

文章编号: 2095-4980(2015)06-0887-10

基于 CSI 及 QSI 的 D2D 传输策略

刘文红^{a,b}, 黄炳洁^{a,b}, 杨涛^{a,b}, 胡波^{a,b}

(复旦大学 a.电子工程系; b.信息学院 智慧网络与系统中心, 上海 200433)

摘要: 为缓解频谱资源紧缺, 提升本地服务质量, 在现有蜂窝网络中引入了D2D通信方式, 使得距离较近的用户之间可不经由基站直接通信。搭建了D2D通信与蜂窝通信并存的网络结构, 并分析了D2D复用蜂窝用户(CU)频谱资源时影响信噪比的干扰因素。为保证CU和D2D用户的通信质量, 采用信道状态信息(CSI)与队列状态信息(QSI)相结合的传输策略控制信噪比及时延。对于多CU多D2D对的资源分配问题, 采用基于优先级矩阵的分配算法。与二分匹配算法相比, 降低了计算复杂度, 结果逼近最优解且能稳定收敛。

关键词: D2D 通信; 干扰控制; 队列稳定; 吞吐量增益; 优先级矩阵

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201506.0887

D2D transmission strategy based on CSI and QSI

LIU Wenhong^{a,b}, HUANG Bingjie^{a,b}, YANG Tao^{a,b}, HU Bo^{a,b}

(a.Department of Electronic Engineering; b.Research Center of Smart Networks and Systems, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Device to Device(D2D) communications are proposed into cellular network in order to ease the shortage of spectrum resources, and improve the quality of local services. Proximity users in a cellular network can communicate directly with each other by D2D communication mode without necessarily going through the base station. The heterogeneous network structure is set up with D2D underlying cellular network, and through which the factors that relates with interference between D2D and the reused Cellular Use(CU) are analyzed. A joint transmission strategy based on Channel State Information(CSI) and Queue State Information(QSI) is adopted for the purpose of controlling Signal to Interference plus Noise Ratio(SINR) and transmission delay in order to guarantee the communication quality of both CU and D2D. As with the scenario of multiple CU and multiple D2D pairs, priority matrix based allocation algorithm is proposed to form optimal CU-D2D reuse combination, which has lower computational complexity and can achieve stable results that approximate to the most optimal solution when compared with binary matching algorithm.

Key words: D2D communication; interference control; queue stability; throughput gain; priority matrix

随着移动通信技术的快速发展,越来越多的用户高频次使用移动智能设备并期待享受高速率以及多样的移动数据业务,持续增长的业务需求与有限的无线资源之间的矛盾显得愈加突出。为满足本地流量负载快速增长的需求并提高用户体验,下一代无线通信系统正致力于提高传输速率以及系统容量的技术研究,因而 D2D 作为 LTE-A(Long Term Evolution-Advanced)新项目来支持更高的通信需求^[1]。在下一个 10 年,设想的移动设备多媒体应用,如远程展示、3D 全息技术,需要的数据率仅依靠 4G 是不够的,还需利用 D2D 通信助力实现^[2]。

在 D2D 通信中,用户设备(User Equipment, UE)可直接传输数据给其他用户而不需要经过基站。D2D 通信的用户间传输距离近,速率也由此得到了大幅提升。目前主要研究将 D2D 接入蜂窝网络, D2D 在基站控制下复用 CU 的授权频段^[3]。蜂窝网络采取频分双工通信模式,其中上行链路(Upside Link, UL)资源相比于下行链路(Down Link, DL)而言未得到充分利用^[4]。因此这里考虑的是 D2D 复用 CU 上行链路的频谱资源,但在频谱复用过程中会产生信道间的干扰。干扰管理机制已经有了一定的研究^[5-7],通过控制功率建立 SINR 约束条件来保证蜂窝用

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2015-11-12

基金项目: 国家科技重大专项: LTE TDD-FDD 联合传输设备研发与验证-子课题基金资助项目(No.2015ZX03001040-002)

户与 D2D 用户的通信性能。文献[6]给出了优化 D2D 与 CU 共存网络下的资源共享方法,但对于信道条件较差的通信链路,如 D2D 复用较近 CU 用户频谱资源、D2D 通信两用户距离较远的情况,增大功率虽可以将信噪比提高至一定水平,但能量利用效率会有损耗。在确定了 D2D 与 CU 复用组合后,通过优化资源配置提升网络的整体吞吐量^[8-9],吞吐量增量来自采用 D2D 频谱复用后相比单一的传统蜂窝网下的吞吐量。对于多 CU 多 D2D 的场景,文献[9]中采用的启发式算法没有考虑到 CU 与 D2D 对间的合作。以上研究都仅考虑了基于 CSI 进行资源分配,然而,实际通信中大部分应用都对时延敏感,缺少队列控制会导致通信时延不受控制。因此,有必要在资源优化过程中将时延控制加入到 D2D 通信。在文献[10]中,构想了未来蜂窝网中物理层与应用层相结合的时延感知 D2D 通信架构,较好地为 CSI 与 QSI 在策略端的结合做了铺垫。早在无线网络研究中,就有将队列因素考虑进来^[11]并利用启发式算法来解决队列相关问题。本文提出了在 D2D 通信背景下,将 CSI 与 QSI 相结合,通过 CSI 观察好的传输机会,在资源分配过程中结合 QSI 解决数据传输的迫切性。对于多 CU 多 D2D 场景,在联合优化模型下建立了相关机制来协调资源分配以最优优化整体吞吐量。

1 模型准备

1.1 D2D 系统模型

在异构网络中,存在宏小区、微小区、D2D 等多层 OFDM 结构。这种多层结构有助于提高频谱利用率,并提升系统吞吐量。由于上行链路资源没有得到充分复用,本文考虑的是蜂窝网络上行链路资源的分配。图 1 中小区内存在 N 个传统蜂窝用户和 K 对 D2D 用户,其中 D2D 用户通过复用小区内 CU 的上行授权频段进行通信,带来的信道间干扰图中用虚线表示。基站会受到来自 D2D 发送者 T_x 的干扰,CU 的通信也会对 D2D 中的接收者 R_x 产生干扰。因此,干扰管理包括 CU 到 D2D 的干扰以及 D2D 到 CU 的干扰^[12]。假设一个全负荷的蜂窝网络场景与文献[6]类似, N 个活跃的 CU 用户占据了小区内 N 个相互正交的信道,用 $C=\{1,2,\dots,N\}$, $D=\{1,2,\dots,K\}$ 表示活跃的 CU 以及 D2D 用户。

