2)而用户到达率在 $[0.4\times 10^{-3}, 1.2\times 10^{-3}]$ 区间, 此时, 需要增加宏基站的部署数量, 以满足网络的服务需求, 在此阶段, 由于增加了宏基站的部署, 小基站的增加速度会减慢; (3)随着用户到达率的继续增加, 最优的宏基站和小基站部署密度会继续增加, 但最后趋于平稳, 此时基站密集部署。

图4给出了宏基站和小基站密度联合优化时的能效与只考虑小基站密度优化的能效对比。由图4可知, 在无约束条件下, 系统的最大能效会随着用户到达率的增加而减少, 因为在无约束条件下, 随着用户到达率的增加, 基站密度随之增加, 从而基站间的干扰会越来越严重, 因此, 成功传输概率减小, 导致网络成功传输的业务量增长速度低于能量消耗的增长速度, 能效降低。在有约束条件下, 当网络要求覆盖率大于0.99时的能效低于无约束的能效, 这是由于为了保证网络覆盖, 宏基站密度大于无约束时的宏基站密度大, 能耗更大。而在有约束条件下, 当用户到达率较小时, 能效随用户到达率的增加而增加, 原因在于用户到达率的增加使保证覆盖率的基站服务更多用户, 网络吞吐量增加, 能效增加。随着用户到达率的继续增加, 为了满足业务需求, 基站密度也继续增长, 此时覆盖率已不是影响能效的关键因素, 基站密度的增加导致基站间干扰严重, 吞吐量下降, 能效下降。

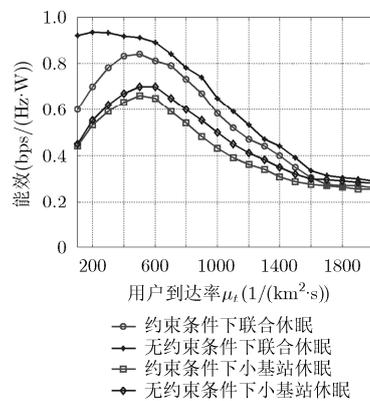


图4 宏基站和小基站密度联合优化与只考虑小基站密度优化的能效对比

同时,对比本文提出的宏基站和小基站密度联合优化方法与只考虑小基站密度优化方法,在有约束和无约束两种情况下,本文提出的方法的能效更大,其能效提升在用户到达率比较低时尤为明显。原因在于:只考虑小基站密度优化的方法不会优化宏基站密度,即使用户到达率比较低时,也有大量的宏基站处于活动状态并消耗能量,因此,它比本文方法消耗更多能量,能效更低。随着用户到达率的增加,本文方法将激活更多的宏基站以满足用户的需求,这使得本文方法的能效与只考虑小基站密度优化方法的能效逐渐接近。

6 结束语

本文采用泊松分布(PPP)建立基站分布模型,提出根据网络业务到达率,合理部署基站的节能思想,构建基于基站密度和业务负载的网络能效模型,分析了基站密度对网络能效的影响,得到宏基站和小基站的最优密度组合,在保证网络服务质量的同时,使能效达到最优。仿真结果表明根据负载优化基站密度,由最优的基站密度,合理地部署宏基站和小基站可提高网络能效。在后续工作中,我们将根据最优基站密度,结合网络负载的动态变化,设计基站的动态休眠策略以降低能耗。

