

# 下含 D2D 蜂窝网中基于公平性原理的功率控制

王振朝<sup>1,2</sup> 赵 云<sup>1</sup> 薛文玲<sup>1</sup>

(河北大学电子信息工程学院 河北 保定 071002)<sup>1</sup>

(河北省数字医疗工程重点实验室 河北 保定 071002)<sup>2</sup>

**摘 要** 针对蜂窝下含 D2D 系统的资源分配问题,文中首次以共道链路间传输速率的公平性为目标来研究功率控制问题。首先,将建立的系统模型归结为以系统吞吐量最大化为目标的联合信道分配与功率控制的最优化问题。为了降低求解该问题的难度,将问题解耦为信道分配和功率控制两个子问题。在假设已得到最优链路匹配集合的基础上,重点研究功率控制问题,分别得出基于公平性原理的最佳发射功率的闭式解、基于系统吞吐量最大化的最佳发射功率的闭式求解域以及满足公平性前提下基于系统吞吐量最大化的最佳发射功率的闭式求解域。仿真结果表明,共道链路的公平性能得到了有效提升。

**关键词** D2D 通信,资源分配,功率控制,公平

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.07.017

## Power Control Based on Fairness in D2D Underlaid Cellular Networks

WANG Zhen-chao<sup>1,2</sup> ZHAO Yun<sup>1</sup> XUE Wen-ling<sup>1</sup>

(College of Electronic & Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Digital Medical Engineering of Hebei Province, Baoding, Hebei 071002, China)<sup>2</sup>

**Abstract** For the resource allocation problem in device-to-device underlaid cellular networks, this paper studied the power control problem with regarding the fairness of transmitting rate between links as the goal for the first time. Joint channel allocation and power control optimization for maximization of the overall network throughput is formed for the system model. In order to reduce the complexity of the problem, it is decoupled into channel allocation and power control. Assuming that optimal matching set has been got previously, this paper focused on power control problem. Optimal transmitting power solutions which are in closed form or can be searched from a finite set are separately induced for the power control for fairness, the power control for maximization of the overall network throughput, and the power control for maximization of the overall network throughput under the condition that fairness has been guaranteed. Simulation results confirm that the fairness between links using the same channel can be improved significantly.

**Keywords** Device-to-device communications, Resource allocation, Power control, Fairness

## 1 引言

蜂窝下含 D2D 系统(DUCN)<sup>[1]</sup>将端对端(D2D)技术引入蜂窝网,通过频谱再分配来提高信道资源利用率,是下一代移动通信的备选技术之一<sup>[2]</sup>。

然而,该项技术还面临诸多挑战,其中,设计优良的资源分配方案来最大限度地降低信道复用造成的同道干扰的影响,并且提升多项系统性能,至今仍是一个开放型的研究内容<sup>[3]</sup>。已有研究工作<sup>[4-6,11-12]</sup>大多以信道分配、功率控制、模式选择、接入控制以及联合分配等方式进行资源分配,实现对

系统容量、吞吐量、公平性以及用户满意度等性能的提升。在联合资源分配方面,已有工作大多将最优化问题解耦为信道分配、功率控制等多个子问题,然后采用“先功率控制,后信道分配”的思路来寻求最优解<sup>[11-12]</sup>。然而,该类方法需要针对所有可能的配对链路计算最优传输功率,且功率控制之后往往会产生较大的链路匹配集合,因此算法的复杂度相对较高。

公平性是衡量蜂窝网系统性能的重要指标。文献[7]提出了一种基于二阶竞价的资源分配算法,保证了具有不同竞价能力的 D2D 对在每个最大拍卖循环周期内都有机会接入网络。文献[8]基于比例公平性算法提出了一种无线资源调

到稿日期:2017-05-19 返修日期:2017-08-15 本文受河北省自然科学基金项目(F2014201168)资助。

王振朝(1958—),男,博士,教授,主要研究方向为下一代移动通信网和工业数据通信;赵云(1989—),男,硕士生,主要研究方向为无线资源分配和蜂窝下含 D2D 系统,E-mail:1057442101@qq.com(通信作者);薛文玲(1975—),女,博士生,副教授,主要研究方向为网络通信。

度策略,使得 CE 链路间和 D2D 对链路间具有良好的传输速率公平性。目前,还没有从资源分配角度针对 CE 和 D2D 对链路间传输速率公平性进行研究的成果。

关于 CE 链路与 D2D 对链路共占信道的功率控制,目前已有诸多研究成果<sup>[9-12]</sup>。文献[9]通过合理的功率控制,不仅降低了同道干扰,而且能给不同链路赋予不同的优先接入网络的权利;文献[10]以最大化系统和速率为优化目标,推导并证明了最优发射功率的闭式求解域;文献[11]提出了一种以最大化 D2D 对能效为目标的联合信道分配与功率控制的迭代策略;文献[12]提出在最优功率控制的基础上基于超图设计最优链路匹配算法,实现了良好的吞吐量性能。然而,当前还没有针对链路传输速率的公平性的功率控制的研究工作。