可从 2 个角度控制干扰:a) 限制 D2D 链路的传输功率;b) 限制 D2D 与可复用频谱资源 CU 间的最短距离。当一个蜂窝用户的频谱资源提供给多对 D2D 复用,会带来 D2D 对间的干扰。为规避此类干扰,提高 D2D 设备的资源优化效率,本文考虑一个蜂窝用户频谱资源仅供一组 D2D 对复用。

对时延敏感的服务来说,在资源分配过程中需要综合考虑信道条件以及队列信息。这些队列信息在现代无线网络中可以很好地获得^[13]。一般考虑比较多的是下行用户的队列,但在视频实时转播、远程展示及未来一些与视频流相关的场景中,发送端的数据会源源不断产生。因此控制发送端用户的队列也很重要,如果队列没有很好地控制,将导致通信的长时延。为解决该问题,引入了 QSI,并通过推导给出了包含队列长度的加权吞吐量优化目标。综上所述,本文做出如下的基本假设:

- 1) 蜂窝用户频谱资源供一组 D2D 对复用;
- 2) 基站可以获得完美 CSI 信息,即可以估计它们的信道增益;
- 3) 用户的数据到达速率服从泊松分布。

1.2 通信模型

移动通信环境中存在信号衰落,文献[7]中根据通信距离给出了信道衰落模型。同时考虑多径带来的信道快衰落以及阴影导致的衰落,因而得到 CU_i 与基站间的信道增益为:

$$g_{i,B} = A\beta_{i,B}\zeta_{i,B} \cdot L_{i,B}^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: A 为常数,取决于系统参量; $\beta_{i,B}$ 为指数分布的快衰落增益; $\zeta_{i,B}$ 为对数正态分布的慢衰落; α 为路径衰落指数; $L_{i,B}$ 是 CU_i 与基站 BS 之间的距离。

用 g_k 表示第 k 对 D2D 的信道增益,从 D2D k 的传输者到基站的干扰链路信道增益为 $h_{k,B}$,从 CU_i 到 D2D k 接收者的干扰链路信道增益为 $h_{i,k}$ 。假设每条信道叠加的高斯白噪声为 σ_N^2 ,有:

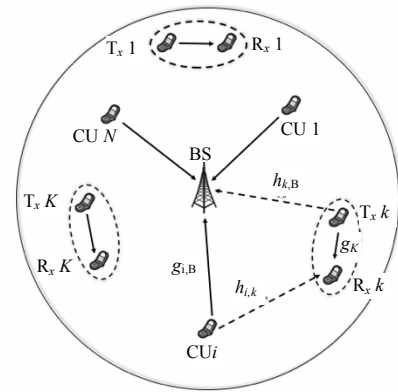


Fig.1 Network system of D2D sharing UL resources of CU
图 1 D2D 复用 CU 上行资源网络系统

$$\begin{cases} h_{k,B} = A\beta_{k,B}\zeta_{k,B} \cdot L_{k,B}^{-\alpha} \\ h_{i,k} = A\beta_{i,k}\zeta_{i,k} \cdot L_{i,k}^{-\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

文献[3]中假设每个时隙内宏小区传输速率固定,与该假设不同的是,允许小区物理层进行速率自适应。式(1)已给出了信道增益,由此,得到 CU 的平均 SINR 为:

$$u_i^c = \frac{P_i^c g_{i,B}}{\sigma_N^2 + \rho_{i,k} P_k^d h_{k,B}} \quad (3)$$

式中: P_i^c 是 CU i 通信时的发送功率; P_k^d 是 D2D k 通信时的发送功率; $\rho_{i,k}$ 为复用系统。假设中给出了一个 CU 用户的频谱资源只能被一对 D2D 复用,当 D2D k 共享 CU i 的频谱资源时,则复用系数 $\rho_{i,k}=1$; 当 CU i 的资源没被复用时,则 $\rho_{i,k}=0$, 此时,它不受 D2D 通信的干扰。同理,得到 D2D 的平均 SINR:

$$u_k^d = \frac{P_k^d g_k}{\sigma_N^2 + \rho_{i,k} P_i^c h_{i,k}} \quad (4)$$

根据香农公式,由式(3)~式(4)对应得到 CU i 和 D2D k 的传输速率:

$$r_i^c = W \log(1 + u_i^c) \quad (5)$$

$$r_k^d = W \log(1 + u_k^d) \quad (6)$$

以上信噪比和传输速率表达式作为资源优化的重要参量,将在第 2 部分的吞吐量优化模型中具体给出。

2 基于 CSI 及 QSI 的联合优化模型

D2D k 复用 CU i 的频谱资源可以增加整体吞吐量,一定程度上减轻了基站的通信负载,且使用 D2D 通信,相比向基站请求服务通信,速率更快。根据 CSI 做资源优化,可以在保证宏小区内 CU 及 D2D 通信质量的基础上,通过 D2D 复用 CU 频谱来提升吞吐量及频谱利用率。但未考虑队列造成的时延影响,因此在基于 CSI 优化的基础上,提出了一个改良方案,即基于 CSI 及 QSI 的联合优化模型。

2.1 基于 CSI 的资源优化

D2D 通信复用 CU 的频谱资源,保证双方通信质量的前提是控制彼此间的干扰,因此需要控制 CU 和 D2D 的 SINR 不低于相应的阈值。

信道质量不好的链路可能会通过增大发送功率使 SINR 达到阈值,此时带来的能量损耗较大。因此,为减少给这类链路分配频谱资源的可能性,对 D2D 通信的最大距离、CU 与 D2D 间能进行频谱复用的距离做出约束。