参 考 文 献

- [1] SAKER L and ELAYOUBI S E. Sleep mode implementation issues in green base stations[C]. IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Istanbul, 2010: 1683-1688.
 - [2] ANDREWS J G and WAN C. What will 5G be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065-1082. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
 - [3] RAMAMONJISON R and BHARGAVA V K. Energy efficiency maximization framework in cognitive downlink two-tier networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(3): 1468-1479. doi: 10.1109/TWC.2014.2367032.
 - [4] HAENGGI M. Stochastic Geometry for Wireless Network [M]. Location: Cambridge University Press, 2012: 92-95.
 - [5] ANDREWS J G, BACCELLI F, and GANTI R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(11): 3122-3134. doi: 10.1109/TCOMM.2011.100411.100541.
 - [6] ARSHAD M W, VASTBERG A, and EDLER T. Energy efficiency gains through traffic offloading and traffic expansion in joint macro pico deployment[C]. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, Paris, 2012: 2203-2208.
 - [7] OBAID N and CZYLWIK A. The impact of deploying pico base stations on capacity and energy efficiency of heterogeneous cellular networks[C]. Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, 2013: 1904-1908.
 - [8] OUNI A, SAADANI A, and RIVANO H. Energy and throughput optimization for relay based heterogeneous networks[C]. 2013 IFIP Wireless Days (WD), Valencia, 2013: 1-6.
 - [9] XU J, ZHANG J, and ANDREWS J G. On the accuracy of the Wyner model in cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(9): 3098-3109. doi: 10.1109/TWC.2011.062911.100481.
 - [10] GILHOUSEN K, JACOBS I, PADOVANI R, et al. On the capacity of a cellular CDMA system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1991, 40(2): 303-312. doi: 10.1109/25.289411.
 - [11] ELSAWY H, HOSSAIN E, and HAENGGI M. Stochastic geometry for modeling, analysis, and design of multi-tier and cognitive cellular wireless networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 996-1019. doi: 10.1109/SURV.2013.052213.00000.
 - [12] MISHRA M K and TRIVEDI A. Performance analysis of two tier cognitive heterogeneous cellular network[C]. 2015 21st National Conference on Communications, NCC, Mumbai, India, 2015: 1-6.
 - [13] SMILJKOVIKJ K, GAVRILOVSKA L, and POPOVSKI P. Efficiency analysis of downlink and uplink decoupling in Heterogeneous Networks[C]. 2015 IEEE International Conference on Communication Workshop, ICCW 2015, London, 2015: 125-130.
 - [14] YU P S, LEE J, QUEK T, et al. Traffic offloading in heterogeneous networks with energy harvesting personal cells-network throughput and energy efficiency[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(2): 1146-1161. doi: 10.1109/TWC.2015.2485989.
 - [15] WANG Ying, ZHANG Yuan, and CHEN Yongce. Energy-efficient design of two-tier femtocell networks[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015, 2015: 40. doi: 10.1186/s13638-015-0242-4.
 - [16] QUEK T Q S and CHEUN W C. Energy efficiency analysis of two-tier heterogeneous networks[C]. European Wireless Conference, Vienna, 2011: 712-716.
 - [17] YONG S S, TONY Q S Q, and SHIN H. Energy efficient heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(5): 840-850. doi: 10.1109/JSAC.2013.130503.
 - [18] YU J, LIU Y, and YIN C. Energy-efficient base station deployment in heterogeneous cellular network with QoS constraint[C]. Workshop on End-to-End Green Cellular Networks, London, 2013: 26-30.
 - [19] RAO J and FAPOJUWO A O. Analysis of load dependent energy efficiency of two-tier heterogeneous cellular networks [C]. Mobile Wireless Networks, London, 2013: 3095-3099.
 - [20] HUANG Y, ZHANG X, ZHANG J, et al. Energy-efficient design in heterogeneous cellular networks based on large-scale user behavior constraints[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2014, 13(9): 4746-4757. doi: 10.1109/TWC.2014.2330334.
 - [21] JINDAL N, WEBER S, and ANDREWS J. Fractional power control for decentralized wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(12): 5482-5492. doi: 10.1109/T-WC.2008.071439.
- 李 云: 男, 1974 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为无线移动通信。
- 王俊伟: 女, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为异构蜂窝无线网络。
- 赵为粮: 男, 1962 年生, 教授, 主要研究领域为无线移动通信。
- 刘期烈: 男, 1974 年生, 副教授, 主要研究方向为机会网络, 异构蜂窝无线网络。