

超密集网络中基于分簇的资源分配方案

田心记*, 贾文杰

(河南理工大学物理与电子信息学院 河南 焦作 454000)

【摘要】为了缓解超密集网络中毫微微小区基站(FBS)间的同层干扰,提出一种基于干扰受限的分簇及资源分配(ILCRA)方案,该方案用一个预先设置的干扰门限来限制每个FBS簇内成员的数量。首先采用聚合成簇的思想对FBS进行分簇,每个FBS簇中干扰权值之和不能超过干扰门限,然后在每个FBS簇内采用穷举图着色算法依次对用户设备(UE)进行分簇;其次,在每个FBS簇内独立地分配资源,根据UE簇在每个子信道上的吞吐量依次为每个UE簇分配子信道;最后在每个FBS簇内采用注水算法为簇内用户分配功率。仿真结果显示,该方案有效地限制了FBS簇内成员的数量,提升了系统的吞吐量和频谱效率。

关键词 分簇; 资源分配; 频谱效率; 吞吐量; 超密集网络

中图分类号 TN911.22 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.06.004

A Clustering-Based Resource Allocation Scheme in Ultra Dense Network

TIAN Xin-ji* and JIA Wen-jie

(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University Jiaozuo Henan 454000)

Abstract To reduce the co-tier interference among femtocell base stations (FBSs) in ultra-dense networks (UDN), an interference-limited clustering and resource allocation (ILCRA) scheme is proposed, in which preset threshold is used to limit the number of FBS in each FBS cluster. Firstly, FBSs are divided into clusters, and the sum weights of interference in each FBS cluster can not exceed the preset threshold. Secondly, user equipment (UE) is clustered by exhaustive graph coloring algorithm in each FBS cluster. Then, the resources are allocated independently within each FBS cluster. Sub-channels are assigned according to the throughput of UE clusters on each sub-channel. Finally, the water-filling algorithm is performed to allocate power to UEs in each FBS cluster. The simulation results show that the proposed scheme effectively limits the number of FBS in each FBS cluster and improves system throughput and spectrum efficiency.

Key words clustering; resource allocation; spectral efficiency; throughput; ultra-dense networks(UDN)

随着无线业务需求的不断增加,移动数据流量呈现指数级增长,超密集网络(UDN)成为提高网络覆盖和系统容量的关键技术之一。然而,在超密集网络中存在着更加严重的干扰,包括毫微微小区基站(FBS)间的同层干扰以及宏基站(macrocell base station, MBS)与FBS间的层间干扰,严重影响系统性能^[1-2]。所以,有效的干扰消减方案尤为重要。

目前国内外学者已经提出了许多资源管理方案来减少干扰,例如基于自适应资源调度和时域资源分配的干扰协调方案^[3-4]以及采用博弈论或智能算法的干扰消减方案^[5-6]。然而这些方案在UDN中的收敛速度非常慢,所以UDN中低复杂度的资源分配方案备受关注。

基于分簇的干扰管理和资源分配方案能降低网络拓扑结构的复杂度,从而能在提高系统性能的同时降低资源分配的复杂度^[7]。目前对分簇方法的研究主要集中于基于干扰图的分簇,图中的顶点代表FBS或用户设备(UE),边代表FBS间的干扰或UE间的干扰。将FBS分簇的方法主要分为两种,一种是基于图着色理论的分簇,将资源分配问题转化为图着色问题,将相互干扰的FBS染上不同的颜色,相同颜色的FBS为一簇,簇内干扰较小,不同的簇使用正交的子信道以避免簇间干扰^[8-9];另一种方法是基于聚合成簇的思想将相互干扰的FBS归入到同一个簇,簇间干扰较小,簇内不同的FBS分配正交的频段以避免簇内干扰^[10-14]。

收稿日期: 2018-09-24; 修回日期: 2018-12-19

基金项目: 河南省科技攻关项目(172102210023); 河南省高等学校矿山信息化开放实验室开放基金(KY2015-01); 河南省高校基本科研业务费专项(NSFRF140126)

作者简介: 田心记(1983-),女,博士,副教授,主要从事MIMO技术、干扰消除待方面的研究。E-mail: tian215216@sohu.com

UE分簇的方法与FBS分簇的方法相同。文献[15]提出了一种基于染色的分簇及资源分配(coloring-based cluster resource allocation, CCRA)算法,采用图着色算法将UE分簇,通过为相互干扰的UE簇分配正交的子信道来减少干扰。文献[16]提出了一种分布式干扰图着色(distribute interference graph coloring, DIGC)算法将UE分簇,当每个UE与周围干扰的UE选择的子信道都不相同时开始在该子信道上传输数据。文献[17]基于K-means聚类算法的思想提出了一种贪婪树生长算法,以最小化UE簇内干扰为目标将干扰较小的UE归入同一个簇内。文献[18]提出了一种基于图论的以用户为中心的频率分配(user-oriented graph-based frequency allocation, UGFA)算法,提升了频谱效率和系统容量。但在实际场景中,UE的数量远远多于FBS的数量,如果考虑任意两个UE之间的干扰并且构建对应的干扰图,则复杂度极高。

