



蜂窝网络中全双工 D2D 通信功率控制

赵季红^{1,2}, 何强¹, 曲桦², 栾智荣²

(1. 西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710061;

2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:在蜂窝网络中,采用全双工传输的设备直通(D2D)通信可以共享蜂窝通信的信道资源,提升频谱利用率和系统吞吐量。针对单对全双工 D2D 用户复用单个蜂窝用户的上行信道资源时,用户之间会产生同频干扰的问题,提出了一种低复杂度的功率控制算法。该算法在保证全双工 D2D 用户和蜂窝用户(CU)的服务质量(QoS)的前提下,最大化全双工 D2D 链路的吞吐量。仿真结果表明,该算法能够提高全双工 D2D 链路的吞吐量;全双工 D2D 链路吞吐量取决于蜂窝用户的 QoS 要求、相对距离以及自干扰消除数量的限制。

关键词:设备直通通信;全双工;功率控制

中图分类号:TN929

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017056

Power control for full-duplex D2D communications underlaying cellular networks

ZHAO Jihong^{1,2}, HE Qiang¹, QU Hua², LUAN Zhirong²

1. School of Telecommunication and Information Engineering,

Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710061, China

2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

Abstract: Device-to-device (D2D) communications that based on the wireless full-duplex transmission mode can not only reuse the cellular users' spectrum resource, but also significantly improve the spectral efficiency and the system throughput in wireless cellular networks. However, full-duplex D2D communications may generate same frequency interference to the reused cellular user (CU) while full-duplex D2D users share the same resources as CU in uplink. A low-complexity power control algorithm was proposed to maximize the full-duplex D2D links throughput while guaranteeing the quality of service(QoS) requirements for full-duplex D2D users and CU. Numerical results show that the proposed algorithm can improve the full-duplex D2D links throughput. Moreover, the performance of full-duplex D2D communications depend on the QoS requirements of CU, the distance of D2D pair and self-interference cancelation amounts.

Key words: D2D communication, full-duplex, power control

收稿日期:2016-09-20;修回日期:2017-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61372092, No.61531013);国家高技术研究发展计划("863"计划)基金资助项目(No.2014AA01A706)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61372092, No.61531013), The National High Technology Research and Development Program (863 Program)(No.2014AA01A706)



1 引言

随着局域应用和智能终端的不断涌现,近距离移动数据业务迅速增多,两种作为未来 5G 无线网络^[12]中潜在的关键技术,即基于近距离传输的 D2D(device-to-device,设备直通)通信技术^[9]和无线全双工(full-duplex,FD)传输技术^[4,9]被广泛讨论和研究。D2D 通信的特点是 D2D 用户的发射功率较低,且用户的数据信息不经过基站而直接在 D2D 终端之间传输。无线全双工传输技术的特点是用户可以在同一时间以相同的频率进行接收和发射信号,用户会接收到自身所发射的信号,业界称之为自干扰信号。正是由于 D2D 的发射功率较低,有利于无线全双工通信中自干扰信号的消除,因此可以将无线全双工技术与 D2D 通信相结合,并且运用目前已提出的先进的自干扰消除(self-interference cancellation,SIC)技术^[6,7],能够有效地提高系统容量和频谱效率。

目前,关于基于传统半双工(half-duplex,HD)传输的 D2D(HD-D2D)通信,国内外已有大量的研究,而基于 FD 传输的 D2D(FD-D2D)通信也被业界迅速地关注,并且有大量的工作围绕 FD-D2D 通信功率控制问题展开。参考文献[8]探究了单对 FD-D2D 用户复用单个蜂窝用户(cellular user, CU)的上行信道资源时,FD-D2D 系统的遍历和速率问题,通过设置最大干扰门限保证 CU 的最低 QoS (quality of service,服务质量),而没有处理 CU 对 D2D 用户的干扰,因此不能保证 FD-D2D 用户的 QoS,更不能实现最大化 FD-D2D 系统的遍历和速率。参考文献[9]在单对 FD-D2D 用户复用单个 CU 的下行信道资源的场景中,从 FD-D2D 链路的成功接入概率和 CU 的中断概率出发,最大化系统的吞吐量,同样没有考虑如何通过功率控制来抑制用户间的同频干扰问题。参考文献[10]在单对 FD-D2D 用户复用单个 CU 的上行和下行信道资源的复用模式中,探究了残留自干扰对 FD-D2D 通信的影响,在蜂窝链路上行期间采用了固定点迭代法求解 CU 和 FD-D2D 用户的发射功率,使蜂窝链路和 D2D 链路功率之和最小,同时保证了 FD-D2D 用户和 CU 的 QoS。参考文献[11]考虑了在单个小区中仅有一对 FD-D2D 用户复用多个 CU 的上行信道资源的情况,通过设置 CU 的干扰比门限确定 FD-D2D 用户的发射功率大小。与参考文献[11]中的复用情况相反,参考文献[12]考虑了单个小区中多对 FD-D2D 用户复用单个 CU 的上行信道资源,其功率控制方案与参考文献[11]类似,但是并没有考虑 FD-D2D 链路之间的干扰。

