

doi:10.13756/j.gtxyj.2021.06.002

光通信系统与网络技术

全双工 D2D 通信链路能效优化研究

缙丽莎,徐 岩

(兰州交通大学 电子与信息工程学院,兰州 730070)

摘要:针对在蜂窝系统下引入设备到设备(D2D)通信导致的干扰和能量消耗问题,文章提出首先将 D2D 通信技术与全双工传输技术相结合,构造一个全双工 D2D 通信链路场景。然后,在满足用户最小速率要求和功率阈值的条件下,分别解决了功率控制和资源分配问题,以提高全双工 D2D 通信链路的能量效率。最后,利用序列二次规划算法解决功率控制问题;利用所提出的自适应禁忌搜索算法解决最优资源分配问题。仿真结果表明,与现有算法相比,文章所提算法具有有效的搜索算子和扰动机制,并能以较低的计算复杂度来解决全双工 D2D 通信链路能效优化问题。

关键词:全双工 D2D 通信;功率控制;自适应禁忌搜索算法;能效优化

中图分类号:TN929

文献标志码:A

文章编号:1005-8788(2021)06-0013-06

Research on Energy Efficiency Optimization of Full-duplex D2D Communication Links

GOU Li-sha, XU Yan

(College of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the problems of interference and energy consumption caused by the introduction of Device-to-Device (D2D) communication in the cellular system, this paper proposes to first combine D2D communication technology with full-duplex transmission technology to construct a full-duplex D2D communication link scenario. Then, the power control and resource allocation problems are solved respectively to improve the energy efficiency of full-duplex D2D communication link under the condition of satisfying the minimum rate requirement and the power threshold. Finally, the sequential quadratic programming algorithm is used to solve the power control problem. The proposed adaptive tabu search algorithm is used to solve the problem of optimal resource allocation. The results show that, compared with the existing algorithms, the proposed algorithm has effective search operator and perturbation mechanism, and can solve the energy efficiency optimization problem of full-duplex D2D communication links with lower computational complexity.

Key words: full-duplex D2D communication ;power control;adaptive tabu search algorithm;the optimization of energy efficiency

0 引 言

终端设备的剧增将导致移动流量和能量消耗不断上升。近几年来,基于邻近性的应用程序是此类数据激增的主要来源之一。设备到设备(Device to Device, D2D)通信是指相邻的两个用户无需通过基站直接发送信号^[1],将全双工传输^[2]与 D2D 通信相结合,可提高频谱效率和终端用户体验,减少通信延迟,并提供高速率数据的短程传输^[3-4]。

目前,国内外研究热点基本围绕 D2D 通信网络的资源配置和干扰控制^[5-6],也有不少文献研究 D2D 通信网络中的能量消耗问题。文献[7]将子载波分配和功率分配联合优化,在满足所有用户速率的要求下使能量消耗最小;文献[8]提出了一种改进的遗传算法,在保证 D2D 通信传输速率的同时使能耗最小化;文献[9]构造了非合作博弈模型,通过资

源分配实现三层网络中 D2D 通信对的能效最大化;文献[10]提出了一种 D2D 通信对访问链路控制和资源分配方案,采用逆聚块近似算法求解;文献[11]构造 Stackelberg 博弈效用函数,通过调整发射功率使每个用户的效用最大化;文献[12]推导出了实现场景的能量效用函数,提出了贪心基站休眠的节能算法来优化能耗。

目前多数算法复杂度高,既不能有效满足用户现代化的通信需求,也不能充分达到能效优化的目的。故本文采用一种分解的方法研究全双工 D2D 通信链路能效优化问题。

1 系统模型

考虑由基站、 c 个蜂窝用户和 d 个全双工 D2D 用户对组成的全双工 D2D 用户对复用单小区蜂窝网络上行链路资源的传输场景,基站在小区中心,如

收稿日期:2021-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61461024)

