

doi:10.13756/j.gtxyj.2019.03.011

无线通信技术

超密集网络中基于均衡策略的功率分割算法

鲁楠¹,秦洪峰²,孙长印¹,江帆¹

(1. 西安邮电大学 陕西省信息通信网络及安全重点实验室,西安 710121;

2. 中兴通讯股份有限公司 西安研究所,西安 710065)

摘要:在超密集网络场景中,针对以用户为中心的重叠虚拟小区系统的和速率的最大化,提出了一种基于效用函数最优化模型的功率分配方案。通过分层交替迭代算法求解最佳功率分配,首先将原问题分解为功率分割和虚拟功率分配两个子问题;然后在高层功率分割中引入拉格朗日函数,求解出一种基于均衡策略的最佳功率分割算法,在底层利用虚拟功率完成进一步的功率分配。由于功率分割系数采用了最大化信干漏比(SLNR)的特征矢量形式,从而实现了信号增强与干扰减少之间的均衡。仿真结果表明,该算法在性能上优于传统的功率分配算法,有效减少了干扰,提高了系统的和速率。

关键词:超密集网络;功率分割;分层迭代;干扰协调

中图分类号:TN929.53 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-8788(2019)03-0053-06

Power Splitting Algorithm based on Equalization Strategy in Ultra-dense Networks

LU Nan¹, QIN Hong-feng², SUN Chang-yin¹, JIANG Fan¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Information Communication Network and Security, Xi'an University of Posts

and Telecommunications, Xi'an 710121, China; 2. Xi'an Institute, ZTE Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the ultra-dense network scenario, a power allocation scheme based on the utility function optimization model is proposed to maximize the sum rate of user-centric overlapped virtual cell systems. The optimal power allocation is obtained based on the hierarchical alternating iterative algorithm. Firstly, the original problem is decomposed into two sub-problems: power splitting and virtual power allocation. Secondly, an optimal power splitting algorithm based on equilibrium strategy is obtained by introducing the Lagrangian function at the upper layer, and further power allocation is achieved by using the virtual power at the bottom layer. Since the power splitting coefficient takes the form of eigenvector which maximizing Signal to Leakage plus Noise Ratio (SLNR), a balanced effect on signal enhancement and interference reduction is achieved. Simulation results show that the proposed algorithm is superior to conventional power allocation algorithms in performance, which can effectively reduce the interference and increase the sum rate of the system.

Key words: ultra-dense network; power splitting; hierarchical iteration; interference coordination

0 引言

面对2020年无线通信业务至少增加1 000倍的挑战,包含大量小小区的超密集网络(Ultra-Dense Network,UDN)被认为是第五代通信中不可缺少的技术^[1-2]。通过密集部署低功耗和短距离的小小区,可以满足更大的系统容量和无处不在的覆盖等多种性能需求^[3-4]。在UDN中,小区的覆盖范围变小,导致频繁的终端切换和复杂干扰等问题^[5]。为了解决这些问题,可以采用以用户为中心的虚拟小区(Virtual Cell,VC)技术,用户及其附近的多个小覆盖范围基站(Base Station,BS)组成一个VC,将其资源作为一个整体进行调度,以减少频繁的终

端切换^[6]。在以用户为中心的VC架构中,不同VC的BS可能是重叠的或不重叠的。重叠VC在架构上更加灵活,可以为用户提供无边界服务^[7],但重叠VC会产生强干扰从而降低系统性能。同时,在功率和波束等不同的资源维度上存在着强耦合关系,使得传输更加复杂^[8]。此外,在同一资源维度中也存在强耦合关系,例如对于归属于不同VC的BS,其所服务的用户之间的功率分割会受到该BS的功率预算约束。

目前,有多个文献从功率域干扰协调角度对UDN中的功率分配进行了研究。以最大化系统和速率及频谱效率作为目标,文献[9]把来自其他小区的干扰近似为常数,将有限总功率约束下的最优功

收稿日期:2018-07-28

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(2016ZX03001016);国家自然科学基金资助项目(61501371);西安邮电大学大学生科技创新活动资助项目(18-B-240)

