



蜂窝网络中基于 D2D 位置的联合模式选择与资源分配方案^{*}

姚 骏^{1,2}, 黄 清¹

(1. 北京交通大学电子信息工程学院 北京 100044;

2. 中国联合网络通信有限公司常州分公司 常州 213003)

摘 要: 蜂窝网络中的 D2D (device-to-device, 终端直通) 技术可以提高频谱资源利用率和用户的吞吐量, 然而, D2D 通信会对蜂窝用户和其他 D2D 用户产生干扰, 合适的模式选择与资源分配方案就变得相当重要。研究了蜂窝用户和 D2D 用户的干扰情况, 并提出了一种基于 D2D 位置的联合模式选择与资源分配方案, 该方案根据 D2D 用户在小区中的位置和终端的干扰情况对 D2D 用户的通信模式和资源的复用方式进行了优化, 从而提升系统下行链路的性能。仿真结果表明, 相比于已有方案和纯蜂窝方案, 采用基于位置的联合模式选择与资源分配方案能得到更高的系统吞吐量。

关键词: D2D 通信; 蜂窝网络; 模式选择; 资源分配; 干扰协调

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.08.012

Location-Based Mode Selection and Resource Allocation for Device-to-Device Underlay Communication

Yao Jun^{1,2}, Huang Qing¹

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Changzhou Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Changzhou 213003, China)

Abstract: Device-to-device (D2D) communication underlaying cellular networks can bring great benefits to spectrum resource utilization and users' throughput. However, because of the interference caused by D2D communication, interference cancellation and coordination becomes very important. A joint mode selection and resource allocation scheme was proposed to improve the performance of system in the downlink direction. Simulation results show that, compared to pure greedy D2D scheme and cellular scheme, the proposed scheme can achieve higher system throughput.

Key words: D2D communication, cellular network, mode selection, resource allocation, interference coordination

1 引言

近几年来, 随着移动多媒体业务的迅猛发展, 用户对传输速率的要求越来越高。为了提升蜂窝网络的性能, 满足用户对速率的需求, 提高频谱资源利用率的相关技术成为研究热点, 如认知无线电技术和 D2D 通信技术^[1]。

在传统蜂窝网络中, 数据通过基站或其他网络单元进行传输。而通过使用 D2D 通信技术, 当用户终端距离较近时, 用户终端之间可以直接进行数据传输。D2D 通信技术不仅可以增加系统吞吐量, 还可以减少设备功耗, 提升系统的频谱利用率^[2]。D2D 通信也给无线资源管理带来新的挑战, 尤其当 D2D 用户复用蜂窝用户资源时, 存在比较严

^{*} 国家自然科学基金重点资助项目 (No.61032002)



重的同频干扰。为了减小同频干扰,陆续提出了一些干扰管理方案。参考文献[3]提出一种功率控制方案来保证蜂窝链路的 SINR (signal to interference plus noise ratio, 信噪比); 参考文献[4]提出一种在单蜂窝用户和单 D2D 对场景中的最优功率分配方案; 参考文献[5]提出一种基于博弈的思想联合调度与资源分配方案; 参考文献[6]提出一种基于干扰感知的资源分配方案。然而, 上述这些研究均假设 D2D 对复用蜂窝用户资源, 事实上, 在下行传输时, 当 D2D 对距离 eNB (evolved NodeB, 演进型基站) 较远时, D2D 对可以复用多个蜂窝用户资源, 从而进一步提高系统的吞吐量; 当 D2D 对距离 eNB 较近时, D2D 对受到的干扰较大, 可以使用专用资源进行通信。

本文基于 D2D 用户在小区中的位置提出了一种联合模式选择与资源分配方案。该方案中, eNB 首先根据 D2D 对到 eNB 的距离对 D2D 对进行分类, 当 D2D 对距离 eNB 较近时, D2D 对为近端 D2D 对, eNB 为其优先分配专用资源; 当 D2D 对距离 eNB 较远时, D2D 对为远端 D2D 对, eNB 为其优先分配复用资源。随着循环的进行, eNB 将会根据资源和终端链路速率为 D2D 对的资源分配进行动态调整, 使 D2D 对分配到合适的资源。仿真结果表明, 本文提出的方案可以有效地减少用户间的干扰, 提高系统吞吐量。