文献[19-21]提出将FBS分簇与UE分簇相结合,将FBS簇内的UE分簇并为UE分配资源。文献[19]首先将FBS分簇,然后在每个FBS簇内将UE分簇并分配资源。文献[20]首先使用一种改进的K-means算法将FBS分簇,其次在每个FBS簇内将UE划分为具有最小簇内干扰的多个UE簇,最后使用两步比例公平调度算法为每个UE簇分配子信道。文献[21]提出的动态图分簇(dynamic graph-based clustering, DGBC)算法,通过定义UE间的干扰权值并在每个FBS簇内建立UE干扰子图,以最小化簇内干扰为目标将干扰较小的UE放在同一个UE簇中。然而,在FBS部署不均匀的区域,该分簇方法会导致部分FBS簇内成员较少而部分FBS簇内成员较多,在成员较多的FBS簇内,可能需要较多的子信道以满足用户需求,而在成员较少的FBS簇内会造成部分频谱资源的浪费。

为了解决该问题,本文提出一种基于干扰受限的分簇及资源分配(ILCRA)方案。首先将FBS聚合成簇,通过设置FBS簇内干扰上限来限制每个FBS簇内成员的数量,然后在每个FBS簇内采用穷举图着色算法将UE分簇;其次,在每个FBS簇内依次为每个UE簇选择能最大化UE簇内吞吐量的子信道;最后,在每个FBS的功率约束条件下采用注水算法为用户分配功率。仿真结果显示,该方案有效地限制了FBS簇内成员的数量,提升了系统吞吐量和频谱效率。

1 系统模型

考虑包含一个MBS、多个FBS和多个UE的UDN,FBS和UE随机分布在MBS的覆盖范围内,FBS

的集合表示为 $S_f = \{f_1, f_2, \dots, f_S\}$, S 是网络中FBS的数量,UE的集合表示为 $S_u = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$, N 是网络中UE的数量。假定FBS和MBS采用正交的子信道,所以不存在层间干扰。FBS服务的UE可用的子信道有 M 个,用 c_m 表示, $m = 1, 2, \dots, M$ 。

用户 u 在子信道 c_m 上从基站 f_s 收到的信号的信干噪比(signal to interference and noise ratio, SINR)可表示为:

$$\gamma_{f_s, u}^m = \frac{\chi_{f_s, u}^m p_{f_s, u}^m \text{PL}_{f_s, u}^m}{\sum_{k \neq s, f_k \in S_f} \chi_{f_k, u}^m p_{f_k, u}^m \text{PL}_{f_k, u}^m + \sigma^2} \quad (1)$$

式中, $\chi_{s, u}^m \in \{0, 1\}$,当 $\chi_{s, u}^m = 1$ 时表示子信道 c_m 分配给了用户 u ,当 $\chi_{s, u}^m = 0$ 时表示子信道 c_m 没有分配给用户 u ; $p_{f_s, u}^m$ 是基站 f_s 在子信道 c_m 上为用户 u 分配的功率; σ^2 为噪声功率; $\text{PL}_{f_s, u}^m$ 表示基站 f_s 在子信道 c_m 上到用户 u 的信道模型,由路径损耗、穿透损耗和瑞利衰落3部分组成,比较接近实际的无线信号传输损耗,表示为:

$$\text{PL}_{f_s, u}^m = K_f \text{WL}^{-2} d_{f_s, u}^{-\alpha} g_{f_s, u}^m \quad (2)$$

式中, K_f 是修正的路径损耗常数; α 是室内路径损耗指数;WL表示渗透损耗; $d_{f_s, u}$ 表示基站 f_s 到用户 u 的直线距离; $g_{f_s, u}^m$ 表示基站 f_s 到用户 u 的瑞利衰落。

根据香农公式,基站 f_s 服务的用户 u 在子信道 c_m 上的可达速率为:

$$R_{f_s, u}^m = B \log_2(1 + \gamma_{f_s, u}^m) \quad (3)$$

式中, B 是子信道的带宽。系统的总吞吐量可表示为:

$$R = \sum_{f_s \in S_f} \sum_{u \in S_u} \sum_{m=1}^M R_{f_s, u}^m \quad (4)$$

本文的目标是合理地设计子信道和功率分配,以最大化系统吞吐量。由于FBS随机分布在MBS的覆盖范围内,子信道和功率分配问题是一个混合整数非线性规划问题(NP hard),计算复杂度极高。因此,将该问题分解成两个子问题,即分簇和资源分配。如果直接将用户分簇,则复杂度极高,因此本文的分簇方法首先将FBS分簇,然后在每个FBS簇内将UE分簇。

假定将 S 个FBS分成 K 个互不重叠的FBS簇并为每个FBS簇选出CH。用 Q_k 表示第 k 个FBS簇,该簇中有 S_k 个FBS, $\sum_{k=1}^K S_k = S$, $k = 1, 2, \dots, K$ 。用 U_k 表示第 k 个FBS簇内的用户集合,将 U_k 分成 L_k 个UE簇,用 G_{kl} 表示 Q_k 内的第 l 个UE簇, $l = 1, 2, \dots, L_k$ 。

CH为所在FBS簇内的UE簇分配子信道和功率。系统吞吐量的优化问题表示为:

$$\begin{aligned} \{\chi_{f_s,u}^m, p_{f_s,u}^m\} &= \arg \max \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^{L_k} \sum_{m=1}^M R_{f_s,u}^m \\ C1: \chi_{f_s,u}^m &\in \{0,1\} \quad \forall f_s \in Q_k, \forall u \in G_{kl} \\ C2: \sum_{m=1}^M \chi_{f_s,u}^m R_{f_s,u}^m &\geq R_{\min} \quad \forall f_s \in Q_k, \forall u \in G_{kl} \\ C3: \sum_{u \in C_s} \sum_{m=1}^M \chi_{f_s,u}^m p_{f_s,u}^m &\leq P_{\max} \quad \forall f_s \in Q_k \\ C4: \sum_{m=1}^M \chi_{f_s,u}^m &= 1 \quad \forall u \in C_s \\ C5: \bigcup_{k=1}^K Q_k &= S_f \\ C6: \bigcap_{k=1}^K Q_k &= \phi \end{aligned} \quad (5)$$

