

异构网中能效最优的小站部署方案

范建存^{①*}, 任琦^①, 罗新民^①, 徐志昆^②

① 西安交通大学电信学院, 西安 710049

② 中国移动有限公司研究院, 北京 100053

* 通信作者. E-mail: fanjc0114@gmail.com

收稿日期: 2015-05-01; 接受日期: 2015-06-18; 网络出版日期: 2015-09-09

中国移动研究院研究基金 (批准号: 2013346)、国家自然科学基金 (批准号: 61302066)、教育部博士点基金 (批准号: 20130201120-021)、陕西省自然科学基金 (批准号: 2014JQ8303, 2014JM2-6124)、国家博士后科学基金 (批准号: 2014M560780, 2015T81031) 和陕西省博士后科学基金资助项目

摘要 针对异构蜂窝网中的小站部署问题, 本文提出了一种最大化系统能效的小站数量和发射功率联合优化的部署方案. 该方案考虑了系统覆盖的约束条件, 以最大化系统能效为目标, 利用交替迭代搜索法对小站数量及发射功率进行优化. 仿真结果表明, 所提方案在算法复杂度方面要优于穷举搜索法, 并且相对于仅优化小站数量的传统方案, 本文提出的联合优化方案能明显提升系统能效.

关键词 异构网 小站部署 能效 覆盖 迭代优化

1 引言

近年来, 高能效的绿色通信技术已经引起了学术界和业界的持续关注, 并成为未来 5G 系统的关键技术^[1,2]. 纵观现有通信系统的能耗分布可以看出^[3], 网络部分的能耗实际上已经占到总能耗的将近 90%, 而终端部分仅占了总能耗的 10% 左右. 可见, 如何大幅度降低网络部分的能耗将是未来实现绿色通信系统的关键所在. 而面对未来通信系统对高速率、低时延和高能效的苛刻要求, 传统的宏蜂窝网络已经不能完全满足未来通信的发展需求, 因此异构蜂窝网络也就应运而生^[4]. 其核心是通过在传统宏蜂窝网络中部署包括微蜂窝基站 (micro base station, micro BS)、微微蜂窝基站 (pico base station, pico BS)、毫微微蜂窝基站 (femto base station, femto BS) 等多种小站, 来降低基站和用户间的距离, 从而降低基站的发射功率并提升系统容量. 基于此, 本文将对异构网能量有效的小站部署方案进行研究.

在此方面, 目前已有许多学者做了大量的研究, 其核心主要是通过优化网络中的小站个数或小站的具体部署位置来最大化网络能效, 如文献 [5~8] 均是从网络能效的角度研究了站点密度对异构蜂窝网中网络能效的影响. 其中文献 [5] 将小站部署分为两个子问题, 第 1 个是为小站选择候选位置集合, 第 2 个就是在这些候选位置集合中选择最优的集合来优化网络能效; 文献 [6] 研究了宏微异构网络中网络能效与小站分布密度及小站与宏站分布密度比值间的关系; 文献 [7] 则在优化网络能效的过程中

引用格式: 范建存, 任琦, 罗新民, 等. 异构网中能效最优的小站部署方案. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 22-32, doi: 10.1360/N112015-00094

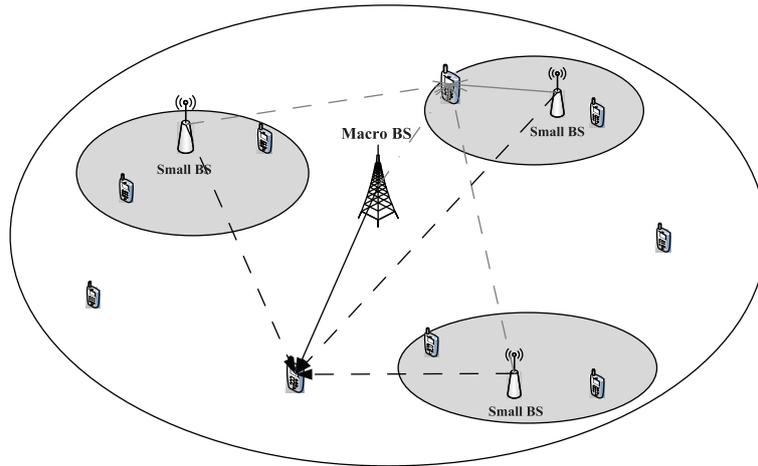


图 1 两层异构网络模型

Figure 1 Two-tier heterogeneous network model

进一步考虑了服务质量及不同业务负载对网络能效的影响, 并通过数值仿真给出网络能效最优时的宏站分布密度及微站分布密度; 文献 [8] 则进一步分析优化了在保证网络覆盖、能效最优时的小站部署密度.

然而, 上述研究在最大化网络能耗时仅考虑了小站的个数或分布位置, 并未考虑小站发射功率这一因素. 而实际上, 小站的发射功率对小站最佳个数的优化同样有很大影响, 不同的分布密度通常应该配置不同的发射功率. 因此, 我们希望知道当追求网络能效最优时, 网络中应该部署多少个小站以及应该为这些小站配置多大的发射功率. 针对这一问题, 本文将对小站分布个数和小站发射功率进行联合优化来最大化系统能效, 从而给出高能效的异构网部署方案.

