

协作异构网络中的用户接入与功率控制联合优化

赵 景 韩圣千

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 本文研究协作异构网络下行传输中的用户接入和功率控制问题。考虑多基站采用协作传输来回避小区间干扰, 在满足用户数据率需求、单基站功率约束、以及给定每个用户最多接入基站个数的限制下, 最小化所有基站的总发射功率。该问题属于包含 0/1 变量和连续变量的组合优化问题, 其全局最优解可以通过遍历搜索得到, 但会导致很高的计算复杂度。为了降低复杂度, 本文提出了一种基于几何规划的用户接入和功率控制联合优化方法。所提出的方法首先将问题中的 0/1 变量表示为连续函数, 进而将得到的优化问题转化为几何规划问题并进行求解。仿真结果表明, 相比于现有的用户接入最近基站方法、用户接入信号最强基站方法、以及偏移接收能量最大方法, 所提出的方法能够有效地平衡网络中各小区负载, 因而可以支持更高的用户数据率需求, 在相同的用户数据率需求下能够大幅降低系统的总发射功率。

关键词: 异构网络; 用户接入; 功率控制; 几何规划

中图分类号: TN914 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)10-1279-08

Joint Optimization of User Access and Power Control in Cooperative Heterogeneous Networks

ZHAO Jing HAN Sheng-qian

(School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper studies joint optimization of user access and power control in downlink cooperative heterogeneous networks. Given coordinated transmission among base stations (BSs) to suppress the inter-cell interference, the user access and power control policies are jointly optimized, aimed at minimizing the total transmit power of all BSs, subject to per-user rate requirement, per-BS power constraint, and the restriction on the maximal number of BSs accessed by each user. This problem is a combinatorial optimization problem involving both 0/1 variables and continuous variables, where exhaustive searching is required to obtain globally optimal solution at the expense of very high computation complexity. To reduce the complexity, an efficient joint optimization method for user access and power control based on geometric programming is proposed, which first approximates the involved 0/1 variables as continuous functions, then transforms the resultant optimization problem into a standard geometric programming problem that can be solved efficiently. Simulation results show that, compared to the existing accessing nearest BS policy, accessing receive-power-maximal BS policy, and accessing biased-receive-power-maximal BS policy, the proposed method can effectively balance the traffic load of cells, and thus can support much higher data rate requirements of users and can also largely reduce the total transmit power under the same users' data rate requirement.

Key words: heterogeneous network; user access; power control; geometric programming

1 引言

异构网络是第五代移动通信系统(5G)的关键技

术之一。通过在宏基站的覆盖范围内部署大量微基站,例如微(micro)基站、毫微(pico)基站、家庭基站(femtocell)等,能够有效地增强对热点地区的覆盖,

收稿日期: 2015-06-02; 修回日期: 2015-08-31

基金项目: 国家 863 计划: 高效能 5G 无线传输关键技术研发(2014AA01A705)

提高整个蜂窝网络的吞吐量^[1-2]。但与此同时,这些微基站的引入也使得异构网络具有比同构网络更加复杂的干扰环境,因此小区间干扰的有效抑制是实现异构网络性能潜力的前提条件^[2]。多基站协作通信是消除小区间干扰的有效途径。根据基站间所共享的信息不同,协作通信可以分为联合传输(Joint transmission, JT)和协作波束赋形(Coordinated beamforming, CB)^[3]。在CB模式下协作基站间只共享用户的信道信息,而在JT模式下协作基站间还可以进一步共享用户的数据信息,因此JT模式的性能通常优于CB模式。在实际应用中,考虑到基站(特别是微基站)的骨干网容量限制,每个用户只能选择有限数量的协作基站进行JT传输。因此,在给定用户数据需求的前提下,确定用户应接入哪些协作基站以及如何通过功率控制来保证用户需求是需要解决的问题。

在同构网络中,用户会选择提供最大接收能量的基站作为其接入基站,但在异构网中由于宏基站的发射功率远大于微基站,这种方式将会使很多用户选择接入宏基站,导致宏基站业务负载过重。为此,文献[1]提出了基于最大偏移接收能量的异构网接入方式,只有当宏基站信号能量比微基站信号能量高过某个预设的门限值时,用户才接入宏基站,以此来增加用户接入微基站的机会,达到微基站分流宏基站业务的效果。这种接入方法实现简单,但通常情况下并不能获得最优的网络性能。文献[4]研究了同构网络中上行链路中最优的用户接入方式,文献[5]在此基础上进一步引入了用户最大发射功率约束,文献[6]将文献[4]中的上行接入方法扩展到同构网络下行链路,但并未考虑基站的发射功率约束。近年来随着异构网络的出现,同时考虑到异构网络与同构网络在网络拓扑、基站类型等方面的差异,用户接入问题得到了广泛的关注。文献[7]以最大化系统和数据率为准则,研究了用户接入、资源分配和功率控制的联合优化,文献[8]以多用户的最低数据率最大化为准则,研究了用户接入和功率控制的联合优化,文献[9]研究了JT协作传输模式下的用户接入和协作预编码联合优化,其中没有约束每个用户的接入基站数目;当限定用户只能接入一个基站时,文献[10]以最大化系统和数据率为准则,对用户接入和发射预编码进行了联合优化。