鉴于以上不足,针对 DUCN 中最多允许一条 D2D 对链路与一条 CE 链路共占信道的场景,本文提出一种以最大化系统吞吐量为目标的联合信道分配与功率控制的资源分配方法。与已有工作<sup>[10-11]</sup>不同,在将优化问题解耦为信道分配和功率控制两个子问题后,本文首次采用“先信道分配,后功率控制”的设计思路,以降低算法的复杂度。由于采用匈牙利算法或其他信道分配算法<sup>[5-7,11-14]</sup>可得到最优链路匹配集合,本文重点研究了功率控制问题。通过公式推导,首次得出了在满足配对链路传输速率公平性前提下以最大化系统吞吐量为目标的最佳发射功率的闭式求解域。最后,通过仿真实验验证了所得结论的正确性。

## 2 系统模型

考虑单蜂窝小区上行链路的资源分配场景。将频谱资源分割为  $K$  个带宽相等且互相正交的信道,上行蜂窝用户(CE)与 D2D 用户在小区中均匀分布。信道、蜂窝用户、D2D 用户分别记为  $K = \{1, 2, \dots, K\}$ ,  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_C\}$ ,  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_D\}$ , 相应的链路用相同的符号表示,其中  $|K| = K$ ,  $|C| = C$ ,  $|D| = D$ 。

由多径效应、阴影衰落、路径损耗产生的信道传输质量用信道增益  $g$  表示。 $g_{i,B}^k, g_{j,j}^k$  分别表示第  $i$  个 CE 与基站(BS)、第  $j$  对 D2D 发送端与接收端占用信道  $k$  进行单工通信时的信道增益; $g_{j,B}^k, g_{i,j}^k$  分别表示第  $j$  对 D2D 发送端与 BS、第  $i$  个 CE 与第  $j$  对 D2D 接收端间干扰链路的信道增益。热噪声服从均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的正态分布。设 CE 终端(CUE)、D2D 对发送端(DUE)的最大发射功率分别为  $P_{\max}^c$  和  $P_{\max}^d$ ,  $P_i$  和  $P_j$  则分别表示 CUE 和 DUE 的实际发射功率。用二元变量  $\rho_l^k$  表示链路  $l$  对信道  $k$  的占用情况, $\rho_l^k = 1$  表示占用, $\rho_l^k = 0$  表示不占用。

假设每条通信链路最多占用一条信道,每条信道最多只能同时分配给一条 CE 链路和一条 D2D 对链路,那么,基于系统吞吐量最大化的问题可表达为:

$$\max_{\rho, P_c, P_d} \sum_{k \in K} \sum_{l \in C \cup D} (\rho_l^k R_l^k) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in K} \rho_l^k \leq 1, \forall l \in C \cup D \quad (1a)$$

$$\sum_{i \in C} \rho_i^k \leq 1, \sum_{j \in D} \rho_j^k \leq 1, \forall k \in K \quad (1b)$$

$$\gamma_l^k \geq \gamma_{th}^c, \forall l \in C \quad (1c)$$

$$\gamma_l^k \geq \gamma_{th}^d, \forall l \in D \quad (1d)$$

$$0 \leq P_i \leq P_{\max}^c \quad (1e)$$

$$0 \leq P_j \leq P_{\max}^d \quad (1f)$$

其中, $\rho$  是以  $\rho_l^k$  为元素的信道分配矩阵, $P_c$  和  $P_d$  分别表示 CUE 和 DUE 的发射功率矩阵; $R_l^k$  是链路  $l$  占用信道  $k$  通信实现的信道传输速率,使用带宽归一化的香农公式  $R_l^k = \log_2(1 + \gamma_l^k)$  计算。当  $l \in C$  时,若 CE 链路  $l$  与 D2D 对链路  $j$  共占信道  $k$  通信, $\gamma_l^k = \frac{P_i g_{i,B}^k}{P_j g_{j,B}^k + \sigma^2}$ ,若 CE 链路  $l$  独占信道  $k$ , $\gamma_l^k = \frac{P_i g_{i,B}^k}{\sigma^2}$ ;当  $l \in D$  时,若 D2D 对链路  $l$  与 CE 链路  $i$  共占信道  $k$ , $\gamma_l^k = \frac{P_j g_{j,j}^k}{P_i g_{i,j}^k + \sigma^2}$ ,若 D2D 对链路  $l$  独占信道  $k$ , $\gamma_l^k = \frac{P_j g_{j,j}^k}{\sigma^2}$ 。限制条件 (1a) 表示每条链路最多占用一个信道,(1b) 表示每个信道最多可同时分配给一条 CE 链路和一条 D2D 对链路(称这种信道分配方式为信道复用、同用信道或共用信道,简记为同道、共道),(1c) 和 (1d) 表示只有信干噪比(SINR)高于门限值时才为该链路分配信道,(1e) 和 (1f) 分别表示 CUE 和 DUE 的实际发射功率应取不大于最大发射功率的正值。