式中, C_s 表示基站 f_s 服务的用户集合; C1表示子信道 c_m 是否分配给用户 u ; C2表示每个用户的速率不能低于 R_{\min} ; R_{\min} 是用户要求的最低传输速率; C3表示功率约束条件, 每个FBS的发送功率都不能超过其最大发送功率值 P_{\max} ; C4表示簇内子信道分配约束条件, 只能为每个用户分配一个子信道; C5和C6表示FBS簇包含了网络中所有的FBS, 并且任意两个FBS簇都不相关。

2 分簇方案

本文的分簇方案分为两个步骤: 1) 将网络中所有的FBS分簇; 2) 将每个FBS簇内的UE进行分簇。

2.1 干扰受限的FBS分簇

本节给出一种基于聚合成簇的干扰受限的分簇方案。首先测量网络中任意两个FBS之间的干扰, 根据干扰建立FBS干扰图。

f_i 和 f_j 之间的干扰表示为:

$$\omega_{i,j} = p_i d_{i,j}^{-\alpha} |h_{i,j}|^2 \quad (6)$$

式中, p_i 表示测试信号的发射功率; $h_{i,j}$ 表示 f_i 和 f_j 之间所有子信道上平均的信道增益。

用矩阵 \mathbf{A} 表示FBS之间的干扰关系, 其元素值可以表示为:

$$\mathbf{A}(i,j) = \mathbf{A}(j,i) = \begin{cases} 1 & \max(\omega_{i,j}, \omega_{j,i}) \geq T_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中, T_1 是可调整的干扰门限; $\mathbf{A}(i,j)=1$ 表示 f_i 和 f_j 之间存在干扰, $\mathbf{A}(i,j)=0$ 表示 f_i 和 f_j 之间没有干扰。

根据 \mathbf{A} , 建立FBS干扰图, 顶点代表FBS, 边代表FBS之间的干扰。令 $d_{i,j}$ ($i \in S_f, j \in S_f$) 表示干扰图

中顶点 i 和顶点 j 之间的距离。如果 $\mathbf{A}(i,j)=1$, 那么在干扰图中相应的顶点之间存在一条边, 边的长度为 $d_{i,j} = 1/\max(\omega_{i,j}, \omega_{j,i})$ 。如果 $\mathbf{A}(i,j)=0$, 则这两个顶点之间没有边, 但是认为这两个顶点之间的距离 $d_{i,j}=\delta$, δ 远大于FBS干扰图中边长的最大值。

本文分簇的思想是将相互之间干扰较大的FBS归入同一个簇, 即将干扰图中距离较短的顶点归入同一个簇中。如果单个FBS簇中FBS的数量过多, 该簇的CH进行资源分配时的计算复杂度非常高, 为此设置FBS簇内干扰上限 W_{th} 来限制簇的规模, 用 W_k 表示 Q_k 内的干扰总和, 定义为:

$$W_k = \sum_{i \in Q_k} \sum_{\substack{j \in Q_k \\ j \neq i}} d_{i,j} \quad (7)$$

在每个FBS簇中必须满足 $W_k \leq W_{th}$, 因此通过合理地设置 W_{th} , 可以限制每个簇中FBS的数量。

综合以上分析, 本文基于FBS干扰图的分簇算法具体如下:

1) 初始化: 根据以上描述构建FBS对应的干扰图, 令 $k=1$ 。

2) while 新的干扰图中存在边

创建一个空的簇 Q_k

令 $W_k = 0$

找到干扰图中最短的一条边, 用 f_i 和 f_j 表示与该边相连的两个FBS

$$Q_k = Q_k \cup \{f_i, f_j\}, \quad W_k = W_k + d_{i,j}$$

while 存在与 Q_k 内FBS相连的点

寻找与 Q_k 内所有FBS距离之和最小的FBS, 用 f_p 表示

$$W_k = W_k + \sum_{s \in Q_k} d_{s,p}$$

if $W_k \leq W_{th}$

$$Q_k = Q_k \cup \{f_p\}$$

else

break

end

end

在最新的干扰图中删除 Q_k 内顶点以及与其相连的边, 得到新的干扰图

$k = k+1$

end

if 干扰图中存在干扰度为零的点

将每个干扰度为零的点放入一个新的簇中

end

文献[19]根据干扰图中FBS间的相邻关系将FBS划分为若干簇,但是在基站密集部署的情况下,可能会出现单个簇内FBS过多的情况,从而导致部分CH计算量过大。本文分簇方案通过设置干扰门限 W_{th} 来限制簇内FBS的数量,能避免簇中成员过多以及CH计算量过高的问题。