作者简介:鲁楠(1994—),女,陕西咸阳人。硕士,主要研究方向为无线通信关键技术。

通信作者:鲁楠,硕士。E-mail:cris_aquarius@163.com

率分配问题转化为凸优化问题,利用拉格朗日乘子法推导出功率分配表达式,提出了没有性能下降的低复杂度迭代注水功率分配算法;为了提高系统的和速率,文献[10]提出了基于比例公平的功率分配算法,根据不同信道强度,为信道状态良好的用户分配更多的功率,与注水功率分配算法相比,此算法不需要复杂的迭代;文献[11]提出了一种信道状态和干扰感知功率分配的博弈,将其作为增强型解决方案进行干扰协调,其中使用了非合作博弈中的Cournot模型进行功率分配的调整,从而提高了边缘用户的吞吐量和系统性能;在宏小区家庭小区网络下行链路传输中,文献[12]提出了基于梯度的分布式功率控制算法以最大化系统能效,通过相邻BS之间周期性交换部分导数和系统功率信息,进行功率的增加或减少;为实现宏小区和小小区之间的负载均衡,文献[13]提出了一种用户关联机制和BS功率控制的协同优化方案,在BS功率固定的情况下求得最佳用户关联策略后,采用Zoutendijk可行方向法求得BS最佳功率,该协同优化方案有效地提升了异构蜂窝网络中的用户速率和系统容量。然而,上述方案大多是非重叠的,未考虑重叠VC复杂的耦合性,且未考虑传统的以网络为中心的架构转变为以用户为中心提供服务的新型网络架构。在新的网络架构下,控制面与用户面采用分离结构^[14],控制面功能若干扰管理将需要重构。重构设计中,控制面功能可划分为:(1)中心控制:全局视野(如协作处理)和慢速变化决策;(2)BS控制:局部视野和快速变化决策。

面对新的重构设计,本文以最大化系统和速率为效用函数,针对重叠VC提出了一种新颖的分层交替迭代功率分配框架:位于高层的功率分割和位于底层的虚拟功率分配,高层决定了底层的控制范围。该结构的突出优点及创新性体现在:(1)分层框架实现了重叠VC复杂功率控制策略的解耦合;(2)分层框架可通过灵活的和不同的功率分割策略适应多样的场景,实现不同的系统目标。

基于上述分层框架,本文为了求解功率分割子问题,通过定义拉格朗日函数,提出了一种基于均衡策略的功率分割算法,该算法使用了最大化信漏噪比(Signal to Leakage plus Noise Ratio, SLNR)的最优功率分割系数,实现有用信号与干扰之间的均衡。然后利用提出的虚拟功率概念,使用快速迭代注水功率分配算法优化系统的和速率。通过功率分割和虚拟功率的交替迭代优化,实现了干扰的联合

协调,改善了边缘用户的性能并提高了用户的和速率。

1 系统模型与问题建模

考虑UDN场景中的下行链路传输,VC由BS集合 $V=\{1,2,\dots,M\}$ 和用户集合 $U=\{1,2,\dots,K\}$ 组成。用户及其周围的多个低功率BS,如家庭BS(Family Base Station, FBS)和微BS(Pico Base Station, PBS)等共同组成一个VC。BS $m(m \in V)$ 有 N_T 根天线,用户 $k(k \in U)$ 有1根天线。

以用户为中心的重叠VC场景如图1所示。假设用户 k 的VC由BS簇 V_k 组成, $V_k \subseteq V$,BS m 的服务用户簇为 U_m , $U_m \subseteq U$ 。一个簇内的BS可以相互共享用户数据,因此数据可以通过簇内的BS天线进行协调传输。简单地说,BS m 可以服务一系列用户 U_m ,用户 k 可以接收来自BS簇 V_k 的信息。