式(1)是一个非线性非凸混合整数规划问题,其求解难度是 NP-hard 的。接下来,我们将其分割成两个子问题,并重点研究最优功率控制子问题。

## 3 最优功率控制

在联合功率和信道分配的资源分配算法研究中,为了降低求解问题的难度,已有研究<sup>[10-11]</sup>通常将最优化函数解耦为信道分配和功率控制两个子问题,本文采用同样的方法。另外,我们注意到,同道干扰是影响最优匹配结果最主要的因素,因此最优匹配的目标就是使匹配组合中通信信道的传输质量远高于干扰信道的传输质量,反映在信道参数上,即通信信道增益应当远大于干扰信道增益。本文采用“先信道分配,后功率控制”的算法设计思路,即首先假设所有链路均以固定功率发射信号,得到最优链路配对集合,然后计算最优发射功率。理论上,由于功率并非影响最优链路配对结果的主要参量,因此相较于“先功率控制,后信道分配”的算法顺序<sup>[10-11]</sup>,这样做不仅不会影响资源分配的结果,而且由于链路匹配算法将得到相对较小的最优链路配对集合,因此功率控制的复杂度将显著降低,从而使整个算法的复杂度降低。

### 3.1 可配对的必要条件与信道分配

#### 3.1.1 可配对的必要条件

由式(1)可知,只有(1c),(1d),(1e),(1f) 4 个条件同时满足时,两条链路才能作为同时共占信道的配对组合,即式(1)才有可行解。图 1 给出了其几何表示,阴影区域为可行求解域,记为  $A_{\text{admin}}$ ;直线  $l_c (P_i = \frac{g_{j,B}^k \gamma_{th}^c}{g_{i,B}^k} P_j + \frac{\sigma^2 \gamma_{th}^c}{g_{i,B}^k})$  和  $l_d (P_i =$

$$\frac{g_{j,j}^k}{g_{i,j}^k \gamma_{th}^d} P_j - \frac{\sigma^2}{g_{i,j}^k})$$

的交点  $O$  的坐标为  $(\frac{\gamma_{th}^d g_{i,B}^k \sigma^2 + \gamma_{th}^c \gamma_{th}^d g_{i,j}^k \sigma^2}{g_{i,B}^k g_{j,j}^k - \gamma_{th}^c \gamma_{th}^d g_{i,j}^k}, \frac{\gamma_{th}^c g_{j,j}^k \sigma^2 + \gamma_{th}^c \gamma_{th}^d g_{i,j}^k \sigma^2}{g_{i,B}^k g_{j,j}^k - \gamma_{th}^c \gamma_{th}^d g_{i,j}^k})$ 。

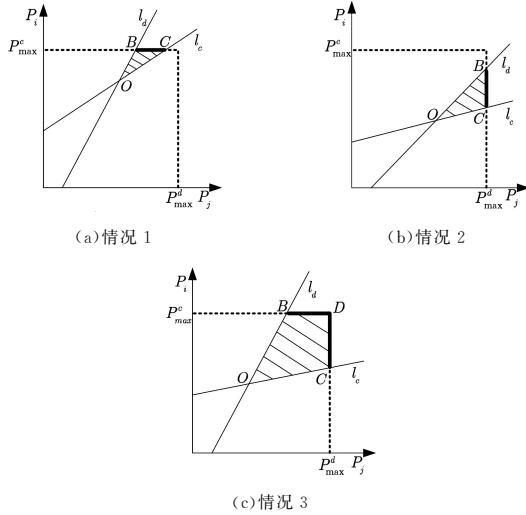


图1 最优发射功率

Fig.1 Optimal transmission power

### 3.1.2 信道分配

若 CUE 和 DUE 均以最大功率发送信号,则式(1)将转化为如下形式:

$$\max_{\rho} \sum_{k \in K} \sum_{l \in CUD} (\rho_l^k R_l^k) \quad (2)$$

s. t. (1a)(1b)(1c)(1d)

可采用经典的匈牙利算法<sup>[13]</sup>、最小加权稳定匹配算法<sup>[14]</sup>和其他信道分配算法<sup>[5-7,11-12]</sup>对式(2)进行求解。下面在假设已知最佳配对集合的基础上寻求链路的最优发射功率。

## 3.2 功率控制

本节在假设已经得到最优链路匹配集合的基础上来研究在满足同时共占信道的链路传输速率公平性的前提下的最优功率分配问题,将相继给出共道链路最优公平功率存在性定理、基于系统吞吐量最大化的最优发射功率闭式求解域,最后将得到在满足公平性的前提下基于系统吞吐量最大化的最佳发射功率的闭式求解域。

### 3.2.1 基于公平性的最优发射功率

本文所提基于公平性的功率控制是指通过调控发射功率,使共占信道的链路具有相等或相差不大的传输速率,从而延长多条链路共占信道的时间,减少基站重复分配信道的频次,降低基站的处理负担。

采用 JAI 评估法<sup>[7]</sup>衡量共道链路传输速率的公平性。设 CE 链路  $c_i$  和 D2D 对链路  $d_j$  共占信道  $K$  时实现的传输速率

分别为  $R_i^k$  和  $R_j^k$ ,则其 JAI 公平值  $F_{ij} = \frac{(R_i^k + R_j^k)^2}{2[(R_i^k)^2 + (R_j^k)^2]}$ 。公平值越接近于 1,公平性越好。