综上所述,除参考文献[10]以外,针对 FD-D2D 在复用模式下的通信中,绝大多数是通过设置用户的干扰阈值设定 FD-D2D 用户设备的发射功率,此方法虽然简单,但是不能同时保证 FD-D2D 用户与被复用的 CU 的 QoS,达不到通过复用模式尽可能提升系统容量的目的。因此,考虑在单个蜂窝小区场景下单个 FD-D2D 链路复用单个 CU 的上行链路信道资源,以提升 FD-D2D 链路的吞吐量为目标,通过分析目标函数在可行性限制区域内部和边界上的特性,提出一种复杂度低、运算速度快的功率控制算法,可以应用于时变的场景中。仿真结果显示,该算法在保证 CU 的 QoS 要求的同时,能够提升 FD-D2D 链路的吞吐量。

2 系统模型

本文考虑的单个蜂窝小区的 FD-D2D 通信系统模型如图 1 所示,有多个 FD-D2D 对和多个 CU,演进型基站(evolved node B,eNode B)和 CU 均采用 HD 传输模式。为了提高无线频谱资源效率和减少由复用产生的干扰,单个 CU 的上行链路信道资源只能被一个 D2D 对用户复用,同时单对 FD-D2D 用户也只能复用一个 CU 的上行信道资源。而对于同一频谱的资源,CU 相较于 FD-D2D 用户具有优先使用权。

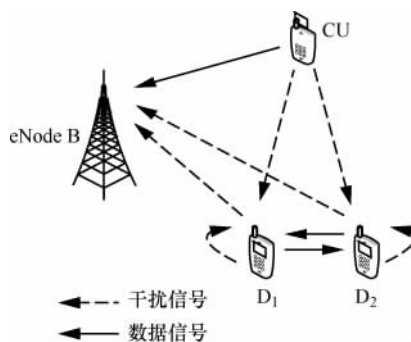


图 1 单个蜂窝小区的 FD-D2D 通信系统模型

在实际情况下,CU 的发射功率是固定不变的^[13],本文也设 CU 的发射功率固定不变。为了使网络更加容易协调 FD-D2D 和 CU 通信,eNode B 能够有效地执行资源分配以满足小区中通信节点的 QoS 要求,采用基站全控制机制^[14]来管理 FD-D2D 通信,包括 D2D 发现、连接、功率控制和信道分配。最优功率控制的过程是基站测量接收到的 FD-D2D 用户的干扰后,通过控制信道来协调 FD-D2D 设备的发射功率,以满足 CU 的 QoS 要求,本文以用户的信干噪比(signal to interference plus noise ratio,SINR)为 QoS 标准。

根据香农公式可以得到 FD-D2D 链路的吞吐量为:

$$R = \text{lb}(1 + \zeta_1^d) + \text{lb}(1 + \zeta_2^d) \quad (1)$$

$$\text{其中, } \zeta_1^d = \frac{P_1 g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_2 P_2 + P_c g_2}, \zeta_2^d = \frac{P_2 g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_1 P_1 + P_c g_1};$$

P_i 、 P_c 和 γ_i 分别表示 D_i 设备的发射功率、CU 的发射功率和自干扰消除因子, $i \in \{1, 2\}$; g_{12} 表示 D2D 对中两个用户之间的信道增益, g_i 表示 D_i 用户与被复用 CU 之间的信道增益; σ_N^2 表示高斯白噪声的功率。

3 功率控制算法

3.1 问题描述

基于 FD 传输模式的 D2D 通信, 通过复用 CU 的上行信道资源能够有效提高资源复用增益和链路增益, 进一步提高系统的频谱效率和网络吞吐量。当 FD-D2D 链路建立时, 既要满足最小的 SINR 要求, 又要保证对被复用的 CU 产生较小的干扰。因此, 在同一时间相同的无线信道资源共同服务一个 CU 用户和 FD-D2D 对用户时, 在保证 CU 用户最小 SINR 要求和 FD-D2D 设备功耗的前提下, 以最大化 FD-D2D 链路的吞吐量为目标, 求解 FD-D2D 设备的最优发射功率, 构建优化问题模型如下:

$$(P_1^*, P_2^*) = \arg \max_{(P_1, P_2) \in \phi} \{ \text{lb}(1 + \zeta_1^d) + \text{lb}(1 + \zeta_2^d) \} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \frac{P_1 g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_2 P_2 + P_c g_2} \geq \zeta_{\min}^d \quad (3)$$

$$\frac{P_2 g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_1 P_1 + P_c g_1} \geq \zeta_{\min}^d \quad (4)$$

$$\frac{P_c g_B}{\sigma_N^2 + P_1 g_{1B} + P_2 g_{2B}} \geq \zeta_{\min}^c \quad (5)$$

$$P_i \leq P_d^{\max}, i \in \{1, 2\} \quad (6)$$

其中, $\phi = \{(P_1, P_2): P_i \leq P_d^{\max}, \zeta_1^d \geq \zeta_{\min}^d, \zeta_2^d \geq \zeta_{\min}^d,$

