



文章编号:1001-9081(2018)09-2610-06

DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2018020351

异构蜂窝网络中联合功率控制的终端直通通信资源分配

李中捷, 谢东朋*

(智能无线通信湖北省重点实验室(中南民族大学), 武汉 430074)

(*通信作者电子邮箱 18064095402@163.com)

摘要:针对异构蜂窝网络中终端直通(D2D)用户和小蜂窝用户复用宏蜂窝用户资源产生的干扰问题,提出一种联合功率控制的资源分配方案。首先,在满足用户信号干扰噪声比(SINR)和发射功率约束条件的前提下,根据系统干扰模型推导出每个D2D用户和小蜂窝用户复用宏蜂窝用户信道资源时的最优发射功率;其次,将用户的信道选择规划成用户和信道之间的双边匹配问题,采用延迟接受(Gale-Shapley)算法得到一个稳定的匹配解;最后,以所得的匹配解为初始条件,通过交换搜索算法进一步优化分配方案。仿真结果表明,该方案的系统总容量和能量效率分别是最优解的93.62%和92.14%,与随机资源分配方案、无功率控制和交换搜索的分配方案,以及有功率控制无交换搜索的分配方案相比,系统容量平均增幅分别为48.29%、15.97%和4.8%,系统能量效率平均增幅分别为62.72%、44.48%和4.45%。该方案能够达到近似最优的系统总容量,有效提高频率利用率和能量效率。

关键词:终端直通通信; 延迟接受算法; 异构蜂窝网络; 资源分配; 系统容量

中图分类号: TN929.53 **文献标志码:**A

Joint power controlled resource allocation scheme for device-to-device communication in heterogeneous cellular networks

LI Zhongjie, XIE Dongpeng*

(Hubei Key Laboratory of Intelligent Wireless Communication (South-Central University for Nationalities), Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: To solve the interference issue caused by Device-to-Device (D2D) users and small cellular users underlaying macro cellular user resources in heterogeneous cellular networks, a joint power controlled resource allocation scheme was proposed. Firstly, the optimal transmit power of each D2D user and small cell user underlaying macro-cell user channel resources was derived according to the system interference model by satisfying the user Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) and transmit power constraints. Secondly, the user's channel selection was programmed as a two-sided matching problem between the user and the channel, and a stable matching solution was obtained by using the Gale-Shapley algorithm. Finally, the matching solution was taken as the initial condition, and the allocation scheme was further optimized by the exchange search algorithm. The simulation results show that the system total capacity and energy efficiency of the proposed scheme are 93.62% and 92.14% of the optimal solution. Compared with stochastic resource allocation scheme, the allocation scheme without power control and exchange search, and the allocation scheme with power control without exchange search, the system capacity averagely increases 48.29%, 15.97% and 4.8% respectively, and the system energy efficiency averagely increases 62.72%, 44.48% and 4.45% respectively. The proposed scheme can achieve approximately optimal system total capacity and effectively improves frequency utilization and energy efficiency.

Key words: Device-to-Device (D2D) communication; Gale-Shapley algorithm; heterogeneous cellular network; resource allocation; system capacity

0 引言

随着通信技术的发展、物联网及多媒体等应用的广泛使用,移动通信网络的数据流量获得爆炸性的增长。终端直通(Device-to-Device, D2D)通信具有较高的无线传输速率和较低的时延,有着广阔的应用前景^[1-3]。因此,未来的5G网络将是由宏蜂窝用户(Cellular User, CU)、小蜂窝用户、D2D用户(D2D User, DU)共存的混合通信网络。因为D2D用户、小蜂窝用户和宏蜂窝用户共享信道资源时会产生严重的同频干

扰,所以如何有效地进行干扰管理、提高频谱资源利用率是当前研究的热点。

目前,学术界对蜂窝网络中D2D通信的干扰管理问题进行了大量研究。文献[4]提出一种贪婪式启发式算法,D2D用户通过复用蜂窝用户信道资源造成的干扰程度的大小选择资源块,但是没有对用户发射功率进行控制。文献[5]采用减轻D2D通信对整个系统的权重影响来降低其产生的干扰,但此方法付出的代价是降低D2D用户的吞吐量。文献[6]提出一种只考虑个体干扰的资源分配方案,并设计一种迭代算

收稿日期:2018-02-07;修回日期:2018-04-24;录用日期:2018-05-04。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61379028, 61671483);湖北省自然科学基金重点资助项目(2016CFA089)。

作者简介:李中捷(1974—),男,湖北武汉人,副教授,博士,主要研究方向:异构蜂窝网络、毫米波通信; 谢东朋(1991—),男,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向:终端直通通信。



