

## 认知网络中 D2D 全双工通信的速率最大化功率分配算法

谢显中\* 田瑜 姚鑫凌 雷维嘉  
(重庆邮电大学宽带接入网络研究所 重庆 400065)

**摘要:** 针对认知 D2D(Device-to-Device)全双工通信网络中, D2D 用户共享蜂窝用户上行链路的频谱资源而带来的复杂干扰问题, 该文给出了系统传输速率最大化的功率分配方案。该方案首先给出了认知 D2D 全双工通信模型, 并分析了上行链路中基站和 D2D 用户所受到的干扰以及对应的链路传输速率。其次, 提出了一种基于认知无线电系统中最大化 D2D 用户传输速率的功率分配算法。仿真结果表明, 所提算法提高了认知 D2D 全双工通信网络中上行链路的频谱效率和系统整体传输速率。

**关键词:** D2D 通信; 认知无线电; 全双工通信; 功率分配; 传输速率最大化

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)04-1002-05

DOI: 10.11999/JEIT160593

## Power Allocation Algorithm of Maximizing Rate for D2D Full-duplex Communication in Cognitive Networks

XIE Xianzhong TIAN Yu YAO Xinling LEI Weijia

(Institute of Broadband Access Network, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In the cognitive D2D (Device-to-Device) full-duplex communication network, there is the interference problem when D2D Users (DUEs) share the same spectrum with Cellular Users (CUEs) in the uplink, a power allocation scheme is proposed to maximize transmission rate. In the scheme, firstly, the cognitive D2D full-duplex communication model is described. Meanwhile, the uplink interference and the corresponding transmission rates at the base station and DUEs are analyzed. Secondly, a power allocation algorithm is proposed to maximize the DUEs' transmission rate in cognitive radio system. Simulation results show that the proposed algorithm can improve the spectrum efficiency and the overall transmission rate of the system in the uplink of the cognitive D2D full-duplex communication network.

**Key words:** Device-to-Device (D2D) communication; Cognitive radio; Full-duplex communication; Resource allocation; Maximizing transmission rate

### 1 引言

随着移动通信网络朝着更高的速率、更大的系统容量发展, 移动数据业务的本地化特征越来越明显, 传统的以基站为中心的通信模式往往缺乏足够的灵活性, 难以完全满足不同业务在实时性和可靠性方面的独特需求<sup>[1,2]</sup>。设备间(Device-to-Device, D2D)通信就是在这一背景下产生的<sup>[3]</sup>, 相比于

WIFI-Direct, Bluetooth 等使用未授权频谱的短距离通信技术, 本文提及的 D2D 通信是指复用蜂窝移动通信授权频谱的带内 D2D 通信, D2D 用户(DUE)间不需要通过基站而直接建立链路通信<sup>[4]</sup>。由于 DUE 复用普通蜂窝用户(CUE)的通信频谱能够提高频谱效率, D2D 通信往往拥有较高的数据速率和较低的能量消耗, 并且节约了无线频谱资源。

D2D 通信在一定程度上能解决无线频谱的匮乏, 但其仍需在基站的控制下复用小区资源, 同时会给系统带来干扰。D2D 通信最主要的挑战是如何恰当地分配可复用的信道、终端传输功率以及消除 D2D 链路和蜂窝链路的同信道干扰。近年来, 很多学者研究提出了关于 D2D 通信中的功率分配和干扰管理方案, 如文献[5,6], 具体总结见文献[7,8]。但是, 这些策略仅考虑了 D2D 通信中的复用资源模式, 缺少对 D2D 通信中的模式选择、频谱资源以及

收稿日期: 2016-06-03; 改回日期: 2016-11-30; 网络出版: 2017-02-24

\*通信作者: 谢显中 xiexzh@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61271259, 61471076), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ130536), 长江学者和创新团队发展计划(IRT1299), 重庆市科委重点实验室专项经费(CSTC)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61271259, 61471076), The Research Project of Chongqing Education Commission (KJ130536), The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT1299), The Special Fund of Chongqing Key Laboratory (CSTC)