$P_1 g_{1B} + P_2 g_{2B} \leq \frac{P_c g_B}{\zeta_{\min}^c} - \sigma_N^2\}$, ϕ 表示 D_i 设备发射功率的

可行区域; $\zeta_{\min}^d$ 和 $\zeta_{\min}^c$ 分别表示 FD-D2D 用户和 CU 用户的最小 SINR 要求; $P_d^{\max}$ 表示 D_i 设备的最大发射功率, g_{iB} 表示 D_i 与 eNode B 之间的信道增益。

3.2 算法描述

对于第 3.1 节提出的优化问题, 很难直接求得全局最优解。因此, 下面将通过分析优化问题的目标函数、可行性限制区域边界以及边界拐点的特性, 提出一种运算复杂度低的算法寻找问题的最优解。

FD-D2D 设备发射功率限制区域由式(3)~式(6)决定, 并假设分别由直线 l_1 、 l_2 和 l_c 代表, 并且, 直线 l_1 、 l_2 和 l_c 作为 FD-D2D 设备发射功率可行解的边界, 其位置在式(3)~式(6)取等的时候确定。此外, 当自干扰消除系数 $\gamma_1 = \gamma_2$ 时, 直线 l_1 和 l_2 的斜率的乘积为 1。本文假设 FD-D2D 设备的自干扰消除数量相等, 即自干扰消除系数 $\gamma_1 = \gamma_2$ 。如果直线 l_1 的斜率小于直线 l_2 的斜率, 这两个约束没有共同的可行解区域, 原问题将无解。因此, 要使原问题有解, 直线 l_1 的斜率必须大于直线 l_2 的斜率, 即:

$$\frac{g_{12}}{\zeta_{\min}^d \gamma_2} > \frac{\zeta_{\min}^d \gamma_1}{g_{12}} \quad (7)$$

此时, 直线 l_1 和 l_2 的交点 $G_0(P_1^{\min}, P_2^{\min})$ 为:

$$P_1^{\min} = \frac{(\sigma_N^2 + P_c g_2) \zeta_{\min}^d g_{12} + (\sigma_N^2 + P_c g_1) (\zeta_{\min}^d)^2 \gamma_2}{g_{12}^2 - (\zeta_{\min}^d)^2 \gamma_1 \gamma_2} \quad (8)$$

$$P_2^{\min} = \frac{(\sigma_N^2 + P_c g_1) \zeta_{\min}^d g_{12} + (\sigma_N^2 + P_c g_2) (\zeta_{\min}^d)^2 \gamma_1}{g_{12}^2 - (\zeta_{\min}^d)^2 \gamma_1 \gamma_2} \quad (9)$$

交点 $G_0(P_1^{\min}, P_2^{\min})$ 表示在满足 D_i 用户的最小 SINR 要求的情况下, FD-D2D 设备的最小发射功率。由此可知, 在复用情况下, $P_d^{\max}$ 必须满足 $P_d^{\max} \geq \max\{P_1^{\min}, P_2^{\min}\}$, 且直线 l_c 位于点 G_0 的上方。因此, 满足式(3)~式(6)的 FD-D2D 设备发射功率的 3 类可能的限制区域如图 2 中的阴影区域所示。针对 CU 不同的最低 SINR 要求, 因此在每一类中存在着多种情况。图 2 中交点 P_i 表示当 $\zeta_i^d = 0$ 且 $P_j = 0$ 时对应的 $P_i, i \neq j$ 且 $i, j \in \{1, 2\}$ 。

定理 1 FD-D2D 设备的最优发射功率对 (P_1^*, P_2^*) 至少有一个最优发射功率 P_i^* 位于可行区域 ϕ 边界上。

证明 根据参考文献[15], 在功率可行性区域内任意一个功率对 (P_1, P_2) , 在该区域总存在另一个功率对 $(\kappa P_1, \kappa P_2)$ ($\kappa > 1$) 满足:

$$\begin{aligned} R(\kappa P_1, \kappa P_2) &= \text{lb} \left(1 + \frac{P_1 g_{12}}{\frac{\sigma_N^2 + P_c g_2}{\kappa} + \gamma_2 P_2} \right) \\ &+ \text{lb} \left(1 + \frac{P_2 g_{12}}{\frac{\sigma_N^2 + P_c g_1}{\kappa} + \gamma_1 P_1} \right) \\ &> R(P_1, P_2) \end{aligned} \quad (10)$$