2 系统模型

假设宏小区中 eNB 处在小区的中间, 小区中包含两类用户, 分别是 D2D 用户和蜂窝用户, D2D 用户成对存在, 每个 D2D 对包含一个 D2D 发射终端和一个 D2D 接收终端, D2D 用户和蜂窝用户在小区中随机分布。同一 D2D 对中的 D2D 发射终端和 D2D 接收终端的距离满足 D2D 通信的最大距离约束, 从而保证 D2D 通信的服务质量。

图 1 是下行传输的场景。假设宏小区中有 C 个 CUE (cellular user equipment, 蜂窝用户设备) 和 K 个 D2D 对, D2D 对在小区中的位置不发生变化。eNB 根据 D2D 对的接收终端与 eNB 之间的距离, 将 D2D 对分为两种类型, 分别是靠近 eNB 的近端 D2D 对和远离 eNB 的远端 D2D 对。

假设小区中有 N 个正交子信道 ($N > C$), 子信道带宽为 B , 且分配给蜂窝用户的子信道是固定的, 蜂窝用户 n 使用子信道 n 。定义一组二进制变量 $\{x_{k,n}\}$ 表示 D2D 对使用子信道的情况, 当 $x_{k,n}=1$ 时, D2D 对 k 使用子信道 n ; 当 $x_{k,n}=0$ 时, D2D 对 k 不使用子信道 n 。

方案中的 D2D 对具有两种通信模式, 即复用模式和

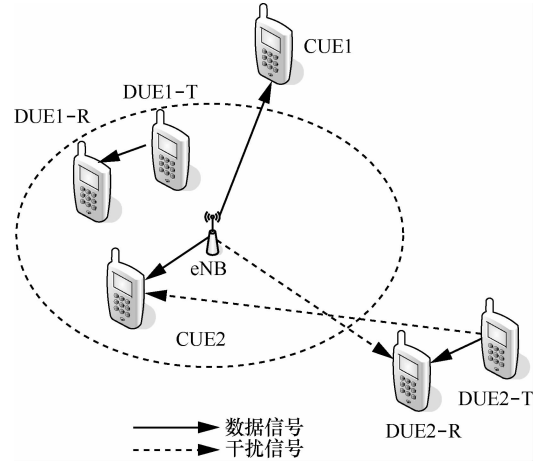


图 1 混合网络系统模型

专用模式。在复用模式, D2D 对复用蜂窝子信道进行通信; 在专用模式, D2D 对使用一个专用子信道进行通信 ($\sum_{n=C+1}^N x_{k,n} \leq 1, \forall k \in \{1, \dots, K\}$), 同时, 每个专用子信道最多只能分配给一个 D2D 对 ($\sum_{k=1}^K x_{k,n} \leq 1, \forall n \in \{C+1, \dots, N\}$)。假设 eNB 和工作在复用模式的 D2D 对用于每个蜂窝子信道的发射功率都是功率固定的, 分别为 P_B 和 P_D 。由于工作在专用模式的 D2D 对不会对其他用户产生干扰, 因此, 工作在专用模式的 D2D 对用最大发射功率 $P_D^{\max}$ 进行传输。

工作在专用模式的 D2D 对的 SINR 可以表示为:

$$\gamma_{k,n}^D = \frac{P_D^{\max} G_k^D}{N_0}, \quad C+1 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K \quad (1)$$