法解决 D2D 用户和蜂窝用户之间的干扰,虽然该方案保护了蜂窝用户的服务质量,但并没有考虑 D2D 用户的服务质量。文献[7]提出一种异构网络中基于网络辅助设备控制的 D2D 智能资源管理方案,能够有效提升系统的性能。文献[8]提出一种基于背包理论的干扰感知资源分配算法,虽然这个方案的目的是为了最小化系统干扰的同时保持系统总速率,但很多情况下不能提供一个可行的分配方案。文献[9]提出一种基于博弈理论的联合集群策略和功率控制方案来最小化传输时间,但并没有对信道资源进行分配。文献[10]提出了一种基于估价理论的资源分配算法,尽管该算法在一定程度上提升了系统容量,但在系统环境较差的情况下,性能达不到理想的效果。文献[11]和文献[12]提出一种基于非合作博弈论的功率控制与资源分配方案,在该方案中蜂窝用户和 D2D 用户各自独立决定自己的功率以使得各自的能量效率最大。文献[13]首先通过限制 D2D 用户的发射功率来保证蜂窝用户的服务质量,然后在求出 D2D 用户的发射功率后运用 Relax-based 算法解决 D2D 用户的资源分配问题。文献[14]提出基于 Gale-Shapley 算法的资源分配算法,该方案有以下不足:1)只考虑了由宏蜂窝用户和 D2D 用户组成的系统环境,并没有考虑到小蜂窝用户对系统的干扰;2)该方案只是获得了一个稳定匹配,并没有最大化系统容量;3)系统中用户的发射功率固定,并不能最大限度提升系统性能。

针对文献[14]中所提出方案的不足,本文在异构蜂窝网络环境下,提出了一种联合功率控制的资源分配方案。该方案首先根据系统干扰模型和约束条件推导出每个 D2D 用户和小蜂窝用户复用宏蜂窝用户信道资源时的最优发射功率,其次采用 Gale-Shapley 算法得到一个稳定的匹配解,最后通过交换搜索算法进一步优化分配方案。仿真结果表明该方案在有效保证用户通信服务质量的前提下,系统总容量逼近最优解。

1 系统模型和问题规划

1.1 系统模型

由宏基站和多个小蜂窝基站构成的异构蜂窝网络模型如图 1 所示,宏基站位于中心,小蜂窝基站服从密度为 λ_s 的齐次泊松点过程,系统中随机分布三种用户,集合 $H = \{1, 2, \dots, D\}$, $M = \{1, 2, \dots, C\}$, $W = \{1, 2, \dots, J\}$ 分别表示 D2D 用户集合,宏蜂窝用户集合,小蜂窝用户集合。

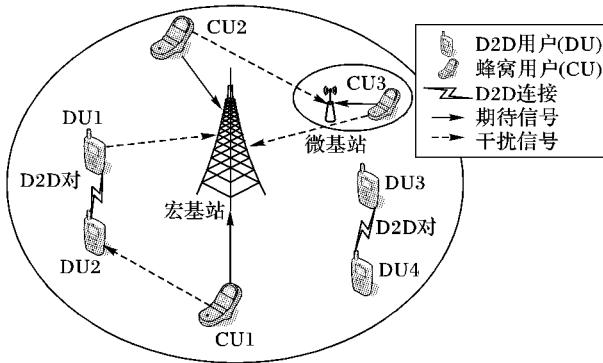


图 1 异构蜂窝网络
Fig. 1 Heterogeneous cellular network

本文研究 D2D 用户和小蜂窝用户复用宏蜂窝用户上行

信道资源的资源分配问题,信道总资源数设定为 N ,假设各基站可以获取全部的信道状态信息。二进制变量 X_c^n, X_j^n 和 X_d^n 为 1 时表示信道 n 分配给宏蜂窝用户 c 、小蜂窝用户 j 和 D2D 用户 d ,否则为 0。假设宏蜂窝用户占用的信道只能被一个小蜂窝用户或 D2D 用户复用,并且小蜂窝用户和 D2D 用户不共用相同信道资源。

D2D 用户 d 复用信道 n 时的信号干扰噪声比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)为:

$$SINR_d^n = \frac{P^d G^{d_t, d_r}}{X_c^n P^c G^{c, d_r} + N_0} \quad (1)$$

其中: P^d 是 D2D 用户 d 的发射功率, P^c 为宏蜂窝用户 c 的发射功率。 G^{d_t, d_r} 是 D2D 用户 d 的发射方 d_t 和接收方 d_r 之间的信道增益, G^{c, d_r} 是宏蜂窝用户 c 到 D2D 接收方 d_r 的信道增益, N_0 是噪声功率。

