

混合 D2D 蜂窝网络的系统吞吐量优化

钱程 钱丽萍 武航 陈庆章

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

摘要 针对 D2D(Device-to-Device)蜂窝混合网络中的资源优化问题,提出了一种基于线性规划和二分图匹配模型的共享资源优化算法(hybrid network Resource optimization Method, hnRoM)。hnRoM 算法首先将资源优化问题分解为 DU-CU 配对优化和时间资源分配优化两个子问题,然后用线性规划的方法得到时间资源分配优化子问题的最优解,根据时间资源分配子问题的解构建二分图模型来求解 DU-CU 配对优化子问题。仿真实验结果表明, hnRoM 算法能够保证接入所有 DU,在满足所有用户最小传输速率的前提下,可以保证最大化系统的总吞吐量。

关键词 混合 D2D 蜂窝网络,二分图的最佳匹配,资源优化

中图分类号 TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.1.033

System Throughput Optimization for Hybrid Device-to-Device Cellular Networks

QIAN Cheng QIAN Li-ping WU Hang CHEN Qing-zhang

(College of Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract Since each DU (Devcie-to-Device user) perceives different channel gains when sharing resource with different shared cellular user (CU), it is important to associate a DU with the right CU for the improvement of spectrum efficiency. Despite its importance, the resource optimization in hybrid Device-to-Device (D2D) cellular networks has been not solved perfectly due to the non-convex nature. This paper proposed a hybrid network resource optimization method (hnRoM) based on the linear programming and bipartite matching. The hnRoM algorithm first decomposes the resource optimization problem into the DU-CU assignment optimization subproblem and the time resource allocation optimization subproblem. The optimal solution of the time resource allocation optimization subproblem is obtained by linear programming. By utilizing the obtained optimal solution, the optimal DU-CU assignment is achieved based on the bipartite graph model. Finally, the simulation results show that all DUs can be served for the maximal system throughput while satisfying the minimum transmission rate requirements of all users.

Keywords Hybrid D2D cellular networks, Bipartite perfect matching, Resource optimization

1 引言

在 3G 蜂窝网络系统中,类似视频和社交媒体这样的高速率需求业务已占用了大部分可用的频谱资源。随着手机用户数目的空前增长,匮乏的无线资源必然越来越难满足用户需求。为了提升频谱效益,3GPP LTE 支持端到端用户通过复用蜂窝网络资源进行通信^[1]。在传统蜂窝模式下,两个用户之间要通信,需要接入基站提供的信道,进而进行数据转发^[2]。在 D2D 通信模式下,两个临近用户可以通过复用 CU 信道直接进行数据传输,基站只需提供少许控制信息^[3]。由于传输速率的差异,DU 与不同的 CU 共享资源可获得不同的频谱效益,所以为每个 DU 分配一个合适的 CU 以确定最佳的资源分配方案,对提升整个系统的频谱效益是极其重要的^[4]。因为 DU 和 CU 共享相同的资源,所以混合 D2D 蜂窝网络中的资源优化是很难解决的^[5]。

针对混合 D2D 蜂窝网络中的资源优化问题,现有的研究工作大致可分为两个方向:一类是通过元启发式算法寻找最优解的近似值,一类是寻找资源优化的最优解^[6]。Xu 等人使用反转迭代的组合竞拍算法为 D2D 用户对寻找最佳的配对蜂窝用户,双方共享资源,从而最大化系统的总速率^[7]。Lei 等人基于贪婪算法提出一种功率控制机制,从而实现系统吞吐量的最大化^[8]。资源优化的最优解算法在资源优化场景中不如启发式算法常用,因为最优解算法虽然能够保证得到全局最优解,但时间复杂度更高。Yu 等人提出了一种最佳的资源优化算法,但该算法局限于一个 DU 和一个 CU 的特殊场景,且不考虑 DU 与 CU 之间相互干扰的情况^[9]。考虑到复用资源带来的彼此干扰,为了降低干扰影响,DU 可以选择采用 D2D 通信模式或者传统的基站通信模式^[10]。Han 等人首次将二分图匹配策略应用到混合 D2D 蜂窝网络的资源优化中,DU 通过与指定的 CU 复用资源,在多项式时间内最小化

