



超蜂窝网络资源动态调度与优化方法

钟祎^{1*}, 张文逸², 郑福春³

1. 华中科技大学电子信息与通信学院, 武汉 430074
2. 中国科学技术大学电子工程与信息科学系, 合肥 230027
3. 哈尔滨工业大学(深圳) 电子与信息工程系, 深圳 518055

* 通信作者. E-mail: yzhong@hust.edu.cn

收稿日期: 2017-02-12; 接受日期: 2017-03-21; 网络出版日期: 2017-05-03
国家重点基础研究发展计划 (973) (批准号: 2012CB316004) 资助项目

摘要 随着无线数据业务爆炸性增长, 无线通信系统日益产生巨大的能耗, 已成为全球能源消耗的主要来源之一. 为降低无线通信系统能耗, 重点探讨超蜂窝架构下, 提高网络能效的资源动态调度与优化方法. 具体包括两方面: 首先建模分析超蜂窝网络分离架构的能效, 同时给出基于能效优化的基站自适应休眠策略; 之后阐述超蜂窝网络时延与能效的折中关系, 并研究能效和时延同时优化的协作策略和资源分配方案.

关键词 超蜂窝网络, 能效, 时延, Poisson 点过程, 随机 DTX

1 引言

无处不在的宽带接入网络和不断增长的无线数据需求使得移动网络也产生了巨大的转变, 从面向语音的服务转向面向数据的服务. 预计到 2020 年, 将会有大约 500 亿终端连入网络, 因此无线网络需要进一步发展以满足这一需求^[1]. 与此同时, 无线业务的爆炸性增长产生了巨大的能源消耗, 已成为全球能源消耗的主要来源之一, 未来预计将进一步增加. 对于减少不可再生资源的消耗, 限制碳排放, 已经产生了越来越多的共识, 需要开发更节能的网络. 此外, 对于无线网络运营商, 降低功耗并不仅仅是保持绿色和负责任的表现, 同时也具有经济意义. 在蜂窝网络中, 基站的能耗占能源消耗总量的比例约为 60%~80%. 近年来, 人们越来越关注减少基站的能耗, 未来的网络将更加面向节能规划和操作.

一般地, 部署宏基站不是为了提高数据速率, 而是为了增强覆盖范围. 因此, 随着现在移动数据量的日益增长, 越来越多的移动数据和话音业务将逐渐从宏基站网络卸载到其他的低功耗小小区网络^[2], 最终形成了异构蜂窝网络. 异构蜂窝网络是在传统的宏蜂窝网络的基础上叠加不同种类的低功率基站或接入点, 例如微基站、家庭基站、WiFi 接入点和中继节点. 异构特性将会成为未来网络的关

引用格式: 钟祎, 张文逸, 郑福春. 超蜂窝网络资源动态调度与优化方法. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 576-590, doi: 10.1360/N112017-00027
Zhong Y, Zhang W Y, Zheng F-C. Dynamic scheduling and optimization of resources in hyper-cellular network (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 576-590, doi: 10.1360/N112017-00027

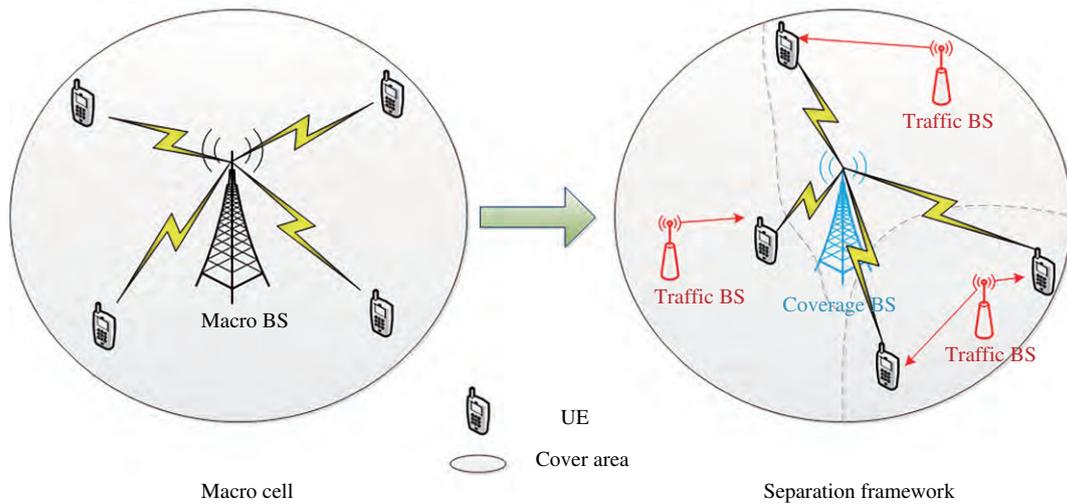


图 1 (网络版彩图) 超蜂窝分离架构网络图

Figure 1 (Color online) Separation architecture in hyper-cellular network

键特性,并将成为一种提高用户吞吐量、增强室内和小区边缘覆盖性能的有力手段.然而,在宏蜂窝的基础上部署大量的小小区基站将不可避免地面临很多技术挑战^[3].基站协作也通常被叫做 CoMP^[4]或网络 MIMO^[5],它是一种管理小区间干扰和提高频谱效率的有效技术.特别地,基于部署的回程体系结构的不同、可容忍的流动性和复杂度以及其他约束,不同的协作策略可能会从协作调度与波束成形延伸到联合传输.尽管现在缺少发展初期的狂热,基站协作仍然具有很大的发展潜力.同时,在异构蜂窝网络中,不同节点需要重新定义其功能,并且需要新的分析工具来进行性能分析和预测.

本文将重点探讨超蜂窝网络架构下,提高能量效率的网络资源动态调度与优化方法.具体而言,将分为两个部分讨论:第 2 节首先建模超蜂窝网络中的分离架构,并分析超蜂窝网络的能效,同时给出基于能效优化的基站自适应休眠策略^[6,7];第 3 节将重点阐述网络中平均时延与能效之间的折中关系,并分析基于能效和平均时延同时优化的基站协作策略和资源分配方案^[8~12].在 3GPP 报告中,视频、语音等延时敏感业务的需求被描述为一个延时界和允许超过延时界的最大概率,即统计延时需求^[13].针对统计延时需求的无线网络资源调度和优化将会为分析带来新的挑战,未来的研究工作将进一步考虑统计延时需求.

2 超蜂窝分离架构

2.1 系统模型

首先研究超蜂窝分离架构网络中的两种基站类型,即控制基站和业务基站.这两类基站在同一个地理区域,控制基站提供可靠覆盖,业务基站处理用户的数据(如图 1 所示).

(1) 传播模型.链路传播模型描述通信系统中基站发送端与用户接收端之间所有链路的增益和衰减.设 P_t 和 P_r 分别表示发送功率和接收功率,单位为 dBm,满足

$$P_r = P_t - L(d) + A_{UE}, \quad (1)$$

其中 $L(d)$ 是与传输距离 d 有关的路径损耗, A_{UE} 表示用户的天线增益,计量单位都为 dB. $L(d)$ 包括路径损耗、阴影衰落 X (单位为 dB)、小尺度衰落 Y (单位为 dB).在 3GPP LTE 系统下,2.0 GHz 载

频和 900 MHz 载频的路径损耗的模型如下:

$$2.0 \text{ GHz} : L(d) = 128.1 + 37.6 \log(d) + X + Y, \quad (2)$$

$$900 \text{ MHz} : L(d) = 120.9 + 37.6 \log(d) + X + Y, \quad (3)$$

其中 d 表示传输距离, X 为服从方差 δ^2 的对数正态分布, Y 服从均值为 μ 的指数分布.