**定理 1** 设 CE 链路的发射功率为  $P_i = \bar{P}_i$ ,则一定存在 D2D 对链路发射功率  $\bar{P}_j$  ( $\bar{P}_j > 0$ ),使得  $F_{ij} = 1$ 。

**证明:**  $F_{ij} = 1$  即  $\frac{P_{\max} g_{i,B}^k}{P_j g_{j,B}^k + \sigma^2} = \frac{P_j g_{j,j}^k}{P_{\max} g_{i,j}^k + \sigma^2}$ ,可推出  $(P_{\max}^c)^2 g_{i,B}^k g_{i,j}^k + P_{\max}^c g_{i,B}^k \sigma^2 = (P_j)^2 g_{j,j}^k g_{j,B}^k + P_j g_{j,j}^k \sigma^2$ ,得  $\bar{P}_j = \frac{\sqrt{(g_{j,j}^k \sigma^2)^2 + 4g_{j,j}^k g_{j,B}^k [(P_{\max}^c)^2 g_{i,B}^k g_{i,j}^k + P_{\max}^c g_{i,B}^k \sigma^2]} - g_{j,j}^k \sigma^2}{2g_{j,j}^k g_{j,B}^k}$ ,

易得  $\bar{P}_j > 0$ 。

类似地,若 D2D 对链路的发射功率为  $P_j = \bar{P}_j$ ,则一定存在 CE 链路发射功率  $\bar{P}_i$  ( $\bar{P}_i > 0$ ),使得  $F_{ij} = 1$ 。为了叙述方便,称满足  $F_{ij} = 1$  的发射功率为最优公平解。

### 3.2.2 基于系统吞吐量最大化的最优发射功率

在满足可配对的必要条件及完成最优链路匹配的前提下,对于配对的  $c_i$  和  $d_j$ ,以系统吞吐量最大化为最优化目标的功率控制问题可以表达为:

$$(P_i^*, P_j^*) = \arg \max_{(P_i, P_j) \in A_{\max}} (R_i^k + R_j^k) \quad (3)$$

s. t. (1c)(1d)(1e)(1f)

其中,  $i \in C, j \in D$ 。

文献<sup>[15]</sup>已针对式(3)的最优解向量给出了如下结论:

**命题 1** 若最优解向量存在,则其至少有一个分量取功率最大值,即  $P_i^* = P_{\max}^c$  或  $P_j^* = P_{\max}^d$ 。

**命题 2** 当  $P_i = P_{\max}^c$  (或  $P_j = P_{\max}^d$ ) 时,  $R_i^k + R_j^k$  是关于  $P_j$  (或  $P_i$ ) 的下凸函数。

因此,式(3)的最优解只有 3 种情况,下面仅给出 3 种情况下可能为最优解的点的坐标。

1) 情况 1 如图 1(a) 所示,最优解为  $B$  与  $C$  中的一点,其中,

$$B = \left( \frac{\gamma_{th}^D (P_{\max}^c g_{i,j}^k + \sigma^2)}{g_{j,j}^k}, P_{\max}^c \right), C = \left( \frac{P_{\max}^c g_{i,B}^k / \gamma_{th}^C - \sigma^2}{g_{j,B}^k}, P_{\max}^c \right);$$

2) 情况 2 如图 1(b) 所示,最优解为  $B$  与  $C$  中的一点,其中,

$$B = \left( P_{\max}^d, \frac{P_{\max}^d g_{j,j}^k / \gamma_{th}^D - \sigma^2}{g_{j,j}^k} \right), C = \left( P_{\max}^d, \frac{\gamma_{th}^C (P_{\max}^d g_{j,B}^k + \sigma^2)}{g_{j,B}^k} \right);$$

3) 情况 3 如图 1(c) 所示,最优解为  $B, C, D$  中的一点,其中,

$$B = \left( \frac{\gamma_{th}^D (P_{\max}^c g_{j,j}^k + \sigma^2)}{g_{j,j}^k}, P_{\max}^c \right), C = \left( P_{\max}^d, \frac{\gamma_{th}^C (P_{\max}^d g_{j,B}^k + \sigma^2)}{g_{j,B}^k} \right), D = (P_{\max}^d, P_{\max}^c)。$$

### 3.2.3 满足公平性的前提下基于系统吞吐量最大化的最优发射功率

在保证共道链路之间传输速率公平性的基础上,以系统吞吐量最大化为最优化目标的功率控制问题可以表达为:

$$(P_i^*, P_j^*) = \arg \max_{(P_i, P_j) \in A_{\max}} (R_i^k + R_j^k) \quad (4)$$

s. t. (1c)(1d)(1e)(1f)

$$(P_i^*, P_j^*) = \arg \max_{(P_i, P_j) \in A_{\max}} F_{ij} \quad (5)$$

其中,  $i \in C, j \in D$ ,式(5)是式(4)的一个约束条件。

这其实是一个多目标最优化问题。由命题 1 知,  $(P_i^*, P_j^*) \in \{(P_i^*, P_j), (P_i, P_j^*)\}$ ,且定理 1 已经表明,对于共占信道的两条链路,若其中一条链路的发射功率固定,则另一条链路存在大于 0 的发射功率,使两条链路的公平值为 0。因此,式(4)的最优解可按如下方式确定:

在情况 1 (见图 1(a)) 中,最优公平解  $\bar{P}_j = \frac{\sqrt{(g_{j,j}^k \sigma^2)^2 + 4g_{j,j}^k g_{j,B}^k [(P_{\max}^c)^2 g_{i,B}^k g_{i,j}^k + P_{\max}^c g_{i,B}^k \sigma^2]} - g_{j,j}^k \sigma^2}{2g_{j,j}^k g_{j,B}^k}$ ,

若  $\bar{P}_j$  在可行求解域中,则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) = (P_{\max}^c, \bar{P}_j)$ ,若  $\bar{P}_j$  不在可行求解域中,则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) = \arg \max_{(P_i, P_j) \in \{B, C\}} (R_i^k + R_j^k)$ ;

$$\bar{P}_i = \frac{\sqrt{(g_{i,B}^k \sigma^2)^2 + 4g_{i,B}^k g_{i,j}^k ((P_{\max}^d)^2 g_{j,B}^k g_{j,B}^k + P_{\max}^d g_{j,j}^k \sigma^2) - g_{i,B}^k \sigma^2}}{2g_{i,B}^k g_{i,j}^k}$$

若  $\bar{P}_i$  在可行求解域中, 则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) = (\bar{P}_i, P_{\max}^d)$ ,

若  $\bar{P}_i$  不在可行求解域中, 则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) =$

$$\arg \max_{(P_i, P_j) \in (B,C)} (R_i^k + R_j^k).$$

在情况 3(见图 1(c))中, 最优公平解为  $\bar{P}_i$  或  $\bar{P}_j$ 。若只有  $\bar{P}_i$  在可行求解域中, 则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) = (\bar{P}_i, P_{\max}^d)$ ;

若只有  $\bar{P}_j$  在可行求解域中, 则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) = (P_{\max}^c, \bar{P}_j)$ ;

若  $\bar{P}_i$  和  $\bar{P}_j$  均在可行求解域中, 则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) =$

$$\arg \max_{(P_i, P_j) \in (\bar{P}_i, P_{\max}^d), (P_{\max}^c, \bar{P}_j)} (R_i^k + R_j^k);$$

若  $\bar{P}_i$  和  $\bar{P}_j$  均不在可行求解域中, 则式(4)的最优解  $(P_i^*, P_j^*) =$

$$\arg \max_{(P_i, P_j) \in (B,C,D)} (R_i^k + R_j^k).$$

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 场景设置

系统带宽为 10 MHz, 中心频率为 2.3 GHz; 上行频率资源被均分为  $K(K=20)$  个信道; 蜂窝用户数量与信道数量相等; 蜂窝网用户和 D2D 用户在小区中均匀分布; D2D 接收用户均匀分布于发射用户周围 50m 的距离内; 所有链路互相独立, 且服从瑞利平坦衰落。基于 MATLAB 平台进行仿真实验的具体参数如表 1 所列。

表 1 仿真参数

参数	取值
小区半径/m	500
D2D 对数量	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80
SINR 门限值/dB	10
CUE, DUE 发射功率/dBm	23
噪声/dBm	-114
路径损耗	Um <sup>[16]</sup>
阴影衰落	

### 4.2 对比实验算法设计

仿真实验采用文献[6]的信道分配算法(限于篇幅, 本文仅以此算法为例, 实际可扩展至其他信道分配算法<sup>[5-7, 11-12]</sup>), 并结合文献[15]和本文的功率分配结论, 分别设计了以系统吞吐量最大化为目标的“先功率控制, 后信道分配”(PCfirst)、“先信道分配, 后功率控制”(PClast)以及本文的在满足公平性的前提下联合信道分配与功率控制(fairPC)共 3 种联合资源分配策略的性能。它们均包括接入控制、信道分配以及功率控制 3 个阶段, 其中, 接入控制阶段通过可配对的必要条件初步选择复用信道的链路组合, 信道分配阶段采用文献[6]的算法。3 种算法的不同点是: 1) “PCfirst”与“PClast”采用 3.2.2 节的功率控制策略, 而“fairPC”采用 3.2.3 节的功率控制策略; 2) “PCfirst”算法的第二个阶段为功率控制阶段, 第三个阶段为信道分配阶段, 而“PClast”与“fairPC”恰好相反。之所以设计上述 3 种算法, 是出于如下考虑: 在遵循对比实验单一变量原则的基础上, 1) 通过“PCfirst”与“PClast”的对比, 验证信道分配与功率控制在算法中的先后顺序对系统性能的影响;

2) 通过“PClast”与“fairPC”的对比, 验证 3.2.3 节所得功率控制结论的正确性和有效性。算法 1 给出了“fairPC”的算法伪代码, “PCfirst”和“PClast”的算法步骤在上述说明的基础上容易得出, 如算法 1 所示。

#### 算法 1 “fairPC”算法

input: C, D, K,  $P_{\max}^c, P_{\max}^d, P, M$

Stage I: Admission Control

for  $c_i \in C, d_j \in D$ ;

if  $(c_i, d_j) \in A_{\text{admin}}$ , then  $M \leftarrow (c_i, d_j) \cup M$ .

