

文章编号:1007-5321(2020)06-0082-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-173

全双工小蜂窝中基于最大流算法的用户匹配策略

赵飞飞¹, 周墨淼², 胡树楷¹, 杨涛¹

(1. 中国电子科技集团公司第38研究所, 合肥 230088;

2. 合肥工业大学 工业安全与应急技术安徽省重点实验室, 合肥 230601)

摘要: 在全双工基站使能的新型小蜂窝中,考虑用户间同频干扰对服务质量的影响,提出了一种最大化满意用户对数的上下行用户匹配策略,用于服务质量敏感的各类新型通信业务. 首先依据用户的速率需求和其可达的实际传输速率,构造包含所有潜在满意上下行用户对匹配的可行图;再将可行图转化为单位容量网络,并证明单位容量网络的最大流数目即为最大满意用户对数目,最终由最大流路径推导出最优匹配策略. 仿真结果表明,所提策略可获得超出最大和速率策略两倍的满意用户对数,且仅具有多项式级的复杂度.

关键词: 全双工; 服务质量; 用户匹配; 最大流

中图分类号: TN915.02

文献标志码: A

User Matching with Maximum Flow Algorithm for Full-Duplex Small Cells

ZHAO Fei-fei¹, ZHOU Mo-miao², HU Shu-kai¹, YANG Tao¹

(1. The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Industry Safety and Emergency Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: Considering the impact of the inter-user interference on the quality of service (QoS) in full-duplex-enabled small cells, an uplink-downlink user matching strategy was proposed with the goal of maximizing the number of satisfied user pairs. The strategy is applicable to some newborn QoS-sensitive services. Firstly, based on the desired rate and the achievable rate of each user, a feasible graph was established to show all the possible satisfied user pairs. Then, the feasible graph was transformed into a unit-capacity network. The max-flow number of the unit-capacity network was proved to be the maximum number of satisfied user pairs, and the optimal matching strategy can be derived from the max-flow route. Finally, simulations demonstrated that the proposed strategy trebled the number of satisfied user pairs as the max-sum-rate strategy while maintaining polynomial complexity.

Key words: full-duplex; quality of service; user matching; max-flow

随着自干扰消除(SIC, self-interference cancellation)理论的不断突破,同时同频全双工(以下简称

全双工)技术已日趋成熟并初步实现商用^[1]. 在该背景下,基于全双工基站的小蜂窝必然在未来逐渐

收稿日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(62001152); 安徽省自然科学基金项目(2008085QF321); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(JJ2020HGQA0184, PA2020GDSK0082)

作者简介: 赵飞飞(1990—),女,工程师.

通信作者: 周墨淼(1991—),男,讲师,硕士生导师, E-mail: mmzhou@hfut.edu.cn.

部署并成为提升移动通信网络承载能力的重要基础设施. 全双工技术将使小蜂窝具备同时同频服务一组上下行用户的能力, 从而最大限度地释放网络收发设计的自由度^[2]. 尽管全双工小基站(SBS, small base station)所受的自干扰能够通过高性能的 SIC 技术得到有效抑制, 然而上下行同时传输所带来的用户间同频干扰问题却难以避免. 因此, 在多用户场景下如何将上下行用户一一匹配成组从而减轻用户间同频干扰是至关重要的课题.

目前已有部分学者针对不同的优化目标设计了相应的上下行用户匹配策略, 如 Silva 等^[3]利用拉格朗日对偶理论和贪心算法求解了用户匹配联合频谱分配问题, 达到了近似最大最小频谱效率的优化目标. 该方案保障了用户传输的公平性, 但未考虑用户的实际繁忙程度. Choi 等^[4]通过减小上行用户的发射功率减轻用户间干扰, 提出了一种启发式算法, 实现了最小化下行中断概率的用户匹配. 该方案仅降低了下行中断概率, 对上行用户缺乏公平性. Chen 等^[5]研究了子信道数目不足情况下的用户匹配策略, 将用户匹配问题转化为组合优化理论中的指派问题进行求解, 获得了上下行用户的最大和速率. 然而该方案无法保障信道质量差的用户的基本服务质量(QoS, quality of service).