(2) 覆盖需求标准. 考虑基站到用户的链路, 用信干噪比 (SINR) 来评估下行链路的覆盖质量. 覆盖基站需要提供可靠的覆盖, 每个接入小区的用户接收到的信干噪比 SINR 需满足

$$\mathbb{P}\{\text{SINR}(R) \geq \gamma_0\} \geq 0.95, \quad (4)$$

其中 $\gamma_0 = -1.5$ dB, R 为小区半径.

(3) 业务需求标准. 业务基站需保证用户的数据业务需求, 需满足以下限制:

$$\mathbb{P}\left\{\frac{S_{\text{prb}}}{N} W_{\text{prb}} C \geq r_0\right\} \geq 0.95, \quad (5)$$

其中 S_{prb} 表示资源块总数量, N 表示用户数, W_{prb} 表示一个资源块的带宽, C 表示平均频谱效率.

2.2 基于拟合的能耗模型

值得注意的是, 简单地添加业务基站在传统网络中并不能较大地节约能耗. 根据典型基站的特点, 对于宏基站, 即使负载较轻 (仅用于覆盖), 仍然有 130 W 的功耗, 基础能耗很高. 为了节约能耗, 有必要用一些新型基站来取代传统宏基站, 即一类新型基站只负责提供可靠覆盖, 但比宏基站消耗更少能量. 首先分析信号覆盖概率和用户的性能需求, 分析基站所需的射频功率以满足这些需求. 然后基于 EARTH 的能耗模型, 进行线性内插拟合, 得到基站射频输出功率 P_t 和对应的整体能耗 P_{in} 间的关系, 提出一种基于拟合的能耗模型

$$P_{\text{in}} = kP_t + b, \quad (6)$$

其中 P_{in} 和 P_t 的单位都是 dBm, $k = 0.618$, $b = 26.1$ dBm.

2.3 分离架构分析

对于业务基站的数据需求 (5), 需要估计平均频谱效率 C . 假设用户分布在半径为 R 的宏基站里, 并服从参数为 λ 的 Poisson 点过程 (PPP). 假设业务基站服从宏基站覆盖区域内参数为 λ_t 的 Poisson 点过程分布, N_t 为业务基站的个数, 则 $N_t \sim \text{Poi}(\lambda_t \pi R^2)$. 平均频谱效率为

$$C = \frac{\int_0^R \mathbb{E}_{X,Y} [\log_2(1 + \text{SINR}(r))] 2\pi r dr}{\pi R^2}. \quad (7)$$

由于业务基站的覆盖区域为 Voronoi 小区, 设单个 Voronoi 面积为 S , 则其近似概率密度函数为

$$f(s) = \frac{343}{15} \sqrt{\frac{7}{2\pi}} (s\lambda_t)^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{7}{2}s\lambda_t\right) \lambda_t. \quad (8)$$

给定 S 时, 一个业务基站服务的用户数 N_u 是均值为 λS 的 Poisson 随机变量, 其概率生成函数为

$$G(z) = \int_0^\infty \exp(\lambda(z-1)s) f(s) ds = \frac{343}{15} \sqrt{\frac{7}{2}} \left(\frac{7}{2} - \frac{\lambda}{\lambda_t}(z-1)\right)^{-\frac{7}{2}}. \quad (9)$$

N_u 的分布函数可以通过对 $G(z)$ 求导得到

$$\mathbb{P}\{N_u = i\} = \frac{G^{(i)}(0)}{i!}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (10)$$

因此, 可以推导出每个业务基地的每个用户的平均速率为

$$C_u = (\log_2 e)\pi\lambda_t \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left(-\pi v\lambda_t - \frac{\mu e^{\frac{\delta^2}{2}} v^{\frac{\alpha}{2}} P_N (e^t - 1)}{P_{\text{out},t}}\right) \mathcal{L}(v, t) dv dt, \quad (11)$$

其中 $P_{\text{out},t}$ 为业务基地的发射功率, 函数 $\mathcal{L}(v, t)$ 为

$$\mathcal{L}(v, t) = \exp\left(-\pi\lambda_t v (e^{\delta^2} (e^t - 1))^{\frac{2}{\alpha}} \int_{(e^{\delta^2} (e^t - 1))^{-\frac{2}{\alpha}}}^\infty \frac{u^\alpha + (3 - e^{\delta^2}) u^{\frac{\alpha}{2}} + 1}{(1 + u^{\frac{\alpha}{2}})^3} du\right). \quad (12)$$

定义能效 E 为网络总的信道容量与总能耗的比率, 数学描述如下:

$$E = \frac{\mathbb{E}[N_t] S_{\text{prb}} W_{\text{prb}} C_u}{P_{\text{total}}}. \quad (13)$$

2.4 业务基地的自适应休眠

蜂窝网络中业务流量通常是不平衡的, 随时间与空间波动. 例如办公区的数据流量在白天会很大, 而晚上流量则会小很多, 导致业务流量的不平衡. 因此, 根据实际业务流量, 通过开/关基地的方式调整业务基地的密度, 是合理且能提高能效的方法. 这里提出一个关键问题: 业务基地的关闭与业务流量降低之间如何度量. 基于上述考虑, 通过分离架构, 采用覆盖基地与业务基地相结合的方法, 覆盖基地来确保服务范围的覆盖和控制业务基地的开关. 本小节主要讨论业务基地密度的动态变化. 此外, 在第 2.5 小节, 将讨论长时间尺度下的业务基地的部署问题.

系统初始状态下, 用户分布服从参数为 λ_0 的 PPP 分布, 而业务基地分布服从参数为 λ_{t0} 的 PPP 分布. 当用户的密度从 λ_0 变为 λ 时, 为最小化总能耗, 可以通过开关基地来动态调整业务基地密度, 从 λ_{t0} 调整为 λ_t . 调整方式为以 $(1 - \frac{\lambda_t}{\lambda_{t0}})$ 的概率随机关闭基地.

新的业务基地密度参数 λ_t 也要符合业务数据需要满足的要求. 使用系数 q 和 \hat{q} 分别代表用户密度和业务基地密度的变化, 即 $\lambda = q\lambda_0$, $\lambda_t = \hat{q}\lambda_{t0}$. 因此, 当用户密度变化值 q 已知时, 在保证服务质量的情况下, 最小化业务基地密度变化量 \hat{q} 的问题可以写成

$$\min \hat{q} \quad \text{s.t.} \quad \mathbb{P}\left\{\frac{S_{\text{prb}}}{N_u} \cdot W_{\text{prb}} \cdot C_u \geq r_0\right\} \geq 0.95, \quad (14)$$

其中 C_u 在式 (11) 中给出.