信道资源的整合分析,同时也未考虑将D2D通信与认知无线电(Cognitive Radio, CR)结合的问题。

将CR技术与D2D通信结合形成认知D2D通信,可以帮助基站卸载流量,改善D2D通信的数据包延迟,提高系统的整体性能。在认知网络中如何进行D2D通信的功率和资源分配是一个有意义的问题。近期,文献[9-12]做了初步探讨。其中,文献[9-11]都提到将认知无线电系统与D2D蜂窝网络结合,但是均未涉及全双工D2D通信。在文献[12]中,对一般蜂窝网络中D2D通信链路采用全双工传输时功率分配进行研究,但未研究认知网络中D2D全双工传输时复杂的功率分配和干扰问题。基于上述研究存在的问题,本文主要讨论认知D2D全双工通信网络中如何高效地分配功率最终达到最大化系统总传输速率的目的。

## 2 系统模型及同信道干扰分析

### 2.1 系统模型

如图1所示,本文考虑单个OFDM蜂窝小区,存在1个基站、2个CUE(CUE<sub>1</sub>, CUE<sub>2</sub>)以及1对D2D(DUE<sub>1</sub>, DUE<sub>2</sub>)的场景。由于蜂窝用户们都竭力争取使用频谱,所以CUE<sub>1</sub>, CUE<sub>2</sub>到基站的两条上行链路分别会产生同信道干扰I<sub>BS</sub><sup>c1</sup>, I<sub>BS</sub><sup>c2</sup>。

以DUE<sub>1</sub>与DUE<sub>2</sub>组成的D2D对为例分析,由于该D2D对距离基站较远,当DUE<sub>1</sub>感知复用uplink<sub>1</sub>时与CUE<sub>1</sub>使用相同的频谱资源,使CUE<sub>1</sub>到基站的通信链路uplink<sub>1</sub>受到同信道干扰。同理,DUE<sub>1</sub>对uplink<sub>2</sub>也有同信道干扰。由于D2D对使用全双工模式通信,DUE<sub>2</sub>也可以同时复用CUE<sub>1</sub>, CUE<sub>2</sub>的频谱资源,对uplink<sub>1</sub>, uplink<sub>2</sub>也有同信道干扰。那么基站受到由DUE<sub>1</sub>与DUE<sub>2</sub>组成的D2D

对产生的同信道干扰即为I<sub>BS</sub><sup>d</sup>。而且,全双工模式下DUE<sub>1</sub>自身也作为接收端也会受到CUE<sub>1</sub>和CUE<sub>2</sub>的干扰I<sub>d1</sub><sup>c1</sup>, I<sub>d1</sub><sup>c2</sup>以及自干扰γ<sub>1</sub>。同理可得DUE<sub>2</sub>受到CUE<sub>1</sub>和CUE<sub>2</sub>的干扰I<sub>d2</sub><sup>c1</sup>, I<sub>d2</sub><sup>c2</sup>以及自干扰γ<sub>2</sub>。小区内其他用户通信的过程中也会对uplink<sub>1</sub>, uplink<sub>2</sub>产生同信道干扰,由于干扰类型相同,本文在这里就不再一一讨论。

### 2.2 同信道干扰分析

根据图1模型,本文路径损耗模型由公式 $PL = K_0 d^{-\nu}$ 给出,其中, $K_0 = [c/(4\pi f_c d_{0c})]^2$ ;  $d_{0c}$ 是计算室外路径损耗时的参考距离,  $c$ 为光速,  $\nu$ 是路径损耗指数。本文所用的平坦衰落模型为对数正态阴影模型参数 $\Theta_C$ , 即 $10 \lg \Theta_C \sim N(0, \sigma_{dB}^2)$ ,  $g(L) = K_0 (d_{0c}/L)^\nu \Theta_C$ ,  $g(L)$ 为链路增益,  $L$ 是传输距离。此时,同信道干扰包括基站处受到的干扰I<sub>BS</sub>, DUE<sub>1</sub>所受到的干扰I<sub>DUE1</sub>, DUE<sub>2</sub>所受到的干扰I<sub>DUE2</sub>等,这里具体分析如下:

(1)在基站处受到的干扰I<sub>BS</sub>:

$$I_{BS} = I_{BS}^{c1} + I_{BS}^{c2} + I_{BS}^d = P_t^{c1} \cdot g(d_{c1}) + P_t^{c2} \cdot g(d_{c2}) + I_{BS}^d \quad (1)$$

$$I_{BS}^d = w_1 P_t^{d1} \cdot g(d_{d1}^{BS}) + (1 - w_1) P_t^{d1} \cdot g(d_{d1}^{BS}) + w_2 P_t^{d2} \cdot g(d_{d2}^{BS}) + (1 - w_2) P_t^{d2} \cdot g(d_{d2}^{BS}) \quad (2)$$

