

超密集网络中干扰协调方法及性能分析

白 璐 刘婷婷 杨晨阳

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在超密集网络中, 全频重用能够提升网络的平均吞吐量, 但严重的小区间干扰限制了边缘用户数据率的提升。如何有效地管理超密集网络中的干扰、提升边缘用户数据率是重要的研究问题。本文研究了超密集网络中两种有代表性的干扰协调方法, 随机干扰协调和基于拓扑干扰协调, 分析了这两种方法的平均数据率和边缘用户数据率、以及系统参数对其性能的影响。理论分析和仿真的结果表明, 采用随机干扰协调能够提升边缘用户的信干噪比, 但不能提升边缘用户数据率。这使得当系统增加频率重用因子时, 会牺牲平均用户数据率同时也不能提高边缘用户数据率。采用基于拓扑的干扰协调能够同时提升边缘用户的信干噪比和数据率; 当频率重用因子较低时, 提高重用因子可以通过以较少牺牲平均用户数据率为代价有效提高边缘用户数据率, 从而实现平均数据率和边缘用户数据率的折中。

关键词: 随机干扰协调; 基于拓扑的干扰协调; 平均数据率; 边缘数据率; 干扰拓扑图

中图分类号: TN929.53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2015)10-1263-09

Interference Coordination Method and Performance Analysis in Ultra-dense Network (UDN)

BAI Lu LIU Ting-ting YANG Chen-yang

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

Abstract: In ultra-dense Networks (UDNs), full frequency reuse can improve the network throughput. However, severe inter-cell interference (ICI) degrades the experience of the cell edge users. To ensure the user experience at any location, it is crucial to investigate how to coordinate ICI effectively to improve the data rate of cell edge users. In this paper, we study two typical interference coordination methods, random interference coordination and topology-based interference coordination. We derive their average data rates and the data rates of cell edge users. Analytical and simulation results show that random interference coordination can improve the signal to interference and noise ratio (SINR) of cell edge users, but cannot improve their data rates. It indicates that simply increasing the reuse factor cannot improve the performance of cell edge users, meanwhile causes the loss of average data rate. By contrast, the topology-based interference coordination can enhance both the SINR and the data rate of cell edge users simultaneously. When frequency reuse factor is low, we can improve the data rate of cell edge users considerably at the cost of little loss of average rate. By increasing the frequency reuse factor, it can achieve a good trade-off between the average data rate and the data rate of cell edge users.

Key words: random interference coordination; topology-based interference coordination; average data rate; data rate of cell edge users; interference topology graph

1 引言

为满足指数级增长的无线数据流量需求, 第五代移动通信(5G)系统需上千倍地提升网络吞吐量^[1]。超密集网络(UDN)是一种有效提高系统频

谱效率的方式^[2], 成为 5G 发展的主要趋势之一。

为了提高吞吐量, 移动通信系统往往采用全频重用。在 UDN 中, 全频重用导致严重的小区间干扰(ICI), 不仅降低了小区边缘用户的性能体验, 也是限制网络吞吐量提升的主要因素。为了保证用户

在小区任何位置的性能体验,如何管理小区间干扰成为亟待解决的问题。

在 UDN 中,由于基站和用户的密度较大,并且基站和用户位置随机部署,很难在基站之间共享数据或瞬时信道信息进行复杂的干扰管理。因此,在面向 UDN 的已有研究中,一般采用正交资源分配来协调 ICI。且干扰协调方法主要分为两大类,一类是随机干扰协调方法,即每个小区随机选择一个正交资源块进行传输。由于在多个资源块中进行随机挑选,这样的协调方法可以在一定程度上降低 ICI 的影响。这种方法不需要任何信道信息,实现非常简单。

文献[3-5]针对随机干扰协调进行了研究。文献[3]设计了在用户最小数据率约束下,最大化系统吞吐量的频率重用因子,研究结论表明小区中心全频重用,小区边缘使用大于 1 的重用因子可以提高边缘用户数据率。文献[4]通过遍历搜索,得到了在考虑小区中心和小区边缘的用户公平性时,使系统吞吐量最大的频率重用因子,但并没有分析小区边缘用户性能与重用因子的关系。文献[3-4]考虑的都是基站规则部署的场景,不适用于基站随机部署的超密集网络。

文献[5-6]分析了基站随机部署,随机干扰协调时系统的覆盖概率和平均数据率。文献[5-6]将随机干扰协调后的干扰基站分布建模为密度减小的二维泊松点过程(PPP)模型,分析表明随机干扰协调可以提高边缘用户的信干噪比(SINR),但其代价是降低平均用户数据率。现有的工作在分析边缘用户性能时,都主要集中在分析边缘用户的 SINR,并没有分析边缘用户的数据率,因此,至今我们还不清楚这种随机干扰协调方法是否能够有效提高边缘用户的数据率。

另外一类干扰协调方法是基于拓扑的干扰协调方法,系统根据干扰影响的大小建立一个干扰网络拓扑,而后利用图论中的染色等算法进行资源分配。这类干扰协调方法需要基站之间共享拓扑信息,即基站到用户之间的大尺度信道信息。与传统干扰协调方法需要共享瞬时信道信息相比,共享拓扑信息可以通过较少的信息交换来获得干扰协调性能的提升。文献[7-9]针对基于拓扑的干扰协调方法进行了研究。

文献[7]使用图论中的染色算法,求解如何为各基站分配带宽,以最大化系统吞吐量,但这种方法并不能保证边缘用户的数据率性能。文献[8]使用遗传算法,求解如何最大化系统的资源利用率,但在构造拓扑图时,只考虑相邻基站间的干扰,并不能有效提高边缘用户数据率。文献[9]通过构造超图协调网络中累积的弱干扰,提高用户的 SINR。这些文献