2.2 UE分簇

本文方案在FBS分簇的基础上将UE分簇管理。在每个FBS簇内建立UE对应的干扰图,基于UE干扰图采用图着色算法将UE分簇,将干扰小的UE放在同一个UE簇中。

用 λ_u 来表示用户 u 的干扰程度,定义为用户 u 接收到干扰信号功率与有用信号功率的比值为:

$$\lambda_u = I_u / S_u \quad (8)$$

式中, S_u 表示用户 u 接收的有用信号功率; I_u 表示用户 u 接收的干扰信号功率之和。用 $\tau_{u,v}$ 表示用户 u 和用户 v 之间的干扰程度,表示为:

$$\tau_{u,v} = \frac{1 + \lambda_v S_u}{1 + \lambda_u I_v} \quad (9)$$

用矩阵 E 描述FBS簇内任意两个UE之间的干扰,其元素 $E(u,v)$ 表示用户 u 和用户 v 的干扰权值:

$$E(u,v) = E(v,u) = \begin{cases} E_{th} & u \text{和} v \text{在同一小区} \\ \max(\tau_{u,v}, \tau_{v,u}) & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中, E_{th} 表示同一个小小区内的UE之间的干扰权值,由于同一小小区内的UE间的干扰较大,所以需要设置非常高的权值,令 $E_{th} = \infty$ 。设置干扰阈值 T_2 ,若 $E(u,v) \geq T_2$,则认为用户 u 和用户 v 之间存在干扰;若 $E(u,v) < T_2$,则认为用户 u 和用户 v 之间没有干扰。

每个FBS簇内UE的分簇过程相互独立。在每个FBS簇内建立UE对应的干扰图,顶点代表UE,边代表相应UE之间的干扰。若两个UE之间的干扰权值大于等于 T_2 ,则这两个UE对应的顶点之间有条边,否则,这两个UE对应的顶点之间没有边。同一个小小区内的UE之间的干扰权值非常大,因此,同一个小小区的多个UE对应的顶点之间都有边。

基于UE干扰图,本文方案使用图着色算法将UE分成多个不相交的UE簇。将干扰度最大的顶点归到一个新的UE簇,从该顶点开始着色,使用相同的颜色对与此UE簇内成员均无干扰的顶点着色,相同颜色的顶点归到一个UE簇中。当UE簇内顶点与其他顶点均存在干扰时,采用相同的方法从剩余的顶点中选出新的UE簇,直到将所有的UE都归到UE簇中。

以 Q_k 为例,假设簇内有 Z 个UE,可用的颜色一共有 s 个,本文UE分簇算法的步骤如下:

1) 初始化:将UE干扰图中的顶点按照干扰度递减标记为 $\Omega = \{N_1, N_2, \dots, N_Z\}$ (相同干扰度的顶点排序可随意), N_z 表示UE干扰图中的顶点, $z = 1, 2, \dots, Z$,用 e_1, e_2, \dots, e_s 表示 s 种颜色,令 $l = 1$ 且 G_{kl} 为空集。

while ($\Omega \neq \phi$)

 用颜色 e_l 对 Ω 中第一个元素即顶点 N_1 进行染色

$$G_{kl} = G_{kl} \cup N_1$$

 for $p = 2 : \text{length}(\Omega)$

 if N_p 与 G_{kl} 中的点没有干扰
 使用颜色 e_l 对顶点 N_p 进行染色

$$G_{kl} = G_{kl} \cup N_p$$

 end

end

$\Omega = \Omega \setminus G_{kl}$,将 Ω 中的顶点按照干扰度递减排序,令 $l = l + 1$ 且 G_{kl} 为空集

end

在UE分簇过程中,先将顶点按照干扰度递减排序,然后再着色,这样能使用最少的颜色对图中所有的顶点进行染色,即可以获得最少数量的UE簇。

3 资源分配

综合考虑子信道分配和功率分配是一个NP hard问题,计算复杂度很高。将资源分配问题分为两个阶段,即子信道分配阶段和功率分配阶段。

3.1 子信道分配

本文方案中,FBS簇内干扰较大,FBS簇间干扰较小,因此FBS簇可以复用所有子信道。最优的子信道分配方法不仅要使得FBS簇内的干扰最小,还应该尽量消减FBS簇间的干扰。然而,这需要在所有的CH之间交换信息,会造成过高的系统开销,因此,本文方案每个FBS簇的子信道分配过程相互独立,不考虑FBS簇间干扰。

由UE的分簇算法知,UE簇内用户的干扰较小,UE簇间用户的干扰可能较大,因此,若为不同的UE簇分配正交的子信道且为同一个UE簇内的用户分配相同的子信道,可以有效地减少UE簇内的干扰和UE簇间的干扰。然而,FBS密集部署且UE较多时,FBS簇内UE簇的数量可能多于子信道数量,从而无法为UE簇分配正交的子信道,所以在进行子信道分配时应考虑到UE簇之间的干扰。

资源分配的目标是最大化系统的吞吐量, 因此子信道分配的原则是: 在考虑UE簇之间干扰的情况下, 最大化每个UE簇的吞吐量。基于该原则, 本文的子信道分配方法的具体步骤描述如下:

1) 初始化: 令 $\Psi = \Psi_{\text{RB}} = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ 表示子信道集合, 将UE簇按UE的数量降序排列, 表示为 $\{G_{k1}, G_{k2}, \dots, G_{kL_k}\}$, L_k 是 Q_k 内UE簇的数量。

2) 计算第 i 个UE簇内的所有UE在子信道 c_j 上的吞吐量之和, 用 β_{ij} 表示, $i \in \{1, 2, \dots, L_k\}$, $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

