

超密集网络中基于簇内用户分组的资源分配算法

杨 季^{1,2}, 周朋光³

(1 北京智芯微电子科技有限公司 国家电网公司重点实验室 电力芯片设计分析实验室, 北京 100192;

2 北京智芯微电子科技有限公司 北京市电力高可靠性集成电路设计工程技术研究中心, 北京 100192;

3 重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对超密集网络中同层干扰和资源管理的问题, 提出一种基于簇内分组的资源分配算法. 该算法分为两个模块: 第一模块是在 FBS(Femtocell Base Station)分簇的基础上, 再进行 FUE(Femtocell User Equipment)组群的分割; 第二模块是在为组群分配最优信干噪比资源的前提下, 按照组内用户优先级为用户择优分配资源. 仿真表明, 该算法在兼顾了 FUE 需求的同时, 有效地减小了超密集网络中同层干扰, 提升了 FUE 的吞吐量和频谱效率, 改善了系统的整体性能.

关键词: 超密集网络; 干扰; 资源分配; 分簇

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)04-0037-05

Group-based Intra-clustering Resource Allocation in Ultra-dense Networks

YANG Ji^{1,2}, ZHOU Peng-guang³

(1 State Grid Key Laboratory of Power Industrial Chip Design and Analysis Technology, Beijing Smart-Chip

Microelectronics Technology Co., Ltd. Beijing 100192, China; 2 Beijing Engineering Research Center of

High-Reliability IC with Power Industrial Grade, Beijing Smart-Chip Microelectronics Technology Co., Ltd.

Beijing 100192, China; 3 School of Communication and Information Engineering, Chongqing

University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: In order to solve the problem of interference and resource management in ultra-dense networks (UDN), a resource allocation algorithm based on intra-clustering grouping is proposed. The algorithm is divided into two modules: the first module is splitting FUE (Femtocell User Equipment) group on the basis of the clustering of FBS (Femtocell Base Station); the second module is firstly satisfying the precondition of resource allocation of the optimal SINR for FUE group, then to allocate resources for FUE according to the priority in same. The simulation results show that the proposed algorithm can reduce the interference of the same FUE group. Simulation shows that the algorithm effectively reduce the co-tier interference in UDN, improves the throughput and spectrum efficiency of the FUE, promotes overall system performance and satisfies the requirement of FUE at the same time.

Key words: ultra-dense networks; interference; resource allocation; clustering

1 引言

超密集网络^[1]是 5G 中的关键技术之一, 它是通过大量且密集地部署低功率小基站来提升系统容

量和达到无缝覆盖的目的. 但是小功率基站的密集部署必然会带来相互间的严重干扰问题^[2], 因此, 在超密集网络中探索可以有效的干扰管理机制和资源分配方案就愈显重要^[3].

至今,国内外很多专家和学者着手研究超密集网络中干扰消除和资源分配的问题^[4-9].文献[4]提出一种基于染色分簇的资源分配(graph-based clustering resource allocation, GCRA)方案,文献[5]提出一种基于染色的新型集中式资源分割方案(graph-based dynamic frequency reuse, GB-DFR),文献[6]基于提升超密集网中频谱效率和协调小区间干扰,提出一种基于染色分簇的资源分配算法(coloring-based cluster resource allocation, CCRA),但是该算法中基于图论的染色算法并没有具体给出.文献[7]提出一种基于 Femtocell 分簇和资源分配的半分布式干扰管理机制.文献[8]提出一种基于分簇的两级资源管理机制来改善系统的吞吐量和频谱效率.文献[9]提出一种超密集网络中基于分簇的分布式节能资源分配方案,经系统级仿真验证,该整体方案能够有效地改善系统的吞吐量和能效.

但是近来的干扰和资源分配算法中大多数集中于考虑 FBS 的分簇问题,却忽略了分簇之后 FUEs 的问题.本文旨在 FBS 分簇的基础之上,全面分析 FBS 覆盖范围下的 FUEs 的分组问题,提出一中 FUE 的分组算法,进行深层次的干扰消除和资源复用,最后本文提出一种二阶资源分配算法,由分组算法可以得到系统中的 FUEs 组群,算法中首先按照最优信干噪比的指标为用户组群分配资源,然后再按照用户组内用户的优先级进行最后的资源分配.