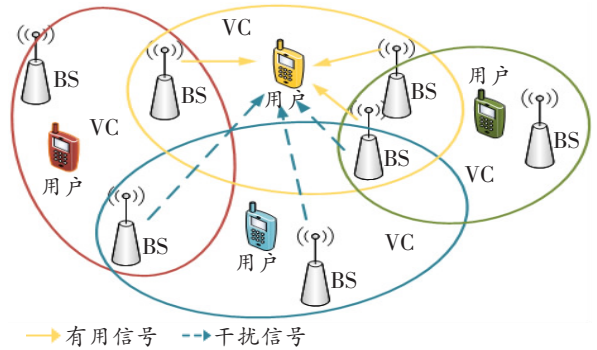


图1 以用户为中心的重叠VC场景

假设 $\mathbf{g}_{kj}$ 为 V_j 内的BS到用户 k 的信道增益向量,且 $\mathbf{g}_{kj}=[\mathbf{h}_{km} \cdot \mathbf{v}_{mj}]$,式中: $\mathbf{h}_{km} \in \mathbf{C}^{1 \times N_T}$ 为BS m 到用户 k 的信道向量; $\mathbf{v}_{mj} \in \mathbf{C}^{N_T \times 1}$ 为BS m 到用户 j 的预编码矢量; $\mathbf{C}^{a \times b}$ 为 $a \times b$ 维的复数矩阵。 p_{mk} 为BS m 到用户 k 的传输功率,令 $p_{mk}=\varphi_{mk} \cdot p_k$, $\forall m \in V_k$,式中: p_k 为用户 k 的虚拟功率; φ_{mk} 为BS m 划分给用户 k 的功率分割因子。所有用户的虚拟功率向量为 $\mathbf{p}=[p_1, p_2, \dots, p_K]$ 。所有用户的功率分割系数向量为 $\mathbf{c}=[\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_K]$,式中, $\mathbf{c}_k$ 为用户 k 的功率分割系数向量,其与功率分割因子的关系为 $\mathbf{c}_k=[\sqrt{\varphi_{mk}}, m \in V_k]^H$ 。此外,设 σ_k^2 为用户 k 的信道噪声。

考虑系统的频率复用因子为1,故用户 k 的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为

$$\gamma_k(\mathbf{p}, \mathbf{c}) = \frac{|\mathbf{g}_{kk}\mathbf{c}_k|^2 p_k}{\sum_{j \neq k, j \in U} |\mathbf{g}_{kj}\mathbf{c}_j|^2 p_j + \sigma_k^2} \quad (1)$$

基于 SINR 表达式,用户 k 的可实现速率为

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k(\mathbf{p}, \mathbf{c}))。 \quad (2)$$

在功率分配时,需要考虑两个约束:

(1) 总功率约束,即 BS m 给用户分配的功率不应该超过其最大功率:

$$\sum_{k \in U_m} c_{mk}^2 p_k \leq \bar{p}_m, \forall m \in V_k, \quad (3)$$

式中: $\bar{p}_m$ 为 BS m 的最大功率; $c_{mk} = \sqrt{\varphi_{mk}}$ 。

(2) 功率分割系数向量的约束,即用户 k 的功率分割系数向量之和应归一化:

$$\|\mathbf{c}_k\|^2 = 1, \forall k \in U_m, \quad (4)$$

式中, $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数。

基于上述假设,将所有用户的最大可实现总和速率作为效用函数,带约束的分层功率分配优化问题可定义如下:

$$\begin{aligned} P_1: \max_{\mathbf{p} > 0, \mathbf{c}_k \in U} & \sum \log_2(1 + \gamma_k(\mathbf{p}, \mathbf{c})), \\ \text{s. t} & \sum_{k \in U_m} c_{mk}^2 p_k \leq \bar{p}_m, \forall m \in V_k, \\ & \|\mathbf{c}_k\|^2 = 1, \forall k \in U_m. \end{aligned} \quad (5)$$

2 功率分割及虚拟功率分配算法

尽管功率分配在无线通信网络中是经典话题,但式(5)中的问题 P_1 是一个很难被求解的 NP-hard 问题。为了更容易求解问题 P_1 ,本文解除虚拟功率向量 $\mathbf{p}$ 与功率分割系数向量 $\mathbf{c}$ 之间的耦合关系,考虑了基于解耦思想的启发式算法以及与解耦思想相适应的控制面功能重构设计。