3) for $i = 1: L_k$
if $\Psi \neq \phi$

$c_{m_0} = \arg \max_{c_j \in \Psi} \beta_{ij}$, 将 c_{m_0} 分配给 G_{ki}

$\Psi = \Psi / c_{m_0}$

else

从 Ψ_{RB} 中选择任意与其相邻UE簇均不相同的子信道 c_m 分配给 G_{ki}

end

end

本文的子信道分配方案中, 将UE簇按UE的数量降序排列, 首先为UE数量多的UE簇分配子信道, 若UE簇的数量大于子信道的数量, 则在所有的子信道均被分配后, CH在 M 个子信道中依次选择一个与相邻UE簇均不相同的子信道分配给剩余的UE簇, 这样可以减少簇间干扰。

3.2 功率分配

平均功率分配是最直接的功率分配方式, 但没有考虑用户的信道条件, 可能会在无线链路变化以及用户移动的情况下导致系统性能的下降。在总功率一定的情况下, 通过为每个用户分配适当的功率可以消减干扰、提高系统吞吐量。

本文方案中功率分配的目标是: 在特定的FBS分簇、UE分簇和子信道分配的情况下, 合理地分配功率以最大化网络的总吞吐量, 表示为:

$$\max \sum_{f_s \in S_f} \sum_{u \in C_{f_s}} \sum_{m=1}^M B \times \log_2 \left(1 + \Gamma \frac{\chi_{f_s, u}^m p_{f_s, u}^m \text{PL}_{f_s, u}^m}{\sum_{f_k \in S_f, k \neq s} \chi_{f_k, u}^m p_{f_k, u}^m \text{PL}_{f_k, u}^m + \sigma^2} \right)$$

$$\text{C1: } \sum_{u \in C_s} \sum_{m=1}^M p_{f_s, u}^m \leq P_{\max} \quad f_s \in S_f$$

$$\text{C2: } \sum_{m=1}^M B \log_2 \left(1 + \Gamma \frac{\chi_{f_s, u}^m p_{f_s, u}^m \text{PL}_{f_s, u}^m}{\sum_{f_k \in S_f, k \neq s} \chi_{f_k, u}^m p_{f_k, u}^m \text{PL}_{f_k, u}^m + \sigma^2} \right) \geq R_{\min} \quad f_s \in S_f, u \in W_{f_s} \quad (10)$$

式中, C1表示FBS的功率限制条件, FBS的发送功率不能超过其最大发送功率值; C2表示要满足每个用户的最低速率需求。

根据目标函数和约束条件, 运用拉格朗日对偶分解法求解式(10), 该方法有较低的复杂度。由KKT定理, 可得到拉格朗日函数:

$$L(p, \alpha, \beta) = \sum_{f_s \in S_f} \sum_{u \in C_{f_s}} \sum_{m=1}^M \chi_{f_s, u}^m R_{f_s, u}^m - \sum_{f_s \in S_f} \alpha_s \left(\sum_{m=1}^M \sum_{u \in C_{f_s}} p_{f_s, u}^m - P_{\max} \right) - \sum_{f_s \in S_f} \beta_s (B \log_2 (1 + \Gamma \text{SINR}_{f_s, u}^m) - R_{\min}) \quad (11)$$

式中, α_s 和 β_s 表示拉格朗日乘子, α 和 β 是分别由 α_s 和 β_s 组成的向量。式(11)可进一步表示为:

$$L(p, \alpha, \beta) = \sum_{f_s \in S_f} \sum_{u \in C_{f_s}} \sum_{m=1}^M B \times \log_2 \left(1 + \Gamma p_{f_s, u}^m \frac{\chi_{f_s, u}^m \text{PL}_{f_s, u}^m}{\sum_{k \neq s, f_k \in S_f} \chi_{f_k, u}^m p_{f_k, u}^m \text{PL}_{f_k, u}^m + \sigma^2} \right) - \sum_{f_s \in S_f} \alpha_s \left(\sum_{m=1}^M \sum_{u \in C_{f_s}} p_{f_s, u}^m - P_{\max} \right) - \beta_s \left(R_{\min} - \sum_{m=1}^M \sum_{f_s \in S_f} B \times \log_2 \left(1 + \Gamma p_{f_s, u}^m \frac{\chi_{f_s, u}^m \text{PL}_{f_s, u}^m}{\sum_{k \neq s, f_k \in S_f} \chi_{f_k, u}^m p_{f_k, u}^m \text{PL}_{f_k, u}^m + \sigma^2} \right) \right) \quad (12)$$

令

$$H_{f_s, u}^m = \frac{\chi_{f_s, u}^m \text{PL}_{f_s, u}^m}{\sum_{k \neq s, f_k \in S_f} \chi_{f_k, u}^m p_{f_k, u}^m \text{PL}_{f_k, u}^m + \sigma^2}$$

则式(12)可简化为:

$$L(p, \alpha, \beta) = \sum_{f_s \in S_f} \sum_{u \in C_{f_s}} \sum_{m=1}^M B \log_2 (1 + \Gamma p_{f_s, u}^m H_{f_s, u}^m) - \alpha_s \left(\sum_{u \in C_{f_s}} \sum_{m=1}^M p_{f_s, u}^m - P_{\max} \right) -$$

$$\beta_s \left(R_{\min} - \sum_{u \in C_{f_s}} \sum_{m=1}^M B \log_2(1 + \Gamma p_{f_s,u}^m H_{f_s,u}^m) \right) \quad (13)$$

如果式(10)中的约束条件得到满足,根据凸最优化理论可知,一定存在最优解。通过求解 $\frac{\partial(L(p, \alpha, \beta))}{\partial(p_{f_s,u}^m)} = 0$, 得到功率分配的最优解为:

$$p_{f_s,u}^m = \left[\frac{(1 + \beta_s)B}{\alpha_s \ln 2} - \frac{1}{\Gamma H_{f_s,u}^m} \right]^+ \quad (14)$$