其中,  $P_t^{c1}$ ,  $P_t^{c2}$ 分别是CUE<sub>1</sub>和CUE<sub>2</sub>的发送功率;  $d_{c1}$ ,  $d_{c2}$ 分别是CUE<sub>1</sub>和CUE<sub>2</sub>到基站的距离;  $P_t^{d1}$ ,  $P_t^{d2}$ 分别是DUE<sub>1</sub>和DUE<sub>2</sub>的发送功率;  $d_{d1}^{BS}$ ,  $d_{d2}^{BS}$ 分别是DUE<sub>1</sub>和DUE<sub>2</sub>到基站的距离;  $w_1$ ,  $w_2$ 分别是DUE<sub>1</sub>和DUE<sub>2</sub>复用uplink<sub>1</sub>, uplink<sub>2</sub>时的发送功率权重。

(2)DUE<sub>1</sub>所受到的干扰I<sub>DUE1</sub>:

$$I_{DUE1} = I_{d1}^{c1} + I_{d1}^{c2} + \gamma_1 = P_t^{c1} \cdot g(d_{d1}^{c1}) + P_t^{c2} \cdot g(d_{d1}^{c2}) + \gamma_1 \quad (3)$$

这里,  $d_{d1}^{c1}$ ,  $d_{d1}^{c2}$ 分别是CUE<sub>1</sub>和CUE<sub>2</sub>到DUE<sub>1</sub>的距离;  $\gamma_1 = \eta_1 \cdot P_t^{d1}$ 是DUE<sub>1</sub>的自干扰,其中 $\eta_1$ 表示自干扰消除系数。一般地,  $0 \leq \eta_2 \leq 1$ ,当 $\eta_1=1$ 时,自干扰消除技术无效;当 $\eta_1=0$ 时,无自干扰残留。

(3)DUE<sub>2</sub>所受到的干扰I<sub>DUE2</sub>:

$$I_{DUE2} = I_{d2}^{c1} + I_{d2}^{c2} + \gamma_2 = P_t^{c1} \cdot g(d_{d2}^{c1}) + P_t^{c2} \cdot g(d_{d2}^{c2}) + \gamma_2 \quad (4)$$

这里,  $d_{d2}^{c1}$ ,  $d_{d2}^{c2}$ 分别是CUE<sub>1</sub>和CUE<sub>2</sub>到DUE<sub>2</sub>的距离;  $\gamma_2 = \eta_2 \cdot P_t^{d2}$ 是DUE<sub>2</sub>的自干扰,本文D2D终端采用相同干扰消除技术,即 $\eta_2 = \eta_1$ 。

由此,当DUE<sub>1</sub>与DUE<sub>2</sub>相距 $d_p$ ,我们可以推导出DUE<sub>1</sub>到DUE<sub>2</sub>信道的传输速率 $R_{d1}^{d2}$ 和DUE<sub>2</sub>到DUE<sub>1</sub>信道的传输速率 $R_{d2}^{d1}$ 分别为

$$\begin{aligned} R_{D_{1,2}} &= B \log_2 \left( 1 + \frac{P_t^{d1} \cdot g(d_p)}{I_{d2}^{c1} + I_{d2}^{c2} + \gamma_2 + N_0} \right) \\ R_{D_{2,1}} &= B \log_2 \left( 1 + \frac{P_t^{d2} \cdot g(d_p)}{I_{d1}^{c1} + I_{d1}^{c2} + \gamma_1 + N_0} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