本文研究协作异构网络中用户接入和功率控制的联合优化问题。与现有工作[4-10]不同,本文以系统总发射功率最小化为设计准则,并考虑每个用户可以接入任意给定数目的协作基站。同时,与传统的不考虑用户数据率需求的基站功率控制不同,本文研究在满足每个用户数据率需求前提下的按需服务策略,因此能够更有效的节省系统的发射功耗。本文所研究的问题属于包含0/1变量和连续变量的组合优化问题,其全局最优解需要通过遍历搜索得到,具有很高的计算复杂度。为了降低复杂度,本文提出了一种基于几何规划的用户接入和功率控制联合优化方法。所提出的方法首先将问题中的0/1变量表示为连续函数,进而将得到的优化问题转化为几何规划问题并进行求解。仿真结果表明,相比于现有的用户接入最近基站方法、用户接入信号最强基站方法、以及偏移接收能量最大方法,本文所提出的方法能够有效地平衡网络中各小区负载,因此可以支持更高的用户数据率需求,并且在相同的用户数据率需求下能够大幅降低系统的总发射功率。

2 系统模型

考虑图1所示异构网络模型。在宏基站的覆盖范围内随机部署 B 个微基站,共同服务 K 个用户。假设宏基站有 N_M 个天线,最大发射功率为 P_M ,微基站有 N_S 个天线,最大发射功率为 P_S ,用户端只有一个天线。这里,我们考虑宏基站和微基站具有不同的最大发射功率和天线资源配置。在实际系统中,通常宏基站比微基站具有更大的发射功率和更多的天线资源,而微基站的部署密度更高,可以缩短与用户之间的距离,从而减小信号的路径损耗。可见,宏、微基站在用户服务能力方面具有不同的优势。

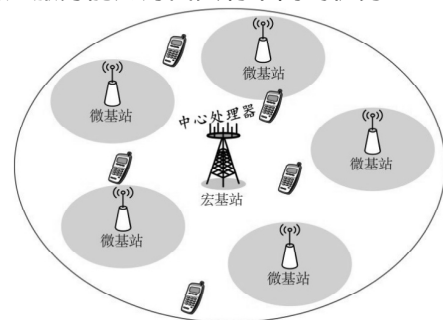


图1 异构网络模型

Fig. 1 Heterogeneous network model

我们考虑宏、微基站采用空间预编码的方式来抑制基站间的相互干扰。设宏基站到用户 k 的信道向量为 $\mathbf{h}_{k0} \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$, 微基站 b 到用户 k 的信道向量为 $\mathbf{h}_{kb} \in \mathbb{C}^{N_S \times 1}$, 则所有基站到用户 k 的信道向量可以表示为 $\mathbf{h}_k = [\mathbf{h}_{k0}^T \ \mathbf{h}_{k1}^T \ \dots \ \mathbf{h}_{kB}^T]^T \in \mathbb{C}^{(N_M+BN_S) \times 1}$, 宏基站到用户 k 的预编码向量表示为 $\mathbf{w}_{k0} \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$, 微基站 b 到用户 k 的预编码向量表示为 $\mathbf{w}_{kb} \in \mathbb{C}^{N_S \times 1}$, 则所有基站到用户 k 的预编码向量可以表示为 $\mathbf{w}_k = [\mathbf{w}_{k0}^T \ \mathbf{w}_{k1}^T \ \dots \ \mathbf{w}_{kB}^T]^T \in \mathbb{C}^{(N_M+BN_S) \times 1}$. 预编码 \mathbf{w}_{kb} 可以进一步表示为 $\mathbf{w}_{kb} = \sqrt{p_{kb}} \mathbf{v}_{kb}$, 其中 p_{kb} 为基站 b 分配给用户 k 的发射功率, \mathbf{v}_{kb} 为归一化的发射预编码向量。假设每个基站可以获得它到所有用户之间的信道信息, 并采用基于信漏噪比最大化准则的发射预编码^[11], 则基站 b 可以根据已知的信道信息得到 \mathbf{v}_{kb} 为:

$$\mathbf{v}_{kb} = \frac{\left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{h}_{ib} \mathbf{h}_{ib}^H + \sigma_k^2 \right)^{-1} \mathbf{h}_{kb}}{\left\| \left(\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{h}_{ib} \mathbf{h}_{ib}^H + \sigma_k^2 \right)^{-1} \mathbf{h}_{kb} \right\|} \quad (1)$$

