



D2D 通信中一种基于 FFR 的动态功率控制方案

王现超, 江帆, 孙长印, 李晨碧, 申斌艳

(西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121)

摘要:工作在 underlay 方式下的 D2D(device-to-device)通信利用资源复用共享蜂窝网络中的资源,在提高频谱资源利用率、降低移动终端功耗的同时,会给已有蜂窝网络带来干扰。在保证 D2D 用户和蜂窝用户的服务质量的前提下,研究了蜂窝用户和 D2D 用户的功率控制和资源分配问题。首先引入部分频率复用(FFR)实现蜂窝用户和 D2D 用户之间的资源划分和复用;然后以系统吞吐量最大化为原则,建立优化目标。结合部分功率控制(FPC)的基本思想,进而提出了一种动态功率控制(DPC)策略。仿真结果表明,所提出的方案能够有效地提高多小区系统的性能。

关键词:D2D 通信;干扰协调;FFR;资源分配;FPC

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016216

Dynamic power control scheme based on fractional frequency reuse for D2D communication

WANG Xianchao, JIANG Fan, SUN Changyin, LI Chenbi, SHEN Binyan

School of Communications and Information Engineering, Xi'an University of

Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract: By reusing the resource of existing cellular users, D2D (device-to-device) communication underlaying cellular network can improve the spectrum utilization rate and reduce the power consumption of mobile terminals. However, it will bring interference to the existing cellular networks. In order to ensure the quality of service of D2D users and cellular users, the power control and resource allocation scheme for D2D communication underlaying cellular communications was studied. Specifically, fractional frequency reuse was introduced to achieve the resource partitioning and resource reuse between cellular users and D2D users. Based on the principle of maximizing the throughput of the whole system, the optimization objective was established. Combined with the fractional power control and introduction of interference limits, a dynamic power control strategy was proposed. Simulation results show that the proposed scheme improves the performance of the overall system.

Key words: D2D communication, interference coordination, fractional frequency reuse, resource allocation, fractional power control

收稿日期:2016-06-13;修回日期:2016-08-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61501371);国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No.2014AA01A703);陕西省国际交流合作项目(No.2016KW-046);陕西省自然科学基金基础研究项目(No.2011JM8027)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.61501371), The National High Tech R&D Program(863 Program) of China(No.2014AA01A703), International Exchange and Cooperation Project of Shaanxi Province(No.2016KW-046), Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China (No.2011JM8027)

1 引言

随着高性能智能终端的普及和移动数据流量的激增,现有蜂窝网络有限的数据传输能力以及无线资源的日趋紧缺,已成为阻碍下一代蜂窝网络系统性能的最主要因素。在此背景下,具有短距离通信和终端直通优势的 D2D(device-to-device)通信得到了广泛的关注。D2D 通信^[1]允许设备之间进行直接点对点传输,通过在频谱衬垫(spectrum underlay)模式下复用蜂窝用户频谱资源,能够有效提升网络频谱效率。然而,蜂窝网络和 D2D 之间的资源复用干扰成为影响 D2D 用户和蜂窝用户共存的主要因素^[2,3]。

为减小 D2D 在 underlay 方式下复用蜂窝用户的资源造成的同频干扰,目前已有许多相关研究,其中资源分配和功率控制是研究的重点^[4,5]。参考文献[6]提出了一种最小化个体用户干扰的 IO(individual optimization)资源分配方案,但该方案忽略了系统整体的干扰情况,因而无法获得整体最优解;参考文献[7]提出了一种基于匈牙利算法的整体干扰最小的 OO(overall optimization)资源分配方案,该方案以最小化 D2D 用户与蜂窝用户的整体干扰为目标实现资源分配。但是参考文献[6,7]的资源分配方案仅考虑了单小区内的资源分配问题,不能拓展到 D2D 用户与蜂窝用户共存的多小区模型中。为了解决蜂窝用户与 D2D 用户共存的多小区之间的干扰问题,参考文献[8]结合了部分频率复用(fractional frequency reuse, FFR),为小区间的边缘蜂窝用户分配正交的频谱资源,从而降低了小区间边缘用户的干扰。但是,该方案的频谱利用率比较低。参考文献[9]结合了部分功率控制(fractional power control, FPC),能够大幅度地降低干扰,提高系统性能,但是所提出的方法信令开销比较大。参考文献[10]提出了将 FFR 与 FPC 相结合,从而有效降低小区之间的干扰,但是所提出的策略仅对蜂窝用户采用 FPC 方案,而对 D2D 用户采用固定的发射功率方案,因此无法使小区性能达到最优。

基于目前研究所存在的不足之处,以蜂窝通信和 D2D 通信共存的多小区蜂窝网络为研究场景,首先使用 FFR 方案进行资源划分。然后根据参考文献[7]所提出的整体干扰最小的资源复用方案,实现多小区场景下 D2D 用户的资源复用。在用户功率控制方面,以 FPC 为基础提出了一种动态功率控制(dynamic power control, DPC)策略,所提出的策略有效降低了 D2D 用户与蜂窝用户之间的干扰,

实现了小区整体吞吐量最大化的目标。另外将非凸的目标函数转化为凸函数,同时对参考文献[11]中拉格朗日对偶分解方法进行改进,降低了算法的复杂度。

2 系统模型及干扰分析

2.1 系统模型

系统模型如图 1 所示。基站布设于小区的中心,每个小区采用正交频分复用(OFDM)技术。将频谱资源划分为一系列相互正交的子载波分配给不同的用户,因此小区内使用正交资源的用户之间不会产生干扰。每个小区中用户的通信模式分为两类:蜂窝通信,用户通过基站通信;D2D 通信,用户之间可直接通信。本文将采用蜂窝通信的用户称为蜂窝用户(cellular user equipment, CUE),采用 D2D 通信的用户称为 D2D 用户(D2D user equipment, DUE)。