的研究工作主要集中在如何设计干扰协调的算法,并没有分析如何选取构造拓扑时的门限以及干扰协调后的边缘用户数据率与系统参数的关系。

全频重用产生了 ICI,为了保证边缘用户性能,需要采用复杂的小区间干扰管理方法,在 UDN 中往往难以实现。在设计干扰管理方法之前,我们需要反思是否有必要在 UDN 中使用全频重用?是否直接增加频率重用因子就能有效避免小区间干扰,而无需要复杂的干扰管理技术?为了回答这些问题,本文面向 UDN 研究了两类干扰协调方法,随机干扰协调和基于拓扑的干扰协调方法,分析了采用不同干扰协调方法时系统能够达到的平均用户数据率和边缘用户数据率,揭示了系统参数、特别是频率重用因子对系统性能的影响。理论分析和仿真结果表明,若采用随机干扰协调,则增加频率重用因子会降低平均用户数据率,且不能提升边缘用户数据率。由于基于拓扑的干扰协调可以根据干扰的强弱、用户对抗干扰能力的差异来确定需要协调哪些干扰,并充分利用协调干扰的资源,所以增加频率重用因子可以通过较小牺牲平均用户数据率来换取边缘用户数据率的明显提升。可见在基站之间共享拓扑信息、根据用户需求建立干扰拓扑并协调干扰,可以有效改善小区边缘用户的体验。

2 系统模型

2.1 系统模型

考虑一个超密集干扰网络,如图 1 所示,基站和用户都只有一根天线,每个基站最多服务一个用户。基站与用户分别服从密度为 λ_{BS} 和 λ_{UE} 、相互独立的二维泊松点过程(PPP)。在面积为 A 的区域内,基站和用户的个数分别为 $A\lambda_{BS}$ 和 $A\lambda_{UE}$ 。每个用户选择最近的基站接入,没有用户接入的基站关闭。根据文献[10]的分析可知,基站开启概率为:

$$p_a = 1 - \left(1 + \frac{\lambda_{UE}}{3.5\lambda_{BS}}\right)^{-3.5} \quad (1)$$

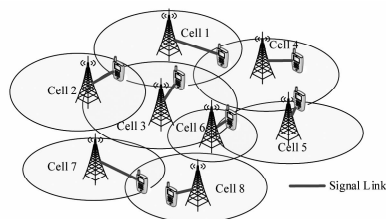


图 1 超密集干扰网络示意图

Fig. 1 Ultra-dense network

当 $\lambda_{BS} \gg \lambda_{UE}$ 时, $p_a \approx \lambda_{UE}/\lambda_{BS}$, 只有少数基站开启。当 $\lambda_{BS} \ll \lambda_{UE}$ 时, $p_a \approx 1$, 几乎所有基站都处于开启状态。则在给定的区域内, 开启的基站个数为 $K = A\lambda_{BS} p_a$, 用户数和小区数均为 K 。

2.2 正交资源分配

为了提高小区边缘用户的服务质量, 通过分配正交资源块(RB)来协调小区间干扰。这些资源块可以是正交的时隙或频段, 本文以正交频段为例进行分析。假设系统有 N 个正交资源块, 分配给 K 个小区。令变量 $\rho_{k,n} \in \{0, 1\}$ 表示给小区 k 分配的正交资源块, 则:

$$\rho_{k,n} = \begin{cases} 1, & \text{用户 } k \text{ 使用资源块 } n \\ 0, & \text{用户 } k \text{ 不使用资源块 } n \end{cases} \quad (2)$$

$$k = 1, \dots, K, n = 1, \dots, N$$

小区 k 分配到的全部资源块可以用如下的集合来表示:

$$\mathcal{Q}_k \triangleq \{n \mid \rho_{k,n} = 1\}, k = 1, \dots, K \quad (3)$$

为了提高网络的资源利用率, 在资源分配时允许一定的资源重用, 用集合 \mathcal{W}_n 表示哪些小区重用了第 n 个资源块, 则:

$$\mathcal{W}_n \triangleq \{k \mid \rho_{k,n} = 1\}, n = 1, \dots, N \quad (4)$$

根据(3)和(4), 可以得到网络的频率重用因子为:

$$\delta = \frac{1}{\frac{1}{KN} \sum_{k=1}^K |\mathcal{Q}_k|} = \frac{1}{\frac{1}{KN} \sum_{n=1}^N |\mathcal{W}_n|} \quad (5)$$

当全频重用时, 频率重用因子为 $\delta=1$, 所有用户使用全部资源块, 即 $\mathcal{Q}_1 = \dots = \mathcal{Q}_K = \{1, \dots, N\}$, $\mathcal{W}_1 = \dots = \mathcal{W}_N = \{1, \dots, K\}$ 。用频率重用因子 δ 的倒数可以表示系统的平均资源利用率, δ 越小, 网络的资源利用率就越高。

为了更好地理解(3)和(4)中定义的两个集合的物理意义, 图2给出了一个资源分配的例子, 把 $N=3$ 个正交资源块分配给 $K=4$ 个小区, 图中不同线型代表不同的资源块。

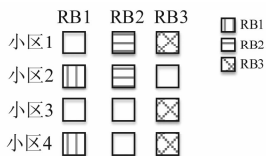


图2 $K=4, N=3$ 时的一种资源分配结果

Fig.2 Resource allocation result, $K=4, N=3$

从图2可见, 小区1分到资源块2和3, 因此小区1的资源集合为 $\mathcal{Q}_1 = \{2, 3\}$ 。资源块1同时被小区2和4所使用, 因此同时使用资源1的集合为 $\mathcal{W}_1 = \{2, 4\}$ 。

2.3 性能指标

用户 k 在资源块 n 上的接收信干噪比(SINR)为:

$$\gamma_k^n = \frac{S_k^n}{\sum_{j \in \mathcal{W}_n \setminus k} I_{k,j}^n + \sigma^2} \approx \frac{S_k^n}{\sum_{j \in \mathcal{W}_n \setminus k} I_{k,j}^n}, \quad \forall n \in \mathcal{Q}_k \quad (6)$$