基于上述模型, 我们采用功率控制变量 p_{kb} 来表示用户到基站的接入情况。当用户 k 未接入微基站 b 时, 则有 $p_{kb}=0$; 否则 $p_{kb}>0$ 。因此, 我们可以定义用户 k 的接入基站集合为 $S_k = \{b \mid p_{kb}>0 \ b=0, \dots, B\}$ 。

用户 k 的接收信号可以表示为:

$$y_k = \mathbf{h}_k^H (\mathbf{w}_1 x_1 + \dots + \mathbf{w}_K x_K) + n_k = \underbrace{\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k x_k}_{\text{期望信息}} + \underbrace{\mathbf{h}_k^H \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{w}_i x_i}_{\text{干扰信息}} + \underbrace{n_k}_{\text{噪声}} \quad (2)$$

其中, x_k 是用户 k 的数据符号, 其平均能量为 1, n_k 是用户 k 的加性白高斯噪声, 均值为零, 方差为 σ_k^2 。需要说明的是, 本文研究单个宏小区内宏基站和多个微基站的功率控制和用户接入问题, 考虑了宏小区内多个基站间的干扰协调, 而将来自小区外的宏基站和微基站的干扰建模为白高斯噪声(从信息论的角度看这是最差的干扰情况)。因此, 公式(2)中的噪声包括用户端的热噪声和宏小区外干扰。在之后的仿真中, 我们将考虑不同的噪声方差来评估不同程度的小区间干扰对所提出的方法性能的影响。

假设在宏小区内所有微基站通过回传链路与宏基站相连接, 用于共享协作传输所需要的信息。考虑多个基站采用非协作 JT 传输技术服务多用户^[12], 则

用户 k 的接收信干噪比可以表示为:

$$\text{SINR}_k = \frac{\sum_{b=0}^B |\mathbf{h}_{kb}^H \mathbf{w}_{kb}|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{b=0}^B |\mathbf{h}_{kb}^H \mathbf{w}_{ib}|^2 + \sigma_k^2} \triangleq \frac{\sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} P_{kb}}{\sum_{i=1, i \neq k}^K \sum_{b=0}^B \alpha_{kib} P_{ib} + \sigma_k^2} \quad (3)$$

其中 $\alpha_{kbb} = |\mathbf{h}_{kb}^H \mathbf{v}_{kb}|^2$ 和 $\alpha_{kib} = |\mathbf{h}_{kb}^H \mathbf{v}_{ib}|^2$ 分别表示用户 k 收到来自基站 b 的期望信号等效信道能量和由基站 b 发送给用户 i 的干扰信号等效信道能量。

由于 α_{kbb} 和 α_{kib} 只与基站 b 端的信道信息 \mathbf{h}_{kb} 和预编码 \mathbf{v}_{kb} , \mathbf{v}_{ib} 有关, 因此基站 b 可以独立的计算等效信道能量 α_{kbb} 和 α_{kib} , $k=1, \dots, K$, 进而将得到的 α_{kbb} 和 α_{kib} 通过回传链路共享给宏基站。宏基站在获得所有等效信道能量信息之后, 对小区内所有基站的功率控制和所有用户的接入方式进行联合优化, 最后将优化结果通过回传链路通知每个微基站, 用于下行数据传输。

在宏基站端, 我们可以将以最小化系统总发射功率为准则的用户接入和功率控制联合优化问题建模为:

$$\min_{p_{kb}} \sum_{b=0}^B \sum_{k=1}^K p_{kb} \quad \text{s.t.} \quad \text{SINR}_k \geq \gamma_k, \ k=1, \dots, K \quad (4.1)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{k0} \leq P_M \quad (4.2)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{kb} \leq P_S, \ b=1, \dots, B \quad (4.3)$$

$$|S_k| \leq L_k, \ k=1, \dots, K \quad (4.4)$$

其中, (4.1) 是用户 k 的最小信干噪比约束, 表示用户 k 的最低数据率需求, γ_k 是用户 k 要求的最小信干噪比, (4.2) 和(4.3) 分别表示宏基站和微基站的总发射功率约束, (4.4) 限制用户 k 最多只能接入 L_k 个协作基站。这里, $|S_k|$ 表示集合 S_k 中的元素个数。

