

# 基于能效和用户服务质量的密集 Macro-Femto 蜂窝网络部署策略

李云<sup>1,2</sup>, 王春生<sup>1</sup>, 曹宾<sup>1</sup>, 刘期烈<sup>1</sup>

(1. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065;

2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 随着用户对流量需求的指数级增长, 运营商密集地部署微蜂窝来满足用户的服务质量, 然而这会引发巨大的能耗。基于此, 在满足用户服务质量 (QoS, quality of service) 的条件下, 提出一种密集的异构蜂窝网络的部署策略。首先, 采用密集 Macro-Femto 偏置蜂窝网络建立模型, 利用随机几何理论分析信干噪比 (SINR) 覆盖率和平均用户速率这 2 种 QoS 指标。然后, 在满足 QoS 约束条件下, 以平均区域功耗 (ASPC, average spatial power consumption) 作为优化目标, 运用经典的最优化理论得到 Femto 的最优部署密度和发射功率。最后, 通过仿真实验证明, 与传统单独考虑基站密度的策略相比, 提出的部署策略可以在保证 QoS 的同时, 获得更高的能效。

**关键词:** 异构蜂窝网络; 能效; 部署; 基站密度

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018129

## Energy-efficient and QoS-supported deployment strategy of dense Macro-Femto cellular network

LI Yun<sup>1,2</sup>, WANG Chunsheng<sup>1</sup>, CAO Bin<sup>1</sup>, LIU Qilie<sup>1</sup>

1. Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Communications, Chongqing 400065, China

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

**Abstract:** With the exponentially increasing of users' demand for mobile data traffic, massive small cells have been deployed to satisfy the users' quality of service (QoS) by operators. However, a significant energy would be consumed caused by dense deployment. To this end, a dense heterogeneous cellular network deployment strategy was proposed with QoS guarantee to decline system energy consumption. Firstly, a dense Macro-Femto biased cellular network was used to build the network model, the two QoS indicators of SINR coverage and user average rate was analyzed by stochastic geometry theory. Then, under the condition of QoS constraint, average spatial power consumption (ASPC) was taken as the optimization goal, optimal deploy density and transmission power of Femto were achieved by using optimization theory. Finally, the experimental results show that, comparing with the traditional strategy which only considering base station density, the proposed strategy has advantages in terms of energy efficiency while QoS guarantee.

**Key words:** heterogeneous cellular network, energy efficiency, deployment, base station density

收稿日期: 2017-11-07; 修回日期: 2018-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671096, No.61701059); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目 (No.2015D07)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61671096, No.61701059), The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory Southeast University (No.2015D07)

## 1 引言

近年来,随着全球智能移动设备的指数级增长以及人们对移动数据业务的巨大需求,思科在《全球移动数据流量预测 2016—2021 白皮书》中指出:2017 年全球移动数据流量比 2016 年同比增长了 57%。预测到 2021 年全球每月平均数据流量将达到 49 艾字节,为现在的 4 倍左右。为了增加网络的容量和满足用户日益增长的流量需求,3GPP 提出了异构蜂窝网络的概念,异构蜂窝网络是在宏蜂窝网络中部署一些低功耗的微蜂窝,例如 Pico 基站、Femto 基站、Relay 等<sup>[1-2]</sup>。为了实现无缝覆盖,5G 采用超密集的异构蜂窝网络,因此如何有效地部署密集异构蜂窝网络、提高网络的能量效率是亟待研究的课题<sup>[3]</sup>。

大量地部署低功耗的微蜂窝会产生大量的能量消耗以及干扰。因此,蜂窝网络的能效问题已经成为运营商、学术界等关注的焦点。Femto 基站具有功耗低、便于灵活安装、能有效地解决 Macro 基站的覆盖空洞、提供更高的容量等优势<sup>[4]</sup>。为了充分地利用 Femto 基站的优势,采用蜂窝网络的偏置技术,即小区范围扩展(CRE, cell range expansion)技术。在 Macro 基站覆盖范围下引入 Femto 基站, Femto 基站采用 CRE 技术,通过调节 Femto 基站的偏置参数,可以动态地扩展 Femto 基站的覆盖范围。当用户位于 Femto 基站的扩展区域时则关联到 Femto 基站,采用偏置技术能够提高用户的速率以及扩大室内和小区边缘的覆盖,卸载 Macro 基站更多的流量并使 Femto 基站服务更多的用户<sup>[5]</sup>。

目前,已有相关文献研究异构蜂窝网络的部署问题,基站的位置和密度都需要考虑满足覆盖和负载需求<sup>[6]</sup>。网络模型的选取对于分析网络的性能至关重要。文献[7]提出一种新的网络模型,基站的位置服从泊松点过程(PPP, Poisson point process)分布。这种模型准确地模拟了基站位置的随机性,同时也易于通过随机几何工具来分析网络的性能指标。文献[8]对于单层网络和两层网络,考虑基站休眠对能效的影响,得到了最优基站密度与能效的关系。然而该文献只是优化基站密度来达到最佳的能效。文献[9]联合优化了宏基站和小基站的密度来保证网络的服务质量,考虑到了覆盖率和用户到达率,然而没有优化基站的发射功率。文献[10]在两层蜂窝网络中得到了最佳的基站密度和发射功率,

在满足覆盖限制条件下使平均功率消耗达到最小。然而该文献只考虑覆盖率的限制,并没有考虑平均用户速率的要求,同时只考虑非偏置网络的情形。然而,随着用户对流量和速率的要求越来越高,考虑平均用户速率是非常必要的。文献[11]针对两层的 Macro-Femto 蜂窝网络进行分析,提出了基于联合聚类和资源分配的正交频分复用干扰管理方案,来最大化地提高 Femto 基站的吞吐量。文献[12]利用随机几何工具,假设基站位置服从泊松点分布,推导出每层网络的成功接入概率,分析基站密度和网络能效的关系,然而也没有考虑平均速率的限制条件。文献[13]将微基站部署在用户接收信号较差的区域,考虑了宏基站密度、微基站密度以及用户密度对网络能效和频谱效率的影响,分析表明合理的基站和用户密度可以提高网络能效和频谱效率。文献[14]考虑非均匀分布的基站部署场景,采用合理的基站负载,得到宏基站和微基站的平均覆盖率和平均用户速率。