其中 $S_{k,j}^n = g_{k,k}^n |h_{k,k}|^2 r_{k,k}^{-\alpha}$ 表示期望信号的接收功率, $I_{k,j}^n = g_j^n |h_{k,j}|^2 r_{k,j}^{-\alpha}$ 表示来自基站 j 的干扰功率, g_j^n 为基站 j 在资源块 n 上的发射功率, $h_{k,j}$ 为基站 j 到用户 k 的信道响应。假设所有资源块上的信道响应都服从瑞利分布; $r_{k,j}$ 为基站 j 到用户 k 的距离, α 为衰减因子; σ^2 为噪声功率。由于在 UDN 中干扰是影响系统性能的主要因素, 噪声的影响基本可以忽略。

用户 k 的数据率为:

$$R_k = \frac{1}{N} \sum_{n \in \mathcal{Q}_k} \log_2(1 + \gamma_k^n) \quad (7)$$

根据(7), 可得网络中用户的平均数据率为:

$$R_{\text{avg}} = \frac{1}{KN} \sum_{k=1}^K \sum_{n \in \mathcal{Q}_k} \log_2(1 + \gamma_k^n) \quad (8)$$

小区边缘用户数据率满足如下关系:

$$P(R < R_{\text{edge}}) = p_{\text{edge}} \quad (9)$$

其中 $P(x)$ 表示事件 x 发生的概率, p_{edge} 表示边缘用户在小区中所占的比例, 一般取 5%, 故 R_{edge} 表示网络中最差 5% 的用户所对应的数据率。

3 随机干扰协调及性能分析

在 UDN 中有两种典型的动态干扰协调方法。一种方法是系统预先给定协调的资源块数 N , 每个小区在这 N 个资源块中随机挑选一个, 我们将这种方法称为“随机干扰协调”。另一种方法是系统根据干扰影响的大小建立一个干扰网络拓扑并根据拓扑进行资源分配, 将这种方法称为“基于拓扑的干扰协调”。我们将在这一节中分析随机干扰协调方法的平均数据率和边缘用户数据率, 在下一节考虑基于拓扑的干扰协调方法。

下面首先介绍如何分析平均数据率和边缘用户数据率。

3.1 数据率与覆盖概率

定义用户的覆盖概率为:

$$P_c(T) \triangleq P(\gamma > T) \quad (10)$$

即网络中用户 SINR 大于给定门限 T 的概率, 也表示在网络中随机选取一个用户其 SINR 大于 T 的概率。

对覆盖概率进行积分, 可以得到平均数据率为:

$$R_{\text{avg}} \triangleq \frac{1}{\delta} E(\log_2(1 + \gamma)) \quad (11a)$$

$$= \frac{1}{\delta} \int_0^{\infty} P(\log_2(1 + \gamma) > t) dt \quad (11b)$$

$$= \frac{1}{\delta} \int_0^{\infty} P_C(2^t - 1) dt \quad (11c)$$

边缘用户数据率为 $R_{\text{edge}} = 1/N \log_2(1 + \gamma_{\text{edge}})$, 其中 γ_{edge} 为边缘用户 SINR。由于 R_{edge} 与 γ_{edge} 之间存在一一对应的关系, 因此有:

$$P(\gamma < \gamma_{\text{edge}}) = P(R < R_{\text{edge}}) = p_{\text{edge}} \quad (12)$$

根据(10)中覆盖概率的定义, 不难得到 $P(\gamma < \gamma_{\text{edge}}) = 1 - P_C(\gamma_{\text{edge}}) = 1 - P_C(2^{NR_{\text{edge}}} - 1)$ 。代入(12)中, 可以得到边缘用户数据率与覆盖概率的关系为:

$$P_C(\gamma_{\text{edge}}) = P_C(2^{NR_{\text{edge}}} - 1) = 1 - p_{\text{edge}} \quad (13)$$

从(11)和(13)可见, 覆盖概率是推导平均数据率和边缘用户数据率的关键, 因此下面将研究覆盖概率。

3.2 随机干扰协调性能

当系统采用 N 个正交资源块进行随机干扰协调时, 系统的频率重用因子就等于资源块数, 即:

$$\delta^{\text{Rand}} = N \quad (14)$$

协调后, 单位资源块上的用户个数降为 $K/N = A\lambda_{\text{BS}} p_a / N$, 干扰基站分布为密度为 $\lambda_l = \lambda_{\text{BS}} p_a / N$ 的 PPP。根据参考文献[11-12]中的分析, 不难得到随机干扰协调后的覆盖概率为:

$$P_C^{\text{Rand}}(T) = \frac{1}{1 + \frac{P_a}{N} f(T, \alpha)} \quad (15)$$

其中

$$f(x, \alpha) \triangleq x^{\frac{2}{\alpha}} \int_{x^{-\frac{2}{\alpha}}}^{\infty} \frac{1}{1 + u^{\frac{\alpha}{2}}} du \quad (16)$$

将(15)代入(11c), 可以得到平均数据率:

$$R_{\text{avg}}^{\text{Rand}}(N) = \int_0^{\infty} \frac{1}{N + p_a f(2^t - 1, \alpha)} dt \quad (17)$$

将(15)代入(13), 可以得到边缘用户数据率:

$$P_C^{\text{Rand}}(2^{NR_{\text{edge}}} - 1, N) = \frac{1}{1 + \frac{P_a}{N} f(2^{NR_{\text{edge}}} - 1, \alpha)} = 1 - p_{\text{edge}} \quad (18)$$