为了提高系统的频谱利用率,假设每个小区分配 K 个物理资源块(physical resource block, PRB)。DUE 以 underlay 的方式复用上行蜂窝链路资源,即 DUE 复用 CUE 已分配的 PRB。假设每个小区中有 N 个 CUE 组成集合 $C, C = \{CUE_1, CUE_2, \dots, CUE_N\}$, CUE 位置随机分布,且 $N \leq K$;所有 D2D 对构成集合 $D, D = \{DUE_1, DUE_2, \dots, DUE_M\}$, DUE 也在小区内随机分布,且 $M < N$ 。为了控制 DUE 资源复用带来的干扰,要求每条蜂窝链路最多只能由一对 DUE 进行复用,并且一对 DUE 最多只能复用一条蜂窝链路。

为了降低小区间的干扰,本文采用 FFR 方案,将每个小区分为不同区域。如图 1(a)所示,每个小区被划分为中心区域和边缘区域,小区中心区域面积和小区面积的比例为 $\beta, \beta \in (0, 1)$ 。假设将 7 个小区所有的可用频带 F 分为 4 个部分,分别标记为 $f_{in}^0, f_{out}^1, f_{out}^2$ 和 $f_{out}^3; f_{in}^0 = f_{out}^1 = f_{out}^2 = f_{out}^3$ 且 $f_{in}^0 + f_{out}^1 + f_{out}^2 + f_{out}^3 = F$; f_{in}^0 与 $f_{out}^1, f_{out}^2, f_{out}^3$ 中的任意一个的和为 K ,因此 $f_{in}^0 = \beta K, f_{out}^1 = f_{out}^2 = f_{out}^3 = (1 - \beta)K$ 。每小区中心区域的 CUE 使用频带 f_{in}^0 ,边缘区域的 CUE 使用 $f_{out}^1, f_{out}^2, f_{out}^3$ 其中的一个为信道资源。由于相邻小区边缘区域 CUE 的资源彼此正交,从而降低了小区边缘 CUE 之间的干扰。图 1(b)、图 1(c)和图 1(d)中的资源划分原理与图 1(a)相同。

DUE 复用 CUE 的资源情况如图 1 所示,以图 1(a)和图 1(c)为例进行说明,在图 1(a)中,当 DUE 处于小区的边缘区域时, DUE 复用小区中心区域 CUE 的资源^[10],即 f_{in}^0 。在图 1(c)中,当 DUE 处于小区的中心区域时, DUE 选择复用邻小区边缘区域 CUE 的资源^[10],即 f_{out}^1, f_{out}^2 和 f_{out}^3 其中的一个。