由于用户的密度和位置随着时间和空间是不断变化的,因此考虑调整基站的发射功率很有必要。通过分析上述相似研究的文献发现,文献[8-9]在优化网络能效时把基站的发射功率设为一个固定的值,没有考虑基站发射功率的动态变化。由于用户对流量的需求呈指数级增长,平均用户速率指标成为评价网络质量的重要指标,同时由于 Macro 基站的容量限制,其已不能满足用户的速率需求,为此需要部署大量的 Femto 基站来增加网络容量,卸载 Macro 基站更多的流量给 Femto 基站。同时采用偏置技术,有利于负载均衡。文献[10]考虑了基站发射功率的动态变化,但没有考虑用户的平均速率这项评估网络质量的重要指标,网络采用的是非偏置网络。本文的创新点是采用偏置技术对 Macro-Femto 蜂窝网络进行分析,同时考虑覆盖率和平均用户速率 2 项指标,联合优化基站密度和基站发射功率来满足用户目标 QoS 要求,同时使 ASPC 达到最低。

本文的工作如下所示:1) 利用随机几何工具分析 Macro-Femto 两层蜂窝网络的 SINR 覆盖率和平均用户速率,得到近似的封闭表达式,使 SINR 覆盖率和平均用户速率是能耗相关表达式的单调递增函数,且收敛;2) 在给定目标覆盖率和目标平均用户速率的情况下,能够得到最优的基站密度和基站发射功率使能耗达到最低;3) 联合优化基站密度

和基站发射功率在满足目标覆盖率和目标平均用户速率的限制条件下，使 ASPC 达到最低，该策略比传统单独考虑基站密度的策略能耗低。

## 2 系统模型

本节首先考虑两层蜂窝网络作为网络模型，基站密度都服从齐次泊松点过程，信道模型采用瑞利衰落信道，Macro 基站和 Femto 基站共享频谱资源，然后分析基站的功率消耗。

### 2.1 网络模型

考虑 Macro-Femto 两层的异构蜂窝网络，在二维的欧几里得平面上，Macro 基站服从密度为  $\lambda_M$  的齐次泊松点过程 (HPPP, homogeneous Poisson point process)  $\Phi_M$ ，其发射功率为  $P_M$ ，偏置参数为  $\beta_M$ 。同样，Femto 基站服从密度为  $\lambda_F$  的齐次泊松点过程  $\Phi_F$ ，发射功率为  $P_F$ ，偏置参数为  $\beta_F$ ，其中， $\beta_F \geq \beta_M \geq 1$ 。假设用户服从独立于  $\Phi_M$  和  $\Phi_F$  的密度为  $\lambda_U$  的齐次泊松点过程  $\Phi_U$ 。由于 Macro 基站和 Femto 基站的发射功率不同，因此基站的覆盖范围为加权泊松沃罗诺伊嵌图<sup>[15]</sup> (WPVT, weighted Poisson-Voronoi tessellation)，如图 1 所示。每个用户关联到平均最强的偏置接收功率 (BRP, biased received power)  $\{P_{r,i}\}_{i=M,F}$  的基站。若一个用户所在的位置接收到 Femto 基站的功率+偏置参数>接收到 Macro 基站的功率，则该用户关联到 Femto 基站，否则关联到 Macro 基站。假设两层网络的路径损耗因子相同，即  $\alpha_M = \alpha_F = \alpha$ ，则用户关联  $i$  层基站的概率<sup>[16]</sup>为

$$A_i = \frac{\lambda_i (P_i \beta_i)^\alpha}{\lambda_M (P_M \beta_M)^\alpha + \lambda_F (P_F \beta_F)^\alpha} \quad (1)$$

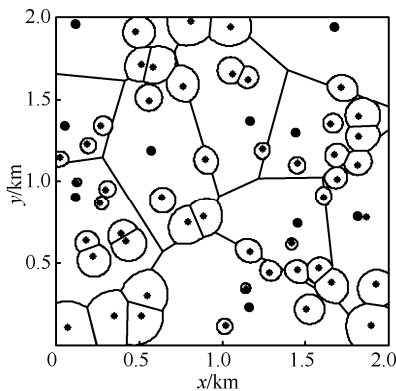


图 1 两层 Macro-Femto 异构蜂窝网络覆盖分布的加权泊松沃罗诺伊嵌图示意 ( $P_M = 20P_F$ ,  $\lambda_F = 5\lambda_M$ , 实心圆点表示 Macro 基站, 星形表示 Femto 基站)

### 2.2 信道模型

采用瑞利衰落信道,不失一般性,根据 Silvyak 定理,以位于原点(0,0)的用户进行分析,假设该用户与其被服务的基站之间的距离为  $r_i$ ,衰落模型采用  $l(r_i) = Lr_i^{-\alpha}$ 。信道衰落损耗  $h_i$  为独立同分布的指数分布,本文采用其均值归一化为 1,即  $h_i \sim \exp(1)$ 。大尺度损耗为  $r_i^{-\alpha}$ ,路径损耗因子  $\alpha > 2$ ,则位于原点的用户接收到位于距离  $r_i$  的基站的信号功率为  $P_i \beta_i h_i L r_i^{-\alpha}$ 。

### 2.3 频谱资源分配

下行采用 OFDMA 技术,为了提高频谱利用率,Macro 基站和 Femto 基站共享总频谱带宽  $W$  Hz。总频谱带宽可以分成许多资源块 (RB, resource block)。不失一般性,假设每个 RB 占用带宽为  $b$  Hz,则系统可用 RB 数量为  $\frac{W}{b}$ ,这组可用 RB 可以表示为  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{\frac{W}{b}}\}$ ,  $I_x$  为可用 RB 的序号。为保证资源利用的公平性,可用 RB 均等地分配给每个用户。所以每个被 Macro 基站  $i$  和 Femto 基站  $j$  服务的用户分配到的 RB 数量分别为  $\frac{W}{bN_{i,M}}$  和  $\frac{W}{bN_{i,F}}$ ,每个用户分配到的带宽分别为  $b_{i,M} = \frac{W}{N_{i,M}}$  和  $b_{i,F} = \frac{W}{N_{i,F}}$ ,其中,  $N_{i,M}$  和  $N_{i,F}$  分别为被 Macro 基站  $i$  或 Femto 基站  $j$  服务的用户数。所以用户会受到同层和跨层的干扰。得到用户  $i$  的 SINR 为

$$SINR_i = \frac{P_i h_i r_i^{-\alpha}}{\sum_{j=M,F} \sum_{r_j \in \Phi_j \setminus \Phi_i} P_j h_j r_j^{-\alpha} + \frac{\sigma^2}{L}} \quad (2)$$

其中,  $\sum_{j=M,F} \sum_{r_j \in \Phi_j \setminus \Phi_i} P_j h_j r_j^{-\alpha}$  为该用户接收到的总干扰,  $\sigma^2$  为恒定的高斯白噪声功率。