2 系统模型

本文考虑一个 MBS 覆盖下密集部署 FBS 的 OFDMA 下行传输系统.系统模型是一个较为真实的城市场景,包括一个 MBS(Macrocell Base Station)、 F 个 FBSs 以及数条街道.其中 MBS 位于系统模型的中心位置,FBSs 随机部署在除了街道以外的区域内.本文假设每个 FBS 允许接入的 FUE 为 1~6 个,如图 1 所示.

由第 j 个 FBS 服务的 FUE _{i} 在子信道 n 上接收的信干噪比 $\text{SINR}_{j,i}^n$ (signal to interference plus noise ratio, SINR) 可以表示为:

$$\text{SINR}_{j,i}^n = \frac{P_j^n \cdot G_{j,i}^n}{\sum_{t \neq j, t \in F} P_t^n \cdot G_{t,i}^n + \sigma^2} \quad (1)$$

式中, P_j^n 表示第 j 个 FBS 的传输功率, $G_{j,i}^n$ 表示第 j 个 FBS 服务的 FUE _{i} 在子信道 n 的信道增益, σ^2 表示

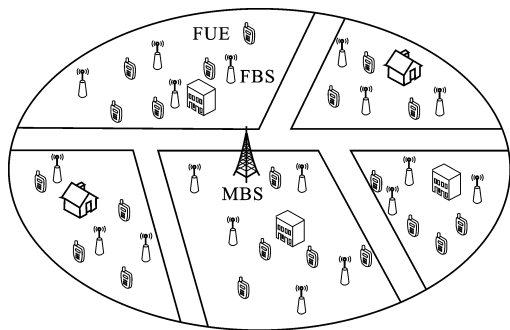


图 1 系统模型

噪声功率, $F = \{1, 2, \dots, f\}$ 表示 FBS 的集合.

我们假设系统带宽为 B , 那么可以得到 FUE _{i} 在子信道 n 上的数据传输速率 $R_{j,i}^n$:

$$R_{j,i}^n = B \cdot \log_2(1 + \text{SINR}_{j,i}^n) \quad (2)$$

定义 $I_{F,F}$ 为 FBS 间的干扰, 可以表示为:

$$I_{F,F} = \sum_{t \neq j, t \in F} P_t^n \cdot G_{t,i}^n + \sigma^2 \quad (3)$$

3 基于簇内用户分组的资源分配算法

为了在降低干扰的前提下, 有效地进行资源分配, 本文提出一种基于簇内用户分组的资源分配算法(group-based intra-clustering resource allocation, GIRA). 在进行用户分组之前先对系统中的 FBSs 分簇, 分簇的目的是为了减小系统的复杂度, 另外, 分簇可以使得 FBS 只需了解同簇内其他 FBSs 的相关信息即可, 无需了解整个网络的状态. 其次为了减小同簇内的干扰, 本文将每个簇内有较低干扰影响的 FUEs 分配到不同的用户组内. 最后根据分簇和分组结果, 本文将资源根据信道增益经过依次迭代分配给用户组, 然后再根据用户组内用户的优先级进行最后的资源分配.

3.1 FBS 分簇

本文搭建的系统模型是基于真实的城市街道, 所以为了简便起见且不失算法的可行性, 故本文按照城市布局中的不同街区进行分簇, 分簇之后的简略图可见图 2.

如图 2 所示, 假设系统 FBS 共有 F 个, 且分簇 C 个, 并在每个簇内随机选取一个簇头, 簇头的集合为 CH. FBS 的簇集合为 CF, $\text{CF} = \{\text{clu}_1, \text{clu}_2, \dots, \text{clu}_C\}$, 其中 clu_c ($c=1, 2, \dots, C$).

3.2 用户分组

本文首先考虑了消除簇间干扰, 所以簇内干扰现象还是会严重影响 FUEs 的用户体验^[10], 所以为了尽可能的减小簇内干扰, 我们在 FBS 分簇的基础

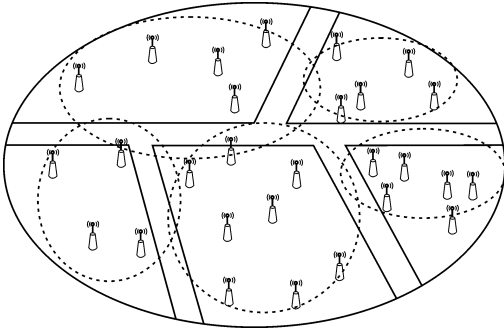


图2 简化系统模型图

上,再为不同簇内的FUEs进行分组.首先,我们创建一个干扰无向拓扑图 $G(V, E)$, 见简略图3. 顶点 V 代表簇内的用户, 边集 E 代表簇内FUEs所遭受的下行干扰.