对于已经确定的单个 CU-D2D 频谱复用组合,根据 CSI 约束条件来优化 CU i 的发送功率 P_i^c 以及 D2D k 的发送功率 P_k^d ,使得两者的吞吐量和最大。

$$\begin{cases} \max_{\rho_{i,k}, P_i^c, P_k^d} \sum_{i \in C} \sum_{k \in D} (r_i^c + r_k^d) \\ s.t. \quad \mu_i^c \geq \mu_{i,\min}^c, \quad \forall i \in C \\ \quad \mu_k^d \geq \mu_{k,\min}^d, \quad \forall k \in D \\ \quad P_i^c \leq P_{\max}^c, \quad \forall i \in C \\ \quad P_k^d \leq P_{\max}^d, \quad \forall k \in D \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mu_{i,\min}^c$ 和 $\mu_{k,\min}^d$ 表示 CU i 和 D2D k 信干噪比最小阈值,通过限制 SINR 必须大于阈值,可保证它们的通信质量; $P_{\max}^c$ 和 $P_{\max}^d$ 表示 CU i 和 D2D k 传输的最大功率。以上是从 CSI 的角度出发,在约束条件下最大化目标函数来优化系统的吞吐量。

2.2 QSI 感知的吞吐量优化

在 2.1 中给出了基于 CSI 的资源分配方法,但上述模型忽略了队列信息。由于大部分应用都对时延敏感,将时延控制加入到 D2D 通信中,能更好地保证用户的体验质量(Quality of Experience, QoE)。为保证用户的队列稳定,减少时延,提出了结合 CSI 以及 QSI 的联合优化方法来动态控制无线资源的分配。引入 QSI,通过将资源分配与用户队列信息相结合来控制队列的稳定。

传输者下一时刻的队列长度受当前时隙的队列长度、数据到达率、传输速率影响。系统一个时隙的长度设为 T_s ,假设在宏基站每个传统蜂窝用户 CU 存在独立的下行队列:

$$Q_i^c(t+1) = \left[Q_i^c(t) - r_i^c(t)T_s, 0 \right]^+ + A_i^c(t) \quad (8)$$

式中: $A_i^c(t)$ 是 CU i 在 t 时刻的数据到达率,服从标准的泊松分布。CU i 的传输速率 $r_i^c(t)$ 取决于当前信道质量及发送功率 $P_i^c(t)$ 。当 CU i 的频谱资源被 D2D 用户复用时, $r_i^c(t)$ 会因 SINR 受到影响而减小,根据式(8)可得到当传输速率 $r_i^c(t)$ 持续性小于数据到达率 $A_i^c(t)$ 时,队列的长度将逐渐增加。为控制蜂窝用户 CU i 的队列稳定以减少时延,限制数据传输率大于平均数据到达率,可以很好地保证这点。因此,吞吐量优化问题式(7)也需满足 CU i 队列稳定约束条件,如式(9)所示:

$$\begin{cases} \sum_i \rho_{i,k} \leq 1, \rho_{i,k} \in \{0,1\}, \forall i \in C \\ s.t. \quad r_i^c \geq A_i^c \end{cases} \quad (9)$$

假设速率 A_i^c 对应的 SINR 为 μ_i^A ,则由式(9)可得对应 SINR 约束为 $\mu_i^c \geq \mu_i^A$,得到 μ_i^c 的约束为:

$$s.t. \quad \mu_i^c \geq \max(\mu_{i,\min}^c, \mu_i^A) \quad (10)$$

式(10)将平均数据到达率作为数据传输率的阈值,以控制队列长度来保证队列趋于稳定。由于数据到达率服从泊松分布,仅通过式(9)约束,仍会存在部分时隙内数据到达率高于数据传输率,导致短时间内队列持续增加。为了从本质上缓解该问题,需要从优化目标本身来控制队列,由此提出了 QSI 感知的优化目标。在优化系统吞吐量的同时从目标函数层面控制队列长度。文献[14]引入了队列长度,并把它作为加权因子来优化资源分配;文献[15]采用了偏移罚函数算法,并由此算法引申得到一阶 Lyapunov 偏移算法。本文采用二阶 Lyapunov 函数,通过目标函数对队列做优化控制。

具体的实现过程:首先控制前后 2 个时刻对应的队列状态偏移 $\Delta(t) \leq (r_i^c(t))^2 + (A_i^c(t))^2 - 2Q_i(t)(r_i^c(t) - A_i^c(t))$ 尽可能小,即等价于使右侧式子取尽可能小的值。由于数据到达率 $A_i^c(t)$ 以及数据传输率 $r_i^c(t)$ 具有最大值上限,可用最大常数项来处理。然后,在不等式的两侧同时添加含 $r_k^d(t)$ 的项,不等式仍然成立。最后,通过变换得到了以下含队列加权因子的优化目标函数。

式(11)给出了 N 个 CU 以及 K 个 D2D 对共存系统下的总体优化函数,综合得到资源配置的整数规划问题:

$$\max_{\rho_{i,k}, P_i^c(t), P_k^d(t)} \sum_{i \in C} \sum_{k \in D} \left(\frac{Q_i(t)}{V} r_i^c(t) + \rho_{i,k} r_k^d(t) \right) \quad (11)$$

$$s.t. \quad \mu_i^c \geq \max(\mu_{i,\min}^c, \mu_i^A), \quad \forall i \in C \quad (12)$$

$$\mu_k^d \geq \mu_{k,\min}^d, \quad \forall k \in D \quad (13)$$

$$P_i^c \leq P_{\max}^c, \quad \forall i \in C \quad (14)$$

$$P_k^d \leq P_{\max}^d, \quad \forall k \in D \quad (15)$$

$$\sum_i \rho_{i,k} \leq 1, \rho_{i,k} \in \{0,1\}, \forall i \in C \quad (16)$$

$$\sum_k \rho_{i,k} \leq 1, \rho_{i,k} \in \{0,1\}, \forall k \in D \quad (17)$$

约束条件式(16)和式(17)保证了一个 CU 的频谱资源最多只能被一个 D2D 对复用,而一个 D2D 对也只能复用一个 CU 的频谱资源。这避免了多对 D2D 复用相同 CU 资源时带来的 D2D 间干扰,也一定程度限制了对提供频谱复用 CU 的干扰。