### 2.4 基站功耗模型

根据文献[17],基站的功率消耗与基站的类型以及基站的状态有关。若基站处于激活状态,基站的功率消耗包括功率放大器、信号处理、制冷设备、电源损耗、馈线损耗、天线损耗等。若基站处于休眠状态,相比激活状态其功耗显著降低,主要包括一些静态损耗和空调设备损耗等。所以基站的功率

消耗为

$$P_{i,BS} = \begin{cases} N_{i,TRX}P_{i0} + \Delta_i P_i, & 0 < P_i \leq P_{i,max} \\ N_{i,TRX}P_{i,s}, & P_i = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $N_{i,TRX}$  为基站的收发机链的数量,  $P_{i0}$  为最小输出功率的消耗,  $P_{i,s}$  为基站休眠状态下单个收发机链的功率消耗,  $\Delta_i$  是和负载相关的参数。因此基站激活状态下的功率消耗可以表示为  $P_{ack,i} = N_{i,TRX}P_{i0} + \Delta_i P_i$ , 休眠状态下的功率消耗为  $P_{sleep,i} = N_{i,TRX}P_{i,s}$ 。

考虑基站激活和休眠的情况, 采用传统的基站休眠策略, 即如果目标基站的覆盖范围内没有用户, 则该基站可以处于休眠状态, 否则该基站处于激活状态。

### 3 Macro-Femto 蜂窝网络的性能分析

为了得到最佳的部署策略, 需要满足用户的服务质量, 即满足目标  $SINR$  覆盖率和平均用户速率, 下面分析  $SINR$  覆盖率和平均用户速率这 2 个指标, 通过近似的方法, 分离出与能耗相关的表达式  $\lambda_i F_i^{\frac{2}{\alpha}}$ , 便于能效优化分析。

#### 3.1 覆盖率分析

$SINR$  覆盖率利用一个随机用户接收到的瞬时  $SINR$  值大于目标  $SINR$  阈值的互补累积分布函数来表示, 如式(4)所示。

$$\begin{aligned} Pr &= Pr_M A_M + Pr_F A_F \\ &= \mathbb{E}_{r_M} (\mathbb{P}(SINR_M(r_M) > \varsigma)) A_M + \\ &\quad \mathbb{E}_{r_F} (\mathbb{P}(SINR_F(r_F) > \varsigma)) A_F \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\varsigma$  为目标  $SINR$  阈值。假设 Macro 基站和 Femto 基站的目标  $SINR$  阈值相等, 得到  $SINR$  覆盖率<sup>[17]</sup>为

$$\begin{aligned} Pr &= \sum_{i=M,F} 2\pi\lambda_i \int_0^\infty r_i \cdot \\ &\quad \exp\left[-\frac{\varsigma\sigma^2}{P_i L r_i^{-\alpha}} - \pi \sum_{j=M,F} \lambda_j \left(\frac{P_j}{P_i}\right)^{\frac{2}{\alpha}} C_j r_i^2\right] dr_i \end{aligned} \quad (5)$$

其中,  $C_j = \left(\frac{\beta_j}{\beta_i}\right)^{\frac{2}{\alpha}} + Z\left(\varsigma, \alpha, \frac{\beta_j}{\beta_i}\right)$ ,  $Z\left(\varsigma, \alpha, \frac{\beta_j}{\beta_i}\right) = \frac{2\varsigma\left(\frac{\beta_j}{\beta_i}\right)^{\frac{2}{\alpha-1}}}{\alpha-2} {}_2F_1\left[1, 1-\frac{2}{\alpha}; 2-\frac{2}{\alpha}; -\frac{\varsigma}{\frac{\beta_j}{\beta_i}}\right]$ ,  ${}_2F_1[\cdot]$  为高斯超几何函数。

首先考虑干扰限制的场景, 即高斯白噪声功率的影响相对于同层和跨层的干扰可以忽略不计。这样得到的覆盖率表达式比较简单, 而且是封闭的表达式。然后在此基础上考虑高斯白噪声对覆盖率的影响。在干扰限制场景下得到的  $SINR$  覆盖率是实际场景下的上界<sup>[7]</sup>。即在考虑高斯白噪声的影响下所得到的  $SINR$  覆盖率要低于干扰限制(忽略噪声)场景下的  $SINR$  覆盖率。

在干扰限制场景下, 由于  $\sigma^2=0$ , 上述  $SINR$  覆盖率可以简化为

$$Pr' = \sum_{i=M,F} \frac{\lambda_i P_i^{\frac{2}{\alpha}}}{\sum_{j=M,F} \lambda_j P_j^{\frac{2}{\alpha}} C_j} \quad (6)$$

在考虑噪声的情况下, 根据式(5), 由于噪声  $\sigma^2$  相对于  $P_i L$  非常小, 所以  $e^{-\frac{\varsigma\sigma^2}{P_i L r_i^{-\alpha}}} \approx 1 - \frac{\varsigma\sigma^2}{P_i L r_i^{-\alpha}}$ ,

$\int_0^\infty x^a e^{-bx} dx = (b)^{-a-1} \Gamma(a+1)$ ,  $\Gamma(\cdot)$  表示伽马函数。所以式(5)可以变换为

$$\begin{aligned} Pr &= \sum_{i=M,F} \pi\lambda_i \int_0^\infty \left(1 - \frac{\varsigma\sigma^2}{P_i L} x^{\frac{\alpha}{2}}\right) \cdot \\ &\quad \exp\left[-\pi \sum_{j=M,F} \lambda_j \left(\frac{P_j}{P_i}\right)^{\frac{2}{\alpha}} C_j x\right] dx \\ &= Pr' - \frac{\varsigma\sigma^2 \Gamma\left(\frac{\alpha}{2} + 1\right)}{\pi^2 L} \cdot \\ &\quad \sum_{i=M,F} \frac{\lambda_i P_i^{\frac{2}{\alpha}}}{\left(\lambda_M P_M^{\frac{2}{\alpha}} C_M + \lambda_F P_F^{\frac{2}{\alpha}} C_F\right)^{\frac{\alpha}{2}+1}} \end{aligned} \quad (7)$$

#### 3.2 平均用户速率分析

类似于  $SINR$  覆盖率的分析方法, 通过  $i$  层网络的随机用户来得到平均用户速率为

$$\begin{aligned} R &= R_M A_M + R_F A_F \\ &= \sum_{i=M,F} \mathbb{E}_{r_i} (\mathbb{E}_{SINR_i} (\ln(1 + SINR_i(r_i)))) A_i \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $r_M$  和  $r_F$  分别为 Macro 基站和 Femto 基站与其关联的用户之间的距离, 得到平均用户速率<sup>[17]</sup>为

$$R = \sum_{i=M,F} 2\pi\lambda_i \int_{r_i>0} \int_{t>0} \exp\left[-\frac{(e^t - 1)\sigma^2}{P_i L r_i^{-\alpha}} - \right]$$

$$\pi \sum_{j=M,F} \lambda_j \left( \frac{P_j}{P_i} \right)^{\frac{2}{\alpha}} D_j(t) r_i^2 \Bigg) r_i dt dr_i \quad (9)$$

其中,  $D_j(t) = \left( \frac{\beta_j}{\beta_i} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + Z \left( e^t - 1, \alpha, \frac{\beta_j}{\beta_i} \right)$ ,  $Z(e^t - 1, \alpha, \frac{\beta_j}{\beta_i}) = \frac{2(e^t - 1) \left( \frac{\beta_j}{\beta_i} \right)^{\frac{2}{\alpha} - 1}}{\alpha - 2} {}_2F_1 \left[ 1, 1 - \frac{2}{\alpha}; 2 - \frac{2}{\alpha}; -\frac{e^t - 1}{\frac{\beta_j}{\beta_i}} \right]$ .