2 系统模型

2.1 网络结构

考虑如图 1 所示的两层异构网络. 假设: 1) 宏、微蜂窝基站的覆盖区域均为圆形, 微蜂窝基站 (以下称“小站”) 以 Poisson 点分布方式部署于宏蜂窝基站覆盖范围内; 2) 设用户密度较高并均匀分布于宏蜂窝内, 且当用户位于小站覆盖范围内时, 即图 1 中的小圆形区域, 则由小站提供服务, 否则由宏站为其提供服务; 3) 宏站与小站的发射功率不同, 所有小站有相同的发射功率; 4) 为了尽量提高频谱利用率, 宏站与小站共享同一段频谱, 因此, 宏站与小站间存在层间干扰, 而小站与小站间亦使用相同的频率资源.

2.2 容量分析

为了描述方便, 令 \mathcal{B} 表示图 1 中所有基站的集合, 其中有一个宏站和 $|\mathcal{B}| - 1$ 个小站, 且宏站、小站间采用同频组网, 那么将不可避免地存在站内及站间干扰. 对此, 图中用实线表示传输信号, 虚线表示干扰信号, 实箭头表示由宏站服务的用户接收到的信号, 空箭头表示由小站服务的用户接收到的信号. 不失一般性, 假设同一小区不同用户间采用频分复用, 而不同小区不同用户可以采用同样的频率,

那么期望小区 b (宏站或小站) 中载波 k 上的用户接收到的信号可以表示为

$$y_{k,b} = \sqrt{g_{k,b,b}}H_{k,b,b}\sqrt{p_{k,b}}x_{k,b} + \sum_{l \in B, l \neq b} \sqrt{g_{k,b,l}}H_{k,b,l}\sqrt{p_{k,l}}x_{k,l} + n_{k,b}, \quad (1)$$

式中第 1 部分表示用户接收的期望信号, 第 2 部分表示来自其他基站的干扰信号, 第 3 部分表示噪声, 其他各参数具体含义为: $H_{k,b,l}$ 表示基站 l 到小区 b 中第 k 个载波上调度用户的信道, 假设它服从均值为 0 方差为 1 的复 Gauss 分布; $g_{k,b,l} = g_0 d_{k,b,l}^{-\alpha}$ 表示基站 l 到小区 b 中第 k 个载波上调度用户的路径损耗, 其中 g_0 表示单位距离时的路径损耗, $d_{k,b,l}$ 表示基站 l 到小区 b 中第 k 个载波上的调度用户的距离, α 表示路径损耗因子; $p_{k,l}$ 表示基站 l 给第 k 个载波上的用户分配的发射功率, 假设宏蜂窝用户间及微蜂窝用户间均采用等功率分配, 且宏站和微站每个载波上的发射功率为 $P_t^{(m)}/K$ 和 $P_t^{(s)}/K$, 这里 K 为总的可用载波数, $P_t^{(m)}$ 和 $P_t^{(s)}$ 分别为宏微站总的发射功率; $x_{k,l}$ 表示基站 l 在载波 k 上的发射信号; $n_{k,l}$ 表示小区 l 中载波 k 上的噪声信号, 其服从均值为 0 方差为 σ_n^2 的 Gauss 分布.

此时根据 (1) 式的信号接收模型并结合 Shannon 公式, 就可以将小区 b 中载波 k 上调度用户的遍历容量表示为

$$C_k = E_H \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{E_{k,b}}{I_{k,b} + \sigma_n^2} \right) \right\}, \quad (2)$$

式中 $E\{\cdot\}$ 表示求期望操作, $E_{k,b}$ 和 $I_{k,b}$ 分别表示期望信号的接收功率和干扰信号的接收功率, 它们分别可以表示成如下形式

$$E_{k,b} = \left\| \sqrt{g_{k,b,b}}H_{k,b,b}\sqrt{p_{k,b}} \right\|^2 = g_{k,b,b}p_{k,b} \|H_{k,b,b}\|^2, \quad (3)$$

$$I_{k,b} = \sum_{l \in B, l \neq b} \left\| \sqrt{g_{k,b,l}}H_{k,b,l}\sqrt{p_{k,l}} \right\|^2 = \sum_{l \in B, l \neq b} g_{k,b,l}p_{k,l} \|H_{k,b,l}\|^2. \quad (4)$$

令 B_{sys} 表示系统可用带宽, 因此系统总容量可以表示为

$$T(N^{(s)}, P_t^{(s)}) = B_{\text{sys}} \left(c_k^{(m)} + \sum_{n=1}^{N^{(s)}} c_{k,n}^{(s)} \right), \quad (5)$$

式中 $c_k^{(m)}$ 和 $c_{k,n}^{(s)}$ 分别为宏站中第 k 个载波上的调度用户及第 n 个小站中第 k 个载波上的调度用户的速率, 它们分别可由 (2) 式获得, $N^{(s)}$ 为小站个数.

2.3 功耗模型及系统能效

系统能效一般被定义为系统单位时间内总吞吐量 (单位: bit/s) 与总功率消耗 (单位: W) 的比值, 因此下面首先给出基站的功耗模型, 然后再给出相应的系统能效.