通过解耦,分别将 $\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{c}$ 固定,把原问题 P_1 转化为功率分割子问题 P_2 和虚拟功率分配子问题 P_3 。同时,它与高层(全局控制)和底层(BS 控制)的功能重构分层设计相匹配。在图 2 所示的分层交替

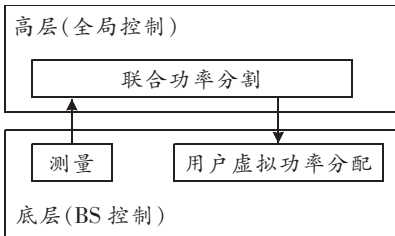


图 2 分层交替迭代的功率分割与虚拟功率分配框架

迭代的功率分割与虚拟功率分配框架中,首先,高层接收来自各个 VC 中 BS 的测量结果,如用户到 BS 的信道信息矩阵,根据不同的业务需求,选择相应的功率分割策略,通过协作求解 P_2 ,得到合适的 $\mathbf{c}$;其

次,高层输出计算得到的 $\mathbf{c}$,将其发送至底层,进行底层的 BS 控制,根据 $\mathbf{c}$ 所划分的虚拟功率范围,求解 P_3 ,进一步快速调整 $\mathbf{p}$;高层与底层交替迭代,直至收敛得到最佳解。

2.1 虚拟功率固定下的功率分割问题

假设在功率分割子问题 P_2 阶段,用户的初始功率 p_0 是确定的,可以利用如下最优约束算法求解得到功率分割系数向量 $\mathbf{c}$:

$$\begin{aligned} P_2: \max_{\mathbf{c}} & \sum_{k \in U} \log_2(1 + \gamma_k^p(\mathbf{c})), \\ \text{s. t} & \|\mathbf{c}_k\|^2 = 1, \forall k \in U_m, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\gamma_k^p(\mathbf{c}) = \gamma_k(\mathbf{p}, \mathbf{c})|_{\mathbf{p}=\mathbf{p}_0}$ 为用户在 $\mathbf{p} = \mathbf{p}_0$ 时的 SINR。

由式(6)可知,子问题 P_2 是 BS 功率在不同服务用户之间进行分割的子问题,通常可以利用等功率分配、比例公平功率分配^[10]和简单注水功率分配^[11]思想得到功率分割值。等功率分割: $p_{mk} = \frac{\bar{p}_m}{|U_m|}$ 。比例公平功率分割: $p_{mk} = \frac{|\mathbf{h}_{km}|^2 \bar{p}_m}{\sum_{k \in U_m} |\mathbf{h}_{km}|^2}$ 。

简单注水功率分割: $p_{mk} = \left[\beta_m - \frac{\sigma_k^2}{|\mathbf{g}_{kk}|^2} \right]^+$, 式中: $[x]^+ = \max\{x, 0\}$; β_m 为注水面;此方法只考虑了噪声,未考虑干扰值。

不同于上述 3 种方法,本文提出一种新的功率分割算法,即基于均衡策略的功率分割算法,具体算法如下。

应用拉格朗日思想求解最优功率分割系数向量 $\mathbf{c}$,拉格朗日函数定义如下:

$$\begin{aligned} J = & \sum_{k=1}^K R_k^p - \sum_{k=1}^K \mu_k (\mathbf{c}_k^H \mathbf{c}_k - 1) = \\ & \sum_{k=1}^K \log_2 \left(\frac{\sum_{j=1}^K |\mathbf{g}_{kj} \mathbf{c}_j|^2 p_j + \sigma_k^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |\mathbf{g}_{kj} \mathbf{c}_j|^2 p_j + \sigma_k^2} \right) - \\ & \sum_{k=1}^K \mu_k (\mathbf{c}_k^H \mathbf{c}_k - 1), \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $R_k^p = \log_2(1 + \gamma_k^p(\mathbf{c}))$; μ_k 为拉格朗日乘子。