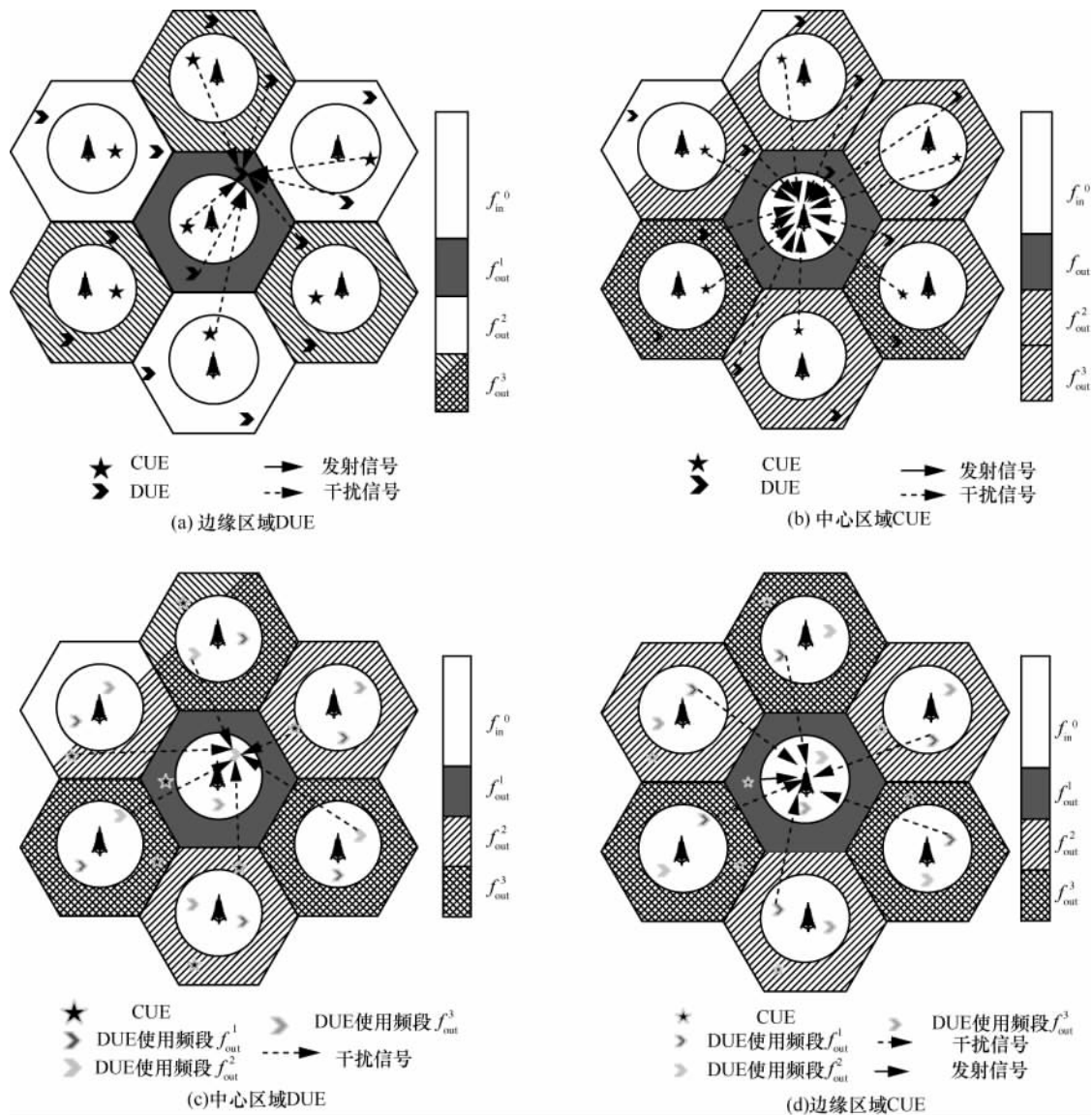


图1 DUE复用CUE的资源情况

2.2 干扰分析

由于D2D的位置及资源复用方式不同,所以受到的干扰也不同。首先对CUE和DUE之间的干扰情况进行分析。图1(a)描述了处于边缘区域的DUE复用中心区域CUE链路资源时的干扰情况。根据CUE与DUE之间的资源分配与复用原则,边缘区域DUE会受到本小区和邻小区中心区域CUE的干扰以及邻小区边缘区域DUE的干扰。而中心区域的CUE会受到邻小区中心区域的CUE干扰以及本小区和邻小区边缘区域DUE的干扰,如图1(b)所示。当中心区域的DUE复用邻小区边缘区域CUE的资源时,干扰情况如图1(c)所示,中心区域的DUE会受到邻小区边缘区域的CUE和中心区域DUE的干扰。同样,边缘区域的

CUE会受到邻小区中心区域DUE的干扰,如图1(d)所示。

由于资源和功率是相互耦合的。首先假设DUE和CUE的发射功率是恒定的^[12],然后考虑DUE与CUE之间的资源分配问题。参考文献[6]提出的IO只是考虑了个体最优,而忽略了整体的最优。因此,结合以前的研究成果^[13],采用基于匈牙利算法^[14]的OO方案;该策略首先计算出每个DUE受到的各CUE的干扰矩阵,然后将干扰矩阵转化为最优化中的0-1指派问题^[14],最后以最小化DUE整体干扰为目标,在所有配对组合中找到最佳分配策略。DUE的资源分配好后,可以分别得出小区边缘区域用户DUE_n接收信号的信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)表达式:

$$\varepsilon_n^{\text{DUE_out}} = \frac{P_n^{\text{DUE_out}} g_n^{\text{DUE_out}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^6 P_{k,n}^{\text{DUE_out}} h_{k,n}^1 + \sum_{l=1}^7 P_{l,n}^{\text{CUE_in}} h_{l,n}^1} \quad (1)$$

其中, $P_n^{\text{DUE_out}}$ 是小区边缘区域 DUE_n 的发射功率, $g_n^{\text{DUE_out}}$ 是小区边缘区域 DUE_n 发射端到接收端的信道增益, $P_{k,n}^{\text{DUE_out}}$ 、 $P_{l,n}^{\text{CUE_in}}$ 分别是邻小区边缘区域使用相同资源 DUE_k 和 CUE_l 的发射功率, $h_{k,n}^1$ 、 $h_{l,n}^1$ 分别是对应的邻小区边缘区域 DUE_k 到本小区边缘区域 DUE_n 的信道增益和小区中心区域的 CUE_l 到小区边缘 DUE_n 的信道增益, δ_N^2 为接收端接收到的热噪声。

同理, 小区中心区域 CUE_i 接收信号的 SINR 表达式为:

$$\varepsilon_i^{\text{CUE_in}} = \frac{P_i^{\text{CUE_in}} g_{i,B}^{\text{CUE_in}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^7 P_{k,i}^{\text{DUE_out}} h_{k,i}^2 + \sum_{l=1}^6 P_{l,i}^{\text{CUE_in}} h_{l,i}^2} \quad (2)$$

$g_{i,B}^{\text{CUE_in}}$ 是小区中心区域 CUE_i 发射端到基站接收端的信道增益。

小区中心区域 DUE_j 接收信号的 SINR 表达式为:

$$\varepsilon_j^{\text{DUE_in}} = \frac{P_j^{\text{DUE_in}} g_j^{\text{DUE_in}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^3 P_{k,j}^{\text{DUE_in}} h_{k,j}^3 + \sum_{l=1}^3 P_{l,j}^{\text{CUE_out}} h_{l,j}^3} \quad (3)$$

小区边缘区域 CUE_m 接收信号的 SINR 表达式为:

$$\varepsilon_m^{\text{CUE_out}} = \frac{P_m^{\text{CUE_out}} g_{m,B}^{\text{CUE_out}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^6 P_{k,m}^{\text{DUE_in}} h_{k,m}^4} \quad (4)$$

3 功率控制

根据第 2.2 节的分析可知, 尽管引入 FFR 可以增加同频复用距离, 但是当 CUE 增大发射功率时, 会对使用同频率的 DUE 造成严重干扰。因此小区间的干扰与用户所采用的功率控制策略密切相关。

为解决以上问题, 结合 LTE 上行功率控制原则^[16], 首先设定每个用户的发送功率为:

$$P_c(i) = \min\{P_{\max}, P_0(i) + 10\lg M(i) + \alpha \cdot PL + \Delta_{\text{mes}}(i)\} \quad (5)$$

其中, $P_{\max}$ 为用户的最大发射功率, P_0 的动态范围是 $[-126 \text{ dBm}, 23 \text{ dBm}]^{[12]}$; $M(i)$ 表示分配给小区中用户的资源块数, α 为小区特定的路径损耗补偿系数, 根据 3GPP 标准, α 取值范围为 $\{0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}^{[11]}$, 表示部分功率控制算法中对大尺度衰落的补偿量, PL 是 UE 测量到的下行参考信号的路径损耗, $\Delta_{\text{mes}}(i)$ 是 3GPP 为 LTE 定义的由调制和编码方式确定的功率偏移量^[17]。