于是,全双工D2D链路的和速率 $R_D$ 为

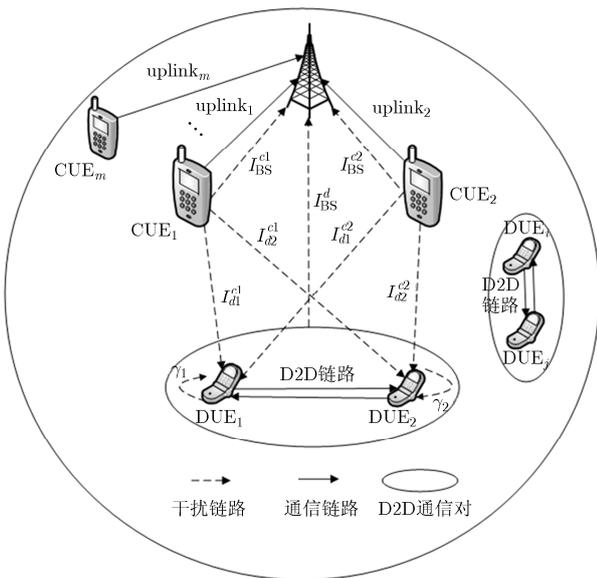


图1 在认知无线电系统中D2D通信的网络模型

$$R_D = R_{D_{1,2}} + R_{D_{2,1}} \quad (6)$$

同理, 易知 CUE<sub>m</sub> 用户上行链路的传输速率  $R_{C_m}$ 。从而可以得到整个通信系统的总速率  $R_{\text{sum}}$  为

$$R_{\text{sum}} = \sum_m R_{C_m} + \sum_{i,j(i \neq j)} R_{D_{i,j}} \quad (7)$$

### 3 最大化系统传输速率功率分配算法

#### 3.1 传输速率最大化与凸性转化

本文首先考虑总功率约束, 即要保证 D2D 对复用 CUE<sub>m</sub> 链路时的总发射功率在约束门限( $P_{\text{th}}$ )内; 其次在认知网络 D2D 通信中要保证 CUE<sub>m</sub> 的通信质量, 则蜂窝链路受到 D2D 对的干扰一定要在阈值  $\gamma_c$  内。于是将本文的最优化问题记为

$$\mathbf{P}_1: \arg \max_{(P_t^{d1}, P_t^{d2})} \{R_{\text{sum}} = R_{C_1} + R_{C_2} + R_{D_{1,2}} + R_{D_{2,1}}\} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} P_t^{d1} \geq 0, P_t^{d2} \geq 0 \\ (P_t^{d1} + P_t^{d2}) \leq P_{\text{th}} \\ P_t^{d1} \cdot g(d_{d1}^{\text{BS}}) + P_t^{d2} \cdot g(d_{d2}^{\text{BS}}) \leq \gamma_c \end{cases} \quad (9)$$

接下来要证明该优化问题是否为一个凸优化问题。为此, 将总速率  $R_{\text{sum}}$  变形为

$$R_{\text{sum}} = B \left[ \log_2(1 + \Phi_{c1} \cdot P_t^{c1}) + \log_2(1 + \Phi_{c2} \cdot P_t^{c2}) + \log_2(1 + P_t^{d1} \cdot \Psi_{d1}) + \log_2(1 + P_t^{d2} \cdot \Psi_{d2}) \right] \quad (10)$$

$$\text{令 } \Phi_{c1} = \frac{g(d_{c1})}{I_{\text{BS}}^d + I_{\text{BS}}^{c2} + N_0}, \Phi_{c2} = \frac{g(d_{c2})}{I_{\text{BS}}^d + I_{\text{BS}}^{c1} + N_0}, \text{ 令}$$

$$\Psi_{d1} = \frac{g(d_p)}{I_{d1}^{c1} + I_{d1}^{c2} + \gamma_1 + N_0}, \Psi_{d2} = \frac{g(d_p)}{I_{d2}^{c1} + I_{d2}^{c2} + \gamma_2 + N_0}.$$

式(10)具有  $\log_2(1+z)$  ( $z \geq 0$ ) 函数形式, 我们可以通过适当的松弛和变形, 将该类型的优化问题转化为严格的凸优化问题求解。我们对  $\log_2(1+z)$  在  $z \geq 0$  的情况下找出该式的一个紧的松弛下边界:

$$\alpha \log_2 z + \beta \quad (11)$$

其中  $\alpha, \beta$  是通过式(12)选出来的下边界系数:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= z_0 / (1 + z_0) \\ \beta &= \log_2(1 + z_0) - \frac{z_0}{1 + z_0} \log_2 z_0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中  $z_0 \in [0, \infty)$  是一个正实数值。