根据文献 [9], 一般常用的简化的基站功耗模型可以建模为

$$P_{\text{in}} = N_{\text{TRX}} \cdot \frac{\frac{P_t}{\eta_{\text{PA}} \cdot (1 - \sigma_{\text{feed}})} + P_{\text{RF}} + P_{\text{BB}}}{(1 - \sigma_{\text{DC}})(1 - \sigma_{\text{MS}})(1 - \sigma_{\text{cool}})}, \quad (6)$$

这里 P_{in} 为与基站收发链路数 N_{TRX} 成正比的基站总功耗, P_t 为每根天线上的发射功率, P_{RF} 和 P_{BB} 分别为射频收发信机和基带处理单元的功耗, η_{PA} 为功放效率, σ_{feed} 为馈线损耗, σ_{DC} , σ_{MS} 和 σ_{cool} 分别为 DC-DC、主要供电支持和空调散热带来的功率损耗因子. 进一步, 可以将 (6) 式中的功耗模型重新定义为

$$P_{\text{in}} = \beta P_t + P_c, \quad (7)$$

这里

$$\beta = \frac{N_{\text{TRX}}}{\eta_{\text{PA}} \cdot (1 - \sigma_{\text{feed}})(1 - \sigma_{\text{DC}})(1 - \sigma_{\text{MS}})(1 - \sigma_{\text{cool}})},$$

$$P_c = \frac{N_{\text{TRX}}(P_{\text{RF}} + P_{\text{BB}})}{(1 - \sigma_{\text{DC}})(1 - \sigma_{\text{MS}})(1 - \sigma_{\text{cool}})}.$$

因此, 宏站和小站的功耗模型可以分别表示成

$$P^{(m)} = \beta^{(m)} P_t^{(m)} + P_c^{(m)}, \quad (8)$$

$$P^{(s)} = \beta^{(s)} P_t^{(s)} + P_c^{(s)}, \quad (9)$$

这里上标 m 和 s 分别表示宏站和小站相关的参数.

此时, 根据系统能效的定义以及 (5), (8) 和 (9) 式, 可以表示系统能效如下:

$$\text{EE}(N^{(s)}, P_t^{(s)}) = \frac{B_{\text{sys}} \left(c_k^{(m)} + \sum_{n=1}^{N^{(s)}} c_{k,n}^{(s)} \right)}{\beta^{(m)} P_t^{(m)} + P_c^{(m)} + N^{(s)} \left(\beta^{(s)} P_t^{(s)} + P_c^{(s)} \right)}. \quad (10)$$

从 (2)~(4) 和 (10) 式可以看出, 当宏站发射功率固定时, 系统能效是小站个数 $N^{(s)}$ 和小站发射功率 $P_t^{(s)}$ 的函数. 因此, 下一节将对这两个参数进行优化, 提出一个基于系统能效 EE(energy efficiency) 最优的小站部署策略.

3 基于网络能效最优的小站部署策略

本节将研究考虑系统覆盖限制的高能效小站部署方案. 在讨论它之前, 首先给出系统的覆盖需求并对优化问题进行建模.

3.1 系统覆盖保障

在无线通信中, 系统覆盖性能是一个重要的服务质量指标, 它通常由小区边缘用户的接收信干噪比 (signal to interference plus noise ratio, SINR) 大于某一门限的概率来衡量, 数学上可以表示为

$$\Pr \{ \text{SINR} \geq \Gamma \} \geq 1 - \varepsilon, \quad (11)$$

式中 $\Pr\{\cdot\}$ 表示某一事件的概率, Γ 表示用户处于小区边缘时相应的 SINR 门限, ε 表示当用户的接收 SINR 小于门限 Γ 时所产生的中断概率. 考虑到本文所采用的是宏微同频组网的异构网模式且宏微覆盖范围内的用户分别由各自基站服务的事实, 因此下面将分别给出宏蜂窝用户和小站用户各自所对应的系统覆盖限制条件.

3.1.1 宏蜂窝用户的覆盖

当在系统中部署小站时, 由于过多的小站会给宏蜂窝用户带来较大的干扰, 造成宏蜂窝用户接收信干噪比下降. 因此, 小站部署的密度应该适中, 不能过大. 此时, 结合 (1), (3) 和 (4) 式就可以将 (11) 式中的某个载波上的 SINR 表达式展开写成^[6,8]

$$\Pr \left\{ \frac{\|H^{(\text{mm})}\|^2 P_t^{(m)} K^{-1} g_0 \left(d_{\text{max}}^{(\text{mm})} \right)^{-\alpha}}{I^{(\text{sm})} + N_0} \geq \Gamma^{(m)} \right\} \geq 1 - \varepsilon^{(m)}. \quad (12)$$

这里所有变量均用含有 m 的上标来表示它是属于宏站中的参量, 其余和上文定义一致, 如: $H^{(mm)}$ 表示宏蜂窝用户与宏基站间的信道增益; $d_{\max}^{(mm)}$ 表示宏蜂窝的边缘用户到宏基站间的距离, 也就是宏站的覆盖半径; $\Gamma^{(m)}$ 是宏蜂窝用户的 SINR 门限; $\varepsilon^{(m)}$ 表示宏蜂窝用户中断概率; N_0 是背景噪声; $I^{(sm)}$ 表示小站对宏站用户的层间干扰, 它可以根据 (4) 式表示为 $I^{(sm)} = \sum_{l \in \mathcal{B}_s} \|H_l^{(sm)}\|^2 P_t^{(s)} K^{-1} g_0 (d_l^{(sm)})^{-\alpha}$, 其中 $H_l^{(sm)}$ 和 $d_l^{(sm)}$ 分别表示第 l 个小站到宏蜂窝用户的信道和距离, \mathcal{B}_s 表示除宏站外的其他小站集合. 对 (12) 式进行变形可得

$$\Pr \left\{ \|H^{(mm)}\|^2 \geq \frac{\Gamma^{(m)} (d_{\max}^{(mm)})^\alpha}{P_t^{(s)} K^{-1} g_0} (N_0 + I_{sm}) \right\} \geq 1 - \varepsilon_m. \quad (13)$$