作者简介:缙丽莎(1994—),女,甘肃金昌人。硕士,主要研究方向为 D2D 通信网络。

通信作者:徐岩,教授。E-mail:1206631592@qq.com

图1所示。每个蜂窝用户拥有正交的链路资源,防止各个链路之间发生同信道干扰,每个链路资源占用 W MHz 带宽。 $K = \{1, \dots, k\}$ 为 k 个蜂窝用户链路资源的集合, $C = \{1, \dots, c\}$ 为蜂窝用户链路集合, $D = \{1, \dots, d\}$ 为全双工 D2D 用户对链路集合,每个全双工 D2D 用户对包括 1 个发射端和 1 个接收端。假设蜂窝用户发射功率恒定,每个蜂窝链路资源块只能被一个全双工 D2D 用户对复用,且每个全双工 D2D 用户对只能复用 1 个蜂窝链路资源块。此时基站会受到来自全双工 D2D 用户对干扰,并且全双工 D2D 用户 D_1 和 D_2 也会受到来自蜂窝用户的干扰,同时全双工 D2D 用户对会产生自干扰。

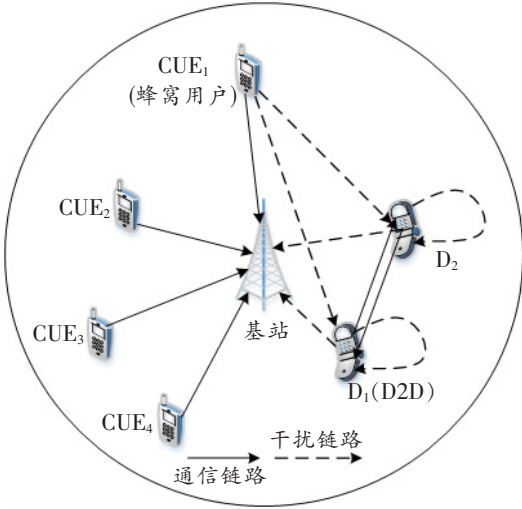


图1 系统模型

首先,定义 p_{c_i} 为第 i 个蜂窝用户的发射功率, $p_{D_1}^{D_1}$ 为全双工 D2D 用户对 D_1 的发射功率, $p_{D_2}^{D_2}$ 为全双工 D2D 用户对 D_2 的发射功率, D_1 到 D_2 的信道增益为 $g_{D_1}^{D_2}$, D_2 到 D_1 的信道增益为 $g_{D_2}^{D_1}$, 蜂窝用户与 D_1 之间的信道增益为 $g_{c_i}^{D_1}$, 蜂窝用户与 D_2 之间的信道增益为 $g_{c_i}^{D_2}$, N_0 为加性高斯白噪声功率。 z_j^k 为全双工 D2D 用户对复用蜂窝用户链路资源的赋值变量, j 为全双工 D2D 用户,如 $z_j^k = 1$ 表示全双工 D2D 用户对复用蜂窝用户链路资源; $z_j^k = 0$ 表示全双工 D2D 用户对不占用蜂窝用户链路资源。

全双工通信中的自干扰消除技术现已有文献充分研究,但在实际的通信过程中,自干扰消除技术是无法彻底消除的,故本文将 D_1 和 D_2 自干扰定义为 $\gamma_{D_1} = \eta_1 p_{D_1}^{D_1}$ 和 $\gamma_{D_2} = \eta_2 p_{D_2}^{D_2}$ 。由此 D_1 和 D_2 的信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)分别为

$$SINR_{D_1}^{D_2} = \frac{p_{D_1}^{D_2} g_{D_1}^{D_2}}{\eta_2 p_{D_2}^{D_2} + N_0 + p_{c_i} g_{c_i}^{D_2}}, \quad (1)$$

$$SINR_{D_2}^{D_1} = \frac{p_{D_2}^{D_1} g_{D_2}^{D_1}}{\eta_1 p_{D_1}^{D_1} + N_0 + p_{c_i} g_{c_i}^{D_1}}, \quad (2)$$

式中, $\eta(\eta_1, \eta_2)$ 为自干扰消除因子。当 $\eta = 0$ 时,自干扰被彻底消除,当 $\eta = 1$ 时,自干扰完全没有被消除, $0 \leq \eta \leq 1$ 。