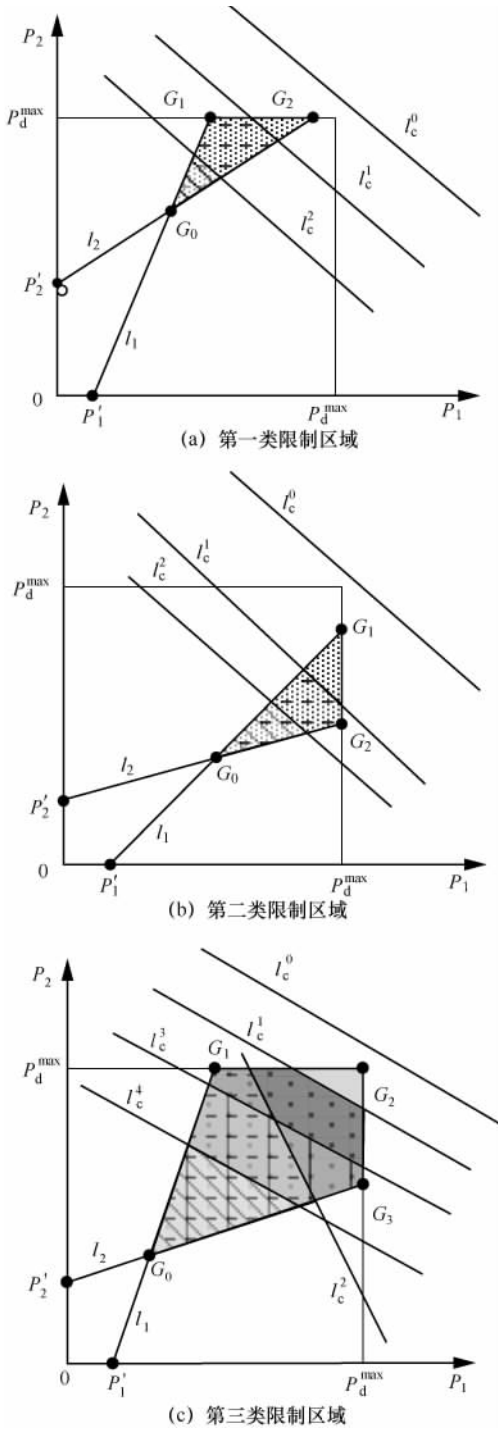


图2 FD-D2D设备发射功率限制区域

定理2 当 $P_2 = P_d^{\max}$ 时, $R(P_1)$ 是关于 P_1 的凸函数; 同时, 当 $P_1 = P_d^{\max}$ 时, $R(P_2)$ 是关于 P_2 的凸函数。证明过程与参考文献[16]证明过程相似。

引理1

$$\text{设 } \phi = \phi \cap \left\{ (P_1, P_2) : P_1 g_{1B} + P_2 g_{2B} = \frac{P_c g_B - \sigma_N^2 \zeta_{\min}^c}{\zeta_{\min}^c} \right\},$$

将 $P_2 = \left((P_c g_B - \sigma_N^2 \zeta_{\min}^c) / \zeta_{\min}^c - P_1 g_{1B} \right) / g_{2B}$ 代入式(1)得到函数 $Q(P_1)$, 且可以证明 $Q(P_1)$ 关于 P_1 拟凸。

证明 首先, 令 $Q(P_1, P_2) = (1 + \zeta_1^d)(1 + \zeta_2^d)$, 根据函数 $\log(\cdot)$ 的单调性, 最大化 R 等价于最大化 $Q(P_1, P_2)$ 。由式(5)可得 $P_2 = (\eta - P_1 g_{1B}) / g_{2B}$, 其中 $\eta = (P_c g_B - \sigma_N^2 \zeta_{\min}^c) / \zeta_{\min}^c$ 。将 P_2 代入 $Q(P_1, P_2)$ 得到关于 P_1 的函数为:

$$Q(P_1) = \frac{A + BP_1}{C - DP_1} \times \frac{E + FP_1}{G + HP_1} \quad (11)$$

其中, $A = g_{2B}(\sigma_N^2 + P_c g_2) + \gamma_2 \eta$, $B = g_{12} g_{2B} - \gamma_2 g_{1B}$, $C = g_{2B}(\sigma_N^2 + P_c g_2) + \gamma_2 \eta$, $D = \gamma_2 g_{1B}$, $E = g_{2B}(\sigma_N^2 + P_c g_1) + g_{12} \eta$, $F = \gamma_1 g_{2B} - g_{1B} g_{12}$, $G = g_{2B}(\sigma_N^2 + P_c g_1)$, $H = \gamma_1 g_{2B}$ 。

利用多项式分解理论, $Q(P_1)$ 可进一步表示为:

$$Q(P_1) = \frac{\alpha P_1 + \beta}{(C - DP_1)(G + HP_1)} - \frac{BF}{DH} \quad (12)$$

其中, $\alpha = (BE + AF) + \frac{BF(BG + CH)}{DH}$, $\beta = AE + \frac{BFGC}{DH}$ 。

对 $Q(P_1)$ 求一阶导数:

$$Q'(P_1) = \frac{\alpha DHP_1^2 + 2\beta DHP_1 + \alpha GC - \beta(CH - DG)}{(C - DP_1)^2 (G + HP_1)^2} \quad (13)$$