本文考虑 D2D 链路的传输速率的最优化, 再求得整个系统的最优化方案。

根据式(11), 我们先对  $R_D$  做如式(13)松弛:

$$R_D \approx \frac{B}{\lg 2} \left[ \alpha_1 \lg(P_t^{d1}) + \alpha_1 \lg(\theta) - \alpha_1 \lg(1 + \mu P_t^{d2}) + \beta_1 \lg 2 + \alpha_2 \lg(P_t^{d2}) + \alpha_2 \lg(\theta) - \alpha_2 \lg(1 + \mu P_t^{d1}) + \beta_2 \lg 2 \right] \quad (13)$$

在式(13)中,  $\alpha_1, \beta_1$  是对应  $R_{D_{1,2}}$  的下边界系数;  $\alpha_2,$

$\beta_2$  是对应  $R_{D_{2,1}}$  的下边界系数;  $\mu = \frac{\eta_0}{\theta \cdot g(d_p)}$ ;

$$\theta = \frac{g(d_p)}{P_t^{c1} \cdot g(d_{d2}^{c1}) + P_t^{c2} \cdot g(d_{d2}^{c2}) + N_0} \approx \frac{g(d_p)}{P_t^{c1} \cdot g(d_{d1}^{c1}) + P_t^{c2} \cdot g(d_{d1}^{c2}) + N_0}$$

将式(13)转换成指数对数和的形式, 记作  $\tilde{R}_D$ :

$$\tilde{R}_D \approx \frac{B}{\lg 2} \left[ \alpha_1 \lg(\tilde{P}_t^{d1}) + \alpha_1 \lg(\theta) - \alpha_1 \lg(1 + \mu \cdot e^{\tilde{P}_t^{d2}}) + \beta_1 \lg 2 + \alpha_2 \lg(\tilde{P}_t^{d2}) + \alpha_2 \lg(\theta) - \alpha_2 \lg(1 + \mu \cdot e^{\tilde{P}_t^{d1}}) + \beta_2 \lg 2 \right] \quad (14)$$

由于  $\alpha_1 \cdot \tilde{P}_t^{d1}$  和  $\alpha_2 \cdot \tilde{P}_t^{d2}$  的线性关系, 故分析式(14)的凸性即是等价于分析式(15)的凸性,

$$f(x, y) = \lg(a + b e^x + c e^y) \quad (15)$$

为证明  $f(x, y)$  的凸性, 得到  $f(x, y)$  的海森矩阵:

$$\mathbf{M}_f = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b e^x + b c e^x e^y & -b c e^x e^y \\ \frac{(a + b e^x + c e^y)^2}{(a + b e^x + c e^y)^2} & \frac{(a + b e^x + c e^y)^2}{(a + b e^x + c e^y)^2} \\ -b c e^x e^y & c e^y + b c e^x e^y \\ \frac{(a + b e^x + c e^y)^2}{(a + b e^x + c e^y)^2} & \frac{(a + b e^x + c e^y)^2}{(a + b e^x + c e^y)^2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

由于  $f_{11} > 0$  且  $(f_{11} f_{22} - f_{12} f_{21}) > 0$ , 则式(16)正定。

由西尔维斯特惯性定律知,  $f(x, y)$  在  $(x, y)$  的取值空间上是凸函数。再利用严格凸函数的性质, 可以得到式(17)中  $\tilde{R}_D$  在  $(\tilde{P}_t^{d1}, \tilde{P}_t^{d2})$  取值空间上也是严格的凸函数。因此, 可以将  $\mathbf{P}_1$  转化成新的问题  $\mathbf{P}_2$ :

$$\mathbf{P}_2: \arg \max_{(\tilde{P}_t^{d1}, \tilde{P}_t^{d2})} \{\tilde{R}_D\} \quad (17)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} e^{\tilde{P}_t^{d1}} + e^{\tilde{P}_t^{d2}} \leq e^{P_{\text{th}}} \\ e^{g(d_{d1}^{\text{BS}}) \cdot \tilde{P}_t^{d1}} + e^{g(d_{d2}^{\text{BS}}) \cdot \tilde{P}_t^{d2}} \leq e^{\gamma_c} \end{cases} \quad (18)$$