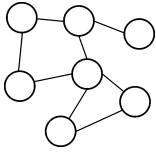


图3 简略干扰拓扑图

本文运用信道衰减指数 $\delta_{f,m}$ 来描述用户所受干扰的影响大小.

$$\delta_{f,m} = \frac{\sum_{t \neq f \in \text{CF}} L_{t,m} + \sigma^2}{L_{f,m}}, m \in U_{\text{FC}} \quad (4)$$

式中, U_{FC} 代表FBS簇FC的FUEs集合, σ^2 代表噪声功率, $L_{f,m}$ 代表FBS f 到FUE m 的路径损耗.

假设 δ_{f,m_1} 和 δ_{f,m_2} 分别代表同FBS簇内受干扰FUE m_1 和 m_2 的相对信道损耗, 二者在拓扑图中边的权重大小 $E(m_1, m_2)$ 可以表示为:

$$E(m_1, m_2) = \begin{cases} \delta_{f,m_1} + \delta_{f,m_2} & m_1, m_2 \text{ 在不同 FBS 簇} \\ E & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

式中, E 值表示一个用户组内的最大用户数, 本文将 E 值设置的足够大, 用以保障更多不同 Femtocell 中的FUEs 可以被分配到相同的用户组内, 一旦某一用户组的总权重达到上限 E 值, 那么就会重新建立一个用户组. $E(m_1, m_2)$ 逻辑上诠释了FUEs 使用相同的频带资源而造成的信号衰减程度. $E(m_1, m_2)$ 越小表示FUE m_1 与 m_2 间的信号衰减程度越小. 所以本文主要是为了减小不同簇内所有用户组的总权重.

假设用户组的集合为 $\text{GR} = \{\text{GR}_1, \text{GR}_1, \dots, \text{GR}_c\}$, $c = \{1, 2, \dots, C\}$ 表示 C 个簇的FUEs 用户组

的集合, GR 中每个元素代表一个FBS簇的用户组的一个集合, ϵ 表示当前逐渐扩张的用户组集合, μ 表示当前并未加入用户组的顶点集合, $\mathbb{G} = \{G_1, G_2, \dots, G_c\} = \{(V_1, E_1), (V_2, E_2), \dots, (V_c, E_c)\}$ 表示FBS簇间的干扰拓扑图. 具体FUEs 分组算法见算法1.

算法1 用户分组算法

输入: $\mathbb{G}$

输出: GR

Step1: 初始化: $\epsilon = \emptyset$, $\forall$ 包含了所有FBS簇的所有顶点;

Step2: For $c = 1:C$

$\text{GR} = \emptyset$

End

Step3: For $c = 1:C$

While $\forall \neq \emptyset$

从 $\forall$ 中随机选取一个顶点 v , 并令 $\epsilon = \{v\}$, 创建集合 μ ;

While ϵ 的总权值 $< E$ 值

选择一个顶点 $v' = \underset{v \in \epsilon}{\text{argmin}} (\sum E(v, v'))$;

将顶点 v' 加入到 ϵ ;

End

更新集合 $\forall, \mu$;

令 $\mathbb{G} \leftarrow \mathbb{G} \cup \{\epsilon\}$, 并重置 $\epsilon = \emptyset$.

End

End

3.3 资源分配算法

由于在用户分组的过程中, 可能会存在每个小区下的用户数不均等和不平衡的问题^[11], 所以本文提出一种基于用户优先级的资源分配算法. 我们首先根据用户组的信道增益进行迭代资源分配, 然后再根据每个用户的业务量和所受干扰强度来进行优先资源分配.

(1) 本文用FUE的数据传输速率 R_i 来粗略估计业务量:

(2) 本文用FUE所受干扰可以表示为 I_i :

那么可以得出FUE i 的优先级 PR 为:

$$\text{PR} = \frac{R_i \cdot I_i}{\sum_{i' \in F/i} R_{i'} \cdot I_{i'}} \quad (6)$$

假设系统全部资源集合为 $\text{RB} = \{\text{RB}_1, \text{RB}_2, \dots, \text{RB}_w\}$, 剩余资源的集合为 $\text{RB}' = \{\text{RB}'_1, \text{RB}'_2, \dots, \text{RB}'_w\}$, H 表示所有FUEs的信道增益集合, ρ 是

正在分配资源的用户组, L 用于保存 FUE 的优先级 PR , $\mathfrak{R}$ 表示资源分配的结果. 具体资源分配算法如算法 2.