小蜂窝用户 j 复用信道 n 时的 SINR 为:

$$SINR_j^n = \frac{P^j G^{j, b_j}}{X_c^n P^c G^{c, b_j} + N_0} \quad (2)$$

其中: b_j 为小蜂窝用户 j 接入的小蜂窝基站, P^j 是小蜂窝用户 j 的发射功率, G^{j, b_j} 是小蜂窝用户 j 和小蜂窝基站 b_j 之间的信道增益, G^{c, b_j} 是宏蜂窝用户 c 和小蜂窝基站 b_j 之间的信道增益。

宏蜂窝用户 c 在信道 n 的 SINR 为:

$$SINR_c^n = \frac{P^c G^{c, B}}{X_c^n P^c G^{j, B} + X_d^n P^d G^{d, B} + N_0} \quad (3)$$

其中: P^c 为宏蜂窝用户 c 发射功率, $G^{c, B}$ 是宏蜂窝用户 c 到宏基站 B 的信道增益, $G^{d, B}$ 是 D2D 用户 d 和宏基站 B 之间的信道增益, $G^{j, B}$ 是小蜂窝用户 j 到宏基站 B 之间的信道增益。由于蜂窝用户和 D2D 用户不共用信道, X_d^n 和 X_j^n 不能同时为 1。

1.2 问题规划

假设 N 个信道资源已被宏蜂窝用户全部占用,且宏蜂窝用户以最大的发射功率 P_M 发射,即 $P^c = P_M$,在保证用户通信质量前提下,以最大化系统总容量为准则,为 D2D 用户和小蜂窝用户选择最佳发射功率并分配信道资源。由香农公式得到优化问题的目标函数及约束条件如式(4)~(11)所示:

$$\begin{aligned} & \max_{X_c^n, X_j^n, X_d^n, (c \in M, j \in W, d \in H)} T(X_j^n, X_d^n, X_c^n) = \\ & \max_{X_c^n, X_j^n, X_d^n, (c \in M, j \in W, d \in H)} \sum_{n=1}^N (X_c^n \ln(1 + SINR_c^n) + \\ & X_j^n \ln(1 + SINR_j^n) + X_d^n \ln(1 + SINR_d^n)) \end{aligned} \quad (4)$$

$$SINR_c^n \geq SINR_{c, threshold}^n; \quad \forall c \in M \quad (5)$$

$$SINR_j^n \geq SINR_{j, threshold}^n; \quad \forall j \in W \quad (6)$$

$$SINR_d^n \geq SINR_{d, threshold}^n; \quad \forall d \in H \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^N X_j^n \leq 1, \quad \sum_{j=1}^J X_j^n \leq 1; \quad \forall j \in W \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^N X_d^n \leq 1, \quad \sum_{d=1}^D X_d^n \leq 1; \quad \forall d \in H \quad (9)$$

$$X_d^n X_j^n = 0 \quad (10)$$

$$0 \leq P^d \leq P_M, 0 \leq P^j \leq P_M \quad (11)$$

式(5)、(6)、(7)保证了宏蜂窝用户、小蜂窝用户和 D2D 用户的 SINR 大于阈值;式(8)、(9)确保每个小蜂窝用户或者 D2D 用户只能复用一个宏蜂窝用户的信道资源,且每个信道资源只能被一个 D2D 用户或者小蜂窝用户复用;式(10)确保小蜂窝用户和 D2D 用户不能同时复用一个宏蜂窝用户的信



道资源;式(11)表示小蜂窝和D2D用户的发射功率不能大于最大发射功率。

式(4)~(11)定义的资源分配问题是混合整数非线性规划问题,可由遍历法得到最优解,但该方法复杂度太高,因此需采用复杂度较低、逼近最优解的次优算法。式(4)定义最大化系统总容量的目标函数,式(5)~(11)定义的约束条件能保证当小蜂窝用户和D2D用户对宏蜂窝用户造成过多的干扰时,不复用该信道资源,有效地保证了用户的通信服务质量与系统的稳定性。

2 联合功率控制的资源分配算法

2.1 功率控制

由1.2节式(1)、(3)、(7)、(11)可以得到D2D用户 d 复用信道 n 时的发射功率变化区间为:

$$P_{\min}^d \leq P^d \leq P_{\max}^d \quad (12)$$

其中:

$$P_{\min}^d = \max \left\{ \frac{SINR_{d,\text{threshold}}^n P_M G^{c,d_r} + N_0 SINR_{d,\text{threshold}}^n}{G^{d_r,d_r}}, 0 \right\} \quad (13)$$

$$P_{\max}^d = \min \left\{ \frac{P_M G^{c,B} - N_0 SINR_{c,\text{threshold}}^n}{G^{d,B} SINR_{c,\text{threshold}}^n}, P_M \right\} \quad (14)$$