到稿日期:2014-12-18 返修日期:2015-04-23

钱程 女,硕士,主要研究方向为无线网络资源优化, E-mail: channy.lee@163.com; 钱丽萍 女,博士,主要研究方向为无线网络资源分配优化, E-mail: lpqian@zjut.edu.cn(通信作者); 武航 男,硕士,主要研究方向为无线网络资源优化, E-mail: wuhang888@qq.com; 陈庆章 男,博士,主要研究方向为分布式处理与计算机网络, E-mail: qzchen@zjut.edu.cn.

DU 和 CU 之间的干扰,提升系统的吞吐量^[11]。规定 DU 只能复用特定 CU 的资源降低了 DU-CU 配对的灵活性。而且文中使用的 KM 算法在处理不对称的二分图时,只能为二分图中节点较少的一方做完全匹配,另一方必然会在没有匹配的节点。对应 DU 比 CU 数目少的情况,直接使用 KM 算法求解会造成不必要的资源浪费。

元启发式算法通过一系列局部最优选择得到最终解,由于之前的选择会直接影响之后的选择,所以这类算法得到的往往不是最优解。而最优解算法在混合 D2D 蜂窝网络中的使用还局限于用户数目较小的场景,或者是在保证 CU 服务质量的前提下尽可能地保证接入 DU。针对目前的研究状况,本文提出一种基于线性规划和二分图匹配的共享资源优化算法。针对大规模用户场景,系统能保证接入所有 DU,并且在满足所有用户最小速率需求的前提下,最大化系统吞吐量。

2 系统模型

本文研究单小区场景,如图 1 所示,在蜂窝网络中有多个 D2D 用户。其中 M 个上行蜂窝用户表示为 $\mathcal{M} = \{CU_1, \dots, CU_M\}$, N 个端到端用户表示为 $\mathcal{N} = \{DU_1, \dots, DU_N\}$, $M > N$ 。小区带宽被分割成大小相等且彼此正交的 M 个子信道,每个蜂窝用户独自占用一条子信道,彼此间没有干扰。文中假设 CU 间的子信道分配是确定的。在 D2D 通信中,所有 DU 通过复用 CU 的子信道来传输数据。其中 g_{ij} 是 DU_i 在复用 CU_j 所在信道时收发器之间的信道增益。 g_j 是 CU_j 和基站之间的信道增益。

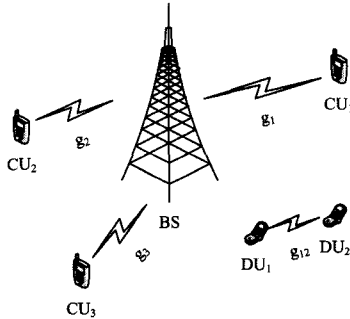


图 1 蜂窝网络中的端到端通信

假设 x_{ij} 是一个二元变量,当 DU_i 和 CU_j 配对共享资源时 x_{ij} 等于 1,否则为 0。 \hat{x}_j 也是一个二元变量,当 CU_j 没有与任何 DU 配对时等于 1,否则为 0。本文对 DU-CU 配对采用一对一映射规则,因此所有的 x_{ij} 和 \hat{x}_j 需要满足如下条件:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1, \sum_{i=1}^N x_{ij} + \hat{x}_j = 1, \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{M} \quad (1)$$

本文假设 DU_i 和 CU_j 以时分复用的模式共享资源,如果 ∂_{ij} 是分配给 CU_j 的时间资源,那么 $1 - \partial_{ij}$ 就是 DU_i 分得的时间资源。用 p_i^D 和 p_j^C 分别表示 DU_i 和 CU_j 的传输功率。 n_i 和 n_j 分别是 DU_i 和 CU_j 收到的噪音功率。 R_{ij}^D 和 R_{ij}^C 分别表示当 DU_i 和 CU_j 配对时各自的吞吐量。根据香农公式, R_{ij}^D 和 R_{ij}^C 分别记作:

$$\begin{aligned} R_{ij}^D &= B(1 - \partial_{ij})x_{ij} \log_2 \left(1 + \frac{p_i^D g_{ij}}{n_i} \right) \\ R_{ij}^C &= B\partial_{ij}x_{ij} \log_2 \left(1 + \frac{p_j^C g_{ji}}{n_j} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, B 是子信道的带宽。