令 $q \triangleq \alpha GC - \beta(CH - DG)$, 在整个实数域上求解 $Q'(P_1) = 0$, 得到最优解 P_1^* :

$$P_1^* = -\frac{\alpha}{\beta} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 - \frac{q}{\alpha DH}} \quad (14)$$

当 $q=0$ 时, 最优解 $P_1^* \leq 0$ 。当 $P_1 > 0$ 时, 满足 $Q'(P_1) > 0$, 故 $Q(P_1)$ 是关于 P_1 的单调递增函数。因此, $Q(P_1)$ 的最大值在直线 l_c 的端点获得。

当 $q < 0$ 时, 存在满足实际情况的最优解 P_1^* 。由于 $Q'(P_1)$ 的分子关于 P_1 的一、二阶系数均大于零, 因此存在 θ , 总是满足 $Q'(P_1^* + \theta) > 0$ 。因此, P_1^* 是局部最优解。

当 $q > 0$ 时, 最优解 $P_1^* < 0$, 没有满足实际情况的最优解 P_1^* 。

综上所述, $Q(P_1)$ 是拟凸的, $P_1 = \phi_1$ 。

由定理1、定理2和引理1可得, 式(2)~式(6)的最优发射功率 (P_1^*, P_2^*) 位于可行区域 ϕ 的拐点。

下面给出满足图2中的3种情况的不同限制区域内的FD-D2D设备的最优发射功率。

当 $\frac{P_d^{\max} g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_1 P_d^{\max} + P_c g_1} \leq \zeta_{\min}^d$ 时, 即可行性区域如图 2(a)

所示, 对于直线 l_c^k 位于不同位置时, 所圈定的可行区域的拐点集合分别由 W_k^a 表示, $k \in \{0, 1, 2\}$ 。原优化问题的最优发射功率位于可行区域的拐点, 则 FD-D2D 设备的最优发射功率可以表述为:

$$(P_1^*, P_2^*) = \arg \max_{(P_1, P_2) \in W_0^a} R(P_1, P_2) \quad (15)$$

其中, $W_0^a = \{(P_1, P_d^{\max}), (P_2, P_d^{\max})\}$, $W_1^a = \{(P_1, P_d^{\max}),$

$(P_3, P_d^{\max}), (P_4, P_5)\}$, $W_2^a = \{(P_4, P_5), (P_6, P_7)\}$;

$$P_1 = \frac{(\sigma_N^2 + \gamma_2 P_d^{\max} + P_c g_2) \zeta_{\min}^d}{g_{12}},$$

$$P_2 = \frac{g_{12} P_d^{\max} - (\sigma_N^2 + P_c g_1) \zeta_{\min}^d}{\gamma_1 \zeta_{\min}^d},$$

$$P_3 = \frac{P_c g_B - (\sigma_N^2 + g_{2B} P_d^{\max}) \zeta_{\min}^c}{g_{1B} \zeta_{\min}^d},$$

$$P_4 = \frac{(P_c g_B - \sigma_N^2 \zeta_{\min}^c) g_{12} - (\sigma_N^2 + P_c g_1) g_{2B} \zeta_{\min}^c \zeta_{\min}^d}{(g_{12} g_{1B} + \gamma_1 g_{2B} \zeta_{\min}^d) \zeta_{\min}^c},$$

$$P_5 = \frac{(\sigma_N^2 + P_c g_1 + \gamma_1 P_4) g_{2B} \zeta_{\min}^d}{g_{12}},$$

$$P_6 = \frac{(P_c g_B - \sigma_N^2 \zeta_{\min}^c) \gamma_2 \zeta_{\min}^d + (\sigma_N^2 + P_c g_2) g_{2B} \zeta_{\min}^c \zeta_{\min}^d}{(g_{12} g_{2B} + \gamma_1 g_{1B} \zeta_{\min}^d) \zeta_{\min}^c},$$

$$P_7 = \frac{g_{12} P_6}{\gamma_2 \zeta_{\min}^d} - \frac{\sigma_N^2 + P_c g_2}{\gamma_2}.$$

当 $\frac{P_d^{\max} g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_2 P_d^{\max} + P_c g_2} \geq \zeta_{\min}^d$ 且 $\frac{P_d^{\max} g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_1 P_d^{\max} + P_c g_1} >$