同样类似于 SINR 覆盖率分析, 首先考虑干扰限制的场景。在干扰限制场景下得到的平均用户速率是实际场景下的上界<sup>[7]</sup>, 即在高斯白噪声的影响下所得到的平均用户速率要低于干扰限制(忽略噪声)场景下的平均用户速率。

在干扰限制场景下, 由于  $\sigma^2 = 0$ , 上述平均用户速率可以简化为

$$R' = \sum_{i=M,F} \int_{t>0} \frac{\lambda_i P_i^{\frac{2}{\alpha}}}{\sum_{j=M,F} \lambda_j P_j^{\frac{2}{\alpha}} D_j(t)} dt \quad (10)$$

在考虑噪声的情况下, 根据式(9), 由于噪声  $\sigma^2$  相对于  $P_i L$  非常小, 所以  $e^{-\frac{(e^t-1)\sigma^2}{P_i L r_i^{-\alpha}}} \approx 1 - \frac{(e^t-1)\sigma^2}{P_i L r_i^{-\alpha}}$ ,

$\int_0^\infty x^a e^{-bx} dx = (-b)^{-a-1} \Gamma(a+1)$ , 所以式(9)可以变换为

$$R = \sum_{i=M,F} \pi \lambda_i \int_{x>0} \int_{t>0} \exp \left( -\frac{(e^t-1)\sigma^2}{P_i L} x^{\frac{\alpha}{2}} - \pi \sum_{j=M,F} \lambda_j \left( \frac{P_j}{P_i} \right)^{\frac{2}{\alpha}} D_j(t) x \right) dx dt$$

$$= R' - \frac{\sigma^2 \Gamma \left( \frac{\alpha}{2} + 1 \right)}{\pi^{\frac{\alpha}{2}} L} \sum_{i=M,F} \int_{t>0} \frac{\lambda_i P_i^{\frac{2}{\alpha}} (e^t - 1)}{\left( \sum_{j=M,F} \lambda_j P_j^{\frac{2}{\alpha}} D_j(t) \right)^{\frac{\alpha}{2} + 1}} dt \quad (11)$$

### 4 能效优化分析

采用 ASPC 表示平均区域功率消耗, 包括单位面积内处于激活状态和休眠状态的基站功耗。ASPC 具体计算式为

$$ASPC = \lambda_M \left( (1 - \mathbb{P}_{s,M}) P_{ack,M} + \mathbb{P}_{s,M} P_{sleep,M} \right) + \lambda_F \left( (1 - \mathbb{P}_{s,F}) P_{ack,F} + \mathbb{P}_{s,F} P_{sleep,F} \right) \quad (12)$$

在两层的 Macro-Femto 异构蜂窝网络中, 由于 Macro 基站和 Femto 基站的发射功率不同, 因此基站的覆盖范围会形成加权泊松沃罗诺伊嵌图。基站覆盖范围的概率密度函数<sup>[18]</sup>为

$$f_i(x) = \frac{K^K}{\Gamma(K)} \left( \frac{\lambda_i}{A_i} \right)^K x^{K-1} \exp \left( -K \frac{\lambda_i}{A_i} x \right) \quad (13)$$

其中,  $K = 3.575$ ,  $\Gamma(K) = \int_0^\infty x^{K-1} e^{-x} dx$ 。

由于用户位置服从泊松点过程分布, 因此在基站覆盖范围内的用户数量服从泊松分布, 用户分布概率密度为

$$P_{X_i}(n) = \frac{(\lambda_U x)^n}{n!} \exp(-\lambda_U x) \quad (14)$$

其中,  $X_i$  为小区的大小, 是一个随机变量。所以一个基站覆盖范围内有  $n$  个用户的概率为

$$\mathbb{P}(N_i = n) = \mathbb{E}_{X_i}(N_i = n) = \int_0^\infty \mathbb{P}[N_i = n | X_i = x] f_i(x) dx = \frac{K^K \Gamma(K+n) \left( \frac{\lambda_U A_i}{\lambda_i} \right)^n}{n! \Gamma(K) \left( \frac{\lambda_U A_i}{\lambda_i} + K \right)^{n+K}} \quad (15)$$

因此, 基站处于休眠状态的概率即基站覆盖范围内没有用户的概率, 如式(16)所示。

$$\mathbb{P}_{s,i} = \mathbb{P}(N_i = 0) = \left( 1 + \frac{\lambda_U A_i}{K \lambda_i} \right)^{-K} \quad (16)$$

经计算, 当用户密度  $\lambda_U A_i \geq 5 \lambda_i$  时, 大约只有 4% 的基站覆盖范围内没有用户, 由于考虑的是密集的网络, 所有基站覆盖范围内都至少有一个用户, 因此考虑基站都处于激活状态。

根据上述分析, 由于基站休眠状态的概率很低, 同时也为了简化能耗表达式, 假设  $\mathbb{P}_{sleep,i} = 0$ , 因此功耗表达式可以简化为

$$ASPC = \sum_{i=M,F} \lambda_i (N_{i,TRX} P_{i0} + \Delta_i P_i) \quad (17)$$

从第 3 节偏置蜂窝网络的 SINR 覆盖率和平均用户速率的分析结果可以看出, SINR 覆盖率和平均用户速率都与  $\lambda_M P_M^{\frac{2}{\alpha}} + \lambda_F P_F^{\frac{2}{\alpha}}$  相关, 为了便于分析, 令  $X = \lambda_M P_M^{\frac{2}{\alpha}} + \lambda_F P_F^{\frac{2}{\alpha}}$ 。