如果忽略约束(4.4), 则问题(4)可以转换为一个线性规划问题, 易于求解。但是当考虑约束(4.4)时, 根据 S_k 的定义, 不难发现该问题是一个包含 0/1 变量和连续变量的组合优化问题。为了找到最优解, 需要遍历搜索所有可能的用户接入情况, 其搜索空间为 $\prod_{k=1}^K \sum_{m=1}^{L_k} \binom{m}{B+1}$, 导致很高的计算复杂度。下面我们将提出一种低复杂度的求解算法。

3 用户接入和功率控制联合优化算法

我们首先解决(4.4)中包含的0/1变量问题。该问题来自于接入基站集合 S_k 的定义, $|S_k|$ 的大小取决于 S_k 中的非零元素个数。我们采用如下方式来近似 $|S_k|$:

定义函数 $f(p_{kb}) = \frac{p_{kb}}{p_{kb} + t}$, 其中 $t \rightarrow 0$ 是一个极小值。不难看出, 当 $p_{kb} = 0$ 时, $f(p_{kb}) = 0$; 而当 $p_{kb} > 0$ 时, $f(p_{kb}) \rightarrow 1$ 。因此, 我们可以利用函数 $f(p_{kb})$ 对离散约束(4.4)进行连续化表示, 即:

$$|S_k| = \sum_{b=0}^B \frac{p_{kb}}{p_{kb} + t} \leq L_k, \quad k = 1, \dots, K$$

进而, 我们可以将问题(4)重新表示为:

$$\begin{aligned} \min_{p_{kb}} \quad & \sum_{b=0}^B \sum_{k=1}^K p_{kb} \\ \text{s.t.} \quad & \frac{\gamma_k \sum_{i=1}^K \sum_{j \neq k} \sum_{b=0}^B \alpha_{kib} p_{ib} + \sigma_k^2}{\sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} p_{kb}} \leq 1, \quad k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{k0} \leq P_M \quad (6.2)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{kb} \leq P_S, \quad b = 1, \dots, B \quad (6.3)$$

$$\sum_{b=0}^B \frac{p_{kb}}{p_{kb} + t} \leq L_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (6.4)$$

问题(6)是只包含连续变量的优化问题, 但由于(6.4)是非凸约束, 因此该问题仍不是凸问题。下面我们将问题(6)近似为一个几何规划问题。根据几何规划的定义, 我们需要将约束(6.1)和(6.4)中不等式左侧的分母部分由现在的多项式转变为关于变量 p_{kb} 单项式。

根据文献[13], 一个可微正函数 $g(x_1, \dots, x_n)$ 在 $\bar{x} = [\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n]$ 处的单项式近似可以表示为:

$$g(x_1, \dots, x_n) \approx g(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) \prod_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\bar{x}_i} \right)^{a_i} \quad (7)$$

其中 $a_i = \frac{\bar{x}_i}{g(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n)} \frac{\partial g}{\partial x_i}$, 该近似在 $x_i = \bar{x}_i, i = 1, \dots, n$ 处取得等号。

由此, 我们可以对约束(6.1)中的分母项 $\sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} p_{kb}$ 进行迭代近似。设 $p_{kb}^{(l)}$ 表示第 l 次迭代

得到的功率值, 则 $\sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} p_{kb}$ 在 $\{p_{kb}^{(l)}\}$ 处的近似可以表示为:

$$\begin{aligned} \sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} p_{kb} & \approx \left(\sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} p_{kb}^{(l)} \right) \prod_{b=0}^B \left(\frac{p_{kb}}{p_{kb}^{(l)}} \right)^{a_{kb}} \\ a_{kb} & = \frac{\alpha_{kbb} p_{kb}^{(l)}}{\sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} p_{kb}^{(l)}} \end{aligned} \quad (8)$$

类似的, 我们将约束(6.4)中的分母项 $p_{kb} + t$ 迭代近似为:

$$p_{kb} + t \approx (p_{kb}^{(l)} + t) \left(\frac{p_{kb}}{p_{kb}^{(l)}} \right)^{c_{kb}}, \quad c_{kb} = \frac{p_{kb}^{(l)}}{p_{kb}^{(l)} + t} \quad (9)$$