#### 3.2 问题求解与算法描述

根据上述分析, 式(17)中的  $\mathbf{P}_2$  问题是严格的凸函数且式(18)是一个凸集。那可知它存在唯一最优解, 再用拉格朗日乘法求解  $\mathbf{P}_2$ , 可记作

$$L(\tilde{P}_t^{d1}, \tilde{P}_t^{d2}; \lambda_1, \lambda_2) \triangleq \left\{ \alpha_1 \tilde{P}_t^{d1} + \alpha_1 \lg(\theta) - \alpha_1 \lg(1 + \mu \cdot e^{\tilde{P}_t^{d2}}) + \beta_1 \lg 2 + \alpha_2 \tilde{P}_t^{d2} + \alpha_2 \lg(\theta) - \alpha_2 \lg(1 + \mu \cdot e^{\tilde{P}_t^{d1}}) + \beta_2 \lg 2 \right\} + \left\{ \lambda_1 \left[ \left( e^{\tilde{P}_t^{d1}} + e^{\tilde{P}_t^{d2}} \right) - e^{P_{\text{th}}} \right] + \lambda_2 \left[ \left( e^{g(d_{d1}^{\text{BS}}) \cdot \tilde{P}_t^{d1}} + e^{g(d_{d2}^{\text{BS}}) \cdot \tilde{P}_t^{d2}} \right) - e^{\gamma_c} \right] \right\} \quad (19)$$

其中,  $\lambda_1, \lambda_2$  是拉格朗日乘法因子, 假设最优的拉格朗日乘法因子为  $\lambda_1^*, \lambda_2^*$ 。

由于  $\mathbf{P}_2$  是一个严格的凸优化问题, 最优的拉格朗日乘法因子  $\lambda_1^*$ ,  $\lambda_2^*$  也是  $\mathbf{P}_{2\_dual}$  的最优解。于是有

$$\mathbf{P}_{2\_dual} : \max_{\lambda} \{ \tilde{L}(\lambda) \} \quad (20)$$

$$\text{s.t. } \lambda_1 \geq 0, \lambda_2 \geq 0 \quad (21)$$

$\tilde{L}(\lambda)$  是一个拉格朗日对偶函数, 可以定义为

$$\tilde{L}(\lambda) = \min_{\{\tilde{P}_t^{d1}, \tilde{P}_t^{d2}\}} \left\{ L(\tilde{P}_t^{d1}, \tilde{P}_t^{d2}; \lambda_1, \lambda_2) \right\} \quad (22)$$

使用次梯度法搜索最优的拉格朗日乘法因子:

$$\lambda_1^* = \left\{ \lambda_1^* + \varepsilon_{\lambda_1} \left[ \left( e^{\tilde{P}_t^{d1}} + e^{\tilde{P}_t^{d2}} \right) - e^{P_{th}} \right] \right\}^+ \quad (23)$$

$$\lambda_2^* = \left\{ \lambda_2^* + \varepsilon_{\lambda_2} \left[ \left( e^{g(d_{th}^{BS})\tilde{P}_t^{d1}} + e^{g(d_{th}^{BS})\tilde{P}_t^{d2}} \right) - e^{\gamma_c} \right] \right\}^+ \quad (24)$$

其中,  $\varepsilon_{\lambda_1}$ ,  $\varepsilon_{\lambda_2}$  是任意趋近于 0 的整实数,  $\{a\}^+$  是取  $(0, a)$  之间的最大值。对式(23), 式(24)的迭代将收敛得到  $\lambda_1^*$ ,  $\lambda_2^*$ 。再将  $\lambda_1^*$ ,  $\lambda_2^*$  代入对  $\tilde{L}(\lambda)$  求  $(\tilde{P}_t^{d1*}, \tilde{P}_t^{d2*})$  偏导的方程组中, 从而得到  $\mathbf{P}_2$  的最优解  $(\tilde{P}_t^{d1*}, \tilde{P}_t^{d2*})$ 。经过逐层代换即可得到 D2D 通信链路的最大传输速率  $R_D$ 。

## 4 性能仿真与分析

本节仿真中假设本小区的半径为 500 m, 小区内用户随机分布, 可被复用的 CUE 到基站的距离在 100 m 内, DUE 可在 50 m 内组成 D2D 对, 噪声功率谱密度为 -174 dBm/Hz。根据修正后的 COST 231-Hata 城市传播模型, 上行链路的路径损耗指数  $\nu_1$  设为 4.7, 针对蜂窝用户对 D2D 用户产生下行干扰时的路径损耗指数  $\nu_2$  设为 3.5, 针对室内 D2D 链路之间的路径损耗指数  $\nu_0$  设为 2。