信道 n 的容量为:

$$C_n(P^d) = W \ln(1 + SINR_d^n) + W \ln(1 + SINR_c^n) = W \ln(1 + SINR_d^n + SINR_c^n + SINR_c^n SINR_d^n) \quad (15)$$

由式(15)可知,为最大化信道 n 的容量,需在区间 $[P_{\min}^d, P_{\max}^d]$ 内,由式(16)求解D2D用户 d 在信道 n 上的最优发射功率 P^d 。

$$\max_{P^d} \{ C1_n(P^d) \} = \max_{P^d} \{ SINR_c^n + SINR_d^n + SINR_c^n SINR_d^n \} \quad (16)$$

由 $C1_n(P^d)$ 对 P^d 求导后等于0可得到关于 P^d 的一元二次方程。求得该方程的根式判别式为:

$$\Delta = 4G^{d_t,d_r}G^{d,B}G^{B,c}P_M(G^{B,c}N_0 + P_M G^{B,c}G^{c,d_r} - G^{d_t,d_r}N_0) \quad (17)$$

当 $\Delta \geq 0$ 时可得方程的两个根为 P_1^d ($P_1^d < 0$ 舍弃)和 P_2^d 。分情况讨论可得D2D用户 d 的发射功率为:

$$P^d = \begin{cases} P_{\max}^d, & \Delta \geq 0, P_2^d \leq P_{\min}^d \\ \arg \max_{P^d \in [P_{\min}^d, P_{\max}^d]} (C1(P^d)), & \Delta \geq 0, P_2^d > P_{\min}^d \\ P_{\min}^d, & \Delta \geq 0, P_2^d \geq P_{\max}^d \\ P_{\max}^d, & \Delta < 0 \end{cases} \quad (18)$$

同理可得小蜂窝用户 j 复用信道 n 时的变化区间 $[P_{\min}^j, P_{\max}^j]$,小蜂窝用户 j 的最优发射功率 P^j 为:

$$P^j = \begin{cases} P_{\max}^j, & \Delta \geq 0, P_2^j \leq P_{\min}^j \\ \arg \max_{P^j \in [P_{\min}^j, P_{\max}^j]} (C1(P^j)), & \Delta \geq 0, P_2^j > P_{\min}^j \\ P_{\min}^j, & \Delta \geq 0, P_2^j \geq P_{\max}^j \\ P_{\max}^j, & \Delta < 0 \end{cases} \quad (19)$$

2.2 资源分配

根据2.1节获得的每个D2D用户和小蜂窝用户在各信

道上的最优发射功率,通过香农公式求得各个用户在不同信道上发射获得的信道容量。将D2D用户和小蜂窝用户看作甲方,信道看作乙方,则甲乙双方的匹配问题可以通过Gale-Shapley算法来进行信道资源的优化分配。

每个D2D用户和小蜂窝用户根据在信道上获得的容量建立用户偏好列表 Ue_list ,如果当前有 m 个D2D用户和 n 个小蜂窝用户接入,则用编号 $1 \sim m$ 表示D2D用户,编号 $m+1$ 到 $m+n$ 代表小蜂窝用户。信道根据让不同的用户通信获得信道总容量大小建立偏好列表 $Channel_list$ 。表1表示由2个D2D用户和3个小蜂窝用户复用6个信道资源的用户偏好列表,偏好列表每行的第一个元素具有最高的优先级,有些用户在某些优先级上的元素为空,说明在这些信道上找不到合适的发射功率,例如偏好列表中的D2D用户1只能在信道5,3,4,1,6上通信。

表1 D2D用户和小蜂窝用户的偏好列表

Tab. 1 Preference list of D2D users and small cellular users

编号	用户	偏好级别					
		1	2	3	4	5	6
1	D2D 用户 1	5	3	4	1	6	∅
2	D2D 用户 2	1	2	4	3	6	5
3	小蜂窝用户 1	2	3	5	1	∅	∅
4	小蜂窝用户 2	5	4	6	3	1	2
5	小蜂窝用户 3	4	2	1	3	5	6

算法还需要定义以下参数:

1)信道与D2D对和小蜂窝用户之间联系的集合(*Association*),集合 $Association(k)$ 表示信道 k 包含已经匹配的D2D或小蜂窝用户;

2)定义当前 D 对D2D和 K 个小蜂窝用户最想复用的信道列表 $Pre = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_D, \delta_{D+1}, \dots, \delta_{D+K}]$,由信道偏好列表知 δ_k 是 $Ue_list(k)$ 列表的第一个元素;