**定理 1** 在两层的 Macro-Femto 偏置异构蜂窝网络中, 当用户随机分布在该蜂窝网络中, 在

$\sigma^2 > 0$ 、 $\alpha > 2$  情况下, 该偏置蜂窝网络的 SINR 覆盖率和平均用户速率随着  $x$  单调递增。

证明见附录 A。

#### 4.1 能效问题构造

能效优化问题可构造为

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_F, P_F} \quad & ASPC \\ \text{s.t.} \quad & Pr(\lambda_M, \lambda_F, P_M, P_F) \geq Pr_{tar}, \\ & R(\lambda_M, \lambda_F, P_M, P_F) \geq R_{tar}, \\ & P_{F,max} \geq P_F \geq 0, \\ & \lambda_{F,max} \geq \lambda_F \geq 0 \end{aligned} \quad (18)$$

其中,  $Pr_{tar}$  和  $R_{tar}$  分别为目标 SINR 覆盖率和目标平均用户速率。

如果该能效优化问题目标函数有最优解, 那么该最优解为

$$\lambda_F P_F^\alpha = F^* \quad (19)$$

根据定理 1, 偏置蜂窝网络的 SINR 覆盖率和平均用户速率是  $F^*$  的单调递增函数, 所以很容易根据式(20)利用二分法求解得到  $F^*$ 。

$$\begin{aligned} Pr(F_C^*) &= Pr_{tar} \\ R(F_R^*) &= R_{tar} \end{aligned} \quad (20)$$

其中,  $F_C^*$  和  $F_R^*$  分别为满足目标 SINR 覆盖率和目标平均用户速率的最优  $F^*$ 。

从上述 SINR 覆盖率和平均用户速率的分析中可以发现。这 2 项 QoS 指标相互影响, 所以把上述能效优化问题分解为 2 个子问题, 即分别满足目标 SINR 覆盖率和目标平均用户速率的能效优化问题。

#### 4.2 基于覆盖率的能效优化分析

基于覆盖率的能效优化问题可以构造为

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_F, P_F} \quad & ASPC \\ \text{s.t.} \quad & Pr(\lambda_M, \lambda_F, P_M, P_F) \geq Pr_{tar} \\ & P_{F,max} \geq P_F \geq 0 \\ & \lambda_{F,max} \geq \lambda_F \geq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

如果该能效优化问题有可行解, 令  $\lambda_M P_M^\alpha = M^*$ ,

$$\lambda_F P_F^\alpha = F_C^*, \quad Pr(F_C^*) = Pr_{tar}。$$

然后优化最优  $\lambda_F$  和  $P_F$ 。上述问题等效为

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_F, P_F} \quad & ASPC = \sum_{i=M,F} \lambda_i (N_{i,TRX} P_{i0} + \Delta_i P_i) \\ \text{s.t.} \quad & \lambda_F P_F^\alpha = F_C^* \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{F,max} &\geq P_F \geq 0 \\ \lambda_{F,max} &\geq \lambda_F \geq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

得到 Femto 基站最佳的发射功率  $P_{F,C}^*$  和密度  $\lambda_{F,C}^*$  分别为

$$\begin{aligned} P_{F,C}^* &= \min \left( \max \left( \frac{2N_{F,TRX} P_{F0}}{(\alpha-2)\Delta_F}, \left( \frac{F_C^*}{\lambda_{F,max}} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \right), P_{F,max} \right) \\ \lambda_{F,C}^* &= F_C^* P_{F,C}^{*\frac{2}{\alpha}} \end{aligned} \quad (23)$$

求解过程见附录 B。

#### 4.3 基于平均用户速率的能效优化分析

基于平均用户速率的能效优化问题可以构造为

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_F, P_F} \quad & ASPC \\ \text{s.t.} \quad & R(\lambda_M, \lambda_F, P_M, P_F) \geq R_{tar} \\ & P_{F,max} \geq P_F \geq 0 \\ & \lambda_{F,max} \geq \lambda_F \geq 0 \end{aligned} \quad (25)$$

上述优化问题可以等效为

$$\begin{aligned} \min_{\lambda_F, P_F} \quad & ASPC = \sum_{i=M,F} \lambda_i (N_{i,TRX} P_{i0} + \Delta_i P_i) \\ \text{s.t.} \quad & \lambda_F P_F^\alpha = F_R^* \\ & P_{F,max} \geq P_F \geq 0 \\ & \lambda_{F,max} \geq \lambda_F \geq 0 \end{aligned} \quad (26)$$

如果该能效优化问题有可行解, 令  $\lambda_F P_F^\alpha = F_R^*$ ,  $R(F_R^*) = R_{tar}$ 。与上述基于覆盖率的能效优化分析相似, 利用等式约束条件, 该能效优化问题中的双变量可以变换为单变量的优化问题, 得到 Femto 基站最佳的发射功率  $P_{F,R}^*$  和密度  $\lambda_{F,R}^*$  分别为

$$\begin{aligned} P_{F,R}^* &= \min \left( \max \left( \frac{2N_{F,TRX} P_{F0}}{(\alpha-2)\Delta_F}, \left( \frac{F_R^*}{\lambda_{F,max}} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \right), P_{F,max} \right) \\ \lambda_{F,R}^* &= F_R^* P_{F,R}^{*\frac{2}{\alpha}} \end{aligned} \quad (27)$$

#### 4.4 最佳能效分析

上面分别分析了在满足目标 SINR 覆盖率和目标平均用户速率这 2 项 QoS 指标下, 得到最优的基站密度和发射功率, 来达到最佳能效的目的。由于 SINR 覆盖率和平均用户速率这 2 项指标之间相互影响, 即在满足目标 SINR 覆盖率的条件下达到能效最优时的基站密度和发射功率会影响目标平均用户速

率，所以单独分析了基于覆盖率和平均用户速率的能耗优化问题。在达到最佳能效的情况下，得到最佳 Femto 基站密度为  $\lambda_F^* = \max(\lambda_{F,C}^*, \lambda_{F,R}^*)$ ，最佳 Femto 基站的发射功率为  $P_F^* = \max(P_{F,C}^*, P_{F,R}^*)$ 。下面给出最佳能效部署基站的主要步骤。