$\zeta_{\min}^d$ 时, 可行性区域如图 2(b) 所示, 对于直线 l_c^m 位于不同位置时, 所圈定的可行区域的拐点集合分别由 W_m^b 表示, $m \in \{0, 1, 2\}$ 。同理, 根据结论, 原优化问题的最优发射功率位于可行区域的拐点, 则 FD-D2D 设备的最优发射功率可以表述为:

$$(P_1^*, P_2^*) = \arg \max_{(P_1, P_2) \in W_m^b} R(P_1, P_2) \quad (16)$$

其中, $W_0^b = \{(P_d^{\max}, P_8), (P_d^{\max}, P_9)\}$, $W_1^b = \{(P_6, P_7),$

$(P_d^{\max}, P_{10}), (P_d^{\max}, P_{11})\}$, $W_2^b = W_2^a$;

$$P_8 = \frac{g_{12} P_d^{\max}}{\gamma_2 \zeta_{\min}^d} - \frac{\sigma_N^2 + P_c g_2}{\gamma_2},$$

$$P_9 = \frac{(\gamma_2 P_d^{\max} + \sigma_N^2 + P_c g_1) \zeta_{\min}^d}{g_{12}},$$

$$P_{10} = -\frac{g_{1B} P_d^{\max}}{g_{2B}} + \frac{P_c g_B - \sigma_N^2 \zeta_{\min}^c}{g_{2B} \zeta_{\min}^c},$$

$$P_{11} = \frac{\zeta_{\min}^d \gamma_1}{g_{12}} P_d^{\max} + \frac{(\sigma_N^2 + P_c g_1) \zeta_{\min}^d}{g_{12}}.$$

当 $\frac{P_d^{\max} g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_2 P_d^{\max} + P_c g_2} > \zeta_{\min}^d$ 且 $\frac{P_d^{\max} g_{12}}{\sigma_N^2 + \gamma_1 P_d^{\max} + P_c g_1}$

$< \zeta_{\min}^d$ 时, 可行性区域如图 2(c) 所示, 对于直线 l_c^n 位于不同位置时, 所圈定的可行区域的拐点集合分别由 W_n^c 表示, $n \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ 。同理, 根据结论, 原优化问题的最优发射功率位于可行区域的拐点可知, FD-D2D 设备的最优发射功率可以表述为:

$$(P_1^*, P_2^*) = \arg \max_{(P_1, P_2) \in W_n^c} R(P_1, P_2) \quad (17)$$

其中, $W_0^c = \{(P_d^{\max}, P_d^{\max}), (P_d^{\max}, P_{11}), (P_1, P_d^{\max})\}$,

$W_1^c = \{(P_d^{\max}, P_{11}), (P_d^{\max}, P_{10}), (P_1, P_d^{\max}), (P_3, P_d^{\max})\}$,

$W_2^c = \{(P_1, P_d^{\max}), (P_3, P_d^{\max}), (P_4, P_5)\}$,

$W_3^c = \{(P_6, P_7), (P_d^{\max}, P_{11}), (P_d^{\max}, P_{10})\}$, $W_4^c = W_2^c$ 。

4 仿真分析

本文仿真只考虑单个小区场景, D2D 对和 CU 均匀地分布在小区中。此外, 主要的仿真参数设置见表 1。为了比较所提算法的性能, 仿真时将与 HD-D2D 链路的性能做比较。其中, HD-D2D 设备的发射功率为在满足被复用的 CU 的 SINR 要求时的最大发射功率。

表 1 仿真参数设置

参数名称	数值
小区半径/m	500
D2D 用户间距/m	20~50
信道带宽/MHz	1.0
噪声功率谱密度 ^[10] /(dBm·Hz ⁻¹)	-174
CU 发射功率/dBm	25
D2D 用户发射功率/dBm	24
CU 的最小 SINR 要求/dB	8~15
D2D 用户的最小 SINR 要求/dB	8
CU 链路路径损耗模型 ^[10]	$g_c = 128.1 + 37.6 \cdot \ln d$
D2D 链路路径损耗模型 ^[10]	$g_d = 148.0 + 40.0 \cdot \ln d$

图 3 比较了两种 FD-D2D 功率控制算法的性能, 并与 HD-D2D 链路的吞吐量做比较, 设置 CU 和 FD-D2D 用户的最小 SINR 要求分别为 12 dB 和 8 dB, 自干扰消除数量为 120 dB。根据图 3 提供的仿真参数信息并追踪仿真过程, 可发现本



仿真场景对应的功率限制区域是第三类中的直线 l_c^3 所圈定的限制区域。首先,可以发现对于不同的功率控制算法,D2D 链路的吞吐量随着 D2D 用户之间的距离增加而逐渐降低。因为随着距离增加,D2D 用户之间的增益减小,为了满足 D2D 用户的 SINR 要求,就必须提高发射功率,这样就导致对复用的 CU 产生了更大的干扰。其次,由于所提算法总是最优功率控制,因此所提算法的性能优于参考文献[11]的功率控制算法。最后,当自干扰消除为 120 dB 时,残留自干扰信号的功率相对较小,采用 FD 传输模式的 D2D 链路的吞吐量均优于 HD-D2D 链路的吞吐量。