通过对 $\mathbf{c}_k$ 的复共轭转置求偏导,并令 $\partial J / \partial \mathbf{c}_k^H = 0$,得到:

$$\begin{aligned} & \frac{1/\ln 2}{\sum_{j \in U} |\mathbf{g}_{kj} \mathbf{c}_j|^2 p_j + \sigma_k^2} \cdot \mathbf{g}_{kk}^H \mathbf{g}_{kk} \mathbf{c}_k p_k - \mu_k \mathbf{c}_k = \\ & \sum_{j \neq k, j \in U} \frac{\gamma_j / \ln 2}{\sum_{i \in U} |\mathbf{g}_{ji} \mathbf{c}_i|^2 p_i + \sigma_j^2} \cdot \mathbf{g}_{jk}^H \mathbf{g}_{jk} \mathbf{c}_k p_k. \end{aligned} \quad (8)$$

为了便于观察,将上式整理重写为

$$(\mathbf{E}_k - \mu_{\max})\mathbf{c}_k = (-\sum_{j \neq k, j \in U} \lambda_{jk} \mathbf{A}_{jk})\mathbf{c}_k, \quad (9)$$

式中: $\mathbf{E}_k = \mathbf{g}_{kk}^H \mathbf{g}_{kk} p_k$; $\mathbf{A}_{jk} = \mathbf{g}_{jk}^H \mathbf{g}_{jk} p_j$; $\mu_{\max}$ 为乘子。权重系数 λ_{jk} 作为平衡信号和干扰的关键因子,其定义如下:

$$\lambda_{jk} = \frac{I_k + |\mathbf{g}_{kk} \mathbf{c}_k|^2 p_k + \sigma_k^2}{I_j + |\mathbf{g}_{jj} \mathbf{c}_j|^2 p_j + \sigma_j^2} \cdot \frac{|\mathbf{g}_{jj} \mathbf{c}_j|^2 p_j}{I_j + \sigma_j^2} - \frac{1 + 1/\gamma_k}{1 + 1/\gamma_j} \cdot \frac{S_k}{I_j + \sigma_j^2}, \quad (10)$$

式中: γ_k 和 γ_j 分别为用户 k 和 j 的 SINR; S_k 为用户 k 的有用信号, $S_k = |\mathbf{g}_{kk} \mathbf{c}_k|^2 p_k$; I_k 和 I_j 分别为用户 k 和 j 受到的干扰, $I_k = \sum_{j=1, j \neq k}^K |\mathbf{g}_{kj} \mathbf{c}_j|^2 p_j$ 。

基于式(9),用户 k 的功率分割系数向量 $\mathbf{c}_k$ 可以通过瑞利商的最大值求解:

$$\mathbf{c}_k = \max_{\mathbf{c}_k} \frac{\mathbf{c}_k^H \mathbf{E}_k \mathbf{c}_k}{\mathbf{c}_k^H (-\sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_{jk} \mathbf{A}_{jk}) \mathbf{c}_k}. \quad (11)$$

式(11)在考虑了有用信号和对其他用户造成的干扰之间的均衡后,最大化 SLNR,获得功率分割系数。

瑞利商是系统特征向量的重要概念,功率分割系数向量可以通过求解特征向量进行计算:

$$\mathbf{c}_k = V_G^{\max}(\mathbf{E}_k, -\sum_{j=1, j \neq k}^K \lambda_{jk} \mathbf{A}_{jk}), \quad (12)$$

式中, $V_G^{\max}(\mathbf{A})$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的最大特征向量。

因此,基于均衡策略的功率分割算法描述如下:
输入:BS集合、用户集合、信道状态信息、波束矢量和虚拟功率

输出:功率分割系数

for 用户 $k, k \in U$ do

 计算用户 k 的信号功率 S_k 、 $\mathbf{E}_k$ 和 γ_k ;

 for 受用户 k 干扰的用户 j do

 计算其 γ_j 和 $\mathbf{g}_{jk}$

 计算 $\mathbf{A}_{jk}$ 和加权系数 λ_{jk}

 end for

 利用式(12)计算用户 k 的 $\mathbf{c}_k$

 更新 $\mathbf{c}_k$

end for

基于均衡策略的功率分割算法具有分布式架构,其具体步骤说明如下:

步骤 1:用户 k 获得信道状态信息,反馈信息至其 VC,VC 计算其信号功率 S_k 、 $\mathbf{E}_k$ 和用户 k 的 γ_k 。

步骤 2:受用户 k 干扰的用户 j 获得其信道状态信息,反馈至用户 j 的 VC,VC 计算其 γ_j 和 $\mathbf{g}_{jk}$,然后

用户 j 的 VC 将这些信息反馈至用户 k 的 VC。

步骤 3:用户 j 的 VC 计算 $\mathbf{A}_{jk}$ 和加权系数 λ_{jk} 。

步骤 4:计算用户 k 的功率分割系数向量 $\mathbf{c}_k$ 。

步骤 5:对用户 k 以外的用户重复步骤 1~4,每个用户更新其对应的功率分割系数向量。

步骤 6:所有用户更新功率分割系数,算法结束。

无论是 PBS 发送信息,还是用户反馈信息至其 VC,此信息交互过程中均含有较少的信息量。所提基于均衡策略的功率分割算法主要包含两个嵌套的循环。在内循环中,每个受干扰用户 j 的计算复杂度为 $O(K)$,则内循环的计算复杂度为 $O(K^2)$;在外层循环中,共需要进行 K 次循环,每次循环需要完成式(12)的矩阵运算,但矩阵维度由 VC 的 BS 数确定,十分有限,故所提算法的整体复杂度为 $O(K^3)$ 。

2.2 功率分割系数固定下的虚拟功率分配问题

当通过求解功率分割子问题 P_2 确定了功率分割系数向量 $\mathbf{c}$ 后,即可通过求解虚拟功率分配子问题 P_3 来获得虚拟功率 $\mathbf{p}$,实现更进一步的功率分配:

$$\begin{aligned} P_3: \quad & \max_{\mathbf{p}} \sum_{k \in U} \log_2(1 + \gamma_k^c(\mathbf{p})) \\ \text{s. t} \quad & \sum_{k \in U_m} (\mathbf{c}_{mk}^*)^2 p_k \leq \bar{p}_m, \forall m \in V_k, \end{aligned} \quad (13)$$

式中: $\gamma_k^c(\mathbf{p}) = \gamma_k(\mathbf{p}, \mathbf{c})|_{\mathbf{c}=\mathbf{c}^*}$ 为当 $\mathbf{c}=\mathbf{c}^*$ 时用户 k 的 SINR; $\mathbf{c}^*$ 为 $\mathbf{c}$ 的最佳值。

子问题 P_3 可以通过多种经典功率分配算法进行求解,如快速迭代注水算法^[9],这里不作过多描述。

综上所述,重叠 VC 内,功率分割和虚拟功率分配算法描述如下:

输入:BS集合、用户集合、信道状态信息和波束矢量

输出:用户功率分配

循环

(1) 利用基于均衡策略的功率分割算法求解子问题 P_2 ,确定功率分割系数向量 $\mathbf{c}$ 。

(2) 利用快速迭代注水功率分配算法求解子问题 P_3 ,确定虚拟功率 $\mathbf{p}$ 。

(3) 迭代直至收敛,获得用户功率分配。

3 仿真分析

为了评估本文所提算法的有效性,将所提算法

与等功率分割、比例公平功率分割^[10]和简单注水功率分割^[11]算法进行对比,通过 Matlab 软件进行系统级仿真。仿真过程中,VC 由部署在“田”字形网格的 PBS 组成,每个 PBS 之间相距 200 m,平均每个 PBS 周围有 6 个用户。用户分布分为两种情况:中心分布(用户随机分布在 PBS 半径为 35~55 m 的环形区域内);边缘分布(用户随机分布在 PBS 半径为 75~95 m 的环形区域内)。信道模型为 3GPP 所提出的空间信道模型(Spatial Channel Model, SCM)中的城市小小区信道模型。为了获得最终的和速率,整个系统级仿真过程包括了 VC 选择、比例公平的贪婪调度、最大化 SLNR 的波束形成和功率分配 4 个过程。主要的仿真参数如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

参 数	数 值
PBS 数目/个	6~12
用户数目/个/基站	6
载波带宽/MHz	10
载波数目/个	2
PBS 路径损耗/dB	$140.7+36.7\lg R$
阴影衰落/dB	8
Pico 基站发射功率/dBm	20
发射天线数目/个	2
接收天线数目/个	1