**算法 1** 最佳能效部署基站

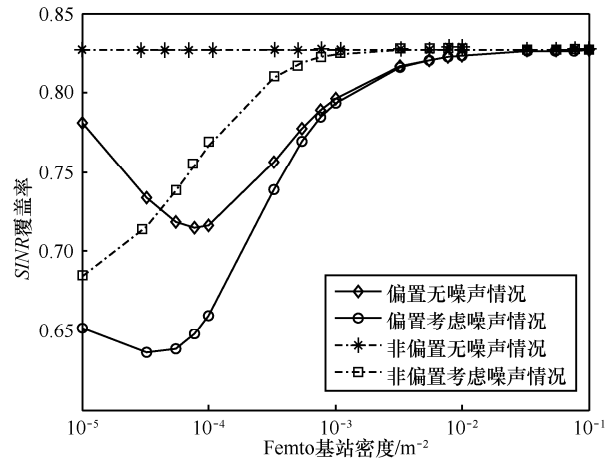
- 1) 利用二分法计算满足目标 SINR 覆盖率  $P_{r_{tar}}$  的最优  $F_C^*$
- 2) 利用最优化理论求取满足 ASPC 最小情况下的 Femto 基站的发射功率  $P_{F,C}^*$
- 3) 根据  $\lambda_{F,C}^* = F_C^* P_{F,C}^* \frac{2}{\alpha}$ ，求 Femto 基站的密度  $\lambda_{F,C}^*$
- 4) 利用二分法计算满足目标平均用户速率  $R_{tar}$  的最优  $F_R^*$
- 5) 利用最优化理论求取满足 ASPC 最小情况下的 Femto 基站的发射功率  $P_{F,R}^*$
- 6) 根据  $\lambda_{F,R}^* = F_R^* P_{F,R}^* \frac{2}{\alpha}$ ，求 Femto 基站的密度  $\lambda_{F,R}^*$
- 7) 求 Femto 基站的最优发射功率  $P_F^* = \max(P_{F,C}^*, P_{F,R}^*)$ ，最优密度  $\lambda_F^* = \max(\lambda_{F,C}^*, \lambda_{F,R}^*)$

**5 性能仿真分析**

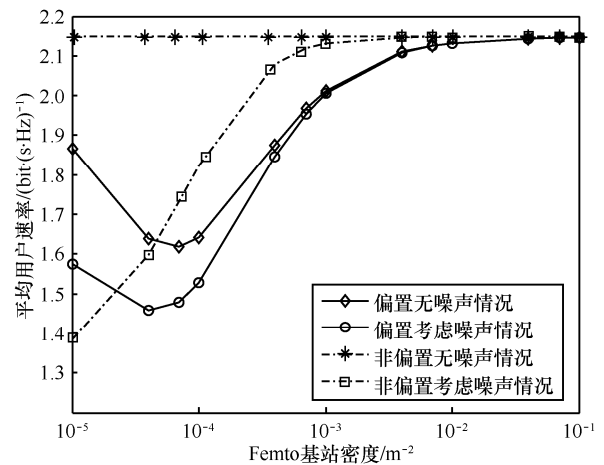
本节对上述理论分析进行性能仿真分析，仿真参数取自文献[16-17,19]。设置如下：系统带宽  $W = 20$  MHz，Macro 基站的密度  $\lambda_M = 10^{-6} \text{ m}^{-2}$ ，Macro 基站的发射功率为  $P_M = 20$  W，偏置参数  $\beta_M = 0$  dB；Femto 基站的密度和最大发射功率分别为  $\lambda_{F,max} = 10^{-2} \text{ m}^{-2}$ ， $P_{F,max} = 19$  dBm；路径损耗因子  $\alpha = 4$ ，路径损耗常数  $L = -55$  dB；用户密度  $\lambda_U = 10^{-4} \text{ m}^{-2}$ ；SINR 覆盖阈值  $\zeta = -6.5$  dB，噪声功率  $\sigma^2 = -104$  dBm；其他基站功耗参数  $N_{M,TRX} = 6$ ， $N_{F,TRX} = 2$ ， $\Delta_M = 4.7$ ， $\Delta_F = 8.0$ ， $P_{M_0} = 130$  W， $P_{F_0} = 4.8$  W。根据式(9)，本文的平均用户速率为用户在单位带宽的平均速率。

如图 2 所示，采用偏置关联的情形，随着 Femto 基站密度的增加，SINR 覆盖率和平均用户速率都低于不采用偏置关联的情形，这是因为更多的 SINR 值低的用户关联到 Femto 基站。当 Femto 基站密度较小时 ( $\lambda_f < 3.25 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2}$ )，随着 Femto 基站密度的增加，对于采用偏置关联的情形，由于那些被卸载到 Femto 基站的用户与 Femto 基站之间的路径损耗以及干扰的影响，SINR 覆盖率和平均用户速率会降

低，但是随着 Femto 基站密度的进一步增加，根据式(1)可知，越来越多的 Macro 基站用户被卸载到 Femto 基站，这些用户与 Femto 基站的距离会降低，路径损耗和干扰也会降低，并且由于 Macro 基站的户数减少，导致那些 SINR 值低的和 Macro 基站小区边缘的用户卸载到 Femto 基站，Macro 基站的覆盖率和平均用户速率得到改善，所以整体网络的 SINR 覆盖率和平均用户速率显著提高。但是随着 Femto 基站密度的进一步增加，SINR 覆盖率和平均用户速率都不再改善，因为此时网络变成干扰限制场景，基站间的干扰成为主导，噪声可以忽略不计。部署更多的 Femto 基站带来的增益与产生的干扰抵消。



(a) Femto 基站密度对 SINR 覆盖率的影响



(b) Femto 基站密度对平均用户速率的影响

图 2 Femto 基站密度对用户 QoS 的影响 ( $\beta_F = 10$  dB)

图 3 给出了  $F^*$  与 SINR 覆盖率和平均用户速率之间的关系。随着  $F^*$  的增加，SINR 覆盖率和平均用户速率都得到了提高。这也验证了定理 1 提出的 SINR 覆盖率和平均用户速率随着  $x$  单调递增。随着  $x$  的增

加, SINR 覆盖率和平均用户速率都达到收敛, 此时随着  $x$  的继续增加, SINR 覆盖率和平均用户速率得不到改善, 反而增加了部署成本和能量消耗。因此, 根据  $\lambda_F P_F^{\frac{2}{\alpha}}$  联合优化 Femto 基站的密度  $\lambda_F$  和发射功率  $P_F$ , 来满足目标 QoS (SINR 覆盖率和平均用户速率), 同时使能耗达到最低。