如上所述, 由于 $H^{(mm)}$ 和 $H_l^{(sm)}$ 都服从均值为零方差为 1 的复 Gauss 分布, 所以 $\|H^{(mm)}\|^2$ 和 $\|H_l^{(sm)}\|^2$ 都服从均值为 1 的指数分布, 此时结合文献 [8] 可以得到

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ \|H^{(mm)}\|^2 \geq \frac{\Gamma^{(m)} (d_{\max}^{(mm)})^\alpha}{P_t^{(s)} K^{-1} g_0} (N_0 + I_{sm}) \right\} \\ &= \exp \left(-\frac{\Gamma^{(m)} (d_{\max}^{(mm)})^\alpha N_0}{P_t^{(s)} K^{-1} g_0} \right) \exp \left(-\frac{2\pi^2 \lambda^{(s)} (d_{\max}^{(mm)})^2}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \left(\frac{\Gamma^{(m)} P_t^{(s)}}{P_t^{(m)}} \right)^{\frac{2}{\alpha}} \right), \end{aligned} \quad (14)$$

式中 $\lambda^{(s)}$ 表示小站分布密度.

结合 (13) 和 (14) 式, 对不等式两边取对数, 则可获得小站分布密度 $\lambda^{(s)}$ 应该满足如下条件

$$\lambda^{(s)} \leq \frac{\left[-\ln(1 - \varepsilon^{(m)}) - \frac{\Gamma^{(m)} (d_{\max}^{(mm)})^\alpha N_0}{P_t^{(s)} K^{-1} g_0} \right]}{\frac{2\pi^2 (d_{\max}^{(mm)})^2}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} \left(\frac{\Gamma^{(m)} P_t^{(s)}}{P_t^{(m)}} \right)^{\frac{2}{\alpha}}} \triangleq \tilde{\lambda}^{(s)}. \quad (15)$$

从 (15) 式可以看出, 为满足 (12) 式表示的宏蜂窝用户覆盖特性, 小站分布密度不应该超过某一门限值 $\tilde{\lambda}^{(s)}$, 也即小站个数 $N^{(s)}$ 不能超过 $\tilde{\lambda}^{(s)} \pi (d_{\max}^{(mm)})^2$, 否则过多的小站将造成宏蜂窝用户接收到的干扰信号过强, 导致其接收 SINR 下降, 此时系统将不能保证宏站用户的覆盖需求. 而影响这个门限值 $\tilde{\lambda}^{(s)}$ 的因素有很多, 例如宏站发射功率 $P_t^{(m)}$ 、小站发射功率 $P_t^{(s)}$ 、宏蜂窝用户信干噪比门限 $\Gamma^{(s)}$ 等.

3.1.2 小站用户的覆盖

对于小站用户来说, 由于各个小站之间使用相同的频谱资源, 这就带来了小站与小站间的层内干扰. 类似于 (12) 式, 为了保证小站用户的覆盖, 小站边缘用户接收到的信干噪比也应满足

$$\Pr \left\{ \frac{\|H_b^{(ss)}\|^2 P_t^{(s)} K^{-1} g_0 (d_{\max}^{(ss)})^{-\alpha}}{I^{(ss)} + I^{(ms)} + N_0} \geq \Gamma^{(s)} \right\} \geq 1 - \varepsilon^{(s)}, \quad (16)$$

式中包含上标 s 的参量表示与小站相关的信息, 如: $H_b^{(ss)}$ 表示第 b 个小站与相应小站用户间的信道; $d_{\max}^{(ss)}$ 表示小站边缘用户和小站间的距离, 也就是小站的覆盖半径; $I^{(ss)}$ 和 $I^{(ms)}$ 分别表示小站与小站

间的层内干扰和宏站对小站用户的层间干扰; $\Gamma^{(s)}$ 和 $\varepsilon^{(s)}$ 分布表示小站的 SINR 及中断概率需求. 同样, (16) 式的左边可以写成

$$\Pr \left\{ \|H_b^{(ss)}\|^2 \geq \frac{(I^{(ss)} + I^{(ms)} + N_0) \Gamma^{(s)}}{P_t^{(s)} K^{-1} g_0 (d_{\max}^{(ss)})^{-\alpha}} \right\} \geq 1 - \varepsilon^{(s)}. \quad (17)$$

此时类似于 (15) 式, 根据 $\|H_b^{(ss)}\|^2$ 服从均值为 1 的指数分布并结合文献 [8], 可以保证小站用户覆盖所需的小站部署密度为

$$\lambda^{(s)} \leq \frac{-\ln \left[\frac{(1-\varepsilon^{(s)})(2+\alpha) \left((d_{\max}^{(mm)})^\alpha P_t^{(s)} + (d_{\max}^{(ss)})^\alpha \Gamma^{(s)} P_t^{(m)} \right)}{2 \left(d_{\max}^{(mm)} \right)^2 P_t^{(s)} F \left(1, 1; 2 + \frac{2}{\alpha}; \frac{(d_{\max}^{(mm)})^\alpha P_t^{(s)}}{(d_{\max}^{(mm)})^\alpha P_t^{(s)} + (d_{\max}^{(ss)})^\alpha \Gamma^{(s)} P_t^{(m)}} \right)} \right]}{\frac{2\pi^2 (d_{\max}^{(ss)})^2}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} (\Gamma^{(s)})^{\frac{2}{\alpha}}} - \frac{(d_{\max}^{(ss)})^\alpha \Gamma^{(s)} N_0}{P_t^{(s)} K^{-1} g_0 \frac{2\pi^2 (d_{\max}^{(ss)})^2}{\alpha \sin(2\pi/\alpha)} (\Gamma^{(s)})^{\frac{2}{\alpha}}} \triangleq \bar{\lambda}^{(s)}, \quad (18)$$

式中 F 表示 Gauss 超几何分布函数. 从 (18) 式可以看出, 为了保证小站用户的覆盖特性, 小站分布密度同样不能超过某一门限值 $\bar{\lambda}^{(s)}$, 即小站个数 $N^{(s)}$ 不能超过 $\bar{\lambda}^{(s)} \pi (d_{\max}^{(mm)})^2$, 否则小站与小站间干扰会变得较为严重, 此时将不能保证小站用户的覆盖.