使用 $\bar{\lambda}_0$ 和 $\bar{\lambda}$ 分别代表初始状态和目前状态下用户和业务基地的密度之比, 即 $\bar{\lambda}_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_{t0}}$, $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_t} = \frac{q}{\hat{q}}\bar{\lambda}_0$. 因此, 问题简化成

$$\min \hat{q} \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \quad \left(\frac{\frac{7}{2}}{\frac{7}{2} + \bar{\lambda}}\right)^{\frac{7}{2}} \left(1 + \frac{1}{15} \sum_{i=1}^K \frac{(5+2i)!}{i!(i+2)!2^{2i+2}} \left(\frac{\bar{\lambda}}{\bar{\lambda} + \frac{7}{2}}\right)^i\right) \geq 0.95, \quad (15a)$$

其中 $K = [k]$, $\lambda = q\lambda_0$, $\lambda_t = \hat{q}\lambda_{t0}$, $\bar{\lambda}_0 = \frac{\lambda_0}{\lambda_{t0}}$, $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_t} = \frac{q}{\hat{q}}\bar{\lambda}_0$,

$$k = \frac{S_{\text{prb}} \cdot W_{\text{prb}} \cdot C_u}{r_0},$$

$$C_u = (\log_2 e) \pi \lambda_t \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left(-\pi v \lambda_t - \frac{\mu e^{\frac{\delta^2}{2}} v^{\frac{\alpha}{2}} \sigma^2 (e^t - 1)}{P_{\text{out},t}}\right) \mathcal{L}(v, t) dv dt,$$

$$\mathcal{L}(v, t) = \exp\left(-\pi \lambda_t v (e^{\delta^2} (e^t - 1))^{\frac{2}{\alpha}} \int_{(e^{\delta^2} (e^t - 1))^{-\frac{2}{\alpha}}}^\infty \frac{u^\alpha + (3 - e^{\delta^2}) u^{\frac{\alpha}{2}} + 1}{(1 + u^{\frac{\alpha}{2}})^3} du\right).$$

业务基站需满足的标准 (14) 可以通过 $\Psi(\bar{\lambda}, K) \geq 0.95$ 来评估. 定义中间变量 U_K 如下:

$$U_K = \max \{\bar{\lambda} : \Psi(\bar{\lambda}, K) \geq 0.95 | K\}. \quad (16)$$

用函数 $\mathbb{F}(\lambda_t)$ 来代表 k , 可得

$$\mathbb{F}(\lambda_t) = k = \frac{S_{\text{prb}} \cdot W_{\text{prb}} \cdot C_u}{r_0}.$$

于是可以得到下面关于中间变量 U_K 的命题.

命题1 通过线性最小二乘插值, 中间变量 U_K 和用户数 K 之间存在着高度拟合的线性关系 $U_K = 0.48K - 0.33$, 拟合度为 0.997. 通过变量代换 $U_K = 0.48K - 0.33$, 约束式 (15a) 可以被大大简化为

$$\{(\bar{\lambda}, K) : \bar{\lambda} \in (0, 0.48K - 0.33], K = 1, 2, \dots, 23\}.$$

意味着中间变量 U_K 可以通过确定的已知函数来评估, 从而简化了分析, 使求解这个最优化问题更方便. 通过求解, 可得如下定理.

定理1 对于分离架构网络, 当用户的密度从 λ_0 变为 $q\lambda_0$ ($0 \leq q \leq 1$), 为使网络总能耗最小, 应动态休眠业务基站, 业务基站密度动态地从 λ_{t0} 匹配为 $\hat{q}\lambda_{t0}$, 则最优的 \hat{q} 为

$$\hat{q} = \begin{cases} \left(\frac{\bar{\lambda}_0}{U_{K_0}}\right) q, & \frac{U_{K_0}}{\lambda_0} \leq q < 1; \\ \left(\frac{\bar{\lambda}_0}{U_{K_m}}\right) q, & \mathbb{F}^{-1}(K_m) \frac{U_{K_m}}{\lambda_0} \leq q < \mathbb{F}^{-1}(K_{m-1}) \frac{U_{K_m}}{\lambda_0}, \\ & K_m = K_0 - m, m = 1, 2, \dots, K_0, \end{cases} \quad (17)$$

其中 $U_K = 0.48K - 0.33$, K_0 表示满足初始条件 (15a) 下业务基站中的最大用户数.

仿真结果图 2 表明, 业务基站根据用户密度的变化, 渐近线性地进行自适应调节密度.

2.5 最优的业务基站部署

用户数量随时间不断变化, 但从长时间尺度上看, 用户总数还是保持稳定. 因此在蜂窝网的最优网络部署和管理中, 从长时间尺度来看, 符合用户分布的基站部署至关重要. 即总功耗优化解决方案将决定在给定数量用户时业务基站数目和射频输出功率. 本小节专注于讨论长时间尺度下的最优业务基站部署密度问题. 在给定用户分布的情况下, 为最小化总功耗, 应该寻求最优的业务基站密度和最优射频输出功率, 此问题可以写成

$$\min \mathbb{E}[N_t] P_{\text{in},t} \quad (18)$$

$$\text{s.t. } \lambda = \lambda_0, \quad (18a)$$

$$P_{\text{min}} \leq P_{\text{out},t} \leq P_{\text{max}}, \quad (18b)$$

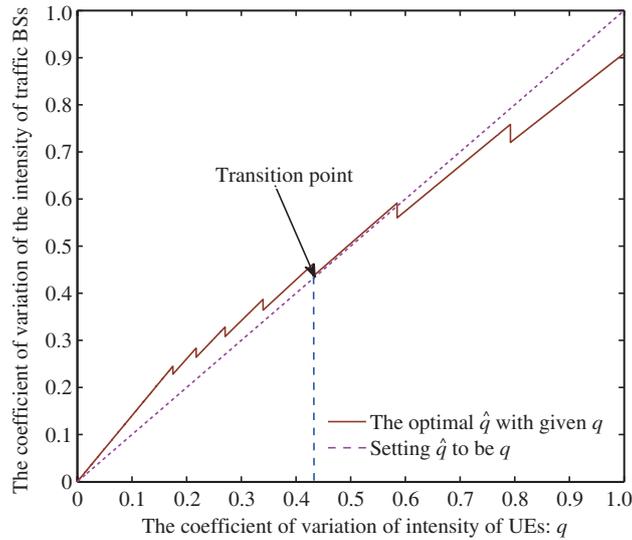


图 2 (网络版彩图) 业务基站的密度 (自适应控制) vs. 用户的密度
 Figure 2 (Color online) Density of traffic BSs (adaptation) vs. user density

$$\mathbb{P} \left\{ \frac{S_{\text{prb}}}{N_u} W_{\text{prb}} \cdot C_u \geq r_0 \right\} \geq 0.95. \tag{18c}$$

根据 2.4 小节的分析, 可得

$$E [N_t] = \pi r^2 \lambda_t, \tag{19}$$

$$P_{\text{in},t} = 0.618 P_{\text{out},t} + 26.1 \text{ (dBm)}. \tag{20}$$

因此, 目标函数可以简化为 $\lambda_t (P_{\text{out},t})^{0.618}$, 可得如下定理.