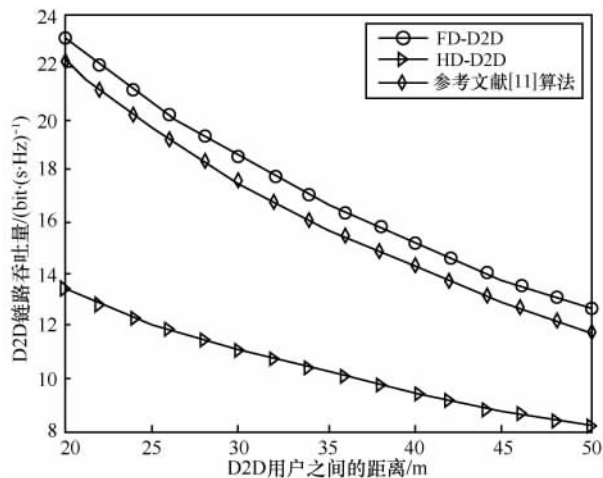


图3 FD/HD-D2D 链路吞吐量与 D2D 用户间距离的关系

不同的 SIC 数量对 FD-D2D 链路吞吐量的影响如图 4 所示,其中 CU 和 FD-D2D 用户的最小 SINR 要求分别为 12 dB 和 8 dB。与图 4 的仿真场景对应的功率限制区域和图 3 对应的功率限制区域一样。随着 SIC 数量增大,FD-D2D 链路的吞吐量也增大,并且逐渐接近于残留自干扰信号的功率 $P=\sigma_N^2$ 时对应的吞吐量,这是由于自干扰消除越多,残留自干扰信号也就越小,因此得到的 FD-D2D 用户的 SINR 就越大。然而,当 SIC 数量仅为 105 dB 且 D2D 对中两个用户之间的距离大于 34 m 时,FD-D2D 链路的吞吐量反而低于 HD-D2D 链路的吞吐量。可见当残留自干扰信号的功率 $P>\sigma_N^2$ 时,SIC 数量对 FD-D2D 链路的吞吐量有很大的影响。

当 D2D 对中两个用户之间的距离为 20 m 且 D2D 用户的最小 SINR 要求为 8 dB 时,FD/HD-D2D 链路的吞吐量与 CU 的最低 SINR 要求的变化关系如图 5 所示。追踪仿真过程可发现,随着 CU 的最低 SINR 由 8 dB 逐渐递增至 15 dB,图 5 对应的仿真场景的功率可行性限制区域属于第 3 类,其变化过程是由直线 l_c^3 逐渐向左下方平移,经

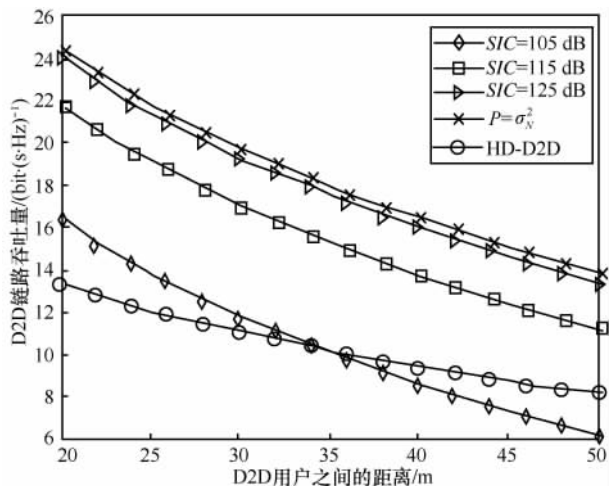


图4 不同 SIC 数量与 FD-D2D 链路吞吐量的关系

历直线 l_c^3 、 l_c^2 和 l_c^1 所圈定的功率限制区域。由图 5 所示,基于两种双工传输模式的 D2D 所实现的链路吞吐量均随着被复用的 CU 的最低 SINR 要求增大而降低。由式 (5) 可知,当 CU 的发射功率固定不变时,随着 CU 的最低 SINR 要求增大,D2D 用户的发射功率的最大值被限制得越多,D2D 用户可实现的 SINR 就越低,最终导致 D2D 链路的吞吐量降低。然而,当 CU 的最低 SINR 小于 10 dB 时,式(5)对应直线的位置为图 2(c)中的直线 l_c^0 的位置,此位置不会限制 D2D 用户的发射功率,此时 FD-D2D 链路的吞吐量与 CU 的最低 SINR 无关,因此 FD-D2D 链路的吞吐量并不随着 CU 的最低 SINR 增大而降低。