由此可以推导出 D_1 到 D_2 和 D_2 到 D_1 的传输速率分别为

$$R_{D_1}^{D_2} = W \log_2 \left(1 + \frac{p_{D_1}^{D_2} g_{D_1}^{D_2}}{\eta_2 p_{D_2}^{D_2} + N_0 + p_{c_i} g_{c_i}^{D_2}} \right), \quad (3)$$

$$R_{D_2}^{D_1} = W \log_2 \left(1 + \frac{p_{D_2}^{D_1} g_{D_2}^{D_1}}{\eta_1 p_{D_1}^{D_1} + N_0 + p_{c_i} g_{c_i}^{D_1}} \right). \quad (4)$$

于是,全双工 D2D 通信链路总的能量效率为

$$U_{D2D}^{EE} = \frac{R_{D2D}^{EE}}{P_{D2D}^{EE}} = \frac{R_{D_1}^{D_2}}{P_{D_1}} + \frac{R_{D_2}^{D_1}}{P_{D_2}}, \quad (5)$$

式中: R_{D2D}^{EE} 为全双工 D2D 通信链路总速率; P_{D2D}^{EE} 为全双工 D2D 通信链路消耗的总功率; $P_{D_1} = \frac{1}{\omega} p_{D_1}^{D_2} + p_{cir} + \gamma_{D_1}$ 和 $P_{D_2} = \frac{1}{\omega} p_{D_2}^{D_1} + p_{cir} + \gamma_{D_2}$ 分别为全双工 D2D 通信链路 D_1 和 D_2 传输信息消耗的总功率, p_{cir} 为全双工 D2D 用户的电路功率消耗, ω 为功率放大系数,一般 $0 < \omega < 1$ 。

2 问题表述

通过优化全双工 D2D 用户对功率分配变量 $p_{D_1}^{D_2}$ 、 $p_{D_2}^{D_1}$ 和 z_j^k 来最大程度地提高全双工 D2D 通信链路的能量效率,从而不影响蜂窝和全双工 D2D 链路的服务质量(Quality of Service, QoS)要求。研究场景为 1 对全双工 D2D 用户对只可以复用 1 个蜂窝链路资源,且 1 个蜂窝链路资源只能被 1 对全双工 D2D 用户对复用。因此,优化问题由下式给出:

$$\begin{aligned} \max_{\{p_{D_1}^{D_2}, p_{D_2}^{D_1}, z_j^k\}} &= U_{D2D}^{EE}, \\ \text{s. t. } &\left\{ \begin{aligned} &\sum_{k=1}^K z_j^k \leq 1, \forall j \in D, z_j^k \in \{0, 1\} \\ &\sum_{j=1}^d z_j^k \leq 1, \forall k \in K, z_j^k \in \{0, 1\} \\ &SINR_{D_1}^{D_2} \geq SINR_{D2D}^{\min} \\ &SINR_{D_2}^{D_1} \geq SINR_{D2D}^{\min} \\ &p_{D_1}^{D_2} \leq p_{D2D}^{\max} \\ &p_{D_2}^{D_1} \leq p_{D2D}^{\max} \end{aligned} \right\}, \quad (6) \end{aligned}$$

式中:约束公式表示 1 对全双工 D2D 用户只能复用 1 个蜂窝用户链路资源,表示 1 个蜂窝用户链路资源只能被 1 对全双工 D2D 用户占用; $SINR_{D2D}^{\min}$ 为

D_1 和 D_2 的最小 SINR 限制; $p_{D2D}^{\max}$ 为 D_1 和 D_2 的发射功率阈值。

联合功率控制和链路资源分配的能效分析是一个混合整数非线性规划问题, 此类问题在文献[13]中已被证明是非确定性多项式问题, 故将能效优化问题转换为两个独立的优化子问题可以降低求解的复杂度。在第 1 个子问题中, 以全双工 D2D 通信链路的能量效率最大化为目标, 解决在给定资源上全双工 D2D 通信链路 D_1 和 D_2 的功率分配问题; 对于第 2 个子问题, 研究如何在第 1 个子问题假设下为多个全双工 D2D 通信链路分配蜂窝链路资源。