本文主要研究当 DU 通过 TDMA 方式与 CU 共享子信道时,在每个 DU 和 CU 都满足其最小传输速率限制条件下的系统吞吐量最大化问题。注意到 CU 的数量比 DU 多,并且 DU 只能与一个 CU 关联,所以有些子信道只服务 CU,这种情况下的子信道吞吐量可以表示为 $B \hat{x}_j \log_2 (1 + p_j^C g_j / n_j)$ 。为了使公式简洁明了,用 D_{ij} 代替 $B \log_2 (1 + \frac{p_i^D g_{ij}}{n_i})$,用 C_j 代替 $B \log_2 (1 + \frac{p_j^C g_{ji}}{n_j})$ 。所以,系统吞吐量最大化问题可以表示成如下公式:

$$\begin{aligned} P1: \quad & \max_{\{\partial_{ij}, x_{ij}, \hat{x}_j, x_j\}} \sum_{j=1}^M (\sum_{i=1}^N (R_{ij}^D + R_{ij}^C) + C_j \hat{x}_j) \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{j=1}^M R_{ij}^D \geq R_{i,\min}^D \\ & \sum_{i=1}^N R_{ij}^C \geq R_{j,\min}^C \\ & \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1, \sum_{i=1}^N x_{ij} + \hat{x}_j = 1 \\ & 0 \leq \partial_{ij} \leq 1 \\ & x_{ij}, x_j \in \{0, 1\}, \forall i \in \mathcal{N}, \forall j \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $R_{i,\min}^D$ 和 $R_{j,\min}^C$ 分别是 DU_i 和 CU_j 的最小传输速率。

P1 是一个混合整数线性规划问题,在有 M 个蜂窝用户和 N 个 D2D 用户的蜂窝网络中,如果 DU-CU 采用一对一的配对规则,就会存在 $\prod_{k=0}^{N-1} (M-k)$ 种配对方案。hnRoM 算法将混合 D2D 蜂窝网络构建为二分图模型,把资源优化问题拆解成 DU-CU 配对和资源分配两个子问题。根据资源分配子问题的解确定权值,最后根据 KM 算法得到二分图的最大权完美匹配。

3 基于二分图匹配的 hnRoM 算法

图匹配算法^[12]被广泛用于项目分配和资源优化等场景。通过构建二分图模型^[13],根据二分图最大权匹配^[14]、二分图最大匹配^[15,16]、二分图最佳匹配^[17]等图匹配方法得到最佳资源分配策略。本文的配对优化子问题就是求一个匹配集合,使得该 DU-CU 配对策略下系统总的吞吐量可以实现最大化,使用图匹配算法可以在多项式时间内找到 DU-CU 配对优化子问题的全局最优解。

3.1 二分图模型定义

设 G 是一个无向图。如果顶点集可分割为两个互不相交的子集 U 和 V ,并且图中每条边依附的两个顶点都分属两个不同的子集,则称图 G 为二分图。给定一个二分图 $G = (V, U, E)$,在 G 的一个子图 Φ 中,如果边集 Φ 中的任意两条边都不依附于同一个顶点,则称 Φ 是一个匹配;如果所有点都在匹配边上,则称这个匹配是完美匹配;如果 G 是加权图,则加权和最大的完美匹配为最大权完美匹配。