其中, G_k^D 表示 D2D 对 k 之间的信道增益, N_0 表示接收终端的热噪声功率, $P_D^{\max}$ 表示 D2D 对的最大发射功率。

工作在复用模式的 D2D 对的 SINR 可以表示为:

$$\gamma_{k,n}^D = \frac{P_D G_k^D}{I_{k,n}^D + N_0} = \frac{P_D G_k^D}{x_{k,n} P_B \cdot G_k^B + \sum_{j \in \{j | x_{j,n}=1 \cap j \neq k\}} P_D G_{j,k}^D + N_0}, \quad 1 \leq n \leq C, 1 \leq k, j \leq K \quad (2)$$

其中, G_k^B 表示 D2D 对 k 的接收终端与 eNB 之间的信道增益, $G_{j,k}^D$ 表示 D2D 对 j 的发射终端与 D2D 对 k 的接收终端之间的信道增益。 $I_{k,n}^D = x_{k,n} P_B \cdot G_k^B + \sum_{j \in \{j | x_{j,n}=1 \cap j \neq k\}} P_D G_{j,k}^D$ 为 D2D 对 k 使用子信道 n 时受到的干扰, 干扰分为两部分: 一部分是 eNB 产生的, 另一部分是与之使用相同子信道 n 的 D2D 对产生的。

D2D 对 k 使用子信道 n 时的速率为:

$$\eta_{k,n}^D = B \ln(1 + \gamma_{k,n}^D), 1 \leq n \leq N, 1 \leq k \leq K \quad (3)$$

D2D 对 k 的链路传输速率表示为:

$$\eta_k^D = \sum_{n \in \{n | x_{k,n}=1\}} B \ln(1 + \gamma_{k,n}^D) \quad (4)$$

CUE 的 SINR 可以表示为:

$$\gamma_n^C = \frac{P_B \cdot G_n^C}{I_n^C + N_0} = \frac{P_B G_n^C}{\sum_{k \in \{k | x_{k,n}=1\}} P_D G_{k,n}^C + N_0}, \quad 1 \leq n \leq C, 1 \leq k \leq K \quad (5)$$

其中, G_n^C 表示 CUE n 与 eNB 之间的信道增益, $G_{k,n}^C$ 表示 D2D 对 k 的发射终端与 CUE n 之间的信道增益, $I_n^C = \sum_{k \in \{k | x_{k,n}=1\}} P_D G_{k,n}^C$ 表示 CUE n 受到的干扰。

CUE n 的链路速率为:

$$\eta_n^C = B \ln(1 + \gamma_n^C) \quad (6)$$

系统的总吞吐量表示为:

$$\eta_{\text{all}} = \sum_{n=1}^C \eta_n^C + \sum_{k=1}^K \eta_k^D \quad (7)$$

在下行链路中, 工作在复用模式的 D2D 对受到的干扰主要来自 eNB 和与之使用相同子信道的 D2D 对。由于 eNB 的发射功率远大于 D2D 终端的发射功率, 当 D2D 对距离 eNB 较近时, eNB 对 D2D 对的干扰较大。同时, 当使用相同子信道的 D2D 对的距离较近时, 彼此之间的干扰也较大。因此, eNB 根据 D2D 对和 eNB 之间的距离对 D2D 对进行分类, 当 $d_k \leq d_{th}$ 时 (其中 d_{th} 为判定门限值, d_k 为 D2D 对 k 到 eNB 的距离), D2D 对 k 为近端 D2D 对, eNB 为其优先分配专用资源; 当 $d_k > d_{th}$ 时, D2D 对 k 为远端 D2D 对, eNB 为其优先分配蜂窝用户资源。

在实际中, D2D 对的 d_k 可以通过 eNB 发送的导频信号接收功率获得, 如 RSRP (reference signal receiving power, 参考信号接收功率)。因此, d_{th} 可以对应到一个功率门限 P_{th} 。设 D2D 对 k 接收到来自 eNB 的参考信号接收功率为 P_k , 当 $P_k \geq P_{th}$ 时, D2D 对 k 为近端 D2D 对, 反之为远端 D2D 对。