以上研究存在的共性问题仅是关注网络整体服务能力的优化, 却无法保障单个用户的 QoS 需求. 事实上, 近年来对用户 QoS 极为敏感的各类新型业务层出不穷, 如在车联网中, 每辆自动驾驶的汽车都需要严格的通信速率以确保交通安全^[6]. 针对现有研究工作的不足, 将考虑全双工小蜂窝用户互不相同的 QoS 需求, 建立以最大化满意用户对数为目标的匹配优化问题, 然后将其转化为图论中经典的网络最大流问题进行求解, 最终得到最优的上下行用户匹配策略, 同时也能够确定上行用户的最佳发射功率范围.

1 系统模型与问题描述

图1所示为典型的基于正交频分多址接入(OFDMA, orthogonal frequency division multiple access)机制的单个小蜂窝, 包括一个具有全双工能力的 SBS 和 $2N$ 个仅具有半双工能力的用户. SBS 装有 2 根天线, 其中一根只用于发射信号, 另一根只用于接收信号, 分别用 t 和 r 表示; 同时, 所有用户都

是单天线设备. 假设恰好有 N 个用户是上行用户, 其余为下行用户, 分别记为 $\mathcal{U} = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ 和 $\mathcal{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}$. $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 表示上行或下行用户的编号. 由于具备了全双工能力, SBS 可在相同的子信道上同时为一组上下行用户服务. 因此, 在所考虑的场景中, 如果将 N 个上行用户和 N 个下行用户一一匹配, 则恰好可以在 N 个子信道上组成 N 个用户对.

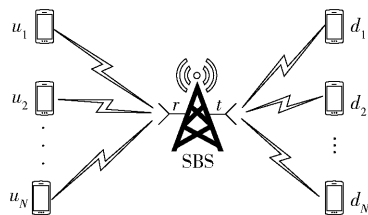


图1 全双工小蜂窝场景示意图

尽管全双工 SBS 的自干扰问题可得到有效应对, 但由于同一组上下行用户使用相同的频段, 所以用户间的干扰仍不可避免, 从而导致下行链路的传输速率受限. 给定 $\forall i, j \in \mathcal{N}$, 假设 u_i 和 d_j 组成一组上下行用户对 (u_i, d_j) , 则上行链路的传输速率可表示为

$$R_{i,j}^u = B \log \left(1 + \frac{P_i G_{r,u_i}}{\eta P_0 G_{r,t} + N_0} \right) \quad (1)$$

其中: B 为子信道的带宽; P_i 为上行用户 u_i 的发射功率; G_{r,u_i} 为上行用户 u_i 到 SBS 接收天线 r 的信道增益; $G_{r,t}$ 为 SBS 发射天线 t 到接收天线 r 的信道增益, 采用块衰落信道模型, 即假设信道增益可在一段时间内保持恒定; P_0 为 SBS 在子信道上的发射功率, 假设为定值; N_0 为噪声功率; $\eta < 1$ 表示自干扰消除系数, 当自干扰消除性能极优时, η 趋近于 0.

同理, 下行链路的传输速率可表示为

$$R_{i,j}^d = B \log \left(1 + \frac{P_0 G_{d_j,t}}{P_i G_{d_j,u_i} + N_0} \right) \quad (2)$$

其中 $G_{d_j,t}$ 和 G_{d_j,u_i} 分别表示 SBS 发射天线 t 和上行用户 u_i 到下行用户 d_j 的信道增益. 式(2)表明, 下行传输受到其对应的上行传输的干扰, 因此下行传输速率与上下行用户的匹配策略密切相关.

假设任意用户 $s \in \mathcal{U} \cup \mathcal{D}$ 至少需要 \bar{R}_s 的传输速率才能保障其业务性能. 如果 s 所在链路的实际传输速率不低于 \bar{R}_s , 则称其 QoS 需求得到满足. 这里引入一个二进制变量来刻画已匹配用户 u_i 和 d_j 的 QoS 需求能否同时被满足, 表示为

$$Z_{i,j} = \begin{cases} 1, & R_{i,j}^u \geq \bar{R}_{u_i}, R_{i,j}^d \geq \bar{R}_{d_j} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

若 $Z_{i,j} = 1$, 则称用户对 (u_i, d_j) 为满意用户对. 为了最大化满意用户对数, 需要设计相应的用户匹配算法, 同时也应考虑为每个上行用户设置合理的发射功率.