将(8)和(9)代入约束(6.1)和(6.4), 则问题(6)转变为标准的几何规划问题。但是, 由于近似的引入, 可能会导致在相同数据率需求下原问题可解而近似问题不可解, 从而减小系统所支持的用户数据率需求范围。为了解决这个问题, 我们引入一组松弛变量 $\beta_k, k = 1, \dots, K$, 将得到的几何规划问题进一步松弛为:

$$\begin{aligned} \min_{p_{kb}} \quad & \sum_{b=0}^B \sum_{k=1}^K p_{kb} + 1 \sum_{k=1}^K \beta_k \\ \text{s.t.} \quad & \frac{\gamma_k \sum_{i=1}^K \sum_{j \neq k} \sum_{b=0}^B \alpha_{kib} p_{ib} + \sigma_k^2}{\left(\sum_{b=0}^B \alpha_{kbb} p_{kb}^{(l)} \right) \prod_{b=0}^B \left(\frac{p_{kb}}{p_{kb}^{(l)}} \right)^{a_{kb}}} \leq 1, \quad k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (10.1)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{k0} \leq P_M \quad (10.2)$$

$$\sum_{k=1}^K p_{kb} \leq P_S, \quad b = 1, \dots, B \quad (10.3)$$

$$\sum_{b=0}^B \frac{p_{kb}}{(p_{kb}^{(l)} + t) \left(\frac{p_{kb}}{p_{kb}^{(l)}} \right)^{c_{kb}}} \leq \beta_k L_k, \quad k = 1, \dots, K \quad (10.4)$$

$$\beta_k \geq 1, \quad k = 1, \dots, K \quad (10.5)$$

其中, 约束(10.1)和(10.4)中不等式左侧的分母部分来自(8)和(9), 我们将每个用户可接入的基站个数由 L_k 个松弛为 $\beta_k L_k$ 个 $\beta_k \geq 1$ 如(10.5)所示。同时我们在目标函数里增加一项 $1 \sum_{k=1}^K \beta_k$, 其中1是一个很大的常数。因此, 如果给定的用户数据率需求对于问题(10)是可行的, 那么为了最小化目标函

数 在迭代算法收敛时所有的 β_k 一定会取到最小值, 即 $\beta_k = 1$, 从而保证所引入的松弛不改变原先的用户接入基站的最大数目限制。而当 β_k 的最优解大于 1 时, 则表示为了满足用户的数据率需求, 用户需要接入大于 L_k 个基站, 因此该数据率不能满足。需要说明的是, 由于原问题(4) 属于非凸问题, 除了遍历搜索方法, 包括本文所提出的方法在内的所有次优方法都难以保证收敛到全局最优点, 因此当本

文所提出的方法收敛到局部最优点时, 可能会导致在原问题(4) 中可达的数据率需求被认为是无法达到, 这是所提出的方法在降低计算复杂度的同时付出的性能损失代价。但从随后的仿真结果中可以看出, 相对于现有的功率控制和用户接入方法, 所提出的方法能够支持更高的数据率, 并消耗更低的功率。

综上所述, 所提出的算法步骤总结如下。

表 1 用户接入和功率控制联合优化算法

Tab. 1 Joint optimization algorithm for user access and power control

1. 初始化: 设定功率控制初始值, 令 $p_{kb}^{(0)} = \frac{P_M}{K}$, $p_{kb}^{(0)} = \frac{P_S}{K}$, $b \geq 1$, 设 $l = 0$ 。
2. 迭代:
a) 求解几何规划问题(10), 得到 $\{p_{kb}, \beta_k\}$;
b) 更新 $l \leftarrow l + 1$, $p_{kb}^{(l)} \leftarrow p_{kb}$, $k = 1, \dots, K$, $b = 0, \dots, B$
c) 如果 $\sum_{b=0}^B \sum_{k=1}^K p_{kb}^{(l)} - p_{kb}^{(l-1)} < \delta$, 则迭代停止, 其中 δ 是预设的迭代收敛门限值。若 $\beta_k = 1$, $k = 1, \dots, K$, 则给定的用户数据速率可行, 输出用户接入结果 S_k ; 否则, 该数据速率不可行。
3. 更新功率控制: 根据步骤 2 的结果, 如果用户的数据率需求可行, 则将问题(4) 中的约束(4.4) 更换为 $p_{kb} = 0$, $\forall b \notin S_k$, $k = 1, \dots, K$, 然后求解所得到的线性规划问题来最小化系统总发射功率, 从而消除几何规划中引入的近似对功率控制和用户数据率需求约束的影响, 最终得到各基站的功率控制结果。

如前所述, 求解原问题(4) 的最优解需要遍历 $\prod_{k=1}^K \sum_{m=1}^{L_k} \binom{m}{B+1}$ 种可能的用户接入情况, 其搜索空间随用户数呈指数增长。所提出的方法将原问题转化为一个凸优化问题, 可以在多项式时间内求解, 因此可以带来计算复杂度的大幅降低。由于对几何规划问题求解复杂度的理论分析比较困难, 我们将在仿真中采用平均处理时间来评估其复杂度。