### 4.1 不同参数对系统总速率的影响

从图 2 可得, 在自干扰消除系数为 40 dB 时, 全双工 D2D 通信的性能不如相同约束条件的半双工 D2D 通信。当自干扰系数提升的时候, 系统的总

速率随着  $P_{th}$  的增加而增加, 当自干扰消除系数达到 100 dB 时的全双工 D2D 通信性能与以最大功率发送时的功率分配方案接近。

由图 3 可知, 随  $P_{th}$  增加, 系统总速率增加不明显。当  $\gamma_c$  较大时, 蜂窝链路能较大地忍受 D2D 对的干扰。当  $\gamma_c = 5$  dB 时, 蜂窝链路能忍受 D2D 对的干扰程度较低, 系统里所有 DUE 链路的传输速率急剧下降, 使得总速率性能受到的影响已经超过了 CUE 带来的边际效益。实际上, 即使  $P_{th}$  增加, 其最优的发送功率并不会改变很大, 这就保证了本文算法的高效性。

图 4 中, 系统总速率随  $d_p/d_D^{BS}$  比值增大而减少。这是由于  $d_p/d_D^{BS}$  增大, 系统中的干扰也增大, 最终导致系统总速率减少。随着比值继续增大, 系统总速率曲线变得相对平滑。本文提出的算法与文献[5]以及另外两种方案[6]相比性能都比较接近, 且在较高比值时本文方案与最耗能的分配方案的容量几乎一致。

### 4.2 总容量与频谱效率的仿真

从图 5 中可以得到, 系统总容量随着 D2D 对的数量以及可复用的 CUE 链路数量的增多而上升。当可复用链路数量一定时, 越多的 D2D 对会有较高的系统容量, 但在可复用链路只有 2 条的时候会出现例外情况, 这是由于复用 D2D 对之间竞争过大, 导致同信道干扰急剧增加。当 D2D 对的数量一定时, 随着可复用的链路资源增多, 系统的总容量也会提高。

从图 6 中可以看到, 在复用链路数量一定时, 随着 D2D 对数量的变化本文算法性能比文献[12]所提算法要好。当 D2D 对的数量一定时, 越多的复用链路数会有越高的频谱效率, 这是因为可复用的链路资源增多, 系统的频谱效率自然会提高。当可复用链路数量一定时, 系统的频谱效率随着 D2D 对的数量增多而下降, 这是由于 D2D 对复用相互之间竞争过大, 导致同信道干扰急剧增加, 从而频谱效率降低。