综合 (15) 和 (18) 式可见, 为了保证宏蜂窝用户覆盖以及小站用户的覆盖, 小站的部署密度 $\lambda^{(s)}$ 应各自满足一定门限值. 考虑到整个系统, 为了保证整个系统的覆盖特性, 即同时考虑宏站和小站用户的覆盖, 小站分布密度 $\lambda^{(s)}$ 应小于 $\tilde{\lambda}^{(s)}$ 和 $\bar{\lambda}^{(s)}$ 中的较小值, 也就是说, 小站密度不应超过为保证宏基站边缘用户覆盖的小站部署密度门限值 $\tilde{\lambda}^{(s)}$ 与保证小站边缘用户覆盖的小站部署密度门限值 $\bar{\lambda}^{(s)}$ 中的较小值, 即小站的个数不能超过 $\min(\tilde{\lambda}^{(s)}, \bar{\lambda}^{(s)}) \pi (d_{\max}^{(mm)})^2$.

3.2 优化问题建模

上节给出了保证系统覆盖时小站个数 N_s 应满足的约束条件, 因此我们建立了如下对小站个数 N_s 及其发射功率 P_{st} 进行联合优化的优化模型

$$\operatorname{argmax}_{\{N^{(s)}, P_t^{(s)}\}} \frac{B_{\text{sys}} \left(c_k^{(m)} + \sum_{n=1}^{N_s} c_{k,n}^{(s)} \right)}{a^{(m)} P_t^{(m)} + P_c^{(m)} + N^{(s)} \left(a^{(s)} P_t^{(s)} + P_c^{(s)} \right)} \quad \text{s.t. } N^{(s)} \leq \min(\tilde{\lambda}^{(s)}, \bar{\lambda}^{(s)}) \pi (d_{\max}^{(mm)})^2. \quad (19)$$

这里的约束条件是为了保证系统中边缘用户的覆盖, 由此也相应的可以保证每个小区中所有用户的最低谱效需求.

从上述优化问题的目标函数可以看出, 该优化问题既包含了连续变量 $P_t^{(s)}$, 同时也包含了离散变量 $N^{(s)}$, 属于混合整数非线性规划问题. 显然, 求解这样的优化问题可以利用穷举法, 但是由于要进行全局搜索, 因此其优化复杂度将会很高. 为了简化优化的求解过程, 我们将在下文提出一种可行的交替迭代算法来求解该优化问题.

3.3 交替迭代优化求解

在给出本文提出的交替迭代算法之前, 我们首先对系统能效关于小站个数及其发射功率的凹凸性进行简单说明. 从 (19) 式中的目标函数来看, 很难直接从该式中证明出 EE 与 $N^{(s)}$ 或者 $P_t^{(s)}$ 的凹凸性关系. 在目前已有的相关研究中, 多是通过仿真来验证这样一个关系. 文献 [10] 中作者通过一个简

化的异构网模型证明了异构网中系统能效关于小站个数存在唯一的极大值. 而文献 [11] 中, 作者通过该简化模型证明了异构网中系统能效与谱效间的凹函数关系, 虽然并未直接证明 EE 与 $P_t^{(s)}$ 的关系, 但是该文献中证明了系统谱效与小站发射功率呈现近似的线性关系, 从而可以说明系统能效与小站发射功率之间的凹函数关系. 基于此, 可以认为系统能效 EE 与小站个数 $N^{(s)}$ 和小站发射功率 $P_t^{(s)}$ 之间存在近似的凹函数关系, 那么 (19) 式中的优化问题就可以用简化的迭代策略来求解.

由于所要求解目标优化问题是二维的, 所以此处采用两个将维的一维处理进行交替迭代来降低优化的复杂度, 其相应的优化步骤可描述如下:

步骤 1 确定系统输入. 首先根据 (8) 和 (9) 式确定宏微站的系统功耗, 然后根据 (15) 和 (18) 式的覆盖约束确定微站部署个数的限制.

步骤 2 给定发射功率优化小站个数. 根据输入条件, 在覆盖约束条件下对小站个数进行优化来最大化 (19) 式中的优化目标, 从而得到一组关于小站个数及发射功率的局部最优的配置信息.

步骤 3 基于上述优化的小站个数来优化发射功率. 根据输入条件及上述优化的小站个数, 进一步对发射功率进行优化来最大化 (19) 式中的优化目标, 从而得到一组关于小站个数及发射功率的局部最优的配置信息.

步骤 4 最优解的判定. 调整小站发射个数, 判定上述局部最优解是否是全局最优解, 若是则输出, 若不是则返回到步骤 2, 进一步迭代执行小站个数和发射功率的优化.

事实上, 上述的优化步骤可以通过算法 1 中的伪代码来实现, 并最终输出 $(N_{\text{opt}}, P_{\text{opt}})$ 作为 (19) 式的优化解. 在下节中, 将对该算法进行仿真验证.