式中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 。

4 计算复杂度分析

本文方案分为分簇、簇内子信道分配和功率分配3个步骤。

在将FBS分簇的过程中,每个FBS需要测量自身与其余 $J-1$ 个FBS之间的干扰,然后构造干扰图。分簇过程的计算复杂度为 $2((J-2) + (J-3) + \dots + 1)$, 即 $\mathcal{O}(J^2)$ 。

假定每个FBS簇内FBS的最大数量为 J_{CS} , 簇内UE的最大数量为 N_1 。每个UE需要测量接收到的来自于服务基站的有用信号强度以及来自于其他FBS的干扰信号强度,所以UE分簇的计算复杂度为 $(J_{CS} - 1)N_1[(N_1 - 1) + (N_1 - 2) + \dots + 1]$, 该复杂度不超过 $\mathcal{O}(JN_1^3)$ 。

用 N_2 表示FBS簇内UE簇的数量的最大值, $N_2 < N_1$ 。在子信道分配过程中,首先将UE簇按UE数量降序排列,然后在未使用的子信道中依次为每个UE簇分配子信道,此过程的计算复杂度为 $[(N_2 - 1) + (N_2 - 2) + \dots + 1][M + (M - 1) + \dots + 1]$, 即 $\mathcal{O}(N_2^2 M^2)$ 。

功率分配是由每个FBS簇内的CH实施的,对于一个给定的簇,进行功率分配所需的迭代次数由簇内的UE数量决定,所以功率分配的计算复杂度不超过 $\mathcal{O}(N_1 M)$ 。综上所述,本文算法的计算复杂度为 $\mathcal{O}(J^2 + JN_1^3 + N_2^2 M^2)$, 与DGBC算法的复杂度相当。

5 性能比较及仿真

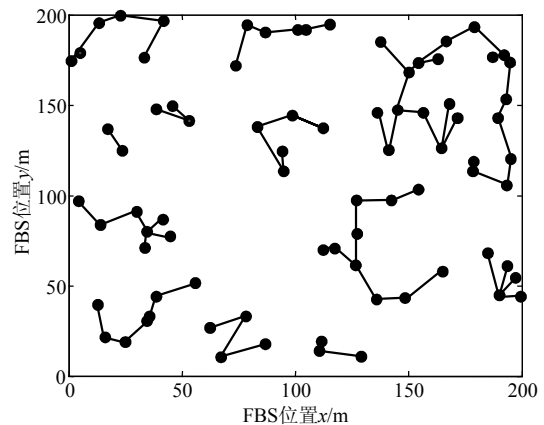
对本文方案的性能进行了仿真验证,仿真环境如下:在 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的区域内部署1个MBS、多个FBS和UE, MBS和FBS采用不同的子信道,所以不存在层间干扰,信道模型主要考虑路径损耗、穿透损耗以及小尺度衰落。具体的仿真参数如表1所示,图2的仿真中有80个FBS,其他图的仿真中有20个FBS。参与对比的算法有文献[15]中的CCRA算法、

文献[16]中的DIGC算法以及文献[21]中的DGBC算法。

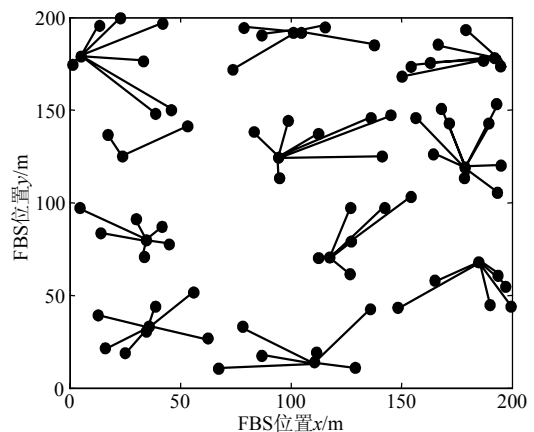
表1 具体参数

参数	值
FBS的数量 N	20
FBS最大发送功率 P/mW	20
路径损耗 K_f	$10^{3.7}$
路径损耗指数 α	4
FBS辐射半径 R_f/m	10
子信道带宽 $\Delta B/\text{kHz}$	180
高斯白噪声 $N_0/\text{dBm} \cdot \text{Hz}^{-1}$	-174

图1对比了DGBC算法与本文ILCRA方案中分簇算法的分簇结果。DGBC算法将80个FBS分成了12个簇,最大的簇内有22个FBS; ILCRA方案将80个FBS分成了11个簇,最大的簇内有10个FBS,可以将FBS更加均匀的归入簇中。由于每个FBS簇复用相同的频谱资源,ILCRA方案可以减少资源的浪费并且降低CH分配资源时的计算复杂度。



a. DGBC的分簇结果



b. ILCRA的分簇结果

图1 两种方案分簇结果对比

图2给出了本文ILCRA方案在不同 W_{th} 以及 T_2 下频谱效率的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)。仿真中假设有6个子信道,从图中可

可以看出, 频谱效率随着 W_{th} 的减小而增加, 因为随着 W_{th} 的减小, FBS簇的规模以及每个FBS簇内UE的数量随之减少, 降低了同一个FBS簇内UE的同频干扰。当干扰阈值 T_2 增大时, 频谱效率随着增加, 因为减少了FBS簇内UE簇的数量使得具有同频干扰的UE簇数量减少。