3 基于 D2D 对位置的联合模式选择与资源分配方案

本文基于 D2D 对在小区中的位置, 提出了一种联合模式选择与资源分配方案。该方案分为 3 个阶段, 即初始阶段、专用资源分配阶段和复用资源分配阶段。在初始阶段完成后, 专用资源分配阶段和复用资源分配阶段将循环进行, 通过不断的循环, eNB 将会给 D2D 对分配到合适的

资源。

3.1 初始化

当 D2D 对的通信链路建立时, 首先接收来自 eNB 的参考信号并将之与门限值 P_{th} 进行比较, 结果反馈给 eNB。eNB 根据反馈的信息对 D2D 对进行分类。

如果 D2D 对 k 的参考信号接收功率 P_k 满足 $P_k \geq P_{th}$, 则 D2D 对 k 属于近端 D2D 对集合 S_1 , 反之, 则属于远端 D2D 对集合 S_0 , 即:

$$DUE_k \in \begin{cases} S_1, P_k \geq P_{th} \\ S_0, P_k < P_{th} \end{cases} \quad (8)$$

初始化时, 近端 D2D 对工作在专用模式, 使用专用资源进行通信; 远端 D2D 对工作在复用模式, 复用蜂窝用户资源进行通信。随着循环的进行, eNB 将根据资源和链路速率动态为 D2D 对分配资源。

3.2 专用资源的分配

在专用资源分配阶段中, 调度器按照顺序对专用子信道进行分配。在第一次专用资源分配阶段, 循环次数 $t=1$ 。

在调度起始时, 首先确认参加调度的专用 D2D 对集合 S_1 , 即在本阶段进行调度的 D2D 对由近端 D2D 对 S_1 和在复用资源分配阶段中终端速率小于门限值的 D2D 对共同组成。在每次调度循环中, 调度器将会调度专用子信道给优先级最高的 D2D 对 (D2D 对的优先权根据式 (9) 计算)。通过这种方式, 小区中的专用子信道会按照优先级的顺序分配给 D2D 对。当 D2D 对 k 分配到专用子信道 n 后, 调度器将把 D2D 对 k 和专用子信道 n 分别从集合 S_1 和专用子信道集合 U_{sub}^D 中删除。当小区内所有的专用子信道分配完毕或所有的 D2D 对调度完毕时, 专用资源分配将会终止。如果专用资源分配终止时, 集合 $S_1 \neq \emptyset$, 调度器将未分配到专用资源的 D2D 对添加到复用 D2D 对集合 S_2 , 使它能够通过复用蜂窝用户资源进行通信。通过这种方式, 系统效率得到了提升。

D2D 对的优先权函数 $Q_k(t)$ 主要由 D2D 对在第 t 次循环的预估链路速率 $\eta_k^D(t)$ 和附加成本 $C_k(t)$ 构成, 表示如下:

$$Q_k(t) = \eta_k^D(t) - C_k(t) = \eta_k^D(t) - \delta \sum_{t=t-1-m}^{t-1} \eta_k^D(t) \quad (9)$$

其中, 附加成本表示为 $C_k(t) = \delta \sum_{t=t-1-m}^{t-1} \eta_k^D(t)$, 由公平系数 $\delta (\delta \geq 0)$ 和 D2D 对 k 在前 m 次循环中取得的链路速率之和组成, 其中 $\eta_k^D(t) = 0, t \in \{-m, \dots, 0\}$ 。当 δ 较大时, D2D 对 k 在前 m 次循环中取得的链路速率之和对于当前的优先



权计算有较大的影响。由于循环初始时,调度器中没有D2D对的历史速率记录,因此,第一次循环时,D2D对的优先根据预估传输速率进行判断,即 $C_k(1)=0$ 。

3.3 复用资源的分配

复用D2D集合 S_2 中的D2D对将通过复用蜂窝子信道进行通信,但D2D用户复用蜂窝子信道并不能保证会带来整个系统吞吐量的提升,因为当D2D对复用蜂窝子信道时,该D2D对将获得一定的速率增益,但是与之使用相同子信道的D2D对和CUE会受到一定的干扰,从而影响链路速率,反之亦然。在考虑蜂窝速率约束和D2D对最大发射功率约束的同时,通过对资源的合理分配,能够取得更好的系统吞吐量。在复用资源分配阶段中,调度通过令牌的形式进行,在第一次复用资源分配中,集合 S_2 中的D2D对先不复用任何蜂窝子信道。