2.1 最优功率分配

首先研究全双工 D2D 通信链路基于能效的功率控制方案。为了不失一般性, 每个蜂窝链路和全

双工 D2D 通信链路仅使用一个链路资源。故复用蜂窝链路资源块的全双工 D2D 通信链路的发射功率优化问题为 $\{p_{D_1}^{*D_2}, p_{D_2}^{*D_1}\} = \arg \max_{p_{D_1}^{*D_2}, p_{D_2}^{*D_1}} U_{D2D}^{EE}$, 式

中, $p_{D_1}^{*D_2}$ 和 $p_{D_2}^{*D_1}$ 分别为 D_1 和 D_2 最优发射功率。由于优化目标函数是非线性且非凸的, 无法用凸优化方法来解决。故联合分析目标优化函数与可行解区域, 通过较低复杂度算法求解最优发射功率。

图 2 所示为由约束条件组成的 3 个限制区域, 最佳发射功率分配的解决方案有如下 3 种情况:

$$p_{D_1}^{D_2} = p_{D2D}^{\max} \text{ 且 } p_{D_2}^{D_1} \text{ 在 } A_1 B_1 \text{ 线上};$$

$$p_{D_2}^{D_1} = p_{D2D}^{\max} \text{ 且 } p_{D_1}^{D_2} \text{ 在 } A_2 B_2 \text{ 线上};$$

$$p_{D_1}^{D_2} = p_{D2D}^{\max} \text{ 且 } p_{D_2}^{D_1} = p_{D2D}^{\max}.$$

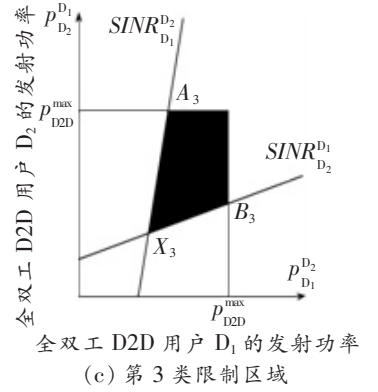
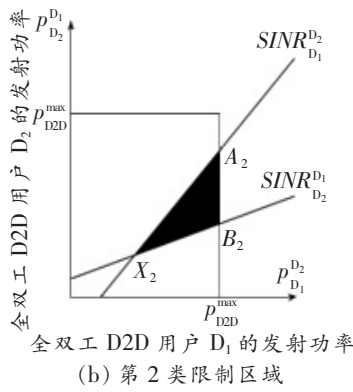
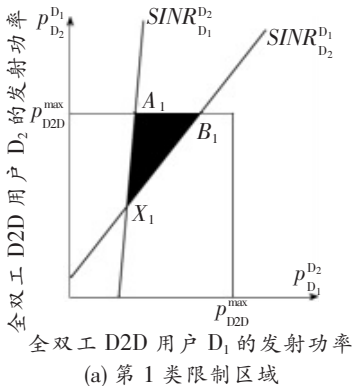


图 2 发射功率限制区域

由于约束能效优化问题是非线性的, 并且目标函数和约束条件都是连续两次可微, 因此可以通过有效的迭代方法对二次规划算法进行求解。具体可以通过 Matlab 软件优化工具箱中的 fmincon 函数求解最优发射功率。上述已证明最佳发射功率分配方案之一是位于可行区域的边界上, 因此将全双工 D2D 通信链路的发射功率初始点设置为最大值, 以提高收敛速度。

2.2 最优链路资源分配

2.1 节分析了在特定链路资源情况下全双工 D2D 通信链路的功率分配, 得到相应的最优能量效率值。接下来, 全双工 D2D 通信系统中最优链路资源分配问题表示如下: $\max \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^d z_j^k U_{D2D}^{EE}(p_{D_1}^{*D_2}, p_{D_2}^{*D_1})$ 。元启发式算法是解决非确定性多项式问题的有效方法, 故本节提出一种自适应禁忌搜索 (Tabu Search, TS) 算法来解决链路资源分配问题。自适应 TS 算法对求解空间可进行强大的探索, 与其他元启发式算法相比, 可减少计算时间, 适用于多用