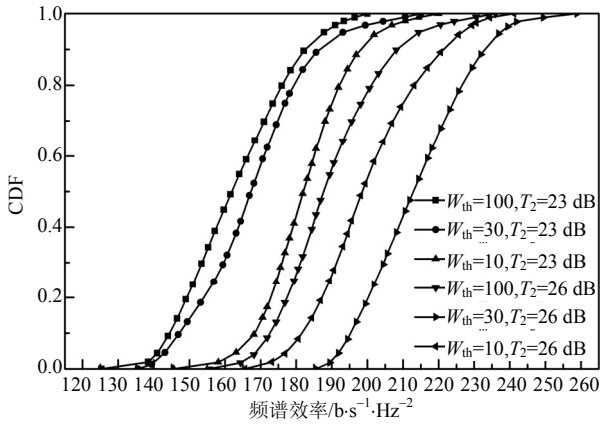


图2 本文方案的频谱效率

图3比较了4种方案在不同UE数量下的频谱效率, 仿真中假设有8个子信道。从图中可以看出, 随着UE数量的增加, 4种方案的系统频谱效率首先呈线性增长, 当UE越来越多时, 增长的速率缓慢, 因为在子信道数量不变的情况下, 随着UE数量的增加会有更多的UE簇分配到非正交的子信道, 增大了簇间干扰, 影响系统性能。

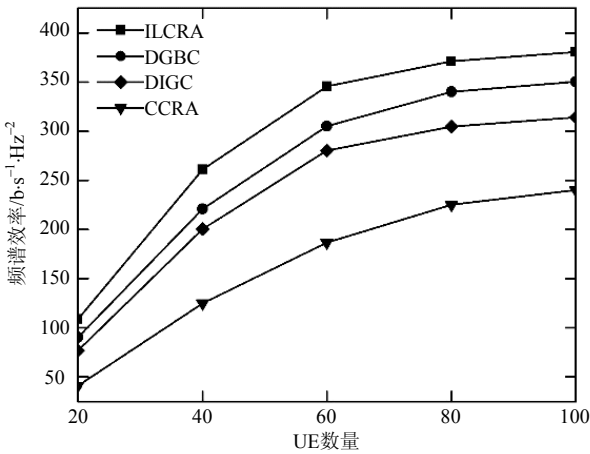


图3 系统频谱效率

图4仿真了4种方案在不同UE数量下的UE平均吞吐量, 仿真中假设有8个子信道。从图中能看出, 对于4种方案, UE平均吞吐量随着UE数量的增加而减少。这是因为UE簇的数量会随着UE数量的增加而增加, 在子信道数量不变的情况下, 会有越来越多的UE簇分配到非正交的子信道, 增大了簇间干扰,

吞吐量也随之减少。从图中还能看出, 用户数量由20到100变化时, 本文ILCRA方案的用户平均吞吐量显著高于DIGC算法和CCRA算法, 与DGBC算法相比, 用户低于55时, 本文方案的用户平均吞吐量较低, 用户多于60时, 本文方案的用户平均吞吐量较高。ILCRA方案将UE干扰图中的顶点按照干扰度降序排列后再分簇, 得到的UE簇的数量较少, 在子信道数量相同的情况下, 分配到非正交子信道的UE簇的数量较少, 从而干扰相对较小。

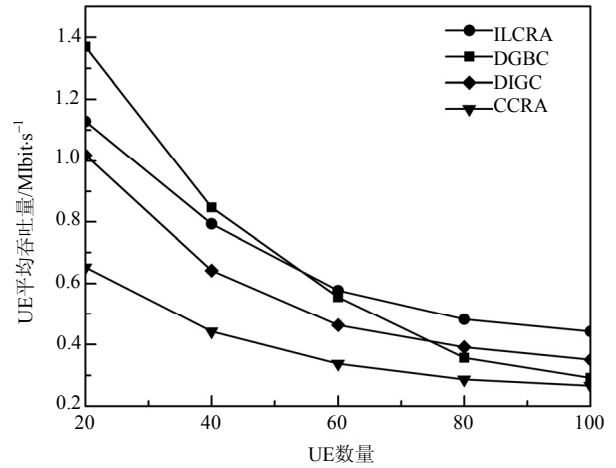


图4 不同UE数量下的UE平均吞吐量

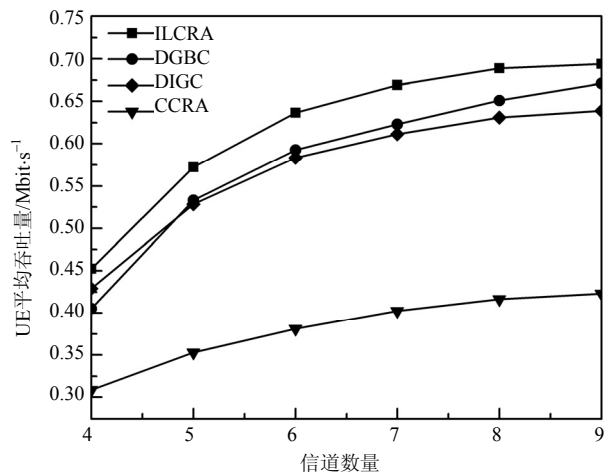


图5 不同子信道数量下UE平均吞吐量

图5仿真了4种方案在不同子信道数量下的系统吞吐量。从图4能看出随着子信道数量的增加, 4种方案的系统吞吐量都得到了提高, 这是因为可用的子信道越多, 就有越多的UE簇能分到正交的子信道, 从而干扰越小, 能传输更多的有用信号。从图5中还能看出, 本文ILCRA方案的系统吞吐量显著高于其他3种方案。在用户数量较多时, ILCRA方案限制了每个FBS簇的规模, 并且同一个FBS簇内所提方案的UE簇的数量较少, 在子信道数量相同的情况