4 仿真结果

本节对所提出的用户接入和功率控制联合优化算法进行性能评估。我们考虑宏基站的覆盖范围为 250 米, 发射功率为 40 瓦, 配有 8 根天线, 宏小区内放置 6 个微基站, 每个微基站的发射功率为 1 瓦, 配有 2 根天线, 8 个用户在宏小区内随机散布, 每个用户配有 1 根天线^[14]。宏基站的路径损耗模型为 $35.3 + 37.6 \log_{10}(d)$, 微基站的路径损耗模型为 $30.1 + 36.7 \log_{10}(d)$, 其中距离 d 的单位为米^[14]。我们采用不同的宏小区边缘信噪比 SNR_{edge} 来表示不同程度的小区间干扰, 其中 SNR_{edge} 定义为宏基站以

最大功率同时用单天线传输时位于宏小区边缘的用户的平均接收信噪比。当给定 SNR_{edge} 时, 白高斯噪声的方差可以计算为 $46 \text{ dBm} - 35.3 - 37.6 \log_{10}(250) - \text{SNR}_{\text{edge}}$, 其中 46 dBm 为宏基站的发射功率。根据文献[14]给出的 LTE 系统的典型参数, 我们可以计算得到不考虑宏小区外干扰时, 宏小区边缘信噪比 SNR_{edge} 约为 15 dB。当进一步将宏小区外干扰建模为白高斯噪声时, SNR_{edge} 将减小, 其取值依赖于宏小区间的干扰协调方法, 例如部分频率复用等。在仿真中, 我们分别考虑 SNR_{edge} 为 0 dB 和 10 dB 的情况。此外, 基站到用户的小尺度信道建模为统计独立同分布的瑞利衰落信道, 所有用户具有相同的数据率需求, 在表 1 给出的算法中参数 δ 的取值为前一次迭代下所有基站总功率的 1%, 参数 l 的取值为 1000。

除了所提出的的方法, 我们还仿真了三种现有方法用于性能比较, 分别是:

1) 接入距离最近基站方法: 用户 k 接入 L_k 个距离最近的基站。对于多用户情况, 采用串行选择的方法, 每次让具有最近距离的用户优先选择接入一

个基站,其中每个基站接入的用户数最多不超过其天线数。

2) 接入信号最强基站方法: 用户 k 接入 L_k 个信号最强的基站。对于多用户情况,采用串行选择的方法,每次让具有最强接收信号的用户优先选择接入一个基站,其中每个基站接入的用户数最多不超过其天线数。

3) 偏移接收能量最大方法: 将来自宏基站的接收能量减小 6 dB,然后采用上述接入信号最强基站方法确定用户接入情况。

当给定用户接入 S_k 后,将问题(4)中的约束(4.4) 更换为 $p_{kb}=0, \forall b \notin S_k, k=1, \dots, K$,然后求解所得到的线性规划问题来最小化系统总发射功率。

首先,我们分析所仿真的四种方法对用户接入的影响。图2是在一个信道实现下得到的四种方法下的用户接入情况,其中红色方块为宏基站,绿色方块为微基站,蓝色圆点为用户,直线表示接入关系。

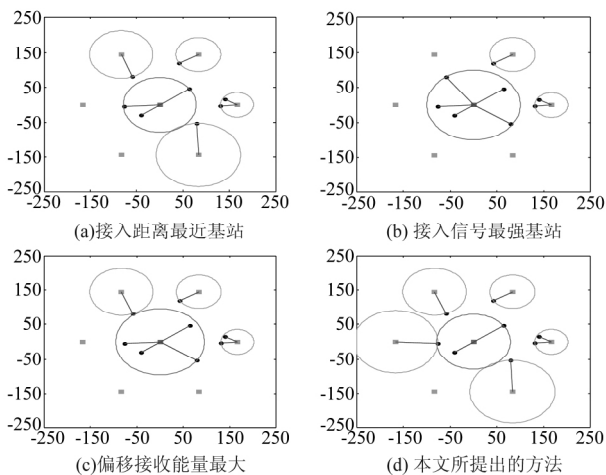


图2 四种方法下的用户接入示意图

Fig. 2 Illustration of user accessing results of the four methods

从图2中可以看出,接入信号最强基站方法(图2(b))会导致宏基站接入用户过多,负载过重,采用偏移接收能量最大方法(图2(c))能够在一定程度上降低宏基站的负载,而接入距离最近基站方法(图2(a))能够进一步减少宏基站服务的用户数。与这三种方法相比,本文所提出的方法(图2(d))能够充分利用微基站来分流宏基站的业务,例如宏基站只服务2个用户,其余6个用户由5个微基站服务,达到了网络负载均衡的效果。