式中 $\frac{Q_i(t)}{V}$ 为拉格朗日乘子, V 是一个大于零的参量, 可用来调整优化性能。一般来讲, V 越大, 对应 CU 平均队列越长, 文献[11]在处理无线电场景时采取的算法也包含了一个可调控系统性能的参量。当 V 趋近于正无穷时, 对应的是系统内复用 CU 频谱资源的 D2D 用户吞吐量。

3 基于优先级矩阵的资源分配算法

3.1 优先级函数

对于 CU 来说, CU 将频谱提供给能带来较大吞吐量增益的 D2D 复用, 并且通过约束能保证 CU 队列稳定, 这样的 D2D 无疑是 CU 组建 CU-D2D 组合优先选择的对象。对 D2D 来说, 复用 CU 的频谱资源, 需要考虑的是复用频谱的 CU 对它产生的干扰, 以及该复用组合下对应的 D2D 功率和速率大小。从系统角度出发, CU-D2D 的组建需要考虑吞吐量增益最大化。为使问题简单化, 将复用组合 CU-D2D 看成一个整体, CU 频谱复用后相比频谱复用前, 带来的吞吐量增量作为资源分配的优先级函数。

当 CU i 的频谱不提供给 D2D 复用时, 只存在白噪声干扰。根据最大可发送功率 $\mu_{i,\max}^c = \frac{P_{i,\max}^c g_{i,B}}{\sigma_N^2}$, 对应得到最大初始吞吐量 $T_{i,\max}$ 。最大发送功率对应的数据传输速率大于数据到达率, 能保证队列稳定, 此情况下不考虑 QSI 对吞吐量的影响。

$$T_{i,\max} = r_{i,\max}^c = W \log_2(1 + \mu_{i,\max}^c) \quad (18)$$

先考虑单个 CU i 与单对 D2D 的情况, 即 $K=1, N=1$, 通过组建一个 CU-D2D 组合, 便可以很好地解决单个 D2D 对复用 CU 资源的优化问题。此时解决的是如何分配功率来最大化整体加权吞吐量, 通过在约束条件范围内求最优组合功率 (P_i^{c*}, P_k^{d*}) 便可以实现。CU-D2D 组合对应的加权吞吐量如式(19):

$$T_{i,k}^{\text{sum}} = \frac{Q_i(t)}{V} r_i^c(t) + r_k^d = W \left[\frac{Q_i(t)}{V} \log_2 \left(1 + \frac{P_i^{c*} g_{i,B}}{\sigma_N^2 + P_k^{d*} h_{k,B}} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P_i^{c*} g_k}{\sigma_N^2 + P_i^{c*} h_{i,k}} \right) \right] \quad (19)$$

由此可得到 D2D 复用 CU 频谱资源带来的加权吞吐量增益, 也就是优先级函数, 用式(20)表示:

$$T_{i,k}^G = T_{i,k}^{\text{sum}} - T_{i,\max} \quad (20)$$

3.2 资源分配算法

当一个 CU 存在多个频谱复用的候选 D2D 集合, 在资源有限的情况下, 需要解决如何组建最佳的复用组合 CU-D2D 的问题, 也就是求解所有 $\rho_{i,k}=1$ 的 i 与 k 组合, 并且确定 $\rho_{i,k}=1$ 下 CU i 与 D2D k 的最优功率 (P_i^{c*}, P_k^{d*})。

首先分析 2 种具体的场景:

对单个 CU i 而言, 当存在多个 $k \in R_i$ 时, 即可复用 CU i 频谱资源的 D2D 设备数目 $|R_i| > 1$, 此时根据式(20)定义的优先级函数 $T_{i,k}^G$, 将 CU i 的频谱资源选择性地给第 k^* 个复用。其中 k^* 取得是 CU i 候选集合 R_i 中吞吐量增益最大值对应的 D2D 对。

$$k^* = \arg \max T_{i,k}^G, \quad k \in R_i \quad (21)$$

对于多个 CU 与多个 D2D 的场景, 可能会存在相同 D2D 同时属于不同 CU 的资源复用候选集合, 即 $k \in R_i$ 且 $k \in R_j$, 其中 $i, j \in C$, 这个问题就变成了最大化权值的双边匹配问题^[16-17], 相比单个 D2D 的资源分配问题要复杂很多, 需要优化的问题如下:

$$\max \sum_{i \in C} \sum_{k \in R} \rho_{i,k} \cdot T_{i,k}^G \quad (22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{s.t.} \quad \sum_k \rho_{i,k} \leq 1, \rho_{i,k} \in \{0,1\}, \forall i \in C \\ \sum_i \rho_{i,k} \leq 1, \rho_{i,k} \in \{0,1\}, \forall k \in R \end{array} \right. \quad (23)$$

式(22)中整体优化问题可采取经典的二分算法^[18], 提供频谱资源的 CU 与候选的 D2D 对形成双边图的 2 组

节点。当 D2D k 可复用 CU i 的频谱资源, 即 $k \in R_i$ 且节点 i 与 k 之间存在相连的边 $e_{i,k}$ 。D2D k 复用 CU i 带来的吞吐量增益作为边 $e_{i,k}$ 的权值。二分法整体求解的复杂度比较高, 为简化求解, 提出了基于优先级矩阵的分配算法。其中优先级体现在对增益较大的 CU-D2D 组合, 采用优先级矩阵算法可保证其优先分配到频谱资源。

在资源分配算法流程中, 首先根据信道条件约束得到距离约束, 确定 CU i 可供频谱复用的 D2D 候选集合。然后, 对可行的 CU-D2D 组合, 通过目标函数求解最优功率组合。最后, 以 CU-D2D 组合功率和对应吞吐量增益为元素组建优先级矩阵, 通过搜索当前优先级矩阵中吞吐量增益最大值来依次确定资源分配, 流程如图 2 所示。