从(16)可见, $f(x, \alpha)$ 中包含复杂的积分, 很难直接推导出边缘用户数据率的显式表达式。由于边缘用户的数据率一般非常低, 可以采用当 x 较小时 $f(x, \alpha)$ 的近似表达式。当 $x \ll 1$ 时, $f(x, \alpha)$ 中积分的下限满足 $x^{-\frac{2}{\alpha}} \gg 1$ 。由于积分变量 u 在整个积分范围内都满足 $u \gg 1$, 因此 $f(x, \alpha)$ 中分式的分母可以近似为 $1 + u^{\frac{\alpha}{2}} \approx u^{\frac{\alpha}{2}}$ 。代入(16), 可得:

$$f(x, \alpha) \approx x^{\frac{2}{\alpha}} \int_{x^{-\frac{2}{\alpha}}}^{\infty} \frac{1}{u^{\frac{\alpha}{2}}} du = \frac{x}{\alpha/2 - 1} \quad (19)$$

将(19)代入(15), 根据(13)可以得到边缘用户的 SINR 和数据率, 分别为:

$$\gamma_{\text{edge}}^{\text{Rand}} \approx \frac{(\alpha/2 - 1) p_{\text{edge}} N}{(1 - p_{\text{edge}}) p_a} \quad (20a)$$

$$R_{\text{edge}}^{\text{Rand}} \approx \frac{1}{N} \log_2 \left(1 + \frac{(\alpha/2 - 1) p_{\text{edge}} N}{(1 - p_{\text{edge}}) p_a} \right) \quad (20b)$$

由于边缘用户 SINR 较小, 根据 $\ln(1+x) \approx x, \forall x \ll 1$, 边缘用户数据率可以进一步近似为:

$$R_{\text{edge}}^{\text{Rand}} \approx \log_2 e \frac{(\alpha/2 - 1) p_{\text{edge}}}{(1 - p_{\text{edge}}) p_a} \quad (21)$$

根据(17)和(21)中平均数据率和边缘用户数据率的表达式, 可见影响随机干扰协调性能的主要因素有基站开启概率 p_a 、信道衰减因子 α , 以及频率重用因子 $\delta^{\text{Rand}} = N$ 。具体地, 这些因素产生的影响如下:

1) 当基站密度与用户密度的比例 $\lambda_{\text{BS}}/\lambda_{\text{UE}}$ 固定时, 开启概率 p_a 也固定, 此时增加基站密度不影响网络性能。

2) 当用户密度 λ_{UE} 固定时, 增加基站密度 λ_{BS} 可以降低开启概率 p_a , 此时可以同时提高平均数据率和边缘用户数据率, 边缘用户数据率与 p_a 呈反比。

3) 当衰减因子 α 单调递增时, 平均数据率和边缘用户数据率都增加。边缘用户数据率随着 α 线性增加。

4) 当频率重用因子 $\delta^{\text{Rand}} = N$ 增加时, 平均数据率会单调递减, 而边缘用户数据率保持不变。

从第4条结论, 可以得到如下结论。

结论 1 当网络的性能指标是最高数据率时(包括平均数据率和边缘用户数据率), 采用随机干扰协调最优的频率重用因子是 $\delta^{\text{Rand}} = 1$, 即全频重用。

已有文献的分析表明, 使用正交资源进行干扰协调会降低平均用户数据率。针对边缘用户性能, 文献[3-4]中的分析表明可以提高边缘用户的 SINR, 但是是否能够提高边缘用户数据率尚无明确结论。从(20a)可见, 增加频率重用因子可以提高边缘用户的 SINR。由于边缘 SINR 一般较低, N 倍增加 SINR 可以为数据率提供 N 倍的增益。但是, 从(20b)可见, 增加频率重用因子导致频谱利用率下降 N 倍, 完全抵消了 SINR 提升带来的增益。可见, 无论增加或降低重用因子都不能改变边缘用户的数据率。这意味着, 在 UDN 中单纯增加频率重用因子不能改善边缘用户性能。

3.3 随机干扰协调存在的问题

随机干扰协调简单、易于实现, 但其存在如下

问题 1 没有区分强干扰和弱干扰,所有干扰都用相同的概率去协调。由于每个小区随机选择资源,无论协调干扰的正交资源数 N 多大,相邻小区所选资源仍然有一定的概率发生碰撞,导致强干扰。

问题 2 没有区分小区中心和边缘用户,对于所有用户都提供相同的性能增益。事实上,干扰主要制约小区边缘用户的性能。对于小区中心用户进行干扰协调不仅不能带来明显的 SINR 增益,还会导致资源利用率的急剧下降,从而降低了网络的总吞吐量。

问题 3 所有用户都只使用一个资源块,未利用资源复用的机会。在 UDN 中,并非所有的小区都产生强干扰,也并非所有的小区都受到强干扰,故网络中有很多小区有机会使用多个资源块并不对其他用户产生干扰。可见,限定所有小区只使用一个资源块也是导致随机干扰协调性能较差的重要原因。

4 基于拓扑的干扰协调

鉴于随机干扰协调存在的问题,下面考虑基于拓扑的干扰协调方法。系统需要先根据用户需求建立一个干扰拓扑来反映需要协调哪些小区之间的干扰,再依据干扰拓扑来分配资源协调干扰。与随机干扰协调相比,基于拓扑的干扰协调方法可以:1) 区分强干扰和弱干扰,使正交资源尽可能用于协调强干扰,2) 区分小区中心和边缘用户,根据用户的需求和抗干扰能力来确定需要协调哪些干扰;3) 允许一个小区使用多个正交资源,充分利用资源复用的机会。

4.1 基于拓扑的干扰协调

为了建立干扰拓扑,需要先确定需要协调哪些干扰。令 $\beta_{k,j} \in \{0,1\}$ 表示是否需要协调小区 k 与小区 j 之间的干扰,则:

$$\beta_{k,j} = \begin{cases} 1, & \text{协调小区 } k, j \text{ 间干扰} \\ 0, & \text{不协调小区 } k, j \text{ 间干扰} \end{cases} \quad (22)$$