4 仿真分析

本节将通过计算机仿真对所提算法的性能进行仿真分析, 并和仅考虑小站个数优化的传统小站部署方案进行对比.

4.1 仿真场景

本文采用 wrap-around 结构的 19 个宏小区组成的网络进行仿真, 其中在每个宏小区中小站以 Poisson 点分布方式进行随机撒点, 用户在各个宏小区中均匀分布且设数目为 50. 同时, 假设宏、微站间共享同一频段资源, 且当用户位于小站覆盖区域时, 则由小站进行服务, 否则由宏站为其服务. 在仿真中, 所采用的仿真参数如表 1 所示. 在优化中, 交替迭代算法中小站个数 $N^{(s)}$ 及其发射功率 $P_t^{(s)}$ 的迭代初值分别设置为 $N_0^{(s)} = 1$ 和 $P_0^{(s)} = 1.6$ W, 迭代步长分别为 $\Delta_{N^{(s)}} = 1$ 和 $\Delta_{P_t^{(s)}} = 0.2$ W. 另外, 算法实现中, 考虑到小站和用户是随机分布的, 并且信道系数也是随机生成的, 因此每一组 $(N^{(s)}, P_t^{(s)})$ 对应的 EE 都是通过 25000 次统计平均后得到. 需要注意的是, 本文给出的基于小站个数和发射功率优化的小站部署方案, 主要是从系统平均能效最优的角度出发来进行系统优化的, 因此此处的仿真评估都是采用最终的平均性能来衡量算法的性能好坏.

4.2 仿真结果

图 2 给出了系统能效关于小站个数及发射功率变换的三维曲面, 同时也给出了用线条描绘的所提算法的搜索路径. 从该图可以看出: 1) 系统能效关于发射功率和小站个数是凸的, 因此存在最优的站点配置和发射功率来最大化系统能效; 2) 所提算法的搜索路径并不需要遍历曲面上所有的点, 而是通

算法 1 交替迭代算法

Initialization: $P^m = \beta^{(m)}P_t^{(m)} + P_c^{(m)}$, $P^{(s)} = \beta^{(s)}P_t^{(s)} + P_c^{(m)}$, $N^{(s)} = N_0^{(s)}$, $P_t^{(s)} = P_0^{(s)}$
 Determine $\tilde{\lambda}^{(s)}$ and $\bar{\lambda}^{(s)}$ based on (15) and (18), respectively.

Step 1 $N^{(s)}$ Iteration with given $P_t^{(s)}$
 If $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)} + \Delta_{N^{(s)}}, P_t^{(s)})$ & $N^{(s)} + \Delta_{N^{(s)}} \leq \min(\tilde{\lambda}^{(s)}, \bar{\lambda}^{(s)}) \pi (d_{\max}^{(mm)})^2$
 While $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)} + \Delta_{N^{(s)}}, P_t^{(s)})$
 $N^{(s)} = N^{(s)} + \Delta_{N^{(s)}}$
 End
 Else if $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) > EE(N^{(s)} + \Delta_{N^{(s)}}, P_t^{(s)})$ & $N^{(s)} - \Delta_{N^{(s)}} \leq \min(\tilde{\lambda}^{(s)}, \bar{\lambda}^{(s)}) \pi (d_{\max}^{(mm)})^2$
 While $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)} - \Delta_{N^{(s)}}, P_t^{(s)})$
 $N^{(s)} = N^{(s)} - \Delta_{N^{(s)}}$
 End
 End

Step 2 $P_t^{(s)}$ Iteration with given $N^{(s)}$
 If $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)}, P_t^{(s)} + \Delta_{P_t^{(s)}})$
 While $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)}, P_t^{(s)} + \Delta_{P_t^{(s)}})$
 $P_t^{(s)} = P_t^{(s)} + \Delta_{P_t^{(s)}}$
 End
 Else
 While $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)}, P_t^{(s)} - \Delta_{P_t^{(s)}})$
 $P_t^{(s)} = P_t^{(s)} - \Delta_{P_t^{(s)}}$
 End
 End

Step 3 Judging optimality of $N^{(s)}$ and $P_t^{(s)}$
 If $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)} + \Delta_{N^{(s)}}, P_t^{(s)})$ or $EE(N^{(s)}, P_t^{(s)}) < EE(N^{(s)} - \Delta_{N^{(s)}}, P_t^{(s)})$
 Go to Step 1
 Else
 Optimization completed and return $(N^{(s)}, P_t^{(s)})$ as $(N_{\text{opt}}, P_{\text{opt}})$
 End

表 1 仿真参数 [9, 12]

Table 1 Simulation parameters [9, 12]

Parameter types	Macro BS	Small BS
Threshold of SINR	$\gamma^{(m)} = 1$	$\gamma^{(s)} = 1$
Outage probability	$\varepsilon^{(m)} = 0.1$	$\varepsilon^{(s)} = 0.1$
Pathloss factor	$\alpha = 3.71$	$\alpha = 3.71$
Radius of cell	500 m	70~130 m
Carrier frequency	$f_0 = 2.0$ GHz	$f_0 = 2.0$ GHz
Bandwidth	10 MHz	10 MHz
Number of available subcarriers	600	600
Noise density	-174 dBm/Hz	-174 dBm/Hz
Transmit power of BS	$P_t^{(m)} = 20$ W	$P_t^{(s)}$
Power consumption model	$\beta^{(m)} = 21.45$, $P_c^{(m)} = 354.44$ W	$\beta^{(s)} = 7.84$, $P_c^{(s)} = 71.50$ W