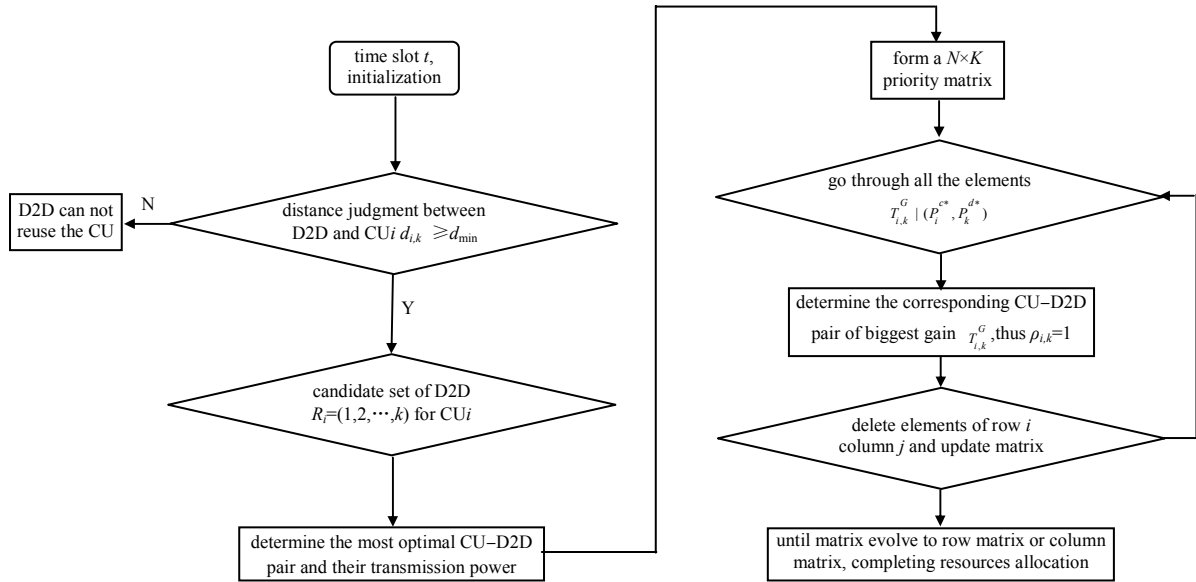


Fig.2 Flow of resource allocation algorithm
图 2 资源分配算法流程图

算法执行的过程说明:

1) 初始化: 初始化当前时隙、系统中的用户分布以及信道参量。

2) 确定复用关系: 基于 SINR 约束条件得到距离约束, 筛选出符合 CU 复用条件的 D2D 对, 得到各个 CU 的候选 D2D 集合 $(R_1, R_2, \dots, R_N)$ 。其中 $R_i = \{1, 2, \dots, k\}, k \in R_i$, 即是 CU i 对应的候选 D2D, 否则矩阵中第 i 行 k 列的元素为零。

3) 确定最优功率及对应吞吐量增益: CU i 与候选 D2D k 组成 CU-D2D 组合, 对应了最优功率组合 (P_i^{c*}, P_k^{d*}) 以及 $T_{i,k}^G$, 由此确定了矩阵第 i 行 k 列的元素为 $T_{i,k}^G | (P_i^{c*}, P_k^{d*})$ 。

4) 确定资源分配: 遍历矩阵中 $T_{i,k}^G$ 最大值, 优先为吞吐量增益大的 CU-D2D 组合确定资源分配, 对应功率分配即为 (P_i^{c*}, P_k^{d*}) 。如, 当优先级矩阵中最大元素为 $T_{i,k}^G | (P_i^{c*}, P_k^{d*})$, 由于该组合在 CU 频谱资源复用后带来的吞吐量增益最大, 基于吞吐量增益优化原则, 按照优先级矩阵算法, 优先将编号为 1 的 CU 资源分配给编号为 1 的 D2D 对使用, CU 和 D2D 的最优发送功率分别为 P_i^{c*} 和 P_k^{d*} , 即完成了该 CU 资源的分配, 进而得到了更新后的优先级矩阵为 $(N-1) \times (K-1)$ 阶。再在剩余的 $i \in \{2, 3, \dots, N\}$ 中重新分配资源, 并依次进行资源分配和矩阵更新。

5) 完成所有 CU 资源分配: 对不断降阶的优先级矩阵, 每一次都遍历当前矩阵中的 $T_{i,k}^G$ 最大值, 直至优先级矩阵降阶到 $1 \times (K-N)$ 的行向量或者 $(N-K) \times 1$ 的列向量时, 则该向量中的最大值对应的 CU 和 D2D 即为最后一个需要确定资源分配的 CU-D2D 组合, 由此完成了频谱资源分配, 并得到了各个 CU-D2D 组合在所求最优功率下对应的吞吐量增益。

下面建立 CU-D2D 组合的资源分配优先级矩阵:

无线通信系统里存在 $C = \{1, 2, \dots, N\}, D = \{1, 2, \dots, K\}$, 对应 $|C| = N, |D| = K$, 所以对应 $N \times K$ 阶的资源分配优先级矩阵。当 $k \in R_i$ 时, 则矩阵元素 $T_{i,k}^G | (P_i^{c*}, P_k^{d*})$ 存在且不为零, 当 $k \notin R_i$ 时, 则第 i 行 k 列的元素为 0。因此, 对于没有复用关系的 CU 与 D2D 先遍历一遍, 对应的矩阵元素为零。矩阵元素 $T_{i,k}^G | (P_i^{c*}, P_k^{d*})$ 表示在 (CU i , D2D k) 组合