干扰协调的目的是为了提高边缘用户、即最差用户的性能,因此希望干扰协调后每个用户的 SINR 满足如下的条件:

$$\tilde{\gamma}_k > \gamma_{\min}, k = 1, \dots, K \quad (23)$$

其中 γ_{\min} 为最小 SINR 约束, $\tilde{\gamma}_k$ 为干扰协调后第 k 个用户的 SINR, 可以表示为:

$$\tilde{\gamma}_k = \frac{S_k}{\sum_{j=1, j \neq k}^K (1 - \beta_{k,j}) I_{k,j}}, k = 1, \dots, K \quad (24)$$

其中 S_k 为期望信号功率, $I_{k,j}$ 为小区 j 对小区 k 产生的干扰功率。如果协调了小区 k 与小区 j 之间的干

扰,即 $\beta_{k,j} = 1$, 那么小区 j 就不再对小区 k 产生影响。

下面需要确定 $\beta_{k,j}$ 的值来满足 (23) 中的约束。为了提高干扰协调的效率,设计 $\beta_{k,j}$ 时需要尽可能协调强干扰,而非弱干扰。在初始设置的时候,将所有的 $\beta_{k,j}$ 取值设为 0, 根据每个小区干扰功率 $I_{k,j}$ 的大小进行降序排列,然后从强到弱开始协调干扰。当协调一个干扰时,就将对应的 $\beta_{k,j}$ 设为 1。然后把协调后的 SINR $\tilde{\gamma}_k$ 与最小 SINR 约束 γ_{\min} 进行比较,判断是否满足 (23) 中的约束,如果不满足就继续协调,直到 (23) 中的约束得到满足为止。根据上述流程,可以确定所有的 $\beta_{k,j}$ 值。

文献[7]在建立干扰拓扑时也考虑了先协调强干扰满足最小信干比下界。但是,我们本文建立拓扑的方法与文献[7]中的方法并不完全相同,这是由于我们建立拓扑的时候引入了协调变量 $\beta_{k,j}$, 由于 $\beta_{k,j}$ 具有对称性,即 $\beta_{k,j} = \beta_{j,k}$, 在利用 (24) 计算信干噪比时避免重复考虑已经被协调过的干扰影响,可以用比文献[7]更少的干扰协调资源满足相同的最小 SINR 约束。具体地,如果小区 k 与小区 j 相互产生干扰,建立拓扑时先考虑小区 k 再考虑小区 j , 如果考虑小区 k 时已经协调小区 j 产生的干扰,那么小区 k 就不再对小区 j 产生干扰。这样会降低小区 j 的初始总干扰功率,使得只需要协调少数几个强干扰就可以满足最小 SINR 约束,因此达到相同的 SINR 下限所需的干扰协调资源开销比文献[7]更少。

当 $\beta_{k,j}$ 的取值确定后,就可以建立一个干扰拓扑,可以用如下的无向图来表示:

$$G = (\mathcal{K}, \mathcal{E}) \quad (25)$$

其中 $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 表示拓扑图中的节点集合,由网络中的所有小区组成; \mathcal{E} 表示拓扑图中的边集,满足 $(k, j) \in \mathcal{E}, \forall \beta_{k,j} = 1$ 。当需要协调小区 k 与小区 j 之间的干扰时,就在干扰拓扑图中节点 k 与节点 j 之间增加一条边,干扰拓扑图中的所有边表示了需要协调的全部小区间干扰。

确定了干扰拓扑图 $G = (\mathcal{K}, \mathcal{E})$ 后,就可以采用图论中染色的方法进行资源分配。染色算法可以保证给每个节点分配一个颜色,也就是每个小区分配一个资源块,同时保证有边连接的节点之间使用不同的颜色,即需要协调干扰的小区使用正交的资源块。经典的染色方法没有考虑资源重用机会^[9-10], 存在一定的资源浪费。为了充分利用资源,考虑极大独立集方法^[15]来设计每个资源块上的小区集合。独立集是指在一个节点的集合中,任意两个节点都不相邻。极大独立集是指一个独立集包含了最多

的不相邻节点。

令 $\mathcal{D}_n(\mathcal{G})$ 表示图 \mathcal{G} 的第 n 个极大独立集,则使用资源块 n 的集合满足:

$$\mathcal{W} = \mathcal{D}_n(\mathcal{G}), n = 1, \dots, N^{\text{Topo}} \quad (26a)$$

$$\bigcup_n^{N^{\text{Topo}}} \mathcal{W}_n = \mathcal{K} \quad (26b)$$

其中 $N^{\text{Topo}} = \chi(\mathcal{G})$ 表示协调干扰所需的资源块数, $\chi(\mathcal{G})$ 表示图 \mathcal{G} 的染色数,即协调干扰所需的最少资源。(26a)保证每个资源都尽可能被重用,(26b)保证所