下,本文方案中使用非正交子信道的UE簇的数量较少,从而有利于消减UE簇间的干扰。

6 结束语

在UDN中FBS以及UE密集部署的场景下,本文的基于干扰受限的分簇及资源分配方案首先将FBS分簇,然后在FBS簇内将UE分簇,最后由CH为本簇内的UE簇分配子信道和功率。与相同场景中的已有方案相比,本文方案可以限制每个FBS簇的规模,减少了FBS簇内UE的数量,不但能降低CH的计算复杂度,还有利于消减FBS簇内UE的同频干扰。在分配子信道时,将UE簇按照簇内用户数量降序排列,依次为每个UE簇分配子信道,进一步提高了FBS簇内的吞吐量。仿真结果验证了本文方案的有效性。

参 考 文 献

- [1] CISCO. Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2013-2018. White paper[EB/OL]. [2018-03-06]. http://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=8bdd69aa425fef3098bb3e7e4da8995c&site=xueshu_se.
- [2] LIU C J, HUANG P, XIAO L, et al. Interference identification and resource management in OFDMA femtocell networks[C]//IFIP Networking Conference. [S.l.]: IEEE, 2014: 1-9.
- [3] LU W, FAN Q, LI Z, et al. Power control based time-domain inter-cell interference coordination scheme in DSCNs[C]//IEEE International Conference on Communications. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-6.
- [4] SOYSAL A, MIZRAHI B, ALI I, et al. A self-organizing downlink ICIC scheme for LTE[C]//Black Sea Conference on Communications and Networking. [S.l.]: IEEE, 2017: 1-5.
- [5] SADR S, ADVE R. Hierarchical resource allocation in femtocell networks using graph algorithms[C]//IEEE International Conference on Communications. [S.l.]: IEEE, 2012: 4416-4420.
- [6] ASHRAF I, BOCCARDI F, HO L. Sleep mode techniques for small cell deployments[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(8): 72-79.
- [7] SENO R, OHTSUKI T, JIANG W, et al. A low-complexity cell clustering algorithm in dense small cell networks[J]. Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking, 2016, 2016(1): 262.
- [8] BAI L, LIU T, CHEN Z, et al. A graph-based interference topology control for ultra-dense networks[C]//International Conference on Signal Processing. [S.l.]: IEEE, 2015: 1676-1681.
- [9] GUO J, MOALIC L, MARTIN J N, et al. Cluster resource assignment algorithm for Device-to-Device networks based on graph coloring[C]//Wireless Communications and Mobile Computing Conference. [S.l.]: IEEE, 2017: 1700-1705.
- [10] HUANG J, ZHOU P, TENG D, et al. Clustering-based energy-saving algorithm in ultra-dense network[C]//Iop Conference Series: Earth & Environmental Science. [S.l.]: [s.n.], 2017: 012145.
- [11] ZHANG Q, ZHU X, WU L, et al. A coloring-based resource allocation for OFDMA femtocell networks[C]//Wireless Communications and Networking Conference. [S.l.]: IEEE, 2013: 673-678.
- [12] QIU J, DING G, WU Q, et al. Hierarchical resource allocation framework for hyper-dense small cell networks[J]. IEEE Access, 2017, 4(99): 8657-8669.
- [13] WEI R, WANG Y, ZHANG Y. A two-stage cluster-based resource management scheme in ultra-dense networks[C]//IEEE/CIC International Conference on Communications in China. [S.l.]: IEEE, 2015: 738-742.
- [14] QIU J, WU Q, XU Y, et al. Demand-aware resource allocation for ultra-dense small cell networks: an interference-separation clustering-based solution[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2016, 27(8): 1071-1086.
- [15] ZHAO C, XU X, GAO Z, et al. A coloring-based cluster resource allocation for ultra dense network[C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. [S.l.]: IEEE, 2016: 1-5.
- [16] AHUJA K, XIAO Y, SCHAAR M V D. Distributed interference management policies for heterogeneous small cell networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(6): 1112-1126.
- [17] LI H, SUN C, LIANG Y. Multi-dimensional resource allocation aware user clustering in user-centric overlapped virtual cells[C]//2017 13th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). Guilin: [s.n.], 2017: 2835-2842.
- [18] LUAN Z, HUA Q U, ZHAO J, et al. User-oriented graph based frequency allocation algorithm for densely deployed femtocell network[J]. China Communications, 2014, 10(12): 57-65.
- [19] ZHOU L, RUBY R, ZHAO H, et al. A graph-based resource allocation scheme with interference coordination in small cell networks[C]//GLOBECOM Workshops. [S.l.]: IEEE, 2014: 1223-1228.
- [20] LIANG L, WANG W, JIA Y, et al. A cluster-based energy-efficient resource management scheme for ultra-dense networks[J]. IEEE Access, 2016, 4(99): 6823-6832.
- [21] ZHOU L, HU X, NGAI C H, et al. A dynamic graph-based scheduling and interference coordination approach in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5): 3735-3748.

编辑 叶芳