定理 2 对于分布式架构, 在长时间尺度下, 当用户密度为 λ_0 时, 为最小化总功耗, 基站最优射频输出功率为 $P_{\text{out},t} = P_{\text{min}}$, 此时最优基站密度满足

$$\lambda_t^* = \max \left\{ \frac{\lambda_0}{U_{K^*}}, \mathbb{F}^{-1}(K^*) \right\}, \tag{21}$$

其中 $K^* = \min\{K : \frac{\lambda_0}{U_K} < \mathbb{F}^{-1}(K + 1)\}$, $K = \lfloor k \rfloor$, $U_K = 0.48K - 0.33$.

3 网络局部时延与能效的折中关系

实际通信系统中干扰随着时间动态变化, 如何刻画建模无线网络中干扰随时间动态变化及其对无线网络性能的影响成为首要的问题. 实际通信网络为静态网络 [14], 即基站部署完毕后, 其空间位置就不再变动, 因而基站在所有时间内的位置可以看作是固定的. 虽然基站位置固定, 但位置信息对用户是未知的, 因此用户接收的干扰在不同时隙来自于相同的未知干扰源, 具有时间相关性. 这类干扰相关会导致的现象是如果传输在前一时隙失败, 则此传输有较大的概率在接下来的时隙失败, 最直接的影响是这类相关会增加局部时延. 本节内容重点研究协作机制和基站非连续传输 (DTX) 两种场景下的局部时延和能效, 分析了干扰时间相关性对局部时延的影响、局部时延和能效的折中关系.

局部时延描述的是网络中一个节点成功地向它的目标节点传输一个数据包所需的时隙数, 是无线通信中的一项重要性能指标. 基站协作传输是指地理位置上分离的多个基站协同参与为一个用户传输数据, 常用来提高网络性能. 本文研究 Poisson 网络中, 协作传输对平均局部时延和能效的影响. 利用点过程理论, 分别得到协作和非协作传输下的平均局部时延和能效的解析式, 并发现在特定的网络配置下, 协作传输能降低平均局部时延并提高能效.

另外, 在基站端使用 DTX 模式是一种管理干扰、提高能效的有效技术. 本节研究在局部时延有限的条件下, 使用随机 DTX 策略优化异构网络能效的问题. 局部时延定义为数据包成功传输所需的平均时间. 因此, 对局部时延的分析为整个系统的时延提供了一个下界. 使用随机几何模型, 首先在一般场景中推导了局部时延和能效, 并在某些特殊场景中获得了闭式表达式. 根据这些分析结果, 可以直观地描述关键系统参数——路径损耗因子、基站密度、信干比 (SIR) 门限以及休眠概率等对系统性能的影响. 此外, 分别考虑低速率和高速率渐近区域, 并提供了最大能效的渐近表达式. 最后, 仿真和分析结果均揭示了: 在低速率区域, 使用随机 DTX 策略反而会降低能效; 但在高速率区域, 使用随机 DTX 策略能保证有限局部时延并提高能效.

3.1 系统模型

(1) 协作机制下的系统模型. 建模基站的分布为密度 λ 的 Poisson 点过程 $\Phi = x_i \subset R^2$. 假定给定的用户 (接收机) 位于原点 o , 一个固定的发送机位于 x_0 , 因此, $R = |x_0|$ 即是这一固定基站与用户之间的距离. 在整个分析过程中, 网络的拓扑结构保持不变.

为方便处理, 假定所有基站发送功率均为 P , 且网络中的热噪声可以忽略. 时间被分成等间隔时隙, 每个时隙长度均为 Δt . α 为路径损耗因子, 在 Rayleigh 衰落下, 定义 $h_{x,k} \sim \text{CN}(0, 1)$ 为衰落因子, 其中 CN 为复 Gauss 分布. 进一步地, 假设块衰落模型, 即在每个时隙中, 衰落因子是定值, 但在不同时间隙间, 衰落因子是独立随机变量.

在接收机处, 采用信干比 (SIR) 门限模型, 接收门限为 θ . 只要信干比超过 θ , 基站与接收机之间将以 $\log_2(1 + \theta)$ bit \cdot s $^{-1}$ \cdot Hz $^{-1}$ 的频效来传输. 为标准化处理, 规定数据包正好需要一个时隙完成传输, 则每个数据包传输的数据量是 $W\Delta t \log_2(1 + \theta)$ bit, 其中 W 为传输带宽.

对于协作传输, 令 A 为 Poisson 点过程中位于 x_0 处的基站以及距离接收机最近的 n 个其他基站组成的集合. 注意到, 当 $n = 0$ 时, 不存在任何协作基站, 模型也将退化为非协作传输. 与此同时, 还考虑了基站干扰消除的模型: 即 A 中的基站除了 x_0 以外全部静默下来, 相当于消除了周围部分基站的干扰. 在协作传输中, 假设系统有无限容量的回程链路 (backhaul) 和理想的定时机制 (perfect synchronization). 所有位于协作集合 A 中的基站将协同传输相同信号给接收机, 接收机接收到信号后将直接叠加, 而 A^C 则产生干扰基站的集合, 干扰之间是互相独立的, 因此接收机的干扰以功率叠加的方式来叠加.

在原有信干比的基础上, 可以考虑随机接入机制. 不失一般性, 主要考虑时隙 ALOHA 协议. 在每个时隙, 发送机将以概率 p 发送数据包, 如先前的传输失败, 发送机仍以概率 p 重传数据包. 假设接收机是健忘的 (oblivious), 即接收机的解码仅依赖于当前接收到的信号而不考虑之前的互信息的累积.

在每一个时隙, 集合 A 中的发送机同时以概率 p 发送相同数据包给接收机, 或者同时以概率 $1 - p$ 进入静默状态. 那么时隙 k 中接收机的信干比应该为

$$\text{SIR}_k = \frac{\left| \sum_{x \in A} P^{1/2} |x|^{-\alpha/2} h_{x,k} \right|^2}{\sum_{x \in A^C} P |x|^{-\alpha} |h_{x,k}|^2 I(x \in \Phi_k)}, \quad (22)$$

其中 $\Phi_k \in \Phi$ 为时隙 k 中干扰基站的传输集合, $I(\cdot)$ 为示性函数. 以上模型可以用来描述 ad hoc 网络、无线局域网或微蜂窝网络等.

(2) DTX 机制下的系统模型. 建模异构蜂窝网络为 K 个独立网络层, 为便于表达, 令 $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$. 不同层基站在部署密度 λ_k 、传输功率 p_k 以及路径损耗因子 α_k ($\alpha_k > 2$) 等方面不同. 每层基站的位置建模为独立同构的 Poisson 点过程 (PPP) Φ_k , 同时令 $\Phi = \bigcup_{k \in \mathcal{K}} \Phi_k$ 表示第 K 层异构蜂窝网中全体基站的集合, 所有的基站和用户都假设配置单天线.

不失一般性, 主要考虑位于原点 $o \in \mathbb{R}^2$ 的典型用户下行性能. 对于传播模型, 考虑常用的幂率法则路径损耗模型, 即位于 x 的第 k 层基站发出的信号经历的路径损耗为 $l(x) = \|x\|^{-\alpha_k}$, 其中, $\|x\|$ 表示坐标 x 到原点 o 的欧式距离. 假设功率衰落系数在空间和时间上相互独立, 且服从单位均值的指数分布 (即 Rayleigh 衰落假设). 令 $h_{t,x}$ 为基站 x 与典型用户通信链路在时隙 t 对应的功率衰落系数. 由于异构网中基站密度非常大, 忽略噪声的影响, 仅考虑干扰受限区域.