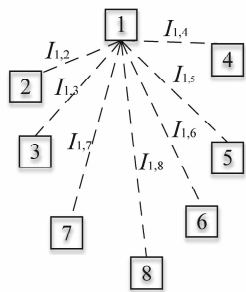


图 3a 干扰拓扑建立过程

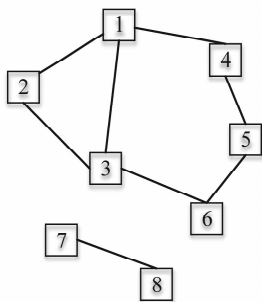


图 3b 干扰拓扑图

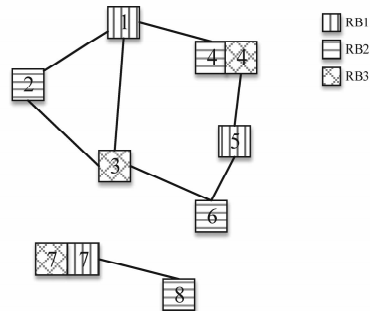


图 3c 正交资源分配结果

Fig. 3a Interference topology construction

Fig. 3b Interference topology graph

Fig. 3c Resource allocation result

为了便于理解基于拓扑的干扰协调方法,图 3a ~ 图 3c 中给出了图 1 所示的 UDN 中干扰拓扑图的建立过程、最终建立的干扰拓扑图、以及正交资源分配的结果。如图 3a 所示,网络中一共有 8 个小区。对于小区 1,首先需要评估来自其他 7 个小区的基站对用户 1 产生的干扰,然后对这些干扰进行排序,若来自小区 2、3、4 的干扰对用户 1 产生的干扰最强,则协调这三个小区的干扰后可以满足用户 1 的最小 SINR 需求。因此,在图 3b 中建立的干扰拓扑图中,把代表小区 1 的节点与代表小区 2、3、4 的节点之间的边相连接。依次评估其他 7 个用户的 SINR,可以确定需要协调哪些干扰,得到如图 3b 所示的干扰拓扑图。根据干扰拓扑图,采用(26)中所示的资源分配方法得到的分配结果如图 3c 所示。使用相同资源的节点所构成的集合都是拓扑图的极大独立集。如果所有的节点都只使用一个资源块,那么网络的频率重用因子为 $\delta = 3$ 。当考虑了频率重用的机会后,频率重用因子降为 $\delta = 2.4$,这样可以提高资源利用率和用户的平均数据率。

4.2 基于拓扑干扰协调的性能

本文考虑的基于拓扑干扰协调方法在建立拓扑时主要协调强干扰,因此可以避免随机干扰协调存在的问题 1。

有的小区都被分配到资源。

此时,网络的频率重用因子为:

$$\delta^{\text{Topo}} = \frac{1}{\frac{1}{KN^{\text{Topo}}} \sum_{n=1}^{N^{\text{Topo}}} |\mathcal{W}_n|} \quad (27)$$

在随机干扰协调方法中,网络的频率重用因子是一个固定参数,等于协调干扰所用的资源块数。而在基于拓扑干扰协调方法中,频率重用因子是一个变量,与干扰拓扑的特征有关。

协调后的干扰总功率为 $\tilde{I}_k = \sum_{j=1, j \neq k}^K (1 - \beta_{k,j}) I_{k,j}$,

满足 $\tilde{I}_k \leq S_k / \gamma_{\min}$ 。这里, S_k 是期望信号的功率,小区中心用户的 S_k 值相对较高,而小区边缘用户的 S_k 值相对较低。在满足最小 SINR 约束时,对于小区中心用户的干扰总功率限制较低,而对小区边缘用户的干扰总功率限制较高。因此,基于拓扑的方法可以根据小区中心和小区边缘用户抗干扰能力的差异性来动态协调干扰,可以避免随机干扰协调存在的问题 2,从而提高网络性能。

本文考虑的基于拓扑干扰协调方法利用极大独立集来分配资源,在满足最小 SINR 的约束下最大程度地复用频率资源,有效避免了随机干扰协调存在的问题 3。

当采用基于拓扑的干扰协调后,干扰基站不再服从均匀分布,产生强干扰的基站密度较低,而产生弱干扰的基站相对密度较高。因此,即使频率重用因子相同,基于拓扑的干扰协调能够比随机干扰协调提供更高的覆盖概率,从而可以达到更高的边缘用户数据率 R_{edge} 和平均数据率 R_{avg} 。

与随机干扰协调类似,基站开启概率 p_a 、信道衰减因子 α ,以及频率重用因子 δ^{Topo} 也影响基于拓扑干扰协调性能。开启概率和衰减因子产生的影响对两种干扰协调方法基本类似,但是频率重用因

子产生的影响对两种干扰协调方法有较大的差别,下面重点分析频率重用因子的影响。

在基于拓扑的干扰协调方法中,频率重用因子是随着最小 SINR 约束 γ_{\min} 单调增加的变量。通过后面的仿真分析可以看到采用基于拓扑的干扰协调方法,当频率重用因子较小、例如 $\delta \in [1, 2.5]$ 时,增加 δ 虽然会降低平均用户数据率,但可以有效提高边缘用户数据率。因此,采用基于拓扑的干扰协调方法时存在平均数据率和边缘用户数据率的折中区域。通过增加最小 SINR 约束 γ_{\min} 提高重用因子,可以牺牲一定的平均用户数据率来换得边缘用户性能的明显提高。因此,可以得到如下的结论。

结论 2 对于基于拓扑的干扰协调,当频率重用因子较小时,提高重用因子可以通过牺牲一定的平均用户数据率来提高边缘用户数据率,在平均数据率和边缘用户数据率间进行折中。

基于拓扑的干扰协调之所以能够提高边缘用户的数据率,是因为进行干扰协调时考虑了强干扰和弱干扰的差异性以及小区中心和边缘用户对抗干扰能力的差异性。因此,即使考虑到增加频率重用因子所带来的资源利用率降低,边缘用户的数据率仍然能够随重用因子单调递增。

5 仿真结果

下面通过仿真来分析和比较两种干扰协调方法的性能,主要仿真参数^[14]如表 1 所示。

表 1 仿真环境与参数设置

Tab.1 Simulation environment and parameters settings

参数	数值
网络区域	半径为 250 m 的圆形区域
基站密度 λ_{BS}	0.0005 ~ 0.008
用户密度 λ_{UE}	0.0005
发射天线数 N_t	1, 2
发射功率	30 dBm
噪声功率	-95 dBm
小尺度信道衰落	瑞利衰落
路径损耗模型	$36.8 + 40 \log_{10}(d)$, d 为基站与用户间的距离