因为 DU-CU 配对遵循一对一映射规则,所以问题 P1 可以解耦成 DU-CU 配对优化和时间资源分配优化两个子问题。假设当 DU_i 与 CU_j 配对关系确定时,时间资源分配优化子问题可以表示为:

$$\begin{aligned} & \max_{\partial_{ij}} (1-\partial_{ij})D_{ij} + \partial_{ij}C_j \\ \text{s. t. } & (1-\partial_{ij})D_{ij} \geq R_{ij}^{\text{p},\min} \\ & \partial_{ij}C_j \geq R_{ij}^{\text{c},\min} \\ & 0 \leq \partial_{ij} \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)是只包含一个变量的线性规划问题,如果它存在可行解,那么最优解 ∂'_{ij} 一定在如下闭集中:

$$\partial'_{ij} = \begin{cases} \frac{R_{ij}^{\text{c},\min}}{BC_j}, & \text{if } C_j \leq D_{ij} \\ 1 - \frac{R_{ij}^{\text{p},\min}}{BD_{ij}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

相应地, DU_i 与 CU_j 的总吞吐量可表示为 W_{ij} :

$$W_{ij} = (1-\partial'_{ij})D_{ij} + \partial'_{ij}C_j \quad (6)$$

如果问题(4)无解,则表示 DU_i 不能与 CU_j 配对。这种情况下, $W_{ij} = -\infty$ 。另外考虑到CU的数量比DU多,系统中被CU独占的子信道的总吞吐量应该为 $\sum_{j=1}^{M \wedge N} x_j C_j$ 。忽略这种情况不仅会导致资源浪费,更会影响到配对策略的正确性,使问题P1不能得到最优解。为了解决这一问题,本文在划分 N 中增加 $M-N$ 个虚拟DU,将非对称二分图调整成对称二分图,使两个顶点集中的节点数量一样多。每个虚拟DU与 CU_j 之间的边的权值为 C_j 。这样,二分图中的所有边权可以表示为一个 $M \times M$ 的方阵:

$$W_{ij} = \begin{cases} (1-\partial'_{ij})D_{ij} + \partial'_{ij}C_j, & \text{if } 1 \leq i \leq N, \frac{R_{ij}^{\text{c},\min}}{BC_j} \leq 1 - \frac{R_{ij}^{\text{p},\min}}{BD_{ij}} \\ -\infty, & \text{if } 1 \leq i \leq N, \frac{R_{ij}^{\text{c},\min}}{BC_j} > 1 - \frac{R_{ij}^{\text{p},\min}}{BD_{ij}} \\ C_j, & \text{if } N < i < M \end{cases} \quad (7)$$

最佳资源分配策略描述如下:

$$\begin{aligned} & \max_{x_{ij}} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N W_{ij} x_{ij} \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^N x_{ij} = 1 \\ & \sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \\ & x_{ij} \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (8)$$

这是典型的完全二分图,如图3所示,图中的顶点分成两个集合,第一个集合中的所有顶点都与第二个集合中的所有顶点相连。图中实线绘制的圆圈表示真实用户,虚线绘制的圆圈表示添加的虚拟DU。实线表示DU和CU之间可以实现配对,边权由式(7)计算得到。粗虚线表示DU和CU之间不能配对,边权值为负无穷大。细虚线表示的是虚拟DU和CU之间的配对,该情况等同于CU独占子信道,边权由CU决定,大小为 C_j 。这样,问题P1就转化为一个二分图的最大权完美匹配问题,用KM算法能够保证在多项式时间内找到全局最优解。最大权完美匹配集合中的权值之和即为系统最大吞吐量。

3.2 hnRoM 算法描述

给每个节点分配一个顶标,通常设顶点 v_i 的顶标为 $lx[i]$,顶点 u_j 的顶标为 $ly[j]$,顶点 v_i 与 u_j 之间的边权为 w_{ij} 。初始 $lx[i]$ 为与 v_i 相连的边的最大边权, $ly[j]=0$ 。在算法执行过程中的任一时刻,对于任意一条边 (v_i, u_j) , $lx[i] + ly[j] \geq w_{ij}$ 始终成立。设 G' 为二部图 G 的子图。如果 G' 中的任何边 (i', j') 都满足 $lx[i'] + ly[j'] = w_{i'j'}$,则称 G' 为 G 的相