3)没有匹配的D2D对和小蜂窝用户集合表示为 $UNMATCH$,信道总数为 $Channel_num$ 。

具体算法的伪码如算法1所示。

算法1 基于Gale-Shapley的资源分配算法。

- 1) 初始化用户数目,信道总数,发射功率,路径损耗,集合 $Association$, $UNMATCH$
- 2) 建立用户和信道的偏好列表
- 3) 根据式(18)(19)求出用户在不同信道上的最优发射功率,并求得吞吐量
- 4) for $i \in W \cup H$ do
- 5) $Association[i] = \emptyset$
- 6) end
- 7) while $UNMATCH = \emptyset$ do
- 8) for $\forall k \in UNMATCH$ do
- 9) $temp = \delta_k$
- 10) if $Association[temp] = \emptyset$ and 满足式(5)~(8)
- 11) $Association[temp] = k$
- 12) $UNMATCH = UNMATCH - \{k\}$
- 13) else
- 14) $P1 =$ 用户 k 在 $Channel_list$ 的偏好值
- 15) $P2 =$ 用户 $Association[temp]$ 在 $Channel_list$ 的偏好值
- 16) if $P1 < P2$ and 满足式(5)~(8)
- 17) $Mid_ue = Association[temp]$
- 18) $Association[temp] = k$
- 19) $UNMATCH = UNMATCH - \{k\}$



```

20)      UNMATCH = UNMATCH + {Mid_ue}
21)      Ue_list(Mid_ue) = Ue_list(Mid_ue) - δMid_ue, 更新
22)      Pre
23)      else
24)          Ue_list(k) = Ue_list(k) - δk, 更新 Pre
25)      end
26)      if Ue_list(w) = ∅(w ∈ H)
27)          UNMATCH = UNMATCH - {w}
28)      end
29)  end
30) end

```

算法 1 的详细步骤如下:

1) 首先初始化用户数目、信道数目、发射功率、路径损耗等系统参数, 建立 D2D 用户和信道的偏好列表, 集合 $Association$, 未被匹配的 D2D 对集合 $UNMATCH$, 发射功率等参数;

2) 第 4) ~6) 行初始化 D2D 用户和小蜂窝用户匹配的信道为空;

3) 第 7) ~25) 行是算法 1 的核心部分, 只有所有接入的 D2D 用户和小蜂窝用户找到合适的信道, while 循环才会中止。对于每个接入的 D2D 用户或者小蜂窝用户, 根据偏好列表找到最想复用的信道资源, 如果这个信道资源已经被其他用户复用, 则信道根据偏好列表从当前两个用户中找到更合适的用户进行匹配, 拒绝另一个用户, 被拒绝的接入用户更新偏好列表, 下一次循环将从未被拒绝的信道中找到优先级最高的信道发出通信请求。

4) 算法第 26) ~28) 表示在算法的最后阶段, 某些 D2D 用户和小蜂窝用户因为 SINR 阈值的限制无法找到合适的信道资源, 也假设这种用户已找到合适的资源, 从集合 $UNMATCH$ 中移除这些用户。

2.3 交换搜索算法

通过 2.2 节的 Gale-Shapley 资源分配算法, 可以从集合 $Association$ 中可以获得用户和信道的一个稳定匹配, 该匹配并不能从最大限度上提升系统总容量, 因此在该匹配结果的基础上通过交换搜索算法来进一步提高系统总容量。假设 2.2 节经过算法 1 的匹配获得的系统容量为 R , 对于两个不同的接入用户, 交换各自匹配的信道, 如果交换信道后的系统容量 $R1$ 大于当前的系统容量, 则更新集合 $Association$, 否则保持原来的匹配。具体的伪码如算法 2 所示。

算法 2 交换搜索算法。

```

1)  for ∀ i, j ∈ H ∪ W and i ≠ j
2)    Current_match = Association
3)    FRONT = Association(i)
4)    Association(i) = Association(j)
5)    Association(j) = FRONT
6)    一组用户交换匹配信道后的系统容量为 R1
7)    if R1 < R2
8)      Association = Current_match
9)    end
10)   end

```

3 仿真实验

为了验证本文所提方案的有效性, 考虑在长期演进-频分双工 (Long Term Evolution-Frequency Division Duplex, LTE-

FDD) 异构蜂窝系统下, 通过 Matlab 软件进行系统级仿真, 对比表 2 中 5 种方案的系统性能, 验证了不同情形下系统的总系统容量、系统能量效率以及 D2D 用户和小蜂窝用户的 SINR 和发射功率分布情况。系统仿真采用第三代合作伙伴计划-长期演进 (3rd Generation Partnership Project-Long Term Evolution, 3GPP-LTE) 所规定的正交频分多址接入 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA) 系统参数, 具体参数设置如表 3 所示。