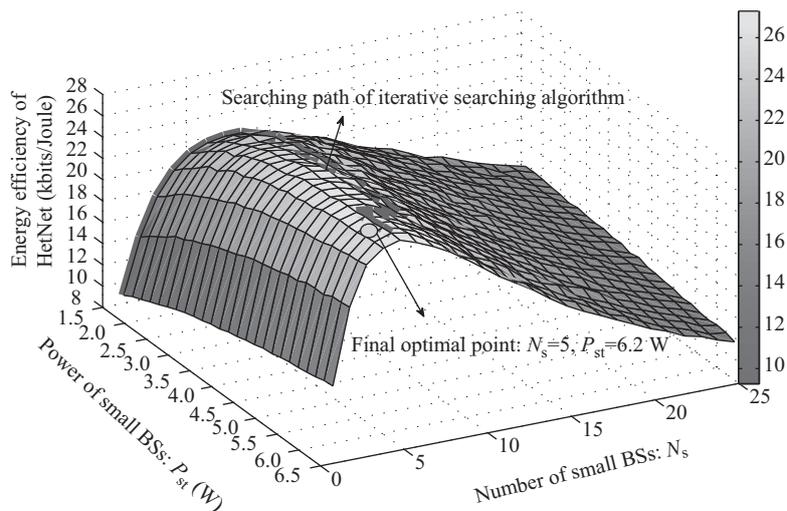


图 2 系统能效三维曲面

Figure 2 Three-dimension surface of system EE (energy efficiency)

过特定的搜索路径就可找到系统能效 EE 最大时对应的 $N^{(s)}$ 和 $P_t^{(s)}$. 对于第 2) 点, 将在图 3 进一步展开讨论.

图 3 给出了所提算法的搜索过程. 在该图中, 星号对应的坐标表示在每次搜索中得到的系统能效 EE 最大时的微站配置, 例如, 在第一趟搜索后得到的系统临时最优配置为 (8, 1.6 W). 这里需要注意的是每得到一个基站的临时最优配置 (即图中的每个星号), 都需要经过若干次迭代. 例如在第 1~5 趟搜索中, 所需的迭代次数分别为 9, 21, 6, 25, 6, 也就是说, 最终找到基站最优配置共需进行 5 趟搜索, 67 次迭代. 与穷举搜索法相比, 利用穷举法则首先需要进行 $N_{\text{range}} \cdot P_{\text{range}}$ 次网络能效的计算, 其中 N_{range} 和 P_{range} 分别表示需要搜索的微基站数量及发射功率数量. 假如当 N_{range} 和 P_{range} 均取为 25 时, 则穷举法就需进行 625 次网络能效计算, 然后再从这 625 个能效值中选取最大值. 可以看出, 本文所提的方案只需进行 67 次网络能效计算, 大大降低了寻找微基站最优配置时的计算比较次数.

图 4 给出了所提算法和仅对小站数目进行优化的传统算法的能效比较. 在该图中, 圆圈标记的曲线代表本文所提算法的 EE 曲线, 其峰值点表示按照所提算法找到小站最优配置时对应的系统能效值; 加号标记的曲线代表传统近优化小站个数时的 EE 曲线. 从该图可以看出, 任意给定一个小站个数, 对小站发射功率优化后, 本文所提算法对应的系统能效 EE 均大于传统方法对应的 EE 值, 系统能效峰值有近 27% 的提升. 但是, 当小站个数较多时, 系统中的干扰较为严重, 此时, 干扰问题已成为制约系统能效提升的一个主要因素, 这时对发射功率优化与否已经差别不大. 因此, 两条曲线间的差距随着小站个数的增加而减小, 甚至消失. 在这种情况下, 系统能效已经非常小, 并且此时系统的覆盖将不能得到保证.

5 结论

本文针对异构蜂窝网中的小站部署问题, 提出了一种高能效的小站部署方案. 该方案从小站个数和小站发射功率两个角度出发, 联合考虑这两个因素对网络能效的影响, 并在系统覆盖的约束条件下, 建立了以最大化系统能效为目标的优化模型. 为了简化优化复杂度, 利用交替迭代搜索法得到系统能

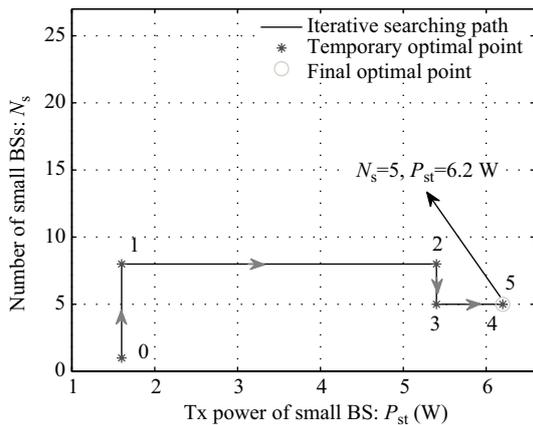


图 3 交替迭代算法搜索路径

Figure 3 Searching path of iterative algorithm

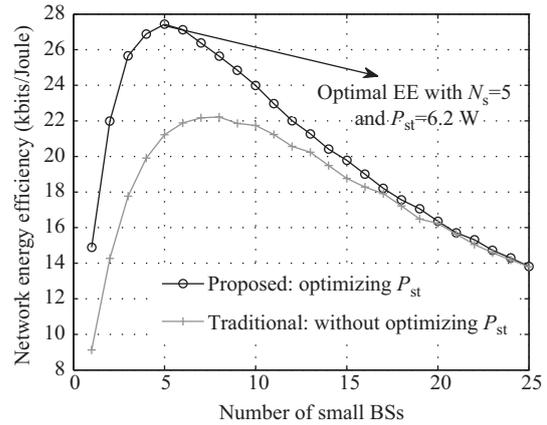


图 4 所提算法和传统算法的比较

Figure 4 Comparison between proposed algorithm and conventional algorithm

效最大时所对应的小站优化部署配置. 仿真结果表明, 所提方案在算法复杂度方面要优于穷举搜索法, 并且相对于仅优化小站个数的传统方案, 本文通过联合优化小站个数及其发射功率获得了大约 27% 的系统能效提升.