最优功率 (P_i^{c*}, P_k^{d*}) 下, 由 CU i 频谱复用带来吞吐量增益 $T_{i,k}^G$ 。

$$\begin{vmatrix} T_{1,1}^G | (P_1^{c*}, P_1^{d*}) & 0 & T_{1,2}^G | (P_1^{c*}, P_2^{d*}) & 0 & T_{1,k}^G | (P_1^{c*}, P_k^{d*}) \\ T_{2,1}^G | (P_2^{c*}, P_1^{d*}) & 0 & T_{2,2}^G | (P_2^{c*}, P_2^{d*}) & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \ddots & T_{i,k}^G | (P_i^{c*}, P_k^{d*}) & 0 \\ T_{N,1}^G | (P_N^{c*}, P_1^{d*}) & \cdots & T_{N,2}^G | (P_N^{c*}, P_2^{d*}) & 0 & T_{N,K}^G | (P_N^{c*}, P_K^{d*}) \end{vmatrix}$$

由以上 5 步可以确定一个时隙内 CU-D2D 频谱复用组合以及对应功率, 在下一个时隙, 将根据更新的用户分布、信道条件以及队列长度, 按照优化模型以及以上算法重新分配资源。

4 性能分析

4.1 仿真设置

表 1 给出了 CU, D2D 分布参数。其中与信道衰落相关分布: 多径衰落是均值为单位 1 的指数分布, 阴影导致的衰落服从对数正态分布, 标准差为 8 dB。根据参数设置, 得到图 3 所示的分布图。

表 1 D2D 通信参数设置

Table1 Simulation parameters for D2D communication		
parameters	value	
cell radius R/km	0.5, 1.0	
uplink bandwidth W/MHz	5	
path loss exponent α	4	
path loss constant K	10^{-2}	
noise variance σ_N^2/dBm	-114	
maximum transmission power of CU $P_{\max}^c/\text{dBm}$	24	
maximum transmission power of D2D $P_{\max}^d/\text{dBm}$	18, 21, 24	
SINR threshold of CU $\mu_{i,\min}^c/\text{dB}$	[0,25] uniform distribution	
SINR threshold of D2D $\mu_{k,\min}^d/\text{dB}$	[0,25] uniform distribution	
radius of D2D pair r/m	20,30,40,...,100	
location of D2D pair L_r	[0, R]均匀分布	
number of active CUs N	20, 40, 60	
number of D2D pairs K	proportional to the number of CUs	
time slot T_s/ms	1	
data arrival rate A_i^c	Poisson distribution, $\lambda=[10,20]$ Mbps	
queue weighted parameters V	450 W bits	

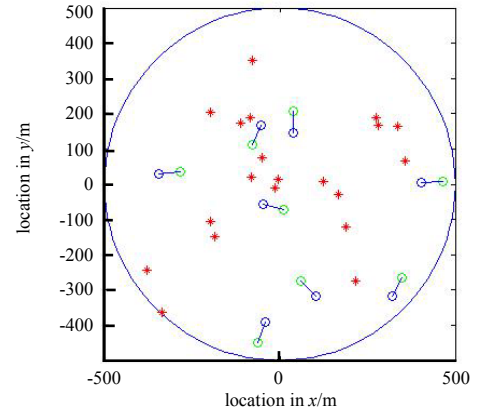


Fig.3 Distribution system model of CU and D2D
图 3 CU 与 D2D 分布结构图

4.2 吞吐量增益分析

图 4 和图 5 给出了吞吐量增益随 D2D 最大通信半径增长的变化曲线图。其中, 图 4 中的 3 条曲线对应了 D2D 3 个不同的最大发送功率 $P_{\max}^d$, 由下至上分别是 18 dBm, 21 dBm, 24 dBm。从仿真结果来看, 横向比较, D2D 通信半径的增加将导致系统整体的吞吐量增益下降。纵向比较, 若保持 D2D 通信半径 r 不变, 随着 D2D 最大发送功率 $P_{\max}^d$ 增大, 吞吐量增益会有所增加。这是因为 $P_{\max}^d$ 增大, 使得最优功率组合 (P_i^{c*}, P_k^{d*}) 中 P_k^{d*} 可以取更高的功率值。

图 5 中固定了 $P_{\max}^c$ 和 $P_{\max}^d$ 分别为 24 dBm, 21 dBm, 比较了 2 种资源优化算法下的吞吐量增益结果。采用优先级矩阵算法得到的吞吐量增益接近二分图最大权值匹配算法。由于优先级函数与目标函数具有一致性, 随着 D2D 最大通信半径的变化, 增益也能保持稳定。

在处理 N 个 CU、 K 对 D2D 的资源分配问题上, 采用二分图法可求得全局最优解, 计算复杂度是 $O(N^3)$ 。虽然采取优先级矩阵算法求得的是次优解, 但是逼近最优解且复杂度仅是 $O(N \times K \times \min(N, K))$, 当网络中 K 与 N 值相差较大, 对应应有 2 种情况: a) 系统内用户分布较稀疏; b) 在非网络高峰期。在以上 2 种情况下请求 D2D 通信的用户也比较少, 对应的计算复杂度会具有很大的优势。

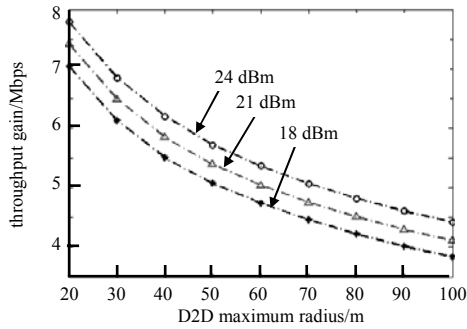


Fig.4 System throughput gain for different maximum transmission powers of D2D pairs with change of D2D maximum radius
图 4 吞吐量增益随 D2D 最大通信半径变化

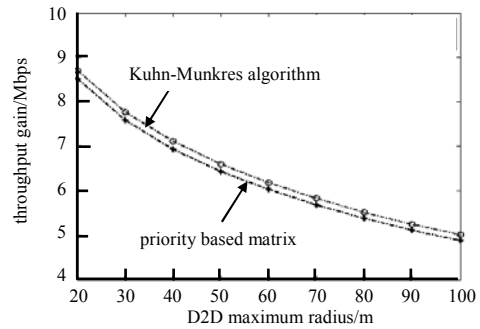


Fig.5 Comparison between priorities based matrix algorithm and Kuhn-Munkres algorithm
图 5 优先级矩阵算法与二分图最大权值匹配算法对比