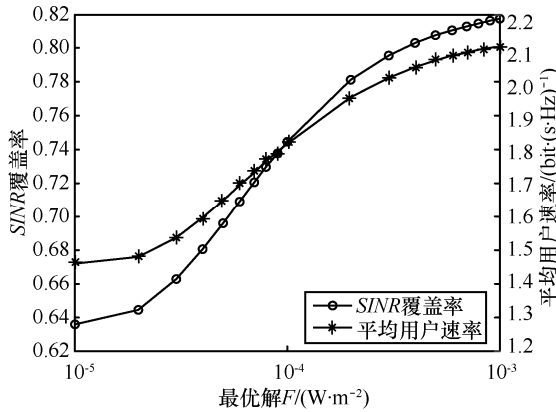
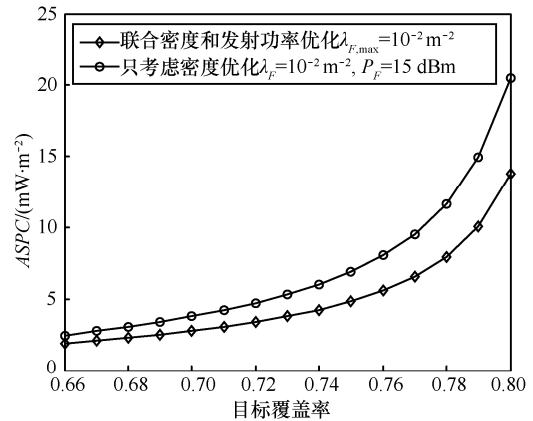


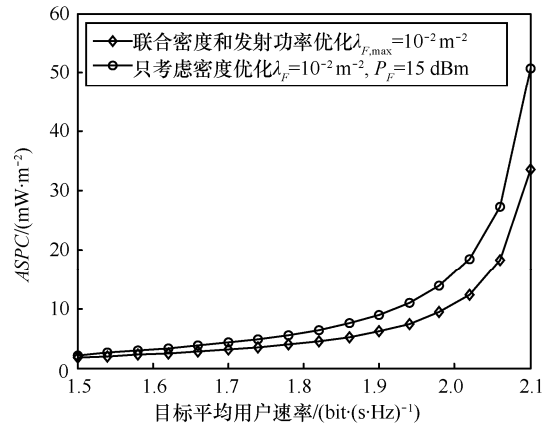
图 3 最优解  $F^*$  与 SINR 覆盖率和平均用户速率的关系

此外, 图 4(a)和图 4(b)分别表示在满足目标 SINR 覆盖率和目标平均用户速率的情况下, 本文提出的联合基站密度和发射功率优化的策略与只考虑基站密度优化的传统策略能耗的对比。随着目标覆盖率和平均用户速率的增加, 相应能耗也会增加, 因此需要提高  $F^*$ 。根据不同的目标覆盖率以及目标平均用户速率, 利用二分法求得  $F^*$ 。本文提出的联合基站密度和基站发射功率优化的策略比只考虑基站密度优化的策略能耗更低。因为在满足给定 Femto 基站限制条件 ( $\lambda_{F,max}, P_{F,max}$ ) 下可以通过优化基站的发射功率来使能耗达到最低。当基站的发射功率达到限定的最大值时, 如果仍然不满足目标 SINR 覆盖率或目标平均用户速率, 则增加 Femto 基站密度来满足需求。传统的方法由于发射功率固定,  $F^*$  增加时需要提高 Femto 基站的密度来达到目标 SINR 覆盖率以及目标平均用户速率。

最后, 考虑的是在满足用户 QoS 要求的情况下达到能耗最低, 由于 SINR 覆盖率和平均用户速率相互关联, 提出先满足指定的目标 SINR 覆盖率。根据图 2(a)发现, 当采用 Bias 关联的情形, SINR 阈值  $\zeta = -6.5$  dB 时, 其 SINR 覆盖率最终随着 Femto 基站密度的增加而收敛, 最终 SINR 覆盖率为  $Pr_{max} = 0.82$ 。假设  $Pr_{tar} = \kappa Pr_{max}$ , 则  $\kappa=0.9$  时  $Pr_{tar}=0.74$ 。在满足此 SINR 覆盖率的条件下, 建立



(a) 本文提出的策略和传统策略在满足目标覆盖率的能耗关系



(b) 本文提出的策略和传统策略在满足目标速率的能耗关系

图 4 本文提出的策略和传统策略在满足目标覆盖率及目标速率的能耗关系

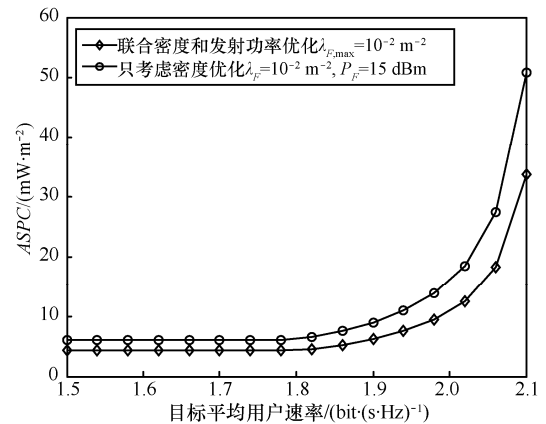


图 5 本文提出的策略和传统策略在联合满足目标用户 QoS 指标下的能耗关系 ( $Pr_{tar} = \kappa Pr_{max}$ ,  $\kappa=0.9$ )

目标平均用户速率与能耗之间的关系, 如图 5 所示。当目标平均用户速率小于  $1.8 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$  时, ASPC 保持不变, 因为此时要首先保证达到目标的 SINR 覆盖率  $Pr_{tar}$ 。当目标平均速率大于  $1.8 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$  时, 能耗将开始增加, 因为达到更高的目标平均用户速率需要更大的  $F^*$ 。通过仿真发现, 本文提出的

联合优化基站密度和发射功率的策略比只考虑基站密度优化的策略能耗更低。

## 6 结束语

本文采用两层的密集偏置 Macro-Femto 异构蜂窝网络进行分析，利用随机几何工具分析了 SINR 覆盖率和平均用户速率与能耗之间的关系。通过分析 SINR 覆盖率和平均用户速率的封闭表达式，得到网络能耗与能耗相关表达式的关系。通过联合优化基站密度和基站发射功率，在满足用户 QoS (SINR 覆盖率和平均用户速率) 的限制条件下，得到最佳的部署策略。通过仿真结果可以看出，本文提出的策略比传统单独考虑基站密度优化的策略能耗更低。在后续的工作中考虑用户分布不均匀，即存在网络热点区域和非热点区域的情况下如何部署 Femto 基站来满足用户的 QoS 要求。

## 附录 A 定理 1 的证明

**证明** 为了便于分析，令  $M^* = \lambda_M P_M^{\frac{2}{\alpha}}$ ， $F^* = \lambda_F P_F^{\frac{2}{\alpha}}$ 。根据式(7)，有

$$Pr = Pr' - \frac{\zeta \sigma^2 \Gamma\left(\frac{\alpha}{2} + 1\right)}{\pi^{\frac{\alpha}{2}} L} \sum_{i=M, F} \frac{\lambda_i P_i^{\frac{2}{\alpha}}}{(M^* C_M + F^* C_F)^{\frac{\alpha}{2} + 1}}$$