Stage II: Channel Allocation

Proposing that optimal channel-reuse-pair results, which can be denoted as  $\text{opt}_k \in \text{OPT}$  where  $\text{opt}_k = (c_i, d_j)$ , can be got by algorithm in [6].

Stage III: Power Control

for  $\text{opt}_k \in \text{OPT}$

if CASE 1 is satisfied;

if  $\bar{P}_j \in A_{\text{admin}}$ , then  $(P_i^*, P_j^*) = (P_{\max}^c, \bar{P}_j)$ ;

else  $(P_i^*, P_j^*) = \arg \max_{(P_i, P_j) \in (B,C)} (R_i^k + R_j^k)$ ;

elseif CASE 2 is satisfied;

if  $\bar{P}_i \in A_{\text{admin}}$ , then  $(P_i^*, P_j^*) = (\bar{P}_i, P_{\max}^d)$ ;

else  $(P_i^*, P_j^*) = \arg \max_{(P_i, P_j) \in (B,C)} (R_i^k + R_j^k)$ ;

else

if  $\bar{P}_i \in A_{\text{admin}}$  and  $\bar{P}_j \notin A_{\text{admin}}$ , then  $(P_i^*, P_j^*) = (\bar{P}_i, P_{\max}^d)$ ;

elseif  $\bar{P}_j \in A_{\text{admin}}$  and  $\bar{P}_i \notin A_{\text{admin}}$ , then  $(P_i^*, P_j^*) = (P_{\max}^c, \bar{P}_j)$ ;

elseif  $\bar{P}_i \in A_{\text{admin}}$  and  $\bar{P}_j \in A_{\text{admin}}$ , then  $(P_i^*, P_j^*) =$

$\arg \max_{(P_i, P_j) \in (\bar{P}_i, P_{\max}^d), (P_{\max}^c, \bar{P}_j)} (R_i^k + R_j^k)$ ;

else  $(P_i^*, P_j^*) = \arg \max_{(P_i, P_j) \in (B,C,D)} (R_i^k + R_j^k)$ ;

$P \leftarrow (P_i^*, P_j^*) \cup P$ , where P is optimal transmitting power matrix.

为了保证实验的完整性, 还对比了文献[6]的算法(withoutPC), 该算法仅包括信道分配阶段。

### 4.3 仿真结果与分析

“PCfirst”“PClast”“fairPC”与“withoutPC”4 种资源分配策略的公平性、平均信道频谱效率、系统容量(接入复用信道的通信链路量)等性能的仿真结果如图 2 所示。其中, 平均信道公平值用  $\bar{F} = \frac{1}{|\text{OPT}|} \sum_{(i,j) \in \text{OPT}} F_{ij}$  计算, OPT 表示最优链路匹配集合; 公平信道占比是  $F_{ij} = 1$  的信道与复用信道总量的比值; 图 2(b)中, “other”表示除“fairPC”外的其他 3 种资源分配策略。图中的每个数据都是经过 500 次重复实验得到的平均统计结果。

从图 2(a)和图 2(b)中可以看出, “fairPC”的平均信道公平值和公平信道占比普遍高于其他 3 种策略, 这一结果验证了本文提出的在满足配对链路间公平性前提下进行功率控制从而使系统吞吐量最大化的资源分配策略是有效的, 即在 DUCN 系统中引入基于公平性原理的功率控制后, 将有效提升系统的公平性性能, 这一性能将降低 DUCN 系统重复进行资源调度的频次, 提高网络的运行能力; 同时也验证了 3.2.1 节与 3.2.3 节得出的基于公平性的功率控制结论的正确性。从图 2(c)中可以看出, “fairPC”实现的平均复用信道频谱效

率普遍略低于“withoutPC”和“PClast” $1.06 \text{ b/s/Hz}$  (1.6%), 这说明公平性的提升是以牺牲微量的系统吞吐量为代价的。