注: R 为路径距离,单位为 km。

图 3 和 4 分别为在中心分布和边缘分布两个场景下,采用不同算法时,9 个 PBS 和 54 个用户的和速率累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)对比曲线图。

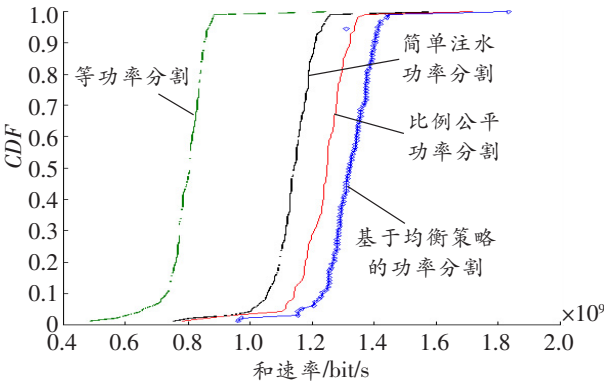


图 3 中心分布场景下和速率 CDF 对比曲线图

由图可知,本文所提的基于均衡策略的功率分割算法在性能上优于等功率分割、简单注水功率分割和比例公平功率分割算法。在等功率分割算法中,每个 BS 将功率平均分配给所服务的用户,实现了一定的公平性,但由于未考虑信道状态信息,系统

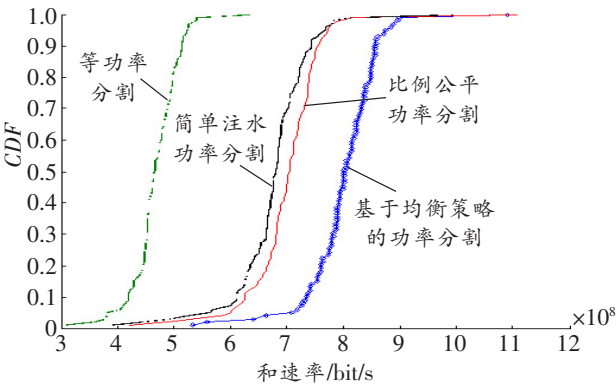


图 4 边缘分布场景下和速率 CDF 对比曲线图

性能较差;在比例公平功率分割算法中,所分割的功率与信道强度成正比,然而干扰并非均衡;简单注水功率分割算法考虑了噪声,未考虑干扰,因此性能并非最佳;本文所提基于均衡策略的功率分割算法充分利用了信道状态信息,且该方案不仅考虑了用户受到的干扰与噪声,还考虑到了该用户对其他用户造成的干扰,从而提高了干扰协调的性能以及系统和速率。

下面对 9 个 PBS 和 54 个用户在中心分布和边缘分布下的平均和速率(对应 CDF 曲线 50% 的位置)进行说明。表 2 给出了本文所提算法对比其他算法的平均和速率提升百分比。

表 2 平均和速率提升百分比

分布类型	对比算法平均和速率提升(%)		
	比例公平功率分割	简单注水功率分割	等功率分割
中心分布	5.96	15.67	63.92
边缘分布	13.51	17.76	72.11

由表 2 可知,与中心分布相比,本文所提算法在边缘分布的情况下对和速率的提升更为明显。由于场景从中心分布到边缘分布时,对用户的干扰与之前相比更为复杂及严重,但是本文所提算法有较强的干扰均衡作用,因此在和速率优化提升方面有一定的优势。

为了进一步证明本文所提算法的有效性,在用户中心分布和边缘分布两种场景下,将 PBS 数目从 6 个逐步增加至 9 和 12 个,并同时与比例公平功率分割算法进行对比,仿真结果分别如图 5 和 6 所示。由图可知,即使 BS 数目变多、干扰加大,所提算法仍然有效,能够较好地均衡有用信号与干扰,提高平均和速率。