假设为每个用户分配一个资源块, 即 $M=1$, $\Delta_{\text{mes}}(i)$ 取 0, 由此 CUE 和 DUE 的发射功率式可简化为:

$$P_c = \min\{P_{\max}, P_0 + \alpha \cdot PL\} \quad (6)$$

当 $\alpha \in \{0, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$ 时, 称为部分功率控制 (FPC)。为了实现小区吞吐量的最大化, 需要动态地调整 α 的值, 然而 FPC 中的 α 值无法连续调整, 从而无法使小区的吞吐量达到最大化。因此在 FPC 方案的基础上提出了 DPC 方案, 以系统吞吐量最大化为原则, 通过动态调整用户的 α 值, 实现系统吞吐量最大化。DPC 方法基于系统的吞吐量最大化得出每一个用户的功率补偿因子 α 。以最大化小区用户的容量之和为优化目标, 结合式 (1)~式 (4), 该优化问题可建模为式 (7) 和式 (8)。

$$\begin{aligned} & \max_{\{P_i^{\text{CUE_in}}, P_j^{\text{DUE_in}}, P_m^{\text{CUE_out}}, P_n^{\text{DUE_out}}\}} \left\{ \sum_{i \in C_{\text{in}}} \sum_{j \in S_{\text{in}}} \sum_{m \in C_{\text{out}}} \sum_{n \in S_{\text{out}}} \right. \\ & \left. [\lg(1 + \varepsilon_i^{\text{CUE_in}}) + \lg(1 + \varepsilon_j^{\text{DUE_in}}) + \right. \\ & \left. \lg(1 + \varepsilon_m^{\text{CUE_out}}) + \lg(1 + \varepsilon_n^{\text{DUE_out}})] \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_n^{\text{DUE_out}} = \frac{P_n^{\text{DUE_out}} g_n^{\text{DUE_out}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^6 P_{k,n}^{\text{DUE_out}} h_{k,n}^1 + \sum_{l=1}^7 P_{l,n}^{\text{CUE_in}} h_{l,n}^1} \\ & \geq \delta_{n,\min}^{\text{DUE_out}}, \quad \forall n \in S_{\text{out}}, \quad \forall l \in C, \quad \forall k \in S_{\text{out}} \\ & \varepsilon_i^{\text{CUE_in}} = \frac{P_i^{\text{CUE_in}} g_{i,B}^{\text{CUE_in}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^7 P_{k,i}^{\text{DUE_out}} h_{k,i}^2 + \sum_{l=1}^6 P_{l,i}^{\text{CUE_in}} h_{l,i}^2} \\ & \geq \delta_{i,\min}^{\text{CUE_in}}, \quad \forall i \in C_{\text{in}}, \quad \forall l \in C_{\text{other}}, \quad \forall k \in S \\ & \varepsilon_j^{\text{DUE_in}} = \frac{P_j^{\text{DUE_in}} g_j^{\text{DUE_in}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^3 P_{k,j}^{\text{DUE_in}} h_{k,j}^3 + \sum_{l=1}^3 P_{l,j}^{\text{CUE_out}} h_{l,j}^3} \\ & \geq \delta_{j,\min}^{\text{DUE_in}}, \quad \forall j \in S_{\text{in}}, \quad \forall l \in C_{\text{other}}, \quad \forall k \in S_{\text{in}} \\ & \varepsilon_m^{\text{CUE_out}} = \frac{P_m^{\text{CUE_out}} g_{m,B}^{\text{CUE_out}}}{\delta_N^2 + \sum_{k=1}^6 P_{k,m}^{\text{DUE_in}} h_{k,m}^4} \\ & \geq \delta_{m,\min}^{\text{CUE_out}}, \quad \forall m \in C_{\text{out}}, \quad \forall k \in S_{\text{in}} \\ & 0 \leq P_i^{\text{CUE_in}} \leq P_{\max}^c, \quad 0 \leq P_m^{\text{CUE_out}} \leq P_{\max}^c \\ & 0 \leq P_j^{\text{DUE_in}} \leq P_{\max}^d, \quad 0 \leq P_n^{\text{DUE_out}} \leq P_{\max}^d \end{aligned} \quad (8)$$

式 (7) 表示优化目标是最大化小区内 CUE 和 DUE 的吞吐量之和。式 (8) 表示了相应的约束条件, 其中 $\varepsilon_i^{\text{CUE_in}}$ 、 $\varepsilon_j^{\text{DUE_in}}$ 、 $\varepsilon_m^{\text{CUE_out}}$ 和 $\varepsilon_n^{\text{DUE_out}}$ 分别表示小区中心区域 CUE_i 的 SINR, 小区中心区域 DUE_j 的 SINR, 小区边缘区域 CUE_m 的 SINR 和小区边缘区域 DUE_n 的 SINR; $\delta_{i,\min}^{\text{CUE_in}}$ 、 $\delta_{j,\min}^{\text{DUE_in}}$ 、 $\delta_{m,\min}^{\text{CUE_out}}$ 和 $\delta_{n,\min}^{\text{DUE_out}}$ 分别表示为保证不同用户正常通信的最



低 SINR 门限值; $P_{\max}^c$ 和 $P_{\max}^d$ 分别表示 CUE 和 DUE 的最大发射功率限制。

由于式(1)~式(4)的分母和分子都包含动态因子 α , 所以式(7)中的目标函数为非凸函数^[18], 无法直接获得最优解。虽然通过联合优化有可能解决上述问题, 但是需要较为复杂的穷尽搜索过程, 且不易获得闭式解。反之, 由于所提出的算法在多小区蜂窝网络中引入了 FFR, 因此小区之间的干扰已经被有效降低, 而小区内的 CUE 与 DUE 之间的资源复用干扰是需要解决的主要问题。根据参考文献[11], 如果采用合理的资源分配算法, 则能有效抑制 CUE 和 DUE 之间的资源复用干扰, 从而将每个用户产生的干扰限制在一定门限值 I 内。由于 D2D 通信受到基站的控制, 上述干扰上限能够通过基站侧的资源分配和资源调度实现。进而使得限制条件式(8)中的分母部分变为一个确定的值, 实现将非凸函数转化为凸函数, 所加入的干扰限制条件表示式如下:

$$\begin{aligned} P_{k,n}^{\text{DUE_out}} h_{k,n}^1 &\leq I, P_{l,n}^{\text{CUE_in}} h_{l,n}^1 \leq I, \\ P_{k,i}^{\text{DUE_in}} h_{k,i}^2 &\leq I, P_{l,i}^{\text{CUE_in}} h_{l,i}^2 \leq I, \\ P_{k,j}^{\text{DUE_in}} h_{k,j}^3 &\leq I, P_{l,j}^{\text{CUE_out}} h_{l,j}^3 \leq I, \\ P_{k,m}^{\text{DUE_in}} h_{k,m}^4 &\leq I \end{aligned} \quad (9)$$