为进一步研究 CU 与 D2D 数量的变化对增益的影响, 图 6 将 D2D 与 CU 数量的比值作为自变量, 给出了在不同 CU 数量下采取 2 种算法对应的吞吐量增益变化曲线。为减少随机性的影响, 每一种情况取的是运算 100 次的平均值。表 2 给出了对应的吞吐量具体数值。通过图 6 的趋势图以及表 2 的数值比较, 可以得出:

1) 当小区内 D2D 数量 K 与 CU 数量 N 的比值 K/N 在 40%~70%之间, 随着 K/N 增长, 吞吐量增益呈线性增长趋势。

2) 当 K/N 比值较小, 可复用的频谱资源充足, 此时吞吐量增益受限于 D2D 对的数目 K 。由于 D2D 与 CU 的复用需满足最小距离约束, 增大 D2D 数目带来的吞吐量增益还取决于 D2D 的分布。但增加 D2D 数目给系统带来的整体吞吐量增益呈上升趋势。

3) 当 K/N 比值较大, 在 80%~100%区间, 此时 CU 数目处于饱和状态, CU 的频谱资源与小区内的 D2D 组成较稳定的复用关系, 再增加 D2D 对的数目对新增 CU-D2D 复合作用不大, 吞吐量增益开始收敛, 并稳定在一个相对固定的值。从表 2 得到, 该稳定值随着 N 取值增大, 吞吐量增益的提升量也与 N 的增长倍数相当。

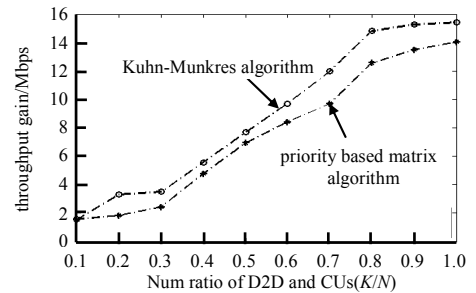
4) 纵向比较, 图 6 和表 2 显示, 在优先级矩阵和二分图 2 种频谱资源分配算法下, 两者结果大体一致。当 CU 数量较多时, 可以看到分别采用 2 种算法得到的结果差值也在缩小。因此, 本文提出的优先级矩阵算法求解次优解稳定且逼近二分图算法下的最优解。其突出优点在于很大程度上降低了计算复杂度。

5) 在相同 K/N 比值下, 随着 N 数量的增大, 整体吞吐量增益也对应增长。但是增长的幅度与 K/N 取值有关。从表 2 得到, 当 K/N 取值较小时, 增大 N 时对整体吞吐量增长幅度影响很大。随着 K/N 取值的增大, 吞吐量增长幅度与 N 线性增长倍数相当。

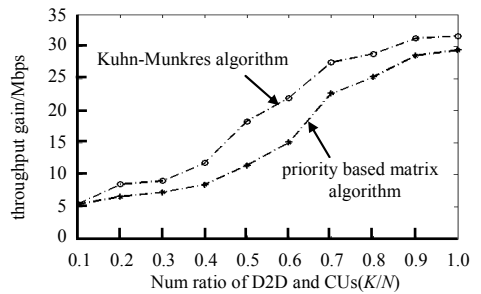
4.3 队列稳定性分析

为分析联合模型下使用优先级矩阵算法对应的用户队列情况, 赋予 CU 初始队列长度, 通过优化模型拟合得到 CU-D2D 组合及对应的发送功率、传输速率。结合数据到达率可以得到 CU 下一时刻的队列长度。通过图 2 给出的算法流程, 多次迭代后得到各时隙内 CU 的队列长度, 并观察其在时间周期 T 上的变化。

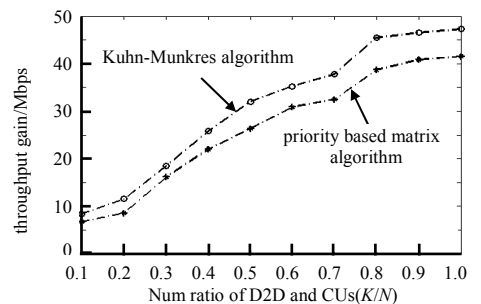
其中数据到达率 λ_i^c 服从泊松分布, 取 $R=0.5$ km, $r=60$ m, $K=N$, 图 7 表示的是小区内某一活跃的 CU, 它将频谱提供给 D2D 复用, 在 λ 取值为 15 Mbps 时队列长度变化情况。从图 7 可以看出, 根据算法迭代得到 500 个时



(a) CU number $N=20$



(b) CU number $N=40$



(c) CU number $N=60$

Fig.6 Throughput gain under different K/N for two algorithms

图 6 两种算法下吞吐量随 K/N 的变化

隙内队列长度在数据到达率均值附近波动。相比无QSI感知的模型,能使队列长度控制在一定范围内。从整个时间周期来看,队列趋于一个较稳定的状态,一定程度上保证了用户较好的QoE体验。

表2 不同算法下吞吐量随 K/N 变化
Table2 Evaluation of throughput gain under different K/N

	throughput gain under different N and K/N									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
CU number $N=20$	1.54	1.84	2.44	4.78	6.94	8.42	9.69	12.57	13.50	14.04
	1.55	3.31	3.50	5.58	7.69	9.69	11.97	14.82	15.27	15.42
CU number $N=40$	5.38	6.57	7.25	8.43	11.46	15.03	22.69	25.26	28.57	29.45
	5.43	8.52	9.03	11.84	18.32	21.99	27.52	28.85	31.25	31.67
CU number $N=60$	6.72	8.56	16.15	21.98	26.33	30.84	32.45	38.66	40.85	40.51
	8.37	11.51	18.45	25.79	32.00	35.25	37.78	45.46	46.48	47.31