将所有用户间的匹配关系用 $N \times N$ 的矩阵表示为 $\mathbf{Y} = [Y_{i,j}]$, 其中如果 u_i 和 d_j 被匹配成对, 则有 $Y_{i,j} = 1$; 否则, 同时将所有上行用户的发射功率组成向量 $\mathbf{p} = [P_1, P_2, \dots, P_N]$, 从而可建立如下优化问题:

$$(P): \max_{\mathbf{Y}, \mathbf{p}} \sum_{i,j \in \mathcal{N}} Z_{i,j} Y_{i,j} \quad (4a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in \mathcal{N}} Y_{i,j} \leq 1, \forall j \in \mathcal{N} \quad (4b)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{N}} Y_{i,j} \leq 1, \forall i \in \mathcal{N} \quad (4c)$$

$$Y_{i,j} = \{0, 1\}, \forall i, j \in \mathcal{N} \quad (4d)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{\max}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (4e)$$

其中: 式(4b)保证了每个上行用户至多与1个下行用户匹配, 式(4c)保证了每个下行用户至多与1个上行用户匹配; 式(4e)限制了上行用户的最大发射功率.

优化问题(P)为混合整数非线性规划问题, 对其直接求解存在极高的难度. 下文将依据用户的速率需求和其可达的实际传输速率, 构造包含所有潜在满意上下行用户对匹配可行图, 再将可行图转化为单位容量网络并求其最大流路径, 最终可得到问题(P)的最优解. 该图论算法仅具有多项式级复杂度.

2 基于图论的求解算法

2.1 构建可行图

由式(3)可知, 使 $Z_{i,j} = 1$ 的充要条件为

$$\left. \begin{aligned} \text{Blb} \left(1 + \frac{P_i G_{r,u_i}}{\eta P_0 G_{r,t} + N_0} \right) &\geq \bar{R}_{u_i} \\ \text{Blb} \left(1 + \frac{P_0 G_{d_j,t}}{P_i G_{d_j,u_i} + N_0} \right) &\geq \bar{R}_{d_j} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(5)可解出 P_i 的取值范围为

$$\left. \begin{aligned} P_i &\geq P_{i,j}^L = \frac{(2^{\bar{R}_{u_i/B}} - 1)(\eta P_0 G_{r,t} + N_0)}{G_{r,u_i}} \\ P_i &\leq P_{i,j}^U = \frac{P_0 G_{d_j,t}}{(2^{\bar{R}_{d_j/B}} - 1) G_{d_j,u_i}} - \frac{N_0}{G_{d_j,u_i}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

结合式(4e)可知, 要使 $Z_{i,j} = 1$, 必须满足:

$$P_{i,j}^U \geq 0, P_{i,j}^L \leq P_{\max}, P_{i,j}^U \geq P_{i,j}^L \quad (7)$$

即若任意用户对 (u_i, d_j) 满足式(7), 则可将 u_i 的发射功率按照式(6)的要求进行调整, (u_i, d_j) 即成为满意用户对. 因此, 利用式(7)可检验任意上下行用户对是否具备成为满意用户对的可能性.

由此, 可按照如下步骤建立一个二分图: 绘制 $2N$ 个顶点, 分别对应 N 个上行用户和 N 个下行用户; 将所有上行用户的顶点和所有下行用户的顶点两两相连, 得到图2(a)所示的完全二分图(以 $N=3$ 为例); 对于所有的 $i \in \mathcal{N}$ 和 $j \in \mathcal{N}$, 根据式(6)计算 $P_{i,j}^U$ 和 $P_{i,j}^L$; 对于 $\forall i, j \in \mathcal{N}$, 若式(7)不成立, 则删除 (u_i, d_j) 间的连线.

经过以上步骤后得到一个包含所有潜在满意用户对上下行用户匹配二分图, 称之为可行图, 用 \mathcal{G} 表示. 图2(b)给出了一个可行图的示例.