考虑如下基站与用户关联策略: 每个用户连接到提供最强平均接收信号强度 (RSS) 的基站 (即 $n = 0$). 因此, 服务基站对应的层索引值为

$$k = \operatorname{argmax}_{j \in \mathcal{K}} p_j \|x_{j,0}\|^{-\alpha_j}, \quad (23)$$

其中, 衰落系数已被其平均值取代, $x_{j,0}$ 表示在第 j 层中距离典型用户最近基站的位置.

每层每单位时隙的随机 DTX 策略被建模为一次 Bernoulli 试验, 且可调参数 ζ_k 表示休眠概率. 具体来说, 第 k 层基站在任意时隙处于休眠状态的概率为 ζ_k , 处于活跃状态的概率为 $1 - \zeta_k$, 且上述概率独立于基站位置和具体时隙 (即时间和空间上都具有无记忆性). 令 $\Phi_{k,t}$ 为时隙 t 第 k 层活跃基站数目, 假设典型用户连接到第 k 层基站, 则典型用户在时隙 t 的干扰为

$$I_t = \sum_{j \in \mathcal{K}} \sum_{x_{j,i} \in \Phi_j \setminus \{x_{k,0}\}} p_j h_{t,x_{j,i}} \|x_{j,i}\|^{-\alpha_j} \mathcal{I}(x_{j,i} \in \Phi_{j,t}), \quad (24)$$

其中, $\mathcal{I}(\cdot)$ 是指示函数, $I_{t,x_{j,i}} \triangleq p_j h_{t,x_{j,i}} \|x_{j,i}\|^{-\alpha_j} \mathcal{I}(x_{j,i} \in \Phi_{j,t})$ 表示基站 $x_{j,i}$ 在时隙 t 对典型用户的干扰. 因此, 典型用户在时隙 t 连接到第 k 层基站时的 SIR 为

$$\text{SIR}_{k,t} = \frac{p_k h_{t,x_{k,0}} r_k^{-\alpha_k}}{I_t}, \quad (25)$$

其中, r_k 表示第 k 层连接到的基站与典型用户的距离.

3.2 网络中的局部时延分析

(1) 协作机制下的局部时延. 在本小节中, 考虑平均时延 (mean delay), 定义为 $D(n, p)$, 其中 n 为协作基站的个数, p 为每时隙的发送概率. 用下标 jt 和 sil 来表示协作传输和静默两种情况. $n = 0$ 对应于非协作的情况. 对于协作传输, 能效表达式有额外的乘数因子 $1/(n + 1)$, 因为当有 n 个协作基站协同传输时, 能量消耗将为原先单基站的 $n + 1$ 倍,

$$\eta_{\text{jt}} = \frac{1}{n + 1} \cdot \frac{W \log_2(1 + \theta)}{[D(n, p) - 1][p \cdot P_1 + (1 - p) \cdot P_2] + P_1}. \quad (26)$$

非协作情况下, 每个时隙数据包将以概率 p 被发送, 给定点过程 Φ 时, 传输成功概率为

$$P(C_\Phi) = pP \left\{ P|x_0|^{-\alpha} |h_{x_0,k}|^2 > \theta \sum_{x \in A^c} P|x|^{-\alpha} |h_{x,k}|^2 I(x \in \Phi_k) \mid \Phi \right\}. \quad (27)$$

由于衰落系数 $h_{x,k}$ 为独立同分布的均值为 1 的指数分布随机变量, 因此有

$$P(\mathcal{C}_\Phi) = p \prod_{x \in AC} \left\{ \frac{p}{1 + \theta |x_0|^\alpha |x|^{-\alpha}} + 1 - p \right\}. \quad (28)$$

所以非协作情况下的平均时延为

$$D(n, p) = E \left(\frac{1}{P(\mathcal{C}_\Phi)} \right) = \frac{1}{p} \exp \left(\frac{pB}{(1-p)^{1-\delta}} \right), \quad (29)$$

其中, $B = \lambda\pi R^2 \theta^\delta C(\delta)$, $\delta = 2/\alpha$, $C(\delta) = 1/\sin c(\delta)$.

在协作情况下, 先给出平均时延的表达式:

$$D_{jt}(n, p) = \frac{1}{p} \int_{0 < d_1 < \dots < d_n < \infty} \exp \left\{ 2\pi\lambda \int_{d_n}^{\infty} \frac{p\theta K_n r^{-\alpha}}{1 + (1-p)\theta K_n r^{-\alpha}} r dr \right\} e^{-\lambda\pi d_n^2 (2\pi\lambda) \prod_{i=1}^n (d_1 \cdot d d_1)}, \quad (30)$$

其中 $K_n = (R^{-\alpha} + \sum_{i=1}^n d_i^{-\alpha})^{-1}$. 对于基站干扰消除的情况, $D_{sil}(n, p)$ 的表达式与上式相同, 仅需将 K_n 替换为 $K_0 = R^{-\alpha}$.

(2) DTX 机制下的局部时延. 本小节首先给出异构蜂窝网络中局部时延的一般表达式, 并进一步考虑一些特殊情形下的简化和观察结果. 假设数据包传输在某个时隙失败, 则重传将会在下一时隙进行. 局部时延定义为数据包成功从传输端发送到接收端所需的平均时间 (即时隙数目).

令 $\mathcal{C}_{k|\Phi}$ 表示以距离参数 r_k 和点过程 Φ 为条件的成功事件. 由于成功事件在不同时隙相互独立, 不用对每次成功事件加上时间指标. 将 SIR 门限值设为 θ , 则以 r_k 和 Φ 为条件的成功传输概率可表示为 $\Pr(\mathcal{C}_{k|\Phi}) = (1 - \zeta_k) \Pr(\text{SIR}_{k,t} > \theta | r_k, \Phi)$, 其中, 系数 $1 - \zeta_k$ 的存在是由于基站处于活跃状态 (即发送数据) 的概率为 $1 - \zeta_k$. 因此, 给定 r_k 和 Φ , 成功传输所需的时隙数目 $\Delta_{k|\Phi}$ 是一个均值为 $\Pr(\mathcal{C}_{k|\Phi})^{-1}$ 的几何分布随机变量. 如果典型用户连接到第 k 层基站, 则同时对 r_k 和 Φ 求期望可得到局部时延

$$D_k = E_{r_k, \Phi} (E(\Delta_{k|\Phi})) = E_{r_k, \Phi} \left[\frac{1}{\Pr(\mathcal{C}_{k|\Phi})} \right]. \quad (31)$$

由于典型用户最多只连接到一个网络层, 根据全概率法则, 局部时延为

$$D = \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathcal{A}_k D_k, \quad (32)$$

其中, \mathcal{A}_k 表示典型用户连接到第 k 层的概率. 注意到假设基站一直处于满负载, 所以只要当基站处于活跃状态, 它总是有数据包传输. 因此局部时延仅表示的是局部时延, 而不是排队时延.

下面提供局部时延的一般表达式, 且该表达式反应了每层不同的基站密度 λ_k 、传输功率 p_k 、路径损耗因子 α_k 以及休眠概率 ζ_k 的影响.