为了分析基站和用户密度对性能的影响,图 4 给出了在全频重用、 $\lambda_{BS}/\lambda_{UE}$ 不同时数据率的累积概率密度函数(CDF)。由图可见,数值分析结果与仿真结果虽然存在一定的间距,但是性能变化规律一

致,能够反映系统参数的影响。同时,还可以看到增加 $\lambda_{BS}/\lambda_{UE}$ 对平均用户数据率 R_{avg} 和边缘用户数据率 R_{edge} 的影响。当 $\lambda_{BS}/\lambda_{UE}$ 由 0.5 增加至 16 时, R_{avg} 由 2.6 bps 增加到 6.8 bps, R_{edge} 由 0.09 bps 增至 0.97 bps。可见,当用户数固定时,增加基站数能提升网络的吞吐量。

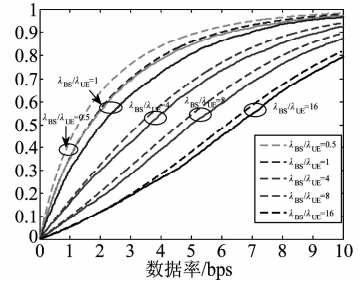


图 4 数据率 CDF 的数值(虚线)和仿真(实线)结果, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 0.5 \sim 16$

Fig. 4 Numerical (dash line) and simulation (solid line) results for CDF of data rate, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 0.5 \sim 16$

图 5 和图 6 给出了当采用随机干扰协调时,不同频率重用因子下的 SINR 和用户数据率的 CDF 曲线。图 5 中还比较了数值分析和仿真结果,图中虚线表示数值结果,实线表示仿真结果。不难看出数值分析与仿真结果变化规律一致,较为准确地反应了频率重用因子的影响。

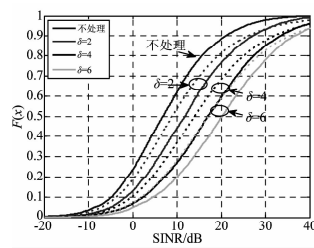


图 5 随机干扰协调时 SINR 的 CDF, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$
Fig. 5 CDF of SINR with random interference coordination, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$

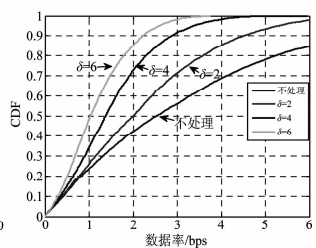


图 6 随机干扰协调的数据率 CDF, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$
Fig. 6 CDF of data rate with random interference coordination, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$

从图 5 可见,增加频率重用因子可以有效提高用户的 SINR。从图 6 可见,增加频率重用因子不仅不能提升边缘用户数据率 R_{edge}^{Rand} ,反而还会降低平均数据率 R_{ave}^{Rand} ,这些结果与前面的理论分析结论一致。

图 7 和图 8 给出了当采用基于拓扑的干扰协调时,不同频率重用因子下 SINR 和用户数据率的

CDF 曲线。为了与随机干扰协调的结果进行比较,我们选择了不同的最小 SINR 约束,使得最终的频率重用因子与随机干扰协调的频率重用因子相同。从图 7 的结果可见,增加频率重用因子可以降低网络中的干扰,提高用户的 SINR 分布。从图 8 可见,不处理时边缘用户数据率为 0.14 bps,采用基于拓扑的干扰协调方法时,能够将边缘用户数据率提升至 0.5 bps,可见基于拓扑的干扰协调方法能够提升边缘用户数据率。

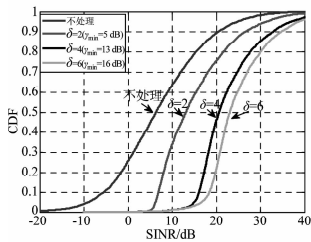


图 7 基于拓扑干扰协调 SINR 的 CDF, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$
Fig. 7 CDF of SINR with topology-based interference coordination, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$

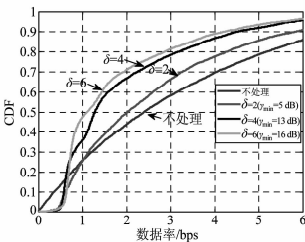


图 8 基于拓扑协调数据率 CDF 的仿真结果, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$
Fig. 8 CDF of data rate with topology-based interference coordination, $\lambda_{BS}/\lambda_{UE} = 1$

图 9 比较了分别采用随机干扰协调和基于拓扑干扰协调时不同重用因子 δ 对平均 SINR 和边缘 SINR 的影响。从图 9 可见,增加频率重用因子可以同时提高两种干扰协调方法的平均和边缘 SINR。当采用随机干扰协调时,增加重用因子只能为边缘 SINR 提供很小的增益,而当采用基于拓扑的干扰协调时,增加重用因子能够显著提高边缘 SINR,可见基于拓扑的干扰协调能够有效地协调网络中的强干扰,获得更高的效率。

图 10 比较了基站端发射天线数为 1 或 2 时,不同重用因子 δ 对平均和边缘数据率的影响。从图 10 可见,当采用相同的频率重用因子时,与随机干扰协调方法相比,基于拓扑的干扰协调方法可以达到更高的边缘用户数据率和平均数据率。当基站端发射天线数为 1,频率重用因子为 2 时,随机干扰协调的边缘用户数据率和平均数据率为 0.11 bps 和 2.2 bps,而基于拓扑干扰协调的边缘用户数据率和平均数据率为 0.57 bps 和 2.6 bps。与随机干扰协调相比,基于拓扑的干扰协调把边缘用户数据率提升了 418%。增加频率重用因子使两种干扰协调