户的中型场景。此外自适应 TS 算法还可调节搜索算子驱动搜索空间跳出局部最优和无效循环。

(1) 解空间和初始化

链路资源分配问题的自适应 TS 解由变量 z_j^k 的矩阵来确定, 将链路资源分配矩阵定义为 $S_{D \times K} = Z_{D \times K}, S_{D \times K}$ 为链路资源分配矩阵, $Z_{D \times K}$ 为链路分配集合。自适应 TS 算法从初始的随机二进制配置开始, 使得每一个蜂窝链路资源被分配到一对全双工 D2D 用户, 以满足目标优化约束条件。

(2) 评估

每个链路资源的分配情况由全双工 D2D 通信链路的能量效率优化能力来评估, 能量效率是在功率控制后对全双工 D2D 用户对分配蜂窝用户链路资源得到的, 则全双工 D2D 通信链路资源分配的评价目标函数表示为 $f(z_j^k) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^d z_j^k U_{D2D}^{EE}(p_{D_1}^{*D_2}, p_{D_2}^{*D_1})$ 。

(3) 搜索运算符和扰动

自适应 TS 算法搜索分配链路资源时包括全双

工 D2D 用户对已分配的链路资源,以便提高每次迭代后链路资源分配的质量。假设链路资源的整体分配矩阵 $S_{h \times l}$ 为当前解, h 为占用第 l 个链路资源的全双工 D2D 用户, l 为被第 h 个全双工 D2D 用户占用的链路资源,交换运算符 swap 为本地搜索运算符,通过单独交换随机两行以创建新的邻域解来分配新的链路资源。

自适应 TS 算法中的扰动机制是把搜索过程引向解空间未探索的邻域从而全局寻找最优解。通过强制选择引导搜索的移动方向来执行微调扰动机制可以产生有希望的解空间。当交换搜索无法超出局部最优解且在多次迭代后仍不能改善最优解时,可以执行扰动。这种微调扰动机制必须设置巧妙,以引导新的搜索区域,生成不同的局部最优解,并避免随机重新搜索。

本文全双工 D2D 用户链路资源分配扰动算子的目标是通过随机改变全双工 D2D 用户链路资源分配矩阵的两行,使最优解的搜索范围多样化。故本文将随机反转全双工 D2D 用户链路资源分配矩阵中的 j_1 和 j_2 行,实际上这里不仅是 j_1 和 j_2 行被交换,而且 j_1 和 j_2 行之间的行也被交换,但 j_1 和 j_2 行之间的距离必须大于 2,以防止生成本地运算符之前的解。对扰动算子中固定参数的设置要足够小以确保扰动机制避免随机重启行为,同时也要足够大以确保不会消除局部搜索的结果。

(4) 禁忌列表

禁忌列表定义为搜索历史记录,以维护每次迭代中最后访问的解决方案。在每次迭代中若执行了最佳交换,禁忌列表就会更新,将新的解决方案添加到禁忌列表中,并且此移动在有限的迭代次数中不会受到影响。通过实验调试将禁忌列表的长度确定为 $n_{\text{swap}}/2$, n 为迭代次数,该长度随着邻域大小的增加而线性增长。

(5) 自适应 TS 算法

本文提出的自适应 TS 算法流程描述如下:TS 从 $S_{h \times l}$ 的初始配置开始,寻找搜索空间最佳的链路资源分配,即在每次迭代中,TS 执行 n_{swap} ,移动以提高目标函数值。经过两次连续的交换操作后,如果新的链路资源分配解决方案导致更高的全双工 D2D 链路能量效率,则本地搜索将使用新获得的解决方案继续搜索,以找到在当前迭代中返回最高能量效率的最佳交换移动,具有最高目标函数的解决方案会在列表中更新;如果在给定的迭代次数后解决方案仍未得到改善,则停止局部搜索,并且扰动在

搜索空间中进行长距离跳跃,这时从扰动的修改解开始,对于给定的迭代次数,将继续执行以上过程达到全局最优。

3 仿真参数及性能分析

将本文所提自适应 TS 算法与其他 3 种算法对比验证本文所提算法性能,其他 3 种算法分别为遗传链路分配的最佳功率算法、无功率控制的自适应 TS 算法和随机链路分配的最佳功率控制算法。仿真参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