定理3 在异构蜂窝网络中, 如果使用随机 DTX 策略, 则局部时延为

$$D = \sum_{k=1}^K \frac{2\pi\lambda_k}{1 - \zeta_k} \int_0^\infty r \exp \left[- \sum_{j=1}^K \pi\lambda_j \left(\frac{p_j}{p_k} \right)^{\frac{2}{\alpha_j}} r^{\frac{2\alpha_k}{\alpha_j}} (1 - (1 - \zeta_j) \mathcal{Z}(\zeta_j, \alpha_j, \theta)) \right] dr, \quad (33)$$

$$\mathcal{Z}(\zeta_j, \alpha_j, \theta) = \int_1^\infty \frac{\theta}{u^{\frac{\alpha_j}{2}} + \theta\zeta_j} du. \quad (34)$$

尽管上述定理没有给出闭式解, 该积分比较容易计算. 对于一些特殊情形, 可以进一步简化表达式, 并且从这些简化的局部时延表达式可以获得很多关键的分析结果.

推论 1 当 $\{\alpha_k\} = \alpha$ 且 $\{\zeta_k\} = \zeta$, 即各层路损因子和休眠概率相同, 则局部时延为

$$D = \frac{1}{1-\zeta} \cdot \frac{1}{1-(1-\zeta)\mathcal{Z}(\zeta, \alpha, \theta)}. \quad (35)$$

局部时延独立于基站传输功率 p_k 和密度 λ_k , 也独立于网络层数 K . 这意味着当随机增加新基站或发射功率时, 局部时延不变. 直观解释如下: 当增加新基站, 用户与服务基站间的距离变短, 从而增加 RSS; 然而, 每个用户将收到更大小区间干扰. 上述场景中, 这两个作用相互抵消, 因此 SIR 统计特性不会因为部署更多基站而改变. 此外, 由于 $\mathcal{Z}(\zeta, \alpha, \theta)$ 是 α 的单调递减函数, 根据式 (35), 局部时延 D 会随路径损耗因子 α 的增加而减小. 从而证实了直观认识: 随着路径损耗因子变大, 每个基站将变得更孤立, 因此, 更大的路径损耗因子将减少小区间干扰并提高 SIR.

3.3 网络的能效分析

(1) 协作机制下的能效. 在确定了平均时延后, 最后一个时隙的数据包是成功发送的, 前 $D(n, p) - 1$ 个时隙内的传输全部失败. 这些失败可分为两类: 一类是基站以概率 $1 - p$ 进行休眠, 另一类是由于 $\text{SIR} < \theta$, 传输失败. 平均来讲, $p[D(n, p) - 1]$ 个时隙是进行了失败的发送, $(1 - p)[D(n, p) - 1]$ 个时隙基站进入了休眠的状态. 因此基站在 $D(n, p)$ 时间内为发送一个数据包而消耗的总能量为

$$E(n, p) = [D(n, p) - 1][pP_1 + (1 - p)P_2]\Delta t + P_1\Delta t, \quad (36)$$

其中 P_1 和 P_2 分别为基站在发送状态和休眠状态下所消耗的功率.

在非协作和静默的情况下, 能效 η 为

$$\eta(n, p) = \frac{W \log_2(1 + \theta)}{[D(n, p) - 1][pP_1 + (1 - p)P_2] + P_1}. \quad (37)$$

(2) DTX 机制下的能效. 本小节将讨论异构蜂窝网络中的能效, 定义为网络吞吐量与平均区域功耗的比值. 首先, 假定使用恒定速率传输方案, 则网络吞吐量定义为单位面积、单位带宽及单位时间上成功传输的数据量, 即

$$\tau = D^{-1} \log(1 + \theta) \sum_{k=1}^K (1 - \zeta_k) \lambda_k, \quad (38)$$

其中, $D^{-1} \log(1 + \theta)$ 表示单位带宽、单位时间以及单条链路上成功传输的数据量, $\sum_{k=1}^K (1 - \zeta_k) \lambda_k$ 表示 K 层异构蜂窝网络中活跃基站的密度.

其次, 采用线性基站功率损耗模型, 即第 k 层中每个基站的功耗可表示为

$$P_{k,\text{in}} = \begin{cases} P_{k0} + \Delta_k p_k, & p_k > 0, \\ P_{k,S}, & p_k = 0, \end{cases} \quad (39)$$

其中, P_{k0} 和 $P_{k,S}$ 表示第 k 层基站分别处于活跃状态和休眠状态时的静态功耗, Δ_k 表示第 k 层功率损耗斜率. 相应地, 平均区域功耗为

$$P_a = \sum_{k=1}^K \lambda_k [(1 - \zeta_k)(P_{k0} + \Delta_k p_k) + \zeta_k P_{k,S}]. \quad (40)$$

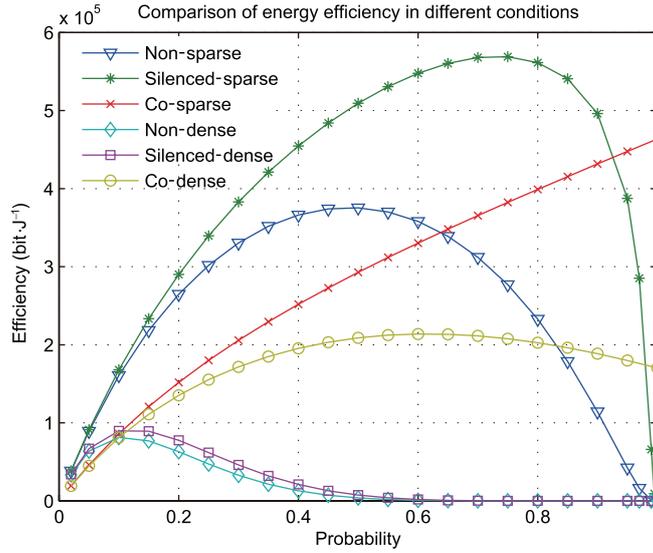


图 3 (网络版彩图) 非协作、干扰消除与协作情况下能量效率比较图

Figure 3 (Color online) Comparison of EE for non-cooperation, interference cancelation and cooperation

因此, 网络吞吐量可为

$$\eta_{EE} = \frac{\tau}{P_a} = \frac{D^{-1} \log(1 + \theta) \sum_{k=1}^K (1 - \zeta_k) \lambda_k}{\sum_{k=1}^K \lambda_k [(1 - \zeta_k) (P_{k0} + \Delta_k p_k) + \zeta_k P_{k,S}]}, \quad (41)$$

其中, 能效单位为 $\text{nats} \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$. 为获得休眠概率对能效的影响, 接下来主要考虑路径损耗和休眠概率相同的特殊场景, 即 $\{\alpha_k\} = \alpha$, $\{\zeta_k\} = \zeta$. 假设 $0 < \zeta < 1$, 即在异构蜂窝网络中使用随机 DTX 策略, 能效表达式为

$$\eta_{EE}(\zeta) = \frac{v_0(1 - \zeta)^2}{v_1 - v_2\zeta} \log(1 + \theta) \left[1 - (1 - \zeta) \left(C(\alpha) \theta^{\frac{2}{\alpha}} \zeta^{\frac{2}{\alpha} - 1} - \frac{1}{\zeta} H_\alpha \left(-\frac{1}{\theta\zeta} \right) \right) \right], \quad (42)$$

其中, $v_0 = \sum_{k=1}^K \lambda_k$, $v_1 = \sum_{k=1}^K \lambda_k (P_{k0} + \Delta_k p_k)$ 且 $v_2 = \sum_{k=1}^K \lambda_k (P_{k0} + \Delta_k p_k - P_{k,S})$.