步骤1 确认参加调度的复用D2D对集合 S_2 ,即在本阶段进行调度的D2D对由远端D2D对在专用资源分配阶段中未分配到专用子信道的D2D对共同组成。

步骤2 当令牌传递给D2D对 k 时,D2D对 k 将逐个检测蜂窝子信道是否被自己复用,如果被复用,进入步骤3,否则,进入步骤4。如果D2D对 k 已经检测所有的蜂窝子信道 $U_{\text{sub}}^C = \{U_{\text{sub}1}, U_{\text{sub}2}, \dots, U_{\text{sub}C}\}$,那么调度器将D2D对 k 从集合 S_2 中删除,若删除后 S_2 不为空集,则将令牌传递给下一个D2D对,若删除后 S_2 为空集,则循环结束,将链路速率低于门限值 R_{th}^D 的D2D对添加到集合 S_1 。

步骤3 假设D2D对 k 复用蜂窝子信道 $U_{\text{sub}n}$ 时,D2D对 k 和与之使用相同子信道的D2D对 $j(j \in \{j | x_{j,n} = 1 \cap j \neq k\})$ 的速率分别为 $\eta_{k,n}^D$ 和 $\eta_{j,n}^D$ 。CUE n 的链路速率为 η_n^C 。如果D2D对 k 没有使用子信道 n ,D2D对 j 的速率将变为 $\tilde{\eta}_{j,n}^D$:

$$\tilde{\eta}_{j,n}^D = B \log(1 + \tilde{\gamma}_{j,n}^D) = B \log(1 + \frac{P_D G_j^D}{I_{j,n}^D - P_D G_{k,j}^D + N_0}) \quad (10)$$

其中, $\tilde{\gamma}_{j,n}^D$ 表示D2D对 k 不使用子信道 n 时,D2D对 j 的SINR; $I_{j,n}^D$ (见式(2))表示D2D对 k 使用子信道 n 时,D2D对 j 受到的干扰。

D2D对 j 复用蜂窝子信道 n 时的速率变化值为:

$$\Delta \eta_{j,n}^D = \tilde{\eta}_{j,n}^D - \eta_{j,n}^D, j \in \{j | x_{j,n} = 1 \cap j \neq k\} \quad (11)$$

同理,CUE n 的链路速率将变为 $\tilde{\eta}_n^C$:

$$\tilde{\eta}_n^C = B \log(1 + \tilde{\gamma}_n^C) = B \log(1 + \frac{P_B G_n^C}{I_n^C - P_D G_{k,n}^C + N_0}) \quad (12)$$

其中, $\tilde{\gamma}_n^C$ 表示D2D对 k 释放子信道 n 后,CUE n 的SINR; I_n^C (见式(5))表示D2D对 k 使用子信道 n 时,CUE n

受到的干扰。CUE n 的链路速率变化值为:

$$\Delta \eta_n^C = \tilde{\eta}_n^C - \eta_n^C \quad (13)$$

如果 $\eta_{k,n}^D, \Delta \eta_{j,n}^D, \Delta \eta_n^C, R_{\text{th}}^C$ (蜂窝链路速率门限)满足:

$$\eta_{k,n}^D < \sum_{j \in \{j | x_{j,n} = 1 \cap j \neq k\}} \Delta \eta_{j,n}^D + \Delta \eta_n^C \mid \eta_n^C < R_{\text{th}}^C \quad (14)$$