参数	值
小区半径/m	500
噪声功率/dBm/Hz	-174
全双工 D2D 用户对数/对	5~20
蜂窝用户数/个	30
全双工 D2D 链路路损模型	$148+40\lg s$
蜂窝链路路损模型	$128.1+36.7\lg s$
全双工 D2D 用户的最大发射功率/dBm	21
全双工 D2D 用户之间的最大距离/m	50
蜂窝链路资源占用带宽/MHz	5
D2D 链路最小 SINR/dB	20
电路功率/mW	50

注: s 为距离,单位为 km。

图 3 所示为 4 种不同算法的收敛性与全双工 D2D 通信链路能效变化关系曲线。由图可知,本文所提自适应 TS 算法在第 18 次迭代达到收敛,而遗传链路分配的最佳功率算法在第 22 次迭代达到收敛,无功率控制的自适应 TS 算法在第 24 次迭代达到收敛,随机链路分配的最佳功率控制算法在第 28 次迭代达到收敛,由此说明本文所提算法的可收敛性。本文所提算法相对于其他 3 种算法,全双工 D2D 通信链路能量效率最优,与对遗传链路分配的

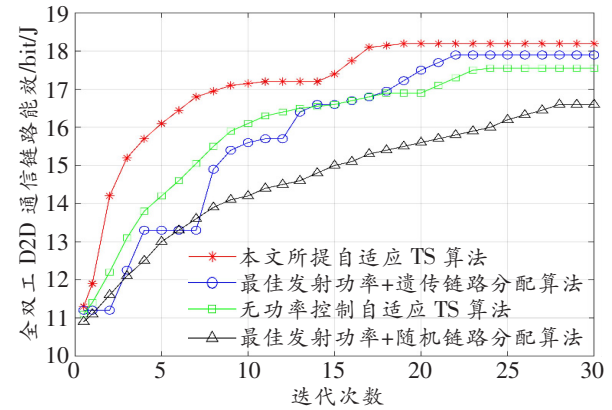


图 3 不同算法下全双工 D2D 链路能效收敛性比较

最佳功率算法相比,本文所提算法提高了约 1.7% 的性能;与无功率控制的自适应 TS 链路资源分配算法相比,本文所提算法提高了约 3.7% 的性能;与随机链路分配的最佳功率控制算法相比,本文所提算法提高了约 9.6% 的性能,这是因为本文所提算法采用了不同的移动算子,且由图可知,本文所提算法在迭代到第 14 次时,移动算子显示出有效扰动的结果。此外,相比于无功率控制的自适应 TS 算法,本文所提算法性能更好,由此得出通过功率控制可以改善全双工 D2D 通信链路能量效率,获取更高的能效。

图 4 所示为 4 种不同算法下全双工 D2D 通信链路能效随距离的变化曲线。在 4 种算法中,全双工 D2D 用户共享蜂窝用户链路资源,随着全双工 D2D 链路距离的增加,信道链路衰减逐渐增大,全双工 D2D 用户的 SINR 减少,为了满足需求,全双工 D2D 用户会提高发射功率,导致系统网络内干扰增大,影响全双工 D2D 通信链路的能效,使其值逐渐下降。本文所提算法在 4 种算法中具有最佳的性能,这意味着利用本文所提算法来解决提出的优化问题是有效的。如果全双工 D2D 对的传输功率是最佳发射功率,即使使用了有效的链路资源分配,由于同信道干扰的增长,性能也会下降。