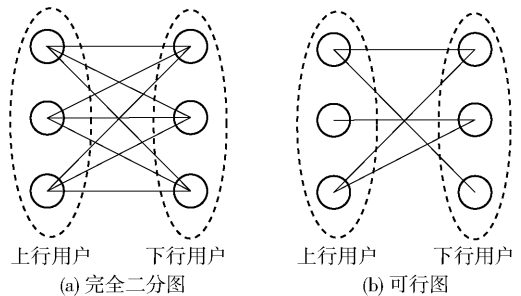


图2 可行图构造示例

在可行图中, 任意2个相连顶点所组成的用户对, 当发射功率设置合理时都能成为满意用户对. 然而, 可行图并不满足上下行用户一一匹配的原则, 因此必须选取可行图的一个子图, 使得每个顶点至多与1条边关联, 即满足式(4b)和式(4c). 同时, 根据式(4a)最大化满意用户对数目的目标, 所选取的子图应包含尽可能多的边.

2.2 构建网络流问题及求解

事实上, 可以将选取子图的过程转化为网络流问题进行求解. 首先, 在可行图上添加虚拟源点 v_s 并与所有上行用户相连, 同时添加虚拟汇点 v_t 并与所有下行用户相连. 令图中所有边的容量都为1 (流量的最小单位), 则对应于图2(b), 可得到如图3所示的单位容量网络^[7].

该网络中任意上行用户 u_i 的输入流量 $f_{v_s, u_i} \leq 1$, 因此其输出流量必须满足 $\sum_{j \in \mathcal{N}} f_{u_i, d_j} \leq 1$, 这就保证了至多只存在1个 d_j 满足 $f_{u_i, d_j} = 1$, 而其余 d_j 与 u_i 关

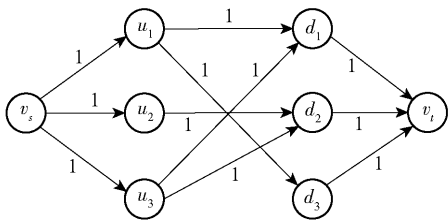


图3 由可行图转化的网络

联的边都是零流边。同时,网络中任意下行用户 d_j 的输出流量 $f_{d_j, v_t} \leq 1$, 因此其输入流量必须满足 $\sum_{i \in \mathcal{N}} f_{u_i, d_j} \leq 1$, 这就保证了至多只存在 1 个 u_i 满足 $f_{u_i, d_j} = 1$, 而其余 u_i 与 d_j 关联的边都是零流边。由此,一旦确定了每条边的流量,并对应地在可行图中删除所有零流边,则可保证每个顶点至多与 1 条边相关联。另一方面,根据前文所述,为最大化满意用户对数目,所选取的子图应包含尽可能多的边。因此,应使得网络中的非零流边数目最大,即对应着网络的最大流问题。

网络最大流问题是图论中一类经典的优化问题,基于网络分层和增广链搜索思想的 Dinic 算法是解决该类问题的有效方法^[8]。基于 Dinic 算法的思想,所构建网络的最大流求解步骤可概括如下:

1) 将网络中所有容量为 0 的边删除,得到新的残量网络;

2) 使用广度优先搜索对残量网络进行分层,分层是指按照距离源点的最小跳数给各个点标号;

3) 基于深度优先搜索,按照节点标号逐层递增的规则寻找增广链;

4) 找到一条增广链后进行增广操作,即把增广链中每条边的容量置为 0,并为每条边添加一条反向边,反向边的容量置为 1;

5) 回溯至源点,并返回步骤 3) 继续执行,直到无法再找到新的增广链;

6) 返回步骤 1) 继续执行,直到残量网络中的汇点与源点不再连通。

以上过程中所找出的增广链总数目即为最大流数目,也就是所求的最大满意用户对数。最后一次执行增广操作后的网络图中上行用户节点到下行用户节点间容量为 0 的边所关联的用户即成为匹配关系。相应的上行用户发射功率依照式(6)进行合理调整。如果最终所得满意用户对数小于 N , 则可通过最大化加权和速率的原则对剩余的上下行用户进行匹配,使它们尽可能逼近 QoS 需求。

2.3 算法实现与分析

所提算法在现实场景下的实现步骤概括如下:

1) 在所有需要获取信道增益信息的链路上由发射端向接收端发送正交导频序列;

2) 接收端收到导频序列后进行最小均方误差估计,获得该链路的信道增益信息;