其次,我们比较了四种方法的总发射功率与可

达数据率。在图3中,限定每个用户只能接入一个基站,其中小区边缘信噪比为 0 dB。从图中可以看出,在达到相同的数据率需求时,接入信号最强基站方法消耗的发射功率最大。由图2的分析可知,此时大量用户会选择接入宏基站,导致宏基站负载过重而微基站并未被充分利用。接入距离最近基站方法能够大幅降低发射功率,但是由于微基站的服务能力受限(即功率和天线资源均受限),因此只能支持较低的数据率需求。偏移接收能量最大方法能够一定程度上平衡各小区的负载,因此可以支持较高的数据率需求,且所需的发射功率小于接入信号最强基站方法。与这三种方法相比,本文所提出的方法所需的系统总发射功率最低,性能增益明显,并且能够支持更高的用户数据率需求。这是因为现有的三种用户接入方式只考虑了用户与基站间的距离、接收信号强度等单一因素,而本文所提出的方法则综合考虑了用户数据率需求、基站最大功率限制和空间服务能力,因此可以获得更优的用户接入和功率控制方案。

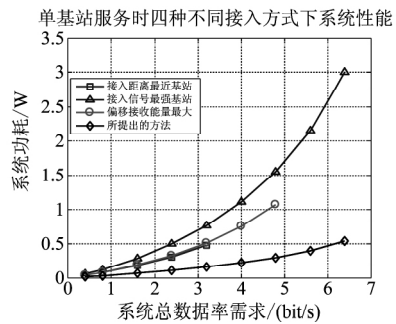


图3 单基站服务下四种接入方法的性能 $SNR_{edge} = 0$ dB

Fig. 3 Performance comparison of four user access methods, where each user can access only one BS and $SNR_{edge} = 0$ dB

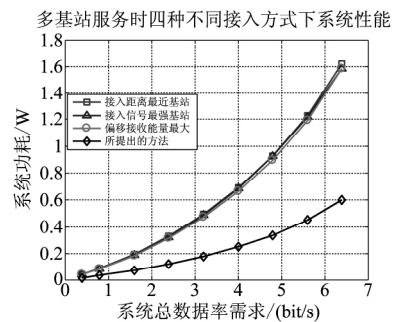


图4 最多接入2个基站时四种接入方法的性能 $SNR_{edge} = 0$ dB

Fig. 4 Performance comparison of four user access methods, where each user can access two BSs and $SNR_{edge} = 0$ dB

在图 4 中, 每个用户最多可以接入 2 个基站, 小区边缘信噪比为 0 dB。此时, 由于每个用户可以选择两个基站作为服务基站, 现有的三种方法所选出的服务基站集合基本相同, 因此其性能相近。相比之下, 在给定相同的数据率需求时, 本文所提出的方法仍能够大幅降低系统的总发射功率。当和数据率需求为 6.4 bps/Hz 时, 本文所提出的方法可以节省将近 63% 的发射功耗。

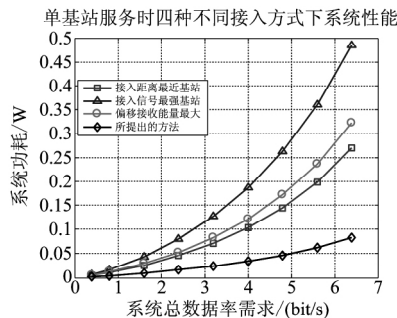


图 5 单基站服务下四种接入方法的性能, $SNR_{edge} = 10$ dB
 Fig. 5 Performance comparison of four user access methods, where each user can access only one BS and $SNR_{edge} = 10$ dB

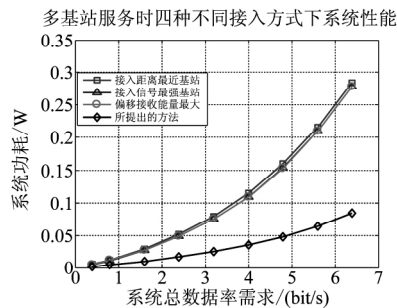


图 6 最多接入 2 个基站时四种接入方法的性能, $SNR_{edge} = 10$ dB
 Fig. 6 Performance comparison of four user access methods, where each user can access two BSs and $SNR_{edge} = 10$ dB

图 5 和图 6 给出了宏小区边缘信噪比为 10 dB 时的性能比较。比较图 3 和图 5 可以看出, 随着宏小区边缘信噪比的增加, 四种接入方式都可以支持较高的数据率需求, 但四种方法功率消耗的相对大小关系仍保持不变, 相对于三种现有方法, 本文提出的方法具有更低的功率消耗。当每个用户可以被两个基站服务, 边缘信噪比 $SNR_{edge} = 10$ dB 时, 如图 6 所示, 本文提出的方法同样可以大大节省系统发射功耗, 例如当和数据率需求为 6.4 bps/Hz 时, 本文所提出的方法可以节省将近 70% 的发射功耗。