5 结论

本文利用基于CSI与QSI的联合优化模型,在满足SINR约束的基础上引入了队列时延因素,通过Lyapunov偏移算法得到包含队列控制的目标函数。通过最大化目标函数,得到可行的CU-D2D组合和最优功率,以及对应的吞吐量增益。基于优先级矩阵的资源分配算法很好地解决了多个CU以及多个D2D场景下的频谱资源分配问题,且算法复杂度相比二分最大权值匹配算法更低。对比了这2种算法下吞吐量增益随用户分布的变化关系,由优先级矩阵算法得到的结果逼近最优且算法复杂度更低。除此之外,引入QSI感知之后,CU的队列在整个时间周期内保持稳态,这也表明一定程度上控制了时延,保障了用户的QoE体验。综上所述,本文提出的D2D传输策略允许在既定网络中接入更多的用户,在保证本地服务质量的基础上提升了系统吞吐量,同时也提高了频谱利用率。

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 Commun. Mag., 2009, 47(12): 42-49.
- [2] Mohsen Nader Tehrani, Murat Uysal, Halim Yanikomeroglu. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions[J]. IEEE Commun. Mag., 2014, 52(5): 86-92.
- [3] Fodor G, Dahlman E, Mildh G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications[J]. IEEE Commun. Mag., 2012, 50(3): 170-177.
- [4] Janis P, YU C, Doppler K, et al. Device-to-device communication underlying cellular communications systems[J]. Int'l J. of Commun., Network and Syst. Sci., 2009, 2(3): 169-178.
- [5] YU C H, Tirkkonen O, Doppler K, et al. On the performance of device-to-device underlay communication with simple power control[C]// Proc. IEEE VTC-Spring. Barcelona: [s.n.], 2009: 1-5.
- [6] YU C H, Doppler K, Ribeiro C, et al. Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2011, 10(8): 2752-2763.
- [7] XING H, Hakola S. The investigation of power control schemes for a device-to-device communication integrated into OFDMA cellular system[C]// Proc. IEEE PIMRC. Istanbul: [s.n.], 2010: 1775-1780.
- [8] MIN H, Lee J, Park S, et al. Capacity enhancement using an interference limited area for device-to-device uplink underlying cellular networks[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2011, 10(12): 3995-4000.
- [9] Zulhasnine M, HUANG C, Srinivasan A. Efficient resource allocation for device-to-device communication underlying LTE network[C]// Proc. 2010 IEEE Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Commun., Niagara Falls: [s.n.], 2010: 368-375.

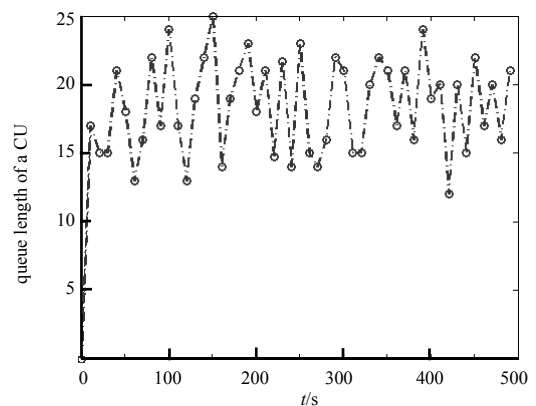


Fig.7 Changing queue length of CU under each time slot
图7 CU在各个时隙下的队列长度变化

- [10] WANG Wei,Vincent K.Lau N. Delay-Aware Cross-Layer design for Device-to-Device communications in future cellular systems[J]. IEEE Commun. Mag., 2014,52(16):133–139.
- [11] Lapicciarella F,LIU X,DING Z. Distributed control of multiple cognitive radio overlay for primary queue stability[J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2013,12(1):112–122.
- [12] PENG T,LU Q,WANG H,et al. Interference avoidance mechanisms in the hybrid cellular and device-to-device systems[C]// Proc. IEEE PIMRC. Tokyo:[s.n.], 2009:617–621.
- [13] Sesia S,Toufik I,Baker M. LTE–The UMTS Long Term Evolution:From Theory to Practice[M]. 2nd ed. Hoboken,NJ,USA: Wiley, 2009.
- [14] LIN X,Shroff N,Srikant R. A tutorial on cross-layer optimization in wireless networks[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2006, 24(8):1452–1463.
- [15] Neely M J. Stochastic network optimization with application to communication and queueing systems[C]// Synthesis Lectures on Communication Networks. San Rafael,CA,USA:Morgan & Claypool, 2010:1–211.
- [16] Roth A E,Sotomayor M A O. Two-Sided Matching-A Study in Game-Theoretic Modeling and Analysis[M]. Cambridge, England, U.K:Cambridge University Press, 1990.
- [17] GU Y,Saad W,Bennis M,et al. Matching theory for future wireless networks:fundamentals and applications[J]. IEEE Commun. Mag., 2015,53(5):52–59.
- [18] West D B. Introduction to Graph Theory[M]. [S.l.]:Prentice Hall, 2001.

作者简介:



刘文红(1991–), 女, 江西省抚州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线网络通信。
email:wenhongliu13@fudan.edu.cn.

杨 涛(1970–), 男, 陕西省汉中市人, 副教授, 主要研究方向为认知无线电、网络信息感知及融合、智能信号处理。

胡 波(1968–), 男, 江苏省常州市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字信号处理。

黄炳洁(1992–), 男, 福建省泉州市人, 在读硕士研究生, 主要方向为无线网络通信。

(上接第 881 页)

作者简介:



任亚博(1987–), 男, 河南省许昌市人, 在读博士研究生, 研究方向为信道编码识别。
email:renyabo2005@126.com.

张 健(1968–), 男, 四川省大竹县人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电子学系统、无线电测控通信、太赫兹科学技术、集成微系统技术等。

刘以农(1963–), 男, 北京市人, 教授, 博士生导师, 研究方向为核电子学。

张 伟(1972–), 男, 四川省绵阳市人, 研究员, 研究方向为信号处理。