3) 各用户将其已获取的所有信道增益信息及其 QoS 需求反馈至 SBS;

4) SBS 根据全局信道增益信息计算各条链路的速率,找出所有潜在满意用户对,构建可行图;

5) SBS 基于可行图建立网络最大流问题并求解,然后将求解结果进行全网广播;

6) 各用户收到广播信息后执行相应的匹配和功率调整策略。

下面证明所提算法能够得到问题(P)的最优解。首先,假设问题(P)的最优功率解为 \mathbf{p}^* , 则对 $\forall i, j \in \mathcal{N}$, 由 \mathbf{p}^* 所设定的功率值可计算 (u_i, d_j) 是否为可能的满意用户对。将所有可能的满意用户对一一用边相连,则可得到一个二分图 \mathcal{G}^* 。将 \mathcal{G}^* 转化为单位容量网络求解其最大流即可确定最终的匹配关系 \mathbf{Y}^* , 并得到最大满意用户对数 K^* 。由于 \mathbf{Y}^* 是对应于 \mathbf{p}^* 的最优匹配解,所以 \mathbf{Y}^* 也必然是问题(P)的最优匹配解。令所提算法得到的满意用户对数为 K , 则必有 $K \leq K^*$ 。

另一方面,由于 \mathbf{p}^* 只是所有可能的功率设置方案中的一种,故 \mathcal{G}^* 必然为可行图 \mathcal{G} 的一个子图。从而由 \mathcal{G}^* 转化的容量网络的最大流必然不超过由 \mathcal{G} 转化容量网络的最大流,即有 $K^* \leq K$ 。综上可知 $K = K^*$, 即本文算法得到的满意用户对数恰好为最大满意用户对数,证毕。

下面给出所提算法的复杂度分析。首先,在构建可行图阶段,对所有的 $i \in \mathcal{N}$ 和 $j \in \mathcal{N}$ 计算 $P_{i,j}^L$ 和 $P_{i,j}^U$, 时间复杂度可表示为 $O(2N^2)$; 在求解网络最大流的阶段,基于 Dinic 思想的算法时间复杂度为 $O(|\mathcal{E}| \sqrt{N})$, 其中 $|\mathcal{E}|$ 表示可行图中边的数目^[8]。由于 $|\mathcal{E}| \leq N^2$, 故该阶段的时间复杂度不超过 $O(N^2 \sqrt{N})$ 。结合以上 2 个阶段,总的时间复杂度不超过 $O[N^2(\sqrt{N} + 2)]$ 。显然,所提算法具有多项式级复杂度。

3 仿真结果

通过 Matlab 仿真分析所提匹配策略的性能,并

和基于最大和速率以及最大加权和速率的另外 2 种匹配策略进行对比^[9]。仿真场景及相应的参数设置如下:全双工 SBS 部署在大小为 $0.1 \text{ km} \times 0.1 \text{ km}$ 的正方形区域中心,发射功率设定为 24 dBm 。所有用户位置在该区域内随机分布,各用户的速率需求从 64 kbit/s 、 128 kbit/s 、 700 kbit/s 和 3400 kbit/s 中随机选取^[10]。假设子信道带宽为 180 kHz ,噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz 。路径损耗模型为 $103.3 + 20\lg d$,其中 d 表示以 km 为单位的传输距离。此外,采用瑞利衰落信道模型来刻画多径效应。为探寻性能指标的统计规律,每个仿真结果都是 200 次随机拓扑的平均值。

图 4 所示为 3 种不同匹配策略下满意用户对数随自干扰消除系数的变化情况。仿真中取上下行用户各 10 个。对于任意匹配策略,在相同的 P_{\max} 设置下,满意用户对数随着自干扰消除系数 η 的增大而减少。因为 η 越大,表示自干扰消除能力越弱,从而残留的自干扰对上行链路的传输速率影响越严重。另一方面,图 4 表明,基于最大和速率的匹配策略只关注于提升系统的整体性能,却难以获得出色的满意用户对数。基于最大加权和速率的匹配策略通过为不同业务需求的用户分配不同的权值,在一定程度上可以提升满意用户对数,但该策略未对各条链路的传输速率作确切的约束,因此其性能仍不及所提策略。