等子图。二分图中满足 $lx[i] + ly[j] = w_{ij}$ 的边 (v_i, u_j) 被称为可行边。如果所有边 (v_i, u_j) 都满足 $lx[i] + ly[j] \geq w_{ij}$,则认为顶标是合理的。算法进行中通过修改某些节点的顶标,保证每次至少会有一条新的可行边加入相等子图,具体步骤描述如图2所示,迭代这4个步骤直至形成一个完备匹配。

Step1 指定 V 中每个未匹配的节点作为交错树的根。

Step2 在相等子图的未匹配节点中拓展交错树。将进入交错树的节点 v_i 标记为 i ,并加入集合 I^* ,同时将进入交错树的节点 u_j 标记为 j ,并加入集合 J^* 。如果成功找到增广路,执行步骤Step4;否则执行步骤Step3。

Step3 按如下规则修改顶标,以增加新的到相等子图的可行边:

$$\begin{aligned} d &= \min_{i \in I^*, j \notin J^*} (lx[i] + ly[j] - w_{ij}) \\ lx[i] &\leftarrow \begin{cases} lx[i] - d, & i \in I^* \\ lx[i], & i \notin I^* \end{cases} \\ ly[j] &\leftarrow \begin{cases} ly[j], & j \notin J^* \\ ly[j] + d, & j \in J^* \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

回到Step2继续寻找增广路。

Step4 通过翻转被选增广路上的匹配和未匹配边来增广当前匹配。stage k 中形成的新匹配 $\Phi_k = (\Phi_{k-1} - P) \cup (P - \Phi_{k-1})$,其中 Φ_{k-1} 是前一次迭代中得到匹配, P 是被选增广路上所有边组成的集合。

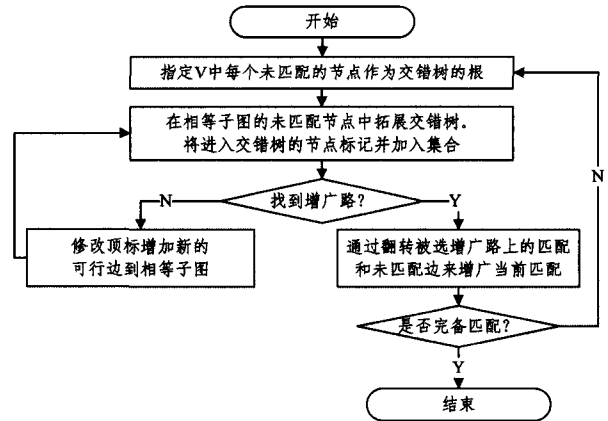


图2 算法流程

3.3 算法总结

众所周知,KM算法可以在多项式时间内求解二分图的最大权匹配。但KM算法仅支持对称的二分图,对于非对称二分图,会造成不可避免的资源浪费。问题P1对应的是非对称二分图,最优解对应二分图的最大权完美匹配,所以不能直接使用KM算法。本文推荐的hnRoM算法对KM算法做出了改进,即通过调整初始二分图,形成与问题P1完全相对的完全二分图。具体调整的意义如下:1)增加权值为负无穷大的边模拟DU和CU不能配对的情况;2)通过添加虚拟DU和权值为 C_j 的边模拟CU独占信道时的吞吐量,这一步是必须且紧要的。因为如果DU数量少,KM算法只会按节点数量较少的一方找最大权完备匹配,即求得的匹配满足 $|\Phi| = |N|$,这样就会有 $M-N$ 个CU没有匹配。而轮空的CU实际上是独占信道在传输,其吞吐量也是必须要计算的一部分,由于每个CU的吞吐量是不一样的,任意 $M-N$ 个CU的组合都可能影响最大权值。所以通过KM算法所求的非对称二分图匹配并不是问题P1的解,只有通过hnRoM算法添加

虚拟 DU 和虚拟边后形成的完全二分图才能与问题 P1 完全对应。

在说明了 hnRoM 算法调整二分图的必要性之后,接着说明 hnRoM 算法的全局最优性。hnRoM 算法在调整完的二分图中寻找最大权匹配的过程实际上与 KM 算法的思路是一样的。注意到 KM 算法使用的前提是必须存在一个完备匹配。hnRoM 算法也要求存在一个完备匹配。显然式(8)对应的二分图一定存在完备匹配,因为初始化时令 $lx[i]$ 为所有与节点 v_i 关联的边的最大权, $ly[j]=0$ 。由满足关系 $lx[i]+ly[j]=w_{ij}$ 的边构成相等子图。如果这个相等子图没有完备匹配,根据式(4)修改节点顶标,修改之后,如下关系一定成立:

- 1) 原先两端都在交错树中的边 (v_i, u_j) , $lx[i]+ly[j]$ 的值没有变化。该边原来属于相等子图,现在仍属于相等子图。
- 2) 原先两端都不在交错树中的边 (v_i, u_j) , $lx[i]+ly[j]$ 都没有变化。该边原来不属于相等子图,现在仍不属于相等子图。

3) 原先 V 端不在交错树中, U 端在交错树中的边 (v_i, u_j) , $lx[i]+ly[j]$ 增大。该边原来不属于相等子图,现在仍不属于相等子图。

4) 原先 V 端在交错树中, U 端不在交错树中的边 (v_i, u_j) , $lx[i]+ly[j]$ 减小。该边原来不属于相等子图,现在可能进入相等子图,使相等子图得到扩大。

$d \text{ min}\{lx[i]+ly[j]-w_{ij} \mid v_i \in I^*, u_j \in J^*\}$ 保证了至少有一条新的边被添加进相等子图。因为式(8)对应的二分图是一个完全二分图,随着顶标的不断变化,边权为 $-\infty$ 的边也可以加入到相等子图中,所以相等子图一定可以找到完备匹配;并且问题 P1 所对应二分图的完备匹配是一个完美匹配,完美匹配是包含了所有节点的匹配。完美匹配的边权和必然是最优的,因为它包含了所有节点的顶标值,而任意一个匹配最多只能包含所有顶点,任何匹配的值总和不可能超过所有顶标和。所以用 hnRoM 算法求得的匹配一定是二分图的最大权完美匹配,即问题 P1 的全局最优解。

4 仿真实验及性能分析

本节针对不同的应用场景设计了两个仿真实验。场景一是针对小规模用户的精准匹配,在假设系统中只包含 4 个 CU 和 3 个 DU 的情况下,仿真结果可以给出 DU-CU 配对的精准结果,结果分别以关联边和关联矩阵的形式展现。场景二是针对贴近真实环境的大规模用户的混合 D2D 蜂窝网络,主要统计系统吞吐量的提升,并且与经典的贪婪算法进行对比^[1]。

场景 1 参照图 3 给出的场景,系统包含 4 个 CU 和 3 个 DU, DU-CU 之间的边权值如图 3 中(a)矩阵所示。其中 DU_3 只能与 CU_2 配对, DU_1 不能与 CU_3 配对, DU_2 不能与 CU_4 配对。通过在拓扑图中增加虚拟 DU_4 和 4 条虚拟边,将原图补成一个完全二分图,相应地在边权矩阵中加入向量 $[1 \ 1 \ 2 \ 4]$ 。根据本文算法所求得的最佳匹配方案如图 4 所示。 DU_1 与 CU_4 配对, DU_2 与 CU_1 配对, DU_3 与 CU_2 配对, CU_3 独占信道,系统能达到的最大吞吐量是 14,该结果的正确性可以通过对比穷举算法验证。