最后, 我们比较本文所提出的方法和遍历搜索方法的复杂度。我们采用两种算法平均处理时间作为复杂度评估指标, 以每个用户可以被 2 个基站服务、和数据率需求为 0.4 bps/Hz 为例, 将两种算法在 Intel Core™ i5-3470@3.3 GHz 8 GB-RAM 个人计算机的 Matlab 环境下运行, 并采用 Matlab 配置的 tic/toc 命令统计两种算法的处理时间, 其中本文所提出的方法中的几何规划问题和遍历搜索中涉及的线性规划问题均采用通用凸优化工具箱 CVX 进行求解^[15]。由于此时原问题的遍历搜索空间过大, 约为 3.8×10^{11} , 在仿真中我们只随机选取 100 种可能的用户接入情况, 统计得到单次接入情况下的平均处理时间, 然后乘以总搜索空间得到遍历搜索算法的平均处理时间。结果表明, 本文所提出的算法平均用时 29.95 s, 而遍历搜索算法的平均用时为 5.65×10^{10} s, 可见本文所提出的算法有效地降低了计算复杂度。

5 结论

本文研究协作异构网络中用户接入和功率控制的联合优化问题。在给定用户的数据速率需求、不同类型基站的最大发射功率约束、以及每个用户最多接入的协作基站数条件下, 以系统总发射功率最小化为优化目标, 提出了一种基于几何规划的用户接入和功率控制联合优化算法。仿真结果表明, 与现有的用户接入最近基站方法、用户接入信号最强基站方法、以及偏移接收能量最大方法相比, 所提出的方法能够有效地平衡网络中小区负载, 大幅降低系统的总发射功率, 并且能够支持更高的用户数据率需求。

参考文献

- [1] Damjanovic A, Montojo J, Cho J, et al. UE's role in LTE advanced heterogeneous networks [J]. IEEE Commun. Mag., 2012, 50: 164-176.
- [2] Soret B, Wang H, Pedersen K, et al. Multicell cooperation for LTE-advanced heterogeneous network scenarios [J]. IEEE Wireless Commun. Mag., 2013, 20: 27-34.
- [3] Yang C, Han S, Hou X, et al. How do we design comp to achieve its promised potential? [J]. IEEE Wireless Commun. 2013, 20: 67-74.
- [4] Hanly S. An algorithm for combined cell-site selection

- and power control to maximize cellular spread spectrum capacity [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1995, 13: 1332-1340.
- [5] Yates R. A framework for uplink power control in cellular radio systems [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 1995, 13: 1341-1347.
- [6] Rashid-Farrokhi F, Liu K, Tassiulas L. Downlink power control and base station assignment [J]. *IEEE Commun. Lett.*, 1997, 1: 102-104.
- [7] Madan R, Borran J, Sampath A, et al. Cell association and interference coordination in heterogeneous LTE-A cellular networks [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2010, 28: 1479-1489.
- [8] Sun R, Hong M, Luo Z. Joint downlink base station association and power control for max-min fairness: computation and complexity [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2015, 33: 1040-1054.
- [9] Hong M, Sun R, Baligh H, et al. Joint base station clustering and beamformer design for partial coordinated transmission in heterogenous networks [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2013, 31: 226-240.
- [10] Sanjabi M, Razaviyayn M, Luo Z. Optimal joint base station assignment and beamforming for heterogeneous networks [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2014, 62: 1950-1961.
- [11] Sadek M, Tarighat A, Sayed A. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels [J]. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2007, 6: 1711-1721.
- [12] BJÖRNSON E, Kountouris M, Debbah M. Massive MIMO and small cells: Improving energy efficiency by optimal soft-cell coordination [C] // *Proc. Int. Conf. Telecommun. (ICT)*, 2013.
- [13] Boyd S, Kimy S, Hassibi A, et al. A tutorial on geometric programming [R]. 2004.
- [14] 3GPP TR 36. 814. Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9) [R]. 2010.
- [15] Grant M, Boyd S. CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 1. 21. <http://cvxr.com/cvx>, 2010.

作者简介



赵景男, 1989年生, 山东菏泽人, 北京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向包括绿色通信、全双工通信等。
E-mail: buaazhaojing@126.com



韩圣千男, 1981年生, 山东威海人, 博士, 北京航空航天大学讲师, 主要研究方向为绿色通信、全双工通信、干扰管理、Massive MIMO 技术等。
E-mail: sqhan@buaa.edu.cn