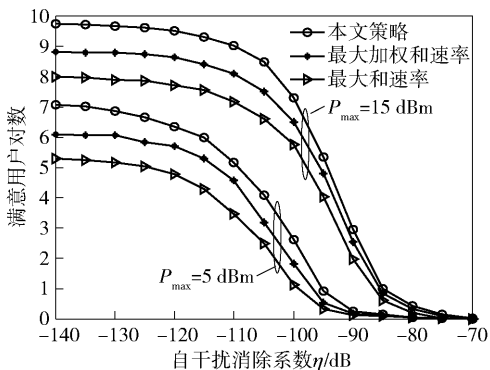


图 4 满意用户对数随自干扰消除系数的变化

图 5 所示为 3 种不同匹配策略下满意用户对数随最大上行发射功率 P_{\max} 的变化情况。仿真中取上下行用户各 10 个。从图 5 可以看出,无论 P_{\max} 如何变化,所提策略都能获得最大满意用户对数。对于任意匹配策略,在相同的 η 设置下,满意用户对数随着 P_{\max} 的增大而增大。这是由于 P_{\max} 越大,式(7)越容易被满足,即用户对成为满意用户对的可能性

越大。此外,3 种策略在 η 取 -100 dB 时的性能都远优于 η 取 -80 dB 时的性能,该结果与图 4 一致。

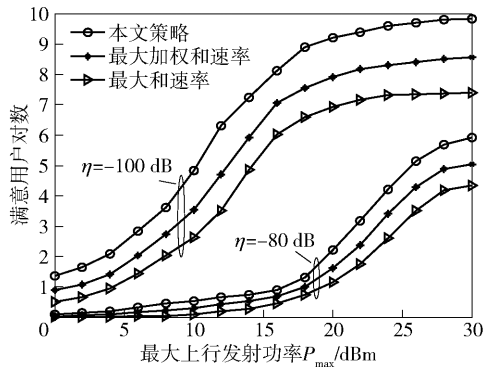


图 5 满意用户对数随最大上行发射功率的变化情况

图 6 所示为 3 种不同匹配策略下满意用户对数随总用户对数的变化情况。仿真中 η 取 -100 dB 。可以看出,3 种匹配策略的满意用户对数和总用户对数都呈正比关系。这是由于给定了 P_{\max} 和 η ,各种策略的满意用户对比率是恒定的。与前面的仿真结果相同,所提策略的满意用户对比率最大,在 P_{\max} 为 15 dBm 时高达 73%。在 P_{\max} 为 5 dBm 时,所提策略所获得的满意用户对数超出最大和速率策略的 2 倍。

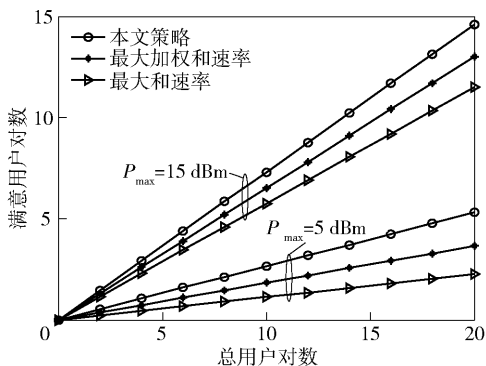


图 6 满意用户对数随总用户对数的变化

由于实际系统中不可避免地受噪声影响,往往很难获得精确的信道增益信息,因此,仿真了所提策略的性能受信道增益误差影响的规律(见图 7)。仿真中取上下行用户各 20 个, η 取 -100 dB , P_{\max} 取 24 dBm 。不难发现,所提策略的用户满意对数随着信道增益归一化均方误差的增大而逐步减少。原因在于,信道增益的估计误差越大,理论上计算的用户速率越不准确,从而导致在判断用户是否是满意用户时存在更多的误判和漏判。随着信道增益误差的进一步增大,误判率和漏判率不断上升,所提策略的性能将最终接近于随机匹配的性能(下界)。但是,