方法的平均数据率降低,但是能提高基于拓扑干扰协调的边缘用户数据率、不能提高随机干扰协调的边缘用户数据率。

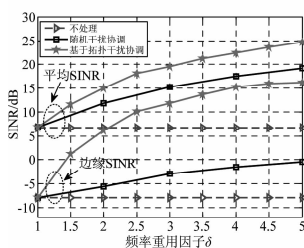


图 9 不同干扰协调方法的平均 SINR 和边缘 SINR
Fig. 9 $SINR_{avg}$ and $SINR_{edge}$ versus different interference coordination method

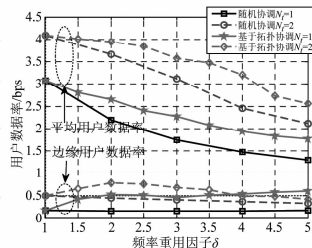


图 10 不同干扰协调方法的平均数据率和边缘数据率
Fig. 10 R_{avg} and R_{edge} versus different interference coordination method

当发射天线数为 2,频率重用因子为 2 时,随机干扰协调的平均用户数据率和边缘用户数据率分别为 3.95 bps 和 0.45 bps。基于拓扑的干扰协调方法平均用户数据率和边缘用户数据率分别为 3.67 bps 和 0.79 bps。与全频重用相比,基于拓扑的干扰协调将边缘用户数据率提升了 62%。因此,在多天线的场景下,基于拓扑的干扰协调仍然能够同时提升边缘用户的 SINR 与数据率,随机协调并不能带来边缘用户数据率的增益。

以上分析表明,为了提高边缘用户数据率,应该采用基于拓扑的干扰协调方法。

6 结论

本文研究了超密集网络中分别采用随机干扰协调和基于拓扑的干扰协调所能够达到的平均用户数据率和边缘用户数据率,分析了系统参数、尤其是频率重用因子对两种协调方法性能的影响。数值和仿真的结果表明,对于随机干扰协调,增加频率重用因子会降低平均用户数据率且不能提升边缘用户数据率。而对于基于拓扑的干扰协调,可以通过增加频率重用因子在平均数据率和边缘用户数据率进行折中。上述结果说明,在 UDN 中需要通过提高频率重用因子来提高边缘用户数据率。不过,若在干扰协调时不考虑干扰的强弱影响和用户的抗干扰能力差异性,则增加频率重用因子并不能改善边缘用户性能。在基站之间共享简单的拓扑信息、根据用户需求建立干扰拓扑并协调干扰才

能有效提升小区边缘用户的体验。

参考文献

- [1] Osseiran A, Boccardi F, Braun V, et al. Scenarios for 5G mobile and wireless communications; the vision of the METIS project[J]. IEEE Commun. Mag., 2014, 52(5): 26-35.
- [2] Wang C X, Haider F, Gao X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks[J]. IEEE Commun. Mag., 2014, 52(2):122-130.
- [3] Assaad M. Optimal Fractional Frequency Reuse (FFR) in Multicellular OFDMA System[C] // IEEE VTC-Fall, 2008: 1-5.
- [4] Afolabi A S, Munkbat E, Ohta C, et al. Fair Resource Partitioning between Cell-Center and Cell-Edge of FFR-Based Multi-Tier Wireless Access Networks[C] // IEEE 7th International Conference on WiCOM., 2011: 1-4.
- [5] Andrews J G, Baccelli F, Ganti R. A Tractable Approach to Coverage and Rate in Cellular Networks[J]. IEEE Trans. on Commun., 2011, 59(11): 3122-3134.
- [6] Yu S M, Kim S L. Downlink capacity and base station density in cellular networks[C] // IEEE 11th International Symposium on WiOpt, 2013: 119-124.
- [7] Zheng K, Wang Y, Lin C, et al. Graph-based interference coordination scheme in orthogonal frequency-division multiplexing access femtocell networks[J]. Iet Communications, 2011, 5(17): 2533-2541.
- [8] Necker M C. A Graph-Based Scheme for Distributed Interference Coordination in Cellular OFDMA Networks[C] // IEEE VTC-Spring, 2008: 713-718.
- [9] Feng J, Tao M. Hypergraph-based frequency reuse in dense femtocell networks[C] // IEEE CIC, 2013: 537-542.
- [10] Li C, Zhang J, Letaief K B. Throughput and Energy Efficiency Analysis of Small Cell Networks with Multi-Antenna Base Stations[J]. IEEE Trans. on Wireless Commu-

ni., 2014, 13(5): 2505-2517.

- [11] Haenggi M, Andrews J G, Baccelli F, et al. Stochastic Geometry And Random Graphs For The Analysis And Design Of Wireless Networks[J]. IEEE J. on Sel. Areas in Commun., 2009, 27(7):1029-1046.
- [12] Baccelli F, Klein M, Lebourges M, et al. Stochastic geometry and architecture of communication networks[J]. Telecommunication Systems, 1997, 7(1-3):209-227.
- [13] Bai L, Liu T, Chen Z, et al. A graph-based interference topology control for ultra-dense networks[C] // IEEE ICSP, 2014: 1676-1681.
- [14] 3GPP TSG RAN WG4. R4-2009, Simulation assumptions and parameters for FDD HeNB RF requirements Alcatel-Lucent[S]. Vodafone, 2009.

作者简介



白璐 女,1993年生,陕西人。北京航空航天大学硕士生,主要研究方向为密集网络中的干扰协调。

E-mail: lubai@buaa.edu.cn



刘婷婷 女,陕西人,北京航空航天大学副教授,主要研究方向为干扰信道的自由度分析与干扰对准算法优化、双向中继的信号对准、能量高效传输。

E-mail: ttliu@buaa.edu.cn



杨晨阳 女,浙江杭州人,博士,北京航空航天大学教授、博士生导师,主要研究方向为面向5G内容中心架构、超密集网络、Massive MIMO的高能效、高谱效传输与干扰控制等。

E-mail: cyyang@buaa.edu.cn