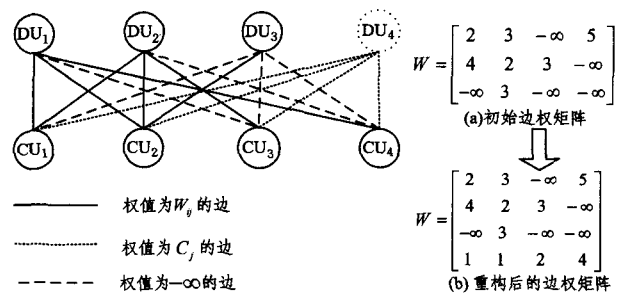


图 3 初始二分图

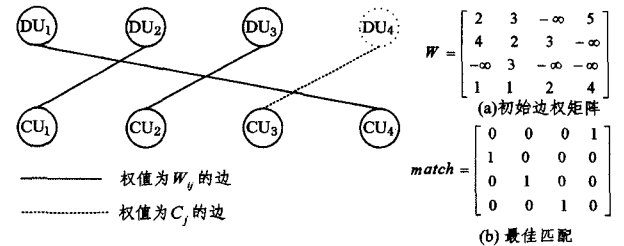


图 4 最佳匹配结果

场景 2 参照如图 1 所示的有 100 个 CU 和 1 个基站的单小区场景。各仿真参数如表 1 所列。小区半径是 250m, DU 随机分布在小区中, DU 之间最大的距离为 30m, 高斯白噪声为 -110dBm/Hz 。CU 和 DU 的最大传输功率分别为 23dBm 和 14dBm。假设子信道带宽为 1kHz, 信道衰减因子为 4, 信道增益 g_i 和 g_{ij} 由双线地面反射模型计算所得, 即 $g_i = d_i^{-4}$, $g_j = d_j^{-4}$, 其中 d_{ij} 是 DU_i 和 CU_j 之间的距离, d_j 是 CU_j 和基站之间的距离。CU 和 DU 的最小速率需求分别是 64kbps 和 1Mbps。为了清晰地表现增量情况, 实验还统计了系统只服务 CU 即 DU 数量为 0 时的系统总吞吐量。为了显示 hnRoM 算法在解决问题 P1 时的最优性, 将通过贪心算法求得的解作为对比数据。将共享信道接入所有 DU 之后, 系统总的吞吐量如图 5 所示。将 DU 个数从 10 递增至 80, 贪心算法不能保证吞吐量的持续提高, 甚至还出现了下降。而使用 hnRoM 算法时, 系统总吞吐量随着 DU 用户数目的增加, 提升越来越明显。

表 1 仿真参数

小区半径	250m
D2D 之间最大距离	30m
高斯白噪声	-110dBm/Hz
CU 最大传输功率	23dBm
DU 最大传输功率	14dBm
子信道带宽	1kHz
CU 数目	100
路径损耗参数	4
CU 最小速率要求	64kbps
DU 最小速率要求	1Mbps

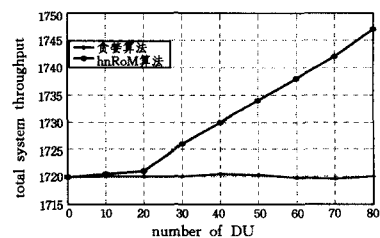


图 5 系统吞吐量

(下转第 177 页)

- [7] Wei W, Xu F, Tan C C, et al. Sybil Defender: Defend Against Sybil Attacks in Large Social Networks[C]//IEEE INFOCOM. 2012;1951-1959
- [8] Golder S, Lotan G. Tweet, tweet, retweet: Conversational aspects of retweeting on Twitter[C]//2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences(HICSS). 2010;1-10
- [9] Honeycutt C, Herring S C. Beyond microblogging: Conversation and collaboration via Twitter[C]//42nd Hawaii International Conference on System Sciences, 2009(HICSS'09). IEEE, 2009; 1-10
- [10] Bilge L, Strufe T, Balzarotti D, et al. All your contacts are belong to us: Automated identity theft attacks on social networks [C]// Proceedings of the 18th International Conference on World Wide Web(WWW'09). 2009;551-560
- [11] Ghosh S, Korlam G, Ganguly N. Spammers' Networks within Online Social Networks: A Case-Study on Twitter[C]// Proceedings of the 20th International Conference Companion on World Wide Web(WWW'11). 2011;41-42
- [12] Krishnamurthy B, Gill P, Arlitt M. A few chirps about twitter [C]//Proceedings of the First Workshop on Online Social Networks(WOSN'08). 2008;19-24
- [13] Chu Z, Gianvecchio S, Wang H, et al. Who is tweeting on Twitter: human, bot, or cyborg? [C]//Proceedings of the 26th Annual Computer Security Applications Conference(ACSAC'10). 2010;21-30
- [14] Tan Lei, Lian Yi-feng, Chen Kai. Malicious users identification in social network based on composite classification model[J]. Computer Applications and Software, 2012(12); 1-5 (in Chinese)
谈磊, 连一峰, 陈恺. 基于复合分类模型的社交网络恶意用户识别方法[J]. 计算机应用与软件, 2012(12); 1-5
- [15] R 语言[OL]. <http://mirror.bjtu.edu.cn/cran/>