加入干扰限制条件后, 对于在同一区域内的同一类用户, 选择信道最好的作为干扰用户到被干扰用户的信道增益, 这样可以降低同频用户之间的干扰, 同时简化了运算的复杂性, CUE 和 DUE 的同频干扰信道增益如下:

$$\begin{aligned} h_{k,B} &= \max\{h_{k,m}^1, h_{k,i}^2\}, h_{l,B} = \max\{h_{l,m}^1, h_{l,i}^2\}, \\ h_{k,D} &= \max\{h_{k,j}^3, h_{k,m}^4\}, h_{l,D} = \max\{h_{l,j}^3\} \end{aligned} \quad (10)$$

结合式(8)和式(9), 可以求出干扰一定时 CUE 和 DUE 的最大发射功率如下:

$$I_{k,B}^d = \frac{I}{h_{k,B}}, I_{l,B}^c = \frac{I}{h_{l,B}}, I_{k,D}^d = \frac{I}{h_{k,D}}, I_{l,D}^c = \frac{I}{h_{l,D}} \quad (11)$$

将式(9)的限制条件代入约束条件(8)的各 SINR 计算式中, 从而可以得到同频干扰的上界; 再将式(8)中的 SINR 值代入目标函数式(7)中, 从而使得式(7)的非凸目标函数转变为凸函数^[7]。为了便于表达, 简化符号如下:

$$\begin{aligned} \frac{g_{i,B}^{\text{CUE_in}}}{\delta_N^2 + 13I} &= \gamma_i^{\text{CUE_in}}, \frac{g_j^{\text{DUE_in}}}{\delta_N^2 + 6I} = \gamma_j^{\text{DUE_in}}, \\ \frac{g_{m,B}^{\text{CUE_out}}}{\delta_N^2 + 6I} &= \gamma_m^{\text{CUE_out}}, \frac{g_n^{\text{DUE_out}}}{\delta_N^2 + 13I} = \gamma_n^{\text{DUE_out}} \end{aligned} \quad (12)$$

经过式(12)的变形和简化, 目标函数及限制条件重写为式(13)和式(14)。

$$\begin{aligned} \max_{\{P_i^{\text{CUE_in}}, P_j^{\text{DUE_in}}, P_m^{\text{CUE_out}}, P_n^{\text{DUE_out}}\}} & \left\{ \sum_{i \in C_{\text{in}}} \sum_{j \in S_{\text{in}}} \sum_{m \in C_{\text{out}}} \sum_{n \in S_{\text{out}}} \right. \\ & \left. [1b(1 + \varepsilon_i^{\text{CUE_in}}) + 1b(1 + \varepsilon_j^{\text{DUE_in}}) + \right. \\ & \left. 1b(1 + \varepsilon_m^{\text{CUE_out}}) + 1b(1 + \varepsilon_n^{\text{DUE_out}})] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \varepsilon_i^{\text{CUE_in}} = \frac{P_i^{\text{CUE_in}} g_{i,B}^{\text{CUE_in}}}{\delta_N^2 + 13I} \\ & = P_i^{\text{CUE_in}} \gamma_i^{\text{CUE_in}}, \quad \forall i \in C_{\text{in}} \\ \varepsilon_j^{\text{DUE_in}} = \frac{P_j^{\text{DUE_in}} g_j^{\text{DUE_in}}}{\delta_N^2 + 6I} \\ & = P_j^{\text{DUE_in}} \gamma_j^{\text{DUE_in}}, \quad \forall j \in S_{\text{in}} \\ \varepsilon_m^{\text{CUE_out}} = \frac{P_m^{\text{CUE_out}} g_{m,B}^{\text{CUE_out}}}{\delta_N^2 + 6I} \\ & = P_m^{\text{CUE_out}} \gamma_m^{\text{CUE_out}}, \quad \forall m \in C_{\text{out}} \\ \varepsilon_n^{\text{DUE_out}} = \frac{P_n^{\text{DUE_out}} g_n^{\text{DUE_out}}}{\delta_N^2 + 13I} \\ & = P_n^{\text{DUE_out}} \gamma_n^{\text{DUE_out}}, \quad \forall n \in S_{\text{out}} \\ P_i^{\text{CUE_in}} \leq P_{\max}^c, & P_m^{\text{CUE_out}} \leq P_{\max}^c \\ P_j^{\text{DUE_in}} \leq P_{\max}^d, & P_n^{\text{DUE_out}} \leq P_{\max}^d \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

由于目标函数转化为了凸函数, 可以利用拉格朗日对偶^[14]的方法进行求解, 因此根据上述目标函数建立拉格朗日表示式:

$$\begin{aligned} L(P_i^{\text{CUE_in}}, P_j^{\text{DUE_in}}, P_m^{\text{CUE_out}}, P_n^{\text{DUE_out}}) &= \\ & \sum_{i \in C_{\text{in}}} \sum_{j \in S_{\text{in}}} \sum_{m \in C_{\text{out}}} \sum_{n \in S_{\text{out}}} [1b(1 + \varepsilon_i^{\text{CUE_in}}) + 1b(1 + \varepsilon_j^{\text{DUE_in}}) + \\ & 1b(1 + \varepsilon_m^{\text{CUE_out}}) + 1b(1 + \varepsilon_n^{\text{DUE_out}})] - \\ & \lambda^{\text{CUE_in}} (P_i^{\text{CUE_in}} - P_{\max}^c) - \lambda^{\text{CUE_out}} (P_m^{\text{CUE_out}} - P_{\max}^c) - \\ & \lambda^{\text{DUE_in}} (P_j^{\text{DUE_in}} - P_{\max}^d) - \lambda^{\text{DUE_out}} (P_n^{\text{DUE_out}} - P_{\max}^d) - \\ & \Omega_{k,B}^d (P_k^{\text{DUE_out}} - I_{k,B}^d) - \Omega_{l,B}^c (P_l^{\text{CUE_in}} - I_{l,B}^c) - \\ & \Omega_{k,D}^d (P_k^{\text{DUE_in}} - I_{k,D}^d) - \Omega_{l,D}^c (P_l^{\text{CUE_out}} - I_{l,D}^c) \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\lambda^{\text{CUE_in}}, \lambda^{\text{CUE_out}}, \lambda^{\text{DUE_in}}, \lambda^{\text{DUE_out}}, \Omega_{k,B}^d, \Omega_{l,B}^c, \Omega_{k,D}^d$ 和 $\Omega_{l,D}^c$ 都是约束条件下的非负的拉格朗日因子, 利用 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件^[13], 解得以下结果:

$$\begin{aligned} P_i^{\text{CUE_in}} &= \begin{cases} I_{l,B}^c, & I_{l,B}^c < P_{\max}^c \\ \min((\frac{1}{\ln(2)(\lambda^{\text{CUE_in}} + \Omega_{l,B}^c)} - \gamma_i^{\text{CUE_in}}), I_{l,B}^c), & I_{l,B}^c \geq P_{\max}^c \end{cases} \\ P_j^{\text{DUE_in}} &= \begin{cases} I_{k,D}^d, & I_{k,D}^d < P_{\max}^d \\ \min((\frac{1}{\ln(2)(\lambda^{\text{DUE_in}} + \Omega_{k,D}^d)} - \gamma_j^{\text{DUE_in}}), I_{k,D}^d), & I_{k,D}^d \geq P_{\max}^d \end{cases} \end{aligned}$$

$$P_m^{\text{CUE_out}} = \begin{cases} I_{i,D}^c, & I_{i,D}^c < P_{\max}^c \\ \min((\frac{1}{\ln(2)(\lambda^{\text{CUE_out}} + \Omega_{i,D}^c)} - \gamma_{i,B}^{\text{CUE_out}}), I_{i,D}^c), & I_{i,D}^c \geq P_{\max}^c \end{cases}$$

$$P_n^{\text{DUE_out}} = \begin{cases} I_{k,B}^d, & I_{k,B}^d < P_{\max}^d \\ \min((\frac{1}{\ln(2)(\lambda^{\text{DUE_out}} + \Omega_{k,B}^d)} - \gamma_j^{\text{DUE_out}}), I_{k,B}^d), & I_{k,B}^d \geq P_{\max}^d \end{cases} \quad (16)$$

式(16)分别是小区 DUE 和 CUE 的最终发射功率。以小区中心区域的 CUE 为例求解 α , 由于 $P_i^{\text{CUE_in}} = \min\{P_{\max}, P_0 + \alpha \cdot PL\}$, 所以当 $P_i^{\text{CUE_in}} = P_{\max}$ 时, 这时的 α_i 未知; 当 $P_i^{\text{CUE_in}} < P_{\max}$ 时, $\alpha_i = \frac{P_i^{\text{CUE_in}} - P_0}{PL}$ 。为了求解最优的 α_i 值, 需要先求解 $P_i^{\text{CUE_in}}$ 。如算法所示求解拉格朗日因子 $\lambda^{\text{CUE_in}}$ 和 $\Omega_{i,B}^c$ 的值。

初始化: $\lambda_i = 0$ 和 $\lambda_u = \delta$, $\Omega_i = 0$ 和 $\Omega_u = \mu$, 其中, δ 和 μ 足够大, 计算每一个用户的 $\gamma_i^{\text{CUE_in}}$ 和 $I_{i,B}^c$ 。

```

if  $I_{i,B}^c < P_{\max}^c$ 
then  $P_i^{\text{CUE\_in}} = I_{i,B}^c$ 
else while  $|P_i^{\text{CUE\_in}} - P_{\max}^c| > \varepsilon$ 
 $\lambda^{\text{CUE\_in}} = (\lambda_i + \lambda_u)/2$ ,  $\Omega_{i,B}^c = (\Omega_i + \Omega_u)/2$ 
计算每一个用户的功率
 $P_i^{\text{CUE\_in}} = \min((\frac{1}{\ln(2)(\lambda^{\text{CUE\_in}} + \Omega_{i,B}^c)} - \gamma_i^{\text{CUE\_in}}), I_{i,B}^c)$ 
if  $I_{i,B}^c < P_{\max}^c$  then  $\lambda^{\text{CUE\_in}} = \lambda_i$ ,  $\Omega_{i,B}^c = \Omega_i$ 
else  $\lambda^{\text{CUE\_in}} = \lambda_u$ ,  $\Omega_{i,B}^c = \Omega_u$ 
end if
end while
return  $\{P_i^{\text{CUE\_in}}\}$ 

```

4 性能仿真及分析

小区模型由 7 小区蜂窝簇构成, 每个小区内用户随机分布, 仿真参数选用 3GPP LTE 规定的 OFDM 系统参数^[19], 见表 1。在资源分配方面, 分别考虑了用户采用 IO 策略和 OO 策略方案。在功率控制方面, 通过仿真比较提出的 DPC 方案和 FPC ($\alpha=0.5$) 方案、FPC ($\alpha=1$) 方案。将以上资源分配方案和功率控制方案进行不同的组合, 得到 6 条不同的仿真曲线 IOFPC($\alpha=0.5$)、IODPC、IOFPC($\alpha=1$)、OOFPC($\alpha=0.5$)、OODPC、OOFPC($\alpha=1$)。

表 1 仿真参数

参数	数值
系统模型	7 小区模型
载波频率/GHz	2.0
系统带宽/MHz	10
资源块带宽/kHz	180
用户的最大发射功率/dBm	23
小区半径/m	500
β	2/3
噪声功率谱密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174
阴影衰落	$\mu=0; \sigma_{\text{CUE}}=8 \sigma=8$ (dBm)
D2D 对收发距离/m	10~15
每一小区的用户数目	CUE: 30 个, DUE: 20 个