3.4 仿真及结果分析与优化

(1) 协作机制下的局部时延和能效. 当平均时延公式给出后, 能效就已知了, 如图 3 所示.

性质 1 在非协作传输和基站干扰消除的情况下, $D(0, 1) = D_{\text{sil}}(0, 1) = \infty$, 但是对于基站协作传输的情况, 却有 $D_{\text{jt}}(n, 1) < \infty, n \geq 1$.

性质 2 对于非协作情况下的平均时延, 存在 $p \in (0, 1)$ 使得 $D(0, p)$ 取最小值.

性质 3 对于基站协作传输, 它的平均时延有以下的性质:

(i) $D_{\text{jt}}(n, p)$ 随着 λ 增大而增大, 随 n 的增大而减小.

(ii) 对任意的 $n \geq 1$ 和 $p \in (0, 1]$, 有 $D_{\text{jt}}(n, p) < D_{\text{sil}}(n, p) < D(0, p)$, 且 $D_{\text{jt}}(n, p)$ 总是有限的.

(iii) 存在一个临界距离 R_0 使得: 当 $R < R_0$ 时, $D_{\text{jt}}(n, p)$ 在 $p \in (0, 1]$ 上随 p 单调递减; 当 $R > R_0$ 时, $D_{\text{jt}}(n, p)$ 可以由 $p \in (0, 1]$ 上的一个最优值 p 优化.

(2) DTX 机制下的局部时延和能效. 本小节通过仿真来验证分析, 为了补充之前的分析结果, 在更一般的场景中给出局部时延和能效的性能. 主要考虑一个干扰受限的两层异构蜂窝网络, 包括 macro

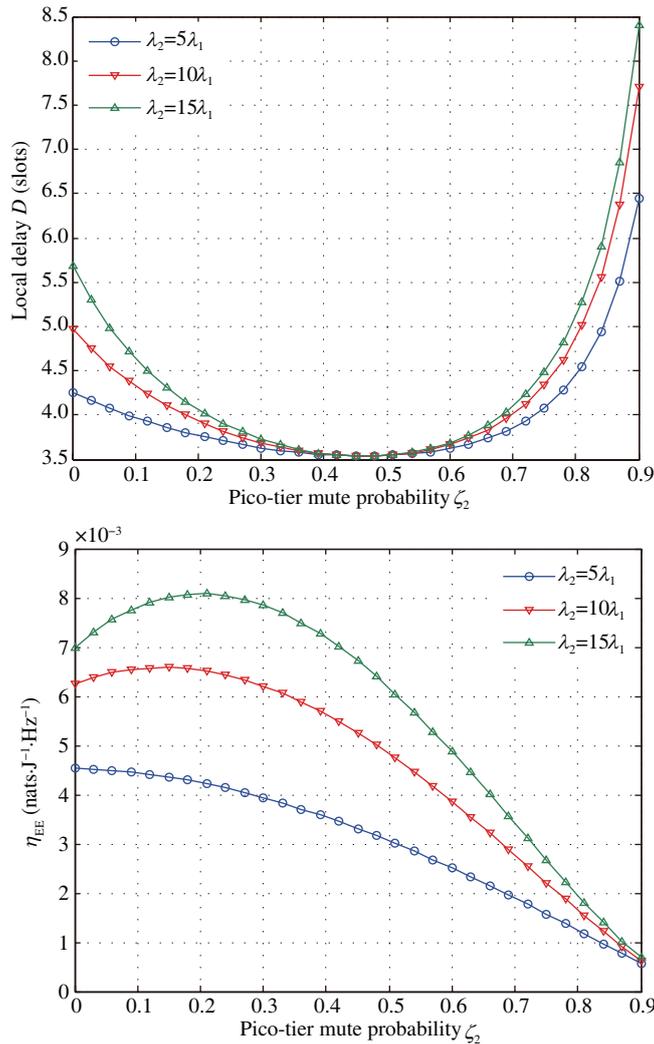


图 4 (网络版彩图) 局部时延和能效与休眠概率和 pico 层基站密度的关系, 其中 $\zeta_1 = 0.5$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 4.0$, $\theta = 0$ dB 且 $\lambda_1 = \frac{1}{\pi 500^2}$
Figure 4 (Color online) Relationship between local delay, EE, sleeping probability and density of BSs where $\zeta_1 = 0.5$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 4.0$, $\theta = 0$ dB and $\lambda_1 = \frac{1}{\pi 500^2}$

基站和 pico 基站. 除非另外说明, 式 (39) 中的功率参数为 $p_1 = 20$, $p_2 = 0.13$, $P_{10} = 130$, $P_{20} = 6.8$, $\Delta_1 = 4.7$ 以及 $\Delta_2 = 4.0$, 其中, $k=1$ 和 $k=2$ 分别表示 macro 基站和 pico 基站. 对于第 k 层处于休眠状态时的休眠静态功耗, 假设 $P_{k,S} = 0.75P_{k0}$, 其中, $k = 1, 2$.

图 4 显示了局部时延和能效作为 pico 基站休眠概率 ζ_2 的函数, 考虑了不同 pico 基站密度 λ_2 的影响. 首先, 对于不同的 pico 基站密度, 存在一个最优的 pico 休眠概率 $\zeta_2^* \approx \zeta_1$ 使局部时延最小. 这表明: 考虑局部时延的性能, 最好使不同层的基站保持相同的休眠概率. 此外, 在不同的 pico 基站密度下, 最优的局部时延保持不变. 这是由于当 $\alpha_1 = \alpha_2$ 且 $\zeta_1 = \zeta_2$ 时, 正如理论分析所示, 系统具有不变特性. 然而, 当 $\zeta_1 \neq \zeta_2$ 时, 观察到局部时延分别随着 pico 基站密度 λ_2 和差值 $|\zeta_2 - \zeta_1|$ 的增加而增加. 这点可以解释如下: 当 $\zeta_2 < \zeta_2^*$ 时, 不同时隙间的干扰相关性将会变大, 而当 $\zeta_2 > \zeta_2^*$ 时, 用户所连接的基站处于活跃状态的概率变小, 这两个情形都会导致更高的局部时延. 随着 pico 基站密度 λ_2 增

加, 上述两种主导作用会变得更加显著, 从而进一步增加局部时延。

观察能效性能, 对于给定的 pico 基站密度 λ_2 , 同样存在一个最优的休眠概率 $\zeta_2^*(\lambda_2)$ 来最大化网络能效, 并且 $\zeta_2^*(\lambda_2)$ 是 λ_2 的单调递增函数. 这显示了与局部时延的巨大不同, 解释如下: 根据式 (41), 该表达式有两个部分会影响网络能效, 即局部时延 D 和单位时隙内的能效 $\eta_{EE,t} \triangleq \eta_{EE}D$. 一方面, 为最小化局部时延 D , 有 $\zeta_2^* = \zeta_1$; 另一方面, 为最大化 $\eta_{EE,t}$, 有 $\zeta_2^* = 0$. 这点很好地解释了为什么最优休眠概率 $\zeta_2^*(\lambda_2)$ 位于区间 $(0, \zeta_1)$. 随着 λ_2 增加, 局部时延 D 会增加, 且局部时延对能效的影响会增强, 为最大化网络能效, 最优休眠概率 $\zeta_2^*(\lambda_2)$ 应增加 (更接近 ζ_1). 基于上述观察, 在实际中要设计合适的 pico 基站休眠概率 ζ_2 时, 应仔细考虑局部时延和能效的折中关系。