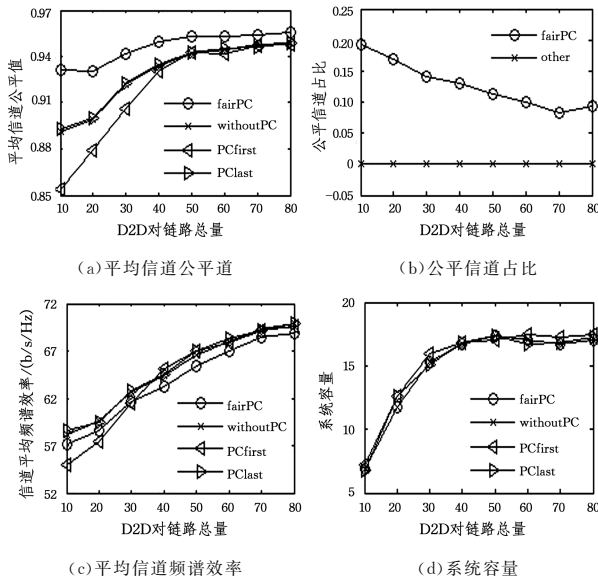


图2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

就功率控制与信道分配在算法中的先后顺序而言,从图2(a)中可以看出,当系统中D2D对链路的数量大于40时,“PCfirst”与“PClast”实现的平均信道公平值和平均信道频谱效率几乎相等;当系统中D2D对链路的数量小于40时,“PCfirst”较“PClast”略低。图2(c)中具有类似的现象,但最多相差 $3.69 \text{ b/s/Hz}$ 。另外,我们从仿真数据中观察到了图2没有反映到的现象,即在采用4种功率控制策略的任意一种策略得到的配对结果中,绝大多数的配对组合都采用最大发射功率。这些结果从侧面证明了我们的推想,即最优匹配筛选出的几乎都是相互干扰较小的组合,而在进行算法设计时,信道分配与功率控制的先后顺序几乎不影响最优链路匹配的结果。根据这一结论,在设计资源分配算法时,可以采用“先信道分配,后功率控制”的算法顺序,从而降低算法的复杂度,且不会显著影响系统的性能。例如,在本文中,“withoutPC”的算法复杂度为 $O(C^2D)$ <sup>[6]</sup>,且容易计算出“PCfirst”的算法复杂度为 $O(C^2D) + O(CD)$ ，“PClast”和“fairPC”的算法复杂度均为 $O(C^2D) + O(K)$ 。当小区中终端(UEs)的数量远大于可分配的信道量时,尽管 $O(CD)$ 和 $O(K)$ 相对于 $O(C^2D)$ 是微量的,但 $O(K)$ 相对于 $O(CD)$ 带来的复杂度下降仍是相当可观的,尤其是采用比文献[6]算法复杂度更低的信道分配算法时,整体算法复杂度将下降得更加显著。

从图2(d)可以看出,若忽略实验的随机性,4种策略实现的系统容量的性能几乎完全相同。

从图2(c)和2(d)中也可以观察到,“withoutPC”算法与其他策略的性能差距并不悬殊,例如,与“PCfirst”相比,系统的信道平均频谱效率的最大差值仅为 $0.72 \text{ b/s/Hz}$  (1.1%),容量的最大差值仅为 $0.91$  (7.2%)。因此,在信道分配算法的基础上引入功率控制策略并不能带来系统吞吐量及容量性能的显著提升。

**结束语** 本文在采用“先信道分配,后功率控制”的联合

资源分配策略并且假设已得到最优链路匹配集合的基础上,得到了在满足共道链路间传输速率公平性的前提下以系统吞吐量最大化为目标的用户设备最优发射功率的闭式求解域;并通过仿真证明了所得传输功率的有效性。该结论可降低密集用户蜂窝网重复分配资源的频次,提高网络运行能力,在理论和实践中具有指导意义。然而,本文仅考虑了共道链路间传输速率的绝对公平,当最优公平解不在发射功率的可行求解域时,如何在尽量满足共道链路公平性的同时不造成系统吞吐量性能的严重下降还有待进一步研究。

## 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] QIAN Z H, WANG X. Reviews of D2D technology for 5G communication networks [J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 1-14. (in Chinese)
- [3] 钱志鸿, 王雪. 面向5G通信网的D2D技术综述 [J]. 通信学报, 2016, 37(7): 1-14.
- [3] ZHAO J, LIU Y, CHAI K K, et al. Many-to-many matching with externalities for device-to-device communications [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(1): 138-141.
- [4] MEMMI A, REZKI Z, ALOUINI M S. Power control for D2D underlay cellular networks with channel uncertainty [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(2): 1330-1343.
- [5] ASHERALIEVA A, MIYANAGA Y. QoS-oriented mode, spectrum, and power allocation for D2D communication underlying LTE-A network [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 9787-9800.
- [6] ZHANG H, WANG T, SONG L, et al. Graph-based resource allocation for D2D communications underlying cellular networks [C] // IEEE/CIC International Conference on Communications in China - Workshops (CIC/ICCC). Xi'an, China, 2013: 187-192.
- [7] ISLAM M T, TAHA A E M, AKL S, et al. A two-phase auction-based fair resource allocation for underlying D2D communications [C] // 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, 2016: 1-6.
- [8] LEE J, GU J, BAE S J, et al. A resource allocation scheme for improving user fairness in device-to-device communication based on cellular networks [C] // International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication. ACM, 2013: 1-6.
- [9] YU C H, TIRKKONEN O, DOPPLER K, et al. Power optimization of device-to-device communication underlying cellular communication [C] // IEEE International Conference on Communications. Dresden, 2009: 3696-3700.
- [10] 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.
- [11] JIANG Y, LIU Q, ZHENG F, et al. Energy-efficient joint re-

source allocation and power control for D2D communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6119-6127.

[12] HOANG T D, LE L B, LE-NGOC T. Resource allocation for D2D communication underlaid cellular networks using graph-based approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(10): 7099-7113.

[13] 卢开澄, 卢华明. 图论及其应用(第 2 版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

[14] IRVING R W, LEATHER P, GUSFIELD D. An efficient algorithm for the “optimal” stable marriage[J]. Journal of the Acm, 1987, 34(3): 532-543.

[15] GJENDEMSJO A, GESBERT D, OIEN G, et al. Optimal power allocation and scheduling for two-cell capacity maximization[C]// IEEE International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks. 2016: 1-6.