D2D对 k 停止使用子信道 n ,否则D2D对 k 继续使用子信道 n 。返回步骤2。

步骤4 假设D2D对 k 没有复用CUE n 的子信道。首先,判断D2D对 k 的发射功率是否小于D2D对的最大发射功率 P_D^{max} ,若D2D对 k 的总发射功率等于D2D对的最大发射功率 P_D^{max} ,则返回步骤2,否则执行以下步骤。

假设复用CUE n 子信道的D2D对 $j(j \in \{j | x_{j,n} = 1\})$ 的速率为 $\eta_{j,n}^D$,CUE n 的链路速率为 η_n^C 。如果D2D对 k 使用子信道 n ,D2D对 j 的速率为 $\tilde{\eta}_{j,n}^D$:

$$\tilde{\eta}_{j,n}^D = B \log(1 + \tilde{\gamma}_{j,n}^D) = B \log(1 + \frac{P_D G_j^D}{I_{j,n}^D + P_D G_{k,j}^D + N_0}) \quad (15)$$

其中, $\tilde{\gamma}_{j,n}^D$ 表示D2D对 k 使用子信道 n 后,D2D对 j 的SINR; $I_{j,n}^D$ 表示D2D对 k 不使用子信道 n 时,D2D对 j 受到的干扰。

D2D对 j 复用蜂窝子信道 n 时的速率变化值为:

$$\Delta \eta_{j,n}^D = \eta_{j,n}^D - \tilde{\eta}_{j,n}^D, j \in \{j | x_{j,n} = 1\} \quad (16)$$

同理,CUE n 的链路速率将变为 $\tilde{\eta}_n^C$:

$$\tilde{\eta}_n^C = B \log(1 + \tilde{\gamma}_n^C) = B \log(1 + \frac{P_B G_n^C}{I_n^C + P_D G_{k,n}^C + N_0}) \quad (17)$$

其中, $\tilde{\gamma}_n^C$ 表示D2D对 k 复用CUE n 后,CUE n 的SINR。 I_n^C 表示D2D对 k 使用子信道 n 时,CUE n 受到的干扰。CUE n 的速率变化值为:

$$\Delta \eta_n^C = \eta_n^C - \tilde{\eta}_n^C \quad (18)$$

如果 $\eta_{k,n}^D, \Delta \eta_{j,n}^D, \Delta \eta_n^C, R_{\text{th}}^C$ (蜂窝链路速率门限)满足:

$$\eta_{k,n}^D > \sum_{j \in \{j | x_{j,n} = 1\}} \Delta \eta_{j,n}^D + \Delta \eta_n^C \&\& \tilde{\eta}_n^C > R_{\text{th}}^C \quad (19)$$

则D2D对 k 使用子信道 n ,否则D2D对 k 不使用子信道 n 。返回步骤2。

4 仿真结果与分析

建立链路级的仿真程序对方案进行测试,仿真结果与D2D对复用—个蜂窝子信道的方案、纯蜂窝方案进行比较。

4.1 仿真设定及参数

考虑一个单小区的场景,蜂窝用户和D2D对随机分布在小区中。D2D对中两个D2D终端间距离满足D2D通

信的最大距离约束。接收功率 $P_i = P_j L_{ij} |h_{ij}|^2$, 其中, P_i 和 P_j 分别表示接收功率和发射功率, L_{ij} 表示发射终端和接收终端之间的路径损耗, h_{ij} 表示复高斯信道系数, 且 $h_{ij} \sim CN(0, 1)$ 。对于蜂窝链路, 路径损耗按照 COST-231 Hata 模型计算, 对于 D2D 链路, 路径损耗按照短距离通信的修正模型进行计算^[7]。具体参数见表 1。

表 1 仿真参数和数值

参数	数值
小区半径	500 m
小区中蜂窝用户数量	6, 9, 12, 15, 18, 21
近端 D2D 对数量	2, 3, 4, 5, 6, 7
远端 D2D 对数量	2, 3, 4, 5, 6, 7
eNB 最大发射功率	46 dBm
终端最大发射功率	23 dBm
噪声频谱密度	-174 dBm/Hz
蜂窝链路路径损耗	$36.7 + 35 \lg d$
D2D 链路路径损耗	$31.54 + 40 \lg d$
D2D 链路最大距离	30 m, 35 m, 40 m, 45 m, 50 m