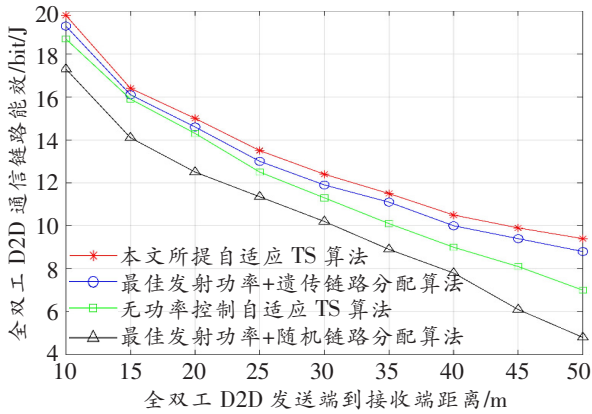


图 4 不同算法下全双工 D2D 通信链路能效随距离的变化曲线

图 5 所示为 4 种不同算法下全双工 D2D 通信链路能效随 QoS 变化的曲线。由图可知,当全双工 D2D 链路 QoS 要求变大时,全双工 D2D 通信链路能效略有下降,这是因为,全双工 D2D 链路需要较高的 SINR 和较小的传输功率,并且随着 QoS 要求的增加,全双工 D2D 用户需要增加其发射功率以满足最低的 QoS。因此,对于低 QoS 要求,全双工 D2D 通信链路能效几乎保持不变。然而,对于高 QoS 要求,全双工 D2D 通信链路能效降低,这是因

为全双工 D2D 用户的发射功率受限于最大值。

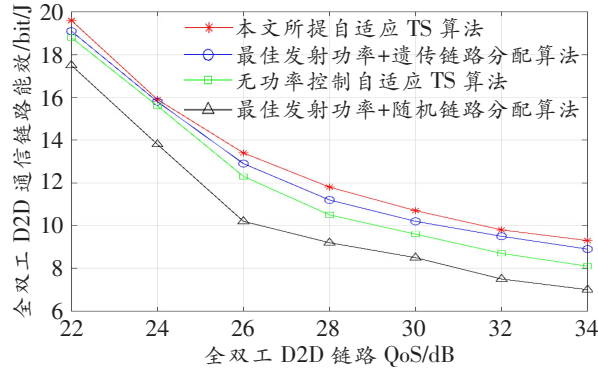


图 5 不同算法下全双工 D2D 通信链路能效随 QoS 变化的曲线

图 6 所示为 4 种不同算法下全双工 D2D 通信链路能效随最大发射功率变化的曲线。由图可知,随着发射功率的增大,全双工 D2D 通信链路能效也略微增大。这是因为全双工 D2D 链路距离较短,信道链路的增益较高,因此,全双工 D2D 用户在功率分配阶段降低了传输功率,以防止同信道干扰,对全双工 D2D 通信链路的能效影响不是很大。但随着发射功率的增加,增大到接近发射功率的阈值时,系统内干扰也会随之增大,影响全双工 D2D 通信链路能效,使之降低。但本文所提自适应 TS 算法相比其他 3 种算法有一定的优越性。

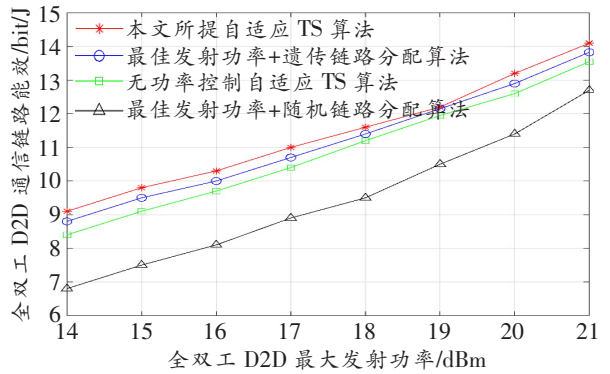


图 6 不同算法下全双工 D2D 通信链路能效随最大发射功率变化的曲线

图 7 所示为不同自干扰消除值下本文所提算法在半双工和全双工模式下 D2D 通信链路的能效对比曲线。由图可知,无论是否在本文链路资源分配算法的基础上加入功率控制,半双工模式下的 D2D 通信链路的能效趋于常数,这是因为,自干扰消除值的大小与半双工模式下的 D2D 通信链路的能效无关。相对于无功率控制的半双工 D2D 通信链路的能效,对 D2D 用户进行功率控制可以增加 D2D 通信链路的能效。且当 $\eta \leq 91$ dB 时,半双工模式下

的本文所提算法 D2D 通信链路的能效反而更高,这是由于全双工 D2D 通信之间的干扰相比半双工干扰更大,而 D2D 通信链路的能效与用户之间的干扰成反相关,因此,全双工模式下本文所提算法 D2D 通信链路的能效更低。但是当 $\eta \geq 91$ dB 时,甚至 $\eta = 100$ dB 时,全双工模式下本文所提算法的 D2D 通信链路的能效要明显高于半双工模式。