表 2 5 种资源分配方案

Tab. 2 Five resource allocation schemes

方案编号	采取的干扰缓解技术	是否功率控制
1	随机资源分配算法	否
2	算法 1	否
3	算法 1	是
4	算法 1 + 算法 2	是
5	最优穷举搜索算法	是

表 3 仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

参数名	参数取值
小区半径	1000 m
接入用户数	10 ~ 50
宏蜂窝用户数(信道数目)	80
小蜂窝基站密度	1e-5 个/m ²
信道带宽	1.8 E5 Hz
D2D 用户, 小蜂窝用户发射功率	0 ~ 23 dBm
宏蜂窝用户发射功率	23 dBm
高斯白噪声密度	-174 dBm/Hz
基站到用户的路径损耗模型 ^[15]	33.65 + 23.47 lg(d)
用户间的路径损耗模型 ^[15]	36.67 + 19.54 lg(d)

图 2 表示当宏蜂窝用户一定的情况下, 系统总容量随接入用户数的变化情况。从图 2 中可以看出, 随着可接入用户数目的增加, 系统的总容量不断增加。其中: 方案 4 是本文所提方案, 因为该方案联合功率控制, 并且结合算法 1 和算法 2, 所以获得的系统总容量近似达到方案 5 最优穷举搜索算法的系统容量; 最优穷举搜索算法需要遍历所有的分配情况, 计算量太高; 随机资源分配算法因为没有优化目标函数, 计算复杂度最低, 但是性能最差。

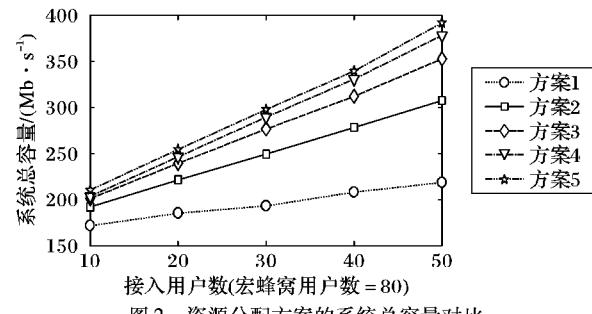


图 2 资源分配方案的系统总容量对比

Fig. 2 Comparison of system total capacity of resource allocation schemes

图 3 表示系统总容量和宏蜂窝用户 SINR 门限的关系, 从图中可以看出, 随着宏蜂窝用户 SINR 门限的提高, 系统总容量不断降低, 因为 SINR 门限的提高会导致某些宏蜂窝用户不能正常通信。而且, 从式(1)、(2)、(3)可以看出, SINR 门限提高会导致一些 D2D 用户和小蜂窝用户因避免对宏蜂



窝用户造成过多干扰而无法正常通信,所以系统总容量不断降低。

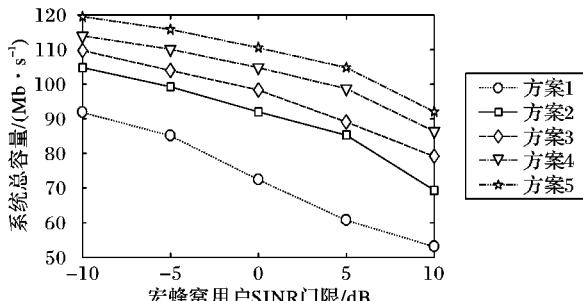


图3 宏蜂窝用户 SINR门限对系统总容量的影响

Fig. 3 Influence of SINR threshold for cellular users on system total capacity

图4表示接入用户的SINR的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)。从图中可以看出,通信用户的SINR都大于阈值,因此用户的通信服务质量得到有效的保障。进行功率控制优化的D2D用户和小蜂窝用户的SINR低于固定功率时的SINR,宏蜂窝用户的SINR则优于未进行功率控制的情况下,D2D用户和小蜂窝用户的发射功率并不是最大的发射功率,所以减少了对宏基站的干扰。

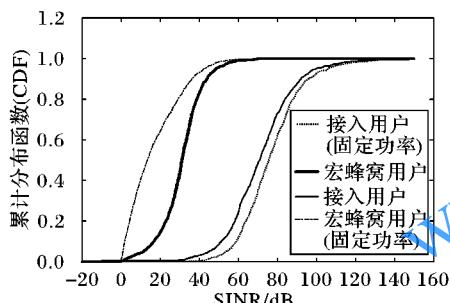


图4 接入用户的SINR累积分布函数

Fig. 4 SINR CDF of access users

图5表示当宏蜂窝用户一定时,系统能量效率和接入用户数的关系。从图中可以看出,随着接入用户的增加,尽管资源复用方案可以提高系统吞吐量,但是用户消耗的总功率也增加,因此采用固定发射功率的方案1和方案2会出现能量效率降低的情况。由于方案3、方案4和方案5对接入用户的发射功率进行了优化,能量效率得到提升。方案5虽然可以达到最优的能量效率,但需要遍历所有的情况,计算量太大。