参考文献

- 1 Wu G, Yang C Y, Li S Q, et al. Recent advances in energy-efficient networks and their application in 5G systems. *IEEE Wirel Commun*, 2015, 22: 145–151
- 2 Hoadley J, Maveddat P. Enabling small cell deployment with HetNet. *IEEE Wirel Commun*, 2012, 19: 4–5
- 3 Hasan Z, Boostanimehr H, Bhargava V K. Green cellular networks: a survey, some research issues and challenges. *IEEE Commun Surv Tut*, 2011, 13: 524–540
- 4 Vereecken W, van Heddeghem W, Colle D, et al. Overall ICT footprint and green communication technologies. In: *Proceedings of the 4th International symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP)*, Limassol, 2010, 10: 1–6
- 5 Coskun C C, Ayanoglu E. Energy-efficient base station deployment in heterogeneous networks. *IEEE Wirel Commun Lett*, 2014, 3: 593–596
- 6 Quek T Q S, Cheung W C, Kountouris M. Energy efficiency analysis of two-tier heterogeneous networks. In: *11th European Wireless Conference Sustainable Wireless Technologies (European Wireless)*, Vienna, 2011. 1–5
- 7 Yu J, Liu Y, Yin C. Energy-efficient base station deployment in heterogeneous cellular network with QoS constraint. In: *IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops)*, London, 2013. 26–30
- 8 Zhang X, Su Z, Yan Z, et al. Energy-efficiency study for two-tier heterogeneous networks (HetNet) under coverage performance constraints. *Mobile Netw Appl*, 2013, 18: 567–577
- 9 Auer G, Giannini V, Desset C, et al. How much energy is needed to run a wireless network? *IEEE Wirel Commun*, 2011, 18: 40–49
- 10 He G N, Zhang S Q, Chen Y, et al. Energy efficiency and deployment efficiency tradeoff for heterogeneous wireless networks. In: *2012 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, 2012. 3189–3194
- 11 He G N, Zhang S Q, Chen Y, et al. Spectrum efficiency and energy efficiency tradeoff for heterogeneous wireless networks. In: *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, 2013. 2570–2574
- 12 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA). Further advancements for E-UTRA: Physical layer aspects. TR 36.814 v9.0.0.2010. <http://www.3gpp.org/DynaReport/36814.htm>

High-energy efficient deployment scheme of small base stations for heterogeneous network

Jiancun FAN^{1*}, Qi REN¹, Xinmin LUO¹ & Zhikun XU²

¹ School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

² China Mobile Communications Corporation Research Institute, Beijing 100053, China

*E-mail: fanjc0114@gmail.com

Abstract For small-cell deployment in heterogeneous cellular networks, we investigate the impact of the number of small base stations (BSs) and the transmit powers on network energy efficiency and propose a joint optimization deployment scheme. In this scheme, we first consider the constraints of network coverage and then use an iterative scheme to maximize the network EE (energy efficiency). Simulation results show that there exists an optimal number of small BSs and transmit power that can not only maximize network EE but also satisfy the constraints. Further, the proposed scheme is more effective than exhaustive searching with respect to the complexity of the algorithm, and the network EE of our scheme has significant gains compared with the traditional scheme when considering only the optimization for the number of small BSs.

Keywords heterogeneous network, small base station deployment, energy efficiency, coverage, iterative optimization



Jiancun FAN received his B.S. and Ph.D. in Electrical Engineering from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 2004 and 2012, respectively. He is currently a lecturer at the Department of Information and Communications Engineering, Xi'an Jiaotong University. His general research interests include statistical signal processing and wireless communications with emphasis on cross-layer optimization for spectral- and energy-efficient networks, multiple-antenna MIMO communication, and practical issues in LTE systems.



Qi REN received his B.S. and M.S. in Information and Communications Engineering from Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, in 2012 and 2015, respectively. His general research interests include optimization of base station deployment for spectral- and energy-efficient networks, application of stochastic geometry to 5G ultra-dense networks, and practical issues in LTE systems.



Xinmin LUO received his B.S. and M.S. in Information and Communication Engineering from Xidian University, Xi'an, China, in 1984 and 1987, respectively. He is currently a professor and a vice dean of the School of Electronic and Information Engineering at Xi'an Jiaotong University. His research interests include signal processing and resource allocation for broadband wireless communications, cognitive radio, device-to-device communications, and spectral- and energy-efficient network deployment.



Zhikun XU received his B.S.E. and Ph.D. in Signal and Information Processing from Beihang University, Beijing, China, in 2007 and 2013, respectively. In 2013 he joined the Green Communication Research Center (GCRC) of the China Mobile Research Institute as a project manager. His current interests include spectral- and energy-efficient network deployment and operation, cross-layer resource allocation in cellular networks, advanced signal processing, and transmission techniques.