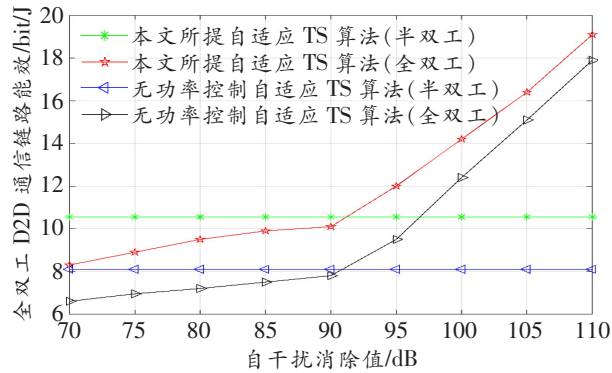


图 7 不同自干扰消除值下的通信链路能效对比曲线

4 结束语

针对全双工 D2D 通信链路场景,研究了在最低要求的全双工 D2D 用户 QoS 保证和功率阈值的条件下,通过给全双工 D2D 用户分配蜂窝用户链路资源最大化全双工 D2D 通信链路的能效问题,该问题是一个复杂的混合组合非凸优化问题。为了使问题易于处理,本文将原问题分解为两个子问题,即功率控制和资源分配问题。在第 1 个子问题中分析了如何求取最优发射功率解,以解决全双工 D2D 通信用户的最优发射功率;在第 2 个子问题中通过应用时间复杂度降低的自适应 TS 算法来解决链路资源分配问题。将提出的算法与其他 3 种算法进行了比较,仿真结果表明,所提算法优于其他对比算法,因其集中于通过在每次迭代中对一个解进行局部搜索和通过执行防止陷入局部最小值的扰动机制来寻找最终解决方案。

参考文献:

[1] Tehrani M, Uysalm, Yanikomeroglu H. Device-to-device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions[J]. IEEE Communication Magazine, 2014, 52(5):86-92.

[2] 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.

[3] Lin X, Andrews J, Ghosh A, et al. An Overview of 3GPP Device-to-Device Proximity Services[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(4):40-48.

[4] Liu J, Kato N, Ma J, et al. Device-to-Device Communication in LTE-Advanced Networks: A Survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 17(4):1923-1940.

[5] Huang J, Xing C C, Qian Y, et al. Resource Allocation for Multi-cell Device-to-Device Communications Underlying 5G Networks: A Game-Theoretic Mechanism with Incomplete Information[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3):2557-2570.

[6] Chen Y, Ai B, Niu Y, et al. Resource Allocation for Device-to-Device Communications Underlying Heterogeneous Cellular Networks Using Coalitional Games [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(6):4163-4176.

[7] Kai C, Li H, Xu L, et al. Energy-Efficient Device-to-Device Communications for Green Smart Cities [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4):1542-1551.

[8] Yang C, Xu X, Han J, et al. Energy Efficiency-based Device-to-device Uplink Resource Allocation with Multiple Resource Reusing[J]. Electronics Letters, 2015, 51(3):293-294.

[9] Mohammed V M N, Sreenivasan P M, Ravishankar T, et al. Energy-efficient Resource Allocation for Device-to-device Communication through Noncooperative Game Theory[J]. International Journal of Communication Systems, 2020, 33(6):e4279.

[10] Ma X, Sun K, Du N, et al. A Novel Access Control and Energy-Saving Resource Allocation Scheme for D2D Communication in 5G Networks[J]. Complexity, 2020(7):1-11.

[11] Ding J, Jiang L, He C. Energy-efficient Power Control for Underlying D2D Communication with Channel Uncertainty: User-centric Versus Network-centric[J]. Journal of Communications and Networks, 2016, 18(4):589-599.

[12] Zhang Y, Zhang Y, Guo D, et al. An Energy-Saving Algorithm based on Base Station Sleeping in Multi-Hop D2D Communication[C]// 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Montreal, QC, Canada.: IEEE, 2016:1-5.

[13] Liang L, Xie S, Li G Y, et al. Graph-based Resource Sharing in Vehicular Communication[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(7):4579-4592.