算法 2 资源分配算法

输入: GR, H, CF, U_{FC}

输出: $\mathfrak{R}$

Step1: 初始化: 将所有用户组按照其每个用户组内用户的数量由多到少排序为 $GR' = \{GR'_1, GR'_1, \dots, GR'_c\}$

Step2: For $c = 1:C$

While $RB \neq \emptyset$

按照 Round Robin 的方式调度 GR' 中的用户组, 并为用户组 ρ 计算资源的信道增益;

令 $H_{\rho}^{RB_w} = \sum_{p \in \rho} H_p^{RB} (\forall RB_w \in RB)$;

计算 $RB^* = \operatorname{argmax}_{\rho} H_{\rho}^{RB_w}$, 并将 RB^* 分配给用户组 ρ ;

End

End

Step3: For $w = 1:W$

While $RB' \neq \emptyset$

计算每个用户组内 FUE 的 PR ;

RB^* 分配给具有最高 PR 的 FUE i , 并更新 L ;

记录 RB' 分配给 FUE i ;

更新 RB' ;

End

End

4 仿真与分析

本文运用 MATLAB 对本文所提 GIRA 算法进行仿真验证, 并与 GCRA 算法、CCRA 算法和 GB-DFR 算法在信干噪比、吞吐量、频谱效率等方面做出了对比, 以验证算法的性能. 表 1 是具体的仿真参数^[12].

图 4 中展示了 FUE 在其服务 FBS 下 SINR 的 CDF 图, 主要用于分析本文算法在干扰消除方面的性能. 从图 4 中可以看出, GCRA 算法和 GIRA 算法均采用对小小区分簇的操作, 对干扰消除的效果较为明显, 但 GIRA 算法更深层次地对簇内的干扰进行进一步的减小, 使其在 SINR 方面性能较为突出.

表 1 仿真参数

参数	值
MBS 覆盖半径	500 m
FBS 覆盖半径	10 m
系统总带宽	3.6 MHz
子信道数	50
每个子信道带宽	180 kHz
载波频段	2 GHz
MBS 最大发射功率	46 dBm
FBS 最大发射功率	20 dBm
高斯白噪声	-174 dBm/Hz
阴影衰落	8 dB
穿墙损耗	20 dB

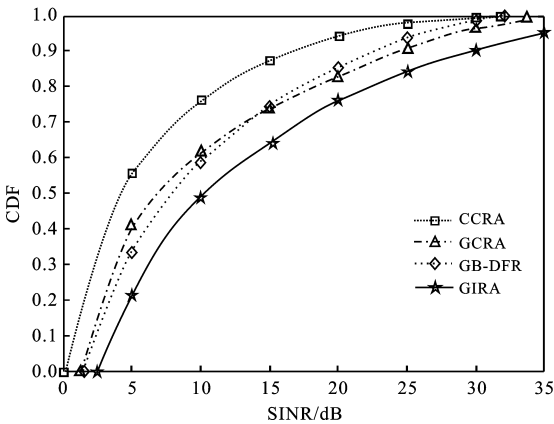


图 4 SINR 的 CDF 图

用户平均吞吐量的 CDF 如图 5 所示. 在 CCRA 和 GB-DFR 算法中, 干扰拓扑图中的顶点代表的是用户, 这样就有可能会造成相互干扰的小区之间复用了相同的频谱资源, 造成的结果就是用户会遭受更严重的干扰, 使得平均用户的吞吐量不高. 本文的 GIRA 算法在消除了簇内簇外干扰的基础上, 对无线频谱资源进行了优先级划分, 再先后地进行资源的分配, 满足了用户的需求, 提升了用户的平均吞吐量.

平均用户频谱效率的 CDF 可见图 6. 由于 GB-DFR 算法中没有干扰的相邻基站也使用的是正交频谱资源, 这样会造成大量的频谱资源的浪费. GIRA 算法在对簇间使用正交的频带资源之后, 考虑了用户组的频带资源复用, 极大地提高了用户的频谱效率.