4.1 中心 D2D 链路与边缘蜂窝链路的信干噪比分布情况

图 2 和图 3 分别是中心区域 DUE 和边缘区域 CUE 随着 SINR 变化的 5 000 次实验的累积分布。由图 2 和图 3 可以看出, CUE 和 DUE 采用 DPC 方案, 与采用 FPC($\alpha=0.5$) 和 FPC($\alpha=1$) 方案相比, D2D 链路和蜂窝链路的 SINR 都有了很大的提升, 这是由于当 CUE 和 DUE 采用 DPC 方案所产生的干扰比较低时, 在保证被干扰用户正常通信的条件下, 适当地增大发射功率, 从而提高用户的 SINR。但是当 CUE 和 DUE 采用 DPC 方案所产生的干扰比较大时, 就会适当地降低发射功率, 从而降低小区的干扰。

从图 2 中还可以看出, DUE 采用 OO 策略时, 中心 D2D 链路的 SINR 分布要比 IO 策略时要高 1~2 dB, 这是由于 OO 策略是从整体上使 CUE 对 DUE 干扰达到最小, 而 IO 策略是考虑是单个用户上使 CUE 对 DUE 干扰达到相对最小。图 3 表明, CUE 采用 OO 和 IO 时的 SINR 分布变化不明

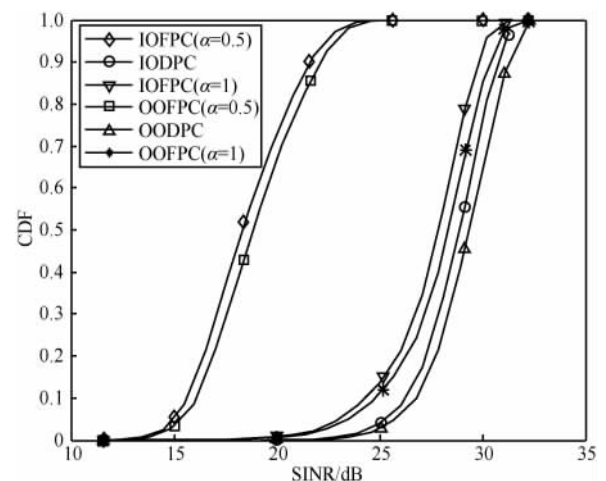


图 2 中心区域 DUE 随着 SINR 变化的累积分布

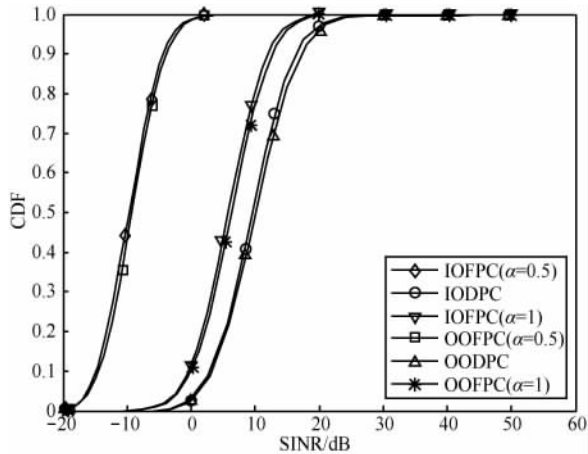


图3 边缘区域 CUE 随着 SINR 变化的累积分布

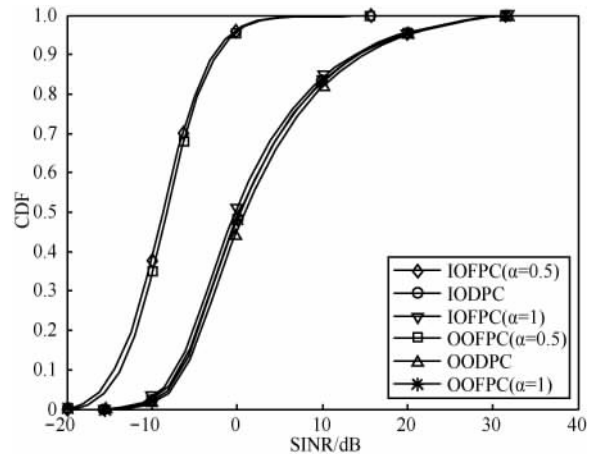


图5 中心区域 CUE 随着 SINR 变化的累积分布

显, 因为 IO 方案和 OO 方案主要是在进行资源分配时降低 CUE 对 DUE 的干扰, 不是降低对 CUE 的干扰, 但是出现轻微变化的原因是 DUE 的资源重新分配后, 被复用 CUE 有所变化, 故 CUE 的上行链路的 SINR 有所变化。

4.2 边缘 D2D 链路 with 中心蜂窝链路的信干噪比分布情况

图 4 和图 5 分别是边缘区域 DUE 和中心区域 CUE 随着 SINR 变化的 5 000 次实验的累积分布。由图 4 和图 5 可以看出, CUE 和 DUE 采用 DPC 方案, 与采用 FPC($\alpha=0.5$) 和 FPC($\alpha=1$) 方案相比, D2D 链路和蜂窝链路的 SINR 都有了很大的提升, 这是由于当 CUE 和 DUE 采用 DPC 方案所产生的干扰比较低时, 在保证被干扰用户正常通信的条件下, 适当地增大发射功率, 从而提高用户的 SINR。但是如果 CUE 和 DUE 采用 DPC 方案所产生的干扰较大, 就会适当地降低发射功率, 从而降低小区的干扰。

从图 4 中还可以看出, DUE 采用 OO 策略时, 中心 D2D 链路的 SINR 分布要比 IO 策略时高 1~3 dB, 这是由

于 OO 策略是从整体上使 CUE 对 DUE 干扰达到最小, 而 IO 策略是考虑单个用户角度使 CUE 对 DUE 干扰达到相对最小。图 5 表明 CUE 采用 OO 和 IO 时的 SINR 分布变化不明显, 因为 IO 方案和 OO 方案主要是资源分配时降低 CUE 对 DUE 的干扰, 不是降低对 CUE 的干扰, 但是出现轻微变化的原因是 DUE 的资源重新分配后, 被复用的 CUE 有所变化, 故 CUE 的上行链路的 SINR 有所变化。