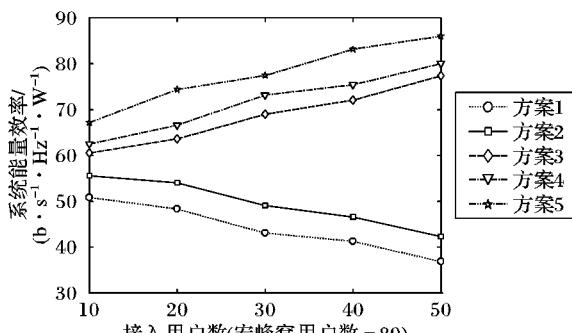


图5 资源分配方案的系统能量效率对比
Fig. 5 Comparison of system energy efficiency of resource allocation schemes

图6表示SINR门限值分别取-10 dB、-5 dB和0 dB时,接入用户的功率分布。从图中可以看出,各用户发射功率分布在区间[0, 200] mW中,其中区间[0, 40] mW和[160, 200] mW的用户数目最多。[160, 200] mW区间的用户数目随SINR门限的增加不断减少,因为SINR门限的提高会导致宏蜂窝用户能接受的最大干扰变小,所以在功率较高区间的用户数目会减少。

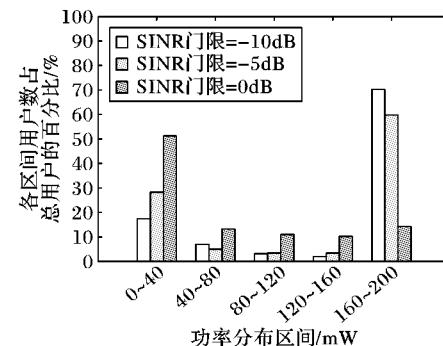


图6 接入用户的发射功率分布

Fig. 6 Transmission power distribution of access users

4 结语

本文提出一种在异构网络中D2D用户和小蜂窝用户复用宏蜂窝用户上行信道资源的联合功率控制资源分配方案。该方案首先根据系统干扰模型及约束条件动态调整D2D用户和小蜂窝用户的发射功率,然后采用Gale-Shapley算法和交换搜索算法得到信道分配的优化方案。仿真结果表明,该方案能够达到近似最优的系统总容量,有效提高频率利用率和系统能量效率。下一步的工作是构建功率控制和系统容量的联合目标函数,研究对该目标函数的优化求解问题,进一步提高频率利用率。

参考文献 (References)

- [1] FODOR G, DAHLMAN E, MILDH G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(3): 170–177.
- [2] LEE N, 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.
- [3] 尼俊红, 申振涛, 杨会峰. 蜂窝网络下基于max-min公平性的D2D功率分配[J]. 计算机应用, 2017, 37(4): 945–947. (NI J H, SHEN Z T, YANG H F. D2D power allocation based on max-min fairness underlying cellular systems [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(4): 945–947.)
- [4] SUN H, SHENG M, WANG X. Resource allocation for maximizing the device-to-device communications underlying LTE-advanced networks [C]// Proceedings of the 2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China-Workshops. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 60–64.
- [5] 王斌, 孟婉婷, 王兆丰, 等. 蜂窝控制下的D2D通信的无线资源分配研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2015, 35(3): 39–46. (WANG B, MENG W T, WANG Z F, et al. Wireless resource allocation for Device-to-Device (D2D) communication underlying cellular networks [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science), 2015, 35(3): 39–46.)



- [6] TEHRANI M N, UYSAL M, YANIKOMEROGLU H. Device-to-device communication in 5G cellular networks: challenges, solutions, and future directions [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(5): 86–92.
- [7] TSAI A H, WANG L C, HUANG J H, et al. Intelligent resource management for Device-to-Device (D2D) communications in heterogeneous networks [C]// Proceedings of the 2012 15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 75–79.
- [8] ISLAM M T, TAHA A E M, AKL S, et al. Reducing the complexity of resource allocation for underlaying device-to-device communications [C]// Proceedings of the 2015 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 61–66.
- [9] PENG B, PENG T, LIU Z, et al. Cluster-based multicast transmission for Device-to-Device (D2D) communication [C]// Proceedings of the 2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 1–5.
- [10] ZHOU Z, DONG M, OTA K, et al. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in Device-to-Device (D2D) communications [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(5): 485–488.
- [11] CHEN X, HU R Q, JEON J, et al. Energy efficient resource allocation for D2D communication underlaying cellular networks [C]// Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 2943–2948.
- [12] HOANG T D, LONG B L, LE-NGOC T. Radio resource management for optimizing energy efficiency of D2D communications in cellular networks [C]// Proceedings of the 2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2015: 1190–1194.
- [13] ISLAM M T, TAHA A E M, AKL S, et al. A stable matching algorithm for resource allocation for underlaying device-to-device communications [C]// Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–6.
- [14] CHANG W, JAU Y T, SU S L, et al. Gale-Shapley-algorithm based resource allocation scheme for device-to-device communications underlaying downlink cellular networks [C]// Proceedings of the 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 1–6.
- [15] 3GPP. Selection procedures for the choices of radio transmission technologies of the UMTS [S]. Valbonne: European Telecommunications Standards Institute, 1998: 3.