4.2 仿真结果

不同方案的系统吞吐量仿真结果如图 2 所示。当直通信路的信道质量较好时, 提出的联合模式选择与资源分配方案和 D2D 对复用一個蜂窝子信道方案的系统吞吐量大于纯蜂窝方案的系统吞吐量。虽然 D2D 通信通过复用蜂窝资源带来了系统总吞吐量的增加, 但系统总吞吐量的增益却随着 D2D 对终端间距离的增加而减少。当 D2D 对之间的最大距离为 50 m 时, 联合模式选择与资源分配方案将会比 D2D 对复用一個蜂窝子信道方案提升 41% 的性能。

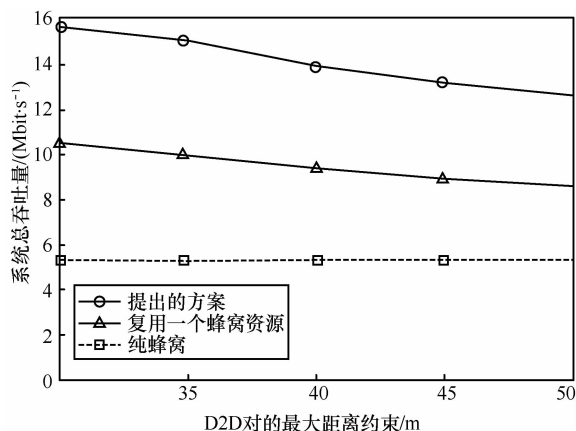


图 2 不同方案的系统吞吐量

图 3 显示了不同方案的用户平均速率的仿真结果。从图中可以看出, 联合模式选择和资源分配方案中的用户平均速率高于 D2D 对复用一個蜂窝子信道方案和纯蜂窝方案中的用户平均速率。随着 D2D 对可以复用的资源的增加, 用户的平均速率也得到了进一步提升。

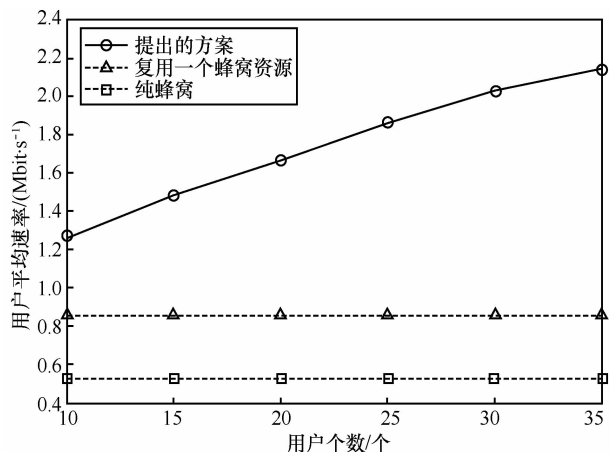


图 3 不同方案的用户平均速率

仿真结果证明, 联合模式选择与资源分配方案可以有效减少用户间的干扰, 提高系统的吞吐量。

5 结束语

本文分析了蜂窝用户和 D2D 用户的干扰情况, 并根据分析结果为蜂窝网络的 D2D 通信设计了一个联合模式选择与资源分配方案。在方案中, eNB 根据 D2D 用户在小区中的位置和终端的干扰情况对 D2D 用户的通信模式和资源分配进行了优化。仿真结果表明, 相比于纯蜂窝方案和 D2D 对复用一個蜂窝子信道方案, 该方案能较好地提升系统总吞吐量和终端的链路速率, 并减少用户间的干扰。