4 总结

第 2 节针对超蜂窝网络这一新型网络架构, 提出了网络能效的量化分析方法, 并利用该方法对各种场景下超蜂窝架构与传统蜂窝架构进行能耗的定量对比. 即使没有基站之间协作, 仅利用分离架构代替传统网络就能减少 50% 以上网络能耗. 分离架构有可能成为高效蜂窝网络的理想解决方案. 为实现能效与资源的联合优化, 根据业务的时变特性, 提出了分离架构下最优基站部署和基站随业务波动自适应休眠策略, 并推导了业务波动、用户密度与基站休眠策略的闭式表达. 仿真表明, 业务基站根据用户密度渐近线性地调节休眠概率。

第 3 节重点研究协作机制和基站随机 DTX 两种场景下的局部时延和能效, 分析干扰时间相关性对局部时延的影响以及时延和能效折中关系. 同时考虑随机 DTX 策略, 并推导典型用户的局部时延和能效, 其结果为系统参数选取提供了指导. 推导了最大能效的低速率和高速率渐近表达式, 渐近结果表明: 在低速率区域, 随机 DTX 策略会降低能效, 但在高速率区域, 随机 DTX 策略能保证有限局部时延, 并能提高能效. 除此之外, 小小区异构组网^[15]也可以潜在地进一步提高能效。

参考文献

- Ericsson L. More than 50 billion connected devices. White Paper, 2011. 1–12. http://www.akos-rs.si/files/Telekomunikacije/Digitalna_agenda/Internetni_protokol_Ipv6/More-than-50-billion-connected-devices.pdf
- Quek T Q S, Roche G D L, Gven I, et al. Small Cell Networks: Deployment, PHY Techniques and Resource Management. New York: Cambridge University Press, 2013
- Lopez-Perez D, Guvenc I, de La Roche G, et al. Enhanced intercell interference coordination challenges in heterogeneous networks. IEEE Wirel Commun, 2011, 18: 22–30
- 3GPP. Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects. TR 36.819. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36819.htm>
- Gesbert D, Hanly S, Huang H, et al. Multi-cell MIMO cooperative networks: a new look at interference. IEEE J Sel Area Commun, 2010, 28: 1380–1408
- Wang Z X, Zhang W Y. A separation architecture for achieving energy-efficient cellular networking. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 3113–3123
- Zhong Y, Qiao P C, Zhang W Y, et al. No blind spot: network coverage enhancement through joint cooperation and frequency reuse. J Commun Netw, 2016, 18: 773–783
- Zhong Y, Zhang W Y, Haenggi M. Managing interference correlation through random medium access. IEEE Trans Wirel Commun, 2014, 13: 928–941
- Liu L, Zhong Y, Zhang W Y, et al. On the impact of coordination on local delay and energy efficiency in Poisson networks. IEEE Wirel Commun Lett, 2015, 4: 241–244
- Nie W L, Zheng F C, Wang X M, et al. User-centric cross-tier base station clustering and cooperation in heterogeneous networks: rate improvement and energy saving. IEEE J Sel Area Commun, 2016, 34: 1192–1206

- 11 Nie W L, Zhong Y, Zheng F C, et al. HetNets with random DTX scheme: local delay and energy efficiency. *IEEE Trans Veh Tech*, 2016, 65: 6601–6613
- 12 Nie W L, Wang X M, Zheng F C, et al. Energy-efficient base station cooperation in downlink heterogeneous cellular networks. In: *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Austin, 2014*. 1779–1784
- 13 She C Y, Yang C Y. Energy efficiency and delay in wireless systems: is their relation always a tradeoff? *IEEE Trans Wirel Commun*, 2016, 15: 7215–7228
- 14 Zhong Y, Zhang W Y, Haenggi M. Stability analysis of static Poisson networks. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Information Theory, Hong Kong, 2015*. 2812–2816
- 15 Zhong Y, Zhang W Y. Multi-channel hybrid access femtocells: a stochastic geometric analysis. *IEEE Trans Commun*, 2013, 61: 3016–3026

Dynamic scheduling and optimization of resources in hyper-cellular network

Yi ZHONG^{1*}, Wenyi ZHANG² & Fu-Chun ZHENG³

1. *School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;*

2. *Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;*

3. *Department of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China*

* Corresponding author. E-mail: yzhong@hust.edu.cn

Abstract With the explosive growth of wireless data traffic, the energy consumption of wireless communication systems is increasingly dramatically. This has become one of the main sources of global energy consumption. In order to reduce the energy consumption of wireless communication systems, this paper discusses resource dynamic scheduling and optimization methods in hyper-cellular architecture. Specifically, we model the energy efficiency of separation architecture and propose adaptive sleeping strategies for hyper-cellular network. We then elaborate on the tradeoff between latency and energy efficiency, and simultaneously optimize energy efficiency and delay.

Keywords hyper-cellular network, energy efficiency, delay, Poisson point process, random DTX



Yi ZHONG received his B.S. and Ph.D. degrees in electronic engineering from University of Science and Technology of China (USTC) in 2010 and 2015, respectively. From August to December 2012, he was a visiting student in Prof. Martin Haenggi's group at University of Notre Dame. From July 2015 to December 2016, he was a postdoctoral research fellow with the Singapore University of Technology and Design (SUTD) in the Wireless Networks and Decision Sys-

tems (WNDS) Group, led by Prof. Tony Q.S. Quek. He is currently an assistant professor at the School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China. His main research interests are heterogeneous cellular networks, ad hoc networks, and stochastic geometry.



Fu-Chun ZHENG obtained B.E. (1985) and M.E. (1988) degrees in radio engineering from the Harbin Institute of Technology, China, and a Ph.D. degree in Electrical Engineering from the University of Edinburgh, UK, in 1992. He was with the University of Reading, UK, from September 2007 to July 2016 as a Professor (Chair) of Signal Processing. He has also been a "1000 talents" adjunct professor with Southeast Uni-

versity, China, since 2010. Since August 2016, he has been with the Harbin Institute of Technology (Shenzhen), China and the University of York, UK as a specially appointed professor. His current research interests include signal processing for communications, multiple antenna systems, and green communications.



Wenyi ZHANG received a Bachelor's degree in automation from Tsinghua University, Beijing, China, in 2001, and a Master's and Ph.D. degrees in electrical engineering from the University of Notre Dame, Notre Dame, IN, USA, in 2003 and 2006, respectively. He is currently a member of the faculty at the Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei, China. Previously, he was with the

Communication Science Institute, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA, as a postdoctoral research associate, and with Qualcomm Incorporated, Corporate Research and Development. His research interests include wireless communications and networking, information theory, and statistical signal processing.