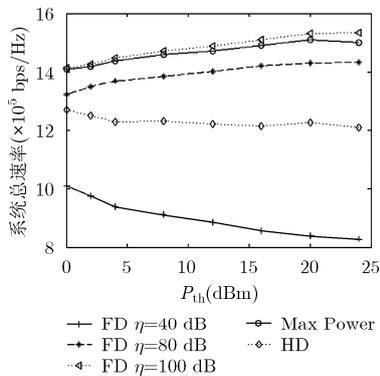


图 2 不同  $\eta$  值, 系统总速率随  $P_{th}$  的变化关系

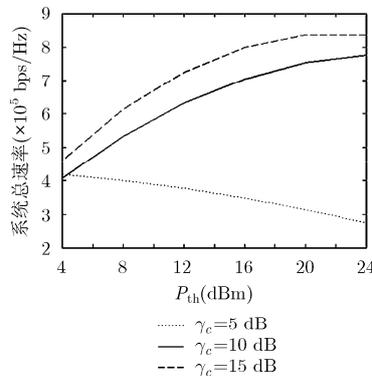


图 3 不同  $\gamma_c$  值, 系统总速率随  $P_{th}$  的变化关系

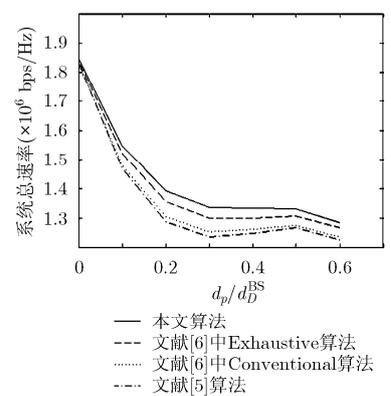


图 4 系统总速率随  $d_p/d_D^{BS}$  的变化关系

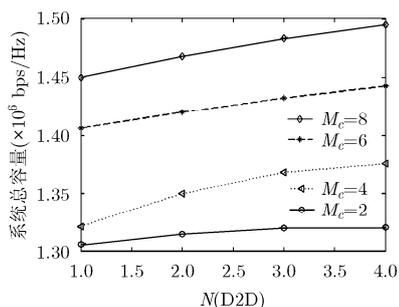


图 5 系统总容量随 D2D 对数量以及可复用链路数的变化

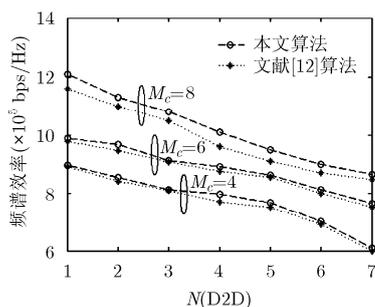


图 6 系统频谱效率随 D2D 对数量以及可复用链路数的变化

## 5 结束语

本文提出了一种基于认知无线电的 D2D 全双工通信系统使系统传输速率最大化的功率分配方案。相对于传统的 D2D 通信系统, 本文既要保证所有用户的通信质量又要消除 DUEs 的自干扰, 同时找出 DUEs 最优的发送功率, 使系统传输速率最大化。下一步工作可以尝试分析其他参数对 D2D 通信复用资源过程中建立连接的中断概率以及能量效率等方面的影响。

## 参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, *et al.* What will 5G be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065–1082. doi: 10.1109/JSAC.2014.2328098.
- [2] PIERUCCI L. The quality of experience perspective toward 5 G technology[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(4): 10–16.
- [3] FENG Daquan, LU Lu, YI Yuanwu, *et al.* Device-to-device communications in cellular networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2014, 52(4): 49–55. doi: 10.1109/MCOM.2014.6807946.
- [4] WANG Mingjun and YAN Zheng. Security in D2D Communications: A review[C]. 2015 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, Helsinki, Finland, 2015, 1: 1199–1204. doi: 10.1109/Trustcom.2015.505.
- [5] BAO Pengcheng, YU Guanding, and YIN Rui. Novel frequency reusing scheme for interference mitigation in D2D uplink underlaying networks[C]. 2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Sardinia, Italy, 2013: 491–496. doi: 10.1109/IWCMC.2013.6583607.
- [6] KAUFMAN B, LILLEBERG J, and AAZHANG B. Spectrum sharing scheme between cellular users and Ad-hoc device-to-device users[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2013, 12(3): 1038–1049.
- [7] MACH P, BECVAR Z, and VANEK T. In-band device-to-device communication in OFDMA cellular networks: A survey and challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 18(4): 1885–1922. doi: 10.1109/COMST.2015.2447036.
- [8] LIU Jiajia, KATO Nei, MA Jiafeng, *et al.* Device-to-device communication in LTE-advanced networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 17(4): 1923–1940. doi: 10.1109/COMST.2014.2375934.
- [9] LIU L, ZHANG Y, LIU S, *et al.* Power allocation optimization for D2D communication underlaying cognitive full duplex relay networks[C]. 11th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM 2015), Shanghai, China, 2015: 1–6. doi: 10.1049/cp.2015.0662.
- [10] WU Xiaolu, CHEN Yueyun, YUAN Xiaopan, *et al.* Joint resource allocation and power control for cellular and device-to-device multicast based on cognitive radio[J]. *IET Communications*, 2014, 8(16): 2805–2813. doi: 10.1049/iet-com.2013.1041.
- [11] SAKR A H, TABASSUM H, HOSSAIN E, *et al.* Cognitive spectrum access in device-to-device-enabled cellular networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(7): 126–133. doi: 10.1109/MCOM.2015.7158275.
- [12] HEMACHANDRA Kasun T, RAJATHEVA Nandana, and LATVA-AHO Matti. Sum-rate analysis for full-duplex underlay device-to-device networks[C]. 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Istanbul, Turkey, 2014: 514–519. doi: 10.1109/WCNC.2014.6952081.

谢显中: 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信网络、认知无线电技术等。

田 瑜: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为无线通信和资源分配。