(上接第 148 页)

结束语 本文提出了一种基于线性规划和二分图匹配的共享资源优化算法。hnRoM 算法将资源优化问题分解为 DU-CU 配对和时隙划分两个子问题。接着用线性规划的方法得到时隙划分子问题的最优解, 根据时隙划分子问题的解构建二分图模型来求解 DU-CU 配对问题。二分图模型将端到端用户(DU)与蜂窝用户(CU)作为两个独立点集, 将两者配对对共享资源时的吞吐量之和作为边权值, 通过权值修改, 获取二分图最大权完美匹配, 从而得到混合 D2D 蜂窝网络下的最优资源分配方案。仿真结果表明, hnRoM 算法能够保证接入所有 DU, 在满足所有用户最小传输速率的前提下, 最大化系统总的吞吐量。本文推荐的资源优化策略对理论研究和实际应用都具有探索和指导意义。

参 考 文 献

- [1] Doppler K, Rinne M, Wijting C, et al. Device-to-device Communication as an underlay to LTE-advanced networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(12): 42-49
- [2] Nasser N, Hasswa A, Hassanein H. Handoffs in fourth generation heterogeneous networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(10): 96-103
- [3] Lee J, Gu J, Bae S J, et al. A session setup mechanism based on selective scanning for device-to-device communication in cellular networks[C]//17th Asia Pacific Conference on Communications. Shanghai, China, 2011; 677-681
- [4] Doppler K, Yu C H, Ribeiro C B, et al. Mode selection for device-to-device communication underlying an LTE-advanced network[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2010; 1-6
- [5] Phunchongharn P, Hossain E, Kim D I. Resource allocation for device-to-device communications underlying LTE-advanced networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2013, 31(9): 348-358
- [6] Sun H, Sheng M, Wang X, et al. Resource allocation for maximizing the device-to-device communications underlying LTE-Advanced networks[C]//IEEE International Conference on Communications. Dresden, 2013; 60-64
- [7] Xu C, Song L, Han Z, et al. Efficiency resource allocation for device-to-device underlay communication systems: A reverse iterative combinatorial auction based approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(9): 348-358
- [8] Lei L, Zhong Z, Lin C, et al. Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 19(3): 96
- [9] Yu C H, Doppler K, Ribeiro C B, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(8): 2752-2763
- [10] Min H, Seo W, Lee J, et al. Reliability improvement using receive mode selection in the device-to-device uplink period underlying cellular networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(2): 413-418
- [11] Han J, Cui Q, Yang C, et al. Bipartite matching approach to optimal resource allocation in device to device underlying cellular network[J]. Electronics Letters, 2014, 50(3): 212-214
- [12] Plummer M D. Matching theory [M]. New York, American Mathematical Soc., 2009
- [13] Sun F, Li V O K, Diao Z. Multi-objective optimized bipartite matching for resource allocation[C]//International Symposium on Communications and Information Technologies. 2007; 666-671
- [14] Halabian H, Lambadaris I, Lung C H, et al. Throughput optimal relay selection in multiuser cooperative relaying networks[C]//IEEE military Communications Conference. 2010; 507-512
- [15] Parveen N, Venkateswarlu D S, Bhandari B N. Implementation of OFDM based multi-relay multipair two-way communication network[C]//IEEE 2014 Eleventh International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. 2014; 1-4
- [16] Ng T C Y, Yu W. Joint optimization of relay strategies and resource allocations in cooperative cellular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2007, 25(2): 328-339
- [17] Cai J, Shen X, Mark J W, et al. Semi-Distributed User Relaying Algorithm for Amplify-and-Forward Wireless Relay Networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(4): 1348-1357