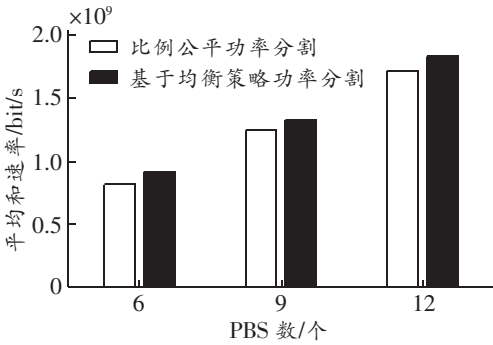


图 5 不同数目 PBS 在中心分布场景下的平均和速率

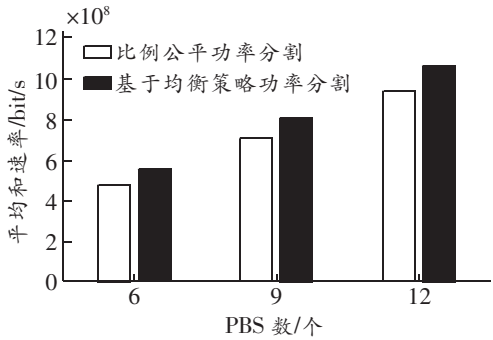


图 6 不同数目 PBS 在边缘分布场景下的平均和速率

4 结束语

本文研究了新型架构下重叠 VC 最大化和速率的功率分配方法,将原始问题分解为功率分割和虚拟功率分配两个子问题。为了实现最优的功率分割,通过定义最大化和速率的拉格朗日函数求解了功率分割问题。基于该思路,提出了基于均衡策略的功率分割算法,所提算法充分利用了信道状态信息,将最大化 VC 用户 SLNR 的特征向量作为功率分割系数向量,因此该功率分割算法可以平衡有用信号和干扰,是优化功率分配的关键因素。仿真结果表明,与传统算法相比,所提算法可以协调对其他用户的干扰,提高系统和速率。此外,该算法的思想在大规模多输入多输出和端到端通信应用中具有巨大的应用潜力,可以尝试进行下一步的研究。

参考文献:

[1] Kamel M, Hamouda W, Youssef A. Ultra-Dense Networks: A Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2522–2545.

[2] Buzzi S, I C L, Klein T E, et al. A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Com-

munications, 2016, 34(4): 697–709.

[3] 赵国锋,陈婧,韩远兵,等. 5G 移动通信网络关键技术综述 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2015, 27(4): 441–452.

[4] 尤肖虎,潘志文,高西奇,等. 5G 移动通信发展趋势与若干关键技术 [J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(5): 551–563.

[5] Hao P, Yan X, Yu N R, et al. Ultra Dense Network: Challenges, Enabling Technologies and New Trends [J]. China Communications, 2016, 13(2): 30–40.

[6] Wang X, Liu B, Su X. A Power Allocation Scheme Using Non-Cooperative Game Theory in Ultra-Dense Networks [C]// Wireless and Optical Communication Conference. Hualien, Taiwan: IEEE, 2018: 17823824.

[7] Chen L, Xia H, Zeng Z, et al. Joint Merging Overlapped Virtual Cells and Designing Beamforming in Ultra Dense Network [C]// International Symposium on Wireless Communication Systems. Bologna, Italy: IEEE, 2017: 17374161.

[8] Kim J, Lee H-W, Chong S. Virtual Cell Beamforming in Cooperative Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1126–1138.

[9] Su X, Liu B, Zhu X, et al. Low-Complexity Iterative Approximated Water-Filling based Power Allocation in an Ultra-Dense Network [J]. Entropy, 2016, 18(5): 1–13.

[10] Wu J, Zeng J, Su X, et al. Joint CoMP and Power Allocation in Ultra Dense Networks [C]// Wireless Telecommunications Symposium. Chicago, USA: IEEE, 2017: 16947781.

[11] 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.

[12] Mao T, Feng G, Liang L, et al. Distributed Energy-Efficient Power Control for Macro – Femto Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 718–731.

[13] 苏恭超,陈彬,林晓辉,等. 异构蜂窝网络中用户关联与基站功率的协同优化 [J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 7–13.

[14] Agyapong P K, Iwamura M, Staehle D, et al. Design Considerations for A 5G Network Architecture [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 65–75.