[16] ITU-R. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced; ITU-R M, 2135[R]. 2008.

(上接第 72 页)

调整活跃节点的数量; 当新能源供应充足时, 基于新能源的供应调整活跃节点的数量。同时, 使用虚拟合并技术实现细粒度的能耗控制策略, 并设计和实现了离线负载的优化调度算法。测试结果表明, 本文提出的基于新能源驱动的存储系统能耗优化方案可以最大化新能源的利用率和存储系统的能耗效率, 同时保证存储系统的性能下降幅度不超过 9.8%。优化方案可以使新能源的利用率达到 95%, 比传统的能源感知型存储系统节约 36% 的能源消耗。

### 参 考 文 献

[1] KOOMEY J. Growth in Data Center Electricity Use 2005 to 2010[R]. Analytics Press, 2005.

[2] DENG W, LIU F M, JIN H, et al. Leveraging Renewable Energy in Cloud Computing Datacenters: State of the Art and Future Research[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(3): 582-598. (in Chinese)

邓维, 刘方明, 金海, 等. 云计算数据中心的新能源应用: 研究现状与趋势[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 582-598.

[3] MANKOFF J, KRAVETS R, BLEVIS E. Some Computer Science Issues in Creating a Sustainable World[J]. COMPUTER-LOS ALAMITOS, 2008, 41(8): 102-105.

[4] SHIBATA T, KURACHI Y. Big data analysis solutions for driving innovation in on-site decision making[J]. Fujitsu Science Technology Journal, 2015, 51(2): 33-41.

[5] LV T W. The depth analysis and prospect for depth analysis and prospect[J]. The World of Power Supply, 2012(12): 6-8. (in Chinese)

吕天文. 中国绿色数据中心深度解析与展望[J]. 电源世界, 2012(12): 6-8.

[6] QU X, WAN J, WANG J, et al. GreenMatch: Renewable-Aware Workload Scheduling for Massive Storage Systems[C]// Parallel and Distributed Processing Symposium, 2016 IEEE International. IEEE, 2016: 403-412.

[7] YUAN J L, ZHONG L, YANG G, et al. Towards Filling and Classification of Incomplete Energy Big Data for Green Data Centers [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(12): 2499-2516. (in Chinese)

袁景凌, 钟路, 杨光, 等. 绿色数据中心不完备能耗大数据填补及分类算法研究[J]. 计算机学报, 2015, 38(12): 2499-2516.

[8] KRIOUKOV A, ALSPAUGH S, MOHAN P, et al. Design and evaluation of an energy agile computing cluster: Tech. Rep. UCB/EECS-2012-13[R]. EECS Department, University of Cali-

fornia, Berkeley, 2012.

[9] ZHOU X, CAI H, CAO Q, et al. Greengear: leveraging and managing server heterogeneity for improving energy efficiency in green data centers[C]// Proceedings of the 2016 International Conference on Supercomputing. ACM, 2016: 12.

[10] LI C, QOUNEH A, LI T. iSwitch: coordinating and optimizing renewable energy powered server clusters[C]// 2012 39th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA). IEEE, 2012: 512-523.

[11] AHMAD F, VIJAYKUMAR T N. Joint optimization of idle and cooling power in data centers while maintaining response time [J]. Acm Sigarch Computer Architecture News, 2010, 45(3): 243-256.

[12] MOORE J, CHASE J S, RANGANATHAN P. Weatherman: Automated, Online and Predictive Thermal Mapping and Management for Data Centers[C]// IEEE, 2006.

[13] MOORE J, CHASE J, RANGANATHAN P, et al. Making Scheduling “Cool”: Temperature-Aware Workload Placement in Data Centers[C]// Conference on Usenix Technical Conference. 2005: 61-75.

[14] ÍNIGO G, LE K, HAQUE M E, et al. GreenSlot: scheduling energy consumption in green datacenters[C]// International Conference for High PERFORMANCE Computing, Networking, Storage and Analysis. IEEE Computer Society, 2011: 1-11.

[15] LE K, NGUYEN T D, GUITART J, et al. GreenHadoop: leveraging green energy in data-processing frameworks[C]// ACM European Conference on Computer Systems. ACM, 2012: 57-70.

[16] THERESKA E, DONNELLY A, NARAYANAN D. Sierra: practical power-proportionality for data center storage[C]// European Conference on Computer Systems, Proceedings of the Sixth European Conference on Computer Systems (EUROSYS 2011). Alzburg, Austria-April. DBLP, 2011: 169-182.

[17] AMUR H, CIPAR J, GUPTA V, et al. Robust and flexible power-proportional storage[C]// ACM Symposium on Cloud Computing. ACM, 2010: 217-228.

[18] LEE H J, LEE K H, NOH S H. Augmenting RAID with an SSD for energy relief[C]// Proceedings of the 2008 conference on Power aware computing and systems. USENIX Association, 2008: 12.

[19] PRITCHETT T, THOTTETHODI M. SieveStore: a highly-selective, ensemble-level disk cache for cost-performance[C]// ACM SIGARCH Computer Architecture News. ACM, 2010: 163-174.