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61379028, 61671483), the Natural Science Foundation of Hubei Province (2016CFA089).

LI Zhongjie, born in 1974, Ph. D., associate professor. His research interests include heterogeneous cellular networks, millimeter wave communication.

XIE Dongpeng, born in 1991, M. S. candidate. His research interests include D2D communication.

(上接第 2586 页)

- [9] 吴帅, 孙力娟, 肖甫, 等. 面向三维的无线传感器网络覆盖增强算法[J]. 计算机研究与发展, 2011, 48(Suppl): 106–110. (WU S, SUN L J, XIAO F, et al. A coverage-enhancing algorithm for the three-dimensional wireless sensor networks [J]. Journal of Computer Research and Development, 2011, 48(Suppl): 106–110.)
- [10] NAZRUL ALAM S M, HAAS Z J. Coverage and connectivity in three-dimensional networks with random node deployment [J]. Ad Hoc Networks, 2015, 34(C): 157–169.
- [11] 杜晓玉, 孙力娟, 郭剑, 等. 异构无线传感器网络覆盖优化算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(3): 696–702. (DU X Y, SUN L J, GUO J, et al. Coverage optimization algorithm for heterogeneous WSNs [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(3): 696–702.)
- [12] 秦宁宁, 余颖华, 吴德恩. 移动混合传感网中的节点自主部署算法 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(7): 1838–1842. (QIN N N, YU Y H, WU D E. Autonomous deployment algorithm in mobile heterogeneous networks [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2016, 38(7): 1838–1842.)
- [13] 谭励, 王云会, 杨明华, 等. 一种基于虚拟力补偿的三维空间自主部署算法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2570–2578. (TAN L, WANG Y H, YANG M H, et al. Three-dimensional space self-deployment algorithm based on virtual force compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2570–2578.)
- [14] 李享. 基于空中传感网的三维部署研究[D]. 太原: 中北大学, 2013: 5–54. (LI X. Three-dimensional disposition algorithm in aerial sensor network research [D]. Taiyuan: North University of China, 2013: 5–54.)
- [15] 周浦城, 崔逊学, 王书敏, 等. 基于虚拟力的无线传感器网络覆盖增强算法 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1416–1419. (ZHOU P C, CUI X X, WANG S M, et al. Virtual force-based wireless sensor network coverage-enhancing algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(5): 1416–1419.)
- [16] 夏娜, 王长生, 郑榕, 等. 鱼群启发的水下传感器节点布置 [J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 295–302. (XIA N, WANG C S, ZHENG R, et al. Fish swarm inspired underwater sensor deployment [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 295–302.)
- [17] 魏连锁, 蔡绍滨, 潘实. 基于加权虚拟力模型的锚节点移动策略的研究 [J]. 通信学报, 2017, 38(6): 97–107. (WEI L S, CAI S B, PAN S. Research on mobile strategy of anchor node based on weighted virtual force model [J]. Journal on Communications, 2017, 38(6): 97–107.)
- [18] 刘慧, 柴志杰, 杜军朝, 等. 基于组合虚拟力的传感器网络三维空间重部署算法研究 [J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 713–723. (LIU H, CHAI Z J, DU J Z, et al. Sensor redeployment algorithm based on combined virtual forces in three dimensional space [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6): 713–723.)

This work is partially supported by the National Natural Science Foundation of China (61662070, 61762079), the Key Science and Technology Research Project of Gansu Province (1604FKCA097, 17YF1GA015), the Science and Technology Innovation Project of Gansu Province (17CX2JA037, 17CX2JA039).

DANG Xiaochao, born in 1963, M. S., professor. His research interests include wireless sensor network.

SHAO Chenguang, born in 1994, M. S. candidate. His research interests include wireless sensor network.

HAO Zhanjun, born in 1979, M. S., associate professor. His research interests include Internet of things, indoor positioning, location services.