参考文献

- 1 Doppler K, Rinne M, Wijting C, *et al.* Device-to-device communication as an underlay to LTE-Advanced networks. *IEEE Communications Magazine*, 2009, 47(12): 42~49
- 2 Fodor G, Dahlman E, Mildh G, *et al.* Design aspects of network assisted device-to-device communications. *IEEE Communications Magazine*, 2012, 50(3): 170~177
- 3 Yu C H, Tirkkonen O, Doppler K, *et al.* On the performance of device-to-device underlay communication with simple power control. *Proceedings of Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2009, Barcelona, 2009*: 1~5



4 结束语

本文根据过采样后信号的特性,设计了一个基于高阶累积量的盲均衡算法,同时加入变步长思想,不仅使得算法实现了全局最优,也加快了收敛速度、减小了稳态剩余误差,同时消除了噪声影响,但运算复杂度较高。本文的六阶累积量是基于对称分布、均值为零且统计独立的信号推导出来的,目前通信中的大部分信号符合这样的特点,所以算法复杂度并没有增加太多。计算机仿真表明,本算法有较快的收敛速度、较低的误码率及较好的收敛效果。

参考文献

- 1 张立毅.数字通信系统中盲均衡技术的研究.北京理工大学博士学位论文,2003
- 2 Tong L, Liu R W, Soon V C, *et al.* Indeterminacy and identifiability of blind identification. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1991, 38(5): 499~509
- 3 Li X H, Fan H H. QR factorization based blind channel identification with second-order statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(1): 60~69
- 4 李长荣,吴迪.水声信道盲均衡优化仿真研究.计算机仿真, 2013, 30(7): 183~186
- 5 乔艳涛,张立军.利用确定性信道盲估计改善 DFE 均衡器的收敛特性.通信学报, 2005, 26(6): 74~79

- 6 陈炯芳,林荣,韦岗.基于输出过采样的 IIR 信道迫零盲均衡.电子学报, 2006, 34(3): 441~444
- 7 王永川,陈自力.基于冗余预编码的 STBC-SC-FDE 系统的频率域盲信道估计.通信学报, 2013, 34(1): 185~190
- 8 张贤达,保铮.通信信号处理.北京:国防工业出版社,2000
- 9 邹谋炎.反卷积和信号复原.北京:国防工业出版社,2001
- 10 Cadzow J A. Blind deconvolution via cumulant extrema. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1996, 13(3): 24~42
- 11 张晓琴,张立毅.基于 T/4 分数间隔采样双模式盲均衡算法的研究.电路与系统学报, 2012, 17(1): 81~85

[作者简介]



张晓琴,女,天津大学博士后,天津商业大学讲师,主要研究方向为盲信号与信息处理。

胡永生,男,天津大学博士生,滨州学院讲师,主要研究方向为信号检测与信息处理。

张立毅,男,博士,天津商业大学教授,天津大学博士生导师,主要研究方向为信号检测与信息处理。

(收稿日期:2014-05-28)

(上接第 83 页)

- 4 Yu C H, Tirkkonen O, Doppler K, *et al.* Power optimization of device-to-device communication underlying cellular communication. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, ICC'09, Dresden*, 2009: 1~5
- 5 Wang F R, Song L Y, Han Z, *et al.* Joint scheduling and resource allocation for device-to-device underlay communication. *Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, China*, 2013: 134~139
- 6 Janis P, Koivunen V, Ribeiro C, *et al.* Interference-aware resource allocation for device-to-device radio underlying cellular networks. *Proceedings of Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2009, Barcelona*, 2009
- 7 Wen S, Zhu X Y, Zhang X, *et al.* QoS-aware mode selection and resource allocation scheme for Device-to-device (D2D) communication in cellular networks. *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, Budapest, 2013: 101~105

[作者简介]



姚骏,男,北京交通大学硕士生,主要研究方向为无线资源管理和 D2D 通信。



黄清,女,博士,北京交通大学副教授,主要研究方向为无线宽带通信、认知无线电、无线资源管理。

(收稿日期:2014-04-01)