5 结束语

本文探讨了 DUE 与 CUE 以 underlay 方式共存的多小区蜂窝网络场景下, 资源分配和功率分配的优化问题。在资源分配方面, 首先引入部分频率复用来实现蜂窝资源划分, 以部分频率复用为基础, 结合整体干扰最小的资源复用方案, 实现了多小区场景下 DUE 的资源复用。在功率控制方面, 在部分功率控制的基础上提出的动态功率控制, 并将所提出的策略与部分功率控制进行了仿真比较, 仿真结果验证了改进算法的有效性, 同时以小区系统吞吐量最大化为目标, 建立目标函数, 将非凸函数转化为凸函数, 并对于拉格朗日对偶分解方法进行改进, 降低了算法的复杂度。

参考文献:

- [1] LEE M, LIN X, Andrews J G, et al. Power control for D2D underlaid cellular networks: modeling, algorithms, and analysis[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(1): 1-13.
- [2] BELLESCHI M, FODOR G, PENDA D D, et al. Benchmarking practical RRM algorithms for D2D communications in LTE advanced [J]. Wireless Personal Communications, 2015, 82(2): 883-910.

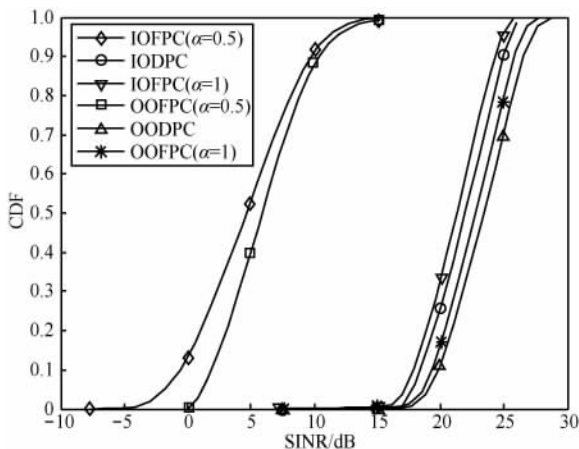


图4 边缘区域 DUE 随着 SINR 变化的累积分布

- [3] TEHRANI M N, UYSAL M. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86-92.
- [4] MALANDRINO F, LIMANI Z, CASETTI C. Interference-aware downlink and uplink resource allocation in HetNets with D2D support[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(5): 2729-2741.
- [5] FENG D, LU L. Device-to-device communications in cellular networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4): 49-55.
- [6] 韩涛. LTE 终端直通通信系统的资源复用与干扰协调[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
HAN T. Resource reusing and interference coordination of D2D underlaying LTE [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [7] HAN T, YIN R, XU Y, et al. Uplink channel reusing selection optimization for device-to-device communication underlaying cellular networks [C]//2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC), September 9-12, 2012, Sydney, Australia. New Jersey: IEEE Press, 2012: 559-564.
- [8] CHAE H S, GU J, CHOI B G, et al. Radio resource allocation scheme for device-to-device communication in cellular networks using fractional frequency reuse[C]//The 17th Asia Pacific Conference on Communications, October 2-5, 2011, Sabah, Malaysia. New Jersey: IEEE Press, 2011: 58-62.
- [9] FAHMI A, ASVIAL M, GUNAWAN D. Uplink resource allocation algorithms with fractional power control as power constraints for OFDMA system [C]//TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference, November 21-24, 2011, Bali, Indonesia. New Jersey: IEEE Press, 2011: 592-596.
- [10] ZHANG Z, HU R Q, QIAN Y, et al. D2D communication underlay in uplink cellular networks with fractional power control and fractional frequency reuse [C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), December 6-10, 2015, San Diego, USA. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-7.
- [11] ANDARGOLI S M H, MOHAMED-POUR K. Weighted sum throughput maximization for downlink multicell orthogonal frequency-division multiple access systems by intercell interference limitation [J]. IET Communications, 2012, 6 (6): 628-637.
- [12] FENG D, LU L, YI Y W, et al. Device-to-device communications underlaying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [13] 王蓉, 江帆, 许腾驹, 等. D2D 通信中一种资源分配与功率控制结合的方案[J]. 电讯技术, 2016(3): 295-301.
WANG R, JIANG F, XU T J, et al. D2D communication with a joint method of resource allocation and power control [J]. Telecommunication Engineering, 2016(3): 295-301.
- [14] 宋巨龙, 王香柯, 冯晓慧. 最优化方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012: 184-192.
SONG J L, WANG X K, FENG X H. The optimization method[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012: 184-192.
- [15] 常庭懋, 韩中庚. 用“匈牙利算法”求解一类最优化问题[J]. 河南郑州信息工程大学学报, 2004, 5(1): 60-62.
CHANG T M, HAN Z G. Using the Hungarian algorithm to solve a class of optimization problems[J]. Journal of Information Engineering University, 2004, 5(1): 60-62.
- [16] 李运会. LTE 上行功率控制的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
LI Y H. Research on uplink power control of LTE [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [17] GAO M, WANG Z, ZHANG B Y. Interference based power control performance in LTE uplink [C]//2008 IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems, October 21-24, 2008, Reykjavik, Island. New Jersey: IEEE Press, 2008: 698-702.
- [18] DINKELBACH W. On nonlinear fractional programming [J]. Management Science, 1967(13): 492-498.
- [19] GU J, BAE S J, CHOI B G. Dynamic power control mechanism for interference coordination of device-to-device communication in cellular networks[C]//Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), June 15-17, 2011, Dalian, China. New Jersey: IEEE Press, 2011: 71-75.

[作者简介]



王现超(1990-),男,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为宽带无线通信、D2D 通信的干扰与协调。

江帆(1982-),女,博士,西安邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为超密异构网络、D2D 通信、协作中继网络等。

孙长印(1963-),男,博士,西安邮电大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为下一代无线通信技术。

李晨碧(1991-),女,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为宽带无线通信、D2D 通信的中继选择。

申斌艳(1990-),女,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为宽带无线通信、D2D 通信的中继选择。