令  $F_2^* > F_1^*$ ，首先证明  $Pr'(F_2^*) > Pr'(F_1^*)$ 。

$$Pr'(F^*) = \frac{1}{\omega + \frac{F^*}{M^*} \left( \left( \frac{\beta_F}{\beta_M} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + Z\left(\zeta, \alpha, \frac{\beta_F}{\beta_M}\right) \right)} + \frac{1}{\omega + \frac{M^*}{F^*} \left( \left( \frac{\beta_M}{\beta_F} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + Z\left(\zeta, \alpha, \frac{\beta_M}{\beta_F}\right) \right)}$$

其中， $\omega = 1 + Z(\zeta, \alpha, 1)$  为常数， $\frac{\left( \frac{\beta_F}{\beta_M} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + Z\left(\zeta, \alpha, \frac{\beta_F}{\beta_M}\right)}{M^*} = B_1$ ，

$$\left( \left( \frac{\beta_M}{\beta_F} \right)^{\frac{2}{\alpha}} + Z\left(\zeta, \alpha, \frac{\beta_M}{\beta_F}\right) \right) M^* = B_2， \text{ 所以 } Pr'(F^*) = \frac{1}{\omega + FB_1} + \frac{1}{\omega + \frac{B_2}{F^*}}。$$

由于  $\beta_F > \beta_M$ ，通过数值计算可知  $B_1 \gg 1$ ， $B_2 \ll 1$ ，因此得到  $Pr'(F_2^*) > Pr'(F_1^*)$ ，类似的方法可以证明  $Pr(F_2^*) > Pr(F_1^*)$ 。

同理，对于平均用户速率的证明类似于上述证明过程。得到  $R(F_2^*) > R(F_1^*)$ 。

## 附录 B 式 (22) 的求解过程

如果该能效优化问题有可行解，令  $\lambda_M P_M^{\frac{2}{\alpha}} = M^*$ ， $\lambda_F P_F^{\frac{2}{\alpha}} = F^*$ ， $Pr(F_C^*) = Pr_{tar}$ 。

利用等式约束条件，该能效优化问题中的双变量可以变换为单变量的优化问题。 $\lambda_F = \frac{F^*}{P_F^{\frac{2}{\alpha}}}$ ，代入目标函数  $ASPC$ ，

得到

$$ASPC = \lambda_M (N_{M,TRX} P_{M_0} + \Delta_M P_M) + \frac{F^*}{P_F^{\frac{2}{\alpha}}} (N_{F,TRX} P_{F_0} + \Delta_F P_F) \quad (29)$$

由式(29)可以发现， $ASPC$  是单一变量  $P_F$  的函数。由于  $ASPC$  是拟凸函数，因此可以通过求导得到  $P_F$  的最小值。

$$\frac{d(ASPC)}{dP_F} = \left(1 - \frac{2}{\alpha}\right) \Delta_F - \left(\frac{2}{\alpha}\right) N_{F,TRX} P_{F_0} P_F^{-1} = 0 \quad (30)$$

由式(30)可以得到  $P_F = \frac{2N_{F,TRX} P_{F_0}}{(\alpha - 2)\Delta_F}$ ，再根据式(22)第

2 个和第 3 个约束条件求解得到结果，如式(23)和式(24)所示。

## 参考文献:

- [1] DAMNJANOVIC A, MONTOJO J, WEI Y, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 10-21.
- [2] GHOSH A, MANGALVEDHE N, RATASUK R, et al. Heterogeneous cellular networks: from theory to practice[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(6): 54-64.
- [3] WU G, YANG C, LI S, et al. Recent advances in energy-efficient networks and their application in 5G systems[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 145-151.
- [4] LIN P, ZHANG J, CHEN Y, et al. Macro-Femto heterogeneous network deployment and management: from business models to technical solutions[J]. IEEE Wireless Communications, 2011, 18(3): 64-70.
- [5] KHANDEKAR A, BHUSHAN N, JI T F, et al. LTE-Advanced: heterogeneous networks[C]// IEEE Wireless Conference. 2010: 978-982.
- [6] HURLEY S. Planning effective cellular mobile radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(2): 243-253.
- [7] DHILLON H S, GANTI R K, BACCELLI F, et al. Modeling and analysis of  $k$ -tier downlink heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 30(3): 550-560.
- [8] LI L, PENG M, YANG C, 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.

- [9] 李云, 王俊伟, 赵为粮, 等. 基于基站密度和业务负载的异构蜂窝网络能效优化[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 854-859.  
LI Y, WANG J W, ZHAO W L, et al. Optimizing the energy efficiency of heterogeneous cellular networks based on the base station density and traffic load[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2017, 39(4): 854-859.
- [10] PENG J, HONG P, XUE K. Energy-aware cellular deployment strategy under coverage performance constraints[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 69-80.
- [11] DAI J Y, WANG S W. Clustering-based interference management in densely deployed femtocell networks[J]. Digital Communications & Networks, 2016, 2(4): 175-183.
- [12] CHEN W, LI H, LI Z, et al. Optimization of small cell deployment in heterogeneous wireless networks[C]// IEEE International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems. 2016: 1-5.
- [13] DEMIRTAS M, ÇAGGATAY SAGGINDA, SOYSAL A. Energy and spectral efficiency for heterogeneous cellular networks with stochastic deployment[C]// IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference. 2017: 1-4.
- [14] LIN C C, LIU K H S, SU S L. Coverage performance of heterogeneous cellular networks with dependent cell deployment[C]// IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. 2016: 1-4.
- [15] ZHANG T, ZHAO J, AN L, et al. Energy efficiency of base station deployment in ultra dense Hetnets: a stochastic geometry analysis[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(2): 184-187.
- [16] JO H S, SANG Y J, XIA P, et al. Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(10): 3484-3495.
- [17] 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.
- [18] SINGH S, DHILLON H S, ANDREWS J G. Offloading in heterogeneous networks: modeling, analysis, and design insights[J]. IEEE

Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(5): 2484-2497.

- [19] TANG J, SO D K C, ALSUSIA E A, et al. Energy-efficient heterogeneous cellular networks with spectrum underlay and overlay access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2439-2453.

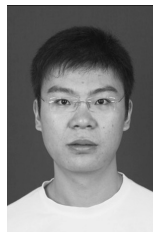
#### [作者简介]



李云 (1974-), 男, 四川西充人, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线移动通信。



王春生 (1989-), 男, 安徽淮北市人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为异构蜂窝网络。



曹宾 (1983-), 男, 重庆人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为网络虚拟化、软件定义网络、资源管理和网络协议设计及性能分析。

刘期烈 (1974-), 男, 四川隆昌人, 博士, 重庆邮电大学教授, 主要研究方向为信息中心网络。