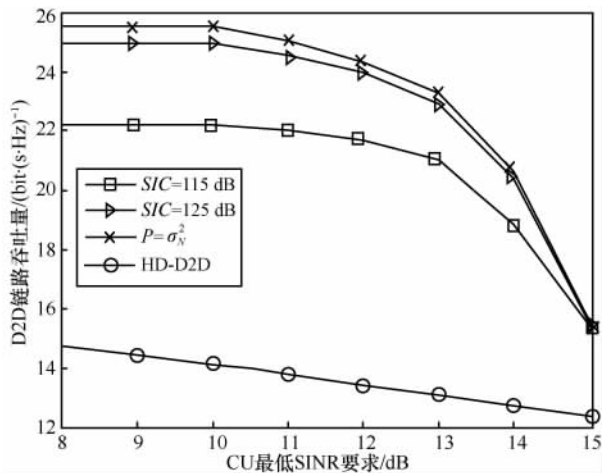


图5 FD/HD-D2D 链路吞吐量随 CU 最低 SINR 要求变化的关系

5 结束语

本文考虑在单个蜂窝小区中单对 FD-D2D 用户复用单个 CU 的上行信道资源的情况,在同时保证 D2D

用户和被复用 CU 的 SINR 要求的前提下,提出了一种协调同频干扰的功率控制算法以最大化 FD-D2D 链路的吞吐量,应用该算法时可针对相应的功率限制区域场景直接使用算法的结论。经过仿真分析发现,在同时满足 FD-D2D 用户和 CU 的 SINR 要求时,该算法能够提高 FD-D2D 链路的吞吐量;另外,在 FD-D2D 复用 CU 的信道资源情况下,FD-D2D 用户间距离、CU 的最低 SINR 要求和 SIC 数量都是限制 FD-D2D 链路吞吐量的主要因素。

参考文献:

- [1] GE X, CHENG H, GUIZANI M, et al. 5G wireless backhaul networks: challenges and research advances[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 6-11.
- [2] GE X, TU S, HAN T, et al. Energy efficiency of small cell backhaul networks based on Gauss-Markov mobile models [J]. Networks IET, 2014, 4(2): 158-167.
- [3] 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.
- [4] SABHARWAL A, SCHNITER P, GUO D, et al. In-band full-duplex wireless: challenges and opportunities [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 32(9): 1637-1652.
- [5] LI Q, YU M, PANDHARIPANDE A, et al. Performance of virtual full-duplex relaying on cooperative multi-path relay channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3628-3642.
- [6] BHARADIA D, MC M E, KATTI S. Full duplex radios[J]. ACM Signal Communication Computer Review, 2013, 43(4): 375-386.
- [7] JAIN M, CHOI J I, KIM T M, et al. Practical, real-time, full duplex wireless[C]//International Conference on Mobile Computing and Networking, September 19-23, 2011, Las Vegas, Nevada, USA. New York: ACM Press, 2011: 301-312.
- [8] HEMACHANDRA K T, RAJATHEVA N, LATVA-AHO M. Sum-rate analysis for full-duplex underlay device-to-device networks [C]//Wireless Communications and Networking Conference, April 6-9, 2014, Istanbul, Turkey. New Jersey: IEEE Press, 2014: 514-519.
- [9] BAGHERI H, MIRANDA B F A, KATZ M. Spectral efficiency and throughput enhancement by full-duplex D2D communication in mobile clouds[C]//European Wireless Conference, May 20-22, 2015, Budapest, Hungary. New Jersey: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [10] ALI S, GHAZANFARI A, RAJATHEVA N, et al. Effect of residual of self-interference in performance of full-duplex D2D communication [C]//International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity, Nov 26-28, 2014, Akaslompola, Finland. New Jersey: IEEE Press, 2014: 46-51.
- [11] AMAD A, NANDANA R, MATTI L. Full duplex device-to-device communication in cellular networks [C]//Computing, International Conference on Networking and Communications (ICNC), June 23-26, 2014, Bologna, Italy. New Jersey: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [12] ALI S, RAJATHEVA N, LATVA-AHO M. Effect of interference of full-duplex transmissions in underlay device-to-device communication[C]//2015 IEEE 14th Canadian Workshop on Information Theory (CWIT), July 6-9, 2015, Toronto, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2015: 54-57.
- [13] 3GPP. 3rd generation partnership project, technical specification group radio access network, evolved universal terrestrial radio access, physical layer procedures(release12); TS36.213,V12.0.0[S]. 2013.
- [14] LEI L, ZHONG Z, LIN C, et al. Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks [J]. IEEE Wireless Communication, 2012, 19(3): 96-104.
- [15] FEND D, LU L, YI Y W, et al. Device-to-device communications underlying cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(8): 3541-3551.
- [16] GJENDEMSJO A, GESBERT D, OIEN G E, et al. Optimal power allocation and scheduling for two-cell capacity maximization[C]//International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Feb26-March 2, 2006, Seattle, WA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2006: 1-6.

[作者简介]



赵季红(1963-),女,博士,西安邮电大学教授,西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信网、新一代网络的管理与控制、5G网络等。

何强(1990-),男,西安邮电大学硕士生,主要研究方向为全双工自干扰消除和全双工 D2D 功率控制。

曲桦(1961-),男,博士,西安交通大学教授、博士生导师,主要研究方向为现代通信网、计算机网络体系结构、移动互联网、智慧城市等。

栾智荣(1988-),男,西安交通大学博士生,主要研究方向为新一代天线网络体系架构、无线异构网络的无线资源管理技术、密集部署小区网络无线资源管理等。