目前的信道估计方法可以很容易地将均方误差降低到 10^{-2} 以内^[11]。因此,实际上信道增益误差不会给所提策略的性能带来严重影响。

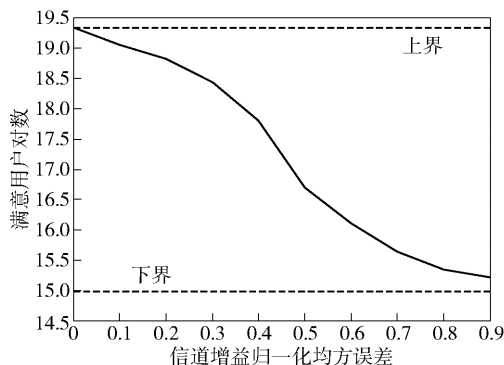


图7 满意用户对数随信道增益误差的变化

最后,对比了使用暴力搜索方法和使用最大流算法寻找最优匹配所需要的运算次数(见图8)。暴力搜索运算次数的曲线是依照理论值画出的(运算量巨大,无法进行实际仿真),而最大流算法的运算次数是在实际仿真过程中获得的,仿真中 η 取 -100 dB、 P_{\max} 取 15 dBm。可以看出,随着总用户对数的增加,暴力搜索所需要的运算次数呈阶乘级增长,目前没有处理器能够实现该级别复杂度的运算;而最大流算法具有多项式级复杂度,因此运算次数的增长极为平缓,在具有大规模用户的情况下也能保证快速匹配。

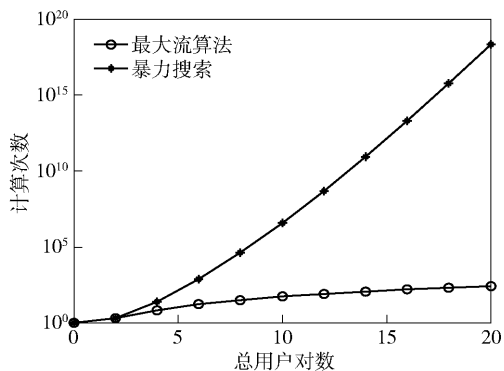


图8 2种算法的运算次数对比

4 结束语

针对全双工小蜂窝用户的实际 QoS 需求,建立了最大化满意用户对数的上下行用户匹配优化问题。为了以低复杂度求解该问题,构造了包含所有潜在满意上下行用户对的匹配可行图;然后将可行图转化为单位容量网络,并证明了单位容量网络的最大流数目即为最大满意用户对数目;最终根据最

大流算法得到了最优的用户匹配策略,同时也确定了上行用户的最佳发射功率范围。仿真结果表明,所提策略可获得比其他策略更多的满意用户对数而仅具有多项式级的复杂度,可用于 QoS 敏感的各类新型通信业务。

参考文献:

- [1] Narbudowicz A, Ruvio G, Ammann M J, et al. Passive self-interference suppression for single-channel full-duplex operation [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(5): 64-69.
- [2] Li R, Chen Y, Li G Y, et al. Full-duplex cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(4): 184-191.
- [3] Silva J M, Fodor G, Fischione C, et al. Spectral efficient and fair user pairing for full-duplex communication in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7578-7593.
- [4] Choi H, Noh W. Outage analysis of user pairing algorithm for full-duplex cellular networks [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2019: 1-12.
- [5] Chen L, Zhong C, Lin H, et al. Joint user pairing and power allocation design for heavy loaded full-duplex small cell systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 8989-8993.
- [6] 侯蓉晖, 郭素霞. 车联网场景中时延受限内容传输方案[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(3): 85-90.
Hou Ronghui, Guo Suxia. Latency-constrained content dissemination scheme in vehicular networks [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(3): 85-90.
- [7] West D B. Introduction to graph theory[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001: 135-139.
- [8] Even S, Tarjan R E. Network flow and testing graph connectivity[J]. SIAM Journal on Computing, 1975, 4(4): 507-518.
- [9] Aquilina P, Cirik A C, Ratnarajah T, et al. Weighted sum rate maximization in full-duplex multi-user multi-cell MIMO networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(4): 1590-1608.
- [10] 3GPP Standard TS 34.108. Common test environments for user equipment; conformance testing (release 15), V15.1.0[S]. [S.L.]: 3GPP, 2019.
- [11] Rao X, Lau V K N. Distributed compressive CSIT estimation and feedback for FDD multi-user massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(12): 3261-3271.