5 结束语

本文在超密集网络场景下对 FBS 分簇之后, 进

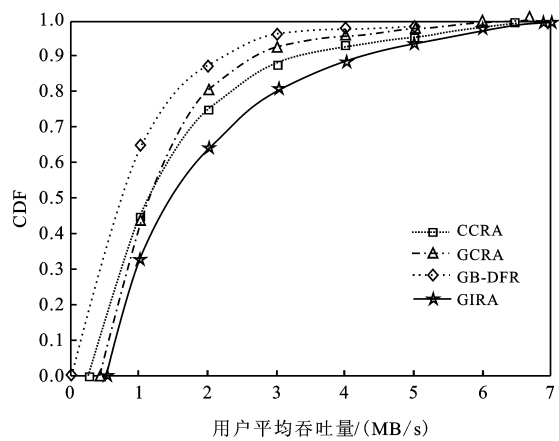


图 5 用户平均吞吐量的 CDF 图

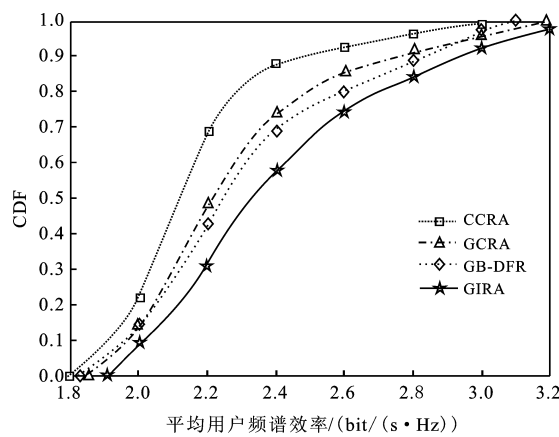


图 6 平均用户频谱效率的 CDF 图

一步对 FUE 进行分组操作,目的是更深一步减小簇内干扰和频带资源的复用,并提出一种基于簇内用户分组的资源分配算法(group-based intra-cluster resource allocation,GIRA).该算法在保障 FUE 较高 SINR 的基础之上,全面提升了用户平均吞吐量和频谱效率,改善了整个系统的性能.仿真结果表明 GIRA 算法能够高效地控制 FBS 的同层干扰,满足用户需求的同时大幅度提升 FUE 的吞吐量和频谱效率.

参考文献:

[1] Wang C X, Haider F, Gao X Q, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(2): 122-130.

[2] Osseiran A, Boccardi F, Braun V, et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the ME-TIS project[J]. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(5): 26-35.

[3] 李云, 杨雄, 张乐, 等. 蜂窝网络中支持全双工 D2D 通信的资源分配算法[J]. 微电子学与计算机, 2016, 33(11):142-146.

[4] Zhang Q, Zhu X, Wu L, et al. A coloring-based resource allocation for OFDMA femtocell networks[C]// Wireless Communications and NETWORKING Conference. Shanghai, China, IEEE, 2013: 673-678.

[5] Uygungelen S, Auer G, Bharucha Z. Graph-based dynamic frequency reuse in femtocell networks [C]// 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Budapest, Hungary, IEEE, 2011:1-6.

[6] Zhao C D, Xu X F, Gao Z B, et al. A coloring-based cluster resource allocation for ultra dense network[C]// International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). Hongkong, IEEE, 2016:1-5.

[7] Gao Y, Cheng L, Zhang X, et al. Enhanced power allocation scheme in ultra-dense small cell network[J]. China Communications, 2016, 13(2): 21-29.

[8] 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. Shanghai, China, 2014: 738-742.

[9] Liang L, Wang W, Jia Y, et al. A cluster-based energy-efficient resource management scheme for ultra-dense networks [J]. IEEE Access, 2016, 99(4): 6823-6832.

[10] Liu T T, Yang C Y, Yang L L. A low-complexity subcarrier-power allocation scheme for frequency-division multiple-access systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1564-1570.

[11] Hatoum A, Langar R, Aitsaadi N, et al. Cluster-based resource management in OFDMA femtocell networks with QoS guarantees[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 63(5):2378-2391.

[12] Luan Z R, Qu H, Zhao J H, et al. User-oriented graph based frequency allocation algorithm for densely deployed femtocell network [J]. China Communications, 2014, 10(12):57-65.

作者简介:

杨季 男, (1976-), 硕士, 工程师. 研究方向为 5G 关键技术. E-mail:zhixin_yj@163.com.

周朋光 男, (1992-), 硕士研究生. 研究方向为超密集网络技术.